

# 土木研究所資料

## 地下水シミュレーションの手引と 濃尾平野への適用

昭和63年 3 月

建設省土木研究所  
河川部水文研究室

Copyright ©1988 by P. W. R. I.

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

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

# 地下水シミュレーションの手引と 濃尾平野への適用

水文研究室 室長 吉野文雄  
研究員 吉谷純一  
技官 細谷信夫

国土庁 官房水資源部 水源地域対策課  
(元水文研究室 研究員) 寺川 陽

東北地方建設局 能代工事事務所 調査課  
(元水文研究室) 田子 秀徳

## 要 旨

濃尾平野に適用した地下水シミュレーションによって地下水シミュレーションの持つ問題点や技術現況を明らかにし、広域地下水シミュレーションを行う現場技術者のための手引書として取りまとめたものである。

キーワード：地下水，地下水シミュレーション，濃尾，手引

## まえがき

地下水は水資源として貴重な役割を果たしているのみならず国土の構成要素として重要な機能を担っている。地下水はその水質が良好で安定していることと同時に利用がしやすいため古くから人類に活用されてきた。しかし地下水利用技術の発達は大規模な揚水を可能としたため、自然界における地下水循環に不均衡を生じ、地盤沈下や地下水位の異常な低下といった国土の構成要素としての地下水に対する障害を発生させている。

このような障害を未然に防ぎ地下水を有効に活用するには地下水の循環を適切に把握し、地下水資源の定量評価を行う必要がある。その手段として地下水の水収支や運動を表現する各種のシミュレーションモデルが提案されてきた。これらのモデルにより地下水の状態を表現するには地下水の賦存する空間の広がりや地層構成、その地下水流動への寄与の仕方といった特性を計測して与える必要がある。しかしこれらの与えるべき条件にはかなりの推定が含まれることが多く、シミュレーションの結果に大きく影響を与えている。

本報告書はこのような観点から現在いくつかの場所で適用されている地下水シミュレーションモデルについて、そのモデルの構成の仕方、モデルへの入力条件の与え方、結果の評価の方法等について取りまとめたものである。特に地下水シミュレーションモデルを濃尾平野に応用し、シミュレーションの技術現況を明らかにし、この経験を地下水シミュレーションの手引としてとりまとめたものである。濃尾平野はわが国でも最も地下水調査が充実して行われている地域であり、観測井も多くかつ地下水帯水層の構造もかなり明らかにされている。したがって、この地域の地下水を対象にシミュレーションを行えば、現在のシミュレーションモデルの持つ問題点を明らかにしうるであろうことを考えて対象地域に選定した。

本研究は建設省中部地方建設局木曽川下流工事事務所の依頼により、土木研究所が地下水研究の一環として行ったものである。特に中心とした問題点は地下水シミュレーションの持つ問題点や技術現況を明確にして、現場技術者のための判断材料にすることであった。そのため技術基準のような形での記述を考えたが、未だ明確に表現しがたい点も多く、手引書として取りまとめることにした。本報告書が地下水シミュレーションを実施する技術者の方々に活用されることを期待したい。

この研究に当たっては地下水シミュレーションの研究に多数の実績を持つ以下の研究者からなる研究会を構成し、議論を尽くした。これらの諸先生方に深く感謝のを表したい。

|          |       |         |
|----------|-------|---------|
| 名古屋大学    | 工学部   | 高木不折教授  |
| 東京大学     | 工学部   | 玉井信行教授  |
| 豊橋技術科学大学 | 建設工学系 | 中村俊六助教授 |
| 埼玉大学     | 工学部   | 渡辺邦夫助教授 |

特に高木教授には研究会の委員長として研究会での議論の取りまとめと本報告書の作成・執筆に御尽力をいただいた。この調査研究は昭和58年に始められ一応の成果は61年に取りまとまっていた

が、その後若干の修正を加え印刷の運びに至ったものである。この間報告書の作成を担当した者は前水文研究室員寺川陽、田子秀徳である。またこの調査研究には株式会社建設技術研究所の方々、特に石井弓夫、伊藤一正氏の協力を得た。記して感謝の意を表したい。

昭和63年 3 月

# 目 次

## まえがき

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第1章 概 論 .....                   | 1  |
| 第2章 地下水シミュレーションの基礎 .....        | 2  |
| 2.1 概 説 .....                   | 2  |
| 2.2 解析の対象とする領域 .....            | 3  |
| 2.3 地下水流れの表現 .....              | 4  |
| 2.3.1 流れを規定する方程式 .....          | 4  |
| 2.3.2 シミュレーションの基礎方程式 .....      | 7  |
| 2.4 シミュレーションモデルとその問題点 .....     | 12 |
| 2.4.1 シミュレーションモデル .....         | 12 |
| 2.4.2 計算方法 .....                | 14 |
| 2.4.3 シミュレーションの問題点 .....        | 19 |
| 第3章 広域地下水シミュレーションのための基礎調査 ..... | 29 |
| 3.1 概 説 .....                   | 29 |
| 3.2 濃尾平野を例とした基礎調査 .....         | 31 |
| 3.2.1 自然・社会条件の概要 .....          | 31 |
| 3.2.2 地 形 .....                 | 32 |
| 3.2.3 地 質 .....                 | 34 |
| 3.2.4 地下水賦存量 .....              | 39 |
| 3.2.5 地下水利用状況 .....             | 39 |
| 3.2.6 透水量係数及び貯留係数 .....         | 43 |
| 3.2.7 地下水流動系 .....              | 49 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第4章 濃尾平野での地下水シミュレーションモデルの構築 .....       | 55  |
| 4.1 概 説 .....                           | 55  |
| 4.2 モデルの基本構想 .....                      | 56  |
| 4.2.1 目 的 .....                         | 56  |
| 4.2.2 解析手法 .....                        | 56  |
| 4.2.3 対象領域の選定 .....                     | 58  |
| 4.2.4 モデルの基本構想 .....                    | 59  |
| 4.3 モデルの構築 .....                        | 59  |
| 4.3.1 数値解析手法 .....                      | 59  |
| 4.3.2 地層のモデル化 .....                     | 63  |
| 4.3.3 境界条件 .....                        | 67  |
| 4.3.4 初期条件 .....                        | 68  |
| 4.3.5 各種パラメータ .....                     | 68  |
| 4.4 シミュレーションの実施と計算結果 .....              | 71  |
| 第5章 地下水シミュレーションにおける問題点の検討及びモデルの改良 ..... | 76  |
| 5.1 概 説 .....                           | 76  |
| 5.2 初期条件・境界条件の設定 .....                  | 78  |
| 5.3 揚水量のモデル化について .....                  | 85  |
| 5.4 パラメータの設定について .....                  | 92  |
| 5.5 シミュレーション結果の妥当性 .....                | 98  |
| 第6章 ま と め .....                         | 105 |
| 参 考 資 料 .....                           | 107 |

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2576号

# 土木研究所資料

## 地下水シミュレーションの手引と 濃尾平野への適用

昭和63年 3 月

建設省土木研究所  
河川部水文研究室

Copyright ©1988 by P. W. R. I.

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

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

# 地下水シミュレーションの手引と 濃尾平野への適用

水文研究室 室長 吉野文雄

研究員 吉谷純一

技官 細谷信夫

国土庁 官房水資源部 水源地域対策課

(元水文研究室 研究員) 寺川 陽

東北地方建設局 能代工事事務所 調査課

(元水文研究室) 田子 秀徳

## 要 旨

濃尾平野に適用した地下水シミュレーションによって地下水シミュレーションの持つ問題点や技術現況を明らかにし、広域地下水シミュレーションを行う現場技術者のための手引書として取りまとめたものである。

キーワード：地下水，地下水シミュレーション，濃尾，手引

## まえがき

地下水は水資源として貴重な役割を果たしているのみならず国土の構成要素として重要な機能を担っている。地下水はその水質が良好で安定していることと同時に利用がしやすいため古くから人類に活用されてきた。しかし地下水利用技術の発達は大規模な揚水を可能としたため、自然界における地下水循環に不均衡を生じ、地盤沈下や地下水位の異常な低下といった国土の構成要素としての地下水に対する障害を発生させている。

このような障害を未然に防ぎ地下水を有効に活用するには地下水の循環を適切に把握し、地下水資源の定量評価を行う必要がある。その手段として地下水の水収支や運動を表現する各種のシミュレーションモデルが提案されてきた。これらのモデルにより地下水の状態を表現するには地下水の賦存する空間の広がりや地層構成、その地下水流動への寄与の仕方といった特性を計測して与える必要がある。しかしこれらの与えるべき条件にはかなりの推定が含まれることが多く、シミュレーションの結果に大きく影響を与えている。

本報告書はこのような観点から現在いくつかの場所で適用されている地下水シミュレーションモデルについて、そのモデルの構成の仕方、モデルへの入力条件の与え方、結果の評価の方法等について取りまとめたものである。特に地下水シミュレーションモデルを濃尾平野に応用し、シミュレーションの技術現況を明らかにし、この経験を地下水シミュレーションの手引としてとりまとめたものである。濃尾平野はわが国でも最も地下水調査が充実して行われている地域であり、観測井も多くかつ地下水帯水層の構造もかなり明らかにされている。したがって、この地域の地下水を対象にシミュレーションを行えば、現在のシミュレーションモデルの持つ問題点を明らかにしうるであろうことを考えて対象地域に選定した。

本研究は建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所の依頼により、土木研究所が地下水研究の一環として行ったものである。特に中心とした問題点は地下水シミュレーションの持つ問題点や技術現況を明確にして、現場技術者のための判断材料にすることであった。そのため技術基準のような形での記述を考えたが、未だ明確に表現しがたい点も多く、手引書として取りまとめることにした。本報告書が地下水シミュレーションを実施する技術者の方々に活用されることを期待したい。

この研究に当たっては地下水シミュレーションの研究に多数の実績を持つ以下の研究者からなる研究会を構成し、議論を尽くした。これらの諸先生方に深く感謝のを表したい。

|          |       |         |
|----------|-------|---------|
| 名古屋大学    | 工学部   | 高木不析教授  |
| 東京大学     | 工学部   | 玉井信行教授  |
| 豊橋技術科学大学 | 建設工学系 | 中村俊六助教授 |
| 埼玉大学     | 工学部   | 渡辺邦夫助教授 |

特に高木教授には研究会の委員長として研究会での議論の取りまとめと本報告書の作成・執筆に御尽力をいただいた。この調査研究は昭和58年に始められ一応の成果は61年に取りまとまっていた

が、その後若干の修正を加え印刷の運びに至ったものである。この間報告書の作成を担当した者は前水文研究室員寺川陽、田子秀徳である。またこの調査研究には株式会社建設技術研究所の方々、特に石井弓夫、伊藤一正氏の協力を得た。記して感謝の意を表したい。

昭和63年 3 月

# 目 次

まえがき

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第1章 概 論 .....                   | 1  |
| 第2章 地下水シミュレーションの基礎 .....        | 2  |
| 2.1 概 説 .....                   | 2  |
| 2.2 解析の対象とする領域 .....            | 3  |
| 2.3 地下水流れの表現 .....              | 4  |
| 2.3.1 流れを規定する方程式 .....          | 4  |
| 2.3.2 シミュレーションの基礎方程式 .....      | 7  |
| 2.4 シミュレーションモデルとその問題点 .....     | 12 |
| 2.4.1 シミュレーションモデル .....         | 12 |
| 2.4.2 計算方法 .....                | 14 |
| 2.4.3 シミュレーションの問題点 .....        | 19 |
| 第3章 広域地下水シミュレーションのための基礎調査 ..... | 29 |
| 3.1 概 説 .....                   | 29 |
| 3.2 濃尾平野を例とした基礎調査 .....         | 31 |
| 3.2.1 自然・社会条件の概要 .....          | 31 |
| 3.2.2 地 形 .....                 | 32 |
| 3.2.3 地 質 .....                 | 34 |
| 3.2.4 地下水賦存量 .....              | 39 |
| 3.2.5 地下水利用状況 .....             | 39 |
| 3.2.6 透水量係数及び貯留係数 .....         | 43 |
| 3.2.7 地下水流動系 .....              | 49 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第4章 濃尾平野での地下水シミュレーションモデルの構築 .....       | 55  |
| 4.1 概説 .....                            | 55  |
| 4.2 モデルの基本構想 .....                      | 56  |
| 4.2.1 目的 .....                          | 56  |
| 4.2.2 解析手法 .....                        | 56  |
| 4.2.3 対象領域の選定 .....                     | 58  |
| 4.2.4 モデルの基本構想 .....                    | 59  |
| 4.3 モデルの構築 .....                        | 59  |
| 4.3.1 数値解析手法 .....                      | 59  |
| 4.3.2 地層のモデル化 .....                     | 63  |
| 4.3.3 境界条件 .....                        | 67  |
| 4.3.4 初期条件 .....                        | 68  |
| 4.3.5 各種パラメータ .....                     | 68  |
| 4.4 シミュレーションの実施と計算結果 .....              | 71  |
| 第5章 地下水シミュレーションにおける問題点の検討及びモデルの改良 ..... | 76  |
| 5.1 概説 .....                            | 76  |
| 5.2 初期条件・境界条件の設定 .....                  | 78  |
| 5.3 揚水量のモデル化について .....                  | 85  |
| 5.4 パラメータの設定について .....                  | 92  |
| 5.5 シミュレーション結果の妥当性 .....                | 98  |
| 第6章 まとめ .....                           | 105 |
| 参考資料 .....                              | 107 |

## 第1章 概 論

地下水は水の循環系の一員を構成し、地表へ降った雨の一部が地下に浸透して形成されたものである。

このように形成される地下水の特徴は、水循環系のなかでも他の水に比べ、数分の一ないし数百分の一に近い循環速度であり、かつ大地をつくる地盤の重要な構成要素となっている。

一方、人間社会の発展のためには、水は最も基本的かつ重要な資源の一つである。そして水資源のなかでも地下水は、質量ともに優れており、古くから人間生活と深い関わりをもってきた。

しかし、地下水に資源としての価値を見出し、それを揚水して利用することは、結果として地下水の動態に大きな変化をもたらし、人間社会に多岐にわたる問題点を発生させることにもなってきた。

今日では、地盤の構成状況の解明及び地下水位の観測が整備され、さらにシミュレーション手法の発達ともあいまって、地下での水の動きがかなり具体的に解明できるようになっているが、実用化する上ではまだ数多くの問題点を残している。

本研究は、被圧地下水を対象に地下水シミュレーションのより一層の具体化をはかるべく、シミュレーションモデルの構築方法及びシミュレーション実施に伴う問題点について検討を行い、今後、広域地下水のシミュレーションを実施する時の参考となるよう、まとめたものである。

本報告書の構成は次のようである。すなわち第2章では、地下水の流れを表現する方法について整理するとともに、これまでにシミュレーションに用いられてきているモデルの特徴を比較した結果をまとめ、第3章、第4章では濃尾平野を例として、広域地下水シミュレーションを行う時の基礎調査の例、及びモデル構築の具体例を示した。第5章では、これらの結果に基づき、地下水シミュレーションにおける問題点を整理し、モデルの改良を行うことによるシミュレーション結果の変化をまとめた。第6章は、これらの成果をとりまとめたものである。また、巻末には第5章における具体的な検討及び濃尾平野準3次元シミュレーションプログラムリストを参考資料として添付した。

## 第2章 地下水シミュレーションの基礎

### 2.1 概説

よく知られているように、地球上で水は循環をしている。その水文学的な水循環にあって、地下水は1つのサブシステムとしての役割を担っており、そのサブシステムの境界を介して、その外界での水の挙動と互いに影響を及ぼし合っている。すなわち、自然界にあって地下水盆もあるいは地下水帯も開いた系となっていて、それを取りまく外界と常に水のやりとりをしている。したがって、地下水の流れ状態を明らかにすることは、実は単に地下水だけでの問題ではなく、水循環の挙動の一部を明らかにすることでもある。

さて、地下水の流れの解析とは、ある具体的な地下水帯内部での地下水の流れの圧力や流速などその物理量の特性、場所的、時間的な分布を明らかにすることである。この作業は一般に地下水の流れの基礎方程式を対象とする地下水帯の条件のもとに解くことによって行われる。しかしながら、実際に、具体的な地下水の状態を明らかにすることは、実はあまり容易なことではない。それは、地下で起こっている現象であって直接われわれの眼に触れないからであると言ってもよい。地下水の圧力などの本当の姿をわれわれが知りうるのは、せいぜい観測井のある地点での値にすぎないのである。

さらに、地下水帯が開いた系となっていることも問題の解析を難しくしているし、1つの地下水帯といっても、その具体的な地質状態も十分には知りつくされえないのが実状である。地下水の流れの状態を十分に解析するためにはわれわれの持っている情報はあまりに少ない。

このような多くの困難を含みつつも、古くから地下水については多くの調査がされ、また研究がされてきた。

そして、地下水流れのシミュレーションという言葉が使われるようになって久しい。ある現象を数式で、数値的にあるいは何らかの方法で再現することを総称してシミュレーションと呼んでいる。その場合に対象とする現象は、仮に地下水の問題と限っても、必ずしも何でなければならないと決まっているものではない。ある領域内の地下水の水圧などの場所的時間的分布状態を再現しようというもの、河川の水位変動に対するある地点の水位の応答を再現するもの、降雨に対するある地点の地下水位の反応を見るもの、あるいは、何らかの人為的な工事の地下水流れに及ぼす影響を再現させるもの、さらに、場合によっては、ある地域内部の状態を知って、その周辺よりの流入の状態を再現しようというものなど多種多様のものが考えられる。何らかの基礎的な表現、すなわちモデルでもって、これらの現象を再現しようというものは等しくシミュレーション（広義の意で）と呼んでよいはずである。実際、地下水が対象であってもシミュレーションとしていろいろな扱いが述べられてきた。

しかしながら、地下水のシミュレーション、とりわけ広域地下水のシミュレーションと呼ばれてきたものは、通常は必要な諸条件を与えることによって、ある領域（実は体積）内部の地下水頭などの物理量の場所的時間的分布を再現しようとするものである。ここでは、このよう

な目的で行われる計算を地下水のシミュレーションと呼ぶことにする。

さて、地下水のシミュレーションを上記のように解釈すると、それは地下水についての基礎方程式をしかるべき条件のもとに解くことになる。そこで本章では、地下水の基礎方程式とはどういうものか、どのように取り扱われるか、さらには実際の場合にそれを応用するためにはどのように考え、どこに問題点があり、何に注意すべきかということに焦点を合わせて記すことにする。

## 2.2 解析の対象とする領域

地下水の挙動を扱うに際しては、必ず「ある体積内部の地下水」を問題とする。よくある地域の地下水と言った表現がされるが、それは面的な地域を意味するのではなく、深さ方向にもある広がりを持った体積を意味することを忘れてはならない。

さて、地下水の解析やシミュレーションを行うにあたっては、まずその対象とすべき地下水帯の体積を定めねばならない。その選定には一定の規則がある訳ではない。調査や解析の目的に応じて、必要な体積、そして最も便利な空間的広がり of 体積を設定すればよいのである。かといってどんなものでもよいかというとそうではない。先にも触れたように地下水帯は開いた系であって外界と相互に干渉し合っている。したがって、系（体積）としてどのようなものを選ぼうと、その体積内部での地下水の挙動を解析するためには対象とするその外界との係わり方、すなわちその体積を囲む表面での境界条件が判っていなければならない。言い換えれば、その境界条件が判っているならば、基本的には任意の体積を対象とする領域として選ぶことができるのである。被圧地下水の解析などで、上下の不透水層間の地下水帯全体を扱うのは、実は不透水層と接する所での境界条件が判っているからに他ならない。広域地下水の解析で地下水盆全体を対象とすることが多いのも、地下水盆の内の水が1つの力学系として挙動しているということの他に、その内部と外部とが地質的に異なるために、他の扱いに比べて比較的容易に境界条件を与えやすいからであると言ってもよい。

対象とする体積を定めるということは、具体的には地下水帯の平面的な広がりとその鉛直方向の厚さ等を明らかにすることである。仮に、上下を不透水層で挟まれた被圧帯水層を対象とするとしても、実際の地下では砂礫層や粘土層等が整然とした状態で分布しているわけではなく、種々の性質の異なった地質の地層が3次元的に複雑に分布し、どれだけが一つの帯水層を成しているか、明瞭には判断しにくいのが普通である。これらの複雑な状態を克明に帯水層としてモデル化することも考えられようが、広域的な地下水の挙動を解析する場合には、流れの場所的、時間的なスケールとの関連で、複雑な地下水帯をある程度平均化したり、理想化した形で、対象とする体積が選定され、その地層地質構造も同様な視点で表現されるのである。従って、同じ地域であっても局所的な流れを問題とするときには帯水層内に挟まった粘土層や難透水層の存在等も考慮する必要があることは言うまでもない。

このように、対象とする体積を定めるには、地質、地層とそこを流れる流れの物理的な性質

そして、解析の対象とする時間的、場所的スケールを基礎として判断しなければならないのである。

## 2.3 地下水流れの表現

### 2.3.1 流れを規定する方程式

#### (1) ダルシーの法則

一般に流れの解析のためには運動方程式、連続方程式、そして状態方程式の3者が必要である。これらの方程式が地下水に対してはどのように記述されるか、またその意味は何かを順を追って記してゆこう。

地下水帯内のような多孔質体（透水性物質）内の流れについては有名なダルシーの法則が成立する。この法則は透水性物質内の流れの任意の方向の流速は、ピエゾ水頭（飽和浸透の場合）のその方向の勾配に比例するという形に一般化されている。すなわち、

$$V_s = -k_s \frac{\partial H}{\partial S} \text{-----} (2.1)$$

ここに、 $V_s$  : S方向の流速、 $H$  : ピエゾ水頭、 $k_s$  : S方向の透水係数である。したがって、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の流速 $u$ 、 $v$ 、 $w$ は、

$$u = -k_x \frac{\partial H}{\partial x}, v = -k_y \frac{\partial H}{\partial y}, w = -k_z \frac{\partial H}{\partial z} \text{-----} (2.2)$$

である。

以上の式は流れ（流速、すなわち運動）とそれを起こす駆動力（動水勾配）との関係を与えているものであって、地下水の流れに対しては運動方程式としての役割を果たしている。

ところで、比較的小さな土質資料や砂柱に対して成立するダルシー則が、実際の平野内部で成立するのかどうかというのは大きな問題である。しかしながら、これまでの多くの研究によれば、井戸近辺の地下水の挙動などはダルシー則に基づいた方程式によってかなり精度よく説明されることが知られている。一方、きわめて複雑な地層構造を持つ実際の広域地下水帯では、ダルシー則を否定し、他の法則の有用性を積極的に主張するに足る根拠も乏しい。地層構造、地下水の流れに関する今日の測定精度は、そのような事柄を論議するには不十分なように思われる。地下の地層構造は複雑ではある。しかしながら、広域的な地下水の挙動を扱うときには、そのような複雑な流れをも平均化した型式で、簡単、実用的かつ美しいダルシー則が適用されているのである。したがって、実際には地下の流れの場の不斉が、広域的な扱いでの透水係数や貯留係数などのパラメータに大きな影響を及ぼしていることは少なくない。

このように、実際には地下には大小さまざまな亀裂や空洞もありうるだろう。そのよう

な場ではダルシー則とは違った形式の流れもありうるはずである。そして、その局所的な流れはダルシー則では説明・表現しえないであろう。あるいは、仮にダルシー則が成立しても実際には透水性の高い場や低い場が混在している。これを平均的に扱うと、平均流の流れと実際の流れの特性の間に大きな差違が現れ、平均的な扱いが実際のもう少し小さいスケールの流れを代表しえないことも少なくない。言いかえれば、地下水流の扱いでは、対象とするスケールをしっかりと定めたいうで議論することが肝要で、それを怠ると場合によっては地下水の流れについて誤った認識や判断をする危険性がある。

## (2) 連続方程式

連続方程式は質量の保存則で地下水帯内に一つの砂層体積を考えると、ある一定時間に周辺からこの体積内部に流入する質量とそこから流出する質量の差が、その体積内部に貯留される質量に等しいことを記述するものである。

ところで、あるかぎられた間隙に相対的に多くの質量の水を貯留させるには、水密度の増加が必要であり、そのため圧力上昇とそれによる間隙体積の増加、砂質体積の増加が起こっている。したがって連続方程式を記述するに際しては、これらの効果を考えなければならない。

こうして水の状態方程式の助けをもとに  $\rho \sim \rho_0$  の場合には

$$\theta \rho \left( \beta + \frac{\alpha}{\theta} \right) \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} \quad (2.3)$$

が得られる。これが砂層及び水の圧縮性を考慮した3次元の連続方程式であって飽和浸透流を対象としたものである。ここに、 $\theta$  : 間隙率、 $u, v, w$  :  $x, y, z$ 、方向のダルシー流速、 $\alpha$  : 砂層の鉛直方向の圧縮率、 $\beta$  : 水の圧縮率である。

上の連続方程式がどのようにしてえられるかを記しておこう。図2-1に示す微小な体積要素を考えると、単位時間にこの体積  $\delta V$  へ周辺より流入する水の質量と、この体積より流出する質量の差は、この体積内部の水質量  $\delta M = \rho \theta \delta x \delta y \delta z$  の単位時間あたりの増加に等しい。すなわち、

$$\frac{\partial (\rho \theta \delta x \delta y \delta z)}{\partial t} = - \left\{ \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} \right\} \delta x \delta y \delta z \quad (ア)$$

である。ただし、 $\rho$  : 水の密度、 $u, v, w$  : 後に説明するダルシー流速の  $x, y, z$  成分、 $\theta$  : 砂層の体積間隙率である。

ところで、一般に砂層内の  $z = z$  のある面では、水の圧力と砂粒子間に作用する砂の有効応力 ( $z$  成分)  $\sigma_z$  の両者でその面上部の砂層を支えている。したがって、上部の荷重に変化がなければ、この両者の和は一定である。

$$p + \sigma_z = \text{const.} \quad (イ)$$

一定体積の砂層に多量の水の質量が貯えられると圧力  $p$  が上昇し、それに応じて  $\sigma_z$  が

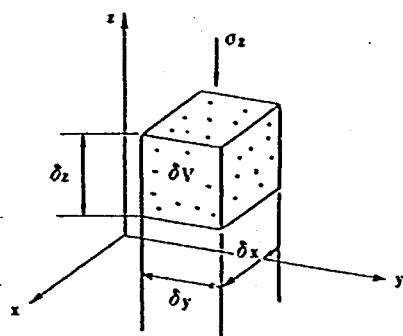


図 2 - 1

減少する。砂の有効応力  $\sigma_z$  の減少は砂層の圧縮をもたらすが、いま考えている砂層体積  $\delta V$  が  $z$  方向のみに圧縮可能 ( $\delta z$  は変化するが  $\delta x$ ,  $\delta y$  は一定) と考えると、一般に、

$$\frac{d(\delta z)}{\delta z} = -\alpha \cdot d\sigma_z \quad \text{あるいは}$$

$$\frac{\partial(\delta z)}{\partial t} = -\alpha \cdot \delta z \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad \text{----- (ウ)}$$

が成立する。一方、圧力の上昇に伴って水の密度も変化する。基準となる密度を  $\rho_0$  とすると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \beta \rho_0 \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{----- (エ)}$$

が成立する。この式は水の状態方程式である。さらに、 $\delta V$  中の砂の実質部分の体積は変化しない、すなわち、

$$(1 - \theta) \delta x \delta y \delta z = \text{const.} \quad \text{----- (オ)}$$

であることを考慮すると、連続方程式 (ア) は、

$$(\theta \beta \rho_0 + \alpha \rho) \frac{\partial p}{\partial t} = - \left\{ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right\} \quad \text{----- (カ)}$$

となる。ここで  $\rho = \rho_0$  としたのが式(2.3)である。

次にピエゾ水頭  $H$  は、その位置 (基準水面よりの鉛直高)  $z$  と圧力  $p$  から、

$$H = z + \frac{p}{\rho g} \quad \text{----- (2.4)}$$

の関係にあるから、上式はまた、

$$S_0 \frac{\partial H}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad \text{----- (2.5)}$$

$$S_0 = \theta \rho^2 g \left( \beta + \frac{\alpha}{\theta} \right) \quad \text{----- (2.6)}$$

とも、書かれる。水及び砂の圧縮性が無視しうる場合には、 $\alpha \sim 0$ 、 $\beta \sim 0$ であるから、この式は、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{----- (2.7)}$$

となる。

上の式(2.1)、式(2.2)の流速  $V_s$  は砂層内のある断面を通じて流れる流量  $Q$  をその方向に垂直な流れの断面積  $A$  (したがって、砂実質部分の占める面積を含んだ面積) で除した  $V_s = Q/A$  と定義される。一方、水の実質的な流速は小さい間隙内部の流れのそれであって、 $V_s$  とは違っている。これらを区別するために、通常前者を filter velocity (ダルシー流速, 流量流速)、後者を pore velocity (間隙流速) などと呼んでいる。したがって、ダルシー則、式(2.1) は砂粒子の占める面積をも含めた断面を平均的に流れる仮想の流体 (ダルシー物体) に対して成立す式であることを注意しておくべきであろう。

水の実質部分、すなわち個々の間隙内の流れは粘性の卓越した流れであって、これについてはネーピア・ストークスの方程式が成立する。ところが、非常に多くのこのような間隙内の流れが互いに干渉し、かつ平均化されることによって、仮想流体 (ダルシー流体) としては、外見上非常に美しいダルシー則が現れ、流れはいわゆるポテンシャル流れ (粘性のない渦なし流れ) としての特性を持つのである。物理的には同じ現象でありながら、スケールの違いによって表に現れる性質が違ってくる一つの例である。個々の間隙内の流れの力学を総合することによって、理論的にダルシー則を導こうとの試み、上記の二つのスケールを関連づけようとの試みは数多いが、今日のところまだ確立はされていない。

ダルシー則は、当初砂柱内部の定常で、かつ飽和浸透の流れを対象として見出されたものであるが、その後一般的な数学的表示に、さらには不飽和浸透の場合にと拡張一般化がされてきた。ダルシー則は流速がエネルギー (ピエゾ水頭は流体が単位当たり持つ位置エネルギーと圧力エネルギーの和である) の勾配に比例する線型構造をしており、レイノルズ数が 1~10 程度の層流状態について成立する。この成立範囲外ではどうか、より精度の高い表現はないかと検討され今日では、流速とエネルギー勾配の関係式として種々の法則が提案されていることを付記しておこう。

### 2.3.2 シミュレーションの基礎方程式

#### (1) 3次元基礎方程式

一般に流れを解析し、あるいはシミュレートするためには、連続方程式、状態方程式と運動方程式が必要であって、前二者はまとめて(2.5)式の形に記された。一方、地下水流の運動方程式としては、運動 (流速) とそれを起こす駆動力としての力学量、すなわち動水勾配 (ピエゾ水頭の勾配、エネルギー勾配に相当) との関係を与えるものとして、通常ダルシー則が用いられる。

地下水の流れを3次元的に取り扱う場合には、(2.2)式および(2.5)式より、基礎方程式として、

$$s_0 \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad \text{----- (2.8)}$$

が導かれる。さらに、水の密度が一定かあるいはその場所的变化が十分小さいなら、この式は、

$$s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad \text{----- (2.9)}$$

と記される。ただし、

$$s = s_0 / \rho$$

であって、この  $s$  も  $s_0$  と同様、比貯留係数と呼んでいる。

(2.8)式あるいは(2.9)式が本来の基礎方程式であって、これを対象とする地下水帯体積に積分すれば、ピエゾ水頭  $H$  の場所的・時間的变化を求めることができる。その場合、本来は揚水井よりの揚水量は境界条件として扱うべきものである。しかしながら、数多くの一本一本の井戸についてこの様な取扱いをする煩雑さを避けるため、また広域地下水の解析では、地下水の平均的な挙動を把えることを目的としているので、揚水が地下水帯のある範囲内で平均的かつ一様に汲み上げられている、すなわち個々の微小体積で単位体積・単位時間あたりに  $W'$  ( $< 0$ ) という水の発生が起こっていると考えられることが多い。

このような考えに立ったのが、(2.9)式に対応してよく見られる記述

$$s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W' \quad \text{----- (2.10)}$$

である。

## (2) 2次元基礎方程式

地下水の流れにあって、ある1つの方向（たとえば  $z$  方向：簡単のためこれを鉛直方向としておこう）の流速成分が全くない場合には、3次元方程式(2.9)において右辺第3項を削除したものが、そのまま  $z$  方向単位幅についての2次元の基礎方程式となる。

ところで、通常の地下水帯（被圧地下水帯を念頭においておこう）では、その  $z$  方向の厚さも場所的に違えば、 $z$  方向の流れも存在する。このような場合でも実は2次元的な解析をすることができる。

地下水の流れを解く、すなわち前述の3次元の方程式を解くということは、(2.9)式あるいは(2.10)式を地下水帯の対象とする体積について積分することである。その積分は前項で触れたように直接3次元の式を積分することもあれば、「(2.9)あるいは(2.10)式をある1つの方向（ここではZ方向）に帯水層について積分した形式で基礎方程式を記し直し（これらが2次元の方程式と呼ばれる）、この方程式をさらに残る2つのx、y方向に面積積分」して、結局(2.9)式の体積分を行うという手法をとることがある。このような手法が2次元解析と言われるものである。

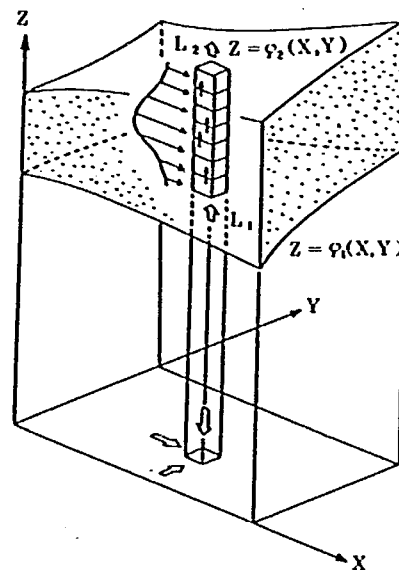


図 2-2

ただ、Z方向に3次元方程式を積分する過程で、水理量のZ方向の場所的变化は消え、得られた2次元方程式では、水理量のZ方向の総計として扱われることになる。この扱いではZ方向の流れがあろうとなかろうと基本的には問題はない。しかし実際にはZ方向の流れについてはそれが無視しえる程度であるか、あるいは無視しえなくともその内容を議論する必要のない場合に用いられる手法であって、水平2次元の基礎方程式は後に記す(2.16)式で与えられる。

2次元解析法を理解するために、3次元方程式より水平2次元の方程式を導いておこう。

いま、その上部、下部が $Z = \phi_2(x, y)$ 、 $Z = \phi_1(x, y)$ 、の難透水面で挟まれた被圧水帯を考えよう。(2.9)式をこの地下水帯についてZ方向に $\phi_2$ より $\phi_1$ まで積分すると、

$$\int_{\phi_1}^{\phi_2} S \frac{\partial H}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\phi_1}^{\phi_2} k_x \frac{\partial H}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\phi_1}^{\phi_2} k_y \frac{\partial H}{\partial y} dz + L_1 - L_2 \quad (2.11)$$

となる。ここに、

$$L_i = -k_z \left. \frac{\partial H}{\partial z} \right|_{\phi_i} + k_x \left. \frac{\partial H}{\partial x} \right|_{\phi_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} + k_y \left. \frac{\partial H}{\partial y} \right|_{\phi_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \quad (i = 1, 2) \quad (2.12)$$

となる。上式中 $L_1$ は $Z = \phi_1$ 面を通して外部より地下水帯内部へ、 $L_2$ は $Z = \phi_2$ 面を通して地下水帯より外部へと流れる水平単位面積あたりの流量である。すなわち、 $L_1 - L_2$ は水平単位面積あたりの地下水帯への水供給強度 $r$ である。

他方、(2.11)右辺第1項、第2項の積分 $-\int k_x(\partial H/\partial x)dz$ 、 $-\int k_y(\partial H/\partial y)dz$ は、この地下水帯の $\phi_1$ より $\phi_2$ までの全厚にわたっての単位幅あたりの $x$ 、 $y$ 方向の流量である。したがって、 $k_x$ 、 $k_y$ に $z$ 方向に平均的な値 $\bar{k}_x$ 、 $\bar{k}_y$ を考え、さらに、 $(\partial H/\partial x)$ 、 $(\partial H/\partial y)$ についても平均的な量を考えると、

$$\frac{1}{\phi_2 - \phi_1} \int_{\phi_1}^{\phi_2} -k_x \frac{\partial H}{\partial x} dz = -\bar{k}_x \frac{\partial H}{\partial x} \quad \text{-----} (2.13)$$

と記すことができる。左辺などについても同様な扱いをすると、 $\bar{H}$ 、 $\bar{k}_x$ ………を改めて $H$ 、 $k_x$ ………と記し直して、

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + r \quad \text{-----} (2.14)$$

がえられる。ただし平均的に、

$$\begin{aligned} S &= s \cdot b, \quad T_x = k_x \cdot b, \quad T_y = k_y \cdot b, \\ b &= \phi_2 - \phi_1, \quad r = L_1 - L_2 \end{aligned} \quad \text{-----} (2.15)$$

と記されている。上に導かれた(2.14)式が、広域地下水の水平2次元解析に用いられる基礎方程式である。また、地下水の揚水量についても平均的に扱う際には、

$$\int_{\phi_1}^{\phi_2} w dz = w''$$

として、先出(2.10)式と同様に(2.15)式右辺に $W''$ を付加した扱いもされる。すなわち、

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + r + w'' \quad \text{-----} (2.16)$$

なお、上式中、 $S$ は貯留係数、 $T$ は透水量係数と呼ばれる。

被圧地下水の鉛直2次元の方程式についても全く同じ考え方で導かれる。すなわち、対象とする体積の側面を $y = \phi_1(x, y)$ 、 $y = \phi_2(x, z)$ と区切られた被圧地下水層を考えると、

$$\begin{aligned} \int_{\phi_1}^{\phi_2} S_s \frac{\partial H}{\partial t} dy &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{\phi_1}^{\phi_2} k_x \frac{\partial H}{\partial x} dy \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \int_{\phi_1}^{\phi_2} k_z \frac{\partial H}{\partial z} dy + L_2' - L_1' \end{aligned} \quad \text{-----} (2.17)$$

$$L_2' = k_y \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{\phi_2} + k_x \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{\phi_2} \cdot \frac{\partial \phi_2}{\partial x} - k_z \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{\phi_2} \cdot \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \quad \text{-----} (2.18)$$

$$L_1' = k_y \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{\phi_1} + k_x \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{\phi_1} \cdot \frac{\partial \phi_1}{\partial x} - k_z \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{\phi_1} \cdot \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \quad \text{-----} (2.19)$$

が得られる。 $L_2' - L_1'$  は前項の  $L_2$ 、 $L_1$  と同様に、 $y = \phi_1(x, z)$ 、 $y = \phi_2(x, y)$  の面を通じて、鉛直単位面積当たりの地下水帯への水平方向（ $y$  方向）の水供給強度  $r$  である。

したがって、前と同様に  $y$  方向の平均量を用いると、鉛直 2 次元の基礎方程式は、

$$(\phi_2(x, z) - \phi_1(x, z)) \cdot Ss \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + r(x, z) \quad \text{----- (2.20)}$$

となり、 $T_x$ 、 $T_z$  は (2.15) 式と同様な量である。

$S = (\phi_2(x, z) - \phi_1(x, z)) \cdot Ss$  とすると、

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + r(x, z) \quad \text{----- (2.21)}$$

となる。

### (3) 1次元基礎方程式

1次元解析と呼ばれるものも考え方としては2次元の場合と同じであって、3次元の基礎方程式をたとえば水平方向、 $x$ 、 $y$  方向に面で積分を完了した形式に書き改めた  $z$  方向の方程式（これが1次元の基礎方程式と呼ばれる）を、最後に諸条件を考慮して  $z$  について鉛直方向に積分することによって、対象体積での積分を行う手法である。

しかしながら、地下水の流れで行なわれている取り扱いでは、多くの場合（上の例では）水平方向の流れがほとんど無視するという前提に立って水平面単位面積あたりについての議論がされている。このような見方をすれば、3次元の基礎方程式においてたとえば  $x$ 、 $y$  方向の諸量  $u$ 、 $v$  をゼロとした式、すなわち、

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad \text{----- (2.22)}$$

が、 $z$  方向の1次元の基礎方程式となる。

### (4) 初期条件と境界条件

3次元解析であれ、2次元解析であれ、基本的には以上述べてきた基礎方程式を対象体積と時間について積分することによって地下水のシミュレーションが行われるが、その際に必要となるのが初期条件と境界条件である。

初期条件は文字通りシミュレーションを行う初期のピエゾ水頭の場所的分布である。シミュレーションの初期時刻の分布はその時点での観測井での値を用いるべきであるが、初期値はいくつかの観測点における値を基礎として、対象とする体積、あるいは（2次元解析の場合には）対象とする面積での分布として与えなければならない。この変換について

もいくつかの工夫、試みがされている。

地下水帯の対象とする体積とそれを囲む外界との交わり方を与えるのが境界条件である。  
この境界条件は、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水位指定} \\ \text{流量指定} \end{array} \right.$$

二者が基本となる。境界におけるこれらいずれかの時間的变化が具体的に観測され、判っている場合には問題ないが、普通は十分に判っていない場合が多い。

これらの初期条件、境界条件についても注意すべきことが多いが、それらについては別項で具体例を通じて説明することにする。

## 2.4 シミュレーションモデルとその問題点

### 2.4.1 シミュレーション

地下水の挙動は、2.3に述べた基礎方程式によって記述される。したがって、この方程式を対象とする地下水帯あるいは地下水盆の体積と時間について積分することによって地下水の挙動が求められることになる。以下で取り扱うシミュレーションというのも、この方程式を積分し、計算機の中で地下水の挙動を実現させることに他ならない。

さて、実際の地下水帯を対象として方程式を積分する手法には3次元、2次元、1次元があり、それぞれ解析の目的や解析上の諸条件に応じて選択される。

#### (1) 3次元解析

3次元解析の意義は先に示した3次元流れの基礎方程式を用い、対象とする体積内部の形状を実際に従いできるかぎり忠実にモデル化し、詳細な地下水の挙動を把握することである。

しかし、実際には地下の複雑な地層構造や地下水の流れに関する今日の測定精度がいまだ不十分なものと思われ、忠実にモデル化することが困難な状況にあるとともに、たとえこのことが可能な領域を対象とする場合でも、広域的な検討を行う場合に、水平、鉛直方向の地層構造に見合ったモデル化を行えば、膨大な分割個数を取り扱うことになり、長大な演算処理時間が必要で、実用化する上での難点もある。

#### (2) 2次元解析

地下の複雑な地層構造を忠実にモデル化することが困難なこと、及び広域的問題を対象とし、かつ、流れの2次元性が卓越すると判断できる場合には、演算処理時間の問題もあり、3次元流れを2次元流れに近似して解析することがある。

この場合には対象とする問題の性質に基づき、水平方向の流れに着目した水平2次元流れを対象とするものと、鉛直方向の流れに着目した鉛直2次元流れを対象とするものがある。

3次元流れを2次元流れに近似するには、ある体積要素の平均量に着目して構成される

3次元の基礎方程式を、水平2次元流れの場合は鉛直成分について、鉛直2次元流れの場合は水平成分の一方を積分することによりなされる。

ここで、ある成分の値を積分することの意味は、本来3次元の挙動を示す地下水の流れについても、ある成分の値については、一定値と見なしても、全体の挙動を十分な精度で表現しうると仮定することである。

### (3) 1次元解析

2次元解析で対象とした2方向のなかから、さらにもう一方の成分を積分すると1次元解析の基本式となる。

1次元解析は2点間の水頭差に基づき、その間の地下水流動を把握するものであり、対象とする領域の地層地質は等方均一性が保たれているものと仮定している。

1次元解析が用いられている例としては、加圧層における漏水量の計算があり、加圧層上下の帯水層における水頭値をもとに、鉛直方向の地下水流動を解析し、漏水量を求めるのに用いられている。

このような考えにもとづき、これまで、地下水のシミュレーションに用いられてきたモデルには、

- ① 3次元モデル
- ② 水平2次元モデル
- ③ 鉛直2次元モデル
- ④ 準3次元モデル
- ⑤ 鉛直1次元モデル

等があり、それぞれの特性は表2-1のようである。

表2-1 モデルの特性

| 特 性             | 3次元モデル                                                               | 水平2次元モデル                                                              | 鉛直2次元モデル                                                                                | 準3次元モデル                                                              | 鉛直1次元モデル                                 |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 理 論             | 3次元にダルシーの法則と水収支関係が適用されている。                                           | 地下水の水平方向の流動に着目し、ダルシーの法則と水収支関係を適用している。                                 | 地下水の断面方向の流動に着目し、ダルシーの法則と水収支関係を適用している。                                                   | 加圧層においては鉛直方向の流れ、被圧層水層においては水平方向の流れに着目してダルシーの法則と水収支関係を適用している。          | 鉛直方向の流動にダルシーの法則と水収支関係を適用している。            |
| 適用上の留意点         | あらゆる地盤条件に適用が可能であるが、そのための土質データが整備されていることが必要である。                       | 地下水の鉛直方向の流動が一定あるいは無視できる層が単層の場合に適用できる。                                 | 地下水の水平方向の流動が一定あるいは無視できる場合に適用できる。                                                        | 層区分が明確な場合3次元流動がシミュレートできる。                                            | 横方向の流動が一定あるいは無視し得る場合のみ適用できる。             |
| 必要データ           | 層別地下水位<br>土質、地層分類<br>層厚<br>透水係数<br>貯留係数<br>鉛直漏水量<br>層別漏水量<br>粘土層の特性値 | 地下水位<br>土質分類<br>層厚<br>透水係数<br>貯留係数<br>鉛直漏水量<br>層別漏水量                  | 層別地下水位<br>土質、地層分類<br>層厚<br>透水係数<br>貯留係数<br>鉛直漏水量<br>層別漏水量                               | 層別地下水位<br>土質、地層分類<br>層厚<br>透水係数<br>貯留係数<br>鉛直漏水量<br>層別漏水量<br>粘土層の特性値 | 地下水位<br>鉛直透水係数<br>貯留係数<br>鉛直漏水量<br>層別漏水量 |
| 計算結果の信頼性及び予測可能性 | 地下水運動を最も良く類似するが、モデルが複雑になり、計算機容量の制約をうける。将来漏水量を入力すれば水位変化及び地盤沈下量を推定できる。 | 土質定数の精度及び境界条件に支配される土質定数の内そう検定には多数のデータを必要とする。将来漏水量を入力すれば地下水位の変化が予測できる。 | 多層ストレナー井の層別漏水量配分等に課題を残しているが、地下水の浸透機構の把握に適する。将来漏水量を入力すれば層別水位変化及び圧密理論を適用することで地盤沈下量を推定できる。 | 将来漏水量を入力すれば水位変化の予測ができる。圧密理論を適用することで地盤沈下量を推定できる。                      | 土質定数の精度による。将来漏水量を入力すれば地下水位の変化が予測できる。     |
| 境界条件            | 水位あるいは流量を与えるが、両者の関係に矛盾及び異常値を生じさせないため、できるだけ固定値が与えられる地点を境界とする。         |                                                                       |                                                                                         |                                                                      |                                          |

#### 2.4.2 計算手法

地下水運動の基本方程式は、前述のように例えば3次元の場合、次式で表わされる。

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad \text{--- (2.23)}$$

計算によって地下水の挙動を解析する場合には、この基本方程式に境界条件、定数等の内部条件を与えて解くことになる。

比較的単純な境界・内部条件のもとでは微分方程式を直接解く理論解法によって解が得られ、多くの地下水流に関する計算公式が示されている。

計算公式の利用は手順が簡単で応用面も広く、一般的な地下水流の特性を把握するのに好都合である。しかし、境界条件等が複雑になってくると複素関数論による等角写像やホドグラフ法等の数学的手法が駆使されねばならず計算が煩雑になり、特に現地調査に基づく解析に際してなお解けないケースが多い。

数値解法は、一般に境界条件や初期条件によって適用が制限されることはなく、非定常地下水流、及び3次元問題の解析も可能である。これらは最近のコンピュータの出現と発展に伴って、地下水の解析に非常に多く用いられるようになった。

微分方程式の数値解法としては、主に差分法、有限要素法が用いられている。それぞれの解法を次項以下に記述する。

## (1) 差分解法

流体に関する微分方程式の数値解法としては、差分法が代表的である。差分法においては計算領域を正方形または長方形に分割し、偏微分方程式を差分によって近似して解く。

### ◎ 差分近似式

関数  $f$  及びその導関数が  $x$  の 1 値の有限連続関数であるとき、 $x$  についてプラス方向のテーラー展開を行い 2 次以上の項を無視すると、前進差分近似式と呼ばれる次式が得られる。

$$\frac{df}{dx} \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad \text{-----} \quad (2.24)$$

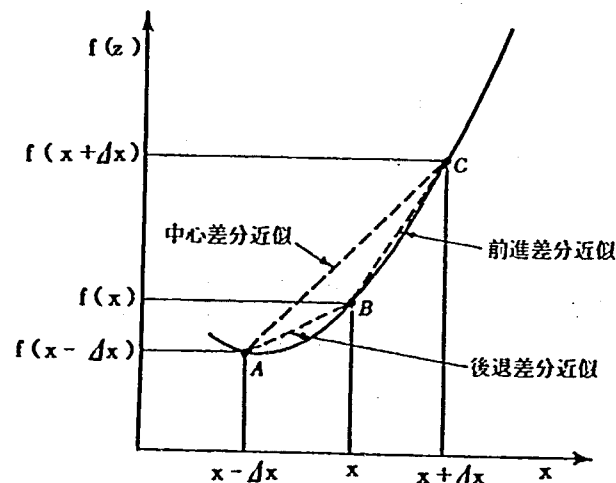
同様に、 $f(x)$  を  $x$  について負の方向にテーラー展開し、2 次以上の項を無視すると、後退差分近似式と呼ばれる次式が得られる。

$$\frac{df}{dx} \approx \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \text{-----} \quad (2.25)$$

また、(2.35) 式、(3.36) 式から、中心差分近似式と呼ばれる次式が得られる。

$$\frac{df}{dz} \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2 \Delta x} \quad \text{-----} \quad (2.26)$$

以上の 3 つの差分近似式を図 2-3 に示す。



B 点における中心差分，前進差分，後退差分を表わす

図 2-3 差分近似式の図解

これらと同様にして、2 次の導関数の近似式が求められる。この際の打ち切り誤差は  $(\Delta x)^2$  の程度である。なお、打ち切り誤差とは（偏微分方程式の厳密解）－（差分近似式の厳密解）をいう。

$$\frac{d^2 f}{dx^2} \approx \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad \text{-----} \quad (2.27)$$

地下水シミュレーションで必要となる差分近似式は以上のとおりであり、現在のところ 3 次元以上の項は無視しても実用上問題はないとされている。

いま、被圧帯水層における非定常流を記述する次の式で、 $S$ と $T$ は一定として考える。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{----- (2.28)}$$

図2-4に示すような  $x$ - $y$  平面を差分格子に区分する。

ここに、 $i, j$  はそれぞれ  $x, y$  方向の格子点番号であり、 $\Delta x, \Delta y$  は  $x, y$  方向の格子点間の距離である。

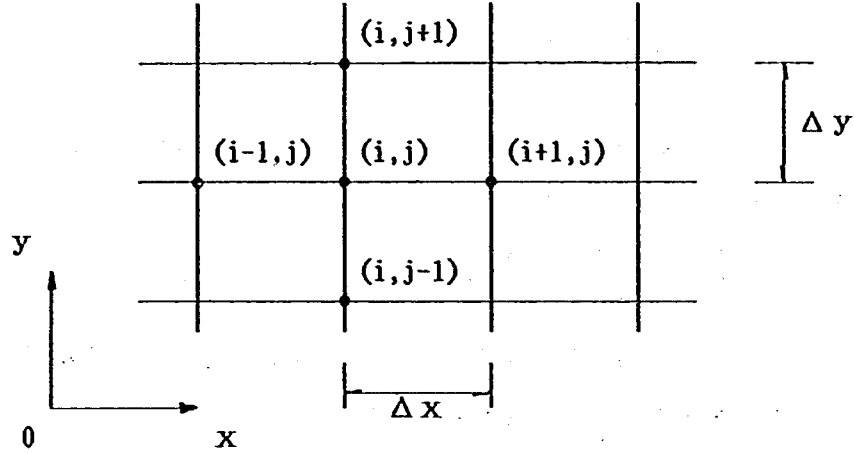


図2-4 差分法における格子区分

また、 $k$  を時間ステップ、 $\Delta t$  を時間の刻み幅とすると、(2.28)式の偏微分方程式は二つの有限差分スキーム（法）によってシミュレートすることができる。

① 前進差分においては、一定の  $\Delta x, \Delta y$  の場合には、

$$\frac{h_{i-1,j}^k - 2h_{i,j}^k + h_{i+1,j}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j-1}^k - 2h_{i,j}^k + h_{i,j+1}^k}{(\Delta y)^2} = \frac{S}{T} \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} \quad \text{--- (2.29)}$$

ここで、各格子点の時間ステップ  $k$  における水頭値  $h_{i,j}^k$  がわかっていれば、時刻  $\Delta t$  経過したときの水頭値  $h_{i,j}^{k+1}$  を得ることができる。このように直接5つの既知の格子点の値  $h_{i-1,j}^k, h_{i,j}^k, h_{i+1,j}^k, h_{i,j-1}^k, h_{i,j+1}^k$  から、一つの未知の格子点の値  $h_{i,j}^{k+1}$  を得る方法を陽解法という。

② 後退差を用いれば  $\Delta x, \Delta y$  は一定として次式が得られる。

$$\frac{h_{i-1,j}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i+1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j-1}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i,j+1}^{k+1}}{(\Delta y)^2} = \frac{S}{T} \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} \quad \text{----- (2.30)}$$

ここでは、時間ステップ  $k$  における  $h_{i,j}^k$  が既知であれば、次の5つの既知項を含む

式となる。

$$h_{i-1,j}^{k+1}, h_{i,j}^{k+1}, h_{i+1,j}^{k+1}, h_{i,j-1}^{k+1}, h_{i,j+1}^{k+1} \quad \text{-----} \quad (2.31)$$

この解には、未知項の数に等しい数の方程式が要求され、各格子点における新しい  $h_{i,j}^k$  を得て、これらの連立方程式を解かなければならない。

そこでこの方程式(2.30)は陽的ではないため、この方法を陰解法と呼んでいる。陰解法と陽解法を比較すると、陰解法では多くの方程式を解かなければならないという苦勞はあるが、時間の刻み幅  $\Delta t$  の大きさにかかわらず無条件に安定であるという長所があり、一方陽解法では、 $\Delta x$  の値がかなり小さくしなければいけないという短所をもっている。

差分解法の計算自体は、陽解法を用いると単純な計算になり、陰解法でも三重対角行列など比較的簡単に解の求まるマトリックスとなる。

## (2) 有限要素解法

有限要素解法の特徴は、要素の区分方法が三角形、四角形等任意でよく、従って境界に適合した要素分割、条件設定ができるので汎用性が高い。

この方法では、対象が微分式から積分式へと変換され、積分は領域内で細分された要素について数値積分される。

有限要素法の適用は変分法による汎関数の最小化に基づいている。最小解の唯一性を仮定して、全領域を細かな部分領域、あるいは要素に分割する。要素分割により、関数は各要素内で領域毎に有限個のパラメータによって定義される。

一例として「新版 地下水調査法」(山本荘毅著)から  $R$  の領域で次の問題の解法を抜粋し紹介する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial h}{\partial y} \right) = f(x,y) \quad \text{-----} \quad (2.32)$$

この問題を変分公式化するためには、次の汎関数の最小化を行う。

$$I(h) = \iint_R \left\{ \frac{1}{2} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 \right] + f h \right\} dx dy \quad \text{-----} \quad (2.33)$$

領域  $R$  は図 2-5 で示すように三角形の要素(他の形でもよい)に分割される要素内における関数  $h$  をその節点の値によって定義する。

それぞれの要素について水頭が次の一次式によって各節点の座標値で表されとする。

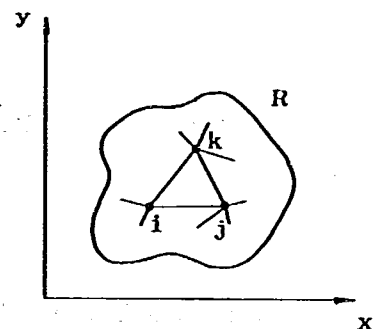


図 2-5 要素の取り方

$$h = Ax + By + C \quad \text{-----} \quad (2.34)$$

節点*i*, *j*, *k*上の*h*の値を上式で表すと、

$$\left. \begin{aligned} h_i &= Ax_i + By_i + C \\ h_j &= Ax_j + By_j + C \\ h_k &= Ax_k + By_k + C \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.35)$$

これから*A*、*B*、*C*を求めて(2.34)式に代入すると次式をうる。

$$\text{ただし、} h = N_i h_i + N_j h_j + N_k h_k$$

$$\begin{cases} N_i = (a_i + b_i x + c_i y) / 2\Delta \\ N_j = (a_j + b_j x + c_j y) / 2\Delta \\ N_k = (a_k + b_k x + c_k y) / 2\Delta \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_i = y_j - y_k \\ a_j = y_k - y_i \\ a_k = y_i - y_j \end{cases} \quad \begin{cases} b_i = x_k - x_j \\ b_j = x_i - x_k \\ b_k = x_j - x_i \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_i = x_j y_k - x_k y_j \\ c_j = x_k y_i - x_i y_k \\ c_k = x_i y_j - x_j y_i \end{cases} \quad 2\Delta = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad \text{-----} \quad (2.36)$$

(2.36)式を(2.33)式に代入して汎関数の最小化のため $\partial I / \partial h = 0$ , (*I*=*i*, *j*, *k*)とすると、ある要素について次の式が導かれる。

$$\{H\}^e \cdot \{h\}^e + \{F\}^e = 0 \quad \text{-----} \quad (2.37)$$

ここで、

$$\{H\}^e = \frac{K}{4\Delta} \begin{bmatrix} a_i a_i & a_i a_j & a_i a_k \\ a_j a_i & a_j a_j & a_j a_k \\ a_k a_i & a_k a_j & a_k a_k \end{bmatrix} + \frac{K}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_k \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_k \\ b_k b_i & b_k b_j & b_k b_k \end{bmatrix}$$

$$\{F\}^e = \frac{f(x, y) \Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(2.37)式を領域全要素について足し合わせると、

$$\{H\} \{h\} + \{F\} = 0 \quad \text{-----} \quad (2.38)$$

(2.38)式を連立方程式として解けば各接点での*h*が求められる。

有限要素法の利点を列挙すれば次のようになる。

- (a) 境界条件の取り扱いについて、差分法の場合、特別な取り扱いが必要であるが、有限要素法の場合、それを必要としない。
  - (b) 有限要素法では、要素の大きさは変化してもよいので、変化の大きい（早い）領域では小さい要素、変化の小さい（おそい）領域では大きい要素を利用することが容易である。
  - (c) 境界面の形（不連続性）は有限要素法では制限されない。
  - (d) 異質及び非等方系では有限要素法のほうが適用しやすい。
- また、不利な点として次のことが挙げられる。
- (e) 有限要素法ではマトリックス演算によって解くことになり、非線型項のために繰り返し計算が必要となり、一般に差分法に比較すると計算時間がかかる。
  - (f) 水深等、計算に必要な入力データは差分法で規則的格子を用いる場合には等深線図等から格子点の水深を読むことになるが、有限要素法の場合には水深の他に各要素の座標値(x,y)も読み取ることになり、かなりの手間となる。

#### 2.4.3 シミュレーションの問題点

シミュレーションとは、現実のシステムの動態を調べるために基本的要素を抽出し、現実の状況を反映するモデルを設定し、そのモデルで疑似実験を行う手法である。広域地下水解析では、地下水帯、地下水の流れについてモデル化が必要であり、モデルにはその対象とするシステムの特徴、すなわち透水係数、貯留係数、層厚等が組み込まれる。実際のシミュレーションではこのモデルに入力を与えたとき、そのモデルがどのような応答をするのかをみるのであるが、その結果が必ずしも現実とは一致するものではなく、一致するまでモデルの入力値等を試行錯誤で定めることになる。

こうして、過去の多くのデータを全体として満足させるような特性値が定まったら、この特性が系の基本的な特性量であるとした上で、将来予想される入力を与えれば、それに対するモデルの反応が将来の状態を表しているということになる。

実際のシミュレーションをこのような手順に従い実施する上での問題点を抽出すると次のようになる。

○まず第一に、対象とすべき地下水盆としての領域の判断及びモデル化についての問題があり、地下で起きているであろう流れの特性をいかに正しく把握することができるかがあげられる。

このことは、具体的に述べると、いかにして地点地点で得られる地形、地質等の特性をもとに、対象領域の地下水帯や地下水脈そして流れの特性を理解できるか、という事であり、場合によっては、広域的な扱いをするときでも地下水について誤った認識をする危険性があることを示している。

したがって、地形、地質に関する十分な調査がこの問題点に対する対応策となり、また、シミュレーションの精度を決定づける重要な諸元ともなる。

○第二には、基本式に含まれる透水係数、貯留係数、層厚等の各種パラメータをいかに設定すべきかがあげられる。そのためには、地質調査や揚水試験等が一つの有力な情報源となるが、実際のシミュレーションにあたっては、対象とする積分領域のスケールに従い、試行錯誤により決定せざるを得ない。

○第三には、初期条件に関する事項である。揚水量をも含め、いかにしてモデル化された領域の初期時刻の特性を正しく設定しうるかがあげられる。特に、揚水量に関しては、各揚水井の大部分が多層取水をしていることから、シミュレーションの実施に際しては、各層別の揚水量をどのように推定するかが結果の精度を大きく左右するものとなる。

また、初期条件、境界条件に関しても、水頭値あるいは流量のどちらで設定するにしても合理的な値を設定すべき手法が具体的に得られていない点にある。

○第四には、計算条件に関する事項があげられ、基本式及び対象領域のモデル化、パラメータ、境界条件等を合理的に設定した後、シミュレーションを実施する場合の、計算時間間隔、計算ステップ数と初期条件の関係及び領域モデル化における区間距離等の問題をいかに取り扱うかである。

具体的には、領域をモデル化する場合の区間距離の設定とパラメータの設定値が計算時間間隔に深い関係を持つこと。また、初期条件については基本式を満足する状態で対象領域全体に設定することが困難であり、計算開始後数十ステップまではその影響が含まれることを前提としてシミュレーションを実施しなければならない事等である。

以上の各項目のもつ問題点の内容及び、シミュレーション結果の評価方法についてまとめると、次の通りである。

#### (1) 解析対象領域の取り扱い方法

基礎方程式を解き、水頭分布を求めるということは、基礎方程式を対象とする地下水帯あるいは、地下水盆の体積と時間について積分することである。それには、まず対象とする体積（積分領域）を定めるとともに、その領域内部の性質を明らかにし、さらに境界条件、初期条件を与える必要がある。

まず、対象とする体積を定めるということは、地下水帯の広がりとその厚さ等を明らかにすることであるが、実際の地下水盆の内部では砂礫層や粘土層等が整然とした状態で分布しているわけではない。地下構造が非常に整然としていると言われる濃尾平野でも、種々の性質の異なった地質の地層が3次元的に複雑に分布し、どれだけがひとつの帯水層を成しているのか、明瞭には判断しにくい。

これらの複雑な状態を克明に帯水層としてモデル化することも考えられるが、広域的な

地下水の挙動を解析するにあたっては、そのようなあまりに微細な議論は無意味である。

そこで通常は、解析の対象とする場所的、時間的なスケールとの関連で複雑な地下水帯をある程度平均化したり、理想化して取り扱われる。従って、同じ地域であっても局所的な流れを問題とするときには、帯水層内に挟まった粘土層や難透水層の存在等も考慮する必要がある、反面巨視的な論議ではそれらの効果をも含めて平均的な地層構造とすることが考えられる。

このような地下水の流れの場を判断し、理想化するに際しては、現在の地質、地層とそこを流れる流れの物理的な性質を基礎として判断されることは言うまでもない。

## (2) 計算モデルの問題点

### ① 水平2次元モデルの問題点

水平2次元モデルは、鉛直方向の流動を積分し、その平均的な水頭の平面的な変動を再現するものである。

問題点としては、多層帯水層系を一つの帯水層に置き換える点及び、揚水量の増加に伴い局部的には鉛直方向に大きい地下水の流れが発生するものと考えられ、モデル化の段階で平面的な変動を重視したことにより、ある程度の誤差が含まれることになる。この誤差はモデルが簡潔であるだけに、透水量係数の選定によっては大きくなる可能性がある。

また、一般に被圧地下水をシミュレートする場合においても、貯留係数を不圧地下水のそれと同程度の大きさか、あるいはそれよりやや大きめに取りなければ、観測値と計算値が一致しないこともあり、鉛直方向の涵養量が実際には無視できないことを示している。

その他、問題として考えられる点は、水位低下によって被圧帯水層が不圧化した場合、貯留係数が水位の変化によって大幅に変化することである。

### ② 鉛直2次元モデルの問題点

鉛直2次元モデルは、 $y$ 方向の流動を積分して多層帯水層の地下水を再現しようとするものであり、深層部の地下水の動態や地層収縮の状況を解明することを意図して開発されたものである。

問題点としては、3次元的な地下水の流動を2次元に押さえ込み、水平方向の一方向( $y$ 方向)の流れを一様化して取り扱う点である。

したがって、適用する場合には流れの卓越する方向に着目してモデル化することが肝要である。

### ③ 準3次元モデルの問題点

準3次元モデルは、加圧層については鉛直方向の流動が卓越し、被圧帯水層については水平方向の流動が卓越するという仮定に基づいてモデル化し、地下水の流れを再現す

るものである。

なお、準3次元モデルは平面2次元モデルの垂直涵養量の項を不圧地下水から被圧地下水への転化量（漏水量）、加圧層からの絞り出し量に分けて具体的に表現したものである。

このモデルは、ある一枚の主被圧帯水層があって、その上位に一枚の加圧層更にその上位に不圧帯水層が位置している場合の主被圧帯水層の水位変化、及び加圧層の圧密収縮量のシミュレーションを行うために考案されたものである。問題点としては、加圧層が欠如して、不圧帯水層と被圧帯水層とがつながっている場合には、計算上の涵養量が不足し、その分加圧層の透水係数を実在試料により得られる値よりも大きくして補うことになり、物理的意味を持たなくなることも考えられる。

モデルの適用にあたっては、解析の目的やデータ整理状況等により得られる成果の精度に応じて、モデルの問題点、モデルの特性（表2-1）を考慮して選定しなければならない。

### (3) パラメータの設定

基礎方程式に含まれている比貯留量( $S_s$ )、透水量係数( $T$ )あるいは、透水係数( $k$ )などのパラメータをどのように設定するかは、重要な問題である。パラメータの評価方法としては、表2-2に示すように揚水試験などいくつかの方法はあるものの、広域的な問題に対してはまだ確固たる方法がなく、今日では、シミュレーション手法などで計算値と実測値（観測井における水位）とが良く合致するように決められているのが普通であるが、得られる値が対象とする現象の時間的、場所的スケールの影響及び局所的な地層の不整などのために、揚水試験などから得られる値とはかなり異なったものとなることもある。

したがって、これらのパラメータの評価にあたっては現在の地質地層構成などの状態を知ることが重要な判断材料となる。

表 2 - 2 モデルに必要な土質定数

| 土質定数                              | 土質定数の説明                                                                                                       | 決 定 法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 概 略 値                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------|--------------------|------|------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 透水係数 (K)<br>透水量係数 (T)             | 透水係数は地層中の水の透水性を表す係数で、単位の水圧勾配で単位面積あたりに流れる水の量をあらわす。帯水層の2次元及び3次元モデルでは透水係数に帯水層の(飽和)厚さをかけた透水量係数を用いる。               | 【帯水層】<br>・揚水試験 (タイスの方法、ヤコブの方法、チョウの方法、回復法)<br>・室内試験 (定水位法、変水位法)<br>・粒径による判定 (ヘーゼンの式、クリーガーの値)<br>・専門家によるボーリングサンプルの鑑定から求める方法<br><br>【加圧層】<br>・室内試験 (変水位法)<br>・圧密試験結果の圧密係数 $C_v$ と体積圧縮係数 $m_v$ から求める方法<br>$k = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w / 8.64 \times 10^7$<br>$C_v : (\text{cm}^2/\text{day}) \quad (\text{cm}^2/\text{sec})$<br>$m_v : (\text{cm}^3/\text{kg})$<br>$\gamma_w : (\text{g}/\text{cm}^3) \approx 1.0$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 透水係数 (水理公式集 昭和60年版より)<br><table><tr><td>透水係数 <math>k(\text{cm}/\text{sec})</math></td><td><math>10^3</math></td><td><math>10^2</math></td><td><math>10^1</math></td><td><math>10^0</math></td><td><math>10^{-1}</math></td><td><math>10^{-2}</math></td><td><math>10^{-3}</math></td><td><math>10^{-4}</math></td><td><math>10^{-5}</math></td><td><math>10^{-6}</math></td><td><math>10^{-7}</math></td><td><math>10^{-8}</math></td><td><math>10^{-9}</math></td></tr><tr><td>土砂の種類</td><td>きれいな砂利</td><td>きれいな砂と砂利の混合</td><td>非常に細かい砂シルトなど</td><td>不透水性の土、粘土など</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$ | $10^3$           | $10^2$              | $10^1$                                       | $10^0$              | $10^{-1}$                                    | $10^{-2}$                 | $10^{-3}$                                    | $10^{-4}$        | $10^{-5}$                                    | $10^{-6}$        | $10^{-7}$                                    | $10^{-8}$                 | $10^{-9}$                                    | 土砂の種類                             | きれいな砂利                                       | きれいな砂と砂利の混合       | 非常に細かい砂シルトなど                      | 不透水性の土、粘土など |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| 透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$    | $10^3$                                                                                                        | $10^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $10^1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $10^0$                         | $10^{-1}$        | $10^{-2}$           | $10^{-3}$                                    | $10^{-4}$           | $10^{-5}$                                    | $10^{-6}$                 | $10^{-7}$                                    | $10^{-8}$        | $10^{-9}$                                    |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| 土砂の種類                             | きれいな砂利                                                                                                        | きれいな砂と砂利の混合                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 非常に細かい砂シルトなど                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 不透水性の土、粘土など                    |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| 比貯留量 (Ss)<br>貯留係数 (S)             | 比貯留量は単位の水頭変化によって単位体積の多孔質媒体に出し入れできる貯留水の体積で $[L^{-1}]$ の次元をもつ。<br>帯水層の2次元及び3次元モデルでは比貯留量に帯水層の(飽和)厚さをかけた貯留係数を用いる。 | ・揚水試験 (タイスの方法、ヤコブの方法、ハンクッシュの方法)<br>・水平載荷試験から求められる弾性係数の逆数として得られる圧縮係数を用いる方法<br><br>$S_s = \gamma_w (\alpha + n\beta) \times 0.1 \quad (1/\text{m})$<br>$\alpha$ : 地層の垂直方向圧縮率 $(\text{cm}^3/\text{kg})$<br>砂層 $1 \sim 5 \times 10^{-4} \text{cm}^3/\text{kg}$ 程度<br>粘土層 $1 \sim 5 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{kg}$ 程度<br>$n$ : 地層の間隙率 $(0.25 \sim 0.70 \text{程度})$<br>$\beta$ : 水の圧縮率 $(\approx 4 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{kg})$<br>$\gamma_w$ : 水の単位体積重量 $(\approx 1 \text{g}/\text{cm}^3)$<br>または、<br>$S_s = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1+\nu)E} \gamma_w \times 10 \quad (1/\text{m})$<br>$\nu$ : ポアソン比<br>$E$ : 弾性係数 $(\text{kg}/\text{cm}^2)$<br>$\gamma_w$ : $\approx (1 \text{g}/\text{cm}^3)$<br><br>・ドメニコの代表値を用いる方法 | 比貯留量 (Domenico&Mifflin(1965), 原ほか, 1975 より)<br><table><tr><th>地殻岩盤及び地層の種類</th><th>比貯留量 <math>S_s</math> (1/m)</th></tr><tr><td>Plastic clay (塑性粘土)</td><td><math>1.9 \times 10^{-3}</math> to <math>2.4 \times 10^{-4}</math></td></tr><tr><td>Stiff clay (しまった粘土)</td><td><math>2.4 \times 10^{-4}</math> to <math>1.2 \times 10^{-4}</math></td></tr><tr><td>Medium hard clay (やや硬い粘土)</td><td><math>1.2 \times 10^{-4}</math> to <math>6.3 \times 10^{-5}</math></td></tr><tr><td>Loose sand (緩い砂)</td><td><math>9.5 \times 10^{-3}</math> to <math>4.6 \times 10^{-3}</math></td></tr><tr><td>Dense sand (密な砂)</td><td><math>1.9 \times 10^{-3}</math> to <math>1.2 \times 10^{-3}</math></td></tr><tr><td>Dense sandy gravel (密な砂礫)</td><td><math>9.5 \times 10^{-6}</math> to <math>4.6 \times 10^{-6}</math></td></tr><tr><td>Rock, fissured, jointed (割れ目、断層岩)</td><td><math>6.4 \times 10^{-6}</math> to <math>3.0 \times 10^{-7}</math></td></tr><tr><td>Rock, sound (堅 岩)</td><td>Less than to <math>3.0 \times 10^{-7}</math></td></tr><tr><td>上総層群</td><td><math>5 \times 10^{-5}</math></td></tr><tr><td>成田層群</td><td><math>1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}</math></td></tr></table><br>不圧地下水の貯留係数 (S) の値は、0.05~0.30程度(Theisによる)。 | 地殻岩盤及び地層の種類                    | 比貯留量 $S_s$ (1/m) | Plastic clay (塑性粘土) | $1.9 \times 10^{-3}$ to $2.4 \times 10^{-4}$ | Stiff clay (しまった粘土) | $2.4 \times 10^{-4}$ to $1.2 \times 10^{-4}$ | Medium hard clay (やや硬い粘土) | $1.2 \times 10^{-4}$ to $6.3 \times 10^{-5}$ | Loose sand (緩い砂) | $9.5 \times 10^{-3}$ to $4.6 \times 10^{-3}$ | Dense sand (密な砂) | $1.9 \times 10^{-3}$ to $1.2 \times 10^{-3}$ | Dense sandy gravel (密な砂礫) | $9.5 \times 10^{-6}$ to $4.6 \times 10^{-6}$ | Rock, fissured, jointed (割れ目、断層岩) | $6.4 \times 10^{-6}$ to $3.0 \times 10^{-7}$ | Rock, sound (堅 岩) | Less than to $3.0 \times 10^{-7}$ | 上総層群        | $5 \times 10^{-5}$ | 成田層群 | $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ |  |  |  |  |  |  |
| 地殻岩盤及び地層の種類                       | 比貯留量 $S_s$ (1/m)                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Plastic clay (塑性粘土)               | $1.9 \times 10^{-3}$ to $2.4 \times 10^{-4}$                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Stiff clay (しまった粘土)               | $2.4 \times 10^{-4}$ to $1.2 \times 10^{-4}$                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Medium hard clay (やや硬い粘土)         | $1.2 \times 10^{-4}$ to $6.3 \times 10^{-5}$                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Loose sand (緩い砂)                  | $9.5 \times 10^{-3}$ to $4.6 \times 10^{-3}$                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Dense sand (密な砂)                  | $1.9 \times 10^{-3}$ to $1.2 \times 10^{-3}$                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Dense sandy gravel (密な砂礫)         | $9.5 \times 10^{-6}$ to $4.6 \times 10^{-6}$                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Rock, fissured, jointed (割れ目、断層岩) | $6.4 \times 10^{-6}$ to $3.0 \times 10^{-7}$                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| Rock, sound (堅 岩)                 | Less than to $3.0 \times 10^{-7}$                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| 上総層群                              | $5 \times 10^{-5}$                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |
| 成田層群                              | $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                |                  |                     |                                              |                     |                                              |                           |                                              |                  |                                              |                  |                                              |                           |                                              |                                   |                                              |                   |                                   |             |                    |      |                                          |  |  |  |  |  |  |

