

ISSN 0386—5878

土木研究所資料 第2368号

土 木 研 究 所 資 料

谷田部試験地における水文調査報告書
(その2)

昭 和 61 年 2 月

建設省土木研究所
河川部水文研究室

Copyright ©(1986) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

谷田部試験地における水文調査報告書 (その2)

水文研究室 室長 吉野 文雄
研究員 吉谷 純一
技官 細谷 信夫

要 旨

筑波研究学園都市の谷田部地区を対象とした水文調査・研究に関する第2報である。試験地の流出解析結果、水収支、地下水変動特性及び、地下水シミュレーション結果についてとりまとめた。

キーワード：試験地調査，谷田部試験地，流出，地下水，水文

ま え が き

本報告書は土木研究所が地下水と地表水の水収支関係を総合的に調査する目的で昭和58年度から調査を開始した谷田部試験地における研究成果をとりまとめたものである。この試験地は昨年（昭和60年）に開催された国際科学技術博覧会の会場のほぼ全域が、工業団地に造成されるため造成前後の水文環境の変化を調査研究する目的で設立された。

当地区の開発にあたっては、新しい雨水処理計画として降雨水の積極的な地下浸透を促し、水文環境の保全と同時に、調節池内敷地の有効利用を図るという基本方針が立てられた。水文研究室では、当地区を流出試験地のひとつとして位置づけ、①自然状態における降雨・流出状況と浅層地下水の挙動の把握、②開発に伴う水文環境の変化の把握、③降雨水の地下浸透処理を含む流出抑制策の実施による保全効果の評価を行うことを目標として、茨城県によって得られた観測データ（雨量、流量、地下水位）や、独自の現地実験データに基く解析を実施してきた。

一方、水文研究室の研究テーマ「地下水の保全に関する研究」も昭和58年から60年にかけて行なわれており、その研究の基礎資料として、当試験地の観測データが活用されている。

本報告書は、昭和60年3月に発行された「谷田部試験地における水文調査報告書（その1）」に記載できなかった、降雨と地下水の応答特性、地下水位シミュレーションの結果、を中心としてとりまとめたものである。前報では主に観測データを中心としたが本報告書では当試験地が未だ開発されなかった時期（昭和57年～59年）のデータに基づき未開発のローム台地における水収支、地下水位変動特性、及びモデルによる解析結果、を総合してとりまとめた。

降雨が地表面から浸透し地下水帯に到達する機構は、現在水文学の主要な研究テーマのひとつになっている。この問題はミクロな現象の解明から、マクロな水収支の問題としての把握までいろいろな立場から追求されているが、本報告書ではタンクモデルによる低水流出のアウトプットとして、雨水の浸透現象を把握すると共に、この浸透量を地下水帯へのインプットとして入力し、平面二次元モデルによる地下水シミュレーションを行ったものである。その結果、当初目標にした開発前の状況のモデル構成はほぼ行なえたと考えるが、開発行為の効果を定量化するためのデータの不足から、開発前後の差違を評価するまでには至っていない。この問題は今後共現地観測を継続実施して評価する必要がある。水文研究室では茨城県の協力の下に試験地観測を実施し、研究を続けて行く予定である。本報告書が地下水と降雨流出の関係を研究している研究者にとり有効に活用されることを期待している。

昭和61年2月

水文研究室長 吉野 文雄
研究員 吉谷 純一
技 官 細谷 信夫

目 次

まえがき

第Ⅰ章 谷田部流出試験地の概要	1
Ⅰ. 1 試験地の概要	1
1. 1 試験地の位置	1
1. 2 地 形	1
1. 3 地 質	5
1.3.1 試験地周辺	5
1.3.2 試 験 地	7
1.3.3 地層の物理・水理特性	9
1. 4 気 象	15
1. 5 土地利用	15
1. 6 利水状況	18
Ⅰ. 2 水文観測状況	20
第Ⅱ章 降雨流出特性	23
Ⅱ. 1 降雨流出特性	23
1. 1 降雨特性及び蒸発散量	23
1.1.1 降雨特性	23
1.1.2 蒸発散量	24
1. 2 流出特性	25
1.2.1 流出形態	25
1.2.2 浸透能	26
1.2.3 流出率	28
Ⅱ. 2 流出解析	29
2. 1 洪水流出解析	29
2. 2 長期流出解析	32
Ⅱ. 3 水収支	35

第Ⅲ章 地下水の特性	39
Ⅲ. 1 地下水変動特性	39
1. 1 試験地周辺の地下水変動	39
1.1.1 不圧地下水	39
1.1.2 被圧地下水	39
1. 2 試験地の地下水変動	43
1.2.1 不圧地下水(5, 10m 井)	43
1.2.2 被圧地下水(50m 井)	50
1. 3 降雨応答解析	51
1. 4 地下水位等高線	54
1. 5 地下水温	60
Ⅲ. 2 地下水シミュレーション	63
2. 1 目 的	63
2. 2 モデル	63
2.2.1 基本式	64
2.2.2 解 法	65
2. 3 モデルの領域及び要素分割	72
2.3.1 モデルの領域	72
2.3.2 要素分割	72
2. 4 パラメータ	75
2. 5 境界条件	75
2.5.1 涵養量	75
2.5.2 周囲境界条件	77
2.5.3 初期条件	77
2. 6 計算条件	77
2. 7 シミュレーション結果	80
2.7.1 地下水位の適合度	80
2.7.2 水収支	86
2.7.3 まとめ	87
第Ⅳ章 結 論	88
あとがき	89
資 料	91
参考文献	117

第Ⅰ章 谷田部流出試験地の概要

Ⅰ. Ⅰ 試験地の概要

1.1 試験地の位置

試験地は図1-1に示すように、茨城県筑波郡谷田部町大字水堀地区に位置し、利根川水系小貝川右支川の谷田川水系東谷田川及び蓮沼川流域（共に一級河川）に属する。

試験地境界は将来、筑波研究学園都市西部工業団地となる面積 101.6ha である。

なお、本試験地は、昭和60年3月17日より6ヶ月間にわたり「国際科学技術博覧会（科学博）」の開催された主会場であり、科学博閉幕後は工業団地造成工事が実施されている。

表1-1 地形図名

縮 尺	1/50,000	1/25,000
地形図名	谷 田 部	谷 田 部

1.2 地 形

本試験地は、関東平野の北東部に位置する稲敷台地に乗っており、この台地は北方に筑波山（876m）を中心とする筑波山地、東方に霞ヶ浦を望んでいる。（図1-2参照）

試験地は、図1-3、1-4に示すように東西を東谷田川、蓮沼川に挟まれた幅約1km、標高23～25mの台地になっており、中央部には蓮沼川支川の水堀川（流域面積約80ha）が台地を刻み、沖積低地を形成している。試験地界とこの水堀川流域界とは比較的近接しており、試験地面積の74%をカバーしている。（水堀川流域界については、1.2 水文観測状況で記す。）

水堀川以外の流域は、試験地西部と東部の小さな谷津に分かれて存在する。また、台地の縁辺部は比高10m前後の斜面をなして低地と接している。

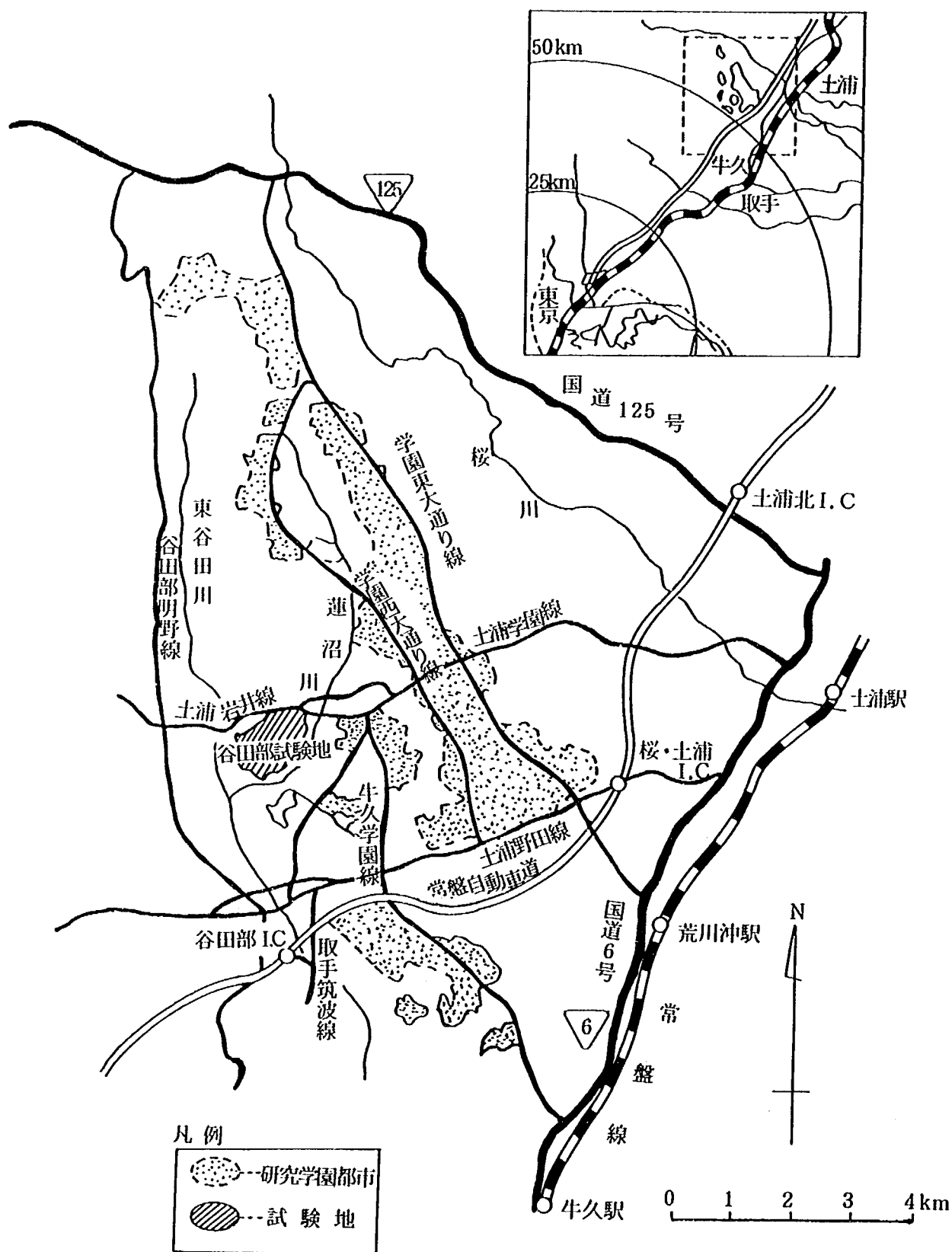
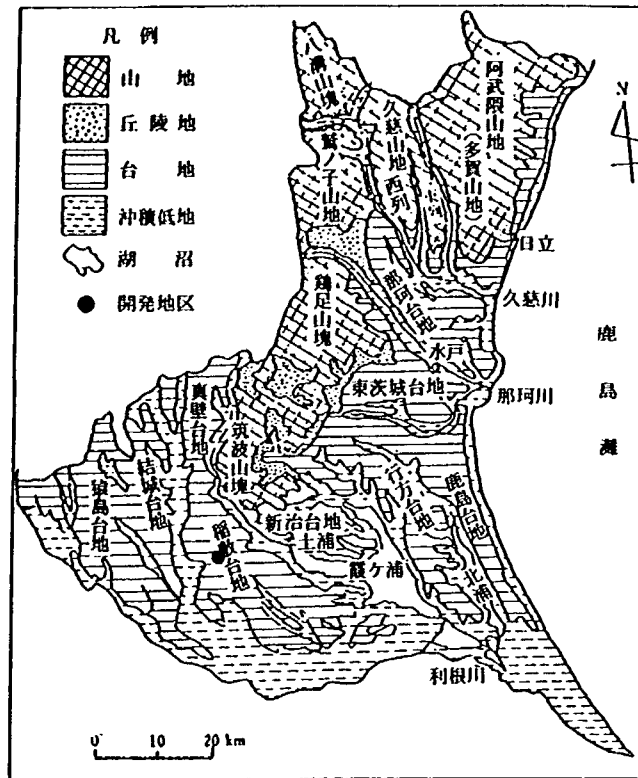
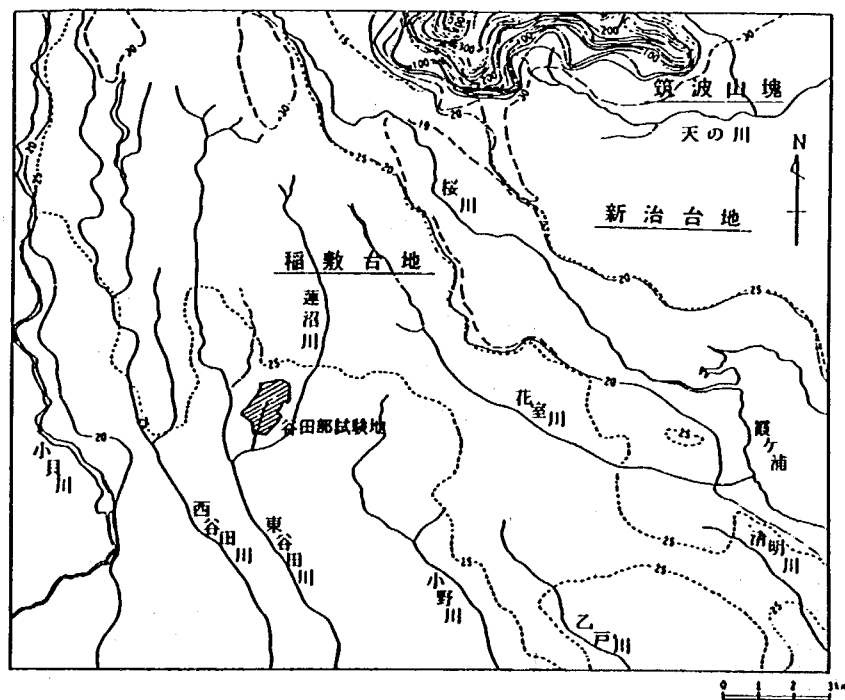


図1-1 谷田部試験位置図



(出典：筑波研究学園都市地盤図)

図1-2 地形分類図(茨城県)



(出典：土地分類基本調査(土浦))

図1-3 試験地付近の地形



図1-4 試験地流域図

1.3 地 質

1.3.1 試験地周辺

試験地周辺の地質構成は表1-2に、模式地層想定図は図1-5に、表層地質図は図1-6に示すとおりである。

まず、基盤は、筑波山地を構成する岩石と同様の花崗岩類と共に、原石は古生層と考えられる変成岩である。これらを、直接上総群以上の地層が覆っている。

上総層群は、前期更新世の海成層で層厚4,000m位と言われており、現在の大陸棚斜面以深の深海堆積物より成る地質から堆積期の後半には、急に大陸棚以浅の浅海性のものになる。この上総層群の隆起により当時の海域は古東京湾として封じ込められ、その湾内に下総層群が堆積した。下総層群は最上位の成田層をはじめ全5層より成る。これらは互いに不整合の関係にあり、氷河性海面変動によってもたらされた現象と考えられている。

成田層は、下末吉海進期に堆積したもので主として非常に淘汰の良い砂層から成り、礫質の部分と礫層として発達するものをはさむ。成田層の層厚は35m以上と言われており、所により数mの粘土層が発達し、10mを越すこともある。

成田層の上部にはヒメスナホリムシなどの生痕化石がみられ、堆積盆（古東京湾）の浅化を裏付けている。この上位に成田層から関東ローム層へ陸化してゆく過程で形成された竜ヶ崎層が不整合に覆っている。

竜ヶ崎層は、層厚3～5m以上、最大10～11mに達し、古鬼怒川の氾濫原堆積物に相当するという。浅化した古東京湾の長期に渡る湿地の環境のもと、下末吉ローム層の降灰が、一部を除きその広大な湖沼や湿地に堆積し、常総粘土層が形成された。この地層は竜ヶ崎層を整合に覆っており、白色～淡白色の凝灰質ないし軽石質の粘土層で0.5～3mの層厚を有し、関東ロームに不整合に覆われている。

表1-2 筑波地区の地形・地質・帯水層区分表

年 代		地 形	地 質		主 要 帯 水 層			
地質年代		地形面	地 層	層 相	帯 水 層	地下水の区分	分布標高	地下水の性状
完新世		沖 積 面	沖 積 層 (A)	有機質土 泥・砂・礫	砂 層 (As) 砂礫層 (Ag)	自由面地下水	沖 積 地	主に域内の降水によって涵養される地下水で、降水との相関が高い。土木、建築工事に際し問題となる帯水層。
第 四 紀	更 新 世	成 増 面 (台地)	立川ローム層 (Lm) 武蔵野ローム層 (Lm)	ロ ー ム	ローム層	自由面地下水	台地表層部	
			常総粘土層 (tc)	凝灰質粘土	—	—	—	
			竜ヶ崎層 (Di)	有機質土 泥・砂・礫	砂層、砂礫層 Ds-1 Dg-1	主に 自由面地下水	+20～+10m	
			成田層 (D2) (下総層群上部)	泥・砂・礫	砂層 (Ds-2)			
新第三紀			下総層群下部 (D3, D4)	有機質土 泥・砂・礫	砂・砂礫層 (Dg-3)	被圧地下水	-20～-40m	域内の降水による影響は少なく広域的な下館帯水層等から涵養される。
			上 総 層 群	砂・礫	砂礫層 (Dg-5)	被圧地下水	-70m以深	

(出典：筑波研究学園都市地盤図)

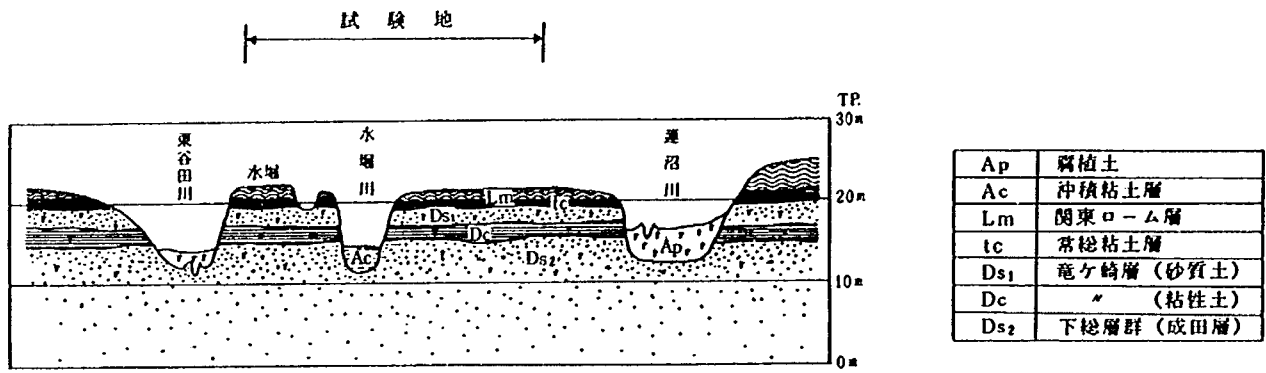


図 1 - 5 模式地層想定断面図

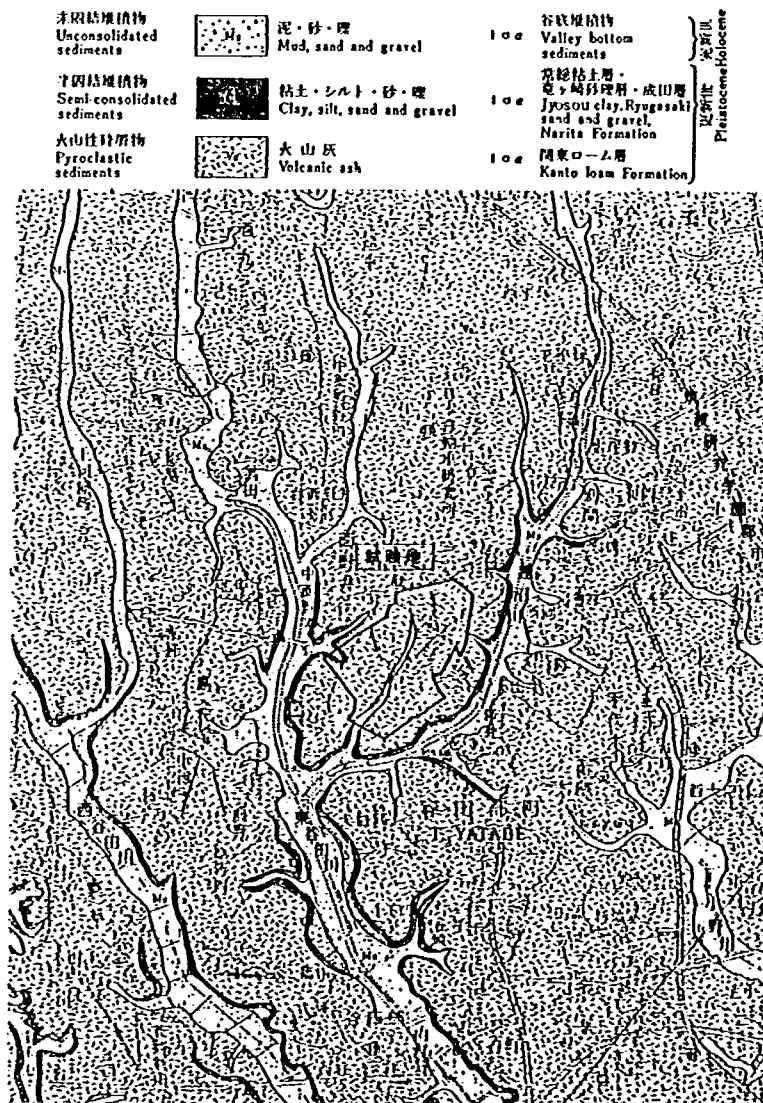


図 1 - 6 試験地周辺表層地質図

1.3.2 試験地

試験地の位置する台地の地質は、図1-7に示すように表層から、関東ローム層、常総粘土層、竜ヶ崎層（砂層、粘土層）、下総層群の順に構成され、それぞれほぼ水平に堆積し広く地区周辺に連続して分布する。

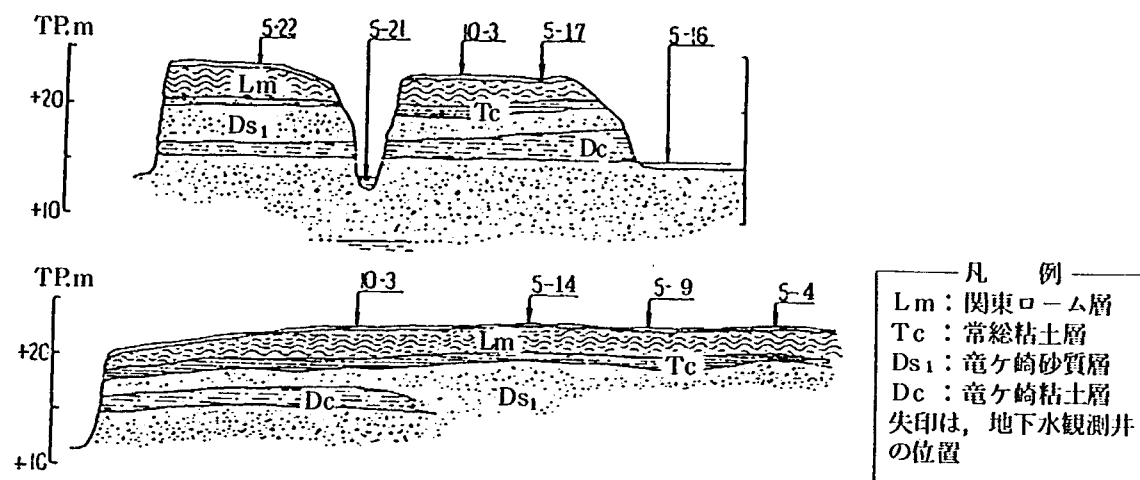


図1-7 試験地模式地質断面図

竜ヶ崎粘土層は、層厚1 m前後で試験地内に広がっているが、試験地中央部には一部存在しないところがある。この層の上部は竜ヶ崎砂層で、層厚は5 m前後である。これより上位の地層は、50cm～1 m程度の層厚の常総粘土層、その上に、層厚2 m前後の関東ローム層、そして約30cmの表層となっている。

本試験地域の地下水は、竜ヶ崎層及び成田層中の砂・砂礫層を帯水層とする不圧地下水と、下総層群下部層を帯水層とする被圧地下水とに大別され、いずれも層状水となっている。（表1-2参照）

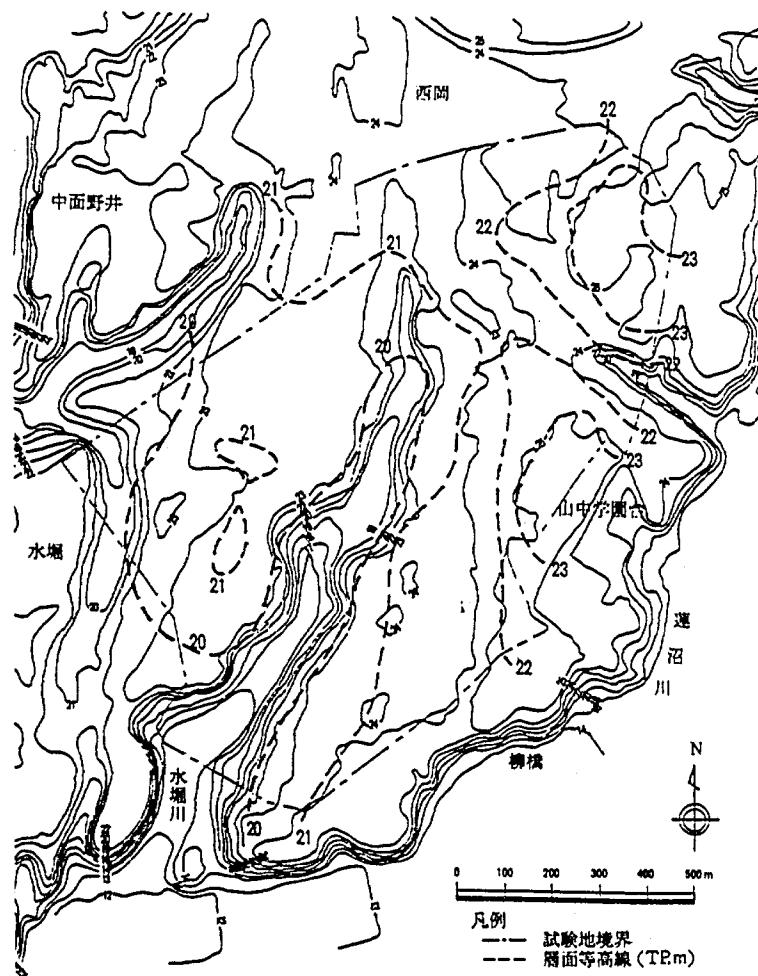


図1-8(a) 常総粘土層層面等高線図

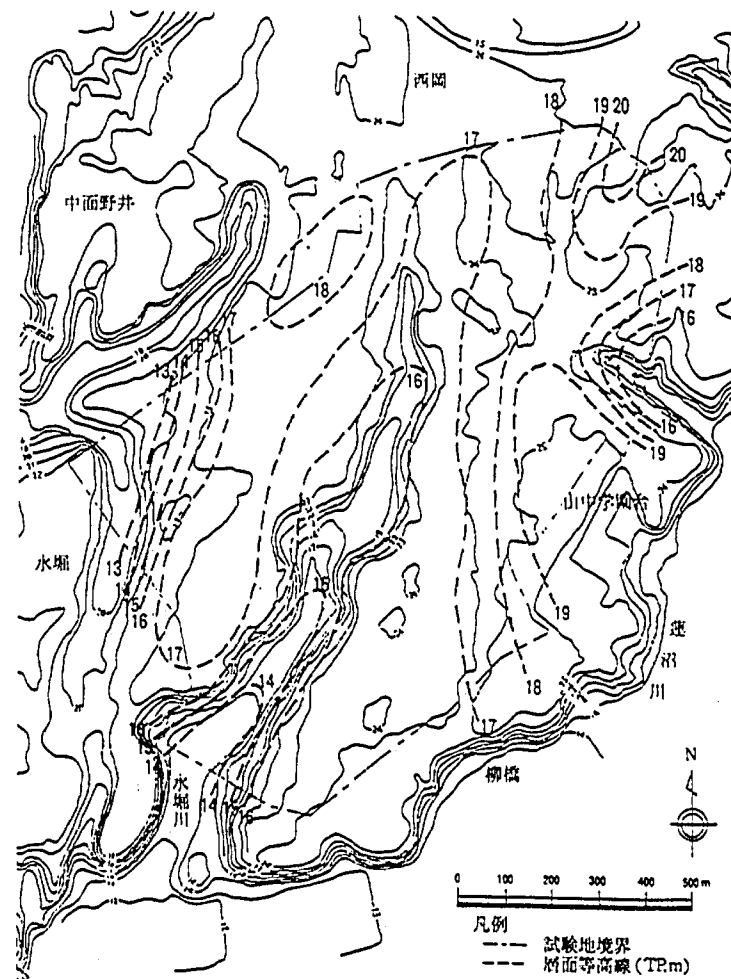


図1-8(b) 竜ヶ崎粘土層層面等高線図

1.3.3 地層の物理・水理特性

試験地で行われた地質調査ボーリング孔において、乱さない試料を採取し室内試験を行った結果及び現場透水試験の結果を表1-3、図1-9に示す。

ローム層と常総粘土層の特徴は、粒度構成上で若干砂分の比率が常総粘土層の方が多い。また、ローム層の比重は、常総粘土層に比べ大きい、間隙比にかなりの差があるために湿潤密度は減少している。

帯水層の透水性を表現する場合に、一般に透水係数 $K=10^{-1}$ cm/sのオーダーに境界線を引き難透水層及び透水層地盤として区分している。

試験地の帯水層は竜ヶ崎砂層及び成田砂層で、その透水係数は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/sの範囲にあり、難透水層に近い帯水層に分類される。

また、ローム層及び粘土層では、透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-6}$ cm/sのオーダーとなっており、難透水層地盤と判断される。

表1-3 地層の物理・水理特性一覧表

地層名	関東ローム層	常総粘土層	竜ヶ崎砂層	竜ヶ崎粘土層	成田砂層	成田粘土層	成田礫層	下総層群 下部砂層	下総層群 下部粘土層	下総層群 下部砂礫層
特性	Lm	tc	Ds1	Dc1	Ds2	Dc2	Dg2	Ds3	Dc3	Dg3
土質	ローム	凝灰質粘土	砂質土	粘性土	砂質土	粘性土	礫質土	砂質土	粘性土	礫質土
粒度	(0)	(1)	(1)	(0)	(1)	(1)	(99)	(9)	(0)	(72)
砂分	(11)	(43)	(82)	(26)	(90)	(42)	(1)	(84)	(9)	(27)
シルト分	(53)	(21)	(10)	(44)	(9)	(46)	(0)	(7)	(58)	(1)
粘土分	(36)	(35)	(7)	(30)	(9)	(11)	(0)	(7)	(33)	(1)
三角座標分類	F	F	SF-S	F-SF	S-F-S	F	G	S-F	F	S-G
比重 Gs	2.728 ~2.782 (2.760)	2.667 ~2.780 (2.714)	2.688 ~2.748 (2.727)	2.720 ~2.736 (2.728)	2.729 ~2.772 (2.751)	2.729 (2.729)	—	2.777 ~2.782 (2.780)	2.719 ~2.758 (2.734)	2.758 ~2.780 (2.775)
含水比 Wn (%)	83.2 ~128.0 (111.3)	43.8 ~99.4 (58.0)	26.6 ~40.6 (34.7)	32.5 ~52.9 (44.7)	21.5 ~45.9 (27.7)	52.8 (52.8)	1.9 (1.9)	13.2 ~24.9 (19.1)	11.3 ~59.9 (36.8)	1.2 ~2.6 (2.0)
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.277 ~1.490 (1.338)	1.378 ~1.822 (1.665)	1.740 ~1.853 (1.814)	1.711 ~1.797 (1.742)	—	—	—	—	—	—
間隙比 e	2.384 ~3.953 (3.325)	1.203 ~2.985 (1.671)	0.926 ~1.185 (1.039)	1.005 ~1.436 (1.269)	—	—	—	—	—	—
飽和度 Sr (%)	87.6 ~96.0 (90.6)	91.7 ~100.0 (96.3)	78.9 ~100.0 (92.4)	88.0 ~100.0 (95.4)	—	—	—	—	—	—
透水係数(室内) K (cm/s)	7.22×10^{-6} ~ 8.51×10^{-4} ($10^{-5} \sim 10^{-3}$)	1.07×10^{-6} ~ 5.39×10^{-4} ($10^{-6} \sim 10^{-3}$)	1.05×10^{-4} ~ 7.44×10^{-4} ($10^{-4} \sim 10^{-3}$)	8.95×10^{-7} ~ 5.20×10^{-6} ($10^{-6} \sim 10^{-5}$)	—	—	—	—	—	—
透水係数(現場) K (cm/s)	9.33×10^{-7} ~ 2.76×10^{-6} (10^{-6})	2.64×10^{-6} (10^{-6})	1.08×10^{-4} ~ 6.44×10^{-3} ($10^{-4} \sim 10^{-2}$)	—	7.37×10^{-5} ~ 8.21×10^{-3} ($10^{-4} \sim 10^{-2}$)	—	—	—	—	—
有効空隙率 Pa (%)	2.8 ~ 9.6 (7.3)	0 ~ 6.2 (2.5)	0 ~ 10.1 (3.8)	0 ~ 6.0 (2.4)	—	—	—	—	—	—
備考 (試料採取深度)	1 ~ 3m	1.5 ~ 4m	3.5 ~ 4.5m	4.5 ~ 7.5m	10 ~ 17m	—	—	—	—	—

注) () の数字は平均値である。

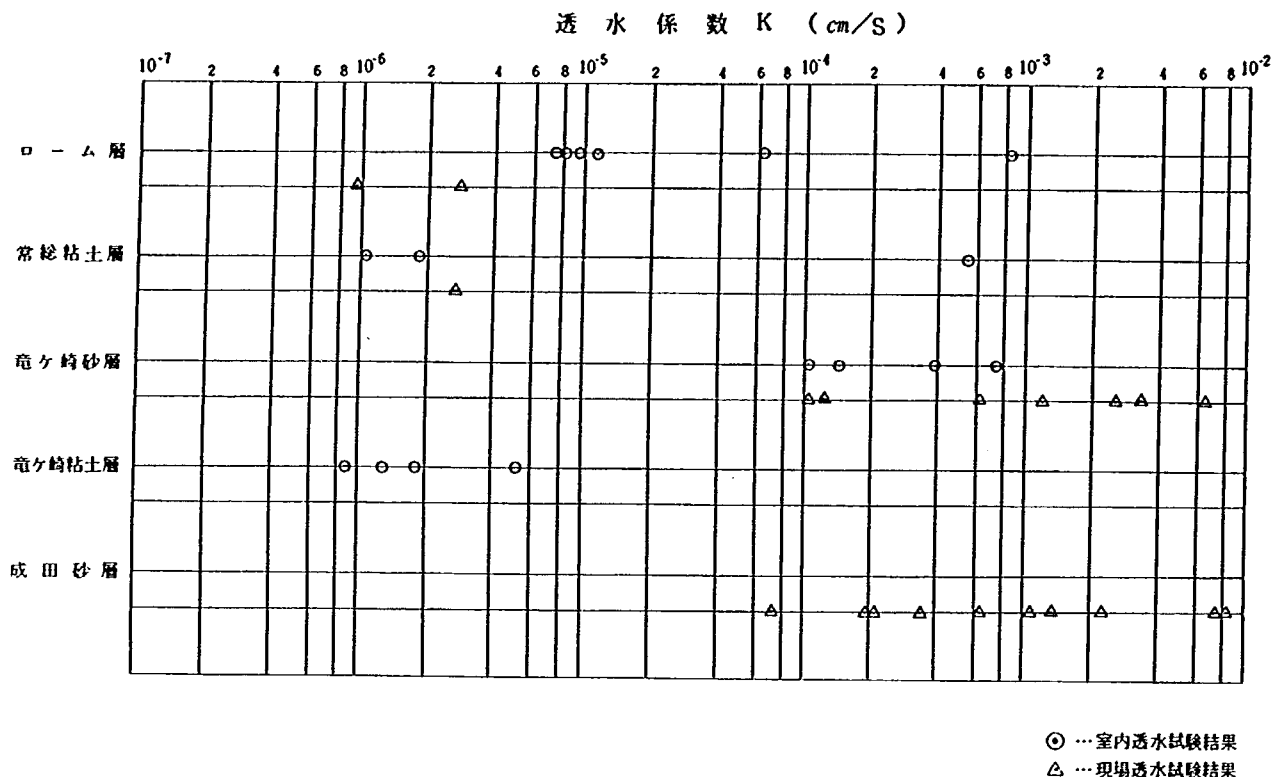


図 1-9 試験結果より得られた透水係数

試験地の水理定数について、試験結果値と推定値とを比較すると次のようになる。

(1) 有効空隙率

有効空隙率を降雨量と地下水位上昇量（地下水観測井による）の関係より推定した。

地下水の流出が無視できる短い期間において、総雨量（R）が地下水に涵養され地下水位上昇量（ ΔH ）となって現れる場合、Rを ΔH で除したもの（雨量係数）は、ほぼ有効空隙率に等しい。

$$\text{雨量係数 (Sp)} = \frac{R \text{ (mm)}}{\Delta H \text{ (mm)}} \approx \text{有効空隙率 (Pa)}$$

これによって求めた地表面と地下水位面間の土壌の有効空隙率を表 1-4 に示す。また、R～ ΔH の関係を図 1-10 に例示する。ただし、地下水位の高い時には降雨による地下水位上昇量が少ないので、Paの算定には、降雨時の地下水位の低い時で降雨量が10mm以上のデータを用いた。地下水観測井の位置等については、I. 2 水文観測状況を参照されたい。

これによると、試験地の Pa は 10.1～26.8% と範囲が広い。

表 1-4 有効空隙率

(降雨と地下水位上昇量より推定)

観測井	Pa (%)	データ数
No. 5-1	21.4	22
No. 5-3	21.4	39
No. 5-4	19.8	34
No. 5-5	19.0	37
No. 5-9	20.4	14
No. 5-12	13.0	42
No. 5-14	21.8	6
No. 5-15	26.8	7
No. 5-19	18.9	9
No. 5-20	22.9	15
No. 5-0	14.0	49
No. 10-1	24.7	35
No. 10-2	22.7	38
No. 10-3	14.3	29
E・ホ-2	10.1	20
平均値	19.4	—

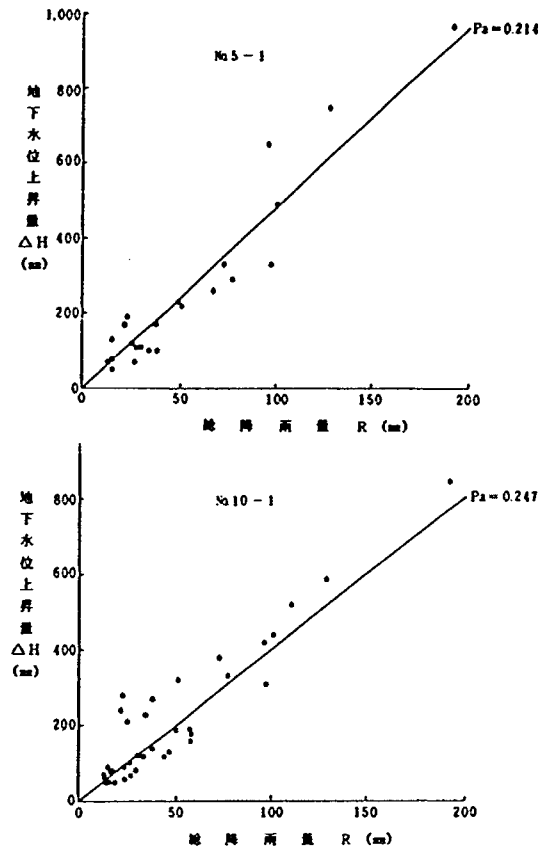


図 1-10 R ~ ΔH の関係

また、粒径によって有効空隙率を推定する。土質試験による各地層の有効径 (D_{10}) は、関東ローム層 0.001mm 以下、常総粘土層 0.001mm 以下、竜ヶ崎砂層 0.001 ~ 0.1mm、竜ヶ崎粘土層 0.001mm 以下である。この結果を Davis De Wiest による粒径と有効空隙率との関係図にあてはめると、有効空隙率は竜ヶ崎砂層で 6 ~ 30% 程度、粘土層で 6 % 以下である。(図 1-11 参照) また、団粒構造のよく発達している関東ローム層においては、表 1-5 から 20% 程度と推定される。

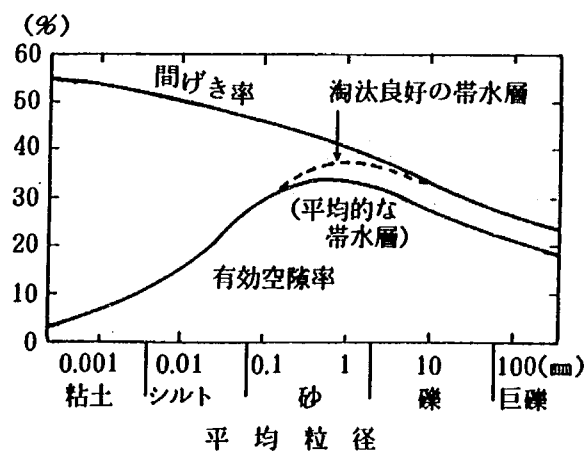


図 1-11 粒径と有効空隙率

(Davis De Wiest による)

表 1 - 5 土砂の空隙率, 保水率, 有効空隙率

地 層	空隙率 (%)	保水率 (%)	有効空隙率 (%)	地 層	空隙率 (%)	保水率 (%)	有効空隙率 (%)
沖 積 礫 層	35	10	25	沖積砂礫層	30	10~15	15~20
細 礫 層	35	20	15	砂 層	35~40	5~10	30
砂 丘 砂 層	30~35	10~15	20	ロ ー ム 層	50~70	30~50	20
泥粘土質層	45~50	30	15~20	泥層粘土層	50~70	45~60	5~10

(出典：山本莊毅, 地下水探査法)

有効空隙率について粒径から得た値と土質試験結果より得られた値とを比較すると, 関東ローム層, 竜ヶ崎砂層の試験結果の値は小さい。関東ローム層の試料は, 表 1 - 5 のローム層 (飽和度60~70%程度) よりも飽和されており, 地表下 1 m 以深のロームの間隙は約 9 割が液相と判断される。竜ヶ崎砂層以下の層の試料のほとんどは地下水中に没し飽和度が高いため竜ヶ崎砂層の有効空隙率は, 推定された値より小さい値を示している。

降水量と地下水位上昇量から推定された有効空隙率については, 地表面から地下水位面までの土壌の値であり, いずれの層の試験結果の値よりも大きい。地表面付近は有効空隙率が大きく, 降雨は一時的に地表面付近に貯留されるものと考えられる。

(2) 透水係数

粒径によって, 透水係数を推定した。

土質試験による各地層の平均的な20%粒径 (D_{20}) は, 関東ローム層 0.001~0.01mm, 常総粘土層 0.001mm 以下, 竜ヶ崎砂層 0.02~0.3mm, 竜ヶ崎粘土層 0.001~0.02mm, 成田砂層 0.075~0.2mm であった。この結果から, Creager による D_{20} と透水係数 (表 1 - 6) で透水係数を推定すると関東ローム層 10^{-5} cm/s 以下, 常総粘土層 10^{-6} cm/s 以下, 竜ヶ崎砂層 10^{-5} ~ 10^{-2} cm/s, 竜ヶ崎粘土層 10^{-5} cm/s 以下, 成田砂層 10^{-3} ~ 10^{-2} cm/s である。

表 1-6 クレーガー(Creager) による D_{20} と透水係数

D_{20} (mm)	k (cm/sec)	土質分類	D_{20} (mm)	k (cm/sec)	土質分類
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘土	0.18	6.85×10^{-3}	微粒砂
0.01	1.05×10^{-5}	細粒シルト	0.20	8.90×10^{-3}	
0.02	4.00×10^{-5}	粗砂シルト	0.25	1.40×10^{-2}	
0.03	8.50×10^{-5}		0.3	2.20×10^{-2}	中粒砂
0.04	1.75×10^{-4}		0.35	3.20×10^{-2}	
0.05	2.80×10^{-4}		0.4	4.50×10^{-2}	
0.06	4.60×10^{-4}	極微粒砂	0.45	5.80×10^{-2}	
0.07	6.50×10^{-4}		0.5	7.50×10^{-2}	粗粒砂
0.08	9.00×10^{-4}		0.6	1.10×10^{-1}	
0.09	1.40×10^{-3}		0.7	1.60×10^{-1}	
0.10	1.75×10^{-3}		0.8	2.15×10^{-1}	
0.12	2.6×10^{-3}	微粒砂	0.9	2.80×10^{-1}	
0.14	3.8×10^{-3}		1.0	3.60×10^{-1}	細レキ
0.16	5.1×10^{-3}		2.0	1.80	

透水係数について、推定値と試験結果の値とを比較すると次のことが言える。

関東ロームの場合、推定された透水係数は粘土一般の値であり、団粒構造のよく発達しているこの層では一般に透水係数が多い。(表 1-7 参照) このことから、試験地の関東ローム層(深度 1 m 以深)の透水係数は乱されていない土壌ではあるが一般的な値よりも小さいと言える。

表 1-7 関東ロームの飽和透水係数測定数例

採土地	深さ (cm)	構造	間隙率 (%)	飽和透水係数 (cm/sec)
農大(表土)	0	団粒状	76	2×10^{-2}
〃(心土)	80	カベ状	83	3×10^{-2}
宇都宮大(心土)	100	カベ状	78	4×10^{-2}
〃(鹿沼土)	240	団粒状	87	1.5×10^{-1}

(田淵らによる)

粘土層については、常総粘土層のうちの1データを除き推定オーダーと同程度であり、常総及び竜ヶ崎粘土層の透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-5}$ cm/sと判断される。

竜ヶ崎砂層、成田砂層については、推定オーダーとほぼ一致し、妥当な値と言える。

成田砂層より下の層の透水係数については、データを得ていないのでCreagerの推定表より求めた値を表1-8に示す。

表1-8 成田砂層下位層の透水係数

地 層 名	20%粒径 D_{20} (mm)	透水係数 K (cm/s)
成田粘土層	0.02 程度	10^{-5}
成田礫層	6.0 程度	10^1
下総層群下部砂層	0.15 程度	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
下総層群下部粘土層	0.001~0.01	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
下総層群下部砂礫層	0.4~13.0	$10^{-2} \sim 10^2$

1.4 気 象

試験地周辺の茨城県南西地方の気象は、「太平洋岸気候区」に属し、年降水量1,200～1,500mm、平均気温12～14℃程度を示している。

気候変化は、梅雨期、秋霖期に多くの降水があり、冬期には少雨となる。気温は8月に最高気温（8月の平均気温26度C前後）、2月に最低気温（2月の平均気温2度C前後）を示す。

試験地の降雨特性は、第Ⅱ章 降雨流出特性にまとめる。

1.5 土地利用

本試験地は科学博会場提供に伴い、昭和57年8月より粗造成が開始され、昭和57年度末には粗造成がほぼ完了し、昭和58年度中に基盤整備が終了、昭和59年にはパビリオンの建設が行われ、昭和60年、科学博が開催された。

開発以前の昭和56年当時の土地利用状況は図1-12、表1-9に示すとおりで、台地部分は畑、樹林地、宅地（集落）、低地部分は水田を基本とし、地形によって明瞭に差異が認められる。このうち大部分を占める台地部分の土地利用は、畑と樹林地が80%以上を占めており、その植生としては、アカマツ林（人工林）・果樹園等の植林が大半を占め、次いで普通畑、芝地が多く浸透性も高い。

このように、開発前の土地利用は、雨水の地下浸透・直接流出抑制にとって適した条件を有していた。

造成工事は資料.1に示すように伐採、盛土等が進められ、科学博開催時の土地利用（計画）は図1-13、表1-10に示すとおりである。

表1-9 土地利用面積（開発前）

地 目	面 積 (ha)	構 成 比 (%)
宅 地	2.5	2.5
樹 林 地	60.2	59.2
水 田	3.8	3.7
畑	23.3	23.0
荒 地	6.8	6.7
道 路	5.0	4.9
計	101.6	100.0

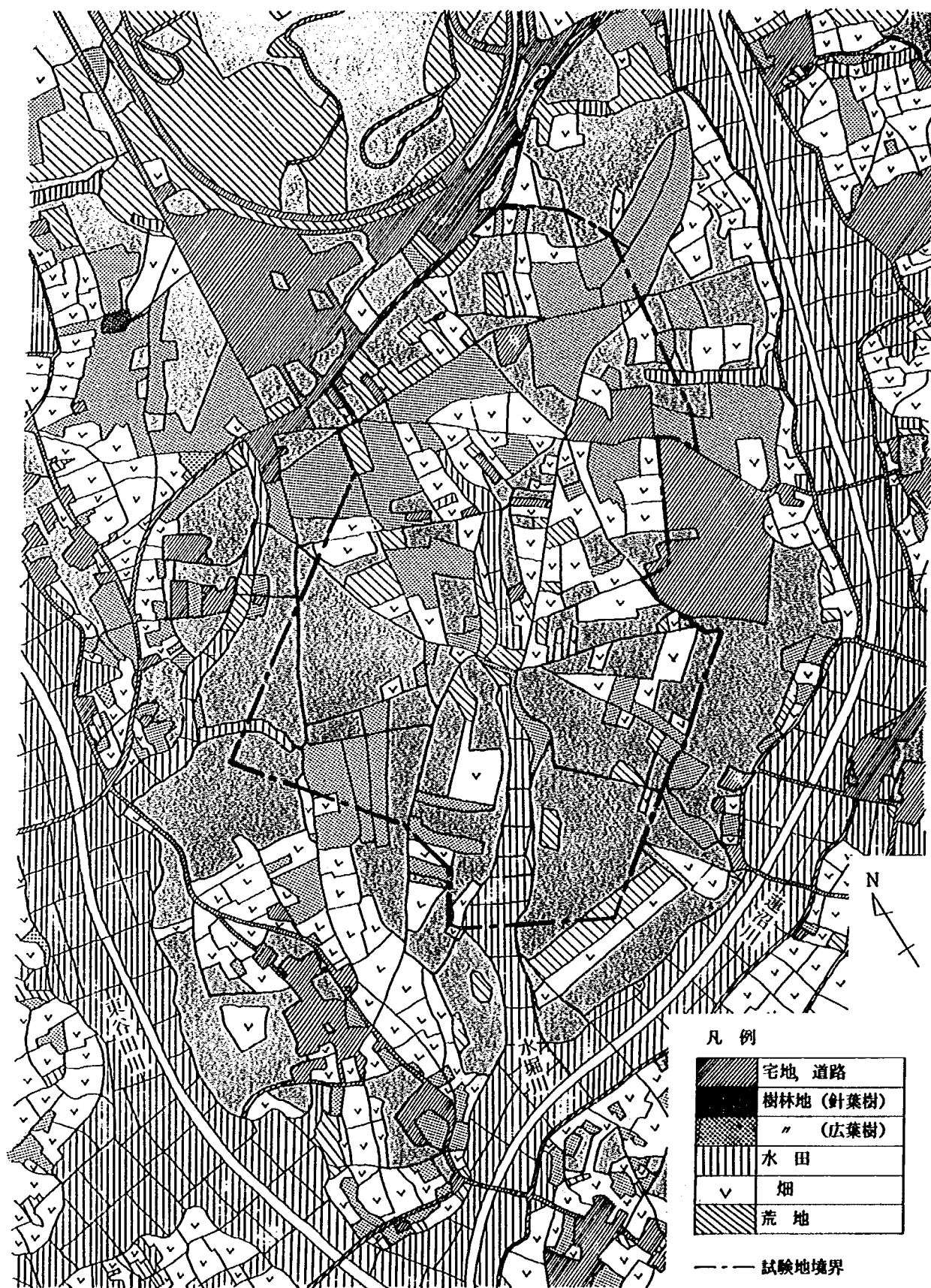


図 1-12 試験地周辺土地利用図

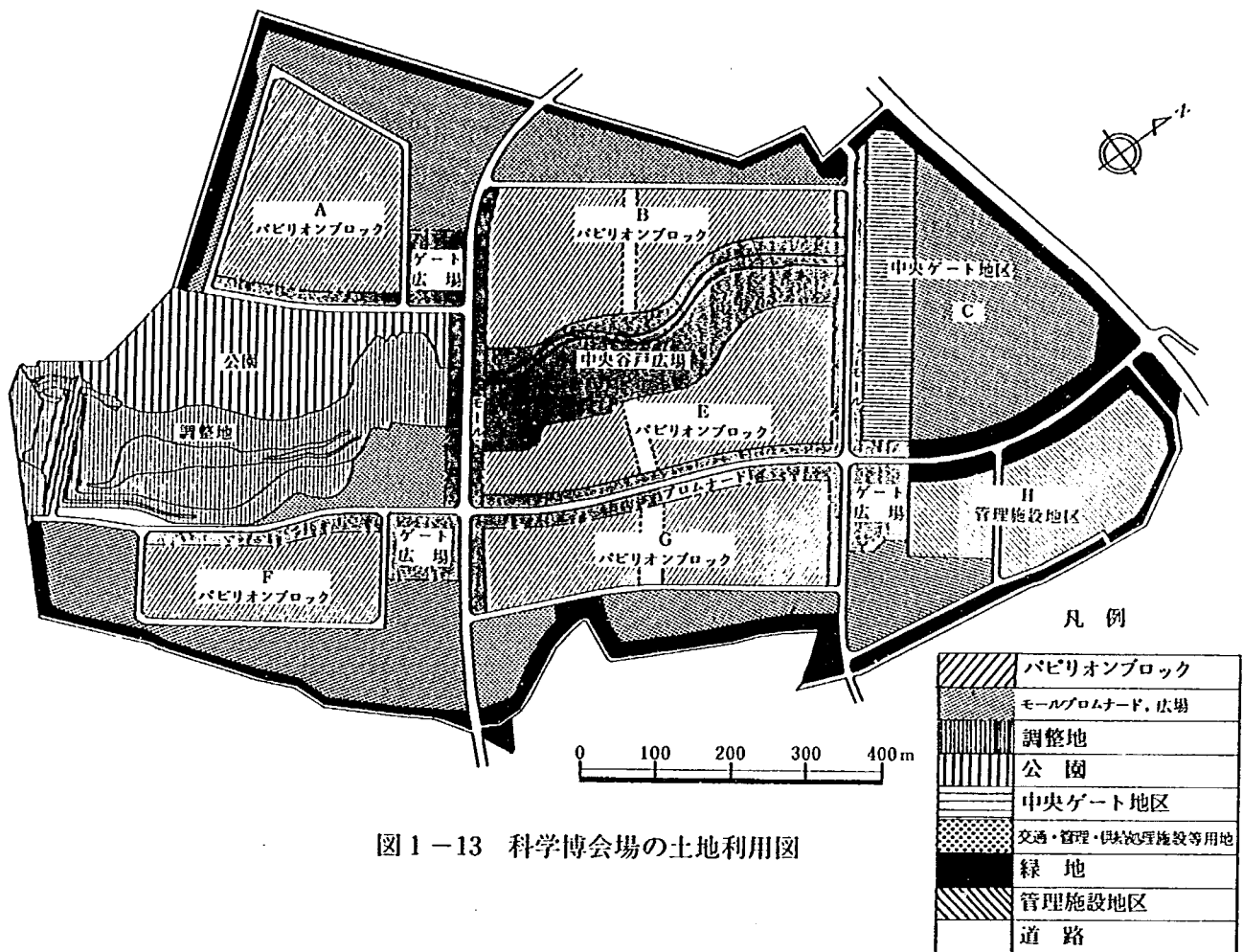


図1-13 科学博会場の土地利用図

表1-10 科学博会場土地利用面積

土 地 利 用	面 積 (ha)	面積率(%)
パビリオンブロック	24.5	24.1
中央谷戸広場 (催し物広場を含む)	6.2	6.1
調整池・公園 ()	15.5	15.3
モール・プロムナード・広場	11.8	11.6
中央ゲート地区	3.0	3.0
場内サービス道路	2.0	2.0
交通・管理・供給処理施設等用地	24.8	24.4
緑 地	6.2	6.1
管理施設地区	4.4	4.3
その他道路	3.2	3.1
合 計	101.6	100.0

