

濃尾平野の地下水状態と

地盤沈下に関する研究

佐藤健

Study on Groundwater and Land Subsidence  
in the Nobi Plain

By

Takeshi Sato

Abstract

The Nobi alluvial plain is situated in the central part of Japan and has about 1300 km<sup>2</sup> in area. The results of the leveling survey showed that the ground level of this plain had settled more than 1.4 m during the period from 1961 to 1977 in the severely settled area. This land subsidence is result of lowering of the piezometric levels of groundwater. in the 1st, 2nd, 3rd confined aquifers within the Quaternary sediments due to the withdrawal of groundwater. The purpose of this present paper is to contribute the solution of land subsidence problems in this plain and the following three subjects were mainly considered.

First allowable groundwater levels for preventing land subsidence were studied with one-dimensional finite element models of the Quaternary sediments at several sinking sites. This study showed that the groundwater levels must be recovered to about 10 m below the ground surface to stop the settlement although they had lowered to about 30 m below the ground surface in the severely settled area.

Secondly allowable yield for making the piezometric levels of groundwater recovered to the desirable levels was studied with a three-dimensional finite element model of the Nobi groundwater basin. The author's model covers almost the Nobi plain and contains the compressible Holocene and Pleistocene sediments including three main confined aquifers. This groundwater basin model was calibrated by simulating the groundwater condition during the period of 1961 to 1977. Subsequently to this calibration the predictive simulation is performed for several future withdrawal plans. This simulation shows that the allowable yield of groundwater out of the Nobi plain must be about a half of the withdrawal in 1977.

Thirdly the prediction of land subsidence for several future plans of groundwater withdrawal was studied using the one-dimensional finite element models for consolidation settlement together with the three-dimensional model for groundwater movement. Result of this study indicates that the land subsidence will still continue at the rate of several centimeters per year for about 10 years if the present rate of withdrawal is kept in future.

Key words : Consolidation, Well, Settlement, Ground Water, Computer Applications, Permeability, Pumping Test, Finite Element Method, Control

## 目次

まえがき	1
第1章 緒論	4
1.1 地盤沈下現象の種類	4
1.2 典型公害として指定された地盤沈下現象	7
1.3 各地の地盤沈下とその対策の現状	9
1.3.1 日本各地における現状	9
1.3.2 世界各国の地盤沈下の状況とその対策の現状	14
1.4 まとめ	19
参考文献	21
第2章 濃尾平野地盤沈下に関する従来の調査ならびに研究	26
2.1 概説	26
2.2 濃尾平野の概要	28
2.3 濃尾平野地盤沈下の推移とその原因	33
2.4 濃尾平野地盤沈下に対する観測体制	36
2.5 濃尾平野地盤沈下に関する地質学的研究	39
2.6 濃尾平野の地下水利用調査・地下水質調査と 水文学的調査研究	43
2.7 濃尾平野地盤沈下に関する土質工学的研究	46
2.8 まとめ	48
参考文献	49

第3章 濃尾平野地盤沈下に対する安全地下水頭に関する考察	56
3.1 安全揚水量の概念とその推定方法	56
3.2 濃尾平野地盤沈下に対する安全地下水頭の考え方	58
3.2.1 濃尾平野における安全地下水頭算出の意義	58
3.2.2 地震災害防止からみた安全地下水頭の必要条件	61
3.2.3 安全地下水頭を見出す方法について	63
3.2.4 鉛直一次元圧密解析による安全地下水頭の推定方法	65
3.2.5 有限要素への離散化	69
3.3 濃尾平野地盤沈下地域での適用とその結果	75
3.3.1 地盤のモデル化と土質定数の与え方	75
3.3.2 内挿検定による土質定数選定の方法	78
3.3.3 帯水層の地下水頭条件と粘土層内の初期条件の与え方	82
3.3.4 内挿検定計算結果と実測値との比較	83
3.4 濃尾平野地盤沈下地域の安全地下水頭の算定	88
3.5 結論	92
参考文献	93
第4章 濃尾平野三次元地下水流動モデルについて	98
4.1 概説	98
4.2 広域地下水流動のシミュレーション計算の意義	99
4.3 濃尾地下水盆三次元地下水流動モデル作成の意義	101
4.4 濃尾平野の地下水流動と地盤沈下に関する従来の シミュレーションモデル	104
4.4.1 平面二次元地下水流動モデル	104

4.4.2	鉛直二次元地下水流動モデル	112
4.4.3	準三次元地下水流動モデル	116
4.5	濃尾平野三次元地下水流動モデルの作成	123
4.5.1	濃尾平野三次元地下水流動モデルの考え方	123
4.5.2	有限要素への離散化	126
4.6	結論	137
	参考文献	139
第5章	濃尾沖積平野における適正揚水量の推定	144
5.1	濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルの組み立て	144
5.1.1	濃尾地下水盆における地盤構造のモデル化	144
5.1.2	透水係数, 比貯留量の土質定数の推定	151
5.1.3	内挿検定によるモデル各部の土質定数選定の方法	157
5.1.4	境界条件の設定	162
5.1.5	地下水頭に関する初期条件の与え方	164
5.2	濃尾地下水盆からの揚水量の整理	165
5.2.1	濃尾地下水盆のモデル化と揚水量集計法	165
5.2.2	多層取水井戸における揚水量配分の考え方	169
5.2.3	揚水量集計結果	170
5.3	内挿検定期間におけるモデルと実際との比較	172
5.3.1	地下水頭値におけるシミュレーションと実際との比較	172
5.3.2	地下水流動状況からみたモデルと実際との比較	173
5.3.3	地下水収支からみたモデルと実際との比較	184
5.4	濃尾地下水盆適正揚水量の推定	187

5.5 結論	190
参考文献	193
第6章 濃尾平野地盤沈下の将来予測に関する考察	197
6.1 概説	197
6.2 濃尾平野地盤沈下の将来予測に関する従来の研究	198
6.3 濃尾平野臨海低平地域における地盤沈下の予測方法	201
6.4 内挿検定計算結果と実測値との比較	204
6.5 濃尾平野臨海低平地における地盤沈下の将来予測	207
6.5.1 地盤沈下予測のための将来揚水条件	207
6.5.2 濃尾平野臨海低平地における地盤沈下の予測	207
6.6 結論	212
参考文献	214
第7章 結論	216
あとがき	220
付録1 揚水量集計に用いた国土基準メッシュごとの 帯水層深度	221
付録2 多層取水井における各帯水層取水率に関する考察	231
付録3 濃尾地下水盒モデルの各メッシュからの揚水量	239
付録4 1977年における各用途別揚水量	244
付録5 安全地下水頭推定に用いた鉛直一次元圧密モデルの 計算フローチャート	251

## ま え が き

人間の生活に、水はなくてはならぬものであり、その中で地下水の果たしている役割は非常に大きい。地下水は、河川水や湖沼水にくらべて、水温が一年を通じてそれ程大きく変化せず、水質も飲料用等に適しており、古から我々人間生活とは密接な関係にあった。砂漠の中のオアシス、弘法の水<sup>1)</sup>といわれる地下水はそうした有難い存在を物語る好例である。

しかし、工業など産業の進歩とともに、これら地下水の利用はその激しさを増し、わが国の臨海工業地帯では地盤沈下といった深刻な環境問題を引き起こすにいたっている。井戸掘削技術の進歩、揚水ポンプの改良といった地下水利用のための諸技術の進歩は、より大量の地下水を深層から汲み上げることを可能ならしめた。しかし、無秩序な大量の地下水利用が、一方で、地盤沈下を引き起こし、人間生活の環境を悪化させる結果をもたらしている。

わが国では、地下水の過剰な揚水によって引き起こされた地盤沈下を停止させるために、1956年に「工業用水法」が制定され、地盤沈下地域での揚水規制が行われるようになった。その後、1962年には、「建築物用地下水の採取の規制に関する法律」が制定され、1967年には、「公害対策基本法」が制定され、地盤沈下が典型公害の一つに指定された。

こうした規制にもとづく地盤沈下対策の効果は、近年の地盤沈下の鈍化傾向として徐々に現われ始めている。しかし、1979年現在、なお

日本の平地面積の約1割にあたる8200 km<sup>2</sup>に地盤沈下現象が確認されており<sup>2)</sup>、これら地盤沈下地域では、地盤沈下停止のための揚水規制に加え、地盤沈下した地域では、堤防のかさ上げ等の防災対策が重要な問題になっている。

濃尾平野においても、1959年の伊勢湾台風を契機にして、この平野の地盤沈下が大きな社会問題になっている。本研究は、そのような濃尾平野地盤沈下問題の解決に幾らかでも役に立つことを目的に行ったものである。

この種の地盤沈下問題の解決には、広域地下水問題としての検討が必要である。また、地下水問題の舞台となる地下水盒(地下水貯留ならびに流動の地域的単位を地下水盒という)の特性のために、ケーススタディー的研究となるが、この研究で述べる考え方や方法論は、他の地域の地盤沈下対策でも、ある程度の調査体制がととのえば利用しうるものと考ええる。

本論文の構成は次のようである。すなわち、第1章では濃尾平野地盤沈下問題の特徴を明らかにするために、あらゆる地盤沈下現象を人為的なものと自然的なものに区分し説明するとともに、公害対策基本法に取り上げられている典型公害として眺めた場合のその特徴についても言及した。また、各地の地盤沈下に対する取り組みの状況についてもとりまとめた。第2章では、本論文で対象にした濃尾平野の概要を述べるとともに、濃尾平野地盤沈下に対する各方面からの調査、研究成果をまとめ、それらについての考察を加えた。第3章では、広域地下水の利用と管理のあり方について述べ、濃尾平野地下水管理目標



値としての安全地下水頭値を地盤工学的考察にもとづいて提案した。第4章では、濃尾平野で適正揚水量を探し出すために、筆者が組み立てた三次元地下水流動モデルの考え方とその特徴を述べた。第5章では、第4章で組み立てた三次元地下水流動モデルを用い、第3章の安全地下水頭の管理目標値によって求まる濃尾平野の適正揚水量について述べた。第6章では、地盤沈下対策事業の一つとして重要な堤防の将来の必要かさ上げ量を知るための地盤沈下将来予測について述べた。以上、各章の研究によって得られた成果を第7章でとりまとめた。

### 参 考 文 献

- 1) 山本荘毅：地下水調査法，古今書院，1962。
- 2) 環境庁：昭和54年版環境白書，pp. 270～276，pp. 442～444，昭和54年6月。

# 第1章 緒論

## 1.1 地盤沈下現象の種類

地盤沈下現象は、いろいろな場合に観察され、それら地盤沈下現象を主要因別に整理すると図-1.1のようになる。山本<sup>1)</sup>は、地下から液体、たとえば、地下水、石油などを採取したためにおこる地表の変形を地盤沈下と呼び、地下から固体、たとえば石炭、岩塩、鉱物などを採取したために起こる地表の変形を地盤陥没と呼んで、区別すべ

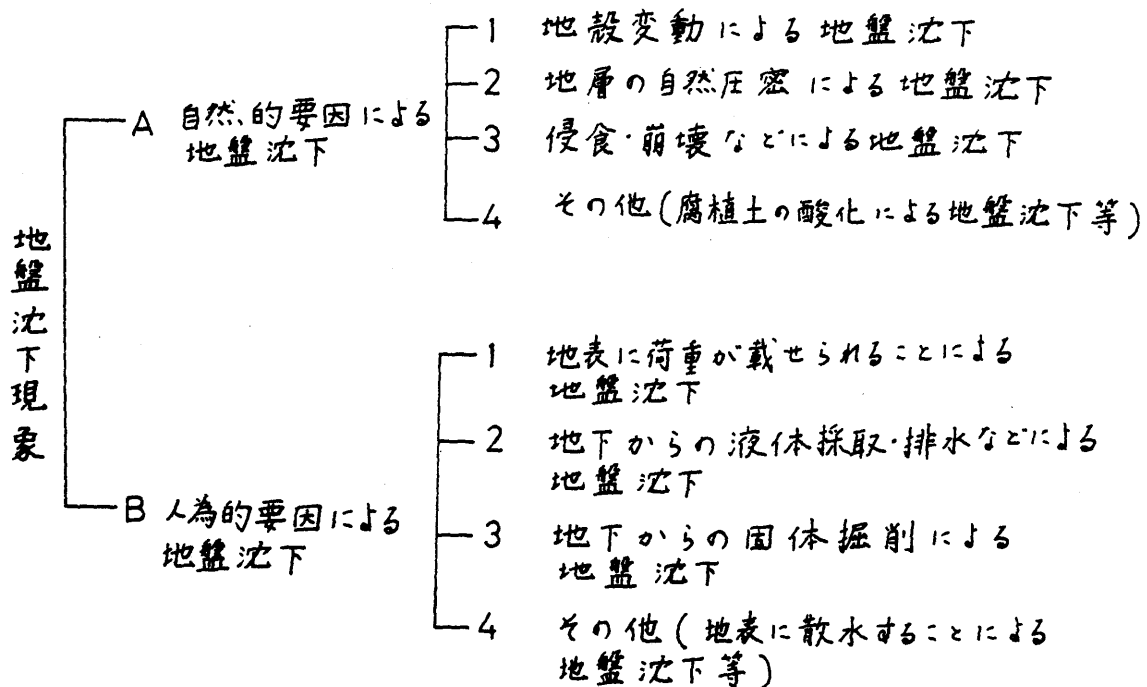


図-1.1 地盤沈下現象の種類

きことを提案している。しかし、土質工学における一つの重要なテーマである盛土等の載荷重によって生ずる沈下現象も地盤沈下現象の一つであり、図-1.1は地表面の低下現象すべてを、一穴、地盤沈下現象と呼ぶことにして、それらを人為的要因によるものと自然的なものに区分して整理したものである。

一般に地殻変動による地盤沈下(図-1.1のA-1)は、非常に小さいと言われている。坪川<sup>2)</sup>によれば、およそ1年に $0.1 \sim 1 \text{ mm}$ 、多田<sup>3)</sup>によれば、1年に $3 \text{ mm}$ 程度、井関<sup>4)</sup>によれば、1年に $1.5 \sim 1.8 \text{ mm}$ と報告されている。

桑原ら<sup>5)</sup>は濃尾傾動地塊運動と呼ばれる地殻変動による地盤沈下量を、濃尾平野地下の各地層の堆積量とその地層堆積面の沈降量、さらにそれら地層の堆積年代とから推定している。そうした方法にもとづいた試算によると、地質年代の新しい地層堆積面の地盤沈下量ほど、地盤沈下速度が速くなっていることが明らかになっている。すなわち、桑原らの試算した地盤沈下量の中には、図-1.1のA-2に分類される地層の自然圧密による地盤沈下量も含まれていることがわかる。堆積年代の若い地層ほど、堆積後の二次圧密速度<sup>6)</sup>は大きく、堆積層の上部の方ほど自然圧密量が多く出るわけである。そうした地層の自然圧密(図-1.1のA-2)の影響により、新しい地層の堆積面ほど沈降速度が速くなっているものと推察される。

A-3に分類される地盤沈下現象の例としては、海岸浸食による地盤沈下や石灰岩質地盤の浸食によって生じるシンクホール<sup>7)</sup>による沈下がよく知られている。

有機質土中の微生物による酸化作用によって地盤沈下の生じることも報告されている<sup>8)</sup>。

次に、人為的要因による地盤沈下現象として、各種建設工事に伴う地盤沈下現象がいろいろと知られている。

盛土築造、建物の設置等、地表に荷重が載せられて生じる地盤沈下現象は、図-1.1のB-1に分類されるが、これら地盤沈下現象は比較的小領域における沈下現象である。

根切り工事に伴う周辺地表面の沈下現象は、地下からの土の掘削(図-1.1のB-3)による地盤沈下現象の1種と考えられ、地下水水位低下工法のため、ティープウエル等からの地下水汲み上げを行った結果生ずる地表面沈下は、B-2の地盤沈下現象とみることができると。

これら建設工事に伴って見られる地盤沈下現象は、現在日本各地で問題になっている広域地盤沈下に比較すれば、局所的現象であり、その対応も局所的な対策で済むものである。

地下からの液体の採取による地盤沈下(図-1.1のB-2)で最も問題になっているものが、地下水、石油の汲み上げによって生じる地盤沈下現象である。日本では、次節(1.2)で述べるように、地下水の汲み上げによる地盤沈下現象が各地域で大きな環境問題となっている。他方、米国ロサンゼルス市内の油田地帯では、1928年の採油開始から1968年までの間に、場所によっては9mも地盤沈下の生じていることが報告<sup>9)</sup>されており、石油採取に伴う地盤沈下が問題となっている。

石炭等、地下鉱物資源の掘削によっても、多くの地域で地盤沈下が

生じている。日本では、北九州等の採炭現場でしばしば問題<sup>1)</sup>となっており、愛知県春日井市の亜炭掘削跡の陥没や東郷町のみばき砂掘削跡の地盤陥没も最近問題になった。これら地下からの固体の掘削によって生じた地下空洞による地盤沈下(図-1.1のB-3)は、地表面の急激な沈下として観察されるが、沈下範囲は局所的である。

オーストラリア国ビクトリア州における露天掘り石炭採掘現場<sup>10)</sup>、南アフリカの金鉱<sup>11)</sup>などでは、作業の安全を確保するために地下水位を低下させて採掘を行っている。そのような地下水位低下によっても広範囲にわたる地盤沈下が生じている。

図-1.1のB-4の例として、地下水を汲み上げるのではなく、水を散水して地盤沈下した例も報告<sup>12)</sup>されている。かんがい用水を水分の不足した地表に散水することによって、ちょうど水締めと同様の圧縮効果が地表付近の地盤に表われて地盤沈下が生じるわけである。

地下に掘られたトンネル内へ、地下水の漏水が生じ、帯水層内の地下水位が低下して地盤沈下を生じた例<sup>13)</sup>も報告されている。

## 1.2 典型公害として指定された地盤沈下現象

1967年、公害対策基本法で地盤沈下が典型七公害の一つに指定された。地盤沈下は、他の6公害(大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、悪臭)と同様に、事業活動など、人間の活動にともなって生活環境に係る被害が生ずる公害として、典型七公害に掲げられたわけである。なお、この場合の地盤沈下は、鉱物採取のための土地掘削を除くとされている(公害対策基本法 第一章 第二条)。

典型公害に指定された地盤沈下現象は、図-1.1のB-2に分類される地盤沈下現象のうちでも、とくに地下水の過剰揚水によって生じる広域地盤沈下を指したものであることが理解できる。

典型公害に指定された地盤沈下公害の特徴を掲げると次のようになりう。

まず第一に、地盤沈下の進行は他の公害に比較すればきわめて緩慢であり、通常の日常生活においては、気付かれることが少ない。こうしたことが、この公害の発見あるいは対策を遅らせる原因となっている。すなわち、毎年1回の水準測量結果の報告、あるいは台風、集中豪雨時の水害を受けるまでは、この地盤沈下公害の深刻さが認識されることは少なく、この公害の早期対策、予防が不十分な現実となっている。1959年の伊勢湾台風による多大の水害によって、濃尾平野地盤沈下問題が、はじめて深刻に認識されるようになったことはその好例である。

第二に、他の6公害は、その原因を除去すれば、時間の長短はあるが、一応、元の好ましい状態に復元することができるのに対し、地盤沈下は復元不可能な公害である。これは、地盤の非可逆的性質にかかわる現象のためである。これら地盤沈下公害の解決には、地盤沈下停止のための揚水規制とともに、すでに地盤沈下を生じた地域ではそれら地域の高潮対策・排水対策など防災対策が重要であるといわれる理由はここにある。

第三に、公害としての地盤沈下の主原因が、他の公害の主原因とは異なって、我々の日常生活、経済活動に必須条件の水利用にかかわっ

ていることである。他の公害の場合には、それら公害の主因をある一定の基準まで規制すれば、一応問題は解決される。地盤沈下公害の解決にも、地下水汲み上げを規制して、地下水揚水量を削減させればよいわけであるが、そのためには削減する地下水に見合うだけの質と量をそなえた代替水を供給することが前提条件になる。

本研究で取り扱う濃尾平野地盤沈下現象は、以上述べたような特徴を有する典型公害に指定された地盤沈下現象であり、図-1.1に分類された地盤沈下現象のうちで、B-2に分類される地下水汲み上げによる広域地盤沈下である。

ただし、濃尾平野地盤沈下現象には、図-1.1でA-1、A-2に分類される地盤沈下現象も含まれている。しかし、それら自然的要因で生じている地盤沈下は、B-2に分類される地下水過剰揚水によって生じる地盤沈下に比してきわめて微量である。したがって、次章以下の濃尾平野地盤沈下現象に関する一連の研究は、B-2に分類される地下水過剰揚水による地盤沈下現象を議論の対象としていることを理解していただきたい。

### 1.3 各地の地盤沈下とその対策の現状

#### 1.3.1 日本各地における現状

現在日本各地で問題となっている地盤沈下は、大部分が地下水の過剰な汲み上げに起因している。新潟<sup>14,15)</sup>、千葉<sup>16)</sup>では、天然ガス採取によって地盤沈下が生じた。それらの地域では、天然ガスを溶解している地下水を汲み上げて、それら地下水中から水溶性天然ガスを分

離して採取してきたのであるが、その際の地下水汲み上げが地盤沈下の原因であったと考えることができる。

昭和54年版環境白書<sup>17)</sup>に掲載された日本各地の地盤沈下地域を図-1.2に、各地盤沈下地域の沈下状況を表-1.1に示した。それによると、日本の地盤沈下地域は、34都道府県58地域にも達し、日本の平地面積(約86700km<sup>2</sup>)の約1割にあたる8200km<sup>2</sup>に沈下現象が認められたことが明らかになっている。

(1) 関東平野南部における現状<sup>16, 18~20)</sup>

東京都内における地盤沈下は1923年関東大地震直後の水準測量結

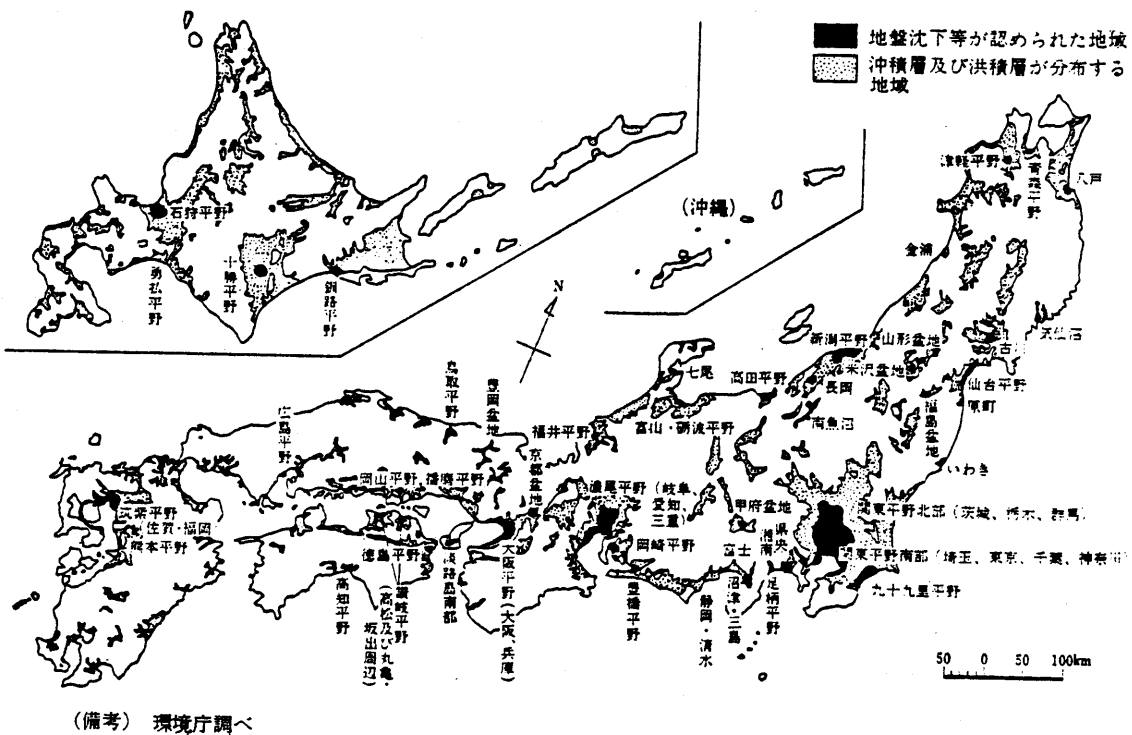


図-1.2 日本の地盤沈下地域<sup>17)</sup>



表-1.1 日本各地の地盤沈下の状況<sup>1)</sup>(図-1.2参照)

都道府県	地 域	地盤沈下等の状況			
		地盤沈下が認められた地域の面積 (km <sup>2</sup> )	ゼロメートル地帯面積 (km <sup>2</sup> )	地域内での水準点の累計沈下量の最大値 (cm) ( ): 測量期間	最近の測量による水準点の年間沈下量の最大値 (cm) ( ): 測量の年度又は期間末
北海道	石狩平野	150		(S48~52) 19	(S52) 3.3
"	釧路平野	—		—	—
"	十勝平野	—		(S28~44) 10	(S28~44)平均 0.6
"	男払平野	—		—	—
青森	青森平野	65	3	(S33~52) 45	(S52) 2.0
"	津軽平野	—		(S43~50) 10	(S43~50)平均 1.4
"	八戸	10		(S50~52) 5注1)	(S52) 2.2
宮城	気仙沼	5		(S41~52) 4	(S52) 1.6
"	古川	10		(S41~52) 9	(S52) 2.2
"	仙台平野	290		(S41~52) 51	(S52) 5.5
秋田	金 浦	10		(S31~52) 97	(S52) 4.2
山形	山形盆地	50		(S49~52) 23	(S52) 6.6
"	米沢盆地	5		(S49~52) 3	(S52) 1.7
福島	福島盆地	—		(S29~49) 11	(S42~49)平均 0.9
"	原 町	25		(S30~52) 157	(S52) 2.9
"	いわき	—		(S28~48) 17	(S42~48)平均 1.5
茨城	関東平野北部	90		(S48~52) 21	(S52) 7.2
栃木	"	—		(S42~52) 16	(S52) 2.7
群馬	"	—		(S50~52) 3	(S52) 1.2
千葉	九十九里平野	565	9	(S43~52) 62	(S52) 4.4
"	関東平野南部	930	15	(S37~52) 197	(S52) 5.9
埼玉	"	1,585	16	(S35~52) 149	(S52) 9.8

都道府県	地 域	地盤沈下等の状況			
		地盤沈下が認められた地域の面積 (km <sup>2</sup> )	ゼロメートル地帯面積 (km <sup>2</sup> )	地域内での水準点の累計沈下量の最大値 (cm) ( ): 測量期間	最近の測量による水準点の年間沈下量の最大値 (cm) ( ): 測量の年度又は期間末
東京	関東平野南部	710	124	(T7~S52) 459	(S52) 4.3
神奈川	"	195	6	(S 6~52) 141	(S52) 6.1
"	泉 央 湖 南	130		(S42~52) 35	(S52) 3.2
"	足柄平野	—		—	—
新潟	新潟平野	430	142以上	(S32~52) 264	(S52) 1.2
"	長 岡	20		(S40~52) 21	(S52) 2.7
"	高田平野(上越)	225		(S42~52) 21	(S52) 4.2
"	南 魚 沼	75		(S50~52) 8	(S52) 6.7
富 山	富山・朝波平野	—		(S48~52) 2	(S49~52)平均 0.6
石 川	七 尾	15		(S47~52) 10	(S52) 6.7
福 井	福井平野	15		(S50~52) 4注2)	(S52) 3.1
山 梨	甲府盆地	60		(S25~52) 26	(S52) 6.5
静 岡	沼津・三島	—		(S42~51) 9	(S47~51)平均 0.5
"	富 士(静岡)	—		—	—
"	静岡・清水	—		—	—
愛 知	豊 岡 平 野	—	27	(S28~52) 7	(S52) 0.4
"	岡 崎 平 野	45	62	(S28~52) 41	(S52) 2.3
岐 阜	濃 尾 平 野	350	60	(S47~52) 10	(S52) 1.5
愛 知	"	735	255	(S37~52) 136	(S52) 7.3
三 重	"	120	55	(S35~52) 153	(S52) 5.3
京 都	京 都 盆 地	125		(S48~51) 9	(S47~51)平均 1.9
大 阪	大 阪 平 野	635	55	(S10~52) 286	(S52) 6.5
兵 庫	"	100	16	(S 7~52) 275	(S52) 2.5

都道府県	地 域	地盤沈下等の状況			
		地盤沈下が認められた地域の面積 (km <sup>2</sup> )	ゼロメートル地帯面積 (km <sup>2</sup> )	地域内での水準点の累計沈下量の最大値 (cm) ( ): 測量期間	最近の測量による水準点の年間沈下量の最大値 (cm) ( ): 測量の年度又は期間末
兵 庫	豊 岡 盆 地	—		(S26~46) 19	(S40~46)平均 1.0
"	播 磨 平 野	—		(S21~39) 60	—
"	淡 路 島 南 部	—		(S39~45) 5	(S39~45)平均 0.9
鳥 取	鳥 取 平 野	10		(S24~52) 48	(S52) 3.9
岡 山	岡 山 平 野	—		(S43~52) 10	(S52) 0.5
広 島	広 島 平 野	85	9	(S40~48) 20	(S45~48)平均 4.1
徳 島	徳 島 平 野	—		(S40~46) 11	(S40~46) 1.8
香 川	廣 敷 平 野 (高松周辺)	—		(S39~45) 2	(S39~45) 0.4
"	廣 敷 平 野 (丸亀・栗田周辺)	—		(S39~45) 10	(S39~45) 1.7
高 知	高 知 平 野	25	10	(S48~52) 11	(S52) 2.0
福 岡	筑 紫 平 野	—	46	(S32~52) 12	(S52) 5.9
佐 賀	"	300	207	(S32~52) 87	(S52) 5.9
鹿 本	熊 本 平 野	—		(S44~51) 5	(S44~51)平均 0.6
計		8,195	1,118		

※ 毎年測量が実施されていない場合は測量が実施された期間の平均の年間沈下量で表示する。なお「最近の測量」として表示した年度以降の測量資料はない。  
 注1) 別の地点 (J6960:八戸市大字長苗代内) では 8 cm (S41~49)。  
 注2) 別の地点 (906:福井市下尾井町) では 84 cm (S23~52)  
 (備考) 1. 環境庁調べ。52年度までの状況を調査の上、53年11月に発表したもの。  
 なお、沈下量等の基礎資料は国土地理院による一等水準路線の検測、地方公共団体による地盤沈下監視測定のための水準測量(うち一部は環境庁補助事業)等による。  
 2. ゼロメートル地帯とは、平均潮位未満以下の地域の面積をいう。  
 3. 累計沈下量、年間沈下量とも「—」とした地域については、最近の数年間について測量結果等からは特に沈下は生じていない。

果により、江東地区ですでに確認されており、他の地域よりもかなり以前から地盤沈下は進行していたと言われている。これら地域の地盤沈下は地下水の過剰な汲み上げに起因していることが明らかとなり、東京都23区、隣接の各県では1966年以来、数次にわたる揚水規制が行われてきた。その結果、近年、これら地域の地盤沈下は鈍化傾向を示すようになりつつある。

しかし、東京都西部の多摩地域では1975年に80万ト/日（1964年の2倍以上）の地下水汲み上げがなお続いており、この地域の地下水利用をどのように地表水へ転換させるかが、水源不足もあって、現在重要な問題となっている。

#### (2) 大阪平野における現状<sup>21)</sup>

大阪市では、1962年の工業用水法改正、ビル用水法の制定を契機に、工業用地下水は市営工業用水道に、ビル用地下水はクーリングタワー方式に転換を進め、地下水汲み上げ量の削減を進めてきた。その結果、近年の地下水状態は戦前の状態（G.L. -10m程度の地下水頭）にまで回復し、1960年代の年間20cmという激しい地盤沈下も最近ではほとんど停止している。

しかし、大阪市の周辺（たとえば、東大阪市、泉大津市）の地盤沈下はなお進行中であり問題となっている。また、揚水規制による地下水位の上昇をどこまで生じさせるかの問題も新たに提起されており、地下水管理と地下水適正利用の好ましいあり方について模索されつつある段階である。

### (3) 新潟平野における現状<sup>14, 15)</sup>

新潟平野における地盤沈下現象も、東京、大阪における地盤沈下と同様に比較的早い時期(1950年頃)から取り上げられてきた。地盤沈下が問題となり始めた当初は、地盤沈下の原因としていくつかの説も出されたが、1959年、科学技術庁資源調査会の調査検討によって、新潟平野臨海部の地盤沈下は、地下水(天然ガスを含む)の急激な大量揚水が主因となっていることが明らかにされた。これら地盤沈下を停止させるため、鉱業用ガス井については1959年から1968年の間に5回にわたりガス揚水量の規制あるいは揚水禁止が行われ、さらに、1973年にはガスとともに揚水された地下水は、すべて地下へ還元する方式でなければ揚水できないような規制が施行された。その結果、各帯水層ともかなりの地下水頭上昇が実測され、地盤沈下も1960年頃の危機的状況は回避されつつある。

近年のエネルギー危機とともに、天然ガス再開産の声もでてきており、こうした資源の利用と地盤沈下防止の両立の検討が、防潮堤の新設・改修、排水施設の増強等の地盤沈下対策と同様に重要な問題となりつつある。

### (4) その他

東北(青森平野)、北陸(新潟県南魚沼、高田平野、長岡)では、冬季消雪用に大量の地下水が揚水されている<sup>1)</sup>。表-1.1からもわかるように、昭和52年度には、青森平野2cm、南魚沼6.7cm、高田平野4.2cm、長岡2.7cmの地盤沈下を生じている。そこで、これら地域では、条例によって地下水採取を許可制(南魚沼、高田平野)としたり、

消雪用地下水採取を禁止（青森平野）したりして、厳しい揚水規制による地盤沈下対策を実施しつつある。

### 1.3.2 世界各国の地盤沈下の状況とその対策の現状

北アメリカ西海岸域の地盤沈下現象は、石油や地下水の汲み上げによって生じており、ここに1例として、サンフランシスコに近い、サンホセ<sup>22)</sup>における地盤沈下の例を紹介する。この地域では、1916年から1966年の間に地下水汲み上げが6000万ト/年から2億3000万ト/年と飛躍的に増加し、観測井における被圧地下水頭が58mも低下した。その結果、観測井付近に設置された水準点は1916年から1966年までに3.8mも沈下し、サンフランシスコ湾に面する44km<sup>2</sup>が大潮時に海水面下となることが判明した。そこで、これら低平地域における高潮堤のかさ上げに加えて、地盤沈下の進行を停止させるため、地下水から地表水への水源転換を1967年頃から積極的に促進している。

まず第1に、シェラネバダ山脈、セントラル峡谷に代替水源を求め、1965年当時3700万ト/年だった地表水の導入を、1975年には1億8300万ト/年と約5倍に増加させ、地下水から地表水への水利用の転換を計った。なお、地下水から地表水に転換させるに際して、サンホセでは地下水利用者に地表水利用者に見合うような税金を課して、地下水利用量の削減を促進している。

また、1965年からは、用水路、貯水池を使用して地下水涵養も積極的に行っており、年平均5100万ト/年の地表水を地下水帯へ涵養することに成功している。

このように、サンホセでは地表水への水源の転換によって、1970～1975年の揚水量をピーク時(1960～1965年)の揚水量の約4割にまで削減した。その結果、1970年以降は観測井の地下水頭は急激に上昇し、1975年には1920年代の地下水頭状態まで回復している。そうした地下水頭の上昇とともに、水準点の沈下状況も1970年以降は鈍化傾向を示しており、1975年には地盤沈下をほぼ停止させることに成功した。

油田地域における地盤沈下対策では、一般に、高潮堤かさ上げ、排水ポンプの増強による洪水防止対策<sup>23)</sup>と帯油層への地下水還流<sup>24)</sup>が行われている。

ロサンゼルス市内のウィルミントン油田地域<sup>24)</sup>では、1928年頃から採油が始まり、1968年までに9mもの地盤沈下が生じた。そこで、これら地盤沈下を防止するためこの油田では石油とともに採取された地下水を帯油砂層に圧入する方法を採用し、石油の採取を継続している。

1975年1年間のウィルミントン油田からの採油量は1050万 $m^3$ で、同時に地下水も6710万 $m^3$ 採取した。石油とともに採取された地下水も含めて、1975年1年間に8870万 $m^3$ の地下水が帯油砂層に還流された。帯油砂層から採取された地下水(6710万 $m^3$ )に加えた注入水の21605万 $m^3$ は、帯油砂層中の地下水とその成分が似ている他の帯水層の地下水を注入した。しかし、詳細な水質分析を行ったところ、帯油砂層中の地下水と水質に若干の相異がみられ、注入井戸に目づまりを生じ、地下水注入が不可能となる場合もあったことが指摘されている。同様の注入井の目づまりについては、他の著者<sup>25)</sup>も指摘しており、これら油田地域

における地盤沈下防止のための地下水注入に関しては、なお問題点が残されている。

スウェーデンのストックホルム<sup>26)</sup>で問題になっている地盤沈下現象は、他の地域とはいく分異なった事情のものである。ストックホルム市街には、古くから上・下水道用のトンネルが地下深い岩盤中に多数掘削されており、岩盤中の割れ目を通じて帯水層中の地下水がこれらトンネル内へ漏水して、年間20~40 cmの地盤沈下を生じている。その結果、地表構造物あるいはそれを支える杭に多大の被害も生じており、各種地盤沈下対策が行われている。

エーテボリでは、トンネルのグラウトをし直し、トンネルへの漏水量をトンネル1 km 当り毎秒0.2 l (スウェーデンのトンネル施工規準では、トンネル1 km 当り毎秒1 l 以内とされている)まで減少させて地盤沈下防止対策を行っている。さらに、岩盤中に掘削されたトンネルから帯水層に向けてボーリング孔を掘り、トンネル全体に圧力をかけて、これらボーリング孔から帯水層へ地下水を注入する試みも行っている<sup>27)</sup>。

ストックホルムに近いある町(原著26)では Botkyrka と記されている)では、毎秒3 l の注水能力を有する直径5 cm の鋼製管によって、その付近1 km<sup>2</sup> にわたる地下水状態の制御、管理を行っている。しかし、注水管の目づまりによって注入効率が低下し、帯水層の地下水頭低下を食い止めることが困難となる場合もあることが指摘<sup>26)</sup>されている。

イタリアのベネチアは、もともと地盤が低く、その上、過剰揚水による地盤沈下によって、洪水の回数も年々増加してきており、比較的早い時期から地盤沈下に対する取り組みが開始されていた。1969年には、これら地盤沈下問題解決のための研究グループも設立され、これら研究グループの人達<sup>28~30)</sup>によって、ベネチアの地盤沈下予測のための広域地下水流動モデルによる研究が報告されている。この研究に用いられたモデルは、ベネチア付近の地下水流動を軸対称流と仮定して組み立てた簡単なものではあったが、揚水量に対する応答値として、帯水層の地下水頭と地盤沈下量の予測が行えることを述べている。

ベネチアでは、これら研究グループによる計算の結果も参考にして、1975年シラー川からの工業用水道敷設を行い、工業用地下水汲み上げ量をピーク時の約4割まで削減させることに成功している。その結果、現在ではベネチアの地下水状態は良好な状態に回復しつつあり、それに呼応して地盤沈下もほぼ停止するに至っている。

ベネチアは歴史的都市であり、ベネチアの地盤沈下問題解決には、イタリア以外の世界各国の研究者<sup>31~33)</sup>も積極的に協力している。ベネチア地盤沈下の最近の状況やベネチア地盤沈下問題解決のために行われた諸作業の内容等に関しては、文献<sup>28~35)</sup>に詳しく述べられており、濃尾平野との研究現況を比較した報告<sup>36)</sup>もある。

地盤沈下現象が顕著となりつつある地域として、タイのバンコク<sup>37,38)</sup>がある。家庭用、工業用の水の供給が地表水だけでは不十分なため、1957年頃から地下水の汲み上げが始まり、1975年にはバンコク市だけで約70万トンの地下水が利用されている。そうした揚水量の増加を反

映して、バンコク市内の地下水位は1958年当時には地表面下8~9mの位置にあったものが、最近では地表面下30mまで低下している。こうした帯水層の地下水頭低下によって、市南部では地下水の塩水化が生じつつある。しかし、全域的な水準測量は行われておらず、バンコクにおける地盤沈下がどれくらい進行しているかは不明とされている。

バンコク市では、ほとんどが150m以上の深井戸から地下水汲み上げが行われており、一部の地質学者、水文学者はこれら深層部からの地下水汲み上げは地盤沈下に影響しないと主張している。しかし、アジア工科大学の研究者を中心に、バンコク地盤沈下研究グループも組織され、バンコク市域の水準測量、各種地下水調査等が4か年計画で実施され、この地域の地盤沈下の真相が究明されつつある。

中国、上海市における地盤沈下対策<sup>39,40)</sup>は、地盤沈下対策の例として興味深い。上海における地下水採取は100年以上も続いており、主に夏の冷却用に使用されていた。したがって、地下水の大量揚水は、夏季の5~9月に集中し、この時期に地下水位が低下し、地盤沈下量の大きいことが、地盤沈下観測井により明らかにされた。そこで、上海市では地盤沈下停止と地下水の効果的利用を目的として次のような対策を行っている。

上海の気温は、夏、冬の温度差が著しいのに対し、地下水温の変化は少なく、地下水の流動はきわめて緩慢である。そこで、上海市内の100以上の工場を、その工場の地下水利用目的に沿って、「水を冬入れて夏に使う」工場群と「水を夏入れて冬に使う」工場群に分けた。そして、前者の工場群では、11月から翌年の4月まで温度の低い水道



水を深井戸を通して帯水層へ還流・貯蔵し、夏に冷たい地下水を冷却用に使い、後者の工場群は、夏期に温度の高い水道水を深井戸を通して帯水層（先述の冷たい水を貯蔵する帯水層とは異なる帯水層）へ還流・貯蔵し、冬に水温の高い地下水を汲み上げて、冬の工場の暖房やボイラー用水に使用している。

#### 1.4 まとめ

本章では、まず、各種の地盤沈下現象を人為的なものと自然的なものに区分し、それぞれをさらに分類整理して述べるとともに、その中で公害対策基本法で典型公害の一つに指定された地盤沈下の特徴を述べ、本研究で対象にする濃尾平野地盤沈下現象の位置づけを行った。

また、既発表の論文、報文にもとづいて、各国・各地の地盤沈下の状況とそれに対する取り組みの実態について述べた。各地の地盤沈下問題には、それぞれの地域の特殊性があって、濃尾平野の沈下問題と同一視できない条件が、いろいろとからんではいるが、各地の地盤沈下に対する取り組みの努力と試みには、次章から述べる濃尾平野の地盤沈下対策を考えてゆく上で参考になることからいろいろと含まれている。

近年、地下水公水論、地下水課徴金制度などの意見も出されるようになってきている<sup>4)</sup>。

現在わが国では民法上、地下水は土地所有者に属するものとして私権になっているが、地下水公水論とは、これを河川水と同様に公水として管理しようとする考え方である。地盤沈下を停止、予防するための地下水規制を行う場合には、公水として地下水を管理した方が好ま

しいわけではあるが、法律上の問題もあってなお議論されている段階である。

米国サンホゼ<sup>22)</sup>では、地盤沈下停止のために地下水の利用を地表水に転換させるときに、地下水利用者に地表水に見合うだけの課徴金を課して、地盤沈下停止に成功した。わが国で検討されている地下水の課徴金制度は、そうした地下水の採取を規制する手段のひとつとしてばかりではなく、代替水供給施設の整備事業、地盤沈下地域における防災事業の財源とすること等も目的として、この考えが提案されている。

地盤沈下対策として、各種地下水涵養法によって地盤沈下防止、停止の効果を上げる努力もなされている。しかし、注入井の目づまり等によって地下水涵養が困難となる場合の生じることも明らかにされており、なお解決されなければならない点が残されている。

## 参考文献

- 1) 山本荘毅：日本の地盤沈下，土と基礎，vol. 25, No. 6, pp. 13~19, 1977.
- 2) 坪川家恒：測地学的に検出される地殻運動，第四紀研究，vol. 7, No. 4, pp. 151~156, 1968.
- 3) 多田文男：わが国におけるネオテクトニクス研究とその応用面，第四紀研究，vol. 7, No. 4, pp. 137~139, 1968.
- 4) 井関弘太郎：先史時代・歴史時代の地殻変動，第四紀研究，vol. 7, No. 4, pp. 127~131, 1968.
- 5) 桑原徹，植下協，板橋一雄：濃尾平野の地盤沈下とその解析，土と基礎，vol. 24, No. 12, pp. 29~34, 1976.
- 6) L. Bjerrum : Embankments on Soft Ground, Proc. A.S.C.E. Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Vol.2, pp.1-54, 1972.
- 7) I.G. Newton : Induced Sinkholes-A Continuing Problems along Alabama Highway, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.453-463, 1976.
- 8) J.B. Fairchild and K.h. Wiebe : Subsidence of Organic Soils and Salinity Barrier Design in Coastal Orange County, California, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.334-346, 1976.
- 9) G.L. Gates, W.H. Caraway and H.J. Lechtenberg : Problems in Injection of Waters in Wilmington Oil Field, California, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.319-324, 1976.

- 10 ) C.S. Gloe : Land Subsidence Related to Brown Coal Open Cut Operations Latrobe Valley, Victoria, Australia, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.399-407, 1976.
- 11 ) J.F. Enslin : Artificial Recharge of Dolomitic Ground-water Compartments in the Far West Rand Gold Fields of South Africa, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.495-506, 1976.
- 12 ) B.E. Lofgren : Hydrogeologic Effects of Subsidence, San Joaquin Valley, California, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.113-123, 1976.
- 13 ) たといは” L. Rozsa : Surface Settlement above Underground Tubes and Stations in bad Soil, Int. Tunnel Symp. '78, pp.B-3-7-1~B-3-7-7, 1978.
- 14 ) S. Aoki : Land Subsidence in Niigata, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.105-112, 1976.
- 15) 青木 滋 : 新潟平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 21 ~ 28, 1977.
- 16) 石井 皓 : 関東平野(その2)千葉の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 37 ~ 43, 1977.
- 17) 環境庁 : 昭和54年版 環境自書, pp. 270 ~ 276, pp. 442 - 444, 昭和54年6月.
- 18 ) M. Ishii, F. Kuramochi and T. Endo : Recent Tendencies of the Land Subsidence in Tokyo, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.25-34, 1976.

- 19) 石井 求 : 関東平野(その1)東京の地盤沈下, 土と基礎,  
Vol. 25, No. 6, pp. 29~36, 1977.
- 20) 片山雅之 : 関東平野(その3)横浜の地盤沈下, 土と基礎,  
Vol. 25, No. 6, pp. 45~51, 1977.
- 21) 中町弘伸 : 大阪平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 61  
- 67, 1977.
- 22) J.F. Poland : Land Subsidence stopped by Artesian-Head  
Recovery, Santa Clara Valley, Proc. 2nd Int. Symp. on  
Land Subsidence, pp.124-132, 1976.
- 23) O. Nunez and D. Escojdo : Subsidence in the Boliver Coast,  
Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.259-266, 1976.
- 24) G.L. Gates, W.H. Caraway and H.J. Lechtenberg : Problems  
in Injection of Waters in Wilmington Oil Field, Califor-  
nia, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.319-324,  
1976.
- 25) J.A. Rancilo : Injection Well Operation and Maintenance,  
Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.325-333, 1976.
- 26) B.B. Broms, A. Fredriksson and L. Carlsson : Land Subsidence  
in Sweden due to Water-Leakage into Deep-Lying Tunnels  
and its Effects on Pile Supported Structures, Proc. 2nd  
Int. Symp. on Land Subsidence, pp.375-387, 1976.

- 27) L. Andresson, G. Svensson and P. Svensson : Geohydrological Activities in Urban Areas for Environmental Control, Proc. Specialty Session on Geotechnical Engineering and Environmental Control, 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation engineering, pp.1-16, 1977.
- 28) G. Gambolati and R.A. Freeze : Mathematical Simulation of the Subsidence of Venice 1. Theory, Water Resources Research, Vol.9, No.3, pp.721-733, 1973.
- 29) G. Gambolati, P. Gatto and R.A. Freeze : Mathematical Simulation of the Subsidence of Venice 2. Results, Water Resources Research, Vol.10, No.3, pp.563-577, 1974.
- 30) L. Carbognin, G. Gambolati and G. Ricceri : Now Trend in the Subsidence of Venice, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.65-81, 1976.
- 31) A.D.W. Sparks : Settlement of Venice and General Estuarine Deposits, Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.739-744, 1977.
- 32) R.W. Lewis and L. Schrefler : A Fully Coupled Consolidation Model of the Subsidence of Venice, Water Resources Research, Vol.4, No.2, pp.223-230, 1978.
- 33) A.D.W. Sparks : Numerical Method for the Settlement of Venice and Layered Soil Deposits, Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.1, pp.213-225, 1979.
- 34) G. Ricceri and R. Batterfield : An Analysis of Compressibility Data from a deep Borehole in Venice, Geotechnique, Vol.24, No.2, pp.175-192, 1974.

- 35) L. Carbognin, P. Gatto, G. Mozzi and G. Gambolati : Land Subsidence of Ravenna and its Simulation with the Venice Case, Proc. of the Int. Conf. on Evaluation and Prediction of Subsidence, pp.254-266, 1978.
- 36) 植下 協, 佐藤 健, 大東憲二: 濃尾平野とヴェネチアを対象とする最近の地盤沈下研究について, 土と基礎, Vol. 28, No. 12, pp. 25~31, 1980.
- 37) C. Piancharoen : Ground Water and Land Subsidence in Bangkok, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.355-364, 1976.
- 38) E.W. Brand and A.S. Balasubramaniam : Soil Compressibility and Land Subsidence in Bangkok, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp.365-374, 1976.
- 39) 上海市水文地質大隊(大島公司, 大久保大訳): 於上海地面沈降与控制, 地質学報, 第2期, pp. 243~254, 1973.
- 40) 植下 協: 濃尾平野の地盤沈下対策に関する考察, 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書(昭和49年度), 愛知県環境部, pp. 243~266, 昭和50年3月.
- 41) 中央公害対策審議会地盤沈下部会: 地盤沈下の予防対策について(答申文), 昭和49年11月.
- 42) 帝国書院編集部: 新詳高等地図, 文部省検定済教科書, 帝国書院, 1974.

## 第2章 濃尾平野地盤沈下に関する従来の調査ならびに研究

### 2.1 概説

現在、日本各地で問題になっている地盤沈下現象は、地下水の過剰な汲み上げが主因となって生じており、こうした広域地盤沈下問題を解決するには、それら地盤沈下が生じている各平野の地下水状態にまで立ち入って検討を行わねばならない。なぜなら、広域地盤沈下を停止させるには、広域の地下水状態が地盤沈下を生じさせない状態にまで回復させることが必要であり、そのために地下水汲み上げ量をどれだけ削減すれば、地下水頭状態がどれだけ回復し、地盤沈下現象がどのように沈静化し、停止するにいたるかという調査・研究が必要になるからである。

その場合の地下水調査としては、個々の井戸周辺の地下水状態を対象に行うのではなく、広域的な地下水状態を対象に行うことが重要である。現在、各地で問題になっている広域地盤沈下現象は、長期にわたる、多数の井戸からの地下水汲み上げによって徐々に進行してきたものであり、ある特定の井戸周辺の地下水状態を調査しても広域地盤沈下問題の解決とはならない。

広域地下水問題の調査としては、地下水涵養、地下水流動、地下水揚水の3項目について検討されなければならない<sup>1)</sup>。これら各項目の具体的な調査、検討方法は地下水調査に関する参考書<sup>2)</sup>に詳しく述べられている。

広域地下水問題の調査には、水理学、水文学、地形学、地質学、土



質力学等の知識を応用することが必要となり、またそれらに関係した資料をそろえて広域地下水のための調査が完成すると言われている。地下水涵養一つを取り上げても、水文気象条件のみならず、地形、地質、土質の条件によってその状況は複雑に変化する。したがって、広域地盤沈下問題の解決には、地下水状態推定に必要な各種調査資料を用い、各種立場からの研究成果を活用した検討が必要になってくる。

本章では、研究の対象となった濃尾平野の概要を説明するとともに、濃尾平野地盤沈下に関するいろいろな立場からの従来の調査、研究についてとりまとめておくこととする。

濃尾平野地盤沈下に対しては、1971年（昭和46年）に東海三県地盤沈下調査会が組織され、この調査会はその後1975年（昭和50年）に改組、拡充され、濃尾平野の水準測量を担当する計量部会と地盤沈下問題の各種解析を担当する解析部会が設けられるにいたっている。この調査会には、先述したような各学問分野の研究者も参加し、活発な意見交換、情報交換が行われている。したがって、筆者が第3章以下で行う地盤沈下問題解決のための各研究で応用したいろいろな分野の知識ならびに研究資料については、この東海三県地盤沈下調査会に負うところが大きくあり、各分野、各立場からの調査、研究、意見を交換し、それらに対して討論できるような組織が広域地盤沈下問題解決に大きく貢献していると考えている。

## 2.2 濃尾平野の概要

濃尾平野は日本のほぼ中央に位置し、平野の東端、名古屋市東部を東経 $137^{\circ}$ の経線が、南端の伊勢湾北部を北緯 $35^{\circ}$ の緯線が走る。名古屋から南九州、鹿児島市までの鉄道距離、 $1208\text{ km}$ は、名古屋から北海道の玄関、函館市までの距離 $1218\text{ km}$ にほぼ等しく、交通の便からみても日本の中央部と言えよう。

写真-1は、1978年3月6日に米国、航空宇宙局より打ち上げられたLANDSAT 3号から撮影された1979年9月8日午前10時頃の濃尾平野、伊勢湾域の衛星写真である。濃尾平野を空中写真で観察するには何十枚もの写真が必要となるのに対して、衛星写真では、1枚の写真でその全貌を概観することができる。LANDSATから送られてくる衛星写真のデータは、広領域の地形、地質、植生状態等に関して貴重な情報を与えてくれることも指摘<sup>3)</sup>されている。

濃尾平野の面積については、文献により、 $1800\text{ km}^2$ <sup>4)</sup>、 $1576\text{ km}^2$ <sup>5)</sup>、 $1300\text{ km}^2$ <sup>6)</sup>などと言われているが、沖積平野域の面積は $1300\text{ km}^2$ となる。この平野域に散在する都市域が写真-1では薄赤く写し出されており、それら都市域を中心に、濃尾平野域の人口は約80万人に達することが報告<sup>5)</sup>されている。

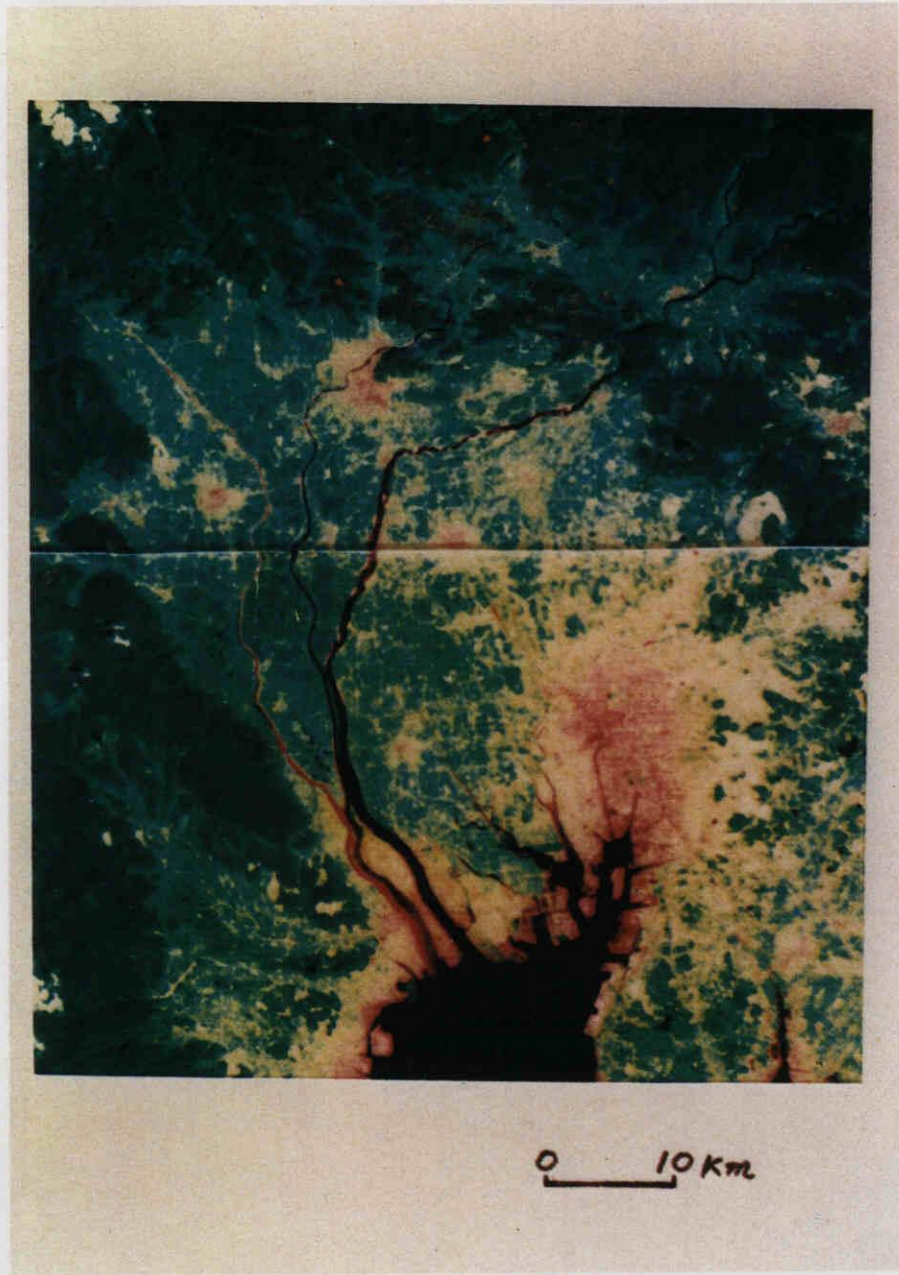


写真-1 衛星写真による濃尾沖積平野の全貌



猿投神社の古図（717～723年に作成されたものと推定されている）による縄文時代の濃尾平野地域の状態を図-2.1に示した。現在の平野域には、長島（現在の長島町）、津島（津島市）、枇杷島（名古屋市枇杷島町）、中島（中島郡）などの島々が点在し、大昔、この地域は一面の海であったことが、この図より推定される。この一面の海が、その後、木曾、長良、揖斐の木曾三川と庄内川の運ぶ土砂によって、沖積平野となったわけである。

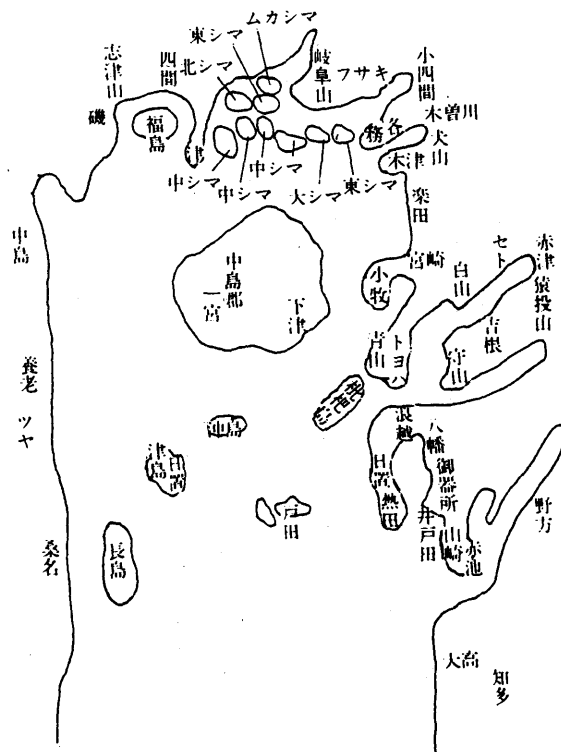


図-2.1 猿投神社古図に示された縄文時代の濃尾平野地域の状態（文献のより引用）

図-2.2に濃尾平野地下の地質構造を示した。古い地層ほど西に沈み、上部に新しい地層が重なる濃尾平野の地質構造の特徴がよくわかる。これは、西側の養老断層で沈降し、東方の猿投山を上昇側とする基盤の傾動地塊運動によるものであることが明らかになっている<sup>8)</sup>。

この平野では、「豊富な水」という立地条件を背景に、江戸時代より北部扇状地では綿の栽培や生糸の生産が盛んで、明治時代には尾張地域を中心に絹織物、綿織物業が栄えた。現在でも、そうした織物産業の伝統は引き継がれており、一宮方面では、わが国の毛織物生産額の約70%を占める毛織物工業が発達している<sup>4)</sup>。三角州平野では稲作も盛んで、愛知県内だけでも水田面積は224km<sup>2</sup>に達することが報告<sup>9)</sup>されている。

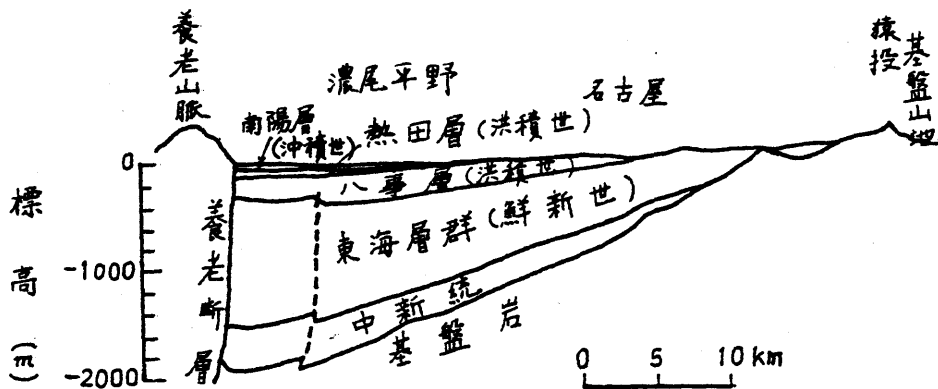


図-2.2 濃尾平野地下の地質構造(東西断面の例)<sup>8)</sup>

### 2.3 濃尾平野地盤沈下の推移とその原因

濃尾平野南部の水準点の変動状況の1例を図-2.3に示した。これら三つの水準点は、いずれも1888年(明治21年)に設置された一等水準点で、伊勢湾台風後の1960年(昭和35年)2月までに10回、1960年以降(1967~1970年の間は一時休止した)は毎年1回(1960~1967年は毎年2月、1971年以降は毎年11月)、水準測量が行われている。

1891年濃尾地震、1944年東南海地震による水準点変動を除けば、

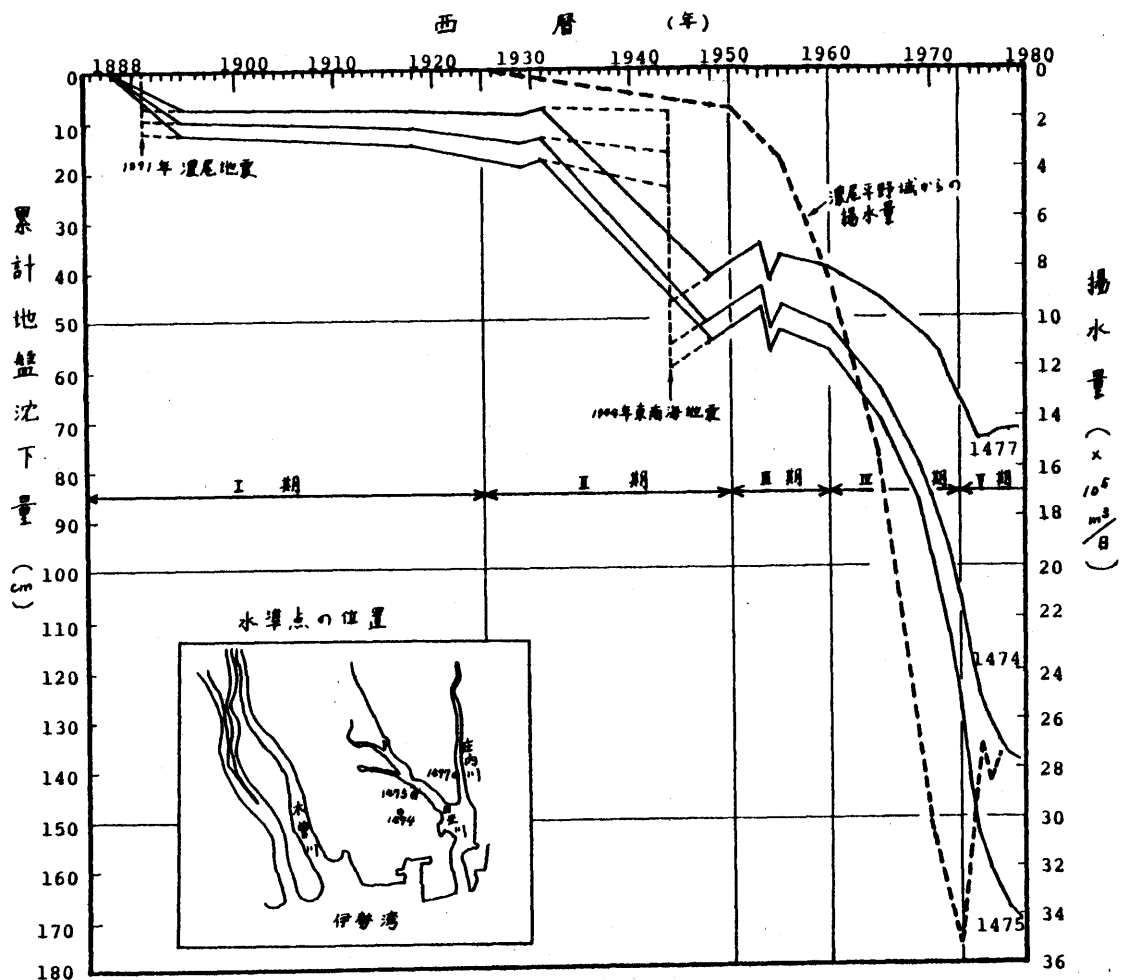


図-2.3 濃尾平野南部の地盤沈下ならびに濃尾平野域からの揚水量の経年変化(文献8)の図に加筆(整理したもの)