#### (4) 揚水量

揚水量も重要な境界条件のひとつであり、基本式においては2.3.2 (2)に示したように井戸の揚水がある範囲の体積で平均的かつ、一様にくみあげられていると仮定されることが多い。

一般に、揚水量データは各揚水井毎に日あるいは月及び年単位の平均揚水量として得られることが多く、多層取水されている井戸の場合、その時点での各帯水層の水頭値と透水係数、ストレーナー長によっても異なるため、各帯水層からの揚水量をどのようにして把握すべきか、実際の値を評価する上で検討すべき事柄は多い。

#### (5) 初期条件

初期条件は基礎方程式を、対象とする時間間隔にわたって積分する際に、その初期時刻における流れの状態、通常は水頭値の場所的分布として与えるものである。

実際には対象とする全体積の各点での値のすべてを知ることは不可能であり、対象領域内に設けられたいくつかの観測井地点での観測水頭値からできるだけ精度よく推算せざるをえないのが現状で、等水頭線図などが用いられる。

#### (6) 境界条件

境界条件は基礎方程式を対象領域にわたって積分する場合に、領域外との境界における流れの状態を決定するものであり、水頭指定と流量指定の2種類がある。

水頭指定の場合は境界で水頭値 $H_0$ が一定値の場合と時間的变化 $H_0(t)$ が既知の場合があり、それぞれ境界で、

$$H = H_0 \quad \text{あるいは} \quad H = H_0(t) \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

が成立しなければならない。

流量指定の場合は、対象としている境界が $f(x, y, z) = 0$ であるとし、その面要素 $df$ に外向きに立てた法線の単位ベクトルを $n$ 、この法線ベクトルの $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の方向余弦を $l$ 、 $m$ 、 $n$ とし、単位面積あたりに、 $q_b(t)$ の流量が地下水帯内部に流入する場合は、

$$l u + m v + n w = -q_b(t) \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

である。このとき境界を通じての水の流れがない場合には言うまでもなく、

$$l u + m v + n w = 0 \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

が成立しなければならない。

したがって、地下水帯が十分な水量をもった水域と接しているならば、その境界ではその水域での水頭値によって(2.40)式の境界条件を与えることができ、明らかに水の出入りのない境界では、(2.41)式が用いられる。

しかし、実際の地下水盆や地下水帯では必ずしもこのような条件が明瞭ではなく、具体

的には境界位置において水頭値を測定し判断することが考えられるが、初期条件の場合も同様に、全境界にわたり水頭値を測定することは困難である。また、将来予測をするような場合も地下水帯の内部と外部とが互いに干渉し合い、その結果、境界の状態も変化することから境界条件の指定は難しいものである。

実際に流量を指定するには、井戸においてストレーナー近傍を開む面（揚水量などから流量を指定しうる）を除くと、少なくとも2点での水頭を求め、水頭勾配からダルシー則により推算するという間接的な方法以外に定量的に求めることが難しく、従って実際の解析で、境界の流量を十分な精度で評価するのに多くの難点がある。

## (7) 評価方法

シミュレーション計算では水収支及び既存の水位及び沈下量などの実測値と計算結果を比較検討し、実測値に合うように土質定数等パラメータの変更を行う。パラメータ変更の手順は対象地域それぞれによって特有のものであり、一般的に説明することは難しいがほぼ共通な点もいくつかある。ここではいずれの地域でも共通に考えられる事項を整理した。

パラメータを変更する際、重要なことは実測値に合わせることを考えて物理的にあるいは地下水水理的に無意味なことをしないことである。どのような条件を変更してもそれに何らかの説明がつくようにしなければならない。

### ① 水収支による評価

水収支は水文現象を考察する際の基本となる概念である。これをシミュレーションに適用して結果を評価することはモデルを総合的に判断する上で重要なことである。

まず、水収支であるが、物質の保存則を対象領域と対象時間を定めて、水に適用したものにはかならず、次式で示される。

$$(\text{流入}) - (\text{流出}) = (\text{貯留量の時間変化})$$

しかし、地下水の水収支に関係する水文学的過程は、多くが地中で起きており、現象の把握が難しい上に地質条件に支配されて場所によって異なり、又時間的にも変化するため、水収支を予測することは困難な場合が少なくない。そこで、実際の水収支を表現する場合には、水収支の精度を高めるため、水収支領域と水収支期間を適切に選んで水収支式をできるだけ単純化することが望ましく、実際の水収支と計算による水収支がよく合うものでなくてはならない。

水収支による評価では、これらによって得られた水収支とシミュレーション計算結果とを比較する訳であるが、シミュレーションによっては地下水位時系列記録が概ね再現されていても水収支で涵養量が降水量を上回るなどといった矛盾が生ずることが少なくない。また、実際の水収支と計算結果とを比較した場合、境界流出入量等に大きな開きが見られることもある。

これらは境界条件の与え方に強く関係するもので、得られる結果が境界条件によって

大きく左右される場合には、観測による境界条件の決定が何よりも必要である。

## ② 地点別水頭値による評価

地点別水頭値によるチェックポイントは水位の経年変化、季節変動、及び水位の絶対値である。

水位の経年変化は揚水量（涵養量）の経年変化とかかわっている。実例で水位が上昇傾向を示しているにもかかわらず低下傾向の計算値となる場合は、揚水量が経年的に増加傾向にあるとした設定（水位の経年変化が不圧地下水のように主に涵養量に左右される場合には、涵養量の過少設定）に問題があると考えられる。

季節変動についても揚水量（涵養量）とかかわっている。季節による揚水量の多少と水位の高低とはほぼ連動するので、季節変動傾向が実測と異なるときには揚水量の季節変化を再検討する必要がある。季節変動の幅については貯留係数（比貯留量）の値が影響している。2次元、3次元モデルの場合、実測の季節変動幅と比較して貯留係数を次のように修正する。

変動幅が実測より大きい → 貯留係数を大きくする

変動幅が実測より小さい → 貯留係数を小さくする

2次元、3次元のモデルでは地下水位の絶対値については1ヶ所の観測値だけではなく、それ以外の観測点での比較を含めて検討する必要がある。つまり、1ヶ所だけで水位が実測値と一致しても他の地点では大きく違っていれば全体の水位のパターンが実測と一致しなくなる。この点で水位の絶対値については次項の水頭値平面分布形状の評価と同様なことになる。

## ③ 水頭値の平面分布形状

ここでは主に2次元、3次元モデルを対象とする。

地下水水頭値の平面分布形状を表した実測地下水面図と計算地下水面図を比較する場合にまず注目する点は等水位線のパターンである。水位の低い部分、高い部分がどこにあるかわかるか、どちらの方向に水が流れているかといった全体の地下水位の傾向である。

地下水面図の形を決める主な要因は2つ考えられる。1つは境界条件と揚水分布から決まる全体の形である。もう1つは地下水位の勾配を決める透水量係数の値である。地下水面図の全体の形は境界条件と揚水量分布でほぼ決まってくる。

たとえば境界付近で等水位線が境界と平行するような傾向を実測値が示しているときに、計算値の方で境界に対して直角方向の等水位線が得られたとする。これは計算で境界条件を不透水としたのに実際は境界を通した地下水の流出入があることを示している。この場合は境界条件の設定に戻って再検討しなければならない。

また揚水によって生じる地下水位の低い部分が実測と異なった場所にできるときは、揚水量データを再検討してみる必要がある。実際に稼動していない井戸の揚水量を入力していたり、稼動日数を過大あるいは過少に評価して実際とかけ離れた揚水量となって

いないかなどをチェックする。

なお、不圧地下水を対象とする場合には、涵養量（降雨浸透等）は地下水面図の形を決める1つの要因となることから、涵養量の分布についての検討も必要となる。

透水量係数の値は地下水位の勾配を決める働きをする。実測の水位勾配と計算の水位勾配を比較して次のような修正を施すと良い。

水位勾配が実測より大きい —————→ 透水量係数を大きくする

水位勾配が実測より小さい —————→ 透水量係数を小さくする

以上のような検討を加えても実測地下水面図と合わないときは実測値の再検討も必要である。測水データの処理の際に標高を誤っていないかといったことなどをチェックする。

地下水面図による検証で重要なことは微小な変化にとらわれず地域全体の傾向を適確にとらえることである。

#### ④ 地盤沈下量による評価

3次元又は準3次元モデルによって得られた各帯水層の地下水頭値を用いて地盤沈下量を推定する場合、地盤沈下量は帯水層の水位低下によって生じるわけであるから、地下水位が実測と合わないのに沈下量だけを取り上げて評価することはできない。ここでは、地下水位が一応実測と合ったあとで沈下量を検討する段階でのこととして述べる。

地盤沈下量による評価のチェックポイントは沈下量の経年的な傾向とその絶対値である。

沈下量の経年変化は沈下の進行速度と関係する。沈下の進行速度が速いと水位低下に速く反応するため残留沈下が残りにくく、水位が上昇に転じると沈下が収束するのが速い。逆に進行速度が遅いと水位が上昇しても残留沈下があるため沈下傾向が残りやすくなる。

地盤沈下の進行速度と土質定数の値とは次のような関係がある。

地盤沈下進行速度を速くする —————→

|   |                       |
|---|-----------------------|
| { | 透水係数 ( $K_z$ ) を大きくする |
|   | 比貯留量 ( $S_s$ ) を小さくする |

地盤沈下進行速度を遅くする —————→

|   |                       |
|---|-----------------------|
| { | 透水係数 ( $K_z$ ) を小さくする |
|   | 比貯留量 ( $S_s$ ) を大きくする |

沈下量の絶対値は最終圧密量として考えるならば比貯留率ではほぼ説明がつくが、一般に実際の地盤沈下現象では過渡的な状態で見ると沈下の進行速度とも関連があり複雑である。上に示した沈下の進行速度は $K_z$ と $S_s$ によって変わるが、 $K_z/S_s$ (=圧密係数 $C_v$ )の値が同じであれば同じ進行速度となる。

したがって経年的な傾向が一致していて絶対値が合わないときは $C_v$ の値を変えないようにして $K_z$ 、 $S_s$ ともに動かすことによって絶対値を合わせることが考えられる。

沈下量を大きくする —————→  $K_z$ 、 $S_s$ ともに大きくする

沈下量を小さくする —————→  $K_z$ 、 $S_s$ ともに小さくする

これまで述べてきたように、地下水シミュレーションの実施に際しては、方程式、積分領域、各種条件の設定、それぞれに多くの問題を抱え、かつ、その精度という点でも問題を残しながら、対象とする時間的、場所的スケールに応じ、いろいろな側面からその正否を判断しつつ、実際の解析が進められている。

したがって、その解析から得られた結論を評価するにあたっては、対象とした場所的スケールで考えると同時に、方程式、積分領域、パラメータ、各種条件の持っている精度に注意を配る必要がある。

また、解析結果を評価する場合に、その基準とする観測井での観測値は、いわばある局所的な点での値であって、解析の対象とするスケールの現象に対する代表値であるとは限らない。また、地下水の汚染、その他の物質の地下水による流れを扱う場合には、実質流体としての流れ、特にその経路が重要であって、広域地下水の場合の平均的な解析を基礎とする際には十分注意をする必要がある。

以上、地下水盆の微小領域での流れの基礎方程式を積分することにより、対象領域での地下水頭の時間的、場所的分布を求める手順について述べてきたが、実際には何が既知量で、何が未知量であるか、対象とする問題に応じ、前に述べた基礎的な関係、あるいはそれから導かれるいろいろな関係、さらには局所的な流れの特性などを用いて種々の解析が行われているのが現状である。

## 第3章 広域シミュレーションのための基礎調査

### 3.1 概 説

地下水は、質量ともに優れた水資源であり、古くから人間生活と深く関わりをもってきた。

しかし、地下水自体は目に見えない存在であり、しかもその涵養・流動の速度が極めて遅いことから、地下水採取量の急激な増加が、自然の水収支のバランスを損なわせることとなり、種々の問題を生起させている。

このようなことから、地下水を有効に利用するにあたっては、広域にわたる地下水の動態を把握することが重要となり、その手段の一つとして数値シミュレーションがある。

数値シミュレーションとは地下水の流れを表現する方程式を、対象とする地下水帯あるいは地下水盆の体積と時間について積分することであり、おおむね次の手順により実施される。

- (1) 対象地域の地下水流動系をシステムとしてとらえ、システムの要素を分析する。
- (2) システムをモデル化する。
- (3) モデルの内・外挿検定を行う。
- (4) 予測シミュレーションの実施

ここで、(1)～(3)について検討しなければならない項目は表3-1に示すとおりとなる。

ここでは広域地下水シミュレーション結果の精度あるいは、モデル化の精度について判断するための基礎資料について、濃尾平野を例として調査した結果をまとめる。

表 3-1 地下水シミュレーションモデルの作成

| 大 項 目                  | 中 項 目             | 小 項 目                    | 細 項 目                                                                                                      |
|------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 地下水流動系におけるシステム要因の分析 | (1) 地下水の自然涵養の実態分析 | ① 地層構造の分析                | イ) 地質柱状図作成・分析<br>ロ) 帯水層・加圧層の分類<br>ハ) 地質構造図作成                                                               |
|                        |                   | ② 地下水流動系の分析              | イ) 地層構造による地下水盆の判断<br>ロ) 地層別の水頭値観測井分布の把握<br>ハ) 観測井毎の実測地下水頭値の把握<br>ニ) 帯水層における実測地下水頭値の平面分布の推定<br>ホ) 地下水流動系の分析 |
|                        | (2) 解析対象領域の判断     |                          | イ) 地下水盆領域の把握<br>ロ) 地下水流動系の把握<br>ハ) 地層構造分析による層分布の把握<br>ニ) 境界部の水頭値、流量諸元の把握                                   |
|                        | (3) シミュレーション手法の検討 | ① 基礎方程式の分析               | イ) 一次元基礎方程式の適用範囲の把握<br>ロ) 二次元基礎方程式の適用範囲の把握<br>ハ) 準三次元基礎方程式の適用範囲の把握<br>ニ) 三次元基礎方程式の適用範囲の把握                  |
|                        |                   | ② 数値積分手法の分析              | イ) 理論解の展開<br>ロ) 差分解の展開<br>ハ) 有限要素解展開                                                                       |
|                        | (4) 計算条件諸量        | ① 初期条件諸量                 | イ) 帯水層別水頭値分布の把握                                                                                            |
|                        |                   | ② 境界条件諸量                 | イ) 不圧層水頭値分布の期間別把握<br>ロ) 帯水層別周囲境界における水頭値の期間別分布把握<br>ハ) 揚水量諸元の把握                                             |
|                        |                   | ③ 物理定数諸量                 | イ) 物理定数の測定値分布把握                                                                                            |
|                        | (1) 解析対象領域のモデル化   | ① 平面領域のモデル化              | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 地下水盆領域の把握<br>ハ) 領域のモデル化                                                        |
|                        |                   | ② 縦断形状のモデル化              | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 地層構造の把握<br>ハ) 領域のモデル化                                                          |
| 2. システムのモデル化           | (2) 境界条件のモデル化     | ① 初期条件のモデル化              | イ) 実測水頭値分布の把握<br>ロ) モデル化手法の検討<br>ハ) 初期条件のモデル化                                                              |
|                        |                   | ② 周囲境界条件のモデル化            | イ) 実測水頭値分布の把握<br>ロ) モデル化手法の検討<br>ハ) 周囲境界条件のモデル化                                                            |
|                        | (3) 数値計算モデルの作成    | ① 基礎方程式の選定               | イ) 解析目的、スケールの分析<br>ロ) 基礎方程式の選定                                                                             |
|                        |                   | ② 基礎方程式展開                |                                                                                                            |
|                        |                   | ③ 数値積分手法の決定              | イ) 解析目的、スケールの分析<br>ロ) 数値積分手法の決定                                                                            |
|                        |                   | ④ 物理定数の検討                | イ) 物理定数測定資料の把握<br>ロ) 物理定数の実測資料にもとづく把握                                                                      |
|                        | (1) 初期条件          | ① 初期条件設定手法               |                                                                                                            |
|                        |                   | ② 初期条件の作成                | イ) 実測水頭値分布の把握<br>ロ) 実測水頭値資料の把握<br>ハ) 初期条件の作成                                                               |
|                        | (2) 境界条件          | ① 不圧帯水層における境界条件の検討       | イ) 設定手法の検討<br>ロ) 実測水頭値分布の把握<br>ハ) 実測水頭値資料の把握<br>ニ) 境界条件の作成                                                 |
|                        |                   | ② 周囲境界条件の検討              | イ) 設定手法の検討<br>ロ) 実測水頭値分布の把握<br>ハ) 実測水頭値資料の把握<br>ニ) 境界条件の作成                                                 |
|                        |                   | ③ 揚水量の検討                 | イ) 設定手法の検討<br>ロ) 揚水井の分布把握<br>ハ) 揚水資料の把握<br>ニ) 境界条件の作成                                                      |
| 3. シミュレーションモデルの内挿検定    | (3) 計算条件          | ① 要素分割の検討                | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 境界条件諸量との比較判断<br>ハ) 要素分割の決定                                                     |
|                        |                   | ② 計算時間間隔                 | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 計算時間間隔の決定                                                                      |
|                        |                   | ③ 計算ステップ数                | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 計算ステップ数の決定                                                                     |
|                        | (4) 物理定数の設定       |                          |                                                                                                            |
|                        | (5) 内挿検定          | ① 感度分析の実施                | イ) 物理定数と計算水頭値分布の関係把握<br>ロ) 物理定数のオーダーの見積もり                                                                  |
|                        |                   | ② シミュレーションにおける初期条件の影響の検討 | イ) 初期条件と計算ステップ数の関係把握                                                                                       |
|                        |                   | ③ シミュレーションにおける境界条件の影響の検討 | イ) 境界条件と計算水頭値の関係把握<br>ロ) 境界条件とモデル領域の水収支の関係分析<br>ハ) 揚水量モデル化手法と水頭値の関係把握                                      |
|                        |                   | ④ 物理定数の検討                |                                                                                                            |
|                        | (6) 結果の判断         | ① 水収支の判断                 | イ) 水収支算定手法の検討<br>ロ) 水収支の算定<br>ハ) 結果の判断                                                                     |
|                        |                   | ② 地点別計算水頭値の判断            |                                                                                                            |
|                        |                   | ③ 計算水頭値の平面分布の判断          |                                                                                                            |

### 3.2 濃尾平野を例とした基礎調査

#### 3.2.1 自然・社会条件の概要

濃尾平野は国土のほぼ中央に位置する面積約1500km<sup>2</sup>の平野で、文化的にみても東西日本の境界域にある。この平野は東高西低の地形を呈し、平野東部には洪積段丘が広がり、西部には、木曽川・長良川・掛斐川左岸地域を尾張平野、右岸地域を美濃平野と称し、尾張平野の東西部には名古屋市、美濃平野の北部には岐阜市、大垣市が所在している。

濃尾平野のうち尾張平野部における人口現象は、我が国三大都市圏の一つである名古屋都市圏における動向としてとらえることができる。名古屋都市圏における人口の動きをみると、人口急増地帯が次第に都心から遠ざかっていく、いわゆる「ドーナツ化現象」が進行しており、この現象は、美濃平野の岐阜市、大垣市にもあらわれている。

表 3 - 2 業種別地下水使用量（工業用）

|                | 工 場 数<br>(件) | 地 下 水 使 用 量            |         | 工場 1 件当りの使用量<br>(m <sup>3</sup> /日) |
|----------------|--------------|------------------------|---------|-------------------------------------|
|                |              | 実数 (m <sup>3</sup> /日) | 構成比 (%) |                                     |
| 総 数            | 1,346        | 1,842,611              | 100.0   | 1,369.0                             |
| 食料品・たばこ製造業     | 185          | 138,978                | 7.5     | 751.2                               |
| 繊維工業           | 393          | 982,342                | 53.5    | 2,499.6                             |
| 衣服・その他の繊維製品製造業 | 69           | 52,079                 | 2.8     | 754.8                               |
| 木材木製品製造業       | 28           | 5,534                  | 0.3     | 197.6                               |
| 家具・装飾品製造業      | 18           | 2,843                  | 0.2     | 157.9                               |
| パルプ・紙・紙加工品製造業  | 35           | 166,305                | 9.0     | 4,751.6                             |
| 出版・印刷関連産業      | 24           | 4,061                  | 0.2     | 169.2                               |
| 化学工業           | 82           | 215,834                | 11.7    | 2,632.1                             |
| 石油製品・石灰製品製造業   | 9            | 5,694                  | 0.3     | 632.7                               |
| ゴム製品製造業        | 10           | 11,878                 | 0.6     | 1,187.8                             |
| なめしかわ、同製品毛皮製造業 | 2            | 15                     | *       | 7.5                                 |
| 窯業・土石製品製造業     | 78           | 41,881                 | 2.3     | 536.9                               |
| 鉄鋼業            | 52           | 34,909                 | 1.9     | 671.3                               |
| 日鉄金属製造業        | 18           | 18,617                 | 1.0     | 1,034.3                             |
| 金属製品製造業        | 118          | 35,666                 | 1.9     | 302.3                               |
| 一般機械器具製造業      | 45           | 19,079                 | 1.0     | 424.0                               |
| 電気機械器具製造業      | 39           | 25,114                 | 1.4     | 643.9                               |
| 輸送用機械器具製造業     | 37           | 46,198                 | 2.5     | 1,248.6                             |
| 精密機械器具製造業      | 17           | 2,513                  | 0.1     | 147.8                               |
| その他の製造業        | 79           | 23,623                 | 1.3     | 299.0                               |
| 電気業            | 1            | 3,500                  | 0.2     | 3,500.0                             |
| ガス業            | 4            | 2,180                  | 0.1     | 545.0                               |
| 熱供給業           | 3            | 3,768                  | 0.2     | 1,256.0                             |

(出典：「濃尾平野の利水歴史」昭和60年3月  
中部地方建設局河川部河川計画課)

また産業面でも日本有数の重要地域をなし、昭和55年の製造品出荷額において全国シェアの50%、また年間販売額の7.8%を占めている。特に工業では、一宮・尾西市の毛織物工業が盛んであるが、現在では、工業の主軸が、繊維工業から輸送機械を含む機械工業に変わりつつある。それでも毛織物生産の全国シェアは約70%にも達している。それらは、地下水依存度の高い業種であるために、昭和48年における工業用地下水使用水量約184万m<sup>3</sup>/日の53%にもあたる98万m<sup>3</sup>/日を使用している。(表3-2)

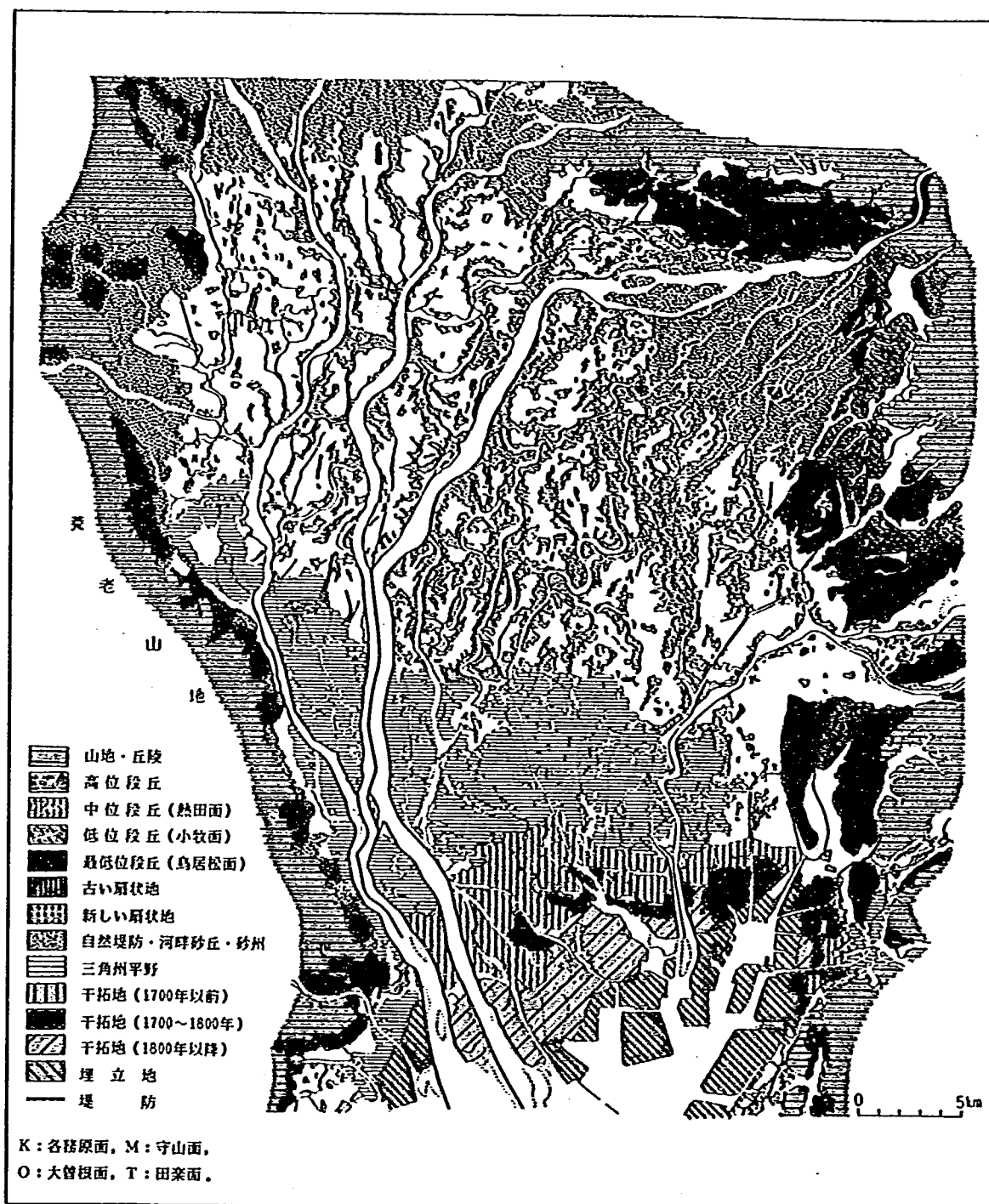
### 3.2.2 地 形

濃尾平野は我国でも有数の沖積平野で、図3-1に示すような地形を呈し、基本的には扇状地、自然堤防地帯、及び三角州地帯に大別でき、特に、自然堤防と背後地の入り乱れている自然堤防地帯が広く発達している。(図3-1)

扇状地のなかで、最も大規模なものとしては、美濃・尾張平野に跨がる木曾川扇状地(犬山扇状地)がある。木曾川扇状地は、犬山城付近を扇頂とする半径12km、面積約100km<sup>2</sup>に達する大扇状地である。扇頂部の標高は約50m、一宮市極楽寺～岩倉市八剣を結ぶ扇端部は標高11～13mであるから、扇状地の平均勾配は約0.3%である。扇状地面には木曾川の分派流、一之枝川(石枕川)、二之枝川(般若川)、三之枝川(浅井川)などが放射線状に発達し、扇状地面に2～3mの深さをもつ開折谷を形成している。

自然堤防地帯は、尾張平野の場合、木曾川扇状地の扇端から、ほぼ津島～名古屋を結ぶ名鉄津島線に至る地帯に広がる。木曾川及びその分派流によって形成される主要自然堤防群は、イ)五条川系統、ロ)青木川系統、ハ)三宅川系統、ニ)日光川系統に大別される。美濃平野側でも木曾川の旧河道や、木曾川の影響が加わった長良川の旧河道などに沿って分布するが、分布の下流限界は海津町今尾付近にあって尾張平野より内陸に位置する。ただ、沈降傾向にある揖斐川右岸地域では、ほとんど自然堤防はみられない。自然堤防と後背湿地との比高は多くが2m以下であり、従来、集落の多くは自然堤防の上にあった。

三角州地帯は、その大部分が海面干拓新田の造成によって陸化した土地なので、地盤は満潮位面より低い場合が多い。この地帯には伊勢湾台風当時においても約186km<sup>2</sup>に及ぶ0m地帯が広がっていたがその後の地盤沈下の影響が加わって、昭和53年時点でその面積は約274km<sup>2</sup>となった。この地帯は、昭和34年の伊勢湾台風の高潮の際には、戦後最大といわれる大被害をこうむり2ヶ月以上にわたって湛水をみた。

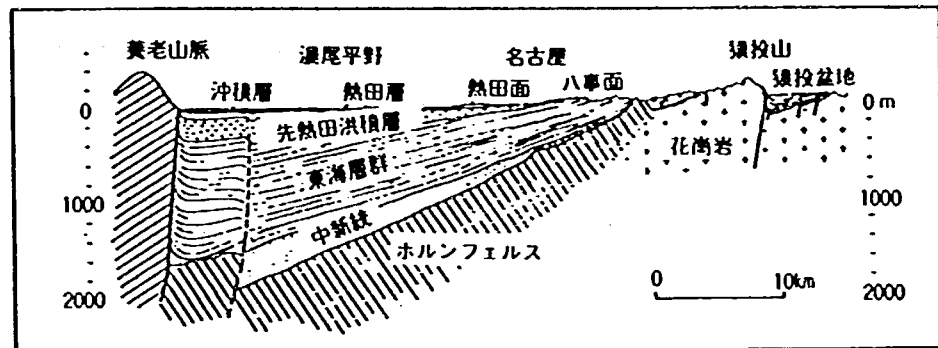


(出典: 東海三県地盤沈下調査会編「濃尾平野の地盤沈下と地下水」)

図3-1 濃尾平野地形分類図

### 3.2.3 地 質

濃尾平野は、西縁を傾動地累性の基盤山地である養老山脈と急峻な養老断層崖で接し、東は尾張・三河の第三紀丘陵地域を経て次第に高度を増して、ついには猿投基盤山地へと続く。北は美濃山地の低下した南縁を沈水海岸状に平野が埋め、南は伊勢湾に開いており、西側の養老断層で沈降し、東の猿投山塊を上昇側とする基盤の傾動地塊運動の結果もたらされた沈降盆地域である。第三紀世末の鮮新世から第四紀前半にかけては、この地域を含む広い範囲に東海湖盆と呼ばれる沈降盆地が存在していた。第四紀の後半以降になって濃尾平野地域の部分は基盤の傾動盆地運動によって新たな沈降地域となり、沈降端側の濃尾平野西縁では、300~400mに達する厚い沖積世中期以降の地層が堆積している。こうした部分では、東海湖時代以降の堆積物の厚さは1500~2000mにも達している。(図3-2, 詳しい地層の重なり方は表3-3参照)



(出典：桑原(1968), 濃尾盆地と傾動地塊運動, 第四紀研究)

図3-2 濃尾傾動盆地の東西断面

これらの第四紀中期以降の地層は、氷期の海面低下期の河床性の礫層と間氷期の高海面期に堆積した淡水成又は海水成の粘土層が交互に重なっている。氷期の海面低下期には、河川の浸食作用によって谷地形が刻み込まれており、こうした礫層堆積期毎に認められる埋没浸食谷地形は、それを覆う粘土層の層厚分布を基本的に支配する要素になるとともに、礫層(帯水層)の中の地下水流を規制する要素となる。一方粘土層は間氷期の高海面期の海灣の浸入域又は退水域の広がりに応じて分布しているが、平野の北部では砂や礫層に移化し、扇状地ではほとんど砂と礫層が上から下まで重なっており、濃尾平野の豊富な被圧地下水はこれらの扇状地で涵養された。

表 3 - 3 濃尾平野の地下層序と周辺地域との対比ならびに地史

| 地質時代        |             |           | 濃尾平野                                                                                                | 周辺地域の同時代の地層                    | 地史<br>(推定年代 × 10 <sup>4</sup> 年前)                            |
|-------------|-------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 新<br>生<br>代 | 第<br>四<br>紀 | 完新世       | 南陽層                                                                                                 | 沖積層                            | 濃尾沖積平野面の形成<br>縄文海進<br>(1)<br>(1.3) (Allerod期)<br>更新世最末期小海面上昇 |
|             |             |           | 濃尾層                                                                                                 |                                | (2)                                                          |
|             |             | 更新世<br>後期 | 第一礫層                                                                                                |                                | 最終氷期海面最低下期<br>(3)                                            |
|             |             |           | (埋没低位段丘群)                                                                                           | 鳥居松礫層<br>小牧・大曾根礫層              | 海面小変動期<br>(4~5)<br>(7~9) 最終氷期の始まり<br>(12) 熱田海 (最終間氷期)        |
|             |             |           | あつた熱田層上部                                                                                            | 熱田層・各務原層・碧海層・野間層               |                                                              |
|             |             |           | 熱田層下部                                                                                               |                                |                                                              |
|             |             | 更新世<br>中期 | 第二礫層                                                                                                |                                | (15) 氷河期海面低下期                                                |
|             |             |           | (埋没段丘群)                                                                                             | 高位段丘群 { 桃山礫層<br>桃花崗礫層<br>湖見坂礫層 | 小海進・小氷期の繰返し                                                  |
|             |             |           | Am <sub>3</sub><br>Ag <sub>2</sub><br>Am <sub>2</sub><br>Ag <sub>1</sub><br>Am <sub>1</sub><br>海部累層 | 高位礫層群<br>(武豊層群・見当山累層)          |                                                              |
|             |             | 更新世<br>前期 | 第三礫層                                                                                                |                                | 氷河期                                                          |
| 第<br>三<br>紀 | 鮮新世         | 東海層群      | 瀬戸層群・常滑層群・奄芸層群                                                                                      | 八事層<br>唐山層<br>上末層              | 氷河性海面変動の繰返し<br>(80+)<br>東海湖時代<br>基盤の波曲的変形                    |
|             |             | 中新世       | 中新統                                                                                                 | 瑞浪層群・師崎層群・一志層群                 | (500)<br>第一瀬戸内海海進期<br>(2,000)                                |
|             | 中・古生代       | 基盤        | 基盤山地の中古生層、花崗岩類                                                                                      |                                |                                                              |

### (1) 南陽層 (不圧帯水層)

南陽層は、上部の砂層と下部の軟弱な海成粘土層から成っている。上部の砂層は濃尾平野の最上部の不圧帯水層を構成し、その厚さは10m前後で、北部の扇状地帯では砂礫層に移化する。下部泥層では氷期に形成された浸食谷中に厚く堆積していて、平野南部では30m以上の厚さとなり、下位の濃尾層とともに第1礫層を加圧する難透水層である。初期の地盤沈下の大半は、この層の圧密によって生じたものと考えられる。

### (2) 濃尾層

濃尾層はアレード期 (更新世末期の小温暖化期) の海面上昇期に伴って堆積した地層で主としてシルトと砂の互層から成っている。濃尾平野の埋没主谷の南部では-40m以深に、北部では-30m前後以深に分布し、その層厚は10~20m程度である。

濃尾層のN値は、沖積層のそれより大きく、砂層では30前後から50以上、粘性土でも20前後の値を示し、その上位に重なる軟弱な沖積層より硬く締まっている。

### (3) 礫層 (第1帯水層)

ウルム氷期における海面低下時の開析谷に堆積した礫層で、濃尾平野西縁の埋没主谷中

で20m以上の厚みを有し、北方の揖斐川沿い低地では40mもの厚さとなり、扇状地を構成する礫層と重なるものと考えられる。このように揖斐川沿いの平野北部で地下水供給量の大きいことの理由の一端がこの地帯で礫層の層厚が著しく肥大することにも示されている。名古屋市西・南部では、埋没熱田台地が地下に存在するためにこの地域には分布しない。第1礫層は、豊富な地下水帯水層として知られ第1帯水層と呼ばれている。

#### (4) 熱田層

熱田層は砂層を主体とする上部層と海成粘土層を主体とする下部層とから成る。上部層は砂層を主体とすることから、第1礫層を欠く名古屋市域の浅井戸の取水層として利用され、また深井戸の補助取水層ともなっている。下部層は30m前後の層厚の海成粘土層であるが、平野北部では砂層と礫層の互層となる。平野東部では、海面低下期に地下水面上に上がったため、過圧密の状態にあると考えられる。しかし、70~80m以深では正規圧密状態にあり、被圧密層として取り扱い必要がある。

#### (5) 第2礫層（第2帯水層）

第2礫層は、15~30mの層厚を有する礫層で、熱田層下部堆積前の海面低下期の河床礫と考えられ、平野西部や庄内川の西流部の西南方延長上の地下に開析谷を刻みながら堆積している。北部の扇状地では層厚を増し、かつ上位の熱田層も砂礫化していることから、第1礫層から砂礫層だけが重なっており、地表水が垂直方向に浸透することを示している。

埋没段丘部分では厚さが10m以下になっていることが多く、特に名古屋市西南部の埋没段丘上では厚さが5m以下となっている。

第2礫層は、こうした埋没段丘域の条件の悪いところを除けば、濃尾平野全域で最も広く利用されている帯水層と言え、第2帯水層と呼ばれている。

#### (6) 海部累層

第2礫層の下位にある地層で、2枚の礫層をはさんで、3層の砂~粘土層が複雑累重している。熱田層の堆積環境に似た海退期~海進期のサイクルが数回繰り返されたものと考えられ、層厚は平野西部に向かって厚くなり100mを越すと考えられる。

#### (7) 第3礫層（第3帯水層）

海部累層の下位には、比較的連続性の良い第3礫層がある。第3礫層は10~30mを有する礫層で、第1礫層や第2礫層同様、比較的海退期（氷期）の堆積物と判断され海部累層の礫層を含めて帯水層を構成し、第3帯水層と呼ばれている。

#### (8) 先海部累層期の地層

第3礫層の下位には東海層群までになお、100m~200mの地層が存在する。これらの地層は、非海成らしい粘土層と砂または砂礫層との互層で上半部は比較的粘土層が厚く発達し、下半部は逆に砂礫層が優勢となる。

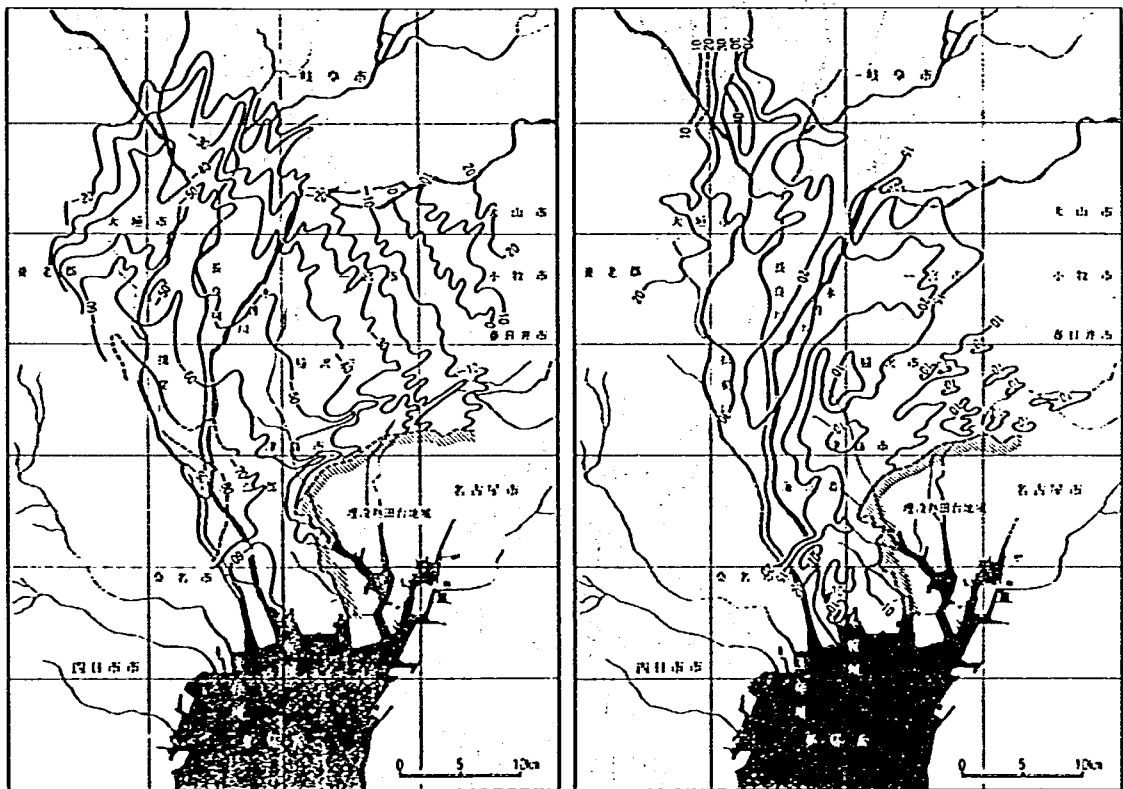
下半部は陸上の八事層・唐山層に相当するものと考えられ、八事期層と呼び、上半部は後八事期と呼んで区別する。この層については資料が極めて不足しており、詳しい事は判

らないのが現状である。

#### (9) 東海層群

第三紀鮮新世に東海湖盆中に堆積した湖成層で、濃尾平野の地下に広く分布している。層厚は、平野西部で1000mを越え名古屋市付近で500m前後あり、平野東縁の瀬戸－名古屋丘陵域には、東海層群の下半部が主体に分布しており、大まかには、礫層～砂泥互層～砂・礫層という地層の重なり方をしている。

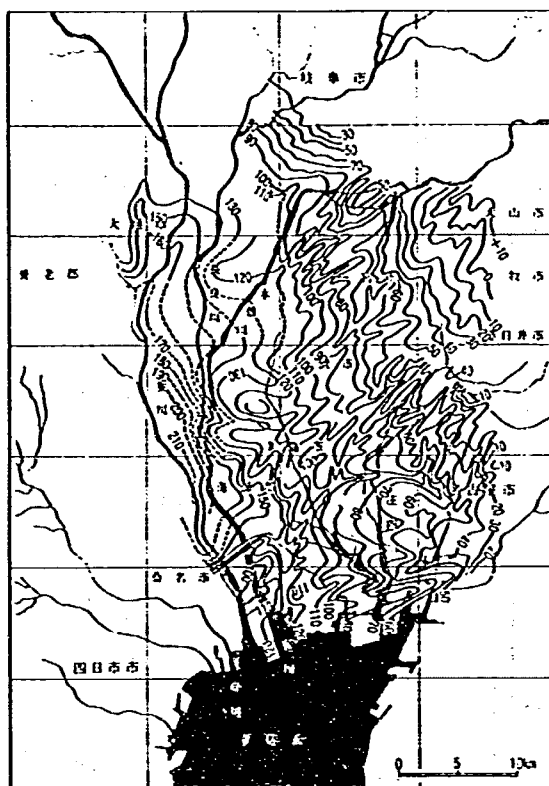
以上のことから地質の状況としては、濃尾平野地下水盆地中の主要帯水層は第1礫層、第2礫層、第3礫層の3層であるといえる。平野南部の臨海部では粘土層と帯水層が互層構造となっており、北部の扇状地では砂礫層が地表から連続して堆積をしている状況である。



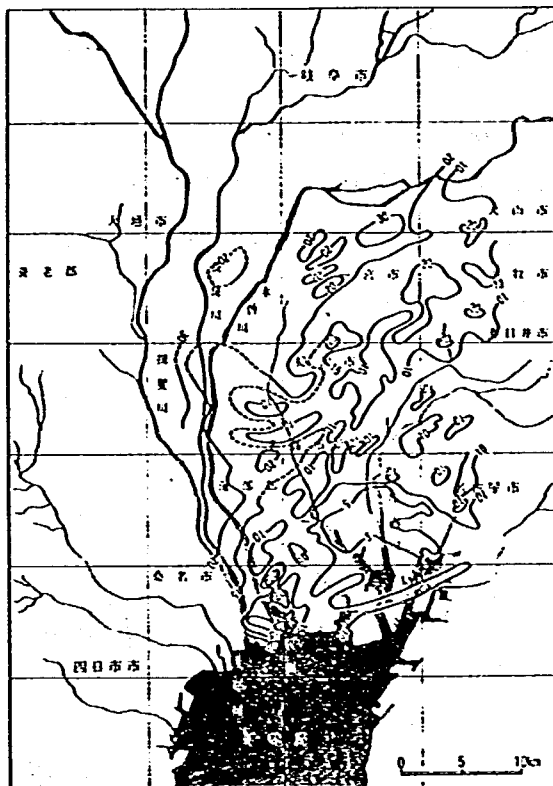
図の東南名古屋市区(斜線部)は、埋没熱田台地域で第1礫層は分らない。数字はT.P.基準(単位:m)  
(出典:桑原(1975), 濃尾湖動揺地の発生と地下の第四系)

(出典:桑原(1975), 濃尾湖動揺地の発生と地下の第四系)

図3-3 第1礫層基底面等深線図 図3-4 第1礫層等層厚線図 (単位:m)



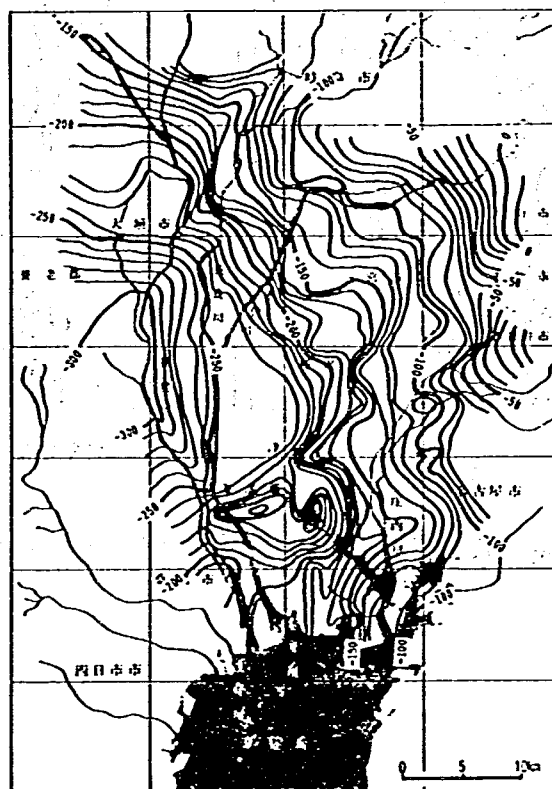
数字はT-P基準(単位:m)  
(出典: 桑原(1975), 濃尾複動盆地の発生と地下の第四系)



(出典: 桑原(1975), 濃尾複動盆地の発生と地下の第四系)

図3-5 第2礫層基底面等深線図

図3-6 第2礫層等層厚線図 (単位:m)



数字はT-P基準(単位:m)  
(出典: 「昭和59年度 濃尾平野地下水管理計画調査」,  
昭和60年3月 本曾川下流工事事務所)

図3-7 第3礫層基底面等深線図

### 3.2.4 地下水賦存量

濃尾平野の地下水賦存量については、さまざまな推定値があるが、桑原によって濃尾平野の地下200m以浅の部分の地質構成を明らかにし、これから地下水の賦存状況の推定を行った報告がある。この報告は土質試験値などを考慮した土質別の平均間隙率を想定し、その間隙は全て水で飽和され、その水分のうち吸着水や毛管水の形で強く土質中に保持されている水分率を保水率、残りを地下水盆中の流動水ないしは揚水可能な水量とし、その率を産出率として、これをもとに固相部分と間隙中の水分の産出可能量と保水量を算出したものである。これより堆積物中の産出可能量は、礫質土から 236億 $\text{m}^3$ 、砂質土から 161億 $\text{m}^3$ 、粘性土から44億 $\text{m}^3$ の計 441億 $\text{m}^3$ 、これに保水量の計 580億 $\text{m}^3$ を加えると約1,000億 $\text{m}^3$ 余りの地下水賦存量になるとしている。

産出可能量 441億 $\text{m}^3$ のうち、粘性土からの産出は、地盤沈下等の被害をもたらすことからこの量44億 $\text{m}^3$ を除いた約 400億 $\text{m}^3$ の地下水の循環使用が可能であるとしている。

表 3 - 4 土質別間隙率、産出率、保水率の設定

| 土 質   | 構 成 比    |              |
|-------|----------|--------------|
|       | 解析域内の構成比 | 北部扇状地域を補った場合 |
| 砂 質 土 | 24.2 %   | 23.4 %       |
| 粘 性 土 | 33.1 %   | 32.2 %       |
| 礫 質 土 | 42.8 %   | 44.4 %       |

表 3 - 5 濃尾平野地下200m以浅の各土質毎の固相、産水可能量、保水量

| 土 質 | 自然状態の総容積<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% | 固体部分の総容積<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% | 産水可能量<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% | 保水量<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% |
|-----|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| 砂質土 | 644                                  | 23.8      | 419                                  | 24.8      | 161                               | 36.5      | 398                             | 68.7      |
| 粘性土 | 884                                  | 32.6      | 442                                  | 26.2      | 44                                | 10.0      | 64                              | 11.0      |
| 礫質土 | 1,182                                | 43.6      | 827                                  | 49.0      | 236                               | 53.5      | 118                             | 20.3      |
| 総 計 | 2,710                                | 100.0     | 1,688                                | 100.0     | 441                               | 100.0     | 580                             | 100.0     |

### 3.2.5 地下水利用状況

#### (1) 地下水利用の推移

愛知県における地下水利用実態調査は、地盤沈下対策の立場から昭和48年度に建設省、

環境庁が企画し、愛知、岐阜、三重の3県が実施した調査が初めてである。その後、昭和50年度に愛知県が独自に県全体にわたり実態調査を実施し、昭和48年度の調査もれ、揚水量等を修正し、調査精度の向上を図った。

また、昭和50年度以降は愛知県公害防止条例によって、毎月の地下水揚水量が報告されるようになり、より精度の高い地下水揚水量の実態を把握することが可能になった。名古屋市を除く尾張33市町村における、昭和40年以降の地下水揚水量の経年変化を図3-8に示した。昭和40年から徐々に増加し、昭和43年には100万 $\text{m}^3$ /日近くの揚水量になっている。昭和44年は揚水量が急増し、120万 $\text{m}^3$ /日台に達した。さらに昭和47、48年にはピークに達し、一日当たり約150~160万 $\text{m}^3$ の揚水量となっている。

昭和49年にはオイルショックによる経済不況、昭和50年以降は公害防止条例による揚水規制の効果があらわれ、昭和56年には約84万 $\text{m}^3$ /日まで減少している。

また、昭和51年から昭和56年までの愛知県、岐阜県、三重県、名古屋市の揚水実態を見れば、図3-9のとおりである。

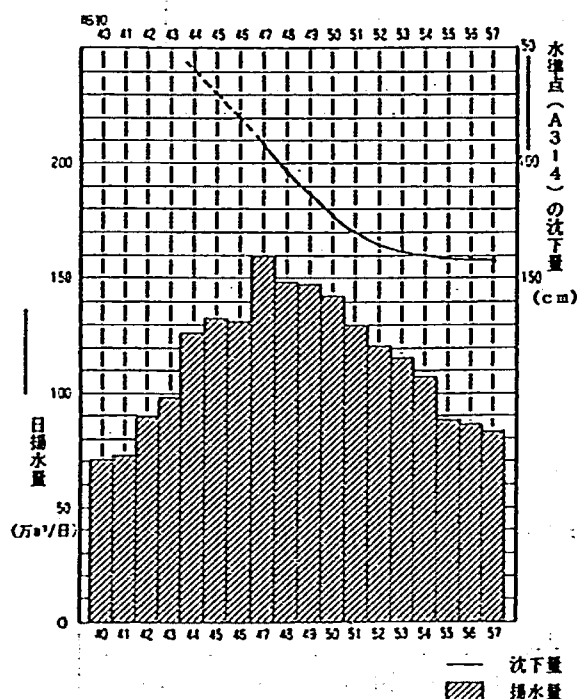
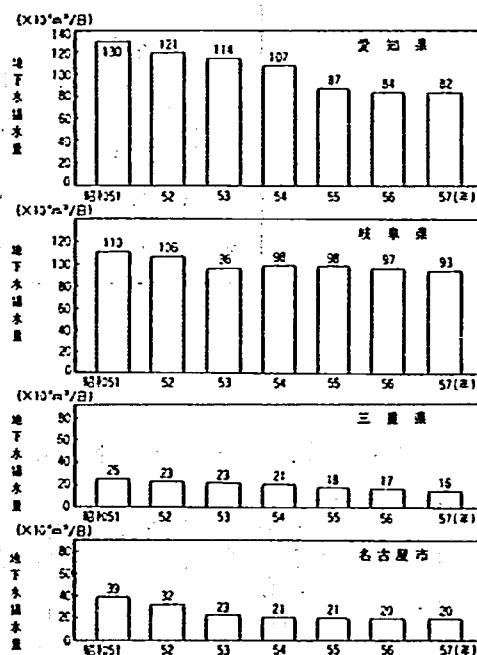


図3-8 揚水量の経年変化  
(名古屋市を除く尾張33市町村)



注) 愛知県は環境白書。岐阜県は工業統計及び岐阜県における水道の現況。三重県は県生活環境部の資料。名古屋市は市公害対策局の資料による。

図3-9 地下水揚水量の経年変化

## (2) 地下水利用の状況

濃尾平野全域にわたって井戸別揚水量の実態が調査されている昭和53年の地下水揚水実態をもとに、昭和53年度の地下水利用状況及び地域的な偏りを調査した結果は次のとおりである。

表 3 - 6 昭和53年度地下水揚水状況

〔上段：揚水量 (m<sup>3</sup>/s/H)、下段：割合(%)〕

| 用途<br>地域 | 工業              | 建築物            | 農業             | 水産             | 水道              | その他            | 合 計       |
|----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
| 愛 知 県    | 543,310<br>62.0 | 69,504<br>8.0  | 3,671<br>0.4   | 4,990<br>0.6   | 260,838<br>31.0 | 0<br>0.0       | 880,547   |
| 三 重 県    | 17,691<br>12.0  | 793<br>1.0     | 29,835<br>20.0 | 71,332<br>49.0 | 7,849<br>5.0    | 18,870<br>13.0 | 146,360   |
| 名古屋市     | 107,030<br>76.0 | 16,430<br>12.0 | 3,478<br>2.0   | 0<br>0.0       | 532<br>0.4      | 12,933<br>9.0  | 140,536   |
| 合 計      | 668,031<br>57.0 | 86,727<br>7.0  | 36,984<br>3.0  | 76,312<br>7.0  | 269,219<br>23.0 | 31,803<br>3.0  | 1,167,443 |

(出典：「昭和59年度 濃尾平野地下水管理計画調査」)

昭和60年3月 建設省中部地方建設局木曽川下流工事事務所)

昭和53年の用途別揚水量は、濃尾平野全域において工業用が最も多く、57%を占め次いで水道用が23%となっており、この2つの用途だけで全体の8割に達する。以下、建築用及び水産養殖用が7%、農業が3%の順になっている。県市別に見ると、愛知県と名古屋市で工業用水の60%以上を占め、三重県では水産養殖用が50%近くを占める。

## (3) 揚水強度の分布

地域的な揚水量の分布を把握するため、国土基準メッシュ (1 kmメッシュ) 毎に揚水量を表3-7の9段階に区分して整理し、その結果を帯水層別の揚水量強度分布として、図3-11～図3-14に示した。

表 3 - 7 揚水強度ランク (m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>)(m<sup>3</sup>/日/kd)

| ランク | 範 囲           | ランク | 範 囲             | ランク | 範 囲              |
|-----|---------------|-----|-----------------|-----|------------------|
| 1   | 0 < Q < 100   | 4   | 500 < Q < 1000  | 7   | 5000 < Q < 7000  |
| 2   | 100 ≤ Q < 300 | 5   | 1000 ≤ Q < 3000 | 8   | 7000 ≤ Q < 10000 |
| 3   | 300 ≤ Q < 500 | 6   | 3000 ≤ Q < 5000 | 9   | 10000 ≤ Q        |

ここで各メッシュの揚水井一本毎の層別揚水量は、各帯水層にかかる各井戸のストレーナ長の比で算出した値である。

すなわち、図3-10に示すメッシュ上の井戸について、ストレーナがそれぞれL1、L2の長さであるとする、G1層では $l_{11}$ 、G2層では $l_{12}$ 及び $l_{21}$ 、G3層では $l_{22}$ の長さに比例する揚水量が算定されることになる。

したがって、ある日の各井戸の揚水量をQとすると

G 1 層では  $\ell_{11}/(L_1+L_2) \times Q$

G 2 層では  $(\ell_{12} + \ell_{21})/(L_1+L_2) \times Q$

G 3 層では  $\ell_{22}/(L_1+L_2) \times Q$

の揚水量となる。

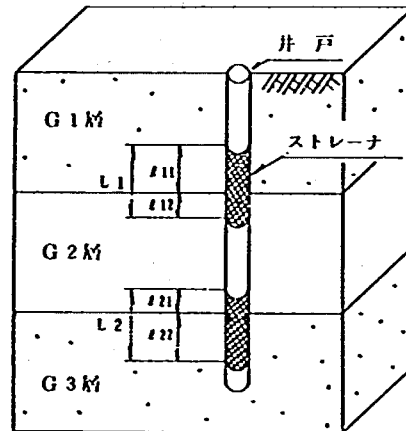


図 3 - 10 帯水層と多層揚水井

各帯水層毎の揚水強度の地域分布の特徴は次のとおりである。

- ① 第 1 帯水層 (G 1 層) の揚水強度 (図 3 - 11) は、犬山扇状地域、岐阜県域、尾張中部域の津島市及び長島町の沿岸部に集中しており、扶桑町、小牧市、岐阜県側の北方町で  $10,000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以上のメッシュが存在するが、大多数は  $3000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以下である。特に名古屋市域は第 1 礫層が欠如して、熱田層からの取水となるため、揚水強度は小さい。
- ② 第 2 帯水層 (G 2 層) の揚水強度 (図 3 - 12) は、第 1 帯水層の分布と似ており、犬山扇状地域、岐阜県域及び津島市、さらには沿岸部の長島地域に集中している。ただ  $10,000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以上の揚水強度を示す扶桑町、小牧市は  $3000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以下に減少しているのが読み取れる。
- ③ 第 3 帯水層 (G 3 層) の揚水強度 (図 3 - 13) は、第 1、第 2 帯水層と比べ全域にわたって大きい強度の揚水メッシュが分布している。特に他の帯水層に比べ集中度が低く、空白のメッシュが目立った濃尾中部域において、 $7000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以上の強度を示す地域が存在するようになった。逆に第 1、第 2 帯水層で揚水強度の大きい犬山扇状地域では、第 1 帯水層のそれに比べかなりの減少がみられる。

④ 次に帯水層別用途別揚水量を集計すれば、表3-8に示すとおりとなる。

表3-8 帯水層別用途別揚水量  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

単位:  $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$

| 用途<br>帯水層 | 工業      | 建築     | 農業     | 水産     | 水道      | 合計        |
|-----------|---------|--------|--------|--------|---------|-----------|
| 不圧層       | 44,135  | 5,771  | 2,100  | 316    | 26,872  | 79,204    |
| 第1帯水層     | 277,485 | 20,388 | 1,983  | 10,635 | 180,654 | 492,161   |
| 第2帯水層     | 204,458 | 11,996 | 2,697  | 12,904 | 97,276  | 330,210   |
| 第3帯水層     | 246,994 | 22,403 | 10,409 | 25,399 | 134,226 | 444,665   |
| 第三紀層      | 25,539  | 5,902  | 436    | 17,241 | 15,767  | 70,523    |
| 合計        | 798,611 | 66,460 | 17,625 | 66,495 | 454,795 | 1,416,763 |

(出典:「昭和59年度 濃尾平野地下水管理計画調査」)

昭和60年3月 建設省中部地方建設局木曽川下流工事事務所)

この結果から、第1帯水層から第3帯水層の各帯水層毎に著しい揚水量の違いはなく、第1帯水層から第3帯水層の利用は、不圧層から第三紀層までの全揚水量に対して90%近い地下水利用を受け持っていることが確認できる。

### 3.2.6 透水量係数及び貯留係数

透水量係数や貯留係数は地下水盆の水収支などを明らかにするために重要な係数である。これらの係数は揚水試験、圧密試験によっても得られる値である。

透水量係数とは、透水係数に層厚を乗じたもので、透水係数はその地質の透水性を表す数値(次元 $\text{L T}^{-1}$ )である。

貯留係数とは、比貯留量に層厚を乗じたもので、比貯留量は土の間隙水頭が単位量だけ増加するときに単位面積の土に貯留される量(次元 $\text{L}^{-1}$ )である。

#### (1) 帯水層

揚水試験より求まる透水係数、比貯留量の値を図3-11に、透水量係数、貯留係数の分布を図3-16、3-17に示す。

透水量係数は、第1帯水層では第1礫層のある濃尾平野西縁で $1000\text{m}^3/\text{日}$ という比較的大きな値を示すものがあり、特にその層厚が大きくなる。また、北東部の掛斐川扇状地に向いても大きな値を示している。これに対して犬山扇状地側ではあまり大きな値はとらない。東半部の埋没段丘域では $200\text{m}^3/\text{日}$ 以下の小さな値となっており、層厚が小さくなっているだけでなく、透水係数も低くなっていることが考えられる。平野東南部の第1

礫層が分布せず、熱田層上部の砂層がその代替の役割をしている地域では、 $100\text{m}^3/\text{日}$ 以下の小さな値となっている。

比貯留量は、第1帯水層、第2帯水層とも $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ 1/m}$ の値を示すのが一般であるが、試験値の精度に問題があり特定の傾向はみられない。

第3帯水層系統については、 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ 1/m}$ の範囲の値が得られ、西部に向かって大きくなる傾向を示している。

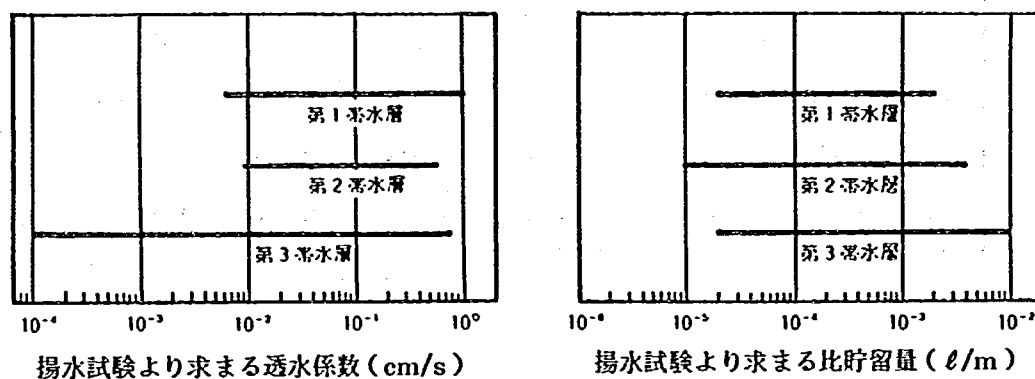
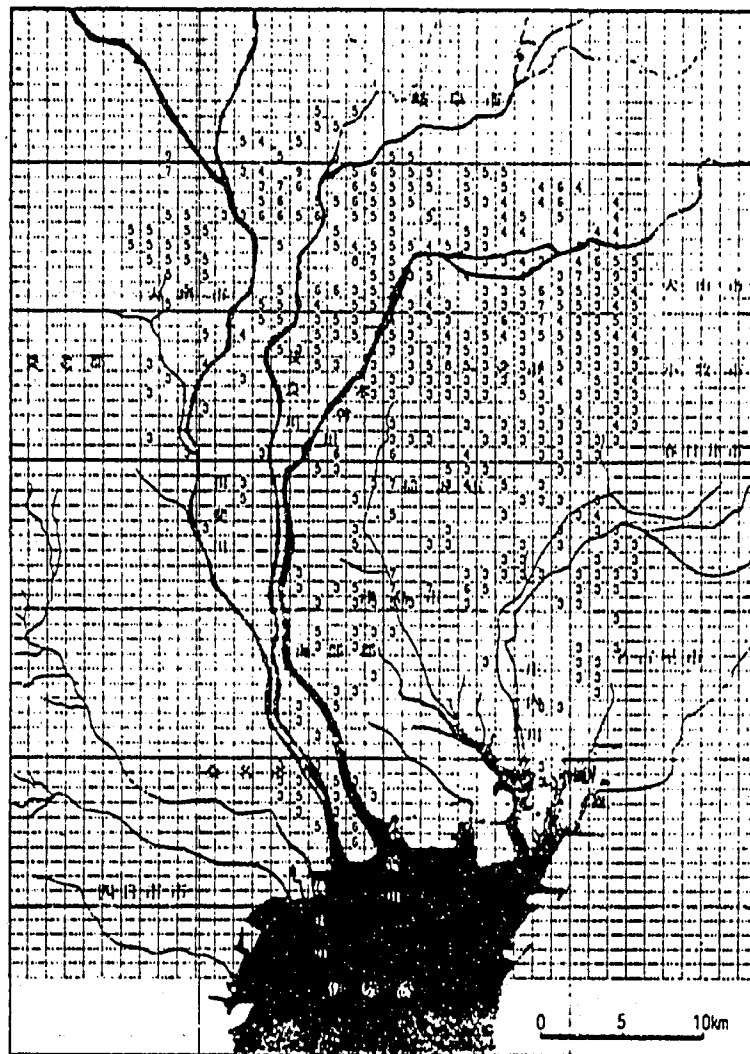


図3-11 帯水層の透水係数及び比貯留量

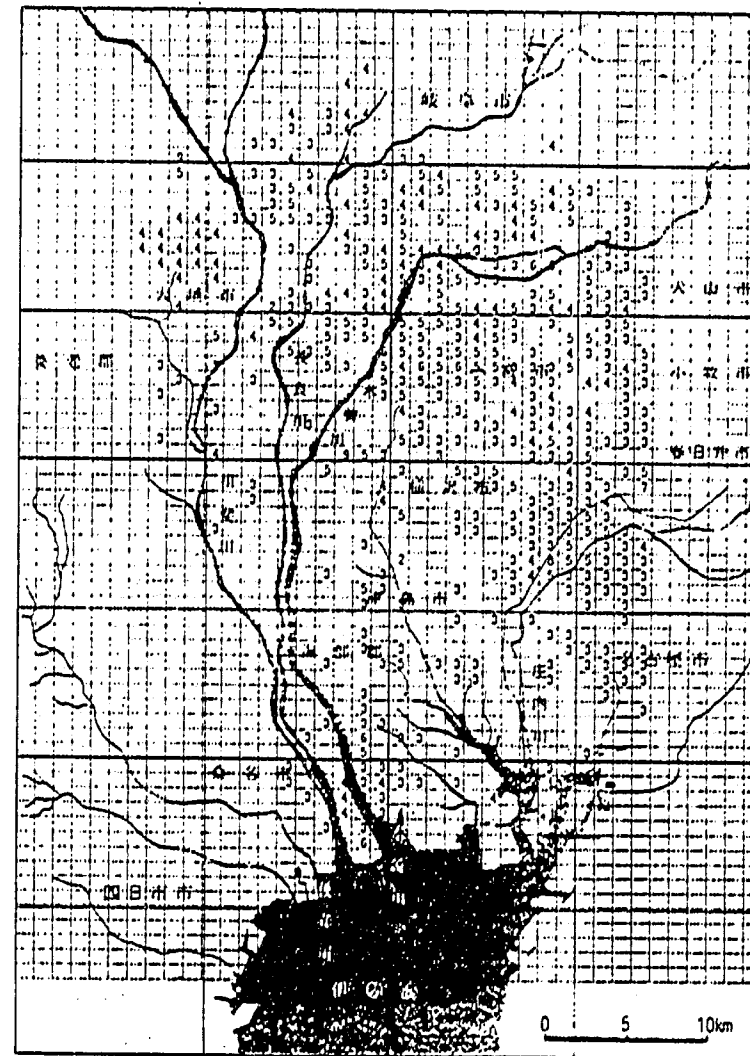


揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

(対象年度……昭和52年度)

