土木研究所報告　第百二十一号　昭和三十九年十一月

土木研究所報告

第121号

実測資料によるアーチダムの挙動解析
——たわみの解析—— ……中村慶一，飯田隆一，三池亮次，古屋久和…(1)

土壌コロイドに関する研究（第6報）
——"本邦主要道路の工学的土性図"作製に使用された
路床土中の粘土鉱物の検索—— ……有泉　昌…(63)

昭和 39 年 11 月

建設省土木研究所

実測資料によるアーチダムの挙動解析

——たわみの解析——

(昭和39年7月)

中村　慶一*・　飯田　隆一**
三池　亮次***・　古屋　久和****

はじめに

洪水調節を主要目的とする多目的ダムの位置の選定にあたって地質条件の難点を克服しても主として調節効率の高度化を計る観点よりその優劣が論ぜられ，また近年わが国においてもダム技術の進歩と経済的有利性を期待するため，アーチダムの型式が採用される場合が多い。

この場合，地質条件の綿密な調査とともにダム本体の変形，ダム内部に生ずる応力，ひずみが許容限界に対して十分安全であるかどうかを「荷重分割計算」とか「模型実験」により厳密に推測する一方，建設後のダム本体の挙動をダム本体に埋設された各種計器によって実測し，設計施工上の過誤とか思わぬ自然の変動によるダム本体の危険を未然に予測することが必要である。

ここで実測とはダム本体に関する構造上の実測を総称し，その目的によって分類すると

(1)　ダムの安全管理のための実測

(2)　ダム施工におけるクーリングのための温度管理，グラウトのための継目間隔の計測等施工管理のための実測

(3)　現在行なわれているダムの設計荷重のとりかたおよび設計計算方法の改善を目的とした，ダムの挙動解析のための実測

以上3点を実測目的としているが，本研究においては特に第3の構造作用究明のための実測に焦点を合わせ，

(i)　実測計器の選定およびその取り扱い方法の検討

(ii)　計器埋設基準の策定

(iii)　実測資料の整理方法の検討

(iv)　構造作用解明計算のための様式統一を試みた。

本文はこのうちアーチダムのたわみの挙動解析についてのべたものである。

目　次

はじめに……(1)
1.　実測解析法の現況……(2)
2.　多変量解析……(2)
〔1〕多変量解析……(2)
〔2〕電子計算による多変量解析……(4)
3.　アーチダム諸元……(8)
4.　堤体温度の挙動……(8)
〔1〕はじめに……(8)
〔2〕堤体温度……(8)
〔3〕堤体平均温度，等価直線温度こう配……(17)
〔4〕気温と堤体温度……(21)
〔5〕むすび……(25)
5.　たわみの挙動解析……(25)
〔1〕アーチダムの挙動を支配する諸要因……(25)
〔2〕たわみの多変量解析……(25)
〔3〕経年変化，水圧荷重，温度荷重によるたわみ……(37)
〔4〕実測解析結果の次元解析的考察……(39)
〔5〕荷重分割計算，模型実験との比較……(55)
〔6〕精密三角測量との比較検討……(56)
〔7〕むすび……(58)
6.　安全管理……(59)
7.　実際計算の手順……(60)
8.　結　論……(60)

*　現　技術管理室長（前ダム構造研究室長）工博
**　現　ダム構造研究室長（前ダム構造研究主任研究員）
***　現　熊本大学助教授　（前ダム構造研究室研究員）
****　現　日本自動ダムKK（　〃　）

1. 実測解析法の現況

アーチダムにおける荷重分割計算や模型実験は，それ自身設計仮定の不備を伴っているばかりでなく，設計条件にはいらない種種の材料特性たとえばコンクリート，岩盤のクリープ，等方性の欠如，弾性係数の変動，コンクリートの供試体では大骨材を除去している点，基礎岩盤の力学的特性の不明確さ，たとえば基礎岩盤の流動変形，静水圧による基礎岩盤の沈下，構造上の特性たとえばジョイント開度の影響，断面急変部に生ずる応力集中，施工の不十分，外的諸条件たとえば日光輻射，水和熱など熱的諸条件の複雑性などのため，荷重分割計算や模型実験のみでは十分にダム本体，基礎の現象を表わすことができない。

しかしダム本体の水圧荷重，温度荷重などの外的諸条件に対する安全性は結局「ダム本体および基礎岩盤の内部応力，ひずみが許容限界に収まるかどうか」あるいは「荷重分割計算や模型実験における応力，ひずみが実測値にいかなる精度をもって対応するか」によって十分に判定されるであろう。

あるいは，ひずみの総合効果として観測されるダムのたわみ量を，この判定の有力な手段とすることが可能である。

そのため，たわみやひずみの挙動と，主要因子として考えられる堤体温度，水圧荷重との間の回帰関係の追求を挙動解析の手がかりとする試みが Tonini, Rocha によって行なわれた。

（1） Tonini[1] は貯水池の静水圧と温度応力およびクリープがたわみに重要な影響を与える因子であるとして，トップアーチクラウンのたわみ δ を表わす次式

$$\delta=\alpha_1\theta_a+\alpha_2\theta_a^2+\alpha_3\theta_a^3+\beta_1\theta_p+\beta_2\theta_p^2+\beta_3\theta_p^3+\gamma_1 h+\gamma_2 h^2+\gamma_3 h^3+p_1 e^{-p_2 t}+k \quad \cdots\cdots(1.1)$$

を提案した。

上式において h は水位であり，温度条件はトップアーチと基礎アーチの平均温度差 θ_a と，上下流面の平均温度差 θ_p によってその平均的状態が表わされるものとし，岩盤のクリープ，塑性変形は時間 t とともに指数関数 $p_1e^{-p_2t}$ にしたがって変化するものとしている。α_1, α_2, α_3, β_1, β_2, β_3, γ_1, γ_2, γ_3, k は各因子にかかる係数および定数である。

上式を Pieve di Cadore ダムに適用し最小二乗法によって各係数，定数の数値を求め，各因子がたわみに与える影響の比率が，

θ_a：32%
θ_p：13%
したがって温度応力：45%
h：45%
その他：10%

であることを確認している。

（2） Rocha[2),3)] は，水位 h の外，ダムの各標高における平均温度 t と，同じ標高における温度こう配 α，コンクリート，岩盤のクリープ，ジョイントグラウトの影響がたわみに重要な影響を与える因子であるとして，トップアーチクラウンの半径方向のたわみ式を

$$\delta=\varphi(h)+a_1t_1+a_2t_2+\cdots\cdots+b_1\alpha_1+b_2\alpha_2+\cdots\cdots+p\log(1+t)+\gamma \quad \cdots\cdots(1.2)$$

と表わした。上式で γ はジョイントグラウトによるたわみであり，$p\log(1+t)$ は時間 t とともに変化するクリープを表わす。a_1, a_2, ……, b_1, b_2, ……, p は係数であり，この係数は数多くの資料の中水位 h の等しいものを取り出し，$\varphi(h)$ の項を一たん消去して最小二乗推定によって求める。Caniçada ダムに対して変位にもっとも強く影響する因子はダムの平均温度で，温度こう配，静水圧の順に小さくなると述べている。また，上式によってダムのたわみ量を，静水圧，平均温度，温度こう配，クリープの各因子に分離することが可能である点を指摘した。

ひずみ，応力の解析において Rocha は主要因子として実際の温度と等置直線分布温度との差 t' を導入した。

（3） アメリカの Bureau of Reclamation[4)] において開発したひずみよりクリープの影響を除いてあらゆる時期における応力を求める方法は，とくにコンクリート打設初期におけるひずみ解析において欠くことができないが，この方法は計算に多くの労力を要しクリープの実験も行なわなければならないのできわめて手間を要する。

それはクリープが応力に比例することおよび時間効果に関する重畳原理にもとづくものであって，すなわち，「任意時間 t_0 に働いた応力増大により，任意時間 t にコンクリート内部に生ずるひずみは，t_0 より前または後に働くいかなる応力の影響にも無関係である。」とすれば時間 τ より θ におけるひずみ $\varepsilon'(\theta)$ は，

$$\varepsilon'(\theta)=\int_\tau^\theta \frac{1}{E(K)}\frac{d\sigma}{dK}dK+\int_\tau^\theta \varphi(K,\theta)\frac{d\sigma}{dK}dK \quad \cdots\cdots(1.3)$$

で表わされることになる。上式において $E(K)$ は材令 K の関数として与えられる瞬間弾性係数，$\sigma(K)$ は応力である。アメリカの Bureau of Reclamation の方法はその図式解法である。

（4） Tonini, Rocha の方法は因子相互の相関性，因子の有意性に対する評価が不十分であり，本報告書では各因子の力学的意義を追求するとともに次章で述べる多変量解析によって挙動解析を試みた。

2. 多変量解析

〔1〕 多変量解析[5),15)]

一般に応答 y_j $(j=1,2,\cdots\cdots,n)$ について n 回の測定

を行なったとき，この y_j の動きに関係すると思われる p 個の因子 x_{ji} $(i=1,2,\cdots\cdots,p)$ について次式

$$y_j=b_1x_{j1}+b_2x_{j2}+\cdots\cdots+b_px_{jp}+e \quad \cdots\cdots(2.1)$$

なる線型回帰模型を想定する。n 個の測定値と関連して

$y'=(y_1, y_2, \cdots\cdots, y_n)$　$1\times n$ 観測変量ベクトル

$$X=\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12}\cdots x_{1p} \\ x_{21} & x_{22}\cdots x_{2p} \\ \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2}\cdots x_{np} \end{pmatrix} \quad n\times p \text{ 確定変数マトリクス}$$

$\beta'=(\beta_1, \beta_2, \cdots\cdots, \beta_p)$　$1\times p$ 未知母数ベクトル

$e'=(e_1, e_2, \cdots\cdots, e_n)$　$1\times n$ ランダムノイズベクトル

とおけば (2.1) 式は

$$y=X\beta+e \quad \cdots\cdots(2.2)$$

と表わすことができる。ここにプライム記号は転置を示すものとし誤差 e についてはその期待値がゼロマトリクス $\mathbf{0}$，その共分散は n 次の単位マトリクス I_n とすれば σ^2I となることを仮定し，β の最良不偏推定量 $\hat{\beta}$ を求めればよい。すなわち

$$E[e]=\mathbf{0}$$

$$C[e]=E[ee']=\sigma^2I_n$$

の仮定のもとに Gauss-Markoff の定理によって残差平方和 $e'e$ を最小にするように $\hat{\beta}$ を定める。

$$S_E=e'e=(y-X\beta)'(y-X\beta)$$
$$=y'y-y'X\beta-\beta'X'y+\beta'X'X\beta$$

に対し

$$\partial S_E/\partial\beta=0$$

の条件より

$$X'X\beta=X'y \quad \cdots\cdots(2.3)$$

となる (2.3) 式はいわゆる正規方程式である。$S=X'X$ が正則，つまり

$$|S|\neq 0 \quad \cdots\cdots(2.4)$$

ならば

$$\hat{\beta}=(X'X)^{-1}X'y \quad \cdots\cdots(2.5)$$

が求める偏回帰係数となり，帰無仮説 (H_n) として"どの因子も効果がない"，つまり $\beta^n=0$，対立仮説 (H_a) として"すべてが 0 ではない" とし，一般に二つの仮説 H_1, H_2 の判別情報量は，そのおのおのの仮説のもとでの解を β^1, β^2 とすれば，

$$D[H_1, H_2]=(\beta^1-\beta^2)'S(\beta^1-\beta^2)/\hat{\sigma}^2$$

であり，今の場合 $\beta^2=0$ であるから判別情報推定量は

$$\hat{D}[H_n, H_a]=\hat{\beta}^{1\prime}S\hat{\beta}^1/\hat{\sigma}^2=\hat{\beta}'X'y/\hat{\sigma}^2$$

したがって y について何等の情報もない場合のあいまいさ $y'y$ に対し X という因子を考えることによって説明できる分 $R(\beta)$ は

$$R(\beta)=\hat{\sigma}^2\hat{D}[H_n, H_a]=\hat{\beta}'X'y$$

となり，これを用いて帰無仮説の検定を行なうことができる。しかし，この検定によって帰無仮説が棄却されることになってもそれは直ちに各因子のすべてが有意であることを意味するわけでなく β の要素の "すべてが 0 でない" だけで P 個の因子 x_i の中には y の変動に対してノイズと区別できない程度にしか影響していないものも含まれている可能性がある。

そこで有意と思われる x_1 ないし x_r までの因子を第 1 群，x_{r+1} ないし x_p までの因子を第 2 群とし，これに対応する β も同様 β_1 と β_2 の 2 群に分割して考える。

すなわち

$$X=\left(\begin{array}{cccc|ccc} x_{11} & x_{12}\cdots\cdots & x_{1r} & & x_{1,r+1}, & x_{1,r+2}\cdots, & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22}\cdots\cdots & x_{2r} & & x_{2,r+1}, & x_{2,r+2}\cdots, & x_{2p} \\ \vdots & & & & \vdots & & \\ x_{n1} & x_{n2}\cdots\cdots & x_{nr} & & x_{n,r+1} & x_{n,r+2}\cdots, & x_{np} \end{array}\right)$$

$$=(X_1, X_2)$$

$$\beta'=(\beta_1, \beta_2, \cdots\cdots \beta_r \mid \beta_{r+1}, \beta_{r+2}, \cdots\cdots, \beta_p)$$

$$=(\beta_1', \beta_2')$$

とすれば (2.2) 式は

$$y=X_1\beta_1+X_2\beta_2+e$$

$$S=X'X=\begin{pmatrix} X_1'X_1, & X_1'X_2 \\ X_2'X_1, & X_2'X_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$$

いま新しい帰無仮説 (H_n) として $\beta_2=0$，対立仮説として β_2 のすべてが 0 ではないものとすれば，仮説 H_n のもとでの解を β^n と書くことにより

$$R(\beta^n)=\hat{\beta}_1{}^{n\prime}S_{11}\hat{\beta}_1{}^n$$

$$R(\beta)=\hat{\beta}'S\hat{\beta}$$

であるから y の動きに対して何等の情報がない場合のあいまいさ $y'y$ に対し帰無仮説によるあいまいさの減少分は $R(\beta^n)$ 対立仮説によるあいまいさの減少分は $R(\beta)$ で，対立仮説と帰無仮説の判別情報量[15] は $R(\beta)-R(\beta^n)$ と

表-2.1　AOV 表

SV	SS	DF	MS	F_0
H_n	$R(\beta^n)=\hat{\beta}_1{}^{n\prime}S_{11}\hat{\beta}_1{}^n$	r	$V\beta^n=R(\beta^n/r)$	$F_0=\dfrac{V_n\mid_a}{V_E}$
$H_n \mid H_a$	$\hat{\sigma}^2\hat{D}[H_a, H_n]=R(\beta)-R(\beta^n)$	$p-r$	$V\beta^n \mid \beta^a=\{R(\beta)-R(\beta^n\}/p-r$	
H_a	$R(\beta)=\hat{\beta}^{a\prime}S\hat{\beta}^a$	p		
E	$S_E=y'y-R(\beta)$	$n-p$	$V_E=S_E/(n-p)$	
T	$y'y$	n		

なるとこより表-2.1の分散分析表（AOV表）を作ることができる。

F_0は自由度対$((p-r);(n-p))$のF分布をすることからF分布表5％点の値$F(p-r, n-p; 0.05)$と比較しF_0が大きければH_nは危険率5％で棄却される。またH_nを適当に選ぶことにより他の因子の影響を除去した後の因子の効果を検定するプログラムを次節のように作る。

〔2〕 電子計算による多変量解析

（a） プログラム作成要領およびフローチャート

① 因子数p，観測値組数N，常数項の有無，各因子の観測値を入力データとして正規方程式を作成する。正規方程式は対称行列であるので三角の形の行列に格納しプリントする。

② 正規方程式を長方形の行列に直し，Gauss-Doolittle 法による連立方程式の根b_iを計算しプリントする。その途中の各段階において$R(1, 2, \cdots\cdots, r)$を計算する。また，正規方程式の係数行列は有意性検定における行列の縮少，入換のため別番地にも格納する。

③ 有意性検定

（i） AOV表は表-2.1にしたがい作成しプリントする。

（ii） 表-2.1において

$$p(1,2,\cdots\cdots,p-1)/V_E - F(1, N-p; 0.05) > 0\ ? \quad \cdots\cdots(2.6)$$

の判定を行ない，(2.6)式がyesの場合はp因子は有意であり，(v)の正規方程式の縮少，入換の作業に進む。

(iii) (2.6) 式がnoの場合はp因子は有意でないので

$$(p-1)(1,2,\cdots\cdots,p-2)/V_E - F(1, N-p; 0.05) > 0\ ? \quad \cdots\cdots(2.7)$$

の判定を行なう。(2.7) 式がyesの場合は有意であり (v) に進む。

(iv) (2.7) 式がnoの場合は $(p-1)$ 因子有意でないので，以下有意な因子が表われるまで上記操作を繰り返す。

（v） 正規方程式の縮小，入換

k 因子が有意であるとき，

(vi) 縮小，入換え後，再びk個の因子に対してAOV表を作成し，$(k-1)$ 因子よりF検定を行なう。すなわち，

$$(k-1)(k,1,2,\cdots\cdots,k-2)/V_E' - F(1, N-k; 0.05) > 0 \quad ? \quad \cdots\cdots(2.8)$$

を判定し，(2.8) 式がyesの場合は$(k-1)$因子は有意，

(vii) (2.8)式がnoの場合は有意でない。

(viii) 以下 $(k-2), (k-3), \cdots\cdots, 1$ の因子を上記と同様操作によって検定する。検定因子番号が零となれば，検定は完了する。

(ix) 最後に有意な因子qが1でないとき$(q-1)$，$\cdots\cdots 2, 1$, の各因子の他の因子の影響を除去したときの有意性をみるため，$AOV-(0)$を計算する。$AOV-(0)$におけるSVは，$q, q', \cdots\cdots, q^{(n)}$を有意な因子とするとき，下記のとおりである。

01 $(q, q', q'', \cdots\cdots, q^{(n)})$
02 $(q, q', q'', \cdots\cdots, q^{(n)}, 1)$
03 $(q, q', q'' \cdots\cdots, q^{(n)}, 1, 2)$
$\vdots$
$(q-1)(q, q', q'', \cdots\cdots, q^{(n)}, 1, 2, \cdots\cdots, q-2)$

（x） F検定の結果，有意な因子が1個の場合には，有意な因子に対して，

$$b_i = \frac{\sum_{i,p+1}}{\sum_{ii}} \quad \cdots\cdots(2.9)$$

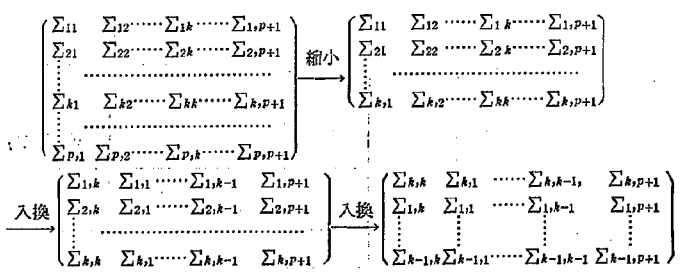
の計算を行ない，これをプリントして停止する。

④ 最後に残った有意な因子のAOV表を作成しプリントする。

⑤ 有意な因子で作る正規方程式の係数行列の逆行列c_{ij}，および根（回帰係数）b_jを計算しプリントする。

⑥ 残差積（平方）和の計算，

有意な因子の作る線型回帰模型において常数項の無い場合は，正規方程式の第1行，第1列に（N, $\sum x_{a1}, \sum x_{a2}, \cdots \sum x_{ap}$）を加えて Gauss-Doolittle 法第1段階計算により$[S_{ij}]$マトリクスを計算す



る。常数項のある場合は直ちに計算できる。

いずれの場合も〔S_{jl}〕行列は Gauss-Doolittle 法第1段階における第1行，第1列を除く行列である。

⑦ 単相関行列を計算する。

⑧ 標準化偏回帰係数を計算する。

⑨ 改めて入力データを与えて観測値 $x_{\alpha,p+1}$ の計算値と残差を計算する。

⑩ フローチャート

図-2.1，図-2.2に示すとおりである。

(b) 多変量解析入力データ様式

① 多変量解析

入力データとして次の数値を与える。すなわち

名称，対照表

p：因子数，固定小数点（fix）で18因子以下

N：データ組数，制限なし

$x_{\alpha i}$：測定値，浮動小数点（floating）で指数部を含み11桁以下($\alpha=1,2\cdots\cdots N,\ i=1,2\cdots\cdots p$)

$x_{\alpha,p+1}$：観測値，浮動小数点（floating）で指数部を含み11桁以下

f：
- 常数項有りのとき固定小数点（fix）で＋1を与える
- 常数項なしのとき固定小数点（fix）で0を与える

ただし，$x_{\alpha,1}=1$ ($\alpha=1,2,\cdots\cdots,N$) のときは $x_{\alpha,1}$ はパンチ不要。

② 残差計算

①と同様，$p, N, x_{\alpha i}, x_{\alpha,p+1}$ の外に回帰係数の推定値 $\hat{b}_i$ を floating にて与える。その桁数は11桁以下とする。ただし，

(i) ①と同様 $x_{\alpha 1}=1$ のときはパンチ不要。

(ii) 有意でない因子に対して $\hat{b}_i=0$ を与える。

(iii) 浮動小数点とは，最初の2桁は指数部でこの数値を a とするとき，小数点の位置を2桁と3桁の間においた3桁以下の数値に対して 10^{a-50} を乗じた値となる。

たとえば 5223 は $0.25\times10^{2}=25$，4958 は $0.58\times10^{-1}=0.058$ である。

(c) 多変量解析出力データ様式

① 出力データとして次のものがプリントされる。

名称，対照表

XI CONST（あるいは XI NOT CONST）

$b_1x_{\alpha 1}$($\alpha=1,2,\cdots\cdots,N$) は常数項である。（あるいは常数項でない。）

NE：正規方程式（Normal Equation）

$\sum_{ij}$($i=1,2,\cdots\cdots,p,\ p+1,\quad j=1,2,\cdots\cdots,p+1$)　6 桁

小数点上桁数は数値右横のカッコ書きにて記入された数値にて指示する。

B：正規方程式の解

b_i ($i=1,2,\cdots\cdots,p$)　9 桁

AOV：分散分析表（Analysis of Variance Table）　9 桁

SV：変動要因（Source of Variance）

SS：変動（Sum of Squares）

$(SS)_R$：回帰にもとづく変動　9桁

$(SS)_E$：残差変動　9桁

$(SS)_T$：全 変 動　9桁

DF：自由度（Degrees of Freedom）　3桁

V_E：残差変動の不偏分散，下欄にプリントされる。　9桁

F：F値　4桁

$P(r)$：r は有意な因子の数，

$AOV(J)$：J は有意な因子の番号，ただし $AOV(0)$ は既述のとおりである。

AOV-$LAST$

有意な因子の AOV

SR：残差積（平方）和（(Sum of Products (Squares) of Residuals)）

S_{ij}'：有意な因子に対する残差積（平方和）　6 桁

IM：正規方程式マトリクスの逆行列（Inverse Matrix）

C_{ij}'：有意な因子に対する逆行列の対角要素　6 桁

B：正規方程式の解

$\hat{b}_i$：有意な因子に対する正規方程式の解　9桁

ただし

(i) 第2番目の AOV 表から，有意となる欄より上，および下欄はプリントしない。

(ii) 常数項のある場合，SR の常数項欄はプリントされない。

(iii) 検定後の因子指示番号は検定前のものを使用する。

(iv) SR, IM, R の小数点指示は NE と同様方式による。

② 単相関係数および標準化偏回帰係数

R：単相関係数（Correlation Coefficient）

r_{ij}：有意な因子に対する単相関係数6桁

SB：標準化偏回帰係数

b_{si}：有意な因子の標準化偏回帰係数6桁

ただし

(i) 常数項のある場合，常数項の R, SB はプリントされない。

(ii) 因子指示番号は検定前のものを用いる。

③ 残差計算

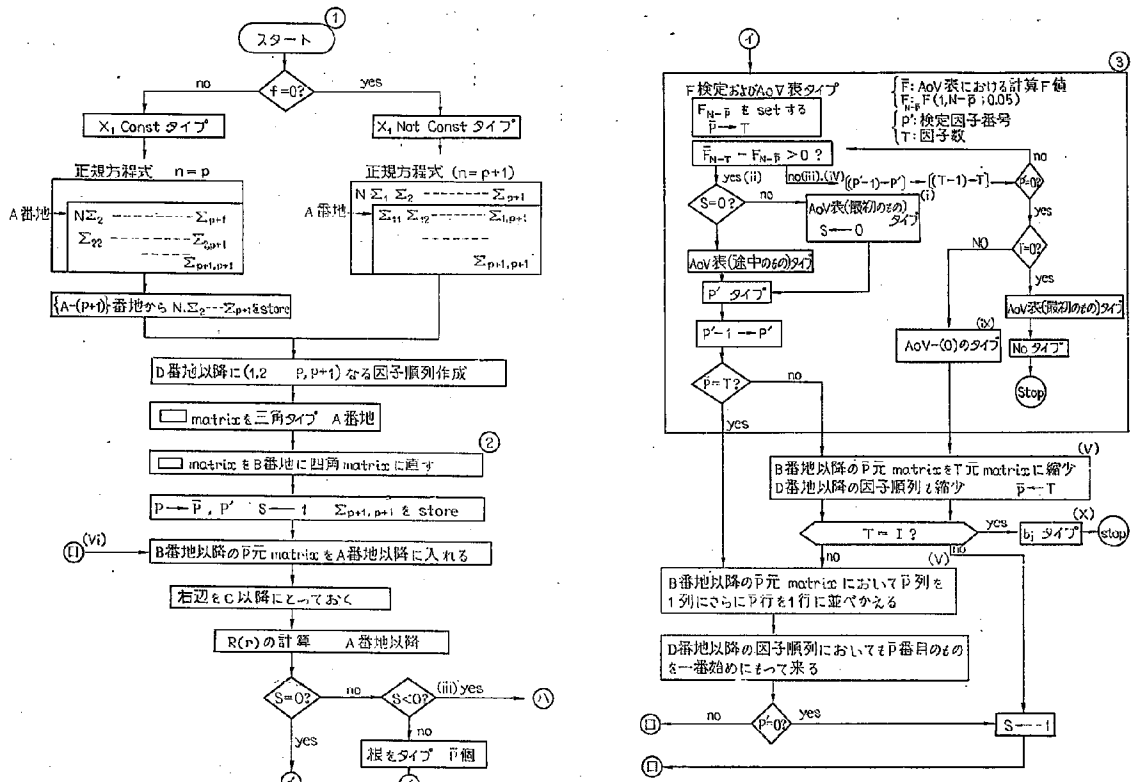


図-2,1 多変量解析フローチャート

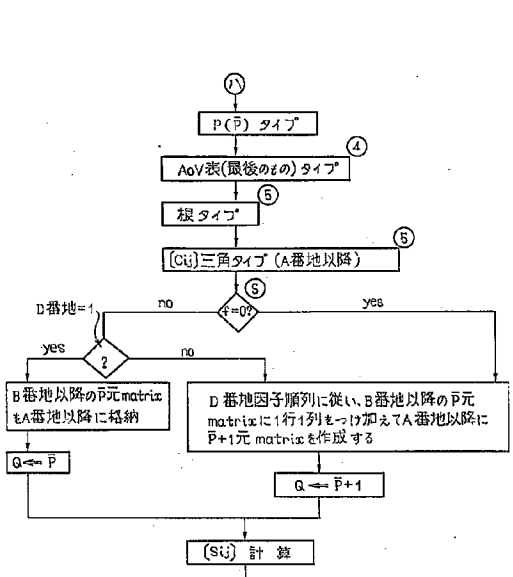


図-2.1 つづき

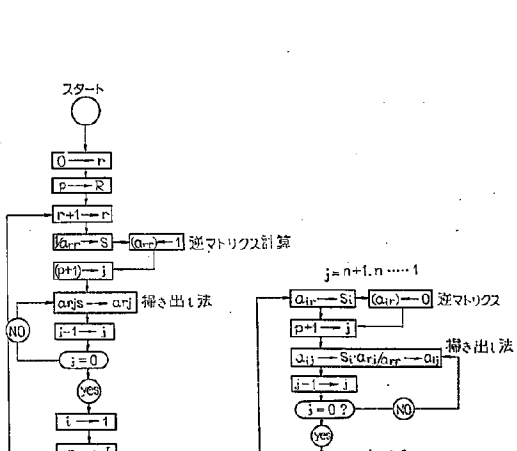


図-2.2 $R\ (1, 2, \cdots\cdots, r)$ 計算フローチャート

表-3.1 ダムの形状，材料特性を示す諸元一覧表

ダム諸元および特性 ＼ ダム名		綾北	室牧	二瀬	鳴子
河川名		大淀川支川綾川	神通川支川室牧川	荒川	北上川支川江合川
ダムの種別		薄肉アーチダム	薄肉アーチダム	厚肉アーチダム	厚肉アーチダム
目的		F. A. P.	F. A. P.	F. A. P	F. A. P
総貯水容量 (m³)		21,300,000	17,000,000	26,900,000	50,000,000
たん水開始期日		1954年4月2日	1961年3月30日	1960年11月16日	1957年4月5日
たわみ計測標高		プラムライン 上段 El. 298 中段 El. 273 下段 El. 248.3	堤頂面における視準測量	プラムライン 上段 El. 545m 下段 El. 460m	プラムライン 上段 El. 260 中段 El. 215 下段 El. 179
解析温度計測断面	断面番号 1	El. 245	El. 186	El. 458	El. 194.3
	2	275	215	495	226.3
	3	285	245	515	242.3
	4	—	—	534.5	—
形状特性 頂部標高		El. 298	El. 261	El. 545	El. 260
基底標高		221	185	455	175
サドル上面よりの高さ H (m)		73	76	90	85
アーチ作用部分の高さ H' (m)		66	70	82	79
アーチ作用部分基底厚 D_b (m)		13	7.5	40	28
アーチ作用部分平均厚 D_m (m)		10	7.0	28	20
頂部半径 R_c (m)		100	64	130	100
堤頂部中心角 H (度)		100	100	120	120
堤頂長 L (m)		174	115	290	215
堤体積 V (m³)		47,000	57,200	356,000	180,000
材料特性 コンクリート弾性係数 E_c(kg/cm²)		200,000	250,000	200,000	200,000
地質		砂岩，頁岩およびその互層	安山岩一部凝灰岩および凝灰安山岩	珪岩，および千枚岩	閃緑花崗岩および石英粗面岩
上部岩盤弾性係数 E_{ru} (kg/cm²)		60,000	40,000	50,000	20,000
下部岩盤弾性係数 E_{rl} (kg/cm²)		80,000	70,000	100,000	100,000

注；F：洪水調節 A：かんがい P：発電

RES：残差 (Residuals)

$Y(0)$‥観測値 (Observed Values) x_{p+1} 9桁

$Y(C)$：計算値 (Computed Values) x'_{p+1} 9桁

RES：残差 (Residuals)

$$\Delta x_{p+1}=x_{p+1}-x'_{p+1} \quad 9\text{桁}$$

3. アーチダム諸元

本報告書で解析する綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムの形状および材料特性は表-3.1のとおりである。

4. 堤体温度の挙動

〔1〕 はじめに

アーチダムは堤体の厚さが薄く不静定構造物であるため，外気温の周期的変動にともなって堤体温度もまた周期的に変動し，内部に拘束応力やひずみを生じ堤体は変形する。そして，この現象は水圧荷重によるものより，しばしば顕著でさえあることが種種の実測解析結果によって確認されている。本文は堤体温度の挙動を主としてたわみ，ひずみの挙動解析の立場より考察したものである。

〔2〕 堤体温度

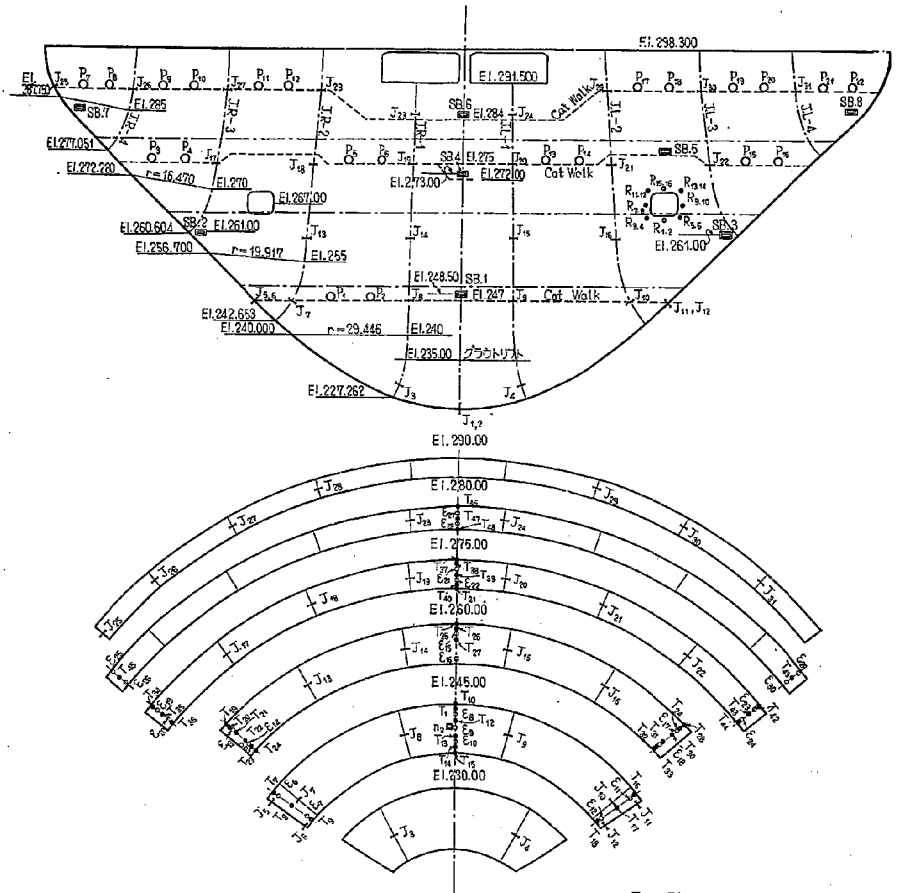
堤体温度は外気温，水温，水和熱等の影響を受けて変動する。図-4.1は綾北ダムの計器埋設図，図-4.2は綾北，室牧，鳴子，二瀬ダムのクラウンカンティレバーおよび右岸の各標高における温度計配置図であり，この計器による堤体温度の変動を図-4.3～図-4.6に画き，水和熱による温度上昇，最終安定温度，最終安定温度振幅を表-4.1にとりまとめた。これより下記事項が観察される。

① 最終安定温度振幅は表面に近い部分ほど，また標高が高くなるにしたがって大となる。

② たん水後の最終安定平均温度は標高が高くなるにしたがって大きくなる。主として水温の影響を受けるためであろう。

表-4.1　水和熱による温度上昇，最終安定温度一覧表

	標高およびダム厚	温度計番号および上流面からの距離	水和熱にもとづく最高温度上昇	打設より最高温度上昇までの期間	打設より最終安定温度までの期間	最終平均安定温度（たん水後）	安定温度振幅（たん水後）	打設時期
鳴子ダム	El. m 194.30 (19.000)	T_{27} (14.25 m)	23.0° C	15 日	3 カ月	10° C	2° C	S. 30年11月27日
		T_{23} (4.75)	23.7	15	3	10	1	S. 30. 11. 27
	226.30 (10.800)	T_{77} (0)	35.0	12	4	10	7	S. 31. 7. 17
		T_{73} (5.4)	42.5	4	6	12	2.5	S. 31. 7. 17
	242.30 (6.500)	T_{82} (3.3)	47.0	4	6	11	8	S. 31. 9. 9
		T_{83} (0)	32.8	2	5	11	12	S. 31. 9. 9
綾北ダム	245.00 (10.241)	T_{10} (0)	16.0	2	2	11	4	S. 33. 12. 8
		T_{12} (3.0)	22.5	10	2.5	10	5	S. 33. 12. 8
	275.00 (6.103)	T_{39} (3.0515)	33.0	3	1.5	16	8	S. 34. 4. 25
		T_{41} (6.103)	26.4	3	1.5	16	12	S. 34. 4. 25
	285.00 (4.724)	T_{46} (0.5)	34.4	2	5	15	10	S. 34. 5. 29
		T_{47} (4.362)	42.6	4	5	15	10	S. 34. 5. 28
室牧ダム	186.00 (7.500)	T_{5} (0)	29.0	12	1.5	9	4	S. 34. 11. 26
		T_{6} (6.5)	12.8	3	1.5	11	9	S. 34. 11. 27
	215.00 (7.500)	T_{31} (3.75)	36.0	12	2	10	5	S. 35. 6. 7
		T_{33} (7.5)	24.3	3	2	12	13	S. 35. 6. 7
	245.00 (5.500)	T_{55} (0)	24.0	4	1	15	12	S. 35. 10. 4
		T_{57} (2.75)	34.5	10	1	15	11	S. 35. 10. 4
二瀬ダム	458.00 (36.545)	T_{3} (28.543)	26.5	12	1	11	2	S. 34. 4. 16
		T_{5} (36.043)	15.5	12	1	10	5	S. 34. 4. 16
	495.00 (21.029)	T_{4} (5.9)	38.3	7	1.5	11	2	S. 34. 9. 24
		T_{13} (20.924)	26.0	5	1.5	11	13	S. 34. 9. 24
	515.00 (12.626)	T_{1} (0.2)	8.5	7	1	3	9	S. 35. 3. 11
		T_{2} (2.9)	15.0	7	1.5	4	5	S. 35. 3. 11
	534.00 (5.064)	T_{1} (0.2)	34.0	6	2	13	10	S. 35. 7. 24
		T_{2} (2.53)	38.8	6	2.5	13	11	S. 35. 7. 24



凡 例

計器名	記号	個数
縦目計	ー I	32
温度計	• T	49
歪計 1成分	○ ε	2
〃 5成分	◉ ε	5× 26=130
〃 9成分	◎ ε	9× 2= 18
無応力計	□ n	4
応力計	○ σ	2
鉄筋計	• R	16
温度測定用パイプ	○ P	22
スイッチボックス	▣ SB	8

図-4.1(a) 綾北ダム計器埋込図

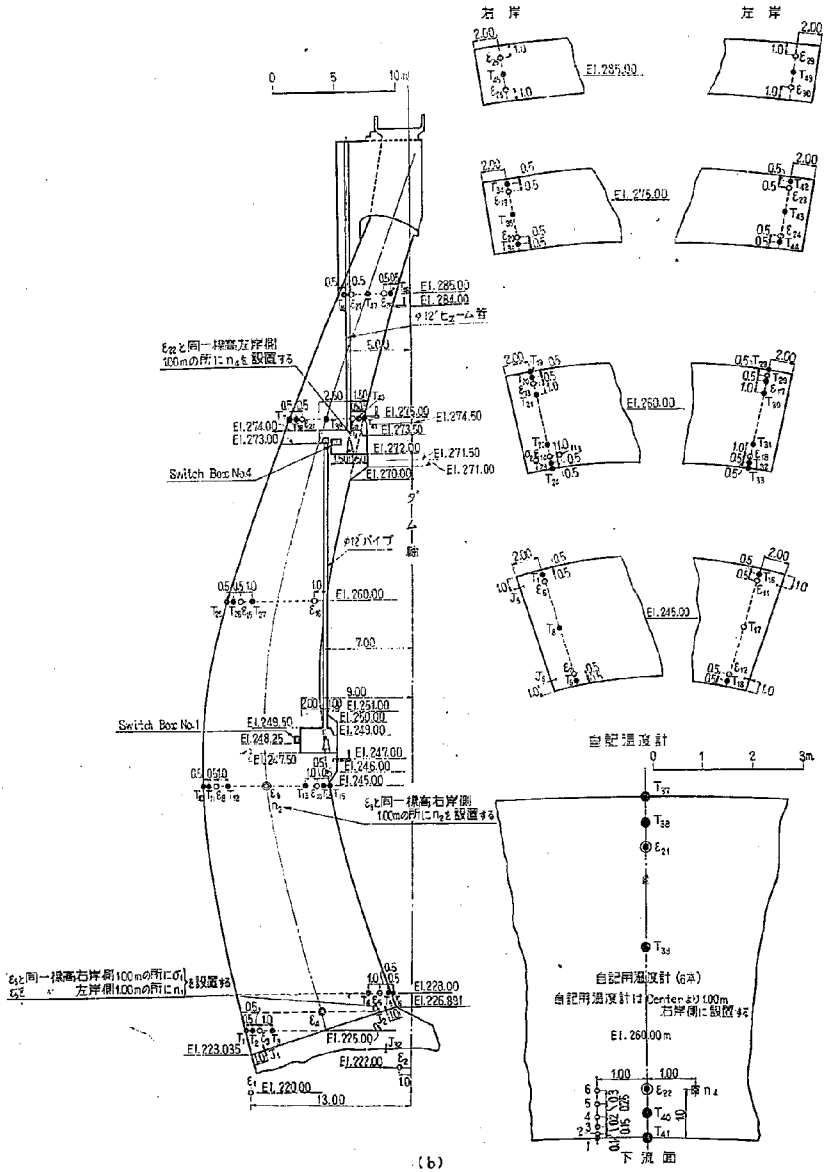


図-4.1(b) 綾北ダム計器埋込図

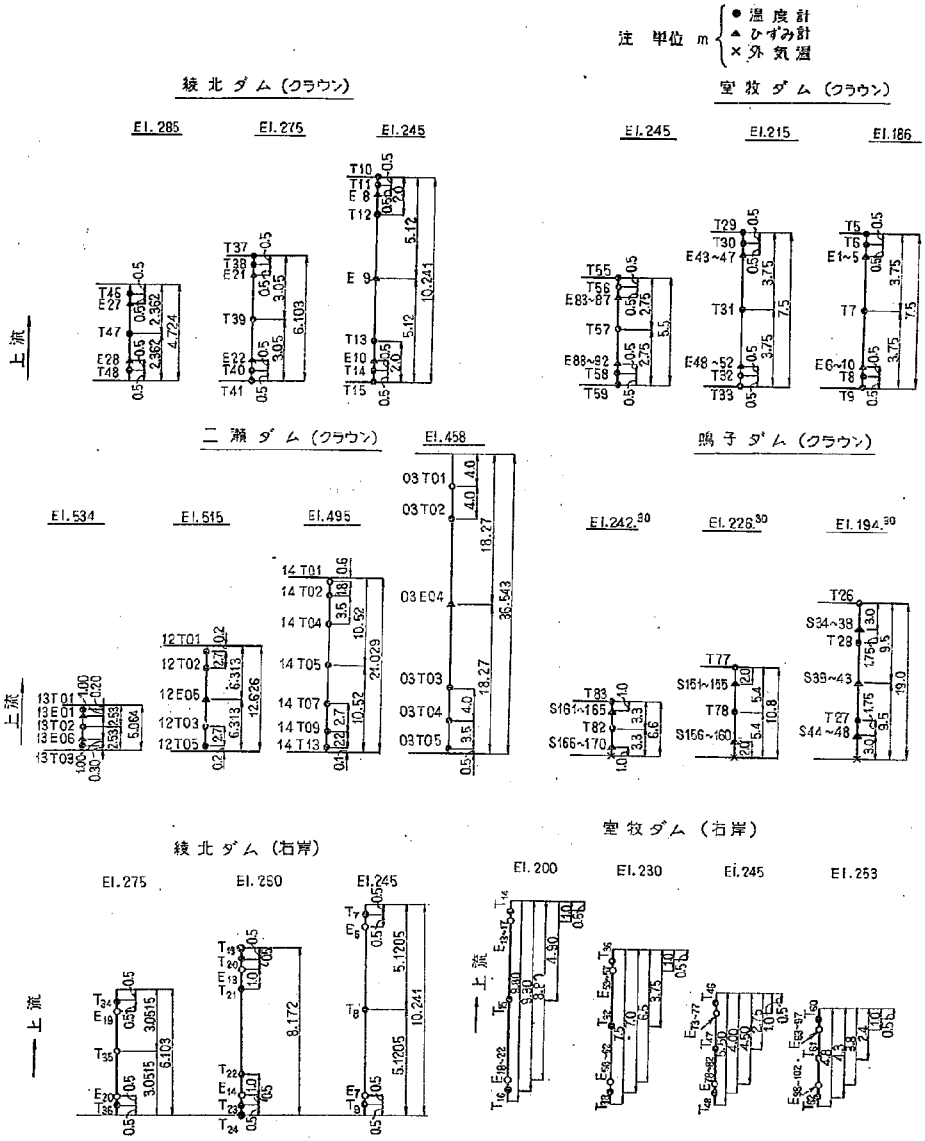

注 単位 m
● 温度計
▲ ひずみ計
× 外気温
綾北ダム（クラウン）
El.285
El.275
El.245
上流
室牧ダム（クラウン）
El.245
El.215
El.186
二瀬ダム（クラウン）
El.534
El.515
El.495
El.458
上流
鳴子ダム（クラウン）
El.242.50
El.226.50
El.194.50
綾北ダム（右岸）
El.275
El.250
El.245
上流
室牧ダム（右岸）
El.200
El.230
El.245
El.253
上流

図-4.2 計器配置図

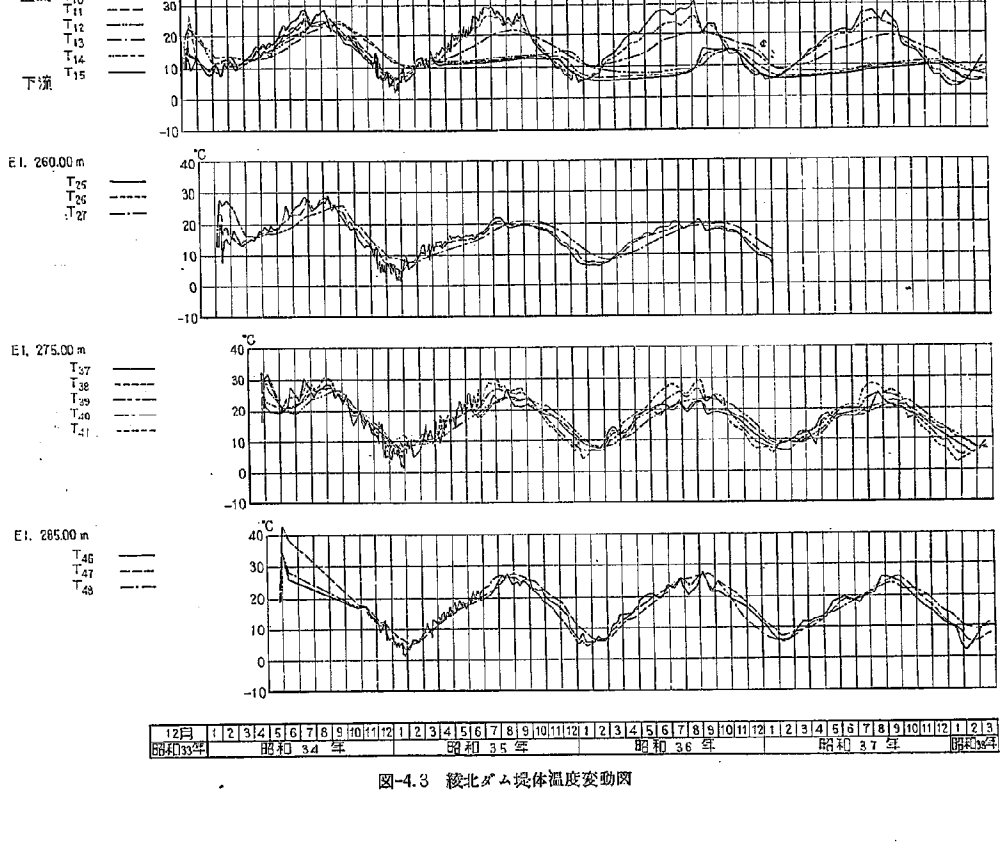


図-4.3 鍛北ダム堤体温度変動図

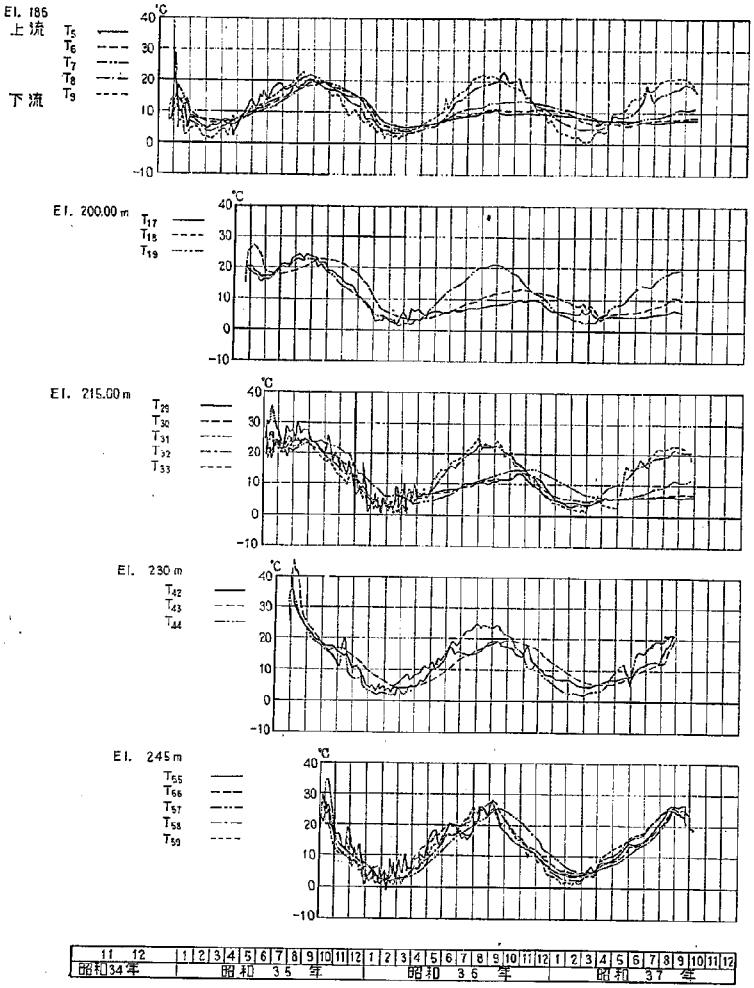


図-4.4 宝牧ダム堤体温度変動図

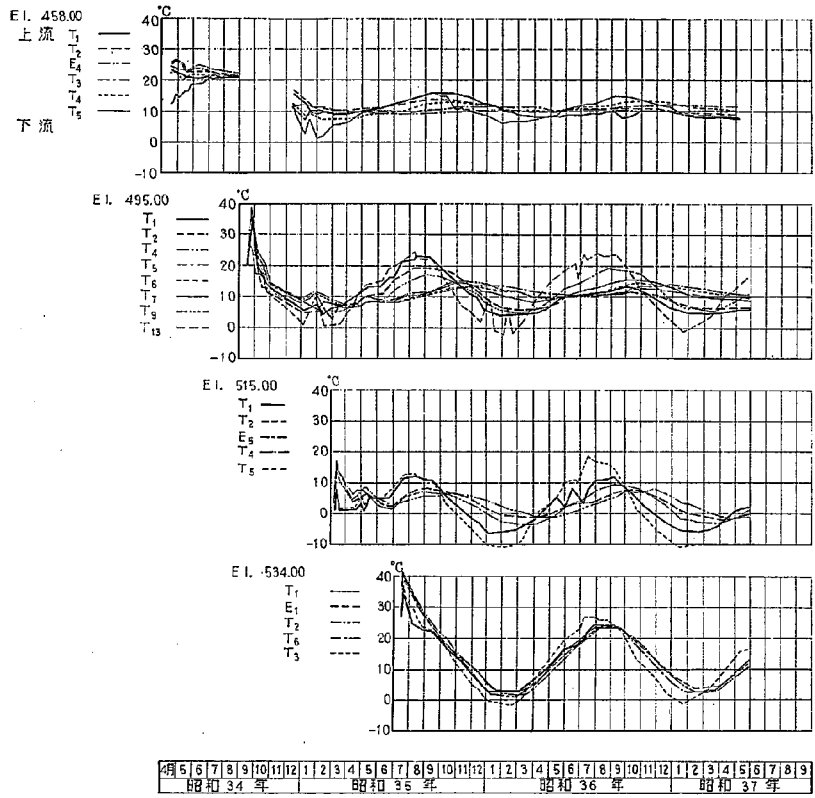


図-4.5 二瀬ダム堤体温度変動図

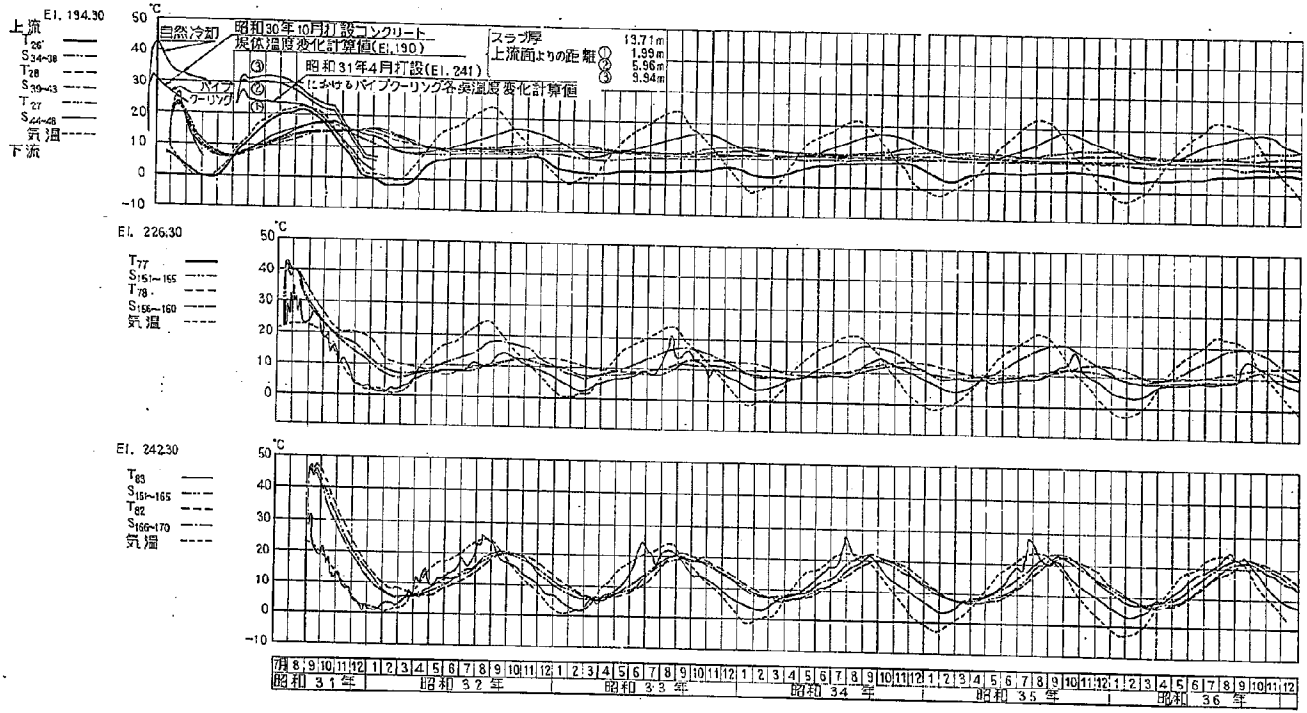


図-4.6 鳴子ダム堤体温度変動図

③ たん水後の常に水面下に埋没する上流面の温度振幅は小さく，また水面下に埋没したり露出したりする上流面の温度変化は不規則である。

④ 最終安定温度の気温に対するおくれは堤体内部ほど，また堤厚が大きいほど大となる。

⑤ 打設が冬期に行なわれたコンクリートの最高温度の中の最大値は23.7° C（鳴子ダム）であるが夏期のものでは47° C（鳴子ダム）に達する例がある。

⑥ 水和熱による最高上昇温度は堤体内部ほど大きい。

鳴子ダムの昭和30年10月打設コンクリート（El. 190）のパイプクリーングを行なう場合の計算温度時間曲線[7]を図-4.6に画いて実測結果と比較したが，実測結果は最高温度において7° C低い値をとっている。なお参考のために図-4.6に自然冷却の場合の計算値も記入してある。また昭和31年4月打設（El. 241）コンクリートにおけるパイプクーリングの場合の各点の温度変化量も記入したが，上記⑥の事項を良く説明している。

〔3〕 堤体平均温度，等置直線温度こう配[2), 3)]

（1） 概　説

既述のように複雑な様相をもった堤体温度は，気温に影響される部分が大きいため，図-4.3，図-4.6にみられるように堤体各点の温度相互間には顕著な相関がみられる。

したがって，実測資料によるダムの挙動解析においては比較的少数の温度測定値によって全体の温度分布を代表せしめることが可能であり，また相互に相関ある温度因子の持分にダムのたわみの挙動を分解する場合，単なる重回帰分析のみによっては信頼度の良い回帰係数を得ることができないことに注意すべきである。

アーチダムのたわみの挙動分析の温度条件として，クラウンカンティレバーの2，3の断面の平均温度，等置直線温度こう配を用いた。

ある標高の断面における平均温度とは，その断面の温度の平均値であり，等置直線温度こう配とは，下流側の温度の高い場合を正とし，その上流端のまわりの一次モーメントと面積とが実際の温度分布形と等しいような台形温度分布のこう配を言う。これは一端を固定し，はりの自由断面における拘束応力を受けた温度ひずみが直線分布をもつものと考え，この拘束応力の総和および一次モーメントをゼロにすることによって得られるものである。

アーチダムの温度応力によるひずみは，両岸における拘束にもとづくものの外に，アーチダムの断面それ自身が適合条件式を満足しないために生ずる。これを自己温度拘束応力と言うことにする。

さて，図-4.7(1)のCDEなる温度上昇分布にもとづくひずみは，自己温度拘束応力のためC′D′E′なる直線に近い分布をとる。いま，図-4.7(1)のアーチ自由面OFに

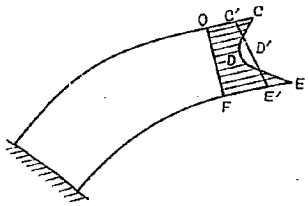


図-4.7 (1)

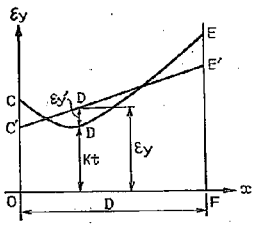


図-4.7 (2)

おけるダム軸方向のひずみ ε_y が図-4.7(2)のとおり直線分布，

$$\varepsilon_y=\alpha' x+C' \quad \cdots\cdots(4.1)$$

をとるものとする。ε_y は温度ひずみ kt と自己温度拘束応力によるひずみ ε_y' の和であり

$$\varepsilon_y=kt+\varepsilon_y' \quad \cdots\cdots(4.2)$$

である。k は温度膨脹係数である。さて

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_y&=kt_1\\ \varepsilon_y'&=kt'\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4.3)$$

なる温度 t_1，t' を想定すれば (4.2)，(4.3) より

$$t_1=t+t' \quad \cdots\cdots(4.4)$$

また (4.1)，(4.3) より

$$t_1=\frac{\alpha'}{k}x+\frac{C'}{k} \quad \cdots\cdots(4.5)$$

を得る。(4.5) 式は温度上昇 t を受けた自由面OFが自己温度拘束応力を受け，あたかも t_1 なる温度上昇の直線分布を受けたようにひずみを生ずることを示す。図-4.7(3)に示される t_1 の分布を等置直線温度分布と言うことにする。

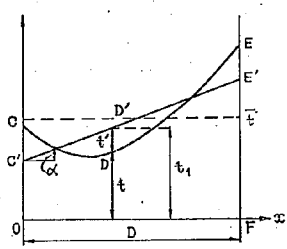


図-4.7 (3)

自己温度拘束応力によるひずみは (4.2), (4.3), (4.4) 式より

$$\varepsilon_y'=\varepsilon_y-kt=k\ (t_1-t)=kt' \quad \cdots\cdots(4.6)$$

として表わされる。

等置直線温度こう配，平均温度は次のとおり求める。(4.2) 式より

$$\varepsilon_y'=\varepsilon_y-kt \quad \cdots\cdots(4.7)$$

OF面には外力が働いていないので σ_y を拘束応力とすれば

$$\int_0^D \sigma_y'\,dx=0, \qquad \int_0^D \sigma_y' x\,dx=0 \cdots\cdots(4.8)$$

しかるに $\sigma_y' \propto \varepsilon_y'$ とすれば，

$$\int_0^D \varepsilon_y'\,dx=0, \qquad \int_0^D \varepsilon_y' x\,dx=0 \cdots\cdots(4.9)$$

(4.1) 式を (4.7) 式に代入し σ_y' を求め，これを(4.9)式に代入すれば，

$$\left.\begin{aligned}\int_0^D(\varepsilon_y-kt)\,dx&=\int_0^D(\alpha' x+C'-kt)dx=0\\ \int_0^D(\varepsilon_y-kt)x\,dx&=\int_0^D(\alpha' x+C'-kt)x\,dx=0\end{aligned}\right\} \cdots\cdots(4.10)$$

(4.10) 式より

$$\left.\begin{aligned}\alpha'\frac{D^2}{2}+C'D&=k\int_0^D t\,dx=kK\\ \alpha'\frac{D^3}{3}+C'\frac{D^2}{2}&=k\int_0^D tx\,dx=kM\end{aligned}\right\} \cdots(4.11)$$

K は図-4.7(3)における MOFEDC の面積，M はその面積のO軸のまわりの一次モーメントである。(4.11)式より α，C をとけば

$$\alpha=\frac{12M-6KD}{D^3},\quad C=\frac{2(2KD-3M)}{D^2} \quad \cdots\cdots(4.12)$$

α は等置直線温度こう配であり，平均温度として次式

$$\bar{t}=C+\alpha\frac{D}{2}=\frac{K}{D} \quad \cdots\cdots(4.13)$$

を得る。温度上昇 t の代わりに温度 f をとる場合，f に対する M, A を計算して (4.12)式，(4.13) 式によって平均温度 $\bar{f}$，等置直線温度こう配 α を得ることができる。この温度計算は電子計算によって行なっているので，以下にその手順を説明しよう。

(2) 電子計算による平均温度，等置直線温度こう配計算

手順　1）不等間隔に計測された温度データ (f_0', f_1', ……, f_n') を知って等間隔温度分布 (f_1, f_2, ……, f_{10}) をラグランジュの補間式によって求める。すなわち

$$f(x)=\sum_0^n \frac{\Pi(x)}{(x-x_t')\,\Pi'(x_t')}f'(x_t') \cdots(4.14)$$

上式において

$$\Pi(x)=(x-x_0')(x-x_1')\cdots(x-x_t')\cdots(x-x_n')$$

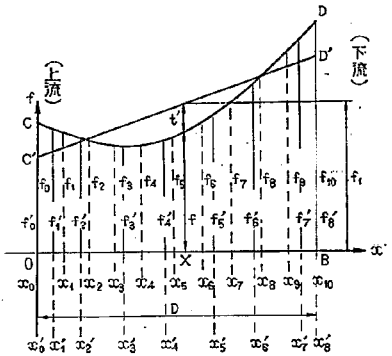


図-4.7 (4)

$$\Pi'(x')=(x_t'-x_0')(x_t'-x_1')\cdots\cdots(x_t'-x_{t-1}')(x_t'-x_{t+1}')\cdots\cdots(x_t'-x_n')$$

手順　2）等間隔温度分布をシンプソン公式に適用し，面積 OBDC(K)を求め次にこれをダム厚さ ($D=x_{10}$) で除して平均温度 (T) を求める。すなわち

$$\left.\begin{aligned}K&=\frac{1}{3}\frac{D}{10}\left\{f_0+f_{10}+2(f_2+f_4+f_6+f_8)\right.\\&\quad\left.+4(f_1+f_3+f_5+f_7+f_9)\right\}\\ T&=K/D\end{aligned}\right\} (4.15)$$

手順　3）等置直線温度分布 ($\overline{C'D'}$) のこう配(A)を求める。

$$A=\frac{12M-6DK}{D^3} \quad \cdots\cdots(4.16)$$

ただし，Mは面積 OBDC の原点Oのまわりの一次モーメントであり，シンプソン公式によって次式のとおり求められる。

$$M=\frac{1}{3}\left(\frac{D}{10}\right)^2\left\{10f_{10}+2(2f_2+4f_4+\cdots+8f_8)+4(f_1+3f_3+\cdots+9f_9)\right\} \cdots\cdots(4.17)$$

手順　4）実測温度分布と等置直線温度分布との差を与えられた点Xにおいて求める計算を行なう。

入力データは図-4.8にしたがって記入し，図-4.9(1), 図-4.9(2)に綾北ダムの温度計算の入出力データ例を示す。

出力データは実測年月日 (S)，平均温度 (T)，温度こう配 (A)，手順4を行なうものについては求める点の上流面よりの距離 (X_t)，温度差 (C) がプリントされる。図-4.10は温度計算のフローチャートであり，図-4.11はプログラムである。

なお，このプログラムの最初の手順においてラグランジュ補間式によって温度分布曲線を求めるのであるから

(1) 温度変化が顕著な表面において温度計を密に配置

```
ダム名
(S)
(N)(Q)(D)(D+1)(DN)(DN-1)……(D1)
(R)(D1')(D2')(B3')(DR')
Date (FN)(FN-1)……(F1)
 —  —  —      —
 —  —  —      —
```

註（ ）は数値を示す

S：測点断面番号（下の標項より付番）	fix	2桁
N：実測測点数	〃	〃
Q：実測データ組数	〃	3桁
D：ダムの厚さ	floating	5桁
D+1：1/10×ダムの厚さ	〃	〃
Di：測点上流よりの距離（下流より記入）	〃	〃
R：温度差測点数(ひずみ計ロゼット数)(*R*<5)	fix	2桁
Di：温度差測点の上流よりの距離	floating	5桁
Date：実測年月日〔例36. 12/△7△〕		
Fi：温度データ（下流より記入）	floating	5桁

図-4.8　堤体平均温度等値直線温度こう配電子計算入力データ様式

```
AYAKIT
02   07   010   52102   51102
52102   51974   51824   51512   51200   50500   50000
03   51924   51512   51100
37.02.06   51530   51480   51910   52116   52100   51680   51570
     .20   51580   51640   51900   52106   51900   51650   51570
   03.20   52111   52105   51950   51910   51790   51640   51600
   04.03   52110   52113   51980   51860   51760   51640   51610
     .17   52148   52129   52106   51840   51740   51650   51630
   05.01   52152   52142   52114   51840   51740   51660   51640
     .15   52183   52161   52137   51850   51740   51670   51660
     .29   52195   52178   52134   51890   51750   51690   51680
   06.12   52207   52192   52146   51920   51760   51700   51690
     .26   52208   52191   52150   51970   51780   51720   51710
```

図-4.9(1)　綾北ダム温度計算入力データ例

```
AYAKIT
 TEM 02
        T        A        X1       X2       X3       X4       X5
                          9.24     5.12     1.00
                          C        C        C        C        C
37.02.06   9.610  —.1322  —3.28    1.99   —2.09
     .20   9.076   .0059  —1.81    1.52   —1.64
   03.20   8.790   .3487  —1.93    .303   — .454
   04.03   8.662   .4195    .619 — .070    .174
     .17   8.954   .6150    .208 — .566    .395
   05.01   9.239   .7240    .946 — .853    .599
     .15  10.05    1.034    .546 —1.57     1.19
     .29  10.27    1.054   1.51  —1.39     1.13
   06.12  10.31    1.208   1.77  —1.64     1.32
     .26  11.14    1.217   1.37  —1.47     1.23
```

図-4.9(2)　綾北ダム温度計算出力データ例

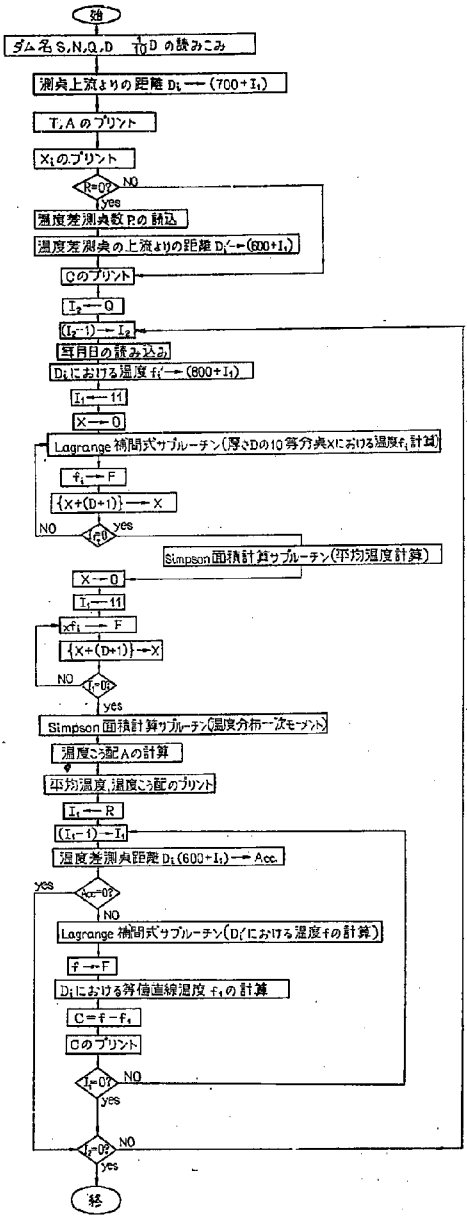


図-4.10　平均温度等値直線温度こう配計算フローチャート

```
100Z A
1101X  43014X
9Z G
711Y  301X  100Y  111Y  100Y  212Y  100Y  321Y
511Z D
1807X  7312X  7323X  193Y  1609X  11025X  193Y  16010X  11027X  11035Y  11046X  193Y
16011X  11031X  11039X  1931Y  16012X  11042X  1932Y  1108X  7218X  100Y  Z I
1104X  21013X  Z I
7228X  30013X  712Y  1105X  3004X  100Y  Z I
14080Z3  3205X  76229Z  1105X  3001X  21013X Z I
7228Z  30013X  712Y  1106X  3001X  100Y Z I
14080Z3  3206X  76237X  14080Z3  Z I
1705X  30082Z3  2007X  1107X  3004X  100Y  Z I
76125X  7212X  7223X  3007X  4333Y  100Y
200
Z A
580Y  4102X  610355Y  4303X  610324Y  3400Z0  11018X  5209Y  28051Y  73217X
41011X  7220Z0  50011Y  642301Y  11018X  610323Y  193Y  2921Y  7220Z0  19018X
642300Y  43015X  193Y  7220Z0  570Y  30018X  580Y  59050Y  610323Y  642300Y
570Y  72217X  4331Y  100Y  Z1  Z1
440Z E
150Z A
180161Y  3809Y  721Z0  100Y  711Y  201475Y  7612X  200475Y  200477Y  200479Y
200481Y  200483Y  140Z0  320162Y  200474Y  200484Y  140Z0  320163Y  140Z0  320469Y
433Y  100Y  Z1  512Z D  50333333333Z D
300Z A
610454Y  610454Y  610454Y  601454Y  610454Y  610454Y  610454Y  610454Y  610454Y  6201006Y
650406Y  610454Y  610439Y  610417Y  610428Y  6601002Y  5009Y  640402Y  610454Y  6601002Y
110415Y  110451Y  6601003Y  110467Y  6601005Y  5006Y  110468Y  6601005Y  5006Y  110469Y
721415Y  100Y  711Y  6601005Y  5006Y  111700Y  761316Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610439Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610413Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610443Y  610401Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610443Y  610402Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610443Y  610403Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610443Y  610404Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610443Y  610405Y  610454Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  6601002Y  42080X  110470Y
721170X  570Y  711Y  6601005Y  5006Y  111600Y  301600Y  42080X  773200Y  100Y
3Z I  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  76171X
610454Y  610454Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  3805Y  721Z0  100Y
711Y  610415Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y
610455Y  610455Y  610455Y  76195X  610454X  722167X  712Y  6201005Y  5102Y  650405Y
6201003Y  5106Y  650403Y  610455Y  721115X  100Y  711Y  6601005Y  5006Y  111800Y
761108X  38011Y  721Z0  180171X  300171Y  773100Y  700Z I  800Z I
Z I  111173X  300171X  200169X  110171X  711X  761112X  773150Y  100Y
110185X  170168X  1201867  38011Y  721Z0  180171X  141173X  320171X  111173X  300171X
200169X  110171X  711X  761123X  773150Y  100Y  110187X  140168X  320168X  110172X
140168X  320172X  110172X  140189X  320168X  140Z0  330185X  140188X  220187X  170172X
120191X  300186X  5205Y  580Y  550Y  570Y  5005Y  773200Y  4Z I
610455Y  610455Y  300191X  580Y  5205Y  550Y  5005Y  570Y  773200Y  100Y
4Z I  610455Y  721170X  711Y  301600Y  420165X  773100Y  700Z I
800Z I  Z I  110173X  301600Y  140168X  230190X  140Z0  320191X
200186X  110192X  300173X  210192X  580Y  5206Y  550Y  5006Y  570Y  773200Y
3Z I  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  610455Y  761147X
610454Y  762103X  4401100Y  100Y
188Z G
5212Z D  516Z D
505Z D
440Z E
```

図-4.11 平均温度等値直線温度こう配プログラム

すること。

(2) 断面中央部において温度計を少なくとも1個配置すること

が必要条件であって，そうでないときは密に配置された温度分布曲線の影響を受けて，たとえば中央部の温度が外気温より高い結果を与えることがあるから注意すべきである。

温度計が不足する場合はひずみ計による温度を代用するが，温度計の精度が±0.3°C であるのに対してひずみ計による温度計測誤差が±1°C であって精度が多少悪くなる。

(3) 平均温度，等置直線温度のこう配の変動

綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムのクラウンカンティレバーに沿って図-4.2にしたがって埋設された温度計によって平均温度，等置直線温度こう配を求め，その数年にわたる変動を図-4.12～図-4.15に画いた。

室牧ダムでは各月末の提体内部平均温度 t_m(°C) を次式によって計算した。

$$t_m=\frac{t_u+t_d}{2}+\alpha\,(t_t-t_d)+\frac{\alpha}{2}(t_d-t_u)$$

$$=\frac{t_u+t_d}{2}+\alpha\left\{t_t-\frac{1}{2}(t_u+t_d)\right\}\quad\cdots\cdots(4.18)$$

上式で t_t は各月当初の提体内部平均温度 (°C)，t_u は月間平均の上流面温度 (El. 185mで4°C，水面で大気温)，t_d は月間平均の下流面温度 (月平均気温)，α は熱拡散係数と寸法で定まる定数 (0.09 m²/day) である。

この結果を実測による平均温度変動と比較するため，図-4.13に記入したがかなりよく一致している。

図より，提体平均温度相互の，また等置直線温度こう配相互の顕著な相関が観察される。また提体平均温度と等置直線温度こう配の間にも相関が認められるが，等置直線温度こう配はまた標高の大なるところで水位の動きと若干の相関がみられる。これは水面より露出したり埋没したりすることが温度こう配の動きに顕著に影響することを示すものである。たん水開始直前の温度こう配は，綾北，鳴子ダムではいずれの標高においても零であるが，二瀬，室牧ダムでは負の値をとり，特に標高の大きい部分においてこの現象が顕著である。これは二瀬，室牧ダムの上流面が南側に面し，より強く太陽輻射を受けるためと推定される。

図-4.12(1)より綾北ダムのたん水開始以前の平均温度，等置直線温度こう配の動きを見ると温度こう配の動きがいずれの標高においてもほとんど零であることがわかる。またたん水開始以前の下部標高の平均温度ほど高い値をとる現象は，この期間は水温の影響を受けず，また下部ほど提厚が大きく，水和熱がより長く残存するためと思われる。

また，図-4.12(2)は綾北ダムの右岸の El. 245, El. 275 の平均温度，等置直線温度こう配であるがクラウンの温度と大差がないことがわかる。

図-4.16は綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムのクラウンカンティレバーにおける平均温度変動幅の分布図であるが，明らかに厚肉である後二者と薄肉である前二者の間の相違がみられる。後者は標高が提頂より低くなるにしたがって急激にその値が減少するが，前者は上部ではほとんど変化せず，むしろ下部において急激に減少する。この現象は主としてクラウンカンティレバーにおける提体厚さの相違に帰因するものと考えられる。また等置直線温度のクラウンカンティレバーに沿う分布を検討してみると，提体平均温度分布と同様薄肉の綾北，室牧ダムでは標高によってほとんどその値は変化しないが，厚肉の特に二瀬ダムでは上部と下部の値が大幅に変化し，下部では零に近づくことが考察される。これは厚肉ダムでは提体平均温度の変動が小さい上に等置直線温度は温度差を提厚で除した値であるためである。

図-4.17は提体厚さの増大とともに平均温度変化量の減少を示すが，提厚が同じでもダムによって傾向の異なることが観察される。これは，主として河床よりの高さの相違による水温の影響の度合いが異なるためと思われる。

アメリカの開拓局で温度変化量推定式として次式

$$\left.\begin{aligned}F&=\frac{680}{t+8}\qquad F：温度変化量\,(°F)\\ &\qquad\quad t：アーチ厚さ\,(ft)\\ C&=\frac{115}{t+2.44}\qquad C：温度変化量\,(°C)\\ &\qquad\quad t：アーチ厚さ\,(m)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(4.19)$$

を誘導した。上式を参考までに図-4.17に記入した。

図-4.18は二瀬ダムの El. 515 における温度分布に着目してその1年の変動を追ったものである。夏型温度分布は下に凸，冬型温度分布は上に凸であり，その遷移点は4月および10月である。この変動は断面の各点における t' の変動によって把握することができる。

〔4〕 気温と提体温度

提体温度は貯水池水位，水温の影響を受けるが，主として太陽輻射に支配され気温変化に伴い1年を周期として規則的に変化するため気温とはかなりの相関がある。表-4.2は熱拡散係数 $(=h^2)=0.0418$ として計算された鳴子ダムの提体温度のおくれ，平均温度，平均温度振幅を各標高に一覧表にしたものである。括弧書きは実測解析結果であるが，平均温度振幅において実測解析結果が約1/2となっている外は，コンクリート平均温度，そのおくれ，ともにほぼ一致していることがわかる。

提体平均温度と気温とは3～4週間のおくれ，等置直線温度こう配とはほとんど同位相，ないし多少のおくれをもって変動するものと考え，気温はいわゆる3寒4温に従い変化するので1週間の平均をとり，たとえば綾北ダムの El. 245 における平均温度 t_3 と15～28日前の平均

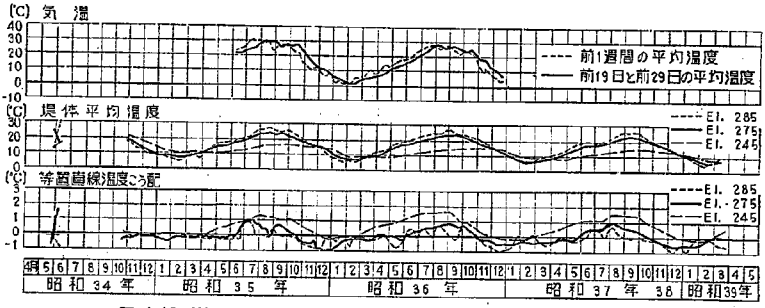


図-4.12 (1) 綾北ダム堤体平均温度，等置直線温度こう配変動図

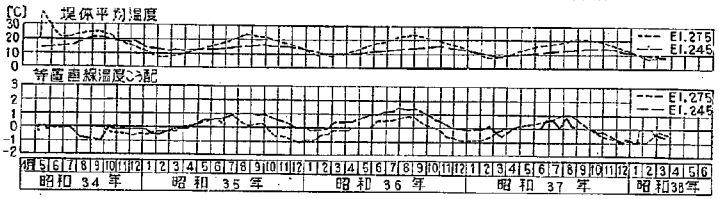


図-4.12 (2) 綾北ダム右岸堤体平均温度，等置直線温度こう配変動図

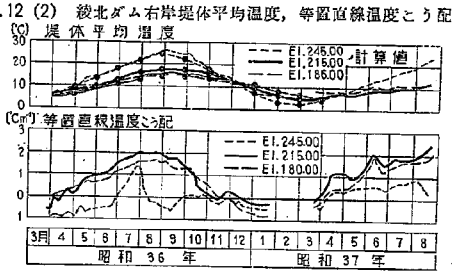


図-4.13 室牧ダム堤体平均温度，等置直線温度こう配変動図

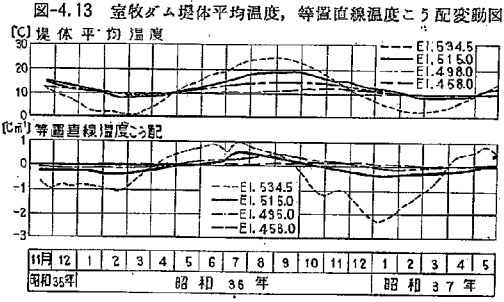


図-4.14 二瀬ダム堤体平均温度，等置直線温度こう配変動図

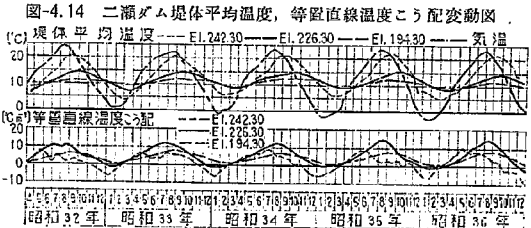


図-4.15 鳴子ダム堤体平均温度，等置直線温度こう配変動図

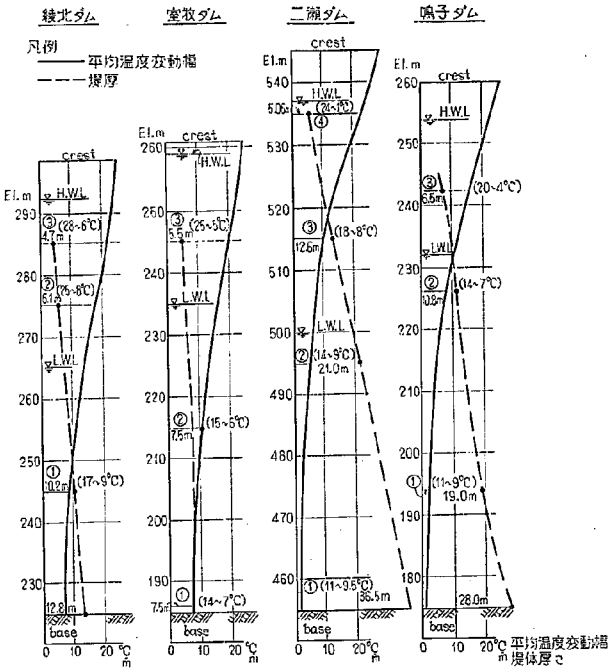


図-4.16　クラウンキャンティレバー断面における堤体平均温度変動幅分布図

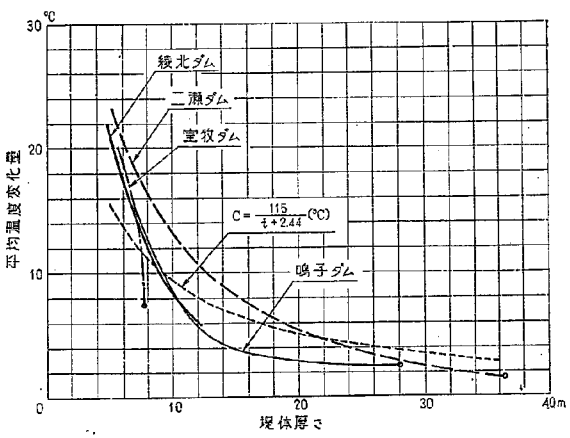


図-4.17　堤体厚さと平均温度変化量との関係

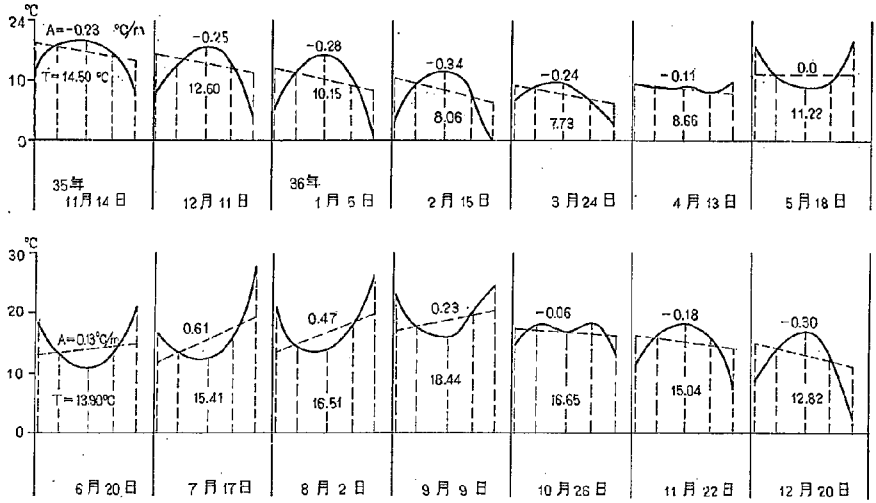


図-4.18　二瀬ダム半径方向温度分布変動図（El. 515mクラウンカンティレバー）

表-4.2　鳴子ダム堤体平均温度およびそのおくれ

標　高	コンクリート厚	スラブ厚	上流面平均温度（水　温）	下流面平均温度（気　温）	堤体平均温度	平均温度振幅	おくれ
181	28.0 m	27.83m	4.44 °C	10.80 °C	7.62 °C	2.12 °C	1.52月
190(194)	20.21	20.09	5.00	〃	7.90(10.0)	2.98(1.5)	1.52(1.5)
201	17.00	16.90	5.69	〃	8.25	3.65	1.55
214	13.80	13.71	6.67	〃	8.73	4.90	1.58
230(226)	10,06	9.82	8.10	〃	9.45(10.5)	7.83(3.5)	1.50(1.2)
240(242)	7.42	7.38	9.28	〃	10.04(12.0)	11.58(8.0)	1.22(0.5)

註　カッコ書きは実測解析結果

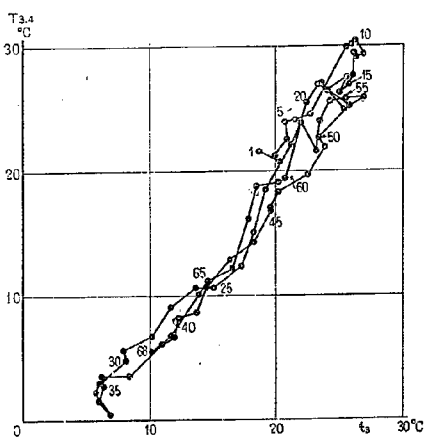


図-4.19　綾北ダム $T_{3.4}$ と堤体平均温度 t_3 の相関図

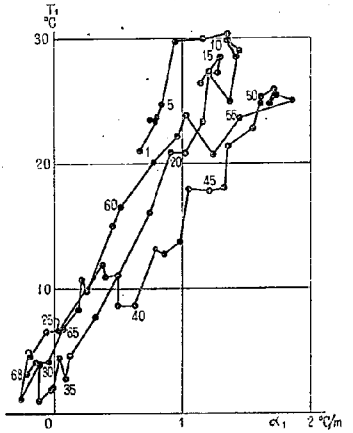


図-4.20　綾北ダム T_1 と等置直線温度こう配 α_1 の相関図

表-4.3　月平均気温および気温変化量一覧表

ダム名	月平均気温 (°C) 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均気温 (°C)	月平均気温変化量 (C°)
綾北	6.0	7.0	12.0	15.0	19.0	23.0	26.0	27.0	22.0	18.0	13.0	9.0	16.4	21.0
室牧	2.0	2.7	6.1	11.7	16.2	19.9	23.9	25.7	21.0	15.2	9.7	5.7	13.3	23.0
二瀬	0.5	2.2	4.9	11.0	16.7	18.5	23.0	24.0	21.0	14.0	7.0	2.2	12.1	23.5
鳴子	−1.3	−0.9	3.1	9.5	14.0	18.2	22.7	24.0	18.9	12.7	7.3	1.7	10.8	25.3

気温 $T_{3,1}$ との相関，および El. 245 の等置直線温度こう配 α_1 と前1週間の平均気温 T_1 との相関関係を図-4.19，図-4.20 に求めた。その相関係数は0.98，0.93となり高度に有意であることがわかる。