1.6 利水状況

開発前の利水状況について述べる。

試験地周辺の上水道は、研究学園都市域は筑南水道企業団の水道供給を受けているが、試験地を含めた研究学園都市周辺地区は、上水道が普及していないため、各集落を対象とした簡易水道水源用深井戸によっている。地下水利用状況を表1-11、図1-14に示す。

表1-11 試験地周辺井戸の状況

目的	深度(m)	0-5	5-10	10-30	30-50	50-100	100以上	不明	合計
	地区								
上 水 (生活用水)	面野井	5 (2)	(5)		4	6			15 (7)
	面野井南	1	(3)	1	2 (1)	1			5 (4)
	西岡	2	(1)	2 (1)	2				6 (2)
	西岡南	2 (2)	(1)	(3)		1 (1)		2	5 (7)
	山中学園台				2	5			7 (-)
	柳橋	3				1			4 (-)
	水堀	(1)	1 (7)			1			2 (8)
農 業 用 水	面野井南				(2)				- (2)
	西岡							1	1 (-)
	西岡南			(1)					- (1)
	山中学園台							(1)	- (1)
	水堀		1						1 (-)
工業・事業所用水					12				12 (-)
合 計		13 (5)	2 (17)	3 (5)	22 (3)	15 (1)	- (-)	3 (1)	58 (32)

注)・()内は使用されていない井戸

・工業・事業所用水は、西岡北部の日本自動車研究所
(11井)、面野井南の炭波ゴム工業所 (1井)である。

試験地においては、水堀地区に集落戸数26戸を対象とした深度54mの簡易水道水源用深井戸があり、その他の地区では、数戸で所有する共同井戸のほか、各家庭に生活用水、一部農業用水用の井戸が使用されている。

農業用水は、水田の大部分が霞ヶ浦農業用水事業による供給を受けているが、面野井で農業用深井戸が使用されている。

工業及び事業所用水については、大部分を地下水(深井戸)に依存しており、試験地北縁に隣接する日本自動車研究所構内に、研究用に11本の井戸が使用されている。

井戸の利用状況から、従来からある家庭用井戸は深度10m以浅の浅層の地下水(関東ロームないし竜ヶ崎砂層中の地下水)、新しく掘られた家庭用井戸、農業用・事業用の井戸は主に深度50m以深の深層地下水(下総層群下部層中の地下水)を取水対象にしているとみられる。

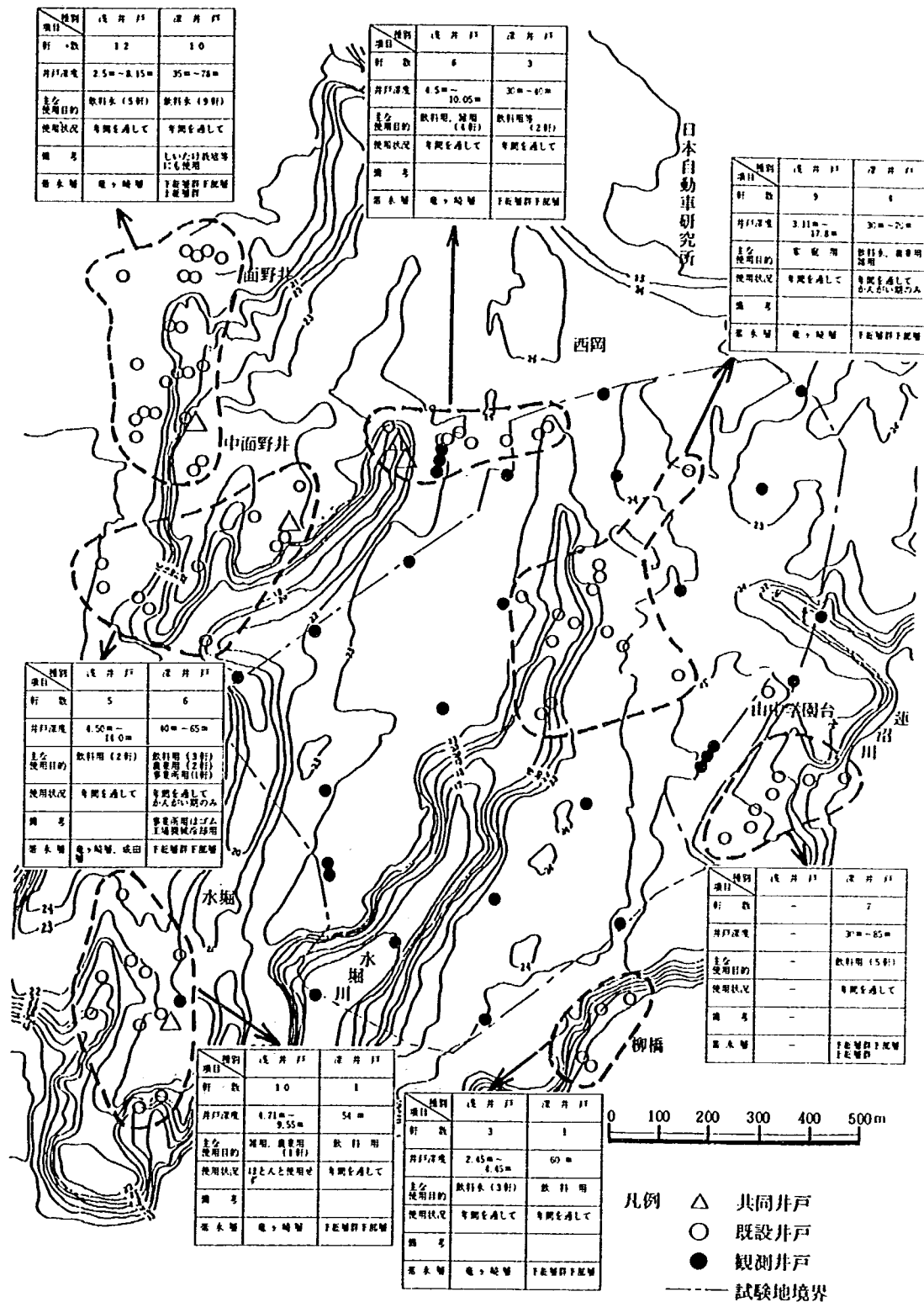


図1-14 地下水利用状況図

1. 2 水文観測状況

谷田部試験地の水文観測は、造成工事等の開発に伴う水文環境の影響を調査する目的で、昭和56年度より各種水文観測を含む水文調査が開始され、図1-15に示す経緯を経て現在に至っている。

昭和56年度当時の水文観測施設の配置は図1-16に示すとおりである。なお、E・ホー2は試験地内、C-1, 2, 3は試験地外の民家の井戸で、C-2は試験地西側約1kmの台地上に、C-3は試験地北側約3kmの台地上に位置する。また、初期のデータ（昭和57～58年）は第1報「谷田部試験地における水文調査報告書（その1）」に整理されている。

なお、本試験地の地下水流域界は、試験地の透水性が高く、浸透が卓越することから、地下水位一斉観測より得られた地下水位コンター図の尾根部を連ねた線を境界としており、試験地内を流れる水堀川の流域界もこれと一致させている。（図1-17参照）

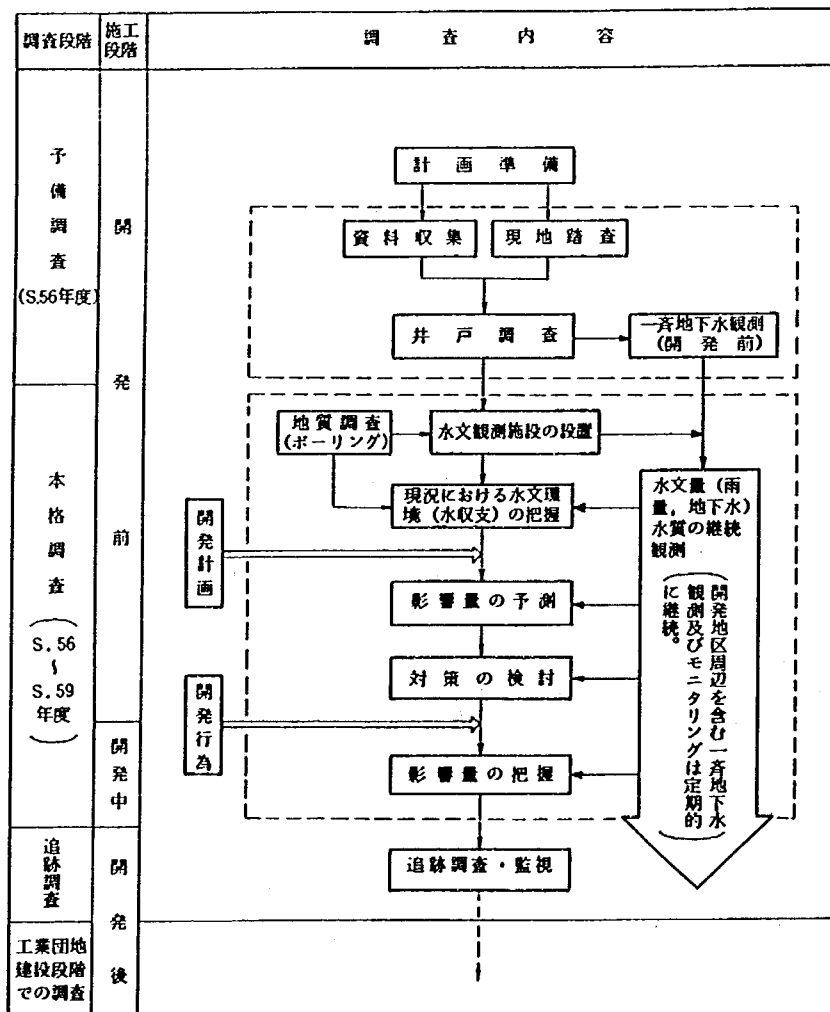
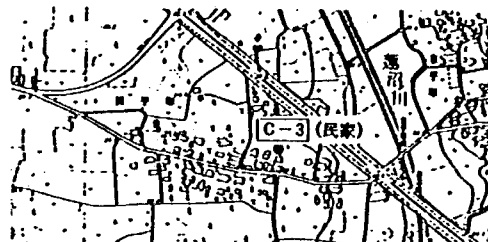


図1-15 調査全体フロー



凡 例

- 雨量観測地点
- ▲ 流量観測地点
- 地下水観測井
- 試験地境界



なお、地下水観測井の番号の前の数字は井戸深度を示し(5 m, 10 m, 50 m), 枠で囲った番号の井戸は地下水位計設置井戸である。

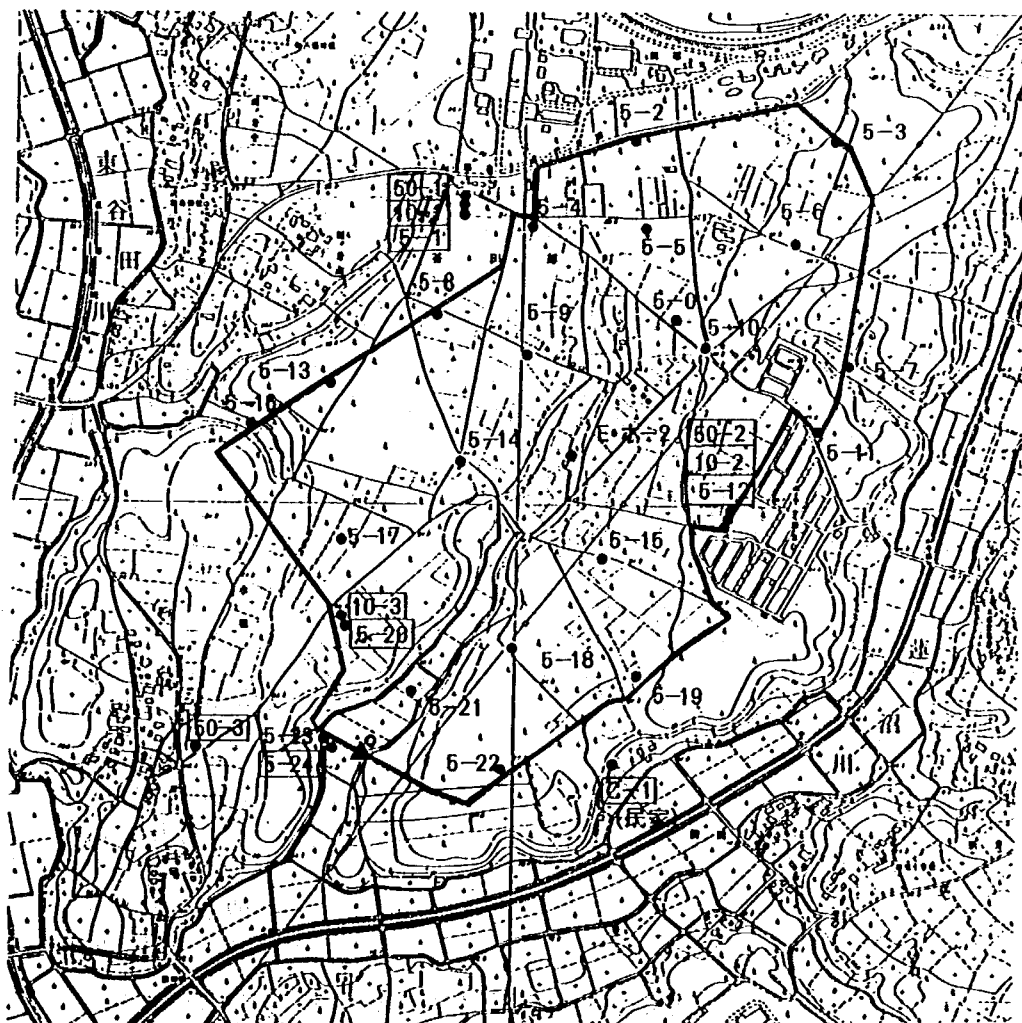
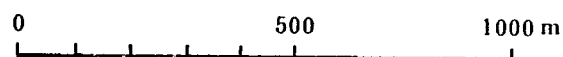


図 1-16 水文観測施設配置図

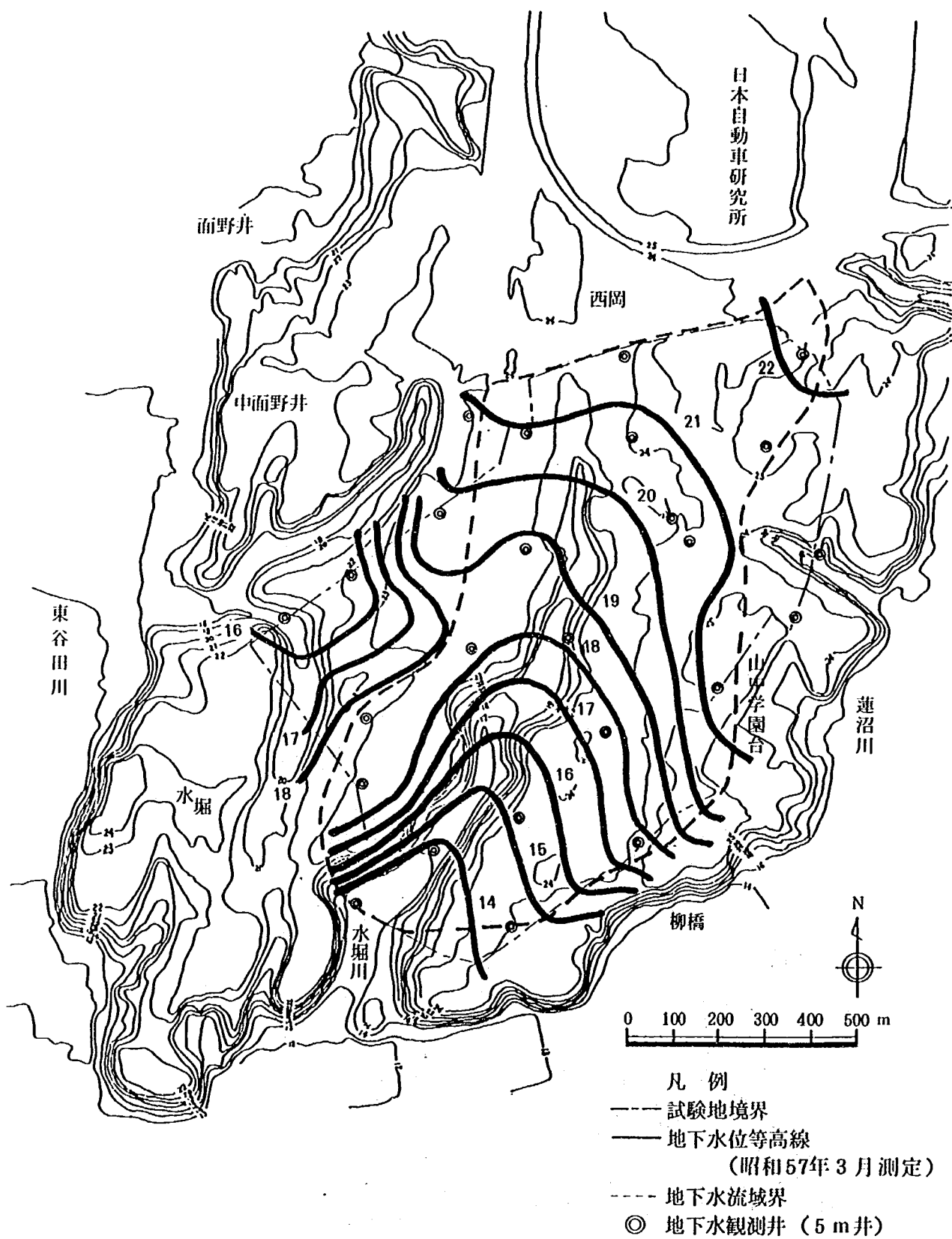


図1-17 流域分割 (浅層地下水位の尾根部を連ねた線による)

第Ⅱ章 降雨流出特性

Ⅱ. 1 降雨流出特性

1.1 降雨特性及び蒸発散量

1.1.1 降雨特性

試験地に設置した自記雨量計によって観測された月別降水量を表2-1、図2-1に示す。なお、雨量計設置前の昭和57年1～2月の月降水量については、筑波研究学園都市内にある館野高層気象台（試験地の東方約5kmに位置する）のデータを引用した。

これによると、6～9月には、梅雨、雷雨、秋雨による多雨期となっているのがわかる。

表2-1 月別降水量

月 年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間降水量
1982年 (昭和57年)	* 29.0	* 23.0	61.0	114.0	77.5	200.5	146.5	76.5	308.5	113.0	111.0	14.5	1275.0
1983年 (昭和58年)	18.5	51.0	103.0	117.5	77.0	142.5	236.5	103.0	243.5	49.0	42.5	2.5	1186.5
1984年 (昭和59年)	21.5	54.0	41.5	48.0	61.0	163.0	78.0	7.0	23.5	65.0	33.0	45.0	610.5

注) *は館野高層気象台データにより補填

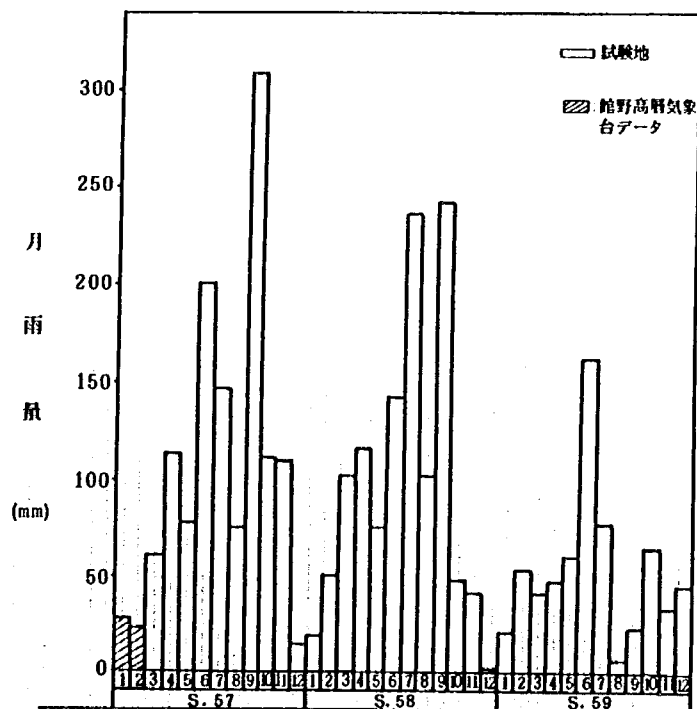


図2-1 月降水量

当地域の年降水量は経年データの整理されている館野高層気象台のデータによると、図2-2のようである。

年降水量は、昭和49年～58年の10年間平均で1,245mm/年となっている。

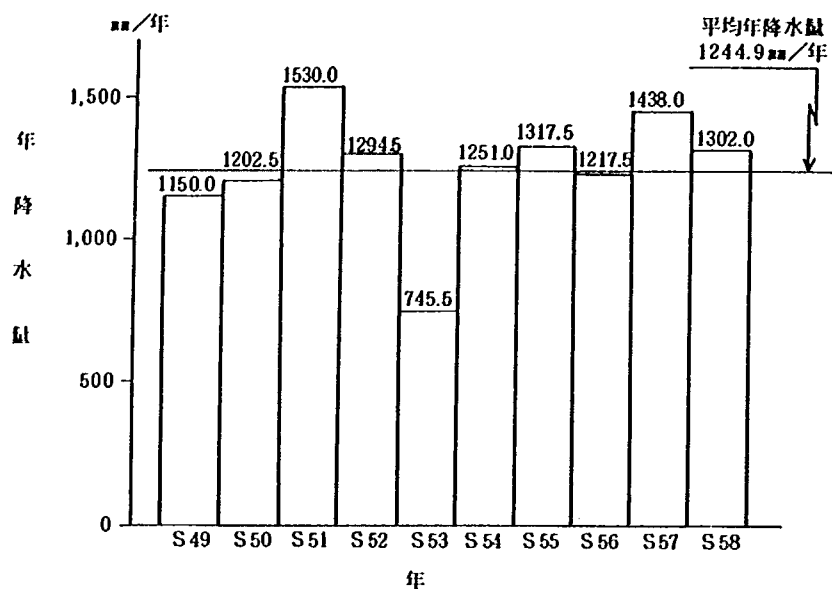
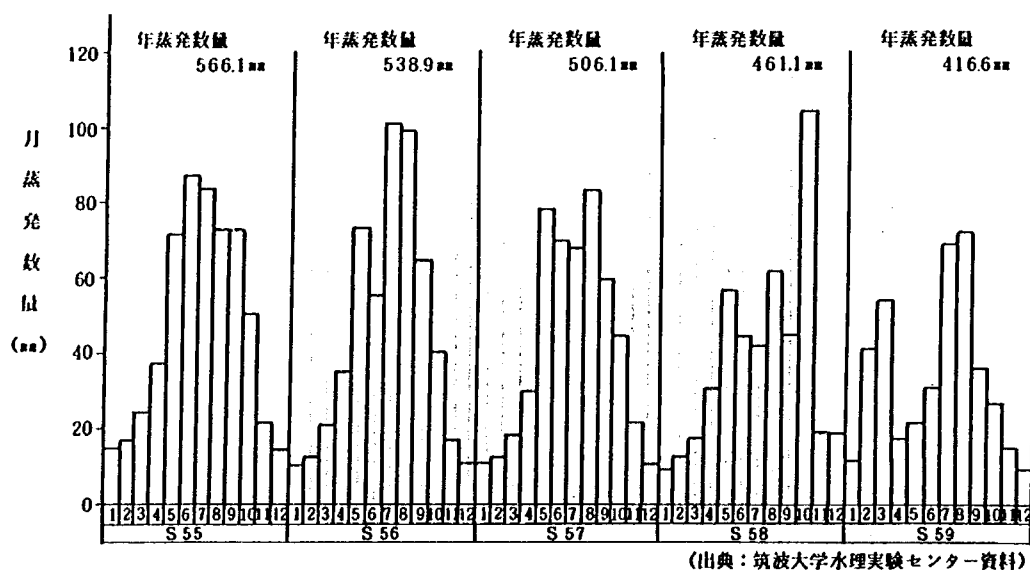


図2-2 過去10年間平均年降水量（館野高層気象台）

1.1.2 蒸発散量

蒸発散量は筑波大学水理実験センターにおける月別実測蒸発散量の5年間のデータによると、図2-3のようである。

これによると、夏期の7、8月を中心に多く、冬期にはその1/5以下となり、年間蒸発散量は500mm前後となっている。



(出典：筑波大学水理実験センター資料)

図2-3 筑波大学水理実験センター内月蒸発散量

1.2 流出特性

1.2.1 流出形態

試験地中央の谷津を流れる水堀川では、晴天時にも毎秒数ℓ程度の流水が認められる。

このことは、降雨の直接流出以外に、地下水流出があることを示しており、台地の地下水位が、低地面より高い位置にあり、谷斜面で地下水が露頭し、地表に浸出していることを示すものである。

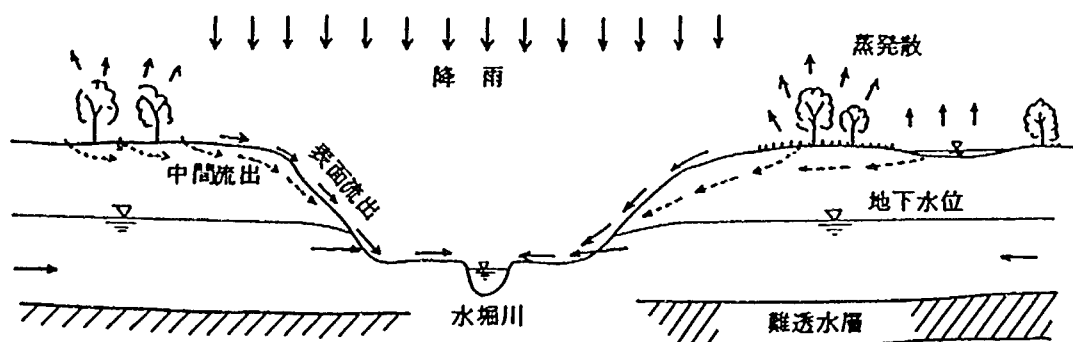


図2-4 水堀川への流出成分

いずれにしても、水堀川へは、前述の年間降雨量（約1,250mm）から蒸発散量（約500mm）を差し引いた残りの一部が流出していることになるが、当地区を開発することによりこのような開発前の流出機構は大きく変化するものと思われる。

水堀川に設置した流量観測施設は、開発に伴う流出量の変化を把握するために設けたものであり、表2-2に示す期間、流出量を観測することができた。

表2-2 流量観測実施期間

	昭和57年	昭和58年	昭和59年	昭和60年
観測	2/27 観測開始 12/4 撤去	欠測 (水堀川改修並びに観測施設の新設工事)	3/29 観測再開	継続
開発		基盤整備工事	パビリオン建設	

昭和57年は、まだ本格的な造成工事に入っていない「開発前」の段階であり、昭和59年は、道路、下水道整備も完了した「開発後」の段階である。

そのため、開発により、流出機構に顕著な変化が加えられたとすれば水堀川への流出量に何らかの変化（流出率の増加等）が現われているものと考えられる。

なお、観測再開後（昭和59年以降）の流量については堰公式（直角三角堰）を適用したが、水路形状等の影響を受け、十分な精度を有していないために参考流量として扱う。なお、今後水位・流量関係を現地において調べ、精度の向上をはかる予定である。

1.2.2 浸透能

試験地の表層地盤の透水性の変化を調査するために、ほぼ自然状態の昭和57年8月中旬及び9月初旬、造成工事中の昭和58年8月中旬にシリンダーインテークによる表面浸透能試験を実施した。

浸透能測定結果の総括表を表2-3に、実験地点を図2-5に示す。

表2-3 表面浸透能測定結果

昭和57年度（開発前）

土地利用	No.	浸透能 (mm/hr)	分 布 (mm/ha)	平 均 (mm/ha)
宅 地	2	6	6 ~23	14
	3	23		
畑	1	96	79~600	250
	4	79		
	7	600		
芝 畑	11	160	160	160
水 田	9	0	0	0
樹 林 地	5	23	23~1,100	300
	6	23		
	8	90		
	10	1,100		

昭和58年度（造成工事中）

造成状況	No.	浸透能 (mm/hr)	分 布 (mm/ha)	平 均 (mm/ha)
切 土 地	1	0	0 (0~440)	0 (80)
	3	0		
	6	0		
	7	440		
	11	0		
盛 土 地	2	50	0 ~68	38
	4	68		
	5	0		
	8	50		
	10	25		
伐 採 伐 根	9	0	0	0

この試験は、試験地の状況の微妙な差異により、大きく影響されるため、得られた結果もバラつきが大きく、一概に評価することは難しいが、表2-3より、概略次のことが言えよう。

造成前においては、宅地、水田を除く畑、林地、芝地は非常に透水性が良く、約20~1,000mm/hr（水頭10cm）程度の浸透能がある。よって、年数回程度の通常の降雨であれば、その大半は一旦は地下に浸透していたものと思われる。

また、造成前の浸透能を透水係数に換算すると、水田 10^{-8} cm/s、宅地 10^{-4} ~ 10^{-3} cm/s、畑・林地・芝地 10^{-3} ~ 10^{-1} cm/s程度となっている。

造成後（土工事完了時点）は、造成前に比べて著しく浸透能力が低下する。造成後の地盤では、全く浸透しない場所も多くあり、最大でも約70mm/hrの浸透能であった。（なお、No.7については斜面部であり、開発前の土地状況とあまり変化がないために大きな値を示している。）

今後、工事建設により地表面が舗装され、雨水排水施設が整備された段階では、地表面よりの浸透量はさらに少なくなるであろう。

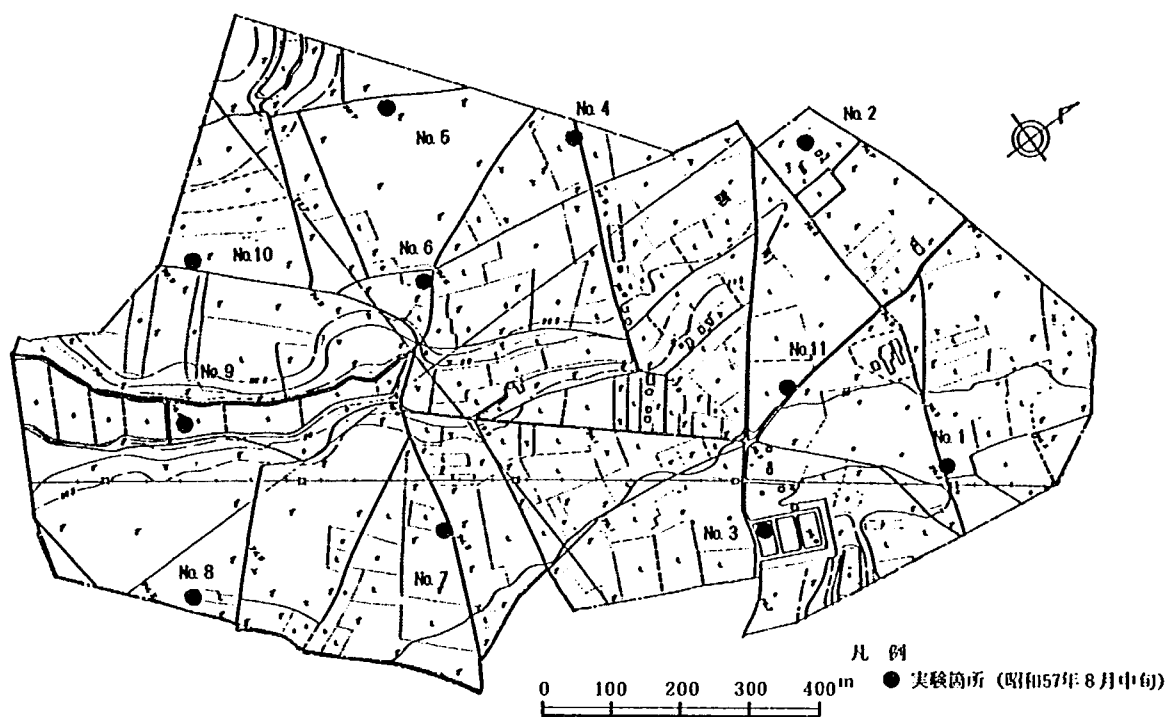


図2-5(a) 表面浸透能実験位置図(開発前)

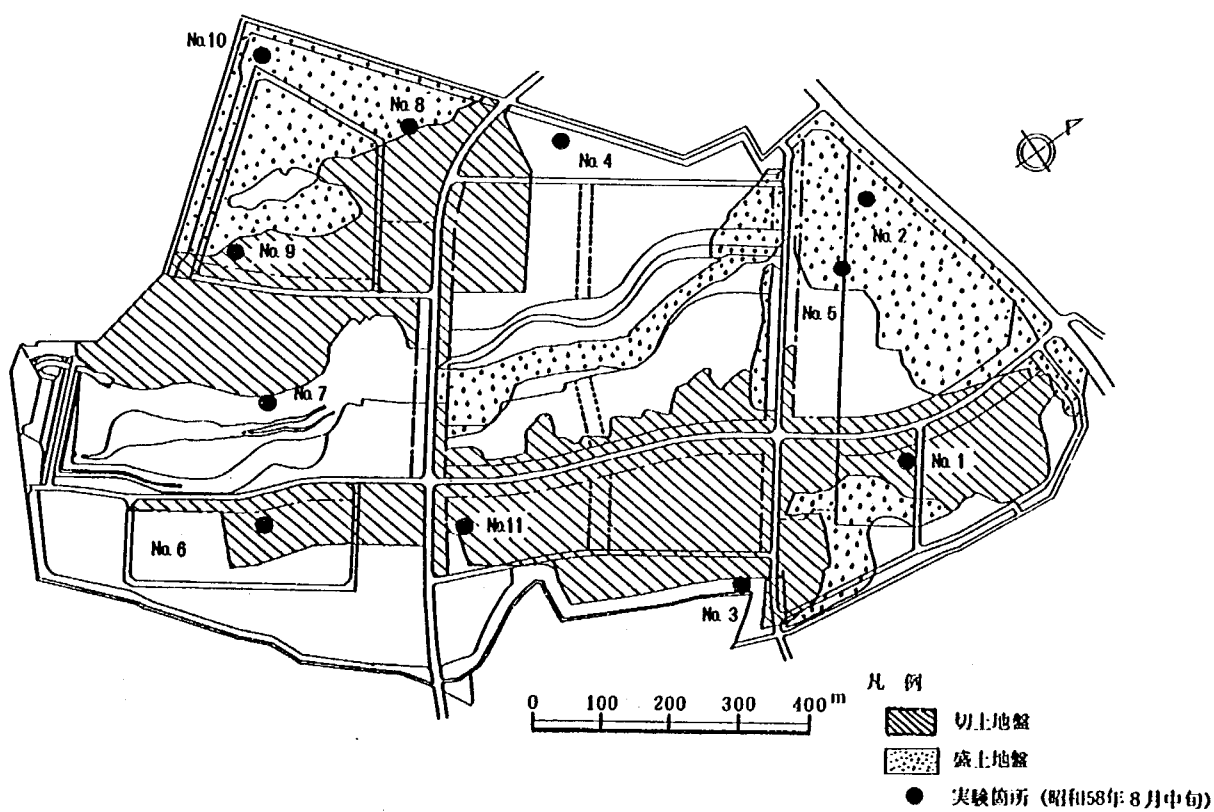


図2-5(b) 表面浸透能実験位置図(造成工事中)

1.2.3 流出率

水堀川の開発前の流出率は非常に小さく、観測期間中（昭和57年3～11月）の流出率は0.34、短期流出率は0.01～0.10（水平分離法による）と浸透の卓越した地域である。短期流出率算定は総雨量30mm以上、もしくはピーク流量30ℓ/s以上の洪水で行った。（表2-4、2-5、図2-6、2-7参照）

造成後の流出率については、流量精度上から参考程度に留めるが、0.52と開発前に比べ増加している（表2-4参照）。これは、造成工事に伴う樹林の伐採による保水機能の低下、そして地盤締め固めや舗装等による表面流出量の増大によるものと考えられる。

表2-4 雨量、流出量、流出高

項目	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合計
昭和57年 (造成前)	月雨量 R (mm)	—	—	61.0	114.0	77.5	200.5	146.5	76.5	308.5	113.0	111.0	14.5	3～11月 1208.5
	月平均流量 Q (ℓ/s)	—	—	4.63	8.61	10.91	10.05	7.44	11.77	19.37	24.22	21.49	—	—
	月流出高 q (mm)	—	—	16.5	29.8	39.0	34.7	26.6	42.0	66.9	86.5	74.3	—	3～11月 416.3
	月流出率 I	—	—	0.27	0.26	0.50	0.17	0.18	0.55	0.22	0.77	0.67	—	年流出率 0.34
昭和59年 (造成後)	月雨量 R (mm)	21.5	54.0	41.5	48.0	61.0	163.0	78.0	7.0	23.5	65.0	33.0	45.0	4～12月 523.5
	月平均流量 Q (ℓ/s)	—	—	—	7.07	4.66	12.10	11.55	5.40	10.95	8.21	6.55	11.30	—
	月流出高 q (mm)	—	—	—	24.4	16.6	41.8	41.2	19.3	37.8	29.3	22.6	40.4	4～12月 273.4
	月流出率 I	—	—	—	0.51	0.27	0.26	0.53	2.76	1.61	0.40	0.68	0.90	年流出率 0.52

(注) ・流域面積は、地下水流域を用い75.0haとする。

$$I = \frac{q}{R}$$

・昭和59年は、堰公式による参考流量を用いた。

表2-5 主洪水一覧表（総雨量30mm以上、ピーク流量30ℓ/s以上）

洪水 No.	生起年月日	総雨量 (mm)	降雨継続時 間 (hr)	降雨強度 (mm/hr)	総直接流出 高 (mm)	ピーク流量 (ℓ/s)	基底流量 (ℓ/s)	流出率	前期5日 雨量(mm)
1	S57.4.14	73.5	30	15.5	5.0	126.4	3.8	0.07	0
2	S57.4.21	27.0	15	5.0	1.5	35.2	5.7	0.06	0
3	S57.5.20	28.0	14	10.0	0.9	53.5	8.3	0.03	0
4	S57.5.31	27.5	17	5.0	1.4	34.1	9.4	0.05	0
5	S57.6.3	37.5	19	13.0	1.8	59.0	11.3	0.05	27.5
6	S57.6.19	79.0	34	52.5	5.2	150.6	3.5	0.07	2.0
7	S57.7.24	57.0	42	12.0	1.1	75.1	4.1	0.02	4.0
8	S57.7.29	99.5	117	9.0	9.0	76.1	6.5	0.09	56.5
9	S57.9.10	191.0	56	20.0	19.6	388.1	3.0	0.10	3.0
10	S57.9.23	68.0	69	12.0	2.3	144.8	13.1	0.03	28.5
11	S57.10.19	28.5	8	7.5	1.3	126.4	32.2	0.05	0
12	S57.11.5	18.0	11	6.0	0.2	36.0	16.7	0.01	0
13	S57.11.7	27.0	10	6.5	1.0	144.8	18.1	0.04	18.0
14	S57.11.9	30.0	47	2.5	1.5	100.4	19.2	0.05	45.0

注) 直接流出高は水平分離法による。

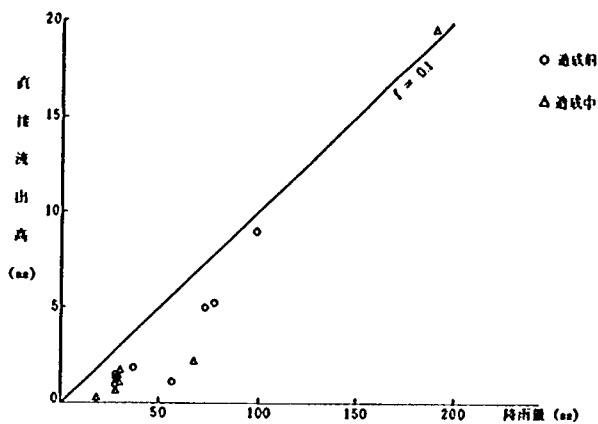


図 2-6 直接流出高—降雨量図

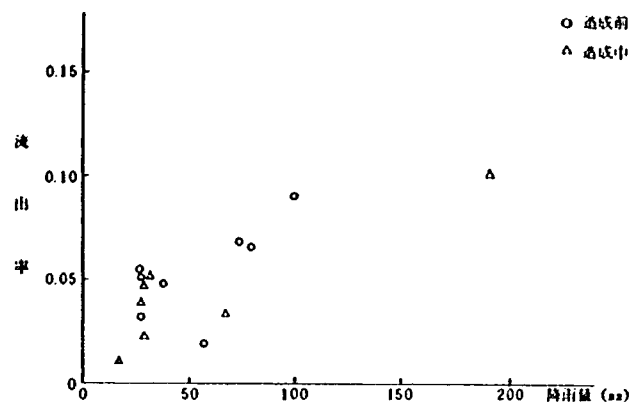


図 2-7 流出率図

II. 2 流出解析

2.1 洪水流出解析

本試験地の地質構造が表層から関東ローム層、常総粘土層、竜ヶ崎層、下総層群の順にそれぞれほぼ水平に堆積し、広く周辺に分布することから、それぞれの層をタンクと考えタンクモデルを用いて流出解析を行った。

解析対象とした洪水は、表 2-5 に示す主な洪水中の上位 6 洪水で、計算時間間隔を 10 分として計算した。

初期のパラメータは、次のように設定した。

i) . 各洪水の低減部を対数紙にとり (T-log Q 図) 曲線の傾き毎に、

$$\begin{aligned} \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 &= 0.029 \\ \alpha_0 + \alpha_1 &= 0.017 \end{aligned} \quad \left[\begin{array}{l} \alpha_0 : \text{浸透孔乗数} \\ \alpha_1, \alpha_2 : \text{流出孔乗数} \end{array} \right]$$

を得る。また、この 2 式より $\alpha_2 = 0.012$ を得る。

ii) . 1 次流出率 $f_1 = 0.07$ 、飽和流出率 $f_2 = 0.34$ とすると、i) との関係から、

$$f_1 = \alpha_1 / (\alpha_0 + \alpha_1) \text{ より, } \alpha_1 \doteq 0.0012$$

$$f_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) / (\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2) \text{ より, } \alpha_2 \doteq 0.009$$

iii) . i) 及び ii) より、初期の最上段タンク乗数を次のように設定する。

$$\alpha_1 = 0.001, \quad \alpha_2 = 0.01, \quad \alpha_0 = 0.017$$

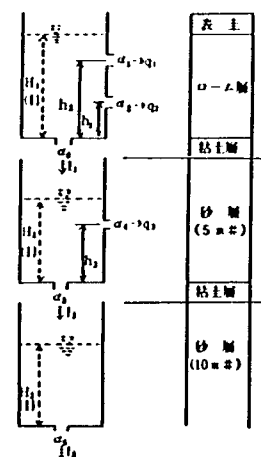


図 2-8 想定タンクモデル

iv) . 流出孔の高さ h_1 を流出開始までの損失雨量とすると、実測データから平均値3.6mm を得る。

また、流出孔の高さ h_2 は土地利用毎の浸透能平均値（構成比によって平均すると250mm程度）を用いるのが妥当だが、 $h_2 = 250\text{mm}$ に達する降雨がないことから、流出に大きく関係すると考えられる土地利用構成比の大きい樹林地、畑地における表面浸透能の比較的小さな値(100mm以下のもの) の平均値60mmを用いる。

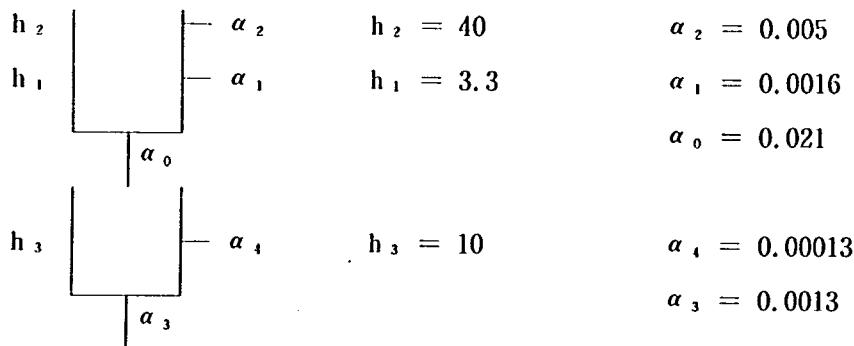
$$h_1 = 3.6\text{mm}, \quad h_2 = 60\text{mm} \quad [h_1, h_2 : \text{流出孔高}]$$

v) . 第2段タンクについては、各孔の乗数を上段タンク各孔の1/10程度と考え、次のように設定する。

$$\alpha_3 = 0.0015, \quad \alpha_4 = 0.0001$$

h_3 については、一般的な値をとり、 $h_3 = 20\text{mm}$ する。

以上のようなモデルを基に、総流出高、ピーク流出高、流出波形の立上りを考慮しながら同定し（目視による試行錯誤による）、次のパラメータを得た。



同定したモデルによるハイドログラフを図2-9に示す。また、相対誤差及びピーク平方誤差により誤差評価すると表2-6のようになり、直列2段タンクながら比較的良好な結果が得られた。

表2-6 モデル同定結果

洪水No.	総雨量 (mm)	総流出高 (mm)	計算総流出高 (mm)	相対誤差	ピーク平方誤差
1	74.0	6.09	6.11	0.10	0.002
2	27.0	3.12	2.97	0.12	0.002
3	37.5	4.38	4.37	0.11	0.003
4	79.0	6.51	7.36	0.19	0.002
5	99.5	12.43	9.64	0.22	0.011
6	191.0	20.83	20.63	0.20	0.001

(注) ・相対誤差は、同定期間中の各10分毎の流出高の | 観測値 - 計算値 | / | 観測値 | の平均値である。

・同様にピーク平方誤差は、| 観測値 - 計算値 | / | ピーク流出高 | の平方の平均値である。

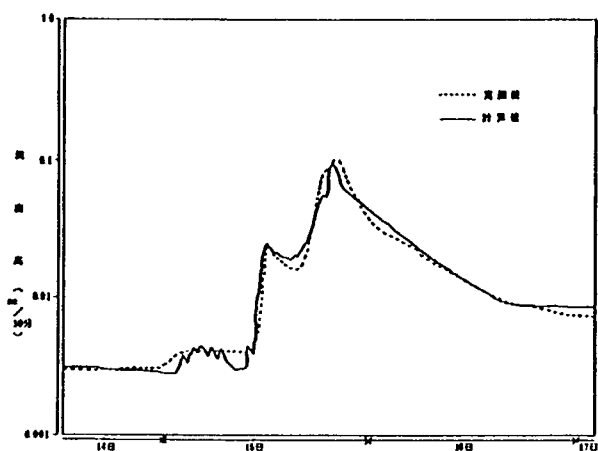


图 2 - 9 (a) 洪水流出解析 (1982. 4. 14)

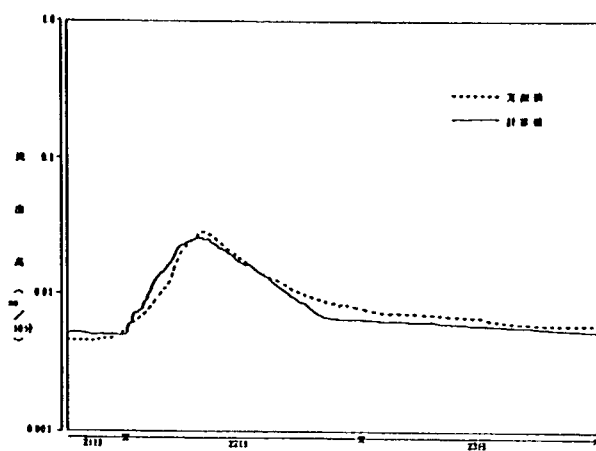


图 2 - 9 (b) 洪水流出解析 (1982. 4. 21)

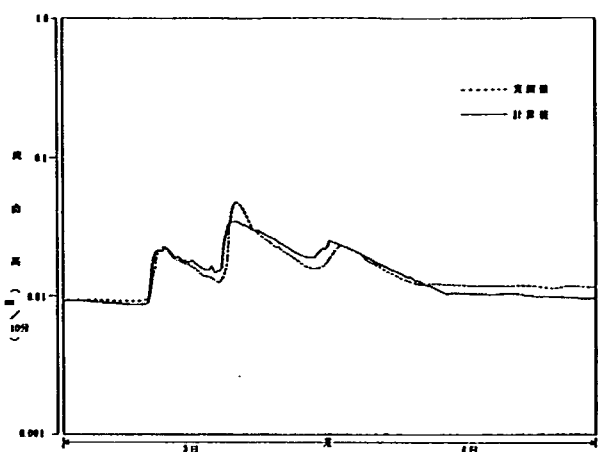


图 2 - 9 (c) 洪水流出解析 (1982. 6. 3)

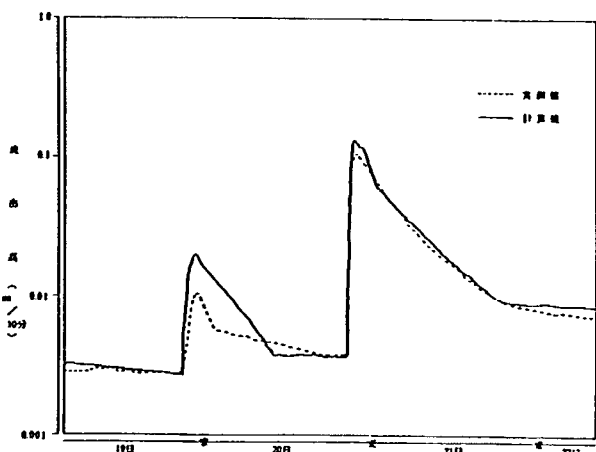


图 2 - 9 (d) 洪水流出解析 (1982. 6. 19)

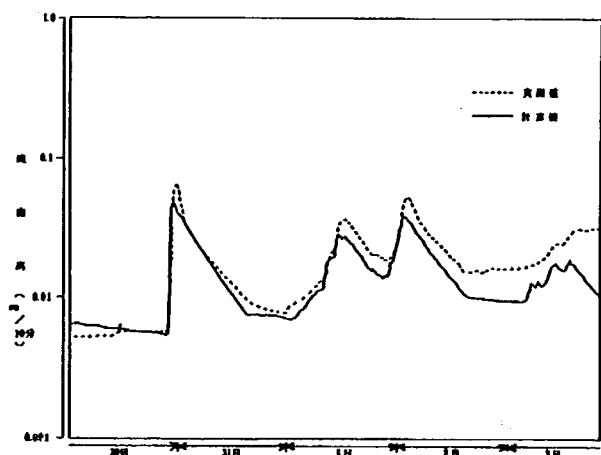


图 2 - 9 (e) 洪水流出解析 (1982. 7. 29)

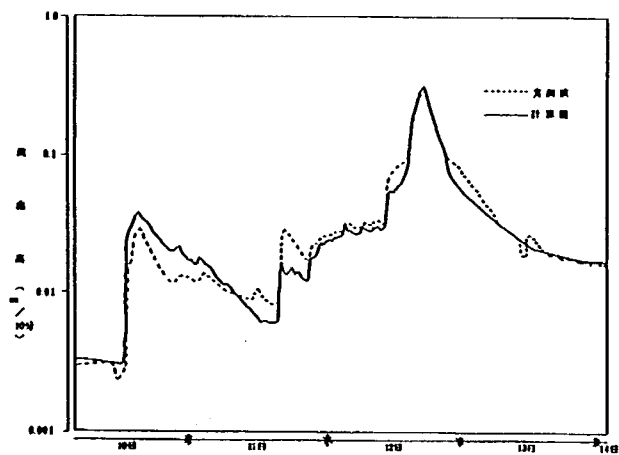


图 2 - 9 (f) 洪水流出解析 (1982. 9. 10)

2.2 長期流出解析

洪水流出解析と同様、タンクモデルを用いて長期流出解析を行った。

解析対象期間は、流量観測期間の昭和57年2月27日～12月31日である。

なお、タンクモデルの計算に使用する蒸発散量は、筑波大学構内においてライシメータにより観測された値を用いた。(表2-7参照)なお、計算時において、降雨日には蒸発散量=0mm/日とし、無降雨日には、月別の蒸発散量をタンク(上段タンク貯留がなければさらに下のタンク)より差引くものとする。

表2-7 蒸 発 散 量

(昭和57年)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
蒸発散量 (mm/日)	1.0	1.1	1.6	2.1	2.9	2.7	3.6	4.5	2.9	2.1	1.3	1.0

(注) 筑波大学水理実験センターでのライシメーターによる測定値

初期のパラメータは次のように設定した。

i) 直列4段タンクとし、日流出高によるT-log Q図の曲線の傾きから、

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 0.52$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 = 0.32$$

ii) 洪水流出モデルの初期パラメータ設定に用いたT-log Q図の曲線の傾きを比較すると、約20倍の傾きであることから、洪水流出同定モデルの流出孔乗数を20倍程度したものを最上段タンク、第2段タンクの流出孔乗数とする。また、流出孔高は、洪水流出同定モデルのものをそのまま用いる。

$$\alpha_0 = 0.40$$

$$\alpha_1 = 0.03, \quad h_1 = 3$$

$$\alpha_2 = 0.10, \quad h_2 = 40$$

$$\alpha_3 = 0.03$$

$$\alpha_4 = 0.003, \quad h_3 = 10$$

iii) 第3段, 第4段タンクについては, 流出孔高を共に0とし, 流出孔の乗数は, それぞれ第2段タンクの流出孔乗数の1/10, 1/100程度とする。

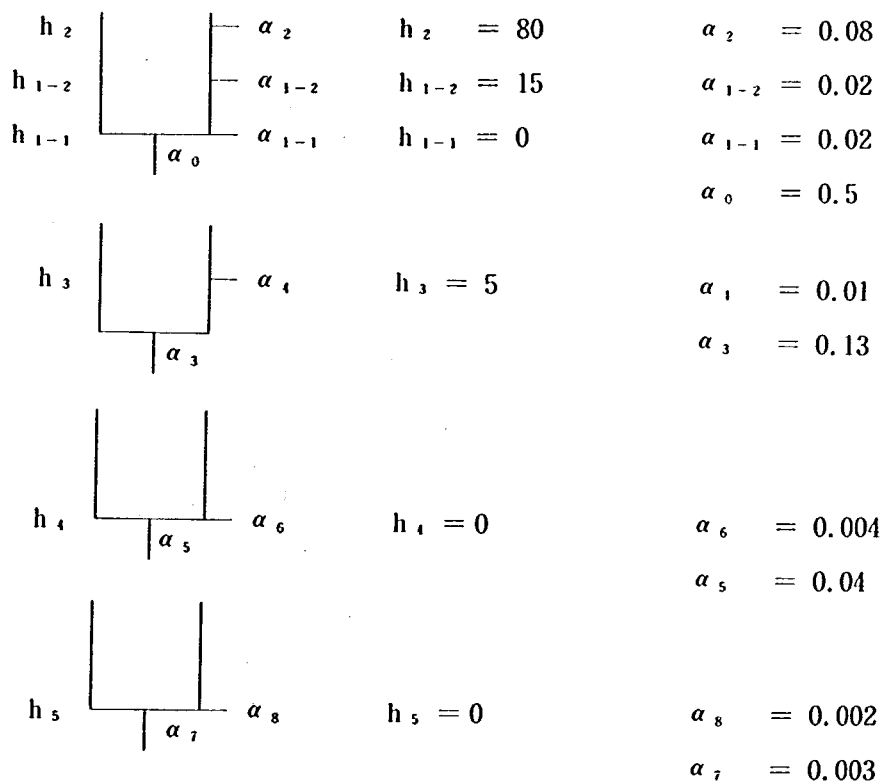
$$\alpha_5 = 0.003$$

$$\alpha_6 = 0.0003, \quad h_4 = 0$$

$$\alpha_7 = 0.0003$$

$$\alpha_8 = 0.0001, \quad h_5 = 0$$

以上のようなモデルを基に, 流出波形の立上り, 流出減水, ピーク流出高を考慮し, 目視による試行錯誤の結果, 次のパラメータを得た。なお, 最上段のタンクについては, 初期のモデルでは, 流出波形の立上りを表現しきれず, 最終的に3つ目の流出孔(流出孔の高さ0)を設けることで克服できた。



