土木研究所報告

第110号

放射性同位元素を使用した地下水調査報告（4報）
——玉川温泉における地下溶透除毒工法に関する調査——
……有泉　昌，近藤　紀，森　芳徳…（1）

伊勢湾台風による高潮と被害の特性
……竹内俊雄，福岡正巳，細井正延，吉川秀夫
……土屋昭彦，木下武雄，富永正照，三井　宏…（5）

品質管理限界について……中村　慶一…（83）

アロファン質粘土の消石灰—石膏による化学的安定方法に関する研究（1）
——アロファン粘土と消石灰溶液との反応により生成する
Hydrated Gehlenite ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$) について——
……有泉　昌…（97）

アロファン質粘土の消石灰—石膏による化学的安定方法に関する研究（2）
——アロファンと$Ca(OH)_2$溶液との反応条件について——
……有泉　昌，大場　正男…（113）

昭和37年1月

建設省土木研究所

土木研究所報告　第百十号　昭和三十七年一月

放射性同位元素を使用した地下水調査報告（4報）

——玉川温泉における地下溶透除毒工法に関する調査——

有泉　昌*
近藤　紀**
森　芳徳***

（昭和36年7月）

目　次

1. まえがき……（1）
2. 実験計画……（1）
3. 実験経過……（2）
4. 実験結果ならびに考察……（2）
5. むすび……（4）

1. まえがき

すでに報告した5回にわたる玉川温泉の温泉水除毒現場での伏流水追跡実験[1~3]で，除毒現場の地中構造が概括的に把握でき，さらに通常の室内実験でも認められるRIの種別による追跡時間のずれ，ならびに吸着損失率の差が存在することが判明した。いままでの実験ではRIとして$^{32}PO_4'''$と$^{131}I'$の両陰イオンしか使用していず，それらは玉川温泉除毒現場の地中に存在するローム質の土，岩石（主として安山岩）と種々な物理化学的な相互作用を持つものであり，また玉川温泉水そのものに相当多量の鉄，アルミニウム等のイオンが含まれており，地中水路通過中に温泉水のpHが上昇すれば，リン酸イオンはこれらのイオンと反応して不溶性沈澱として地中に固定されることも考えられる。そのようなわけで玉川温泉除毒現場の場合，これらのRIは地中を通過する温泉水の流速，地中水路の方向など定性的なものを知るためには十分であるけれども，地中水路中の温泉水の流量のごとき定量的な調査には満足できるトレーサーとは考えられない。

RIを地下水のトレースに使用する場合は，そのRIは調査現場の地理，地形，岩石，土砂の性状，化学的性格などによって規定される種々の条件を満足させねばならない。それらの条件の中で測定，放射線障害に関する問題は，検出装置の改良，取扱いの安全配慮といった措置を講じて解決するが，地下水とほとんど全く行動をともにし，しかも地中を流下中に起るRIの吸着損失ができるだけ小さいRIの核種を選択することは，非常にむずかしい問題であって，いままで多くの人々がこの問題について研究を行なっている。そして，いずれも最も信頼がおけるRIとして^{36}Clと^{3}Hをあげている。

^{36}Clは，はなはだ高価であって，現場的な規模で使用するには適さないが，^{3}Hは安価であるから測定法の進歩によって将来地下水のトレーサーとして最も有望なRIになるものと考えられる。著者らは現在まで$^{32}PO_4'''$と$^{131}I'$の2種の陰イオントレーサーによる追跡を行なって来，これらのRIの特性についても相当の知見を得ることができたので，第6回実験ではトレーサーとして新しく$^{3}H^{+}$と$^{86}Rb^{+}$の2種の陽イオンを使用し，他に今まで使用してきた$^{32}PO_4'''$を比較のため使用することにして，これら3種のRIの地下水追跡特性について調査することにした。

2. 実験計画

トレーサーとして使用するRIとして^{3}HはHClの形で，1c，^{86}RbはRbClの形で200mc，^{32}PはH_3PO_4の形で200mcそれぞれ入手した。除毒現場にはあらかじめ3カ月前から通水を中止しないよう依頼しておき，平衡状態を保たせるようにした。今回の調査は3つの核種の地下水追跡特性を比較するのが目的であったから，RIの投入は3種のRIを一たん混合した後，溶透井に投入することとし，溶透井としては注入された温泉水が井戸から越流することなく直接に井底から地中に浸透している1号線1号井を選んだ。採水口としては，いままで最も高い放射能が検出されていた湧出口No.6だけを選び，ここでRI投入後5分間隔で延100時間にわたって採水を行なうことにした。なお今回は採水方法を改良した。従来はたとえば5分間隔の採水といえば，5分ごとに湧出口でその時刻の湧水を汲み取っていたのであるから，RIが5分間以上にわたって流出している場合は，その放射能ピークの一部は抑えることはできるけれども，RIの全流出量，ピークの高さは判明しなかった。ま

*　地質化学部長
**　地質化学部　化学研究室　研究員
***　地質化学部　化学研究室

た，RI が5分間以内に流出しおわる場合では，この採水方法ではピークを見逃がしてしまう可能性もあった。そこで今回は湧出口にパイプを設け，パイプの末端に大きな容量のバケツを置き，常に湧水の一部がバケツに溜まるようにし，5分間隔の採水であれば5分目ごとのバケツ中の湧水をよく混合して，うち一部を試水瓶に移し替えるようにした。こうすれば RI の全湧出量も判明するし，従来の採水方法では見逃がしていたかも知れない短時間内の RI の流出も完全に抑えることができる。また放射能ピークの出現時間も5分の時間帯で抑えることができる。

3. 実験経過

実験は昭和33年9月に行なった。まず現場には同年6月頃除毒区域，とくに1号線1号井への通水は停止しないよう連絡しておいた。9月10日に投入すべき RI が全部揃ったので，現地に向って出発し，11日に現地に到着，ただちに溶透井の状況，湧出口などを調査した。翌12日午前8時に3種の RI を混合して 2 l に稀釈し，うち5c.c. を放射能標準体として取り分け，残りを1号線1号井に投入した。投入と同時に渋黒川岸の湧出口 No. 6 では5分間隔の採水を開始した。採水作業は順調に進み，RI 投入後100時間目の16日の正午に採水を修了した。試水は実験室に持ち帰り，^{32}P はリンモリブデン酸アンモンの沈澱から，^{86}Rb は塩化白金酸ルビヂウムの沈殿を80%エチルアルコール溶液から生成させて，それぞれ放射能を測定した。また2時間目ごとの試水からは塩素イオン濃度と pH を測定した。^{3}H は ^{3}H 測定用装置の組立てをまって測定することとし，残った試水は ^{3}H の測定まで保存することにした。

4. 実験結果ならびに考察

RI 投入前に渋黒川岸の湧出口の状況を調査した結果，24個の湧出口が存在しているのを認めた。その大半は前年には存在していなかったものであり，第5回実験の後10カ月間にわたる温泉水注入のため，新たに生成したものであると考えられた。表-1 にこれら湧出口の水温，湧出量を示す。表-1 を前年6月の調査結果と比較してみると，湧水量には大差は認められないが，水温がかなり上昇している。表-1 で湧出口番号が14から23までの10個の湧出口は新たに生成した湧出口で，岩盤の割目などから湧出していたものである。

現地から実験室へ持ち帰った試水のうち2時間目ごとの試水からは pH，塩素イオン濃度を測定した。その結果，100 時間の採水時間中試水中のこれらの値には全然変化が認められなかった。このことから除毒地域の地中は実験期間中は平衡状態を保っていたということができる。

表-1 渋黒河岸の湧出口（1958年9月）

湧出口番号	水温（°C）	湧出量 c.c./sec	備考
1	42.9	1,100	
2	43.0	800	前回 No. 1
3	45.0	3,500	
4	42.8	1,100	
5	38.1	2,300	前回 No. 2
6	42.0	2,500	前回 No. 3
7	44.0	800	
8	47.6	900	前回 No. 3′
9	46.8	400	前回 No. 4
10	47.2	40	
11	48.1	50	前回 No. 4′
12	50.2	1,000	
13	47.9	20	前回 No. 5
14	51.0	500	
15	50.3	30	
16	48.8	30	
17	49.0	100	
18	49.1	150	
19	49.8	20	
20	51.0	30	
21	50.0	10	
22	50.3	60	
23	49.0	80	
24	47.8	300	前回 No. 6

試水の放射能は前にも述べたように，^{32}P はリンモリブデン酸アンモンとして測定し，^{86}Rbは塩化白金酸ルビヂウムの沈澱を80容量%アルコール溶液中から生成させて測定した。その結果 ^{32}P については4個，^{86}Rbについては5個の試水について放射能を検出した。表-2 に検出された試水の放射能を示す。表-2 でわかるように，連続した試水に放射能が検出されたのは試水番号 828，829 の ^{32}P だけで，あとはそれぞれ単独の試水に放射能が検出されている。そして放射能の値は連続した試水に現われたものが最大である。いま 表-2 を採水時刻を横軸に，放射能の値を縦軸に図に画いてみると 図-1 のごとくなる。図-1 を見ると ^{32}P と ^{86}Rb との間には全く関連性が認められない。RI の投入は ^{32}P と ^{86}Rb とを一たんよく混合した上で行なったのであるから，本来ならば ^{32}P と ^{86}Rb とは同時にとは行かなくとも，ある一定の関係にある時間差で RI は現われなくてはならない。図-1のようにPと Rb と全然別々に検出されたということは，注入された温泉水が通った地中水路の化学的性質が PO_4''' に対するのと Rb^+ に対するのとでは全然異なり，Rb^+ が吸着されてしまうような水路では PO_4''' は吸着の度合が少なく検出され，また PO_4''' が全く吸着されてしまうような水路では Rb^+ の吸着は比較的に少なく検出されるということを推定させるに十分である。表-2 からわかるように稀釈度の最も小さいピークは試水番号 828，829 の連続したピークであって約 7,000m³ となっている。これは RI の全投入量に対する値であるから，もしこのピークによって表わされる地中水路が，1号線1号井への温泉水全注入量のうち，1/10を通すと

表-2 検出された試水の放射能

試水番号	RI投入後時間	RIの種別	測定に供した試水量	10月20日における放射能（cpm）(除BG)	同放射能強度*(mμc)	試水中放射能濃度*(mμc/l)	稀釈度 (×10³m³)
779	64h55m	P	50c.c.	36.8	0.23	4.6	43.5
789	65h45m	Rb	〃	30.1	0.37	7.4	27.0
811	67h35m	P	〃	8.5	0.05	1.0	200.0
824	68h40m	Rb	〃	15.0	0.18	3.6	55.5
828	69h 0m	P	〃	214.1	1.36	27.2	7.4
829	69h 5m	〃	〃	200.9	1.28	25.6	7.8
951	79h15m	Rb	〃	4.3	0.05	1.0	200.0
973	81h 5m	〃	〃	96.8	1.19	23.8	8.4
987	82h15m	〃	〃	17.2	0.21	4.2	47.6

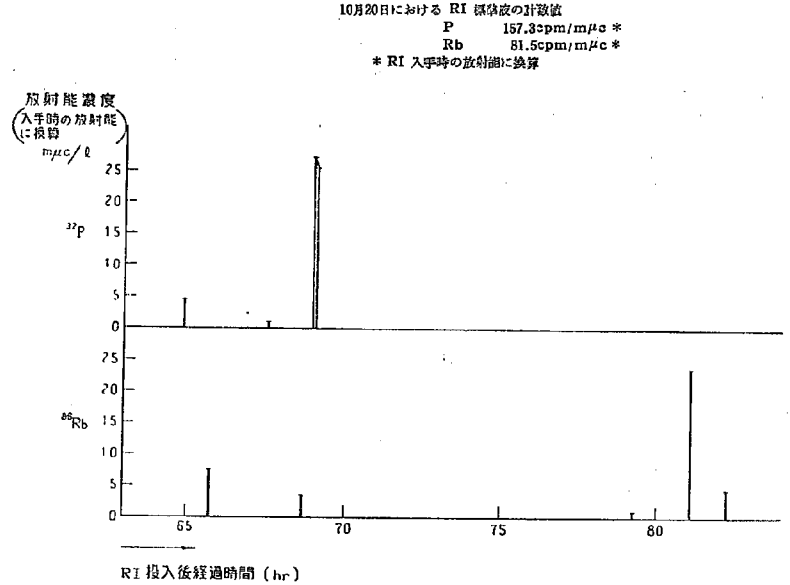


図-1

いうことであれば，この水路における稀釈度は700m³ということになる。すなわち，この地中水路へ入った RI は一たん 700m³ に稀釈されてのち10分間以内に湧出口 No.6 またはその他の湧出口から流出しおわったということになる。しかし，こう考えてみると湧出口における湧出量の関係から矛盾が生じてくる。すなわち，この地中水路が1号線1号井に注入された温泉水の 1/10 を通すと仮定しても湧出口における全湧出量は毎秒 1m³ はなくてはならないからである。そこで逆に湧出口におけるこの水路を通って来た温泉水の全湧出量を仮に毎秒10 l とした場合，地中水路を通過中に吸着されないで残る RI の割合は 1%ということになる。実際にこの値を湧出量，現在までに得られたトレースのデータなどを参考にして考えると，もっと少なく 0.2%以下である。すなわち，最も吸着損失が少ないと考えられる地中水路でこのような状態であるから，表-2 にある試水番号 811 や 951 のように稀釈度 20 万m³ というものは，地中における RI イオンの吸着損失率がいかに大であったかということを示すものである。また，このように高い吸着損失率は温泉水の地中浸透速度が小さく，粘土粒子，岩石表面との接触がよく行なわれているときに得られるものであって，温泉水の地中浸透速度が大であるときは，粘土岩石類との接触時間が短かく，吸着損失率はさほどまで大きくないはずである。このことは，いままで実施したトレースのデータによると，最も浸透速度の大な地中水路では5時間しかかかっていなかったのが，今回の実験では最も早くて64時間55分かかっていることでも推定される。

以上のことから考えてみると，湧出口 No.6 に通じる地中水路は図-1 に現われている 8本より少ないことはないと考えられる。

5. むすび

第6回実験で得られたデータをまとめて結論とする。

i) 渋黒川左岸の湧出口が前年度と比べて相当増加し，湧出水温もかなり高くなった。

ii) 実験期間中は地中の温泉水の脱酸反応は平衡状態を保って進行していた。

iii) 湧出口 No. 6 で ^{32}P について3個，^{86}Rb について5個のピークが認められた。これらのピークの間に関連性が全然認められないことから，地中水路はPO_4'''とRb^+とに対して違った化学的振舞いをするものと考えられる。また，このことから湧出口 No. 6 に通じる地中水路は少なくともこのピークの数だけ，すなわち8本以上はあるものと考えられる。

iv) RI イオンの吸着損失率は極めて大であって，99%以上である。この吸着損失率が 100%であるか，それ以下であるかによって RI のピークが現われたり，現われなかったりする。

v) 最も早く現われたピークは RI 投入後64時間55分目のものであって，いままで実施した実験のうちピークが現われる時間は一ばん遅かった。このことから，温泉水の地中浸透時間は長く，したがって RI が粘土，岩石類と接触する機会が多くて吸着が進行したものと考えられる。

なおこの実験では秋田県鹿角土木事務所から多大の御援助を受けた。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

伊勢湾台風による高潮と被害の特性

竹内俊雄* ・ 福岡正巳** ・ 細井正延*** ・ 吉川秀夫****
土屋昭彦+ ・ 木下武雄++ ・ 富永正照+++ ・ 三井 宏++++

（昭和 36 年 7 月）

序 文

毎年台風がくるたびに，日本のどこかで大きな被害を受けている。伊勢湾台風のように大災害をこうむり，多くの人命と経済的損失をこうむるごとに二度とこのような悲劇を繰り返すまいと誓いを新たにする。そしてやがて災害を忘れ去る頃，ふたたび災害は繰り返されるのである。伊勢湾におこった高潮災害は東京湾にも大阪湾にも，また有明海などにも起る可能性は十分にあるのである。今後高潮対策として早急に検討されねばならない事項はつぎのように分類されるであろう。すなわち，台風および高潮の予報および予測，波浪の推算，防潮堤などの構造物の高さ，断面形および構造の合理的な設計，地盤沈下の対策，高潮防御のための合理的な都市計画，土地利用計画などがそれである。高潮や波の推算については，伊勢湾台風以来方々で活発な研究が行なわれており，すでに相当の成果が上っているとはいえ，防災構造物の設計にいまただちに利用できるという状態にはいたっていない。また従来の堤防の構造設計は経験に立脚したものが多く，全部が全部最良のものとはいいがたい。われわれは経験的事実をも十分に取りいれ，水理，構造，材料，土質等を考慮した合理的な設計方法をつくり上げねばならない。またどんなにりっぱな堤防をつくっても永年のうちに次第に老朽化していくことはまぬがれないから，平素の維持，管理を十分に行なうことがりっぱな堤防をつくることに劣らず必要なことである。近頃急速に方々で，海面を埋め立て臨海工業地帯の造成を行なっているが，はたして高潮対策や洪水対策に十分な考慮が払われているであろうか。臨海工業地帯が造成されれば低湿地は沈下のためにますます低くなる危険があるわけで，あらかじめ，その対策を十分に考慮して安全で住みよい都市を造らねばならない。工業地帯の造成は単なる工業用地のつぎたしであってはならない。

われわれは災害発生直後，数回にわたって現地調査を行なって種々検討した結果，高潮や波の水理的特性，構造物の被害の特性などについてここに一文をまとめた次第である。この小文が今後方々で行なわれる高潮対策の仕事に対して少しでも役に立てば，喜びこれに過ぎるものはない。　　土木研究所長　横 田 周 平

ま え が き

高潮がおこった直後10月１日に被災現場に急行し，主として高潮潮位の検潮記録，痕跡を測量調査し，つづいて２回にわたって主として海岸及び河川構造物の被害状況の調査を行なった。河川，海岸，港湾，干拓などの関係の諸機関では，高潮や波浪，構造物の災害の原因等について種々検討を行なって，すでにそれらに関する報告書もかなりでている。たとえば高潮の計算については，気象庁で電子計算機を用いて運動方程式の数値計算を行なって，おおよその水理機構は解明されたのであるが，細かい点についてはまだ十分とはいいがたい。もちろん，ここでそのすべてを明らかにすることはできないが，二三の問題点について検討を行なった。また波浪についても運輸省等で計算を行なっているが，われわれは若干異なった方法を用いて波高，周期を計算し伊勢湾沿岸に来襲した波浪の大きさを推算した。つぎに伊勢湾内の海岸堤防及び湾への流入河川の堤防の被害の特性を検討した結果，堤防を合理的に設計するための多くの指針をうることができた。

目 次

1. 高潮についての考察……（2）
〔1〕 高潮の概況……（2）
(1) 潮位分布……（2）
(2) 昭和28年13号台風との比較……（2）
〔2〕 高潮の解析……（4）
(1) 湾口からの流入量……（4）
(2) 風の応力係数について……（5）
(3) 高潮の主因の検討……（9）
2. 波の推算……（12）
〔1〕 概説……（12）

*河川部長　**工博　機械施工部長　***河川部海岸研究室長　****工博　河川部河川研究室長
+前河川部河川研究室研究員　++東大運博　河川部河川研究室研究員　+++河川部海岸研究室研究員　++++河川部海岸研究室研究員

〔2〕 浅海における波の推算法……(13)
(1) Bretschneider の方法 ……(13)
(2) 風向・風速の変化および海底摩擦を考慮したS.M.B.法による推算(16)
〔3〕 湾内の各地における波の推算……(17)
(1) Bretschneider 法による推算……(17)
(2) 風向・風速の変化および海底摩擦を考慮したS.M.B.法による推算(18)
(3) 波の推算値の検討……(21)
3. 海岸および河川堤防の被害の特性……(30)
〔1〕 海岸堤防の被害特性……(30)
〔2〕 河川堤防の被害特性……(37)
4. 付録……(40)
〔1〕 各地の構造物の被害状況……(40)
〔2〕 伊勢湾台風と高潮の資料……(73)
〔3〕 伊勢湾における高潮の歴史……(76)
参考文献

1 高潮についての考察

〔1〕 高潮の概況

昭和34年9月26日夕刻，15号台風は本邦に上陸し，各地に甚大なる被害をひきおこした。この台風はまれにみる強大なもので，その被害は近畿以東の全地域にわたったが，被害の最もはげしかった地域は伊勢湾を中心とした愛知・三重県下であった。

この台風では，雨量は400mm をこえたところがあったとはいえ，一般にいちじるしいものではなかった。しかし風は強く，瞬間最大風速は名古屋で45.7m/sec，中心から300kmも遠かった東京でさえ，37.0m/sec を記録した。伊勢湾を中心とする本邦南岸の各地は，同日夕刻より目にみえて推算潮位を上回わる海面上昇を記録し，21時前後にはその極に達し，各地は激浪と海水の侵入とによる被害をうけた。

高潮の災害は伊勢湾のみならず，他の海岸でもひきおこされたのであるが，この高潮のいちじるしい性質は伊勢湾において明瞭にみられた。ゆえに，われわれは，高潮の実態を把握し，その防災対策を検討する上に，伊勢湾をモデルにして研究することは有意義であると思った。

（1） 潮位分布

伊勢湾台風による高潮潮位は，伊勢湾一帯に異常に高かったというが，はたしてどの程度高く，どういう分布であったのか。

図-1.1は高潮痕跡調査の結果を地図上に記したものである。これは同時潮位分布を示しているのではないので，これによって海面こう配などを論じることはできないが，潮位の大体の傾向を知ることは可能であろう。

図-1.1をさらにわかりよくするため，海岸線に沿って湾奥から湾口へ横座標をとり，縦軸に潮位痕跡をとってみたのが図-1.2である。これを見ると，(i) 潮位はほぼ一様に高い。伊勢湾西岸沿いに測ってみても（この場合が，横方向に最も広い範囲をとっている。）2mから4m の間に統一されている。他の場合は，5割程度しか差がない。(ii) 湾奥の方が湾口より潮位が高い。(iii) 小規模の凹凸は存在する。これは微地形の影響かも知れない。以上のようなことが概観される。

（2） 昭和28年13号台風との比較

昭和28年の13号台風はこの地方を襲った台風としては大きい部類にはいるものであった。また13号台風はその後の計画高潮位の基準となったものである。それで，伊勢湾台風を13号台風と比較しておくことは必要であろう。

比較のために，それぞれの台風の最大風速，その時の風向，最低気圧，最高潮位，潮位偏差などを表-1.1，また径路略図を図-1.1に掲げる。

この両台風のちがいの第1は，それらの強さのちがいである。中心示度についてみると伊勢湾台風の方が10 mb ほど低い。風速分布についても全般に，伊勢湾台風の方が大きく，数割ほどのひらきがあるので，風速の2乗にして比べれば2倍から3倍のちがいが考えられる。両台風のちがいの第2はその径路である。伊勢湾台風は伊勢湾の西側を北々東進したのに対して13号台風は伊勢湾を南西から北東へ横切った。そのため，伊勢湾台風では，最大風速時の風向は南東寄りであった。伊勢湾の形状を考え合わせると，エネルギーは外洋から湾内へ，さ

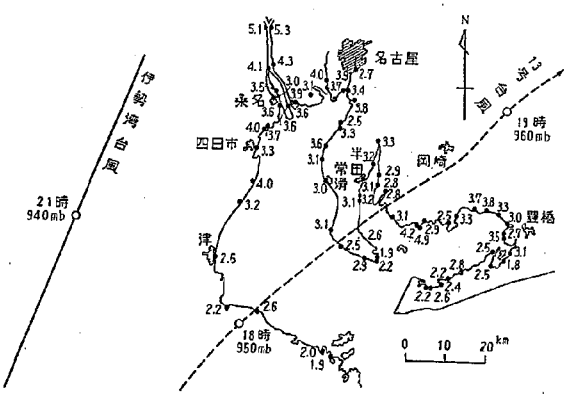


図-1.1 最高潮位分布

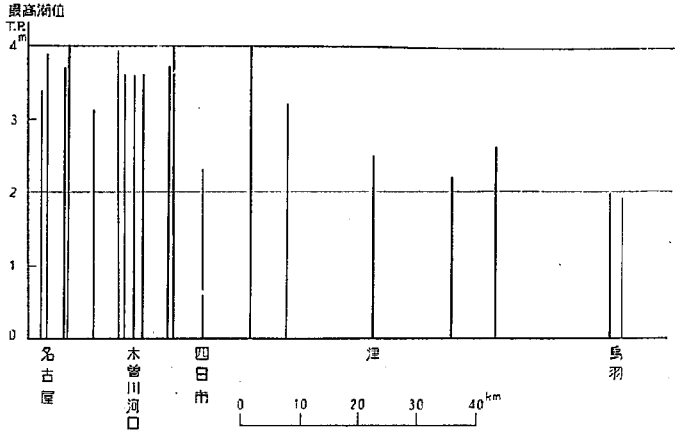


図-1.2 (a)　最高潮位　(伊勢湾　三重県沿い)

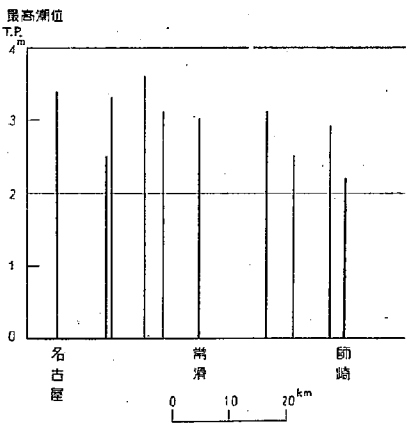


図-1.2 (b)　最高潮位 (伊勢湾知多半島沿い)

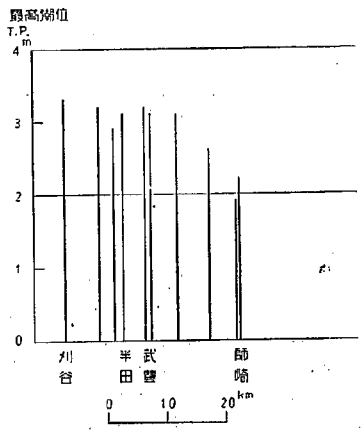


図-1.2 (c)　最高潮位 (知多湾)

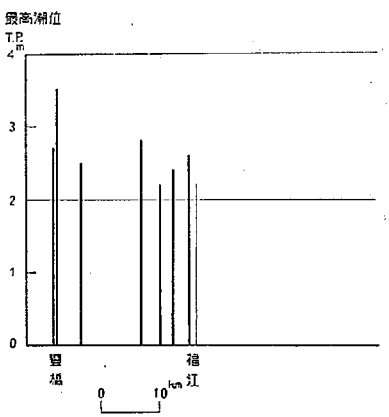


図-1.2 (d)　最高潮位 (渥美湾南岸)

表-1.1　伊勢湾台風と13号台風との比較

	昭和28年（13号台風）						昭和34年伊勢湾台風					
	検潮器	最高潮位 m	偏差 m	最大風速 m/sec	最大風速時の風向	最低気圧 mb	検潮器	最高潮位 m	偏差 m	最大風速 m/sec	最大風速時の風向	最低気圧 mb
鳥羽	あり	2.50	1.55				あり			25	SE	
大淀川河口		3.10						2.56				
櫛田川河口		3.27					あり	松阪2.22				
碧川河口		4.05										
志登茂川河口（津）		3.01		23.6	E	964.6		2.54		36.8	ESE	950.6
白下		2.50						2.91				
塩浜（四日市）		2.70										
四日市		2.53						3.9				
富田		2.52	1.27	23.0			あり	3.29	2.95	27.3	SE	
伊島		2.43						4.0				
鍋田川河口		3.14					あり	横満3.34				
名古屋	あり	2.54						親				
大野	あり	2.33	1.23	22.6	NNW	970.0	あり	3.89	3.55	39.6	SSE	962.9
常滑	あり	2.36						3.1				
豊浜		2.58		30.0				2.96				
豊田川		3.07						2.9				
武平	あり	2.56	1.28					3.05	2.71	30		
境新		2.00						3.05				
形前		1.90						刈谷 3.3				
豊橋		2.78						2.9				
江		3.15						3.3				
福	あり	2.83					あり	3 0				
伊良湖	あり	3.02	1.42	21.1	SE			3.03	2.69	28.9		
		2.50		21.0	ESE		あり	2.13				
		2.48		30.0	ESE	957.1				38.4	SE	967.3

出典　昭和28年13号台風海岸災害誌，愛知県
1959年9月26日伊勢湾台風に伴った高潮の緒査報告，東大気象庁高潮合同調査班
佐藤清一，岸力：海岸堤防に関する研究(3)　土木研究所報告90号の4
細井正延　災害発生の過程と対策　河川，昭和35年4月号
福岡正巳，吉川秀夫：伊勢湾台風による災害をみて，土木技術資料　2巻2号

らに湾奥へと集積されて行ったと思われる。13号台風では，径路の北側は北寄りの風，南側は南東寄りの風が最大風速時に吹いていた。それで湾奥部すなわち径路の北側では最高潮位は 2m を若干こえる程度であったが，湾口付近・渥美湾すなわち径路の南側ではそれが 3m 前後となっている。これらのことを概念的に表現すれば，ちがいの第3として，13号台風では最高潮位は湾口・渥美湾で高く，湾奥で低かったが伊勢湾台風では，それは湾口で低く湾奥で高くなっている。

湾奥たとえば名古屋では，13号台風では最高潮位2.33 m，伊勢湾台風では 3.89m と，後者が 1.6m ほど高いのに，湾口たとえば鳥羽では，13号台風では 2.25m，伊勢湾台風では 1.88m と，後者が 0.3m ほど低いという結果になっている。

このように台風が湾に対してどのような径路を通るかということは，高潮に重大な影響を持つものである。

〔2〕 高潮の解析

（1） 湾口からの流入量

湾の入口からの流入総量は図-1.3 に示すとおりである。これは湾内各検潮器の上昇高に水面積をかけてえられた値である。また 30分ごとの流入流量は図-1.4 である。伊良湖岬における風力（図-1.5）を湾口において湾内へ水を送り込む応力と仮定し，風力と流入流量との関係をみたものが図-1.6である。これによると両者はほぼ

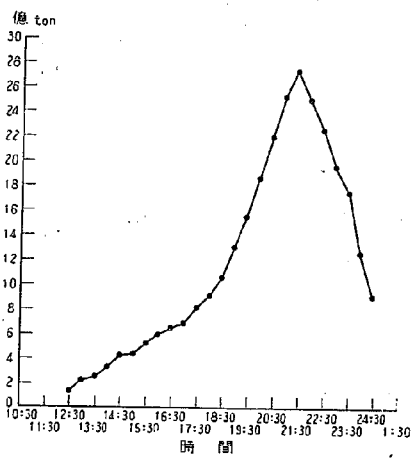


図-1.3　湾の入口からの流入総量

直線的な関係をもっている。すなわち，湾口の風によって水が湾内へ送りこまれているとみることも可能である。ただし両者に直接の因果関係があるか否かはこれだけからは言えない。20時から21時までの流量が少ないのは，陸地へ侵水したからではないかと思われる。時刻としてもおおよそ一致しているが，次のような浸水量の見積りをしてみよう。被災後何日間にわたった湛水では

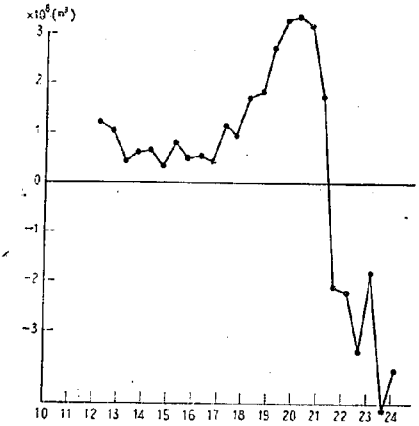


図-1.4　湾の入口からの流入量（30分間の量）

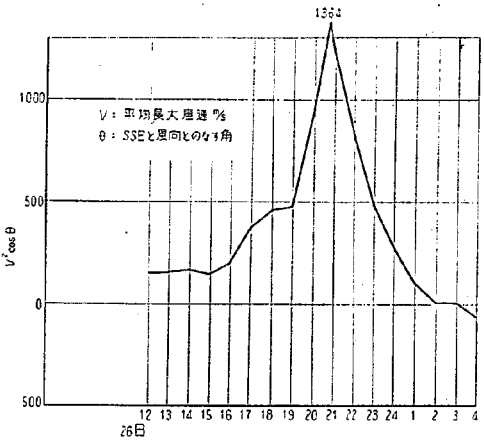


図-1.5　伊良湖岬における風力

なく，高潮時の 1～2 時間程度の間の問題である。

浸水範囲は名古屋－四日市国道の南側，名古屋市内より桑名市までの 140km² とする。浸水深は，名古屋における最高潮位 3.89m，明徳橋 3.72m，横満蔵 3.34m などであり，地盤高はほぼ 0m～1m であるから，3.5m と仮定する。したがって浸水量は 3.5m×140km²=49×10⁷m³ となる。よって約 5 億m³ とみるべきであろう。

上述の 20 時から 21 時へかけての流入流量の不足量は 30 分で約 2 億 m³ であるから，この不一致は陸地への侵水とみなすことができよう。

（2）　風の応力係数について

高潮の原因として考えられるものはいろいろあるが，第一にあげるべきものは風による吹き寄せである。この風の影響は基礎的な面では 2 つの流体の境界面における相互作用の問題として極めて重要である。また実用的な面では高潮対策や高潮予報の基礎法則に利用される。たとえば，ある湾に構造物を設けて港湾や市街地，農地を保護する場合，構造物によってどの程度に高潮が軽減されるか，あるいは，構造物によってこれまで見られなかった現象があらわれることはないかを，あらかじめ調査しておくことが望ましい。その方法の 1 つとして，電子計算機などを用いて解析する例をみるが，主要因たる風の応力についての係数がわからなければ結論がでない。高潮予報についていえば，各主要港について高潮の推算式というものが求められているが，これは各地点にのみ適用される風と気圧とによる経験式で普遍性に乏しい。そこで風の応力という形で把握しておけば，より一般的に高潮の予報の確実性がます。

この種の研究はかなり古くから注目されていたもので，1872年バルト海を襲った暴風によっておこった海面傾斜について Colding の研究は有名である。その後

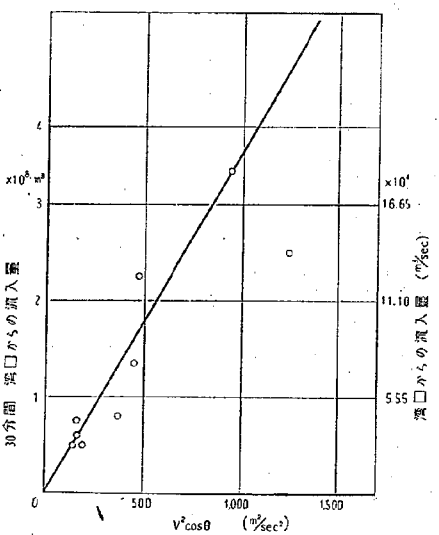


図-1.6　湾口からの流入量と風力の関係

Ekman, Wüst, Francis, Prandtl, Munk などが，それぞれの立場から論じている。しかし，これらに用いられた風速の範囲は 20m/sec 程度またはそれ以下である。その場合の応力係数が伊勢湾台風のように40m/sec にも及ぶ風速の下におこった高潮に適用できるか否かは一応考察してみる価値があると思われる。

その上，伊勢湾周辺は最近急速に発展しつつある工業地帯で，関係機関が多大の努力を払って気象の観測・検潮を行なっているので，今回の伊勢湾台風のおりには多くの資料がえられた。

この機会に台風による高潮――速い風速による風の応

力の問題――について，いま一度検討しなおしたのがこの節の内容である。

正確には，台風による高潮は定常現象ではないので，非定常性を考慮した形で風の応力係数を求めるのが本筋であろう。つまり，流体の運動方程式を解いて実測値とよく合うような応力係数を決めるべきであろう。しかし，実際にはそれは困難であること，および，加速度項の小さいことにより，定常状態を仮定して応力係数を求めたらどうか。もちろん，それでは定常性の仮定の故にはいってくる誤差があるが，資料をいくつか，まとめることによって，統計的に消す方法をとった。また逆に，そうしてまとめた結果からのずれを改めて検討することにより，非定常性追求への手がかりがえられるわけである。

名古屋地方気象台が昭和 35 年1月に発行した伊勢湾台風気象概報をもとにして，東京大学地球物理学教室気象研究室がまとめた毎時の風速・風向図を用いた。この図は奥羽地方南半から関東，中部，近畿の諸地方にわたる資料を 1/100万 地図に書きこんだものである。観測所は，気象庁・消防署，灯台・自衛隊・電力会社など所轄はまちまち，したがって精度はまちまちであるが，大局的にみると流線の模様がわかる。

風向の実測値は地形に強く影響されるので，地上の少数地点の風向だけを用いるのはよくない。それで大規模に描かれた風向図によって伊勢湾上の風向きを決めた。

風速については，気圧分布から傾度風として，風速を算出し，それを基準にして，その値よりいちじるしく離れた測定はのぞいた。

考えている2検潮所を結ぶ直線と，その付近の風向となす角を θ，その風速を W としたとき，$W^2\cos\theta$ を作り，付近の風を平均して，風力 $\overline{W^2}$ とした。

$$\overline{W^2}=\frac{1}{n}\sum W^2\cos\theta$$

検潮記録は伊勢湾周辺で数多く測られているが，そのうちで適当に離れていて，記録がよくとれている次の5点をえらんだ。

名古屋港，津，鳥羽，福江，前芝

自記記録から毎時の値を cm 単位で読みとって，潮位資料とする。基準面は T.P. に換算できるものもあるが，それとても，地盤変動などで，不確定性がはいってしまうので，その点は考慮に入れて資料を整理した。

気圧は海面の吸い上げに直接影響するほか，空気の密度にも影響するし，傾度風を求めるのにも必要である。これも，東京大学地球物理学教室気象研究室でまとめた当日の毎時の地上等圧線図を用いた。この地図の縮尺は 1/100万 である。気圧低下 1mb が海面上昇 1cm として検潮記録に更生をして潮位をだした。

上記の5検潮所で適当に対を作り，1/10万 海図で，その2点間の距離を測って L とする。結ぶ線分が半島にかかる場合には，水深を考慮に入れて，若干曲げて測った。そして，1.5km おきに海図から水深を読みとって，算術平均したものが2点間の平均水深 h である。ただし，この水深は最低干潮面以下の値であるから，鳥羽・名古屋における当日 18 時の干潮と 24 時の満潮との推算潮位の平均値によって補正した。

重力の加速度は 980cm/sec^2，海水の密度 ρ は 1.025 gr/cm^3，空気の密度 ρ_a は，気温 25°C，気圧は 1001mb から 957mb まで変化するものとして乾燥空気の密度を求め，概略の平均値 1.15×10^{-3}gr/cm^3 を採用した。

つぎに，上記の資料のとりまとめ方と解析の結果を記す。

風の応力 τ_a と，それによって生ずる海面こう配 i との間に，

$$i=\tau_a/\rho gh$$

なる関係があることはよく知られている。これは海水の運動方程式を表面から海底まで積分してえられる式について，加速度，海底の摩擦の項とコリオリの項を無視してえられる。それらの項が小さいことは，すでに述べたとおりである。他方 τ_a は $k\rho_a W^2$ とおける。k はディメンションのない量で，風の応力係数と呼ばれる。W は風速である。

そこでこれらの関係により

$$i=k\rho_a W^2/\rho gh$$

さらに2地点間の潮位差を ΔH とおいて $i=\Delta H/L$ の関係より

$$\Delta H=\frac{k\rho_a W^2 L}{\rho gh}$$

もし，各点の潮位が共通の基準面から測ってあれば，ΔH はそのままでよいが，一般にはそうではないので，2地点の基準面のちがい C を考慮に入れて，$\Delta H+C$ と書いておかねばならない。こうして記した ΔH は共通の基準面によった潮位差である。

また W^2 は1地点の風の資料によるのではなく，$\overline{W^2}$ を用いることは前にも述べたとおりであるが，さらに1時間前の値とその時刻の値との平均をとって，あたかも 30 分前に相当する $\overline{W^2}$ を算出して ΔH と比べる。それで式は次のようになる。

$$\Delta H+C=\frac{k\rho_a L\overline{W^2}}{\rho gh}$$

縦軸に2地点の検潮記録読取の値の差をとり，横軸に $\overline{W^2}$ をとって，毎時の測定値を記入する。それらの点によく合う直線を引けば，そのこう配は $k\rho_a L/\rho gh$ である。k 以外は既知数であるから，こう配の読取から k がきまる。

図-1.7 (a)～(f)はそのこう配を求めるためのグラフ，表-1.2 および 1.3 はそのようにして求めた k：風の応力係数の値である。図-1.7 中で●は 10 時～17 時の値，○は 18 時～22 時の値，×は23 時～24 時の値である。

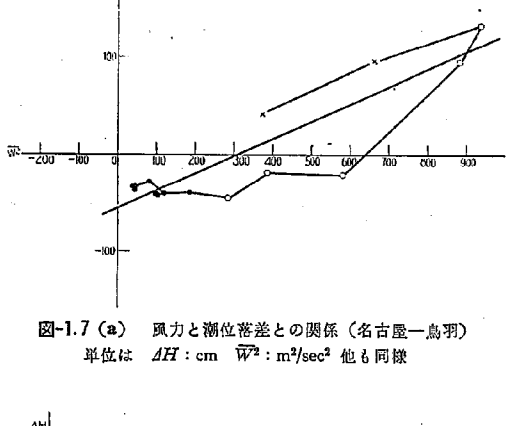


図-1.7 (a)　風力と潮位落差との関係（名古屋—鳥羽）
単位は　ΔH：cm　$\overline{W^2}$：m²/sec²　他も同様

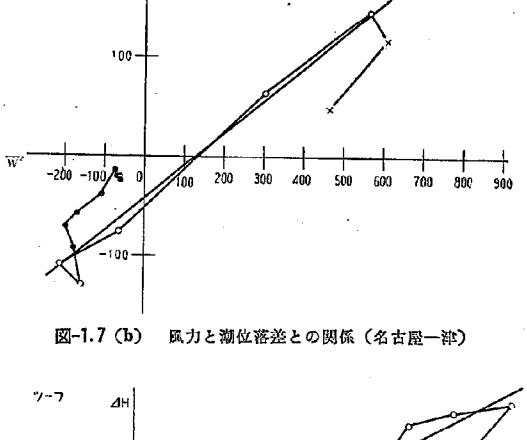


図-1.7 (b)　風力と潮位落差との関係（名古屋—津）

図-1.7 (c)　風力と潮位落差との関係（津—鳥羽）

図-1.7 (d)　風力と潮位落差との関係（津—福江）

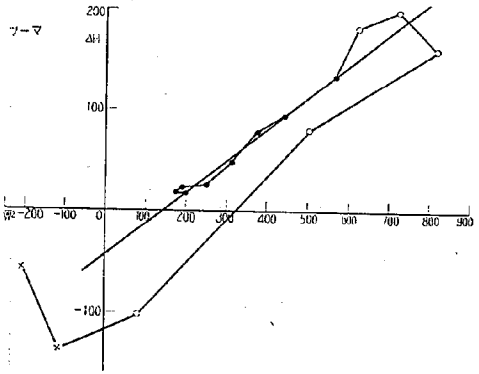


図-1.7 (e)　風力と潮位落差との関係（津—前芝）

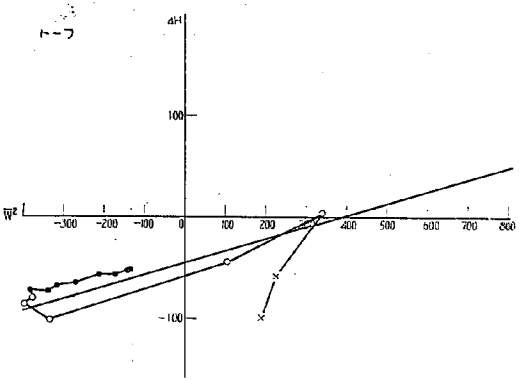


図-1.7 (f)　風力と潮位落差との関係（鳥羽—福江）

表-1.2　風　力　と　潮　位　落　差

名古屋—津			名古屋—鳥羽			津—鳥羽			津—福江			津—前芝			鳥羽—福江		
時	ΔH	$\overline{W^2}$	時	ΔH	$\overline{W^2}$	時	ΔH	$\overline{W^2}$	時	ΔH	$\overline{W^2}$	時	ΔH	$\overline{W^2}$	時	ΔH	$\overline{W^2}$
10	−0.24m	− 61m²/sec²	10	−0.37m	42m²/sec²	10	−0.13m	125m²/sec²	10	+0.39m	190m²/sec²	10	+0.16m	197m²/sec²	10	−0.54m	−137m²/sec²
11	−0.20	− 63	11	−0.33	39	11	−0.13	124	11	+0.39	163	11	+0.18	172	11	−0.54	− 141
12	−0.20	− 68	12	−0.31	44	12	−0.11	140	12	+0.45	191	12	+0.22	187	12	−0.58	− 171
13	−0.14	− 74	13	−0.27	81	13	−0.13	203	13	+0.44	245	13	+0.24	249	13	−0.59	− 215
14	−0.36	− 109	14	−0.39	118	14	−0.03	302	14	+0.62	305	14	+0.44	310	14	−0.67	− 272
15	−0.55	− 170	15	−0.40	102	15	+0.15	369	15	+0.82	366	15	+0.74	374	15	−0.71	− 317
16	−0.68	− 200	16	−0.39	98	16	+0.29	453	16	+1.01	450	16	+0.90	442	16	−0.76	− 340
17	−0.88	− 178	17	−0.36	184	17	+0.52	692	17	+1.23	605	17	+1.27	568	17	−0.75	− 384
18	−1.25	− 156	18	−0.41	284	18	+0.84	802	18	+1.62	669	18	+1.75	623	18	−0.84	− 380
19	−1.03	− 212	19	−0.13	385	19	+0.90	945	19	+1.71	775	19	+1.89	725	19	−0.93	− 396
20	−0.64	− 65	20	−0.13	578	20	+0.51	1,175	20	+1.76	919	20	+1.43	818	20	−1.09	− 335
21	+0.72	+ 302	21	+0.92	885	21	+0.20	882	21	+0.61	688	21	+0.60	503	21	−0.49	+ 102
22	+1.41	+ 564	22	+1.23	937	22	−0.18	328	22	−0.25	233	22	−1.09	80	22	+0.04	+ 339
23	+1.14	+ 607	23	+0.88	665	23	−0.26	58	23	+0.34	− 26	23	−1.41	− 116	23	−0.58	+ 225
24	+0.47	+ 464	24	+0.38	374	24	−0.09	63	24	+0.91	− 142	24	−0.59	− 204	24	−1.00	+ 189

表-1.3 風の応力係数

	距離 km	平均水深 m	グラフ上のこう配	係数
名古屋—津	52.8	13.5	3.26	6.98×10^{-3}
名古屋—鳥羽	69.5	21.3	1.78	5.57
津—鳥羽	38.1	16.1	0.88	3.62
津—福江	53.7	23.9	2.16	9.72
津—前芝	78.0	19.8	3.10	6.91
鳥羽—福江	29.4	25.7	1.18	8.69

一般に図の点はばらつくが全体の潮位上昇の段階では，傾向はほぼ直線的である。そして下降の段階では点の揃わないものもある。また，風が弱くて変動の小さい17時以前では，若干ちがった傾向を示す地点もある。これら初期と末期とについては，他の形響が大きく関与していて風の応力と海面こう配の釣合とは考えられないことを意味しているのであろう。たとえば潮位下降期では固有振動のような現象があらわれているのかも知れない。

こうして求めた風の応力係数は全般的に大きくでている。この点については (i) 大きい風速に対する風の応力係数である。(ii) バルト海その他の実測値に比べ，規模が数 10kmであって，ずっと小さい。(iii) 非定常性がはいっているのではないか。

ここに，求めた風の応力係数が大きいということは，高潮の原因として風の影響が，従来考えられていたより大きいことを示すものである。

さらに河川内の潮位上昇も主因が風の応力と考えられるから，木曽川について調べてみると横満蔵，船頭平両量水標の水位差 ΔH と桑名の風速(一部名古屋)との関係は図-1.8のようになる。これによって前のとおり風の応力係数を求めると，約 1.91×10^{-3} となる。つまり海の場合に比べて，風の応力係数は半分ほどである。これは，河道においては，海の場合ほどエネルギーが風から水へ移らないことを示すもので，水面の粗度，流速分布と関係した興味ある問題として今後研究すべきことであろう。

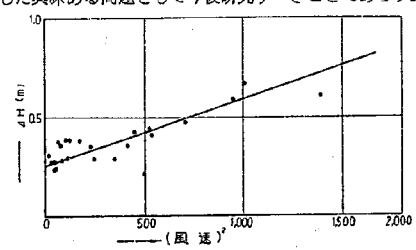


図-1.8 横満蔵と船頭平の両量水標での水位差と桑名（一部名古屋）の風力との関係

(3) 高潮の主因の検討

高潮時の潮位上昇の大部分は風が海面に及ぼす応力と釣合うための水位上昇であると思われる。このことを明らかにするために，高潮の運動を十分の精度で表現しているといわれる運動方程式 (1.1) について，伊勢湾台風時に実測された資料を各項に入れてその大きさを検討してみよう。

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t}&=2\frac{\omega}{g}\sin\varphi\, v-\frac{\partial(\zeta-p)}{\partial x}+\frac{\tau_s^x-\tau_b^x}{g(h+\zeta)}\\ \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}&=-2\frac{\omega}{g}\sin\varphi\, u-\frac{\partial(\zeta-p)}{\partial y}+\frac{\tau_s^y-\tau_b^y}{g(h+\zeta)}\end{aligned}\right\}\quad(1.1)$$

ここで u, v は x, y 方向の平均流速，ζ は水位上昇高，p は気圧低下量を静水圧の式で水柱に換算した値，τ_s, τ_b は，風の応力と海底摩擦，h は水深，ω は地球自転の角速度，φ は緯度である。左辺は加速度，右辺第1項はコリオリの項，第2項は水面こう配，第3項は風の応力と摩擦である。

なお，資料の密度の関係から，対象となる現象は時間的には1時間，空間的には伊勢湾を数個に分割した程度の規模より粗い変動である。加速度といい，水面こう配といっても，このような大きい規模でみているために，短周期の変動としてもっと絶対値の大きい加速度が存在するかも知れないし，地域的に大きい水面こう配が生じているかもしれないが，それらについては論じられない。これは，高潮という現象にどの程度の規模の変動が支配的であるかということにつながってくる問題で，計測技術の進歩とともにおいおい解決されて行くであろう。

（i） 気圧低下

気圧低下によって海面が吸い上げられる。平均海面と平均気圧とが，どのあたりで釣合っているかわからないが，最も気圧が下ったときには，津で約 950mb 名古屋で 960mb であって，低下量を静水圧 ρgh に換算すれば 1mb＝1cm であるから，最大で 50cm～60cm の水位上昇を考えられる。しかし，実際はこれよりは大分小さいであろう。

（ii） 水面こう配

検潮記録は各所でとられているが，各検潮器の基準面が統一されていない。いま，例を名古屋－津，津－鳥羽について，9時には水位差はないと仮定する。こうして求めた水面こう配は，表-1.4 および図-1.9のとおりで，かなりの長い時間にわたり，大きく 10^{-5} を上回わつている。

(iii) 風の応力

風の応力については前述したが，おおよその見積を立てる。Colding の式を用いて，風速 31.6m/s，水深20mを仮定すると，$\tau_s/\rho gH=1.4\times10^{-5}$ となって，風の応力が 10^{-5} をこえることがわかる。

(iv) 加速度$(1/g)(\partial u/\partial t)$

これは非定常の影響を表現した部分で，波動としてじょう乱が伝播すると考えることは，とりもなおさず，この加速度が大きな値を持っていると解釈することである。しかし，この値の推定はなかなかむずかしい。検潮記録を用いて概略の値を推定しよう。伊勢湾を各検潮器に対応する水域に分け，水位上昇高と水面積との積はその水域へ流入した水の体積とみなす。湾口からの水の出

表-1.4 水面こう配

	名古屋—津		津—鳥羽		福江—前芝	
	水位差	水面こう配	水位差	水面こう配	水位差	水面こう配
9	0m		0m		0m	
10	− 0.02	− 0.04×10⁻⁵	+ 0.05	+ 0.13×10⁻⁵	+ 0.04	+ 0.15×10⁻⁵
11	+ 0.02	− 0.04	+ 0.05	+ 0.13	+ 0.03	+ 0.11
12	+ 0.02	− 0.04	+ 0.06	+ 0.16	+ 0.04	+ 0.15
13	+ 0.08	− 0.15	+ 0.05	+ 0.13	+ 0.01	+ 0.04
14	− 0.16	− 0.30	+ 0.16	+ 0.42	− 0.02	− 0.07
15	− 0.35	− 0.66	+ 0.33	+ 0.87	− 0.12	− 0.45
16	− 0.48	− 0.91	+ 0.47	+ 1.08	− 0.09	− 0.34
17	− 0.70	− 1.35	+ 0.71	+ 1.87	− 0.25	− 0.93
18	− 1.07	− 2.03	+ 1.03	+ 2.70	− 0.33	− 1.23
19	− 0.87	− 1.65	+ 1.09	+ 2.87	− 0.38	− 1.42
20	− 0.53	− 1.00	+ 0.73	+ 1.94	− 0.21	− 0.78
21	+ 0.87	+ 1.65	+ 0.50	+ 1.32	− 0.21	− 0.78
22	+ 1.68	+ 3.18	+ 0.07	+ 0.18	+ 0.69	+ 2.57
23	+ 1.40	+ 2.65	− 0.03	− 0.08	+ 1.57	+ 5.86
0	+ 0.72	+ 1.36	+ 0.11	+ 0.29	+ 1.33	+ 4.96

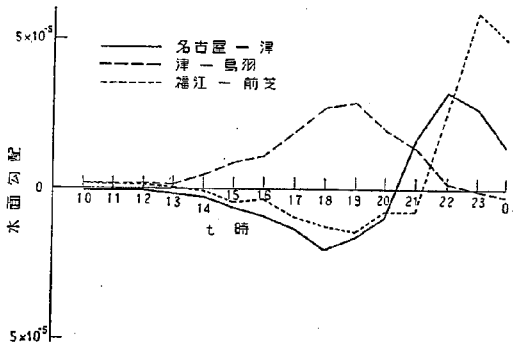


図-1.9 各地点間の水面こう配変動状況

入だけを考えて，流速を算出することができる。この時間的変化高が $\partial u/\partial t$ である。$(1/g)(\partial u/\partial t)$ を表-1.5，図-1.10 に示す。

この値をみると，ごく一部の点を除いて 10^{-6} 以下にしかならない。これは水面こう配，風の応力と比べて小さい。

(v) **海底摩擦**

算出された流速は 0.3m/sec の程度であるので，(表-1.6 および図-1.11)これを用いて海底摩擦を推定してみよう。河川における同じ摩擦公式が成立つとすると，たとえば，マニングの公式を用いれば $n^2u^2/R^{4/3}$ である。$n=0.02$，$R=30$m ととれば，この項は 4×10^{-7} になる。

また，海底では流れはなく，流速は深さの2次式であ

表-1.5 各地点における $1/g\ \partial u/\partial t$ の値

時刻＼位置	名古屋	四日市	津	松阪	前芝	福江	鳥羽
10	0.186×10⁻⁶	−0.401×10⁻⁶	−0.375×10⁻⁶	−0.551×10⁻⁶	−0.434×10⁻⁶	−0.379×10⁻⁶	−0.556×10⁻⁶
11	−0.650	0.109	−0.039	−0.340	−0.521	−1.635	−1.056
12	−0.186	−0.611	−0.637	−0.992	−0.607	−0.973	−1.534
13	−1.674	−0.689	0.0064	−0.047	−0.607	−1.563	−0.547
14	0.078	−0.109	0.039	−0.112	−0.434	−0.084	−0.296
15	0.093	0.337	0.027	0.039	0.782	0.093	1.687
16	0.278	−0.0015	0.027	0.606	−0.955	0.346	0.763
17	0	1.521	1.414	2.416	0.521	0.160	2.594
18	2.881	0.578	−0.555	0.476	0.434	0.670	0.641
19	−2.415	2.967	0.718	3.143	2.170	2.337	4.225
20	7.806	−0.543	−0.734	2.590	2.765	9.203	3.874
21	−6.319	−7.109	−4.508	5.828	8.073	7.492	8.224
22	−9.479	−5.595	3.545	2.777	-12.153	-30.960	−9.002
23	−3.531	0.671	0.465	0.683	−9.722	8.290	−3.375

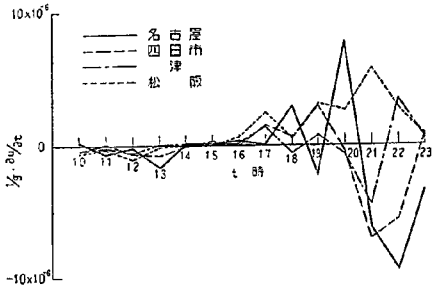


図-1.10(a)　各地点における$(1/g)(\partial u/\partial t)$の変動状況

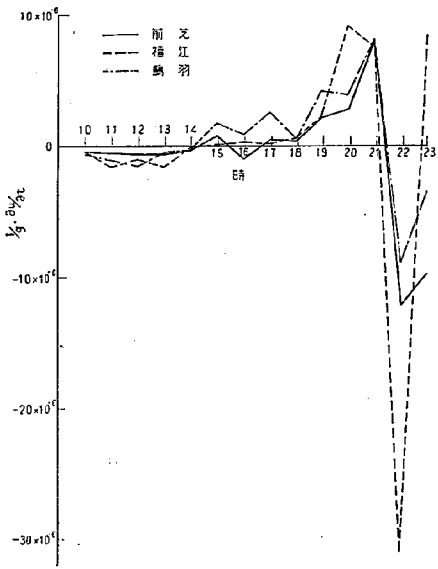


図-1.10(b)　各地点における$\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t}$の変動状況

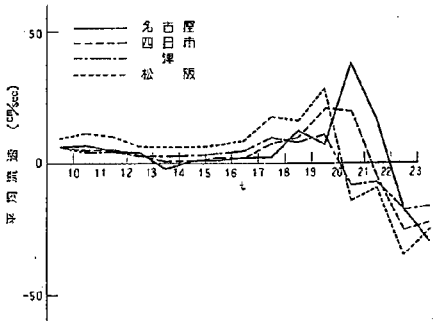


図-1.11(a)　各地点における平均流速の変動状況

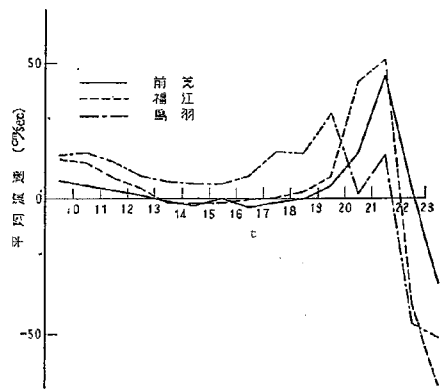


図-1.11(b)　各地点における平均流速の変動状況

らわされるとする山田の式によれば，

$$\frac{3\nu\rho_w}{g(h+\zeta)^2}u$$

という海底摩擦の式ができる。$\nu=\mu(h+\zeta)$と仮定して，$\mu=0.1$ c・g・s とおけば，10^{-6}になる。

湾奥とか，岸ぞいの附近とか，水深の浅いところではこれより大きな値となることが予想されるが，大部分は無視できると思われる。

表-1.6　各地点における平均流速 m/sec

時刻＼位置	名古屋	四日市	津	松阪	前芝	福江	島羽
9.30	6.219×10^{-2}	6.297×10^{-2}	6.251×10^{-2}	9.559×10^{-2}	6.450×10^{-2}	14.426×10^{-2}	16.1×10^{-2}
10.30	6.877	4.878	4.934	11.250	4.905	13.104	17.3
11.30	4.599	5.260	4.801	10.021	3.062	7.349	13.6
12.30	3.942	3.112	2.554	6.390	0.921	3.910	8.1
13.30	−1.971	0.673	2.580	6.212	−1.220	−1.575	6.2
14.30	0.657	0.819	3.019	6.266	−2.764	−1.882	5.6
15.30	0.964	2.002	3.392	6.835	0	−1.557	5.3
16.30	1.971	2.002	4.575	8.633	−3.360	−0.344	8.1
17.30	1.971	7.371	9.549	17.480	−1.545	0.217	17.2
18.30	12.133	9.409	7.594	15.949	0	2.588	16.7
19.30	6.877	20.748	10.640	28.231	4.607	8.163	31.4
20.30	37.668	19.565	− 8.485	-14.418	16.856	43.241	1.3
21.30	15.374	− 5.515	− 7.368	−9.808	45.393	51.332	15.9
22.30	−18.002	−25.243	−18.141	-35.137	2.466	-39.404	−46.3
23.30	−30.441	−22.877	−16.505	-25.205	-31.897	-69.287	−51.8

(vi) Coriolis の項

この伊勢湾程度の規模では Coriolis の項(地球自転による転向力の項)は主因子とはなりえない。一応計算してみると，流速 0.3 m/sec として $(2\omega/g)\sin\varphi \cdot u = 2\times10^{-6}$ となる。このこう配は流向と直角の方向であることは言うまでもない。

2 波の推算

〔1〕概　説

浅海域における波は水深の影響を受ける。そのため風によって発生する波の波高および周期は風速，吹続時間，吹送距離以外に水深にも関係するようになる。すなわち，水底の摩擦によるエネルギーの消失があるので，浅海波は同一条下における深海波より多少規模が小さくなる。

次式は波が一様水深の浅海域を伝わる場合の波高の減衰を示すもので，Bretschneider によって与えられたものである。

$$H=H_1\left[\frac{f\cdot H_1\cdot\phi_f\cdot\Delta x}{K_s\cdot T^4}+1\right]^{-1} \quad\cdots\cdots(2.1)$$

ここに，H：距離 Δx を進行した後の波高

H_1：始めの波高

Δx：波の進行距離

f：海底における摩擦係数

T：周期

K_s：水深による波高変化を示す係数

$\phi_f=64\pi^3/3g^2[K_1/\sinh(2\pi h/L)]^3$

h：水深

L：波長

g：重力の加速度

波高3 m，周期 6 sec の波が水深30m，20m，15m，10m，7.5m の海域をそれぞれ1 km，3 km，5 km，10 km 進行した場合の H/H_1 を計算すると表-2.1 のようになる。これによると水深が 20m の場合には，10km 進んでも波高の減少は約2％にすぎないが，水深が15m 10mとなるにつれて摩擦の影響はしだいに大きくなり，7.5mとなると同一距離に対して約40％減少することがわかる。また進行距離の影響も大きく，1km 程度の進行では波高の減少は非常に小さい。

図-2.1 は伊勢湾の海底地形を示すものである。これ

表-2.1 波高3 m，周期6 sec の波が浅海を進行する場合の波高減衰率(H/H_1)

水深 / 進行距離	30m	20	15	10	7.5
1 km			0.996	0.980	0.940
3	0.9999	0.997	0.985	0.940	0.840
5	0.9997	0.995	0.970	0.900	0.760
10	0.9995	0.982	0.950	0.830	0.610

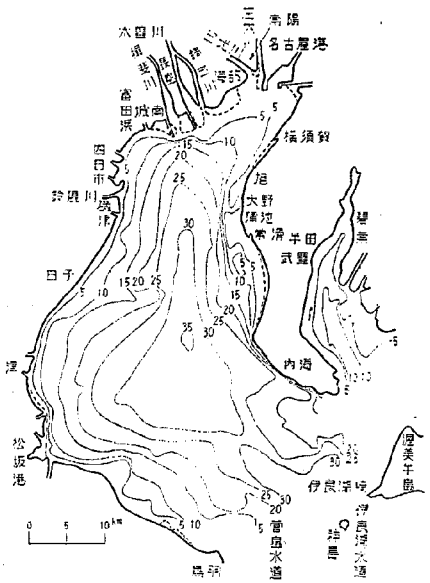


図-2.1 伊勢湾および知多湾の深浅図

によると，伊勢湾の中心附近は水深30～35mで，周期6～7 sec 程度の波に対してはほとんど深海と考えられる。しかし木曽川河口付近から名古屋港に至る海域は水深10m以下できわめて浅い。また長良川河口の左右岸では10mの等深線がかなり海岸線に接近しているが，水深5 m以下の海域が約3km ある。さらに南に下って，富田浜，四日市，鈴鹿川河口付近になると，5 mの等深線が海岸にずっと接近するのがみられる。

表-2.1に示したような海底摩擦の影響と上述の海底地形とを考慮すれば，伊勢湾台風によって伊勢湾奥の各地に生じた波を推算する場合，四日市以南の地域を除いて，海底摩擦の影響を考慮せねばならないことは明らかである。Bretschneider は従来の SMB 法と (2.1) 式とを組合せて浅海域に発生する波を推算する方法を示した。これは摩擦係数のとり方，周期の計算などに問題はあるが，現在のところ浅海域の波を計算する一つの有力な方法である。