1960年以前の沈下状況は、それ以降の水準点沈下に比較すれば、きわめて小さかったことがこの図よりわかる。すなわち、地震による地盤変動の影響が比較的少ないと推定される1895年から1931年までの36年間における各水準点の沈下量をみると、いずれも3~6cm程度で、1960年以降の沈下状況にくらべるときわめてわずかであったことがわかる。

飯田<sup>11)</sup>は、伊勢湾北部で1965年までに行われた広範な水準測量結果にもとづいて、濃尾平野地盤沈下状況を4段階に分けて説明した。

(しかし、図-2.3に示したようにその後の水準測量結果もつけ加えて判断すると、1960年以降の地盤沈下の推移は、2つの期間に分けられる。つまり、1960年から1973年にかけて(揚水量増大期)の水準点の加速度的な沈下期間と、それ以降(揚水量削減期)の沈下速度の減少あるいは水準点の上昇傾向が認められる期間に区分できる。

第I期の水準点変動の主因は、地殻変動としての濃尾傾動運動と自然圧密現象によるものである。

横尾ら<sup>12)</sup>は濃尾傾動地塊運動と呼ばれる地殻変動量を、濃尾平野地下の各地層(熱田層と八事層)の堆積面の沈降水量とそれら地層の堆積年代とから推定している。その計算結果によれば、熱田層面の年平均沈降水量は1.7mm程度、八事面の年平均沈降水量は1mm程度である。

その後、飯田ら<sup>8)</sup>は、唐山層面、第三紀層面についても、同様の考えと方法にもとづいて各地層面の年平均沈降水量を算出し、その結果を報告している。それによれば、唐山層面、第三紀層面ともに、だいたい0.5mm程度の年平均沈降水量である。

濃尾平野地下の地質層序については、本章第2節で述べるが、地質



年代の古いものから先述の各地層を列挙すれば、第三紀層、唐山層、八事層、熱田層の順となる。したがって、以上の結果より判断すれば地質年代の新しい地層面ほど年平均沈降水量は大きくなっていることがわかる。これは、横尾ら<sup>(12)</sup>の考えにもとづく計算法には、地殻変動量のみならず、地層の自然圧密度も含まれていることに原因がある。すなわち、新しい地質年代の地層ほど堆積後の時間は短く、地層も十分に締まっていけないので、自然圧密度が多く生じ、そうした地層の自然圧密による影響を受けて、地質年代の新しい地層の堆積面ほど沈降速度が大きくなっているものと考えられる。

以上の考えにより、弥富における現在 240 m 厚の熱田層の自然圧密度を推定すれば、約 25000 年前には 275 m 厚であったものが、最近の 35000 年間におよそ 35 m (元の層厚の約 13%) の自然圧密が生じたと推定される。したがって、図 - 2.3 の第 I 期における地盤沈下の主因は地殻変動と自然圧密現象にあると考えたわけである。

第 II 期の水準点の沈下の大部分は、東南海地震による急激な地盤変動が原因しており、飯田<sup>(11)</sup>は東南海地震前後の水準点沈下状況から判断して、図 - 2.3 に示した破線のようにこの期間の水準点の沈下状況を理解することを提案している。第 II 期における水準点の変動は、1944 年以前の傾動地塊運動、自然圧密現象、東南海地震が原因している。

1944 年以降から第 III 期にかけて見られる水準点の上昇、沈降の複雑な変動は、東南海地震の余震によるものであることが指摘<sup>(13)</sup>されている。

1960年以降の第Ⅳ期における水準点の沈下状況は、それまでのどの期間の沈下よりも激しく、年々、沈下速度が加速度的に増加している。図-2.3には、1973年(昭和48年)に行われた濃尾平野地下水揚水量実態調査<sup>14,15)</sup>とその後の各関係機関による揚水量調査にもとづいて集計された地下水汲み上げ量の推移を破線で示した。図-2.3の破線のような濃尾平野域からの急激な地下水汲み上げ量の増加が、この期間の水準点沈下速度の増加の主因となっていることは、各著者<sup>13,16)</sup>が指摘している。

濃尾平野域では、図-2.3に示したような1960年以降の急激な地盤沈下の進行を停止させることを目標に、揚水規制が1974年(昭和49年)9月30日より行われており、それら揚水規制等の効果もあり、1975年以降は地盤沈下速度の鈍化傾向が見られる。

しかし、図-2.3の1474、1475水準点にみられるように、なお年間4~6cmの地盤沈下が生じている場所もあり、こうした地盤沈下停止のための地下水汲み上げ量の削減、臨海低平地域の防災対策が、濃尾平野地盤沈下地域では重要な問題となっている。

#### 2.4 濃尾平野地盤沈下に対する観測体制

図-2.3に示したような濃尾平野における地盤沈下の状況を把握するため、1971年以降、毎年11月1日を測量基準日<sup>17)</sup>と決めて水準点の測量を行っている。1978年11月現在の、濃尾平野各関係機関の水準点数を表-2.1に示した。それら水準測量結果は、東海三県地盤沈下調査会<sup>18)</sup>が濃尾平野全域についてとりまとめ、毎年公表<sup>19)</sup>している。

表-2.1 1978年の濃尾平野における水準測量の延長  
ならびに水準点数<sup>17)</sup>

測量機関名	測量延長(km)	水準測点数
国土地理院	280	247
中部地方建設局	700	3,021*
愛知県	371	294
岐阜県	120	107
三重県	98	108
名古屋市	400	443
名古屋港管理組合	95	112
四日市港管理組合	19	37
計	2,083	4,369

\* 河川距離標を含む

帯水層の地下水位や地層収縮量を把握する目的で、図-2.4に示すように、多数の地盤沈下観測井が設置されている。帯水層の地下水状態を把握する上で、これら観測井で計測された地下水位の利用価値は大きい。

なお、それら地盤沈下観測井によって計測された地下水頭値、地層別地盤収縮量についても、東海三県地盤沈下調査会がとりまとめ公表<sup>20)</sup>している。

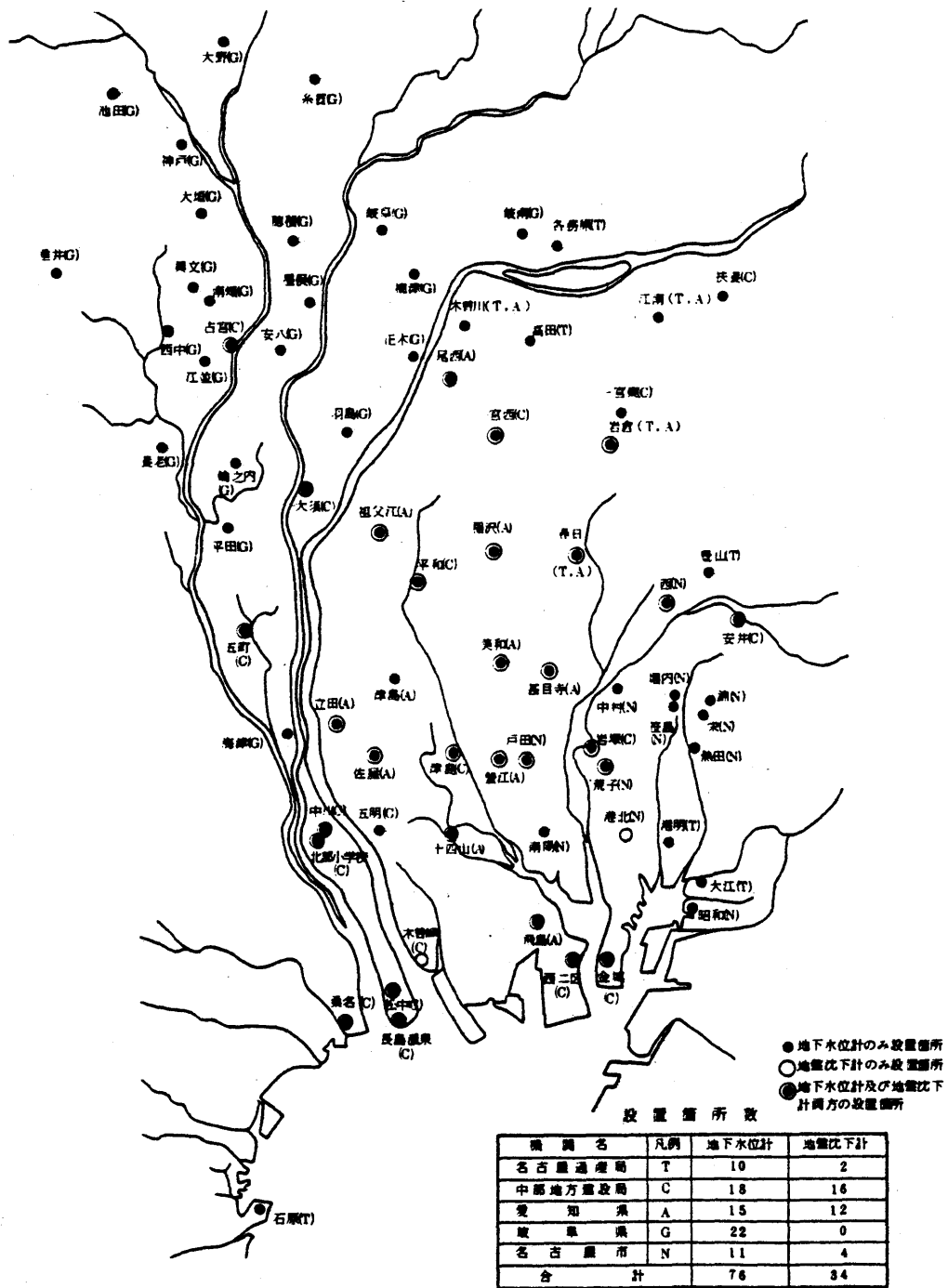


図-2.4 濃尾平野における地盤沈下観測井網<sup>17)</sup>

## 2.5 濃尾平野地盤沈下に関する地質学的研究

図-2.5に、濃尾平野における地盤断面図<sup>6)</sup>の1例を示した。濃尾平野域では、地表付近の自由地下水にくらべ水質がよく、水温が好都合な状態にある深部の被圧地下水が利用の対象となっており、濃尾平野の主要な被圧帯水層は、上から第1、第2、第3帯水層と呼ばれている。

第1帯水層は、沖積層と洪積世後期の熱田層上部の間にある第1礫層(図-2.5のG<sub>1</sub>)で、深度50~70m前後の位置に分布し、層厚は

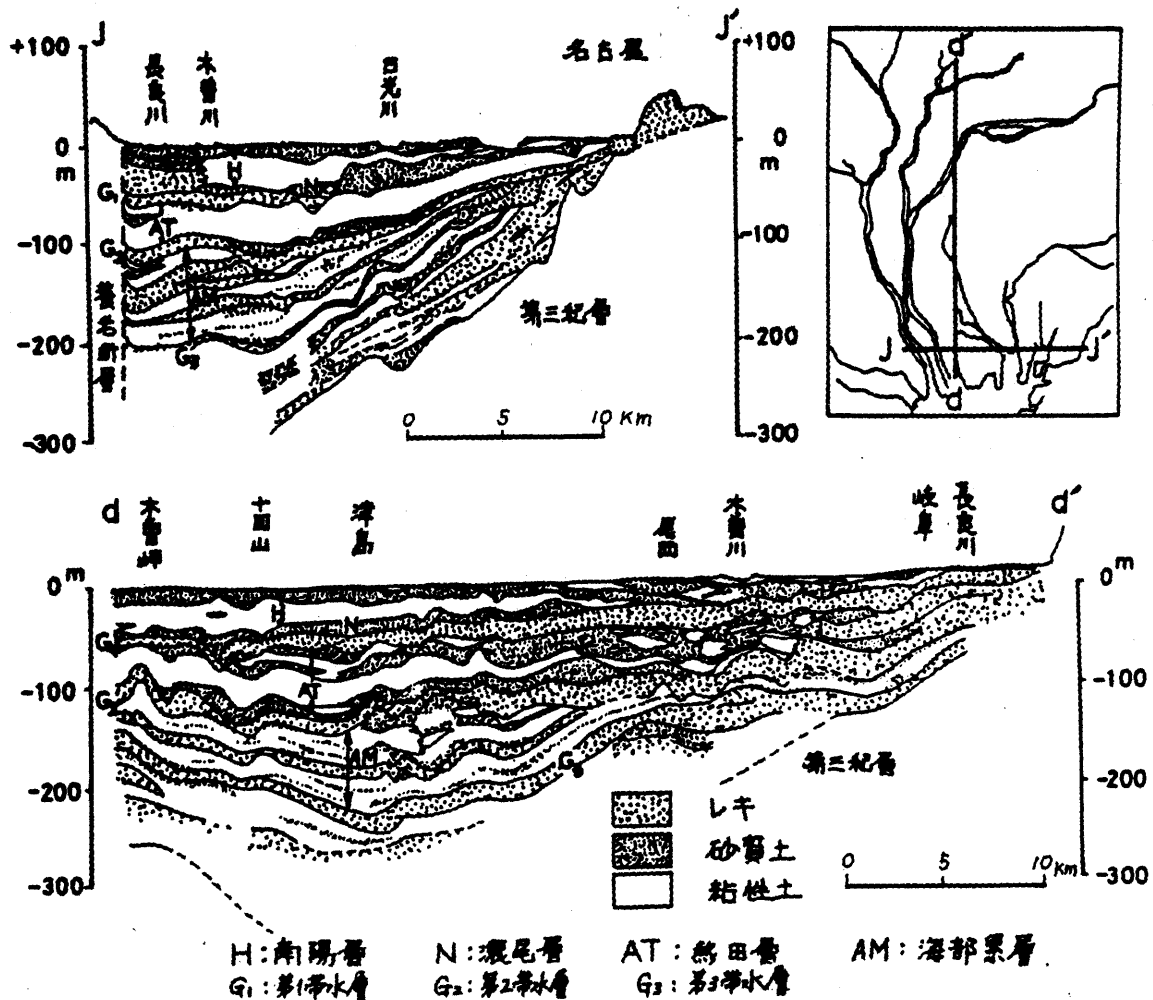


図-2.5 濃尾平野地盤断面図の例<sup>6)</sup>

10~20m, 北部の扇状地に近づくと層厚は30m近くにも達している。  
なお、第1礫層は名古屋市域には分布していないことが明らかとなっ  
ている<sup>6)</sup>。

第2帯水層は、熱田層下部粘土層の下にある第2礫層(図-2.5の  
G<sub>2</sub>)で、深度60~200mに分布し、濃尾平野のほぼ全域に分布してい  
る。

第2帯水層の下部には海部累層と呼ばれる地層が分布し、この海部  
累層下部を画する礫層(図-2.5のG<sub>3</sub>)が第3帯水層と呼ばれている。  
海部累層内には、そのほかに2~3層の連続性のよい礫層が存在し、  
帯水層として利用されている<sup>21)</sup>。

図-2.6に、濃尾平野における標準的な地質層序を示した。

図-2.7に示したように、濃尾平野では、東西方向に11断面(A-A'  
断面からK-K'断面)、南北方向に6断面(A-A'断面からカ-カ'  
断面)の合計17断面について、図-2.5と同様の地盤断面図が桑原<sup>22)</sup>  
によって作成されている。

地域		濃尾平野地下
完新世		南陽層 (40)
更新世後期	1	濃尾層 (20)
	18	第1礫層 (20)
	3	<埋没段丘群>
	7	熱田層上部 (60)
	最終氷期	熱田層下部 (50)
更新世中期	最後から2番目の氷期	第2礫層 (30)
		<埋没段丘群>
	亜氷期	海部累層
	亜間氷期群	Am <sub>3</sub> Am <sub>2</sub> Am <sub>1</sub> (150)
	氷期	第3礫層 (20)
	?	先海部累層 (100)
更新世前期		東海層群
鮮新世		

(注) ( )内数字は層厚, m

図-2.6 濃尾平野における地質層序<sup>21)</sup>

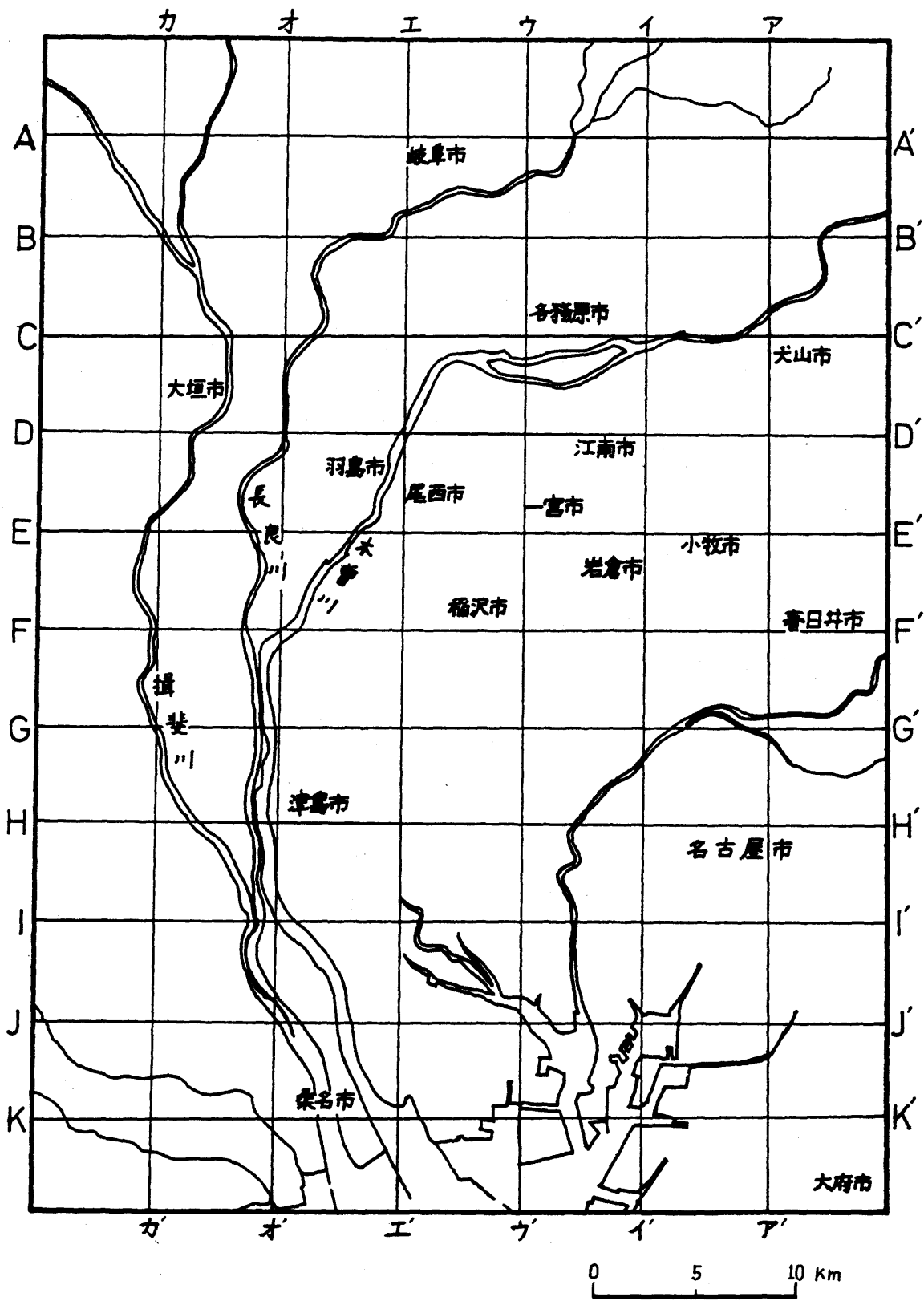


図-2.7 濃尾平野における地盤断面図作成位置図<sup>22)</sup>



## 2.6 濃尾平野の地下水利用調査・地下水質調査と水文学的調査研究

従来、濃尾平野を対象として、地下水利用状況を比較的まとめた形で示したもののとして、経済企画庁の報告<sup>23)</sup>があった。最近の濃尾平野域のほぼ全域にわたる揚水量実態調査は、1969年(昭和44年)に農林省、1973年(昭和48年)に環境庁、建設省、愛知県、岐阜県、三重県<sup>14)</sup>、名古屋市<sup>15)</sup>によって行われた。

1973年の調査は、揚水量の他に井戸の用途、井戸のストレーター深度、井戸掘削年月等についても併せて調査されており、この調査結果が、今日、濃尾平野域における過去の地下水汲み上げ量を推定する場合の目安となっている。

1973年以降の地下水利用状況調査は、愛知県、三重県、名古屋市域については、それぞれ各関係機関により独自に行われており、岐阜県域については、通産省が揚水量実態調査<sup>24,25)</sup>を行っている。

地下水質を分析して濃尾平野の地下水流動機構を把握しようとする試みも行われつつある<sup>26~34)</sup>。その場合、分析対象となる水質成分としては、通常、溶存イオン( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 等)のほか、溶存ガス(ヘリウム、アルゴン等)、同位元素(トリチウム、重酸素等)が利用されている。地表水が地下に浸透し、停滞あるいは流動することによって、その水質がある一定の傾向に従って変化することを利用して地下水の流動方向、流動速度、地下水の停滞時間、さらには地下水帯への異種の水の流入状況を明らかにしようとするものである。地下水の過剰な汲み上げによって、従来無視されていた帯水層間の漏水現象や粘土層からの絞り出し現象が、これら地下水質分析結果によって実

証されており、濃尾平野地下水流動機構解明の上で、この水質分析調査結果の果たす役割には非常に大きいものがある。現在までの地下水水質分析結果から明らかとなっている濃尾平野地下水流動状態をまとめると、次のようになる<sup>17)</sup>。

(1) 濃尾平野の地下水は、その水質からみて2つの領域に分けられる。その1つは、平野周辺部の扇状地域から地表水が浸透し流下している領域、他の1つは、海水の浸透している領域である。そして、前者の領域ではその水質の変化からみて、平野周辺部から中心域に向けて地下水流動の生じている傾向がみられ、後者の領域では、沿岸部や河口の感潮域から内陸へ向って海水の浸透が生じている。

(2) 犬山扇状地、名古屋市域では塩素イオンが検出されており、地表での人間の種々の活動による汚染が地下水にもわずかながら表われている。

(3) 地下水位低下域には、水質より判断して地下に特に長く停滞していたと考えられる地下水がみられる。このことは、粘土層中に含まれていた間隙水が帯水層中へ絞り出されていることを示している。

(4) 濃尾平野の地下水盆の状態が過剰揚水に伴って、今日ではかなり変化しており、とくに浅層の地下水が深い帯水層中に移動する条件が生じている。

地盤沈下防止対策として、揚水規制が現在行われつつある。濃尾平野では、地下水から地表水への水源転換とともに、地下水合理化<sup>35,36)</sup>による地下水汲み上げ量の削減も行われている。

濃尾平野における木曾三川流域は、水資源としては関東、関西地域

にくらべて恵まれていると言われている。地下水に替わる代替水源をどこに求めるか重要な問題であり、そうした木曾三川の利水等についての調査、報告<sup>37~41)</sup>もなされている。

山本<sup>42)</sup>は、濃尾平野の地下250 mまでには約1600億トンの地下水があり、これは大阪平野の2倍、関東平野の約半分にあたる地下水賦存量で、日本第2の地下水域であることを指摘した。桑原<sup>43)</sup>も、濃尾平野地下200 m以浅の地下水賦存量は、約1000億トン余になると試算した。しかし、これら地下水賦存量の概算は、いずれも土中の間隙を満たしている全水分量の推定である。井戸からの揚水によって実際に利用し得る地下水は、間隙を満たす水のうちで吸着水や毛管水の形で保水された水分を除いた、いわゆる重力水である。したがって、地下水賦存量がそのまま、その地域で利用可能な地下水量を示すものではない。桑原<sup>43)</sup>の試算によれば、濃尾平野地下200 m以浅で実際に利用可能な地下水量は、賦存量の約4割程度である。

## 2.7 濃尾平野地盤沈下に関する土質工学的研究

植下<sup>16)</sup>は、1959年(昭和34年)伊勢湾台風後の堤防のかさ上げによる堤体沈下の予測を、Terzaghi<sup>44)</sup>の一次元圧密理論を利用して行った。その結果、かさ上げによる堤体自重増加の影響だけでは、堤体の実測沈下量の進行を説明できず、地下水汲み上げ等による全般的な地盤沈下が濃尾平野では進行しつつあることを指摘した。

粘土の圧縮指数 $C_c$ は、初期間げき比 $e_0$ と相関性のあることが西田<sup>45)</sup>により指摘されたが、植下<sup>46)</sup>は伊勢湾北部沖積粘土層においては、

$$C_c = 0.6 (e_0 - 0.5) \quad (2.1)$$

の関係が見い出されることを報告している。桑原ら<sup>47)</sup>は、名古屋市域の沖積粘土層については、

$$C_c = 0.5 (e_0 - 0.5) \quad (2.2)$$

の関係があることを報告した。

濃尾地盤における土質工学的諸性質を、統一土質分類と対応させて、検討した報告<sup>48~50)</sup>もある。

地盤沈下観測井の増加とともに、地層収縮は深部洪積層でも生じていることが判明<sup>51)</sup>し、それら深部の土質試料に対する各種土質試験も行われるようになってきた。植下<sup>52)</sup>は、稲島300m地盤沈下観測井設置時に行われた土質試験結果を整理し、深層地盤の土質工学的性質を報告した。その中で、植下は稲島観測井設置時に行われた横方向載荷試験結果にもとづいて、砂層の弾性係数 $E$ ( $\text{kg/cm}^2$ )と深度 $D$ ( $\text{m}$ )との間に、ほぼ

$$E = 11 D \quad (2.3)$$

の関係のあることを見出した。砂の不攪乱試料の採取が困難な現状で、この関係式は砂層の圧縮量を推定するためにしばしば利用されている。一方、砂の不攪乱試料の採取方法及び不攪乱砂の力学的特性に関する研究<sup>53)</sup>も、現在行われつつある。

深度1000m以上の温泉水汲み上げによ、ても地盤沈下することが指摘されており、深層粘土試料にもとづく圧密試験を行って、それら深層粘土の圧密特性について検討した結果も報告<sup>52)</sup>されている。

地盤沈下現象を室内模型実験によって再現させ、地盤沈下に対する水理学的、土質力学的考察を加えた研究は、京都大学防災研究所の研究者達<sup>54~57)</sup>によって報告されているが、建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所<sup>58)</sup>でも同様の模型実験が行われている。

また建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所<sup>59)</sup>では、木曾三川河口部における沖積粘土層と第1礫層の間隙水圧を実測し、第1礫層の水圧低下による沖積粘土層下部からの圧密脱水現象を実証している。また、近年、農林水産省東海農政局木曾岬干拓建設事務所<sup>60)</sup>も、濃尾平野南部における沖積粘土層内間隙水圧の測定を行っている。

## 2.8 まとめ

本章で述べたことを要約すれば以下のようになる。

(1) 衛星写真, 古地図を利用して, 本研究で対象とした濃尾平野の全体像や地質的特徴を理解しやすくするために, 一般的な説明を行った。

(2) 濃尾平野南部の代表的水準点の水準測量結果と揚水量実態調査結果を用いて, 現在までの地盤沈下の推移状況を5つの段階に分けて説明し得ることを示した。また, そうした地盤沈下の推移の原因について述べた。

(3) 従来, 濃尾傾動地塊運動による地盤沈下量とみなされていたものの中には, 地層の自然圧密度も含まれていることを明らかにした。

(4) 濃尾平野地盤沈下問題に対する各専門分野からの従来の調査研究の概要を整理して示した。

## 参考文献

- 1) 土質工学会編：土質調査法—第1回改訂版—, pp. 311 ~ 342, 昭和52年。
- 2) たとえば, 山本荘毅：地下水調査法, 古今書院, 1962。
- 3) 丸安隆和, 土屋清, 中島巖, 渡辺貫太郎：日本の衛星写真, 朝倉書店, 1974。
- 4) 国際連合, 日本国政府, 名古屋市：国連都市・地域開発セミナー資料, 1966。
- 5) 建設省中部地方建設局：地盤沈下の実態とその対策(沈みゆく濃尾平野), 昭和50年4月。
- 6) 桑原徹, 植下協, 板橋一雄：濃尾平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 53 ~ 60, 1977。
- 7) 故西畑勇夫先生記念会：西畑勇夫先生記念論文選集, p. 5, 昭和54年12月。
- 8) K. Iida, K. Sazanami, T. Kuwahara and K. Ueshita : Subsidence of the Nobi Plain, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, pp. 47-54, 1976.
- 9) 丸山利輔：都市化に伴う濃尾用水地域の水循環の変化, 京都大学農学部かんがい排水研究室, 昭和50年12月。
- 10) 植下協, 佐藤健, 大東憲二：濃尾平野とベネチアを対象とする最近の地盤沈下研究について, 土と基礎, Vol. 28, No. 12, pp. 21 ~ 27, 1980。

- 11) 飯田淑專：伊勢湾北部地域の地殻変動の考察，伊勢湾北部地域地盤沈下研究報告書，名古屋大学地盤変動研究グループ，pp. 7~75，昭和42年3月。
- 12) 横尾義貫，嘉藤良次郎，桑原 徹：伊勢湾北部地域地盤沈下の地質学的考察，伊勢湾北部地域地盤沈下調査研究報告書，名古屋大学地盤変動研究グループ，pp. 77-102，昭和42年3月。
- 13) 井関弘太郎：伊勢湾北部地域地盤沈下の地下水利用からの考察，伊勢湾北部地域地盤沈下調査研究報告書，名古屋大学地盤変動研究グループ，pp. 103~125，昭和42年3月。
- 14) 環境庁，建設省，愛知県，岐阜県，三重県：昭和48年度濃尾平野地下水揚水量等実態調査報告書，1974。
- 15) 名古屋市：昭和48年度名古屋市地下水揚水量等実態調査報告書，1974。
- 16) 植下 協：伊勢湾北部地域地盤沈下の土質力学的考察，伊勢湾北部地域地盤沈下調査研究報告書，名古屋大学地盤変動研究グループ，pp. 127-149，昭和42年3月。
- 17) 東海三県地盤沈下調査会：昭和53年における濃尾平野の地盤沈下の状況，昭和54年6月。
- 18) 植下 協：地盤沈下の状況とその対策，産業公害，Vol. 14, No. 8，pp. 19~26，1978。
- 19) 東海三県地盤沈下調査会：東海三県地盤沈下調査測量水準点成果表，昭和54年7月。



- 20) 東海三県地盤沈下調査会：濃尾平野地盤沈下・地下水位観測成果報告書，昭和53年1月。
- 21) 桑原 徹，濃尾平野第四系研究グループ：伊勢湾周辺地域の中期更新統 1. 分布と層序，日本第四紀学会講演要旨集9，pp.5～8，1979。
- 22) 桑原 徹：濃尾平野地下断面図，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書，愛知県環境部，pp.159～182，昭和50年3月。
- 23) 経済企画庁総合開発局国土調査課：木曾川水系調査書，1966。
- 24) 通商産業省名古屋通商産業局：昭和52年度濃尾平野地下水理調査報告書（地下水利用実態調査報告），昭和53年3月。
- 25) 通商産業省名古屋通商産業局：昭和53年度濃尾平野地下水理調査報告書（地下水利用実態調査報告），昭和54年3月。
- 26) 建設省中部地方建設局：昭和30年度地盤変動調査報告書（伊勢湾周辺地域），pp.50～91，昭和31年3月。
- 27) 名古屋大学理学部地球科学教室小穴研究室：濃尾平野の地下水，愛知県工場誘致委員会，1961。
- 28) 建設省国土地理院，建設省中部地方建設局：地盤沈下と地域構造との相関関係の調査研究（第二報）報告書 濃尾平野，pp.19～34，昭和49年3月。
- 29) 建設省国土地理院，建設省中部地方建設局：地盤沈下と地域構造との相関関係の調査研究（第三報）報告書 濃尾平野，pp.2～18，昭和50年3月。

- 30) 成瀬聖慈：濃尾平野における地下水成分の変化について，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書（第二報），愛知県環境部，pp. 103～108，昭和51年7月。
- 31) 成瀬聖慈，佐野治之：地下水・河川水の成分変化について（その2）—濃尾平野および西三河地域—，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書（第三報），愛知県環境部，pp. 69～80，昭和52年9月。
- 32) 杉浦敦：濃尾平野の地盤沈下における地下水の水質変化，沿海低地帯の地盤沈下の実態と災害の解明，文部省自然災害特別研究，pp. 74～92，1978。
- 33) 加藤喜久雄：濃尾平野の地下水の酸素同位体組成と地盤沈下，文部省自然災害特別研究，pp. 93～100，1978。
- 34) 杉崎隆一，杉浦敦：地下水質と地下水の流動機構—濃尾平野の例を中心として—，日本河川水質年鑑，日本河川協会，pp. 885～897，1979。
- 35) 愛知県揚水規制対策研究会：地下水利用合理化の調査研究報告，昭和50年3月。
- 36) 愛知県環境部：地下水利用合理化に関する調査研究報告書，昭和51年6月。
- 37) 建設省中部地方建設局：木曾三川—その治水と利水—，昭和38年7月。
- 38) 太田更一：木曾三川の電源開発と利水（I），水利科学，Vol. 18，No. 5，pp. 100～123，1974。

- 39) 太田更一：木曾三川の電源開発と利水(Ⅱ)，水利科学，Vol. 18，  
No. 6，pp. 79～100，1974。
- 40) 土木学会中部支部：木曾三川物語—木曾三川治水利水の歴史，  
昭和51年3月。
- 41) 桑原 徹：木曾三川流域の水資源と水利用，地盤沈下の実態とそ  
の対策に関する調査研究報告書(第三報)，愛知県環境部，pp. 93  
～119，昭和52年9月。
- 42) 山本荘毅：地下水の現状 2 濃尾平野，アーバン フォータ，  
No. 8，pp. 6～7，1973。
- 43) 桑原 徹：濃尾平野地下の地盤構成物質と地下水包蔵量，地盤沈  
下の実態とその対策に関する調査研究報告書(第四報)，愛知県  
環境部，pp. 131～140，昭和53年10月。
- 44) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley,  
pp. 265-296, 1943.
- 45) 西田義親：土の圧縮指数に関する一考察，土木学会論文集，第43  
号，pp. 48～52，1957。
- 46) 植下 協：沖積層粘土の圧縮指数と液性限界および間けき比との  
関係について，第19回土木学会年次講演会概要集，pp. 41-1～41-2  
1964。
- 47) 桑原 徹，堀内孝英：名古屋市南部の軟弱粘性土の性質について，  
名城大学理工学部研究報告，第7号，1966。
- 48) 植下 協，林 茂昭：名古屋地盤図における土質分類の検討，土  
と基礎，Vol. 15，No. 12，pp. 7～14，昭和42年12月。

- 49) 植下 協, 浅井武彦: 名古屋地盤図資料にもとづく統一土質分類と土の諸性質との関係, 土の判別分類に関するシンポジウム, 昭和44年度発表論文集, pp. 21~26, 昭和44年2月。
- 50) 植下 協, 浅井武彦: 統一土質分類と土の諸性質との関係について—愛知・三重臨海部の土質資料にもとづいた場合—, 第5回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 57~60, 昭和45年
- 51) 建設省中部地方建設局: 濃尾平野の地盤沈下の現状と対策, 昭和49年11月。
- 52) 植下 協: 濃尾平野の地盤沈下対策に関する考察, 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書, 愛知県環境部, pp. 241~222, 昭和50年3月。
- 53) 板橋一雄, 植下協: 乱さなほ洪積熱田砂の力学的特性, 土質工学会論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 101~109, 1980。
- 54) 速水頌一郎, 赤井浩一: 被圧地下水の揚注水による地下水圧の変動と地盤沈下に関する水理実験, 京都大学防災研究所創立5周年記念論文集, pp. 67~74, 昭和31年12月。
- 55) 速水頌一郎, 赤井浩一: 被圧地下水の変動と地盤沈下に関する水理実験Ⅱ, 京都大学防災研究所年報, 第1号, pp. 26~40, 昭和32年12月。
- 56) 村山朔郎, 柴田 徹, 山本順一: 地盤沈下の模型実験(Ⅰ), 京都大学防災研究所年報, 第4号, pp. 11~20, 昭和36年3月。
- 57) 村山朔郎, 松尾 檢: 地盤沈下の模型実験(Ⅱ), 京都大学防災研究所年報, 第7号, pp. 10~14, 昭和39年3月。

- 58) 建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所，地盤沈下対策調査報告書，pp. 118~127，昭和48年3月。
- 59) 文献 58) の pp. 128~135。
- 60) 農林省東海農政局木曾岬干拓建設事務所，(株)応用地質調査事務所；木曾岬地区堤防沈下対策検討業務報告書(土質調査)，pp. 24~28，昭和53年9月。

### 第3章 濃尾平野地盤沈下に対する安全地下水頭に関する考察

#### 3.1 安全揚水量の概念とその推定方法

安全揚水量 (safe yield) という用語を始めて用いたのは Lee<sup>2)</sup> であると言われている<sup>3)</sup>。Lee は、地下水涵養量を越えない揚水量を安全揚水量と考へた。

その後、経済的要件を付加した安全揚水量の概念<sup>4)</sup>も提案されたが、現在一般に用いられている安全揚水量の概念の基礎を示したのは、Conkling<sup>5)</sup> である。Conkling は地下水涵養量、経済性、地下水質にもとづいて安全揚水量が定義されるべきことを述べている。

Banks<sup>6)</sup> は、南カリフォルニア州における地下水利用問題を取り扱った報告の中で、地下水利用の目安となる安全揚水量には法律的要件も重要であることを指摘している。

Todd<sup>7)</sup> は、Conkling<sup>5)</sup>、Banks<sup>6)</sup> の指摘した安全揚水量の具備すべき要件を踏まえて、次のように安全揚水量の定義を行っている。すなわち、ある地下水盒における安全揚水量とは、①地下水涵養量を越えない、②地下水汲み上げ費がある限界値を越えない、③水質悪化をもたらさない、④水利権に抵触しない、という条件を満たす地下水揚水量であると考へた。そして、「安全揚水量とは、地下水盒から好ましくない結果を生じさせることなく、継続的に揚水できる水量である」と定義した。

そのような安全揚水量の推定法は、Hill<sup>8)</sup>、Harding<sup>9)</sup> によって提案されている。

Hill<sup>8)</sup> は、南カリフォルニアとアリゾナ州の地下水盆における安全揚水量を次のような方法で推定している。すなわち、地下水盆を代表するある地点の地下水頭の年間変動量とその年に地下水盆から汲み上げられた総揚水量とを経年的に整理して、地下水頭の年間変動量がゼロとなる揚水量を見つけ出し、地下水盆からの安全揚水量とした。

Harding<sup>9)</sup> は、カリフォルニア州サンウオーキン山峡谷地域における安全揚水量を推定している。この方法は地表付近の不圧帯水層からの安全揚水量を推定するもので、地表水の水収支計算から地下水涵養量の経年変化を推定し、地下水盆を代表する地点における地下水位の年間変動量と推定された地下水涵養量との直線関係を仮定して、地下水位変動量がゼロとなる地下水涵養量を探し出して地下水盆からの安全揚水量とする方法である。

地下水盆全体の地下水頭分布にもとづいて地下水流動方向を推定し、地下水流動方向に直交する地下断面積とその断面付近の透水係数、動水勾配とから地下水流動量を算出して、許容揚水量を推定する試みも行われている<sup>10, 11)</sup>。

沿岸地下水の塩水化防止を要件とした許容揚水量の推定法も報告<sup>12)</sup>されている。海水の地下水帯への浸入を防止するには、地下水位と海水位を同一にする必要があるとの考えにもとづいて推定する方法であり、臨海地下水盆における代表的地点の年平均地下水位と年間総揚水量との関係を見出し、地下水位が平均海水面と一致するときの揚水量を探し出すものである。

地盤沈下停止を要件とした地下水管理目標値を推定する方法<sup>13~15)</sup>

も提案されている。

和達<sup>14)</sup>の提案した地盤沈下停止に必要な標準水圧はよく知られている。これは、地盤沈下観測井で計測された地表面沈下速度と帯水層地下水頭との間の直線関係より、地表面沈下速度がゼロとなる地下水頭値を探し出す方法である。和達はこの方法を大阪の地盤沈下地域に適用し、標準水圧として地表面下十数メートルという値を見い出した。

広域地下水盆を小領域に分割して、各小領域における年間地盤沈下量とその小領域からの地下水汲み上げ量とを経年的に整理すると、地盤沈下量がゼロとなる揚水量が見い出されることを示した報告<sup>15)</sup>もある。

### 3.2 濃尾平野地盤沈下に対する安全地下水頭の考え方

#### 3.2.1 濃尾平野における安全地下水頭算出の意義

山本<sup>16)</sup>の試算によれば、濃尾平野の地下には約1600億トンの地下水が貯留されているとのことである。これは、関東地方の地下水賦存量(約4000億トン)の約半分、大阪平野の地下水賦存量(約800億トン)の2倍であり、濃尾平野は日本第2の地下水賦存量を誇る沖積平野であることが知られている。

木曾川上流に建設された岩屋ダムの有効貯水量は1億5000万トン、揖斐川上流に現在建設中の日本最大のロックフィルダム、徳山ダムの有効貯水量は3億5000万トンであり<sup>17)</sup>、濃尾平野の地下水賦存量は岩屋ダムの約1000倍、徳山ダムの約500倍にも達する。



地下水賦存量がそのままその地域で利用可能な地下水量を示すわけではない。しかし、濃尾平野に貯留されている地下水は、量的に地表水に匹敵する水資源になり得ることが以上の試算結果より推定できよう。

このように豊富な濃尾平野地下水も、過去の長期にわたる過剰な揚水によってその水頭値は年々低下を続け、昭和初期には自噴状態にあった被圧地下水頭値も現在では平野南部で地下30m程度にまで低下するに到っている。その結果、濃尾沖積平野の広い範囲に地盤沈下を引き起こす結果となり、日本一の広域ゼロメートル地帯を有する沖積平野<sup>18)</sup>となっている。

臨海低平地域では、地盤沈下によって沿岸高潮堤、河川堤防の治水機能が年々低下しつつあり、これら堤防のかさ上げは重要な地盤沈下対策事業となっている。また、地盤沈下することによって、低平地域からの内水排除用に設置された排水ポンプも、従来の能力では不十分となり、排水ポンプの増強、増設もこれら臨海低平地盤沈下地域の重要な対策事業となっている。

成瀬<sup>19)</sup>は、濃尾平野の地盤沈下によってもたらされた社会的損失費用を計算し、地下水1m<sup>3</sup>当りの社会的コストを試算している。それによれば、濃尾平野地盤沈下地域からの地下水利用の社会的コストは、1m<sup>3</sup>当り100円以上になることが明らかとなっている。この費用は、現行工業用水1m<sup>3</sup>当りの単価11円(1978年における愛知用水の例<sup>20)</sup>)に比較してはるかに高く、これら地盤沈下地域における地下水の値段(社会的コスト)は非常に高いものであることがわかる。

地下水賦存量の概算結果よりみると、濃尾平野地下水は地表水に匹敵する水資源になり得る。水質、水温の面からみると、飲料用水としては、地下水は地表水よりも優れた水源と言えよう。しかし、現在のような地盤沈下を引き起こすまどに至っている過剰揚水状況のもとでは、地下水価は地表水のそれにくらべはるかに高くなっており、そうした地下水のもつ優れた点を十分に活用して、地下水資源を有効に利用しているとはいえない。

濃尾平野では、地盤沈下をこれ以上は進行させないという条件で、安全揚水量を探し出し、その範囲内で地下水を利用するための管理を行うことが必要である。地盤高のある程度高い地域では、許容地盤沈下量を設定して、その許容地盤沈下量の範囲内で地下水利用を行うことも可能と考えられる<sup>(15, 21)</sup>。しかし、濃尾平野では、既に多くの土地が地盤沈下しており、地盤高は海水面すれすれか、それ以下の地域が広範に広がっている。したがって、それら濃尾平野臨海低平地盤沈下地域での地下水適正利用のあり方は、地盤沈下をこれ以上進行させないことを第1条件に考えるべきであり、本研究では、地盤沈下を起させない地下水頭状態（以下安全地下水頭と呼ぶ）を見出し、その状態を保って利用しうる地下水量を濃尾平野の安全揚水量として求めることとした。

地下水の舞台となる地下水盆の地域的特性によって、安全揚水量に対する考え方は各地域で特有のものとなる。しかし、地盤沈下が問題になっているわが国の臨海低平地域では、濃尾平野臨海部と同様に、地盤高が海水面以下のいわゆる海拔ゼロメートル地域の広がっている

地域が多い。したがって、ここ濃尾平野地下水に対して設定した安全揚水量の考え方は、他の臨海低平地盤沈下地域でも利用することができると考える。

ところで、地盤沈下を停止させるには、現在の地下水汲み上げ量を削減して、地下水頭を地盤沈下が停止する状態まで回復させることが必要である。本章では、地盤沈下停止に必要な被圧地下水頭値を探し出すこととする。

なお、濃尾平野では、地下水全体地下水状態を把握するため、図-3.1に示すように、多数の観測井<sup>22)</sup>が設置されており、安全地下水頭値が地下水管理の目標値として決定されれば、図-3.1の観測井網を利用して、濃尾平野の地下水状態を安全に管理することが可能となる。

### 3.2.2 地震災害防止からみた安全地下水頭の必要条件

1964年新潟地震<sup>23)</sup>の際、地表付近に存在する飽和砂層からの噴水、噴砂現象が多数確認された。しかし、1968年十勝沖地震<sup>24)</sup>の際には、地表付近の飽和砂層の液状化に加え、地割れに伴って被圧地下水が噴き出し、地表構造物に被害を及ぼした例が報告されている。大崎<sup>25)</sup>も、新潟地震の際問題となった液状化現象とは異なって、地割れから生ずる噴砂、噴水現象のあることを、広範な過去の震害調査記録にもとづいて指摘している。

1968年十勝沖地震の際の被圧地下水の噴き出しは、震害調査報告<sup>26)</sup>にも示されているように、それら被害地域には自噴井があったことが

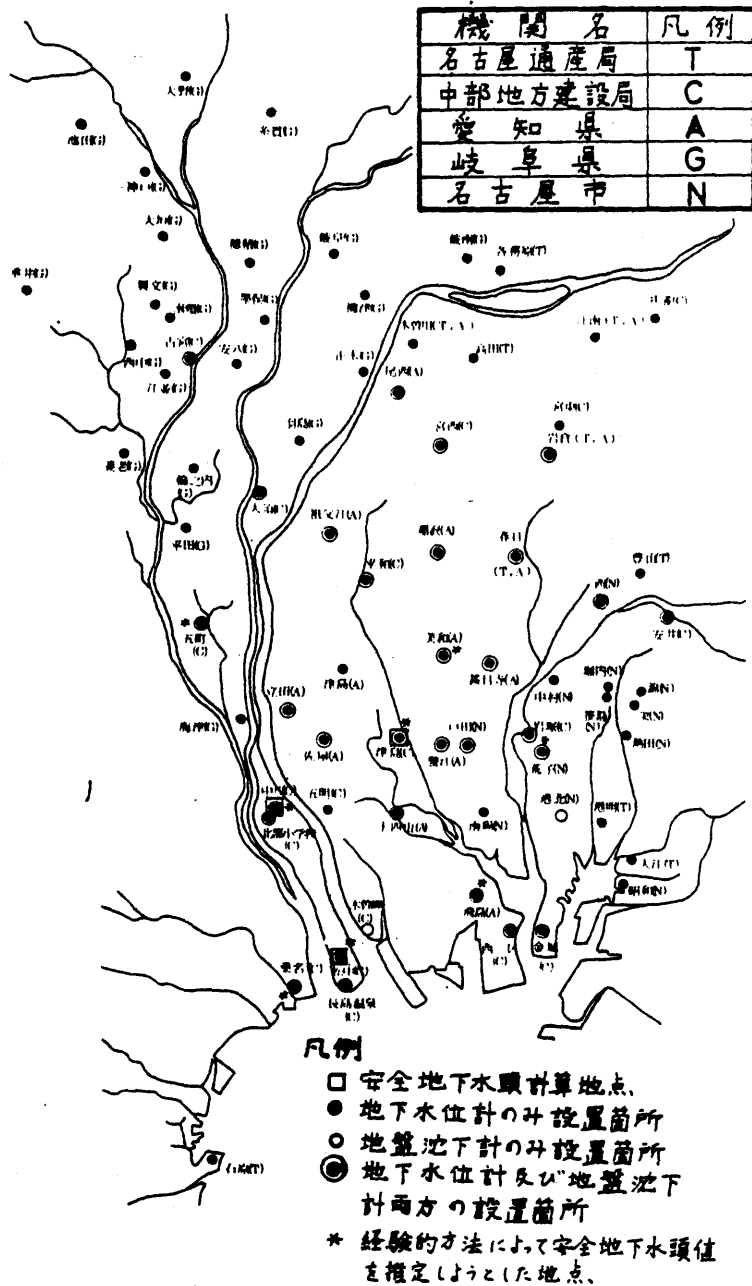


図-3.1 濃尾平野における観測井の配置図  
ならびに安全地下水頭計算地点

ら、被圧地下水頭はかなり高い状態にあったと考えられ、地震動により被圧地下水帯を覆っていた地盤にきれつが生じた結果、そのきれつ部分から地下水頭の高い被圧地下水が地表付近の砂、小石等を巻き込んで地上に噴き上げたものと理解される。

したがって、地下水管理の目標値としての安全水頭については、被圧地下水の噴水、噴砂等に対する地震時地盤の安定性に対する配慮も必要であり、地盤沈下を止めるための被圧地下水の安全水頭は高いばかりが良いのではなく、地震時の被圧地下水の噴砂、噴水等による地盤災害防止という面も考慮して、妥当な値（地盤沈下を生じさせない範囲で、地表面よりある程度低い被圧地下水頭値）で地下水の管理と利用を行うべきであると考えている。

### 3.2.3 安全地下水頭を見出す方法について

地盤沈下地域における地下水管理目標値として、和達<sup>(4)</sup>の提案した標準水圧はよく知られている。和達の提案した方法は、先述したように観測井で計測された地下水位と地盤沈下速度の関係より、地盤沈下速度がゼロとなる地下水位を探し出す方法で、濃尾平野においてこの方法を利用して標準水圧を推定する試み<sup>26,27)</sup>も行われている。しかし、各観測井（図-3.1に示した\*印を付した8箇所の観測井）で計測された地盤沈下速度と観測井水位との間には相関関係が認められず、地盤沈下停止に必要な被圧帯水層の地下水頭値は推定できないことが報告<sup>26,27)</sup>されている。これは、上記方法が経験的方法であり、観測井周辺における地盤の力学的履歴や複雑な地盤状態を考慮していないため

であることが指摘<sup>26, 27)</sup>されている。

濃尾平野地盤沈下観測井(図-3-1に示した\*印の観測井地点)で計測された地層別累計地盤収縮量と帯水層の地下水頭との関係にもとづいて、地盤沈下が生じないような地下水頭を探し出そうとする試みも行われている。しかし、それら観測井における地層別累計地盤収縮量と地下水頭の関係は極めて複雑な挙動を示し、この方法によっても地盤沈下の生じない被圧地下水頭値を推定することは困難であることが明らかにされている<sup>26, 27)</sup>。

本研究では、濃尾平野地盤沈下観測井を設置する際に行われたボーリング調査結果と、それらボーリング試料にもとづいて行われた各種土質試験結果より、各観測井地点の地盤状態をモデル化し、それら観測井地点の鉛直一次元圧密モデルを組み立て、地盤沈下停止に必要な帯水層の地下水頭状態を推定することとした。この方法によれば、地盤の複雑さは現地ボーリング柱状図及びそれら観測井付近の地盤断面図<sup>28)</sup>にもとづいてモデル化に考慮することができ、過去の過剰揚水による帯水層の地下水頭低下状態も、過去から現在までの各観測井の実測地下水頭値にもとづいて追跡できるので、現在進行しつつある濃尾平野各観測井地点の地盤沈下停止に必要な安全地下水頭は、この鉛直一次元圧密モデルによれば土質力学的に推定できることとなる。

### 3.2.4 鉛直一次元圧密解析による安全地下水頭の推定方法

過剰揚水による広域地盤沈下問題を取り扱う場合、地盤の変形状態は、各地点ではほぼ鉛直方向の一次元的とみなすことができるので、圧密層中の地下水の流れを、揚水によって地下水頭が低下した砂礫層に向う鉛直一次元流とすると、飽和地盤中の地下水連続式は、次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.1)$$

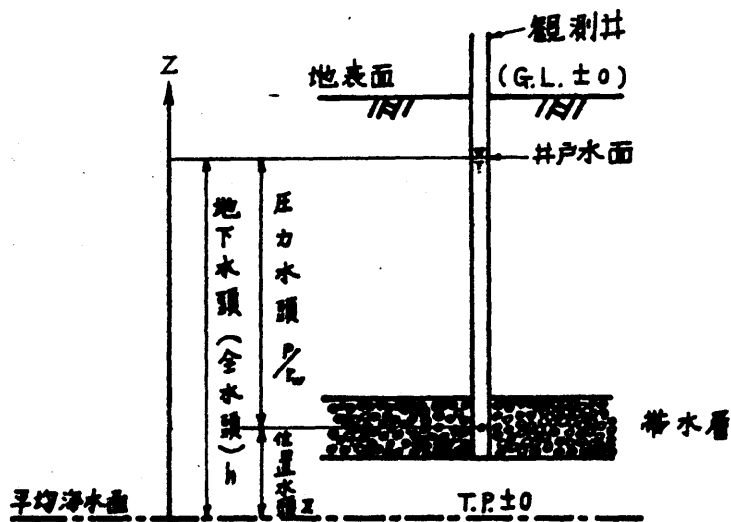
ここで、 $h$ 、 $u$ は今考えている飽和地盤内のある要素における地下水頭と地盤要素の変位量、 $k_z$ は鉛直方向透水係数、 $z$ は平均海水面 (T.P. ±0) を基準として鉛直上方に正とした座標を示している。

図-3.2に鉛直一次元圧密解析を行う場合の基準座標と各水頭との関係を示したが、一般に被圧地下水頭は観測井による井戸水位として計測されており、これら観測井水位を水頭として物理的に矛盾なく圧密解析に利用できるように、今回の計算では、T.P.を基準に上向きを正とした座標を用いることとした。

飽和地盤中における力の釣り合い式は、骨格が弾性体であると仮定すると、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ E \frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_w (h - z) \right\} + f = 0 \quad (3.2)$$

となる<sup>2)</sup>。ここで、 $E$ は側方完全拘束状態での骨格の弾性係数、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量、 $f$ は物体力で地下水位以下の飽和地盤中では土



(注) 濃尾平野では、地表面が平均海水面下にくるゼロメートル地域も広範囲に存在するが、Z軸は平均海水面を基準として、上方に正まとの約束を一貫して用いた。

図-3.2 鉛直一次元浸透流解析における基準座標と各地下水頭の関係

の飽和単位体積重量  $\gamma_{sat}$  となる。

濃尾地下水盆における被圧地下水汲み上げの主要な帯水層（第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層）での地下水頭値は、地下水の汲み上げ状況とその帯水層の涵養条件に支配されているが、それらの値は、近年その数が増加しつつある観測井により実測できるので、以下で述べる一次元圧密モデルでは、帯水層の地下水頭値を既知条件として与えることによって、圧密層における間隙水压状態とそれにもとづく圧縮・膨張を計算することとした。

本研究で取り扱っている地盤沈下は、被圧地下水頭の低下によって生ずる粘土層からの地下水絞り出し現象であり、地表面に構造物が載っている場所は局所的で、一般に地表面における外力下による圧密沈下の影響はないものと考えることが出来る。また、濃尾平野臨海低平



地域における地表付近の不圧地下水については、雨水、河川水等によって涵養されやすく、その地下水頭値は常に地表付近にあると考えられる。

以上のことから、地表面では、

$$\left. \begin{array}{l} T = 0 \\ h = \text{const.} \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

の境界条件を仮定した。

第3帯水層以深は、それより浅い地盤よりかなり固いので基盤と考えて、第3帯水層下面の境界では、

$$\left. \begin{array}{l} u = 0 \\ k_z \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

の境界条件を仮定した。

次に、濃尾平野では地下水過剰揚水による地盤沈下がそれほど激しくなかった昭和25年当時には、粘土層からの地下水絞り出しはほとんど生じておらず、各被圧帯水層はある程度の自噴状態を示す状態にあったと考え、昭和25年の粘土層内の地下水頭分布を、そのような第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層の地下水頭値から推定し、粘土層内の地下水頭に関する初期条件とした。また、このときの地盤沈下量をゼロとした。

なお、これら被圧帯水層の地下水頭に関する条件設定と粘土層内地下水頭分布に関する初期条件の与え方等については、3.4.2 におい

て述べる。

さて、(3.1), (3.2) 式を境界条件 (3.3), (3.4) 式にもとづいて、濃尾平野各観測井地点 (図-3.1 に示した松中, 津島, 中川の3つの観測井) で圧密層内の間隙水圧状態と地盤変位を算定する場合、①各観測井地点で地盤状態が複雑に変化する、②既知条件となる帯水層の地下水頭値が時間的に変化をす、等の理由から (3.1), (3.2) の偏微分方程式を解析的に解くことは困難である。そこで、本研究では数値計算の一手法である有限要素法を用いて数値的に解くこととした。

(3.1), (3.2) 式を境界条件 (3.3), (3.4) 式にもとづいて Galerkin 法により解く方法は既に報告<sup>27)</sup> されている。今回の計算では、Gurtin<sup>30)</sup> が導いた汎関数を利用して、次式によって有限要素に離散化を行った。

$$\pi = \int_L \left\{ -\frac{1}{2} \tau_w \delta_z^* \frac{\partial h}{\partial z} * \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{1}{2} E \frac{\partial u}{\partial z} * \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_w (h-z) * \frac{\partial u}{\partial z} - f * u \right\} dL \quad (3.5)$$

ここで、 $L$  は解析対象の地盤厚さを示し、 $*$  は初期条件も同時に汎関数の中に含めて取り扱うために導入されたもので、一般にたたみ込み積分と呼ばれるものである。

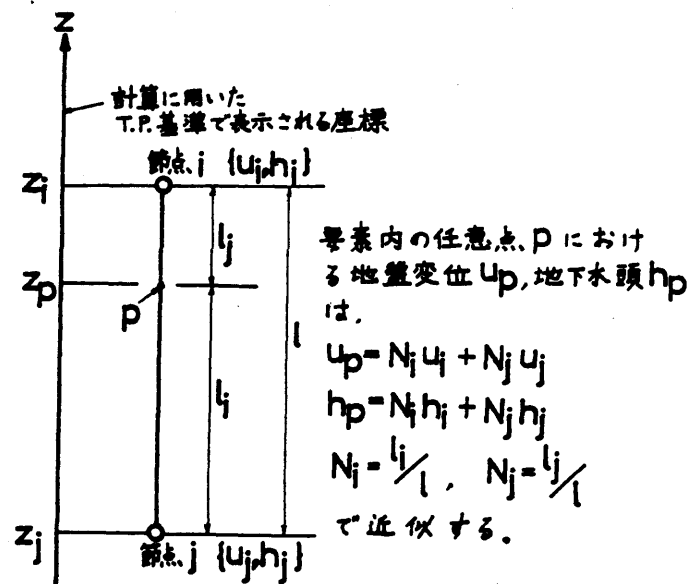
### 3.2.5 有限要素への離散化

有限要素へ離散化する場合、有限要素内での任意の位置の地盤変位  $u_p$  と地下水頭  $h_p$  を次のように一次式で近似した。

$$\left. \begin{aligned} u_p &= \alpha_1 z + \alpha_2 \\ h_p &= \beta_1 z + \beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ここで、 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  は、図-3.3 に示した一次元有限要素を構成する2つの節点の座標 ( $z_i, z_j$ ) とその節点における地盤変位 ( $u_i, u_j$ )、地下水頭値 ( $h_i, h_j$ ) より求まる値である。

(3.6) 式を用いて、図-3.3 に示した一次元有限要素の2つの節点 ( $i, j$ ) における地盤変位 ( $u_i, u_j$ )、地下水頭値 ( $h_i, h_j$ ) を示



(注)  $\{u_i, h_i\}$  は、節点  $i$  における地盤変位  $u_i$  と地下水頭  $h_i$  を示す。

図-3.3 一次元有限要素法に離散化するために仮定された形状関数の説明図

すとは、

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \alpha_1 z_i + \alpha_2 \\ u_j &= \alpha_1 z_j + \alpha_2 \\ h_i &= \beta_1 z_i + \beta_2 \\ h_j &= \beta_1 z_j + \beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

となり、(3.7)式より $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ を算出して、(3.6)式に代入すると

$$\left. \begin{aligned} u_p &= \left\{ \frac{z_p - z_i}{l}, \frac{z_i - z_p}{l} \right\} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \\ h_p &= \left\{ \frac{z_p - z_i}{l}, \frac{z_i - z_p}{l} \right\} \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \end{Bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

となる(図-3.3参照)。

いま、数値計算のしやすさを考え、(3.8)式を次のように整理をし直して有限要素への離散化を行うこととした。

$$\left. \begin{aligned} u_p &= \left\{ \frac{z_p - z_i}{l}, 0, \frac{z_i - z_p}{l}, 0 \right\} \{x\}^e \\ h_p &= \left\{ 0, \frac{z_p - z_i}{l}, 0, \frac{z_i - z_p}{l} \right\} \{x\}^e \\ \{x\}^{eT} &= \{u_i, h_i, u_j, h_j\} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

ここで、 $\{x\}^{eT}$ は $\{x\}^e$ の転置行列を示している。

(3.9)式によって、解析対象の任意の深度 $z$ における地盤変位、地下水頭値は、その深度を含むように設けられた有限要素格子点の地盤変位、地下水頭値によって一義的に定義されることとなる。したがって

て、解析対象全領域にわたって成り立つ汎関数 (3.5) 式も

$$\pi = \pi (z, u_1, h_1, u_2, h_2, \dots, u_n, h_n) \quad (3.10)$$

と解析対象全領域にわたり設けられた  $n$  個の有限要素格子点上の地盤変位、地下水頭関数の関数となる。

変分原理<sup>33)</sup>によれば、(3.1)、(3.2)式を境界条件(3.3)、(3.4)式のもとに解く問題は、解析対象全領域  $L$  において (3.5) 式の汎関数  $\pi$  を最小とするような地盤変位と地下水頭分布を求める問題と等価であることが知られており、(3.10)式を利用して、離散的に表示すれば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \pi}{\partial u_i} &= 0 \\ \frac{\partial \pi}{\partial h_i} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.11)$$

となるような各節点の地下水頭値、地盤変位量を求める問題に帰着される。

(3.11)式は、解析対象全領域内に設けられた  $n$  個の有限要素格子点上における地盤変位と地下水頭に関する  $2n$  組の連立方程式を示しており、これら  $2n$  組の連立方程式を解けば、解析対象領域内各節点における地盤変位と地下水頭値が求まることとなる。

数値計算プログラムの作成方法については有限要素法に関する参考書<sup>34)</sup>に譲るが、プログラム作成に当たっては、(3.11)式の連立方程式を直接組み立てることにはせず、まず要素  $m$  における汎関数の、2つ

の節点上の地盤変位と地下水頭に関する微係数を求め、それら微係数を解析対象地盤における全要素について重ね合わせを行って、(3.11)式の連立方程式をつくることとした。すなわち

$$\sum_{m=1}^M \delta \pi^m = \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\partial \pi^m}{\partial u_i}, \frac{\partial \pi^m}{\partial h_i}, \frac{\partial \pi^m}{\partial u_j}, \frac{\partial \pi^m}{\partial h_j} \right\} = 0 \quad (3.12)$$

によって数値計算に必要な連立方程式を組み立てることとした。ここで、 $m$ は有限要素番号、 $M$ は解析対象領域内の全要素数、 $\pi^m$ は要素 $m$ における汎関数を示す。

図-3.3からわかるように、 $\pi^m$ は要素 $m$ を構成する $i, j$ 節点上の地盤変位 $u_i, u_j$ と地下水頭 $h_i, h_j$ のみの関数となっているので、特定の有限要素 $m$ について、(3.12)式の各微係数を計算しておけば、他の要素についても全く同じ手順で汎関数の微係数が計算されることとなる。

先述の汎関数(3.5)式を用いて、(3.12)式の各微係数を計算し、未知数である節点 $i, j$ の地盤変位と地下水頭値を示す $\{x\}^e$ について整理をすると、

$$\sum_{m=1}^M \left\{ [P]_m \{x\}^e + [S]_m^* \{x\}^e + \{f\}_m \right\} = 0 \quad (3.13)$$

となる。ここで、 $[P]_m$ は要素 $m$ における弾性係数に関するマトリックス、 $[S]_m$ は要素 $m$ における透水性係数に関するマトリックス、 $\{f\}_m$ は要素 $m$ における位置水頭と物体力に関する列ベクトル、 $\sum_{m=1}^M$ は解析対象領域内全要素にわたる重ね合わせを示している。