同定したモデルによるハイドログラフを図2-10に示す。

この同定結果をみると, 4月末から6月上旬にかけて, 日流出高にして0.7mm/day(約6 l/s)ほど実測流出高が計算流出高を上回っている(図2-10の斜線部)。これは, 水堀川及び谷津における水田や畑での地下水の農業用水としての利用によるものと推定される。

また, 9月末からは実測流出高は, 計算流出高の約2倍と流出高に相当な開きがある。これは, 科学博開催のための粗造成開始時期とほぼ一致し, 初期においては, 伐採による蒸散量の減少の影響, 後半は, 造成工事に伴う重機による関東ローム層の転圧の影響が現れたものと考えられる。

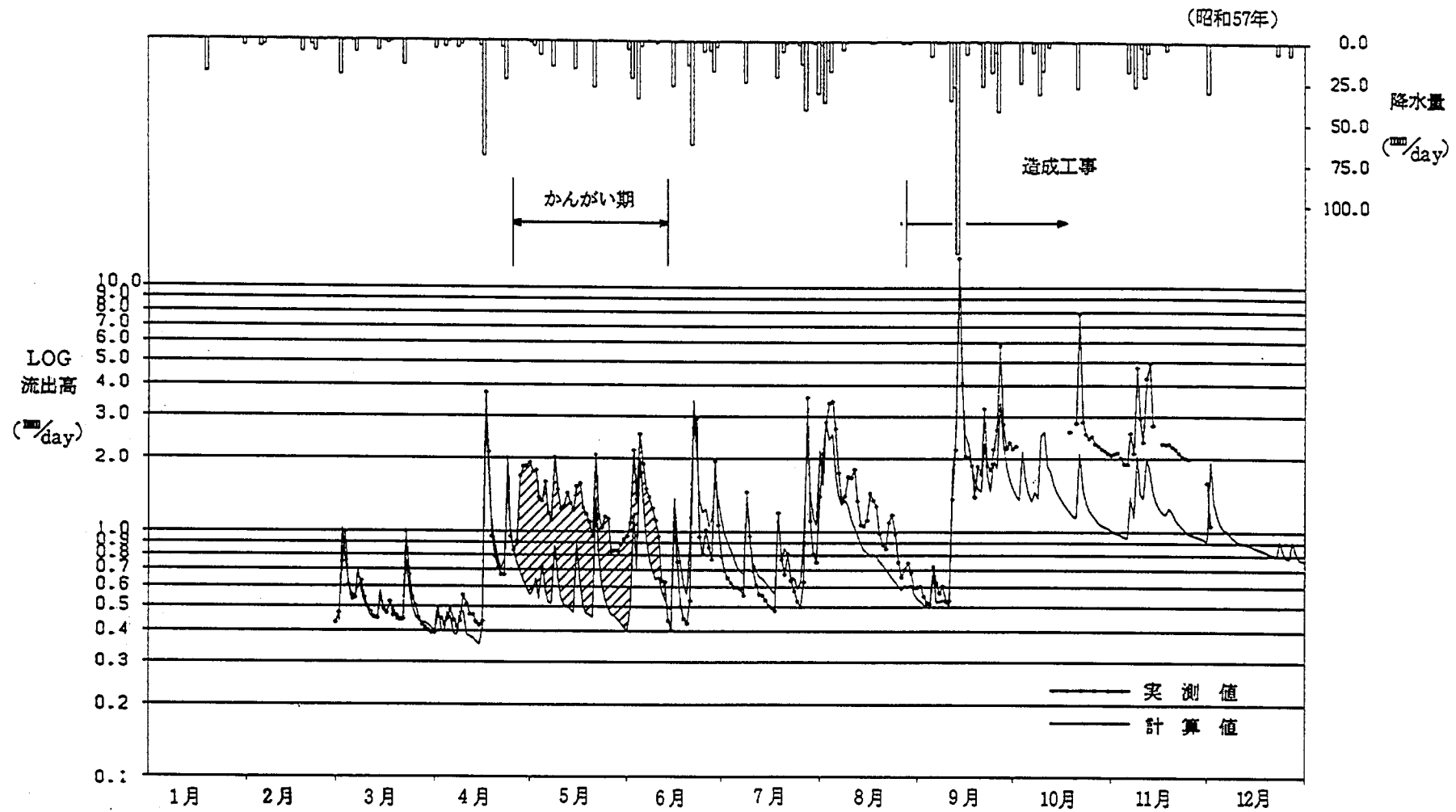


図 2-10 長期流出解析 (タンクモデル)

II. 3 水収支

(1) 水理地質構造の把握

基本的な地質の構成は、上位より、関東ローム層・常総粘土層・竜ヶ崎層・成田層（下総層群上部層）・下総層群である。

試験地における最も有力な不透水層として挙げられるのは、成田層下部の層厚10m程度の厚くて連続性のよい粘性土層である。

竜ヶ崎粘土層および常総粘土層は、いずれも不透水性の地層であり、常総粘土層の層厚は平均60cm程度で連続性も良いが、部分的には、この地層が欠除している区域も見受けられる。

同様に、竜ヶ崎層中の粘土層は2m前後の層厚で確認されているが、地層欠除点が常総粘土層より多く見受けられ、連続性は良くない。

また、地下水観測結果を見ると、いずれの不透水層も地下水面の動きに抵抗を示していないように見受けられ、本来の不透水層としての役割を演じておらず、全体としてみると一連の単一の帯水層中の狭み的存在と考えられる。

従って試験地における自由地下水の帯水層としては単一である可能性が強いと思われる。

以上の考え方から、成田層中の砂層までを一連の帯水層として水収支計算を行った。

(2) 水収支計算

水収支式は一般に次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} P &= (D_2 - D_1) + E + (G_2 - G_1) + \Delta S \\ \Delta S &= W_s + M + H \cdot P_a \\ G &= (G_2 - G_1) + H \cdot P_a \end{aligned} \right\}$$

P：降水量， D_1 ：地表水流入量， D_2 ：地表水流出量，E：蒸発散量， G_1 ：地下水流入量

G_2 ：地下水流出量， ΔS ：貯留量変化， W_s ：地表における水量変化，M：不飽和層内の土湿変化

H：地下水位変化， P_a ：有効空隙率，G：地下水補給

ここで、対象地域の水収支対象領域の境界を図2-11のようにとれば、

$D_1 = 0$ ……表流水の流域界と一致するため

$W_s = 0$ ……湖沼等が無いため0とみなす

と簡略化され、上の水収支式は次式となる。

$$P = D_2 + E + (G_2 - G_1) + M + H \cdot P_a$$

この式において、観測データのない $G_2 - G_1$ ，Mを未知項として水収支式を解くこととする。

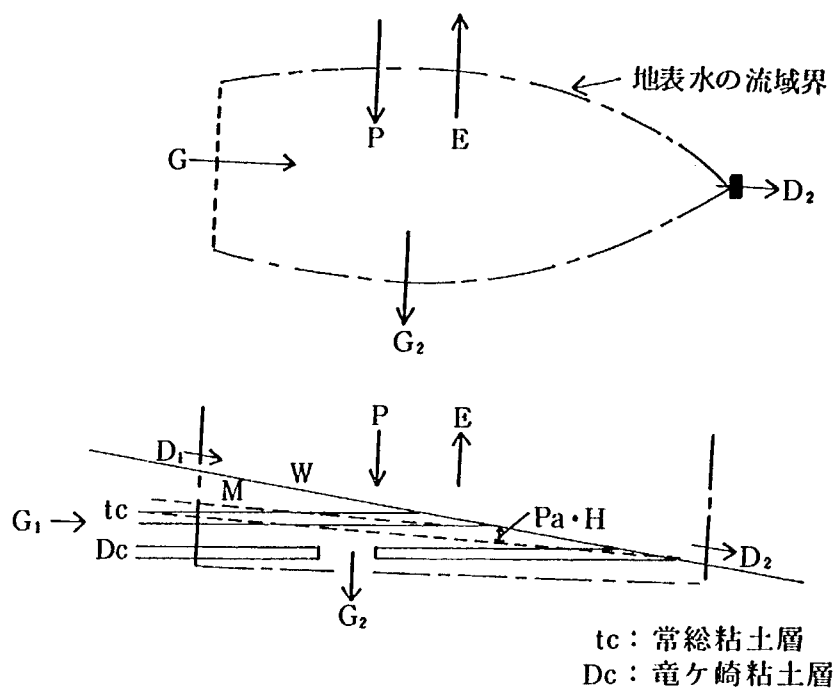


図 2-11 水収支対象領域

なお、水収支表作成にあたって、期間は本来不飽和帯の水分量が少ないこと、期間境界付近に降雨が無いこと、月の境界等を考慮して決定されるが、今回の調査では、自記記録計による観測点が少ないため月 1 回の一斉観測データを基本に検討するので、その観測日を境界とした。また、降雨量は期間内の総雨量を自記紙より読みとり、地表水流出量は水堀川流量観測データを使用、欠測箇所は年流出率を用いた推定による。蒸発散量については、筑波大学水理実験センターでのライシメータによる観測値を用いた。

有効変動量 ($H \cdot Pa \cdot S$) については、実測の地下水位変動量 (H) を、ティーセン法により、各地点の支配面積 (S) による重みづけを行った。有効空隙率 (Pa) は、地学ハンドブックより、砂・礫：25%，泥：5%，粘土：3%，ローム：10%と設定し、各地点の地層別変動頻度の比により各領域の Pa を求めた。

簡略化された水収支式を解くと、未知項（残差） X は、

$$X = (G_2 - G_1) + M = P - D_2 - E - H \cdot Pa$$

となる。

(3) 計算結果

各期間ごとの水収支計算の結果を資料. 2, 資料. 3 に示す。

以上の結果を 1 水文年として表すと図 2-12 のようになる。

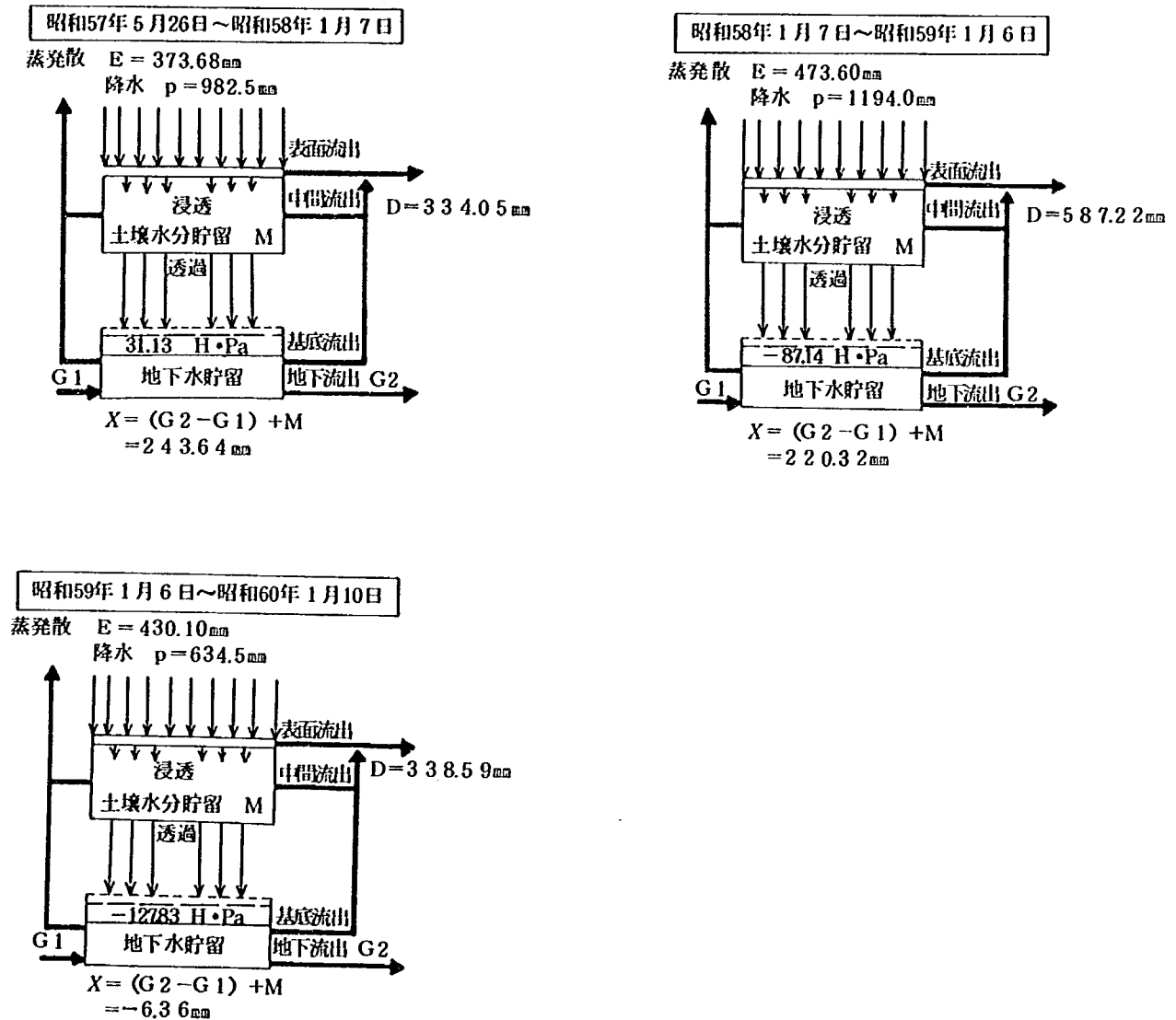


図 2-12 水収支結果

3 ヶ月間の観測結果を全降水量に対する割合でみると、蒸発散量は昭和57年38.0%，昭和58年39.7%，昭和59年67.8%，表面流出量はそれぞれ34.0%，49.2%，53.4%，地区内に貯留された量はそれぞれ24.8%，18.5%，0.0%となっている。

また、水収支の結果を他地域と比較すると次のとおりである。

都内の本郷台、白山における不圧地下水の涵養機構の解析（平田(1971)）で求められた本郷台における水収支結果と、試験地の昭和58年のデータを比較したものが表2-8である。両地区の水収支各項目は、ほぼ同等な値であり試験地の水収支結果は妥当な値と言えよう。

表2-8 水収支結果の比較

地 区	本郷台（東京都）	谷田部試験地
年 間 雨 量	1001.8 **	1194.0 **
蒸 発 散 量	500.3 **	473.60 **
表 面 流 出 量	210.1 **	* 578.62 **
域内に貯留された量	257.4 **	228.92 **
有 効 変 動 量	34.0 **	-87.14 **

*中間流出・基底流出を含む。

・本郷台は平田(1971)による。

第Ⅲ章 地下水の特性

Ⅲ. 1 地下水変動特性

1.1 試験地周辺の地下水変動

1.1.1 不圧地下水

不圧地下水は、低地の沖積層、台地上の関東ローム層及び竜ヶ崎層、成田層に賦存するものから成り、域内の降水によって涵養される。これらの帯水層の透水係数としては $1.0 \times 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$ オーダーの値が得られているが、その帯水層の規模は小さく、大量の地下水を得ることは困難とされている。

筑波大学地球科学系(1978)によると、不圧地下水の分布形態は図3-1に示すとおりであり、不圧地下水面の形状は大局的には地形形状に沿っており、台地を刻む開析谷中の河川は、地下水によって涵養されている。また、筑波環境研究グループ(1980)によると、1971年8月と1978年9月の不圧地下水の分布形態を比較すると、全体的な地下水面の形態は不変であるが、学園都市域については1~2mの水位低下が認められている。

これは、谷田川西方の従来通りの農村地域に比べ、東方の学園都市建設による都市化地域では、地下水涵養条件が大きく変化したことによるもので、水文循環が新しい平衡系へ向って変遷しつつあることを示している。

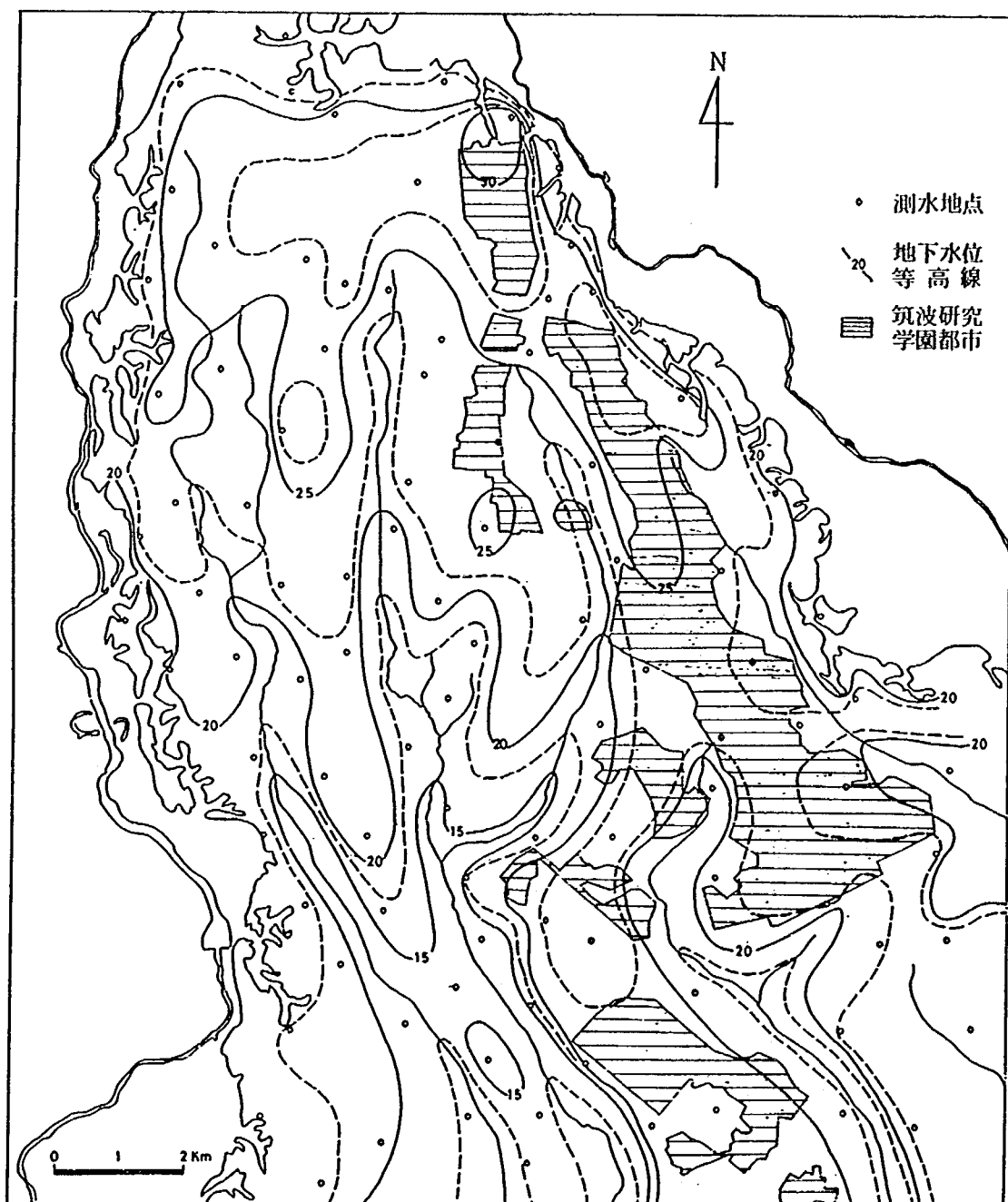
なお、1975年、1976年度に地下水障害が発生した集落の位置は図3-2に示すとおりで、いずれも学園都市周辺に位置しており、先の地下水の低下域と密接に関連していることが知られている。

1.1.2 被圧地下水

被圧地下水は、成田層の粘土(Dc-2)を主とする厚い不透水層の下位に賦存し、北から南へ傾斜する広域的な帯水層(下館帯水層など)から涵養されている。これらの帯水層は、深井戸の採水対象となっており、1,000~3,500 m^3/day の取水が可能とされている。

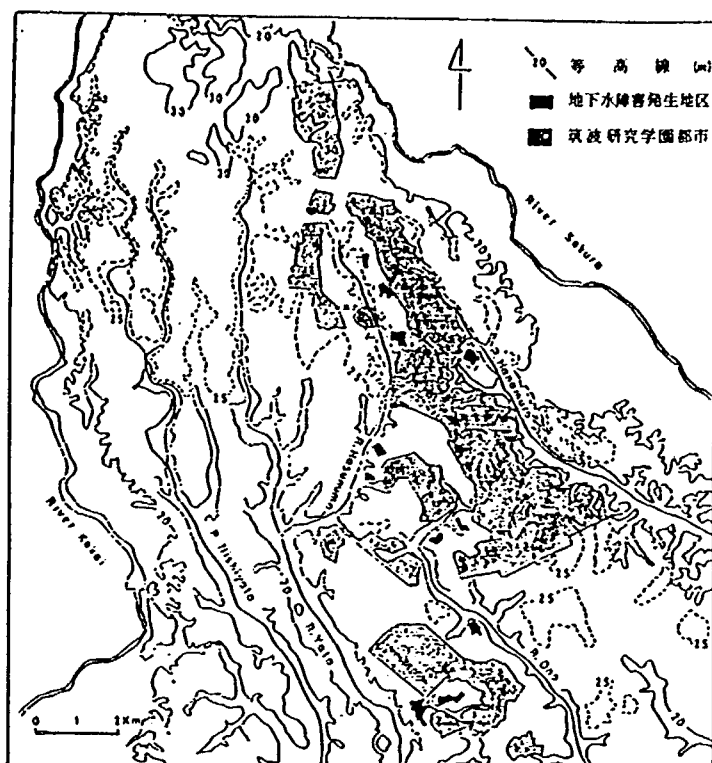
また、深井戸資料をもとに被圧地下水の帯水層を区分した結果では、深度150m前後までの間に4層が認められ、そのうちの第1、第3帯水層について下限の位置を等高線によって示すと図3-3となる。この第1、第3帯水層は分布標高からみて、表1-1に示す下総層群下部、上総層群にそれぞれ相当するものと思われる。被圧地下水面の形状は図3-4、3-5に示す通りで、帯水層の構造と近似しているが、近年地下水位は揚水量の増加に伴って全般的に低下する傾向にある。

被圧地下水の水位は主に揚水の影響を受け、5~9月頃までのかんがい期に低下し、それ以降回復するという周年変化を示している。このような変化は、被圧地下水の揚水による影響の範囲が広いことから取水井近傍だけでなく広域に共通な現象とされている。



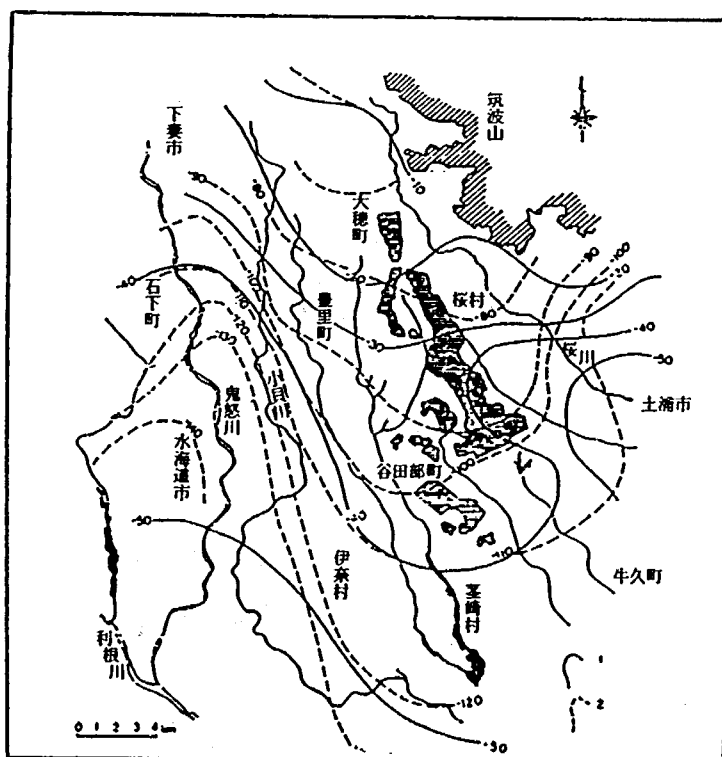
出典：筑波大学地球科学系（1978）筑波研究学園都市
の開発にともなう気候・水文環境の変化

図3-1 不圧地下水面等高線図（November, 1975）単位：m



(出典：筑波大学筑波環境研究グループ(1980))

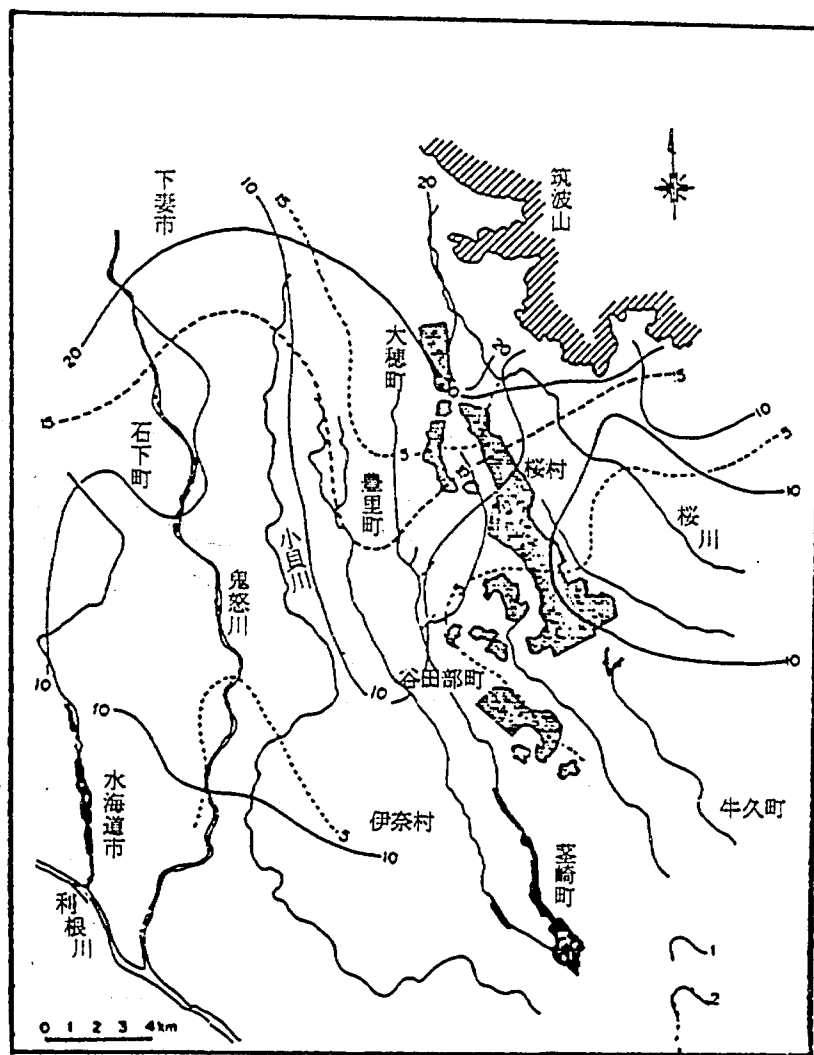
図3-2 地下水障害発生地区分布図



—— 第1帯水層, - - - - 第3帯水層

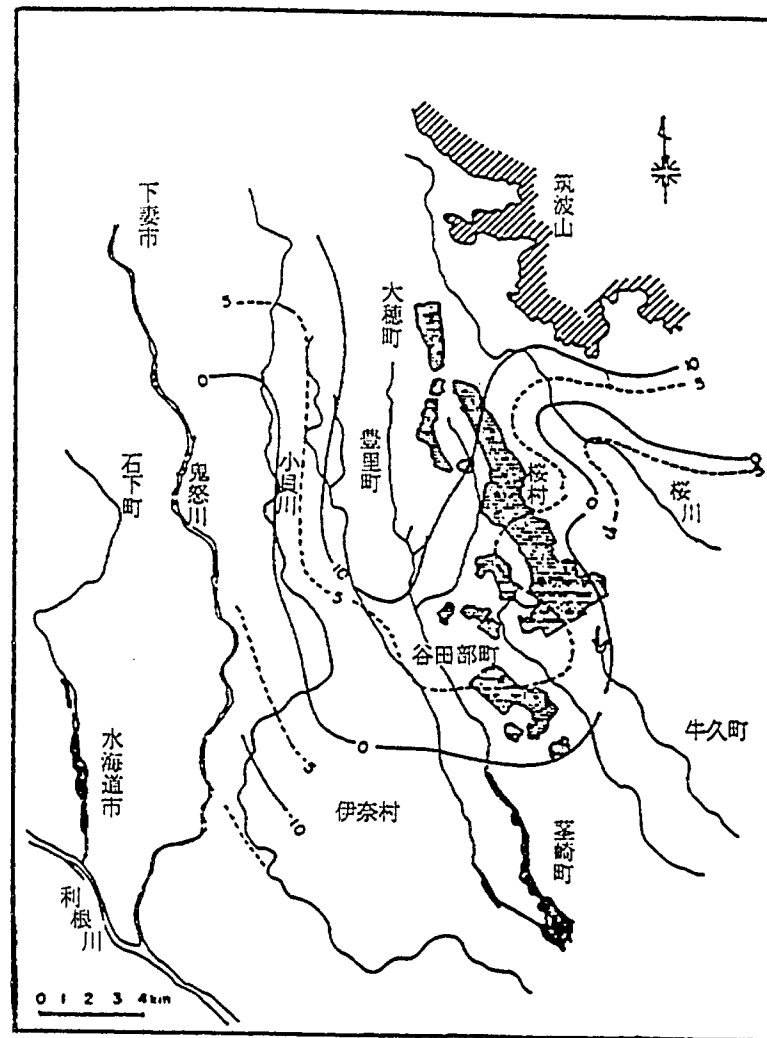
(注) 横線で模様をつけた地域は研究学園都市域である
(出典：新 藤 (1975))

図3-3 帯水層の構造等高線図 (海拔)



—— 昭和30-35年の記録による
 - - - - 昭和40-45年の記録による
 (出典：新藤静夫 (1975))

図 3 - 4 被圧地下水面図 (海拔)



(出典：新藤静夫 (1975))

図 3 - 5 被圧地下水面図 (昭和46年8月測定, 海拔)

1.2 試験地の地下水変動

試験地に設置された自記水位計によって得られたデータから、それぞれの観測井の地下水位の変化を図3-6に示した。

地下水位は、図3-6に示すように、G.L.-5mの浅層を対象に測定している5m井と、その下のG.L.-10mの帯水層を対象に測定している10m井、さらにその下層のG.L.-50mの帯水層を対象に測定している50m井がある。なお、50m井施工時に行った電気検層結果を資料4に示す。(各観測井の位置関係は、図1-16 水文観測施設の配置図を参照されたい。)

1.2.1 不圧地下水(5, 10m井)

図3-6の地下水位時系列図をもとにして、試験地の浅層地下水観測井の地下水位変動パターンを7グループに分けた。その分け方は全体的な変動パターン、地形的要素、井戸の種類、地下水位の標高などを考慮して行った。

第Ⅰグループ：No. 5-0, No. 5-1, No. 5-3, No. 5-4, No. 5-5

これらは、水堀川低地北側の台地に位置する観測井である。

地下水位は、地盤高より1~4mほど深いT.P. 20~24mの間で変化しており、地質のうえでも、いずれも常総粘土をはさんで上位の関東ローム層と下位の竜ヶ崎砂層の間を変動しており、各井戸の水位差はあるものの変動パターンは類似している。

第Ⅱグループ：No. 5-9, No. 5-15, No. 5-19, No. 5-20, E・ホ-2

これらは、水堀川低地によって分割された北西及び南東の2つの台地上に位置する。地下水位は、地盤高より3~6mほど深いT.P. 17~20mの間で変化している。地質的には、No. 5-20が常総粘土層と竜ヶ崎砂層中で変動している以外は、竜ヶ崎砂層中で変動している。ただし、民家の井戸であったE・ホ-2は、地質柱状図がないため不明である。

変動パターンは、基本的には第Ⅰグループと類似している。

第Ⅲグループ：No. 5-18

第Ⅱグループと同様の台地上に位置するが、地盤高-8~10mと水位が深く、変動も非常に小幅である。地質をみると、竜ヶ崎粘土層下位の成田層の砂層中を変動している。

第Ⅳグループ：No. 5-12

試験地南東側台地の中で最も高い所に位置し、観測井(浅層)の中で最も変動の振幅が大きい。また、地下水変動パターンの極大値からの低減勾配は急である。

このNo. 5-12は常総粘土層を欠いており、地形的・地質的条件の違いが変動パターンの相違を生んだものと思われる。

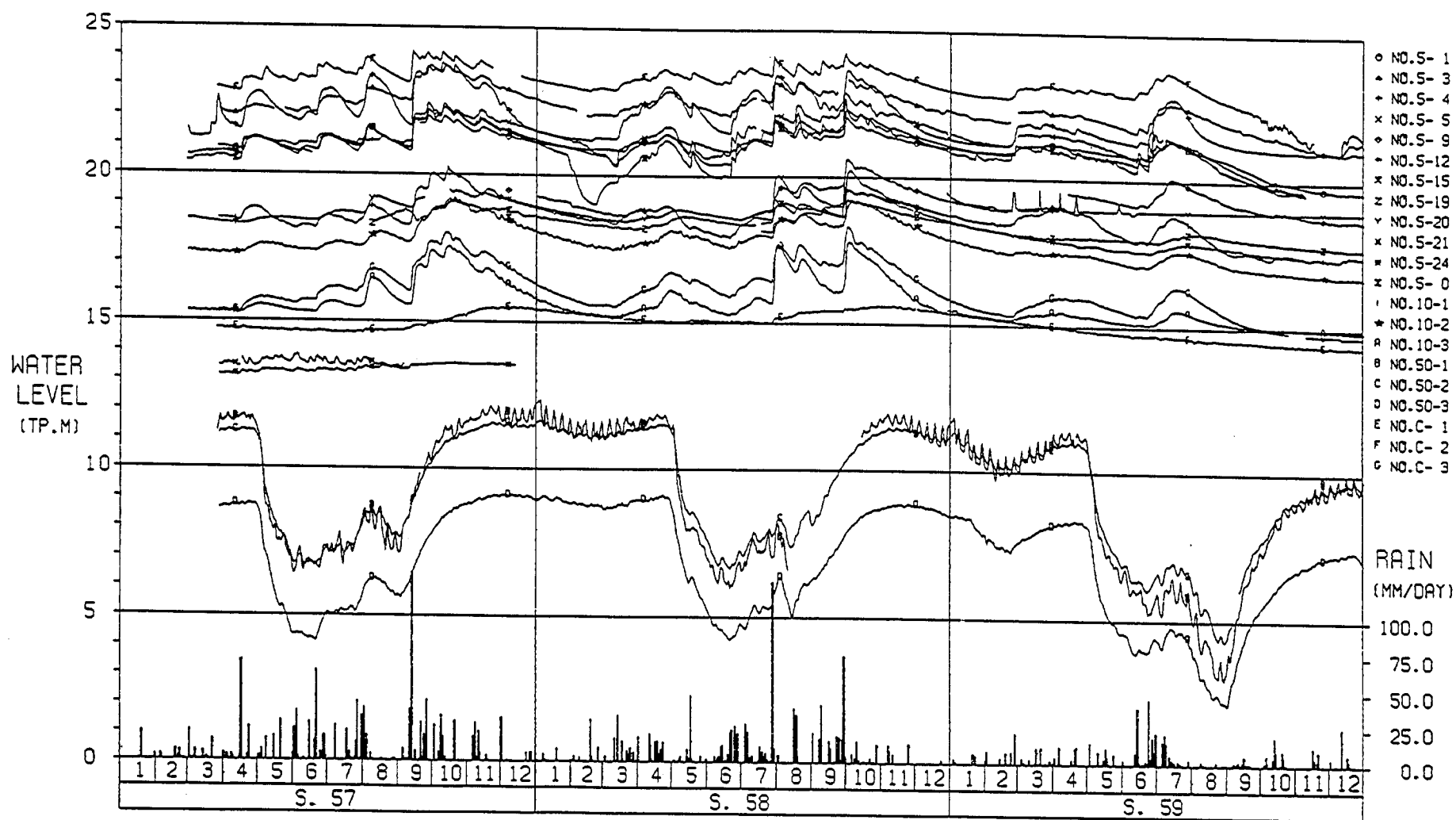


图 3-6 地下水位時系列图

第Ⅴグループ： No. 5－24

水堀低地の水耕田の中にあり，被圧されている。

地下水位は，昭和57～58年前半にかけては約50cm程度地面より高かったが，以後低下の傾向にあり，最近では地面付近にまで低下している。水位変動は非常に小さい。

第Ⅵグループ： No. 10－1， No. 10－2， No. 10－3

これら10m井は，5m井に隣接して設置されたもので，順にNo. 5－1，No. 5－12，No. 5－20とペアである。No. 5－1とNo. 10－1及びNo. 5－20とNo. 10－3のペアは，地下水位標高は違うものの互いの変動パターンがほとんど同じである。

これは，10m井の方が位置のエネルギーの分だけ水頭が下がるためで，同一の帯水層の地下水位を捕えているものと考えられる。このことは，10m井と5m井の間に存在する粘土層（竜ヶ崎粘土層）の欠除する箇所が流域内にあるため，もしくは粘土層が薄く比較的容易に水を通すことなどの理由で，帯水層を分けるに十分な不透水層となっていないことを示しているものと考えられる。

第Ⅶグループ： C－1， C－2， C－3

これらは，試験地外の民家の井戸である。

C－1は，試験地の台地部南側の斜面に位置する井戸で，水位変動は比較的小さい。

C－2は，試験地の西側を流れる東谷田川右岸側台地上の井戸で，試験地関連地下水観測井中最も水位が高い。しかし，その地下水位変動パターンは試験地台地上の浅井戸と非常によく対応している。

C－3は，試験地北方約3kmの台地上の井戸である。変動パターンはC－2同様，試験地台地上の浅井戸と同一傾向にある。

これらの自記水位計による観測井のほか，試験地の地下水面形状を把握するために月1回観測を実施している観測井がある。

これら水位計なしの観測井について，自記水位観測井と同一のグループ分けをすると次のようになる。なお，一斉観測による観測井の地下水位の変化を図3－7に示す。

第Ⅰグループ： No. 5－2， No. 5－6， No. 5－8

自記水位観測井（第Ⅰグループ）の場合と同様の位置，地質的条件にあり，変動パターンは類似する。なお，No. 5－6は昭和59年半ばから特異な動きを示しており，その変動幅は第Ⅳグループ（No. 5－12）に類似している。

第Ⅱグループ： No. 5－11， No. 5－14， No. 5－17

自記水位観測井（第Ⅱグループ）の場合と同様な水堀川低地によって分割された台地上に位置する観測井（No. 5－14）と，谷津に近い台地上に位置する観測井（No. 5－11，No. 5－17）で，地質的にはNo. 5－11，No. 5－14は竜ヶ崎砂層中を変動しており，No. 5－17は近隣するNo. 5－20同様に常総粘土層と竜ヶ崎砂層中で変動している。

地下水位は自記水位観測井（第Ⅱグループ）と同様，地盤高より3～6mほど深い位置にあり，No. 5－11はT.P. 20～23mの間で，他の2井はT.P. 17～20mの間で変動している。

第Ⅲグループ： なし

第Ⅳグループ： No. 5 - 10

自記水位観測井（第Ⅳグループ：No. 5 - 12）に近隣する観測井で、地下水位は地盤高より2 - 4 m ほど深いT.P. 20 - 23 mの間で変動し、変動パターンはNo. 5 - 12に類似する。

第Ⅴグループ： No. 5 - 7, No. 5 - 16, No. 5 - 21

台地をきざむ水堀川低地及び谷地に位置する観測井で、河谷堆積物や腐植土、農耕土等の堆積土中にあり被圧されている。

地下水の変動パターンは、地盤高の高い観測井（No. 5 - 7）ほど台地上の観測井の変動パターンに類似し、低地の観測井ほど変動幅が小さく表れている。

第Ⅵグループ： なし

第Ⅶグループ： なし

このほかに上記地下水位変動パターンのグループのいずれにも分類しがたい観測井が2井ある。

一つは、No. 5 - 13で、試験地西側の谷津に分割された台地上にあり、観測井の中で最も常総粘土層が厚く、また、観測データが少ないため分類しなかった。

もう一つは、No. 5 - 22で、試験地東南台地の南端に位置し、地下水位は地盤高より7 - 10 m ほど深いT.P. 14 - 17 mの間で変動している。地質的には、成田層砂層と竜ヶ崎粘土層中を変動しており、5 m井でこれに類する挙動を示すものはほかにはない。このNo. 5 - 22をあえて分類するとすれば、同様な地質的条件、変動幅を持つ第Ⅵグループ（10 m井）となるが、変動パターンが特異であることからⅠ - Ⅶのグループ分類は行わなかった。

以上のように、観測井個々の地下水変動パターンにはそれぞれ違いがあるが、試験地全体として見た時の変動パターンは次のようである。

i) 5 m級観測井は、T.P. 17 - 24 m程度の間で地下水位が存在し、台地上に位置する観測井は地下水位標高が高く、変動幅も大きい。水堀川低地及び谷地部の観測井では、変動幅は小さい。

なお、地盤から地下水面までの深さと観測井深度の関係を図3 - 8に示す。

ii) 粗造成が完了した昭和58年1月以降に一部の観測井で一時的な水位低下や変動に乱れが生じている。これらは、現場工務所における地下水の汲み上げが原因と考えられる。

iii) 昭和59年末の地下水位は、昭和57年末と比べ1 - 1.5 m程度の低下が認められ、その原因として造成の影響と昭和59年洪水の影響が挙げられる。しかし、造成の影響のないC - 2, C - 3と試験地内観測井の地下水位変動パターンを比較すると、昭和59年においてもほぼ一定の水位差を保っており、これら地下水観測井データで見る限りでは、試験地の造成による影響は極めて小さいと言える。（図3 - 9, 3 - 10参照）

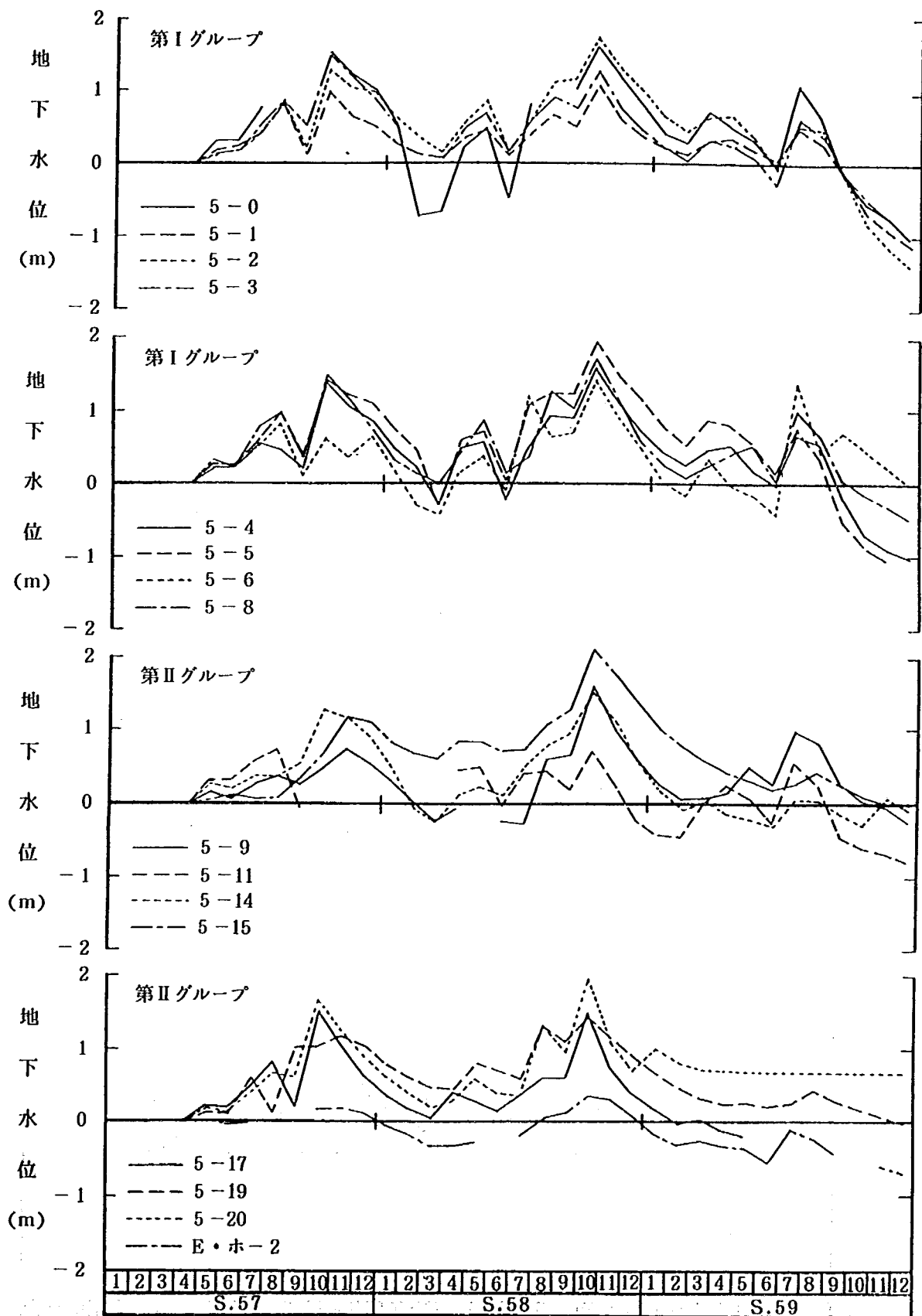


図3-7(a) グループ別地下水変動図

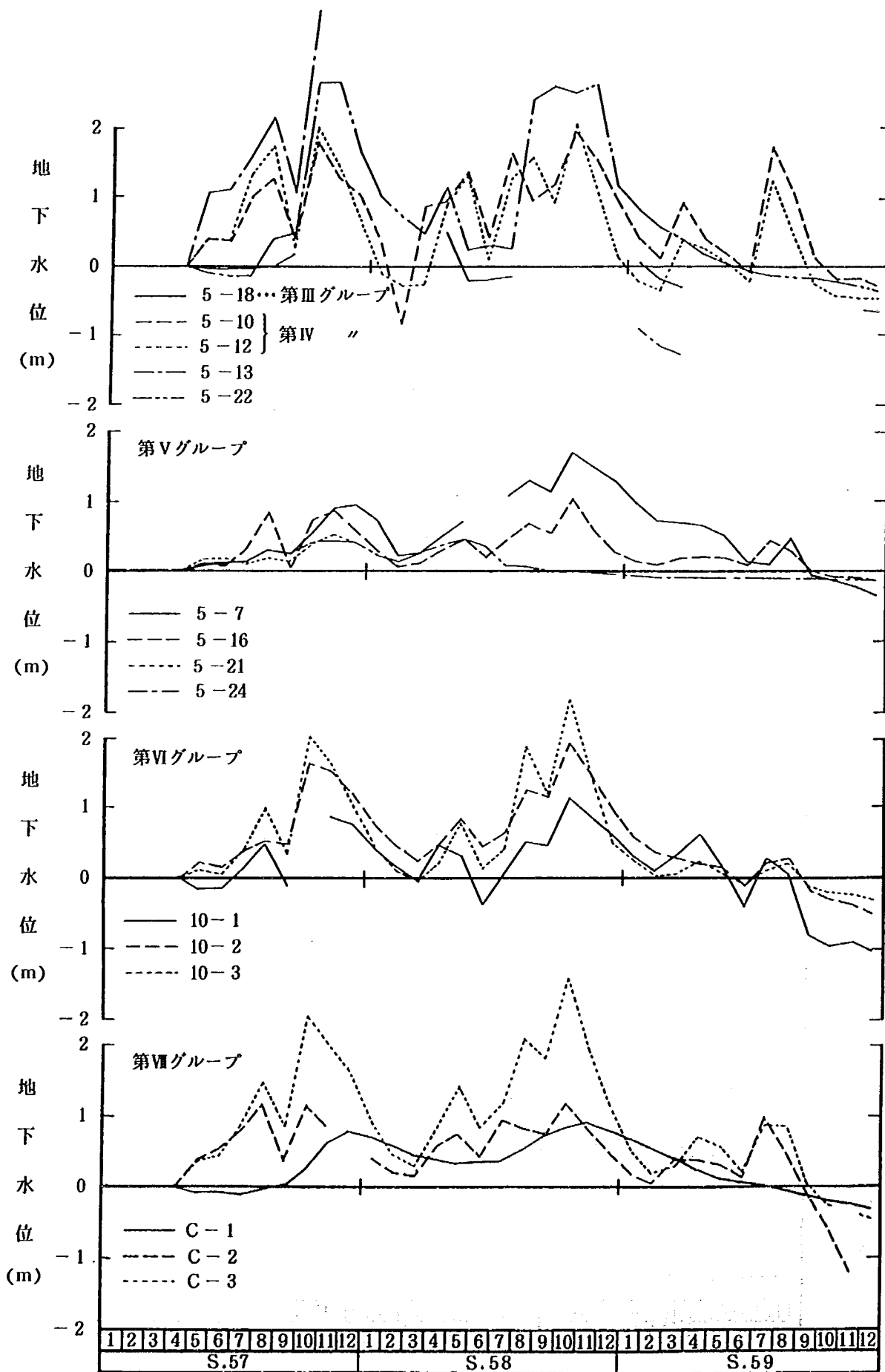


図3-7(b) グループ別地下水変動図

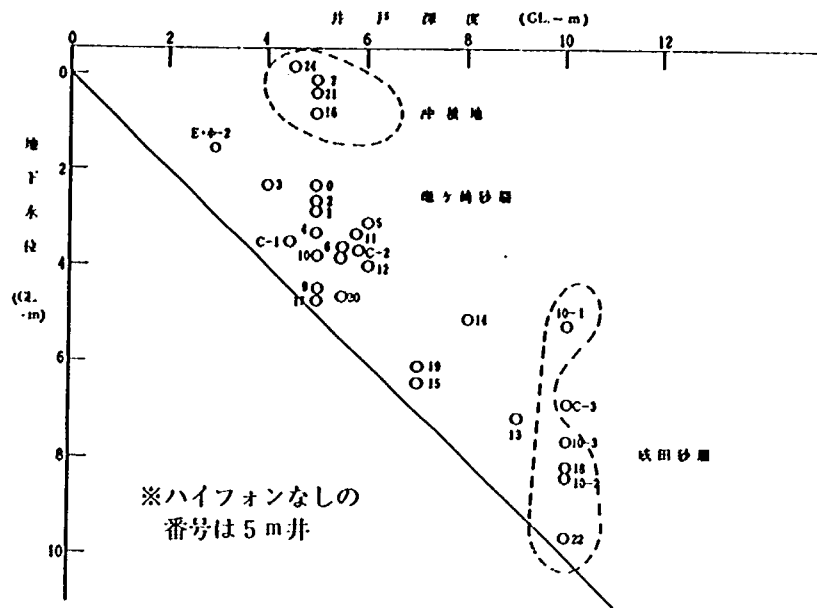


図3-8 地下水位・井戸深度相関図 (昭和57年4月12日データによる)