伊勢湾台風による各地の風向・風速をしらべてみると時間によって著しく変化している。上述の Bretschneider の方法は一定の風向・風速の場合に適用されるものであるから，各地の波を計算するためには，まず Fetch を定め，ついでその Fetch 上で風速と吹続時間を適当に定めなければならない。したがって，この場合は計算者の主観がはいることは避けられない。この主観を除き，機械的に波を計算するためには，風向・風速の変化も考慮した方法を用いなければならない。

以下に Bretschneider の方法および風向・風速の変化と海底摩擦とを考慮した SMB 法の2方法によって波を計算し，両者の結果を比較検討した。

〔2〕 浅海における波の推算法

(1) Bretschneider の方法

図-2.2は深海における波の推算図である。(a)はFetch と風速と波高との関係，(b)は Fetch と風速と周期との関係，(c)は Fetch と風速と最小吹続時間との関係を示すもので，1958年に Bretschneider が与えた深海波の発生理論に用いられる各無次元量から計算したものである。これらの図によって海面が風から受けるエネ

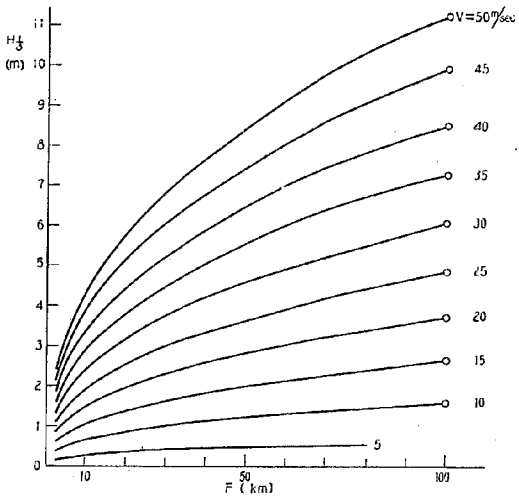


図-2.2(a)　Fetch・風速・波高の関係

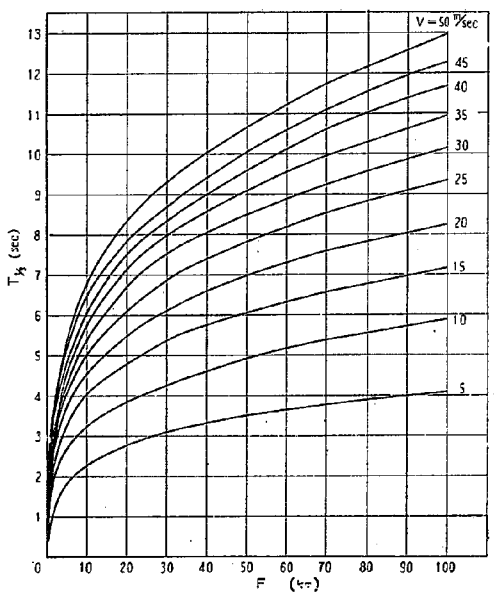


図-2.2(b)　Fetch・風速・周期の関係

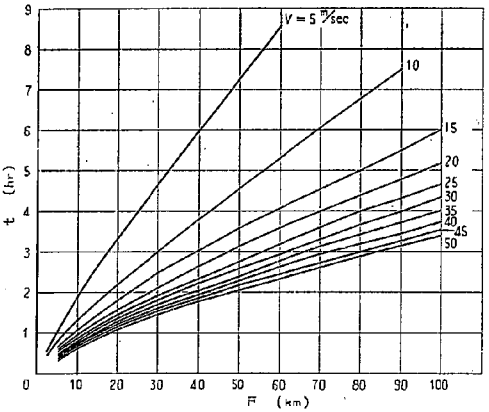


図-2.2(c) Fetch・風速・最小吹続時間の関係

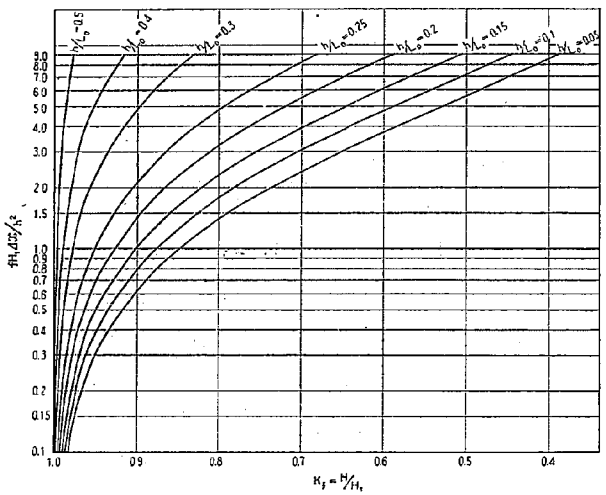


図-2.3 海底摩擦による波高減衰率

ルギー量を知ることができる。一方図-2.3は(2.1)式を図示したもので，海底摩擦による波のエネルギーの消失を示すものである。そこで，これらの図を組合せて浅海域の波を計算する。

(i) 一様水深の浅海域に発生する波の推算

一様水深の比較的浅い海域上で，波がしだいに発達すれば，ついに波長の1/2が水深より大きくなり，それ以後は海底摩擦によるエネルギーを失うと考えられる。図-2.4において波長の1/2が水深に等しくなった点を，Aとし，A点における波高を H_0，周期を T_0 とすれば，波が ΔF だけ進んだ後の波はつぎのように求められる。

(a) $F_0+\Delta F$ と与えられた風速 (V) とを図-2.2に適用して波高 (H_0')，周期 (T_0') を求める。

(b) $(H_0+H_0')/2$，$(T_0+T_0')/2$ を図-2.3に適用して K_f を求める。

(c) $\{(H_0+H_0')/2\}\cdot K_f$ と V とを図-2.2(a)に適用してFetch (F_e) を求める。

(d) F_e と V とを図-2.2(b)に適用して周期 (T_1') を求める。

(e) $\{(H_0+H_0')/2\}\cdot K_f$ と $(T'_0+T_1')/2$ とが求める波高と周期である。ただし，$\{(H_0+H_0')/2\}\cdot K_f$ は相等深海波高を示すから，水深 h における波を求めるためには，$(T_0+T_1')/2$ と h とを図-2.5に適用して K_f を求め，これを $\{(H_0+H_0')/2\}\cdot K_f$ にかけなければならない。

Bretschneider は上述のものと同じような方法によっ

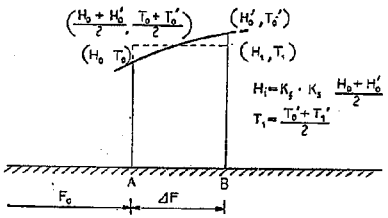


図-2.4　一様水深の浅海における波の推算

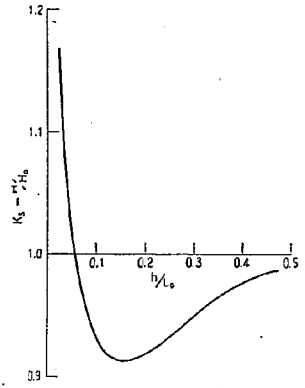


図-2.5　水深による波高変化率

て一様水深の浅海域に発生する波の推算図（図-2.6）をつくった。この図による波の推算の手順はつぎのとおりである。

（a）風速，Fetch，Fetch 内の平均水深を与える。

（b）gF/V^2，gh/V^2 を計算する。

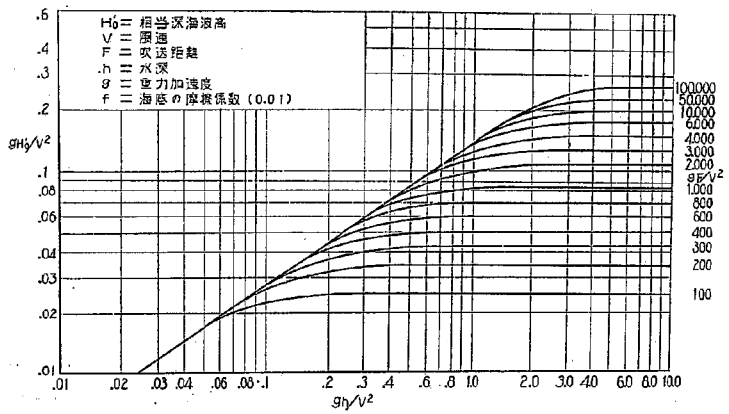


図-2.6　一様水深の浅海における波の推算図

（c）これらの値を図-2.6に適用して gH_0'/V^2 を求める。

（d）H_0' を計算し，H_0' と V を図-3.2に適用して周期 T を求める。

（e）T と h とを図-2.5に用いて K, を求める。

（f）求める波高と周期は K, H_0' と T である。

ここで，$f=0.01$ としているが，Bretschneider は f をこのようにとったときに，実測値と計算値とがよく一致したとのべている。また，この図は吹続時間が十分に長い場合に適用されるものであるから注意せねばならない。

(ii)　水深が変化する場合の波の推算

実際の海では一様水深と考えてよい場合はきわめて少なく，Fetch に沿った断面は大部分図-2.7のようになる。このような場合にはまず深海波と考えられるところまで図-2.2により計算し，それより海岸側では Fetch をいくつかの区間に分割し，その間は等水深と考え，

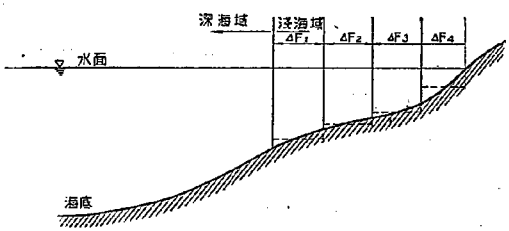


図-2.7　水深が変化する浅海における波の推算

(i) でのべた方法を適用して順次計算を進める。この場合深海と浅海との境界点はわからないが，表-3.1にも示したように水深15mくらいまでは摩擦の影響は非常に小さいので，水深15m以上の適当な点を選んでさしつかえない。

また，この場合 Fetch 全体の平均水深を求め，図-2.6によって計算することもできる。この方法は水深15m以下の区間が短かい場合にはさしつかえないが，浅い区間が長く，摩擦の影響が大きい場合には，誤まった結果を与える。すなわち，海底摩擦の影響は水深の小さいところに集中してあらわれるので，平均水深では大きすぎることが多く，したがって波高が過大となりやすい。それゆえに，Fetch 全体の平均水深を用いるよりも，深い部分と浅い部分とを分けて計算するのが安全である。

(2) 風向・風速の変化および海底摩擦を考慮した S. M. B. 法による推算

Wilson は1955年に風域が移動する場合の波の図式計算法を発表した。この基本的な考え方は適当に選んだ固定した直線を考え，その上のある点において発生し，進行する波は，その点における水深と周期とによって決まる群速度で進行し，風速および水深が不連続に変化しても群速度は連続的に変化するものとする。

この考え方と，前述の Bretschneider の方法とを組合せて波を計算する。図-2.8において Fetch AB をとって考えてみる。いま，風は時間的には変化するが，Fetch に平行な成分はつねにAからBの方向に吹くものとする。まず Fetch を図のように4区間(実際にはいくつでもよい)に分ける。この断面は図-2.8（b）のとおりで，AC間は比較的深く深海とみなされ，CB間は浅く浅海とみなされるものと仮定する。つぎに，A，(a)，(b)，(c)，Bの各点における風速の時間的変化を与える。この場合，風速は実際の風速のAB成分をとる。波の計算の手順はつぎのとおりである。

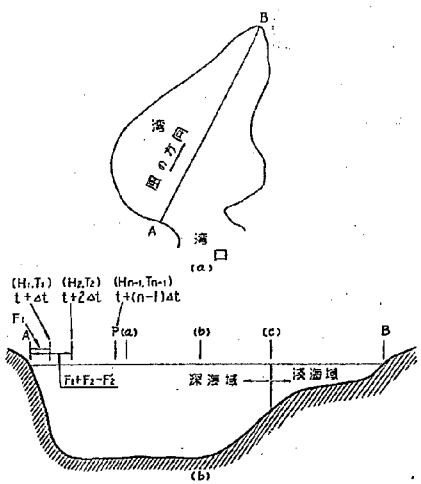


図-2.8　風向・風速の変化および海底摩擦を考慮した SMB 法による波の推算（深海域）

(i) Aa 間（深海と考える）

(a) 時刻 t を時間の原点とし，適当な時間の単位 Δt をとる。

(b) Δt 時間内の Aa 間の平均風速(V_1)を求める。

(c) 図-2.2（c）に V_1 と Δt とを適用して F_1 をを求める。

(d) F_1 と V_1 とを図-2.2（a），（b）に適用して H_1, T_1 を求める。

(e) H_1 T_1 はAから F_1 だけ離れた点における時刻 $t+\Delta t$ の波高および周期である。

(f) 時刻 $t+\Delta t$ と $t+2\Delta t$ との間の平均風速(V_2)を求める。

(g) V_2 と T_1 とを図-2.2（b）に適用して F_2' を求める。F_2' と V_2と を図-2.2（c）に適用して t_2 を求める。$t_2+\Delta t$ と V_2 とを図-2.2（c）に適用して F_2 を求める。

(h) V_2 と F_2 とを図-2.2（a）および（b）に適用して H_2, T_2 を求める。H_2, T_2 はAから $F_1+F_2-F_2'$ 離れた点における時刻 $t+2\Delta t$ の波高および周期である。

このようにして計算を進め，図-2.8（b）において時刻 $t+(n-1)\Delta t$ にP点に達したとする。さらに Pa 間において上述の方法を適用した場合 $t+n\Delta t$ に対する波の位置がa点をこえる場合が起り得る。この場合にはつぎのようにしてa点における波とその到達時刻を求める。

(i) (g)と同様 $F_n'_{-1}$ を求め，$F_n'_{-1}+\overline{Pa}$ を F_n とする。

(j) この F_n を用いて(h)の操作を行なえばaにおける波高と周期とが求められる。

(k) (g)において $t_n+\Delta t'$ と V_n とを図-2.2(c)に適用した場合，求めるものが F_n となるように $\Delta t'$ を定める。求める時刻は $t+(n-1)\Delta t+\Delta t'$ となる。

ab間およびbc間も Aa間とまったく同様に計算することができる。

(ii) CB 間（浅海波と考える）

CB 間を適当に分割し，各区間は水深一様とする。また水深の時間的変化は与えられるものとする。図-2.9について説明する。

(a) 時刻 t における C 点の波高および周期を H, T とする。

(b) 時刻 t を時間の原点とし，適当な時間の単位 Δt を定める。

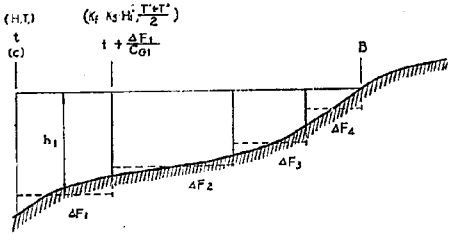


図-2.9　風向・風速の変化および海底摩擦を考慮した SMB 法による波の推算（浅海域）

（c）t と $t+\Delta t$ 間の平均風速(V_1)を求める。

（d）図-2.1(b)に V_1 と T とを適用して F' を求める。

（e）$F'+\Delta F$ と V_1 とを図-2.2(a)および(b)に適用して H_1' および T_1' を求める。

（f）t と $t+\Delta t$ 間の平均水深(h_1)を求める。

（g）H_1', T_1', h_1, ΔF_1 を図-2.3および図-2.5に適用して K_3, K_1 求める。

（h）$K_1 H_1'$ と V_1 とを図-2.1 に適用して周期 T_1'' を求める。

（i）$K_3 \cdot K_1 \cdot H_1' = H_1$ と $(T_1'+T_1'')/2 = T_1$ とが求める波高および周期である。

（j）$(T+T_1)/2$ と h_1 とから群速度 C_{G1} を計算する。

（k）$t+\Delta F_1/C_{G1}$ が波の到達時刻である。

（l）$t+\Delta F_1/C_{G1}$ と $t+\Delta F_1/C_{G1}+\Delta t$ との間の平均風速 V_2 を求め，T_1 と V_2 とを用いて上述の計算を繰返せばよい。

この計算の中では風から受けるエネルギーは SMB 法，海底摩擦によるエネルギーの消失は Bretschneider 法によって計算しているので，各境界点において実際の群速度は連続ではない。しかし群速度を連続にする意味は海面があらかじめもつエネルギーを計算にとり入れる手段と考えられる。したがって前述の計算法に示したように，エネルギーの供給の際に仮想的な群速度を考え，これを連続させるのが適当である。

風および水深の変化を考慮した計算法としては，図-2.3から各水深に対する F-V-H の関係を計算し，また浅海に適用すべき F-V-t の関係を求めて，これらと図-2.2(b)とを組合せて計算する方法も考えられる。この方法では群速度を連続させることができるが，そのために水深の小さい場合に，非常に長い仮想的な浅い海を考えることになり，波高が過小になりやすい。とくに風速が減少する場合にこの傾向がいちじるしい。

これに対し，ここにのべた方法は深海と浅海とに分割していること，群速度が連続していないことなど理論的な欠点はあるが，風および水深が極端に変化しない限り一般に使用可能であり，また深海と浅海との境界点の選定も実際上問題はないので実用的な方法と考えられる。しかし Bretschneider の方法，Wilson の方法の中に若干の問題点があるので，今後この方法は実測資料により十分検討してゆかねばならない。

〔3〕 湾内の各地における波の推算

(1) Bretschneider 法による推算

波を計算した地点と採用した Fetch は図-2.10に点線で示したとおりで，実際の計算方法および計算条件はつぎのとおりである。

(i) 計算方法

Fetch を浅い部分と深い部分とに分け，前者には〔2〕，(1)の(ii)でのべた方法を適用し，後者には図-2.6を適用して計算した。両者の境界点は南陽海岸では 5 m等深線とし，その他のところは10m等深線とした。

(ii) 風向・風速・吹続時間

湾内の風向は実測値を参照して表-2.2のように仮定した。また風速は高潮の最盛時に近い時刻の実測値を参照して定めた。吹続時間は Fetch の方向に対し±22.5°の範囲を有効と考えて決定した。

表-2.2　伊勢湾台風時における仮定風向

時刻	18時	19	20	20.30	21	21.30	22	23
風向	ESE	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	SW

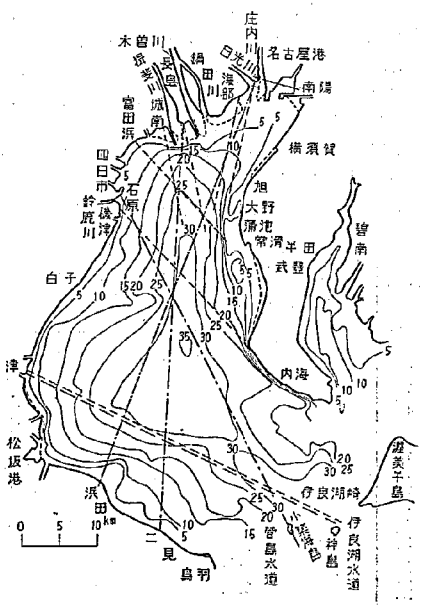


図-2.10　波を計算した場所と Fetch

表-2.3　Bretschneider 法による計算結果

海岸名	風速	風向	吹続時間	相等対岸距離	波高	周期	最終区間における水深
南陽	35m/s	SSW～S	1hr(20^h30′～21^h30′)	14.3km	1.8m	5.4sec	7.3m
海部	35	SSW～S	1 (20^h30′～21^h30′)	14.3	2.0	5.4	7.3
長島	35	SSE～S	1 (20^h30′～21^h30′)	14.3	1.8	5.5	4.3
城南	35	SSE～S	1 (20^h30′～21^h30′)	14.3	1.9	5.6	4.3
富田浜	35	SE	1.5(19^h30′～21^h)	18.3	2.7	6.2	6.3
石原	35	SE	1.5(19^h30′～21^h)	25.0	3.4	7.0	6.8
津	30	ESE	3 (16^h～19^h)	45.0	3.9	8.0	10
半田	35	SSE～S	1 (20^h30′～21^h30′)	14.3	2.0	5.4	6.3

(iii)　水　深

海図の基準面は T.P.－1.0m，堤防ののり先の地盤高は T.P.－0.5m と定め，高潮を考慮して水深を決定した。

以上のようにして計算した結果は表-2.3に示すとおりである。この表において波高および周期は堤防前面のものであるが，津のみは5m等深線におけるものである。また最終区間は長島および城南では0m等深線から堤防まで，津では10m等深線から5m等深線までを表わすが，その他の地域は5m等深線から堤防前面までを示す。

(2)　風向・風速の変化および海底摩擦を考慮した S. M. B. 法による推算

波を計算した地点と採用した Fetch は図-2.10に一点鎖線で示したとおりで，実際の計算方法および計算条件はつぎのとおりである。

(i)　計算方法

各 Fetch のうち15m 等深線より浅い部分は浅海と考え，15m等深線より深い部分は深海と考えた。ただし，15m等深線より浅い部分でも Fetch の始点付近にある場合は深海と考えた。15m等深線で分割したのは多分に便宜的なものであるが，水深が20m以上ある場合には，海底摩擦の影響はきわめて小さいので，実際には深海とみてさしつかえない。また Fetch の始点付近は波が小さいから水深が浅くても実質的に深海と考えてよいと思われる。浅海の部分では風向・風速の変化および海底摩擦の影響を考慮し，深海の部分では風向・風速の変化のみを考慮した。

(ii)　風向・風速

計算に用いた風の実測値は名古屋，四日市，津，伊良湖におけるもので，それらは表-2.4のとおりである。これらの実測値から各 Fetch の始点と終点における Fetch 方向の風速成分の時間的変化を計算した。この始点と終点における風の計算はつぎのように行なった。

南陽　始点には津と伊良湖との風の平均値を用い，終点には名古屋の風を用いた。

長島　始点には津と伊良湖との風の平均値を用い，終点には名古屋と四日市との風の平均値を用いた。

石原　始点には伊良湖の風を用い，終点には四日市の風を用いた。

津　　始点には伊良湖の風，終点には津の風を用いた。

表-2.5はこのようにして計算した風速を示したものである。また Fetch 内のある点の風速は始点から終点までその変化が直線的であるとして計算した。

(iii)　水　深

各 Fetch の断面は図-2.11のとおりであり，それぞれ深海部と浅海部とに分割され，そのおのおのが，またいくつかの区間に分割されている。浅海部の水深は各区間の基本水準面以下の水深に終点の潮位変化を加えて算出した。各終点の潮位変化は図-2.12に示すとおりである。

以上の条件の下に計算を行なったが，以下にその結果

表-2.4　各地の風向および風速

時刻	名古屋		四日市		津		伊良湖	
	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速
9時		m/sec		m/sec	E	11.2 m/sec	E	16.4 m/sec
10			ESE	8.2	〃	13.2	〃	14.9
11			〃	9.4	〃	10.7	〃	13.4
12			〃	10.7	〃	13.9	〃	19.5
13			〃	11.0	〃	12.2	〃	20.0
14			E	10.2	〃	17.9	〃	20.8
15			〃	17.3	〃	19.4	〃	20.0
16			〃	17.9	〃	24.2	〃	22.3
17			ESE	17.0	ESE	29.1	ESE	24.0
18			〃	16.6	〃	26.4	〃	25.4
19			〃	20.7	〃	33.6	〃	26.0
20	ESE	27.4	SE	27.3	SE	35.0	SE	33.0
21	SE	27.0	S	27.0	S	24.3	S	38.0
22	SSE	37.0	〃	17.7	SW	12.9	S	30.0
23	S	21.0	SW	14.2				
24								

表-2.5　各 Fetch の始点および終点におけるその Fetch 方向の風速成分

時刻	南陽		長島		石原		津	
	南陽	浜田	長島	二見	石原	小築海島	津	神島
9時	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec			10.3 m/sec	15.1 m/sec
10					6.5 m/sec	7.5 m/sec	12.2	13.8
11					7.4	6.7	9.9	12.4
12					8.5	9.8	12.8	18.0
13					8.7	10	11.3	18.5
14					5.1	10.4	16.5	19.2
15					8.6	10	17.9	18.5
16					9.0	11.2	22.2	20.6
17			3.3	10.2	13.5	19.0	29.1	24.0
18			6.6	9.8	13.1	20.1	26.4	25.4
19			7.8	11.4	16.4	20.6	33.6	26.0
20	2.1	2.3	15.9	24.0	26.4	31.9	32.4	30.5
21	12.1	15.5	23.1	31.2	23.4	32.9	9.3	14.6
22	28.1	29.6	26.0	19.5	13.3	26.0		11.5
23	20.0	20.0	15.5		3.7	14.0		
24						11.0		

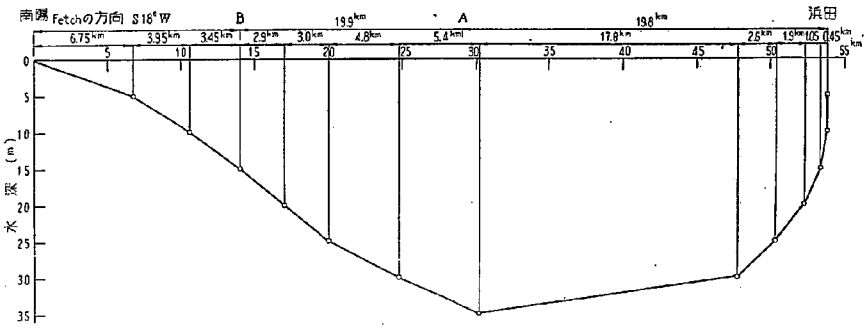


図-2.11(a)　南陽～浜田間の海底断面

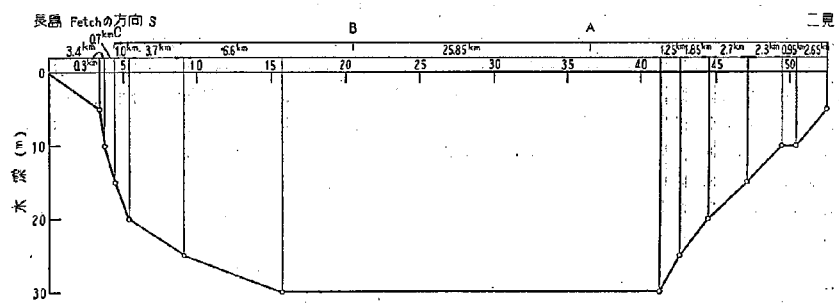


図-2.11(b)　長島～二見間の海底断面

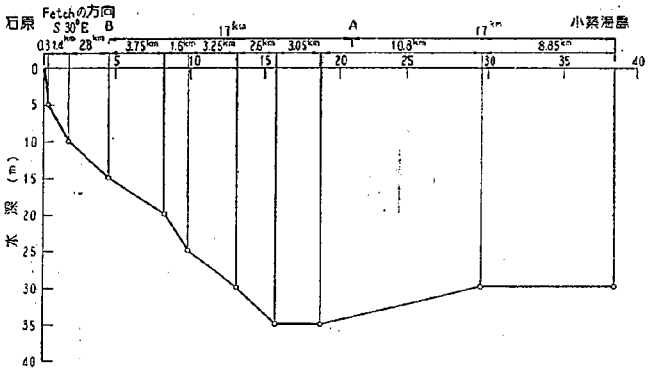


図-2.11(c) 石原～小築海島間の海底断面

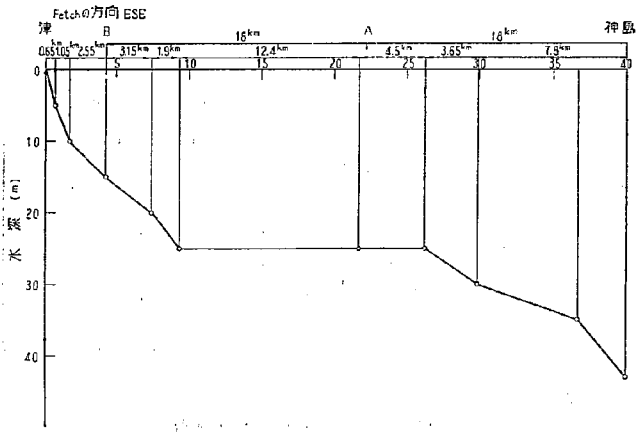


図-2.11(d) 津～神島間の海底断面

を示す。

(i) 南 陽

図-2.11(a)のように始点は浜田で，浜田と南陽との間をA，Bの2点で3区間に分割した。浜田～B区間が深海で，B～南陽区間が浅海である。各区間における風速の時間的変化は図-2.13(a)のとおりである。計算およびその結果を表-2.6に示す。これらの表において，(c)および(e)の H_2，$(T_1+T_2)/2$，到達時刻の各欄の( )をつけたものが，南陽における相当深海波高，周期，到達時刻を示している。相当深海波高を南陽海岸における波に換算するためには h/L_{01} を図-2.5に適用して K_s を求め，これを H_2 にかければよい。この換算については以下すべて同じである。

(ii) 長 島

始点は二見で，二見，長島間をA，B，Cの3点で，4区間に分割した。C～長島間が浅海である。各区間における風速の時間的変化は図-2.13(b)のとおりである。計算結果を表-2.7に示す。(長島における波は(d)中の( )をつけたものである。

(iii) 石 原

始点は菅島水道付近の小築海島で，これと石原との間をA，Bの2点で3区間にわけた。各区間における風速の時間的変化は図-2.13(c)に示すとおりである。計算結果は表-2.8に示す。石原における波は(c)中の( )をつけたものである。

(iv) 津

始点は伊良湖水道付近にあってこれと津との間をA，Bの2点で3区間にわけた。B～津間が浅海である。各区間における風の時間的変化は図-2.13(d)のとおりで，計算結果を表-2.9に示す。津における波は(c)中の( )をつけたものである。

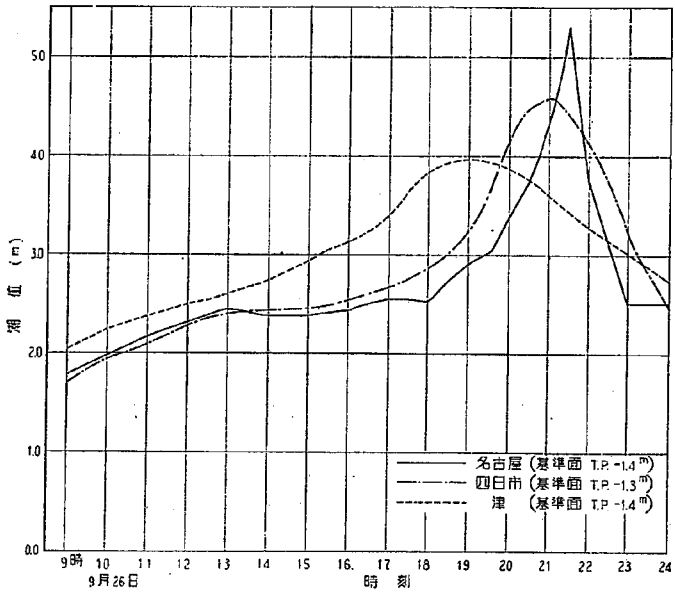


図-2.12　名古屋，四日市，津における実測潮位

(3)　波の推算値の検討

以上二つの方法によって波を計算したが，その結果を比較すると表-2.10のようになる。〔2〕・(2)の方法では波の時間的変化が与えられるが，この表には最高値と考えられるものを載せた。これをみるとまず両者ともいずれも南になるほど波が大きくなるが，これは伊勢湾の海底地形から当然予想されたことである。実際に南陽，海部海岸では堤防前面の200～300kgの捨石が台風後でもあまり移動していないが，富田浜では約200kgの石が破壊された堤防の天ばまで打ち上げられており，また四日市では1tonのテトラポッドがかなり移動していたことから考えて，富田浜以南では南陽，海部海岸より波が大きかったと推察される。

つぎに両者の計算値には若干の差異があるが，現在のところ正確な実測値がないので，どちらがより真の値に近いかはっきりわからない。しかし両者の差異は比較的小さく，だいたいのところ南陽付近では1.5～2.0m程度，長島付近では2m前後，四日市付近で3m前後，津付近では3.5～4.0m程度とみてよいと思われる。知多湾では3.2(2)の方法では計算しなかったが，実際のFetch

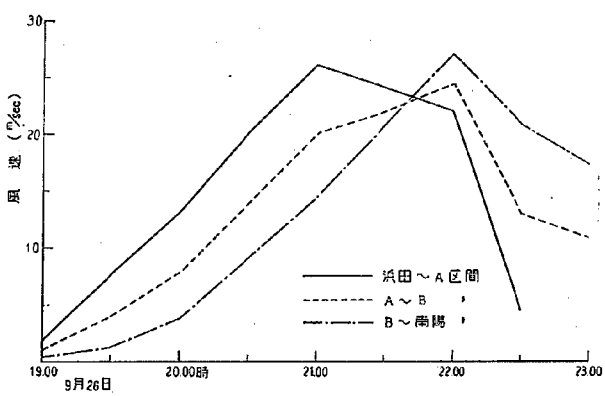


図-2.13(a)　南陽～浜田間の各区間における風速の変化

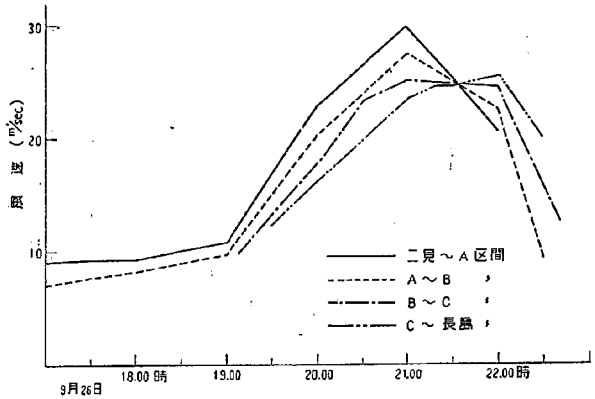


図-2.13(b) 長島～二見間の各区間における風速の変化

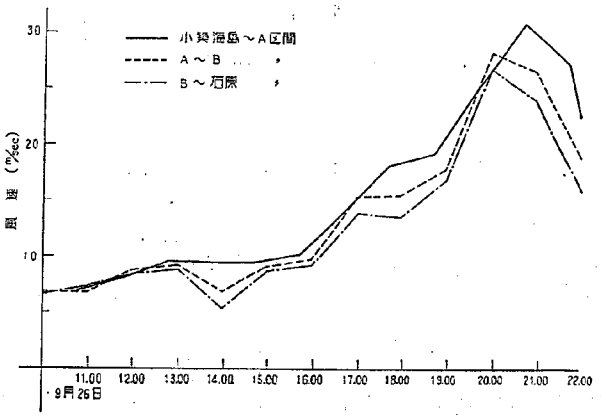


図-2.13(c) 石原～小柴海島間の各区間における風速の変化

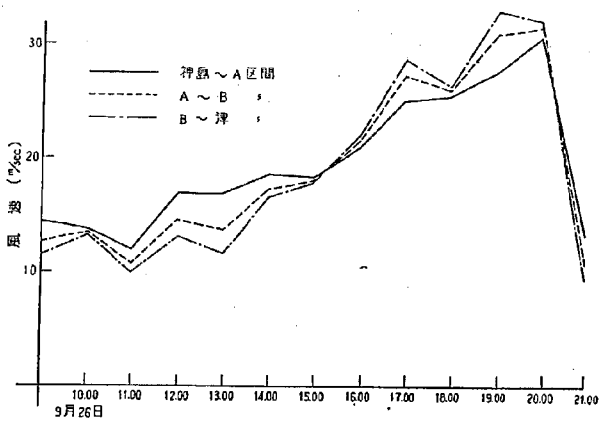


図-2.13(d) 津～福島間の各区間における風速の変化

表-2.6　南陽～浜田間における波の推算

（a）海岸名　南陽　　区間　浜田～A　　区間距離　19.80 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
19.00										
19.30	4.8				0.5	2.0	0.13	1.5	2.0	
20.00	10.3	1.5	1.5	0.4	0.9	6.0	0.52	2.9	6.5	
20.30	16.5	2.9	1.8	0.38	0.88	8.0	1.05	3.95	12.7	
21.00	23.0	3.95	4.5	0.55	1.0	11.6	1.85	5.0	19.8	20.57
19.30										
20.00	10.3				0.5	2.5	0.4	2.3	2.5	
20.30	16.5	2.3	1.5	0.3	0.8	7.0	1.0	3.8	8.0	
21.00	23.0	3.8	4.0	0.5	1.0	11.5	1.85	5.0	15.5	
21.30	25.0	5.0	10.0	0.88	1.13	14.3	2.23	5.55	19.8	21.15
20.00										
20.30	16.5				0.5	3.5	0.75	3.3	3.5	
21.00	23.0	3.5	3.0	0.45	0.95	10.5	1.78	4.85	11.0	
21.30	25.0	4.85	9.0	0.8	1.3	17.5	2.40	5.90	19.5	
22.00	23.0	5.90	21.0	1.55	1.57	21.3	2.36	6.0	19.8	21.31
20.30										
21.00	23.0				0.4	4.0	1.22	3.82	4.00	
21.30	25.0	3.82	3.5	0.45	0.95	11.0	2.0	5.15	11.50	
22.00	23.0	5.15	13.0	1.10	1.57	21.3	2.36	6.00	19.80	21.58

（b）海岸名　南陽　　区間　A～B　　区間距離　19.90 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
20.57										
21.27	20.7	5.0	14.0	1.2	1.7	22.5	2.12	5.75	8.5	21.27
21.27										
21.57	23.2	5.75	19.0	1.45	1.95	30.0	2.7	6.6	19.5	21.57
21.57										
22.07	23.1	6.6	30.0	1.96	2.00	30.4	2.75	6.65	19.9	21.59
21.15										
21.45	22.2	5.55	17.0	1.35	1.85	27.0	2.5	6.35	10.0	21.45
21.45										
22.15	21.1	6.35	31.0	2.15	2.62	40.9	2.77	6.82	19.9	22.13
21.31										
22.01	23.2	6.0	21.5	1.57	2.07	32.0	2.80	6.7	10.5	22.01
22.01										
22.31	18.7	6.7	46.5	3.06	3.55	55.9	2.75	6.95	19.9	22.30
21.58										
22.28	19.2	6.0	30.0	2.2	2.7	40.0	2.42	6.45	10.0	22.28
22.28										
22.58	12.8	6.45	94.5	6.8	7.3	104.4	2.20	6.70	19.9	22.58

（c）海岸名　南陽　　区間　B～南陽

時刻	平均風速	T_0	F km	$\Delta \cdot x$ km	$F+\Delta x$	H_1	T_1	L_{01}	h	$\frac{f \cdot H_1 \cdot \Delta x}{h^2}$	$\frac{h}{L_{01}}$	K_f	H_2	F'	T_2	(A) $\frac{T_1+T_2}{2}$	$\frac{T_0+(A)}{2}$	L_0	C_0	C_g	$\frac{\Delta x}{C_g}$	到達時刻
21.59																						
22.29	23.9	6.65	32.0	7.4	39.4	3.18	7.2	81.00	13.4	1.31	0.165	0.91	2.89	32.0	6.65	6.93	6.79	72.0	10.6	6.33	1110	22.19
22.19																						
22.49	20.8	6.93	45.0	6.75	51.8	3.0	7.2	81.00	5.67	6.29	0.070	0.54	(1.62)	11.5	4.8	(6.0)	6.6	67.8	10.3	5.70	1182	(22.39)
22.13																						
22.43	21.9	6.82	38.0	7.4	45.4	3.07	7.16	80.20	13.1	1.32	0.163	0.91	2.79	37.0	6.8	6.98	6.9	74.3	10.8	6.45	1148	22.32
22.32																						
23.00	19.0	6.98	56.0	6.75	62.8	2.87	7.2	81.00	5.3	6.9	0.066	0.49	(1.41)	11.0	4.5	(5.85)	6.42	64.3	10.0	5.52	1221	(22.52)

（d）海岸名　南陽　　区間　A～B　　区間距離　19.90 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
19.30										
20.00	6.1			0.5	2.0	0.18	1.6	2.0		
20.30	11.1	1.6	1.5	0.37	0.87	6.0	0.58	3.03		
21.00	17.0	3.03	2.5	0.40	0.90	8.0	1.12	3.98		
21.30	21.1	3.98	6.0	0.65	1.15	13.9	1.55	5.02	19.9	21.30

（e） 海岸名 南陽　区間 B～南陽　A点を19h30'に出発した波

時刻	平均風速	T_0	F km	Δx km	$F+\Delta x$	H_1	T_1	L_{01}	h	$\frac{f\cdot H_1\cdot \Delta x}{h^2}$	$\frac{h}{L_{01}}$	K_f	H_2	F'	T_2	(A) $\frac{T_1+T_2}{2}$	$\frac{T_0+(A)}{2}$	L_0	C_0	C_a	$\frac{\Delta x}{C_a}$	到達時刻
21.30																						
22.00	23.9	5.02	10.5	7.4	17.9	2.57	5.8	52.50	15.0	0.85	0.286	0.97	2.49	21.0	6.1	5.95	5.88	49.1	8.34	4.62	1600	21.57
21.57																						
22.27	23.9	5.95	19.5	6.75	26.3	2.75	6.55	67.10	5.95	5.2	0.089	0.58	(1.59)	7.0	4.55	(5.55)	6.05	57.1	9.44	5.47	1232	(22.18)

表-2.7　長島～二見間における波の推算

（a） 海岸名 長島　区間 二見～A　区間距離 16.00 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
17.00										
17.30	9.2				0.5	2.5	0.30	1.90	2.5	
18.00	9.3	1.90	2.5	0.5	1.0	6.0	0.45	2.83	6.0	
18.30	9.7	2.83	6.0	1.0	1.5	11.0	2.63	3.30	11.0	
19.00	10.5	3.30	9.0	1.22	1.65	14.0	0.75	3.60	16.0	18.56
17.30										
18.00	9.3				0.5	2.5	0.3	1.90	2.5	
18.30	9.7	1.90	2.2	0.45	0.95	6.0	0.47	2.85	6.3	
19.00	10.5	2.85	5.0	0.78	1.28	9.5	0.65	3.30	10.8	
19.30	13.8	3.30	5.0	0.67	1.17	10.2	0.92	3.85	16.0	19.30
18.00										
18.30	9.7				0.5	2.8	0.35	2.00	2.8	
19.00	10.5	2.00	2.0	0.35	0.85	5.5	0.52	2.92	6.3	
19.30	13.8	2.92	3.2	0.47	0.97	8.0	0.82	3.62	11.1	
20.00	19.8	3.62	5.0	0.60	0.98	9.9	1.40	4.50	16.0	19.53
18.30										
19.00	10.5				0.5	3.0	0.40	2.35	3.0	
19.30	13.8	2.35	1.5	0.2	0.7	5.2	0.70	3.30	6.7	
20.00	19.8	3.30	3.2	0.4	0.9	9.0	1.35	4.45	12.5	
20.30	24.5	4.45	6.5	0.65	0.9	10.0	1.85	4.95	16.0	20.15
19.00										
19.30	13.5				0.5	3.5	0.6	3.00	3.5	
20.00	19.8	3.00	2.0	0.25	0.75	7.0	1.2	4.20	8.5	
20.30	24.5	4.20	5.0	0.55	1.05	12.5	2.03	5.30	16.0	20.30
19.30										
20.00	19.8				0.5	4.0	1.00	3.65	4.0	
20.30	24.5	3.65	2.5	0.3	0.8	9.0	1.77	4.85	10.5	
21.00	28.1	4.85	7.2	0.7	1.00	12.7	2.42	5.60	16.0	20.48
20.00										
20.30	24.5				0.5	4.3	1.32	4.10	4.3	

（b） 海岸名 長島　区間 A～B　区間距離 16.00 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
18.56										
19.26	11.6	3.60	11.0	1.35	1.85	17.5	0.93	4.05	6.5	
19.56	17.0	4.05	8.0	0.87	1.37	14.2	1.37	4.70	12.7	
20.26	21.6	4.70	9.5	0.9	1.12	12.8	1.72	5.05	16.0	20.09
19.30										
20.00	17.7	3.85	6.0	0.67	1.17	12.0	1.32	4.50	6.0	
20.30	22.0	4.50	8.0	0.80	1.30	16.0	1.95	5.42	14.0	
21.00	25.7	5.42	12.5	1.00	1.15	14.5	2.30	5.65	16.0	20.39
19.53										
20.23	21.2	4.50	8.5	0.85	1.35	16.5	1.90	5.37	8.0	
20.53	24.8	5.37	13.2	1.10	1.52	21.2	2.55	6.22	16.0	20.48
20.15										
20.45	23.8	4.95	10.5	0.95	1.45	19.5	2.30	5.90	9.0	
21.15	26.5	5.90	16.0	1.20	1.55	23.0	2.85	6.58	16.0	21.06
20.30										
21.00	25.7	5.30	11.5	0.95	1.45	20.5	2.65	6.25	9.0	
21.30	26.3	6.25	19.5	1.38	1.72	26.5	3.00	6.85	16.0	21.20
20.48										
21.18	26.5	5.60	13.2	1.06	1.56	23.2	2.87	6.60	10.0	
21.48	24.8	6.60	26.5	1.75	2.05	32.5	3.00	7.00	16.0	21.36
21.12										
21.42	25.3	5.85	16.5	1.23	1.73	26.5	2.87	6.70	10.0	
22.12	21.2	6.70	37.0	2.45	2.73	43.0	2.84	6.90	16.0	21.59
21.42										
22.12	21.2	5.93	23.5	1.75	2.25	33.5	2.52	6.50	10.0	
22.42	11.8	6.50	107.0	—	—	113.0	2.10	6.70	16.0	—

21.00	28.1	4.10	3.0	0.4	0.9	10.5	2.30	5.30	11.8	
21.30	28.0	5.30	10.5	0.9	1.10	14.7	2.55	5.85	16.0	21.12
20.30										
21.00	28.1				0.5	5.0	1.70	4.40	5.0	
21.30	28.0	4.40	5.0	0.5	1.0	12.5	2.40	5.60	12.5	
22.00	22.9	5.60	17.0	1.32	1.52	20.5	2.30	5.93	16.0	21.42
21.00										
21.30	28.0				0.5	5.0	1.70	4.40	5.0	
22.00	22.9	4.40	6.5	0.65	1.15	14.0	1.95	5.30	12.5	
22.30	11.8	5.30	50.0	4.25	4.45	53.5	1.55	5.45	16.0	22.12

(c) 海岸名 長島　区間 B～C　区間距離 16.00 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
20.09										
20.39	22.1	5.05	12.5	1.08	1.58	21.0	2.20	5.80	8.5	
21.09	25.0	5.80	16.5	1.25	1.63	24.0	2.70	6.47	16.0	21.02
20.39										
21.09	25.0	5.65	15.0	1.17	1.67	25.0	2.75	6.55	10.0	
21.39	24.9	6.55	25.0	1.67	1.95	31.0	3.00	6.97	16.0	21.26
20.48										
21.18	25.1	6.22	21.0	1.50	2.00	32.0	3.00	7.00	11.0	
21.48	24.8	7.00	32.0	2.02	2.20	37.0	3.17	7.27	16.0	21.29
21.06										
21.36	24.9	6.58	25.5	1.70	2.20	36.0	3.16	7.25	10.50	
22.06	24.6	7.25	37.0	2.25	2.50	42.5	3.35	7.50	16.00	21.51
21.20										
21.50	24.7	6.85	30.0	1.95	2.45	41.5	3.30	7.45	11.50	
22.20	23.6	7.45	47.0	2.75	2.95	51.5	3.36	7.65	16.00	22.02
21.36										
22.06	24.2	7.00	34.5	2.15	2.65	46.0	3.35	7.53	11.50	
22.36	17.8	7.53	88.0	5.05	5.20	91.5	3.10	7.60	16.00	22.15

(d) 海岸名 長島　区間 C～長島

時刻	平均風速	T_0	F km	Δx km	$F+\Delta x$	H_1	T_1	L_{01}	h	$\frac{f \cdot H_1 \cdot \Delta x}{h^2}$	$\frac{h}{L_{01}}$	K_f	H_2	F'	T_2	(A) $\frac{T_1+T_2}{2}$	$\frac{T_0+(A)}{2}$	L_0	C_0	C_d	$\frac{\Delta x}{C_d}$	到達時刻
21.02																						
21.32	24.4	6.47	24.50	1.0	25.50	2.70	6.52	66.40	17.21	0.091	0.259	1.0	2.70	25.50	6.52	6.52	6.50	66.00	10.15	5.29	189	21.05
21.05																						
21.35	24.60	6.50	25.0	3.4	28.4	2.85	6.75	71.10	7.21	1.864	0.101	0.80	(2.28)	16.2	5.75	(6.25)	6.38	63.50	9.95	5.83	583	(21.15)
21.26																						
21.56	24.70	6.97	31.50	1.0	32.50	3.00	7.02	77.10	17.33	0.100	0.224	0.955	2.98	32.00	7.00	7.01	6.99	76.30	10.90	6.37	157	21.29
21.29																						
21.59	24.60	7.01	32.50	3.4	35.90	3.15	7.15	79.80	7.05	2.16	0.089	0.74	(2.33)	25.50	6.55	(6.85)	6.93	74.70	10.80	6.13	553	(21.38)
21.29																						
21.59	24.60	7.27	36.5	1.0	37.5	3.15	7.28	82.80	17.05	0.108	0.206	0.994	3.13	37.0	7.28	7.28	7.28	82.70	11.38	6.73	149	21.32
21.32																						
22.02	25.00	7.28	36.5	3.4	39.9	3.30	7.45	86.80	6.86	2.39	0.079	0.72	(2.38)	17.2	5.85	(6.65)	6.97	75.60	10.85	6.11	555	(21.41)
21.51																						
22.21	24.4	7.50	43.5	1.0	44.5	3.40	7.55	89.20	16.36	0.127	0.184	0.99	3.36	44.0	7.52	7.54	7.52	88.30	11.72	7.00	143	21.53
21.53																						
22.23	24.2	7.54	45.0	3.4	48.4	3.45	7.65	92.00	6.34	2.92	0.069	0.70	(2.41)	19.5	6.00	(6.83)	7.19	80.90	11.27	7.85	432	(22.00)
22.02																						
22.32	23.00	7.65	55.0	1.0	56.0	3.40	7.70	92.20	16.18	0.130	0.176	0.99	3.36	54.0	7.60	7.65	7.65	91.50	11.96	7.15	14.0	22.04
22.04																						
22.34	22.8	7.65	54.7	3.4	58.1	3.40	7.67	92.00	6.18	3.030	0.067	0.68	(2.31)	21.50	5.93	(6.80)	7.23	81.50	11.27	6.10	557	(22.13)

表-2.8 石原～小築海島間における波の推算

（a） 海岸名 石原 区間 小築海島～A 区間距離 17.00 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
12.00										
12.30	8.8				0.5	2.3	0.3	2.05	2.3	
13.00	9.6	2.05	2.3	0.5	1.0	6.2	0.5	2.82	6.2	
13.30	9.6	2.82	6.5	1.02	1.52	11.5	0.65	3.30	11.2	
14.00	9.5	3.30	11.5	1.55	2.02	17.3	0.75	3.70	17.0	13.58
14.00										
14.30	9.5				0.5	2.3	0.35	2.15	2.3	
15.00	9.5	2.15	2.5	0.5	1.0	6.5	0.50	2.80	6.3	
15.30	9.9	2.80	5.0	0.82	1.32	10.0	0.65	3.27	11.3	
16.00	10.2	3.27	10.0	1.32	1.82	15.7	0.80	3.72	17.0	16.00
16.00										
16.30	12.3				0.5	2.5	0.48	2.65	2.5	
17.00	14.3	2.65	2.5	0.45	0.95	8.0	0.91	3.70	8.0	
17.30	16.3	3.70	6.5	0.78	1.28	13.2	1.30	4.45	14.7	
18.00	18.2	4.45	11.5	1.10	1.22	13.8	1.45	4.70	17.0	17.37
17.00										
17.30	16.3				0.5	4.0	0.80	3.40	4.0	
18.00	18.2	3.40	3.5	0.50	1.0	10.0	1.35	4.32	10.5	
18.30	18.7	4.32	9.5	0.95	1.4	16.0	1.60	4.95	17.0	18.27
18.00										
18.30	18.7				0.5	4.0	0.93	3.50	4.00	
19.00	19.2	3.50	3.8	0.5	1.0	10.0	1.37	4.42	10.2	
19.30	22.2	4.42	8.0	0.77	1.2	14.8	1.97	5.28	17.0	19.26
19.00										
19.30	22.2				0.5	4.0	1.17	3.77	4.0	
20.00	25.2	3.77	3.2	0.47	0.97	12.5	2.17	5.38	13.3	
20.30	28.0	5.38	10.5	0.90	1.10	14.2	2.55	5.90	17.0	20.12

（b） 海岸名 石原 区間 A～B 区間距離 17.00 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
13.58										
14.28	7.4	3.70	30.0	3.9	4.4	35.0	0.75	3.80	5.0	
14.58	8.5	3.80	26.0	3.15	3.65	32.0	0.86	4.10	11.0	
15.28	9.2	4.10	30.0	3.30	3.80	36.0	0.95	4.30	17.0	15.28
16.00										
16.30	11.2	3.72	13.5	1.60	2.10	19.5	0.95	4.10	6.0	
17.00	13.9	4.10	12.5	1.33	1.83	19.2	1.25	4.60	12.7	
17.30	15.3	4.60	16.0	1.50	1.82	20.3	1.43	4.90	17.0	17.19
17.37										
18.07	15.6	4.70	17.0	1.57	2.07	24.3	1.57	5.20	7.3	
18.37	16.3	5.20	23.0	1.97	2.47	31.5	1.80	5.65	15.8	
19.07	18.3	5.65	26.0	2.03	2.10	27.2	1.95	5.75	17.00	18.41
18.27										
18.57	17.2	4.95	17.5	1.53	2.03	25.0	1.81	5.50	7.5	
19.27	19.8	5.50	21.0	1.67	2.17	30.0	2.27	6.10	16.5	
19.43	23.6	6.10	22.5	1.61	1.65	23.0	2.45	6.17	17.0	19.30
19.26										
19.56	24.8	5.28	12.2	1.04	1.54	21.5	2.57	6.23	9.3	
20.26	27.7	6.23	17.5	1.27	1.65	25.2	3.17	6.92	17.0	20.19
20.12										
20.42	27.5	5.90	14.5	1.12	1.62	25.0	3.15	6.90	10.5	
21.12	26.3	6.90	27.5	1.75	2.05	34.0	3.32	7.27	17.00	21.00

(c) 海岸名 石原　区間 B～石原

時刻	平均風速	T_0	F km	Δx km	$F+\Delta x$	H_1	T_1	L_{01}	h	$\frac{f \cdot H_1 \cdot \Delta x}{h^2}$	$\frac{h}{L_{01}}$	K_f	H_2	F'	T_2	(A) $\frac{T_1+T_2}{2}$	$\frac{T_0+(A)}{2}$	L_0	C_0	C_a	$\frac{\Delta x}{C_a}$	到達時刻
15.28																						
15.58	9.1	4.30	36.5	2.8	39.3	1.00	4.37	29.80	15.01	0.125	0.504	1.00	1.00	39.3	4.37	4.37	4.34	29.34	6.75	3.43	815	15.42
15.42																						
16.12	9.5	4.37	35.5	1.4	36.9	1.02	4.40	30.20	10.03	0.143	0.332	0.997	1.02	36.9	4.40	4.40	4.39	30.10	6.86	3.73	375	15.48
15.48																						
16.00	9.1	4.40	40.0	0.3	40.3	1.00	4.40	30.20	5.03	0.119	0.166	1.00	(1.00)	40.3	4.40	(4.40)	4.40	30.10	6.85	4.10	75	(15.49)
17.19																						
17.49	13.6	4.90	26.0	2.8	28.8	1.36	5.00	39.00	15.28	0.163	0.392	0.999	1.36	28.8	5.00	5.00	4.95	38.20	7.70	4.03	695	17.31
17.31																						
18.01	13.6	5.00	29.0	1.4	30.4	1.38	5.15	41.40	10.32	0.180	0.242	0.992	1.37	30.0	5.12	5.14	5.07	40.10	7.92	4.53	309	17.36
17.36																						
17.46	13.6	5.14	33.0	0.3	33.3	1.40	5.15	41.40	5.30	0.150	0.128	1.00	(1.40)	33.3	5.15	(5.15)	5.15	41.30	8.03	4.77	63	(17.37)
18.41																						
19.11	16.5	5.75	32.0	2.8	34.8	1.95	5.85	53.20	15.72	0.221	0.296	0.993	1.94	34.3	5.83	5.84	5.80	52.60	9.07	5.05	555	18.50
18.50																						
19.20	17.4	5.84	31.0	1.4	32.4	2.02	5.90	54.30	10.80	0.241	0.199	0.984	1.99	32.0	5.88	5.89	5.87	53.80	9.17	5.45	257	18.54
18.54																						
19.00	16.5	5.89	37.0	0.3	37.3	2.00	5.90	54.30	5.72	0.182	0.105	0.975	(1.95)	35.0	5.82	(5.89)	5.89	54.10	9.20	5.32	56	(18.55)
19.30																						
20.00	24.2	6.17	22.0	2.8	24.8	2.65	6.43	64.70	16.38	0.275	0.253	0.987	2.62	24.0	6.40	6.42	6.30	62.00	9.85	5.65	496	19.38
19.38																						
19.50	24.0	6.42	25.0	1.4	26.4	2.70	6.50	66.10	11.36	0.293	0.172	0.975	2.63	24.0	6.40	6.45	6.44	64.80	10.05	6.01	233	19.42
19.42																						
19.50	24.4	6.45	25.0	0.3	25.3	2.67	6.46	65.10	6.39	0.196	0.098	0.97	(2.59)	23.0	6.30	(6.38)	6.42	64.10	9.98	5.73	53	(19.43)
20.19																						
20.49	25.2	6.92	29.0	2.8	31.8	3.10	7.07	78.00	17.00	0.299	0.218	0.983	3.04	30.5	7.00	7.04	6.98	76.30	10.92	6.40	437	20.26
20.26																						
20.36	25.3	7.04	31.5	1.4	32.9	3.17	7.15	79.80	11.98	0.311	0.150	0.97	3.07	31.0	7.03	7.09	7.07	78.00	11.00	6.58	213	20.30
20.30																						
20.40	25.0	7.09	33.0	0.3	33.3	3.13	7.10	78.80	7.00	0.192	0.089	0.97	(3.04)	31.0	7.00	(7.05)	7.07	78.00	11.00	6.15	48	(20.31)
21.00																						
21.30	22.0	7.27	49.0	2.8	51.8	3.15	7.37	84.80	17.02	0.304	0.201	0.98	3.08	47.0	7.20	7.29	7.28	82.60	11.37	6.72	416	21.07
21.07																						
21.27	21.7	7.29	50.5	1.4	51.9	3.10	7.32	83.90	12.02	0.300	0.144	0.97	3.01	48.0	7.18	7.25	7.27	82.70	11.36	6.80	206	21.10
21.10																						
21.20	22.0	7.25	48.0	0.3	48.3	3.08	7.27	82.50	7.02	0.187	0.085	0.97	(2.99)	44.0	7.05	(7.16)	7.21	81.10	11.24	6.27	48	(21.11)

表-2.9 津～神島間における波の推算

（a） 海岸名 津　区間 神島～A　区間距離 18.00 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
9.00										
9.30	14.2				0.5	3.0	0.60	3.0	3.0	
10.00	13.9	3.0	3.0	0.5	1.0	8.0	0.85	3.6	8.0	
10.30	13.3	3.6	8.5	1.07	1.57	15.0	1.07	4.17	14.5	
11.00	12.4	4.17	17.5	1.82	2.10	21.0	1.12	4.45	18.0	10.47
11.00										
11.30	13.2				0.5	3.0	0.55	2.85	3.0	
12.00	15.7	2.85	1.8	0.3	0.8	6.7	0.92	3.72	7.9	
12.30	16.9	3.72	6.0	0.7	1.2	12.2	1.37	4.45	14.1	
13.00	16.9	4.45	12.5	1.2	1.47	16.4	1.50	4.85	18.0	12.46
13.00										
13.30	17.4				0.5	3.5	0.82	3.35	3.5	
14.00	18.2	3.35	3.5	0.5	1.0	10.0	1.30	4.32	10.0	
14.30	18.6	4.32	10.0	1.0	1.5	18.0	1.65	5.00	18.0	14.30
15.00										
15.30	19.1				0.5	4.0	1.0	3.50	4.0	
16.00	20.4	3.50	3.5	0.48	0.98	11.0	1.57	4.70	11.5	
16.30	22.1	4.70	9.5	0.87	1.27	16.0	2.02	5.40	18.0	16.24
16.00										
16.30	22.1				0.5	4.0	1.17	3.80	4.0	
17.00	24.1	3.80	4.0	0.50	1.0	12.0	1.95	5.15	12.0	
17.30	25.3	5.15	10.7	0.92	1.23	16.7	2.40	5.85	18.0	17.19
17.00										
17.30	25.3				0.5	4.0	1.42	4.10	4.0	
18.00	25.5	4.10	4.0	0.5	1.0	12.0	2.13	5.35	12.0	
18.30	26.2	5.35	11.5	0.95	1.3	17.5	2.52	6.00	18.0	18.21
18.00										
18.30	26.2				0.5	4.0	1.45	4.10	4.0	
19.00	27.2	4.10	3.8	0.5	1.0	12.2	2.35	5.50	12.4	
19.30	28.5	5.50	11.0	0.92	1.22	16.6	2.74	6.15	18.0	19.18

（b） 海岸名 津　区間 A～B　区間距離 18.00 km

時刻	平均風速	T'	F'	t'	t	F	H	T	始点からの距離	到達時刻
10.47										
11.17	11.2	4.45	25.5	2.57	3.07	32.5	1.20	4.65	7.0	
11.47	12.7	4.65	25.0	2.37	2.87	32.0	1.37	4.95	14.0	
12.17	14.1	4.95	25.0	2.25	2.55	29.0	1.48	5.15	18.0	12.05
12.46										
13.16	14.1	4.85	23.5	2.15	2.65	31.0	1.55	5.25	7.5	
13.46	15.5	5.25	25.0	2.12	2.62	33.0	1.76	5.57	15.5	
14.16	17.2	5.57	26.0	2.07	2.25	28.5	1.90	5.68	18.0	13.57
14.30										
15.00	17.9	5.00	17.5	1.52	2.02	25.0	1.82	5.50	7.5	
15.30	19.0	5.50	22.0	1.72	2.22	31.0	2.20	6.05	16.5	
16.00	20.8	6.05	27.0	1.92	2.00	28.5	2.35	6.20	18.0	15.35
16.24										
16.54	25.4	5.40	12.5	1.00	1.50	22.0	2.72	6.40	9.5	
17.24	27.1	6.40	20.0	1.42	1.77	28.5	3.30	7.15	18.0	17.15
17.19										
17.49	26.7	5.85	15.5	1.17	1.67	25.5	3.02	6.77	10.0	
18.19	26.7	6.77	25.5	1.67	2.03	33.5	3.36	7.25	18.0	18.11
18.21										
18.51	29.0	6.00	14.5	1.12	1.62	25.5	3.40	7.12	11.0	
19.21	31.5	7.12	23.0	1.49	1.78	30.0	3.97	7.70	18.0	19.08
19.18										
19.48	31.5	6.15	14.0	1.05	1.55	24.0	3.60	7.30	10.0	
20.18	26.4	7.30	34.5	2.08	2.43	42.5	3.67	7.65	18.0	20.02