以下の説明の便宜上、解析対象全領域にわたって重ね合わせを行っ

た後の形を次のように表示する。

$$[P]\{x\} + [S]^*\{x\} + \{F\} = 0 \quad (3.14)$$

$$[P] = \sum_{m=1}^M [p]_m \quad [S] = \sum_{m=1}^M [s]_m$$

$$\{F\} = \sum_{m=1}^M \{f\}_m$$

ここで、 $\{x\}$ は解析対象地盤中に設けられた全節点における地盤変位と地下水頭に関する未知量ベクトルを示し、その並び方は、

$$\{x\} = \{u_1, h_1, u_2, h_2, \dots, u_n, h_n\} \quad (3.15)$$

となっている。

(3.14)式左辺の $\{F\}$ を構成している物体力、位置水頭の時間的变化は、帯水層の被圧地下水頭変化に比してきわめて小さいことを考慮して、(3.14)式を差分近似を用いて漸化式の形で表示し、帯水層の被圧地下水頭値を既知条件として各計算ステップごとに逐次与えながら、圧密層の間隙水圧状態を計算することとした。すなわち、(3.14)式を時間に関して微分すれば、

$$[P]\{\dot{x}\} + [S]\{x\} = 0 \quad (3.16)$$

となる。ここで、 $\{\dot{x}\}$ は時間に関する微分を示している。

いま、(3.16)式を漸化式で表示するために、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ を次のように近似する。

$$\{\dot{x}\}_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (\{x\}_{t+\Delta t} - \{x\}_t) \quad \Bigg\}$$

$$\{x\}_{t+\Delta t/2} = \frac{1}{2} (\{x\}_{t+\Delta t} + \{x\}_t) \quad (3.17)$$

ここで、 $t$ は計算時刻を示し、 $\Delta t$ は計算の時間間隔を示している。

(3.16)式は、各時刻ごとになり立っている式であり、この式に(3.17)式を代入して漸化式の形で表示すれば、

$$\{ [P] + \frac{2}{\Delta t} [S] \} \{x\}_{t+\Delta t} = \{ \frac{2}{\Delta t} [S] - [P] \} \{x\}_t \quad (3.18)$$

となる。(3.18)式は、ある時刻 $t$ の解析領域内の各節点の地盤変位と地下水頭値が与えられたとき、時刻 $t+\Delta t$ における各節点の地盤変位と地下水頭値が $2n$ 組の連立方程式の解として与えられることを示しているが、今回の計算では、帯水層の位置での被圧地下水頭値を実測値等にもとづいて推定し、各時刻ごとに既知量として与えつつ、圧密層における圧密脱水・吸水膨張の計算を行っている。

ところで、上式(3.18)を用いて実際の計算を濃尾平野各観測井地点(図-3.1参照)で行う場合、計算時間の刻み $\Delta t$ を決める必要がある。Desai<sup>25)</sup>は、要素の大きさや土質パラメーター(弾性係数、透水性係数)を各種変化させて、計算結果が意味を持つための条件式を提案しているが、今回の濃尾平野地盤沈下地域での計算では、各計算地点ごとに $\Delta t$ を変えた予備計算を行い、解の安定性と計算に要する時間から考えて、一応、0.05年刻みで数値計算を行うこととした。

なお、鉛直一次元圧密モデルによる計算フローチャートを付録5に示しておいたので参照されたい。



### 3.3 濃尾平野地盤沈下地域での適用とその結果

#### 3.3.1 地盤のモデル化と土質定数の与え方

濃尾平野地盤沈下地域の代表的観測井地点(図-3.1に示した松中, 中川, 津島の3つの観測井地点)で安全地下水頭を算出するために, まずこれら各地点における1950年から1977年までの圧密層内間隙水圧状態を再現させる計算を行った。これら計算地点は現在も地盤沈下が進行している地域にあり, その帯水層の地下水頭状態は観測井によって近年計測されており, 地盤状態や土質定数がボーリング結果, 土質試験結果にもとづいてかなり知りうること, さらに地層別の地盤収縮量もこれら観測井地点では計測されており, 筆者らの方法により得られた計算結果の妥当性を判定できることなどから, これら三地点で安全地下水頭を計算することとした。

図-3.4(a), (b), (c)に松中, 津島, 中川の各観測井地点におけるモデル柱状図を示した。地盤沈下観測井設置時に行われたボーリング調査にもとづく土質柱状図からだけでは, 砂礫層の水平方向のつながりが不明で, 帯水層, 圧密層の判別も困難であったので, この平野内の数多くのボーリング資料に地質学的考察を加えて作成された地盤断面図<sup>28)</sup>も参考にして, 取水帯水層と圧密層を識別して地盤構造のモデル化を行った。

また, 観測井深度(松中観測井は150m, 津島観測井は152m, 中川観測井は150mの深度である)よりも深いところの地盤のモデル化に際しても, 地盤断面図<sup>28)</sup>を参考にした。

なお、有限要素によるモデル化にあたっては、粘土層内に1~2mごとに間隙水圧伝げんの計算点となる有限要素格子点を設け、粘土層からの地下水絞り出しの時間的遅れが十分に再現できるようにモデル化を行っている。

粘土層内の間隙水圧を低下させる方式の圧密試験より得られた体積圧縮係数、透水係数を通常の荷重載荷方式圧密試験の体積圧縮係数、透水係数と比較した研究<sup>36)</sup>もあるが、工学的にみた場合には、両者の相異はそれほど大きくはないとする報告<sup>37, 38)</sup>もあり、ここでは、一応、各観測井地点の相当する粘土層で行われた標準圧密試験結果にもとづいて、モデル化された各圧密層の体積圧縮係数、体積膨張係数と透水

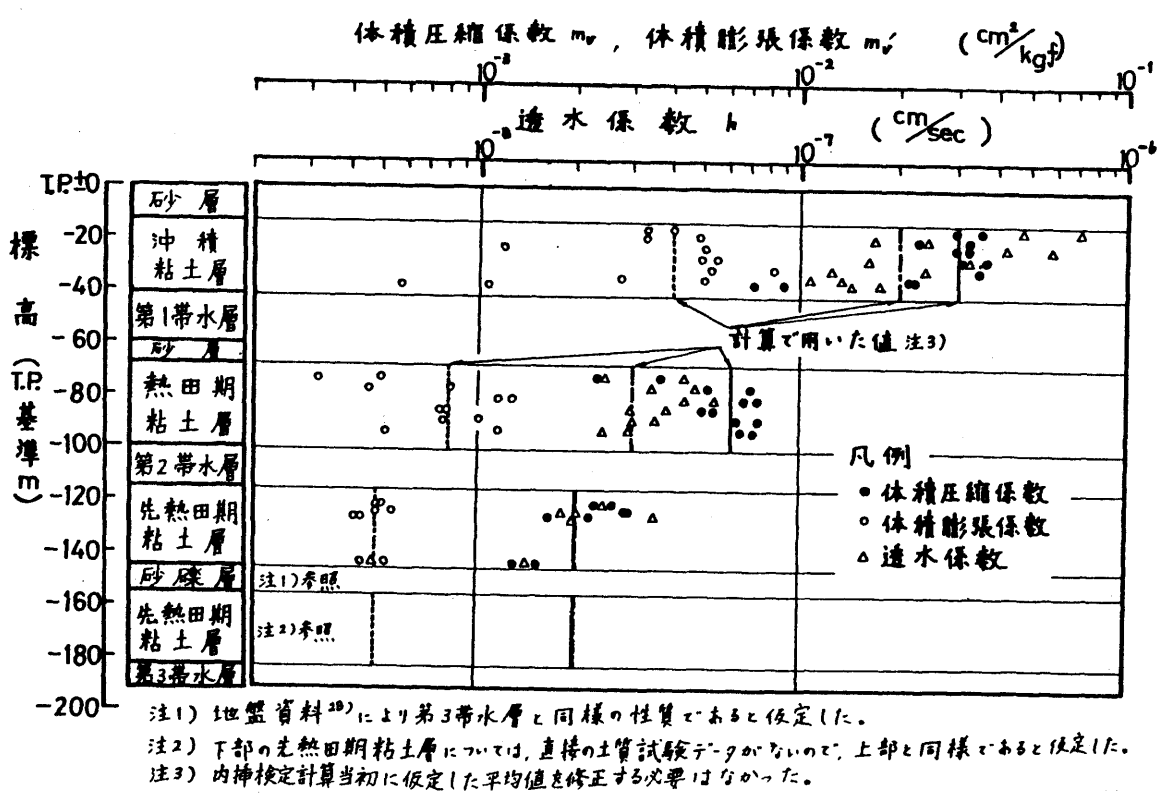


図-3.4(a) 松中地点のモデル柱状図および圧密試験結果と内挿検定によるモデル圧密層に与えた土質定数

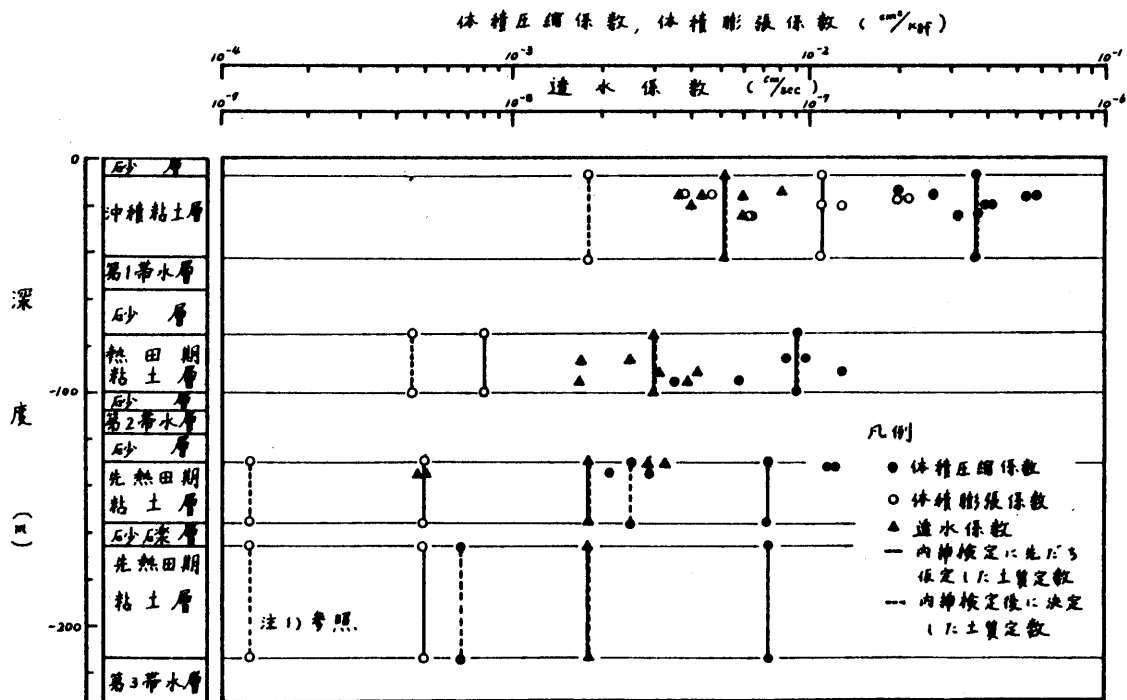
係数を推定することとした(図-3.4参照)。したがって、(3.2)式中の粘土層の弾性係数  $E_c$  は、次の関係によった。

$$E_c = \frac{1}{m_v} \quad (3.19)$$

ここで、 $m_v$  は標準圧密試験結果から得られた体積圧縮係数を示す。

砂層の透水係数は、粒度分析試験より得られた有効径より Hazen の式にもとづいて推定した。砂層の側方拘束状態での弾性係数は、吉中<sup>(40)</sup>による  $N$  値とボーリング孔内弾性係数の関係、あるいは植下<sup>(41)</sup>による深度とボーリング孔内弾性係数の関係を利用して、ポアソン比  $\mu = 0.33$  と仮定することにより推定した。

(3.2) 式中の帯水層の弾性係数  $E_g$  は、各観測井で行われた揚水試験か



注1) 先熱田期下部粘土層については圧密試験資料がなく、内挿検定計算当初は先熱田期上部粘土層と同じ土質定数であることを仮定した。

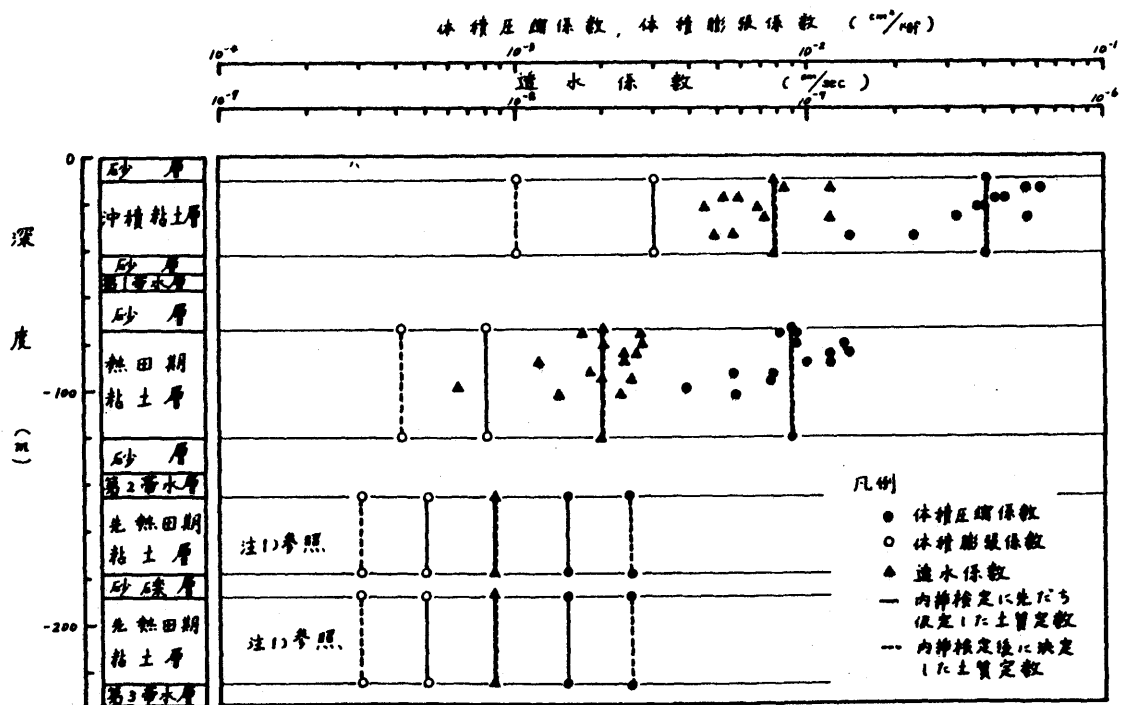
図-3.4(b) 津島地点におけるモデル柱状図および圧密試験結果と内挿検定によってモデル圧密層に与えた土質定数

ら求まった比貯留量  $S_G$  より、次式により推定した。

$$E_G = \frac{r_w}{S_G} \quad (3.21)$$

### 3.3.2 内挿検定による土質定数選定の方法

地盤沈下停止に必要な安全地下水頭値を推定するには、過去から現在にいたる圧密層内の間隙水圧状態を追跡する計算が必要となる。地盤沈下停止に必要な安全地下水頭値は、圧密層内の現在の過剰間隙水圧の消散具合によって変化をすることは容易に理解できる。しかしながら、そうした圧密層内の現在の過剰間隙水圧の消散状況を推定することは困難であるので、本研究では、過去から現在までの被圧帯水層



注1) 先熱田期粘土層については、圧密試験資料がなく、伊島観測井地点における先熱田期粘土層の圧密試験結果の平均値を内挿検定当初の土質定数とした。

図-3.4(c) 中川地点におけるモデル柱状図および圧密試験結果と内挿検定によってモデル圧密層に与えた土質定数

の地下水頭値の変化による各圧密層内の間隙水圧状態を、この鉛直一次元圧密モデルを用いて追跡しつつ、現在の各圧密層内の間隙水圧状態を推定することとした。過去から現在にいたる圧密層内の間隙水圧状態あるいは地盤沈下量の再現が良好に行われないと、地盤沈下停止に必要な安全地下水頭値の推定も正確に行えないことになるので、鉛直一次元圧密モデルを用いた安全地下水頭値を推定する計算においては、この過去から現在にいたる内挿検定計算がきわめて重要な作業となる。

1950年から1977年までの内挿検定計算にあたり、最初にモデル圧密層に仮定した体積圧縮係数と透水係数は、図-3.4(a), (b), (c)に示した圧密試験結果の平均値を用いた。なお、松中観測井(図-3.4(a))と津島観測井(図-3.4(b))の下部の先熱田期粘土層と中川観測井(図-3.4(c))の上下部の先熱田期粘土層については、圧密試験が行われていないので、これらの体積圧縮係数と透水係数を直接推定することはできない。そこで、松中観測井と津島観測井地点の下部の先熱田期粘土層については、上部の先熱田期粘土層と同じ値を仮定し、中川観測井地点における先熱田期粘土層については、津島観測井の先熱田期粘土層で行われた圧密試験結果の平均値を内挿検定計算の当初の仮定として利用することとした。

被圧地下水頭値が上昇した場合の圧密層における体積膨張係数は、吸水膨張試験にもとづき推定するわけであるが、図-3.4(a), (b)に示した松中観測井と津島観測井地点における沖積粘土層以外では、それらを直接推定することは不可能であった。したがって、これら圧密

層については、内挿検定計算当初は松中観測井地点で得られた体積膨張係数を用いることとした。

モデル砂層の透水係数と弾性係数、帯水層の弾性係数は、3.3.1で述べた方法にもとづいて推定した。なお、モデル帯水層の被圧地下水頭値は計算条件として与えるプログラムとなっており、鉛直一次元圧密モデルの帯水層には透水係数を与える必要のない計算となっている。

松中観測井地点では、深度50mと150m、津島観測井では、深度50mと152m、中川観測井では、深度50mと150mの位置にそれぞれ地盤沈下計が設置されており、地層別の地盤収縮量が実測されている。したがって、安全地下水頭値推定のためのモデル各部の土質定数を決定する際には、各観測井付近に設けられた水準点の沈下状況のみならず、これら各観測井で実測されている地層別地盤収縮量も拘束条件として利用した。

モデル圧密層の土質定数の修正は、図-3.4(a)、(b)、(c)に示した圧密試験結果、さらに濃尾平野各地点で行われた圧密試験結果にもとづいて、実際的と思われる範囲で、必要に応じて修正する方法をとった。

砂層の透水係数と弾性係数、帯水層の弾性係数の地盤沈下量に与える影響をみるための予備計算の結果によれば、これら砂礫層の土質諸定数は、圧密層における体積圧縮係数、体積膨張係数、透水係数に比して、計算地盤沈下量にそれ程大きな影響を及ぼさないことが明らかになっており、今回の計算では、内挿検定計算当初に仮定された砂層、帯水層の土質定数は、特に修正対象とはしなかった。

以上のような方法で、3～4回の内挿検定計算を行った後に決定されたモデル各部の土質定数を図-3.4(a), (b), (c) に示したが、松中観測井地点の計算では内挿検定計算当初に仮定した各圧密層における土質試験結果の平均値をそのまま用いることにより、図-3.7(a)程度の再現性をもつモデルを組み立てることができた。

津島観測井と中川観測井についても、沖積粘土層、熱田期粘土層の土質定数は、それら各圧密層内の圧密試験結果の平均値を用いることにより図-3.7(b), (c) に示した程度の再現性を有するモデルを組み立て得ることがわかった。また、内挿検定計算後、修正された先熱田期粘土層の土質定数については、濃尾平野域各地点で行われた先熱田期粘土層内の圧密試験結果のバラツキの範囲(体積圧縮係数:  $1.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ , 透水係数:  $1.0 \times 10^{-9} \sim 4.0 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ )と比較してそれ程大きな距りもなく、モデル全体の性格としては、地盤工学的に納得のゆくものとなっていることが図-3.4(b), (c) より理解できる。

吸水膨張試験の行われていない圧密層の体積膨張係数についても、内挿検定計算によって修正された後の(体積膨張係数/体積圧縮係数)の値は、大体 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10}$ となっており、濃尾平野で過去に行われた吸水膨張試験結果と圧密試験結果より推定される(体積膨張係数/体積圧縮係数)の値(松中で $\frac{1}{25} \sim \frac{1}{4}$ , 稲狐で $\frac{1}{13} \sim \frac{1}{6}$ となっている)に比較して、それ程大きな修正を加える必要もなくモデル各圧密層の体積膨張係数を推定することができた。

### 3.3.3 帯水層の地下水頭条件と粘土層内の初期条件の与え方

濃尾地下水盆での取水層としてモデル化された第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層の地下水頭状態については、観測井による実測値の得られる期間はそれら実測値にもとづいて計算条件を決定した。なお、図-3.5に示すように帯水層の実測地下水頭値は、夏期に低下、冬期に上昇するほぼ一年周期の変動をくり返しながら平均的水頭値が変化する傾向を示すが、今回の計算では1950年以降、長期にわたる帯水層の被圧地下水頭低下によって、粘土層内地下水頭状態が平均的にどのように変化し、地盤沈下がどのように進行してきたかを大局的に把握して、将来の平均的安全水頭を探し出すことを第1の目標としたので、計算条件として与える帯水層の地下水頭値には、これら実測値にみら

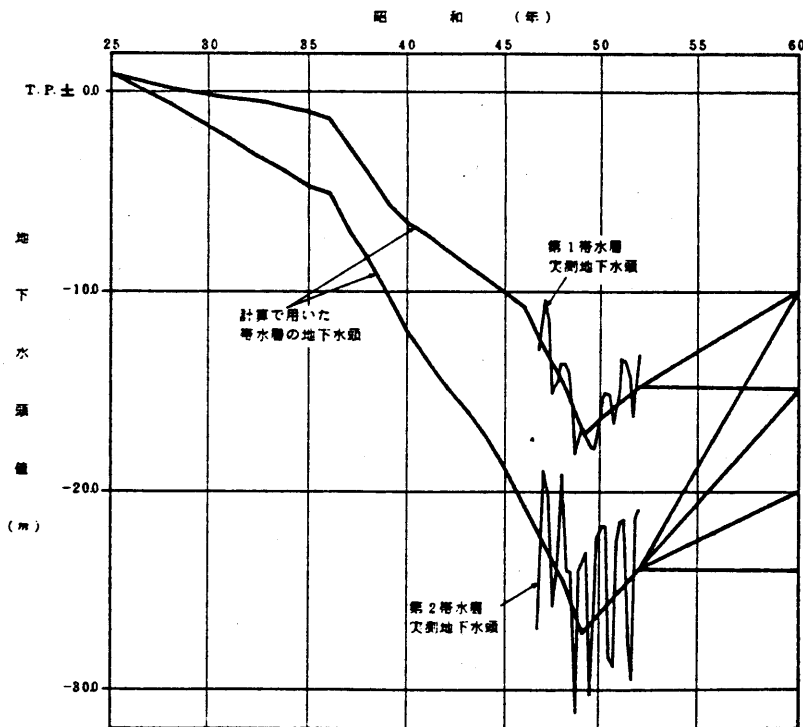


図-3.5 松中地点の計算に用いた第1帯水層、第2帯水層の地下水頭値



れる季節変動は考慮せず、各年の地下水頭の平均値によって計算を進めることとした。

観測井により、直接実測値の知り得ない期間の帯水層の地下水頭値は、各観測井付近における過去の井戸資料を参考にして推定した。

1950年当時の被圧地下水頭低下量は、当時の井戸資料によれば年間およそ十数センチであり、地下水の過剰揚水による粘土層内地下水頭低下による地盤沈下はほとんど生じていなかったこと<sup>42)</sup>から考えると、1950年当時は粘土層からの地下水絞り出しはわずかで、大部分は濃尾平野上流側からの地下水の水平方向涵養だけによって地盤沈下地域の地下水は涵養されていたと推察できる。したがって、1950年における粘土層内地下水頭分布は、その粘土層上下面の帯水層の被圧地下水頭値を結ぶ直線的分布であるとして計算の初期条件とした。

### 3.3.4 内挿検定計算結果と実測値との比較

先述した方法にもとづいて計算に必要な土質定数と初期条件を決定し、帯水層の地下水頭値の平均的変動傾向を各計算ステップごとに追跡しつつ、1950年から1977年までの各圧密層における圧密脱水・吸水膨張の計算を松中観測井地点で行ったところ、地下水頭分布の経年変化として図-3.6、地盤沈下量の推移として図-3.7(a)のような結果を得た。

図-3.7(a)には、これら計算結果の妥当性をチェックするために、計算地点付近に設置されている水準点(K25-17)の沈下状況と、この観測井に設置された沈下計による地盤収縮量(地表面からG.L. -150 mまで)も示した。実測値として利用したK25-17水準点

の水準測量は1961年2月より、観測井地点の地盤収縮量は1971年6月より計測が開始されているので、図-3.7(a)に示した実測値は計測開始年月に相当する計算結果の位置に実測累計地盤沈下量の基準を移動させて示してあるが、図-3.7(a)の結果から判断すれば、計算結果はこれら松中観測井付近の実際の地盤沈下の推移をよく再現していると判断することができる。

計算結果として得られた粘土層内間隙水圧分布と実測結果とを比較するため、1971年1月と1978年6月に松中観測井付近の沖積粘土層内で行われた実測間隙水圧<sup>43,44)</sup>と計算間隙水圧分布の比較を図-3.8に

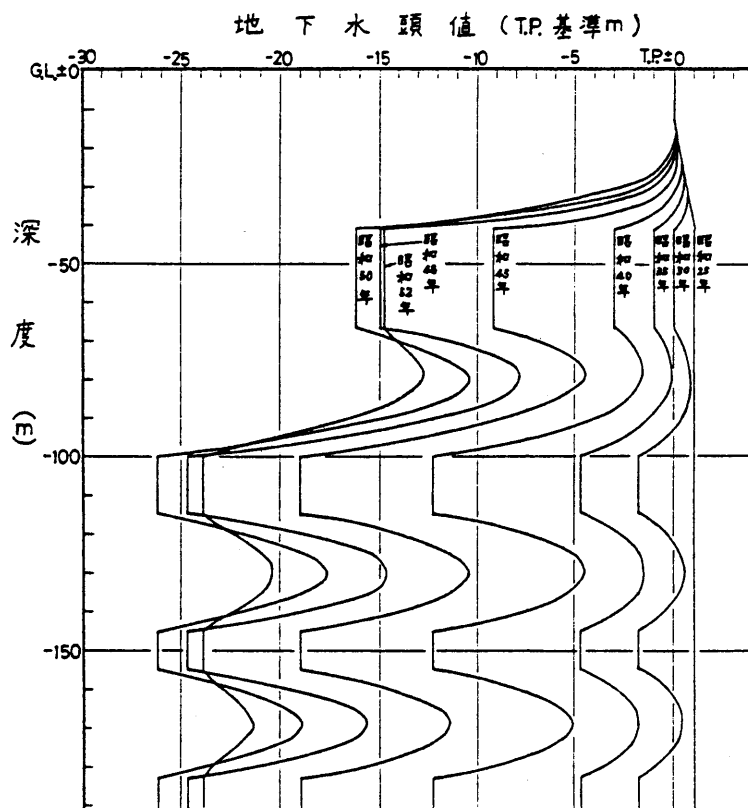


図-3.6 松中地点における地下水頭値の計算経年変化

示した。図-3.8によれば、沖積粘土層内の計算間隙水圧分布は実測間隙水圧分布とよく一致していることがわかる。

なお、中川、津島観測井地点での計算地盤沈下量と各観測井で実測された地盤収縮量、付近の水準点の沈下状況についても図-3.7(a)と同様の比較を行っているが、計算値と実測値は松中地点の場合と同様にかなりよい一致を示している(図-3.7(b),(c)参照)。

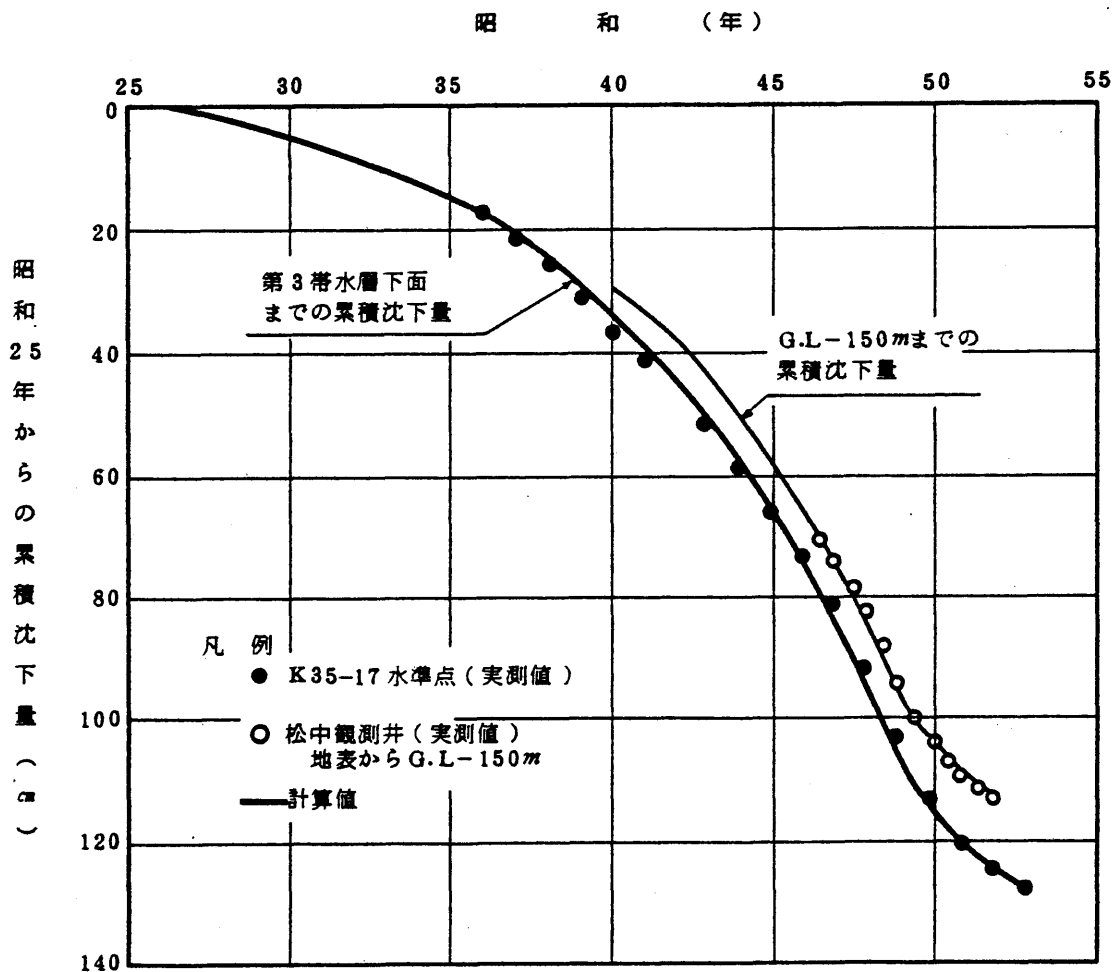


図-3.7(a) 松中地点における計算地盤沈下量と実測値との比較

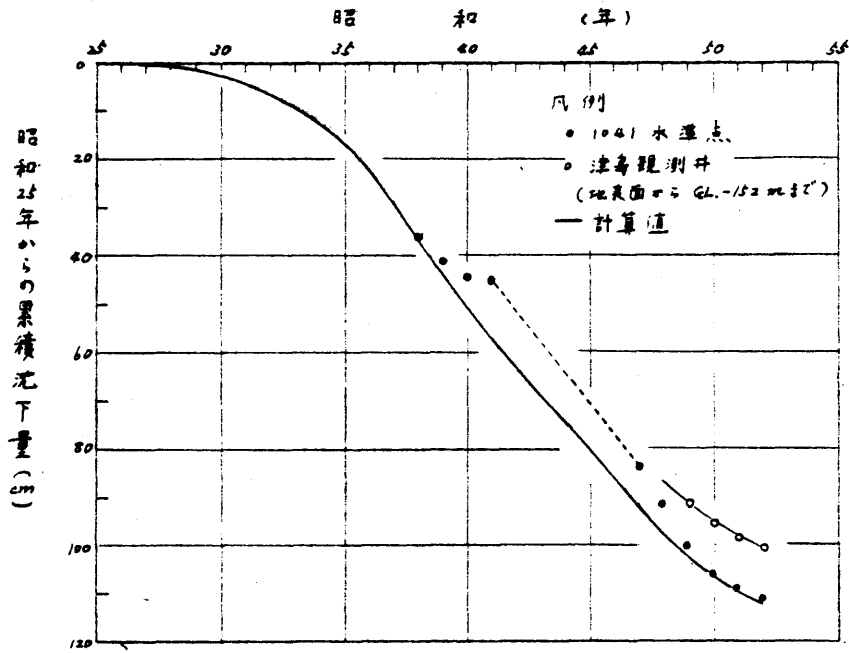


図-3.7(b) 津島地点における計算地盤沈下量と実測値との比較

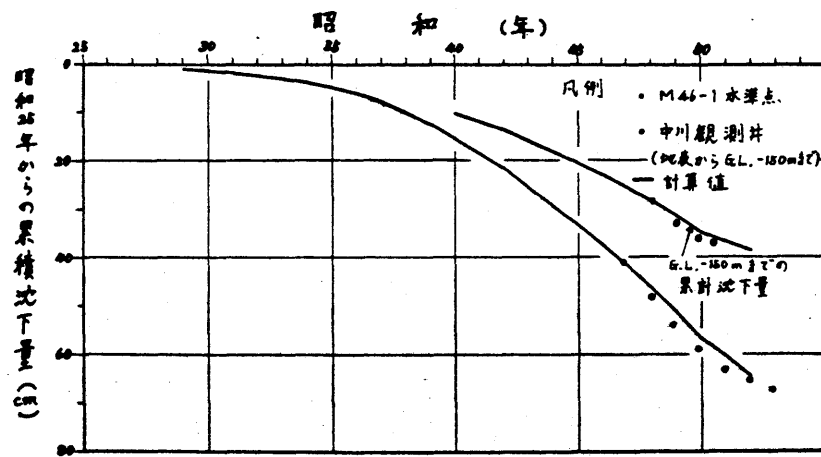


図-3.7(c) 中川地点における計算地盤沈下量と実測値との比較

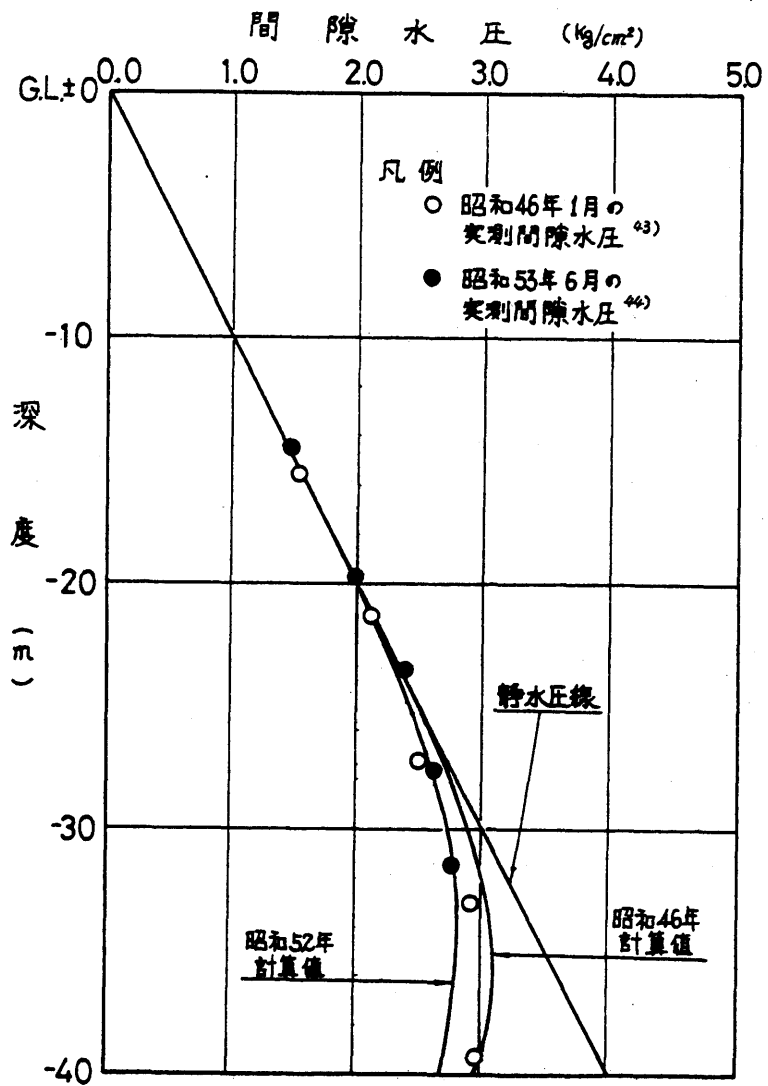


図-3.8 松中地点付近における沖積粘土層の計算間隙水圧と実測間隙水圧の比較

### 3.4 濃尾平野地盤沈下地域の安全地下水頭の算定

図-3.6, 図-3.8 に示した粘土層における間隙水圧分布から理解されるが, 粘土層と帯水層の透水性に大きな差があることから, 一般に圧密層における過剰間隙水圧の消散速度はまわめて遅く, 過去の過剰揚水による帯水層の地下水頭低下に対し, 粘土層内の地下水頭の低下はかなり遅れており, 1977年時点においても, なお圧密層内の各深さでは過去の帯水層の水圧低下に起因する過剰間隙水の脱水が生じ続けている。

したがって, 第1被圧帯水層, 第2被圧帯水層, 第3被圧帯水層の地下水頭値を1977年時点の現状に維持しても, これら粘土層からの地下水絞り出しが継続し, 地盤沈下はなお進行することが予想される。そこで, 図-3.5

に示すように, 各被圧帯水層の地下水頭値を1985年まで現状維持とした場合, または, 各種の回復速度で水頭を上昇させた場合の1977年から1985年までの累計地盤沈下量と, 1985年時点の地盤沈下速度を計算し, 地盤沈下停止に必要な安全地下水頭を探し出す作業を試みた。

今回の計算では, 地盤沈下停止の政策目標達成年度を, 一応1985年(昭和60年)に設定している。地盤沈下停止にとっては, 過剰揚水によって低下した被圧地下水頭を一刻も早く好ましい状態まで回復させることが重要と考える。被圧地下水頭回復には, 現在の地下水揚水量を削減することが必要であり, 濃尾平野域では地下水利用の合理化や各種用水事業計画が進行中であるので, 今回の計算で設定した地盤沈下停止の政策達成目標年度はそれら用水事業の完成目標年度に対応させて決めた。

ところで、図-3.5に示した松中観測井における実測地下水頭値に見られるように、地下水汲み上げ状況と地下水の涵養状況が各帯水層で異なるため、1977年時点の第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層には地下水頭値の差が見られる。将来の地下水管理の条件として、各帯水層間に地下水頭差を設けて、各帯水層間の鉛直浸透涵養を計りつつ地下水管理を行うことも考えられるが、本研究では将来の地下水管理目標を、一応、各帯水層、各地域とも共通の地下水規制値で考えることを試みた。

なお、濃尾地盤沈下地域では、図-3.5に示した実測地下水頭にみられるように、第1被圧帯水層の水頭値は他の被圧帯水層の水頭値にくらべかなり高い値となっている。したがって、安全地下水頭値を探し出すために設定される1985年時点における地下水頭の回復目標値が、1977年現在における地下水頭値より低くなる場合もあるが、地下水頭の高いそれら帯水層の水頭値は現状のままとし、回復目標地下水頭値にくらべ水頭の低い帯水層における地下水頭を目標地下水頭値まで回復させる条件で安全水頭の推定を行った。

図-3.9に、先述の松中、中川、津島の各観測井地点における第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層の地下水頭を1985年時点でそれぞれ図-3.9の横軸の各地下水頭値まで直線的に回復させたときに、1977年から1985年の間に見込まれる累計地盤沈下量(図-3.9の上図)と1985年1年間の地盤沈下速度(図-3.9の下図)を示した。なお、図-3.9の横軸に示した地下水頭値は、対象地点の地盤面を基準とした値で示してある。

図-3.9の計算結果によれば、地盤沈下地域のこれら各観測点で、1985年を目標に被圧地下水頭状態をG.L.-10m程度まで回復させれば、1977年から1985年までの間に4~7cm程度の累計地盤沈下量はお見込まれるが、地盤沈下停止の目標年度とした1985年には現在進

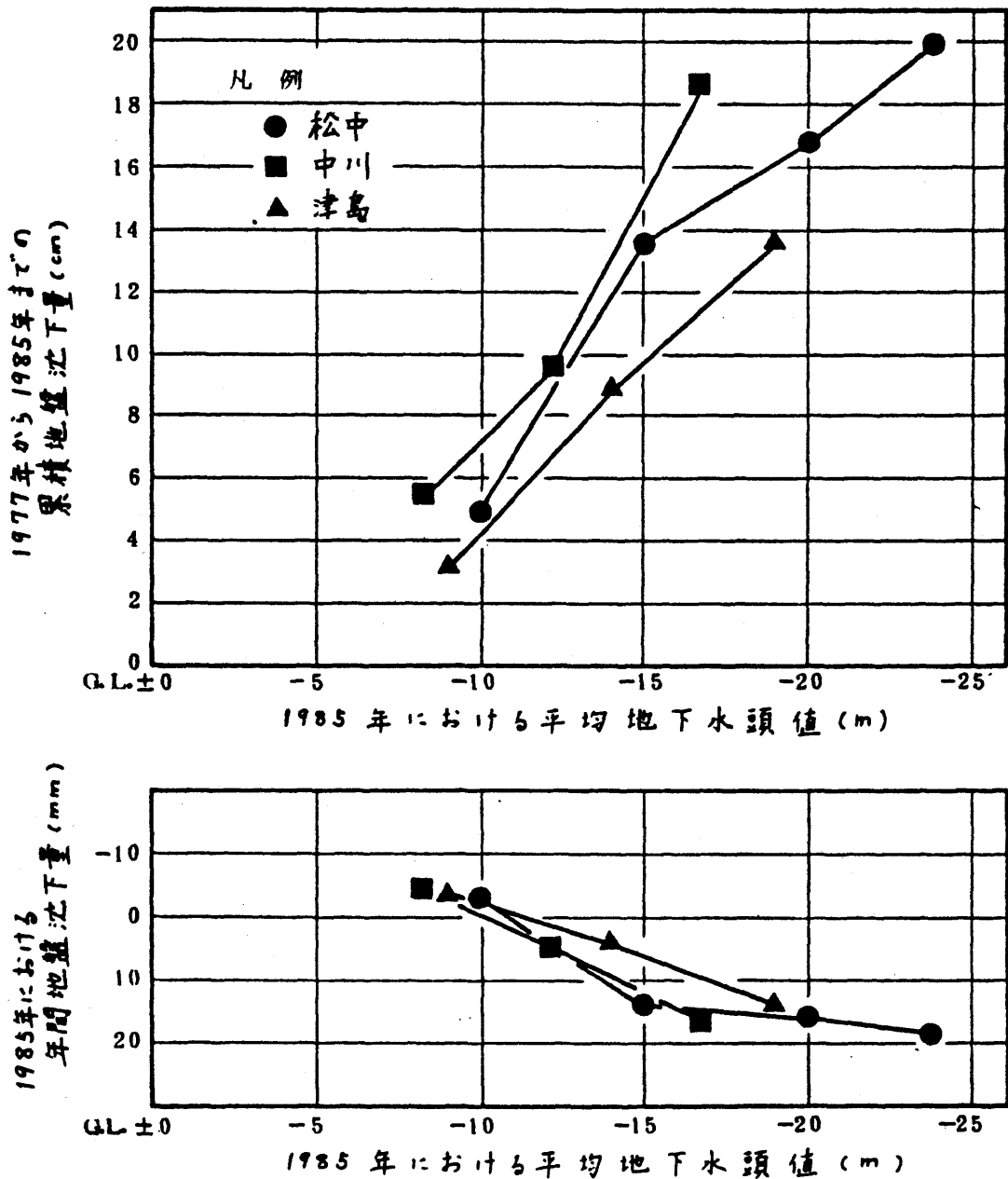


図-3.9 松中、津島、中川における地下水頭の1985年回復目標値と、それに対応した8年間(1977~1985年)の累計沈下量ならびに1985年の年間沈下量との関係



行中の地盤沈下はほぼ停止することがわかる。

地下水頭値と地盤沈下速度、あるいは地下水頭値と地層別累計地盤沈下量との経験的関係にもとづいて濃尾平野地盤沈下停止に必要な安全地下水頭値を推定する試み<sup>26,27)</sup>も行われているが、それらの方法によっても濃尾平野地盤沈下停止に必要な安全地下水頭値を推定することは不可能であった。しかし、以上の研究により、濃尾地盤沈下地域における地盤沈下の激甚地と言われているこれら地域の地盤沈下を停止させるのに必要な被圧地下水頭状態として、G.L. -10mの目標値を見つけ出すことができたわけである。

濃尾平野の地盤沈下を止めさえすればよいという視点からすれば、地下水頭値は高ければ高い方がよいという答となる。しかし、必要以上に地下水頭が上昇してくると、地下構造物(地下鉄、ビルの地階等)では排水処理施設の負荷が大きくなり、新たな問題も生じてくる。さらに、地下水頭が地表面に近づきすぎると、地震時にこれら地下水が地上に噴き出し、構造物等に多大の被害を及ぼす危険性も増大することとなる。

濃尾平野南部の被圧地下水頭には地下水利用のための季節変動(変動の激しい場所で年平均地下水頭値から $\pm 5m$ の変動幅)がみられる。できるかぎり地下水利用を現在の実績に近い状態で続けるという立場から、G.L. -10mを地下水管理の目標値とし、G.L. -(10 $\pm$ 5)mの幅の地下水状態で今後の地下水利用を考えるのが妥当であると判断した。

### 3.5 結論

地下水管理のあり方と濃尾平野地盤沈下地域における地下水管理目標値としての安全地下水頭値について検討し、提案を行った。

本章の要点をまとめると以下のようになる。

(1) 臨海低平地盤沈下地域における地下水適正利用のあり方として、地盤沈下を生ぜず、地震時に安全な地下水圧状態を保ちながら地下水を利用すべきであり、そのために観測井で安全地下水位を確かめながら利用することが考えられる。その地下水管理基準値を地盤工学的に見出す必要がある。

(2) 従来、安全地下水頭値は地盤沈下観測井の水頭値と地盤沈下量または地層収縮量をプロットすることにより推定されていたが、本研究では、地盤沈下地域の観測井地点で、鉛直一次元圧密解析を行って、安全地下水頭値を知る方法を示した。

(3) 鉛直一次元圧密モデルにもとづいて地盤沈下停止に必要な安全地下水頭を計算する際に必要となる土質定数の決定法、帯水層の地下水頭に関する計算条件、粘土層内地下水頭の初期条件の与え方を濃尾平野地盤沈下地域における適用例によって示した。

(4) 濃尾地盤沈下地域の地盤沈下停止に必要な安全地下水頭を、本章で提案した方法にもとづいて計算したところ、地表面下10mの値が得られ、これを濃尾平野での広域地下水管理目標値として使用することを提案し、今後の地下水利用は地下水頭値がG.L. - (10 ± 5) mの範囲で許容すべきことを提案した。

## 参 考 文 献

- 1) 植下協, 佐藤健 : 濃尾平野地盤沈下に対する安全地下水頭の研究, 土木学会論文報告集, 第299号, pp.65~72, 1980.
- 2) C.H. Lee : The Determination of Safe Yield of Underground Reservoirs of the closed Basin Type, Trans. Amer. Soc. Civil Engrs., Vol.78, pp.148-151, 1915.
- 3) P.A. Domenico : Concepts and Models in Groundwater Hydrology, McGraw-Hill, pp.41-77. 1972.
- 4) O.E. Meinzer : Outline of Method for estimating Groundwater Supplies, U.S. Geol. Surv., Water Supply Papers, 638-C, pp.94-144, 1932.
- 5) H. Conkling : Utilization of Ground-Water Storage in Stream System Development, Trans. A.S.C.E., Vol.3, pp.275-305, 1946.
- 6) H.O. Banks : Utilization of Underground Storage Reservoirs, Trans. A.S.C.E., Vol.118, pp.220-234, 1953.
- 7) D.K. Todd : Ground Water Hydrology, John Wiley, pp.200-218, 1959.
- 8) R.A. Hill : Discussion on " Utilization of Ground-Water Storage in Stream System Development " by H. Conkling, Trans. A.S.C.E., Vol.3, pp.306-311, 1946.
- 9) S.T. Harding : Ground Water Resources of Southern San Joaquin Valley, Bull.11, Calif. Div. Eng. and Irrig., Sacramento, p.146, 1927.

- 10) 柴崎蓮雄, 熊井又雄: 被圧地下水層の水収支—とくに佐賀白石平野を例にして—, 地質雜誌, Vol. 74, No. 3, pp. 165~176, 1968.
- 11) 通商産業省名古屋通産局: 昭和53年度濃尾平野地下水理調査報告書(水理解析・資料編), 昭和54年3月。
- 12) 地下水ハンドブック編集委員会: 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp. 1177~1186, 昭和54年。
- 13) 水収支研究グループ: 地下水層の管理[理論と実際], 東海大学出版会, pp. 68~72, 1976。
- 14) 和達清夫: 地盤沈下研究の回顧, 土と基礎, Vol. 24, No. 11, pp. 87~92, 1976。
- 15) 佐藤邦明, 渡辺邦夫: 地下水の適正揚水システムに関する研究, 水資源に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 506~511, 1977。
- 16) 山本荘毅: 地下水の現状, アーバン7ボタ, No. 8, pp. 4~9, 1973。
- 17) 桑原 徹: 木曾三川流域の水資源と水利用, 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書(第三報), 愛知県環境部, pp. 93~119, 昭和52年9月。
- 18) 環境庁編: 昭和54年版環境白書, 大蔵省印刷局, pp. 442~447, 昭和54年6月。
- 19) 成瀬聖慈, 宮崎朝生: 地盤沈下による社会的損失の一考察, 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書(第二報), 愛知県環境部, pp. 201~217, 昭和51年7月。

- 20) 水利科学研究所：1979年版水経済年報，pp.186~205，昭和54年2月。
- 21) 上田年比古，神野健二，長野益徳：広領域地下水からの最適井戸取水について，土木学会論文報告集，第283号，pp.33~43，1979。
- 22) 東海三県地盤沈下調査会：昭和53年における濃尾平野の地盤沈下の状況，昭和54年6月。
- 23) 土木学会新潟震災調査委員会：昭和39年新潟地震震害調査報告，土木学会，1966。
- 24) 土質工学会震害調査委員会：1968年十勝沖地震による地盤震害調査概報，土と基礎，Vol.16，No.9，pp.5~17，1968。
- 25) 大崎順彦：震害調査委員会，土と基礎，Vol.17，No.12，pp.90~12，1969。
- 26) 愛知県環境部地盤沈下対策室，(株)国際航業：昭和51年度尾張地域地下水の利用と将来の沈下予測調査報告書，昭和52年3月。
- 27) 愛知県環境部地盤沈下対策室，(株)国際航業：昭和51年度尾張地域地下水の利用と将来の沈下予測調査資料集，昭和52年3月。
- 28) 桑原 徹：濃尾平野地下断面図，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書，愛知県環境部，pp.159~182，昭和50年3月。
- 29) 赤井浩一，大西有三，安川郁夫：バーチカルドレーン工法の設計法に関する検討報告書，防災研究会，pp.109~125，昭和53年3月。
- 30) M.E. Gurtin：Variational Principles for Linear Initial-Value Problems，Quarterly of Applied Mathematics，Vol.22，No.3，pp.252-256，1964。

- 31) R.S. Sandhu and E.L. Wilson : Finite- Element Analysis of Seepage in Elastic Media, Proc. A.S.C.E., EM3, pp.641-652, 1969.
- 32) Y. Yokoo, K. Yamagata and H. Nagaoka : Finite Element Method Applied to Biot's Consolidation Theory, Soils and Foundations, Vol.11, No.1, pp.29-46, 1971.
- 33) 林 毅, 村 外志夫: 変分法, 応用数学講座, 第13巻, 工口社, pp.7~53, 昭和36年。
- 34) たとえば O.C. Zienkiewicz and Y.K. Cheung : The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, McGraw-Hill, 1967.
- 35) C.S. Desai : Analysis and Evaluation of some Finite Element Schemes for Flow through Rigid and Deformable Media, Int. Conf. on Finite Element in Water Resources, pp.155-179, 1976.
- 36) 佐々木 伸: 中立応力低下による圧密促進に関する研究, 京都大学学位論文, pp.7~27, 昭和50年10月。
- 37) 網干寿夫, 吉國 洋: 軟弱地盤の真空排水工法に関する二,三の実験的研究, 第19回土木学会年次学術講演会第3部, pp.45.1~45.3, 1964。
- 38) 三笠正人: 第9回土質工学研究発表会講演要旨および一般報告, 土と基礎, Vol. 22, No. 10, p.19, 1974。
- 39) 赤井浩一, 足立紀尚: 有効応力よりみた飽和粘土の一次元圧密と強度特性に関する研究, 土木学会論文集, 第113号, pp.11~27, 1965。

- 40) 吉中龍文進：横方向地盤反力係数，土木技術資料，Vol. 10, No. 1, pp. 32~37, 1968。
- 41) 植下 協：濃尾平野の地盤沈下対策に関する考察，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書，愛知県環境部，pp. 243~266, 昭和50年3月。
- 42) 名古屋大学地盤変動研究グループ：伊勢湾北部地域地盤沈下調査研究報告書，昭和42年3月。
- 43) 建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所：地盤沈下対策調査報告書，pp. 128~135, 昭和48年3月。
- 44) 農林水産省東海農政局木曾岬干拓建設事務所，(株)応用地質調査事務所：木曾岬地区堤防沈下対策検討業務報告書(土質調査)，pp. 24~28, 昭和53年9月。

## 第4章 濃尾平野三次元地下水流動モデルについて

### 4.1 概説

濃尾平野で現在進行中の地盤沈下を停止させるには、地下水の汲み上げ量を削減させて、帯水層の地下水頭を安全地下水頭値まで回復させることが必要である。そのためには、水使用の合理化等によって地下水利用量を削減するとともに、それでも不十分な場合は、必要な地下水削減量に見合うだけの代替水を確保して、地下水から地表水利用への転換を計ることとなる。それら代替水供給による地盤沈下対策を行う場合には、地盤沈下停止に必要な地下水削減量を推定することが重要な作業となって来る。なぜならば、それにもとづいて代替水確保のための諸施設の規模が決定されるからである。

こうした地盤沈下停止に必要な適正揚水量を見い出す方法として、広域地下水流動モデルが用いられてきた。濃尾平野においても、いろいろな広域地下水流動モデルを用いて適正揚水量を探し出す試みが行われている。しかし、従来この平野で用いられてきた広域地下水流動モデルは、地盤沈下停止に必要な適正揚水量を推定するモデルとしては満足の中くものではないことが明らかになっている。

そこで、濃尾平野においては、従来用いられてきた広域地下水流動モデルよりもさらに進んだ地下水流動モデルを用いた計算が必要であると判断したので、濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルを組み立て、濃尾平野地盤沈下停止に必要な適正揚水量を探し出す計算を行うこととした。



本章では、そうした濃尾地下水盆三次元モデルを用いて適正揚水量を推定するにいたった理由を説明するとともに、この三次元地下水流動モデルの考え方、組み立て方についても説明を加える。一般に、三次元モデルによる計算は、二次元、準三次元モデルによる計算に比して、計算時間、計算費用などの面から莫大な作業になると言われている。しかし、三次元地下水流動モデルによる広域地下水流動のシミュレーション計算を行うことなくしては、濃尾平野におけるこの問題の最終目的を達することができず、この方針で仕事を完遂することによってのみ、濃尾平野におけるこの分野の作業に一応の結着を与えうるものと考えて、以下の研究を行った。

#### 4.2 広域地下水流動のシミュレーション計算の意義

濃尾平野の地盤沈下は地下水の過剰な汲み上げが主因となって生じている。したがって、この平野における地盤沈下問題の解決には、濃尾平野における水収支の状況を明らかにし、水収支のバランスのとれた揚水量まで地下水汲み上げ量を削減する必要がある。とりわけ濃尾平野では、被圧地下水における水収支状況の解明が重要となる。なぜなら、濃尾平野における地下水利用は、地表付近の自由地下水よりも、深部被圧地下水の汲み上げが中心となっており、これら深部被圧地下水帯の地下水頭低下による地盤沈下が問題となっているからである。

濃尾平野に広範に多数分布した井戸群からの過剰揚水によって生じた地盤沈下問題を考える場合には、それぞれの井戸周辺の地下水状態よりも、ある程度広域的な地下水状態の把握が重要となる。その場合の検討対象範囲としては、できうるならば、地下水盆と呼ばれる地質学的堆積盆地全体を対象にすべきである。濃尾地下水盆は底と縁が不透水性基盤で囲まれた、一種の地下貯水池と見なすことができ、地下水盆の中では地下水は連続しており、広域地下水収支を一つの関連地域全体として考える上では都合がよいからである。

ところで、地表面付近の不圧地下水と、深層にあって圧密層によって被圧された被圧地下水とでは、地下水収支を検討する場合の取り扱いは相当異なっているといわれている<sup>5)</sup>。不圧地下水の場合には、降雨、河川水等の地表水との水の出入りが地下水収支の検討の中心となるのに対し、被圧地下水では、降雨、河川水との関係は間接的であり、不圧地下水からの涵養速度、地下水貯留量などが重要になってくるからである。

被圧地下水の揚水による地盤沈下現象は、地下水の汲み上げによって被圧地下水頭の低下した帯水層に接する粘土層から、地下水頭の低下した帯水層に向って間隙水が絞り出される圧密脱水現象と理解される。したがって、地盤沈下問題を解決するための被圧地下水収支を考える場合には、揚水量、被圧地下水頭、地盤沈下量の三つの関係が定量的に明らかにされるなら、地盤沈下を停止させるための適正揚水量は推定できることとなる。ここに、被圧地下水の揚水による地盤沈下を広域地下水流動の問題として取り扱う意義がある。

広域地下水利用の基準とすべき安全揚水量の概念<sup>6~10)</sup>については第3章で述べた。臨海低平地盤沈下地域での地下水利用の適正値は、地盤沈下による被害(構造物の破損、堤防の治水機能の低下、台風、集中豪雨時の浸水被害)の重大さを考えれば、地盤沈下を生じさせない範囲での揚水量が地下水管理のための安全揚水量として模索されるべきである。

地下水盆内の地下水流動状態は三次元的であり、地下水盆内各部の地盤構造、土質状態も複雑に変化しており、井戸理論<sup>11)</sup>のような解析的方法によって問題を解明することは困難である。そこで、こうした広域地下水問題を解く有効な手段として、大型計算機による数値シミュレーションが利用されるようになってきた。

各種の地盤沈下対策を考える上で、将来の地下水状態、地盤沈下量をできるかぎり正確に予測することが必要となる。ある地域の揚水量をどれだけ許容した場合、帯水層の地下水頭状態がどのように変化し、地盤沈下がどれだけ生ずるかということを定量的に予測することは、臨海ゼロメートル地域の防災対策、将来の揚水計画を考える上で重要な作業となる。そのような作業を概括的になす方法が広域地下水シミュレーション計算であり、その意義はきわめて大きい。

#### 4.3 濃尾地下水盆三次元地下水流動モデル作成の意義

濃尾平野で現在問題となっている地盤沈下を停止させるには、地下水の汲み上げ量を削減させて、地下水頭状態を好ましい状態まで回復させる必要がある。そうした、地盤沈下を停止させるための地下

水利用のあり方を探し出すために、濃尾平野で広域地下水のシミュレーション計算が数多く行われている。

しかし、従来用いられてきた地下水流動モデルは、濃尾地下水盆内の地下水の流れを水平二次元流<sup>(2,13)</sup>と仮定したり、鉛直断面内での二次元流<sup>(14)</sup>と仮定したりして、実際の地下水流動状態をあまりにも単純化しすぎていることが、各種地下水調査、地盤調査結果等から明らかになってきている。

広域地下水流動のシミュレーション計算を行う場合は、まず過去から現在にいたるモデルと実際との対応をみて、対応のよくない所を適宜修正しつつ、実際との対応（通常は地下水頭値の対応で判断する）のよいモデルとするために内挿検定が行われる。従来用いられてきた地下水流動モデルは先述したように実際の地下水流動状態をあまりにも単純化しすぎているために、内挿検定計算を行って、モデル各部の土質定数や境界条件をどのように修正しても満足のゆくモデルを組み立てることができなかつたり、修正した後の土質定数が実際の現場試験結果と大きくかけ離れたモデルとなっていたりして、濃尾平野地盤沈下問題を解決するための地下水流動モデルとしてはあまりにも多くの問題点を有することが明らかになっている。

帯水層では地下水流動状態を水平二次元流と仮定し、圧密層では鉛直一次元流と仮定して組み立てられる準三次元地下水流動モデル<sup>(15~19)</sup>を利用して、濃尾平野域の広域地下水流動のシミュレーション計算を行った例もある。しかし、それら準三次元地下水流動モデルも、圧密層からの地下水絞り出しを無視していたり、地下水絞り出し量を水準測量

結果等にもとづいて既知量として与えていたりして、濃尾平野地盤沈下問題を解決するための広域地下水流動モデルとしては満足の中くものでなかった。

環境庁<sup>19)</sup>の組み立てた準三次元地下水流動モデルが、濃尾平野で用いられた地下水流動モデルの内では最も実際の適用性の高いモデルであると思われる。しかし、この準三次元地下水流動モデルを濃尾地下水盆全域に適用することは困難であった。なぜなら、準三次元地下水流動モデルは、濃尾平野臨海部の粘土層と帯水層が互層構造となっている地域では地下水流動状態の近似が可能ではあるが、濃尾地下水盆北部の粘土層が存在せず砂礫層が地表から連続して堆積した地域では、濃尾平野臨海部と同じ仮定で適用することが困難であったからである。

筆者は、濃尾地下水盆の中の地下水の三次元的な動きを現実在即して把握するためには、三次元地下水流動モデルによるこの平野域の広域地下水のシミュレーション計算が必要であると考へ、濃尾地下水盆の三次元地下水流動モデルを組み立てた。

準三次元モデルでは、圧密層と帯水層が互層になっている地域の地下水流動状態しかシミュレートできないのに対し、この三次元地下水流動モデル<sup>1~3)</sup>によれば、あらゆる地盤構造条件の地下水流動状態をシミュレートすることができる。

また、粘土層における貯留量の減少、つまり地下水絞り出し現象も考慮しているので、モデル各部に与える比貯留量、透水係数のパラメータを、内挿検定計算を行っている段階で大きく修正する必要もなく、

物理的意味のそこなわれない地下水流動モデルを組み立てることも可能である。

広域地下水を対象にした地下水流動のシミュレーション計算を行う場合には、対象とする地下水盆の地盤状態、地下水状態に関する情報量に見合った地下水流動モデルを用いた方が、大過のない判断を下すことができる。

濃尾地下水盆において、三次元地下水流動モデルを組み立てる意義は、地下水盆内の地下水流動を現実在即してシミュレートして濃尾平野地盤沈下問題解決のために具体的に貢献しうるとともに、他地域での同様のシミュレーション計算にも間接的に貢献しうることにあると考えている。

#### 4.4 濃尾平野の地下水流動と地盤沈下に関する従来のシミュレーションモデル

##### 4.4.1 平面二次元地下水流動モデル

平面二次元地下水流動モデルによるシミュレーション計算<sup>12, 13)</sup>が、図-4.1に示す領域で行われている。

建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所<sup>12)</sup>の行ったシミュレーション計算は、熱田層下部にある第2帯水層( $G_2$ )から第1帯水層( $G_1$ )までを濃尾平野における主要な被圧帯水層とみなし、この主被圧帯水層内の地下水流動に水平二次元モデルを適用したものである。名古屋市<sup>13)</sup>の組み立てたモデル