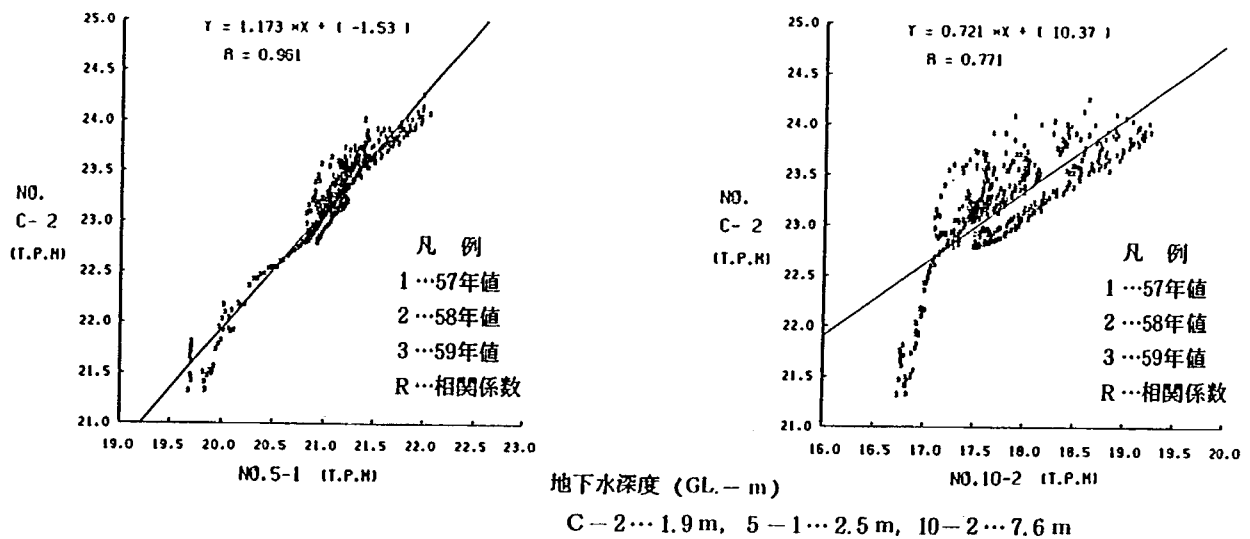


図3-9 C-2と試験地観測井の相関

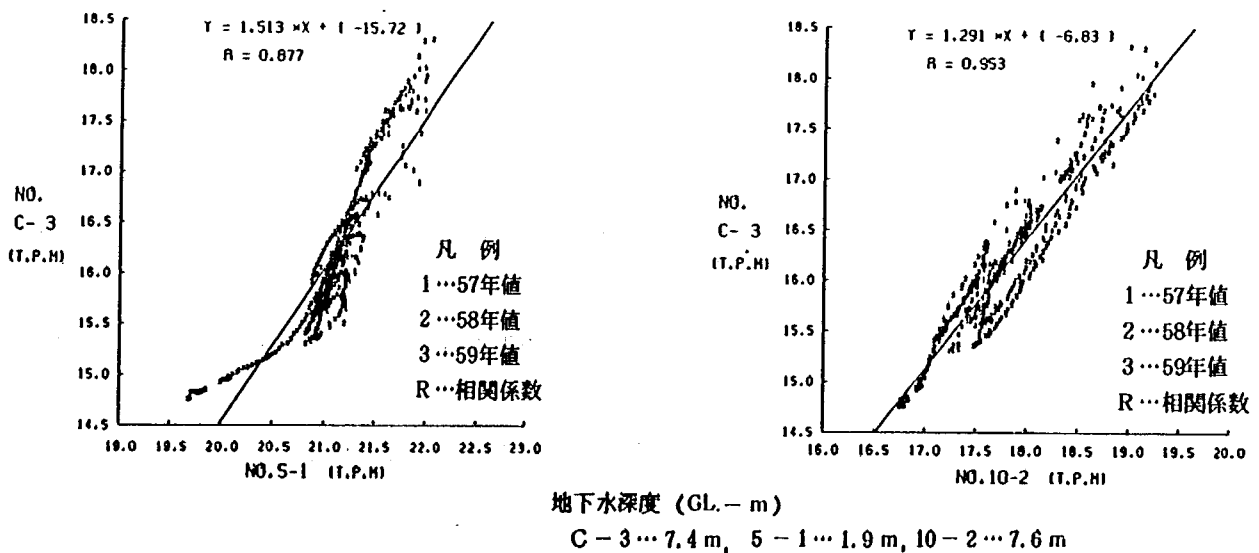


図3-10 C-3と試験地観測井の相関

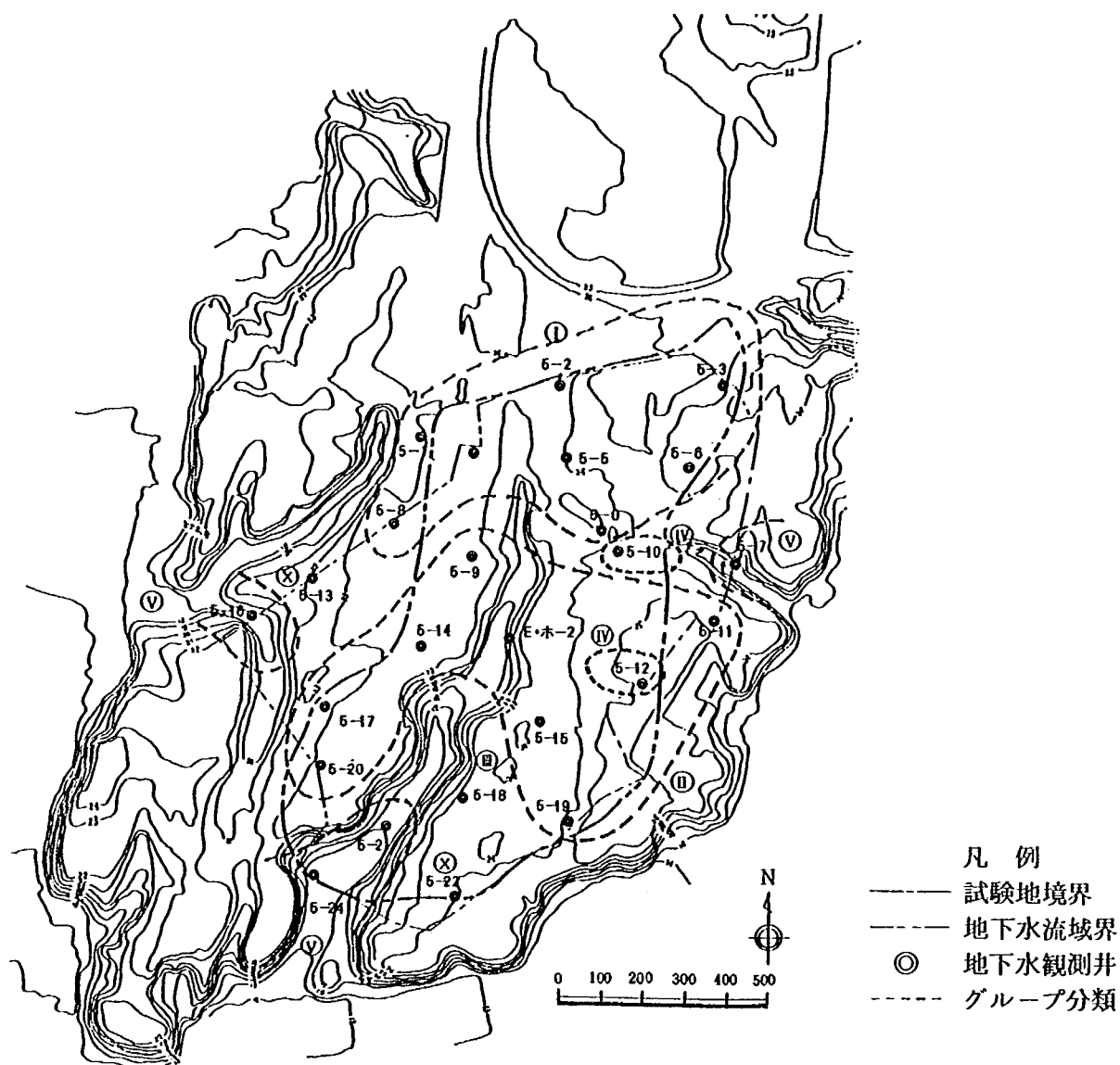


図3-11 浅層地下水観測井の分類

1.2.2 被圧地下水 (50m井)

試験地には、No. 50-1, No. 50-2, No. 50-3の3本の50m級観測井があり、いずれも下総層群下部層中の被圧地下水をとらえている。

図3-6の地下水位時系列図でわかるように、昭和57～59年の3ヶ年のいずれも4月末に急激な水位低下が認められ、6月末頃に年間の最低水位を記録しているが、雨の少なかった59年は特に8月の月間降水量が極端に少なかったため8月上旬に最低水位を記録している。この現象は、稲作のための灌漑用水の汲み上げによるものと考えられる。

また、地下水位の経年変化をみると昭和57年、58年は大差ないものの、昭和59年は渇水による揚水量の増大等によって、非灌漑期における回復水位が約1 mほど低くなっている。

なお、No. 50-1 及び No. 50-2 の非灌漑期にみられる鋸歯状の地下水変動は、その変動周期が1週間であること、そして、その1つの周期の最低水位が金曜日の17時頃、最高水位が月曜日の6～9時頃であることから、試験地北側に位置する日本自動車研究所の地下水汲み上げによるものと思われる。しかし、灌漑期においてこの変動パターンは、日本自動車研究所の水利用量をはるかに上まわる灌漑用の揚水のためパターンが崩れ、不明瞭になっている。

1.3 降雨応答解析

前述のように浅層地下水位（竜ヶ崎砂層5 m井）は降雨に良く応答し、10 m井（成田層砂層）は5 m井より応答は鈍いもののほぼ5 m井と同様な動きをする。

また、50 m井は、5 m井や10 m井とは異なる動きを示し、短期的な降雨には左右されず、灌漑用水等の揚水や年単位の降雨によって変動が支配されているものと考えられる。

浅層地下水の降雨による変動量は大きく、昭和57年9月10日降雨（総雨量 192.5mm）では総じて1 m前後の水位上昇を記録しており、ローム層中に降雨が良く浸透していることがわかる。これは、試験地の洪水時の流出率が0.1以下と極めて小さいことから裏付けられる。

降雨による地下水位の上昇量は、図3-12に示すように、場所によってかなりの違いが見られ、これは地下水の流れや表層土壌等の違いによるものと思われる。そこで、降雨の地下水位上昇量に対する影響を時系列的に解析した。

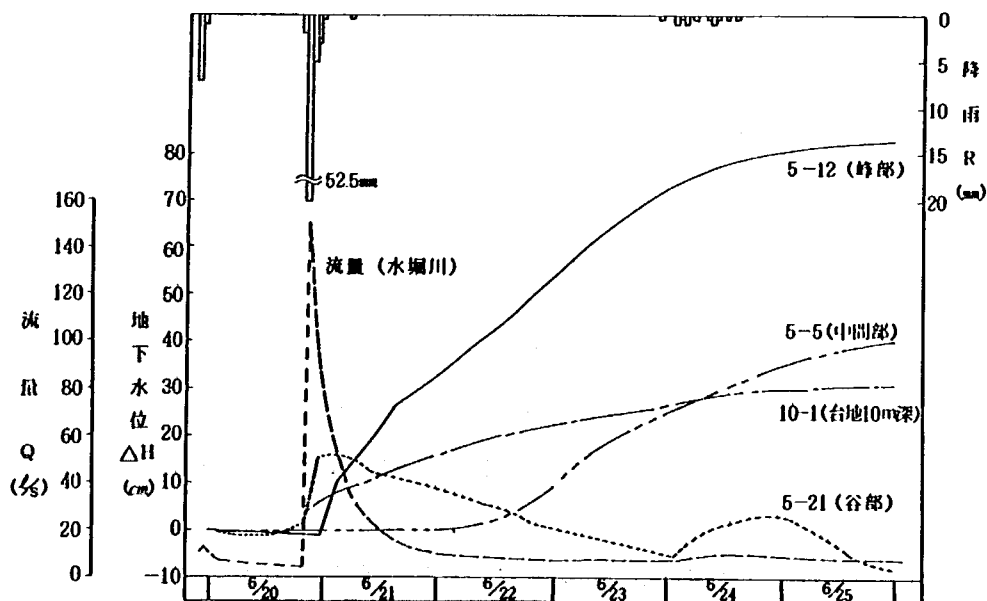


図3-12 降雨による流出量と浅層地下水位の変化（1982年6月19日洪水）

解析の方法は、ある日の地下水位変動量 ΔH が次式のように前日の地下水位変動量 ΔH_{i-1} と当日を含めた8日間の線形和で表現されると仮定し、各井戸について昭和57年12月までの日データを用いて最小2乗法で同定した。

$$\Delta H_i = \Delta H_{i-1} + \sum_{j=1}^8 \alpha_j R_{i-j+1}$$

ΔH ：水位の日変動量 (m) ($\Delta H_i = H_i - H_{i-1}$)

R：日降雨量 (mm)

α ：係数

同定した結果を表3-1に示す。これをグラフにしたものが図3-13、図3-14である。上式の α の係数の大小が降雨の地下水位の変動に対する影響の度合いを表わすと考えるならば、浅層地下水(5 m 井)は3つのタイプに別けられる。

表3-1 降雨～地下水位時系列解析パラメータ同定結果

井戸 井	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
5-1	0.00032	0.00338	0.00059	0.00012	-0.00020	-0.00031	-0.00026	-0.00031
5-4	-0.00045	0.00200	0.00141	0.00071	0.00031	-0.00006	-0.00013	-0.00028
5-5	0.00040	0.00048	0.00051	0.00148	0.00112	0.00086	-0.00019	-0.00087
5-12	0.00081	0.00355	0.00225	0.00152	0.00094	0.00009	-0.00025	-0.00008
5-20	-0.00014	-0.00021	0.00059	0.00074	0.00065	0.00048	0.00015	0.00025
5-21	0.00338	0.00144	-0.00191	-0.00119	-0.00078	-0.00046	-0.00079	0.00073
5-24	0.00058	0.00041	-0.00022	-0.00015	-0.00007	-0.00009	-0.00008	0.00017
10-1	0.00035	0.00157	0.00076	0.00052	0.00024	0.00013	-0.00002	-0.00002
10-2	0.00060	-0.00019	-0.00005	0.00055	0.00061	0.00037	0.00012	0.00041
10-3	0.00006	-0.00005	0.00162	0.00157	0.00107	0.00037	0.00010	0.00006
備考	$\Delta H_i = \Delta H_{i-1} + \sum_{j=1}^8 \alpha_j R_{i-j+1}$							

第1のタイプは、前日の降雨が最も影響するタイプ(5-1, 5-4, 5-12)である。これらは、主に地下水流域の峰の部分に当りローム層が2 m程度存在する所である。

第2のタイプは、2日～3日以降の降雨が地下水位の変動に最も影響するタイプ(5-5, 5-20)で地下水流域の中間部に位置する。

第3のタイプは、当日の降雨が地下水位の日変動に影響するタイプ(5-21)で、地下水流域の谷部に位置する。

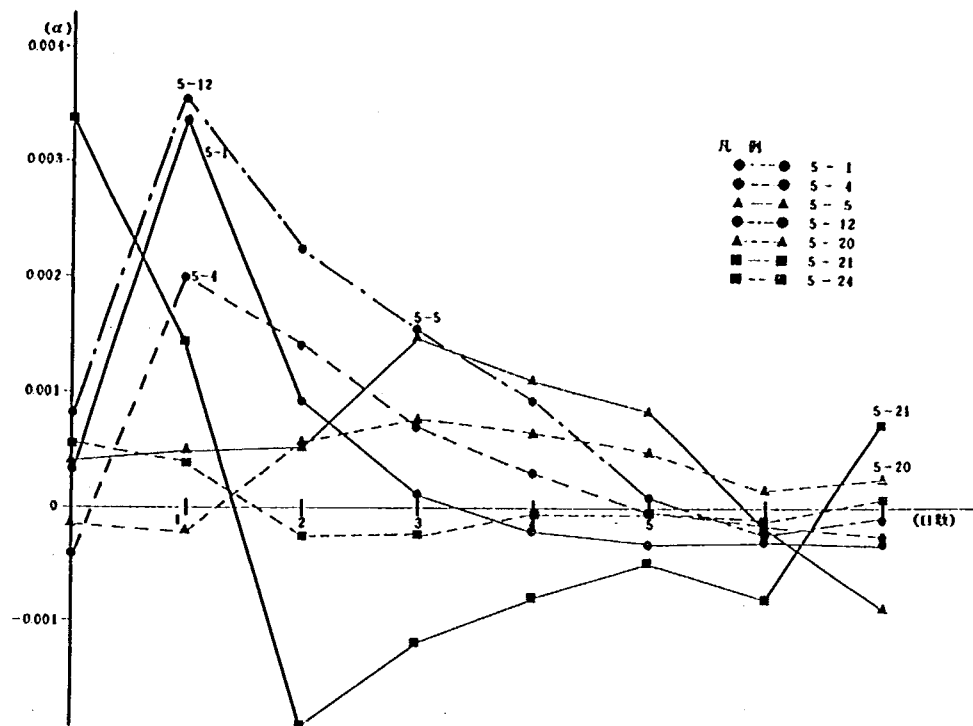


図 3-13 5 m 井の降雨～地下水位時系列解析のパラメータ

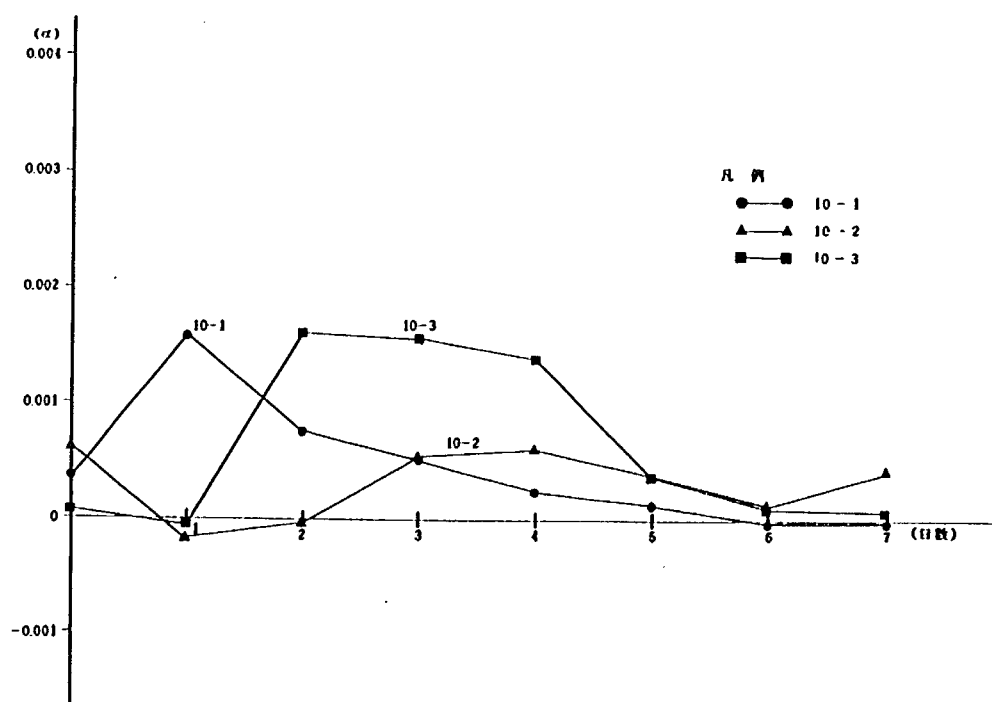


図 3-14 10 m 井の降雨～地下水位時系列解析のパラメータ

1.4 地下水位等高線

月1回の地下水位の観測結果及び自記記録をもとに、地下水位等高線図を作成した。

図3-15(a)~(d)に当地区の各季節毎の地下水位等高線図を示した。地下水位の高所、低所は、地形の高所、低所に対応しており、台地部で高く、谷部で低くなっている。

全体的には、南々西方向に向かって標高が下がるにつれて地下水位も低下しているが、台地面を刻みこむ沖積低地の存在によって、地下水面の形状はやや複雑な出入りを示している。

季節別にみると、夏期に地下水位の等高線がつまっており、冬期には間隔が広がっている。これは図2-1に示した月降水量のグラフによれば、昭和58年は年間降水量の約3割の降水が梅雨期に、約2割が秋雨期に得られ、地下水が涵養されたためと考えられる。

昭和57年以降の梅雨後にあたる7月期と、乾期にあたる1月期の地下水位等高線図を図3-16(a)~(f)に示す。これで比較すると、全体的な地下水の流向は同様であるが図3-16(f) 昭和60年1月の地下水位が若干下がっている。これは、昭和59年の総降水量が平年の約1/2程度であったことに起因すると考えられる。

造成に伴う伐採・掘削・盛土などによって、浸透量・地下水位に変化が現われると考えられるが、造成前である図3-16(a) 昭和57年7月の地下水位等高線図と、粗造成の完了した昭和58年1月以降の地下水位等高線図でみる限りでは、地下水位に関する造成の顕著な影響は認められない。

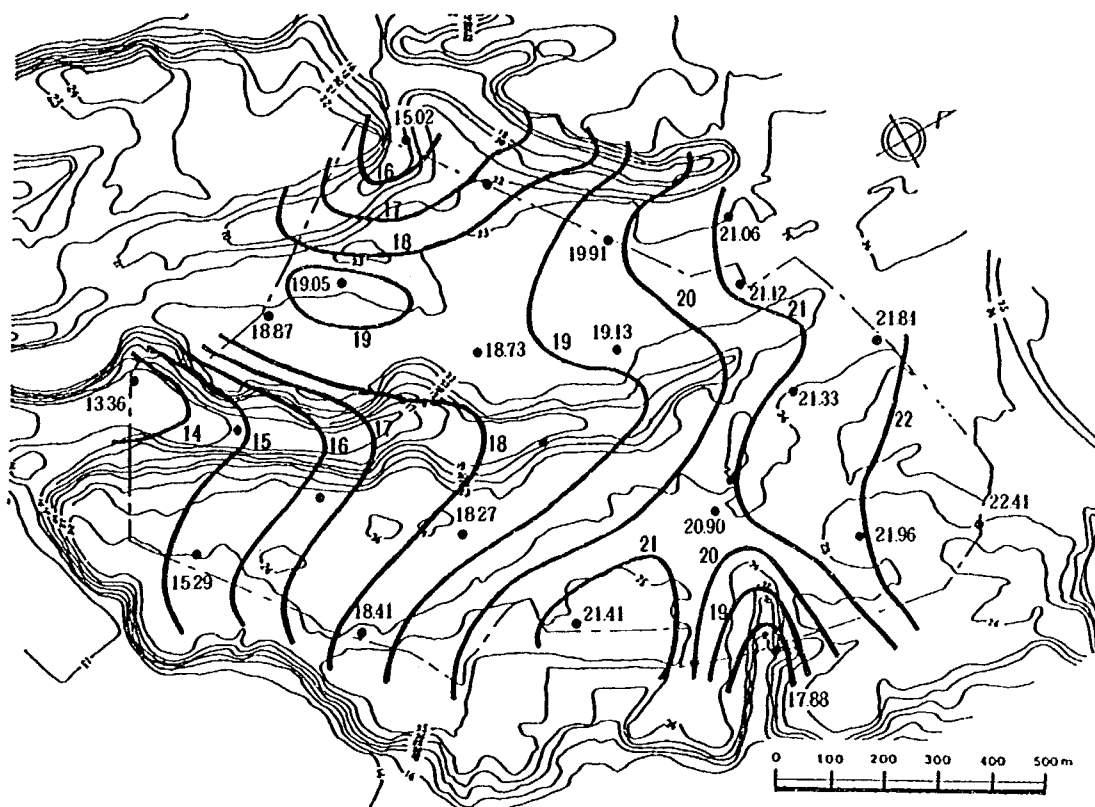


図3-15(a) 地下水位等高線図 (季節変化)

[昭和58年1月7日]

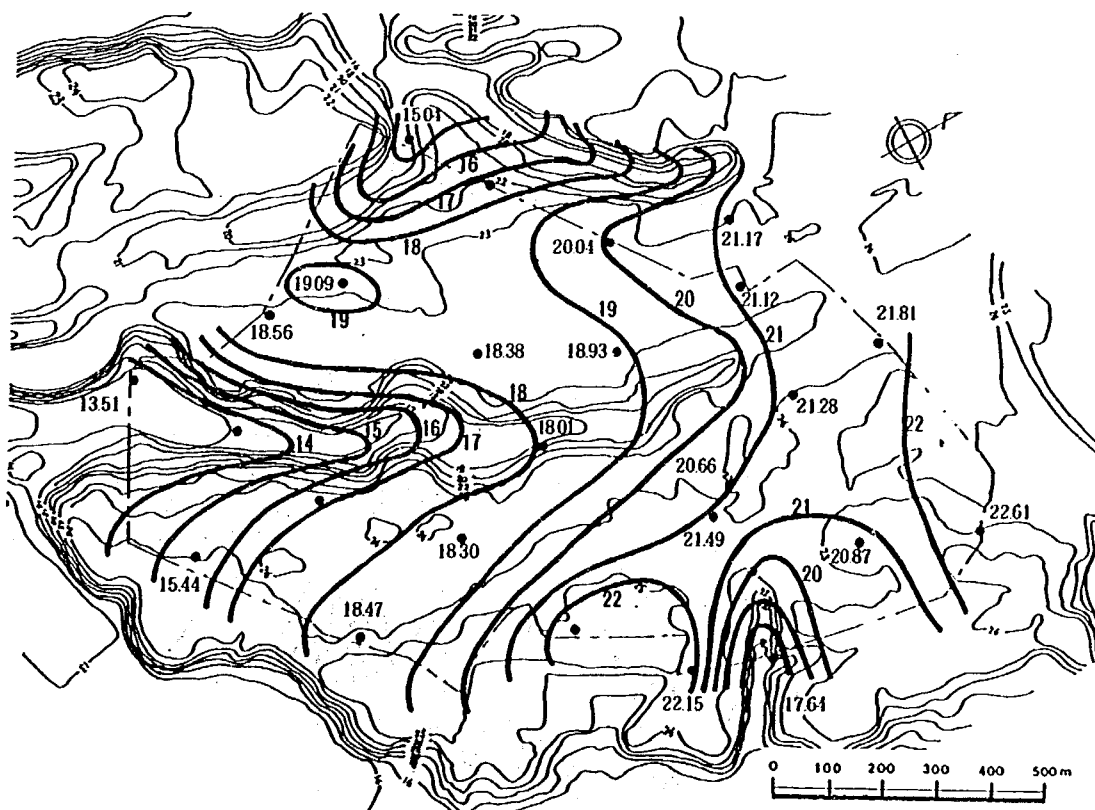


図3-15(b) 地下水位等高線図 (季節変化)

[昭和58年4月4日]

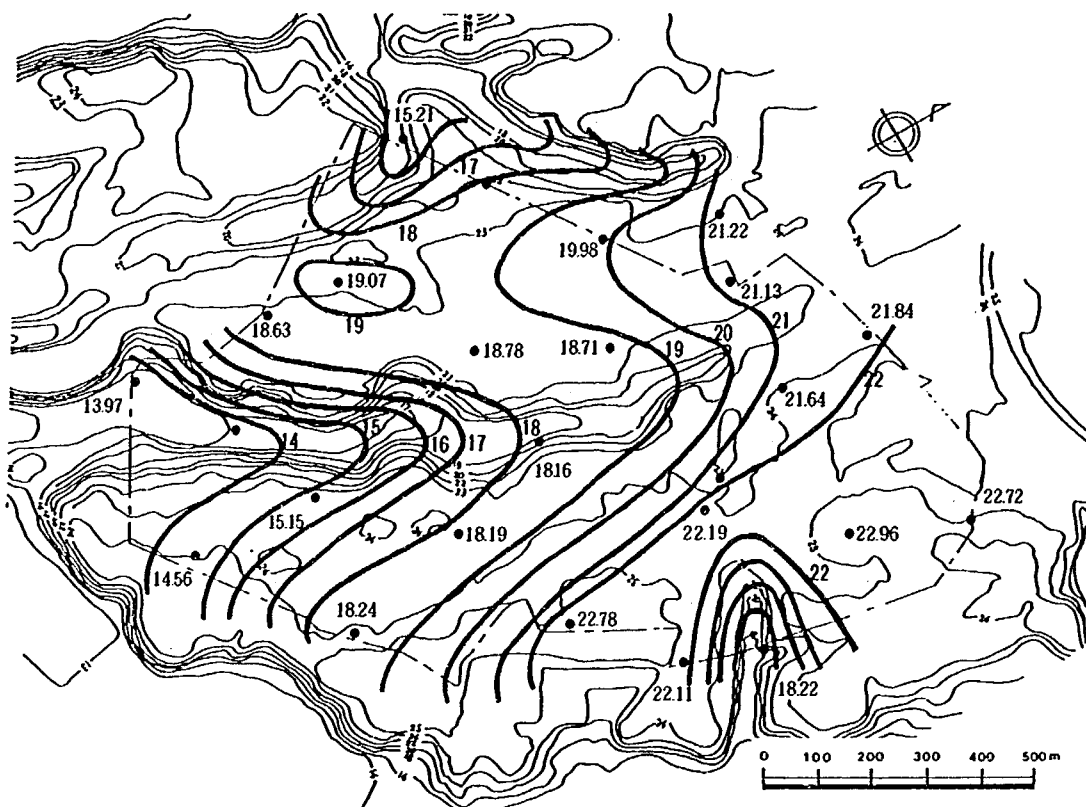


図3-15(c) 地下水位等高線図 (季節変化)
〔昭和58年7月6日〕

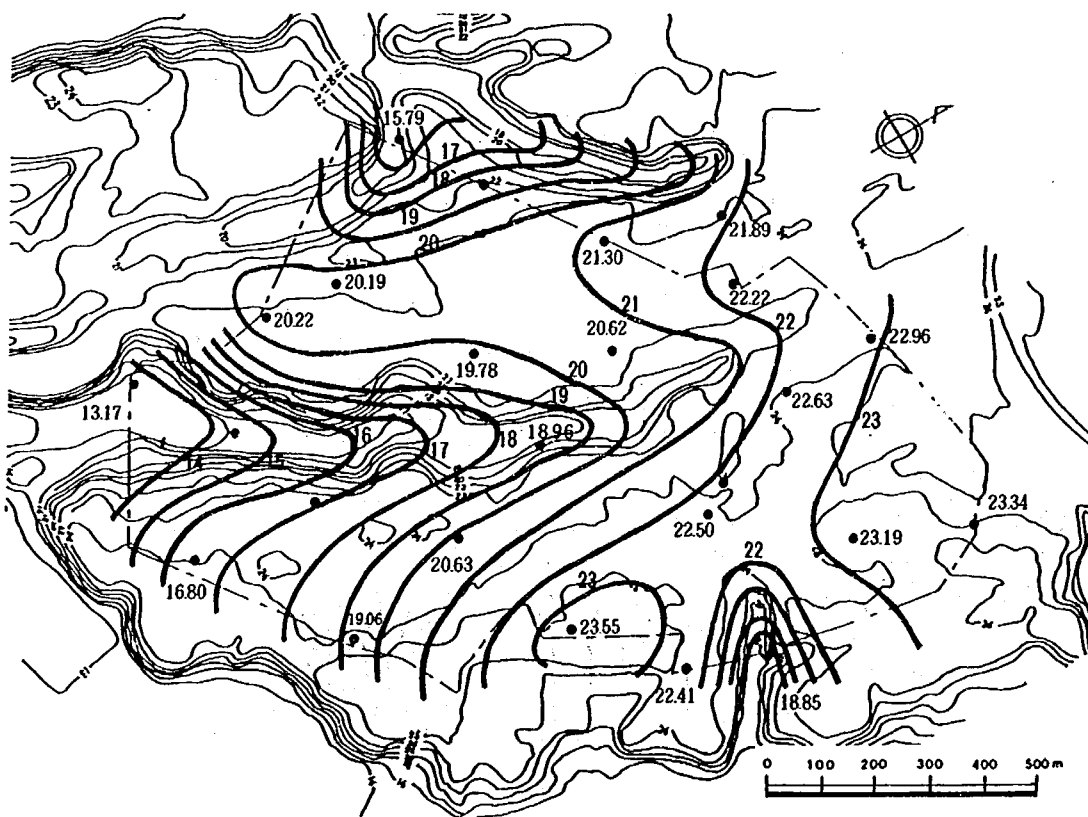


図3-15(d) 地下水位等高線図 (季節変化)
〔昭和58年10月4日〕

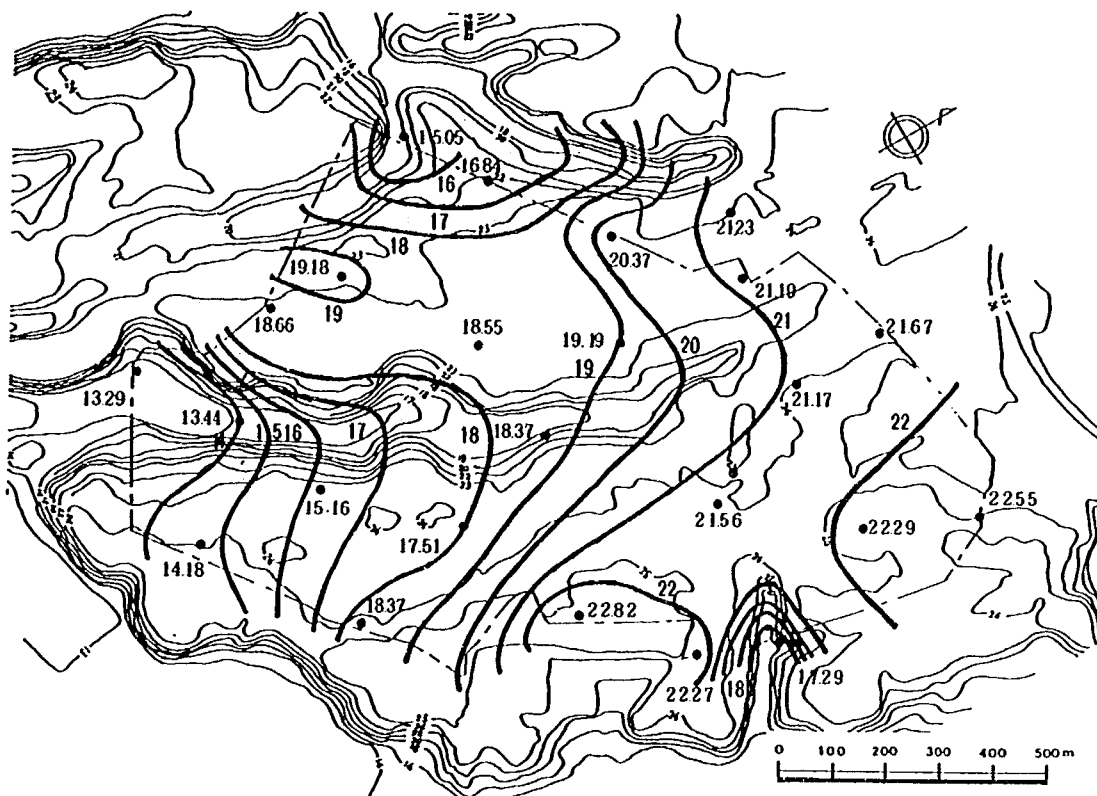


図3-16(a) 地下水位等高線図 (経年変化)

[昭和57年7月5日]

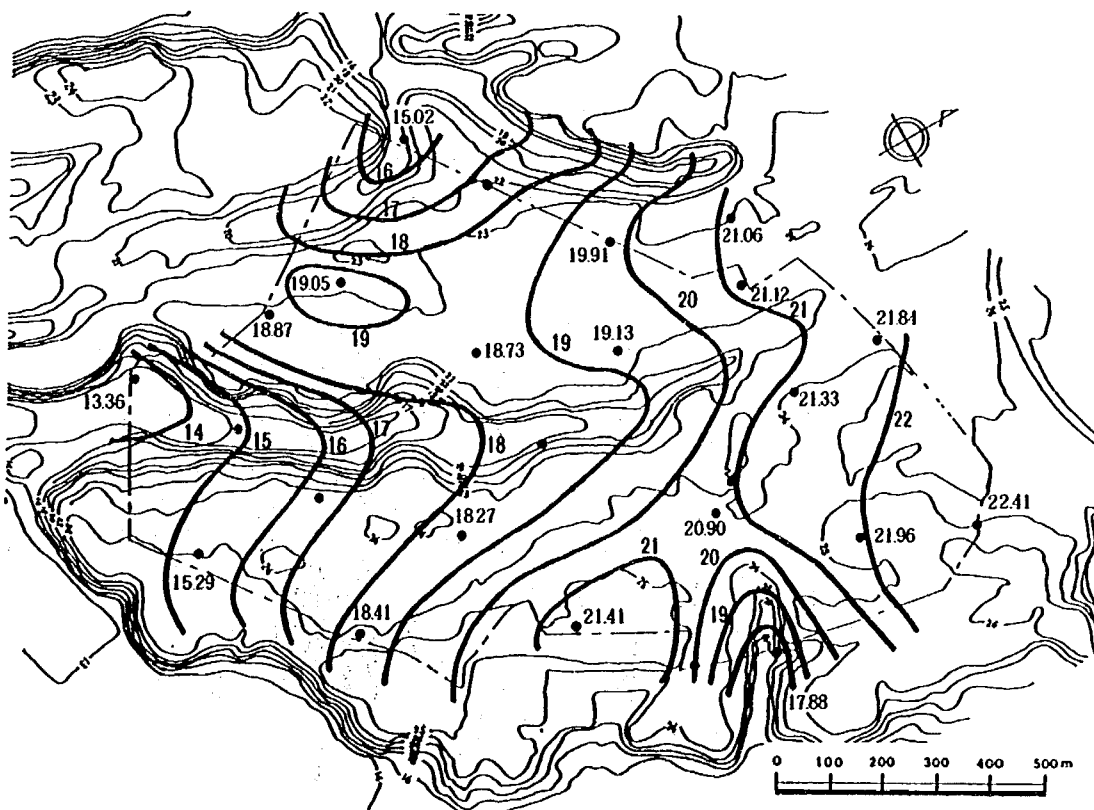


図3-16(b) 地下水位等高線図 (経年変化)

[昭和58年1月7日]

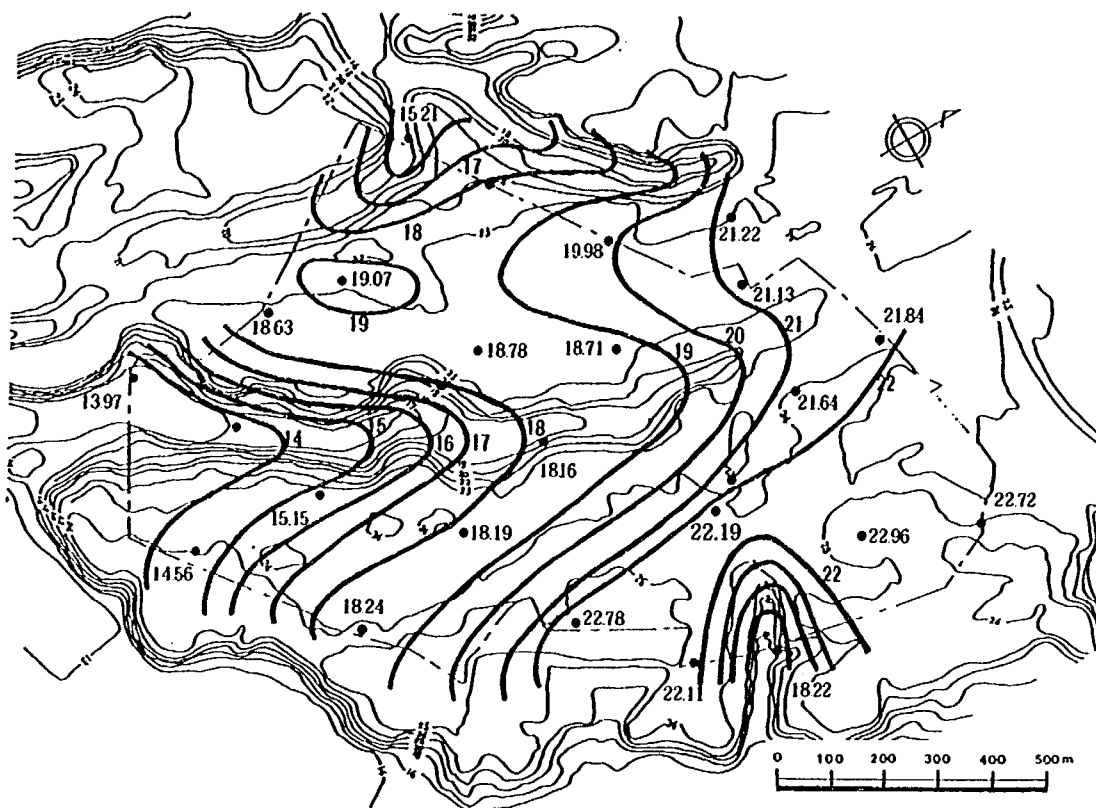


図3-16(c) 地下水位等高線図 (経年変化)

[昭和58年7月6日]

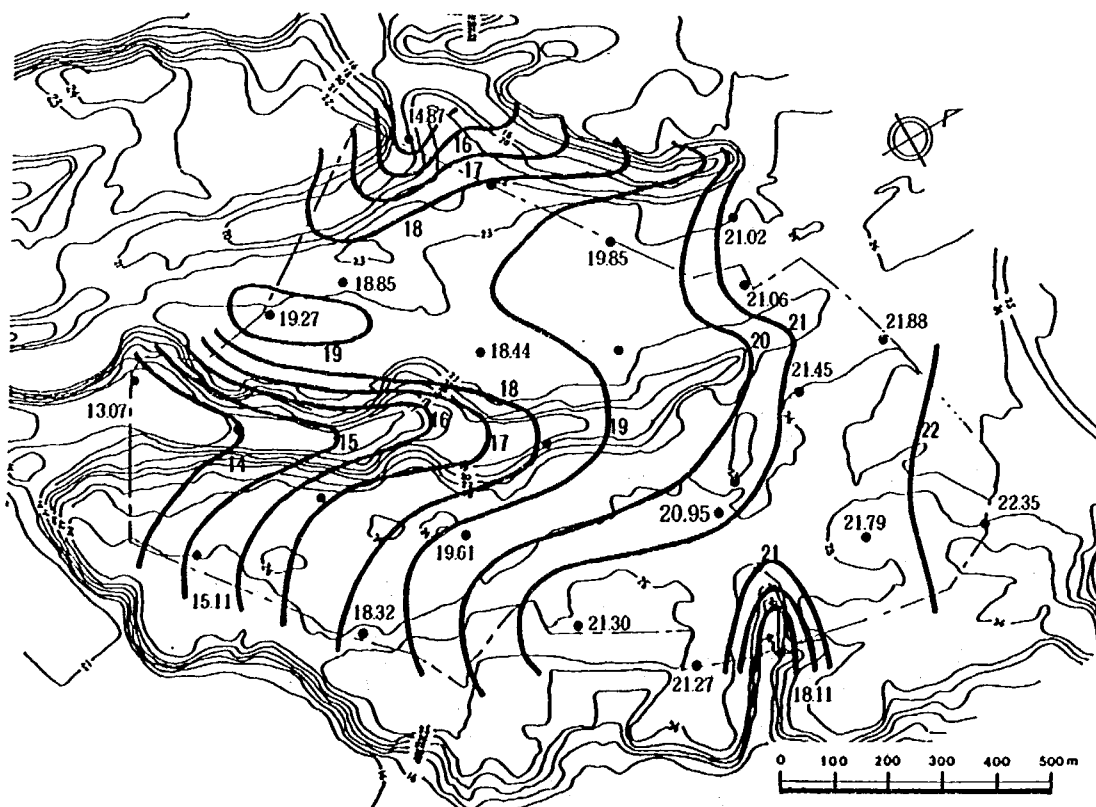


図3-16(d) 地下水位等高線図 (経年変化)

[昭和59年1月6日]

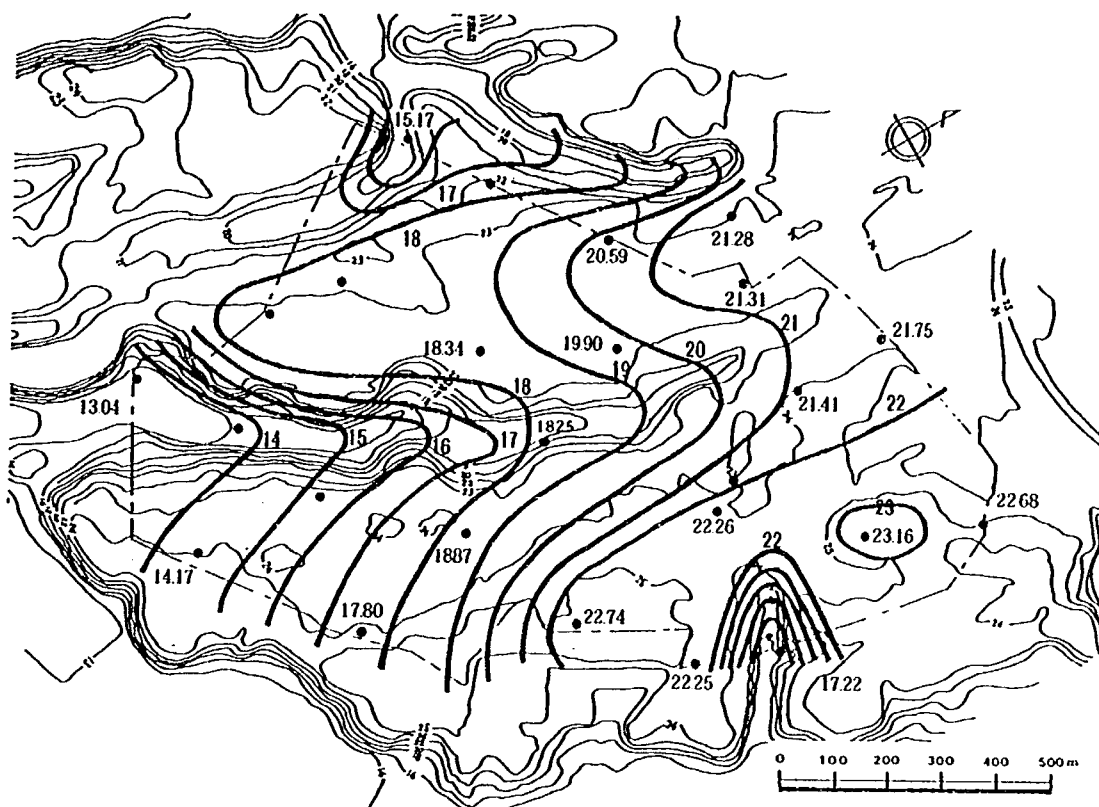


図3-16(e) 地下水位等高線図 (経年変化)

[昭和59年7月9日]

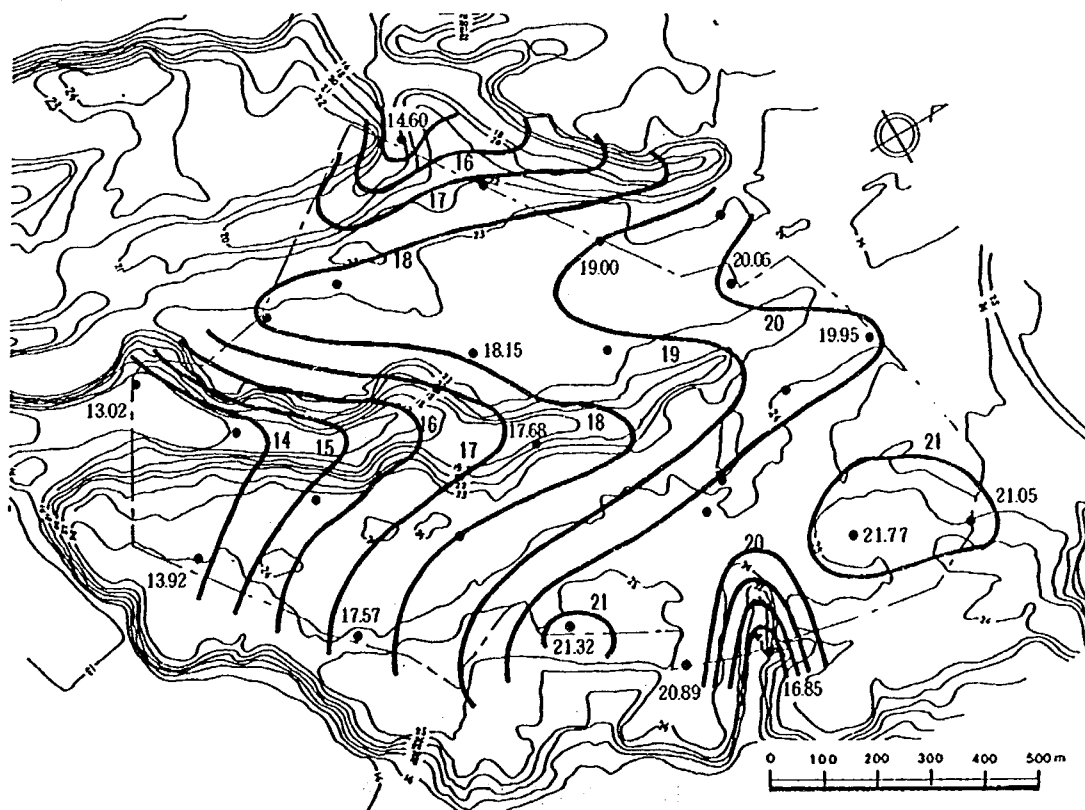


図3-16(f) 地下水位等高線図 (経年変化)

[昭和60年1月10日]

1.5 地下水温

毎月の地下水位一斉観測時に測定した水温の時系列図を図3-18に示す。

全体的な傾向として、1年周期で地下水温が変化している。また、地下水位が地表に近いほど気温の影響を受けており、深くなるほど温度変化の振幅は減少し、位相も遅れてきている。

ある深度になると、地下水温が年変化を消失する層となる。この層は恒温層と呼ばれ、筑波周辺の恒温層は深さ12~14m、地下水温14~16℃と言われている。(木内(1950))

谷田部試験地における地下水温測定対象井は、いずれも5m井であるため恒温層は見受けられないが、8月期、2月期の地下水温と地下水深度の関係を表すと図3-17となり、6m以深での較差は比較的小さく恒温層に近づいていることが推測される。

地下水温の土地造成による影響は、数本の観測井に見られ、それは、観測井付近の盛土、切土施工による地下水深度の変化によるものと考えられる。図3-18中の矢印の位置は、盛土、切土の施工時期を表しており、特に盛土の厚いNo. 5-7及び切土部にあたるNo. 5-5において年周期に変化がみられる。

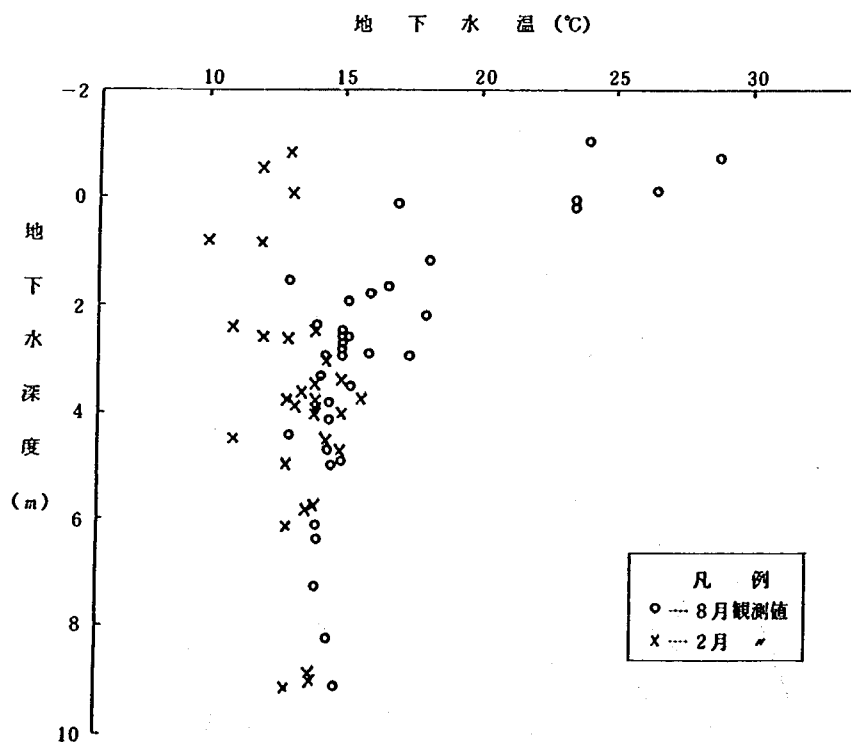
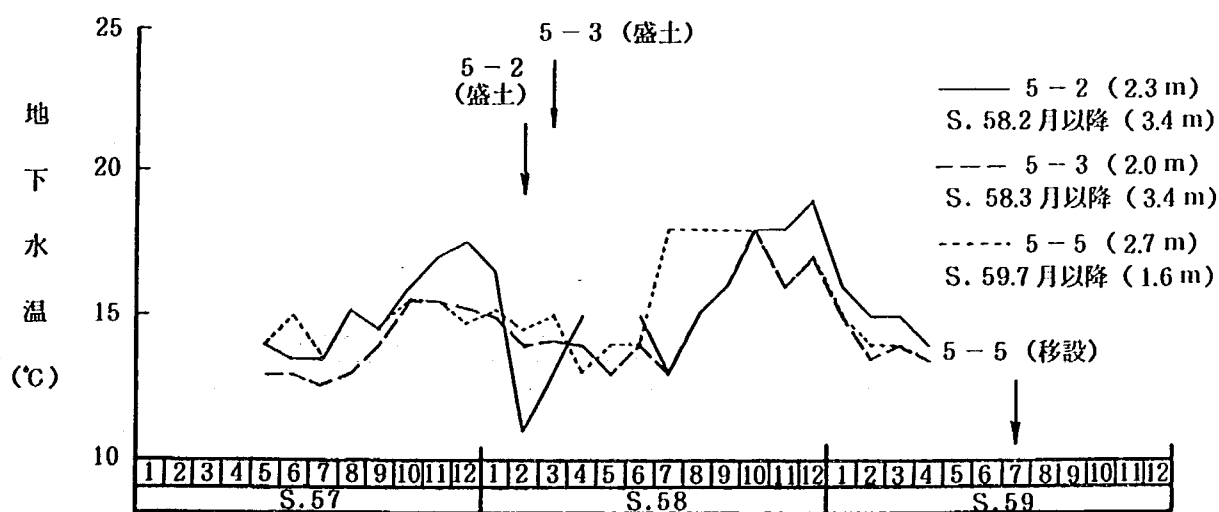
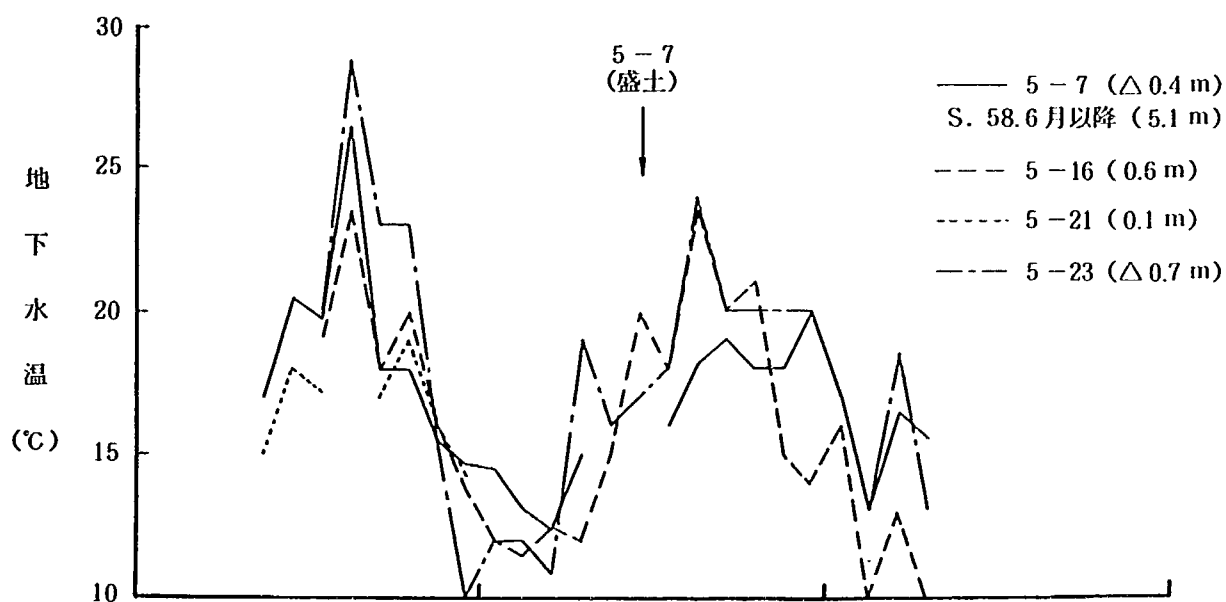
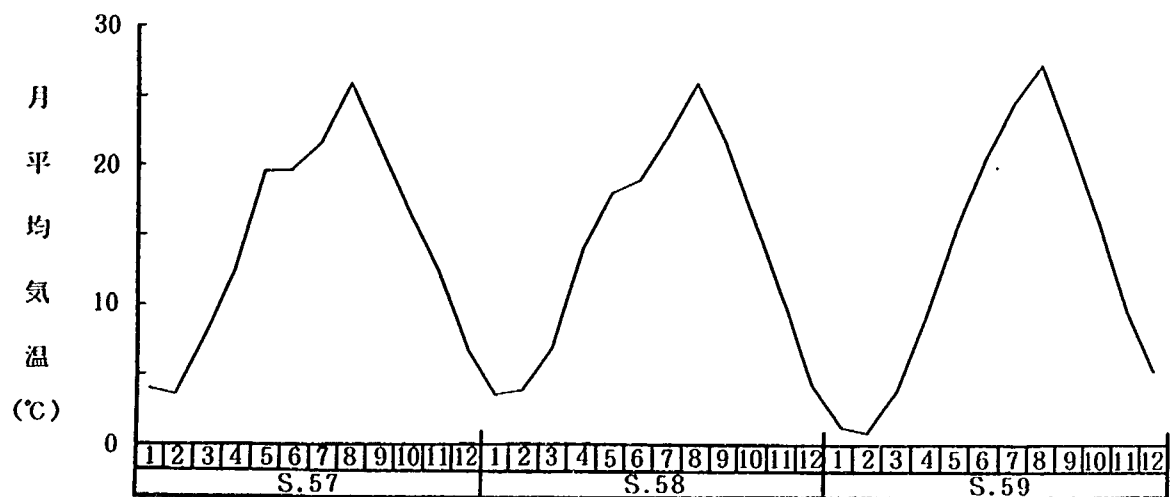
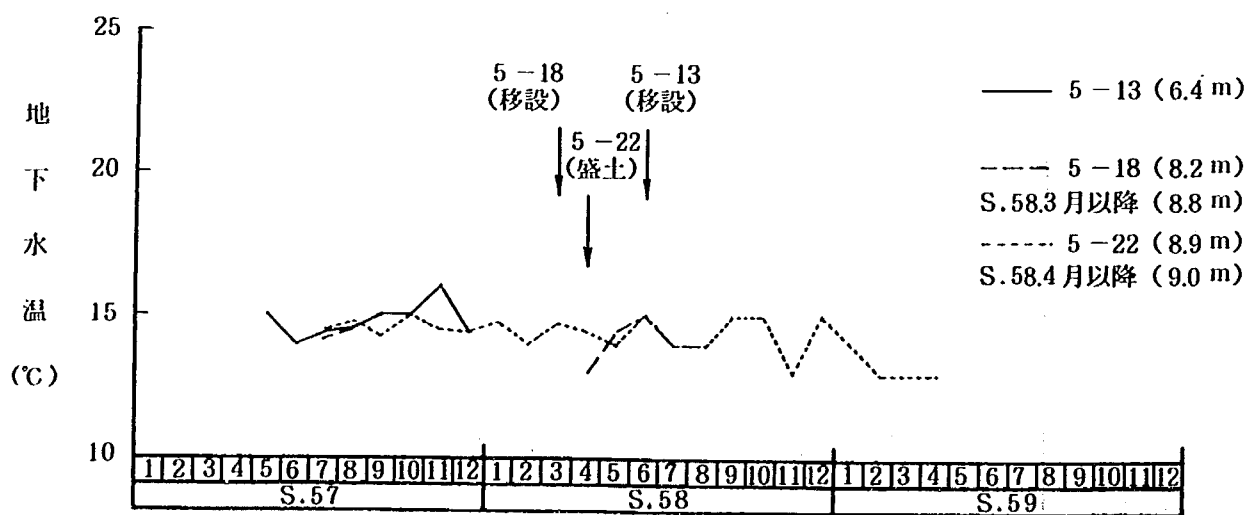
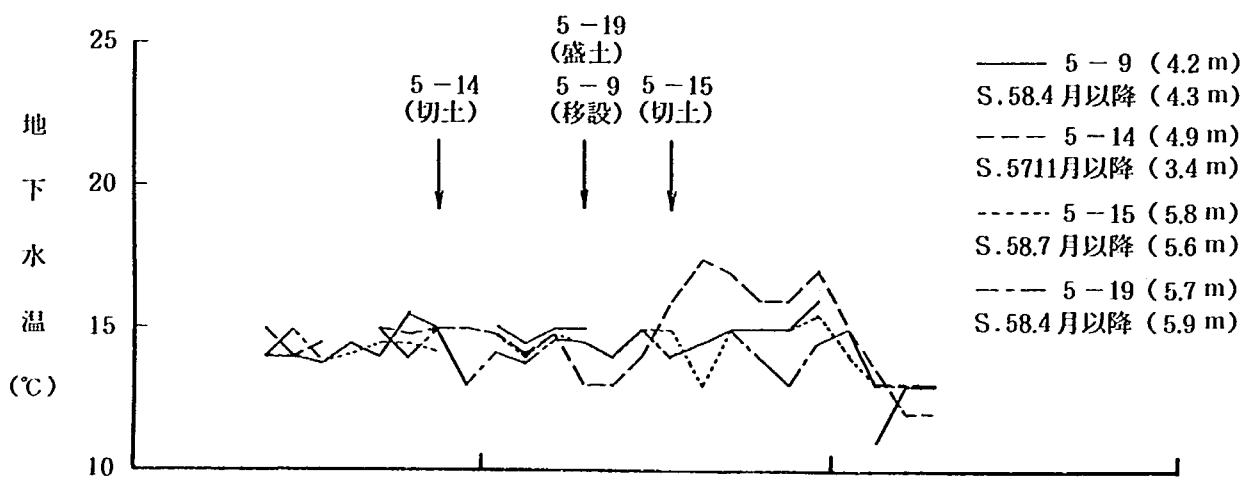
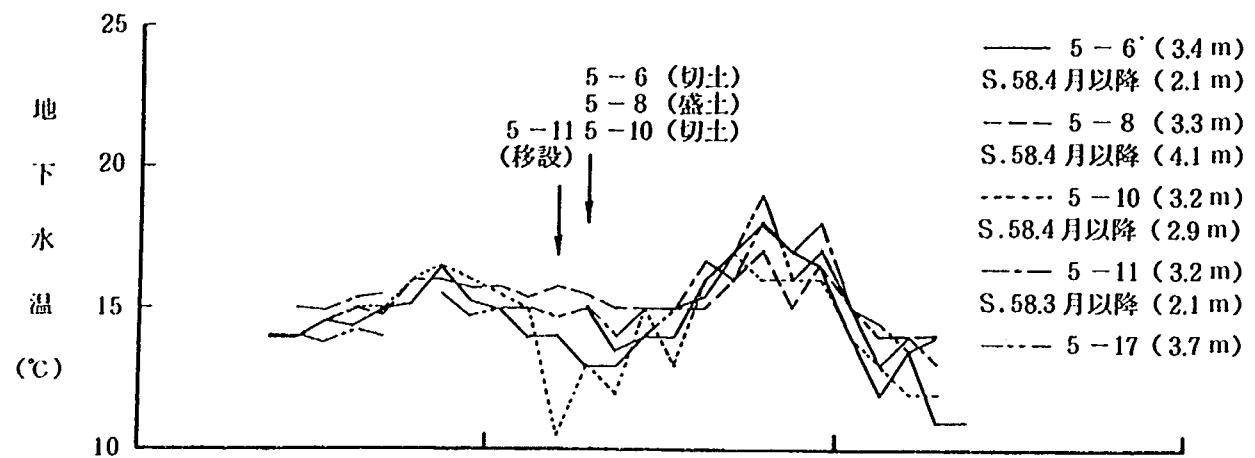


図3-17 地下水温と地下水深度



・ () 書は地下水位深度.