（c） 海岸名 津　区間 B～津

時刻	平均風速	T_0	F km	$\Delta\cdot x$ km	$F+\Delta x$	H_1	T_1	L_{01}	h	$\frac{f\cdot H_1\cdot \Delta x}{h^2}$	$\frac{h}{L_{01}}$	K_f	H_2	F'	T_2	(A) $\frac{T_1+T_2}{2}$	$\frac{T_0+(A)}{2}$	L_0	C_0	C_a	$\frac{\Delta x}{C_a}$	到達時刻
12.05																						
12.35	12.6	5.15	38.0	2.55	40.55	1.50	5.23	42.80	15.03	0.169	0.351	0.998	1.50	40.55	5.23	5.23	5.19	42.00	8.10	4.33	588	12.15
12.15																						
12.45	12.4	5.23	41.0	1.70	42.70	1.50	5.25	43.00	7.54	0.447	0.175	0.965	(1.45)	40.0	5.17	(5.21)	5.22	42.60	8.16	4.88	348	(12.21)
13.57																						
14.27	17.0	5.68	29.5	2.55	32.05	2.00	5.80	52.50	15.29	0.224	0.291	0.993	1.99	32.50	5.80	5.80	5.74	51.50	9.00	5.00	510	14.06
14.06																						
14.36	17.1	5.80	32.0	1.70	33.70	2.05	5.85	53.50	7.82	0.572	0.146	0.95	(1.95)	32.00	5.80	(5.83)	5.82	52.90	9.10	5.45	312	(14.11)
15.35																						
16.05	21.5	6.20	27.0	2.55	29.55	2.50	6.35	63.00	15.60	0.262	0.248	0.99	2.48	28.5	6.30	6.33	6.27	61.30	9.80	5.61	455	15.43
15.43																						
16.13	22.0	6.33	28.0	1.70	29.70	2.55	6.40	64.00	8.14	0.655	0.128	0.925	(2.36)	25.0	6.15	(6.28)	6.31	62.30	9.87	5.87	290	(15.48)
17.15																						
17.45	27.6	7.15	28.5	2.55	31.05	3.42	7.35	84.20	16.16	0.334	0.192	0.975	3.34	30.0	7.25	7.30	7.23	81.70	11.30	6.70	381	17.22
17.22																						
17.52	27.3	7.30	31.0	1.70	32.70	3.50	7.35	84.20	8.72	0.783	0.104	0.910	(3.18)	26.0	6.95	(7.15)	7.23	81.70	11.30	6.75	252	(17.26)
18.11																						
18.41	29.2	7.25	27.5	2.55	30.05	3.60	7.42	86.00	16.42	0.339	0.191	0.975	3.51	28.5	7.34	7.37	7.31	83.50	11.40	9.77	261	18.16
18.16																						
18.46	30.0	7.37	27.0	1.70	28.70	3.67	7.45	86.60	8.94	0.780	0.103	0.910	(3.34)	22.50	6.95	(7.20)	7.29	82.90	11.35	6.60	258	(18.21)
19.08																						
19.38	32.9	7.70	28.5	2.55	31.05	4.30	7.85	96.10	16.46	0.409	0.171	0.965	4.15	29.0	7.77	7.81	7.76	93.70	12.10	7.24	352	19.14
19.14																						
19.44	32.8	7.81	30.0	1.70	31.70	4.30	7.90	97.50	8.94	0.915	0.092	0.88	(3.78)	24.0	7.30	(7.60)	7.71	92.50	12.00	6.85	249	(19.18)
20.02																						
20.32	26.0	7.65	41.0	2.55	43.55	3.65	7.70	92.50	16.31	0.350	0.177	0.97	3.54	39.50	7.53	7.62	7.64	91.40	11.98	7.15	357	20.08
20.08																						
20.38	23.6	7.62	52.0	1.70	53.70	3.45	7.68	92.00	8.79	0.760	0.096	0.91	(3.14)	41.0	7.15	(7.42)	7.52	88.50	11.77	6.75	252	(20.12)

表-2.10　二つの方法によつて計算した各地の波高

海岸名	Bretschneider 法	風の変化，海底摩擦を考慮した S.M.B. 法
南陽	1.8m	1.6m
長島	1.8	2.3
石原	3.4	2.9
津	3.9	3.6

が小さいので両計算の差異は小さいものと思われる。

Bretschneider の方法は比較的簡単に波を計算できるが，風向・風速の変化がいちじるしい場合には個人的な能力に左右されることが多い。現在の段階では〔2〕・(2)の方法にもなお若干の問題点があり，どの程度信頼性があるか不明である。しかし，この方法は Bretschneider 法に比較すれば，ずっと機械的に計算することができるので，信頼性が確かめられれば，今後大いに用いられるものと考えられる。ただ手数がかかるので，簡単に見当をつける程度の場合には Bretschneider 法によるのが便利であろう。

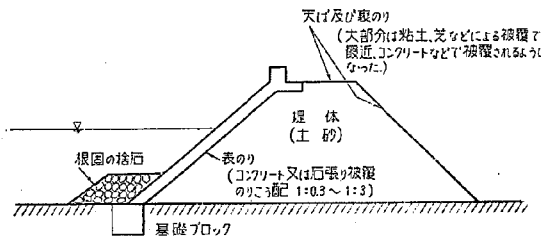
3.　海岸および河川堤防の被害の特性

〔1〕 海岸堤防の被害特性

愛知・三重海岸は伊勢湾台風による災害前にもしばしば高潮に襲われてきたが，特に昭和28年の13号台風による災害は非常に大きく，海岸堤防にいちじるしい被害を受けた。そのため，その後ただちに一定の復旧および改良計画がたてられ，それらの計画にもとづく復旧および改良工事がずっと続けられてきた。

この復旧計画の基本となった設計潮位は三重県側の鳥羽港の最大偏差1.55mと名古屋港の既往最大潮位（大正10年9月26日）の推定偏差1.6mを勘案して，愛知・三重全域に偏差1.6mを用い，これに朔望平均満潮位 1.0～1.3m を加えて2.6～2.9mとした。さらに堤防前面における波高を0.5～1.5mとし，打上げ高を考慮して堤防高を5.5～6.0mとした。また堤防の型式は図-3.1に示すように築堤式で，表のり，天ば，裏のりともコンクリートなどで被覆することになっていた。伊勢湾台風来襲時までに，天ば高および表のり被覆は第1期工事として計画どおり施工されたが，財政上の問題で堤防の天ばまたは裏のり面の被覆は第2期工事として後に残した所が相当にあり，愛知・三重海岸全体としては天ばおよび裏のりに強固な被覆のない堤防が大部分であった。

表-3.1は特に被害の大きかった海岸における堤防の高さ，表のりこう配，被覆の状況，伊勢湾台風時における推定最高潮位および推定波高を示したものである。これによると天ばおよび裏のりをコンクリート，石張りなどで全面的に被覆してある堤防は，石原および磯津海岸におけるもののみで，全延長にくらべてきわめて短かい。



図—3.1　伊勢湾，知多湾および遠美湾沿岸における海岸堤防の一般的形式

愛知・三重海岸地帯の土質は地表面から5.5～10mは砂層で，その下に粘土層があり，さらにその下が砂れき層になっているが，鍋田川河口付近では粘土層の厚さが40mにおよぶ所もある。また衣浦干拓のように表面から軟粘土の所も部分的には存在する。地表面付近の砂はちゅ

表-3.1　被災堤防諸元

海岸名	天ば高	表のりこう配	被覆の状況	推定最高潮位	推定波高
康衛新田	T.P. 4.9m	1：3	表のり　石張り，天ば　なし，裏のり　コンクリート	T.P. 3.0m	2.0m
南陽	5.5～5.75	1：2.5～1.3	表のり，石張り，天ば・裏のり　張芝	3.9	1.7
海部	5.5～6.0	1：3	表のり　石張りおよびコンクリート，天ば　裏のり　張芝	3.9	2.0
長島	6.0～6.5	1：3	表のり　石張り，天ば　張芝，一部コンクリートブロック 裏のり　張芝，一部石張り	3.5	2.0
城南	5.5	1：4	表のり　石張り，　天ば・裏のり　なし	3.5	2.0
富田浜	5.5	1：2	表のり　階段式コンクリート，天ば・裏のり　なし	3.3	2.6
石原	4.5～5.0	1：1	表のり　石張り，　天ば　コンクリート，裏のり　石張り	3.0	3.0
磯津	5.5	1：1.5	表のり・天ば，裏のり　すべてコンクリート	3.0	3.0

う積期に河川から流れ出してきたものであり，砂の性質は各河川上流部の山地の地質の影響を大きく受けている。矢作川，朝明川，鈴鹿川は花こう岩の風化した粗粒の砂からなっている。木曽，長良，揖斐の諸川は中粒砂，日光川，庄内川などの内水河川は粘土を含んだ細砂を流してくる。古い堤防は付近の表層土のうち粘土分に富んだものを用いて造ってある。その例は海部南部の海岸堤防である。最近の堤防は海底の砂をサンドポンプで吹き上げ，その表面等に粘土をはっている。木曽川，揖斐川の河口付近の堤防には「あしね土」と称する粘土分に富んだ土が，また碧南干拓堤防には洪積層の山地粘性土が用いられている。これらの粘土は侵食防止のため，植物の成育を助けるための働きをする。粘土張りの厚さは15～30 cmである。

現地調査の際に採取した土を三角座標によって分類すると，木曽川河口付近の堤防の被覆土に用いてある「あしね土」はローム，南陽町から飛島村をへて長島に至る間の古い堤防は砂質ローム，その他は砂である。三重県北部の堤防の被覆土に用いた土はごく少量のシルトと粘土分を含んでいる。砂の粒径を60%粒径で比較すると，富田浜の6 mmが最大で，磯津2.4mm，四日市1.1 mm，石原0.85mm，朝明川0.8mmである。以上は花こう岩の風化した砂である。木曽川河口付近の砂はこれらよりも小さく，0.50～0.40mmで，鍋田干拓は0.22mmで最も小さい。

図-3.2は今回の災害による浸水域を示したものである。これらによると，ほとんど湾内の沿岸全域が浸水を受けているが，海岸堤防の被害の大きかった所は四日市から名古屋に至る伊勢湾奥と，半田，衣浦，碧南などの知多湾奥であって，その他の所は前面堤よりもむしろ河口堤の被害がいちじるしかった。

過去におけるいくつかの高潮災害調査（たとえば昭和17年の周防灘の高潮，昭和28年の伊勢湾，知多湾および渥美湾における高潮）によって，天ばおよび裏のりがコンクリートなどで強固に被覆されていない堤防は，越波，しぶきなどによって容易に堤土が流出し，堤防全体の破壊を招きやすいことが指摘されてきた。今回の災害においても，まったくこのことがあてはまり，越波，し

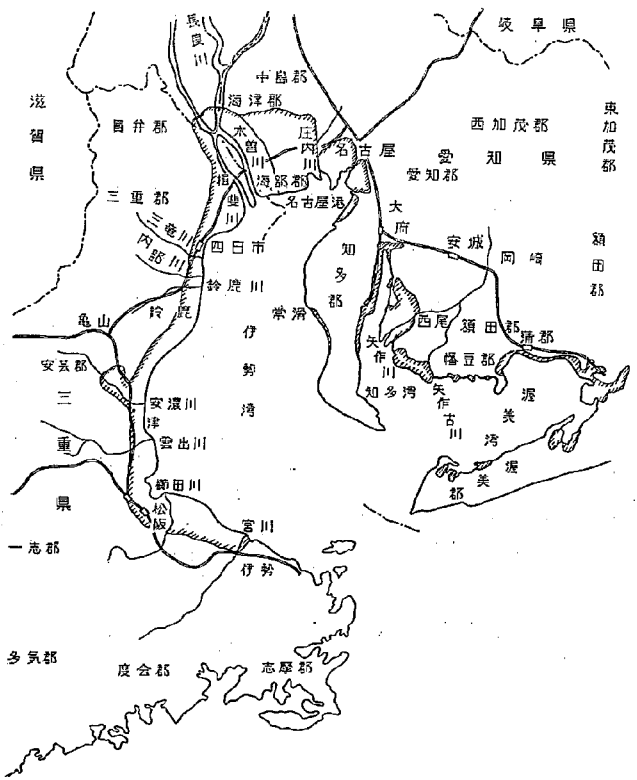


図-3.2 伊勢湾浸水域

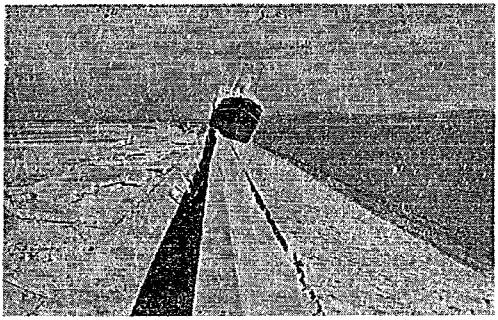


写真-3.1(a)　康衛新田

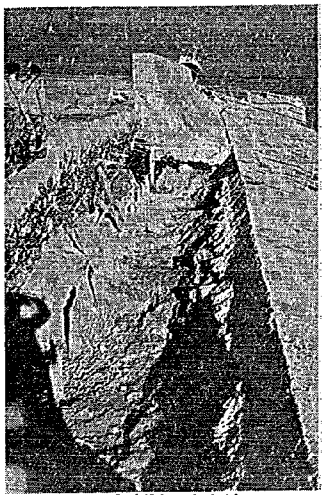


写真-3.1(b)　康衛新田

ぶきなどによる堤土の流出が災害の第一の原因としてあげられる。

表-3.1によると，堤防の天端高と推定最高潮位との差は長島海岸を除いて，だいたい1.5m～2.5mである。一方，波高は1.7m～3.0mであるから，波の打上げ高を考慮すれば，高潮の最盛時に各地でかなりの越波があったことが考えられる。

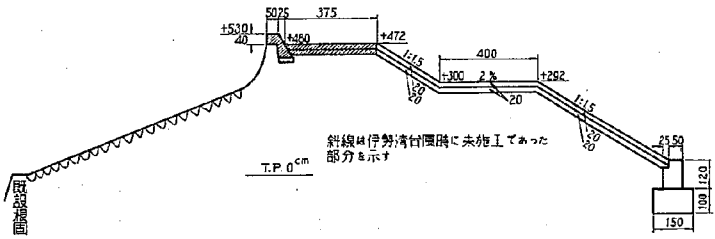


図-3.3　康衛新田海岸堤防標準断面図

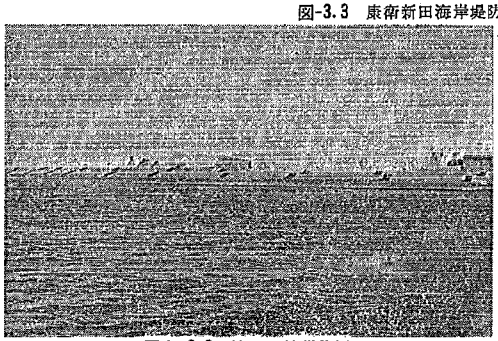
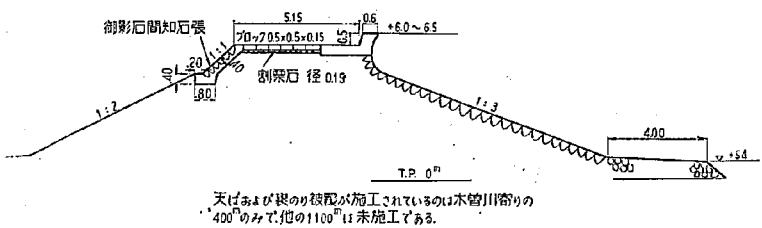


写真-3.2　波返し被災状況

写真-3.1は知多湾奥にある半田康衛新田の堤防の破壊状況で，天端被覆が未施工であったため，越波により堤土が流出し，堤防全体の破壊を生じた例である。堤防断面は図-3.3のとおりであり，斜線を入れた部分が未施工で，天端高はT.P.4.9mであった。写真-3.1(a)をみれば，堤土が流出し，裏のり被覆が海側に倒れ，ささえを失なった波返しが陸側に傾いている状態が認められる。写真-3.2(b)は波返しが転倒している状況を示したもので，今回の災害において至る所で見受けられた現象である。すなわち，波返しの重量が大きす



天端および裏のり被覆が施工されているのは木曽川寄りの400mのみで，他の1100mは未施工である。

図-3.4(a)　長島海岸堤防標準断面図

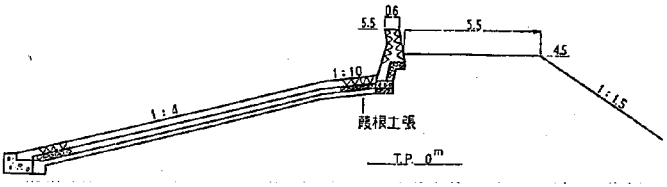


図-3.4(b)　城南海岸堤防標準断面図

ぎるため，堤土の流出によりささえを失なうと不安定となり，波力によって簡単に倒れる。この堤防では波返しの下に杭が打ってあるが，杭は横力に対する抵抗力が弱いため，写真にみるように十分な効果をあげていない。また，これらの写真を通じて，波返しより下の表のりがほとんど無傷であることが認められる。このような現象は伊勢湾奥においても一般的にみられたが(写真-3.2)，これは伊勢湾台風時の潮位が計画潮位をかなり上回ったために，波のエネルギーがちょうど波返し付近に集中したことによるものであろう。

長良川河口左岸には長島，右岸には城南という海岸堤防がある。両者の断面は図-3.4のようにだいたい類似しており，高さだけが約1m異なる。また前面の海底地形もほとんど一致しているので，潮位，波も同程度と考えられる。しかし，写真-3.4のように城南堤防はほとんど全線にわたって壊滅したにもかかわらず，長島堤防(写真-3.3)は越波により堤土がかなり流出し，危険な状態になってはいるが，実際に破堤したのは全長1.5kmのうち約250mにすぎない。これは堤高による被害状況の差をかなり明瞭に示した一例と考えられる。表-4.1によれば，この付近の潮位は T.P.3.5 m，波高は2mである。のりこう配1：3，のり先水深4～5m，波形こう配0.05程度という条件では，波の打上げ高は波高の1.5倍程度と考えられる。これらの数値から最大波頂高を計算すると T.P.6.5mとなる。したがって，城南堤防は常にかなりの越波を受けたが，長島堤防を越波する波ははるかに少なく，しぶきによってたたかれることが多かったものと考えられる。波の実測値がないこと，堤体土質の差異など不明確な点もあるが，この例は堤高を有義波の最大打上げ高程度にとった堤防は，天ばおよび裏のり被覆がなくても，波浪に対して相当の抵抗力を有することを示すものと考えてよいであろう。

木曽川から名古屋に至る間の堤防は堤体が主として砂であるが，「あしね土」，「山土」のように粘土分のある土で，被覆してあり，その厚さは一般に 15～30cm である。また，その上には芝，

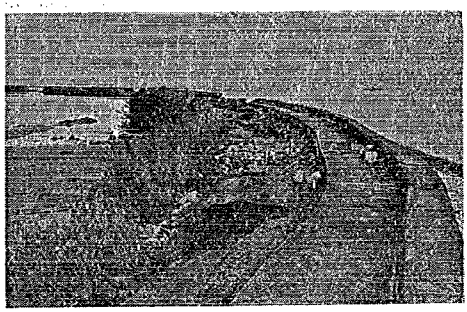


写真-3.3　長島新田

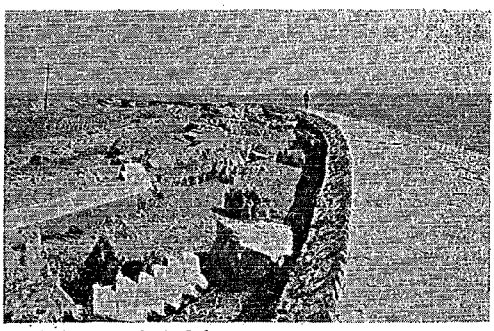


写真-3.4　城南干拓

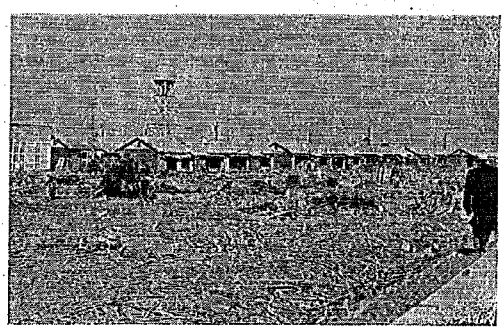


写真-3.5　石原海岸堤防背後の家屋被災状況

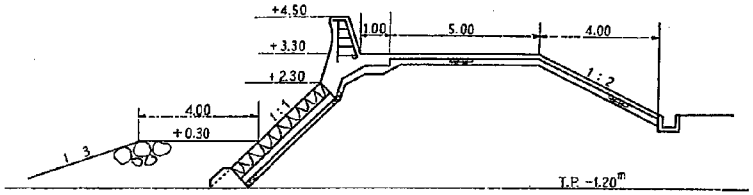


図-3.5 石原海岸堤防標準断面図

Weeping grass などを植えているが，古い堤防は笹竹で覆われている。

粘土被覆，芝，Weeping grass，笹竹などは洗掘に対して砂よりはるかに強い抵抗を示すと思われる。とくに十分に繁茂した笹竹は洗掘防止にかなりの効果をあげたようである。しかし激しい越波，しぶきなどに対しては，このようなもののみに頼ることは危険であり，石張り，コンクリート張りなどによって洗掘を防止するのが適当と考えられる。

写真-3.5は鈴鹿川右岸の石原海岸堤防の背後にある家屋の被害状況を示したものである。これによれば堤防をこえてかなり波が侵入したことは明瞭であるが，堤防は一部に多少被害を受けただけでほとんど原形のまま残存している。堤防断面は図-3.5に示すように，天ばおよび裏のりも被覆した強固なものである。前の例と同様に最大打上げ高を計算すると，T.P. 7.5mで，一方天ば高はT.P. 4.5mであるから，背後の家屋に写真-4.5のような被害があったことは当然であろう。また，この例によって，天ばおよび裏のりを強固に被覆した堤防は（この場合背後地の高いことを考慮しても）越波に対する抵抗をいちじるしく増すものであることがわかる。しかし堤防の後側に接して人家が密集するような所では，堤防の高さを上げるか，または捨石などを高く積んで越波による家屋の被害を防ぐことが必要である。

伊勢湾奥，知多湾などでは水深が小さいので，高潮も大きくなりやすいが，同時に発生する波は浅海のため必然的に小さくなる。したがってこの地域では波力によって堤防が直接破壊された例はほとんどみられなかった。しかし四日市以南になると，Fetch および水深が大きく，そのため波高も大きくなり４mに達した所もあると思われる。したがって越波だけでなく，直接波力によって堤防が破壊する場合も起り得る。写真-3.6(a)は鈴鹿川河口右岸の磯津海岸堤防の被害状況を示したものである。この堤防は昭和28年の13号台風による災害後につくられたもので，図-3.6のような断面を有している。表のりこう配は 1：1.5，裏の

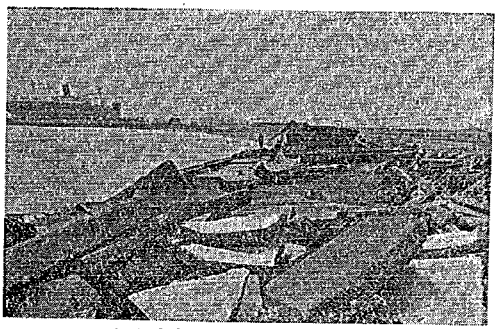


写真-3.6(a) 磯津海岸堤防

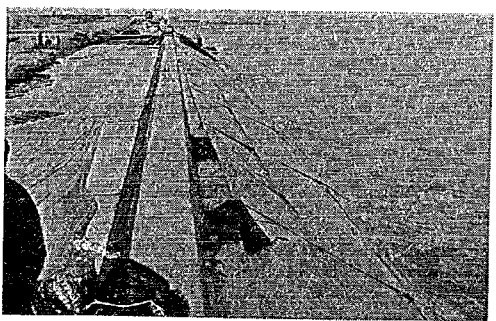


写真-3.6(b) 磯津海岸堤防

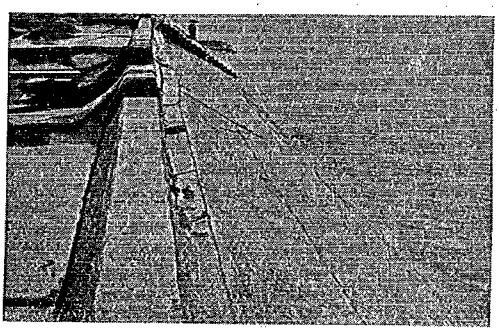
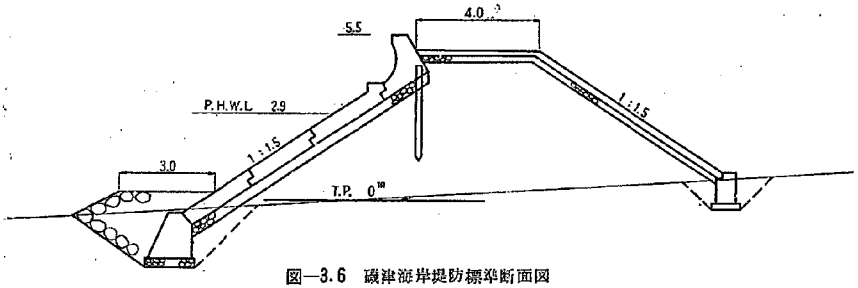


写真-3.6(c) 磯津海岸堤防



図—3.6　磯津海岸堤防標準断面図

り，天ばおよび裏のりはすべてコンクリート被覆である。設計潮位はT.P. 2.9m，設計波高は明瞭ではないが，だいたい2mを考えたようで，天ば高はT.P. 5.5mとなっている。伊勢湾台風では表-3.1に示すように，潮位T.P. 3m，波高3.0mで波のほうがかなり設計を上回わっている。写真-3.6(b)をみると，天ば被覆は無傷であるが，表のりが中央付近の継ぎ手の部分から折れたような形になっている。また写真-3.6(c)をみると，表のり中央付近が下がり，上部および下部が前に出たため，天ばが陥没した様相を示し，またすぐ隣りでは表のりの変形はあまり目立たず，天ばコンクリートのみが波返しに沿うてせり上った形となっている。このような点からみて，波力のため表のり天ばなどの弱い部分がしだいに変形し，構造物の水密性が小さくなるとともに，越波などにより堤体中にはいった海水の流動が活発となり，多量の堤土が流出し，ついに堤防全体が破壊するに至ったのではないかと考えられる。潮位はT.P. 3mであるから堤防の前面水深は4mくらいであったと思われる。一方，波高は3.0mであるから，水深と波高との比をとると約1.3となる。したがって，波がちょうど砕波する条件を備えており，堤体に大きな波力が作用したことは十分に考えられる。

また，この堤防では裏込めに粒径80～30mmの砂利が20cmの厚さに入れてあった。堤体上は最大粒径でも10mm以下である。したがって，堤体内に水が浸透すれば砂質の堤体土は流されて裏込めのすきまをつめる。堤体土の容積はこのすきまの量だけ減少したと同様な効果を生じ，ついに天ばコンクリートの下にすきまができる。この状態では，天ばのコンクリート版は越波，しぶきなどにより非常に破壊しやすくなる。今回の災害において，このような現象がどの程度きいているかはっきりしないが，天ばおよび裏のりをコンクリートなどで被覆する場合は今後十分に検討しなければならない問題である。

石原海岸は鈴鹿川河口左岸にあり，潮位，波の状況とも磯津海岸とほぼ同様である。したがって波力も磯津海岸と同じ程度であったと考えられるが，堤防自体はいちじるしい被害を受けなかった。しかし写真-3.7をみればわかるように，波返しと石張り被覆との境界にはっきりしたずれがあり，相当な波力を受けたことを示している。しかし，背後の地盤高がT.P. 1.5mくらいでかなり高いので，波力に対する抵抗力が大きく，大きな被災をまぬがれたのではいかと考えられる。

写真-3.7　石原海岸堤

現在までのところ，波力の研究はほとんど防波堤について行なわれ，海岸堤防に適用し得る公式がない状態である。そのため堤防の設計は経験的に行なわれ，力学的計算はほとんど行なわれていない。磯津海岸における堤防の被災は波力の強力な破壊力を十分に示したもので，今後この点について十分に研究しなければならない。

写真-3.8(a)は天ばおよび裏のり被覆の災害例で，長島海岸堤防の裏のり崩壊状況を示したものである。この堤防は長島海岸のうち木曽川河口に近い所にあり，図-3.4(a)のように天ばがコンクリートブロック，裏のりが石張りで被覆されている。しかし，裏のり被覆はのりの中央付近までしか施工されておらず，基礎も不十分のようであった。このような状態では，天ばを越えてきた海水により基礎が洗掘され，また堤体が海水を含んです

べりやすくなれば，写真-3.8(b)のように基礎が前にはみだし，ついに裏のり全体が写真-3.8(c)のようにすべり落ちる。こんどの災害では潮位が高く，越波が多かったので，天ばおよび裏のり被覆にこのような災害を受けた例がいくつかみられた。ここにあげた例は，裏のりの途中までしか被覆されていないという特に悪い例であるが，のり全体をコンクリートなどで被覆したものでも，一般に基礎が弱く，これが災害の原因をなしていた例もみられた。

さきに多少ふれたように，湾奥における災害では一般に表のり下部にはいちじるしい被害はなくしたがって捨石もあまり動いたようにみられなかった。しかし四日市付近の富田浜では約200kgの石が破壊された堤防の天ばに打上げられ，また石原海岸では捨石下層部の約 50kg の石が抜けて飛び出し，花こう岩の張り石に衝突して，その傷が白いはん点のようになっていた。この付近は湾奥にくらべると，潮位は低く，波は大きい。したがって，高潮災害においても水理的条件によっては捨石の散乱をまねき，ついには堤防が基礎から破壊することも起りうるから，十分に注意しなければならない。

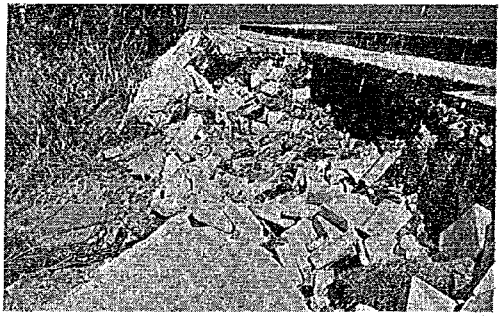


写真-3.8(a) 長島海岸堤防裏のり崩壊状況

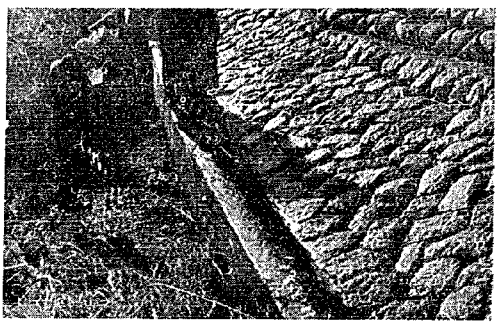


写真-3.8(b)長島海岸堤防裏のり崩壊状況

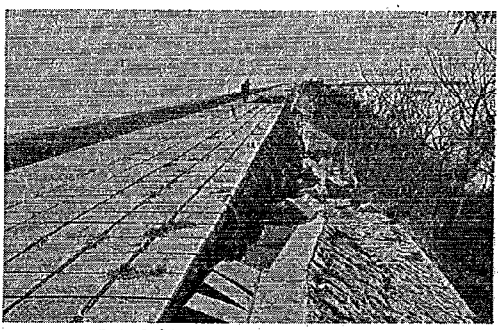


写真-3.8(c) 長島海岸裏のり崩壊状況

災害後の復旧堤防については，上述の災害状況からまず天ばおよび裏のりを強固に被覆することが第一にきめられたが，その場合堤高をどのようにきめるかが問題となった。

13号台風以後の種々の研究によって，堤高は高潮時の最大打上げ高（この場合波高は有義波高を意味する。）以上あればよいと考えられてきた。今回の高潮は異常に大きいものであったため，高潮時の最大打上げ高より高い堤防はきわめて少なく上述の考え方を検証する十分な資料がえられなかった。しかし，さきにのべた長島海岸と城南海岸における堤防の破壊例は一つの貴重な実物実験であって，従来の考え方をだいたい裏付けするものとみてさしつかえないと思われる。また長島海岸堤防の例からわかるように，最大打上げ高程度の堤高があっても，実際には有義波以上の波による若干の越波と相当なしぶきを受けることは避けられず，相当量の堤土が流出する。したがって，堤高を高潮時の最大打上げ高にとっても，なお，天ばおよび裏のりをコンクリートなどで被覆することは必要なのである。

一方石原海岸堤防の例からみると，天ばおよび裏のりを被覆した堤防は越波およびしぶきに対する抵抗力をいちじるしく増すので，この場合堤高を高潮時の最大打上げ高までとる必要があるかどうか問題である。現在までのところ，このような堤防は非常に少なく，異常高潮にさらされた実例もほとんどない。したがって実際堤高を低くしてもよいか，またその程度はどのくらいか，などのことはなおまったく不明である。将来多くの実例がえられ，また実験室内の研究なども進めばこの点もしだいに明らかとなろうが，現段階では天ばおよび裏のり被覆

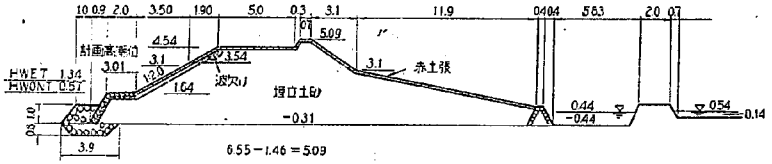


図-3.7　磐南干拓河川第1号堤（上流）矢作川右岸

は越波（有義波高以上の波による。），しぶきなどによる堤土の流出を防止する機能を有するものと考え，提高としては高潮時の最大打上げ高をとるのが妥当であろう。

〔2〕 河川堤防の被害特性

伊勢湾台風が去ったのちに残存堤防を調査した結果から，災害原因は波力によるもの，越流によるもの（越波を含む），漏水その他によるものの三つに大別できることが認められた。代表的な被害個所をこのような災害原因別に示すとつぎのようになる。

(1) 波力により表のり肩から欠壊したもの

図-3.7は矢作川下流部右岸の河川堤防の構造を示すもので，台風13号による計画高潮位より数十センチ高い3.54m(T.P)の高さまで植石コンクリート護岸を張り，天ば，表のり肩，裏のりは芝付きの赤土張りで，裏のり肩は土盛りをして天ば4.54mより高い5.09mとしてある。これが被災後には写真-3.9に示すように，コンクリート被覆をしていない表のり肩が欠壊し，この状態が河口から約2km上流の地点まで連続しており，そのうち約140mの区間が破堤している。

潮位のこん跡調査によれば付近の半田3.1m，武豊3.1m，布土3.1m，大浜3.2mであるから，この河口付近におけるる最大潮位は3.1m(T.P)程度だったと思われる。波高を前文で指定した康衛新田における2.0mに等しかったものとし，遡上係数を1.0にとって（堤防のり線に対し波はそうとう斜めに入射していると思われるから）波頭高を求めると，3.1m＋(2.0m×1.0)＝5.1mとなり，天ば高4.54mより高く，土盛り高5.09mとほぼ等しくなる。したがって，コンクリート被覆をしていない天ばと表のり肩に波が当り，連続的に表のり肩の部分が波力により洗掘されたものと推定される。これと同様な原因により被災したと思われるものには，日光川左岸

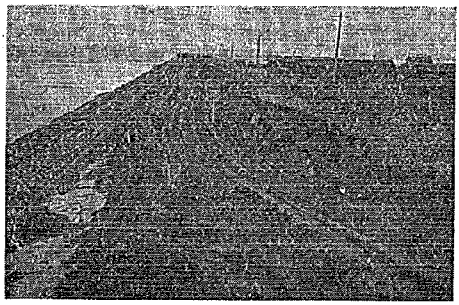


写真-3.9　矢作川下流右岸堤防被災状況

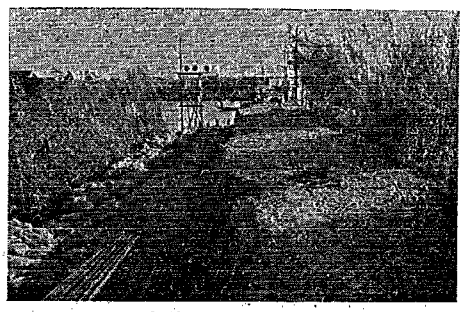
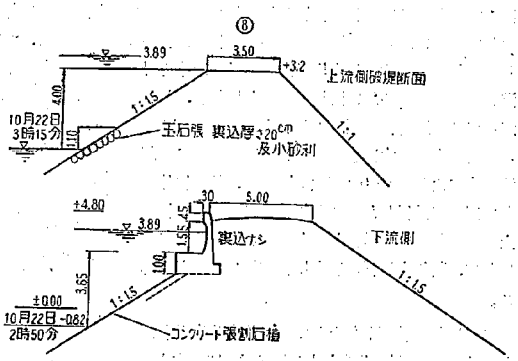


写真-3.10　裏のり肩崩壊状況



図—3.8　日光川左岸南陽町（河口）

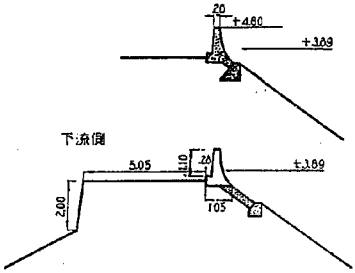


図-3.9 鍋田川左岸芝井 4.2km 地点

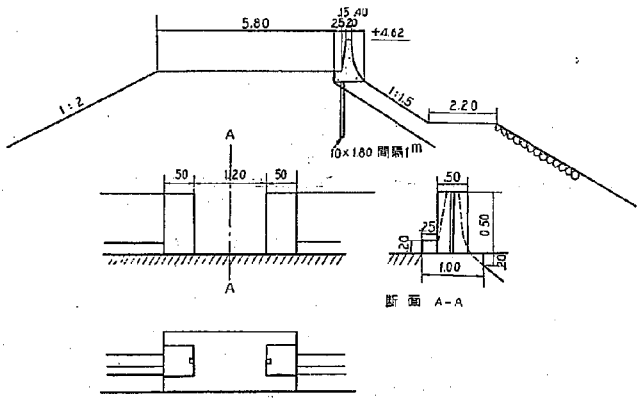


図-3.10 鍋田川左岸芝井 3.6k -70 m 地点堤防横断図

南陽町大字福田前天目地内の堤防，鍋田川左岸鍋田干拓河川堤，内部川河口部左岸木曽川右岸などがある。

(2) 越流，越波により裏のり肩から欠壊したもの

図-3.8は日光川左岸南陽町側に開口する運河出口の運河堤防と日光川左岸堤防の断面である。破堤した運河堤の天ば高は約3.2m で表のりは1割5分こう配，裏のりは1割こう配でいずれも笹竹が繁茂している。天ばは被覆していない。写真-3.10はこの運河堤の残存部で裏のり肩の欠壊を示す。日光川付近の潮位は名古屋港の3.89mとだいたい同じ程度だと思われ，したがってこの運河堤の天ばより高かったことになるから完全に海水は越流したことになる。この越流海水により裏のり肩が洗掘され，特に堤体の弱い区間が破堤したのであろう。このように堤防上を完全越流して破堤したと思われる地点はこのほかに，新川右岸堤，善太川善田橋付近などがある。

このほかに特別な例として鍋田川左岸芝井付近がある。これは図-3.9および図-3.10に示すように，天ば高約3.5m にかさ上げのためパラペット状のコンクリート壁を作ったもので，壁の上端の高さは4.6~4.8m であり，図に示すように壁のところどころに通行のため幅1.2m の開口部を設けてある。この被災状況は写真-3.11および3.12に示すように裏のりが崩壊したり，堤土がほとんど洗い流されて護岸だけになったりしている。これは，この付近の最高潮位が堤防天ば3.5mより高く，壁高4.6~4.8m よりも低かったため，開口部より海水が侵入し，裏のりから堤防は崩壊を始め，ついには堤土の大部分が洗い流されて護岸だけとな

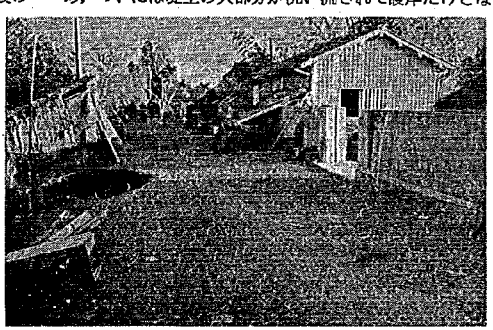


写真-3.11 鍋田川左岸芝井付近

り水圧に耐えられなくなって破堤したものと思われる。なお，開口部のない壁の区間でも，壁の直後の天ばが部分的に洗掘されているので，若干の越波があったものと思われる。このような現象は海岸堤防と同じような型式の表のりがわり合に急こう配で，パラペットなどを設けているような河川堤防（日光川河口付近）によく見かけられた。

(3) 漏水その他によるもの

写真-3.13および3.14は矢作川中流部の右岸，東海道本線鉄橋下流および下佐々木付近の河川堤の被災状況で，裏のりの崩壊と堤内地の水田に生じた湧水跡を示すものである。これは河川水位が上昇したため，堤体および堤体基礎からの漏水が原因であると思われる。

上記の例は堤内側の被災であるが，これとは逆に堤外側に崩壊を生じた所もある。図-3.11は長良川右岸の関西本線鉄橋付近の堤防断面で，裏および表のりは芝被覆であるが，天ばは道路兼用であるため被覆なく，しかも路面がそうとうくぼんでいた。この表のりが写真-3.15に示すように約30mの区間にわたって崩壊している。この原因は河川水位が異常に上昇したため，堤土の含水比が大きくなって地すべりしたためと思われる。

以上のほかに災害原因としては雲出川上流のように山津波により人家や道路が破壊されたもの，鍋田川中流部や日光川支川に見られたように樋管，樋門の付近から漏水して破堤したと思われるものがあった。

災害原因により分類すれば波力の項にはいるのであるが，河川堤防ののり線の形が被害程度に影響したと思われる地点もあった。鍋田川下流はだいたい南に向って流出しており，台風最盛時には河道に沿って波は上流に向って伝播したものと推定される。このとき，堤防のり線が屈曲していれば，波の進行の阻害程度により波当りの強い部分を生じよう。このような地点で破堤しれと思われ

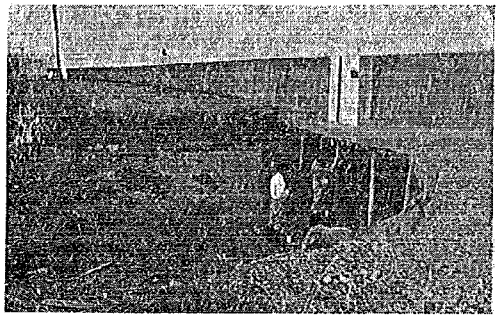


写真-3.12　鍋田川左岸芝井付近

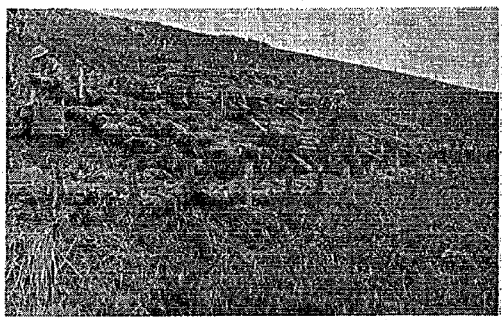


写真-3.13　矢作川中流部右岸堤防裏のりの漏水による崩壊

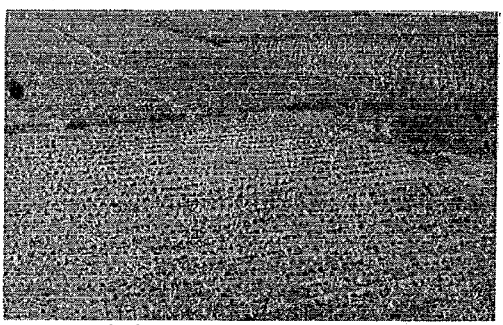


写真-3.14　矢作川中流部右岸堤内地の湧水状況

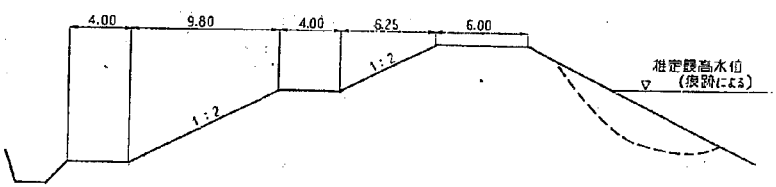


図-3.11　長良川右岸野寺地先堤防断面図

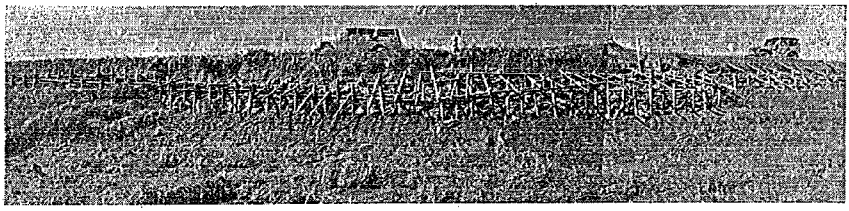


写真-3.15 長良川右岸堤防表のり崩壊状況

る例が鍋田川下流では多く見受けられた。堤防の屈曲以外に，堤防断面の形が急変する地点においても，波の進行を阻害し，波当りが強くなることが同様に起こりうるだろう。堤防型式の急変地点において破堤した例は，日光川沿岸に数多く見られた。

4. 付 録

[1] 各地の構造物の被害状況

図-4.1：宝飯海岸加藤新田における被災地区を示す。

写真-4.1および写真-4.2：堤防の被災状況。

この堤防は表のりは被害を受けなかったが，天ばおよび波返しが未施工であったので堤防を越えた海水はほとんど提体内に浸入し，そのため堤内の水圧が高まり，このような裏のりの崩壊を招いたものと考えられる。写真-4.1は裏のりの土砂が抜けてコンクリート被覆が落ち込んだ状況を示し，写真-4.2は裏のりじりの破壊状況を示す。

図-4.2：幡豆海岸西幡豆地区の被災個所

写真-4.3および写真-4.4：堤防の被災状況。

この堤防は下部の石積みに比して，上部の波返しが大きく，構造的に不安定であったことが災害を受けた原因と考えられている。写真-2.1は全般的な災害状況を示し，写真-2.2は表のりが波返しの下部から折れている状態を示す。

図-4.3：幡豆海岸矢作川付近における被災区域を示す。

写真-4.5および写真4.6：矢作川右岸中流部，国鉄東海道本線鉄橋下流および下佐々木付近の河川堤防の被災状況で，堤防裏のり尻の堤土が崩壊し，堤内地の水田に湖水跡が見られた。高潮のときの水圧により堤体および堤体基礎から浅水したものだろう。

写真-4.7および写真4.8：南奥田新田海岸堤の破堤状況を示す。

図-4.4：碧南干拓河川堤（矢作川河口右岸）の構造ならびに被災状況を示す。河口左岸ではこのような連続した波欠けを生じていなかった。

図-4.5：碧南干拓海岸堤防の構造を示す。

写真-4.9：権現崎の大浜寄りにある海岸堤で，階段の手すりが完全に残っているほど構造物の被害はなかった。ただし越波により背後地の家屋が被災した地点もある。

図-4.6：同上の海岸堤の構造を示す。

図-4.7：衣浦干拓付近の平面図である。

写真-4.10：衣浦大橋高浜町側取り付け付近の状況。潮位は堤内地盤より高かったが，構造物の被害はなかった。ただし，堤内の家屋は軒下まで浸水した。

写真-4.11：衣浦大橋神前神社側取り付け干拓堤の破壊状況。

写真-4.12および写真4.13：同破堤地点と衣浦大橋取り付けとの中間付近における堤防裏のり肩の越波による崩壊を示す。

図-4.8：同破堤区間平面図。

図-4.9：同破堤地点の堤防横断面。

図-4.10：同衣浦大橋干拓側取り付けの堤防横断面。

図-4.11：同堤防縦断図。前面波高は風速 20 m/s とし，モリターの式で計算すると1.3mとなる。波向は堤防に対してそうとう斜めだったと思われるので，遡上係数を1.0として波頭高を推定すると図に記入したように，3.5m+(1.3m×1.0)=4.8m となる。

図-4.12：半田武豊海岸平面図。

写真-4.14：康衛新田海岸堤防破壊状況。表のり先の被覆がわずかに残っているのみである。

写真-4.15：同上パラペット倒壊状況。

写真-4.16：同上座礁船付近の表被覆のみ残存し，裏被覆および堤土が流出してしまった状況。なお，この区間の堤防は天ば被覆をしていなかった。

図-4.13：康衛新田海岸堤標準断面。（正面堤大部分）

図-4.14：康衛新田海岸堤南西部屈曲点付近断面。

図-4.15：同上。

図-4.16：康衛新田海岸堤の座礁船付近の状況。

写真-4.17：南柴田新田南西屈曲部の海岸堤防の被災状況。パラペットは間知石積みで表のり下部は玉石張りで，天ばと裏のりは笹竹で被覆してある。この写真の区間では堤防上半部が倒壊している。南柴田新田の位置は図-4.17を参照されたい。

写真-4.18：同上。この区間の堤防はパラペット基部が破壊されて大きな穴を生じている。

写真-4.19：同上。同じくパラペット基部に生じた大穴を裏側から見たもの。

写真-4.20：同上。堤防の裏側から見たもので，堤土が崩壊しはじめており，越波がそうとう激しかったことが想像できる。

図-4.17：名古屋港付近の被災地点を示す。

写真-4.21：名古屋港石炭埠頭横物揚場のコンクリート製連絡橋の被災状況で，各ブロックが東から西にそれぞれ移動し，西端の数個は海中に転落していた。

この連絡橋の前面はつぎの写真に示すような透過構造のコンクリート製防舷材である。このことから台風最盛時の港内では東寄りの波力の成分が卓越していたものと思われる。

写真-4.22：連絡橋前面の防舷材。透過構造であるためか，被害はなかった。

写真-4.23：石炭埠頭横物揚場の倉庫付近の被災状況。台風最盛時に背後地に海水が越流し，倉庫間の舗装していない地盤が洗掘されて倉庫の基礎が数十センチ露出していた。また倉庫の壁には床上数十センチの高さに潮位痕跡がみとめられた。

写真-4.24および4.25：庄内川河口左岸汐止町先屈曲点の被災状況。練り石張りの上にコンクリート製パラペットを取り付けてあったが，パラペット基部に大穴を生じたり，パラペットが倒壊したりしている。天ばと裏のりは三和土で被覆してあったが，背後地盤が高かったため，大きな被害はなかった。

図-4.18：新川庄内川平面図。

写真-4.26：新川右岸藤高地先破堤地点。

図-4.19：新川右岸堤横断面図。図中には明徳橋で観測された最高潮位4.26mと名古屋の3.89mを記入しておいた。これからみると，堤高が低すぎて，完全越流し破堤したものと思われる。

図-4.20：新川縦断図。この図によれば被害の大きかった距離標2.2～3.0 km の区間の右岸堤高は今回の高潮に対して低かったことがわかる。

図-4.21：日光川沿岸被災地点平面図。図中に示す L は破堤区間長で H は破堤部に生じたミオの水深である。

写真-4,27：および4.28：善太川善太橋右岸取り付け破堤状況。

図-4.22：善太橋破堤地点平面図。善太川右岸の旧橋脚，善太橋右岸取り付けから下流屈曲点までの70m区間が破堤している。

図-4.23：同上部の縦断および横断である。最深部は6.5m の深いミオを生じている。高潮位+3.89（名古屋港）～+4.26m（明徳橋）に対し，堤防高+3.4～3.5m は低すぎたようで，台風最盛時には完全に越流したものと思われる。

写真-4.29：日光川左岸南陽町福田前天目地内の堤防の破壊状況。図-7.4の②の地点付近である。

図-4.24：同上地点の堤防の縦断と横断。破堤部には水深8m以上の深いミオを生じている。最盛時の潮位はコンクリート護岸の肩まであったと思われ，したがって，それより上部の被覆していない堤頂部は越波により流出したのだろう。

写真-4.30：日光川左岸南陽町福田前天目地内③の付近の堤防被災状況。

図-4.25：同上地点の堤防横断図。潮位はコンクリート被覆の高さまであったと考えられる。越波により被覆のない堤頂部の堤土が流出し，続いてコンクリート被覆も破壊されたのであろう。

写真-4.31および4.32：日光川左岸南陽町藤高前地先⑨の付近の堤防の被災状況。

図-4.26および4.27：同上地点付近の堤防横断図。天ばと裏のりはカヤ被覆であるが，越波に十分抵抗できず，パラペット背後の堤土が写真のように流失し，ついで大重量のパラペットが倒壊したものと思われる。

図-4.28：日光川右岸海部海岸被災地点平面図。図中の H は破堤部に生じたミオの水深で，L は破堤区間長である。

写真-4.33，4.34，4.35，4.36：海部郡飛島村樹之郷地先海岸堤防の被災状況。天ばと裏のりは芝付き粘土張りであるが越波により，ところどころ大穴を生じている。堤土が流失し，表護岸のみが残されてパラペット基部付近に大穴を生じたり，パラペットが倒壊したりしている。

図-4.29：同上地点の堤防断面および破壊状況図。台風最盛時の潮位は名古屋港3.89mであるから，この地点もこの程度であろう。表のりの傾斜がこのようにゆるいと最も大きな波力の作用する点は，砕波後の落下点であるから，図のように大穴を生じた範囲がだいたい落下点になったのであろう。

写真-4.37，4.38，4.39：それぞれ，海部海岸筏川河口樋門，樋門左岸海岸堤防，樋門右岸海岸堤防の被災状況である。残存堤防をみると，上述と同様に裏のり肩より堤土が流失し，パラペット部が倒壊している。

図-4.30：鍋田干拓平面図。

写真-4.40：鍋田干拓東側干拓堤被災状況。残存部は堤体基礎ブロックのみで，他はほとんど何も残らなかった。

図-4.31：同地点の海岸堤の構造。表は練り石積みで，天ばと裏は芝付き粘土張りであった。潮位は，名古屋港+3.89mとほぼ同程度と思われるから，天

ば高5.64mから潮位を差引けば1.7m程度となる。もし，遡上係数を1.3とするならば，この地点における相当深海波高は1.3m以上あったことになる。

写真-4.41： 鍋田干拓舟溜りの被災状況。前面に低い防波堤があったためか，付近にくらべて被災は小さく，表のり肩が崩壊しただけで残存しているものが多かった。

写真-4.42： 鍋田干拓西側鍋田川筋河川堤被災状況。表のりのコンクリートブロックを残して堤土は流失

写真-4.43： 同上地点の若干上流側。表のりの肩の部分とは天ばに越波による崩壊を生じている。この波欠けの方向はS～SSWであった。前面は遠浅で，アシが生えている。

図-4.32： 同上地点堤防構造図。天ば高は4.00mであるから潮位より高く，完全越流はしなかったと思われる。

図-4.33： 鍋田川芝井付近平面図。

写真-4.44： 同上地点左岸の被災状況。パラペットに設けた開口部より水が侵入し，裏の堤土が流失している。(本文参照)

図-4.34： 同上地点の堤防横断図。堤防の天ば地盤高は名古屋港の潮位3.89mとほぼ同じ高さである。したがって，開口部からの越波により堤土が流失したものと思われる。

図-4.35： 鍋田川加稲山付近平面図。

写真-4.45： 同上地点左岸の破堤状況。堤内地に排水ポンプ場があり，その樋管付近が破堤している。樋管周囲よりの漏水が破堤原因と思われる。

図-4.36： 同上地点の堤防横断図。

図-4.37： 伊曽島平面図。

写真-4.46： 伊曽島正面堤被災状況。この地点の堤防は裏のり肩と天端にブロック被覆をしてないことを除けばつぎに示す松阪地先の海岸堤防と同じ構造である。写真において，天ばと裏のりに乗っている間知石は，表のりに張ってあったものが破壊されて打ち上げられたものである。この練り石張りの脱落はパラペット基部と表のり尻付近に多く見られた。

写真-4.47： 伊曽島東南端正面堤寄りの被災状況。裏のり肩がずり落ちている。

図-4.38： 同上地点の海岸堤横断図。

図-4.39： 同上海岸堤の破壊状況。堤防天ば高5.84mから潮位3.89m（名古屋港）を差引くと約2.0mとなる。被災状況から越波がそうとうあったと思われ，したがって遡上係数を1.3とするなら，相当深海波高は1.5mより大きかったはずである。表のりは練り石張りであったが，パラペット基部に生じた亀裂と石の脱落が目立った。

図-4.40： 木曽川横満蔵付近平面図。

写真-4.48： 木曽川右岸下流部の河川堤は，この写真のように，表のりは緩傾斜にコンクリートブロックを千鳥型に張り，天ばと裏は芝で被覆してある。

写真-4.49： 木曽川右岸下流部河川堤の被災状況。河口から上流約1.2kmまでの区間はこのように堤頂部が崩壊している。崩壊部にあったブロックは前面に落下している。したがって，この部分は波にそうとうたたかれたものと思われる。

図-4.41： 木曽川潮位，波浪，洪水位痕跡図。

図-4.42： 長良川潮位，波浪，洪水位痕跡図。

図-4.43： 揖斐川潮位，波浪，洪水位痕跡図。

図-4.44： 長良川右岸野寺地先平面図。

写真-4.50：および4.51： 同上地点河川堤防の被災状況。表のり上部が滑動して崩壊している。本文参照。

写真-4.52： 城南干拓揖斐川右岸堤の被災状況。天ばと裏のり肩に大きな波欠けが見られ，この方向は南東であった。したがって，南東方向からの波がそうとう越波したものと思われる。

写真-4.53： 城南干拓正面堤被災状況。表のりの途中から折れて後方へ倒壊している。

写真-4.54： 城南干拓町屋川寄り海岸堤被災状況。パラペット基部より折れて後方へ倒れている。

図-4.45： 城南干拓町屋川寄り海岸堤防構造図。

図-4.46： 城南干拓正面堤破壊状況。残存堤防を見ると，パラペット直後の堤土が局部洗掘され，裏のり肩は高さ約1mにわたって洗掘されている。越波がひどかったのであろう。

図-4.47： 朝明川河口付近平面図。

写真-4.55： 朝明川河口左岸川越地区海岸堤防の被災状況。堤土が流失し，パラペット基部付近から折れて後方へ倒壊している。

図-4.48： 川越地区海岸堤防標準断面図。四日市港での最高潮位＋3.29mと天ば高＋5.01mとの差は約1.7mである。遡上係数を1.3とすれば越波のひどくない相当深海波高は1.3mとなる。被害状況をみると，そうとう越波があったと思われるので，相当深海波高は1.3mよりずっと大きかったのであろう。

図-4.49： 富田浜地区付近平面図。

写真-4.56： 富田浜地区海岸堤防被災状況。堤土が流失し，表被覆の上部が折れて倒壊している。障壁は完全に残っている。背後地の家屋には，越波した海水により床下まで浸水したものがある。

図-4.50： 同上標準断面図。天ば高と潮位（四日市）との差は5.50−3.29=1.21mであり，遡上係数を1.3mとするならば，ひどい越波を起さぬ相当深海波高は90cmとなる。被災程度からみて，相当量の越波があると思われるので，被災時の相当深海波高

は90cmよりも大きかったはずである。

図-4.51：　霞浦地区海岸堤防標準断面図。被害はあまりなかった。背後地の地盤が高かったためであろう。

図-4.52：　羽津地区海岸堤平面図。破堤区間は海蔵川左岸導流堤の先端を見通して，S30°E～S34°Eの範囲であった。

写真-4.57：　同上地点の被災状況。表のりはコンクリート被覆，天ばは道路兼用で被覆なく，裏のりはコンクリート被覆をしてある区間もあった。天ばは越波にたたかれた跡が認められ，裏のりは崩壊している。

図-4.53：　四日市市旭町海岸，石原海岸，鈴鹿川付近平面図。

図-4.54：　旭町昭和石油大協東亜タンク前海岸堤断面図。完全に被覆してあったが，高さが低かったためか，ところどころ破堤している。

図-4.55：　石原海岸被災状況。(図-4.53に示すA地点)

図-4.56：　同上海岸堤断面図。(　〃　〃　B地点)

図-4.57：　同上海岸堤断面図。(　〃　〃　C地点)

写真-4.58：　石原海岸海岸堤被災状況。天ば被覆と裏被覆が破壊している。

写真-4.59：　同上。パラペット基部が後方へ5cmほどずれている。

写真-4.60：　表のり下部にクラックがはいり，間知石がところどころ抜けている。前面の直径40～50cm程度の捨石が波で打ち上り，表のりの間知石張り表面やパラペット表面に，無数の衝突した跡が認められた。

写真-4.61：　同上。パラペットがずれたことにより，図-4.56に示すように天ばの床版が約5cm沈下し，床版とパラペットおよび裏のり被覆の接触点が欠損した状況。

写真-4.62：　同上破堤状況。

写真-4.63：　同上破堤状況。

写真-4.64：　同上堤内地家屋の被災状況。前面の堤防は破堤していないが，背後の家屋は倒壊流失しており，多量の越波があったものと思われる。

写真-4.65：　同上捨石堤。直径約80cm程度の捨石を使用しているが，あまり散乱しないで残っていた。

写真-4.66：　鈴鹿川左岸河川堤防被災状況。

図-4.58：　鈴鹿川河口部左岸堤防横断図ならびに被災状況図。

図-4.59：　鈴鹿川縦断痕跡図。河口部左岸堤内痕跡は3.3mである。四日市港の最高潮位は3.29mと記録されているので，この付近の潮位は四日市港と同程度だったと言えよう。