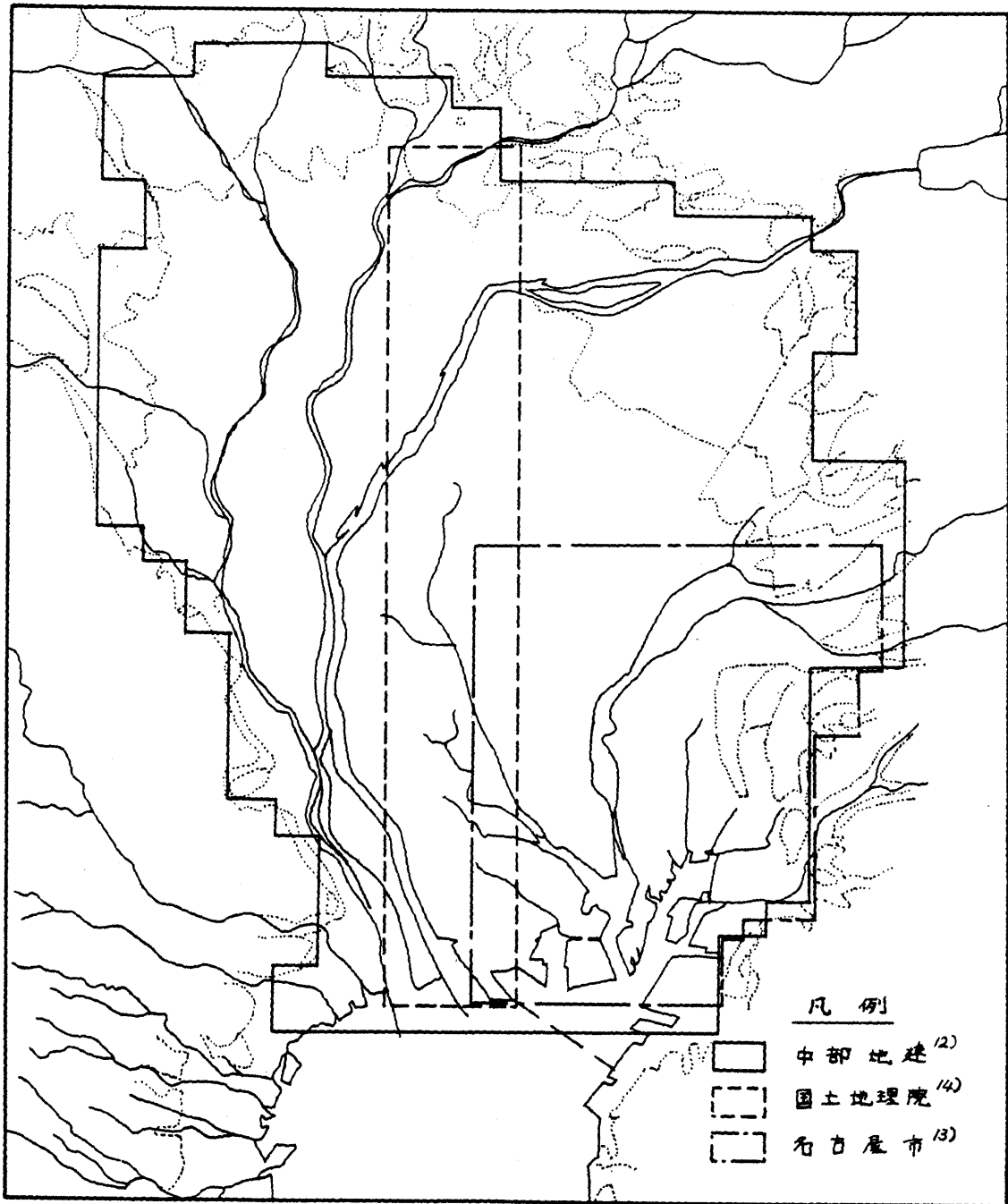


図-4.1 濃尾平野で適用された平面二次元モデル<sup>(12,13)</sup>  
鉛直二次元モデル<sup>(14)</sup>の範囲

は、第2帯水層 (G<sub>2</sub>) から第三紀層までを主被圧帯水層とみなしている (名古屋市域には第1帯水層 (G<sub>1</sub>) は存在せず、地下水の利用は第2帯水層以深から行われている)。

いずれのモデルも考え方は同じであるので、以下、建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所<sup>(12)</sup>で行われた平面二次元地下水流動のシミュレーション計算について説明する。

地下水盆における地下水流動状態は、一般には三次元であり、それら地下水流動の基礎式を Darcy 則と質量保存則にもとづいて表わすと次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

ここで、 $k_x, k_y, k_z$  は  $x, y, z$  方向の透水性係数、 $S_s$  は比貯留量、 $h$  は地下水頭値を示している。

図-4.2 に、濃尾平野地下の地盤構造と水平二次元地下水流動モデル<sup>(12)</sup>の対応を示した。いま、図-4.2 に示す第2帯水層 (G<sub>2</sub>) 下面から第1帯水層 (G<sub>1</sub>) 上面までにわたり (4.1) 式を積分すると

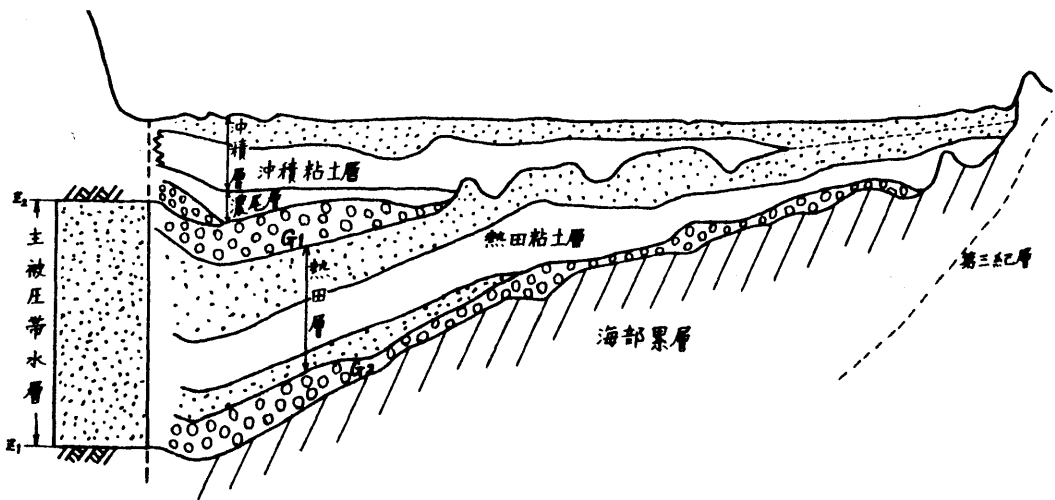


図-4.2 平面二次元地下水流動モデル<sup>(12)</sup>の地盤構造



$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) dz + \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) dz = \left[ k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z_1}^{z_2} + \int_{z_1}^{z_2} (S \frac{\partial h}{\partial t}) dz \quad (4.2)$$

となる。ここで、主被圧帯水層が等方均質で、主被圧帯水層内では地下水頭の鉛直方向の変化がないものと仮定すれば、(4.2)式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} (T \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + k_z \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z_1} - k_z \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z_2} \quad (4.3)$$

となる。ここで、 $T$ は透水量係数、 $S$ は貯留係数を示す。右辺第2項、第3項は、主被圧帯水層上面と下面での地下水流出入量を示しているが、この水平二次元地下水流動モデル<sup>(2)</sup>では、第2帯水層以深の地層は不透水性の基盤と仮定された。

さて、主被圧帯水層からの井戸による揚水の取り扱いについては、揚水対象となるその要素から一様に揚水されているとして、上式(4.3)の右辺に、単位時間、単位面積あたりの揚水量 $W$ を加えて水平二次元地下水流動モデルを組み立てている。

具体的な数値計算は、Tyson and Weber<sup>20)</sup>の示した差分近似表現を用い、図-4.1に示す領域(面積約1500 km<sup>2</sup>)を、東西2 km、南北2 kmの4 km<sup>2</sup>の小領域に分割して、シミュレーション計算を行っている。

1960年から1993年まで内挿検定計算を行っているが、この水平二次元流のシミュレーション計算<sup>(2)</sup>で行われた内挿検定の方法を説明するため、Tyson and Weberの差分近似を行った後の数値計算式を示すと次のようになる(図-4.3参照)。

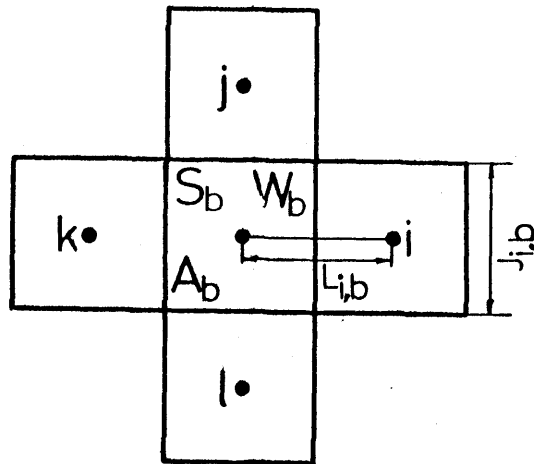


図-4.3 平面二次元地下水流動モデル<sup>(12,13)</sup>の差分格子の説明図

$$\left. \begin{aligned} \sum (h_i - h_b) Y_{i,b} &= A_b S_b \frac{dh_b}{dt} + A_b Q_b \\ Q_b &= W_b - k_z \frac{dh_b}{dz} \Big|_{z_z} \\ Y_{i,b} &= \frac{J_{i,b} T_{i,b}}{L_{i,b}} \end{aligned} \right\} (4.4)$$

ここで、 $A_b$ は数値計算を行うために分割された領域**b**の面積(4 km<sup>2</sup>)、 $J_{i,b}$ は領域**b**と隣接する小領域*i*との境界を構成する四辺形の1辺の長さ(2 km)、 $L_{i,b}$ は領域**b**と領域*i*との中心距離(2 km)、 $T_{i,b}$ は領域**b**と領域*i*間の平均透水量係数、 $S_b$ は領域**b**の平均貯留係数、 $W_b$ は領域**b**からの単位時間、単位面積当りの揚水量、 $Q_b$ は領域**b**からの単位時間、単位面積当りの鉛直方向地下水流出入量を示す。

地下水汲み上げ量の集計は、1973年の地下水利用実態調査<sup>(21,22)</sup>に  
とづいて推定しているが、(4.4)式中段の右辺第2項における主被圧帯  
水層への鉛直方向の地下水涵養量については次のような処理を行っ  
ている<sup>(12)</sup>。すなわち、1960年から1973年までの内挿検定期間中におけ

る主被圧帯水層からの揚水量は、先述の地下水利用実態調査<sup>21,22)</sup>結果よりかなり推定しうるので、(4.4)式において、鉛直方向の地下水流出入を示す $Q_b$ としては、領域Bからの揚水量( $W_b$ )だけを考慮した。そして、鉛直方向の地下水涵養量を無視した効果は、1960年から1973年の内挿検定計算を行っている段階で、計算地下水頭値が実測値に合致するように、貯留係数 $S_b$ を修正することによって考慮した。したがって、修正された後の貯留係数は、主被圧帯水層への鉛直方向の涵養による効果をも考慮したパラメーターとなっており、見かけの貯留係数<sup>12)</sup>と呼ばれた。なお、名古屋市<sup>13)</sup>が行った平面二次元地下水流動のシミュレーション計算においても、鉛直涵養量の効果を主被圧帯水層における見かけの貯留係数を用いることによって近似している。

その結果、これら平面二次元地下水流動モデルにおける貯留係数は、被圧帯水層における一般的な値( $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3}$  程度といわれている<sup>23)</sup>)に比較してかなり大きな値となっており(建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所<sup>12)</sup>で用いられたモデルでは $5 \times 10^{-3} \sim 5.5 \times 10^{-1}$ 、名古屋市<sup>13)</sup>で用いられたモデルでは $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1}$ が同定されている)、モデル各部の貯留係数と実際の地盤構造との対応をつけることができなくなっている。

尾島<sup>24)</sup>は、(4.4)式を用いて、愛媛県重信川下流域の地下水流動のシミュレーション計算を行い、(4.4)式の鉛直方向の地下水流出入を示す $Q_b$ について考察を加えている。それによれば、鉛直涵養量と揚水量を含む仮想的な鉛直方向地下水移動量 $Q_b$ を、実測地下水頭値、帯水層定数(透水量係数、貯留係数)から逆算すれば、実測地下水頭値を良好

に再現できることがわかっている。しかし、仮想的な鉛直方向地下水移動量 $Q_v$ を無視した場合には、いかなる帯水層定数をモデルに与えても、実測地下水頭値を良好に再現することはできず、平面二次元地下水流動モデルでは、この鉛直方向の地下水移動量 $Q_v$ の取り扱いが非常に重要であることを指摘した。

なお、前述の(4.3)式右辺、第3項の鉛直方向の地下水涵養量を評価するために、平面二次元モデルとタンクモデルを併用して、地下水収支のシミュレーション計算を行った例もある。その場合、タンクモデルのパラメータの決定方法やそれらパラメータの物理的意味に、なお問題点を残すことが明らかになっている<sup>25)</sup>。

地盤沈下観測井網の拡充によって、濃尾平野各帯水層の地下水状態が着実に解明されつつある。それら結果によると、濃尾平野には主要な三つの被圧帯水層(これを第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層と呼ぶ)があり、各帯水層の地下水頭状態はかなり異なっていることが判明している。とくに、第2、第3帯水層の地下水頭値は第1帯水層の地下水頭値よりもかなり低いことがわかっている。したがって、地下水頭状態のかなり異なる各帯水層間の鉛直方向の地下水流動を無視して平面二次元モデルを適用することは困難である。また、建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所<sup>12)</sup>の計算では、内挿検定期間中における実測地下水頭値として第1帯水層と第2帯水層の平均地下水頭値を一応用いているが、この水平二次元地下水流動モデルより得られた地下水頭値は、どの帯水層の地下水頭値を表わしているのか問題点も残る。

濃尾平野では、土質調査、広域地下水調査がかなり行われてきており、地盤構造、地下水流動状態もかなり解明されつつある。したがって、地下水流動モデルもこれらの各種調査結果を踏まえた上で、組み立てられるべきである。その意味から、濃尾平野で用いられた水平二次元モデル<sup>(12,13)</sup>による計算では満足ゆく地下水流動のシミュレーション計算は不可能で、地下水頭値、地盤沈下量の定量的予測も困難である。

平面二次元地下水流動モデル<sup>(12,13)</sup>では、圧密層からの地下水絞り出しは考慮していないので、次のような便宜的方法によって地盤沈下量の計算を行っている<sup>(2)</sup>。すなわち、平面二次元地下水流動モデルの主被圧帯水層における計算地下水頭値は、第1帯水層と第2帯水層の地下水頭値を表わしているものと考え、それら計算地下水頭値を用いて、沖積粘土層と熱田層内粘土層の圧縮量を次式で求めている(図-4.4参照)。なお、地盤沈下量を計算する場合、地表付近の不圧帯水層の地下水頭値は一定であると考えている。

沖積粘土層

$$\Delta S_1 = H_1 \cdot m_{v1} \cdot r_w \cdot \frac{1}{2} \Delta h$$

熱田粘土層

$$\Delta S_2 = H_2 \cdot m_{v2} \cdot r_w \cdot \frac{1}{2} \Delta h$$

(4.5)

ここで、 $\Delta h$ は平面二次元地下水流動モデルにおける主被圧帯水層の地下水頭低下量、 $r_w$ は水の単位体積重量、 $m_{v1}$ 、 $m_{v2}$ は沖積粘土層、熱田層内粘土層の体積圧縮係数、 $H_1$ 、 $H_2$ は沖積粘土層、熱田層内粘土層の層厚、 $\Delta S_1$ 、 $\Delta S_2$ は沖積粘土層、熱田層内粘土層の地盤収縮量を示す。

なお、同様の水平二次元地下水流動モデルは、山本ら<sup>(26)</sup>によっても

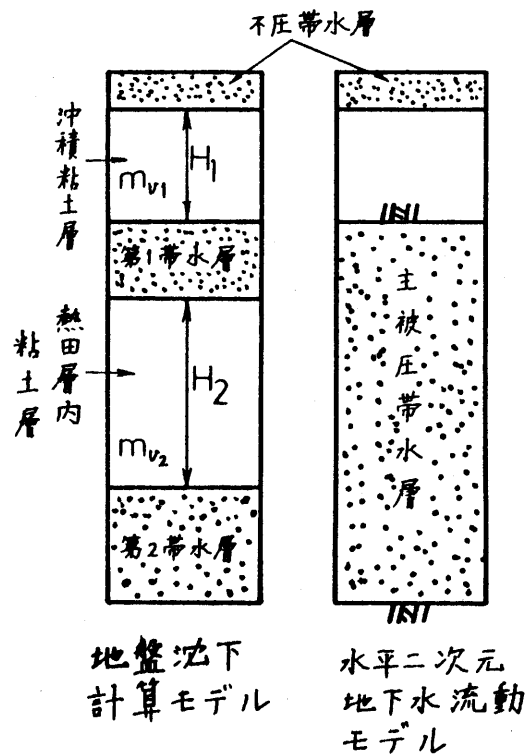


図-4.4 平面二次元地下水流動モデル<sup>(12)</sup>による地盤沈下計算の説明図

東京都における地盤沈下シミュレーション計算に適用されている。

#### 4.4.2 鉛直二次元地下水流動モデル

濃尾平野で行われた建設省国土地理院らによる鉛直二次元地下水流動モデル<sup>(14)</sup>の平面領域を図-4.1に示したが、南北方向46.2 kmにわたる地下水流動のシミュレーション計算を行っている。鉛直二次元地下水流動モデルは、鉛直断面内での地下水流動を考えるが、地下水汲み上げ量を整理する上で、有限幅(6762 m)をもつ図-4.1に示したような領域を考える必要がある。

モデル化された地盤構造を図-4.5 に示した。南北46,200 m, 深さ250 mまでの地盤を, 深さ方向に10 m, 南北方向に924 m間隔に分割して地盤構造のモデル化を行っている。図-4.5 からわかるように, モデル化された地盤の最下層には, 海部累層最下部の砂礫層(第3帯水層)まで含めている。

先述の(4.1)式において,  $y$ 方向の地下水流動が無視できると仮定して, 差分近似による数値計算を行い, 内挿検定計算は1963年から1973年まで行っている。

先述の(4.1)式において,  $y$ 方向の地下水流動が無視できると仮定して, 差分近似による数値計算を行い, 内挿検定計算は1963年から1973年まで行っている。

井戸からの揚水については次のような取り扱いをしている<sup>(4)</sup>。すなわち, 図-4.5 に示す6762 mの奥行きをもつ小領域内にストレーナーが設けられている井戸がある場合, その井戸からの地下水汲み上げは, その小領域全体からまんべんなく平均的に行われていると近似した。そ

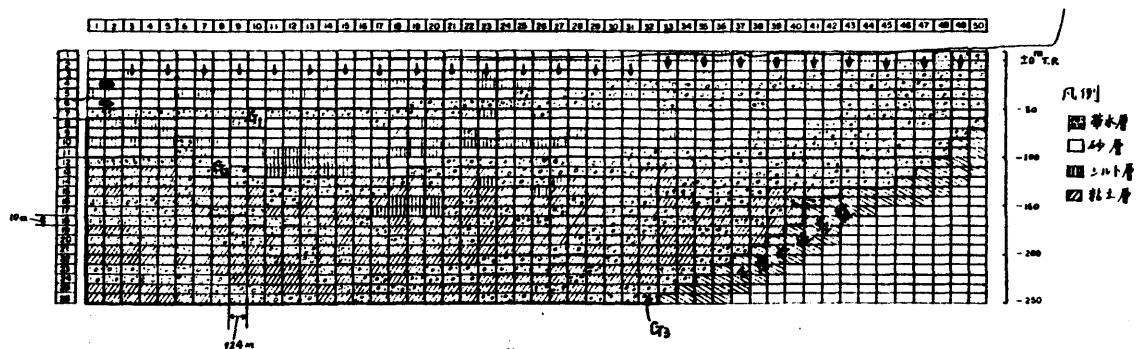


図-4.5 濃尾平野で行われた鉛直二次元地下水流動モデル<sup>(4)</sup>の地盤構造

して、(4.1)式右辺に、単位時間、単位体積当りの揚水量をつけ加えて差分近似による数値計算を行っている。この鉛直二次元地下水流動モデルの差分近似による数値計算の手順と、計算機プログラムについては文献 10) に詳述されている。

図-4.5 からわかるように、粘土層内には数点の差分格子点が設けられているので、粘土層からの地下水絞り出しの時間的遅れ効果も、一応は考慮できる。したがって、各時刻で得られた計算地下水頭値を用いて、第 $l$ 層における地盤収縮量を次式で算出している。

$$\Delta S_l^i = m_{v,l} \cdot \Delta z \cdot \gamma_w \cdot \alpha h_l^i \quad (4.6)$$

ここで、 $\Delta S_l^i$  は第 $l$ 層小領域の $i$ 年1年間の地盤収縮量、 $\Delta z$  は小領域の層厚(10m)、 $\gamma_w$  は水の単位体積重量(1 $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\alpha h_l^i$  は第 $l$ 層小領域における $i$ 年1年間の計算地下水頭低下量を示す。

さて、内挿検定計算を1963年から1973年まで行うには、各小領域の土質定数(透水係数、比貯留量)、境界条件、初期条件を決める必要がある。土質定数については、図-4.5 に示す地盤を9つの土質領域に区分し、それら各土質領域内の土質定数を一定とした。そして、粘土層については圧密試験結果にもとづいて比貯留量、透水係数を推定したが、他のパラメーターについては Domenico<sup>27)</sup> が示した比貯留量を用いたり、内挿検定計算より試行錯誤的に同定した。境界条件、初期条件についても、内挿検定期間中に試行錯誤的に修正しつつ、計算地下水頭値が実測値に合致するように設定された。

この鉛直二次元地下水流動モデル<sup>14)</sup>では、内挿検定期間中のパラメ



ターの修正は主に透水係数について行っているが、文献(4)の出版段階では、なお満足の中の内挿検定計算結果は得られておらず、地下水頭、地盤沈下量の予測についても不明のままである。

図-4.1からもわかるように、この鉛直二次元地下水流動モデル<sup>(4)</sup>によつては、濃尾地下水盆全体にわたる広域地下水流動状態を再現することは不可能で、濃尾平野に存在する多数の井戸からの揚水による地下水頭低下と地盤沈下現象を満足にシミュレートすることはできない。

ところで、この鉛直二次元地下水流動モデルを実際に運用する場合には、特別な揚水量集計が必要となる。揚水量集計を行うに際しては、先述したようにある一定の幅を決めて、その幅の中に存在する井戸からの地下水汲み上げ量について整理を行うことが必要である。しかし、この幅の決定方法は不明で、内挿検定計算によつて決定する以外に方法はなく、鉛直二次元地下水流動モデルの物理的意味をあいまいなものとしていることは既に指摘<sup>(28)</sup>されている。

同様の鉛直二次元地下水流動モデルは、舟橋市、市原市、千葉市でも組み立てられているが、いずれの場合も揚水量集計時に必要となる鉛直二次元モデルの幅は、他の小領域の諸元にくらべかなり大きな値が用いられている(舟橋モデルでは1500m、市原モデルでは3500m、千葉モデルでは3000m<sup>(10)</sup>)。

なお、鉛直二次元モデルによる計算はロックフィルダムや堤体の浸透問題等によく利用されているが、その場合には、自由地下水面の取り扱いが問題になってくることが指摘<sup>(25)</sup>されている。

#### 4.4.3 準三次元地下水流動モデル

地下水流動を、帯水層では水平二次元流、圧密層では鉛直一次元流と近似して組み立てられるモデルが準三次元地下水流動モデルと呼ばれ、各著者<sup>29~38)</sup>によって、いくつかの準三次元地下水流動モデルが提案されている。濃尾平野でも準三次元地下水流動モデルを適用して、広域地下水流動のシミュレーション計算<sup>15~19)</sup>が行われている。

濃尾平野で従来行われた準三次元地下水流動モデル<sup>15~19)</sup>による広域地下水流動のシミュレーション計算範囲を図-4.6に示した。

丸山ら<sup>15,16)</sup>は、濃尾地下水盆の地下構造を深度50mの位置で2つに分け、それより浅い地層を浅層帯水層、それより深い地層を深層帯水層とした。そして、浅層帯水層を49個、深層帯水層を68個の三角形要素に分割して、図-4.6に示した約567 km<sup>2</sup>にわたる地下水帯の水収支を有限要素法によって検討した。

浅層帯水層における水収支の内容は、かんがい期と非かんがい期で異なることを考慮して、かんがい期には

$$T_s \left( \frac{\partial^2 h_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_s}{\partial y^2} \right) + K(h_s - h_0) + B(GH - R_s) + R = 0$$
$$R = R_3 - Q_3 \quad (4.7a)$$

非かんがい期には

$$T_s \left( \frac{\partial^2 h_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_s}{\partial y^2} \right) + K(h_s - h_0) + R_s = 0$$
$$R_s = R_3 - Q_3 + R_1 \quad (4.7b)$$

によって水収支を検討している。ここで、 $h_s$ は浅層帯水層の地下水頭、 $h_0$ は深層帯水層の地下水頭、 $T_s$ は浅層帯水層の透水量係数、 $K$ は深層

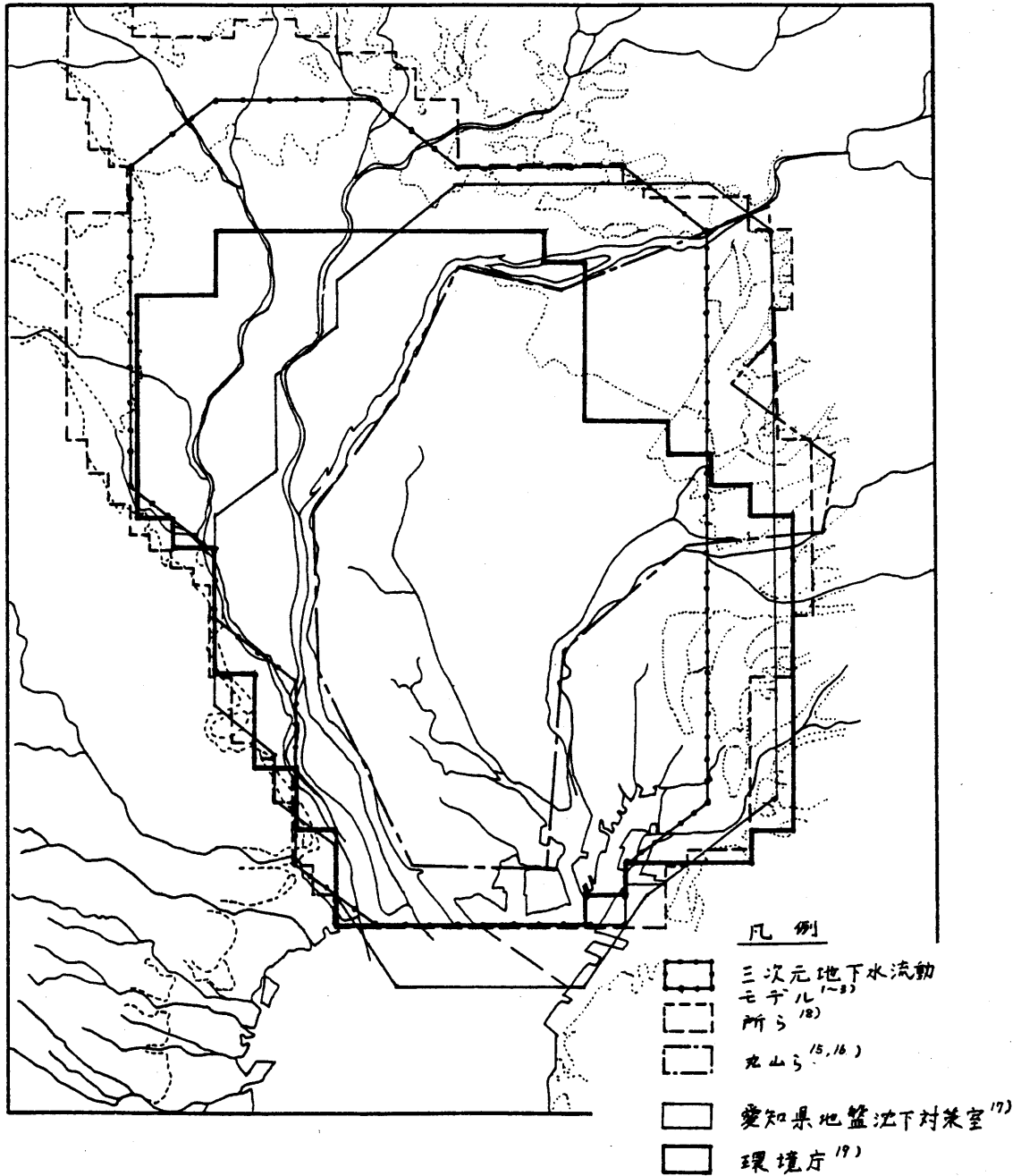


図-4.6 濃尾地下水盆で行われた三次元ならびに準三次元地下水流動モデルの範囲

地下水と浅層地下水との交換係数,  $R_0$ は降雨の地下浸透量,  $Q_0$ は浅層帯水層からの地下水汲み上げ量,  $R_1$ は非かんがい期の地下水貯留量の減少量,  $B$ は表流水と浅層地下水との交換係数,  $GH$ はかんがい期における田面上の水の地下水頭値を示す。

深層帯水層については, 浅層帯水層からの漏水量, 地下水絞り出し量が主な地下水涵養量になると考えて,

$$T_0 \left( \frac{\partial^2 h_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_0}{\partial y^2} \right) + K(h_0 - h_s) + R_0 = 0$$

$$R_0 = R_2 - Q_0 \quad (4.8)$$

を用いて水収支モデルを組み立てた。ここで,  $T_0$ は深層帯水層の透水量係数,  $R_2$ は地下水絞り出し量,  $Q_0$ は深層からの地下水汲み上げ量を示す。

さて, 以上の式を図-4.6の領域にわたり数値的に解くには, 適当な境界条件が必要となるが, 丸山らは, 浅層地下水については浅層帯水層の境界を形成する木曾川, 庄内川の河川部分で, 深層地下水については大垣, 名古屋市域と接する位置で給水条件の境界条件を適用し, それ以外の境界ではすべて遮水状態を設定して計算を進めた。なお, それら境界条件の数学的取り扱い等の詳細な説明は文献(15, 16)に譲る。

数値計算を行う上で必要となる各土質定数, 揚水量等については次のように推定している。

浅層帯水層への降雨の地下浸透量  $R_0$ は, 濃尾平野<sup>20</sup>地点で行われたシリンドラーインテークレート試験<sup>39)</sup>結果を *philp*の浸入式<sup>40)</sup>により近似して推定し, 浅層, 深層帯水層からの揚水量  $Q_0$ ,  $Q_0$ は1973年揚水量

実態調査資料<sup>21, 22)</sup>より推定し、地下水絞り出し量  $R_2$  は水準測量結果による年間地盤沈下量の実測値を用いた。その他のパラメータは、実測地下水頭値と計算結果より最小自乗法により決定している。

丸山らの地下水流動モデルは、50 m 以浅、50 m 以深の砂礫層をそれぞれ1層の帯水層としてモデル化している。したがって、4.4.1で述べた水平二次元地下水流動モデルと同様に、丸山らによって組み立てられたモデルから得られる計算地下水頭値は、濃尾地下水盆のどの帯水層における地下水頭値を追跡しているのか不明となる。特に50 m 以深の深層帯水層については、深度50 m 以深にストレーナーが設けられている井戸からの揚水は、すべて深層帯水層からの地下水汲み上げとしてモデル化されているので、50 m 以深の帯水層をすべて一括して深層帯水層で代表していることとなり、深層帯水層における地下水頭値の実際的な意味がほとんどなくなっている。

また、このシミュレーションモデル<sup>15, 16)</sup>は定常解析を行っているため地下水貯留量の減少を考慮することはできない。つまり、地下水貯留量は常に一定で、揚水量が増加すればそれに見合った地下水流動が生じ、常に定常状態が出現する計算となっている。

丸山らの行ったこの地下水流動のシミュレーション計算は、浅層帯水層と表流水との水の交換に主眼を置いていたために、深層地下水の貯留量の変化は全く無視して計算を行っている。したがって、深層地下水汲み上げによる地盤沈下については、地盤沈下量を既知量としてこのモデルに与える必要があり、地盤沈下量の実測値のない場合とか地盤沈下量の将来予測計算等には、このモデルは適用できない。

なお、丸山らが組み立てた地下水流動モデルを用いて地下水揚水規制効果を推定したところ、1973年揚水量を5割削減してもそれほど大きな地下水頭回復効果は期待できないことが一応の結論として得られている。

愛知県地盤沈下対策室<sup>17)</sup>は、濃尾平野の主要な帯水層である第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層では地下水流動を水平二次元流とし、それら各帯水層はその間に存在する圧密層を通じて行われる漏水のみによって結合された準三次元地下水流動モデルを組み立てた。図-4.6に、そのシミュレーション計算対象範囲を示したが、面積は約1100 km<sup>2</sup>となっている。

図-4.7に、この準三次元モデル<sup>17)</sup>で用いられた地下水盆の地盤構造と、実際の濃尾地下水盆における地盤構造との対応を示した。この図からもわかるように、第三紀層までの地層を主要な3つの被圧帯水層（第

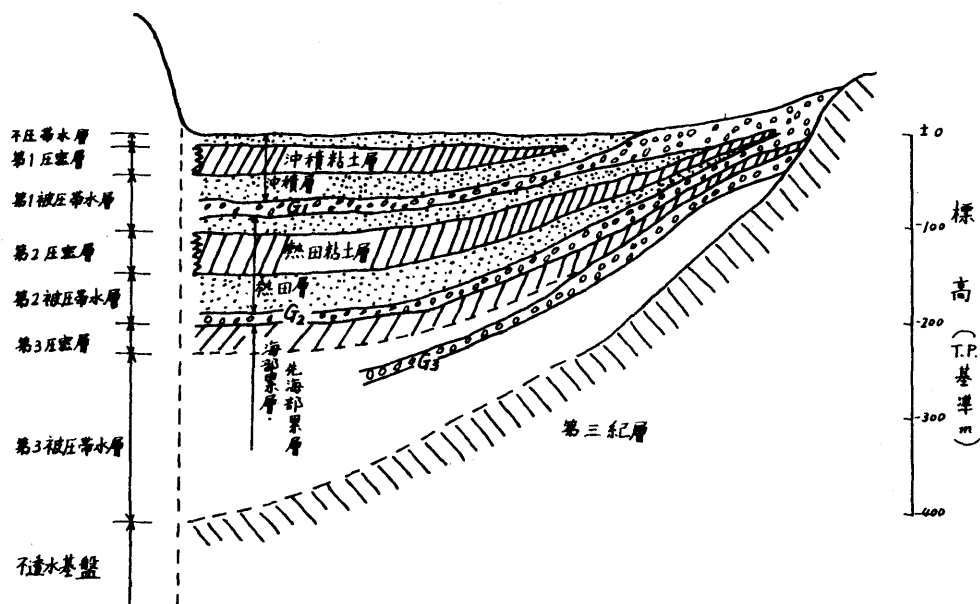


図-4.7 愛知県の組み立てた準三次元地下水流動モデル<sup>17)</sup>の地盤構造の説明図

1被圧帯水層，第2被圧帯水層，第3被圧帯水層)を含む7層の地盤構造にモデル化している。

内挿検定期間は1974年4月から1976年3月までの2年間で，2か月単位で地下水頭の季節変動を追跡するような地下水流動のシミュレーション計算を行っている。なお，所<sup>18)</sup>は同様の準三次元地下水流動モデルを用いて，1961年から1973年までの内挿検定期間を，年平均地下水頭値を追跡するように計算を行っている。

この準三次元地下水流動モデル<sup>17)</sup>は圧密層における貯留量の変化を無視しているので，内挿検定計算によって圧密層における透水係数と帯水層における貯留係数を，計算地下水頭値が実測値によくあうように試行錯誤的に修正して，予測計算のためのモデル各部のパラメーターが決定されている。その結果，内挿検定計算後のそれら各土質諸定数(圧密層の透水係数，帯水層の貯留係数)は，現地で実測された値よりもかなり大きな値となっていることは，既に指摘されている<sup>17)</sup>。

地盤沈下量の計算は，圧密層からの地下水絞り出しが考慮されていないので，この準三次元地下水流動モデル<sup>17)</sup>とは別の計算で行われた。すなわち，地盤沈下観測井で得られた地下水頭と地層別地盤収縮量にちとづいて見かけの体積圧縮係数<sup>19)</sup>を求め，準三次元モデルから得られた各帯水層の地下水頭値変化量を用いて各圧密層の地盤収縮量を計算し，それら各圧密層における地盤収縮量を合計して地盤沈下量とする簡便法を採用した。

環境庁<sup>19)</sup>は，愛知県<sup>17)</sup>が組み立てた準三次元地下水流動モデルをさらに発展させて，圧密層からの地下水絞り出しの効果も考慮できる準

三次元地下水流動モデルを組み立てた。

シミュレーション計算の範囲を図-4.6に示したが、愛知県とほぼ同じ約1100 km<sup>2</sup>を対象として行われた。モデル化した地盤構造を図-4.8に示したが、第2帯水層までの濃尾地下水盆の地盤構造を、第1帯水層、第2帯水層を含む5層にモデル化し、第2帯水層の下の海部累層は不透水性基盤と仮定された。

粘土層内には1m間隔で計算点を設け、圧密層からの地下水絞り出しの時間的遅れも追跡できるように準三次元地下水流動モデル<sup>19)</sup>が組み立てられた。なお、数値計算を行うに際しては、1100 km<sup>2</sup>の面積を有する各帯水層を260個の長方形に分割し、その中心に差分格子点を持つように数値計算モデルが組み立てられている。

環境庁の行ったシミュレーション計算は、準三次元地下水流動モデルの特性を調べることに主眼を置いていたので、将来の予測計算を行わず、1960年から1973年までの過去から現在にいたる計算が行われている。しかし、計算に必要な各種土質定数の地下水頭値に及ぼす

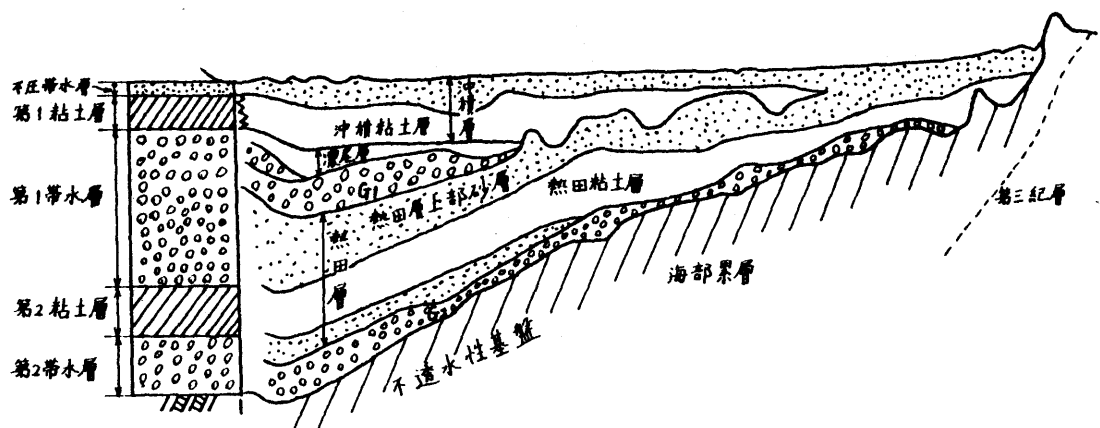


図-4.8 環境庁の組み立てた準三次元地下水流動モデル<sup>19)</sup>の地盤構造



影響が詳細に検討されており、準三次元モデルを組み立てる場合の貴重な指針を提供している。それによれば、圧密層における比貯留量の帯水層地下水頭値に及ぼす影響はかなり大きく、圧密層からの地下水絞り出しは無視できないことが明らかとなっている。

濃尾平野南部のように圧密層と帯水層が互層になった地盤状態における地下水シミュレーションには、環境庁の準三次元モデルはかなり有効に利用できるように思われる。しかし、濃尾平野北東部の犬山扇状地のように圧密層が欠如した地域における地下水流動のシミュレーションには、この準三次元モデルは適用できない。

#### 4.5 濃尾平野三次元地下水流動モデルの作成

##### 4.5.1 濃尾平野三次元地下水流動モデルの考え方

濃尾地下水盆から地下水汲み上げを行っている井戸のうち、ある一定量以上（年間  $1000 \text{ m}^3$  または1日当り  $50 \text{ m}^3$  より大きい揚水量）のものだけでも約7000本に達することがわかっている<sup>21,22)</sup>。したがって、それら各井戸からの揚水による影響を詳細にシミュレートすることは、計算機の容量、計算時間の制約によって困難である。また、そうした井戸1本ごとの揚水による地下水状態の変化を詳細に検討するよりも、濃尾地下水盆内の地下水流動状態を大局的に把握することの方が、濃尾平野地盤沈下問題を解決する上では重要である。

そこで、井戸からの揚水については、その井戸の揚水対象となっている帯水層要素から一様に揚水されていると近似して、地下水汲み上げによる地下水流動状態の変化を追跡することとした。

そうした取り扱いをすれば、揚水のある場合の地下水流動を示す基礎式は、ダルシー則と質量保存則より

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = s_s \frac{\partial h}{\partial t} + w \quad (4.9)$$

となる。ここで、 $k_x, k_y, k_z$  は  $x, y, z$  方向への透水係数、 $s_s$  は比貯留量、 $h$  は地下水頭、 $w$  は単位時間、単位体積当りに平均化された揚水量を示す。

(4.9) 式を用いて広大な濃尾地下水盆内の地下水流動状態をシミュレートする場合、① (4.9) 式に含まれる透水係数  $k_x, k_y, k_z$ 、比貯留量  $s_s$ 、揚水量  $w$  は濃尾地下水盆各地域ごとに複雑に変化する、② (4.9) 式を解くには適当な境界条件、初期条件も必要となるが、それら条件はかなり複雑である、等の理由により、(4.9) 式を解析的に解くことは不可能である。

そこで本研究では、(4.9) 式を数値計算によって解くこととした。濃尾平野で行われた広域地下水流動のシミュレーション計算では、差分法による数値計算<sup>12~14, 17~19)</sup>が従来しばしば用いられてきた。しかし、①境界条件が導入しやすい、②要素の形状を任意に取ることができる、等複雑な地盤構造を有する濃尾地下水盆の地下水流動のシミュレーション計算を行うに当り有利であると思われたので、本研究では有限要素法による数値計算を行うこととした。

(4.9)式を有限要素に離散化する場合、汎関数を利用したので、以下の説明の便宜上、濃尾地下水盆モデル境界面上で設定された境界条件の数学的取り扱いをここで示すと次のようになる。なお、これら各境界条件がどのようにして濃尾地下水盆モデルで用いられているかについては、第5章で述べることにする。

水頭一定の状態が保たれる境界では、

$$h = \text{const.} \quad (4.10)$$

モデル外部との水頭差により、モデル内への地下水流入量が決まると考えられる境界では、

$$q = \alpha (h - h_0) \quad (4.11)$$

外周と地下水流が遮断状態にあると考えられる境界では、

$$e_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + e_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + e_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z = 0 \quad (4.12)$$

ここで、 $q$ は境界面上の単位面積を通過する地下水流動量、 $h_0$ はモデル外で地下水頭が常に一定と仮定される地下水涵養源における水頭、 $\alpha$ はモデルの外で水頭一定と仮定される地下水涵養源からモデルの境界面までの平均的透水係数 $k$ と距離 $L$ により、 $e/L$ として定義される係数で、漏水係数と一般に呼ばれている。 $l_x, l_y, l_z$ は境界面上に立てた外向き法線の方向余弦である。

さて、変分原理<sup>4)</sup>によれば、地下水流動のシミュレーション計算を行おうとする濃尾地下水盆全領域において、(4.9)式を(4.10)、(4.11)、(4.12)式の境界条件のもとに解く問題は、次の汎関数 $\Pi$ を最小にするような地下水頭 $h$ の分布を求める問題と等価であることが知られている。

$$\pi = \iiint_V \left[ \frac{1}{2} \left\{ c_x \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + c_y \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + c_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left( w + s_s \frac{\partial h}{\partial t} \right) h \right] dV + \iint_A \frac{1}{2} \alpha (h - h_0)^2 dA \quad (4.13)$$

ここで、 $V$ は解析対象の濃尾地下水盆全体積、 $A$ は(4.11)式が適用される境界面上の面積を示す。

#### 4.5.2 有限要素への離散化

汎関数(4.13)式を最小にするような $h$ の分布を探し出すため、濃尾地下水盆の解析対象全領域(図-4.6に示す面積 $1164 \text{ km}^2$ 、深さ最深部で約 $400 \text{ m}$ )を有限個の四面体要素(今回の計算では $2646$ 個)に分割して数値計算を行った。そして、それら分割された四面体要素内における水頭 $h$ の分布を、次のように $x, y, z$ の一次関数で表わされるものとして計算を進めた。

$$h = d_1 + d_2 x + d_3 y + d_4 z \quad (4.14)$$

ここで、 $d_1, d_2, d_3, d_4$ は四面体要素を構成する4つの節点(図-4.9の $i, j, k, l$ )の座標と水頭値より求まる値である。

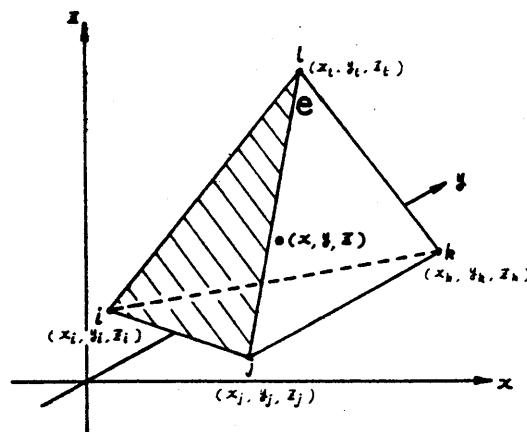


図-4.9 要素eの節点番号とその座標の説明図

なお、解析対象領域内すべての四面体における4つの節点には、右手の法則（四面体のはじめの3つの節点が、最後の節点から見て反時計回りとなる）に従って節点番号を付し、有限要素への離散化を行った。

いま、図-4.9に示した四面体要素の4つの節点（ $i, j, k, l$ ）における地下水頭（ $h_i, h_j, h_k, h_l$ ）を、(4.14)式を用いて表示すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} h_i &= d_1 + d_2 x_i + d_3 y_i + d_4 z_i \\ h_j &= d_1 + d_2 x_j + d_3 y_j + d_4 z_j \\ h_k &= d_1 + d_2 x_k + d_3 y_k + d_4 z_k \\ h_l &= d_1 + d_2 x_l + d_3 y_l + d_4 z_l \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

(4.15)式を  $d_1, d_2, d_3, d_4$  について解いて、先述の(4.14)式に代入し、四面体の4つの節点における水頭（ $h_i, h_j, h_k, h_l$ ）について整理すれば、

$$\begin{aligned} h = \frac{1}{\delta V^e} \{ & (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) h_i + (a_j + b_j x + c_j y + d_j z) h_j \\ & + (a_k + b_k x + c_k y + d_k z) h_k + (a_l + b_l x + c_l y + d_l z) h_l \} \end{aligned} \quad (4.16)$$

となる。ここで、 $V^e$ は四面体要素  $ijkl$  の体積、 $a_i \sim a_l, b_i \sim b_l, c_i \sim c_l, d_i \sim d_l$  はそれぞれ四面体を構成する4つの節点の座標（図-4.9参照）より求まる量で、いずれも(4.15)式を解くことにより得られる定数である。

(4.16)式をマトリックス表示すれば次のようになる。

$$\begin{aligned}
 h &= [N_i, N_j, N_k, N_l] \{h\}^e \\
 N_i &= \frac{1}{6V^e} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \\
 N_j &= \frac{1}{6V^e} (a_j + b_j x + c_j y + d_j z) \\
 N_k &= \frac{1}{6V^e} (a_k + b_k x + c_k y + d_k z) \\
 N_l &= \frac{1}{6V^e} (a_l + b_l x + c_l y + d_l z)
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

ここで、 $\{h\}^e$  は今考えている四面体要素  $e$  (図-4.9参照) の4つの節点における水頭値、そのならば方は、

$$\{h\}^e = \{h_i, h_j, h_k, h_l\}^T \tag{4.18}$$

である。添字  $T$  は転置行列を示す。

解析対象領域の他の全ての四面体要素についても、以上と同じ取り扱いをすれば、地下水盆内の任意の地点における地下水頭値  $h$  は、濃尾地下水盆モデル領域内に設けられた節点の地下水頭値によって、一義的に定義されることとなる。したがって、汎関数(4.13)式が最小となるような地下水頭分布を求めることは、解析対象領域内に設けられた各節点の地下水頭値に関して汎関数  $\pi$  を最小にする問題と同じになる。数学的に表示すると

$$\frac{\partial \pi}{\partial h_n} = 0 \quad (n=1, 2, \dots, N) \tag{4.19}$$

のようになる。ここで、 $N$  は解析対象領域内に設けられた全節点数を示し、今回の計算では637個設けた。したがって、(4.19)式から得られた  $N$  組(今回の濃尾地下水盆モデルでは637組となる)の連立方程式を解けば、解析対象領域内各節点の地下水頭値が求まることとなる。

さて、図-4.9に示した四面体要素  $e$  内における汎関数  $\pi^e$  の、第  $i$  節

点の地下水頭値  $h_i$  に関する微係数を求めると次のようになる。

$$\frac{\partial \pi^e}{\partial h_i} = \iiint_{V^e} \left\{ k_x \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial}{\partial h_i} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial}{\partial h_i} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) + k_z \frac{\partial h}{\partial z} \frac{\partial}{\partial h_i} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w \frac{\partial h}{\partial h_i} + s_s \frac{\partial h}{\partial t} \frac{\partial h}{\partial h_i} \right\} dV^e \quad (4.20)$$

なお、いま考えている要素  $e$  が、先述の (4.10) 式の適用される節点を有していたり、(4.12) 式の適用される境界面を有している場合でも、上式 (4.20) はそのままよい。しかし、(4.11) 式の適用される境界面を有する場合には、先述の汎関数 (4.13) 式からもわかるように、上式 (4.20) の右辺には、

$$\iint_{A^e} \left\{ d(h - h_0) \frac{\partial h}{\partial h_i} \right\} dA^e \quad (4.21)$$

がつけ加わる。

節点  $i$  に着目して、節点  $i$  の関係する全四面体要素について、各要素の汎関数の  $i$  節点に関する微係数を加え合わせると、先述の (4.19) 式により、

$$\sum_{e=1}^M \frac{\partial \pi^e}{\partial h_i} = 0 \quad (4.22)$$

となる。ここで  $\sum_{e=1}^M$  は、いま着目している  $i$  節点の関係する全四面体要素にわたる総和を示している。

(4.22) 式と同様の計算を解析対象領域内におけるすべての節点について行えば、節点の数、637 組の連立方程式が得られ、各節点の地下水頭値は、一応求まることになる。

しかし、具体的な数値計算プログラムを作るに当たっては、濃尾地下水盆モデルの各節点について、一つずつ (4.20) ~ (4.22) 式の実行を行うことは、計算時間の面から不利であると見え、次のような手順で

数値計算を行った。

すなわち，図-4.9に示す四面体要素 $e$ を構成する4つの節点地下水頭値( $h_i, h_j, h_k, h_l$ )が，その要素に関する汎関数 $\pi^e$ の微係数にどれくらい寄与しているかを求め，それと全く同じ手順で他の要素における各節点地下水頭値に関する汎関数の微係数を算出した。そして，それら微係数を濃尾地下水盆の全要素(2646個)について重ね合わせ，(4.22)式と同様の連立方程式を作ることにした。

解析対象領域内の全四面体要素の節点番号を規則的に付した理由はここにある。つまり，一つの四面体要素から得られる4つの汎関数の微係数は，その四面体を構成する4つの節点における地下水頭値だけに関係しており，四面体の4つの節点の番号を常に一定の規則(今回の計算では右手の法則に従って順番を決めている)に従って付しておけば，特定の四面体要素 $e$ について行った各節点地下水頭値に関する汎関数の微係数算出の手順は，他の要素へも同様に適用できるからである。

図-4.9の要素 $e$ における4つの節点地下水頭の汎関数の微係数への寄与  $\left\{ \frac{\partial \pi}{\partial h} \right\}^e$  を求めると

$$\left\{ \frac{\partial \pi}{\partial h} \right\}^e = \left\{ \frac{\partial \pi^e}{\partial h_i}, \frac{\partial \pi^e}{\partial h_j}, \frac{\partial \pi^e}{\partial h_k}, \frac{\partial \pi^e}{\partial h_l} \right\}^T \quad (4.23)$$

となる。ここで， $T$ は転置行列を示す。

$h_j, h_k, h_l$ についても先述の(4.20)式と同様にして汎関数の微係数を求め，要素 $e$ の4つの節点地下水頭値 $\{h\}^e$ について(4.23)式を整理して表示すれば，



$$\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e = [S] \{h\}^e + [P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e + \{f\}^e \quad (4.24)$$

となる。ここで、 $[S]$  は四面体要素  $e$  内の透水係数に関するマトリックス、 $[P]$  は四面体要素  $e$  内の比貯留量に関するマトリックス、 $\{f\}^e$  は四面体要素  $e$  からの揚水量に関するベクトルを示している。なお、(4.23)式から(4.24)式への誘導は、有限要素に関する一般的参考書<sup>42)</sup>を参照されたい。

(4.24)式を濃尾地下水盆の解析対象領域内の全要素について重ね合わせると、先述の(4.22)式より

$$\left. \begin{aligned} [S] \{h\} + [P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} + \{F\} &= 0 \\ [S] &= \sum [S] \\ [P] &= \sum [P] \\ \{F\} &= \sum \{f\} \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

となる。ここで、 $\sum$  は全要素についての重ね合わせを示し、 $\{h\}$ 、 $\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}$  は解析対象領域に設けられた全節点の地下水頭値と地下水頭の時間的变化を示している。

ところで、境界条件(4.11)式が適用される場合には、(4.24)式は次のようになる。いま、説明の便宜上、要素  $e$  の  $ij$  面(図-4.9参照)に、境界条件(4.11)式が適用されるとする。その場合には、

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e &= [S] \{h\}^e + [S_1] \{h\}^e + [P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e + \{f\} + \{f_1\} \\ [S_1] &= \frac{\alpha}{12} A^e \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \\ \{f_1\} &= -\frac{1}{3} \alpha h_0 A^e \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{aligned} \right\} (4.26)$$

となる。

さて、(4.25) 式左辺の第2項における地下水頭の時間的变化を示す  $\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}$  については、次のような処理を行い数値計算を進めることとした。

$\Delta t$  時間内で  $\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}$  が直線的に変化しているものとして、時刻  $t$  における地下水頭値  $\{h\}_t$  を、次のように近似した。

$$\{h\}_t = \{h\}_{t-\Delta t} + \frac{1}{2} \left( \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} + \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_t \right) \Delta t \quad (4.27)$$

先述の(4.25) 式は、任意の時刻で常に成り立っているので、(4.27) 式における  $\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_t$  を、(4.25) 式左辺の第2項に代入して整理すれば、

$$\begin{aligned} ([S] + \frac{2}{\Delta t} [P]) \{h\}_t &= [P] \left( \frac{2}{\Delta t} \{h\}_{t-\Delta t} + \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} \right) \\ &\quad - \{F\}_t \end{aligned} \quad (4.28)$$

となる。ここで、上式(4.28)の右辺第2項の  $[P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t}$  は、時刻  $t-\Delta t$  で成り立っている先述の(4.25)式より、

$$[P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} = -\{F\}_{t-\Delta t} - [S] \{h\}_{t-\Delta t} \quad (4.29)$$

として求まる。

したがって、最終的には、

$$\begin{aligned} ([S] + \frac{2}{\Delta t} [P]) \{h\}_t &= (\frac{2}{\Delta t} [P] - [S]) \{h\}_{t-\Delta t} \\ &\quad - (\{F\}_t + \{F\}_{t-\Delta t}) \end{aligned} \quad (4.30)$$

の漸化式を解くことにより、解析対象領域内 637 個の節点における任意の時刻  $t$  の地下水頭値を逐次推定することとした。

今回のシミュレーション計算は、濃尾平野地下からの長期的な過剰揚水の継続によって、濃尾平野地下の地下水状態がどのように変化してきたかを大局的に把握することを第 1 の目的とした。したがって、実測地下水頭値には季節変化が見られるが、この計算では年平均地下水頭値を追跡するようになっている。

また、計算時間の刻み  $\Delta t$  については、内挿検定計算の段階で、各種時間刻みで予備計算を行い、計算結果の安定と計算時間の両要素を考慮して、大多数の計算を 0.1 年単位で行った。

以上に述べてきた濃尾平野を対象とした地下水流動・地盤沈下シミュレーション研究の比較が理解しやすいように、表-4.1 にとりまとめてみた。



表-4.1 濃尾平野地域における地下水流動・地盤沈下シミュレーション研究の比較

計算実施機関 または氏名	名古屋大学工学部 植下・佐藤 <sup>(13)</sup>	愛知県 <sup>(17)</sup>	環境庁 <sup>(19)</sup>	農林水産省東海農政局 京都大学農学部 <sup>(15)(16)</sup>	名古屋大学工学部 高木・所 <sup>(18)</sup>	建設省中部地方建設 局木曾川下流工事事務所 <sup>(2)</sup> 名古屋市 <sup>(13)</sup>	建設省国土地理院 建設省中部地方建設局 <sup>(14)</sup>	
モデル作成 の経緯	1974年に開発し、その後、検討、改良を加えてきた。	愛知県尾張地域の地下水利用に伴う将来の水位変化と地盤沈下の予測を目的として、1976年度に行われた。	1975年度から地盤沈下の予測手法の調査・研究を開始した。1977年度には濃尾平野を対象にシミュレーションを実施した。	濃尾平野地下水状態に果たす農業用水の役割を明確にすることを目的として1975年度に行われた。	1975年度の名古屋大学修士論文のテーマ(濃尾平野における地下水の挙動に関する研究)の一環として行った。	当面の地盤沈下対策の指針を得るために1974年度に実施した。	名古屋市域の被圧地下水収支を解明することを目的として、1975年度に行われた。	「地盤沈下と地域構造との相関関係の調査研究」の一環として、1974年～1975年に作業を行った。
モデル	三次元有限要素モデル	準三次元有限要素モデル	準三次元差分モデル	準三次元有限要素モデル	準三次元差分モデル	平面二次元差分モデル	平面二次元差分モデル	鉛直断面二次元差分モデル
計算対象 領域	第1,第2,第3被圧帯水層を合計,面積1160 Km <sup>2</sup> 。	第1,第2,第3被圧帯水層を合計,面積1100 Km <sup>2</sup> 。	第1,第2被圧帯水層を対象とし,面積約1100 Km <sup>2</sup> 。	深度50m以浅を浅層帯水層,それ以深を深層帯水層とし,面積約570 Km <sup>2</sup> 。	第1,第2被圧帯水層を合計,面積1600 Km <sup>2</sup> 。	第1帯水層上面から第2帯水層下面までを主被圧帯水層とし,面積1500 Km <sup>2</sup> 。	第2帯水層上面から第3帯水層上面までを主被圧帯水層とし,面積380 Km <sup>2</sup> 。	南北断面は長さ46.2 Km,深さ250m,東西断面は長さ28.2 Km,深さ320m。
シミュレーション の概要	可能なかぎり長期間(1961～1977年まで)にわたり内挿検定計算を行い,将来の地下水管理目標値(GL-10m程度)まで,被圧地下水頭値が回復するような適正揚水量を探り出そうとした。	1974年4月から1976年3月までの2か年を,2か月単位で追跡しながら内挿検定計算を行った。10通りの将来の揚水計画を仮定して,1976年4月から1985年3月までの地盤沈下量と地下水頭の将来予測を行った。	準三次元モデルを予測手法として用いるときの適応性を吟味し,モデル各部のパラメータの感度分析を行った。圧密層からの地下水絞り出しの時間的遅れ効果も考慮できるように圧密層内にも計算点を設けている。	浅層帯水層については,表流水との水の交換,雨水の地下浸透との関係,深層帯水層については,浅層帯水層からの漏水,地下水絞り出し量との関係を考察した。	1961年から1973年までの内挿検定計算により,モデルの特性,濃尾平野地下水の挙動を明らかにした。3つの将来揚水計画による将来地下水頭変化の予測を行った。	内挿検定により固定されたモデルにより,4通りの揚水計画案に対する濃尾平野全域の地下水頭,地盤沈下量の予測を行った。	1960年から1973年までの14年間を内挿検定計算により組み立てられたモデルを用いて,将来の4つの揚水計画案に対する地下水頭値の予測を1974年から1985年まで行った。	南北方向断面,東西方向断面の2断面について計算した。
シミュレーション 計算結果の 概要	内挿検定後の土質定数は地盤工学的に納得できる値となっている。1977年揚水量のおよそ5割が濃尾平野の適正揚水量であることが予測された。	仮定された10通りの揚水計画の中では,1975年揚水量を4割まで削減する揚水計画が,累計地盤沈下量が最も少なく地下水頭の回復も大きいことが予測された。	帯水層の地下水頭に粘土層のパラメータが大きな影響を及ぼすことがわかり,広域地下水シミュレーションにおける圧密層の果たす役割の重要性が明らかになった。	農地面積と雨水の地下浸入率との関係が明らかになった。揚水量を1972年時点の半分に削減して地下水頭の大きな回復は期待できないことがわかった。	地下水頭低下を停止させるには,1973年揚水量の現状維持とすればよいという一応の結論が得られた。	濃尾平野の広域的な地下水頭,地盤沈下量の平面的な動向を定性的に把握できた。	1973年揚水量の現状を続けるとなれば地下水頭が低下し,地下水頭の低下を阻止するには,1973年揚水量を大幅に削減する必要があることが明らかとなった。	南北断面については地下水揚水と地盤沈下の相関性をおおむねその傾向として反映できるモデルが作成されたが,東西断面については,まだ十分な結果は得られていない。
シミュレーション の問題点	① 計算機容量,計算費用が大きい。 ② 圧密層内の地下水絞り出しの時間的遅れを考慮できない。 この点を内挿検定にてカバー。また,近年は各地点の鉛直-次元有限要素モデルの併用にて補足。	① 圧密層からの地下水絞り出しを考慮できない。 ② 内挿検定後にモデル各圧密層に与えられた漏水係数の物理的意味が不確かとなっている。 ③ 地盤沈下量の計算は弾性圧縮を算出するモデルとなっており,圧密現象を考慮できない。	① 実際の濃尾地下水盆に即した土質定数を持つモデルに改良が必要。 ② 一般的地質条件に対して常に適用可能ではない。	① 地下水絞り出し量を既知量として与える必要があり,地盤沈下量の予測を行うことはできない。 ② 濃尾平野の各被圧帯水層の特徴をモデルに反映することができない。 ③ 各帯水層の貯留量の変化を考慮できない。	① 圧密層からの地下水絞り出しが考慮されていない。 ② 地下水盆内の地下水の鉛直方向の流れを考慮できない。 ③ モデル帯水層における貯留係数が地盤工学的に納得できる値となっておらず,土質状態との対応もできない。 ④ 沈下計算において,圧密脱水の時間的遅れを考慮できない。	① 地下水盆内の鉛直方向の地下水流動をシミュレートできない。 ② モデル帯水層における貯留係数が地盤工学的に納得できる値となっておらず,濃尾地下水盆各部の土質状態との対応もできないモデルとなっている。	① 濃尾地下水盆全域にわたる計算は不可能である。 ② 三次元的地下水流動を二次元的鉛直断面モデルでシミュレートする無理がある。 ③ 粘土層内に2～3の計算点を設けているが,圧密脱水現象の時間的遅れは完全には再現できない。	
内挿検定に用 いた観測値	濃尾平野各観測井,既設井戸による1961～1977年までの地下水頭値。1961～1977年までの水準点の変動状況。松中,中川,津島観測井の1977年までの地層別地盤収縮量,1971年と1978年の沖積粘土層内の間隙水圧状態。 1977～1979年の地下水頭値,地盤沈下量を外挿検定に使用。	濃尾平野各観測井による1974～1976年の2か月ごとの地下水頭。1974～1976年までの水準点の変動状況。	モデルの適用性についての検討に主眼を置いており,観測値との比較は行っていない。	1955～1972年までの一宮,高田観測井による地下水頭の経年変化。1972年の濃尾平野各観測井による地下水頭分布。	濃尾平野各観測井,既設井戸による1961年～1973年までの被圧地下水頭値。	濃尾平野各観測井による1960～1973年の第1被圧帯水層と第2被圧帯水層の平均的地下水頭値。1961～1973年までの水準点変動状況。	濃尾平野各観測井による1960～1973年までの第2被圧帯水層の地下水頭値。1963～1973年までの水準点の変動状況。	

## 4.6 結論

以上の説明によつて、濃尾平野地盤沈下停止に必要な適正揚水量を採り出すための手段として、広域地下水流動モデルによるシミュレーション計算を行う意義が明らかになったものと考えられる。さらに、濃尾平野地下水盆の三次元モデルによる地下水流動のシミュレーション計算を行う意義、その考え方も理解いただけたものと思う。

本章で述べた要点をまとめると以下のようになる。

(1) 広域地盤沈下問題を解決する上で、広域地下水流動のシミュレーション計算を行う意義はきわめて大きい。とりわけ、安全揚水量を見つけて出すことが困難な現状にあつては、地盤沈下停止ということと当面の地下水管理の目標値に採用することは臨海低平地盤沈下地域の地下水管理として妥当な考えであり、広域地下水管理を行うための広域地下水流動モデルのもつ意義は大きい。

(2) 濃尾平野で従来用いられてきた2つの平面二次元地下水流動モデルを具体例としながら、平面二次元地下水流動モデルの考え方やこのモデルを実際問題に適用した場合の問題点について整理を行った。すなわち、地下水頭状態が異なる地下水盆内の各帯水層の地下水状態はこれらのモデルによつては追跡できないこと、内挿検定によつてモデル各部のパラメータを同定した場合、主被圧帯水層の貯留係数をかなり大きくとる必要が生じ、実際の地下水盆各部の地盤構造との対応がつけられなくなること等の問題点を指摘した。

(3) 濃尾平野で用いられた鉛直二次元地下水流動モデルを例にしてこの地下水流動モデルの考え方や問題点を示した。すなわち、鉛直二

次元モデルを広域地下水流動のシミュレーション計算に用いることは困難であり、とくに揚水量をこのモデルに与える場合に必要となるモデルに直角方向のモデル幅の決定方法やその幅のもつ物理的意味等に問題点を有することを指摘した。

(4) 濃尾平野で過去に用いられてきた3種類の準三次元地下水流動モデルの考え方とそれらシミュレーションモデルの長短と問題点について述べた。すなわち、被圧帯水層をまとめて一層に取り扱っていたり、地盤沈下量を配水量として与える必要があったり、地盤沈下現象を無視しているので圧密層における透水性係数等のパラメーターが現地試験結果とかなり異なる値を用いる必要が生じ、実際の地盤構造との対応がつかないモデルが組み立てられる等の問題点を指摘した。総じて、環境庁の組み立てている準三次元地下水流動モデルが従来この平野で用いられた地下水流動モデルのうちでは、最も適用性の高いモデルであることが理解されたが、このモデルを広域地下水全体にわたり適用することは困難であることを指摘した。

(5) 濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルの考え方と数値計算の進め方について説明するとともに、このモデルを用いて実際の数値シミュレーション計算を行うときの2,3の留意点について述べた。

## 参考文献

- 1) Ueshita, K., Itabashi, K., Tanahashi, H. and Sato, T. : Modeling of the Nobi Ground Water Basin to Solve the Subsidence Problem, Proc. Specialty Session on Geotechnical Engineering and Environmental Control, 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.465-480, 1977.
- 2) Sato, T., Itabashi, K. and Ueshita, K. : Improved Model of the Nobi Ground Water Basin to Solve the Subsidence Problem, Proc. of the Specialty Session on Geotechnical Engineering and Environmental Control, 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pp.79-81, 1978.
- 3) 植下 協, 佐藤 健 : 濃尾平野の適正揚水量に関する研究, 土木学会論文報告集, 第287号, pp.137~146, 1979.
- 4) 植下 協, 佐藤 健, 大東憲二 : 濃尾平野とベネチアを対象とする最近の地盤沈下研究について, 土と基礎, Vol.28, No.12, pp.25~31, 1980.
- 5) 山本荘毅, 榎根 勇 : 水循環の立場からみた地下水利用のあり方, 水利科学, Vol.18, No.2, pp.42~52, 1974.
- 6) H. Conkling : Utilization of Ground-Water Storage in Stream System Development, Trans. A.S.C.E., Vol.3, pp.275-305, 1946.
- 7) H.O. Banks : Utilization of Underground Storage Reservoirs, Trans. A.S.C.E., Vol.118, pp.220-234, 1953.