図 3-18(a) 地下水温の時系列図



・ () 書は地下水位深度.

図 3-18(b) 地下水温の時系列図

Ⅲ. 2 地下水シミュレーション

2.1 目 的

前述のように谷田部試験地は、開発される以前においては雑木林、畑が大半を占めていたため、地区内に降った雨は、蒸発散と表面流出($f=0.1$ 以下)を除いた量が地下に浸透し、地下水を涵養していた。

しかし、当地区のように、地下水涵養機能に優れた地域を造成し、道路、建物等により地表面を覆うことは、地下水涵養機能を著しく損ない、また、地中から大気へ向う水の流れ(蒸発)も止められ、水循環に大きな影響を及ぼすと考えられる。地下への涵養量が少なくなれば、地区およびその周辺の地下水位は低下し、地下水利用障害、土壌の乾燥化による畑作、植生等への影響も考えられる。

そこで、将来の開発による地下水位の影響、浸透施設による地下水涵養効果について検討するため、特に浅層の自由地下水について数値シミュレーションを行った。

2.2 モデル

谷田部試験地の地質構造は前述のとおりで、帯水層を考えた場合次のことが言える。

常総粘土層については地下水位がこの層を上下しており、必ずしも一様に分布していないことを考えると、帯水層を分けるほどの不透水層とは考えにくい。また、竜ヶ崎粘土層については、この層をはさんで上下に設けた観測井(No. 5-1とNo. 10-1, No. 5-12とNo. 10-2, No. 5-20とNo. 10-3)の地下水位で見ると、上と下とでは各々水位は異なり、帯水層が分かれているように見うけられるが、竜ヶ崎粘土層下の10m井の水位はこの層を横断しており、また10m井の地下水が被圧されていると考えるには降雨後の水位変化が大きすぎる。

谷田部試験地を対象としたシミュレーションモデルの作成にあたっては、以上のことから図3-19に示すように竜ヶ崎粘土層をはさんで上下層に自由地下水が存在するものと考えた。つまり、台地上に

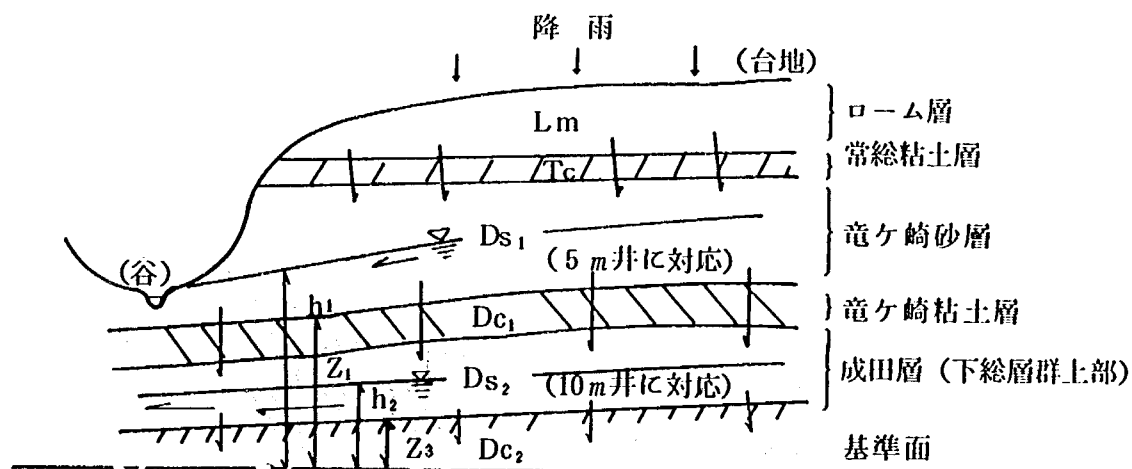


図3-19 モデルの考え方

降った雨は、ローム層中に一部雨水を生じさせるが、大半は竜ヶ崎層の地下水を涵養し、さらに竜ヶ崎粘土層の透水性が比較的高い所では、さらに下層の地下水まで不飽和状態で、浸透するものとする。

よって、開析谷に近い部分では竜ヶ崎層中の地下水位は、直接谷へ流出する成分が多くなる。

このような、中間に難透水性の粘土層をはさむ台地の不圧地下水を対象としたシミュレーションモデルを構築するには、実際の現象により近い物理性を持つ不飽和帯を含めたモデルとなる三次元モデルが最も良い。しかし、不飽和帯を含めたモデルでは、モデルがかなり複雑なものになり、また計算に必要な不飽和透水係数などのデータの分布を現場から得るのは容易なことではない。それに、三次元モデルは膨大な計算処理時間を要するものである。

地下水流動を主として水収支的な立場でとらえるのであれば、飽和帯のみを考えるモデルで十分である。飽和帯のみを考える場合は飽和帯での地下水の流動が主として水平方向に生じることから水平二次元のモデルが適切なモデルと言える。

以上のことから、谷田部試験地における地下水賦存状況、変動特性を考慮し、水平二次元（有限要素法）モデルを採用した。

なお、帯水層は竜ヶ崎砂層、下総層群上部砂層の2層（いずれも不圧地下水）を対象とし、各層に水平二次元モデルを適用した。

2.2.1 基本式

ここで取り扱うモデルは、三次元的な地下水の流動現象を、帯水層について、水平二次元の不圧地下水流動モデルとし、次の基本式により解析するものである。

なお、帯水層は、難透水層（竜ヶ崎粘土層）の上層である竜ヶ崎砂層を上部層、下の層である下総層群上部砂層を下部層と称して進める。

<上部層>

$$\frac{\partial}{\partial x} K_1 (h_1 - Z_1) \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_1 (h_1 - Z_1) \frac{\partial h_1}{\partial y} = S_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} - R + L_1 \quad \dots\dots(1)$$

<下部層>

$$\frac{\partial}{\partial x} K_2 (h_2 - Z_3) \frac{\partial h_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_2 (h_2 - Z_3) \frac{\partial h_2}{\partial y} = S_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} - L_1 + L_2 \quad \dots\dots(2)$$

h_1 : 上部層水位, Z_1 : 上部層下限高度

K_1 : 上部層透水係数, S_1 : 上部層有効空隙率

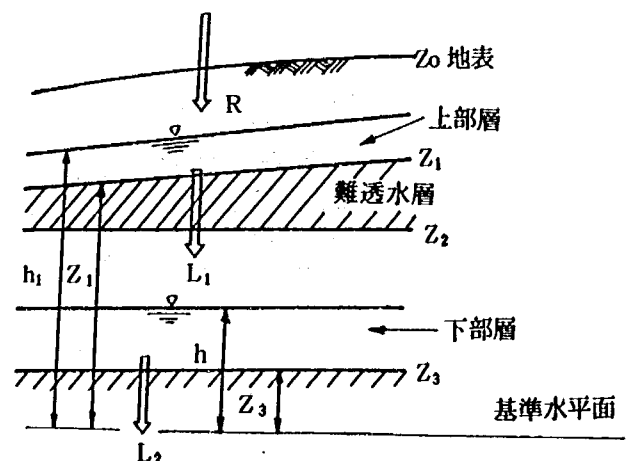
R : 地表から上部層への涵養量

L_1 : 上部層から下部層への浸透量

h_2 : 下部層水位, Z_3 : 下部層下限高度

K_2 : 下部層透水係数, S_2 : 下部層有効空隙率

L_2 : 下部層と深層地下水層間の移動水量



揚水が存在する場合には(1), (2)式の右辺に Q_1 , Q_2 が加わる。

(Q_1 , Q_2 : 上部層および下部層の単位面積当り揚水量)

(1), (2)式の L_1 は不飽和浸透であり, 上部層の水位には関係すると考えられが, 下部層の水位には関係しない。また, (2)式の L_2 については飽和浸透であり, 下部層の水位と深層地下水位の水頭差によって移動するものであるが, 下部層下の帯水層の水頭値が得られず水頭差も得られない。

ここでは, L_1 を上部層の水位に関係して変化する項と, 関係しない項とに分けて表現することとし, L_2 については, 単に水頭差に関係しない項で表現することとした。

$$L_1 = \alpha_1 + \alpha_2 (h_1 - Z_1) \dots\dots\dots(3)$$

$$L_2 = \alpha'_1 \dots\dots\dots(4)$$

ここに, α_1 , α_2 は難透水層(竜ヶ崎粘土層)の性状に依存するパラメータ。

α'_1 は下部層(下総層群上部砂層)以下の層の性状に依存するパラメータ。

(1), (2)式で $h_1 < Z_1$, $h_2 < Z_3$ とはならないものとし, 計算上こうなる場合はそれぞれ $h_1 = Z_1$, $h_2 = Z_2$ と置き直すこととする。また, $h_1 = Z_1$ のときは, $L_1 = \alpha_1$ となる。ただし, $L_1 > R$ となるときは, $L_1 = R$ とする。

2.2.2 解 法

前出の(1), (2)式で表わされる地下水流動モデルを有限要素法により離散化し数値解を求める。上部層, 下部層はそれぞれ別個の水平二次元モデルとして交互に解いて計算を進めるものとする。

不圧地下水水平二次元モデルの有限要素法による解法を次に示す。

(1), (2)式とも基本的には同一の方程式であるのでここでは説明のため次の式の有限要素法による定式化を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} K(h-Z) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K(h-Z) \frac{\partial h}{\partial y} = S \frac{\partial h}{\partial t} - R \dots\dots\dots(5)$$

ここで R は正味の涵養量である。

有限要素法を導入する前に(5)の微分方程式の解を求める問題を汎関数の最小値問題に置き換える。

(5)と等価で最小化を必要とする汎関数は次式で表わされる。

$$x = \iint \left[\frac{1}{2} \left\{ T \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + T \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left(S \frac{\partial h}{\partial t} - R \right) h \right] dx dy \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{ただし } T = K(h-Z) \dots\dots\dots(7)$$

有限要素法では領域を三角形または四角形に分割し, その領域内で h が座標 x , y の関数で表わされると定義する。この関数を形状関数と呼ぶ。最も簡単な形は,

$$h = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \dots\dots\dots(8)$$

といった一次多項式を用いることである。

(8)式を三角形要素の各節点 i, j, k 上で示すと

$$\left. \begin{aligned} h_i &= a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i \\ h_j &= a_1 + a_2 x_j + a_3 y_j \\ h_k &= a_1 + a_2 x_k + a_3 y_k \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

(9)式を a_1, a_2, a_3 に関する連立方程式として解くと次式となる

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2\Delta} (a_i h_i + a_j h_j + a_k h_k) \\ a_2 &= \frac{1}{2\Delta} (b_i h_i + b_j h_j + b_k h_k) \\ a_3 &= \frac{1}{2\Delta} (c_i h_i + c_j h_j + c_k h_k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで } a_i &= x_j y_k - x_k y_j & b_i &= y_j - y_k & c_i &= x_k - x_j \\ a_j &= x_k y_i - x_i y_k & b_j &= y_k - y_i & c_j &= x_i - x_k \\ a_k &= x_i y_j - x_j y_i & b_k &= y_i - y_j & c_k &= x_j - x_i \end{aligned}$$

$$2\Delta = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} = 2 \times (\text{三角形の面積})$$

(10)式を(8)式に代入して整理すると

$$h = \frac{1}{2\Delta} \left\{ (a_i + b_i x + c_i y) h_i + (a_j + b_j x + c_j y) h_j + (a_k + b_k x + c_k y) h_k \right\} \dots\dots\dots(11)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{さらに } N_i &= (a_i + b_i x + c_i y) / 2\Delta \\ N_j &= (a_j + b_j x + c_j y) / 2\Delta \\ N_k &= (a_k + b_k x + c_k y) / 2\Delta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

とおくと(11)式はベクトルの積の形で表わして次式となる。

$$h = [N_i \ N_j \ N_k] \{h\}^e \dots\dots\dots(13)$$

$$\text{ただし } \{h\}^e = \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \\ h_k \end{Bmatrix}$$

ここで(6)式の汎関数の最小化問題にもどる。汎関数の最小値を求めることは通常関数と同様に微分して0とおいた式を解けば良い。三角形要素の有限要素法に適用するには(6)式の汎関数 χ を三角形各節点の $h(h_i, h_j, h_k)$ で偏微分して0とおくことになる。

χ を h_i で偏微分すると

$$\frac{\partial \chi}{\partial h_i} = \iint \left[T \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial}{\partial h_i} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + T \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial}{\partial h_i} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) + \left(S \frac{\partial h}{\partial t} - R \right) \frac{\partial h}{\partial h_i} \right] dx dy \dots\dots\dots(14)$$

ここで(11)式から

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta} [b_i \ b_j \ b_k] \{h\}^e$$

となるので

$$\frac{\partial}{\partial h_i} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{2\Delta} b_i$$

となる。

同様に

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta} [c_i \ c_j \ c_k] \{h\}^e$$

$$\frac{\partial}{\partial h_i} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{1}{2\Delta} c_i$$

また(13)から

$$\frac{\partial h}{\partial h_i} = N_i$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = [N_i \ N_j \ N_k] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e$$

となる。これらの式を(14)式に代入すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial h_i} = \iint & \left[\frac{T}{4\Delta^2} [b_i \ b_j \ b_k] \{h\}^e b_i + \frac{T}{4\Delta^2} [c_i \ c_j \ c_k] \{h\}^e c_i \right. \\ & \left. + S [N_i \ N_j \ N_k] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e N_i - R N_i \right] dx dy \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

同様に h_j, h_k についても偏微分して三角形 i, j, k について示すと次式となる。

$$\left\{ \frac{\partial \chi}{\partial h} \right\}^e = \begin{bmatrix} \frac{\partial \chi}{\partial h_i} \\ \frac{\partial \chi}{\partial h_j} \\ \frac{\partial \chi}{\partial h_k} \end{bmatrix} = \iint \left[\frac{T}{4\Delta^2} \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{bmatrix} [b_i \ b_j \ b_k] \{h\}^e \right. \\ \left. + \frac{T}{4\Delta} \begin{bmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{bmatrix} [c_i \ c_j \ c_k] \{h\}^e + S \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{bmatrix} [N_i \ N_j \ N_k] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e \right. \\ \left. - R \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{bmatrix} \right] dx \ dy \dots\dots\dots(16)$$

さらに $\iint dx \ dy = \Delta$ であることを考慮して整理し、行列表示すると次式となる。

$$[H]^e \{h\}^e + [P]^e \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e + \{F\}^e = 0 \dots\dots\dots(17)$$

$$[H]^e = \frac{T}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_k \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_k \\ b_k b_i & b_k b_j & b_k b_k \end{bmatrix} + \frac{T}{4\Delta} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_k \\ c_j c_i & c_j c_j & c_j c_k \\ c_k c_i & c_k c_j & c_k c_k \end{bmatrix}$$

$$[P]^e = S \left[\iint \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{bmatrix} [N_i \ N_j \ N_k] dx \ dy \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e = S \frac{\Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e$$

$$\{F\}^e = -\frac{R}{3}\Delta \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

以上の一つの三角形要素についてのものである。これを領域内の全要素について重ね合わせると領域全体の h を求める式となる。領域全体の方程式を次式で表わす。

$$[H] \{h\} + [P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} + \{F\} = 0 \dots\dots\dots(18)$$

ここで $\frac{\partial h}{\partial t}$ を差分により次式で近似する。時間きざみを Δt とする。

$$\{h\} = \frac{1}{2} (\{h\}_{i+\Delta t} + \{h\}_i)$$

$$\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} = \frac{1}{\Delta t} (\{h\}_{i+\Delta t} - \{h\}_i)$$

とにおいて未知数 $\{h\}_{i+\Delta t}$ について整理すると

$$[M] \{h\}_{i+\Delta t} = \{V\} \dots\dots\dots(19)$$

$$[M] = \frac{1}{2} \left([H] + \frac{2}{\Delta t} [P] \right)$$

$$\{V\} = -\frac{1}{2} [H] \{h\}_i + \frac{1}{\Delta t} [P] \{h\}_i - \{F\}$$

[H] に含まれる T は

$$T = K (h_i - Z)$$

のように既知の t 時点の h を用いて先に求めておく。

・境界条件の扱い

不透水境界については特別な取扱いを必要としない。

水位境界については(19)式で次のような処理をする。

まず(19)式の $[M]$, $\{h\}$, $\{V\}$ を水位固定点とそうでない点に分ける。

M_{11}	M_{12}	=	h_1	=	V_1	↑ ↓	水位固定以外 水位固定
M_{21}	M_{22}		h_2		V_2		

このとき h_2 は境界値で与えられているのでこの部分を全体方程式から消去するため次の計算を行う。

M_{12}	×	h_2	=	m_1
----------	---	-------	---	-------

未知の点の値を求めるには次の形の方程式を解く

M_{11}	×	h_1	=	V_1	-	m_1
----------	---	-------	---	-------	---	-------

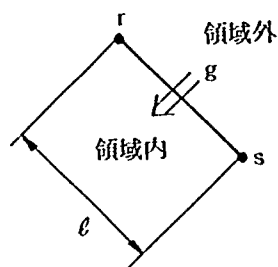
h_1 が解ベクトルである。

h_1 が求められたあと水位固定節点での流出入量を求めるには次の計算をすれば良い。

$$\begin{bmatrix} M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2' \end{bmatrix}$$

$|f_2'| = |V_2|$ が水位固定節点での流出入量である。

勾配一定境界は $|F|$ の項に操作を加えることによって表わされる。



今、境界線上の2節点で領域外から領域内に向って勾配 g が与えられているとすると、 $r-s$ 上での流量 q は

$$q = K \cdot \frac{(hr - Zr) + (hs - Zs)}{2} \cdot g \cdot \ell \text{ となる。}$$

したがって $|F|$ の r, s 節点の部分にそれぞれ $-q/2$ ずつ加えることで境界条件を表現できる。

(18)式の $[H]$ に含まれる T の値は h の関数であり、また上部層から下部層へのフラックスは h の関数となる。上に示した解法ではこれらの h は既知の時点での値を用いている。透水層の厚さが十分な厚さを持っている場合にはこの解法で問題はないと考えられるが透水層が薄い場合には誤差が発生する。

したがって透水層が薄い場合にはこれを解決するため次に示すような繰り返し計算を行う。

まず上の方法で求められた水位から透水層厚の変化を節点別に次式で求める。

$$\begin{aligned} dr &= \frac{h_{t+\Delta t} - Z}{h_t - Z} & h_{t+\Delta t} - Z < h_t - Z \\ dr &= \frac{h_t - Z}{h_{t+\Delta t} - Z} & h_t - Z < h_{t+\Delta t} - Z \end{aligned}$$

全節点での dr を求めその中の最大値が一定値 dr_{lim} を超えているときに繰り返し計算を行う。

繰り返し計算のフローを図3-20に示す。

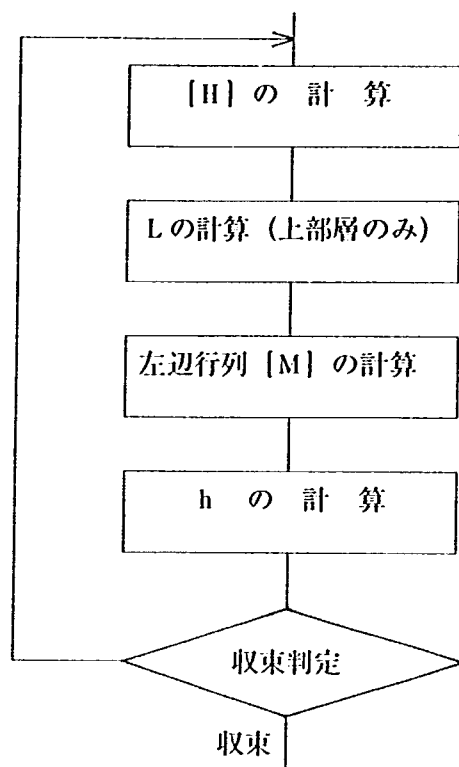


図 3-20 h の繰り返し計算のフロー

$$L = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2} \{ (h_l - Z) + (h_{l+M} - Z) \}$$

右辺に含まれる [H] はそのままとする

収束判定

$$\left| h_{l+M}^{(n)} - h_{l+M}^{(n+1)} \right| < \epsilon$$

(n)は繰り返し数

- ・繰り返し計算 開始基準 : $dr\ lim = 1.2$
- ・収束判定基準 : $\epsilon = 0.05$
- ・最大反復回数 : 10回

最大反復回数分の繰り返しを行っても収束しないときは最後の値を採用する。

2.3 モデルの領域及び要素分割

2.3.1 モデルの領域

モデルの領域は、なるべく自然的な条件で決まる範囲とすることが望ましい。洪積台地では計算の範囲として、沖積低地との境目にとるのが最も妥当な方法である。さらに台地内にきざまれた開析谷も境界として扱うほうが良い。一方、データ上の制約とか低地との境目まで広げると領域が広くなりすぎるという場合には、台地上に領域の境目を設けることもやむを得ない。また、台地上に境界を置く場合でも解析の対象となる地区ぎりぎりに設定するよりは、少し余裕を持った範囲とする方が無難である。

そこで、モデルの領域は、図3-21に示すような地下水流域をカバーするものとした。

帯水層の区分は試験地内の調査ボーリング柱状図を基に次のようにした。

上部層；竜ヶ崎(粘土)層 (D_{c1}) を基盤とした帯水層

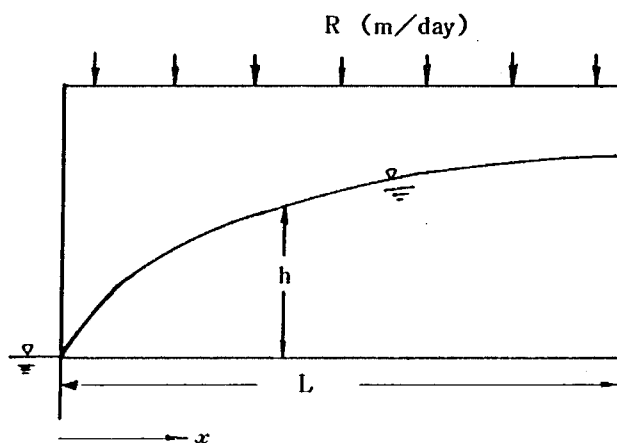
下部層；成田(粘土)層 (D_{c2}) を基盤とした帯水層

また、モデルの上部層基盤高を図3-22に示す。下部層基盤高については、試験地内にはほぼ水平な基盤で分布標高は6～8mであるので、領域全体を平均的標高の7.5mとした。

2.3.2 要素分割

要素分割は、図3-23に示す一辺が約100mの三角形要素分割とした。また、実測値と計算値を比較することを考え、観測井の場所に節点を置いた。

なお、水位固定境界付近での水位、境界流量の計算値は要素分割に大きく影響されることがわかった。水位固定境界を持つ要素について条件を単純化して定常状態を考えると、解析解が得られる。



$$h = \sqrt{\frac{R}{K} (2L - x)x}$$

R : 涵養量

K : 透水係数

解析解からもわかるように境界で透水層厚がゼロの場合には境界付近の水位勾配が非常に大きくなり、これを近似するためには境界に近接する要素を小さくする必要がある。

そこで水位固定境界には幅約1.0mの薄い要素を設けた。

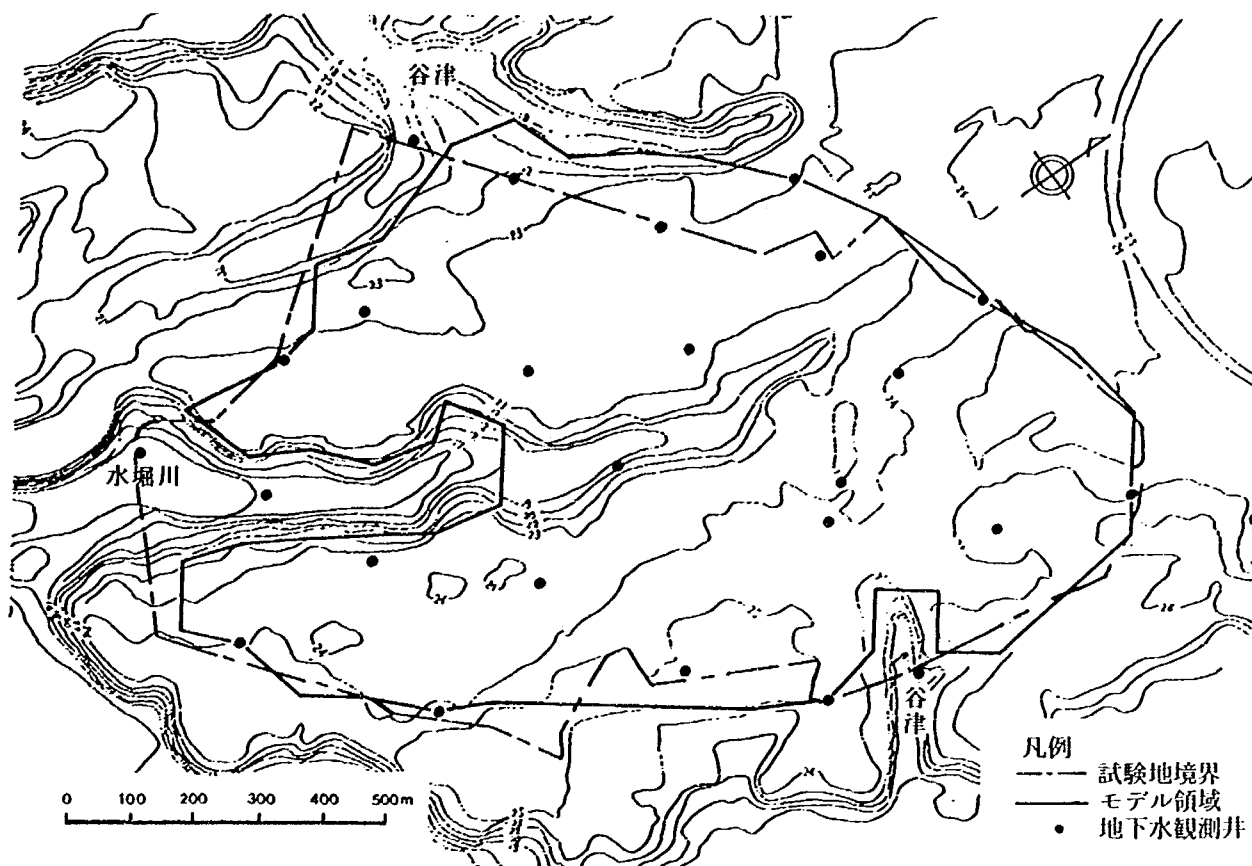


図3-21 モデルの領域

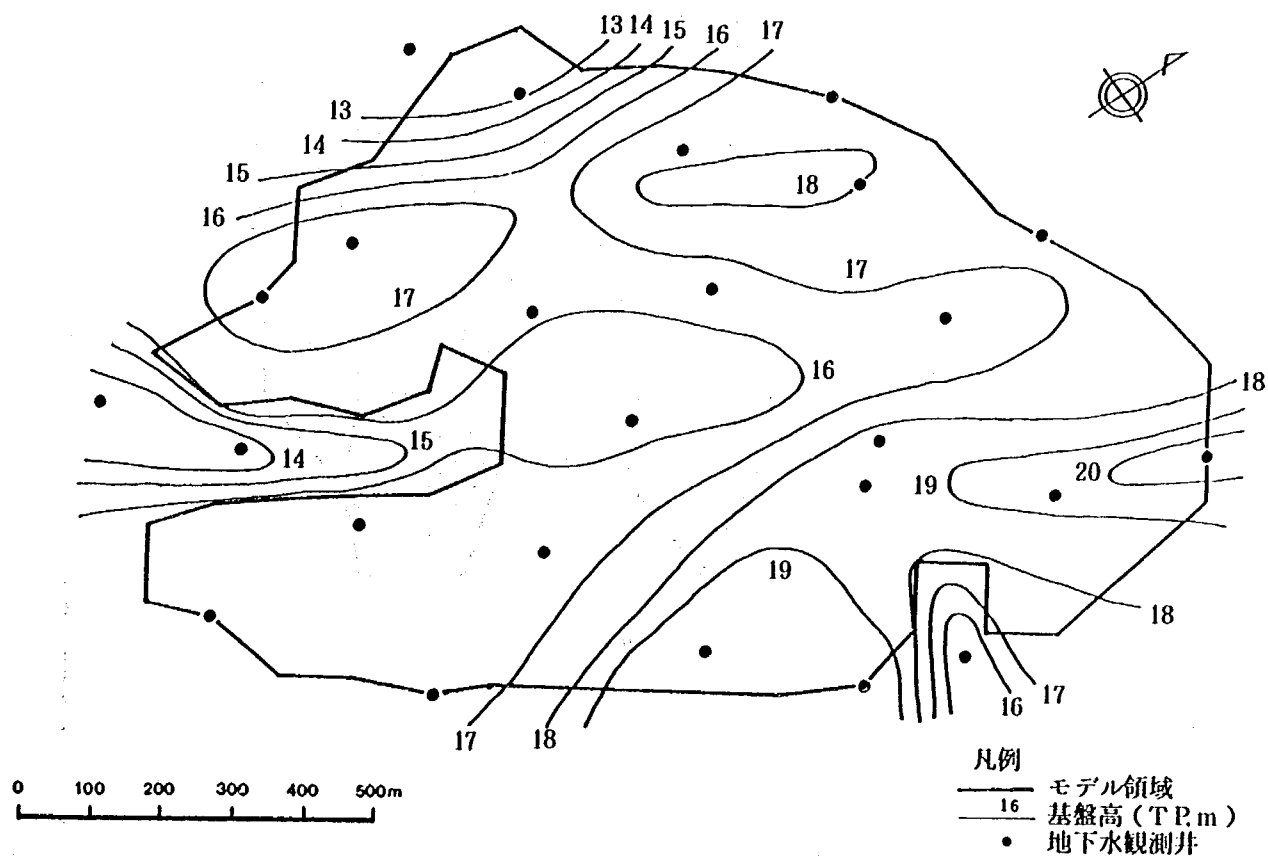


図3-22 上部層基盤高図

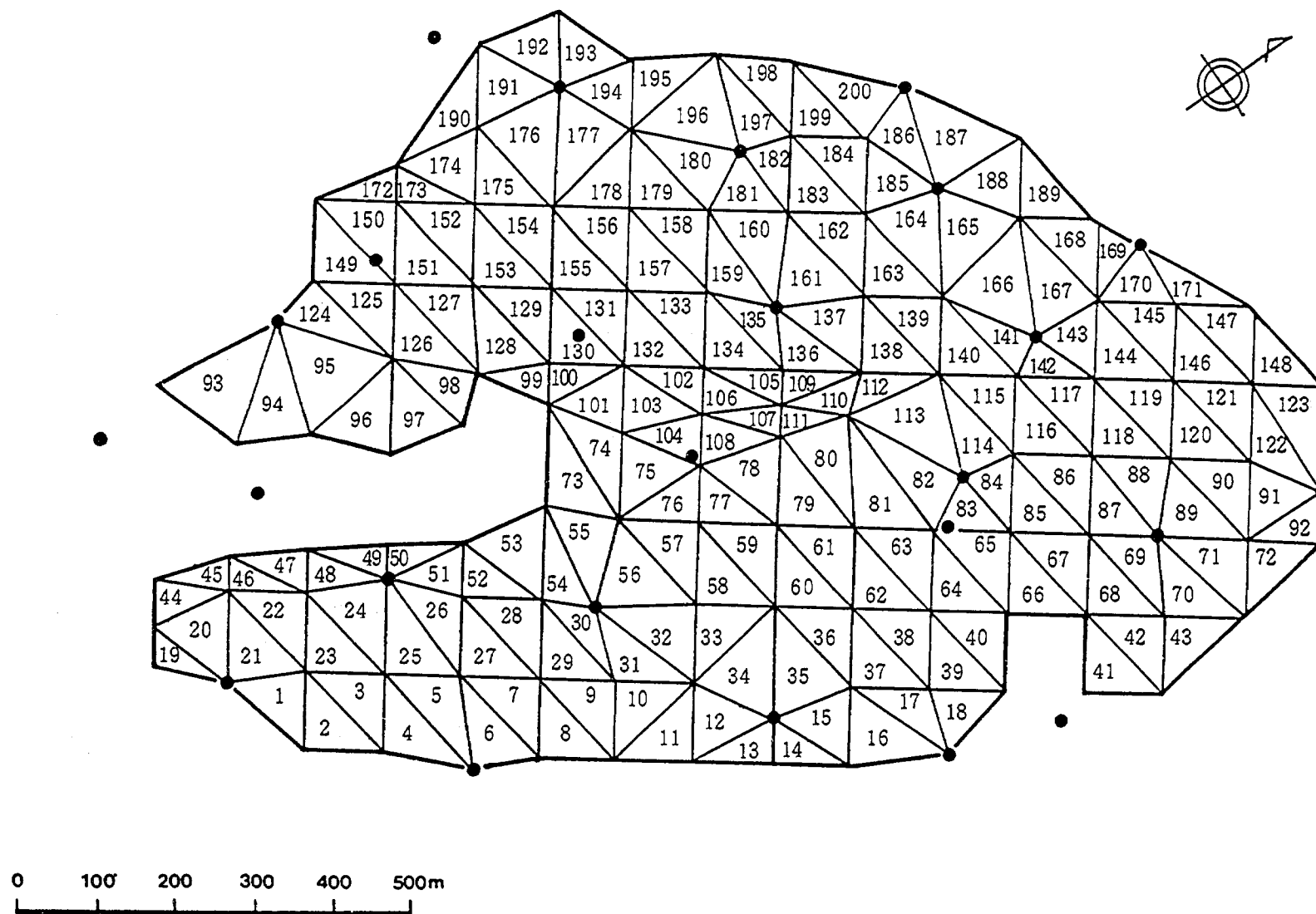


図 3-23 要素分割と要素番号

2.4 パラメータ

地層の水理定数をもとに、地質、層厚を考慮して各層ごとに透水係数、有効空隙率、漏水パラメータを設定、内挿検定によって表3-2に示す諸パラメータを得た。

表3-2 パラメータ一覧表

	透 水 係 数 K (cm/s)	有 効 空 隙 率 S	漏 水 パ ラ メ ー タ α_1	漏 水 パ ラ メ ー タ α_2	備 考
上 部 層	5.0×10^{-3}	0.08 ~0.25	0	0.0006 ~0.0013	$L = \alpha_1 + \alpha_2(h_1/Z_1)$
下 部 層	5.0×10^{-3}	0.01	0.0005	—	$L_2 = \alpha_1'$

有効空隙率（上部層）、漏水パラメータ α_2 の設定領域は図3-24に示すとおりである。

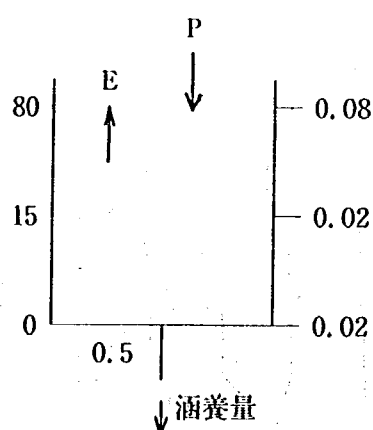
2.5 境界条件

境界条件は、涵養量、周囲境界条件、初期条件について考える。

2.5.1 涵養量

地下水涵養量は、地下水流域界とほぼ同一流域界を持つ水堀川の流出解析に用いたタンクモデルを利用して推算するものとした。

地下水シミュレーションには、一段目のタンクの浸透量を涵養量として扱った。



P : 降水量 (mm/ H)

E : 蒸発散量 (mm/ H)

ただし、Eは $P = 0$ のときのみタンク水位から差し引く

また、このタンクモデルは造成前を対象としたものであるため、造成後の涵養量については造成後のタンクモデルによる必要があるが、造成に伴う地下水位の変化をみるため、造成後においても造成前のタンクモデルを用いてシミュレーションを行った。

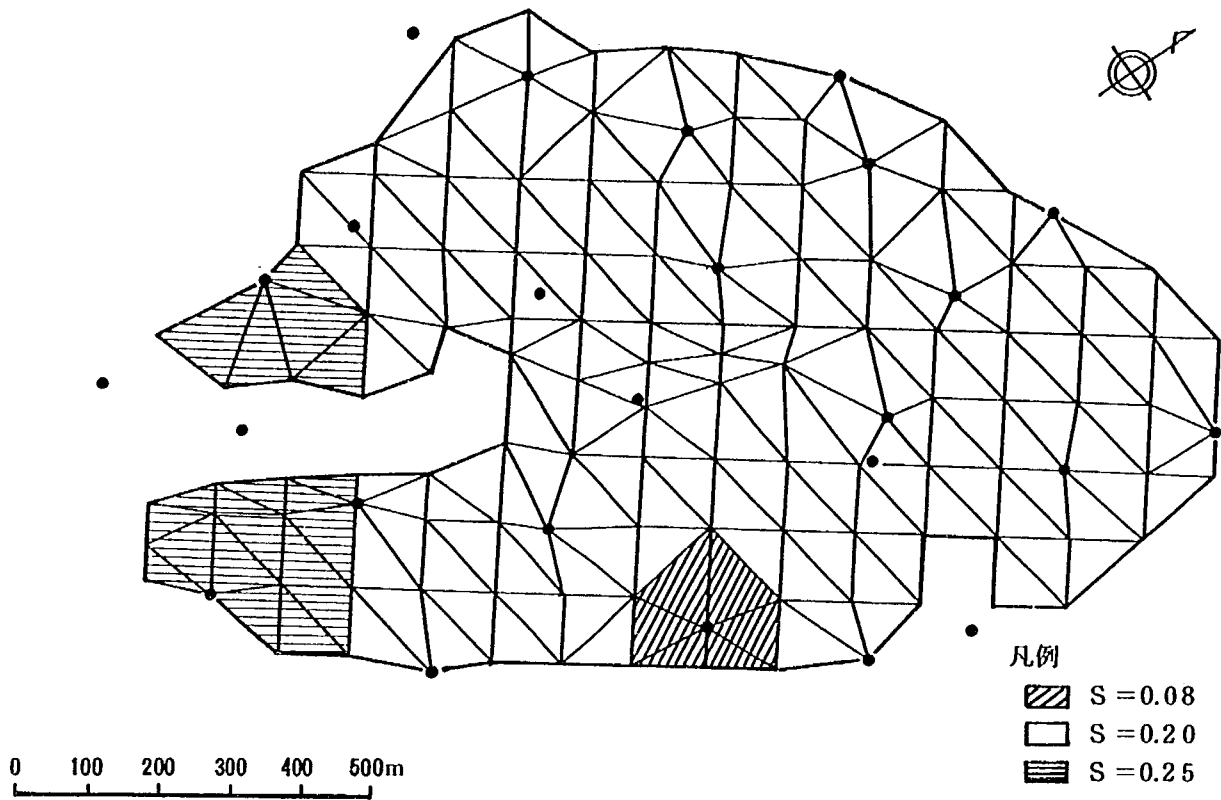


図 3-24(a) 定数設定領域図 (有効空隙率：上部層)

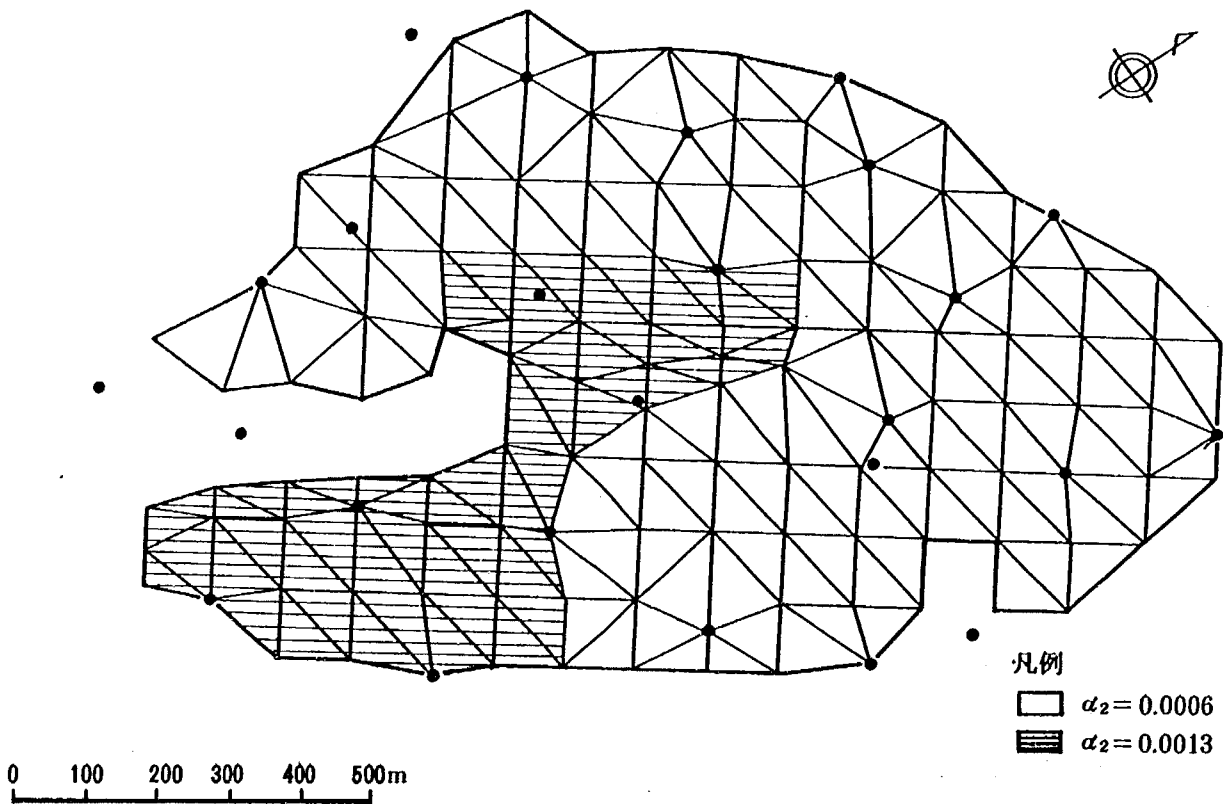


図 3-24(b) 定数設定領域図 (漏水パラメータ α_2)

2.5.2 周囲境界条件

周囲境界条件は次のものを上下層それぞれ別々に与えられるようにした。

- ① 水位一定……主に谷斜面の境界
- ② 勾配一定……横流出入量は、動水勾配によって与えるものとし、
領域の外郭要素で辺上に与える。
- ③ 変動水位……時間とともに変化する値を与える。
- ④ 不透水 ……地下水の流れが遮断されている境界、あるいは
地下水等高線と境界が直交している境界

浅い部分の地下水は河川の水位に大きく影響されると考えるので、水堀川低地部の境界は水位一定境界とし、地下水位は河川水位程度とみなした。また、台地上の境界付近は地下水流域界にあたり、境界での地下水移動はないものと考え、不透水境界とした。北部台地上の境界は、既設観測井（No. 5-2, No. 5-5）の間の地下水位勾配をもとに、勾配一定境界とした。

これらに地下水特性等を考慮して、図3-25に示す周囲境界を与えた。

2.5.3 初期条件

昭和57年4月12日における実測地下水位をもとに作成した地下水等高線図（図3-26）により、上下層の各節点に水位を与えた。

2.6 計算条件

計算時間間隔は1日とし、計算ステップは昭和57年4月12日から昭和59年12月31日までの約2年9ヶ月間を、1ステップ1日で995ステップの計算を行った。

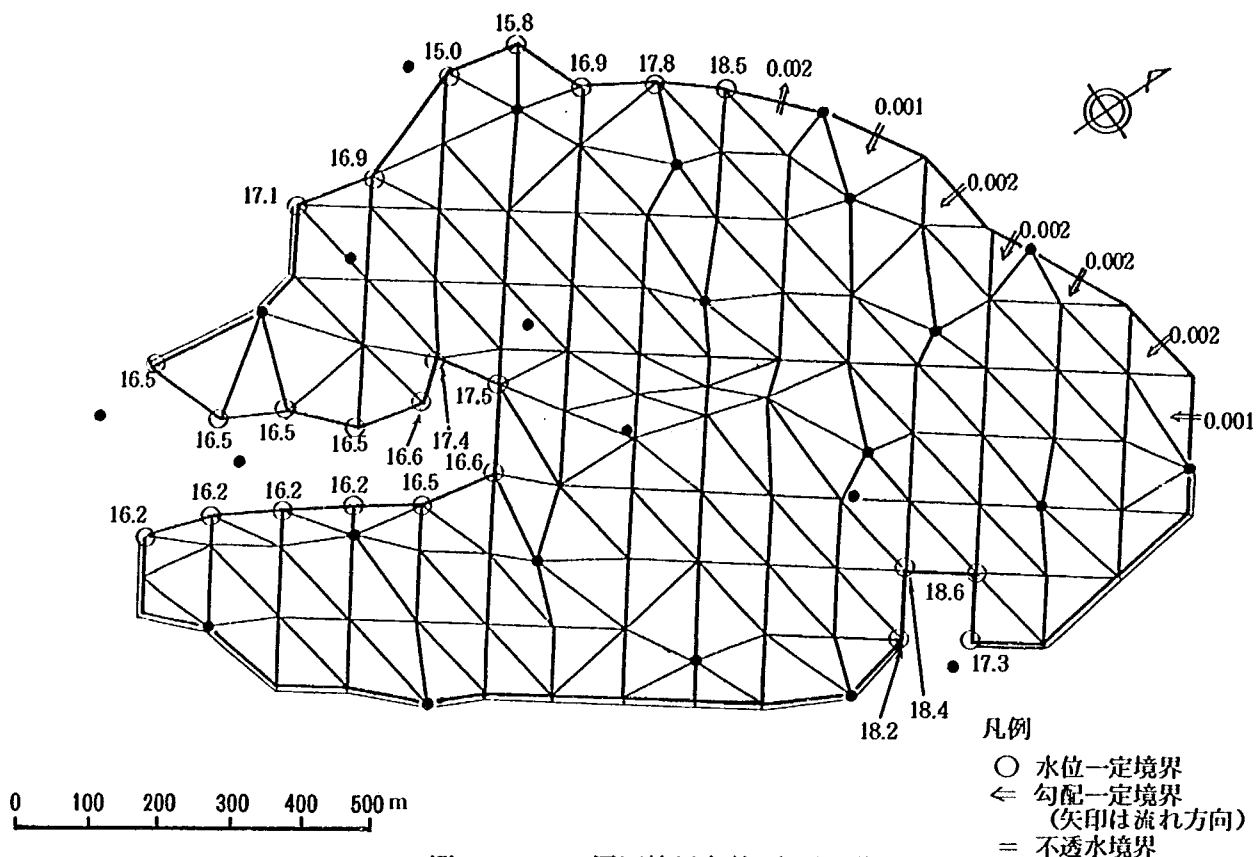


図3-25(a) 周囲境界条件 (上部層)

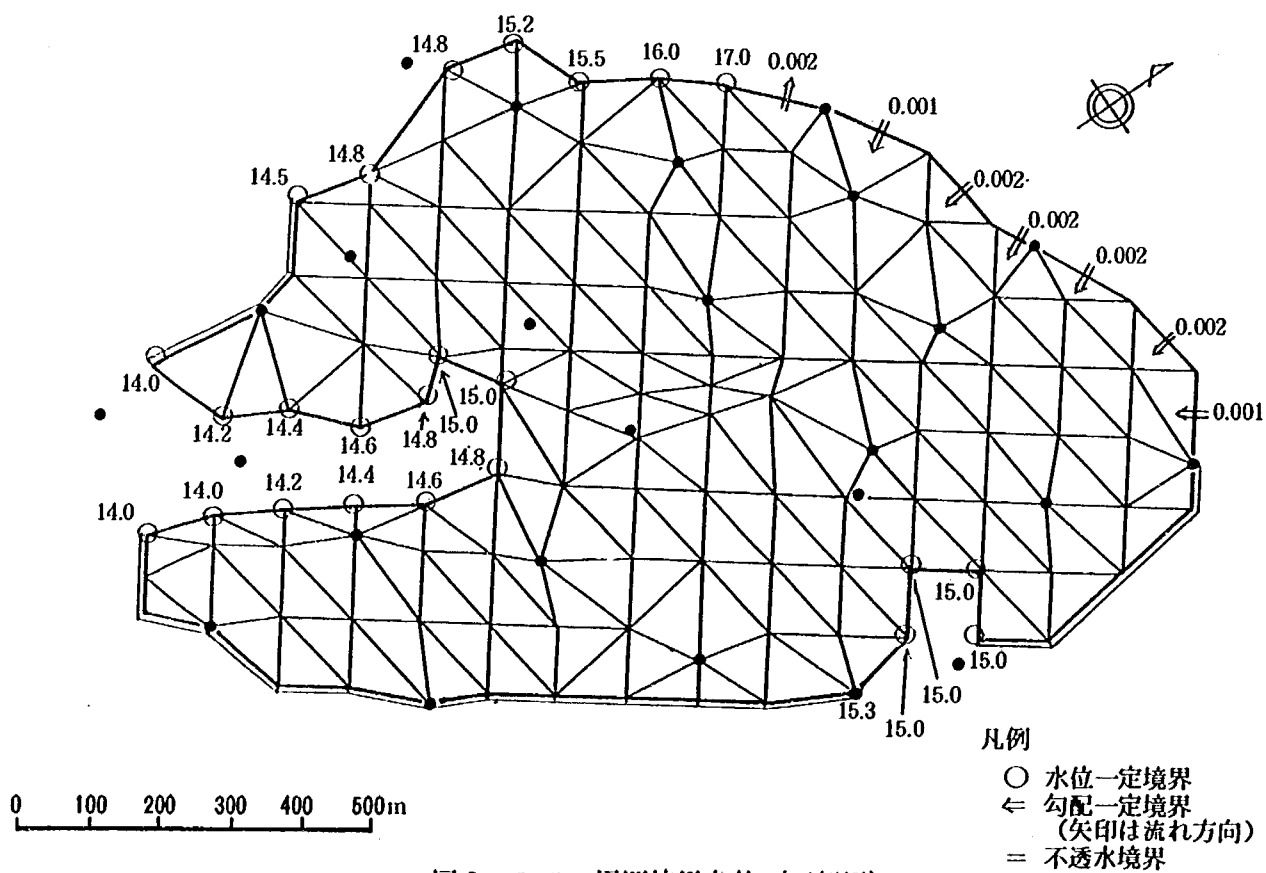


図3-25(b) 周囲境界条件 (下部層)