図-4.60：　磯津吉崎地区平面図。

図-4.61：　同上鈴鹿川河口右岸海岸堤平面図。

図-4.62：　同上海岸堤防標準断面図。

図-4.63：　同上破壊状況図。

写真-4.67：　同上破壊状況。

写真-4.68：　同上パラペット基部の破損状況。

写真-4.69：　同上表被覆下部継ぎ手の張り出し状況。

写真-4.70：　同上残存堤防の状況。内部の堤土が流失し，天ばの床版の中央付近にクラックがはいって中央部が約3cm下がっている。

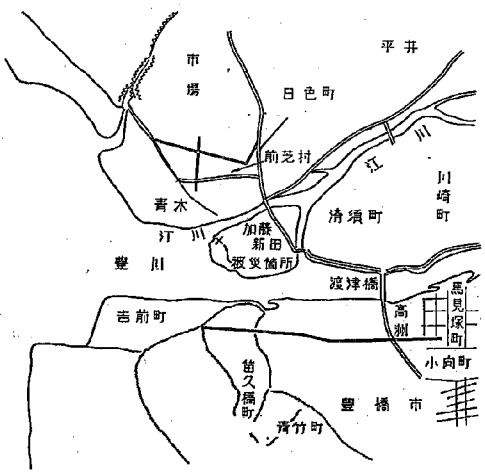


図-4.1

写真-4.1

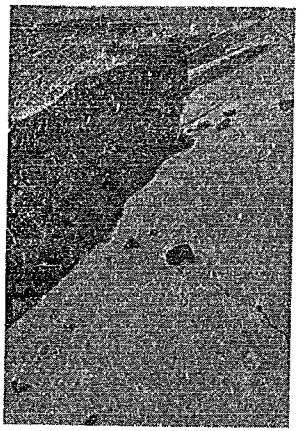


写真-4.2

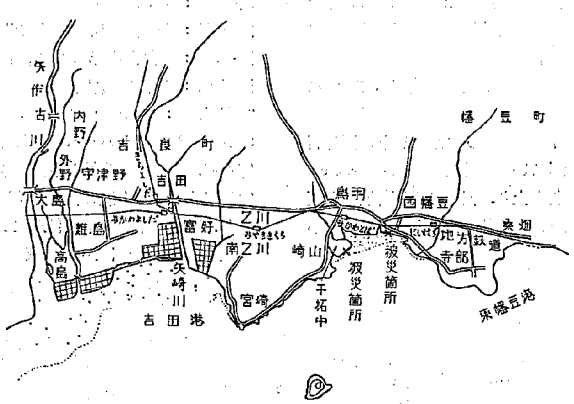


図-4.2

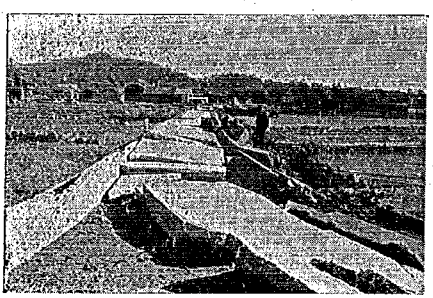


写真-4.3

写真-4.4

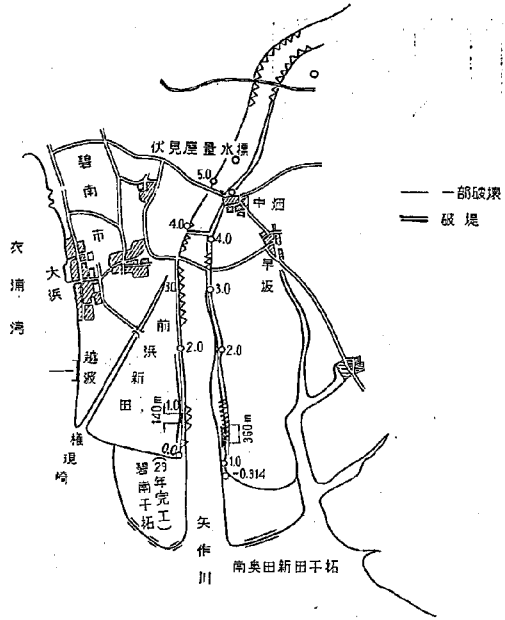


図-4.3

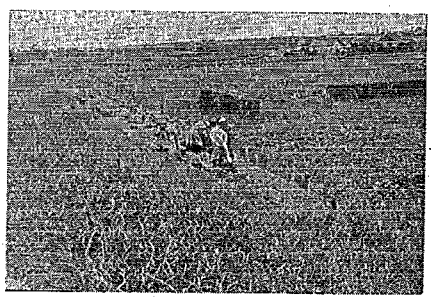


写真-4.5

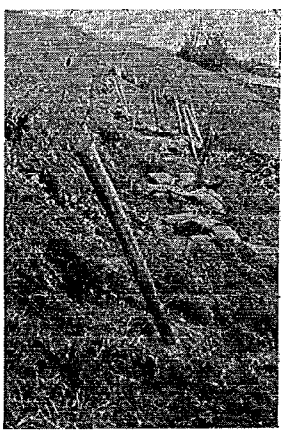


写真-4.6

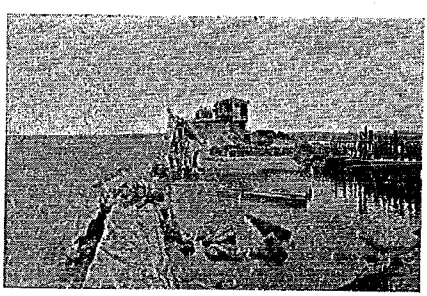


写真-4.7

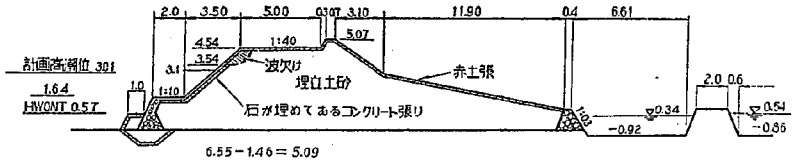


図-4.4

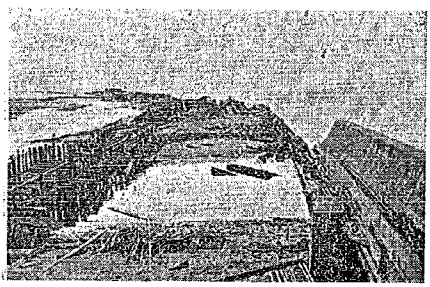


写真-4.8

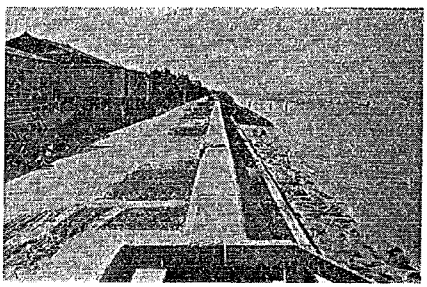


写真-4.9

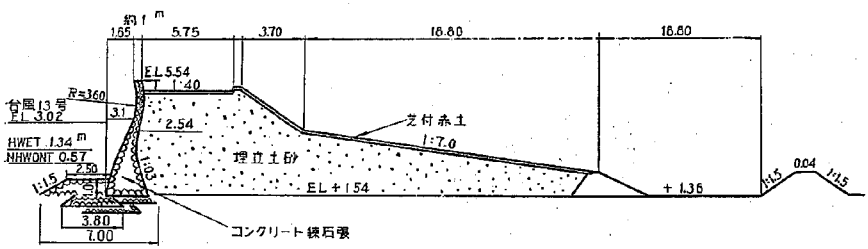


図-4.5

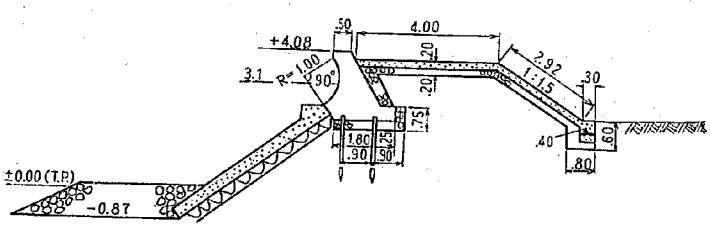


図-4.6

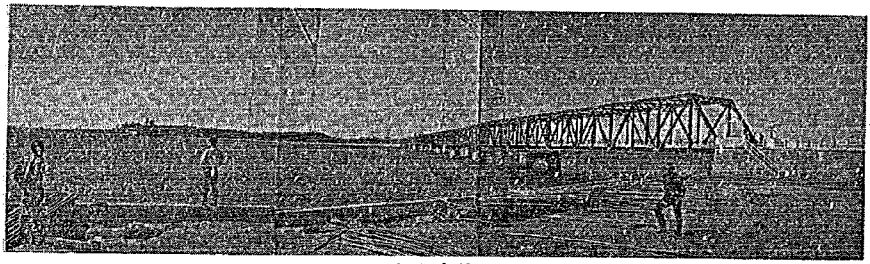


写真-4.10

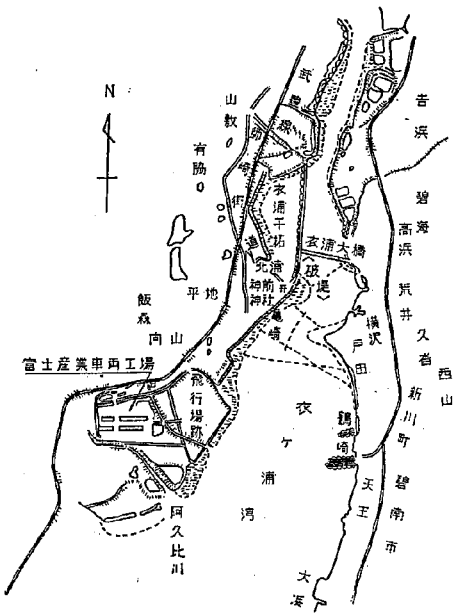


図-4.7

写真-4.11

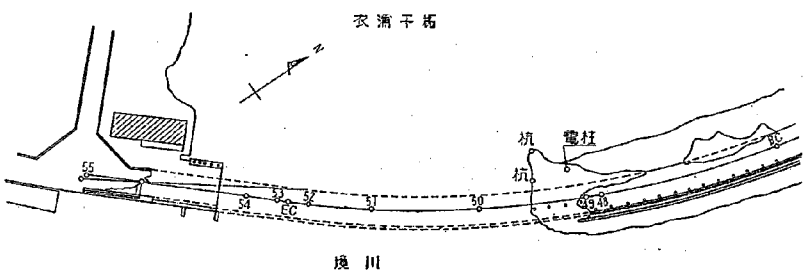


図-4.8

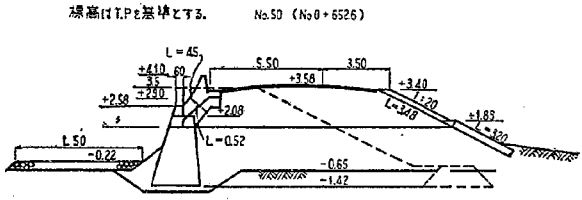


図-4.9

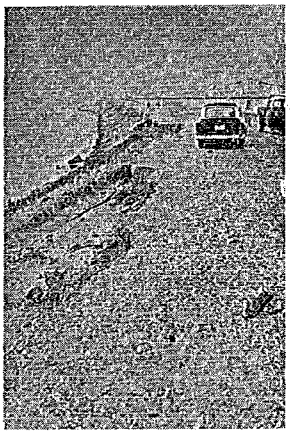


写真-4.12

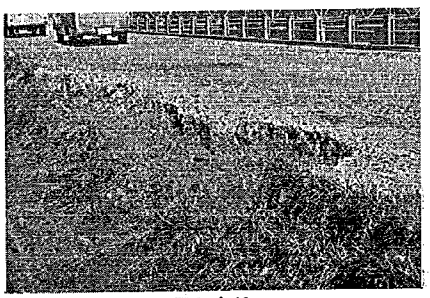
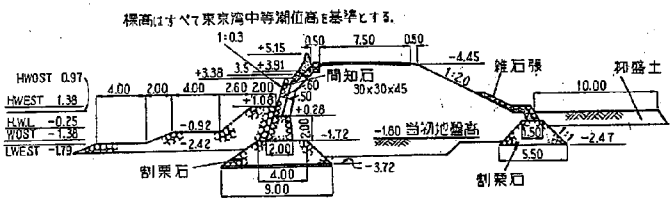


写真-4.13



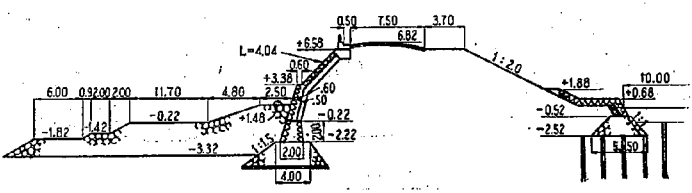


図-4.10

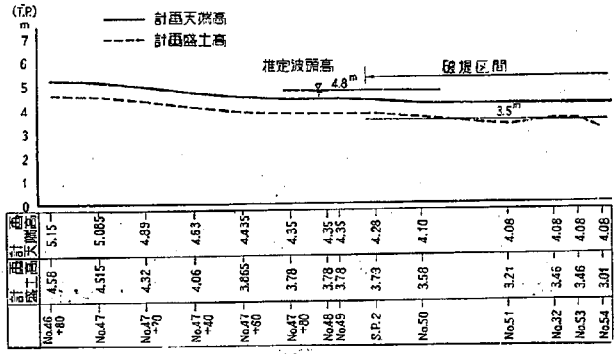


図-4.11

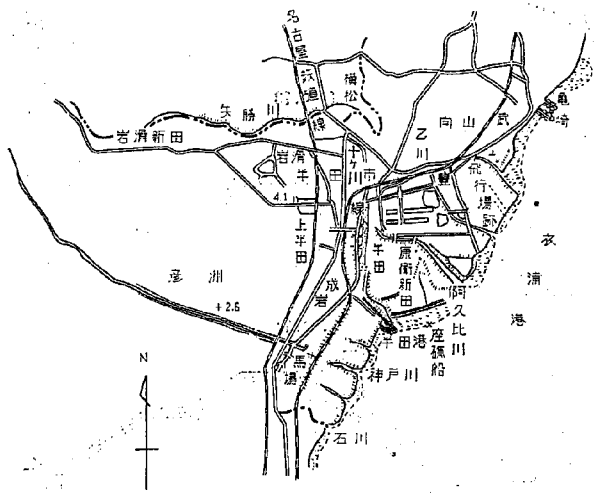


図-4.12

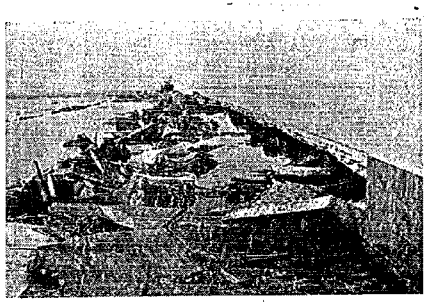


写真-4.14

写真-4.15

写真-4.16

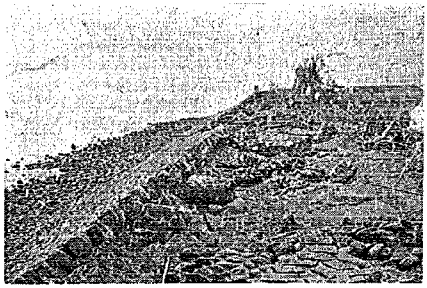


写真-4.17

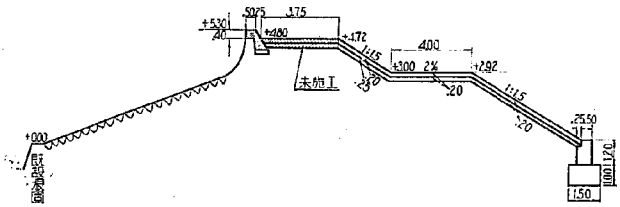


図-4.13

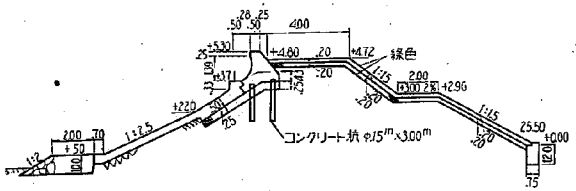


図-4.14

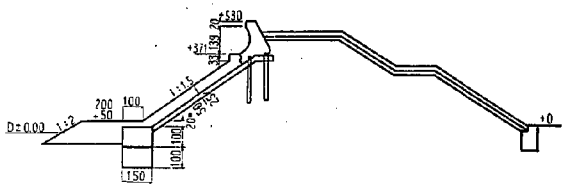


図-4.15

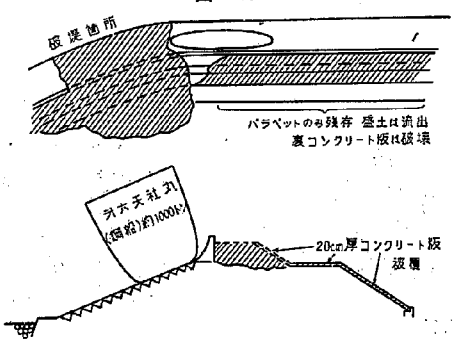


図-4.16

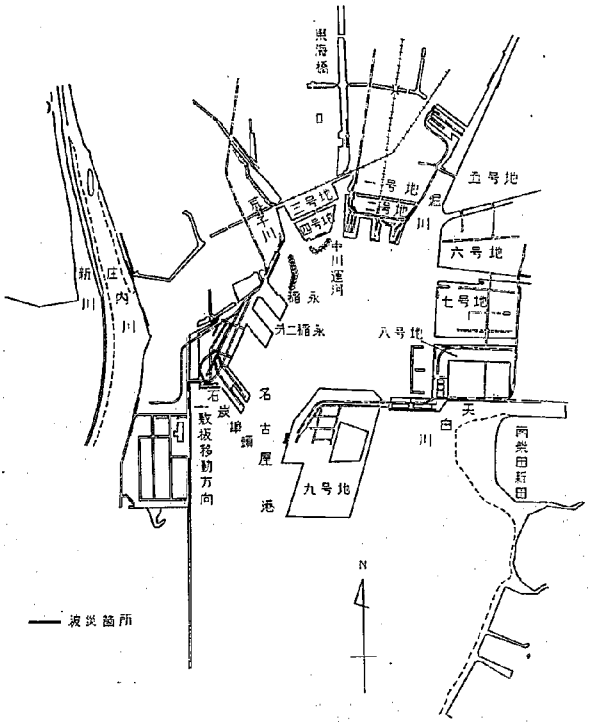


図-4.17

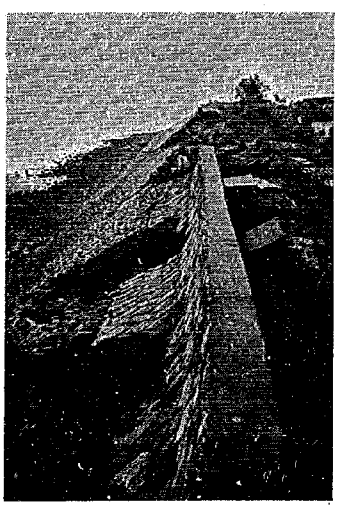


写真-4.18

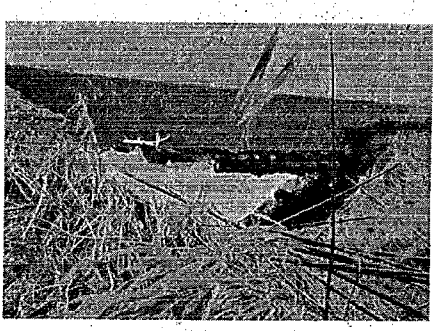


写真-4.19

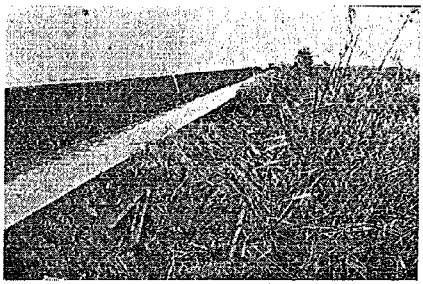


写真-4.20

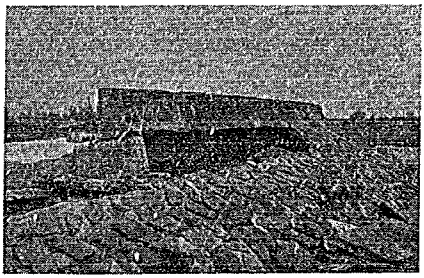


写真-4.24

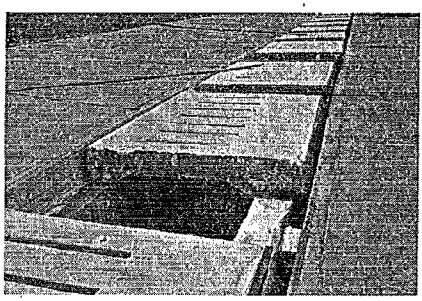


写真-4.21

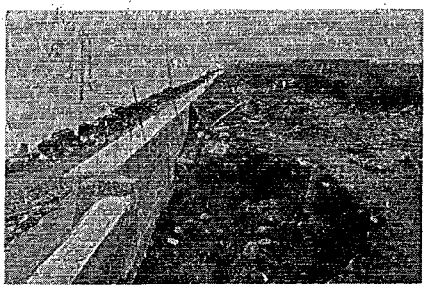


写真-4.25

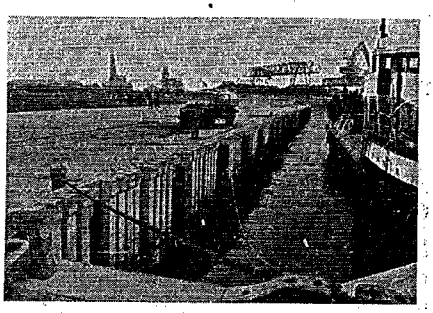


写真-4.22

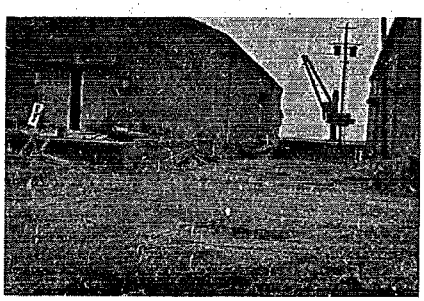


写真-4.23

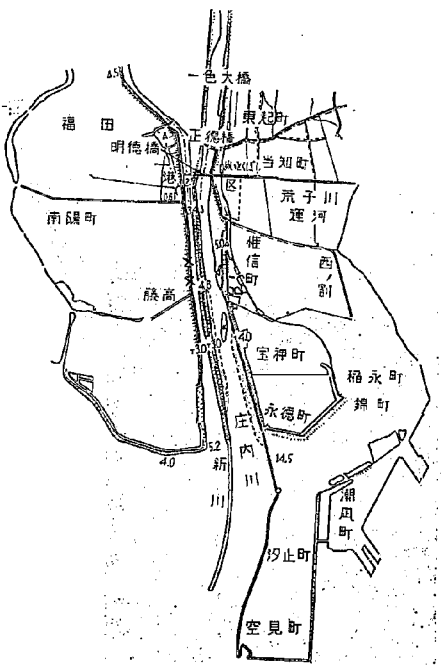
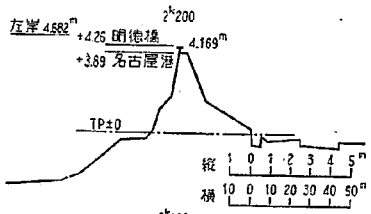


図-4.18



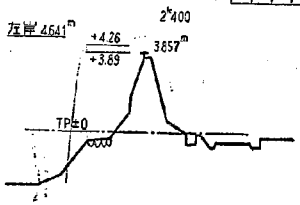
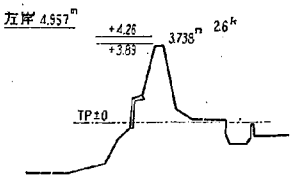


図-4.19 (a)



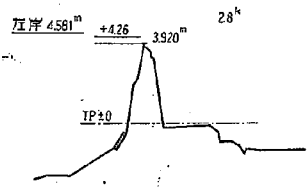
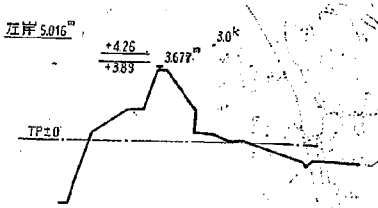


図-4.19 (b)



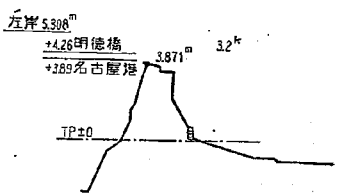


図-4.19 (c)

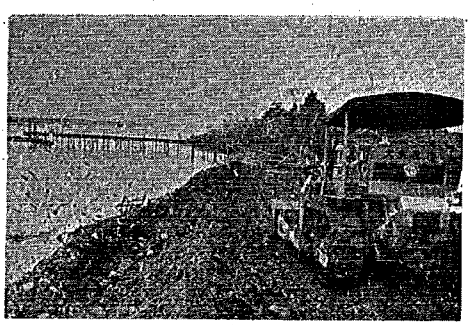


図-4.26

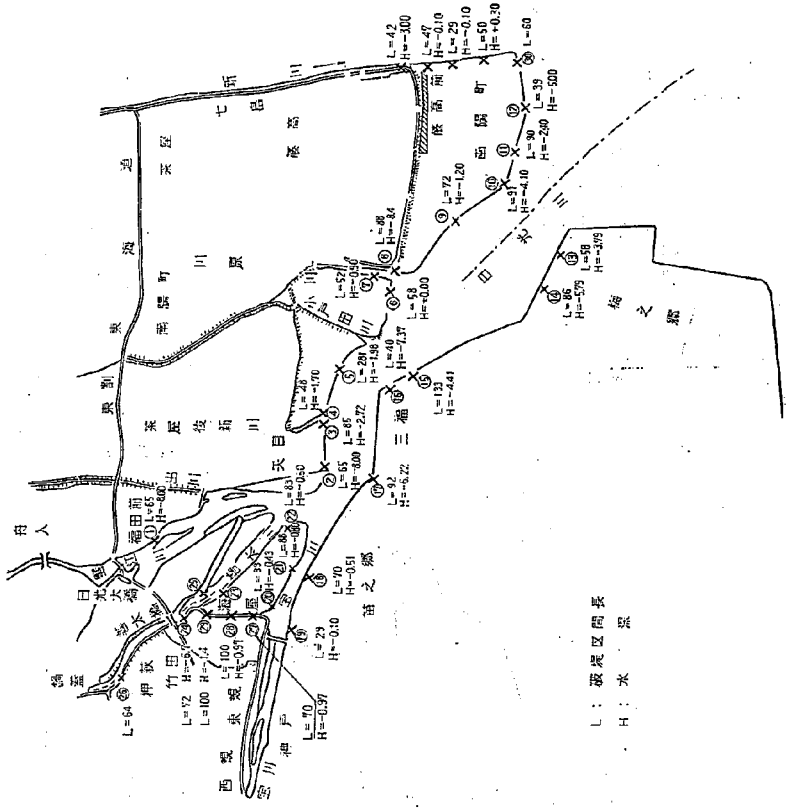

L：破堤区間長
H：水　深

図-4.21

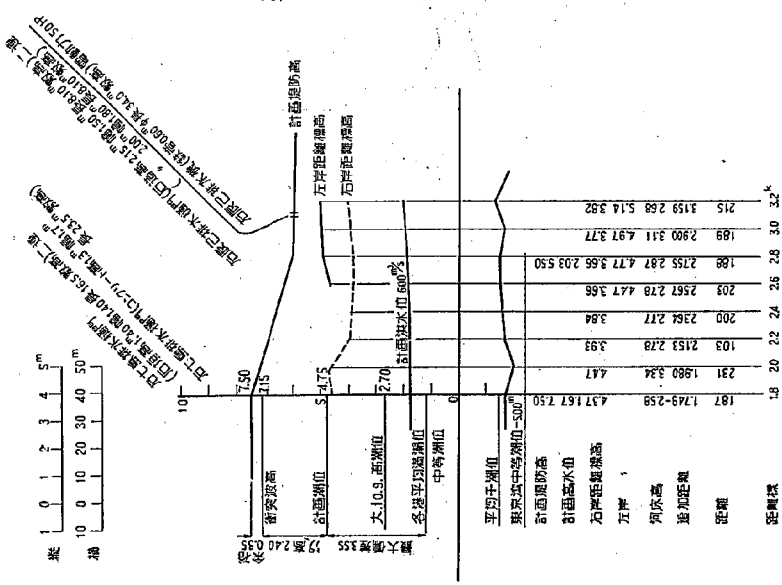

計画堤防高
左岸距離標高
右岸距離標高
計画洪水位 600m³/s
計画堤防高
計画高水位
左岸
河床高
追加距離
距離
距離標

図-4.20

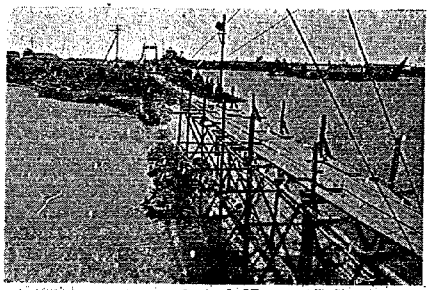


写真-4.27

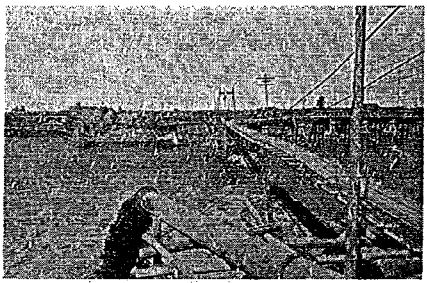


写真-4.28

㉔

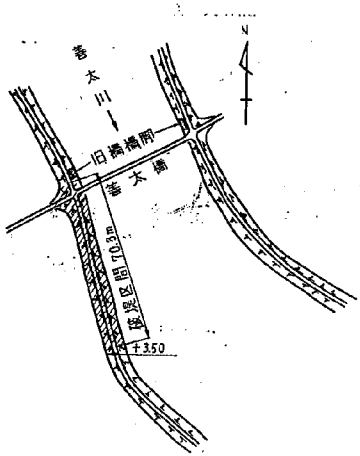
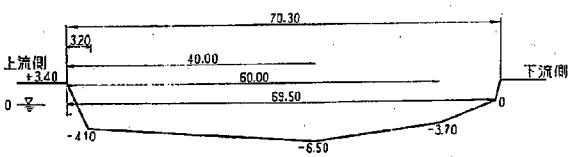


図-4.22

㉔



下流側断面（右岸）

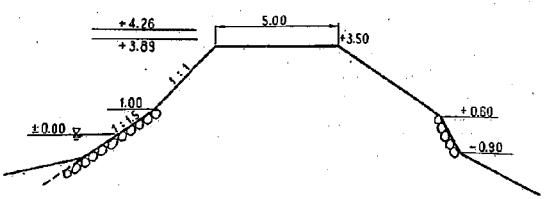


図-4.23

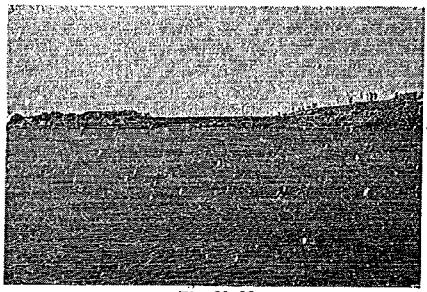


写真-4.29

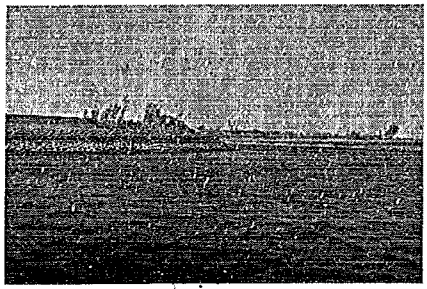


写真-4.30

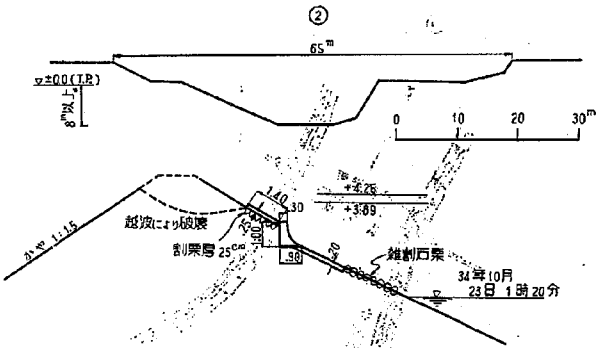


図-4.24

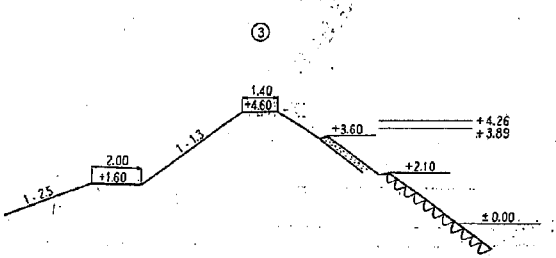


図-4.25

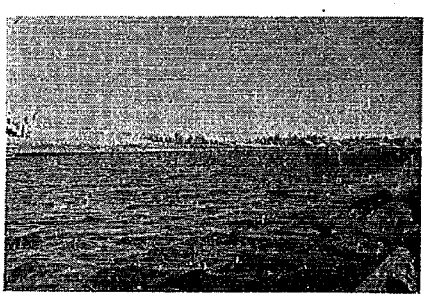


写真-4.31

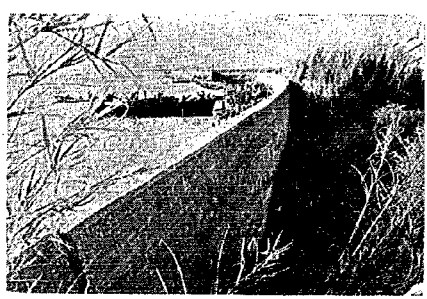


写真-4.32

⑨ の附近

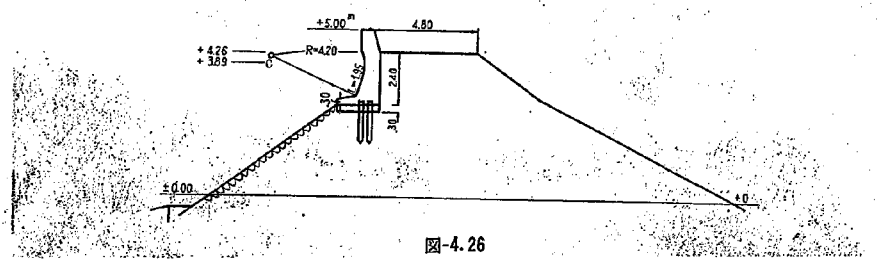


図-4.26

⑨ ⑩ ⑪ の附近

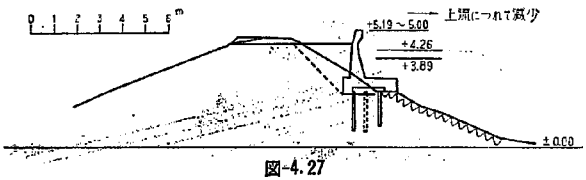


図-4.27

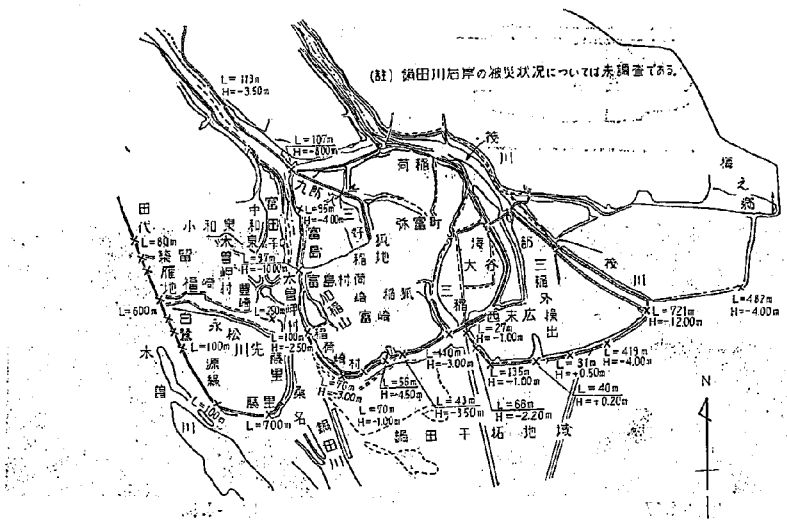


図-4.28

写真-4.33

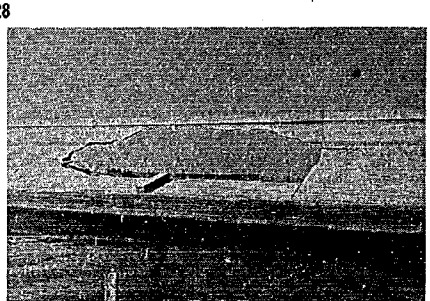


写真-4.34

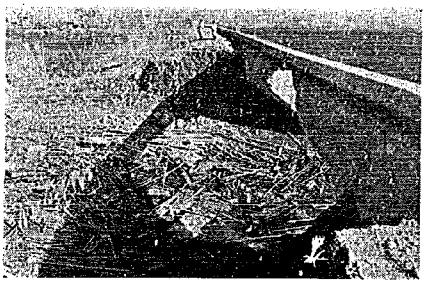


写真-4.35

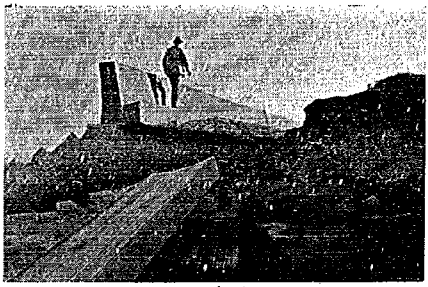


写真-4.36

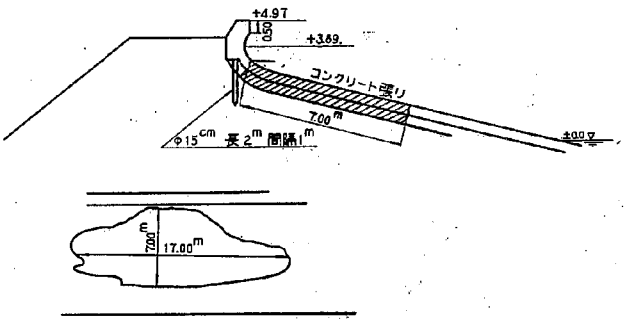


図-4.29

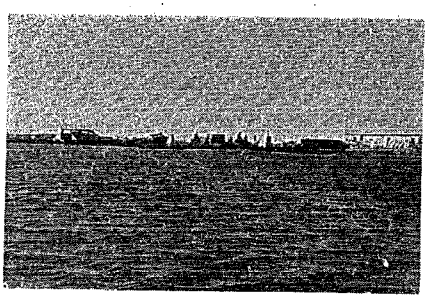


写真-4.37

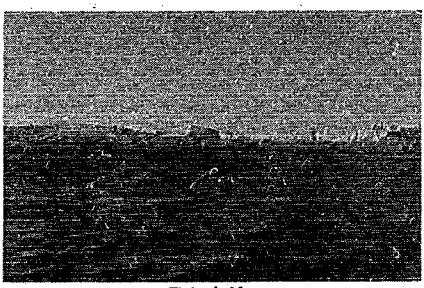


写真-4.38

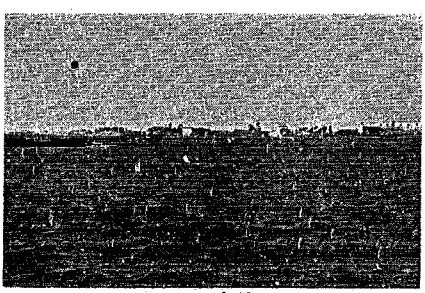


写真-4.39

写真-4.40

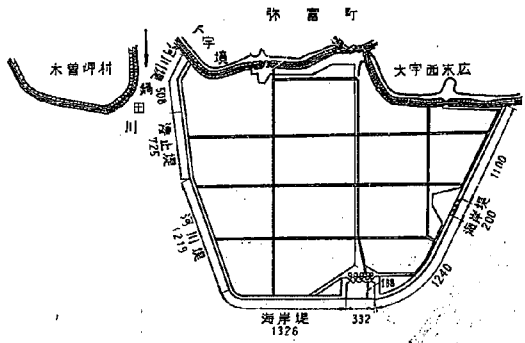
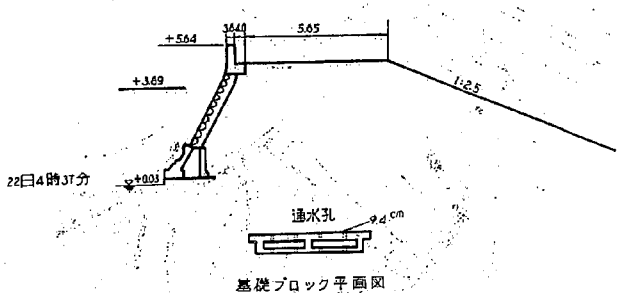


図-4.30



基礎ブロック平面図

図-4.31

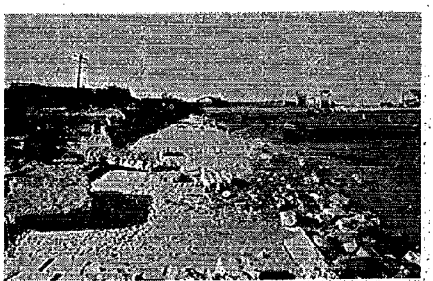


写真-4.41

写真-4.42

写真-4.43

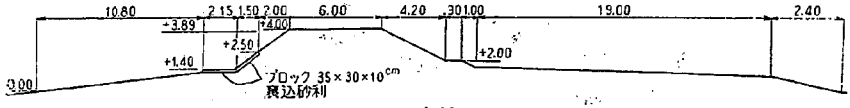


図-4.32

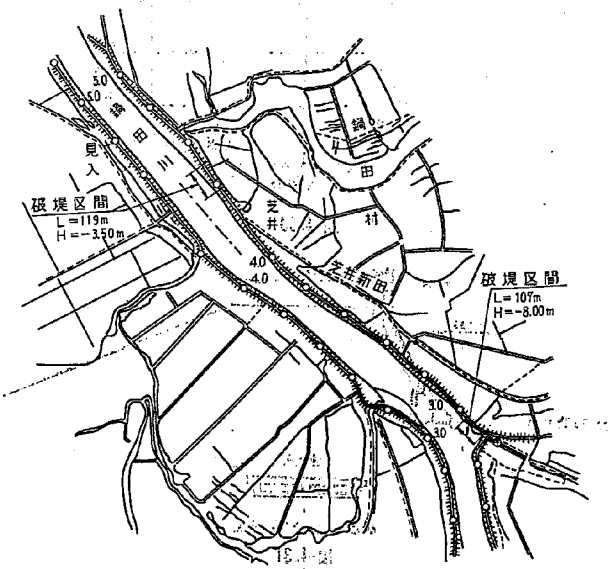


図-4.33

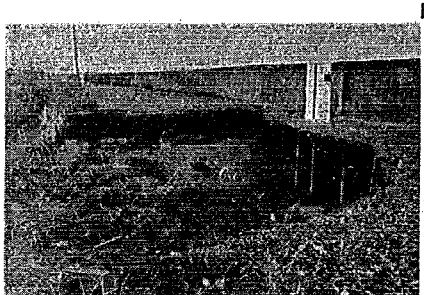


写真-4.44

写真-4.45

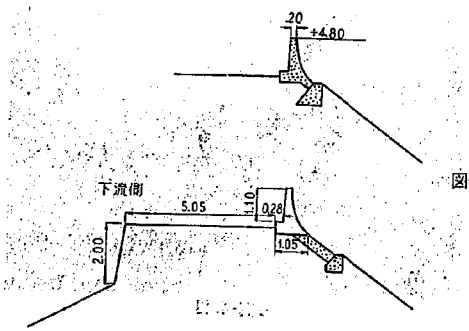


図-4.34

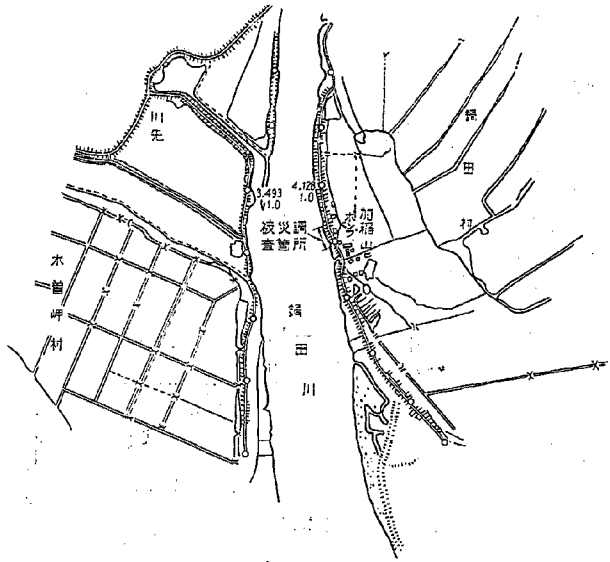


図-4.35

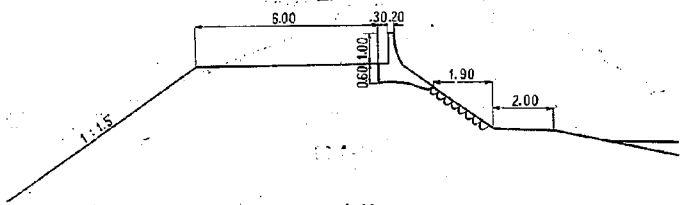


図-4.36

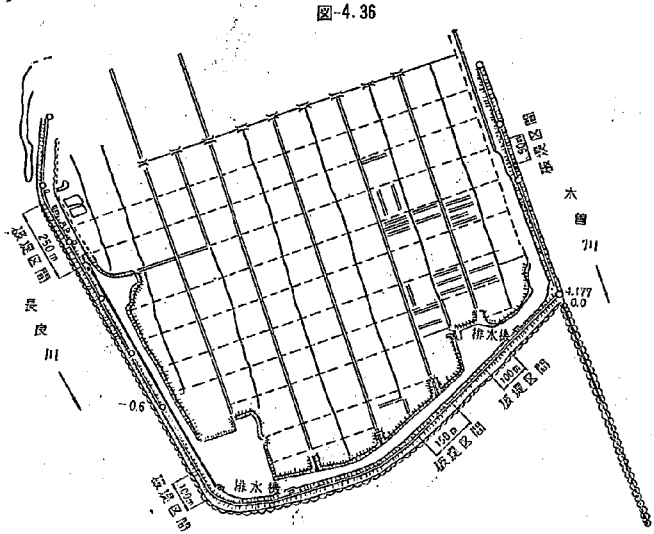


図-4.37

写真-4.46

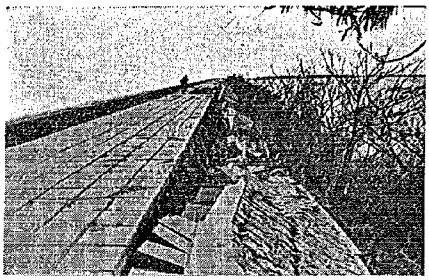


写真-4.47

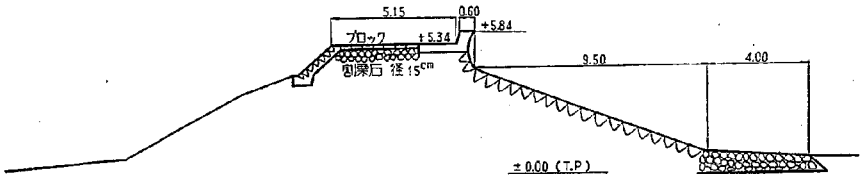


図-4.38

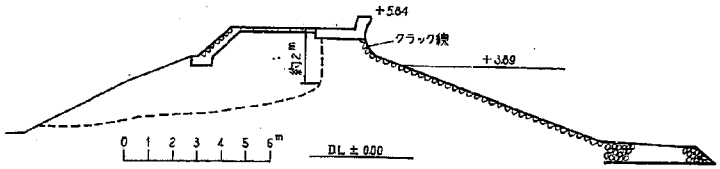


図-4.39

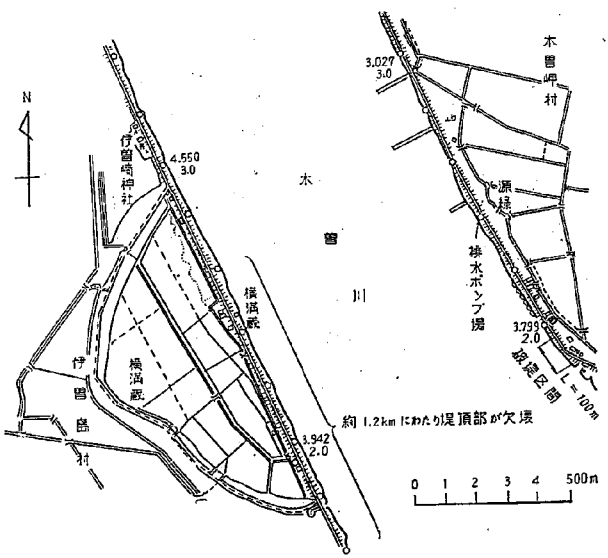


図-4.40

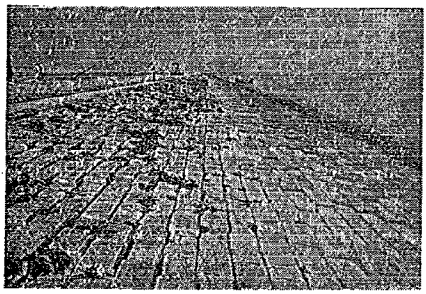


写真-4.48

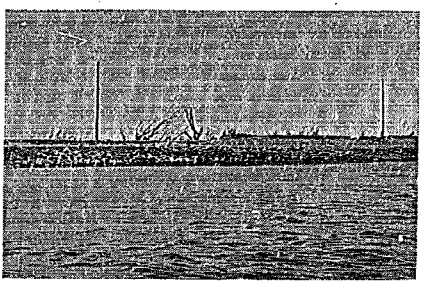


写真-4.49

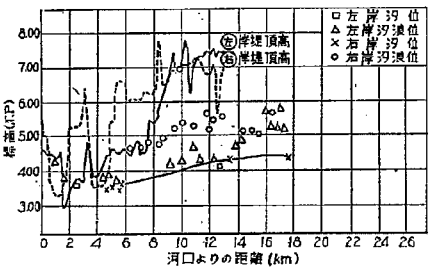


図-4.41

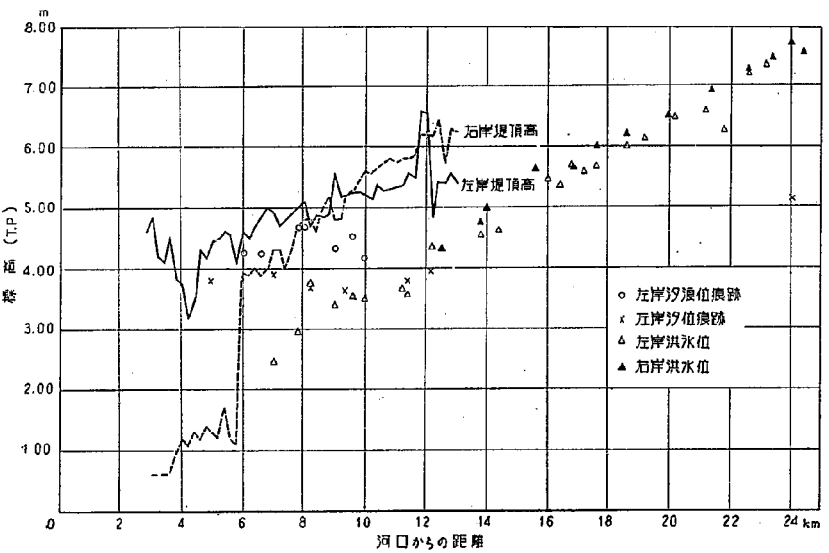


図-4.42

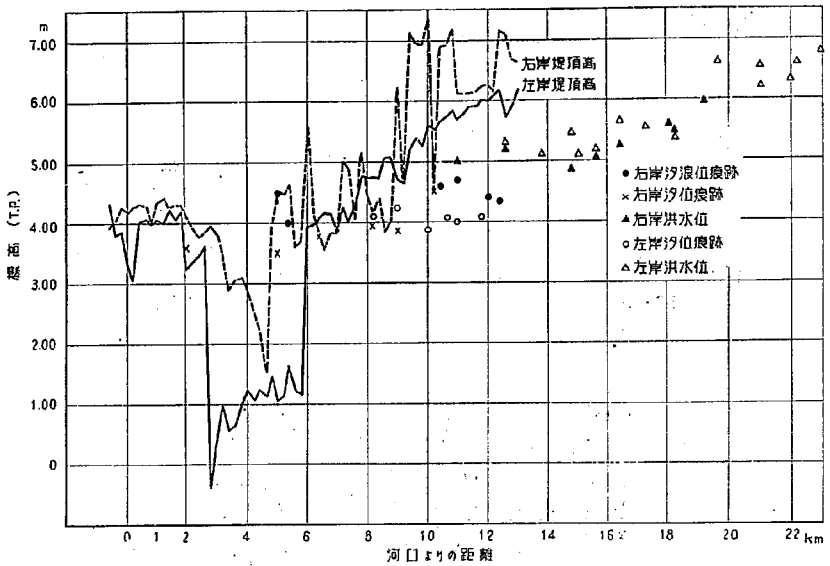

m
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0
水位（T.P.）
0 1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 km
河口よりの距離
右岸堤頂高
左岸堤頂高
●右岸汐浪位痕跡
×右岸汐位痕跡
▲右岸洪水位
○左岸汐位痕跡
△左岸洪水位

図-4.43

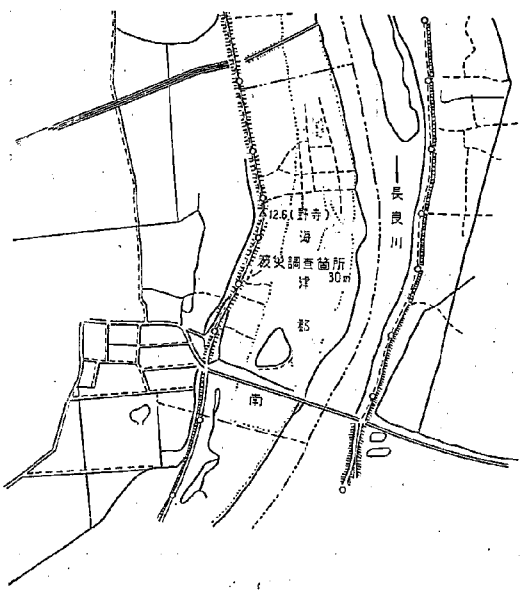

12.6(計寺)
海
被災調査箇所
岸 30m
郡
南
長良川

図-4.44

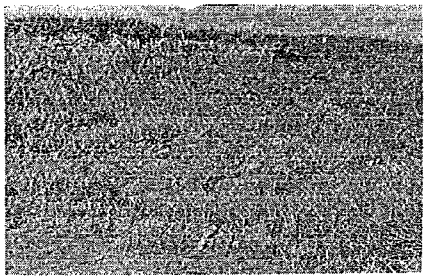


写真-4.50

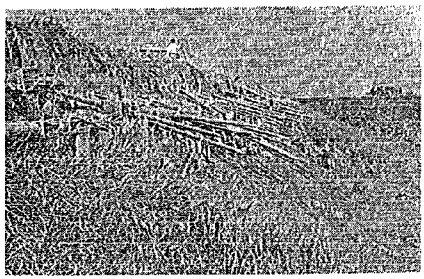


写真-4.51

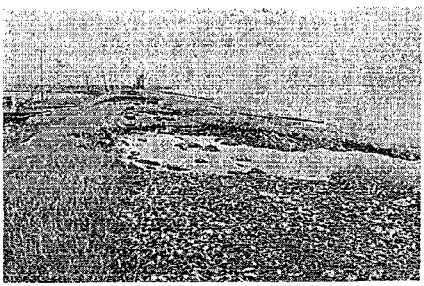


写真-4.52

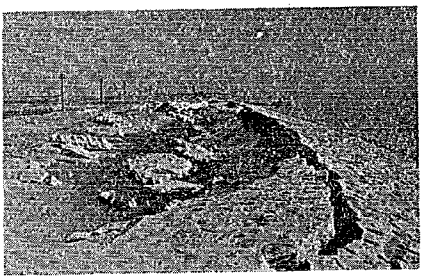


写真-4.53

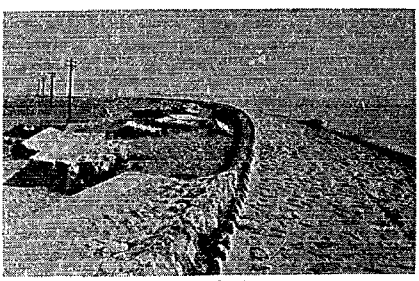


写真-4.54

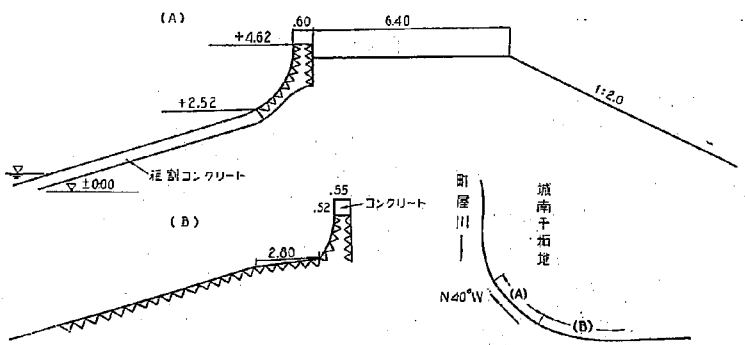


図-4.45

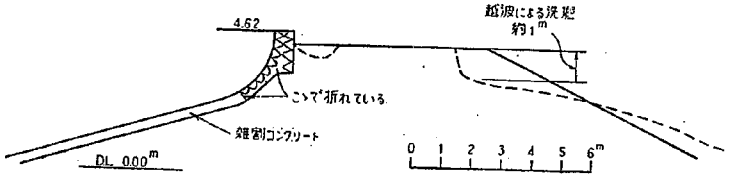


図-4.46

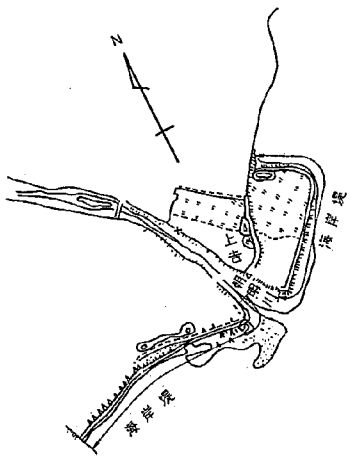


図-4.47

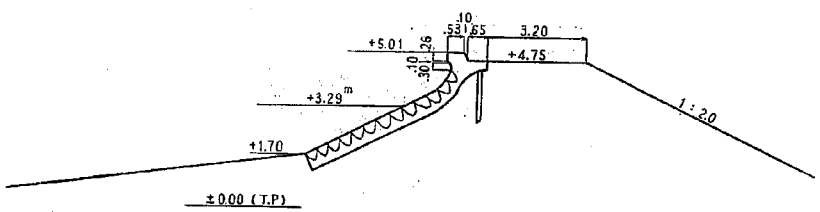


図-4.48

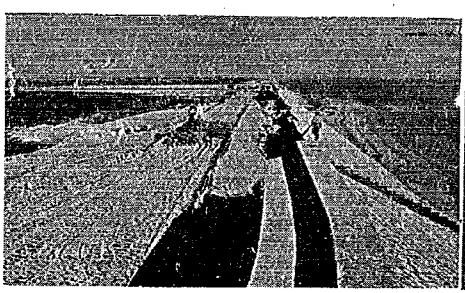


写真-4.55

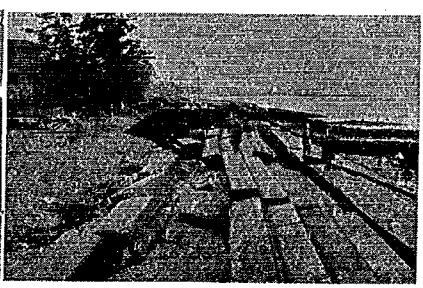


写真-4.56

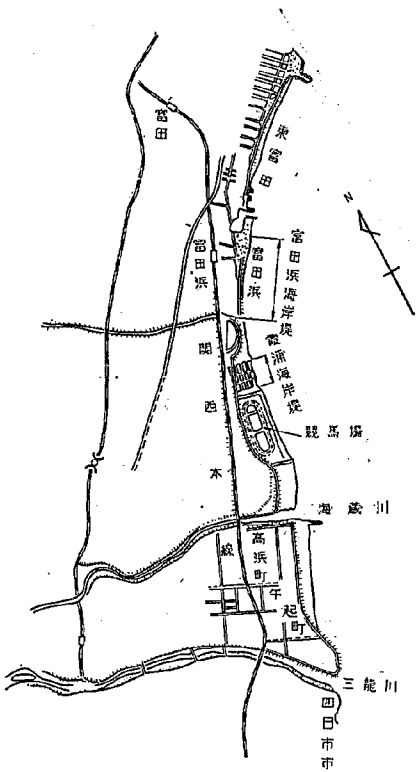


図-4.49

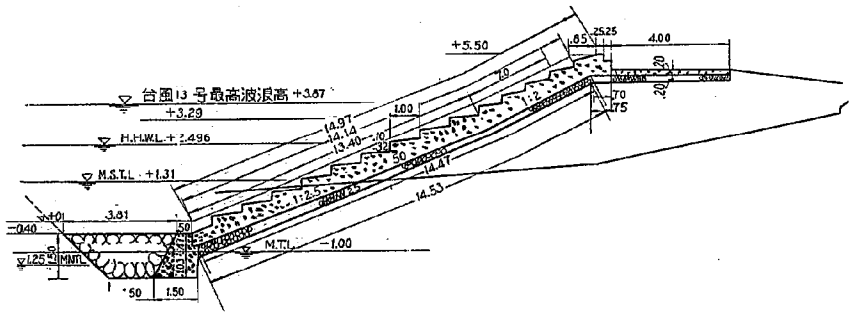


図-4.50

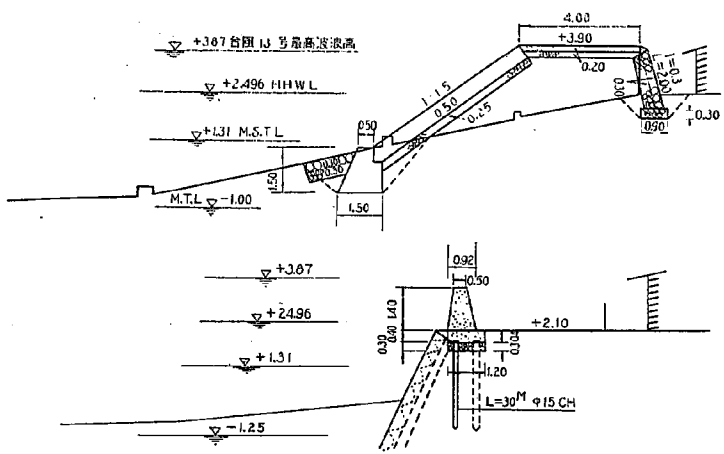


図-4.51

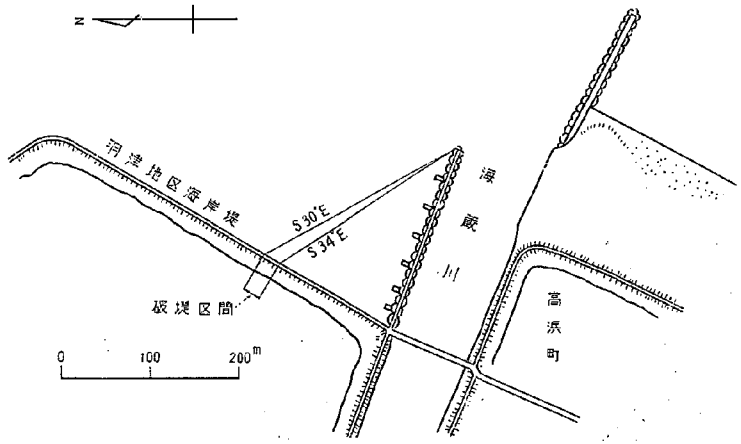


図-4.52

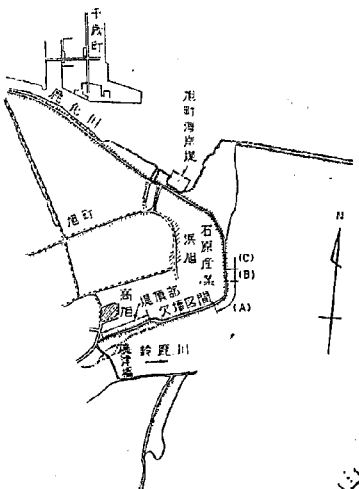


図-4.53

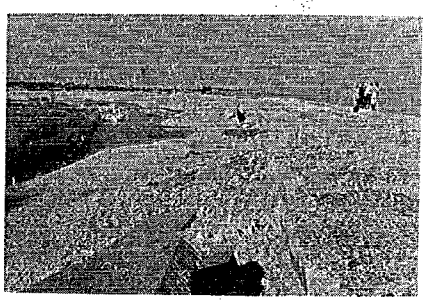


写真-4.57

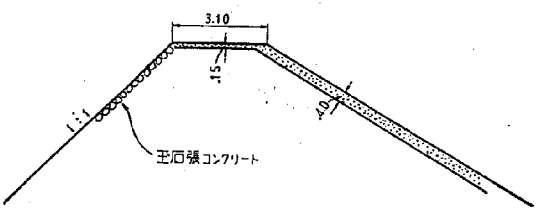


図-4.54

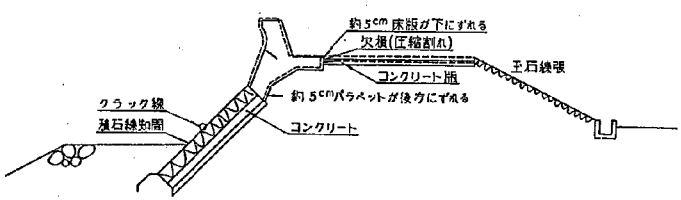


図-4.55

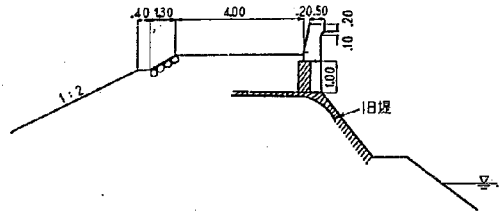


図-4.56

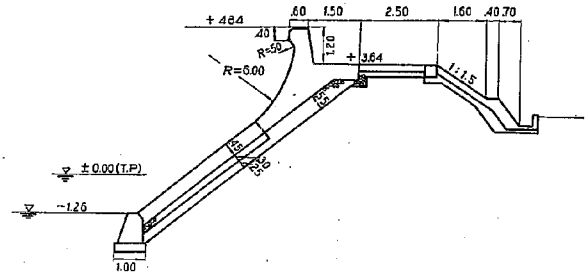


図-4.57

写真-4.58

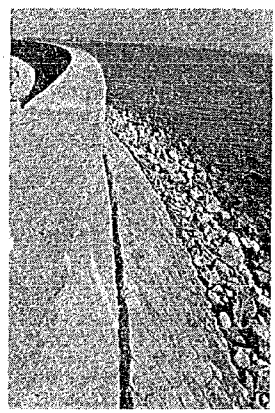


写真-4.59

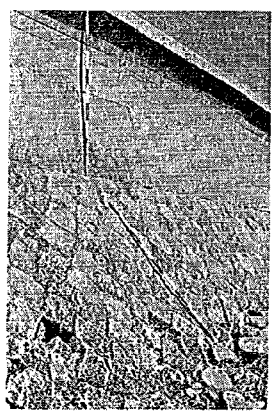


写真-4.60

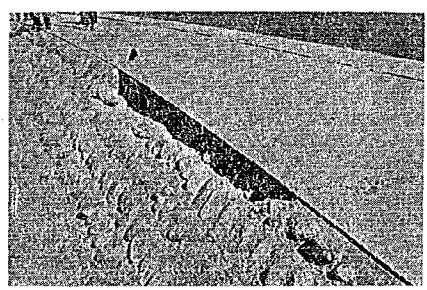


写真-4.61

写真-4.62

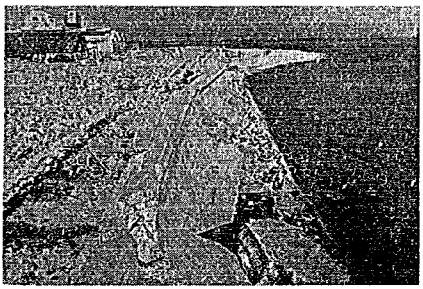


写真-4.63

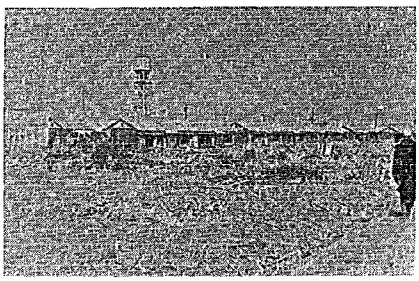


写真-4.64

写真-4.65

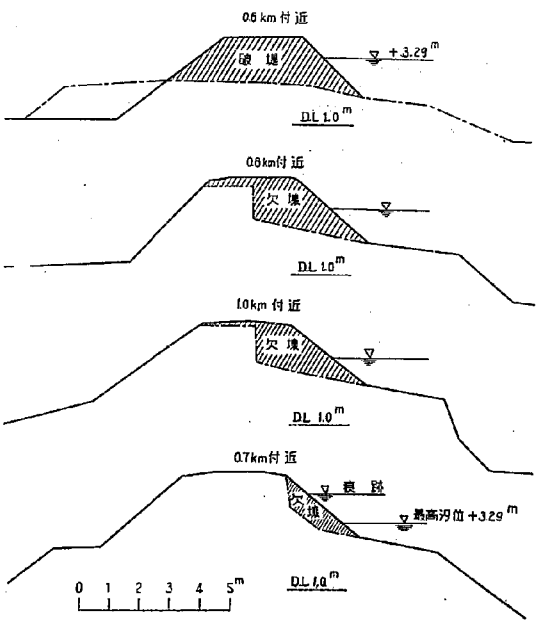


図-4.58

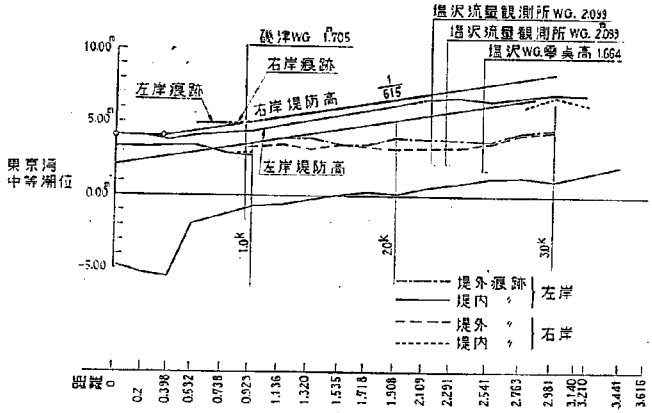


図-4.59

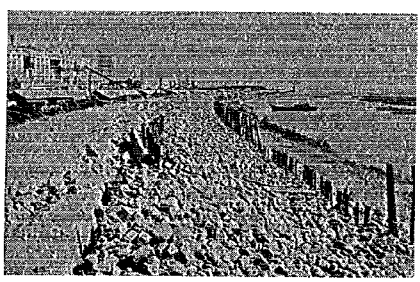


写真-4.66

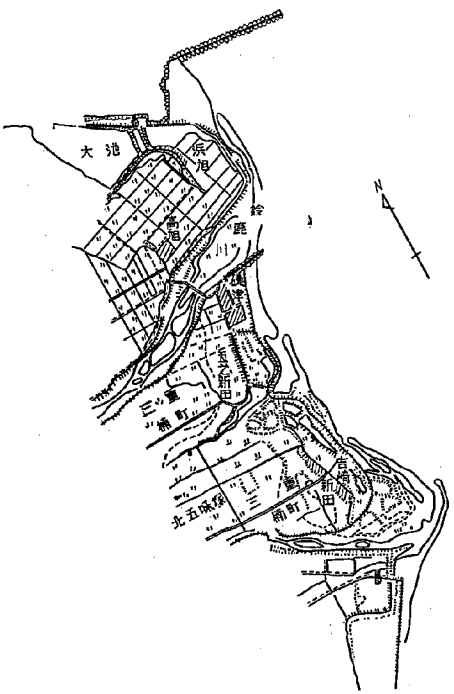


図-4.60

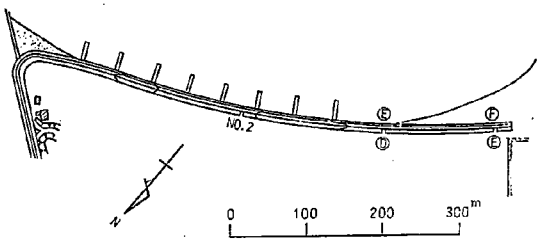


図-4.61

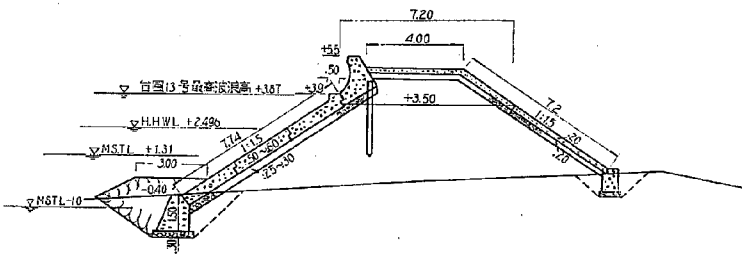


図-4.62

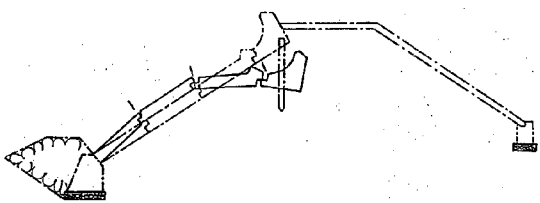


図-4.63

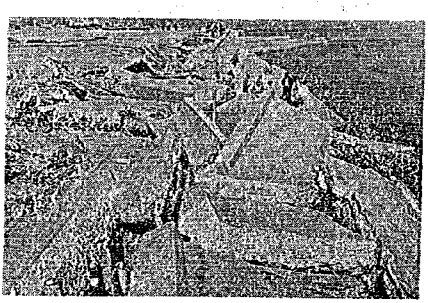


写真-4.67

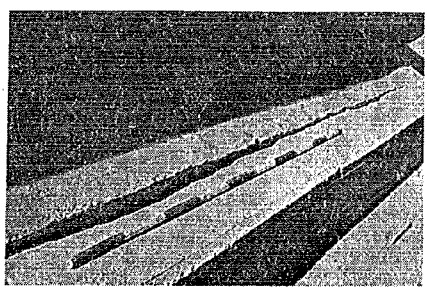


写真-4.68

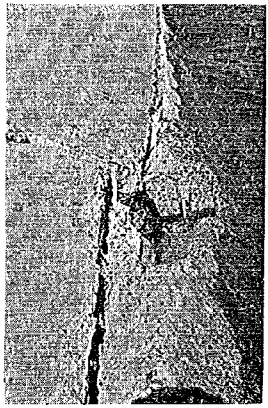


写真-4.69

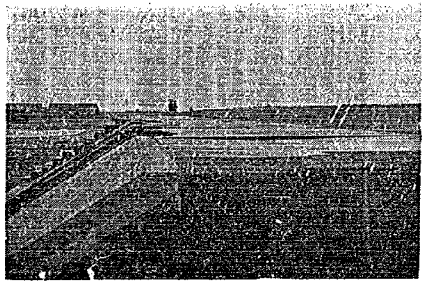


写真-4.70

(2) 伊勢湾台風と高潮の資料

9月20日9時，弱い熱帯性低気圧がエニウェトック島の西方洋上に発生し，しだいに発達しながら西のち北西に進み，21日21時に台風15号となった。22日15時にはサイパン島北東約 150km の洋上に達し，急速に発達して以後図-4.65に示す径路を進んだ。26日18時には図-4.65に示すように紀伊半島潮岬と自浜との中間に上陸して半島の中央部を北東に進んだ。21時頃には名古屋市にもっとも接近し，22時に揖斐川上流部を通って北陸に抜け，27日1時には日本海黒部海岸に出て佐渡ケ島を通り，5時頃秋田沖に到達した。なお，参考のため，図-4.64および図-4.65には13号台風の進路も併記してある。