図3-12 揚水強度分布 (G1層)

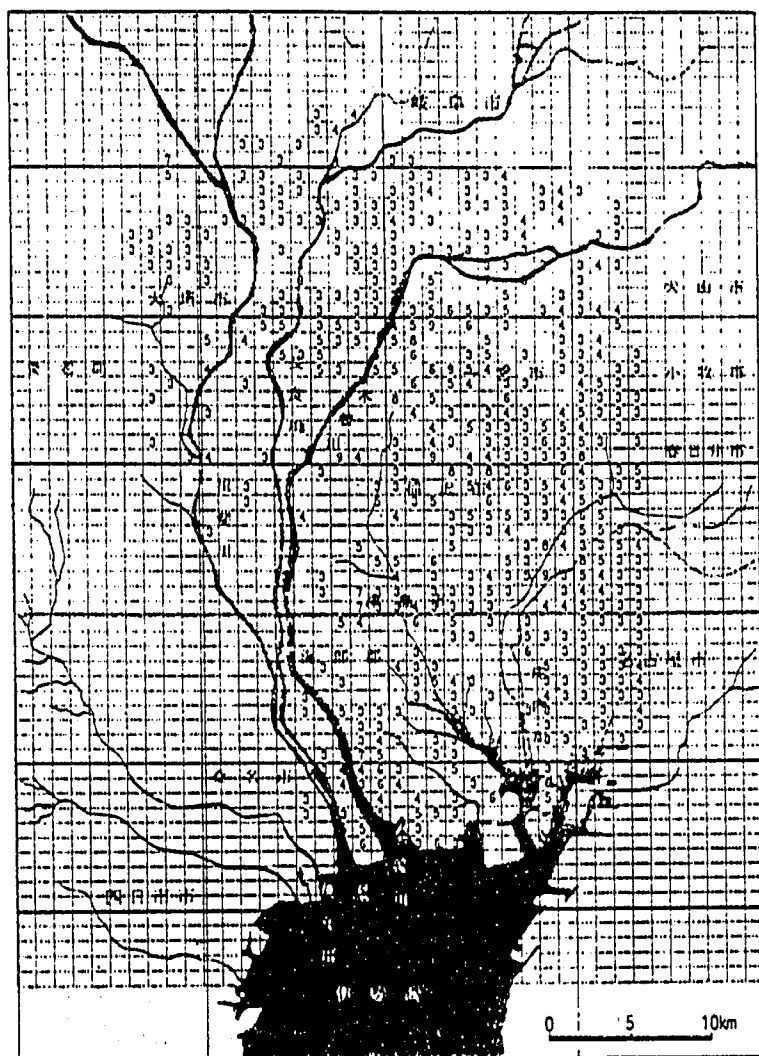


揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

(対象年度……昭和52年度)

図3-13 揚水強度分布 (G2層)

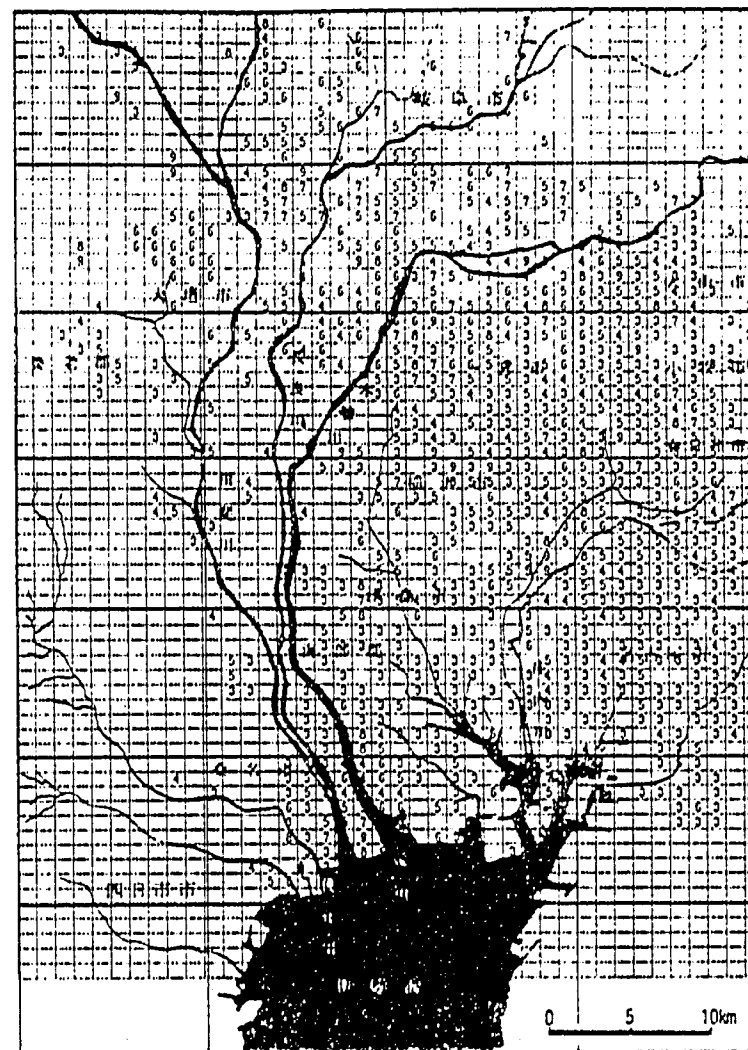


揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

(対象年度……昭和52年度)

図3-14 揚水強度分布 (G3層)



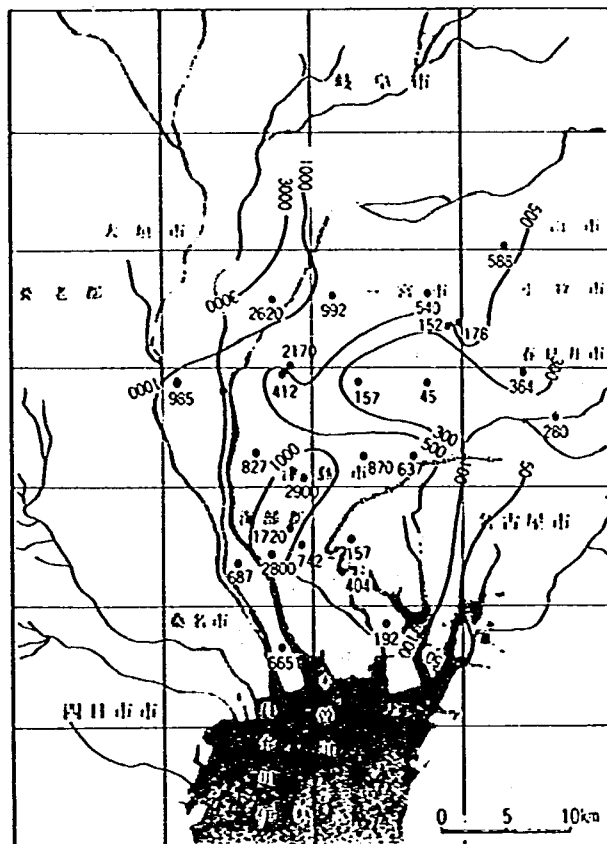
揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

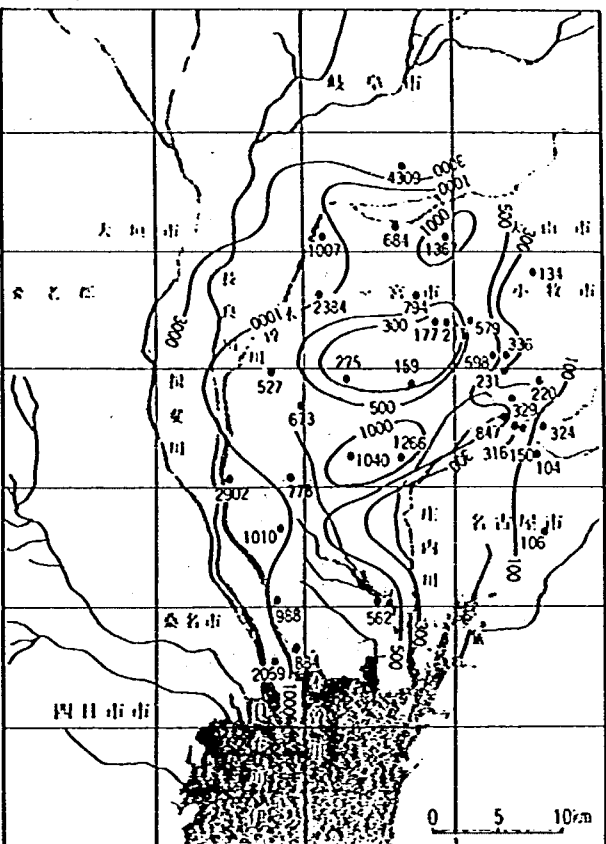
(対象年度……昭和52年度)

図3-15 揚水強度分布 (全層)

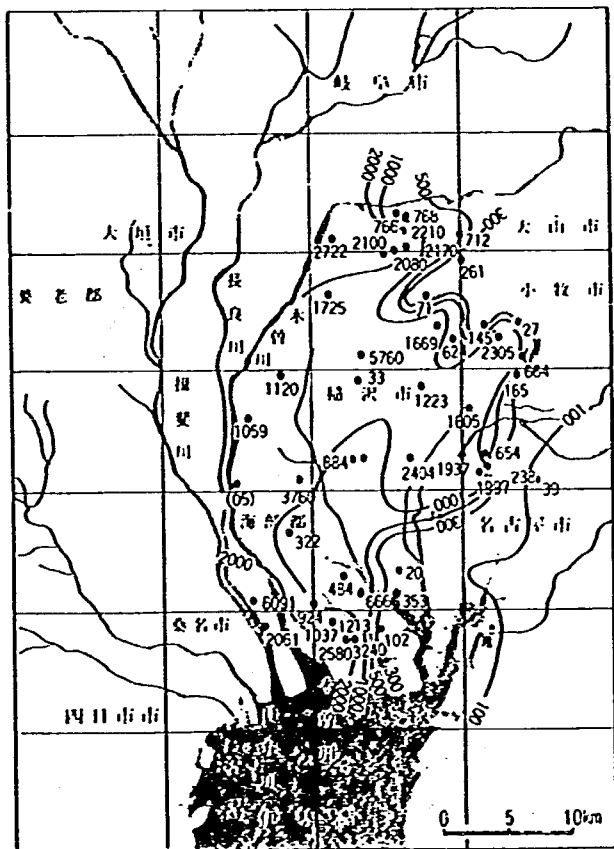
G 1 層



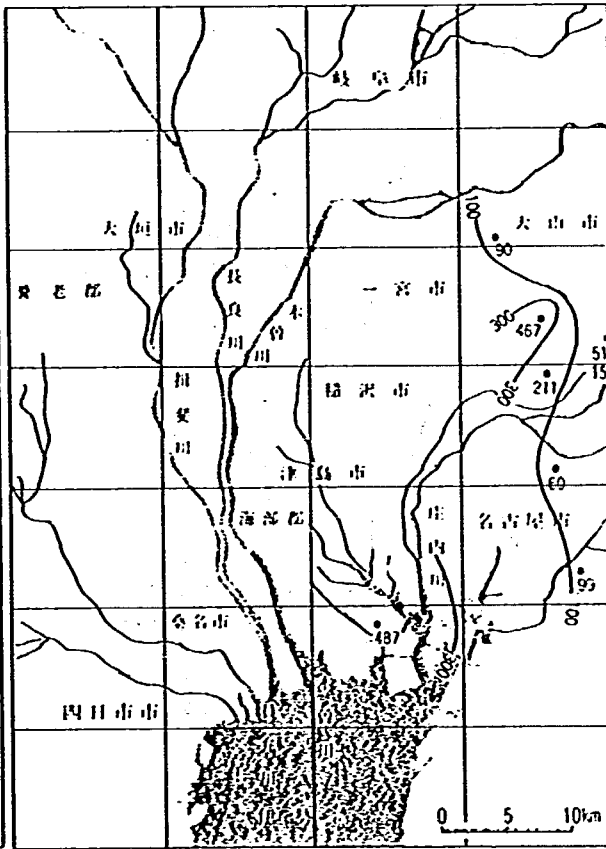
G 2 層



G 3 層

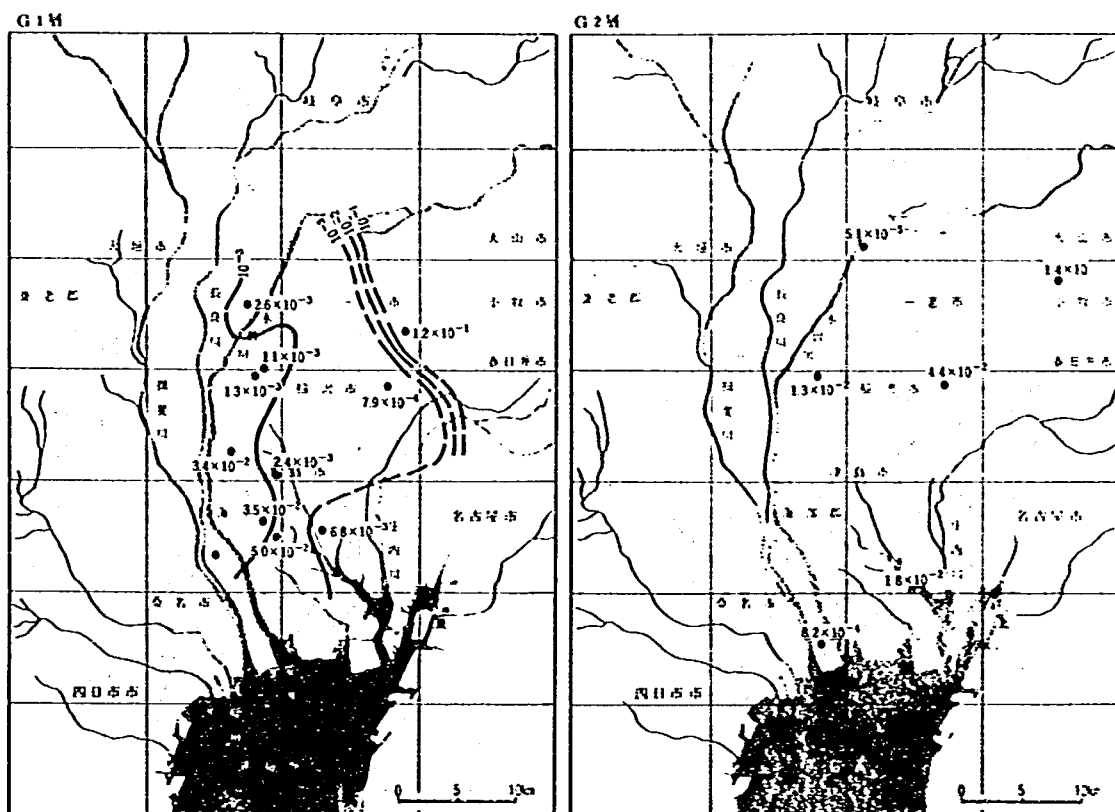


第三紀東海層群

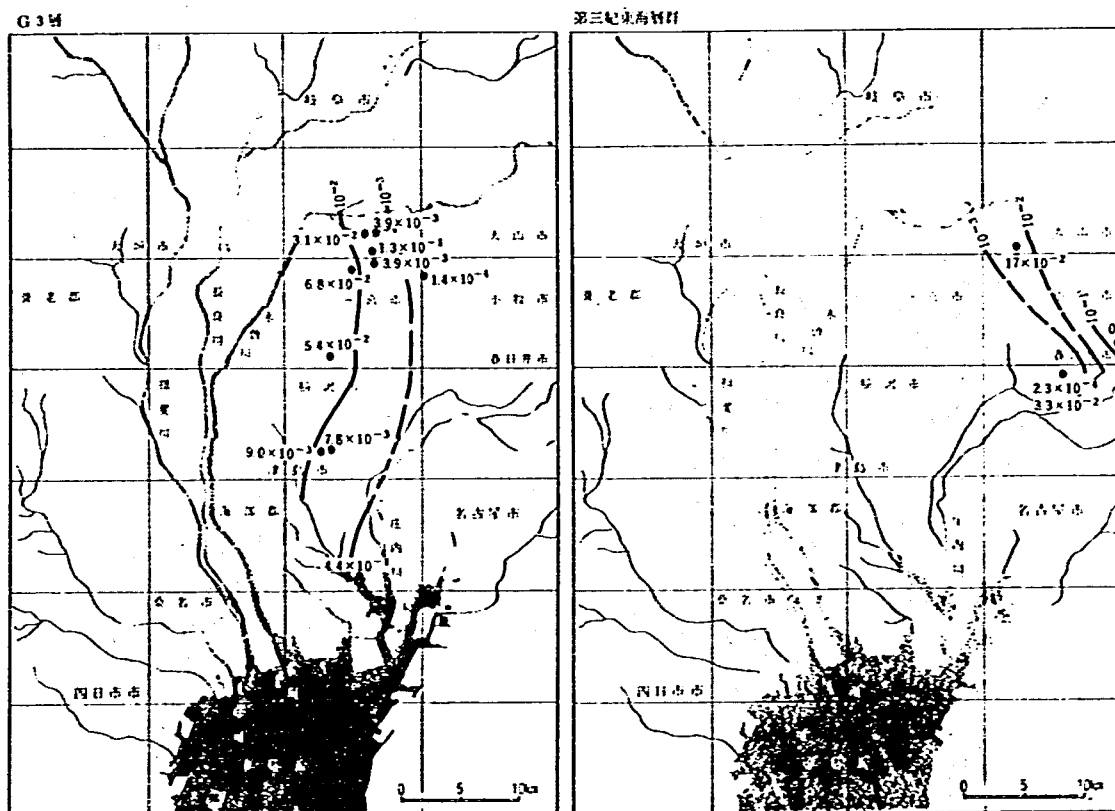


●は揚水試験地点，数字は透水量係数（単位： $\text{m}^2/\text{日}$ ）

図 3-16 透水量係数分布図



●は排水試験地点、数字は貯留係数



●は排水試験地点、数字は貯留係数

図 3-17 貯留係数分布図

## (2) 加圧層

濃尾平野における加圧層の透水係数，比貯留量のとりうる範囲としては、図3-18にあるように、沖積粘土層が透水係数で約 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、比貯留量で $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ l/m}$ のオーダーである。

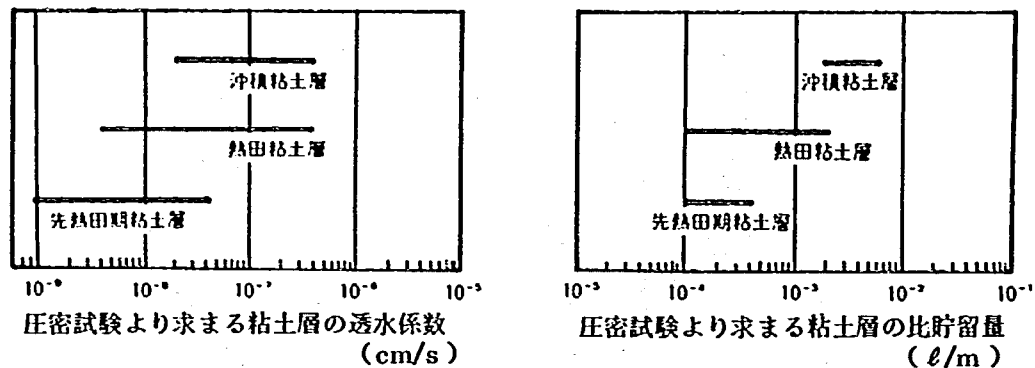


図3-18 加圧層の透水係数及び比貯留量

### 3.2.7 地下水流動系

#### (1) 濃尾平野地下水盆領域の設定

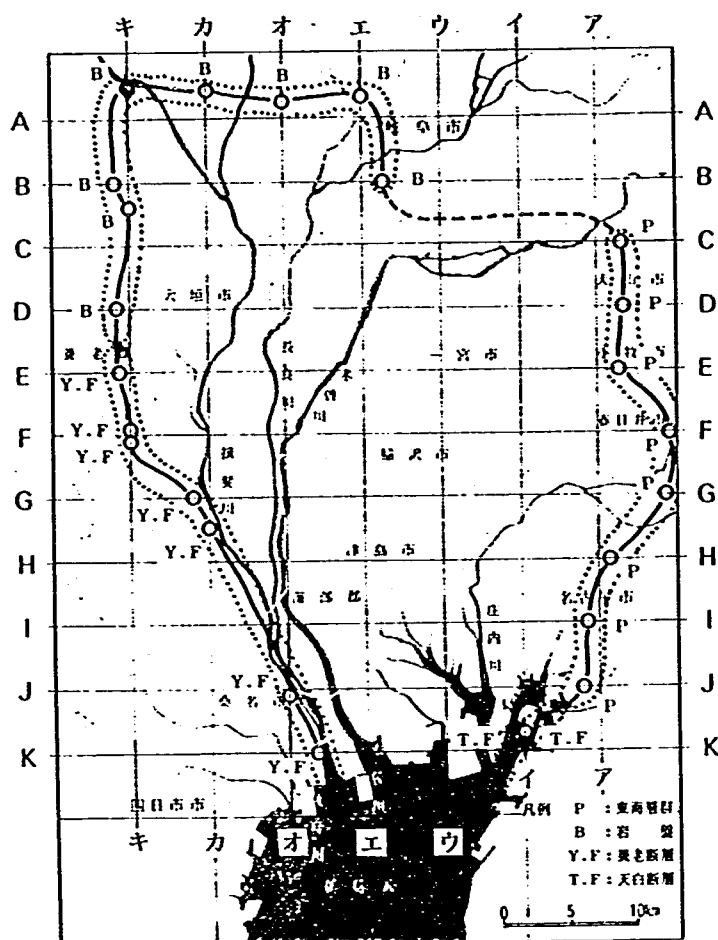
東西方向に木曾川河口から岐阜県岐阜市に至る11測線（A～K），及び南北方向に愛知県大府市から三重県四日市市に至る7測線（ア～キ）における地質縦断図<sup>2)</sup>をもとに濃尾平野の地下水盆領域を設定する。（測線は図3-19参照）。

第1帯水層～第3帯水層を遮断する断層，東海群層，基盤等の位置を地質縦断図より確認し、それらによって囲まれる地域を地下水盆領域と考える。

- ① 東海群層が地表面まで露出している地点が平野東部のア測線付近一帯のJ～C測線で確認できる。
- ② 基盤が地表面まで露出している地点が岐阜県内北東部（エ～キ，A～D測線）で確認できる。
- ③ 養老山地に沿って揖斐川河口部（エ～キ，E～K測線）まで養老断層が確認できる。
- ④ 庄内川左岸域（イ，J～K測線）には、天白断層が確認できる。
- ⑤ 木曾川三派川地区の上流域であるC測線上流ア～ウ測線間では、地質資料の不足から明確な境界域を見出せないが、当該地域では金華山を含む山脈が存在していることからこれらによって地下水流が遮断されていると考え、山開部に沿って境界域を設定した。

以上の各調査測線の境界点を包絡し、地下水盆域を設定すると図3-19のとおりとなり、

その面積はおよそ1600km<sup>2</sup>に及ぶ。



(出典：昭和59年度 濃尾平野地下水管理計画調査，木曾川工事事務所)

図 3-19 濃尾平野地下水盆領域

## (2) 地下水流動系の推定

3.3地質に示した各帯水層厚分布（図3-4，図3-6）は、3.3に示した各帯水層基底面等高線図（図3-3，図3-5）と密接な関係がある。

同図の主谷、支谷では一般に層厚は厚く、稜線または埋没段丘の部分では層厚が比較的薄く、礫層も谷地形の中の礫層とは異質で、段丘上の礫層は谷の中の礫層とも連続性が断たれている可能性がある。

したがって、地下水の流動は当然このような埋没地形の支配を受けていると考えるべきであり、地下水位の低下域や沈下域も地形状況を反映しているものと考えられる。

しかし、地下水流動系体は必ずしも地質学的に区分された地層の单元内にとどまらず、他の透水性の地層との水分の移動が行われると考えられるが、地形のみならず透水性、貯留性などの物理特性を総合的に評価し、定量化することは困難である。

しかし、今後ある程度マクロなスケールでも指摘されるような帯水層の異方性についてはなるべく考慮していくことが必要である。

### ① 地下水質変化からみた帯水層中の地下水流動系

帯水層の諸係数など物理的性質により地下水流動系を推定する事は困難であるが、帯水層中を流下する地下水の質の変化の面から、地下水流動系体を把握することが可能である。

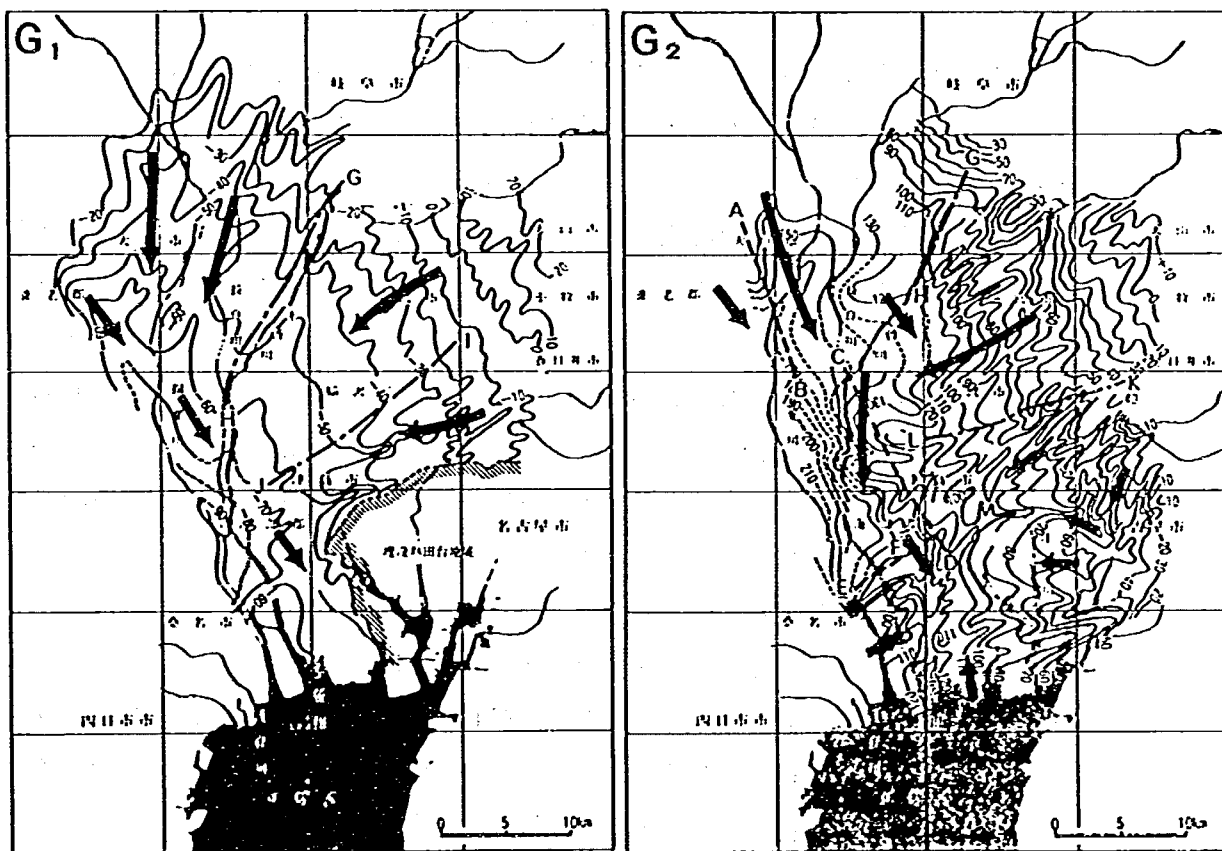
ここでは、既に行われた第1帯水層(G1)と第2帯水層(G2)についての地下水質調査資料から地下水流動系の把握と帯水層の性質について検討を行った。

こうした資料を総合してみると、濃尾平野の被圧地下水は水脈系統に分けられることが示唆される。これらの水脈系統の間には、水質上の不連続線が想定できる。

こうした不連続線は、各帯水層の主体となる礫層の基底面地形、つまり埋没地形の尾根線に相当していたり、帯水層の分布深度に急激な変化を与えている伏在断層に相当している。

これらの事実は、帯水層中の地下水流に埋没地形や伏在断層が一定の規制を加えていると判断される。

第1帯水層(G1)と第2帯水層(G2)の基底面等高線図と地下水質不連続線を表したのが図3-20である。



破線は伏在断層に関係するもの、鎖線は埋没地形による地下分水界線。

A-B: 大垣-今尾断層, C-D: 大藪-津島断層, E-F: 弥富断層

(出典: 濃尾平野の地下水利用と地下水理に関する考察, 桑原(1977))

図3-20 第1帯水層(G1)、第2帯水層(G2)基底面等高線図と地下水水質不連続線と地下水流系の推定図

a. 第1帯水層（G1）の不連続線

木曾川の西岸と東岸の水系を界とする水質の不連続線は、図3-20のG-H線付近にあると考えられ、第1帯水層の埋没地形の尾根線に相当する。

次にI-J線は、埋没地形上小牧、鳥居松段丘の地下延長部の埋没段丘域に相当しており、この埋没段丘域によって北側と南側の水系が区分され、犬山扇状地から流下する水系と名古屋市域からその西方域へ流下する水系とに区分される。

b. 第2帯水層（G2）の不連続線

木曾川西岸の水系で養老山脈沿いの地域には、掛斐川の支流である牧田川から伏流したと考えられる水系が大垣-今尾線（図3-20のA-B線）によって区分される。

このA-B線は、地質断面図上でも第2礫層以深の地層がうまくつながらない部分と一致し、またその南方延長は図3-20の埋没地形にも直線状に第2礫層の分布深度が急に深くなっている部分と一致し、地下に伏在断層が推定されている。木曾川西岸の残りの水系は、第1帯水層と同様、主として掛斐川・長良川沿いの扇状地域から伏流する水系である。しかし、木曾川東側の水系との境界線は第1帯水層ほど明確でなく、愛知県尾西市付近では木曾川西岸側から東岸側に水が流入しているようである。このことは図3-20の第2礫層の埋没地形からも明らかなように、第1礫層のように埋没尾根線が木曾川沿いに顕著に発達していないことからもうなずける。

尾西市付近は、揚水量の大きい目玉を作っているため、この付近では西岸側の水系から水と呼ばれていることが当然考えられる。

木曾川東岸の水系は、埋没段丘の発達する地域の北限（図3-20のK-L線）の北側を流れ、その先は大藪-津島線（図3-20のC-D線）と呼ばれる伏在断層の西側の“海津沈降塊”域に流れ込んでいるものと考えられる。この地域には、木曾川西岸の地下水も当然流入しており、東岸側との混合水系となっていると考えられる。

この海津沈降塊の南限は、弥富伏在断面（図3-20のE-F線）で、その南側の“長島上昇塊”と接している。弥富伏在断面による第2礫層の変位量は50m前後に達し、第2帯水層の連続性はかなり失われていると考えられる。

② 透水量分布からみた帯水層中の地下水流と地下水位との関係

図3-16の透水量係数分布図より地下水供給能力をみた。

北部の扇状地域で、第1帯水層（G1）が $1000\sim 5000\text{m}^3/\text{日}$ にも達し、第2帯水層（G2）でもほぼ同じ程度の値を示しているのに対して南部の平野地域では、G1で $500$ ないし $100\text{m}^3/\text{日}$ 前後、G2で $300$ ないし $100\text{m}^3/\text{日}$ 前後の小さな値となっている。

このように、帯水層の地下水の供給能力は地域によって著しく変化することが指摘される。ここで注目すべきことは、同じ扇状地でも木曾川沿いの犬山扇状地域は、長良川・掛斐川の扇状地域に比べてかなり低く、 $1000\text{m}^3/\text{日}$ にも達しない。

このことは犬山扇状地域の地下水供給能力が相対的に低いことを示している。次に図

3-21から地下水質不連続線と地下水位低下域との関連性をみた。図中の地下水位低下域は、濃尾平野において過去最大の低下が発生した昭和48年当時の地下水位の低下域である。

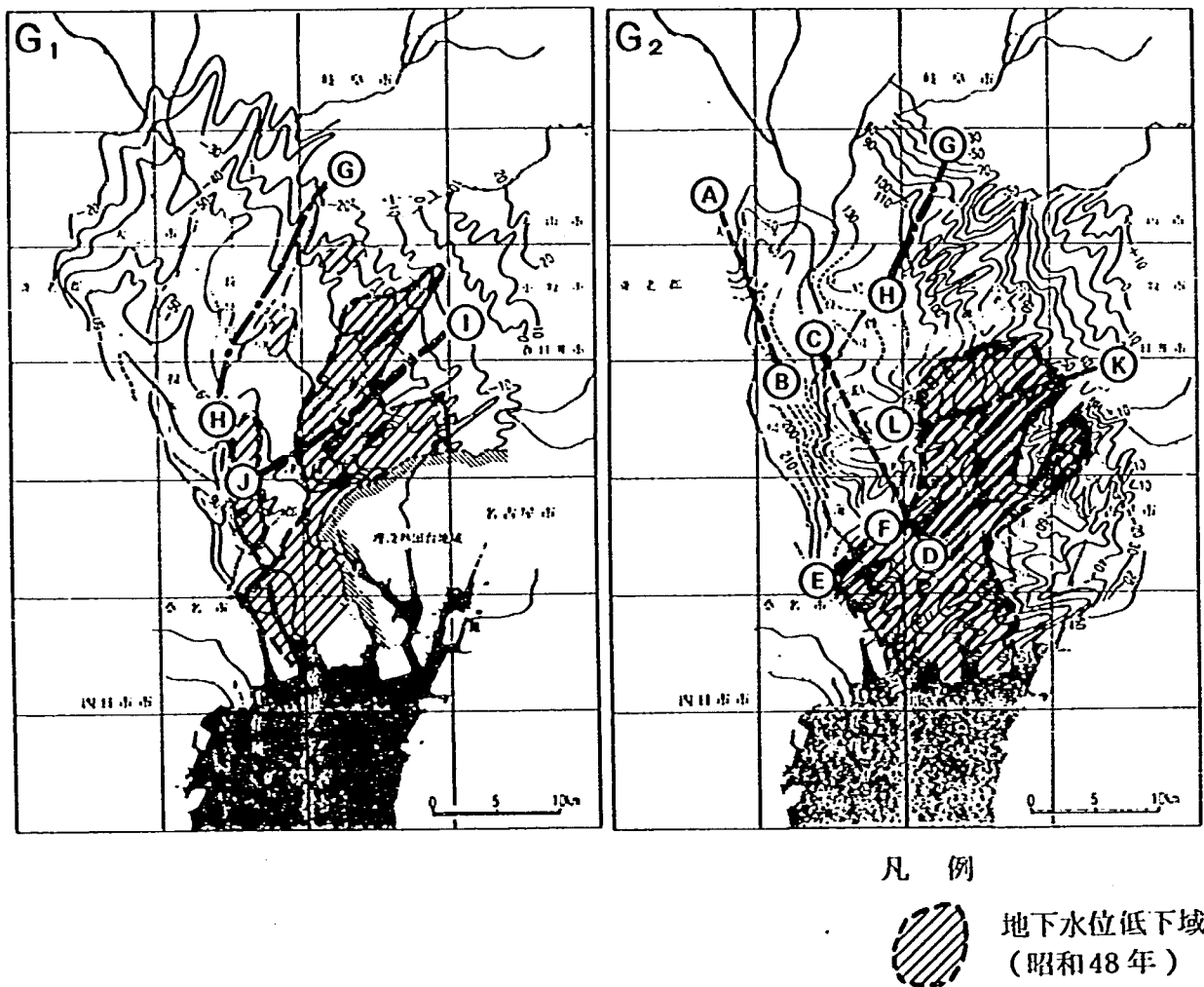


図3-21 G1層、G2層における地下水位低下域と地下水水質不連続線との関係

第1帯水層において、水位低下域は水質不連続線のI-J線の南側、第2帯水層において、K-L線、C-D線、E-D線に囲まれた名古屋市東部から臨海部の地域に集中している。

この原因としては、

- 1) 透水量分布図からみて、犬山扇状地からの地下水供給能力が、長良川・揖斐川の扇状地に比べてかなり低いこと。
- 2) 地下水質の不連続線に相当する埋没地形や断層によって、その環境において地下水流下量が大きく変化すること。
- 3) 特に犬山扇状地では濃尾地震時に活動が記録されている西落ちの断層（地形が急激に落ち込む）が、岐阜市から名古屋市に向けて走っており（岐阜-名古屋断層線）、この断層による扇状地側からの伏流浸透流を阻害していること。

4) 水位低下域は、地下水揚水量が比較的大きく集中していること。

等が考えられる。

## 第3章 広域シミュレーションのための基礎調査

### 3.1 概 説

地下水は、質量ともに優れた水資源であり、古くから人間生活と深く関わりをもってきた。

しかし、地下水自体は目に見えない存在であり、しかもその涵養・流動の速度が極めて遅いことから、地下水採取量の急激な増加が、自然の水収支のバランスを損なわせることとなり、種々の問題を生起させている。

このようなことから、地下水を有効に利用するにあたっては、広域にわたる地下水の動態を把握することが重要となり、その手段の一つとして数値シミュレーションがある。

数値シミュレーションとは地下水の流れを表現する方程式を、対象とする地下水帯あるいは地下水盆の体積と時間について積分することであり、おおむね次の手順により実施される。

- (1) 対象地域の地下水流動系をシステムとしてとらえ、システムの要素を分析する。
- (2) システムをモデル化する。
- (3) モデルの内・外挿検定を行う。
- (4) 予測シミュレーションの実施

ここで、(1)～(3)について検討しなければならない項目は表3-1に示すとおりとなる。

ここでは広域地下水シミュレーション結果の精度あるいは、モデル化の精度について判断するための基礎資料について、濃尾平野を例として調査した結果をまとめる。

表 3 - 1 地下水シミュレーションモデルの作成

| 大 項 目                  | 中 項 目                 | 小 項 目                        | 細 項 目                                                                                                      |
|------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 地下水流動系におけるシステム要因の分析 | (1) 地下水の自然涵養の<br>実態分析 | ① 地層構造の分析                    | イ) 地質柱状図作成・分析<br>ロ) 帯水層・加圧層の分類<br>ハ) 地質構造図作成                                                               |
|                        |                       | ② 地下水流動系の分析                  | イ) 地層構造による地下水盆の判断<br>ロ) 地層別の水頭値観測井分布の把握<br>ハ) 観測井毎の実測地下水頭値の把握<br>ニ) 帯水層における実測地下水頭値の平面分布の推定<br>ホ) 地下水流動系の分析 |
|                        | (2) 解析対象領域の判断         |                              | イ) 地下水盆領域の把握<br>ロ) 地下水流動系の把握<br>ハ) 地層構造分析による層分布の把握<br>ニ) 境界部の水頭値、流量諸元の把握                                   |
|                        | (3) シミュレーション手法<br>の検討 | ① 基礎方程式の分析                   | イ) 一次元基礎方程式の適用範囲の把握<br>ロ) 二次元基礎方程式の適用範囲の把握<br>ハ) 準三次元基礎方程式の適用範囲の把握<br>ニ) 三次元基礎方程式の適用範囲の把握                  |
|                        |                       | ② 数値積分手法の分析                  | イ) 理論解の展開<br>ロ) 差分法の展開<br>ハ) 有限要素法展開                                                                       |
|                        | (4) 計算条件諸量            | ① 初期条件諸量                     | イ) 帯水層別水頭値分布の把握                                                                                            |
|                        |                       | ② 境界条件諸量                     | イ) 不圧層水頭値分布の期間別把握<br>ロ) 帯水層別周囲境界における水頭値の期間別分布把握<br>ハ) 揚水量諸元の把握                                             |
|                        |                       | ③ 物理定数諸量                     | イ) 物理定数の測定値分布把握                                                                                            |
|                        | (1) 解析対象領域のモデル化       | ① 平面領域のモデル化                  | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 地下水盆領域の把握<br>ハ) 領域のモデル化                                                        |
|                        |                       | ② 縦断形状のモデル化                  | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 地層構造の把握<br>ハ) 領域のモデル化                                                          |
| 2. システムのモデル化           | (2) 境界条件のモデル化         | ① 初期条件のモデル化                  | イ) 実測水頭値分布の把握<br>ロ) モデル化手法の検討<br>ハ) 初期条件のモデル化                                                              |
|                        |                       | ② 周囲境界条件のモデル化                | イ) 実測水頭値分布の把握<br>ロ) モデル化手法の検討<br>ハ) 周囲境界条件のモデル化                                                            |
|                        | (3) 数値計算モデルの作成        | ① 基礎方程式の選定                   | イ) 解析目的、スケールの分析<br>ロ) 基礎方程式の選定                                                                             |
|                        |                       | ② 基礎方程式展開                    |                                                                                                            |
|                        |                       | ③ 数値積分手法の決定                  | イ) 解析目的、スケールの分析<br>ロ) 数値積分手法の決定                                                                            |
|                        |                       | ④ 物理定数の検討                    | イ) 物理定数測定資料の把握<br>ロ) 物理定数の実験資料にもとづく把握                                                                      |
| 3. シミュレーションモデルの内挿検定    | (1) 初期条件              | ① 初期条件設定手法                   |                                                                                                            |
|                        |                       | ② 初期条件の作成                    | イ) 実測水頭値分布の把握<br>ロ) 実測水頭値資料の把握<br>ハ) 初期条件の作成                                                               |
|                        | (2) 境界条件              | ① 不正帯水層における<br>境界条件の検討       | イ) 設定手法の検討<br>ロ) 実測水頭値分布の把握<br>ハ) 実測水頭値資料の把握<br>ニ) 境界条件の作成                                                 |
|                        |                       | ② 周囲境界条件の検討                  | イ) 設定手法の検討<br>ロ) 実測水頭値分布の把握<br>ハ) 実測水頭値資料の把握<br>ニ) 境界条件の作成                                                 |
|                        |                       | ③ 揚水量の検討                     | イ) 設定手法の検討<br>ロ) 揚水井の分布把握<br>ハ) 揚水資料の把握<br>ニ) 境界条件の作成                                                      |
|                        | (3) 計算条件              | ① 要素分割の検討                    | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 境界条件諸量との比較判断<br>ハ) 要素分割の決定                                                     |
|                        |                       | ② 計算時間間隔                     | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 計算時間間隔の決定                                                                      |
|                        |                       | ③ 計算ステップ数                    | イ) 解析対象スケール（空間、時間）の設定<br>ロ) 計算ステップ数の決定                                                                     |
|                        | (4) 物理定数の設定           |                              |                                                                                                            |
|                        | (5) 内挿検定              | ① 感度分析の実施                    | イ) 物理定数と計算水頭値分布の関係把握<br>ロ) 物理定数のオーダーの見放り                                                                   |
|                        |                       | ② シミュレーションにおける<br>初期条件の影響の検討 | イ) 初期条件と計算ステップ数の関係把握                                                                                       |
|                        |                       | ③ シミュレーションにおける<br>境界条件の影響の検討 | イ) 境界条件と計算水頭値の関係把握<br>ロ) 境界条件とモデル領域の水収支の関係分析<br>ハ) 揚水量モデル化手法と水頭値の関係把握                                      |
|                        |                       | ④ 物理定数の検討                    |                                                                                                            |
|                        | (6) 結果の判断             | ① 水収支の判断                     | イ) 水収支算定手法の検討<br>ロ) 水収支の算定<br>ハ) 結果の判断                                                                     |
|                        |                       | ② 地点別計算水頭値の判断                |                                                                                                            |
|                        |                       | ③ 計算水頭値の平面分布の判断              |                                                                                                            |

### 3.2 濃尾平野を例とした基礎調査

#### 3.2.1 自然・社会条件の概要

濃尾平野は国土のほぼ中央に位置する面積約1500km<sup>2</sup>の平野で、文化的にみても東西日本の境界域にある。この平野は東高西低の地形を呈し、平野東部には洪積段丘が広がり、西部には、木曽川・長良川・掛妻川左岸地域を尾張平野、右岸地域を美濃平野と称し、尾張平野の東西部には名古屋市、美濃平野の北部には岐阜市、大垣市が所在している。

濃尾平野のうち尾張平野部における人口現象は、我が国三大都市圏の一つである名古屋都市圏における動向としてとらえることができる。名古屋都市圏における人口の動きをみると、人口急増地帯が次第に都心から遠ざかっていく、いわゆる「ドーナツ化現象」が進行しており、この現象は、美濃平野の岐阜市、大垣市にもあらわれている。

表 3 - 2 業種別地下水使用量（工業用）

|                | 工 場 数<br>(件) | 地 下 水 使 用 量           |        | 工場1件当りの使用量<br>(m <sup>3</sup> /日) |
|----------------|--------------|-----------------------|--------|-----------------------------------|
|                |              | 実数(m <sup>3</sup> /日) | 構成比(%) |                                   |
| 総 数            | 1,346        | 1,842,611             | 100.0  | 1,369.0                           |
| 食料品・たばこ製造業     | 185          | 138,978               | 7.5    | 751.2                             |
| 繊維工業           | 393          | 982,342               | 53.5   | 2,499.6                           |
| 衣服・その他の繊維製品製造業 | 69           | 52,079                | 2.8    | 754.8                             |
| 木材木製品製造業       | 28           | 5,534                 | 0.3    | 197.6                             |
| 家具・装備品製造業      | 18           | 2,843                 | 0.2    | 157.9                             |
| パルプ・紙・紙加工品製造業  | 35           | 166,305               | 9.0    | 4,751.6                           |
| 出版・印刷関連業       | 24           | 4,061                 | 0.2    | 169.2                             |
| 化学工業           | 82           | 215,834               | 11.7   | 2,632.1                           |
| 石油製品・石灰製品製造業   | 9            | 5,694                 | 0.3    | 632.7                             |
| ゴム製品製造業        | 10           | 11,878                | 0.6    | 1,187.8                           |
| なめし皮製品製造業      | 2            | 15                    | *      | 7.5                               |
| 窯業・土石製品製造業     | 78           | 41,881                | 2.3    | 536.9                             |
| 鉄鋼業            | 52           | 34,909                | 1.9    | 671.3                             |
| 鉄金属製品製造業       | 18           | 18,617                | 1.0    | 1,034.3                           |
| 金金属製品製造業       | 118          | 35,666                | 1.9    | 302.3                             |
| 一般機械器具製造業      | 45           | 19,079                | 1.0    | 424.0                             |
| 電気送用機械器具製造業    | 39           | 25,114                | 1.4    | 643.9                             |
| 輸送用機械器具製造業     | 37           | 46,198                | 2.5    | 1,248.6                           |
| 精密機械器具製造業      | 17           | 2,513                 | 0.1    | 147.8                             |
| その他の製造業        | 79           | 23,623                | 1.3    | 299.0                             |
| 電力             | 1            | 3,500                 | 0.2    | 3,500.0                           |
| ガス             | 4            | 2,180                 | 0.1    | 545.0                             |
| 熱供給業           | 3            | 3,768                 | 0.2    | 1,256.0                           |

(出典：「濃尾平野の利水概史」昭和60年3月  
中部地方建設局河川部河川計画課)

また産業面でも日本有数の重要地域をなし、昭和55年の製造品出荷額において全国シェアの50%、また年間販売額の7.8%を占めている。特に工業では、一宮・尾西市の毛織物工業が盛んであるが、現在では、工業の主軸が、繊維工業から輸送機械を含む機械工業に変わりつつある。それでも毛織物生産の全国シェアは約70%にも達している。それらは、地下水依存度の高い業種であるために、昭和48年における工業用地下水使用水量約184万m<sup>3</sup>/日の53%にもあたる98万m<sup>3</sup>/日を使用している。(表3-2)

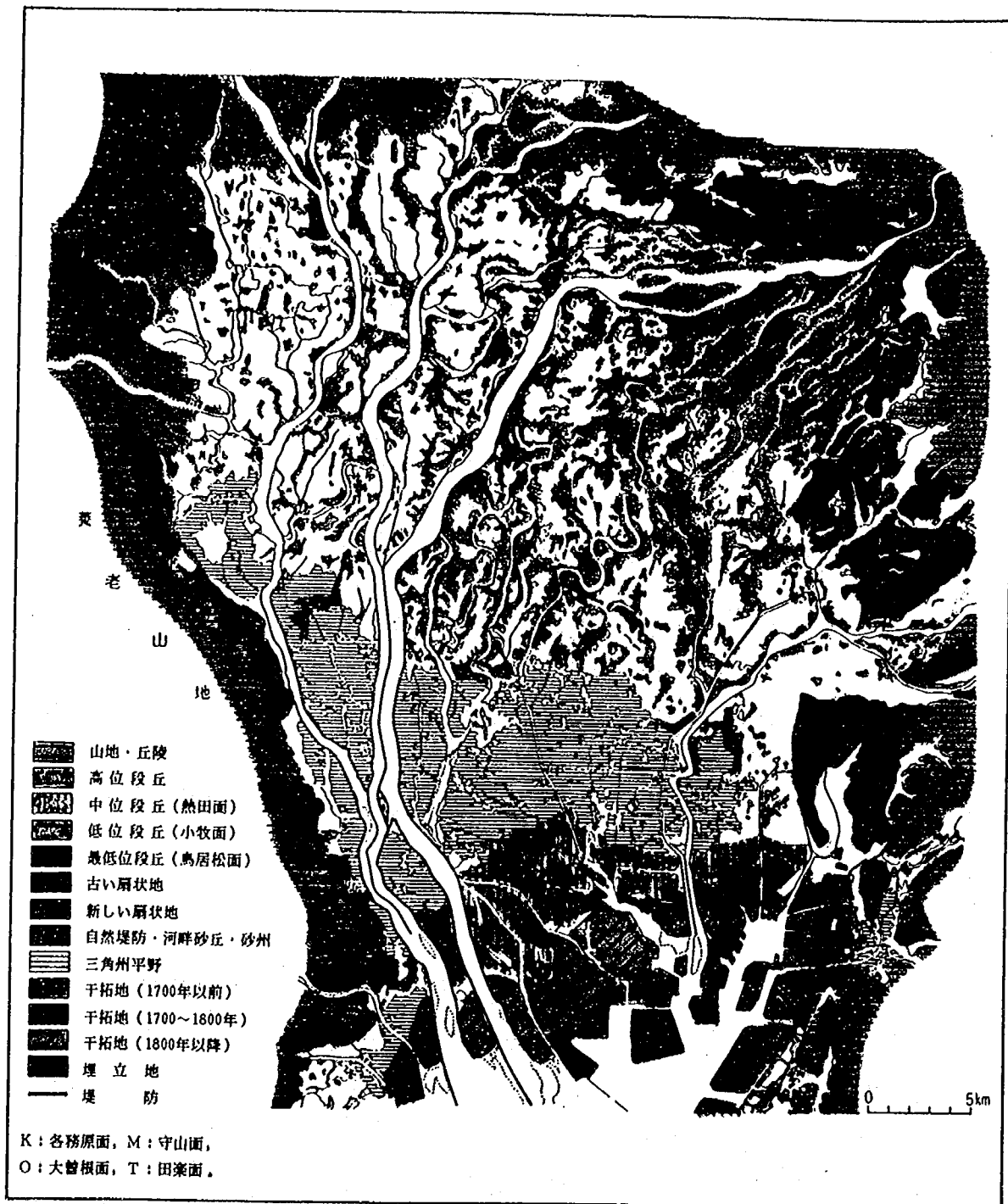
### 3.2.2 地 形

濃尾平野は我国でも有数の沖積平野で、図3-1に示すような地形を呈し、基本的には扇状地、自然堤防地帯、及び三角州地帯に大別でき、特に、自然堤防と背後地の入り乱れている自然堤防地帯が広く発達している。(図3-1)

扇状地のなかで、最も大規模なものとしては、美濃・尾張平野に跨がる木曾川扇状地(犬山扇状地)がある。木曾川扇状地は、犬山城付近を扇頂とする半径12km、面積約100km<sup>2</sup>に達する大扇状地である。扇頂部の標高は約50m、一宮市極楽寺～岩倉市八剣を結ぶ扇端部は標高11～13mであるから、扇状地の平均勾配は約0.3%である。扇状地には木曾川の分派流、一之枝川(石枕川)、二之枝川(般若川)、三之枝川(浅井川)などが放射線状に発達し、扇状地面に2～3mの深さをもつ開析谷を形成している。

自然堤防地帯は、尾張平野の場合、木曾川扇状地の扇端から、ほぼ津島～名古屋を結ぶ名鉄津島線に至る地帯に広がる。木曾川及びその分派流によって形成される主要自然堤防群は、イ)五条川系統、ロ)青木川系統、ハ)三宅川系統、ニ)日光川系統に大別される。美濃平野側でも木曾川の旧河道や、木曾川の影響が加わった長良川の旧河道などに沿って分布するが、分布の下流限界は海津町今尾付近にあって尾張平野より内陸に位置する。ただ、沈降傾向にある揖斐川右岸地域では、ほとんど自然堤防はみられない。自然堤防と後背湿地との比高は多くが2m以下であり、従来、集落の多くは自然堤防の上にあった。

三角州地帯は、その大部分が海面干拓新田の造成によって陸化した土地なので、地盤は満潮位面より低い場合が多い。この地帯には伊勢湾台風当時においても約186km<sup>2</sup>に及ぶ0m地帯が広がっていたがその後の地盤沈下の影響が加わって、昭和53年時点でその面積は約274km<sup>2</sup>となった。この地帯は、昭和34年の伊勢湾台風の高潮の際には、戦後最大といわれる大被害をこうむり2ヶ月以上にわたって湛水をみた。

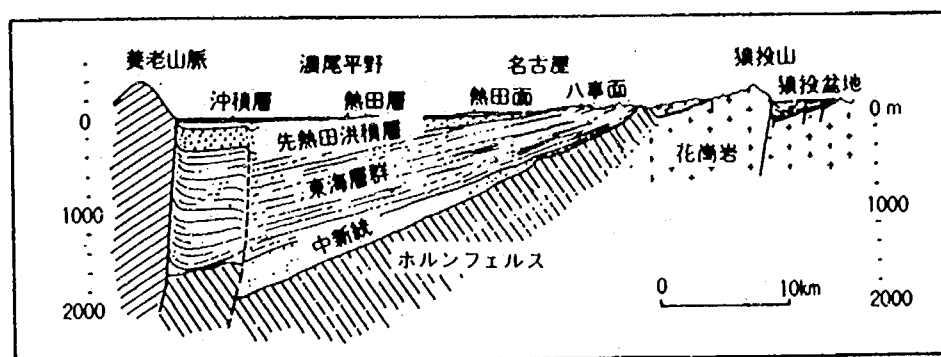


(出典: 東海三県地盤沈下調査会編「濃尾平野の地盤沈下と地下水」)

図 3-1 濃尾平野地形分類図

### 3.2.3 地 質

濃尾平野は、西縁を傾動地累性の基盤山地である養老山脈と急峻な養老断層崖で接し、東は尾張・三河の第三紀丘陵地域を経て次第に高度を増して、ついには猿投基盤山地へと続く。北は美濃山地の低下した南縁を沈水海岸状に平野が埋め、南は伊勢湾に開いており、西側の養老断層で沈降し、東の猿投山塊を上昇側とする基盤の傾動地塊運動の結果もたらされた沈降盆地である。第三紀世末の鮮新世から第四紀前半にかけては、この地域を含む広い範囲に東海湖盆と呼ばれる沈降盆地が存在していた。第四紀の後半以降になって濃尾平野地域の部分は基盤の傾動盆地運動によって新たな沈降地域となり、沈降端側の濃尾平野西縁では、300~400mに達する厚い沖積世中期以降の地層が堆積している。こうした部分では、東海湖時代以降の堆積物の厚さは1500~2000mにも達している。(図3-2, 詳しい地層の重なり方は表3-3参照)



(出典：桑原(1968), 濃尾盆地と傾動地塊運動, 第四紀研究)

図3-2 濃尾傾動盆地の東西断面

これらの第四紀中期以降の地層は、氷期の海面低下期の河床性の礫層と間氷期の高海面期に堆積した淡水成又は海水成の粘土層が交互に重なっている。氷期の海面低下期には、河川の浸食作用によって谷地形が刻み込まれており、こうした礫層堆積期毎に認められる埋没浸食谷地形は、それを覆う粘土層の層厚分布を基本的に支配する要素になるとともに、礫層(帯水層)の中の地下水流を規制する要素となる。一方粘土層は間氷期の高海面期の海湾の浸入域又は退水域の広がりに応じて分布しているが、平野の北部では砂や礫層に移化し、扇状地ではほとんど砂と礫層が上から下まで重なっており、濃尾平野の豊富な被圧地下水はこれらの扇状地で涵養された。

表 3 - 3 濃尾平野の地下層序と周辺地域との対比ならびに地史

| 地 質 時 代 |       |       |       | 濃 尾 平 野                                                                                             | 周 辺 地 域 の 同 時 代 の 地 層          | 地 史<br>(推定年代 × 10 <sup>4</sup> 年前)                                         |
|---------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 新 生 代   | 第 四 紀 | 完新世   | 新 期   | 南 陽 層                                                                                               | 沖 積 層                          | 濃尾沖積平野面の形成<br>縄文海進<br>(1)<br>(1.3) (Allerod期)<br>更新世最末期小海面上昇               |
|         |       |       |       | 濃 尾 層                                                                                               |                                | (2)                                                                        |
|         |       | 更新世   | 後 期   | 第 一 礫 層                                                                                             |                                | 最終氷期海面最低下期<br>(3) ↑<br>海面小変動期<br>(4~5) ↓<br>(7~9) 最終氷期の始まり<br>(12) (最終間氷期) |
|         |       |       |       | (埋没低位段丘群)                                                                                           | 鳥居松礫層<br>小牧・大曾根礫層              |                                                                            |
|         |       |       |       | あつた 熱田層 上部<br>熱田層 下部                                                                                | 熱田層・各務原層・碧海層・野間層               |                                                                            |
|         |       |       |       | 第 二 礫 層                                                                                             |                                | (15) 氷 河 期<br>海面低下期<br>小海進・小氷期の繰返し                                         |
|         |       | 中 期   | (洪積世) | (埋没段丘群)                                                                                             | 高位段丘群 { 桃山礫層<br>桃花崗礫層<br>潮見坂礫層 |                                                                            |
|         |       |       |       | 海部累層<br>Am <sub>3</sub><br>Ag <sub>2</sub><br>Am <sub>2</sub><br>Ag <sub>1</sub><br>Am <sub>1</sub> | 高位礫層群<br>(武豊層群・見当山累層)          |                                                                            |
|         |       |       |       | 第 三 礫 層                                                                                             |                                | 氷 河 期                                                                      |
|         |       | 鮮新世   | 前 期   | やぶ 弥富累層                                                                                             | 八事層 唐山層 上末層                    | 氷河性海面変動の繰返し<br>(80+) ↓<br>東海湖時代 基盤の波曲的変形<br>(500)                          |
|         |       |       |       | 東 海 層 群                                                                                             | 瀬戸層群・常滑層群・奄芸層群                 | 第一瀬戸内海海進期<br>(2,000)                                                       |
| 中・古 生 代 | 第 三 紀 | 中 新 世 |       | 中 新 統                                                                                               | 瑞浪層群・師崎層群・一志層群                 |                                                                            |
|         |       |       |       | 基 盤                                                                                                 | 基盤山地の中古生層、花崗岩類                 |                                                                            |

### (1) 南陽層 (不圧帯水層)

南陽層は、上部の砂層と下部の軟弱な海成粘土層から成っている。上部の砂層は濃尾平野の最上部の不圧帯水層を構成し、その厚さは10m前後で、北部の扇状地帯では砂礫層に移化する。下部泥層では氷期に形成された浸食谷中に厚く堆積していて、平野南部では30m以上の厚さとなり、下位の濃尾層とともに第1礫層を加圧する難透水層である。初期の地盤沈下の大半は、この層の圧密によって生じたものと考えられる。

### (2) 濃尾層

濃尾層はアレード期 (更新世末期の小温暖化期) の海面上昇期に伴って堆積した地層で主としてシルトと砂の互層から成っている。濃尾平野の埋没主谷の南部では-40m以深に、北部では-30m前後以深に分布し、その層厚は10~20m程度である。

濃尾層のN値は、沖積層のそれより大きく、砂層では30前後から50以上、粘性土でも20前後の値を示し、その上位に重なる軟弱な沖積層より硬く締まっている。

### (3) 礫層 (第1帯水層)

ウルム氷期における海面低下時の開析谷に堆積した礫層で、濃尾平野西縁の埋没主谷中

で20m以上の厚みを有し、北方の掛斐川沿い低地では40mもの厚さとなり、扇状地を構成する礫層と重なるものと考えられる。このように掛斐川沿いの平野北部で地下水供給量の大きいことの理由の一端がこの地帯で礫層の層厚が著しく肥大することにも示されている。名古屋市西・南部では、埋没熱田台地が地下に存在するためにこの地域には分布しない。第1礫層は、豊富な地下水帯水層として知られ第1帯水層と呼ばれている。

#### (4) 熱田層

熱田層は砂層を主体とする上部層と海成粘土層を主体とする下部層とから成る。上部層は砂層を主体とすることから、第1礫層を欠く名古屋市域の浅井戸の取水層として利用され、また深井戸の補助取水層ともなっている。下部層は30m前後の層厚の海成粘土層であるが、平野北部では砂層と礫層の互層となる。平野東部では、海面低下期に地下水面上に上がったため、過圧密の状態にあると考えられる。しかし、70~80m以深では正規圧密状態にあり、被圧密層として取り扱い必要がある。

#### (5) 第2礫層（第2帯水層）

第2礫層は、15~30mの層厚を有する礫層で、熱田層下部堆積前の海面低下期の河床礫と考えられ、平野西部や庄内川の西流部の西南方延長上の地下に開析谷を刻みながら堆積している。北部の扇状地では層厚を増し、かつ上位の熱田層も砂礫化していることから、第1礫層から砂礫層だけが重なっており、地表水が垂直方向に浸透することを示している。

埋没段丘部分では厚さが10m以下になっていることが多く、特に名古屋市西南部の埋没段丘上では厚さが5m以下となっている。

第2礫層は、こうした埋没段丘域の条件の悪いところを除けば、濃尾平野全域で最も広く利用されている帯水層と言え、第2帯水層と呼ばれている。

#### (6) 海部累層

第2礫層の下位にある地層で、2枚の礫層をはさんで、3層の砂~粘土層が複雑累重している。熱田層の堆積環境に似た海退期~海進期のサイクルが数回繰り返されたものと考えられ、層厚は平野西部に向かって厚くなり100mを越すと考えられる。

#### (7) 第3礫層（第3帯水層）

海部累層の下位には、比較的連続性の良い第3礫層がある。第3礫層は10~30mを有する礫層で、第1礫層や第2礫層同様、比較的海退期（氷期）の堆積物と判断され海部累層の礫層を含めて帯水層を構成し、第3帯水層と呼ばれている。

#### (8) 先海部累層期の地層

第3礫層の下位には東海層群までになお、100m~200mの地層が存在する。これらの地層は、非海成らしい粘土層と砂または砂礫層との互層で上半部は比較的粘土層が厚く発達し、下半部は逆に砂礫層が優勢となる。

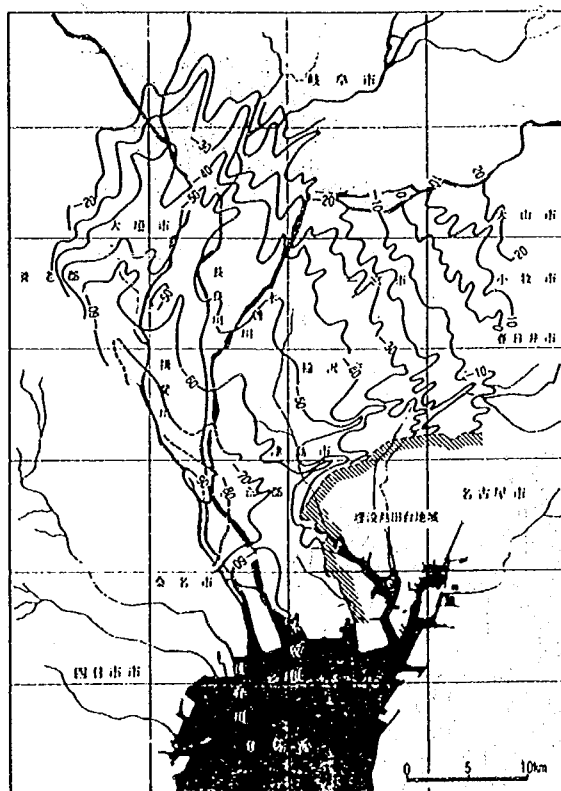
下半部は陸上の八事層・唐山層に相当するものと考えられ、八事期層と呼び、上半部は後八事期と呼んで区別する。この層については資料が極めて不足しており、詳しい事は判

らないのが現状である。

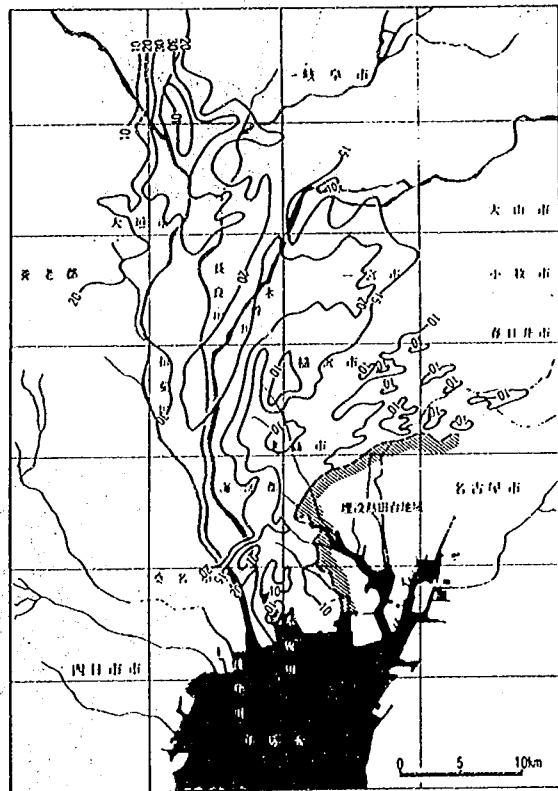
#### (9) 東海層群

第三紀鮮新世に東海湖盆中に堆積した湖成層で、濃尾平野の地下に広く分布している。層厚は、平野西部で1000mを越え名古屋市付近で500m前後あり、平野東縁の瀬戸一名古屋丘陵域には、東海層群の下半部が主体に分布しており、大まかには、礫層～砂泥互層～砂・礫層という地層の重なり方をしている。

以上のことから地質の状況としては、濃尾平野地下水盆地中の主要帯水層は第1礫層、第2礫層、第3礫層の3層であるといえる。平野南部の臨海部では粘土層と帯水層が互層構造となっており、北部の扇状地では砂礫層が地表から連続して堆積をしている状況である。



図の東南部名古屋市域（斜線部）は、埋没熱田台地域で第1礫層は分布しない。数字はT.P.基準（単位：m）  
（出典：桑原（1975）、濃尾傾動盆地の発生と地下の第四系）



（出典：桑原（1976）、濃尾傾動盆地の発生と地下の第四系）

図3-3 第1礫層基底面等深線図      図3-4 第1礫層等層厚線図      （単位：m）



### 3.2.4 地下水賦存量

濃尾平野の地下水賦存量については、さまざまな推定値があるが、桑原によって濃尾平野の地下200m以浅の部分の地質構成を明らかにし、これから地下水の賦存状況の推定を行った報告がある。この報告は土質試験値などを考慮した土質別の平均空隙率を想定し、その空隙は全て水で飽和され、その水分のうち吸着水や毛管水の形で強く土質中に保持されている水分率を保水率、残りを地下水盆中の流動水ないしは揚水可能な水量とし、その率を産出率として、これをもとに固相部分と空隙中の水分の産出可能量と保水量を算出したものである。これより堆積物中の産出可能量は、礫質土から 236億 $\text{m}^3$ 、砂質土から 161億 $\text{m}^3$ 、粘性土から44億 $\text{m}^3$ の計 441億 $\text{m}^3$ 、これに保水量の計 580億 $\text{m}^3$ を加えると約1,000億 $\text{m}^3$ 余りの地下水賦存量になるとしている。

産出可能量 441億 $\text{m}^3$ のうち、粘性土からの産出は、地盤沈下等の被害をもたらすことからこの量44億 $\text{m}^3$ を除いた約 400億 $\text{m}^3$ の地下水の循環使用が可能であるとしている。

表 3 - 4 土質別空隙率、産出率、保水率の設定

| 土 質   | 構 成 比    |              |
|-------|----------|--------------|
|       | 解析域内の構成比 | 北部扇状地域を補った場合 |
| 砂 質 土 | 24.2 %   | 23.4 %       |
| 粘 性 土 | 33.1 %   | 32.2 %       |
| 礫 質 土 | 42.8 %   | 44.4 %       |

表 3 - 5 濃尾平野地下200m以浅の各土質毎の固相、産水可能量、保水量

| 土 質 | 自然状態の総容積<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% | 固体部分の総容積<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% | 産水可能量<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% | 保水量<br>$\times 10^3 \text{m}^3$ | 同構成比<br>% |
|-----|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| 砂質土 | 644                                  | 23.8      | 419                                  | 24.8      | 161                               | 36.5      | 398                             | 68.7      |
| 粘性土 | 884                                  | 32.6      | 442                                  | 26.2      | 44                                | 10.0      | 64                              | 11.0      |
| 礫質土 | 1,182                                | 43.6      | 827                                  | 49.0      | 236                               | 53.5      | 118                             | 20.3      |
| 総 計 | 2,710                                | 100.0     | 1,688                                | 100.0     | 441                               | 100.0     | 580                             | 100.0     |

### 3.2.5 地下水利用状況

#### (1) 地下水利用の推移

愛知県における地下水利用実態調査は、地盤沈下対策の立場から昭和48年度に建設省、

環境庁が企画し、愛知、岐阜、三重の3県が実施した調査が初めてである。その後、昭和50年度に愛知県が独自に県全体にわたり実態調査を実施し、昭和48年度の調査もれ、揚水量等を修正し、調査精度の向上を図った。

また、昭和50年度以降は愛知県公害防止条例によって、毎月の地下水揚水量が報告されるようになり、より精度の高い地下水揚水量の実態を把握することが可能になった。名古屋市を除く尾張33市町村における、昭和40年以降の地下水揚水量の経年変化を図3-8に示した。昭和40年から徐々に増加し、昭和43年には100万 $\text{m}^3$ /日近くの揚水量になっている。昭和44年は揚水量が急増し、120万 $\text{m}^3$ /日台に達した。さらに昭和47、48年にはピークに達し、一日当たり約150～160万 $\text{m}^3$ の揚水量となっている。

昭和49年にはオイルショックによる経済不況、昭和50年以降は公害防止条例による揚水規制の効果があらわれ、昭和56年には約84万 $\text{m}^3$ /日まで減少している。