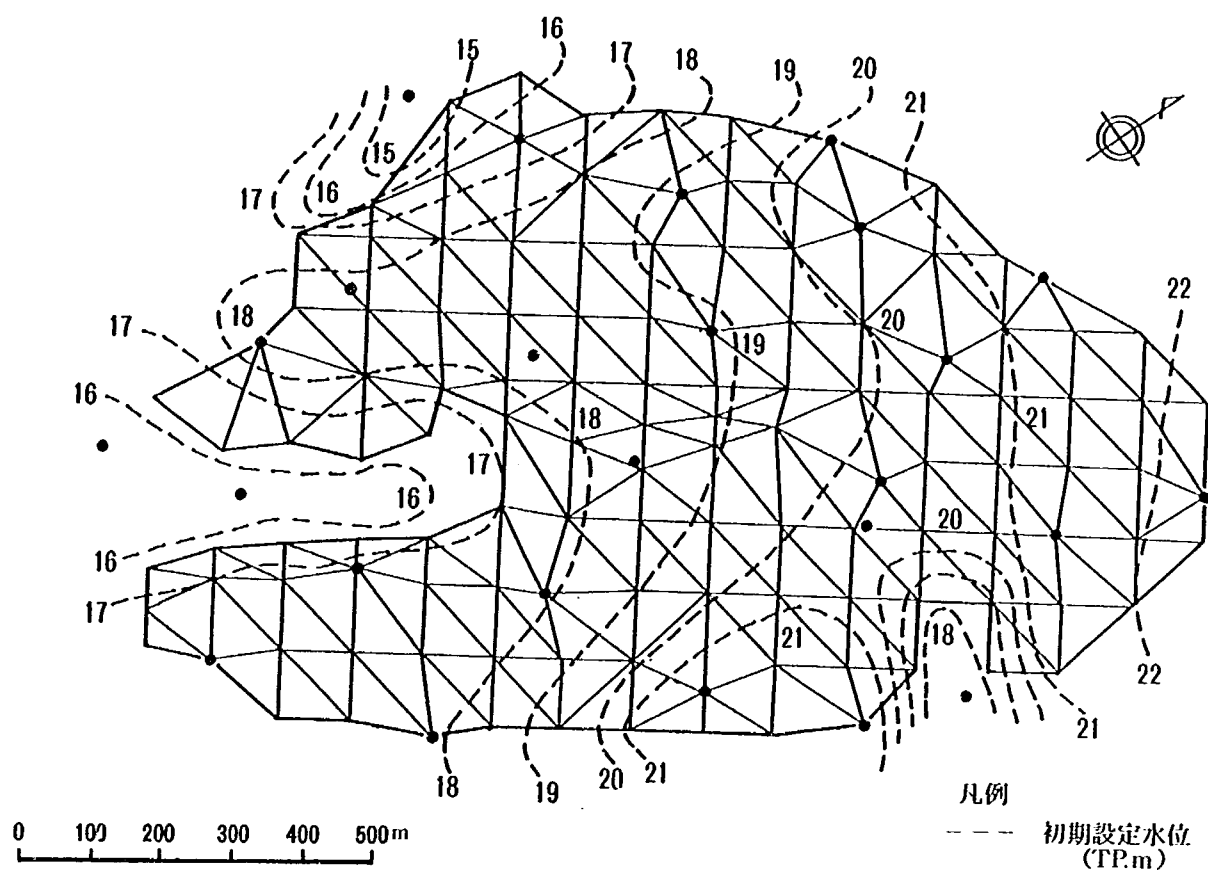


圖 3-26(a) 初期設定水位 (上部層)

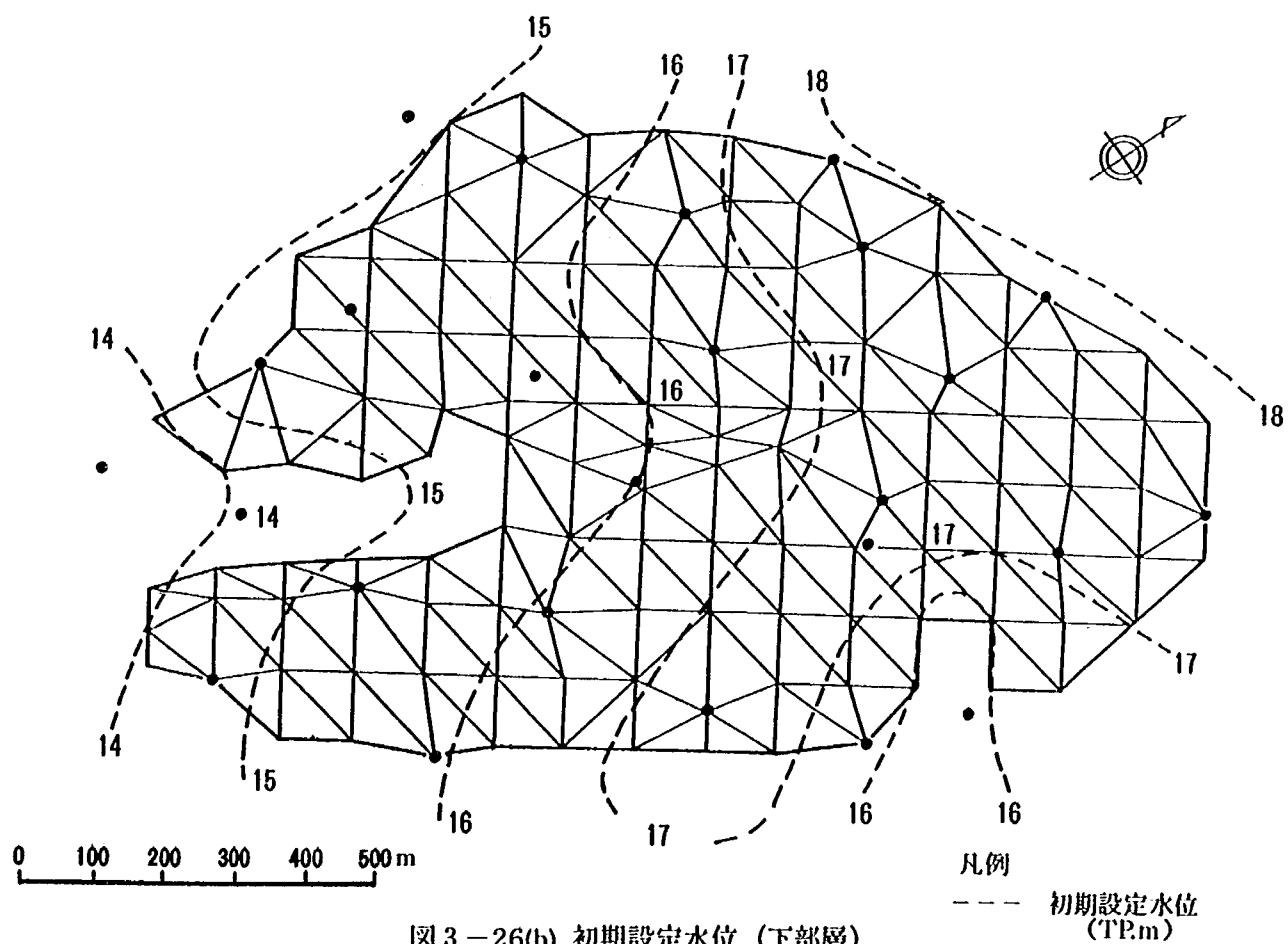


圖 3-26(b) 初期設定水位 (下部層)

2.7 シミュレーション結果

2.7.1 地下水位の適合度

造成前を対象としたシミュレーションによる計算水位と実測水位の地下水平面形状を図に示す。

図3-27……昭和57年7月5日における地下水等高線図（造成前）

図3-28……地下水位の高い昭和57年10月5日における地下水等高線図（粗造成工事初期）

図3-29……地下水位の低い昭和58年2月5日における地下水等高線図（粗造成工事終期）

これによると、各等高線図とも全体的に計算水位と実測水位の分布傾向は一致している。

また、造成後の時期も含めた昭和57～59年の3ヶ年間の計算水位と実測水位とを時系列図によって比較すると図3-30のようである。これらは計算結果のおおむね良好な観測井について掲げたものであるが、他の観測井の計算結果については資料. 4に掲載した。

これら時系列図をみると、昭和58年末までは計算水位と実測水位とはほぼ整合しているが、昭和59年には地下水位の変動に差がみられる。昭和59年2月末における実測水位の上昇については、1・2月に降り積もった雪が2月26日の降雨によって融け出したことと、降雨前における融雪に伴い毛管水帯が上昇していたためと考えられる。昭和59年8月以降の実測水位の急激な下降については、7月以降の異常湧水による影響（モデル中に浅層地下水帯からの蒸発を考慮していないため）及び、科学博のバピリオン建設による影響が現われたものと考えられるが、相方の影響度合は判別しがたい。

参考のため、造成工事後の昭和58年10月4日、昭和59年2月6日、同年3月2日、7月9日、10月5日の計算水位と実測水位の地下水等高線図を資料. 5に添えた。

以上のようにシミュレーション結果について、実測水位と計算水位とを比較すると、各地点においても、また、領域全体の水位等高線としても、おおむね適合していると判断できる。また、このシミュレーションは造成前（昭和57年）の実測地下水位再現モデルとしてパラメータ等同定したものであるが、造成による地下水位の変化をみるため造成後の昭和59年末まで同一モデルで計算を進めた。しかし、昭和59年の異常湧水があったものの、シミュレーション結果からは造成開始以降の際立った地下水位の変化は見られなかった。

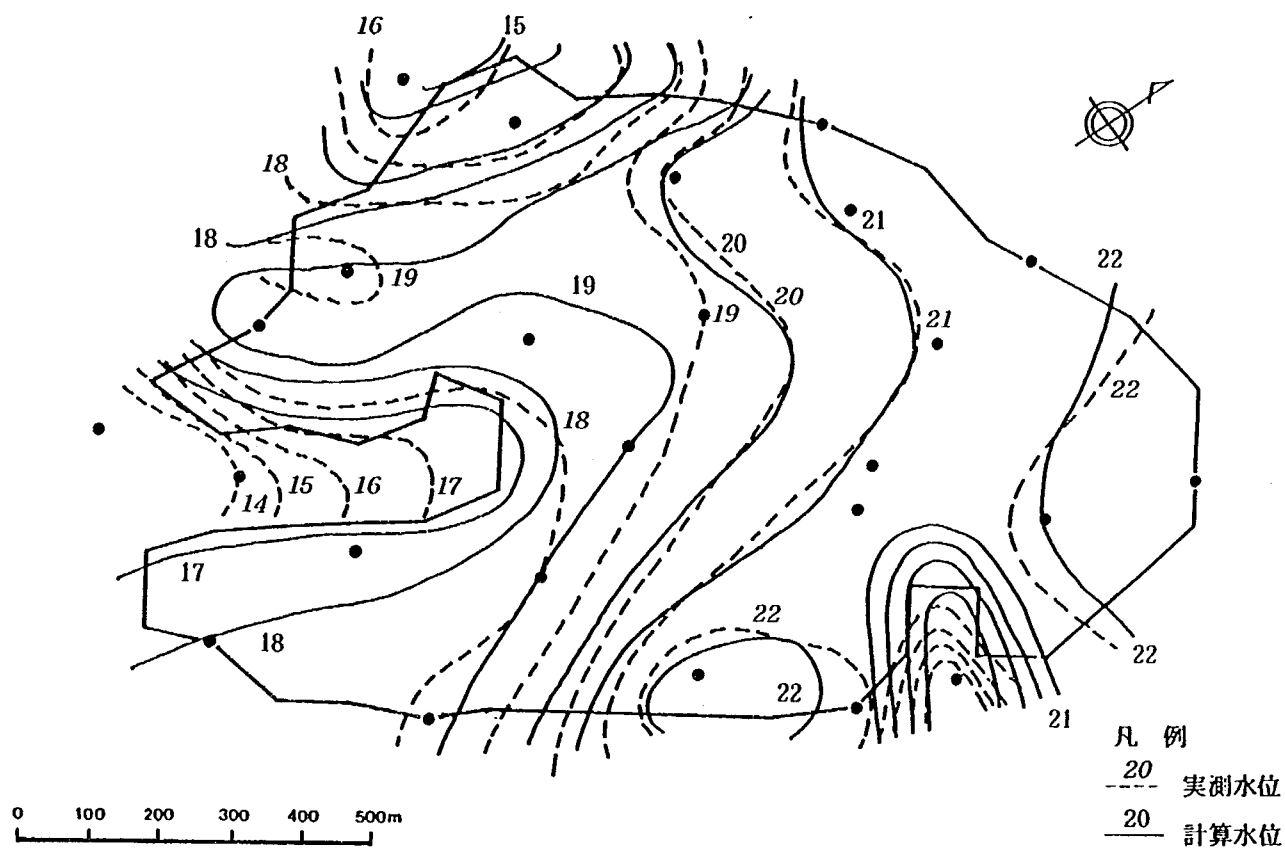


図 3-27(a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 (昭和57年 7 月 5 日)

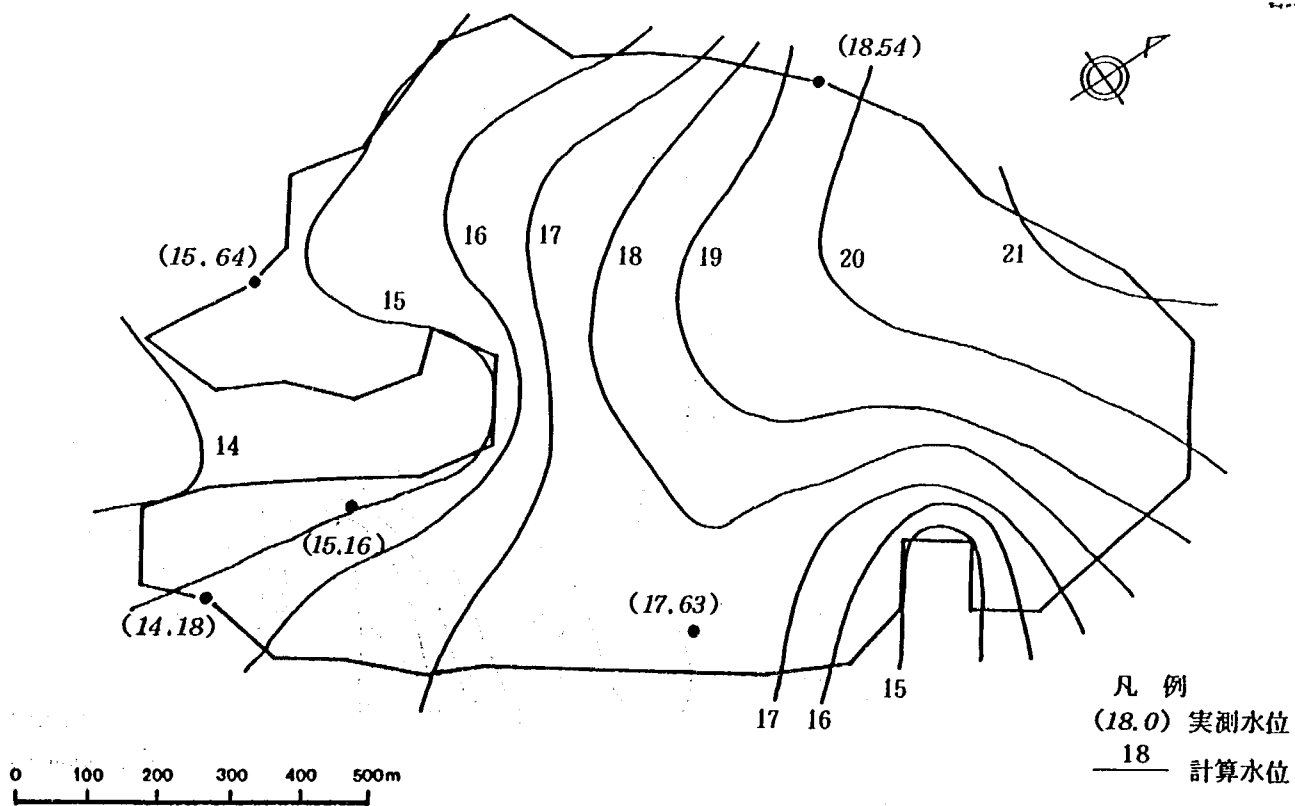


図 3-27(b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 (昭和57年 7 月 5 日)

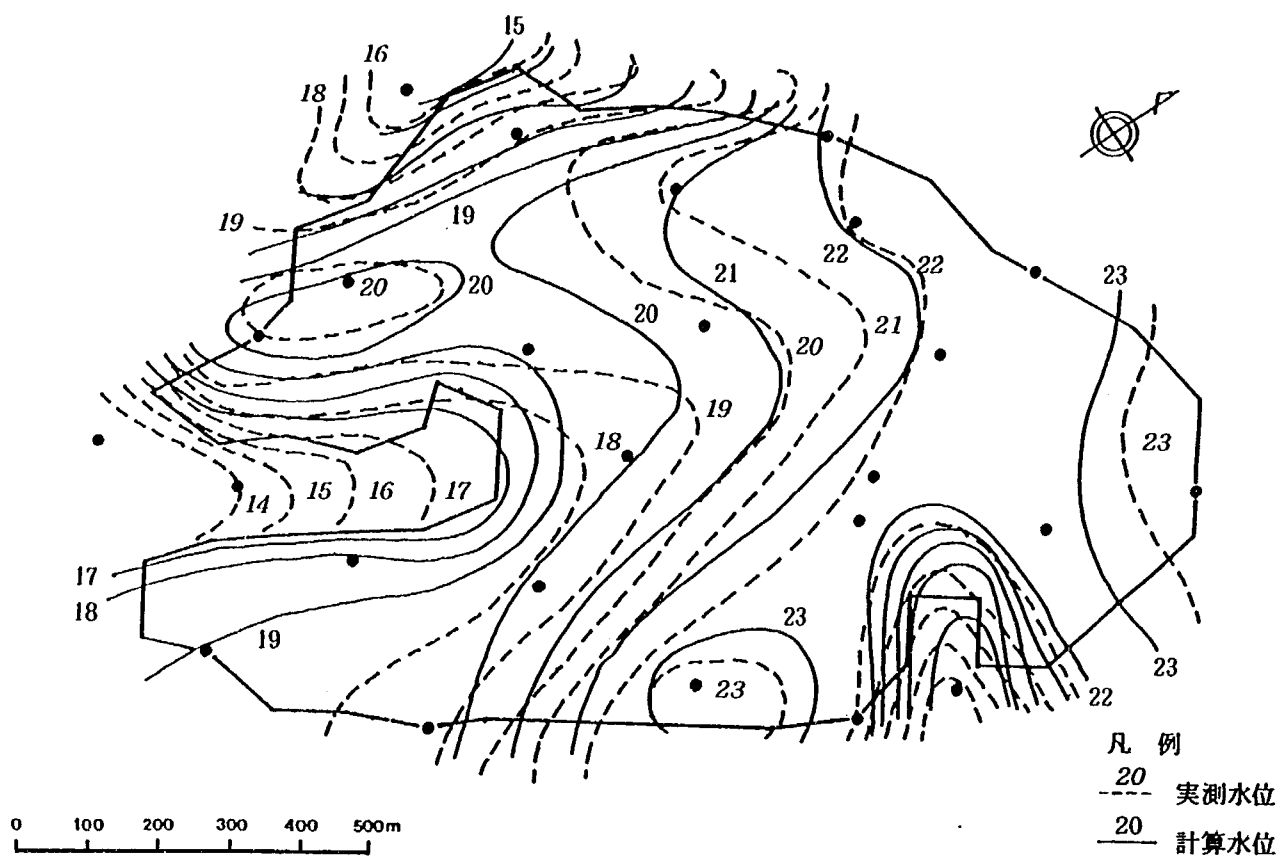


図3-28(a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和57年10月5日]

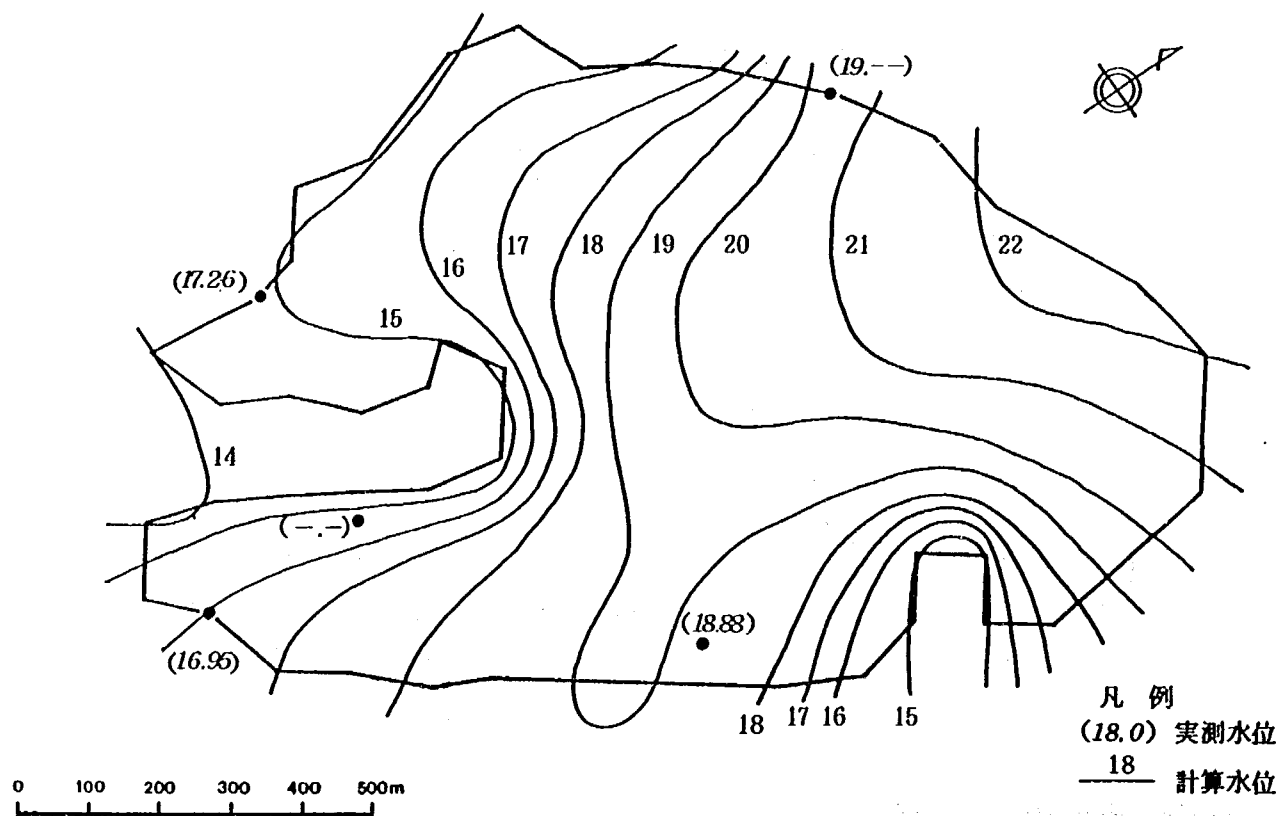


図3-28(b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和57年10月5日]

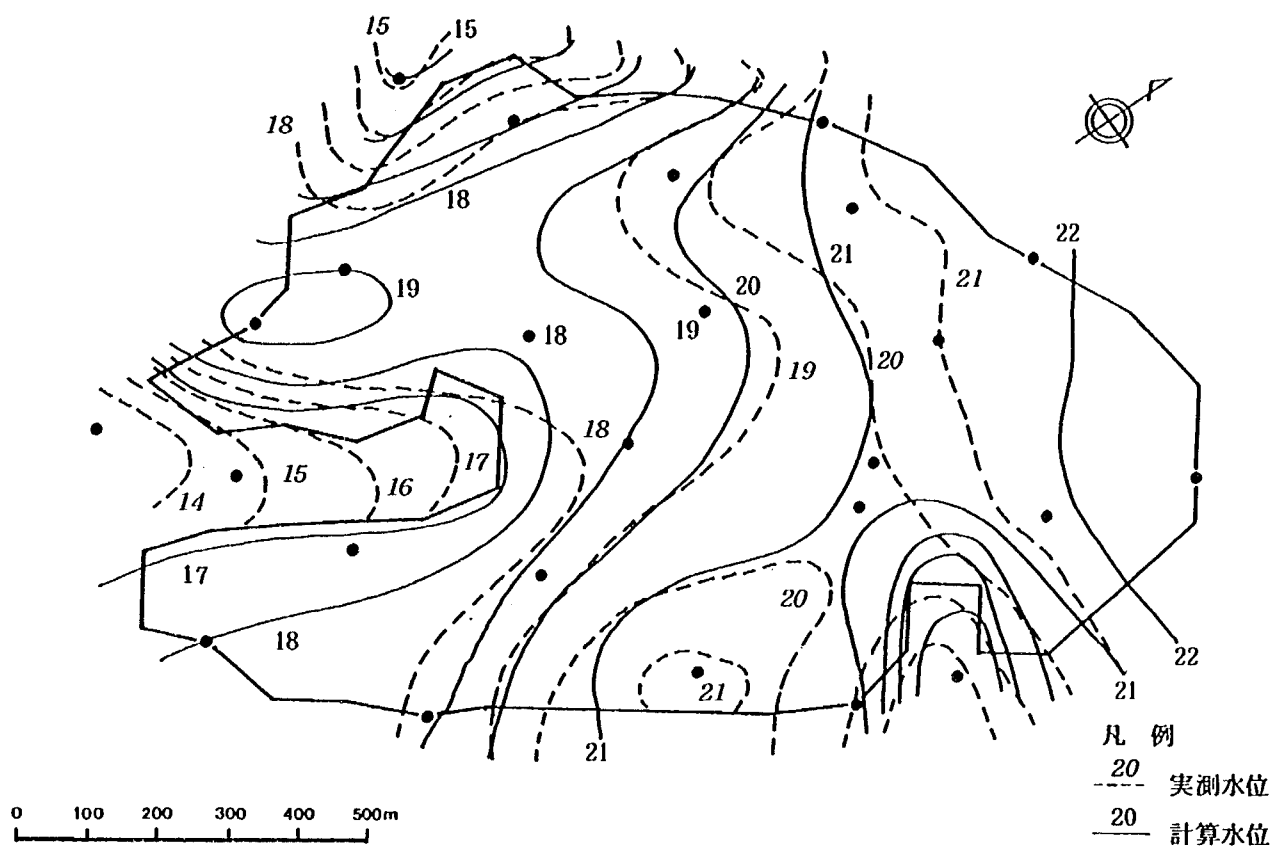


図3-29(a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和58年2月5日]

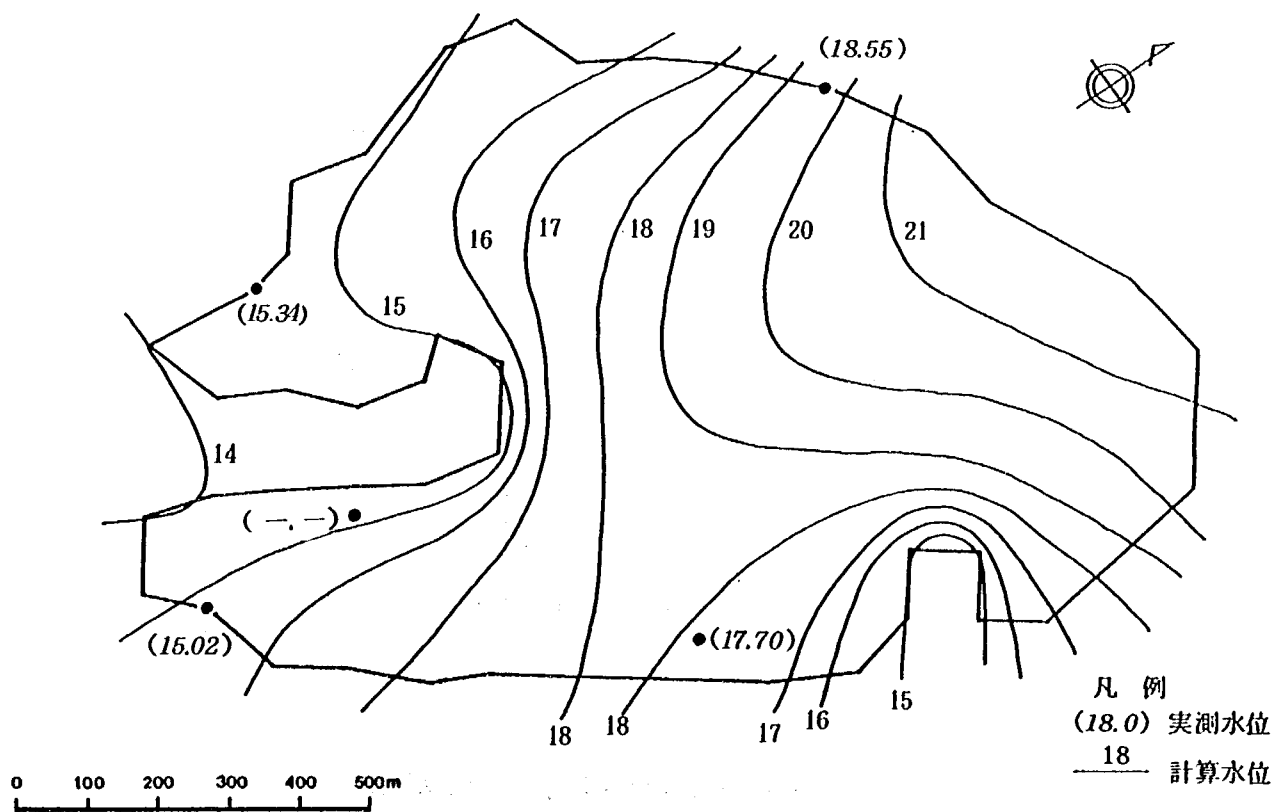


図3-29(b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和58年2月5日]

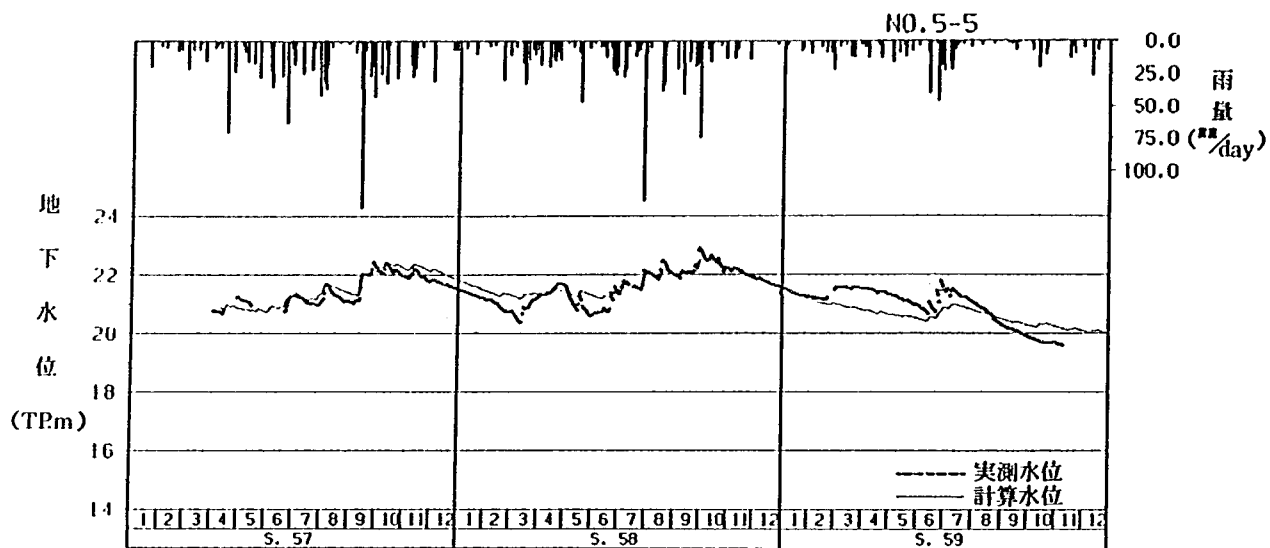


図 3-30(a) 地下水位時系列図 (計算結果)

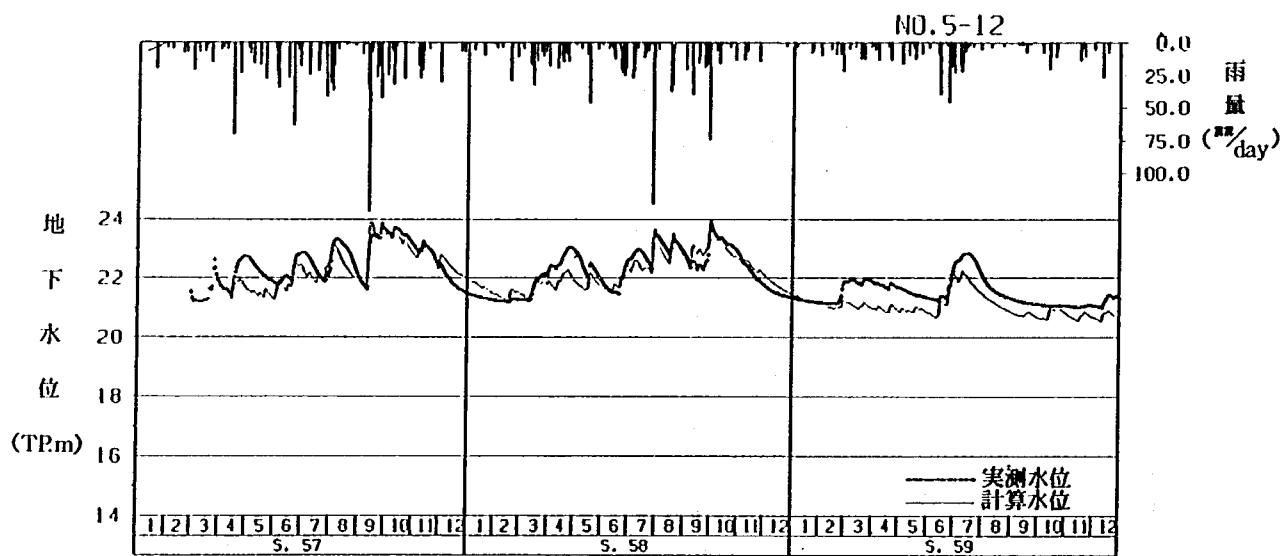


図 3-30(b) 地下水位時系列図 (計算結果)

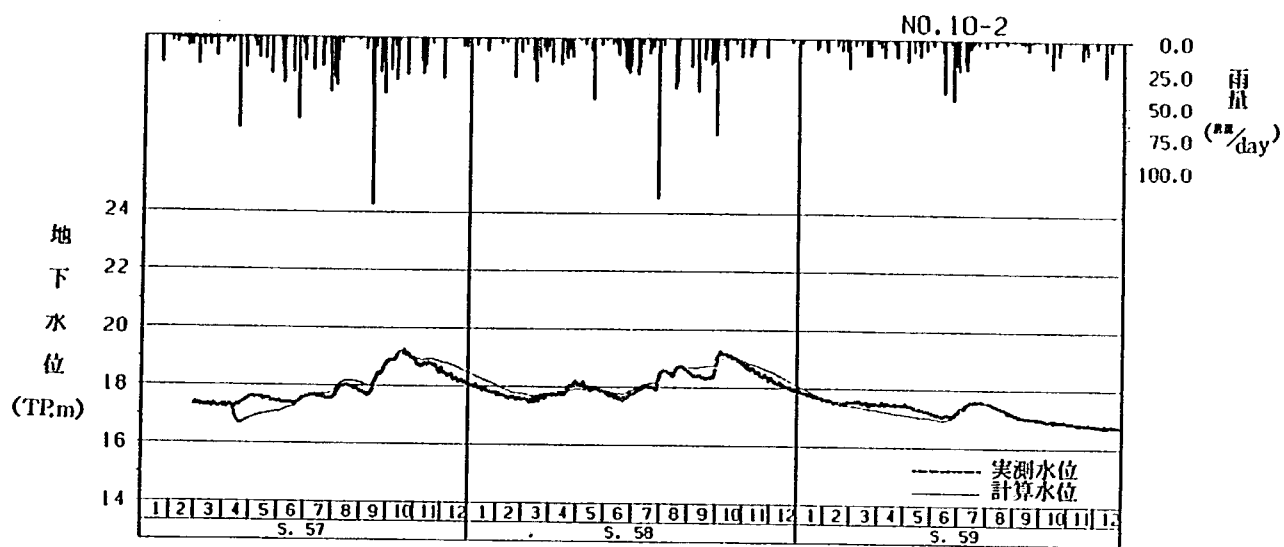


図 3 - 30(c) 地下水位時系列図 (計算結果)

2.7.2 水収支

シミュレーション計算によって算定した値を次に示す。

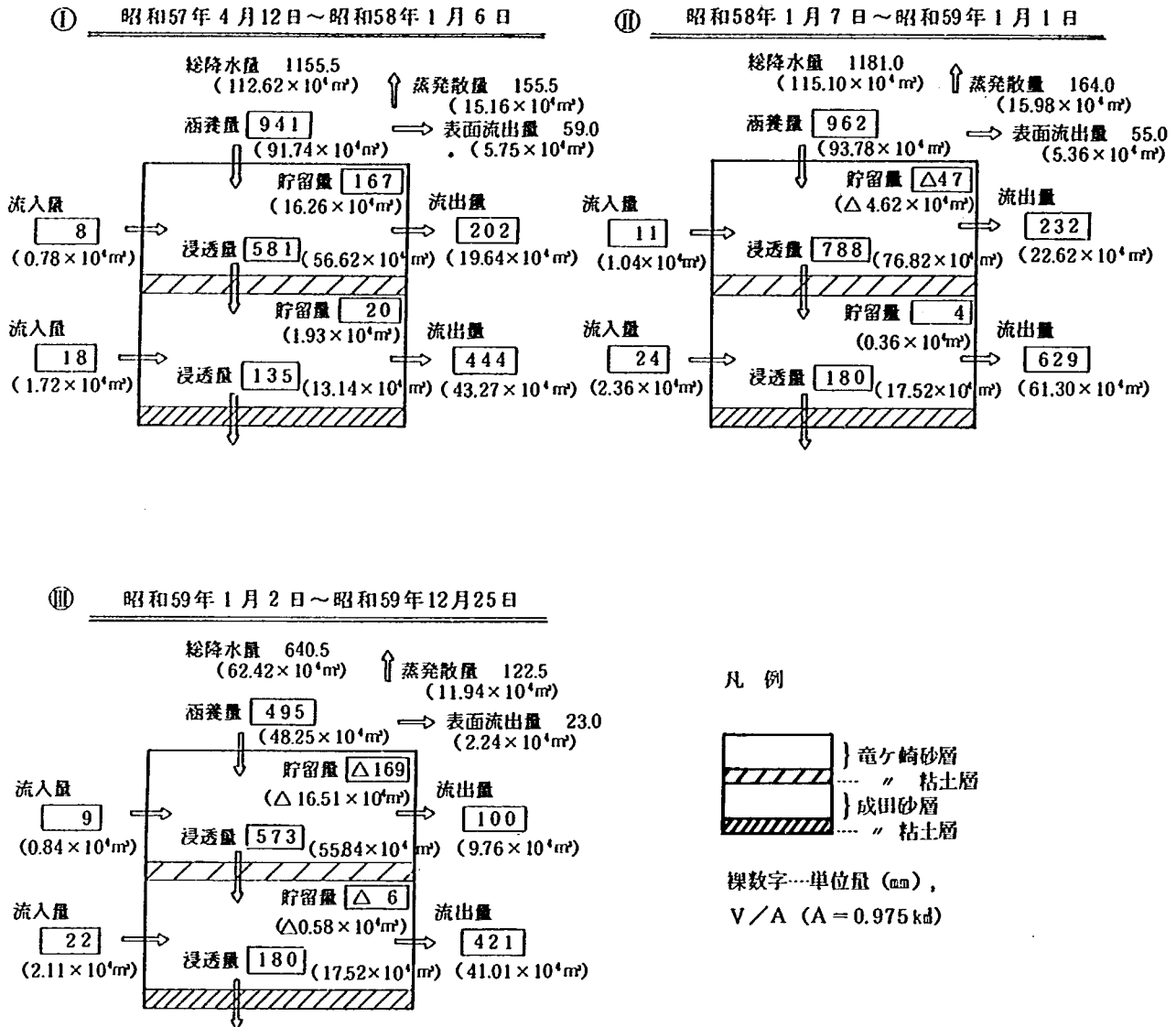


図3-31 シミュレーションによる水収支結果

なお、表面流出量は、涵養量を求めるために用いたタンクモデル（1段）から得た流出量である。

これによると、蒸発散量が観測値（年間 400～500mm程度：筑波大学水理実験センター資料による）の約3割と極めて少ない。

2.7.3 まとめ

谷田部試験地における浅層地下水は、民家等による若干の揚水はあるもののそれに伴う揚水井の地下水位の変動は著しいものではない。また、帯水層を分けている不透水層は前述のように厚さ0～2 m程度で、その上下の帯水層はいずれも自由地下水と判断される。

以上のことから、三次元的な流れを示す地下水現象ではあるが、不圧地下水の絞り出しは考慮せず、平面二次元的に近似させることで地下水現象を再現した。

再現された結果をみると、水収支等に検討の余地はあるものの全般的な地下水位変動は良く捉えられている。

今後検討すべき課題として次の項目が挙げられる。

- ① 地下水涵養量については、簡略的なタンクモデルを用いて計算したものである。今後は、表層からの蒸発機構のモデル化、積雪融雪機構のモデル化を加え、地下水シミュレーションモデルの精度向上を図る必要がある。
- ② 浅層地下水層の下部層と深層地下水層間の移動水量については、水文データ等を収集したうえでモデルに反映させる必要がある。

第Ⅳ章 結 論

得られた結果及び今後の課題をまとめると、次のようになる。

- (1) 試験地の造成前の土地利用は田畑、林地が卓越する状態で、宅地部を含んだ最終浸透能は20～1.000mm/hr、また、年流出率は0.34、洪水時流出率は0.01～0.10であった。
- (2) 造成後における最終浸透能は全く浸透しない場所も多く、最大でも70mm/hr程度であった。また、年流出率は0.52程度であった。

これら浸透能、流出率の変化は、伐採による降雨遮断効果の喪失と蒸発散量の減少及び、盛土、切土施工時の地盤締め固めと舗装による地下浸透機能の低下によるものと考えられる。

- (3) 試験地における浅層地下水は、地表下2～3m付近に分布する常総粘土層（存在しない部分もある）を挟んで、上下部に位置する関東ローム層と竜ヶ崎層上部に賦存しており、ほぼ地形勾配に従って流下している。
- (4) 造成期間中の地下水位の変化は、局所で造成工事の影響と思われる一時的な水位低下が認められたが、全体的な地下水位等高線のパターンにはほとんど特異な変化は認められなかった。
- (5) 土地造成による地下水位の影響を評価するため、平面二次元モデルによる地下水シミュレーションを行ったが、造成期間中の地下水の異常な変化は認められなかった。造成後の昭和59年の地下水位には、若干計算水位との開きがみられた。この変化は、昭和59年が年間雨量半減の異常年であり、地下へ涵養される水量が減少したのに加えて、造成による影響も付加されたものと考えられる。
- (6) 当試験地は、今後さらに工業団地として造成、建設事業が行われる予定であり、また、開発に伴う地下水涵養機能の低下に対処するため浸透施設（地下埋管）の設置が予定されている。（一部設置済）。
今後は、現地、ライシメータ等による実験を行い、浸透現象を把握することが必要である。
また、引き続き水文観測を実施し、今後の開発に伴う水文環境の変化の評価及び、浸透施設による地下水涵養効果の評価を行う予定である。

あ と が き

本報告書は、開発が水文環境に及ぼす影響及び水文環境の保全のために設置する浸透施設を評価するために試験地化した谷田部試験地の水文調査・研究に関する第2報である。

本調査の実施にあたっては、茨城県企画部及土木部、住宅都市整備公団学園都市開発局、三井共同建設コンサルタント、筑波大学新藤教授をはじめ多くの方々の多大なる御協力を賜りました。記してここに感謝の意を表します。

資 料

1. 造成進捗状況図
2. 水収支表
3. 水収支図（期間別）
4. 電気検層結果
5. 観測孔別地下水位変動図
6. シミュレーション結果，地下水位時系列図
7. シミュレーション結果，地下水平面形状（造成後）

本

自

一、關於本會之宗旨

二、關於本會之組織

三、關於本會之經費

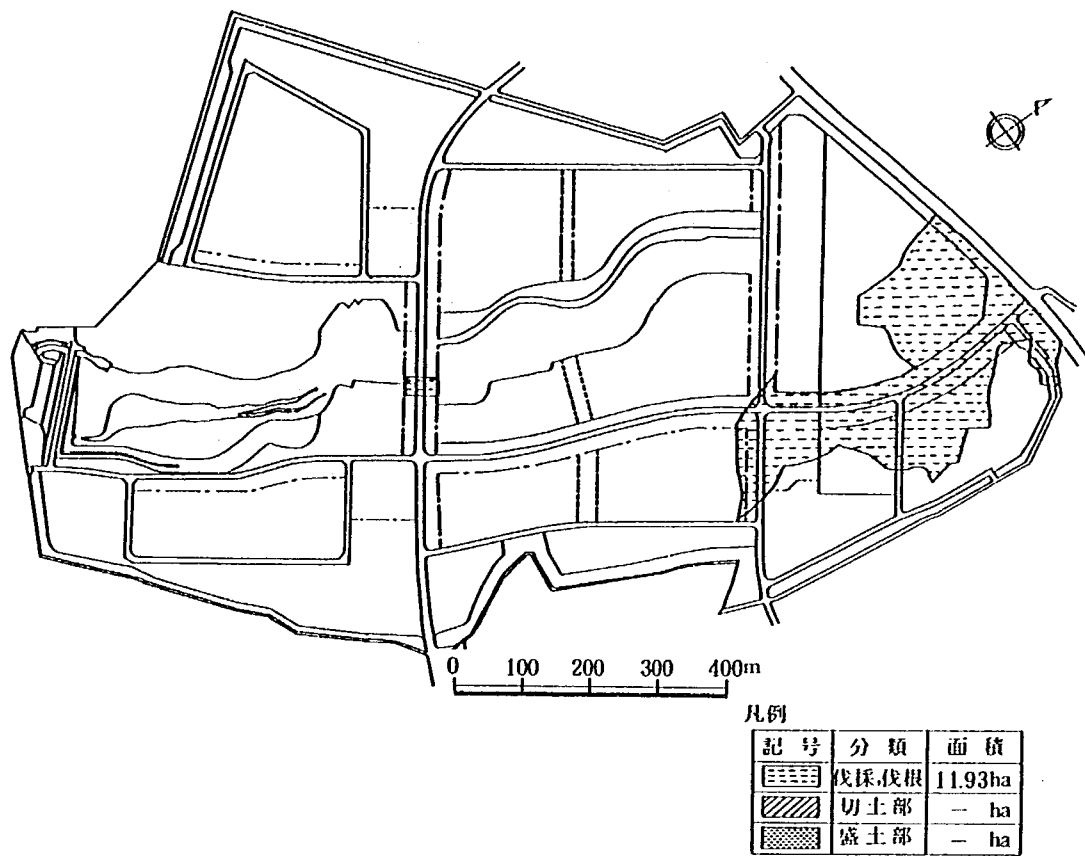
四、關於本會之業務

五、關於本會之附屬機構

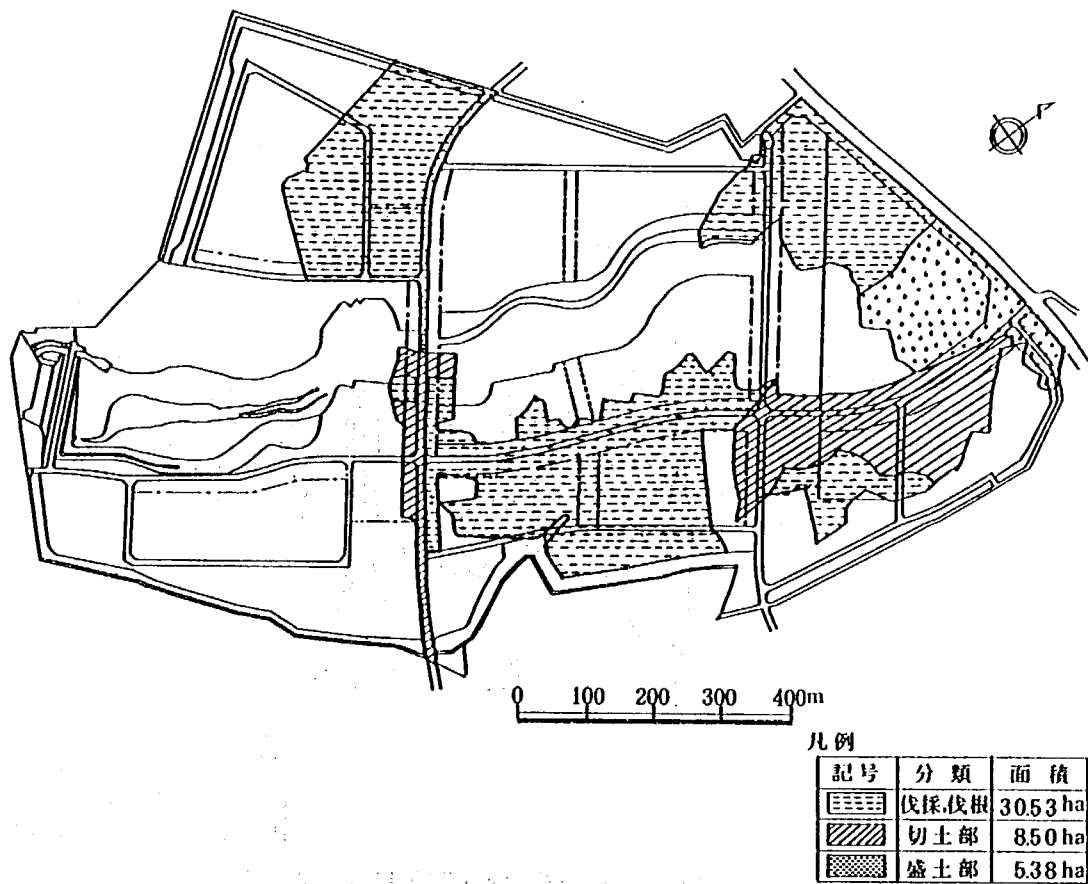
六、關於本會之其他事項

七、關於本會之附屬機構

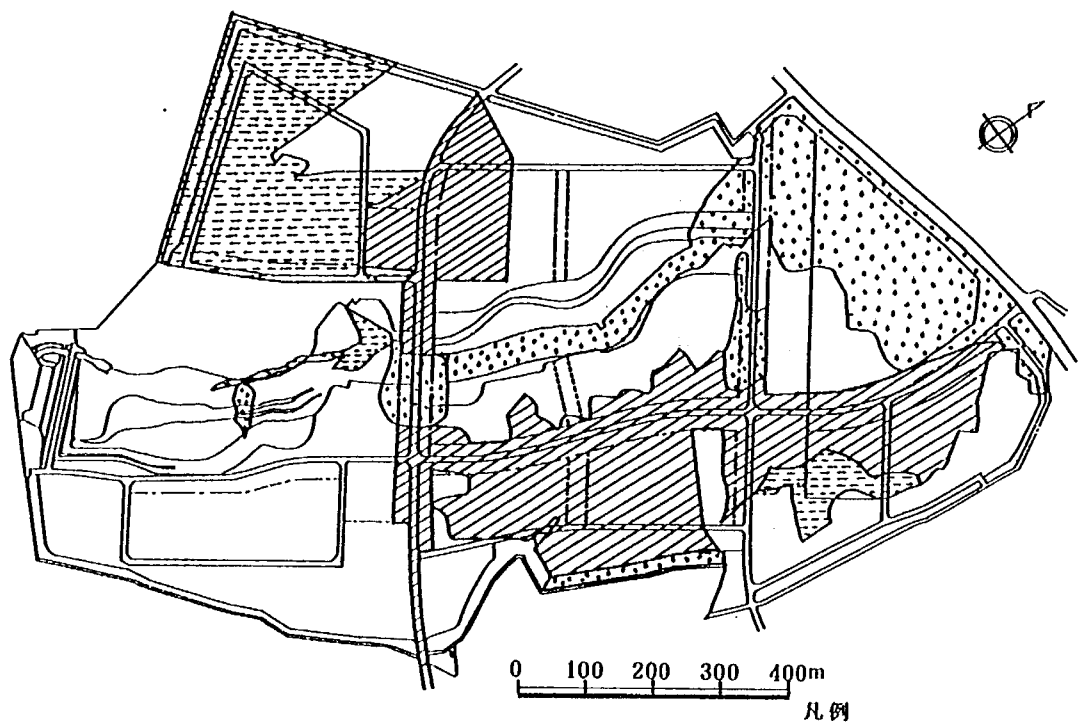
附錄



資料 1-1 造成進捗状況図 (昭和57年 8 月)