図-4.12(1)には綾北ダムの T_1，$T_{3,1}$ と堤体平均温度，等置直線温度こう配が対象的に画かれている。

表-4.3は4ダムにおける月平均気温，年平均気温，および月平均気温変化量を示すが，年平均気温が低いダムほど月平均気温変化量が大きいことがわかる。月平均最高気温が地域的にほとんど差異がないが，月平均最低気温は年平均気温の低いダムサイトで顕著に低いためである。したがって年平均気温の低いダムはむしろ温度応力をいちじるしく受けることになる。

〔5〕 むすび

アーチダムの堤体温度，および気温との関係等の諸特性をダムのたわみ，ひずみの挙動解析の立場より考察し，あわせて水和熱による温度上昇，平均温度の変動，堤体厚さと平均温度変化量との関係を表わす従来の諸計算式を鳴子，綾北，室牧，二瀬ダムの実測値によって検討した。

5. たわみの挙動解析

〔1〕 アーチダムの挙動を支配する主要因

(1) 経年変化

コンクリートのクリープに関する重畳原理によれば，材令 K における単位応力による時間 θ におけるクリープ $\rho(K,\theta)$ が対数関数的に増大することが実験的に認められており

$$\rho(k,\theta)=k_K \log\left(\frac{1+\theta}{1+K}\right),\quad 1+\theta>1+K \qquad \cdots\cdots(5.1)$$

とすれば，クリープによるひずみは (1.3) 式第2項によって，次式

$$\varepsilon(\theta)=\int_0^{\theta} k_K \log\left(\frac{1+\theta}{1+K}\right)\frac{d\sigma}{dK} \qquad \cdots\cdots(5.2)$$

として与えられる。

本解析においては経年変化あるいはコンクリート，岩盤のクリープを近似的に

$$\delta_\theta=\sum k_i \log\left(\frac{1+\theta}{1+\theta_i}\right),\quad 1+\theta>1+\theta_i \cdots(5.3)$$

として解析する。θ_i はクリープが顕著に変動すると思われる時点である。

(2) 水圧荷重

水圧荷重によるたわみ δ_h はダム固有の形状，地質特性等と荷重因子としての水圧荷重によって決定されるが，まず荷重因子としての水圧のみに着目して δ_h を次式

$$\delta_h=\sum_{i=1}^{4} c_i h^i \qquad \cdots\cdots(5.4)$$

として表わした。しかし，たん水初期においては水位が反復することがなく，また水位の変動と経年変化に相関があるので両者を分離することが不可能であり，この場合は水圧荷重が水深の2乗に比例することから水深の2乗因子のみをとり，さらに水深の相乗効果を考えて水深の4乗の項を入れて解析した。

(3) 温度荷重

堤体温度状態は主として1年を周期とし規則的に変化する気温に支配されるので堤体温度は相互に顕著な相関があり，堤体の数点の温度条件によってそれぞれ代表させることが可能であろう。本文ではクラウンカンティレバーにおける，3ないし4断面における堤体平均温度と等置直線温度こう配を温度条件として用いた。

平均温度の上昇はダムのアーチリングの伸張をうながし，等置直線温度こう配の増大は片持梁要素の上流への回転となって，いずれの場合もアーチは上流にたわむ。

〔2〕 たわみの多変量解析

(1) 概説

たわみの構造式としてはたわみを δmm（上流向きを正），i 標高の平均温度を t_i °C，温度こう配を α_i °C/m，水位を h m（標高），たん水前100日を原点にとり経年変化が顕著と思わる時点を θ_i として

$$\delta=k+\sum a_i t_i+\sum b_i\alpha_i+\sum c_i h^i + \sum d_i \log\left(\frac{1+\theta}{1+\theta_i}\right)+e \quad \cdots\cdots(5.5)$$

として電子計算機による多変量解析によってその解を求めた。上式で k, a_i, b_i, c_i, d_i は常数および各因子にかかる係数であり，e は残差である。温度解析断面は表-3.1に与えられる。

(2) 電子計算によるたわみの多変量解析[10),15)]

この場合は h, h^2, h^3, h^4, $\log\left(\frac{1+\theta}{1+\theta_i}\right)$ の計算をあらかじめ自動的に行ない因子として与えるプログラムを既述の多変量解析のプログラムに付加した。したがって制

御指令として，因子数 p，データ組数 N，常数項の有無 f_1 の外に l（平均温度項数），m（等置直線温度こう配の項数），f_5（ひずみ解析に使用する t' の項の有無），p_x（$=l+m+f_5$），f_2（基準値の有無），f_3（水深の項の乗数，2乗，4乗のとき 24000000000 として与える。），f_4（log の項数），f_6（残差計算継続の有無）を与える。f_2, f_3, f_4, f_5, f_6 は有のとき 1，無のとき 0 を与えればよい。さらに水深，平均温度，温度こう配，経年変化の基準値を必要があるとき与えるプログラムとなっている。

(3)　多変量解析

(a)　綾北ダム

昭和35年4月より37年1月までの82個の資料に対して，水圧荷重としては水深の2乗のみを与え，経年変化はたん水開始前100日を原点にとり解析した結果，次式

$$\begin{aligned}\hat{\delta}=&33.558-0.8126(t_3-11.63)\\&-4.2167(\alpha_1+0.0769)-2.094(\alpha_2-0.0292)\\&-1.5723(\alpha_3+0.0339)+0.00182(h-238.2)^2\\&-19.283\log(1+\theta)+58.56\log\left(\frac{1+\theta}{161}\right)\\&-38.034\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right)\end{aligned}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(5.6)$$

となる。水圧因子の項の基準値 238.9 はたん水開始の時点における水位である。

次に水圧によるたわみがクラウンカンティレバーのサドル上面よりの水深の2乗，4乗に比例するものと考え，$\theta_i=0, 160, 200$，を与えて解析した結果，

$$\begin{aligned}\hat{\delta}=&36.696+0.6034(t_1-11.34)\\&-1.288(t_3-11.63)-3.1768(\alpha_2-0.0292)\\&-1.9717(\alpha_3+0.0339)\\&+0.000000225(h-221)^4\\&-20.732\log(1+\theta)+45.471\log\left(\frac{1+\theta}{161}\right)\\&-23.768\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right)\end{aligned}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(5.7)$$

を得た。その電子計算入力データおよび (5.6)，(5.7) 式の実測解析図は図-5.1，図-5.2(1)，図-5.2(2)のとおりである。

(5.6) 式の残差不偏分散の平方根は 0.739 mm，たん水後約2カ月にわたり約3mmの上流向き経年変化が認められ，その後経年変化は下流向きに転じ1カ月半の後に旧状に復した。水圧によるたわみは水位 El. 292 に対して約6mmで，堤体平均温度によるたわみは約20mm，温度こう配によるたわみは約13mmであった。

(5.7) 式の不偏分散の平方根は 0.831 mmであり。図-5.2(2)をみると温度こう配によるたわみを除いて図-5.2(1)と類似した結果が得られている。その水圧によるたわみは水位 El. 292 に対し約6mmで，堤体平均温度によるたわみの変化量は約25mm，温度こう配によるたわみの変化量は約11mm，経年変化はたん水開始より約2カ月間に上流向きに5mm，その後約3 mm回復している。このように堤体平均温度，温度こう配の持分が図-5.2(1)と大幅に変わるのは両因子の間に特に下部において顕著な相関があるためであって，すなわち，$\delta_t=\Sigma a_i t_i$，$\delta_\alpha=\Sigma b_i\alpha_i$ は不安定であり，温度によるたわみはその和 $\delta_t+\delta_\alpha$ によって議論すべきことを暗示するものである。

次に (5.7) 式が任意の水位，堤体平均温度，温度こう配，時間に対していかなる精度をもって推定できるかを調べよう。たん水開始より37年1月までの期間について，月1回の割合で任意の期日における推定総たわみ計算値を求めたのが図-5.2(2)の×印であり，図より (5.7) 式による内挿結果はかなり良好であることがわかる。

次に37年2月より38年3月までの (5.7) 式の各因子によるたわみの持分，および総たわみ計算値の外挿結果を図-5.2(2)に画いたが，総たわみ計算値が38年1月よりズレていることがわかる。そこで改めて35年4月より38年3月までの資料に対して多変量解析計算を行なった。たん水開始前100日を原点とし，$\theta_i=0$, 160, 200, 1065 とし水圧荷重として水深の2乗のみを与えた結果は次式のとおりである。すなわち

図-5.1　綾北ダムたわみの入力データ

番号	年 月 日	t_1	t_2	t_3	α_1	α_2	α_3	h	θ	δ_{275}	δ_{298}
1	35. 4. 2	521134	521103	521163	−497690	492920	−493390	5323894	53100	−513100	−514350
2	16	521141	521242	521342	501484	−493270	−499310	5326424	53114	−514750	−516800
3	27	521156	521374	521516	502549	−502042	−503705	5326598	53125	−515750	−519050
4	5. 6	521185	521513	521679	504070	−502133	−503351	5326835	53134	−516800	−521150
5	19	521236	521688	521840	505407	−501685	−502430	5327147	53147	−517850	−521400
6	30	521275	521763	521827	506754	−499700	498940	5326928	53158	−518400	−521560
7	6. 9	521320	521929	522031	507914	−502566	−502982	5327100	53168	−519200	−521670
8	16	521339	521908	521994	507412	495790	491040	5327598	53175	−518500	−521585
9	27	521391	521941	522070	509370	508552	507201	5329037	53186	−516300	−521620
10	7. 4	521408	521988	522136	509527	509915	511138	5329150	53193	−516350	−521730
11	13	521480	522113	522261	511170	511288	511220	5329105	53202	−517150	−521945
12	26	521548	522315	522544	511346	506801	−497640	5328041	53215	−521050	−522200
13	8. 9	521605	522394	522616	511363	504598	494320	5328048	53229	−521085	−522170
14	16	521633	522437	522690	511429	504904	−501748	5327885	53266	−521140	−522225
15	23	521638	522475	522632	511363	494650	499580	5327534	53243	−521160	−522160

図-5.1　綾北ダムたわみの入力データ（つづき）

番号	年 月 日	t_1	t_2	t_3	α_1	α_2	α_3	h	θ	δ_{275}	δ_{298}
16	35. 9. 2	521606	522334	522604	511272	505910	503705	5328667	53253	−519400	−521920
17	13	521652	522295	522485	511139	507566	501234	5328336	53264	−519600	−521860
18	27	521697	522334	522547	511213	506309	−501327	5328222	53278	−521005	−521930
19	10. 4	521689	522265	522395	511162	502267	485200	5328341	53285	−519150	−521655
20	18	521649	522169	522237	509181	499210	−501394	5328614	53299	−517600	−521325
21	25	521626	522079	522118	507288	−502093	−504600	5328745	53306	−516550	−519850
22	11. 8	521574	521917	521921	505039	−504565	−504928	5328889	53320	−514850	−515700
23	15	521543	521826	521821	503873	−505081	−508081	5328775	53327	−514350	−514250
24	24	521502	521709	521726	502769	−503053	−507067	5328552	53336	−514400	−515250
25	12. 6	521448	521536	521507	493560	−508251	−511131	5328696	53348	−512400	507000
26	20	521364	521320	521169	−501981	−507760	−503496	5328331	53362	−511800	512050
27	27	521303	521206	521018	−502017	−507778	−482600	5328186	53369	−511400	512400
28	36. 1. 3	521227	521048	517872	−502722	−509475	−499460	5327761	53376	−511150	513850
29	17	521099	518635	516177	−501294	−506787	497750	5327979	53390	−503000	514350
30	29	521032	518040	515756	−492520	−502183	492490	5327363	53402	−505000	513400
31	2. 7	519703	516999	516862	−491880	−501728	−508148	5327039	53411	−511000	512150
32	21	519114	516723	516314	499020	−501156	−501051	5327714	53425	−505500	511650
33	27	518910	517009	516219	501159	−501503	501196	5327585	53431	−506500	511200
34	3. 7	518992	518482	518386	503193	−501344	−501062	5327556	53439	−507500	−511100
35	21	519023	521027	521088	504850	−503420	−501614	5327659	53453	−513050	−514300
36	4. 4	519098	521084	521232	506198	501009	−504190	5328380	53467	−512500	−514700
37	23	519489	521253	521452	508630	501569	−501260	5328602	53486	−513350	−517400
38	5. 2	519837	521425	521629	509897	501339	−503284	5327734	53495	−515800	−521100
39	16	521009	521592	521823	511061	−497270	−506557	5327668	53509	−516900	−521065
40	6. 1	521081	521800	521962	511326	502523	493130	5327730	53525	−517700	−521395
41	27	521184	522017	522237	511557	506316	−495510	5327921	53551	−519200	−521870
42	7. 5	521233	522089	522381	511604	505181	504454	5329142	53559	−519000	−521880
43	25	521303	522297	522572	511725	505957	−493010	5328108	53579	−521070	−522155
44	8. 8	521340	522206	522368	511684	507872	507790	5328670	53593	−519350	−522060
45	22	521387	522300	522526	511735	509886	506780	5328701	53607	−519600	−522205
46	9. 6	521458	522379	522703	511859	511023	−498790	5328297	53622	−521095	−522375
47	19	521491	522259	522411	511244	505478	503112	5328654	53635	−518950	−521880
48	10. 10	521592	522172	522317	509629	505343	506963	5329038	53656	−517200	−521565
49	31	521589	521998	522072	505147	494500	−501670	5329106	53677	−515200	−519200
50	11. 14	521551	521823	521847	502386	−503345	−505677	5329025	53691	−514660	−514600
51	28	521520	521640	521646	501953	−503864	−506333	5329108	53705	−512600	−512400
52	12. 12	521404	521403	521385	495250	−506094	−509039	5329091	53719	−511200	−511200
53	26	521300	521202	521159	−501644	−506985	−509814	5328826	53733	−502500	513550
54	37. 1. 9	521187	519913	519475	−501346	−505881	−508066	5328405	53747	500000	514400
55	23	521064	518482	517787	−501909	−506094	−495250	5327724	53761	−500000	514300
56	35. 4. 9	521129	521158	521277	−491130	−501256	−504544	5326274	53107	−514000	−515500
57	19	521137	521225	521332	501169	−501153	−503153	5326375	53117	−514650	−516350
58	23	521132	521295	521400	501587	−491250	−502456	5326534	53121	−515100	−518400
59	5. 2	521166	521466	521578	503297	−497390	−502207	5326354	53130	−516600	−521160
60	16	521217	521646	521758	505147	−502188	−502602	5326797	53144	−517600	−521300
61	24	521241	521711	521820	505467	−502412	−502851	5326342	53152	−517900	−521330
62	6. 3	521282	521772	521869	506618	−496510	−498270	5326366	53162	−518650	−521515
63	23	521361	521900	522081	508002	503316	−502878	5328165	53182	−517850	−521560
64	8. 2	521583	522366	522593	511423	507413	498790	5328350	53222	−521030	−522250
65	30	521635	522436	522614	511226	501500	505151	5328665	53250	−519800	−521890
66	9. 6	521658	522382	522576	511286	507190	501234	5328463	53257	−519850	−522050
67	10. 11	521670	522211	522340	511032	501639	−501144	5328451	53292	−518400	−521490
68	12. 13	521191	521419	521369	−496590	−506974	−509039	5328543	53355	−512000	508000
69	36. 1. 10	521191	519671	518138	−501256	−504817	−503377	5327705	53383	−509000	513100
70	2. 14	519400	516977	516004	494840	−501762	−498010	5327604	53418	−508000	511700
71	3. 28	518920	521029	521185	505128	−503550	−504771	5328148	53418	−512100	−512500
72	4. 18	519337	521211	521358	507946	502845	−491040	5328872	53481	−512500	−516000
73	5. 30	521056	521786	521955	511224	−501800	−502035	5327690	53523	−517850	−521440
74	6. 13	521109	521874	522002	511364	504306	506504	5329026	53537	−516150	−521490
75	7. 11	521240	522138	522337	511623	508329	507227	5328689	53565	518800	522070
76	9. 14	521484	522318	522526	511454	507692	501208	5328232	53630	−521100	−522150
77	10. 3	521584	522227	522394	511034	508992	509039	5328784	53649	−518150	−521890
78	21	521590	522096	522188	507727	503518	503112	5328923	53667	−516600	−521470
79	11. 4	521578	521940	522034	504476	−501373	−491300	5329133	53681	−514660	−519760
80	19	521532	521772	521775	502110	−501358	−505912	5329141	53691	−513400	−515600
81	12. 8	521444	521499	521456	495020	−504121	−508171	5329041	53715	−511450	504500
82	37. 1. 5	521248	521052	521012	−502294	−506156	−508133	5328716	53743	502500	515050

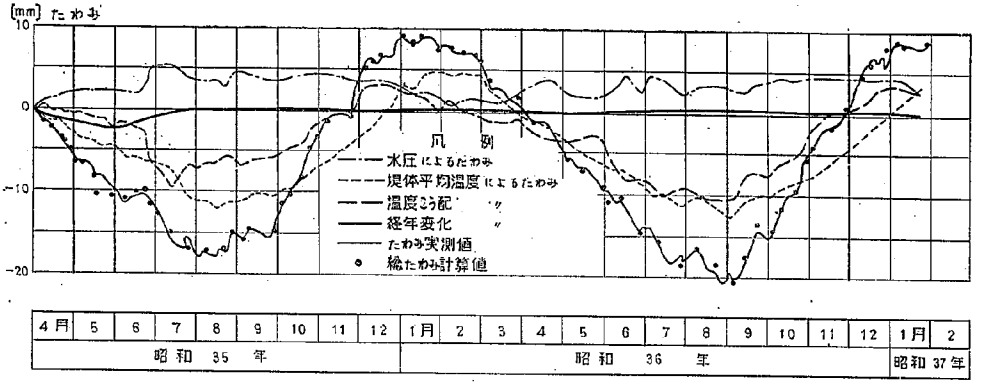


図-5.2 (1) 綾北ダム実測解析図

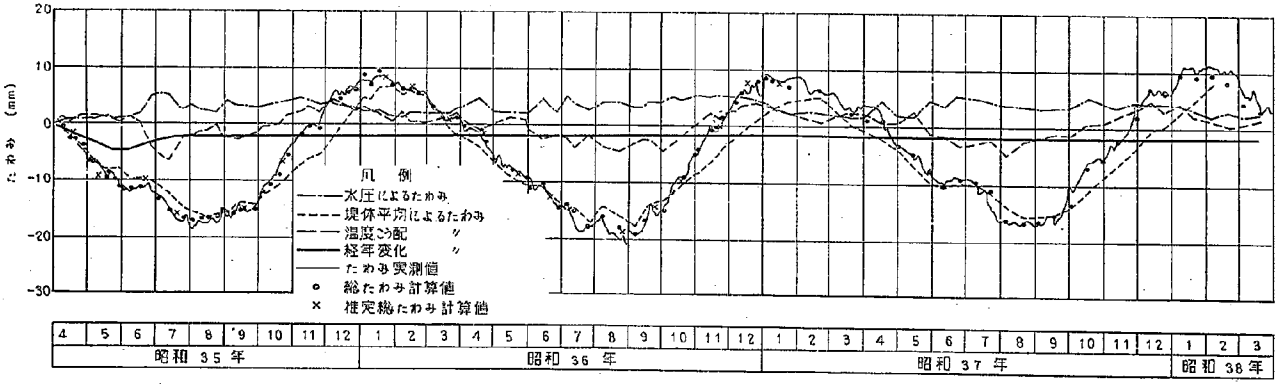


図-5.2 (2) 綾北ダムたわみの実測解析図

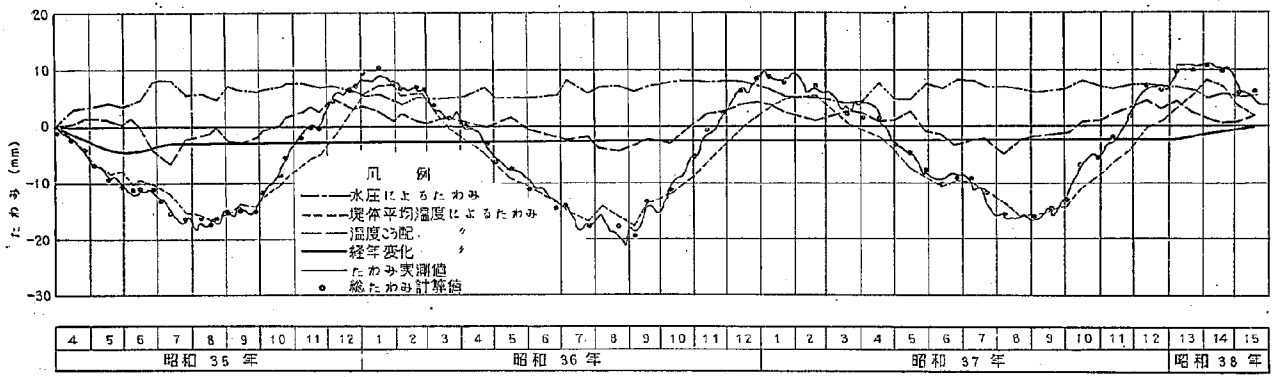


図-5.2 (3) 祓北ダムのたわみの実測解析図

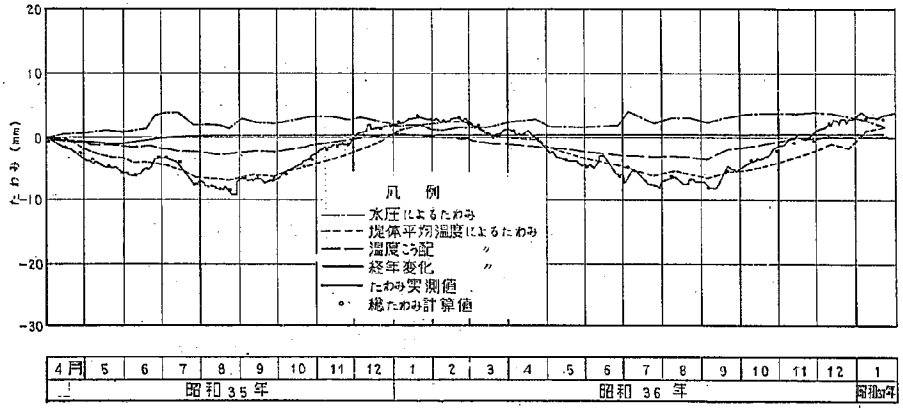


図-5.2 (4) 祓北ダム中間標高たわみの実測解析図

$$\hat{\delta}=44.942+0.637\ (t_1-11.34)$$
$$-1.307\ (t_3-11.63)-3.421(\alpha_2-0.0292)$$
$$-1.744\ (\alpha_3+0.0339)+0.00181(h-225)^2$$
$$-25.520\ \log(1+\theta)+47.895\ \log\left(\frac{1+\theta}{161}\right)$$
$$-21.495\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right)+70.306\log\left(\frac{1+\theta}{1066}\right)$$
$$\cdots\cdots(5.8)$$

上式を各因子の持分に分解し，図-5.2(3)にプロットした。明らかに $\theta_t=1065$ すなわち38年1月より3月までの約2mmの上流向きのクリープが観察される。水圧荷重，温度荷重によるたわみは図-5.2(3)と大差がない。その残差不偏分散の平方根は0.964mmである。図-5.2(3)によって経年変化はある期間を経て安定するものでなく，微小な振幅とある長い周期をもって変動するか，または突然なんらかの原因によって岩盤の移動がおこったものと思われるが，さらに長期の観測結果をみなければ断定できない。また総たわみ計算値の残差不偏分散の平方根は小さいが個個の因子の持分の精度は多少劣るものと考えられる。

綾北ダムのクラウンの中間標高 El. 275 における35年4月より37年1月までの82個のたわみ観測量の多変量解析の結果は次式

$$\hat{\delta}_{273}=7.542-0.3056(t_2-11.03)$$
$$-0.1796(t_3-11.63)-1.7926(\alpha_1+0.0769)$$
$$+0.000000152(h-221)^4-5.593\log(1+\theta)$$
$$+18.339\log\left(\frac{1+\theta}{161}\right)-12.518\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right)$$
$$\cdots\cdots(5.9)$$

を得た。図-5.2(4)は上式より計算される水圧荷重，温度荷重，経年変化の持分を画いたものである。この残差不偏分散の平方根は0.908mm，水圧荷重によるたわみは水位 El. 292 に対して約4mm，経年変化はたん水開始より2カ月間に上流向きに約1mm，その後1カ月間に回復する動きを示している。堤体平均温度によるたわみの変化量は約9mm，温度こう配によるたわみの変化量は約3mmである。

(b) 室牧ダム

経年変化が顕著と思われる時点として $\theta_t=0$, 100, 130, 200, 400（たん水開始前100日を原点にとる）を図上より選定し，36年3月より37年6年までの55個の資料に対してトップアーチクランのたわみ δ の多変量解析を行なった。その入力データは図-5.3に示すとおりであり，有意となった因子について $\hat{\delta}$ を作ってみると次式

$$\hat{\delta}=-10.063-0.5526\ (t_3-5.23)$$
$$-2.516(\alpha_2+0.5179)-2.433(\alpha_3+0.9222)$$
$$+0.00255(h-200)^2+4.801\ \log(1+\theta)$$
$$\cdots\cdots(5.10)$$

を得る。残差不偏分散の平方根は1.65mmで他のダムより大きかったが，室牧ダムのたわみ観測が視準測量であり観測精度が落ちたこと，基礎岩盤の挙動を含む絶対たわみが計測されたためと思われる。この結果を水位，堤体平均温度，経年変化のたわみの持分に対して図-5.4(1)にプロットしたが，たん水開始より約15カ月間に約3.5mmの下流向きの経年変化を生じ逐次回復した。平均温度，温度こう配によるたわみの変化量はいずれも約12mm，水圧によるたわみは水位 El. 260に対して約9mmであった。水圧によるたわみの基準値200はたん水開始における水位である。

次に，その後の37年4月以降38年6月までの資料を追加し36年3月以降70個の資料に対して多変量解析を行なった。水位の基準値として185mをとり，経年変化が顕著と思われる時点として $\theta_t=0,100,200,400,700$ をとり次式を得た。すなわち

$$\hat{\delta}=-12.76-0.5706\ (t_3-5.23)$$
$$-3.145(\alpha_2+0.518)+0.00115(h-185)^2$$
$$+6.037\ \log(1+\theta)-9.980\log\left(\frac{1+\theta}{401}\right)$$
$$\cdots\cdots(5.11)$$

その残差不偏分散の平方根は1.94mmであり，その他の因子による傾向は（5.10）式と類似している。経年変化は最初下流向きに生じ，37年11月までに下流向きに3.5mmに達して後，上流向きの経年変化が発生して38年6月までに1.5mm回復している。水圧によるたわみは極めて小さくなっており，堤体平均温度によるたわみの変化量は約12mm，温度こう配によるたわみの変化量は約10mm，水圧によるたわみは水位 El. 260に対して約6.5mmであった。その解析図は図-5.4(2)のとおりである。

(c) 二瀬ダム

昭和35年4月以降37年5月までの32個の資料に対して経年変化の基準点として $\theta_t=0,100,110,120,130,200,300,450$（たん水開始前100日を原点にとる）を与え解析し

$$\hat{\delta}=207.24-1.54(t_3-14.5)$$
$$-11.549(\alpha_3+0.2343)+0.002194(h-469.4)^2$$
$$-71.44\log(1+\theta)+35.30\log\left(\frac{1+\theta}{131}\right)$$
$$+51.60\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right)\cdots\cdots(5.12)$$

を得た。この結果を水位，堤体平均温度，温度こう配に分けて図-5.6にプロットしてみると，初期の3カ月間に約15mm上流に動き，以降15カ月間に6mm回復する経年変化がみられる。これは下部に水圧荷重がかかった場合の岩盤の流動変形のためにおこる上部と下部の相対変位によるものと思われる。平均温度によるたわみの変化量は約17mm，温度こう配によるたわみの変化量は約

12mm，水圧によるたわみは水位 El. 545 に対して約12mmであった。

上式の水位の基準値 El. 469.4 はたん水開始における水位であるが，次に水位の基準値として El. 455 を与え，上記解析で有意となった t_3，α_3，および経年変化として $\theta_t=0, 130, 200$ に対して多変量解析を行ない，次式

$$\hat{\delta}=224.78-1.53\ (t_3-14.5)$$
$$-11.22(\alpha_3+0.2343)+0.00172(h-445)^2$$
$$-80.38\log(1+\theta)+43.37\log\left(\frac{1+\theta}{131}\right)$$
$$+51.20\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right) \quad \cdots\cdots (5.13)$$

を得た。その残差不偏分散の平方根は 1.06mm であり，各因子の持分は (5.12) 式と大差はない。37年6月以降の資料に対して，さらにたわみ解析を続行し，特に今後の経年変化の動きを観察したい。

(d) 鳴子ダム

経年変化が顕著と思われる時点として $\theta_t=0, 50, 100, 365, 800, 1460$(原点はたん水前100日)を選定し 1957年3月30日より1961年12月20日までの約4年9カ月にわたる120個の資料により解析した。δ_{260} の人力データは図-5.7 のとおりであり，電子計算によって有意となった因子について，頂部標高および中間標高のたわみ $\hat{\delta}_{260}$，$\hat{\delta}_{215}$ を作ってみると次式を得る。

$$\hat{\delta}_{260}=-25.196-0.8529(t_3-6.144)$$
$$-11.194(\alpha_1-0.1267)-1.148(\alpha_3-0.0562)$$
$$+0.7516(h-179.6)-0.0265(h-179.6)^2$$
$$+0.000267(h-179.6)^3+12.569\log(1+\theta)$$
$$-12.857\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)$$
$$-31.371\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right) \quad \cdots\cdots (5.14)$$

ただし　$h>225$m

$$\hat{\delta}_{215}=-15.597-0.2514(t_3-6.144)$$
$$-4.147(\alpha_1-0.1267)+1.579(\alpha_2-0.107)$$
$$+0.4624(\alpha_3-0.0562)-0.05567(h-179.6)$$
$$+0.002577(h-179.6)^2+7.764\log(1+\theta)$$
$$-6.338\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)-14.216\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right)$$
$$\cdots\cdots (5.15)$$

ただし，$h>215$m

残差不偏分散の平方根は $\hat{\delta}_{260}$ に対し 1.10mm，$\hat{\delta}_{215}$ に対して 0.6mm であった。この結果を水位，堤体温度，温度こう配，経年変化の諸因子に分解したが，δ_{260}，δ_{215} の経年変化はたん水開始より1957年までの約9カ月の期間にそれぞれ下流へ7mm，5mm程度の動きを示し，以降35年10月までに安定したが，その後上流向きの経年変化が表われているので今後の動きを観察したい。δ_{260} に対して水位 El. 255 のたわみは約20mm，平均温度によるたわみの変化量は14mm，温度こう配によるたわみの変化量は約9mmであった。

次に水圧によるたわみが水深の2乗に比例するものと考え解析した。水位の基準値としてはサドル上面標高すなわち El. 175 を用いたが，

$$\hat{\delta}_{260}=-26.597-1.332(t_3-6.144)$$
$$-0.3179(\alpha_1-0.1267)-2.4844(\alpha_3-0.0562)$$
$$+0.00465(h-175)^2+8.8562\log(1+\theta)$$
$$-8.253\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)-35.795\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right)$$
$$\cdots\cdots (5.16)$$

$$\hat{\delta}_{215}=-15.866-0.2572(t_3-6.144)$$
$$-4.0591(\alpha_1-0.1267)+1.4273(\alpha_2-0.107)$$
$$+0.5076(\alpha_3-0.0562)+0.00189(h-175)^2$$
$$+7.169\log(1+\theta)-5.743\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)$$
$$-13.035\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right) \quad \cdots\cdots (5.17)$$

を得た。その残差不偏分散の平方根は $\hat{\delta}_{260}$ に対して1.76 mm $\hat{\delta}_{215}$ に対して 0.62mm であった。(15.14)，(5.15) 式と比べて $\hat{\delta}_{215}$ はほとんど変わりないが $\hat{\delta}_{260}$ については若干の相違が見られ，(5.14) 式より残差不偏分散の平方根が大きくなっていることからむしろ (5.14) 式が (5.16) 式より適切であると思われる。なお(5.16)式の結果を図-5.8(2)にプロットした。試みに(5.14)，(5.16) 式で表わされる水圧荷重によるたわみと水位の関係を図-5.10 に画いて比較したが，(5.16) 式のたわみ曲線は水深の小さいときのたわみが (5.14) 式のたわみより大きい。

このことから，水圧によるたわみは水深の2乗式よりはむしろ4乗式がより適当と考え，(5.16)，(5.17) 式で有意となった因子について，ただし水圧荷重が水深の4乗に比例するものとして解析した結果次式を得た。

$$\hat{\delta}_{260}=-24.437-1.266(t_3-6.144)$$
$$-0.3167(\alpha_1-0.1267)-2.308(\alpha_3-0.0562)$$
$$+0.000000534(h-175)^4+11.569\log(1+\theta)$$
$$-10.901\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)-43.861\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right)$$
$$\cdots\cdots (5.18)$$

$$\hat{\delta}_{215}=-15.628-0.3033(t_3-6.144)$$
$$-3.017(\alpha_1-0.1267)+2.000(\alpha_2-0.107)$$
$$+0.000000210\ (h-175)^4+8.662\log(1+\theta)$$
$$-7.354\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)-16.975\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right)$$
$$\cdots\cdots (5.19)$$

その残差不偏分散の平方根は $\hat{\delta}_{260}$ に対して 1.26mm，$\hat{\delta}_{215}$ に対して 0.65mm である。$\hat{\delta}_{260}$ について言えば (5.18) 式の不偏分散の平方根は (5.16) 式より良いが (5.14) 式より悪い。図-5.10 から(5.18)式はむしろ

図-5.3 室牧ダムたわみの多変量解析入力データ (A)

番号	年月日	(t_1)	(t_2)	(t_3)	(α_1)	(α_2)	(α_3)	(h)	(θ)	(σ)
										(0)
1	36. 3.30	515417	514705	515230	−491970	−505179	−509222	5320000	531000	51310
2	4. 6	515752	515330	517095	493160	−496490	−507641	5322505	531087	−50200
3	18	516084	515720	518034	501681	494130	−508726	5322855	531190	−51110
4	25	516407	516366	519135	502183	504091	−507910	5322745	531260	−51130
5	5. 9	517009	517073	521107	504887	505652	−504971	5323268	531400	−51400
6	17	517353	517470	521296	507232	507597	−507614	5323155	531480	−51420
7	23	518466	518195	521340	505634	507743	−506798	5323015	531540	−51490
8	6.27	521189	521047	521820	511073	511449	−503304	5323830	531890	−51880
9	7. 1	521221	521105	521843	511126	511459	−491810	5324415	531930	−51950
10	29	521330	521356	522072	511686	511876	511387	5324853	532220	−52140
11	8. 1	521378	521404	522131	511630	511951	511375	5324626	532250	−52141
12	14	521397	521458	522360	511528	511923	−502268	5324028	532380	−52141
13	29	521398	521534	522480	511416	512101	−505101	5324145	532530	−52127
14	9. 5	521439	521580	522559	511569	511644	−505652	5323797	532600	−52138
15	18	521405	521563	522419	511226	511773	−503214	5325287	532730	−52121
16	10. 2	521404	521506	522469	511255	511265	495960	5324335	532870	−52112
17	17	521346	521516	522023	507228	505219	489000	5325879	533020	−51330
18	24	521286	521454	521925	506274	−502126	502268	5325055	533090	−51200
19	11. 1	521262	521342	521779	504665	−506444	491650	5325820	533170	51210
20	14	521206	521408	521538	−491420	−501259	−504117	5325659	533300	51280
21	28	521168	521245	521394	−501637	503134	492270	5325453	533440	51320
22	12. 6	521126	521217	521291	−503216	501965	−503149	5324766	533520	51240
23	19	521042	521016	519785	−506551	−501527	−503724	5325171	533650	51340
24	37. 1. 9	519611	518383	516606	−509263	−501975	−505528	5325712	533860	51510
25	18	518984	517668	516114	−508293	−502408	−505149	5325755	533950	51570
26	3.22	516605	515021	514321	−504022	−503108	−504499	5322180	534580	51300
27	31	516322	515730	514666	−502620	486000	−505373	5323549	534670	51310
28	4.13	517698	516911	517539	503958	511158	502041	5324950	534800	51110
29	5. 2	517509	517006	518140	504753	511266	503088	5324943	534990	−50800
30	14	517886	516825	519530	506525	508131	504960	5324769	535110	−51100
31	22	518246	517265	521089	508058	509970	505607	5324545	535190	−51230
32	6.12	521055	519531	521365	511989	512148	506578	5325332	535400	−51190
33	27	519716	519073	521486	511226	511541	503773	5324668	535550	−51140
34	7. 9	521049	521044	521663	511605	511959	507263	5324617	535670	−51860
35	7.19	521089	521048	521786	511681	511872	507876	5324551	535770	−52117
36	8. 9	521164	521156	522171	511825	512003	509672	5323784	535980	−52150
37	8.22	521257	521294	522426	511853	512357	502367	5323006	536110	−52146
38	36. 3.31	515417	515517	515566	493280	−507199	−509263	5321795	531010	−51130
39	4. 1	514460	515482	515710	493540	−506448	−509146	5322213	531020	+50900
40	11	517920	514867	516194	494120	−503124	−509032	5322685	531120	−50600
41	5. 1	516718	516053	519877	502749	499570	−509411	5322860	531330	−51260
42	5	516974	516322	521031	503003	501879	−508223	5323070	531370	−51480
43	13	517629	517282	521194	504838	506343	−506465	5323261	531450	−51450
44	6.21	521152	519770	521694	507998	511102	−505418	5323280	531840	−51800
45	22	521393	521465	522430	511668	511915	502189	5324136	532460	52133
46	9.12	521419	521586	522498	511384	511688	506798	5323723	532670	52125
47	26	521408	521533	522341	511250	511495	498280	5324567	532810	52118
48	10. 5	521395	521517	522270	511207	511136	498300	5324998	532900	51940
49	9	521381	521542	522192	511100	511261	501769	5325800	532940	51440
50	11. 7	521234	521380	521640	501937	501076	502292	5325815	533230	51110
51	21	521203	521312	521483	496760	494730	495290	5325773	533370	51330
52	12.12	521082	521077	521038	505354	495130	502602	5324571	533580	51180
53	37. 3.24	516616	515169	514402	503902	501249	504038	5323238	534600	51540
54	27	516603	515435	514484	504130	499670	504034	5323527	534630	51430

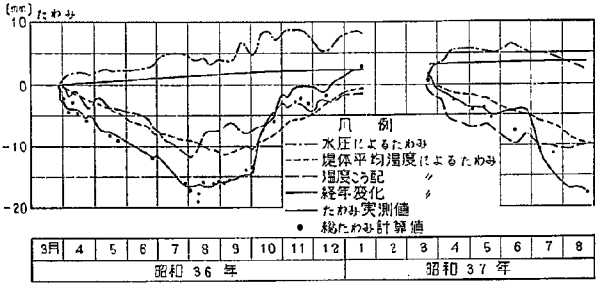


図-5.4 (1)　宝牧ダムのたわみの実測解析図

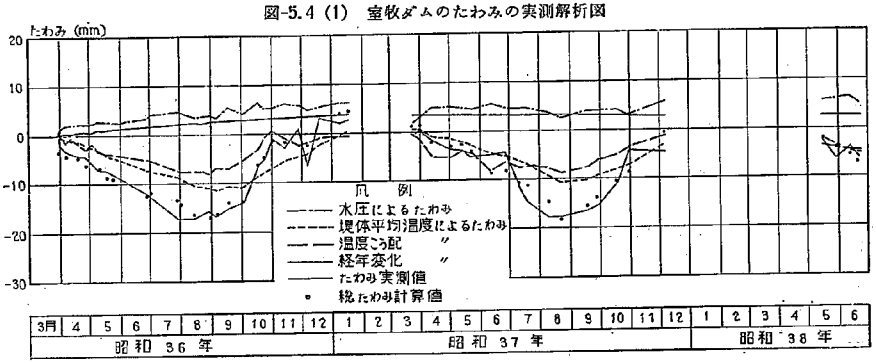


図-5.4 (2)　宝牧ダムのたわみの実測解析図

図-5.5　二瀬ダムたわみの多変量解析入力データ

	Date		t_1	t_2	t_3	t_4	α_1	α_2	α_3	α_4	h	θ	σ
1	35. 11. 17		521192	521380	521450	521265	−501244	−501480	−502343	−506032	5346940	53100	516370
2	12. 4		521169	521308	521314	519458	−499240	−501330	−502564	−508918	5349051	53120	516265
3	11		521149	521287	521260	518136	−498760	−501437	−502484	−507988	5349585	53127	516235
4	24		521118	521181	521140	516274	−495290	−501126	−502435	−508577	5350112	53140	516225
5	36. 1. 5		521102	521117	521065	513907	−492130	−498240	−502776	−508284	5350160	53150	516130
6	2. 3		521023	519701	518318	511779	491050	−501173	−503864	−509264	5350235	53181	516250
7	15		521011	519330	518060	512163	493220	−501160	−503444	−503725	5350190	53193	516285
8	24		519560	518945	517808	511213	496530	−501365	−503755	−511078	5350165	53202	516375
9	3. 10		519723	518782	517570	512121	495160	−501003	−503752	−505906	5350170	53216	516390
10	24		519728	518844	517730	513333	497040	−493300	−502441	−501762	5350225	53230	516350
11	4. 13		519683	518804	518657	516448	496220	497620	−501102	501529	5350790	53250	516380
12	5. 18		519641	519966	521122	521315	496750	501536	482600	505043	5351410	53285	515820
13	6. 1		519841	521110	521223	521549	499620	501816	502825	506337	5351410	53299	515590
14	20		519935	521123	521390	521776	499470	502752	501326	508506	5351500	53318	515285
15	29		519890	521131	521388	521814	501041	502288	501915	504768	5353463	53327	515820
16	7. 8		519918	521203	521445	521952	501126	503207	504644	509168	5353290	53336	515320
17	17		521002	521232	521541	522157	501077	503138	506068	511046	5352988	53345	514985
18	8. 2		521016	521291	521651	522326	501163	503949	504760	507339	5352105	53361	514705
19	11		521024	521315	521715	522350	501081	503960	504450	506693	5351659	53370	514620
20	26		521054	521364	521793	522407	499820	504053	503713	504796	5350455	53385	514490
21	9. 9		521065	521400	521844	522397	501292	504122	502315	503534	5350283	53399	514565
22	27		521081	521437	521855	522262	501251	503488	501295	−492260	5351622	53417	514720
23	10. 26		521100	521424	521665	521839	501144	502177	−495570	−511148	5353719	53446	516040
24	11. 22		521102	521311	521504	521328	499450	501349	−501760	−511029	5353697	53473	516350
25	12. 20		521096	521173	521282	518771	498010	495370	−502985	−511894	5353692	53501	516870
26	37. 1. 23		521036	519961	519795	514196	498860	−498150	−503901	−512109	5353544	53535	517465
27	2. 14		521011	519153	518434	513196	501046	−497850	−503317	−511460	5353141	53557	517480
28	3. 16		519882	517875	517815	513788	501129	−492510	−501430	−506360	5351917	53587	517090
29	4. 7		519747	518796	517872	514953	501183	496840	−501193	504104	5351622	53609	516905
30	25		519718	518883	518922	517950	501157	501338	−491110	506617	5351820	53627	516820
31	5. 10		519647	519158	519955	521059	501267	502146	501200	508686	5351964	53642	516660
32	26		519672	519486	521071	521299	501323	502941	502191	505599	5352670	53658	516455

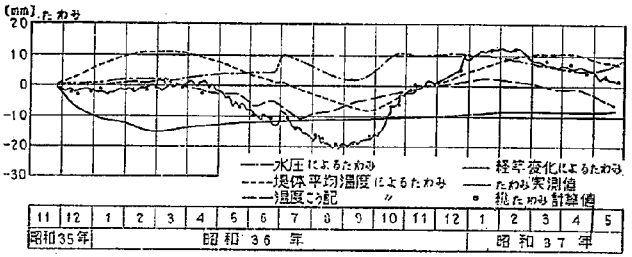


図-5.6　二瀬ダムのたわみの実測解析図

図-5.7　鳴子ダムのたわみの入力データ

番号	年月日	t_1	t_2	t_3	α_1	α_2	α_3	h	θ	σ_{215}	σ_{260}
1	32. 4. 5	518884	517427	516144	501267	501070	495620	5317960	53100	50000	50000
2	4.17	519018	517741	517407	501771	502963	501500	5323864	53112	51510	51560
3	4.24	519101	517887	518640	502017	503791	501500	5324026	53119	51440	51590
4	5. 8	519420	518424	519536	502412	505137	507914	5324760	53133	51850	51830
5	5.23	519633	519043	521091	503006	506844	508433	5325342	53148	52145	52110
6	6.13	519968	519521	521150	503845	508387	505553	5324754	53169	51820	51890
7	6.27	521046	521020	521389	504272	508982	501687	5324138	53183	51250	51680
8	7. 3	521057	521045	521483	504503	511004	501875	5324085	53189	50800	51630
9	7.17	521068	521135	521552	505254	509667	507294	5324785	53203	51260	51780
10	8. 1	521079	521173	521765	505820	511013	503375	5324290	53218	51240	51610
11	8.14	521089	521237	521943	506172	511148	501500	5323924	53231	51510	51530
12	9. 5	521133	521383	522035	506159	509585	501875	5323174	53253	51720	51380
13	9.19	521122	521398	521951	505717	517273	502923	5324241	53267	51280	51550
14	10. 1	521161	521410	521944	505575	505381	501673	5324940	53279	51410	51810
15	10.15	521152	521391	521840	505087	504393	501033	5324930	53292	51480	51850
16	10.30	521123	521337	521701	504404	503851	−493120	5324526	53308	51410	51720
17	11. 6	521116	521321	521640	504176	503051	−493700	5324822	53315	51710	51870
18	11.19	521118	521279	521490	503647	501915	−501072	5324846	53328	52101	51950
19	32.12.25	521024	521080	519955	501387	−501347	−504394	5325064	53364	52200	52115
20	33. 1. 8	521004	519607	517583	496810	−501667	−507356	5325388	53378	52264	52135
21	1.23	519974	518952	516988	482600	−502723	−505183	5325294	53393	52268	52139
22	2.13	519345	517938	515131	488600	−501078	−501966	5324857	53414	52229	52127
23	2.27	518975	516900	513913	491680	−494790	493510	5324508	53428	52192	52119
24	3.12	518983	517113	514373	495210	−501255	497490	5323901	53441	52153	52102
25	3.19	518858	516477	514618	501073	497120	501394	5324445	53448	52175	52115
26	4. 2	518956	518127	516044	492860	501606	502947	5325017	53462	52223	52135
27	4.17	519441	518104	516704	502037	502769	505447	5325294	53477	52240	52146
28	5. 1	519870	518513	517789	502379	503806	506486	5325414	53491	52235	52145
29	5.14	519922	518755	518736	502774	504606	505621	5325355	53504	52217	52141
30	6.11	521041	519903	521264	504017	507891	502557	5324229	53532	51670	51950
31	6.26	521058	521062	521467	504725	509037	502625	5323732	53547	50400	51770
32	7. 9	521053	521135	521637	505499	511036	502086	5324252	53560	51120	51830
33	7.27	521075	521206	521754	506159	511103	507423	5324440	53578	−50600	51800
34	8. 9	521164	521325	521890	506852	511043	505418	5324316	53591	−51180	51790
35	8.24	521150	521374	522022	506989	509426	505091	5324392	53606	−51150	51760
36	9. 5	521135	521420	521927	506686	506971	505759	5324439	53618	−50300	51760
37	9.20	521136	521407	521927	506406	506601	504942	5324806	53633	51130	51830
38	10. 1	521123	521409	521804	506170	505343	503601	5324924	53644	51450	51890
39	10.16	521090	521399	521650	506108	504299	503504	5324660	53659	51500	51860
40	11.12	521125	521311	521498	504416	501821	−501015	5324369	53676	51710	51870
41	11.26	521095	521241	521332	503505	499480	−502130	5324333	53700	51900	51890
42	12.10	521075	521154	521131	502665	492170	−502279	5324949	53714	52165	52112
43	12.27	521028	521049	519410	501599	−501434	−505481	5325453	53731	52240	52133
44	34. 1. 7	519920	519807	518150	497280	501980	506673	5325372	53742	52271	52140
45	1.20	519762	518856	516544	402920	502407	506572	5325292	53755	52281	52144
46	2. 3	519504	518500	515827	488600	−501900	−504500	5325110	53769	52250	52140
47	2.19	519336	517827	515553	488500	−499990	−502207	5325220	53785	52251	52143
48	3. 7	519337	517752	515673	492150	−496750	−501303	5325030	53801	52241	52151
49	3.21	519451	517894	515989	493810	−491960	−454950	5325055	53815	52234	52142
50	4. 6	519630	518190	516709	499440	−501258	−501476	5325427	53831	52261	52152

番号	年月日	t_1	t_2	t_3	α_1	α_2	α_3	h	θ	σ_{215}	σ_{215}
51	4.21	519803	518289	517207	501610	−502348	−504510	5325405	538460	52251	52151
52	5. 6	521014	518347	518418	501687	503549	504476	5325403	538610	52222	52146
53	5.19	521013	519141	521012	502116	505112	504913	5325248	538740	52191	52139
54	6. 3	521034	521009	521193	502657	506210	506062	5324832	538890	52125	52120
55	6.16	521043	521039	521271	502881	506763	506029	5325066	539020	52125	52129
56	7. 1	521089	521074	521326	503966	508829	506322	5324473	539170	51590	52102
57	7.14	521102	521137	521541	504409	511024	508505	5324572	539300	51420	52101
58	8.13	521176	521282	521956	505372	511206	503937	5323849	539600	−51160	51700
59	8.27	521201	521351	522006	505746	511006	503933	5324421	539740	−50700	51800
60	9. 9	521203	521399	521996	505380	508350	503014	5324241	539870	−51190	51740
61	9.23	521206	521425	521975	505151	506819	503187	5323839	541001	−51360	51730
62	10. 7	521197	521469	521925	504976	505292	−501212	5324554	541015	51170	51830
63	10.21	521164	521440	521732	504440	503620	501125	5324042	541029	51180	51830
64	11. 4	521121	521402	521589	503709	503835	−502693	5324293	541043	51450	51980
65	11.19	521126	521343	521461	502965	502388	−503347	5325109	541058	52132	52109
66	12. 4	521128	521248	521293	502053	−492000	−505654	5325355	541073	52199	52126
67	12.17	521101	521173	521101	501647	−501324	−506625	5325251	541086	52222	52129
68	12.30	521052	521053	519665	499610	−502259	−507409	5325069	541099	52230	52130
69	35. 1.13	519966	519678	518060	491620	−502453	−507726	5325207	541113	52251	52136
70	1.28	519471	518895	516824	−491940	−502699	−505750	5324719	541128	52228	52130
71	2.10	519652	518541	516079	−493650	−502119	−504019	5324538	541141	52190	52123
72	2.25	519621	518127	515561	−493290	−501524	−504067	5324231	541156	52176	52118
73	3.10	519717	518247	515483	−481500	−501096	501327	5323760	541169	52149	52107
74	3.23	519776	518295	515938	493250	−478000	501687	5323655	541182	52139	52104
75	4. 6	519824	518443	516582	496580	501074	501596	5324332	541196	52164	52117
76	4.20	519758	518546	517568	499990	501895	503033	5324919	541210	52196	52134
77	5. 4	521012	518693	518120	501567	502838	504293	5325412	541224	52224	52150
78	5.19	521021	519314	519689	502470	505244	506510	5325411	541239	52215	52148
79	6. 2	521029	519883	521090	502776	506979	507933	5325328	541253	52184	52140
80	6.15	521055	521016	521226	503576	507691	507841	5324821	541266	52108	52123
81	6.29	521090	521093	521414	504501	511038	505702	5324518	541280	51670	52110
82	7.13	521108	521163	521626	505119	511224	503187	5324161	541294	51130	51930
83	7.27	521140	521251	521864	505814	511418	502250	5323777	541308	−51330	51770
84	8.10	521170	521291	522050	506399	511508	501125	5323352	541322	−51740	51600
85	8.24	521170	521375	522117	506624	511281	501125	5323558	541336	−51540	51600
86	9. 7	521183	521450	522210	506547	511160	502625	5323574	541350	−51670	51180
87	9.21	521197	521440	522103	506692	509521	501312	5323947	541364	−51540	51550
88	10. 5	521188	521437	522012	506170	506902	502625	5323950	541378	−51300	51690
89	10.19	521159	521428	521865	505372	504458	−501000	5324263	541392	50900	51800
90	11. 2	521147	521362	521603	504767	503102	501687	5323768	541406	50500	51710
91	11.16	521117	521342	521502	504198	502174	499370	5323754	541420	51320	51840
92	11.30	521095	521265	521270	503403	496960	491870	5323623	541434	51450	51740
93	12.14	521058	521150	518051	502319	−498430	−504538	5324719	541448	52140	52108
94	12.28	521013	521058	516723	501201	−501073	−506000	5325017	541462	52209	52126
95	36. 1.11	519747	519698	517698	496880	−501936	−507808	5325094	541476	52224	52135
96	1.25	519590	519020	516441	493080	−502582	−507938	5324712	541490	52219	52131
97	2. 9	519227	518261	515635	484200	−502234	−505726	5324468	541505	52195	52125
98	2.22	519019	517814	514515	482600	−502022	−501687	5324001	541518	52177	52116
99	3. 8	519180	517884	514876	491980	−494840	499370	5323831	541532	52152	52106
100	3.23	519206	517901	515378	497070	−483900	501312	5323352	541547	52116	51920
101	4. 6	519235	518356	516850	501564	501779	502721	5324526	541561	52146	52121
102	4.19	518990	518554	517181	501902	502751	505899	5325416	541574	52237	52151
103	5. 6	519571	518892	518961	502745	504983	507149	5325379	541591	52202	52147
104	5.18	519965	519906	521073	503521	507236	511062	5325241	541603	52157	52140
105	6. 1	521032	521051	521239	504400	509103	506591	5324622	541617	51830	52117
106	6.14	521061	521094	521416	505030	511042	506466	5324245	541630	51520	52102
107	7. 6	521092	521184	521625	506126	511288	507519	5324459	541652	51170	52116
108	7.20	521118	521234	521800	506608	+511364	506995	5324425	541666	50900	51930
109	8. 3	521141	521295	522012	506889	+511443	505062	5324146	541680	−51540	51710
110	8.17	521153	521324	522021	507184	+511450	505062	5323903	541694	−51550	51730
111	8.31	521172	521366	522156	507403	+511432	502062	5324018	541708	−51630	51670
112	9.14	521173	521429	522198	507297	+511228	501875	5323540	541722	−51850	51510
113	9.28	521170	521486	522107	506967	508661	501687	5323808	541736	−51730	51520
114	10.12	521171	521469	522016	506424	506321	−503068	5325031	541750	−50700	51730
115	10.26	521151	521409	521837	505783	503922	−502145	5325189	541764	51400	51850
116	10.30	521137	521410	521770	505668	503698	−502976	5325401	541768	51660	51900
117	11. 8	521109	521364	521642	505175	502952	−502039	5325335	541777	51860	51930
118	11.22	521086	521283	521423	504305	502354	−503164	5325393	541791	52119	52102
119	12. 6	519976	521180	521238	503191	494730	−503852	5325268	541805	52141	52106
120	12.20	521009	521111	521083	502171	−501550	−507164	5325258	541819	52163	52109

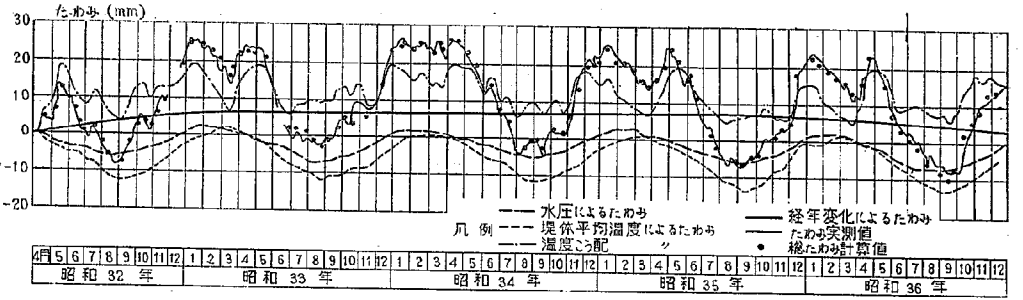


図-5.8 (1) 鳴子ダムのたわみの実測解析図

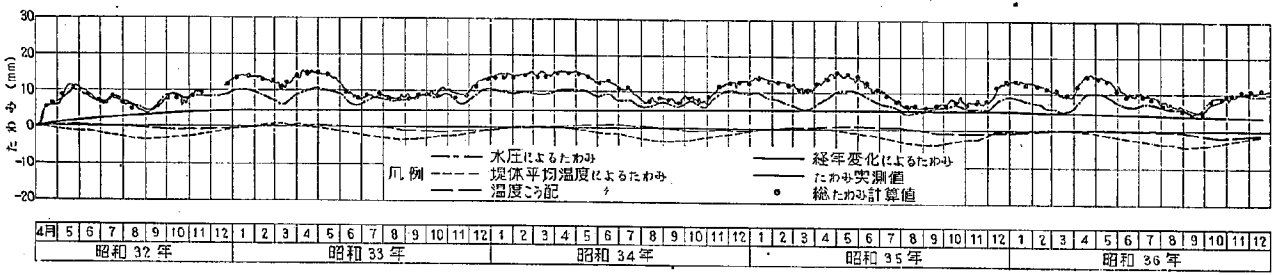


図-5.8 (2) 鳴子ダムの中間標高のたわみの実測解析図

(5.14) 式に近い曲線であり，水圧によるたわみが水深の4乗式で表わす方が2乗式より適当であることを示唆するものと考えられる。

〔3〕 経年変化，水圧荷重，温度荷重によるたわみ

綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムのクラウンのたわみの構造解析については個別に述べたが，ここにその結果を総括し共通した問題点について考察を加える。

(1) 経年変化

(a) アーチダムの非弾性的挙動を示す経年変化は，一般にたん水後の初期に特に顕著であり，数カ月にして安定するが，綾北，室牧，鳴子ダムのように再びなんらかの原因によって経年変化が現われる例が多い。

(b) プラムライン観測の経年変化は，言わば基礎岩盤に対する堤頂部の相対的挙動であるから，中間水位が比較的長く続く二瀬，綾北ダムではたん水初期に上流向きの経年変化が観察される。鳴子，室牧ダムのたん水初期の経年変化は下流向きである。

(c) 経年変化の原因としては，コンクリートのクリープや岩盤に介在するクラック，破砕帯などの存在による流動的変形が考えられるが，後者が支配的であると考えられる。

(d) 水圧荷重によるたわみ式として，たん水初期の経年変化と水圧荷重によるたわみを分離するために，一方的に水深の2乗あるいは4乗と表わす場合は，経年変化の一部が実は水圧荷重の持分であるおそれがあるから，図上検討の必要がある。たとえば，二瀬ダムのたん水後3カ月間は水位が上昇し温度が低下しているのであるから，水圧，堤体温度，温度こう配のいずれによる効果も下流にたわませるものであるのに，実測されたたわみは上流向きのものであったこと，鳴子ダムでは水位，堤体温度，温度こう配のほぼ等しい1957年5月13日と1958年5月20日のたわみ値に5mmの差があることから，その存在を確認することができた。

(2) 水圧荷重によるたわみ

(a) 綾北ダム

綾北ダムの水圧荷重によるたわみは次式で表わされた。すなわち頂部のたわみ

$$\delta_{h,298}=0.000000225\ (h-221)^4 \quad \cdots\cdots (5.7)'$$

あるいは

$$\delta_{h,298}=0.00181\ (h-225)^2 \quad \cdots\cdots (5.8)'$$

中間標高のたわみは

$$\delta_{h,273}=0.000000152\ (h-221)^4 \quad \cdots\cdots (5.9)'$$

しかしながら，綾北ダムのたわみは表-3.1に示すように，El.248 に対するトップアーチクラウンの相対たわみであって，ベースに対するものではない。そこでベースに対する相対たわみを推定するために，図-5.9 に (5.7)′，(5.9)′ 式で表わされるトップアーチクラウンおよび中間標高の水圧によるたわみ曲線を画き，この2直線から各水位におけるアーチクラウンのたわみの関係図を鎖線のとおり画いた。

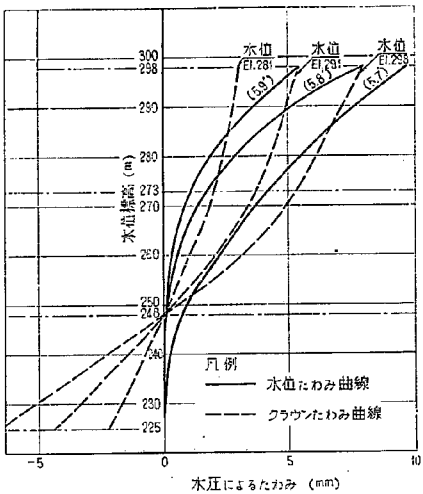


図-5.9 綾北ダム水位～たわみ曲線，クラウンたわみ曲線

この曲線は El.248 でたわみが零となるが，さらに El.225 まで下に外挿すれば，ベースに対する頂部の相対たわみを推定することができる。たとえば，水位 El.298 に対して頂部の El.248 に対する相対たわみは 8 mm，ベースに対する相対たわみは 14.4mm であるから，この水位に対しては $\eta=14.4/8=1.8$ なる換算係数を仮定し，η を計測区間のたわみに乗ずればベースに対する水圧荷重によるたわみを次式のとおり求めることができる。すなわち

$$\delta_{h,298}=0.000000405(h-221)^4 \quad \cdots\cdots (5.20)$$

または，

$$\delta_{h,298}=0.00326(h-225)^2 \quad \cdots\cdots (5.21)$$

$$\delta_{h,275}=0.000000274(h-221)^4 \quad \cdots\cdots (5.22)$$

(b) 室牧ダム

室牧ダムの水圧によるトップアーチクラウンのたわみは，観測資料が少なくまた精度が落るのであまり期待できないが，次式，

$$\delta_h=0.00115(h-185)^2 \quad \cdots\cdots (5.11)'$$

のとおり表わされた。しかし，そのたわみは視準測量によって計測されたものであり，むしろ絶対たわみに近いものである。したがって他のダムのたわみと比較するために，堤頂およびベースに対する相対たわみに換算する。すなわち，荷重分割計算，または模型実験による設計水圧荷重が作用したときのベース El.185 におけるたわみは，模型実験，水圧荷重に対して 18mm，4.4mm 荷重分割計算に対して 12mm，2.2mm であり換算係数と

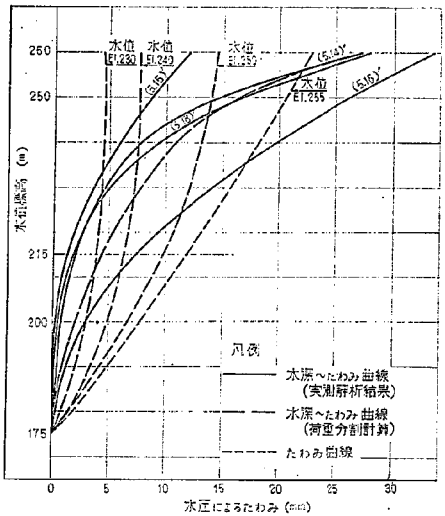


図-5.10　鳴子ダム水位～水圧によるたわみ曲線

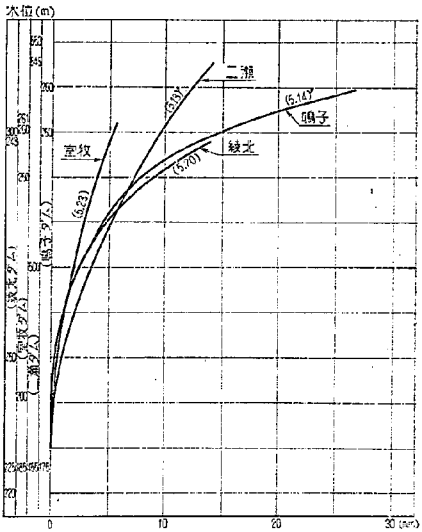


図-5.11　水位～水圧によるたわみ曲線

クラウンたわみ曲線

って 11.7/15≒0.8 を仮定した。したがって室牧ダムのトップ・アーチクラウンのベースに対するたわみは次式

$$\delta_h = 0.00092(h-185)^2 \quad \cdots\cdots(5.23)$$

のとおり推定される。

(c)　二瀬ダム

トップアーチクラウンの水圧荷重によるたわみは次式のとおりであった。

$$\delta_h = 0.00172(h-455)^2 \quad \cdots\cdots(5.13)'$$

(d)　鳴子ダム

鳴子ダムのアーチクラウンのたわみを表わす式として，水深の1乗，2乗，3乗または2乗および4乗のみで表わす場合を考えて次式を得た。

$$\delta_{h,260} = 0.7516(h-179.6) - 0.0265(h-179.6)^2 + 0.000267(h-179.6)^3 \quad \cdots\cdots(5.14)'$$

ただし　$h>225$

$$\delta_{h,215} = -0.05567(h-179.6) + -0.002577(h-179.6)^2 \quad \cdots\cdots(5.15)'$$

ただし　$h<215$

または，

$$\delta_{h,260} = 0.00465\ (h-175)^2 \quad \cdots\cdots(5.16)'$$

$$\delta_{h,215} = 0.00189\ (h-175)^2 \quad \cdots\cdots(5.17)'$$

あるいは，

$$\delta_{h,260} = 0.000000534\ (h-175)^4 \quad \cdots\cdots(5.18)'$$

$$\delta_{h,215} = 0.000000210\ (h-175)^4 \quad \cdots\cdots(5.19)'$$

(5.14)'，(5.16)' 式を図-5.10に画いてたわみを比較すると，既述のように (5.14)' 式のたわみはいずれの水位に対してもより小さい値を与えるが，たわみの多変量解析の残差不偏分散の値から (5.14)' 式をとるのがより適切であると思われる。図-5.10 における鎖線は荷重分割計算から求めた水位―たわみ曲線であるが，水深の2乗式で水圧によるたわみを表わすのみ無理があることを裏付けるものと思われる。(5.18)' 式の水深の4乗で表わしたたわみ曲線は，(5.14)' 式と極めて近似した曲線になることから，水圧によるたわみが顕著なダムでは水深の4乗で表わすべきものと考えられる。

参考のために (5.15)' 式で表わされる中間標高のたわみ曲線を図-5.10 に画いて，各水位におけるクラウンのたわみ曲線を点線のとおり求めた。

(e)　綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムの水位と水圧によるたわみの関係曲線をとりまとめて図-5.11 に示す。綾北，室牧ダムでは換算係数を用いてベースに対する相対たわみに換算した。二瀬，鳴子ダムでは換算係数を近似的に零とした。図-5.11 より鳴子ダムのたわみがもっとも大きく，以下順に綾北，二瀬，室牧，の順にたわみにくくなる。

(3)　温度荷重によるたわみ

堤体平均温度，温度こう配のたわみの持分は両因子の間に相関があるため完全に分離することができないので両因子の和によって温度荷重によるたわみを検討する。

(a)　綾北ダム

図-5.12 は綾北ダムのたん水開始のたわみを零とするたわみ曲線の変動を，各時点における El.273, El.298の温度荷重によるたわみより求めたものである。綾北ダムのわみは El.248 に対するものであるから，それ以下のたわみは外挿によって推定する。この図から綾北ダムのトップアーチクラウンの El.225 に対する相対たわみの

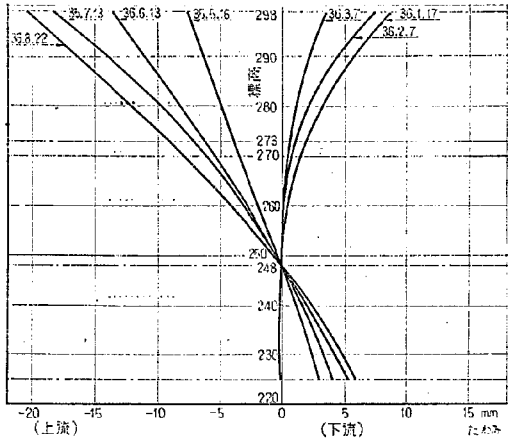


図-5.12　綾北ダムの温度荷重によるたわみの変動

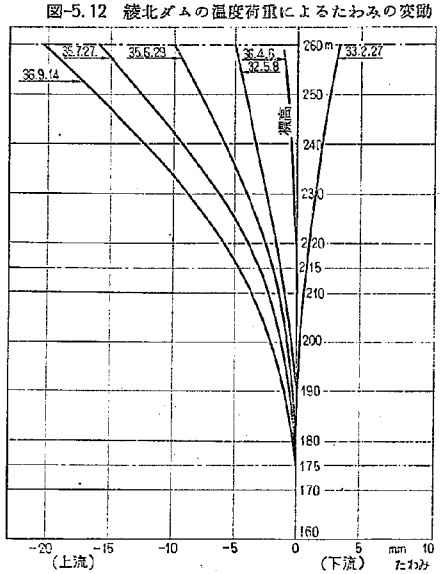


図-5.13　鳴子ダムの温度荷重によるたわみの変動

最大変化量は，El.225 に対して 36mm であることがわかる。この場合の温度荷重によるたわみの換算係数は頂部で 36/30=1.20 である。

(b)　室牧ダム

室牧ダムの温度荷重によるたわみの最大変化量は16mm ベースの温度荷重によるたわみは零とした。

(c)　二瀬ダム

二瀬ダムの温度荷重によるたわみの最大変化量は約23mm であった。

(d)　鳴子ダム

図-5.13 は鳴子ダムのたん水開始のたわみを零とするたわみ曲線の変動を，各時点の El.215，El. 260 の温度荷重によるたわみより求めたものである。この図から鳴子ダムのトップアーチクラウンの相対たわみの変化量は 23mm であることがわかる。

(4)　水圧荷重，温度荷重によたわみ

綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムの水圧荷重または温度荷重によるベースに対する相対たわみを表-5.1 のとおり，とりまとめて掲載した。

〔4〕 実測解析結果の次元解析的考察[13]

(1)　まえがき

アーチダムのたわみ，ひずみ，応力等の挙動の解析は荷重分割計算，模型実験によって可能であるが，前者はその計算が極めて複雑なため，後者は模型製作に多額の費用と時間を必要とするためアーチダムの挙動の諸特性を把握することは極めて困難である。次に述べる荷重分割計算はその量的精度において劣るが，無次元要因を抽

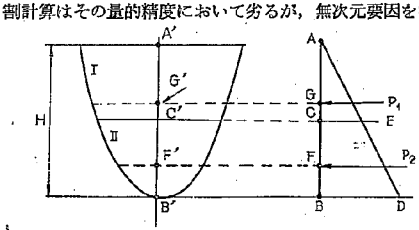


図-5.14 (1)　簡易荷重分割計算説明図（水圧荷重）

表-5.1　水圧荷重，温度荷重によるたわみ一覧表

	綾北		室牧	二瀬	鳴子	
	δ_{298}	δ_{278}	δ_{261}	δ_{545}	δ_{260}	δ_{215}
水圧によるたわみ　(mm)	水位El.297に対して 13.5	水位El.297に対して 9	水位El.261に対して 5.3	水位El.542に対して 13	水位El.257に対して 23	水位El.257に対して 11
温度荷重によるたわみの変化量　(mm)	36	19	16	23	23	5
堤体平均温度によるたわみの変化量	28	15	12	17	14	4
温度こう配によるたわみの変化量	13	7	10	12	9	2

出してそれがたわみ，ひずみに及ぼす影響の一般的諸特性を推測する上に有効であって，かくして誘導された諸式を実測解析結果と比較検討する。

(2) 水圧荷重

図-5.14 (1)にしたがってアーチダムを分割し上部，下部をⅠ，Ⅱ区間とする。各区間における水平方向単位幅あたりの水圧荷重を P_1, P_2 としその片持梁の持分を P_{1c}, P_{2c}，アーチの持分を P_{1a}, P_{2a} とすれば

$$\left.\begin{aligned} P_1&=P_{1c}+P_{1a}\\ P_2&=P_{2c}+P_{2a}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.24)$$

満水位の水深は近似的に堤高に等しく，これを H にて表わし，水の密度を w とする。P_1, P_2 は△ABD，台形CBDEの図心に作用し

$$CG=\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{2}H=\frac{1}{6}H$$

$$BF=\frac{BD+2CE}{CE+BD}\times\frac{CB}{3}$$

$$=\frac{wH+2\cdot\frac{1}{2}wH}{\frac{1}{2}wH+wH}\times\frac{\frac{1}{2}H}{3}=\frac{2}{9}H \quad \cdots\cdots (5.25)$$

$$\left.\begin{aligned} P_1&=\frac{1}{2}w\left(\frac{1}{2}H\right)^2=\frac{1}{8}wH^2\\ P_2&=\frac{1}{2}wH^2-\frac{1}{8}wH^2=\frac{3}{8}wH^2\end{aligned}\right\} \cdots (5.26)$$

(3) 弾性支承をもつ片持梁のたわみ

P_{1c}, P_{2c} はG，F点に集中荷重として作用するものとしてA，C点におけるたわみ$(\delta_1)_{P1c}$, $(\delta_2)_{P1c}$, $(\delta_1)_{P2c}$ $(\delta_2)_{P2c}$ を求める。片持梁ABの平均厚さを T_{1c}，CBの平均厚さを T_{2c} とするとヤング率 E_{rl} の基礎岩盤で弾性支承された片持梁のたわみ

$$\delta=\delta_f+(M_A\alpha'+V_A\alpha'')l+V_A\gamma'+M_A\alpha'' \quad \cdots\cdots (5.27)$$

$$\alpha'=\frac{k_1}{E_{rl}\,T_c^2},\quad \alpha''=\frac{k_5}{E_{rl}\,T_c},\quad \gamma'=\frac{k_3}{E_{rl}} \quad \cdots\cdots (5.28)$$

M_A, V_A は基礎におけるモーメント，およびせん断力，δ_f は固定支承の片持梁のたわみ，l は片持梁の長さである。さて，P_{1c}, P_{2c} を受けるA，C点の δ_f はコンクリートのヤング率を E_c，断面二次モーメントを I とするとき

$$(\delta_{f1})_{P1c}=\frac{P_{1c}(BG)^2}{6E_cI_{AB}}(3AB-BG)$$

$$=\frac{P_{1c}\left(\frac{2}{3}H\right)^2}{6E_cI_{AB}}\left(3H-\frac{2}{3}H\right)$$

$$\fallingdotseq 2\frac{P_{1c}H^3}{E_cT_{1c}^3} \quad \cdots\cdots (5.29(1))$$

$$(\delta_{f1})_{P2c}=\frac{P_{2c}(BF)^2}{6E_cI_{CB}}(3AB-BF)$$

$$=\frac{P_{2c}\left(\frac{2}{9}H\right)^2}{6E_cI_{CB}}\left(3H-\frac{2}{9}H\right)$$

$$\fallingdotseq 0.274\frac{P_{2c}H^3}{E_cT_{2c}^3} \quad \cdots\cdots (5.29(2))$$

$$(\delta_{f2})_{P1c}=\frac{P_{1c}(BG)^3}{6E_cI_{AB}}\left\{3\left(\frac{BC}{BG}\right)^2-\left(\frac{BC}{BG}\right)^3\right\}$$

$$\fallingdotseq 0.75\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} \quad \cdots\cdots (5.29(3))$$

$$(\delta_{f2})_{P2c}=\frac{P_{2c}(BF)^2}{6E_cI_{CB}}(3BC-BF)$$

$$\fallingdotseq 0.162\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{2c}^3} \quad \cdots\cdots (5.29(4))$$

弾性支承の基礎の変形によるたわみ δ_r は，P_{1c}, P_{2c} による基礎におけるモーメント，せん断力が

$$\left.\begin{aligned} (M_A)_{P1c}&=P_{1c}\cdot(BG)=-\frac{2}{3}P_{1c}\cdot H\\ (V_A)_{P1c}&=P_{1c}\\ (M_A)_{P2c}&=P_{2c}\cdot(BF)=-\frac{2}{9}P_{2c}\cdot H\\ (V_A)_{P2c}&=P_{2c}\end{aligned}\right\} \cdots (5.30)$$

であるから

$$(\delta_{r.1})_{P1c}=\{(M_A)_{P1c}\cdot\alpha'+(V_A)_{P1c}\gamma''\}H$$
$$+(V_A)_{P1c}\gamma''+(M_A)_{P1c}\cdot\alpha''$$
$$=\left(-\frac{2}{3}P_{1c}H\frac{k_1}{E_{rl}\cdot T_c^2}+P_{1c}\frac{k_5}{E_{rl}\cdot T_c}\right)H$$
$$+P_{1c}\frac{k_3}{E_{rl}}+\frac{2}{3}P_{1c}H\frac{k_5}{E_{rl}\cdot T_c}$$
$$=-\frac{2}{3}\cdot\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{1c}}{E_{rl}}$$
$$\times\left(k_1+\frac{T_c}{H}k_5+\frac{T_c^2}{H^2}k_3+\frac{T_c}{H}k_5\right)$$

$k_1\fallingdotseq 4\sim5$, $k_2\fallingdotseq 1\sim2.5$, $k_3\fallingdotseq 1\sim2.5$, $k_4\fallingdotseq 5\sim6$, $k_5\fallingdotseq 0.5\sim0.8$ であり，アーチダムでは $T_c/H<1$ であるから

$$(\delta_{r.1})_{P1c}\fallingdotseq-\frac{2}{3}\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{1c}}{E_{rl}}k_1$$

すなわち δ_r は基礎モーメントによる回転にもっとも大きく影響される。したがって

$$(\delta_{r.1})_{P1c}\equiv\mu_1'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_c}{E_{rl}}$$
$$\fallingdotseq-\frac{2}{3}k_1\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{1c}}{E_{rl}} \quad \cdots\cdots (5.31(1))$$

同様に

$$(\delta_{r.2})_{P1c}\equiv\mu_2'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_c}{E_{rl}}$$
$$\fallingdotseq-\frac{2}{9}k_1\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{1c}}{E_{rl}} \quad \cdots\cdots (5.31(2))$$

$$(\delta_{r.1})_{P1c}\equiv\nu_1'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{2c}}{E_{rl}}$$
$$\fallingdotseq-\frac{1}{3}k_1\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{2c}}{E_{rl}} \quad \cdots\cdots (5.31(3))$$

$$(\delta_{r.2})_{P2c}\equiv\nu_2'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{2c}}{E_{rl}}$$

$$\fallingdotseq \frac{1}{9} k_1 \frac{H^2}{T_c^2} \frac{P_{2c}}{E_{rl}} \quad \cdots\cdots (5.31(4))$$

片持梁のたわみは δ_f と δ_r の和であり

$$(\delta_1)_{P1c} = 2\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} + \mu_1'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{1c}}{E_{rl}}$$

$$\equiv 2\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} \times\left\{1+\mu_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

$$\equiv \zeta_1\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3}$$

$$\fallingdotseq 2\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} \times\left\{1+0.333\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\} \quad \cdots\cdots (5.32(1))$$

$$(\delta_1)_{P2c} = 0.274\frac{P_{2c}H^3}{E_c T_{2c}^3} + \nu_1'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{2c}}{E_{rl}}$$

$$\equiv 0.274\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{2c}^3} \times\left\{1\times\nu_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

$$\equiv \xi_1\frac{P_{2c}}{E_c}\left(\frac{H}{T_{2c}}\right)^3$$

$$\fallingdotseq 0.274\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{2c}} \times\left\{1+0.811\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\} \quad \cdots\cdots (5.32(2))$$

$$(\delta_2)_{P1c} = 0.75\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} + \mu_2'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{P_{1c}}{E_{rl}}$$

$$\equiv 0.75\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} \times\left\{1+\mu_2\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

$$\equiv \zeta_2\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3}$$

$$\fallingdotseq 0.75\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} \times\left\{1+0.444\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\} \quad \cdots\cdots (5.32(3))$$

$$(\delta_2)_{P2c} \fallingdotseq 0.162\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{2c}^3} + \nu_2'\frac{H^2}{T_c^2}\frac{T_{2c}}{E_{rl}}$$

$$\equiv 0.162\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{2c}^3} \times\left\{1+\nu_2\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

$$\equiv \xi_2\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{2c}^3}$$

$$\fallingdotseq 0.162\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{2c}^3} \times\left\{1+0.686\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\} \quad \cdots\cdots (5.32(4))$$

ゆえに片持梁のA点におけるたわみ

$$\delta_1 = (\delta_1)_{P1c} + (\delta_1)_{P2c}$$

$$= \zeta_1\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{H^3}{T_{1c}^3} + \xi_1\frac{P_{2c}}{E_c}\left(\frac{H}{T_{2c}}\right)^3$$

$$= \zeta_1\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{1}{K_{1c}} + \xi_1\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{1}{K_{2c}} \quad \cdots\cdots (5.33(1))$$

ただし，

$$K_{1c} = \left(\frac{T_{1c}}{H}\right)^3, \quad K_{2c} = \left(\frac{T_{2c}}{H}\right)^3$$

$$\delta_2 = (\delta_2)_{P1c} + (\delta_2)_{P2c}$$

$$= \zeta_2\frac{P_{1c}}{E_c}\frac{1}{K_{1c}} + \xi_2\frac{P_{2c}}{E_c}\frac{1}{K_{2c}} \quad \cdots\cdots (5.33(2))$$

$$\therefore \frac{P_{1c}}{E_c} = \begin{vmatrix} \delta_1 & \xi_1/K_{2c} \\ \delta_2 & \xi_2/K_{2c} \end{vmatrix} \Big/ \begin{vmatrix} \zeta_1/K_{1c} & \xi_1/K_{2c} \\ \zeta_2/K_{1c} & \xi_2/K_{2c} \end{vmatrix} = \frac{\xi_2\delta_1 - \xi_1\delta_2}{\zeta_1\xi_2 - \zeta_2\xi_1} \cdot K_{1c}$$

$$= (\lambda_1\delta_1 + \rho_1\delta_2)K_{1c} \quad \cdots\cdots (5.34(1))$$

$$\lambda_1 = \frac{\xi_2}{\zeta_1\xi_2 - \zeta_2\xi_1}, \quad \rho_1 = \frac{-\xi_1}{\zeta_1\xi_2 - \zeta_2\xi_1} \quad \cdots\cdots (5.35(1))$$

$$\frac{P_{2c}}{E_c} = \begin{vmatrix} \zeta_1/K_{1c} & \delta_1 \\ \zeta_2/K_{1c} & \delta_2 \\ \zeta_1/K_{1c} & \xi_1/K_{2c} \\ \zeta_2/K_{1c} & \xi_2/K_{2c} \end{vmatrix} \Big/ \begin{vmatrix} \zeta_1/K_{1c} & \xi_1/K_{2c} \\ \zeta_2/K_{1c} & \xi_2/K_{2c} \end{vmatrix} = \frac{-\zeta_2\delta_1 + \zeta_1\delta_2}{\zeta_1\xi_2 - \zeta_2\xi_1} K_{2c}$$

$$= (\lambda_2\delta_1 + \rho_2\delta_2)K_{2c} \quad \cdots\cdots (5.34(2))$$

$$\lambda_2 = \frac{-\zeta_2}{\zeta_1\xi_2 - \zeta_2\xi_1}, \quad \rho_2 = \frac{\zeta_1}{\zeta_1\xi_2 - \zeta_2\xi_1} \quad \cdots\cdots (5.35(2))$$

(4)　弾性支承をもつアーチの変位

円形アーチクラウンの半径方向たわみは上流向きを正にとるとき

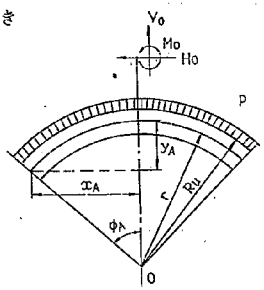


図-5.14 (2)　簡易荷重分割計算説明図
（アーチのたわみ）

$$\delta' = {}_LC_1 M_0 + {}_LB_2 H_0 + {}_LC_2 V_0 - {}_LD_2 \quad \cdots\cdots (5.36)$$

である。M_0，H_0，V_0 はアーチクラウンにおけるモーメント，スラスト，せん断力であって図に示す方向を正にとる。

${}_LC_1$，${}_LB_2$，${}_LC_2$ はアーチ常数，${}_LD_2$ は荷重常数であって

$$
\begin{aligned}
{}_LC_1 &= 12\frac{r^2}{E_C T^3} c_1 + \alpha x_A + \alpha_2 \cos\phi_A \\
{}_LB_2 &= \frac{12 r^3}{E_C T^3} b_{2.1} + \frac{r}{E_C T} b_{2.2} + \alpha x_A \cdot y_A \\
&\quad - \beta \sin\phi_A \cdot \cos\phi_A + \gamma \sin\phi_A \cos\phi_A \\
&\quad + \alpha_2 x_A \sin\phi_A + \alpha_2 y_A \cos\phi_A \\
{}_LC_2 &= \frac{12 r^3}{E_C T} c_{2.1} + \frac{r}{E_C T} \cdot c_{2.2} + \alpha x_A^2 \\
&\quad + 2\alpha_2 x_A \cos\phi_A + \beta \sin^2\phi_A + \gamma \cos^2\phi_A \\
{}_LD_2 &= \frac{12 R_U r^3}{E_C T^3} P \cdot d_{2.1} + \frac{R_U r}{E_C T} P \cdot d_{2.2} \\
&\quad + {}_AM_L(\alpha x_A + \alpha_2 \cos\phi_A) + {}_AH_L \beta \sin\phi_A \\
&\quad + {}_AV_L(\gamma \cos\phi_A + \alpha_2 x_A)
\end{aligned}
$$

上式におけるアバットの左側等分布荷重によるモーメント，スラスト，せん断力

$$
\left.
\begin{aligned}
{}_AM_L &= P R_U r \operatorname{vers}\phi_A \\
{}_AH_L &= P R_U \operatorname{vers}\phi_A \\
{}_AV_L &= P R_U \sin\phi_A
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (5.37)
$$

であり，P はアーチ上流面の単位長あたりの分布荷重，R_U，r は上流面，アーチ中心までの半径，ϕ_A は中心角の ½，T は厚であり，c_1，$b_{2.1}$，$b_{2.2}$，$c_{2.1}$，$c_{2.2}$，$d_{2.1}$，$d_{2.2}$……は ϕ_A のある関数である。また，

$$
\left.
\begin{aligned}
M_0 &= \frac{1}{K}(D_1 B_3 - D_3 B_1) \\
H_0 &= \frac{1}{K}(-D_1 B_1 + D_3 A_1) \\
V_0 &= \frac{D_2}{C_2} \\
K &= A_1 B_3 - B_1^2
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (5.38)
$$

である。上式で

$$
\begin{aligned}
A_1 &= {}_LA_1 + {}_RA_1 = 2\left(\frac{12 r}{E_C T^3} a_1 + \alpha\right) \\
B_1 &= {}_LB_1 + {}_RB_1 = 2\left(\frac{12 r^2}{E_C T^3} b_1 + \alpha y_A + \alpha_2 \sin\phi_A\right) \\
B_3 &= {}_LB_3 + {}_RB_3 = 2\left(\frac{12 r^2}{E_C T^3} b_{3.1} + \frac{r}{E_C T} b_{3.2}\right. \\
&\quad + \alpha y_A^2 + \beta \cos^2\phi_A + \gamma \sin^2\phi_A \\
&\quad \left. + 2\alpha_2 y_A \sin\phi_A\right) \\
D_1 &= {}_LD_1 + {}_RD_1 \\
&= 2\left(\frac{12 R_U r^2}{E_C T^3} P \cdot d_1 + {}_AM_L \alpha + {}_AV_L \alpha_2\right) \\
D_2 &= 0 \\
D_3 &= 2\left\{\frac{12 R_U r^3}{E_C T^3} P \cdot d_{3.1} + \frac{R_U r}{E_C T} P \cdot d_{3.2}\right. \\
&\quad + {}_AM_L(\alpha y_A + \alpha_2 \sin\phi_A) - {}_AH_L \beta \cos\phi_A \\
&\quad \left. + {}_AV_L(\gamma \sin\phi_A + \alpha_2 y_A)\right\}
\end{aligned}
$$