- 8) The Committee on Ground Water of the Irrigation and Division of the A.S.C.E. : Ground Water Basin Management, A.S.C.E. Manuals of Engineering Practice, No.40, pp.52-69, 1961.
- 9) 山本荘毅：水文学総論，水文学講座 1，共立出版，pp.176~182，1972。
- 10) 水収支研究グループ：地下水盆の管理〔理論と実際〕，東海大学出版会，pp.47~75，1976。
- 11) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，pp.367~377，昭和46年。
- 12) 建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所：地盤沁下対策調査報告書（シミュレーション編），昭和50年4月。
- 13) 名古屋市公害対策局：名古屋市域水収支解析報告書，昭和50年8月。
- 14) 建設省国土地理院，建設省中部地方建設局：地盤沁下と地域構造との相関関係の調査研究報告書（第三報）—濃尾平野—，pp.21~56，昭和50年3月。
- 15) 丸山利輔：都市化に伴う濃尾用水地域の水循環の変化，昭和50年12月。
- 16) 三野 徹，小林慎太郎，丸山利輔：土地利用と広域地下水収支，土と基礎，Vol.26，No.1，pp.83~90，1978。
- 17) 愛知県地盤沁下対策室，（株）国際航業：尾張地域地下水の使用と将来の沁下予測調査報告書，昭和52年3月。

- 18) 所 裕司：濃尾平野における地下水の挙動に関する研究，名大土木研究報告，No.76113，昭和51年2月。
- 19) 環境庁水質保全局企画課，日本能率協会総合研究所：地盤沈下予測手法調査報告書，昭和52年3月。
- 20) H.N. Tyson and E.M. Weber : Ground-Water Management for the Nation's Future, Computer Simulation of Ground-Water Basins, Proc. A.S.C.E., HY.4, pp.59-77, 1964.
- 21) 環境庁，建設省，愛知県，岐阜県，三重県：昭和48年度濃尾平野地下水揚水量等実態調査報告書，1974。
- 22) 名古屋市：昭和48年度名古屋市地下水揚水量等実態調査報告書，1974。
- 23) 河野伊一郎：貯留係数，土と基礎，Vol.26, No.10, pp.91~92, 1978。
- 24) 尾島 勝：低平地下水の水位変動と流動量に関する考察，第21回水理講演会論文集，pp.151-158, 1977。
- 25) 小山 潤：地下水流動のシミュレーション，第3回土質工学会中部支部地盤研究会テキスト，1980。
- 26) Yamamoto S., Kayane I., Aoki S. and Fuji S. : Simulation of Ground Water Balance as a Basis of Considering Land Subsidence in the Kōtō Delta, Tokyo, IASH, No.88, pp.215-224, 1969.
- 27) P.A. Domenico and M.D. Mifflin : Water from low Permeability Sediments and Land Subsidence, Water Resources Research, Vol.4, pp.563-576, 1965.

- 28) 北川 明：地下水のシミュレーション, 土木技術資料, vol. 19, No. 9, pp. 37~42, 1977.
- 29) Javandel, I. and Witherspoon, P.A. : A Method of Analysing Transient Fluid Flow in Multilayered Aquifers, Water Resources Research, Vol.5, No.4, pp.856-869, 1969.
- 30) Bredehoeft, J.D. and Pinder, G.E. : Digital Analysis of Areal Flow in Multiaquifer Groundwater Systems : A Quasi Three-Dimensional Model, Water Resources Research, Vol.6, No.3, pp.883-888, 1970.
- 31) Pinder, G.E. and Frind, E.O. : Application of Galerkin's Procedure to Aquifer Analysis, Water Resources Research, Vol.8, No.1, pp.108-120, 1972.
- 32) Herrera, I. and Rodarte, L. : Integrodifferential Equations for Systems of Leaky Aquifers and Applications 1. The Nature of Approximate Theories, Water Resources Research, Vol.9, No.4, pp.995-1005, 1973.
- 33) 鎌田烈, 村上雅博, 原田和彦：準三次元帯水層モデルによる地盤沈下の解析, 地球科学, vol. 27, No. 4, pp. 131~140, 1973.
- 34) Fujinawa, K. : Finite-Element Analysis of Groundwater Flow in Multiaquifer Systems, 1. the Behavior of Hydrological Properties in An Aquitard while being pumped, Journal of Hydrology, Vol.33, pp.59-72, 1977.

- 35) Fujinawa, K. : Finite-Element Analysis of Groundwater Flow in Multi-aquifer Systems, 2. A Quasi Three- Dimensional Flow Model, Journal of Hydrology, Vol.33, pp.349-362, 1977.
- 36) Sparks, A.D.W. : Settlement of Venice and General Estuarine Deposits, Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.739-744, 1977.
- 37) 藤崎克博, 岡 秀行, 鎌田 烈: 準三次元多層および三次元有限要素モデルによる非定常被圧地下水流の解析, 地球科学, vol. 33, No. 2, pp. 73~84, 1979.
- 38) Sparks, A.D.W. : Numerical Methods for the Settlement of Venice and layered Soil Deposits, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.1, pp.213-225, 1979.
- 39) 川畑幸夫: 水文気象学, 応用気象学大系第1巻, 地人書館, pp. 145~150, 昭和44年.
- 40) J.R. Philip : Theory of Infiltration, Advances in Hydro-science, Vol.5, pp.235-248, 1969.
- 41) 林 毅, 村 外志夫: 変分法, 応用数学講座 第13巻, コロナ社, pp. 7~53, 昭和36年.
- 42) たとえば O.C. Zienkiewicz and Y.K. Cheung : The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, McGraw-Hill, 1967.

## 第5章 濃尾沖積平野における適正揚水量の推定

### 5.1 濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルの組み立て

#### 5.1.1 濃尾地下水盆における地盤構造のモデル化

濃尾地下水盆の地下水状態を総体的に把握するために、濃尾地下水盆全体をモデル化することに努め、西は養老断層まで、北部、東部はほぼ第三紀層が地表に露出する位置、南部は伊勢湾までの図-5.1に示す範囲(濃尾沖積平野 $1300 \text{ km}^2$ に対し、図-5.1のモデルは東西 $30.8 \text{ km}$ 、南北 $46.8 \text{ km}$ 、面積 $1164 \text{ km}^2$ )にわたりモデル化を行った。

図-5.2は、桑原<sup>2)</sup>の示した濃尾平野南部における地盤断面図の1例である。濃尾平野において、地下水を汲み上げている主要な被圧帯水層は、図-5.2に示す第1帯水層( $G_1$ )、第2帯水層( $G_2$ )、第3帯水層( $G_3$ )である<sup>3)</sup>。

1973年に行われた揚水量実態調査<sup>4,5)</sup>によれば、濃尾平野全域からの揚水量のうち約9%が第三紀層からの揚水であることが知られており、主に濃尾平野北東部で、これら第三紀層からの揚水量のあることが認められている。しかし、今回の計算で主眼とした濃尾平野南部の地盤沈下地域においては、第三紀層からの地下水汲み上げ量は、第3帯水層以浅の地下水汲み上げ量にくらべ、量的にきわめて少ないこと、さらに第三紀層より上にある地層にくらべ、それ以下の地層はかなり硬いことなどにより、今回の地下水盆モデルでは第三紀層を不透水性の基盤と仮定した。そして、第三紀層までの濃尾地下水盆における地

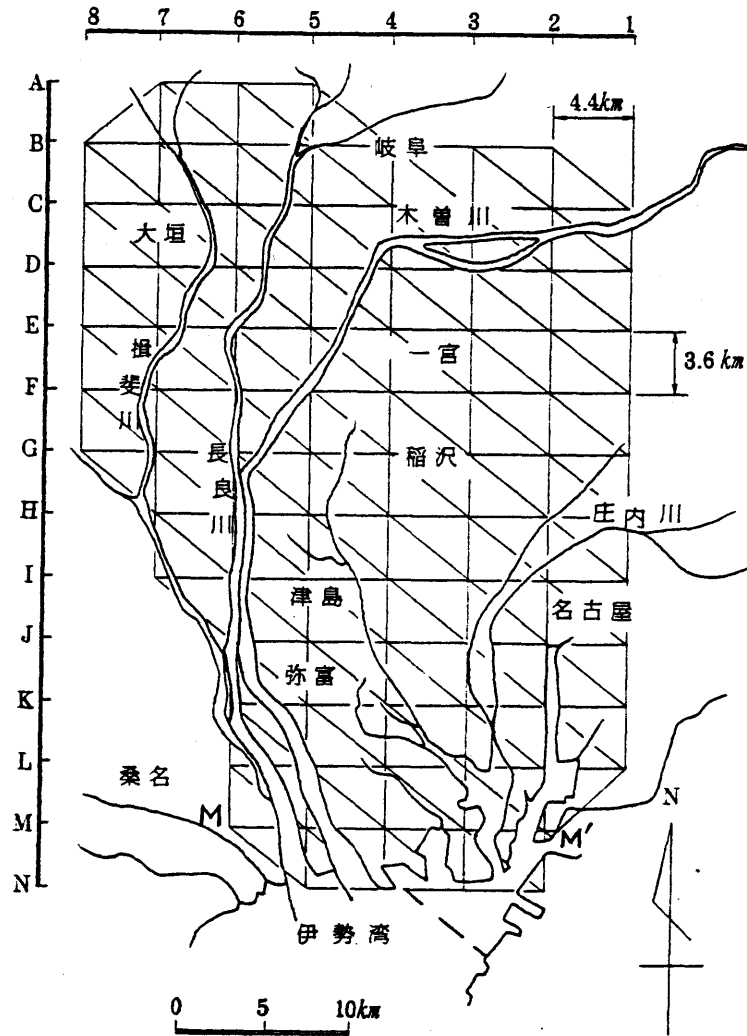


図-5.1 濃尾地下水モデルの平面領域

盤構造を、表-5.1に示すように、主要な3つの被圧帯水層( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ )を含む6層構造にモデル化を行った。

図-5.1に示した地下水モデル平面図における東西断面の1例を、図-5.3に示した。濃尾平野では、東西方向11断面、南北方向6断面の合計17断面(図-5.5参照)について地盤断面図<sup>2)</sup>が作成されており、図-5.3は、図-5.1のM-M'の位置におけるモデルの東西断面を示したものである。

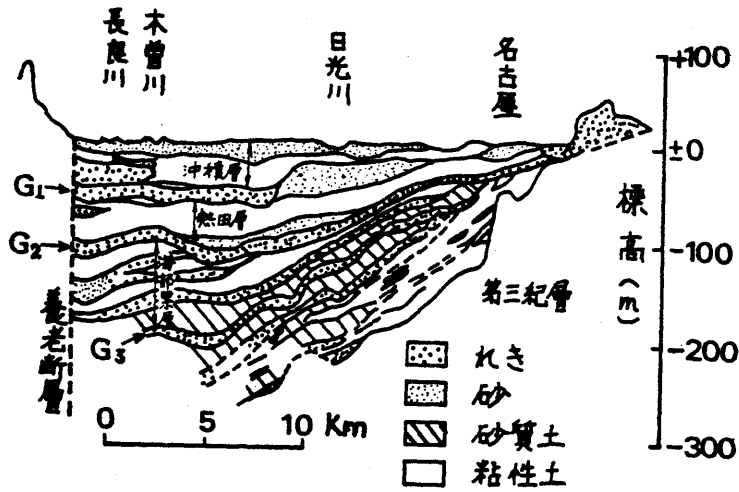


図-5.2 濃尾地下水盆南部の東西断面の例  
(栗原<sup>2)</sup>による)

表-5.1 濃尾地下水盆モデルと実際の地質構造との対応

地層名		土相	濃尾地下水盆モデル
沖積層	南陽層	砂層	第1層
		粘土-シルト層	
洪積層	濃尾層	砂泥互層	第2層 (第1帯水層)
	第1礫層(G <sub>1</sub> )	石礫層	
	熱田層	砂層	第3層
		粘土-シルト層	
	第2礫層(G <sub>2</sub> )	砂泥互層	第4層 (第2帯水層)
		石礫層	
	海部累層	粘土-シルト層	第5層
		砂泥互層	
第3礫層(G <sub>3</sub> )	石礫層	第6層 (第3帯水層)	
先海部累層	砂泥互層		
第三紀層	東海層群	不透水性基盤	

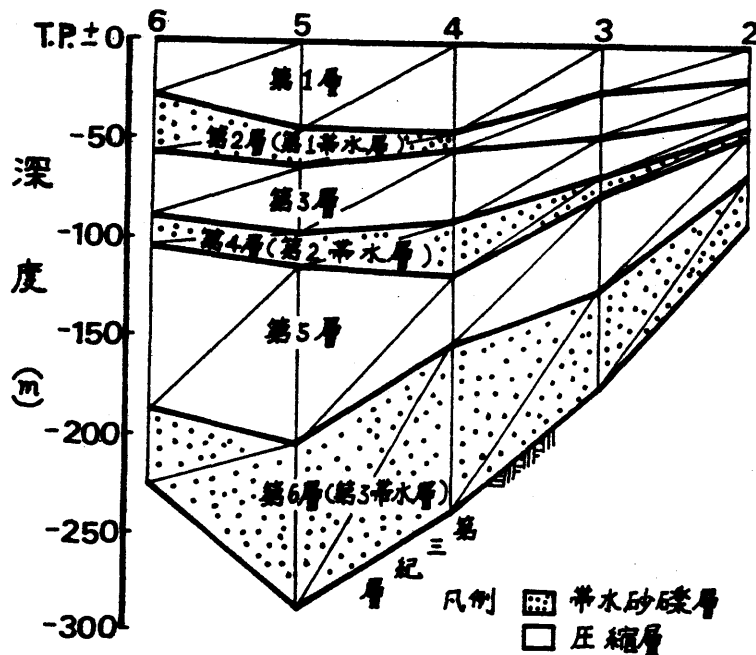


図-5.3 濃尾地下水盆モデルの地盤構造の例  
(図-5.1のM-M'断面)

なお、海部累層内には、第3帯水層 ( $G_3$ ) の他に2~3層の連続性  
のよい砂礫層もあり帯水層として利用されている<sup>6)</sup>。今回の計算では、  
これら海部累層以深の帯水層を第6層として一括してモデル化し、第  
3帯水層と呼ぶこととした(表-5.1, 図-5.3 参照)。

図-5.2に示した地盤断面図からもわかるように、各被圧帯水層  
( $G_1, G_2, G_3$ )の間には、砂層、粘土層、砂礫層が複雑に互層となっ  
て堆積している地域もある。それら地域において、砂層、粘土層を  
実際の地盤断面図通りに一層ずつ忠実にモデル化することは、計算機容  
量の点から困難であり、また今回のシミュレーション計算は、濃尾地  
下水盆における地下水状態を総体的に把握することに主眼を置いたの  
で、それら各主要被圧帯水層の間には圧縮層のみが存在する地盤構造



モデルを考えた(ただし、モデル北部では圧密層は存在しない)。そして、モデル化された圧密層が実際の地盤で砂層、粘土層等の互層になっている影響は、モデル圧密層における透水係数、比貯留量の土質定数を決定するときに考慮することとした。

ところで、図-5.3 に示した濃尾地下水盆モデルの地盤断面の1例からもわかるように、今回の計算では計算機容量(名古屋大学大型計算機 FACOM 230-75, 主記憶容量 120 KW)との関係により、圧密層としての粘土層を鉛直方向に多数要素でモデル化し得なかったため、粘土層からの圧密脱水は時間的な遅滞をとまわず行われる計算となっている。しかし、過去から現在に至る内挿検定計算の段階で、計算結果が実際の水収支と合致するようにモデル圧縮層の土質定数を修正することによって実際に近い答が得られるように計算を行った。

また、この濃尾地下水盆モデルでは、地下水盆の地質状況を反映させるため、実際の地質状態との対応を考慮して図-5.4 に示すような16種の土質領域を考えた。

この16種類の土質区分は、地盤断面図<sup>2)</sup>を参考にして行ったものである。図-5.5 に地盤断面図の作成されている断面位置と濃尾地下水盆三次元水収支モデルの平面図を示した。地盤断面図中には、地質年代別の地層区分と各層の土質状態(礫層、砂層、粘土層、粘土・砂の互層といった土質状態の区分)が記載されている。そうした地盤断面図が、図-5.5 に示すように濃尾平野の東西、南北の合計11か所の断面(東西断面は、A-A' ~ K-K'の11断面、南北方向にはア-ア' ~ カ-カ'の6断面の合計17断面)について作成されている。したがって、

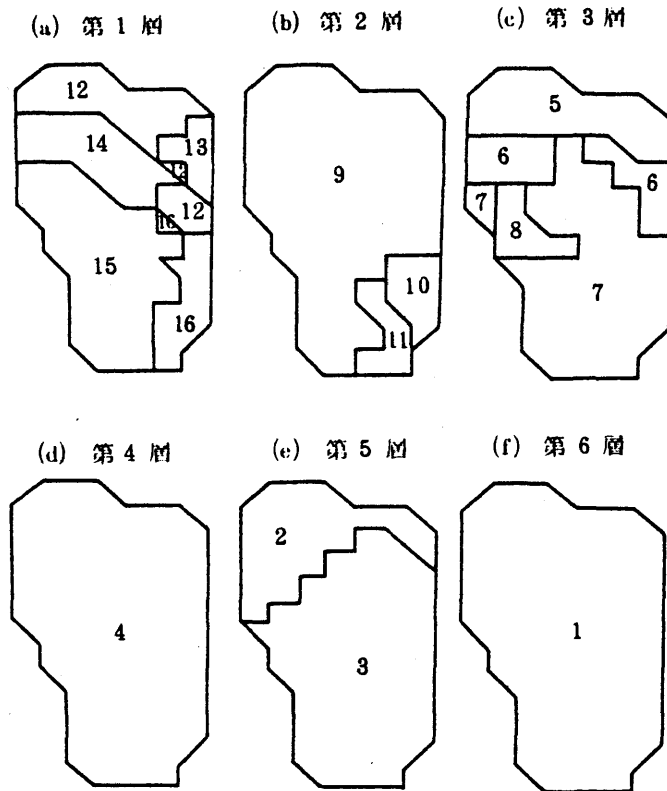


図-5.4 濃尾地下水盒モデルにおける土質区分

図-5.5に示したように、これら地盤断面図の断面位置と、濃尾地下水盒三次元モデルの位置を対応させながら、地質状態、土質状態の相異にもとづいて濃尾地下水盒モデルの土質区分を行った。

なお、濃尾平野の北部地域や海部累層下部に存在する第3礫層に関しては、深層ボーリング資料の不足もあって、なお不確かな点も残されていたので、これら土質区分については、この分野の地質専門家であり、文献2)の著者である名城大学教授、桑原徹博士の指導を仰いだ。

適正揚水量を推定するために必要となるモデル各部の土質定数を決

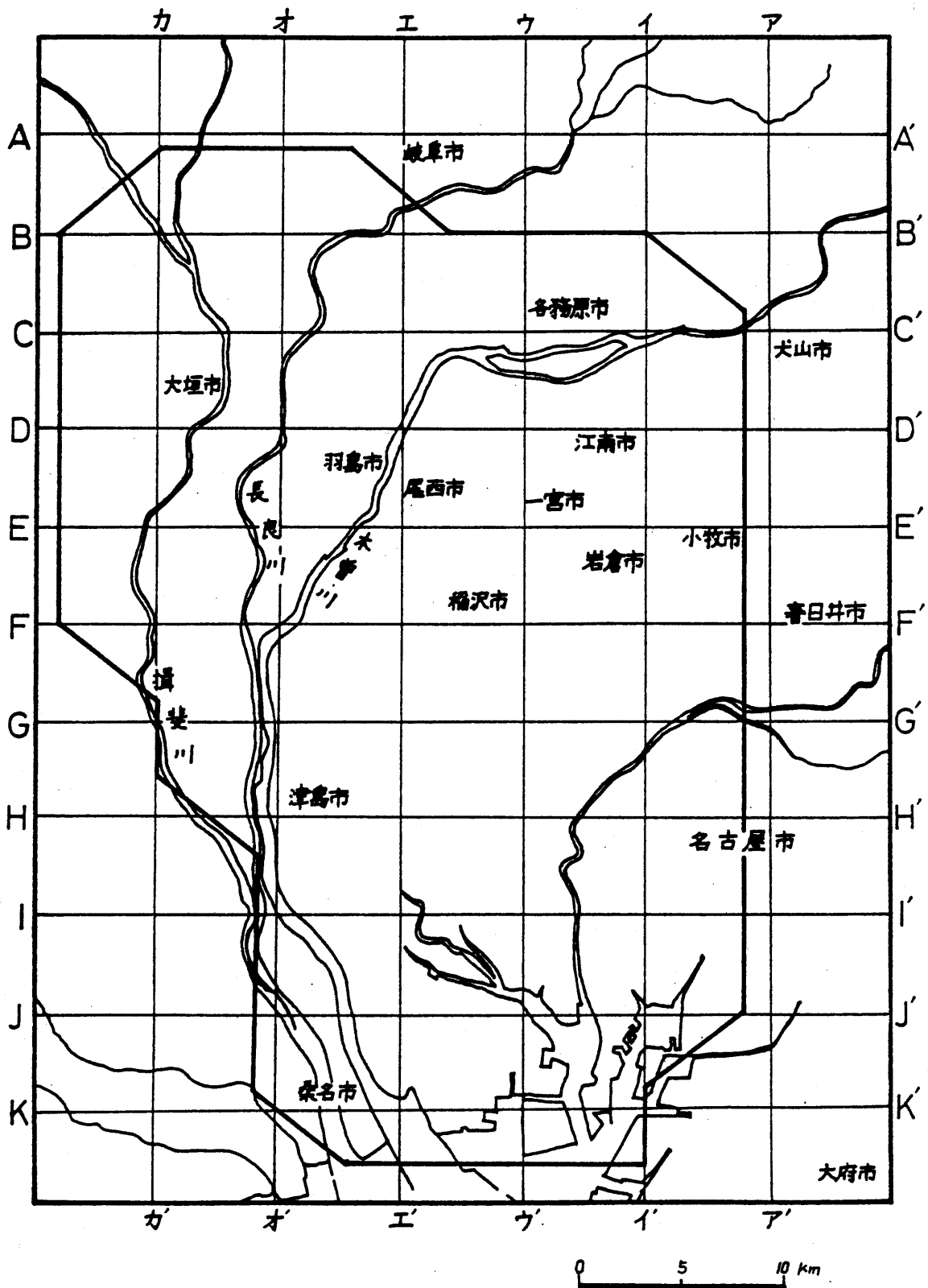


図-5.5 濃尾平野における地盤断面図作成位置と濃尾地下水盆  
三次元水収支モデルの平面図

定する際には、濃尾地下水盒モデルによる過去から現在への内挿検定計算により、計算結果が実測値によく合致するようにモデル各部の土質定数を推定する作業が重要となる。その場合、これら区分された土質領域が、濃尾地下水盒モデルにおける土質定数の等しい領域として扱われることとなる。

### 5.1.2 透水係数、比貯留量の土質定数の推定

将来予測のシミュレーション計算に必要なパラメータの決定の方法に、過去の实測地下水頭分布と計算結果が合致するように逆算して、パラメータを決める方法<sup>7~9)</sup>が提案されている。

Kleinecke<sup>7)</sup>は、Tyson and Weber<sup>10)</sup>の示した平面二次元地下水流動モデルにおいて、地下水頭値が各差分格子点で既知となっている場合に、帯水層定数(透水量係数、貯留係数)を最小2乗法や線形計画法を用いて同定する方法を示した。

Frind and Pinder<sup>8)</sup>は、平面二次元地下水流動の定常状態を表わすシミュレーションモデルにおいて、シミュレーション計算領域の境界上の透水量係数と領域内の地下水頭分布にもとづいて、ガラーキン法を用いて計算対象領域内各有限要素格子点上の透水量係数を同定する方法を提案している。

藤縄ら<sup>9)</sup>は、Frind and Pinder<sup>8)</sup>の水平二次元地下水流動モデルに貯留量の時間的变化と揚水量をつけ加えて、各有限要素格子点上の透水量係数、貯留量変化、揚水量を最小2乗法を用いて同定する方法を提案し、この方法を山科盆地に適用している。

しかし、これら数値的取り扱いによって広域地下水流動のシミュレーション計算に必要となるパラメーターを同定した場合、一般の常識的な土質定数値と大きくかけ離れた値が同定されることもあることは既に指摘<sup>7,9)</sup>されており、数値的にパラメーターを同定する場合でも、対象とする地下水盆各部の地盤状態に対する解析者自身の判断も重要になることが指摘<sup>11~13)</sup>されている。

今回の計算では、地盤工学的に納得できる実際に近い地下水流動モデルとするため、実際の地質状態に近い三次元モデルを組み立てた上で、先述の図-5.4に示した各土質領域で行われた各種土質試験、揚水試験結果等を参考にして、各地域、各層の比貯留量、透水係数を内挿検定計算に先だつて仮定し、その後内挿検定によって試行錯誤的に修正する方法を採用した。

粘土層の比貯留量 $s_c$ は、濃尾平野各地点で採取された粘土試料の標準圧密試験結果の体積圧縮係数 $m_v$ により次式で推定した。

$$s_c = m_v \gamma_w \quad (5.1)$$

ここで、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量を示す。

砂層の比貯留量 $s_s$ は、弾性係数 $E$ とポアソン比 $\mu$ を推定することにより次式で求めた。

$$s_s = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} \gamma_w \quad (5.2)$$

飛鳥観測井設置時に行われたボーリング孔内横方向載荷試験の結果から、弾性係数 $E$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) と深度 $D$  ( $\text{m}$ ) の関係はほぼ次のように推定できる<sup>14)</sup>。

$$E = 11 D \quad (5.3)$$

Holl<sup>15)</sup>によれば、弾性係数と深度が(5.3)式のように1次式で表わされる場合は、ポアソン比が0.33の場合であることが報告されており、砂層の比貯留量推定に際してはこの関係を利用することとした。

粘土層の透水係数は、比貯留量を推定したときと同様に、標準圧密試験結果を参考とし、砂層の透水係数  $k_s$  (cm/sec) は各土質領域 (図-5.4参照) におけるボーリング試料について行われた粒度分析試験結果にもとづく有効径  $D_{10}$  (cm) により次式<sup>16)</sup>より推定した。

$$k_s \approx 100 (D_{10})^2 \quad (5.4)$$

帯水層の比貯留量、透水係数は既存の揚水試験結果を可能なかぎり集め、それにより推定した。

先述したように、複雑な地盤構造を帯水層と圧縮層の互層としてモデル化している。モデル各帯水層については揚水試験結果にもとづく比貯留量、透水係数をそのまま内挿検定計算当初のパラメーターとして用いたが、モデルの圧縮層については、対応する実際の地盤では、透水係数、比貯留量の異なる多層で構成されている場合が多い。その場合には、その領域の水平方向透水係数  $K_H$  と鉛直方向透水係数  $K_V$  は、次式<sup>17)</sup>により求めた。

$$\left. \begin{aligned} K_H &= \frac{\sum K_i H_i}{\sum H_i} \\ K_V &= \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{K_i}} \end{aligned} \right\} (5.5)$$

ここで、 $H_i$  は今考えている圧縮層における  $i$  番目の層の厚さ、 $K_i$  は  $i$

番目の層の透水係数， $\Sigma$ は今考えている圧縮層内の各層にわたる総和を示している。

また，比貯留量 $s$ は，圧縮層内各層の層厚 $H_i$ とそれぞれの層における比貯留量 $s_i$ を考慮した次式による重みつき平均値で与えた。

$$s = \frac{\sum s_i H_i}{\sum H_i} \quad (5.6)$$

さて，以上述べた方法にもとづいて推定されたモデル各土質領域の比貯留量，透水係数を仮定して，1961年から1977年まで内挿検定計算を行うわけであるが，内挿検定条件としては濃尾平野各地点に設置された観測井による実測地下水頭の経年変化と，濃尾地下水盆モデル内の各帯水層の地下水頭の平面分布を用いた。

図-5.6 (a), (b)に，土質領域3, 7, 15 (図-5.4参照)のモデル圧縮層内の各粘土層で行われた標準圧密試験結果にもとづいて，先述の(5.1)式より推定した粘土層の比貯留量と透水係数値の分布状況を示した。同様に，図-5.7 (a), (b)にはモデル各帯水層 (図-5.4に示した土質領域1, 4, 9)で行われた揚水試験結果から求めた透水係数，比貯留量の分布状況を示した。なお，図-5.6 (a), (b)，図-5.7 (a), (b)の横軸は整理のしやすさから対数目盛で示してある。

図-5.7 (a), (b)において，各モデル帯水層の比貯留量を推定するために利用した揚水試験の数は，透水係数を推定した揚水試験の数と比較してきわめて少なくなっている。これは，帯水層の比貯留量をも推定できる揚水試験を行うためには，揚水井の他に帯水層の水頭状態を計測するための観測井が必要となるが，今回のシミュレーション計算を行うに際して収集整理した揚水試験結果は揚水井のみによるもの

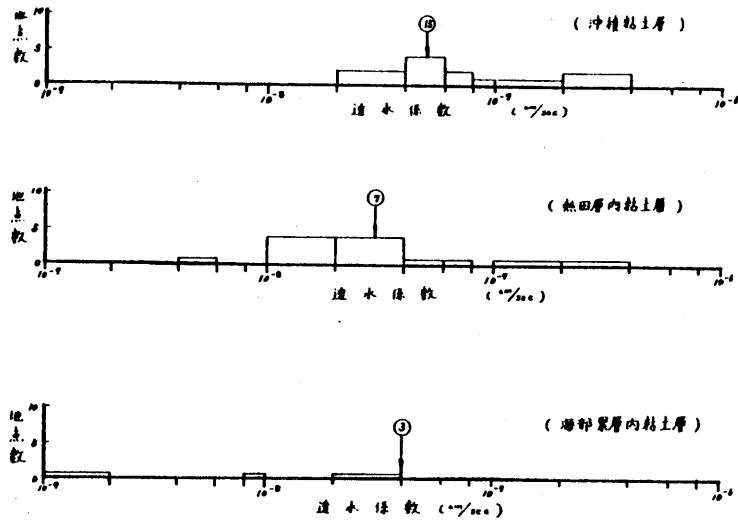


図-5.6(a) 内挿検定計算後、モデル圧密層(図-5.4に示した3, 7, 15の土質領域)に与えた透水性係数値と標準圧密試験より求めた各粘土層における透水性係数との比較

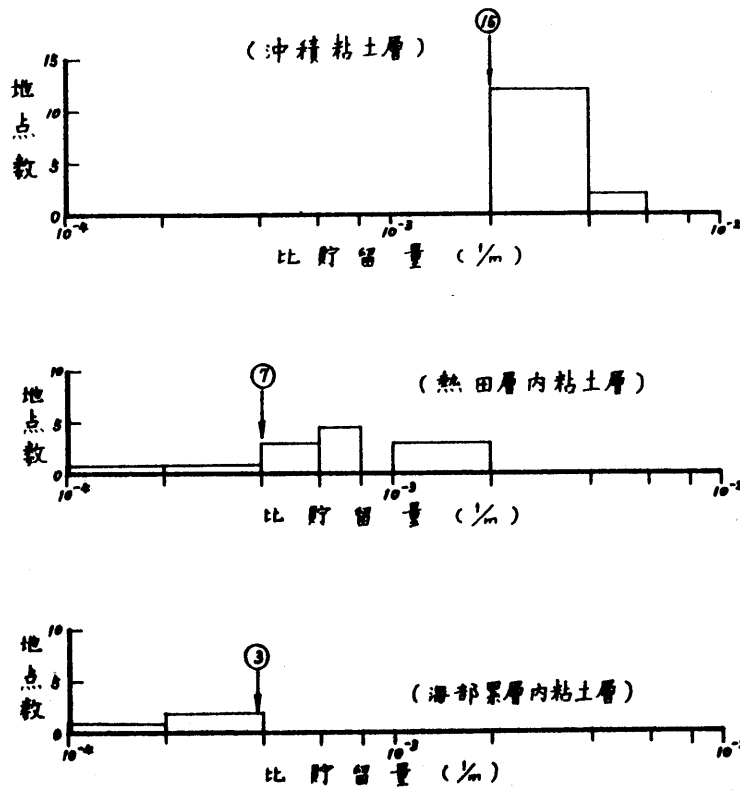


図-5.6(b) 内挿検定計算後、モデル圧密層(図-5.4に示した3, 7, 15の土質領域)に与えた比貯留量と標準圧密試験より求めた各粘土層における比貯留量との比較



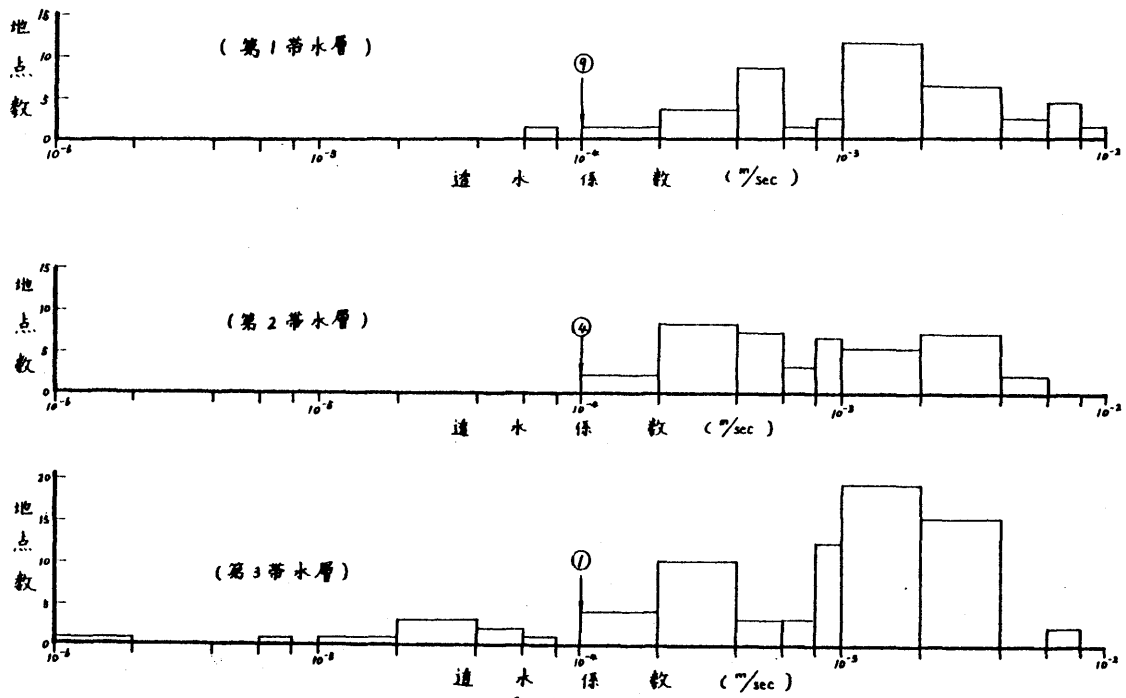


図-5.7(a) 内挿検定計算後、モデル帯水層に与えた透水係数値と現地揚水試験から求めた透水係数との比較

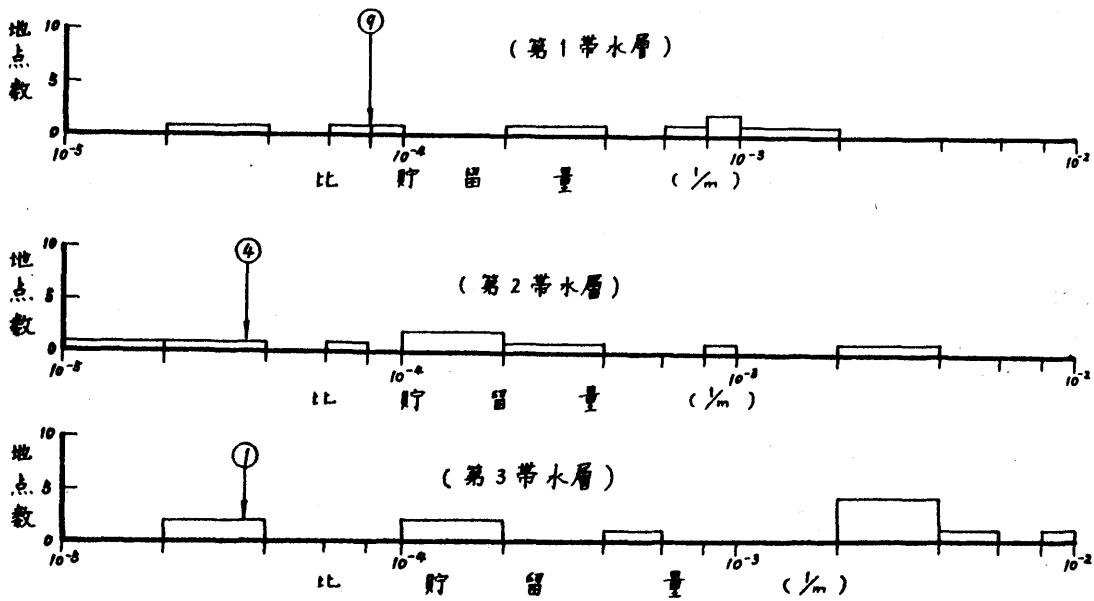


図-5.7(b) 内挿検定計算後、モデル帯水層に与えた比貯留量と現地揚水試験結果から求めた比貯留量との比較

が多かったことに起因している。しかし、濃尾平野では、近年、揚水井と観測井を用いた揚水試験も行われており、図-5-7(b)の比貯留量に関する情報も着実に蓄積されつつある。

### 5.1.3 内挿検定によるモデル各部の土質定数選定の方法

内挿検定計算に先立ち、モデル各土質領域に相当と思われる透水係数、比貯留量の第1近似値を選定するためには、各土質領域内で行われた土質試験結果、現場揚水試験結果を可能なかぎり収集し、それら試験結果の算術平均値を用いた。土質試験結果の得られなかった土質領域については、その領域の土質状態を考慮し、濃尾地下水盆モデルの他の土質領域における土質試験結果を参照して内挿検定計算当初の土質定数第1近似値とした。

ただし、濃尾地下水盆モデルにおける3つの被圧帯水層に与える透水係数、比貯留量の土質定数については次のような取り扱いをした。

内挿検定計算によるモデル各土質領域の土質定数推定の作業に先立ち、濃尾平野南部の被圧地下水頭値にモデル各土質領域の土質定数がどれくらい影響を及ぼすかを調べるための感度計算を行い、その結果、モデル各被圧帯水層における透水係数値の変化が、地盤沈下地域の被圧地下水頭値に最も大きく影響することがわかった。したがって、モデル各被圧帯水層の透水係数については、内挿検定計算当初に与えた値を、内挿検定計算中に修正することはしなかった。すなわち、内挿検定作業の段階で、これら帯水層の透水係数を試行修正すると、わずかな透水係数の修正に対しても被圧地下水頭値が大きく変化し、他の

土質領域の適切な土質定数を決定することが困難であると判断したからである。

濃尾平野各地点で行われた揚水試験結果から求めた透水係数値のヒストグラムを図-5.7(a)に示した。この図の結果から判断すれば、濃尾平野の各被圧帯水層とも、透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-2}$  m/sec程度の範囲にあることが推定されたので、内挿検定計算作業の煩雑さを避けるため、モデル各帯水層に与える透水係数は等価性と仮定し、各被圧帯水層とも同一の透水係数を与えることとした。その場合の透水係数値としては、図-5.7(a)に示した揚水試験結果より判断して、 $10^{-4}$  m/sec,  $10^{-3}$  m/sec,  $10^{-2}$  m/sec の3種類を内挿検定計算当初に仮定した。

図-5.6(b), 図-5.7(b)に圧密試験結果より推定された粘土層の比貯留量と現場揚水試験結果より推定された各帯水層の比貯留量を示した。

被圧帯水層の比貯留量の目安として、Domenicoら<sup>18)</sup>は $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$  ( $\%m$ )の値を報告している。図-5.7(b)に示した帯水層の揚水試験結果には、図-5.6(b)に示した粘土層の比貯留量よりも大きな比貯留量の試験結果も含まれており、地盤工学的知識に反している。したがって、内挿検定計算に先だってモデル各帯水層に与える比貯留量としては、図-5.6(b)の粘土層の比貯留量あるいはDomenicoら<sup>18)</sup>の報告を参考にして、現場揚水試験結果から推定された比貯留量(図-5.7(b)参照)のうちで、 $10^{-4}$  ( $\%m$ )以下になっている揚水試験結果の平均値を内挿検定計算の当初に仮定した。また、内挿検定計算によって帯水層の比貯留量を修正する場合の拘束条件と

しても、図-5.7(b)に示した揚水試験結果全てを利用することはせず、図-5.7(b)の試験結果のうちでも、 $10^{-4}$  (1/m)以下となっている揚水試験結果を拘束条件に用いた。すなわち、こうした地盤工学的な検討にもとづく拘束条件を設けることによって、内挿検定後にモデル帯水層に与えられる比貯留量が地盤工学的に納得できる値となるようにした。

内挿検定計算で主に修正を施したパラメーターは、モデル圧密層の比貯留量と透水係数である。濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルでは、大型電子計算機の記憶容量の制約により、圧密層からの地下水絞り出しの時間的遅れ効果を完全に再現できない近似計算となっており、そうしたことの不十分さをカバーして計算結果が近似的にあうように、圧密層の比貯留量と透水係数を意識的に修正したわけである。しかし、その場合の圧密層における土質定数の修正も、土質試験結果と無関係に行うのではなく、濃尾平野各地点で行われた土質試験結果を参考として、妥当と思われる範囲にあることを拘束条件として、修正を行ったわけである。

以上のようにして内挿検定計算後に、モデル各部に与えられた比貯留量と透水係数を表-5.2に、また先述した各土質領域における土質試験、揚水試験結果による比貯留量、透水係数と内挿検定計算後にそれらモデル各部に与えられたパラメーターとの対応の例を図-5.6(a), (b), 5.7(a), (b)に示したが、内挿検定によって修正された後の値は、地盤工学的に納得できる範囲にあることが確認できる。

那島観測井設置時に行われた圧密試験結果によれば、圧密脱水時の

表-5.2 モデル各土質領域のパラメーター

地質領域 (図-1参照)	水平方向透水係数 ( $m/年$ )	鉛直方向透水係数 ( $m/年$ )	比貯留量 ( $1/m$ )
1	3153.6	3153.6	0.00035
2	2000.0	500.0	0.00045
* 3	756.9	0.0124	0.0038 (0.00021)
4	3153.6	3153.6	0.00035
5	2000.0	500.0	0.00005
6	1576.8	94.6	0.0001
* 7	157.7	0.0076	0.0004 (0.00018)
* 8	315.4	0.0076	0.0004 (0.00018)
9	3153.6	3153.6	0.00008
10	1198.4	1198.4	0.0001
11	1576.8	1576.8	0.0004
12	1198.4	119.8	0.0001
13	3153.6	315.3	0.00008
* 14	1198.4	0.018	0.002 (0.00046)
* 15	1182.6	0.018	0.002 (0.00046)
* 16	1182.6	0.018	0.0004 (0.000088)

注 (1) \*印で示す地質領域は地下水モデル内の圧縮層を示す。  
 (2) 比貯留量についての( )内の値は水頭上昇時に対するものである。

体積圧縮係数  $m_v$  と吸水膨張時の体積膨張係数  $m_v'$  との比は図-5.8に示すようである。そこで、粘土層については、地下水頭回復期における粘土層の吸水膨張が、一般、図-5.8に示すような関係にあることを考慮した。一方、礫層、砂層については、ほぼ弾性挙動を示すと仮定して、地下水頭回復期にも地下水頭低下期と同じ比貯留量を用いた。そのような考えと、先述の(5.6)式にもとづいて、地下水頭回復期における圧縮層の等価な比貯留量を内挿検定計算に先だてて仮定し、数回の内挿検定計算を行って実測地下水頭値との対応のよい比貯留量を求めたところ、モデル第1層では地下水頭低下期比貯留量の  $1/4.57$  の値、モデル第3層では  $1/22.2$  の値、モデル第5層では  $1/17.5$  の値が算出された(表-5.2の比貯留量の欄参照)。

ところで、先述した(5.5)式は図-5.4に示した各土質領域の代表地点における土質試験結果と、その地点のボーリング柱状図にもとづいて、内挿検定計算に先だてて仮定されるモデル圧縮層の水平方向透水

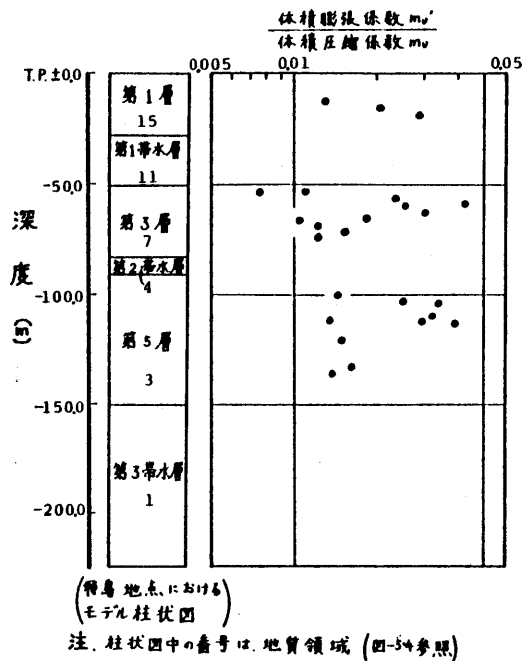


図-5.8 圧密試験より求まる粘土層の体積圧縮係数と体積膨張係数との比

係数と鉛直方向透水係数を求める式である。その場合、ボーリング柱状図の同一地層内では、透水係数は一定等方性と仮定して、モデル圧縮層の水平、鉛直方向透水係数を求めた。したがって、モデル圧縮層における透水係数の異方性は、透水係数の異なる多層地盤を1層としてモデル化した結果生ずるもので、モデル圧縮層を構成する各地層の層厚が変化すれば異方性の度合いも変化し、図-5.4に示した各土質領域内でもモデル圧縮層を構成する粘土層、砂層等の層厚はかなり変化しており、異方性の度合いもかなり変化することが推定される。

以上のことから考えて、内挿検定計算を行うに当っては、(5.5)式で算出された透水異方性にとらわれず、水平方向透水係数 $K_H$ 、鉛直方向透水係数 $K_V$ は独立として取り扱い、計算結果が内挿検定条件

に適合するように修正を加えることとした。

#### 5.1.4 境界条件の設定

濃尾地下水盆モデルの外周各境界に与えた境界条件を図-5.9に模式的に示した。

濃尾地下水盆の地表面に沿う自由地下水は、雨水や河川水により涵養されやすく、その水頭は常に地表面近くにあると考えられるので、自由地下水の水頭は常に一定とし、その水頭は1975年の浅井戸観測井による実測値(年平均地下水頭値)にもとづき決定した。図-5.10に濃尾地下水盆モデルの表層における地下水頭分布を示した。

モデルが伊勢湾と接する境界では、モデル南西部の第1帯水層、第2帯水層は伊勢湾へさらに伸びており、そこから伊勢湾へ伸びた帯水層からの地下水や海水が間接的にこのモデル内へ浸入するという境界条

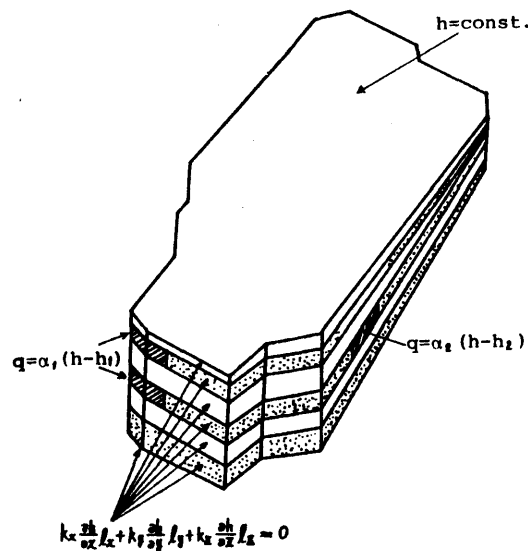


図-5.9 濃尾地下水盆モデルの境界条件を示す模式図



図-5.10 濃尾地下水モデル表層に与えた不圧地下水頭分布 (T.P.基準 m)

件を設定した。そして、伊勢湾側の地下水頭 $h_1$ を平均海面 (T.P.  $\pm 0.0$  m) とし、この境界面での漏水係数 $\alpha_1$ を数回の内挿検定計算にもとづき  $0.5$  ( $1/\text{年}$ ) と仮定した。

モデルの東側境界面については、名古屋市東部に露出する第2帯水層からモデル内へ地下水が流入している<sup>3)</sup>。そこで、この部分の境界条件については、モデル外の名古屋市東部における第2帯水層の地下水頭 $h_2$ は、この地域の不圧地下水頭 (T.P.  $+10$  m) とつねに一致しており、モデル内の地下水頭との差によって地下水流入量が決まる境界条件を仮定した。そして、この境界での漏水係数 $\alpha_2$ を内挿検定により  $0.6$  ( $1/\text{年}$ ) と仮定した。

その他のモデル周辺の境界面、モデル下底面では、地下水の出入りはないものと仮定した。



### 5.1.5 地下水頭に関する初期条件の与え方

各帯水層の地下水頭の初期条件として、1961年の地下水頭分布を用いた。地下水頭に関する初期条件を1961年に置いた理由は、1959年の伊勢湾台風災害に対する復旧工事が終り、水準点網も整備され、1961年以來濃尾平野の地盤沈下状況を明らかにしうる水準測量が行われるようになったことによる。

1973年に行われた揚水量実態調査資料<sup>4,5)</sup>には、井戸さく井時の水位が記録されているので、これら井戸資料のうち、単層取水井で、地層区分がはっきりしている井戸について、井戸さく井時水位と1973

年水位とを直線で内挿あるいは外挿させて、1961年における地下水頭を求めた。なお、モデル第6層の第3帯水層群の1961年における地下水頭値については、直接推測しうるだけの資料に欠けていたので、当初は第2帯水層の水頭と同じと仮定して、1961年から1977年までの内挿検定計算を行い、近年の実測地下水頭分布との適合度

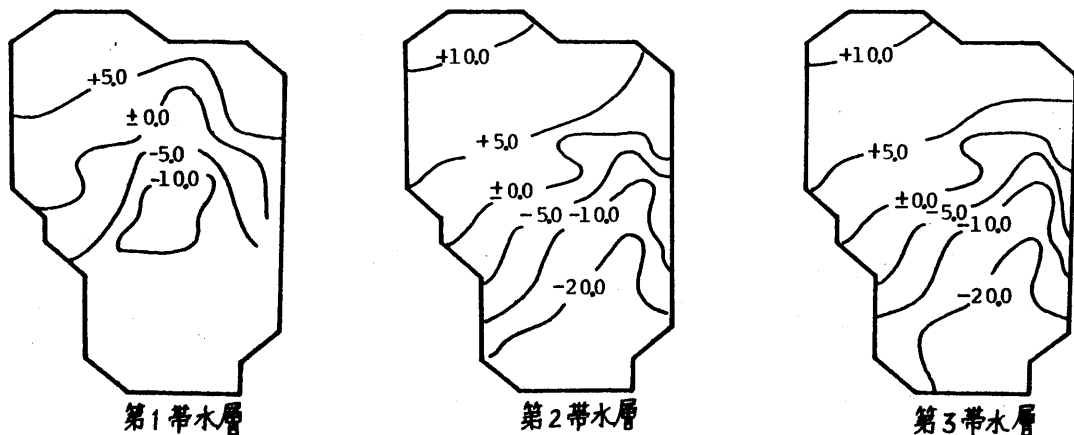


図-5.11 濃尾地下水盒モデルに与えた1961年の地下水頭分布 (T.P.基準 m)

がよくなるように修正することによって決めた。

以上の方法によって決定された第1帯水層，第2帯水層，第3帯水層の地下水頭に関する初期条件（1961年）を図-5.11に示した。

## 5.2 濃尾地下水盆からの揚水量の整理

### 5.2.1 濃尾地下水盆のモデル化と揚水量集計法

1973年揚水量実態調査<sup>4,5)</sup>の集計結果は桑原<sup>19)</sup>によって報告されている。その集計に際しては筆者も協力したが，まず，井戸の所在位置を国土基準メッシュ（国土地理院の255千分の1の地形図を東西方向10等分線，南北方向10等分線によって100等分した区画，図-5.12参照）の上で判定し，井戸台帳に記載されたストレーナー深度と地盤断面図<sup>2)</sup>を比較して，その井戸の取水帯水層を識別し，国土基準メッシュ別，取水帯水層別に井戸を分類する作業を行った。この作業は，濃尾平野域に散在する7000本以上の井戸一本ごとに行う必要があり，多大の作業時間を必要とした。さらに，国土基準メッシュ別，取水帯水層別に分類された井戸台帳にもとづいて揚水量を集計する場合，集計途中の計算チェックにもかなり時間がかかっており，こうした揚水量集計作業の苦勞については桑原<sup>19)</sup>が既に報告している。

したがって，こうした揚水量集計作業の簡素化は広域地下水流動のシミュレーション計算を行う上でも重要な課題であった。そこで，1973年以降の揚水量集計に際しては，次のようにして作業の簡素化を計るとともに，揚水量集計に費す時間を節減した。

すなわち、濃尾平野に存在する7000本以上の井戸の諸元(ストレーナー位置、井戸深度)、井戸の所在位置、井戸の使用目的、揚水量等を計算機に記憶させ、広域地下水流動のシミュレーション計算を行うために組み立てた濃尾地下水盆三次元モデルの各有限要素メッシュごとの揚水量集計を計算機の中で行うこととした。井戸の所在位置、井戸諸元、その年の揚水量を一定のフォーマットに従って整理する作業は面倒ではあるが、濃尾平野域の揚水規制<sup>20)</sup>の現状から考えると、今後井戸が急増したりすることは少ないので、いったん一定のフォーマットに従って濃尾平野域に存在する井戸に関する情報の整理が済めば、あとは各年の揚水量を入れるだけでよい。また、揚水量を広域地下水流動のシミュレーション計算以外の各種目的に合わせて集計し直す場合でも、集計作業の手間が省け、集計の精確さも期することができると考えられる。

濃尾平野域には、図-5.12に示すような国土基準メッシュの網目がかぶせられており、これら各メッシュには図-5.12のような規則で番号が付されている。したがって、濃尾平野域に存在する各井戸の位置は市町村名によるのではなく、国土基準メッシュ番号より判断することとした。たとえば、5612という国土基準メッシュ番号が付された井戸は、濃尾平野域において図-5.12の斜線部分に位置する井戸であることがすぐにわかる。広域地下水流動のシミュレーション計算に用いる有限要素網も、図-5.12に示すように国土基準メッシュに準じて組み立てられており、井戸の有限要素網内での平面的位置も容易に対応させることができるようになっている。

なお、揚水量を濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルに入力する場合の基本要素は、図-5.12に示したように国土基準メッシュ16個（縦4メッシュ×横4メッシュ）の長方形地域を対角線で2等分した直角三角柱要素とし、これら直角三角柱要素内では地下水汲み上げは一律に行われていると仮定して、濃尾地下水盆各地域における井戸からの揚水による地下水流動状態の変化をシミュレートすることとした。

また、各井戸の取水がどの帯水層から行われているか識別する必要がある。その場合、①国土基準メッシュごとに、濃尾平野における主要な被圧帯水層を明確に識別することが、深層ボーリング資料の不足

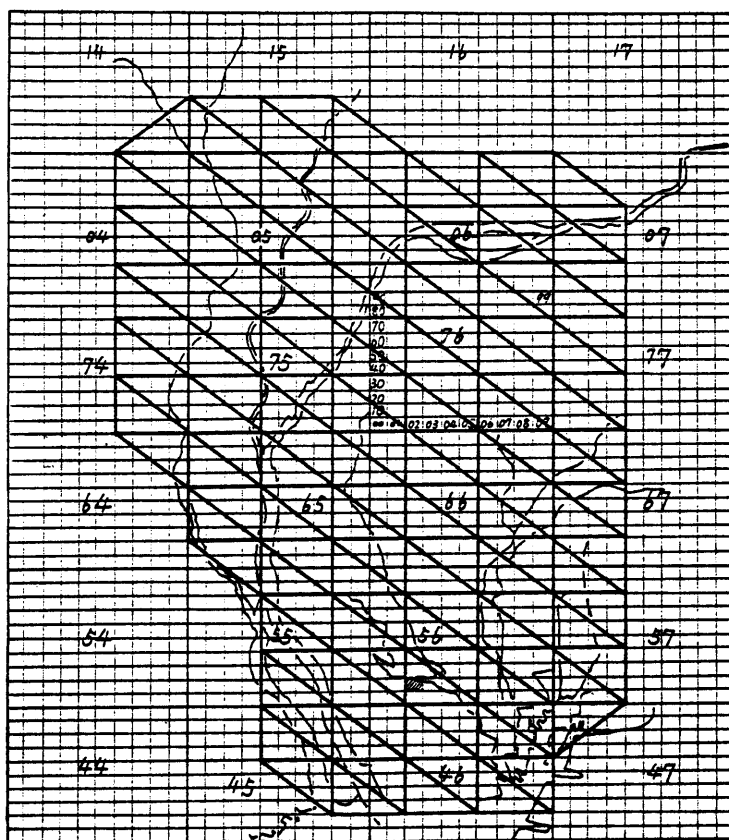


図-5.12 濃尾平野にかぶせられた国土基準メッシュ網と濃尾地下水盆モデル小領域との対応

等により現状ではなお困難である，③井戸のストレーナーが正確に切られていない場合もあり，時にはストレーナー位置さえ不明の井戸もある，等の理由から揚水量集計のための国土基準メッシュごとの被圧帯水層の位置は，熱田粘土層上限深度，第2帯水層下限深度，第三紀層上限深度を，先述の地盤断面図<sup>2)</sup>，現地ボーリング柱状図等を利用して判断し，それらの数値を計算機に記憶させて識別することとした。実際の濃尾地下水盆における地質層序と揚水量集計に用いた地盤モデルの対応を示すと，図-5.13のようになる。なお，ストレーナーが深度15m以浅に設置されているものについては，地表付近の不圧帯水層からの取水とみなし，今回のシミュレーション計算の対象からは一応除外することとした。

付録-1に，図-5.12に示した有限要素の各メッシュにおける揚水量を集計するために利用した国土基準メッシュごとの地盤高，熱田粘土層上限深度，第2帯水層下限深度，第三紀層上限深度の値を示した。

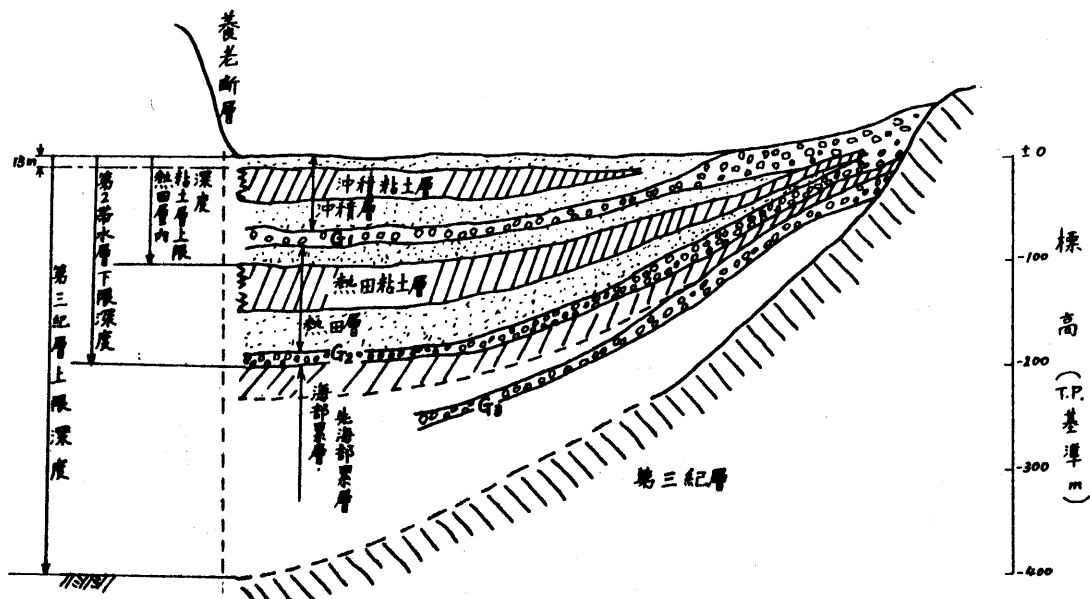


図-5.13 揚水量集計のために用いた濃尾地下水盆モデル

付録-1で、地盤高に999と表示される国土基準メッシュは、濃尾地下水盆三次元地下水流動のシミュレーションモデルの計算対象外のメッシュであることを示し、99と表示されているメッシュは、岐阜県域に属するメッシュであることを示している。

岐阜県域については、通商産業省名古屋通産局<sup>21,22)</sup>によって揚水量実態調査が行われているが、井戸のストレーナー深度が不明で、井戸の取水がどの帯水層から行われているか判断することは不可能であった。そこで、岐阜県域における各帯水層からの取水量の推定は1973年揚水量実態調査の集計結果<sup>19)</sup>を利用することとした。すなわち、1973年揚水量実態調査の集計結果によれば、1973年1年間の岐阜県域からの揚水量のうち、第1帯水層から58%、第2帯水層から20%、第3帯水層群から10%の割合で揚水が行われていたことがわかっており、それ以降の昭和50、51、52年の岐阜県域における国土基準メッシュ別、取水帯水層別揚水量を集計するに当たっては、各国土基準メッシュの全揚水量にそれらの百分率を乗じて、各帯水層からの揚水量を推定することとした。

付録-1の表示は、平均海水面を基準(T.P.基準)として、下向きを正として表示しており、通常の表示とは正負を逆にしていることをことわっておく。

### 5.2.2 多層取水井戸における取水量配分の考え方

ストレーナーが1か所だけに設けられている井戸については、付録-1に示した国土基準メッシュごとの熱田粘土層上限深度、第2帯水

層下限深度，第三紀層上限深度より判断すれば，その井戸がどの被圧帯水層からの取水であるか，一応推定できる。しかし，ストレーナーが何か所にも設けられている井戸（一般に多層取水井戸<sup>23)</sup>と呼ばれる）もあり，これら井戸については各帯水層におけるストレーナー長比で取水量が比例しているものとして，揚水量の集計を行った。

なお，揚水井の汲み上げ時の井戸内外の地下水位状況などの数値が正確にわかれば，さらに実際的な揚水量配分を行うことができる。このことに関する考察を付録-2に述べるが，データ不足ならびに計算機容量の不足から現在の計算は，ここに述べた方法で進めざるを得なかった。

ところで，地下水汲み上げは行われているが，ストレーナー深度の不明な井戸もある。そうした井戸については，井戸深度にもとづいて取水帯水層を識別した。すなわち，その井戸が貫通する帯水層から一様に揚水が行われているとして，井戸が貫通している各帯水層厚士に比例して各帯水層から取水していると仮定した。

### 5.2.3 揚水量集計結果

以上のようにして集計された濃尾地下水盆モデル各部（図-5.18参照）からの，1961年以降の揚水量の推移をまとめると表-5.3のようになる。

1973年以降（1974年を除く）の揚水量については，その年の揚水量実態調査結果をそのままその年の揚水量として利用しているが，1973年より過去にさかのぼった揚水量については，適当な揚水量調査が行われていなかったため次のように推定した。すなわち，1973年の揚水量実態調査<sup>4,5)</sup>では，井戸掘削時期も記載されており，それら井戸

掘削年次に従って、井戸増設による揚水量の増加があったとして、1961年、1965年、1969年、1973年当時の揚水量を推定した。そして、それら4つの時期の間の揚水量は直線的に変化しているものとして、シミュレーション計算における各年の揚水量を推定した。

1969年、農林省によって行われた愛知、岐阜、三重の各県における揚水量実態調査結果が報告<sup>24)</sup>されている。それによると、1969年の愛知、岐阜、三重県の三県で約270万ト/日の地下水が深井戸から汲み上げられていたことがわかっている。表-5.3に示した1969年における濃尾地下水盆モデル内の揚水量は約190万ト/日となっているが、モデル対象範囲外も含めた濃尾沖積平野全域からの被圧地下水汲み上げ量を見ると、1969年には約290万ト/日となっており<sup>19)</sup>、1969年揚水量については、1973年揚水量実態調査<sup>4,5)</sup>にもとづいて推定した値はほぼ妥当な揚水量となっていることがわかる。