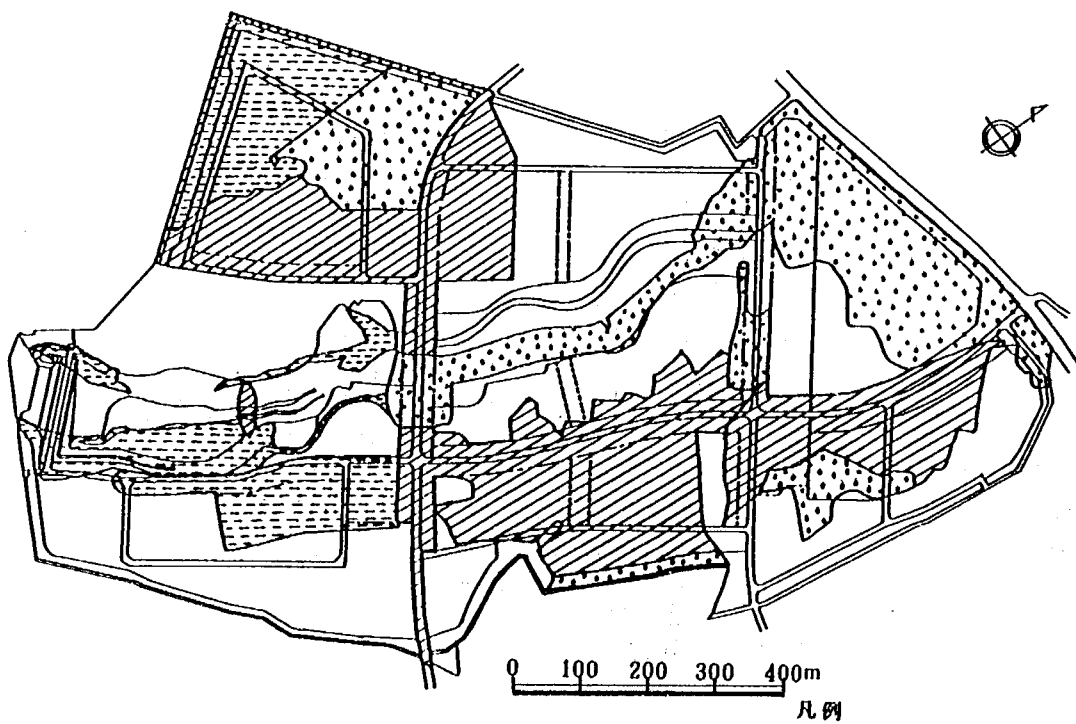


資料 1-2 造成進捗状況図 (昭和57年 9 月)



記号	分類	面積
	伐採, 伐根	14.40ha
	切土部	27.25ha
	盛土部	21.98ha

資料 1-3 造成進捗状況図 (昭和57年10月)



記号	分類	面積
	伐採, 伐根	14.55ha
	切土部	33.60ha
	盛土部	22.85ha

資料 1-4 造成進捗状況図 (昭和57年11月~58年1月)

資料2 水収支表

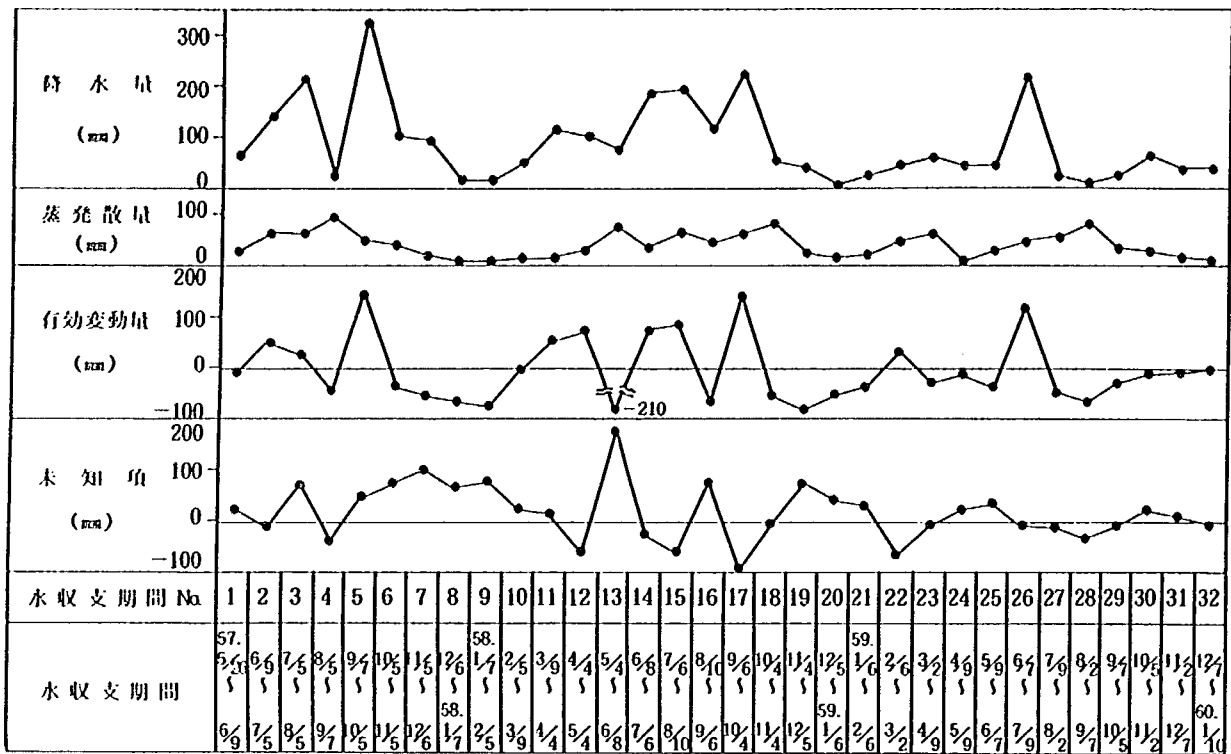
(単位: mm)

期 間				1	2	3	4	5	6	7	8	年 計
項 目				S57 5.26~6.9	6.9~7.5	7.5~8.5	8.5~9.7	9.7~10.5	10.5~11.5	11.5~12.6	S58 12.6~1.7	
降 水 量 P				65.5	110.0	212.5	21.5	322.5	106.5	94.5	19.5	962.5
地表水流入量 D1				0	0	0	0	0	0	0	0	0
地表水流出量 D2				22.27	47.60	72.25	7.31	109.65	36.21	32.13	6.63	334.05
蒸 発 量 E				31.32	64.63	62.75	95.43	49.55	40.14	20.01	9.80	373.68
地下水流入量 G1												
地下水流出量 G2				15.63	-23.91	50.94	-41.04	18.21	64.56	92.72	66.53	243.64
不飽和帯の上澄変化 M												
地表における水量変化 W				0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水量変化 ΔS												
有 効 変 動 量 H・F・S				-3.72	51.68	(26.56)	(-49.25)	(115.09)	(-34.41)	(-50.36)	(-63.45)	(31.13)
地下水補給 G												

期 間	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	年 計
項 目	S58 1.7~2.5	2.5~3.9	3.9~4.4	4.4~5.4	5.4~6.8	6.8~7.6	7.6~8.10	8.10~9.6	9.6~10.4	10.4~11.4	11.4~12.5	S59 12.5~1.6	
降 水 量 P	19.0	51.5	116.5	102.0	79.5	186.5	193.0	118.5	222.5	55.0	42.5	7.5	1194.0
地表水流入量 D1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地表水流出量 D2	6.46	17.51	39.61	53.04	41.34	96.98	100.36	61.62	115.70	28.60	22.10	3.90	587.22
蒸 発 量 E	9.50	16.80	15.60	32.00	72.70	37.10	62.49	46.50	61.20	81.10	24.50	14.20	473.60
地下水流入量 G1													
地下水流出量 G2	75.08	17.98	2.86	-60.21	175.38	-22.98	-57.89	73.28	-95.60	-4.01	74.96	41.47	220.32
不飽和帯の上澄変化 M													
地表における水量変化 W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水量変化 ΔS													
有 効 変 動 量 H・F・S	(-72.04)	(-0.79)	(58.43)	(77.17)	(-209.92)	75.40	(88.13)	(-62.90)	(141.20)	(-50.69)	(-79.06)	(-52.07)	(-87.14)
地下水補給 G													

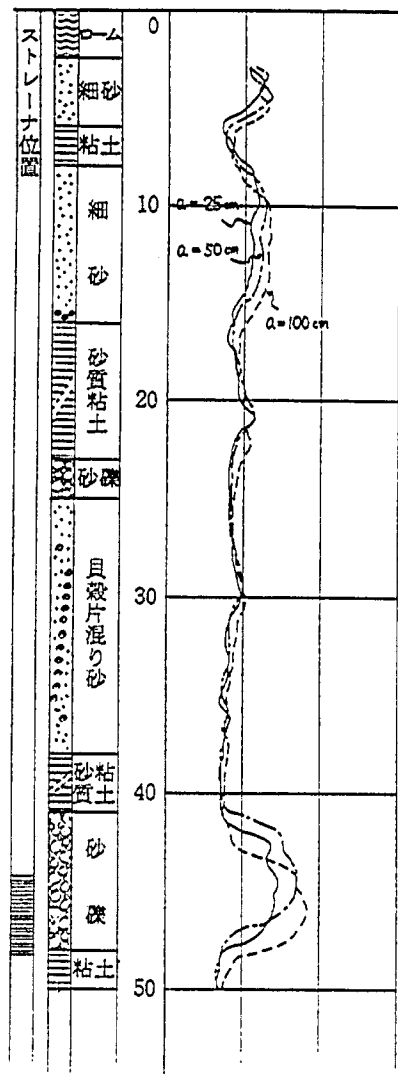
期 間	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	年 計
項 目	S59 1.6~2.6	2.6~3.2	3.2~4.9	4.9~5.9	5.9~6.7	6.7~7.9	7.9~8.2	8.2~9.7	9.7~10.5	10.5~11.2	11.2~12.7	S60 12.7~1.10	
降 水 量 P	26.0	44.5	60.5	41.5	45.5	217.0	23.5	9.0	23.0	63.0	38.5	39.5	634.5
地表水流入量 D1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地表水流出量 D2	13.52	23.14	31.45	21.20	14.13	59.83	22.07	22.90	32.85	29.24	25.58	42.67	338.59
蒸 発 量 E	19.60	49.30	61.90	9.90	28.30	44.10	56.00	81.70	29.70	23.70	16.10	(9.80)	430.10
地下水流入量 G1													
地下水流出量 G2	29.87	-62.01	-5.19	23.08	39.54	-3.91	-9.11	-31.62	-9.45	21.76	8.64	-8.56	-6.36
不飽和帯の上澄変化 M													
地表における水量変化 W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水量変化 ΔS													
有 効 変 動 量 H・F・S	(-36.99)	(34.07)	(-27.67)	(-9.68)	(-36.47)	(116.98)	(-45.46)	(-64.58)	(-30.10)	(-11.70)	(-11.82)	(-4.01)	(-127.83)
地下水補給 G													

注) () 内の値は、推定データを含む。

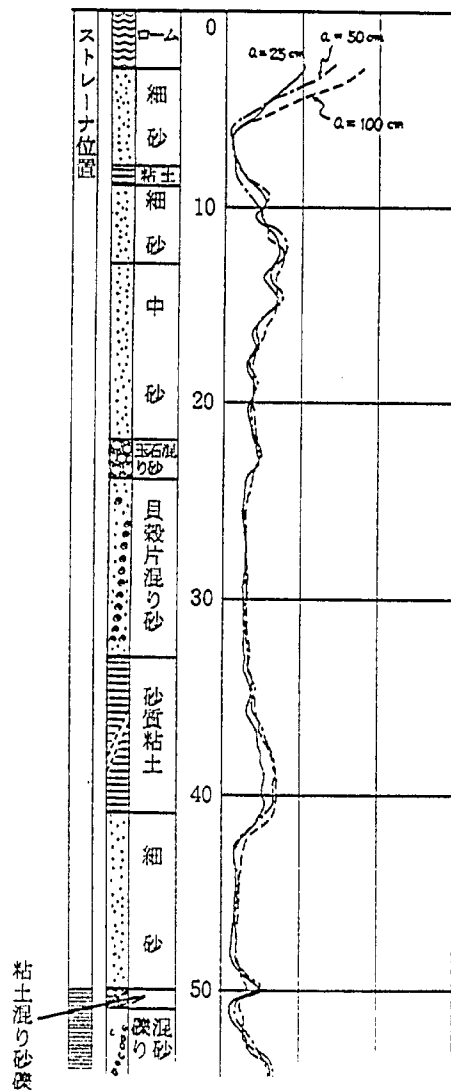


資料3 期間単位の水収支図

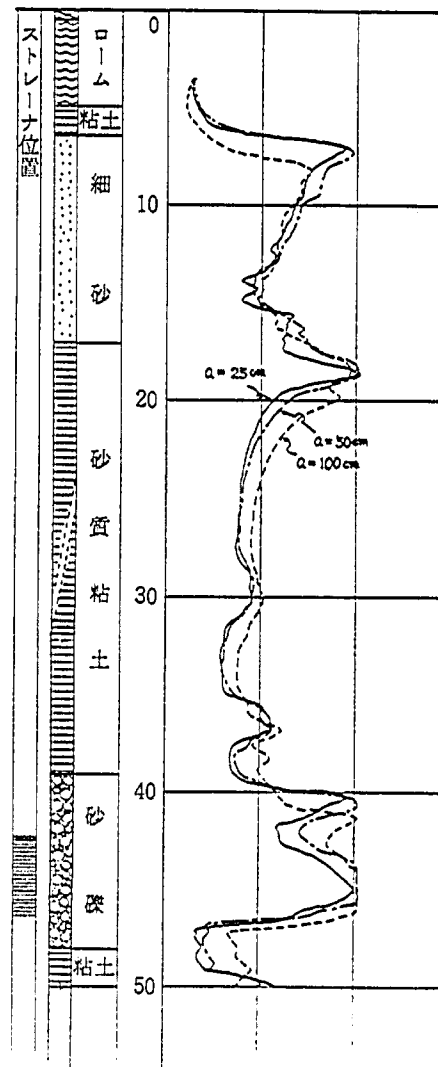
Na50-1 地層 深度 比抵抗 (Ω -m)
(m) 0 200 400 600



Na50-2 地層 深度 比抵抗 (Ω -m)
(m) 0 200 400 600



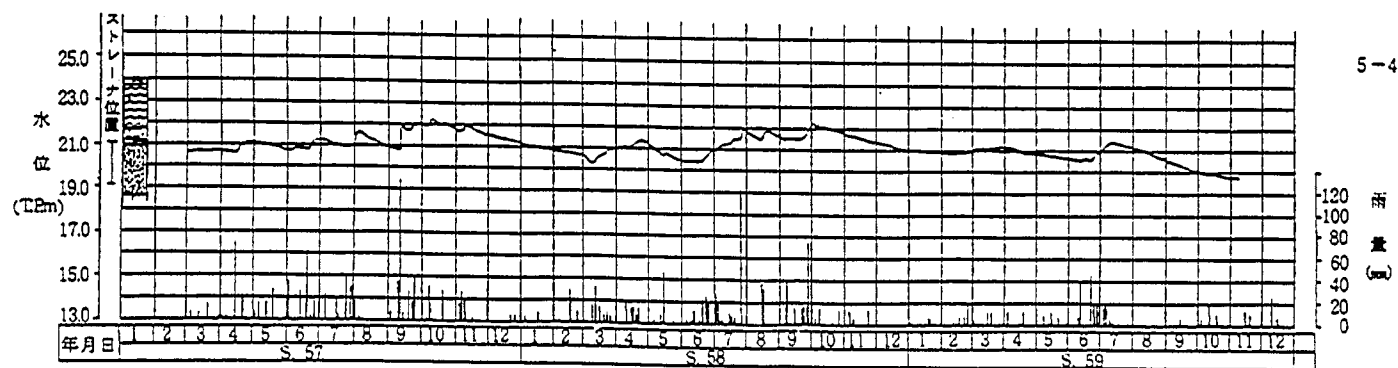
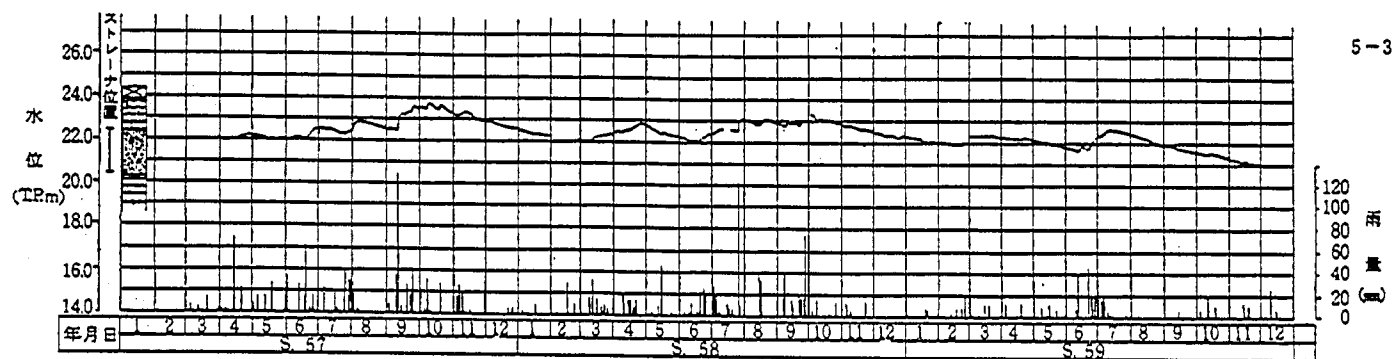
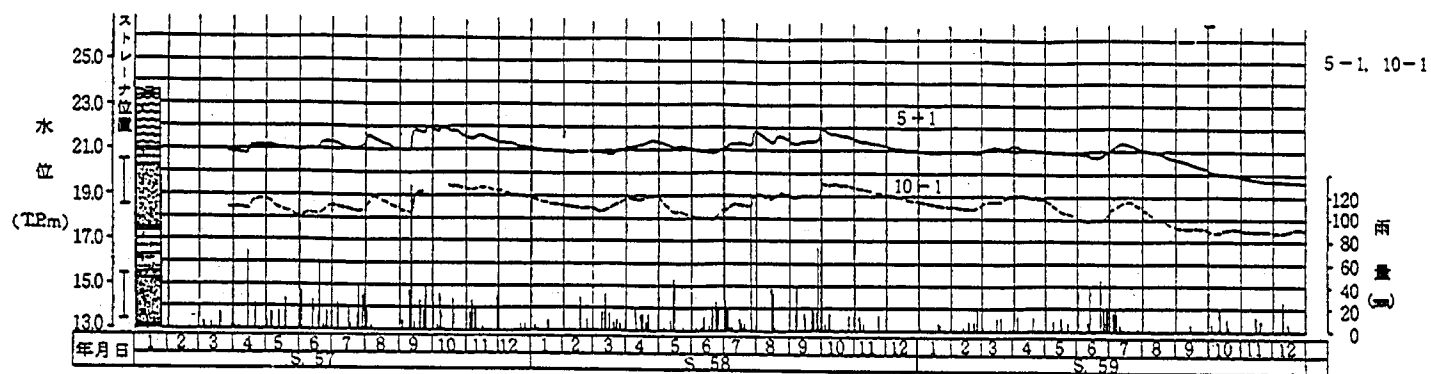
Na50-3 地層 深度 比抵抗 (Ω -m)
(m) 0 50 100 150



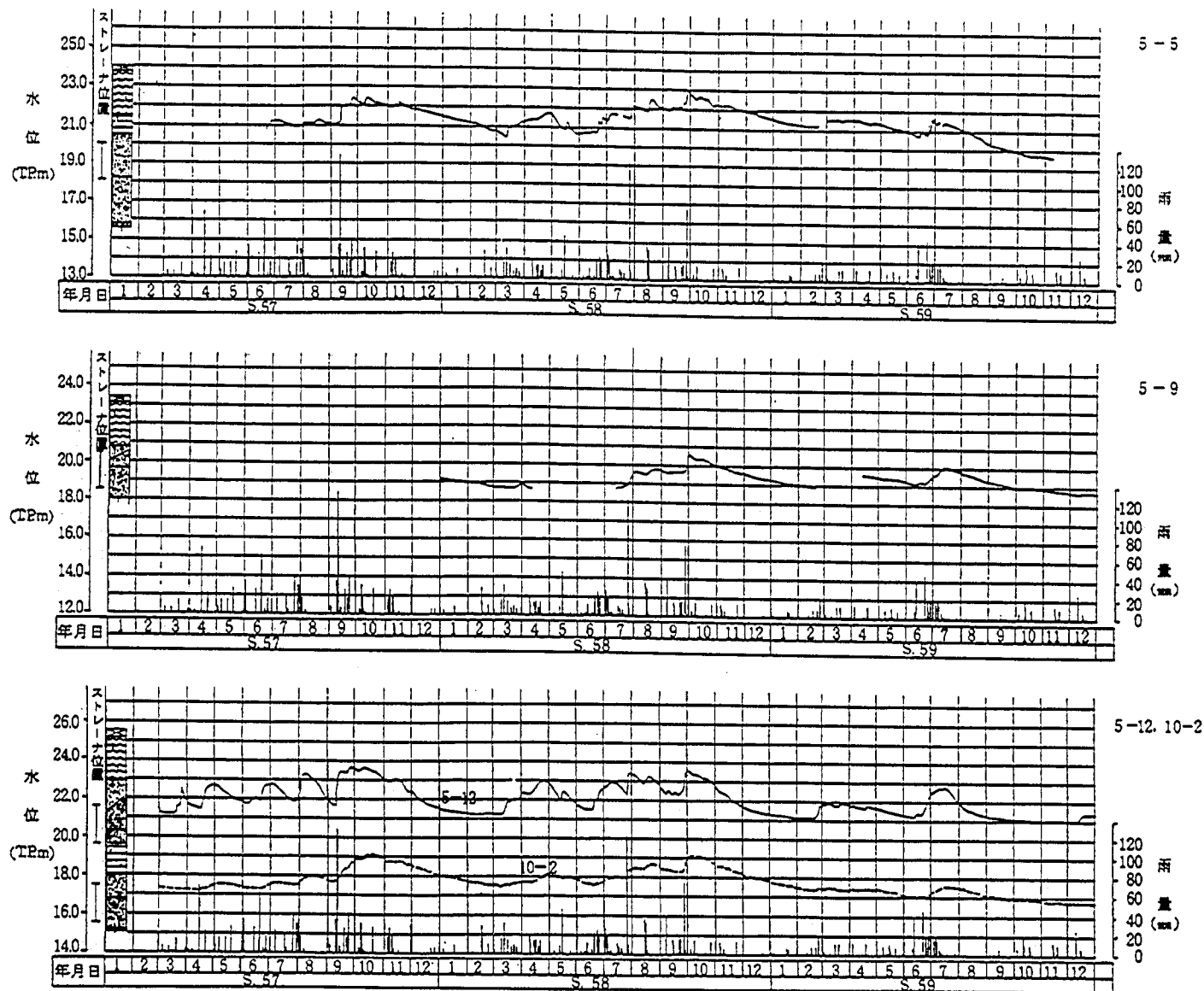
資料 4-1 電気検層結果

資料 4-2 透水層及び不透水層と比抵抗との関連

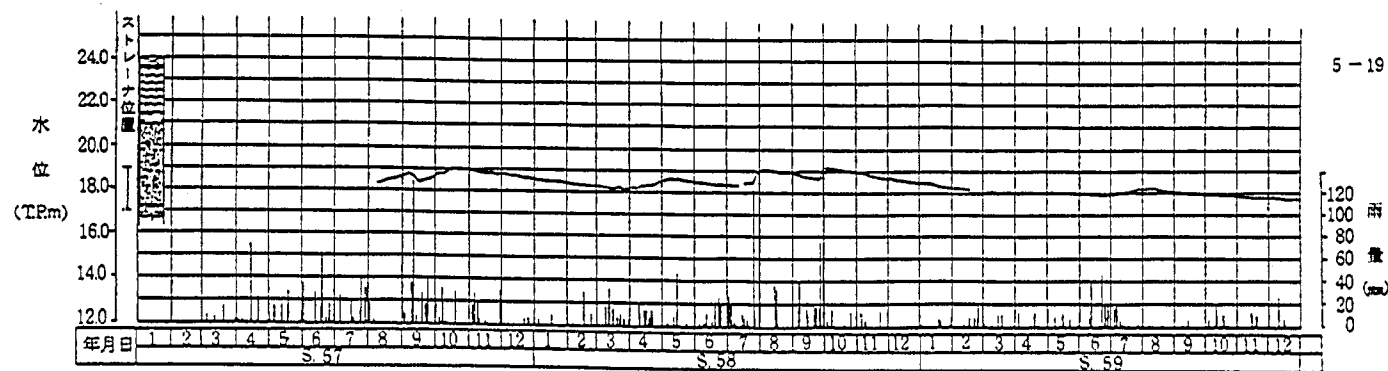
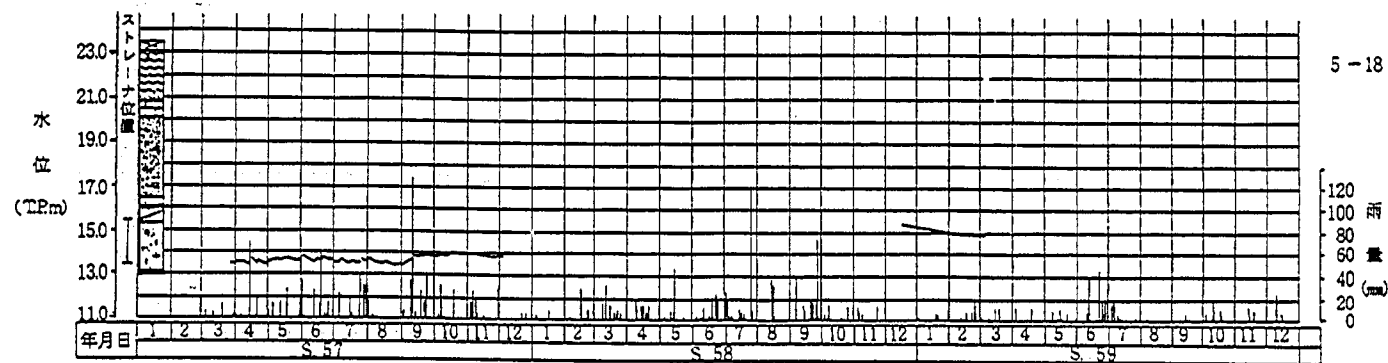
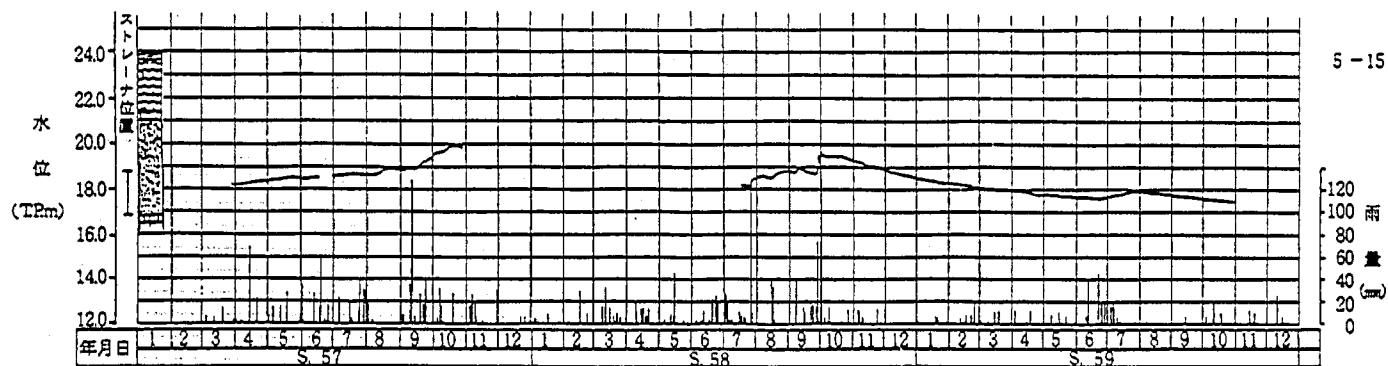
	岩 石	比 抵 抗 (Ω-m)	
		湿	乾
透 水 層	礫	200~10,000	1,000~15,000
	砂	200~5,000	1,000~7,000
	砂	100~700	300~7,000
	礫岩	100~500	300~1,800
	砂岩	100~500	200~2,500
不 透 水 層	礫	100~1,000	500~5,000
	凝灰岩	100~1,000	
	粘土	100以下	
	泥岩	100以下	
	頁岩	約100以下	
水 層	花崗岩	1,000~10,000	
	安山岩	200~10,000	
	玄武岩	2,000	
	結晶片岩	200~20,000	
	片麻岩	200~20,000	



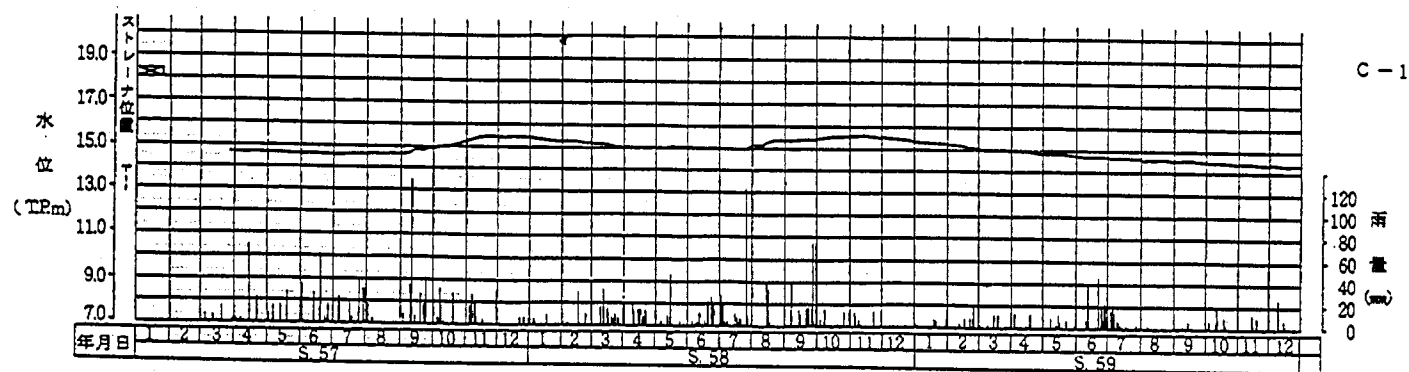
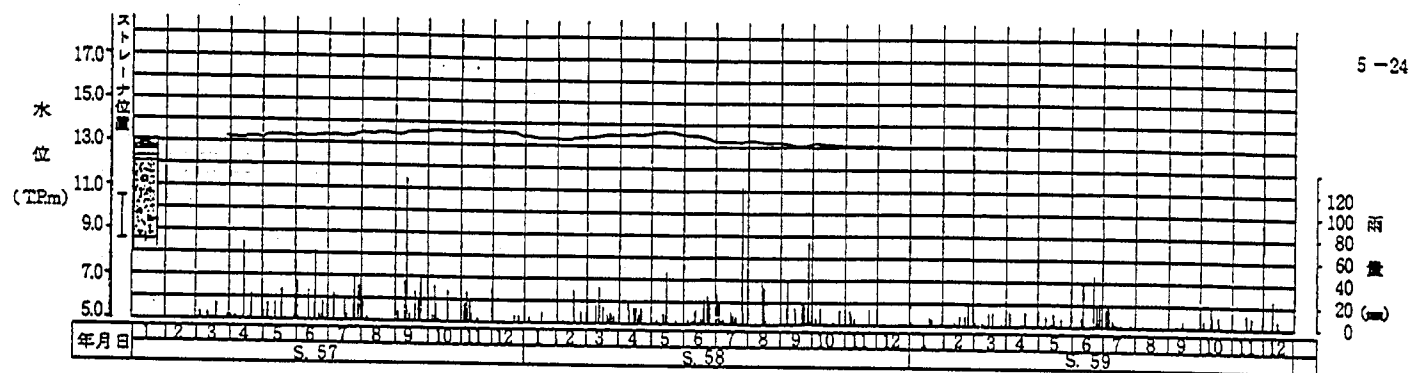
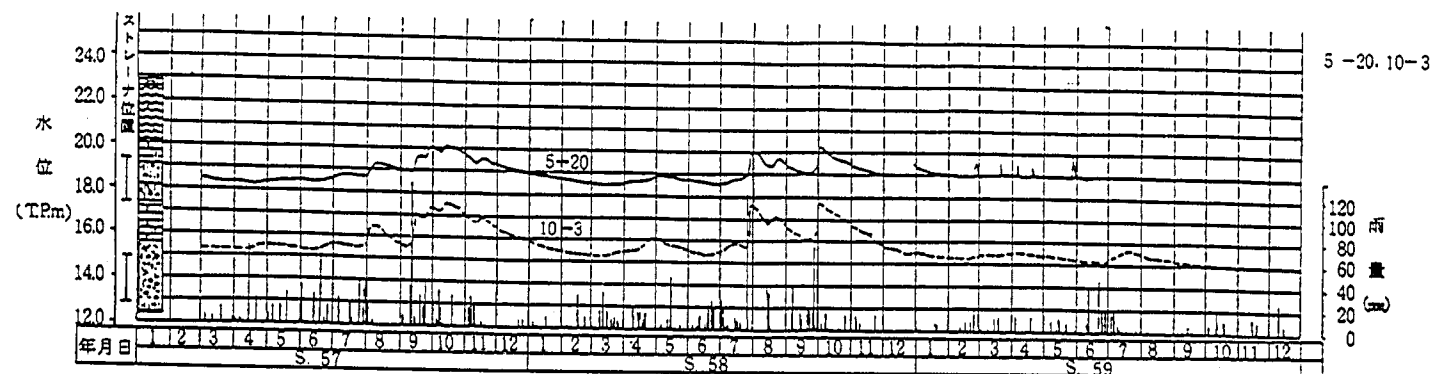
資料 5-1 観測孔別地下水位変動図



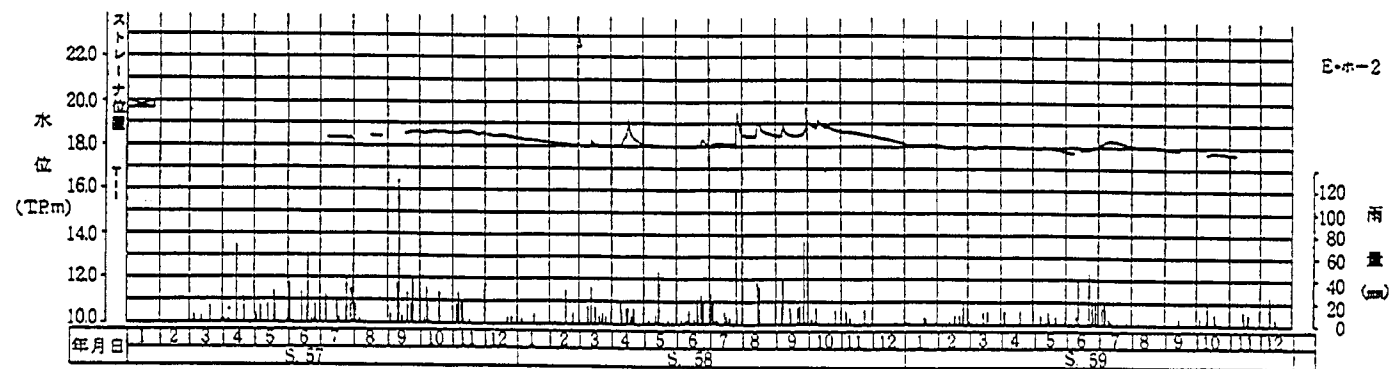
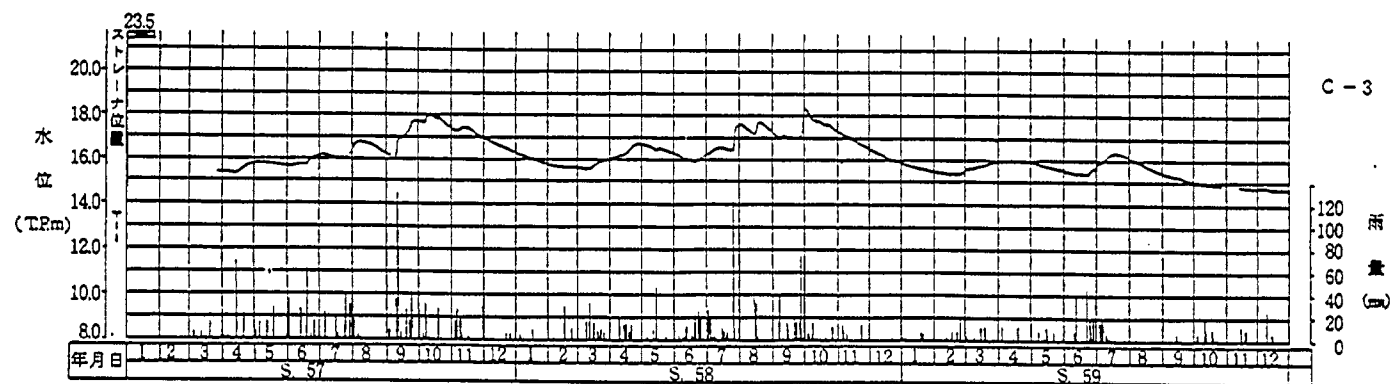
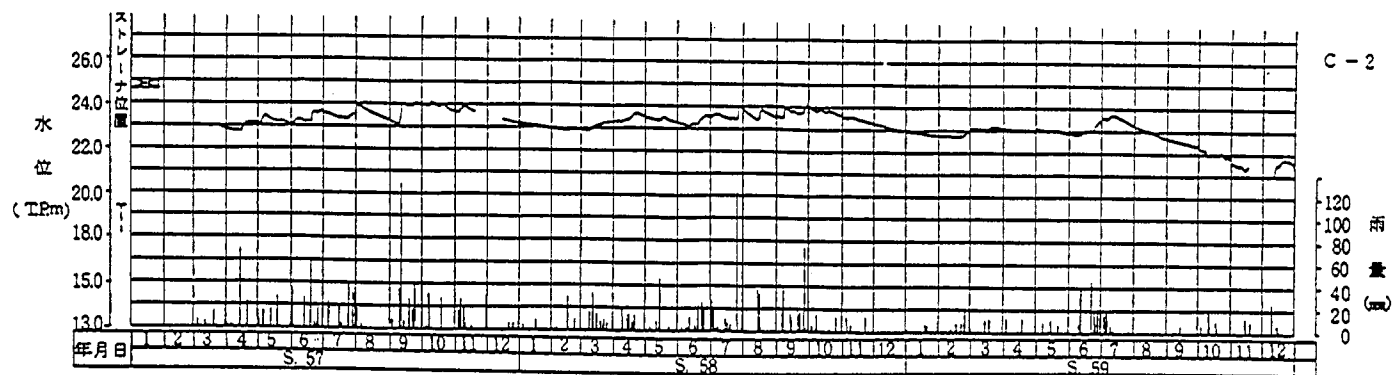
資料 5 - 2 観測孔別地下水位変動図



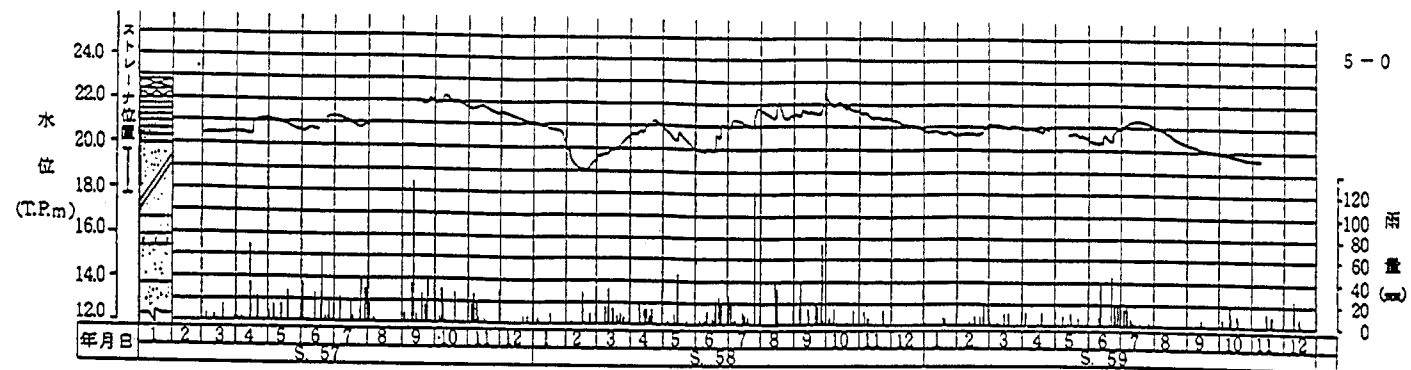
資料 5 - 3 観測孔別地下水位変動図



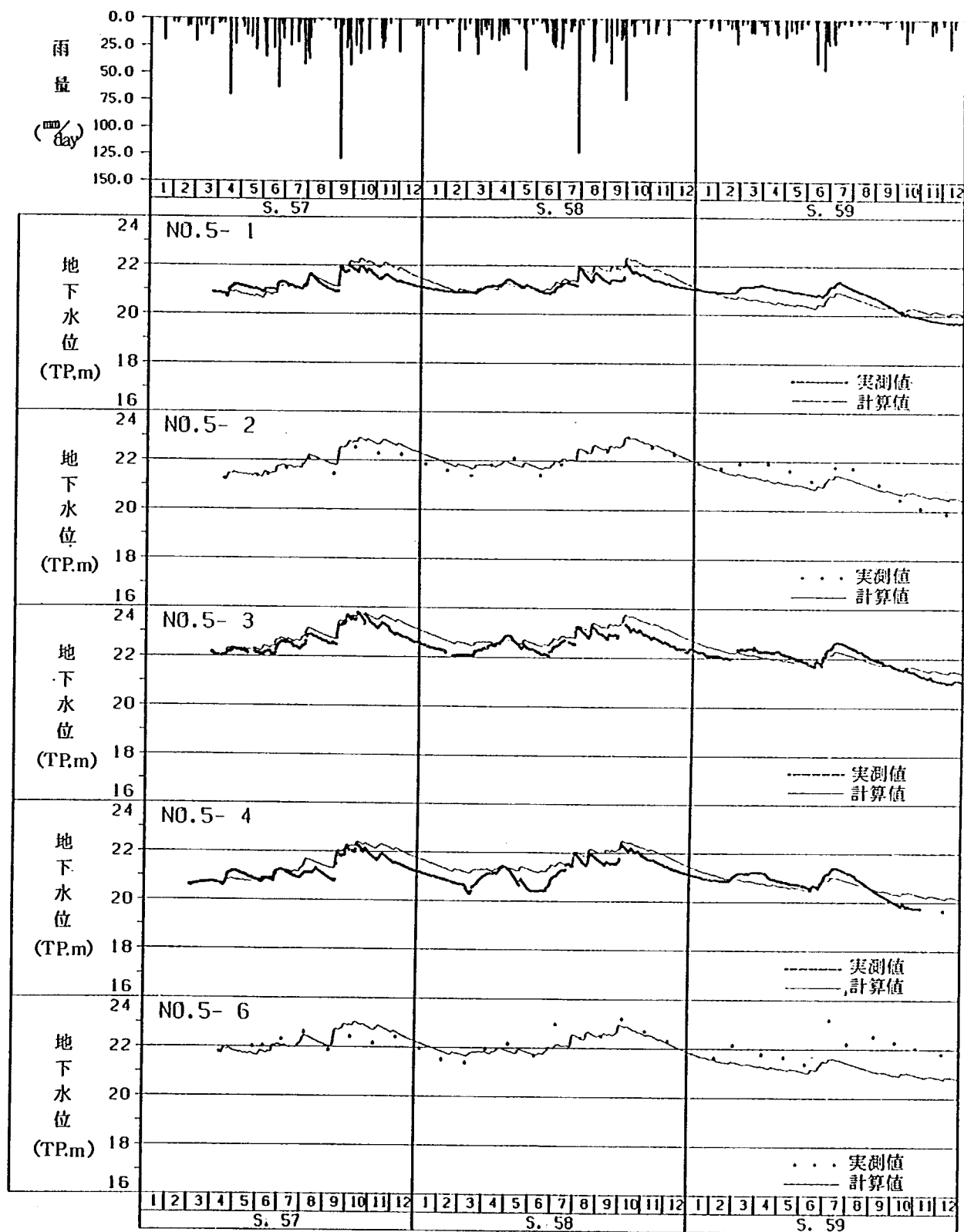
資料 5-4 観測孔別地下水位変動図



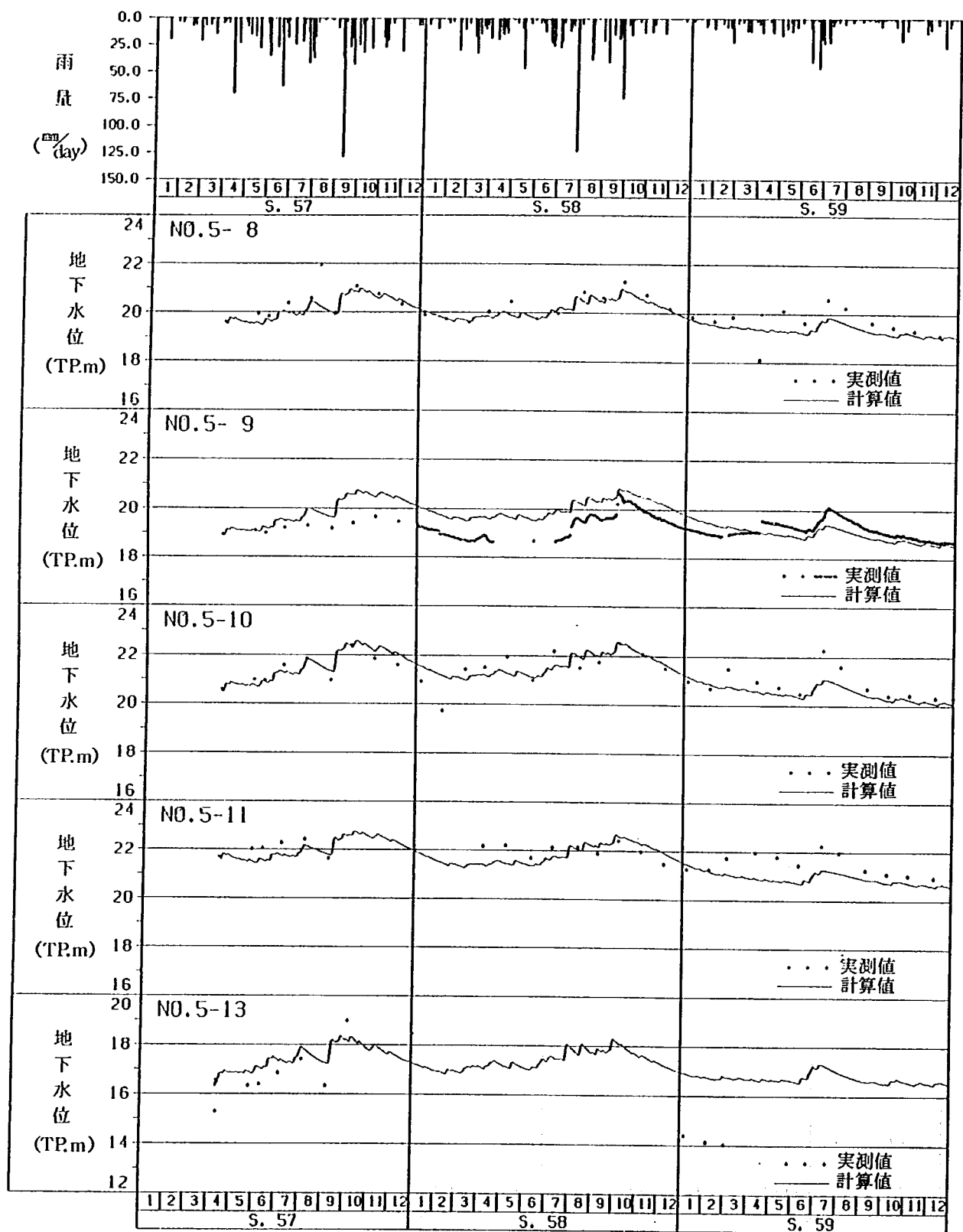
資料 5 - 5 観測孔別地下水位変動図



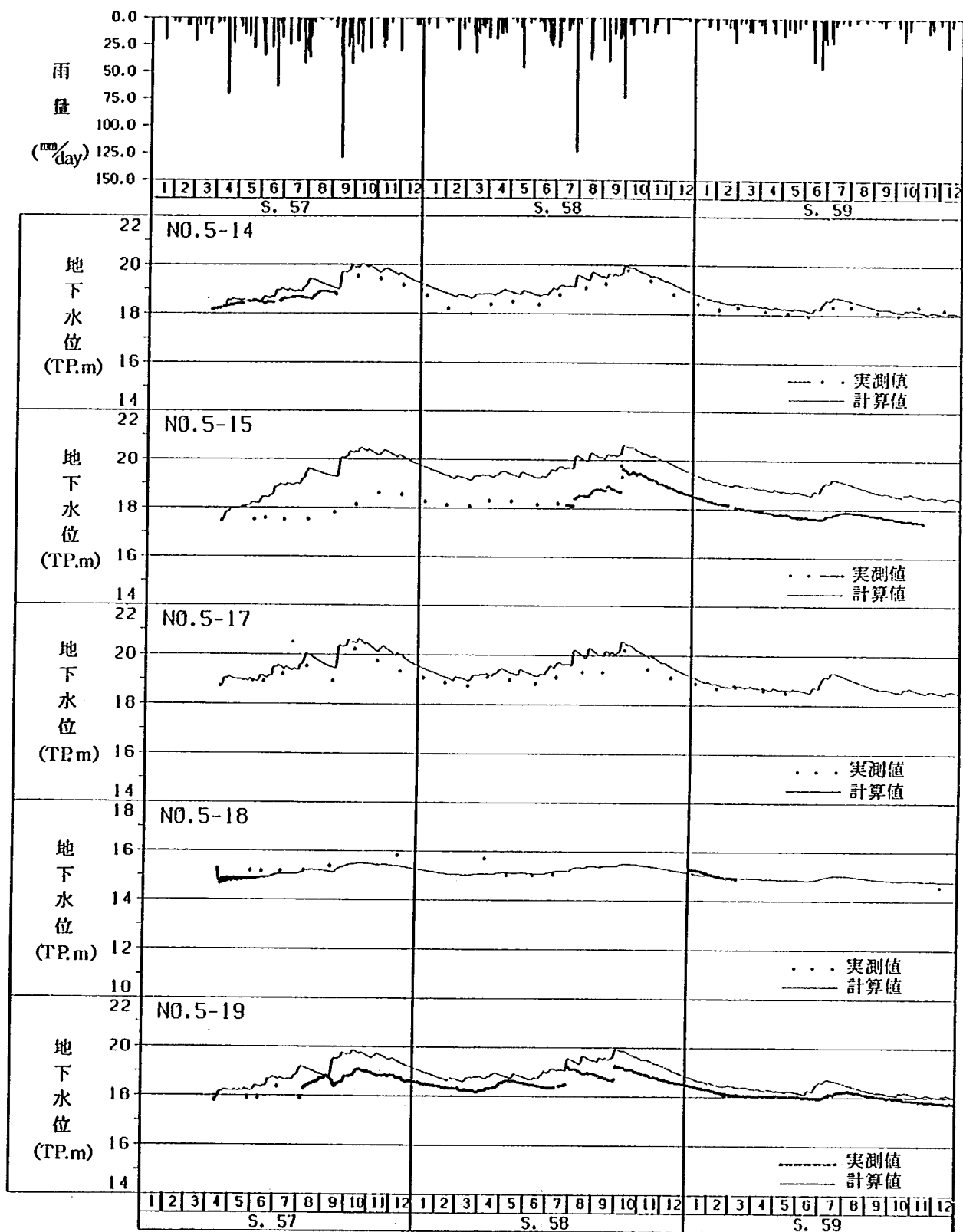
資料 5 - 6 観測孔別地下水位変動図



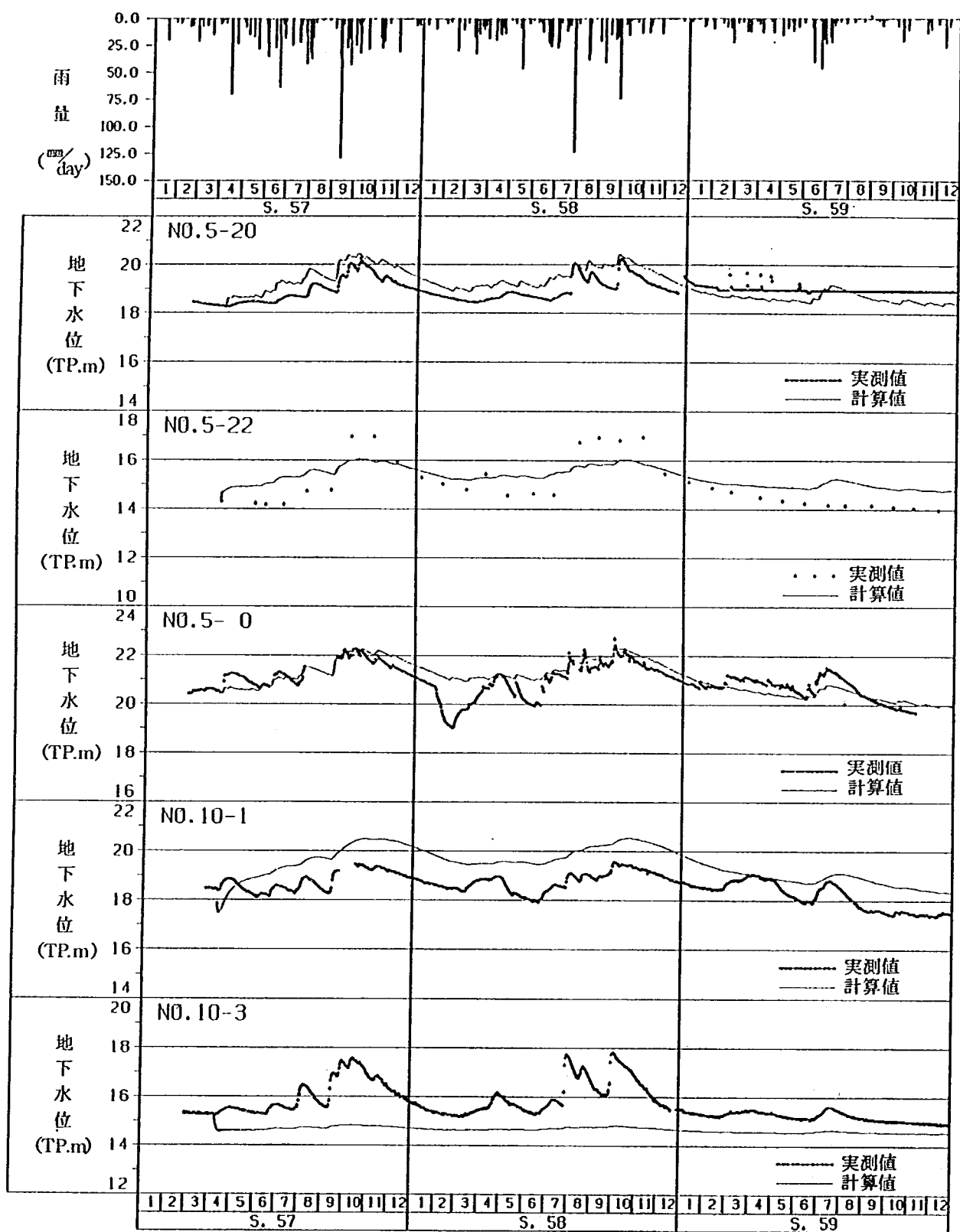
資料 6 - 1 地下水位時系列図 (計算結果)