である。α_1，α_2，β，γ は岩盤常数であり，次式で表わされる。

$$
\left.
\begin{aligned}
\alpha &= \alpha' \cos^3\psi + \delta' \sin^2\psi \cos\psi \\
&= \frac{1}{E_\tau T^2}(k_1 \cos^2\psi + k_4 \sin^2\psi \cos\psi) \\
&\equiv \frac{1}{E_\tau T^2} \kappa_\alpha \\
\alpha_2 &= \alpha'' \cos^2\psi = \frac{k_0}{E_\tau T} \cos^2\psi = \frac{1}{E_\tau T} \kappa_{\alpha 2} \\
\beta &= \beta' \cos^3\psi + \gamma' \sin^2\psi \cos\psi \\
&= \frac{1}{E_\tau}\left(k_2 \cos^3\psi + k_3' \sin^2\psi \cos\psi\right) \\
&\equiv \frac{1}{E_\tau} \kappa_\beta \\
\gamma &= \gamma' \cos\psi = \frac{k_3}{E_\tau} \cos\psi = \frac{1}{E_\tau} \kappa_\gamma
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (5.39)
$$

したがってアーチ常数，荷重常数は次式のとおり表わされる。

$$
\begin{aligned}
{}_LC_1 &= \frac{12 r^2}{E_C T^3} c_1 + \frac{1}{E_\tau T^2} \kappa_\alpha \cdot r \sin\phi_A \\
&\quad + \frac{1}{E_\tau T} \kappa_{\alpha.2} \cos\phi_A \\
&= \frac{12 r^2}{E_C T^3} c_1 \left\{1 + \frac{1}{12 c_1} \frac{E_C}{E_\tau}\right. \\
&\quad \left. \times\left(\kappa_\alpha \sin\phi_A \frac{T}{r} + \kappa_{\alpha.2} \cos\phi_A \frac{T^2}{r^2}\right)\right\} \\
&\equiv \frac{12 r^2}{E_C T^3} c_1' \quad \cdots\cdots (5.40.(1))
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
{}_LB_2 &= \frac{12 r^3}{E_C T^3} b_{2.1} + \frac{r}{E_C T} b_{2.2} \\
&\quad + \frac{1}{E_\tau T^2} \kappa_\alpha r \sin\phi_A r \operatorname{vers}\phi_A \\
&\quad - \frac{1}{E_\tau} \kappa_\beta \sin\phi_A \cos\phi_A \\
&\quad + \frac{1}{E_\tau} \kappa_\gamma \sin\phi_A \cos\phi_A \\
&\quad + \frac{1}{E_\tau T} \kappa_{\alpha.2} r \sin\phi_A \operatorname{vers}\phi_A \\
&\quad + \frac{1}{E_\tau T} \kappa_{\alpha.2} r \operatorname{vers}\phi_A \cos\phi_A \\
&= \frac{12 r^3}{E_C T^3} b_{2.1}\left\{1 + \frac{b_{2.2}}{12 b_{2.1}} \frac{T^2}{r^2}\right. \\
&\quad + \frac{1}{12 b_{2.1}} \frac{E_C}{E_\tau}\left(\sin\phi_A \operatorname{vers}\phi_A \kappa_\alpha \frac{T}{r}\right. \\
&\quad - \sin\phi_A \cos\phi_A \kappa_\beta \frac{T^3}{r^3} \\
&\quad + \sin\phi_A \cos\phi_A \kappa_\gamma \frac{T^3}{r^3} \\
&\quad \left.\left. + \sin^2\phi_A \kappa_{\alpha.2} \frac{T^2}{r^2} + \operatorname{vers}\phi_A \cos\phi_A \frac{T^2}{r^2} \kappa_{\alpha.2}\right)\right\} \\
&\equiv \frac{12 r^3}{E_C T^3} b_{2.1}' \quad \cdots\cdots (5.40.(2))
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
{}_LC_2 &= \frac{12 r^3}{E_C T^3} c_{2.1} + \frac{r}{E_C T} c_{2.2} \\
&\quad + \frac{1}{E_\tau T^2} \kappa_\alpha (r \sin\phi_A)^2 \\
&\quad + 2\frac{\kappa_{\alpha.2}}{E_\tau T} r \sin\phi_A \cos\phi_A \\
&\quad + \frac{1}{E_\tau} \kappa_\beta \sin^2\phi_A + \frac{1}{E_\tau} \kappa_\gamma \cos^2\phi_A \\
&= \frac{12 r^3}{E_C T^3} c_{2.1}\left\{1 + \frac{C_{2.2}}{12 c_{2.1}} \frac{T^2}{r^2}\right.
\end{aligned}
$$

$$+\frac{1}{12c_{2\cdot1}}\frac{E_c}{E_r}\left(\sin^2\phi_A\,\kappa_\alpha\frac{T}{r}+2\sin\phi_A\cos\phi_A\,\kappa_{\alpha\cdot2}\frac{T^2}{r^2}+\sin^2\phi_A\,\kappa_\beta\frac{T^3}{r^3}+\cos^2\phi_A\,\kappa_\gamma\frac{T^3}{r^3}\right)\Big\}$$

$$=\frac{12r^3}{E_cT^3}c_{2\cdot1}' \quad \cdots\cdots (5.40.(3))$$

$${}_LD_2=\frac{12Rur^3}{E_cT^3}P\cdot d_{2\cdot1}+\frac{Rur}{E_cT}P\cdot d_{2\cdot2}+PR_U r\,\mathrm{vers}\phi_A\left(\frac{1}{E_rT^2}\kappa_\alpha r\sin\phi_A+\frac{1}{E_rT}\kappa_{\alpha\cdot2}\cos\phi_A\right)+PR_U\,\mathrm{vers}\phi_A\frac{1}{E_r}\kappa_\beta\sin\phi_A+PR_U\sin\phi_A\left(\frac{1}{E_r}\kappa_\gamma\cos\phi_A+\frac{1}{E_rT}\kappa_{\alpha\cdot2}r\sin\phi_A\right)$$

$$=\frac{12Rur^3}{E_cT^3}P\cdot d_{2\cdot1}\Big\{1+\frac{d_{2\cdot2}}{12d_{2\cdot1}}\frac{T^2}{r^2}+\frac{E_c}{E_r}\frac{1}{12d_{2\cdot1}}\Big(\mathrm{vers}\,\phi_A\sin\phi_A\kappa_\alpha\frac{T}{r}+\mathrm{vers}\,\phi_A\cos\phi_A\kappa_{\alpha\cdot2}\frac{T^2}{r^2}+\mathrm{vers}\,\phi_A\sin\phi_A\kappa_\beta\frac{T^3}{r_3}+\sin\phi_A\cos\phi_A\kappa_\gamma\frac{T^3}{r^3}+\sin^2\phi_A\kappa_{\alpha\cdot2}\frac{T^2}{r^2}\Big)\Big\}$$

$$=\frac{12Rur^3}{E_cT^3}P\cdot d_{2\cdot1}' \quad \cdots\cdots (5.40.(4))$$

$$A_1=2\left(-\frac{12r}{E_cT^3}a_1+\frac{1}{E_rT^2}\kappa_\alpha\right)=\frac{24r}{E_cT^3}a_1\left(1+\frac{E_c}{E_r}\frac{T}{r}\frac{\kappa_\alpha}{12a_1}\right)=\frac{24r}{E_cT^3}a_1' \quad \cdots\cdots (5.40.(5))$$

$$B_1=2\left(\frac{12r^2}{E_cT^3}b_1+\frac{\kappa_\alpha}{E_rT^2}r\,\mathrm{vers}\phi_A+\frac{\kappa_{\alpha\cdot2}}{E_rT}\sin\phi_A\right)=\frac{24r^2}{E_cT^3}b_1\Big\{1+\frac{1}{12b_1}\frac{E_c}{E_r}\frac{T}{r}\times\left(\kappa_\alpha\,\mathrm{vers}\,\phi_A+\kappa_{\alpha\cdot2}\sin\phi_A\frac{T}{r}\right)\Big\}=\frac{24r^2}{E_cT^3}b_1' \quad \cdots\cdots (5.40.(6))$$

$$B_3=2\Big\{\frac{12r^3}{E_cT^3}b_{3\cdot1}+\frac{r}{E_cT}b_{3\cdot2}+\frac{1}{E_rT^2}\kappa_\alpha(r\,\mathrm{vers}\phi_A{}^2)+\frac{1}{E_r}\kappa_\beta\cos^2\phi_A+\frac{1}{E_r}\kappa_\gamma\sin^2\phi_A+2\frac{1}{E_cT}\kappa_{\alpha\cdot2}r\,\mathrm{vers}\phi_A\sin\phi_A\Big)\Big\}$$

$$=\frac{24r^3}{E_cT^3}b_{3\cdot1}\Big\{1+\frac{b_{3\cdot2}}{12b_{3\cdot1}}\frac{T^2}{r^2}+\frac{1}{12b_{3\cdot1}}\frac{E_c}{E_r}\frac{T}{r}(\kappa_\alpha\,\mathrm{vers}^2\phi_A)+2\kappa_{\alpha\cdot2}\,\mathrm{vers}\phi_A\sin\phi_A\frac{T}{r}+\kappa_\beta\cos^2\phi_A\frac{T^2}{r^2}+\kappa_\gamma\sin^2\phi_A\frac{T^2}{r^2}\Big)\Big\}$$

$$=\frac{24r^3}{E_cT^3}b_{3\cdot1}' \quad \cdots\cdots (5.40.(7))$$

$$D_1=2\Big\{\frac{12Rur^2}{E_cT^3}P\cdot d_1+P\cdot Pur\,\mathrm{vers}\phi_A\times\frac{1}{E_rT^2}\kappa_\alpha+PR_U\sin\phi_A\frac{1}{E_rT}\kappa_{\alpha\cdot2}\Big\}=\frac{24Rur^2}{E_cT^3}P\cdot d_1\Big\{1+\frac{1}{12d_1}\frac{E_c}{E_r}\frac{T}{r}\times\left(\mathrm{vers}\phi_A\cdot\kappa_\alpha+\sin\phi_A\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}\right)\Big\}=\frac{24Rur}{E_cT^3}Pd_1' \quad \cdots\cdots (5.40.(8))$$

$$D_3=2\Big\{\frac{12Rur^3}{E_cT^3}P\cdot d_{3\cdot1}+\frac{Rur}{E_cT}P\cdot d_{3\cdot2}+PRur\,\mathrm{vers}\phi_A\left(\frac{1}{E_rT^2}\kappa_\alpha\cdot r\,\mathrm{vers}\phi_A+\frac{1}{E_rT}\kappa_{\alpha\cdot2}\sin\phi_A\right)+PR_U\sin\phi_A\left(\frac{1}{E_r}\kappa_\gamma\sin\phi_A+\frac{1}{E_rT}\kappa_{\alpha\cdot2}r\,\mathrm{vers}\,\phi_A\right)-PR_U\,\mathrm{vers}\,\phi_A\cos\phi_A\frac{K_\beta}{E_r}\Big\}$$

$$=\frac{24Rur^3}{E_cT^3}Pd_{3\cdot1}\Big\{1+\frac{d_{3\cdot2}}{12d_{3\cdot1}}\frac{T^2}{r^2}+\frac{1}{12d_{3\cdot1}}\frac{E_c}{E_r}\frac{T}{r}\Big(\mathrm{vers}^2\phi_A\kappa_\alpha+\mathrm{vers}\,\phi_A\sin\phi_A\kappa_{\alpha\cdot2}\frac{T}{r}+\sin^2\phi_A\,\kappa_\gamma\frac{T^2}{r^2}+\sin\phi_A\,\mathrm{vers}\,\phi_A\kappa_{\alpha\cdot2}\frac{T}{r}-\mathrm{vers}\,\phi_A\cos\phi_A\,k_\beta\frac{T^2}{r^2}\Big)\Big\}=\frac{24Rur^3}{E_cT^3}Pd_{3\cdot1}' \quad \cdots\cdots (5.40.(9))$$

したがって

$$K=A_1B_3-B_1^2=\left(\frac{24r}{E_cT^3}a_1'\right)\left(\frac{24r^3}{E_cT^3}b_{3\cdot1}'\right)-\left(\frac{24r^2}{E_cT^3}b_1'\right)^2=(24)^2\frac{r^4(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}{E_c^2T^6} \quad \cdots\cdots (5.41.(1))$$

$$D_1B_3-D_3B_1=\left(\frac{24PRur^2}{E_cT^3}d_1'\right)\left(\frac{24r^3}{E_cT^3}b_{3\cdot1}'\right)-\left(\frac{24PRur^3}{E_cT^3}d_{3\cdot1}'\right)\left(\frac{24r^2}{E_cT^3}b_1'\right)$$

$$= (24)^2 \frac{P R_U r^5 (d_1' b_{3,1}' - d_{3,1}' b_1')}{E_C^2 T^6} \quad \cdots\cdots (5.41.(2))$$

$$-D_1 B_1 + D_3 A_1 = \left(\frac{-24 P R_U r^2}{E_C T^3} d_1'\right)\left(\frac{24 r^2}{E_C T^3} b_1'\right) + \left(\frac{24 P R_U r^3}{E_C T^3} d_{3,1}'\right)\left(\frac{24 r}{E_C T^3} a_1'\right)$$

$$= (24)^2 \frac{P R_U r^4 (-d_1' b_1' + d_{3,1}' b_1')}{E_C^2 T^6} \quad \cdots\cdots (5.41.(3))$$

$$\therefore M_0 = \frac{P R_U r^5 (d_1' b_{3,1}' - d_{3,1}' b_1')}{r^4 (a_1' b_{3,1}' - b_1'^2)} = P R_U r \left(\frac{d_1' b_{3,1}' - d_{3,1}' b_1'}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2}\right) \quad \cdots\cdots (5.42)$$

$$H_0 = \frac{P R_U r^4 (-d_1' b_1' + d_{3,1}' a_1')}{r^4 (a_1' b_{3,1}' - b_1'^2)} = P R_U \left(\frac{-d_1' b_1' + d_{3,1}' a_1'}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2}\right) \quad \cdots\cdots (5.43)$$

$$V_0 = 0$$

$$\therefore \delta' = \left(\frac{12 r^2}{E_C T^3} c_1'\right)\left(P R_U r \frac{d_1' b_{3,1}' - d_{3,1}' b_1'}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2}\right) + \left(\frac{12 r^3}{E_C T^3} b_{2,1}'\right)\left(P R_U \frac{-d_1' b_1' + d_{3,1}' a_1'}{a_1' d_{3,1}' - b_1'^2}\right) - \left(\frac{12 R_U r^3}{E_C T^3} P d_{2,1}'\right)$$

$$= \frac{12 P P_U R^3}{E_C T^3} \left\{ \left\{ \frac{c_1' (d_1' b_{3,1}' - d_{3,1}' b_1')}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2} + \frac{b_{2,1}' (-d_1' b_1' + d_{3,1}' a_1')}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2} \right\} - d_{2,1}' \right\}$$

である。上式において

$$F = d_{2,1}' - \left\{ \frac{c_1' (d_1' b_{3,1} - d_{3,1} b_1')}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2} + \frac{b_{2,1}' (-d_1' b_1' + d_{3,1}' a_1')}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2} \right\} \quad \cdots\cdots (5.44)$$

とすれば上流へのたわみ

$$\delta = \frac{12 P R_U r^3}{E_C T^3} F \quad \cdots\cdots (5.45)$$

である。F は ϕ_A, κ_α, κ_β, κ_Γ …… $\frac{E_C}{E_r}\frac{T}{r_1}$, $\frac{T^2}{r^2}$ なる因子の関数である。アーチ，荷重常数の $\left(\frac{E_0}{E_r}\frac{T}{r}\right)$ を含む項は岩盤効果を表わし，それを含まない $\left(\frac{T^2}{r^2}\right)$ なる因子によって表わされる項は，アーチスラスト，せん断力効果を示すものであることがわかる。岩盤効果は $T < r$ であれば主としてアバットにおけるモーメント効果 κ_α によって顕著な影響を受ける。アーチスラスト，せん断力効果は厚肉ほど顕著であり，したがってまた薄肉では主としてモーメントの影響を受け変形する。中心角 ϕ_A はアーチの下流へのたわみに対する抵抗を表わす。

さて，(5.45) 式において堤頂長を L とし $R_U \fallingdotseq r$, $r\phi = L$, $\phi = 2\phi_A$ とすると (5.47) 式は

$$\delta = \frac{3}{4}\frac{P r^4}{E_C T^3}\frac{1}{\phi_A^4} \cdot F = \frac{1}{2} A \frac{P r^4}{E_C T^3} \quad \cdots\cdots (5.46.(1))$$

ただし，　$A = 1.5 F \frac{1}{\phi_A^4}$ ……(5.46.(2))

となる。(5.44) 式において

$$M_1 = \frac{d_1 b_{3,1}' - d_{3,1}' b_1'}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2} \quad \cdots\cdots (5.47.(1))$$

$$H_1 = \frac{-d_1' b_1' - d_{3,1}' a_1'}{a_1' b_{3,1}' - b_1'^2} \quad \cdots\cdots (5.47.(2))$$

とおけば，

$$F = d_{2,1}' - (c_1' M_1 + b_{2,1}' H_1) \quad \cdots\cdots (5.48)$$

である。(5.46(1)) 式における $\frac{1}{2}A$ の値は静定等分布荷重単純梁の中点において $\frac{5\times 12}{384}$ であるから $A = \frac{10\times 12}{384} = \frac{5}{16}$ である。

P_{1a}, P_{2a} を受ける A，C 点のアーチのたわみは P_{1c}, P_{2c} を受ける片持梁のたわみ δ_1, δ_2 と一致し上部，下部アーチの平均厚さを T_{1a}, T_{2a}，半径を r_1, r_2，堤頂長を L_1, L_2，中心角の 1/2 を ϕ_{A1}, ϕ_{A2} とすれば，(5.46) 式によって近似的に

$$\left.\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{1}{2} A_1 \frac{\{P_{1a}/(H/2)\} L_1^4}{E_C T_{1a}^2} = A_1 \frac{P_{1a}}{E_C K_{1a}} \frac{L_1}{H} \\ \delta_2 &= \frac{1}{2} A_2 \frac{\{P_{2a}/(H/2)\} L_2^4}{E_C K_{2a}} = A_2 \frac{P_{2a}}{E_C K_{2a}} \cdot \frac{L_2}{H} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.49)$$

あるいは

$$\left.\begin{aligned} \frac{P_{1a}}{E_C} &= \frac{\delta_1 K_{1a}}{A_1}\frac{H}{L_1} \\ \frac{P_{2a}}{E_C} &= \frac{\delta_2 K_{2a}}{A_2}\frac{H}{L_2} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.50)$$

である。

(5)　水圧荷重によるたわみ

(5.24) 式に (5.26) 式，(5.34.(1)), (5.34.(2)) 式および (5.50) 式を代入すれば

$$\frac{1}{8} w H^2 = (\lambda_1 \delta_1 + \rho_1 \delta_2) E_C K_{1c} + \frac{1}{A_1} K_{1a} \frac{H}{L_1} \delta_1 E_C$$

$$\therefore \frac{1}{8}\frac{w H^2}{E_C} = \left(\lambda_1 K_{1c} + \frac{1}{A_1} K_{1a}\frac{H}{L_1}\right)\delta_1 + \rho_1 K_{1c} \delta_2$$

同様にして

$$\frac{3}{8}\frac{w H^2}{E_C} = \lambda_2 K_{2c} \delta_1 + \left(\rho_2 K_{2c} + \frac{1}{A_2} K_{2a}\frac{H}{L_2}\right)\delta_2$$

$$\therefore \delta_1=\frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 K_{1c} \\ 3 & \rho_2 K_{2c}+\frac{1}{A_2}K_{2a}\frac{H}{L_2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \lambda_1 K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1} & \rho_1 K_{1c} \\ \lambda_2 K_{2c} & \rho_2 K_{2c}+\frac{1}{A_2}K_{2a}\frac{H}{L_2} \end{vmatrix}} \times\frac{1}{8}\frac{wH^2}{E_c}$$

$$=\left\{\left(\rho_2 K_{2c}+\frac{1}{A_2}K_{2a}\frac{H}{L_2}\right)-3\rho_1 K_{1c}\right\} \Big/\left\{\left(\lambda_1 K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}\right)\times\left(\rho_2 K_{2c}+\frac{1}{A_2}K_{2a}\frac{H}{L_2}\right)-\rho_1\lambda_2 K_{1c}K_{2c}\right\}\times\left\{\frac{1}{8}\cdot\frac{wH^2}{E_c}\right\}$$

$$=\left\{\left(K_{2c}+\frac{1}{A_2\rho_2}K_{2a}\frac{H}{L_2}\right)-3\frac{\rho_1}{\rho_2}K_{1c}\right\} \Big/\left\{\left(K_{1c}+\frac{1}{A_1\lambda_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}\right)\times\left(K_{2c}+\frac{1}{A_2\rho_2}K_{2a}\frac{H}{L_2}\right)-\frac{\rho_1}{\rho_2}\frac{\lambda_2}{\lambda_1}K_{1c}K_{2c}\right\}\times\left\{\frac{1}{8}\cdot\frac{wH^2}{E_c\lambda_1}\right\} \quad \cdots\cdots (5.51)$$

(5.51) 式における $-3\frac{\rho_1}{\rho_2}K_{1c}$ は(5.35.(1), (2)) 式を用いて次式のとおりとなる。

$$-3\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{3\frac{\xi_2}{\zeta_1}}{}=\left\{3\times 0.274\times\left\{1+0.811\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}\right\} \Big/\left\{2\left\{1+0.333\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}\right\}$$

$$=0.411\times\left\{\left\{1+0.811\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\times\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\} \Big/\left\{1+0.333\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)\right\}\right\} \quad \cdots\cdots (5.52)$$

同様にして

$$-\frac{\rho_1\lambda_2}{\rho_2\lambda_1}=\frac{(-\xi_1)(-\zeta_2)}{(\zeta_1)(\xi_2)}=-\frac{\xi_1\zeta_2}{\zeta_1\xi_2}$$

$$=\left\{-0.274\left\{1+0.811\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{E_{rl}}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}\times 0.75\left\{1+0.444\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}\right\} \Big/\left\{2\left\{1+0.333\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{T_c}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}\times 0.162\left\{1+0.686\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}\right\}$$

$$\fallingdotseq -0.63 \quad \cdots\cdots (5.53)$$

(5.51) 式の分母第2項 $-(\rho_1\lambda_2/\rho_2\lambda_1)K_{1c}K_{2c}$ が第1項に比べて小さいものとして消略すれば，次式

$$\delta_1=j\frac{wH^2}{\lambda_1 E_c}\frac{1}{\left(K_{1c}+\frac{1}{A_1\lambda_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}\right)}\times\left\{1-\frac{3\frac{\rho_1}{\rho_2}K_{1c}}{K_{2c}+\frac{1}{A_2\rho_2}K_{2a}\frac{H}{L_2}}\right\} \quad \cdots\cdots (5.54)$$

あるいは

$$\frac{\delta_1 E_c}{wH^2}=j\frac{1}{\left(\lambda_1 K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}\right)}\times\left\{1+\frac{3\left|\frac{\rho_1}{\rho_2}\right|}{\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_1}}\right\} \quad \cdots\cdots (5.54)'$$

$j>1/8$

を得ることができる。

上式の左辺 $\delta_0\equiv\frac{\delta_1 E_c}{wH^2}$ は単位高さに換算したトップアーチクラウンのたわみを表わす。右辺の

$$G_1\equiv\lambda_1 K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1} \quad \cdots\cdots (5.55)$$

の第1項は片持梁抵抗，第2項はアーチの抵抗を表わし G_1 はアーチダムの上部全抵抗を表わす。

$$G_2\equiv\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_1} \quad \cdots\cdots (5.56)$$

は下部の全抵抗の上部片持梁抵抗に対する比であり G_2 が大きくなれば換算たわみ δ_0 は小さくなるが，上部抵抗 G_1 ほど直接的でない。

$$\lambda_1=\frac{\xi_2}{\zeta_1\xi_2-\zeta_2\xi_1}=\frac{1}{\zeta_1-\zeta_2\frac{\xi_1}{\xi_2}}$$

は $\zeta_2\frac{\xi_1}{\xi_2}=\left\{0.75\left\{1+0.444\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}\times 0.274\left\{1+0.811\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}\right\} \Big/\left\{0.162\left\{1+0.686\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}\right\}$

$$\fallingdotseq 1.27\left\{1+0.444\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

$$\zeta_1=2\left\{1+0.333\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

であるから

$$\lambda_1=\frac{1}{0.7\left\{1+0.444\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}} \quad \cdots\cdots (5.57)$$

である。また

$$\frac{1}{\rho_2}=\frac{\zeta_1\xi_2-\zeta_2\xi_1}{\zeta_1}=\xi_2-\xi_1\frac{\zeta_2}{\zeta_1}$$

は，$\xi_1\frac{\zeta_2}{\zeta_1}=\left\{0.274\left\{1+0.811\,k_1\frac{E_c}{E_{rl}}\frac{T_{1c}}{H}\times\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}\right.$

$$\times 0.75\left\{1+0.444\,k_1\frac{E_c}{E_{r1}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}\Big)\Big/\left(2\left\{1+0.333\,k_1\frac{E_c}{E_{r1}}\frac{T_{1c}}{H}\left(\frac{T_{1c}}{T_c}\right)^2\right\}\right)$$

$$\fallingdotseq 0.103\left\{1+0.811\,k_1\frac{E_c}{E_{r1}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

$$\xi_2=0.162\left\{1+0.686\,k_1\frac{E_c}{E_{r1}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\}$$

であるから

$$\frac{1}{\rho_2}\fallingdotseq 0.05\left\{1+0.686\,k_1\frac{E_c}{E_{r1}}\frac{T_{2c}}{H}\left(\frac{T_{2c}}{T_c}\right)^2\right\} \quad \cdots\cdots (5.58)$$

λ_1, ρ_2, $\frac{1}{A}$ は片持梁アバットあるいはアーチアバットの岩盤抵抗を表わす。

薄肉ダムでは，上部片持梁に引張応力が作用しないためには，上部のアーチ抵抗が片持梁抵抗より極めて大きいことが必要である。すなわち，(5.54) 式において

$$\lambda_1 K_{1c} \ll \frac{1}{A_1} K_{1a}\frac{H}{L_1}$$

であり，したがって，そのたわみは主として上部アーチ抵抗の影響を受ける。厚肉ダムでは片持梁抵抗，下部アーチ抵抗が加わりたわみはさらに小さくなる。

(6) 温度荷重による拘束を受けないアーチ，片持梁のたわみ

(a) 平均温度増分 Δt によるアーチクラウンのたわみ c をコンクリートの膨脹係数とすれば，その半径方向たわみ

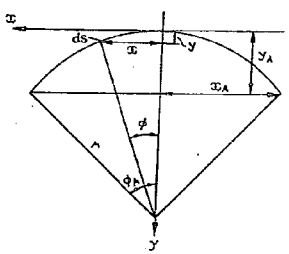


図-5.14(3) 簡易荷重分割計算説明図（アーチ形状）

$$\left.\begin{aligned} {}_L\delta t_0 &= \int_0^s c\,\Delta t\,ds\sin\phi \\ &= c\,\Delta t\,r\,\mathrm{vers}\,\phi_A = c\,\Delta t\,y_A \\ {}_R\delta t_0 &= c\,\Delta t\,r\,\mathrm{vers}\,\phi_A = c\,\Delta t\,y_A \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.59)$$

切線方向のたわみ

$$\left.\begin{aligned} {}_LS_{t0} &= \int_0^s c\,\Delta t\,ds\cos\phi \\ &= c\,\Delta t\,r\sin\phi_A = c\,\Delta t\,x_A \\ {}_RS_{t0} &= -c\Delta t\,r\sin\phi_A = -c\,\Delta t\,x_A \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.60)$$

回転角

${}_L\theta_{t0} = {}_R\theta_{t0} = 0$

(b) 等置直線温度こう配の増分 Δg によるアーチクラウンのたわみ，

回転角

$$\left.\begin{aligned} {}_L\theta_{g0} &= \int_0^s d\theta = \int_0^s c\Delta g\,ds = c\Delta g\,r\,\phi_A \\ {}_R\theta_{g0} &= -c\Delta g\,r\,\phi_A \end{aligned}\right\} \cdots (5.61.(1))$$

半径方向のたわみ

$$\left.\begin{aligned} {}_L\delta_{g0} &= \int_0^s c\Delta g\,ds\,x = c\Delta g\int_0^{\phi_A} r\,d\phi\,r\sin\phi \\ &= c\Delta g\,r^2\,\mathrm{vers}\,\phi_A \\ {}_R\delta_{g0} &= c\Delta g\,r^2\,\mathrm{vers}\,\phi_A \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.61.(2))$$

切線方向のたわみ

$$\left.\begin{aligned} {}_LS_{g0} &= -\int_0^s c\Delta g\,ds\,y = -c\Delta g\int_0^{\phi_A} r\,d\phi\,r(1-\cos\phi) \\ &= -c\,\Delta g\,r^2(\phi_A - \sin\phi_A) \\ {}_RS_{g0} &= c\,\Delta g\,r^2(\phi_A - \sin\phi_A) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.61.(3))$$

(c) 等置直線温度こう配の増分 Δg による片持梁のたわみ

$$\delta_{g0} = \int_0^s c\,\Delta g\,dx(h-x) = c\,S_g\,x_g$$

S_g は等置直線温度こう配分布図の面積である。x_g はその重心の堤頂面よりの距離であり，Δg の平均値を $\overline{\Delta g}$，堤高を H とすれば

$$\overline{\Delta g}\,H = S_g \quad \cdots\cdots (5.62.(1))$$

であるから

$$\delta_{g0} = c\,\overline{\Delta g}\,H^2\frac{x_g}{H} = c\eta\,\overline{\Delta g}\,H^2 \quad \cdots (5.62.(2))$$

ただし，$\eta = \frac{x_g}{H}$ $\cdots\cdots (5.62.(3))$

である。

(7) 温度荷重によるたわみ

(a) 平均温度によるアーチのたわみ

荷重常数は次のとおりである。

$$\left.\begin{aligned} {}_LD_1 = {}_RD_1 = 0 \qquad & D_1 = 0 \\ {}_LD_2 = -c\,\Delta t\,y_A,\ {}_RD_2 = c\,\Delta t\,y_A, \qquad & D_2 = 0 \\ {}_LD_3 = -c\,\Delta t\,x_A,\ {}_RD_3 = c\,\Delta t\,x_A, \qquad & D_3 = 2c\Delta t\,x_A \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.63)$$

アーチ常数は (5.40) 式のとおりであるから

$$D_1B_3 - D_3B_1 = -D_3B_1 = -\left(2c\,\Delta t\,x_A\right)\left(24\frac{r^3}{E_c\,T^3}\,b_1'\right) = -48\frac{c\Delta t\,x_A r^2}{E_c^2 T^3}\,b_1'$$

$$-D_1B_1 + D_3A_1 = D_3A_1 = \left(2c\,\Delta t\,x_A\right)\left(24\frac{r}{E_c\,T^3}\,a_1'\right) = 48\frac{c\,\Delta t\,x_A r}{E_c T^3}\,a_1'$$

$$K = (24)^2\frac{r^4(a_1'b_{3.1}' - b_1'^2)}{E_c^2\,T^6}$$

$$\therefore M_0 = -\frac{1}{12}\frac{b_1'}{a_1'b_{3.1}' - b_1'^2}\,c\,\Delta t\,x_A\frac{E_c\,T^3}{r^2} \quad \cdots\cdots (5.64)$$

$$H_0=\frac{1}{12}\frac{a_1'}{a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2}c\,\Delta t\,x_A\frac{E_C T^3}{r^3} \quad \cdots\cdots (5.65)$$

であるから平均温度上昇によるアーチのたわみ

$$\begin{aligned}\delta_{t0}&=\left(12\frac{r^2}{E_C T^3}c_1'\right)\\&\times\left(-\frac{1}{12}\frac{b_1'}{(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}c\,\Delta t\,x_A\frac{E_C T^3}{r^2}\right)\\&+\left(\frac{12r^3}{E_C T^3}b_{2\cdot1}'\right)\\&\times\left(\frac{1}{12}\frac{a_1'}{(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}c\,\Delta t\,x_A\frac{E_C T^3}{r^2}\right)\\&+c\,\Delta t\,y_A\\&=c\,\Delta t\,y_A\left\{1+\frac{x_A}{y_A}\frac{-c_1'b_1'+a_1'b_{2\cdot1}'}{a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2}\right\}\\&=c\,\Delta t\,y_A B \quad \cdots\cdots (5.66)\end{aligned}$$

ただし

$$\left.\begin{aligned}B&=1+\frac{\sin\phi_A}{\mathrm{vers}\,\phi_A}\frac{-c_1'b_1'+a_1'b_{2\cdot1}'}{a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2}\\&=1+\frac{\sin\phi_A}{\mathrm{vers}\,\phi_A}(c_1'M_2+b_{2\cdot1}'H_2)\\M_2&=-\frac{b_1'}{a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2},\\H_2&=\frac{a_1'}{a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.67)$$

（b）等置直線温度こう配によるアーチのたわみ

荷重常数は次のとおりである。

$$\left.\begin{aligned}&{}_LD_1=-c\,\Delta g\,r\,\phi_A,\quad {}_RD_1=-c\,\Delta g\,r\phi_A\\&D_1=-2c\,\Delta g\,r\,\phi_A\\&{}_LD_2=-c\Delta g\,r^2\mathrm{vers}\phi_A,\ {}_RD_2=c\Delta g r^2\mathrm{vers}\phi_A\\&D_2=0\\&{}_LD_3=-c\,\Delta g\,r^2(\phi_A-\sin\phi_A),\\&{}_RD_3=-c\,\Delta g\,r^2(\phi_A-\sin\phi_A)\\&D_3=-2c\,\Delta g\,r^2(\phi_A-\sin\phi_A)\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.68)$$

$$\begin{aligned}D_1B_3-D_3B_1&=\left(-2\,c\,\Delta g\,r\phi_A\right)\left(\frac{24\,r^2}{E_C T^3}b_{3\cdot1}'\right)\\&-\left\{-2c\,\Delta g r^2(\phi_A-\sin\phi_A)\right\}\left(\frac{24\,r^2}{E_C T^3}b_1'\right)\\&=48c\,\Delta g\frac{r^4}{E_C T^3}\left\{-\phi_A b_{3\cdot1}'+(\phi_A-\sin\phi_A)b_1'\right\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}-D_1B_1+D_3A_1&=-\left(-2c\,\Delta g\,r\,\phi_A\right)\left(\frac{24\,r^2}{E_C T^3}b_1'\right)\\&+\left\{-2c\,\Delta g\,r^2\,(\phi_A-\sin\phi_A)\right\}\left(\frac{24\,r}{E_C T^3}a_1'\right)\\&=48c\,\Delta g\frac{r^3}{E_C T^3}\left\{\phi_A b_1'-(\phi_A-\sin\phi_A)\,a_1'\right\}\end{aligned}$$

$$K=(24)^2\frac{r^4(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}{E_C T^6}$$

$$M_0=\frac{1}{12}c\,\Delta g\,T^3E_C$$

$$\times\frac{-\phi_A b_{3\cdot1}'+(\phi_A-\sin\phi_A)b_1'}{a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2} \quad \cdots\cdots (5.69)$$

$$H_0=\frac{1}{12}c\Delta g\frac{T^3E_C}{r}\times\frac{\phi_A b_1'-(\phi_A-\sin\phi_A)a_1'}{a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2} \quad \cdots\cdots (5.70)$$

したがって求めるたわみは

$$\begin{aligned}(\delta_{g0})_a&=c\,\Delta g\,r^2\,\mathrm{vers}\,\phi_A\\&\times\left\{1+\frac{c_1'\{-\phi_A b_{3\cdot1}'+(\phi_A-\sin\phi_A)b_1'\}}{\mathrm{vers}\,\phi_A(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}\right.\\&\left.+\frac{b_{2\cdot1}'\{\phi_A b_1'-(\phi_A-\sin\phi_A)a_1'\}}{\mathrm{vers}\,\phi_A(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}\right\}\\&=c\,\Delta g\,r^2\mathrm{vers}\phi_A\,C \quad \cdots\cdots (5.71)\end{aligned}$$

ただし，

$$\left.\begin{aligned}C&=c_1'M_3+b_{2\cdot1}'H_3+1\\M_3&=\frac{-\phi_A b_{3\cdot1}'+(\phi_A-\sin\phi_A)b_1}{\mathrm{vers}\phi_A(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}\\H_3&=\frac{\phi_A b_1'-(\phi_A-\sin\phi_A)\,a_1'}{\mathrm{vers}\,\phi_A(a_1'b_{3\cdot1}'-b_1'^2)}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.72)$$

である。$(\delta_{g0})_a$ の値は表-5.2 に示される C の値が極めて小さいことから δ_{t0} に対して無視することができる。

（c）温度荷重によるたわみ

片持梁に対するアーチの相対たわみは$(\delta_{g0})_a$を無視すれば

$$\delta_t'\fallingdotseq\delta_{t0}-\delta_{g0} \quad \cdots\cdots (5.73)$$

である。さて既述のようにアーチダムを上部，下部に分割する。片持梁がアーチ抵抗，P_1，P_2 を受けて上流に $(\delta_{t1})_c$, $(\delta_{t2})_c$ たわむものとすれば，(5.33) 式によって

$$\left.\begin{aligned}(\delta_{t1})_c&=\zeta_1\frac{P_1}{E_C}\frac{1}{K_{1c}}+\xi_1\frac{P_2}{E_C}\frac{1}{K_{2c}}\\(\delta_{t2})_c&=\zeta_2\frac{P_1}{E_C}\frac{1}{K_{1c}}+\xi_2\frac{P_2}{E_C}\frac{1}{K_{2c}}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.74)$$

アーチは片持梁より抵抗 P_1, P_2 を受けて下流に $(\delta_{t1})_a$, $(\delta_{t2})_a$ たわむものとすれば (5.49) 式によって

$$\left.\begin{aligned}(\delta_{t1})_a&=A_1\frac{P_1}{E_C}\frac{1}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\\(\delta_{t2})_a&=A_2\frac{P_2}{E_C}\frac{1}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.75)$$

しかるに片持梁に対するアーチの相対たわみ

$$\left.\begin{aligned}(\delta_t')_1&=(\delta_{t1})_c+(\delta_{t1})_a\\(\delta_t')_2&=(\delta_{t2})_c+(\delta_{t2})_a\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5.76)$$

であるから

$$\begin{aligned}(\delta_t')_1=&\left(\zeta_1\frac{1}{K_{1c}}+A_1\frac{1}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\right)\frac{P_1}{E_C}\\&+\xi_1\frac{1}{K_{2c}}\frac{P_2}{E_C}\end{aligned}$$

$$(\delta_t')_2=\zeta_2\frac{1}{K_{1c}}\frac{P_1}{E_c}+\left(\xi_2\frac{1}{K_{2c}}+A_2\frac{1}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}\right)\frac{P_2}{E_c}$$

$$\therefore\frac{P_1}{E_c}=\frac{\begin{vmatrix}(\delta_t')_1 & \xi_1\frac{1}{K_{2c}}\\ (\delta_t')_2 & \left(\xi_2\frac{1}{K_{2c}}+A_2\frac{1}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}\right)\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}\left(\zeta_1\frac{1}{K_{1c}}+A_1\frac{1}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\right) & \xi_1\frac{1}{K_{2c}}\\ \zeta_2\frac{1}{K_{1c}} & \left(\xi_2\frac{1}{K_{2c}}+A_2\frac{1}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}\right)\end{vmatrix}}$$

$$=\frac{\left((\delta_t')_1\left(\xi_2\frac{1}{K_{2c}}+A_2\frac{1}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}\right)-(\delta_t)_2\xi_1\frac{1}{K_{2c}}\right)}{\left(\left(\zeta_1\frac{1}{K_{1c}}+A_1\frac{1}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\right)\times\left(\xi_2\frac{1}{K_{2c}}+A_2\frac{1}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}\right)-\xi_1\zeta_2\frac{1}{K_{1c}K_{2c}}\right)}$$

$$\fallingdotseq\frac{(\delta_t')_1K_{1c}}{\zeta_1\left(1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\right)}\times\left\{1-\frac{\frac{(\delta_t')_2}{(\delta_t')_1}\frac{\xi_1}{\xi_2}}{1+\frac{A_2}{\xi_2}\frac{K_{2c}}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}}\right\}\quad\cdots\cdots(5.77)$$

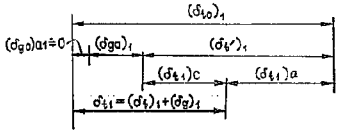


図-5.14(4)　温度荷重によるたわみ説明図

温度荷重によるアーチのたわみは

$$\left.\begin{aligned}\delta_{t1}&=(\delta_{g0})_1+(\delta_{t1})_c\\&=(\delta_{g0})_1+\{(\delta_t')_1-(\delta_{t1})_a\}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(5.78)$$

である。しかるに (5.75), (5.77) 式から

$$(\delta_{t1})_c=(\delta_t')_1-(\delta_{t1})_a$$

$$=(\delta_t')_1-\frac{(\delta_t')_1K_{1c}}{\zeta_1\left(1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\right)}\times\left\{1-\frac{\frac{\xi_1}{\xi_2}\frac{(\delta_t')_2}{(\delta_t')_1}}{1+\frac{A_2}{\xi_2}\frac{K_{2c}}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}}\right\}A_1\frac{1}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}$$

$$=(\delta_t')_1\frac{1}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}\times\left\{1+\frac{\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\frac{\xi_1}{\xi_2}\frac{(\delta_t')_2}{(\delta_t')_1}}{1+\frac{A_2}{\xi_2}\frac{K_{2c}}{K_{2a}}\frac{L_2}{H}}\right\}\quad\cdots\cdots(5.79)$$

下部抵抗が無視されるものとすれば，

$$(\delta_{t1})_c=\frac{(\delta_t')_1}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}\quad\cdots\cdots(5.80)$$

しかるに (5.73) 式から

$$(\delta_t')_1=(\delta_{t0})_1-(\delta_{g0})_1\quad\cdots\cdots(5.81)$$

であるから (5.81) 式を (5.80) に代入し，さらに (5.80) 式を (5.78) 式に代入し

$$\delta_{t1}=(\delta_{g0})_1+\frac{(\delta_{t0})_1-(\delta_{g0})_1}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}$$

$$=\frac{(\delta_{t0})_1+(\delta_{g0})_1\left(\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}\right)}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}$$

$$=\frac{(\delta_{t0})_1}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}+\frac{(\delta_{g0})_1}{-\frac{\zeta_1}{A_1}\frac{K_{1a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_1}+1}$$

$$=\frac{cdt_1y_{A1}B_1}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}+\frac{c\eta\,\overline{\Delta g}\,H^2}{1+\frac{\zeta_1}{A_1}\frac{K_{1a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_1}}\quad\cdots\cdots(5.82)$$

すなわち，温度荷重によるたわみはアーチ抵抗と片持梁抵抗の比によって影響される。

(5.82) 式の第2項の等置直線温度こう配によるたわみはアーチ抵抗が片持梁抵抗に比べて大きく無視されるものとすれば，

$$\frac{\delta_{t1}}{cdt_1y_{A1}}\fallingdotseq\frac{B_1}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}\quad\cdots\cdots(5.83)$$

この場合はアーチ抵抗に対して片持梁抵抗が大となれば温度こう配によるたわみが大きくなる。

(8)　水圧荷重，温度荷重を受けるアーチのたわみ

水圧荷重，温度荷重の重ね合わせによって，総合たわみを求め得ることを，荷重分割計算によって説明する。

アーチのたわみ式

$$\delta'=M_0{}_LC_1+H_0{}_LB_2-{}_LD_2$$

において ${}_LC_1$, ${}_LB_2$ はアーチ常数であり荷重因子とは無関係の常数である。${}_LD_2$ は水圧，温度荷重の線型結合である。また，

$$M_0=\frac{1}{K}\,(D_1B_3-D_3B_1)$$

$$H_0=\frac{1}{K}\,(-D_1B_1+D_3A_1)$$

であって K, A_1, B_1, B_3 はアーチ常数であるから水圧，温度荷重の線型結合である。

したがって δ' は水圧，温度荷重の線型結合であって重ね合わせが可能であり，(5.54) (5.84) 式より下流向きのトップアーチクラウンのたわみ

$$\delta = j\frac{wH^2}{E_C}\frac{1}{\left(\lambda_1 K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}\right)}\times\left\{1+\frac{3\left|\frac{\rho_1}{\rho_2}\right|}{\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}}\right\}-\left\{\frac{c\,dt_1 y_{A1}\,B_1}{1+\frac{A_1}{\zeta_1}\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}+\frac{c\eta\sqrt{dg}\,H^2}{1+\frac{\zeta_1}{A_1}\frac{K_{1a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_1}}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots (5.84)$$

(9) アーチおよび荷重常数の値

式 (5.84) 式における，A，B，および (5.72) 式における C の値を推定するために a_1'，b_1'，$b_{2\cdot1}'$，$b_{2\cdot2}'$……などのアーチ常数，荷重常数を求める諸式を (5.85) 式のとおりとまとめる。

$$a_1' = a_1\left(1+\frac{1}{12a_1}\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\kappa_\alpha\right)$$

$$b_1' = b_1\left(1+\frac{1}{12b_1}\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\times\left\{\mathrm{vers}\,\phi_A\cdot\kappa_\alpha+\sin\phi_A\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}\right\}\right)$$

$$b_{2\cdot1}' = b_{2\cdot1}\left(1+\frac{b_{2\cdot2}}{12b_{2\cdot1}}\left(\frac{T}{r}\right)^2+\frac{1}{12b_{2\cdot1}}\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\left\{\sin\phi_A\,\mathrm{vers}\,\phi_A\cdot\kappa_\alpha+\left(\sin^2\phi_A+\cos\phi_A\mathrm{vers}\,\phi_A\right)\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}+\sin\phi_A\cos\phi_A\left(\frac{T}{r}\right)^2(\kappa_T-\kappa_\beta)\right\}\right)$$

$$b_{3\cdot1}' = b_{3\cdot1}\left(1+\frac{b_{3\cdot2}}{12b_{3\cdot1}}\left(\frac{T}{r}\right)^2+\frac{1}{12b_{3\cdot1}}\times\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\left\{\mathrm{vers}^2\phi_A+2\sin\phi_A\,\mathrm{vers}\,\phi_A\times\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}+\cos^2\phi_A\left(\frac{T}{r}\right)^2\kappa_\beta+\sin^2\phi_A\left(\frac{T}{r}\right)^2\kappa_T\right\}\right)$$

$$c_1' = c_1\left(1+\frac{1}{12c_1}\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\times\left\{\sin\phi_A\kappa_\alpha+\cos\phi_A\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}\right\}\right)$$

$$d_1' = d_1\left(1+\frac{1}{12d_1}\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\times\left\{\mathrm{vers}\,\phi_A\kappa_\alpha+\sin\phi_A\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}\right\}\right)$$

$$d_{2\cdot1}' = d_{2\cdot1}\left(1+\frac{d_{2\cdot2}}{12d_{2\cdot1}}\left(\frac{T}{r}\right)^2+\frac{1}{12d_{2\cdot1}}\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\left\{\sin\phi_A\,\mathrm{vers}\,\phi_A\kappa_\alpha+\left(\cos\phi_A\,\mathrm{vers}\,\phi_A+\sin^2\phi_A\right)\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}+\left(\mathrm{vers}\,\phi_A\kappa_\alpha+\cos\phi_A\kappa_T\right)\sin\phi_A\left(\frac{T}{r}\right)^2\right\}\right)$$

$$d_{3\cdot1}' = d_{3\cdot1}\left(1+\frac{d_{3\cdot2}}{12d_{3\cdot1}}\left(\frac{T}{r}\right)^2+\frac{1}{12d_{3\cdot1}}\frac{E_C}{E_T}\frac{T}{r}\times\left\{\mathrm{vers}^2\phi_A\kappa_\alpha+2\sin\phi_A\,\mathrm{vers}\,\phi_A\frac{T}{r}\kappa_{\alpha\cdot2}+\sin^2\phi_A\left(\frac{T}{r}\right)^2\kappa_T-\cos\phi_A\,\mathrm{vers}\,\phi_A\left(\frac{T}{r}\right)^2\kappa_\beta\right\}\right) \quad \cdots\cdots\cdots (5.85)$$

上式の ϕ_A=45°，50°，55°，60 におけるアーチ常数，荷重常数，a_1，b_1，$b_{2\cdot1}$，……の値を表-5.2(1)に示す。し

表-5.2(1)　アーチおよび荷重常数

ϕ_A	45°	50°	55°	60°
ϕ_A(radian)	0.785,398,2	0.872,664,6	0.959,931,1	1.047,197,6
$\sin\phi_A$	0.707,106,8	0.766,044,4	0.819,152,0	0.866,025,4
$\cos\phi_A$	0.707,106,8	0.642,787,6	0.573,576,4	0.500,000,0
$\mathrm{vers}\,\phi_A$	0.292,893,2	0.357,212,4	0.426,423,6	0.500,000,0
a_1	0.785,398,2	0.872,664,6	0.959,931,1	1.047,197,6
b_1	0.078,291,38	0.106,620,2	0.140,779,0	0.181,172,1
$b_{2\cdot1}$	0.042,893,22	0.063,860,35	0.090,918,53	0.125,000,0
$b_{2\cdot2}$	0.500,000,0	0.588,624,1	0.671,010,1	0.750,000,0
$b_{3\cdot1}$	0.013,883,68	0.023,169,99	0.036,515,70	0.055,251,87
$b_{3\cdot2}$	1.070,796,3	1.252,925,4	1.450,015,9	1.661,382,4
c_1	0.292,893,2	0.357,212,4	0.426,423,6	0.500,000,0
d_1	78.291,38	106.620,2	140.779,1	181.172,2
$d_{2\cdot1}$	42.893,22	63.860,35	90.918,53	125.000,0
$d_{2\cdot2}$	792.893,2	941.036,5	1.097,434,	1250.000,0
$d_{3\cdot1}$	13.883,68	23.110,00	36.515,71	55.251,87
$d_{3\cdot2}$	353.689,5	436.680,9	630.863,8	795.357,0

たがって (5.46)，(5.47)，(5.48)，(5.67)，(5.72) 式に (5.85) 式で計算された数値を代入し，A，M_1，H_1，B，M_2，H_2，C，M_3，H_3 の値を計算することができる。(5.39) 式すなわち

$$\kappa_\alpha = k_1\cos^3\psi + k_4\sin^2\psi\cos\psi$$
$$\kappa_{\alpha\cdot2} = k_5\cos^2\psi$$
$$\kappa_\beta = k_2\cos^3\psi + k_3'\sin^2\psi\cos\psi$$
$$\kappa_T = k_3\cos\psi$$

において ψ=60°，k_1=5，k_2=k_3=2，k_4=6，k_5=0.6 とすれば，κ_α=2.4，$\kappa_{\alpha\cdot2}$=0.15，κ_β=0.9，κ_T=1 である。表-5.2(2) は E_C/E_T，T/r，ϕ_A の各値に対してアーチ，荷重常数を計算した出力データである。

表より C の値は極めて小さく，したがって温度こう配によるアーチリングのたわみは平均温度によるものに比べて極めて小さいことがわかる。荷重常数は 1,000 倍の値で計算したから 1,000A の値が計算される。また，

$$A = f\left(\phi_A, \frac{E_C}{E_T}, \frac{T}{r}, \frac{T^2}{r^2}\right)$$

であるが，T^2/r^2 なる因子はアーチスラスト，せん断力によるたわみであって，この値が大きくなるほど，両応力の効果が顕著に表われるから A は大きくなる。また，E_C/E_T なる因子は岩盤の軟度を表わし，この値が大きくなれば A は大きくなり，たわみやすくなる。中心角はアー

表-5.2.(2) 等厚円形アーチのたわみに関するアーチ常数

PHI 45.00 E_c/E_r 1.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+1.501+00	+2.131+00	+2.871+00	+3.701+00	+5.601+00	+1.901+01	+3.751+01	+6.141+01
B	+6.191+00	+6.101+00	+6.011+00	+5.921+00	+5.721+00	+4.751+00	+4.091+00	+3.681+00
C	+3.871−03	+4.601−03	+5.251−03	+5.821−03	+6.651−03	+4.111−03	−7.071−03	−2.301−02

PHI 45.00 E_c/E_r 2.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+1.491+00	+2.121+00	+2.861+00	+3.681+00	+5.591+00	+1.951+01	+4.011+01	+6.791+01
B	+6.101+00	+6.011+00	+5.911+00	+5.811+00	+5.601+00	+4.701+00	+4.131+00	+3.781+00
C	+7.161−03	+8.361−03	+9.391−03	+1.021−02	+1.131−02	+6.291−03	−1.061−02	−3.371−02

PHI 45.00 E_c/E_r 4.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+1.491+00	+2.121+00	+2.851+00	+3.691+00	+5.631+00	+2.071+01	+4.491+01	+7.911+01
B	+5.971+00	+5.871+00	+5.761+00	+5.651+00	+5.441+00	+4.651+00	+4.171+00	+3.871+00
C	+1.241−02	+1.411−02	+1.551−02	+1.651−02	+1.761−02	+8.551−03	−1.481−02	−4.621−02

PHI 45.00 E_c/E_r 10.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+1.501+00	+2.161+00	+2.941+00	+3.831+00	+5.991+00	+2.461+01	+5.831+01	+1.091+02
B	+5.731+00	+5.621+00	+5.511+00	+5.411+00	+5.231+00	+4.601+00	+4.201+00	+3.911+00
C	+2.221−02	+2.411−02	+2.551−02	+2.631−02	+2.651−02	+1.071−02	−2.211−02	−7.011−02

PHI 45.00 E_c/E_r 20.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+1.581+00	+2.311+00	+3.181+00	+4.221+00	+6.791+00	+3.141+01	+8.011+01	+1.571+02
B	+5.541+00	+5.431+00	+5.341+00	+5.251+00	+5.101+00	+4.571+00	+4.201+00	+3.861+00
C	+3.011−02	+3.171−02	+3.251−02	+3.281−02	+3.211−02	+1.151−02	−3.221−02	−1.081−01

PHI 50.00 E_c/E_r 1.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0 40
1,000A	+9.961−01	+1.421+00	+1.911+00	+2.481+00	+3.781+00	+1.331+01	+2.681+01	+4.411+01
B	+5.131+00	+5.081+00	+5.021+00	+4.961+00	+4.841+00	+4.181+00	+3.671+00	+3.331+00
C	+3.621−03	+4.351−03	+5.051−03	+5.711−03	+6.851−03	+7.971−03	+2.251−03	−7.621−03

PHI 50.00 E_c/E_r 2.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+9.921−01	+1.411+00	+1.901+00	+2.461+00	+3.771+00	+1.351+01	+2.801+01	+4.761+01
B	+5.071+00	+5.011+00	+4.941+00	+4.871+00	+4.741+00	+4.101+00	+3.661+00	+3.371+00
C	+6.751−03	+8.001−03	+9.151−03	+1.011−02	+1.181−02	+1.251−02	+3.461−03	−1.071−02

PHI 50.00 E_c/E_r 4.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+9.881−01	+1.411+00	+1.901+00	+2.461+00	+3.781+00	+1.411+01	+3.071+01	+5.421+01
B	+4.971+00	+4.891+00	+4.821+00	+4.741+00	+4.601+00	+4.011+00	+3.641+00	+3.401+00
C	+1.181−02	+1.371−02	+1.531−02	+1.671−02	+1.881−02	+1.761−02	+4.921−03	−1.371−02

PHI 50.00 E_c/E_r 10.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+9.961−01	+1.431+00	+1.941+00	+2.531+00	+3.961+00	+1.631+01	+3.881+01	+7.321+01
B	+4.771+00	+4.691+00	+4.611+00	+4.531+00	+4.401+00	+3.921+00	+3.631+00	+3.431+00
C	+2.181−02	+2.411−02	+2.601−02	+2.741−02	+2.921−02	+2.431−02	+7.651−03	−1.711−02

PHI 50.00 E_c/E_r 20.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+1.031+00	+1.511+00	+2.081+00	+2.751+00	+4.421+00	+2.041+01	+5.241+01	+1.041+02
B	+4.611+00	+4.531+00	+4.461+00	+4.391+00	+4.281+00	+3.891+00	+3.641+00	+3.441+00
C	+3.021−02	+3.241−02	+3.391−02	+3.501−02	+3.611−02	+2.961−02	+1.151−02	−2.031−02

PHI 55.00 E_c/E_r 1.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+6.851−01	+9.801−01	+1.321+00	+1.711+00	+2.641+00	+9.541+00	+1.951+01	+3.231+01
B	+4.331+00	+4.301+00	+4.261+00	+4.221+00	+4.141+00	+3.681+00	+3.291+00	+3.021+00
C	+3.381−03	+4.101−03	+4.801−03	+5.491−03	+6.761−03	+1.001−02	+8.161−03	+2.631−03

PHI 55.00 E_c/E_r 2.00 T/R	0.05	0.06	0.07	0 08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+6.821−01	+9.761−01	+1.311+00	+1.711+00	+2.621+00	+9.601+00	+2.011+01	+3.421+01
B	+4.281+00	+4.241+00	+4.201+00	+4.151+00	+4.061+00	+3.601+00	+3.251+00	+3.011+00
C	+6.351−03	+7.601−03	+8.781−03	+9.901−03	+1.181−02	+1.611−02	+1.241−02	+4.341−03

PHI 55.00	E_c/E_r 4.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+6.801−01	+9.731−01	+1.311+00	+1.701+00	+2.621+00	+9.901+00	+2.161+01	+3.821+01
B	+4.201+00	+4.151+00	+4.101+00	+4.051+00	+3.941+00	+3.501+00	+3.201+00	+3.011+00
C	+1.131−02	+1.321−02	+1.491−02	+1.651−02	+1.921−02	+2.311−02	+1.741−02	+7.091−03

PHI 55.00	E_c/E_r 10.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+6.831−01	+9.831−01	+1.331+00	+1.741+00	+2.721+00	+1.121+01	+2.661+01	+5.031+01
B	+4.051+00	+3.981+00	+3.921+00	+3.871+00	+3.761+00	+3.391+00	+3.171+00	+3.011+00
C	+2.121−02	+2.381−02	+2.601−02	+2.781−02	+3.051−02	+3.251−02	+2.571−02	+1.451−02

PHI 55.00	E_c/E_r 20.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+7.071−01	+1.021+00	+1.411+00	+1.871+00	+3.001+00	+1.371+01	+3.531+01	+7.081+01
B	+3.911+00	+3.851+00	+3.791+00	+3.741+00	+3.651+00	+3.351+00	+3.161+00	+3.031+00
C	+3.011−02	+3.261−02	+3.461−02	+3.621−02	+3.841−02	+4.011−02	+3.611−02	+2.821−02

PHI 60.00	E_c/E_r 1.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+4.861−01	+6.971−01	+9.441−01	+1.221+00	+1.891+00	+6.981+00	+1.441+01	+2.411+01
B	+3.711+00	+3.691+00	+3.671+00	+3.641+00	+3.591+00	+3.261+00	+2.971+00	+2.741+00
C	+3.181−03	+3.871−03	+4.561−03	+5.241−03	+6.551−03	+1.121−02	+1.181−02	+9.521−03

PHI 60.00	E_c/E_r 2.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+4.841−01	+6.941−01	+9.401−01	+1.221+00	+1.881+00	+6.981+00	+1.471+01	+2.521+02
B	+3.681+00	+3.651+00	+3.621+00	+3.591+00	+3.521+00	+3.181+00	+2.901+00	+2.701+01
C	+6.001−03	+7.221−03	+8.401−03	+9 541−03	+1.161−02	+1.811−02	+1.821−02	+1.451−00

PHI 60.00	E_c/E_r 4.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+4.831−01	+6.921−01	+9.361−01	+1.211+00	+1.871+00	+7.141+00	+1.561+01	+2.761+01
B	+3.621+00	+3.581+00	+3.541+00	+3.501+00	+3.421+00	+3.081+00	+2.841+00	+2.681+00
C	+1.071−02	+1.271−02	+1.451−02	+1.621−02	+1.911−02	+2.641−02	+2.551−02	+2.091−02

PHI 60.00	E_c/E_r 10.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+4.841−01	+6.971−01	+9.481−01	+1.231+00	+1.931+00	+7.971+00	+1.881+01	+3.561+01
B	+3.491+00	+3.441+00	+3.391+00	+3.351+00	+3.271+00	+2.971+00	+2.791+00	+2.661+00
C	+2.071−02	+2.341−02	+2.581−02	+2.791−02	+3.121−02	+3.761−02	+3.701−02	+3.431−02

PHI 60.00	E_c/E_r 20.00						
T/R	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40
1,000A	+4.991−01	+7.251−01	+9.981−01	+1.311+00	+2.111+00	+9.621+00	+2.461+01	+4.931+01
B	+3.371+00	+3.321+00	+3.281+00	+3.231+00	+3.161+00	+2.921+00	+2.781+00	+2.681+00
C	+2.991−02	+3.271−02	+3.501−02	+3.691−02	+3.981−02	+4.651−02	+5.051−02	+5.561−02

注　+3.041−2=3.04×10^{-2}=0.0304 である。

チの下流へのたわみに対する抵抗であるから，ϕ_4 の増大とともに A は減少する。これらの現象が表-5.2(2)より考察される。表より A の値は1/100～1/20，B の値は 3～4 をとることがわかる。

(10) 実測解析結果の次元解析的考察

(5.54)式，(5.82)式にしたがって綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムの水圧荷重，温度荷重によるたわみを検討しよう。

(a) 水圧荷重によるたわみ

表-5.3 は 4ダムの形状諸因子で E_c=200,000kg/cm^2 としている。

二瀬ダムの水圧によるたわみが鳴子ダムより小さいのは主として二瀬ダムの堤厚が大きく，片持梁抵抗 K_{1c} が大なるためである。室牧ダムは薄肉であるがその堤頂長が短かく，アーチ抵抗の値が二瀬ダムの片持梁抵抗の値より大きく，室牧ダムの水圧荷重による換算たわみ δ_0 は二瀬ダムより小さいことが表から考察される。綾北ダムは鳴子ダムに比べて厚さが薄く，片持梁抵抗 K_{1c} が小さく，しかもアーチ抵抗の値もむしろ小さいから，水圧荷重によるたわみは鳴子ダム以上に大きいはずであるが，表の換算たわみ δ_0 は逆の現象を示している。この理由としては，綾北ダムの全高に対する計測長が短かいため，ベースに対する全高のたわみに換算する換算係数を小さく評価したためか，綾北ダムのコンクリートの品質管理が良好で E_c が他のダムより大きいことが考えられる。

図-5.15 は 4ダムの換算たわみ δ_0 と形状因子である(5.54)' 式の右辺の全抵抗の逆数 W との関係をプロットしたものであるが，綾北ダムの点が直線よりはずれている。綾北ダムの○印は E_c=400,000 kg/cm^2 とした値である。

表-5.3 アーチダムの水圧 温度荷重によるたわみに影響を及ぼす諸因子

		綾北	室牧	二瀬	鳴子
形状	堤高 H(m)	73	76	90	85
	上部アーチ半径 r_1(m)	81	53	117	96
	上部アーチ中心角の 1/2 ϕ_{A1}(度)	53	51	58	55
	上部アーチ堤長 L_1(m)	150	95	237	185
	上部アーチ平均厚さ T_{1a}(m)	5.4	6.0	9.0	7.4
	片持梁平均厚さ T_{1c}(m)	9.6	7.5	25.0	16.0
	下部アーチ半径 r_2(m)	40	29	85	78
	下部アーチ中心角 ϕ_{A2}(度)	55	59	44	44
	下部アーチ堤長 L_2(m)	77	60	130	120
	下部アーチ平均厚さ $T_{2a}=T_{2c}$	10.6	7.5	30.0	19.0
因子	$K_{1c}=\left(\frac{T_{1c}}{H}\right)^3$	2.35×10^{-3}	0.959×10^{-3}	21.5×10^{-3}	6.64×10^{-3}
	$K_{2c}=\left(\frac{T_{2c}}{H}\right)^3$	3.05×10^{-3}	0.959×10^{-3}	37.26×10^{-3}	11.24×10^{-3}
	$K_{1a}=\frac{H}{L_1}=\left(\frac{T_{1a}}{L_1}\right)^3\frac{H}{L_1}$	0.0227×10^{-3}	0.202×10^{-3}	0.0208×10^{-3}	0.0317×10^{-3}
	$K_{2a}=\frac{H}{L_2}=\left(\frac{T_{2a}}{L_2}\right)^3\frac{H}{L_2}$	2.49×10^{-3}	2.48×10^{-3}	8.53×10^{-3}	2.79×10^{-3}
	K_{2c}/K_{1c}	1.30	1	1.73	1.69
	$(K_{2a}/K_{1c})(H/L_2)$	1.06	2.59	0.397	0.420
	T_{1a}/r_1	0.0667	0.113	0.0770	0.0771
	T_{2a}/r_2	0.265	0.259	0.352	0.243
岩盤常数	$\tau_1=H/T_{1c}(T_{1c}/T_c)^2$	13.9	10.13	9.20	16.3
	$\tau_2=H/T_{2c}(T_{1c}/T_c)^2$	10.3	10.1	5.36	9.70
	$-3\frac{\rho_1}{\rho_2}=0.411\times\frac{1+0.811(E_c/E_{r1})/\tau_2}{1+0.333(E_c/E_{r1})/\tau_1}$	0.591	0.560	0.755	0.629
	$\zeta_1=2\left(1+0.333k_1\frac{E_c}{E_{r1}}/\tau_1\right)$	2.48	2.66	2.72	2.41
	$\lambda_1=1/0.7\left(1+0.444k_1\frac{E_c}{E_{r1}}/\tau_1\right)$	1.08	0.995	0.962	1.12
	$\frac{1}{\rho_2}=0.05\left(1+0.686k_1\frac{E_c}{E_{r1}}/\tau_2\right)$	0.0832	0.0840	0.114	0.0854
アーチおよび片持梁抵抗	A_1	1.4/1,000	4.0/1,000	1.3/1,000	1.6/1,000
	$1/A_1$	715	250	770	625
	λ_1K_{1c}	2.54×10^{-3}	0.954×10^{-3}	20.68×10^{-3}	7.44×10^{-3}
	$\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}$	1.64×10^{-3}	50.5×10^{-3}	16.0×10^{-3}	19.8×10^{-3}
	$G_1=\lambda_1K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}$	18.9×10^{-3}	51.45×10^{-3}	36.2×10^{-3}	27.2×10^{-3}
	$U_1=1/G_1$	53.0	19.5	27.6	36.8
	A_2	15/1,000	10/1,000	50/1,000	30/1,000
	$1/A_2\rho_2$	5.55	8.44	2.28	2.82
	$\frac{1}{A_2\rho_2}\cdot\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}$	5.89	21.8	0.905	1.19
	$G_2=\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}$	7.19	22.8	2.635	2.88
	$U_2=1+\left(\left(3\left\lvert\frac{\rho_1}{\rho_2}\right\rvert\right)\Big/\left(\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}\right)\right)$	1.087	1.025	1.288	1.218
	$W=U_1U_2$	57.6	20.0	35.6	44.8

表-5.3　のつづき

		綾北	室牧	二瀬	鳴子
水圧荷重によるたわみ	水圧荷重によるたわみ δ_1(m)	0.0135	0.0053	0.013	0.0230
	換算たわみ $\delta_0=E_c\delta_1/wH^2$	2.53	0.916	1.61	3.18
	水圧荷重たわみの回帰係数 b_h(1/m)	0.00326×10^{-3}	0.00092×10^{-3}	0.00172×10^{-3}	0.00465×10^{-3}
	E_c(kg/cm²)	200.000	200.000	200.000	200,000
	b_hE_c/w	6.52	1.84	3.44	9.30
堤体平均温度によるたわみ	$\eta_c=K_{1c}/K_{1a}\ H/L_1$	104	4.75	1034	209
	$\eta_a=K_{1a}\ H/L_1/K_{1c}$	0.961×10^{-2}	21.1×10^{-2}	0.0965×10^{-2}	0.478×10^{-2}
	$G_{tc}=1+\frac{A_1}{\zeta_1}\eta_c$	1.293	1.018	4.39	1.782
	$G_{ta}=+\frac{\zeta_1}{A_1}\eta_a$	4.41	57.13	1.327	2.28
	B_1	4.5	4.5	3.6	4.0
	$y_{A1}=r_1\,\mathrm{vers}\,\phi_{A1}$(mm)	32.2×10^3	19.6×10^3	55.0×10^3	40.9×10^3
	Δt_1(°C)	21	19	13	14
	$(\delta_{t0})_1=c\,\Delta t_1\,y_{A1}\,B_1$(mm)	37.18	16.74	25.74	22.92
	$(\delta_t)_1=(\delta_{t0})_1/G_{tc}$(mm)	28.8	16.4	6.37	12.9
等温度直線温度によるたわみ	η	0.5	0.5	0.15	0.2
	$\overline{\Delta g}$(°C/m)	1.0	1.2	1.7	1.1
	$(\delta_{g0})_1=c\,\eta\overline{\Delta g}\,H^2$(mm)	30	34.7	13.8	15.9
	$(\delta_g)_1=(\delta_{g0})^1/G_{ta}$(mm)	6.8	0.64	15.6	6.9
温度荷重によるたわみ	$\delta_{t1}=(\delta_t)_1+(\delta_g)_1$(mm)	35.6	17.0	21.4	19.8
	実測解析による δ_{t1}(mm)	36	16	23	23

注) 1. r_1 は堤頂面より全高の1/4点におけるアーチ半径
2. r_2 は堤頂面より全高の3/4点におけるアーチ半径
3. ϕ_{A1} は堤頂面より全高の1/4点におけるアーチ中心角の1/2
4. ϕ_{A2} は堤頂面より全高の3/4点におけるアーチ中心角の1/2
5. $L_1=2r_1\phi_{A1}$, $L_2=2r_2\phi_{A2}$
6. T_{1a} は堤頂面より全高の1/2点までのクラウンの平均厚さ
7. T_{1c} はクラウン全高の平均堤厚さ
8. $T_{2a}(=T_{1c})$ は，ベースより全高の1/2点までのクラウンの平均厚さ
9. Δt_1 は，堤頂面より全高の1/4点における堤体平均温度の振幅

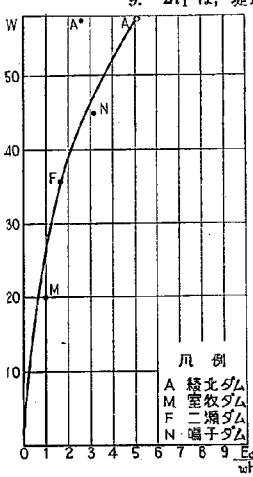


図-5.15　水圧による換算たわみ δ_0 と形状因子 Wとの関係

表-5.3よりまた下部抵抗のトップ・アーチクラウンに及ぼす影響は薄肉ダムでは，ほとんど無視されることがわかる。

水圧荷重によるたわみの回帰係数と形状因子の関係を明らかにして，任意の水位のたわみを求める式を誘導しよう。水圧荷重によるたわみ δ_h は綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムに対して次式のとおり表わされた。すなわち

綾北ダム　$\delta_h=0.00326\ (h-225)^2$

室牧ダム　$\delta_h=0.00092\ (h-185)^2$

二瀬ダム　$\delta_h=0.00172\ (h-455)^2$

鳴子ダム　$\delta_h=0.00465\ (h-175)^2$

δ_h の回帰係数を b_h とするとき水位の変動の小さい範囲では

$$b_h\propto\frac{w}{E_c}\cdot\frac{1}{\lambda_1K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}}\times\left\{1+\frac{3\left|\frac{\rho_1}{\rho_2}\right|}{\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}}\right\}$$

$$\propto(w/E_c)W$$

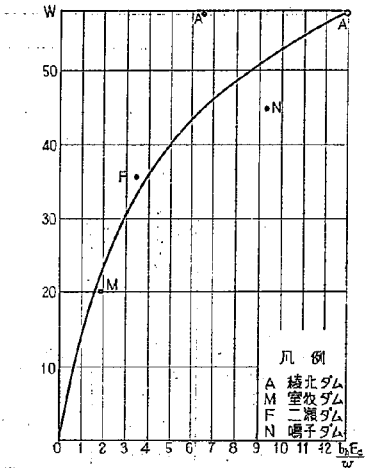


図-5.16　水圧による換算たわみ δ_0 と形状因子 W との関係

ただし

$$W=\frac{1}{\lambda_1 K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}}\times\left\{1+\frac{3\left|\frac{\rho_1}{\rho_2}\right|}{\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}}\right\}$$

の関係が成立するものとして $b_h E_c/w$ と W の関係を図-5.16 にプロットする。この場合も綾北ダムの点は E_c=200,000 kg/cm² とすると多少ずれてくる。図の直線は

$$W=18+3.5\frac{b_h E_c}{w}$$

として表わされるから

$$\delta_h=\frac{1}{3.5}(W-17)\frac{w}{E_c}(h-h_0)^2$$

あるいは E_c を kg/cm², h を m, δ_h を mm とするとき次式

$$\delta_h=43.6\frac{(W-17)}{E_c}(h-h_0)^2$$

$$=43.6\frac{1}{E_c}\left(\frac{1}{\lambda_1 K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}}\times\left\{1+\frac{3\left|\frac{\rho_1}{\rho_2}\right|}{\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{1}{A_2\rho_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}}\right\}-17\right)\times(h-h_0)^2 \quad \cdots\cdots (5.86.(1))$$

によって水圧によるたわみを近似することができる。

$\lambda_1\fallingdotseq 1.0$,　$3\left|\frac{\rho_1}{\rho_2}\right|\fallingdotseq 0.62$,　$\frac{1}{\rho_2}=0.10$

とすれば

$$\delta_h\fallingdotseq 43.6\frac{1}{E_c}\left(\frac{1}{K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}}\times\left\{1+\frac{0.62}{\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{10}{A_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}}\right\}-17\right)\times(h-h_0)^2 \quad \cdots\cdots (5.86(2))$$

となる。鳴子ダムのたわみが水深の2乗式で表示することが困難のために，$W\geqslant 26$の条件がはいるものと思われる。

（b）温度荷重によるたわみ

(5.82)式における温度荷重によるたわみに影響を及ぼす諸因子を表-5.3に示す。η_c はカンティレバーアーチ配分係数とも言うべきものであって，平均温度上昇によるアーチリングの伸びに対するカンティレバー抵抗 G_{tc} は η_c に比例して増大する。アーチ・カンティレバー配分係数 η_a，カンティレバーのたわみに対するアーチ抵抗 G_{ta} についても同様のことが言える。

表によれば鳴子，二瀬ダムの頂部より全高の1/4の点における平均温度の変化量が厚肉のために他の薄肉ダムに比べて小さく，また抵抗 G_{tc} が大きいために，厚肉ダムの平均温度によるたわみは薄肉ダムに比べて小さい値をとることがわかる。逆に二瀬ダムの温度こう配によるたわみはそのアーチ抵抗が特に小さいために提体平均温度によるたわみよりむしろ大きい値をとる。薄肉である室牧ダムでは逆に温度荷重によるたわみは極めて小さい。(5.82)式にしたがって計算された温度荷重によるたわみは，実測解析の結果得られた温度荷重によるたわみとかなり近似した値をとることが表から考察される。なお表の $\overline{\Delta g}$，η は (5.62) 式に定義されるものでその数値はアーチクラウンにおける等置直線温度こう配の変化量の分布図から推定されるものである。

（c）水圧荷重，温度荷重によるたわみ

任意の水位，提体温度によるトップアーチクラウンのベースに対する相対たわみは (5.82)，(5.86) 式から次式のとおり推定される。すなわち

$$\delta=43.6\frac{1}{E_c}\left(\frac{1}{K_{1c}+\frac{1}{A_1}K_{1a}\frac{H}{L_1}}\times\left\{1+\frac{0.62}{\frac{K_{2c}}{K_{1c}}+\frac{10}{A_2}\frac{K_{2a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_2}}\right\}-17\right)\times(h-h_0)^2-C\left\{\frac{\Delta t_1\gamma_{A,1}B_1}{1+0.4A_1\frac{K_{1c}}{K_{1a}}\frac{L_1}{H}}+\frac{\eta\overline{\Delta g}H^2}{1+\frac{2.5}{A_1}\frac{K_{1a}}{K_{1c}}\frac{H}{L_1}}\right\}$$

〔5〕 荷重分割計算，模型実験との比較

(1) 鳴子ダムの荷重分割計算

鳴子ダムの種種の水位，温度条件下におけるたわみをクラウンカンティレバー法によって求めて実測解析結果との比較を試みた。水位の条件は El. 175 よりの水深にて与え，水深 75.0 m，67.3 m，51.3 m，35.3 m，の4組の値に対して計算した。温度条件としては平均温度，等値直線温度こう配計算より求めた堤体平均温度からクラウンにおける温度分布を想定して各標高の平均温度を求め，これよりたん水を開始した32年4月5日の温度に対する温度差を計算して表-5.4のとおり与えた。

表-5.4　鳴子ダムの荷重分割計算設計条件(温度条件)

	33.8/24	33.7/27	33.6/11	33.2/27
El. 178.3m	2 °C	1.5°C	1.3°C	0 °C
194.3	2.6	1.7	1.5	0
210.3	3.5	2.8	2.0	−0.1
226.3	6.3	4.7	2.5	−0.5
242.3	14.1	11.4	6.5	−2.2
250.0	18.0	14.5	10.0	−3.0

なお，コンクリートの比重は2.3，ポアソン比 0.2，膨脹係数10×10^{-6}，岩盤のヤング率は El. 250～El. 242.3 まで 2.0×10^5 ton/m²，El. 226.3～El. 178.3 まで 10×10^5 ton/m² とし滞砂圧は零とした。

図-5.17，図-5.18は上記水圧，温度荷重に対する計算たわみをプロットしたものである。図-5.17における鎖線は水深67.3 m，75 m における実測解析より得られたたわみ曲線であり，El. 260 および El. 215における挙動方程式 (5.14)，(5.15) によって各水深における水圧荷重によるたわみ δ_h を計算して求めたものである。実測解析より求めたたわみ曲線は荷重計算のそれよりやや小さい値をとることがわかる。

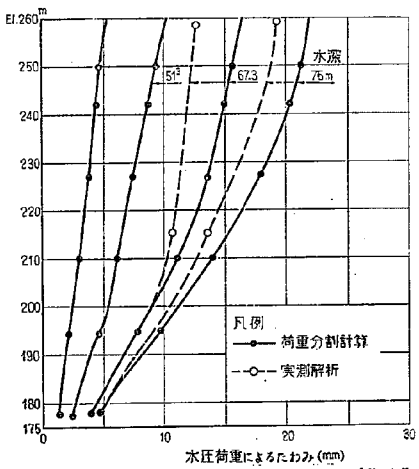


図-5.17　鳴子ダムの水圧荷重によるたわみ（荷重分割計算比較図）

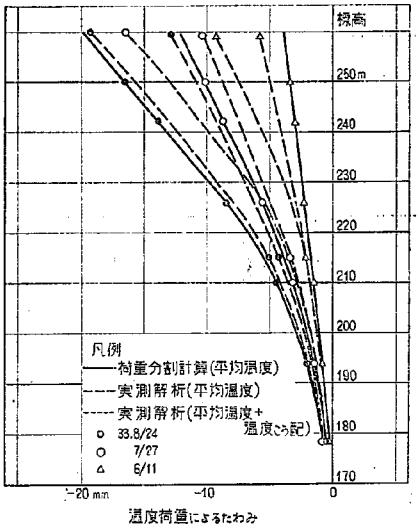


図-5.18　鳴子ダムの温度荷重によるたわみ（荷重分割計算比較図）

同様に図-5.18には実測解析より得られた温度荷重によるたわみ曲線が33年8月24日，33年7月27日，33年6月11日の各時点に対して画かれているが，実測解析より求めたたわみ曲線は荷重分割計算のそれに比べて，絶対値において温度の高いとき小さい値を，温度の低いとき（6月11日）はやや大きい値となる。

図-5.19は鳴子ダムにおいて水位 El. 242.6 および1958

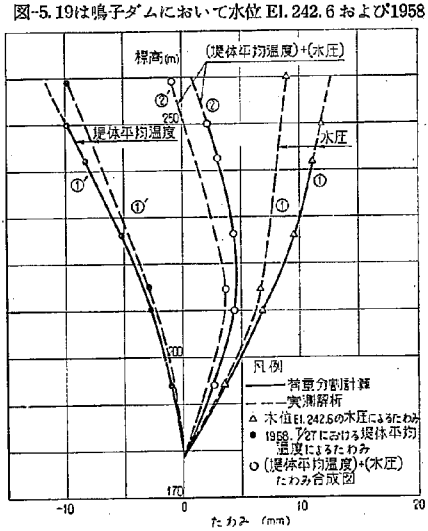


図-5.19　鳴子ダムの水圧および堤体平均温度によるたわみおよびその合成図（荷重分割計算比較図）

表-5.5　水圧によるたわみの実測解析結果，設計値比較表

ダム名	綾北[12]	室牧[8]	二瀬	鳴子
水位	El. 295	El. 260	El. 545	El. 255
たわみ計測区間	El. 248～El. 298	El. 185～El. 261	El. 460～El. 545	El. 180～El. 260
実測解析結果	6.7mm	5.1mm	14mm	20mm
設計値（模型実験）	11.5mm	13.4mm	17mm	——
設計値（荷重分割計算）	12mm	10mm	——	23mm

年7月27日における堤体平均温度条件を与えて各要因によるたわみ曲線を荷重分割計算，実測解析結果に対して画いたもので全般に実測解析結果が絶対値において小さい値を与える。なお各種の水位，温度条件に対して両者の比較を行なったが，水圧によるたわみは常に実測解析結果が上流側にあり，温度荷重によるたわみも若干の相違があるが，いずれの場合も傾向として類似した曲線をとることを知った。

（2）水圧荷重によるたわみの設計値との比較

水圧によるたわみの設計値と実測解析結果を比較すれば表-5.5 のとおりである。綾北は (5.7)′ 式，室牧は (5.23) 式，二瀬は (5.13)′ 式，鳴子は (5.14)′ 式による挙動式を用いた。表より設計値が実測解析結果に比べて全般に大きいことがわかる。

〔6〕 精密三角測量との比較検討

（1）鳴子ダム

測点は堤体下流面に28カ所，右取付岩盤に10カ所配置され三角精密測量によりこれらの水平位置および鉛直変位を測定している。既述のプラムラインによるたわみはベースに対する相対たわみであるので，精密三角測量によって絶対たわみを測定して検討する必要がある。

三角網は下流水圧領域外の8カ所の基準点をもって構成し，この基準点より38カ所の測点を観測する。測量には相当の労力と日数を要し，したがって同時観測は不可能で測定回数の制限を受ける。鳴子ダム工事事務所においては昭和31年11月より昭和37年5月にわたり観測精度1mmを目途に6回の観測を行なっている。

第1回（昭和31年11月26日～12月10日）
第2回（昭和32年3月16日～29日）
　継目グラウトが完了した時期
第3回（昭和32年10月25日～11月9日）
　平均貯水位　246.4m
第4回（昭和35年10月13日～27日）
　平均貯水位　242.27m
第5回（昭和36年5月11日～17日）

クラウンにおけるたわみは，たん水を開始した32年4月5日における計測資料がないためその日に近い32年3月16日より29日にわたる第2回三角測量の時点を基準にとり，その半径方向の動きを調べ図-5.20 を得た。実線は三角測量，鎖線はプラムラインによるたわみ曲線を示す。

絶対三角測量は計測期間が1週間ないし2週間にわたり，この間において水位，温度は刻刻に変動するので，その中間時点におけるプラムラインのたわみの値をプロットした。また三角測量のたわみは32年3月16日より29日までの値を基準にとるもので，たん水開始の時点と若干のズレがあるが，この間は温度応力にもとづく変動を受ける時期であって，たん水開始からの実測解析結果とは頂部において2mm，El. 215 において 0.8mm のズレがあるものと思われるが，このズレは無視して検討を進める。

1）両たわみ曲線は横軸方向に平行移動することによって重ね合わせることができるものとして画かれた推定曲線である。三角測量の El. 190 以下の曲線はかくして求めたたわみ曲線の外挿曲線であるが，明らかにクラウンの基礎における下流方向の絶対変位を示している。重ね合わせの可能なことはまた観測精度の良好なことを示すものである。

2）図-5.20 のたわみ曲線は中間標高において最大た

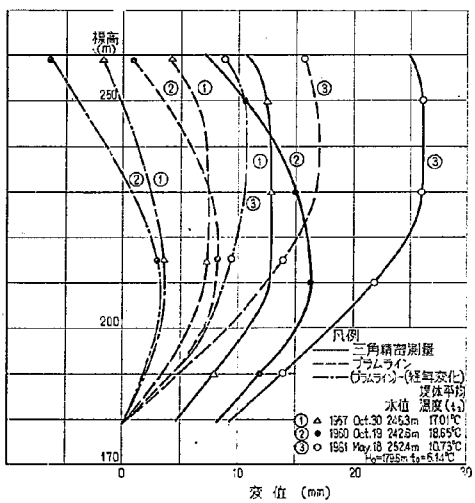


図-5.20　鳴子ダムたわみ曲線
—精密三角測量，実測解析比較図—

わみをもつ湾曲線であるが，これは図-5.19 にみられるように，水圧によるたわみ曲線が下に凸であるが，温度荷重によるたわみ曲線が上に凸で，両曲線を合成したためである。

3) 図-5.20 のたわみ曲線の①，②を比較すると，②の曲線は①の曲線に対して水位は低く，温度が高いにもかかわらず実際観測された値は標高 230～240 付近で逆転している。しかしプラムラインによる実測値に対して解析によって得た経年変化をさしひいた値は，①，②，③の一点鎖線として示したものとなり，これについて①，②を比較してみると予想どおり①は②より各標高において下流側にあることを示している。すなわち実測の逆転現象は経年変化のため生じたものと考えることができる。このことはまたベースに対するクラウンの相対的経年変化の存在を裏付けるものである。さらに基礎岩盤における②の変位が①より大きいのは基礎に対する相対クリープばかりでなく，ベースそのもに経年変化のあるこ

表-5.6　鳴子ダムの半径方向の岩盤のたわみ

		(3)	(4)	(5)	(6)
		m	m	m	m
R 1	El. 255	+0.006	+0.008	+0.011	+0.008
2		(第3回基準)	−0.003	+0.006	+0.002
3	228	+0.011	+0.015	+0.017	+0.015
4	213	0	+0.003	+0.005	+0.004
5	196	(第3回基準)	+0.004	+0.004	+0.003
L 1		0	+0.002	+0.001	+0.001
2	El. 251	0	−0.002	+0.002	0
3	232	0	−0.002	+0.002	0
4	211	0	+0.002	+0.002	0
5	192	0		+0.001	+0.001

とを示す。表-5.6 は岩盤の半径方向の動きを示すが，El. 228 の $R3$ において最大 17mm の岩盤変形が観察されている。

(2) 綾北ダム

堤体には変位観測用の測点が29個とりつけられ，精密三角測量によってこの水平位置および鉛直変位が測定されている。三角網は下流の水圧領域の外の7カ所の基準点をもって構成し，この基準点よりウィルド T_3 経緯儀をもって測点を観測する。すなわち

第1回（昭和35年1月26日～2月9日）
第2回（昭和35年7月6日～7月20日）
第3回（昭和36年1月10日～1月24日）

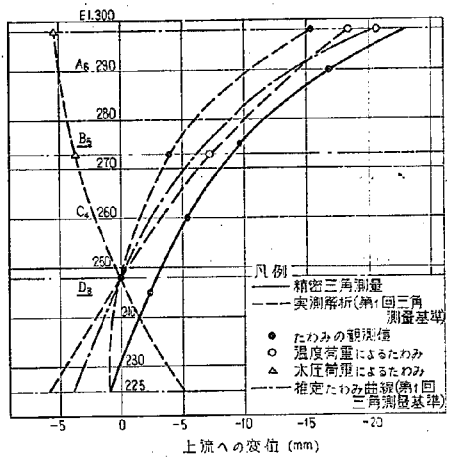


図-5.21　綾北ダムたわみ曲線
—精密三角測量実測解析比較図—

第4回（昭和37年1月17日～1月31日）
第5回（昭和38年1月22日～2月10日）

図-5.21 は綾北ダムの第1回を基準とする第2回精密三角測量によるクラウンの変位を実測解析結果と比較したものである。実線は精密三角測量，鎖線はたん水開始よりのプラムラインによるたわみの観測値，および水圧荷重，温度荷重の持分を画いたものである，El. 248 以下は外挿による推定値である。