また、昭和51年から昭和56年までの愛知県、岐阜県、三重県、名古屋市の揚水実態を見れば、図3-9のとおりである。

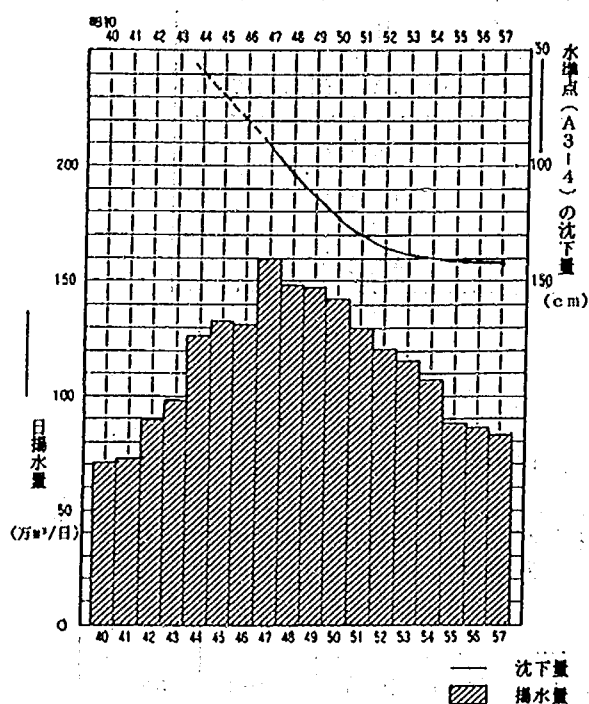
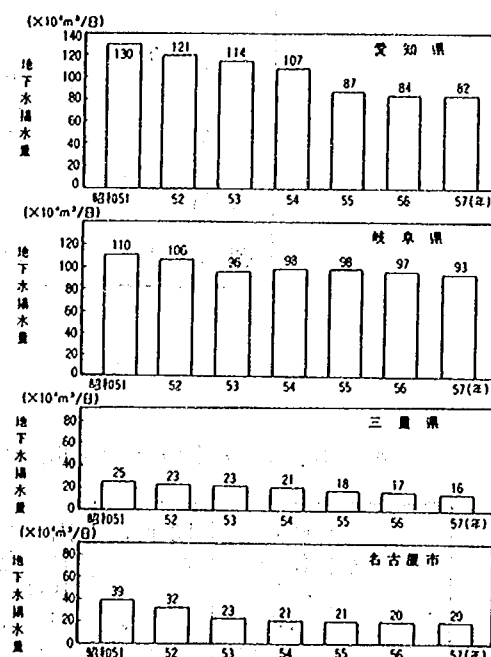


図3-8 揚水量の経年変化  
(名古屋市を除く尾張33市町村)



注) 愛知県は環境白書、岐阜県は工業統計及び岐阜県における水道の現況、三重県は県生活環境部の資料、名古屋市は市公害対策局の資料による。

図3-9 地下水揚水量の経年変化

## (2) 地下水利用の状況

濃尾平野全域にわたって井戸別揚水量の実態が調査されている昭和53年の地下水揚水実態をもとに、昭和53年度の地下水利用状況及び地域的な偏りを調査した結果は次のとおりである。

表 3 - 6 昭和53年度地下水揚水状況

〔上段：揚水量 (m<sup>3</sup>/s/日)、下段：割合(%)〕

| 用途<br>地域 | 工業              | 建築物            | 農業             | 水産             | 水道              | その他            | 合 計       |
|----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
| 愛 知 県    | 543,310<br>62.0 | 69,504<br>8.0  | 3,671<br>0.4   | 4,990<br>0.6   | 260,838<br>31.0 | 0<br>0.0       | 880,547   |
| 三 重 県    | 17,691<br>12.0  | 793<br>1.0     | 29,835<br>20.0 | 71,332<br>49.0 | 7,849<br>5.0    | 18,870<br>13.0 | 146,360   |
| 名古屋市     | 107,030<br>76.0 | 16,430<br>12.0 | 3,478<br>2.0   | 0<br>0.0       | 532<br>0.4      | 12,933<br>9.0  | 140,536   |
| 合 計      | 668,031<br>57.0 | 86,727<br>7.0  | 36,984<br>3.0  | 76,312<br>7.0  | 269,219<br>23.0 | 31,803<br>3.0  | 1,167,443 |

(出典：「昭和59年度 濃尾平野地下水管理計画調査」

昭和60年3月 建設省中部地方建設局木曽川下流工事事務所)

昭和53年の用途別揚水量は、濃尾平野全域において工業用が最も多く、57%を占め次いで水道用が23%となっており、この2つの用途だけで全体の8割に達する。以下、建築用及び水産養殖用が7%、農業が3%の順になっている。県市別に見ると、愛知県と名古屋市で工業用水の60%以上を占め、三重県では水産養殖用が50%近くを占める。

## (3) 揚水強度の分布

地域的な揚水量の分布を把握するため、国土基準メッシュ (1 kmメッシュ) 毎に揚水量を表 3 - 7 の9段階に区分して整理し、その結果を帯水層別の揚水量強度分布として、図 3 - 11～図 3 - 14に示した。

表 3 - 7 揚水強度ランク (m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>)(m<sup>3</sup>/ 日/ km<sup>2</sup>)

| ランク | 範 囲           | ランク | 範 囲             | ランク | 範 囲              |
|-----|---------------|-----|-----------------|-----|------------------|
| 1   | 0 < Q < 100   | 4   | 500 < Q < 1000  | 7   | 5000 < Q < 7000  |
| 2   | 100 ≤ Q < 300 | 5   | 1000 ≤ Q < 3000 | 8   | 7000 ≤ Q < 10000 |
| 3   | 300 ≤ Q < 500 | 6   | 3000 ≤ Q < 5000 | 9   | 10000 ≤ Q        |

ここで各メッシュの揚水井一本毎の層別揚水量は、各帯水層にかかる各井戸のストレーナ長の比で算出した値である。

すなわち、図 3 - 10に示すメッシュ上の井戸について、ストレーナがそれぞれ L 1, L 2 の長さであるとする、G 1 層では  $l_{11}$ , G 2 層では  $l_{12}$  及び  $l_{21}$ , G 3 層では  $l_{22}$  の長さに比例する揚水量が算定されることになる。

したがって、ある日の各井戸の揚水量を Q とすると

G 1 層では  $\ell_{11}/(L_1+L_2) \times Q$

G 2 層では  $(\ell_{12} + \ell_{21})/(L_1+L_2) \times Q$

G 3 層では  $\ell_{22}/(L_1+L_2) \times Q$

の揚水量となる。

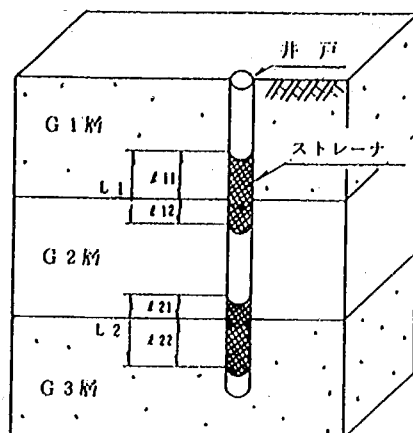


図 3 - 10 帯水層と多層揚水井

各帯水層毎の揚水強度の地域分布の特徴は次のとおりである。

- ① 第 1 帯水層 (G 1 層) の揚水強度 (図 3 - 11) は、犬山扇状地域、岐阜県域、尾張中部域の津島市及び長島町の沿岸部に集中しており、扶桑町、小牧市、岐阜県側の北方町で  $10,000\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以上のメッシュが存在するが、大多数は  $3000\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以下である。特に名古屋市域は第 1 礫層が欠如して、熱田層からの取水となるため、揚水強度は小さい。
- ② 第 2 帯水層 (G 2 層) の揚水強度 (図 3 - 12) は、第 1 帯水層の分布と似ており、犬山扇状地域、岐阜県域及び津島市、さらには沿岸部の長島地域に集中している。ただ  $10,000\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以上の揚水強度を示す扶桑町、小牧市は  $3000\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以下に減少しているのが読み取れる。
- ③ 第 3 帯水層 (G 3 層) の揚水強度 (図 3 - 13) は、第 1、第 2 帯水層と比べ全域にわたって大きい強度の揚水メッシュが分布している。特に他の帯水層に比べ集中度が低く、空白のメッシュが目立った濃尾中部域において、 $7000\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$  以上の強度を示す地域が存在するようになった。逆に第 1、第 2 帯水層で揚水強度の大きい犬山扇状地域では、第 1 帯水層のそれに比べかなりの減少がみられる。

④ 次に帯水層別用途別揚水量を集計すれば、表3-8に示すとおりとなる。

表3-8 帯水層別用途別揚水量  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

単位:  $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$

| 用途<br>帯水層 | 工業      | 建築     | 農業     | 水産     | 水道      | 合計        |
|-----------|---------|--------|--------|--------|---------|-----------|
| 不圧層       | 44,135  | 5,771  | 2,100  | 316    | 26,872  | 79,204    |
| 第1帯水層     | 277,485 | 20,388 | 1,983  | 10,635 | 180,654 | 492,161   |
| 第2帯水層     | 204,458 | 11,996 | 2,697  | 12,904 | 97,276  | 330,210   |
| 第3帯水層     | 246,994 | 22,403 | 10,409 | 25,399 | 134,226 | 444,665   |
| 第三紀層      | 25,539  | 5,902  | 436    | 17,241 | 15,767  | 70,523    |
| 合計        | 798,611 | 66,460 | 17,625 | 66,495 | 454,795 | 1,416,763 |

(出典:「昭和59年度 濃尾平野地下水管理計画調査」)

昭和60年3月 建設省中部地方建設局木曽川下流工事事務所)

この結果から、第1帯水層から第3帯水層の各帯水層毎に著しい揚水量の違いはなく、第1帯水層から第3帯水層の利用は、不圧層から第三紀層までの全揚水量に対して90%近い地下水利用を受け持っていることが確認できる。

### 3.2.6 透水量係数及び貯留係数

透水量係数や貯留係数は地下水盆の水収支などを明らかにするために重要な係数である。

これらの係数は揚水試験、圧密試験によっても得られる値である。

透水量係数とは、透水係数に層厚を乗じたもので、透水係数はその地質の透水性を表す数値(次元 $\text{L T}^{-1}$ )である。

貯留係数とは、比貯留量に層厚を乗じたもので、比貯留量は土の間隙水頭が単位量だけ増加するときに単位面積の土に貯留される量(次元 $\text{L}^{-1}$ )である。

#### (1) 帯水層

揚水試験より求まる透水係数、比貯留量の値を図3-11に、透水量係数、貯留係数の分布を図3-16、3-17に示す。

透水量係数は、第1帯水層では第1礫層のある濃尾平野西縁で $1000\text{m}^3/\text{日}$ という比較的大きな値を示すものがあり、特にその層厚が大きくなる。また、北東部の掛斐川扇状地に向けても大きな値を示している。これに対して犬山扇状地側ではあまり大きな値はとらない。東半部の埋没段丘域では $200\text{m}^3/\text{日}$ 以下の小さな値となっており、層厚が小さくなっているだけでなく、透水係数も低くなっていることが考えられる。平野東南部の第1

礫層が分布せず、熱田層上部の砂層がその代替の役割をしている地域では、 $100\text{m}^2/\text{日}$ 以下の小さな値となっている。

比貯留量は、第1帯水層、第2帯水層とも $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ 1/m}$ の値を示すのが一般であるが、試験値の精度に問題があり特定の傾向はみられない。

第3帯水層系統については、 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ 1/m}$ の範囲の値が得られ、西部に向かって大きくなる傾向を示している。

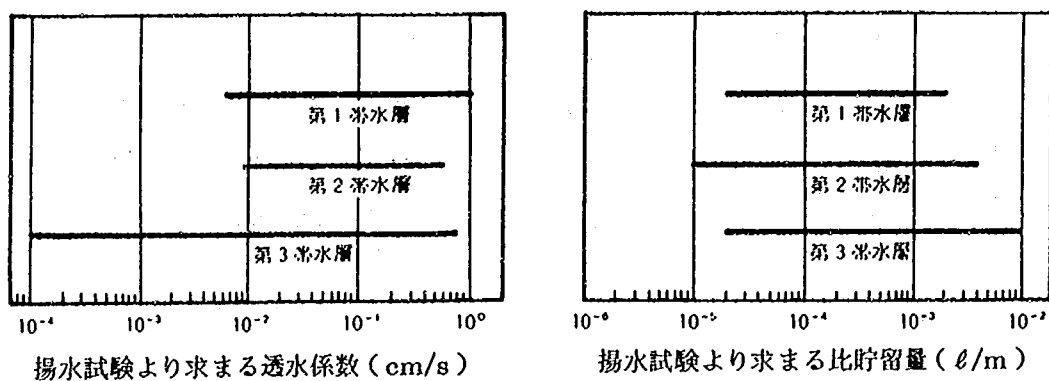
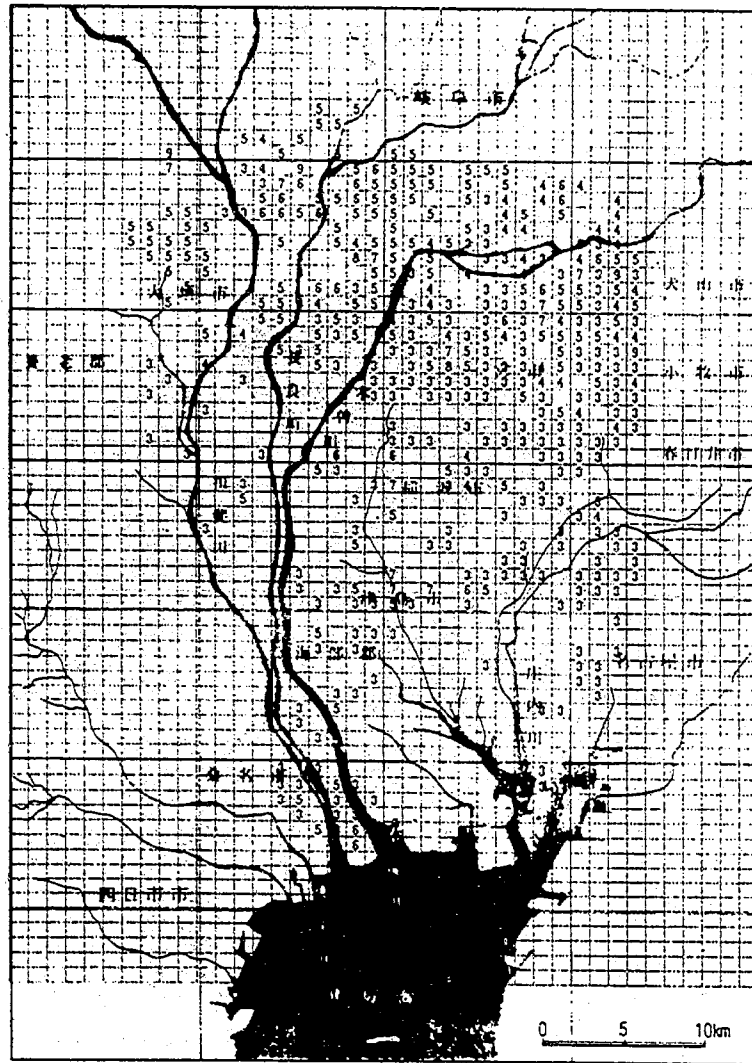


図3-11 帯水層の透水係数及び比貯留量

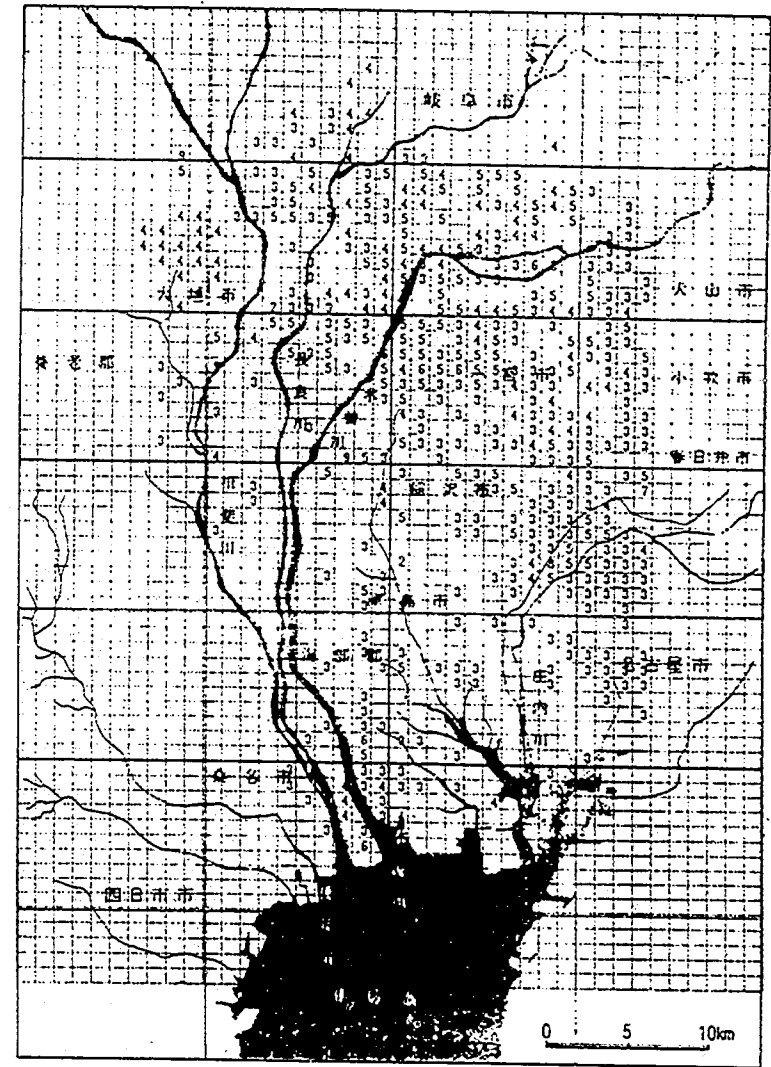


揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

(対象年度……昭和52年度)

図3-12 揚水強度分布 (G1層)

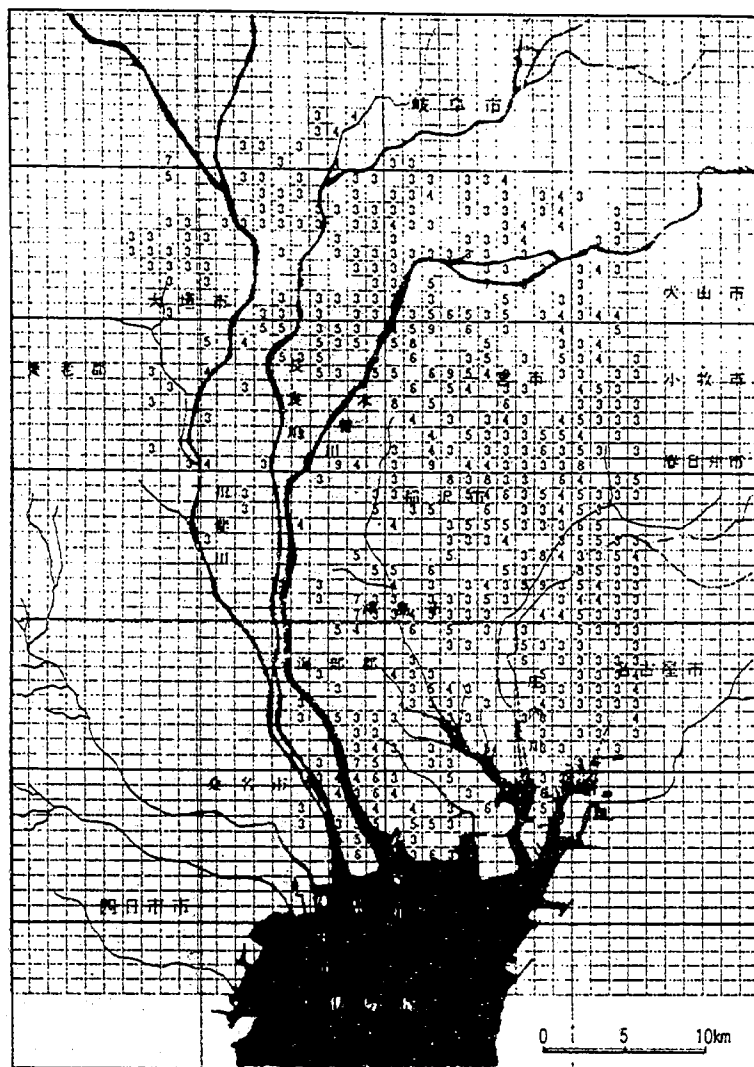


揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

(対象年度……昭和52年度)

図3-13 揚水強度分布 (G2層)

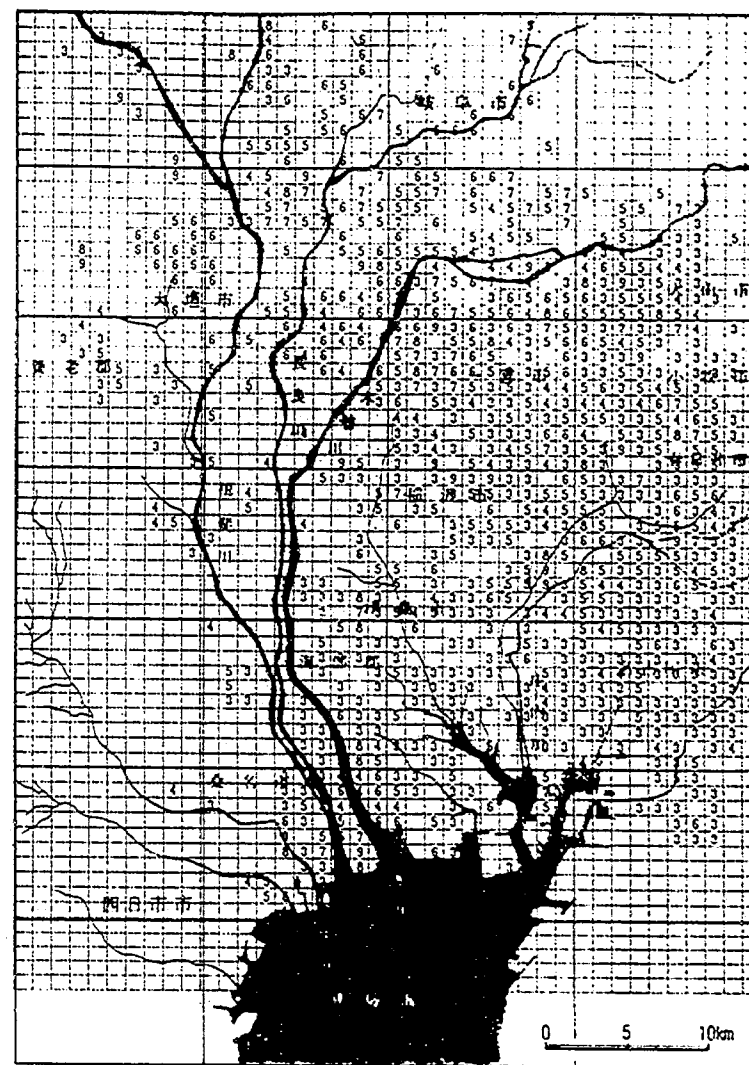


揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

(対象年度……昭和52年度)

図3-14 揚水強度分布 (G3層)



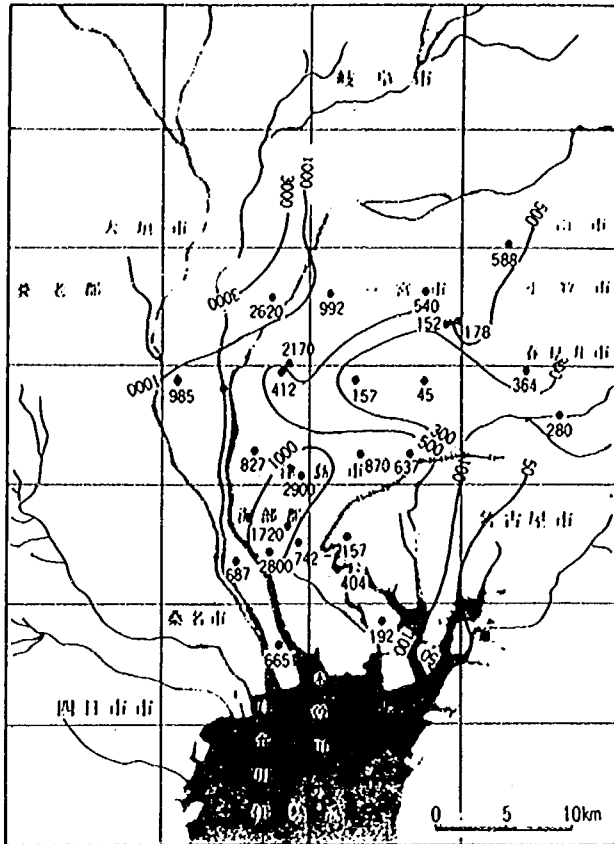
揚水強度  
ランク

|   |                                              |
|---|----------------------------------------------|
| 3 | 0 ~ 500 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 未満 |
| 4 | 500 ~ 1000 "                                 |
| 5 | 1000 ~ 3000 "                                |
| 6 | 3000 ~ 5000 "                                |
| 7 | 5000 ~ 7000 "                                |
| 8 | 7000 ~ 10000 "                               |
| 9 | 10000 $\text{m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ 以上   |

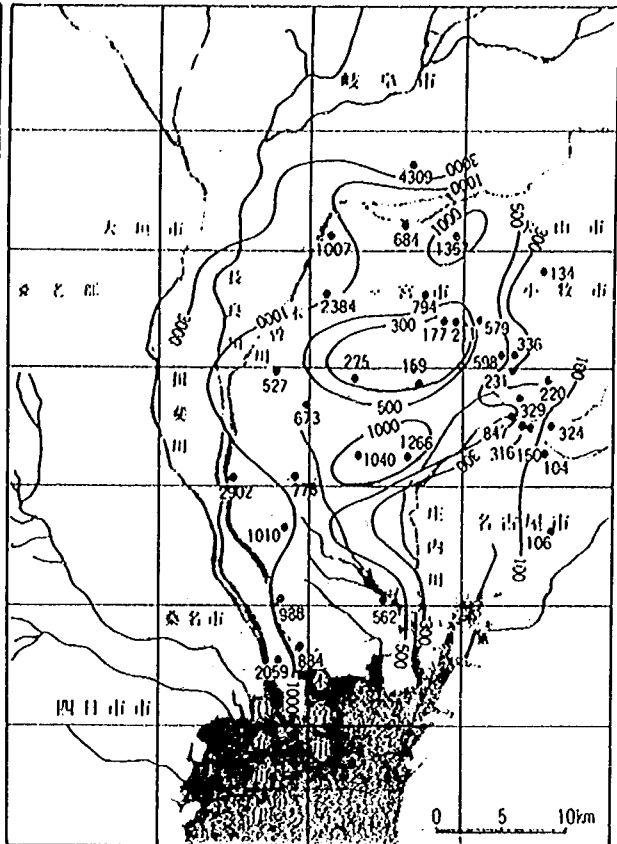
(対象年度……昭和52年度)

図3-15 揚水強度分布 (全層)

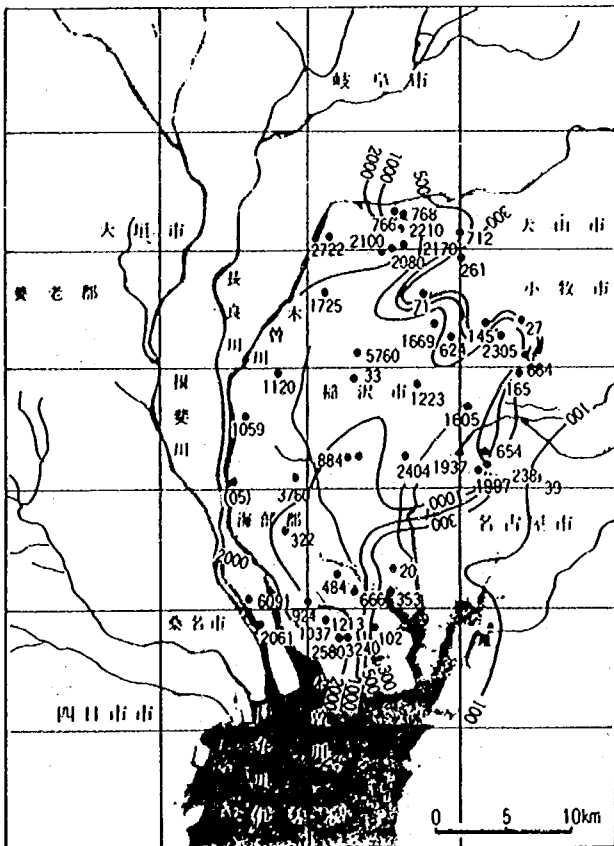
G 1 層



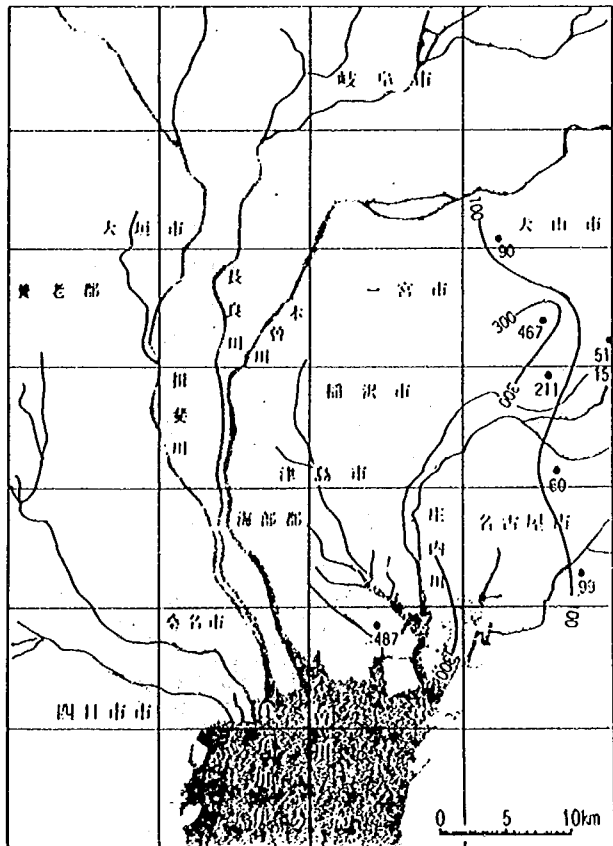
G 2 層



G 3 層

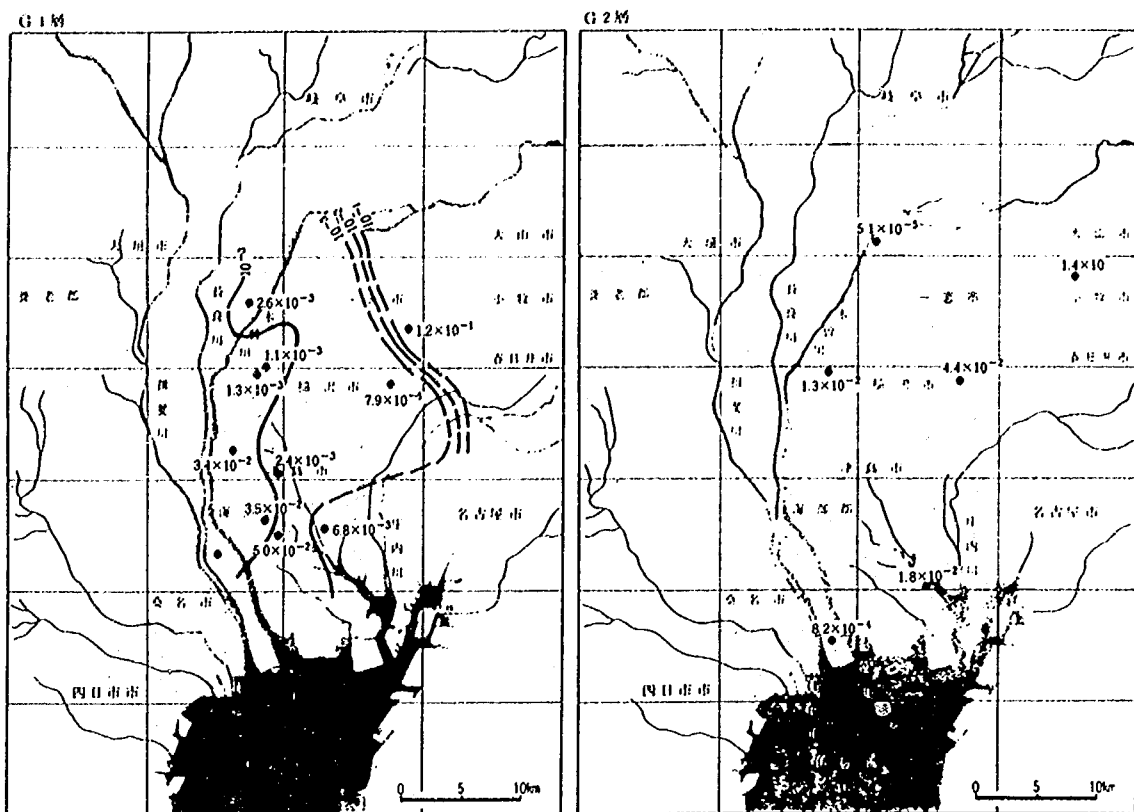


第三紀東海層群

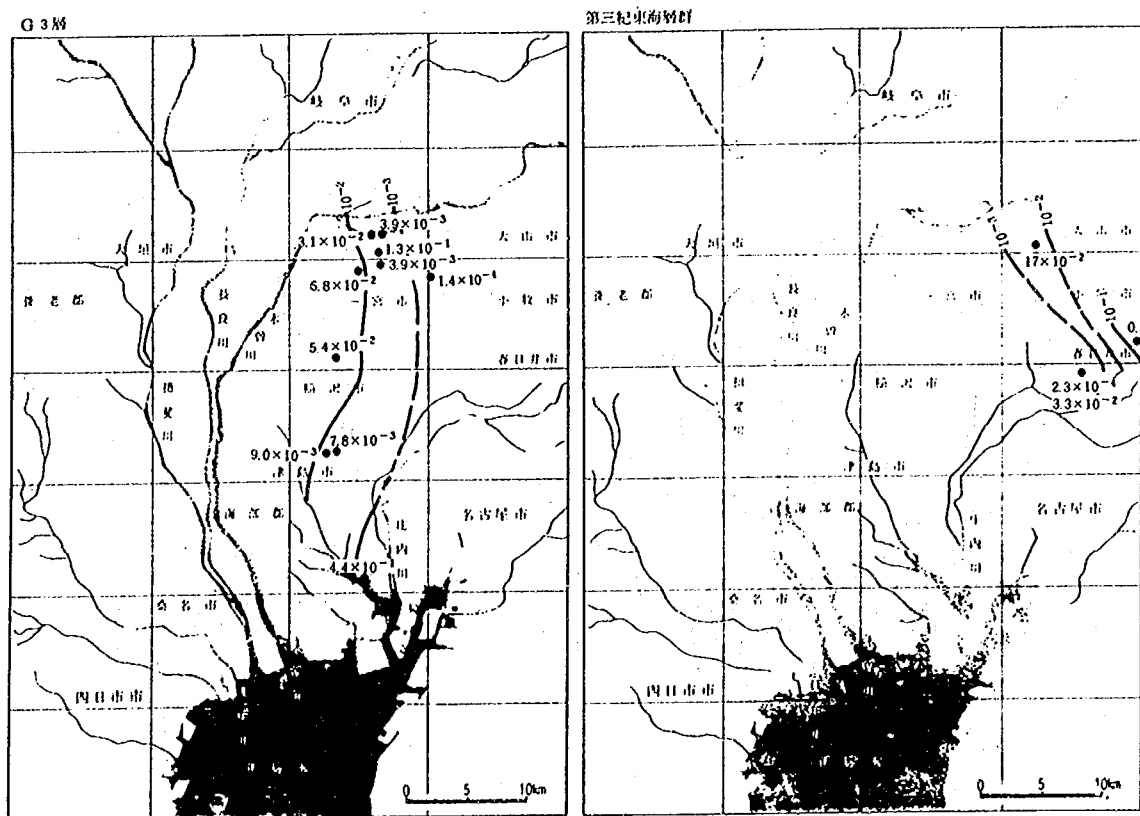


●は揚水試験地点，数字は透水量係数（単位： $\text{m}^2/\text{日}$ ）

図 3-16 透水量係数分布図



●は揚水試験地点，数字は貯留係数



●は揚水試験地点，数字は貯留係数

图 3-17 貯留系数分布图

## (2) 加圧層

濃尾平野における加圧層の透水係数、比貯留量のとりうる範囲としては、図3-18にあるように、沖積粘土層が透水係数で約 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、比貯留量で $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ l/m}$ のオーダーである。

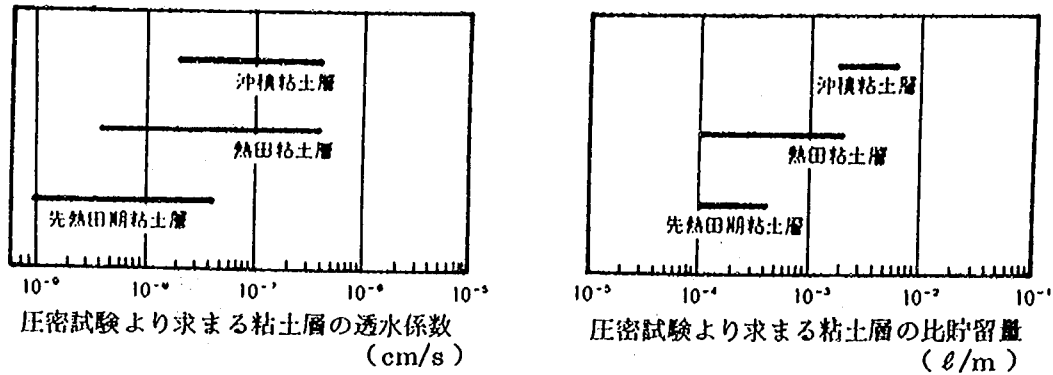


図3-18 加圧層の透水係数及び比貯留量

### 3.2.7 地下水流動系

#### (1) 濃尾平野地下水盆領域の設定

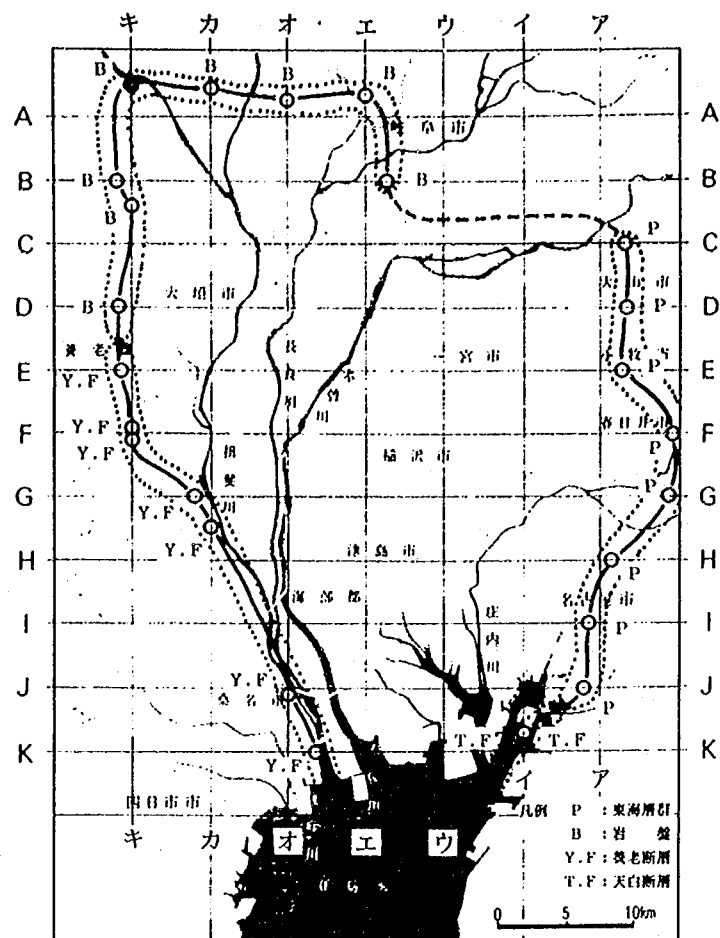
東西方向に木曾川河口から岐阜県岐阜市に至る11測線（A～K），及び南北方向に愛知県大府市から三重県四日市市に至る7測線（ア～キ）における地質縦断図<sup>2)</sup>をもとに濃尾平野の地下水盆領域を設定する。（測線は図3-19参照）。

第1帯水層～第3帯水層を遮断する断層，東海群層，基盤等の位置を地質縦断図より確認し、それらによって囲まれる地域を地下水盆領域と考える。

- ① 東海群層が地表面まで露出している地点が平野東部のア測線付近一帯のJ～C測線で確認できる。
- ② 基盤が地表面まで露出している地点が岐阜県内北東部（エ～キ，A～D測線）で確認できる。
- ③ 養老山地に沿って掛斐川河口部（エ～キ，E～K測線）まで養老断層が確認できる。
- ④ 庄内川左岸域（イ，J～K測線）には、天白断層が確認できる。
- ⑤ 木曾川三派川地区の上流域であるC測線上流ア～ウ測線間では、地質資料の不足から明確な境界域を見出せないが、当該地域では金華山を含む山脈が存在していることからこれらによって地下水流が遮断されていると考え、山開部に沿って境界域を設定した。

以上の各調査測線の境界点を包絡し、地下水盆域を設定すると図3-19のとおりとなり、

その面積はおよそ1600km<sup>2</sup>に及ぶ。



(出典：昭和59年度 濃尾平野地下水管理計画調査，木曾川工事事務所)

図3-19 濃尾平野地下水盆地領域

## (2) 地下水流動系の推定

3.3地質に示した各帯水層厚分布(図3-4, 図3-6)は、3.3に示した各帯水層基底面等高線図(図3-3, 図3-5)と密接な関係がある。

同図の主谷、支谷では一般に層厚は厚く、稜線または埋没段丘の部分では層厚が比較的薄く、礫層も谷地形の中の礫層とは異質で、段丘上の礫層は谷の中の礫層とも連続性が断たれている可能性がある。

したがって、地下水の流動は当然このような埋没地形の支配を受けていると考えるべきであり、地下水位の低下域や沈下域も地形状況を反映しているものと考えられる。

しかし、地下水流動系体は必ずしも地質学的に区分された地層の单元内にとどまらず、他の透水性の地層との水分の移動が行われると考えられるが、地形のみならず透水性、貯留性などの物理特性を総合的に評価し、定量化することは困難である。

しかし、今後ある程度マクロなスケールでも指摘されるような帯水層の異方性についてはなるべく考慮していくことが必要である。

# ① 地下水質変化からみた帯水層中の地下水流動系

帯水層の諸係数など物理的性質により地下水流動系を推定する事は困難であるが、帯水層中を流下する地下水の質の変化の面から、地下水流動系体を把握することが可能である。

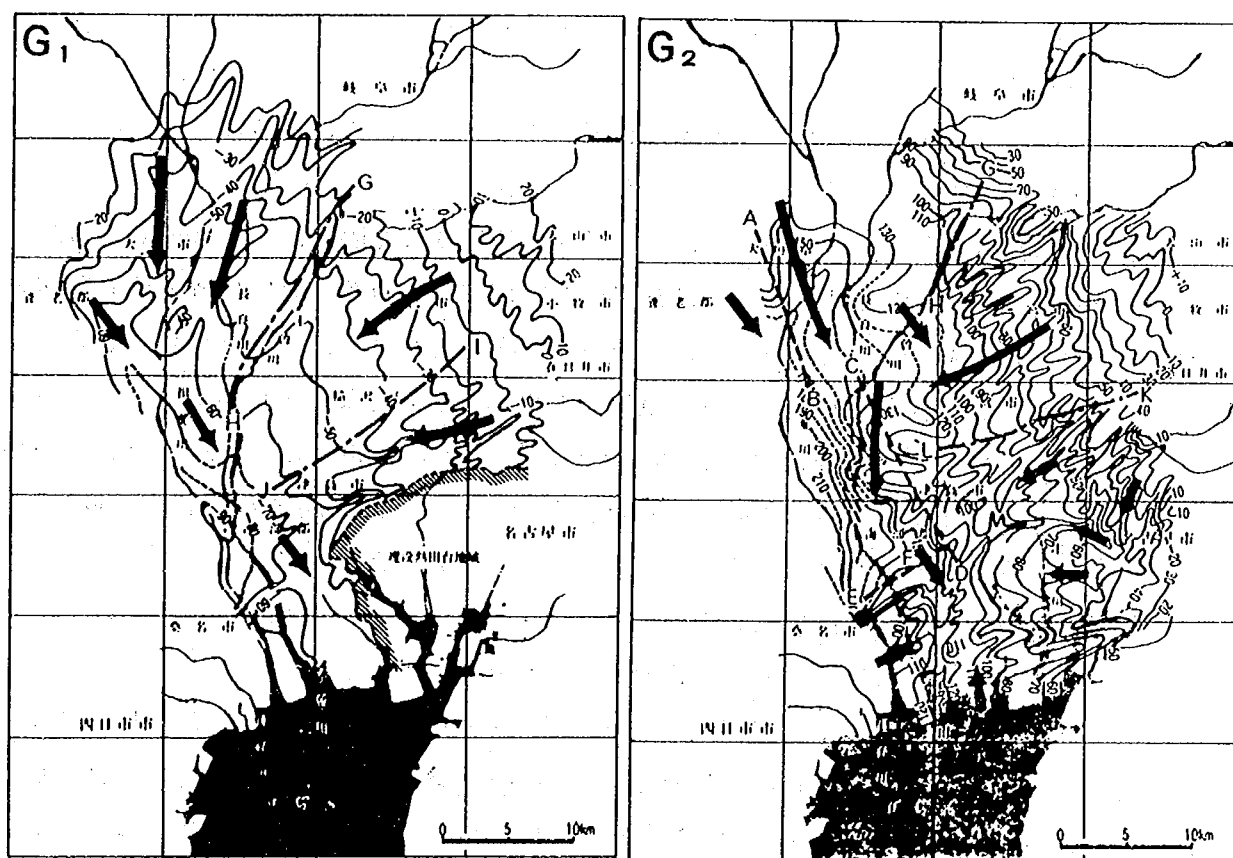
ここでは、既に行われた第1帯水層（G1）と第2帯水層（G2）についての地下水質調査資料から地下水流動系の把握と帯水層の性質について検討を行った。

こうした資料を総合してみると、濃尾平野の被圧地下水は水脈系統に分けられることが示唆される。これらの水脈系統の間には、水質上の不連続線が想定できる。

こうした不連続線は、各帯水層の主体となる礫層の基底面地形、つまり埋没地形の尾根線に相当していたり、帯水層の分布深度に急激な変化を与えている伏在断層に相当している。

これらの事実、帯水層中の地下水流に埋没地形や伏在断層が一定の規制を加えていると判断される。

第1帯水層（G1）と第2帯水層（G2）の基底面等高線図と地下水質不連続線を表したのが図3-20である。



破線は伏在断層に関係するもの、鎖線は埋没地形による地下分水界線。

A-B：大垣-今尾断層，C-D：大藪-津島断層，E-F：弥富断層

（出典：濃尾平野の地下水利用と地下水理に関する考察，桑原（1977））

図3-20 第1帯水層（G1）、第2帯水層（G2）基底面等高線図と地下水水質不連続線と地下水流系の推定図

a. 第1帯水層 (G 1) の不連続線

木曾川の西岸と東岸の水系を界とする水質の不連続線は、図3-20のG-H線付近にあると考えられ、第1帯水層の埋没地形の尾根線に相当する。

次にI-J線は、埋没地形上小牧、鳥居松段丘の地下延長部の埋没段丘域に相当しており、この埋没段丘域によって北側と南側の水系が区分され、犬山扇状地から流下する水系と名古屋市域からその西方域へ流下する水系とに区分される。

b. 第2帯水層 (G 2) の不連続線

木曾川西岸の水系で養老山脈沿いの地域には、掛斐川の支流である牧田川から伏流したと考えられる水系が大垣-今尾線 (図3-20のA-B線) によって区分される。

このA-B線は、地質断面図上でも第2礫層以深の地層がうまくつながらない部分と一致し、またその南方延長は図3-20の埋没地形にも直線状に第2礫層の分布深度が急に深くなっている部分と一致し、地下に伏在断層が推定されている。木曾川西岸の残りの水系は、第1帯水層と同様、主として掛斐川・長良川沿いの扇状地域から伏流する水系である。しかし、木曾川東側の水系との境界線は第1帯水層ほど明確でなく、愛知県尾西市付近では木曾川西岸側から東岸側に水が流入しているようである。このことは図3-20の第2礫層の埋没地形からも明らかなように、第1礫層のように埋没尾根線が木曾川沿いに顕著に発達していないことからもうなずける。

尾西市付近は、揚水量の大きい目玉を作っているため、この付近では西岸側の水系から水と呼ばれ込んでいることが当然考えられる。

木曾川東岸の水系は、埋没段丘の発達する地域の北限 (図3-20のK-L線) の北側を流れ、その先は大藪-津島線 (図3-20のC-D線) と呼ばれる伏在断層の西側の“海津沈降塊”域に流れ込んでいるものと考えられる。この地域には、木曾川西岸の地下水も当然流入しており、東岸側との混合水系となっていると考えられる。

この海津沈降塊の南限は、弥富伏在断面 (図3-20のE-F線) で、その南側の“長島上昇塊”と接している。弥富伏在断面による第2礫層の変位量は50m前後に達し、第2帯水層の連続性はかなり失われていると考えられる。

② 透水量分布からみた帯水層中の地下水流と地下水位との関係

図3-16の透水量係数分布図より地下水供給能力をみた。

北部の扇状地域で、第1帯水層 (G 1) が $1000 \sim 5000 \text{ m}^3/\text{日}$ にも達し、第2帯水層 (G 2) でもほぼ同じ程度の値を示しているのに対して南部の平野地域では、G 1 で $500$ ないし $100 \text{ m}^3/\text{日}$ 前後、G 2 で $300$ ないし $100 \text{ m}^3/\text{日}$ 前後の小さな値となっている。

このように、帯水層の地下水の供給能力は地域によって著しく変化することが指摘される。ここで注目すべきことは、同じ扇状地でも木曾川沿いの犬山扇状地域は、長良川・掛斐川の扇状地域に比べてかなり低く、 $1000 \text{ m}^3/\text{日}$ にも達しない。

このことは犬山扇状地域の地下水供給能力が相対的に低いことを示している。次に図

3-21から地下水質不連続線と地下水位低下域との関連性をみた。図中の地下水位低下域は、濃尾平野において過去最大の低下が発生した昭和48年当時の地下水位の低下域である。

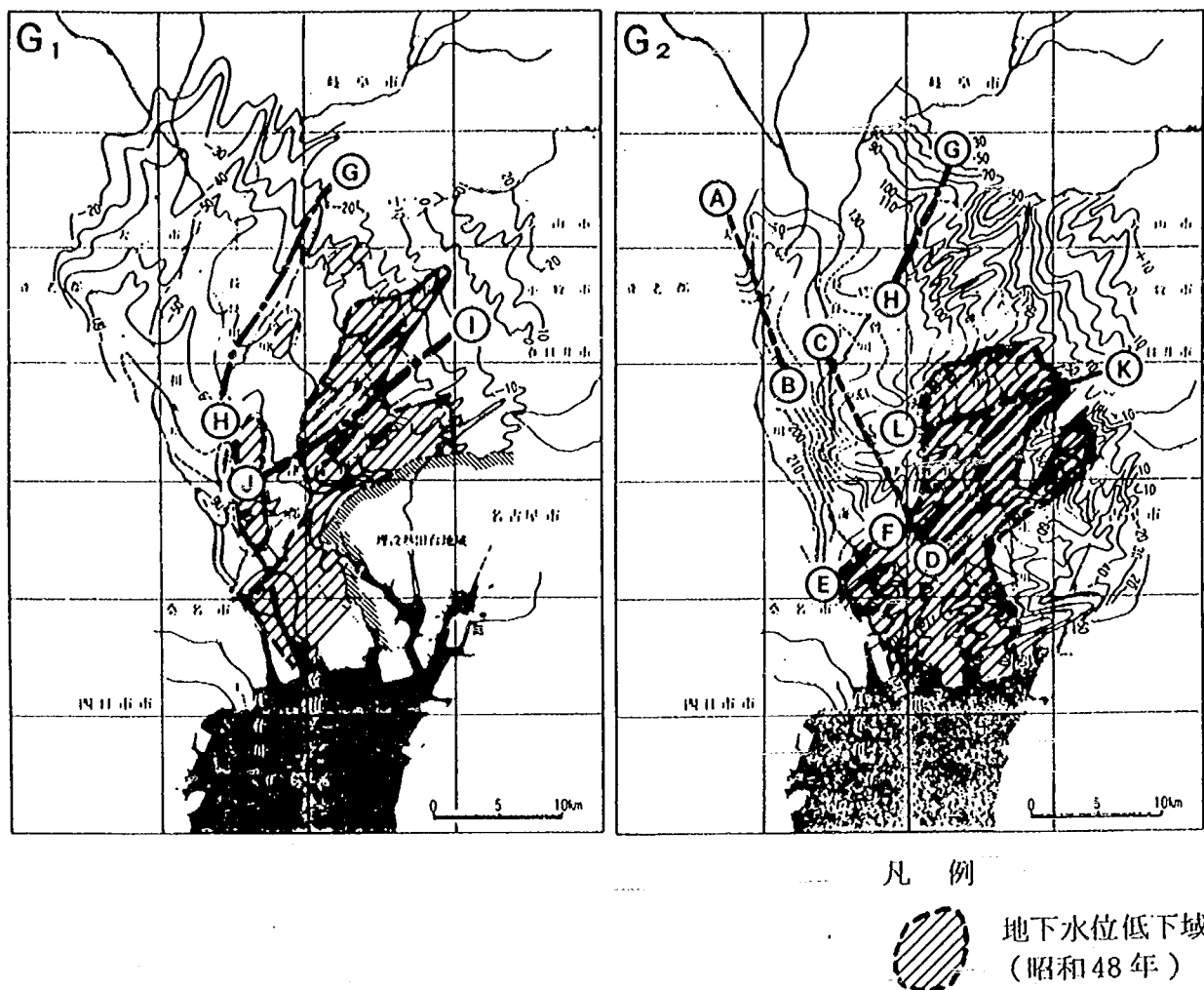


図3-21 G1層、G2層における地下水位低下域と地下水水質不連続線との関係

第1帯水層において、水位低下域は水質不連続線のI-J線の南側、第2帯水層において、K-L線、C-D線、E-D線に囲まれた名古屋市東部から臨海部の地域に集中している。

この原因としては、

- 1) 透水量分布図からみて、犬山扇状地からの地下水供給能力が、長良川・掛斐川の扇状地に比べてかなり低いこと。
- 2) 地下水質の不連続線に相当する埋没地形や断層によって、その環境において地下水流下量が大きく変化すること。
- 3) 特に犬山扇状地では濃尾地震時に活動が記録されている西落ちの断層（地形が急激に落ち込む）が、岐阜市から名古屋市に向けて走っており（岐阜-名古屋断層線）、この断層による扇状地側からの伏流浸透流を阻害していること。

- 4) 水位低下域は、地下水揚水量が比較的大きく集中していること。  
等が考えられる。

## 第4章 濃尾平野での地下水シミュレーションモデルの構築

### 4.1 概 説

濃尾平野は古くから木曾三川の河川水を農業用水として利用してきたが、戦後の中京圏における産業の伸びと都市化に伴う河川水の利用とにより用水不足をきたすようになり、その対応として、愛知用水、濃尾用水、西濃用水などが建設されてきた。

しかし、急激な産業の伸びと都市の拡大は、その後も続き各用水を濃尾平野の地下水に依存するようになり、その結果、急激かつ広範囲の地盤沈下を生ずることになった。こうした地下水の利用に伴う弊害を解消するため、工業用水法や、各自治体の条例等が制定・施行され、その結果、地下水の揚水が規制され、その効果をあげてきている。

具体的には、昭和49年頃を境に、地下水位が上昇傾向に転じ、地盤沈下は鈍化してきているが、まだ一部地域においては年間10mm以上の沈下が続いている。(図4-1) その影響は、河川管理施設にも現れており、特に、伊勢湾台風後に構築された防潮堤は、計画当初の安全性が失われつつあり、水害の脅威が再びますこととなってきた。

このような地盤沈下を防止するには、地下水を有効な水資源と考え、障害が起こらない程度で、また、表流水とバランスのとれた範囲での利用、すなわち、治水・利水・環境の面におい

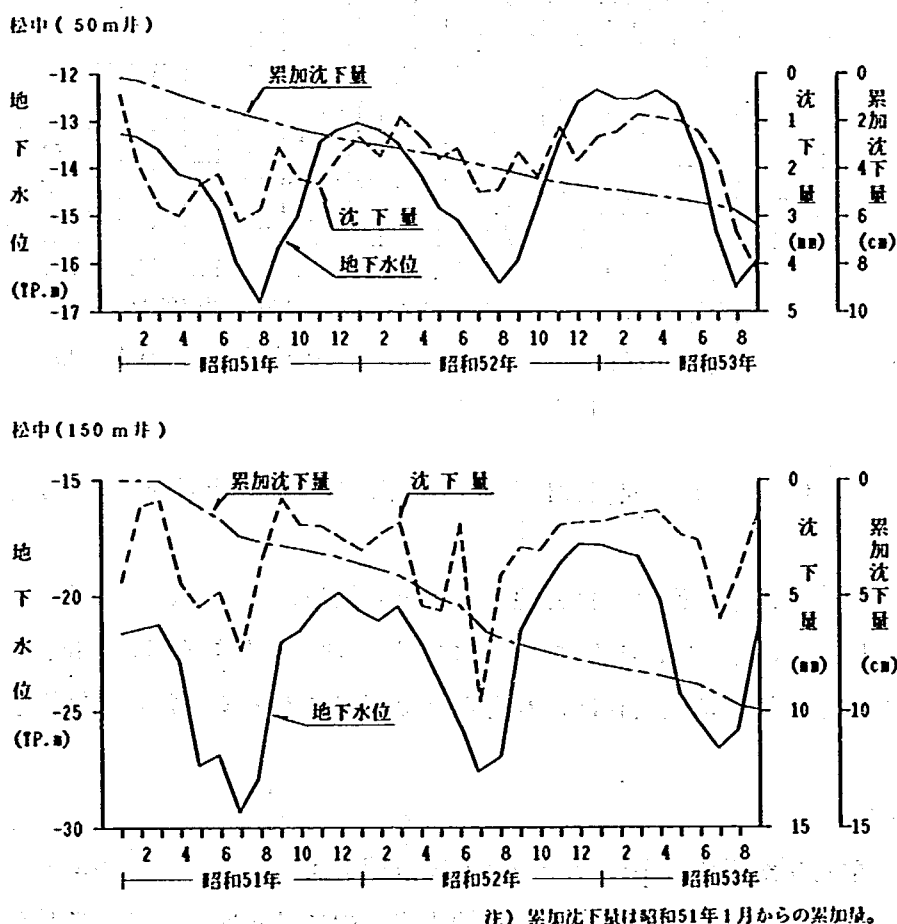


図4-1 松中観測所の地下水位・地層収縮量の変動

て整合のとれた計画を考えなければならない。このような計画を策定するためには、地下水の挙動を把握することのできるシミュレーションモデルが必要となる。

ここでは、濃尾平野を対象に広域地下水のシミュレーションモデルを構築し、揚水量変化と地下水位変化の関係を把握したものである。

## 4.2 モデルの基本構想

### 4.2.1 目的

図4-1に見たように、濃尾平野における地下水位と地盤沈下の関係には、強い相関関係が認められる。このような、地下水障害を防止するためには、地下水の挙動を追跡し、地下水位の変化を把握することのできるシミュレーションモデルを構築し、適切な地下水利用の計画を策定することが重要である。

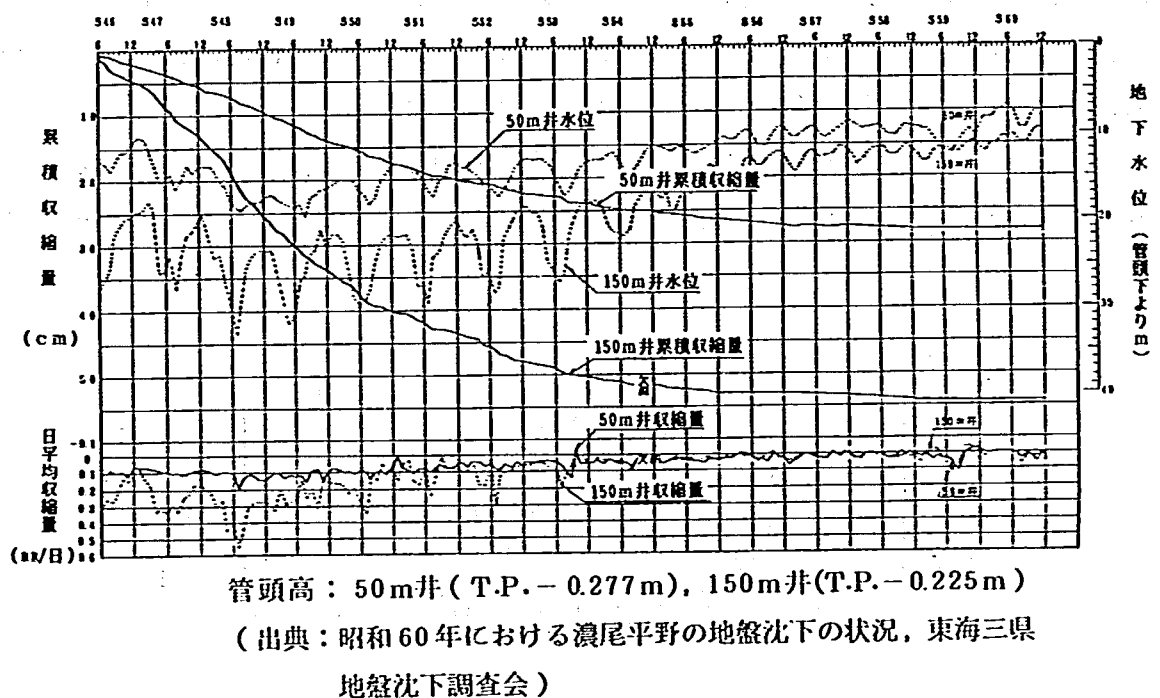


図4-2 松中観測井における月平均地下水位と沈下量の月別変動

ここでは、特に地下水位の変化と地盤沈下との関係に着目し、揚水量の変化が各帯水層の地下水位に与える影響及び、地下水位の変化が地盤沈下に与える影響を把握しうるシミュレーションモデルの構築を基礎調査により得られた資料にもとずき行った結果を述べる。

### 4.2.2 解析手法

地下水の挙動を解析する手段の一つとして数値シミュレーションがあり、流れを表現する方程式を、対象とする地下水帯あるいは地下水盆の体積と時間について積分することにより実施される。

ここで流れを表現する方法には3次元・2次元・1次元があり、それぞれ解析の目的に応じ選択されることは既に述べたとおりであり、対象とする空間スケール・時間スケールにより選択される。

この点に関し、基礎調査の結果に基づき、濃尾平野について整理すると次のとおりである。

#### (1) 空間スケールによる適用モデルの判断

濃尾平野の地質構造は既に述べたように、3帯水層3加圧層の互層で構成されている。

各帯水層の地下水状態は実測地下水位の記録から、かなり異なっていることがわかり、したがって、地下水位の変化を把握するには各帯水層の地下水の状況を把握しなければならない。

一方、地下水シミュレーションモデルは、1次元・2次元・3次元とあり、広域の解析を目的とする場合には2次元あるいは3次元のモデルを用いることが考えられる。

2次元モデルには水平2次元及び鉛直2次元の2つのモデルがあり、それぞれ、鉛直方向を一つの層として水平方向の2次元の流れを解析する方法と、水平方向を一つの層とし鉛直断面を対象に2次元の流れを解析する方法である。

ここで、濃尾平野のように互層の地質構造で構成される領域の場合、互層からなる構造を一つの層にモデル化し水平2次元モデルとして取り扱くと、シミュレーション結果として得られる水頭値がどの帯水層に位置するか特定することが不可能であり、各層毎の状況の表現が困難となる。また、互層の構造に着目し、鉛直2次元モデルとして取り扱う場合には、深層にまでわたる地下水の挙動を把握することが可能となるが、平面的な広がり及び地域格差は表現することが困難となる。したがって1次元あるいは2次元のシミュレーションモデルの適用は、濃尾平野の地質構造の分布状況から、望ましくないものと判断される。

#### (2) 時間スケールによる適用モデルの判断

地盤沈下現象の進行は図4-1にみられるように、比較的短時間の地下水位の変化に支配されている。したがってシミュレーションによる地下水位の表現も月単位程度の変化を追従するモデルであることが望まれる。

シミュレーション実施において時間スケールが問題となるのは、特に2次元・3次元のモデルの場合であり、計算対象とする格子（要素）の数と計算に用いる計算機の演算処理能力との関係により生ずる。

いま、濃尾平野を対象に考えると、地質構造が深さ方向に数100mで、層区分は、3帯水層・3加圧層の互層により構成されているのに対し、平面的な広がり約1500km<sup>2</sup>もある。したがって、2次元としての格子数では数100～数1000のオーダー、3次元の場合はさらに深さ方向に6層～10数層について格子を設けることが考えられる。

このことから、3次元の場合は2次元に対し格子数の面で6～10数倍となることが明らかであり、したがって、演算処理時間も、ほぼ6～10数倍を要するものとなる。

このように、空間スケールの面では、広域地下水の挙動を把握するのに3次元モデルが望ましいとの結果を得るが、時間スケールの面では、実用的なシミュレーションモデルを構築するのに計算機の演算能力が問題となり、3次元モデルの場合には計算時間間隔を大きくしたり格子数を少なくしたりすることにより対応せざるを得ないものとなり、3次元の特性を十分に活かし切れないことが考えられる。

このように、実用面、その計算に要求される条件、及び濃尾平野の地質構造などを考慮すると、加圧層では水平方向の流れが鉛直方向の流れに比べ非常に小さいことから鉛直1次元の流れを対象にし、帯水層では水平方向の流れが卓越することから水平2次元の流れを対象にする準3次元モデルが最も適したモデルと考えられることから、ここではこれを採用することにする。

#### 4.2.3 対象領域の選定

先に示したように、対象領域は解析の対象とする場所的・時間的なスケールとの関連で複雑な地下水帯をある程度平均化したり、理想化して取り扱うことになる。したがって、同じ地域であっても局所的な流れを問題にするときには、帯水層に挟まった粘土層や難透水層の存在なども考慮する必要がある、その反面巨視的な論議ではそれらの効果をも含めて平均的な地層構造を対象としなければならない。

ここでは、濃尾平野全域を対象に、揚水量が地下水位に与える影響及び地下水位の変化が地盤沈下に与える影響を把握しうるシミュレーションモデルの構築を目的とすることから、巨視的な流れに着目する必要がある、地下水盆全体を解析対象とすることが望まれる。

ここで、濃尾平野の地下水盆領域は、3.2.7の図3-19に示すおよそ1600km<sup>2</sup>であり、このなかから境界条件の設定が比較的容易にできる図4-3の1164km<sup>2</sup>を解析対象領域とする。

図4-3に示す範囲は、東は天白断層・東海層群、西は養老断層、南は伊勢湾、北は基盤露出部に囲まれており、南の伊勢湾に面する境界以外は地下水の流動が無いものと仮定することが可能である。

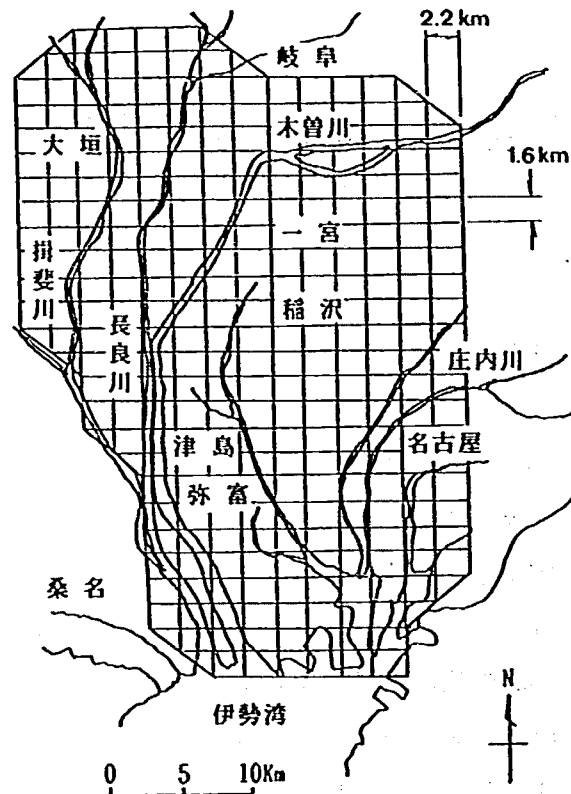


図4-3 地下水シミュレーションモデル領域

#### 4.2.4 モデルの基本構想

これまでの論議をまとめると、濃尾平野を対象とする広域地下水のシミュレーションモデルは次のとおりである。

解析の対象とする領域は、濃尾平野の地下水盆地領域 $1600\text{km}^2$ のなかから、基盤露出や断層などで境され、境界条件として地下水の流動が無いものと仮定しうる $1164\text{km}^2$ とし、深さ方向には地質構造から3帯水層3加圧層の6層にモデル化する。

これらの領域について、帯水層は水平2次元、加圧層は鉛直1次元による準3次元のシミュレーションモデルを適用するものであり、シミュレーション結果による地下水位の変動は月単位に把握可能なものとする。

### 4.3 モデルの構築

#### 4.3.1 数値解析手法

準3次元モデルは、3次元的な地下水の流動現象を被圧帯水層については平面の2次元として、加圧層については鉛直1次元として取り扱う手法を採用しており、次の基礎方程式により解析するものである。

〔被圧帯水層〕

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial h}{\partial y}) + w(x, y, t) \quad \text{-----} (4.1)$$

〔加 圧 層〕

$$Ss' \frac{\partial h'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (Kz \frac{\partial h'}{\partial z}) \quad \text{-----} (4.2)$$

ここで、 $S$  : 被圧帯水層の貯留係数

$T_x, T_y$  :  $x, y$  方向の透水量係数 ( $m^2/d$ )

$h$  : 被圧帯水層の水頭値 ( $m$ )

$w(x, y, t)$  : 単位時間、単位面積当たりの涵養量又は揚水量 ( $m^3/d/m^2$ )

$Ss'$  : 加圧層の比貯留量 ( $1/m$ )

$Kz$  : 加圧層の  $z$  方向の透水係数 ( $m/d$ )

$h'$  : 加圧層の水頭値 ( $m$ )

であり、 $z$  方向を鉛直方向としている。

この準3次元モデルの基礎方程式の数値解析手法は、被圧帯水層の基礎式について有限要素法を基準とした解法、加圧層については差分法による陰解法を適用する。

#### (1) 被圧帯水層基礎方程式の数値解法

(4.1)式を(4.3)式の初期条件、(4.4)式、(4.5)式の境界条件のもとに解く。

$$h(x, y, t=0) = \bar{h}(x, y, t=0) \quad (t=0 \text{ の条件}) \quad \text{-----} (4.3)$$

$$h(x, y, t=0) = \tilde{h}(x, y, t=0) \quad (\text{対象領域上下面の条件}) \quad \text{-----} (4.4)$$

$$T_x \frac{\partial h}{\partial x} \ell_x + T_y \frac{\partial h}{\partial y} \ell_y = 0 \quad (\text{対象領域周辺の条件}) \quad \text{-----} (4.5)$$

(4.1)式に通常のカラースキーム法を適用して、三節点、三角形要素を用いて離散化すると、一般に各要素毎に次の連立常微分方程式が得られる。

$$[P] \cdot \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} + [H] \cdot \{h\} + \{F\} = 0 \quad \text{-----} (4.6)$$

$[P] \cdot$  ,  $[H] \cdot$  は単位要素の  $3 \times 3$  次元マトリクス

$\{h\} \cdot$  ,  $\{F\} \cdot$  は単位要素の3次元ベクトル

(4.6)式を各要素毎に総和をとると、最終的に解くべき方程式は次式となる。

$$[P] \left\{ \frac{dh}{dt} \right\} + [H] \{h\} + \{F\} = 0 \quad \text{-----} (4.7)$$