15号台風接近時の伊勢湾沿岸各地における気圧，風向，風速，潮位の観測値は表-4.1に示すとおりである。図-4.66は伊勢湾沿岸の代表的地点における高潮の偏差

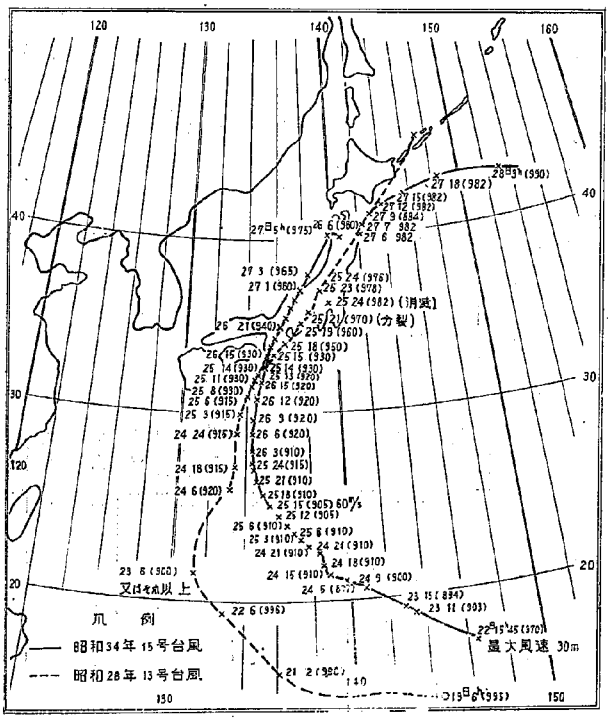


図-4.64　台　風　進　路　図

表-4.1

0点高			26日 9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	27日 1	2	3	瞬間最大風速
−2.13	鳥羽港	風向	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SSE	S	SW	SW	SW	SW	SW	NW	
		風速	5	6	5	6	5	5	7	10	11	14	16	23	25	20	11	10	5	1	1	
		実測潮位	2.78	2.95	3.12	3.24	3.33	3.38	3.42	3.45	3.50	3.59	3.71	3.72 4.15	3.94	4.02	3.85	3.44	3.13	2.90	2.80	
	尾鷲	風向	NE	E	E	ESE	ESE	E	E	E	E	E	SSE	SSW	SW	SW	SW	W	W	WNW	W	
		風速	1.0	8.4	9.8	11.5	13.9	13.0	13.9	16.0	21.0	27.9	26.4	15.4	15.7	12.0	13.4	1.8	9.1	6.5	4.2	
		気圧	1001.0	1000.6	999.3	994.4	993.0	990.1	985.7	980.6	974.7	964.4	950.4	949.0	965.7	976.6	985.8	990.9	991.5	995.1	996.0	
		雨量	0.1	1.2	2.4	4.1	11.3	22.8	13.3	11.9	24.8	23.3	24.6	45.0	10.5	0.8	1.0					
	津 測候所	風向	E			E	E	E	E	E	ESE	ESE	ESE	SE	S	SW	SW	W			WSW	26.19.37 ESE
		風速	11.2			13.9	12.2	17.9	19.4	24.2	29.1	26.4	33.6	35.0	24.3	12.9	13.0	8.4			7.8	51.3
		気圧	1001.6				995.6	991.4	989.2	985.8	981.0	977.0	970.0	957.2	950.9	966.6	978.4	987.4			996.6	
	上野	風向	E	E	ES	ESE	E	E	E	E	E	E	E	E	WSW	WSW	SW	WSW			WSW	
		風速	9.0	12.1	11.2	11.0	13.5	15.1	15.1	16.5	21.9	21.9	23.1	20.2	9.4	14.6	15.9	15.3			7.3	
		気圧	1000.3				993.8	990.6	986.6	982.7	977.3	972.3	963.9	951.7	952.0	968.0	988.1	990.4			998.2	
		雨量	0.9	1.9	2.8	7.0	8.0	18.3	26.3	26.3	17.0	17.1	15.6	21.8	7.9	2.0	5.8	1.9			0.4	
	亀山	風向	E				E	E	E	ESE	ESE	ESE	ESE	SE	S	SW	WSW	W	W		WNW	26.19.55 SE
		風速	7.4				8.5	9.4	11.7	14.5	17.6	17.1	22.0	28.4	21.6	16.0	17.9	18.4	15.7		19.1	42.3
		気圧	1002.3				996.8	993.6	990.4	987.2	982.8	978.3	972.3	959.3	947.3	964.6	969.5	968.3	990.9		994.6	
		雨量	34.6				3.5	1.9	6.9	5.2	5.0	1.7	19.1	18.4	24.5	12.4	4.7	2.3	0.2		0	
−1.26	四日市港	風向	ESE	ESE	ESE	ESE	E	E	E	E	ESE	ESE	ESE	SSE	SSW	SW	SW	SW	SW	SW		
		風速	10	12	12	16	15	17	18	19	30	30	30	34	35	28	20	20	19	14		
		実測潮位	0.35	0.63	0.78	0.90	1.05	1.19	1.11	1.28	1.27	1.50	1.78	2.73	3.29	2.80	1.85	1.02	0.49	0.12	0.23	
	桑名	風向		S	S	S	S	S	S	S	S	SSW	SSW	S	S							
		風速		7.7	7.3	9.3	10.7	8.3	15.0	11.0	16.0	20.0	24.3	26.6	38.5							

0点高			26日 9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	27日 1	2	3	4	5
−1.26	被満蔵	水位	0.40	0.68	0.88	1.02	1.14	1.15	1.18	1.19	1.26	1.52	2.01	2.46	2.46 (30)3.58	3.41	2.82	2.12	1.40	0.94	0.66	0.59	0.68
−2.341		潮位 (T.P)	0.17	0.03	0.25	0.35	0.51	0.43	0.46	0.46	0.54	0.66	1.12	1.42	2.70 (20)3.40 故障	2.42	1.70	1.32	0.82	0.40	0.24		
−2.341	明徳橋	潮位 (T.P)	0.24	0.44	0.68	0.80	0.94	0.93	0.87	0.98	1.06	1.16	1.56	1.94	3.01 (25)4.26	2.40	2.58	1.90	1.57	1.47	1.50	1.51	1.46
−1.924	名古屋港	風向				SE	ESE	ESE	E	E	E	ESE	SE	SE 27.4	SSE	SSE	S	SSW	SSW	S	SSE	瞬間最大風速 26.21.25 SSE 45.7	
		風速				10.0	12.2	12.5	11.2	11.3	16.5	17.7	19.9	(30)35.0	24.7	39.6	22.4	19.4	17.7	7.4	7.4		
		気圧	1002.7	1002.4	1001.3	999.8	997.8	995.1	992.6	989.7	987.0	982.7	977.7	971.1	963.3	962.9	974.9	985.4	990.9	994.1	995.7		
		潮位 (T.P)	0.38	0.57	0.78	0.92	1.04	0.98	1.00	1.03	1.09	1.15	1.52	1.73	2.88 (35)3.89	3.35	2.80*	1.87*		(*) 推定			
		雨量							1.0	0.5	3.1	3.3	11.4	10.2	25.5 (00)2.50	18.1	3.3						
	常滑港	潮位 (T.P)	0.18	0.38	0.55	0.70	0.78	0.82	0.82	0.82	0.86	1.00	1.20	1.44	(03)2.96 (10)2.58	以後故障							
	衣浦港	潮位 (T.P)	0.533	0.763	0.923	1.063	1.153	1.173	1.193	1.233	1.393	1.503	1.673	2.193	2.953	以後故障							
	形原	潮位 (T.P)				0.65	0.69	0.71	0.67	0.69	0.75	0.69	0.91	1.13	(00)1.19 (15)2.29	2.29	2.29	0.95	0.24	0.07	0.33	0.29	
	国府高等学校	風向							E	ESE		ESE	ESE	SE		観測中止			WSW	WNW	WNW	W	WNW
		風速							16.5	12.8		15.5	21.1	36.5					3.0	2.8	5.4	1.7	3.0
		気温							25.4	24.9		25.1	25.2	24.9					24.0	24.0	23.7	23.0	23.2
		気圧							996.4	995.2		989.0	984.5	980.5	979.3				997.2		1001.7	1003.3	1004.5
−1.541	前芝	風向					(39)ESE ESE			(05)ES		(15)ES ES	(45)SSE	SSE	S	(30)SSW SW	SW	SW	WSW	WNW	WNW	NW	
		潮位											0.12	0.35	1.26	(15)2.94	2.25	0.92	0.28	0.27	0.44	0.49	0.48
	福江	潮位 (T.P)				0.67	0.75	0.75	0.75	0.73	0.79	0.79	0.85	0.97	1.31	2.13	1.37	(00)0.57 (25)0.27	0.15	0.17	0.29	故障	
	伊良湖岬	風向				E	E	E	E	E	ESE	ESE	(50)SES	S 31.9	S	SSW	SSW	SSW	WSW	WSW	W		
		風速				19.5	20.0	20.8	19.2	22.3	22.8	25.4	25.8	(50)38.4	36.6	30.0	24.7	19.4	11.4	2.7	7.9	8.7	

			26日 9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	瞬間最大風速
	浜松	風向				E	E	E	E	ESE	ESE	ESE	SE	SE	SSE	S	SSW	SW				SSE
		風速				9.6	9.3	11.2	14.0	14.9	15.5	17.1	19.1	22.6	25.7	19.4	18.5	16.5				42.0
		気温				25.3	25.9	25.4	25.5	25.6	25.8	26.5	26.0	26.0	25.2	24.5	24.5	24.6				
		雨量		0.8	0.1	0	0	0.6	2.6	15.4	3.9	0.5	5.0	10.4	19.2	5.6	1.0	0.3				

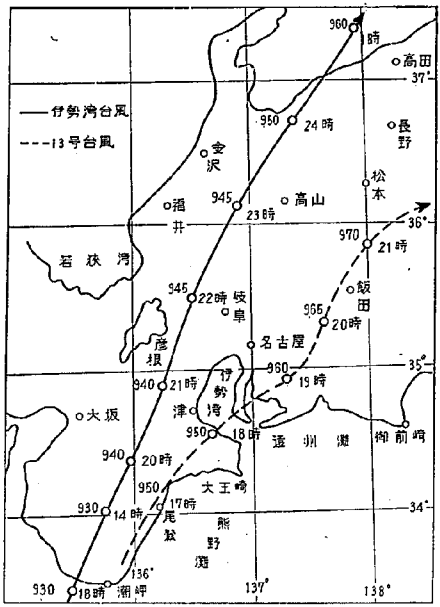


図-4.65　台風進路図

（潮位から推算潮位を差引いたもの）の時間的変化を示すもので，風向，風速も記入してある。最大偏差の起時は湾口に近い順序に鳥羽，四日市，常滑，名古屋においてそれぞれ20時25分，21時00分，21時03分，21時30分で，伊良湖および名古屋における最低気圧の起時はそれぞれ20時20分および21時27分であるから，最大偏差と最低気圧の起時はほとんど一致しているようである。

〔3〕 伊勢湾における高潮の歴史

伊勢湾においてこれまでに記録された高潮は決して少なくない。その頻度分布を概観すると，時代の下るにつれて，多くなる傾向がある。災害はそれを生じる物理的要因とともに，それを受ける側の社会的条件にも左右されるものである。さらに記録というものは時のたつにつれて薄れて行ってしまうので，最近になって災害を発生させるような大台風が頻繁に襲うようになったと考える特別な根拠はあまりないようである。

いま，ここでは高潮災害の頻度を論じるのではなく，高潮の記録，および，この地方に来襲した強い台風の記録を記すと次のようである。

水谷鱗：尾張湾の高潮誌によれば，大正年代以前の高潮には次のようなものがある。明治以前の月日は陰暦による。

◎寛治６年８月３日
伊勢大水海溢　損田壊廬　民多死（大日本史）

◎寛永12年８月13日
熱田海岸堤防破壊す（徴公実録）

◎慶安４年８月
海東海西両郡水害（正事記）

◎正徳４年８月８日
熱田高潮，神戸，鳥ケ池，甚兵衛，伝馬新田，堤破（政純日記）

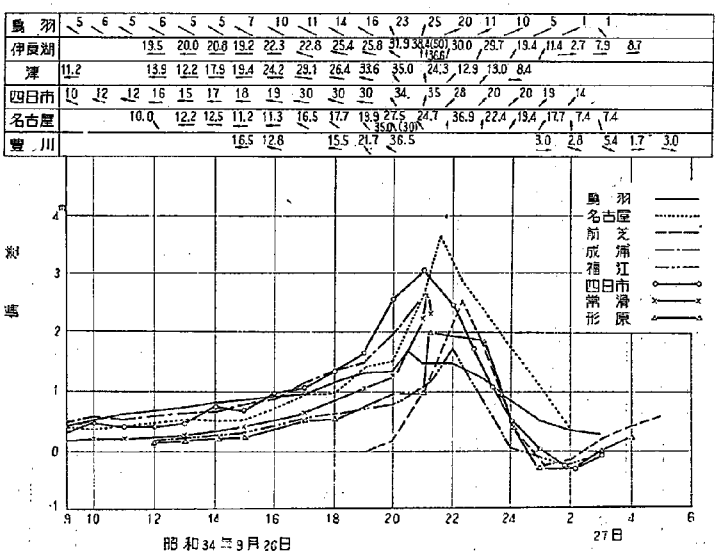


図-4.66　伊勢湾各地の偏差

◎享保7年8月14日

熱田に海嘯あり夜12時俄に東南の方より暴風逆浪，裁断橋以東井戸田「うつくし」の森に至る間民家悉く流失し，羽城の辺最も甚し，漂没する者250余人流家潰家245軒，流舟78双，此外領内の潰家17,000軒，死人80余人破損崩壊せる堤防普請奉行の調査によれば11,100余間，田畑の損害39万石，永荒地となれるもの45,000石に及ぶ（綱年大略）

◎寛政3年8月20日

夕方より風吹き始め夜に入りて暴風となり，樹を抜き枝を折り家屋を倒潰す。又た熱田には海嘯ありて源太夫祠の南鳥居まで押上げられたる船あり，死人94　潰家流家5,825を生じ沿海の新田害を蒙る者多し，熱田の潰家28軒市中に49軒なり，（松濤棹筆）

◎天保6年閏7月6日

暴風雨の為め熱田の海に高潮を生じ，家屋を流失す，沿海の新田大害を蒙り，堤防の破壊9ケ所に達す。（名陽見聞図会）

◎嘉永3年9月3日

海嘯あり海西郡八穂新田堤防破壊す。（松濤棹筆）

◎安政2年8月20日

大風雨により夜10時頃高潮起り沿海新田堤防91個所所を破る。流家130軒　死人20人（鶏肋集）

◎万延元年

伊勢湾に高潮あり，（青窓紀聞）

◎明治3年3月18日

夜大風あり熱田に高潮起り潮水沿海の新田に切入り数個所あり，稲富永徳海嘯によりて流失せり。（名古屋市史）

◎明治14年9月13日

伝馬町裁断橋流失，港内の大船は神戸町の街上に浮き上れり，大瀬子町，白鳥町　神戸町等浸水（名古屋市史）

高潮はこれに引きつづいて明治22年（1889）9月11日明治29年（1896）8月30日，大正元年（1912）9月23日大正10年（1921）9月26日とおこされたことが記録されている。（表 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8）これら資料をまとめて表にして掲げる。昭和年代にはいってからの記録は気象要覧によった。災害統計は愛知・三重両県下の資料をあげてあるので純粋に高潮によるものと言うわけではない。

表-4.2　1889年（明治22年）9月11日

	最低気圧	最大風速	瞬間最大風速	潮位 m
	mmHg			普通満潮位上
津	717			
名古屋	721.7			熱田 1.9
岐阜	729.8			
幡豆郡吉田町				5.3
知多郡豊浜町				4.2
幡豆郡小鈴				3.3

死傷者 955，家屋被害 140,541，橋梁被害 1,379，道路欠潰 232 km，堤防欠潰 175 km，田畑など 1,939町

表-4.3　1896年（明治29年）8月30日

	最低気圧	最大風速	瞬間最大風速	潮位 m
	mmHg	m/s		平均最高潮位上
名古屋	741	16.5 SE		
日光川				2.2

死者 20，家屋 約18,000，橋梁破損 3,500，道路欠損 230km 堤防欠損 60km，田畑 5,152町

表-4.4　1912年（大正元年）9月23日

	最低気圧	最大風速		潮位 m
	mmHg	m/s風向		平均最高潮位上
名古屋	728.6	40.3 SE		
日光川				2.7

死者 41，行方不明 14，家屋被害 17,993
船舶流失破損 903，橋梁流失 33，田畑 3,400町

表-4.5　1921年（大正10年）9月26日

	最低気圧	最大風速		潮位 m
	mmHg	m/s		推定潮位上
名古屋	739.3	17.5 S		
福田前新田				2.5
大野				1.5

死傷者 50，建物潰倒 2,500，船舶流失沈没 700余
田畑被害 120,000町

表-4.6　1944年10月　7日～8日

	最低気圧	最大風速	瞬間最大風速	潮位偏差
	mmHg	m/s 風向	m/s 風向	m
津	730.7	20.5 E	26.6 E	
名古屋	731.5	13.7 S S E	21.7 S S E	
西浦	730.5	16.3 W S W	22.0 W S W	

死者 5，傷者 2，住宅被害 865，船舶流失・沈没 864
田畑被害 223町

7日夕刻熊野灘にせまり，夜半遠州灘から遠州平野に上陸した。8日6時には能登半島に達し
7日6時　135°E　28°N
8　〃　137°E　38°N

表-4.7　1945年9月18日　枕崎台風

	最低気圧	最大風速	瞬間最大風速	潮位偏差
	mmHg	m/s 風向	m/s 風向	m
津	738.1	22.3 S E		
亀山	737.9	14.9 S S E	22.9 W	
名古屋	740.8	20.2 S S E	29.7	
岐阜	739.3	22.7 S S E	26.5 S E	
西浦	739.4	23.5 S S W	25.2	
鳥羽	738.0	16.5 S E		0.29
内浦				0.29

死者 13，傷者 19，家屋被害 4,408，橋梁流失 12
道路損壊 88，堤防欠壊 231，田畑被害 26,768町
経路：枕崎，豊予海峡 松山，岡山，鮮錦，富山，佐渡

表—4.8 1953年9月25日 13号台風（テス）

	最低気圧	最大風速		瞬間最大風速		潮位偏差
	mb	m/s	風向	m/s	風向	
津	964.6	23.6	E	31.1	E	
亀山	969.1	23.6	WNW	33.2	WNW	
名古屋	970.0	22.6	NNW	30.4	N	+.90
岐阜	975.7	15.2	NE	19.5	NNE	
伊良湖	957.1	30.0	ESE	39.9	ESE	
鳥羽	964.6	23.6	E			+.87

死者・行方不明 118, 傷者 1,018, 家屋被害 190,463戸
田畑被害 39,473町, 道路損壊 2,391, 橋梁流失 871
堤防決壊 1,175

中心位置

25日	9時	31°.7N	134°.9E
	12	32.6	135.4
	15	33.5	136.1
	18	34.6	136.8
	21	35.8	137.9
	24	37.9	139.5

参考文献

(1) "伊勢湾台風時の海と気象と高潮", 神戸海洋気象台
(2) "1959年9月26日伊勢湾台風に伴った高潮の踏査報告", 東大, 気象庁高潮合同調査班
(3) "災害科学研究所報告書第一報", 災害科学研究所
(4) "災害発生の過程と対策", 河川, 昭和35年4月号
(5) "伊勢湾台風による災害を見て", 土木技術資料昭和35年2月号
(6) "伊勢湾台風の特色と災害", 土質工学会, 昭和35年6月
(7) "伊勢湾台風による外海および伊勢湾沿岸の波", 第7回海岸工学講演会講演集
(8) "伊勢湾台風による高潮とその理論計算について", 同上
(9) "高潮変形に及ぼす流水断面の効果について", 同上
(10) "伊勢湾台風にともなつた高潮の解析", 同上
(11) "伊勢湾台風における被害と対策", 同上
(12) "伊勢湾台風による構造物の被害とその特性", 同上
(13) "伊勢湾台風により被災した海岸堤防の復旧に用いた二, 三の工法について", 同上
(14) "伊勢湾高潮対策事業について", 同上

品質管理限界について

中　村　慶　一*

(昭和 36 年 7 月)

Quality Control Limit

Keiiti Nakamura

(July 1961)

要　旨

Shewhart の創始になる　いわゆる　3シグマ管理限界は各方面でその合理性が実証されながらも，数理的な基礎がはっきりしないため，いろいろと誤解を受けたり　誤って用いられることが多かった。

本文はこれに対して，管理限界とは　工程をプロセスとしてみたとき，工程の一様性検定を行なうための限界であると規定することによって，普通の場合の危険率5%の限界が　ほとんど3シグマ管理限界と一致することおよび予備データの少ない場合でもある制限のもとに，3シグマ限界を適用することが適当であることについてのべたものである。

目　　次

はじめに……(1)
1° 品質管理限界に関する諸論議……(1)
2° 管理図の性格……(2)
3° 工程平均の異常検出……(3)
4° 効率のいい工程の一様性検定法……(6)
5° バラツキの一様性検定……(8)
6° $\bar{x}-R$ 管理図と一点管理図……(8)
7° 管理図による安定状態の判定方法（技術基準案）……(9)
8° $\bar{x}-R$ 管理図の実例……(10)
9° $x-R_s-R_m$ 管理図の実例……(12)
おわりに……(14)

はじめに

品質管理は各鉱工業分野に必須のものであることがようやく理解され，その中の主要な道具である管理図は急速に普及しつつある。Shewhart の創始以来，経験的には3シグマ管理限界が合理的であることが，種々の分野で実証され，世界の大部分で　3シグマ法が採用されているが，この方法はアメリカ流の大量生産管理の場で発達したためと，はっきりした統計学的な裏付けがなかったために，大量のデータを取扱う場合しか適用できないような印象が非常に強く，またこの"欠点"を補う目的で，いろいろな少数例の管理図と称するものが提出されている。殊に建設事業分野では，多品種少量生産のものが多い関係もあってかこの傾向は特にはなはだしいように見受けられる。

また3シグマ法を採用しているところでも，その数理的基礎がはっきりしないまま $\mu\pm3\sigma$ の外に出るようなことは非常にめずらしいことで，このようなことが起ったら異常データと考えるといったような幼稚な説明に基いて，誤った使い方をしているところが非常に多い。

著者は工程をプロセスとして時系列としてながめ，ある個数の中の極端な値による系列の一様性の検定方式として，両側5%限界を求めたところ，それはいわゆる3シグマ法によって求めた限界と非常に近似していることをたしかめることができた。それに基き3シグマ管理限界を工程の一様性検定の限界として解釈し，この立場に立った場合の取扱基準案を作成したので，その方法について報告する。

1°　品質管理限界に関する諸論議

品質管理限界としては日本工業規格では，いわゆる3

* ダム部　ダム構造研究室長

シグマ管理限界を採用している。JIS が3シグマ法を採用するに当っては Shewhart の3シグマ法[1]をとるべきか，Pearsonの確率限界法[2]か，また和気・増山の棄却限界法[3]を採用すべきかについて長期の論争[4]がくり返されたが，工業生産の場では第一種の過誤をおかす危険率と，第二種の過誤をおかす危険率とが，ちょうどつり合っている限界としては3シグマ限界程度が適当であることが実際生産の場で実証され，また東大の森口教授は極値的にみた管理限界と平均値的にみた F 検定との比較[5][6][7][8]などの議論などもあって，3シグマ限界が妥当であるという結論になり，JIS Z 9021-1954「管理図法」として3シグマ法が公式に採用された。

しかし，この JIS 規格の中でも，たとえば $\bar{x}$–R 管理図について，予備データは大きさ 4～5 位の試料を約20～25組とり測定すると説明され，過去の情報として80～120 個位のデータを必要とする立場をとっており，また3シグマ限界の第一種の誤り（異常原因がないのに異常原因ありとしてしまう誤り）についても0.27%であるといったふうな説明をしてある解説書[9]が多いために，"何故に一般の検定の危険率が5%であるのに対し，管理図のみが 0.27% という小さな危険率で検定しなければならないか" とか，"$\mu \pm 3\sigma$ の範囲外のものが生ずることが，めったに起らないから，母集団が変ったと考えるのならば，何も3シグマでなくてもいいのではないか" と考える人も多く，また "この方法はアメリカ流の大量生産の場だけに適用可能な方法であり，日本のような多品種少量生産の多い所では適用できない" とか，"建設事業　特にコンクリート工事では数十個のサンプルを得たときには工事が終わってしまっていることが多いので，大量の予備データを必要とする3シグマ法は適用できない" として，独自の管理図を提案したものとか，こうまででないにしても JIS に 80～120 の予備データをとれと書いてあるのに対して，10～30個のデータしか得られない場合に，多少のためらいを伴いながら，3シグマ管理図を使用したりする場合も多くみられた。そこで，品質管理の中での管理図の占める役割りに立ち帰って，考察を進めることとする。

2°　管理図の性格

品質管理とは，与えられた規格を満足するような製品を，最も経済的に造り出してゆくための手段の体系であることは云うまでもない。ところで，規格を満足した製品を経済的に造り出してゆくためには

1.　製品がある許容範囲で規格を満足していること
2.　工程が安定していること

の2条件がそれぞれ満足されなければならない。この2条件は互いに独立であって，個々の製品は規格を満足していても工程が安定していない場合（規格が工程の能力に比してゆるすぎる場合などには起り得る），逆に工程は安定しているのに出てくる製品は規格を満足しないものも出てくる場合（工程の調節が悪いときなどに起り得る）があり，前の条件はヒストグラムによって，後の条件は管理図によってチェックする。

つまり管理図とは，工程が安定かどうかをチェックする道具であって，いわば現在の工程の実力について，平均および分散に関する情報を持っている場合，その情報にもとづいて，爾後の生産品のある組数に対して各組の平均および分散の最大値，または最小値に着目して，これらが，ある範囲をこえて起ったならば，この工程には異常が起ったものと考えて原因追求　除去という処置をとり，その範囲をこえないならば，工程には異常が起っていないものとして，その状態を維持するというような，一連の行動を決定するための基準が管理限界ということになる。

管理図の性格を，ある組数の間の極値（最大値　最小値）に着目して，工程の安定状態をチェックする道具と規定すると，次には管理限界の設定のために，安定状態というものを定義しなければならない。一般には安定な状態とは，異常原因によるバラツキ（この原因を探求して再発しないよう処置をとることが経済的にできるバラツキ　見のがせない原因によるバラツキ）と，偶然原因によるバラツキ（この原因を探求して再発しないよう処置をとることができないか，または　できても経済的でないバラツキ）とを分離し，これにもとづいて異常原因をさがして再び起らぬよう処置をとり，偶然原因による

1) Shewhart, W.A.: "Economic Control of Quality of Manufactured Products" Van Nostrand Co. Inc. (1931)
2) Pearson, E.S.: "The Application of Statistical Methods to Industrial Standardization and Quality Control" (1935) B.S. 600
3) 和気洋太郎：品質管理論　コロナ社 (1949)
　増山元三郎：推計学への道　東京大学出版会 (1950) p.145
4) 討論　3シグマ法批判の再批判　品質管理　I—4 (1950) p.173
　討論　F 分布による管理図法の研究　品質管理　I—5 (1950) p.258
　和気洋太郎：討論　品質管理を読んで　品質管理　I—8 (1950) p.362
5) 森口　繁一："品質管理の基礎概念について"　品質管理　I—3 (1950)
6) 森口　繁一："統計的行動方式としての品質管理"　品質管理　I—7 (1950)
7) 森口　繁一："極値か平均か"　品質管理　VI—3 (1955)
8) 森口　繁一："あとがきの話"　品質管理　V—5 (1954)
9) 品質管理教程　管理図法　日本科学技術連盟 (1955) p.246
　品質管理実用便覧　日本規格協会 (1955) p.92

（管理された）バラツキのみを持つようにした状態と考えられている。

したがって過去のデータにもとづいて平均 $\bar{x}_0$, 不偏分散の平方根 $\sqrt{V_0}$（その自由度 ϕ_0）という情報を得たとき，この知識をもとにして，爾後の工程で得られるデータを観察しながら工程の異常（逆にいえば平均値　分散などの一様性）を検定する方式の中で主として極値に着目するものが管理図であると考えることができる。

平均値　分散などの一様性を検定する方法としては，このような極値に着目するやり方のほかに，主として平均的な考え方に着目する検定方式ももちろん考えることができる。たとえば不偏分散（二乗平均）を用いた F 検定などはその一例であるが，後の例でもわかるように，F 検定によると計算手数が非常にかかる上に，ちがい方の中でも，とび離れたものが3つ以上あるような，複雑なちがい方に対しては F 検定の方が検出力が高いが，とび離れたものが1つまたは2つといったような一般の非一様性を示すときには，極値に着目した管理図による検定の方が，検出力が高くなることが証明されており[10]，本文でも以下極値に着目した管理図方式の中で，工程の異常検出のための限界としては，何が適当かという点について考察する。

一般的に同じ程度の測定手数に対しては，計量的取扱いの方が計数的取扱いをするよりも，与えられる情報の量が多い。建設事業の場では，特に最小の測定手数を要求されることが多いので，計量値の管理図の代表的なものである $\bar{x}$–R 管理図や，さらに測定回数の少ない場合に対する　$\bar{x}$–R_s–R_m　管理図の適用機会がきわめて多い。

$\bar{x}$–R 管理図はデータを合理的な群（その群の中のバラツキは偶然原因のみによるバラツキであり，もし異常原因によるバラツキがあるとすれば，それは群と群の間の違いという形であらわれるように分けた群で，一般に時間　日　交替　週または起点からの距離などに分けることが多い）に分け，その群の中の範囲 R（最大値と最小値の差）とその群の平均値 $\bar{x}$ とを管理しようとするものである。

範囲 R は，要するに群内のバラツキの指標であり，$\bar{x}$–R 管理図は，群の平均値および群内のバラツキを組にして管理しようとしている方法であるということができる。

$\bar{x}$ と R とを組にして扱う必要は，精度を管理しようとしている立場として説明することができる。われわれが誤差といっているものの内容としては，カタヨリとバラツキを考えることができる。前者は測定値の平均 $\bar{x}$ が期待値 μ と離れている程度を意味し，これが大きい場合，正確度（accuracy）が悪いといわれる。後者は各測定値 x が平均値 $\bar{x}$ と離れている程度を意味し，これが大きい場合精密度（precision）が悪いといわれる。この正確度と精密度を総合したものは精度（accuracy and precision）といわれ，精度が管理状態にないことは信頼度（reliability）が悪いといわれる。今の場合，$\bar{x}$ の安定度をしらべることは正確度の管理を行なっていることに当り，R の安定度をしらべることは精密度の管理を行なっていることに当っているので，$\bar{x}$–R 管理図によって精度の管理を行なっているということができる。

x–R_s–R_m 管理図はデータの数が少なく，何個かを組にして $\bar{x}$ をつくるまで待てないような場合に，隣り合った x の差（逐次レンジ）R_s を利用し一点管理図である。同時に採取した m 個の値の平均が一つの値として定義され，この m 個の間の範囲 R_m は試験誤差位しか反映しないような，例えばコンクリート強度のような場合も，m 個の値を平均した x を1個の値と考え，x–R_s 管理図として使用する。試験誤差の管理も併せて行ないたいときは，x–R_s–R_m 管理図としてもよい。この場合は x 管理図によって正確度を，R_s 管理図によって精密度を，R_m 管理図によってある制限範囲内の精密度（試験誤差など）の管理を，総じて精度の管理を行なっているものであることは $\bar{x}$–R 管理図の場合と同様である。

本文では，主として $\bar{x}$–R 管理図について，これが精度の管理を行なうことによって工程の異常検出を行なうためには，その管理限界をどのように定めるべきであるかについて考察を進めることとする。

3°　工程平均の異常検出

母平均 μ，母分散 σ^2 の正規分布よりサンプリングされた大きさ n の測定値 x_i がある場合，すなわち

$$x_i \in N(\mu, \sigma^2)$$

ならば

$$\bar{x} \in N(\mu, \sigma^2/n)$$

となり，これは n がある程度大きければ，中心極限定理によって正規母集団でなくても近似的に成立する。

標本平均　　$\bar{x}=\sum_i^n x_i/n$

不偏分散の平方根　$\sqrt{V}=\sqrt{\sum_i^n (x_i-\bar{x})^2/(n-1)}$

とすれば

$$t \triangleq \frac{|u|}{\sqrt{\chi^2/\phi}}$$

は自由度 ϕ の t 分布をする。ただし

$$u=\frac{\sqrt{n}(\bar{x}-\mu)}{\sigma}$$

$$\chi^2=S/\sigma^2=\sum_i^n (x_i-\bar{x})^2/\sigma^2$$

で u は $N(0, 1^2)$ すなわち，母平均 0，母分散 1^2 の正規分布をし，χ^2 は自由度 $\phi=m-1$ の χ^2 分布をする。

10）森口　繁一：前出 7）

t の定義式の分子および分母は，互いに独立であり，大きさ n の標本によって u を，大きさ m の標本によって $\sqrt{V}$ を計算した場合

$$t \perp \frac{|u|}{\sqrt{\chi^2/\phi}} = \frac{|(\bar{x}-\mu)/\sigma\sqrt{1/n}|}{\sqrt{\sum_i^m (x_i-\bar{x})^2/\sigma^2\phi}}$$

$$= \frac{|(\bar{x}-\mu)/\sqrt{1/n}|}{\sqrt{\sum_i^m (x_i-\bar{x})^2/\phi}}$$

$$= \frac{|(\bar{x}-\mu)/\sqrt{1/n}|}{\sqrt{V}}$$

は $\sqrt{V}$ の自由度つまり $\phi=m-1$ の t 分布をする。(同じデータを用いて $\bar{x}$ と $\sqrt{V}$ とを計算した場合のみ $\phi=n-1$ となる) 大きさ n のサンプルにより $\bar{x}$ および $\sqrt{V}$ を計算し，これと独立に大きさ m のサンプルにより $\bar{y}$ を計算した場合

$$x_i \in N(\mu_x, \sigma^2) \qquad y_i \in N(\mu_y, \sigma^2)$$

とすれば

$$(x_i - y_i) \in N\left[\mu_x-\mu_y,\ \sigma^2\left(\frac{1}{n_x}+\frac{1}{n_y}\right)\right]$$

であるから

$$u = \frac{\{\bar{x}-\bar{y}-(\mu_x-\mu_y)\}/\sqrt{(1/n_x)+(1/n_y)}}{\sigma}$$

したがって

$$t \perp \frac{\{\bar{x}-\bar{y}-(\mu_x-\mu_y)\}/\sqrt{(1/n_x)+(1/n_y)}}{\sqrt{V}}$$

は $\sqrt{V}$ の自由度 $\phi=n-1$ の t 分布をする。したがって両側危険率5%自由度 $n-1$ の t の値を $t_{0.05}[n-1]$ とすれば，$\mu_x-\mu_y$ の信頼係数 95%の区間は

$$\bar{x}-\bar{y} \pm t_{0.05}[n-1]\cdot\sqrt{V}\cdot\sqrt{(1/n_x)+(1/n_y)}$$

でこれが和気の提案の基礎となり，特に $n_y=1$ の場合，次の1点 y の棄却限界として

$$\bar{x} \pm t_{0.05}[n-1]\cdot\sqrt{V}\cdot\sqrt{(n_x+1)/n_x}$$

が得られ，これが増山の棄却限界法[3]の根拠となっている。

したがって，この方法は次の一個，あるいは次の一組のデータが今までと同じ母集団に属するかどうかの検定としては，まさに危険率5%の検定方式であるが，次にのべるように，管理限界は工程が安定かどうかを検定するためのものであり，工程が安定かどうかを，ある期間内の最大値または最小値が管理限界をこえるかどうかによって検定しようとしている場合には，危険率が大きくなりすぎてしまうこととなる。

たとえば次の A_1 : 47.9　47.8　48.4　48.2　47.0 の5個のデータにより $\bar{x}=47.86$，$\sqrt{V}=0.54$ を得たとき次の5個のデータが A_4 : 47.5　46.4　47.4　46.7　46.5 であったとする。この平均 46.88 について，前の母集団と異なるものかどうかを検定すれば，母平均に差はないという仮説のもとに

$$t = \frac{|\bar{x}-\bar{y}|/\sqrt{(1/n_x)+(1/n_y)}}{\sqrt{V}}$$

は $\sqrt{V}$ の自由度 4 の t 分布をし，(いまの場合 A_4 については平均値しか知られていないとする) これに，いま得た値を代入すれば

$$t_0 = \frac{|47.86-46.88|}{(0.54)\sqrt{(1/5)+(1/5)}} = 2.86$$

自由度4の t 分布の両側5%点は 2.776 であるから，この二つの平均値の間には差が認められることになる。

ところが，この後で得られた A_4 の値は，実は後で得られた三組の値 A_2 A_3 A_4 の中の最小のものであり，他の2組とは

A_2 : 47.6　47.5　48.9　47.9　46.8　平均 47.74

A_3 : 47.0　46.5　48.0　47.6　47.5　平均 47.32

であったとする。

この4組の値が最初から得られていれば，平均値の間の一様性を F 検定し，次の分散分析表が得られることになる。

SV	SS	ϕ	V	F_0	$F_{0.05}[3.16]$
A	2.4395	3	0.8132	2.18	3.22
E	5.9780	16	0.3740		
D	8.4170	19			

したがって，別にこの4つの平均値は一様でないとは認められないこととなり，前のこの中の A_1 のバラツキに関する情報をもって A_4 が異質のものであるかどうかを t 検定したときの A_1 と A_4 の間には差が認められるという結論と異なったものになっている。この違いは A_1 と A_4 の両方のバラツキに対する情報を持っている場合でも同じことで，A_1 と A_4 の分散の間に差がみとめられないので，これらの分散をコミにして

$$\sqrt{V} = \sqrt{\frac{S_x+S_y}{n_x-1+n_y-1}} = \sqrt{\frac{1.152+1.148}{4+4}}$$

$$= 0.536$$

(ただし，S は残差平方和で $\sum(x-\bar{x})^2$ である。)

そこで，これを用いて次の t の値が自由度 4+4=8 の t 分布をすることにより t 検定を行なえば

$$t = \frac{|47.86-46.98|}{(0.536)\sqrt{(1/5)+(1/5)}}$$

$$= 2.585$$

$$t_{0.05}[8] = 2.306$$

であるから，この場合もやはり A_1 と A_4 の間には差がみとめられることとなる。

A_1 と A_4 だけをみつめているときは差があるという結論になり，A_2 A_3 に関する情報も加わって実は A_1 と A_4 は A_1 A_2 A_3 A_4 の中でのそれぞれ最大および最小のものであるということがわかっている場合は，必ずしも A_1 A_4 の間の差は認められず，この例のような結果となることもある。これは

$$t = \frac{|\bar{x}-\mu|/\sqrt{1/n}}{\sqrt{V}}$$

と

$$q=\frac{(\bar{x}_{\max}-\bar{x}_{\min})/\sqrt{1/n}}{\sqrt{V}}$$

との違いとも云うことができる。q はスチューデント化範囲といわれるもので，そのα%点は Hartley[11], May[12], Harter[13] 等が計算している。管理図に関係ある両側5%点は Harter が計算しているので，それを表示すれば

ϕ \ k	2	5	10	20	30	50	100
5	4.47	6.78	8.29	9.69	10.47	11.40	12.59
10	3.72	5.29	6.28	7.21	7.73	8.36	9.17
20	3.43	4.70	5.48	6.20	6.60	7.39	7.72
60	3.25	4.36	5.01	5.59	5.91	6.30	6.80
120	3.21	4.28	4.89	5.44	5.74	6.10	6.56
∞	3.17	4.20	4.78	5.30	5.58	5.91	6.33

しかし，この Studentized Range q は自由度 ϕ の $\sqrt{V}$ に関する情報を持っていて，次に得られる $\bar{x}$ の k 組中の最大のひろがり幅を示すものではあるが，限界として設定するためには，k 組の中の最大または最小のものを $\bar{x}_m$ 最初の $\sqrt{V}$ を計算したときの総平均を $\bar{x}_0$ とすれば

$$h\triangleq\frac{|\bar{x}_m-\bar{x}_0|/\sqrt{1/n}}{\sqrt{V}}$$

の両側5%点 $h_{0.05}[\phi,k]$ を求めることにより，大きさ n のサンプルの平均値 $\bar{x}$ が k 組打点される間に工程の異常を危険率5%で検出する限界は

$$\bar{x}_0\pm h_{0.05}[\phi,k]\sqrt{V}/\sqrt{n}$$

で与えられることになる。

$\bar{x}_0$ が予備データの総平均でなく，次に得られた k 組についての総平均 $\bar{x}$ である場合は David[14], Nair[15] によって解かれており**スチューデント化絶対残差** d を次のように定義する。

$$d\triangleq\frac{|\bar{x}_m-\bar{x}|/(\sqrt{1/n})}{\sqrt{V}}$$

ただし，分子分母は互いに独立である。

この d の両側5%点は David によれば

ϕ \ k	5	10	20	50
10	2.82	3.36	3.84	4.56
20	2.54	2.96	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

となり，自由度 40～∞ の予備データを用いて $\sqrt{V}$ を計算した場合大きさ n のサンプルの平均値 $\bar{x}$ が k 組ある中での最大または最小の値 $\bar{x}_m$ がこれらの総平均 $\bar{x}$ から離れている程度，つまり残差をスチューデント化した値は k=15～30 に対して，大体 3.0，また自由度が小さい場合でも k の小さい部分では，やはり d は 3.0 付近の値を示す。さらに k が 50 にもなると ϕ が相当大きい場合でも d が 3.5 近くになり，このことは3シグマ限界が $\phi>40$ の場合 15～30 組のプロットを行なう場合の極値に対する限界として使用された工程の一様性に対する5%の検定基準であり，プロットされた点が30点をこす場合には，そのままの限界を延長して用いないで，最近のデータを用いて3シグマ管理限界を再計算し，次の30組程度の間に用いるというやり方の裏付けになっているとも考えられる。

このスチューデント化絶対残差 d を用いた場合，一つ問題になることは，$\bar{x}$ は次に得られるはずの k 個の $\bar{x}$ に対する総平均であって，実は，これはプロットする点が全部得られない限り知ることはできない。したがって自由度 ϕ のデータを得て $\sqrt{V}$ を計算し，これを用いて，あらかじめ次のような形の管理限界を計算することはできない。

$$\bar{x}\pm d_{0.05}[5]\sqrt{V}\ \sqrt{1/n}$$

そこで，予備データの総平均を $\bar{x}_0$ としたとき

$$h=\frac{|\bar{x}_m-\bar{x}_0|/(\sqrt{1/n})}{\sqrt{V}}$$

という統計量の分布の両側5%点を計算することができればこれを $h_{0.05}[\phi]$ として

$$\bar{x}_0\pm h_{0.05}[\phi]\sqrt{V}\ \sqrt{1/n}$$

として，次の打点に先立って，管理限界を設定することができる。

この分布は，まだ厳密に計算されていないが，近似的に d の分布から修正計算を行なってみる。

次の大きさ m のサンプルの平均値 $\bar{x}$ が k 組ある中の最大または最小のものを $\bar{x}_m$，その総平均を $\bar{x}$ としたとき，予備データの大きさが n で，その総平均を $\bar{x}_0$ とすれば，$\bar{x}_0-\bar{x}$ という統計量について，予備データをとったときと，実際打点を始めたときとでは，母集団が変らないという仮説のもとに

$$t=\frac{|\bar{x}_0-\bar{x}|/\sqrt{(1/n)+(1/mk)}}{\sqrt{V}}$$

は自由度 $n-1$ の t 分布をする。$\bar{x}_0$ については定数であり $t\sqrt{V}\sqrt{(1/n)+(1/mk)}$ というバラツキと $d\sqrt{V}\sqrt{1/m}$ というバラツキを合成すれば，$\bar{x}_m$ のバラツキと考える

11) Pearson & Hartley: "Tables of the Probability Integral of the Studentized Range" Biometrika 33 (1943) p.89
12) May: "Extended and Corrected Table of the Upper Percentage Points of the Studentized Range" Biometrika 39 (1952) p.192
13) Harter: "Tables of Range and Studentized Range" Annals of Mathematical Statistics 31—4 (1960) p.1122
14) David: "Revised Upper Percentage Points of the Studentized Deviate from the Sample Mean" Biometrika (1956) p.446
15) Nair: "The Distribution of the Extreme Deviate from the Sample Mean and its Studentized Form" Biometrika (1948) p.118

ことができるので，$\bar{x}_m$ の管理限界としては

$$\bar{x}_0 \pm \sqrt{V}\sqrt{t^2[(1/n)+(1/mk)]+d^2(1/m)}$$

を用いればいい。

$$t^2[n-1]=F[1,\ n-1]$$

であり，k は予備データと同じ程度のサンプルの大きさについて設定するものとすれば

$$n \fallingdotseq mk$$

であるから，$\bar{x}_m$ の管理限界は近似的に

$$\bar{x}_0 \pm \sqrt{V}\sqrt{1/m}\ \sqrt{(2F/k)+d^2}$$

となる。前述した d の値を用いて計算すれば

ϕ \ k	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

となり d の場合に比べて，いっそう係数3.0となる部分が拡大している。

以上の結果を総合してみると，大きさ n のデータの平均 $\bar{x}$ について，k 組の中での最大または最小値に着目した工程平均の一様性に対する管理限界としては，予備データより計算した $\sqrt{V}$ の自由度を ϕ，予備データの総平均を $\bar{x}_0$ とすれば

$$\bar{x}_0 \pm d_{0.05}[\phi]\sqrt{V}\sqrt{1/n}$$

となり，係数 d は $\phi>40$ では $k=15\sim30$ に対し，$\phi<40$ では，予備データの組数と同程度の組数に対しほぼ3となり管理限界は

$$\bar{x}_0 \pm 3\sqrt{V}\sqrt{1/n}$$

がよいということになる。また，この3という係数を使う限りは ϕ がいくら大きくても k が30までで，それを超しそうなときは，また最近の $\phi=40\sim120$ のデータによって管理限界を再計算し，次の $k=30$ 位の間の一様性検定を行なう必要があることもこの表によって理解できる。

4° 効率のいい工程の一様性検定法

n 個のデータを用いて $\sqrt{V}$ を計算すると，そのときの自由度は $n-1$ となる。ところが $\sqrt{V}$ の計算には残差平方和 S の計算を必要とするため相当な計算手数がかかる。一般的には効率を同じ精密度の推定を行なうのに必要な標本の大きさの比で表現している。精密度は標準誤差の逆数と考えられるから，$\sqrt{V}$ については

$$E[\sqrt{V}]=c_2^*\sigma \qquad D[\sqrt{V}]=c_3^*\sigma$$

したがって

$$E[\sqrt{V}/c_2^*]=\sigma$$

$$D[\sqrt{V}/c_2^*]=(c_3^*/c_2^*)\sigma$$

また R については

$$E[R]=d_2\sigma$$

$$D[R]=d_3\sigma$$

$$\therefore\ E[R/d_2]=\sigma$$

$$D[R/d_2]=(d_3/d_2)\sigma$$

ただし，$E[\ ]$ とは $\sum x\cdot p_x$ として，すべての値についてその値とその値の起る確率の積の和をとったもので 母平均 μ，$D[\ ]$ とは $\sqrt{\sum(x-\mu)^2 p_x}$ で母分散 σ^2 の平方根となり，標準偏差とよばれる。

$$D[x]=E[x^2]-\{E[x]\}^2$$

である。

また，$d_2\ d_3\ c_2^*\ c_3^*$ はサンプルサイズ n に関する定数で後に表示する。したがって，R による σ の推定量の $\sqrt{V}$ による σ の推定量に対するいわゆる効率 η は

$$\eta=\left(\frac{1}{D[R/d_2]}\right)^2\Big/\left(\frac{1}{D[\sqrt{V}/c_2^*]}\right)^2$$

$$=\left(\frac{1}{(d_3/d_2)\sigma}\right)^2\Big/\left(\frac{1}{(c_3^*/c_2^*)\sigma}\right)^2$$

$$=(c_3^*/c_2^*)^2/(d_3/d_2)^2$$

そこで各 n について η を計算してみると

n	η
2	1.00
6	0.96
10	0.85
20	0.71
100	0.35

となる。

$n=2$ では $\sqrt{V}$ によるときも，R によるときも，2個の値のもたらす情報のすべてを利用しているから，効率 1.00 つまり同じことになるが，何しろ R は最大値および最小値と，他の値はその間にあるという情報しか利用していないのであるから，$\sqrt{V}$ にくらべて，より多くのデータがなければ，同じ程度の精密度の推定量が得られないのは，当り前である。しかし，$n<10$ の範囲では少なくも85%のいわゆる効率を確保できるので，n が大きい場合には m 個づつ k 組に分けて，各組の R を平均した $\bar{R}$ を用いると

$$E[\bar{R}/d_2]=\sigma$$

$$D[\bar{R}/d_2]=\frac{1}{\sqrt{k}}\left(\frac{d_3}{d_2}\right)\sigma$$

となるから，例えば100個のデータについて $\sqrt{V}$ による推定の標準誤差は

$$(c_3^*/c_2^*)\sigma=0.071\,\sigma$$

であるのに対して，4個づつ25組に分けて4個の中の R を平均して用いると，そのときの推定の標準誤差は

$$\frac{1}{\sqrt{k}}\left(\frac{d_3}{d_2}\right)\sigma=0.086\,\sigma$$

となり，そのいわゆる効率は

$$\eta=(0.071/0.086)^2=0.68$$

で，100個全体の R を用いた場合の効率 0.35 に対し

て，相当大幅に大きくなっている。

ところで，効率というものを同じ精密度の推定を得るために最もデータ数が少なくてすむ方法を用いたときのデータ数との比だけでなく，このほかに計算手数をも考慮に入れたものにすることは，日常の解析手法として近代統計学をとり入れつつあり また日常の生産活動に活用することが本質的に必要な工鉱業分野では重要なことである。

n	$k=1$		$k=2$		$k=3$		$k=4$		$k=5$		$k>5$	
	ϕ_c	C	ϕ_c	C	ϕ_c	C	ϕ_c	C	ϕ_c	C	ϕ_c	C
2	1.0	1.41	1.9	1.23	2.8	1.23	3.7	1.21	4.6	1.19	$0.88k+0.25$	$1.128+0.32/k$
3	2.0	1.91	3.8	1.80	5.7	1.77	7.5	1.75	9.3	1.74	$1.82k+0.25$	$1.693+0.23/k$
4	3.0	2.24	5.7	2.15	8.4	2.12	11.2	2.11	13.9	2.10	$2.74k+0.25$	$2.059+0.19/k$
5	3.8	2.48	7.5	2.40	11.1	2.38	14.7	2.37	18.4	2.36	$2.62k+0.25$	$2.326+0.16/k$
6	4.7	2.67	9.2	2.60	13.6	2.58	18.1	2.57	22.6	2.56	$4.47k+0.25$	$2.534+0.14/k$
7	5.5	2.83	10.8	2.77	16.1	2.75	21.3	2.74	25.6	2.73	$5.27k+0.25$	$2.704+0.13/k$
8	6.3	2.96	12.3	2.91	18.3	2.88	24.4	2.88	30.4	2.87	$6.03k+0.25$	$2.847+0.12/k$
9	7.0	3.03	13.8	3.02	20.5	3.01	27.3	3.00	34.0	2.99	$6.75k+0.25$	$2.970+0.11/k$
10	7.7	3.18	15.2	3.13	22.6	3.11	30.1	3.10	37.5	3.10	$7.45k+0.25$	$3.078+0.10/k$

この意味では，Rを用いることは，直接$\sqrt{V}$を計算する場合に比べて，極端に計算手数が少なくてすみ，管理図法だけでなく，統計解析手法すべての分野で大いに活用される必要がある。

ここで，今までの$\bar{x}$管理限界に用いてきた$\sqrt{V}$をRを用いて推定する方法があれば，今までの議論からしても，管理図法としては理想的な計算法方であると考えることができる。

Patnaik[16] はこれに対して次のような提案を行なっている。

$$\{D[\bar{R}]\}^2=V[\bar{R}]=E[\{\bar{R}-E[\bar{R}]\}^2]$$
$$=E[(\bar{R})^2]-\{E[\bar{R}]\}^2$$
$$\therefore\quad E[(\bar{R})^2]=\{E[\bar{R}]\}^2+\{D[\bar{R}]\}^2$$
$$=(d_2\sigma)^2+(d_3\sigma)^2/k$$
$$=(d_2^2+d_3^2/k)\sigma^2$$

したがって，$d_2^2+d_3^2/k=C^2$ とおけば

$$E[(\bar{R}/C)^2]=\sigma^2$$

そこで，

$$E[(\bar{R}/C)^2]=E[V]$$
$$E[(\bar{R}/C)=E[\sqrt{V}]$$

の二つがともに成り立つように C および相当自由度 ϕ_c を求めれば，この C を用いて $\bar{R}/C$ とすることにより自由度 ϕ_c の $\sqrt{V}$ と同等にとり扱うことができることとなる。

Cは前にのべたように

$$C=\sqrt{d_2^2+d_3^2/k}$$

ϕ_c は

$$E[\sqrt{V}]=c_2{}^*\sigma=\left\{\sqrt{\frac{2}{\phi}}\Gamma\left(\frac{\phi+1}{2}\right)\Big/\Gamma\left(\frac{\phi}{2}\right)\right\}\sigma$$
$$E[\bar{R}/C]=(d_2/C)\sigma$$

したがって

$$\frac{d_2}{C}=\sqrt{\frac{2}{\phi}}\Gamma\left(\frac{\phi+1}{2}\right)\Big/\Gamma\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

ゆえに

$$\frac{d_2}{\sqrt{d_2^2+d_3^2/k}}=\sqrt{\frac{2}{\phi}}\Gamma\left(\frac{\phi+1}{2}\right)\Big/\Gamma\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

を ϕ について解けば，求める相当自由度 ϕ_c が得られる。

そこで，予備データから直接 $\sqrt{V}$ を求めないで，データをサンプルサイズ n，k 組の合理的な群に分け，群の中の範囲 R の k 組についてこれを平均して $\bar{R}$ を求め，n，k より C，ϕ_c を求め

$$\sqrt{V}\fallingdotseq\bar{R}/C$$

として $\sqrt{V}$ を推定するわけである。ところが，$k>10$ ではほとんど C は d_2 に一致するから，これを用いて

$$h\fallingdotseq\frac{|\bar{x}_m-\bar{x}_0|/\sqrt{1/n}}{\bar{R}/d_2}$$

として，管理限界の係数を計算してよい。

$\bar{x}$ の k 組の間の極値 $\bar{x}_m$ に対する工程の異常検出のための限界は

$$\bar{x}_0\pm\left(\frac{h_{0.05}[\phi]}{d_2\sqrt{n}}\right)\bar{R}$$

となり，h は前述のとおり $\phi>40$ では，$k=15\sim30$ に対し，大体 3.0 であるから，これを用い管理限界は

$$\bar{x}_0\pm(3/d_2\sqrt{n})\bar{R}$$

となる。

$3/d_2\sqrt{n}$は n に関する定数であるから，これを A_2（後で表示する）とおけば，工程平均の一様性検定のための限界は

$$\bar{x}_0\pm A_2\bar{R}$$

となる。これはいわゆる 3 シグマ限界そのものであって，換言すれば，3 シグマ法での $\bar{x}-R$ 管理図中の $\bar{x}$ 管理限界は R を用いて $\sqrt{V}$ を推定し，これを用いて工程平均の一様性を危険率 5 %で検定している方法ということができる。

そこで，予備データと同じ組数の間の極値を対象にして，工程平均の一様性を検定する方式をRを用いて表示すれば

$$\bar{x}_0\pm d_{0.05}[\phi]\sqrt{V}\sqrt{1/n}=\bar{x}_0\pm d_{0.05}[\phi]\left(\frac{\bar{R}}{C}\right)\sqrt{1/n}$$
$$=\bar{x}_0\pm\left(\frac{d_{0.05}[\phi]}{C}\sqrt{1/n}\right)\bar{R}$$
$$=\bar{x}_0\pm H\bar{R}$$

すなわち，予備データをサンプルサイズ n のグループ k 組に分け，これから $\bar{R}$ および ϕ_c，および C を求めたとき，同程度の k 組の間の $\bar{x}$ の極値を対象とした管理限界の係数 H は

16) Patnaik, P.B.: "The Use of Mean Range as an Estimator of Variance in Statistical Tests" Biometrika 37 (1950) p.78

n \ k	2	5	10	20	50	A_2
2	2.48	2.28	2.10	2.10	2.19	1.880
3	0.825	0.959	1.009	1.090	1.150	1.023
4	0.498	0.634	0.694	0.743	0.814	0.729
5	0.369	0.487	0.542	0.582	0.640	0.577
6	0.295	0.402	0.450	0.484	0.533	0.483
7	0.251	0.343	0.386	0.418	0.461	0.419
8	0.219	0.304	0.341	0.371	0.410	0.373
9	0.196	0.272	0.308	0.334	0.372	0.337
10	0.178	0.248	0.281	0.305	0.340	0.308