両観測値を比較するためには第1回三角測量の時点よりのプラムラインのたわみを推定しなければならない。このプラムラインの換算たわみは El. 248 に対する相対たわみであるから，平行移動によって三角測量の絶対たわみ曲線と重ね合わせることができるものと考えれば図の1点鎖線が第1回三角測量の時点よりの El. 248 に対する相対たわみと推定され，1点鎖線とたん水開始の時点を基準とするたわみとの差は，第1回三角測量の時点よりたん水開始までの温度荷重によるたわみを表わすものと考えられる。ベース El. 225 では当然下流にたわまなければならない。しかし図の El. 248 以下への外挿の結果は，この値が極めて小さいことを示している。

表-5.7　綾北ダムのクラウンの半径方向たわみ（精密三角測量）

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	35.1/26～2/9	35.7/6～7/20	36.1/17～1/31	37.1/17～1/31	38.1/22～2/10
A_6 El. 290	0	−16.8mm	3.4mm	3.9mm	8.0mm
B_5 El. 275	0	− 9.1	1.6	2.6	5.8
C_4 El. 260	0	− 5.5	2.5	2.6	5.8
D_3 El. 245	0	− 2.4	1.2	3.5	4.5
水位	0	291.05m	277.56m	277.56m	277.37m
堤体平均温度 t_3	——	25°C	5.2°C	6°C	5°C

3，4，5回の半径方向のたわみは水位，堤体平均温度 t_3 とともに表-5.7 に示すが，この観測精度は 0.5 m/m程度であり，たわみ量に対して大きい値をとることから，第2回観測のように好ましい結果は考察されない。しかし表より水位，堤体温度条件がほとんど変わらないのに，半径方向たわみが進行していくことは基礎岩盤の経年変化の存在を示唆するものである。特に第5回観測における下流向きの経年変化は顕著であって，この事実は図-5.2(3) の実測解析結果においてもみられる。綾北ダムは今後ともプラムライン観測を続行し経年変化の動きを追ってみる必要がある。

〔7〕 む す び

第5章において考察された諸事項を次のとおりとりまとめる。

（1） 実測されたクラウンにおけるたわみについて多変量解析により他の因子の効果を除去した後も有意となった因子による構造式をたてたが，堤体平均温度については基礎より 4/5～2/3 の高さにおける条件によってトップアーチクラウンのたわみを説明できる場合が多い。

（2） 水圧荷重によるたわみは水深の1乗，2乗，3乗4乗を因子として与えるべきものであるが，たん水初期の経年変化との分離が困難である場合は水深の2乗，または4乗の項のみを与えて多変量解析を行なった。しかし鳴子ダムのようにたわみの変化が大きい場合は水深の2乗のみで水圧によるたわみを表わすのに無理があり，むしろ水深の4乗式が適当であると思われた。

（3） 経年変化はたん水前100日を起点にとる時間 θ，経年変化が顕著と思われる時間 θ_i に対して

$\Sigma k_i \log\left(\frac{1+\theta}{1+\theta_i}\right)$ として与え解析したが，かなり良好な結果が得られた。

二瀬ダム，綾北ダムではトップアーチクラウンにおいてたん水初期に上流向きの相対経年変化を検出した。これは数カ月の後に下流向きに転じ回復に向かうものである。その上流への経年変化は中間水位の期間が比較的長かったために，下部岩盤の変位が上部岩盤のそれに比べて相対的に大きかったために生じたものと推定される。

鳴子，室牧ダムではたん水後下流向きの経年変化が認められたが，1年の中にその増大は停止した。これは岩盤に介在するクラック，破砕帯などの存在による岩盤の流動変化に帰因するものと思われる。

鳴子ダム，綾北ダムではその後それぞれ昭和35年10月，昭和38年1月以降に再び上流ないし下流向きの経年変化が生じている。このことは経年変化は絶対的に安定するものでないこと，それゆえにまた経年変化の動きがダムの安全管理の1つの指標になることを示唆するものである。

（4） 水圧荷重による単位高さあたりのトップアーチクラウンの換算たわみ δ_0 は片持梁抵抗 K_{1c}，アーチ抵抗 $K_{1a}(H/L_1)$ の和として表わされる全抵抗に逆比例する。たとえば室牧ダムは薄肉アーチダムであるが，そのアーチ抵抗 $K_{1a}(H/L_1)$ の値が大きいために厚肉ダムである二瀬ダムの換算たわみ δ_0 と大差はない。鳴子ダムのたわみが二瀬ダムより大きいのは片持梁抵抗の差に帰因している。綾北ダムの実測解析によるたわみは次元解析による推定値よりはるかに小さい値を与えた。この理由としてはベースに対する相対たわみに換算する換算係数または綾北ダムのコンクリート弾性係数を過少に評価したためと考えられる。

（5） 堤体平均温度と等置直線温度こう配の間には特に下部標高において顕著な相関があるため，各因子の持分に完全に分離することができない。この場合には主成分分析によって相関の構造を明らかにする必要があるように思われる。

（6） 次元解析的考察によれば堤体平均温度によるトップアーチクラウンのたわみは，堤頂長と堤頂面より1/4点における温度の変化量に比例し，カンティレバーアーチ配分係数 η_c に逆比例する。等置直線温度こう配によるたわみはクラウンにおける等置直線温度こう配分布の平均値 $\overline{dg}$，その重心までの距離の堤高に対する比 η，堤高の2乗に比例しアーチカンティレバー配分係数 η_a に逆比例する。

薄肉の綾北，室牧ダムの堤体平均温度によるたわみは，厚肉の二瀬ダムより堤厚が薄いために温度変化量が大きく，また η_c が小さいために大きい値をとる。二瀬ダムの平均温度によるたわみは特に小さい値をとった。

等置直線温度こう配によるたわみは薄肉の室牧ダムでは η_a が大きいために堤体平均温度に比べてほとんど無視されるが，厚肉の二瀬ダムでは η_a の値が小さいために，堤体平均温度によるたわみより大きい値をとる。

（7） 任意の水位，温度条件を与え，任意の形状諸元をもつアーチのトップアーチクラウンのたわみを推定する式を誘導した。4ダム以外のダムに適用し，さらに検討を進めることが望ましい。

（8） 水圧によるたわみについて実測解析結果と設計値とを比較したが，前者がやや小さい値をとることを知った。

（9） 各種の水位，温度条件を与えて鳴子ダムに対して荷重分割計算と実測解析を比較したが，水圧によるたわみは常に実測解析が小さい値を与えた。温度によるたわみについても若干の相違があるが，傾向として類似した曲線をとることを知った。

(10) 鳴子ダム，綾北ダムにおいて精密三角測量成果と比較することによって，プラムラインの計測の正確性と実測解析における相対的経年変化を確認した。また，基礎岩盤の経年変化も推察されたが，このことは鳴子ダ

ムではたん水初期の，綾北ダムでは38年1月における実測解析結果より得られた経年変化の存在を裏づけるものである。

また鳴子ダムのたわみ曲線が中間標高において最大となる湾曲線を画くのは，水圧によるたわみと温度によるたわみがおのおの方向反対で下に凸，上に凸なる曲線となりこれを合成した結果であることがわかった。

(11) 堤体温度条件は気温との相関が大であって太陽輻射を直線的に表わす気温と水位によってたわみを与える挙動式の誘導を試みた。

(12) 4ダムの中室牧ダムのみが視準測量によるたわみ観測であり，観測精度，回数に制限を受け，また基礎岩盤の変位を含めた挙動を観測するためか，その挙動式の残差の不偏分散の平方根は他のダムに比べて特に大きかった。資料を追加して解析した結果，水圧によるたわみが小さくなったのもこのことに帰因するものと思われ，今後の解析の継続を期待したい。

6. 安 全 管 理

アーチダムの実測解析の主要目的の1つがダムの安全管理にあることは既に述べたとおりで，昭和34年のフランスのマルパセアーチダムの崩壊，イタリーのバイオントダムの周辺山腹の地すべりによる洪水にみられるように，ダムおよび貯水池の事故による被害は計り知れない。特にそれが人命の安全に関するだけに堤体または基礎岩盤に埋設された諸計器によって災害を未然に予知するダムの保守，管理組織，方法の確立は緊急を要する問題であり，本章ではアーチダムのたわみの挙動解析から得られた諸経験から安全管理の1方法を提案しようとするものである。

アーチダムは不静定重複構造であるために，本体の一部にクラックが生じたとしてもそれが必ずしも致命的破壊にまでいたらない。この見地から堤体内部に埋設された一部のひずみ計の引張応力が進行することはもちろん警戒を要するが，同時にまたプラムラインまたは視準測量による堤体の総合的たわみの挙動による危険度の予測は，もっとも簡便，正確な方法である。ここで前章に誘導した4ダムのたわみの挙動式をとりまとめて下記に示す。

(1) 綾 北 ダ ム

(昭和32年4月より $\hat{\delta}_{298}$ に対して38年3月，$\hat{\delta}_{273}$ に対して37年1月まで)

$$\hat{\delta}_{298}=44.942+0.637\ (t_1-11.34)$$
$$-1.307\ (t_3-11.63)-3.421\ (\alpha_2-0.0292)$$
$$-1.744\ (\alpha_3+0.0339)+0.00181(h-225)^2$$
$$-25.520\log(1+\theta)+47.895\log\left(\frac{1+\theta}{161}\right)$$
$$-21.495\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right)+70.306\log\left(\frac{1+\theta}{1066}\right) \quad \cdots\cdots (5.8)$$

$$\hat{\delta}_{273}=7.542-0.3056(t_2-11.03)$$
$$-0.1796(t_3-11.63)$$
$$-1.793(\alpha_1+0.0769)$$
$$+0.000000152(h-221)^4-5.593\log(1+\theta)$$
$$+18.339\log\left(\frac{1+\theta}{161}\right)-12.518\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right) \quad \cdots\cdots (5.9)$$

(2) 室 牧 ダ ム

(昭和36年3月より38年6月まで)

$$\hat{\delta}=-12.76-0.5706(t_3-5.23)$$
$$-3.145(\alpha_2+0.518)+0.00115(h-185)^2$$
$$+6.037\log(1+\theta)$$
$$-9.980\log\left(\frac{1+\theta}{401}\right) \quad \cdots\cdots (5.11)$$

(3) 二 瀬 ダ ム

(昭和35年11月より37年5月まで)

$$\hat{\delta}=224.78-1.53(t_3-14.5)$$
$$-11.22(\alpha_3+0.2343)+0.00172(h-455)^2$$
$$-80.38\log(1+\theta)+43.37\log\left(\frac{1+\theta}{131}\right)$$
$$+51.20\log\left(\frac{1+\theta}{201}\right) \quad \cdots\cdots (5.13)$$

(4) 鳴 子 ダ ム

(昭和32年4月より36年12月まで)

$$\hat{\delta}_{260}=-25.196-0.8529(t_3-6.144)$$
$$-11.194(\alpha_1-0.1267)$$
$$-1.148(\alpha_3-0.0562)$$
$$+0.7516(h-179.6)-0.0265(h-179.6)^2$$
$$+0.000267(h-179.6)^3$$
$$+12.569\log(1+\theta)$$
$$-12.857\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)-31.371\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right) \quad \cdots\cdots (5.14)$$

ただし　$h>225$ m

$$\hat{\delta}_{215}=-15.597-0.2514(t_3-6.144)$$
$$-4.147(\alpha_1-0.1267)+1.579(\alpha_2-0.107)$$
$$+0.4624(\alpha_3-0.0562)-0.05567(h-179.6)$$
$$+0.002577(h-179.6)^2+7.764\log(1+\theta)$$
$$-6.338\log\left(\frac{1+\theta}{366}\right)-14.216\log\left(\frac{1+\theta}{1461}\right) \quad \cdots\cdots (5.15)$$

ただし　$h>215$ m

時間 θ はたん水前100日を原点にとっている。室牧ダムを除いていずれの残差の不偏分散の平方根も小さく，綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムのトップアーチクラウンに対しておのおの 0.964 mm, 1.94 mm, 1.06 mm, 1.10 mmである。

水深，温度に関する項は安定した堤体の弾性変形を示し，経年変化は基礎岩盤の塑性変形その他の非定常的挙

動を示すものであり，もし一方的に増大する経年変化が存在すればそのダムは危険と言えよう。あるいはある時点までの挙動式の回帰係数をその時点以降に適用した場合のたわみの計算値と観測値を比較して，その残差が一方側に増大していくときは新たな時点における log 項を挿入し，しかもそれがやがて安定するものでなければ警戒を要する。

また観測値の計算値に対する残差が偶然誤差に対して次第に増大する場合も危険であって，この場合は統計的手法によって危険度を予測することができる[14]。

たとえば残差についてその不偏分散の平方根を$\sqrt{V_E}$，その自由度をϕ_Eとすれば次にとったk個の点のうちで残差が$\pm d_p\sqrt{V_E}$よりも大きくなったときは，何か今までとりあげなかった異常原因が作用しているものと判断して，その危険率は５％以下であり，さらに前述のように残差が一方的に増大傾向を持つならば，ただちに処置をとる必要がある。d_p の値は文献14に示してあるが表-6.1に再録するこの処置の具体的方法たとえば貯水位の引下げ（ただし地すべり等の問題に対してはあまり急激な引き下げは逆に問題を起こす場合がある），警報，補強工作等については日頃より準備しておく必要がある。この限界を各ダムについて計算すると表-6.2のとおりとなる。

表-6.1 d_p 表

ϕ_E \ d_p	5	10	20	50
10	2.83	3.36	3.84	4.56
20	2.54	2.98	3.33	3.82
40	2.42	2.82	3.11	3.53
60	2.38	2.76	3.05	3.44
120	2.34	2.71	2.99	3.35
∞	2.30	2.66	2.92	3.27

表-6.2 綾北，宣牧，二瀬，鳴子ダムにおける $\pm d_p\sqrt{V_E}$ 表

ダム名 \ k	5	10	20	50
綾北	2.27mm	2.63mm	2.90mm	3.26mm
宣牧	4.40	5.34	5.90	6.65
二瀬	2.67	3.14	3.51	4.03
鳴子	2.59	2.99	3.30	3.70

7. 実際計算の手順

(1) 温度計算

(i) 温度計算断面の選定

アーチダム本体各点の温度相互には顕著な相関があるため，温度条件としてはクラウンにおける３ないし４断面を選定すればよい。水位の変動の顕著な上部は温度計算断面を密にとることが望ましい。この解析では最下部標高断面より上方へ断面番号をつける。

(ii) 温度計，ひずみ計配置図の作成

温度計算のための温度計およびひずみ計の配置図を画く。温度計が不足するときは気温，水温，ひずみ計によって計測された温度を利用する。

(iii) 温度変動図を画く

各温度計の変動図と，各断面における温度分布の変動図を画き，誤って計算されたデータは修正する。ひずみ計による温度を使用するときはその精度が温度計による温度より悪いために，かならず温度変動図による検討を行ない，一群のひずみ計の温度の中どれを採用すべきかを決定する。

(iv) 堤体平均温度，等置直線温度こう配，自己拘束温度 t' の計算と図化

各断面の堤体平均温度，等置直線温度こう配およびひずみ計埋設点における t' を電子計算する。t' はひずみの多変量解析計算に使用する。次に堤体平均温度，等置直線温度こう配の変動図を画き，誤って計算された平均温度，温度こう配はこの変動図または温度分布変動図によって検討する。温度計算は月２回，水位の変動の顕著な時点は密に選んで行なえばよい。

(2) たわみの多変量解析

(i) 同じ時点における水位，堤体平均温度，等置直線温度こう配，時間，たわみを月２回の割合で，水位の変動の顕著な時点においてはさらに密に選んで多変量解析入力データ様式に記入して電子計算する。

(ii) 水圧荷重は水深の１乗，２乗，３乗，４乗として与えるが，経年変化との分離が困難のときは２乗または４乗のみを与えればよい。

(iii) 経年変化計算のための時間はたん水開始前 100日を起点にとり，θ_t は最初の計算において，たとえば等間隔に 100日毎にとり，多変量解析を行なって経年変化の顕著な時点を探がし，次にかくして推定された経年変化の顕著な時点の近くは θ_t を密にとって計算すれば解析が可能である。

(3) 残差および各因子の持分の計算

多変量解析で一たん打ち切ってから残差計算を行なうときの入力データは，求めた回帰係数を追加記入する必要がある。

(4) 水位，たわみ，各因子のたわみの持分を図化し考察する。

(5) ひずみの多変量解析

たわみの多変解析入力データに t' の値を追加記入し解析する外はたわみ解析とまったく同様である。

8. 結 論

(1) たわみの挙動に影響を及ぼす温度，温度こう配，および水深，経年変化の変換構造を解析する手法として多変量解析の理論を展開しその電子計算のプログラムを開発した。

(2) たわみの挙動に影響を及ぼす温度荷重，水圧荷重

で説明し得ない因子として，岩盤に介在するクラック，破砕帯などの存在による経年変化を考え，これを対数式 $\Sigma k_i \log\left(\frac{1+\theta}{1+\theta_i}\right)$ で表示し，かなり良好な結果を得た。

(3) 温度荷重，水圧荷重，経年変化の持分に観測たわみを分解して荷重分割計算，模型実験と比較し，さらに次元解析的手法によってたわみの挙動の力学的考察を行ない，水圧荷重，温度荷重によるたわみの厚肉ダムと薄肉ダムの特性の相違を検討した。

(4) 打設時期からの堤体温度の挙動を検討し，特に堤体温度，等置直線温度こう配の間の相関性を確認した。

(5) 相互に相関する要因のある場合の解析を遂行するに必要な主成分分析の理論とその電子計算プログラムを提案したが，具体的適用の段階には至らなかった。

(6) 挙動解析の結果得られた構造式を用いて解析期間またはそれ以後の任意の水位，温度条件に対して予測が可能なことを示した。

(7) 経年変化 $\Sigma k_i \log\left(\frac{1+\theta}{1+\theta_i}\right)$ の項が上流側か下流側の一方向に増大し，またはたわみの残差が偶然誤差に対して次第に増大するかどうかを検討することによって，もっとも簡便，正確にダムの危険度を予測し，安全管理の1方法として利用できることを述べた。

(8) 精密三角測量によるクラウンの半径方向のたわみを検討してベースに対する相対的経年変化の存在を確認するとともに，このような相対的経年変化が発生するときには基礎岩盤自身にも経年変化の生じていることが推察された。

(9) 最後にたわみの挙動解析の経験から得られた計器配置，計測方法，データ整理の具体案を次に列記する。

(a) 温度計は半径方向に沿って端部に密に中央部に少なくとも1個配置しなければ温度分布曲線を推定することができない。ダムの上下流面にも温度計を設置したい。

ひずみ計による温度測定は，温度計に比べて精度が落ちる上にロゼットに組んで埋設されているときは温度測点位置よりのズレがあるからできるだけ避けるべきである。

堤体温度は相互に顕著な相関があるから，たわみの挙動解析の場合には高さ 100m 未満のダムではクラウンに沿って3～4断面に埋設するのみでよいと思われる。ただし，ひずみ解析を行なう場合はひずみ計と温度計を必ず併設する必要があるため，ひずみ計埋設要領に準じなければならない。

(b) プラムラインの観測精度は良好でかつ容易に測定できるが，ダム全高にわたって設置し，できれば下部岩盤にまで通してダム全体の挙動を把握するよう心がけるべきである。特に薄肉ダムではトップアーチクラウンのたわみが下部アーチのたわみの影響を受けにくいから，中間標高のたわみを計測する必要がある。できればクラウン以外に両岸側にもプラムラインを設け，3次元的たわみの挙動を調べたい。

(c) 視準測量はプラムラインに比べてその精度が悪く，また測定も煩雑で測定回数も少なくなる傾向があるから必要があるときはプラムラインと併設する程度が望ましい。しかし視準測量は岩盤の直接的挙動を含めたより絶対的変位を測定し得る利点がある。

(d) たわみ観測はグラウト直後より継続して行ない，たん水前の温度応力によるたわみの動きをも観測すべきである。

(e) 精密三角測量はプラムラインによる観測，解析結果を検証するためにも実施の必要がある。特にプラムライン観測では計測が不能な基礎岩盤の挙動を観測するためにダムのクラウンのベースに測点を設けたい。

プラムラインによるたわみの実測解析の結果，新たな経年変化が生じた時点あるいは毎年同月同日に三角測量を行なえば経年変化の動きを捕えることができる。

少なくともクラウンについては毎年三角測量を行ないたいものである。またたん水開始前後には必ず三角測量を行なわなければ水圧荷重によるたわみは算出されない。プラムライン観測がたん水開始の時点より始まるとき，三角測量をそれ以前に行なっても両者の比較が困難である。

(f) 多変量解析において初期の水位によるたわみと経年変化の動きの分離を完全にするためには，たん水後水位がある程度上昇したとき，再び水位を意識的に下げることが望ましい。意識的にかあるいは自然的にこのような水位が低下する傾向が表われたときは水位，温度，たわみ，ひずみ等の観測回数を多くとるべきである。

(g) 多変量解析を行なう場合，堤体平均温度条件としては堤頂面より 1/3～1/5 の点で十分に表示し得る場合が多かった。温度こう配計測断面は水深の変動の顕著な部分を密にとりたい。

(h) 水位の観測は極めて容易であるから毎日行ないたい。

(i) プラムライン，視準測量も水位の変動の顕著なときは毎日行ないたい。水位の変動の緩慢なときは週1回でも良いであろう。

(j) 温度測定間隔はたわみの挙動解析が目的の場合はプラムライン観測と同時点に計測する必要がある。

(k) 計測を自動化しして遠隔操作による集中管理を可能にする必要がある。遠隔操作を行なう二瀬ダムとその他のダムを比較すると，二瀬ダムの計測精度は良好である。

(10) たわみ解析の今後の問題

(a) 鳴子ダム，綾北ダムについては，解析期間末期に表われた新たに生じた経年変化の挙動を追跡する。

(b) 二瀬ダム，室牧ダムではたん水開始以後まだ十分に年月を経過していないので，今後もたわみ観測と解析を続行することが必要である。

(c) 二瀬ダムでは両岸のたわみ解析を行ない，三次元的なたわみの挙動とそのクラウンに沿ったたわみとの関係を検討する。

(d) 水圧荷重，温度荷重を受けたアーチダムの挙動を厳密荷重分割計算によって比較検討する。

(e) 水圧荷重によるたわみが水深の4乗式，2乗式のどちらで表示するのが適当であるかを検討する。

(f) 水深がベース付近まで低下するときがあれば，観測解析して経年変化と水深の分離を完全にしたい。

(g) 堤体平均温度と等置直線温度こう配を分離する方法として主成分分析その他を考慮する。

(h) ひずみの挙動とたわみの挙動の関係を検討し安全管理の問題を破壊理論の立場から解析する。

(i) この解析結果を安全管理の1手段とすることを含めて計器埋設，測定方法，整理様式の基準策定を行なう。

以上に述べたように本文においてはまず実測資料によるアーチダムの挙動解析の基礎理論の展開と電子計算プログラムの開発を行ない，綾北，室牧，二瀬，鳴子ダムの堤体温度およびたわみの挙動を解析，考察してかなり興味ある幾つかの事実を確認した。また安全管理，計器埋設，測定方法，実測資料の整理様式の諸問題解析の手がかりを与えることができた。

このたわみ解析で得た諸経験を生かしてさらにアーチダムのひずみの挙動解析に進む予定である。

なお，この解析の電子計算はNEAC-2203を使用し（担当日本ビジネスオートメーションKK保田玲子）図表作成，計算は，前ダム構造研究室久保田宗高技官，石山武司技官および現ダム構造研究室内藤寿夫技官が行なったことを付記する。

参考文献

1) D. Tonini, "Observed Behaivour of Several Italian Arch Dams" Journal of the Power Division, Proc. of A.S.C.E. Dec. 1956

2) M.Rocha, J.L. Serafin, A.F. da Silveira, M.Q. Guerreiro, "Observation of Concrete Dam Result Obtained in Cabril Dam". R. 83, the VIth Congress on Large Dam, New York, 1958

3) M. Rocha, J.L. Serafin, A.F. da Silveira, M. Q. Guerreiro, "A Method of Quantitative Interpretation of the Results Obtained in Observation of Dams" R. 36. the VIth Congress on Large Dam, New York, 1958

4) J.M. Raphael, "Determination of Stress from Measurements in Concrete Dams" Bureau of Reclamation, U.S.A. Feb. 1954

5) 中村慶一 "実測資料による構造分析(1)" 土木技術資料 4-6, 土木研究会，1962

6) 中村慶一 "実測資料による構造分析(2)" 土木技術資料 5-6, 土木研究会，1963

7) "鳴子ダム工事誌" 東北地方建設局鳴子ダム工事事務所，1959年3月

8) "室牧ダム及び発電所工事誌" 富山県電気局，1963年4月

9) Ivan. E. Houk "Temperature Variation in Concrete Dams" Western Construction News, Dec. 10, 1930

10) 中村慶一，飯田隆一，三池亮次，"実測資料によるアーチダムの挙動解析" 土木技術資料，5-12，土木研究会，昭和38年12月

11) K. Nakamura, R.Iida, R.Miike "Analysis on Behaivour of Arch Dam by Multivariate Analytical Method" the VIII th Congress on Large Dam, London, 1964

12) 村幸雄，中村慶一，大久保忠良，飯田隆一，"綾北ダム構造模型実験" 土木研究所報告，第108号，建設省土木研究所，昭和36年4月

13) United States, Bureau of Reclamation "Treatise on Dams Chapt. 10 Arch Dams."

14) 中村慶一"品質管理限界について"，土木研究所報告88頁，第110号，建設省土木研究所，昭和37年1月

15) 中村慶一 "河川工学における情報量解析の応用に関する研究"，土木研究所報告第118号建設省土木研究所 昭和39年

土壌コロイドに関する研究（第6報）

——“本邦主要道路の工学的土性図”作製に使用された路床土中の粘土鉱物の検索——

（昭和36年9月）

有泉　昌*

目　次

〔Ⅰ〕緒　言……(1)
〔Ⅱ〕わが国の土壌粘土鉱物について……(2)
〔Ⅲ〕試料および実験方法……(4)
〔Ⅳ〕実験結果とその検討……(23)
〔1〕東京都の路床土(東—1～24，神奈川県路床土をふくむ)…(23)
（1）X線回析およびDTA曲線について……(23)
（2）化学分析結果について……(27)
（3）電子顕微鏡写真について……(30)
〔2〕埼玉県の路床土(埼—1～12)……(32)
〔3〕群馬県の路床土(群—1～18)……(34)
〔4〕茨城県の路床土(茨—1～13)……(38)
〔5〕三重県の路床土(三—1～49)……(40)
〔6〕愛知県の路床土(愛—1～36)……(50)
〔7〕静岡県の路床土(静—1～16)……(55)
〔8〕宮城県の路床土(宮—1～46)……(59)
〔9〕福島県の路床土(福—1～28)……(70)
〔10〕岩手県の路床土(岩—1～10)……(76)
〔Ⅴ〕考　察……(78)
〔1〕試料粘土の分離方法および実験方法について……(78)
〔2〕路床土の粘土鉱物の種類と一般的性質……(78)
〔3〕路床土中の粘土鉱物種の地域的特性…(87)
〔4〕粘土鉱物と土質試験結果との関係について……(93)
〔Ⅵ〕結　言……(95)

〔Ⅰ〕緒　言

すべての土木構造物は土の上に安定な状態を維持するように造られねばならない。舗装の場合は分散された荷重は路床土によって支持される。したがって路床土に要求される性質は十分な地耐力を持ち，気象条件によって変形の少ないこと，盛土の沈下のおそれのないこと，および法面の安定していること等である。これらの性質は土質として考えれば，土の凝集力，内部摩擦角，圧縮性，毛管性，透水性，弾性等に関係する。これらの土の性質は相互に関連したものであるが，共通の基盤は巨視的にはこれらの性質が土の含水量の関数であることであり，微視的には土粒子と水との親和性の問題である。これらの現象をさらに掘り下げて考えると最も表面積の多い物質の親水性の程度の問題となる。したがって土に存在するコロイドの問題に関係する。すでにのべたように土の力学的性質がコロイドの粘土鉱物に支配されるのであるから，路床土の性質を考える場合はその路床土に含まれる粘土鉱物がなんであるかを知らねばならない。

わが国の路床土の性質がどのようであるかは，すでに“本部工学的土性図の作製”として建設技術研究補助金により昭和26年度に関東地方，昭和27年度に中部地方，昭和28年に東北地方の路床土について調査が行なわれている。[1),2),3),4)] この調査ではその地域の代表的試料と認められるものを主とし，なるべく表層土または表層土に近い土を考慮して採取し，室内実験で物理試験および力学試験を行ない，その工学的性状を決定している。これらの室内試験の結果にもとづいて土を分類（Burean of Public Roads, A. A. S. H. O, Casagrande, 三角分類で表示する）し，さらに地質的分類をも加えている。

従来地質図や農業用土性図は全国的規模で造られ，それぞれの目的を果たしているが土木工事の調査設計施工にあたっては参考とはなるが，直接には役立っていない。このために工学的土性図の作製が試みられたのである。しかしながらわが国の地質，地形および気象条件等からして，土質は平面的にも縦断的にも変化に富み，また主要路線に沿って調査が行なわれている等のこともあり，満足すべき状態でないことはもち論であるが，[5)] わが国の路床土が系統的に調査されたことは大きい意義を持つものである。この調査結果から工学的土性図は主として道路工事にともなう切取り，盛土などの土工計画，路盤材料，路面材料の選択等に有力な資料を提供するもので

* 地質化学部長 工博

あり，その他一般の土木工事の計画のための参考となる。

路床土の工学的性質はこの調査で明らかにされているが，この性質に潜在的に関与していると考えられる土壌コロイドの粘土鉱物に関する資料はない。これらに関する完全な資料が加えられれば，工学的土性図としての利用度も高まることと期待される。とくに化学的な土質安定処理を考える場合の参考資料がえられると考えてよい。

本調査研究では“工学的土性図”に欠けている粘土鉱物に関する資料を加え，その分布または地域的特性を知り，土質と粘土鉱物の関係について今後検討されるべき点についても考察する。本調査研究において粘土鉱物検索に用いた試料の多くは“本邦工学的土性図の作製”に使用された土質試験の行なわれている路床土である。実験は主としてX線回折およびDTA方法であり，この結果より粘土鉱物の決定または推定を試みた。路床土の数が多く全部の試料について実験が行なわれなかった点と，これらの方法だけでは粘土鉱物決定のための十分な方法でないことは認めざるをえない点があり，本研究の目的は部分的に果たされたに過ぎぬことは残念に思う。粘土鉱物学的には今後の検討にまつ点も多いのでさらに実験を進める予定である。しかしここにえられた結果のみからでもわが国路床土を構成する粘土鉱物について知る点が多いことを認め，また土質と粘土鉱物の関係についても今後検討を要する問題も多いことをのべ，これらについて考察する。

なお，実験を追加してから本報告を完結するつもりでいたが，不可能な事情もあり，ここに大要を報告する。

〔II〕 わが国の土壌粘土鉱物について

土壌は元来農学部門の研究対象として多くの研究が行なわれてきたのであり，土壌コロイドについても多数の研究が報告されている。X線回折法の発見がなされるまでは土壌コロイドはゲル複合体とみなされ，主として化学分析法等によりその組成が研究され考察され，その化学的性質または行動が詳細にわたり明らかにされてきた。X線回折法の発展とともに土壌コロイドは粘土鉱物よりなることが明らかにされ，粘土鉱物学の進歩とともに土壌粘土鉱物の農学上しめる位置の重要性が認められ，土壌粘土鉱物に関する研究が盛んになっている。

わが国の土壌粘土鉱物に関する研究は主として戦後X線スペクトロメーター等の導入にともない各所で実施されているのであるが，1936年に川村および船引[6]によってわが国各地の各種母材よりなる土壌中の粘土鉱物が，X線的に研究されたことは注目に値する。この研究でえられた結果は，当時の旧式なX線回折装置のために，低角部の底面反射が十分えられなかったにかかわらず今日でも通用する成果となっている。この研究ではわが国の土壌粘土鉱物は主としてカオリン鉱物よりなることを認めており，底面反射が明瞭でない点も示している。この問題については，粘土鉱物に関して指導的立場にある須藤[7]も今日のように低角部の詳細なる測定結果等から，底面反射の明瞭でないことは土壌粘土鉱物自体の特質によることを指摘している。

戦後わが国の土壌粘土鉱物に関する研究は主として農耕地の土壌学的研究の一環として行なわれてきた。路床土として考える場合は土壌生成論，土壌型態学，土壌化学的意味は必らずしも直接的必要性のあるものではないので，むしろ必要性が認められる土壌粘土鉱物の存在または分布について簡単に既往の研究結果をのべることとする。

わが国の国土の約8.4%は火山灰でおおわれており，火山灰土は北海道から九州にかけて広く分布し重要な畑作地帯または牧野をなしていると同時に，関東ローム，ヨナ，黒ボク，味噌土，鹿沼土，オンジ土等の名で知られる土質力学的に好ましくない土となっている。火山灰はその岩石学的組成，噴出年代または気象条件による風化の程度等により，粘土鉱物の組成にも相当の差異があると考えられる。これらについては多くの人々に[8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]により研究され，火山灰土の粘土鉱物は次のようにだいたい3つにわけられることが明らかになっている。

主としてアロファンよりなるもの，

主として加水ハロイサイトよりなるもの，

アロファン，加水ハロイサイト，ギプサイトよりなるもの，

これらの粘土鉱物の類別は火山灰の岩質には余り関係なく，また地域的の相異も余り顕著でなく，火山灰の降下年代の新しいほどアロファンに富み，アロファンが加水ハロイサイトに変るとともに加水ハロイサイトを主とするものに変るのが一般の傾向である。したがって関東ローム層では比較的新らしい火山灰土である立川層は主としてアロファンよりなり，より古い武蔵野層等は加水ハロイサイトを主としている。このように比較的新らしい火山灰土の粘土鉱物がアロファンであることがわが国の地域性に関係しないことと，火山灰土の垂直方向では下部になるにしたがい加水ハロイサイト化することは路床土を考える場合重要なことである点が特に強調されねばならない。

沖積土はわが国の面積の約14%におよび，わが国の大都市の多くはこの上に発達しており，地盤沈下または軟弱地盤等との関係もあり土質力学的には関心が持たれている。一方沖積層はわが国の水田の大部分をなしている点からもその粘土鉱物については究研がなされている。沖積層の粘土鉱物についてはすでに川村，船引[6]により多くの沖積土について研究され，ハロイサイトが主なる成分鉱物であることを認めている。水田土壌の粘土鉱物

については，水田という特殊な環境が粘土鉱物のあり方とどのように関係するかが関心を持たれている。

沖積土は一般にその供給源の岩石風化物や地層中にふくまれた粘土鉱物よりなる場合が多いので，地域的の差異の著しい場合と，著しくなくむしろ平均化する場合とがあることは注意を要する点である。沖積土の特殊な例としては干拓地等の場合であり，海水の溶脱作用を考えねばならないので陸地上に見られる現在の沖積土とは著しく異なる。有明湾岸の干拓地等の粘土鉱物は青峰等[18]，山内等[19]により研究され，イライト，モンモリロナイト，クロライト等を含くむとされ，主として瀬戸内海の底土はハロイサイトとイライトであることが弘法ら[20]により報告され，瀬戸内海鎗海湾の堆積物中の粘土鉱物の垂直分布については松下[21]等により報告され，カオリン鉱物とイライトが存在し，クロライトは下層で増加するとのべている。

沖積土中の粘土鉱物としてはすでに川村，船引[5]により本邦西部の試料について研究されハロイサイトを認めているが，その後も多くの報告がある。内山，鬼鞍[22]，[23]によれば宮城県刈田郡白石町の第三紀水成岩の風化物の沖積された水田土壌粘土では degrade されたイライトが主成分であり，これよりノントロナイトが生成していると報告し，さらに岩沼町の阿武隈川沖積土よりなる水田土壌の粘土ではモンモリロナイトが主で，少量のハロイサイトおよびイライトをふくみ，また混合層鉱物が生成しているのが一般である。九州地方では筑後川および矢部川の沖積地の畑土壌の粘土は，菅野等[24]によればモンモリロナイトを主とし，イライトとカオリナイトをふくみ，上流の集塊岩および安山岩より供給されたとされ，熊本県人吉盆地の中生層堆積岩（頁岩または粘板岩）より供給された水田土壌ではイライトを主とし，ほかにカオリナイト，クロライト，ジプサイトまたはゲータイトを含有するとされる[25]。また人吉盆地でも球磨川北岸の旧木上村の水田土壌のように結晶片岩および四万十層郡堆積岩より供給される場合は，土壌粘土は主としてハロイサイトおよび加水ハロイサイトよりなるとされている[26]。

第三紀層および洪積層土壌の粘土鉱物についてはすでに川村，船引[5]の研究があり，ハロイサイトを主要成分とするとされている。水成岩よりの土壌中には本来母材である水成岩を造る粘土鉱物がそのまま残ることもあるが，地表での風化により別の粘土鉱物に変化する場合もあるのが一般である。第三紀層および洪積層は土木工学の分野では種種の問題を提出するので，これらより生成する土壌中の粘土鉱物にふれてみる。

岡山県津山盆地の第三紀頁岩である津山層よりの土壌の主要な粘土鉱物は，呈色反応によればハロイサイトとモンモリロナイトであることが原田[27]により報告されている。宮城県刈田郡白石町水田土壌についての内山の報告[22]はすでにふれた。静岡県掛川町近くの丘陵地帯，愛知県常滑町近くの丘陵地帯，千葉県房総半島南部の丘陵地帯，神奈川県大船の丘陵地帯はいずれも第三紀層であり，この砂岩，泥岩または凝灰質砂岩等を起源とする土壌の粘土鉱物は，主としてハロイサイトとイライトよりなり，モンモリロナイトの存在も推定されると江川[17]等は報告している。また同じ報告によれば静岡県三方ケ原，愛知県渥美半島の高師ケ原の洪積層土壌では，粘土鉱物は結晶度の低くいハロイサイトか加水ハロイサイトを主とし，ジプサイトも存在すると推定している。福岡県香椎の第三紀頁岩層の粘土鉱物は主にモンモリロナイトであり，これが地上風化で土壌を造るときはモンモリロナイトはハロイサイトに変り，ほかにイライト，ジプサイトも少量含まれる[23]。三方ケ原，高師ケ原，福岡県高良台，三重県鈴野等の洪積層土壌では，ハロイサイトが主要粘土鉱物であり，ジプサイトが共存しこのほかイライト，14Å鉱物としてクロライトおよびバーミキュライト等が少量現在すると菅野等[29]により報告されている。また松井，加藤[30]によれば静岡県新所原の洪積層土壌の粘土鉱物もハロイサイトを主としている。さらに宮城県鬼首の第三紀凝灰岩質頁岩の風化生成物は下層では主としてイライトであり，表層に向い不規則混合層をへてモンモリロナイトが生成すると増井[31]は報告している。

火成岩類を起源とする土壌の粘土鉱物についてもいくつかの報告が見られるが，川村および船引[5]の報告では主としてハロイサイトの生成が認められている。福島県片曽根山の花崗閃緑岩よりはカオリナイトが，角閃石斑粉岩よりはバイデライトが生成し[32]，福島県片曽根山の花崗閃緑岩よりはノントロナイト，ハロイサイトおよび degrade されたイライトが生成する[33]。増井[34]はまた福島県大越の石英安山岩は石灰岩の共存の下で風化した場合にモンモリロナイトと加水ハロイサイトを主として生成し，ほかにイライト，ジプサイト，カオリナイトを混在させるとのべている。

九州地方の花崗岩より生成する土壌中の粘土鉱物については菅野等[35]，[36]，[37]の研究があり，熊本県玉名郡，福岡県筑紫郡大野町および北九州新期花崗岩では一般にハロイサイトまたは加水ハロイサイトが主要成分であり，イライトを混じ，風化の進行と共にクロライト，バーミキュライトも生成する。佐賀県大浦の多良岳よりの玄武岩よりの土壌では，ハロイサイトまたは加水ハロイサイトを主とし，ジプサイトおよびヘマタイトも存在する[38]。

瀬戸内海北岸の花崗岩地帯では西條町および安芸津町地域の土壌について研究され[39]，ハロイサイトが主でイライト，バーミキュライト，ジプサイト，ヘマタイトを

踊じている。わが国のように温暖湿潤な地方では花崗岩，石英粗面岩，花崗閃緑岩の風化により生成される土壌中の粘土鉱物は主としてハロイサイトであることが原田[40],[41]により報告されている。

変成岩の風化土壌中の粘土鉱物についても川村，船引[5]によりハロイサイトを主とすることが知られているが，特殊な例として愛媛県八幡浜近辺の結晶片岩地帯の残積土中にはバーミキュライト様鉱物の存在が知られている[42]。

以上主としてわが国の土壌粘土鉱物について知られている結果をのべたのであるが，これらの研究はいずれも土壌生成論の立場で行なわれている。土壌の生成には気候，母材，植物被，地形，年代が5つの重要な因子であり，これらの因子が土壌生成を律する程度にも差異がある。気候という因子を取ってみてもその内容は気温，降雨量，湿度，凍結，蒸発等多様性を持つ。これら因子の内どれが支配的であるか，それらの相関性の程度により生成される土壌に差が生じる。母材が土壌生成作用を示す環境におかれれば必然的に母材層中に層位の分化が起こり，この分化は平面的にも垂直的にも出現し，環境要因の変化の方向のあり方または周期性等のために，母材の風化と土層位の分化とは重複，連続，不連続の関係が生じる。また風化と土層位の分化には物質の移動と変質がともなわねばならないし，それらの現象には当然その種類，速度等が関係する。したがってわれわれの見ている土は現在までの多種の要因の必然的結果としての一つの変化の過程にある現在の姿である。わが国の場合は多数の新旧火山群の存在と多雨気候であり，とくに梅雨性の雨の多いことが特徴であり，比較的せまい地域性も顕著に見られるが，一般には大部の地域がポドソール化作用に関係した圏内にあるとされている。

路床土を考える場合，路床土として利用される土が水田とか畑のように耕地として利用されていることもあり，また未耕地のときもある。盛土のときもまた切取のときもある。したがって路床土の性質の平面的また立体的分布，地域性が知られる必要があると同時に，路床土として用いられるための新しい環境での変化の方向等も考慮されねばならない。土を材料として考える場合はそれに含まれる粘土鉱物を考えるのは当然であるが，土壌生成論的考慮も払われる必要がある。

なお土壌生成と粘土鉱物等については塩入[43]の解説がある。

〔III〕 試料および実験方法

本研究の目的を達するためには，できるだけ多くの試料について粘土鉱物を検索するとともに，土質試験も実施せねばならない。一方土質力学的性質は粘土鉱物の種別よりほかの要因にもよるのであり，それらの要因はそれぞれ試料によって相異する。また粘土鉱物の同定自体簡単ではない。短期間内でこの目的を十分はたすことは困難であるから，実験方法等も限定せざるをえないし，えられた結果も勢い定性的とならざるをえない。しかしこの結果からでも十分価値ある結論がえられるし，今後解明されるべき問題点をも知りうることは後で論及する。

試料路床土は土質資料の備えられたものが望ましく，わが国全県について一定規準の下に試料が採取される見込みがあったために，建設省の要望研究課題であった“工学的土性図の作製”に用いられた路床土を試料とした。実験に用いる試料は土性図作製の研究に参加したかたがたから分譲してもらい，試料土に関する説明は土性図作製関係の研究報告[1],[2],[3]を参照している。関東地方のものでも千葉県および栃木県の試料は入手できなかったし，他のものでも全試料は入手してもいないし，入手しても粘土分の著しく少ないものは取り扱っていない。またここで取り扱ったものでも土質試験結果をともなわないものもある。とくに関東地方の路床土については採取地のみは明らかであるが，土質試験結果については入手することができなかった。これらの試料についての地質的分類は筆者が地質図より求めて記入している（関東地方，三重県）。

なお東京都関係の試料は筆者が独自に入手したものもある。

試料路床土の採取地点とその性質等は上記の報告より抜き書きして表-1，2，3，4，5，6，7，8，9，10に示し，さらに簡単な地図上でその位置も示すために図-1，2，3，4，5，6，7，8，9，10で図示した。

実験方法は試料路床土から1μ以下の粘土分を分離し，この粘土試料について粘土鉱物同定のために種種の方法を選んだ。

1μ以下の粘土の分離は“茶臼山地すべり地帯の土壌コロイド”に関する研究に用いたと同じ方法によった。すなわち路床土を NH_4OH を少量ふくむ水中で分散させ，ストークス径で1μ以下の粒子を求め，$CaCl_2$ 溶液を加えてCa粘土を凝集分散させ，H_2O_2 水を加えて80°Cで2時間処理して有機物を酸化除去し，$Ca(CH_3COO)_2$ 溶液で凝集させて後 CH_3OH で洗い Ca イオンが洗液中に見られないようにする。洗滌した粘土は風乾させる。

風乾粘土試料はX線回折およびDTAのための試料とする。X線回折には Geigerflex を用い，対陰極は銅（Niでフィルタ）とし，Scale Factor 16，Time Constant 4，Multiplier 1 の条件で回折図を求める。エチレングライコール処理した試料ではデッキグラス上にエチレングライコールでペースト状とした試料を塗付しており，Scale Factor は8とした。また一部の試料では Scale Factorを 32 としたものもある。この回折図より網面間隙（Å）を求めているが，その強さはピークの高さの目

表-1 東京都の路床土試料（神奈川県をふくむ）

試料番号	採取地名	地質的分類	試料番号	採取地名	地質的分類
東—1	東京都八王子市	関東ローム	東—21	上野 2m	関東ローム
〃—2	〃 南多摩郡原町田	〃	〃—22	〃 4m	〃
〃—3	〃 西多摩郡氷川町付近（奥日部国道使用のもの）	不明（古生層又は中生層の風化土？）	〃—23	〃 7m	〃
〃—4	東京都西多摩郡青梅町付近（青梅13号線上層）	関東ローム	〃—24	〃 13m	〃
〃—5	〃 〃 〃 （ 〃 〃 ）	〃	〃—25	脱鉄試料（東京— 1）	
〃—6	〃 〃 〃 （青梅2号線上層）	〃	〃—26	〃 （ 〃 — 8）	
〃—7	〃 〃 〃 （ 〃 〃 ）	〃	〃—27	〃 （ 〃 — 2）	
〃—8	〃 北多摩郡保谷町	〃	〃—28	〃 （ 〃 — 6）	
〃—9	〃 北区田端町	〃	〃—29	〃 （ 〃 — 4）	
〃—10	採取地名不詳（東大 No.11）	〃	〃—30	〃 （ 〃 —9.2m層）	
〃—11	〃 （東大 No.18）	〃	〃—31	〃 （ 〃 — 4m層）	
〃—12	〃 （東大 No.32）	〃	〃—32	〃 （ 〃 —15）	
〃—13	〃 （東大 No. 3）	〃	〃—33	〃 （ 〃 —14）	
〃—14	東京都北多摩郡野川村	〃			
〃—15	〃 西多摩郡氷川町	古生層風化土	神— 1	神奈川県中郡神田村上郷	沖積層（相模川）
〃—16	〃 北多摩郡中藤村	関東ローム	〃— 2	〃 〃 秦野町寺山	関東ローム
〃—17	〃 南多摩郡下柚木村	〃	〃— 3	〃 〃 南秦野村西大竹	〃
〃—18	〃 〃 大蔵	〃	〃— 4	足柄下郡片浦村江ノ浦	箱根古期外輪山熔岩
〃—19	〃 〃 稲城村	〃	〃— 5	神奈川県川崎市木月	沖積層（多摩川）
〃—20	上野 1m	〃	〃— 6	〃 津久井郡興瀬町	小仏層郡？ 御坂層？

表-2 埼玉県路床土試料

試料番号	採取地	地質的分類	試料番号	採取地	地質的分類
埼— 1	北足立郡水谷村水久保	関東ローム	埼— 8	南埼玉郡蒲生村	沖積層
〃— 2	〃 大和田	〃	〃— 9	浦和市大牧	関東ローム
〃— 3	〃 下片山	〃	〃—10	大里郡深谷村	〃
〃— 4	入間郡豊岡笠幡山伝	〃	〃—11	北足立郡箕田村	〃
〃— 5	南埼玉郡大田袋	沖積層（利根川）	〃—12	比企郡南吉見	沖積層
〃— 6	北足立郡鳩ケ谷の南	関東ローム	〃—13	松山市松葉町原	関東ローム
〃— 7	〃 赤山	〃			

表-3 群馬県路床土試料

試料番号	採取地	地質的分類	試料番号	採取地	地質的分類
群—1	群馬郡金古町	泥溶岩流風化土（榛名山）	群—10	甘楽郡黒岩村明戸	第三紀層風化土
〃—2	北群馬郡白郷井村土白井伊熊	ローム	〃—11	多野郡吉井町塩川	関東ローム
〃—3	利根郡片品村八丁滝付近	石英安山岩風化土	〃—12	〃 日野村金井	三波川層風化土
〃—4	〃 新治村吹路	第三紀層風化土	〃—13	邑楽郡長柄村里塚	関東ローム
〃—5	北群馬郡伊香保地蔵河原	泥溶岩流風化土（榛名山）	〃—14	新田郡毛里田村唐沢	沖積層（渡良瀬川，上流花崗岩，古生岩）
〃—6	〃 東村五反田	関東ローム	〃—15	佐波郡東村三郷	関東ローム
〃—7	吾妻郡中之條町台地	泥溶岩風化土（榛名山）	〃—16	勢多郡新里村牧橋	泥溶岩風化土（赤城山）
〃—8	〃 岩島村細谷	第四紀安山岩風化土	〃—17	〃 荒砥村	関東ローム
〃—9	〃 嬬恋村大里ヶ原	泥溶岩風化土	〃—18	〃 南橋町関係	泥溶岩風化土（赤城山）

表-4 茨城県路床土試料

試料番号	採取地	地質的分類	試料番号	採取地	地質的分類
茨—1	取手町青柳新田	沖積層	茨—8	那珂郡大宮町東富	沖積層
〃—2	鹿島郡上島村二重作	関東ローム	〃—9	久慈郡上小川村川下	沖積層
〃—3	東茨城郡緑岡村海道	関東ローム	〃—10	西茨城郡宍戸町下加賀田	沖積層
〃—4	〃 長岡村小鶴	関東ローム	〃—11	真壁郡養蚕村笹持	沖積層（大谷川の沖積土）
〃—5	多賀郡豊浦町折笠	沖積層	〃—12	結城郡中結城村菅谷	関東ローム
〃—6	久慈郡賀美村細田	黒雲母花崗岩風化土	〃—13	古河市	関東ローム
〃—7	〃 与田村小野	沖積層			

表-5 三 重 県 路 床 土 試 料

試料番号	採取地	地質的分類	試料番号	採取地	地質的分類
三— 1	三重郡千種村大字音羽地内学校前	第四紀更新	三—26	鈴鹿市石薬師町地内	新第三紀層風化土
〃— 2	鈴鹿市石薬師町	沖積層	〃—27	志摩郡立神村字神口	第四紀更新層
〃— 3	度会郡穂原村大字伊勢路	古生層風化土	〃—28	鈴鹿市平田町算所	沖積層（現世）
〃— 4	員弁郡丹生川村	古生層風化土	〃—29	員弁郡丹生町大字庁通	沖積層
〃— 5	一志郡川口村大字下世古	新第三紀層風化土	〃—30	志摩郡波切町小坂	第四紀更新層
〃— 6	鈴鹿郡深伊沢村長浜	更新層	〃—31	一志郡家城町②	第三紀層風化土
〃— 7	四日市市東富田茂福（国道添）	沖積層（現世）	〃—32	〃 倭村大字垣内②	沖積層（現世）
〃— 8	度会郡有田村大字岡村	花崗岩，石英閃緑岩，風化土	〃—33	多気郡下御糸村大字内庄	沖積層
〃— 9	〃 竜原町大字野後字長志野	第四紀更新層	〃—34	飯南町粥見村大字棚野	沖積層（現世）
〃—10	一志郡豊地村大字下之庄	沖積層（現世）	〃—35	多気郡三瀬谷村大字下三瀬	更新層
〃—11	〃 七栗村大字一色	更新層	〃—36	〃 大淀町山大淀	古生層風化土
〃—12	〃 香良洲町	沖積層（現世）	〃—37	〃 相可町大字相可	沖積層（現世）
〃—13	〃 多気村大字下多気	花崗岩，石英閃緑岩，風化土	〃—38	〃 東黒部村大字出間	沖積層
〃—14	志摩郡的矢村大字的矢	第四紀更新層	〃—39	松阪市伊勢寺	更新層
〃—15	三重郡下野村大字山城下野橋前	沖積層	〃—40	阿山郡島原村大字宇山	沖積層
〃—16	志摩郡加茂村大字河田	カンラン岩風化土	〃—41	松阪市朝田	
〃—17	一志郡八知村大字小西	花崗岩，石英閃緑岩，風化土	〃—42	多気郡上御糸	沖積層
〃—18	志摩郡片田村字樽山	第四紀更新層	〃—43	上野市大字上野	沖積層
〃—19	一志郡家城村大字小杉	花崗岩，石英閃緑岩，風化土	〃—44	名賀郡古山村大字昌満池	花崗岩，石英閃緑岩，風化土
〃—20	度会郡一之瀬村大字脇出	沖積層（現世）	〃—45	〃 上津村大字伊勢地	沖積層
〃—21	〃 内城田村大字大野木	第四紀更新層	〃—46	阿山郡阿波町字巣山	沖積層
〃—22	志摩郡浜島町大字浜島	第四紀更新層	〃—47	一志郡中郷村大字矢下	沖積層（現世）
〃—23	〃 答志村	緑色岩類風化土	〃—49	飯南町川俣村栗野	沖積層
〃—24	鈴鹿郡北若松町	沖積層			
〃—25	一志郡戸木村戸木	更新層			

表-6　愛　知　県　路

試料番号	試料採取地	粒度分析 通過量(%) 10番	40番	200番	区分量(%) 礫分	砂分	シルト分	粘土分	最大径 (mm)	有効径 (mm)	均等係数	土粒子の密度 (gr/cm³)	稠度(%) 液性限界	塑性指数	収縮限界
1	名古屋市千種区本山町	100	98	86	0	22	74	4	1.2	0.012	2.16	2.27	55.0	28.2	20.9
2	名古屋市千種区名大南	100	98	83	0	37	59	4	1.2	0.007	6.57	2.68	62.0	32.7	33.7
3	名古屋市昭和区繭園町3の12	69	35	1	31	69	0	0	5.0	0.28	2.36	2.75			
4	名古屋市千種区田代町瓶杁大乗寺南	25	11	0.5	76	24	0	0	10.0	0.4	1.90	2.76	42.5	9.9	
5	〃	100	90	70	0	32	63	5	1.2	0.0064	4.84	2.65	38.0	18.4	28.7
6	東春日井郡旭町本池ケ原	98	79	54	0	50	42	8	1.2	0.0069	21.70	2.76	72.0	—	25.6
7	東春日井郡品野町中品野	97	70	54	0	55	45	0	1.2	0.015	20.00	2.62	61.5		
8	海部郡富田町富田中学校西	100	94	50	0	60	36	4	0.6	0.008	14.30	2.64	31.7	—	33.5
9	海部郡弥富町五明	100	96	67	0	49	49	2	0.3	0.009	8.00	2.67	44.0	—	28.0
10	中島郡長岡村四貫	100	72	11	0	100	0	0	1.2	0.073	3.97	2.59			
11	葉栗郡北方村方江木曽川橋南語	100	84	7	0	97	3	0	0.6	0.08	34.30	2.60			
12	丹羽郡大山町丸山	100	86	61	0	60	40	0	1.2	0.025	2.88	2.55	49.5	14.6	31.1
13	知多郡河合町布上防奥	100	100	84	0	22	78	0	0.15	0.018	3.20	2.43			38.5
14	半田市馬場町	100	90	12	0	95	5	0	1.2	0.069	2.03	2.68	28.0	—	
15	碧海郡知立町一里山	98	60	32	0	72	26	2	1.2	0.013	32.30	2.70	59.0	25.6	
16	碧海郡明治村西端	99	78	36	0	72	28	0	1.2	0.025	6.80	2.71	70.0	44.7	26.0
17	碧南市新川町東山下	98	83	42	0	62	38	0	1.2	0.013	1.15	2.66	52.0	34.2	21.5
18	幡豆郡福地村市子	100	99	67	0	44	55	1	0.6	0.011	5.45	2.75	38.0	8.5	
19	幡豆郡幡豆町鳥羽	100	87	35	0	70	30	0	1.2	0.028	4.64	2.59	66.0	12.8	49.3
20	幡豆郡幡豆町鳥羽足ケ谷	100	92	42	0	70	30	0	2.5	0.02	5.50	2.63	46.2	—	36.7
21	幡豆郡幡豆町東幡豆中浜	95	58	17	4	82	14	0	2.5	0.03	14.60	2.35	54.5	—	31.2
22	岡崎市若松町向山	89	50	9	10	86	4	0	5.0	0.08	7.50	2.70			
23	豊橋市西高師町小谷	100	98	25	0	86	12	2	0.6	0.028	3.57	2.63	36.0	—	
24	豊橋市西高師町沢向	99	90	36	0	74	26	0	1.2	0.02	5.45	2.72	51.0	35.2	
25	渥美郡田原町白谷字中畑	99	84	62	0	68	32	0	1.2	0.02	3.60	2.80	45.0	14.2	35.2
26	渥美郡伊良湖岬村大字伊良湖字新田	100	68	8	0	97.5	2.5	0	1.2	0.084	3.93	2.64			21.65
27	渥美郡伊良湖伊良湖岬村大字野尻	98	80	53	0	55	45	0	1.2	0.025	6.00	2.70	39.0	18.1	
28	渥美郡杉山村	100	97	38	0	75	25	0	0.3	0.03	4.33	2.79	50.0	—	
29	北設楽郡稲武町桑原	41	12	0	66	34	0	0	10.0	0.32	16.85	2.65	38.0		41.4
30	西加茂郡藤岡村石飛	95	66	27	0	76	18	6	2.5	0.023	15.20	2.62	24.0	—	
31	知多郡有松町別道	100	68	23	0	80	20	0	0.6	0.019	20.50	2.72	36.0	—	
32	西春日井郡旭村大字新田	100	91	68	0	46	46	8	1.2	0.006	10.00	2.69	37.0	—	22.0
33	東春日井郡篠岡村西洞	4	2	0	96	4	0	0	20.0	5.0	1.68	2.66	32.0	—	
34	東春日井郡品野町沓掛	4	2	0	96	4	0	0	20.0	5.6	2.14	2.75	32.0	—	28.0
35	東春日井郡志段味村上志段味	100	91	46	0	67	33	0	1.2	0.019	6.32	2.62	35.0	—	28.6
36	知多郡三和村久米	100	100	69	0	40	50	10	0.3	0.006	8.33	2.68	46.0	—	34.0

床土試料

締固め試験 最大乾燥密度 (gr/cm³)	締固め試験 最適含水比 (%)	剪断試験 C (kg/cm²)	剪断試験 φ (度分)	一軸試験 qu/2 (kg/cm²)	三軸試験 C (kg/cm²)	三軸試験 φ (度分)	土の分類 A. A, S, H, O	土の分類 Casagrande	土の分類 三角分類	土の分類 地質学的分類
1.61	20.0	0.85	31°00′	1.75	0.976	31°36′	A—7—6(18)	CH	沈泥質ローム	城山層粘土
1.42	30.0						A—7—6(20)	CH	沈泥質ローム	八事層粘土
1.66	19.5	0.61	22°30′	0.98	0.421	43°14′	A—1—b(0)	GW	砂	熱田層の砂
1.81	15.0	—	—				A—1—a(0)	GP	礫	東山層細礫
1.60	21.0	—	—				A—6 (13)	CL	沈泥質ローム	東山層粘土
1.60	22.0	—	—				A—5 (6)	MH	砂質ローム	大曽根層礫
		—	—				A—5 (6)	MH	砂質ローム	鮮新層下部常滑層含角礫シルト層
1.69	17.0	—	—				A—4 (3)	ML	砂質ローム	沖積層の砂質ローム
1.49	24.0	—	—				A—5 (7)	ML	砂質ローム	沖積層の砂質ローム
1.62	14.0	1.00	15°20′	0	0	44°11′	A—2—4(0)	SP	砂	沖積層の砂
1.67	13.0						A—3 (0)	SP	砂	沖積層の砂
1.60	21.0	1.30	3°10′	2.70	1.580	29°20′	A—7—5(8)	ML	砂質ローム	鮮新層尾張挟炭層礫層の礫
1.05	50.0	—	—				A—4 (0)	ML	沈泥質ローム	含亜炭層の浮砂
1.65	17.0	—	—				A—2—4(0)	SP	砂	熱田層の砂
1.78	16.0	—	—				A—2—7(3)	SF	砂質ローム	東山層の細礫交り砂質ローム
1.67	20.0	—	—				A—7—6(4)	CH	砂質ローム	熱田層の砂質ローム
1.63	21.0	1.24	1°40′	1.05	0.654	25°53′	A—7—6(7)	CH	砂質ローム	沖積層の粘土
1.54	21.5						A—4 (6)	MH	沈泥質ローム	沖積層の沈泥質ローム
1.47	29.0	1.50	11°30′	2.59	1.461	31°03′	A—7—5(1)	ML	砂質ローム	橄欖班岩風化土
1.60	19.0	1.65	20°10′	1.64	0.876	33°45′	A—5 (1)	ML	砂質ローム	雲母片岩風化土
1.64	15.0	—	—				A—2—5(0)	SW	砂	花崗岩風化土
1.71	15.0	—	—				A—1—b(0)	GC	砂	花崗岩風化土
1.66	16.0	—					A—2—4(0)	SP	礫	鮮新層礫の砂
1.68	19.0	—					A—7—6(4)	CH	砂質ローム	洪積層砂層の砂質ローム
1.71	19.0	1.08	31°20′	2.41	1.351	31°26′	A—7—5(8)	ML	砂質ローム	石灰岩風化土
1.63	12.0	—					A—3 (0)	SW	砂	沖積層の礫
1.81	16.0	1.10	3°30′	1.68	1.68	29°09′	A—6 (8)	CL	砂質ローム	古生岩風化土
1.51	24.0	—					A—5 (1)	MH	砂質ローム	鮮新層礫層の砂質ローム
1.76	15.5	9.70	1°30′	1.52	1.52	43°29′	A—1—a(0)	GW	礫	花崗岩風化土
1.80	12.5	—					A—2—4(0)	SF	砂質ローム	花崗岩風化土
1.81	14.0	—					A—4 (0)	ML	砂	東山層の砂
1.71	16.0	1.60	5°48′	2.15	2.15	32°33′	A—4 (7)	ML	砂質ローム	沖積層の砂質ローム
1.93	10～11	—					A—1—a(0)	GP	礫	東山層の礫
		—					A—1—a(0)	GP	礫	古生層風化礫
1.75	15.5	0.62	10°00′	2.32	2.32	28°54′	A—4 (2)	ML	砂質ローム	大曽根層の砂質ローム
1.51	26.0	1.40	0°00′	1.41	1.41	30°39′	A—5 (8)	ML	沈泥質ローム	含亜炭層の沈泥質粘土

表-7 静岡県路床土試料

番号	採取地点	粒径 (mm またはフイル通過分)												60%	10%	均一性	真比重	液性限界	塑性限界	塑性指数	遠心含水当量	現場含水当量
		50	20	10	5.	No.10 2	No.40	No.60	No.100	No.200	0.05	0.005	0.001									
1	加茂郡田子村大田子	—	—	—	—	100	80	73	67	51	20	0	—	0.100	0.03	33.37	2.787	49.20	31.60	17.60	—	26.30
2	富士郡原町	—	—	—	—	100	74	58	50	45	24	12	2	—	—	—	2.308	—	—	—	—	—
3	浜松市茶町	—	—	100	99	96	91	85	80	68	55	28	15	0.060	0.0008	—	2.707	60.90	35.64	25.26	97.70	38.31
4	浜名郡積志村有玉	—	—	35	32	24	23	22	21	19	16	2	—	0.300	0.090	33.33	2.703	20.35	16.98	3.32	3.38	22.64
5	御殿場町東田中	—	—	—	—	100	80	60	45	30	22	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	三島市徳倉	—	—	—	—	100	87	76	51	30	5	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	三島市トンネル上	—	—	—	100	99	88	82	73	65	60	48	10	0.085	0.005	17.00	2.667	42.80	29.10	13.70	32.80	16.55
8	榛原郡勝間田村	—	—	—	100	99	94	74	65	58	53	23	0	0.70	0.01	10.00	2.749	64.1	25.9	38.2	51.3	32.80
9	浜名郡東浜名村都築	—	—	—	100	85	79	73	70	68	50	16	5	0.055	0.0035	15.71	2.638	38.50	16.80	21.70	451.00	18.46
10	熱海市國立病院	—	—	—	—	100	89	85	80	73	71	55	50	0.50	0.57	7.15	2.680	100.00	69.80	40.60	150.20	77.60
11	小笠郡於保村南田	—	—	—	—	100	98	95	93	90	80	23	5	0.02	0.002	10.00	2.629	45.6	25.0	20.6	35.2	2.40
12	周智郡森町西金谷	—	—	—	100	99	92	81	73	65	56	47	22	0.08	0.00	—	2.682	45.5	7.30	38.2	47.30	22.34
13	静岡市長沼	—	—	—	—	有	機	質	腐	蝕	土	—	—	—	—	—	2.703	—	—	—	—	31.43
14	小笠郡南山村前岡	—	—	—	—	99	99	99	98	82	45	5	—	0.06	0.011	5.45	2.653	34.4	17.60	16.8	24.2	23.20
15	富士郡白糸村田貫沼	—	—	—	—	100	40	22	14	14	12	7	7	0.70	0.65	1.07	2.658	84.20	49.58	34.62	73.51	52.46
16	浜名郡新井町三谷	—	—	—	100	98	79	56	37	30	23	17	4	0.300	0.02	15.00	2.663	—	—	—	42.13	29.45

表-7（つづき）

番号	採取地点	収縮限界	収縮比	容積変化	線収縮	自然含水比	最適含水比	現場乾燥密度	最大乾燥密度	膨脹率	支持力比 C.B.R	単純圧縮試験	山口式二重 C	箱剪断 φ	三軸圧 C	縮試験	地下水位	年雨量(mm)	良	被圧縮性
1	加茂郡田子村大田子	28.10	1.551	32.93	9.00	—	16.60	1.830	1.796	0.0009	28.70	0.430	0.400	64°48′	0.160	24°00′	—	2500	黒褐色	
2	富士郡原町	—	—	—	—	82.08	—	1.200	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00	2800	黒褐色	大
3	浜松市葵町	20.554	1.658	40.356	8.0	31.19	36.24	1.71	1.730	0.002	35.10	0.670	0.50	37°50′	1.48	23°58′	1.000	2200	赤褐	小
4	浜名郡都志村有玉	26.749	1.702	6.449	0.250	19.80	11.50	1.75	1.970		7.60	0.35	0.67	30°40′	1.00	26°35′	1.30	2800	褐	
5	御殿場町東田中	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
6	三島市徳倉	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
7	三島市トンネル上	40.85	1.366	14.28	0.50	59.07	25.20	1.030	1.266	0.0001	10.60	1.252	1.460	55°38′	1.960	16°42′	—	2800	灰白色	小
8	榛原郡勝間田村	26.9	1.401	22.11	6.0	—	26.2	1.58	1.620	0.0020	58.0	0.40	0.80	39°52′	0.83	10°45′	—	—		中
9	浜名郡東浜村都築	28.190	1.424	6.764	27.0	16.81	17.86	1.41	1.730	0.0005	56.60	0.51	0.54	30°14′	1.02	16°00′	—	2200	赤褐	中
10	熱海市国立病院	19.90	1.358	66.70	15.50	67.90	71.20	1.365	1.365	0.0020	12.50	0.55	0.560	22°09′	0.21	11°46′	—	2200		中
11	小笠郡於保村南田	34.6	1.370	15.14	4.0	27.1	21.0	1.540	1.580	0.0010	7.2	0.59	0.26	16°12′	0.63	27°40′	1.0	2200	灰	
12	周智郡森町西金谷	23.837	1.623	13.348	4.0	27.27	14.7	1.96	1.87	0.001	19.0	1.145	0.1	57°59′	0.86	33°20′	1.0	2800	赤茶	中
13	静岡市長沼	—	—	—	—	22.30	19.80	1.320	2.018	—	—	0.21	0.950	18°15′	0.30	24°15′	1.0	—	青灰色	
14	小笠郡南山村前岡	26.9	1.478	5.13	2.5	26.2	18.3	1.580	1.765	0.0001	12.3	0.11	0.45	45°00′	0.65	33°45′	0.8	3000	灰褐	中
15	富士郡白糸村田貫沼	42.98	1.081	38.12	10.60	85.33	5.00	1.030	1.140	0.002	11.80	0.311	0.460	45°20′	0.420	9°29′	—	—	褐色	中
16	浜名郡新井町三谷	—	—	—	—	12.44	14.93	1.71	1.000	0.001	23.50	0.29	0.15	49°20′	0.18	24°00′	—	1800	赤	小

表-8 宮城県路

試料番号	採取地点名	色	土質名	現場含水比 (%)	現場乾燥密度 (gr/cm³)	粒度試験 通過量(%) 10番	40番	200番	区分量(%) 礫分	砂分	シルト分	粘土分	最大径 (mm)	有効径 (mm)	均等係数	土粒子の密度 (gr/cm³)	液性限界
1	伊具郡角田町天神町	黒灰色	沖積粘土	40.8		96	88	74	4	32	33	31	1.50	0.001以下		2.622	62.25
2	伊具郡角田町大鳥橋	褐色	沖積ローム質土	56.2	0.772	100	100	96	0	23	67	10	0.07	0.0052	6.15	2.710	46.50
3	伊具郡四恩村	茶褐色	凝灰岩風化土	5.7		97	94	44	3	60	33	4	1.6	0.02	9.50	2.664	
4	刈田郡白石町上郡山	黄褐色	洪積層ローム質土	61.92		92	80	65	8	44	37	11	3.0	0.004	15.2	2.688	61.45
5	刈田郡斉川村町尻	茶色	路床ローム質土	33.2	1.275	98	88	60	2	48	39	11	1.1	0.004	18.5	2.616	49.95
6	刈田郡越河村五賀	茶色	路床ローム質土			99	89	71	1	35	41	23	0.9	0.003	16.0	2.714	
7		黒褐色	路床ローム質土	42.5	1.156	99	91	76	1	34	50	15	0.7	0.003	13.2	2.655	51.34
8	刈田郡宮村遠刈田温泉入口		洪積土	51.6													
9	刈田郡宮村青根温泉	褐色	洪積ローム質土	101.3	0.574	100	97	45	0	70	29	1	0.36	0.02	4.82	2.714	52.83
10	柴田郡川崎村立野	淡黄褐色	洪積ローム	118.8	0.610	98	80	57	2	47	41	10	1.4	0.005	20.0	2.623	
11	柴田郡村田町大曲り	淡黄白色		28.9		99	73	50	1	74	24	1	1.3	0.03	5.3	2.478	
12	柴田郡村田町丹田町の境界	灰色	凝灰岩風化土	43.8		92	62	41	8	55	25	12	4.0	0.004	82.5	2.454	
13	柴田郡富岡村支倉字大石田	青灰色	凝灰岩風化土	35.4		99	80	28	1	74	14	11	0.76	0.004	76.2	2.679	64.10
14	名取郡秋保村湯の橋	茶褐色	河岸段丘礫層	21.2													
15	名取郡生出村茂庭	暗青灰色	風化凝灰岩													2.847	
16	亘理郡山下町小平	淡黄色	山砂	17.2	1.404	98	47	11	2	90	8	0	1.2	0.06	6.66	2.678	
17	亘理郡吉田村	暗青灰色	路床粘土ローム	31.3	1.146	99	92	62	0	53	40	7	0.5	0.008	8.67	2.471	
18	仙台市長町特殊鋼社前	暗青灰色	路床沖積ローム質土			99	76	38	1	69	22	8	0.95	0.001	38.4	2.557	
19	宮城郡広瀬村白沢	淡黄淡色	凝灰岩風化土			100	93	68	0	39	30	31	0.48	0.001以下		2.561	61.00
20	仙台市北根	淡黄色	沖積ローム質土	18.6		100	96	85	0	54	29	17	0.27	0.002	31.6	2.632	71.03
21	宮城郡七北田村新田	茶褐色	沖積砂層	34.3	1.185						10	3		0.025		2.720	
22		暗灰黒色	沖積シルト														
23	黒川郡富谷村字町	ねづみ色	凝灰岩風化土			100	74	18	0	88	12	0	0.81	0.04	7.62	2.603	
24	黒川郡大衡村吹付	黄褐色	洪積ローム質土	72.2	0.775	100	97	90	0	21	79	0	0.26	0.02	2.00	2.650	76.25
25	仙台市福田町福田橋	暗灰黒色	沖積ローム質土	82.6		100	100	84	0	16	79	5	0.086	0.01	2.28	2.469	53.30
26	宮城郡多賀城町八幡	黄褐	凝灰岩風化土	39.4		100	99	65	0	44	32	24	0.24	0.001以下		2.585	
27	宮城郡松島町海岸	灰白色	凝灰岩	48.5		99	79	42	1	64	30	5	0.90	0.01	18.90	2.491	
28	石巻市下山	灰褐色	砂丘	4.5	1.310	100	96	1	0	99	0	1	0.38	0.14	1.93	2.599	

床　土　試　料

度試験			締固の試験		C.B.R試験		せん断試験		三軸試験		一軸圧	土の分類			
塑性限界	塑性指数	収縮限界	最大乾燥密度 (gr/cm³)	最適含水比 (%)	C.B.R. (%)	膨張率 (%)	粘着力 (kg/cm²)	内部摩擦角 (度分)	粘着力 (kg/cm²)	内部摩擦角 (度分)	縮強度 (kg/cm²)	AASHO分類	CASAGRANDE分類	三角分類	地質学的分類
31.09	31.16											A—7—5 (20)	CH	粘土	沖積層
19.26	33.36	—	1.242	40.00								A—7—5 (17)	MI	沈泥質ローム	沖積層
			1.904	11.00									SF	砂質ローム	洪積層
31.52	29.63	31.77	1.408	31.80								A—7—5 (17)	MH	砂質ローム	洪積層
17.97	31.78	33.97	1.337	35.70	22.60	1.93	0.17	8°00′	0.505	16°11′	1.327	A—7—5 (16)	MI	砂質ローム	沖積層
			1.370	33.00								A—7—5	MH	粘土質ローム	
26.15	25.19	39.48	1.383	29.50					0.504	32°52′	1.953	A—7—6 (16)	MH	沈泥質ローム	沖積層
															洪積層
3.90	48.93	83.63	1.119	47.20			1.10	27°30′				A—5(9)	MH	粘質ローム	洪積層
			0.918	62.00									ML	ローム	〃
			1.342	31.40									ML	砂質ローム	〃
			1.279	28.40									ML	砂質ローム	
40.83	23.29		1.508	26.40					0.544	27°23′	1.872	A—2—7 (2)	MI	砂質ローム	凝灰岩風化生成物
															河設堆積層
															風化した凝灰岩
			1.675	17.30								A—3	SW	砂	風化土
			1.482	24.20	36.85	0.93			0.534	19°02′	1.359		OL	粘土質ローム	沖積層
			1.423	27.50									SF	砂質ローム	沖積層
25.53	35.49		1.408	30.40								A—7—5 (19)	MH	粘土質ローム	白沢層凝灰岩の風化物
40.96	30.07		1.271	35.30					0.628	28°93′	2.470	A—7—5 (20)	MH	砂質ローム	洪積層
			1.715	19.60									SF	砂	沖積層
			1.444	27.50	37.14	0.204			0.359	39°07′	1.550	A—2	SW	砂	洪積層
31.00	45.25		1.293	37.20	25.00	1.12	0.90	32°00′	0.572	25°19′	1.690	A—7—5 (20)	MH	シルト質ローム	洪積層
24.51	33.79		1.138	43.40	24.57	1.48	0.90	17°00′	0.542	27°58′	1.715	A—7—5 (20)	MH	沈泥質ローム	沖積層
			1.244	36.00	65.00	0.36	0.95	41°30′	0.441	36°41′	1.816		ML	粘土質ローム	洪積層
			1.109	45.70								A—4		砂質ローム	凝灰岩
												A—3	SU	砂シルト質	

表-8

試料番号	採取地点名	色	土質名	現場含水比 (%)	現場乾燥密度 (gr/cm³)	粒度 通過量(%) 10番	40番	200番	区分量(%) 礫分	砂分	シルト分	粘土分	試験 最大径 (mm)	有効径 (mm)	均等係数	土粒子の密度 (gr/cm³)	粘性 液性限界
29	栗原郡飯野川町根岸		砂岩														
30	登米郡上沼村桜湯	褐色	路床ローム質土	42.3		100	100	80	0	52	40	8	0.11	0.006	9.5	2.632	66.30
31	登米郡佐沼町新田	暗灰色	路床ローム質土	103.0		100	99	98	0	4	84	12	0.048	0.005	2.19	2.534	105.23
32	登米郡石越村岳根	淡黄褐色	凝灰岩風化土	41.7		100	74	49	0	59	41	0	1.08	0.02	8.88	2.643	53.72
33	栗原郡沢辺村金成村の境界	褐色	路床粘土	77.6		100	99	97	0	4	23	73	0.04	0.001以下		2.640	90.30
34		暗灰色	路床粘土	116.5		100	99	96	0	7	30	63	0.062	0.001以下		2.526	73.70
35		黒色	路床有機質土	269.3		100	100	99	0	1						2.222	113.00
36	栗原郡高清水町	淡黄褐色	凝灰岩風化土			83	66	49	17	39	25	19	15.0	0.001	192.3	2.670	45.50
37	古川市田尻町	淡黄褐色	凝灰岩風化土			93	72	40	0	18	48	34	2.7	0.0056	47.3	2.458	
38	遠田郡北浦村関根	青灰色	路床ローム質土	56.1		100	98	89	0	24	48	28	0.15	0.001	21.3	2.589	62.50
39	遠田郡涌谷町黄金迫	淡黄緑色	山砂	30.9		100	99	20	0	87	13	0	0.25	0.04	4.0	2.676	
40	志田郡鹿島台町内の浦		沖積ローム質土			100	98	74	0	47	46	7	0.26	0.008	7.63	2.623	
41	玉造郡一迫村池月 A	黄茶色		49.5		100	100	95	0	22	64	14	0.0078	0.003	11.67	2.623	51.22
42	〃 B																
43	玉造郡鳴子町		河沿い砂礫層	35.3		99	83	19	1	87	9	3	0.82	0.04	6.10	2.653	
44	加美郡広原村	黒色	有機質土	101.0													
45	加美郡色麻村朝日座	淡黄褐色	路床ローム質土			99	84	63	1	42	57	0	0.96	0.015	4.13	2.633	70.61
46	志田郡三本木町蟻ヶ袋	黄褐色	凝灰岩風化土	45.9		100	93	55	0	63	28	9	0.50	0.008	15.0	2.581	55.00

（つづき）

度試験			締固め試験		C.B.R試験		剪断試験		三軸試験		一軸圧	土の分類			
塑性限界	塑性指数	収縮限界	最大乾燥密度 (gr/cm³)	最適含水比 (%)	C.B.R. (%)	膨張率 (%)	粘着力 (kg/cm²)	内部摩擦角 (度分)	粘着力 (kg/cm²)	内部摩擦角 (度分)	縮強度 (kg/cm²)	AASHO分類	CASAGRANDE分類	三角分類	地質学的分類
36.06	30.24	31.02	1.456	26.30	12.19	3.78	1.55	19°30′	0.380	36°59′	2.280	A—7—5 (20)	MH	砂質ローム	沖積層
57.96	49.27		1.052	51.80					0.215	41°19′	1.540	A—7—5 (20)	MH	沈泥質ローム	沖積層
22.43	31.29	39.77	1.412	28.70			0.60	31°12′				A—7—5 (11)	MH	砂質ローム	洪積層
44.63	45.07	30.35	1.149	37.20			1.20	20°30′				A—7—5 (20)	CH	粘土	沖積層
23.66	50.04	31.94	1.060	48.00			0.80	12°24′	0.316	37°08′	1.450	A—7—5 (20)	CH	粘土	沖積層
55.57	57.43		0.760	78.00			0.25	11°30′				A—8 (20)	PT		
			1.488	25.50	42.86	1.34	1.45	8°48′	0.577	26°56′	2.040	A—7—6	MI	砂質ローム	洪積層
			1.321	28.10								A—4	ML	砂質ローム	洪積層
30.88	31.62	38.43	1.322	31.00	33.33	1.48	1.68	16°24′	0.243	38°15′	1.603	A—7—5 (20)	MH	粘土質ローム	沖積層
			1.553	22.80								A—2	SP	砂	洪積層
			1.390	29.50								A—4	ML	ローム	沖積層
25.48	25.74		1.362	31.80	18.00	1.23	1.70	22°00′	0.437	37°38′	2.024	A—7—6 (17)	MH	シルト質ローム	沖積層
												A—2	SC	砂	
			0.934	56.40								A—8	PT		沖積層
40.92	29.69	24.88	1.490	26.70	7.24	3.07	1.30	38°12′	0.370	41°21′	1.836	A—7—6 (20)		シルト質ローム	沖積層
32.10	22.90	—	1.367	28.5	37.00	0.55	1.20	19°00′	0.651	29°23′	2.589	A—7—6 (11)		砂質ローム	風化土

表-9 福島県路

試料番号	地点名	色	土質名	現場含水比 (%)	現場乾燥密度 (gr/cm³)	粒度分析 通過量(%) 10番	40番	200番	区分量(%) 礫分	砂分	シルト分	粘土分	最大径 (mm)
1	西白河郡西郷村米	褐色	ローム質土	—	—	100	94	75	0	29	42.5	28.5	0.7
2	白河市白河駅前広場	黒褐色	路床ローム質土	—	—	92	76	45	8	59	30	3	9
3	岩瀬郡鏡石村久来石	褐色	ローム質土	33.1	1.39	99	92	75	1	39	60	0	2.0
4	〃 高久田	白色	路床粘土	—	—	99	94	73	1	37	61	1	1.5
5	須賀川市八幡町	青色	粘土	—	—	98	96	88	2	20	45	33	2.0
6	岩瀬郡白方村梅田	黒褐色	畑土	—	—	86	98	43	4	64	28	4	4.0
7	安積郡河内村永倉	褐色	ローム質土	—	—	100	94	68	0	45	55	0	1.0
8	耶麻郡翁島村金子沢	褐色	ローム質土	—	—	100	92	58	0	64	36	0	0.6
9	耶麻郡磐梯村磨上	褐色	ローム質土	—	—	89	69	22	11	53	36	0	8
10	大沼郡川口村越川	黒色	礫交り砂質土	—	—	90	68	11	10	86	4	0	6.0
11	南会津郡荒海村滝の原	灰褐色	砂質土	87	0.706	98	76	11	2	96	2	0	2.0
12	北会津郡一箕村金堀	灰白色	砂質土	—	—	100	100	18	0	100	0	0	0.5
13	安達郡渋川村米沢	褐色	ローム質土	61.6	1.02	100	94	30	0	72	28	0	0.2
14	田村郡常葉町板橋	褐色	花崗岩風化土	—	—	85	56	8.5	15	81	4	0	5
15	石川郡川東村雨田	褐色	花崗岩風化土	—	—	100	86	11	0	97	3	0	0.6
16	西白河郡釜子村刈敷坂	褐色	ローム質土	—	—	99	96	85	1	17	62	20	2.5
17	東白河棚倉町花園	青灰色	路床砂質土	—	—	97	64	15	4	84	12	0	2.5
18	〃 豊里村小田川	黒色	畑土	—	—	90	63	36	10	62	26	2	5
19	双葉郡広野町折木	褐色	砂岩風化土	—	—	100	74	14	0	93	7	0	1.2
20	相馬郡太田村矢川原	黄色	ローム質土	—	—	100	99	27	0	85	15	0	0.3
21	〃 日立木村柚木	黄色	砂岩風化土	—	—	100	100	13	0	94	6	0	0.3
22	伊達郡大木戸村見田	茶褐色	集塊岩風化土	—	—	100	90	55	0	52	48	0	2.5
23	〃 保原町揃川	淡褐色	畑土	—	—	100	100	73	0	38	50	12	0.3
24	〃 伊達町田町	褐色	路床砂質土	—	—	98	93	40	2	66	28	4	5
25	福島市岡部西原	黒色	路床ローム質土	—	—	98	98	70	0	42	48	10	5
26	〃 春日町	赤色	石英粗面岩風化土	—	—	82	69	30	18	61	21	0	5
27	〃 早稲町	青色	路床粘土質土	—	—	89	62	18	11	79	10	0	2.5
28	安達郡針道村笹の田	白色	花崗岩風化土	—	—	96	90	90	4	29	46	21	5

表-10 岩手県路

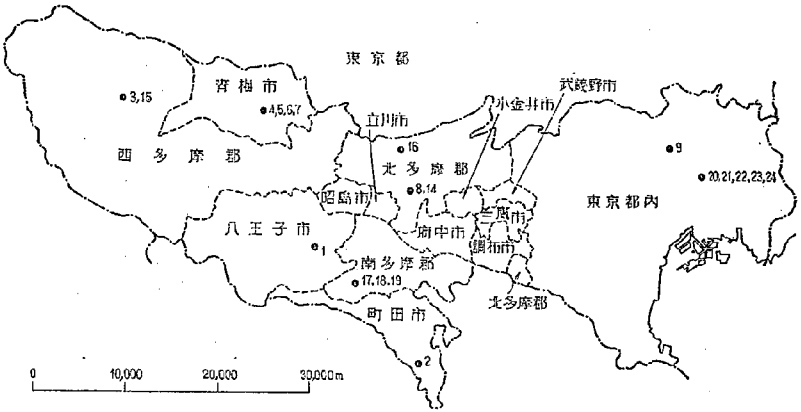
試料番号	採取地点名	色	土質名	現場含水比 (%)	現場乾燥密度 (gr/cm³)	粒度試験 通過量(%) 10番	40番	200番	区分量(%) 礫分	砂分	シルト分	粘土分	最大径 (mm)	有効径 (mm)	均等係数	土粒子の密度 (gr/cm³)
1	胆沢郡前沢町岩堰		路床ローム	40.0	—	100	80	57	0	47	24	29	0.800	0.001以下		2.64
2	胆沢郡相去村赤鳥居		砂礫層	44.4	—	32	21	8	68	25	4	3	80.0	0.095	168.5	—
3	和賀郡笹間村中笹間	茶褐色	路床粘土	—	—	82	66	55	18	—	0	—	10.0	—	—	—
4	和賀郡笹間村中笹間	茶褐色	路床礫混り粘土	—	—	95	90	86	5	10	24	61	1.8	0.001以下	—	2.67
5	南貫郡湯本村寺前		河段丘砂礫層	26.8	—	28	11	5	72	23	—	—	70.0	—	44.4	2.55
6	岩手郡西山村西根	赤茶褐色	路床砂質ローム	53.8	—	97	88	57	3	53	32	12	1.0	0.004	21.2	—
7	岩手郡大更村松森山麓	黄褐色	火山風化土	36.2	—	85	75	64	15	—	—	—	11.0	—	—	2.82
8	岩手郡松尾村野駄	黄褐色	洪積粘土	94.4	—	100	99	95	0	16	54	30	0.072	0.001以下	—	2.74
9	二戸郡一戸町西方	黄褐色	風化土	75.9	—	100	96	72	0	35	37	28	0.37	0.0015	22.0	2.65
10	寺岩手郡滝沢村種畜所前	褐色	路床ローム	—	—	100	90	60	0	49	41	10		0.0054	13.7	2.50