$\{P\}$ ,  $\{H\}$  は  $N \times N$  元マトリクス

$\{h\}$ ,  $\{F\}$  は  $N$  元ベクトル ( $N$  は節点数である。)

(4.7) 式の連立常微分方程式に対し、時間微分項を差分化することにより、

$$\frac{1}{\Delta t} \{P\} \{t+1, h\} - \frac{1}{\Delta t} \{P\} \{t, h\} + \{H\} \{t+1, h\} + \{t+1, F\} = 0 \quad \text{--- (4.8)}$$

$$\text{から } \left( \frac{1}{\Delta t} \{P\} + \{H\} \right) \{t+1, h\} = \frac{1}{\Delta t} \{P\} \{t, h\} - \{t+1, F\} \quad \text{--- (4.9)}$$

なる連立一次方程式が得られる。

通常、(4.9) 式を解くことは多大な演算時間を要するので、今回は (4.6) 式から (4.9) 式への変換の過程で若干の近似を導入する。すなわち (4.6) 式において集中マトリクスの概念を導入し、次の変換を行う。

$$\begin{aligned} & \{P\} \cdot \left\{ \frac{dh}{dt} \right\} + \{H\} \cdot \{h\} + \{F\} = 0 \\ & \approx \{\tilde{P}\} \cdot \left\{ \frac{dh}{dt} \right\} + \{H\} \cdot \{h\} + \{F\} = 0 \quad \text{----- (4.10)} \end{aligned}$$

$$\text{ここに, } \{\tilde{P}\} = \begin{bmatrix} \frac{A}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{3} \end{bmatrix} \quad \text{A は三角形要素の面積}$$

とし、

$$\frac{1}{\Delta t} \{\tilde{P}\} \{t+1, h\} + \{H\} \{t+1, h\} = \frac{1}{\Delta t} \{\tilde{P}\} \{t, h\} - \{t+1, F\} \quad \text{----- (4.11)}$$

となる。

(2) 加圧層基礎方程式の数値解法

$$S_s' \frac{\partial h'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h'}{\partial z} \right)$$

$$\Delta z = xz/mz$$

$$S_s' \frac{t+1 h'_i - t h'_i}{\Delta t} = \frac{K_z}{(\Delta z)^2} (t+1 h'_{i-1} - 2 t+1 h'_i + t+1 h'_{i+1}) \quad (4.12)$$

$$\frac{\Delta t}{S_s'} \cdot \frac{K_z}{(\Delta z)^2} = T \text{ として整理すると式(4.20)は}$$

$$-T t+1 h'_{i-1} + (2T+1) t+1 h'_i - T t+1 h'_{i+1} = t h'_i \quad (4.13)$$

となる。

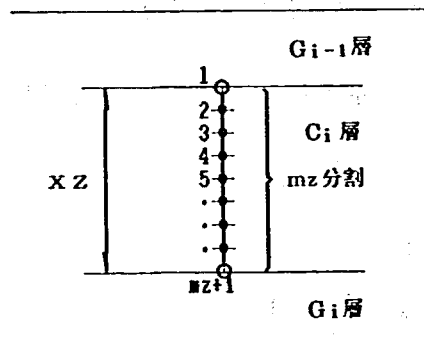


図4-4 加圧層モデル

これを全格点について作成し、境界条件として被圧帯水層の水頭値( $G_{i-1}$ ,  $G_i$ )を用いると、

$$\begin{bmatrix} 1 & & & & \\ -T & B & -T & & \\ & -T & B & -T & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & -T & B & -T \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t+1 h'_1 \\ t+1 h'_2 \\ t+1 h'_3 \\ \vdots \\ t+1 h'_{z_m} \\ t+1 h'_{z_m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{i-1} \\ t h_2 \\ t h_3 \\ \vdots \\ t h_{z_m} \\ G_i \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

となり、(4.14)式を解くことにより各格点の水頭値が求まる。

### (3) プログラミング

(1)～(2)の結果をもとにプログラミングし検証した結果を参考資料1に、プログラムリストを参考資料7に示した。

#### 4.3.2 地層のモデル化

濃尾平野地下水盆の地下水の挙動を把握することを目的とすることから、可能な限り地下水盆領域全体をモデル化することとし、東は天白断層・東海層群、西は養老断層、南は伊勢湾、北は基盤露出部に囲まれた範囲の約1,164km<sup>2</sup>を対象とした。(図4-3参照)

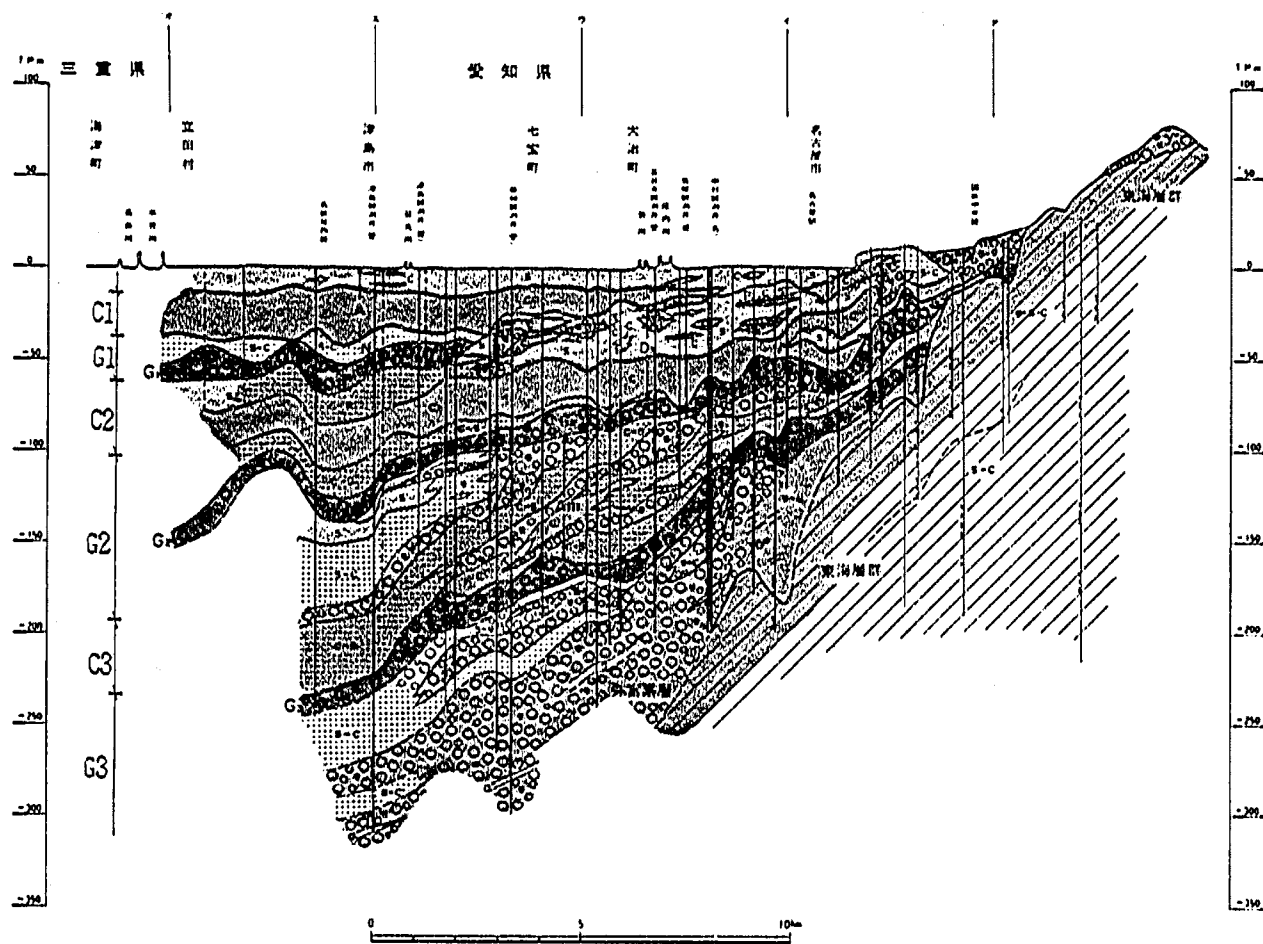
地層のモデル化は、ボーリング調査をもとに桑原<sup>3)</sup>等が作成した。南北方向に11測線、東西方向に6測線の地質縦断図(図4-5参照)に基づいて行った。

その結果、表4-1に示すように第三紀層を透水基盤とする3つの礫層を含む被圧帯水層と3つの加圧層の互層で構成されたモデルとした。

表4-1 地層モデルと地質構造

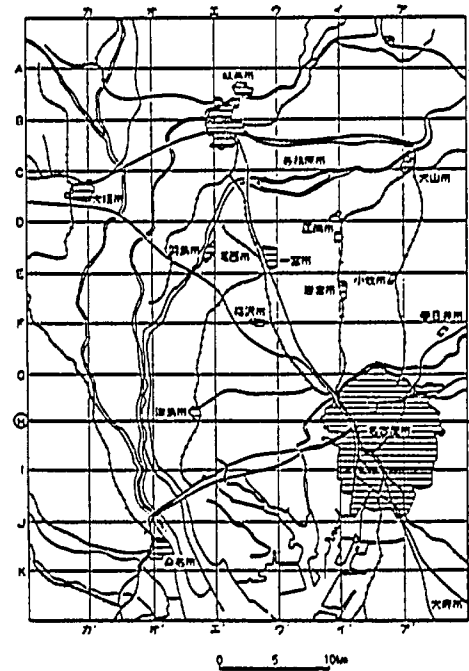
| 地 層 名 |           | 土 相    | 地層モデル            |
|-------|-----------|--------|------------------|
| 沖積層   | 南陽層       | 砂 層    | 第1層 (C1)         |
|       |           | 粘土シルト層 |                  |
| 洪積層   | 濃尾層       | 砂泥互層   | 第2層<br>(第1帯水層G1) |
|       | 第1礫層 (G1) | 礫 層    |                  |
|       | 熱田層       | 砂 層    | 第3層 (C2)         |
|       |           | 粘土シルト層 |                  |
|       | 第2礫層 (G2) | 砂泥互層   | 第4層<br>(第2帯水層G2) |
|       |           | 礫 層    |                  |
|       | 海部累層      | 粘土シルト層 | 第5層 (C3)         |
|       |           | 砂泥互層   |                  |
| 第三紀層  | 第3礫層 (G3) | 礫 層    | 第6層<br>(第3帯水層G3) |
|       | 先海部累層     | 砂泥互層   |                  |
|       | 東海層群      | 不透水性基盤 |                  |

また、各層厚は、前述の地質縦断図より第1～第3帯水層の上下面の深度を読み取り、それをもとに図4-6に示すような深度分布図を作成し、それより求めた。(図4-7参照)。



| 凡                                                                                   |      | 例              |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|-----------|
|  | 主岩硬層 | A              | 南陽層       |
|  | 硬層   | N              | 漢江層       |
|  | 砂層   | G <sub>1</sub> | 第一砂層      |
|  | 砂岩層  | D <sub>1</sub> | 興恩松坡層     |
|  | 粘土層  | D <sub>2</sub> | 小牧硬層 大管根層 |
|                                                                                     |      | D <sub>3</sub> | 熱田層       |
|                                                                                     |      | G <sub>2</sub> | 第二砂層      |
|                                                                                     |      | Am             | 海部果層      |
|                                                                                     |      | G <sub>3</sub> | 第三砂層      |

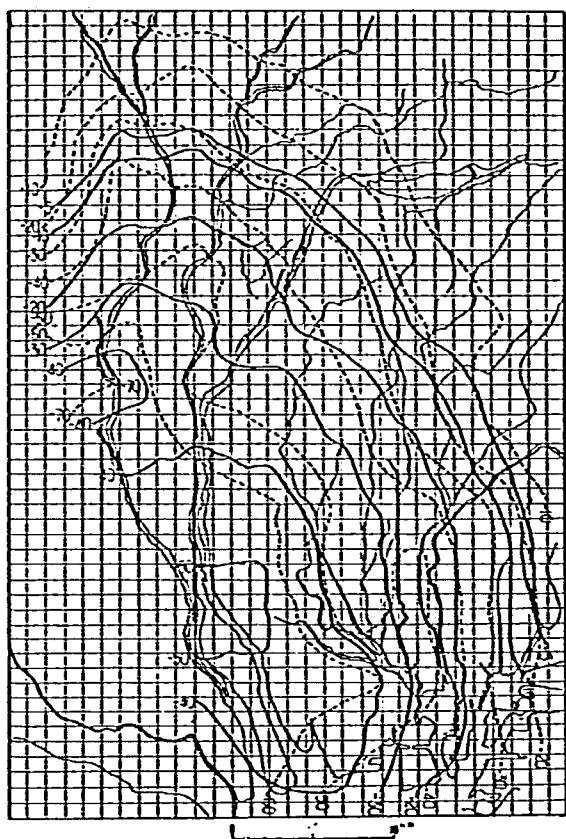
地質縦断面測線位置



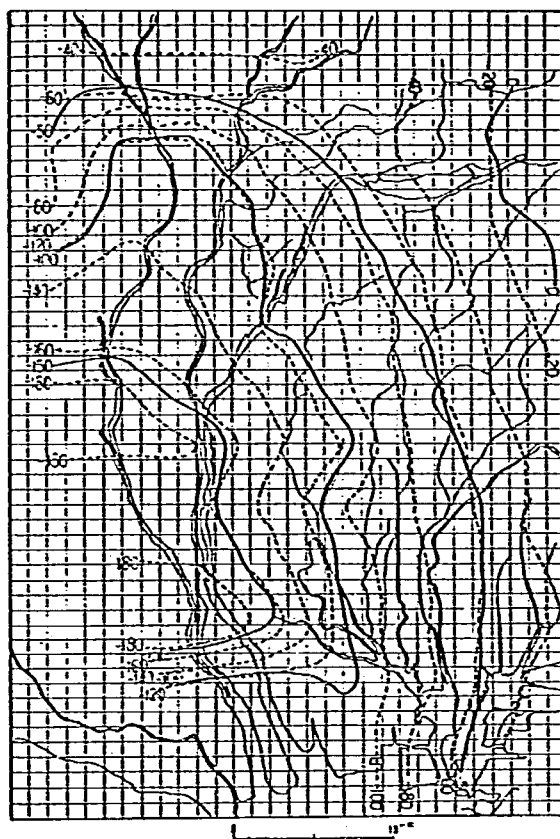
(出典：地盤沈下の実態とその対策に対する調査研究報告書，桑原)

图 4-5 濃尾平野東西方向地質断面图

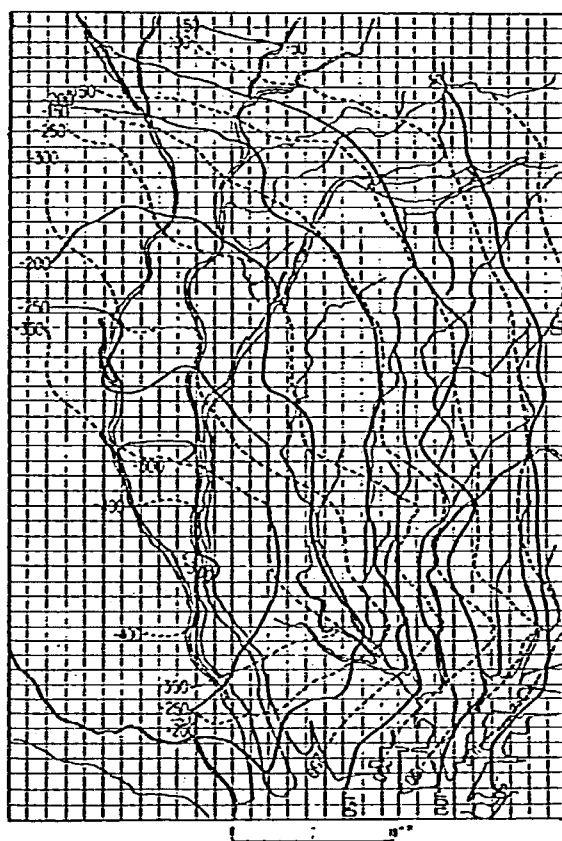
G1層



G2層



G3層



凡例  
 —— 上面 (IP.m)  
 --- 下面 (IP.m)

图4-6 带水層上面・下面深度分布图

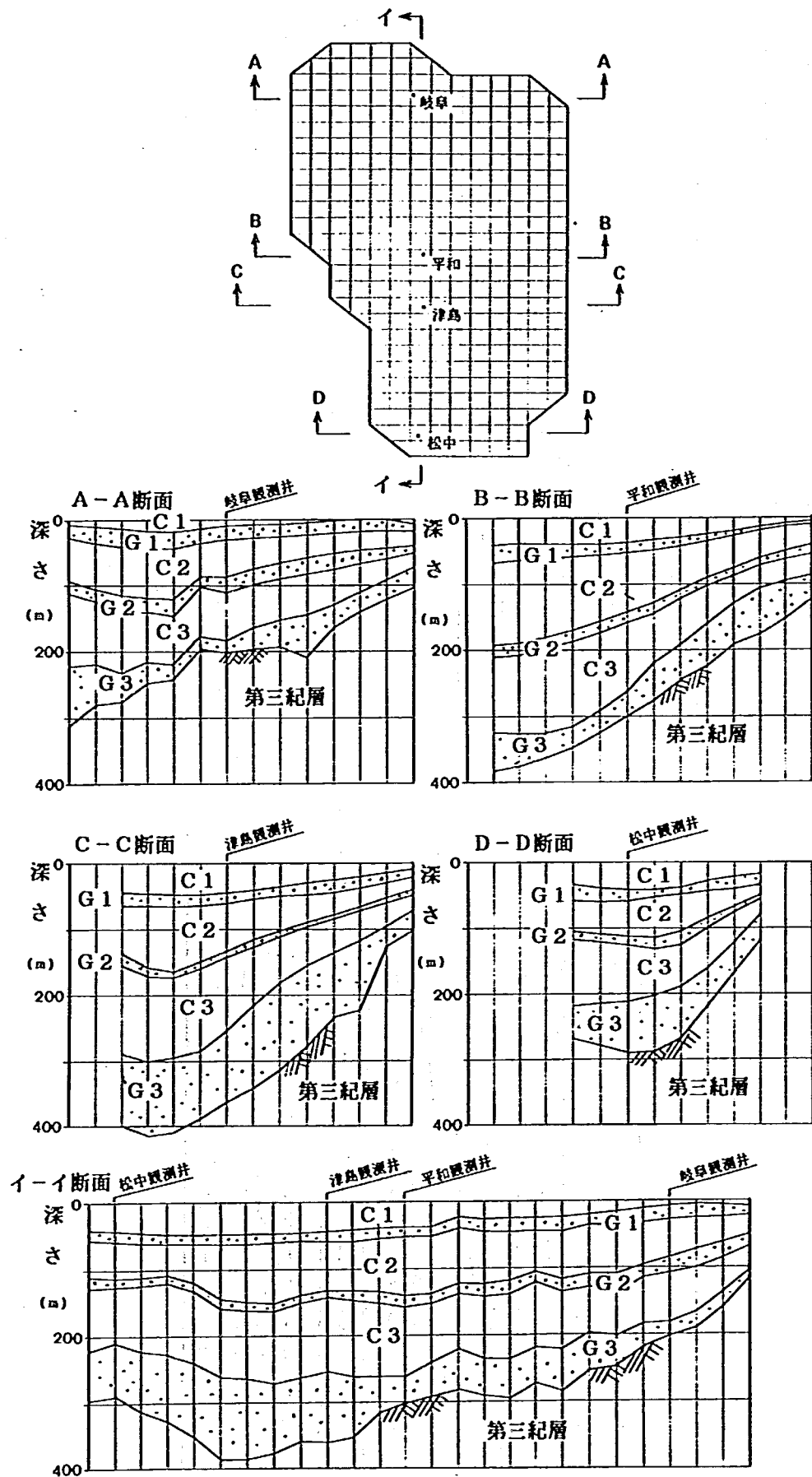


図4-7 主要断面における地質モデルの縦断面

#### 4.3.3 境界条件

##### (1) 周囲境界条件

水位境界条件は、対象とする領域の上面・周囲・下面に設定され、下面境界（第3帯水層G3の下部）は地層モデル作成時に不透水性基盤としたことから、水の出入りはないものとする。

上面境界については、不圧帯水層より第1加压層（C1層）を通じて第1帯水層（G1層）へ涵養されることから、不圧帯水層の水頭値を与え、その値は計算期間中一定とする。

周囲境界については、モデルが伊勢湾と接する面以外での水の出入りはないものとした。これは、モデル領域がほぼ濃尾平野の地下水盆領域と同じであることから、その周辺では、断層等により地下水の出入りを遮断しているものと考えられるからである。

モデル領域が伊勢湾と接する面では、モデル南西部の帯水層がさらに伊勢湾に伸び、この伸びた帯水層から地下水が間接的にモデル内に涵養されるものと考え、境界面の計算水頭値と伊勢湾の海水面との水頭差を用い、次式により涵養量を与えるものとする。

$$q = \alpha (H - h)$$

ここで、 $q$ ：涵養量

$\alpha$ ：漏水係数（=0.5）

$H$ ：海水面

$h$ ：計算水頭値

なお、漏水係数 $\alpha$ は、数回の内挿検定をもとに0.5とした。

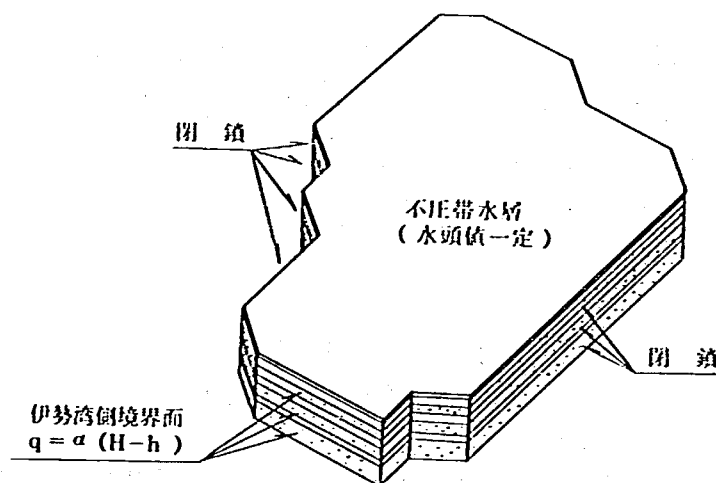


図4-8 モデルの周囲境界条件

##### (2) 揚水量

計算対象領域内には、約8,000本の揚水井があり、各揚水井データは、井戸の総揚水量として、国土基準メッシュ（3次メッシュ1.1×0.9km）単位で集計されている。各帯水層における揚水量は、各帯水層のストレーナの長さの比率に応じて配分した値を用いる。（3.5.

### 3参照)

計算では、帯水層毎に各節点に揚水量を与えるもので、その揚水量は当該節点を囲む国土基準メッシュ毎に集計されている揚水量を合計した値である。

つまり、図4-9のような節点aの揚水量は、節点aを囲む国土基準メッシュ①、②、③、④の揚水量の合計を与える。

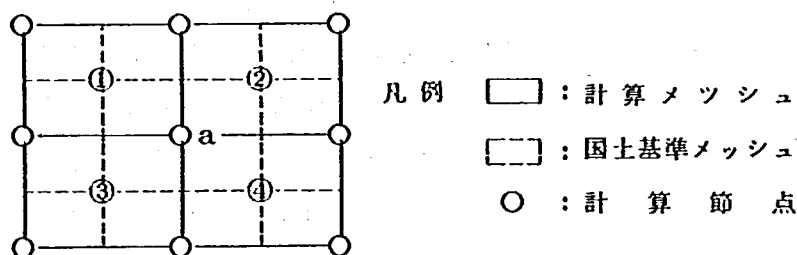


図4-9 計算メッシュと国土基準メッシュ

#### 4.3.4 初期条件

不圧層（上面境界）及びG1～G3帯水層に与える計算開始時の水頭値は、各層の観測井の実測水位をもとにコンター図を作成し、各層のモデル全節点にコンター図から水位を読み取り、各層の各節点毎に与える。

#### 4.3.5 各種パラメータ

##### (1) 透水係数及び貯留係数

前述の地質縦断図をもとに、地質、層厚を考慮して図4-10に示すような定数設定領域を各層毎に設け、各領域毎に透水係数及び比貯留量を与える。

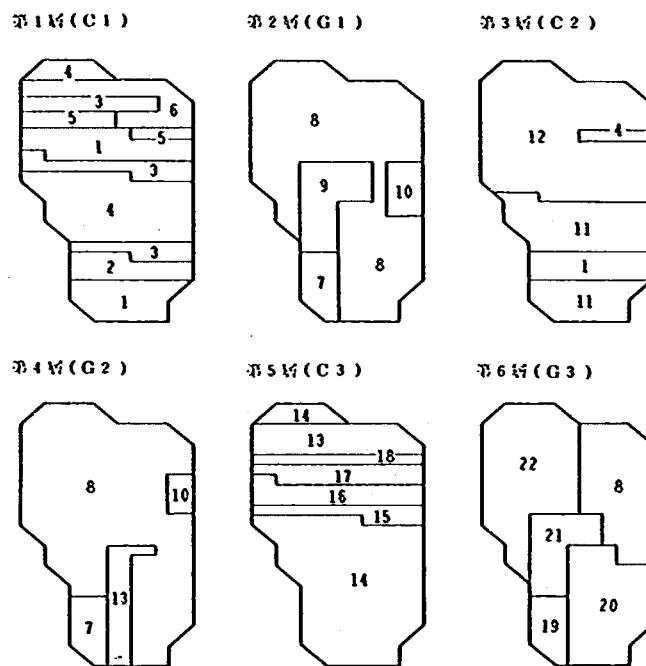
具体的な値は、3.6で示した透水量係数、貯留係数の分布図（図3-16、17）及び各係数の範囲を示した図（図3-15、18）をもとに表4-3の値で設定した。各層における設定した値の範囲は次のとおりである。

表4-2 透水係数及び比貯留量の設定範囲

| 帯水層（x, y 方向） |                    |                     |
|--------------|--------------------|---------------------|
|              | 〔透水係数〕             | 〔比貯留量〕              |
| 第2層（G1）      | 4.31 ～ 25.00 (m/日) | 0.003 ～ 0.010 (1/日) |
| 第4層（G2）      | 8.64 ～ 25.00       | 0.003 ～ 0.010       |
| 第6層（G3）      | 4.31 ～ 25.00       | 0.001 ～ 0.005       |

| 加圧層（z 方向） |                     |              |
|-----------|---------------------|--------------|
|           | 〔透水係数〕              | 〔比貯留量〕       |
| 第1層（C1）   | 0.003 ～ 0.010 (m/日) | 0.0005 (1/日) |
| 第3層（C2）   | 0.003 ～ 0.010       | 0.0005       |
| 第5層（C3）   | 0.004 ～ 0.020       | 0.0003       |



注) 領域内の数字は表4-3中のNoを表す。

図4-10 定数設定領域区分図(現行モデル)

表4-3 領域別定数

| 領域区分    | 透水係数 (m/日) | 比貯留量 (l/日) |
|---------|------------|------------|
| Ⅱ Ⅲ 1   | 0.004      | 0.005      |
| Ⅱ 2     | 0.006      | 0.005      |
| Ⅱ 3     | 0.010      | 0.005      |
| Ⅱ Ⅲ 4   | 0.003      | 0.005      |
| Ⅱ 5     | 0.002      | 0.005      |
| Ⅱ 6     | 0.005      | 0.005      |
| ② ④ 7   | 25.00      | 0.001      |
| ② ④ ⑥ 8 | 8.64       | 0.003      |
| ② 9     | 4.32       | 0.003      |
| ② ④ 10  | 8.64       | 0.010      |
| Ⅲ 11    | 0.003      | 0.0005     |
| Ⅲ 12    | 0.010      | 0.0005     |
| ④ 13    | 17.00      | 0.003      |
| Ⅲ 14    | 0.010      | 0.0003     |
| Ⅲ 15    | 0.004      | 0.0003     |
| Ⅲ 16    | 0.002      | 0.0003     |
| Ⅲ 17    | 0.010      | 0.0003     |
| Ⅲ 18    | 0.020      | 0.0003     |
| ⑥ 19    | 12.00      | 0.001      |
| ⑥ 20    | 8.64       | 0.002      |
| ⑥ 21    | 4.32       | 0.001      |
| ⑥ 22    | 8.64       | 0.005      |

Ⅱ Ⅲ Ⅳ: 加圧層区分番号

② ④ ⑥: 潜水層区分番号

## (2) 計算条件

計算条件としては、要素分割、計算時間間隔 $\Delta t$ 及び計算ステップ数を与えるものである。

### ① 要素分割

揚水量が集計されている国土基準メッシュ（3次メッシュ $1.1 \times 0.9\text{km}$ ）及び、計算時間間隔を考慮し、東西方向 $2.2\text{km}$ 、南北方向 $1.8\text{km}$ の直交三角形要素とする。したがって、対象領域内には図4-11～図4-12に示す588要素、328節点の要素分割が行われる。

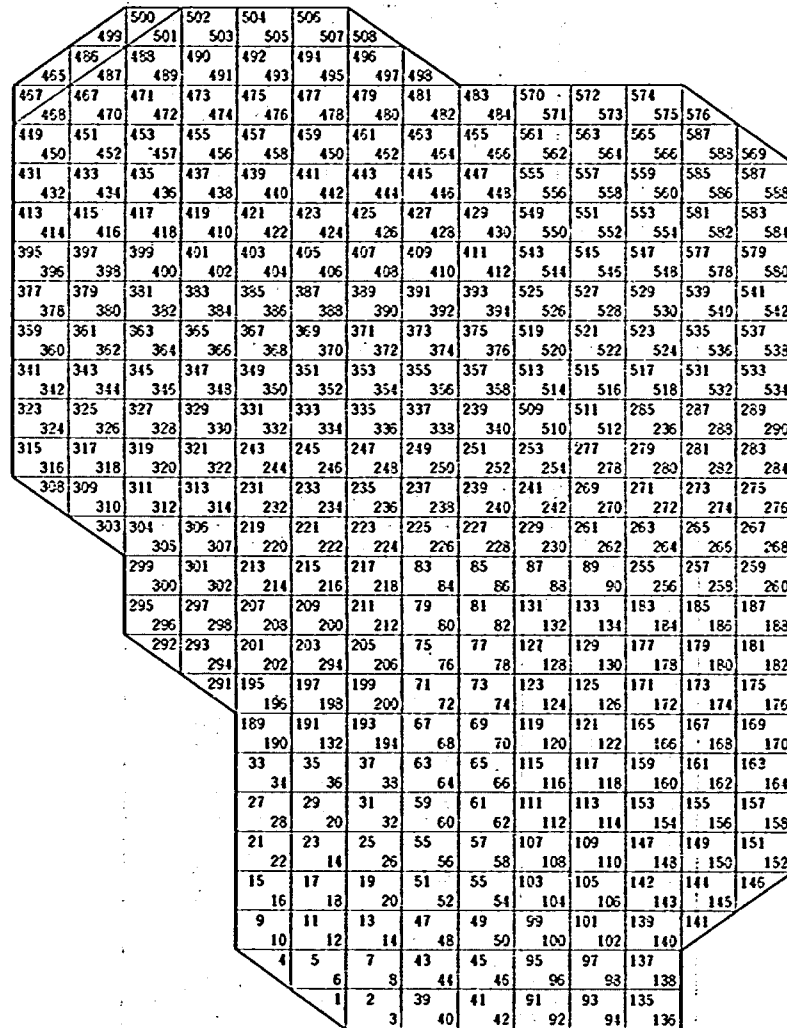


図4-11 要素番号



### (1) 計算対象期間

揚水量,実測水位データは、昭和33年～昭和56年まで収集可能であるが、対象領域全体にわたり両データが存在するのは昭和53年～昭和56年までである。(実測水位データは、昭和56年末までであるが、揚水量データのうち名古屋市を除く愛知県,岐阜県三重県のデータは市町村単位の集計値となっている。)従って、計算期間としては、データの明確な昭和53年4月～昭和54年3月までの12ヶ月間とした。

### (2) 境界条件

#### ① 上面境界 (不圧層水位分布)

昭和53年3月における計算領域内の観測井の不圧層の実測地下水位をもとにコンター図を作成し、そのコンター図より不圧層の各節点に水位を与え、計算期間中一定値とした。

#### ② 周囲境界 (帯水層水頭値分布)

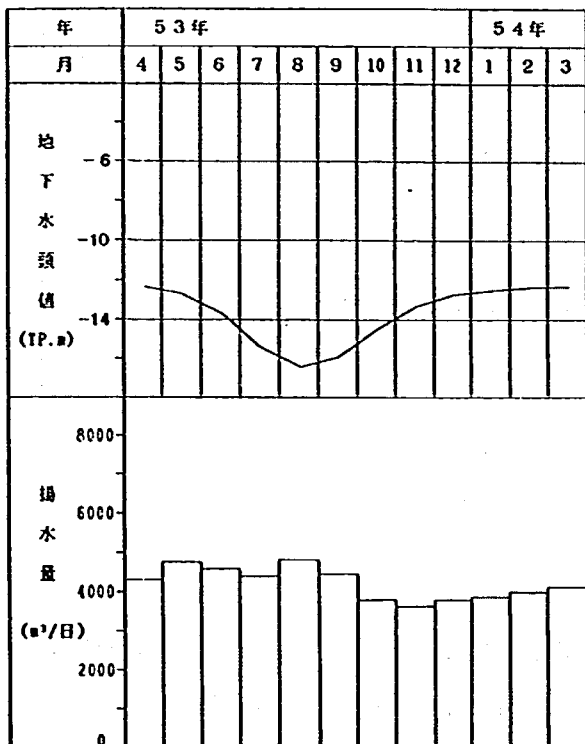
周囲境界は、1ヶ月毎に計算領域の南部(伊勢湾沿い)に位置する地下水位観測井の実測地下水頭値をもとに各層毎に推定し、伊勢湾に面する各帯水層に与えた。

#### ③ 揚水量

昭和53年4月～昭和54年3月までの12ヶ月間の月単位の揚水量を各帯水層の節点に与えた。

図4-13に松中観測井(節点番号9番)のG1,G2帯水層の実測水位、揚水量の変化図を示す。

(昭和53年4月～昭和54年3月; G1層):



(昭和53年4月～昭和54年3月; G2層):

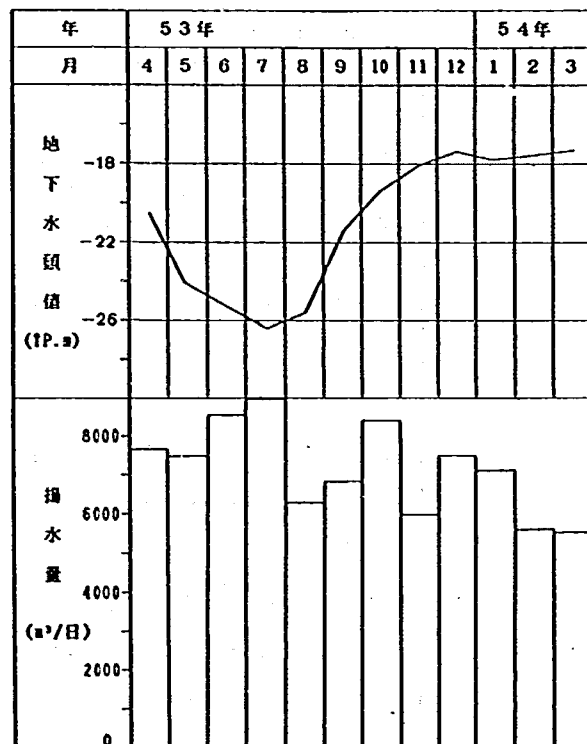


図4-13 松中観測井における実測水位変動

## (3) 初期条件

昭和53年3月における計算対象領域内の実測地下水頭値をもとに、コンター図を作成し、そのコンター図より各被圧帯水層の各節点に水位を読み取って与えた。

## (4) 計算条件

① 計算時間間隔  $\Delta t$ 

計算時間間隔  $\Delta t$  は10日とし、3ステップで1ヶ月とした。(第3ステップは8日, 又は10日, 11日とする)。

## ② 計算ステップ

昭和53年4月～昭和54年3月までの12ヶ月間を1ステップ10日, 1ヶ月3ステップで36ステップの計算を行った。

計算条件の一覧を表4-4に示す。

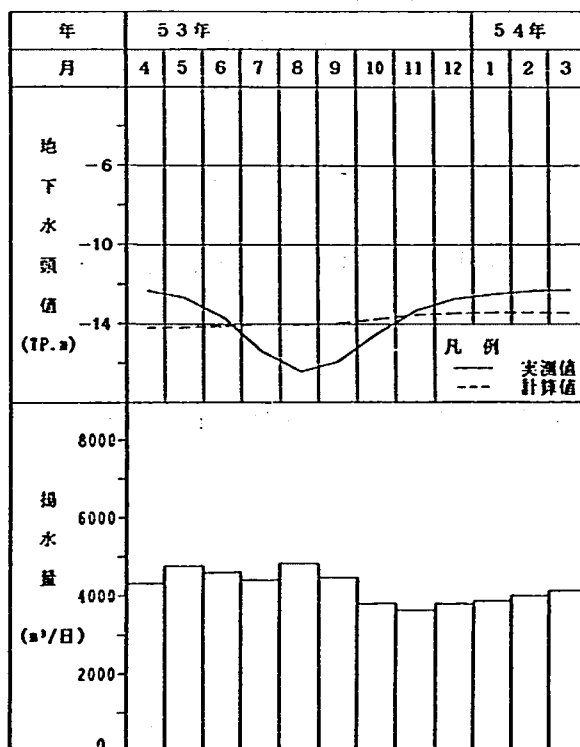
表4-4 計算条件一覧

| 計 算 条 件    | 設 定 方 法                               |
|------------|---------------------------------------|
| 上面境界条件     | 実測値からコンター図を作成し、計算期間中一定値で設定。           |
| 周囲境界       | 伊勢湾に面する帯水層の各節点のみに、近傍の実測水頭値をもとに推定して設定。 |
| 揚水量        | 各節点に実測値を設定。                           |
| 初期条件       | 実測値からコンター図を作成し、各節点に設定。                |
| $\Delta t$ | 10日                                   |
| 計算期間       | 昭和53年4月～昭和54年3月                       |

(5) 地下水位再現計算結果

図4-14に昭和53年7月におけるG1～G2帯水層の計算水頭値と実測水頭値のコンターを比較した図を示す。これによると、全体的に計算水頭値と実測水頭値の分布傾向は一致している。なお、コンター図は計算値、実測値をそれぞれ目視により包絡したものである。しかし、図4-15に示す松中観測井の地下水位変動図を見ると、G1帯水層では計算水位がほとんど変動しておらず、また、G2帯水層では7月以降の実測値にみられる水位の上昇が表現しきれしていない。

G1層



G2層

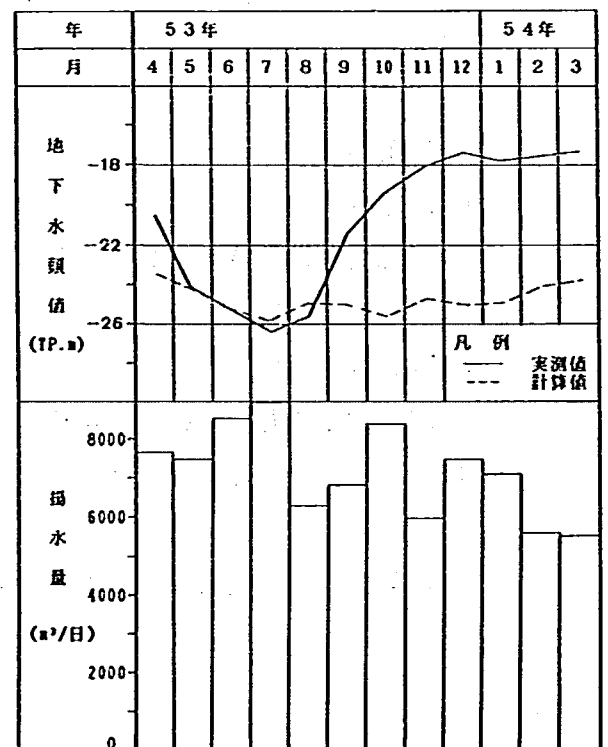
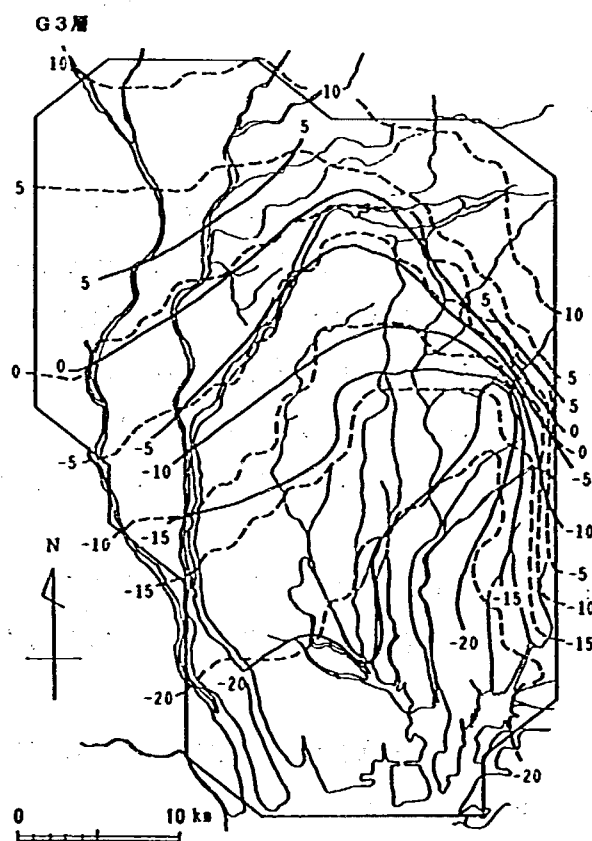
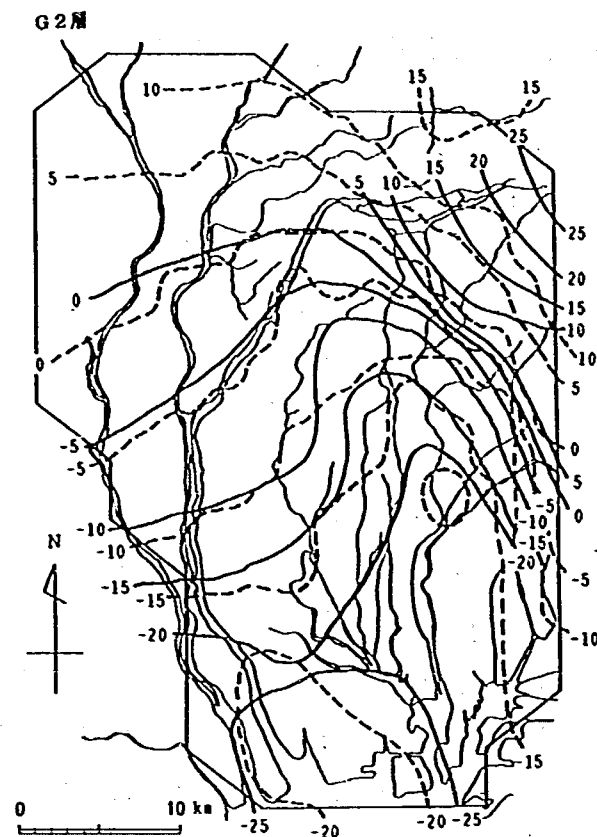
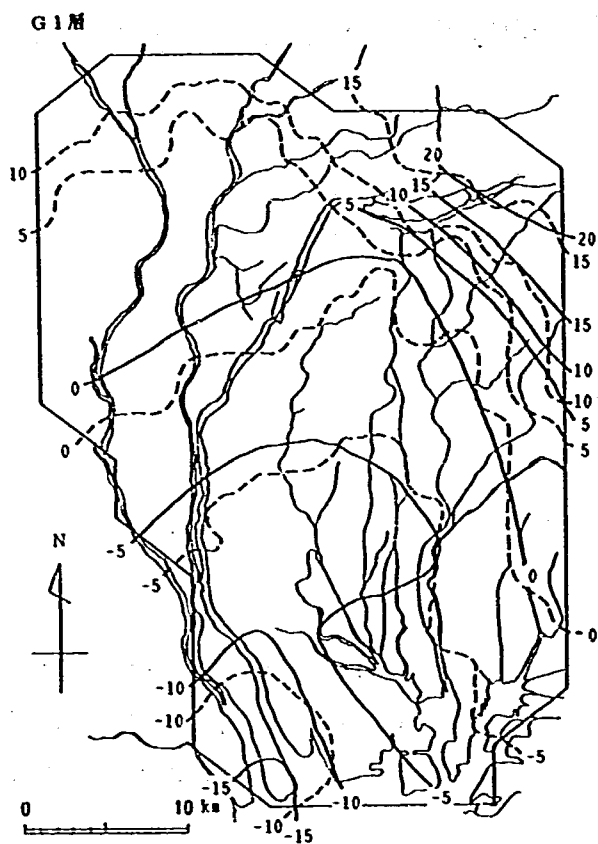


図4-14 現行モデルによる水位変動計算結果（松中観測井）



凡例 — 実測値  
--- 計算値

図4-15 現行モデルによるシミュレーション結果  
(昭和53年7月地下水位コンター図)

## 第5章 地下水シミュレーションにおける問題点の検討及びモデルの改良

### 5.1 概 要

第4章で構築した地下水シミュレーションモデルでは、地下水位の全体的な分布傾向は表しているが、各観測井の月単位の変動までも表現するには至っていない。

この原因として一般には、

- ① 基本式の適正について
- ② モデルの領域設定・地層のモデル化について
- ③ 初期条件・境界条件の設定について
- ④ 計算条件の設定について
- ⑤ パラメータの設定について

等の問題点があげられる。

上記の問題点のうち、①の基本式の適正については、参考資料に示したように理想的な条件のもとでは十分の精度の計算結果が得られることから、問題がないことは明らかであり、②のモデルの領域設定、地層のモデル化についても現在得られている地質情報から考えて、大きな問題を含んでいるとは考えられない。

したがって、残った問題点として③計算条件の設定、④初期条件・境界条件の設定、⑤パラメータの設定が考えられ、これらの検討を次の方針により行った。

#### (1) 初期条件・境界条件の設定

##### ① 初期条件

初期条件は、基礎方程式を対象とする時間間隔全体にわたって積分する際に、その初期時刻における流れの状態を水頭値の場所的分布として与えるものであるが、対象とする全体的な各点での値のすべてを知ることは不可能であり、対象領域内に設けられたいくつかの観測井地点での観測水頭値から推算して与えなければならない。

したがって、推算方法の違いにより、初期条件の設定値が異なることになる。

ここでは、実測水頭値データをもとに各点の値を推定する方法について検討する。

##### ② 境界条件

境界条件は基礎方程式を対象領域全体にわたって積分する場合に、境界における流れの状態を決定する条件であり、水頭指定と流量指定の2種類がある。具体的には次のようになる。

〔水頭指定〕………不圧層の水位変化、対象領域周辺の水頭変化による設定

〔流量指定〕………揚水量などでの設定

水頭指定の場合は、境界水頭値が一定の場合と、時間的に変動する場合があります、ここでは実測水頭値の状況をもとに、時間的に変動する境界水頭値について検討する。

流量指定の場合は、揚水量を対象とするものであり、揚水井におけるストレーナ近傍を囲む面についてのみ具体的に流量指定を行うことが可能である。

しかし、揚水井のなかには、ストレーナが数ヶ所設けられている場合があり、ストレーナ個々の揚水量をいかに把握するか、また、その揚水量と帯水層の関係をいかに合理的にモデル化すべきか等の問題点があり、それらが明らかにされて、はじめてシミュレーションモデルにおいて要素毎に総合した揚水量が設定できることになる。ここではこれらについて種々の検討を加える。

## (2) 計算条件の設定

計算条件としては、要素分割、計算時間間隔  $\Delta t$ 、計算ステップがあげられる。

### ① 要素分割

要素分割は合理的な境界条件の設定が可能な対象領域の大きさと計算処理時間等の関係が要因となり決定される。

ここでは、揚水量データの集計が国土基準メッシュ（第3次メッシュ  $1.1\text{km} \times 0.9\text{km}$ ）を単位として行われていることから、最小で  $1.1\text{km} \times 0.9\text{km}$  の範囲まで要素分割が可能となる。しかし、計算処理時間を考えると  $1.1\text{km} \times 0.9\text{km}$  メッシュでは約 2,400要素、1,300節点となり実用上の問題が残るため、基本的には先のモデル構築に用いた  $2.2\text{km} \times 1.8\text{km}$  とし、588要素、328節点とする。

参考として、 $1.1\text{km} \times 0.9\text{km}$  のメッシュにより一部の領域を対象に計算した結果を参考資料2に示す。

### ② 計算時間間隔 $\Delta t$

計算時間間隔  $\Delta t$  は、月単位程度の計算を行うことから、30日以下とする必要があり、参考資料1に示した理想条件による検討結果を踏まえ、10日としたものであり、特に問題点としての検討は実施しない。

### ③ 計算ステップ

計算ステップは、初期条件が計算値に与える影響を取り除くのに必要な期間を示すものであるが、(1)の①で精度の高い初期値が設定しうるのあれば第一ステップからシミュレーション結果を評価の対象と考えることができる。ここでは、参考として初期値がシミュレーション各ステップに与える影響を検討した結果を参考資料3に示す。

## (3) パラメータの設定について

パラメータは、基礎方程式に含まれている比貯留量( $S_s$ )、透水量係数( $T$ )、透水係数( $k$ )などであり、どのように設定するかは広域的な問題に対して確固たる方法がなく、シミュレーション手法では計算値と実測値とが良く合致するように決められている。

ここでは、観測井間における水頭値変化の周期、波長をもとに推定する方法と揚水試験デー

タをもとに推定する方法を参考に、一般的なパラメータの範囲を把握し、その結果をもとにパラメータを種々変更してシミュレーションを行い、計算値と実測値の合致の度合に基づき検討する。

## 5.2 初期条件、境界条件の設定

### (1) 初期条件

初期条件は、不圧層、G 1～G 3 各帯水層の観測井による実測値をもとに目視やコンピュータを用いて地下水位コンター図を作成し、各帯水層の各節点毎に水頭値を与える。

#### ① 各節点水頭値の設定方法

各帯水層の観測井による実測水頭値をもとに、高次の曲面を表現する回帰式を作成し、得られる回帰式により各節点水頭値を設定する。

高次の曲面式は次式により表現する。

$$h = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} \alpha_{i,j} \cdot x^i \cdot y^j \quad \text{----- (5.1)}$$

ここで、  
 $h$  : 地下水頭値  
 $m$  : 回帰式の次数  
 $x, y$  : 地点の  $x, y$  座標  
 $\alpha$  : 回帰式の係数

いま、 $m=1$ の時  $h = \alpha_{00} + \alpha_{10}x + \alpha_{01}y$

$m=2$ の時  $h = \alpha_{00} + \alpha_{10}x + \alpha_{11}xy + \alpha_{01}y + \alpha_{20}x^2 + \alpha_{02}y^2$

である。

したがって、 $n$  次の曲面式を作成する場合、係数  $\alpha$  の個数が  $(n+1)(n+2)/2$  個となり、実測データの個数が  $M$  個の場合には、最大  $(N+1)(N+2)/2 = M$  となる  $N$  次の曲面式により想定することができる。

#### ② 高次曲面式の次数の検討

(5.1)式について、昭和51年8月の第1帯水層(G 1層)の実測データを用いて、次数の検討を行う。

G 1層のデータにより(5.1)式の2次～6次に対する係数を最小自乗法にて求め、得られた係数によりコンター図を作成すると、図 5-1のようになる。図中(f)は同じ実測値によるコンター図(「東海三県地盤沈下調査会資料」)でこの両者を比較すると、ほぼ3次の局面式による想定で表現できるものと考ええる。

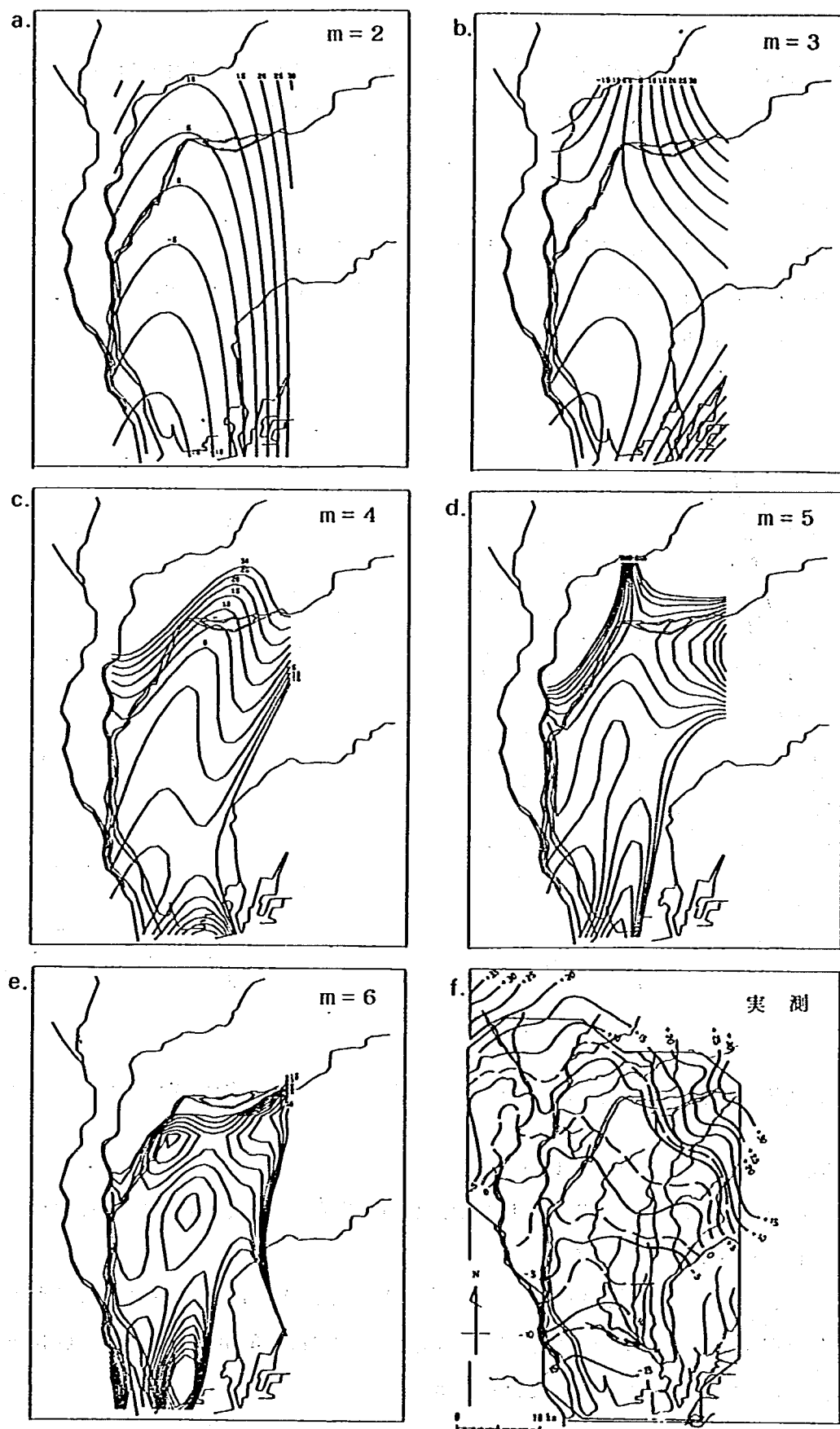


図5-1 高次曲面式によるコンター図 (G1層)

## (2) 境界条件

境界条件は不圧層の各節点での水位時間変化と各帯水層の計算対象領域周辺における節点水頭値の時間変化及びG1～G3各層の各要素における揚水量がある。

ここでは、まず第一に水位境界値の設定方法について検討するものであり、(1)の初期条件の検討と同様に3次の曲面式を用い、月毎の実測水頭値にもとづき回帰式を作成し、各節点毎に境界水位を計算し設定する。揚水量については5.3にて検討を加える。

昭和53年4月～昭和54年3月までの不圧層、G1～G3各帯水層における境界水頭値を計算した結果の一部を図5-2～3に示す。

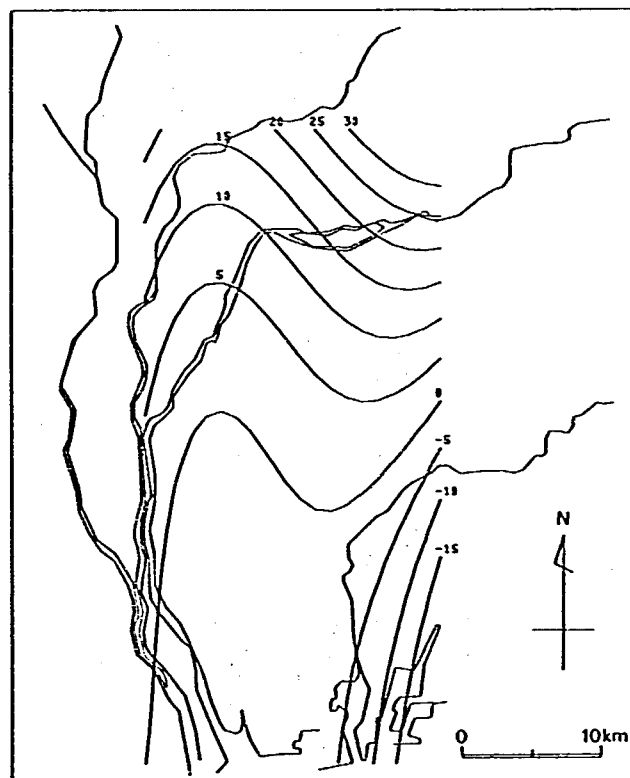
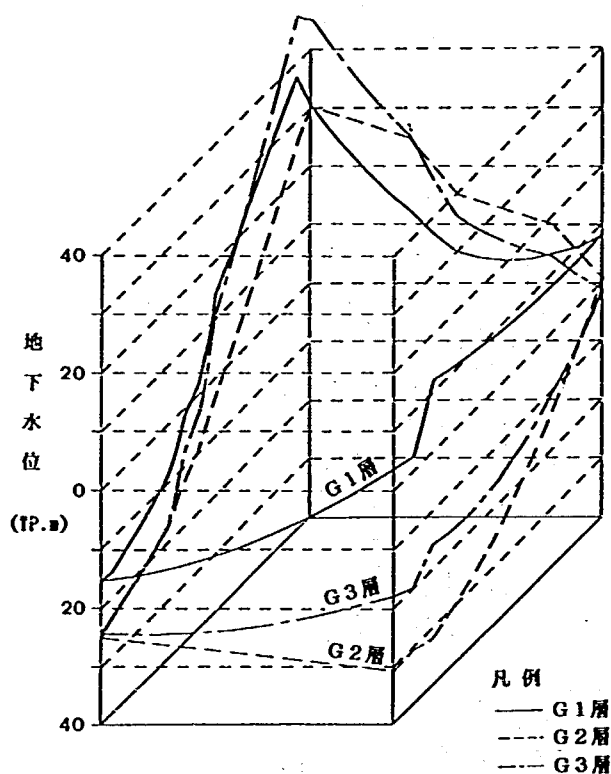


図5-2 周囲境界推定値（昭和53年8月）      図5-3 不圧層境界水頭推定値（昭和53年8月）

## (3) 小領域モデルによるシミュレーション

モデルの初期条件、境界条件として(1)、(2)から得られた検討結果の妥当性を調べるために、シミュレーションを実施する。

シミュレーション領域は種々のケースが検討可能なように、図5-4に示すような小さな領域を設定するものであり、現行モデルに比べ要素数が588から185、節点数が328から113となり、およそ4分の1の規模となる。

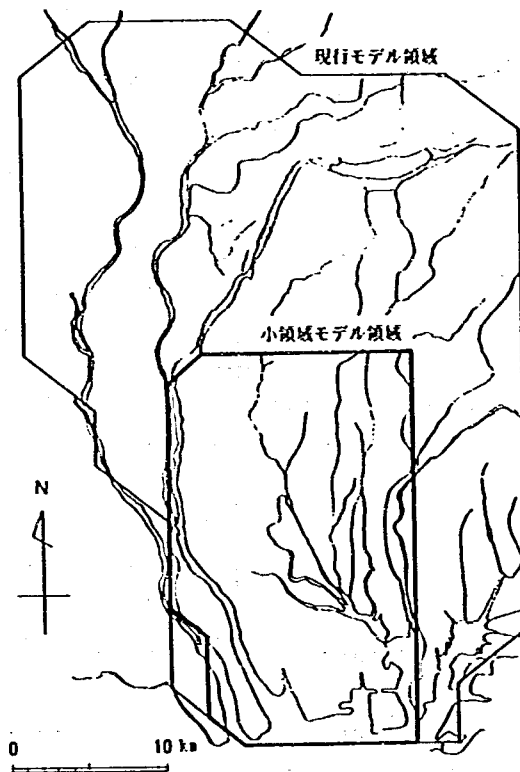


図 5-4 小領域モデルの対象領域

小領域モデルの要素分割を図 5-5 に示す。なお、パラメータ・計算条件は現行モデルの値をそのまま用い、初期条件・境界条件は表 5-1 に示す 4 ケースを与え、その結果を比較する。

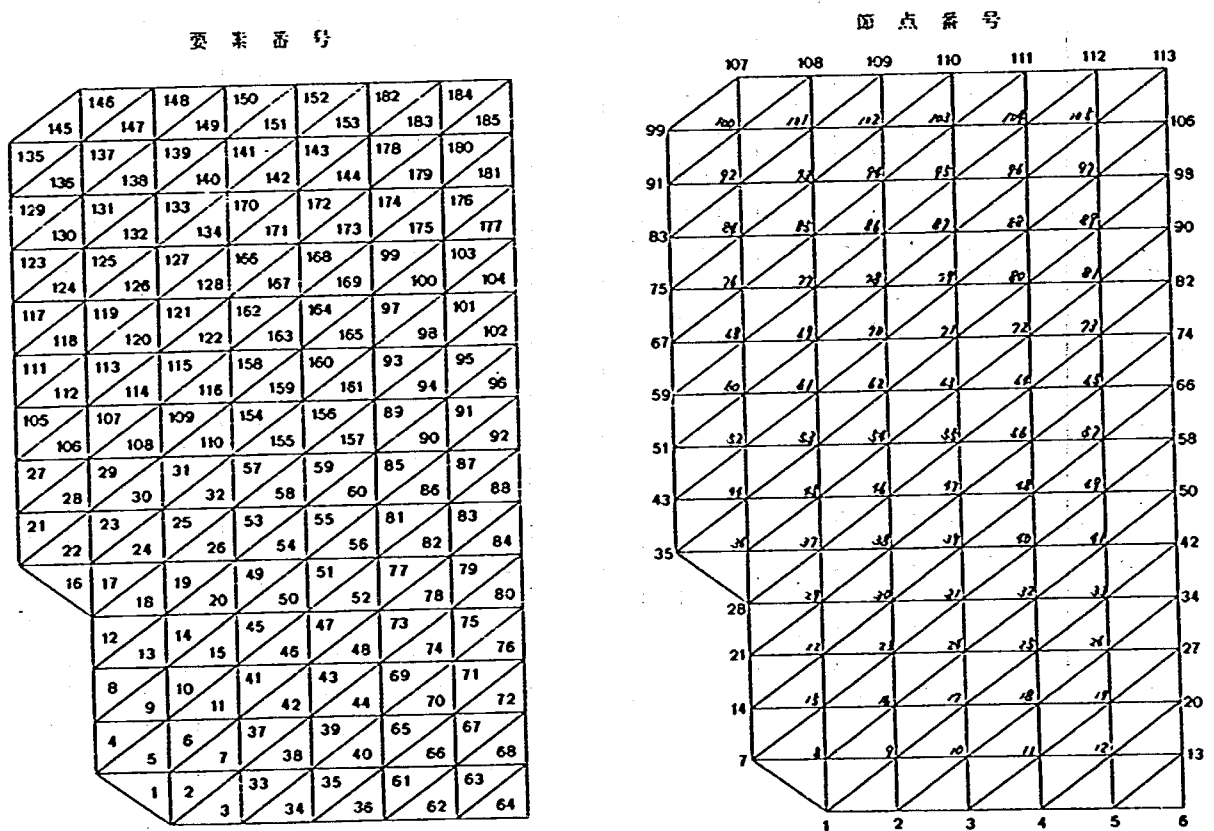


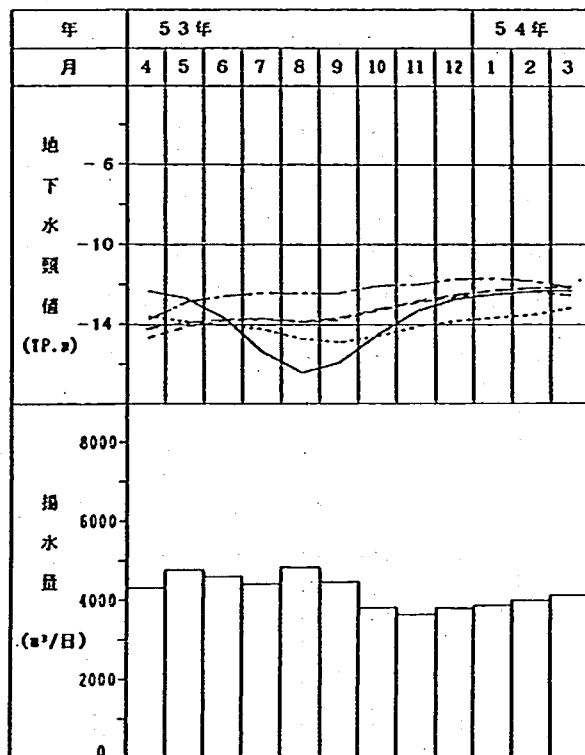
図 5-5 小領域モデル要素節点番号

表5-1 初期条件・境界条件

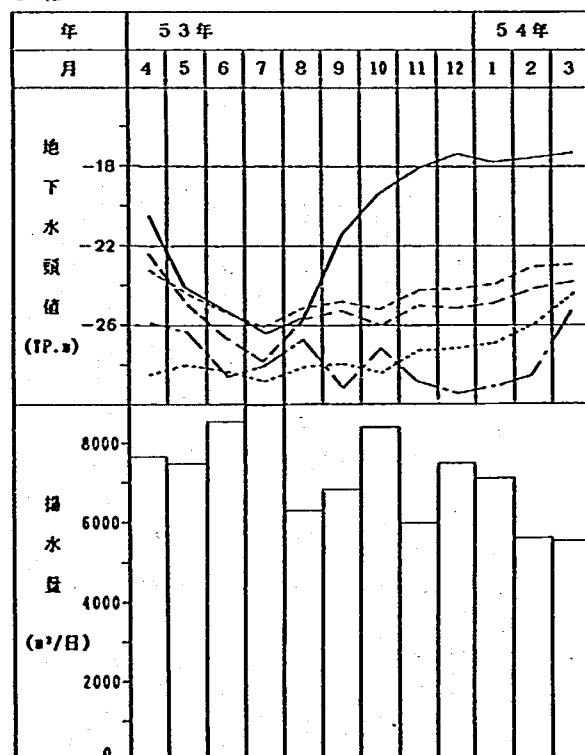
| ケース | 不圧帯水層                             | 周囲境界                                                                                           |
|-----|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 現行モデルの領域内の全観測井<br>(51観測井)を対象とする。  | 現行モデルの領域内のG-1～<br>G3帯水層の全観測井を対象と<br>する。<br>G1帯水層 …… 45観測井<br>G2帯水層 …… 58観測井<br>G3帯水層 …… 62観測井  |
| 2   | 小領域モデルの領域内の全観測<br>井(18観測井)を対象とする。 | 小領域モデルの領域内のG-1<br>～G3帯水層の全観測井を対象<br>とする。<br>G1帯水層 …… 28観測井<br>G2帯水層 …… 25観測井<br>G3帯水層 …… 39観測井 |
| 3   | 各地点近傍6観測井を対象とす<br>る。              | 各地点近傍6観測井を対象とす<br>る。                                                                           |
| 4   | 現行モデルの領域内の全観測井<br>(51観測井)を対象とする。  | 境界に対して、密状領域を設定<br>し、その領域の観測井とする。                                                               |

シミュレーション結果を図5-6に示す。

G1層



G2層



凡例 ——— 実測値  
 ..... ケース1  
 - - - - ケース2  
 - - - - ケース3  
 - - - - ケース4

図5-6 小領域モデルによる水位変動計算結果(松中観測井)

4 ケースの計算結果を水収支の点から検討すると、表 5-2 のようになる。ここで水収支は次の 4 項目の収支で算定する。

1) 揚水量

各節点毎に年間合計の揚水量を集計

2) 上下方向の移動量

各計算ステップ毎の不圧帯水層、各被圧帯水層 (G 1 層、G 2 層、G 3 層) での出入り量を集計する。

例えば、G 1 層の収支は次のようになる。

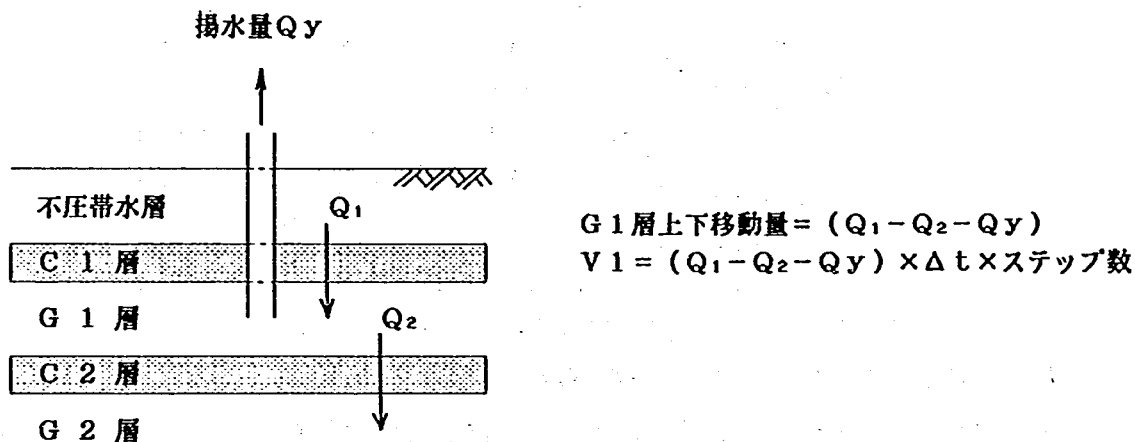


図 5-7 G 1 層上下方向移動量

3) 境界からの横流入量

境界からの出入り量は、境界の水頭値と領域内の水頭値により流速  $v$  を求め、この流速に境界格子の一边の長さ  $L$  と層厚  $D$  を乗じ、それらを集計する。

$$Q = V \text{ (m/H)} \times L \text{ (m)} \times D \text{ (m)} \times \Delta t$$

4) 水頭値変化による貯留量

各格子の水頭値変化  $\Delta h$  と比貯留量  $S_s$ 、格子の面積  $A$ 、層厚  $D$  を用い、貯留量変化  $V$  を

$$V = \Delta h \text{ (m)} \times S_s \text{ (1/m)} \times A \text{ (m}^2\text{)} \times D \text{ (m)}$$