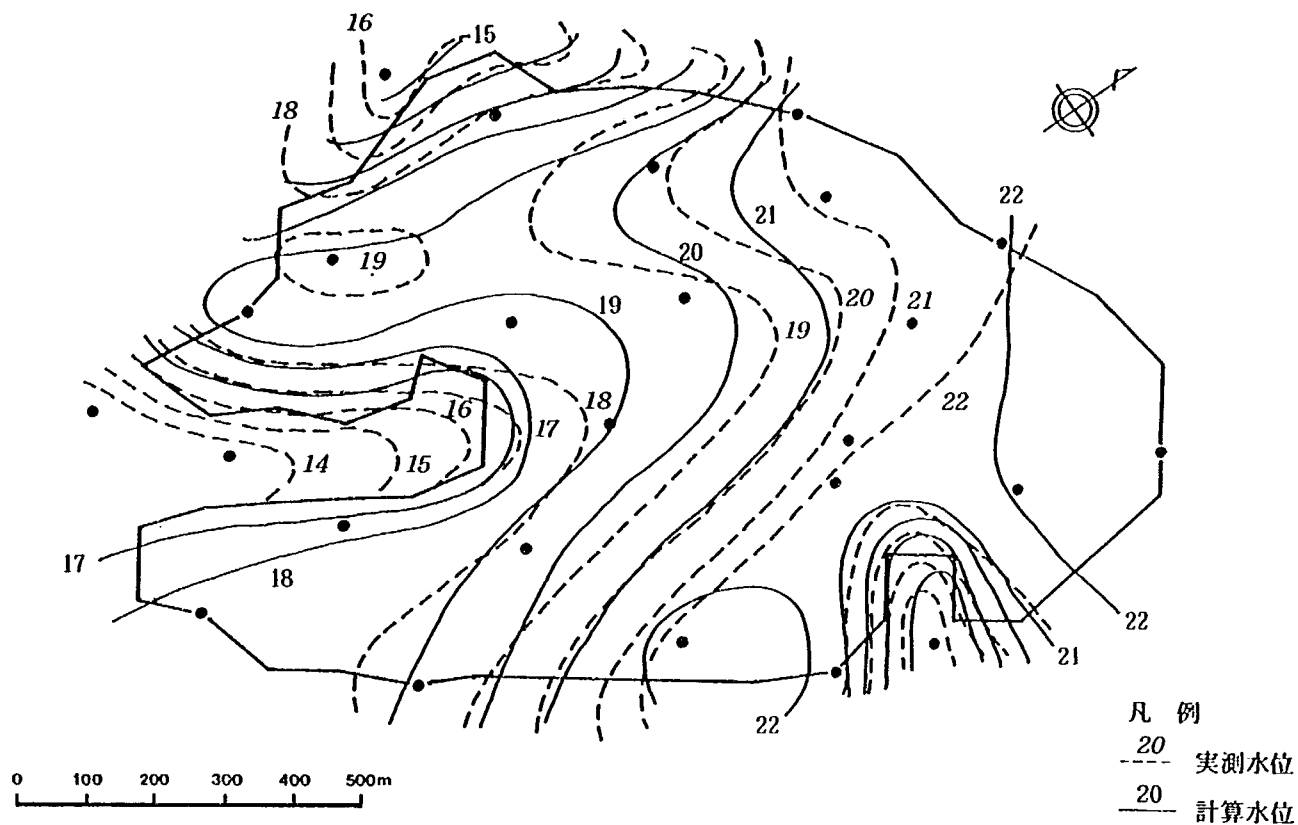
資料 6-2 地下水位時系列図 (計算結果)



資料 6 - 3 地下水位時系列図 (計算結果)

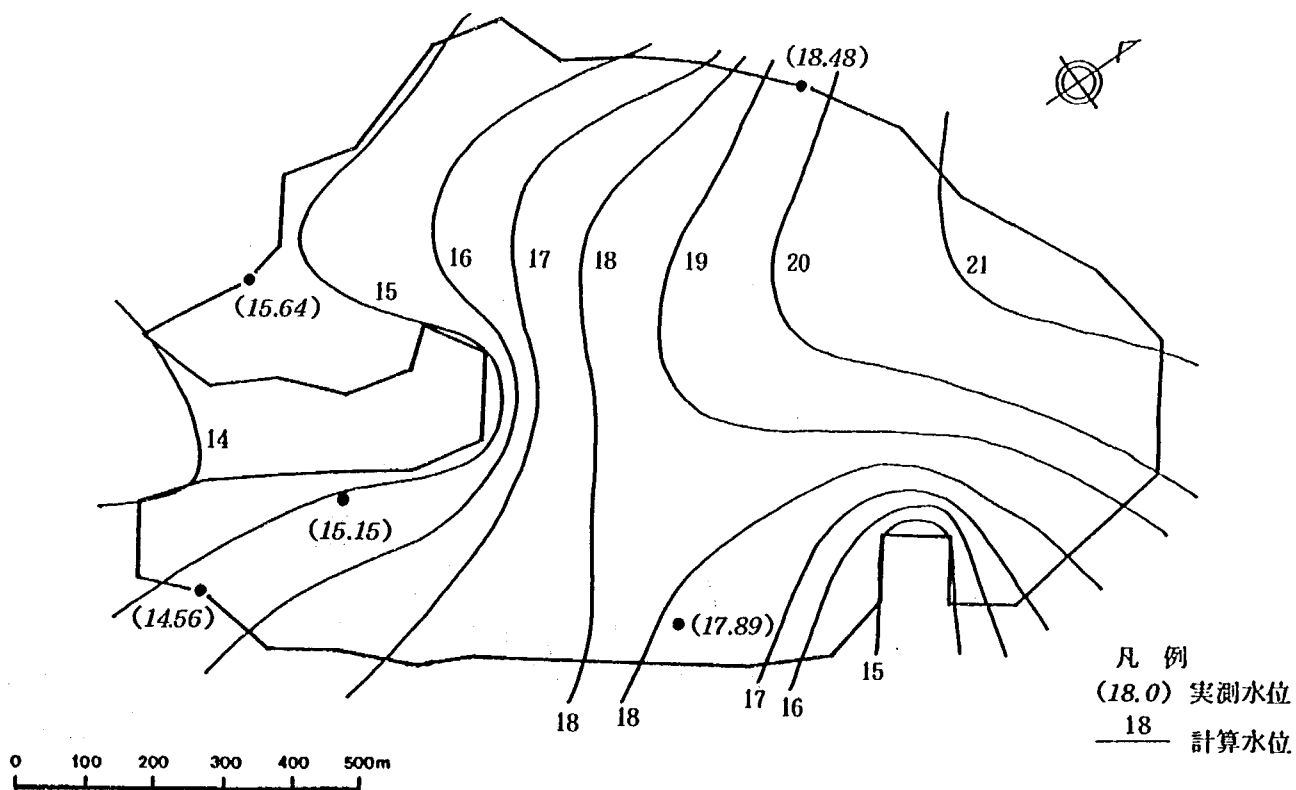


資料 6 - 4 地下水位時系列図 (計算結果)



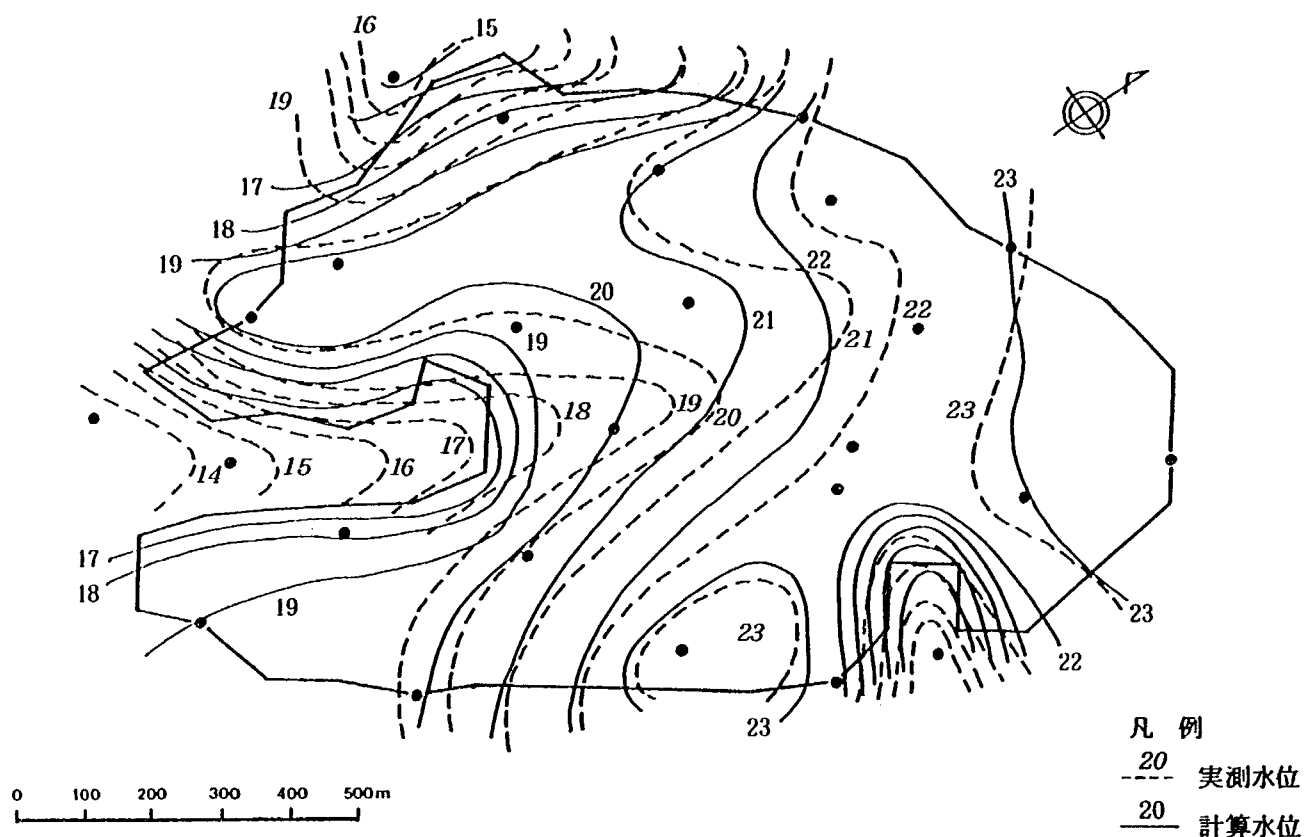
資料 7 - 1 (a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和58年 7 月 6 日]



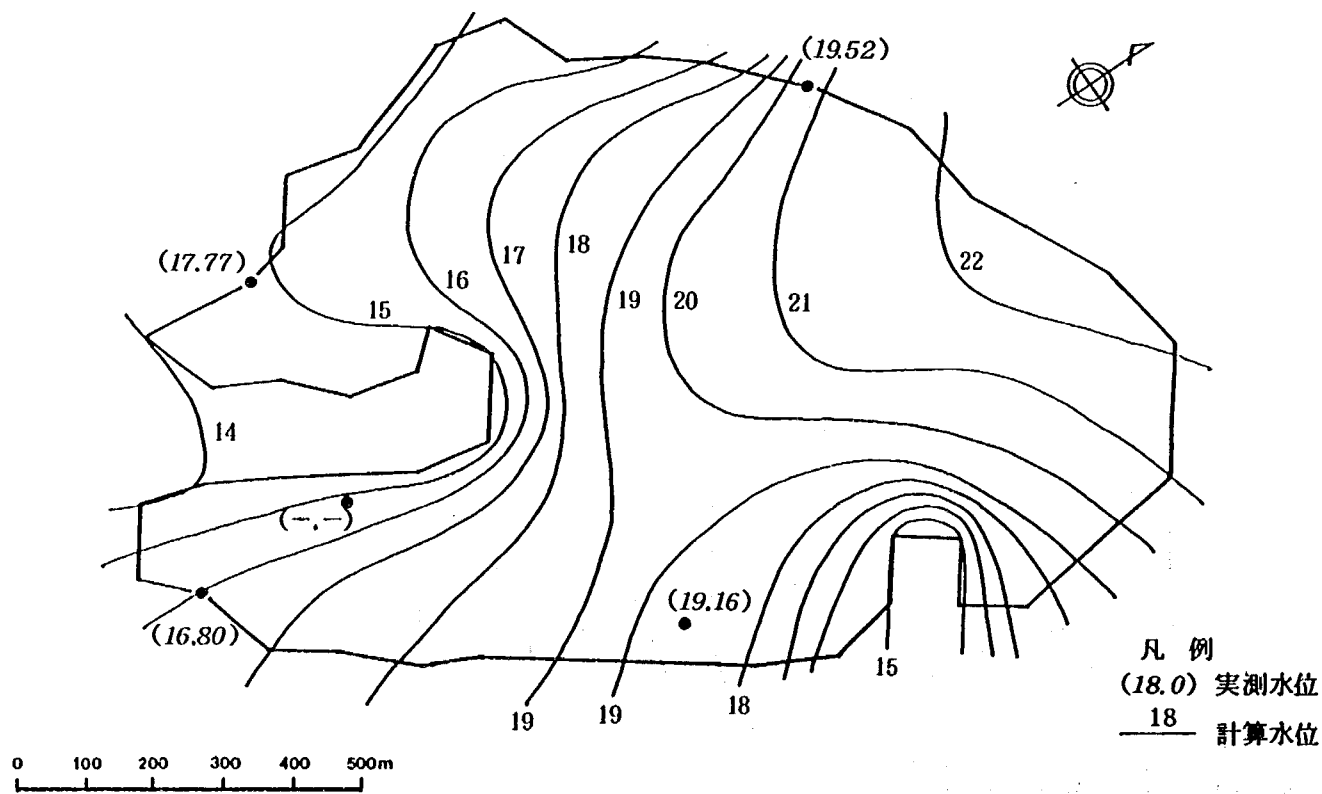
資料 7 - 1 (b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和58年 7 月 6 日]



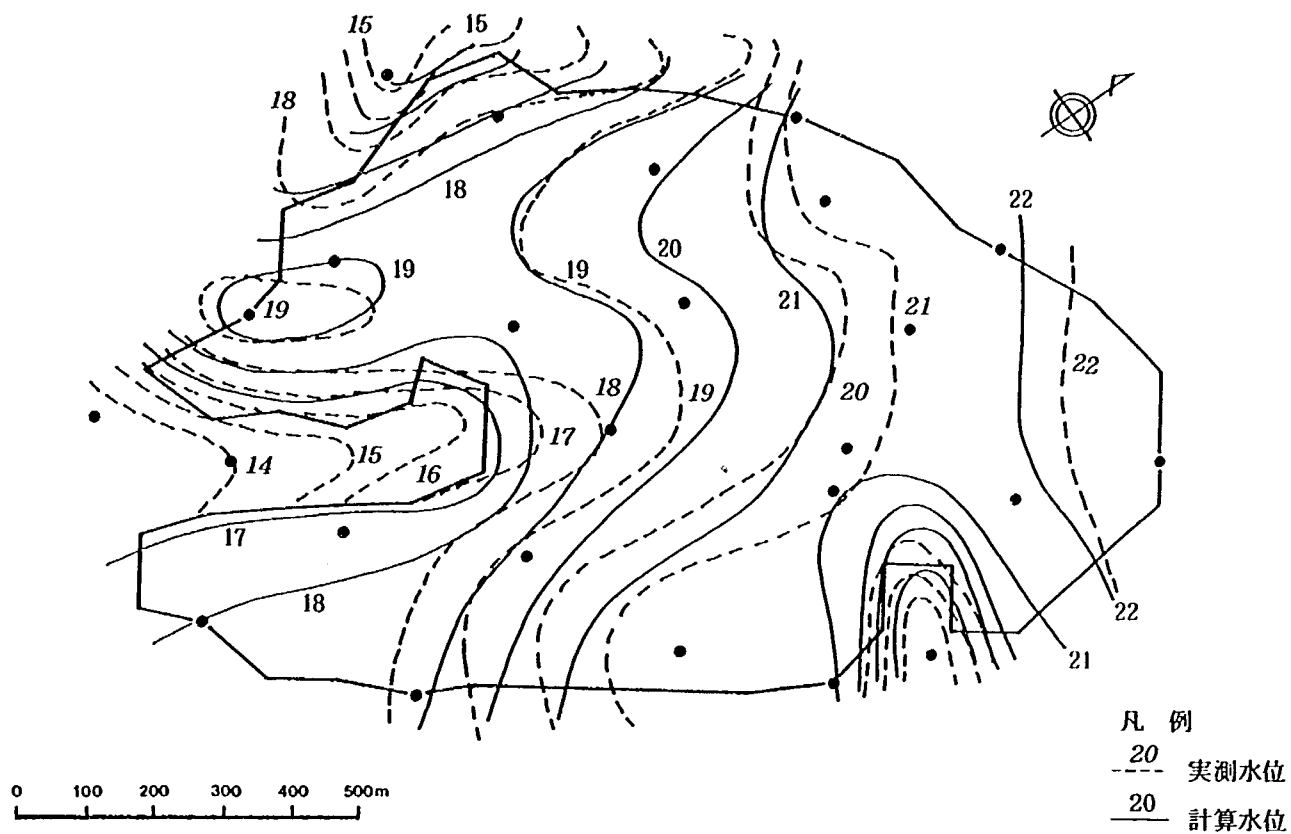
資料 7 - 2 (a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和58年10月4日]



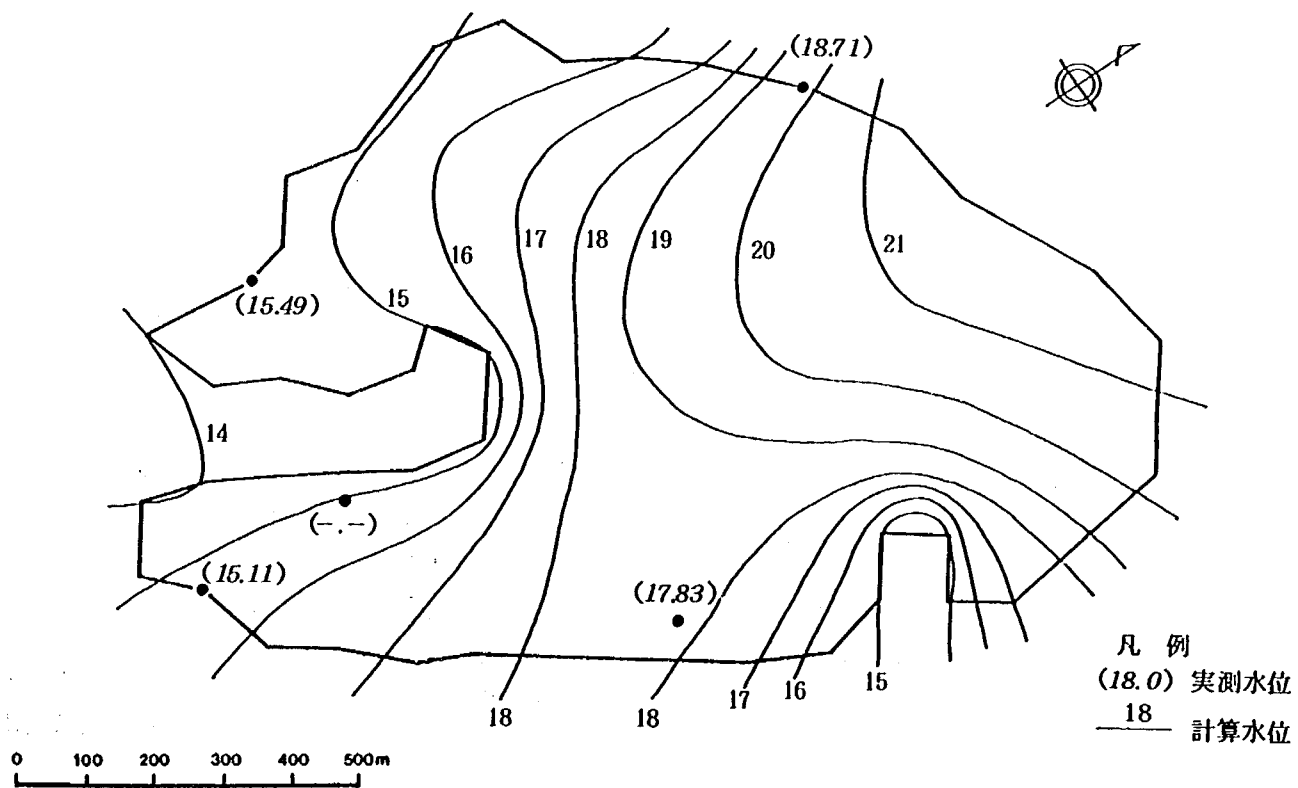
資料 7 - 2 (b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和58年10月4日]



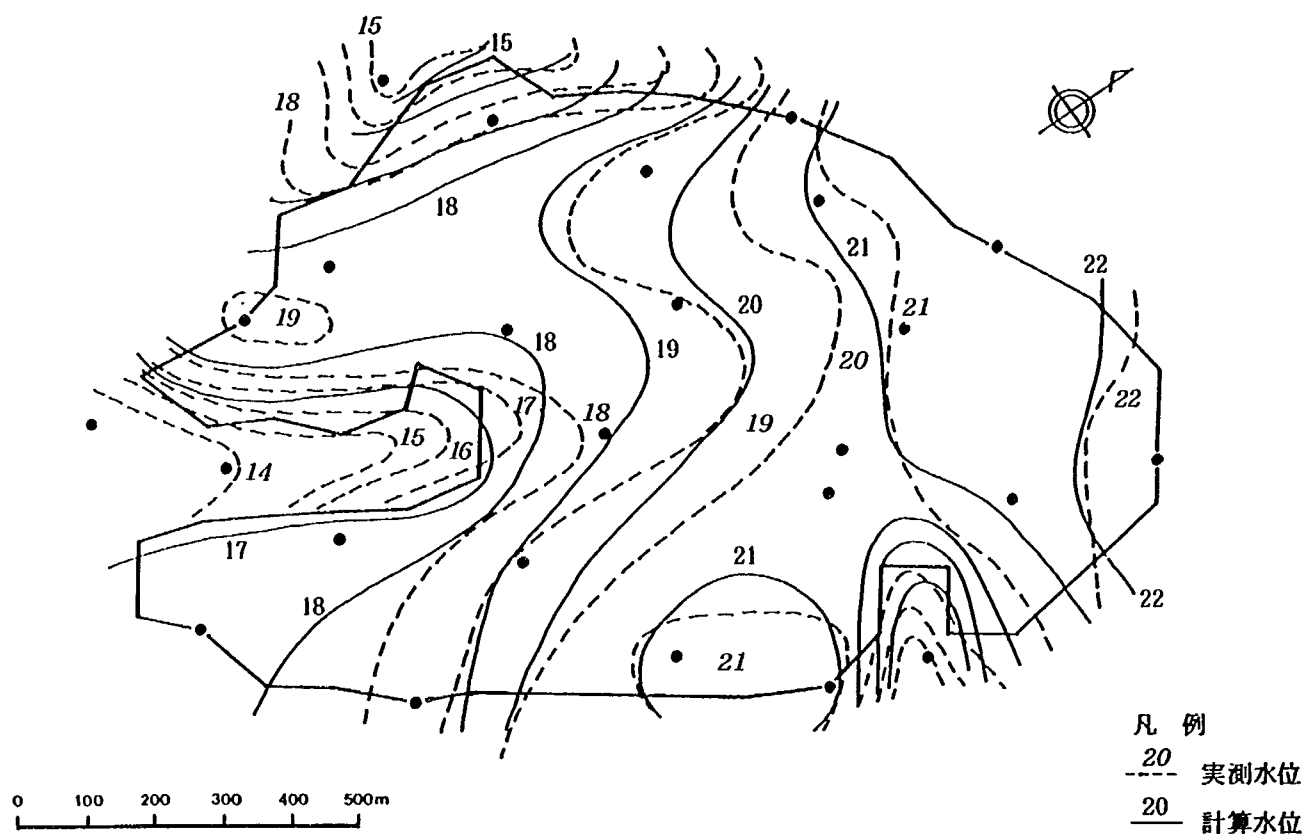
資料 7-3(a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和59年 1月 6日]



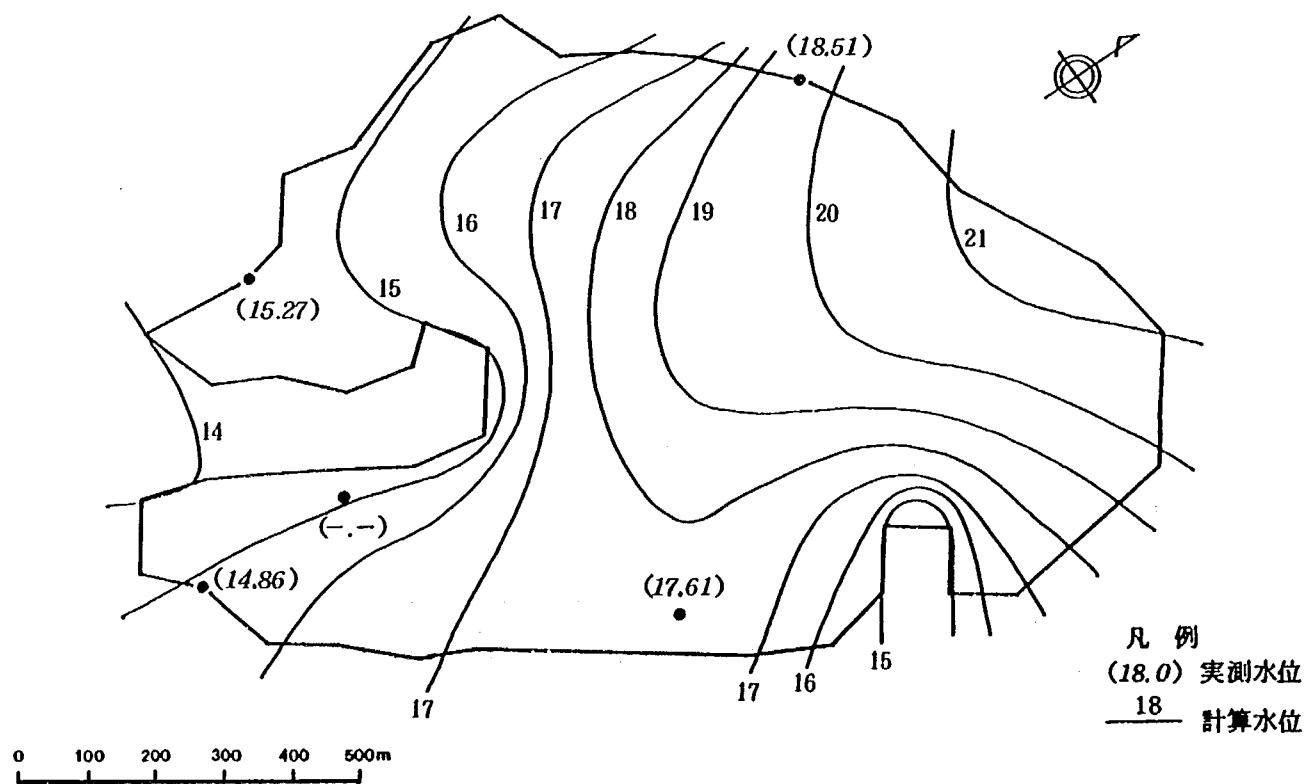
資料 7-3(b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和59年 1月 6日]



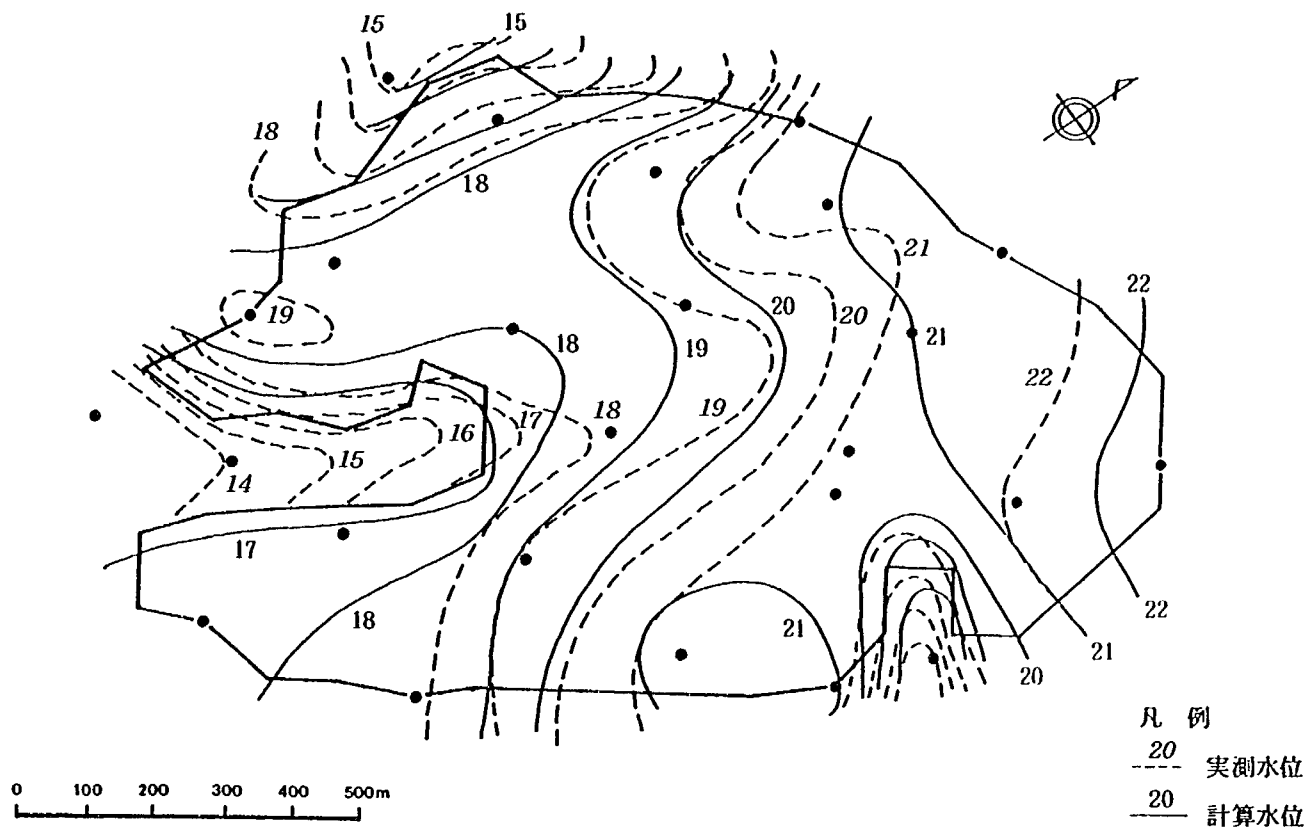
資料7-4(a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和59年2月6日]



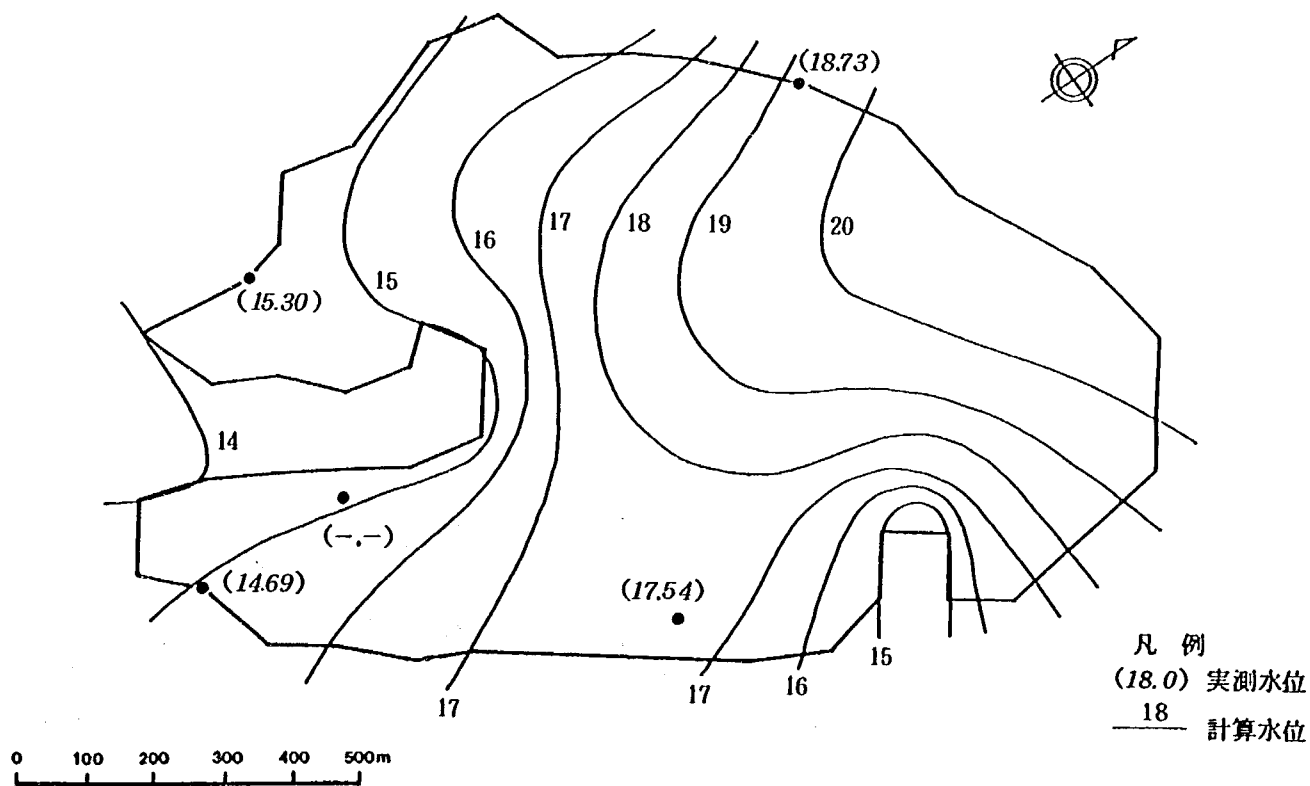
資料7-4(b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和59年2月6日]



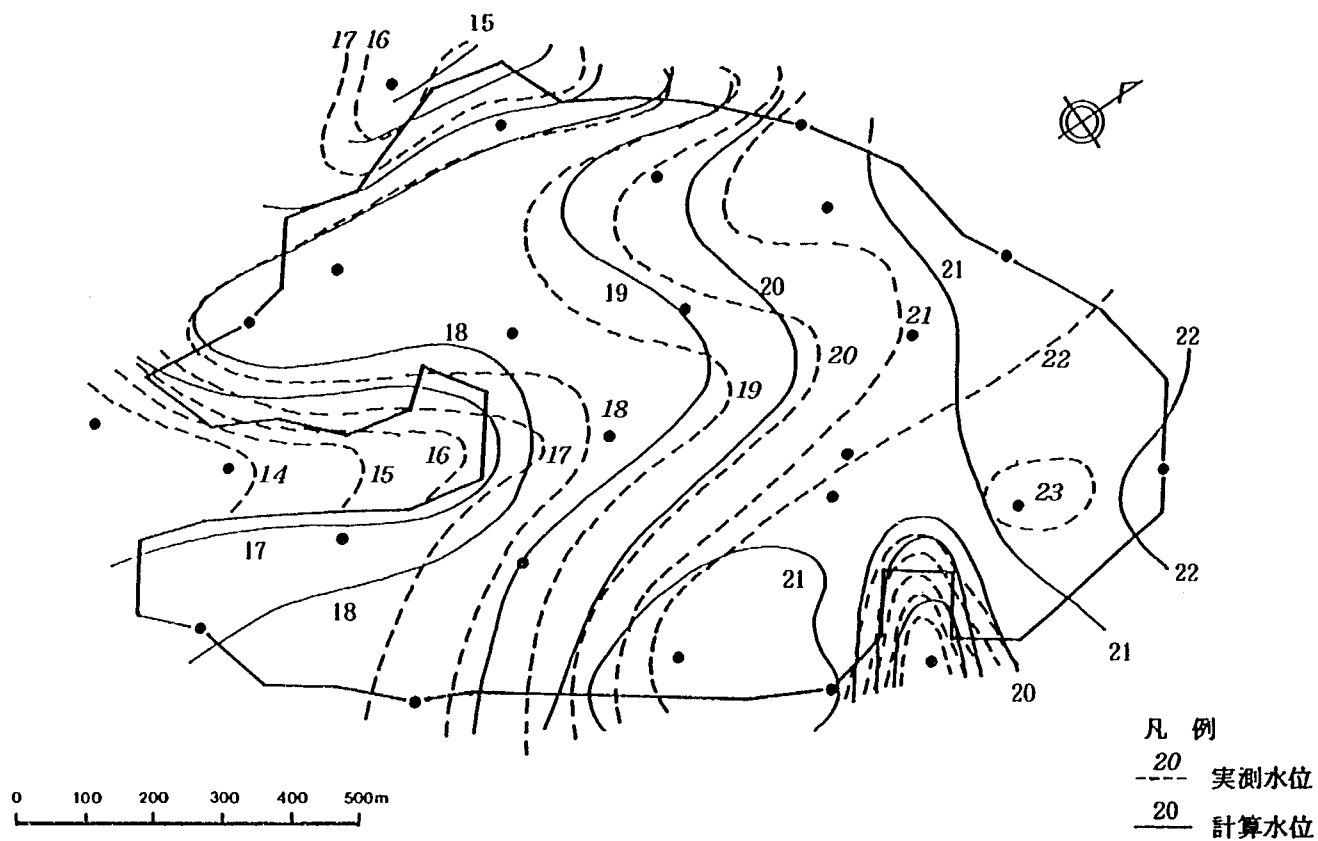
資料7-5(a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和59年3月2日]



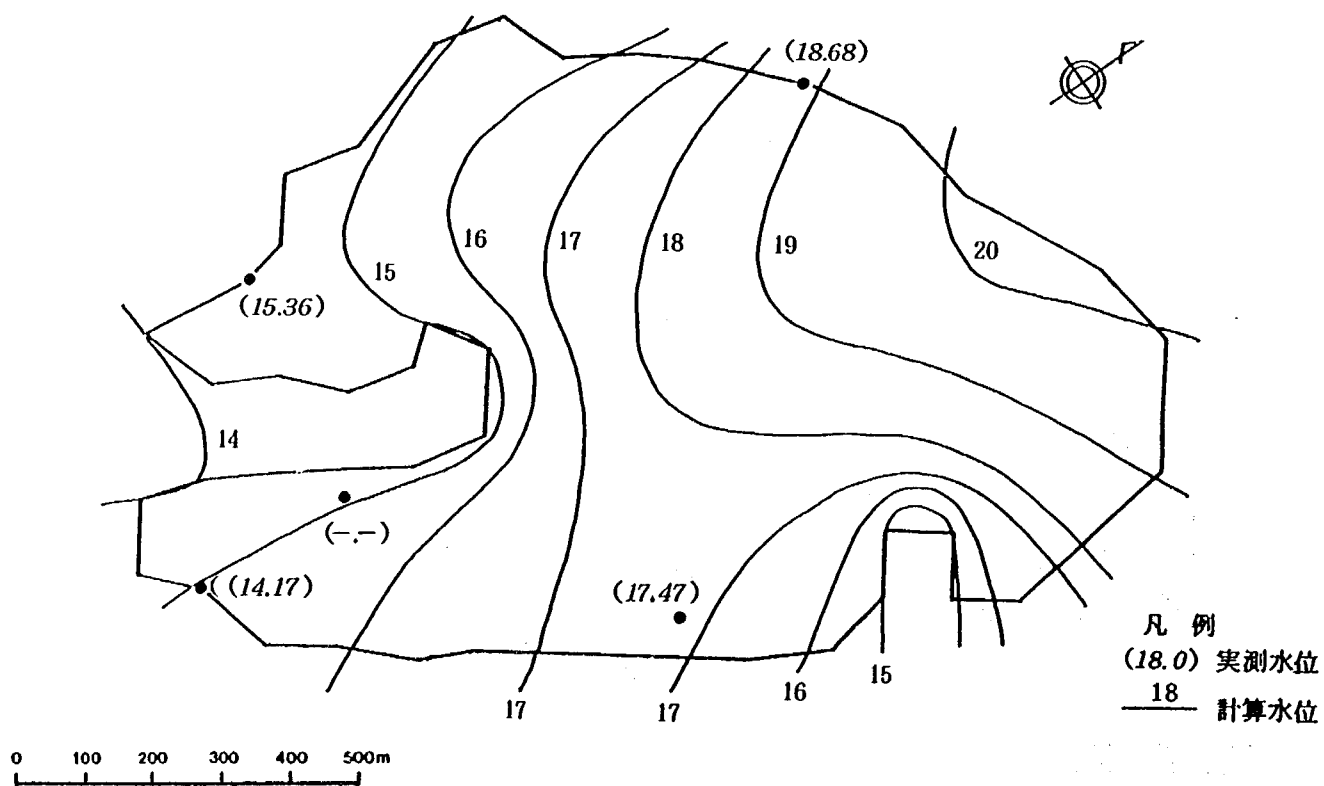
資料7-5(b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和59年3月2日]



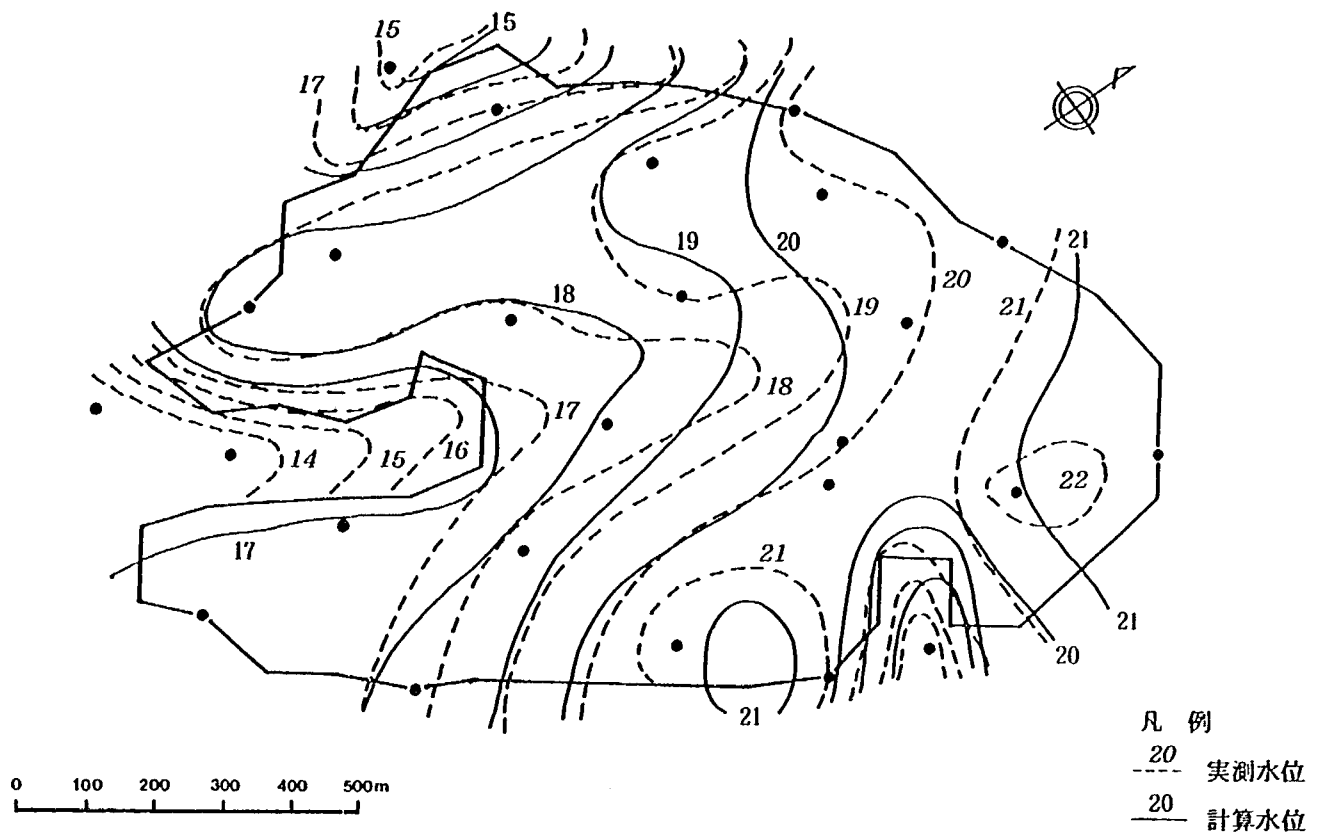
資料 7 - 6 (a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和59年 7 月 9 日]



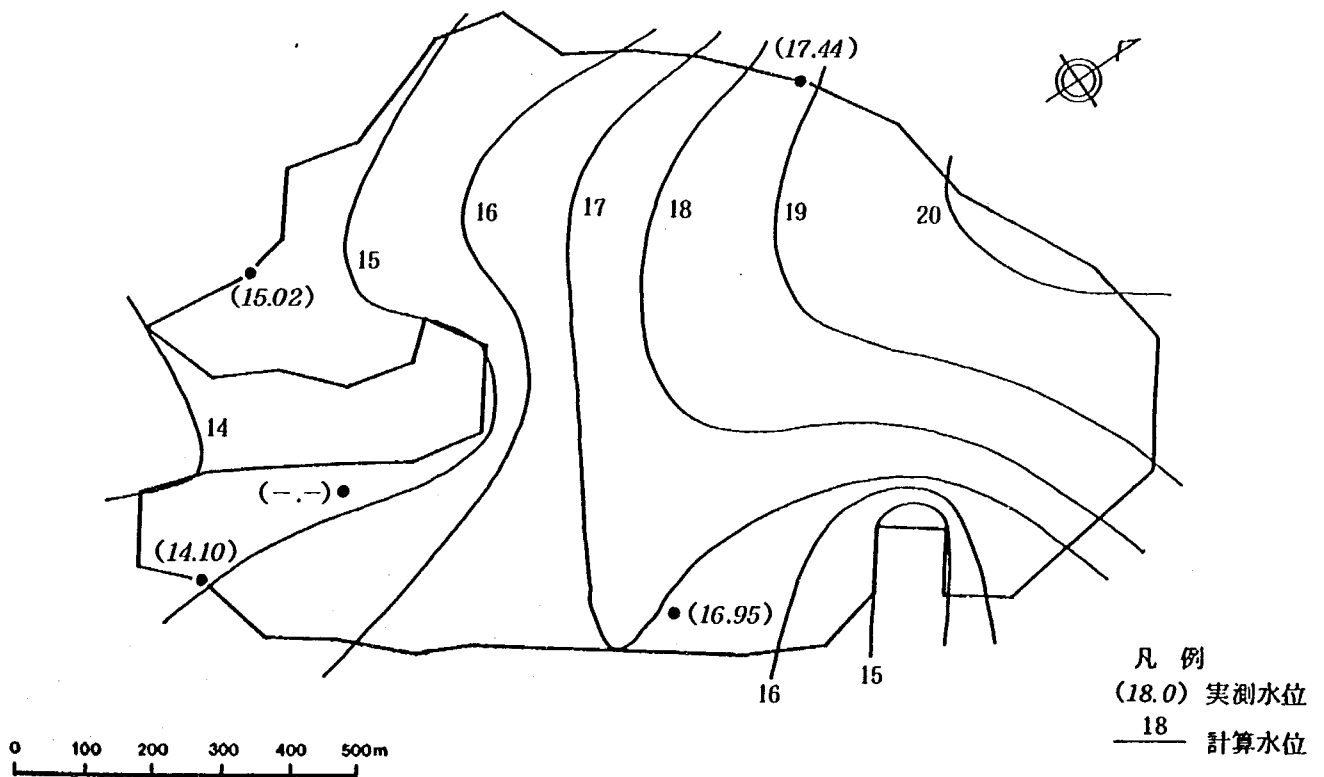
資料 7 - 6 (b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和59年 7 月 9 日]



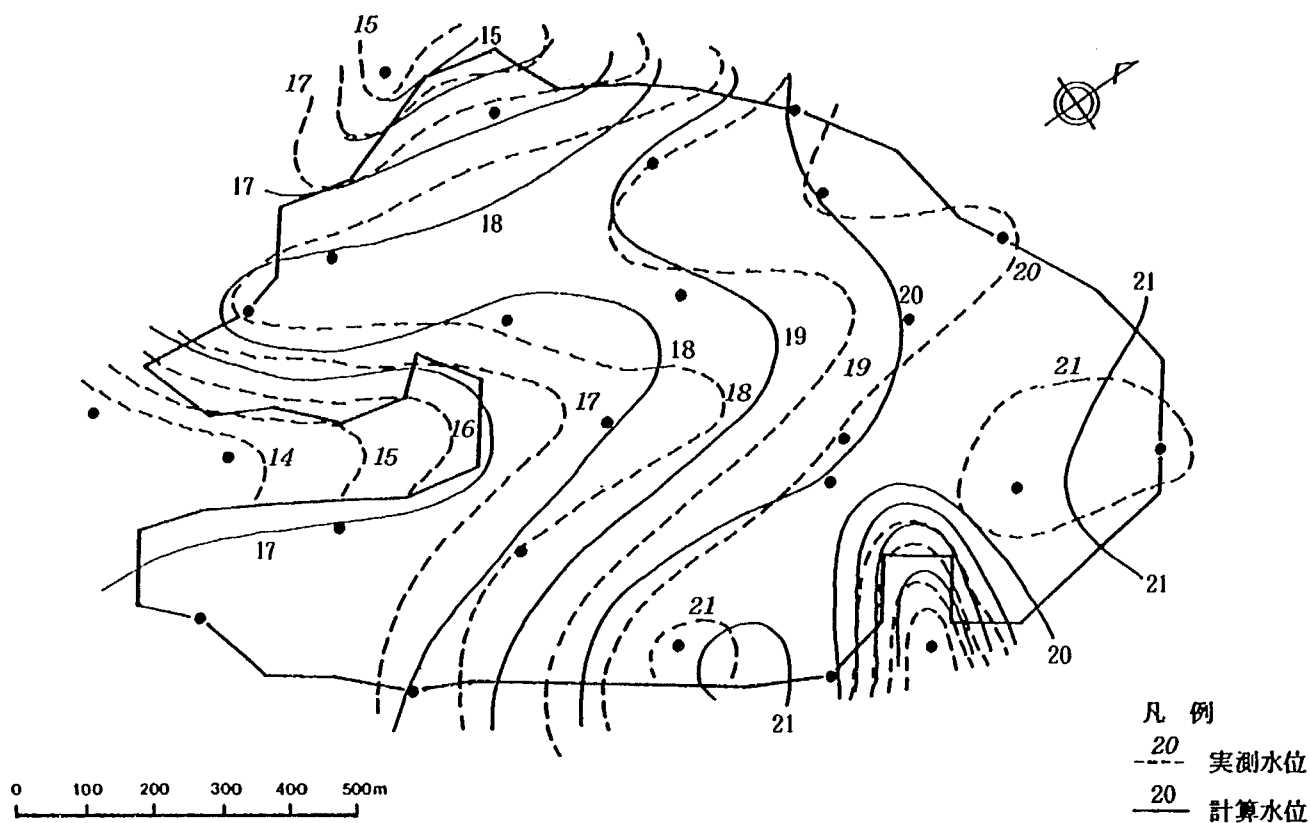
資料7-7(a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和59年10月5日]



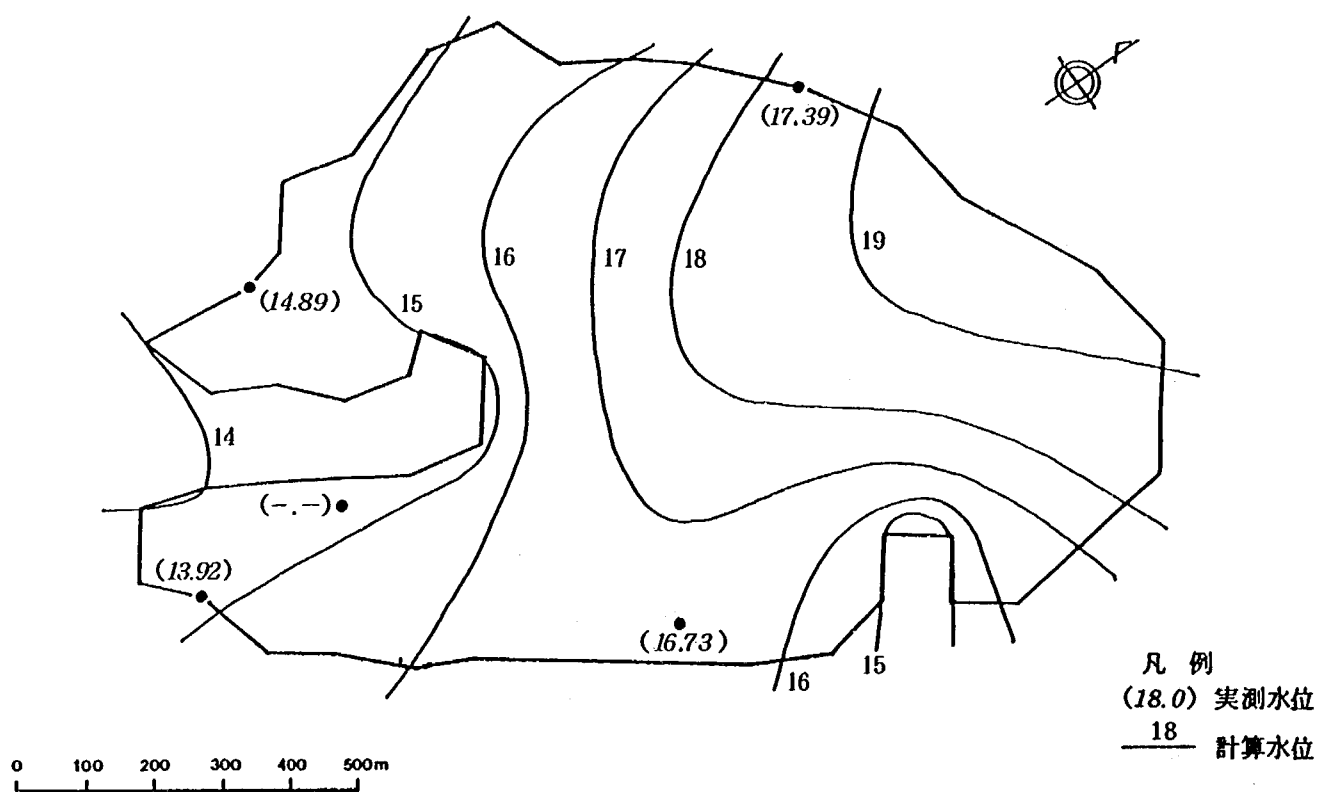
資料7-7(b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和59年10月5日]



資料 7 - 8 (a) 地下水位等高線図 (計算結果)

上部層 [昭和60年 1 月 10 日]



資料 7 - 8 (b) 地下水位等高線図 (計算結果)

下部層 [昭和60年 1 月 10 日]

参 考 文 献

1. 地下水ハンドブック：建設産業調査会
2. 水理公式集：土木学会編
3. 土質試験法：土木学会編
4. 建設省河川砂防技術基準（案）調査，計画編：建設省河川局監修，日本河川協会編／山海堂
5. 谷田部試験地における水文調査報告書，土木研究所資料 第2126号：建設省土木研究所（1985）
6. 筑波研究学園都市工業団地地下水涵養影響調査報告書：茨城県（1985）

谷田部試験地における
水文調査報告書(その2)

ISSN 0386-5878
土研資料第2,368号
昭和61年2月(1986年)
河川部水文研究室

要 旨 筑波研究学園都市の谷田部地区を対象とした水文調査・研究に関する第2報である。試験地の流出解析結果、水収支、地下水変動特性及び、地下水シミュレーション結果についてとりまとめた。

キーワード：試験地調査，谷田部試験地，流出，地下浸透，水文



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい。

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
水文研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2368 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印