地下水利用の合理化によっても揚水量をかなり削減できるとの報告

表-5.3 濃尾地下水盆モデルからの揚水量 (m<sup>3</sup>/日)

地域名 (西濃尾平野部)	揚水量 層別	1961	1965	1969	1973	1976	1976	1977
岐阜地域C	第1帯水層 G <sub>1</sub>	275672	349282	575993	734064	824016	469217	448940
	第2帯水層 G <sub>2</sub>	81749	114064	163307	200915	145712	193843	182447
	第3帯水層群	40699	51665	65388	73918	72625	106770	100235
岐阜地域の小計		398120	515011	804688	1008897	542353	769830	731622
尾張北部 地域 B <sub>2</sub>	第1帯水層 G <sub>1</sub>	79827	110174	141483	159710	135575	246034	223273
	第2帯水層 G <sub>2</sub>	161458	234067	313934	357718	260239	176565	174833
	第3帯水層群	77358	123670	218200	319616	340680	286867	279791
尾張北部地域の小計		318643	467905	673617	837044	736494	709466	677897
尾張南部 地域 A	第1帯水層 G <sub>1</sub>	54003	63116	72039	77246	102588	102354	100885
	第2帯水層 G <sub>2</sub>	33454	53310	72487	108948	48765	53375	52873
	第3帯水層群	62536	105991	175533	222988	251788	251476	250202
尾張南部地域の小計		149993	222417	320059	409182	403141	407205	403960
三重地域 B <sub>1</sub>	第1帯水層 G <sub>1</sub>	9765	21124	39990	67643	38696	24915	23255
	第2帯水層 G <sub>2</sub>	17935	21464	26157	42274	18921	15871	16255
	第3帯水層群	14638	16069	21047	31589	27843	44547	39097
三重地域の小計		42338	58657	87194	141506	85460	85333	78607
濃尾地下水盆モデル全揚水量		909094	1263990	1885558	2396629	1867448	1971834	1892084



<sup>25~27)</sup> もあり、濃尾平野でも揚水規制と平行して、地下水利用の合理化の研究も行われつつある<sup>28,29)</sup>。その場合、使用目的による地下水利用の合理化を行うことの難易もあるので、揚水量を用途別に把握することも必要であると考え、1977年については、井戸の使用目的を、工業用、農業用、ビル用、上水道用、水産その他用の5つの用途に分けて揚水量集計を行っている。

付録-3に、表-5.3に示した濃尾地下水盒モデルからの地下水汲み上げ量の詳細な値を示した。また付録-4には、1977年における各用途別地下水汲み上げ量の濃尾地下水盒モデル各メッシュにおける値を示した。付録-4に示した水産その他用の揚水量で、モデル内三重県域からの揚水量がきわめて多くなっているが、それら地域は養鰻業が盛んで、それら養鰻のための地下水汲み上げ量が大部分を占めている。

なお、付録-3,4に示した揚水量の単位はすべてト/日である。

### 5.3 内挿検定期間におけるモデルと実際との比較

#### 5.3.1 地下水頭値におけるシミュレーションと実際との比較

図-5.11に示した1961年の地下水頭分布を初期値とし、各地域の年々の平均揚水量をインプットしながら、1961年から1977年までの各被圧帯水層の地下水頭の応答を計算した。その結果、1977年の第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層群における計算地下水頭分布として、図-5.14のような結果を得た。図-5.14には、破線で1977年の実測地下水頭分布(1977年4月における地下水頭分布)も示したが、各帯水層とも、実測値、計算値はかなりよく対応している。

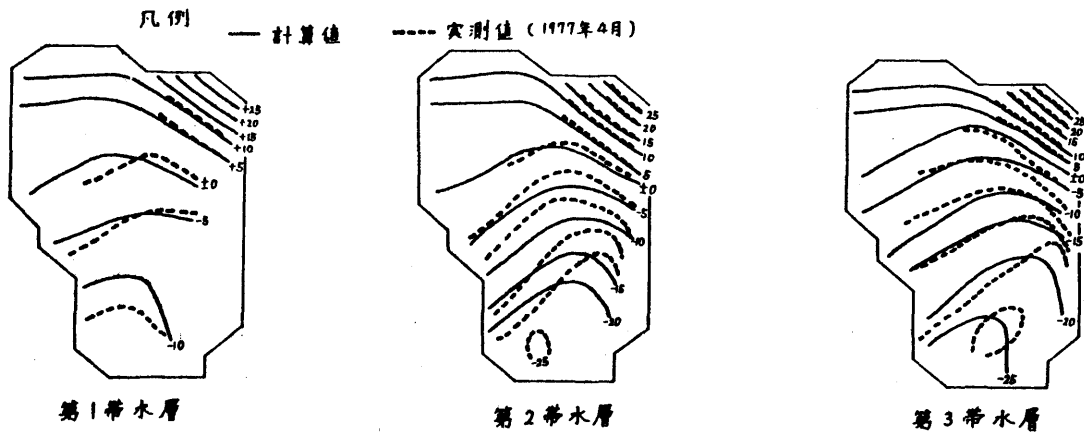


図-5.14 1977年の各帯水層における計算地下水頭値と実測値との比較(地下水頭値はT.P.基準mで表示)

内挿検定期間中の、各帯水層の計算地下水頭値と実測値との経年変化の対応の例を図-5.20(a), (b)に示した。

実測地下水頭値は毎年夏に下降し、冬に回復する1年周期の変動をくり返しながら経年的変化を行っているが、計算としては、細かい変動を追跡することは無理なので、大きい傾向において大過のない予測のことに重点をおいているが、図-5.20(a), (b)の例により、計算値と実測値との経年的変化の対応もかなりよいと見ることができよう。

### 5.3.2 地下水流動状況からみたモデルと実際との比較

濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルより得られた被圧帯水層の地下水頭値にもとづいて、各帯水層の地下水流動ベクトルを描き、水質分析結果等により明らかとなっている濃尾地下水盆の地下水流動状態と比較し、濃尾地下水盆モデルの妥当性を検討する。

濃尾地下水盆モデルに設けられた637個の有限要素格子点における

地下水頭値が得られたならば、各基本有限要素（濃尾地下水盆モデルでは、2646個の四面体要素）ごとの平均流量速度  $\{v\}^e$  は、

$$\{v\}^e = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k & b_l \\ c_i & c_j & c_k & c_l \\ d_i & d_j & d_k & d_l \end{bmatrix} \{h\}^e \quad (5.7)$$

と近似的に表わすことができる<sup>30)</sup>。ここで、 $v_x, v_y, v_z$  は  $x, y, z$  方向の流量流速、 $k_x, k_y, k_z$  は  $x, y, z$  方向の透水係数、 $V$  はいま考えている四面体要素  $e$ （4.5.2 参照）の体積、 $b_i \sim b_l, c_i \sim c_l, d_i \sim d_l$  は四面体要素  $e$  を構成する4つの節点座標より得られる定数、 $\{h\}^e$  は四面体要素  $e$  の各節点の地下水頭値で、その並び方は  $\{h_i, h_j, h_k, h_l\}^T$  である。

なお、流量速度  $v$  ( $m^3/年$ ) は、地下水流動量  $Q$  ( $m^3/年$ ) と流動方向に垂直な土の断面積  $A$  ( $m^2$ ) によって次のように定義されるものである。

$$v = \frac{Q}{A} = kv_i \quad (5.8)$$

ここに、 $k$  は透水係数、 $i$  は動水勾配である。

この場合、実際には土の断面積  $A$  の間隙の中だけを地下水が動いているので、流量速度  $v$  は実際の流速ではなく、実際の水の動きを示す流速  $v_s$  ( $m/年$ ) は、土の間隙の断面積  $A_v$  ( $m^2$ ) を用いて計算されるものであり、土の間隙率  $n$  (または開けき比  $e$ ) によって (5.8) 式の  $v$  より次のように求めることができる。

$$v_s = \frac{Q}{A_v} = v \cdot \frac{A}{A_v} = \frac{v}{n} = \frac{1+e}{e} v \quad (5.9)$$

ところで、 $1+e/e$  の値のおよその見当をつけるために、濃尾平野沖積砂層（愛知県海部郡立田村における地表面下数メートルにわたる砂

層)の砂(統一土質分類法<sup>31)</sup>によればSPに分類される)の場合の計算<sup>32)</sup>を示すと、 $e_{max} = 1.193$ 、 $e_{min} = 0.665$ であるので

$$1 + \frac{e_{max}}{e_{max}} = 1.8, \quad 1 + \frac{e_{min}}{e_{min}} = 2.5$$

となる。したがって、地下水の実際の流速 $v_s$ ( $m/年$ )は一般に用いられている流量速度 $v$ ( $m/年$ )の数倍(上記の砂層の場合には2倍程度)と考えればよいことがわかる。

今回組み立てた濃尾地下水盆モデルでは帯水層の上面と下面に有限要素格子点を設けているが、同一の帯水層内では帯水層上面と下面の計算地下水頭値は一致した値を示し、帯水層内では鉛直方向の地下水流動はほとんど無視し得る。そこで、モデル化した各被圧帯水層における地下水流動ベクトル図を作成するに際しては、各帯水層における平面的地下水流動ベクトル図を作成した。

また、結果の見やすさから、表示は3つの四面体要素の浸透速度の平均値を、三角柱要素(図-5.1に示すように平面的には直角三角形となる)における平均浸透速度とし、これら三角柱要素ごとの地下水流動ベクトルを描いた。

図-5.15(a)~(c)に1961年時点における第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層群の地下水流動ベクトル図を、図-5.16(a)~(c)に濃尾地下水盆モデル内からの地下水汲み上げ量が過去最大であった1973年時点の各被圧帯水層における地下水流動ベクトル図を、図-5.17(a)~(c)には1977年時点の地下水流動ベクトル図を示した。

図-5.15~17の地下水流動ベクトルは(5.8)式の $v$ ( $m/年$ )の10倍の値を記入したものである。しかし、実際の地下水の動きとして $v_s$ ( $m/年$ )

で表記する場合には、 $v$  ( $m^3/年$ ) の数倍となるはずであるから、 $v$  ( $m^3/年$ ) の10倍で表記した図-5.15~17の地下水の動きは  $v_s$  ( $m^3/年$ ) の数倍 (2~5倍: 5倍の場合は、先述の立田村の砂層と同じ場合<sup>32)</sup>, 2倍の場合は、粒径分布が理想的な土 ( $e_{min} = 0.25$ ) の最大密度の場合<sup>33)</sup>) のスケールで表現されているものと見なすことができる。

被圧地下水帯における地下水流動は、人為的作用つまり揚水条件に

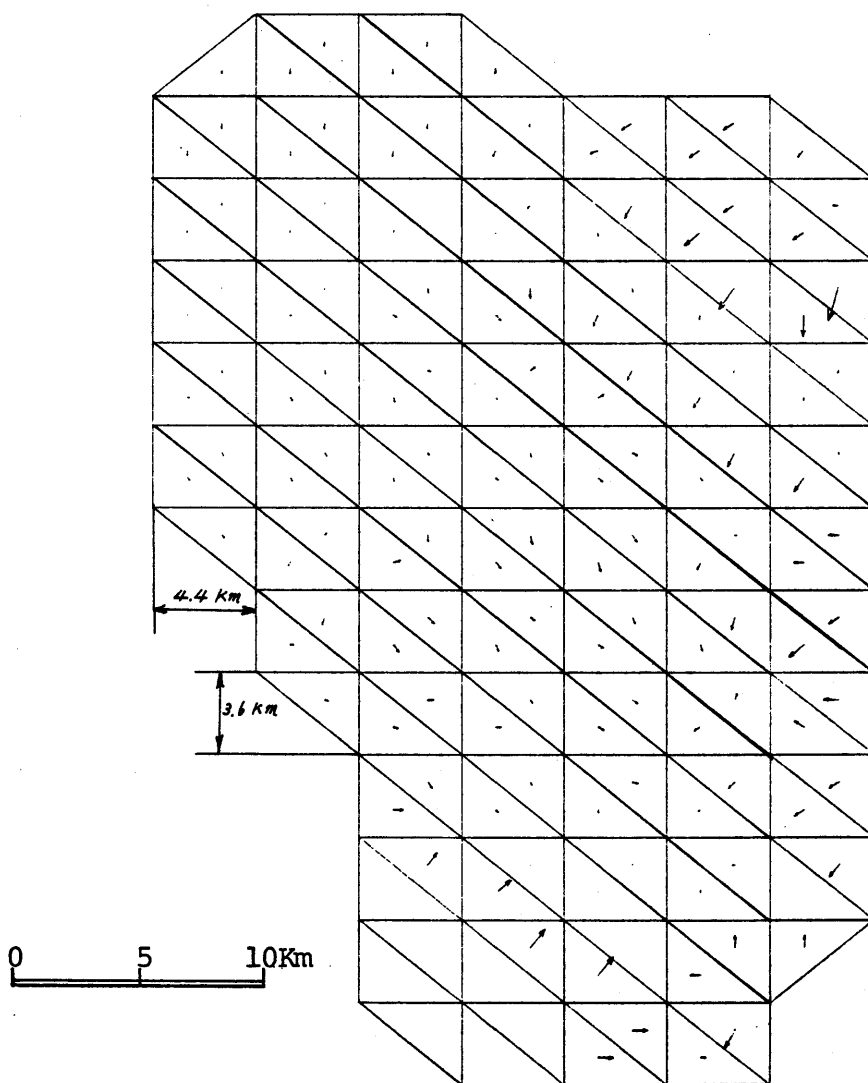


図-5.15(a) 1961年時点における第1帯水層の地下水流動ベクトル図 (実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き)

よって種々に変化することはよく知られており、図-5.15~17における各年の地下水流動状態にも、局所的な地下水流動傾向の変化が認められる。

1973年における名古屋市北部地域の第1帯水層(G1)、第2帯水層(G2)では、この地域への地下水流動が他の年にくらべて激しくなっている(図-5.16(a), (b)参照)。これは、付録-3の1973年における

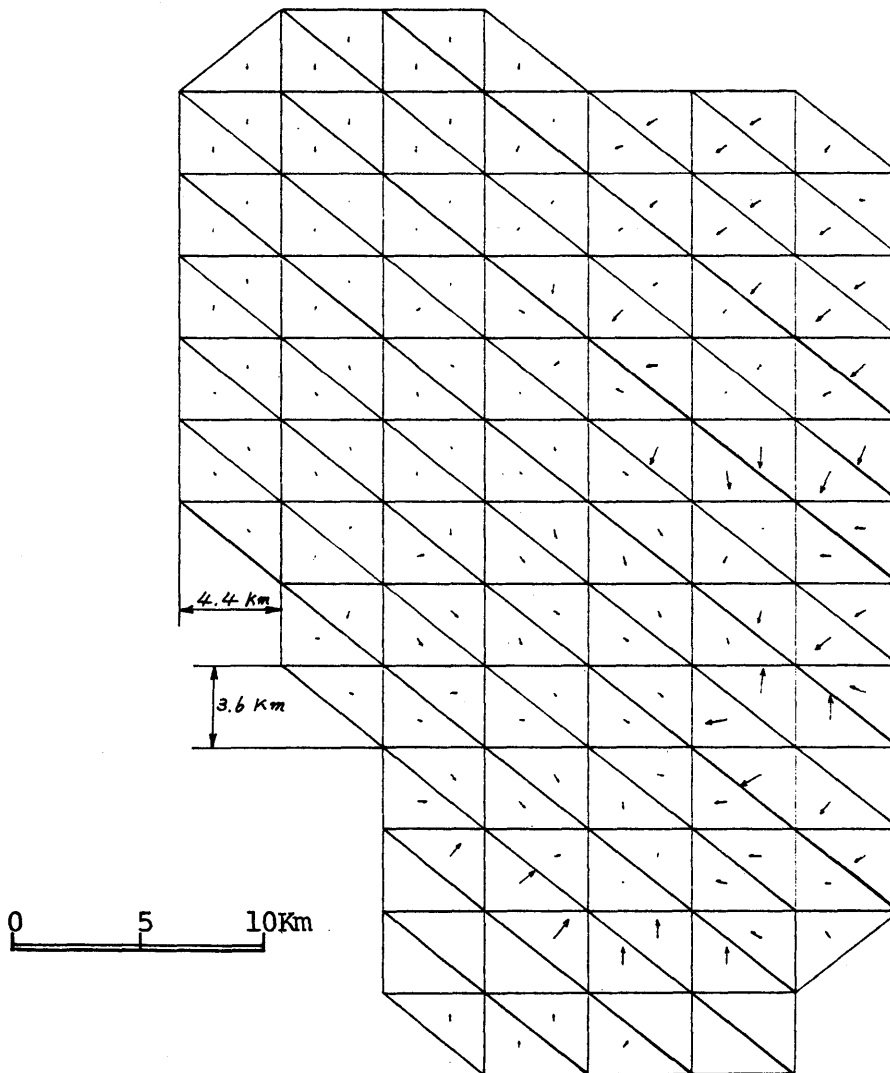


図-5.15(b) 1961年時点における第2帯水層の地下水流動ベクトル図(実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き)

この地域からの揚水量がらわかるように、1973年にはこの地域に  
 とくに地下水汲み上げの激しい場所が存在しており<sup>19)</sup>、そうした激しい揚水  
 の結果、この地域の地下水頭が低下し、まわりからの地下水流動を強制的に引  
 き起こしたものである。しかし、この局所的な地下水流動も、1974年  
 以降のこの地域における地下水汲み上げ量の削減による地下水頭上昇  
 により消えており(図-5.17(a), (b) 参照)、濃尾地下水盆における被

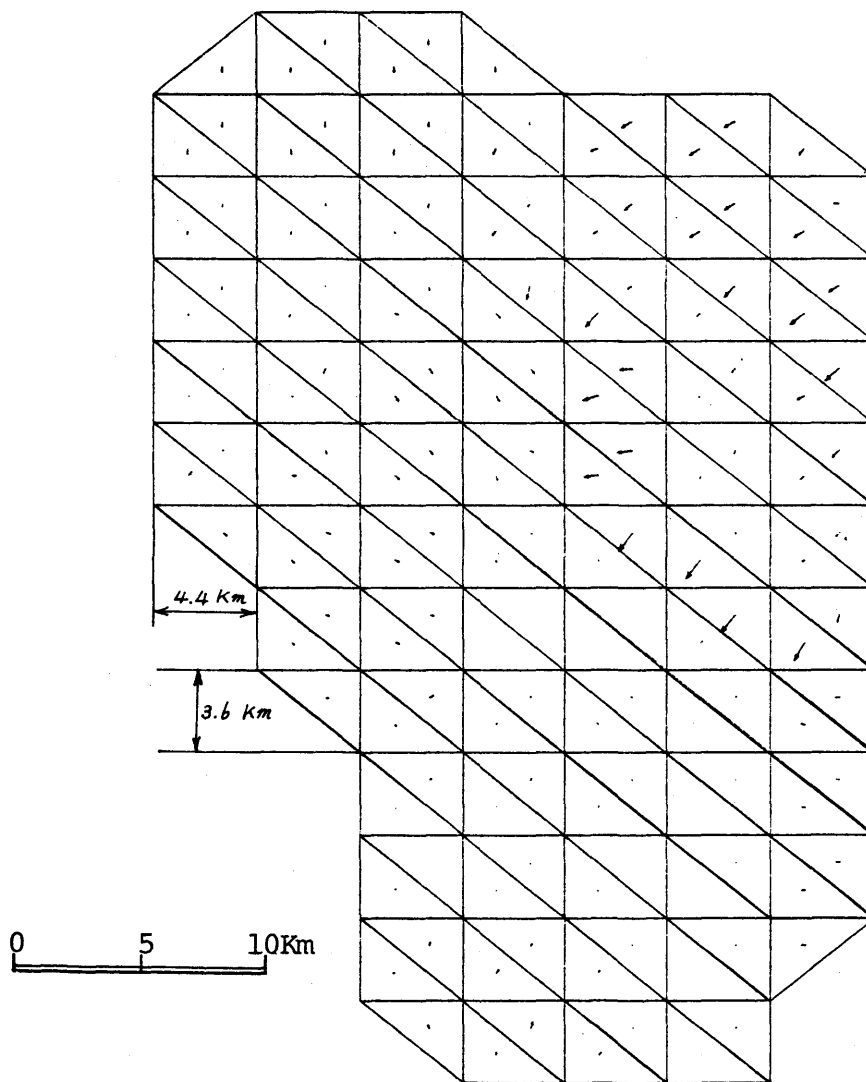


図-5.15(c) 1961年時点における第3帯水層の地下水  
 流動ベクトル図(実際の流動の数倍のスケ  
 ールで描いた1年間の動き)

圧地下水流動状態への人為的影響を読み取ることができよう。

一方、図-5.16, 5.17より、濃尾平野の地盤沈下激甚地とされている平野南部地域における地下水流動は、他の地域の地下水流動に比し、きわめて、緩いことがわかる。濃尾地盤沈下地域からの揚水量は、他の地域からの地下水汲み上げ量にくらべ特に多くはない。たとえば、表-5.3に示した濃尾地下水モデル各部からの揚水量から

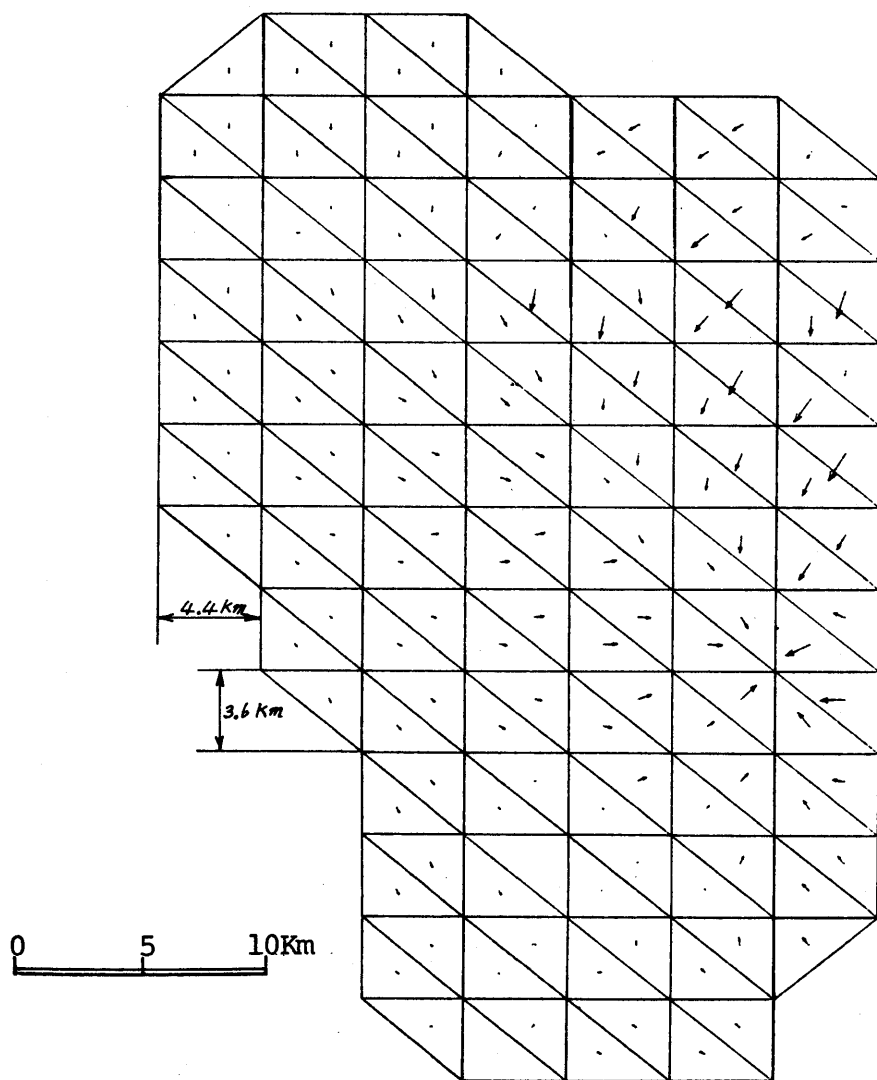


図-5.16(a) 1973年時点における第1帯水層の地下水流動ベクトル図(実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き)



もわかるが、モデル内の地盤沈下地域（表-5-3に示した尾張南部地域と三重県域）からの揚水量は、他の地域からの揚水量の約3割程度である。しかし、地盤沈下地域では、その程度の揚水量であるにもかかわらず、上流地域からの地下水涵養速度の緩慢さが、濃尾平野臨海部の地盤沈下量を大きくしている原因であることが理解できる。

乗原<sup>34)</sup>は地下水質、トリチウム分析結果にもとづいて、濃尾

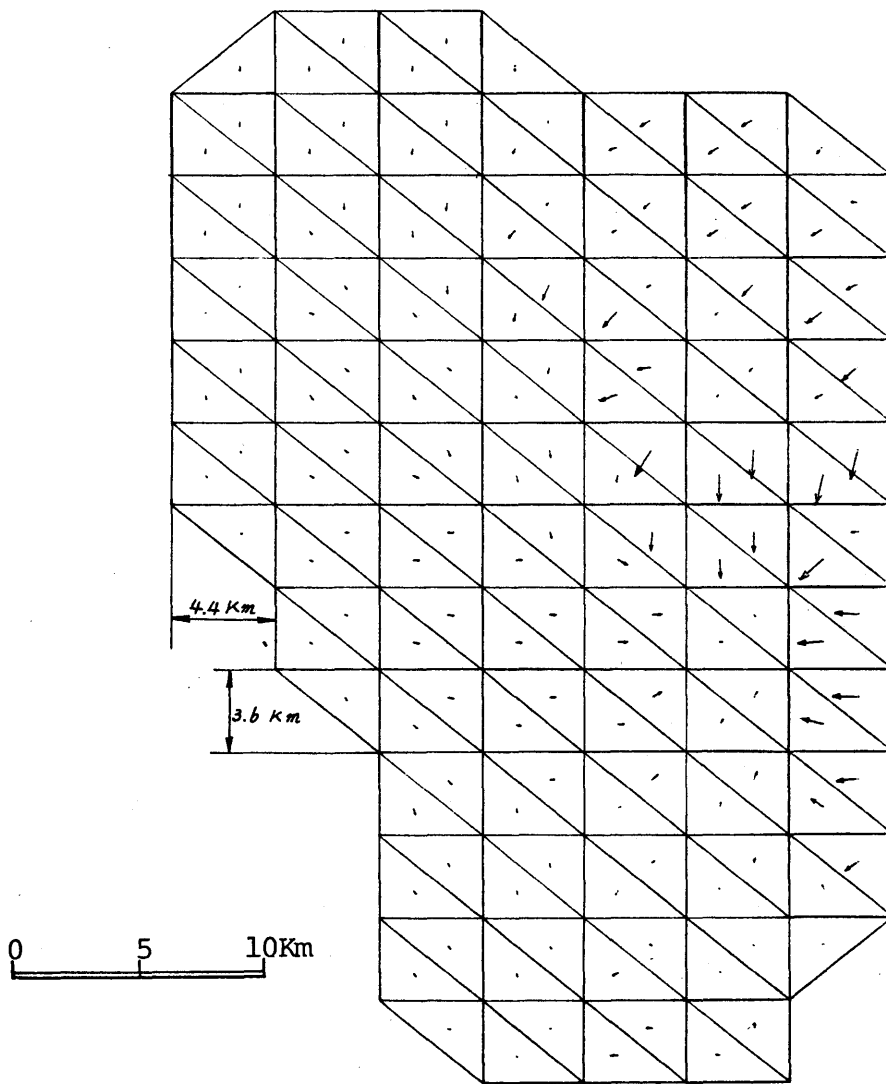


図-5-16 (b) 1973年時点における第2帯水層の地下水流動ベクトル図（実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き）

平野の地下水流動には、二つの大きな流動系があることを指摘している。すなわち、長良川、揖斐川流域の扇状地からの濃尾平野南部へ流下する地下水流動系と、木曾川流域の大山扇状地からの平野南部へ流下する地下水流動系の二つである。

加藤<sup>35)</sup>は濃尾平野地下水の酸素同位体組成を調べて、栗原<sup>34)</sup>と同じような濃尾平野地下の二つの地下水流動系を確認している。なお、通

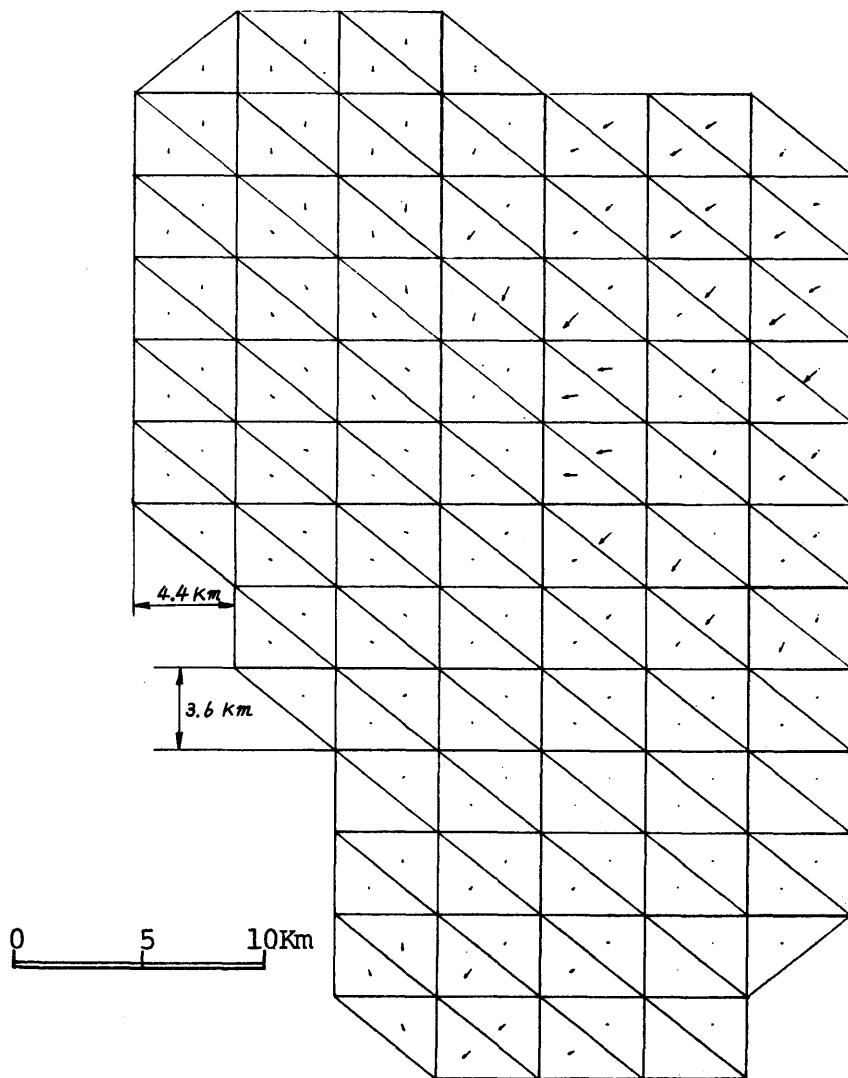


図-5-16(c) 1973年時点における第3帯水層の地下水流動ベクトル図(実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き)

商産業省名古屋通産局の研究<sup>36)</sup>においても，名古屋大学の中井信之教授が，酸素同位体組成により，地下水の流動状況を推定しており，同様の結果を得ている。

図-5.15～5.17に示した各被圧帯水層の地下水流動のベクトル図からわかるように，モデル北東部の犬山扇状地からのモデル南部への地下水流動とモデル北西部の大垣地域からモデル南部への地下水流動

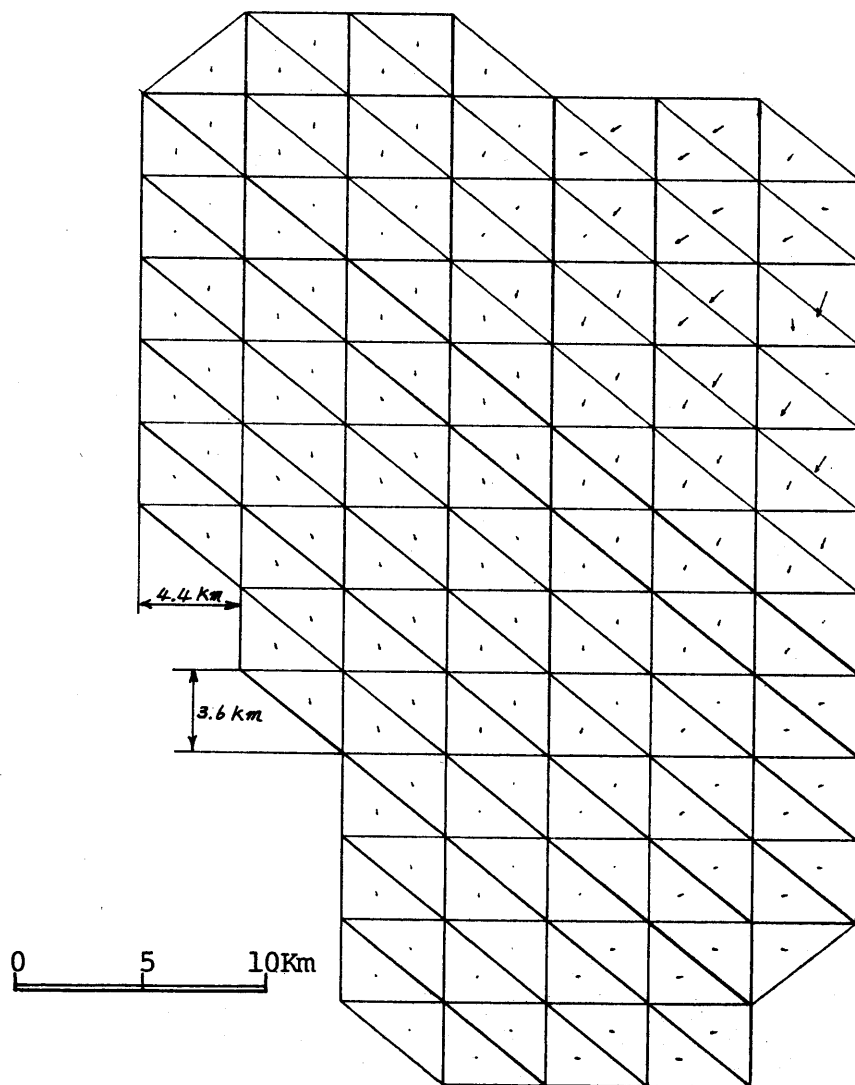


図-5.17(a) 1977年時点における第1帯水層の地下水流動ベクトル図(実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き)

が濃尾地下水盆モデルでも認められ、広域地下水の流動状態からみても、実際の濃尾地下水盆内の地下水流動状態とほぼ対応のよい濃尾地下水盆モデルとなっていることが、これら地下水流動ベクトル図から判断される。

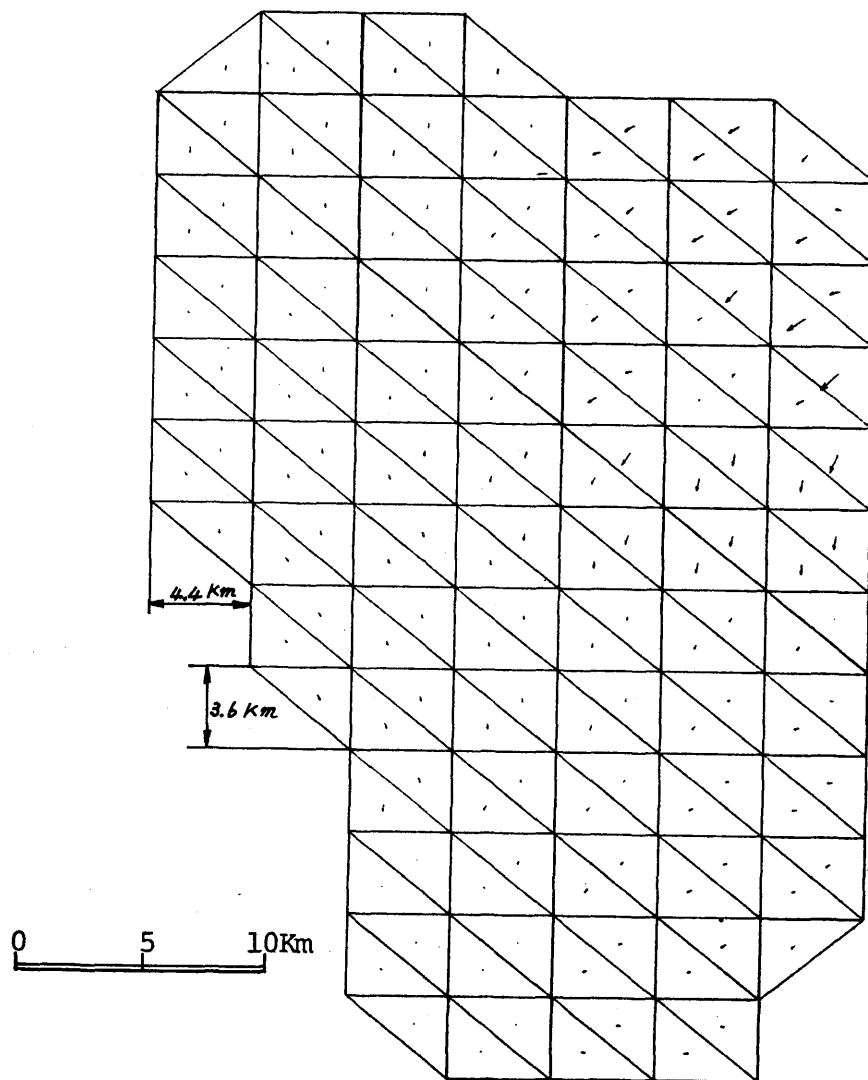


図 - 5.17 (b) 1977年時点における第2帯水層の地下水流動ベクトル図 (実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き)

### 5.3.3 地下水収支からみたモデルと実際との比較

今回のシミュレーション計算の妥当性を調べるため、この地域における涵養量(上方からの地下水浸透量と周辺からの地下水流入量)、この地域からの地下水汲み上げ量、この地域での地盤沈下体積収縮量の対応が妥当であるかを以下に述べるような方法で検討した。

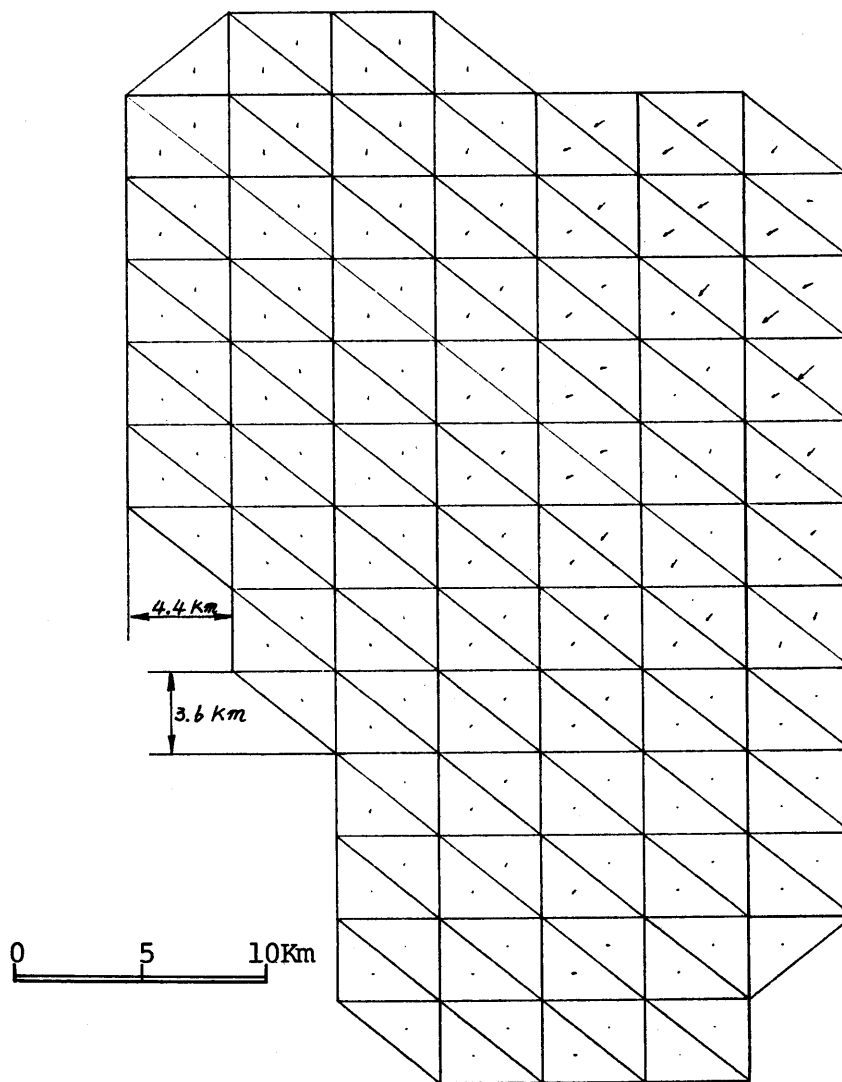


図-5.17(c) 1977年時点における第3帯水層の地下水流動ベクトル図(実際の流動の数倍のスケールで描いた1年間の動き)

地下水流動のシミュレーション計算に用いた基礎式(第4章, (4.9)式参照)を, 地下水収支を検討する地下水盒モデルにおける地盤沈下地域(図-5.18の[A+B]地域)の全領域にわたり体積積分すると,

$$\begin{aligned} \iiint_{V_i} s \frac{\partial h}{\partial t} dV_i &= \iint_{A_i} (k_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z) dA_i \\ &- \iiint_{V_i} w dV_i \end{aligned} \quad (5.10)$$

となる。

ここに,  $V_i$ は今考えている地下水盒モデルにおいて地下水収支を検討する地盤沈下地域の体積,  $A_i$ は地下水収支検討領域の全表面積を示している。

上式(5.10)の右辺にもとづいて地盤沈下地域全体の収支を検討するわけであるが, 具体的な数値計算を行うに際しては, 今回組み立てた濃尾地下水盒モデルの各メッシュごとに鉛直方向の地下水浸透量と各帯水層における周辺部からの水平方向地下水流入量を, 内挿検定後の透水係数(表-5.2参照)を用いて計算した。そして, (5.10)式右辺の地下水赤字量と水準測量結果から求まる地盤沈下体積(涵養量を上まわる過剰揚水により, 飽和粘土層中の水が絞られて粘土層が収縮し地盤沈下が起ったとすれば, 収支赤字量が地盤沈下体積となる)とを比較して, 今回組み立てた地下水流動モデルに大きな誤りのないことを確かめることとした。

図-5.19に最近10年間における地下水盒モデル[A+B]地域(図-5.18参照)の地下水収支状況を示した。図-5.19の柱状グラフの上端の値は,

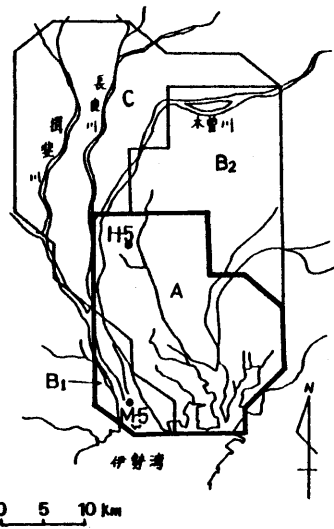


図-5.18 濃尾地下水盆モデルにおける地下水収支の検討範囲 (A+B<sub>1</sub> 地域)

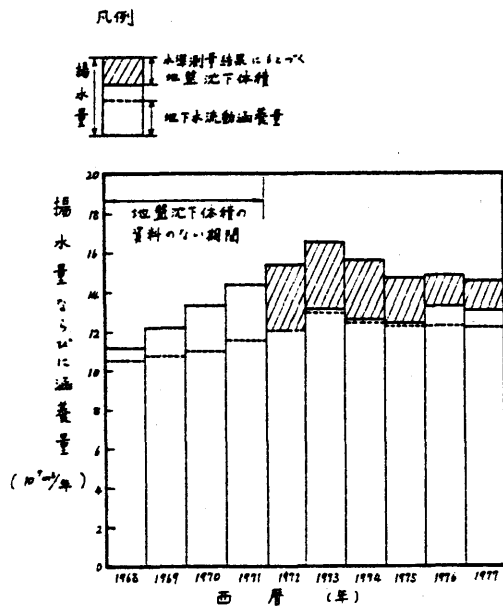


図-5.19 モデル内の地盤沈下地域 (図-5.18のA+B<sub>1</sub> 地域) での地下水収支状況

この地域からの地下水汲み上げ量を、点線における値は、この地域への地下水流入量(地下水涵養量)を示している。図-5.19の柱状グラフの上端から点線までの差が、地下水流動モデルの地盤沈下地域における被圧地下水の赤字量を示すこととなる。

1972年以來毎年行われつつある水準測量結果にもとづいて、図-5.18の[A+B]地域における地盤沈下収縮体積を算出し、図-5.19の柱状グラフの上端から下に向けての斜線部分で示した。この図より、地下水盒モデルにおける地下水収支赤字量と地盤沈下収縮体積とがほぼよく対応しており、地下水収支の面からみてもこのモデルによるシミュレーション計算は良好であることがわかった。

#### 5.4 濃尾地下水盒適正揚水量の推定

濃尾地下水盒三次元モデルによる地下水流動のシミュレーション計算が、1961年から1977年までの16年間の実際との対応において、ほぼ満足できる結果を示すにいたったので、このモデルにより濃尾平野における将来の適正揚水量を予測する作業を行った。

現行の揚水規制区域に一致させて、濃尾地下水盒モデルを4つの区域(図-5.18のA, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C)に区分し、次に示すI~Vの5種の将来揚水量の仮定を設け、被圧地下水頭の回復状態を調べた。

(I) A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C 地区で、1978年以降の揚水量は、1977年の揚水量と同一のままで続くとする。

(II) A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 地区で、1978年の揚水量が1977年の揚水量の2割減となり、その後はその揚水量(1977年揚水量の8割)が続



くとする。

(Ⅲ) A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 地区で, 1978年から1979年まで毎年2割ずつ揚水量を減少させ, その後はその揚水量(1977年揚水量の6割)が続くとする。

(Ⅳ) A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 地区で, 1978年から1980年まで毎年2割ずつ揚水量を減少させ, その後はその揚水量(1977年揚水量の4割)が続くとする。

(Ⅴ) A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 地区で, 1978年から1981年まで毎年2割ずつ揚水量を減少させ, その後はその揚水量(1977年揚水量の2割)が続くとする。

さて, 以上5つの将来揚水条件による地下水頭回復状態の例を, 松中, 津島観測井付近の有限要素格子点(図-5.18に示したM-5, H-5節点)で示せば, 図-5.20(a), (b)のようになった。

先述した5種の将来揚水量の仮定による計算では, 1977年揚水量をおよそ5割減しなければ, 第2被圧帯水層, 第3被圧帯水層の水頭が安全地下水頭値, G.L. -10m程度に回復しないという予測を図-5.20(a), (b)は示している。(図-5.20(a), (b)の地下水頭値は, 平均海水面, T.P.基準で示してあるが, 松中観測井付近の地盤高はT.P. -1.6m, 津島観測井付近の地盤高はT.P. -1.4m程度にある。)

今後, さらに精度を高める努力を続けねばならないが, 一応の結論として, 濃尾平野の第2, 第3帯水層に関する適正揚水量は1977年揚水量の約半分であるという結論を得ることができたわけである。

なお, 図-5.20(a), (b)によれば, 第1帯水層の水頭値は, 第2

帯水層，第3帯水層の水頭値よりも回復状態がよいが，実際には，各帯水層の水頭値の平均化が生じ，図-5.20(a)，(b)よりもさらに好ましい傾向が期待できる。

また，観測井を利用して，地下水頭値 G.L. - (10 ± 5) m の管理範囲で地下水を利用する体制をとれば，上記結果を一応の参考値としながら，地下水の有効利用がはかれるものと考えている。

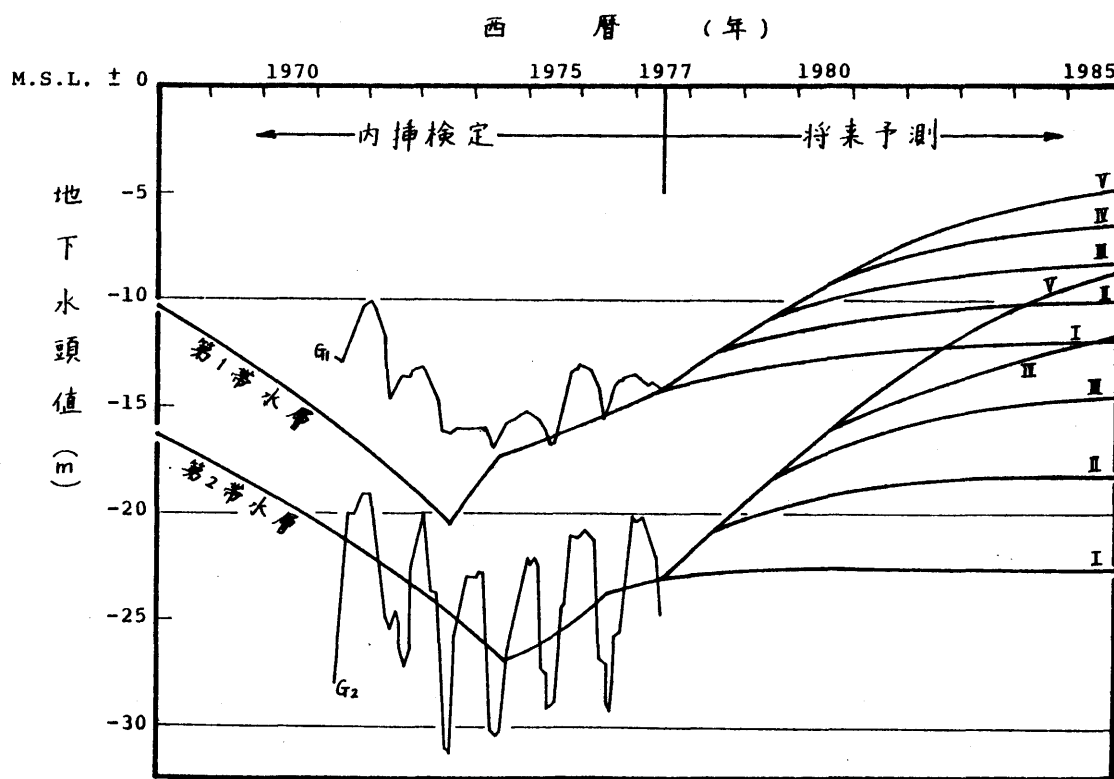


図-5.20(a) 将来の揚水条件(5つのケース)に対応した松中観測井付近地下水頭値の推移予測

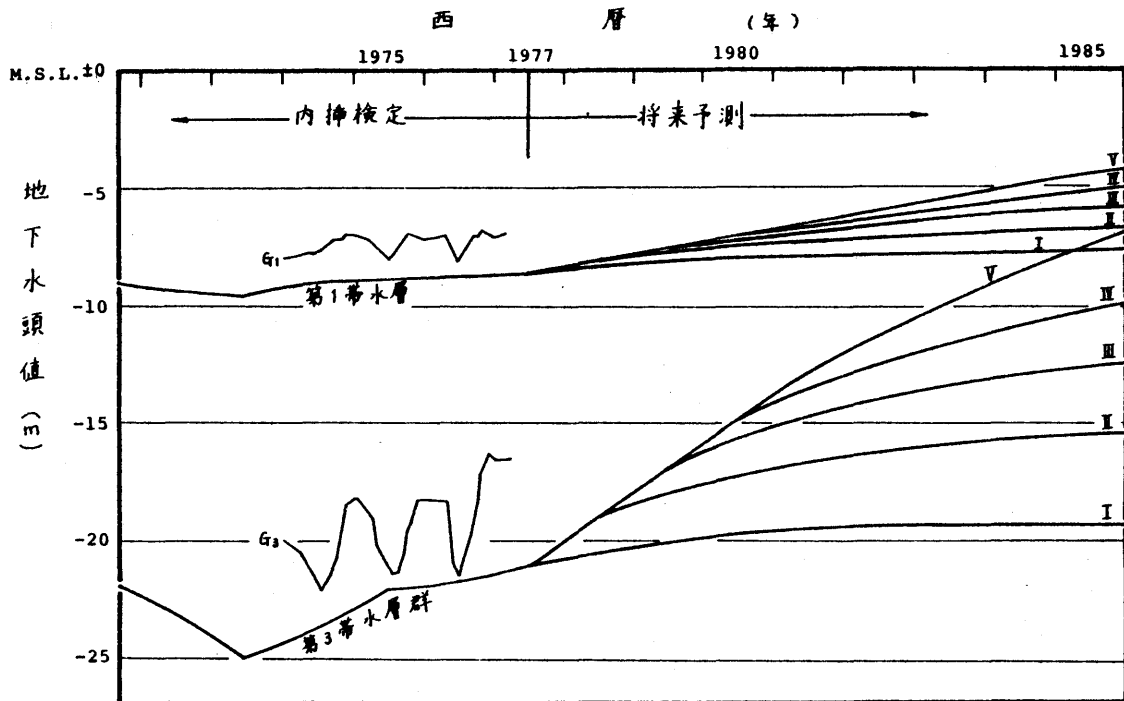


図-5.20(b) 将来の揚水条件(5つのケース)に対応した津島観測井付近地下水頭値の推移予測

## 5.5 結論

濃尾平野における地盤沈下問題の解決には、過去の過剰揚水によって生じた各帯水層の地下水頭の低下を止め、早期に各帯水層の地下水頭を安全地下水頭 G.L. -10 m まで回復させることが必要である。こうした好ましい地下水圧状態での将来の適正揚水量を予測するため、濃尾地下水盆の広域地下水流動のシミュレーション計算を行った。

筆者の用いた地下水盆モデルは、従来用いられてきた平面二次元モデル、鉛直二次元モデル、準三次元モデルよりもさらに実際の適用性をもつ、三次元モデルである。また、モデルの大きさ、内挿検定期間の長さ等、いずれも過去に例をみない大規模なものである。

本章で述べた事柄ならびに明らかになったことの要点をまとめると次のようになる。

(1) 計算機容量(名古屋大学大型計算機 FACOM 230-75)との関係を考慮しつつ、広大な濃尾平野(1300 km<sup>2</sup>)の地下水の入れ物である濃尾地下水盆の三次元有限要素モデル(東西 30.8 km, 南北 46.8 km, 面積 1164 km<sup>2</sup>, 最大深さ 400 m)を、将来の地下水状態の推定を行うために、地盤工学的研究成果、地質学的研究成果と過去 16 年間の地下水の実態に基づき作成した。

(2) 従来の地下水盆モデルの土質定数(透水係数と比貯留量)の決め方は、地盤工学的調査に基づきだけでなく、内挿検定期間の地下水状態と対応するように逆算して決めることがよく行われ、モデルの不完全さの影響が表われるため、それらの土質定数が実際の値と大きくかけはなれることがみられてきた。これに対し、筆者の作成した濃尾地下水盆三次元モデルの土質定数は、実際の土質試験、揚水試験結果と対応する定数を最初に仮定し、その後内挿検定し、必要に応じて修正したもので、それらの定数は、地盤工学的に納得(うる値のもの)となっている。

(3) 地下水頭の回復期には、砂層、礫層についてはほぼ弾性的挙動をすると仮定して、地下水頭低下期と同じ比貯留量を用いたが、粘土層については、圧密・膨潤試験結果に基づいて、非弾性的挙動を考慮し、圧密時と膨潤時で異なる比貯留量を用いた。

(4) 内挿検定期間は、可能なかぎり長期間(1961年から1977年まで)を採用し、モデルと実際との適合度は、地下水頭平面分布、地下水頭の経年変化、各帯水層の地下水流動状態だけでなく、地盤沈下収縮

体積とモデル内の地下水収支赤字量により、地下水収支の面からも検討した。その結果、モデルと実際との対応は、かなり良好であることがわかった。

(5) 濃尾平野南部の地盤沈下激甚地で、第2、第3の被圧地下水を安全地下水頭の状態とするためには、1977年揚水量の約半分程度に揚水量を減らさなければならぬであろうことが推定された。

## 参考文献

- 1) 植下 協, 佐藤 健: 濃尾平野の適正揚水量に関する研究, 土木学会論文報告集, 第287号, pp. 137~146, 1979.
- 2) 桑原 徹: 濃尾平野地下断面図, 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書, 愛知県環境部, pp. 159~182, 昭和50年3月.
- 3) 桑原 徹, 植下 協, 板橋一雄: 濃尾平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 53~60, 1977.
- 4) 環境庁, 建設省, 愛知県, 岐阜県, 三重県: 昭和48年度濃尾平野地下水揚水量等実態調査報告書, 1974.
- 5) 名古屋市: 昭和48年度名古屋市地下水揚水量等実態調査報告書, 1974.
- 6) 桑原 徹, 濃尾平野第四系研究グループ: 伊勢湾周辺地域の中期更新統 1. 分布と層序, 日本第四紀学会講演要旨集 9, pp. 5~8, 1977.
- 7) D. Kleinecke: Use of Linear Programing for Estimating Geohydrologic Parameters of Groundwater Basin, Water Resources Research, Vol. 7, No. 2, pp. 367-374, 1971.
- 8) E.O. Frind and G.F. Pinder: Galerkin Solution of the Inverse Problem for Aquifer Transmissivity, Water Resources Research, Vol. 9, No. 5, pp. 1397-1410, 1973.
- 9) 藤縄克之, 丸山利輔, 三野 徹: 地下水流動モデルにおけるシステムパラメーターの同定について, 農業土木学会論文集, 第174号, pp. 47~52, 1978.

- 10) H.N. Tyson and E.M. Weber : Ground-Water Management for the Nation's Future, Computer Simulation of Ground-Water Basins, Proc. A.S.C.E., HY.4, pp.59-77, 1964.
- 11) S.P. Neuman : Calibration of distributed Parameter Ground-water Flow Models viewed as a Multi-objective Decision Process under Uncertainty, Water Resources Research, Vol.9, No.4, pp.1004-1021, 1973.
- 12) J.C. Halepaska : Comment on " Galerkin Solution of the Inverse Problem for Aquifer Transmissivity " by E.O. Frind and G.F. Pinder, Water Resources Research, Vol.10, No.3, p.609, 1974.
- 13) E.O. Frind : Reply to J.C. Halepaska's Comment, Water Resources Research, Vol.10, No.3, p.610, 1974.
- 14) 植下 協 : 濃尾平野の地盤沈下対策に関する考察, 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書, 愛知県環境部, pp. 241 ~ 322, 昭和50年3月.
- 15) D.L. Holl : Stress Transmission in Earth, Proc. Highway Research Board, Vol.20, 1940.
- 16) 久保田敬一, 河野伊一郎, 宇野尚雄 : 透水設計へのアプローチ, 土質工学基礎叢書 2, 鹿島出版会, pp. 75 ~ 79, 昭和51年.
- 17) K. Terzaghi : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, p.244, 1943.
- 18) P.A. Domenico and M.D. Mifflin : Water from low Permeability Sediments and Land Subsidence, Water Resources Research, Vol. 4, pp.563-576, 1965.