となり，$n=2$ の場合を除いては，$k=15\sim30$ の間の係数 H はほとんど3シグマ限界係数 A_2 に一致している。$n=2$ の場合については，いずれも 10～20% A_2 よりも大き目の値を与えているが，予備データの3分の2の組数に対する限界としては，次にくるべき組数 4，6，8，10 に対し，H はそれぞれ，1.84，1.83，1.93，1.95 となり，また予備データの2分の1の組数に対する限界としては，$k=2$，5，10，20 に対し，H はそれぞれ 1.53，1.78，1.88，1.96 となり，$n=2$ に対する A_2 の 1.88 にほとんど近似してくる。

そこで，$n=2$ の場合に限って，他の場合の予備データと同程度の個数の間の管理限界を計算するという方式を要て，最初の5組で次の3組を，次にこの8組のデータを用いて次の5組を，次にこの13組のデータを用いて次の7組を，次にこの20組のデータを用いて次の10組の間の管理限界とする方法によって，3シグマ限界の適用を可能にすることができる。

これ以後は，最近20組のデータを用いて次の10組の間の管理限界とすればよいわけである。

後で出てくるが，一点管理図の場合，合理的な群として隣り合った2つの値をとる。この場合は，同じ値を2回使用するために，この隣り合った値の差 R_s（逐次レンジ）は完全に独立でなくなるので，厳密に，この $n=2$ の場合のやり方を適用できないが，近似的に利用できるので，一点管理図（$x-R_s$ 管理図）の場合にも，この 5+3+5+10 という管理限界の再計算方式を採用する。

5° バラツキの一様性検定

二組の不偏分散 $V_1=S_1/\phi_1$ および $V_2=S_2/\phi_2$ は母分散が等しいという仮説のもとで

$$F\equiv V_1/V_2$$

とおいた F は，自由度対 $\phi_1\phi_2$ の F 分布をする。したがって，二組の分散の違いは $F_{0.025}[\phi_1\phi_2]$ と比較することによって検定することができる（2.5% 点を用いたのは二つの不偏分散をみて，大きい方を分子に持って行き，すでにあとぢえがきいているからである）。

また，多数組の分散の一様性に対しては Cochran の検定法がある。これは自由度 ϕ の不偏分散が k 組ある中で，最大の不偏分散を $F_{\max}$ として

$$C=V_{\max}/\sum V$$

の分布を計算したものである。

これに対して，計算手数も考慮した効率の点から，R を用いた方が有利であるから Bliss Tukey[17] による

$$T=R_{\max}/\sum R$$

という統計量を，管理図に適用しやすいように修正した

$$B=R_{\max}/\bar{R}$$

の分布を計算してみる。ただし，サンプルサイズ n の標本の範囲 R が k 組あるとき，その平均値を $\bar{R}$ とする。

この分布の5%点を表示してみると次のようになる。

n \ k	5	10	20	50	D_4
2	3.00	3.39	3.76	4.10	3.27
3	2.22	2.53	2.76	3.00	2.58
4	2.09	2.20	2.38	2.55	2.28
5	1.84	2.04	2.20	2.35	2.12
6	1.74	1.93	2.08	2.20	2.00
7	1.69	1.90	1.98	2.10	1.92
8	1.64	1.82	1.92	2.05	1.86
9	1.60	1.79	1.86	2.00	1.82
10	1.57	1.75	1.82	1.95	1.78

この場合も $\bar{R}$ が予備データの $\bar{R}$ でない点，多少問題が残るが，$\bar{x}$ の場合同様あまり大きな差はないものと考えられる。

最後の D_4 は

$$R_{\max}=B\bar{R}$$

でなくて

$$\begin{aligned}R_{\max}&=\hat{E}[R]+3\hat{D}[R]\\&=d_2(\bar{R}/d_2)+3d_3(\bar{R}/d_2)\\&=\{1+3(d_3/d_2)\}\bar{R}\\&=D_4\bar{R}\end{aligned}$$

として求めたもので，いわゆる R の3シグマ管理限界係数であるが，$\bar{x}$ 管理図の場合と同様，$k=10\sim30$ ではほとんど B は D_4 に近似している。ただ $k=5$ 程度のものに対しては，一様に 0.2 程度 D_4 より小さい。また $k>30$ に対しては3シグマ係数 D_4 より大きいものになっていることは $\bar{x}$ 管理図の場合と同じであって，R 管理図においても，k が 30 を越すときは，最近の $\phi=40\sim120$ のデータを用いて管理限界を再計算し，次の $k=30$ 程度の間の R 管理限界とする必要があることは，ここでもうかがわれる。

6° $\bar{x}-R$ 管理図と一点管理図

合理的な群の平均値 $\bar{x}$ および群の範囲 R についての，いわゆる3シグマ管理限界は，それぞれ危険率5%で，工程の異常を検定するための基準である。

また，データの数が少なく，何個かを組にして $\bar{x}$ をつくるまで待てないような場合，隣り合った x の差 R_s（逐

17) Bliss, Tukey: "A Rejection Criterion Based upon the Range" Biometrika 43 (1956) p.418

次レンジ）を利用した一点管理図を用いる。同時にとった m 個の値の平均値が一つの値として定義されている，たとえばコンクリートの強度のような場合は，この m 個の値の間の範囲 R_m は試験誤差位しか反映しないので，このような場合も m 個の値を平均した x を一個の値と考え，$\bar{x}-R_s$ 管理図として使用する。試験誤差の管理も併せて行ないたいときは，$x-R_s-R_m$ 管理図としてもよい。

この場合は3シグマ管理限界は

x 管理限界		$\bar{x}\pm 2.66\bar{R}_s$
R_s 〃	（上部）	$3.27\bar{R}_s$
R_m 〃	（上部）	$D_4\bar{R}_m$
	（下部）	$D_3\bar{R}_m$

となる。

$\bar{x}-R$ および $x-R_s-R_m$ 管理図で係数として指定した c_2^* c_3^* d_2 d_3 A_2 D_4 D_3 は次のようなものである。

n	c_2^*	c_3^*	d_2	d_3	A_2	D_4	D_3
2	0.7979	0.6028	1.128	0.853	1.880	3.267	——
3	0.8862	0.4632	1.693	0.888	1.023	2.575	——
4	0.9213	0.3888	2.059	0.880	0.729	2.282	——
5	0.9400	0.3412	2.326	0.864	0.577	2.115	——
6	0.9515	0.3076	2.534	0.848	0.483	2.004	——
7	0.9594	0.2822	2.704	0.833	0.419	1.924	0.076
8	0.9650	0.2621	2.847	0.820	0.373	1.864	0.136
9	0.9693	0.2458	2.970	0.808	0.337	1.816	0.184
10	0.9727	0.2322	3.078	0.797	0.308	1.777	0.223
∞	$1-\frac{1}{4n}$	$\frac{1}{\sqrt{2n}}$			$\frac{3}{\sqrt{n}\,d_2}$	$1+3\frac{d_3}{d_2}$	$1-3\frac{d_3}{d_2}$

7° 管理図による安定状態の判定方法
（技術基準案）

I．$\bar{x}-R$ 管理図

手順 1 予備データが得られるまでの暫定的管理限界の設定

管理限界は現在の工程の能力に基いて設定するのが原則である。したがって，規格に基いて計算したり，標準値に基いて計算したりすることは本筋ではないが，一ばん最初に，まったく現在の工程の能力に関する情報がない場合には，参考として過去のデータ，同種の作業経験などに基いて管理限界らしきものを計算する場合もある。

しかし，これらは正しい意味での管理限界ではないから，あくまで参考にとどめ，しかも手順2に示すように最初の5組のデータが得られたら直ちに管理限界を計算し，以後はこれを用いる必要がある。

（S_U を規格上限 S_L を規格下限とする）

A．両側規格の場合

i　$\bar{x}$ 管理限界

中心線　$\hat{\mu}=\dfrac{S_U+S_L}{2}$

上下限　$\hat{\mu}\pm 3\hat{\sigma}\sqrt{1/n}$

ただし，$\hat{\sigma}=\dfrac{S_U-S_L}{2u}$

変動係数 CV を用いるときは

$\hat{\sigma}=CV\cdot\hat{\mu}$

n：合理的な群の大きさ

u：一般には3できれば4をとる。

ii　R 管理図

中心線　$d_2\hat{\sigma}$

上下限　$(d_2\pm 3d_3)\hat{\sigma}$

B．片側規格の場合

i　$\bar{x}$ 管理図

中心線　$\hat{\mu}=S_U-u\hat{\sigma}\sqrt{1/n}$

または

$\hat{\mu}=S_L+u\hat{\sigma}\sqrt{1/n}$

CV を用いる場合は

$$\hat{\mu}=\frac{S_U}{1+\dfrac{u}{\sqrt{n}}\left(\dfrac{CV}{100}\right)}$$

または

$$\hat{\mu}=\frac{S_L}{1-\dfrac{u}{\sqrt{n}}\left(\dfrac{CV}{100}\right)}$$

ただし，$\hat{\sigma}$ は同種工事の実績から推定するが CV を用いるときは $\hat{\mu}\cdot CV$

上下限　$\hat{\mu}\pm 3\hat{\sigma}\sqrt{1/n}$

ii　R 管理図

中心線　$d_2\hat{\sigma}$

上下限　$(d_2\pm 3d_3)\hat{\sigma}$

手順 2 この限界に入るよう工程調節を行ない，工事を開始する。

最初の5組のデータが得られたとき，総平均 $\bar{\bar{x}}$ および平均範囲 $\bar{R}$ を求め，次式により，次の5組に対する管理限界を計算する。

$\bar{x}$ 管理図

中心線　$CL=\bar{\bar{x}}$

上限　$UCL=\bar{\bar{x}}+A_2\bar{R}$

下限　$LCL=\bar{\bar{x}}-A_2\bar{R}$

R 管理図

中心線　$CL=\bar{R}$

上限　$UCL=D_4\bar{R}$

下限　$LCL=D_3\bar{R}$

ただし，A_2, D_3, D_4 は合理的な群の大きさ n に関する定数であり，$n<7$ の場合は R 管理下限は考えない。

手順 3 次の5点をプロットするうちに点が管理状態を示さないときは　その原因追求を行ない処置をとる。管理状態を示すときは，今までに得られた10組のデータ全部を用いて，総平均 $\bar{\bar{x}}$，平均範囲 $\bar{R}$ を計算し，

手順2と同様管理限界を計算し，次の10組に対する管理限界とする。

手順 4　次の10点をプロットする間，手順3と同様管理状態の判定を行なう。管理状態を示すときは，今までに得られた20組のデータ全部を用いて総平均 $\bar{\bar{x}}$ 平均範囲 $\bar{R}$ を計算し，手順2と同様，管理限界を計算し，次の20組に対する管理限界とする。

手順 5　次の20点をプロットする間，手順3と同様管理状態の判定を行ない，管理状態を示すときは，新しい20組のデータだけを用いて，総平均 $\bar{\bar{x}}$，平均範囲 $\bar{R}$ を計算し，手順2と同様，管理限界を計算し，次の20組に対する管理限界とする。

手順 6　手順5と同様20点に対し，管理状態の判定を行ない，以後最近20組のデータによって次の20組に対する管理限界を計算して用いる。

手順 7　管理状態を示さない場合，その原因を調べてもわからないか，またはわかってもその原因に対し処置をとることができないとか，あるいは，できても経済的でない場合は，そのデータを含めて管理限界の計算を行ない，処置がとれる場合は，そのデータを除外して計算を行なう。

（注意 1）管理状態を示さない場合とは，次のような場合のことである。

1. 予定された次の k 個の打点を行なってゆくうちに点が限界外に打点されたとき。
2. 点が限界内に打点されるが，中心線に対し一方の側に連続7点，連続11点中10点，連続14点中12点並んだとき。
3. 点が週期的に上下するとき。

（注意 2）合理的な群の大きさが2となる場合は 5+5+10+20 という本基準の方法によらず，5+3+5+7+10 という方式による方がよい。すなわち，最初の5組のデータによって次の3組に対する限界を，次にこの8組のデータによって次の5組に対する限界を次々と計算して行く方法で，これによって3シグマ限界係数をそのまま利用することができる。

（注意 3）このようにデータの数が少ないときは次の一点管理図を用いてもよいが，母集団が正規分布から離れているようなときには，中心極限定理により，できるだけ何個かの平均値としてとり扱ったほうがよい。

II．$x-R_s-R_m$ 管理図

データの数が少なく，何個かを組にして $\bar{x}$ をつくるまで待てないような場合，隣り合った x の差 R_s を利用した一点管理図を用いる。同時にとった m 個の値の平均値が一つの値として定義され，この m 個の間の範囲 R_m は試験誤差位しか反映しない場合も m 個の値を平均した x を一個の値と考え，$x-R_s$ 管理図として使用する。

試験誤差の管理も併せて行ないたいときは，$x-R_s-R_m$ 管理図としてもよい。この場合 R_s と R_m を混同しないように注意する必要がある。

手順 1　$\bar{x}-R$ 管理図（以下Iという）手順1に同じ，ただし，過去のデータによる暫定的管理限界の計算は次の式によって行なう。

A．両側規格の場合

i　x 管理図　I手順1　A i で $n=1$ とする

ii　R_s 〃　I手順1　A ii で d_2 は $n=2$ に対応したものとする。

iii　R_m 〃　I手順1　A ii で d_2 は同時にとったものが m 個のとき $n=m$ に対応したものとする。

B．片側規格の場合

i　x 管理図　I手順　B i で $n=1$ とする。

ii　R_s 〃　I手順　B ii で d_2 は $n=2$ に対応したものとする。

iii　R_m 〃　I手順　B ii で d_2 は $n=m$ に対応したものとする。

手順 2　I手順2に同じ，ただし管理限界は次のようにとる。

x 管理図

$$CL=\bar{\bar{x}}$$
$$UCL=\bar{\bar{x}}+2.66\bar{R}_s$$
$$LCL=\bar{\bar{x}}-2.66\bar{R}_s$$

R_s 管理図

$$CL=\bar{R}_s$$
$$UCL=3.27\bar{R}_s \quad (LCL \text{ は考えない})$$

R_m 管理図

$$CL=\bar{R}_m$$
$$UCL=D_4\bar{R}_m$$
$$LCL=D_3\bar{R}_m$$

ただし D_4 D_3 は $n=m$ に対応したものとする。

手順 3～8　I手順 3～8 に同じ

8°　$\bar{x}-R$ 管理図の実例

ある舗装工事現場でマーシャル供試体の空隙率，比重，充填率，フロー値，安定度を約2時間おきに，午前1回午後2回とって管理を行なった。そのときの空隙率に関するデータシートは表-1 のようなものであった。

一般に JIS などでも，予備データとして，20 組位のデータによって管理限界を計算するような説明になっているが，建設事業ではこのような組数の予備データをとっているうちに工事が終ってしまうような実例も少なくないので，ここでは前に説明したように，予備データと同数程度の範囲の管理限界として，3シグマ限界が適当であることを利用し，最初の5組を得て次の5組を，次

表-1 $\bar{x}$-R 管理図データシート

No.

名称	マーシャル試験	工事名	工事	期間	自	年 月 日	
品質特性	空隙率	出張所名	出張所		至	年 月 日	
測定単位		日標準量	m^2	作業者			
規格限界 最大		試料 大きさ	$n=3$	作業機械		P－プラント	
規格限界 最小		試料 間隔	10時半，2時，4時	測定者		Y	
規格番号		測定器番号		作製者		A	

月 日	番号	測定値 x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	計 Σx	平均値 $\bar{x}$	範囲 R R_2	R_3	R_4	R_5	x R R_i
	1	2.1	1.6	2.4			6.1	2.03		0.8			$\bar{\bar{x}} \pm A_2\bar{R}$ = 2.21 ± 1.00
	2	2.5	1.6	2.8			6.9	2.30		1.2			= 3.21 ~ 1.21
	3	2.1	2.6	1.8			6.5	2.17		0.8			$D_4\bar{R}$ = 2.52
	4	2.5	1.6	2.7			6.8	2.27		1.2			平均 2.21 0.98
	5	1.6	1.8	2.5			6.9	2.30		0.7			累計 11.07 4.9
													小計 11.07 4.9
	6	2.8	3.8	2.0			8.6	2.87		1.8			$\bar{\bar{x}} \pm A_2\bar{R}$ = 2.34 ± 0.93
	7	2.1	2.0	2.1			6.2	2.07		0.1			= 3.27 ~ 1.41
	8	2.8	3.0	2.4			8.2	2.73		0.6			$D_4\bar{R}$ = 2.34
	9	2.5	2.8	2.3			7.6	2.53		0.5			平均 2.34 0.91
	10	2.8	2.1	1.6			6.5	2.17		1.2			累計 23.44 9.1
													小計 12.37 4.2
	11	2.5	2.5	2.8			7.8	2.60		0.3			
	12	2.5	1.6	2.1			6.2	2.07		0.9			
	13	3.1	2.6	3.5			8.2	2.73		0.9			
	14	2.5	1.8	2.7			7.0	2.33		0.9			累計 34.84 12.4
	15	0.8	2.1	2.1			5.0	1.67		0.3			小計 11.40 3.3
	16	1.2	2.5	1.2			4.9	1.58		1.3			$\bar{\bar{x}} \pm A_2\bar{R}$ = 2.25 ± 0.9
	17	1.2	1.6	2.0			4.8	1.60		0.8			= 3.16 ~ 1.34
	18	2.5	1.6	2.5			6.6	2.20		0.9			$D_4\bar{R}$ = 2.28
	19	2.5	2.2	3.7			8.4	2.80		1.5			平均 2.25 0.89
	20	1.6	1.6	2.5			5.7	1.90		0.9			累計 44.92 17.8
													小計 10.08 5.4

記事　管理はずれの　月　日の試料を除いた上
次の20日に対する管理限界の再計算すれば
$\bar{\bar{x}} \pm A_2\bar{R}$ = 2.25 ± 0.91 = 3.16 ~ 1.34
$D_4\bar{R}$ = 2.28

n	d_2	A_2	D_4
2	1.128	1.880	3.267
3	1.693	1.023	2.575
4	2.059	0.729	2.282
5	2.326	0.577	2.115

にこの10組を使って次の10組を，最後に今までの20組を使って次の20組を管理し，以後は最近の20組を使って次の20組に対する限界を再計算する方式とした。

したがって，1～5 のデータによる次の 6～10 の間の管理限界としては

$\bar{x}$ 管理図

$CL=2.21$

$UCL=3.21$

$LCL=1.21$

R 管理図

$CL=0.98$

$UCL=2.52$

これで，管理外れを示さないから1～10のデータによる次の 11～20 の間の管理限界として

$\bar{x}$ 管理図

$CL=2.34$

$UCL=3.27$

$LCL=1.41$

R 管理図

$CL=0.91$

$UCL=2.34$

この間に管理外れを示さないので1～20のデータによる次の 20～40 の間の管理限界として

$\bar{x}$ 管理図

$CL=2.25$

$UCL=3.16$

$LCL=1.34$

R 管理図

$CL=0.87$

$UCL=2.28$

を使用する。40番までのデータが得られたときは21～40のデータによって管理限界を再計算し，次の 41～60 の間の管理限界とし，以降最近20組のデータを用いて次の20組の間の管理限界とする。

もちろん，工程の異常が警告されたときは，その原因の追求を行ない，原因が判明したときは，その除去処置をとった上で，次の管理限界計算の際は，その異常データを除去し，もし原因が判明しないときは，そのような原因は今後も起るものと考えて，そのデータは管理限界の計算に算入する。

今の場合は，いずれも工程に異常は認められないので，その状態を維持しつつ工事を続行する。

また，合理的な群の大きさ n が異なるときは R_t の欄を使用し，

$$\hat{\sigma}=\frac{1}{K}\left\{\frac{\sum R_2}{d_2(2)}+\frac{\sum R_3}{d_2(3)}+\frac{\sum R_4}{d_2(4)}\right\}$$

などとして，$\hat{\sigma}$ を計算し，n に対する管理限界として

$\bar{x}\pm A_2 d_2(n)\hat{\sigma}$

$D_1 d_2(n)\hat{\sigma}$

を用いる。ただし，$d_2(n)$ は n に対する d_2，K は $\hat{\sigma}$ の計算に用いる総組数である。しかし，n が異なるときはこのように計算が面倒であるから，できるだけ n を揃えるほうが望ましい。

9°　$x-R_s-R_m$ 管理図の実例

同時にとった3本の供試体の圧縮強度の平均値を，コ

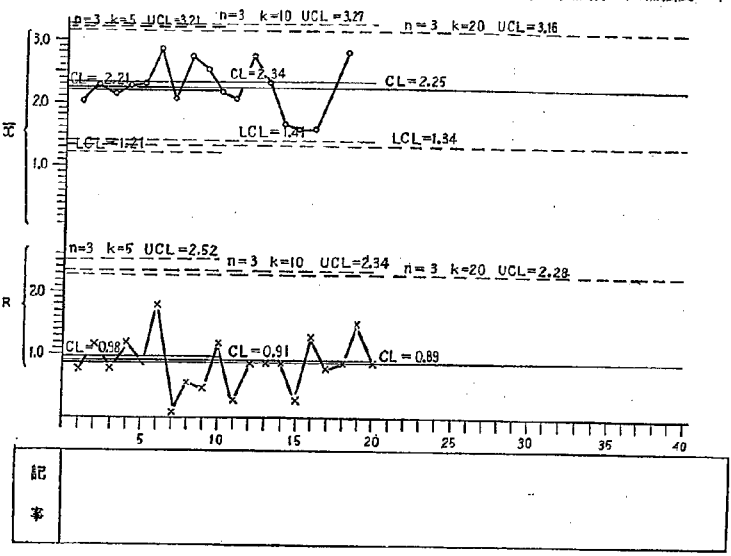


図-1　$\bar{x}$-R 管理図

表-2 x-R_s-R_m 管理図データシート

No.

名称	舗装コンクリート	工事名	S舗装工事	期間	自	年 月 日	
品質特性	28日圧縮強度	出張所名	S 出張所		至	年 月 日	
測定単位	kg/cm²	日標準量	75 m³	作業者			
規格限界 最大		試料 大きさ	1日1回3個	作業機械		S プラント	
規格限界 最小	280 kg/cm²	試料 間隔	10日毎	測定者		K	
規格番号		測定器番号		作製者		H	

月	日	番号	測定値 a	b	c	d	計 Σ	平均値 x	移動範囲 R_s	R_m 2	3	4	x	R_s	R_m
9	29	1	382	358	355		1,095	365			27		±2.66$\bar{R}_s$ = 368±95.6 = 464~272		
	30	2	411	405	396		1,212	404	39		15		3.267$\bar{R}_s$ = 117.6		
10	3	3	369	410	410		1,189	396	8		41		$D_4\bar{R}_m$ = 104.8		
	7	4	389	339	396		1,124	375	21		57		平均	368	36.0	40.8
	8	5	278	278	342		898	299	76		64		個数	5	4	5
													累計	1839	144	204
													小計	1839	144	204
	9	6	353	337	347		1,037	346	47		16		±2.66$\bar{R}_s$ = 364±97=267~461		
	10	7	352	301	359		1,012	337	9		58		3.267$\bar{R}_s$ = 119		
	11	8	367	379	427		1,173	391	54		60		$D_4\bar{R}_m$ = 108.5		
													平均	364.1	36.3	42.2
													累計	2913	254	338
													小計	1074	110	134
	16	9	303	300	313		916	305	86		13		±2.66$\bar{R}_s$ = 363±103 = 260~466		
	17	10	374	367	372		1,113	371	66		7		3.267$\bar{R}_s$ = 126.8		
	25	11	393	424	376		1,193	398	27		48		$D_4\bar{R}_m$ = 98.9		
	27	12	379	376	351		1,106	369	29		28		平均	363	38.8	37.0
	28	13	345	356	393		1,094	365	4		48		個数	13	12	13
													累計	4721	466	482
													小計	1808	212	144
	27	14	395	349	392		1,136	379	14		46		±2.66$\bar{R}_s$ = 367±83 = 284~450		
	31	15	331	340	369		1,040	347	32		38		3.267$\bar{R}_s$ = 102.1		
11	8	16	378	359	388		1,125	375	15		29		$D_4\bar{R}_m$ = 94.9		
	10	17	381	366	415		1,162	387	12		49		平均	367	31.3	36.9
	11	18	378	424	376		1,178	393	6		48		個数	20	19	20
	12	19	410	384	398		1,192	397	4		26		累計	7350	595	39
	13	20	363	342	348		1,053	351	46		21		小計	2629	129	257

記事　管理はずれの　月　日の試料を除いた上

次の20日に対する管理限界を再計算すれば

±2.26$\bar{R}_s$ = 367 ± 83
= 284 ~ 450

3.267$\bar{R}_s$ = 102.1

$D_4\bar{R}_m$ = 94.9

n	d_2	D_4
2	1.128	3.267
3	1.693	2.575
4	2.059	2.282
5	2.326	2.115

ンクリートの圧縮強度と定義すれば，この場合3本の供試体の圧縮強度の範囲 R_m を用いて管理限界を計算することは，圧縮強度の変動のうち，試験誤差による変動の程度をこえたものは，全部異常であるかのように検出し，粒度，含水量などの変動のうち，普通に起る程度の，何等異常でない変動も，全部異常変動として警告されることになり，無駄な心配をさせられる機会が増してしまうことになる。

この場合は1点管理図を用い，偶然変動としては，隣り合った2つの値の差 R_s（逐次レンジ）を用いる。また試験誤差も管理する必要があれば R_m 管理図を併用し $x-R_s-R_m$ 管理図として使用する。

また，一点管理図はいわば $n=2$ の範囲を用いている方式であるから，前の $\bar{x}-R$ 管理図のように予備データと同程度の次の組数に対する管理限界を作ると過大になるので，サンプル数が少ないときは予備データの組数の3分の2程度，ある程度予備データの組数が大きくなったら，その2分の1程度の，次の組数に対する管理限界に止める必要がある。（これを前の 5+5+10+20 方式に対し 5+3+5+7+10 方式と呼ぶことにする）

したがって，1～5 のデータによる次の6～8の間の管理限界としては

x 管理図

$$CL=\bar{x}=368$$
$$UCL=\bar{x}+2.66\bar{R}_s=464$$
$$LCL=\bar{x}-2.66\bar{R}_s=272$$

R_s 管理図

$$CL=\bar{R}_s=36.0$$
$$UCL=3.267\bar{R}_s=117.6$$

この間に管理外れを示さないので 1～8 のデータによる9～13 の間の管理限界としては

x 管理図

$$CL=\bar{x}=364$$
$$UCL=\bar{x}+2.66\bar{R}_s=461$$
$$LCL=\bar{x}-2.66\bar{R}_s=267$$

R_s 管理図

$$CL=\bar{R}_s=36.3$$
$$UCL=3.267\bar{R}_s=119$$

次に 1～13 を用いて 14～20 の間の管理限界とし，以降 1～20 を用いて 21～30 の間と，次々に最近の20個のデータを用い，次の10組に対する管理限界とする。

なお，R_m についてはもし必要ならば $D_4\bar{R}_m$ として UCL を計算する。しかし，この場合は $\bar{x}-R$ 管理図と同様予備データと同数の区間に対する管理限界とすべきであることを注意する必要がある。

おわりに

3シグマ法が大量生産の場でのみ成り立つ近似法であるとする見方に対して，工程をプロセスとして時系列的にみた場合，3シグマ管理限界は，合理的な群の大きさが2以外の場合，予備データが少なくても，その予備データとほぼ同じ大きさの組数の間の管理限界として，また予備データが多いときは $k=15\sim30$ の間の，極値的にみた異常検出の限界として，危険率5％の方式であることをたしかめることができた。

また，$n=2$ の場合でも，予備データの数が少ない場合その3分の2程度の組数に対し，予備データの数が多い場合，その2分の1程度の組数に対し，やはり3シグマ管理限界は，危険率5％の検定方式を与えており，工業生産の場で統計解析手法として最も適当な，範囲 R を用いる手法の適当さもあって，$\bar{x}-R$ および $x-R_s$ 管理図の適用分野は非常に広いものである。

過去の情報にもとづいて，今後の行動決定の基準を極値的なものに求めるという方式は，何も製造する場合だけでなく，計画，試験，研究なども含めた日常すべての場で適用可能なものであり，従来の3シグマ法に対する誤解を一掃して各方面で大いに利用されることが期待される。

（参考文献）

1. 森口繁一：“品質管理” 岩波全書 (1955)
2. 日科技連ＱＣリサーチグループ：“品質管理教室 管理図法” JUSE 出版 (1955)
3. Cowden, D. J: “Statistical Analysis of Quality Control” Prentice Hall, Kinokuniya (1957)
4. 秋草・深谷・横田・中村：“工事管理とその実際” 最新土木施工法講座 山海堂 (1959)
5. JIS Z 9021-1954 管理図法
   JIS Z 9022-1959 メジアン管理図
   JIS Z 9023-1959 x 管理図
6. Hald, A: “Statistical Theory with Engineering Applications.” Wiley (1952)

アロファン質粘土の消石灰—石膏による化学的安定方法に関する研究（1）

アロファン粘土と消石灰溶液との反応により生成する Hydrated Gehlenite（$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$）について

有　泉　　昌*

（昭和36年8月）

目　次

まえがき……（1）
〔Ⅰ〕 アロファン粘土と $Ca(OH)_2$ との反応生成物の性質と同定……（2）
〔1〕 試料と実験方法……（2）
〔2〕 実験結果……（3）
〔3〕 実験結果の検討……（4）
〔4〕 要　約……（8）
〔Ⅱ〕 アロファン粘土の処理条件が Hydrated Gehlenite（C_2ASH_n）の生成に及ぼす影響（8）
〔1〕 試料および実験方法……（8）
〔2〕 実験結果とその検討……（9）
〔3〕 要　約……（10）
〔Ⅲ〕 産地を異にするアロファン粘土および粘土鉱物焼成物との反応生成物……（10）
〔1〕 試料と実験方法……（11）
〔2〕 実験結果とその検討……（12）
〔3〕 要　約……（16）

まえがき

わが国は火山国であり，国土の表層の約10%近くが火山灰地帯または火山灰に起源を持つ表層でおおわれている。火山灰はガラス質であり粒径も小さく風化速度も大であり，粘土化が早い。わが国の気象条件の下では，火山灰の風化生成物中には粘土鉱物としてアロファンが含有されるのが一般である。[1] このアロファンは下層に至るに従い加水ハロイサイト化し，さらにハロイサイト化するのが一般的傾向であるが，表層はアロファンに富むのが一般である。著者はすでに我国の路床土中の粘土鉱物について研究を一応完了しており，関東ローム全般についてはアロファン，加水ハロイサイトの存在を認め，東北地方の路床土でも火山灰起源のものがアロファンを主要粘土鉱物とすることがあることも認めている。なおこれらの研究結果については引き続き報告する。

道路の路床となる部分は一般には表層土であり，路床土の力学的性質と舗装の耐久性を考えれば，アロファン粘土についての研究がなされねばならないことを知る。アロファンは粘土鉱物の一種ではあるが，X線的には結晶性とは言いがたい無機コロイド複合体であり，一方その主成分である SiO_2，Al_2O_3，H_2O の間には何らかの結合が存在し，単なるシリカゲルまたはアルミナゲルの混合体ではない。現在アロファンの構造についてはほとんど明らかにされていない。

火山灰土の土質力学的性質が特異なものであることはよく知られていることであり，その粒度分布にもよるが，実はこのアロファンの行動がその特異性を支配していることが知られている。たとえば関東ロームが特殊な土質を示めすのは，アロファンの存在によると考えられている。New Zealand の特殊土壌もアロファンの存在によることが認められ，その比表面積が著るしく大きく，多量の吸着水を有し，緩除に可逆的にゲル化する性質を持ち，この粘土を含有する土は圧密されやすく，空隙比が大きく，液性限界も大でありまた圧縮率も大きいことなどが Gradwell[2] により示めされている。

関東ロームでもそうだがこのアロファンを含有する土は，土質力学的性質が特異であり，モンモリロナイトを含む土と共に路床土としては好ましいものでないことは土質試験の結果から知られる所であり，この問題については別に論ずる予定である。アロファン粘土を含有する土はアロファンの構造に起因する著るしい親水性のために自然含水量も大きく，機械化施工法の対象としては取り扱いがたいものであることは関東ローム等ですでに十分経験ずみのことである。

舗装の耐久性を保持するために路床土の安定工法が近時大いに研究され，ソイルセメント工法が実施されているが，アロファン粘土のように自然含水比の高いものに

* 地質化学部長

は工法的に効果がないと同時に，アロファン粘土自体のためでもあるが化学的に活性の大きいアロファンに吸着された有機物等のためにセメントの硬化は妨害されて強度の発生が小さい。さらにセメント自体が単独に水和反応を起すのみで，アロファン自体はセメントの水和反応とは殆んど関係がないと考えられている。このような土に高い自然含水比で添加剤を加えて，その性質を改変し，できれば強度を持たせることが望ましい。さらに可能ならばアロファン自体を粘結材に適用することが望ましいことである。

アロファンは結晶度の著るしく低い SiO_2-Al_2O_3-H_2O 系鉱物であり，化学的にはカオリナイト等と異なり著るしく活性を持つ鉱物である。したがって化学的処理によってその性質を改えることの可能性が考えられる。この問題は関東ローム等の化学的安定処理工法の基礎的研究問題に連らなることである。著者は $Ca(OH)_2$ をアロファンに加え，ペースト状に保った場合強度を発生し，水中でスレーキングせず，さらに $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を添加することにより強度の発生が大きいことを発見した。すなわちアロファンは $Ca(OH)_2$ との反応で Hydrated Gehlenite とされる結晶性物質を生成し，温度の高いときは Hydrogarnet を生成することを認め，さらに $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加によりセメントバチルスを生成することを確かめ，アロファン粘土の安定化に成功した。この化学的反応を詳細に研究するとともに実験室内での強度試験を試みたのでその結果を報告する。

この反応はアロファンの構造とも密接な関係があると同時に，いまだ知られていないアロファンの簡易な検出方法とも関係がある点にも言及し，別に報告する我国路床土のコロイド成分に本法を適用した場合の諸問題について検討し，$Ca(OH)_2$ 処理方法がアロファン以外の土壌粘土では $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ の生成を利用してその処理の可能性がある点にもふれる。

なおアロファンと $Ca(OH)_2$ より生成する Hydrated Gehlenite は高炉セメントの水和反応生成物，ポゾラン反応生成物とも関係があり，この反応の様式は岩石の変成作用とも関係することに注意する必要がある点等今後の研究問題にもふれる。

〔1〕 アロファン粘土と $Ca(OH)_2$ との反応生成物の性質と同定

アロファン粘土は $Ca(OH)_2$ 溶液と常温で反応して $Ca(OH)_2$ を固定して結晶性物質を生成することを見出した。この結晶性物質が何であるかを知るために，その種々の性質を研究し，この物質の同定を試みる。ここではこの反応を見出した経過および同定に至るまでの予備実験結果について報告する。

〔1〕 試料と実験方法

試料としては鹿沼土No.-1，No.-2より分離したアロファン粘土 A_0 および B_0 を用いた。これらの試料がアロファンを主体とすることは別に確かめた。

試料土よりアロファン粘土を分離するためには次の方法によった。試料土を NH_4OH を分散剤としてストークス径 1μ 以下の粒子の懸濁液を分離し，$CaCl_2$ 液を加えて凝固させ，H_2O_2 で 80°C で有機物を酸化し，さらに $Ca(CH_3COO)_2$ 溶液を加えて沈澱させ，この沈澱を，CH_3OH で十分に洗って $Ca(CH_3COO)_2$ を除き風乾させて粘土試料とする。なお，この実験に用いた試薬類はすべて試薬として最純品である。

これらの試料の内 A_0 試料約 1.0g を CO_2 の存在に注意して造った CaO 約 1.0g/l の $Ca(OH)_2$ 溶液 1l と室温で密封したガラス器中で20日，39日，70日放置して後 CO_2 に注意しつつ液底体を分離し，水洗の後風乾させ A_{20}，A_{39}，A_{70} をうる。また B_0 試料約 20g を CaO 0.8g/l の $Ca(OH)_2$ 溶液 18l と室温で30日間反応させ，約200ccの蒸溜水を20回に分けて洗い，風乾させて後50%H_2SO_4 のデシケーター中で10日以上放置して B_{30} をうる。

これらの $Ca(OH)_2$ と反応したアロファン粘土は化学分析を試みたり，Lerch-Bogue 法[3] で遊離石灰の定量を試みた。また 0.01M の EDTA 溶液で Ca の抽出実験を試みたり，溶液中の SiO_2，Al_2O_3 の濃度も測定した。

化学分析のほか Geigerflex による X 線回折（対陰極は銅）を加熱処理試料，エチレングライコール処理試料，空中放置試料等について試み，示差熱分析は既報の装置により 10°C/min の温度上昇速度で試み，一部の試料についてはパーキンエルマー社の赤外線分光器(KBr錠剤法)

表-1 試料，反応生成物の分析値

試料	H_2O^-	H_2O^+	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SiO_2/Al_2O_3	SiO_2/CaO	Al_2O_3/CaO	H_2O^-/Al_2O_3	H_2O^+/Al_2O_3
A_0	18.92	16.18	29.00	29.18	4.32	1.81	—	1.69	15.0	8.9	3.7	3.1
A_{20}	8.52	29.56	18.32	20.23	2.47	20.15	—	1.53	0.84	0.55	2.4	8.2
A_{39}	5.89	31.00	17.89	20.92	2.97	20.79	—	1.45	0.80	0.55	1.5	8.4
A_{70}	8.00	28.60	17.65	22.29	2.89	21.42	—	1.34	0.77	0.57	2.0	7.3
B_0	17.68	15.58	28.13	33.20	4.03	2.04	0.10	1.14	10.0	7.0	3.0	2.7
B_{30}	14.50	19.62	22.62	26.76	3.37	14.06	0.06	1.44	1.88	1.04	3.1	4.2

により吸収スペクトルを求めたり，また電子顕微鏡写真による観察も試みた。

〔2〕実験結果

(1) 化学分析結果

供試粘土試料 A_0 および B_0，それらの $Ca(OH)_2$ 溶液との反応物 A_{20}，A_{39}，A_{70}，B_{30} の分析結果を表-1 に示めす。

これらの結果からアロファン粘土は $Ca(OH)_2$ と反応して，多量の $Ca(OH)_2$ を吸収することを知る。吸収された $Ca(OH)_2$ はX線回折でも熱分析でも遊離の結晶状態ではない。反応によって，100°C 以下で失われる水は減少し，100°C以上で失われる水は増加する。Al_2O_3/CaO は A_{20}，A_{39}，A_{70} では約 0.55 であるが，B_{30} では約 1.0 であり，同様に $(H_2O)^+/Al_2O_3$ は A_{20}，A_{39}，A_{70} が 8 に近いのに対し，B_{30} では 4 に近かい。A_{20}，A_{39}，A_{70} では SiO_2/Al_2O_3 が材合と共に低下するがこの場合液中の Al については定量していない。

B_{30} を Lerch-Bogue 法で遊離石灰を求めたが検出されないし，200°C に 1 時間加熱しても同様に検出しえない。また 0.01M EDTA 溶液で処理すれば大部分の CaO を抽出できる。水洗いを何回繰りかえしても Ca^{++} が溶出する。なお B_{30} を分離したときの母液中の SiO_2，Al_2O_3 は何れも，1mg/l 程度であった。

表-2　アロファンと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物の網面間隔（Å）

A_{20}		A_{39}		A_{70}		A_0	
d	強度	d	強度	d	強度	d	強度
12.6	1.00	12.6	1.00	12.6	1.00	3.1～3.8Å	
7.9	0.10	7.9	0.13	7.83	0.30	2.1～2.4 Å	
6.28	0.50	6.20	0.40	6.19	0.45	4.4Å前後にハローが認められるが結晶による回折線は認めない。	
—	—	—	—	4.93	0.10		
4.15	0.90	4.15	0.85	4.15	0.85		
3.40	0.37	3.41	0.10	43.39	0.10		
3.28	0.22	—	—	3.29	0.15		
3.04	0.25	3.03	0.80	3.03	0.40		
2.88	0.25	2.87	0.17	2.87	0.30		
2.71	0.22	—	—	2.73	0.17		
2.61	0.25	2.61	0.15	2.01	0.25		
2.49	0.25	2.49	0.30	2.49	0.25		
2.38	0.10	2.36	0.20	2.35	0.25		
2.31	0.35	0.28	0.20	2.28	0.05		
2.11	0.26	2.13	0.10	2.12	0.05		
2.07	0.10	2.09	0.15	2.09	0.10		
2.01	0.20	2.01	0.17	2.06	0.10		
1.97	0.30	1.97	0.10	1.97	0.15		
—	—	1.92	0.20	1.92	0.10		
1.88	0.25	1.87	0.20	1.88	0.15		
1.82	0.10	1.82	0.10	1.82	0.10		

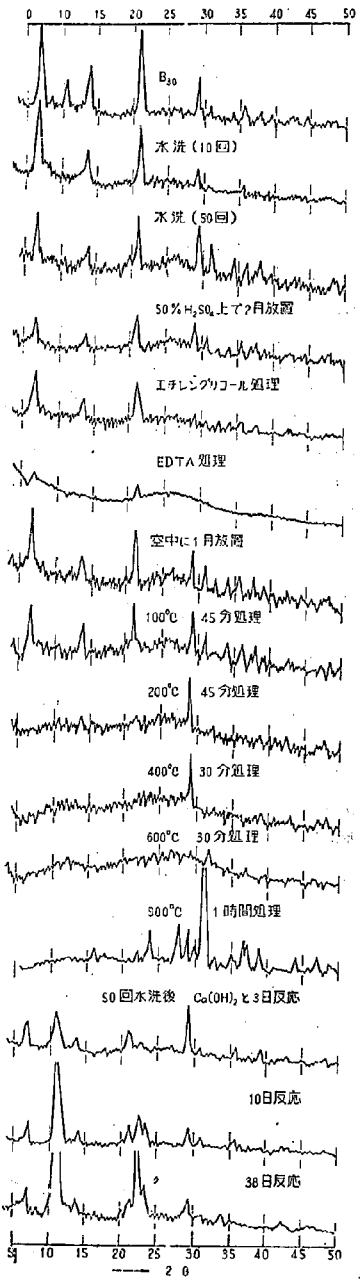


図-1　反応生成物の性質

(2) X線回折

試料をX線回折した結果より網面間隙を求めた結果を表-2に示めす。A_{20}, A_{30}, A_{70} は何れも 12.6Å 6.28Å および 4.15Å で特徴づけられた粉末線を示めし，X線的には無定形のアロファンより結晶性物質が生成したことを示めす。

B_{30} はエチレングライコル処理で網面間隙は変化をうけないし，空中に 30 日間放置しても炭酸化は見られない。100°C で45分間加熱した場合は特有の粉末線が見られるが，200°C で 45 分間の加熱により混入した Calcite の粉末線を残して新生結晶性物質は消失する。600°C に加熱した場合も無定形であるが，900°C に加熱すると Gehlenite を生成することを確かめた。EDTA 溶液で CaO を強制的に抽出すれば粉末線を失いアロファンにもどる。また B_{30} の分離に際して水洗いの 20 回と 50 回の場合を比較すると，50回の方は (00l) 以外の粉末線が明瞭化される。これらの結果を図-1 に示めす，

なお，$Sr(OH)_2$ 溶液では $SrCO_3$ 以外の回折線がえられず，$Ba(OH)_2$ 溶液では長期材令に至り新しい回折線がえられるがここではふれない。

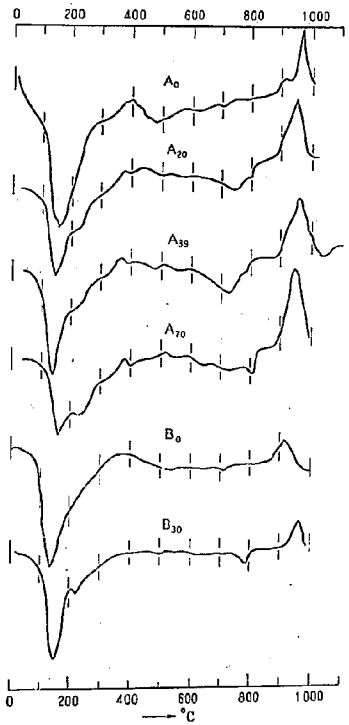


図-2 鹿沼土よりの土壌コロイドと $Ca(OH)_2$ との反応生成物の DTA 線

(3) 示差熱分析 (DTA曲線)

反応前のアロファン粘土 A_0, B_0 および反応後の A_{20}, A_{30}, A_{70}, B_{30} の DTA 曲線を図-2 に示めす。A_0 および B_0 の DTA 曲線は何れもアロファンのそれと一致し，反応後の粘土もアロファンの DTA 曲線と比較的近似している。B_0 の吸熱ピークは 130°C でやや低温側に偏しているが，B_{30} では新たに 220°C に吸熱ピークが出現し，930°C の発熱ピークは 970°C に上昇している。さらに高温での発熱ピークと低温での吸熱ピークの面積比は B_0 の方が B_{30} より小さい。800°C に見られる小吸熱ピークは実験過程で混入した Calcite によるものであろう。

A_{20}, A_{30}, A_{70} の DTA曲線も B_{30} の場合と同じであるが，600°C から 800°C におよぶ巾の広い弱い吸熱が見られ，高温部の発熱ピークは A_0 より高温側に偏し，高温側で二重ピーク化の傾向を示めす。B_{30} の場合と大体同じであり，材令とともに DTA 曲線の変化の傾向が見られる。

(4) 電子顕微鏡写真・赤外線吸収スペクトル

B_{30} の電子顕微鏡写真の一例を写真-1 に示めす。この写真によれば元来無定形で球状に近かいゲル状の外観を持つアロファンは，$Ca(OH)_2$ との反応によりやや角ばり，針状または板状の微結晶が球の外周辺に見られ，また 6 角板状の著るしくうすい結晶の生成をも認める。この結晶からは電子回折像はえられなかったが，一部の結晶からは 4.3Å(m), 2.9Å(s), 2.5Å(m), 1.88Å(w), 1.66Å(s), 1.43Å(m), 1.36Å(w) をえた。また試料を水中で分散させた場合とワセリン中で分散させた場合とは電顕像に著るしい差は認めなかった。

B_0 および B_0 を 125°C で45分間加熱したもの，および B_{30} についてえられた赤外線吸収スペクトルを図-3 に示めす。B_0 と B_0 を 125°C に加熱したものは殆んど同じ吸収スペクトルを与えるが，B_{30} は 6.5~7.2μ の間に顕著な吸収を示めし，11.5μ には微弱な吸収が見られる。

〔3〕 実験結果の検討

(1) 試料粘土について

鹿沼土中のコロイド粘土分がアロファンであることは公知のことであるが，この研究に使用したものがアロファンであるか否かは一応検討する必要がある。分離した粘土 A_0, B_0 は化学分析結果では $(H_2O)^+$, $(H_2O)^-$ が何れも大きく SiO_2/Al_2O_3 は 1.69, 1.14 である。X線回折では何れもハローを与えるのみで明瞭な回折線はほとんど示めさない。DTA 曲線もアロファンのそれと一致し，赤外線吸収スペクトルは OH 基による 3500cm^{-1} の大きい吸収，H_2O による 1650cm^{-1} の吸収，アルミノ珪酸塩による 850~1300cm^{-1} の巾広い吸収を示めす。このほかに認めうる吸収はない。このような吸収スペクトル図はアロファンについて代表的である。アロファンの赤外線吸収スペクトルについては Fieldes[1] の研究があ

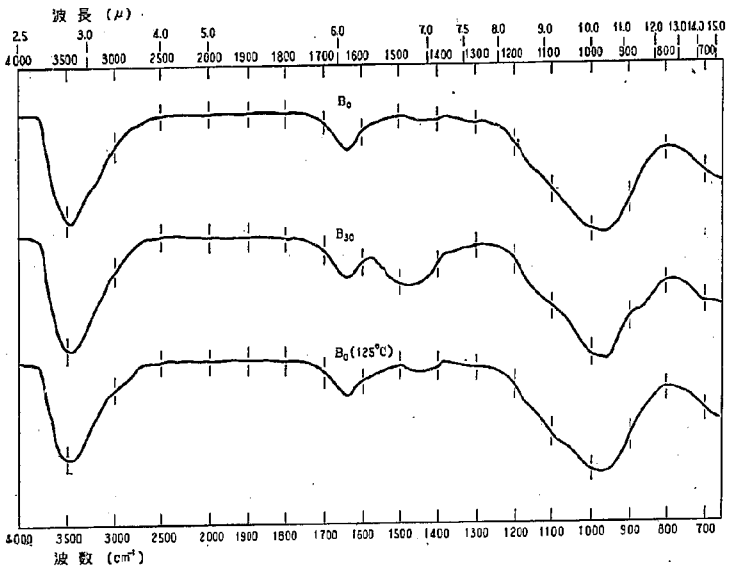


図-3 赤外線吸収スペクトル

り，Fieldes はアロファンを A，AB，B に分類しているのであるが，B_3 試料はアロファンAに該当すると考えられる。

電子顕微鏡写真によればゲル状体が塊状に集合した状態が見られ，鹿沼土についての多くの電子顕微鏡観察結果とも一致している。

以上の結果より本研究に用いた粘土 A_3，B_3 は大部分がアロファンと断定することが出来，B_0 は Fieldes のいうアロファンAに該当する。A_0 も同様にアロファンAに該当すると考えられる。しかしアロファン以外にどのような物質が副成分として存在するかは明らかでないし，Fe_2O_3 についてもその存在形態は明確ではない。

(2) アロファンと $Ca(OH)_2$ との反応および反応生成物の性質について

アロファンと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応により生成する結晶性物（Xとよぶ）の性質とこの反応について知りえた今後の問題点についてふれる。この反応およびXの性質については引きつづき第2報以下でのべるのであるが，アロファン粘土に関する本研究の糸口となった一部定性的であるこの予備的実験結果の意義を考える必要がある。

アロファンは $Ca(OH)_2$ 溶液と常温に放置すると多量のCaOを固定し，その固定量は脱水したアロファンに対して約50%におよび $(H_2O)^+/Al_2O_3$ は約3より約8に達し結合水の増大が明瞭であり，結晶性物質Xが新たに生成する。CaO の固定量は A_{20}，A_{30}，A_{70} で殆んど変化がないので，ある条件の下では固定量に平衡関係が存在すると考えられる。一方Xの粉末線も材令により 7.9Å 線が除々に強くなる等多少の規則的変化があり，DTA 曲線でも 220°C の吸熱ピークの変化等も顕著であり，CaO 固定体内での緩除な変化が起ることが十分推定できる。CaO の固定量には平衡関係があることをのべたが，反応後の液底体を水で洗えば洗液中に $Ca(OH)_2$ が常に見られ，反応後の CaO は水中に溶解してくることが明らかである。たとえば50回水洗しても液中に $Ca(OH)_2$ を認め，洗滌をくり返えしたときはX線回折結果によれば (00l) 線と考えられる 12.8Å，6.4Å，4.2Å は弱くなり，その反面 2.8Å 線等は強くなり，CaO の溶脱とともに結晶度にも変化が見られる。X鉱物は $Ca(OH)_2$ 濃度とある平衡関係のあることが推定されるのであり，B_{33} の場合はCaOの固定量が少ない点は反応に使用した $Ca(OH)_2$ 溶液の濃度が CaO として 0.8g/l のように A_3 の場合より低濃度であるためと考えられる。これらの点については後節で詳細に論及する。

なお反応中の液相組成の変化については明らかでないが，SiO_2/Al_2O_3 が A_3 と A_{30}，A_{39}，A_{70} の場合でも，B_0 と B_{30} の場合でも何れも低下することは注意すべき点と考えられ，SiO_2 が不溶としても Al_2O_3 は試料より液中に入るものである。これらの消長については今後研究を要する点である。

固定された CaO はX線回折では CaO または $Ca(OH)_2$ として存在しないので，X鉱物の主要組成成分となって

いることが明らかである。したがってCaOはLerch-Bogue法による遊離石灰の分析に際し，グリセリン中に溶解してこない。固定されたCaOはまたEDTA溶液のようにCa^{++}を除去できる溶液と接触させると，CaOは容易に除かれて結晶性は失われてX線的には無定形化する。

X鉱物は水に対しては不安定であることはすでにのべたが加熱に対してはどのようであるかをX線回折で実験すると，100°Cでは安定であるが125°C以上の温度で45分間以上加熱すると結晶性を失いつつアロファンと同様にX線に対し無定形化する。しかしX線回折ではCaOまたは$Ca(OH)_2$を検出できないし，またCaOまたは$Ca(OH)_2$がグリセリンに溶出してこない。すなわち固定されたアロファンと結晶性鉱物Xを生成したCaOは加熱で結晶性を失っても，何等かの形でアロファンに固定されているものであろう。600°Cまでの加熱では同様にX線的には無定形であるが，900°Cに加熱した場合はGehleniteを生成する。DTA曲線でXがアロファンと同様に900°C以上で発熱ピークを持つが，その機構はアロファンの場合とは異なりGehleniteの生成によるものと推定される。なお900°CでのGehleniteの生成は$Ca(OH)_2$，アルミナゲル，シリカゲルの混合物においても認められ，セメントの焼成反応[5]でもその生成が認められているので，この反応はX鉱物の特徴とのみは断言できない。またXは空気中のCO_2には安定であり，B_3，は30日間空中に放置しても分解されないし，Calciteの生成量が多いとは考えられない。

XはそのX線回折により強い3本の粉末線を与えることが特徴であり，その粉末線は12.8Å線，6.4Å線および4.2Å線である。この内12.8Å線が最も強く，4.2Å線がこれにつぎ，更に6.4Å線が弱い。また6.4Å線は高角側にやや尾を引いている。この3本の粉末線は一応(001)，(002)，(003)の底面反射と考えられるので，X鉱物は層構造を持つと推定される。モンモリロナイト等の層構造を持つ鉱物はエチレングライコール処理によって底面反射が変化することが知られているので，X鉱物についてもこの処理を試みたが底面反射と推定される粉末線に変化が認められなかった。したがってXは膨張性格子は持っていない。

(3) X鉱物の同定について

12.8Å線，6.4Å線および4.2Å線で特性づけられるこのX鉱物が何であるかはDana[6]のThe System of Mineralogyにも記載されておらず明白さをかいている。$CaO-SiO_2-H_2O$系鉱物が一応考えられるが，現在までに知られているこの三成分系鉱物のX線粉末線[7]には合致するものはない。SiO_2ゲルと$Ca(OH)_2$液との常温での反応ではTobermoriteの生成が知られているのであるが，その粉末線は3.0Å線が最も強く，DTA曲線でも800°Cから900°Cの間に発熱ピークを認める。またこのような条件下では結晶度の著るしく低いものであり，実際シリカゲルと$Ca(OH)_2$液との反応でえられたものは，Xの12.8Å線に比べればその強度は著るしく小さい。Xの粉末線中に3.0Å線も一部認めるが，実験中に$CaCO_3$の生成を避けえなかったためにそれとの区別は不可能であった。しかしDTA曲線でその存在は否定されるので，Tobermoriteが存在しても少量であろう。Xは少くも現在までに知られている$CaO-SiO_2-H_2O$系の鉱物とは考えられない。つぎに問題となるのは，$CaO-Al_2O_3-H_2O$系鉱物であろう。この系の鉱物については比較的詳しく研究され，$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$，$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (8 \sim 12)H_2O$，$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$，$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$，$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$，$6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 33H_2O$，$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (18 \sim 21)H_2O$等が知られており，常温での平衡関係からは$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$，$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$，$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$の存在が知られている[8]。これらの鉱物の粉末線とXとの粉末線は一致しないし，アルミナゲルと$Ca(OH)_2$溶液との反応でも$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$の生成を認めるのみである。DTA曲線では$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$[9]は否定され，$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$も否定され[10]，$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$については断言できない[9]。しかしいづれにしても$CaO-Al_2O_3-H_2O$系鉱物は否定される。一方SiO_2/Al_2O_3が1.0（モル比）のようなシリカゲルおよびアルミナゲルの混合物を同様な条件で10日間$Ca(OH)_2$溶液と反応させた場合はCalciteをもふくんだ3.0Å線以外の粉末線は余り認められなかった。また後節で論ずるがB_3を600°Cまでの各温度で加熱処理したものでは$Ca(OH)_2$溶液との反応でいずれもXを生成し，高温処理の方がXの結晶度も高いことなども考慮すれば，この反応はアロファンによる反応と考えてよい。なおこの問題についても後節で論じる。したがってXは$CaO-SiO_2-H_2O$系鉱物でもなく，$CaO-Al_2O_3-H_2O$系鉱物でもなく，アロファンの関与する反応であるから，$CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$系鉱物と考えねばならない。なお今後記載の簡便さのためにAl_2O_3をA，SiO_2をS，Fe_2O_3をF，CaOをC，H_2OをHと略記する。

ここに生成したXなる鉱物が何であるかについて考えて見よう。Xはおそらく$C-A-S-H$系鉱物と考えられるのであるが，そのうち割合明確に研究されているのは，Hydrogarnet系統の鉱物[11]である。これらの鉱物群のうち$C_3AS_2H_2$，C_3ASH_4などはポルトランドセメントの高温水和生成物中に認められており，その等軸晶系に属するそれら鉱物のX線粉末線は知られており[11]，ここにえられたXとはその構造が異なることは確実である。Hydrogarnetのほかに$C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$のようなセメントバチルス型鉱物も知られ，そのX線粉末線はEttringiteに似ているとされる[13]。しかしXの粉末線はEttringite

のそれとは似ていない。またこの4成分鉱物には輝沸石[14]，東沸石[14]フイリップサイト等が知られているが，X鉱物の粉末線はこれら沸石類とは一致しない。

Strätling[15] はツエトリッツカオリンを焼いてえたメタカオリンと $Ca(OH)_2$ 溶液の常温での反応を研究し，CaOはメタカオリンに固定され新たな鉱物が生成することと認めた。この鉱物を C_2ASH_n すなわち Gehlenite の水和物としている。この C_2ASH_n はまた C_3A と C_3S を同時に水和させたときも一部生成することも知られている。Strätling はメタカオリンと $Ca(OH)_2$ の反応で，まずCaOの吸着が起り，ついでメタカオリン中にCaOが拡散し，最後に Topochemical 反応により CaO が配位固定されて結晶性物質を生成すると考えており C_2ASH_n の生成と同時に CSH_n および C_3AH_6 の生成をものべている。Strätling がX線粉末写真よりえた粉末線間隔より算出した網面間隔d(Å)と，本実験でえられたX，関白カオリンおよび香港カオリンの700°C焼成物を $Ca(OH)_2$ 液中で10日間反応させたもの，合成アロファン（続報でのべる）焼成物と $Ca(OH)_2$ との反応生成物のdの値を表-3に示めす。なお関白カオリンの場合は混在する石英の粉末線は除いてある。

Strätling は，4.17Åより大きいdの値を求めていないし，3.02，1.82，1.653Å線は $C_3S_2H_n$ に，2.60，1.88Å線は C_3AH_6 によるとしている。しかし C_3AH_6 の他の強い線は認められないので，2.6Åおよび1.88Å線は C_2ASH_n に帰すべきであろう。また $C_3S_2H_n$ は本実験のような反応条件では結晶度の良好なものはえがたいし，3.02Å線も Calcite によると考えられる A_{20} 等のほかはえられないので1.82Å線は C_2ASH_n によると考えてもよい。結局表-3に示したXの粉末線は，Strätling のえた C_2ASH_n に一致し，Strätlingのうることができなかった低角側の12.8Å，6.4Åの強い反射線により特徴づけられることが明らかである。また，合成アロファンよりえられた C_2ASH_n の粉末線もXと一致し，Fe_2O_3 等の混在の影響が認められないことを示めしている。一方結晶度の良好なカオリナイトである関白カオリンの700°C焼成物と $Ca(OH)_2$ 液との10日間の常温反応物のX線回折結果によれば，その粉末線はXの持つ粉末線をすべて持ち，この場合でもSträtlingの C_2ASH_n が生成したことが示される。なお関白カオリンの場合は9.80(0.60)，8.26(0.30)，7.62(0.20)，4.87(0.25)Å線が認められ，C_2ASH_n 以外のものの共存が示めされる。ハロイサイトである香港カオリンの700°C焼成物での実験では，僅かにXと思われる鉱物を生成するが，10.3Åおよび5.1Å線で代表される粉末線を持つ同定しがたい鉱物の生成を示している。

Turriziani，Schippa[16] はツエトリッツカオリンを700°Cで焼いたものを $Ca(OH)_2$ 溶液と反応させたときの生成物の熱分析曲線をえている。それによれば固定された $Ca(OH)_2$ 量には無関係に140～145°C，220°Cに吸熱ピークが認められ，270°Cにも微弱な吸熱ピークを認めている。140°Cのピークは Taylor[17] のCHS(I)により，220°Cのピークは C_2ASH_n によるとしている。また6カ月間 $Ca(OH)_2$ 溶液と反応させた場合の反応生成物について，X線回折を試みCSH(I)と同時に C_2ASH_n を認めており，その主要な粉末線が12.8Å，6.4Å，4.2Åであることも認めている。また C_2ASH_n は120°Cの温度で明らかに不安定であることも認めている。本実験によれば220°Cの吸熱ピークを認めることと，150°Cに加熱すれば分解するくらい不安定であることは，Turriziani 等の実験とも一致し，X線粉末線も完全に一致する。以上のほか C_2ASH_n の性質については $CaSO_4$ で分解され，42°C以上で C_3AH_6 を生成し[15]，$Ca(OH)_2$ 溶液中で安定であり，しかも $Ca(OH)_2$ 溶液と平衡関係を持ち[15]，恐らく Ca-Aluminate Hydrate と Ca-Silicate Hydrate との Complexdouble-Compound を生成したものであり[13]，Hydrogarnet より溶解度が高いので常温で除々にHydrogarnet

表-3　C_2ASH_n，X，焼成カオリンと $Ca(OH)_2$，合成アロファンと $Ca(OH)_2$ の反応生成物等の網面間隔　(Å)

X		C_2ASH_n		関白カオリン焼成物と $Ca(OH)_2$ との反応生成物		香港カオリン焼成物と $Ca(OH)_2$ との反応生成物		合成アロファン焼成物と $Ca(OH)_2$ との反応生成物	
d	強度	d	強度	d	強度	d	強度	d	強度
12.8	1.00	—		12.6	1.00	12.6	m	12.8	1.00
6.33	0.60	—		9.8	0.60	10.3	sst	6.37	0.46
4.20	1.00	4.17	sst	8.26	0.30	9.4～8.5	m	4.21	0.71
3.44	0.10	3.06	m	7.62	0.20	7.6	ss	3.45	0.04
2.88	0.70	2.87	st	6.32	0.42	5.13	st	2.894	0.13
2.62	0.50	2.60	mst	4.87	0.25	4.48	s	2.637	0.10
2.49	0.30	2.49	st	4.21	0.75	4.40	s	2.521	0.13
2.42	0.30	—		4.10	0.10	4.23	m	2.417	0.04
2.38	0.50	2.36	st	3.53	0.30	4.04	s	2.380	0.10
2.25	0.10	—		2.88	0.30	3.41	m	2.137	0.10
2.13	0.20	2.11	m	2.62	0.20	3.25	s	2.036	0.08
2.03	0.30	2.00	m	2.51	0.25	3.06	m	1.900	0.09
1.89	0.30	1.88	m	2.39	0.20	2.88	s	1.837	0.06
1.83	0.20	1.82	m	2.24	0.20	2.64	ss	1.804	0.03
1.66	0.30	1.653	st	2.13	0.25	2.56	ss	1.667	0.05
1.64	0.20	1.59	s	2.04	0.10	2.47	ss	1.561	0.02
1.55	0.10	1.537	s	1.895	0.25	2.29	ss	1.546	0.03
1.44	0.25	1.429	m	—	—	—		1.443	0.03
—	—	1.354	s	—	—	—		—	—

に変化する[19]などと記述されている。

以上論じたようにアロファン粘土と $Ca(OH)_2$ 溶液との常温反応で生成する結晶性鉱物は Strätling が始めてツェトリッツカオリンよりのメタカオリンと $Ca(OH)_2$ の反応によりえた C_2ASH_n と一致し Turriziani 等の研究によりさらに明らかにされた諸性質にも合致するので，X は Hydrated Gehlenite (C_2ASH_n) と同定することができる。しかしメタカオリンの場合に共存するとされる C_3AH_n，CSH(I) はアロファン粘土の場合は生成しないと推定される。Hydrated Gehlenite が果たして C_2ASH_n の組成を持つか否かはその結晶構造と共に現在明らかにされていないのであり，この点は今後の研究にまつ所である。なおカオリン鉱物以外の粘土鉱物の加熱分解物では，$Ca(OH)_2$ 溶液との反応で C_2ASH_n は生成しないのであり，この問題については後でのべる。