床　土　試　料

有効径 (mm)	均等係数 (mm/mm)	土粒子の密度 (gr/cm³)	稠度試験(%) 液性限界	塑性限界	収縮限界	塑性指数	締固め試験 最大乾燥密度 (gr/cm³)	最適含水比 (%)	C.B.R試験 C.B.R. (%)	膨脹率 (%)	土の分類 三角分類	
0.0015	1.6	2.70	97	80.6	46.9	16.4	1.00	55			粘土質ローム	洪積層赤土
0.0115	11.7	2.65	9.8	53.3	24.7	6.5	1.07	25	13.3	0.52	砂質ローム	沖積層ローム質土
0.0135	3.7	2.69	54	29.6	24.8	24.4	1.50	26	20.5	1.93	シルト質ローム	洪積層赤土
0.0108	4.2	2.64	72	32.2	27.0	39.8	1.40	28			〃	洪積層粘土
0.0014	15.3	2.53	53	45.4	28.9	7.6	1.40	25	18.4	4.41	粘土	〃
0.0078	1.7	2.70	33	21.3	20.5	11.7	1.62	20			礫交り砂質ローム	洪積層表土
0.0127	4.5	2.74	50.5	32.3	22.7	18.2	1.44	30	21.2	1.74	シルト質ローム	洪積層ローム質土
0.034	2.3	2.78	71	56.5	41.9	14.5	1.15	40			砂質ローム	洪積層粘土
0.017	15.8	2.51	58	50.5	38.2	7.5	1.30	34			礫交り砂質ローム	火山噴出土
0.071	19.4	2.30	40	37.9	25.7	2.1	1.40	27			礫交り砂	沖積層砂礫土
0.074	4.1	2.67	78	67.6	18.4	10.4	0.96	60			砂	洪積層砂質土
0.063	1.83	2.71	72	55.9	38.7	16.1	1.45	25			砂	第三紀層砂礫土
0.018	6.95	2.73	69	36.2	35.0	32.8	1.24	38			砂質ローム	洪積層赤土
0.084	5.71	2.59	43	39	29.74	4.0	1.55	25			礫交り砂	花崗岩風化土
0.073	3.70	2.63	44	30.5	23.7	13.5	1.47	25			砂	花崗岩風化土
0.0034	50.9	2.61	70	55	54.0	15					シルト質ローム	洪積層赤土
0.04	8.75	2.33	58	50	40.7	8	1.20	40			砂	凝灰岩風化土
0.023	16.50	2.66	67.5	58.1	40.9	9.4	1.30	35			礫交り砂質ローム	洪積層表土
0.059	4.74	2.65	31	26.1	13.8	4.9	1.70	15			砂	第三紀層砂岩風化土
0.04	3.25	2.65	54	44.2	36.9	9.8	1.29	30			砂	〃
0.064	4.30	2.55	45	37	23.8	8.0	1.70	15			砂	〃
0.015	5.73	2.76	46.2	28	13.0	18.2	1.37	27			砂質ローム	集塊岩風化土
0.0044	10.20	2.72	44	31.1	29.0	12.9	1.63	20			シルト質ローム	沖積ローム質土
0.0011	91.00	2.77	32	23.1	27.9	8.9	1.46	25			砂質ローム	沖積砂質土
0.0054	10.00	2.67	75	45.4	16.5	29.6	1.24	25			ローム	沖積ローム質土
0.022	8.18	2.65	46	30.3	19.0	15.7	1.50	25			礫交り砂質ローム	石英粗面岩風化土
0.05	8.00	2.69	48	42.5	21.8	5.5	1.50	20			礫交り砂	沖積粘土質土（礫混入）
0.003	12.00	2.69	77	43.1	32.6	33.9	1.10	45			粘土質ローム	火山噴出土

床　土　試　料

稠度試験 液性限界	塑性限界	塑性指数	収縮限界	締固め試験 最大乾燥密度 (gr/cm³)	最適含水比 (%)	C.B.R試験 C.B.R. (%)	膨脹率 (%)	剪断試験 粘着力 (kg/cm²)	内部摩擦角 (度分)	一軸圧縮強度 (kg/cm²)	土の分類 AASHO分類	CASAGRANDEの分類	三角分類	地質学的分類
49.4	24.36	—	—	1.500	24.1	—	—	—	—	—	A-7-6	MI	砂質ローム	洪積層ローム
—	—	—	—	1.610	23.4	—	—	—	—	—	A-1-2	GC	礫混り砂	洪積層砂礫土
51.70	20.99	30.71	29	1.490	27.0	—	—	—	—	—	A-7-5(13)	MH	粘土質ローム	階段堆積層
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	CI	粘土	階段堆積層
—	—	—	—	1.486	26.0	—	—	—	—	—	A-1-2	GC	礫混り砂	〃
57.50	14.30	43.20	—	1.323	34.4	—	—	1.30	32°00′	1.27	A-7-5(14)	MH	砂質ローム	沖積土
—	—	—	—	1.130	45.5	—	—	—	—	—	—	GF	砂質ローム	火山岩風化土
94.70	26.33	68.37	54	0.882	71.0	—	—	1.15	12°36′	—	A-7-5(20)	MH	粘土	洪積層
86.60	38.74	47.86	61	1.005	56.0	—	—	0.40	10°00′	0.92	A-7-5(19)	MH	粘土質ローム	三紀層風化土（火山岩風化物を混ず）
68.2	52.1	16.1	—	—	—	—	—	—	—	—	A-7-5(10)	MH	ローム	火山風成層



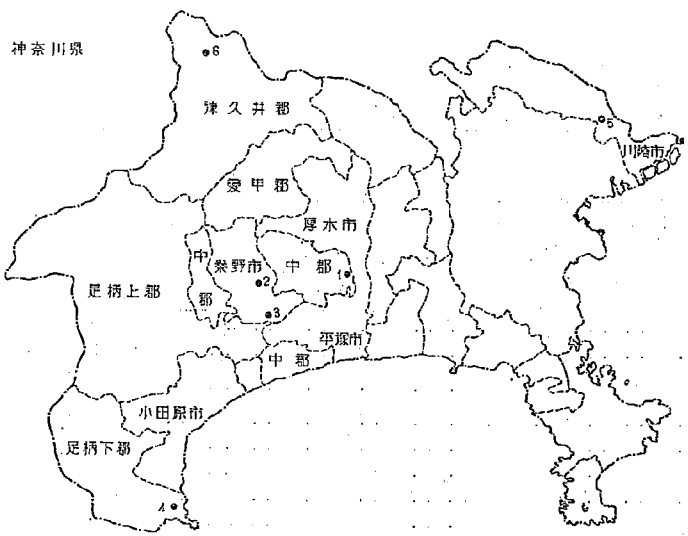


図-1 東京都ならびに神奈川県路床土試料採取地点

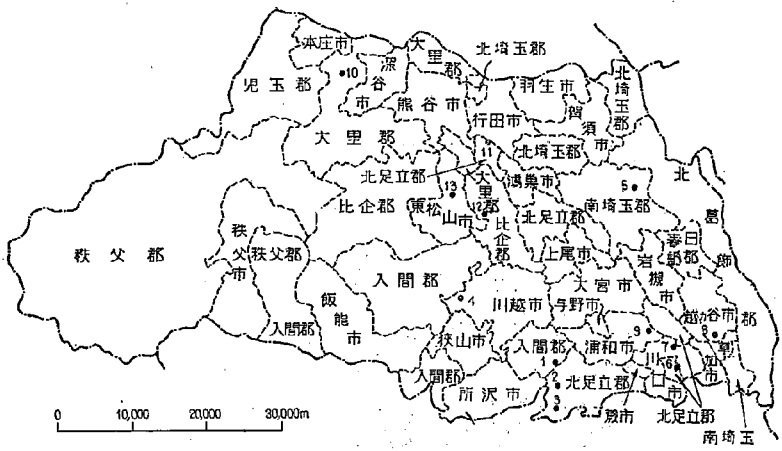


図-2　埼玉県路床土試料採取地点

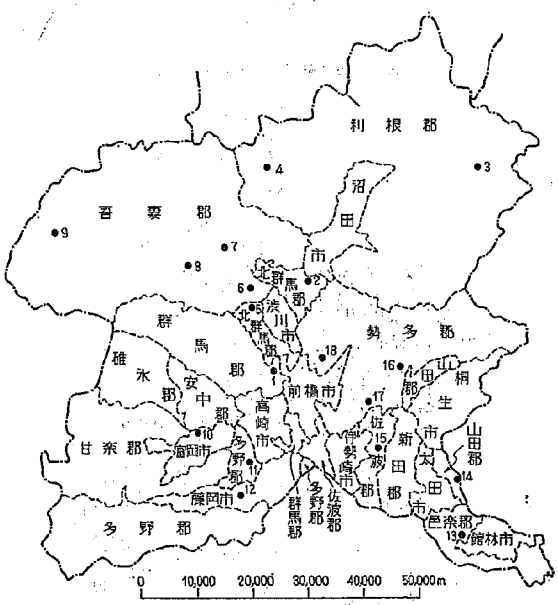


図-3　群馬県路床土試料採取地点

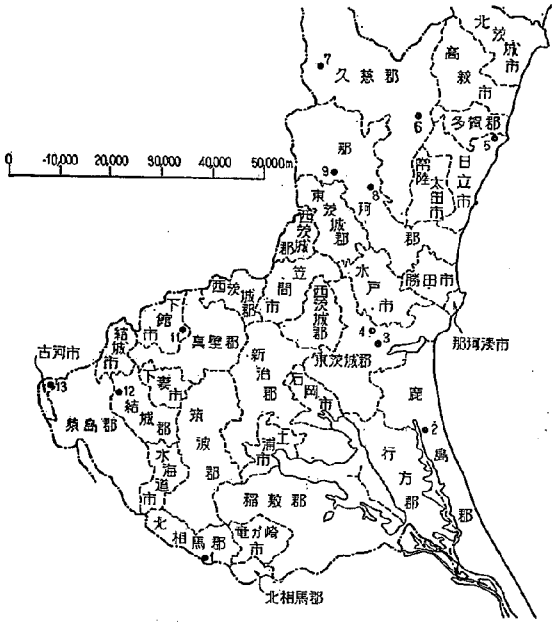


図-4 茨城県路床土試料採取地点

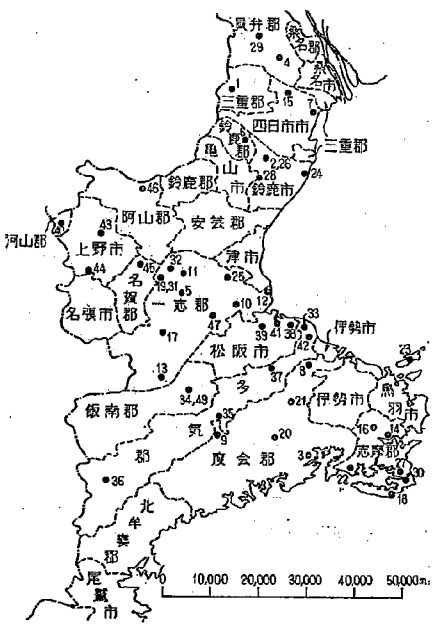


図-5 三重県路床土試料採取地点

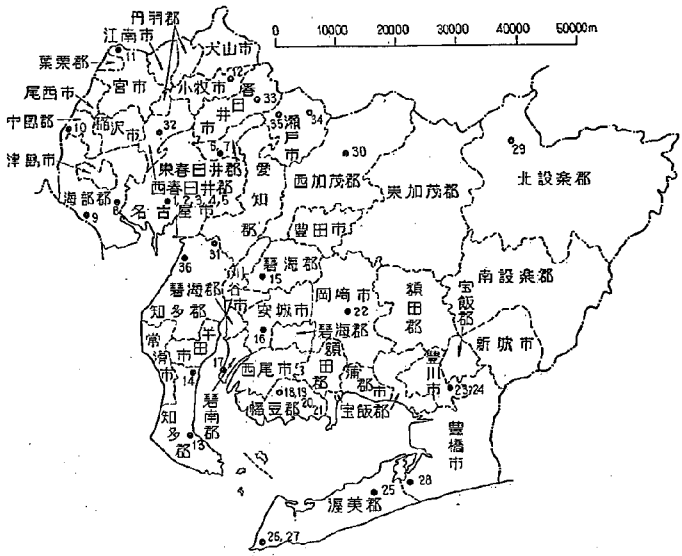


図-6　愛知県路床土試料採取地点

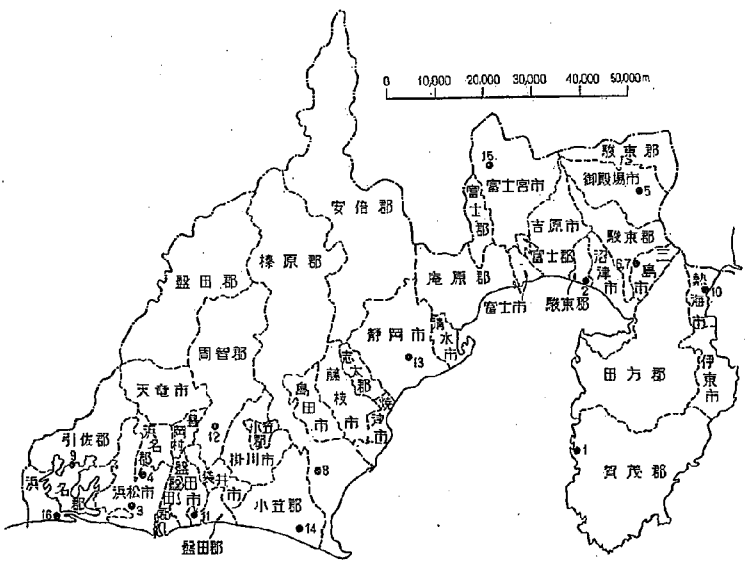


図-7　静岡県路床土試料採取地点

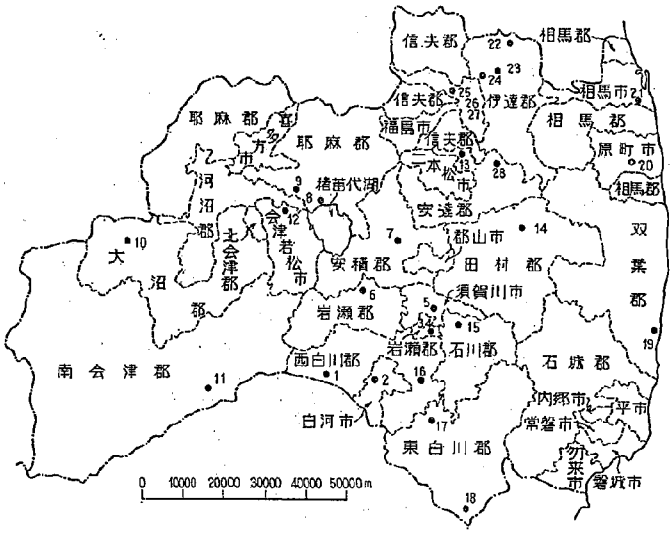


図-8 福島県路床土試料採取地点

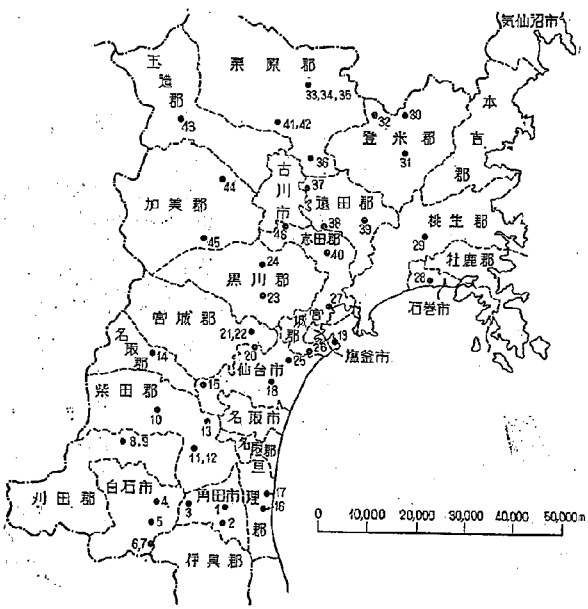


図-9 宮城県路床土試料採取地点

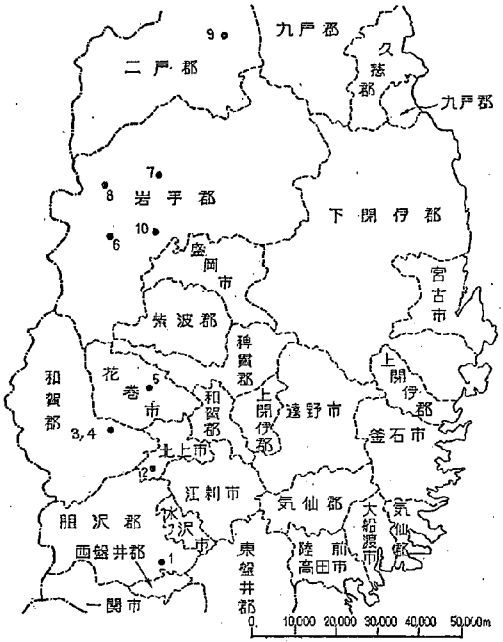


図-10　岩手県路床土試料採取地点

〔IV〕 実験結果とその検討

〔1〕 東京都の路床土（東—1～24，神奈川県路床土をふくむ）

東京都路床土のコロイド成分の粘土鉱物をX線回折およびDTA方法で検索した結果を図-11，12に示す。なおこれらの試料那については化学分析，イオン交換能の測定，電子顕微鏡による観察等も同時に実施したのでそれらの結果についてもふれることとする。

つぎに実験結果をのべる。

（1） X線回析およびDTA曲線について

東—1試料のX線回折図は鮮明な回折線を与えず，わずかに7.5Å，6.2Å，5.0Å，4.48Å，2.59Åの回折線を明らかに示すのみである。DTA曲線は150°Cの吸熱が大きく，幅も広く，またカオリン鉱物の存在も示す。920°Cの発熱ピークは530°Cの吸熱ピークに比して大きい。DTA曲線からはアロファンの存在が考えられる。この試料中には主としてアロファンが存在し，一部のハロイサイトも存在すると考えられる。

東—2試料のX線回折図は鮮明な回折線を与えない。DTA曲線は470°Cの発熱ピークと810°Cの吸熱ピークを与えるほかはアロファンのDTA曲線を示す。この試料中にはアロファンが主として存在し，一部のX鉱物（三重県の路床土を参照）らしいものが存在するかも知れないが明らかでない。

東—3試料のX線回折図は強い15.2Å線，7Åから8Åにおよぶ拡散した回折線，3.7Åの拡散した回折線および10.4Å線を示す。エチレングライコール処理で17.0Å線が見られることよりモンモリロナイトが存在することは明らかであり，10.4Å線はイライトであり，拡散した線はハロイサイト鉱物の混合層鉱物である。DTA曲線はモンモリロナイト，ハロイサイト鉱物およびイライトの混在を示し，X線回折の結果とも一致している。

東—4試料のX線回折図はわずかにカオリン鉱物を示しジプサイトを推定させるのみで，回折線はほとんど見られない。DTA曲線はアロファンとカオリン鉱物とジプサイトを示す。主としてアロファンよりなり，少量のカオリン鉱物およびジプサイトが存在する。

東—5試料のX線回折図はカオリン鉱物の少量のほかにジプサイトの回折線を示す。カオリン鉱物は底面反射をかくのでハロイサイト鉱物の混合層鉱物であろう。DTA曲線はジプサイトの熱吸ピークが顕著であり，カオリン鉱物による530°Cの吸熱ピークも見られるが，900°Cの発熱ピークは著しく拡散している。この発熱ピ

測によるものである。

DTA曲線はすでに報告してあるのと同一の装置により求めた。試料は原則として0.40g前後としたが，試料の少ないものはアルミナでうすめている。温度の上昇速度は10°C/minである。

大部分の試料は風乾試料粘土のX線回折とDTA方法を用い，エチレングライコール処理（EGと記す）は特殊のものにのみ適用している。加熱試料についてのX線回折，ピペリヂン処理試料でのDTA等は実施していないのでたとえば14Å鉱物の分別等は行なわれない場合もあり，今後これらの点を解明する必要がありさらに実験を継続したい。

X線回折，DTA法等でも試料によっては不完全の方法であり，化学分析，電子顕微鏡観察，赤外線スペクトル，イオン交換容量の測定等が必要であるが，この報告ではこれらの方法は併用していない。ただ東京都の路床土試料について化学分析，イオン交換容量の測定，電顕観察が一部試みられているにすぎない。この場合でも化学分析はアルカリ溶融法を用い，アルカリは炎光分析法により，イオン交換容量は酢酸アンモニヤ法によっている。電子顕微鏡写真は外部に依頼している。

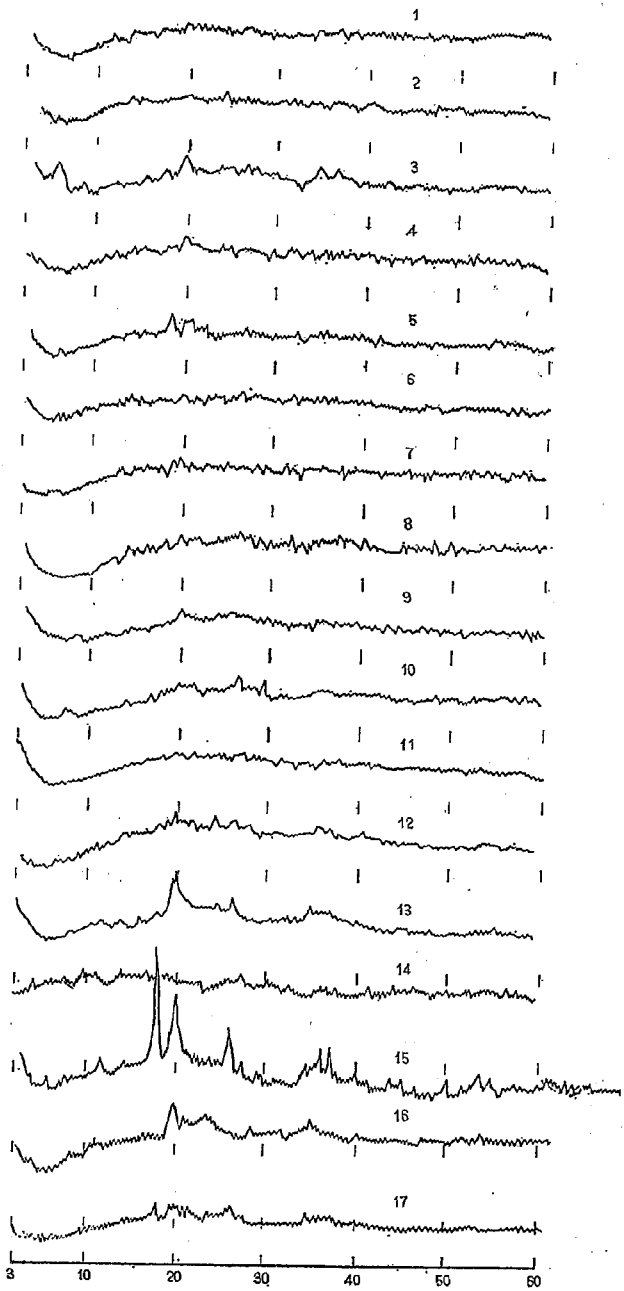


図-11 土壌コロイドのX線回折図（東京都路床土，神奈川県路床土）

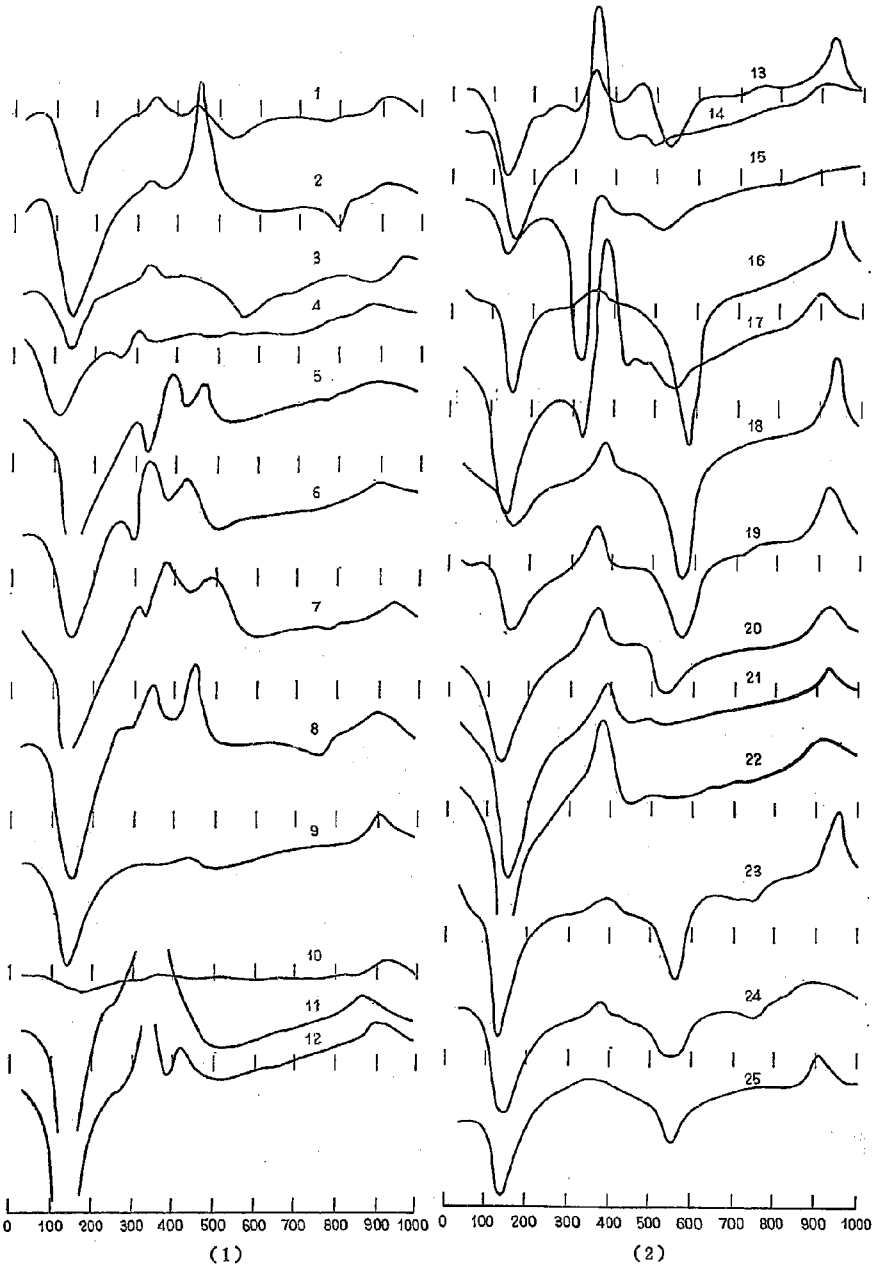
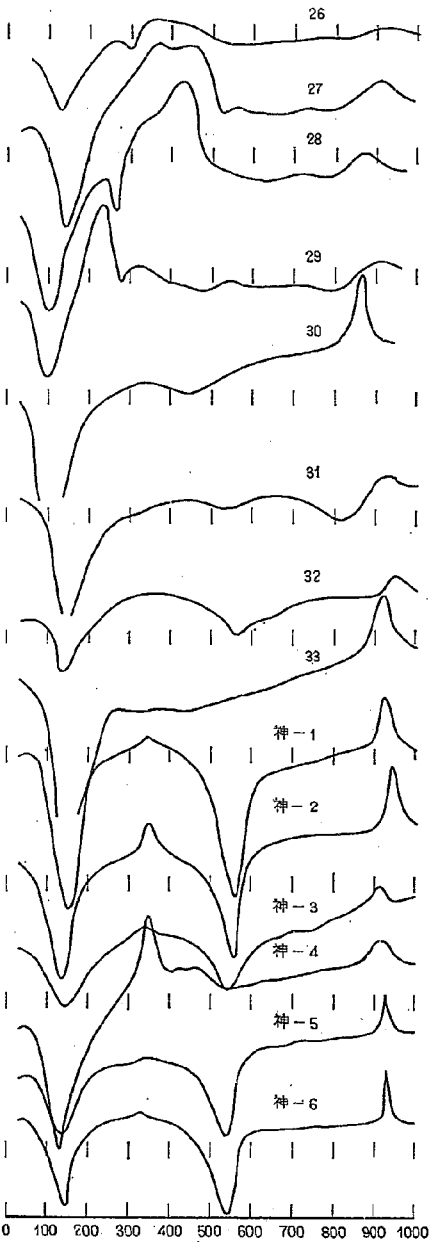


図-12　土壌コロイドの DTA 曲線（東京都路床土，神奈川県路床土）



(3)

図-12 土壌コロイドの DTA 曲線
(東京都路床土，神奈川県路床土)

ークはアロファンによると考えられる。この試料中には主としてアロファンが存在し，一部のハロイサイト鉱物とジプサイトが存在すると考えられる。

東—6試料のX線回折図は顕著な回折線を欠く。DTA曲線と共に考えれば，この試料中には主としてアロファンが存在し，一部のジプサイトおよびハロイサイト鉱物も見られる。

東—7試料のX線回折図も上図土である東—6試料とほとんど同じであり，主としてアロファンよりなり一部のハロイサイト鉱物とジプサイトを含有する。

東—8試料のX線回折図は顕著な回折線を示さないが，カオリン鉱物およびジプサイトさらに長石類の存在を示している。DTA 曲線と共に考えてアロファンが主要成分であり，一部のハロイサイト鉱物ジプサイトおよび長石類が考えられる。X鉱物も推定される。

東—9試料のX線回折図はわずかに加水ハロイサイトを示すが，明瞭な回折線を与えない。DTA 曲線と共に考えてアロファンが主要成分であり，一部の加水ハロイサイトを混じると考えられる。

東—10試料のX線回折図は明瞭な回折を示さない。粘土鉱物の（hk）線のほか石英の回折線が見られる。DTA 曲線は試料量が著しく少ないので鮮明でないが，100°C から300°C にわたる吸熱および930°C に見られる発熱ピークよりアロファンが主要成分と考えうる。

東—11試料のX線回折図と DTA 曲線よりほとんどアロファンと考えられる。

東—12試料のX線回折図と DTA 曲線よりほとんどアロファンと考えられ，一部のゲータイトも存在する。

東—13試料のX線回折図は7.2Å から8.8Å におよぶ拡散した回折線が示され，この線は低角側に尾を引いている。ほかに石英とジプサイトが存在する。また5.47Å線が見られ何によるかは明らかでないが β-$Fe_2O_3 \cdot H_2O$に関係する公算もある。X鉱物も推定される。

DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，ジプサイトも見られる。X線回折図と DTA 曲線からこの試料中にはハロイサイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在し，ほかにジプサイト，石英が見られる。X鉱物も推定され，β-$Fe_2O_3 \cdot H_2O$ が存在するかもしれない。

東—14試料のX線回折図は明瞭な回折線を示さず，わずかに粘土鉱物の（hk）線の一部とゲータイトの回折線を示す。DTA 曲線は少量のカオリン鉱物を示すほかはアロファンの存在を示す。X線回折の結果と考えてこの試料中には主としてアロファンが存在し，そのほか少量のハロイサイト鉱物とゲータイトの存在すると考えられる。

東—15試料のX線回折図は弱い14.7Å線，11.2Å線，10.6Å 線および比較的強い7.31Å 線を示し，このほかジプサイトおよび石英の明瞭な回折線を示す。DTA

曲線はジプサイトを示し，カオリン鉱物の存在も示す。

東—16試料のX線回折図は鮮明な回折線は与えないがハロイサイトおよび加水ハロイサイトの存在を示す。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，X線回折の結果と一致する。少量のジプサイトが存在する。

東—17試料のX線回折図は鮮明な回折線をほとんど示さない。7Åから9Åにおよぶ弱い帯状回折が見られ，粘土鉱物による4.50Å，2.58Å線等も見られ，ハロイサイト鉱物がわずかながら存在すると考えられる。ほかにジプサイトがはっきり存在し，石英も推定される。DTA曲線は一部のハロイサイト鉱物を示すが，相当量のアロファンの存在を示し，ジプサイトも明瞭である。この試料中には主としてアロファンが存在し，ジプサイトの存在も明らかであり，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物も存在し，ほかにゲータイトおよび石英も推定される。

東—18試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線からはハロイサイト鉱物が考えられる。

東—19試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線からはハロイサイト鉱物が考えられ，700°C に小さい吸熱ピークが見られ少量の14Å鉱物が混在するかも知れない。

東—20～24は上野公園西郷銅像地点でのプロファイル試料である。X線回折図を欠くので DTA 曲線より推定すれば，表層部はハロイサイト鉱物とアロファンよりなり，2m および 4m 層では主としてアロファンであり，ついで7m 層では加水ハロイサイトを主とし，700°C から800°C におよぶ吸熱反応が見られこの原因については明らかでない。最下部の13m層では500°C から600°C の吸熱ピークは幅が広くて浅くなり，900°C の発熱ピークは円味を持った拡散した形となり，さらに 700°C から800°C に明瞭な吸熱が見られる。この吸熱は恐らく14Å鉱物によるものであろうことは SiO_2/Al_2O_3 が大きく，MgO 含量が大きいことより十分推定することができる。この地点では上方より下方に向かいアロファンより加水ハロイサイトをへて，14Å鉱物を含有するハロイサイト鉱物に変っていると考えられる。

関東ローム層として地質学的にも最も詳しく研究されているのは東京周辺のものであるから，東京都の路床土についてやや詳細に実験した結果を次にのべる。

関東平野は関東ロームで覆われている。その生因については多くの研究があり，[44], [45] その性質が特異であるためにわれわれの経済活動と密接な関係を持ち，それだけ関心を集めてきている。関東ローム土の性質がその土壌粘土鉱物の性質に支配されることが想定されたので，関[46]，塩入[47]を始め主として土壌学分野の多くの研究者により研究された。その結果はアロファンとされている。しかし鉱物学的のアロファンの立場はそれ程明確ではなかった。戦後粘土鉱物学的の検討が主として須藤[48], [49] により加えられ，ローム層のプロファイルにより粘土鉱物を異にし，それらの間に相関性のあることも発見された。関東ロームに関する地質学的研究も進められ，東京周辺については詳細に分類されるに至り[50]，関東平野の全部にわたる同様な研究が行なわれると期待される。

東京都の路床土として考える場合は次のことを考慮しておかねばならない。東京都周辺のローム層は古さの順に下層から多摩ローム層，下末吉ローム層，武蔵野ローム層，立川ローム層に分類され，立川ローム層が大部分アロファンが主要粘土鉱物であり，下方の方が加水ハロイサイトとハロイサイトの不規則混合層鉱物の形をとりつつ，加水ハロイサイト化することである。したがって路床土としては地域的にもまた土工の方法によっても，これらの各ローム層の土である場合が多い。

東京都の路床土試料としては工学的土性図作製に用いたものもあるが，土木研究所道路研究室での試験試料および著者の採取したものもある。

これらの試料中の粘土鉱物の検索結果については，すでに日本化学会第8年会(1955)で報告したのであるが，関東ローム層全部に関係あるので，X線分析および示差熱分析のほかに化学分析，陽イオン交換容量または電子顕微鏡による観察をも加えた結果を述べる。

（2） 化学分析結果について

化学分析結果を表-11に示し，$Al_2O_3/(H_2O)^+$ および $SiO_2/(H_2O)^+$ と $(H_2O)^+$ との関係を図-13に示す。表より明らかのように $(H_2O)^-$ および $(H_2O)^+$ はいづれも大きく，吸着水の多量に存在するゲル状物質等の存在を示し，Al_2O_3 の含量は多い。SiO_2/R_2O_3，SiO_2/Al_2O_3 は共に小さく，MgO，Na_2O および K_2O の含量はいずれも低くい。ただ東—3試料は例外である。これらのことはモンモリロナイトおよびイライト等が存在しても少量であることを示す。Al_2O_3 の含量は特に多く，SiO_2/Al_2O_3 が2を超すものは東—3，19，24 以外はない。$Al_2O_3/(H_2O)^+$ と $(H_2O)^+$ の間および $SiO_2/(H_2O)^+$ と $(H_2O)^+$ の間には図-2，3，13に示すような直線的関係が見られ，Al_2O_3 および SiO_2 は $(H_2O)^+$ と特に密接な関係がある。またこれらの線より著しく離れているものは特殊な鉱物組成を示すものである。遊離状態で存在する酸化物は Fe_2O_3 が多く，Fe_2O_3 の半分以上におよんでいるが，Al_2O_3 はそれ程著しくはないし，SiO_2 は遊離状態のものは1％にもおよばない。

分析値をもう少し検討するために Al_2O_3-SiO_2-$(H_2O)^+$ の三成分系として三角座標で示したのが図-14である。アロファンの組成は小坂[51]によれば $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$ と $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 5H_2O$ の範囲内にあるとされる。実験に用いた試料では多くは $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$ と $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot$

表-11 東京都路床土コロイド成分の化学分析値

試料番号	化学分析値（%）												成分比率（モル比）				遊離酸化物(%)			成分比率（脱鉄物）		イオン交換能
	$(H_2O)^-$	$(H_2O)^+$	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	P_2O_5	TiO_2	MnO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SiO_2/Al_2O_3	SiO_2/R_2O_3	$SiO_2/(H_2O)^+$	$Al_2O_3/(H_2O)^+$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2/Al_2O_3	SiO_2/R_2O_3	(meq/100g)
東一 1	12.06	15.56	25.40	12.60	27.40	0.75	1.37	0.17	2.69	1.03	0.47	0.84	1.57	1.21	0.49	0.31	0.40	4.26	5.92	1.84	1.55	30.3
2	15.15	18.49	22.29	11.89	22.35	0.86	1.32	0.10	5.99	0.89	0.45	0.31	1.69	1.26	0.36	0.21	0.59	2.87	8.66	1.89	1.71	48.7
3	7.83	7.72	42.06	9.38	23.18	0.16	0.94	0.14	1.94	3.26	0.16	2.68	3.05	2.42	1.61	0.53	0.46	0.50	5.06	3.14	2.76	43.6
4	14.37	15.97	22.57	11.91	27.39	1.14	1.29	0.13	3.29	1.01	0.51	0.43	1.40	1.10	0.42	0.30	0.57	4.71	7.34	1.65	1.46	12.6
5	14.10	16.37	19.89	14.53	29.02	0.20	1.61	0.05	2.04	1.20	0.34	0.50	1.16	0.88	0.36	0.31	0.39	3.65	6.80	1.31	1.09	14.3
6	15.01	17.11	21.83	13.33	25.75	0.94	1.36	0.14	2.82	1.06	0.40	0.66	1.44	1.08	0.38	0.27	0.43	4.05	8.56	1.67	1.47	20.4
7	18.19	16.79	20.70	11.85	25.35	0.37	1.23	0.10	3.79	0.91	0.10	0.42	1.39	1.07	0.37	0.27	0.45	4.05	7.84	1.61	1.44	34.7
8	18.25	16.10	21.10	11.09	25.39	0.43	1.57	0.13	3.43	0.89	0.38	0.36	1.41	1.10	0.40	0.28	0.80	3.86	6.87	1.60	1.42	35.4
9	19.39	12.92	26.46	8.71	28.43	0.31	1.08	0.07	2.59	0.70	0.13	0.22	1.58	1.32	0.60	0.39	0.66	2.12	5.08	0.66	1.53	46.2
14	3.44	11.96	33.73	18.17	29.08	—	—	—	1.40	1.04	—	—	1.98	1.43	0.85	0.43	—	—	—	—	—	—
15	3.35	15.40	26.89	11.56	39.12	—	—	—	0.97	1.25	—	—	1.17	0.99	0.53	0.45	—	—	—	—	—	—
16	3.85	12.72	35.54	14.63	29.72	—	—	—	0.89	0.49	—	—	2.02	1.56	0.83	0.41	—	—	—	—	—	—
17	6.32	14.93	27.88	13.54	32.93	—	—	—	1.91	1.21	—	—	1.45	1.15	0.56	0.39	—	—	—	—	—	—
18	9.19	14.11	26.56	14.94	26.56	—	—	—	3.56	1.56	—	—	1.61	1.22	0.56	0.36	—	—	—	—	—	—
19	4.44	11.75	37.60	14.13	37.60	—	—	—	1.91	0.95	—	—	2.30	1.75	0.97	0.42	—	—	—	—	—	—
20	7.85	16.65	29.47	14.90	24.31	—	—	—	3.89	0.71	—	—	2.05	1.50	0.53	0.26	—	—	—	—	—	—
21	10.99	15.16	26.39	14.25	28.56	—	—	—	2.52	0.53	—	—	1.57	1.20	0.52	0.33	—	—	—	—	—	—
22	10.26	14.16	29.33	9.75	31.45	—	—	—	2.67	0.47	—	—	1.57	1.32	0.63	0.40	—	—	—	—	—	—
23	5.39	13.86	37.80	6.21	31.89	—	—	—	2.45	0.55	—	—	2.01	1.80	0.62	0.41	—	—	—	—	—	—
24	4.73	9.38	45.93	14.86	18.24	—	—	—	2.99	1.64	—	—	4.25	2.83	1.48	0.35	—	—	—	—	—	—

$2H_2O$ を結ぶ線上にあり，この線より右側のものも $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ と $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ を結ぶ線内にある。結局大部分は $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$，$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$，$Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$，$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 5H_2O$ を結ぶ四辺形内にあり，しかも Al_2O_3 と $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$ を結ぶ線より下部に限られている。なおアロファンに関する青峰[11]の総説に記載された分析表よりの点をプロットすればいずれもこの範囲内にあり，それらはだいたい一直線上にあり，その両端は SiO_2 と $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ にだいたい一致することが知れる。Fe_2O_3 の存在状態について考慮をはらわねばならないが，東京都の路床土試料はハロイサイト鉱物とアロファンの混合体およびそれにジプサイトを混じたものと考えることができる。この範囲外にあるものは東—3のようにモンモリロナイトおよびイライトを含有するもの，東—15のようにジプサイトの特に多いものであり，東—19，24等についてはこの点X線回折結果を欠くので明らかでない。

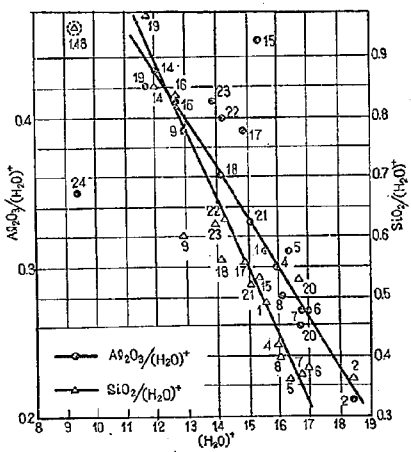


図-13　$Al_2O_3/(H_2O)^+$，$SiO_2/(H_2O)^+$ と $(H_2O)^+$ との関係

アロファンは特有なDTA 曲線を与え，X線的には無定形であり，その定量方法もなく定性的にもその確認反応は知られていない。アロファンについては青峰[11]の総説もあり，SiO_2 と Al_2O_3 の結合様式についてはいくつかの段階があることは明らかになってきている。Fieldes[32]は New Zealandのアロファンについて研究し，アロファンにはA型，AB型，B型の段階があるとしており，これらの階程を経過して加水ハロイサイトに変化するものである。ここに示す試料ではアロファンから加水ハロイサイトまでの各過程を示すものも見られ，立川層，武蔵野層，下末吉層等に該当するものが見られる。例えば東—20～24に見られるように同一地点でも深さによって粘土鉱物の変化を見ることができ，すでに報告されている事実にも合致している。

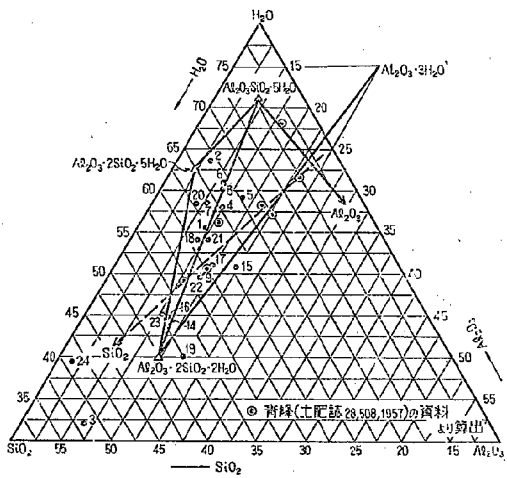


図-14　Al_2O_3–SiO_2–$(H_2O)^+$ 三成分系図

DTA 曲線では300°C から 400°C におよぶ発熱をしばしば示し，400°C から500°C におよぶ発熱ピークも示される。後者の発熱ピークは800°C 前後の吸熱ピークを一般にともない，有機物の Ca 塩類によるものと推定されているが，前者の方は有機物か否かは明らかでない。この 300°C から 400°C におよぶ発熱ピークは Truog の脱鉄処理で一般に消えるし，同時に 0.1N HCl および 0.1N HNO_3 で24時間冷所においても同様に消えるが，この操作ではアロファンの分解またはジプサイトの溶解は見られない。この発熱ピークを示す物が有機物とすれば，この有機物は Truog の脱鉄処理，N/10 HCl，N/10 HNO_3 処理で除かれるものであろう。しかし Fe_2O_3 の加水化合物とすれば，Mackenzie[33]の cold precipitated ferric hydroxide にあたるものかも知れない。これらの点については今後確認を要する点である。

イオン交換容量はモンモリロナイトが約100meq/100g で最も大きくイライトはだいたいモンモリロナイトの半分に近く，カオリン鉱物は約20程度とされ，イオン交換容量の測定より試料中の粘土鉱物を推定できる場合もある。しかしアロファンの交換容量はその測定方法，測定条件によって著しく変化することは青峰[11]がすでにのべているところであるが，アロファンの交換容量はだいたい 40～50meq/100g 程度であろう。加水ハロイサイトの交換容量は和田[34]の報告するように複雑な機構も見

られるのである。したがって東京都の路床土よりの粘土について測定した値には検討を要する点もある。しかしだいたい 13~50meq/100g の値であり，アロファンの含量の多い粘土としては妥当の値である大部分がアロファンと考えられる東—9の46は一応妥当な値であるが，東—4，5，6 が 20 以下である点は理解しがたい点でもある。東—2が49であることは有機物を含むことに関係あるかも知れない。モンモリロナイトを含む東—3が44を示すことは妥当であろう。またイオン交換容量と SiO_2/R_2O_3 の間には定まった関係はない。東京都の路床土のような鉱物組成を持つ場合は，イオン交換容量より組成鉱物を推定することはできない。

（3） 電子顕微鏡写真について

電子顕微鏡による関東ローム中の粘土の観察は今までも多くの研究者により行なわれているが，主として須藤[48), 55), 56)]の見解が代表的なものである。関東ロームでは上層はアロファンが多く，下層になるにしたがい加水ハロイサイトに変化することは知られているが，電子顕微鏡的にもこの変化の過程が追跡されており，中間に特殊の形態と内部構造を持つ粒子の存在が指摘されており，またこのような粒子はわが国火山灰土壌中にも広く分布することが知られている。

東京都の路床土ははとんど大部が関東ロームであり，その堆積時代の新旧によってアロファンから加水ハロイサイトへの変化の過程にあるから，電子顕微鏡による観察を試みた。

写真はいずれもアンモニヤ水(0.5%)中で分散させたもので，一部は同時に超音波分散を試みているし，さらに一部は 0.1N HCl で常温24時間放置したものをアンモニヤ水中で分散させたものもある。写真は日立製作所研究所に1951年に依頼したものを始め，日本セメント社および宇部セメント社の好意により与えられたものであり，顕微鏡の型式および撮影条件等はそれぞれ異なっている。写真に電子顕微鏡写真を示す。また一部の試料については電子回折をも実施した。つぎに電顕写真を示し，それらについて説明を試みる。

東—1試料（写真・東—1）は大小のやや角張ってはいるが球に近いゲル状物質が主であり，アロファンの形に近かいが一部の粒子では加水ハロイサイトの棒状結晶が突出している状態が見られるほか，うすい無定形板状晶も見られる。立川ローム層の粘土に近かいと考えられる。

東—2試料（写真・東—2—a）は球状粒子が集合して団粒を造くっている状況が見られる，個個の粒子では加水ハロイサイトのパイプ状のものをふくむものが見られる。これらの試料の分散を計るため HCl 処理を行なったもの（東—2—b）は著しく小さい繊維状物質よりなる膜状体が見られ，この膜状体の中でも繊維状物質の集合の程度にも差が見られる。組状に集合した繊維状物質がアロファン粒子の構造に関係があるか否か等は不明である。

東—3試料の代表的視野は東—3—aのようである。塊状物質は棒状体および板状体が集まったことを示し，棒状体または板状体がそれぞれ独立して存在する場合も見られる。電顕観察では東—1，2等とはその形態は著しく異なっている。試料をさらに分散させた場合（東—3—b）は著しく薄いゲル状に見える板状体，それよりも厚い不定形板状結晶が多く見られ，パイプ状結晶も一部に見られる。これらが集合して団粒体を造るものであろう。X線回折，DTA 曲線等によればイライト，モンモリロナイト，ハロイサイト，が存在するとされるが，電顕でもこの三者の存在は十分推定できる。多くの視野の中から一つの制限視野（東—3—c）を選び電子回折を行なえば粉末線をうる（東—3—d）。これより網面間隙を計算すれば次の結果をうる。

4.5(s), 3.2(w), 2.64(s), 2.45(m), 2.05(w), 1.92(m), 1.68(m, br), 1.48(s), 1.27(m), 1.23(w)

この粉末線はイライトに主として起因すると考えられる。同様にほかの制限視野について測定した結果では，この値とほとんど同様な値となっている。なお東—3試料は東京都の路床土試料としては特異な組成を持っている。

東—4試料（東—4—a）も無定形で球状に近かい微細な粒子の集合体が見られる。集合体の表面には細かい板状結晶や崩れかけた棒状結晶がところどころに見られる。この試料の分散を計るため5%アンモニヤ水中で2分間以上超音波分散を試みた場合（東—4—b）は微細な繊維状体が明瞭に見られ，東—2試料について HCl 処理を試みた場合と同じである。この方法でもいまだ分散していない粒子も形が崩れかけたものから，繊維状物質の膜になる直前のものもある。X線分析ではほとんど回折線を認めず，また DTA 曲線では 500~600°C の吸熱を持たず，アロファンと考えられるのであるから，これらの繊維状物質はいまだ加水ハロイサイト化に進まない状態と考えられる。

東—5試料（東—5—a）は多くの視野のうちの代表的のものにシャドウイングを施したものである。アロファンと考えられる球状体を認め，"梨のイガ状" も示すものも見られる。大きい団粒体は球状体が集合したものである。球状体のほかに微細な繊維状体が集合したと考えられる板状体も見られ，くずれたパイプ状のものもわずかに見られる。X線回折では明瞭な回折線はジプサイト以外は認められないし，DTA 曲線でもジプサイトを認める。この板状体がジプサイトか否かは明らかでないが，この部分の電子回折結果では明瞭でない回折線を

与え，粉末線ではなく，網面間隙（Å）はジプサイトを与えない。網面間隙は4.4Å(S)，2.5Å(s)，2.3Å(w)，1.7Å(w)，1.5Å(m)，1.25Å(w) であり，カオリン鉱物を与える。

東—6試料（東—6—a）もやや角ばった球状体よりなり，この球状体はやや伸長型となっている。球状体の表面には棒状突起が見られるものもあるが，うすい板状体が見られるものもある。球状体のほかに無定形，六角形，短冊形等の著しくうすい板状体が比較的多く見られる。この試料はX線回折では明瞭な粉末線を与えないが，DTA 曲線ではわずかに 500～600°C に吸熱を示し，ジプサイトもわずかに見られる。アロファンが優勢ではあるが一部が加水ハロイサイト化に進んでいると考えられる。板状体が一部の加水ハロイサイトから不規則混合層を生成していることを示すのか，ジプサイトまたはその他の混在鉱物を示すのか確認はできない。

東—7試料（東—7—a，b，c，d，e，f）はアロファンの形態を示すが，他の東京都の路床土と同様に伸長型の不規則板状の結晶が認められる。X線回折では明瞭な回折線はほとんど示さないが，わずかにカオリン鉱物の粉末線が見られ，DTA 曲線ではジプサイトも推定されるのである。ここに見られる不規則板状体について電子回折を試みた結果はいずれも明瞭な回折図を与える。aは代表的の視野であり，bはこの視野中の板状晶，cはその回折図，dは別の視野中に見られる板状晶，eはその回折図，fはアロファンと考えられるゲル状体の回折図である。c，e，fについて網面間隙（Å）を求めれば次に示すようになる。

東—7—b：
4.5(s)，3.3(w)，2.62(s)，2.48(w)，2.22(m)，1.95(w)，1.70(w)，1.54(s)，1.30(m)，1.26(w)

東—7—d：
4.6(s)，4.0(w)，3.6(w)，2.56(s)，2.31(w)，1.89(w)，1.76(w)，1.55(s)，1.30(m)，1.25(w)

東—7—f：
4.6(s)，3.05(m，br)，2.55(w)，2.32(w)，1.94(m，br)，1.52(m)，1.30(w)，1.25(w)

これらの結果からはジプサイトとは考えがたくむしろイライトに近いものらしいと推定されるが，今後の検討を要する。アロファンと考えられる粒子もfのように拡散しているが回折線を与えることは，板状晶をそれ自体が持つのか，制限視野の中に板状晶が分離して存在するためか明らかでない。

東—8試料（東—8—a）はアロファンの形態を示すが，この写真では分散が不十分であるので，5％アンモニヤ水中で超音波分散を試みると（東—8—b）ゲル状物の膜がえられる。この膜は東—4試料と同じく著しく微細な針状または繊維物質よりなり，これらはさらに集合して組状を造りこれはループを造っている。分散しない無定形塊状粒子も見られる。東—2と同様にHCl処理を試みた場合（東—8—c）は繊維状物質が集合して組状となりループを造っている状況が見られる。一部の分散しない粒子も崩壊して球状体がくずれ始めている状態も見ることができる。

東—9試料(東—9—a，b)はアロファンの形態を示し，(b)においてはゲル状の膜も見られる。分散をさらに計るため超音波分散も試みると(東—9—c)，東—4,8と同様に微細な繊維状物質の交絡した膜状体を認める。またHCl処理を試みると(東—9—d)著しく微細粒子にまでなり，これら微細粒子は多くは無定形というよりむしろ伸長状の板状体であり，分散しがたい粒子でも球状体はくずれかけた状態となっている。クロームシャドウを施こせば(東—9—e)はだいたい球状に近いことを知る。

東—9—aの視野について電子回折を行なえば，明瞭な回折は認められず，わずかに4.4Å，2.5Å，15Åに拡散したハローを認め，ほかの多くの視野でも同様である。しかし東—9—bの膜状体について電子回折を行なえば明瞭な粉末線を与え，その網面間隙（Å）は次のようである。

4.40(m)，2.56(s)，2.36(w)，1.70(w)，1.50(s)，1.25(m)，1.23(w)

この薄膜状物質は微細な結晶性物質の集合体であり，カオリン鉱物と見なされる。

東—14試料は球形に近いアロファンと同じ形を示すものが多いが，分散の程度によっては種種の形態が見られる。東—14—aは球形のものが崩れた場合と考えられ，繊維状または棒形の微細物質の集合体と見られ，この物質は電子回折像は不明瞭であり，わずかに4.5Å，2.5Åおよび1.5Åに粉末線が見られる程度である。東—14—bはさらに分散したものと考えられ繊維状体の集合体は棒状または組状となりそれぞれ交絡し，ゲル状フィルムを包んでいる。電子回折では4.5Å，2.5Å，1.5Åの近辺にハローを認めるのみである。東—14—cはゲル状の微細粒子が連結し合って組状となっている状況を示す。以上の三つの形の間にどのような関係があるかは不明である。また東—14—dに示されるような繊維状体の集合も見られ，これらの間には伸長型の無定形板状体が散在している。この繊維状体の集合物の電子回折図は明瞭な粉末線（東—14—e）を与え，その網面間隙（Å）は次のようである。

3.18(vs)，3.03(w)，2.74(m)，2.45(w，br)，2.28(w)，2.15(w)，1.94(s)，1.79(w)，1.65(m)，1.35(w)，1.23(w)，1.10(w)，1.03(w)

東—14—dは東—14—bとは電子回折では別個のものであり，dは粘土鉱物ではないと考えられるがなんであるかは決定しがたい。本試料はアロファンと考えられる

が，DTA 曲線が脱鉄で顕著に変化し，酸化鉄の何らかの形態のものが存在することも推定されたのであるが，この粉末線が関係ありや否やは不明である。ただこの粉末線がレピドクロサイトに比較的よく似ていることは今後の検討を要する点と考えられる。

東—15試料は相当量のジプサイトを持つことがすでに明らかである。電顕写真で最も一般に見られる視野（東—15—a）ではアロファンらしい球形体，明瞭な大型の板状結晶，棒状または短冊状の結晶体とそれらの凝集体，これらの集合体が見られる。この視野の電子回折結果からえられる網面間隙（Å）は次に示すようである。

4.6(s), 3.0(w), 2.64(s), 2.57(w), 2.52(w), 2.37(w), 2.31(w), 2.17(w), 1.72(s), 1.67(m), 1.53(m), 1.47(m), 1.30(m), 1.27(w)

この値はいく種類かの鉱物の混合物を示し，個個の鉱物については明らかでない。

この試料ではまた分散程度によって東—15—b に示す視野が見られ，微細な棒状または短冊形，無定形板状形，またはこれらの集合状のものが見られる。この視野の電子回折図は明瞭な粉末線を与え，網面間隙（Å）は次のようである

3.19(vs), 3.02(w), 2.78(w), 2.50(m), 2.38(m) 1.94(s), 1.65(m), 1.52(m), 1.35(w), 1.23(w, br), 1.10(w), 1.01(w)

この粉末線はジプサイトによるものではなく，粘土鉱物そのものによるとも考えられない。むしろ東—14試料に見られたと同じ回折図と考えてよい。東—14でこのような回折線を与えるものは繊維状物質の間にはさまれて存在する物質かも知れない。またこの試料では東—15—c に示すような視野も見られる。すなわちやや角ばった小判形粒子が見られ，表面から角が突出している場合も多い。これらの粒子は玉ネギ状を示すがその構造は細かい棒状体の交絡したものである。これらの粒子が集合して塊状体を形成する様子も見られる。この粒子は電子回折では明瞭な回折図を与えないが，網面間隙（Å）は 3.36(s) と 3.04(s), 2.49(w) と 2.36(w), 1.97(s) と 1.87(m), 1.66(m) と 1.60(w) の4組の二重線を与え，このほか 1.44(w), 1.23(w), 1.03(w) をも与える。この回折線は東—15—b とも関連のあることは明らかであり，一方ジプサイトが存在することは知られているので，ジプサイトに対する真空および電子線の衝撃が関係あるかも知れないし，今後の研究を要する点である。

東—16試料の電子顕微鏡写真（東—16—a）は結晶度の低くいハロイサイト鉱物と考えられるパイプ状物質が見られるほか，板状結晶もところどころに見られる。パイプ状物質では電子回折図はえられなかったが，板状晶は明瞭な雲母様回折図を与える。

東京都の路床土試料の電子顕微鏡による観察では，アロファンが優勢とされるものではいずれもアロファンの形態についてすでに知られていることに合致している。しかし超音波による分散または HCl 処理後に分散させた場合は，電子回折では回折線を示さない微細な繊維状物質が見られるし，これらが集合して細状となる場合も見られる。またイライトと推定される不定形板状結晶も少量ながら一般に見られる。

神奈川県の路床土（神—1～6）

神奈川県路床土のコロイド成分の粘土鉱物をX線回折および DTA 方法が検索した結果を図-11，12に示す。

つぎに実験結果をのべる。

神—1 試料のX線回折図はハロイサイト，加水ハロイサイト，それらの混合層鉱物の混在を示し，DTA 曲線もこの結果を支持している。

神—2 試料はX線回折図をかくが，DTA 曲線からは神—1 と同様にハロイサイト鉱物を示す。

神—3 試料のX線回折図は著しく回折線の強度が弱く，無定形物を混じると推定されるが，DTA 曲線では結晶度の低くいカオリン鉱物の存在を示す。

神—4 試料はX線回折図をかくが，DTA 曲線からはアロファンを主要成分とすると考えられる。

神—5 試料はX線回折図をかくが，DTA 曲線からはハロイサイト鉱物が考えられる。

神—6 試料は7～11Å線，3.5～3.9Å線のように (00l) が帯状の回折図を与え，DTA 曲線ではハロイサイト鉱物が示される。混合層鉱物をふくむハロイサイト鉱物が考えられる。

〔2〕 埼玉県の路床土（埼—1～12）

埼玉県路床土のコロイド成分の粘土鉱物をX線回折および DTA 方法で検索した結果を図-15，16に示す。

つぎに実験結果をのべる。

埼—1試料のX線回折図は低角側にやや尾を引いた7.4Å線および著しく弱い11Å線を示す。11Å線は加水ハロイサイトによるかイライトによるかは明らかでない。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示す。この試料中には主としてハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，少量の石英もふくまれ，イライトについては明らかでない。

埼—2 試料のX線回折図はそれぞれ 6Å から 4Å，3.8Å から 3.3Å，2.7Å らか 2.2Å におよぶ帯状の回折線を示し，そのほかの回折線は方解石によるものを除きほとんど見られない。DTA 曲線は方解石による吸熱ピークのほかは有機物によるとされる発熱ピークと 910°C の発熱ピークが見られる。アロファンが大部分であり一部の方解石が見られる。

埼—3 試料のX線回折図は粘土鉱物の (hk) 線として 4.46Å 線を示すほか鮮明な回折線を示さない。15.5Å，10.5Å および 8Å から 7Å にわたる微弱な回折線が見

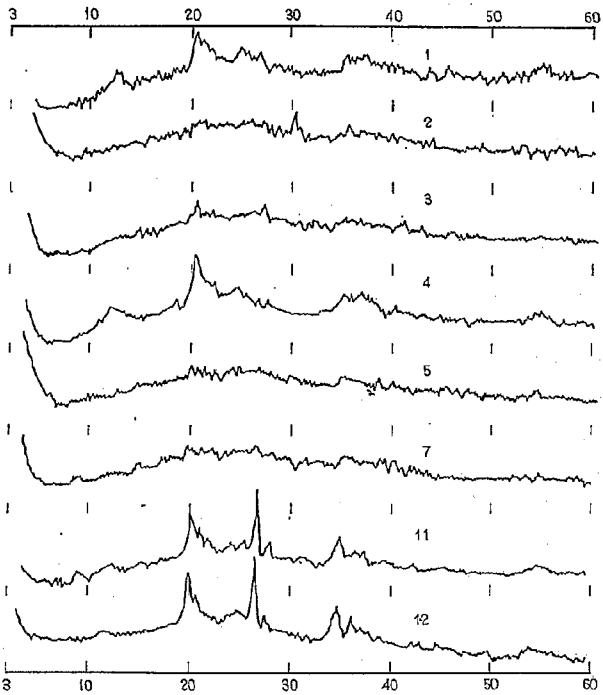


図-15　土壌コロイドのX線回折図（埼玉県路床土）

られる。エチレングライコール処理により7Åから14Åにおよぶ帯状回折線と，3Åから5Åにおよぶ帯状回折線が見られる。これらの帯状回折線は小さい回折線の集合である。14Å線または17Å線は明瞭には見られない。DTA曲線はハロイサイト鉱物を与えるが，900°Cの発熱ピークは著しく拡散しており，また大きい。200°Cの吸熱ピークの大きいことと共に考えてアロファンの存在をも示す。800°Cに吸熱ピークを示すが明らかでない。X線回折およびDTA曲線から本試料中には主としてアロファンが存在し，一部の著しく結晶度の低くいハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられる。

埼—4試料のX線回折図は8.4Åから7.0Åにわたる拡散した回折線を与え，その一部は10.5Åまで尾を引いている。3.70Å線も著しく拡散した線である。エチレングライコール処理試料では7.35Åのほか，8.2Åから低角側に尾を引いた回折線を示す。DTA曲線はハロイサイト鉱物を与える。この試料中にはハロイサイトが主として存在し，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物も存在する。

埼—5試料のX線回折図は明瞭な回折線はほとんど示さないし，DTA曲線と共に考えてアロファンと考える。

埼—6試料はX線回折図をかくがDTA曲線ではハロイサイトを示す。150°Cの吸熱ピークも考えてハロイサイト鉱物の混合層鉱物と考えられる。

埼—7試料のX線回折図は明瞭な回析線は示さず，DTA曲線と共に考えてこの試料中には主としてアロファンが存在し，一部の結晶度の低くいハロイサイト鉱物の混合層鉱物も見られると考えてよい。

埼—8試料はX線回折図を欠くがDTA曲線ではハロイサイト鉱物を示すほか，710°Cの小吸熱ピークが示される。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在すると考えられる。

埼—9試料はX線回折図をかくがDTA曲線はハロイサイト鉱物を示し，一部のモンモリロナイトも推定される。

埼—10試料はX線回折図をかくが，DTA曲線は主としてアロファンを示し，一部の結晶度の低くいハロイサイト鉱物を推定させる。

埼—11試料のX線回折図は低角側に拡散した7.3Å線と，やや高角側に拡散した10.2Å線を示す。エチレングライコール処理で8.0Å線を示すが帯状回折で拡散しており，10.2Å線も明瞭に見られる。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物を示し，おそらく少量のイライトも存在

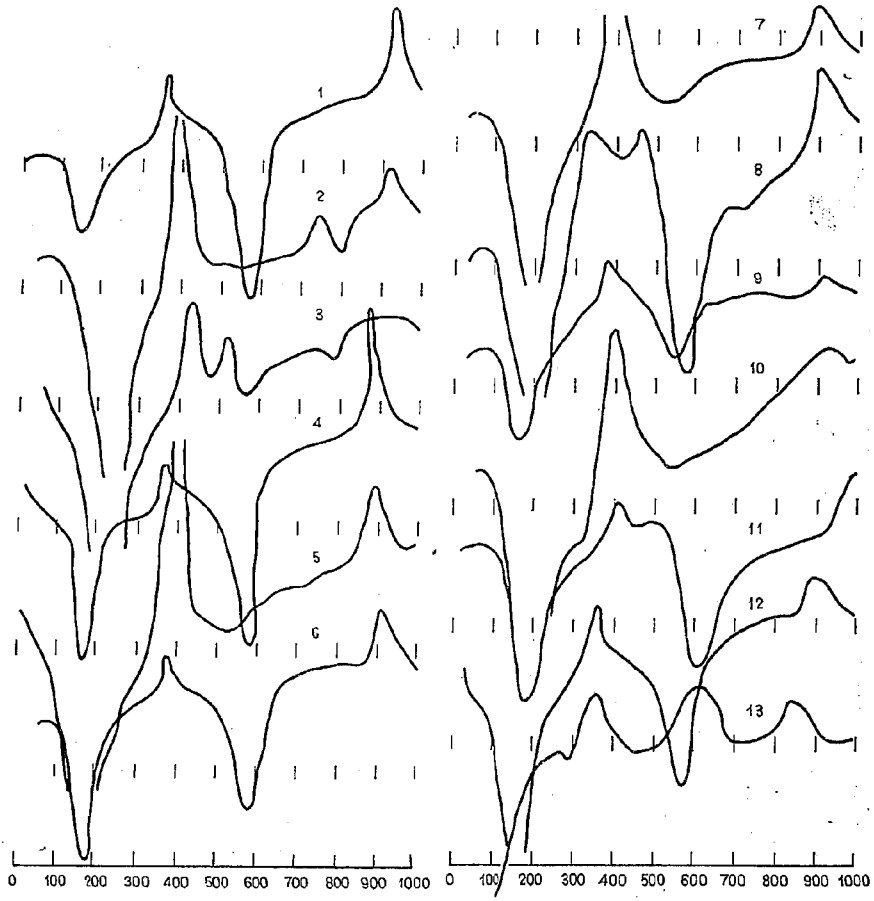


図-16 土壌コロイドの DTA 曲線（埼玉県路床土）

するであろう。DTA 曲線はカオリン鉱物を示すが，600°C の吸熱ピークは高温側にゆるやかに傾むき，この温度範囲で吸熱を示すものの存在が推定できる。X線回折の結果では10Å線は認められ14Å線は認められないので，吸熱を示す物質はイライトと考えれば，結晶度の良好なものであろう。この試料中にはハロイサイトが主として存在し，結晶度の高かいイライトも存在が推定され，このほか石英および長石も推定される。

埼—12試料の X 線回折図は弱い 7.6Å の回折線を示し，ハロイサイト鉱物の不規則混合層鉱物が主として存在し，一部のハロイサイトも存在する。ほかに石英も見られる。DTA 曲線は加水ハロイサイトを示す。この試料中にはハロイサイト鉱物の不規則混合層鉱物が主として存在し，一部のハロイサイトおよび石英が存在する。

埼—13試料は X 線回折図をかくが，DTA 曲線は600°C に発熱ピークが見られ，この原因については明らかでない。低温側にずれているが 850°C に発熱ピークが見られ，おそらくアロファンによると推定されるが明確なことは解らない。

〔3〕 群馬県の路床土（群—1～18）

群馬県路床土のコロイド成分の粘土鉱物を X 線回折（エチレングライコール処理をふくむ）および DTA 方法で検索した結果を図-17，18に示す。

つぎに実験結果をのべる。

群—1 試料の X 線回折図は加水ハイロサイトを示し，

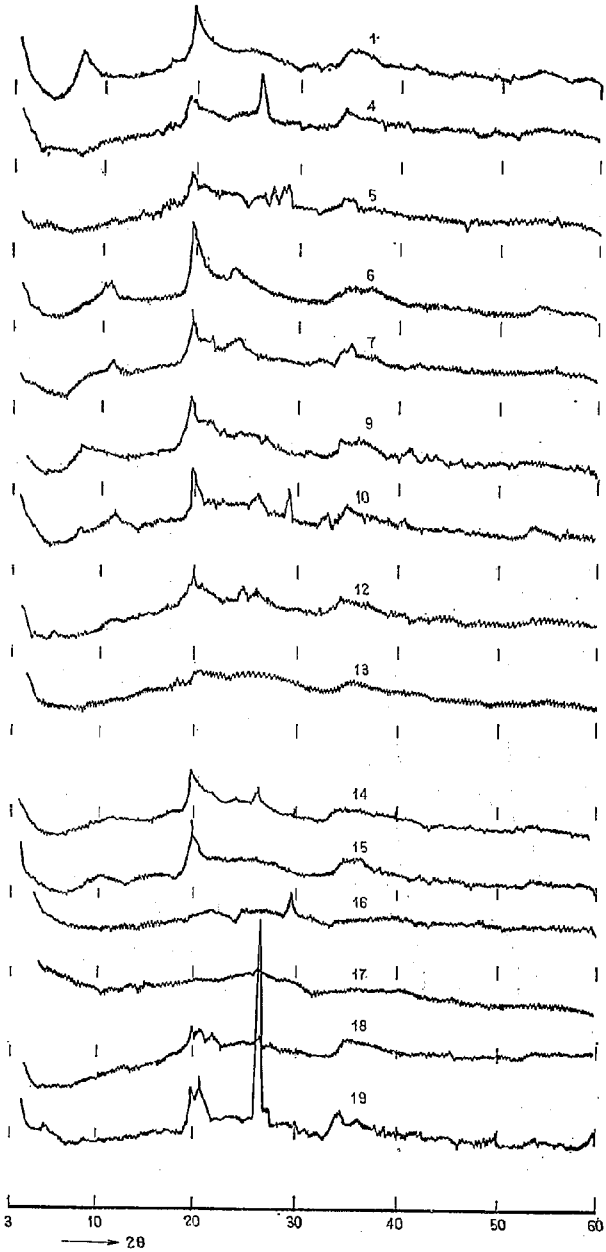


図-17　土壌コロイドのX線回折図（群馬県路床土）

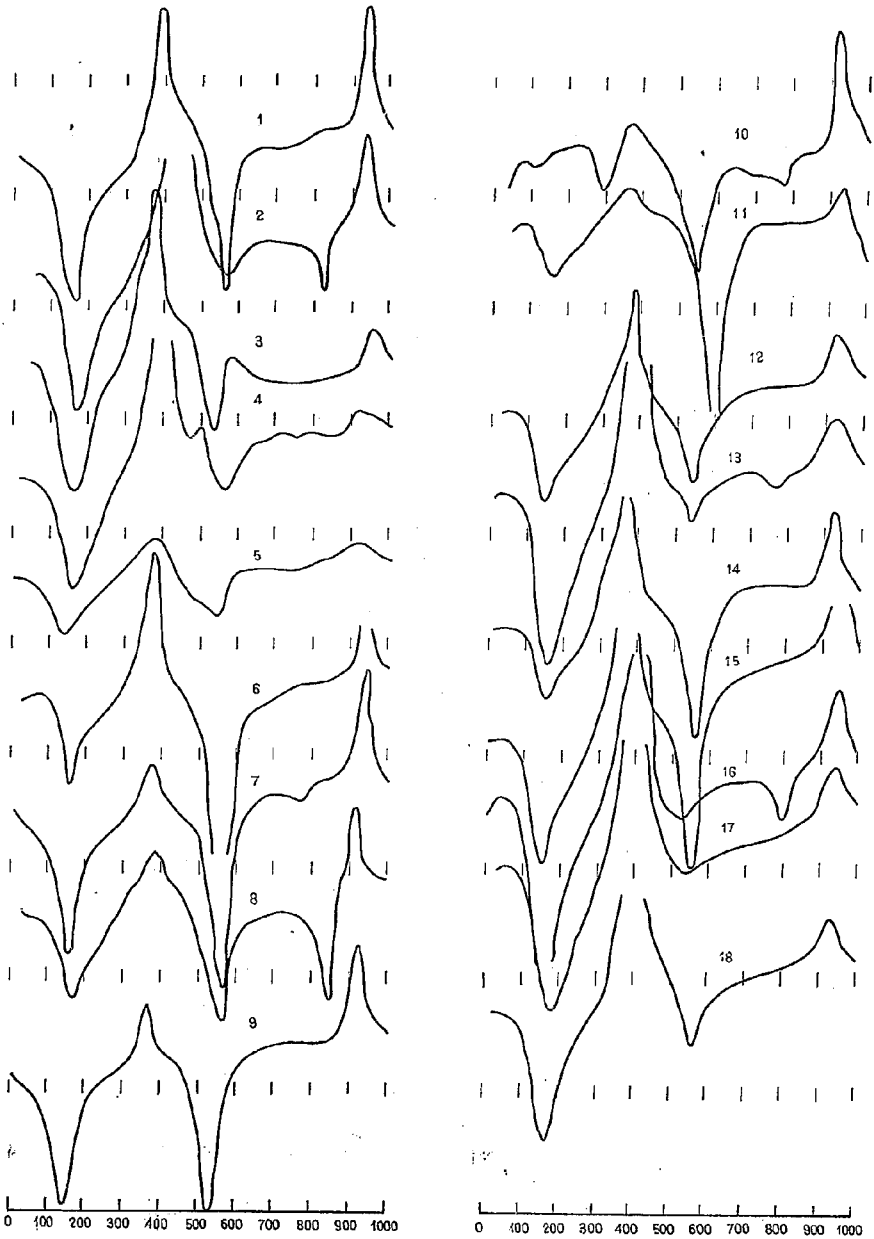


図-18 土壌コロイドの DTA 曲線（群馬県路床土）

少量のジプサイトの存在が推定される。DTA 曲線も加水ハロイサイトと考えることができ，700°C にわずかであるが吸熱が見られるがX線ではモンモリロナイトが明瞭には見られない。DTA 曲線で 380°C 近辺に鋭い発熱が見られるが，有機物によるとされている。しかし必ずしも有機物とは断定できないことについては東京都の路床土の項で触れた。ここでは一応有機物としておく。

群—2試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線より考えれば加水ハロイサイトのほかに方解石が存在し，有機物の除去が完全でないことを示す。またアロファンの存在も知られる。

群—3試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線からは群—1試料と同じであり，加水ハロイサイトの結晶度がやや低いこと考えられる。

群—4試料のX線回折図は 4.4Å より低角部で明瞭な回折線を示さず，むしろ著しく拡散した帯状の回折像を示す。このように明瞭な底面反射の認められないものが関東ローム中に存在することは多くの人に認められており，ハロイサイトと加水ハロイサイトの不規則混合層鉱物とされている。DTA 曲線では粒径分布の広いカオリン鉱物が推定でき，この試料中には上記の混合層鉱物が主要成分として存在すると考えてよい。また一方では DTA 曲線は480°C，680°C，770°C に小吸熱ピークを示し，この原因については明らかでないが，14Å 鉱物の存在も十分推定できるのである。X線では14Å 線を明瞭には認めがたいので14Å 鉱物がカオリン鉱物等と混合層鉱物を造っているのかもしれない。有機物の存在も考えられる。

群—5試料のX線回折図は 15.5Å 線を明瞭に示し，拡散した 7.4Å 線のほか著しく拡散した 10Å 線をわずかに示す。エチレングライコール処理試料では弱い17.4Å 線を示し，強い 8.0Å の回折線は低角側に 11Å まで尾を引いている。ハロイサイト型鉱物の混合層鉱物が推定されるが，イライトの共存も考えうる。DTA 曲線はハロイサイト型鉱物を示すが，イライトの存在も示し，またモンモリロナイトをも推定させる。ほかに長石の存在が明瞭であり，一部のアロファンも推定できる。

群—6試料のX線回折図は7.35Å 線を明瞭に示し，この線は低角側に10Å 線まで直線的に尾を引いている。(02) 線が顕著に見られるほかは (hk) 線は鮮明でなく，(002) 線も 3.5Å から 3.7Å 線までに拡散している。ハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在すると考えられる。DTA 曲線もX線回折の結果と一致する。

群—7試料のX線回折図は群—6試料とほとんど同じであるが，ハロイサイトのピークが 7.5Å であり，不規則混合層の回折線が 8.2Å から 10.6Å におよぶ帯状である点が異なっている。DTA 曲線はX線回折の結果とも一致するが，780°C に小さい吸熱ピークを示す点は明らかでない。

群—8試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線はハロイサイト鉱物と方解石の存在を示す。

群—9試料のX線回折図は 10Å 線を示し，この線は高角側に 7.3Å 線まで断続的な回折線となっている。(02) 線が明瞭であるほかは鮮明でなく，加水ハロイサイトの (003) 線およびハロイサイトの (002) 線も鮮明でない。加水ハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物の存在が考えられる。DTA 曲線は加水ハロイサイトを示すと考えてよい。なおX線粉末線として 2.18Å および2.09Å が明らかに見られるがその原因は明らかでない。

群—10試料のX線回折図は10.3Å 線と拡散した7.56Å 線を示す。10.3Å 線はほかの底面反射がほとんど見られないのでイライト系鉱物によるとは考えがたく，むしろ加水ハロイサイトと推定され，7.56Å 線は混合層鉱物をふくむハロイサイトと考えられる。加水ハロイサイトの (003) 線とハロイサイトの (002) 線は断続的に連なり帯状回折を示す。エチレングライコール処理によっても同様のことがいえる。ジプサイトが見られ，クリストバライトが推定されるほか，強い3.04Å 線が見られるが方解石としてはその他の回折線がほとんど認められず，この線については明らかでない。

DTA 曲線はハロイサイトを示し，ジプサイトによる吸熱も見られ，600°C から700°C の吸熱，780°C の吸熱ピークが見られる。600°C からの吸熱はモンモリロナイト等を示すかも知れないが，X線回折ではほとんど 14Å 鉱物が見られないので明らかでない。X線回折図では長周期粘土鉱物らしいものの存在が推定されるが，この点を明瞭にすれば上記の吸熱との関係が明らかになると考えられる。土壌コロイド中に見られる方解石は一般に3.05Å 線は著しく強いが，その他の線は結晶度の高いものに比して弱く，また DTA 曲線上での吸熱ピークが 800°C 以下になることもある。このように考えれば 780°C の吸熱ピークはX線で疑問とされる方解石と関係があると推定することができる。また 100°C～200°C の吸熱ピークが小さいが，100°C 以下の曲線の形状から考えて実験の誤りと考える。

群—11試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線ではハロイサイト型鉱物が示される。600°C の吸熱ピークに比して930°C の発熱ピークが著しく小さい。このピークより高温側での曲線の形状より考えて実験上の誤りも考えられるのでこの点にはこれ以上ふれない。

群—12試料のX線回折図は14.2Å 線，7.3Å 線から8.0Å 線に拡散した線を示し，4.48Å および2.57Å 線を除いて鮮明な回折線を示さない。エチレングライコール処理試料では 11Å まで著しく低角側に拡散した回折線を

与える。ハロイサイトのほかにハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられ，14Å線はエチレングライコールで変位せずモンモリロナイトは存在しないことは明らかであるが，クロライトかバーミキュライトかは明らかでない。DTA 曲線はハロイサイトを示すが，900°C の発熱ピークの面積は 550°C の吸熱ピークの面積より大きく，200°C より300°C にわたる吸熱が見られること，およびX線回折図が鮮明でないこと等を考えてアロファンの存在が推定される。580°C から700°C にわたる吸熱は14Å鉱物によると考えられるがこれについては明らかでない。長石類も推定される。本試料はハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物を含くみ，アロファンの存在が推定され，モンモリロナイトではないがクロライトか否かは明らかでない14Å鉱物が存在する。

群—13試料の X 線回折図は鮮明でなく，(02) および (13) 線がわずかに見られるほか粘土鉱物による明瞭な回折線を示さない。DTA 曲線は有機物によるらしい発熱ピークとカオリン鉱物によると推定される540°C の吸熱ピークおよび何か不明の物質による770°C の吸熱ピークを示すほか，920°C の大きい幅の広い発熱ピークを示す。X線回折図と共に考えてアロファンが多量に存在するほか，結晶度の低いカオリン鉱物が少量存在すると考えられる。

群—14試料のX線回折図は 7.3Å から 9Å にわたり著しく拡散した回折線と拡散した10Å線を示す。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物と加水ハロイサイトが考えられ，ゲータイト，石英および長石類が推定される。DTA曲線はハロイサイトを示し，有機物によるらしい発熱が見られる。

群—15試料のX線回折図は 7.2Å から 10.0Å にわたる帯状の回折線を示し，ハロイサイトと加水ハロイサイトの不規則混合層鉱物の存在が考えられ，DTA 曲線も有機物によるらしい発熱ピークを除いてはX線回折の結果と一致する。

群—16試料のX線回折図は方解石による回折線を除いては粘土鉱物による回折線をほとんど示さないで，著しく拡散した帯状回折線を示し，アロファンの存在が推定される。DTA 曲線は方解石を示すほかアロファンを示し，有機物によるらしい発熱ピークのほかに少量のカオリン鉱物を推定させる。本試料は主としてアロファンよりなり，少量の方解石を含有する。

群—17試料のX線回折図はアロファンの存在を示し，DTA 曲線もアロファンを示す。

群—18試料のX線回折図は鮮明な回折図を示さない。弱い14Å線のほかいずれも拡散した10Å線および7Å線を示す。エチレングライコール処理試料では14Å線は変位しないし，7Å線は 10.2Å 線まで 8.0Å，8.8Åをともなって断続している。ほかに11.8Å線もわずかに見られるにはハロイサイト，加水ハロイサイトが存在するが，そる。7Å線は 10.2Å 線までの回折線とともにハロイサイト鉱物の混合層鉱物によると推定されるが，14Å線はモンモリロナイトでない点を除いては明らかでないし，11.8Å線についても明らかでない。ほかに長石類および石英の存在が推定される。DTA 曲線はハロサイト型鉱物を示し，600°C から700°C の吸熱ピークは14Å鉱物によるものであろう。X線回折および DTA 曲線から一部のアロファンが推定できる。

〔4〕 茨城県の路床土 (茨—1～13)

茨城県路床土のコロイド成分の粘土鉱物をX線回折(エチレングライコール処理をふくむ)および DTA 方法で検索した結果を図-19，20に示す。

つぎに実験結果をのべる。

茨—1試料のX線回折図は 7.5Å の拡散した線を示し，低角側に 8.1Å 線，8.7Å 線をともなっているほか 9.8Å より 10.6Å にわたる拡散した弱い回折線をともなう。4.48Å 線以外の回折線はそれ程鮮明でなく，3.5Å から 3.9Å にわたる拡散した線も見られる。ハロイサイト，加水ハロイサイトのほか両者の混合層鉱物が存在すると考えられる。また回折線のバックグラウンドからアロファンも推定される。

DTA 曲線は加水ハロイサイトも示すが，ハロイサイトをも考えて150°C の吸熱が大きすぎ，一部のアロファンを推定できる。720°C に痕跡的な吸熱が見られるが僅少量の14Å鉱物等によるのかも知れない。

茨—2試料のX線回折図は 7.3Å の拡散した回折線を示し，この線は低角側に10Å線までに尾を引いている。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物の存在が考えられる。ほかにジプサイト，石英も推定される。DTA 曲線はハロイサイト型鉱物を示し，ジプサイトも見られるが 400°C から500°C にわたる吸熱および750°C の吸熱については明らかでない。X線回折で 6.2Å，2.27Å が明瞭でありその他の回折線からもすでにのべた同定不可能なX鉱物が存在すると考えれば，この DTA 曲線は説明しやすい。

茨—3試料のX線回折図はいずれも回折線の強度が低くいことが示され，7Åおよび10Å の拡散した回折線が見られる。加水ハロイサイトのほか結晶度の低いハロイサイトが存在すると考えられる。ほかにジプサイトとゲータイトの存在が明らかである。アロファンの存在も推定される。

DTA 曲線は有機物による発熱ピークのために解釈が難しいが，ジプサイトとゲータイトを考えることはできる。530°C の吸熱はカオリン鉱物によると考えられるが，900°C の発熱ピークはカオリン鉱物によるとしては大きすぎ，一部のアロファンを考えることは150°C の吸熱ピークの大きさと関連させることができる。本試料中

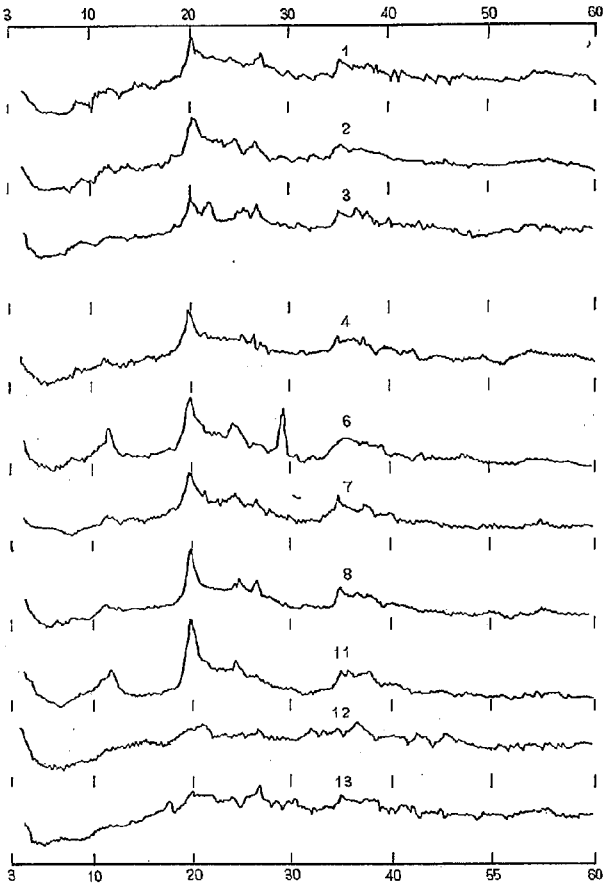


図-19　土壌コロイドのX線回折図（茨城県路床土）

の量は特に著しいとは考えられず，一部のアロファンが推定され，このほかにジプサイトおよびゲータイトも存在すると考えることができる。

次—4試料のX線回折図は7.8Åおよび10.4Åの拡散した回折線を示す。ハロイサイト，加水ハロイサイトが考えられるし，少量のジプサイトも推定される。DTA曲線は加水ハロイサイト，ハロイサイトを示す。

次—5試料はX線回折図を欠くが，DTA曲線によればハロイサイト鉱物が示される。ほかに350°Cおよび470°Cの吸熱ピークが見られ，この原因については明らかでない。

次—6試料のX線回折図は鋭い7.37Å線を示し，低角側にやや尾を引き微弱な拡散した10Å線に連らなっている。回折線はいづれも鮮明であるほか方解石の回折線が見られ，ジプサイトも推定される。結晶度の比較的高いハロイサイトが優勢であり，加水ハロイサイトも推定され，方解石の存在も確実である。DTA曲線はジプサイトについては明らかでないが，ハロイサイト，方解石のほか加水ハロイサイトについてもX線回折の結果に合致している。

次—7試料のX線回折図は比較的拡散した7.6Å線とやはり拡散した14.7Å線を示す。ほかにゲータイトの回折線が見られ，長石も推定される。エチレングライコール処理試料については，14.7Å線は17.6Å線に変位し，7.7Å線は9Åから11Åにわたる拡散した回折線に連らなっている。モンモリロナイトの存在が知られ，加水ハロイサイトも存在し，その外加水ハロイサイトとハロイサイトの混合層鉱物が考えられる。DTA曲線はハロイサ