として求め、集計する。

以上 1)~4) を用い、水収支  $\Delta v$  は

$$\Delta V = (\text{上下方向移動量} - \text{揚水量} + \text{横流入量}) - \text{貯留量}$$

として求められ、合理的な解が得られていれば、 $\Delta V = 0$  となる。

表5-2 境界条件ケース別水収支

(単位:  $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ )

| ケース<br>No | ケース名                                 | 層<br>区<br>分 | 揚水量<br>① | 上下方向<br>移動量<br>(①を含む)<br>② | 境界から<br>の横流入<br>量<br>③ | 貯留量<br>変化<br>④ | 収支<br>①-②-③ |
|-----------|--------------------------------------|-------------|----------|----------------------------|------------------------|----------------|-------------|
| (1)       | 全観測井<br>による<br>境界値                   | 61          | -22      | 2.7                        | 2.5                    | 18.2           | 12.9        |
|           |                                      | 62          | -28      | 20.0                       | -1.8                   | 14.3           | -3.9        |
|           |                                      | 63          | -81      | -5.6                       | 7.8                    | 26.9           | 24.7        |
| (2)       | 対象領域<br>内観測井<br>による<br>境界値           | 61          | -22      | -75.1                      | 7.7                    | -28.8          | 38.6        |
|           |                                      | 62          | -28      | 38.6                       | 0.6                    | 22.3           | -16.9       |
|           |                                      | 63          | -81      | -5.7                       | -1.4                   | -18.1          | -11.0       |
| (3)       | 節点近傍<br>6ヶ所以<br>上の観測<br>井による<br>境界値  | 61          | -22      | -54.1                      | 2.3                    | -59.2          | -7.4        |
|           |                                      | 62          | -28      | 60.4                       | -3.0                   | 3.5            | -54.0       |
|           |                                      | 63          | -81      | -14.7                      | -32.4                  | -217.4         | -170.3      |
| (4)       | 境界に対<br>し掃状の<br>範囲を設<br>けその中<br>の境界値 | 61          | -22      | -37.5                      | -4.0                   | -41.0          | 0.5         |
|           |                                      | 62          | -28      | 57.9                       | -8.7                   | -11.0          | -38.3       |
|           |                                      | 63          | -81      | -38.0                      | -1.1                   | -65.2          | -26.0       |

表5-2より結果をみると、収支が貯留量変化又は、移動量の50%を越える例も見られ、その原因として次のことが考えられる。

- (イ) 貯留量変化の値には、境界格子での水位変動が大きく影響していると考えられるケースがある。そこで、境界水頭値を一定値とした計算結果をみると、収支は表5-3のようになる。

表5-3によれば、水収支は貯留量変化ないし上下方向移動量の10~20%程度の範囲となることが考えられる。ここで、境界水頭値一定の計算結果と変動させた計算結果において各節点の計算水頭値を比べると、どちらも大きな差が認められない。このことは境界を変動させてもその影響が各節点に伝播していないことを示している。

したがって先の1)~4)のケースの収支には境界として与えるデータの水位変動と計算上の各種条件 (K・Ssと揚水量・層厚等) が整合していないことにより差が生じたものと考えられる。

表5-3 境界値を一定とした場合の水収支

(単位:  $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ )

| 層<br>区<br>分 | 揚水量<br>① | 上下方向<br>移動<br>(①を含む)<br>② | 境界から<br>の横流入<br>量<br>③ | 貯留量<br>変化<br>④ | 収支<br>①-②-③ |
|-------------|----------|---------------------------|------------------------|----------------|-------------|
| 61          | -22      | -12.1                     | 1.4                    | -9.9           | 0.9         |
| 62          | -28      | -10.0                     | 1.3                    | -7.2           | 1.5         |
| 63          | -81      | -48.5                     | 3.6                    | -37.9          | 7.0         |

(ロ) 表5-3の結果では、収支として  $0.9 \times 10^6 \sim 7.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  の差が得られるが、この値は境界格子での揚水量により生ずるものであり、揚水量が月毎に変化するのに対し、境界水位は一定としたことによるものである。従って、境界のデータとしては、これら揚水量、層厚、透水係数、比貯留量を考慮し、境界での収支がバランスするように設定されなければならない。

しかし現実には、そのような設定は不可能で境界水頭値は境界格子の揚水量とは無関係に設定される。

このように、初期条件・境界条件を変化させたシミュレーション結果から、合理的な水収支を得るためには、モデルの各種条件 ( $K \cdot S$  と揚水量・層厚等) と境界値等の間に十分の整合が必要であることが明らかとなった。

### 5.3 揚水量のモデルについて

次にシミュレーションを実施する場合の境界条件の一つである揚水量データのモデル化について、その手法と具体的に設定される揚水量の関係について検討する。

検討は、(1)多層取水井における揚水量の層別配分の方法、(2)揚水量集計方法の2項目について実施する。

#### (1) 多層取水井における揚水量の層別配分の方法

現行のシミュレーションで用いている層別揚水量のデータは、昭和53年度の愛知県(2,481本)、岐阜県及び三重県(320本)、名古屋市(868本)の揚水井のデータを基礎とし、各メッシュの揚水井一本毎に層別のストレーナ長の比で総揚水量を層別の揚水量に配分し、これらを国土基準メッシュ座標の3次メッシュ区分( $0.9\text{km} \times 1.1\text{km}$ )に集計している。

多層取水井における層別揚水量モデル化の方法について検討すると以下のとおりである。

##### ① モデル化の方法

一本の揚水井において、ストレーナが多層にわたり設けられている場合、各ストレーナからの取水量は各層の水理諸元により決定され则认为られる。

この現象をモデル化する場合には、各層における透水係数、層厚及びストレーナ長等が基本的な諸元として考えられる。したがって、揚水量のモデル化の手法としては、これらの諸元の組み合わせにより現行の他、次の5ケースが考えられる。

##### a) 層厚×透水係数の比による配分

揚水量( $Q$ )は次式で算定される。

$$Q = 2\pi \sum_{m=1}^3 \frac{K_m \cdot D_m \cdot (H_m - h_o)}{\log_e(R_m/r_o)} \quad \text{-----} \quad (5.2)$$

$r_o$ : 井戸の半径

Rm : 揚水の影響半径 (500~1,000m)

Km : 透水係数、 Dm : 層 厚

Hm : Rmにおける水位 ho : 井戸水位

したがって、QはKm,Dmに比例することから、Km,Dmを係数として用いる。

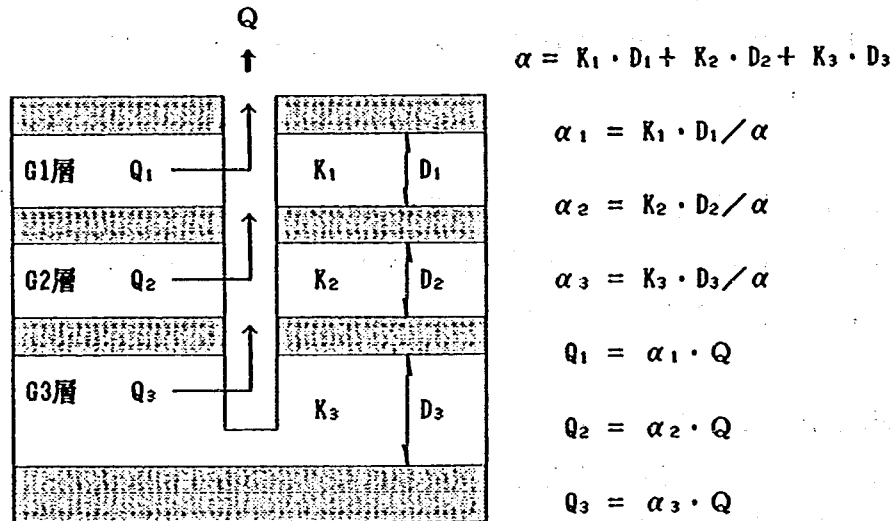


図5-8 層厚×透水係数の比による揚水量配分方法

b) 透水係数については、不明な要素が多いので、層厚のみで配分する方法

c) ストレーナ長×透水係数の比率にしたがった配分をする方法

a)におけるKm,Dmのかわり、Km,Lmを用いる。

Lm : ストレーナ長

d) 層厚×ストレーナ長×透水係数の比で配分する方法

e) 層厚×ストレーナ長の比で配分する方法

## ② 検討結果

松中観測井G 1、G 2層における実測水位の変動と各ケースの揚水量パターンを図にすると、図5-9のようになる。

これより、ケースc)の揚水量パターン(ストレーナ長×透水量係数)が観測水位の変化パターンに比較的似た形状を示すことがわかるが、現行の方法による結果と、あまり大きな違いは認められず、現行の方法でも十分であると考えられる。

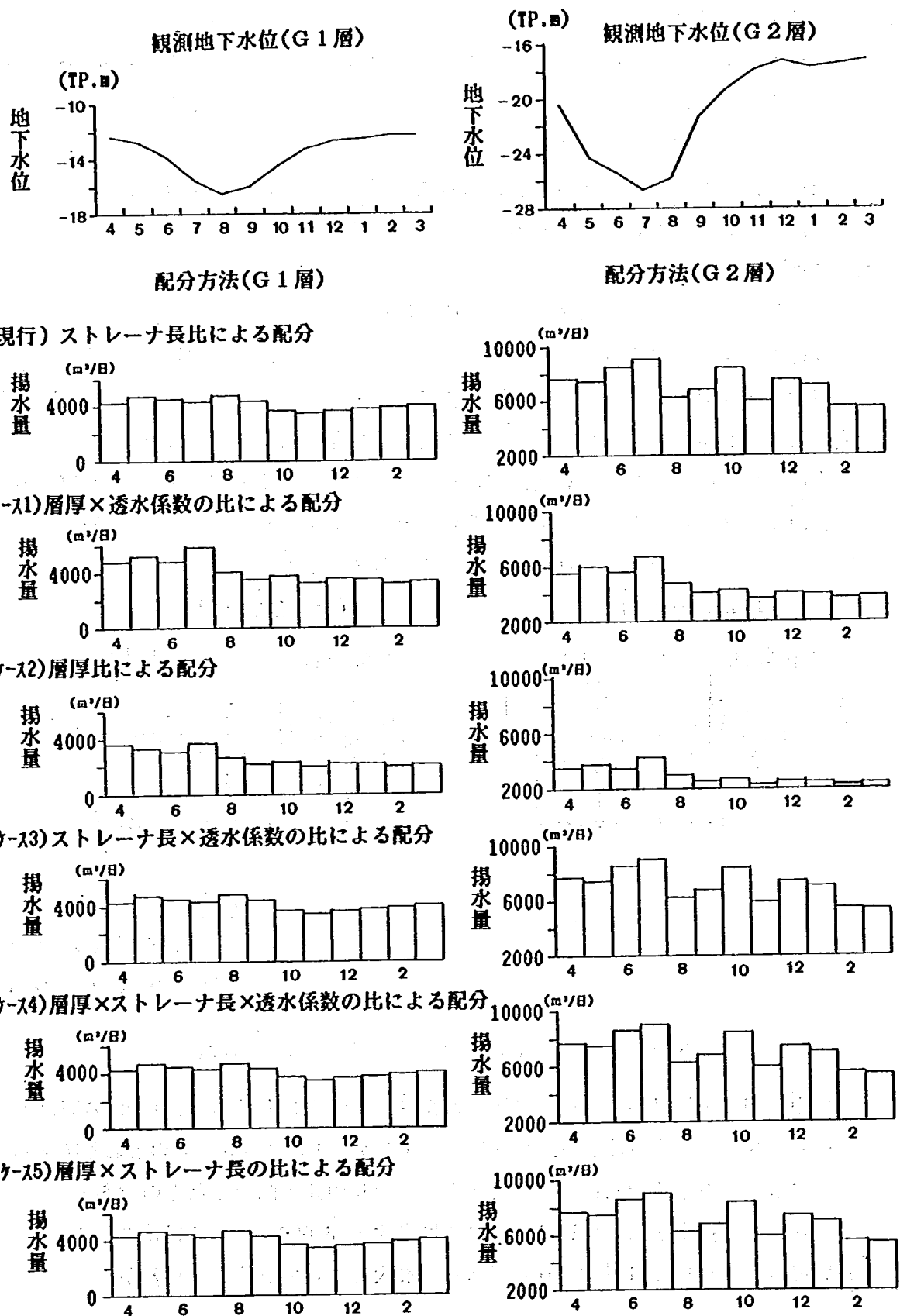


図5-9 揚水量配分方法の比較

(昭和53年度、松中地点G 1層、G 2層)

## (2) 揚水量集計方法について

各節点に与える揚水量は、個々の揚水井の揚水量を要素上で合計してモデル化している。そこで、揚水量集計メッシュ規模の違いや揚水量パターンの異なる各揚水井の揚水量を合計することによる問題点を検討する。

対象領域内において実測水頭値、揚水量データ等が詳細に把握できる地点は、松中観測井及び津島観測井であり、それぞれの基礎データは次のとおりである。

### ① 基礎データ

国土基準メッシュと計算メッシュの位置関係

現行モデルでの揚水量データは国土基準メッシュ ( $0.9\text{km} \times 1.1\text{km}$ ) 毎に集計されており、一方計算メッシュは  $1.8\text{km} \times 2.2\text{km}$  の格子である。したがって計算メッシュ上の揚水量はその周辺4ヶ所の国土基準メッシュ上の揚水量を集計したデータで与えられる。

次に、松中観測井及び津島観測井の計算メッシュと国土基準メッシュの関係を図にすると、図5-10に示すとおりであり、それぞれの計算メッシュにおける格子点番号を罫字、国土基準メッシュを①～④及び①'～④'の番号で示した。

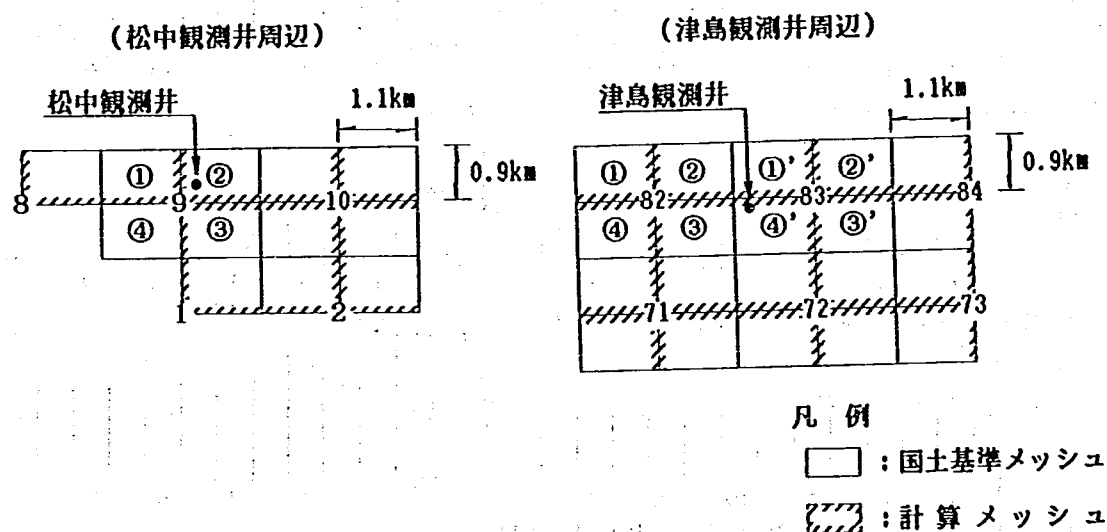


図5-10 国土基準メッシュと計算メッシュの関係

松中観測井・津島観測井近傍の国土基準メッシュ上における各井戸毎の昭和53年4月～昭和54年3月の期間の月平均揚水量データは表5-4及び表5-5のとおりである。なお、多層取水井における層別揚水量は、ストレーナ長の比で配分したものである。

これより、松中観測井周辺のデータでは最大で  $3,000\text{m}^3/\text{日}$  の揚水量があり、津島観測井周辺のデータでは  $161\text{m}^3/\text{日}$  の揚水量が最大となっていることがわかる。

表5-4 松中地点揚水データ

| 区 域      | 揚水井<br>番 号 | 月 別 揚 水 量 (m <sup>3</sup> /日) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |            | 4 月                           | 5 月   | 6 月   | 7 月   | 8 月   | 9 月   | 10 月  | 11 月  | 12 月  | 1 月   | 2 月   | 3 月   |
| ①        | 1          | 1768                          | 2323  | 1440  | 2508  | 929   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 155   |
|          | 2          | 1440                          | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 0     | 1440  | 1440  | 120   | 120   |
|          | 3          | 1440                          | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  |
|          | 4          | 3000                          | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  |
|          | 5          | 117                           | 114   | 117   | 114   | 142   | 147   | 85    | 117   | 114   | 114   | 126   | 85    |
|          | 6          | 1                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 2     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     |
|          | 7          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 合 計        | 7766                          | 8317  | 7437  | 8502  | 6951  | 6029  | 5969  | 4561  | 5998  | 5998  | 4690  | 4804  |
| ②        | 1          | 985                           | 1235  | 760   | 2183  | 604   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 93    |
|          | 2          | 1024                          | 1343  | 904   | 2191  | 604   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 125   |
|          | 3          | 1584                          | 2230  | 1344  | 2137  | 743   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 147   |
|          | 4          | 0                             | 474   | 504   | 488   | 504   | 504   | 468   | 420   | 504   | 504   | 492   | 460   |
|          | 5          | 0                             | 0     | 0     | 18    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 6          | 1200                          | 1200  | 1200  | 1200  | 1182  | 1135  | 1189  | 1130  | 1200  | 1200  | 1200  | 1200  |
|          | 7          | 1200                          | 1161  | 973   | 755   | 1182  | 1168  | 1200  | 1188  | 1161  | 1200  | 771   | 1045  |
|          | 8          | 1200                          | 1200  | 1150  | 1142  | 1195  | 823   | 1200  | 1093  | 1161  | 1200  | 1157  | 1184  |
|          | 9          | 1200                          | 1200  | 1200  | 1200  | 0     | 440   | 1141  | 1141  | 1200  | 1200  | 1071  | 1045  |
|          | 10         | 1440                          | 1440  | 900   | 1440  | 720   | 600   | 571   | 570   | 600   | 480   | 600   | 542   |
|          | 11         | 0                             | 0     | 1512  | 1512  | 1073  | 1109  | 1512  | 504   | 488   | 244   | 0     | 0     |
|          | 12         | 1440                          | 1387  | 1440  | 1440  | 1022  | 1190  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  | 1440  |
|          | 13         | 3000                          | 2947  | 3000  | 3000  | 3000  | 2895  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  | 3000  |
|          | 14         | 1030                          | 1104  | 1104  | 1104  | 1104  | 1104  | 0     | 0     | 0     | 0     | 624   | 549   |
|          | 15         | 26                            | 27    | 26    | 25    | 23    | 19    | 14    | 14    | 11    | 11    | 12    | 22    |
|          | 16         | 240                           | 60    | 120   | 60    | 60    | 120   | 480   | 480   | 480   | 480   | 480   | 480   |
|          | 合 計        | 15569                         | 17008 | 16137 | 19895 | 13016 | 11107 | 12215 | 10980 | 11245 | 10959 | 10847 | 11332 |
| ③        | 1          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 2          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 3          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 4          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 5          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 6          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 7          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 8          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 9          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 10         | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 11         | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 合 計        | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| ④        | 1          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 2          | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|          | 合 計        | 0                             | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 総 計      |            | 23335                         | 25325 | 23574 | 28397 | 19967 | 17136 | 18184 | 15541 | 17243 | 16957 | 15537 | 16136 |
| 層別<br>水量 | G 1 層      | 4299                          | 4755  | 4569  | 4364  | 4801  | 4414  | 3745  | 3571  | 3740  | 3811  | 3949  | 4096  |
|          | G 2 層      | 7675                          | 7492  | 8557  | 9014  | 6286  | 6827  | 8439  | 5970  | 7503  | 7146  | 5588  | 5520  |
|          | G 3 層      | 11361                         | 13078 | 10448 | 15019 | 8880  | 5895  | 6000  | 6000  | 6000  | 6000  | 6000  | 6520  |

表5-5 津島地点揚水データ

| 区 域      |       | 月 別 揚 水 量 (m <sup>3</sup> /日) |     |     |     |     |     |      |      |      |     |     |     |
|----------|-------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|
|          |       | 4 月                           | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 | 1 月 | 2 月 | 3 月 |
| ①        |       | 82                            | 105 | 101 | 41  | 111 | 100 | 82   | 77   | 78   | 76  | 71  | 75  |
| ②        |       | 2                             | 2   | 3   | 5   | 5   | 6   | 3    | 2    | 2    | 2   | 2   | 2   |
| ③        |       | 0                             | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   |
| ④        |       | 108                           | 117 | 118 | 110 | 98  | 114 | 112  | 112  | 107  | 92  | 113 | 119 |
| 合 計      |       | 192                           | 224 | 222 | 156 | 214 | 220 | 197  | 191  | 187  | 170 | 186 | 196 |
| 層別<br>水量 | G 1 層 | 84                            | 107 | 104 | 46  | 116 | 106 | 85   | 79   | 80   | 78  | 73  | 77  |
|          | G 2 層 | 108                           | 117 | 118 | 109 | 98  | 114 | 112  | 112  | 107  | 92  | 113 | 119 |
|          | G 3 層 | 0                             | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   |
| ①        |       | 0                             | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   |
| ②        |       | 0                             | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   |
| ③        | 1     | 121                           | 131 | 140 | 161 | 147 | 45  | 18   | 21   | 16   | 11  | 17  | 22  |
|          | 2     | 10                            | 4   | 8   | 8   | 8   | 7   | 4    | 4    | 1    | 1   | 2   | 21  |
|          | 計     | 131                           | 135 | 148 | 169 | 155 | 52  | 22   | 25   | 17   | 12  | 19  | 43  |
| ④        |       | 0                             | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   |
| 合 計      |       | 131                           | 135 | 148 | 169 | 155 | 52  | 22   | 25   | 17   | 12  | 19  | 43  |
| 層別<br>水量 | G 1 層 | 0                             | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   |
|          | G 2 層 | 0                             | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   |
|          | G 3 層 | 131                           | 135 | 148 | 169 | 155 | 52  | 22   | 25   | 17   | 12  | 19  | 43  |
| 総 計      |       | 323                           | 359 | 370 | 325 | 369 | 272 | 219  | 216  | 204  | 182 | 205 | 239 |

図5-10及び表5-4に示すように、松中水頭値観測井の位置する国土基準メッシュの格子内には表5-4の②領域の16本の揚水井があり、一日平均で10,000~20,000m<sup>3</sup>/日の揚水が行われている。

現行の準3次元シミュレーションではこれらの揚水量をストレーナ長の比にもとづき帯水層別の揚水量に配分して用いており、当該松中地点の地質縦断面図からG1~G3の各帯水層の位置を確認し、上記16本の揚水井のストレーナ位置と比較すると図5-11のとおりである。

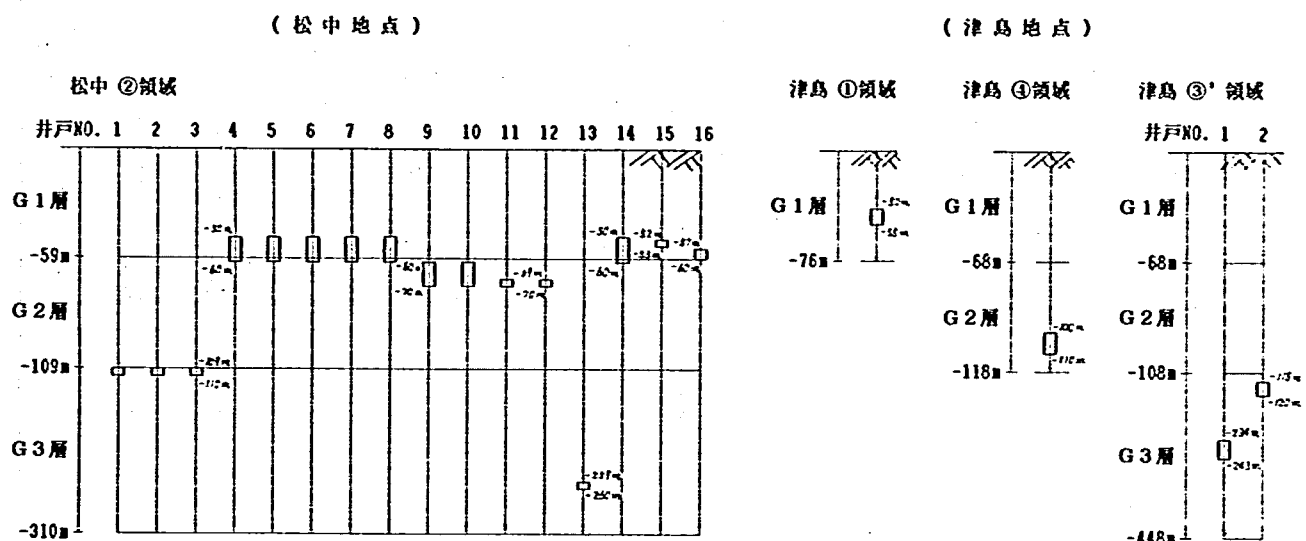


図5-11 帯水層とストレーナ位置の関係

## ② 揚水量パターンの比較

①の基礎データから松中地点では、水頭値観測井の位置する区域(図5-10、上図の②)内に14本の揚水井があり、各々の月揚水量変化を作図し比較すると図5-12に示すとおりであり、各揚水量パターンの特徴は、松中地点では年間ほぼ一定のパターン(パターン1)、9月に揚水量が小さくなるパターン(パターン2)、6~10月に大きな揚水量があるパターン(パターン3)、2~9月に大きな揚水量のあるパターン(パターン4)に、また、津島地点では揚水井の数が少なく、概ね年間ほぼ一定のパターンと4~8月に大きな揚水があり、その後揚水量が少なくなるパターンに分けられる。

このように、個々の揚水井でそれぞれのパターンの揚水量が認められるが、これらを要素上で合計してモデル化すると、個々の特徴が打ち消し合うことがある。この問題は井戸一本ずつモデル化できれば解消できるものであるが、実用的なシミュレーションを考えると、要素数及び演算に要する時間数などが非現実的なものとなる。

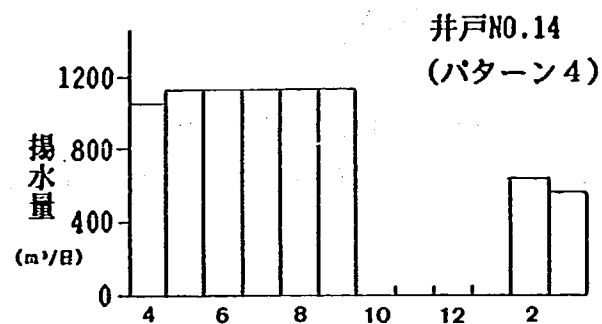
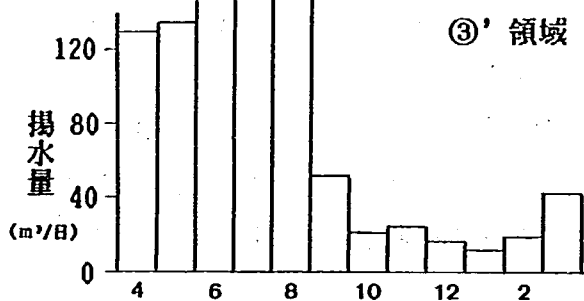
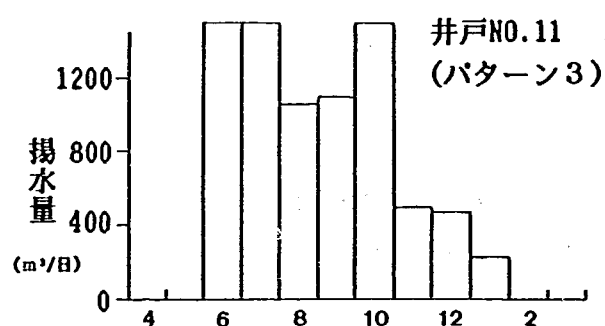
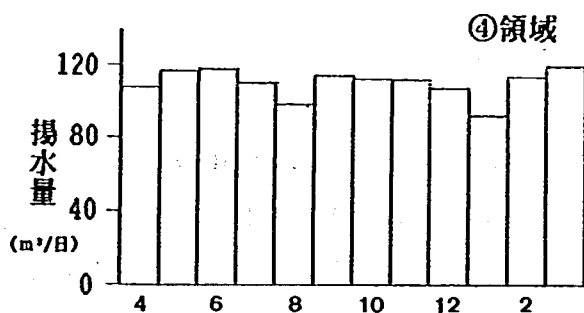
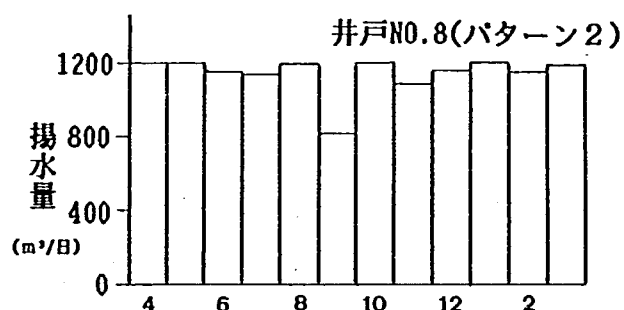
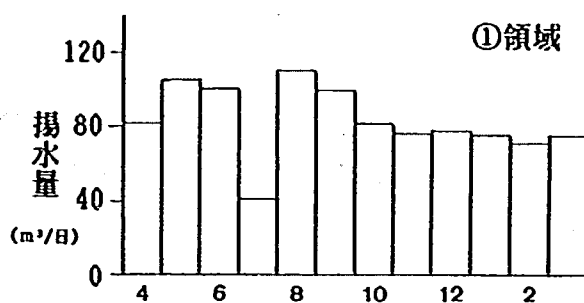
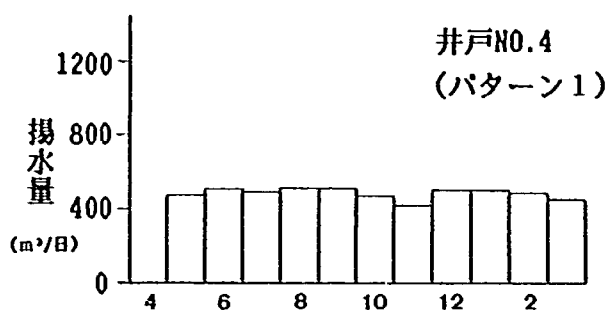
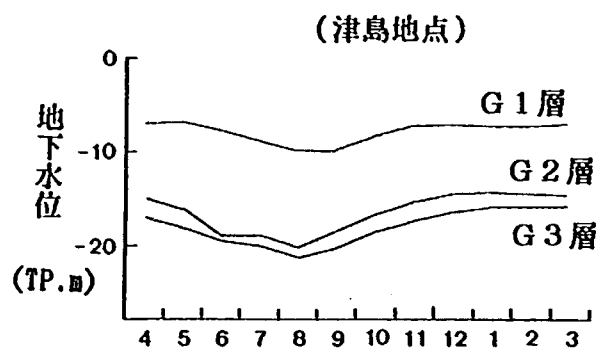
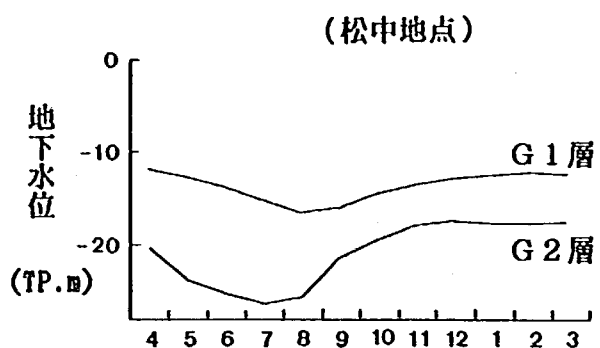


図 5-12 揚水井別揚水量の比較 (昭和53年度松中、津島地点)

### ③ 検討結果

松中地点及び津島地点の揚水量基礎データの状況と実測水頭値の比較から両者の関係は次のようにまとめられる。

松中地点では表5-4及び図5-11、図5-12にみられるように、G2層ではNo11揚水井及びNo14揚水井の影響を敏感に反映した水頭値が観測されていることが考えられ、G1層についてはNo8揚水井の影響を強く反映していると見ることができる。しかし、周辺の帯水層位置のデータ及びストレーナの位置をもとに推定した計算メッシュ全体の揚水強度に従う場合、図5-12のようにNo8あるいはNo11、No14の揚水井の特徴が平均化される状況となる。

津島地点では表5-5及び図5-12に示すように、揚水量の値が比較的小さいため、実測水頭値が直接揚水量に反応した結果とは判断できない。

これらのことや参考資料2から、特に大きな揚水量の考えられるメッシュにおいては、揚水量の集計方法いかんによって計算水頭値にかなり大きな誤差を含むことが予想されることがわかる。

## 5.4 パラメータの設定について

濃尾平野における透水係数、比貯留量を観測井間における水頭値変化の周期及び波長をもとに推定した結果と揚水試験データから整理した結果は巻末の参考資料4に示すとおりで、 $S_s/K$ の値で $10^{-8} \sim 10^{-2}$ 、 $K$ については $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ m/日}$ 、 $S_s$ については $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ 1/m}$ である。

これらを参考にシミュレーションモデルの感度分析を行い、内装検定を実施した結果をまとめる。

### (1) シミュレーションモデルの感度分析

ここでは、透水係数、比貯留量を変化させ、計算水位の感度を検討したものであり、透水係数を低減させるに従い、地下水頭値の絶対値が低くなり、比貯留量を低減させると地下水頭値の変動が激しくなることがわかる。

透水係数・比貯留量と計算水頭値の変化は、巻末の参考資料5に示すとおりである。

### (2) 定数の検討

現行モデルの定数をもとに、現行シミュレーションモデルの内挿検定を行う。

まず、現行モデルの定数に対して、表5-6に示す比率を乗じた値でシミュレーションを実施する。

表 5 - 6 ケース別計算定数

| ケース | 現行モデル 定数に対する比率 |         |         | 備 考     |
|-----|----------------|---------|---------|---------|
|     | 帯水層比貯留量        | 帯水層透水係数 | 粘土層透水係数 |         |
| 1   | × 1.0          | × 1.0   | × 1.0   | 現行モデル定数 |
| 2   | × 0.05         | × 1.0   | × 0.05  |         |
| 3   | × 0.05         | × 100.0 | × 0.05  |         |
| 4   | × 0.05         | × 10.0  | × 0.05  |         |

シミュレーションの結果は図 5 - 13 ~ 5 - 15 に示す。

これによると、ケース 4 における松中観測井及び津島観測井での水位変動はある程度の適合度が見られるものの、平面的（コンター図）な水頭値分布は適合度が低い。

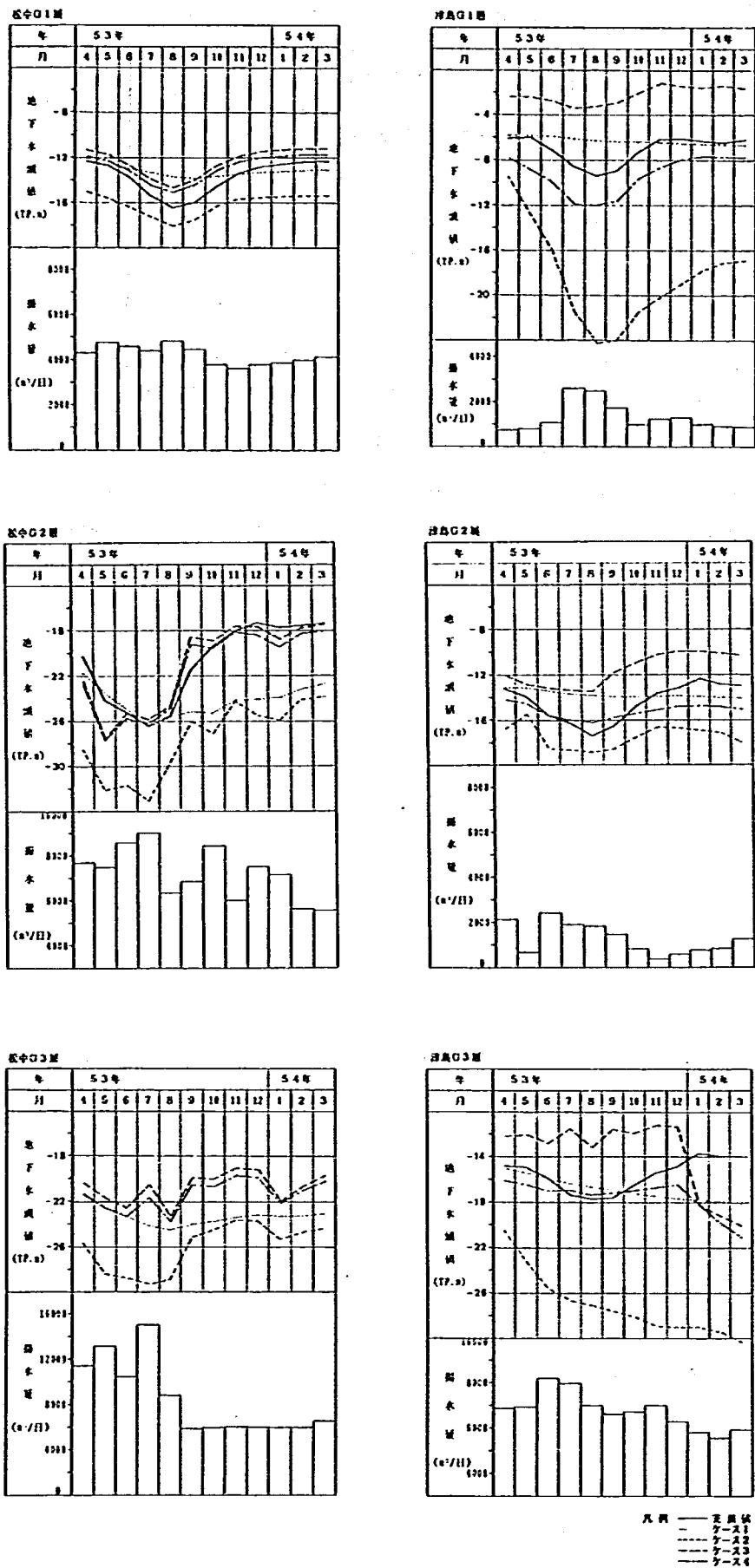
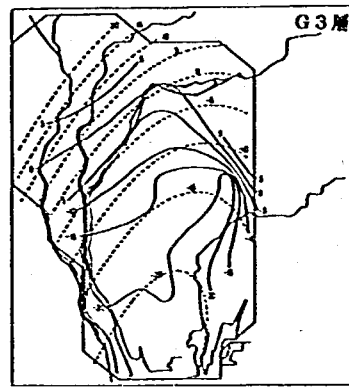
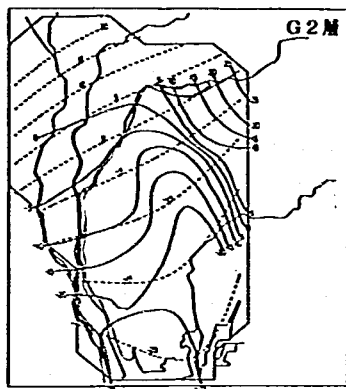
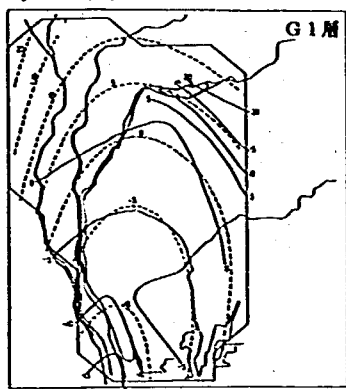
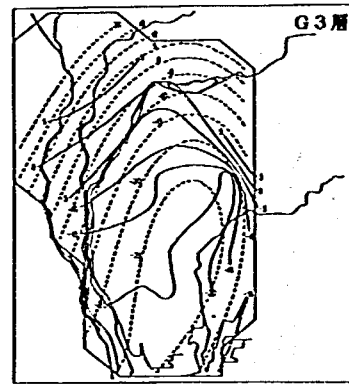
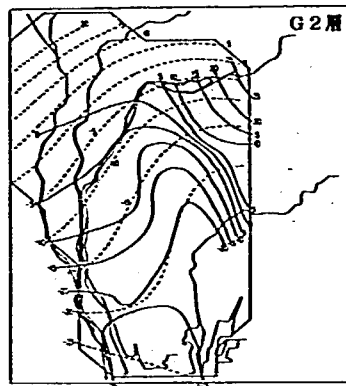
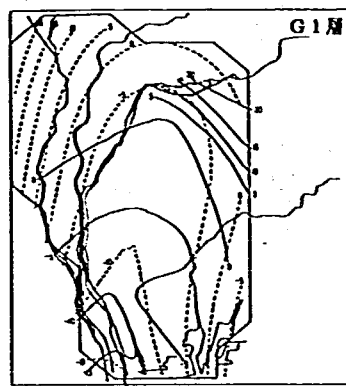


図5-13 水位変動計算結果の比較 (松中、津島地点)

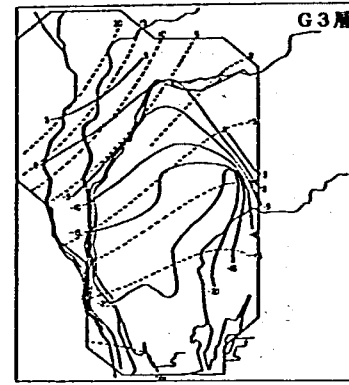
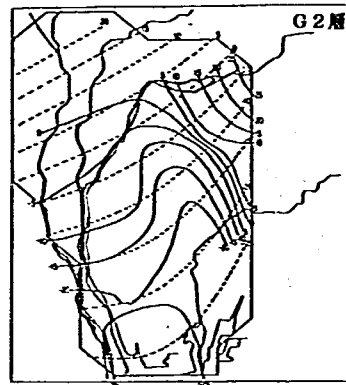
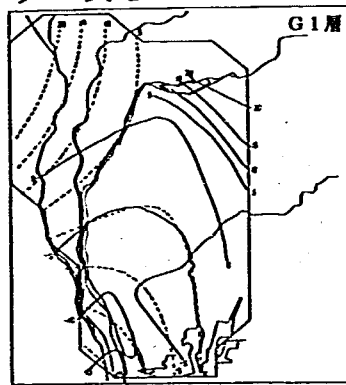
ケース 1



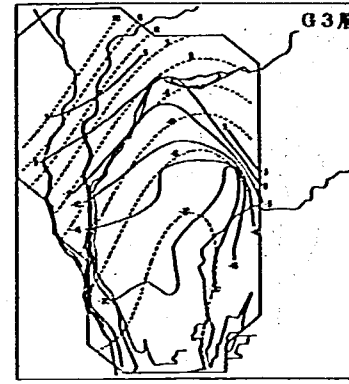
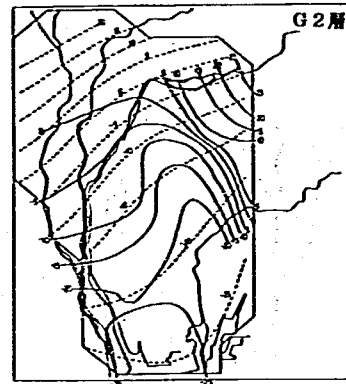
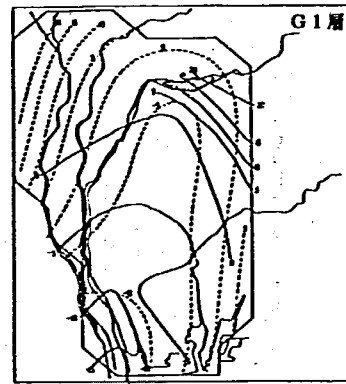
ケース 2



ケース 3



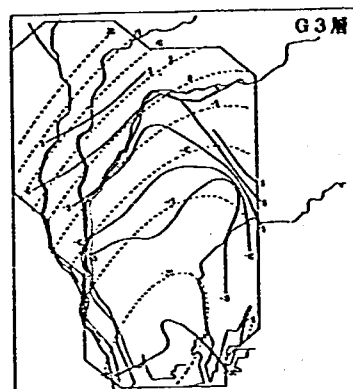
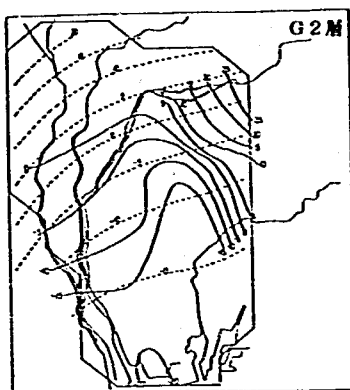
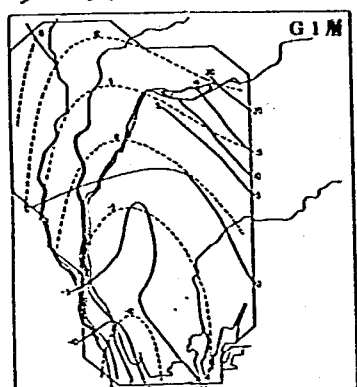
ケース 4



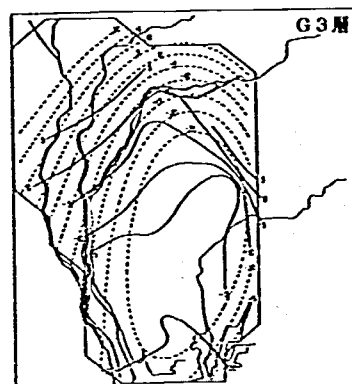
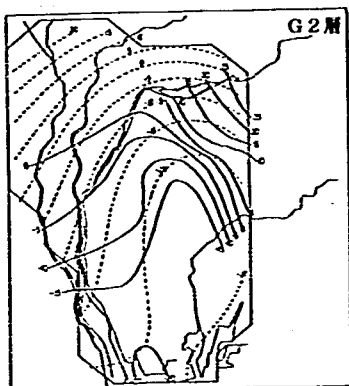
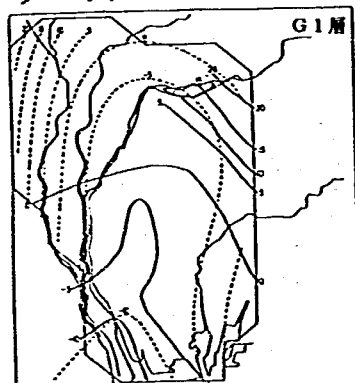
凡例 ——— 実測値  
----- 計算値

図 5-14 コンター図による計算結果の比較 (昭和53年 7 月)

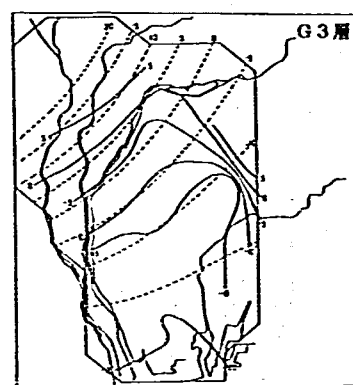
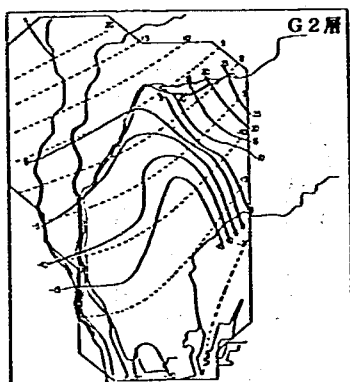
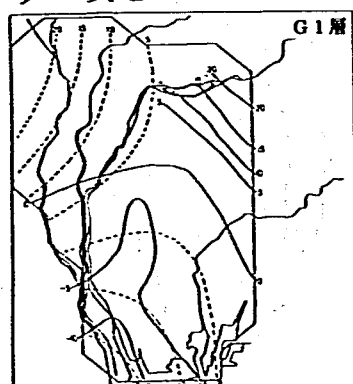
ケース 1



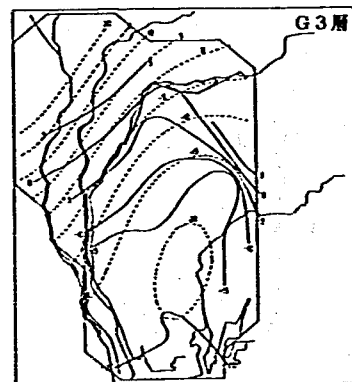
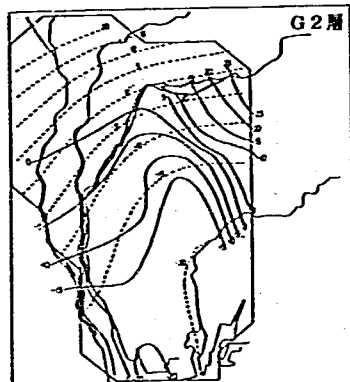
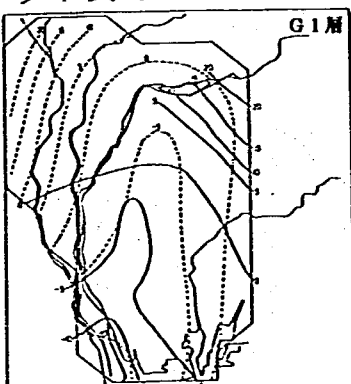
ケース 2



ケース 3



ケース 4



凡例 ——— 実測値  
----- 計算値

図 5-15 コンター図による計算結果の比較 (昭和53年12月)

次にケース4を基本に、個々の観測井の観測値と計算値の適合度を高めるため、各定数設定領域毎に定数を検討し、全体の精度を高めるためのシミュレーションを実施する。

具体的には、地下水流動系を基本に考え、まず第一にモデル北部の犬山扇状地付近の観測井に着目し、計算水頭値の適合度を高める。

次いで、北西部の養老山脈付近の観測井に着目し、計算水頭値の適合度を高めるような定数の調整を行い、最終的にはモデル中央部の定数調整を行う。

このようにして検定した定数の一覧表 表5-7、図5-16に示した。

表5-7 定数一覧表(最終モデル)

| 帯水層 | 区分番号 | 透水係数(m/日) | 比貯留量(1/m) | 粘土層 | 区分番号 | 透水係数(m/日) | 比貯留量(1/m) |
|-----|------|-----------|-----------|-----|------|-----------|-----------|
| G1  | 1    | 60.0      | 0.00002   | C1  | ①    | 0.00020   | 0.005     |
|     | 2    | 86.4      | 0.00015   |     | ②    | 0.00030   | 0.005     |
|     | 3    | 86.4      | 0.00015   |     | ③    | 0.0005    | 0.005     |
|     | 4    | 86.4      | 0.00015   |     | ④    | 0.0015    | 0.05      |
|     | 5    | 400.0     | 0.00001   |     | ⑤    | 0.00015   | 0.005     |
|     | 6    | 200.0     | 0.00001   |     | ⑥    | 0.00015   | 0.005     |
|     | 7    | 200.0     | 0.001     |     | ⑦    | 0.0005    | 0.005     |
|     | 8    | 200.0     | 0.00001   |     | ⑧    | 0.00020   | 0.005     |
|     | 9    | 86.4      | 0.0005    |     | ⑨    | 0.00020   | 0.005     |
|     | 10   | 50.0      | 0.00005   |     | ⑩    | 0.00010   | 0.005     |
|     | 11   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑪    | 0.00025   | 0.005     |
|     | 12   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑫    | 0.0005    | 0.005     |
|     | 13   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑬    | 0.00025   | 0.005     |
|     | 14   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑭    | 0.00015   | 0.005     |
| G2  | 1    | 200.0     | 0.00150   | C2  | ①    | 0.00015   | 0.0005    |
|     | 2    | 50.0      | 0.00015   |     | ②    | 0.00020   | 0.0005    |
|     | 3    | 10.0      | 0.00005   |     | ③    | 0.00020   | 0.0005    |
|     | 4    | 10.0      | 0.00015   |     | ④    | 0.0015    | 0.005     |
|     | 5    | 50.0      | 0.00001   |     | ⑤    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 6    | 10.0      | 0.00005   |     | ⑥    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 7    | 10.0      | 0.00005   |     | ⑦    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 8    | 100.0     | 0.00001   |     | ⑧    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 9    | 100.0     | 0.00015   |     | ⑨    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 10   | 800.0     | 0.00020   |     | ⑩    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 11   | 200.0     | 0.00015   |     | ⑪    | 0.00015   | 0.0005    |
|     | 12   | 86.4      | 0.0005    |     | ⑫    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 13   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑬    | 0.0005    | 0.0005    |
|     | 14   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑭    | 0.0005    | 0.0005    |
| G3  | 1    | 120.0     | 0.00005   | C3  | ①    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 2    | 86.4      | 0.00015   |     | ②    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 3    | 86.4      | 0.00015   |     | ③    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 4    | 86.4      | 0.00015   |     | ④    | 0.005     | 0.003     |
|     | 5    | 50.0      | 0.00005   |     | ⑤    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 6    | 10.0      | 0.00001   |     | ⑥    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 7    | 50.0      | 0.001     |     | ⑦    | 0.00020   | 0.0003    |
|     | 8    | 10.0      | 0.00001   |     | ⑧    | 0.0010    | 0.0003    |
|     | 9    | 40.0      | 0.00005   |     | ⑨    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 10   | 86.4      | 0.00025   |     | ⑩    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 11   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑪    | 0.0005    | 0.0003    |
|     | 12   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑫    | 0.0010    | 0.0003    |
|     | 13   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑬    | 0.00020   | 0.0003    |
|     | 14   | 86.4      | 0.00015   |     | ⑭    | 0.0005    | 0.0003    |

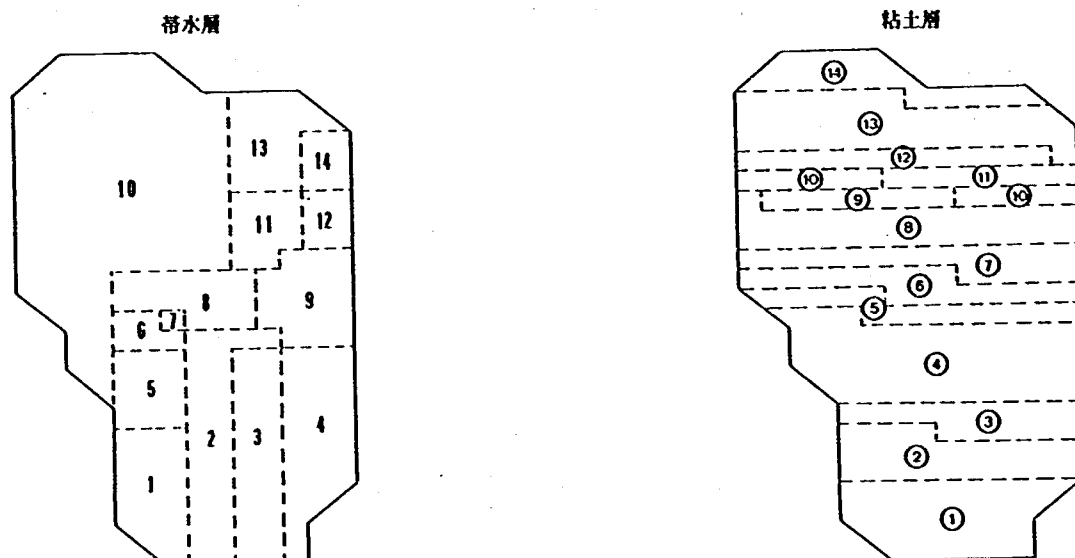


図5-16 定数設定領域区分図（最終モデル）

参考資料6に3次元モデルシミュレーションで用いられているパラメータと比較した結果を示した。これによると、比貯留量については、ほぼ同じオーダーであるが、透水係数は準3次元モデルのほうが15～30倍大きな値となった。

## 5.5 シミュレーション結果の妥当性

シミュレーション結果の妥当性の判断は、第一に水収支により行われるものであり、次いで、地点別の計算水頭値の適合度合による判断、さらに計算水頭値の平面分布の適合度合の判断によりなされる。

ここまでに扱ってきたモデルではデータの制約から昭和53年4月から12ヶ月間を対象として同定したものであり、実用的なモデルの検証にまでは至っていない。

最終的には、正確な水文データの収集を行い、それらとシミュレーション結果とを比較するというモデルの検証が必要であり、境界条件、定数の見直し、修正を伴うものとなる。

ここでは、同定による最終モデルを対象として妥当性を判断する方法を示すものである。各判断の方法は、次のとおりとなる。

### (1) 水収支によるシミュレーション結果の判断方法

シミュレーション結果から対象とした領域における水収支関係は次の式により把握することができる。

$$\Delta V = (\text{水頭値変化による貯留量の変化量}) - (\text{上下方向の境界からの地下水の移動量}) \\ - (\text{周囲の境界からの地下水の流出入量})$$

各々の計算は次のようになされる。

#### ① 水頭値変化による貯留量の変化量

領域内各格子の  $\Delta t$  間における水頭値変化  $\Delta h$  に対し、比貯留量  $S_s$  及び格子の面積  $A$ 、層厚  $D$  を用い、

$$V = \Delta h \text{ (m)} \times S_s \text{ (1/m)} \times A \text{ (m}^2\text{)} \times D \text{ (m)}$$

として求め、対象とする領域の値を集計する。

② 上下方向の境界からの地下水の移動量

G1～G3 帯水層に対する出入り量を集計するものであり、次図のようになる。

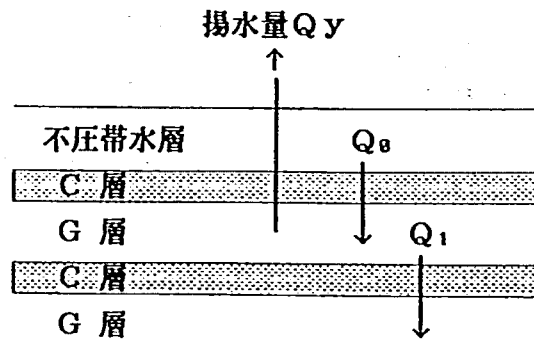


図5-17 上下方向移動量

③ 周囲の境界からの地下水の流出入量

周囲の境界からの出入りは、境界条件として与えられる流量がある場合には、その値を集計したものとなり、水頭値境界で与えられる場合には、境界の水頭値と計算対象領域内の水頭値により流速 ( $v$ ) を算定し、各要素における境界に接する辺の長さ ( $L$ ) 及び層厚 ( $D$ ) から、

$$V = v \times D \times L \times \Delta t$$

として求められる。

これらの諸量のなかで、周囲の境界からの出入り量については、参考資料1に示すように、計算対象格子の形状によっては、理論解の 2/1 となる場合があり、注意を要する。

定数検討の最終値によるシミュレーション結果から水収支を算定した値を比較すると、図5-18のとおりとなる。

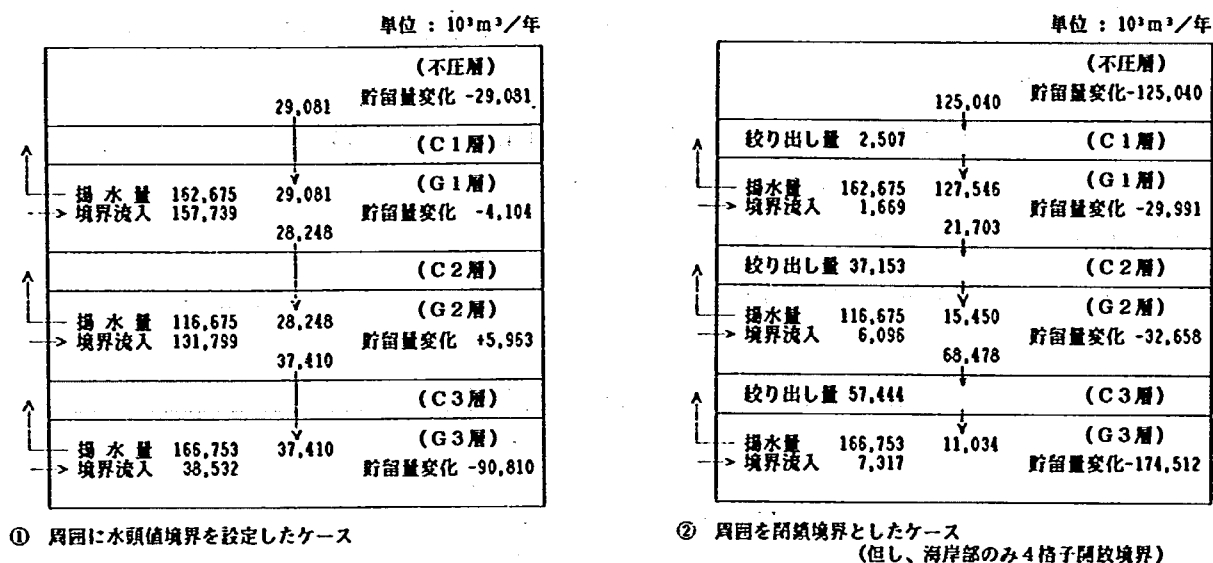


図5-18 水収支によるシミュレーション結果

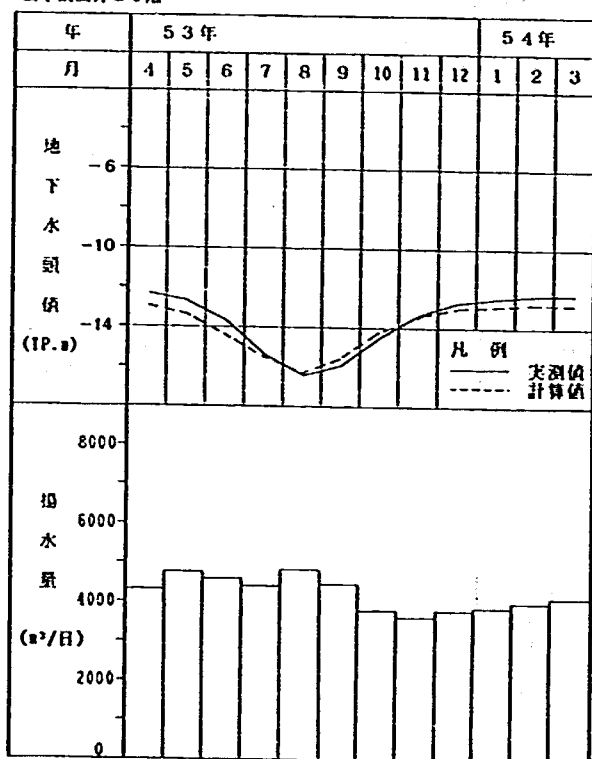
## (2) 地点別計算水頭値の適合度合の判断方法

ここでは、シミュレーション結果から、適合度を判断すべき地点における計算水頭値を抽出し、その値の検討目的の時間スケールに応じた変化図を作成し、同一地点における実測水頭値との適合度を比較するものである。

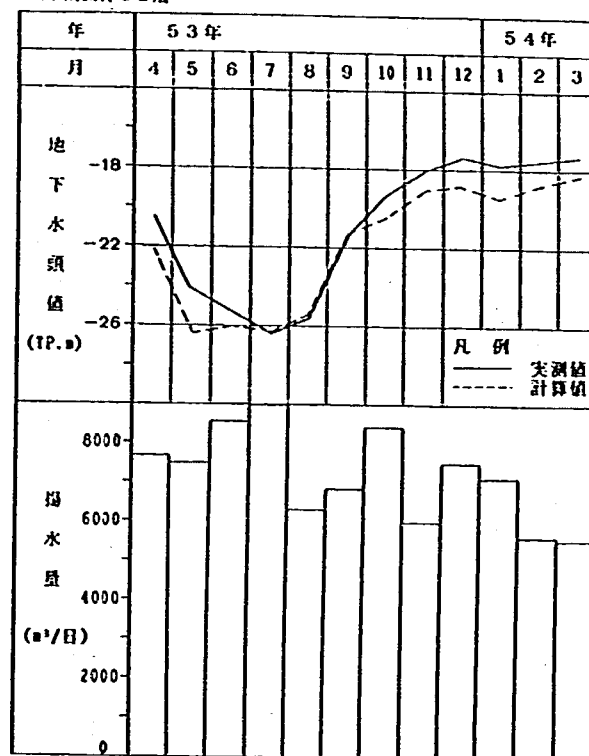
この場合、計算モデルの作成過程、特に格子分割の作成方法如何によっては、計算水頭値の得られる地点と実測水頭値の得られる地点が最大  $\Delta x / 2$  の距離異なることがあり、その影響によって、適合度が悪くなる場合があるので注意を要する。

定数検討の最終ケースによるシミュレーション結果から濃尾平野の代表的地点における計算水頭値と実測水頭値を比較した結果を図5-19に示す。

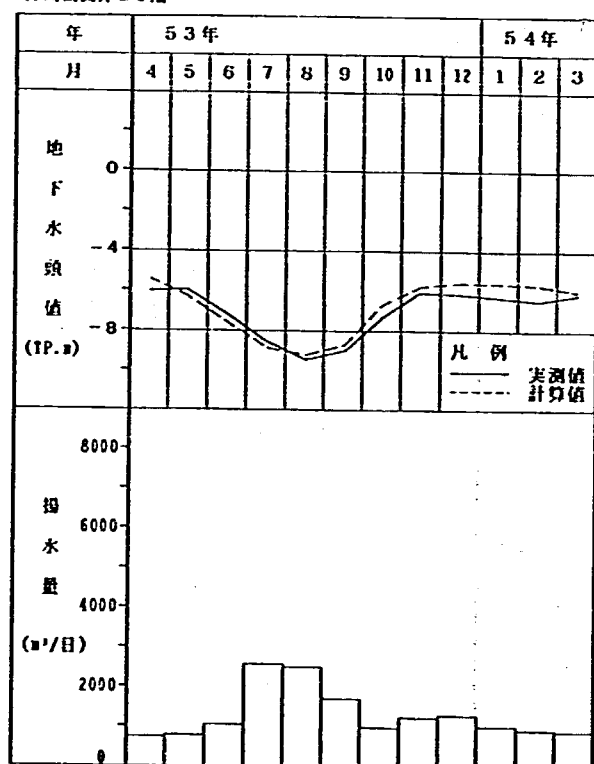
松中観測井G1層



松中観測井G2層



津島観測井G1層



津島観測井G2層

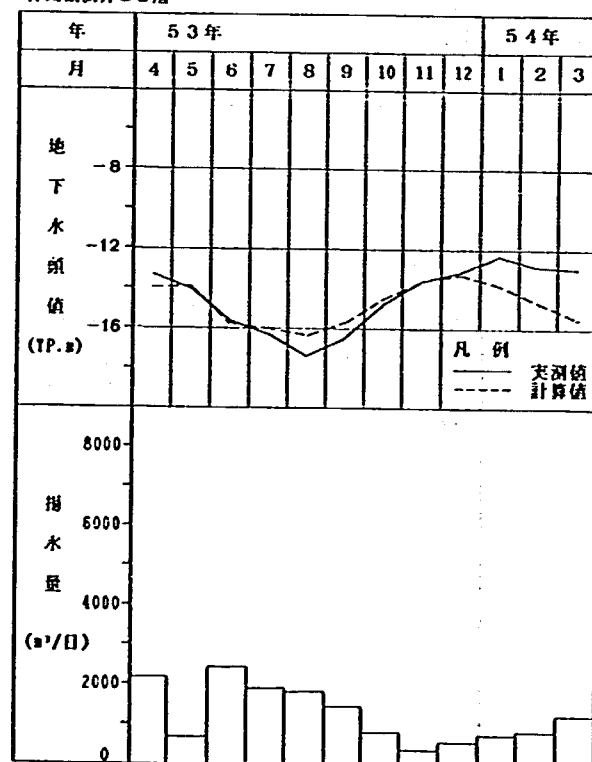
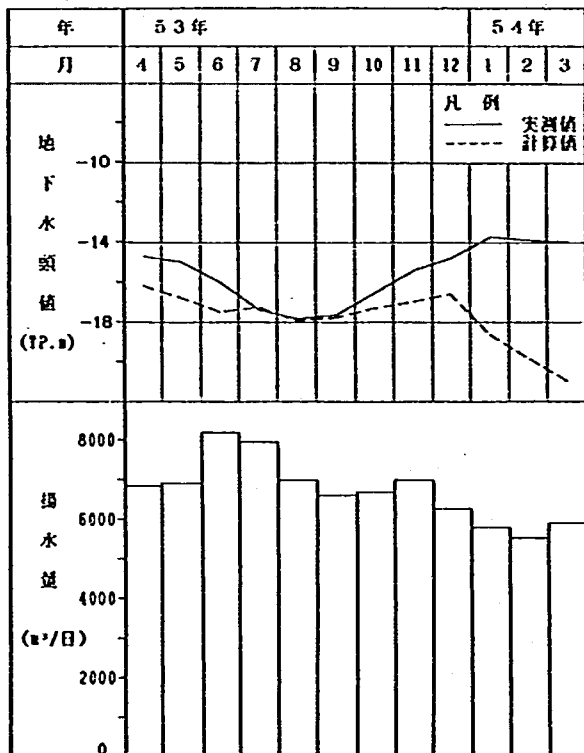
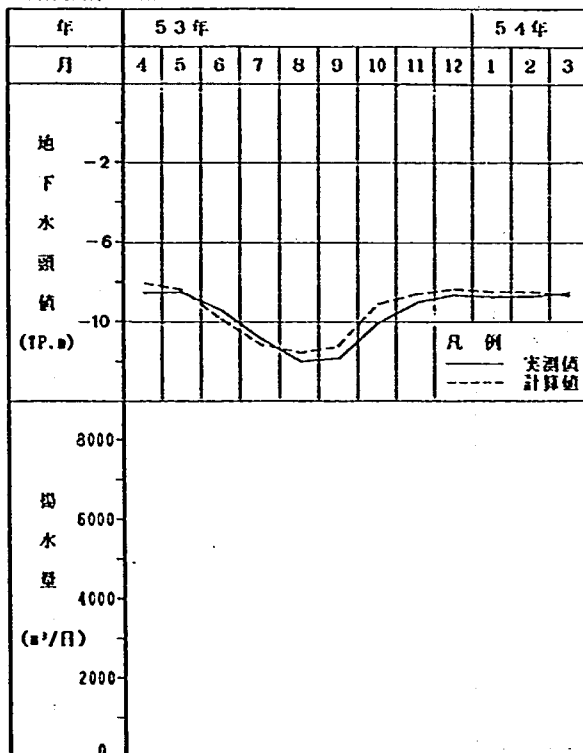


図5-19 地点別水位変動でみるシミュレーション結果

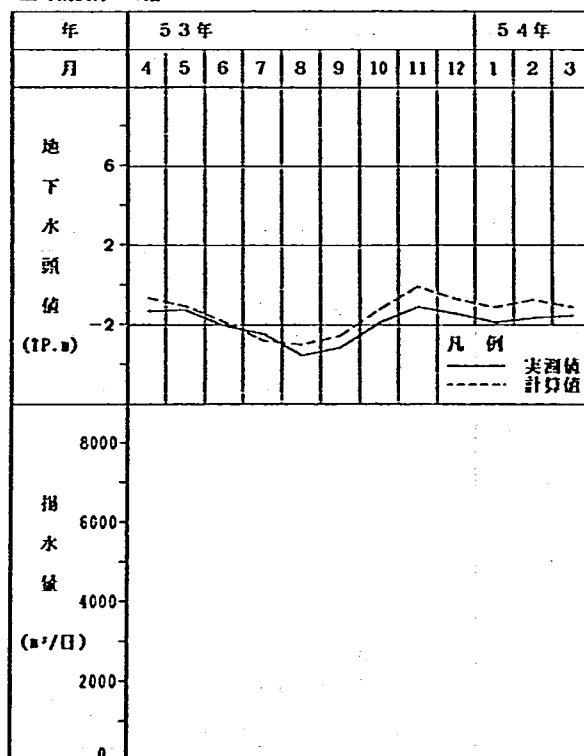
津島観測井G3層



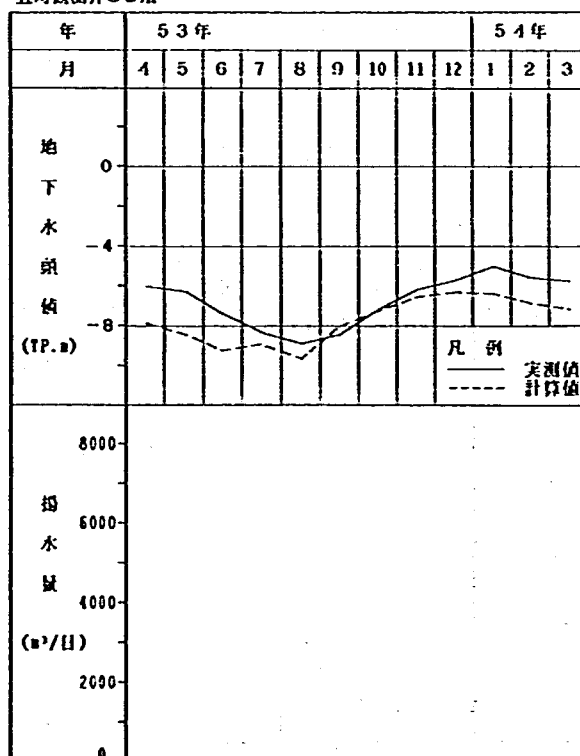
五明観測井G1層



五明観測井G1層



五明観測井G2層



### (3) 計算水頭値の平面分布形状による適合度合の判断方法

この方法は、解析対象領域について、実測水頭値に基づく等水頭値線とシミュレーション結果による等水頭値線を作成し、それぞれを比較し、その適合度から全体の制度を判断する方法である。