〔4〕 要　約

土壌粘土のうち関東ローム中に存在するアロファンと $Ca(OH)_2$ 溶液の反応により，新たに結晶性鉱物が生成することを認めた。鹿沼土より分離したアロファンはその無水物に対し 30～50% の CaO を常温で $Ca(OH)_2$ 溶液中より1カ月くらいのうちに固定し，ここに生成した鉱物は Strätling がツェトリッツカオリンと $Ca(OH)_2$ 溶液の反応によりえた C_2ASH_n と同じものであることを認めた。この鉱物は Strätling の記載しない強い 12.8Å 線および 6.4Å 線で特徴づけられ Turriziani 等の報告とも一致する。C_2ASH_n は DTA によれば 220°C に吸熱ピークを持ち，150°C で 30分以上加熱すれば分解し，分解生成物は X 線で回折線を示めさない。900°C に加熱すれば Gehlenite (C_2AS) を生成し，DTA 曲線が 900°C 以上でアロファンと同様に発熱ピークを持つのは，この Gehlenite の生成によると考えられる。水で洗えば $Ca(OH)_2$ が溶出して粉末線は弱くなり，空中の CO_2 には安定であり，加熱分解したものは浸水しても結晶性とはならない。膨潤性格子を持たない。層状構造を示めす。

C_2ASH_n はポゾラン反応，高炉セメントの水和反応に際して生成するとされ，アロファン粘土と $Ca(OH)_2$ との反応でも生成するので，関東ローム等の化学安定処理工法の基礎ともなり，重要な反応であり今後の研究が必要であることを確認した。またアロファンより C_2ASH_n 生成はアロファンの構造に関する知見を与えるものであると共に，アロファンの検出反応として利用できるか否かを明らかにする必要が認められる。

〔II〕 アロファン粘土の処理条件が Hydrated Gehlenite (C_2ASH_n) の生成におよぼす影響

〔I〕においてアロファン粘土と $Ca(OH)_2$ 溶液との常温反応により C_2ASH_n が生成することをのべた。しかしこの反応が混在する Fe_2O_3 の影響をうけるか，また，アロファンの構造そのものに関係あるか等を知る必要がある。ここではアロファンの加熱処理をふくめて，種々の化学処理を加えた場合に，C_2ASH_n の生成がどのようになるのかを知るために実験を試みた。

〔1〕 試料および実験方法

試料としては〔I〕でのべた鹿沼土より分離した 1μ 以下の Ca 粘土 (B_0 試料) を用い，加熱温度の影響について実験し，各種の化学処理の影響を調べるためには同様の方法で分離した Ca 粘土を 100°C で乾燥したもの (E_0) を用いた。なお E_0 の分析値は次のようであり，X 線分析および DTA 曲線からはアロファンと認められる。

SiO_2：38.8%，Al_2O_3：43.3%，Fe_2O_3：5.2%

試料粘土の加熱処理では，管状電気炉中で 100°C，125°C，150°C，175°C，200°C，250°C，300°C，350°C 400°C，500°C および 600°C でそれぞれ1時間加熱し，加熱減量を求めた。$Ca(OH)_2$ 溶液との反応条件は次のようである。CO_2 を含有しない蒸溜水に純粋な CaO を懸濁させて，20°C で $Ca(OH)_2$ の飽和溶液を造り，その 1 l に加熱試料をそれぞれ 1.0g を加えて密封し，20°C 恒温室に10日間放置する。反応後手早く沪過し少量の蒸溜水で洗って風乾させ，風乾試料は X 線スペクトロメーター (Geigerflex) で銅を対陰極とし (Ni でフィルター) 粉末線を求める。また既報と同じ装置と条件で DTA 曲線も求めた。

化学処理方法としては一般土壌化学で用いられる遊離鉄の除去方法 (Truog法)，Tamm の試薬処理，Na_2CO_3 溶液処理および余り用いられていない EDTA 溶液処理を採用した。Truog の脱鉄操作を次にのべる。試料は水で分散させて，NH_4OH で微アルカリ性とし，H_2S を通じて粘土中の遊離酸化鉄を FeS とし，ついで HCl で FeS を完全に溶解させて，H_2S を追い出した後沪過し，脱鉄試料は C_2H_5OH および CS_2 で洗い遊離した S を除く。

Tamm の試薬処理方法を簡単にのべる。$(NH_4)_2C_2O_4$ 49.1g と $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ 3.15g を蒸溜水に溶かす。この溶液の PH は 4.3 である。この溶液 500cc に試料 1.0g を加え常温で1時間撹拌して沪過する。

Na_2CO_3 溶液処理法では，2% の Na_2CO_3 液 200cc 中に 1.0g の試料を加えて 70°C で10時間処理して沪過洗滌する。EDTA 溶液処理では，EDTA (0.217mol/l) 1 l に 1.0g の試料粘土を加え48時間浸漬処理する。EDTA 溶液の PH は予かじめ 4.2，7.3，9.9，としておく。

上記の化学処理を加えた試料粘土は SiO_2，Al_2O_3，Fe_2O_3 について化学分析を実施し，20°C の飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液中に14日間浸漬して後分離し，風乾させて X 線回折を試みる。また反応前後の溶液の滴定により CaO を求め，処理前の乾燥試料粘土 1g 当りの固定 CaO 量をも求めた。

〔2〕 実験結果とその検討

(1) 加熱処理の影響について

アロファン粘土を加熱処理したものの $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物は，X線回折の結果ではいづれも〔I〕で認めたように C_2ASH_n を含むことを示す。図-4 に示め

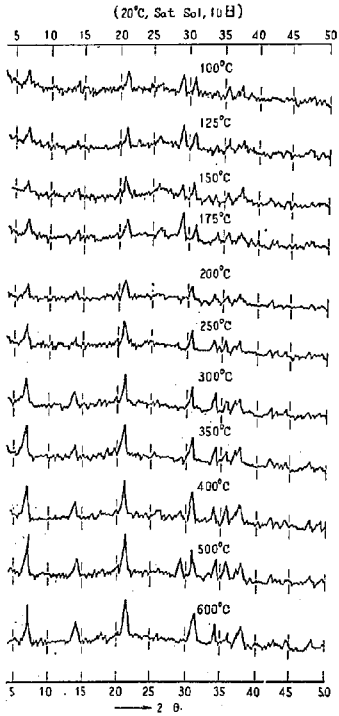


図-4　加熱処理したアロファン粘土と $Ca(OH)_2$ の反応生成物

す実験結果より試料アロファン粘土は 600°C まで加熱しても $Ca(OH)_2$ に対しては何れも同じ粉末線を与え，高温に加熱したもの程粉末線は明瞭となり，2.42Å 線と 2.38Å 線はよく分離し，さらに 1.66Å 線と 1.64Å 線も分離する傾向を示す。このことはアロファンに結合する水が除去されるほど，アロファンの構造中に規則性が与えられ，C_2ASH_n の結晶度がよくなることを意味すると考えられる。また C_2ASH_n は水洗いするほど (001)，(002)，(003) 面よりの反射と推定される粉末線が明瞭となる反面それ以外の反射が弱くなることは前節で述べた所である。しかしこの加熱試料よりの C_2ASH_n はこの (00l) 面よりほかの反射も強く，結晶度は高かいと考えられる。なおこの実験によれば C_2ASH_n 以外の粉末線は 3.0Å を除いてほとんど見られない。3.0Å 線が Calcite によることが明瞭の場合もあり，また 3.0Å 線を全然示

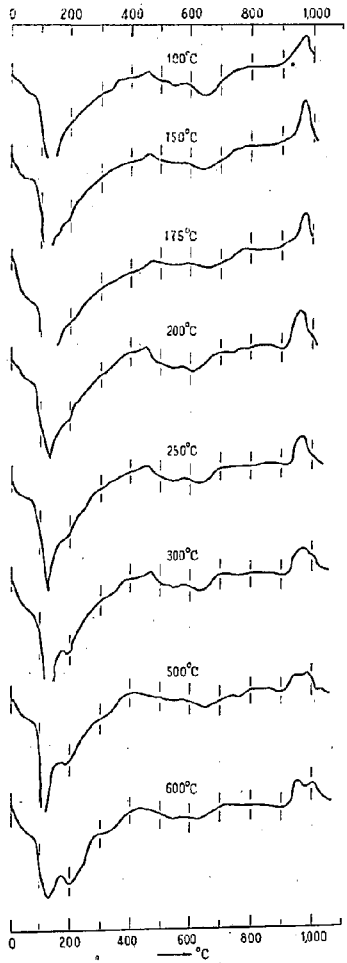


図-5　加熱処理したアロファン粘土と $Ca(OH)_2$ の反応生成物の DTA 曲線

めさない場合もあり，そのピークは比較的鋭いので，CSH（I）によるものとは考えがたい。

DTA 曲線は 図-5 に示めすように高温処理を加えたほど 950°C の発熱ピークが明瞭となり，一方 200°C の吸熱ピークも明瞭となる。しかし 500～700°C の浅い吸熱ピークにはほとんど変化が見られない。

以上のことはアロファンが加熱されるとカオリナイトからのメタカオリンに近づくことを示めすものと考えられるのであるが，メタカオリンよりは C_2ASH_n のほかに C_3AH_6 とか CSH（I）等が生成するとされる点はやや異なっている。脱水アロファンがメタカオリンに似た行動を示すことは，アロファン中の水の状態についての重要

な実験事実を提示するものである。なお同様に水の状態についての実験データーである加熱試料の酸液に対する溶解熱については別に報告する。

(2) 化学的処理の影響について

Truog 法で脱鉄した粘土には Fe_2O_3 が 3.2%残り，一部の Fe_2O_3 は遊離状態で存在する。この脱鉄操作によっても $Ca(OH)_2$ との反応では依然として C_2ASH_n が生成することが図-6 でも認められる。このことはアロファンの構造は脱鉄操作で変化をうけないことを示し，また遊離の Fe_2O_3 の存在は，C_2ASH_n の生成とは関係のないことを示す。

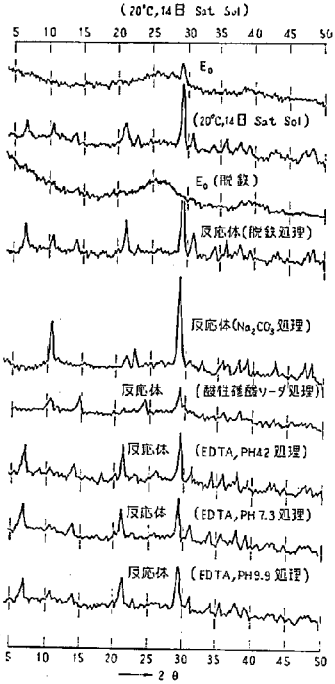


図-6　種々の処理を加えた鹿沼土 (E_0) と $Ca(OH)_2$ 溶液の反応生成物

Tamm 試薬処理を施したものは，SiO_2：37.6%，Al_2O_3：31.8%，Fe_2O_3：2.8%であり，Al_2O_3 および Fe_2O_3 の溶出が著しい。処理粘土は $Ca(OH)_2$ 溶液との反応で C_2ASH_n を生成せず C_4AH_{13} の少量を認めるほか，6Å 線および 3.7Å 線を示す。なお CaO の固定量は試料粘土 1 g について 0.25g である。C_4AH_{13} の生成はこの処理により Al_2O_3 の一部が $Ca(OH)_2$ に可溶性となったことを意味するが，6 Å 線等については明らかではなく，おそらくシュ酸塩によるものであろう。アロファンの構造はこの処理で変化し CaO の固定される量は余り変らないが，もはや C_2ASH_n は生成しえないものと推定できる。

Na_2CO_3 溶液で処理したものは SiO_2：34.6%，Al_2O_3：39.9%，Fe_2O_3：3.4%で，$Ca(OH)_2$ 溶液との反応で試料粘土に対し，30%の CaO が固定される。しかし C_2ASH_n の生成は認められない。この処理でもアロファンの構造が変化し，もはや C_2ASH_n は生成しえないものと推定できる。

EDTA 溶液で処理した場合，PH4.2では SiO_2：37.0% Al_2O_3：42.8%，Fe_2O_3：1.3%で，Fe_2O_3 の溶出率が大きく，PH7.3では SiO_2：36.5%，Al_2O_3：34.0%，Fe_2O_3：4.9%で Al_2O_3 の溶出率が割合に大きく，PH9.9では SiO_2：38.3%，Al_2O_3：42.9%，Fe_2O_3：5.0%である。$Ca(OH)_2$ 溶液との反応で試料粘土に対する CaO の固定率は，それぞれ25%，26%，27%である。これらの処理粘土と $Ca(OH)_2$ 溶液との反応では，何れも一部の C_4AH_{13} をともなうが C_2ASH_n の生成は認められる。アロファンの構造は EDTA 溶液での処理で Al_2O_3 および Fe_2O_3 が，一部溶出されても変化はないものと考えられる。なおX線回折図に見られる 8.3Å，5.0Å，4.4Å 線等は EDTA に関係する線と考えられ DTA 曲線でも400°C に有機物によると推定される発熱ピークを明瞭に示す。

〔3〕要　約

アロファン粘土を 600°C まで各温度で加熱処理して，常温で $Ca(OH)_2$ 溶液と反応させれば，C_2ASH_n を生成する。加熱温度が高い方が生成する C_2ASH_n の結晶度が高く，C_2ASH_n 以外の粉末線は見られない。アロファン粘土はカオリナイトよりのメタカオリンと C_2ASH_n の生成に関しては同じように行動する。

アロファン粘土は Truog の脱鉄操作，EDTA 溶液処理によっても C_2ASH_n 生成機構が保存されるが，Tamm の試薬処理および 2%の Na_2CO_3 溶液での 70°C 処理によって C_2ASH_n 生成機構が破壊される。また遊離の Fe_2O_3 の存在は C_2ASH_n の生成には関係がない。

〔III〕産地を異にするアロファン粘土，および，粘土鉱物焼成物との反応生成物

アロファン粘土が $Ca(OH)_2$ 溶液と常温で反応すれば CaO が固定され，結晶性の C_2ASH_n が生成し，アロファン粘土の 600°C までの加熱ではこの性質は失われず，このほか 2,3 の化学的処理によってこの性質に変化が見られること等について〔II〕にのべた。ここでは $Ca(OH)_2$ 溶液との反応で C_2ASH_n を生成する反応が，アロファン粘土一般に認められるか否かについて検討し，各種粘土鉱物の焼成物にもこの反応があるかを明らかにするための実験を試みた。

〔1〕 試料と実験方法

(1) 試料について

アロファン粘土の試料としてはすでに〔Ⅰ〕および〔Ⅱ〕の実験に用いた鹿沼土より分離した A_0, B_0, E_0, のほかに，アロファン質土壌とされている飯島みそ土（長野県土木部より送付,）福バン土（北上市東洋化成より送付），浮石風化物[20]（熊本県阿蘇郡長陽村産，和田光史氏より与えられる），いもご[21]（熊本県球磨郡上村産，和田光史氏より与えられる），関東ローム表層土（東京都田端台地で採取），鹿沼土（No.-3）よりアロファン粘土 D_0 を分離した。なお火山灰風化物とされており，二和土等の原料として徳川時代より使用された天川粘土（長崎市産，土木研究所に保存されている）も参考試料とした。粘土の分離方法は前節と同様である。

粘土鉱物として〔Ⅰ〕はで関白カオリン，香港カオリンについて実験しているが，ここでは須藤俊男氏より与えられた八幡白木節，ディッカイト，パイロフィライト，タルクおよび今まで実験に用いて来た村上粘土，豊順ベントナイト（300メッシュ）を使用した。これらの粘土鉱物は石英等の副成分をふくむが，本実験には原土のまま使用した。

(2) 実験方法

アロファン粘土はX線，DTA 曲線，赤外線スペクトルおよび化学分析で一応の実験を試み，ついでアロファン粘土については前節までと同様の方法で $Ca(OH)_2$ と反応させる。反応時間は10日および60日とし，反応温度は 20°C のほかに 80°C および 10°C を選んでいる。また庶糖の5%溶液に $Ca(OH_2)$ を溶解させ，CaO：1.53% としたもので 20°C，14 日間反応させることも試みた。反応後液中の $Ca(OH)_2$ を滴定で求め，試料粘土に対する CaO の固定量も求める。$Ca(OH)_2$ との反応体はX線スペクトロメーターで回折図を求め，また DTA 曲線も求めた。

粘土鉱物は八草カオリンは 600°C で，ディッカイトは 800°C でパイロフィライトは 600°C で，タルクは 900°C で，ベントナイトは 800°C で，村上粘土は 800°C で，そ

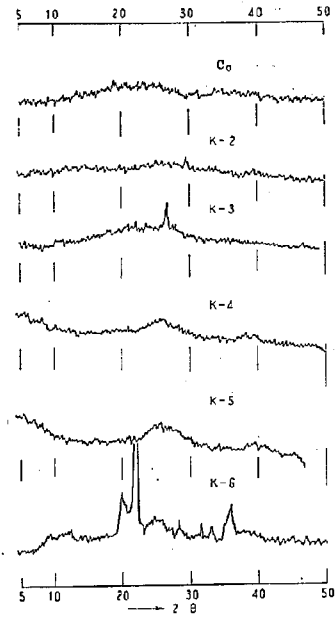


図-7　アロファン粘土のX線回折図

表-4　アロファン粘土の化学分析値

試料番号	分離した原土名	化学分析値（%）							SiO_2/Al_2O_3
		H_2O^-	H_2O^+	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	
A_0	鹿沼土 No.-1	18.92	16.18	29.00	29.18	4.32	1.81	—	1.69
B_0	鹿沼土 No.-2	17.68	15.58	28.13	33.20	4.03	2.04	0.10	1.14
C_0	関東ローム(東京都田端台地)	30.29		26.29	31.07	9.62	2.49	—	1.44
D_0	鹿沼土 No.-3	12.4	26.0	26.1	29.0	3.7	2.3	—	1.53
E_0	鹿沼土 No.-4	—	—	38.8	43.3	5.2	—	—	1.52
K-2	浮石風化物	—	14.87	30.97	35.37	6.92	0.93	—	1.92
K-3	いもご	—	13.34	42.39	24.72	6.44	1.19	—	2.92
K-4	飯島みそ土	—	16.06	27.42	34.72	5.02	0.71	—	1.34
K-5	福バン土	—	16.14	27.24	34.46	5.40	0.57	—	1.34
K-6	天川粘土	—	10.40	52.76	26.89	7.80	0.17	—	3.34

K-6 はハロイサイト鉱物を主とするがアロファンも含有されると考えられる。

れぞれ1時間電気炉中で焼く。$Ca(OH)_2$ との反応条件は 20°C で1カ月とする。反応体についてX線回折図，DTA 曲線を求める。

〔2〕 実験結果とその検討

(1) アロファン粘土の同定

各種のアロファン質土壌より分離したアロファン粘土の化学分析，X線回折図，DTA 曲線および赤外線スペクトルを表-4，図-7，8，9 に示めす。

分析結果からは鹿沼土より分離した粘土はいづれも，H_2O^+ および H_2O^- が大であり，SiO_2/Al_2O_3 は2以下であり，アロファン粘土の組成に近かいし，鹿沼土はロット毎にその組成は異なっているが，アロファンとしての大体の組成範囲内にあると考えられる。関東ロームよりの C_0 も大体鹿沼土よりの粘土に近い組成を持つ。K-4および K-5 も同様である。K-2 および K-3 は SiO_2/Al_2O_3 が大きいが $(H_2O)^+$，$(H_2O)^-$，も大きく，アロファンを含むとされている[20),21)]。K-6は分析結果からはアロファンの存否は不明である。

X線回折図は K-2 はほとんど回折線を示さないし，K-3 は僅かな石英の回折線以外は示さない。K-4 および K-5 は何れも 2θ が 25° の近くにハローを示すのみであり，明瞭な回折線は示さない。K-6 は 7 Åから10Åにおよぶ拡散した弱い回折線を示し，ハロイサイト鉱物の混合層鉱物を推定させるほか，クリストバライトの存

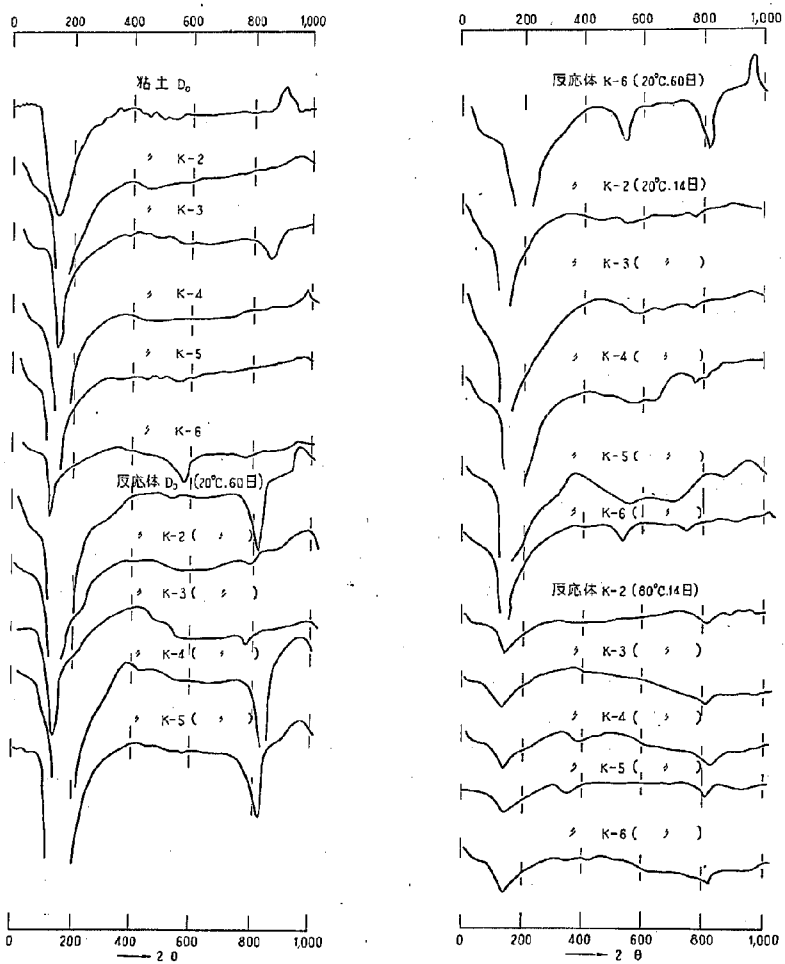


図-8　各種アロファン粘土と $Ca(OH)_2$ 溶液との反応体の DTA 曲線

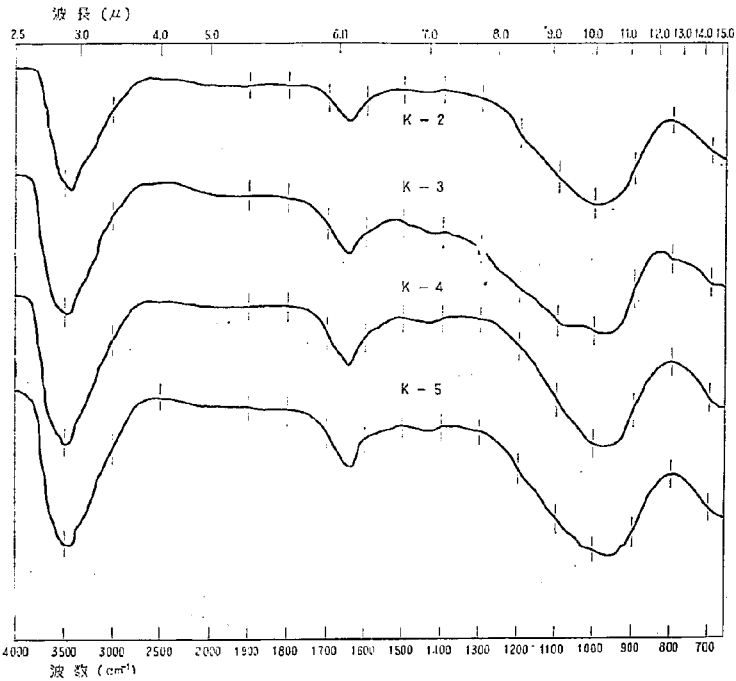


図-9 赤外線吸収スペクトル

在が明瞭である。C_0 および E_0 も明瞭な回折線を示さない。A_0 および B_0 についてはすでにのべた。

DTA曲線ではいづれもアロファンのDTA曲線に似ているが，一般に高温部の発熱ピークは小さい。おそらく用いた試料が 0.10g（K-3 は 0.05g）でやや少ないことと関係があると思われる。K-3 はまた 850°C に吸熱ピークを示めすがその原因については明らかでない。K-6 は加水ハロイサイトを示めすが，ゲルの脱水によると推定される吸熱ピークを持つ。鹿沼土よりの粘土はアロファンを示す。

赤外線吸収スペクトル図（図-9）では B_0 K-2，K-3，K-4，K-5 は何れも 3500cm^{-1} の大きい吸収，1630cm^{-1} の比較的大きい吸収，850～1200cm^{-1} にわたる巾の広い大きい吸収を示し，1400cm^{-1} に僅かな吸収の見られるものもあるが，Fieldes[4] ものべているようなアロファンAの吸収を示している。

X線回折，DTA 曲線，化学分析，赤外線吸収スペクトル等の実験結果から鹿沼土よりの粘土，関東ロームよりの粘土 C_0，K-4，K-5 等はいずれもアロファンと考えられ，K-2 および K-3 もアロファンを含むと考えてよく，K-6 は一部のアロファンを含むと推定される。

(2) アロファン粘土と $Ca(OH)_2$ との反応生成物

アロファン粘土を $Ca(OH)_2$ 溶液と10日間および60日間反応させた場合の CaO の固定率（CaOg/100g粘土）は次のようである。

	E_0	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6
10日	25.9	24.1	20.4	29.6	29.0	12.5
60日	29.4	33.0	28.6	33.9	32.0	28.3

また60日養生の場合の CaO/Al_2O_3（モル比）は K-2，3，4，5，6 についてそれぞれ 2.2，2.1，1.8，1.7，1.9 である。これらの実験結果からアロファン粘土は相当量の CaO を吸着し，CaO/Al_2O_3 のモル比は大体2前後である。

X線回折（図-10）では C_0（この場合は30日養生）は C_2ASH_n のほか強い 7.76Å 線（[IV] で C_3AH_6 であることを論じる），8.5Å 線（[IV] で C_4AH_{13} であることを論じる）のほか 9.6Å 線を示す。K-2 は10日目では C_2ASH_n を示し，60日で明瞭であるが，一部の C_3AH_6 および C_4AH_{13} の存在も示す。K-3 は10日で C_3AH_6 および C_4AH_{13} を示し，C_2ASH_n はほとんど見られないが，60日で C_2ASH_n の生成が著るしい。K-4 は10日で C_2ASH_n を示すが60日で顕著である。K-5 は K-4 と同じであるが K-4 より C_2ASH_n の生成はさらに顕著である。K-6は10日および60日で C_2ASH_n を示すがそれ程強い回折線

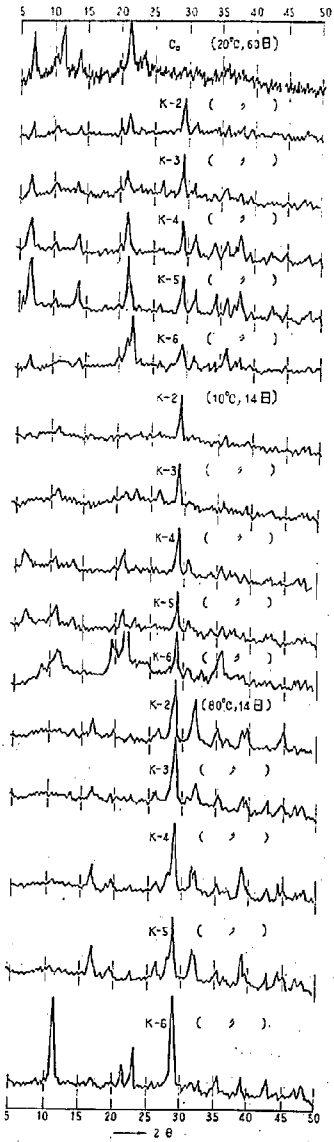


図-10　各種アロファン粘土と Ca(OH)₂溶液との反応生成物のX線回折図

を与えない。

10°C で 14 日養生した場合は K-4, K-5 は C_2ASH_n の生成を示すが，K-2, 3, 6 は C_2ASH_n を示さない。なお CaO の固定率（%）はそれぞれ 22.9, 14.7, 23.9, 28.4, 7.4 である。また 80°C で 14 日養生した場合は K-2, K-3, K-4, K-5, は何れも C_3AH_6（〔IV〕で論じる）を生成し，K-4 および K-5 は 2.80Å線と 2.77Å線が分離し結晶度が良い。K-6 の場合は C_3AH_6 が生成せず C_3AH_5 が生成する。

なお $Ca(OH)_2$ 溶液は溶解度が低いので CaO の懸濁液を用いた場合は，何れの試料でも結晶性物質は生成しない。しかし CaO の固定率（%）は K-2, 3, 4, 5, 6 でそれぞれ 18.0, 22.9, 17.9, 21.2, 13.6 である。

DTA 曲線では各試料とも 200°C 付近の吸熱ピークを持つことが明らかであり，900°C 以上の発熱ピークは，C_2ASH_n より C_2AS の生成にともなうものと考えられ，C_2ASH_n の存在を示すものと考える。$Ca(OH)_2$ と反応させないものの DTA 曲線と比較するときには，反応後のものの方が 0.20g の試料を用いている点を考慮せねばならない。DTA 曲線では K-4, K-5 等のように一部の混入した Calcite を示すものもある。10°C で 14 日処理したものの DTA 試験では試料は 0.08g 程度を用いており，C_2ASH_n の生成を示めすと考えられる。また 80°C で14日処理した場合の DTA 曲線は，用いた試料が0.06g 程度であり，明瞭なピークを示さない。K-2, K-3 は，C_3AH_6 による吸熱ピークを示さないが，K-4 および K-5 はやや高温側にかたよるが C_3AH_6 の吸熱ピークを示し，K-6 は C_3AH_6 を示さない。

以上のべた実験結果からアロファン粘土は常温での $Ca(OH)_2$ 溶液との反応で相当量の CaO を固定し，結晶性物質である Hydrated Gehlenite を生成することを認めた。この性質はアロファン粘土について共通する性質であることをのべることができる。またこの反応は10°C でも起り，80°C では Hydrated Gehlenite が生成せずに，むしろ C_3AH_6 等の Hydrogarnet が生成する。アロファン粘土でも C_2ASH_n が生成する速さ，またはその量ないしは結晶度にもそれぞれ相当の相異のあることが，この実験結果からも何がえるのである。このことはアロファン粘土でもその構造中に見られる規則性に差があり，C_2ASH_n の生成速度等が異なることを示すと考えるべきであろう。また C_2ASH_n のほかに C_4AH_{13} または C_3AH_6 等がしばしば見られるが，これらがこの反応の中間生成物であるか，またはアロファン粘土中に存在する Al_2O_3 化合物等の副成分によるか等は，ここでは確言できない。これらの問題については〔IV〕で論ずる。ここではアロファンと呼ばれる鉱物は $Ca(OH)_2$ 溶液との反応で，C_2ASH_n を生成し，この反応より考えてアロファン粘土でもそれらの間に現在までの方法では認知することができなかった構造上の差異のあることに論及した。

なお $Ca(OH)_2$ の濃度を高めるために $Ca(OH)_2$ の懸濁溶液を用いたときは，CaO の固定は見られるが，C_2ASH_n の生成が見られないことは今後の研究を要する点と思う。

(3) 粘土鉱物焼成物と $Ca(OH)_2$ 溶液との反応

C_2ASH_n とされる鉱物は始め Strätling[15] により，結晶度の著るしく良好なカオリナイトであるツェトリッツカオリンの焼成物と $Ca(OH)_2$ 溶液の反応で見出されたことはすでにのべた。またアロファン粘土の焼成物でも同様に C_2ASH_n を生成することも〔II〕でのべた。ここでは一般の粘土鉱物の構造が破壊されるまで加熱した場合でも同様な反応が見られるか否かを図-11 に示すX線回折図で検討する。

カオリナイトでも結晶度の良好な関白カオリンでは，C_2ASH_n を生成することをのべたので，結晶度のより低い八草カオリンについて実験した。その結果によれば，600°C に加熱した八草カオリンは，$Ca(OH)_2$ 溶液との反応で C_2ASH_n を生成し，一部の C_3AH_6 と C_4AH_{13} をもともなう。ディツカイトも 800°C に焼成したものは同様に C_2ASH_n を確実に生成する。この際 C_3AH_6 または C_4AH_{13} 等はほとんどともなわない。カオリン鉱物でも結晶度の良好なハロイサイトである香港カオリンの場合は，すでにのべたように C_2ASH_n は一部しか生成せずに，10.3Å 線および 5.1Å 線で代表される同定しがたい反応生成物を示す。

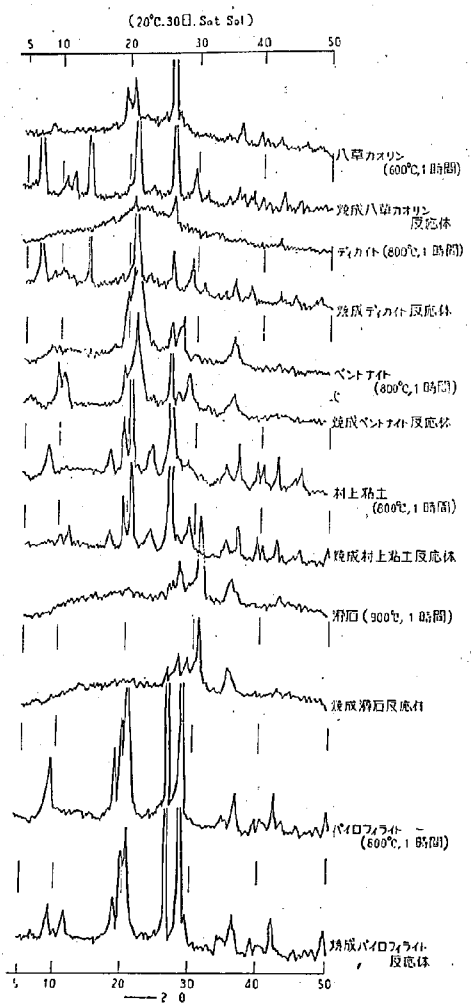


図-11　各種粘土鉱物焼成物と $Ca(OH_2)$ との反応生成物

セリサイトを主とする村上粘土を 800°C に加熱すると，10°Å 線は弱くなるが残存し，この試料と $Ca(OH)_2$ との反応では C_2ASH_n は全然生成せず，僅かに C_3AH_6 および C_4AH_{13} が見られるのみである。このさい 5.0Å 線等はともなうが 10Å 線が殆んど見られなく，その理由は不明である。

モンモリロナイトを主とするベントナイト試料はX線回折の結果では副成分としてクリストバライト石英および輝沸石ないし束沸石と推定される沸石類をふくむ。800°C に加熱した場合はモンモリロナイトの (001) 反射は消えている。この焼成物を $Ca(OH)_2$ と反応させると，モンモリロナイトの (001) 反射である 15.2Å 線が弱いが見られ，沸石類による 9.21Å 線が見られるほか C_4AH_{13} も見られるが，C_2ASH_n は全然見られない。加熱処理体の水和による 15.2Å 線の再生は考えうるが，9.21Å 線の再生は考えがたい。9.21Å 線が加熱処理したモンモリロナイトと $Ca(OH)_2$ との反応生成物か否かはここでは断言できない。しかし，いずれにしても C_2ASH_n が生成しない点はたしかである。

タルクとして用いた試料はX線回折の結果では，副成分として恐らくクロライトをふくみ，セリサイトの少量も推定される。900°C に加熱した場合はタルクおよびクロライトの底面反射は消え，2.90Å 線 3.20Å 線および 2.53Å 線が残る。この加熱処理試料は $Ca(OH)_2$ 溶液と反応させれば，上記の残存粉末線以外のものは 3.05Å のほか見られない。タルクは加熱処理によっては $Ca(OH)_2$ 溶液とは反応しないことを示し，また共存するクロライトも何等この反応に関与しないことも示される。

パイロフィライト試料は相当量の石英をふくみ，著るしく弱いが 12.8Å 線と 7.2Å 線を持つ。600°C に加熱すれば，(001) 反射は相当弱くなるが(002)，(003) 等には変化はなく，12.8Å 線や 7.2Å 線は消える。加熱試料を $Ca(OH)_2$ 溶液と反応させても，パイロフィライトの粉末線は (001) 反射が弱くなるほか変化をうけない。C_3AH_6 の生成が見られ，12.8Å 線も見られるが C_2ASH_n によるのか否かは断定で

きない。パイロフィライトの構造破壊のためには 600°C は低すぎるのできらに今後の実験により確かめたい。

以上のべたように粘土鉱物を加熱処理してその構造を破壊させたものを，$Ca(OH)_2$ 溶液と反応させた場合は，カオリナイトまたはデイッカイトは C_2ASH_n を生成し，ハロイサイトでは C_2ASH_n も一部生成するがほかに同定しがたい主要反応生成物を認め，セリサイト，タルク，モンモリロナイト，クロライトでは今後の研究にまつ点もあるが少くも C_2ASH_n は生成しない。結局 C_2ASH_n の生成はカオリナイトの構造と密接な関係のあることが認められる。一方アロファンは加熱処理の有無に関せず，C_2ASH_n を生成するのであり，その 600°C までの加熱処理によってはカオリナイトからのメタカオリンに近い構造に到達すると考えることができる。アロファンに付着する水の多少に関せず，アロファンがメタカオリンと同じ行動を取ることは，アロファンの構造について一つの目標を与えるものと云える。また関白カオリンと香港カオリンよりのメタカオリンが，$Ca(OH)_2$ 溶液に対し別の行動を取ることも今後の研究を要する点である。

(4) カオリン鉱物加熱処理体と $Ca(OH)_2$ との反応生成物の電子顕微鏡写真について

関白カオリン，香港カオリン，八草カオリン，デイツカイトの焼成物と常温での $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物の電顕写真-2 に示めす。

a，b，c は関白カオリンの場合を示し，カオリンの本来の形を持つが，何れも伸長状となり何枚かのうすい結晶が方向を変えて重なっている状況が見られる。

d，e，f は香港カオリンの場合で，ハロイサイトの棒状または管状が残るが，それらの側面から微小な突起が成長し，各管状体を連結してこれらをからみ合せている。また管は長軸に平行な線状体に分離される例も見られる。

g，h，i は八草カオリンの場合であり，結晶度の低いカオリンは伸長状結晶に成長しており，不規則の三角形または四角形をなすうすい結晶も見られる。不規則な四角形晶を電子回折すると，2.88Å(s)，2.47Å(m)，1.85Å(w)，1.64Å(m)，1.42Å(w) を与える。

これらの結晶が何であるかは現在明確にはしてないが，X線回折の結晶からは香港カオリンの場合を除いて C_2ASH_n と考えるのが妥当であろう。〔IV〕でのべる C_4AH_{13} および C_3AH_6 とは (00l) 線を除いて区別しがたい回折線を与えるので，C_2ASH_n はこれら鉱物と似た構造であることは推定しうるのであるが，今後の研究にまたねば確実のことは解らないのであろう。

〔3〕 要　　約

アロファン土壌とされる各種の土より土壌コロイドを分離し，それらがアロファン粘土であることを確かめた。これらのアロファン粘土はいずれも $Ca(OH)_2$ 溶液と常温で反応させれば，CaO を固定し，結晶鉱物化し，この鉱物は Hydrated Gehlenite (C_2ASH_n) であることを明らかにした。C_2ASH_n 生成反応はアロファンの構造に起因するものであり，アロファンに共通するものであることをのべた。しかし一方この反応の速さ，C_2ASH_n の結晶度等は試料とするアロファン別に相当の差異があることも明らかであり，アロファンの構造にいくつかの段階のあることをのべた。

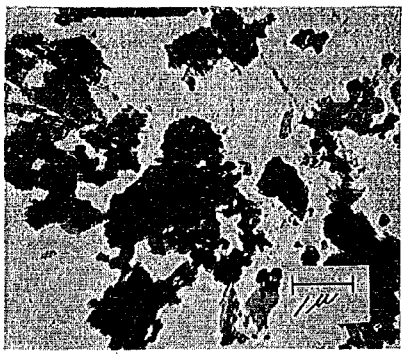
粘土鉱物を加熱処理してその構造を破壊したものと，$Ca(OH)_2$ 溶液との反応ではカオリン鉱物のみが結晶性鉱物を容易に生成することを認めた。ハロイサイトのみは C_2ASH_n 以外の鉱物(10.3Å線，5.1Å線で代表される)を生成するがカオリナイト，ディッカイトは C_2ASH_n を生成する。したがってアロファンの構造はカオリナイトからのメタカオリンに近似したものであると推定した。またカオリナイトからのメタカオリンとの反応ではカオリナイトの形態が保存されつつ C_2ASH_n が生成すると推定されることをのべた。

なお，本報の一部はセメント技術年報XIII(1959)，第3回粘土科学討論会報告集 (1959) に掲載されている。

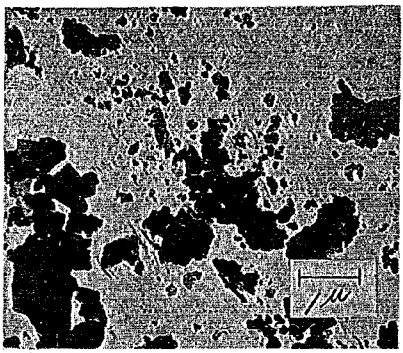
文　　献

1) 土屋滋雄，倉林三郎，地質雑 64，605，1958
2) M. Gradwell etal. New Zealand J. Sci. Tech. Sec. B 36 No.2, 108, 1954
3) A. S. T. M. Specification. C. 114-53
4) M. Fieldes. New Zealand J. Sci. Tech. Sec. B. 37, 336, 1955
5) W. L. de Keyser. Bull. Soc. chim. Belg. 63, 40, 1954
6) C. Palache, H. Berman, C. Frordel. Danas' The System of Mineralogy
7) H. F. W. Taylor. Crystallographic Data for the Calcium. Silicates, 1954
8) L. S. Wells. W. F. Clarke, H. F. Mc Murdie J. Res. NBS. 30, 367, 1943
9) G. L. Kalousek et al. J. Am. Conc. Jnst. Proc. 45, 693, 1949
10) 有泉昌． 土木研報．94号，193，1955
11) E. F. Flint, H. F. Mc Murdie, L. S. Wells. J. Res. NBS. 26, 13, 1941
12) A. Pobst. Am. Mineralogist, 22, 861, 1937
13) E. P. Flint, L. S. Wells. J. Res NBS. 33,471,1944
14) 小泉光恵，桐山良一，鉱物学雑．1，334，1954
15) W, Strätling. Zement. 29, 475, 1940
16) R. Zurriziani, G, Schippa. Ricerca Sci 24, 366, 1954
17) H. F. W. Taylor. J. Chem. Soc. 163, 1953
18) R. Zurriziani, G. Schippa. Ricerca Sci 24, 2645, 1954
19) E. P. Flint, L. S. Wells. J. Res. NBS. 27,171,1941
20) 青峰重範，和田光史，東俊男， 第三回粘土科学討論会 (1959)
21) 青峰重範，吉永長則， 第三回粘土科学討論会 (1959)

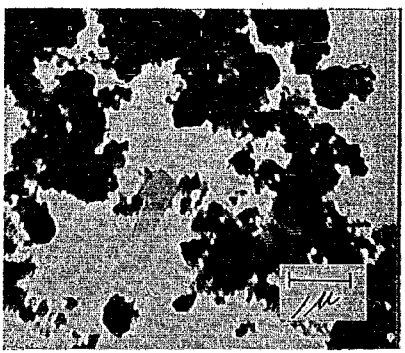
1 - a



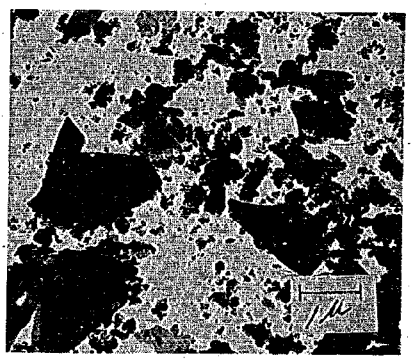
1 - d



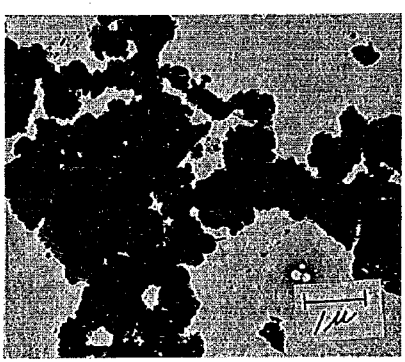
1 - b



1 - e



1 - c



1 - f

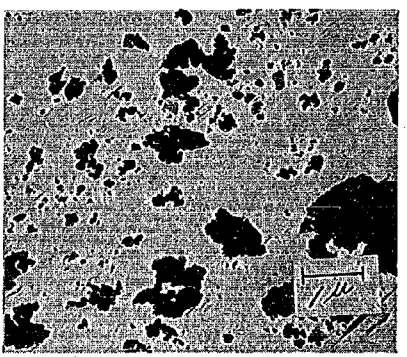
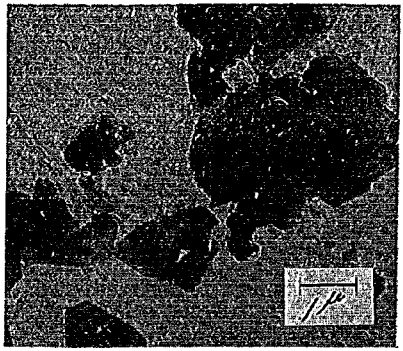
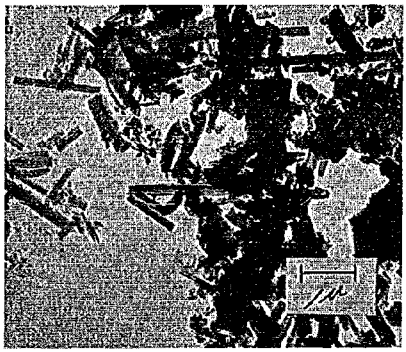


写真-1　アロファンと $Ca(OH)_2$ との反応生成物の電子顕微鏡写真

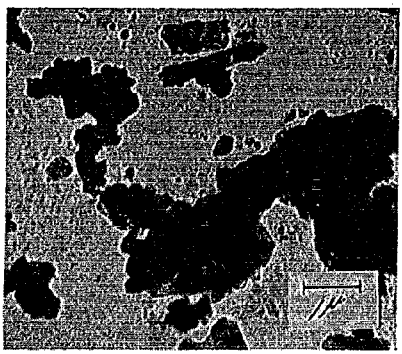
2-a　(関白カオリン)



2-d　(香港カオリン)

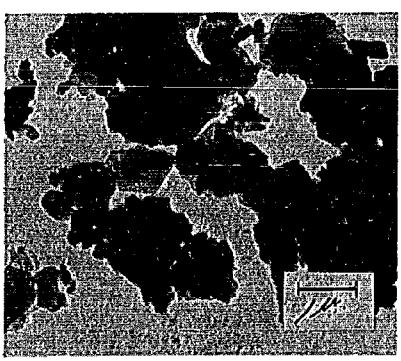


2-b　(関白カオリン)



2-e　(香港カオリン)

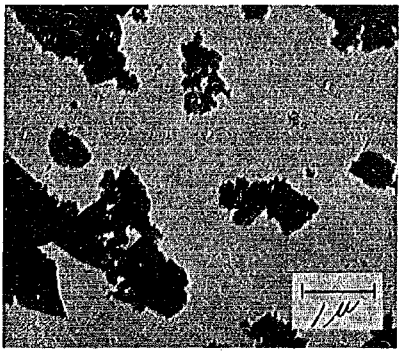
2-c　(関白カオリン)



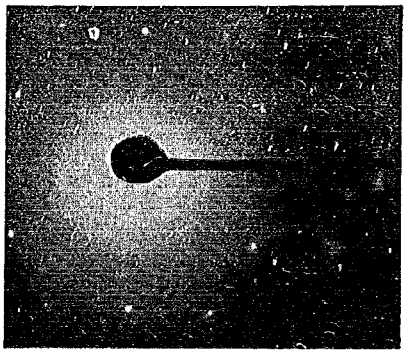
2-f　(香港カオリン)

写真-2　メタカオリンと $Ca(OH)_2$ との反応生成物の電子顕微鏡写真

2-g　(八草カオリン)



2-i　(八草カオリン)



2-h　(八草カオリン)

2-j　(Dickite)

写 真 - 2

アロファン質粘土の消石灰-石膏による化学的安定方法に関する研究 (2)

—アロファンと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応条件について—

(昭和36年8月)

有泉　昌*
大場　正男**

目　次

Ⅳ アロファンと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応条件について……(1)
[1] 試料および実験方法……(1)
[2] 実験結果……(1)
[3] 実験結果の検討……(10)
[4] 要約……(14)

Ⅳ アロファンと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応条件について

アロファンが $Ca(OH)_2$ 溶液との反応により C_2ASH_n を生成することはすでにのべてきた。しかしその反応条件として $Ca(OH)_2$ 溶液は飽和溶液であり，溶液 1 l に対し使用したアロファンは 1g 程度であり，温度は 20°C で反応時間は少なくとも10日以上であった。ここでは反応過程を追求するために，温度，反応時間および $Ca(OH)_2$ 濃度を主として変え，反応生成物の X 線回折によってその消長を追求した。

[1] 試料および実験方法

試料アロファンはすでにのべた方法で鹿沼土よりえた。この試料はX線回折，DTA曲線，化学分析，赤外線吸収スペクトル等で実験し，アロファンと考えられている。このアロファンは[Ⅲ]でのべた D_0 試料と同じである。

反応液の濃度は CaO の飽和水溶液，1.0g CaO/l，0.8g CaO/l，0.6g CaO/l および 0.2g CaO/l を基準とする。試料と反応液量の割合は，風乾アロファン 1.50g について液量は 1.00 l である。反応温度が 20°C, 40°C, 60°C の場合は恒温水槽を，80°C の場合は恒温空気槽を用いた。一部の実験では 50°C および 45°C とした。

反応容器としては小形3角フラスコを用い，実験中は空気中の CO_2 の影響をうけないように注意したが，特に沪過時に一部の炭酸化の起るのを防ぎえなかった。反応後の液相については Ca^{++} を EDTA 法で求め，試料えの CaO の固定量を求める。また OH^- の減少状況は HCl による滴定で求める。反応時間は1時間より5週間にわたり適当に選び，ある条件のものは8カ月におよんでいる。

液底体となる反応アロファンは沪過し，その一部をデッキグラス上に塗りつけ，風乾後 Geigerflex で回折図を求める。この場合 Scale Factor 16, Time Constant 4, Scanning Speed 2°/min, Chart Speed 5 div/min, Slit 1-1-0.4 とする。ある反応条件の場合にはX線回折のほかに，化学分析，DTA，電顕観察，赤外線スペクトルなども併用した。

[2] 実験結果

(1) 反応温度，反応時間と反応生成物について

20°C の場合の反応生成物のX線回折図を図-12 に示めす。この図より明らかなように飽和溶液の場合は1時間で 8.2Å 線と 7.8Å 線が見られ，7時間では 7.7Å 線が見られ，1日および2日では 8.4Å 線が顕著となる。3日で 7.7Å 線のほかに C_2ASH_n が出現しはじめ，7日では C_2ASH_n が明瞭となり，8.4Å 線と 7.7Å 線も見られる。10日では C_2ASH_n の回折線の強度は大きくなるが 8.4Å 線も強く残こっている。21日に至れば C_2ASH_n の回折線はさらに鮮明となる。35日では C_2ASH_n の回折線は (00l) のほかのものも出現する。しかし 8.4Å 線も依然として残り，弱いが 7.7Å 線も認められる。70日に至れば C_2ASH_n の全回折線が鮮明であり，7.7Å 線と 8.2Å 線もやや強度は低下するが残存する。8月の反応では 70 日の場合とほとんど同じである。8.4Å 線は 8.2Å から 8.6Å まで変動することが認められ，常に 8.4/2Å 線をともない，7.7Å 線も常に 7.7/2Å 線をともなう。前者を Y 鉱物，後者を Z 鉱物とする。この反応においては時間の経過とともに C_2ASH_n と Y または Z による粉末線の強さの比は順次大きくなるのである

* 地質化学部長
** 地質化学部化学研究室研究員

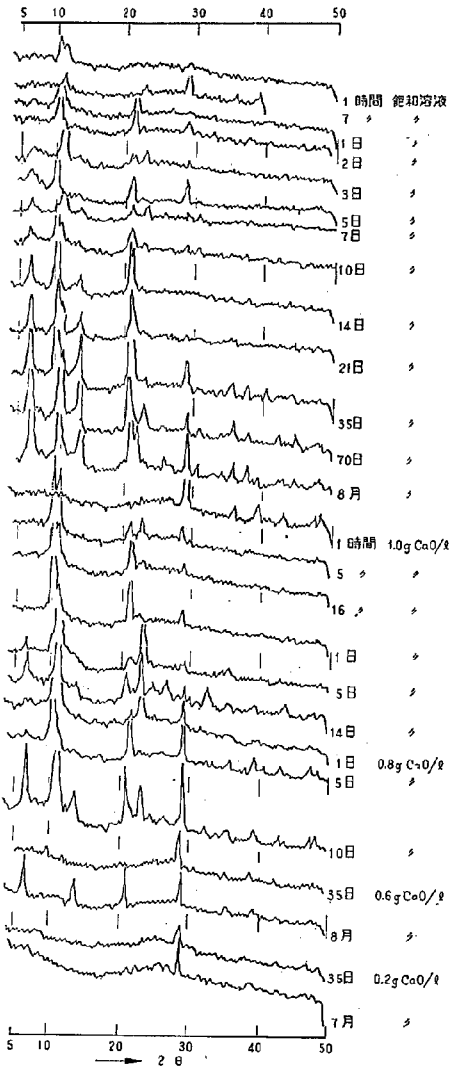


図-1 220°C における反応生成物のX線回折図

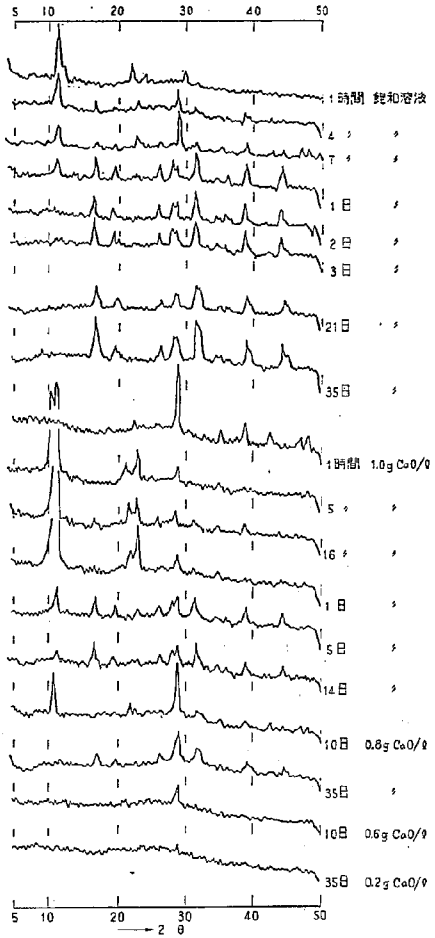


図-13 80°C における反応生成物のX線回折図

Ca(OH)$_2$ 溶液の濃度が 1.0g CaO/l の場合は飽和溶液の場合よりやや遅延した状況であり，C_2ASH_n は5日で明瞭に認められ，Yの強度は飽和の場合より相当に大きい。Ca(OH)$_2$ の濃度が 0.8g CaO/l の場合は1日でZが主で一部のYをともない，5日まではYが明瞭に見られ，10日で C_2ASH_n が見られ，以後 C_2ASH_n が増加するがYは依然残存する。6ヵ月では C_2ASH_n が著しく顕著となり，YおよびZは C_2ASH_n に比し弱くなる。Ca(OH)$_2$ 溶液の濃度が 0.6g CaO/l または 0.2g CaO/l の場合はもはや35日でも C_2ASH_n およびYまたはZの回折線は見られない。しかし8カ月に至れば，0.6g CaO/l 溶液との反応生物中には C_2ASH_n が確実に認められ，0.2g CaO/l では7ヵ月でも結晶性物質は生成しない。

80°C の場合の反応生成物のX線回折図を図-13 に示めす。この図より明らかなように，飽和溶液の場合は1時間でYおよびZを生成し，4時間でYのみが消失すると同時に 5.18, 4.46, 3.36, 3.14, 2.80, 2.29, 2.03Å 線で特徴づけられる粉末線を与える鉱物Vを生成する。2日でZもほとんど認められなくなり，1週間では3.14

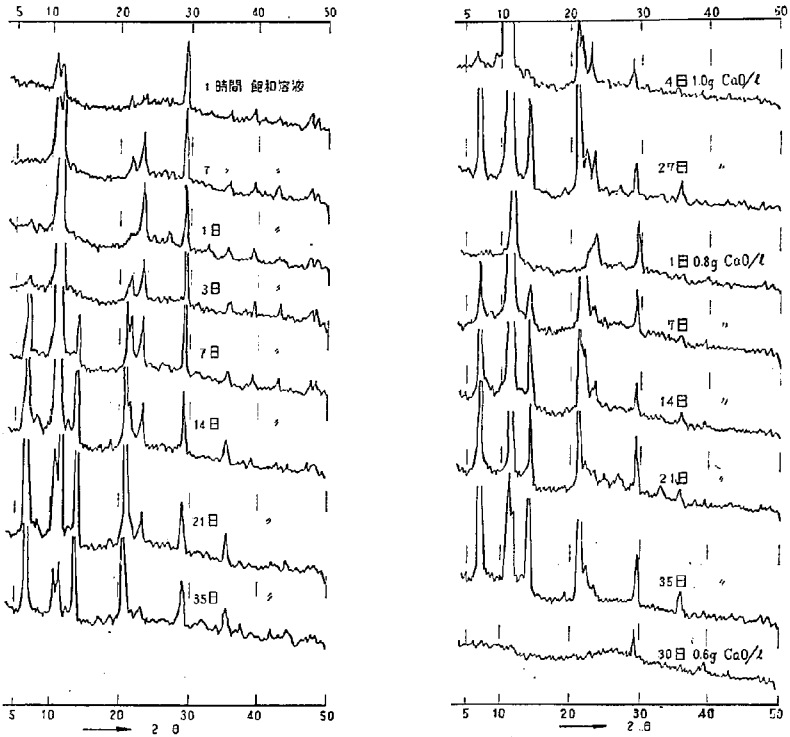


図-14　40°C における反応生成物のX線回折図

2.80, 2.29, 2.03Å 線が二重線となり始め，以後二重線化は顕著となる。1.0g CaO/*l* の場合には飽和溶液の場合より反応は遅延された状況となり，Vは1日目に僅かに認められ，5日では明瞭となる。一方YおよびZは1日目でも確実に存在し，5日でYはほとんど消失するがZは残り，14日でも僅かに認められる。二重線化は14日で認められ始める。$Ca(OH)_2$ 溶液の濃度が 0.8g CaO/*l* の場合には7時間でYが生成し，10日に至ってVの生成が認められ，Yも残存する。濃度が0.6および0.2の場合にはY，ZおよびVはいずれも生成しない。

40°C の場合の反応生成物のX線回折図を図-14 に示めす。この図より明らかなように，飽和溶液の場合は1時間でYおよびZを生成し，7時間でその生成量も多く，この傾向は3日まで継続し，3日に至って僅かに C_2ASH_n が認められ，7日以降は順次 C_2ASH_n の回折線は著るしく鮮明となり，時間と共に C_2ASH_n とYおよびZの粉末線の強度の比は増加する。35日に至って僅かにVが認められるようである。1.0g CaO/*l* の場合には C_2ASH_n の生成が4日で見られるほかは飽和の場合と大体同じであり，ただ反応がやや遅延された状態となる。0.8g CaO/*l* の場合は4時間でZを認め，1日でZの外にYも認め，7日で C_2ASH_n の生成が明瞭に見られるがYおよびZの強い回折線も残る。以降 C_2ASH_n とYまたはZの粉末線の強さの比は時間の経過と共に大きくなる。0.6g CaO/*l* の場合には30日に至っても C_2ASH_n はもち論YまたはZも見られない。

40°C の場合は反応液の濃度が変った条件でも，いずれも 20°C の反応が加速された状態であり，反応生成物は C_2ASH_n，YおよびZである。飽和溶液の場合は長時間の反応によってはVが一部生成すると推定される。

60°C の場合の反応生成物のX線回折図を図-15 に示めす。この図より明らかなように飽和溶液の場合は，1時間でYおよびZが生成し，7時間まではそれらの回折線の強度は増加し，24時間でVが生成し始め，3日ではさらに C_2ASH_n も生成するがVはもち論YおよびZは残る。7日に至りYは消失しZとVが残り，この状態は21日まで継続し，35日に至りZも消失しVのみとなり，回折線の二重線化も見られる。1.0g CaO/*l* の場合は1日でYおよびZを認めるが，まだVは生成しない。4日ではVが明瞭に認められるがYおよびZもまだ強い粉

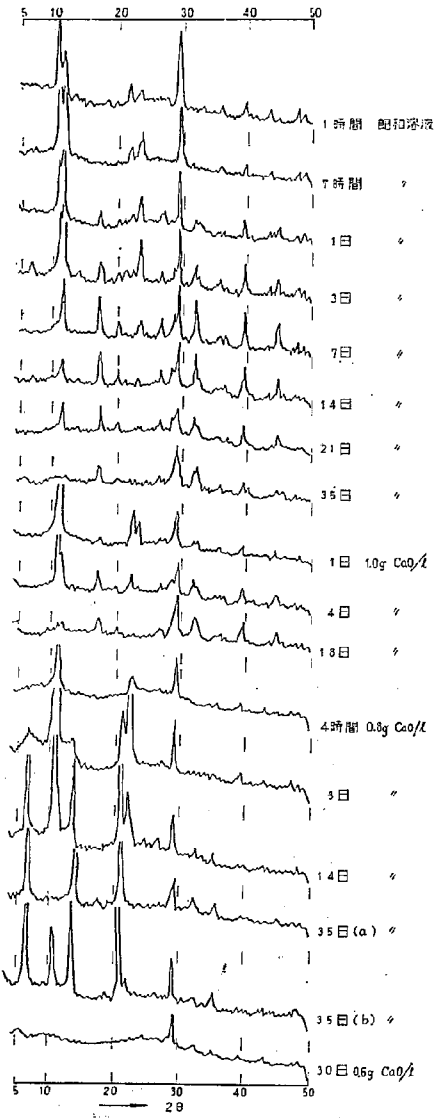


図-15 60°C における反応生成物のX線回折図

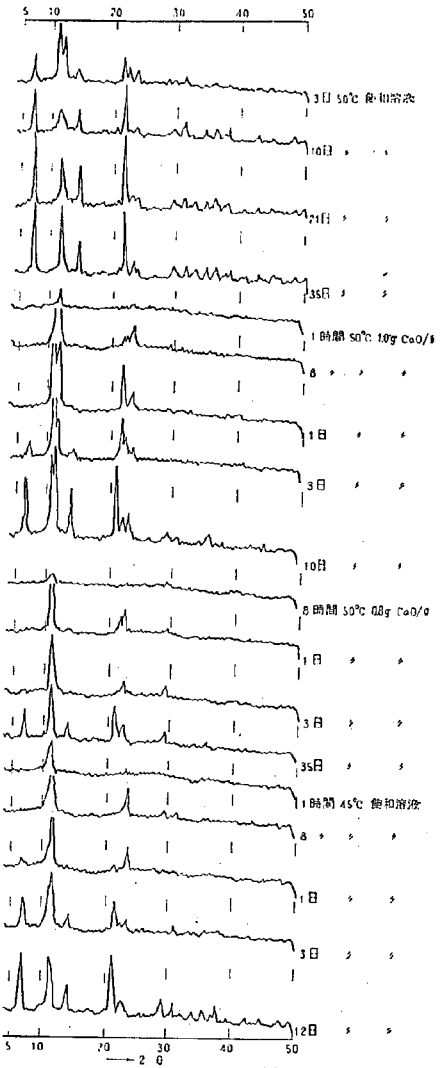


図-16 50°C, 45°C における反応生成物のX線回折図

末線をのこしている。しかし18日に至ればYおよびZはほとんど見られなくなり，Vのみが認められる。0.8g CaO/l の場合は1時間では結晶性物質は生成しないが4時間でYを認め，Yの粉末線強度は漸次強くなり3日に至って C_2ASH_n を認める。さらに時間の経過と共に C_2ASH_n の粉末線強度は大きくなる反面，Yによる強度は漸次低下する。35日の反応生成物を容器底に比較的強く付着したものと，簡単に懸濁する白色のものとに分けて回折線を求めれば，後者(a)では C_2ASH_n のみが認められYは認められない反面，前者(b)では C_2ASH_n とYの両者が認められる。0.6g CaO/l の場合は30日でも結晶性物質は生成しない。