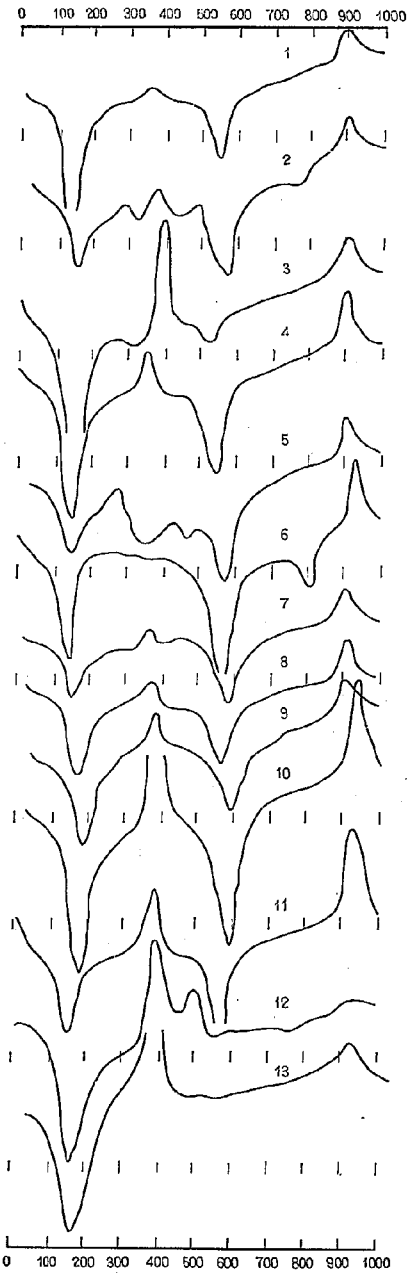


図-20 土壌コロイドのDTA曲線（茨城県路床土）

イト型鉱物を示すが，600°Cから700°Cにかけての吸熱も見られモンモリロナイトの影響と考えられる。この試料中にはハロイサイト，加水ハロイサイトおよびそれらの混合層鉱物が存在し，一部モンモリロナイトも存在し，ほかにゲータイトも存在する。長石も推定される。なおアロファンの存在も推定できる。

茨—8試料のX線回折図は7.7Åの拡散した回折線を示し，10.7Å線もわずかに見られる。ほかに一部のゲータイトも見られる。DTA曲線はハロイサイト型鉱物を示し，この鉱物による吸熱および発熱ピークが小さいことと回折線のバックグラウンドからアロファンの存在も推定される。

茨—9試料はX線回折図を欠き，DTA曲線はハロイサイトを示すほか700°Cにわずかの吸熱が見られるが，これについては明らかでない。

茨—10試料はX線回折図を欠くが，DTA曲線は結晶度の良好な加水ハロイサイトを示し，ハロイサイトの共存も考えられる。ほかに有機物によるらしい発熱ピークも見られる。

茨—11試料のX線回折図はハロイサイトの回折線を示し，回折図は比較的鮮明である。7.5Å線は低角側に尾を引き，一部のハロイサイト鉱物の混合層鉱物が推定される。DTA曲線はX線回折の結果と一致している。

茨—12試料のX線回折図はゲータイトの回折線を示すほかは粘土鉱物の回折線は著しく不鮮明である。回折図のバックグラウンドの形よりアロファンの存在が推定される。DTA曲線はゲータイトのほかにアロファンの存在が明らかに認められる。

茨—13試料のX線回折図は明瞭な回折線を示さず，むしろアロファンを推定させる。DTA曲線は有機物によるらしい発熱ピークを除けばアロファンの存在を考えさせる。

〔5〕 三重県の路床土（三—1～49）

三重県路床土のコロイド成分の粘土鉱物をX線回折（エチレングライコール処理をふくむ）およびDTA方法で検索した結果を図-21，22，23に示す。つぎに実験結果についてのべる。

三—1資料はX線回折では7.25Å線を認めるが，10Åおよび14Å線はほとんど認めない。7.25Å線は低角側に拡がった形をとり，結晶度の低いハロイサイトの存在にきせしめうる。ハロイサイトの外にジプサイトの存在も明瞭であり，ゲータイトおよび石英も存在し，長石類も推定される。DTA曲線はX線回折の結果とよく一致している。

三—2試料はX線回折では14Åおよび10Å線はほとんど認めないが7.45Å線は低角側に拡がった形を取っており，回折図は結晶度の良好でないハロイサイトを示す。ジプサイトの存在を認める。DTA曲線もX線回折の結

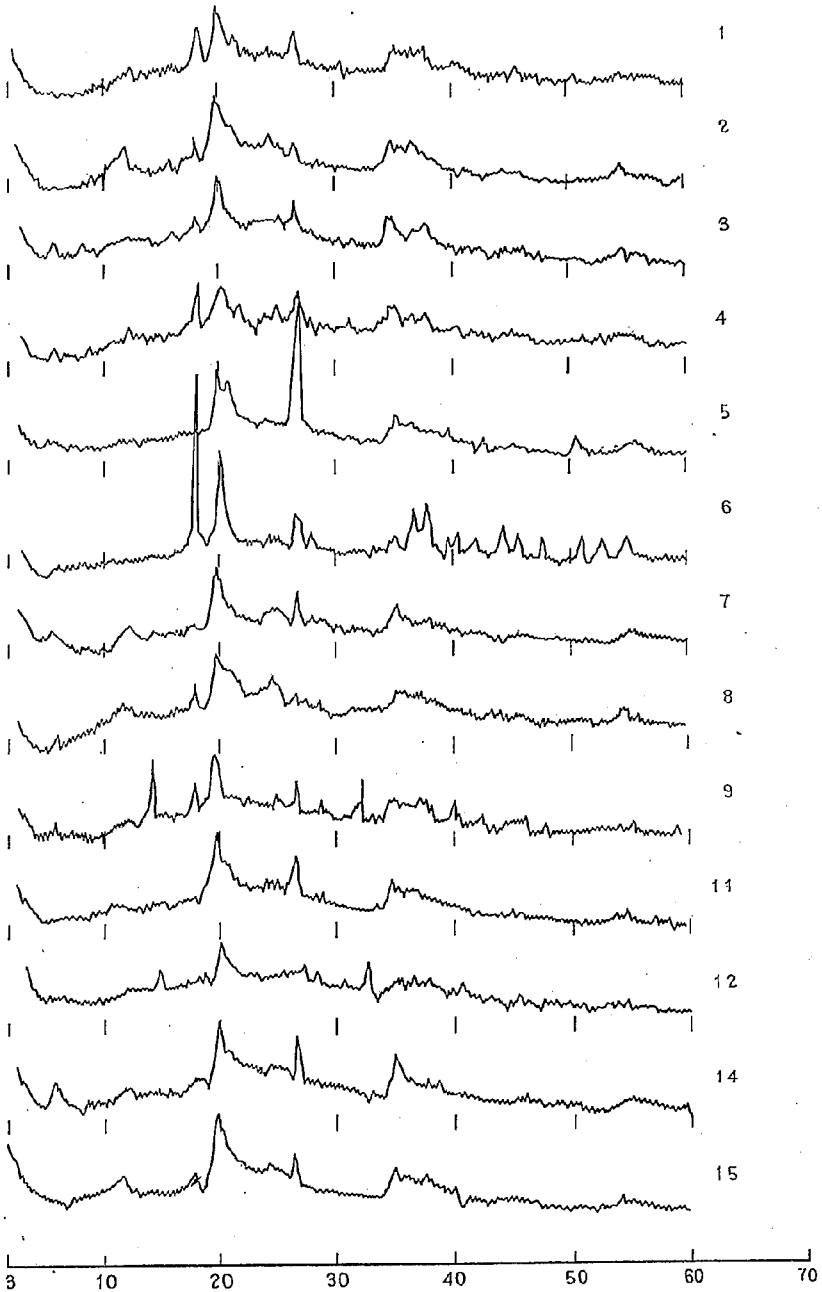


図-21（1） 土壌コロイドのX線回折図（三重県路床土）

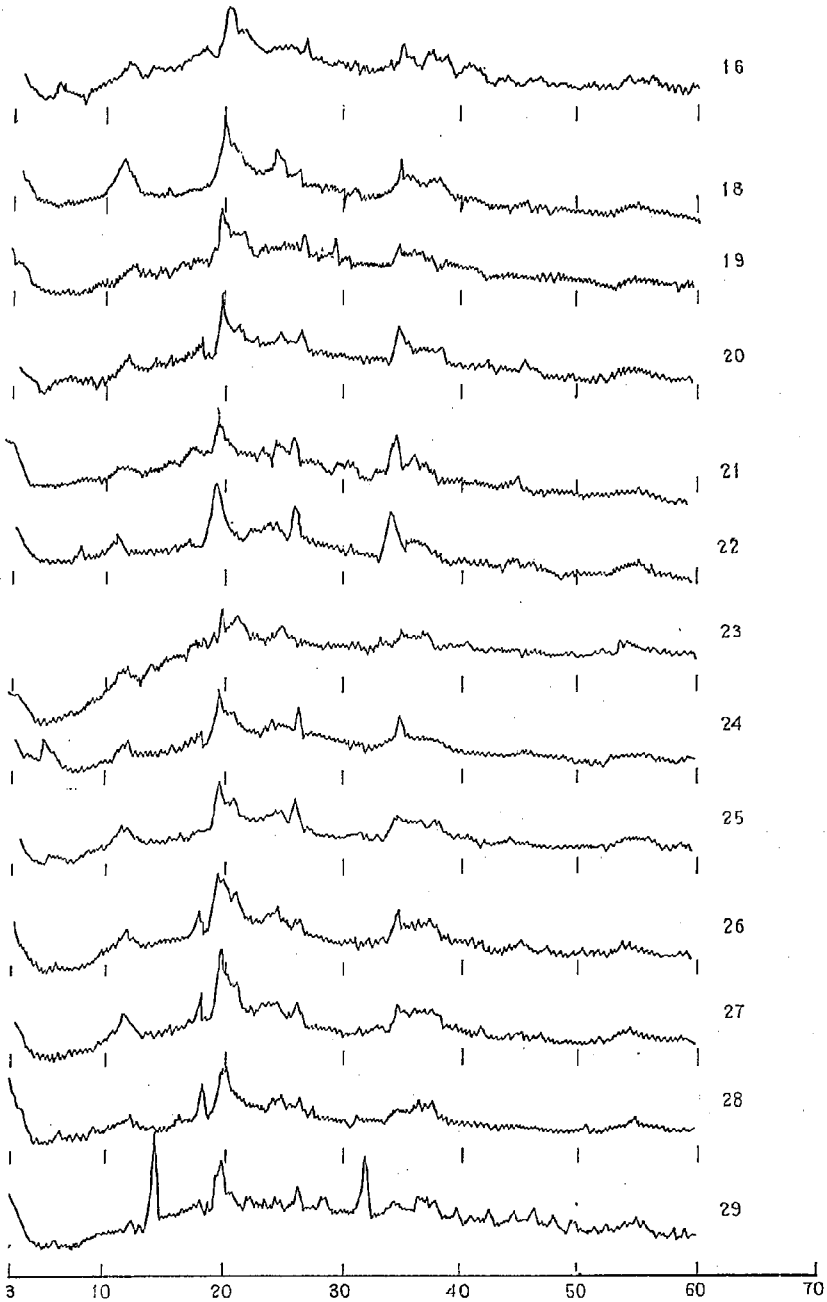


図-21（2） 土壌コロイドのX線回折図（三重県路床土）

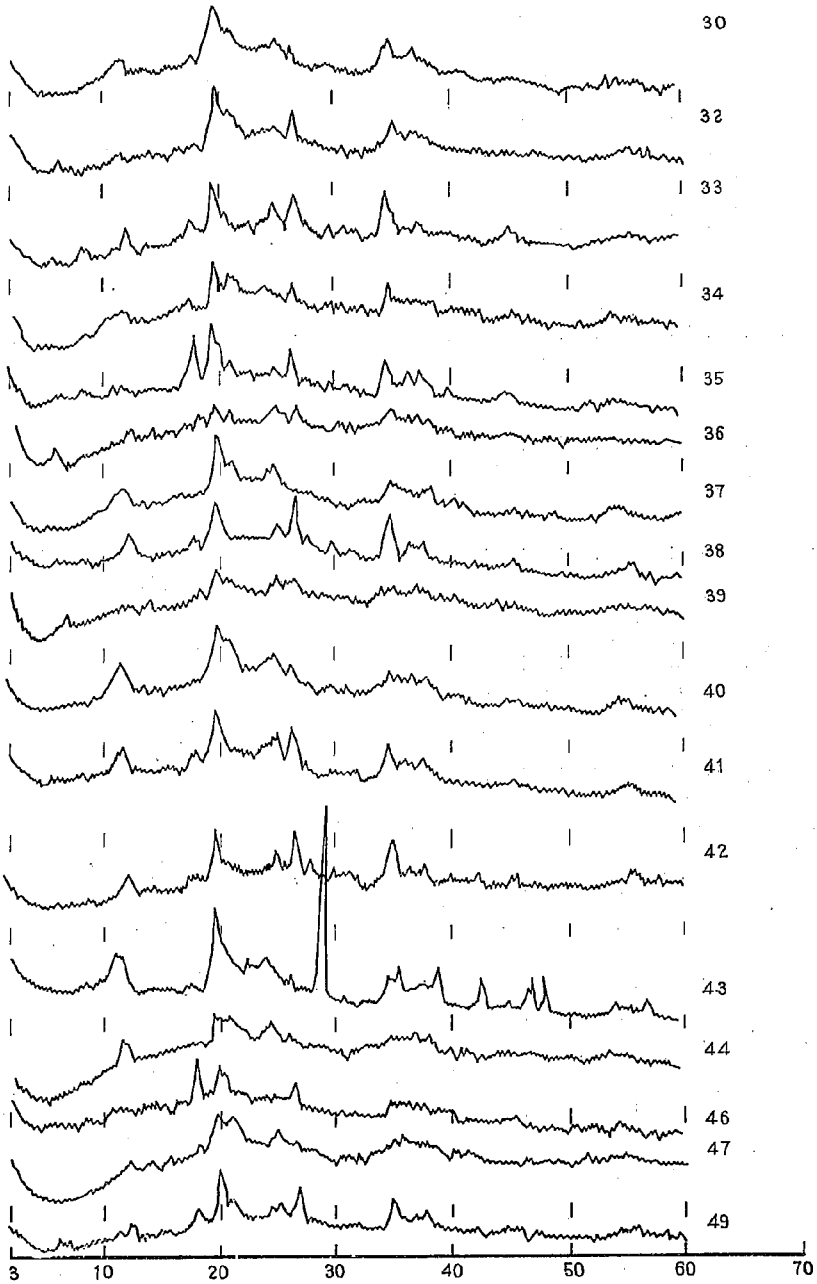


図-21（3） 土壌コロイドのX線回折図（三重県路床土）

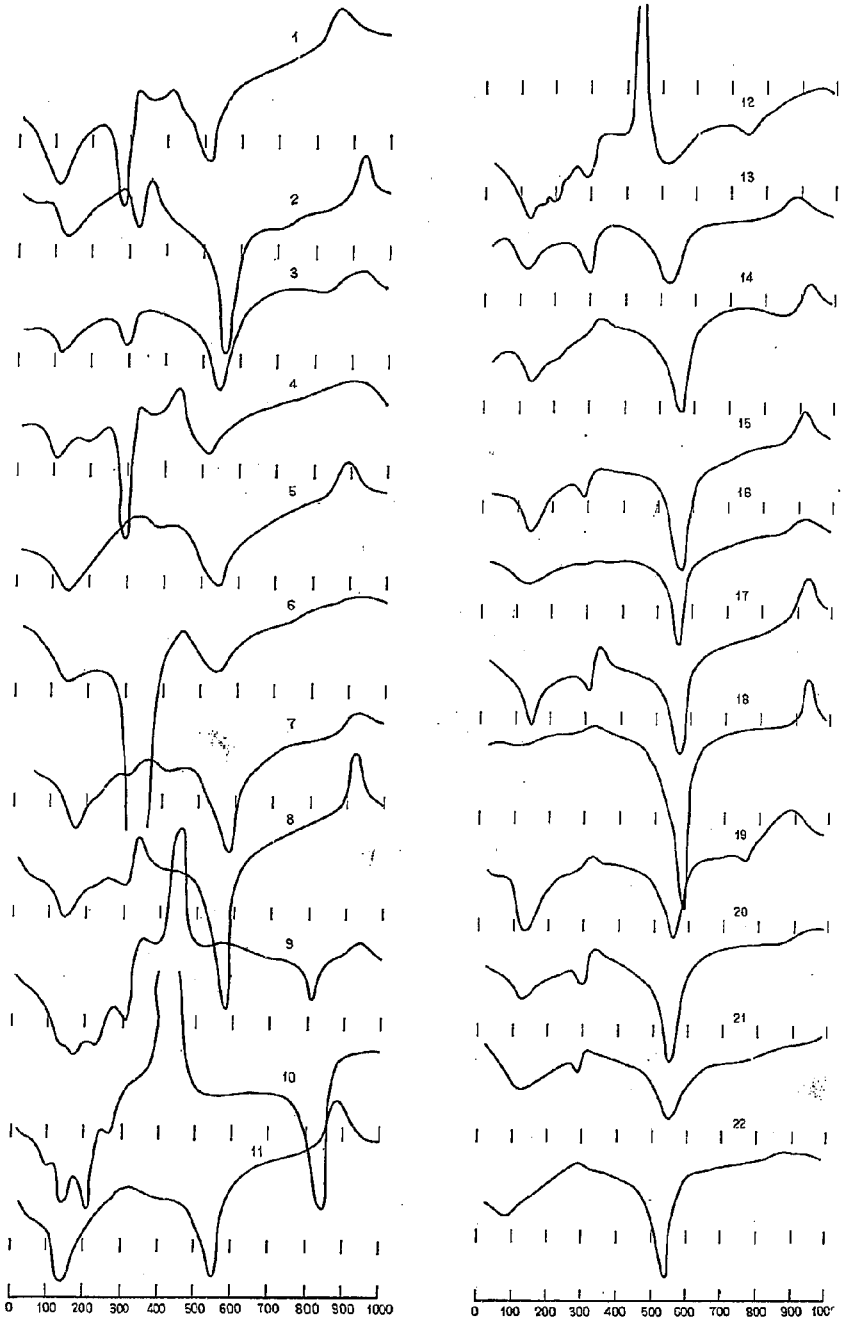


図-22（1） 土壌コロイドの DTA 曲線（三重県路床土）

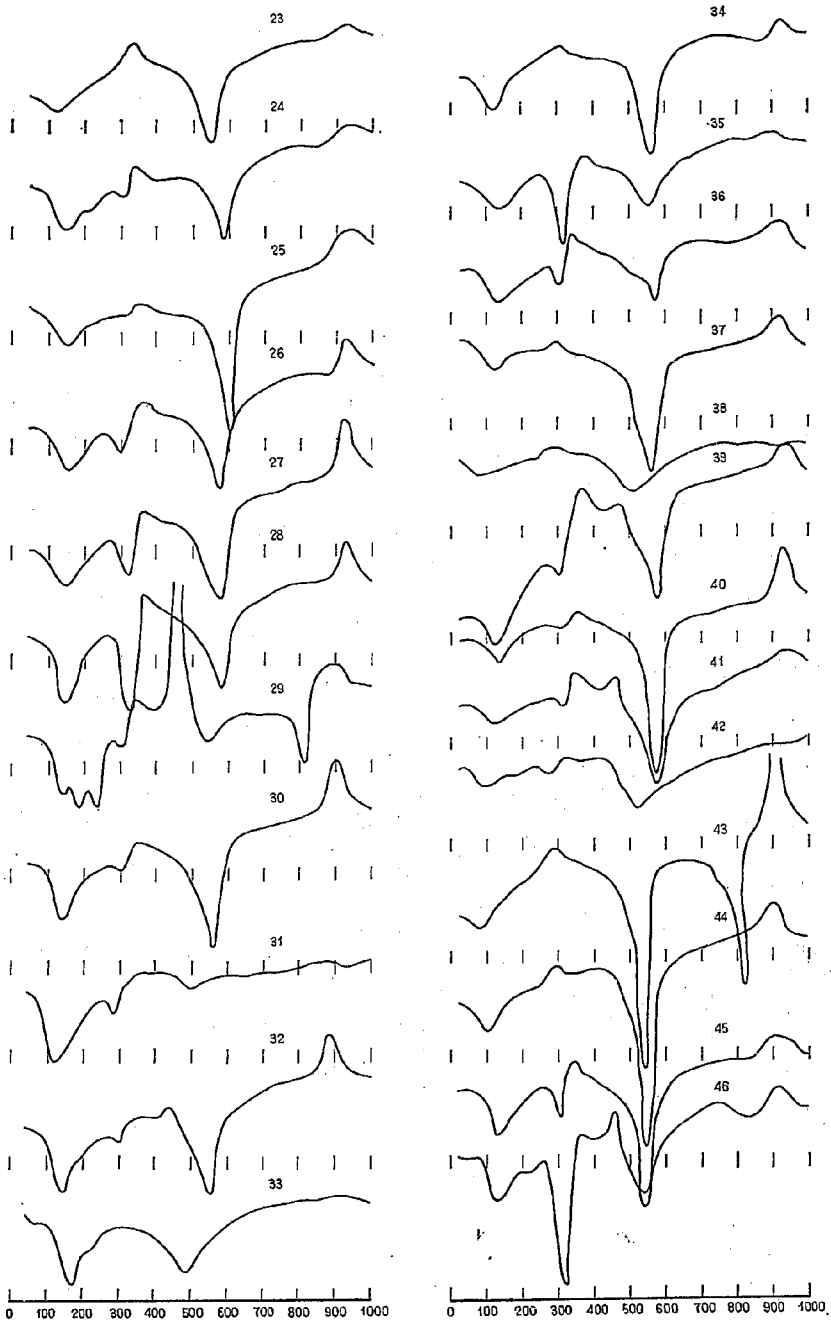


図-22（2）　土壌コロイドの DTA 曲線（三重県路床土）

図-23 エチレングライコール処理粘土のX線回折図

果と一致するが，700°C の小吸熱が見られるので一部のモンモリロナイトが推定される。

三—3 試料は 14Å，10Å，7Å 線を示し，7Å 線は低角側に拡散した形を持つ。エチレングライコール処理試料では14.5，10.2，7.25，5.06，4.87，3.63，3.35Å の鋭い回折線を与え，クロライトおよびイライトの存在も示し，モンモリロナイトは存在しない。(00*l*) 線が鮮明であり (02) 線が著しくぼやけているのは，配向性試料に基くと考えられるが，検討がさらに必要であることも示す。DTA 曲線は一部のイライトの存在も示しているが，クロライトは明瞭には認めず，カオリン鉱物の存在を示す。7Å 線はカオリン鉱物にもきさせることが可

能であり，風乾試料の回折図よりはカオリン鉱物と，カオリン鉱物が混合層鉱物を形成していることを推定させる。本試料はカオリン鉱物の，混合層鉱物としてカオリン鉱物を持つもの，ジプサイト，クロライト，イライトの存在が推定される。

三―4試料は 14Å，10Å，7Å 線を持ち，ジプサイトの存在も示す。DTA 曲線はジプサイトのほかにイライト，モンモリロナイト，結晶度の低いカオリン鉱物の存在を推定させる。この実験結果のみからは確かなことはいえないが，モンモリロナイト，カオリン鉱物およびイライトの存在の公算が大きい。

三―5試料は低角回折部にいくつかの拡散した回折線を持ち。エチレングライコールで処理すれば17.3，10.4，8.4Åを与え，8.4Å線は著しく拡散した線である。この結果からはモンモリロナイトの多量の存在，カオリン鉱物とモンモリロナイトまたはイライトとの不規則混合層鉱物が推定される。10.4Å線は加水ハロイサイトかイライトによるか不明である。この場合も（02）線は著しく不鮮明となり，混合層鉱物の存在を示すものと考えうる。DTA 曲線も 600～700°C での吸熱を示し，カオリン鉱物の外にモンモリロナイトの存在を示している。

三―6試料はジプサイトの粉末線を明瞭に示し，わずかに10Å線を認めるが7Å 線はほとんど見られない。DTA曲線はジプサイトを示すほかカオリン鉱物によるらしい吸熱ピークが見られる。このほか石英，長石類の存在が推定される。10Å線がイライトによるか，加水ハロイサイトによるかは不明であるが，むしろ加水ハロイサイトによると推定される。

三―7試料はいずれも 15.5Å，10.4Å，7.35Å線を示すが，エチレングライコール処理試料では17.3Å，10.0Å線のほかに 7～10Åにわたる著しく拡散した回折線を示し，また（02）線は拡散しており弱い。モンモリロナイトが一部存在するほかにハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物が優勢であることが考えられる。DTA 曲線もX線回折の結果を支持している。石英と長石類が推定される。

三―8試料はジプサイトの粉末線を示す外 7.7Å線は低角側に拡散している。エチレングライコール処理試料では7.35Å線が10.5Å線まで低角側に尾を引いており，ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物の存在を示す。DTA 曲線は X線回折の結果を支持する。わずかに見られる14Å線はエチレングライコール処理で15.5Å線となりモンモリロナイトかクロライトかは明らかでない。

三―9，10（X線回折を欠く），12試料は共に特異なX線粉末線と DTA 曲線を示す。X線粉末線は粘土鉱物や石英等の粉末線を除いて考えれば下記の値で特徴づけられる。

6.23(18)，3.90(2)，3.38(5，？)，3.10(3)，
2.80(12)，2.26(3)，2.13(2)，2.03(2)，1.96(3)，
1.90(2)，1.85(2)

DTA曲線には130°C，200°C，220°C，300°C，400°C，800°C に吸熱があり，450°C に顕著な発熱ピークが見られる。800°C の吸熱ピークは試料によりやや変動するようである。これらの性質を持つ鉱物は三重県以外の各地の陥床土にしばしば見られるが，その同定は現在不可能である。この鉱物を一応X鉱物と仮称する。

三―9試料はX鉱物のほかにジプサイトが優勢であり，14.7Å線はエチレングライコール処理で変位せず，かえって（002），（003），（004）線を明瞭にともなうのでクロライトによると考えられる。7.4Å の弱い拡散した線は 8.7Å を中心とした線となり，加水ハロイサイトとハロイサイトの混合層鉱物を示すものであろう。しかし DTA 曲線ではハロイサイト等はわずかに見られる程度である。

三―10試料は多くがX鉱物であると考えられる。

三―12試料は一部のX鉱物のほかジプサイト，ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物を含むと考えられ，14Å鉱物はエチレングライコール処理で17.4Åに変位しモンモリロナイトの存在を示すが一部は14.7Åが弱っておりこの点は明らかでない。

三―11試料は 7.8Åの弱いが著しく拡散した粉末線を持つが（02）線は明瞭であり，（13）線は拡散している。加水ハロイサイトの脱水により生成したハロイサイトと考えられる。14Å 鉱物は含有されない。DTA 曲線もX線回折の結果を支持している。石英の少量を含有する。

三―14試料は 15.2Å，7.5Å，10.5Å 線を示す。エチレングライコール処理で 15.2Å線は変位しない。7.5Å線は10.6Å線まで連続した回折図を与え，（02）線は著しく弱い。14Å鉱物はモンモリロナイトではないが何であるかはこの実験結果では明らかにしえない。DTA 曲線はハロイサイトを示し，880°C にわずかの吸熱を見られるほか14Å鉱物の影響は見られない。石英が含まれる。

三―15試料はエチレングライコール処理で7.35Å線は14Åまで低角側に尾を引いており，ハロイサイト型鉱物の混合層鉱物が推定されるほか，10Å鉱物と14Å鉱物の混合層鉱物も推定できる。ジプサイトも存在し，14Å鉱物はモンモリロナイトではないが何であるかは明らかでなく，その含量も少ない。DTA 曲線は 700°C に14Å鉱物によるらしい一部の吸熱を示すがハロイサイト型鉱物の存在を示している。

三―16試料は 15.5Å線と著しく拡散した 7.4Å線を示し，エチレングライコール処理で 14.2Å にとどまり，7.4Å線も変位しない。しかし10～8Åの幅広い回折図が見られる。（02）線はぼやけており 4.87Å線は明瞭化する。クロライトのほかハロイサイト鉱物の混合層鉱物が

推定される。DTA 曲線は 900°C の発熱ピークが著しく円味を持っており粒径分布が広いことを示すのかも知れない。石英を含む。

三—17試料は比較的拡散した 7.5Å 線を示し，加水ハロイサイトより生成したハロイサイトの存在が知られ，外にジプサイトと石英が含有され，長石も推定される。モンモリロナイトは存在しない。DTA 曲線も X 線回折結果を支持している。

三—18試料は 7.6Å の比較的鋭い粉末線を示し，(hk) 線もはっきりしており，加水ハロイサイトより生じたハロイサイトと考えられるが比較的結晶度が高い。モンモリロナイト等を含まない。エチレングライコール処理試料では10Å の比較的拡散した回折線も見られ，一部加水ハロイサイトの存在も見られる。DTA 曲線はハロイサイトを示すが，150°C の吸熱ピークが小さすぎる点は検討を要する。

三—19 試料は低角側に著しく拡散した 7Å 線を示し，(02) 線を除いて(hk)線はいずれも鮮明さをかき，その強さも小さく一部の非晶質も存在すると考えられる。エチレングライコール処理したものは7.63Å 線と 11Å 線まで尾を引いた 8.5Å 線が見られる。すでにのべたハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物およびハロイサイトの存在が考えられる。14Å 鉱物はエチレングライコール処理で変位が確実でなく，この実験結果だけでは同定できないし，6.7Å 線も何によるか明らかでない。なお方解石の存在が明らかである。DTA 曲線は結晶度の低いハロイサイトと方解石を示すが，これら以外のものの存在は DTA 曲線上には見られない。

三—20試料は 14Å，12.6Å，7.9Å および 7.25Å 線を示す。7.9Å 線は加水ハロイサイトの一部脱水された状況を示し，7.25Å 線はハロイサイトを示すものであろう。12.6Å 線は雲母系鉱物の混合層鉱物によるのかも知れないし，14Å 線は明らかでない。エチレングライコール処理試料については10Å，12.6Å，7.3Å 線を示し，10Å 線と 7Å 線が引きつづいていることはハロイサイト系の混合層鉱物をも含むことを示し，14Å 線が消えることはその理由が明らかでない。外にジプサイトと石英，長石類が見られ (13) 線は独立した形を示す。DTA 曲線はハロイサイト，ジプサイトの吸熱ピークを示すが，ハロイサイト等に見られる 900～1,000°C の発熱ピークを明瞭には示さない。この原因については明らかでないが，結晶度が著しく小さいこととか不純物の混入によるものであろう。

三—21試料は 7.2Å の著しく低角側に傾斜した回折図を与え，(13)および(02)線以外は不鮮明な回折図を与えることは三—20試料と同じであり，わずかであるが10.4Å の回折線を示す。加水ハロイサイトより生成したハロイサイトを示すものであろう。ジプサイト，石英，長石類の存在も知られる。DTA 曲線は 550°C の吸熱ピークが浅く，その幅も広くさらに900°C 以上の発熱を明瞭には示さない。三—20試料と同様に考えることができる。

三—22試料は10.4Å 線が測台に強いこととジプサイトの粉末線を示さないことを除いて，三—21試料および三—20試料と同様に考えられる。10.4Å 線は 5.0Å 線をともなうことおよび DTA 曲線で 150°C の吸熱ピークの幅の広いことと関連してイライトの存在が推定される。

三—23試料は低角側に傾斜した 7.5Å 線を示し，明瞭な (hk) 線を示さない。結晶度の低いハロイサイの混合層鉱物で粒径も小さいと推定されるが，ゲータイトの存在も示される。DTA 曲線も X 線回折の結果を支持する。

三—24試料は 16Å に強い回折線を示し，7.3Å 線も低角側に傾斜している。エチレングライコール処理試料では17.3Å 線が見られ，7.3Å 線も 10Å 程度まで拡散した状態を示し，(02)線は不明瞭である。ほかにジプサイトの粉末線を示す。DTA 曲線もモンモリロナイトとハロイサイトおよびジプサイトの存在を示す。

三—25試料はハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物の存在を示すほか，モンモリロナイトは存在せず，むしろクロライトが少量であるが推定される。石英も存在する。

三—26試料および三—27試料には加水ハロイサイトより生成した比較的結晶度の低くないハロイサイトおよびジプサイトが存在することが，X 線回折および DTA 曲線より考えられる。

三—28 試料は三—26 試料と同じであるが 14Å 線を示す。14Å 線は何によるか不明であるが，DTA 曲線上に 700°C にわずかな吸熱が見られることよりモンモリロナイトによると推定される。

三—29試料は三—9，10，12 試料等に見られた X 鉱物を多く含有する。14Å 線はエチレングライコール処理で変位せず，モンモリロナイトではないが何によるかは明らかにしえない。また拡散した回折線上に 8.3Å，9.1Å および 9.8Å 線等が見られ，3.5Å 線から 4.0Å 線にわたり帯状の回折図を示し，ハロイサイト型混合層鉱物も推定され，14Å 線は (002)，(003)，(004) 線をともないクロライトの公算が大きい。DTA 曲線は X 鉱物を示すほか，一部のハロイサイト型鉱物を示す。なおジプサイトおよび石英の存在が推定される。

三—30試料はモンモリロナイト等は含まず，ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物とジプサイトの存在を示す。

三—32試料は 7Å 線が低角側に傾斜し，(02) および (13)線以外は鮮明でなく，結晶度の低いハロイサイトの混合層鉱物を示す。弱い14Å 線が見られるがエチレングライコール処理で変位しないのでモンモリロナイトではないと考えられる。ジプサイトと石英の存在も考えられ

る。DTA 曲線では 600°C の吸熱ピークが低温側に，900～1,000°C の発熱ピークも著しく低温側に偏している。結晶度が低く，粒径の特に小さいハロイサイトと推定される。

三—33試料は14.3Å, 10.2Å, 7.2Å線を示す。エチレングライコール処理で14.3Å線は変位せず，10.2Å線は5.0Å線と共に明瞭に見られ，また 4.80Å も見られる。7Å線はクロライトの (002) 線としては強すぎるので，カオリン鉱物の存在を示すものと考えてよい。10Å線はセリサイトまたはイライトにより，14.3線は(002)，(003)，(004) 線をともない一部のクロライトが存在することを示す。DTA 曲線は 500°C にピークを持つ幅の広い吸熱を示し，イライトを示すものである。またカオリン鉱物の明瞭な発熱ピークが見られないのはイライト等との共存のためであろう。ほかに長石類と石英が存在する。

三—34試料は 7～9Å の著しく拡散した回折線を示し，ハロイサイトと加水ハロイサイトとの混合層鉱物の存在を示す。エチレングライコール処理した試料では混合層鉱物のほかに鋭い10Å線を示し(002)，(003)線もともない一部のイライトの存在が考えられる。著しく弱い14Å線は何によるか不明である。ほかにゲータイトおよびジプサイトの存在が明らかである。DTA 曲線は 920°C の発熱ピークは小さいが，結晶度の低いハロイサイトの存在を示し，870°C の吸熱ピークはイライトによるものであろう。石英，長石類が推定される。

三—35試料は14Å, 10.5Å, 7.7Å線を示すがいずれも拡散した形を示し，(02)線および(13)線は明瞭である。エチレングライコール処理試料の回折図からも推定されるように，7.7Å 線はハロイサイトと考えられ，10.5Å 線はイライトと推定され，14Å線は17.4Å に変位しないのでモンモリロナイトではないが不明である。ほかにジプサイトの明瞭な粉末線が見られ，ゲータイトも推定される。DTA 曲線には 560°C の広い吸熱が見られ，むしろイライトの存在が考えられるが，600°C 前後の吸熱よりカオリン鉱物の存在も推定される。670°C，810°C の小吸熱ピークはクロライトを考えうることを示すが明確ではない。ジプサイトの吸熱ピークも明瞭であり，ゲータイトも推定できる。

三—36試料は14.2Å, 7.2Å線を示す。7.2Å線は低角側に傾斜しておるが比較的明瞭な回折線である。(02) 線がやや大きい値を示すがいずれも回折線の強度は低く，一部の非晶質が存在すると考えられる。(06) 線は1.53Å である。14Å線はクロライトかバーミキュライトによると推定されるがこの実験結果だけからは明らでない。ジプサイトの粉末線も見られる。DTA 曲線はカオリン鉱物の存在を示すが，300°C から500°C にかけてゆるやかな吸熱が見られ，何によるか明らでない。この試料についてはさらに実験結果が必要である。

三—37試料は 7.5Å の比較的拡散しているが明瞭な回折線を示すが，14Å 線等は示さない。DTA 曲線では 560°C の吸熱ピークに比して910°C の発熱ピークは小さく，結晶度の低いハロイサイトの存在が知られる。

三—38試料は 14.7Å, 10.1Å, 7.2Å線を示し，(02) および(13)線が鮮明である。14.7Å線は (002)，(003)，(004) に当る粉末線をともなうのでクロライトが推定され，10Å線は強度は低いが(002)，(003)，(005)をともないイライトと推定される。エチレングライコール処理試料の回折図についても上にのべたと同様である。7.2Å線はクロライトにもよるが，14Å線を比較して強度が大きすぎ一部はカオリン鉱物にもよると考えられる。DTA 曲線は 400～700°C にわたる拡散した吸熱を与え，イライトの DTA 曲線に近かく，クロライト等によるピークは見られない。さらに検討が必要である。

三—39試料は明瞭な粉末線を与えない。7～8Å線は著しく拡散しており，ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物を示すと考えられる。弱い13Å線が見られるが明らかでない。ジプサイトの存在も推定される。回折線はいずれも弱く明瞭でなく，非晶質が一部存在すると考えられる。DTA 曲線はハロイサイトの存在を示し，ジプサイトの吸熱ピークも見られる。長石類も推定される。

三—40試料は三—37試料と殆んど同じであるが，むしろやや結晶度が高いと考えられる。石英も存在する。

三—41試料は 7.3Å 線がやや低角側に傾いているが明瞭であり，一部の混合層鉱物を含むかも知れないが結晶度の低いハロイサイトの存在が知られる。ジプサイトも存在する。エチレングライコール処理試料については14Å線は変位しないで，10.2Å線が明瞭に見られイライトと考えられ，14.4Å線はクロライトと推定されるが確実のことは解らない。700°Cにわずかに吸熱が見られるが，120°C の吸熱も小さくモンモリロナイトとも考えがたい。石英，長石類が推定される。

三—42試料は 7.3Å 線がわずかであるが低角側に傾いているが明瞭であり，結晶度の低いカオリン鉱物が知られる。10Å線は (002)，(003)，(005) 線を明瞭にともないイライトの存在を示している。14Å線は拡散した線でありエチレングライコール処理で変位せず(002)，(003)，(004) 線をともなうのでクロライトと考えられる。また (02)，(13) 線は鋭い独立した形を示し，その値もやや大きい。DTA 曲線は 450～700°C の広く浅いピークを与えイライトのそれと一致し，このピークの形が著しく非対称性であることはイライトと結晶度の低いカオリン鉱物の共存を示すものであろう。150°C のピークは顕著でなくモンモリロナイトは存在しても少量であろう。280°C の吸熱ピークはジプサイトによると考えられるがX線では明瞭でない。高温部での発熱ピークは著しく小さい。X線回折および DTA 曲線からはイライトの存在

が明瞭であり，結晶度の低いカオリン鉱物も存在し，14Å鉱物は恐らくモンモリロナイトでなく，クロライトと考えられ，ほかに長石類の存在が明らかであり，ジプサイトの存在も推定される。

三—43試料は明瞭な 7.7Å線を示し，加水ハロイサイトの脱水したハロイサイトの存在を示すほか，方解石の明瞭な回折線を示す。DTA 曲線は一部の有機物によると推定される300°C の発熱ピークを示すほかは，ハロイサイトと方解石を示す。900°C の発熱ピークがハロイサイトとしては低温側にあることは，粒径が小さくしかも均一であることを示すものであろう。

三—44試料は 7.5Å線を示すが拡散しており，低角側に著しく拡散した線を与え，(002) 線以外には余り明瞭な回折図を与えない。加水ハロイサイト，ハロイサイトの混合層鉱物と考えられ，わずかに見られる14Å鉱物は明らかでない。ほかに5.1Å，4.19Å，3.38Å，2.44Å等で知られるようにゲータイトの存在が知られる。また回折図からは一部の非晶質の存在が考えられる。DTA 曲線はハロイサイトを示し，その結晶度は低いことが知られる。X線で認められたゲータイトの熱ピークは400°C には見られなく，著しく結晶度が低いため300°C 前後に示されるであろうが，一部の有機物による発熱でマスクされていると推定できる。

三—45試料は X線回折を欠き，DTA 曲線がえられている。DTA 曲線からはハロイサイトないしは加水ハロイサイトまたはその混合層が存在し，結晶度はいずれも低いことが知られ，ジプサイトの存在も考えられ，モンモリロナイトの存在も推定できる。

三—46試料は弱い 7.5Å 弱線を示すが 7.1～8.6Å にわたって拡散しており，ハロイサイトの混合層鉱物を示す。ほかに 14Å，12Å，10Å がわずかに見られるが，どの鉱物によるかは明らかでない。(hk) 線は明瞭ではない。エチレングライコール処理試料では7.2Å から 10.2Å また 3.4Å から 4.5Å にわたり拡散した帯状回折線を示し，14Å 線は変位しない。ジプサイトの粉末線は明瞭に見られる。DTA 曲線には 450～700°C にわたった幅の広い吸熱ピークが見られ，ハロイサイトのほかに600°C 以上での吸熱を示すものの存在が推定され，850°C での広い吸熱ピークとも関連するものであろう。モンモリロナイトは存在しないので150°C の吸熱ピークはやや大きく，クロライト，バーミキュライトの熱持性も明瞭には見られない。この実験結果だけではハロイサイトの混合層鉱物，ジプサイトの存在，モンモリロナイトが存在しないことが知られるほかは，他の粘土鉱物の推定はできない。

三—47試料は DTA 曲線をかく。X線ではハロイサイトとその混合層鉱物を示し (hk) 線も明瞭でない。また非晶質の存在も考えられる。ジプサイトと長石類の存在が考えられ，モンモリロナイト等の14Å線を示すものは存在しない。

三—49試料は比較的強い 7.2Å線を示し，微弱な 8A 線も見られるが混合層鉱物は存在しても少量であろう。14.7Å が示されるが，クロライトとすれば (003) 線がほとんど見られないし，7.2Å 線はカオリン鉱物を示すと考える。わずかに見られる 12.6Å 線は雲母系のものであろう，がこの結果だけでは推定もできない。ジプサイトが見られるほか石英も推定できる。

〔6〕 愛知県の路床土 (愛—1～36)

愛知県路床土のコロイド成分の粘土鉱物を X 線回折 (エチレングライコール処理をふくむ) および DTA 方法で検索した結果を図-24，25，23に示す。

つぎに実験結果をのべる。

愛—1 試料は X線回折によればやや拡散してはいるが強い7.38Å 線を示し (hk) 線と共にハロイサイトの代表的な回折図を示す。14Å 線もわずかに見られるが，明らかでないし，同様に10Å 線も見られ恐らくイライトによると推定されるが確実ではない。石英が存在し，方解石も少量存在すると考えられる。ハロイサイトは結晶度の高いものである。DTA 曲線はハロイサイトを示し，結晶度の低い方解石によると推定される740°C の小吸熱ピークが見られる。14Å 鉱物の存在は DTA 曲線よりは明らかでないが，100～300°C の吸熱ピークの形はイライトを推定させる。

愛—2 試料の X線回折図は愛—1 試料より結晶度の低くいハロイサイトの存在を示し，7.35Å 線が低角側に傾いており一部のハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物の存在を推定させる。14Å 鉱物および10Å 鉱物等はほとんど見られない。石英の少量が推定される。DTA 曲線は高温部の発熱ピークが920°C でやや低くく，130°C の吸熱ピークは比較的大きい。ハロイサイトが主であり，一部の加水ハロイサイトとハロイサイトの混合層鉱物が存在すると考えられる。

愛—3 試料の X線回折図は7.50Å 線を示し，この線は低角側に傾いており，愛—2 試料と同様に考えられる。ジプサイトの少量をともない，石英も推定される。DTA 曲線も愛—2 試料と大体同じであるが，やや高温側の発熱ピークがやや高く，ジプサイトによる300°C の吸熱ピークも示され，400°C にも小吸熱ピークが示される。ハロイサイト，加水ハロイサイトとハロイサイトの混合層鉱物，ジプサイト，石英が存在し，14Å 鉱物等は見られない。

愛—4 試料は X線回折でも DTA 曲線でも結晶度の高かいハロイサイトを示し，僅少量の石英をともなう。DTA 曲線は 950°C の発熱ピークが 500～600°C の吸熱ピークに比して小さい

愛—5 試料は X線回折実験を実施していないが，DTA 曲線からは主としてハロイサイトよりなり，300°C まで

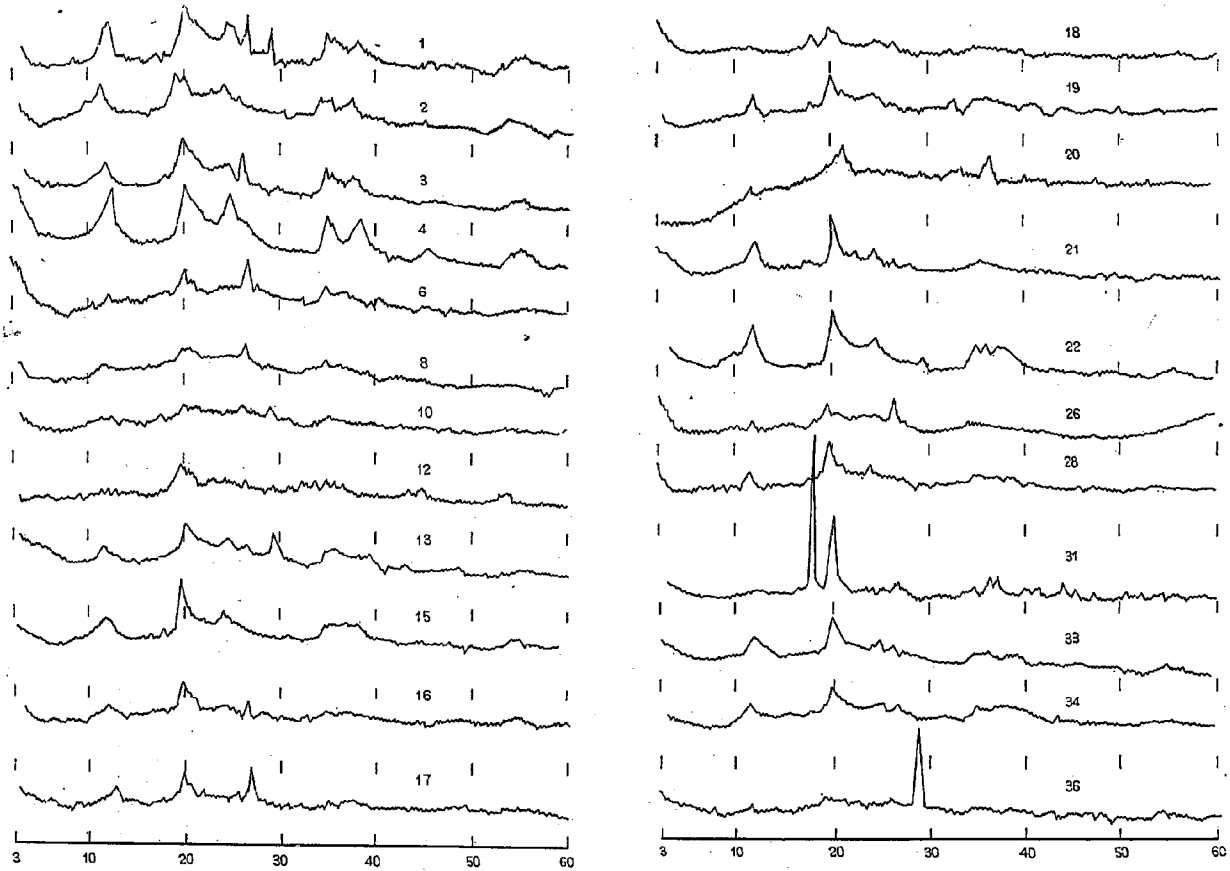


図-24　土壌コロイドのX線回折図（愛知県路床土）

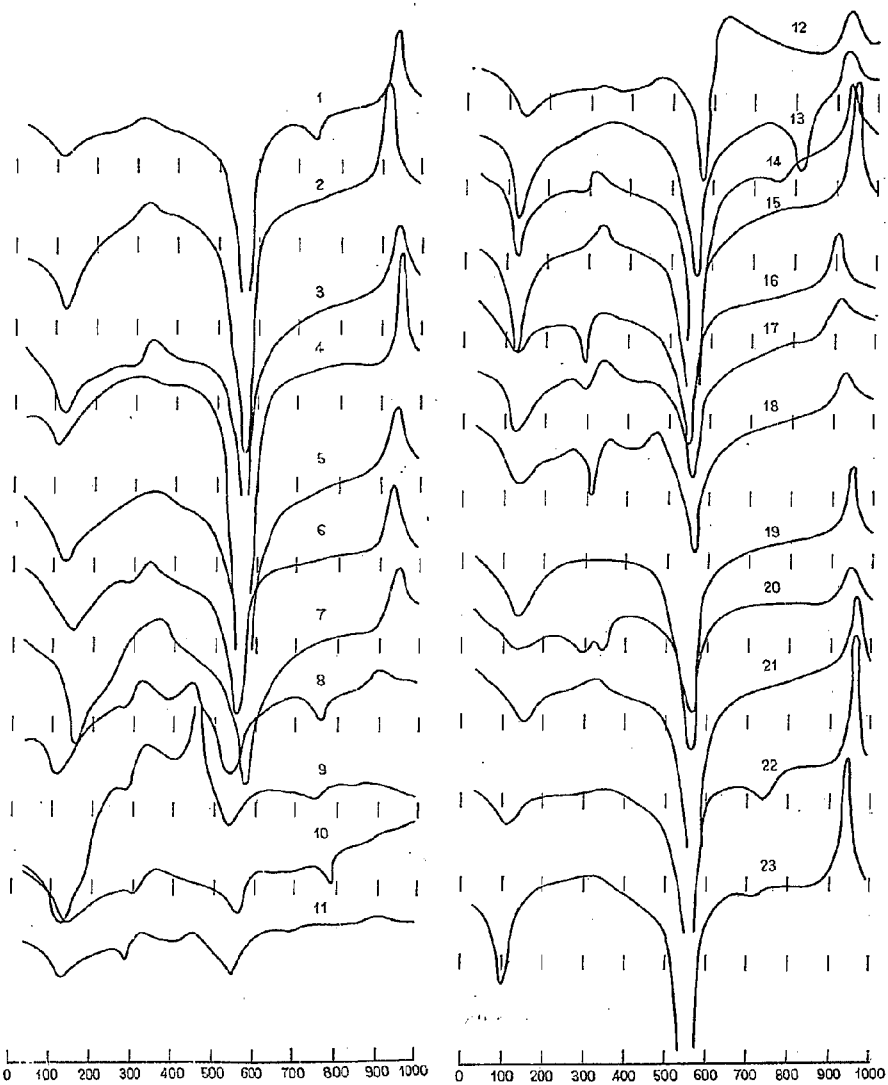


図-25（1） 土壌コロイドの DTA 曲線（愛知県踏床土）

の吸熱ピークおよび700°C でのわずかな吸熱部分等より考えて，イライトおよびモンモリロナイト等の存在が推定される。

愛—6 試料のX線回折では低角部側に拡散した7.25Å線，8.4Å線，10.4Å線および15Å 線を示す。エチレングライコール処理試料では 7.2Åから 10Å にわたる拡散した線および14.6Å，17.4Å線を示す。加水ハロイサイトとハロイサイトおよびそれらの概して規則性のある混合層鉱物の存在が考えられる。一部のモンモリロナイトとそれよりほかの14Å鉱物が考えられる。長石類が存在しジプサイト，石英も推定される。DTA曲線はハロイサイトまたは加水ハロイサイトを示し，ジプサイトによる300°Cの吸熱ピークも示し，700°C のわずかな吸熱部はモンモリロナイトを推定させ，300°C までの吸熱ピークの形はイライトの共存を推定させる。ハロイサイト，加水ハロイサイト，両者の比較的規則性のある混合層鉱物が

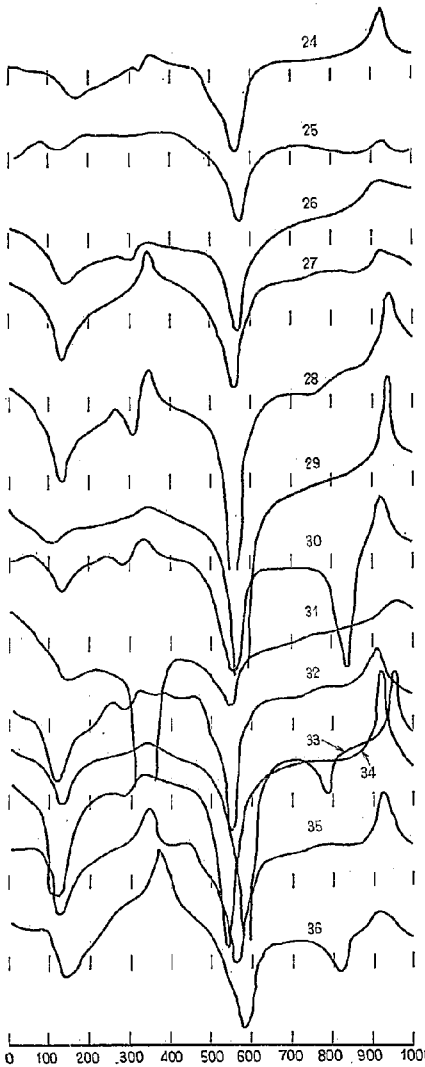


図-25（2）土壌コロイドのDTA曲線(如愛県路床土)

考えられ，少量のモンモリロナイト，ジプサイト，長石類，石英も考えられる。ほかに少量の14Å鉱物が示されるほかにイライトが推定される。

愛—7試料はX線回折を欠くが，DTA 曲線からはハロイサイト系鉱物が示されるほか，300°C までの吸熱ピークの形状，600～700°C の曲線形状および 900°C でのわずかな吸熱部の存在等を考えてモンモリロナイトの存在は十分考えられる。

愛—8試料は回折図が鮮明でなく，一部の非晶質物を含むとも推定されるが，また結晶度自体が著しく低くいことを示すとも考えられる。ハロイサイトの(001)線に当るものは7～7.8Åにわたって拡散しており，さらに9Å にも達するように尾を引いている。エチレングライコール処理で鋭い7.35Å線は低角側に11Å線まで8.3Å，10.0Åの回折線をともなって尾を引いている。ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物が考えられる。10.3Å線は加水ハロイサイトによるものであらうし14.2Å線はエチレングライコールで変位せずモンモリロナイトではなく，一部の17Å線も見られるが，それらの量はそれ程多くはないと推定される。ほかにゲータイト，ジプサイト，石英が推定される。DTA 曲線は 500～600°C の吸熱ピークは低温側に，900°C の発熱ピークは高温側に偏して結晶度の低いカオリン鉱物を示す。540°C の吸熱ピークは 900°C の発熱ピークに比して著しく大きく，540°C のピークはカオリン鉱物以外のもののピークと重なっていると考えられる。これら鉱物は600°Cより700°C にわたった吸熱部分の存在とも合せ考えてモンモリロナイトと推定され，また770°C の吸熱ピークはクロライトに関係あるものと推定される。ジプサイト，ゲータイトの存在も推定される。この試料中にはハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物，少量のゲータイト，ジプサイト，石英が見られるが，ほかにモンモリロナイトおよびクロライトも推定され，イライトについては明らかでない。

愛—9試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線は三重県路床土にも見られたX鉱物の曲線とよく一致し，ほかに一部のカオリン鉱物の存在が示される。

愛—10試料は拡散した 7.2Å を与えるが，回折線は全般的に鮮明でなく，(02)線や(13)線も明瞭ではない。エチレングライコール処理で7.35Å線は11Å まで低角側に尾を引いた回折線を与えハロイサイトは著しく結晶度も低くく，またその含量も少ないと考えられる。14Å線もわずかに見られるがエチレングライコール処理でも変位せずその強度も小さく何によるか明らかでない。ジプサイトの存在が示され，石英および方解石の少量が推定される。DTA 曲線はハロイサイトの少量の存在を示し，ジプサイトおよび方解石をも示す。400°C から吸熱が始まることおよび100°C から始まる吸熱ピークの幅が広いことはイライト等を推定させるが，X線では10Å線は明瞭でなく，14Å線の影響も明らかでない。

愛—11試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線からはジプサイト，イライト，ゲータイト等を推定させる。

愛—12試料のX線回折図は 7.0～8.8Å の著しく拡散した反射を示し，11Å線と14Å線おもわずかに示す。エチレングライコール処理試料では7.37Å の強い反射と 8Å の弱い反射のほかに 9～11Å の拡散した反射を与え，

わずかであるが14.4Å，4.74Å線をも示す。ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物およびハロイサイトの存在が考えられ，わずかの恐らくクロライトも推定される。なお6.6Å 線が見られるが何によるか明らかでない。DTA 曲線はハロイサイトを示す。

愛—13試料は方解石の存在を除いてハロイサイト鉱物に関しては，愛—3試料と同様であるが，14Å より低角側に帯状に拡がった回折線を示す。

愛—14試料は少量のジプサイトおよび方解石をふくみ，愛—13試料と同じと考えられる。

愛—15試料はハロイサイトを主とし，(13)，(20)，(03) 線等は鮮明ではない。5.0Å 線がわずかに示されるが明らかでない。DTA 曲線は比較的結晶度の高いハロイサイトを示す。

愛—16試料のX線回折図は全般的に鮮明でない。7.5Å 線は低角側に拡散しており，ハロイサイトとその混合層鉱物を示すと考えられる。エチレングライコール処理試料では 7.5Å線は 11Å まで拡散しておる。結晶度も低く，含量も特に多いとは考えられない。少量のジプサイトと石英が見られる。14Å線はエチレングライコール処理で変位しないのでモンモリロナイトは存在しないが，詳しいことは解らない。

愛—17試料のX線回折図は愛—16試料と同様に考えられる。エチレングライコール処理試料については17.6Å 線10.0Å のほかに 12.4Å 線もわずかながら見られる。DTA 曲線はハロイサイトの存在を示し，830°C のわずかな吸熱，600～700°Cにわたる吸熱，220°Cの吸熱等を考えてモンモリロナイトが考られる。ほかにイライト等については明らかでない。ジプサイト，長石類，石英も推定される。

愛—18試料はX線回折図も DTA 曲線もほとんど愛—17試料と同じである。14Å鉱物については明確をかく。

愛—19試料のX線回折図は 7.5Å の強い反射のほかに 8.3Å および拡散した10Å線を与える。(hk) 線は (02) 線を除いて著しく不鮮明である。ハロイサイトのほかにその混合層鉱物が考えられ，長石類も推定される。10Å 線については明らかでない。DTA 曲線はハロイサイトを示し，イライト等の影響は見られない。

愛—20試料はX線回折図が不鮮明であり非晶質物質の存在が推定される。7.4Å 線は著しく弱く低角側に拡散しており，また (hk) 線も明瞭さをかく。ハロイサイトと加水ハロイサイトの不規則混合層鉱物の存在が推定され，このほかにゲータイトの明瞭な回折線とヘマタイトが推定される。DTA 曲線はハロイサイトを示し，300°C と320°C の吸熱ピークはこの間に有機物による発熱ピークが存在したと考えられるので，結晶度の低いゲータイトによると考えられる。

愛—21試料は 7.5Å の比較的鋭い反射と明瞭な (02) 線および (002) 線を示すほかは，(h,k) 線は著しく弱い。DTA 曲線はハロイサイトを示すが 960°C の発熱ピークの大きさは 500～600°C の吸熱ピークに比して著しく小さい。

愛—22試料のX線回折図は愛—3試料とほとんど同じであるが，方解石をわずかに示しているほか10Å 線が痕跡的に見られる。結晶度の高いハロイサイトを示すことはDTA 曲線からも明らかである。

愛—23 試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線はハロイサイトを示し，720°C の小吸熱ピークは明らかでない。500～600°C の吸熱ピークが著しく大きいことは愛—4試料とよく似ている。100°C の吸熱ピークが明瞭に見られ，加水ハロイサイトを示すと考えられる。

愛—24試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線からは一部のハロイサイトのほかにイライトの存在が考えられ，少量のジプサイトも推定される。

愛—25試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線からは余り多量ではないがカオリン鉱物が存在し，さらにイライトが推定される。

愛—26試料のX線回折図は全般的に回折線の強度が小さく，鮮明さをかく。7.35Å 線は比較的拡散しているが，8～10.6Å にわたる微弱であるが著しく拡散した回折線が見られる。ハロイサイトのほかハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物が考えられ，少量のジプサイト，石英，長石類の存在が推定される。DTA 曲線はカオリン鉱物を示すが 910°C の発熱ピークは円味をもち，低温側に偏している。ジプサイトの存在も推定され，130°C の吸熱ピークの幅が広い。

愛—27試料はX線回折図を欠き，DTA 曲線はカオリン鉱物を示すが，910°C の発熱ピークは円味を持ち，低温側に偏し，980°C にも微小な発熱ピークをもつ。カオリン鉱物は結晶度も低いものと推定される。880°C に明らかに吸熱ピークを示し，700°C にもわずかな吸熱ピークを示すのでモンモリロナイトが一部推定できる。

愛—28試料のX線回折図は 7.6Å線を示し，これより低角側には11Å までに痕跡程度であるが 8.0Å，9.2Å，9.6Å，10.0Å の反射が見られる。14.4Å 線もわずかに見られる。(hk) 線は (02) を除いては不明瞭である。ハロイサイト，ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物の存在が考えられ，ジプサイトも推定され長石類，ゲータイト，石英も推定される。しかし14Å鉱物については明らかでない。DTA 曲線はハロイサイトのほかジプサイトを示し，760°C に見られる小さい吸熱ピークは14Å線と関係があるかどうかは明らかでない。

愛—29試料はX線回折図を欠くが，DTA 曲線は愛—21試料等とほとんど同じであり，ハロイサイトを示すと考えられる。

愛—30試料もX線回折図を欠くが，DTA 曲線はハロイサイトを示し，一部の方解石および少量のジプサイトとも示していると考えられる。

愛—31試料のX線回折図はジプサイトの回折線をすべて示し，ジプサイトの存在が優位であることが示される。8.8～7.0Åにわたる弱いが著しく拡散した回折線も見られ，ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物が推定される。DTA 曲線はジプサイトを示し，ハロイサイトの存在も推定される。

愛—32試料は X線回折図を欠くが，DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，少量のジプサイトをも推定させる。200°C，700°C および 860°C の小さい吸熱ピークはモンモリロナイトの存在を推定させ，500°C の吸熱はイライトの存在と関係あるかも知れない。

愛—33試料のX線回折図は比較的明瞭な7.5Å 線を示しハロイサイトの存在を示すが，(hk) 線が (02) 以外は鮮明でない。10.5Åの弱い回折線は5.0Å，3.36Å，2.00Å線をともないイライトを推定させるとも考えられる。ゲータイト，方解石の少量をともなうと考えられる。DTA 曲線はハロイサイトを示すが，960°C の発熱ピークが580°C の吸熱ピークに比して著しく小さく，方解石によると推定される800°C の小吸熱ピークを示す。

愛—34試料のX線回折図は 7.5Å線を示すが低角側に拡散した形を与え，わずかに見られる10Å線も著しく拡散している。(hk) 線も余り明瞭ではない。エチレングライコール処理で7.5Å線は鋭い線となるが低角側に 11Å線まで尾を引いている。このほか微量の 14.4Å も見られ，モンモリロナイトは存在しないことを示す。ハロイサイトのほかに加水ハロイサイトとハロイサイトの混合層鉱物を示すと考えられる。10Å線は一部の加水ハロイサイトによると考えられるが，6.7Å 線については明らかでない。石英，クリストバライトが推定される。DTA 曲線はハロイサイトを示し，540°C の吸熱ピークは低くく920°C の発熱ピークも低温側にある。

愛—35試料は X線回折図を欠き，DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，700°C および880°C にわずかであるが小吸熱が見られモンモリロナイトを示すのかも知れない。570°C の吸熱ピークの幅が割合広いのはイライトと関係あるか知れないが明らかでない。ゲータイトが推定される。

愛—36試料の X線回折図は全般的に鮮明を欠き，7.4Åは拡散した線であり，15.5Å線も拡散している。非晶質物が一部存在すると推定される。エチレングライコール処理で17.4Å線が明らかに見られ，7.4Å線は 10.6Å までに拡散しており，12.2Å線も見られる。ハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物とモンモリロナイトが考えられるが，わずかに見られる12.2Å線については明らかでない。方解石の回折線が見られるが3.04のみ強く，それ以外の線は非常に弱く結晶度の低いものであろう。DTA 曲線はハロイサイトを示すが，結晶度の低いものとしてはそのピークが600°C で高すぎ，モンモリロナイトの存在を考えてよい。方解石の存在も考えられる。

〔7〕 静岡県の路床土（静—1～16）

静岡県路床土のコロイド成分の粘土鉱物を X 線回折（エチレングライコール処理をふくむ）および DTA 方法で検索した結果を図-26，27，23 に示す。

つぎに実験結果をのべる。

静—1 試料のX線回折図は15.2Å の強い回折線を示すほか，7.5Å の拡散した線も示しこの線は低角度側に尾を引いており，弱い10Å線にまで及んでいる。エチレングライコール処理で 17.4Å が強く示され，7.5Å線は 7.35Å線と 8.5Å 線に分割され，8.5Å線は 10Å線まで尾を引いて連続している。(02)線はエチレングライコール処理でむしろ不鮮明となり，ハロイサイトの (002) および加水ハロイサイトの (003) が移動するために3.3～4.4Åの間がぼやけている。これらの事実よりこの試料はモンモリロイトのほかにハロイサイと加水ハロイサイトの不規則混合層鉱物が存在すると考えてよい。このほか長石類が推定され，石英も微量存在するかも知れないし 5.4Å線は明らかでない。

DTA 曲線は結晶度の低いカオリン鉱物と，200°C の吸熱，600～730°C の吸熱，820°C の吸熱で見られるようにモンモリロナイトの存在を示すと考えられる。なお400°C の吸熱ピークについては明らかでない。

X線回折および DTA 曲線から，モンモリロナイトとハロイサイト鉱物の不規則混合層鉱物が主として存在すると考える。

静—2 試料のX線回折図は方解石を示し，これ以外の鉱物の回折線は明瞭には見られない。非晶質の存在が推定される。DTA 曲線は方解石を示すが吸熱ピークは 880°C で低くい。150°C の吸熱ピークは大きいが，幅がせまいのは単なる非晶質の存在量が多いことを示すものであろう。400°C および 500°C に吸熱が見られるが，450°C の発熱ピークの結果と考えるべきかも知れないしこの点明らかでない。930°C の発熱ピークが見られるが，550°C の吸熱ピークをともなわないので少量のカオリン鉱物よりもむしろ少量のアロファン等を推定すべきであろう。

静—3 試料のX線回折図は 14.5Å，10.2Å，7.13Å，5.04Å線を示し，4.48Å，3.56Å および2.58Å線は独立した明瞭の回折線である。また (06) 線は1.54Å であり，2.01Å線も見られる。エチレングライコール処理試料は 10.0Å線が鋭どく (002)，(003) もともないイライトの存在が考えられ，わずかに見られる14.5Å線は変位せず，

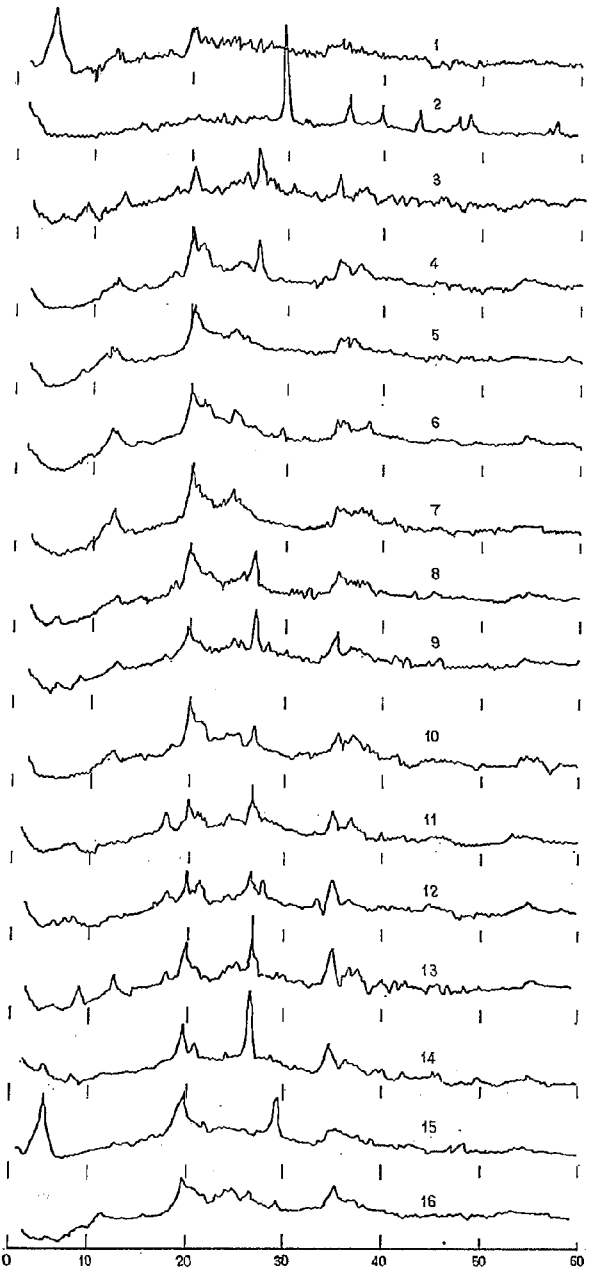


図-26 土壌コロイドのX線回折図（静岡県路床土）

モンモリロナイトは存在せず，クロライトか否か等はこの実験結果だけでは明らかでないが，(002)線，(003)線および(004)線をともなうことよりクロライトの少量が推定される。7.13Å線はエチレングライコール処理で著しく鮮明となりカオリン鉱物によるとも断言できないが，結晶度の比較的高いカオリナイトが少量存在すると推定することもできる。なお8.56Å線が明瞭に示されるが不明である。DTA 曲線は100～250°Cの吸熱ピークの幅が広く，450～700°Cのピークの幅も広く浅いこと等はイライトの DTA 曲線の特徴であり，1,000°C 近くに発熱ピークが見られることは少量のカオリナイトの存在を推定させる。550°C から700°C にわたる吸熱ピークの形状はおそらくクロライトまたはバーミキュライトの存在を想定させ，クロライトの公算が大きいがそのいずれによるかは明らかでない。

X線回折と DTA 曲線でここに示した実験結果だけではイライトの存在は考えてよいが，14Å鉱物については明らかでなく，カオリナイトの存在は推定できる程度であり，さらに詳細な実験が必要である。なお長石類と石英も見られる。

静―4試料のX線回折図は拡散した7.3Å線を示し，この回折線は8.5Åまで低角側に尾を引いている。(002)線も拡散した線を示す。(hk)線は(02)，(13)線のみが明瞭である。ハロイサイトのほかハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられ，ジプサイトと石英の混在が考えられる。DTA 曲線はハロイサイトを示し，ジプサイトも示される。なお6.1Å の回折線が見られるが明らかでない。

静―5試料のX線回折図は著しく拡散した7.76Å線を示し，低角側に10.6Å 線まで連続しており，(002)線に当る線も著しく拡がり，(hk)線は4.46Å線のほかは鮮明でない。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が見

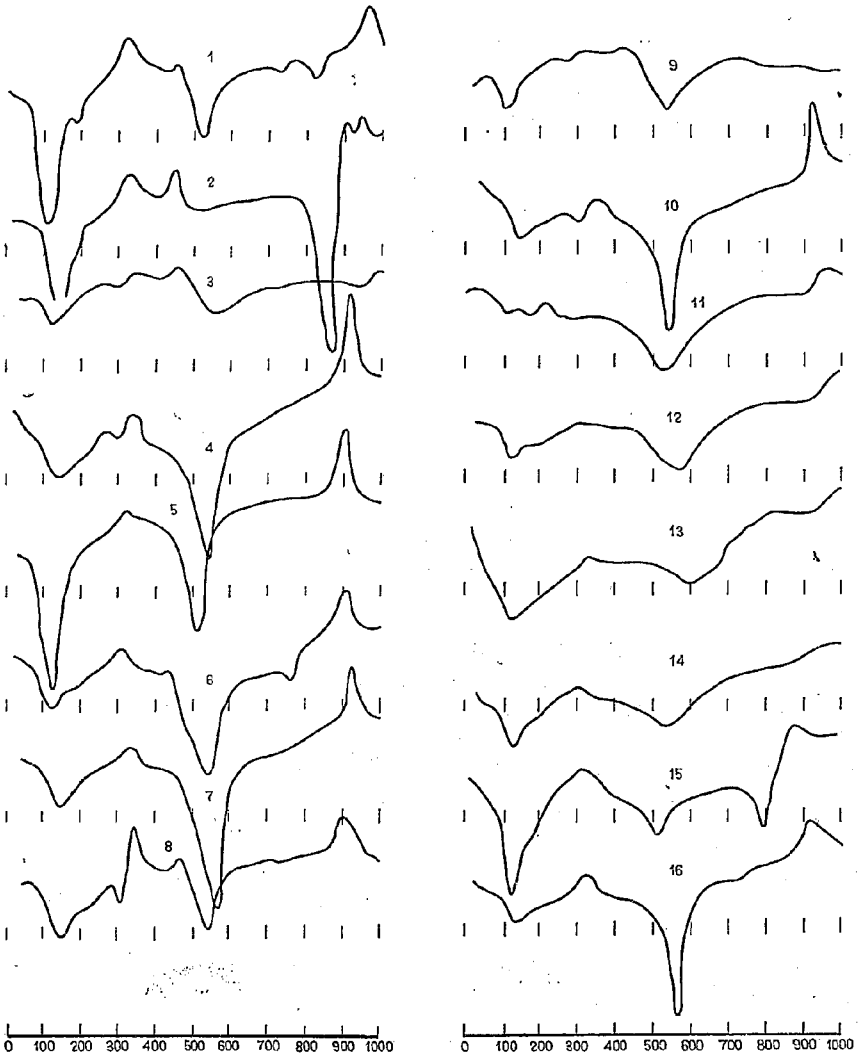


図-27　土壌コロイドの DTA 曲線（静岡県路床土）

られ，10.6Å 線は弱いが3.35線が著しく弱いのでイライトは考えがたくむしろ加水ハロイサイトが考えられる。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，520°C の吸熱ピークと900°C の発熱ピークは結晶度の低いことを示す。130°C の吸熱ピークは一部の加水ハロイサイトを推定させる。

静—6 試料のX線回折図もハロイサイトのほかにハロイサイト鉱物の混合層鉱物をも示し，ほかにクリストバライト，ゲータイトおよび方解石等が少量推定できる。DTA 曲線も X線回折の結果と一致する。

静—7 試料のX線回折図はハロイサイトを示す。結晶度は比較的よいと考えられる。DTA 曲線も土壌粘土としては比較的結晶度のよいハロイサイトを示す。

静—8 試料のX線回折図は14.7Å 線および比較的拡散した 7.25Å 線の中間にわずかであるが 12.4Å，10.3Å，9.0Å 線を示す。エチレングライコール処理した場合は 14.7Å 線は変位せず，12.4Å 線は不鮮明となり，10.4Å 線は拡散した線となり，7.2Å 線は独立した鋭い線とな

り，7.6Åから9.6Åに連続した反射が見られ，4.48Å線は弱くなり，4.0～4.3Åに著しく拡散した反射が見られ，3.56Å 線も鋭いものとなる。このほか 4.78Å，5.6Å，6.6Å線が見られる。7.2Å線はカオリナイトによると考えられ，一部のハロイサイト鉱物の混合層鉱物の存在も考えられる。モンモリロナイトは存在しないが14Å線がクロライトかバーミキュライトかは決定しがたく，(002)，(003)，(004) 等をともなうことよりクロライトの公算が大きい。12.4Å線は雲母系のものと推定されるが不明であり，5.6Å線および6.6Å線等についても明らかでない。これらのほかジプサイトおよび石英が見られ，クリストバライトも推定できる。

DTA 曲線は結晶度の高かくないカオリン鉱物を示し，その粒径分布も広いことが推定でき，ジプサイトの存在も示される。720°C にわずかな吸熱が見られるが14Å鉱物との関係は明らかでない。400°C の吸熱はゲータイト等によると推定されるがX線ではその粉末線が明瞭でない。本試料はさらに実験を行わねば明確なことはいえないが，カオリナイトのほかにハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられ，ほかに相当量のクロライトではないかと推定される14Å鉱物が見られ，12.4Å鉱物の少量が見られる。粘土鉱物のほかにジプサイト，石英が見られ，クリストバライトおよび結晶度の低いゲータイト等も推定される。なお 5.6Å，6.0Å 線については明らかでない。

静―9 試料のX線回折図は14.5Å，10.4Å，7.2Å線を示し，エチレングライコール処理で14.5Å，10.3Å，7.2Å，5.0Å，4.77Å，3.50Å，3.35Å線を示し，いづれも鋭い線となっている。(02)線はほとんど見られないのは配向性試料について測定したためである。これらの結果からモンモリロナイトは存在せず，イライトが明瞭であり，14Å鉱物はクロライトと考えられるが (003) 線が他の線より相当弱い。なお 8.4Å に弱い拡散した線が見られるが明らかでない。DTA 曲線はカオリン鉱物の 900°C 以上での発熱ピークを示さないし，イライトの DTA 曲線に近い。クロライトによるピークは明瞭でないが，イライトの DTA 曲線と重なり，600°C より高温部が主としてクロライトによると考えてよく，それより高温部での発熱吸熱がある程度重なって複合平坦な曲線を与えると考えられる。詳しく見ればわずかであるが 800°C に吸熱，880°C に発熱，950°C に吸熱が見られる。

静―10試料のX線回折図は 7.4Å線および 15.2Å線を示す。7.4Å 線は低角側に尾を引いた拡散した形状を示し，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物をふくむハロイサイトの存在が考えられる。15.2Å は著しく弱い線であり，何によるか明らかでない。ほかにジプサイト，石英の存在が考えられる。DTA 曲線はハロイサイトを示し，14Å鉱物による影響は確認されない。ほかにジプサイトも見られる。200°Cにわずかな吸熱が見られるほか700°Cに痕跡的の吸熱が見られ15.2Å線がモンモリロナイトによるかも知れないことを推定させる。

静―11試料のX線回折図は 10.4Åから 16Åにまたがる著しく拡散した回折線を示し，低角側に尾を引いている。しかも (02) 線は4.55Åで大きく，また5.01Å線も顕著である。エチレングライコール処理で 10.16Å 線は独立した回折線と見られるが，引きつづき低角側に尾を引いている。16Å線が明瞭であり，7.37Å線はむしろ高角側に拡散した線となり，5.10Å線および4.74Å線をともなう。イライトの存在が考えられ，雲母のイライト化へのある段階にあるものと推定され，またその一部は14Å鉱物と混合層鉱物を造っていると推定される。7Å 線はカオリン鉱物によるらしいが明らかでない。

DTA 曲線は150°C の吸熱ピークが小さく，530°C の吸熱ピークが著しく幅が広い。モンモリロナイトは存在せず，イライト系鉱物による曲線と考えられる。この試料中にはイライト，黒雲母のイライト化の中間物，イライトと14Å鉱物の混合層鉱物が推定され，カオリン鉱物も少量存在すると推定される。複雑な組成を持つと考えられる。

静―12試料のX線回折図は 15.2Å線，9.8Åから 12.6Åにわたる著しく拡散した回折線，7.4Å の比較的拡散した弱い線を示す。(02) 線および (13) 線のほかは明瞭でない。エチレングライコール処理試料では15.8Å線，12.0Å 線，拡散した 10.0Å 線，著しく拡散した 7.3Å線，拡散した 5.1Å 線が見られ，4.48Å線は弱くなり，3.75Å線も拡散した線となる。ここに示したX線回折の結果だけではこの試料がどのような粘土鉱物であるかは明らかでない。恐らく不規則混合層鉱物と長周期粘土鉱物が推定されるがさらに精密な実験を要するものである。DTA曲線は100°C から300°Cにわたる幅の広い非対称性の吸熱ピーク，450°Cから700°Cにわたる非対称性の幅広い吸熱ピーク，900°C の小吸熱ピーク，約 1,000°C の発熱ピークが見られる。これらの曲線からはカオリン鉱物およびモンモリロナイトは相当量存在することは推定できないし，イライトに近い鉱物が大部分であると推定することはできる。X線回折の結果と共に考えても雲母系の不規則混合層鉱物が考慮されるではなかろうか。

静―13試料のX線回折図は14.6Å線，鋭い 10.0Å線，比較的鋭い7.25Å線を示す。エチレングライコール処理試料では，14.6Å線は弱い17.4Å線に一部が移るが多くは14.6Å 線として残り，10Å線は強い 10.2Å線となり，7.2Å線も強い線として残り，5.10Å線，4.79Å線，3.56Å線，3.35Å線も明瞭となる。これらの結果から主としてイライトが存在し，クロライトも存在し，少量のモンモリロナイトも考えられるほか，7.2Å 線がクロライトの (002) 線としては強すぎることより一部のカオリン鉱

物も推定できる。ほかに石英，長石類が考えられる。

DTA 曲線には300°C までの吸熱ピーク，500°C から700°Cにわたる吸熱ピーク，700°Cの小吸熱ピーク，750°Cの微小吸熱ピーク，800°C の小発熱ピーク，900°C の吸熱ピークおよび1,000°C の小発熱ピーク等が見られる。この曲線よりイライト，クロライトを考えることは妥当であり，一部のモンモリロナイトとカオリン鉱物を推定することもできる。この試料はイライトとクロライトを主とし，少量のモンモリロナイトをふくみ，なお一部のカオリン鉱物も推定され，長石類と石英の少量も含有すると考える。

静—14試料のX線回折図は16.0Å線，10.3Å線および7～8.5Åにわたる著しく拡散した線を示す。エチレングライコール処理試料では17.4Å，10.1Å，7.25Åおよび5.10Å等の回折線を示す。ほかに8.0Å，9.0Åにも弱い回折線が見られる。以上の結果からモンモリロナイトの存在が考えられ，10Å線はイライトと考えられるほか一部のカオリン鉱物またはハロイサイト鉱物の混合層鉱物が推定される。粘土鉱物以外のものとして長石類，石英が示される。DTA 曲線はモンモリロナイトおよびイライトの共存を考えても妥当であり，カオリン鉱物の存否はこの曲線では明瞭ではない。

静—15試料の X線回折図は 15.2Å の強い線と，6.8～8.8Å の拡散した小回折線の集合を示すほか，方解石が見られ，長石類も推定される。エチレングライコール処理試料では 17.4Å が強く示され，8.4Å線も拡散しているが明瞭に示される。モンモリロナイトの存在は明らかであるが，エチレングライコール処理で著しく拡散した線が8.4Å になったことは，この処理によってハロイサイトと加水ハロイサイトの規則性のある混合層が生成したことを示すものであろう。

DTA 曲線はハロイサイトおよびモンモリロナイトを示すほか方解石をも示す。

静—16試料の X線回折図は7.7Å の拡散した回折線を示し，10Å線および 14Å 線がわずかに示される。7.7Å線は結晶度の低いハロイサイトと考えられる。10Å線は明らかでない。ほかに長石類と石英が示される。DTA曲線はハロイサイトを示すが，720°C にわずかの吸熱を示し900°C の発熱が高温側に傾くことは，14Å線と関係あると考えられるが明らかでない。

〔8〕 宮城県の路床土（宮—1～46）

宮城県路床土のコロイド成分の粘土鉱物を X 線回折（エチレングライコール処理をふくむ）および DTA 方法で検索した結果を図-28，29，30に示す。

つぎに実験結果をのべる。

宮—1試料のX線回折図はいずれも拡散した16Å，10Å，7.3Åの回折線を示す。エチレングライコール処理で16Å線は17.6Å 線に変るのでモンモリロナイトの存在は明らかであり，10Å 線は変らず割合鋭いピークを与え 5.0Å線，3.36Å 線も明瞭でありまた 2.01Å 線も見られるので，おそらくイライトと考えられる。7Å線はエチレングライコール処理で7.20Å線と7.90Å線を示し，7.90Å線は9Å線まで尾を引いた回折図を示す。3.56Å線と 3.68Å線は分離して見られるが，4.40Å線までが帯状の回折図を示す。なお長石類，石英，ゲータイトが推定されるほか 6.3Å線と 2.78Å線が見られすでにのべた X鉱物の公算も考えられる。また約25Åの回折線が見られるが今後の実験にまたねば明確にしえない。

DTA 曲線は 550°C の吸熱ピークの形状よりハロイサイト鉱物が推定され，220°C の吸熱ピーク，150°C 吸熱ピーク，700°C の吸熱ピーク等よりモンモリロナイトが考えられ，450°C から 550°C までの 吸熱ピーク および 200°C より高温側の吸熱ピークの幅等からイライトの存在も考えられる。900°C の発熱ピークは円味を持つが，各種粘土鉱物の共存の結果であろう。

上記の実験結果からこの試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物とイライトおよびモンモリロナイトが存在すると考えられ，一部の長週期粘土も推定され，長石，石英，ゲータイトの存在を考えてよく，少量のX鉱物の混在の公算もある。

宮—2 試料のX線回折図は15.2Å線，拡散した7.36Å線を示し，4.45Åが明瞭であるほかは（hk）線は鮮明でない。エチレングライコール処理で17.2Å線が見られ，7.36Å線は鋭いピークを与えるがそれに引きつづいて低角側に11Å線までにわたって拡散した回折線を示す。イライトによると考えられる線は明瞭には見られない。エチレングライコール処理試料ではまた 6.5Å，5.68Åが見られるが何か不明である。なお21Åに近い回折線がわずかに見られるが何か明らかでないし，石英およびゲータイトも推定される。

DTA 曲線は宮—1 試料と大体同じであるが 550°C の吸熱ピークの幅がせまい点が異なるし，250°C にも吸熱が見られる。この曲線はハロイサイト鉱物が多く，モンモリロナイトも一部含有され，イライトについては明瞭ではないことを示す。

上記の実験結果からこの試料中にはハロイサイトのほかハロイサイト鉱物の混合層鉱物，モンモリロナイトが存在し，確実ではないが一部の21Å線を示すものも見られ，ゲータイト，石英も推定される。

宮—3 試料のX線回折図は 7.3Åおよび 3.56Å線が著しく拡散しており，わずかであるが14Å線も見られる。(06) 線は 1,496Å である。DTA 曲線は 590°C の鋭い吸熱ピークを示し，920°C の発熱ピークをともなう。結晶度の低くいカオリン鉱物が考えられ，14Å線を示す鉱物の存在は明瞭でない。ほかにクリストバライトと長石が推定される。