定数検討結果の最終ケースにおけるシミュレーション結果について、実測水頭値と計算水頭値を比較すると図5-20のとおりとなり、対象領域全体についておおむね適合していると判断される。

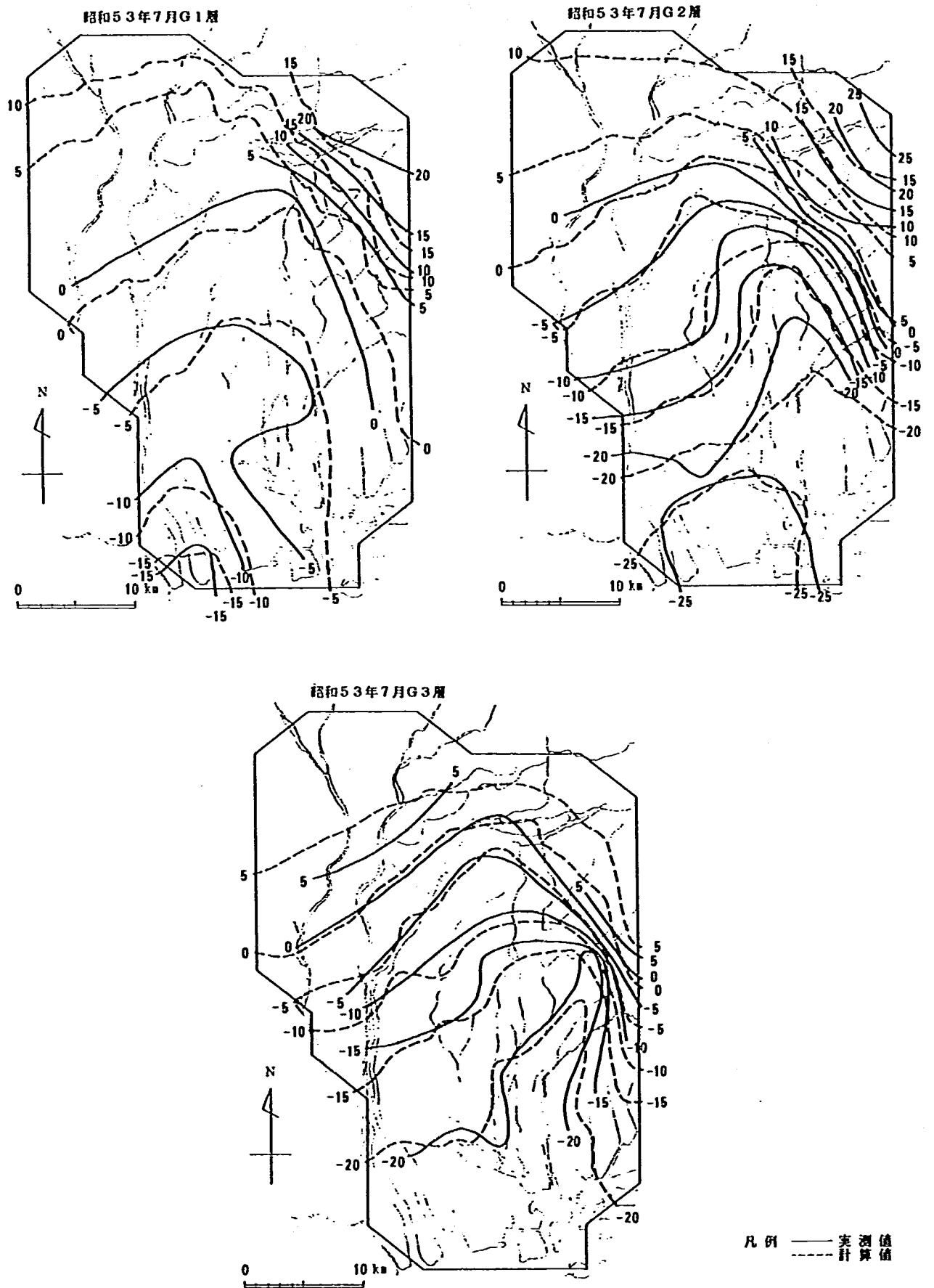


図5-20 コンター図によるシミュレーション結果

## 第6章 ま と め

本報告書は、地下水シミュレーションの手引と濃尾平野への適用例を取りまとめたもので、各章をまとめると次のとおりである。

第2章では、地下水流れの表現方法・シミュレーションモデルの種類とその解法などを解説し、モデルを応用する場合の考え方や問題点及び注意すべき点について記述した。

第3、4章では、濃尾平野を例にシミュレーション実施までに必要な作業手順として、シミュレーションのための基礎調査からシミュレーションモデル構築までを示した。

第5章では、検討すべき問題点を5項目に区分し、次の結論を得た。

- ①基本式の適正については、理想条件を与えたモデルによって問題の無いことを確認した。
- ②モデルの領域設定、地層のモデル化については、得られている地質情報からみて大きな問題はないと考えられた。
- ③初期条件・境界条件の設定については、水頭指定の場合、実測に近い曲面式による想定値を用いて各節点に初期水頭値、境界水頭値を設定した。しかし、合理的な水収支を得るためには、 $K$ 、 $S_s$ 及び揚水量、層厚等モデルの各種条件と境界値等の間に十分な整合が必要であることが分かった。流量指定となる揚水量のモデル化については、多層取水井の場合、水頭値の変動傾向を現す揚水量配分方法について検討した。また、揚水量集計メッシュとしてはその集計方法によって、計算水頭値にかなり大きな誤差を含むことから、なるべく個々の井戸の特徴を現し、かつ実用的なモデル化のできるメッシュ規模が要求された。
- ④計算条件の設定については、要素分割は、対象領域の大きさと用いる計算機の計算処理能力から決定されるものであり、計算時間間隔は、理想条件を与えたモデルを用いて、計算水頭値及び水収支を検討し決定した。
- ⑤パラメータの設定については、パラメータを変動させてモデルの感度分析を行い、調査資料から得られる土質定数や各種方法による推定値を基に計算値と実測値とが良く合致するようパラメータを同定させた。

シミュレーション結果の評価の方法については、各地点の計算水頭値と実測水頭値の比較のみではなく、対象領域全体における計算水頭値の適合度をみることが重要であり、最終的には領域全体の水収支の適合度が最も大切なことである。

地下水シミュレーションの目的は、要求される精度で水頭なり水収支なりを表現できることである。シミュレーションはあくまでシミュレーションで、実際の水文現象を物理的に表現するのではない。水の流れを決定する場の複雑さ、不均一性は常につきまとう問題であり、全ての地下水シミュレーションモデルは、本当の地下水流れを表していなくても、流れの複雑さ、不均一性をいくつかの平均的な場に単純化してモデル化している。その結果、パラメータは実際とは異なっ

た数値を取ることにも起こり得る。今回はデータが一年分しか無かったのでできなかったが、このような場合、最低限同定計算に使わないデータでの検証が必要である。特に、経験したことのない揚水量など条件を外挿する場合、モデルの検証によりどの程度の誤差を含んでいるか把握するために必要不可欠である。逆に、外挿条件で予測計算するときにとてつもない間違いを犯すのを避けるため、モデルは要求される再現性の範囲でできるだけ単純であることが望ましいことを強調したい。

## 参 考 資 料

- 参考資料 1      プログラムの検証
- 参考資料 2      要素規模とシミュレーション結果
- 参考資料 3      初期条件が計算ステップに与える影響
- 参考資料 4      遊水係数・比貯留量の設定について
- 参考資料 5      シミュレーションモデルの感度分析
- 参考資料 6      3次元モデルと準3次元モデルの定数比較
- 参考資料 7      濃尾平野準3次元シミュレーションプログラムリスト



## 参考資料1 プログラムの検証

モデルの解析手法に基づいて作成されたプログラムの検証を理想条件を与えて行う。

### (1) モデルの格子分割

モデル領域は、縦 1,000m、横 1,000mで、 $5 \times 5$ の領域とする。したがって、三角形の要素は50要素、36節点となる。

50要素、36節点の番号は図-1の通りとする。

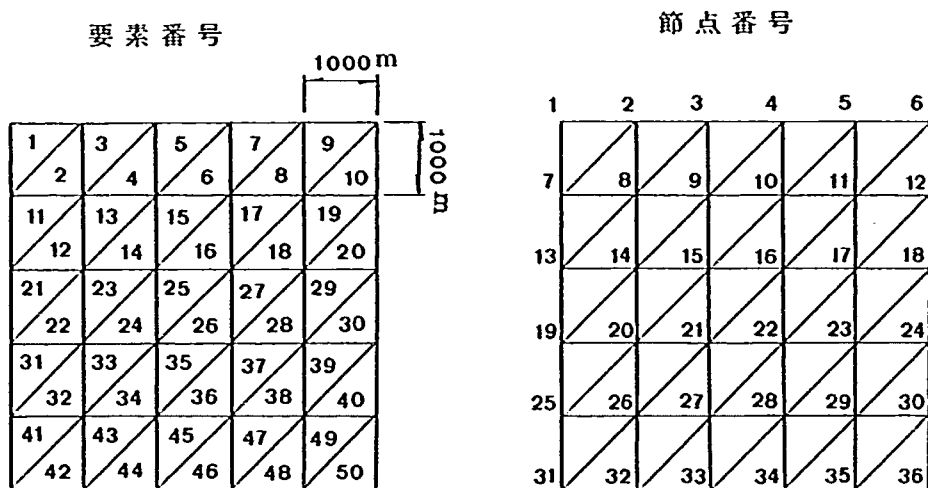


図-1 理想モデル要素・節点番号

### (2) 各層圧の分布

濃尾地区を想定し、各要素とも層毎に同一の値を設定するものとし、図-2のように、

G1..... 20m      C1..... 50m

G2..... 20m      C2..... 50m

G3.....100m      C3.....100m

とする。

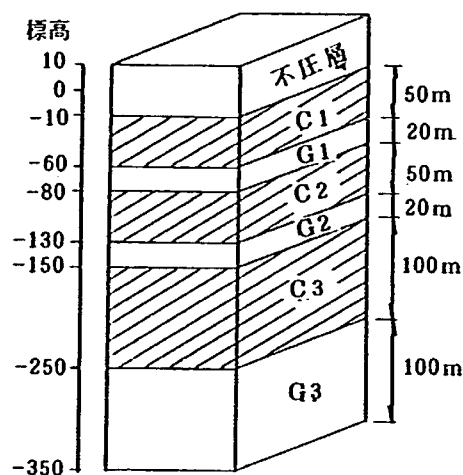


図-2 理想モデルの各層厚

(3) 透水係数、比貯留量

濃尾地区で用いている値をもとに、層ごとに次の値とする。

① 帯水層透水係数(k)

|           |           |
|-----------|-----------|
| G 1 ..... | 25.0(m/日) |
| G 2 ..... | 25.0(m/日) |
| G 3 ..... | 25.0(m/日) |

② 帯水層比貯留量(Ss)

|           |            |
|-----------|------------|
| G 1 ..... | 0.001(1/m) |
| G 2 ..... | 0.001(1/m) |
| G 3 ..... | 0.001(1/m) |

③ 加圧層透水係数(k')

|           |            |
|-----------|------------|
| C 1 ..... | 0.004(m/日) |
| C 2 ..... | 0.003(m/日) |
| C 3 ..... | 0.001(m/日) |

④ 加圧層比貯留量(Ss')

|           |             |
|-----------|-------------|
| C 1 ..... | 0.005(1/m)  |
| C 2 ..... | 0.0005(1/m) |
| C 3 ..... | 0.0003(1/m) |

(4) 揚水量

モデルの中央部に位置する節点番号22のみに、層別に同一揚水量を与える。揚水のパターンは図-3のとおりとする。

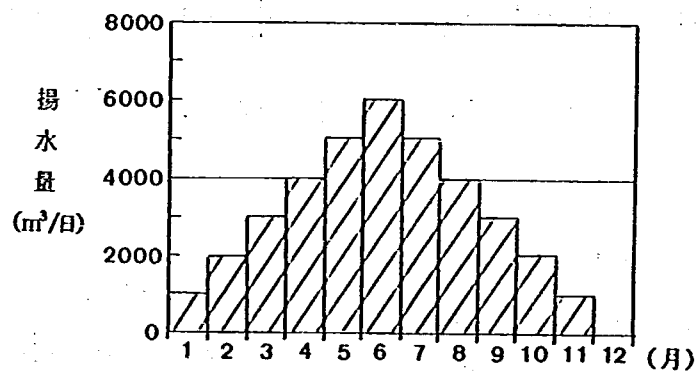


図-3 理想モデル揚水量パターン

(5) 計算対象期間等

1月から12月までの12ヶ月間とし、計算時間間隔は、1日、5日、10日、15日、30日の5ケースとする。

(6) 境界条件

境界条件は、次の2点に与える。

① 不圧層水位

② 横方向流入を与える各層の周囲境界

但し、境界条件は、各層毎に計算期間中常に同一の値 (10.0m) を設定する。

#### (7) 計算結果

各計算時間間隔毎の計算結果を水頭値の変化、水頭値コンター図により比較すると図-4～図-7のとおりとなる。

なお、水頭値変化で図化の対象とした節点は、揚水量を設定した節点であるNo22及びその点から等距離範囲にあるNo16、No21、No23、No28の5地点とする。No22と各点の距離は、1,000 mである。

この結果から、理想条件でのシミュレーションは、合理的な計算条件を示していることが明らかであり、また、 $\Delta t$ の変化による計算水位の変化は殆ど見られない。

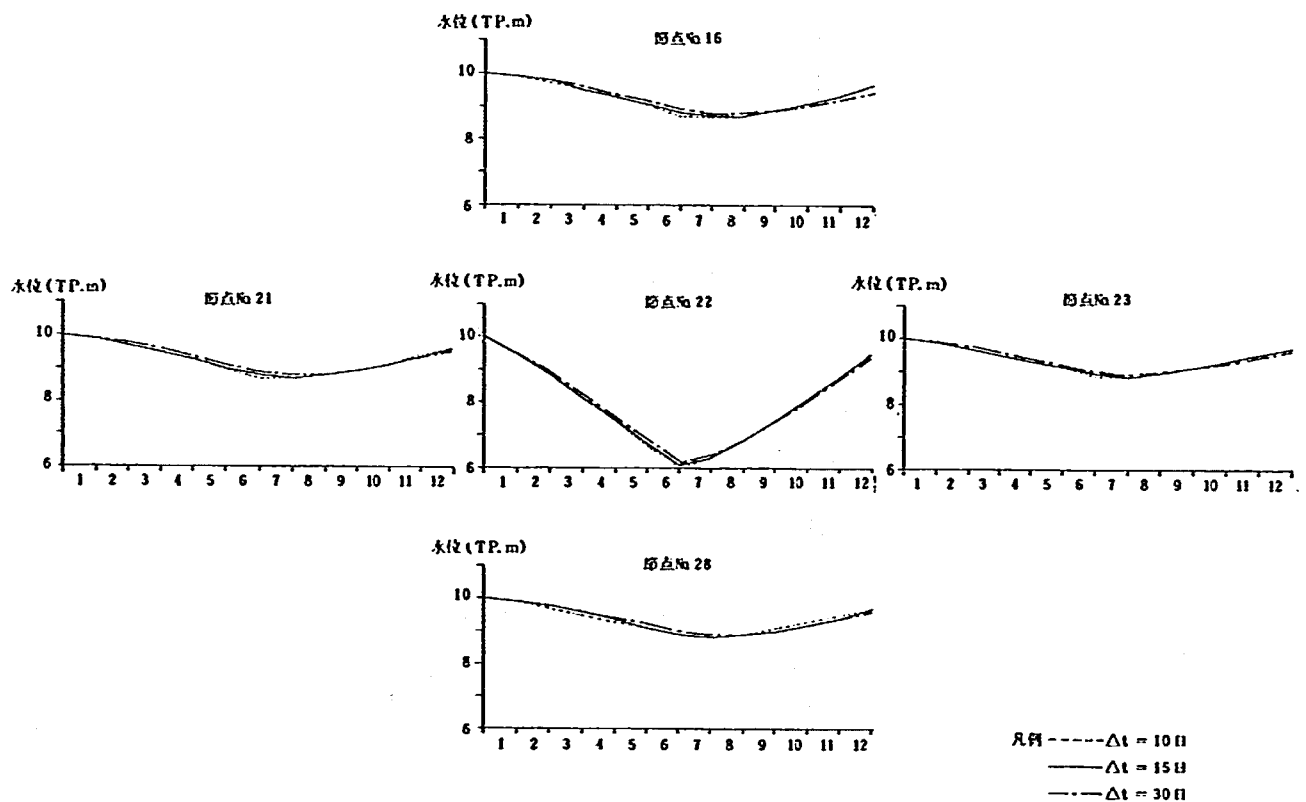


図-4 理想モデル水頭値計算結果 (G1層)

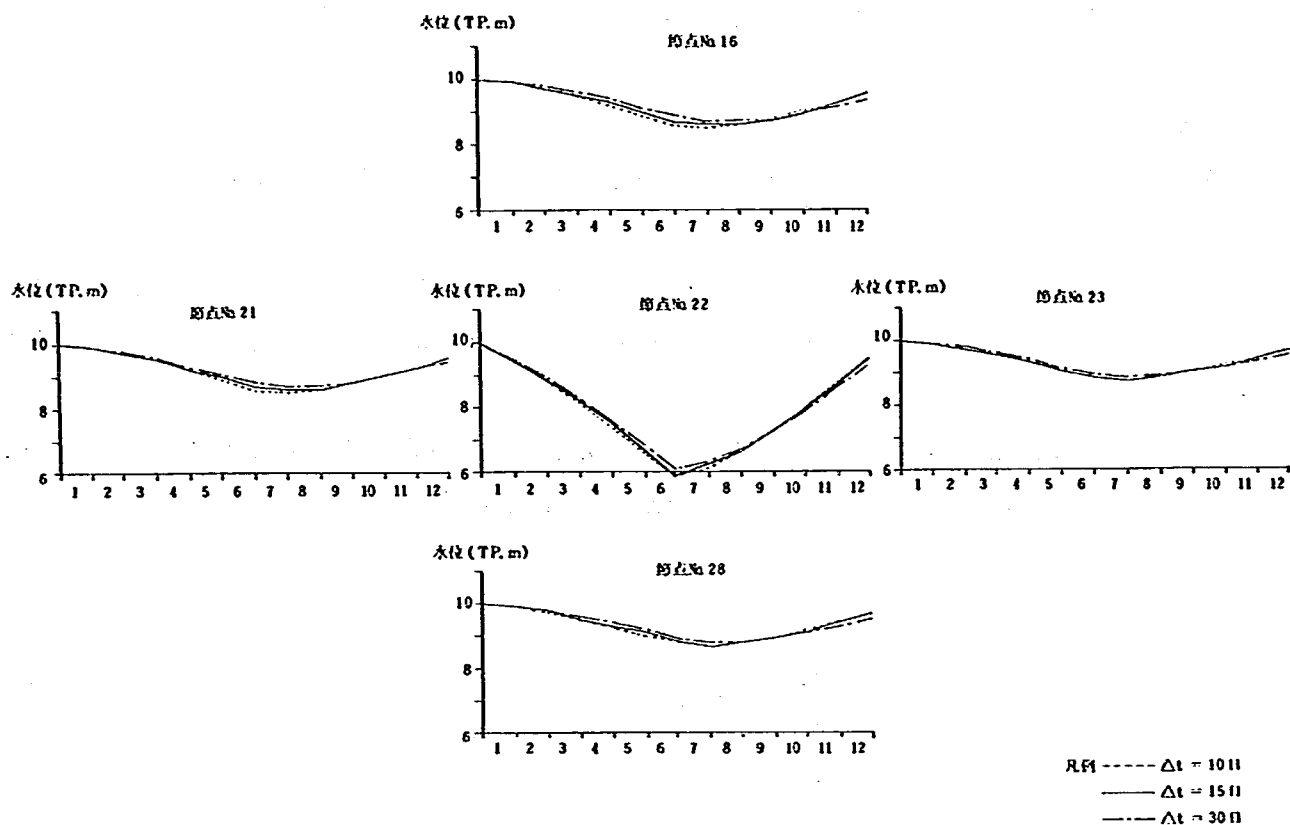


図-5 理想モデル水頭値計算結果 (G 2 層)

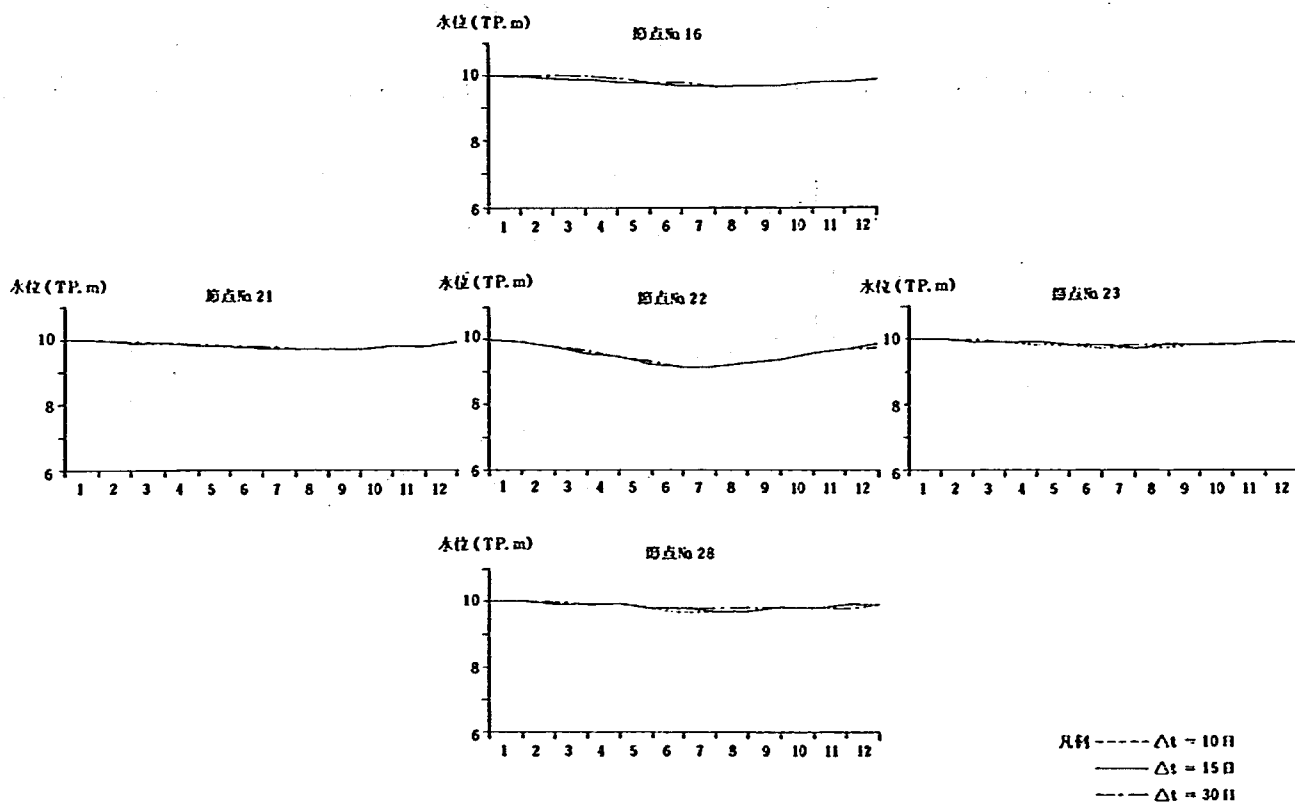


図-6 理想モデル水頭値計算結果 (G 3 層)

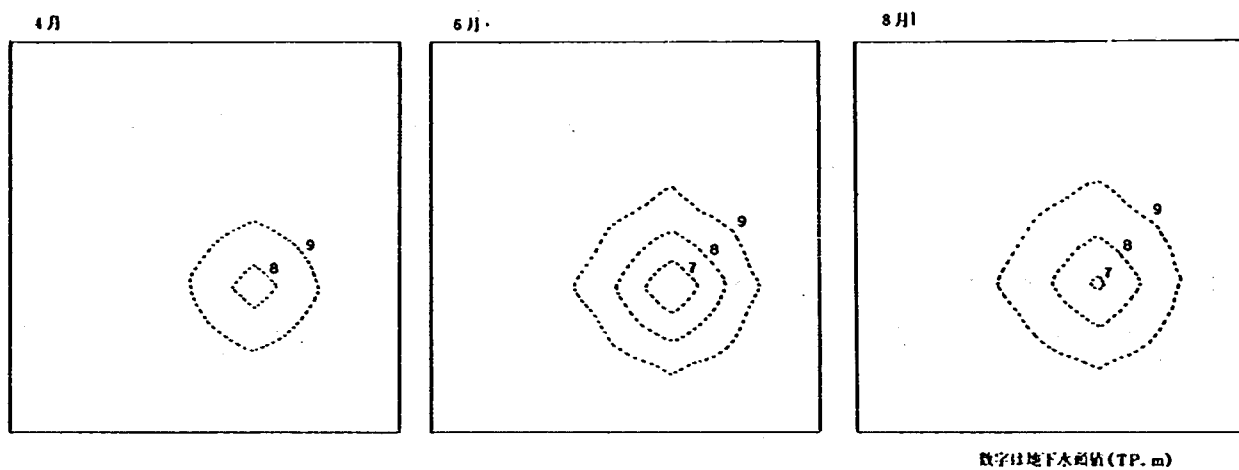


図-7 理想モデルによる計算水頭値コンター図 (G 1層)

### (8) 水収支の比較

水収支は次の式により算定する。

$$V = (\text{水頭値変化による貯留量の変化分}) - (\text{上下方向の移動量}) - (\text{境界からの流入量})$$

ここで、各々は次のように求める。

#### ① 水頭値変化による貯留量の変化分

領域内格子の  $\Delta t$  間における水頭値変化分  $\Delta h$  に対し、比貯留量  $S_s$ 、格子面積  $A$ 、層厚  $D$  を用い、

$$V = \Delta h \text{ (m)} \times S_s \text{ (1/m)} \times A \text{ (m}^2\text{)} \times D \text{ (m)}$$

として求め、対象域内の値を集計する。（ $\Delta h$  は三角形要素、3 頂点の水頭値）

$(H_A + H_B + H_C) / 3$  の差で設定する。

#### ② 上下方向移動量

G 1 ～ G 3 層に対する出入りの量を集計する

ものであり、図-8 のようになる。

G 層での上下方向移動量は  $(Q_1 - Q_0)$  となり各要素毎に、

$$V = (Q_1 - Q_0) \times \Delta t$$

として求められる。

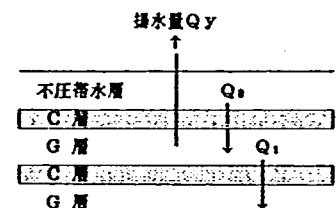


図-8 上下方向移動量

#### ③ 境界からの流入量

境界からの出入りは、標準の水頭値と領域内の水頭値により、流速 ( $v$ ) を求め各要素の境界に接する辺の長さ ( $L$ )、層厚 ( $D$ ) を乗じ、

$$V = v \times D \times L \times \Delta t$$

として求める。

これら①～③の収支量計算のうち、境界からの流入量の計算には次のような誤差が挙げられる。

今、基礎式  $S_s (\partial h / \partial t) = K (\partial^2 h / \partial x^2) + q$  において、定常状態の収支を解析解と有限要素解（差分解）にて比較する。

(1) 解析解

上式は、
$$\frac{d^2h}{dx^2} = \frac{q}{k}$$

となり、
$$\frac{dh}{dx} = \frac{q}{k} x + a$$

$$h = \frac{q}{2k} x^2 + ax + b$$

として水頭値分布が得られる。

今、 $x=0$  及び  $x=\ell$  で  $h=0$  とする前式は、

$$h = \frac{q}{2k} x^2 + \frac{q}{2k} \ell x$$

となる。この式は区間  $\ell$  に対し、涵養量  $q \times \ell$  を与えた時の水頭値  $h$  の分布をあらわし、その状態は図-9 のようになる。

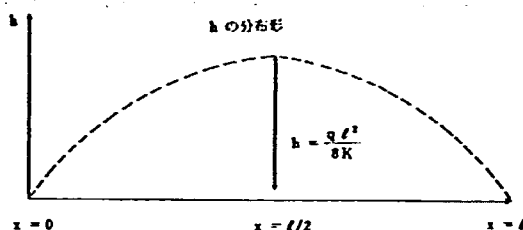


図-9 水頭値分布形状 (解析解)

図-9 の水頭値分布形状に対し、両端 ( $x=0$ 、 $x=\ell$ ) から流出する量は、

$$Q = -k \frac{dh}{dx} \quad \text{--- (透水係数} \times \text{水頭勾配)}$$

で与えられ、

$$Q = -k \left( -\frac{q}{k} x + \frac{q}{2k} \ell \right) = qx - \frac{q}{2} \ell$$

である。

この式において両端の値は  $x=0$ 、 $x=\ell$  で計算され、

$$\text{左端 } (x=0) \quad \text{---} \quad Q = -\frac{q}{2} \ell$$

$$\text{右端 } (x=\ell) \quad \text{---} \quad Q = \frac{q}{2} \ell$$

である。

このことにより、上からの総涵養量  $q \cdot \ell$  があった場合、左端からの流出量が  $q \cdot \ell$ 、右端からの流出量が  $q \cdot 1/2$  となり、両端での  $q \ell$  と等しい流出となり、その時の水頭分布が先の図に示す形状となるものである。(中央部で  $h = q \ell^2 / 8K$ )

## (2) 有限要素解 (差分解)

$$k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = -q$$

を  $x=0$  及び  $x=1$  にて  $h=0$  なる境界条件のもとに差分化して、解析することを考える。

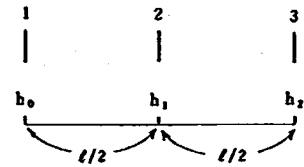


図-10

$$k \cdot \frac{h_0 - 2h_1 + h_2}{\Delta x^2} + q = 0$$

今、差分を図-10のように2分割で考えると、上式において  $h_0 = 0$ 、 $h_2 = 0$  であることから、 $h_1$  は次のようになる。

$$h_1 = \frac{q \ell^2}{8k}$$

この値は、先の解析分解における中央部の水頭値と一致する。

(図-11参照)。

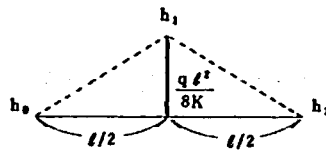


図-11 水頭値分布形状 (差分解)

次に両端からの流入量は、

$$Q = -K \frac{h_1 - h_0}{(\ell/2)} \quad (\text{左端})$$

$$Q = -K \frac{h_2 - h_1}{(\ell/2)} \quad (\text{右端})$$

で与えられ、 $h_1 = \frac{q \ell^2}{8k}$ 、 $h_0 = h_2 = 0$  から、

$$Q_{\text{左端}} = -\frac{q\ell}{4} \quad (\text{左方向に流出})$$

$$Q_{\text{右端}} = -\frac{q\ell}{4} \quad (\text{右方向に流出})$$

となり、両端で  $\frac{q}{2}\ell$  の流出量となる。(1)及び(2)の結果から、対象区間の区分数を小さくすると(今の例では、差分解において2区分としている)、両端の流量の見積が解析解の1/2になることを示しており、この差は区分数を増加させることにより解析解に近づくことが判断できる。

以上のことから、ここで取り上げられる水収支Vは決して0にはなりえないものであり、このような前提のもとに各計算時間 $\Delta t$ における収支を算定すると、その収支の差割合は(上下方向涵養量に対する割合)、

|              |     | (G 1 層)   |   | (G 2 層) |   | (G 3 層) |
|--------------|-----|-----------|---|---------|---|---------|
| $\Delta t =$ | 1 日 | .....2.7% | ~ | 0.4%    | ~ | 0.5%    |
|              | 5 日 | .....1.8% | ~ | 0.5%    | ~ | 1.4%    |
|              | 10日 | .....0.5% | ~ | 1.8%    | ~ | 2.8%    |
|              | 15日 | .....1.0% | ~ | 3.4%    | ~ | 4.3%    |
|              | 30日 | .....6.4% | ~ | 8.8%    | ~ | 9.8%    |

となる。

したがって、現シミュレーションプログラムは、数値計算上は充分な解を得ることができるものとみなせる。

## 参考資料2 要素規模とシミュレーション結果

シミュレーションを実施する場合に、計算対象領域の要素分割の大きさによっては計算値と実測値を比較する地点の位置の違いが大きくなり、差を生じることが予想される。したがって、ここでは現行モデルのメッシュ  $2.2\text{km} \times 1.8\text{km}$  に対し、 $1.1\text{km} \times 0.9\text{km}$  のメッシュを設定し、シミュレーションにおける要素の大きさの違いによるシミュレーション結果の差について検討する。

### (1) 要素規模

ここでは、現行のシミュレーション時のメッシュ  $2.2\text{km} \times 1.8\text{km}$  の大きさに対し、揚水データの集計可能な最小の大きさである  $1.1\text{km} \times 0.9\text{km}$  のメッシュ（国土基準メッシュ）を設定する。

したがって、要素の大きさは現行のものに対し  $1/4$  となり、現行モデルの1格子が4格子に区分されることとなる。

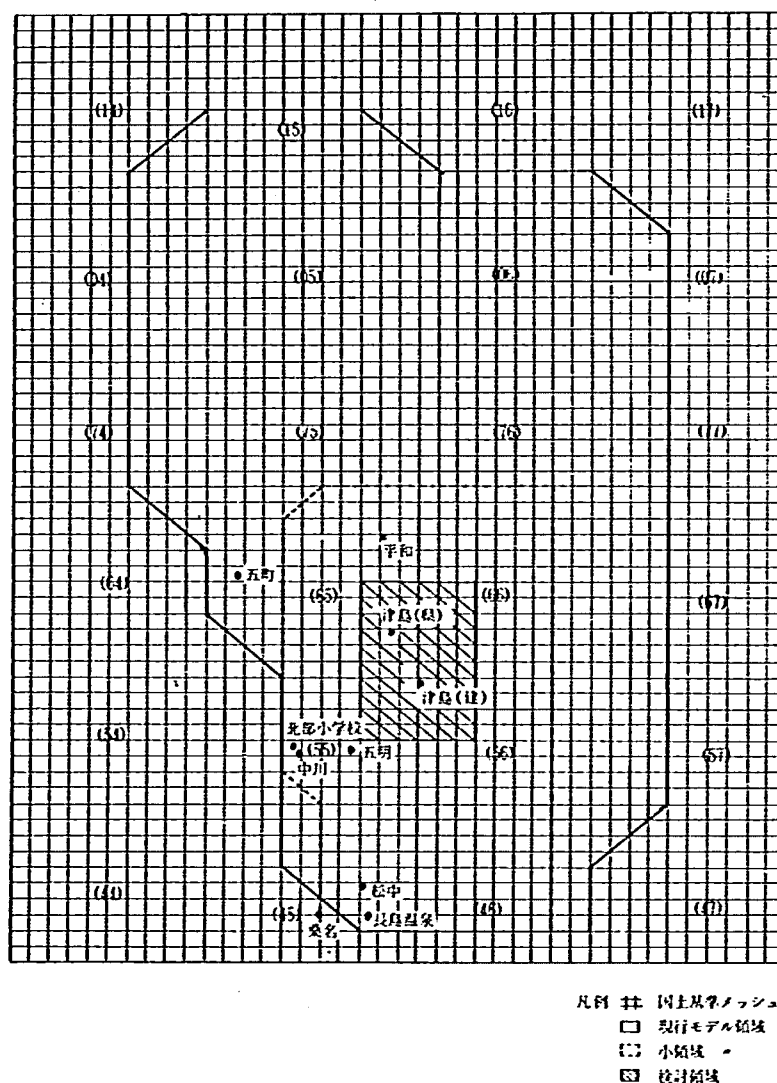


図-1 国土基準メッシュ分割と検討領域

## (2) 計算領域

既往検討との関連からすれば、松中地点を選定し対象領域とするのが望ましいが、周囲境界を与えるための実測データが十分に得られないことから、実測データが十分に得られる津島の観測井を囲む領域を対象とする。

## (3) 計算結果

### ① 揚水量の比較

既往シミュレーション領域 ( $2.2 \times 1.8\text{km}$  格子) に用いた揚水量データを本計算に用いた揚水量データと比較すると、図-3に示すとおりである。比較対象としたのは図-2に示すA～Cの3地点である。

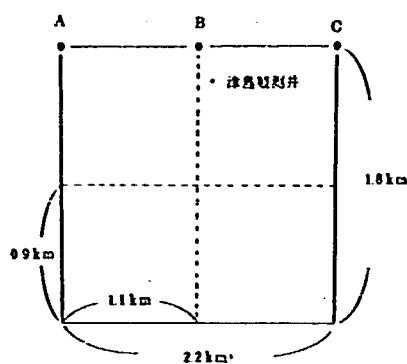
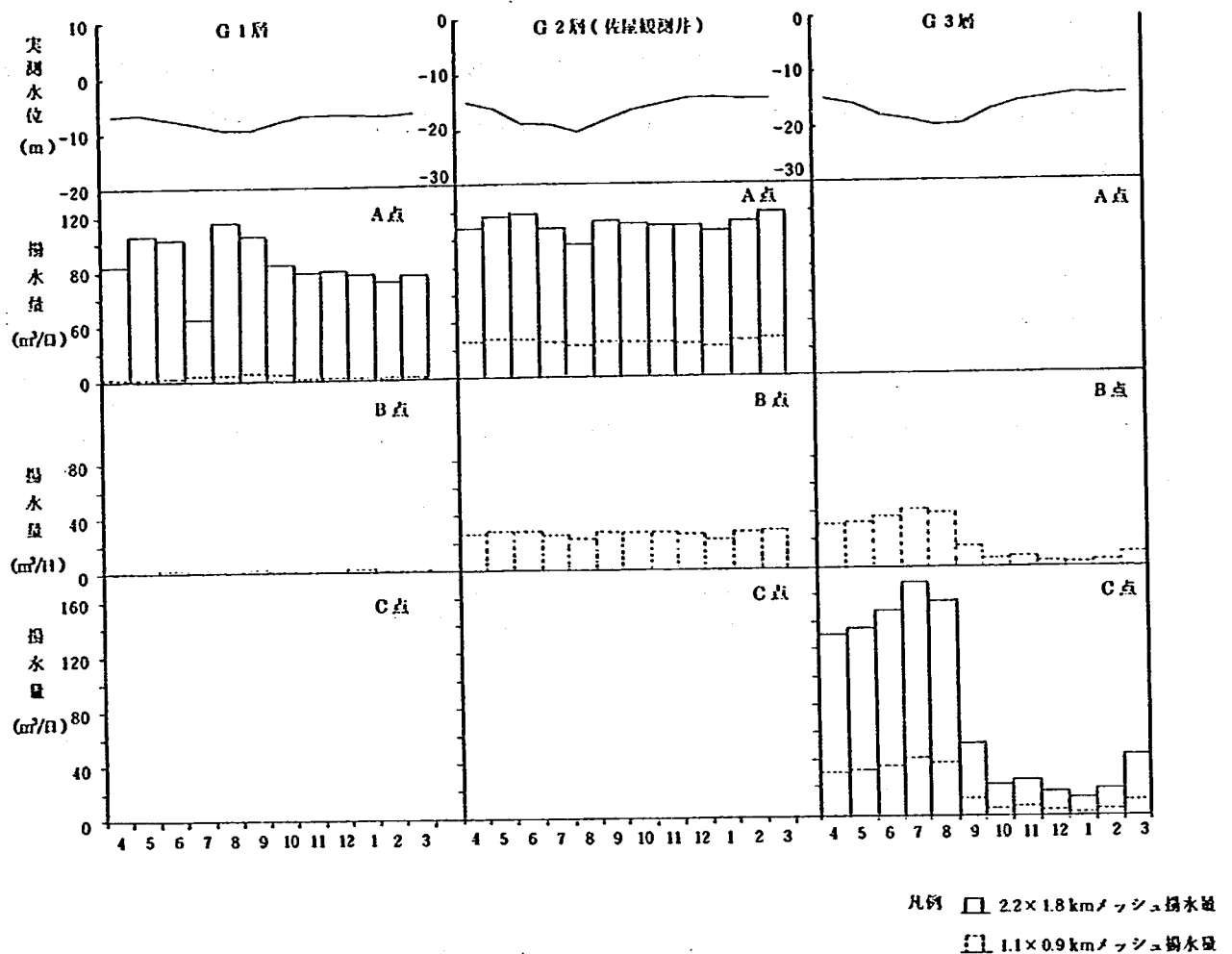


図-2 メッシュと観測井の位置

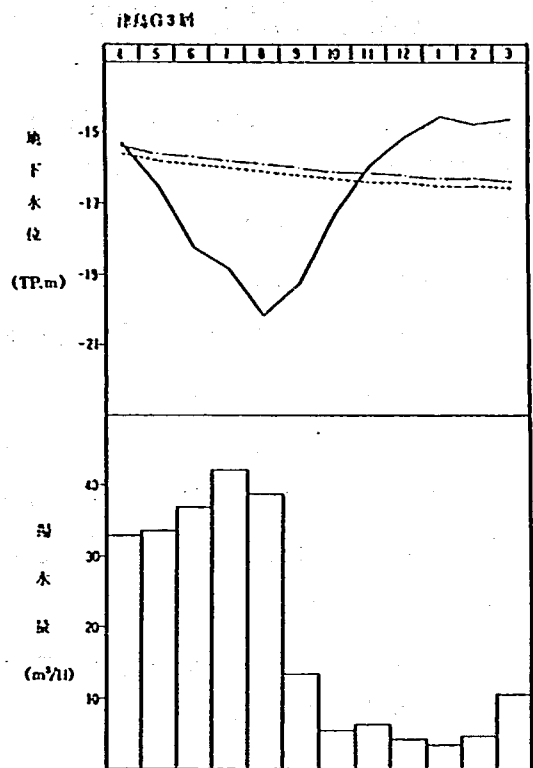
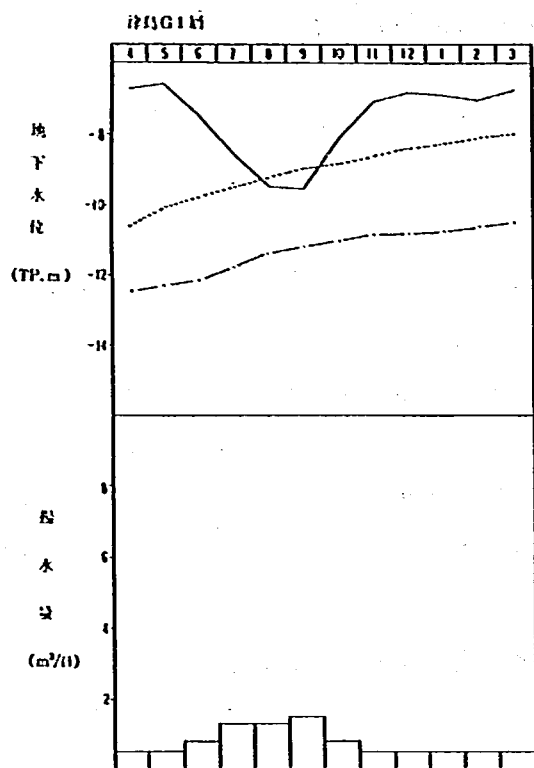
図-3によると  $2.2\text{km} \times 1.8\text{km}$  格子で用いた揚水量は、 $1.1\text{km} \times 0.9\text{km}$  メッシュで用いる揚水量の3～4倍、A地点のG1層では20～30倍もの大きさとなっており、格子の面積の比が1:4であることからすると、特にA地点G1層の揚水量の差は顕著なものである。



図－3 津島観測実測水位と揚水量（昭和53年4月～54年3月）

## ② 計算水位の比較

既往検討に用いた領域での計算結果及び今回の 1.1km×0.9kmメッシュでの計算結果を比較すると、図－4 のとおりである。



凡例 ——— 観測値  
 ---- 22km×1.8kmメッシュ  
 - · - 1.1km×0.9kmメッシュ

図-4 要素の大きさによるシミュレーション結果の比較

### 参考資料 3 初期条件が計算ステップに与える影響

ここでは、計算開始時において、初期値を外部から入力した時にその影響が予想されることから、計算を長期間にわたり実施し、その影響の度合を検討したものである。

検討結果は次のとおりである。

シミュレーションは境界条件を対象領域内（小領域モデル）の全観測井のデータにより内挿して作成したものとし、 $\Delta t=30$ 日、計算年数を3ケ年として実施した。

なお、第2、第3年度は揚水量、境界条件とも第1年度の値を繰り返し用いたものである。

計算結果より、松中地点を抽出し、水位変化を図にすると、図-1～2のようになる。

図-1、図-2によると、計算スタートから5ヶ月間は2年目、3年目に比べ変化状況が異なるがそれ以降はほぼ同じ傾向を示していることがわかる。この1～5月までの間が初期値による影響であるものとみられる。

したがって、シミュレーションを行い水頭値変化を検討する場合には、少なくとも2ヶ年以上の期間について計算することが必要である。

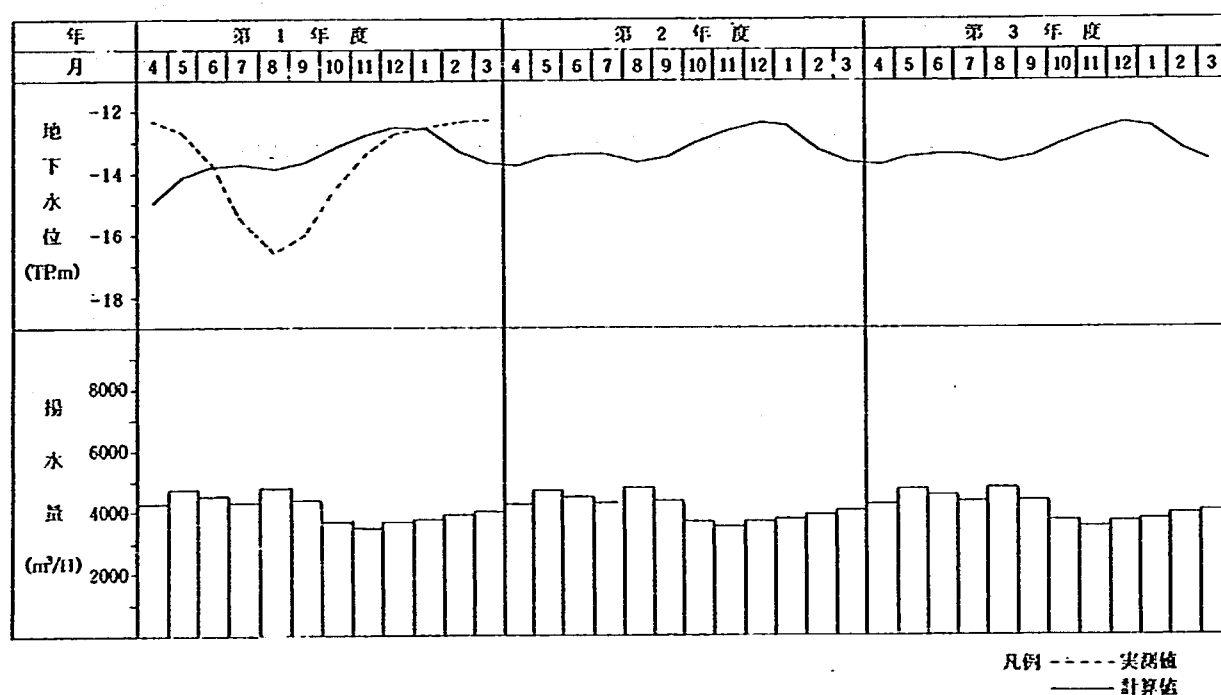
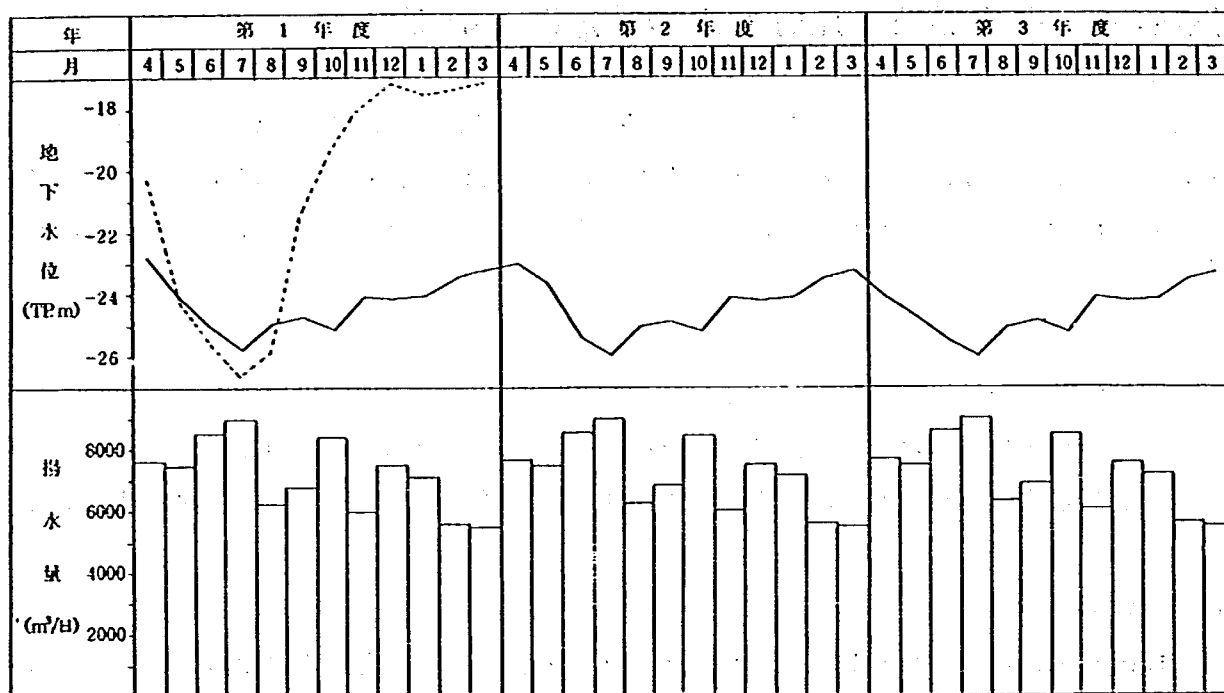


図-1 初期値が与える経年変動の影響 (G1層)



凡例 ----- 実測値  
 ————— 計算値

図-2 初期値が与える経年変動の影響 (G 2 層)

## 参考資料 4 透水係数・比貯留量の設定について

ここでは、シミュレーションにおける物理定数である透水係数及び比貯留量についてそのオーダーがどの程度の範囲に存在するのか検討した。検討項目は(1)実測地下水水頭値の変動及び潮位変動をもとに定数を推定したケースと、(2)過去の多くの試験結果から得られている定数についてまとめた。

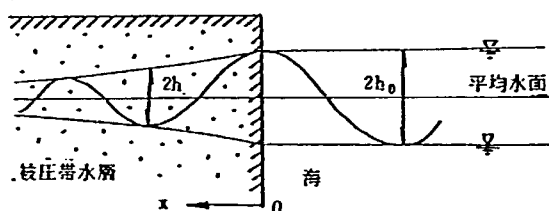
### (1) 実測水頭値及び潮位記録に基づく定数の推定

臨海部の被圧帯水層の地下水位は、潮位の影響により、周期的な変動を示すことから、潮位記録と実測水位の記録をもとに、臨海部被圧帯水層の透水係数を逆算すると次の結果が得られる。

#### 1) 算定方法

David K. ToddによるGround Water Hydrologyより潮汐と地下水の振動に関する次の式を用いる。

$$\frac{\partial^2 x}{\partial x^2} = \frac{Ss}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{--- (1)}$$



$Ss$  : 比貯留量

$K$  : 透水係数

図-1 潮潮と地下水の振動

式(1)に対し、 $x=0$  で  $h=h_0 \sin \omega t$

$x=\infty$  で  $h=0$

ここに、 $\omega = \frac{2\pi}{t_0}$  ,  $t_0$  : 潮汐の周期

の条件のもとに積分すると、

$$h = h_0 e^{-x \sqrt{\pi \cdot Ss / t_0 \cdot k}} \sin\left(\frac{z\pi t}{t_0} - x \sqrt{\pi Ss / t_0 \cdot k}\right) \quad \text{--- (2)}$$

となり、 $x$ 地点の地下水位の振幅( $h_x$ )は、

$$hx = h_0 e^{-x \sqrt{\pi \cdot Ss / t_0 \cdot k}} \quad \text{----- (3)}$$

となる。

したがって、式(3)より地下水位の振幅と潮汐振幅の比率をもとに、透水係数(k)と比貯留量(Ss)の比率を次式のように算定することができる。

$$\frac{hx}{h_0} = e^{-x \sqrt{\pi \cdot Ss / t_0 \cdot k}} \quad \text{----- (4)}$$

$$\begin{aligned} \log \left( \frac{hx}{h_0} \right) &= -x \sqrt{\left( \frac{\pi}{t_0} \right) \cdot \left( \frac{Ss}{k} \right)} \\ \therefore \frac{Ss}{k} &= \frac{t_0}{\pi \cdot x^2} (\log \left( \frac{hx}{h_0} \right))^2 \quad \text{----- (5)} \end{aligned}$$

ここに、Ss : 比貯留量(1/m)

k : 透水係数(m/日)

hx : 海岸線よりのxの距離の地下水位の振幅(m)

h<sub>0</sub> : 潮汐の振幅(m)

x : 海岸線からの距離(m)

t<sub>0</sub> : 潮汐の周期(日)

である。

## (2) 検討対象データ

濃尾平野地域内の建設省の代表的な被圧地下水位観測井は、図-2に示す16ヶ所あり、各観測井の層区分は次のとおりである。

G 1 層 .....五町、松中、中川、五明、桑名、津島

G 2 層 .....五町、松中、北部小学校、五明、桑名、津島、平和

G 3 層 .....長島温泉、平和

これらの観測井の中から、G 1、G 2、G 3各層を代表する観測井として、

G 1 .....桑名

G 2 .....松中

G 3 .....長島温泉

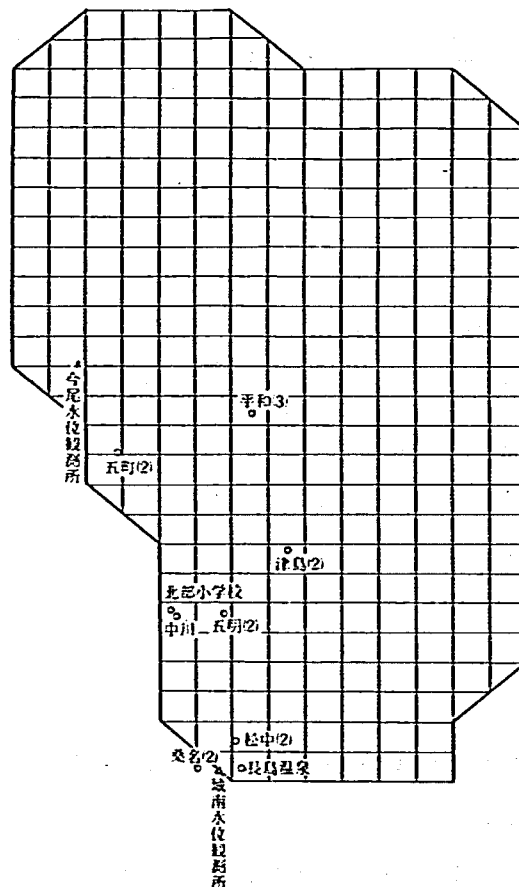
の各観測井を検討対象とし、2観測所間の定数検討では地域的なばらつきを考慮し、松中、五明、中川、北部小学校、平和の5観測所を選定した。

次に対象とする日時について、昭和56年における地下水位の高い時期、及び低い時期を選び、  
2月15日、5月15日、8月15日、11月15日

の4日を選定した。

また、潮位の資料は、海岸部での検討で対象となる松中、長島温泉、桑名の観測井近傍に位置する城南水位観測所の記録を用いた。

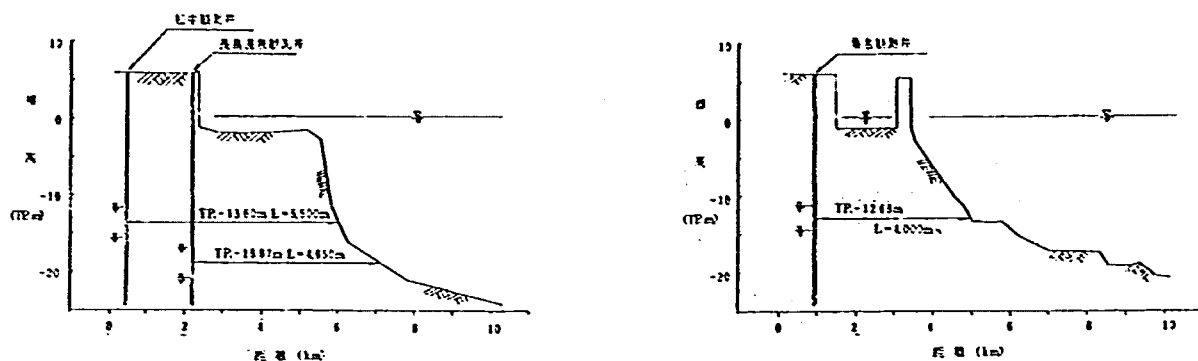
ここで、城南観測所は水位の観測を行っていることから、洪水時には潮位を正確に把握し得ないことが予想されるため、上流の今尾水位観測所の記録と比較し、平水時の記録であることを確認した後に対象日時を選定した。



図－2 時刻地下水位観測井位置図

#### (イ) 各観測井と海岸線の距離

各観測井の位置及び近傍の海底地形の状況を1/50,000地形図及び海図をもとにまとめ、これらの図をもとに、南北方向に地形縦断図を作成すると、図－3のようになる。但し、海図からの読み取る水深は地図上で、基本水準面下の数値で表示されていることから、名古屋港検潮所の諸天を用いTP値に換算した。(TP+0.0=基本水準面+1.32)



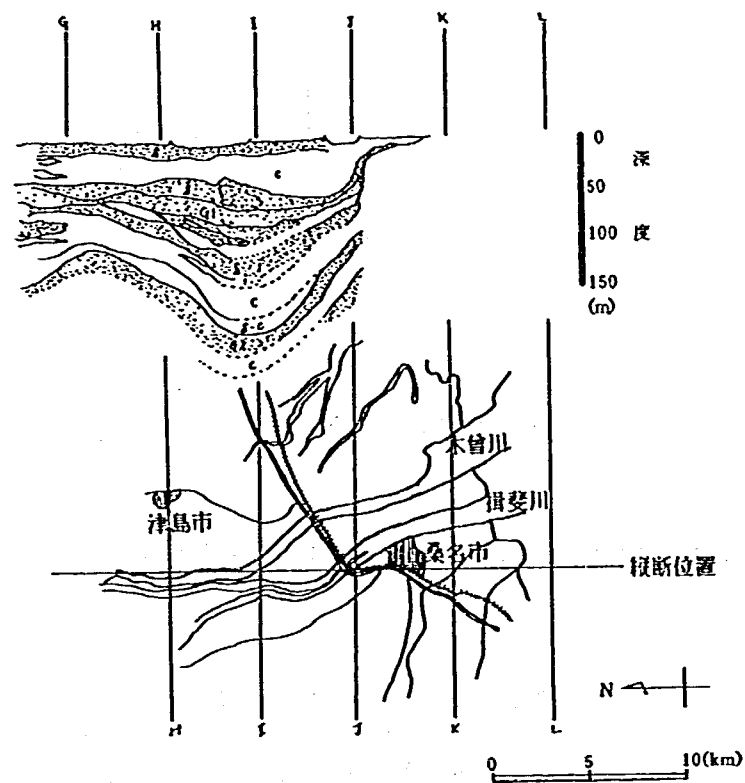
図－3 海底地形縦断面

この図より、各観測井の観測水位の変動値を参考に、海底地形との距離を算出すると表－1 のようになる。

表－1 各観測水位と海岸線の距離

| 観測井名     | 観 測 水 位 (Tp,m) |         |         | 平均水位による海底地形との距離(m) |
|----------|----------------|---------|---------|--------------------|
|          | 最 高            | 最 低     | 平 均     |                    |
| 松 中(G2)  | － 11.69        | － 15.51 | － 13.60 | 5,500              |
| 長島温泉(G3) | － 16.94        | － 20.79 | － 18.87 | 4,850              |
| 桑 名(G1)  | － 11.22        | － 19.13 | － 12.68 | 4,000              |

また、沿岸部の地質状況を図にすると、図－4 のようになり、G 1：G 2 層とも沿岸部で地表付近に収束する状況を示しており、図－3 の縦断面図に示す海底部には各層とも集中しているものと考えられる。



(出典：建設省「地盤沈下と地域構造との相関関係の調査研究(総括編)-濃尾平野-」)

図-4 沿岸部地質図

(ロ) 各観測井間距離

各観測井のコード表より座標をもとに距離を算出する(表-2、表-3参照)。

表-2 観測井座標

| 観測井名 | 井戸コード     | 座 標    |        |
|------|-----------|--------|--------|
|      |           | x (km) | y (km) |
| 松 中  | 2803K001  | 13.6   | 2.4    |
| 中 川  | 2803K002  | 10.2   | 10.3   |
| 五 明  | 1428K001  | 13.1   | 10.5   |
| 平 和  | 1402-K001 | 14.7   | 23.1   |
| 長島温泉 | 2803K005  | 14.0   | 0.9    |

表-3 観測井間距離 (km)

|      | 松 中  | 中 川  | 五 明  | 平 和  | 長島温泉 |
|------|------|------|------|------|------|
| 松 中  |      | 8.6  | 8.1  | 20.7 | 1.6  |
| 中 川  | 8.6  |      | 2.9  | 13.6 | 10.1 |
| 五 明  | 8.1  | 2.9  |      | 12.7 | 9.6  |
| 平 和  | 20.7 | 13.6 | 12.7 |      | 22.2 |
| 長島温泉 | 1.6  | 10.1 | 9.6  | 22.2 |      |

(3) 検討結果

(i) 潮位と松中、長島温泉、桑名観測井間のデータによるSs/k値の推定

検討対象日時の水位記録をもとに、波形の山の部分と谷の部分の高さ及びその間の時間数を読み取り、潮位の振幅との比及び周期をまとめると観測井毎に表-4, 表-5のようになり、振幅比は 1.81~3.96、周期は1/4周期で 6.1時間である。

これらから、(1). 1)のSs/k算定式を用いての臨海部の被圧帯水層におけるSs/K推定値は表-6のように、

|            |       |                                              |
|------------|-------|----------------------------------------------|
| 松 中 (G 2)  | ..... | $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.3 \times 10^{-8}$ |
| 長島温泉 (G 3) | ..... | $0.3 \times 10^{-8} \sim 0.7 \times 10^{-8}$ |
| 桑 名 (G 1)  | ..... | $3.3 \times 10^{-8} \sim 4.5 \times 10^{-8}$ |

の値を得た。

表-4 振幅比及び周期

| 観測井<br>日付             | 松 中 (G2)    |      | 長島温泉 (G3)   |      | 桑 名 (G1)    |      | 城南水位観測所     |               |
|-----------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|---------------|
|                       | 振 幅<br>(cm) | 振幅比  | 振 幅<br>(cm) | 振幅比  | 振 幅<br>(cm) | 振幅比  | 振 幅<br>(cm) | 1/4周<br>期(時間) |
| 2月15日<br>~<br>2月16日   | 29          | 4.55 | 39          | 3.38 | 18          | 7.33 | 132         | 6             |
|                       | 28          | 2.54 | 44          | 1.61 | 19          | 3.74 | 71          | 6             |
|                       | 52          | 2.98 | 104         | 1.49 | 39          | 3.97 | 155         | 6             |
|                       | 67          | 2.57 | 116         | 1.48 | 49          | 3.51 | 172         | 7             |
|                       | 34          | 2.82 | 55          | 1.75 | 26          | 3.69 | 96          | 6             |
|                       | 36          | 2.53 | 45          | 2.02 | 20          | 4.55 | 91          | 5             |
| 平 均                   | —           | 3.00 | —           | 1.96 | —           | 4.47 | —           | 6             |
| 5月15日<br>~<br>5月16日   | 46          | 2.85 | 80          | 1.64 | 35          | 3.74 | 131         | 6             |
|                       | 47          | 2.77 | 76          | 1.71 | 31          | 4.19 | 130         | 6             |
|                       | 44          | 2.80 | 91          | 1.35 | 29          | 4.24 | 123         | 6             |
|                       | 48          | 2.77 | 89          | 1.49 | 39          | 3.41 | 133         | 5             |
|                       | 77          | 2.04 | 89          | 1.76 | 43          | 3.65 | 157         | 7             |
|                       | 67          | 2.34 | 98          | 1.60 | 37          | 4.24 | 157         | 6             |
| 平 均                   | —           | 2.68 | —           | 1.56 | —           | 3.96 | —           | 6             |
| 8月14日<br>~<br>8月15日   | 63          | 2.83 | 110         | 1.62 | 51          | 3.49 | 178         | 7             |
|                       | 70          | 2.86 | 116         | 1.72 | 58          | 3.45 | 200         | 6             |
|                       | 46          | 3.00 | 80          | 1.73 | 29          | 4.76 | 138         | 6             |
|                       | 47          | 2.79 | 96          | 1.36 | 38          | 3.45 | 131         | 5             |
|                       | 70          | 2.89 | 134         | 1.51 | 53          | 3.81 | 202         | 7             |
|                       | 78          | 2.83 | 124         | 1.78 | 62          | 3.56 | 221         | 7             |
| 平 均                   | —           | 2.87 | —           | 1.62 | —           | 3.75 | —           | 6.3           |
| 11月15日<br>~<br>11月16日 | 84          | 2.70 | 127         | 1.79 | 54          | 4.20 | 227         | 7             |
|                       | 48          | 2.75 | 82          | 1.61 | 39          | 3.38 | 132         | 5             |
|                       | 42          | 3.14 | 69          | 1.90 | 37          | 3.54 | 131         | 6             |
|                       | 70          | 2.84 | 114         | 1.75 | 48          | 4.15 | 199         | 7             |
|                       | 74          | 2.76 | 120         | 1.70 | 55          | 3.71 | 204         | 6             |
|                       | 36          | 3.11 | 49          | 2.29 | 36          | 3.11 | 112         | 6             |
| 平 均                   | —           | 2.93 | —           | 2.09 | —           | 3.67 | —           | 6             |

表-5 振幅比及び周期のまとめ

| 観測所<br>日付  | 松 中 観 測 井<br>振 幅 比 | 長島温泉観測井<br>振 幅 比  | 桑 名 観 測 井<br>振 幅 比 | 城南水位観測所<br>1/4周期(時間) |
|------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| 2月15日~16日  | 3.00               | 1.96              | 4.47               | 6.00                 |
| 5月15日~16日  | 2.68               | 1.56              | 3.96               | 6.00                 |
| 8月14日~15日  | 2.87               | 1.62              | 3.75               | 6.30                 |
| 11月15日~16日 | 2.93               | 2.09              | 3.67               | 6.00                 |
| 平 均        | 2.68~3.00<br>2.87  | 1.56~2.09<br>1.81 | 3.67~4.47<br>3.96  | 6.00~6.30<br>6.10    |

(注) ここに振幅比は(城南水位振幅/観測井振幅)である。

表-6 Ss/k逆算値

| 観測井                      | 日付            | 海岸線からの距離<br>x (m) | 潮汐の<br>周期<br>to (日) | 振幅比<br>(hx/ho) | $\frac{Ss}{k} = \frac{to}{\pi x^2} \left( \log \left( \frac{hx}{ho} \right) \right)^2$ |
|--------------------------|---------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 松<br>中<br>(G2)           | 2/15 ~ 2/16   | 5,500             | 1.0                 | 1/3.00         | $1.270 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 5/15 ~ 5/16   |                   | 1.0                 | 1/2.68         | $1.023 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 8/14 ~ 8/15   |                   | 6.3/6.0             | 1/2.87         | $1.228 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 11/15 ~ 11/16 |                   | 1.0                 | 1/2.93         | $1.216 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 平均            |                   | 6.1/6.0             | 1/2.87         | $1.189 \times 10^{-8}$                                                                 |
| 長<br>島<br>温<br>泉<br>(G3) | 2/15 ~ 2/16   | 4,850             | 1.0                 | 1/1.96         | $0.613 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 5/15 ~ 5/16   |                   | 1.0                 | 1/1.56         | $0.268 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 8/14 ~ 8/15   |                   | 6.3/6.0             | 1/1.62         | $0.331 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 11/15 ~ 11/16 |                   | 1.0                 | 1/2.09         | $0.735 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 平均            |                   | 6.1/6.0             | 1/1.81         | $0.484 \times 10^{-8}$                                                                 |
| 桑<br>名<br>(G1)           | 2/15 ~ 2/16   | 4,000             | 1.0                 | 1/4.47         | $4.461 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 5/15 ~ 5/16   |                   | 1.0                 | 1/3.69         | $3.768 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 8/14 ~ 8/15   |                   | 6.3/6.0             | 1/3.75         | $3.649 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 11/15 ~ 11/16 |                   | 1.0                 | 1/3.67         | $3.363 \times 10^{-8}$                                                                 |
|                          | 平均            |                   | 6.1/6.0             | 1/3.96         | $3.83 \times 10^{-8}$                                                                  |

## (ロ) 層別の観測井時間でのSs/k値の推定

## ① 検討方法

各観測井の波形パターンについて、次の2種類の変動に着目し、その振幅、周期にてSs/k値を算出する。

a. 時間単位の変動を対象とするケース

b. 月2回程度の周期で変動する振幅を対象とするケース

## ② 検討結果

a. 時間単位の変動を対象とするケース

地下水位の年間変動をもとに、地下水位が低下した時期である2月と上昇した時期である5月に着目し、それぞれ2月15日~17日、5月15日~17日の時刻水位変化を図にし、この図と対象とする観測井の所在地から、振幅の特徴は次のようにまとめられた。

1) 潮位の振幅に明確に反応しているのは、中川、ないし五明の観測井までであり、海岸線からの距離はおよそ10kmまでである。

2) 振幅はやや不明瞭ではあるものの海岸線からほぼ20kmにある平和ないし五町の観測井にあっても振幅していることが認められる。

各観測井の振幅について、周期、波高を図から読み取り、これから各観測井の層別の地下水位振幅の波高及び周期が表-7のようにまとめられる。(各観測井の波高、周期の算術平均値)