60°C の反応では80°C の反応が遅延された状態であり，また濃度の低い場合は高い場合が遅延された状態である。飽和溶液および1.0g CaO/l の場合は初めYおよ

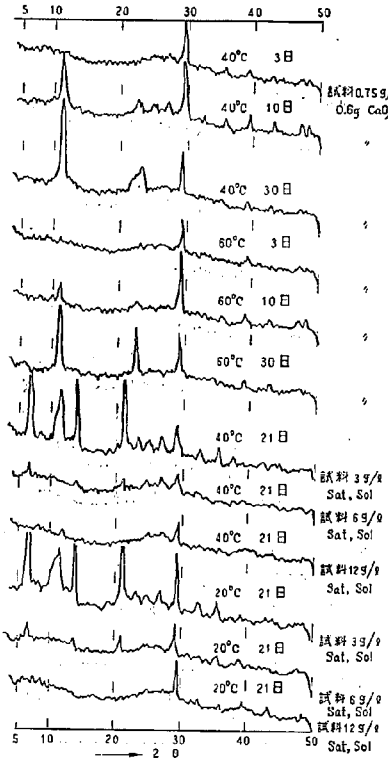


図-17　試料量を変えた場合の反応生成物のX線回折図

びZが生成するがVが最終的には安定相となり，0.8g CaO/lの場合はC_2ASH_nが安定相であり，むしろ20°Cの反応に似ている。

50°Cおよび45°Cの場合の反応生成物のX線回折図を図-16に示めす。50°Cで1.0g CaO/lの場合は，1時間でZを認め，8時間でYおよびZを認め，1日ではYおよびZの粉末線は鮮明となり，3日でC_2ASH_nが認められると同時に8.04Å線と4.02Å線で代表されるYとZの中間体と推定される相の生成が認められる。3日以降はC_2ASH_nの成長が明瞭である。すなわち50°Cで1.0g CaO/lの場合は，40°Cでの飽和溶液と1.0g CaO/l溶液との反応の中間に当り，60°Cでの0.8g CaO/lの場合に相当する。50°Cで0.8g CaO/lの場合は8時間に至ってYを認め，1日でYおよびZを認め，3日に至りC_2ASH_nの微量の生成が見られ，40°Cで1.0g CaO/lの場合に相当すると考えられる。45°Cで飽和溶液の場合は1時間でZを認め，以後Zの成長がつづき1日でC_2ASH_nの生成が認められる。以降Zは減少し，C_2ASH_nは増加する傾向が見られ，40°Cでの反応が加速された状況と考えられる。

(2)　試料量と液量を変化させた場合の反応生成物について

上にのべた実験結果はすべて試料1gについて反応液を1l用いた場合である。ここではこれらの関係を変えた場合についてのべる。

試料の量を反応液1lについて0.75gを使用し，0.6g CaO/l溶液と40°Cおよび60°Cでそれぞれ3日，10日，30日反応させた場合，反応生成物のX線回折図を図-17に示めす。40°Cの場合は3日では結晶性物質の生成は認められないが，10日でYを生成し，30日でYおよびZを生成し，Xは生成しない。試料を1g用いた場合はすでにのべたようになんら結晶性物質を生成しなかったのに比して，試料量を少なくすればYまたはZを生成するに至る。60°Cの場合も40°Cの場合と同じであり30日で明瞭にYを認め，1gの試料を用いた場合とは相異する。

試料の量を1gの場合より増加させた場合のX線回折図も同様に図-17に示めす。飽和溶液1lに対し，3gの試料を用い，40°Cで21日間反応させた場合は，C_2ASH_nの生成が明確であり一部のYおよびZをともなうが，6gの試料をい用た場合は僅かにC_2ASH_nを認めるのみで，YまたはZは認められない。さらに試料量を12gとした場合結晶性物質をみとめない。また20°Cで40°Cの場合と同じ期間反応させた場合でも生成物は40°Cの場合と同様である。なお40°Cの場合試料3g, 6g, 12g, 24g, を用いたときのCaOの試料1g当りの固定量は，それぞれ28%，16%，9%，であり，反応後の液のCaO濃度(m・mol/l)はそれぞれ7，4，2，0.8である。

(3)　反応生成物の再処理による反応生成物

反応生成物がC_2ASH_nとYである20°Cでの24週の反応生成物，およびVをふくむ60°Cでの3週の反応生成物に種々の処理を加えた場合，X線回折図の変化の状況についての実験結果の一部を図-18に示めす。つぎに図について説明を加え，再処理の条件についてのべる。

1.　再処理を加えるべき反応生成体であり，すでにのべたように飽和$Ca(OH)_2$溶液とアロファンを20°Cで24週間反応させたもので，C_2ASH_nとYの回折線が顕著に認められている。

2.　反応生成体0.15gを蒸溜水100c.c中で60°Cで14日処理した場合であり，Yは完全に消失しC_2ASH_nのみが残ることが示めされる。

3.　反応生成体0.10gを蒸溜水200c.c中で80°Cで30日処理した場合であり，Yは完全に消失しC_2ASH_nのみ残ることが示される。

4.　反応生成体0.20gを$Ca(OH)_2$飽和溶液100c.c

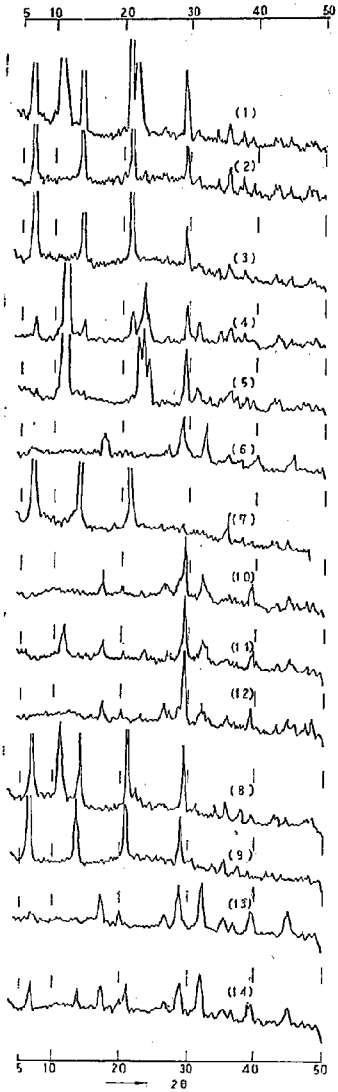


図-18 反応生成物の再処理による生成物

中で40°C で14日処理した場合であり，C_2ASH_n は著るしく減少し，Yは消失しその代りにZが顕著に認められる。

5. 反応体 0.10g を飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液 100c.c と 20°C で14日処理した場合であり，C_2ASH_n は僅かに認めうる程度に減少し，Y は網面間隙 8.00Å と小さくなり，7.80Å をともなってZの 7.63Å に移行した状態を示めしている。

6. 反応体を液相と分離せずそのまま 80°C で14日処理した場合であり，Y および C_2ASH_n は消失し，V および V′の生成が認められる。

7. 反応体 0.15g を蒸溜水 100c.c と 80°C で30日処理した場合であり，Y が完全に消失して C_2ASH_n のみ残ることが示めされる。

8. 反応体 0.50g を蒸溜水 50c.c で常温で各30分づつ3回抽出した場合であり，Yは減少することが示めされる。

9. さらに 50c.c の蒸溜水で20時間常温で処理して可溶成分を抽出した場合であり，Yは認められなくなり C_2ASH_n のみ残ることが示めされてる。

10. アロファンを 60°C で21日間飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液で反応させてえた反応体（VとZをふくむ）1.25gに蒸溜水 50c.c を加え，20°C で21日処理した場合であり，Zが消失しVのみが残ることが示めされる。

11. 上記の反応体を液相と分離することなく，そのまま温度を 40°C に低下させて14日処理した場合であり，Yが僅かに見られるがZおよびVが認められ，著るしい変化が見られない。

12. 同じ反応体 0.10g を 100c.c の蒸溜水と 40°C で21日処理した場合であり，Zは消失するが V は残ることが示めされる。

13. アロファンを飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液と 40°C で14日間反応させてえた反応体（C_2ASH_n, Y, Z をふくむ）を液相と分離することなくそのまま 80°C で30日処理した場合であり，YおよびZが消失し C_2ASH_n は僅かに認めうる程度であるが，V の生成が認められしかもV′も一部生成していることが示めされる。

14. 上記の処理方法と同じだが，14日の場合でありYおよびZは消失し，C_2ASH_n はいまだ明瞭に見られるがVおよびV′の生成が示めされる。

(4) $Ca(OH)_2$ が過量に存在する場合およびペースト状での反応生成物

今までのべてきた実験結果は $Ca(OH)_2$ 溶液との反応であったが，$Ca(OH)_2$ が飽和溶液のほかに固相として過量に存在する場合，および水量が少なくペースト状態の場合の反応生成物について実験した結果の一部を図-19に示めす。

1. アロファン 1.50g に 2.21g の $Ca(OH)_2$ および蒸溜水 1l を加え，20°C で1時間処理した場合はY，ZおよびCa(OH)₂が認められる。しかし5日では Ca(OH)₂ はすでに全部溶解し Z のみが見られ，10日でも同様であるが23日ではZおよびYのほかに C_2ASH_n も明らかに認められる。

2. 上記と同様な条件だが，温度を 50°C とした場合は，1日でZを生成して一部の $Ca(OH)_2$ が残存し，5日に至れば $Ca(OH)_2$ はすでに全部溶解して反応体中に

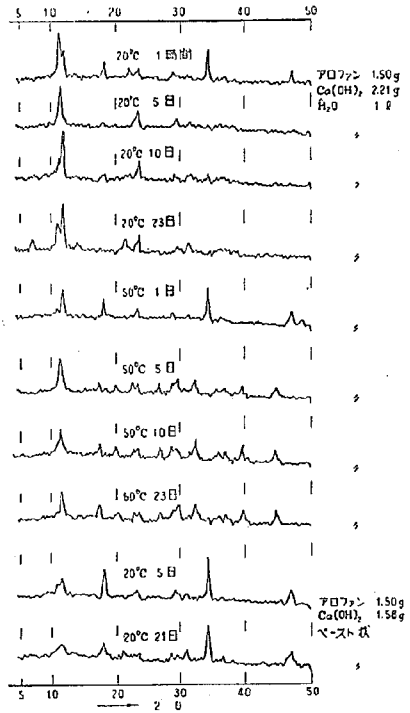


図-19　$Ca(OH)_2$ の過量ペースト状の場合の反応生成物

はY，Zのほかに V の生成が認められる。10日では5日と同様であるが23日に至れば V の回折線は二重線化して V′の生成も認められる。

3. アロファン 1.50g と $Ca(OH)_2$ 1.58g とを少量の水でペースト状としたものは，5日の反応で $Ca(OH)_2$ が残存して Z と Y の両者が見られ，21日に至っても $Ca(OH)_2$ 量が減少する傾向が見られるが C_2ASH_n の生成が認められない。

(5) 溶液中の $[Ca^{++}]$，$[OH^-]$ の変化および生成物の組成

アロファンが $Ca(OH)_2$ と種々の条件で反応する場合の反応生成物についてはすでにのべた。つぎにこれらの反応時の液相の $[Ca^{++}]$ および $[OH^-]$ 変化について実験結果の一部をのべる。

図-20 は試料アロファン 1g が飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液中より各反応温度で固定する CaO の量と反応時間の関係を示めし，図-21 は 80°C で種々の濃度の $Ca(OH)_2$ 溶液より固定する CaO 量と反応時間の関係を示めす。図より明らかなように温度が高かいほど固定量は大きく，しかも早く平衡に近づく。温度が低くなると平衡に達する時間は著るしく遅延されることが示めされる。また CaO の固定される量は温度が一定であれば，濃度の高い方が多くしかも平衡状態に早く達する。濃度が低い場合は平衡に達する時間が遅延されることが示めされる。

この反応で重要なことは液相中で $[Ca^{++}]$ と $[OH^-]$ が常に等量関係にあることである。

反応生成物の化学分析の結果は別表に示めすようである。

この分析結果から試料アロファンの SiO_2/Al_2O_3 が 1.53 に対し，80°C で処理した場合は 1.74 と大きくなる。液中では SiO_2 の方が Al_2O_3 より濃度が低いので，

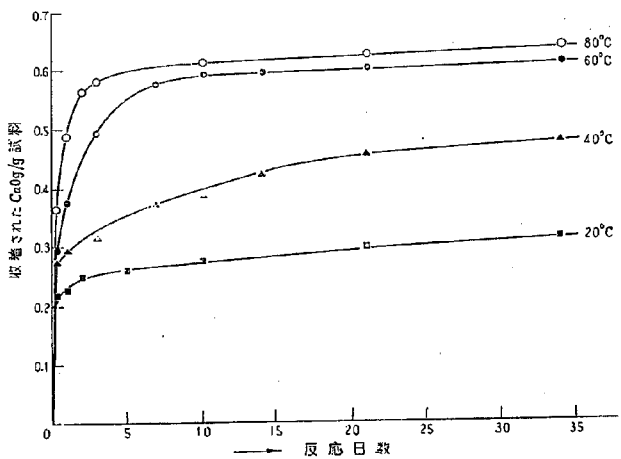


図-20　反応温度が異なる場合飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液からの CaO 収着量と反応日数

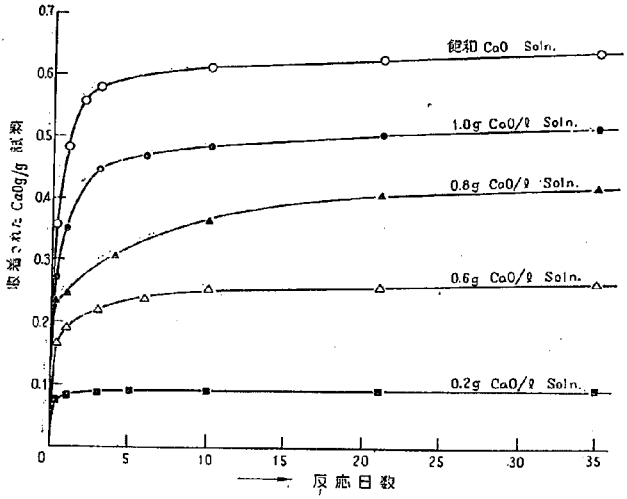


図-21 各種濃度の CaO 溶液からの CaO の収着量と反応日数（80°C）

分析結果

試料	H_2O^-	H_2O^+	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SiO_2/Al_2O_3	Al_2O_3/CaO	備考
1	26.0	12.4	26.2	29.0	3.7	2.3	0.1	1.53	—	アロファン試料
2	11.3	19.2	18.6	22.6	2.6	24.2	0.1	1.42	0.51	20°C，35 日，飽和溶液
3	1.9	18.8	17.3	17.1	2.6	40.9	0.1	1.74	0.23	80°C，35 日，飽和溶液
4	24.7	13.0	22.5	24.1	3.0	11.8	0.1	1.58	1.13	20°C，35 日，0.6CaO/l

SiO_2 は外部より入ったと考えるべきである。この SiO_2 は反応容器より入ったものと推定され，事実 80°C での長時間の反応後ガラス容器は一部くもりを生じたことが認められた。20°C での反応の場合 SiO_2/Al_2O_3 はアロファンよりやや小さい値を示す。

(6) 電子顕微鏡写真および赤外線吸収スペクトル

電子顕微鏡写真を写真-3 に示めし，赤外線吸収スペクトルは図-22 に示めす。赤外線吸収スペクトルについてはすでに[Ⅰ]にのべたが，ここでは実験条件の異なる反応体についての結果をのべる。

20°C で飽和溶液と5週間反応させた場合と，0.2g CaO/l 溶液と5週間反応させた場合では，いずれも 6.3μ と 7.5μ の間に巾の広い吸収が見られる。この吸収部でも飽和溶液の場合は 6.8μ と 7.05μ のピークが明瞭に識別できるが，0.2g CaO/l 溶液を用いた場合はこのピークは明瞭でない。反応に用いたアロファンの吸収と比較すれば，この 6.3~7.5μ の吸収と 11.4μ の小吸収ピークの存否が相異するほか，3.0μ の吸収がやや小さくなりまた 8.2~12.5μ の吸収の谷が割合平旦化される点が異なる。

80°C で飽和溶液と5週間反応させた場合は，6.3~7.5μ の吸収の谷は浅くなり，7.1μ のピークは著るしく小さくなり，8.2~12.5μ の吸収の谷も浅くなり，一方 11.6μ のピークは明瞭となり，2.95μ の吸収も小さくなる。80°C で1時間および5時間の場合はほとんど区別しがたいが，6.3~7.5μ の吸収は5週間の場合より顕著である。用いたアロファンとの相異する点は 20°C の場合と大体同じである。80°C で 0.2g CaO/l 溶液と5週間反応させた場合は，6.3~7.5μ に僅かに吸収が見られるほかは，アロファンと区別しがたい。また 80°C で5時間と5週間の反応体では，7.1μ の吸収が5週間の方が小さく，8.2~12.5μ の吸収は全体として小さく，11.4μ の吸収が大きくなる。

5週間の反応で 80°C と 20°C の場合は，80°C の方が 6.3~7.5μ の吸収は小さく特に 6.8μ のピークは共通に認められるにかかわらず 7.1μ のピークは小さく 11.6μ の吸収がより大きいことである。しかし 20°C で5週間の場合と 80°C で5時間の場合はあまり差異はない。

電子顕微鏡観察に用いた試料は下記の反応条件のものである。

No.- 0 飽和溶液，20°C，5週
No.- 1 0.2g CaO/l，20°C，5週
No.- 2 飽和溶液，20°C，7カ月

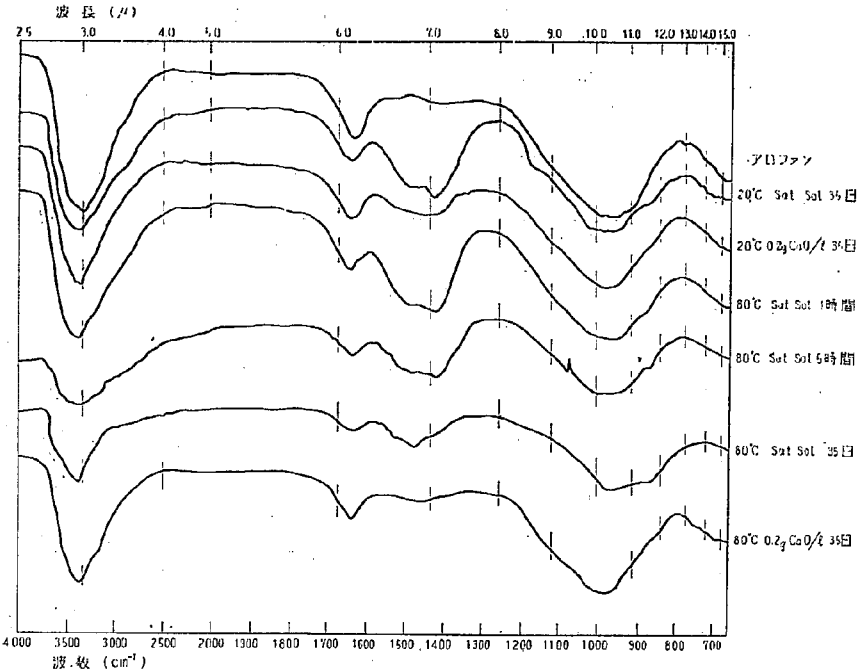


図-22　赤外線吸収スペクトル

No.-3　飽和溶液，　20°C，1カ月(ただし,600°C加熱処理試料)

No.-4　飽和溶液，　20°C，2週(合成ゲルNo.-2による)

No.-5　1.0g CaO/l，40°C，1時間

No.-6　飽和溶液，　40°C，5週

No.-7　飽和溶液，　60°C，5週

No.-8　0.2g CaO/l，80°C，5週

No.-9　飽和溶液，　80°C，1時間

No.-10　飽和溶液，　80°C，5時間

No.-11　飽和溶液，　80°C，5週

No.-12　飽和溶液，　40°C，3週(20°C,飽和溶液，8月反応物の再処理)

No.-00　アロファン試料

電顕写真について簡単な説明をつぎに加える。

No.-1はアロファンの形を残しているがやや角ばり，伸長性を示しているが，結晶性物質は認めがたい。

No.-2は不規則の四角形ないし六角形をした比較的厚い結晶を多く認め，うすい結晶が不規則に重なった状況も見られる。ほかに著るしくうすい板状晶も見られる。アロファンより発達したと考えられる形状を示すものが多い。

No.-3は不規則の四角形ないし六角形を示す結晶が発達しており，周辺がまる味を持つ場合がしばしば見られる。結晶は重なっておる。これらの結晶はC_2ASH_nであろう。

No.-4は[V]でのべる合成ゲルよりえたものであり，結晶の発達は著るしい。No.-3でのべたと同様な結晶を認め，X線回折等の結果とも考えC_2ASH_nであることは確かとみとめられる。

No.-5はアロファンがやや伸長状に角ばった傾向を示し，周辺に微細な結晶が見られるが，明瞭な結晶は見られない。

No.-6はNo.-4に見られると同様な結晶を示めし，一部のうすい板状晶も見られ，アロファン粒子より結晶が成長したと推定できる形態が見られる。

No.-7はアロファン粒子が球形のまま角ばる傾向を示し，周辺に小突起を見たりするが，アロファン粒子自体が微細な結晶の集合体に変わっているのが見られる。

No.-8はアロファン粒子が崩れかかっているが結晶性物質は生成していない状況を示めす。

No.-9はアロファン粒子が角ばり，板状化の傾向を示めす。

No.-10はアロファン粒子がやや伸長化し，内部に微細な結晶を生成し始めていることを示めす。

No.-11はアロファン粒子が球形のまま角ばっている

表-5 反応条件と反応生成物(ただし試料粘土 1.5g

反応速度	$Ca(OH)_2$濃度 CaO g/l	1時	2時	3時	4時	5時	7時	8時	16時	1日	2日	3日	4日
20°C	Sat, Sol	Y, Z	—	—	—	—	Z	—	—	Y	Y	Z, X	—
	1.0	no	—	—	—	Y, Z			Y, Z	Y, Z	—	—	—
	0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	Z, Y	—	—	—
	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	no	—	no	—
40°C	Sat, Sol	Y, Z	—	—	Y, Z	—	Z, Y	—	—	Z, Y	—	Z, Y, X	—
	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	Z, Y	—	—	Z, Y, X
	0.8	no	—	—	Z	—	—	—	—	Z, Y	—	Z, Y, X	—
	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	no
45°C	Sat, Sol	Z	—	—	Z	—	—	Z	—	Z, X	—	Z, X, Y	
50°C	Sat, Sol	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Y, Z, X	—
	1.0	Z	—	Z	—	—	—	Z, Y	—	Y, Z	—	Y, Z, X	—
	0.8	—	no	—	no	—	—	Y	—	Z, Y	—	Z, Y, X	—
	0.6	—	no	—	no	—	—	Y	—	Z, Y	—	Y, Z, X	—
60°C	Sat, Sol	Y, Z	—	—	Y, Z	—	Z, Y	—	—	Z, Y, V	—	Z, Y, V, X	—
	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	Y, Z	—	Y, Z, V	—
	0.8	—	—	—	Z	—	—	—	—	Y	—	Y, X	—
	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	no	—	—	no
80°C	Sat, Sol	Y, Z	—	—	Z, V	—	Z, V	—	—	V, Z	V	V	—
	1.0	no	—	—		—	Z, Y	—	Z, Y, V	—	Z, Y, V	—	—
	0.8	—	—	—	—	—	Y	—	—	Y	—	—	Y
	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	no	—	no	—

備考 X： C_2ASH_n V： C_3AH_6
Y： C_4AH_{13} V′： C_3ASH_4
Z： C_3AH_8 no： 回折線を認めないもの

状況を示めしている。

No.-12 はアロファン粒子が角ばり不規則な形の結晶となっている状況を示めし，周辺には小突起が見られる。また一部の視野では竹の葉状の結晶とそれらの集合体も見られるが，他の試料については見られず何か明らかではない。

[3] 実験結果の検討

(1) 反応生成物の同定

反応条件を変えてもこの反応で生成する結晶性物質は，すでにのべた C_2ASH_n と Y, Z, V と略称した鉱物である。これら Y, Z, V がいかなる物質であるかを検討する。

Yは 8.4Å 線と 4.2Å 線で代表され，そのほかの粉末線をも考慮して $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}H_2O$ 平衡系[8]に認められる。$4CaO\cdot Al_2O_3\cdot 13H_2O$($C_4AH_{13}$) の粉末線[22),8)]に一致するので，$C_4AH_{13}$ と考えてよい。C_4AH_{13} は上記の平衡系で $Ca(OH)_2$ 濃度の高い所で比較的安定して存在しうるし，実際 Al_2O_3 ゲルと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応ではその生成が見られるので，C_4AH_{13} の存在を考えることは妥当である。なお熱分析曲線は 220°C の吸熱ピークが特徴であるから，C_2ASH_n との区別はできない。

Zは $3CaO\cdot Al_2O_3\cdot(8\sim12)H_2O$($C_3AH_8$) の主要な粉末線[23),24)]を持ち $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}H_2O$ 系ではその存在が知られていないが，C_4AH_{13} と C_2AH_8 の混合層鉱物[8)]とされているので，$Ca(OH)_2$ の濃度によっては不安定相として存在すると考えてもよく，$3CaO\cdot Al_2O_3$ の水和物中にはしばしば認められる鉱物である。

Vは $3CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}H_2O$ 系での最も安定相である $3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O$ (C_3AH_6) とその粉末線が完全に一致するので，C_3AH_6 であることは明確であり，DTA 曲線[9)]からも支持される。Vはまたその粉末線が二重線化しV′となる。$C_3AH_6\text{-}C_3AS_3$ は Hydrogarnet として $SiO_2 \rightleftarrows 2H_2O$ の交換による C_3ASH_4 および $C_3AS_2H_2$ が知られており，何れも等軸晶系に属するが格子常数は C_3AH_6 より C_3AS_3 に変るに従い減少する。$C_3AS_{0.33}H_{5.3}$ は C_3AH_6 と格子常数は変らないとされておるのでVは C_3AH_6 ないしは $C_3AS_{0.33}H_{5.3}$ を示めすと考えてよく，V′のように二重線化するのは C_3ASH_4 が生成することを推定させる。メタカオリンと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応では，50°C で3月の反応で $C_3AS_{0.33}H_{5.3}$ が生成することが Zurriziani [8)] により報告されており，アロフ

と溶度 1*l* の場合)

5日	6日	7日	10日	12日	14日	18日	21日	27日	30日	35日	その他
Y,X	—	Z,X,Y	Y,X,Z	—	Y,X	—	Y,X,Z	—	—	Y,X,Z	70日：X,Y,Z 8月：X,Y,Z
Y,X	—	—	—	—	Z,X	—	—	—	—	—	6月：X,Z,Y
Y	—	—	Z,X,Y	—	—	—	Z,X	—	—	X,Y	—
—	no	—	no	—	—	—	no	—	—	no	8月：X
—		Z,Y,X	Z,X,Y	—	X,Y,Z	—	X,Z,Y	—	—	X,Z,Y	—
—	—	—	—	—	—	X,Y,Z	—	X,Y,Z	—	—	—
—	—	Y,X,Z	Y,Z,X	—	Y,X,Z	—	X,Y,Z	—	—	X,Y,Z	—
—	—	—	no	—	—	no	—	—	no	—	—
		X,Z,Y	—	X,Y	—	—	X,Y	—	—	—	—
—	X,Z,Y	—	X,Z,Y	—	—	—	X,Y,Z	—	—	X,Y,Z	—
—	X,Z	—	X,Z,Y	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	Y,X	—	—	Y,X	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	Z,V	Z,V	—	V,Z	—	V,Z	—	—	V,V′	—
—	—	—	—	—	—	V,Z	—	V,Z	—	—	—
—	—	Y,V	Y,X	—	Y,X	—	Y,Z	—	—	X,Y	—
—	—	—	no	—	—	no	—	—	no	—	—
—	—	—	—	—	—	—	VV′	—	—	V,V′	—
Z,V	—	—	—	—	V,Z	—	—	—	—	—	—
—	—	—	Y,V	—	—	—	V	—	—	V,V′	—
—	no	—	no	—	—	—	—	—	—	—	—

ァンの場合でも同様な反応が見られることは注意を要する点である。

(2) 反応条件と反応生成物について

試料粘土 1.5g について $Ca(OH)_2$ 溶液 1*l* を用いた場合の種々の条件での反応生成物についてすでにのべた。これらの結果を表示すれば表-5 のようになる。この表より明らかなことは，反応の始めはYまたはZが生成し，XまたはVはそれから以後に生成し始めるが，YおよびZはXまたはVと共存する。しかし材令と共にYおよびZが減少し，XまたはVが増加する傾向を示めすのが一般である。Vは 60°C 以上で生成し，Xは 60°C 以下で生成する。Xの生成については，温度が高く $Ca(OH)_2$ 溶液の濃度が高い方が，その生成速度は大きい。60°C の場合には CaO が 1.0 g/*l* の溶液を用うれば高温型のVを生成する反応が見られ，0.8g/*l* の溶液を用うれば，低温型のXを生成する反応が見られる。すなわち高温型と低温型の反応が存在することが知られ，温度および濃度の大きい方が反応は加速されることも確かである。しかし濃度が特に低い場合は，CaO の収着は起っても結晶性物質は生成しないのであり，著るしく長時間の後には結晶性物質が見られることもある。

ここにのべた反応は試料と液量が 1.5 g/*l* の関係であるが，もし試料の量を少なくすればこの反応は加速された状態となり，反対に試料の量を多くすれば遅延された状態となる。すなわち試料量を多くとれば，液中よりアロファンに固定される CaO 量は多いが，反応体中の CaO 含有率は低く，また液相中の CaO 濃度の低下も著るしく，ある平衡状態の下で反応は進行せず，CaOが固定されても結晶性物質は生成しない状態が存在する。

(3) C_2ASH_n, C_3AH_6, C_3AH_8 および C_4AH_{13} の安定性

C_2ASH_n は低温型反応で安定であり，C_3AH_6 は高温型の反応で安定であり，C_3AH_8 および C_4AH_{13} は高温でも低温でも C_2ASH_n または C_3AH_6 と共存し，反応の過程で消長のあることは実験結果より知りえた所である。C_3AH_8 および C_4AH_{13} は一般に初期に生成し，C_2ASH_n または C_3AH_6 の生成にともない減少ないしは消失するのが一般的傾向である。これらの各種反応生成物の安定性を知るために，これらの共存する反応体を種々の条件で再処理した結果についてはすでにのべた。この結果によれば C_4AH_{13} は水で洗うとか CaO をふくまない水と接すると消失することが示めされ，また CaO

表-6 35日反応による試料に固定される CaO の量と反応後の濃度

反応液の基準濃度	反応温度(°C)	CaO固定量g/g試料	反応後の濃度(N)	固定率(%)	CaO固定量/無水試料
飽和溶液	20	0.31	0.0260	39	0.50
〃	40	0.48	0.0192	60	0.78
〃	60	0.62	0.0104	76	1.01
〃	80	0.64	0.0086	80	1.04
1.0g CaO/l	20	0.26	0.0216	39	0.42
〃	40	0.35	0.0168	53	0.57
〃	60	0.49	0.0092	74	0.80
〃	80	0.52	0.0078	78	0.84
0.8g CaO/l	20	0.22	0.0164	42	0.36
〃	40	0.30	0.0124	56	0.48
〃	60	0.35	0.0096	66	0.57
〃	80	0.43	0.0058	80	0.70
0.6g CaO/l	20	0.15	0.0128	40	0.24
〃	40	0.18	0.0108	49	0.28
〃	60	0.23	0.0078	63	0.37
〃	80	0.27	0.0066	69	0.44

の飽和溶液等と接すると C_4AH_{13} と C_3AH_6 の恐らく混合層鉱物を経過して C_3AH_6 に転移する。また高温の方が低温より早く消失するようであり，C_3AH_6 の方が C_4AH_{13} より安定である。

C_2ASH_n は水で洗っても安定であるが，$Ca(OH)_2$ の濃度の特に高い所では不安定であり，むしろ C_3AH_6 の方が安定となる。C_2ASH_n は温度が高かければ C_3AH_6 に変るが，温度が高かくても $Ca(OH)_2$ の濃度が低いときはむしろ安定であると見なされる。

C_3AH_5 は温度の高い場合に生成し安定であるが，一旦生成した C_3AH_6 は 20°C でも安定である。C_3AH_5 は反応時間の経過と共に $SiO_2 \rightleftarrows 2H_2O$ の交換も行なわれる。これらの反応生成物の安定性は上にのべたように温度によると同時に，液相の CaO 濃度に最も影響されているのであり，しかも準安定状態が推定されるのであり，これらの点については改めて論ずる。

しかし C_3AH_6 および C_2ASH_n の安定性については Zurriziani[16] はメタカオリンと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応の場合，"42°C 以下では C_2ASH_n が安定であり，これより高温では C_3AH_6 が安定である" とのべている。以上にのべた実験結果からアロファンと $Ca(OH)_2$ 溶液の反応でも，低温側では C_2ASH_n が生成し安定に存在するが，高温側では C_3AH_6 が生成し安定に存在することが一般的に云える。しかしこれら結晶性物質の生成および安定性は温度によってのみ一義的に決まるものではなく，その温度において示めす液相一固相間の収着平衡関係から固相に収着される CaO 量と密接に関係するものと考えられる。まず 42°C に C_2ASH_n と C_3AH_6 との転移点が存在するとの前記 Zurriziani の説明は，少くもアロファンについては必ずしも妥当なものではないことが認められる。また実験結果から，C_2ASH_n は C_4AH_{13} および C_3AH_6 より $Ca(OH)_2$ 濃度の高い範囲では，溶解度がより大きく，$Ca(OH)_2$ 濃度の低い範囲では C_2ASH_n の方が溶解度が低いとして説明ができる。C_4AH_{13} は CaO-Al_2O_3-H_2O 系では $Ca(OH)_2$ 濃度の高いときのみ安定に存在しうることが知られているので，$Ca(OH)_2$ 濃度の低下と共に固相より消失することは当然予期される所である。

C_3AH_6 は CaO-Al_2O_3-H_2O 系では，AH_3 と C_3AH_6 の共存する $Ca(OH)_2$ 濃度以上では，C_4AH_{13} より安定な固相であることは当然予期される所である。液相の濃度との関係はあるが，温度が高いとき溶解度は C_3AH_6 の方が C_2ASH_n より低く，温度が低いとき C_2ASH_n の溶解度は C_3AH_5 よりも低いと考えられる。

$Ca(OH)_2$ の過量をふくむ溶液との 20°C での反応では，C_3AH_6 が 10 日でも安定で C_2ASH_n の生成が見られず，その生成が遅延されることは上の説明で理解される。同様に 50°C で C_2ASH_n が生成せず C_3AH_6 が生成することも説明することができる。ペースト状での反応では液相の濃度が常に飽和に近いので，20°C では C_3AH_6 が存在しても長時間に亘たり C_2ASH_n の生成を見ないことも十分説明することができる。

(4) CaO の固定量と結晶性物質の生成

反応条件と反応生成物についてはすでに検討したので，CaO の固定量の観点より検討を試みる。

表-6 は各反応条件（試料 1.50g に 1.00l の溶液を用うる）での CaO の固定量についての1例を示めす。一般に 20°C および 40°C のような低温側の反応では，反

応液の濃度がある程度（ここでは 0.8g CaO/l）以上ある場合は，反応開始後数時間以内で試料に対し約 16% またはそれ以上の CaO が固定され，その頃より C_4AH_{13} および C_3AH_8 の生成が認められる。反応時間が経過するにしたがい CaO の固定量は増加し，約 20% 位が固定される頃（40°C で3～5日，20°C で5～7日）から C_2ASH_n の生成が見られ漸次発達する。試料に固定される CaO の量が増加して，液の濃度が減少して 5m・mol/l 程度に達すると C_4AH_{13} または C_3AH_8 の結晶は除々に減少する。20°C で試料に対し約 15% 程度の CaO が固定された場合は何等結晶性物質を認めないが，8カ月のような長期間では C_2ASH_n の生成が見られ，この際の CaO 固定量は 29% に達している。40°C で試料に対し 18% の CaO が固定された場合も，何等結晶性物質は生成しない。しかし約 30% が固定された場合は C_2ASH_n 等を認める。このような関係は溶液 1l に対して試料を 3g，6g，12g，24g 加えた場合でも見られ，CaO の固定量はそれぞれ 28%，16%，9%，5% であり，反応後の液濃度（m・mol/l）はそれぞれ 7，4，2，0.8 である。16% の固定量では痕跡的に C_2ASH_n を認めるが，9% 等では何等結晶性物質が見られない。

これらの実験事実から 20°C および 40°C では試料に対し 20% 程度以上の CaO が固定されると C_2ASH_n が生成し安定であり，反応液の濃度が 5m・mol/l 程度以上であれば C_4AH_{13} または C_3AH_8 も共存すると云える。

80°C のような高温側での反応では CaO の固定量が約40% に達する頃から C_3AH_6 が生成し，始めに生成していた C_4AH_{13} および C_3AH_8 は漸次減少する。CaO の固定量が約 25% では何等結晶性物質を生成しない（低温側反応ではこの程度の固定量で C_2ASH_n を生成する）。

上にのべた反応条件と反応生成物についての実験結果を綜合すると，アロファンは $Ca(OH)_2$ 溶液より CaO を固定し，固定体中の CaO は除々に C_2ASH_n を生成し，この速度は CaO の固定量の大きい程大きいと考えることができる。また CaO の固定量は温度が高いほど多く，80°C では C_3AH_6 を生成する。CaO の固定量が少ないときは，C_2ASH_n または C_3AH_6 生成の速度が小さいので結晶性物質の生成には長時間を要する。また C_2ASH_n および C_3AH_6 と共存する C_4AH_{13} および C_3AH_8 等の結晶性物質は $Ca(OH)_2$ 濃度と平衡関係を持つことも考えられる。

(5) 赤外線吸収スペクトルを電子顕微鏡写真

C_3AH_6 が明瞭に見られる反応体は 6.8μ の新しい吸収が認められるが，7.1μ の吸収は明瞭でない。また 11.6μ の吸収が明瞭となり，8.2～12.5μ の吸収の谷も浅くなる。これが C_3AH_6 の特徴と考えられるが，比較すべき文献も見当らないので詳細には論じられない。C_3AH_8，C_4AH_{13} をふくむものは 6.3～7.5μ に顕著な吸収を認め，この吸収部でも 6.8μ と 7.1μ にピークが見られ，C_3AH_6 が 7.1μ のピークを欠くことと対比される。CaO を収着しているが結晶性物質を生成していない反応体では 6.3～7.5μ の吸収を認める。

これらの結果から考えられることは，アロファンが CaO を吸着すれば 6.3～7.5μ に巾の広い吸収が生ずるほかは吸着剤のアロファンとほとんど同じである。C_3AH_8 および C_4AH_{13} が生成すればこの吸収部に 6.8μ と 7.1μ のピークが認められ，C_3AH_6 が生成するときは巾広い吸収は小さくなると同時に 7.1μ のピークが消える。C_2ASH_n の吸収の特性は現在明らかでなく，C_4AH_{13} および C_3AH_8 と区別できない。なお C_3AH_6 および C_2ASH_n を含むものでは 11.6μ の吸収が比較的大きく，C_4AH_{13} 等は 11.4μ で比較的小さい。なお C_3AH_6 を含むものは 8.2～12.5μ の吸収部がアロファンよりも平旦化されるのも特性である。

電子顕微鏡写真の観察結果をX線回折結果等と比較して考えてみる。試料は少量のアンモニア水で分散させているので，液相との平衡関係を考慮して考えることが必要であり，試料の作製方法について今後の研究で検討するべきである。

No.-1 および No.-8 のように X 線で結晶性物質を認めない $Ca(OH)_2$ 収着体では，アロファン粒子が角ばりまたは崩れかかり，アロファンの構造変化は十分推定できるが結晶性物質は見られない。X線回折で著しく顕著な C_2ASH_n の存在を示めしている合成ゲルの反応体でえられた電顕像は，C_2ASH_n の形態等を知るのに都合がよい。この結果からは C_2ASH_n の特徴は，不規則な四角形ないし六角形を示めす結晶でその辺の一部が直線ではなく円味を持つ場合が多く，うすい結晶が少しづつずれて重なり合い比較的厚い結晶にもなっている。このような例は結晶度の良好な C_2ASH_n を与えると考えた No.-3 および No.-2 にもあてはまり，また No.-0 でも同様である。これらの結晶は電子回折によって No.-0 で見られるような回折図を与え，網面間隙は次のようである。

2.87(s), 2.52(vw), 1.67(s), 1.42(m), 120(w)
2.92(s), 2.54(w), 1.67(m), 1.43(w～m), 1.06(w)
2.91(s), 2.52(w), 2.38(w), 1.87(w), 1.66(s), 1.42(m), 1.20(w)

これらの値はX線回折で知りえた C_2ASH_n の網面間隙値と一致するが，C_4AH_{13} 等も同様な値を与えることを考慮しておかねばならない。これらの結晶がアロファンの不規則な球状を一部残していることは，これらの結晶が $Ca(OH)_2$ を収着したアロファンより成長すると考えるこの反応の機構を支持するものである。

80°C での反応では，No.-9 の初期1時間ではやや角ばり，一部に六角に近い板状晶が見られる。この電子回折によれば次の網面間隙を与える。

約 5.0(m), 2.90(s), 2.51(m), 1.88(w), 1.67(s), 1.45(w), 1.36(w), 1.22(w), 1.02(w)

この値は C_2ASH_n でえられた値と同様であるが，約 5.0Å に回折線を認める点が特に異なり，C_3AH_6 と考えることができる。さらに5時間に至れば (No.-10) アロファン粒子は伸長化し，電子回折では No.-9 の場合と殆んど同じ網面間隙を与える。5週間に至れば (No.-11) 一部の板状体も見られるが，アロファン粒子が正六角形の形状に近いものに変ったと考えられる場合もあり，これら粒子の電子回折よりは次の網面間隙をうる。

3.4(w), 3.1(s), 2.78(s), 2.48(w), 2.26(s), 2.08(s), 1.77(m), 1.71(w), 1.68(w)

この値は C_3AH_6 の生成を意味するものである。結局 80°C の場合でも $Ca(OH)_2$ 収着体の生成，それよりの結晶化が起ると考えるべきを示めし，X線回折の結果とも一致している。

40°C の場合の No.-6 では C_2ASH_n の生成が，60°C の場合の No.-7 では C_3AH_6 の生成が示めされ，X線回折結果と一致する。

電子顕微鏡による観察からは，アロファンはまず $Ca(OH)_2$ 収着体を造り，C_2ASH_n を生成するときは伸長化し，C_3AH_6 を生成するときは正六角形に近い投影を与えるように変化し，それぞれの結晶を生成する。これらの生成結晶がアロファンの形状に支配されていることは十分推定でき，これら結晶は液相を経由しないと推定できる。また C_3AH_6 は著るしく小さい結晶であることも収着体よりの生成を示めすものであろう。

電子回折結果は C_2ASH_n は約 5.0Å 線を持たないことは C_3AH_6 と区別しうる点であろう。

なお $CaO—SiO_2—H_2O$ 系化合物については電顕観察では何等知りえない。

[4] 要　約

アロファン粘土と $Ca(OH)_2$ 水溶液との反応を，温度，濃度，反応時間，試料量と液量の関係等の諸条件を変えて実験し，反応生成物をX線回折法を主として研究した。反応生成物としてえられるものは結晶性物質としては，C_2ASH_n, C_4AH_{13}, C_3AH_6, C_3AH_6 (おそらく C_3AH_6-C_3ASH_4 系と考えられる) であり，このほかにX線的には結晶と考えられない CaO を固定したアロファン (CaO 収着体) を認めた。

この反応は高温型と低温型に分類でき，低温型では C_2ASH_n が安定であり，高温型では C_3AH_6 が安定であることを明らかにした。これらの反応では何れも温度が高かい場合および濃度の高かい場合は，温度が低い場合および濃度の低い場合の反応が加速された状態となることを認めた。

反応生成物の安定性を検討し，反応生成物は反応液の濃度と平衡関係にあり，この平衡関係は温度にも関係することを知った。また CaO の収着量とも関係することも推定した。

この反応では先ず液中より CaO の収着が起こり，Ca^{++} と OH^- は液中より等量的に減少する。収着量は温度または濃度が高い方が大であり，収着平衡にも早く達する。収着量がある量に達すると低温型反応では C_2ASH_n の生成が始まり，高温型では C_3AH_6 の生成が始まる。収着が起こるとともに溶液中の濃度は低下し，それにともない収着速度，収着平衡体よりの結晶性物質の生成速度と平衡関係が変化することを認めた。

赤外線吸収スペクトルは，結晶性物質が生成しなくとも反応体は一般に 6.3～7.5μ に新たに吸収を示めすほかは，アロファンのそれと余り変らない。

電子顕微鏡での観察では $Ca(OH)_2$ の収着体よりの結晶の生成成長を推定しうること，C_2ASH_n の形態の特徴および C_3AH_6 の結晶度の低いこと等を認めた。

なお本報告の一部はセメント技術年報XIV, 353—359, 1960 に掲載されている。

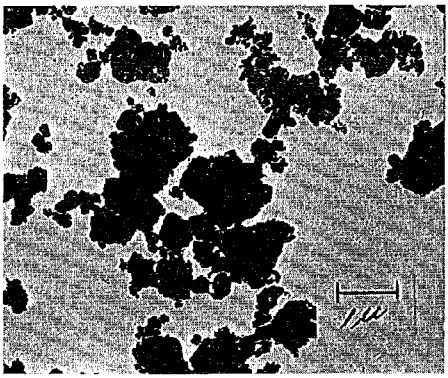
文　献

(22) H.G.Midgley : The Chemistry of Cement and Concrete (F.M.Lea), 612, 1956

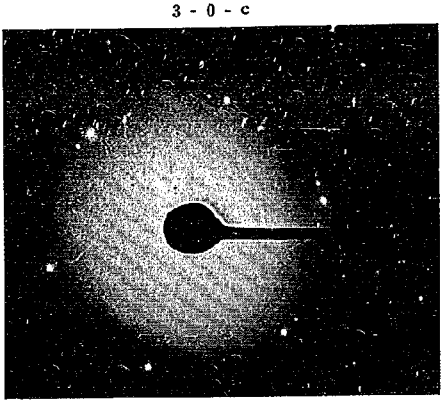
(23) Index of the X ray Powder Data File (ASTM 1958) No.-2-0083

(24) T.Thorvaldson, N.S.Grace, V.A.Vigfussion Can. J.Res. 1,201, 1929

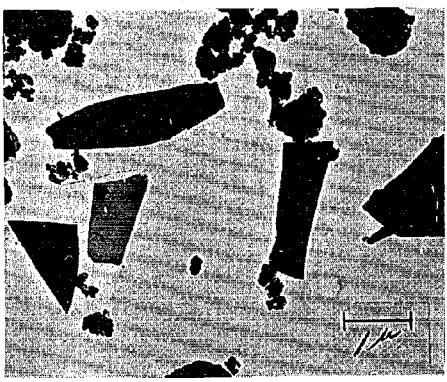
3 - 00 - a



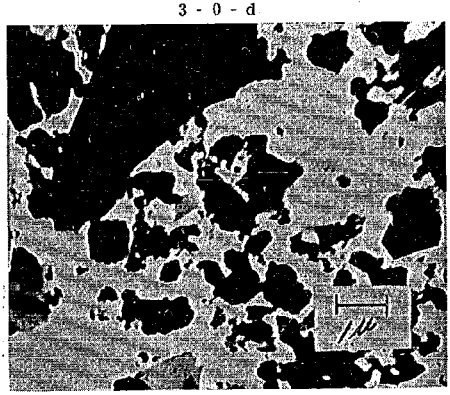
3 - 0 - c



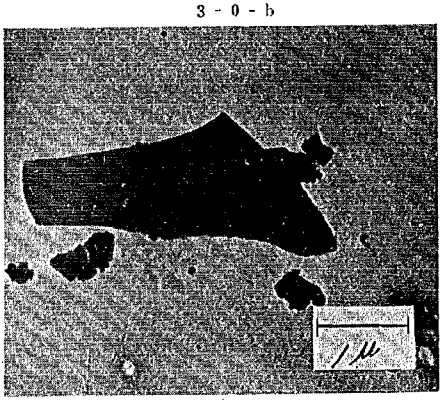
3 - 0 - a



3 - 0 - d



3 - 0 - b



3 - 0 - e

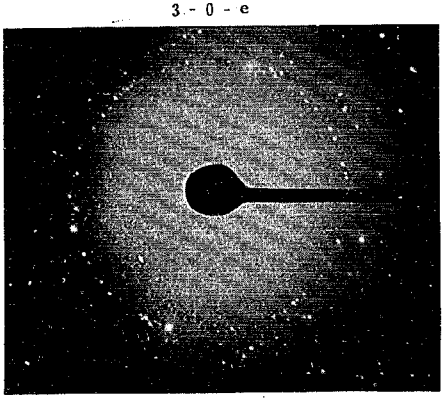
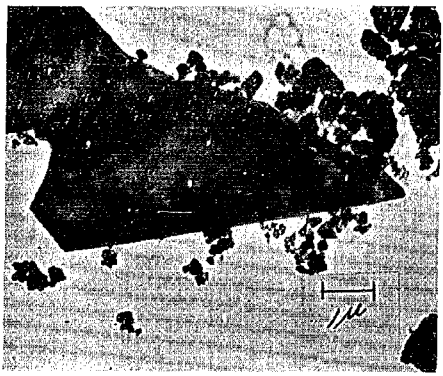


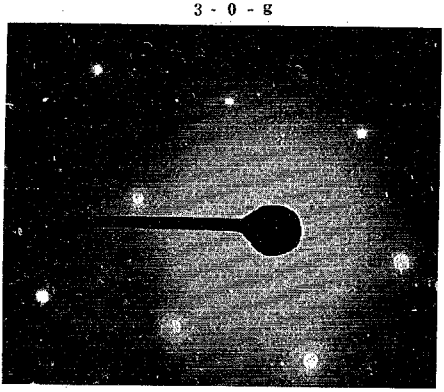
写真-3　アロファンと $Ca(OH)_2$ との反応生成物の電子顕微鏡写真

3 - 0 - f

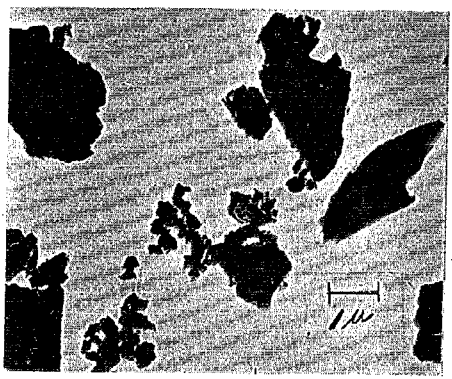


3 - 2 - a

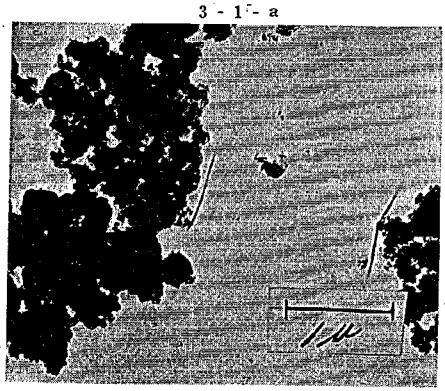
3 - 0 - g



3 - 2 - b



3 - 1 - a



3 - 3 - a

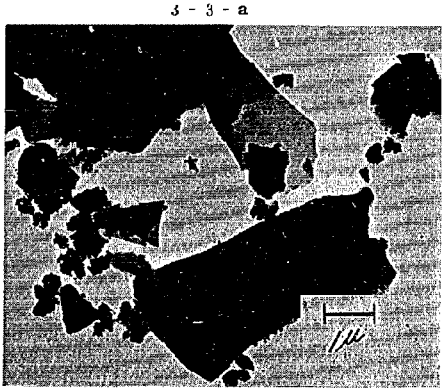
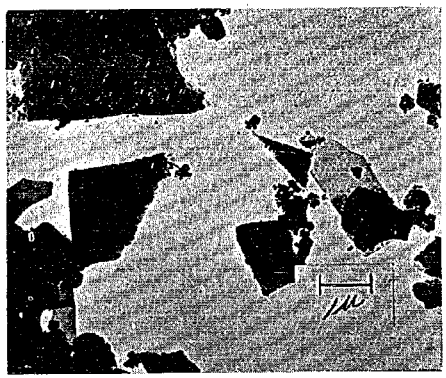
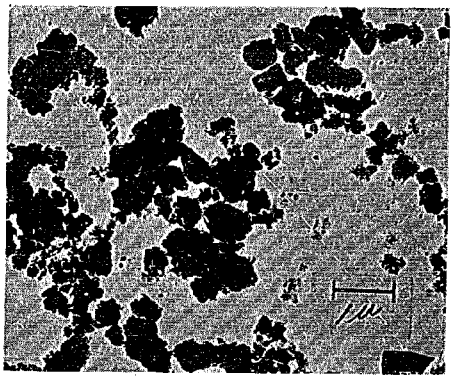


写真-3

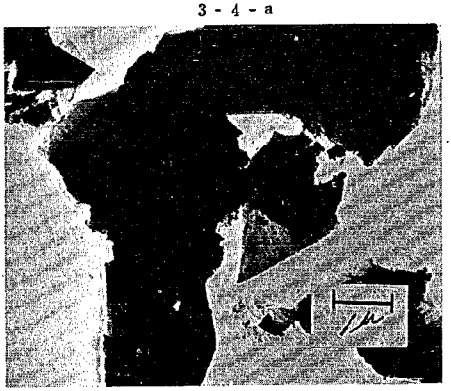
3 - 3 - b



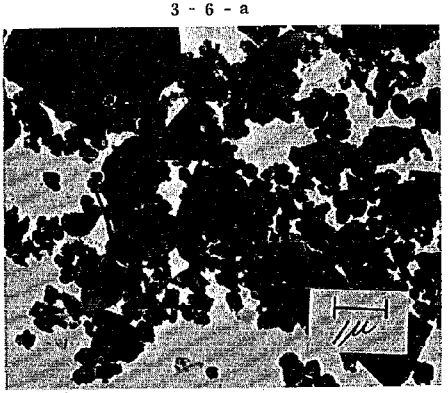
3 - 5 - a



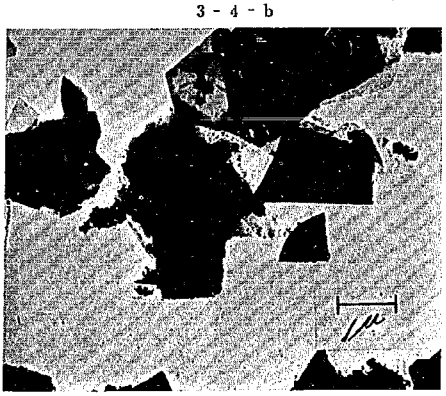
3 - 4 - a



3 - 6 - a



3 - 4 - b



3 - 6 - b

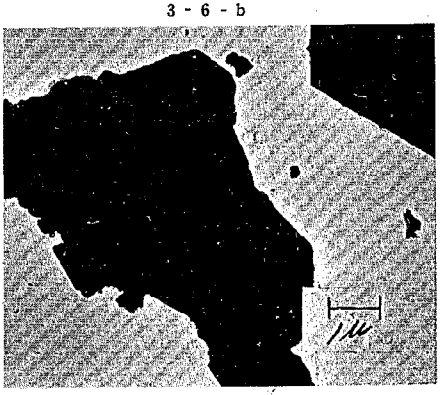
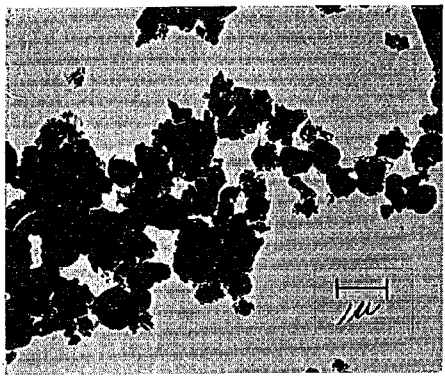
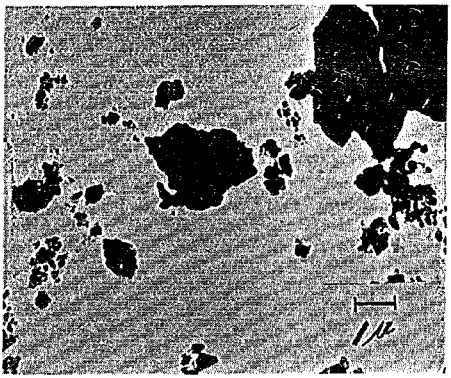


写真-3

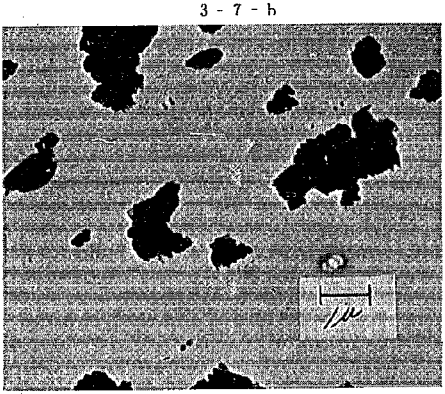
3 - 7 - a



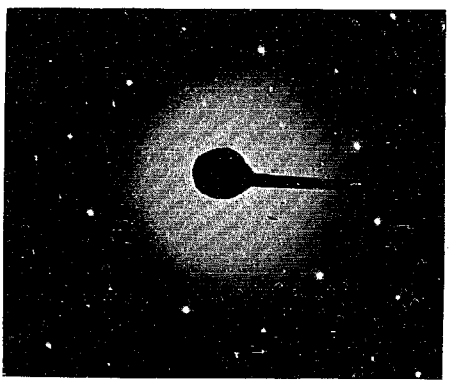
3 - 9 - a



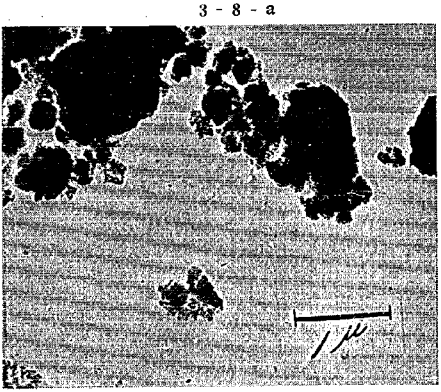
3 - 7 - b



3 - 9 - b



3 - 8 - a



3 - 10 - a

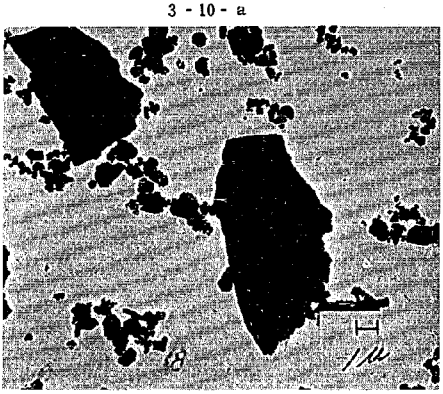
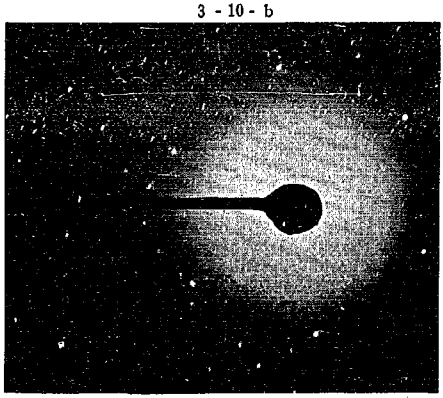
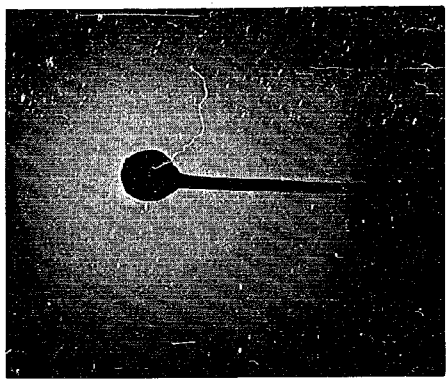


写真-3

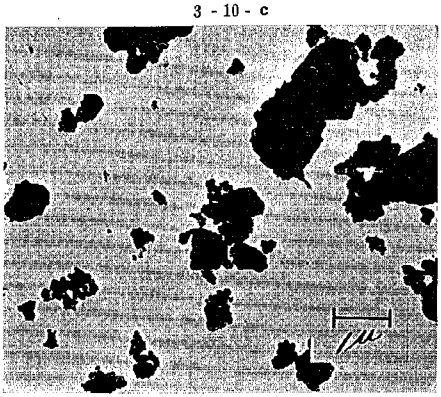
3 - 10 - b



3 - 11 - b

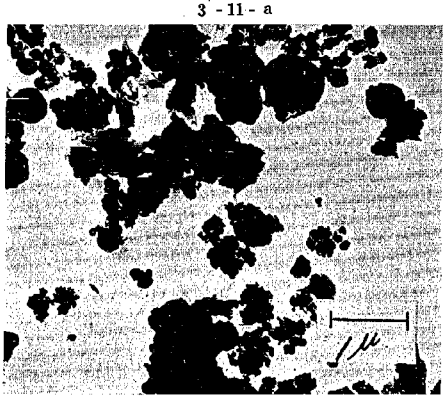


3 - 10 - c



3 - 11 - c

3 - 11 - a



3 - 12 - a

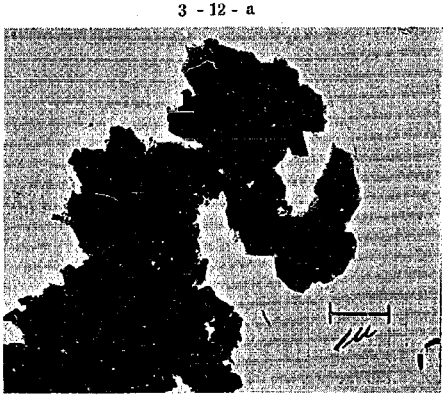
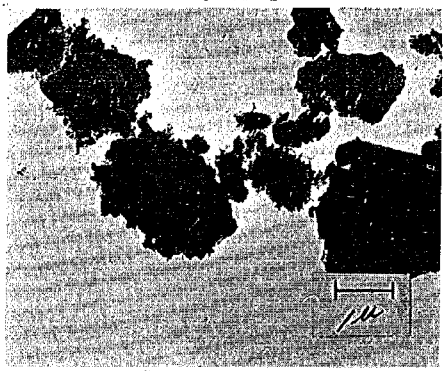


写真-3

3 - 12 - b



3 - 12 - c

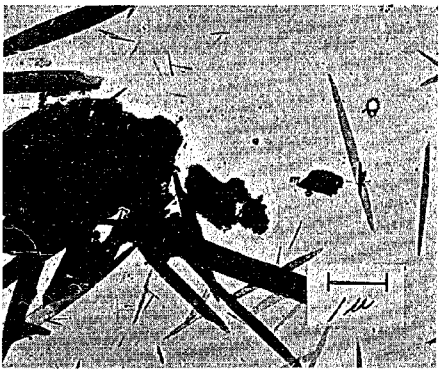


写真-3

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 110, January 1962

CONTENTS

1. A. Ariizumi, O. Kondou and Y. Mori
A Report on the Research of Underground Water with Radioisotopes (The Fourth Report)
—— Investigation of the Treatment of Acid Water by Chemically Dissolving Method at the Tamagawa Hot Spring —— ..... (1)

2. T. Takenouchi, M. Fukuoka, M.Hosoi, H. Kikkawa, A. Tsuchiya, T. Kinoshita, M. Tominaga and H. Mitsui
The Storm Surges and the Disasters caused by the Typhoon No. 5915 (Nicknamed Ise-Bay Typhoon or the Typhoon Vera) ..... (5)

3. K. Nakamura
Quality Control Limit ..... (83)

4. A. Ariizumi
Stabilization of Allophane Soils by Lime and Gypsum (1)
—— Hydrated Gehlenite as Reaction Product of Allophane with Lime Solution —— ..... (97)

5. A. Ariizumi and M. Oba
Stabilization of Allophane Soils by Lime and Gypsum (2)
—— The Reaction Conditions of Allophane with $Ca(OH)_2$ Solutions —— ..... (113)