1965。

- 19) 桑原 徹：濃尾平野における地下水利用の実態，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書（第二報），愛知県環境部，pp. 33～75，昭和51年7月。
- 20) 植下 協：濃尾平野の地盤沈下と揚水規制，土木学会誌，Vol. 61，pp. 31～36，1976。
- 21) 通商産業省名古屋通産局：昭和52年度濃尾平野地下水理調査報告書（地下水利用実態調査報告），昭和53年3月。
- 22) 通商産業省名古屋通産局：昭和53年度濃尾平野地下水理調査報告書（地下水利用実態調査報告），昭和54年3月。
- 23) 酒井軍治郎：応用地下水学，朝倉書店，pp. 198～207，昭和42年。
- 24) 建設省国土地理院，建設省中部地方建設局：地盤沈下と地域構造との相関関係の調査研究（第一報）報告書—濃尾平野，pp. 78～81，昭和48年3月。
- 25) 島津暉之，田中義明：水使用合理化による地下水揚水量の削減，土木技術資料，Vol. 19，No. 9，pp. 31～36，1977。
- 26) 石野良夫：東京都の地下水使用合理化基準とその考え方，水利科学，Vol. 19，No. 5，pp. 101～109，1975。
- 27) 石崎勝義，北川 明，遠藤真一：地下水揚水の削減方法の比較検討，第21回水理講演会論文集，pp. 143～149，1977。
- 28) 愛知県揚水規制対策研究会：地下水利用合理化の調査研究報告，昭和50年3月。



- 29) 愛知県環境部：地下水利用合理化に関する調査研究報告，昭和51年6月。
- 30) 川本眺石，林 正夫：地盤工学における有限要素解析，培風館，pp. 369~398，1978。
- 31) 土質工学会編：土質試験法，第1回改訂版，pp. 621~643，昭和51年。
- 32) 木村剛也，守梶文雄，植下 協：軟弱二層地盤（上部砂層-粘土層）の支持力に関する調査研究，第5回土質工学研究発表会講演概要集，pp. 253~256，1970。
- 33) 河上房義：土質力学，森北出版，pp. 17~18，昭和46年。
- 34) 泉原 徹：濃尾平野の地下水利用と地下水理に関する考察，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書（第三報），愛知県環境部，pp. 39~51，昭和52年9月。
- 35) 加藤喜久雄：濃尾平野の地下水の酸素同位体組成と地盤沈下，沿岸低平地帯の地盤沈下の実態と災害の解明，文部省・自然災害特別研究報告，pp. 93~100，昭和53年3月。
- 36) 通商産業省名古屋通産局：昭和53年度濃尾平野地下水理調査報告書（水理解析・資料編），昭和54年3月。

## 第6章 濃尾平野地盤沈下の将来予測に関する考察

### 6.1 概説

濃尾平野では、近年、被圧帯水層の地下水頭が上昇傾向を示すとともに、かねがね進行し続けてきた地盤沈下が1974年頃から鈍化傾向を示しつつある。しかし、1959年の伊勢湾台風当時186 km<sup>2</sup>であった平均海面以下のいわゆるゼロメートル地域は1978年の水準測量結果によると274 km<sup>2</sup>に拡大しており、このような海面以下にある濃尾平野南部臨海低平地域の防災対策は、きわめて重要な問題となっている。

濃尾平野では現在、地盤沈下対策事業として、地盤沈下停止を目標とした揚水規制に加え、広域地盤沈下によって治水機能の低下した堤防のかさ上げや排水ポンプの強化等も行われつつある。

堤防のかさ上げを行う場合、かさ上げに伴う堤体自重の増加による圧密沈下に加え、地下水過剰揚水による広域的な地盤沈下が将来どのように推移するかを予測することも必要となる。とくに、臨海低平地域では、地盤高が比較的高い堤防付近に民家が集まっており、堤体かさ上げのための堤体断面の拡大にあたっては、それら堤防敷の拡張(付近の民地買収)が必要となるので、今後の地盤沈下をも見込んだ堤体高の検討が、これら臨海低平地域の防災対策上、重要な問題となっている。

さて、濃尾平野における堤体荷重増加による圧密沈下の予測については、Terzaghi 圧密理論<sup>3)</sup>による推論<sup>4)</sup>がすでに行われている。また近年、現地での観測値を利用して、今後生じる沈下を推定する方法<sup>5,6)</sup>も提案されている。

しかし、過剰揚水による地盤沈下量を満足に予測する方法は見当らず、濃尾平野で行われた地下水汲み上げによる沈下計算も、濃尾地下水盆の地下水流動状態を水平二次元流や鉛直二次元流として単純化していたり、圧密層からの地下水絞り出しの時間的遅れ効果を無視した沈下計算を行ったりしている。

そこで、濃尾平野地盤沈下問題の解決には、そうした地下水汲み上げによる地盤沈下量予測に関してさらに進んだ方法が必要であると判断したので、筆者は、本章第3節以下で説明するような手順で、濃尾平野臨海地域の地盤沈下の予測計算を行い、この平野の地盤沈下を早期に停止させるための揚水量削減の効果を調査した。

## 6.2 濃尾平野地盤沈下の将来予測に関する従来の研究

被圧帯水層からの過剰揚水に起因する地盤沈下予測については、一次元圧密理論を用いた計算が、植下<sup>4)</sup>、桑原<sup>5)</sup>によって報告されている。

植下<sup>4)</sup>は、地表付近の不圧帯水層における地下水頭変化はないものとして、沖積粘土層以深の深部被圧帯水層の地下水頭が毎年1mずつ10年間低下し続け、10年目からこれら被圧地下水頭低下が毎年0.5mに減少して4年間継続し、被圧地下水頭低下開始から14年後に地下水頭低下が停止する帯水層の地下水頭変化を仮定して、一次元圧密理論にもとづく地盤沈下計算を行っている。そして、それら地盤沈下計算例より、地下水汲み上げによる帯水層地下水頭状態が明らかにされたなら、圧密理論を用いて地盤沈下量の推定を

行うことが可能なことを一応の結論として導いている。

その後、桑原<sup>11)</sup>は濃尾平野の被圧帯水層(第1被圧帯水層、第2被圧帯水層)における過去の実測地下水頭値にもとづいて、濃尾平野各地点の被圧地下水頭低下傾向を推定し、第2被圧帯水層以浅の粘土層(沖積粘土層と熱田層内粘土層)の圧密収縮量と砂層等の弾性変形量を算定した。そして、桑原は過去から現在にいたる地盤沈下計算結果にもとづいて、被圧帯水層における地下水頭の将来変化を各種仮定して地盤沈下の予測計算を行っている。それら結果によれば、濃尾平野域における被圧地下水頭低下速度が過去最大であったと思われる1973年当時の被圧地下水頭低下速度が、1973年以降10年間継続したとすると、濃尾平野南部では1973年以降10年間にさらに160cmの地盤沈下することを警告している。

しかし、これらの方法は濃尾地下水盆からの地下水汲み上げ状況を直接の変数として考慮しておらず、地下水汲み上げによる広域地盤沈下を予測する方法としては、満足の中くものではない。すなわち、地盤沈下停止を条件とする各種揚水計画案の事前評価を行うためには無力である。

過剰揚水に起因する広域地盤沈下の予測計算については、揚水量、地下水頭、地盤沈下量の三つの変量を同時に考慮できるような広域地下水流動のシミュレーション計算法が提案されており<sup>8~12)</sup>、濃尾平野でも、そうした広域地下水流動のシミュレーション計算を行って、地盤沈下予測計算を試みた報告<sup>13~15)</sup>もある。

建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所<sup>13)</sup>は、平面二次元地下

水流動モデルを用いて濃尾地下水盆の地下水頭状態を計算し、それら計算結果を用いて沖積粘土層と熱田層内粘土層の地盤沈下計算を行っている。

地下水頭状態の異なる濃尾地下水盆各帯水層の地下水頭状態を、平面二次元地下水流動モデルを用いて推定することにも問題はあ  
るが、この方法は平面二次元モデルによって推定された地下水頭値を用いて  
各圧密層の地盤沈下計算を行う場合、被圧帯水層の地下水頭低下に  
伴う圧密層内の過剰間隙水圧消散の時間的遅れを考慮していないので、圧密  
層からの地下水絞り出しは各沈下計算時間内で終了する計算となっ  
ている。したがって、帯水層の地下水頭値が一定値を示しているにも  
かかわらず、地盤沈下が進行するような、いわゆる残存沈下等の現  
象を検討することは不可能な方法となっている。

鉛直二次元地下水流動モデルを用いて、揚水量、地下水頭、地盤沈  
下量三つの変量を同時に考慮し、地盤沈下の予測計算を試みた報告<sup>(4)</sup>  
もある。しかし、濃尾地下水盆内の三次元地下水流動状態を無視して  
地下水流動モデルを組み立てたことにより、実測地下水頭値を良好に  
再現するようなモデル内部のパラメータを決定するための内挿検定  
計算に手間取っており、文献(4)の発表段階ではなお満足の中く予測  
モデルを組み立てることに成功していない。

愛知県環境部<sup>(4)</sup>は、準三次元地下水流動モデルを用いて濃尾平野の  
各被圧帯水層(第1被圧帯水層、第2被圧帯水層、第3被圧帯水層)  
の地下水頭状態を予測し、濃尾平野に設置されている地盤沈下観測井  
で実測された被圧地下水頭値と地層別累計地盤収縮量との対応関係に

もとづいて、地盤沈下計算を行っている。しかし、地盤沈下観測井で計測される地層別累計地盤収縮量と各被圧帯水層の地下水頭値との間には必ずしも明瞭な対応関係が認められるとはかぎらず、こうした方法によっては、地盤沈下計算を満足に行うことが不可能な場合のあることはよく知られている。さらに、この方法では圧密層内からの地下水絞り出しの時間的遅れ効果は無視しており、被圧地下水頭低下が停止すると地盤沈下はただちに停止する計算となっている。

### 6.3 濃尾平野臨海低平地域における地盤沈下の予測方法

現地ボーリング資料、地盤沈下観測井網の掘削や地下水質分析等によって、濃尾地下水盆の地盤構造、地下水流動機構が着実に解明されつつある。それら結果によると、濃尾地下水盆における地盤構造は複雑で、地下水流動状態も平面二次元、鉛直二次元、準三次元流ではなく三次元流動状態となっていることが明らかになっている。

粘土層内の間隙水圧状態も実測<sup>16,17)</sup>されており、それら結果によれば、被圧帯水層の地下水頭低下に伴って、被圧帯水層に接する粘土層内の間隙水圧も低下をするが、その間隙水圧低下は時間的にかなり遅れて生ずることが明らかになっている。ところが、粘土層からの地下水絞り出しの時間的遅れ効果は無視した従来<sup>13,15)</sup>の方法によっては、粘土層内の間隙水圧状態を推定することは不可能である。

本研究では、濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルと濃尾平野各地点で組み立てた鉛直一次元圧密モデルを併用して、被圧地下水汲み上げ量の変化による地盤沈下量の推移を予測することを試みた。

濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルの平面領域を示すと図-5.1のようである。またモデル化された深さ方向の地盤構造は、図-5.3のようである。本研究で組み立てた濃尾平野三次元地下水流動モデルは $1300 \text{ km}^2$ の濃尾沖積平野のほとんどもを覆い、深さ方向にも地下水汲み上げの対象となつて、各主要被圧帯水層を含むものとなっている。

ただし、図-5.3に示したように、今回の計算で組み立てた濃尾地下水盆三次元モデルでは、計算機（名古屋大学大型計算機 FA COM 230-75）の容量の制約から、藤縄<sup>11,12)</sup>の提案した地下水流動モデルと同様に、圧密層内の各深さに計算点を設けることは困難であったので、圧密層からの地下水絞り出し効果は、1961年から1976年における過去から現在にいたる内挿検定計算により計算結果が実測地下水頭値によくあうような三次元地下水流動モデルを作り、これを用いて地下水汲み上げによる濃尾平野各主要帯水層の地下水状態の予測を行っている（5.1.3参照）。

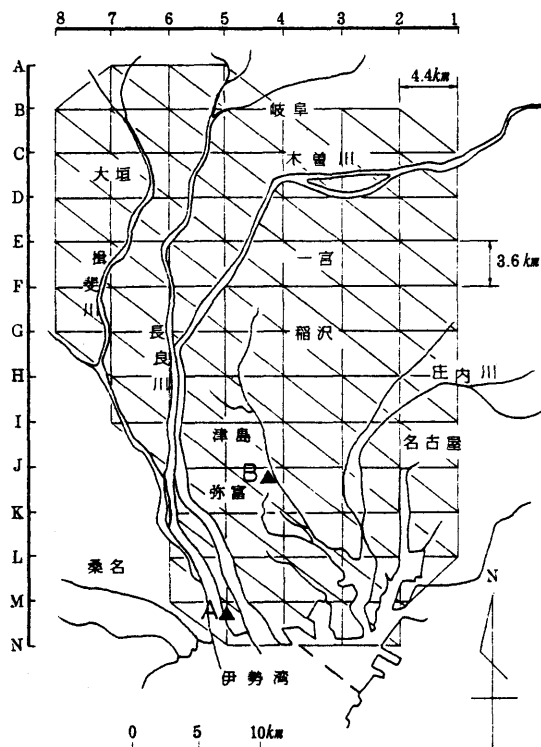
以上の欠点を補うために、濃尾平野臨海低平地域における地盤沈下の予測計算を行う際には、沈下地域の代表的地点において、鉛直一次元浸透流モデルを別途組み立て、地盤沈下計算を行うこととした。鉛直一次元浸透流モデルによる計算においては、三次元地下水シミュレーション計算より得られた各帯水層の地下水頭値を計算条件として、圧密層における圧密脱水、吸水膨張の計算と帯水層の弾性変形量の計算を行い地表面変位量を打ち出すプログラムとした。三次元地下水流動モデルで実測結果に合致するように内挿検定し、将来予測された各被圧帯水層の水頭変化の条件を用いて、圧密層内の地下水流動を、この鉛直一次元浸透流モデルで詳細に再追跡するわけである。

先述したように、帯水層における地下水圧の変化にくらべ、圧密層における間隙水圧変化は時間的な遅れを伴いつつ生じているが、前述の三次元地下水流動モデルにおける圧密層からの地下水絞り出しは弾性的応答で実際の地下水絞り出し現象が再現できるように、モデル圧密層における透水係数、比貯留量の土質定数を試行修正している。

しかし、鉛直一次元浸透流モデルによる計算では圧密層内には1~2 m間隔に計算点を設けて地下水絞り出しの時間的遅れを考慮している。したがって、鉛直一次元浸透流モデルによる地盤沈下量の予測計算を行う場合には、三次元地下水流動モデルに与えられる時間的に平均化された土質定数、地盤構造をそのまま鉛直一次元浸透流モデルに利用するよりも、それぞれの沈下予測地点で行われたボーリング結果や土質試験結果にもとづいて圧密沈下モデルを組み立てた方が、精度よい沈下予測が行えると考え、沈下予測地点のボーリング柱状図、土質試験結果等にもとづいて鉛直一次元圧密沈下モデルを組み立てた。

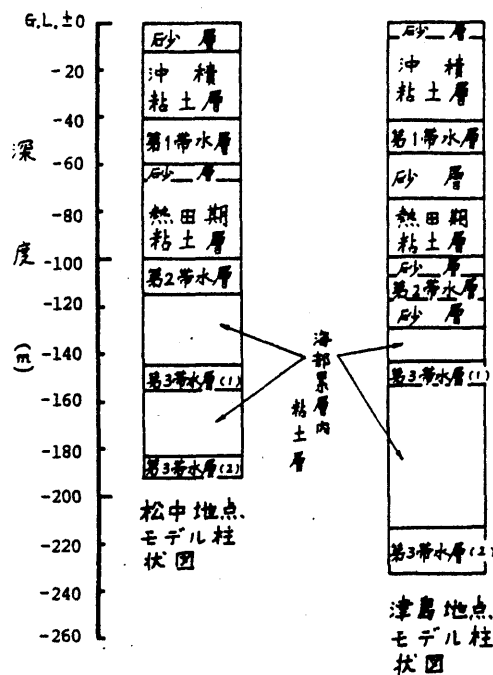
図-6.2に、地盤沈下予測を行うこととした松中、津島観測井地点(図-6.1参照)の土質柱状図を示したが、各観測井深度(松中観測井はG.L. -150 m, 津島観測井はG.L. -152 m)よりも深い地盤の土質定数については、付近の深層ボーリング試料にもとづく圧密試験結果および内挿検定計算(1950年から1976年にわたる)から推定した(3.3.2参照)。





凡例  
 A ▲ : 松中観測井  
 B ▲ : 津島観測井

図-6.1 濃尾平野三次元地下水流動モデルの平面図ならびに鉛直一次元圧密モデルを組み立て将来沈下量を計算した松中・津島観測井の位置



(注)最近の研究で、第3帯水層(2)が連続性のない主要第3帯水層と見られるにいたっている。

図-6.2 圧密沈下の子測計算を行った松中・津島地点における土質柱状図

#### 6.4 内挿検定計算結果と実測値との比較

三次元地下水流動モデルによる内挿検定計算は1961年から1976年まで行い、鉛直一次元圧密モデルによる内挿検定計算は1950年から1976年まで行った。

鉛直一次元圧密モデルの内挿検定期間を、三次元地下水流動モデルの内挿検定期間よりも以前にさかのぼり、地下水圧の実質的低下が始まる頃の1950年から検定計算を始めたのは、地盤沈下進行途中の1961年からの計算では、粘土層内間隙水圧の計算初期条件の評価がむづか

しいと考えたからである。

なお、1950年における粘土層内の間隙水圧分布は静水圧分布として、粘土層をはさむ上下の帯水層の地下水頭値にもとづいて推定した。

濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルによって得られた1961年から1976年までの内挿検定期間中の計算地下水頭値と実測値の比較を、図-6.3(a), (b)に示した。実測地下水頭値は、夏期に低下し冬期に上昇するほぼ1年周期の変動をくり返しながら年平均地下水頭が1973年まで低下し、その後は上昇する推移を示している。三次元地下水流動モデルによる計算は、計算機容量の制約から年平均地下水頭値を追跡する計算となっているが、計算値と実測値との対応はかなり良好であることが図-6.3(a), (b)の結果より理解できよう。

1950年から1976年までの鉛直一次元圧密モデルによる地盤沈下量の内挿検定計算を行うには、その期間の各被圧帯水層( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ )の地下水頭値が必要となる。

1961年から1976年までの鉛直一次元圧密モデルに与える各被圧帯水層の地下水頭値としては、図-6.3(a), (b)に示した濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルによる計算から得られた年平均地下水頭値を用いたが、それより以前の1950年から1961年までの地下水頭値は、各地盤沈下計算地点付近の井戸資料等から推定することとした。

(しかし、井戸資料等に記載された帯水層地下水頭値にもとづいて推定された1950年から1961年の間の地下水頭推移と、図-6.3(a), (b)に示した三次元地下水流動モデルから得られた1961年から1976年の内挿検定期間中の地下水頭推移に大きな相異がある場合には、両期間の

地下水頭変化がスムーズに推移するように地下水頭値を修正し、地盤沈下予測モデルの内挿検定計算を行った。

地盤沈下予測計算を行うこととした松中、津島地点(図-6.1参照)における鉛直一次元圧密モデルによる地盤沈下量の内挿検定計算結果を図-6.4(a)、(b)に示した。図-6.4(a)、(b)には各計算地点付近に設置されている水準点の沈下状況も合わせて示したが、1950年から1976年の内挿検定期間中における計算値と実測値との対応は良好で、過去の地盤沈下の再現性のよい鉛直一次元圧密モデルを組み立てることができたと判断される。

この鉛直一次元圧密モデルにおけるモデル各部の土質定数は、各計算地点で行われた各種土質試験結果等にもとづいて推定するわけであるが、1950年から1976年までの内挿検定計算の当初には、モデル各部で行われた土質試験結果の平均値を用いた。そして、各観測井で実測されている地層別地盤収縮量、付近の水準点の沈下状況と内挿検定計算結果との対応をみながらモデル各部の土質定数を必要に応じて修正し、1976年以降の地盤沈下予測計算に必要となるモデル各部の土質定数を決定した(3.3.2参照)。

## 6.5 濃尾平野臨海低平地における地盤沈下の将来予測

### 6.5.1 地盤沈下予測のための将来揚水条件

濃尾平野では、地盤沈下防止対策の一つとして、揚水規制も施行されており、正確な揚水量の把握も可能となりつつある。将来、井戸からの地下水汲み上げの管理が適確に行われれば、将来揚水量の推移も適切な井戸管理のもとに精度よく予測できるものと考えられる。しかし、現在のところ、精度のよい将来揚水量の予測はなお困難なので、将来の地盤沈下を推定する計算条件としては、5.4で仮定した5つの将来揚水条件を用いてみた。

### 6.5.2 濃尾平野臨海低平地における地盤沈下の予測

1976年までの内挿検定計算によって、濃尾地下水盆における各帯水層の地下水頭状態は、三次元地下水流動モデルを用いることにより揚水量に対する応答値として良好に再現でき、臨海低平地における代表地点（松中、津島地点）の地盤沈下量は、それら地点で組み立てた鉛直一次元圧密沈下モデルにより良好に再現できることがわかったため、これら2つの数値モデルを併用して濃尾平野臨海低平地の地盤沈下予測計算を行った。

なお、地下水汲み上げ量の削減によって、地下水頭が上昇した場合の圧密層、帯水層における地盤膨張量の計算は次のように行った。

地盤沈下観測井で実測される地下水頭回復値と累計地盤膨張量から粘土層の体積膨張係数を推定する方法も提案されているが、今回の計

算では、地盤沈下予測計算を行う地点で採取された試料で行われた圧密試験機による吸水膨張試験結果にもとづいて、圧密層の体積膨張係数を推定し、圧密沈下量の計算と同じように帯水層の地下水頭上昇による粘土層の吸水膨張量の計算を行った。帯水層については弾性的挙動をすると仮定し、地下水圧低下による弾性収縮量と同じ取り扱って弾性膨張量の計算を行った(3.3.2参照)。

図-6.3(a), (b)に、松中、津島両地点付近の各帯水層地下水頭値の将来予測計算結果を示した。また、これら図-6.3(a), (b)の地下

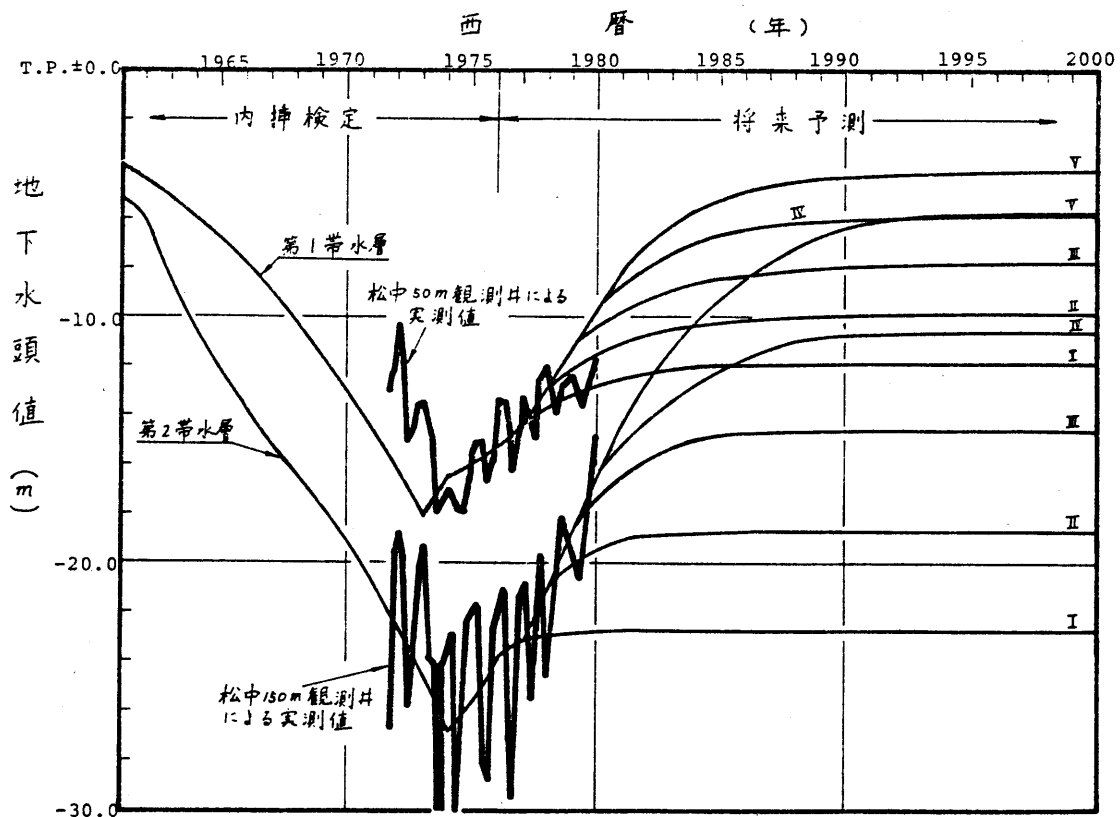


図-6.3(a) 松中地点付近の地下水頭の内挿検定と将来予測  
 (注) 松中50m観測井のストレーナー位置は深度40~50m  
 松中150m観測井のストレーナー位置は深度100~115m

水頭値を計算条件に用いて、鉛直一次元圧密モデルにより計算された各地点の地盤沈下予測結果を図-6.4(a), (b)に示した。

図-6.3(a), (b), 図-6.4(a), (b)の予測結果は、1976年時点の予測結果であり、その後の実測結果もそれら図中にはプロットしてある。これら実測値と予測結果との対応から、両観測井付近における最近の地下水状態と地盤沈下状況を評価すると次の点が明らかとなる。すなわち、従来低下の激しかった第2帯水層と第3帯水層の地下水頭値が、目下、揚水条件のケースⅢに沿って回復しつつあり、地盤沈下についても、被圧地下水頭値の回復の場合と同様に、目下、揚水条件

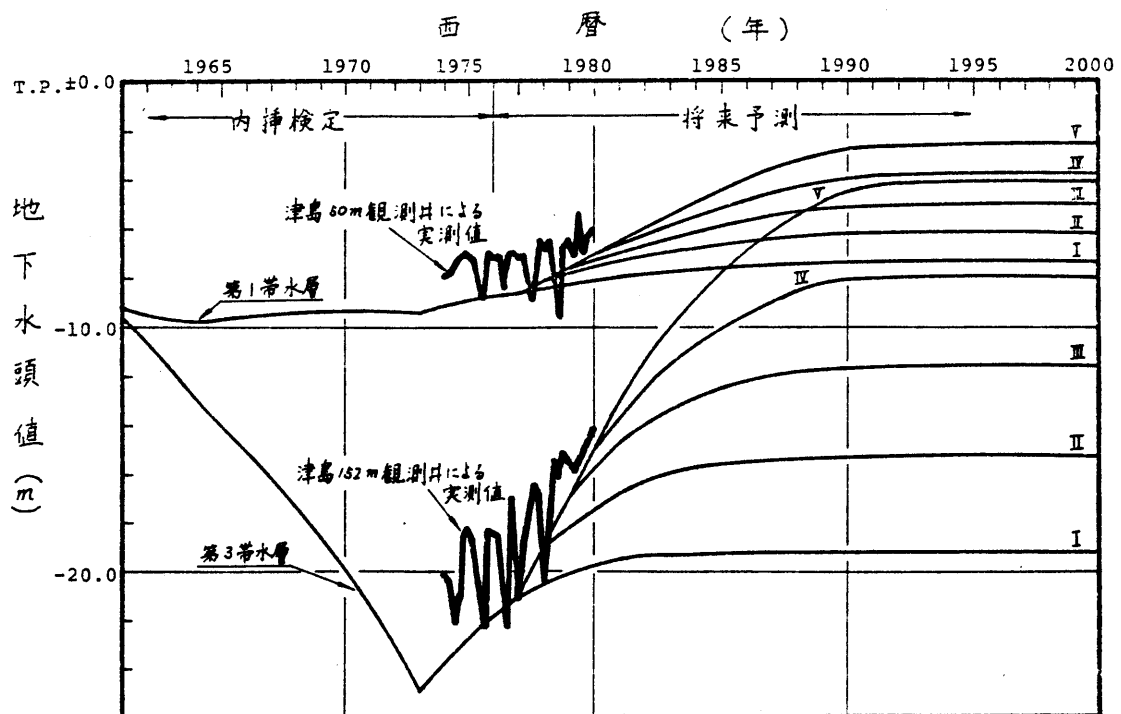


図-6.3(b) 津島地点付近の地下水頭の内挿検定と将来予測  
 (注) 津島 50m 観測井のストレーナー位置は深度 42~50 m  
 津島 150m 観測井のストレーナー位置は深度 143~152 m

のケースⅢに沿って進行しつつあることがわかる。

松中観測井付近の地盤高は平均海水面下約160 cm、津島観測井付近の地盤高は平均海水面下140 cm程度にあることが1977年に行われた水準測量結果<sup>18)</sup>より明らかになっており、図-6.4(a)、(b)の右側縦軸には、これら平均海水面の位置を基準にした場合の地表面沈下量も示しておいた。これら2つの地点の地表面は、1977年現在、図-6.4(a)、(b)に示したような平均海水面下の位置にあり、海水面が最も低下すると考えられる大潮における平均干潮位からも、松中地点では、1979年にはすでに20 cm程度下まわる状態となっており、早急に地盤沈下を停めることの必要性が理解できる。

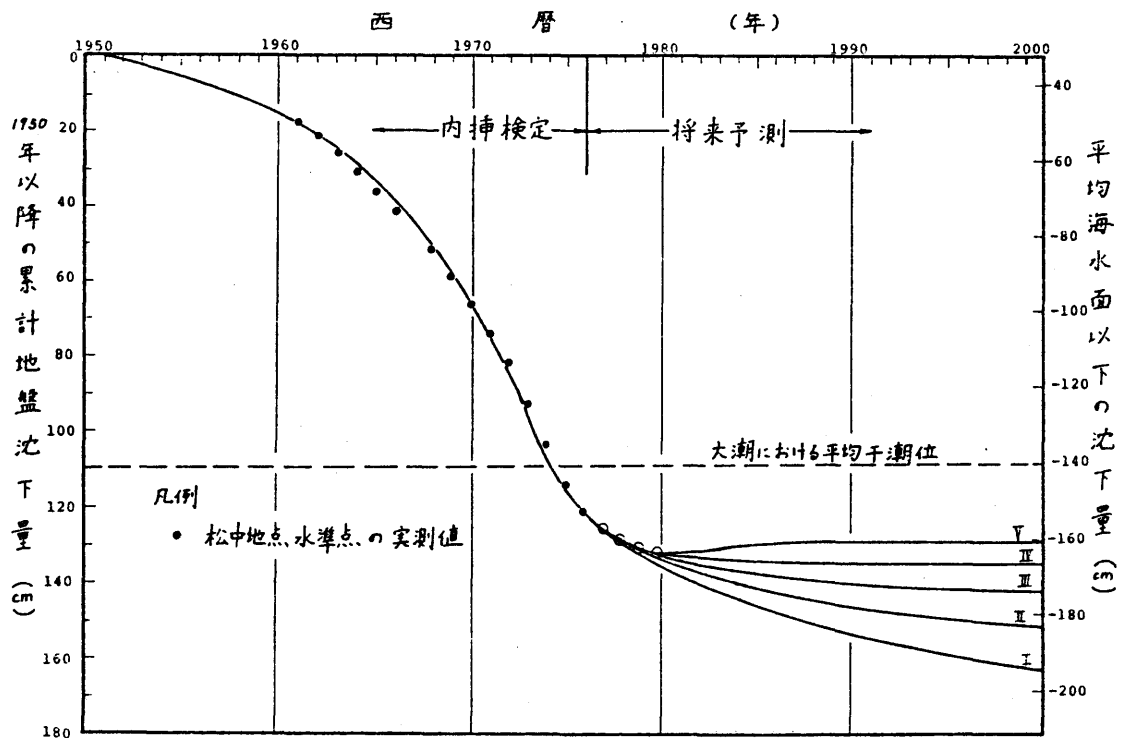


図-6.4(a) 松中地点における地盤沈下の内挿検定と将来予測

また、図-6.4(a), (b)の結果によれば、1977年時点の揚水量で地下水汲み上げを継続した場合、濃尾平野南部で、10年間に20cm程度は地盤沈下がなお進行することもわかる。安全地下水頭(G.L. -10m)の考えを利用すれば、図-6.3(a), (b)の結果からだけでも1977年時点の揚水量を削減しなければ、進行している地盤沈下を止め得ないことがわかる。しかし、図-6.3(a), (b)の結果だけでは地盤沈下量の定量的予測は不可能で、堤防のかさ上げ高の決定等には図-6.4(a), (b)のような地盤沈下量の予測による対策の樹立が必要である。

なお、図-6.3(a), (b)および図-6.4(a), (b)の将来予測線は、年々計測される地下水頭値、地盤沈下量とたえず対応させ、必要に応じて修正しつつ、将来を見通すために利用されるべきであると考えている。

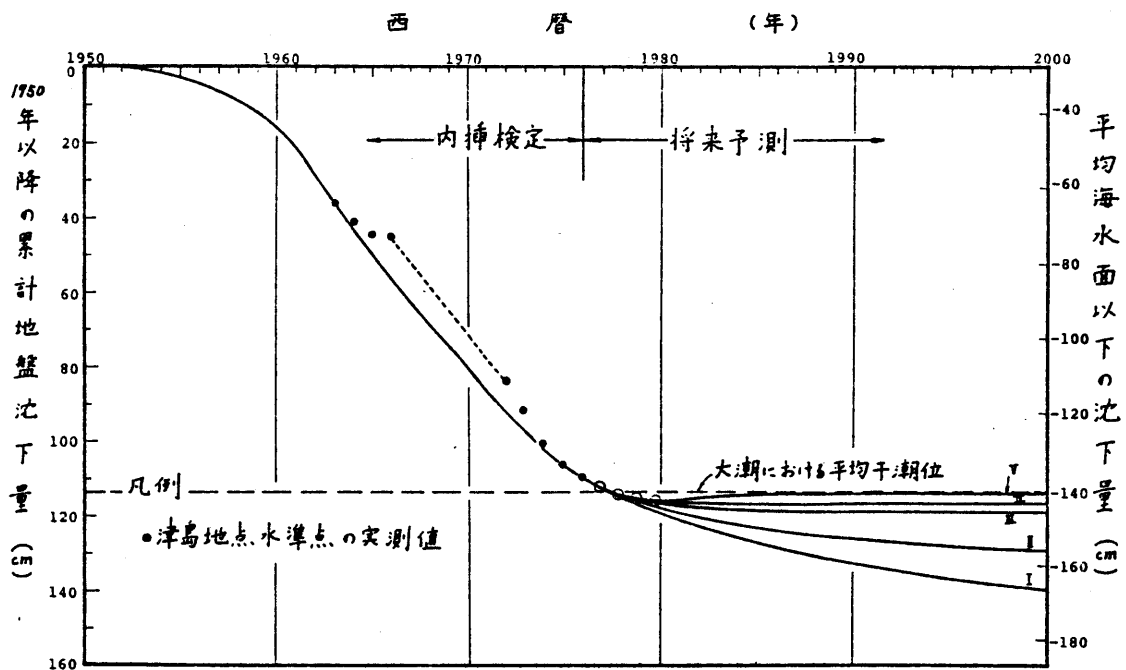


図-6.4(b) 津島地点における地盤沈下の内挿検定と将来予測



## 6.6 結論

濃尾平野では、揚水規制等により、地盤沈下は鈍化傾向にあるが、地盤の非可逆的な変形特性により、過去の地盤沈下によって拡大した海拔ゼロメートル地域は縮小することはない。したがって、これら臨海低平地域では、地盤沈下防止のための揚水規制と同様に、これら地域の防災対策もきわめて重要である。

臨海低平地域における主要な防災対策に、地盤沈下によって治水機能の低下した堤防のかさ上げがある。堤防のかさ上げを行う場合には、将来の地下水汲み上げによって現在の広域地盤沈下がどのように変化するかを定量的に予測して、堤防のかさ上げ高を決定する必要がある。

しかし、こうした地下水の揚水による広域的な地盤沈下を予測する満足のゆく方法は従来なく、第5章で述べた三次元地下水流動のシミュレーション計算によっても、計算機容量の制約から、地盤沈下予測の計算は直接的には困難であった。そこで、濃尾平野臨海低平地の各地点で鉛直一次元圧密モデルを補助的に組み立てて、濃尾平野域からの地下水汲み上げによるそれら各地点の地盤沈下量を予測する方法を提案し、濃尾平野臨海低平地の地盤沈下予測結果を示した。

本章で明らかとなった事項をまとめると次のようになる。

(1) 地盤沈下計算を広域地下水流動のシミュレーション計算の中で行うには、計算機容量の制約があって一般には困難である。

そこで、筆者らはまず揚水量と帯水層地下水頭状態の関係を、濃尾平野のほぼ全域にわたる三次元地下水流動モデルを用いて定量的に明らかにし、それら三次元地下水流動のシミュレーション計算より得られ

た帯水層の地下水頭値を利用して、各地点ごとの鉛直一次元圧密モデルによる地盤沈下予測を行った。

(2) 地盤沈下の予測計算を行う場合には、圧密層内間隙水圧の初期条件を決める必要がある。被圧地下水状態がすでに低下し続けてきたある時点の粘土層の間隙水圧状態を把握するのは、一般には困難である。そこで、粘土層からの地下水絞り出しが生じていなかったと考えられる時点（粘土層内の間隙水圧が静水圧分布をしていたと推定できる時点）にまでさかのぼって地盤沈下の内挿検定計算を行った。

(3) 地盤沈下の予測計算を行う場合に必要となる鉛直一次元圧密モデル内部の土質定数の推定は、1950年から1976年までの内挿検定計算の当初はモデル各部で行われた土質試験結果の平均値を用い、その後地盤沈下観測井で実測された地層別地盤収縮量、水準点の沈下状況と内挿検定計算結果との対応をみながら必要に応じてそれら土質定数を修正する方法をとった。

(4) 地盤沈下予測計算を行った濃尾平野臨海部の地盤高は、1977年現在すでに大潮における平均干潮位よりもさらに20cm程度低いので、早期に進行中の圧密沈下を止める必要があるが、そのための許容揚水量を示した。

(5) 1977年現在の揚水量が続けば、濃尾平野地盤沈下激甚地では、10年間にさらに20cm程度は地盤沈下が進行するであろうことを予測した。

## 参考文献

- 1) 植下協, 佐藤健: 将来の地下水利用と地盤沈下の関係を評価する方法について—濃尾平野の場合を例として—, 第8回環境問題シンポジウム講演論文集, pp.19~24, 1980.
- 2) Ueshita, K. and Sato, T. : Study on Subsidence of the Nobi Plain, 10th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981 ( under printing ).
- 3) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, pp. 265-296, 1943.
- 4) 植下 協: 伊勢湾北部地盤沈下の土質力学的考察, 伊勢湾北部地域地盤沈下調査研究報告書, 名古屋大学地盤変動研究グループ, pp. 127-149, 昭和42年3月.
- 5) Asaoka, A. : Observational Procedure of Settlement Predictions, Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.87-101, 1978.
- 6) 柴田 徹(編着): 建設技術者のための現場計測工法, 日刊工業新聞社, pp.44-49, 1979.
- 7) 桑原 徹: 濃尾平野地域の沈下予測, 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書(第二報), 愛知県環境部, pp.107-149, 昭和51年7月.
- 8) Bredehoeft, J.D. and Pinder, G.E. : Digital Analysis of Areal Flow in Multiaquifer Groundwater Systems : A Quasi Three-Dimensional Model, Water Resources Research, Vol.6, No.3, pp.883-888, 1970.
- 9) 鎌田 烈, 村上雅博, 原田和彦: 準三次元帯水層モデルによる地盤沈下の解析, 地球科学, Vol. 27, No. 4, pp. 131-140, 1993.

- 10) 水収支研究グループ：地下水盆の管理〔理論と実際〕，東海大学出版会，pp.100-106，1976。
- 11) Fujinawa, K. : Finite-Element Analysis of Groundwater Flow in Multiaquifer Systems, 1. The Behavior of Hydrological Properties in An Aquitard while being pumped, Journal of Hydrology, Vol.33, pp.59-72, 1977.
- 12) Fujinawa, K. : Finite-Element Analysis of Groundwater Flow in Multiaquifer Systems, 2. A Quasi Three-Dimensional Flow Model, Journal of Hydrology, Vol.33, pp.349-362, 1977.
- 13) 建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所：地盤沈下対策調査報告書（シミュレーション編），昭和50年4月。
- 14) 建設省国土地理院，建設省中部地方建設局：地盤沈下と地域構造との相関関係の調査研究報告書（第三報）—濃尾平野—，pp.21-56，昭和50年3月。
- 15) 愛知県環境部地盤沈下対策室，（株）国際航業：尾張地域地下水の使用と将来の沈下予測調査報告書，昭和52年3月。
- 16) 建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所：地盤沈下対策調査報告書，pp.108-135，昭和48年3月。
- 17) 農林水産省東海農政局木曾岬干拓建設事務所，（株）応用地質調査事務所：木曾岬地区堤防沈下対策検討業務報告書（土質調査），pp.24-28，昭和53年9月。
- 18) 東海三県地盤沈下調査会：東海三県地盤沈下調査測量水準点成果表，昭和54年7月。

## 第7章 結論

以上の各章で述べた内容と得られた成果について要約すると以下のようになる。

第1章では、本論文で対象にした濃尾平野地盤沈下現象の性格を明らかにし、それら地盤沈下現象の位置づけを行った。すなわち、地盤沈下現象を自然的要因によって生じる地盤沈下と、人為的要因によって生じる地盤沈下に分け、そのような分類体系に従って地盤沈下現象全般を眺めることによって、濃尾平野地盤沈下現象の位置づけを行った。さらに、公害問題として濃尾平野地盤沈下現象を見たときの特徴を、他の公害と比較し、その性格を明らかにした。次に、各地における地盤沈下現象の原因とその対策を整理して述べた。この章で述べた地盤沈下現象の中には、濃尾平野地盤沈下現象とその原因や性格を異にするものもあるが、人為的要因によって生じた地盤沈下現象に対する各地での取り組みは、濃尾平野地盤沈下問題を解決する上で参考になると考えた。

第2章では、濃尾平野地盤沈下問題に対する各分野の既往の研究成果を取りまとめた。この章の第1節では濃尾平野南部の水準点の長期にわたる沈下状況とこの平野からの地下水汲み上げ量の推移とを示した。そのような整理の中から、従来の方法による地殻変動量推定値には、地層の自然圧密度も同時に含まれていることを明らかにし、その自然圧密度の推定を行った。

第3章では、まず安全揚水量の概念について述べ、地盤沈下停止のための広域地下水管理を行う必要性が生じてきている濃尾平野における安全揚水量の定義を明らかにした。すなわち、濃尾平野臨海低平地域では、現在進行しつつある地盤沈下を停止させるような安全地下水頭と、それに対する適正揚水量を見つけ出すことの必要性を述べた。ただし、地盤沈下停止のためだけであれば、安全地下水頭値は高ければ高い方がよいという答の出る可能性もあるが、地震時の噴水、噴砂等の地盤災害防止という観点に立てば、広域地下水管理の目標値として安全地下水頭値をG.L. -10m程度と考え、被圧地下水については、G.L. -(10±5)m程度の状態で地下水を利用すべきであるという結論を得た。

第4章では、地盤沈下問題を広域地下水流動モデルを用いて検討することの意義について述べるとともに、従来、濃尾平野で用いられてきた広域地下水流動モデルを具体例として利用しながら、各種広域地下水流動モデルの考え方、特徴等を概括した。そして、従来この平野で用いられてきた地下水流動モデルは、この平野の地下水流動状態をあまりにも単純化しすぎていたり、地下水絞り出しが考慮されていないか、地下水絞り出し量を水準測量結果にもとづいて既知量として与える必要があるなどして、濃尾平野地盤沈下問題を解決するための広域地下水流動モデルとしては満足の中くものでないことを明らかにした。また、そうした従来の問題点をふまえて、より実際への適用性の高い三次元地下水流動モデルの考え方と、濃尾地下水盆へのこのモデルの適用について述べた。

第5章では、第4章で述べた三次元地下水流動モデルを濃尾平野域に適用する手順と、この平野の適正揚水量算定結果について述べた。濃尾平野地盤沈下問題の解決には、この平野全域にわたる地下水状態を大局的に把握することがまず必要であると考え、1300 km<sup>2</sup>とされる濃尾沖積平野に対し、平面領域1164 km<sup>2</sup>、深さ方向には沖積層、洪積層を含む広大な濃尾地下水盆三次元モデルを組み立てた。濃尾平野の広域地下水流動のシミュレーション計算を行うには、地下水盆モデル各部の土質定数も必要となるが、それら土質定数の与え方についても言及した。この計算で行った土質定数の与え方は、まず現地土質試験結果、揚水試験結果を可能なかぎり集め、それら土質試験結果等の平均値をモデル各部に与え、その後、内挿検定を行い、実測地下水頭値との対応をみながら、必要に応じて土質定数を修正する方法をとった。この方法によって内挿検定計算後にモデル各部に与えられた土質定数と土質試験結果、現場揚水試験結果による土質定数との対応を調べたところ両者の対応は良好であり、地盤工学的に納得できる濃尾地下水盆の三次元モデルを組み立てることができた。また、揚水量の集計に際しては、研究の初期段階では手作業にたよっていたが、その後の検討と改良によって、揚水量集計を計算機の中で行うことに成功し、広域地下水流動のシミュレーション計算を行うための揚水量集計に費す労力の節約と精度の向上を計ることができた。以上のようにして組み立てられた濃尾地下水盆三次元地下水流動モデルを用いて、濃尾平野域の適正揚水量を推定したところ、1977年揚水量の約半分が適正揚水量であるという一応の結論を示すことができた。

第6章では、地盤沈下対策として、地盤沈下停止のための揚水規制のみならず、地盤沈下した臨海低平地域の防災対策も重要であることの指摘を行い、その一つとして、堤体のかさ上げ高等の決定に必要な地盤沈下量の将来予測について述べた。地下水汲み上げ量の変化による地盤沈下量の予測を行うために、この章では、第3、4、5章で説明した方法を用いている。地盤沈下量の予測のためには将来揚水量の推定も必要であるが、ここでは、1977年揚水量が今後も続く場合、揚水量が毎年2割ずつ削減されて1977年揚水量の2割、4割、6割、8割が削減される五つの将来揚水量の仮定によって濃尾平野臨海低平地域の今後の地盤沈下量の予測を行った。以上述べた将来揚水量の仮定にもとづく地盤沈下予測計算結果から、1977年揚水量が継続した場合には、10年間にさらに20cm程度のペースで地盤沈下が進行することを明らかにしたが、臨海部の地盤高は大潮における平均干潮面よりもすでに低い状態となっており、可能なかぎりの揚水量削減を速に行い、地盤沈下を止めることの急務であることを示した。



## あ と が き

以上、濃尾平野地盤沈下阻止に必要な地下水管理目標値としての安全地下水頭値と、それに対応する適正揚水量、ならびに地下水揚水計画に応じた濃尾平野臨海部の地盤沈下将来予測について述べてきた。

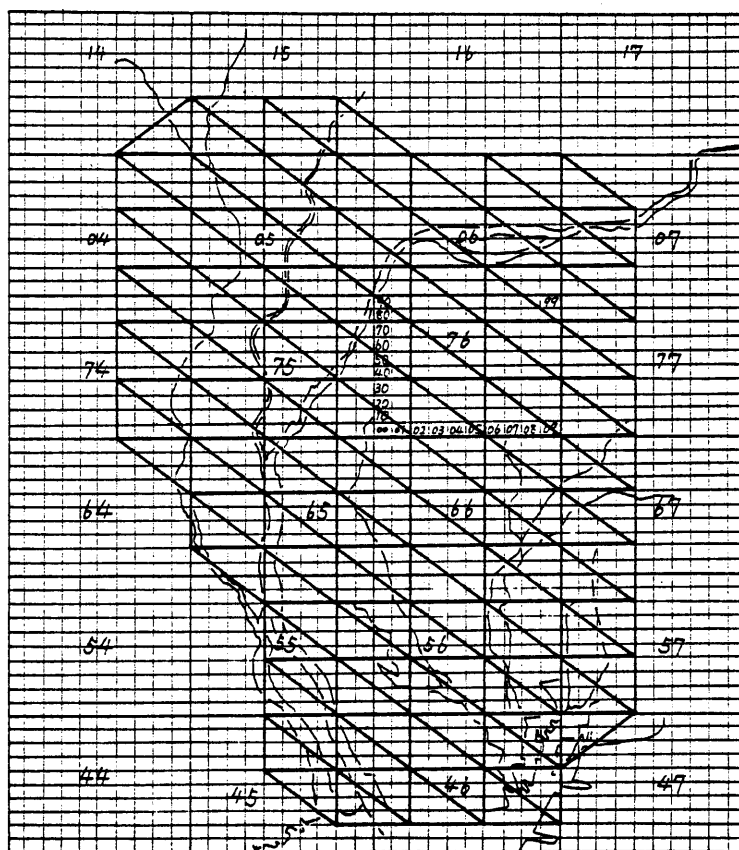
今後、さらに詳細な検討を続ける必要はあるが、従来、定性的議論にとどまっていた濃尾平野地盤沈下阻止のための地下水利用のあり方、地下水管理について、地盤工学的・数学モデル的研究の結果、かなり具体的に定量的な指針を示すことができた。

最後に、本研究を行うに当り終始指導を賜りました川本朧石教授、植下協教授、島田静雄教授、松尾徳教授、高木不折教授に深く感謝の意を表します。また、成岡昌夫教授を始めとする名古屋大学工学部土木工学教室、地盤工学教室の諸先生・諸先輩からも多くの御助言をいただき感謝いたします。地質学的分野につきましては名城大学理工学部桑原徹教授にお世話になりましたことを記し、感謝いたします。

また、東海三県地盤沈下調査会ならびにその関係機関の方々には、本論文作成の途上において、常に熱心な討議と資料の提供をいただきました。ここに記して、感謝の意を表する次第です。

## 付録 1 揚水量集計に用いた国土基準メッシュごとの帯水層深度

揚水量の集計に必要となる国土基準メッシュ（国土地理院の2万5千分の1の地形図を東西方向10等分線，南北方向10等分線によって100等分した区画，付図-1.1参照）ごとの各地層の標高を示した。



付図-1.1 濃尾平野にかぶせられた国土基準メッシュ網と濃尾地下水盒有限要素モデルのメッシュとの対応

なお，付表-1.1の凡例に示したように，平均海水面T.P.を基準とし，下方を正として表示している。

付表-1.1 各地層の標高表示の凡例

メッシュ番号 (付表-1.1参照)

④④

国土基準メッシュ位置

地盤高	00	01	02	03	09	10	11	19
	20	21			29	30	31	39
熱田層	40				49	50		59
	60				69	70		79
新土層上限	80				89	90		99
	00				09	10		19
第2帯水層下限	20				29	30		39
	40				49	50		59
第3帯水層上限	60				69	70		79
	80				89	90		99

- 注1. 表示は T.P. 基準とする。ただし、T.P. 以下を正で表示した。
2. 地盤高に 999 と表示されている位置はシミュレーションモデル対象以外の領域、  
地盤高に 99 と表示されている位置はシミュレーションモデルの境界領域。

04

999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.

05

99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

06

-9.	-8.	-8.	-9.	-10.	-11.	-15.	-16.	-19.	-20.	-8.	-8.	-8.	-9.	-10.	-12.	-15.	-17.	-19.	-23.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.	99.
79.	78.	68.	59.	60.	51.	45.	36.	29.	30.	78.	78.	68.	59.	50.	42.	35.	27.	29.	33.
0.	69.	58.	50.	44.	35.	37.	29.	30.	23.	0.	49.	39.	40.	35.	35.	28.	31.	22.	24.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	22.	23.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
109.	98.	98.	89.	90.	81.	75.	66.	59.	60.	108.	108.	98.	89.	80.	82.	75.	67.	59.	53.
0.	109.	98.	90.	84.	75.	67.	59.	60.	53.	0.	109.	99.	90.	85.	65.	58.	61.	52.	54.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	52.	53.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
189.	178.	178.	179.	170.	161.	155.	136.	129.	110.	178.	168.	168.	169.	160.	152.	145.	137.	129.	113.
0.	169.	158.	160.	154.	145.	137.	129.	130.	113.	0.	159.	149.	140.	145.	135.	138.	131.	122.	114.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	122.	103.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

07

-22.	-24.	-26.	-30.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	-24.	-26.	-28.	-31.	999.	999.	999.	999.	999.	999.
-25.	-27.	-31.	-33.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	-29.	-28.	-32.	-34.	999.	999.	999.	999.	999.	999.
-29.	-30.	-33.	-38.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	99.	99.	99.	99.	999.	999.	999.	999.	999.	999.
99.	99.	99.	99.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	99.	99.	99.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	999.
99.	99.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	99.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	999.	999.
22.	24.	16.	20.	13.	10.	15.	0.	0.	0.	24.	26.	18.	11.	15.	8.	16.	10.	0.	0.
25.	27.	21.	13.	7.	9.	16.	15.	0.	0.	29.	28.	22.	14.	8.	13.	9.	10.	0.	0.
29.	20.	23.	18.	9.	14.	12.	10.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	10.	5.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
52.	44.	36.	30.	23.	20.	25.	0.	0.	0.	54.	46.	38.	31.	25.	18.	26.	20.	0.	0.
55.	47.	41.	43.	37.	19.	26.	25.	0.	0.	49.	48.	42.	44.	38.	33.	29.	30.	0.	0.
49.	50.	43.	48.	49.	44.	42.	30.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	50.	45.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
92.	74.	56.	35.	28.	30.	25.	0.	0.	0.	94.	76.	48.	36.	30.	28.	26.	20.	0.	0.
95.	87.	61.	43.	47.	29.	36.	35.	0.	0.	99.	78.	72.	54.	48.	43.	44.	50.	0.	0.
89.	70.	63.	58.	49.	44.	42.	40.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	50.	45.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.





46

999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 1. 0. 1. 0. -4. -4. 0. 0. 0.
0. 1. 1. 1. 0. -4. -5. 0. 0. 0.	1. 1. 1. 1. 0. -3. -3. 0. 0. 99.
1. 1. 1. 1. -4. -4. -3. 0. -2. -3.	1. 1. 1. 1. 2. -5. -3. 0. -4. -2.
1. 0. 0. 2. 0. -1. 0. 0. -3. -5.	1. 1. -1. 1. 1. 0. 0. 0. -2. -3.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
50. 59. 50. 42. 40. 39. 39. 37. 34. 32.	60. 59. 60. 49. 40. 34. 34. 34. 33. 33.
60. 59. 59. 49. 40. 44. 45. 39. 33. 33.	69. 59. 59. 49. 40. 43. 43. 40. 40. 0.
69. 69. 59. 59. 54. 44. 43. 40. 42. 43.	69. 69. 59. 59. 48. 45. 53. 50. 54. 52.
79. 70. 70. 58. 60. 51. 50. 50. 53. 55.	79. 79. 71. 59. 59. 50. 50. 50. 52. 53.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
110.119.110.113.100.90. 70. 65. 50. 42.	120.119.110.99. 90. 84. 74. 55. 44. 40.
120.119.109.99. 90. 84. 75. 60. 52. 40.	119.119.109.99. 90. 93. 83. 80. 70. 0.
119.119.109.109.94. 94. 83. 80. 82. 83.	119.109.109.109.98. 95. 93. 80. 84. 82.
119.120.110.108.110.101.90. 80. 73. 85.	129.119.111.109.99. 100.90. 80. 72. 63.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
320.249.220.220.200.180.160.140.100.80.	300.279.250.219.190.184.164.140.130.90.
310.299.279.249.200.194.185.140.130.100.	329.319.309.299.250.203.183.170.160.0.
339.329.319.309.284.254.203.180.172.153.	339.329.329.309.278.255.213.180.174.162.
329.320.320.298.270.241.200.180.173.165.	329.319.301.279.249.230.190.180.172.163.

47

999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
0. 999.999.999.999.999.999.999.999.999.	-2. -4. 999.999.999.999.999.999.999.999.
-3. -2. -2. 999.999.999.999.999.999.999.	0. -3. -1. 0. 999.999.999.999.999.999.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
33. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	32. 32. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
43. 32. 28. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	40. 33. 31. 10. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
44. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	72. 40. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
73. 72. 40. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	60. 63. 61. 40. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
150.0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	152.150.0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
153.132.100.0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	150.133.121.100.0. 0. 0. 0. 0. 0.

54

999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.	999.999.999.999.999.999.999.999.999.999.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.

55

999.999.999.999.0. 0. 0. -1. -1. 0.	999.999.999.999.0. 0. -1. -1. 0. 0.
999.999.999.999.0. -1. 0. -1. -1. -1.	999.999.999.999.0. -1. 0. -1. -2. -2.
999.999.999.999.0. -1. 0. -1. -2. -2.	999.999.999.999.0. -1. 0. -1. -2. -2.
999.999.999.999.0. 0. -1. 0. -1. -1.	999.999.999.999.0. 0. 0. -1. -1. -2.
999.999.999.99. 0. -1. 0. 0. -1. -2.	999.999.99. 99. 0. 0. 0. 0. -1. -1.
0. 0. 0. 0. 100.90. 80. 69. 69. 80.	0. 0. 0. 0. 110.100.89. 79. 70. 80.
0. 0. 0. 110.110.109.100.89. 89. 89.	0. 0. 0. 120.119.120.110.99. 99. 89.
0. 0. 0. 130.130.119.120.109.98. 88.	0. 0. 0. 130.130.129.120.109.98. 88.
0. 0. 0. 140.140.130.119.110.99. 89.	0. 0. 0. 150.140.130.120.99. 89. 78.
0. 0. 0. 150.140.129.120.100.89. 78.	0. 0. 0. 0. 130.120.100.100.89. 79.
0. 0. 0. 0. 170.160.140.109.119.130.	0. 0. 0. 0. 180.170.149.139.130.130.
0. 0. 0. 200.200.179.160.149.139.139.	0. 0. 0. 200.199.190.160.149.149.139.
0. 0. 0. 210.210.199.170.159.158.148.	0. 0. 0. 210.210.199.170.169.158.148.
0. 0. 0. 210.210.200.169.170.159.139.	0. 0. 0. 210.210.200.170.159.149.138.
0. 0. 0. 210.200.189.170.160.139.138.	0. 0. 0. 0. 200.180.170.160.139.139.
0. 0. 0. 0. 420.400.380.369.349.340.	0. 0. 0. 0. 440.400.379.359.350.340.
0. 0. 0. 480.450.439.420.389.349.339.	0. 0. 0. 470.449.440.440.399.379.359.
0. 0. 0. 510.480.469.450.439.438.398.	0. 0. 0. 520.510.499.490.479.468.458.
0. 0. 0. 530.520.510.499.490.479.479.	0. 0. 0. 550.540.530.520.499.489.488.
0. 0. 0. 550.520.519.500.480.469.458.	0. 0. 0. 0. 500.500.480.470.469.449.

56

1. 2. 1. 2. 2. 0. 1. 0. 0. -2.	0. 2. 1. 1. 1. 2. 1. 0. 0. 0.
2. 2. 2. 1. 1. 2. 2. 0. 0. 0.	2. 2. 2. 2. 0. 0. 0. 0. -1. 0.
2. 2. 2. 2. -1. -1. 0. 0. 0. 0.	2. 2. 2. 2. 1. -1. 0. 0. 0. 0.
1. 2. 2. 1. 1. -1. 0. 0. 0. 0.	1. 1. 2. 1. 1. -1. 0. 0. -1. 0.
2. 0. 2. 1. 0. 0. 0. -1. -1. -1.	1. -1. 1. 1. 0. -1. -1. -1. -1.
79. 78. 69. 58. 58. 50. 49. 50. 40. 42.	80. 78. 69. 59. 59. 48. 49. 40. 40. 40.
78. 78. 68. 69. 59. 48. 48. 40. 40. 40.	88. 78. 68. 68. 60. 50. 50. 40. 41. 40.
78. 68. 68. 58. 61. 51. 50. 50. 40. 40.	78. 78. 68. 58. 59. 61. 50. 50. 40. 40.
79. 68. 68. 59. 59. 61. 50. 50. 40. 40.	69. 69. 58. 59. 59. 61. 50. 50. 41. 40.
78. 70. 58. 59. 50. 50. 50. 51. 41. 41.	79. 71. 59. 59. 60. 51. 51. 51. 41. 41.
129.128.119.108.98. 90. 89. 80. 70. 72.	130.128.119.109.99. 88. 89. 80. 70. 70.
138.128.118.99. 89. 88. 88. 70. 60. 60.	138.118.118.98. 90. 80. 80. 70. 71. 60.
138.118.118.98. 91. 81. 80. 70. 70. 60.	138.118.108.108.89. 91. 80. 70. 70. 60.
129.118.108.109.99. 91. 80. 80. 70. 70.	119.109.108.99. 99. 101.90. 90. 81. 80.
118.110.108.99. 100.100.90. 91. 81. 81.	119.111.99. 99. 90. 91. 91. 81. 71. 61.
329.318.289.268.238.220.189.180.170.172.	330.308.279.259.229.228.199.190.180.180.
328.318.298.279.259.248.228.200.200.200.	348.328.298.278.270.250.240.220.221.210.
378.348.328.298.281.271.250.230.230.220.	448.398.348.328.299.281.260.240.230.220.
479.448.378.339.319.291.260.240.230.220.	479.449.378.339.319.291.250.230.221.210.
458.420.378.339.320.290.250.231.221.201.	449.401.359.339.320.291.251.221.211.181.

57

-2. -3. -1. 0. 999.999.999.999.999.999.	0. -2. 1. -1. 999.999.999.999.999.999.
0. -1. 1. 0. 999.999.999.999.999.999.	0. 0. 0. -1. 999.999.999.999.999.999.
0. 0. -2. -2. 999.999.999.999.999.999.	0. -1. -3. -2. 999.999.999.999.999.999.
0. -1. -3. -2. 999.999.999.999.999.999.	0. -2. -3. -3. 999.999.999.999.999.999.
-1. -2. -10. -1. 999.999.999.999.999.999.	-1. -2. -11. -8. 999.999.999.999.999.999.
42. 33. 31. 20. 11. 13. 0. 0. 0. 0.	40. 32. 29. 21. 13. 16. 0. 0. 0. 0.
40. 31. 29. 20. 22. 20. 0. 0. 0. 0.	40. 30. 30. 21. 23. 15. 0. 0. 0. 0.
30. 30. 22. 22. 27. 19. 0. 0. 0. 0.	30. 31. 23. 22. 25. 20. 0. 0. 0. 0.
30. 31. 23. 22. 25. 23. 0. 0. 0. 0.	40. 32. 35. 23. 34. 24. 0. 0. 0. 0.
41. 32. 40. 27. 25. 25. 0. 0. 0. 0.	41. 32. 31. 28. 26. 26. 30. 20. 0. 0.
52. 53. 51. 40. 31. 23. 0. 0. 0. 0.	50. 52. 39. 41. 33. 26. 0. 0. 0. 0.
60. 51. 49. 40. 42. 40. 0. 0. 0. 0.	60. 50. 50. 51. 43. 35. 0. 0. 0. 0.
60. 60. 52. 52. 47. 29. 0. 0. 0. 0.	60. 71. 63. 52. 55. 30. 0. 0. 0. 0.
70. 71. 63. 42. 55. 33. 0. 0. 0. 0.	80. 62. 55. 43. 54. 34. 0. 0. 0. 0.
81. 62. 60. 47. 55. 35. 0. 0. 0. 0.	71. 62. 51. 48. 56. 36. 40. 30. 0. 0.
162.143.121.100.51. 53. 0. 0. 0. 0.	180.162.129.71. 53. 56. 0. 0. 0. 0.
200.171.129.100.42. 50. 0. 0. 0. 0.	210.160.140.131.53. 55. 0. 0. 0. 0.
210.190.142.122.87. 69. 0. 0. 0. 0.	210.181.133.122.95. 60. 0. 0. 0. 0.
210.181.133.102.85. 53. 0. 0. 0. 0.	210.182.145.93. 64. 44. 0. 0. 0. 0.
181.172.140.107.65. 45. 0. 0. 0. 0.	171.172.111.108.56. 46. 30. 30. 0. 0.





67

-2. -2. -10. -10. 999.999.999.999.999.999.999.	-2. -3. -10. -10. 999.999.999.999.999.999.999.
-3. -3. -4. -7. 999.999.999.999.999.999.999.	-3. -4. -5. -6. 999.999.999.999.999.999.999.
-3. -5. -5. -6. 999.999.999.999.999.999.999.	-3. -4. -6. -8. 999.999.999.999.999.999.999.
-4. -4. -5. -6. 999.999.999.999.999.999.999.	-4. -4. -5. -7. 999.999.999.999.999.999.999.
-5. -5. -5. -9. 999.999.999.999.999.999.999.	-6. -7. -7. -9. 999.999.999.999.999.999.999.
42. 32. 30. 30. 23. 27. 41. 45. 0. 0.	42. 33. 40. 30. 24. 26. 15. 40. 0. 0.
33. 33. 34. 27. 18. 17. 13. 17. 17. 0.	33. 34. 35. 26. 17. 20. 13. 25. 15. 9.
33. 35. 35. 26. 17. 11. 11. 12. 20. 15.	33. 34. 26. 18. 19. 10. 10. 12. 21. 0.
34. 34. 25. 16. 18. 12. 13. 14. 6. 0.	34. 34. 25. 17. 20. 14. 6. 5. 6. 0.
35. 25. 25. 19. 12. 15. 7. 10. 0. 0.	36. 37. 27. 9. 12. 8. 10. 3. 5. 3.
62. 62. 50. 40. 33. 37. 51. 55. 0. 0.	62. 53. 50. 40. 34. 36. 25. 50. 0. 0.
63. 53. 54. 37. 28. 27. 23. 22. 27. 0.	63. 54. 55. 46. 27. 30. 23. 25. 15. 9.
53. 55. 45. 36. 27. 21. 21. 12. 20. 15.	53. 54. 56. 28. 29. 20. 20. 12. 21. 0.
64. 54. 45. 46. 38. 22. 13. 14. 6. 0.	64. 54. 45. 37. 30. 24. 16. 10. 11. 5.
65. 55. 45. 39. 32. 25. 17. 10. 10. 5.	66. 57. 47. 29. 22. 18. 20. 13. 15. 8.
152.152.110.80. 53. 57. 51. 55. 0. 0.	142.133.110.70. 54. 56. 45. 50. 0. 0.
133.123.104.67. 38. 37. 43. 17. 27. 0.	133.124.105.76. 37. 40. 43. 35. 25. 19.
133.115.95. 66. 47. 41. 41. 22. 30. 25.	123.104.86. 68. 49. 40. 40. 22. 31. 0.
124.94. 75. 66. 48. 42. 33. 34. 26. 0.	124.104.75. 67. 50. 34. 36. 35. 26. 30.
125.105.65. 59. 52. 35. 37. 40. 40. 40.	126.107.57. 49. 42. 38. 40. 43. 45. 43.

74

999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.	999.999.999.999.999.999.99. 99. 99. 99.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.

75

99. 99. 99. 99. 99. -3. -3. -4. -3. -2.	99. 99. 99. 99. 99. -3. -3. -4. -3.
99. 99. 99. 99. 99. -4. -3. -4. -4.	99. 99. 99. 99. 99. -5. -5. -4. -5.
99. 99. 99. 99. 99. -6. -5. -6.	99. 99. 99. 99. 99. -6. -6.
99. 99. 99. 99. 99. -6. 99. 99. -6.	99. 99. 99. 99. 99. -5.
99. 99. 99. 99. 99. -4. 99. 99. 99.	99. 99. 99. 99. 99. 99.
0. 0. 0. 0. 0. 113.103.94. 93. 82.	0. 0. 0. 0. 0. 103.103.94. 93.
0. 0. 0. 0. 0. 104.103.94. 94.	0. 0. 0. 0. 0. 105.105.94. 95.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 106.95. 96.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 96. 96.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 96.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 85.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 74.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 153.143.144.133.132.	0. 0. 0. 0. 0. 143.143.134.133.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 144.143.134.124.	0. 0. 0. 0. 0. 135.135.134.125.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 136.135.126.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 126.126.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 126.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 125.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 114.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 343.333.324.313.302.	0. 0. 0. 0. 0. 333.323.304.283.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 324.313.304.294.	0. 0. 0. 0. 0. 315.305.294.275.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 286.275.266.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 266.256.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 246.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 225.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 224.	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.