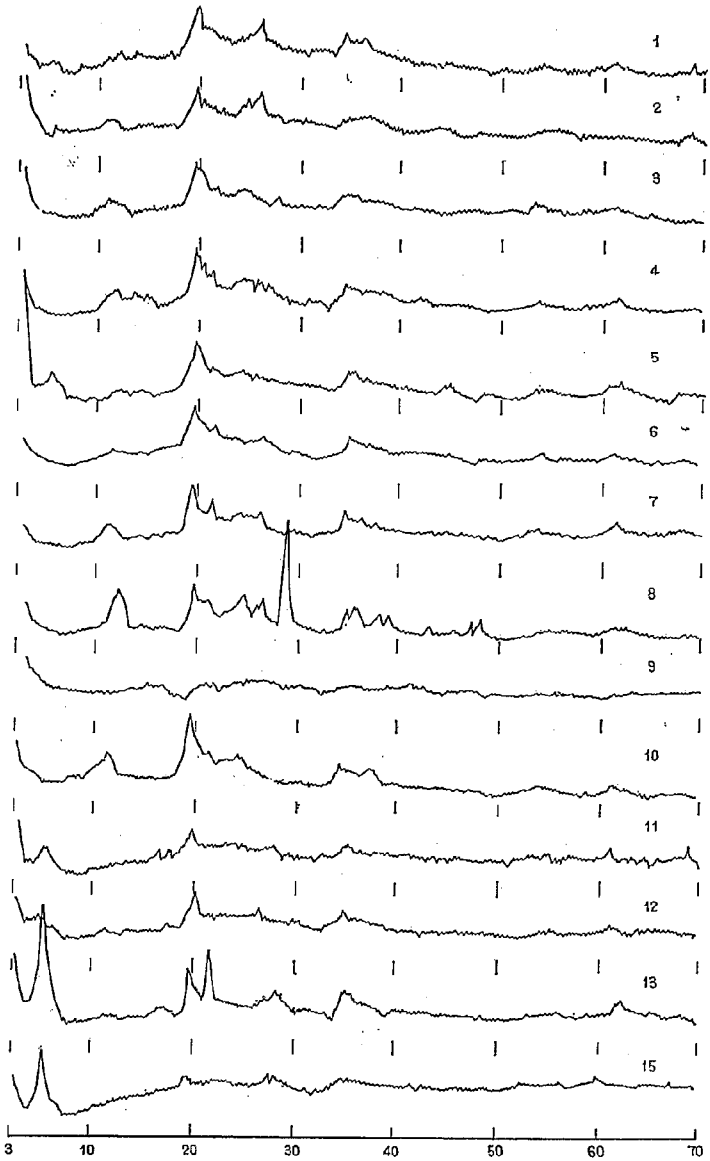


図-28（1） 土壌コロイドのX線回折図（宮城県路床土）

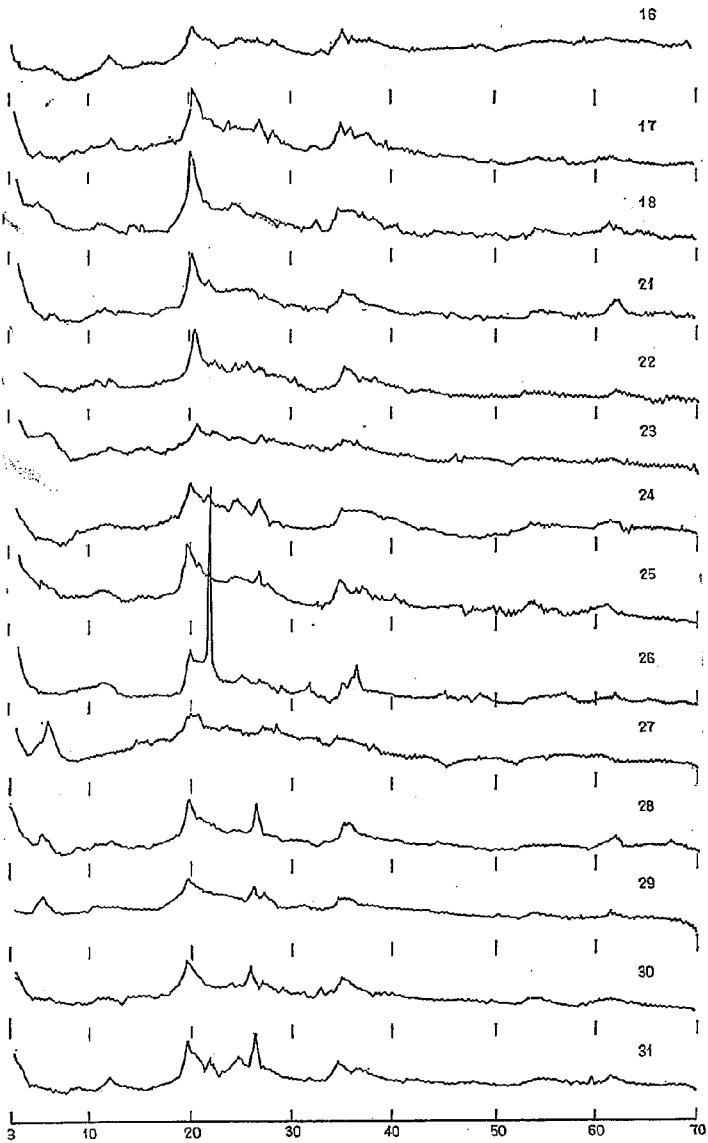


図-28（2） 土壌コロイドのX線回折図（宮城県路床土）

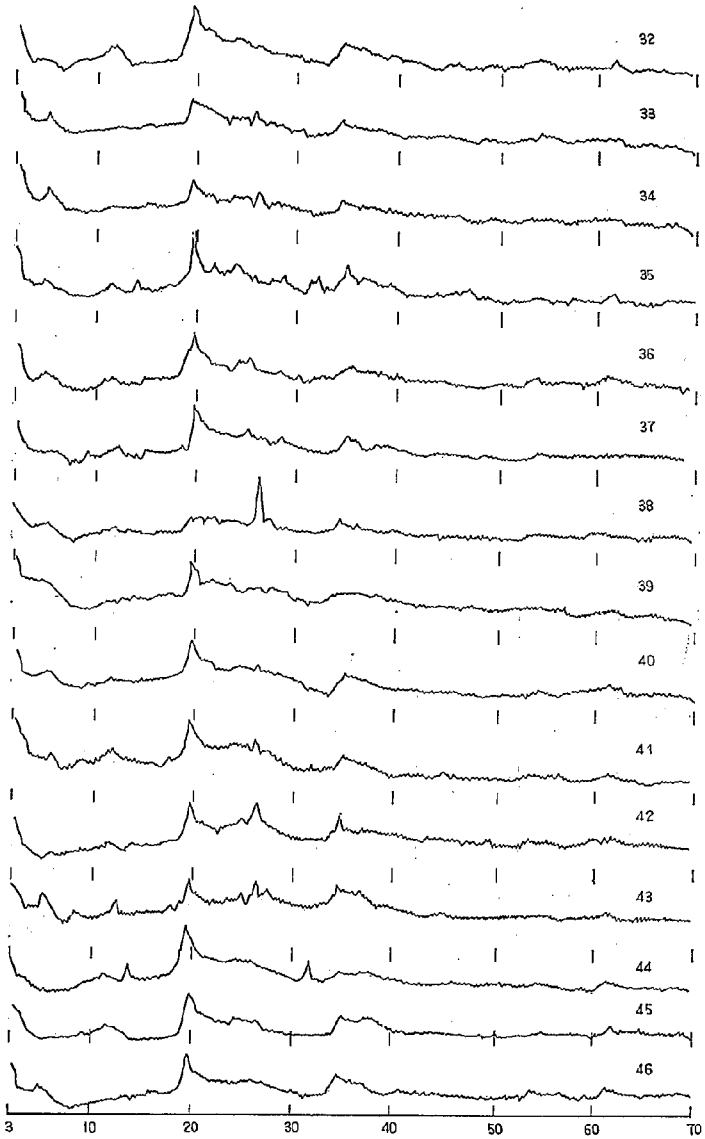


図-28（3） 土壌コロイドのX線回折図（富城県路床土）

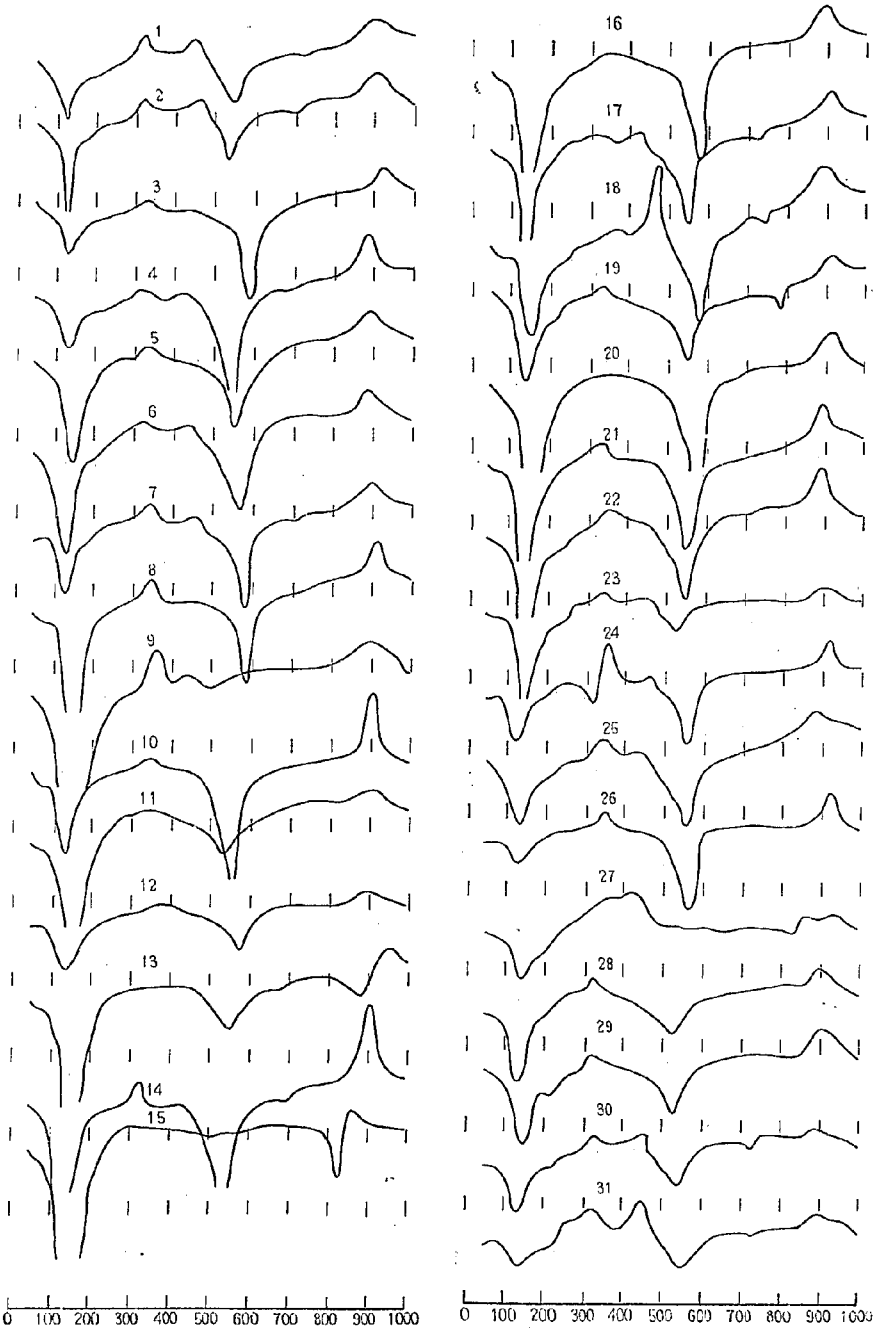


図-29（1） 土壌コロイドのDTA曲線(宮城県路床土)

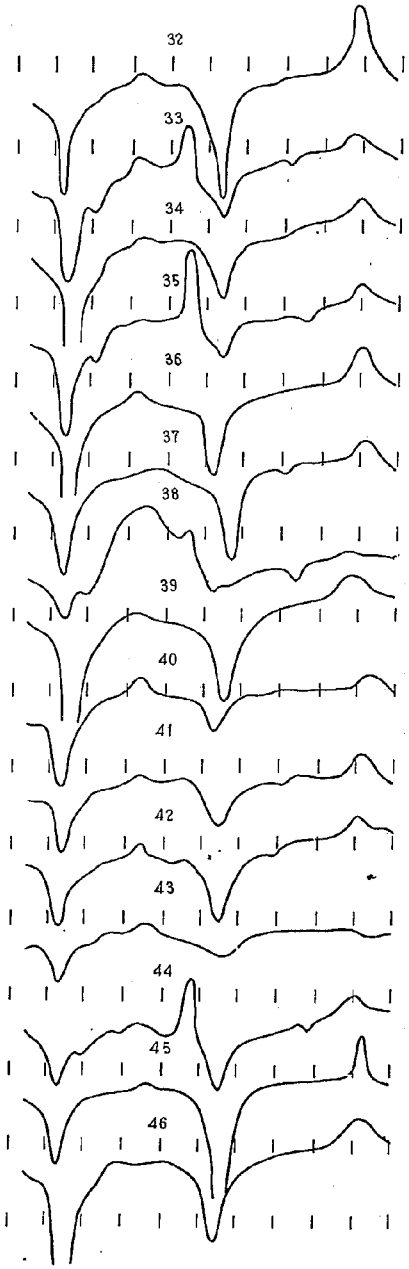


図-29（2） 土壌コロイドのDTA曲線(宮城県路床土)

宮—4試料のX線回折図は比較的拡散した7.25Å線を示すほか6.56Å線，6.15Å線，5.79Å線を示し，(hk)線も比較的鮮明であり（06）線は1.49Åである。6.15Å線は3.30Å線および2.47Å線をともないレピドクロサイトによると推定され，また長石も推定される。なお僅少であるが16Å線も見られる。

DTA 曲線は540°C の吸熱ピークは深く発熱ピークは900°C よりわずかに低くい。吸熱ピークの形状よりハロイサイト鉱物と考えられる。700°C の小さい吸熱ピークはモンモリロナイトの存在を示すものであろうし，370°C の吸熱ピークと410°C の発熱ピークはレピドクロサイトに関連すると考えられる。

上記の実験結果からこの試料中ではハロイサイト鉱物の混合層鉱物が大部をしめ，少量のレピドクロサイトが考えられ，また少量のモンモリロナイト，長石が推定される。

宮—5試料のX線回折図は強い16Å線と拡散した7.36Å線を示し，2.00Å 線は鋭い線となっており，(06) 線は1,495Å である。エチレングライコール処理試料では17.6Å線が強く，7.76Å線は7.3Åから10.7Åにわたって拡散した線となり，3.3Åから4.0Åにわたる帯状の回折も見られる。モンモリロナイトとハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられる。このほかクリストバライトが存在し，石英も推定される。DTA 曲線は150°C の吸熱ピークの大きいこと，220°C の小吸熱，600°C～700°C の吸熱部で示されるようにモンモリロナイトが考えられ，ハロイサイト鉱物も考えられ，X線回折の結果に合致している。

宮—6試料のX線回折図は14.7Å線と拡散した7.4Å線を示す。エチレングライコール処理で14.7Å線は17.6Å線に変位し，7.4Å線は7Åから10Åにわたる帯状回折線となる。ほかにクリストバライトが存在する。DTA 曲線は粒経の小さいものを含有するハロイサイト鉱物を示し，モンモリロナイトについては明らかでない。

上記の実験結果から本試料は主としてハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物よりなり，一部のモンモリロナイトとクリストバライトを含有すると考えられる。

宮—7試料のX線回折図は比較的拡散した7.63Å線を示し，15Å線も拡散しているほか同様に拡散した6.37Å線も示す。DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，700°C にわずかな吸熱ピークを持つ。おそらくある程度の規則性を持つハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられるが15Å線については明らかでない。ほかにクリストバライトが存在し，石英および長石類もわずかに存在すると推定される。6.37Å線については明らかでない。

宮—8試料のX線回折図は低角度側に著しく拡散した比較的弱い7.4Åの回折線を示し，いずれも微弱な14Å，

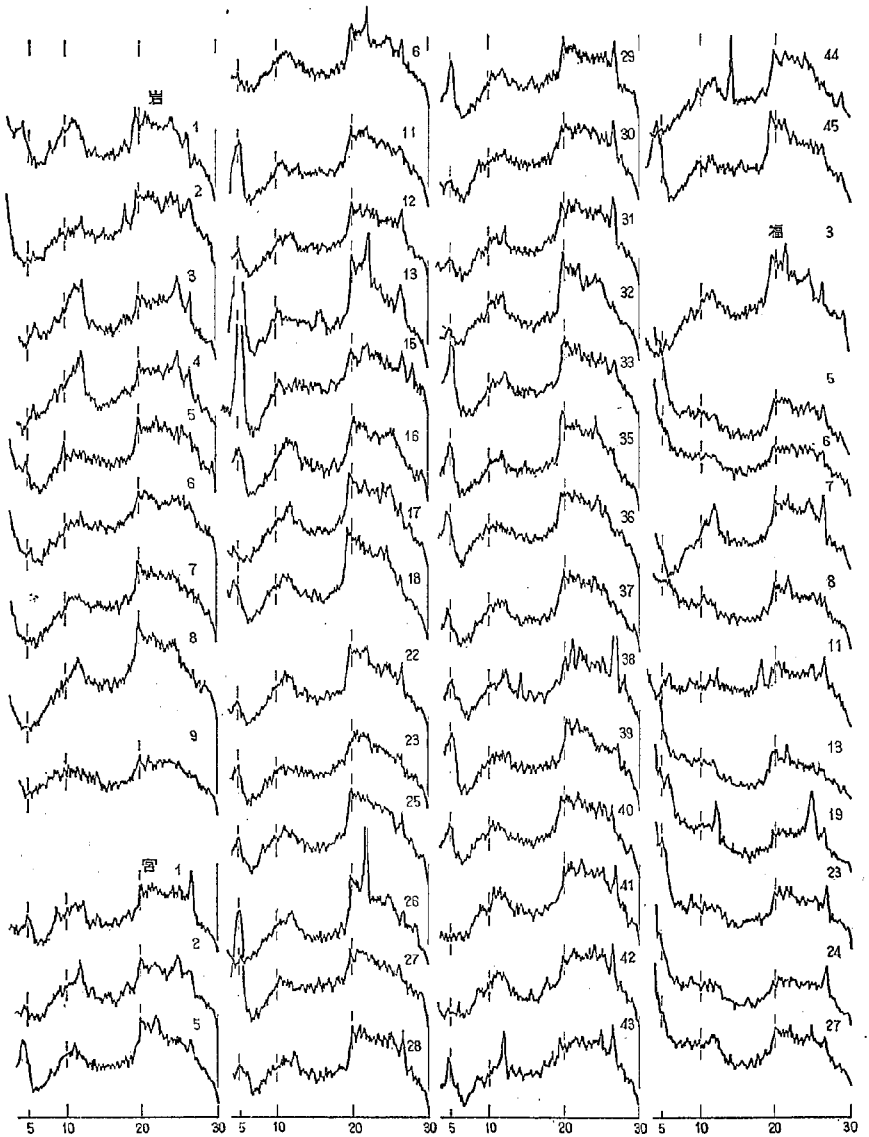


図-30　エチレングライコール処理粘土のX線回折図

11Å線も示し痕跡的であるが約21Å線も示す。14Å線がモンモリロナイトによるか否かはこの実験では明らかにしえないが，7.4Å線はハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物の存在を示すと考えてよい。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示すが，700°C に小さい吸熱が見られ，また150°C の吸熱ピークも大きいことより少量であるがモンモリロナイトを考えるべきと考える。この試料中には主としてハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，少量のモンモリロナイトも考えられ，このほかクリストバライトの存在が明らかである。21Å線がわずかに見られるが明らかでない。

宮—9試料のX線回折図は回折線をほとんど示さない。DTA 曲線はアロファンを示し，痕跡的であるがカオリン鉱物を示す。

宮—10試料のX線回折図は 7.5Å の鮮明な回折線を示し，低角側に尾を引いている。DTA 曲線は 560°C の吸熱ピーク，900°C の発熱ピークがともに鋭どく，ハロイサイト鉱物を示す。この試料中にはハロイサイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主要成分として存在している。

宮—11試料のX線回折図は拡散した17.6Å線を示し，7Å線や10Å線は見られないし，(hk) 線も (02) 線を除いては著しく不鮮明である。エチレングライコール処理試料では 17.7Å 線が強く鋭いピークとして見られ，拡散した 8.0Å も見られる。また 4.5Å から 3.0Å にわたって連続した帯状の回折が見られる。DTA 曲線は150°C の深かい吸熱ピーク，520°C の浅い吸熱ピーク，840°C の小吸熱ピーク，900°C の幅の広い発熱ピークを示す。520°C の吸熱ピークは400°C から700°C にわたる吸熱部分に見られる。520°C のピークの部分はハロイサイト等により，この吸熱部の幅の広い谷はモンモリロナイトにより，両者の共存のために図に見られるような曲線が見られると考えることができる。DTA 曲線からモンモリロナイトはバイデライトに近いもので，結晶度は低いと推定される。エチレングライコール処理を行なわないものでも拡散した線であるが17.7Å線が見られ，カオリン鉱物の (001) 線が見られないことは，モンモリロナイトの一部がカオリン鉱物と混合層鉱物を造っているためとも考えられる。しかしこの問題については今後の実験にまたねばならない。

宮—12試料のX線回折図は15.2Å線，17.6Å線，著しく弱いが 10Å 線，および著しく弱い 7Å 線を示す。エチレングライコール処理試料では17.7Å線が明瞭であり，7.37Å 線も拡散しているが明瞭に見られ，8.27Å 線も明瞭であるが 10.6Å 線まで尾を引いている。また 3.4Å から4.4Å までにわたり帯状の回折線が見られる。DTA 曲線は 580°C の吸熱ピークを持つが，ピークは浅く，モンモリロナイトとカオリン鉱物の共存を示すと考えられる。宮—11試料と同様にバイデライトに近いモンモリロナイトが主であり，カオリン鉱物が一部存在し，さらにモンモリロナイトは一部が何等かの形で混合層鉱物を造っていると考えられる。

宮—13試料のX線回折図が比較的結晶度の高いモンモリロナイトを示すことは，エチレングライコール処理によっても明らかである。少量のカオリン鉱物も存在し，クリストバライトの存在も明らかである。DTA 曲線はモンモリロナイトを明瞭に示し，吸熱ピークが低温側に偏ったモンモリロナイトおそらくバイデライト的なものも示し，一方カオリン鉱物の存在も知られる。

宮—14試料はX線回折図を欠くが，宮—10試料と同様に結晶度の比較的高いハロイサイト，特に加水ハロイサイトが考えられ，700°C の吸熱ピークは少量のモンモリロナイトによるのかも知れない。

宮—15試料のX線回折図は鋭い16.4Å線を示し，(02) 線は4.55Å で (06) 線は1.54Å である。カオリン鉱物等の底面反射を示さない。エチレングライコール処理試料では17.6Å線が強く明瞭であり，モンモリロナイトを示し，5.5Å から8.6Å にわたり帯状の著しく拡散した回折線が見られる。DTA 曲線は 150°C の著しく大きい吸熱ピーク，500°C から700°C にわたる浅く幅の広い吸熱ピーク，820°C の吸熱ピークおよび870°C の発熱ピークを持つ。X線回折と DTA 曲線よりこの試料中にはモンモリロナイトの存在が知られ，モンモリロナイトでもむしろサポナイトに近いものが大部分を占めていることが考えられる。カオリン鉱物によるらしい回折線が見られるが，DTA 曲線ではそれが見られない点はさらに検討を要する。

宮—16試料のX線回折図は 16.4Å 線と 7.35Å 線を示す。7.35Å 線はやや拡散し 8.6Å 線まで尾を引いている。エチレングライコール処理で17.6Å線が明瞭となり，7.35Å線は 7.8Å線となり 10.7Å まで拡散してた回折図を与える。モンモリロナイトとハロイサイト鉱物の混合層鉱物を示すと考えられる。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，モンモリロナイトの方は明瞭でない。ほかにクリストバライトが推定される。

宮—17試料のX線回折図は16Å線と拡散した7.35Å線を示し，エチレングライコール処理でわずかに17.7Å線を見るが，強度の大きい7.35Å線は低角側に10.6Å まで尾を引いている。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物とハロイサイトの共存，およびモンモリロナイトが混在すると考えられる。DTA 曲線はハロサイト鉱物を示すが，モンモリロナイトは720°C にわずかな吸熱が見られるほかその存在は明瞭でない。

ハロイサイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物のほか少量のモンモリロナイトの存在が知られ，さらにクリス

トバライトおよび長石の存在が推定される。

宮—18試料のX線回折図は拡散した7.56Å線，同様に拡散した17.7Å線を示す。17.7Å線の低角側には引きつづき約22Åの回折線が見られる。エチレングライコール処理を行なわないもので17.6Å 線を示すのは宮—11，12試料と同様であり，約22Åの回折線が見られるのは宮—1，2試料と同様である。7.56Å線は低角側に尾を引いておりハロイサイト鉱物の混合層鉱物と考えられる。また6.32Å 線と 2.79Å 線が明瞭に見られ X鉱物も推定できる。

DTA 曲線は 900°C の発熱ピークが低温側にずれているがハロイサイト鉱物を示し，220°Cの吸熱および600°Cから700°C にかけての吸熱部はモンモリロナイトの存在を示すものであろう。470°C の発熱ピーク，750°C の吸熱ピークはX鉱物によるものと考えられる。

上記の実験結果から本試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物が多量に存在し，モンモリロナイトおよびモンモリロナイトが何等かの混合層鉱物として存在すると考えてよく，X鉱物の存在も十分考えられ，少量の長石類や石英も推定できる。

宮—19試料はX線回折図を欠き，DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，220°C の吸熱と 600～700°C の吸熱よりモンモリロナイトも推定できる。800°C の吸熱ピークは比較的鋭どく何によるか明らかでない。

宮—20試料はX線回折図を欠き，DTA 曲線は加水ハロイサイトを示し，モンモリロナイト等は含まれても少量であることが明確である。

宮—21試料のX線回折図は7.70Åの拡散した線と，弱い14.7Å線を示す。DTA 曲線は 900°C の発熱ピークがやや低温側にずれておりハロイサイト鉱物を示すが，モンモリロナイト等の存在は150°C の吸熱ピークが大きいことを除いてはこの曲線上では明らかでない。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，14Å鉱物も見られるが何であるかは明らかでない。ほかに長石類と石英の少量が推定される。

宮—22試料のX線回折図は 7.2Åから8.9Åにわたる著しく拡散した回折線を示し，15.7Å線も拡散している。エチレングライコール処理試料では17.6Å線が明瞭となり，7.76Å線は低角側に11Åまで連続した回折線となっている。ほかにクリストバライトおよび石英の回折線が見られる。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示すが，150°C の大きい吸熱ピーク，220°C の吸熱，600°C の吸熱等よりモンモリロナイトが推定できる。700°C の小吸熱ピークもモンモリロナイトに関係あるともいえる。この実験結果からハロイサイト鉱物の混合層鉱物が多量に存在し，ついでモンモリロナイトが存在し，さらにクリストバライトおよび石英の少量が推定できる。

宮—23試料のX線回折図は 16.6Å線と拡散した 7.6Å線を示し，(hk) 線も一般に強度が低くく，(02) 線は 4.52Å線と4.44Å線よりなり，(06)線は1.51Åである。エチレングライコール処理で17.6Å線が明瞭となり，7.6Å線は著しく拡散した帯状回折線を示し，4.5Åより3.0Åにわたり鮮明な回折線を示さない帯状回折線を示している。DTA 曲線はハロイサイト鉱物とモンモリロナイトを推定させる。この試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物とモンモリロナイトが存在するほかクリストバライトが見られ，石英の少量も推定される。

宮—24試料のX線回折図は 7.1Åから 8.9Åにわたる帯状回折を示し，14Å線および10Å線等は明瞭でなく，さらにジプサイトとクリストバライトの回折線も見られる。DTA 曲線は有機物の存在も示すがハロイサイト鉱物を示し，モンモリロナイトは明瞭でない。ジプサイトも見られる。この試料は大部分がハロイサイト鉱物の混合層鉱物であり，ほかにジプサイト，クリストバライトが存在し石英の少量も推定される。モンモリロナイトは見られない。

宮—25試料のX線回折図は 7.4Åから 8.0Åにわたる拡散した回折線を与えるほか，17Å線とわずかであるが約20Å線が見られる。17Å線はエチレングライコール処理で17.6Åに変化するからモンモリロナイトと考えてよく，7Å線は7.3Åから10.6Åにわたる回折線となりハロイサイト鉱物の混合層鉱物と考えてよい。エチレングライコール処理を行なわないものですでに17Å線のように膨張した線を与える例は宮—11，12，18試料等に見られ，拡散した線となる。ほかにジプサイト，長石類，石英も推定される。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，モンモリロナイトも600°C 以上に見られる吸熱および 200°C の吸熱より十分推定できる。ジプサイトも見られる。この結果から本試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在し，モンモリロナイトも相当量存在し，ジプサイトも少量存在し，長石と石英も推定される。なお約20Åに回折線が見られるが何であるか明らかでない。

宮—26試料のX線回折図は 7.4Åから 8Åにおよび拡散した回折線と10Å線が見られ，これらの線はエチレングライコール処理で 7.4Åから 11Åにおよぶ回折線となり，わずかであるが17.6Å線も見られる。粘土鉱物のほかに相当量のクリストバライトが存在する。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示す。この試料中にはハロイサイトのほかにハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，クリストバライトも相当量存在し，少量のモンモリロナイトも見られる。

宮—27試料のX線回折図は強い 15.8Å 線を示し，7Åから 10Å に引きつづいた拡散した回折線も示し，(02) 線は 4.52Å で (13) 線も拡散しており，(hk) 線は一般に鮮明でない。エチレングライコール処理により，15.8Å線は 17.6Å線に移動し，7Åから 10Åにわたる回折線は

8.6Åをピークとした7Åから11Å間にわたる連続した回折線を与える。また 3.0Åから 4.5Åまでの間の回折線も連続した帯状回折線となっている。DTA 曲線は有機物によるらしい発熱のために500°C から600°C にわたる吸熱は明瞭でないが，ゆるやかな吸熱があり，また650°C にも吸熱が見られる。840°C の吸熱と870°C の発熱および950°C の発熱が見られる。この曲線からはモンモリロナイトの存在が推定され，一部のカオリン鉱物も推定できる。

この試料中に主として存在するのはモンモリロナイトで，一部のハロイサイト鉱物の混合層鉱物も存在すると考えられる。ほかにゲータイトも推定される。

宮—28試料のX線回折図は15.6Å線，拡散した10Å線および低角側に拡散した7.2Å線を示し (06) 線は1.514Åと1.501Åである。エチレングライコール処理で15.6Å線は17.6Å線に移動し一部の14.4Å線が残る。7.20Å線は独立した回折線となり，新たに 8.2Å 線が見られ低角側に 11Å まで拡散した回折線となっておる。3.6Å から4.2Å 間の回折線は連続した帯状回折となっている。モンモリロナイトが主として存在し，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物も存在し，7.20Åで示されるカオリナイトの存否は明らかでなく，14Å鉱物はモンモリロナイトのほかに何かが存在するが明らかでない。石英の存在は明瞭である。

DTA 曲線は 150°C の吸熱ピークは大きく，200°C にも吸熱があり，400°C から600°C に至る吸熱は著しく幅が広く，870°C の吸熱と 900°C の発熱が見られる。900°C の吸熱はわずかであるが二重ピークを与える。X線回折の結果と大体は一致し，モンモリロナイトはバイデライトに近かいものと推定される。

宮—29試料のX線回折図は16.0Å線と7.3Åから8.5Åにわたる拡散した回折線を示す。ほかに長石と石英の回折線も示される。エチレングライコール処理によって16.0Å線はすべて 17.6Å線に移動し，7.3Å線が明瞭となり，8.5Å線は 11Å 線まで拡散した回折線となっており，新たに 5.55Å線も見られる。DTA 曲線はモンモリロナイトとハロイサイト鉱物の共存を示す。

この試料中にはモンモリロナイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，ほかに石英，長石等が推定される。

宮—30試料の X線回折図は 15.5Å，9.8Å，拡散した7.6Å線を示す。エチレングライコール処理で15.5Å線はその大部分が17.6Å線に移り，わずかに14.4Å線が残留する。7.6Å線は7.2Åをピークとする拡散した回折線となり低角側に尾を引いている。10.0Å 線も明瞭となる。モンモリロナイトの存在，一部の14Å鉱物の存在，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物の存在は示されるが，10.0Å線はこれだけでは明らかでない。3.38Å 線は石英にもよるが石英の他の回折線の強度に比して著しく大きいので，イライトの (003) 線とも考えてよく，イライトの存在を推定することができる。ほかに長石の回折線が見られる。

DTA 曲線は 500°C から 600°C の吸熱の幅が広く，730°C に小さい吸熱ピークが見られ900°C の発熱ピークの前にも小さい吸熱ピークが見られる。950°C にも小さい発熱ピークをともない，220°C の吸熱も見られる。この曲線からモンモリロナイトを推定でき，カオリン鉱物も考えられるが，イライトの存在は400°C から500°C 間の発熱ピークのために明瞭には見られない。900°C 以上の発熱ピークは 500°C から 600°C の吸熱ピークに比して著しく小さいが，拡散した線となっている。

この試料中にはモンモリロナイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在し，長石や石英も混在する。イライトについてはその存在が推定できる。

宮—31試料のX線回折図は16.0Å線，10.0Å線，7.2Å線を示す。エチレングライコール処理で16.0Å線はすべて17.6Å 線に変位し，7.2Å 線は独立した線ではあるが低角側に尾を引いた回折線を与え，11.0Åにまでおよんでいる。10.0Å 線は独立した 線として 明瞭には見られない。(06) 線は 1.492Åである。X線回折の結果からはモンモリロナイト，ハロイサイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられ，このほかに長石類，石英も見られる。イライトについては確認しがたく，存在しても僅少であろう。

DTA 曲線は宮—30試料と大体同じ形を示すが，600°C から700°C にかけての吸熱が明瞭である。X線回折でえられた結果と一致する。

宮—32試料の X線回折図は 7.36Å 線を明瞭に示すが10Å線に至るまで低角側に尾を引いた回折線となっている。また15.2Å線のほかに18.5Å線がわずかに見られる。3.62Å線は拡散しており (06) 線は1.492Åはである。エチレングライコール処理で17.6Å線が見られモンモリロナイトを示し，7.4Å から 11.0Åまで連続した回折線図が見られ，ハロイサイトのほかにハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられる。DTA 曲線では 700°C に吸熱がわずかに見られるがハロイサイト鉱物を示し，X線回折でえられた結果と一致する。

宮—33試料のX線回折図は7.3Å 線と15.7Å線を示す。エチレングライコール処理で 15.7Å線は 17.6Å線に移り，7.3Å 線は 11.0Åに至るまで低角側に連続した回折線となる。(06) 線は 1.508Å線と 1.492Å線からなる。モンモリロナイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられ，ほかに少量の石英，長石も存在しクリストバライトも推定される。

DTA 曲線は X鉱物を考えさせるが，X線回折ではその存在が明確でない。このために DTA 曲線は複雑とな

るがハロイサイトの存在は確かであり，モンモリロナイトも600°Cから700°Cの吸熱および220°Cの吸熱等でその存在は考えられる。X線回折の結果と一致している。なお宮—35試料は本試料と同じ地区のものであり，DTA曲線は同一であるがX鉱物はX線回折でも確認されるので，本試料中にも一部のX鉱物の存在を考えてもよい。X鉱物がある種の有機物の存在を示す点については後でふれる。

宮—34試料は宮—33試料と同一地区の試料であり，X線回折図もほとんど同じであるが，450°Cの吸熱ピークがない点と720°Cの吸熱ピークが弱くなる点が異なる。鉱物組成は宮—33試料の場合と同じである。

宮—35試料は宮—33，34試料と同一地区の試料である。X線回折図は宮—33試料とほとんど同じである。ただ6.23Å線および2.79Å線で代表されるX鉱物の存在が特異な点である。クリストバライトと長石の存在も見られる。DTA曲線は780°Cの吸熱ピークがやや大きく高温側にずれている外は宮—33試料とほとんど同じである。この試料中にはモンモリロナイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在し，ほかにX鉱物，クリストバライトが存在する。

宮—36試料のX線回折図は拡散した15.6Å線，7.4Åから8.0Åにおよぶ拡散した回折線および5.5Åから5.9Åにおよぶ弱い拡散した回折線を示す。エチレングライコール処理で17.6Å線は強く，5.5Åから11Åにおよぶ連続した帯状の回折図が見られる。モンモリロナイトの存在は明らかであり，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物も考えられるが，これだけではエチレングライコール処理試料に見られる7Åより高角度側の回折線を説明しえない。モンモリロナイト，加水ハロイサイトの一部の存在形態等を考えねばならないが，今後の研究にまたねば明らかにしえない。

DTA曲線は加水ハロイサイトの曲線に近いが，520°Cの吸熱ピークで示されるようにこのピークは相当低温側にずれており，600°Cから700°Cにわたり吸熱も見られるのでモンモリロナイトも考えられる。この試料中にはモンモリロナイトは単独にまた恐らく混合層鉱物として存在し，加水ハロイサイトについても同様に考えられ，ほかにハロイサイト鉱物の混合層鉱物も存在すると考えられる。

宮—37試料のX線回折図は7.36Å線，拡散した10Å線，11.6Å線，著しく拡散した16.4Å線，わずかに見られる約22Å線，拡散した6.37Å線が見られ，4.48Å線のほかは鮮明な（hk）線を示さないし，（06）線は1.497Åである。エチレングライコール処理で20Å線が明瞭となり，この線は高角側に16Å線まで尾を引いた形を示す。7.35Å線は低角側に11Å線まで尾を引いた拡散した線となり，11.6Å線はこの処理で消失してしまう，また6.37Å線も明瞭には見られない。

DTA曲線はハロイサイト鉱物を示し，700°Cにも吸熱ピークが見られる。X線回折とDTA曲線より考えればハロイサイト鉱物の混合層鉱物とハロイサイトおよび加水ハロイサイトの存在が考えられるが，モンモリロナイトは混合層鉱物として存在すると推定できるにとどまりその詳細は明らかでない。長週期の回折線も見られるがその構造も不明であり，11.6Åおよび6.37Å線も不明である。粘土鉱物のほかに長石がわずかに見られる。

宮—38試料のX線回折図は7.25Å線と15.5Å線を示す。エチレングライコール処理で17.6Å線は明瞭となり一部の14.7Å線が残る。14.7Å線は7.25Å線，4.67Å線，3.56Å線を考えればクロライトによる公算が大きい。また8.8Åから11Åに及ぶ拡散した回折線も7.5Å線と共に見られる。これらの結果からモンモリロナイトが存在し，恐らくクロライトも存在し，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物とハロイサイトも存在すると考えてよい。6.27Å線と2.79Å線が見られX鉱物を示し，石英も確実に存在し，クリストバライトおよび長石も推定される。

DTA曲線はX鉱物の存在を示し，このためにDTA曲線は明瞭でなくなる。しかし600°Cから700°Cにおよぶ吸熱と210°Cの吸熱はモンモリロナイトによると考えてよく，520°Cの小さい吸熱ピークはカオリン鉱物によるものであろう。900°Cの発熱ピークは広がり鮮明ではない。X線回折の結果と大体に一致している。

宮—39試料のX線回折図は16.3Å線を示すが著しく拡散した回折線であり，6Åから8Åにわたる帯状の弱い回折線が見られる。エチレングライコール処理により著しく拡散した16.3Å線は比較的拡散した18.8Å線に確実に移り，7.3Åから11Åにおよぶ拡散した回折線が見られる。（hk）線は4.48Å線のほかは鮮明でない。DTA曲線はハロイサイト鉱物を示すが，600°Cから700°Cにおよぶ吸熱はモンモリロナイトを推定させる。エチレングライコール処理で18.8Åに移ることは膨潤性格子の存在を示すがモンモリロナイトそのものではない。無処理の場合16.3Å線が著しく拡散しているのは不規則混合層鉱物の存在を示すものと推定され，この膨潤性格子を持つ鉱物と関係があると考えられる。しかし詳細については明らかでない。今後の検討にまたねばならない。

宮—40試料のX線回折図では15Åから17Åにおよぶ二重線と，やや拡散した7.5Å線が見られる。エチレングライコール処理で17.6Å線が明瞭に見られ，7.6Å線は拡散しており，9.4Å線も低角側に尾を引いている。また3.35Åから4.5Åにわたって拡散した回折線が見られる。DTA曲線はカオリン鉱物を示すが530°Cの吸熱は低温側にずれる反面，940°Cの発熱が見られ高温側にずれている。600°Cから700°Cに吸熱ピークも見られる。モンモリロナイトの存在は確実であり，ハロイサイト鉱

物の混合層鉱物も考えられるが，DTA 曲線からはさらに検討すべき点が残っている。

宮—41試料のX線回折図では15.7Å線，10.4Å線，8Åから9Åにわたる回折線，拡散した7.5Å線が見られる。エチレングライコール処理で15.7Å線はほとんど消失し，拡散した 8.2Å 線が見られ，9.8Å線が 11Å 線まで拡散している。DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，600°C から 700°C にわたる吸熱と 700°C の吸熱ピークが見られる。この実験結果からでは恐らくハロイサイト鉱物の混合層鉱物が推定でき，15.7Å線は何かの混合層鉱物を示すものであろうと推定できるだけであり，詳細はさらに実験を要する。ほかに石英および長石が見られる。

宮—42 試料の X 線回折図はいずれも拡散した 15.2Å線，7.6Å線を示す。エチレングライコール処理で7.7Å線の拡散した線に引きつづき10Å線が見られ，17.6線はわずかに見られ，14.7Å線もわずかに見られる。モンモリロナイトはほとんど見られず，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，10Å線はイライトと考えられる。DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，600°C から 700°C に引きつづき吸熱が見られ，700°C にも吸熱ピークが見られ，恐らく 14Å鉱物によると推定できる。X線回折と DTA 曲線よりハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在し，14Å鉱物の一部はモンモリロナイトだが多くはどの鉱物か明らかでなく，またイライトの存在も推定され，ほかに石英と長石も推定できる。

宮—43試料のX線回折図は 16.0Å，10.0Å，7.25Å の回折線を与える。エチレングライコール処理で強い17.6Å線および 7.25Å線が示され，14.4Å線もわずかであるが見られ，9.8Å線も明瞭に示される。14.4Å線は7.25Å線，4.72Å線，3.56Å線が見られるのでクロライトによると考えられ，9.8Å 線は 3.35Å 線（石英による 4.25Å線は著しく弱い）および2.01Å線をともない，5.00Å線も見られるのでイライトによると考えられる。7.25Å線は一部はカオリナイトによるのかも知れない。モンモリロナイトの存在も確実である。

DTA 曲線には 400°C から600°C におよぶ幅の広い浅い吸熱があり，540°C でこの曲線は形状が変り，630°C までこの吸熱がつづいている。イライト，カオリナイト，モンモリロナイトを含むと考えられることを示す。900°C の発熱ピークのほかにカオリナイトによるらしい980°C のピークも見られる。クロライトの量は少ないのでその影響は見られない。

この試料中にはイライト，モンモリロナイトが主として存在し，カオリナイトも見られ少量のクロライトも考えられる。ほかに少量の長石と石英も推定される。

宮—44試料のX線回折図は7.31Å線を示し低角側に尾を引いており，また約 27Å の弱い回折線も見られるほか，6.23Å 線および 2.80Å 線も見られる。エチレングライコール処理により7.25Å線は8.8Å線および10.1Å線をともない低角側に拡散している。DTA 曲線はX鉱物とハロイサイト鉱物を示す。X線回折の結果とともに考えればハロイサイト鉱物の混合層鉱物とX鉱物が考えられる。

宮—45試料のX線回折図はハロイサイトを示し，混在鉱物はほとんど見られない。DTA 曲線はハロイサイトを与える。

宮—46試料のX線回折図は 16.6Å線と7.4Å線を示し，いずれも拡散した回折線である。エチレングライコール処理で強い17.6Å線が見られモンモリロナイトが示され 7.4Å 線はハロイサイトと考えられ，この回折線とならんで 8.6Å 線が見られ低角度側に尾を引いている。DTA 曲線はハロイサイト鉱物とモンモリロナイトを与える。

この試料中にはモンモリロナイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物およびハロイサイトが存在すると考えられる。

〔9〕 福島県の路床土（福—1～28）

福島県路床土のコロイド成分の粘土鉱物をX線回折（エチレングライコール処理をふくむ）および DTA 方法で検索した結果を図-31，32，30 に示す。

つぎに実験結果をのべる。

福—1 試料のX線回折図は鋭い10.0Å線を示し，3.33Å 線はやや拡散し，2.6Å から 2.0Å にわたって帯状の回折線が示される。結晶度のあまり高くない加水ハロイサイトの存在を示す。DTA 曲線も X線回折の結果と一致する。ほかにクリストバライトが考えられる。

福—2 試料のX線回折図は割合に拡散し低角側に尾を引いた 7.4Å 線を示し，弱い 10Å 線と微弱な 15Å 線を示す。10Å線はイライトか加水ハロイサイトかは不明であり，15.2Å線についても不明である。ほかに石英の存在が明らかであり，長石も推定できる。DTA 曲線はカオリン鉱物を示し，モンモリロナイトやイライトの混在は不明であり 300°C までの吸熱が見られる。X線回折図と DTA 曲線からアロファンの存在が考えられる。この試料中にはハロイサイトのほかハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在し，アロファン，10Å，15.2Å を示すものが存在する。石英が存在し長石も考えられる。

福—3 試料のX線回折図は 7.8Å，7.35Å，9～11Å，弱い 16Å の回折線を示す。エチレングライコール処理で 7.35Å 線は 11Å 線まで連続した回折線となっており，3.56Å 線も 3.8Å 線まで拡散した線となっている。微弱な 14.4Å 線が見られ 4.77Å 線をともなう。X線回折図からはハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在すると考えられ，少量のクロライトも推定できるほかクリストバライトと石英も存在する。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を与え，X 線回折の結果を支持している。

福—4試料のX線回折図は福—3試料と殆んど同様であり，DTA 曲線も吸熱ピーク，発熱ピークの温度が低温側にかたよるほかは福—3試料と同じである。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物およびハロイサイトが主として存在する。クリストバライトも存在する。

福—5試料のX線回折図は拡散した15.7Å線，10.4Å線および7.3Å線を示す。エチレングライコール処理で強い17.6Å線が見られ，10.0Å線，拡散した 8.8Å 線および 7.3Å 線も見られる。モンモリロナイトの存在は明らかであり，10.0Å線はイライトでなく加水ハロイサイトと考えられ，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物も考えられる。3.36Å 線から 4.1Å 線まで帯状の回折線も見られる。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，600°C から700°C におよぶ吸熱，850°C の吸熱はモンモリロナイトを示し，900°C 以上の発熱ピークも二重線化している。X線回折および DTA 曲線よりこの試料中にはモンモリロナイト，加水ハロイサイト，ハロイサイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，クリストバライトと石英も存在すると考えられる。

福—6試料のX線回折図は16.0Å線，低角側に尾を引いた7.4Å線を示すほか微弱な9.6Å線を示し，(hk) 線は鮮明ではない。エチレングライコール処理で 17.6Å 線が見られ，この線は高角側に 7Å 線まで連続した帯状回折線となっている。また 3.3Å 線から 4.5Å 線まで連続した帯状回折線が見られる。X線回折図からはカオリン鉱物おそらくハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられ，モンモリロナイトも存在するがその一部はハロイサイト鉱物と不規則混合層鉱物を造っていると推定される。

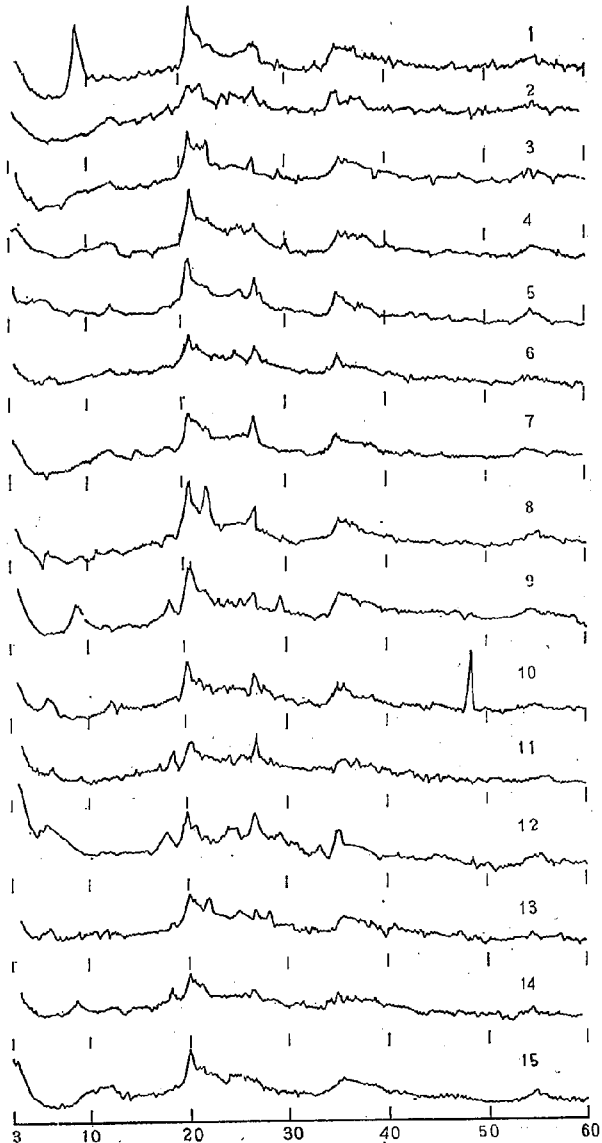


図-31（1） 土壌コロイドのX線回折図（福島県喜床土）

DTA 曲線は 550°C の吸熱ピーク，700°C の小吸熱ピーク，900°C の著しく円味を持った発熱ピークを与える。結晶度は低く，X 線回折より考えられる結果と DTA 曲線は一致すると考えてよい。DTA 曲線は 400°C に小吸熱ピークを示すが一方X線回折ではゲータイトの回折線も見られるので，ゲータイトの存在も明らかである。ほかに石英，長石の少量が推定される。

福—7試料の X 線回折図は強い拡散した 7.8Å 線，10.0Å線のほか弱い15Å線を示す。ほかに6.1Å線および 5.1Å 線も見られる。エチレングライコール処理試料で

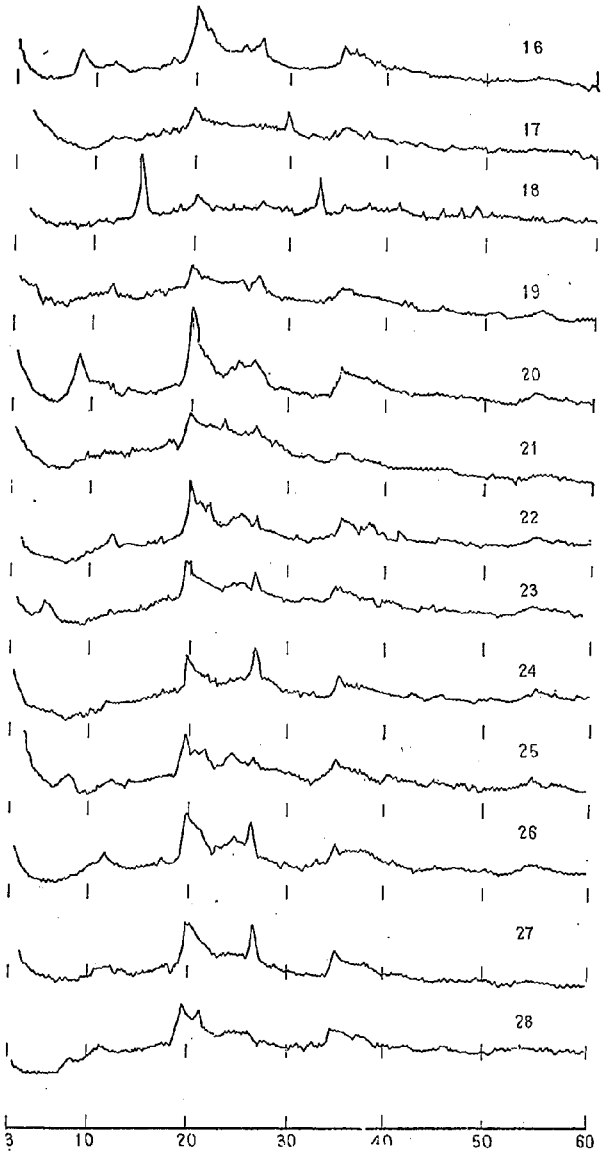


図-31（2） 土壌コロイドのX線回折図（福島県路床土）

は 7.35Å に比較的鋭い回折線を与え，引きつづき 8.2Å 線および10.4Å 線をともない低角側に拡散している。また15°Å線は殆んど見られないし 6.1Å 線および 5.1Å 線も見られない。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を与えるが，920°C の発熱ピークが著しく小さく，14Å鉱物等の混在は示さない。この試料中にはハロイサイトのほかハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在すると考えられ，クリストバライトと石英も少量存在する。

福—8 試料のX線回折図は拡散した16.6Å 線，低角側に尾を引いた7.3Å線，10Å線と弱い 8.6Å 線を示す。このほか 5.8Å，5.2Åの回折線も示し，3.6Åの回折線は平坦化された形となっている。エチレングライコール処理により17.6Å 線は明瞭に見られるが，14.2Å線をともなって11Å線まで引きつづいた回折線となっており，弱い10.0Å線が見られるほか 8.4Å線も見られ，この線は 7.3Å 線まで拡散した回折線となっている。またこの処理により5.8Å，5.2Å 線は消失し，3.35Å から4.5Å までの帯状回折線も見られる。

DTA 曲線はカオリン鉱物を示し 670°C に小吸熱ピークも見られるが，530°C の吸熱ピークは幅が広く浅いことが特徴であり，バイデライトに近いモンモリロナイト等の混入を考えるべきであろう。X線回折および DTA 曲線より本試料中にはモンモリロナイトとハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在すると考えられ，一部のモンモリロナイトは加水ハロイサイトと恐らく混合層鉱物を造っていると推定され，またクリストバライトも存在する。

福—9 試料の X 線回折図は強い 10.0Å 線を与えるほか微弱な 7.4Å 線を示し，ジプサイトおよび方解石の存在も明らかである。DTA 曲線は加水ハロイサイト，ジプサイトおよび方解石を示し，X線回折の結果と一致する。

福—10試料は DTA曲線をかくが，X線回折図は強い15.2Å線，低角側に尾を引いた 7.3Å 線および微弱な 10.4Å線を示す。ハロイサイト鉱物の混合層とハロイサイトおよびモンモリロナイトが主要なものと考えられ，ほかに強い1.88Å線が見られるが何によるか明らかでない。石英，長石が推定される。

福—11試料のX線回折図は15.2Å，10.2Å および拡散した 7.7Å線を示す。エチレングライコール処理で 17.6Å，14.0Å，10.0Å，7.7Åおよび7.13Åの回折線を示す。

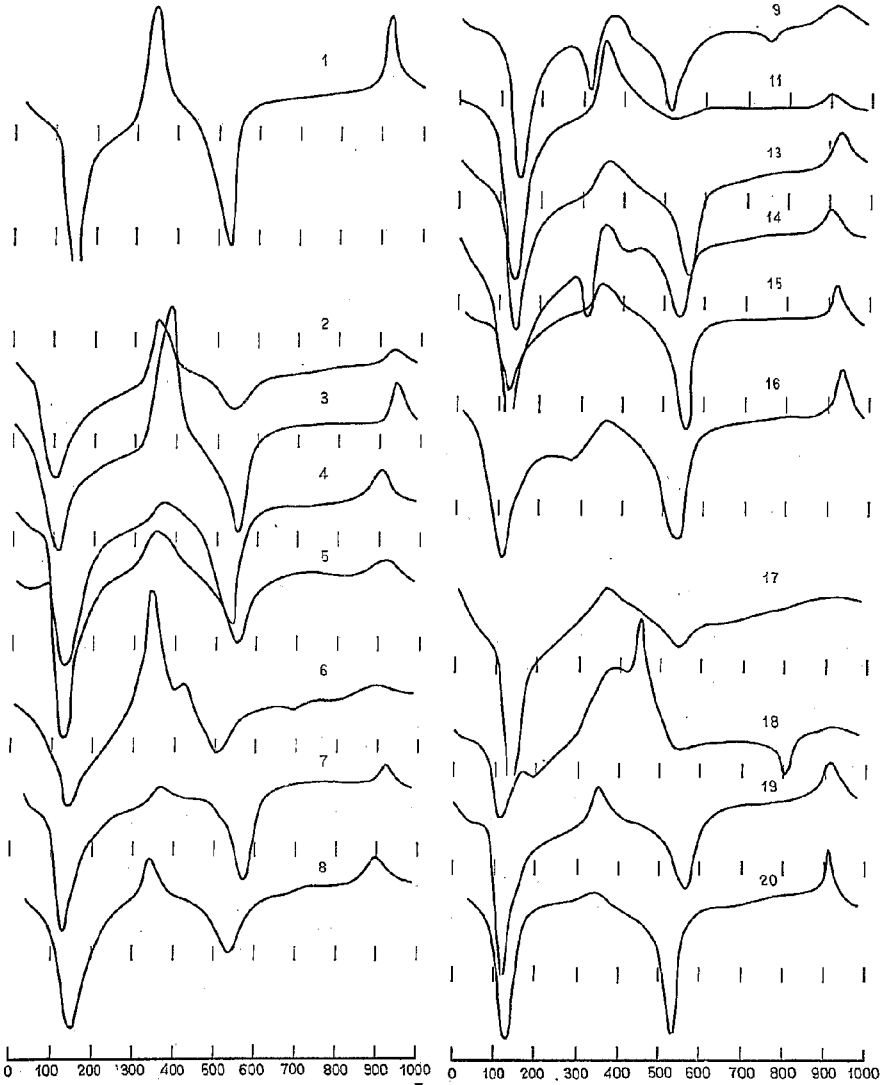


図-32（1） 土壌コロイドの DTA 曲線（福島県路床土）

粘土鉱物の（hk）線は一般に鮮明でない。モンモリロナイト，ハロイサイトの混合層鉱物の存在が知られ，10.0Å線はイライトでなく加水ハロイサイトと考えられる。7.13Å 線は 14.0Å 線と関連して考えてむしろクロライトと推定される。またアロファンの存在が考えられるほかにジプサイト，石英も見られる。DTA 曲線は X線回折の結果と一致する。

福—12試料は DTA 曲線をかくが，X線回折図は15.2Åの強い回折線を示し，この線は高角側に10Å まで拡散した回折線となっている。この15.2Å 線は恐らくモンモリロナイトによると考えられ，一部のモンモリロナイトは10Å鉱物と混合層鉱物を造っていると推定される。石英の存在も明らかである。

福—13試料のX線回折図は15.2Å，10.0Åおよび7.2Å

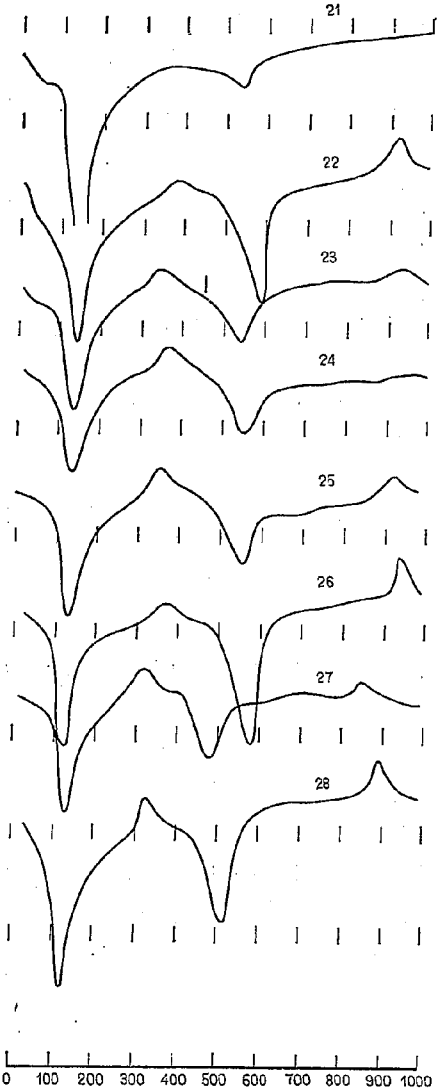


図-32（2） 土壌コロイドの DTA 曲線（福島県路床土）

の回折線を示し，ほかに弱い8.9Å線も見られる。エチレングライコール処理により 17.6Å線が強くなり，10.7Å線も見られる。17.6Å線は高角側に尾を引き10.7Å線にまでおよび，10.7Å線は7.25Å線まで拡散した帯状回折線となる。また3.35Åから4.5Åまでは帯状回折線となっている。一方 DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，600°C から 700°C にかけての僅かであるが吸熱も見られ，モンモリロナイトを示すと考えられる。これらの実験結果からこの試料中には主としてハロイサイト鉱物の混合層鉱物および加水ハロイサイトが主として存在し，モンモリロナイトは加水ハロイサイトとの混合層鉱物として一部が存在すると考えてよい。このほかジプサイト，クリストバライトも存在する。

福—14試料のX線回折図はいずれもやや拡散した10.4Åと 7.4Å の回折線を示すほか，一般の回折線は鮮明でなく，ジプサイトおよびゲータイトの回折線が見られる。10.4Å線はイライトによるとしても (003)，(005) 線を認めないので，加水ハロイサイトによると考えるべきであろう。7.4Å 線はハロイサイト鉱物の混合層鉱物によると考えられ，アロファンの存在が推定される。DTA 曲線はハロイサイト鉱物，ジプサイト，ゲータイトを示し，680°C に僅かの吸熱が見られ少量の14Å鉱物を示す。150°C の吸熱ピークが著しく大きくアロファンの存在が推定できる。この試料中には加水ハロイサイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物，アロファンが主として存在し，ゲータイト，ジプサイトも存在し，わずかな14Å鉱物も推定される。

福—15試料のX線回折図は7.7Å の拡散した回折線と，9Åから11Åにおよぶ回折線を示し，3.8Åから 4.2Åにおよぶ回折線と 3.3Åから 3.7Åにおよぶ回折線も見られ，2.40Å 線も著しく拡散しており，(hk) 線は 4.48Å線を除いて鮮明でない。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示すが920°C の発熱ピークは割合に小さい。この試料中にはハロイサイトのほかハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物が主として存在し，一部のアロファンの存在をも推定されるほか15.2Å を示す鉱物も少量存在する。

福—16試料のX線回折図は強い 10.4Å 線と拡散した 7.6Å 線を示す。ほかにゲータイト，ジプサイト，石英も見られる。10.4Å 線はイライトの (005) 線が殆んど見られないので大部分が加水ハロイサイトによると考えられ，ハロイサイトも存在すると考えられる。DTA 曲線は加水ハロイサイトを与え，一部のジプサイトも見られるがゲータイトについては明らかでない。850°C に僅かの吸熱が見られるがイライトによるのかどうかは明らかでない。DTA 曲線はX線回折の結果と一致しておる。ほかに石英もわずかながら存在する。

福—17試料のX線回折図は 7Å から 8Å にわたる拡散した回折線と，10.6Å 線を示し，その他の回折線は一般に鮮明でない。15Å 線は測定していないので明らかでないが，クロライトは (001) 線のほかの回折線より考えて存在しても少量であろう。また方解石も少量存在する。DTA 曲線は少量のカオリン鉱物を示すほか，600°C から700°C に吸熱を示しモンモリロナイトの存在を推定させる。また150°C の吸熱ピークは特に大きく，アロファ

ンまたは無定形物質が推定される。X線回折と DTA 曲線の結果からこの試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物と無定形物が存在し，モンモリロナイトも一部存在すると推定されるほか，方解石も見られる。

福—18試料のX線回折図は6.23Å線と2.80Å線で代表されるX鉱物を示し，14Å 線，10Å 線および7Å 線は見られなく，粘土鉱物は多くは存在しないと考えられる。ジプサイトの少量が存在する。DTA 曲線は X線回折の結果と一致する。

福—19試料のX線回折図は15.2Å線，7.25Å線を示すがほかの回折線の強度は一般に低くい。エチレングライコール処理で17.6Å，14.4Å，7.25Åの回折線は鋭どく，8Åから10Åにおよぶ拡散した回折線も見られる。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示すが，600°C から700°C にかけての吸熱も見られ，150°C の吸熱も大きい。14.4Å線はクロライトと考えても (003) 線を全然かくのでクロライトとは考えがたく，したがって7.25Å線はカオリン鉱物おそらくはハロイサイトによると考えられ，8Åから10Åにおよぶ回折線はハロイサイト鉱物の混合層鉱物によると考えられるほか，モンモリロナイトの存在も明らかである。14.4Å線が何によるかは明らかでない。

福—20試料の X 線回折図は 10.2Å の強い回折線を示し，この回折線に引きつづいて 7Å から 9Å にわたる帯状の回折線が見られる。10.2Å線はイライトではないので加水ハロイサイとによると考えられ，拡散した回折線はハロイサイト鉱物の混合層鉱物を示す。ほかに僅かな16Å線が示されるが明らかでなく，ジプサイトの回折線も見られる。DTA 曲線は加水ハロイサイトをしめし X線回折の結果を支持している。

福—21試料のX線回折図は 7Å から 9Å にわたる著しく拡散した回折線を示し，4.2Åから3.0Åにかけても帯状の回折線を示す。粘土鉱物による回折線は鮮明でなく強度も低くいので無定形物質の存在も考えられる。粘土鉱物としてはハロイサイト鉱物の不規則混合層鉱物が考えられる。DTA 曲線は 150°C の深い吸熱と，540°C の浅い吸熱を示すのみである。X線回折の結果と一致している。

福—22試料のX線回折図は低角側に拡散した 7.4Å 線を示し，そのほかはクリストバライトと石英の回折線を示す。ハロイサイトと一部のハロイサイト鉱物の混合層鉱物を示し，DTA 曲線も X線回折の結果と一致している。

福—23試料のX線回折図は強い16.4Å線，低角側にやや拡散した 7.5Å 線および10.4Å線を示す。エチレングライコール処理試料では17.6Å線が見られモンモリロナイトの存在が示され，7.0Å線は低角側に10Å線まで拡散した帯状の回折線を示す。ハロイサイト，加水ハロイサイト，それらの混合層鉱物の存在を示す。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，600°C から700°C にかけての吸熱はモンモリロナイトを示すと考えてよく，X線回折の結果と一致している。ほかに石英が見られ，長石も推定される。

福—24試料の X 線回折図は僅かに高角側 に 拡散した 15.2Å線，拡散した弱い10.3Å線，同様に拡散した7.7Å線を示す。そのほかの回折線は一般には鮮明でない。エチレングライコール処理によって17.6Å 線が明瞭となり，7.5Åから11Åにわたって連続した帯状の回折線を示し，12.6Å 線も僅かながら見られる。4.5Å から 3.4Å におよぶ連続した回折線も見られる。モンモリロナイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物が見られ，イライトも僅かに推定され，雲母系鉱物も12.6Å線より想定できる。またモンモリロナイトの一部はイライトまたは加水ハロイサイトとともに混合層鉱物を造っているのではないかと考えられる。石英，クリストバライトの少量も見られる。DTA曲線はカオリン鉱物を示すが，950°Cの発熱ピークは幅は広いが著しく低くく，900°C に僅かな吸熱も見られる。600°C から650°C にわたって吸熱が見られ，モンモリロナイトによるものであろう。この試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物，モンモリロナイトが主として存在し，イライトおよび雲母の風化段階の鉱物さらにモンモリロナイトが何等かの混合層鉱物として存在するらしく考えられ，ほかにクリストバライトおよび石英さらに長石も考えられる。

福—25試料のX線回折図は強い15.2Å線，低角側にやや拡散した7.5Å 線を示し，3.60Å 線も拡散した回折線である。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を示し，700°C における吸熱も明瞭であり，X線回折の結果と共に考えて，この試料中には主としてハロイサイトとモンモリロナイトが存在し，クリストバライトも推定できる。しかし 6.4Å 線については明らかでない。

福—26試料の X線回折図は低角側に尾を引いた 7.5Å 線を示し，きわめて微弱な 15.2Å 線も見られる。一方 DTA 曲線ではハロイサイト鉱物を与えるので，ハロイサイト，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物の存在を考えることができる。ほかに石英が存在し，クリストバライトも推定される。

福—27試料のX線回折図は拡散した 15Å 線，7Å から 9Åに拡散した回折線を示し，3.5Åから3.8Åにおよぶ拡散した回折線も見られる。エチレングライコール処理で 7.35Å 線は 9.8Å 線，10.4Å 線をともない低角側に尾を引いた回折線を与え，弱い 14.4Å 線も見られる。3.56Å 線は 3.8Å 線まで低角側に尾を引いている。14.4Å 線は 4.77Å 線および 2.80Å 線をともない (02) 線は 4.53Å を示しクロライトと推定される。DTA 曲線は吸熱，発熱のピークが低温側にずれており，実験結果について信頼性が欠けるのでこの曲線については余りふれない。X線

回折の結果からはハロイサイトとハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられ，一部のクロライトが推定されるほか石英が見られる。

福—28試料のX線回折図は7Åから8Åにおよぶ拡散した回折線が見られ，この線は9Å位まで尾を引いており，このほかに10.4Å線も見られる。3.4Åから3.8Åまでの回折線も拡散した帯状回折線となっている。DTA曲線はハロイサイト鉱物を与え，その吸熱ピークは520°Cで低温側にずれている。ハロイサイト鉱物の混合層鉱物とハロイサイト，加水ハロイサイトが存在すると考えられる。クリストバライトも存在する。

〔10〕 岩手県の路床土（岩—1～10）

岩手県路床土のコロイド成分の粘土鉱物をX線回折（エチレングライコール処理をふくむ）およびDTA方法で検索した結果を図-33，34，30に示す。

つぎに実験結果をのべる。

岩—1試料のX線回折図はやや拡散した7.6Å線のほか微弱な10Å線および8.2Å線を示し，痕跡的であるが14Å線も見られる。また5Åと7Åの間に弱い回折線がいくつか見られる。エチレングライコール処理試料は拡散した7.6Å線を示し，17.5Å線も明瞭であり，10.4Å線も弱いが見られる。モンモリロナイトの存在は明らかであり，多量のハロイサイトが存在する。少量のイライトも考えられる。少量のジプサイトも推定される。

DTA曲線はハロイサイト鉱物を与えるほか，720°Cの吸熱ピークも存在し，モンモリロナイトの存在を考えてもよい。450°Cより始まる吸熱も割合に大きく，イライトの存在も推定できる。ジプサイトも推定できる。

X線回折図とDTA曲線からこの試料中には主としてハロイサイトが存在し，モンモリロナイトも相当量存在し，少量のジプサイト，イライトおよび石英も推定される。

岩—2試料のX線回折図はやや拡散した7.25Å線，いずれも弱い14.4Å線および10.3Å線を示す。3.6Å線は拡散しており(02)線は4.53Åおよび4.42Åである。エチレングライコール処理で微弱な17.0Å線，14.5Å線を示し，7Åから11Åにおよぶ帯状回折線が見られ，10.6Å，9.4Å，8.2Å等のピークをともなっている。10.3Å線は(002)，(003)，(005)にあたる回折線も見られるのでイライトらしく思われる。モンモリロナイトが少量存在し，14.4Åを示す鉱物も少量存在する。このほかジプサイトの存在が明瞭であり，石英およびクリストバライトも推定される。なお6.32Å線が明瞭に見られるが何によるか明らかでない。

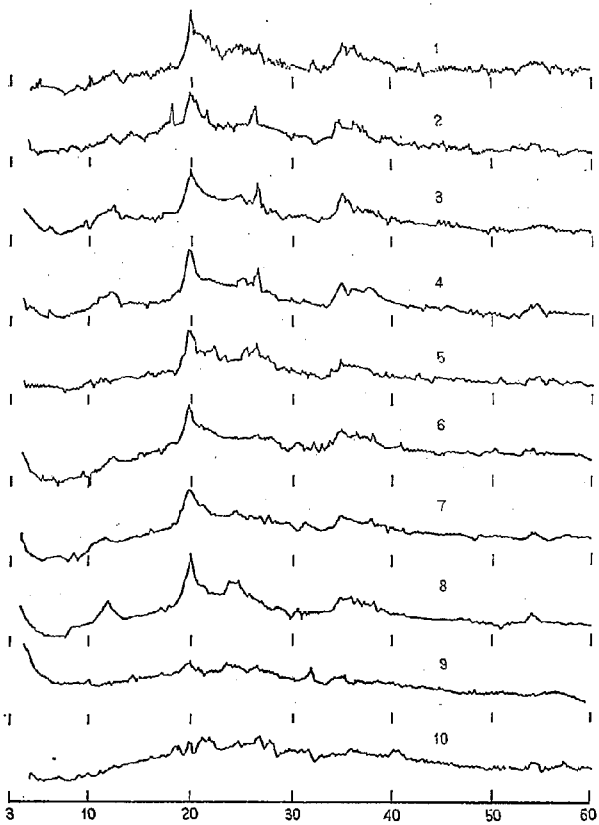


図-33 土壌コロイドのX線回折図（岩手県路床土）

DTA曲線はジプサイトとカオリン鉱物を明瞭に示す。500°Cから700°Cの吸熱が2つのピークよりなり，600°Cをこしても吸熱が除除に見られることは2種以上の鉱物の混在を示すものである。ハロイサイト，イライト，モンモリロナイトの混在は推定できる。720°Cおよび800°Cに明瞭な小吸熱ピークが見られ，前者は470°Cの発熱ピークと6.32Å線よりX鉱物の公算もあり，800°Cのピークは14Å鉱物に関係するものであろう。

X線回折とDTA曲線よりこの試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物を一部ともなったハロイサイ

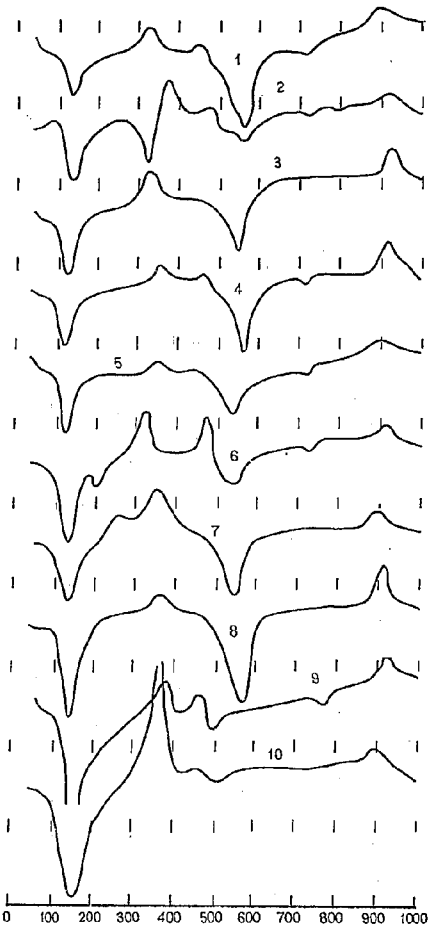


図-34　土壌コロイドの DTA 曲線（岩手県路床土）

ト，ジプサイトの存在はたしかであり，モンモリロナイトは少量存在しほかに14Å鉱物も僅かに見られる。イライトの存在も十分推定でき，少量のX鉱物の見られる公算もある。ほかにクリストバライト，石英も推定できる。

岩—3試料のX線回折図は7.25Å線と低角側に尾を引いた8.0Å線および比較的弱い15.2Å線を示す。3.68Å線も拡散しており，2.58Å線も高角側に尾を引いたような回折線も示す。エチレングライコール処理により14.2Å線は明瞭となり，4.93Å線も見られるし，3.56Å線および7.25Å線も明瞭となる。また8.0Å線は10Å線まで拡散し，4.5Å線から3.6Å線までは帯状の回折線となっている。これらのことからハロイサイト鉱物の混合層鉱物が多く存在し，クロライトも比較的多く存在すると考えてよい。ほかに石英が存在する。DTA 曲線はハロイサイト鉱物を与え，580°C から650°C まで吸熱が見られ，これはおそらく結晶度の低いクロライトに帰するものであろうと考えると，X 線回折の結果と大体一致する。

岩—4試料のX線回折図は岩手—3試料とほとんど同じであり，エチレングライコール処理の場合と大体同じ回折線を与える。また DTA 曲線も710°C に小さい吸熱ピークが見られ，700°C まで吸熱がつづく点を除いてはほとんど同じである。この吸熱ピークはクロライトによるものであろう。この試料中にはハロイサイト鉱物の混合層鉱物が主として存在し，クロライトも存在し，石英も少量見られる。

岩—5試料のX線回折図は微弱な9.2Å線を示し，5Å線より低角側には回折線らしいものも見られるが明瞭な底面反射をかき，3.6Å 線も見られない。不規則混合層鉱物を示す。エチレングライコール処理試料では，18.0Å と 9.1Å 線が明瞭に見られ，14.4Å線もわずかに見られる。7Å から10Å にかけて帯状の回折線を示す。18Å 線と9.1Å線は関連するものであろうが何か明らかでない。DTA 曲線からはハロイサイト鉱物の混合層鉱物が考えられるが，600°C から700°C におよぶ吸熱を示すものの存在が考えられる。おそらくエチレングライコール処理により18Å, 9.1Å を示すものによるであろう。この試料中には関東ローム等に見られる加水ハロイサイトとハロイサイトの不規則混合層鉱物が主として存在し，エチレングライコール処理で 18Å，9.1Å 線を与えるもののほか少量の14.4Å線を示す鉱物が推定される。なお石英および長石の存在が明瞭である。

岩—6試料のX線回折図はそれぞれ低角側に尾を引いた7.2Å線および9.6Å線，微弱な14.2Å線を示す。(hk) 線は 4.48Å 線のみ鮮明であり，また3.2Åより4.2Åにわたって明瞭な回折線が見られがたい。エチレングライコール処理試料では7Åから11Åにおよぶ帯状回折線，3.2Åから 3.9Åにおよぶ帯状回折線が見られ，17.0Å 線もかすかに認めうる。DTA 曲線はカオリン鉱物を示すが，600°Cから700°Cにかけての吸熱も見られ，200°Cの吸熱ピークも明瞭である。この200°C のピークが480°C の発熱ピーク，720°C の吸熱ピークとともにX鉱物によるかどうかはX線回折で 6.3Å および 2.8Å 線を与えないので明らかでない。モンモリロナイトは存在しても少量であるから，200°C の吸熱ピークがモンモリロナイトによるかどうかも明らかでない。この実験の結果からはこの試料中に存在する鉱物のそれぞれを明らかにできないが，ハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物は確かであり，モンモリロナイトの存在も確かである。拡散した9.6Å線は3.35Å線をかくのでイライトとは考

えがたく，加水ハロイサイトによると考えられる。

岩—7試料のX線回折図は7.1Åから8.4Åにおよぶ低角側に拡散した回折線，弱い10.5Å線，微弱な9.1Å線および12.2Å線を示す。4.48Åのほかは鮮明な回折線を与えない。エチレングライコール処理による7Åから11Åにおよぶ回折線を示し，3Åから4.5Åまで連続した帯状回折線となる。DTA曲線はハロイサイト鉱物を示し，ジプサイトも推定される。この試料中には主としてハロイサイト鉱物の混合層鉱物，ハロイサイトが存在し，少量の12.2Å鉱物も存在し，ジプサイトおよび長石も推定される。イライトについては明らかでなく，存在してもごく少量であろう。

岩—8試料のX線回折図は強い7.50Å線を示し，この線はわずかに拡散している。弱い10.7Åと10.2Å線も見られる。3.67Å線も拡散しており，3.35Å線および2.00Å線は見られないのでイライトも存在しない。エチレングライコール処理にした場合でも同様な結果を与える。DTA曲線はハロイサイト鉱物を与える。この試料中にはハロイサイトが主として存在し，一部の加水ハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物も存在する。

岩—9試料のX線回折図は微弱な15.2Å線を示すほか，粘土鉱物の底面反射を示さない。(hk)線はいづれも不鮮明であるが4.48Å線，2.55Å線は見られ，また3.67Å線も拡散している。エチレングライコール処理試料では6.8Åから11.0Åにわたる連続した帯状回折を示す。結晶度の著しく低くいハロイサイト鉱物の混合層鉱物が一部存在すると考えられるが，無定形物質も相当量存在すると考えられる。ほかに6.32Å線，2.79Å線で示されるX鉱物も見られる。DTA曲線は結晶度の低くいカオリン鉱物のため500°Cの吸熱ピークが見られ，このピークより考えても920°Cの発熱ピークは高温側であり，しかもピーク面積も大きくさらに150°Cの吸熱も著しい。これらのことからアロファンの存在が考えられる。X鉱物のDTA曲線の特性も見られる。この試料中には主としてアロファン，結晶度の著しく低くいハロイサイト鉱物の混合層鉱物が存在し，一部のX鉱物も見られる。

岩—10試料のX線回折図は明瞭な回折線をほとんど示さない。DTA曲線は岩—9試料と同様に一部のハロイサイト鉱物の混合層鉱物を含有するが大部はアロファンであることを示す。

〔V〕考　　察

〔1〕試料粘土の分離方法および実験方法について

試料粘土はアンモニヤで分散させ，$CaCl_2$で凝固させ，H_2O_2で有機物を分解させて後酢酸石灰で凝固させて，アルコールで酢酸石灰を洗って除く方法を選んだ，しかしこの方法によって時に6.32Åと2.80Åの粉末線で特徴づけられ，400°Cから500°C間の著しい発熱反応と800°C前後での吸熱反応でも特色づけられる物質（この物質をXとする）を認め，粘土鉱物検索上好ましくないことが明らかとなった。このような性質を示す物質が何であるか明らかでないが粉末線からは酢酸石灰でないことは明らかであり，DTA曲線からは一般の脂肪酸石灰と同様に酢酸カルシュムにも似ている。この物質は試料の水洗いまたは2時間のアルコール(1：1)洗いではほとんど除去できないが，N/40 HClと常温で10分間処理しても除去できず，16時間放置して始めてその大部分を除くことが可能であり，分析してもCaOの含量が多い。したがってCaOをふくむ有機物であることは事実であり，発熱反応はそれが熱分解して$CaCO_3$を生成し，次いで結晶度の低くい$CaCO_3$が800°C前後で熱分解すると考えてよい。

この物質は土に元来存在したものでないことは原土についてX線回折を試みても検出しえないこと，およびアンモニヤで分散させて遠心分離でえた1μ以下の粘土でも検出しえないことより知りうる。またアンモニヤ水で分散後$CaCl_2$で処理してえた粘土中にも存在しない。しかし$CaCl_2$で分離した粘土をH_2O_2で80°Cで酸化するとこの物質が生成し，その反面遠心分離のみでえた粘土のH_2O_2処理では生成しないことを確かめた。したかってCa^{++}が何等かの形の有機物と反応し，それが酸化されたときに反応生成物として生成するものと推定される。この有機物が何であるかは今後明らかにせねばならない問題と思われるが，土壌有機物について重要な意義を持つと考えられる。なおこの物質を検出する土は有機質土と表示されるか，アロファンを含む場合とか，有機物を含むと推定されるとか，有機物と何等かの関係が多いと考えられる場合が多いことは注目すべきであろう。さらに土質としても好ましくない場合も多い傾向は認めうる。

また試料粘土が試料土中の粘土の代表的のものであるか否かは断言できない。分散の方法にもよるであろうし，1μより大きい粒子も粘土化の過程にあるものもあろうが，この実験では一応代表的のものと考える。

実験方法としてはエチレングライコール処理物をふくみX線回折を行ない，DTAも実施したがその何れか一方を欠くこともある。これらの実験結果のみからは粘土鉱物の同定は確実にはできないことは十分認めねばならないが，この結果だけでも特殊な試料を除いては相当たしかな推定ができるし，少量存在するものを別にすれば主要構成物については，この程度の実験でも十分の場合が多い。今後この実験結果のみからは明らかでない試料については，種種の方法を用いて実験し検討を加えたい。

〔2〕路床土の粘土鉱物の種類と一般的性質

この研究に用いられた路床土は工学的土性図作製に用いた試料の一部であり，関東地方（栃木県，千葉県をか

く），東北地方（宮城県，福島県，岩手県），東海地方（静岡県，愛知県，三重県）の主として既設道路について採取されている。既設道路網はわが国国土の利用形態に基いて分布しており，地質的には沖積層地帯に最も多く，洪積層地帯および第三紀層がこれについでおり，地形的には平野，丘陵，海岸，段丘地帯に多い。路床土はまた盛土される場合もあり切り取られる場合もあり，人為的に相当距離を運搬されたり，また粒度を変えるための操作も行なわれたりするので，長い路線を考える場合は材料としての均一性も十分でないのが一般である。しかし一方農耕地におけるような農耕作業，作物栽培等による人為的な環境の下にはおかれないで，主として気象環境の下におかれる。

わが国の土壌粘土鉱物についてはすでに触れたのであるが，川村および船引[6]の本邦西部の32個の試料土についての研究では，土の中の粘土鉱物は地質系統および母岩の種類のいかんに関せず，ハロイサイト様鉱物が主要組成成分であることを認めている。すなわちわが国土壌の主要粘土鉱物はその変化に乏しいとされる。その研究結果ではハロイサイトの底面反射が明瞭でないとされていたが，たとえば須藤[37]により指摘されたように今日では土壌粘土そのものの特性であると考えられている。すなわち結晶性が著しく低くく，また粒径も細かく，無定形物質その他の鉱物が少量混在するためであるが，不規則性ないしは規則性混合層鉱物が生成することも主要な要因である。また土壌粘土鉱物としてのハロイサイトは一般に（00l）線は幅が広く，しかも低角側に拡散しており，（02，11），（13，20）のような（hk）線は鮮明で強度も大きく，非対称性散慢散乱を示すことが特徴である。松井[16]は日本の土壌粘土鉱物の特質としてカオリン鉱物のほかにしばしば degrade したイライトを含むこと，バーミキュライト様鉱物の少量が存在する場合も多く，火山灰土でもアロファンよりバーミキュライト化の起りうること等をのべている。

この研究で推定しえられた路床土中の粘土鉱物組成を表-12～21に示す。これらの結果より路床土中の粘土鉱物についてつぎのような特性が見られる。

（1）　ハロイサイトまたは加水ハロイサイトが優勢であり，多くは（001）線が低角側に拡散し，（02），（13）線は鮮明で DTA 曲線は 900°C の発熱ピークは低温側であり，ピークは小さい。これらの粘土はジプサイト，モンモリロナイト，石英，クリストバライト，ゲータイト，イライト，クロライト，14Å 鉱物等をしばしば含み，これらの混合物を持たないものは稀である。ハロイサイトおよび加水ハロイサイトを主とするものでもそれらの混合層鉱物との種種の組み合せで認められる場合が多く，その例を次に示す。

H（比較的結晶度が高かく，他の粘土鉱物含量の少ないもの）：愛—1，4，22，宮—45，三—18，27，40，43

H・H（比較的結晶度が高かく，他の粘土鉱物含量の少ないもの）：福—1，9，群—1

H-H・H（7Å から 11Å にわたる拡散した回折線を示すもの）：福—3，15，27，28，群—15，4，埼—4，愛—8，静—15，宮—3，24，26，三—3，8，11，16，34，46

H・H，H-H・H（H・H のほかに H-H・H を持つもの）：福—20，群—9

H，H-H・H（Hのほかに H・H-H を持つもの）：群—6，7，福—4，茨—11，岩—3，静—7，5，宮—10，32，三—25，26，30，34

(001) 反射を示さない H-H・H：福—21，岩—5，群—4，埼—12，宮—22，三—5，11

（2）　モンモリロナイトも多くの粘土中に見られ，それが優勢である場合もあるが，多くはハロイサイト等をともなっている。モンモリロナイトがバイデライト的であると推定できる場合も多い。モンモリロナイトか否か推定できない場合もある。その存在状態の例を次に示す。

Mont（モンモリロナイトを主とするもの）：静—1，15，宮—12，13，15，27

Mont，Mont 混合層（モンモリロナイトのほかにその混合層鉱物が含まれるもの）：福—12，6，8，13，宮—18，37，11

Mont，H（モンモリロナイトを一部ふくみほかはハロイサイト等のもの）：愛—36，静—14，群—5，福—5，23，24，25，東—3，宮—5，15，16，23，28～36，40，46，三—24，7，5

（3）　イライトはしばしば見出されるが，それが優勢である場合は稀であり，比較的多くの量が他の鉱物と共存する場合があり，少量の副成分として見られることが多い。

I（イライトの比較的多いもの）：静—3，13，14，9，東—3，宮—1，43，三—33，34，35，38，41

I，I 混合層（イライトのほかイライト系鉱物をふくむもの）：静—11，12

（4）　クロライト，バーミキュライト等はこの実験では確認していないものが大部であるが，14Å 鉱物でもモンモリロナイトでないことが明らかなものがある。これらの鉱物は主要成分として存在することはほとんどないが副成分としは多くの試料粘土に見出されている。

Ch（クロライトをふくむもの）：静—9，13，岩—3，4，宮—38，43，三—3，16，33

14Å 鉱物（モンモリロナイトではないがクロライト，バーミキュライトか不明であり，ある量が確実にふくまれるもの）：群—8，愛—1，7，8，12，18，静

表-12 東京都路床土のコロイド成分組成（神奈川路床土を含む）

試料番号	実験方法	比較的多量に存在するもの	比較的少量存在するもの
東— 1	X, DTA, 化学分析, 電顕	A, H	—
〃— 2	X, DTA, 化学分析, 電顕	A	X
〃— 3	X(EG), DTA, 化学分析, 電顕	Mont, I, H	—
〃— 4	X, DTA, 化学分析, 電顕	A	H, Gib
〃— 5	X, DTA, 化学分析, 電顕	A	H-H·H, Gib
〃— 6	X, DTA, 化学分析, 電顕	A	H, Gib
〃— 7	DTA, 化学分析, 電顕	A	H, Gib
〃— 8	X, DTA, 化学分析, 電顕	A	H-H·H, Gib, F, X
〃— 9	X, DTA, 化学分析, 電顕	A	H-H·H
〃—10	X, DTA	A	H, Q
〃—11	X, DTA	A	—
〃—12	X, DTA	A	H-H·H, Ge
〃—13	X, DTA	H, H-H·H	Gib, Q, β-$Fe_2O_3 \cdot H_2O$(?), X(?)
〃—14	X, DTA, 化学分析, 電顕	A	H-H·H, Ge
〃—15	X, DTA, 化学分析, 電顕	H, Gib	11.2Å鉱物, 14Å鉱物
〃—16	X, DTA, 化学分析, 電顕	H, H·H	Gib
〃—17	X, DTA, 化学分析	A, H-H·H	Gib, Ge, Q
〃—18	DTA, 化学分析	H	—
〃—19	DTA, 化学分析	H	14Å鉱物(?)
〃—20	DTA, 化学分析	A, H	—
〃—21	DTA, 化学分析	A	H-H·H
〃—22	DTA, 化学分析	A, H·H	H-H·H
〃—23	DTA, 化学分析	H·H, A	14Å鉱物
〃—24	DTA, 化学分析	H, 14Å鉱物	—
神— 1	X, DTA	H, H·H, H-H·H	—
〃— 2	DTA	H-H·H	—
〃— 3	X, DTA	Amorph	H-H·H
〃— 4	DTA	A	—
〃— 5	DTA	H	—
〃— 6	X, DTA	H, H-H·H	—

表-13 埼玉県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量に存在するもの	比較的少量存在するもの
埼— 1	X, DTA	H, H-H·H	Q
〃— 2	X, DTA	A	Cal
〃— 3	X(EG), DTA	A, H-H·H	Q
〃— 4	X(EG), DTA	H, H-H·H	—
〃— 5	X, DTA	A	—
〃— 6	DTA	H-H·H	—
〃— 7	X, DTA	A, H·H-H	—
〃— 8	DTA	H-H·H	—
〃— 9	DTA	H	Mont(?)
〃—10	DTA	A, H-H·H	—
〃—11	X(EG), DTA	H, I(?)	F, Q
〃—12	X, DTA	H-H·H	H, Q
〃—13	DTA	A(?)	—

表-14 群馬県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量に存在するもの	比較的少量存在するもの
群— 1	X, DTA	H·H	Gib
〃— 2	DTA	H·H, A	Cal
〃— 3	DTA	H·H	—
〃— 4	X, DTA	H-H·H	14Å (混合層?)
〃— 5	X(EG), DTA	H-H·H, Mont	I, F, A(?)
〃— 6	X, DTA	H, H-H·H	—
〃— 7	X, DTA	H, H-H·H	—
〃— 8	DTA	H, Cal	—
〃— 9	X, DTA	H·H, H-H·H	—
〃—10	X(EG), DTA	H, H·H, H-H·H	長週期粘土(?) Cal(?), Gib, Cris
〃—11	DTA	H	—
〃—12	X(EG), DTA	H, H-H·H	14Å(Montでない),A(?),F(?)
〃—13	X, DTA	A	K
〃—14	X, DTA	H·H, H-H·H	Ge, F
〃—15	X, DTA	H-H·H	—
〃—16	X, DTA	A	Cal
〃—17	X, DTA	A	—
〃—18	X(EG), DTA	H-H·H, 14Å(?), 10Å(?)	A(?), F

表-15 茨城県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量に存在するもの	比較的少量存在するもの
茨— 1	X, DTA	H, H-H·H	H·H, A(?)
〃— 2	X, DTA	H, H-H·H	H·H, X(?), Q
〃— 3	X, DTA	H, H·H, H-H·H,A(?)	Ge, Gib
〃— 4	X, DTA	H, H·H	Gib, A
〃— 5	DTA	H	—
〃— 6	X, DTA	H	Cal, H·H, Gib(?)
〃— 7	X(EG), DTA	H, H·H, Mont, H-H·H	Ge, A(?), F
〃— 8	X, DTA	H, H-H·H	A(?), Ge, H·H
〃— 9	DTA	H	—
〃—10	DTA	H·H, H	—
〃—11	X, DTA	H, H-H·H	—
〃—12	X, DTA	A	Ge
〃—13	X, DTA	A	Q

表-16 三重県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量に存在するもの	比較的少量存在するもの
三— 1	X, DTA	H, Gib	F, Q, Ge
〃— 2	X	H, H-H·H, Gib	—
〃— 3	X(EG), DTA	H, H-H·H, Ch, Gib	—
〃— 4	X, DTA	H, Gib, Mont(?), I(?)	Q, F
〃— 5	X(EG), DTA	Mont, K, K-Mont, Q	I(?), H·H(?)
〃— 6	X, DTA	Gib, K	H·H(?), I(?), Q, F
〃— 7	X(EG), DTA	H, H-H·H, Mont	F, Q
〃— 8	X(EG), DTA	H-H·H	14Å(?), Gib
〃— 9	X(EG), DTA	X, Gib	H-H·H, Ch
〃—11	X, DTA	H-H·H	Gib, Q
〃—12	X(EG), DTA	H-H·H, X	Gib, Q, Mont, 14Å(?)
〃—14	X(EG), DTA	H,H-H·H,14Å(Montでない)	Q
〃—15	X(EG), DTA	H, H-H·H	Gib, 14Å(?), 14Å-10Å(?)
〃—16	X(EG), DTA	H-H·H, Ch	Q
〃—17	X, DTA	H, H-H·H, Gib	Q, F
〃—18	X(EG), DTA	H	Q, H·H
〃—19	X(EG), DTA	H-H·H, Amorph	Gib, 6.7Å, 14Å(?), Cal
〃—20	X(EG), DTA	H, H-H·H	14Å(?), 12.6Å(?), Q, F
〃—21	X, DTA	H, H-H·H	Gib, F
〃—22	X, DTA	H, H-H·H, I(?)	Q
〃—23	X, DTA	H, H-H·H, Ge	—
〃—24	X(EG), DTA	H, Mont, H-H·H	Gib, Q
〃—25	X(EG), DTA	H, H-H·H	Ch, Q
〃—26	X, DTA	H, H-H·H, Gib	Q
〃—27	X, DTA	H, H-H·H, Gib	5.7Å(?)
〃—28	X, DTA	H, H-H·H, Gib	14Å(Mont?)
〃—29	X(EG), DTA	X	H-H·H, 14Å(Montでない) Gib, Q
〃—30	X, DTA	H, H-H·H	Gib
〃—32	X(EG), DTA	H,H-H·H,14Å(Montでない)	Q, Gib
〃—33	X(EG), DTA	K, I, Ch	Q, F
〃—34	X(EG), DTA	H-H·H, Ge, I	14Å(?), Q, F
〃—35	X(EG), DTA	H-H·H, Gib, I(?)	14Å(Montでない), Ge, F
〃—36	X, DTA	14Å(?), K, Amorph	Gib
〃—37	X, DTA	H	—
〃—38	X(EG), DTA	K, I, Ch(?)	F
〃—39	X, DTA	H-H·H, Amorph	13Å(?), F, Gib
〃—40	X, DTA	H	Q
〃—41	X(EG), DTA	H, Gib, I	14Å(Ch?), F, Q
〃—42	X(EG), DTA	K, I	Gib, F, 14Å (Montでない)
〃—43	X, DTA	H, Cal	—
〃—44	X, DTA	H-H·H, Ge, Amorph	—
〃—45	DTA	H-H·H, Gib, Mont(?)	?
〃—46	X(EG), DTA	H-H·H, Gib	16Å(?),14Å(?),12Å(?), 10Å
〃—47	X	H-H·H, H	(?)F, Amorph, Gib
〃—49	X	K, H-H·H, Gib	14Å(?), 12.6Å(?), Q

表-17 愛知県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量存在するもの	比較的少量存在するもの	AASHO分類	Casagrande分類
愛— 1	X, DTA	H	—	A-7-6	CH
〃— 2	X, DTA	H, H-H·H	Cal, Q, 14Å, I(?)	A-7-6	CH
〃— 3	X, DTA	H, H-H·H	Q	A-1-b	GW
〃— 4	X, DTA	H	Gib, Q	A-1-a	GP
〃— 5	DTA	H	—	A-6	CL
〃— 6	X(EG), DTA	H, H-H·H, Mont	Mont(?)	A-5	MH
〃— 7	DTA	H, H-H·H(?), Mont(?)	Gib, Q, 14Å, I(?)	A-5	MH
〃— 8	X(EG), DTA	H-H·H, Ge	—	A-4	ML
〃— 9	DTA	X, K	Mont(?), Ch(?), Gib, Q	A-5	ML
〃—10	X(EG), DTA	H-H·H	I(?), Gib,Cal,Q,14Å(?)	A-2-4	SP
〃—11	DTA	I(?), Ge(?)	Gib	A-3	SP
〃—12	X(EG), DTA	H, H-H·H	14Å(Ch?), 6.6Å, Q	A-7-5	ML
〃—13	X, DTA	H, H-H·H, 14Å(?)	Cal, Q	A-4	ML
〃—14	DTA	H, H-H·H(?)	Gib, Cal	A-2-4	SP
〃—15	X, DTA	H	—	A-2-7	SF
〃—16	X(EG), DTA	H, H-H·H	14Å(Montでない), Gib,Q	A-7-6	CH
〃—17	X(EG), DTA	H, H-H·H	Mont, F, Gib, 12.4Å, 6.6Å	A-7-6	CH
〃—18	X, DTA	H, H-H·H, Gib	14Å, Ge, Q	A-4	MH
〃—19	X, DTA	H, H-H·H	I(?), F	A-7-5	ML
〃—20	X, DTA	Ge, H-H·H	Hematite, Amorph	A-5	ML
〃—21	X, DTA	H	F	A-2-5	SW
〃—22	X, DTA	H	Cal, 10Å	A-1-b	GC
〃—23	DTA	H·H	—	A-2-4	SP
〃—24	DTA	H	I(?), Gib	A-7-6	CH
〃—25	DTA	K	I(?)	A-7-5	ML
〃—26	X, DTA	H, H-H·H	Gib, F, Q	A-3	SW
〃—27	DTA	K	Mont(?)	A-6	CL
〃—28	X, DTA	H, H-H·H	Gib, F, Ge, 14Å	A-5	MH
〃—29	DTA	H	—	A-1-a	GW
〃—30	DTA	H, Cal	Gib	A-2-4	SF
〃—31	X, DTA	Gib	H-H·H	A-4	ML
〃—32	DTA	K	Mont(?), I(?)	A-4	ML
〃—33	X, DTA	H	I(?), Cal, Ge	A-1-a	GP
〃—34	X, DTA	H, H-H·H	Ge, Q, 6.7Å, 10Å	A-1-a	GP
〃—35	X, DTA	K	Mont(?), Ge(?), I(?)	A-4	ML
〃—36	X(EG), DTA	Cal, H-H·H, Mont	12.6Å(?), Amorph	A-5	ML

表-18 静岡県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量存在するもの	比較的少量存在するもの	AASHO分類	Casagrande分類
静— 1	X(EG), DTA	Mont, H, H-H·H	F	A—3	S F
〃— 2	X, DTA	Cal, Amorph	Allophane(?)	A—8	P T
〃— 3	X(EG), DTA	I, K(?)	F, Q, 14Å(Ch)	A—3	S F
〃— 4	X, DTA	H, H-H·H	Gib, Q, 6.1Å(?)	A—7—6	M L
〃— 5	X, DTA	H-H·H	H·H	—	—
〃— 6	X, DTA	H, H-H·H	Cal, Cris, Ge(?)	A—3	S F
〃— 7	X, DTA	H	—	A—7—5	M L
〃— 8	X(EG), DTA	K, H-H·H, 14Å(Ch?)	Q, Cris, 5.6Å(?), 6.0Å(?)	A—7—6	C L
〃— 9	X(EG), DTA	I, Ch, H-H·H	Q, F, Ge(?)	A—3	G P
〃—10	X, DTA	H, H-H·H	14Å(Mont?), Gib, Q	A—7—6	O L
〃—11	X(EG), DTA	I, 雲母系混合層 (?)	(I—14Å)?, K(?), Q	A—7—6	C L
〃—12	X(EG), DTA	Mica 系混合層 (?)	K, Q	A—4	M L
〃—13	X(EG), DTA	I, K(?), Ch	F, Q, Mont	A—8	P T
〃—14	X(EG), DTA	Mont, I, K(?)	Q, F	A—7—6	C L
〃—15	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	Cal	A—3	S F
〃—16	X, DTA	H	14Å(?), 10Å(?), F	A—3	S P

—8, 福—19, 宮—28, 三—8, 12, 15, 20, 29, 32, 35, 42

(5) アロファンはしばしば多くの試料に見られ，アロファンが主要鉱物である場合もあり，また加水ハロイサイト等をともなう場合もある。

A (アロファンが優勢のもの)：群—13, 16, 17, 東—1~8(3を除く)，埼—2, 5, 茨—13, 12, 福—18, 宮—9, 岩—9

A, H-H·H (ハロイサイト鉱物とアロファンが共存するもの)：茨—3, 4, 8, 埼—3, 4, 7, 10, 群—18, 岩—10, 福—11

(6) 粘土鉱物以外のジプサイト，ゲータイト，石英，クリストバライト，方解石，長石，赤鉄鉱，レピドクロサイト等の存在はよく知られている。特にジプサイトおよび石英は最も広く存在する。これらの鉱物が特に多量存在する場合もしばしば見られる。

Gib (ジプサイトが相当量含まれるもの)：東—15, 愛—31, 18, 三—6, 1, 4, 28, 35, 46

Ge (ゲータイトが相当量含まれるもの)：愛—8, 20, 三—23, 34, 44

Cal (方解石がある程度含まれるもの)：静—2, 茨—6, 群—8, 2, 愛—30, 36, 三—43, 19

Cris (クリストバライトが含まれるもの)：宮—26, 13, 31

(7) 組成鉱物が複雑であったり，混合層鉱物等の存在のためこの程度の実験では推定しかできないもの，または推定もできないもので今後の研究が必要のもの

岩—5, 7, 宮—18, 36, 37, 39, 41, 福—6, 8, 12, 13, 24, 群—18, 静—8, 11, 12, 愛—8, 17, 三—4, 5, 15, 19, 20, 35, 39, 41, 46, 49

(8) 長週期格子がわずかに存在する疑いのあるもの

福—8, 20, 21, 23, 宮—1, 2, 8, 25, 37, 44, 岩—9, 群—5, 10, 16, 18, 静—9, 愛—16, 18, 三—9, 19, 21, 27, 28, 39

わが国の路床土は沖積土が最も多く用いられるのであるが，実験に使用した地域に関しては路床土中の粘土鉱物はほとんど大部分がハロイサイトを主とするものである。ハロイサイトは加水ハロイサイトと混合層鉱物を造り，その規則性には著しい差異が認められ，完全なる不規則性のために明瞭な底面反射を示さないもの，僅かに7Åから10Åにおよぶ盛り上った帯状反射を示すもの，7Åの反射は明瞭であるが低角側に拡散しその程度に多様性が見られるもの，10Å線は明瞭であり高角側に拡散したもの，回折強度のピークが7Åから8Åにわたって一定の位置を示さないもの等が見られる。これらの回折線はエチレングライコール処理で(002)線と共に拡散した形を示し，明瞭に見られた(02)線も帯状回折となる。またDTA曲線は発熱ピークが900°Cに近かく，ピークの高さも低いのが一般である。これらの性質はすでにのべた多くの研究者の報告と一致するものである。なおこれらのハロイサイト系土壌粘土は第8報でのべるように $Ca(OH)_2$ 溶液との反応で7.7Å, 8.2Å, 8.7Å, 9.1Å線等の底面反射を与える鉱物を生成し，それらの構造には何等かの相異のあることを推定させる。

モンモリロナイトを主要組成鉱物とする土もわずかに見られるが，モンモリロナイトがハロイサイト等と共存する場合は相当に多く，モンモリロナイトがハロイサイト等と混合層鉱物を造る場合もしばしば示される。

イライトを主要組成鉱物とすることはまれであるが，ハロイサイトまたはモンモリロナイト等と共に比較的多

表-19 宮城県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量存在するもの	比較的少量存在するもの	AASHO分類	Casagrande分類
宮— 1	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, I	25Å(?), X, Q, F, Ge	A-7-5	CH
〃— 2	X(EG), DTA	H, H-H·H, Mont	21Å(?), Ge(?), Q	A-7-5	ML
〃— 3	X, DTA	K	14Å(?), F, Cris	—	SF
〃— 4	X, DTA	H-H·H	Mont(?), Lep, F(?)	A-7-5	MH
〃— 5	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	Cris, Q, 2.00Å(?)	A-7-5	ML
〃— 6	X(EG), DTA	H-H·H	Mont, Cris, Q	A-7-5	MH
〃— 7	X, DTA	H-H·H	14Å(?), Cris, Q, F, 6.37Å(?)	A-7-6	MH
〃— 8	X, DTA	H, H-H·H	Mont, Cris, 21Å(?)	—	—
〃— 9	X, DTA	A	K	A-5	MH
〃—10	X, DTA	H, H-H·H	—	—	ML
〃—11	X(EG), DTA	Mont, M-K	K	—	ML
〃—12	X(EG), DTA	Mont	K, Mont-?(?), Q	—	ML
〃—13	X(EG), DTA	Mont	K, Cris	A-2-7	ML
〃—14	DTA	H·H	Mont(?)	—	—
〃—15	X(EG), DTA	Mont, K	—	—	—
〃—16	X(EG), DTA	Mont, K	Cris	A-3	SW
〃—17	X(EG), DTA	H, H-H·H	Mont, Cris, F	—	OL
〃—18	X(EG), DTA	H-H·H, Mont, Mont-(?)	X, F, Q	—	SC
〃—19	DTA	K	Mont(?)	A-7-5	MH
〃—20	DTA	H·H	—	A-7-5	MH
〃—21	X, DTA	H-H·H	Mont(?), F, Q	—	SF
〃—22	X(EG), DTA	H-H·H, Mont	Cris, Q	—	—
〃—23	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	Cris, Q	A-2	SW
〃—24	X, DTA	H-H·H	Gib, Cris, Q	A-7-5	MH
〃—25	X(EG), DTA	H-H·H, Mont	Gib, 20Å(?), Q, F	A-7-5	MH
〃—26	X(EG), DTA	H, H-H·H, Cris	Mont	—	ML
〃—27	X(EG), DTA	Mont	H-H·H, Ge	A-4	—
〃—28	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, K	14Å(?), Q	A-3	SU
〃—29	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, H	Q, F	—	—
〃—30	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	I(?), F, Q	A-7-5	MH
〃—31	X(EG), DTA	Mont, H, H-H·H	Q, F	A-7-5	MH
〃—32	X(EG), DTA	H, H-H·H	Mont, Cris	A-7-5	MH
〃—33	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	Q, Cris, F	A-7-5	CH
〃—34	X, DTA	Mont, H-H·H	Cris, F, Q	A-7-5	CH
〃—35	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	X, Cris, F	A-8	PT
〃—36	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, Mont-H·H(?)	—	A-7-6	ML
〃—37	X(EG), DTA	H, H·H, H-H·H, Mont (?), ?(?)	22Å(?), 11.6Å(?), F	A-4	ML
〃—38	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, H	Ch, X, Q, Cris, F	A-7-5	MH
〃—39	X(EG), DTA	Expanding Lattice(?), H-H·H	—	A-2	SP
〃—40	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	Q, F	A-4	ML
〃—41	X(EG), DTA	H-H·H, 15.7Å(?)	F, Q	A-7-6	MH
〃—42	X(EG), DTA	H-H·H	Ch, Mont, Q, F	—	—
〃—43	X(EG), DTA	Mont, I, K	Ch, Q	A-2	SC
〃—44	X(EG), DTA	H-H·H	X, 27Å(?), F, Q	A-8	PT
〃—45	X(EG), DTA	H	—	A-7-6	—
〃—46	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, H	—	A-7-6	—

表-20 福島県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量存在するもの	比較的少量存在するもの	AASHO 分類	Casagrande 分類
福— 1	X, DTA	H·H	Cris	A-1-a	GP
〃— 2	X, DTA	H-H·H, H	10Å(?), 15.2Å(?), A, Q, F	A-5	MH
〃— 3	X(EG), DTA	H, H-H·H	Ch, Cris, Q	A-7-6	MH
〃— 4	X, DTA	H, H-H·H	Cris	A-7	CH
〃— 5	X(EG), DTA	Mont, H·H, H, H-H·H	Cris, Q	A-5	MH
〃— 6	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, Mont-?(?)	Ge, Q, F	A-6	CL
〃— 7	X(EG), DTA	H, H-H·H	Cris, Q	A-7-5	MH
〃— 8	X(EG), DTA	Mont, H-H·H, Mont-H·H(?)	Cris	A-7-5	MH
〃— 9	X, DTA	H·H, H	Gib, Cal	A-2-5	SC
〃—10	X	Mont, H, H·H	10.4Å(?), Q, F(?)	A-2-4	SW
〃—11	X(EG), DTA	A, H-H·H	Mont, H·H, Ch, Gib, Q	A-2-5	SW
〃—12	X	Mont, Mont-10Å	Q	A-2-7	SP
〃—13	X(EG), DTA	H·H, H-H·H, Mont, Mont-H·H	Gib, Cris	A-7-5	MH
〃—14	X, DTA	H·H, H-H·H	Gib, Ge, 14Å(?)	A-2-5	SW
〃—15	X, DTA	H, H-H·H, A	15Å(?)	A-2-7	SW
〃—16	X, DTA	H·H, H	Gib, Ge, Q, I(?)	A-7-5	MH
〃—17	X, DTA	H-H·H, Amorph	Mont(?), Cal	A-2-5	SW
〃—18	X, DTA	X	Gib	A-5	MH
〃—19	X(EG), DTA	H, H-H·H, Mont	14Å(?), Q	A-2-4	SW
〃—20	X, DTA	H·H, H·H-H	—	A-2-5	SP
〃—21	X, DTA	H-H·H, Amorph	—	A-2-5	SP
〃—22	X, DTA	H, H-H·H	Cris, Q, F	A-7-6	ML
〃—23	X(EG), DTA	Mont, H, H·H, H-H·H	Q	A-7-5	ML
〃—24	X(EG), DTA	Mont, H-H·H	I(?), 12.6Å(?), Mont-?(?), Q, Cris, F	A-4	CL
〃—25	X, DTA	Mont, H	Cris	A-7-5	MH
〃—26	X, DTA	H, H-H·H	Q, Cris, 15Å(?)	A-2-7	GC
〃—27	X(EG), DTA	H, H-H·H	Ch, Q	A-2-5	GC
〃—28	X, DTA	H, H·H, H-H·H	Cris, F	A-2-4	SW

表-21 岩手県路床土のコロイド成分組成

試料番号	実験方法	比較的多量存在するもの	比較的少量存在するもの	AASHO 分類	Casagrande 分類
岩— 1	X(EG), DTA	H	Mont, I(?), Gib, Q	A-7-6	ML
〃— 2	X(EG), DTA	H, H-H·H	Mont, 14Å(?), I(?), Gib, Cris, Q, X(?)	A-1-a	GC
〃— 3	X(EG), DTA	H-H·H	Ch, Q	A-7-5	MH
〃— 4	X(EG), DTA	H-H·H	Ch, Q	—	CL
〃— 5	X(EG), DTA	H-H·H, (18.0Å, 9.1Å)?	14Å(?), Q, F	A-1-a	GC
〃— 6	X(EG), DTA	H-H·H, H, H·H	Mont	A-7-5	MH
〃— 7	X(EG), DTA	H-H·H, H	12.2Å(?), Gib, F, I(?)	—	GF
〃— 8	X(EG), DTA	H	H·H, H-H·H	A-7-5	MH
〃— 9	X(EG), DTA	A, H·H-H	X	A-7-5	MH
〃—10	X, DTA	A	—	A-7-5	MH

量含くまれる場合もあり，イライトとその混合層鉱物と推定されるものの混在が見られる場合もある。

クロライトも主要組成鉱物として存在することはほとんどなく，明瞭にその存在が示される場合は比較的多い。クロライトかバーミキュライトか確認できないがモンモリロナイトでない14Å鉱物の混在が示される場合は多く，この点もすでに報告されている。

アロファンも多くの土に見られるがその検出方法が確立されないので不明の点が多い。第8報で報告するように $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物として $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ を与えることが今後の検出反応として利用される。特にハロイサイト系鉱物との共存の下で見逃されやすいアロファンが認められ，このような例は三重県等でしばしば見られる。

粘土鉱物以外のものでジプサイト，ゲータイト，方解石，クリストバライト等が主要組成鉱物の場合もあり，著しく複雑な粘土鉱物組成のためにこの程度の研究方法では同定の不可能の例もしばしば示された。また痕跡程度であるが長週期格子が推定される場合もある。

以上のべたようにわが国路床土の粘土鉱物組成はハロイサイト型鉱物を共通に含有し，その間にもそれぞれ変異が大きく，それらの優勢は認めるが，その他の鉱物種についても多種多様であり，種種の鉱物の共存が一般であり，地域的特性も顕著であるということができる。

〔3〕 路床土中の粘土鉱物種の地域的特性

路床土はそれが生成した母材の上にある場合と，運搬されて現在の位置を占める場合があり，わが国の既設道路の場合は後者の方が多い。わが国の地質，地形は著しく複雑であり，堆積状態も著しく乱だされている。したがって広い視野からみた地域性はもち論のこと，狭い意味での地域性が見出される。岩石の風化により土の生成する場合の支配要因としては気候が最も大きいし，母材のいかんも大いに関係がある。わが国でも気象条件のために東北地方はポドソール化の影響をうけて灰褐色ポドソール土が多く，関東，中央，北陸，山陰地方では褐色森林土が多く，東海，近畿，中国，四国，九州では赤色土が多い。この一般的傾向のほかに火山灰土の場合は特に母材の影響が顕著である。これらの土は自然の力で運ばれて堆積する。このことは地質時代から現在に至るまでつづけられ，さらに気象作用および堆積環境の影響を程度の差こそあり受けてきている。したがって路床土の場合でもその粘土鉱物組成は広域地域的特性および地区別特性も持つであろうし，さらに地質的影響とか母材の影響も見られるであろう。この研究に用いた試料は路線に沿っているし，試料の数も少ないのでこの結果だけで地域性を正確明瞭に示すことはできないが，既往の多くの研究結果とも合致する一応の結果をえたので，これらの点についてのべる。

（1） 宮城県の路床土

宮城県の路床土は主として国道4号線に沿って採取され，それに含まれる粘土鉱物は大部分ががモンモリロナイトをふくみ，ハロイサイト鉱物と共存する。モンモリロナイトまたはハロイサイトが単独で大部分を占めることはまれである。ハロイサイト鉱物の（001）反射は著しく拡散している場合が多く，900°C の発熱ピークは一般に小さい。モンモリロナイトはバイデライト的であり，ジプサイトの含有されることは少なく，クリストバライトが含有される場合が多いのが一般である。

宮城県の路床土試料の大部は沖積層であり（宮—1, 2, 5, 6, 7, 17, 18, 21, 22, 25, 31, 33, 34, 35, 38, 40, 41, 42, 44, 45），洪積層がこれにつぎ（宮—3, 4, 8, 9, 10, 11, 20, 23, 24, 32, 36, 37, 39），第三紀凝灰岩風化物はさらに少ない（宮—12, 23, 15, 19, 26, 27）。また宮—14, 16, 28, 29, 44については明らかでない。宮城県鬼首または松島湾に見られる第三紀凝灰岩がモンモリロナイト化していることは増井[31]により報告されており，広く分布するこの凝灰岩に原因するモンモリロナイトが沖積土に見られると考えられる。

阿武隈川に関係する宮—1, 2, 3, 6, 7 はモンモリロナイトの含量は少なく，ハロイサイト鉱物が多いことが示されるが，福島県の阿武隈川流域の路床土がハロイサイト含量の多いこと，および宮城県南部にまでのびている阿武隈山地の花崗岩等がその基因となっている。宮—8, 9, 10試料もモンモリロナイトの含有が少くないが火山灰または安山岩地帯よりの供給に関係があると考えられる。宮—11, 12はいずれも主としてモンモリロナイトよりなりハロイサイト鉱物の含量は少ないが，凝灰岩の風化土に関係があると考えられる。宮—12, 13, 15, 19, 26, 27は凝灰岩の風化土でいづれもモンモリロナイトを主とし，一部のカオリン鉱物を含くみ，この種粘土は沖積土に対するモンモリロナイトの供給源となっている。宮—20, 21, 22, 23, 25はモンモリロナイトとハロイサイト鉱物を含有し広瀬川流域の凝灰岩に関係があると考えられる。宮—31, 32, 33, 34, 35はモンモリロナイトとハロイサイトをふくみ沖積土として予想される組成となっている。宮—36, 37, 39はモンモリロナイトが一部混合層鉱物として存在し増井[31]の認めるモンモリロナイトとイライトの混合層鉱物を示すとも考えられる。宮—41, 42, 44, 45, 24はハロイサイト鉱物が多くモンモリロナイトは少ない。この沖積土の供給源は花崗岩，安山岩地帯であることに関係がある。

（2） 福島県の路床土

福島県の路床土試料も多くは阿武隈川に沿って採取され，その鉱物組成は阿武隈山地および那須火山帯の影響をうけている。試料は洪積層が多く（福—1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 16, 18），ついで沖積層が多い（福—

2, 10, 22, 23, 25, 27)。第三紀層は試料としては少なく（福—12, 19, 20, 21），花崗岩（福—14, 15, 28），石英粗面岩（福—26），凝灰岩（福—17），集塊岩（福—22），火山噴出土（福—9）よりの残積土試料等も少くない。

これら試料の粘土鉱物組成はモンモリロナイトが優勢の場合も少なく，他はハロイサイト鉱物よりなるが，加水ハロイサイトが単独に明瞭に見られる場合がしばしばである。ハロイサイトの結晶度も宮城県の場合に較べて高かく，DTA 曲線の発熱ピークは 900°C を越す場合が多い。イライトを主要鉱物とする場合はなく，少量のイライトを含む場合もわずかである。モンモリロナイト以外の14Å鉱物の場合もあるが，その含量は少ない。クリストバライトの含有される場合が宮城県の場合より少なく，むしろジプサイトが含有される割合が多く見られる。

阿武隈山地の花崗岩の風化による残積土である福—14, 15, 28 はいづれも加水ハロイサイト，ハロイサイト，それらの混合層鉱物を主とし，モンモリロナイト等はほとんど見られない。石英粗面岩を母材とする福—26 試料の場合は加水ハロイサイトは認めないが，ハロイサイトのほかに一部それらの混合層鉱物が見られる。磐梯火山の噴出土である福—9 では加水ハロイサイトとハロイサイトを主とする。凝灰岩を母材とする福—17試料はハロイサイト鉱物よりなるが，一部のゲル状物質を含有し，モンモリロナイトの存在も推定される。大平洋岸に分布する第三紀砂岩を母材とする福—19, 20, 21試料では福—19がハロイサイト鉱物のほかにモンモリロナイトを含むのに対し，福—20ではモンモリロナイトを含まず加水ハロイサイトが主であり，福—21では結晶度の低くい明瞭な (001) 反射を示さないハロイサイト鉱物を含くみ，14Å鉱物はほとんど見られない。会津若松近郊の第三紀層の残積土である福—12試料ではモンモリロナイトが主であり，一部は10Å鉱物と混合層鉱物を造る。福島県の残積土は花崗岩地帯はハロイサイト鉱物でモンモリロナイトを含まず，第三紀層は宮城県の場合と同様にモンモリロナイトを主とし，さらに火山噴出物や火山灰に起因するハロイサイト鉱物をふくむ。気象条件の変化も地域的に著しい差のあることと共に，沖積層または洪積層よりの土はモンモリロナイトやハロイサイト鉱物のいづれか一方を多く含む場合と両者を含む場合が見られる。

洪積層よりなる路床土については白河市付近の福—1 試料で主として結晶度の高かい加水ハロイサイトが見られ，$Ca(OH)_2$ との反応で水和ゲーレナイトを生成することより火山灰起源と推定され，同様に白河市の路床土で沖積土である福—2 試料は結晶度の低くいハロイサイト鉱物であり比較的新しい火山灰を母材とすると推定される。須賀川市近辺の福—5, 6試料および郡山北方の福—13試料はモンモリロナイトが優勢であり，阿武隈川左岸の第三紀層と関係があると考えられる。福—7 試料は福—3, 4と同様にハロイサイト鉱物を主とする。福—8 試料はモンモリロナイトとハロイサイト鉱物の混合層をふくみ，母材については明らかでないがこの母材の性質がこれらの鉱物組成を生ぜしめたのかも知れない。福—11試料はハロイサイト鉱物の不規則混合層鉱物とアロファンをふくみ火山噴出物を母材とするものであろう。福—16は福—1, 3, 4 と同じように考えられる。

沖積層では福—2 は結晶度の低くいハロイサイト鉱物であり，福—10はモンモリロナイトが主要成分をなし，この付近の第三紀層より供給されたものと考えられる。福島県と宮城県境より福島市にかけての福—23, 24, 25 試料はモンモリロナイトが主要成分をなし，阿武隈川左岸の第三紀層の影響が見られると考えてよい。福島市内の福—27試料はハロイサイトおよびハロイサイト鉱物の混合層鉱物を主とし，阿武隈山地の風化岩より供給されたと推定される。なお福島市内でも福—25と福—27は沖積土でもその鉱物組成が著しく相異し，さらに福—26のように石英粗面岩より生成した土もあり，鉱物組成についてはむしろ福—27に似ている。このように同一地区でもその組成の著しく異った路床土が見られる。

今国道4号線に沿って福島県を北上するとすれば，白河市に入る前に沖積層，洪積層上を通り洪積層(H-H・H H) である白河駅前に至る。須賀川市の洪積層 (H, H-H・H) まで洪積層上を走り，郡山市まで一部沖積層上を走る。郡山市を出て洪積層をして一時阿武隈川河床堆積物上を過ぎ，結晶片岩地帯，花崗岩地帯，安山岩地帯を通り沖積層 (H, H-H・H) である福島市に入り，ここを過ぎてすぐ石英粗面岩の風化帯 (H, H-H・H) を通過し，阿武隈川に沿った沖積層 (Mont, H-H・H) を通り，県境に近づいて凝灰岩の風化土を通り，さらに集塊岩の風化土 (H, H-H・H) を通過する。このように路床土には多様性が見られ，せまい地区内でもここに示したものよりはるかに多くの土性を示すことが注意されねばならない。

（3） 岩手県の路床土

岩手県の路床土試料は主として北上川に沿い国道4号線で採取されている。その鉱物組成は主として北上山地および那須火山帯により影響をうけている。沖積層は河段丘堆積物をふくめて岩—3, 4, 5, 6であり，ついで洪積層よりの岩—1, 2, 8 である。ほかに火山岩の風化土である岩—7，第三紀層の風化土である岩—9，および火山風成層である岩—10試料等がある。岩手県の路床土の鉱物組成の地域性を考えるには試料の数が余りに少ないので，その傾向をのべるに止める。

岩手県路床土よりの試料について見ると，モンモリロナイトを主要成分とするものはほとんどなく，大部分は

ハロイサイトであり，一部の加水ハロイサイトとの混合層鉱物をともない，結晶度も低くい。イライトを少量含むと推定されるものも2例程見られるほかクロライトを少量含むものも見られ，一般に優勢なハロイサイト鉱物のほかに少量のモンモリロナイト，クロライト，イライト等を含有する。クリストバライトを明瞭に示さないことおよびジプサイトがしばしば見られる点も宮城県の路床土と異なる。

盛岡市西部の岩手火山よりの火山灰風化土はアロファンを主成分とすることは関東ロームの場合と同じであり，この種の土は岩手ロームとよばれ岩手県西部にしばしば見られ，そのアロファンとしての代表的のものは北上市の福バン土である。火山灰風化物を混入する第三紀層の風化土とされる岩—9試料はアロファンを主として含有し，一部の加水ハロイサイトを持つ。火山岩の風化土である岩—7試料はハロイサイト鉱物を含有する。洪積層である岩—1，2，3，4，5はいづれもハロイサイト鉱物の混合層を含むハロイサイトが主要成分であり，岩—3，4は少量のクロライトをふくむ。岩—5試料は一部の不明鉱物（18.0Å，9.1Å）をふくむ。盛岡南部の平地およびその周辺の洪積層地帯ではハロイサイト鉱物が主要な成分粘土となっており，もち論一部の14Å鉱物もふくまれる。沖積層としては岩—6の試料のみしか調べてないがハロイサイト鉱物であり，モンモリロナイトはわずかしか含まれない。この供給源については明らかでない。雫石川に沿う洪積層では結晶度の高いハロイサイトが主成分である。

（4）関東地方の路床土

関東地方の南部は三浦半島，房総半島に第三紀層が見られ，北方は火山郡であり，西方は秩父古生層で境されている。東北方では阿武隈山地が南下している。栃木県の西南部，茨城県水戸の西部では古生層も見られる。関東平野はこれらの山地で境され，洪積層の火山灰を起源とする関東ローム層におおわれている。このローム層を利根川始め各河川が解析し，沖積地を造っている。

関東地方の道路はこの平野部に最も発達し，路床土は主として関東ローム層であり，特異の土質をなし，その性質が好ましいものでない点は多くの関心を集めている。関東ロームについては近時地質学的に研究されつつあることはすでにのべたが，現在比較的はっきりしてきたのは主として東京地方であり，関東ローム全体についての研究は今後にまたねばならない。しかし少くとも東京地方では関東ローム層は立川層，武蔵野層，下末吉層および多摩層にわけられ，粘土鉱物は立川層がアロファンであり下層になるにしたがい加水ハロイサイト化することは明らかにされている。関東ローム全体についてこの関係は恐らく成立すると考えられている。したがって路床土を考える場合は主としてローム層の堆積年代によってその組成粘土鉱物が異なることに留意せねばならない。

関東地方の路床土試料としてこの研究に使用したものでは栃木県および千葉県のものを欠くが，関東平野の路床土のうち関東ローム層については東京都，埼玉県のものはもち論のこと群馬県，茨城県および神奈川県のものはいづれもアロファンの優勢のもの，加水ハロイサイトの優勢のもの，加水ハロイサイトの脱水によるハロイサイト鉱物の混合層鉱物の優勢のもの，ハロイサイト鉱物の不規則混合層鉱物の優勢のもの等が共通して見られ，モンモリロナイトまたはイライト等を明瞭に認めるものはほとんど見られない。東京都近辺で見られる関東ローム層中の粘土鉱物の分布の形式は関東ローム全体に適用されるものと推定される。

関東平野に見られる沖積層は沖積土を運搬した河川の流域の地質に影響されることは当然であるが，また土壌侵食をうけやすい関東ロームの影響も顕著に受けると考えられる。このことは埼—6，8，12，群—14，茨—1，8，9，神—1，5等に見られる。沖積土では流域の影響をうける場合も見られ，茨—7はモンモリロナイトを含有し，第三紀層および古生層を流域とする茨—8，9ではDTA曲線からもモンモリロナイトの存在が推定される。

赤城山，榛名山よりの泥溶岩もその崩壊しやすさとも関連してその風化土について関心が持たれるが路床土として採取された試料より推定する限りでは，榛名山のものは群—1，5，7，9に見るようにほとんどハロイサイト鉱物を主とするが，群—5のみは一部のモンモリロナイトを含有する。赤城山のものは群—16に見るようにアロファンを主として一部の方解石を含有するに対し，群—18は14Å鉱物，10Å鉱物が見られ，おそらく風化の時間的過程の差によると推定される。

山岳地方の路床土では第四紀安山岩の風化土（群—8）はハロイサイトと方解石を一部含み，石英安山岩風化土（群—3）はハロイサイト鉱物が優勢であり，黒雲母花崗岩の風化土（茨—6）ではハロイサイトを主とし一部の方解石をふくむ。第三紀層の風化土（群—4）はモンモリロナイトをふくむが，ハロイサイト鉱物が優勢であり，群—10については14Å線は見られない。また第三紀層を流域とする沖積土（茨—8，9）ではモンモリロナイトの存在が推定される。なお三波川層の風化土（群—12）はハロイサイト鉱物を主とする。なお古生層の風化土（東—15）はジプサイトが多いことと，同じ地区の古生層か中生層の風化土（東—3）がモンモリロナイトおよびイライトを多く含むことは特異な例であろう。

関東地方は関東ロームでおおわれ，また火成岩，火山岩類でおおわれる面積が大部分をしめるので，土壌はアロファンと加水ハロイサイト系列のものおよびハロイサイト鉱物を主とするものが多いのが一般である。モンモリロナイト，イライト等の優勢な土は三紀層，古生層，

結晶片岩地帯で恐らく見られると思われるが，今後山岳道路の建設とともにこの種路床土も問題となると考えられる。

（5） 静岡県の路床土

静岡県の路床土試料は主として国道1号線および海岸線に沿って採取されている。静岡県は東部は富士火山帯でしめられ，中部から西部にわたって安部川，大井川，天竜川による沖積平野により主として占められ，御前崎を頂点とする三角地帯では第三紀層または洪積層でしめられ，浜名湖周辺は洪積層および古生層でしめられる。路床土中のコロイド組成の粘土鉱物にはこれらの地形的または地質的影響が見られる。

地域的に限られた路床土試料ではあるが，ハロイサイト鉱物が一般に優勢であり，雲母系の粘土鉱物が優勢の場合が比較的多く見られるのが特徴であり，モンモリロナイトの特に優勢のものも見られる。ハロイサイト鉱物は一般に結晶度もやや高かく，DTA 曲線での 900°C の発熱ピークはやや高温側にあり，しかも600°C の吸熱ピークに比して比較的大きい振幅を持っている。クリストバライトおよびジプサイトの見られる割合は少ない。

試料は沖積層が多く（静—3, 8, 9, 11, 12, 13, 14），洪積層は比較的少ない（静—4, 10, 16）。火山岩および火山砂も東部に限られて少くない（静—1, 2, 5, 6, 7, 15）。

富士火山帯に関係する安山岩の風化土（静—1）はモンモリロナイトが特に優勢であるが，伊豆地方の路床土の特徴かどうかは疑問がある。古富士の溶岩風化土である御殿場土（静—5）では加水ハロイサイトをふくむハロイサイト鉱物が主であり，火山灰層の風化土（静—2）では結晶度の低くいハロイサイト鉱物のほかに相当量の方解石をふくむ。箱根火山噴出物の風化した土（静—6, 7）はいずれもハロイサイト鉱物を主とする。安山岩の風化土（静—15）も静—1と同様にモンモリロナイトが特に優勢であるがその原因については明らかでなく，両者が同じ風化過程でモンモリロナイトを生成するかどうかは現在のところ明らかでない。静—10は洪積層とされるが安山岩の集塊岩の風化土であり，ハロイサイト鉱物を主とし微量の14Å鉱物をもふくむ。静岡県東部の路床土はモンモリロナイトを主とする安山岩風化土も見られるが，多くはハロイサイト鉱物を主とすると考えられる。

中部の静岡市内の路床土（静—13）は安部川の沖積土とされ，イライトが主でありクロライトおよびカオリン鉱物を含くみ，カオリン鉱物はむしろカオリナイトと推定される。静岡市は安部川の沖積地であるから，安部川流域の影響をうけているのは当然であり，これらの粘土を供給したのは安部川流域一帯をおおう古第三紀層によると考えられる。第三紀層の風化生成物にイライトがふくまれることは次にものべるが，供給源をこのように限定することも妥当であろう。

静岡県西部の路床土のうち静—11，12は大田川の沖積土であり，大田川の流域は中生代三倉累層郡でありこの風化生成物と関係があると考えられる。粘土鉱物は複雑で明確にはしていないが，雲母系鉱物であることは十分推定できる。静—14は菊川により掛川層郡より供給された沖積土であり，モンモリロナイトとイライトを主とし掛川層の風化物はイライト様鉱物が主であることはすでに江川[17]により報告されており，その結果とも一致する。モンモリロナイトは沖積後にイライトより変化したものであろう。静—8は地質図では洪積台地をなし，この粘土鉱物も複雑でありクロライトらしいものを相当量ふくみ，雲母系鉱物も存在するらしいがハロイサイト鉱物も多い。この洪積層を造る母材の特殊性と関係があると推定できる。静—3，9はいずれも天竜川の沖積土であり，結晶度の高いイライトを主とし，一部のクロライトをふくみ天竜川流域の結晶片岩との関係が推定される。

洪積層としては静—4，16 があり，静—4は三方原で採取されている。三方原の粘土鉱物としては江川[17]がすでに報告しており，ハロイサイト鉱物を主とするのであるが，この実験結果もそれと一致する。静—16は浜名湖をへだてて三方原と連らなり，その粘土鉱物もハロイサイト鉱物である点は共通している。

静岡県の路床土の粘土鉱物を検索した結果をのべたが，地域的に著しい特性が見られ，それらは主として母材と地質的要因に支配されることを推定した。

（6） 愛知県の路床土

愛知県の路床土は主として濃尾平野で採取され，一部渥美半島および知多半島でも採取されている。したがって試料は名古屋市を中心とする沖積地帯および周辺の洪積層が多く，木曽川，庄内川，矢作川の沖積平野を主とするが，渥美半島の洪積層および知多半島の第三紀層よりの路床土試料もあり，一部は西部の花崗岩地帯および古生層地帯のものもある。

試料は沖積層のものも多いが（愛—6, 8, 9, 10, 11, 17, 18, 26, 32, 36），洪積層のものが最も多い（愛—1, 2, 3, 4, 5, 14, 15, 16, 23, 24, 31, 33）。花崗岩の風化土は少なく（愛—21, 22, 29, 30），古生層の風化土（愛—25, 27, 34），第三紀層の風化土（愛—7, 12, 13, 28），カンラン岩の風化土（愛—19），雲母片岩の風化土（愛—20）等も少ない。

組成粘土鉱物は大部分がハロイサイト鉱物であり，ハロイサイト鉱物以外を主要組成鉱物とするものは愛—31（ジプサイト），愛—20（ゲータイト），愛—11（恐らくイライトおよびゲータイト）等である。ハロイサイト鉱物の結晶度は土壌鉱物としては高かいものが多く見られ，X線分析を行った試料数の約40%に達し，(hk) 線が鮮明さをかくものも約40%であり，この場合は14Å線を

一般に認める。14Å線が弱いがはっきり認められるものは愛—6，8，10，12，16，17，18，26，28，36等である。またジプサイトも比較的多く見られるが，三重県の路床土と比較すればその量も一般に少なく，クリストバライトは見られない。

洪積層土壌で最も新しい熱田層（愛—3，14，16，23，24）は結晶度が高かいハロイサイトで，特に愛—14および23は顕著である。愛—24には一部のイライトが推定される。愛—23，24は高師原土壌であり，この地区の洪積土は三方原の洪積土と共にハロイサイト鉱物を主として含むことは江川[7]等により報告されている。熱田層の下部である八事層（愛—2）も結晶度の高かいハロイサイト鉱物である。八事層の下部である城山層（愛—1）も同様である。城山層の下部である東山層（愛—4，5，15，31，33）は愛—31がジプサイトを主とすることを除けばいずれもほとんどハロイサイト単独であり，その他の鉱物の存在は少ない。愛—31にジプサイトが濃縮する理由は明らかでない。

花崗岩の風化土（愛—21，22，29，30）はいずれも結晶度の高かいハロイサイトが優勢であり，しばしば方解石が含有され，14Å線はほとんど見られない。花崗岩風化土がこのような組成を持つことは十分予期されることである。

古生層の風化土（愛—25，27，34）はカオリン鉱物が主であるが，愛—25では一部のイライトが推定され，愛—27ではモンモリロナイトらしいものの存在が推定され，愛—34でも弱いが10Å線を示し，三重県の路床土の場合と同様に古生層の風化土の一つの性質とも考えられる。

第三紀層の風化土（愛—7，12，13，28）はいずれもハロイサイト鉱物を主とするが，14Å鉱物をも含くむ。愛—12は第三紀でも洪積世に近い尾張炭層であり，DTA曲線にも有機物の存在が見られる。なお雲母片岩の風化土である愛—20は結晶度の低いハロイサイト鉱物であり，ゲータイトおよびヘマタイトを含有し，カンラン岩の風化土である愛—19は結晶度の比較的よいハロイサイトよりなり，一部イライトの存在も十分推定できる。

沖積層でも比較的古い大曽根層に属する愛—6，35ではハロイサイト鉱物が優勢であるが，モンモリロナイトが見られたりまた推定され，イライトの存在も推定され，14Å線が明瞭に見られる。現世の沖積層である愛—8，9，10，11はいずれもハロイサイト鉱物を多く含むが，14Å鉱物が明瞭に示され，イライトの存在が推定される場合もあり，恐らく木曽川流域の地質と関係あるものと考えられるが，堆積環境と関係するのかも知れない。矢作川の沖積土である愛—17，18はハロイサイト鉱物を主とするが，一部の14Å鉱物も存在し，さらに海岸に近い愛—17では雲母系と推定される物質をふくむ。また愛—26はハロイサイト鉱物を主とし，周囲の洪積層より供給されたと推定される。愛—36は海岸に近い沖積土であり，結晶度の低いハロイサイト鉱物のほかに方解石が見られ，モンモリロナイトも存在し，12.6Å線も見られる。

愛知県の道路は主として洪積層と沖積層上にあり，結局濃尾平野に発達し，西方の花崗岩，古生層，第三紀層地帯には余り発達していない。一般的には洪積層は結晶度の比較的高かいハロイサイトが大部分を占め，沖積層では結晶度の低いハロイサイト鉱物のほかに14Å鉱物または雲母系鉱物をふくみ，やや複雑な組成となっている。地質との関係も割合に明瞭に見られることは一つの特性であろう。

（7）　三重県の路床土

三重県の路床土は主として海岸平野部と河川に沿った道路で採取されている。鈴鹿山脈が西方を南北に走り，地質的には中央構造線が東西に走り，主要河川は西から東に流れる。地質は南部から第三紀層，中生層，古生層，結晶片岩地帯，深成岩地帯となっている。路床土の粘土鉱物にはこれらの地質的または地形的影響が見られる。

地域的に限られた路床土試料ではあるが，ハロイサイト鉱物がほとんどの試料で優勢であり，約70%にはジプサイトが検出される。X線分析で認められる程度の14Å線を示すものは約53%であり，明瞭に認められるものは15%，明瞭でないものは38%である。このうちクロライトと考えられるものは三—3，9，16，25，38等であり，モンモリロナイトと考えられるものは三—5，7，24等である。そのほかのものについてはこの実験では確認していないが，モンモリロナイトではないものは三—14，29，32，35，42等であり，それ以外は確認していない。イライトまたは加水雲母系鉱物が推定されるかまたは見られるのは約25%であり，イライトの明瞭なものは三—33，38，42試料であり，12Å～13Å線を示すものは三—20，39，46，49試料等である。

ハロイサイト鉱物も7Å線が低角側に拡散しているのが一般であり，結晶度の低いハロイサイトのほかにハロイサイト鉱物の混合層鉱物が一般に存在する。X線回折図からは（02）線，（13）線のみは明瞭でありその他の（hk）線は鮮明さをかく。

試料は沖積層のものが多く（三—3，7，10，12，24，28，32，33，34，37，38，40，41，42，43，45，46，47，49），洪積層がこれにつぐ（三—6，9，11，14，18，21，22，25，30，35，39），第三紀層のもの（三—2，5，25，26，31），古生層のもの（三—3，4，20，29，36）結晶片岩風化土（三—21，34，35），花崗岩風化土（三—8，13，17，44），緑色岩風化土（三—16，23）と考えられるものは比較的少ない。

志摩半島地域の路床土試料（三—3, 14, 18, 22, 27, 30）は三—3を除いて洪積層に属し，洪積層に属するものはいずれも比較的結晶度の高いハロイサイトを持ち一部のハロイサイト鉱物の混合層をふくむ。しかし三—14はモンモリロナイトではない14Å鉱物を明瞭に示し，三—22は10Å線を明瞭に示す。これらの原因については明らかでない。現世の沖積土である三—3はハロイサイト鉱物のほかにクロライトをふくみ，その起源が周囲の古生層の風化物によると推定されることに関係があるのかも知れない。

宮川流域の路床土試料は三—9, 20, 21, 35, 36である。宮川の最上流部の流域は中生層であり，ついで古生層となり，中流部よりは結晶片岩地帯となり，この流域には花崗岩はほとんどない。三—21は結晶片岩地帯にあるが洪積層でありハロイサイト鉱物よりなり，三—20は現世の沖積土であり古生層が流域をなし，ハロイサイト鉱物のほかに14Å線および12.6Å線を示す。三—36は古生層の風化土であり，カオリン鉱物と14Å鉱物を示し，10Å鉱物も一部存在する。三—35はこの流域内の洪積層でありハロイサイト鉱物のほかにイライトが存在すると考えられる。三—9も洪積層であり上流は主として中生層であり，採取点の周辺は古生層であり，ハロイサイト鉱物のほかにクロライトらしい鉱物をふくみ結晶度は低くい。山間部では，ハロイサイト鉱物のほかに14Å鉱物および10Å鉱物がふくまれているのは地質との関係を推定させると考えられる。

櫛田川の上流は一部の古生層地帯を除き大部は結晶片岩であり，中流部に至り北方の花崗岩地帯が流域となる。平地部にでるところも花崗岩地帯である。三—49は上流部の結晶片岩地帯より供給された沖積土と考えられ，14Å鉱物と12Å鉱物をふくむことは流域の地質と関係がある。三—34も沖積土であり一部の花崗岩地帯を流域とするがハロイサイト鉱物のほかにイライトを認め14Å鉱物も見られ，流域の結晶片岩地帯の影響を示すと考えられる。三—37はハロイサイトを持ち花崗岩地帯の影響が見られると考えられる。三—33, 38, 42はいずれも海岸に近い現世の沖積土でありイライト，クロライトおよびカオリン鉱物が見られ，結晶片岩地帯の影響か海中での堆積環境が原因なのかは明らかでない。

雲出川は上流部は花崗岩地帯であり，中流部は第三紀層である。花崗岩の風化土である三—13, 17, 19はハロイサイト鉱物を主とし，第三紀層の風化土である三—5, 31はイライト，モンモリロナイトが明瞭であり，現世の沖積土である三—10, 32, 47はハロイサイト鉱物を主とし上流部の花崗岩地帯よりの供給と関係するものと推定される。第三紀層の影響も三—32には見られ，一部の14Å鉱物を含有するのかも知れない。三—12は海岸部の沖積土でありハロイサイト鉱物のほかに，モンモリロナイトおよびモンモリロナイト以外の14Å鉱物をふくみ，流域の地質の影響か海中堆積の影響かは明らかでない。洪積層である三—11はハロイサイト鉱物であり，三—25は少量のクロライトを含くみその原因等は明らかでない。

鈴鹿川は上流部が花崗岩であり，中流部以下で新第三紀層である。新第三紀層の風化土である三—2, 26はハロイサイト鉱物よりなり，現世の沖積土である三—28は花崗岩地帯の影響をうけハロイサイト鉱物よりなる。海岸部での沖積土である三—24はモンモリロナイトを含有する。洪積層である三—6はジプサイトが優勢であり，その原因については明らかでない。

町屋川の流域は古生層および第三紀層であり，沖積土である三—4, 29, はいずれも14Å鉱物，10Å鉱物を含有する。朝明川流域の沖積土である三—1は花崗岩地帯の影響をうけハロイサイト鉱物とジプサイトよりなり，一部古生層の影響をうけると考えられる三—15は一部の14Å鉱物をふくむ。海岸部の沖積土である三—7はモンモリロナイトを含有する。

木津川は上流部の流域は主として花崗岩であり，一部が第三紀層および第三紀安山岩である。花崗岩地帯よりの沖積土である三—40, 43, 45はいずれもハロイサイト鉱物よりなり，結晶度も高かく7Å線は明瞭である。沖積土でも三—46のように流域に第三紀層のある場合は，ハロイサイト鉱物のほかに16Å, 14Å, 12Å, 10Å線が見られる。花崗岩の風化土である三—44はハロイサイト鉱物を主とし，一部ゲータイトが見られる。

このほか緑岩類の風化土である三—23では結晶度の低くいハロイサイト鉱物とゲータイトが見られ，カンラン岩の風化土である三—16ではハロイサイト鉱物のほかにクロライトが多く見られる。古生層の風化土である三—3はクロライトの相当量が含まれ，同様な試料である三—20では14Å線と13Å線も見られる。花崗岩の風化土である三—8では一部の14Å線も見られるが，主としてハロイサイト鉱物であり，ジプサイトも含む。洪積層である三—39はハロイサイト鉱物のほかに13Å線を見る。

以上三重県の路床土についてのべたが，現在の海岸部に見られる沖積土は流域の地質に関せずいずれもモンモリロナイトを含有し，志摩半島地区では比較的結晶度のよいハロイサイト鉱物が優勢であり，平地部の沖積土では比較的流域の地質に起因すると推定される組成を持ち，山間部の現河床に関係のある沖積土では地質との関係が相当明瞭に見られる。洪積層ではハロイサイト鉱物を主とするが，一部にクロライトらしい鉱物とイライトらしい鉱物を含む場合が多い。また花崗岩の風化土ではハロイサイト鉱物を主として一部のジプサイトが含有されることは共通であり，古生層の風化土またはその影響をうけたと推定される場合は，14Å鉱物（恐らくクロライト）および恐らくイライトをふくみ，結晶片岩よりの

風化土でもクロライトおよびイライトと推定される鉱物を含むことは共通している。第三紀層の風化土はモンモリロナイトおよびイライトを含む場合もあるが，これらをかく場合もあり，両者はいずれもそれぞれ地域的には同じである。このほかカンラン岩の風化土にクロライトが見られ，緑色岩類の風化物には比較的多くのゲーライトも見られる。

〔4〕 粘土鉱物と土質試験結果との関係について

粘土鉱物の種類が土質試験結果と関係のあることはすでにのべたし，この関係がわが国路床土の性質にどのように該当するかを考察するのが本調査研究の目標の一つでもある。ここでは路床土の粘土鉱物について検索した結果と“工学的土性図の作製”の際供試路床土について行なはれた土質試験の結果とを対照し検討を加える。

土質はすでにのべたようにその粒度組成，粘土鉱物の種類，その表面に存在する交換性イオンの種別，有機物の量と性質，土壌水の組成等により支配されるので，ここで対象とする粘土鉱物の種類とは必ずしも一義的の関係は見出しえない。また同一の粘土鉱物でもその結晶度によっても，活性のある異種の粘土鉱物の混在によっても相当に水に対する行動は異なるので，ここにのべた目的にかなった相関性は必ずしも見出されがたい点は認めねばならない。今後これらの点については実験の精密さを加えることにより解決にふみこむべきであろう。しかしながらここにえられた結果でもある程度両者の関係を知ることができるのでこれらの点について検討を試みる。

関東ロームが特異な土質であり，土木の分野では好ましい性質を持っていないことはすでに知られている。われわれの日頃の経験でも乾燥季には黄塵万丈となり寒冷季には霜柱が生じ，降雨季には泥状となる。土質としても簡単にいえば，塑性が大きすぎ粒度も細かすぎ，自然含水比は100%を超える場合も多く，γ_d も小さく0.5～0.7ton/m³程度である。また自然乾燥状態から含水比を大きくすると試験時の含水比により塑性指数も大きくなるが，特に液性限界は大きくなり，一定の液性限界を持たない。最適含水比も大きい。このような性質が何により出現するかは関東ローム中の粘土鉱物に関係があり，主要粘土鉱物であるアロファンの特異な性質に基づくのである。アロファンは火山灰の風化により生成する粘土鉱物であり，わが国と同様な火山国である New Zealand でもアロファン粘土の特異な土質についてよく研究されている。たとえば Gradwell[53] の研究によればアロファンは比表面積が著しく大きく，多量の吸着水を持ち，緩除に可逆的にゲル化する性質を持ち，これらの性質がこの粘土の土質として圧縮率が大きく，空隙比が大きく，塑性限界が大きく，圧密されやすくしているとのべている。アロファンの結晶構造の特異性がこのような土質を与えることは，その機構の詳細は明らかではないが十分考えられることである。またアロファンは有機物を吸着する性質も顕著であるから，有機物の存在が土質に影響している点も大きいと考えられる。

すでにのべたように東京近辺で見られる関東ローム層では下層の方になるとアロファンより加水ハロイサイトに変ることが知られている。関東ロームを路床土とする場合たとえば多摩ローム層のようにアロファンを主成分としない粘土も見られるのであるが，土質が層別にどのように変化しているかその規則性については明らかにされていない。しかし関東ロームの土質は採取場所で著しい変動が見られるが，その性質は共通していることが知られている。このことはアロファンより変化した加水ハロイサイトの結晶度が著しく低くいことと一部のアロファンが残存することによると考えるべきであろう。一部のアロファンの共存は現在の実験方法では検出が容易でなく見逃されている場合が多いのであるが，$Ca(OH)_2$ との反応による Hydrated Gehlenite の生成を利用してアロファンの共存を知りうることについては別にのべる。

東京近辺を除いた関東平野に見られる関東ローム系路床土は，この実験によれば大部分がアロファンを含有するが，古い堆積層では恐らく加水ハロイサイト化しているであろう。このことは土質を考えるとき考慮せねばならない点であろう。

なおアロファンの加熱による脱水速度，加水ハロイサイトの加熱によるハロイサイト化が不可逆反応であること，加水ハロイサイトのハロイサイト化は100°C 以下で起ること等は，アロファン系土質の含水量を測定するときに考慮されねばならない問題であろう。

東北地方（宮城県，福島県，岩手県）の路床土の土質と粘土鉱物について検討を試みる。試料路床土中に検索された粘土鉱物は宮城県ではモンモリロナイトを含有するものが著しく多く，福島県ではハロイサイト鉱物を主としモンモリロナイト等を余り含くまないものが多く，岩手県でもハロイサイト鉱物を主としている。これらの特徴が土質にも見られることが期待される。

粘土分の比較的多い宮城県の路床土試料についてのべれば，塑性図より見れば特に異常なものと考えられるものは割合に少くない。LL が50%より低くいものはほとんど見られず，特に LL の大きい宮—31，33，35等はいずれもモンモリロナイトの多いものであり，PI の著しく小さい宮—9はアロファンを含有するものであり，PL は比較的に大きい値を示す。最適含水比は30より大きいものが多く，収縮限界も 30 より大きいものが多い。LL と粘土の含有量の比および PI と粘土の含有量の比はモンモリロナイトでは一般に大きいとされており，この関係は一応認められはするが宮—33，34，38等は例外であり，粘土の含有量は少なくても これらの値が大きいも

の，またはハロイサイト鉱物が主要組成をなしてもこれらの値が大きいものも認められる。これらの点についてはさらに検討する。また宮城県の路床土は AASHO の分類によればA—7に属するものが多い。

福島県の路床土の土質は塑性図より見れば LL に対して PI が小さいことを特徴としている。最適含水比は多くは30%以下であり，収縮限界も30%以下のものが大部分である。PI が20以上のものは福—3，4，13，25の4試料のみである。塑性図と含有粘土鉱物の間にも概略的の相関性が見られ，結晶度の低くいハロイサイト鉱物を主成分とするもの（福—2，11，14，17，18，21，27）は PI が少さく，加水ハロイサイトを主とするもの（福—9，16，20）も PI は小さい。結晶度のいずれかといえば高かいもの(福—19，22，26)またはハロイサイトと加水ハロイサイトの混合層鉱物として明らかなもの（福—3，4，7，13，15）は LL の割合には PI が大きい傾向は認めうる。モンモリロナイトを比較的多く含むもの（福—5，8，10，23，25）またはイライトをも含むもの（福—2，12，24）等は特に PI が大きいとはいえない。おそらくモンモリロナイトと共存するハロイサイト鉱物の影響が大きいものと考えられる。福島県の路床土と宮城県の路床土とは土質と含有粘土鉱物に著しい差があり，これらは前者が粘土の含有量が少なく後者は含有量が多いこととも関係あると思われるが，前者が主として洪積層でモンモリロナイトが少なく，後者が主として沖積層でモンモリロナイトが多いことも一つの原因と考えられる。

福島県の路床土の粒度試験結果では粘土が含有されていないものが多い，それにもかかわらず LL が相当に大きい例が多い。LL は粘土の量により相当支配され，PI も同様であることは異論のないところであり，粘土量の少ない点はある程度 PI の小さいことと関係するが，LL の大きいことの説明は困難である。この説明としては試験結果では粘土量は0とされているが，少量が存在し，それらが著しく活性に富むことに起因すると推定できる。同じ粘土鉱物でも熱水性鉱物のように結晶度の良好なものと土壌粘土はコンシステンシーに対する影響は相当の差異があると考えるべきであろう。特にわが国の土壌粘土のようにハロイサイト鉱物の混合層鉱物を主とするものではこのような特性を持つと推定すべきものと考える。

なおアロファン，モンモリロナイト，Xを含む土（ある種類の有機物をふくむと推定される）は締固めの試験における最高乾燥密度が比較的少さい傾向がある。

静岡県の路床土の土質試験結果と粘土鉱物の関係を見れば，試料数もそれ程多くないことも原因と思われるが明確な相関性は示さない。しかし次に示すように一応の傾向は認めうると考える。静岡県の路床土で土質試験資料をそなえたものは土壌粘土がハロイサイト鉱物を主とする静—4，5，6，7，10，16，イライト系鉱物を主とする静—3，9，11，12，14（静—13は有機質土であり除外する），モンモリロナイトを主とする静—1，15，および無定形物質をふくみアロファンの存在も推定される静—2に分けることができる。ハロイサイト鉱物を主とするものは LL/粘土含量および PI/粘土含量の値がイライト系鉱物を主とするものに比して小さい傾向を示す。またモンモリロナイトを主とするものはこの値がいずれも相当に大きいことが示される。塑性図上ではイライト系鉱物を主とするものはA線より上方に存在し，この方がハロイサイト系鉱物を主とする粘土をふくむ土より被圧縮性も大きく，最高乾燥密度は大きい傾向が示される。収縮限界と粘土含量の比もイライト系鉱物を主とするものはハロイサイト鉱物を主とするものより大きい傾向を示し，モンモリロナイトを主とする方がなお大きい傾向を示す。モンモリロナイトを主とする静—1，15はいずれも最適含水量は少ないのであるが，最高乾燥密度は静—15のように明瞭に小さい値が見られるにもかかわらず，静—1では大きい値となつている。この点については明らかでないが，静—1試料は粒度分析では粘土含量が0とされるように，粒度組成が大きく関係していると推定される。静—2は無定形物質をふくみ，その自然含水比は大きく被圧縮性も大きい。モンモリロナイトをふくむ土は自然含水比は大きい。またハロイサイト鉱物のほかに明らかにクロライトらしい14Å鉱物をふくむ静—8は，イライト系鉱物を含有するものよりやや活性であると推定される。

愛知県路床土の土質試験結果と含有される粘土鉱物の関係を検討しても試料数が少ないので明確さをかく点もあるが，一応定性的には次にのべるようである。愛知県路床土試料は砂質または砂質ローム等のものが多く，粘土含有率が10% のものは愛—36であり，8%のものは愛—6，32であり，4～6% のものは愛—1，2，5，8，30であり，これ以下のものは愛—9，15，18，23であり，ほかはいずれも粘土の含有はなしとされている。また粘土鉱物について見るとモンモリロナイトが明瞭に認められるか推定されるものは愛—6，7，27，36等であるほかは，主としてハロイサイト鉱物であり，このハロイサイト鉱物でも比較的結晶度の高かいハロイサイトがしばしば見られるほか，ハロイサイトと共に混合層鉱物を含む場合が多い。愛知県の路床土試料の多くは AASHO 分類によればA—5以下であり，A—6以上のものは愛—1，2，5，12，16，17，19，24，27 である。愛知県の路床土がこのように分類されるのはその粘土含有量の少ないことによるのではあるが，その構成粘土鉱物が主としてハロイサイト鉱物であることにもよると考えられる。

愛知県の路床土が粘土の含有量の少ない場合の多いこ

とは福島県の場合と同じであるが，両者の相異は福島県の場合はハロイサイト鉱物のほかにモンモリロナイトを含む場合の多いのに比べて愛知県の場合はモンモリロナイトを含む場合がまれであることである。両者の相異はLLでは愛知県の場合が50を超えるものが約1/3であるに対し福島県の場合は2/3であり，愛知県の場合はLLが40以下のものも多いが福島県の場合は40以下のものはほとんど見当らない。また愛知県の路床土のPIは福島県のものが比較的小さいのに比べれば，いずれもやや大きい傾向を認めうる。この関係はどのように解釈されるべきかについては現在論及する資料が不足しているが，次のような考え方もありうると考える。すなわち土壌コロイド中のハロイサイト鉱物はLLに比してPLが小さく，PIが比較的大きいのであるが，これにモンモリロナイトが共存するとLLを増加させる割合よりむしろPLを増加させる割合が大きいように作用しPIは小さくなり，モンモリロナイトの量が多くなればLLの増加の割合が大きくなってPIは大きくなると考える。愛知県の路床土試料でも粘土の含量より考えればPIは相当に大きく，わが国土壌粘土の活性度の大きいことが推定される。この点については土壌粘土と$Ca(OH)_2$との反応の項で触れるが，比較的結晶度が高かい粘土でも$Ca(OH)_2$との顕著な反応を認めうることと関係がある。

愛知県の路床土は大部が最適含水比は20%以下で福島県の場合の20%以上とは異なり，最大乾燥密度はいずれも大きく，1.5以下のものはほとんど見当らない。また愛知県路床土の場合は収縮限界は最適含水比よりいずれも大きいのであり，この点福島県の場合のように収縮限界の方がむしろ小さい場合がしばしば見られることと異なる。

三重県の路床土の土質試験結果と含有される粘土鉱物組成との関係は，土質試験が実施されたものは三—1，7，8，13，14，20，21，35，36，41，43，46であり，試料数も少なく明瞭さをかく。いずれの試料土も一部の粘土分を含有している。三重県の路床土中の粘土鉱物は地質的の影響を顕著にうけていることはすでにのべたところであり，ハロイサイト鉱物を主とするが，モンモリロナイトを含有するもの，クロライト，イライト等を含むものも多いがジプサイトを含むことは一般的であり，この試料群の内ではイライト系鉱物を含むものが多い（三—20，21，35，36，41）。土質試験結果との相関性については定性的に次のように考えられる。モンモリロナイトを含む三—7を除いてはPIは余り大きくはなく，いずれも30以下であるがPI/粘土含有量率は2～5程度で割合に大きい。愛知県の路床土の場合でも粘土含有率が著しく小さくても相当の塑性を示し，土壌粘土の活性度が高かいことはすでに触れたが，三重県の場合でも同様にいえる。最大乾燥密度は1.5以下のものは三—7を除いてない。収縮限界は比較的大きい。

〔VI〕結　　言

わが国の路床土中の粘土がどのような粘土鉱物組成をもつか，さらに土質との間にどのような関係があるかを知る目的で，関東地方（東京都，神奈川県，埼玉県，群馬県，茨城県）東海地方（静岡県，愛知県，三重県）および東北地方（福島県，宮城県，岩手県）の路床土約250試料について1μ以下の粘土を分離し，この粘土についてX線回折およびDTA法で粘土鉱物を検索し，土質試験結果との関係を考察した。なお試料路床土としては“工学的土性図の作製”に使用されたものを用いた。

粘土鉱物の検索方法としてはここに用いた方法のみでは粘土鉱物学的に不十分であり，推定すら不可能の場合もある。しかしここにえられた結果だけからでも多くの知見がえられるし，本研究の目的も一応果たしうると考える。研究結果については種種検討し考察を加えたが，ここにその結果の概要をのべる。

路床土中の粘土の鉱物組成はわが国の土壌粘土に認められているようにハロイサイト鉱物が共通して存在し，それらが優勢である。その結晶度は一般に低く，ハロイサイトと加水ハロイサイトとの混合層鉱物がハロイサイトと共存する場合が一般である。ハロイサイト鉱物のほかにモンモリロナイト，イライト，クロライト等を副成分としてふくむことも多く，これらが主要成分となる場合もしばしば認められる。アロフェンを主要組成鉱物とする場合も多く，またジプサイト，ゲータイト，方解石の優勢の場合もまれに見られる。これらの鉱物組成は地域的にも地質的にも密接な関係があることを知ることができた。地域性を考えた場合は地質的の影響が大きいのであるが，たとえば東北地方特に宮城県の路床土はモンモリロナイトを含む場合が多く，クリストバライトも一般的に含くみ，これに対し三重県の路床土ではモンモリロナイトを含くむことが少なく，一般にジプサイトを含くむ。関東平野ではアロフェンが主要鉱物であり，加水ハロイサイトもしばしばアロフェンと共存する。地質との関係は母材の影響が顕著であり，関東ローム等の火山灰源の土ではアロフェンと加水ハロイサイトを主とし，沃積層はハロイサイト鉱物を主とし，第三紀層ではモンモリロナイトおよびイライトをハロイサイト鉱物とともにふくむ。古生層の風化した土ではハロイサイト鉱物のほかに一部の14Å鉱物をふくむ場合が多い。花崗岩類の風化土では比較的結晶度のよいハロイサイトを含む場合が多く，ジプサイトが共存するのが一般である。沖積層ではそれが運ばれてきた流域の地質的環境をうけるが，モンモリロナイトまたはイライトを含む場合が多く，とくに海岸に近い沖積土ではイライトを含む場合が一般で

ある。

わが国の道路が沖積層，洪積層，火山灰層，第三紀層上に発達している場合が多い現状であることは，路床土の粘土鉱物をある程度限定するものであろうし，地質的環境より粘土鉱物を推定することもある程度可能であろう。

土の力学的性質が土壌粘土の粘土鉱物と密接な関係のあることは明らかにされているのであるが，土の粒径分布，有機物の含量と種類，粘土鉱物の交換性イオン等の要因も関与するので，粘土鉱物と力学的性質の関係は一義的には定まらない。本研究においても両者の関係を明確には示しえなかつたが，定性的には両者の密接な関係を知ることができた。

土はその粘土含有量が著しく少ないと塑性を示さないとされているが，土質試験結果で粘土分がないとされるものでも相当の塑性を示している。少量の粘土の存在でも土の塑性に強く関与しているものと考えられ，粘土は著しく活性を持つと考えられる。わが国の土壌粘土が一般に結晶度の低いハロイサイト鉱物であり，その存在が土に塑性を与えるものと推定する。 PI/粘土含有率は例外もあるが一般にモンモリロナイト，ハロイサイト鉱物，イライトの順であり，収縮限界/粘土含有率はモンモリロナイト，イライト，ハロイサイト鉱物の順を示す傾向が見られる。モンモリロナイトをふくむ土は最適含水比が大きい傾向があり，アロファンおよびモンモリロナイトをふくむものは自然含水比が大きく，また締め固め試験での最大乾燥密度は小さい。イライトを含むものはハロイサイト鉱物をふくむものより被圧縮性が大きく，最大乾燥密度も大きい傾向が見られる。アロファンは少量含有されても PI を大きくし，関東ロームの土質の特異性はアロファンによるものである。さらに土を AASHO の分類で示した場合，粘土がモンモリロナイトを相当量含むときはA—6，A—7と分類されることが多く，モンモリロナイトが少なく主としてハロイサイト鉱物の場合はA—5以下と分類されることが多い。アロファンを主とする場合もA—6以上となるのが一般である。

以上に概括したように本研究で取り扱った試料路床土では，その土質力学的性質は一般に路床土の地質的および地域的環境により支配されることが示される。路床土試料は主に既設道路に沿って採取されているので，山岳道路等が問題となる場合は岩石の風化土の場合が多く気象条件も関係するので，ここにのべた状況とは相異することも想定される。しかしこの研究でえられた結果の平面方向，垂直方向および母材についての考慮によつて粘土鉱物について推定することも可能であろう。また今後土の化学的安定方法を研究する場合は，モンモリロナイトとアロファンがその対象となることを認めた。

参考文献

1) 星埜和，建設技術研究補助金による研究報告抄録 昭26，67
2) 星埜和，〃 昭27，41
3) 星埜和，〃 昭28，113
4) 谷藤正三，第2回日本道路会議論文集 昭29，205
5) 三木五三郎，第3回日本道路会議論文集 昭30，481
6) 川村一水，船引真吾，土肥雑，10，281，1936
7) 須藤俊男，粘土鉱物（岩波書店），1953
8) T. Sudo, Clay Mineral Bull., 2, 96, 1953
9) S. Aomine, N. Yoshinaga, Soil Sci., 79, 349, 1955
10) I. Kanno, 6 th. Intern. Congr. Soil Sci., Paris, E 105, 1956
11) 青峯重範，土肥誌，28，508，1958
12) 菅野一郎，桑野幸男，科学，27，253，1957
13) 菅野一郎，粘土科学の進歩（1） 213，1957
14) 土屋滝雄，倉林三郎，粘土科学の進歩(1) 113，1957
15) 土屋滝雄，倉林三郎，粘土科学の進歩(2) 178，1958
16) 松井健，桑野恵子，資科研彙報，45，33，1957
17) 江川友治，渡辺裕，佐藤昭夫，農技研報 B, No. 5, 39, 1955
18) 青峰重範，和田光史，九大農学芸誌，14，377，1954
19) 山内豊聡，田中信也，土木学会誌，39，437，1954
20) 弘法健三，藤沢徹，日本塩学会誌，11，50，1957
21) 松下勉，高柳淑子，粘土科学の進歩(1)，121，1957
22) 内山修男，鬼鞍豊，土肥誌，24，307，1954
23) 内山修男，鬼鞍豊，土肥誌，26，318，1956；26，471，1956
24) 菅野一郎等，土肥誌，29，480，1958
25) 菅野一郎等，土肥誌，28，227，1957
26) 菅野一郎等，土肥誌，29，197，1958
27) 原田光，土肥誌，23，273，1953
28) 菅野一郎，本荘吉男，有村玄洋，土肥誌 27，355，1956；27，358，1956
29) 菅野一郎等，土肥誌，27，287，1956
30) 松井健，加藤芳郎，資源研彙，39，1，1955
31) 増井淳一，土肥誌，28，351，1957
32) 増井淳一，土肥誌，24，277，1954；24，313，1954
33) 増井淳一，土肥誌，26，15，1955
34) 増井淳一，土肥誌，27，72，1956
35) 菅野一郎等，土肥誌，28，55，1957
36) 菅野一郎等，土肥誌，29，57，1958
37) 菅野一郎等，土肥誌，29，233，1958
38) 菅野一郎等，土肥誌，28，1，1957
39) 菅野一郎等，土肥誌，28，51，1957
40) 原田光，農化，26，519，1952；26，577，1952

41) 原田光，農化，27，327，1953；27，448，1953
42) 原田登五郎，久津那浩三，農技研報，B, No.5，27，1955
43) 塩入松三郎，土壌肥料講話，p14，1953 朝倉書房
44) 中尾清蔵，地質雑，44，413，1937
45) 原田正夫，東大農土壌肥料教室モノグラフ No.1
46) T. Seki Proc. 2 nd Intern. Congr. Soil Sci. Commision V, 141, 1930
47) 塩入松三郎，日本学術協会報告，10，694，1934
48) T. Sudo Clay Min. Bull. 2, 96, 1954
49) T. Sudo Sci. Rep. Tokyo Kyoiku Daigaku. Section C. 5, 39, 1956
50) 関東ローム研究グループ，地質雑，62，302，1955；64，294，1958
51) 小坂丈予，粘土科学の進歩，2，339，1958
52) M. Fieldes, New Zealand J. Sci. Tech. 92, 336, 1955
53) R. Mackenzie, Problems of Clay and Laterites Genesis p65
54) 和田光史，粘土科学の進歩，2，263，1958
55) T. Sudo, H. Takahashi, H. Mitsui, Nature 173, 261, 1954
56) T. Sudo, Min. J. No.-1, 66, 1953
57) 須藤俊男，粘土鉱物，岩波書店
58) M. Gradwell etal, New Zealand J. Sci. Tech Section B. No.-2, 108, 1954

この研究を実施するに当り“本部主要道路の工学的土性図”の作製に参加された里基和先生を始めとする諸先生から試料の送付を願った。諸先生に感謝の意を表する。

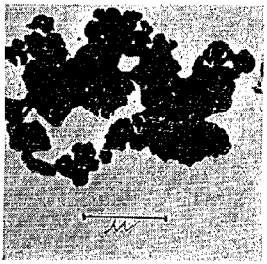
また示差熱分析を主として担当した岩村俊司氏，X線回折を主として担当した藤崎邦弥技官，牧脇正研究員，分析を担当した牧脇正研究員の諸氏を始め，試料からの粘土の分離操作に参加された多くの学生諸君ならびに化学研究室の皆様に感謝の意を表する。

電子顕微鏡写真は日立製作所中央研究所，日本セメント社研究所，宇部興産社中央研究所の好意によりえられた。感謝の意を表する。

この研究の一部は日本化学会年会（1955）において発表し，また第4回道路会議（1957）および第6回道路会議（1961）においても発表した。

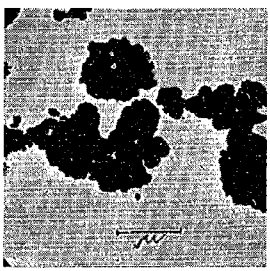
東—1—a

東—2—a

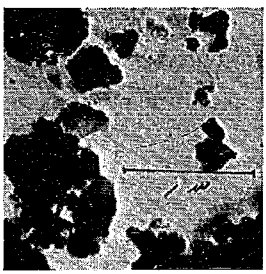


東—2—b

東—3—a

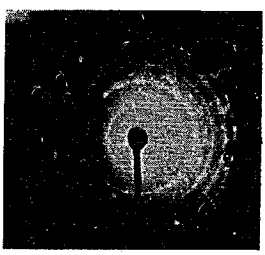


東—3—b

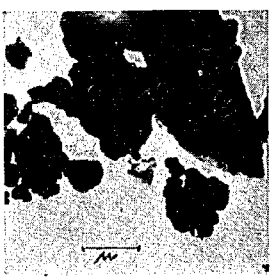


東—3—c

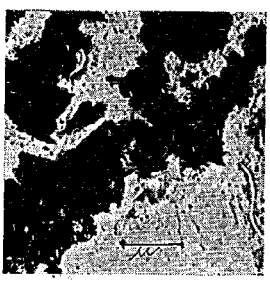
東—3—d



東—4—a

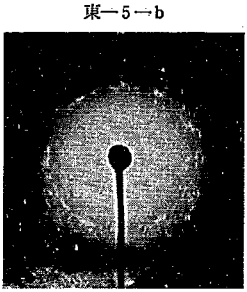


東—4—b



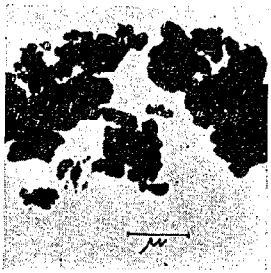
東—5—a

東—5—b

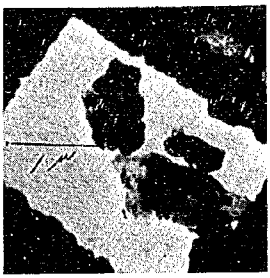


東—6—a

東—7—a

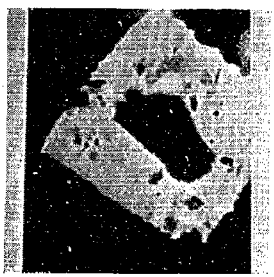


東—7—b



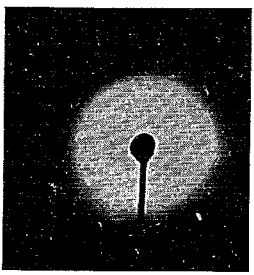
東—7—c

東—7—d

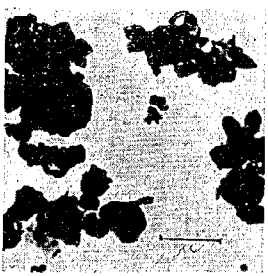


東—7—e

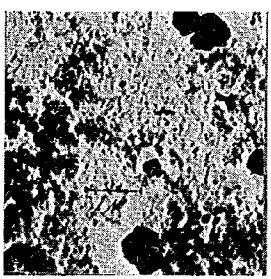
東—7—f



東—8—a

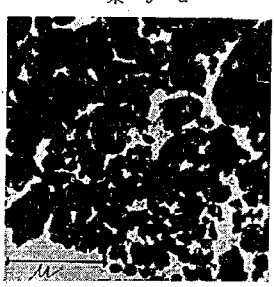


東—8—b

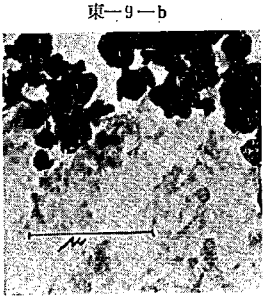


東—8—c

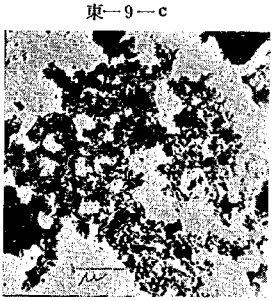
東—9—a



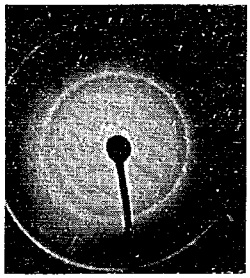
東—9—b



東—9—c

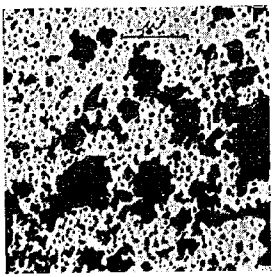


東—9—d



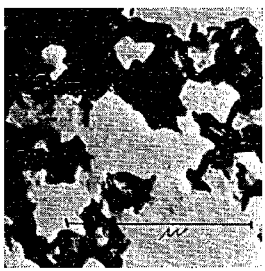
東—9—e

東—9—f

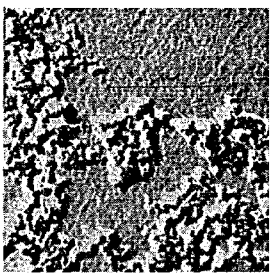


東—14—a

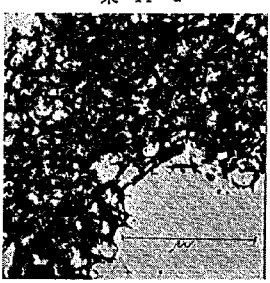
東—14—b



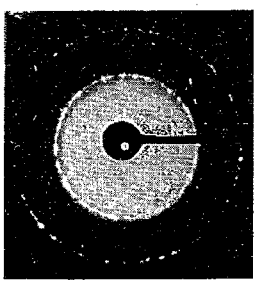
東—14—c



東—14—d

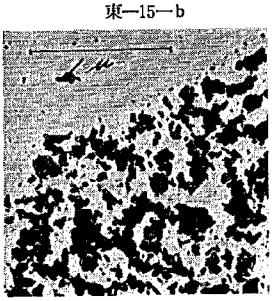


東—14—e

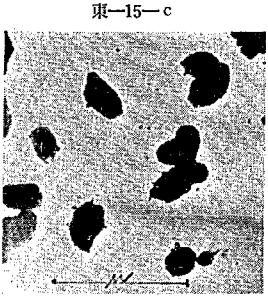


東—15—a

東—15—b



東—15—c



東—16—a

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 121, November 1964

CONTENTS

1. K. Nakamura, R. Iida, R. Miike and H. Furuya
——A Study on Arch Dam Behavior Analysis—— ……(1)

2. A. Ariizumi
Studies on Soil Colloids (6)
——Clay Minerals in the Subgrades Tested to Complete "Soil Maps for Road Construction"—— ……(63)