76

-3, -3, -4, -5, -5, -6, -6, -6, -6, -7,	-3, -4, -4, -5, -7, -6, -7, -6, -7, -8,
-5, -4, -4, -5, -8, -7, -7, -6, -7, -8,	-5, -5, -5, -6, -8, -7, -8, -8, -8, -10,
-5, -6, -6, -7, -9, -7, -9, -8, -10, -11,	-5, -7, -7, -8, -9, -9, -9, -9, -11, -12,
-6, -6, -7, -8, -9, -10, -10, -10, -11, -13,	-6, -6, -7, -8, -8, -10, -11, -12, -13, -15,
-6, -7, -7, -8, -8, -10, -12, -14, -15, -16,	-7, -7, -7, -8, -9, -10, -13, -15, -17, -19,
83, 83, 74, 75, 65, 66, 56, 56, 46, 47,	83, 84, 74, 75, 67, 66, 57, 56, 47, 48,
85, 84, 74, 75, 68, 67, 57, 56, 47, 48,	85, 85, 75, 76, 68, 67, 58, 58, 48, 50,
85, 86, 76, 77, 69, 67, 59, 58, 50, 41,	85, 87, 77, 78, 69, 59, 59, 59, 51, 42,
86, 86, 77, 78, 69, 60, 50, 41, 33,	86, 76, 77, 68, 68, 60, 61, 42, 43, 35,
76, 77, 67, 68, 58, 60, 52, 44, 35, 26,	77, 77, 67, 58, 59, 50, 43, 35, 37, 29,
123, 113, 104, 105, 95, 86, 76, 76, 66, 67,	123, 114, 114, 105, 97, 86, 77, 76, 67, 68,
125, 114, 114, 105, 98, 87, 77, 76, 67, 68,	125, 115, 115, 106, 88, 77, 78, 78, 68, 60,
125, 116, 106, 107, 99, 77, 79, 78, 80, 61,	125, 117, 107, 98, 99, 89, 79, 79, 81, 62,
126, 116, 107, 98, 99, 100, 80, 80, 81, 63,	126, 116, 107, 98, 98, 100, 91, 72, 73, 55,
116, 107, 107, 108, 98, 90, 92, 84, 65, 56,	107, 107, 107, 108, 99, 90, 73, 65, 67, 59,
283, 263, 244, 225, 205, 186, 176, 156, 146, 137,	273, 264, 234, 225, 207, 196, 177, 156, 137, 128,
275, 254, 234, 215, 198, 177, 167, 146, 137, 128,	265, 245, 225, 216, 198, 177, 158, 148, 138, 120,
245, 236, 226, 207, 189, 177, 159, 138, 120, 111,	235, 227, 217, 198, 189, 179, 159, 139, 131, 112,
226, 216, 217, 198, 179, 180, 160, 140, 131, 103,	216, 216, 197, 188, 178, 170, 151, 142, 133, 105,
216, 207, 197, 188, 178, 170, 152, 144, 125, 106,	207, 197, 197, 188, 179, 170, 153, 145, 127, 109,

77

-8, -8, -8, -9, 999, 999, 999, 999, 999, 999,	-8, -8, -10, -13, 999, 999, 999, 999, 999, 999,
-9, -10, -12, -14, 999, 999, 999, 999, 999, 999,	-10, -9, -15, -16, 999, 999, 999, 999, 999, 999,
-11, -10, -14, -22, 999, 999, 999, 999, 999, 999,	-13, -13, -15, -22, 999, 999, 999, 999, 999, 999,
-15, -15, -18, -23, 999, 999, 999, 999, 999, 999,	-17, -18, -20, -23, 999, 999, 999, 999, 999, 999,
-19, -20, -23, -25, 999, 999, 999, 999, 999, 999,	-20, -22, -24, -27, 999, 999, 999, 999, 999, 999,
38, 38, 28, 9, 18, 30, 17, 9, 12, 6,	38, 28, 20, 13, 5, 10, 8, 10, 15, 10,
39, 30, 22, 14, 10, 11, 6, 12, 18, 15,	40, 29, 25, 16, 11, 14, 8, 12, 20, 0,
41, 30, 14, 22, 13, 6, 7, 0, 0, 0,	33, 23, 15, 12, 15, 9, 13, 0, 0, 0,
35, 25, 18, 13, 9, 11, 5, 0, 0, 0,	27, 18, 20, 13, 10, 3, 0, 0, 0, 0,
29, 20, 23, 15, 11, 5, 7, 0, 0, 0,	30, 22, 14, 17, 12, 8, 10, 0, 0, 0,
58, 48, 38, 29, 28, 30, 22, 19, 17, 16,	58, 48, 40, 23, 15, 20, 18, 20, 20, 20,
59, 50, 32, 24, 20, 21, 16, 22, 18, 15,	50, 39, 35, 26, 21, 19, 18, 22, 20, 0,
41, 30, 24, 32, 23, 6, 7, 0, 0, 0,	43, 33, 25, 32, 25, 19, 13, 0, 0, 0,
45, 35, 28, 23, 19, 21, 15, 0, 0, 0,	47, 38, 30, 23, 20, 13, 0, 0, 0, 0,
49, 40, 33, 25, 21, 15, 17, 0, 0, 0,	50, 42, 24, 27, 22, 18, 20, 0, 0, 0,
118, 98, 58, 49, 48, 30, 37, 39, 52, 56,	108, 88, 50, 43, 25, 20, 28, 30, 55, 60,
109, 70, 42, 34, 30, 21, 16, 22, 38, 55,	80, 59, 40, 31, 31, 24, 18, 22, 20, 0,
81, 60, 34, 37, 28, 26, 17, 0, 0, 0,	83, 63, 30, 37, 30, 24, 23, 0, 0, 0,
85, 65, 38, 28, 24, 26, 25, 0, 0, 0,	87, 68, 50, 28, 25, 23, 0, 0, 0,
89, 70, 53, 30, 26, 25, 17, 0, 0, 0,	90, 72, 54, 32, 27, 28, 20, 0, 0, 0,

## 付録2 多層取水井における各帯水層取水率に関する考察

ストレーナーが何か所にも設けられている多層取水井の各帯水層からの取水率については次のような理論的考察が行いうる。

Kozeny の部分貫入井（ストレーナーが帯水層全厚さにわたり設けられていない井戸）の地下水汲み上げ理論<sup>1)</sup>によれば、井戸からの地下水汲み上げ量 $Q$ は、被圧地下水の場合、およそ次式で求められる。

$$Q = \frac{2\pi k b_0 (H - h_w)}{\ln(R/r_w)} \left( 1 + 7 \sqrt{\frac{r_w}{2b_0}} \cos \frac{\pi b_0}{2b} \right) \quad (\text{付 2.1})$$

ここに、 $k$  は被圧帯水層の透水性係数、 $H$  は被圧帯水層における揚水前の自然水頭、 $h_w$  は井戸の水位、 $r_w$  は井戸半径、 $b$  は被圧帯水層厚、 $b_0$  はその帯水層に対して設けられている井戸のストレーナー長（ $b_0 \leq b$ ）、 $R$  は影響円半径で、通常、 $R/r_w = 3000 \sim 5000$  を採用することが多い<sup>1)</sup>。

ここで、 $\ln(R/r_w)$  がすべての帯水層でほぼ等しいと仮定して、ストレーナーが $n$ 個の帯水層に設けられている多層取水井において、第 $i$ 帯水層からの取水率（第 $i$ 帯水層からの取水量の全揚水量に対する百分率）を（付 2.1）式を利用して表現すれば次式を得る。

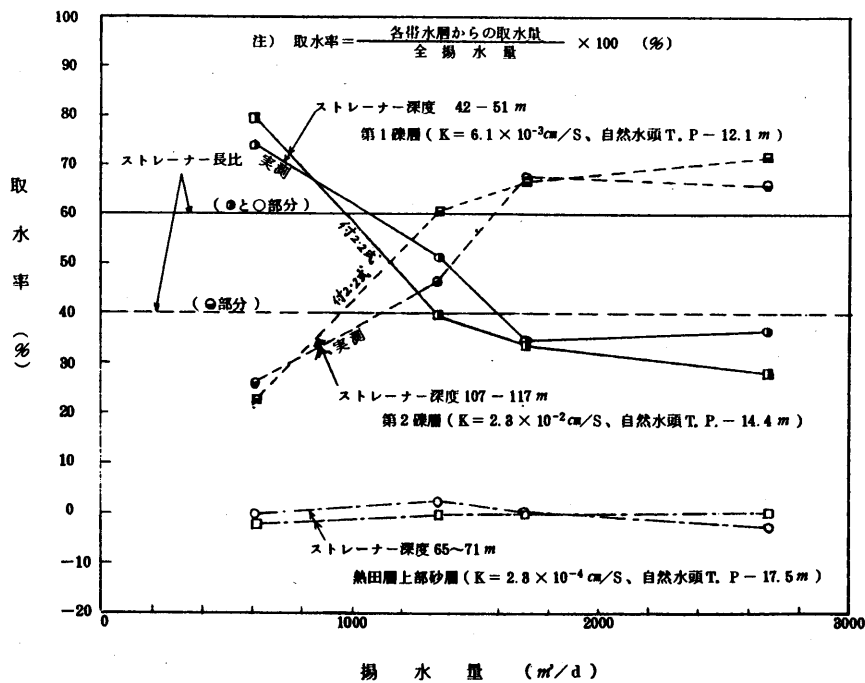
$$\frac{Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{k_i b_{0i} (H_i - h_w) \left( 1 + 7 \sqrt{\frac{r_w}{2b_{0i}}} \cos \frac{\pi b_{0i}}{2b_i} \right)}{\sum_{i=1}^n k_i b_{0i} (H_i - h_w) \left( 1 + 7 \sqrt{\frac{r_w}{2b_{0i}}} \cos \frac{\pi b_{0i}}{2b_i} \right)} \times 100 (\%) \quad (\text{付 2.2})$$

ここで、 $k_i$ 、 $b_i$ 、 $b_{0i}$ 、 $H_i$  は第 $i$ 帯水層における透水性係数、層厚、帯水層内ストレーナー長、揚水前の自然水位、 $Q_i$  は第 $i$ 帯水層からの取水量を示している。

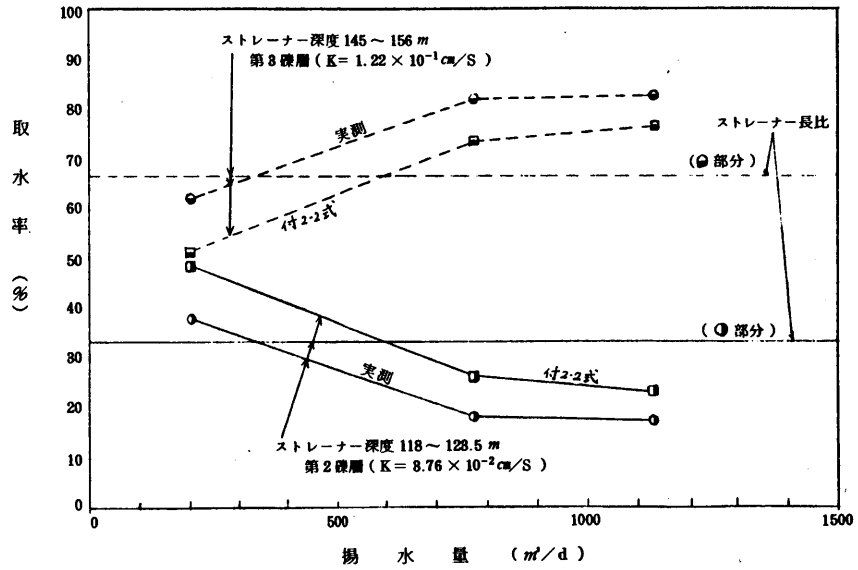
(付2.2)式において、 $i = 1, 2$  の場合で、 $b_{0i} = b_i$  の場合とすれば、この式は、高木らの式<sup>2)</sup>と一致する。

愛知県環境部地盤沈下対策室では、濃尾平野に存在する数本の多層取水井において、微流速計を用いて各帯水層からの揚水量を実測しているので、それらの結果と(付2.2)式ならびに従来仮定されてきたストレーナー長比との対応を調査してみた。

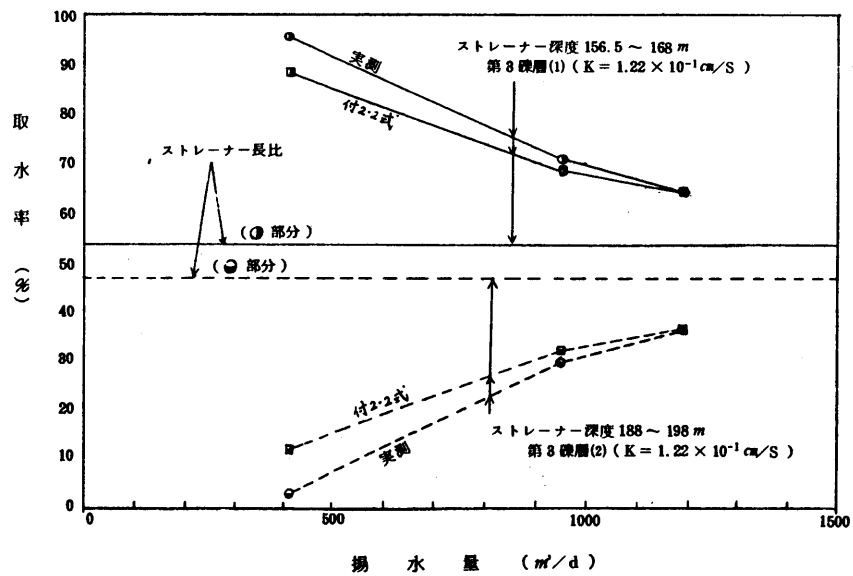
付図-2.1~2.9に、微流速計により計測された結果を用いて各帯水層からの取水率を求めた結果を○印で示し、(付2.2)式による各帯水層からの取水率を算出した結果を□印で示した。



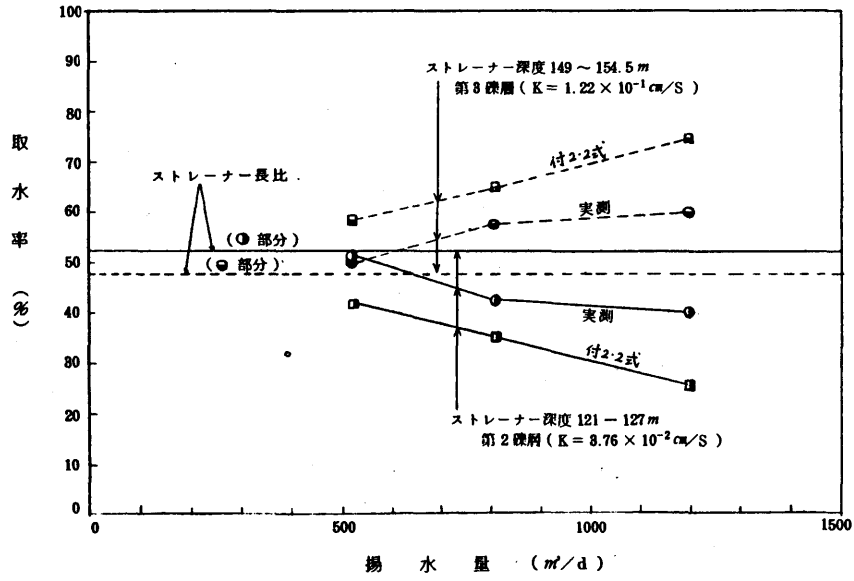
付図-2.1 中島郡平和町における揚水量と各帯水層からの取水率



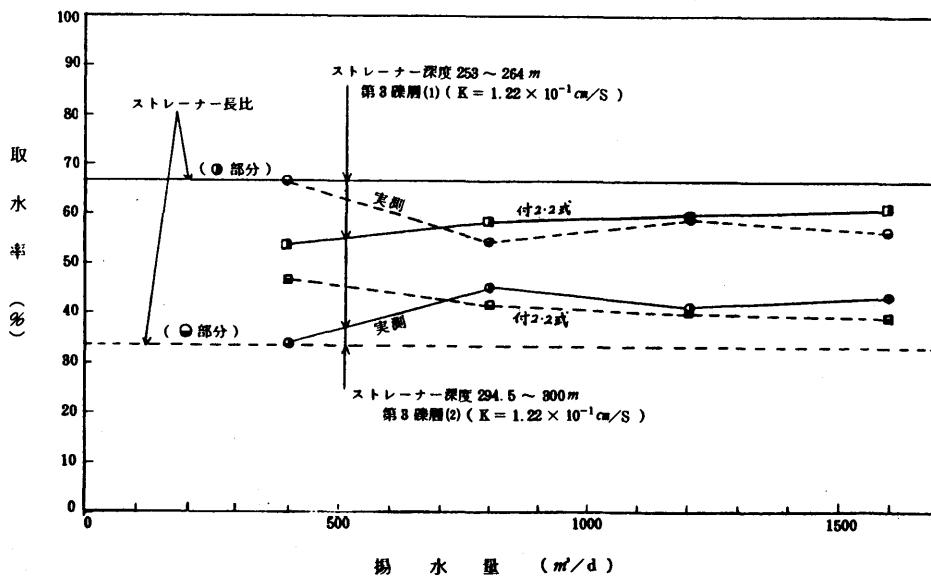
付図-2.2 稲元における揚水量と各帯水層からの取水率



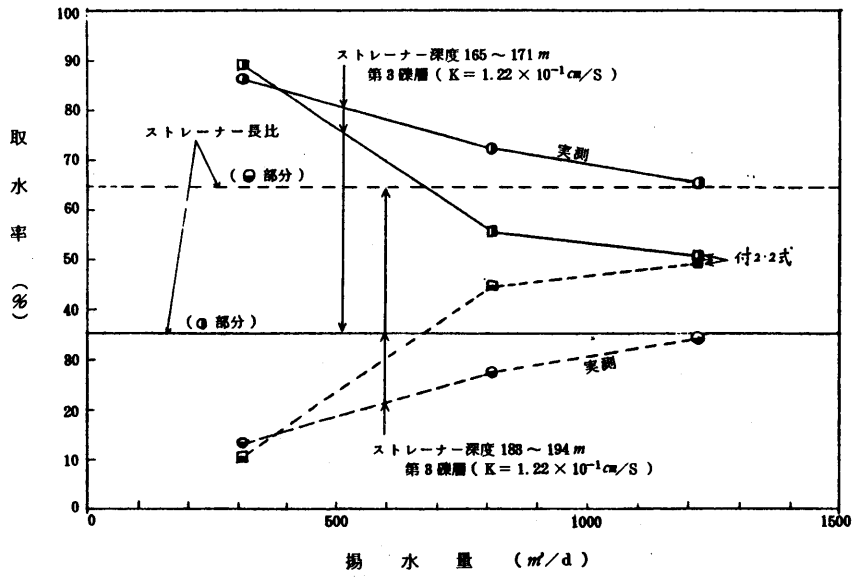
付図-2.3 操手北における揚水量と各ストレーナーからの取水率



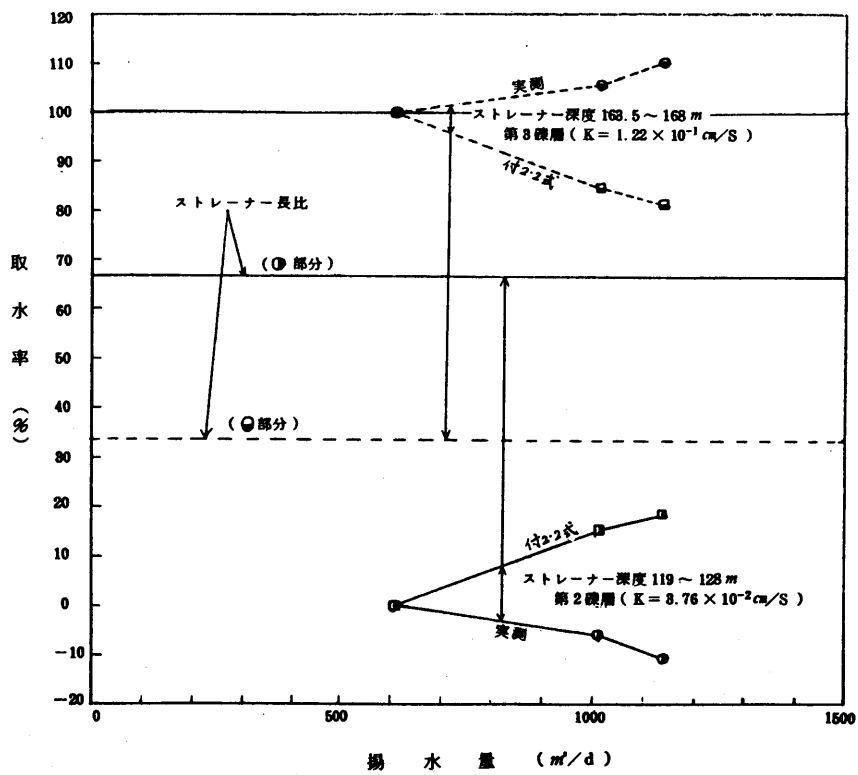
付図-2.4 南部消防署における揚水量と各帯水層からの取水率



付図-2.5 海部南水道における揚水量と各ストレーナーからの取水率

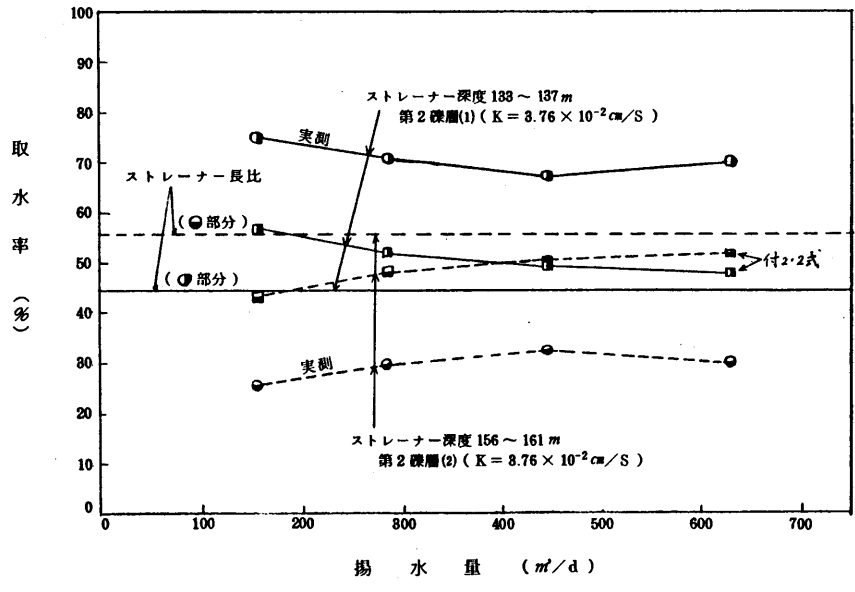


付図-2.6 松名における揚水量と各ストレーナーからの取水率

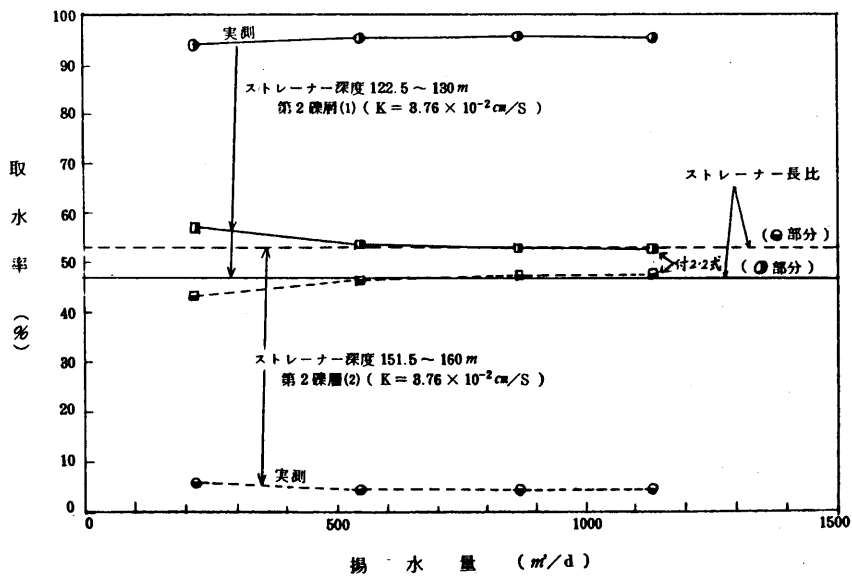


付図-2.7 録島における揚水量と各帯水層からの取水率





付図-2.8 鍋平における揚水量と各ストレーナーからの取水率



付図-2.9 大宝における揚水量と各ストレーナーからの取水量

(付2.2)式を利用して各帯水層からの取水率を求めるには、各帯水層の透水係数、揚水前の自然水位も必要となるが、透水係数については各井戸付近の観測井設置時に行われた揚水試験結果と粒度分析試験結果の有効径より推定し、各帯水層の自然水位については、微流速計による計測結果より推定した。

付図-2.1～2.9の結果をみてもわかるように、微流速計より求めた多層取水井における各帯水層からの取水率は、揚水量、取水帯水層、井戸地点等によって複雑な変化を示し、(付2.2)式、ストレーナー長比による配分率との対応も各井戸地点、揚水量、取水帯水層で多様に変化している。これらの調査を手がかりとして、濃尾地下水盆の水収支計算を改善するためには、なお多くの努力が必要であることがわかる。

そこで、今回の濃尾地下水盆の広域地下水流動のシミュレーション計算では次のような考えと取り扱いによって作業を進めることとした。

すなわち、① 7000本の各井戸からの個々の揚水の仕方を、広域地下水流動のシミュレーション計算に反映させることは、計算機容量の点から困難であること、② 計算のねらいが、濃尾平野広域地下水状態の大局的把握にあり、広域地下水流動モデルにインプットされる揚水量も空間的、時間的にかなり平均化された値を用いていること、③ 多層取水井戸における揚水量配分を、第1近似的方法であるストレーナー長比にもとづいて集計した結果生ずる各帯水層揚水量の誤差は、濃尾地下水盆モデルによる計算結果が実際の地下水状態を良好に再現するように内挿検定計算の段階である程度調整することが可能で

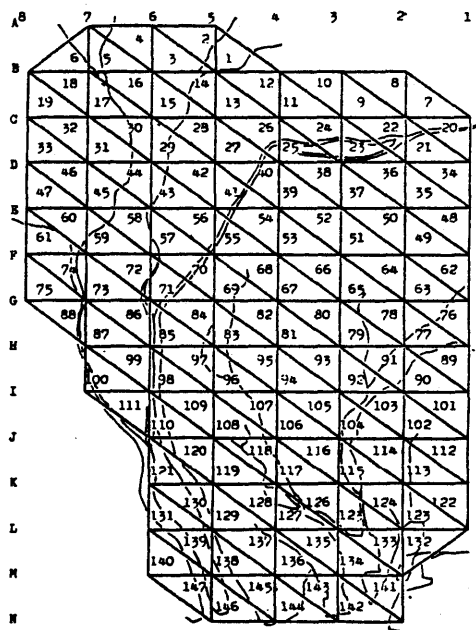
ある，との考えにもとづき，今回のシミュレーション計算を実施することとした。

### 参考文献

- 1) 土木学会編：水理公式集（昭和46年改訂版），pp. 365 - 378，昭和47年。
- 2) 高木不折，他：多層地下水帯よりの揚水量，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書（第五報），愛知県環境部，pp. 63 - 76，昭和54年10月。

### 付録3 濃尾地下水盒モデルの各メッシュからの揚水量

濃尾地下水盒モデルの各メッシュ（付図-3.1 参照）における  
 1961年から1977年まで（1961年から1973年までは4年間隔、  
 1975年以降は毎年）の揚水量を示した。



付図-3.1 揚水量集計のための有限要素メッシュ番号

なお、付表-3.1の凡例にも示したように、揚水量はすべて  $m^3/日$  の単位で表示してある。

# 付表-3.1 揚水量表示の凡例

1961年  
1  
4月

有限要素メッシュ位置 (付図3参照)

モデル第3帯水層からの揚水量 (%)
モデル第2帯水層からの揚水量 (%)
モデル第1帯水層からの揚水量 (%)

(1961年)

0.	438.	0.	0.	0.	0.	0.	842.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	99.	111.	2388.	0.
0.	0.	300.	0.	1200.	0.	0.	0.	0.	0.
7582.	4549.	2359.	550.	550.	2552.	0.	281.	3161.	3523.
1450.	0.	0.	0.	0.	5040.	0.	0.	0.	1814.
264.	3942.	8421.	5617.	0.	0.	0.	22.	22.	0.
414.	700.	2003.	514.	191.	1587.	3332.	868.	88.	5930.
5930.	0.	0.	0.	0.	533.	333.	2479.	2960.	1732.
151.	116.	10.	0.	0.	0.	0.	0.	877.	9235.
8076.	8035.	0.	644.	18.	426.	0.	0.	0.	0.
6900.	7076.	1531.	1329.	1597.	0.	675.	150.	0.	0.
0.	3026.	5277.	7141.	77.	3944.	2414.	0.	0.	0.
0.	1443.	3161.	104.	0.	4618.	1342.	0.	1919.	0.
4.	0.	4608.	100.	130.	1872.	7547.	2567.	4988.	1697.
0.	0.	0.	228.	126.	5256.	0.	0.	0.	0.
8.	227.	63.	0.	0.	0.	3252.	675.	347.	0.
96.	0.	0.	127.	6166.	463.	122.	0.	778.	2190.
6707.	1153.	1409.	73.	6840.	248.	1146.	0.	0.	89.
14870.	13969.	23894.	1173.	1722.	21865.	2464.	5189.	21134.	716.
1036.	0.	0.	0.	0.	1672.	329.	798.	1204.	1137.
3010.	15803.	6409.	15987.	3110.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	774.	1881.	1042.	1403.	966.	1336.	248.	48.	4875.
4275.	0.	0.	975.	687.	4843.	6964.	2687.	712.	1401.
1046.	4691.	10.	1500.	0.	0.	0.	0.	2033.	3125.
5186.	5840.	0.	15.	17.	4050.	0.	250.	0.	0.
2373.	4693.	664.	553.	468.	137.	1553.	2553.	0.	0.
0.	1600.	1697.	1165.	40.	582.	626.	0.	0.	0.
0.	1206.	32.	50.	0.	0.	0.	30.	810.	0.
1644.	0.	100.	0.	0.	981.	606.	1712.	3793.	1366.
0.	0.	0.	228.	1226.	5229.	2465.	0.	0.	0.
2930.	213.	1874.	0.	0.	4082.	4306.	105.	2317.	423.
2780.	23817.	24892.	393.	11545.	3094.	202.	415.	21474.	15.
523.	196.	1089.	252.	267.	6985.	2643.	221.	3016.	1125.
13903.	57075.	23930.	1500.	729.	11440.	1018.	2701.	5999.	3665.
4829.	1570.	2805.	786.	3680.	23337.	629.	174.	1258.	397.
1121.	12377.	6450.	7043.	6236.	5996.	2920.	338.	346.	89.
89.	153.	453.	1478.	128.	9050.	3009.	2008.	564.	4269.
4279.	241.	84.	101.	87.	0.	0.	548.	542.	4471.
676.	4595.	99.	10638.	0.	0.	0.	0.	0.	56.
222.	623.	1407.	1434.	30.	4563.	300.	9196.	0.	0.
170.	95.	0.	20.	76.	95.	4771.	5213.	1.	0.
0.	0.	0.	3.	16.	753.	153.	28.	296.	1111.
1112.	0.	0.	8.	58.	0.	5.	0.	122.	0.
0.	0.	0.	0.	130.	1428.	1836.	1722.	1179.	770.
0.	0.	0.	0.	750.	750.	3482.	0.	0.	0.

(1965年)

0.	438.	3.	0.	0.	0.	0.	842.	0.	0.
684.	0.	0.	0.	0.	0.	99.	111.	2388.	29.
229.	0.	300.	0.	1200.	0.	0.	0.	0.	0.
7582.	6271.	2359.	1613.	1525.	2613.	0.	1081.	6041.	5473.
1700.	0.	0.	0.	0.	7862.	0.	0.	330.	264.
264.	3227.	10229.	9815.	7225.	0.	0.	22.	22.	0.
414.	700.	2973.	914.	1247.	1632.	3382.	2002.	88.	7699.
7699.	0.	0.	0.	0.	649.	2605.	5068.	4891.	8167.
4331.	167.	1146.	0.	0.	0.	0.	0.	1510.	14752.
12689.	10220.	357.	1016.	18.	426.	0.	0.	0.	0.
10361.	12294.	1810.	1432.	1603.	8.	1289.	130.	0.	0.
0.	7009.	13663.	9984.	85.	5446.	2998.	0.	0.	0.
0.	1630.	3168.	270.	144.	4702.	3178.	0.	2586.	0.
4.	0.	6128.	227.	170.	1872.	8081.	2858.	4988.	1397.
0.	0.	114.	342.	592.	6230.	0.	0.	0.	0.
1214.	227.	63.	0.	0.	880.	3292.	675.	4084.	234.
438.	0.	200.	127.	7991.	463.	122.	0.	778.	3335.
11148.	2736.	2567.	73.	7743.	238.	1136.	0.	0.	149.
15280.	13957.	27638.	2711.	9597.	23143.	2765.	7259.	23916.	613.
3179.	5500.	0.	0.	0.	5594.	329.	1543.	2349.	4426.
7447.	30196.	8061.	18948.	3628.	0.	0.	1700.	0.	0.
0.	860.	1934.	1697.	1643.	968.	3807.	248.	131.	8146.
8146.	0.	0.	979.	687.	5243.	10950.	3940.	492.	7138.
1324.	4764.	875.	1500.	0.	0.	0.	0.	4463.	3847.
6647.	9996.	0.	393.	17.	4050.	0.	250.	0.	0.
4453.	7767.	761.	607.	468.	137.	1333.	253.	0.	0.
0.	3189.	1800.	1580.	62.	641.	641.	0.	0.	0.
0.	1590.	58.	82.	0.	6.	0.	30.	864.	78.
1772.	0.	100.	0.	0.	981.	2414.	2722.	3793.	1982.
0.	0.	114.	342.	1692.	5909.	3516.	0.	0.	0.
6042.	222.	1874.	150.	0.	5950.	6312.	1405.	6516.	603.
4345.	35460.	26945.	528.	11787.	3134.	1397.	494.	2431.	718.
1518.	402.	2470.	252.	3387.	9549.	3133.	234.	3283.	1584.
5195.	59544.	35577.	2029.	752.	12741.	5972.	4666.	8854.	4136.
5749.	1791.	3359.	1816.	4965.	38109.	922.	1673.	1293.	426.
3285.	13159.	6645.	10711.	6624.	6220.	2920.	502.	685.	222.
1124.	217.	519.	1758.	133.	9050.	4084.	3391.	565.	4257.
4280.	375.	94.	101.	87.	11.	11.	586.	929.	7616.
1288.	4778.	682.	10638.	0.	779.	779.	0.	0.	56.
222.	625.	1439.	2678.	30.	4615.	300.	9196.	0.	0.
222.	145.	0.	84.	125.	142.	4983.	5733.	622.	0.
0.	80.	80.	15.	16.	773.	173.	28.	410.	1344.
1127.	0.	0.	19.	76.	0.	5.	60.	192.	73.
562.	0.	0.	0.	130.	1448.	2123.	1742.	1304.	837.
0.	0.	0.	0.	730.	3727.	10902.	0.	0.	0.

(1969年)

0.	438.	0.	0.	0.	0.	0.	842.	0.	0.
684.	0.	0.	0.	0.	0.	99.	111.	2388.	138.
338.	0.	300.	0.	1200.	0.	0.	0.	0.	0.
8182.	6271.	2359.	1791.	1573.	3913.	0.	4623.	10233.	8563.
5290.	809.	0.	0.	0.	7862.	0.	0.	780.	264.
264.	8242.	13444.	13676.	9111.	0.	0.	22.	22.	0.
414.	760.	4283.	3807.	3290.	5432.	9345.	3002.	88.	10061.
10061.	0.	0.	0.	0.	1993.	6274.	8643.	6289.	15493.
8229.	167.	1146.	100.	0.	1110.	0.	0.	4480.	39517.
15926.	18270.	1707.	1016.	32.	426.	0.	0.	0.	0.
16871.	16218.	2210.	1590.	3765.	1108.	1569.	3450.	1000.	0.
0.	7974.	17848.	10087.	89.	8711.	6451.	283.	1751.	0.
0.	2367.	3660.	960.	144.	7723.	3822.	550.	5051.	0.
34.	0.	6316.	245.	604.	8174.	13515.	5637.	4986.	1397.
0.	0.	228.	684.	1276.	7717.	0.	0.	0.	0.
1212.	227.	63.	0.	0.	880.	3292.	1283.	4084.	234.
438.	0.	11270.	204.	10641.	463.	122.	0.	778.	3558.
12775.	3210.	3235.	73.	9063.	608.	3082.	0.	0.	149.
15300.	22118.	31549.	3290.	13517.	36695.	4292.	8851.	25508.	6289.
4388.	5500.	625.	763.	0.	5598.	329.	4200.	4417.	4762.
7447.	33193.	10164.	22868.	5140.	0.	300.	1700.	0.	0.
0.	3198.	4113.	5937.	2117.	968.	3807.	248.	2331.	13640.
13640.	0.	0.	979.	687.	5387.	12764.	7011.	1103.	8864.
2367.	4855.	2315.	1500.	0.	0.	0.	0.	2645.	4459.
9826.	16962.	103.	498.	31.	7390.	0.	250.	0.	0.
4794.	8071.	1034.	682.	468.	137.	2553.	3558.	0.	0.
870.	4403.	2262.	1656.	66.	922.	922.	0.	754.	70.
1.	1843.	141.	182.	0.	6.	60.	30.	3278.	503.
2178.	0.	100.	0.	24.	792.	6435.	4225.	3818.	2906.
0.	0.	228.	1297.	2989.	5927.	3578.	0.	0.	0.
8308.	10526.	9733.	38.	8534.	6000.	10268.	3491.	6713.	1079.
4577.	46587.	32637.	3678.	28120.	17932.	3685.	7817.	30001.	4821.
5621.	1096.	2638.	264.	11385.	12277.	28991.	6114.	6627.	4339.
20813.	43905.	46489.	2892.	1002.	13075.	9493.	4886.	9448.	4398.
6964.	2179.	3670.	2671.	8619.	69226.	1845.	1786.	1316.	424.
3283.	15073.	6885.	11552.	7259.	6323.	2931.	889.	1577.	763.
3225.	292.	594.	1758.	135.	9620.	5343.	3888.	664.	4399.
4279.	573.	276.	169.	0.	99.	99.	1201.	1648.	7626.
1450.	5103.	717.	12238.	0.	780.	784.	0.	0.	56.
248.	1489.	1636.	3171.	44.	4415.	323.	11376.	0.	0.
294.	145.	4.	216.	278.	279.	5016.	5920.	1280.	0.
0.	97.	81.	35.	21.	947.	298.	28.	410.	1732.
1135.	0.	0.	19.	78.	0.	3.	60.	192.	163.
765.	0.	0.	0.	130.	3468.	2999.	2707.	1708.	1846.
0.	0.	0.	0.	3132.	15264.	13263.	0.	0.	0.

(1973年)

0.	438.	108.	750.	750.	0.	0.	842.	0.	0.
1308.	0.	0.	0.	0.	0.	99.	111.	2388.	138.
338.	0.	3610.	972.	2800.	0.	0.	0.	0.	0.
8182.	6271.	2359.	4443.	4419.	11346.	2379.	7574.	13389.	8902.
9695.	0.	609.	0.	0.	7862.	0.	40.	884.	284.
2219.	14116.	14784.	14506.	11743.	0.	0.	22.	22.	0.
414.	2301.	15459.	6532.	3290.	6732.	19165.	4202.	1988.	10638.
10638.	0.	0.	0.	0.	1993.	14030.	10174.	7051.	21685.
13101.	167.	1446.	1363.	0.	1110.	0.	0.	7371.	46127.
19881.	26450.	2382.	1018.	48.	1426.	0.	0.	0.	0.
17084.	17053.	3445.	2179.	7896.	2013.	1569.	4450.	3874.	0.
0.	9181.	19516.	12475.	504.	8761.	7312.	298.	1751.	0.
0.	2867.	3780.	1242.	169.	8576.	5357.	2402.	13275.	0.
1494.	0.	10384.	715.	722.	9944.	16221.	13033.	5988.	1397.
0.	0.	228.	991.	1360.	7717.	0.	0.	0.	0.
1212.	371.	15061.	0.	0.	880.	3292.	1283.	4424.	694.
594.	0.	13985.	163.	10847.	463.	122.	0.	778.	3798.
12475.	3210.	4387.	73.	9800.	0.	5170.	0.	33.	149.
16914.	22115.	36667.	7718.	20175.	39246.	6777.	10224.	27071.	9690.
438.	3950.	2620.	765.	2180.	5594.	329.	4995.	4520.	4961.
7447.	36499.	10165.	23826.	7575.	0.	300.	1700.	0.	0.
0.	3555.	4472.	8224.	2129.	1054.	3834.	283.	2339.	14563.
14565.	0.	0.	879.	687.	5765.	14130.	8736.	1406.	1853.
4352.	4915.	2715.	4437.	0.	0.	0.	0.	12098.	5645.
10964.	22863.	103.	2118.	47.	8050.	0.	616.	0.	0.
4894.	8146.	1034.	742.	483.	152.	2553.	3786.	1400.	0.
470.	4803.	3200.	2001.	66.	942.	922.	0.	778.	70.
1.	1943.	231.	478.	122.	80.	250.	293.	16721.	711.
3844.	0.	602.	0.	126.	1133.	10553.	8335.	3820.	3958.
0.	0.	228.	1609.	11801.	6030.	1772.	0.	0.	0.
9921.	14232.	25280.	2038.	8636.	6000.	10920.	5501.	22284.	4190.
6131.	73300.	37059.	7383.	31496.	19114.	4461.	24486.	30947.	7881.
8681.	2105.	3536.	318.	15149.	16925.	30308.	6527.	7377.	4835.
22799.	89702.	54380.	3707.	1527.	13125.	9503.	4930.	9492.	5852.
4588.	2975.	4003.	4392.	11022.	99054.	2388.	1789.	1319.	516.
3283.	16353.	9029.	11931.	8051.	4253.	4489.	764.	1198.	1506.
4083.	292.	594.	1784.	155.	9620.	5343.	4303.	664.	4399.
4279.	306.	292.	247.	87.	12.	12.	1201.	1688.	7626.
2071.	5103.	729.	12238.	0.	824.	798.	9.	0.	56.
248.	1739.	1668.	3171.	75.	5438.	343.	11366.	0.	0.
294.	145.	12.	233.	790.	240.	5048.	6042.	1580.	4.
0.	97.	81.	36.	108.	947.	298.	73.	488.	2060.
1135.	0.	0.	33.	53.	0.	5.	60.	192.	179.
783.	0.	0.	0.	130.	4165.	4458.	4780.	3835.	2445.
0.	0.	0.	0.	3861.	33731.	16894.	0.	0.	0.

(1975年)

1355.	1438.	1284.	906.	777.	9010.	613.	2071.	2507.	2076.
1857.	4603.	4700.	2443.	4704.	1156.	749.	1347.	524.	481.
1861.	361.	162.	2245.	7459.	1724.	3520.	1907.	325.	201.
10064.	2617.	1412.	5094.	7267.	7988.	6205.	18508.	20025.	442.
776.	1077.	913.	645.	933.	3649.	0.	5688.	5204.	1411.
4630.	22296.	14997.	19426.	7781.	779.	1051.	52.	1867.	16.
2123.	1824.	11688.	8500.	3149.	11082.	21349.	3945.	1523.	10632.
10638.	86.	383.	5.	29.	2249.	16174.	6603.	8708.	19158.
738.	1280.	2879.	206.	0.	159.	104.	0.	15489.	16607.
15676.	31482.	6173.	6033.	749.	12256.	46.	856.	2.	2.
5733.	9225.	6353.	6494.	3361.	3903.	16460.	13845.	4026.	0.
0.	4397.	1280.	5628.	853.	1858.	15441.	2296.	977.	129.
1634.	1207.	224.	853.	7.	774.	2925.	4363.	23443.	3574.
1786.	0.	8005.	426.	9995.	19731.	26201.	12573.	2191.	515.
0.	4.	45.	45.	2102.	1228.	124.	0.	0.	0.
2730.	2877.	2569.	1812.	133.	1640.	1624.	4182.	5013.	4152.
3715.	9206.	9400.	4887.	9407.	2312.	1498.	2693.	1049.	3778.
22704.	3210.	4387.	1104.	9800.	3447.	7039.	3814.	789.	403.
2013.	5234.	3623.	6121.	12626.	20333.	9673.	6045.	16170.	884.
1551.	2154.	1825.	3289.	1867.	7298.	329.	11077.	2032.	3671.
3477.	24862.	10234.	23826.	5140.	1557.	2102.	105.	3759.	31.
4245.	1676.	2050.	4884.	1976.	1222.	415.	3425.	3557.	68.
68.	172.	766.	11.	58.	1406.	5317.	1284.	3094.	5092.
429.	1326.	4346.	4437.	120.	318.	207.	0.	4121.	2296.
11610.	12095.	1260.	42.	197.	1260.	45.	664.	3.	3.
572.	1244.	925.	876.	461.	65.	1284.	2934.	473.	91.
0.	416.	274.	240.	217.	478.	549.	2159.	1473.	628.
25.	249.	15.	158.	0.	24.	358.	1142.	2126.	226.
442.	0.	396.	0.	1898.	2312.	5950.	2690.	1352.	3343.
0.	0.	45.	45.	3219.	5143.	2479.	0.	0.	0.
7918.	8343.	7449.	5256.	4507.	52259.	4716.	12127.	14543.	12042.
10772.	26697.	27259.	14172.	27282.	6705.	4343.	7811.	3042.	7881.
8681.	2105.	3536.	418.	15148.	9997.	20414.	11060.	2289.	1158.
5438.	15178.	10508.	493.	4177.	8552.	5715.	2529.	11797.	2563.
4429.	6245.	5294.	3738.	5413.	21164.	2388.	1005.	1417.	3623.
2179.	9419.	3867.	11931.	8051.	4517.	6097.	304.	10831.	91.
12312.	1059.	2146.	1846.	989.	759.	2754.	2995.	1830.	196.
194.	300.	2221.	31.	170.	581.	494.	819.	2020.	3661.
239.	2776.	5648.	12238.	1264.	323.	601.	9.	1161.	696.
551.	2121.	1946.	1379.	471.	10591.	1157.	12590.	9.	9.
230.	214.	204.	126.	2712.	152.	3656.	12172.	1580.	2027.
0.	20.	76.	63.	48.	59.	139.	432.	1602.	856.
273.	9.	39.	353.	0.	22.	380.	1562.	3652.	2811.
324.	0.	774.	0.	594.	1708.	11301.	2732.	5487.	2818.
0.	0.	0.	48.	3077.	12110.	9044.	0.	0.	0.

(1976年)

5521.	1633.	1393.	833.	761.	8783.	811.	2036.	2887.	2238.
2095.	5126.	5439.	2624.	4804.	1173.	760.	1256.	516.	483.
807.	360.	120.	2594.	4195.	1828.	3571.	1906.	411.	198.
990.	4358.	3566.	3798.	4179.	4501.	3476.	11198.	16221.	8099.
8132.	1087.	1066.	918.	935.	3636.	0.	1332.	4071.	4933.
4771.	13762.	14143.	19208.	10871.	783.	1052.	58.	1868.	20.
2134.	2208.	11975.	9546.	2568.	4013.	21475.	3378.	1839.	6492.
6492.	98.	412.	7.	37.	2227.	7397.	8541.	8596.	32589.
7041.	1219.	2137.	191.	0.	186.	135.	0.	15657.	12913.
14519.	29181.	3160.	3824.	1340.	12988.	47.	301.	2.	2.
4820.	7376.	4170.	4734.	2454.	3428.	11653.	11466.	3772.	0.
0.	4443.	1315.	5949.	976.	967.	11368.	2717.	742.	222.
1635.	1906.	1517.	825.	0.	353.	2918.	7149.	28844.	3421.
767.	0.	5761.	606.	8519.	16960.	26988.	18324.	5245.	1170.
0.	0.	173.	2182.	4642.	6508.	2817.			
3043.	3266.	2786.	1766.	1522.	17567.	1623.	4112.	4898.	4417.
4189.	10253.	10878.	5249.	9607.	2347.	1320.	2512.	1031.	1123.
1815.	746.	442.	1993.	9946.	3879.	7358.	3812.	822.	396.
1941.	4716.	7132.	5953.	6306.	6757.	6121.	4969.	13296.	7963.
8349.	2174.	2132.	1835.	1870.	7272.	0.	3701.	1538.	1590.
2701.	14064.	5631.	19031.	5851.	1565.	2104.	115.	3736.	40.
4267.	1489.	3090.	3307.	3293.	813.	429.	4298.	3913.	11489.
10553.	196.	825.	14.	75.	2174.	1967.	1705.	4395.	5704.
292.	2096.	3197.	3518.	63.	372.	269.	0.	4401.	2243.
12100.	13626.	905.	45.	323.	707.	45.	125.	37.	37.
430.	1021.	572.	508.	372.	71.	758.	1774.	263.	47.
0.	510.	229.	781.	179.	445.	324.	1873.	1335.	616.
26.	250.	293.	157.	0.	17.	374.	664.	8895.	104.
1160.	0.	642.	0.	1597.	1243.	10375.	3677.	1428.	882.
0.	0.	87.	87.	2850.	3642.	2102.			
8824.	9472.	8040.	5123.	4413.	50944.	4706.	11326.	14204.	12890.
12149.	29734.	31546.	15221.	27861.	4405.	4408.	7286.	2991.	5136.
30609.	2973.	2065.	3387.	7045.	10668.	20779.	11055.	2364.	1149.
2745.	25278.	20682.	13658.	24628.	24435.	13460.	3391.	11812.	4745.
7111.	6304.	6183.	5322.	5424.	21090.	0.	19725.	4970.	8298.
3790.	19512.	9190.	5079.	2970.	4540.	6102.	335.	10835.	116.
12375.	2399.	2586.	3452.	1165.	794.	2578.	2424.	2054.	3815.
1578.	570.	2392.	40.	217.	741.	929.	510.	2114.	4385.
154.	6307.	4317.	13694.	2115.	1078.	781.	0.	1265.	515.
463.	1436.	1972.	1475.	379.	10127.	1317.	11577.	10.	10.
186.	215.	218.	136.	2913.	319.	3343.	10452.	760.	1920.
0.	29.	92.	196.	51.	43.	108.	735.	1653.	713.
283.	0.	547.	299.	4.	27.	351.	849.	2367.	2304.
468.	0.	587.	0.	1597.	907.	1861.	11990.	2565.	5961.
0.	0.	44.	84.	2296.	4679.	2483.			

(1977年)

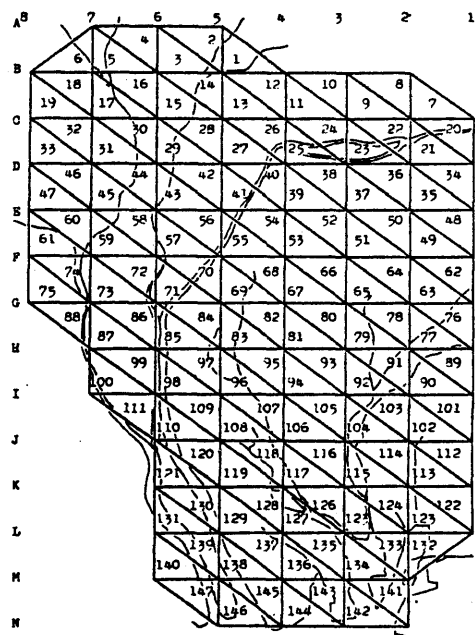
1524.	1641.	1422.	925.	406.	4843.	811.	2377.	2491.	2254.
2084.	5137.	5454.	2629.	4802.	1178.	767.	1300.	474.	484.
1357.	360.	120.	3017.	4605.	1849.	3594.	1908.	417.	182.
911.	2369.	1840.	3282.	3670.	424.	3501.	11215.	16207.	8042.
8087.	1114.	1113.	1002.	903.	3573.	0.	1919.	4031.	1205.
4464.	13763.	14150.	19536.	10853.	796.	1055.	60.	1847.	21.
2137.	1999.	10778.	9635.	3640.	3958.	22674.	3378.	1839.	6035.
6037.	98.	433.	7.	40.	2485.	7397.	9292.	8591.	32734.
7140.	1219.	2129.	191.	0.	215.	154.	0.	15657.	12913.
13648.	24636.	5145.	5825.	1100.	11749.	1204.	198.	2.	24.
4820.	7376.	2985.	2955.	3205.	3214.	12474.	12603.	2129.	0.
0.	4443.	1315.	5949.	976.	1890.	13030.	1809.	739.	34.
189.	1906.	1517.	542.	0.	441.	2912.	6750.	28578.	2559.
140.	0.	5761.	606.	8519.	16778.	26667.	15866.	4861.	810.
0.	0.	173.	2064.	4606.	6399.	3669.			
3048.	3282.	2845.	1856.	1512.	17688.	1622.	4755.	5781.	4537.
4170.	10272.	10905.	5259.	9602.	2359.	1334.	2601.	949.	1483.
1795.	728.	249.	1899.	9082.	3926.	7410.	3817.	834.	364.
1422.	4737.	3280.	5819.	6345.	6280.	5452.	4513.	13074.	5599.
6578.	2227.	2239.	2003.	1807.	7146.	0.	3911.	1527.	1628.
2812.	14052.	3600.	18837.	5749.	1591.	2109.	119.	3696.	43.
4274.	1531.	3081.	3571.	3192.	743.	429.	4298.	3643.	10153.
10097.	195.	864.	15.	80.	2251.	1967.	1979.	4328.	3413.
296.	1396.	3167.	3496.	0.	430.	307.	0.	4401.	2243.
12103.	13606.	882.	43.	291.	631.	276.	118.	3.	3.
430.	1021.	584.	536.	372.	71.	1059.	1847.	263.	49.
0.	510.	229.	781.	179.	433.	291.	1865.	1334.	597.
24.	250.	293.	148.	0.	17.	374.	632.	8843.	261.
698.	0.	642.	0.	1597.	1234.	10374.	3173.	1428.	883.
0.	0.	87.	87.	2849.	4355.	2341.			
8839.	9515.	8244.	5385.	4677.	51294.	4706.	13790.	16745.	13154.
12091.	29791.	31633.	15250.	27847.	6430.	4444.	7543.	2751.	6355.
29314.	2583.	1746.	3429.	6597.	10784.	20914.	11070.	2418.	1037.
5284.	13738.	9511.	13564.	19039.	24670.	10386.	3260.	11759.	3994.
4501.	6459.	6491.	5808.	5240.	20721.	0.	19015.	4332.	4547.
3952.	19330.	9190.	4541.	2097.	4616.	6117.	345.	10718.	125.
12397.	2430.	2281.	3438.	1161.	808.	2608.	2074.	993.	2282.
2282.	366.	2511.	43.	232.	742.	929.	510.	2128.	4385.
154.	6220.	3904.	12744.	345.	1247.	891.	0.	1265.	516.
663.	1184.	1931.	1475.	378.	10041.	820.	11015.	10.	10.
186.	215.	218.	145.	291.	319.	3342.	10453.	749.	1914.
0.	29.	92.	196.	51.	43.	108.	734.	1646.	676.
203.	0.	547.	123.	4.	6.	332.	829.	2348.	2295.
1968.	0.	587.	0.	907.	1859.	12990.	2335.	3642.	3876.
0.	0.	44.	84.	2292.	4362.	2179.			



## 付録4 1977年における各用途別揚水量

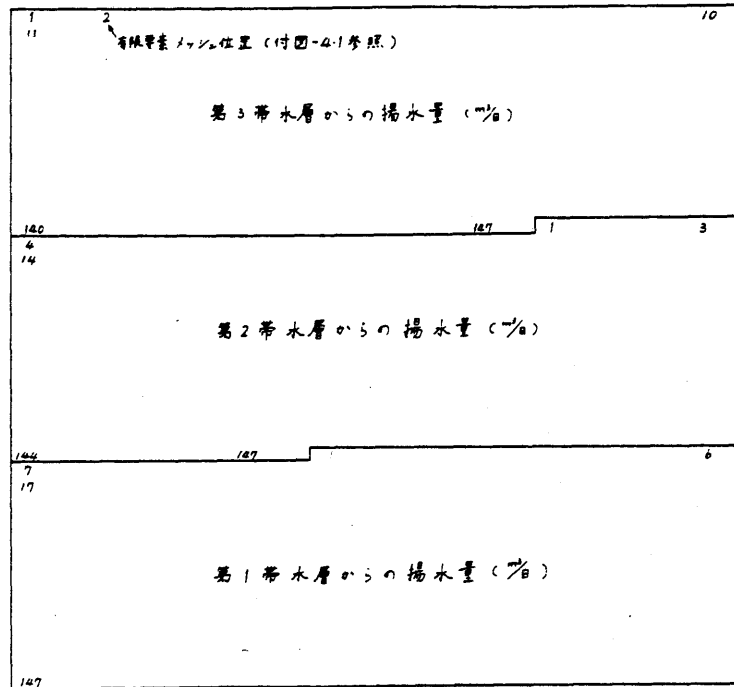
1977年の揚水量集計については、用途別（工業用揚水量，建築物用揚水量，農業用揚水量，水産，その他用揚水量，水道用揚水量）に揚水量集計を行っており，濃尾地下水盆モデル各メッシュごと，各帯水層ごとに整理した。これらの揚水量を以下に示す。

なお，濃尾平野域内での各メッシュの位置を理解しやすくするために，濃尾地下水盆モデルの平面図を付図-4.1に示しておいた。



付図-4.1 濃尾沖積平野の有限要素モデル平面図

付表-4.1 用途別揚水量の表示例



(工業用揚水量)

676.	782.	455.	122.	0.	4261.	599.	839.	839.	581.
903.	2245.	3156.	2082.	2649.	611.	263.	0.	0.	484.
807.	360.	120.	176.	2065.	641.	2794.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	3119.	2911.	1093.	135.	9601.	14657.	6361.
6353.	698.	692.	225.	225.	0.	0.	944.	2908.	657.
522.	11724.	12056.	12997.	1190.	605.	121.	0.	0.	0.
0.	732.	619.	6575.	777.	3100.	1348.	3378.	1839.	5999.
5999.	0.	0.	0.	0.	872.	7155.	5089.	6449.	25333.
4014.	103.	2129.	191.	0.	0.	0.	0.	12729.	10498.
13001.	24000.	4914.	1676.	0.	8084.	0.	171.	2.	2.
3919.	5997.	1198.	1124.	2434.	376.	4874.	10816.	0.	0.
0.	3612.	1069.	4837.	793.	73.	4179.	137.	37.	38.
0.	1550.	1233.	0.	0.	16.	232.	735.	171.	2358.
0.	0.	4684.	493.	5038.	11.	68.	1067.	144.	144.
0.	0.	0.	0.	0.	39.	0.	1353.	1564.	910.
244.	0.	8523.	1198.	1678.	1678.	1161.	1807.	4490.	6313.
4164.	5297.	1222.	526.	0.	0.	1001.	1671.	719.	240.
353.	5942.	1336.	5644.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4654.	3802.	2760.	1352.	2696.	11056.	3099.	4117.	1396.	1385.
450.	450.	0.	0.	1792.	598.	180.	444.	13026.	4980.
16620.	4259.	1210.	242.	0.	0.	0.	0.	1040.	528.
1628.	663.	490.	306.	3459.	3791.	10021.	10021.	0.	0.
0.	0.	1037.	1919.	1045.	3426.	5598.	281.	671.	3006.
2976.	0.	0.	0.	0.	3578.	1824.	11578.	13011.	820.
39.	87.	622.	0.	117.	3.	3.	350.	830.	411.
320.	350.	39.	859.	1680.	263.	49.	0.	415.	186.
635.	146.	257.	45.	304.	128.	593.	26.	203.	238.
0.	0.	1.	1.	44.	74.	0.	0.	0.	522.
0.	913.	17.	4.	0.	39.	666.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	3923.	4534.	2638.	708.	0.	24716.
3476.	4866.	4866.	3368.	5240.	13022.	18307.	12076.	15363.	3544.
1525.	0.	0.	4331.	26024.	2201.	981.	1023.	5214.	3778.
16271.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	9576.	15401.	13276.
5116.	1843.	9700.	2577.	5158.	4048.	4016.	1306.	1306.	0.
0.	5886.	2632.	3159.	2735.	17902.	8029.	3892.	1522.	3510.
702.	0.	0.	0.	0.	1668.	874.	2402.	647.	469.
2069.	1526.	78.	1952.	1952.	0.	0.	0.	0.	507.
898.	96.	1885.	4276.	109.	497.	2465.	2466.	113.	0.
0.	0.	1028.	420.	350.	754.	1663.	1270.	6.	8814.
166.	311.	10.	10.	151.	175.	177.	73.	2878.	293.
2403.	8914.	366.	1309.	0.	24.	75.	159.	41.	13.
13.	116.	356.	98.	21.	0.	445.	0.	3.	2.
2.	63.	743.	2180.	7.	0.	477.	0.	0.	15.
21.	21.	108.	1662.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.									

(水道用揚水量)

192.	575.	468.	125.	125.	1118.	0.	1538.	2052.	1196.
689.	767.	1150.	383.	693.	140.	77.	1300.	474.	0.
550.	0.	0.	2841.	2540.	716.	636.	530.	340.	182.
911.	2369.	1640.	0.	655.	3303.	3338.	1497.	1497.	1302.
1357.	416.	427.	463.	364.	729.	0.	843.	595.	436.
3294.	0.	1317.	4796.	9651.	191.	38.	60.	310.	21.
54.	1165.	10088.	540.	352.	136.	20760.	0.	0.	36.
38.	98.	312.	7.	40.	1351.	0.	3958.	526.	6618.
3087.	0.	0.	0.	0.	205.	134.	0.	0.	0.
11.	11.	230.	4148.	0.	2730.	1157.	27.	0.	0.
0.	0.	1791.	1791.	751.	2803.	7048.	1622.	1977.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	1702.	7281.	0.	0.	0.
189.	0.	0.	0.	0.	282.	282.	2343.	0.	55.
0.	0.	0.	0.	0.	3060.	0.	1514.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	383.	1150.	936.
250.	250.	2237.	0.	3077.	4103.	2392.	1378.	1533.	2300.
767.	1385.	279.	154.	2601.	949.	450.	92.	9.	9.
1383.	3058.	1506.	1438.	1061.	681.	364.	1822.	4737.	3280.
425.	2300.	2858.	4027.	1776.	1883.	959.	1070.	831.	353.
925.	729.	1458.	0.	1892.	577.	1047.	1401.	0.	0.
48.	841.	381.	76.	119.	621.	43.	108.	309.	2453.
1019.	499.	136.	0.	428.	0.	76.	76.	195.	623.
15.	80.	473.	0.	854.	745.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	410.	267.	0.	0.	0.	39.	39.	58.
0.	0.	0.	231.	1.	0.	0.	0.	0.	165.
165.	0.	0.	147.	147.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	1112.	3335.	2714.	726.	726.	6486.
0.	8924.	11899.	6937.	3996.	4446.	6669.	2223.	4017.	809.
446.	7543.	2751.	1921.	2655.	336.	551.	2406.	1269.	4153.
3692.	3077.	1974.	1057.	5284.	13738.	9511.	2260.	2869.	9517.
4339.	1093.	1526.	765.	1087.	2411.	2475.	2682.	2114.	4227.
0.	12533.	191.	1974.	569.	0.	0.	4.	0.	1106.
221.	345.	1801.	125.	314.	252.	677.	669.	11.	0.
0.	48.	48.	221.	221.	566.	1807.	43.	232.	0.
0.	0.	103.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1189.
775.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	8986.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

(農業用揚水量)

0.	0.	499.	681.	681.	3464.	212.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	1296.	427.	427.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1069.	77.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	314.	314.	2844.	0.	6.	160.	19.
0.	0.	0.	0.	6.	0.	896.	0.	1537.	0.
2083.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	121.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	10.	20.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	1074.	909.	41.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	6.	0.	612.	0.
0.	0.	0.	542.	0.	143.	357.	516.	7594.	6.
0.	0.	0.	0.	1393.	2572.	20175.	8967.	1410.	243.
0.	0.	91.	21.	3151.	1907.	1415.	0.	0.	999.
1362.	1362.	6928.	424.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
0.	2592.	854.	854.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	2137.	153.	0.	0.	0.	0.
3.	22.	64.	64.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
628.	628.	5688.	0.	22.	18.	191.	0.	0.	0.
0.	12.	0.	1791.	0.	3075.	0.	4166.	50.	0.
0.	0.	0.	0.	19.	0.	0.	0.	0.	243.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	20.	40.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	195.	0.	41.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	1.	2.	847.	4.	0.	0.	0.
148.	0.	3.	193.	412.	2940.	0.	20.	0.	0.
0.	381.	1101.	9508.	1809.	1209.	0.	0.	0.	87.
87.	1724.	0.	0.	0.	0.	2896.	3951.	3951.	20092.
1230.	0.	0.	0.	2.	0.	0.	0.	7516.	2477.
2477.	0.	0.	47.	127.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	6198.	444.	0.	0.	0.	0.	130.	86.	299.
494.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1820.	1820.	16494.
0.	83.	561.	760.	75.	0.	0.	26.	35.	0.
5194.	0.	8917.	0.	12083.	0.	25.	13.	1.	0.
200.	130.	739.	109.	109.	0.	704.	0.	0.	0.
0.	2.	2.	0.	0.	1950.	1374.	10181.	199.	58.
116.	0.	0.	0.	0.	2.	187.	187.	496.	1007.
342.	1673.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	956.	309.	441.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
1.	392.	1033.	411.	107.	0.	0.	123.	0.	2.
176.	477.	1333.	33.	197.	0.	0.	0.	250.	1478.
9479.	280.	0.	0.	0.	0.	84.	84.	1646.	0.
0.									

(建築物用揚水量)

656.	284.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	492.
492.	2125.	1148.	164.	164.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	492.	164.	309.	0.	0.
0.	0.	0.	163.	104.	28.	28.	64.	0.	379.
377.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	126.	318.	93.
805.	2039.	777.	1743.	6.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	102.	71.	2520.	2333.	722.	566.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	252.	242.	245.	1616.	783.
39.	1116.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2928.	2415.
656.	623.	1.	1.	26.	26.	6.	0.	0.	0.
901.	1379.	0.	40.	20.	35.	552.	165.	152.	0.
0.	831.	246.	1112.	183.	15.	1454.	993.	25.	0.
0.	356.	284.	0.	0.	0.	0.	22.	347.	0.
0.	0.	1077.	113.	1394.	258.	0.	0.	1547.	402.
0.	0.	102.	2973.	0.	0.	0.	1312.	568.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	984.	984.	4249.	2296.
328.	328.	0.	0.	0.	0.	32.	32.	0.	0.
163.	82.	984.	328.	619.	0.	0.	0.	0.	0.
737.	221.	598.	9.	41.	135.	1541.	1391.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	205.	334.	167.	907.	1026.	620.
2169.	637.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	152.	80.
924.	2030.	119.	123.	352.	92.	56.	0.	0.	0.
0.	0.	741.	48.	80.	157.	15.	15.	725.	161.
520.	0.	0.	0.	0.	823.	419.	486.	556.	4.
4.	9.	9.	4.	0.	0.	0.	80.	191.	8.
51.	22.	32.	53.	20.	0.	0.	0.	95.	43.
146.	33.	26.	57.	134.	49.	0.	0.	47.	55.
0.	0.	13.	13.	7.	28.	0.	0.	0.	120.
0.	122.	0.	0.	0.	0.	37.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	91.	3804.	1646.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	2853.	2853.	12323.	6657.	951.	951.	0.
0.	0.	0.	56.	508.	46.	214.	0.	114.	2853.
951.	1795.	0.	0.	0.	0.	0.	1598.	683.	1578.
637.	180.	389.	652.	256.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	510.	617.	654.	573.	1428.	1161.	619.	540.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	510.	705.	354.	502.	339.
339.	370.	128.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	235.
31.	412.	138.	109.	45.	3773.	65.	97.	233.	0.
0.	0.	237.	96.	313.	408.	81.	18.	76.	220.
312.	45.	0.	0.	35.	40.	41.	72.	34.	26.
913.	582.	63.	0.	0.	5.	17.	37.	10.	30.
55.	213.	113.	62.	0.	0.	102.	0.	1.	2.
2.	74.	40.	0.	0.	0.	110.	0.	79.	0.
38.	0.	58.	1842.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
129.									

(水産・その他用揚水量)

0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	53.	53.	0.
43.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	50.	0.
0.	0.	0.	0.	178.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	10.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	100.	110.	679.	65.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	2041.	3134.	20466.	140.
140.	0.	0.	0.	694.	19877.	6624.	4318.	1760.	21.
0.	0.	0.	0.	1455.	4453.	2254.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	43.	60.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	150.	188.	1425.	310.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	167.	189.	5841.	261.	678.	0.	0.
0.	181.	121.	862.	1364.	180.	180.	0.	0.	0.
0.	1125.	4596.	2250.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	144.	144.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	3.	331.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
26.	1.	11.	166.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
39.	13.	144.	105.	75.	0.	0.	0.	0.	0.
152.	215.	232.	82.	1764.	0.	0.	0.	578.	366.
3452.	2034.	3476.	372.	0.	0.	0.	0.	746.	4365.
2050.									

付録 5 安全地下水頭推定に用いた鉛直一次元圧密モデルの  
計算フローチャート (表記法は、浦昭二編:FORTRAN入門,  
培風館,による)