これら条件によりSs/kを求めると、G1層、G2層の値は表-8、図-6のと

おりである。

これよりG 1層では、 $0.60 \times 10^{-8}$ 、G 2層では五明－松中間が $0.02 \times 10^{-8}$ 、平和－五明間が $0.60 \times 10^{-8}$ となり、ほぼ $10^{-8}$ のオーダーであることがわかる。

これらの値は、揚水試験データによる検討値 (2)に示す) の下限値近くに位置するものである。

表－7 観測井・帯水層別波高・周期

| 層 区 分 | 観 測 井   | 波 高 (m) | 1/4 周期 (時間) |
|-------|---------|---------|-------------|
| 潮 位   | 名 古 屋 港 | 1.39    | 6.15        |
| G 1   | 松 中 中 川 | 0.54    | 6.0         |
|       |         | 0.17    | 6.15        |
| G 2   | 松 五 平   | 0.52    | 6.15        |
|       |         | 0.43    | 12.75       |
|       |         | 0.13    | 13.50       |
| G 3   | 長 島 温 泉 | 0.91    | 6.05        |

表－8 Ss/k算定値 (G 1層)

| 項 目                   | 観 測 井                  |      |
|-----------------------|------------------------|------|
|                       | 松 中                    | 中 川  |
| 距 離 (km)              | 8.6                    | 8.6  |
| 振幅 (波高 $\times 2$ ) m | 1.08                   | 0.34 |
| 振幅比 (中川 / 松中)         | 0.315                  |      |
| 周 期 (日)               | 1.025 (松中)             |      |
| Ss/k                  | $0.589 \times 10^{-8}$ |      |

(G 2層)

| 項 目                   | 観 測 井                              |                                    |                                    |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                       | 松 中                                | 五 明                                | 平 和                                |
| 距 離 (km)              | 五明: 8.1,<br>平和: 20.7               | 松中: 8.1,<br>平和: 12.7               | 松中: 20.7<br>五明: 12.7               |
| 振幅 (波高 $\times 2$ ) m | 0.52                               | 0.43                               | 0.13                               |
| 振 幅 比                 | 五明 / 松中:<br>0.827                  | 平和 / 松中:<br>0.250                  | 平和 / 五明:<br>0.302                  |
| 周 期 (日)               | 1.025                              | 2.125                              | 2.250                              |
| Ss/k                  | 五明 / 松中:<br>$0.018 \times 10^{-8}$ | 平和 / 松中:<br>$2.220 \times 10^{-8}$ | 平和 / 五明:<br>$0.600 \times 10^{-8}$ |

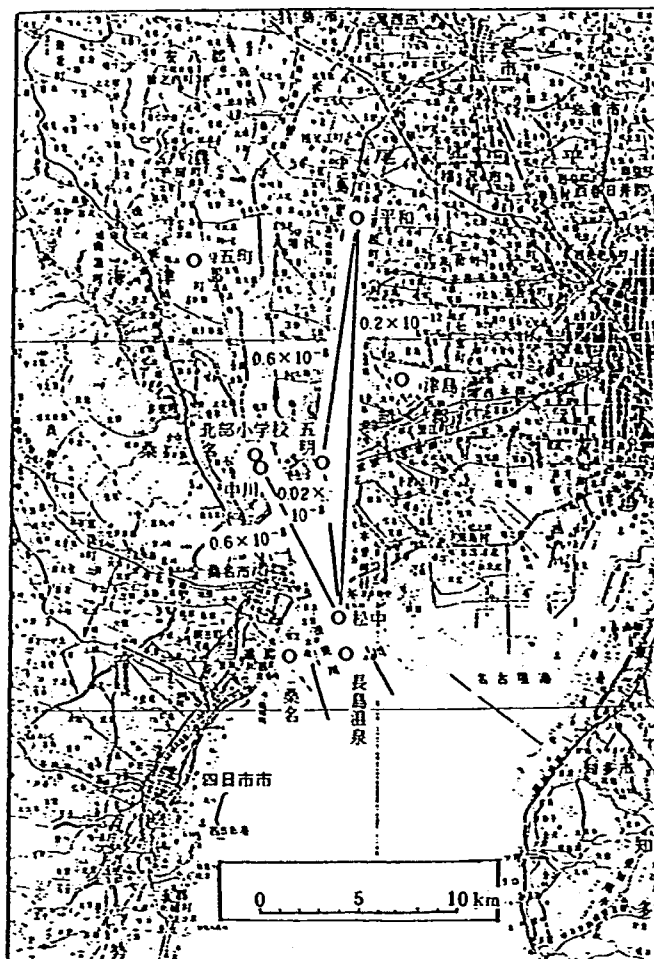


図-5 Ss/k値の分布

b. 月2回程度の周期で変動するケース

変化が明瞭に得られず、Ss/K値は算出できなかった。

- (2) 既往調査による透水係数・比貯留量，濃尾平野の各帯水層における透水係数、比貯留量を揚水試験データをもとに分析した結果（濃尾地下水盆の水収支解析による）を用い、比較すると次のようになる。

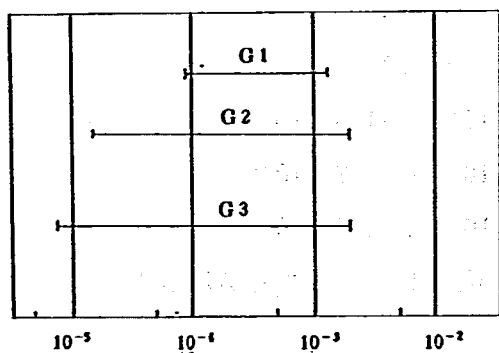


図-6 揚水試験による透水係数(m/sec)

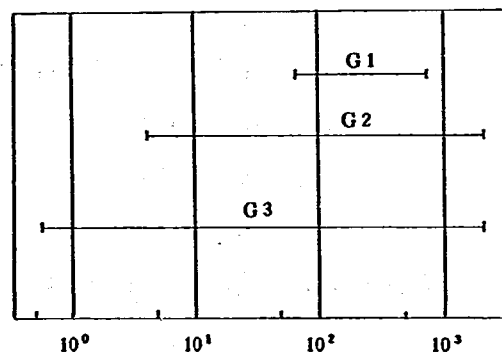


図-7 揚水試験による透水係数(m/日)

図-6を日量の透水係数にすると図-7のとおりである。

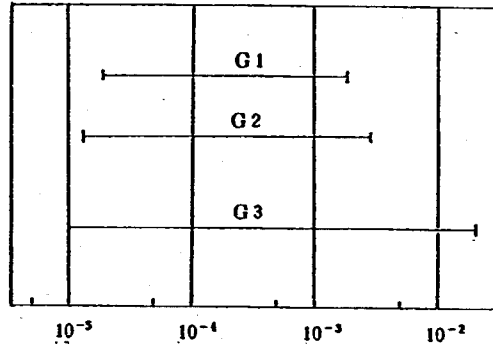


図-8 揚水試験による比貯留量(1/m)

## ② Ss/k値

①のデータよりSs/kを求めると次のようになる。

### イ) G1層

$$10^2 < k < 10^3 \text{ (m/日)}, 10^{-5} < Ss < 10^{-3} \text{ (1/m)}$$

したがって

$$10^{-8} < Ss/k < 10^{-5}$$

である。

### ロ) G2層

$$10^1 < k < 10^3 \text{ (m/日)}, 10^{-5} < Ss < 10^{-3} \text{ (1/m)}$$

したがって

$$10^{-8} < Ss/k < 10^{-4}$$

である。

### ハ) G3層

$$10^0 < k < 10^3 \text{ (m/日)}, 10^{-5} < Ss < 10^{-3} \text{ (1/m)}$$

したがって

$$10^{-8} < Ss/k < 10^{-3}$$

である。

これらの結果を比較すると(1)の算定値 (Ss/k)、

$$\text{松 中 (G2)} \dots\dots\dots 1.0 \times 10^{-8} \sim 1.3 \times 10^{-8}$$

$$\text{長島温泉 (G3)} \dots\dots\dots 0.3 \times 10^{-8} \sim 0.7 \times 10^{-8}$$

$$\text{桑 名 (G1)} \dots\dots\dots 3.3 \times 10^{-8} \sim 4.5 \times 10^{-8}$$

は前記揚水試験による値の下限値近くに位置していることがわかる。

(3) 物理定数の検討結果

これらの結果をまとめると、濃尾平野においては $Ss/k$ の値として、 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ と考えられ、 $k$ については $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 、 $Ss$ については $10^{-3} \sim 10^{-5}$ の範囲にあるものと考えられる。

## 参考資料5 シミュレーションモデルの感度分析

ここでは、現行モデルの透水係数、比貯留量の2つの係数を変化させ、係数の変化に対する計算水位の応答性を検討したものである。

検討対象地点は、実測地下水位既設変動の最も大きい松中観測井とし、松中付近の透水係数、比貯留量を変化させて、計算水位の感度を検討する。

### (1) 検討ケース

図-1に示した帯水層の係数分布区分のうち、松中観測井を含む地域の透水係数、比貯留量を表-1に示すように変化させた5ケースについて計算する。

ここに、ケース1～5は、G1、G2層の係数を示したものであり、G3層は変化させないものである。

表-1 ケース別係数表

| ケース<br>NO | 透水係数<br>(m/日) | 比貯留量<br>(1/m) |
|-----------|---------------|---------------|
| 1         | 25.0          | 0.001         |
| 2         | 20.0          | 0.001         |
| 3         | 15.0          | 0.001         |
| 4         | 25.0          | 0.0008        |
| 5         | 25.0          | 0.0006        |

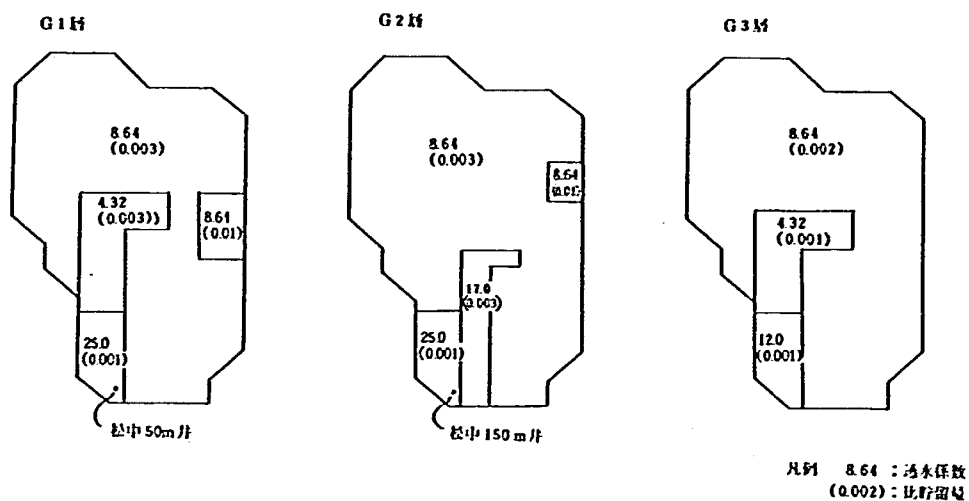


図-1 透水係数、比貯留量の分布（設定値）

## (2) 計算結果の比較

各ケースの計算結果から、松中地点における水位の変化を図-2にまとめ、比較する。

松中G2層の例では、水位の月変動については、ケース1, 2, 3ともほとんど変化がみられないが、透水係数を低減させるにしたがい地下水位の絶対値が低くなっていることがわかる。

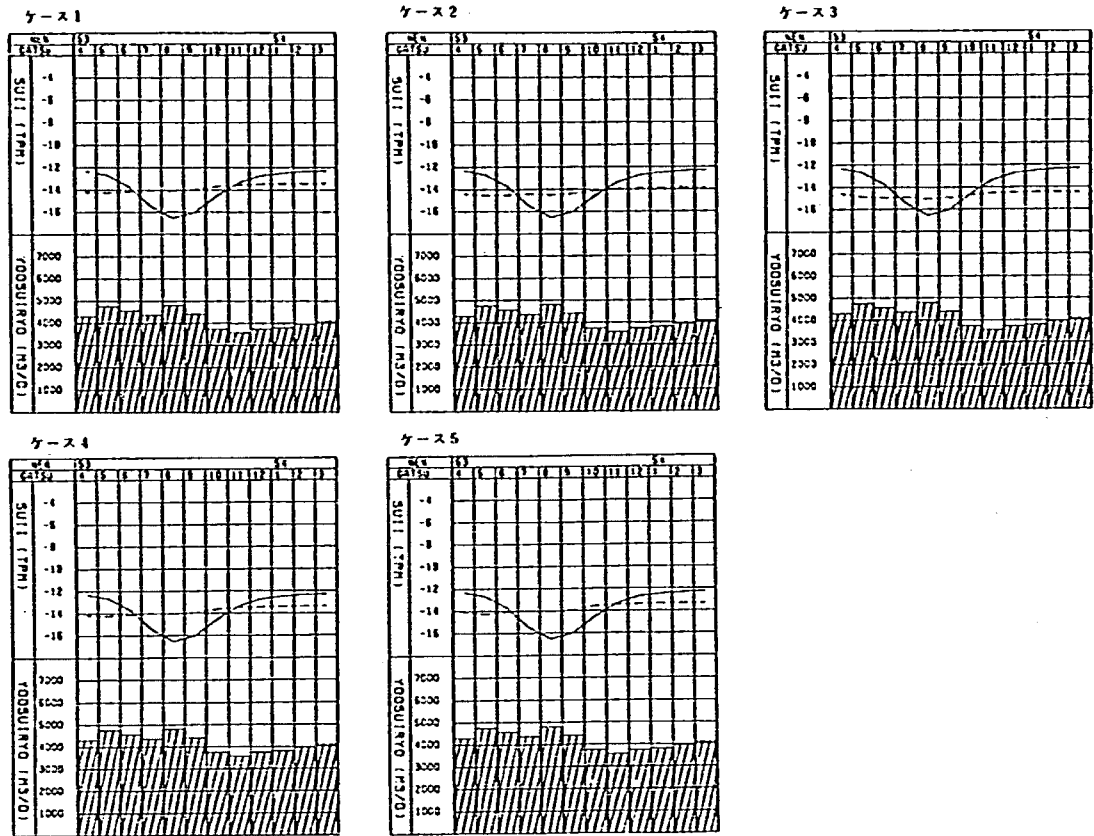
これに対し、比貯留量を変えたケースでは、地下水位の絶対値（最低水位時で比較）は各ケースほとんど差が認められないのに対し、変動傾向が異なってくる。すなわち、比貯留量を低減させると、変動の仕方が著しくなることがわかる。

このことは、次のように考えることができる。

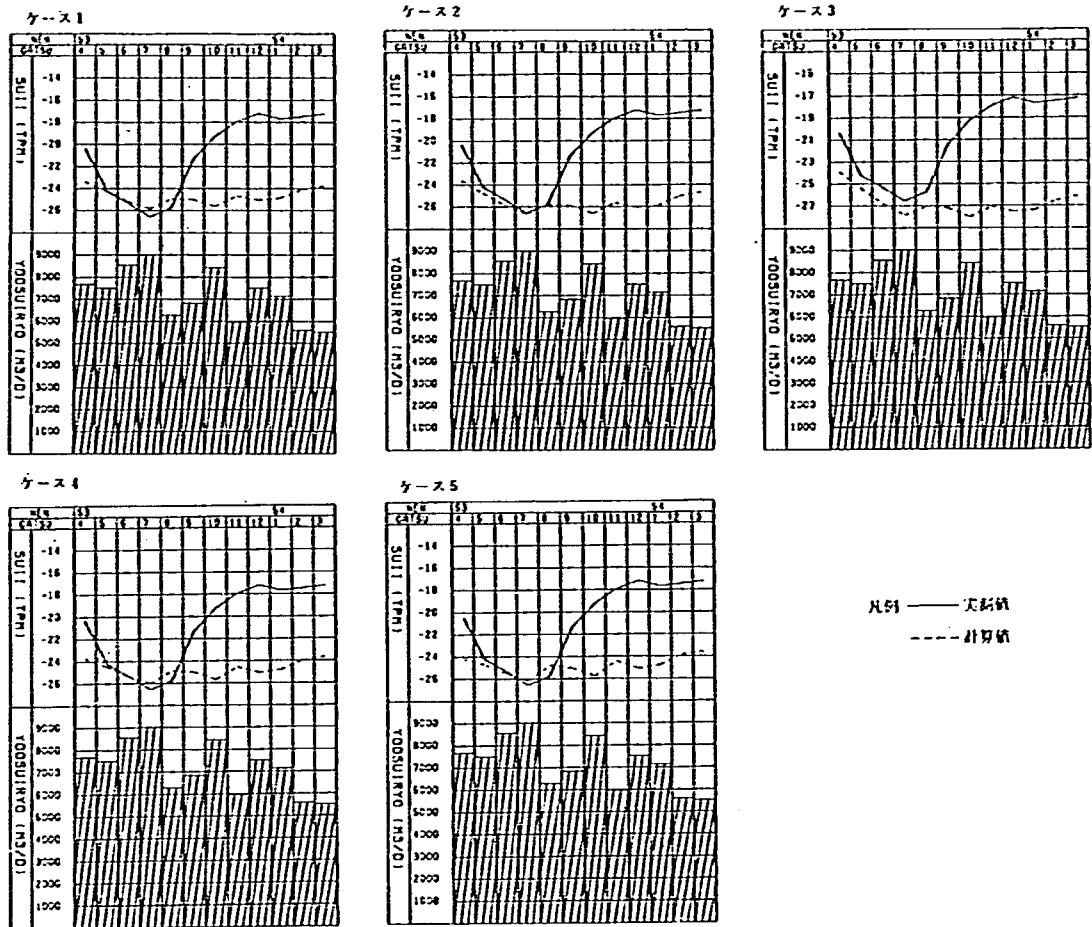
透水係数を低下させると、周囲からの横方向流入量が減少するため、水位の低下を生じやすくなるが、比貯留量は水位の変化に対する水の解放される割合であることから、揚水量が同じ場合、比貯留量が大きければ水位低下が少なく、比貯留量が小さければ水位低下が著しいことになる。

また、本検討の結果から揚水量に対しては、比貯留量の方が透水係数より敏感に反応していることがわかる。

G1層



G2層



凡例 ——— 実観値  
----- 計算値

図-2 地下水位変動図でみるモデルの感度分析 (松中観測井)

## 参考資料6 3次元モデルと準3次元モデルの定数比較

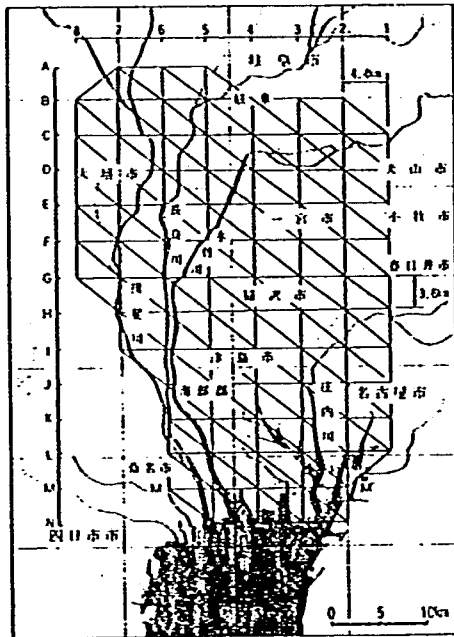
### (1) 3次元モデル定数による準3次元シミュレーション

ここでは、現行の準3次元モデルに3次元モデル（名古屋大学・植下・佐藤モデル）での計算条件を与え、シミュレーションを行い、準3次元モデル定数と3次元モデル定数との違いについて検討する。

#### ① 計算対象領域

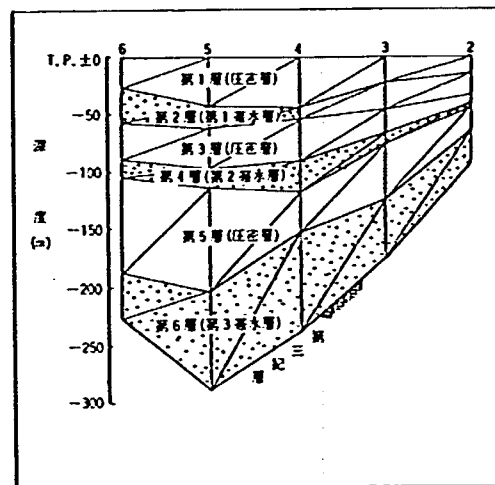
3次元モデルで行われたシミュレーション計算領域は図-1、図-2に示すとおりで、現行の準3次元モデルの領域と同じである。

要素の区分は東西4.4km,南北3.6kmの直交三角形要素で要素数147,節点数91である。



(出典：濃尾平野の地盤沈下と地下水，東海三県地盤沈下調査会)

図-1 濃尾平野3次元シミュレーションの有限要素メッシュ

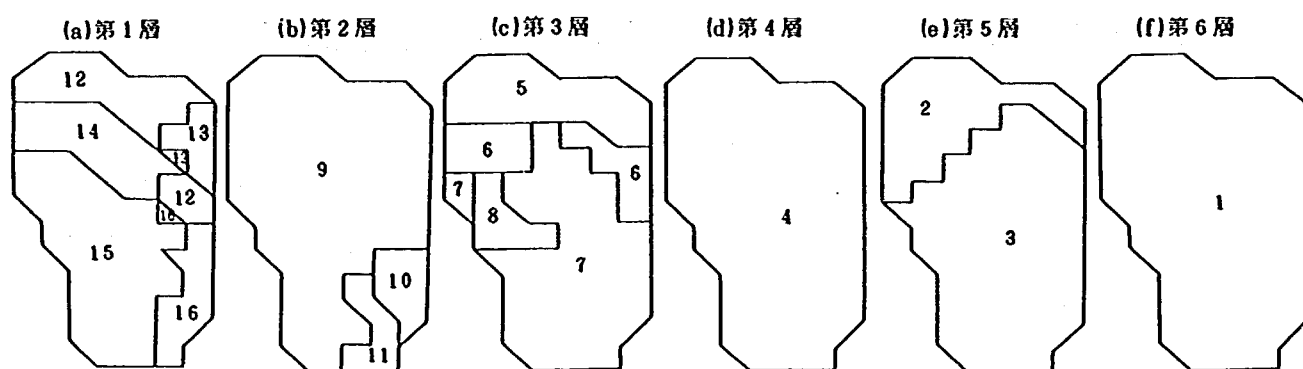


(出典：濃尾平野の地盤沈下と地下水，東海三県地盤沈下調査会)

図-2 3次元シミュレーション地盤モデルの南北における東西断面(M-M')

#### ② 定数の設定

3次元モデルにおける定数設定領域及び定数 $S_s$ ,  $K$ は、図-3、表-1に示すとおりである。この比貯留量( $S_s$ ), 透水係数( $K$ )は、各定数設定領域で行われた各種土質試験、揚水試験結果等を参考に仮定し、内挿検定によって決定したものである。



(出典：濃尾平野の地盤沈下と地下水，東海三県地盤沈下調査会)

図－3 3次元モデルによる定数設定領域（表－1に対応）

表－1 3次元モデルによる領域別定数

| 地質領域  | 水平方向透水係数 | 鉛直方向透水係数 | 比貯留量     |
|-------|----------|----------|----------|
| ③ 1   | 8.64     | 8.64     | 0.000035 |
| ③ 2・  | 5.48     | 1.37     | 0.000045 |
| ③ 3・  | 2.07     | 0.000034 | 0.00038  |
| ② 4   | 8.64     | 8.64     | 0.000035 |
| ② 5・  | 5.48     | 1.37     | 0.00005  |
| ② 6・  | 4.32     | 0.26     | 0.0001   |
| ② 7・  | 0.43     | 0.000021 | 0.0004   |
| ② 8・  | 0.86     | 0.000021 | 0.0004   |
| ① 9   | 8.64     | 8.64     | 0.00008  |
| ① 10  | 3.28     | 3.28     | 0.0001   |
| ① 11  | 4.32     | 4.32     | 0.0004   |
| ① 12・ | 3.28     | 0.33     | 0.0001   |
| ① 13・ | 8.64     | 0.86     | 0.00008  |
| ① 14・ | 3.28     | 0.000049 | 0.002    |
| ① 15・ | 3.24     | 0.000049 | 0.002    |
| ① 16・ | 3.24     | 0.000049 | 0.0004   |

・：粘土層 ①～③：層区分番号  
単位：透水係数(m/d)，比貯留量(1/m)

### ③ 境界条件の設定

3次元モデルにおける外周各境界条件は、図－4に示すとおりである。

モデル表層に与えた不圧地下水頭は常に一定とし、その水頭は昭和50年の浅井戸観測井による実験値（年平均地下水頭値）に基づき決定したもので、図－5に水頭分布を示す。

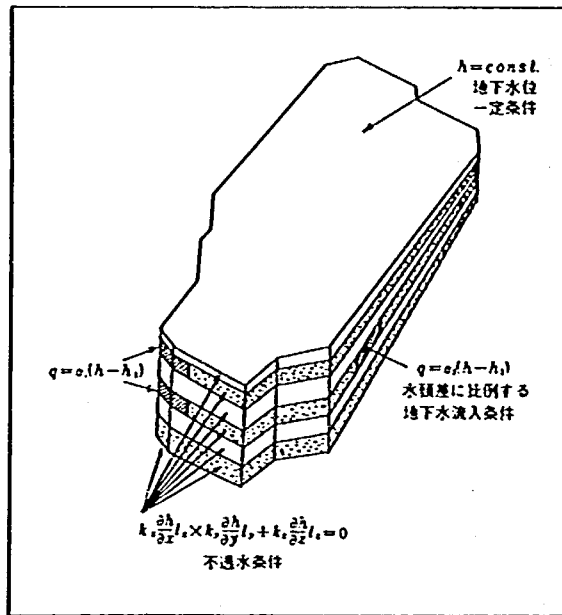
モデルが伊勢湾と接する境界では、モデル南西部のG 1帯水層，G 2帯水層は伊勢湾へさらに伸びており、それら伊勢湾へ伸びた帯水層から地下水や海水が間接的にこのモデル内へ浸入するという境界条件となっている。そして、伊勢湾側の地下水頭値 $h_1$ を平均海水面(TP±0.0m)とし、漏水係数 $\alpha_1$ を0.5(1/年)とした。

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G 2帯水層からモデル内に地下

水が流入しており、地下水頭値 $h_0$ はこの地域の不圧地下水頭（TP+10.0m）とした。

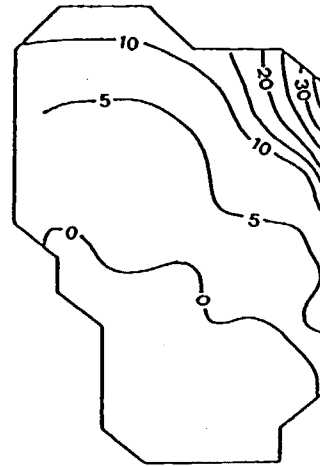
そして、この境界での漏水係数 $\alpha_2$ を0.6(1/年)とした。

その他のモデル周辺の境界面、モデル下部では、不透水条件であるとした。



（出典：濃尾平野の地盤沈下と地下水，東海三県地盤沈下調査会）

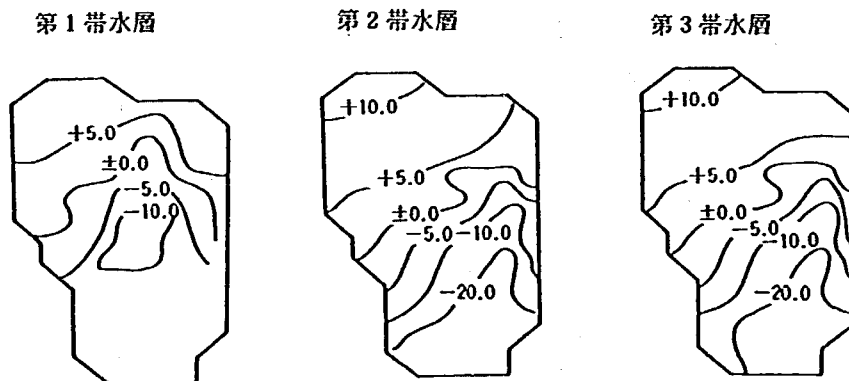
図－4 3次元モデル外周における境界条件横式図



図－5 3次元モデル表層に与えた不圧地下水頭分布（T.P.m）

#### ④ 初期条件の設定

各帯水層の地下水頭の初期条件として、図－6に示す昭和36年の地下水頭分布を用いる。



（出典：濃尾平野の地盤沈下と地下水，東海三県地盤沈下調査会）

図－6 3次元モデル初期条件としての昭和36年の水頭値分布（T.P.m）

#### ⑤ 揚水量の設定

モデル各部（図－7参照）からの昭和36年以降の揚水量の推移は、表－2のとおりで、昭和51年以降の揚水量については、その年の揚水量実態調査結果を用い、昭和51年以前の揚水量については、揚水量調査が行われていなかったため、昭和51年の実態調査の井戸掘削時期

をもと、昭和36年,昭和40年,昭和45年,昭和51年の揚水量を推定した。

その間の年の揚水量は直線内挿により推定された。

表-2 モデルからの揚水量

(単位:  $\text{m}^3/\text{日}$ )

| 地域名           |         | S. 36  | S. 40   | S. 44   | S. 48   | S. 50   | S. 51   | S. 52   |
|---------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 岐阜地域<br>C     | G 1 帯水層 | 275672 | 349282  | 575993  | 734064  | 424016  | 469127  | 448940  |
|               | G 2 帯水層 | 81749  | 114064  | 163307  | 200915  | 145712  | 193843  | 182447  |
|               | G 3 帯水層 | 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<br>地域B 2 | G 1 帯水層 | 79827  | 110174  | 141483  | 159710  | 135575  | 246034  | 223273  |
|               | G 2 帯水層 | 161458 | 234061  | 313934  | 357718  | 260239  | 176565  | 174833  |
|               | G 3 帯水層 | 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<br>地域A   | G 1 帯水層 | 54003  | 63116   | 72039   | 77246   | 102588  | 102354  | 100885  |
|               | G 2 帯水層 | 33454  | 53310   | 72487   | 108948  | 48765   | 53375   | 52873   |
|               | G 3 帯水層 | 62536  | 105991  | 175533  | 222988  | 251788  | 251476  | 250202  |
| 尾張南部地域の小計     |         | 149993 | 222417  | 320059  | 409182  | 403141  | 407205  | 403960  |
| 三重県域<br>B 1   | G 1 帯水層 | 9765   | 21124   | 39990   | 67643   | 38696   | 24915   | 23255   |
|               | G 2 帯水層 | 17935  | 21464   | 26157   | 42274   | 18921   | 15871   | 16255   |
|               | G 3 帯水層 | 14638  | 16069   | 21047   | 31589   | 27843   | 44547   | 39097   |
| 三重県域の小計       |         | 42338  | 58657   | 87194   | 141506  | 85460   | 85333   | 78607   |
| モデル全揚水量       |         | 909094 | 1263990 | 1885558 | 2396629 | 1867448 | 1971834 | 1892086 |

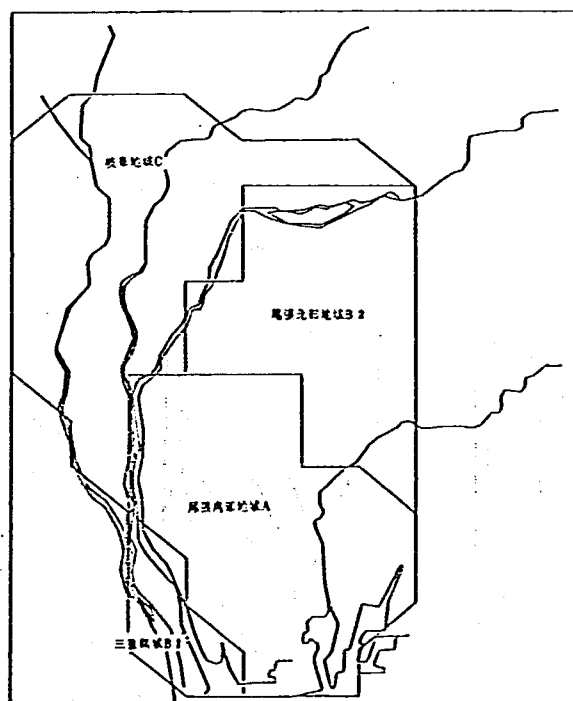


図-7 3次元モデル揚水量集計地域区分

# ⑥ 3次元モデル定数による準3次元のシミュレーション結果

上述の計算条件をもとに、3次元モデル定数による昭和36年～昭和52年の17年間のシミュ

レーションを計算時間間隔10日で行った結果を図-8に示す。

これによると、松中観測井における実測値（昭和47年以降）のほぼ平均的な値を計算値は包絡しており、3次元モデル（名古屋大学・植下・佐藤モデル）を再現しているものと考えられる。

この17年間のシミュレーションでは、年間単位の揚水量を与えるために得られる結果は年間変動量となっている。

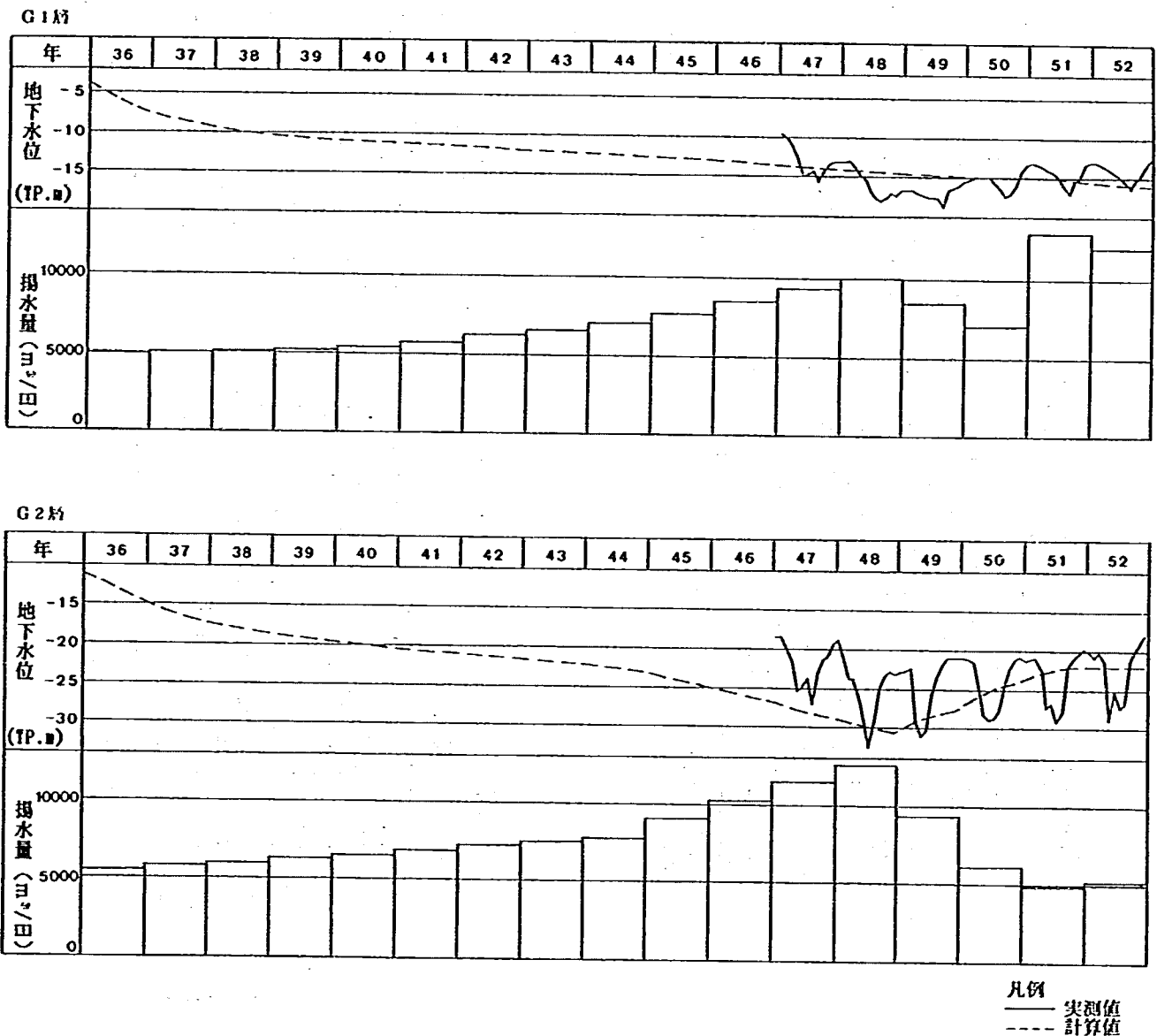


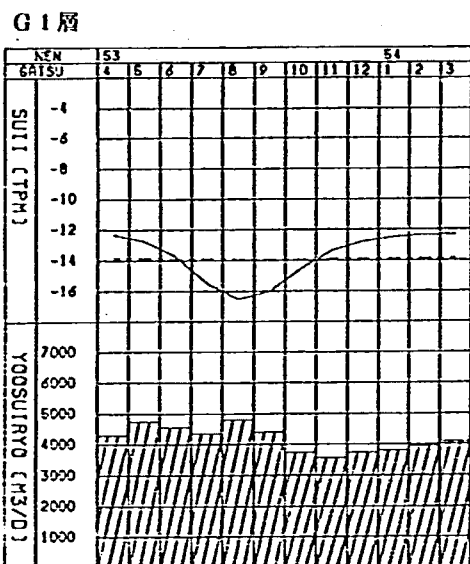
図-8 3次元モデル定数による準3次元シミュレーション結果 (S.36~52、松中観測井)

## (2) 準3次元モデルによる計算結果の妥当性

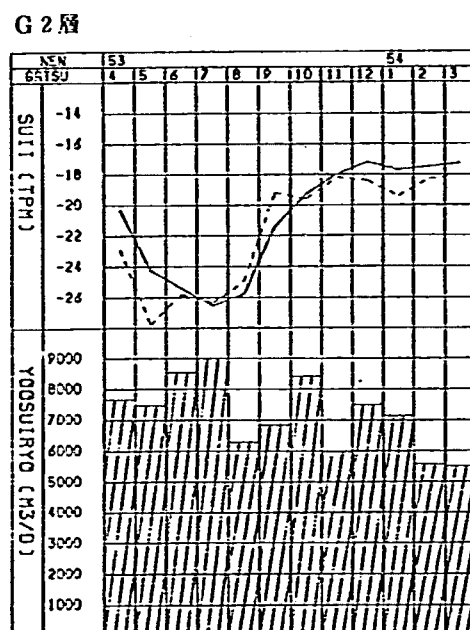
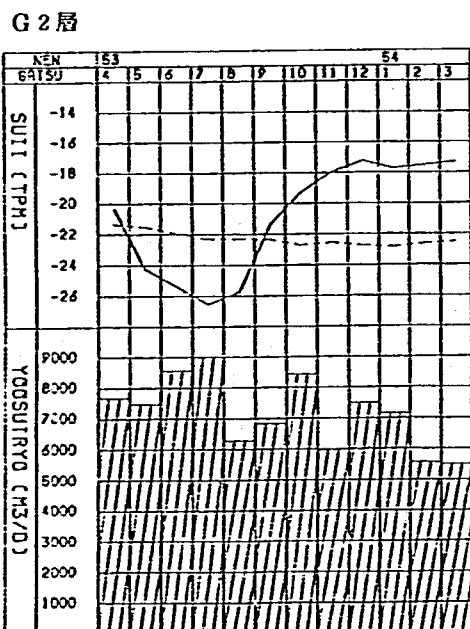
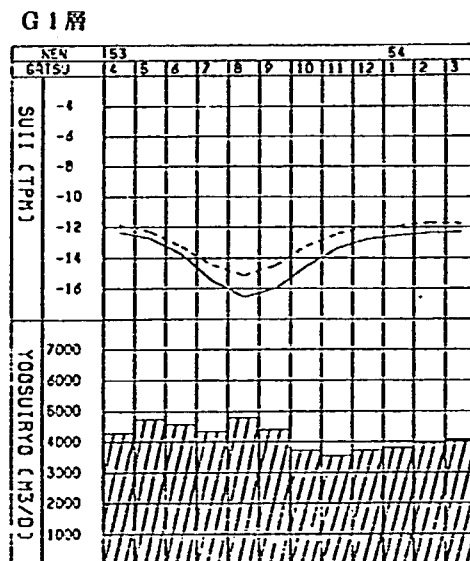
### ① 月変動揚水量で与えた場合のモデルの比較

(1)に示した3次元モデルに対し、揚水量を月変動のデータで与えた場合のシミュレーションを実施し、現行の準3次元モデルによるシミュレーションと比較すると図-9のとおりとなる。

a. 3次元モデル定数による  
シミュレーション結果



b. 準3次元モデル定数による  
シミュレーション結果



凡例 ——— 実測値  
----- 計算値

図-9 地下水位変動の比較 (松中地点)

これによると、3次元モデル定数によるシミュレーションでは、松中観測井の月単位の変動量を表現しきれない。それに対して、準3次元モデル定数は変動を表現しているものと考えられる。

両者の松中観測井地点の帯水層の比貯留量、透水係数は表-3のとおりである。

表-3 松中観測井地点の定数の比較

| 帯水層 | 水平方向透水係数 (K) | 鉛直方向透水係数 (Kz) | 比貯留量 (Ss) | Ss/K                 |
|-----|--------------|---------------|-----------|----------------------|
| G1  | 8.64         | 8.64          | 0.000080  | $9.3 \times 10^{-6}$ |
|     | 250.00       | 250.00        | 0.000050  | $2.0 \times 10^{-3}$ |
| G2  | 8.64         | 8.64          | 0.000035  | $4.1 \times 10^{-6}$ |
|     | 250.00       | 250.00        | 0.000050  | $2.0 \times 10^{-3}$ |
| G3  | 8.64         | 8.64          | 0.000035  | $4.1 \times 10^{-6}$ |
|     | 120.00       | 120.00        | 0.000150  | $1.3 \times 10^{-5}$ |

ここで、 透水係数 ..... m/日      上段 ..... 3次元モデル定数  
 比貯留量 ..... 1/m      下段 ..... 準3次元モデル定数

表-3によると、比貯留量についてはほぼ同値であるが、透水係数は3次元モデルが8.64 m/日に対して、準3次元モデルは120~250m/日と14~29倍、準3次元モデルの方が大きい。

これを透水量係数でみると表-4のとおりである。

これによると、透水量係数についても透水係数の場合と同様に13~33倍準3次元モデルが大きいものとなっている。

透水量係数については、松中観測井付近では各帯水層とも、数百~数千のオーダーであることから、準3次元モデルの透水係数のオーダーが妥当であると言えよう。

表-4 透水量係数の比較

| 帯水層 | 3次元モデル |     |        | 準3次元モデル |     |        |
|-----|--------|-----|--------|---------|-----|--------|
|     | 透水係数   | 層 厚 | 透水量係数  | 透水係数    | 層 厚 | 透水量係数  |
| G1  | 8.64   | 16  | 138.24 | 250.0   | 18  | 4500.0 |
| G2  | 8.64   | 14  | 120.96 | 250.0   | 13  | 3250.0 |
| G3  | 8.64   | 79  | 682.56 | 250.0   | 73  | 8760.0 |

ここで、 透水係数 ..... m/日  
 層 厚 ..... m  
 透水量係数 ..... m<sup>2</sup>/日

## ② 準3次元モデル定数による3次元シミュレーション

次に準3次元モデルの透水係数を用いて、3次元モデルの領域によるシミュレーション結果を図-10に示す。（3次元モデル透水係数×10～29倍）

これによると、松中観測井の月単位の地下水の変動に計算値がある程度追従しており、月単位の地下水の変動を表現する（月単位の揚水量に反応する）透水係数としては、3次元モデルで用いられている透水係数の10～30倍（数十～数百m/日）と考えられる。

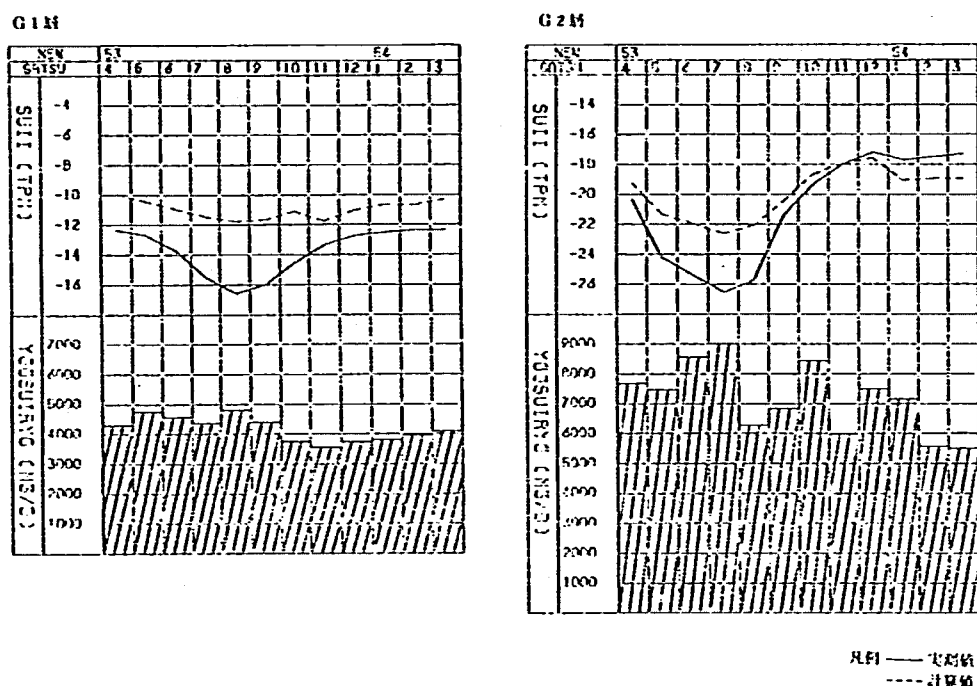


図-10 準3次元モデル定数（透水係数）による3次元シミュレーション結果（松中観測井）

## 参考文献

- 1) 地下水ハンドブック：建設産業調査会
- 2) 新版 地下水調査法：山本荘毅／古今書院
- 3) 地下水のシミュレーションの現状とその問題点、土木研究所資料第1191号：建設省土木研究所（昭和52年3月）
- 4) 地下水管理計画策定指針（案）：建設省河川局（昭和59年3月）
- 5) 地下水盆の管理〔理論と実際〕：水収支研究グループ、柴崎達雄編／東海大学出版会
- 6) 濃尾平野の地盤沈下と地下水：東海三県地盤沈下調査会／名古屋大学出版会
- 7) 東海三県地盤沈下調査会資料

# 参考資料7 濃尾平野準3次元シミュレーションプログラムリスト

```

** CHIKASUI **
1  COMMON /F15/ IREV /IYIP/ IYIP,IYI1(30),IYT2(30),ALPYT(30)
2  COMMON /IKSX/ IKS /IFX/ IFX1,IFX2,IFX3
3  COMMON /FF15/ IREV2
4  COMMON /FF19/ IPOD
5  COMMON /NO1/ TITL(20),H,H,NG,NC
6  COMMON /NO6/ KHON,IDAY,ISTAY,ISTAH
7  COMMON /HBANDV/ HBB
8  COMMON /I10/ KCASE
9  COMMON /LBT/ LBTYPE
10 DEFINE FILE 17(200,24,U,IJ17)
11 DEFINE FILE 16(20,1180,U,IJ16)
12 DEFINE FILE 15(250,660,U,IJ15)
13 DEFINE FILE 14(150,660,U,IJ14)
14 DEFINE FILE 13(200,660,U,IJ13)
15 DEFINE FILE 12(50,660,U,IJ12)
16 DEFINE FILE 11(200,660,U,IJ11)
17 REVIND 20
18 REVIND 21
19 HBB=30
20 CALL PRDATA
21 CALL DATAR
22 CALL ALDATA
23 READ(5,1) NENSU,KHON,IDAY,ISTAY,ISTAH,IREV,KCASE,KFPOT,IREV2,
24 * IPOD,LBTYPE,IKS,IYIP,IFX1,IFX2,IFX3
25 IF(IFX1.EQ.0) IFX1=5
26 IF(IFX2.EQ.0) IFX2=5
27 IF(IFX3.EQ.0) IFX3=5
28 IF(IYIP.EQ.0) GO TO 20
29 DO 21 I=1,IYIP
30 READ(5,3) IYI1(I),IYT2(I),ALPYT(I)
31 ALPYT(I)=ALPYT(I)/FLOAT(NENSU-1)
32 21 CONTINUE
33 20 CONTINUE
34 IF(NENSU.GT.1) KHON=12
35 IF(IREV.EQ.0) IREV=1
36 IF(IREV2.EQ.0) IREV2=1
37 CALL DATAR1
38 DO 10 KENN=1,NENSU
39 WRITE(2,2) KHON,KENN
40 KENN=KENN
41 CALL GDATA(N,KHON,IDAY,KENN)
42 CALL BDATA(KENN)
43 CALL YDATA(KENN)
44 CALL KEISAN(KENN)
45 IF(IPOD.GT.0) CALL POUT(KENN)
46 CALL SYUSHI(KENN)
47 IF(KFPOT.EQ.1) CALL TPV
48 10 CONTINUE
49 1 FORMAT(16I5)
50 2 FORMAT(3I5)
51 3 FORMAT(2I5,F10.3)
52 REVIND 20
53 REVIND 21
54 STOP
55 END
56 SUBROUTINE PRDATA
57 COMMON /NO9/ IMAX,JMAX,IHO(27),JSNO(27),JENO(27),
58 * KSHO(27),KENO(27),IYPRIT
59 READ(5,2) IMAX,JMAX,IYPRIT
60 DO 1 I=1,IMAX
61 READ(5,2) HN,JSNO(HN),JENO(HN),KSHO(HN),KENO(HN)
62 1 IHO(I)=HN
63 2 FORMAT(16I5)
64 RETURN
65 END
66 SUBROUTINE DATAR
67 COMMON /NO1/ TITL(20),H,H,NG,NC
68 COMMON /NO2/ X(330),Y(330),II(590),JJ(590),KK(590),NOA01(330)
69 COMMON /NO4/ HCKUBH,NOZ(330),HSKZ(3,90),HEKZ(3,90)
70 COMMON /NO41/ OAKZ(3,90)
71 COMMON /NO8/ CDPH(3,330),GOPH(3,590)
72 COMMON /HBANDV/ HBB
73 COMMON /VORK/ DPTH(6,590),DUHY(13797)
74 DIMENSION ICOUNT(3,330)
75 NG=3

```

```

76      ** CHIKASUI **
77      NC=3
78      READ(5,1) N,M
79      READ(5,2) (X(J),Y(J),J=1,M)
80      WRITE(2,1) N,M
81      WRITE(2,4) (X(I),I=1,M)
82      WRITE(2,4) (Y(I),I=1,M)
83      WRITE(20,1) N,M
84      WRITE(20,4) (X(I),I=1,M)
85      WRITE(20,4) (Y(I),I=1,M)
86      DO 10 I=1,M
87      NOA01(I)=1
88      10 NO2(I)=1
89      DO 11 I=1,M
90      READ(5,3) NO,II(NO),JJ(NO),KK(NO),(DPTH(J,NO),J=1,6)
91      WRITE(2,5) NO,II(NO),JJ(NO),KK(NO),(DPTH(J,NO),J=1,6)
92      WRITE(20,5) NO,II(NO),JJ(NO),KK(NO),(DPTH(J,NO),J=1,6)
93      11 CONTINUE
94      MBHAX=-9999
95      DO 12 I=1,M
96      I1=II(I)
97      J1=JJ(I)
98      K1=KK(I)
99      I11=I1-J1
100     IF(I11.LT.0) I11=-I11
101     IF(I11.GT.MBHAX) MBHAX=I11
102     JJ1=J1-K1
103     IF(JJ1.LT.0) JJ1=-JJ1
104     IF(JJ1.GT.MBHAX) MBHAX=JJ1
105     KK1=K1-I1
106     IF(KK1.LT.0) KK1=-KK1
107     IF(KK1.GT.MBHAX) MBHAX=KK1
108     12 CONTINUE
109     HBB=2*MBHAX+1
110     IF(HBB.GT.35) GO TO 100
111     DO 13 I=1,3
112     DO 13 J=1,M
113     CDPH(I,J)=0.0
114     13 ICOUNT(I,J)=0
115     DO 20 K=1,M
116     DO 20 I=1,3
117     I1=(I-1)*2+1
118     CDPH(I,I1(K))=CDPH(I,I1(K))+DPTH(I1,K)
119     CDPH(I,JJ(K))=CDPH(I,JJ(K))+DPTH(I1,K)
120     CDPH(I,KK(K))=CDPH(I,KK(K))+DPTH(I1,K)
121     ICOUNT(I,I1(K))=ICOUNT(I,I1(K))+1
122     ICOUNT(I,JJ(K))=ICOUNT(I,JJ(K))+1
123     ICOUNT(I,KK(K))=ICOUNT(I,KK(K))+1
124     20 CONTINUE
125     DO 21 I=1,3
126     DO 21 J=1,M
127     CDPH(I,J)=CDPH(I,J)/ICOUNT(I,J)
128     21 CONTINUE
129     DO 30 K=1,M
130     DO 30 I=1,3
131     I1=I*2
132     30 GDPH(I,K)=DPH(I1,K)
133     1 FORMAT(16I5)
134     2 FORMAT(8F10.0)
135     3 FORMAT(4I5,6F10.0)
136     4 FORMAT(4E20.8)
137     5 FORMAT(4I5,6F10.5)
138     500 FORMAT(1H1,///,30X,'*** 277272 11 11 11 HBB=',15,' > 35 ***')
139     RETURN
140     100 CONTINUE
141     WRITE(6,500) HBB
142     STOP 1111
143     END
144     SUBROUTINE ALDATA
145     COMMON /NO11/ NALKO,MALNO(20),MPTNO(20,2)
146     COMMON /NO112/ ALVAL(20,3),ALQ(20,3)
147     READ(5,1) NALKO
148     IF(NALKO.EQ.0) GO TO 12
149     DO 10 I=1,NALKO
150     READ(5,2) MALNO(I),MPTNO(I,1),MPTNO(I,2),
      *      (ALVAL(I,J),J=1,3), (ALQ(I,K),K=1,3)

```

```

151      ** CHIKASUI **
152      10 CONTINUE
153      DO 11 I=1,NALCO
154      DO 11 J=1,3
155      ALVAL(I,J)=ALVAL(I,J)+10.0
156      11 CONTINUE
157      12 CONTINUE
158      1 FORMAT(1615)
159      2 FORMAT(315,5X,6F10.0)
160      RETURN
161      END
162      SUBROUTINE DATARI
163      COMMON /NO1/ TITL(20),N,H,NG,NC
164      COMMON /NO3/ NGKUBN,NSKXY(3,15),NEKXY(3,15)
165      COMMON /NO31/ DAKX(3,15),DAKY(3,15)
166      COMMON /NO4/ NCKUBN,NOZ(330),NSKZ(3,90),NEKZ(3,90)
167      COMMON /NO41/ DAKZ(3,90)
168      COMMON /NO10/ ALABE
169      COMMON /IKSX/ IKS
170      COMMON /NO5/ SG(3,15),SC(3,90),HC(3)
171      COMMON /NO7/ HBKO,HBNO(70)
172      COMMON /NO8/ GPTH(3,330),GDPTH(3,590)
173      COMMON /IBDATA/ HNKO,HNNO(200),HNS(200),HNE(200),HNNO(200)
174      COMMON /WORK/ DPTH(6,590),TX(3,590),TY(3,590),DUNY(10257)
175      DIMENSION ICOUNT(3,590)
176      READ(5,666) NGKUBN,ALPGX,ALPGY,ALPSC
177      IF(ABS(ALPGX).LT.1.0E-5) ALPGX=1.0
178      IF(ABS(ALPGY).LT.1.0E-5) ALPGY=1.0
179      IF(ABS(ALPSC).LT.1.0E-5) ALPSC=1.0
180      DO 20 I=1,NG
181      DO 21 J=1,NGKUBN
182      READ(5,5) NSKXY(I,J), NEKXY(I,J),DAKX(I,J),DAKY(I,J),SG(I,J)
183      21 CONTINUE
184      20 CONTINUE
185      WRITE(2,2) NG
186      WRITE(20,2) NG
187      DO 22 I=1,NG
188      DO 23 J=1,NGKUBN
189      NS=NSKXY(I,J)
190      NE=NEKXY(I,J)
191      DAKX(I,J)=DAKX(I,J)*ALPGX
192      DAKY(I,J)=DAKY(I,J)*ALPGY
193      SG(I,J)=SG(I,J)*ALPSC
194      DO 24 K=NS,NE
195      TX(I,K)=DAKX(I,J)
196      TY(I,K)=DAKY(I,J)
197      IF(IKS.EQ.1) TX(I,K)=DAKX(I,J)/GDPTH(I,K)
198      IF(IKS.EQ.1) TY(I,K)=DAKY(I,J)/GDPTH(I,K)
199      24 CONTINUE
200      23 CONTINUE
201      WRITE(2,10) (TX(I,J),J=1,H)
202      WRITE(2,10) (TY(I,J),J=1,H)
203      WRITE(20,10) (TX(I,J),J=1,H)
204      WRITE(20,10) (TY(I,J),J=1,H)
205      22 CONTINUE
206      READ(5,2) NCKUBN
207      DO 25 I=1,NC
208      DO 26 J=1,NCKUBN
209      READ(5,5) NSKZ(I,J),NEKZ(I,J),DAKZ(I,J),SC(I,J)
210      26 CONTINUE
211      25 CONTINUE
212      READ(5,2) (HC(J),J=1,NC)
213      WRITE(6,1)
214      IF(IKS.NE.1) WRITE(6,6) NGKUBN
215      IF(IKS.EQ.1) WRITE(6,9) NGKUBN
216      DO 30 J=1,NGKUBN
217      WRITE(6,3) (NSKXY(I,J),NEKXY(I,J),DAKX(I,J),DAKY(I,J),SG(I,J),
218      * I=1,NG)
219      30 CONTINUE
220      WRITE(6,11) NCKUBN
221      DO 31 J=1,NCKUBN
222      WRITE(6,4) (NSKZ(I,J),NEKZ(I,J),DAKZ(I,J),SC(I,J),I=1,NC)
223      31 CONTINUE
224      WRITE(6,8) (HC(J),J=1,NC)
225      READ(5,12) ALABE
226      HNKO=0

```



```

301      ** CHIKASUI **
302      XXK(J)=ZY
303      YYK(J)=ZY
304      SSG(J)=ZSG
305      13 CONTINUE
306      12 CONTINUE
307      ID1=(NN-1)*2+1
308      ID2=ID1+1
309      ID3=7*NN
310      WRITE(16,ID1) XXK
311      WRITE(16,ID2) YYK
312      WRITE(16,ID3) SSG
313      11 CONTINUE
314      RETURN
315      END
316      SUBROUTINE NAK1(KHON,NSTEP,N,NEHN)
317      COMMON /FF15/ IREV2 /IFX/ IFX1,IFX2,IFX3
318      COMMON /VORK/ XBOUND(330),DUMY(17007)
319      IF(IFX3.NE.5.AND.MOD(NEHN-1,IREV2).EQ.0) REVIND IFX3
320      DO 10 I=1,KHON
321      DO 10 J=1,NSTEP
322      READ(IFX3,1) (XBOUND(K),K=1,N)
323      ID=(I-1)*NSTEP+J+4+1
324      WRITE(11,ID) XBOUND
325      10 CONTINUE
326      1 FORMAT(8F10.2)
327      RETURN
328      END
329      SUBROUTINE NAK2(KHON,NSTEP,NBKO,NEHN)
330      COMMON /FF15/ IREV2 /IFX/ IFX1,IFX2,IFX3
331      COMMON /ID11/ IB,I313,NAK(70),NS(70),NE(70)
332      COMMON /ID12/ G(10,12,3)
333      COMMON /VORK/ XBOUND(330),H(3,70,36),DUMY(9447)
334      IFF=IFX3
335      DO 10 K=1,3
336      IF(IFX3.NE.5) IFILE=IFF*K
337      IF(IFX3.EQ.5) IFILE=5
338      IF(IFX3.NE.5.AND.MOD(NEHN-1,IREV2).EQ.0) REVIND IFILE
339      DO 10 I=1,KHON
340      DO 10 J=1,NSTEP
341      READ(IFILE,1) (H(K,L,I),L=1,NBKO)
342      10 CONTINUE
343      IF(NEHN.EQ.1) READ(5,2) IB,I313
344      IF(IB.LE.0) GO TO 14
345      IF(NEHN.EQ.1) READ(5,2) (NAK(I),I=1,IB)
346      DO 11 I=1,IB
347      IF(NEHN.EQ.1) READ(5,2) NS(I),NE(I)
348      DO 12 K=1,3
349      IF(NEHN.EQ.1) READ(5,3) (G(I,1,K),I=1,KHON)
350      12 CONTINUE
351      IF (I313.GE.1) GO TO 11
352      DO 13 K=1,3
353      DO 13 L=NS(I),NE(I)
354      I1=0
355      DO 13 I=1,KHON
356      DO 13 I3=1,NSTEP
357      I1=I1+1
358      NN=L
359      H(K,NN,I1)=G(I,1,K)
360      13 CONTINUE
361      11 CONTINUE
362      14 CONTINUE
363      DO 15 K=1,3
364      DO 15 I=1,KHON
365      DO 15 J=1,NSTEP
366      DO 16 L=1,NBKO
367      XBOUND(L)=H(K,L,I)
368      16 CONTINUE
369      ID=(I-1)*NSTEP+J+3+K+3
370      WRITE(13,ID) XBOUND
371      15 CONTINUE
372      DO 17 K=1,3
373      I=1
374      J=1
375      DO 18 L=1,NBKO
376      XBOUND(L)=H(K,L,I)

```



```

451      ** CHIKASUI **
452      DATA PJ /3.78E11/
453      JNEN=JNEN
454      J1MON=MON+ISTAN-1
455      JMON=MOD(J1MON-1,12)+1
456      KNEN=JNEN*(J1MON-1)/12
457      IF(NTYPE.EQ.2.AND.MOD(JMON,1000).NE.0) RETURN
458      IF(NTYPE.EQ.1.AND.NN.GE.1) WRITE(6,1) KNEN,JMON, NN
459      IF(NTYPE.EQ.2.AND.NN.GE.1) WRITE(6,2) KNEN,JMON, NN
460      IF(NTYPE.EQ.1.AND.NN.EQ.0) WRITE(6,6) KNEN,JMON
461      IF(NTYPE.EQ.2.AND.NN.EQ.0) WRITE(6,7) KNEN,JMON
462      WRITE(6,3) (JK,JK=1,JMAX)
463      WRITE(6,4)
464      DO 10 I=1,JMAX
465      DO 11 J=1,JMAX
466      Y(J)=XX(I,J)
467      IF (Y(J).LT.-90000.0) Y(J)=PJ
468      11 CONTINUE
469      IF(NTYPE.EQ.1) WRITE(6,5) I,(Y(J),J=1,JMAX)
470      IF(NTYPE.EQ.2) WRITE(6,8) I,(Y(J),J=1,JMAX)
471      10 CONTINUE
472      1 FORMAT(1H1,/,15X,'3333',13,' 33 ',12,
473      *      ' h"3 G-',11,'33 333333 ', '(H=3/DAY)',/)
474      2 FORMAT(1H1,/,15X,'3333',13,' 33 ',12,
475      *      ' h"3 G-',11,'33 3333 3333-3 (H)',/)
476      3 FORMAT(/,7X,15I6)
477      4 FORMAT(1H1,/)
478      5 FORMAT(/,2X,13,2X,15F6.1)
479      6 FORMAT(1H1,/,15X,'3333',13,' 33 ',12,
480      *      ' h"3 ', ' 333-33 333333 (H=3/DAY)',/)
481      7 FORMAT(1H1,/,15X,'3333',13,' 33 ',12,
482      *      ' h"3 ', ' 333-33 3333-3 (H)',/)
483      8 FORMAT(/,2X,13,2X,15F6.2)
484      RETURN
485      END
486      SUBROUTINE GDATA(N,KMON,IDAY,NEHN)
487      KSTEP=30/IDAY
488      CALL MAK1(KMON,KSTEP,N,NEHN)
489      RETURN
490      END
491      SUBROUTINE BDATA(NEHN)
492      COHMON /N06/ KMON,IDAY,ISTAY,ISTAN
493      COHMON /N07/ NBKO,NBKO(70)
494      COHMON /LBT/ LBTYPE
495      COHMON /ID11/ IB,1313,NAK(70),NS(70),NE(70)
496      COHMON /WORK/ XX(330),HB(330),DATA(70,12),
497      *      ZZ(12),X0(330),X1(330),DX(70),DUHY(15095)
498      IF(LBTYPE.EQ.1) GO TO 1
499      KSTEP=30/IDAY
500      CALL MAK2(KMON,KSTEP,NBKO,NEHN)
501      RETURN
502      1 CONTINUE
503      READ(5,100) NBKO,1313
504      READ(5,100) (NBKO(I),I=1,NBKO)
505      DO 10 I=1,3
506      II=I+1
507      READ(11,11) XX
508      DO 11 J=1,NBKO
509      JJ=NBKO(J)
510      11 HB(J)=XX(JJ)
511      WRITE(13,1) HB
512      10 CONTINUE
513      K=0
514      ID=0
515      1000 K=K+1
516      IF(K.GT.NBKO) GO TO 9000
517      READ(5,100) NS(K),NE(K)
518      DO 20 I=1,3
519      ID=ID+1
520      READ(5,110) (ZZ(J),J=1,KMON)
521      WRITE(17,10) ZZ
522      20 CONTINUE
523      GO TO 1000
524      9000 CONTINUE
525      KK=K-1
526      DO 50 KN=1,3

```

```

526      ** CHIKASUI **
527      DO 51 I=1,KK
528      ID=(I-1)*3+NN
529      READ(17,10) Z2
530      DO 52 J=1,KHON
531      52 DATA(I,J)=Z2(J)
532      51 CONTINUE
533      XCONT=30/IDAY
534      KSTEP=30/IDAY
535      IDD=0
536      DO 60 I=1,KHON
537      IF(I.NE.1) GO TO 61
538      READ(13,NN) XO
539      61 CONTINUE
540      DO 62 J=1,KK
541      62 Z2(J)=DATA(J,I)
542      DO 63 J=1,KK
543      NSS=NS(J)
544      NEE=NE(J)
545      DO 64 JJ=NSS,NEE
546      64 X1(JJ)=Z2(J)
547      63 CONTINUE
548      DO 65 J=1,NBKO
549      JJ=NBNO(J)
550      65 DX(J)=(X1(JJ)-XO(JJ))/XCONT
551      DO 66 J=1,KSTEP
552      IDD=IDD+1
553      DO 67 JJ=1,NBKO
554      JP=NBNO(JJ)
555      67 HB(JJ)=XO(JP)+DX(JJ)*FLOAT(J)
556      ID1=IDD*3+NN
557      WRITE(13,101) HB
558      66 CONTINUE
559      DO 68 J=1,NBKO
560      JJ=NBNO(J)
561      68 XO(JJ)=X1(JJ)
562      60 CONTINUE
563      50 CONTINUE
564      100 FORMAT(16I5)
565      110 FORMAT(8F10.0)
566      RETURN
567      END
568      SUBROUTINE YDATA(NENN)
569      COMMON /IYTP/ IYTP,IY1(30),IY2(30),ALPY1(30)
570      COMMON /F15/ IREV /I10/ KCASE /IFX/ IFX1,IFX2,IFX3
571      COMMON /N01/ TITL(20),N,H,NG,NC
572      COMMON /N02/ X(330),Y(330),I1(590),JJ(590),KK(590),NOAD1(330)
573      COMMON /N06/ KHON,IDAY,ISTAY,ISTAH
574      COMMON /N09/ IMAX,JMAX,INO(27),JSNO(27),JENO(27),
575      * KENO(27),KENO(27),IYPRIT
576      COMMON /VORK/ Z2(330),YOSUI(330,3),A(590),YY(330),XX(30,15),
577      * YYZ2(3,30,20),DUNY(12847)
578      IF(IFX1.NE.5.AND.MOD(NENN-1,IREV).EQ.0) REVIND IFX1
579      KSTEP=30/IDAY
580      KKK=0
581      NEN=ISTAY+NENN-1
582      DO 10 I=1,3
583      DO 10 J=1,30
584      DO 10 K=1,20
585      10 YYZ2(I,J,K)=0.0
586      DO 20 HON=1,KHON
587      KHON=HON
588      READ(IFX1,5)
589      DO 11 IYOS0=1,H
590      11 CONTINUE
591      READ(IFX1,4,END=9999) JJJ,(YOSUI(JJJ,JK),JK=1,3)
592      IF(IYTP.EQ.0) GO TO 40
593      SUMYO=0.0
594      DO 41 JKL=1,IYTP
595      J1=IY1(JKL)
596      J2=IY2(JKL)
597      SALP=1.0-ALPY1(JKL)*FLOAT(NENN-1)
598      DO 42 JJJ=J1,J2
599      DO 42 KKK=1,3
600      YOSUI(JJJ,KKK)=YOSUI(JJJ,KKK)*SALP
601      SUMYO=SUMYO+YOSUI(JJJ,KKK)

```

```

** CHIKASUI **
601 42 CONTINUE
602 41 CONTINUE
603 JSIY=ISTAY*NNN-1
604 SUHYO=SUHYO/10000.0
605 WRITE(6,601) JSIY,SUHYO
606 40 CONTINUE
607 601 FORMAT(20X,'SYOWA',13,' NEW SOU-YOUSUI =',F10.0,' (10000H3)')
608 DO 12 IST=1,KSTEP
609 DO 12 KJ=1,3
610 KKK=KKK+1
611 DO 13 JH=1,N
612 ZZ(JH)=YOSUI(JH,KJ)
613 13 CONTINUE
614 WRITE(14'KKK) ZZ
615 12 CONTINUE
616 READ(16'7) A
617 IF(IYPR11.EQ.0) GO TO 20
618 DO 14 NN=1,3
619 NNN=NN
620 DO 16 J=1,N
621 YY(J)=0.0
622 16 CONTINUE
623 DO 17 I=1,N
624 YY(I)=YY(I)+YOSUI(I,NN)
625 17 CONTINUE
626 DO 18 I=1,IMAX
627 DO 18 J=1,JMAX
628 XX(I,J)=-99999.9
629 18 CONTINUE
630 DO 19 I=1,IMAX
631 JS=JSNO(I)
632 JE=JENO(I)
633 NKO=JE-JS+1
634 NJBASE=JS-1
635 KS=KSNO(I)
636 KE=KENO(I)
637 NKBASE=KS-1
638 DO 19 JJJ=1,NKO
639 JJH=NJBASE+JJJ
640 KKN=NKBASE+JJJ
641 XX(I,JJH)=YY(KKN)
642 YYZZ(NNN,I,JJH)=YYZZ(NNN,I,JJH)+XX(I,JJH)
643 19 CONTINUE
644 IF(NNN.GT.900) GO TO 14
645 IF(KCASE.NE.1) GO TO 14
646 CALL DPPP(NNN,XX,NHON,1,NEN)
647 14 CONTINUE
648 20 CONTINUE
649 DO 30 I=1,IMAX
650 DO 30 J=1,JMAX
651 30 XX(I,J)=-99999.9
652 DO 31 NN=1,3
653 NNN=NN
654 SUM=0.0
655 DO 32 I=1,IMAX
656 DO 32 J=1,JMAX
657 XX(I,J)=YYZZ(NNN,I,J)*30.0/10000.0
658 IF (XX(I,J).GT.0.0) SUM=SUM+XX(I,J)
659 32 CONTINUE
660 NHON=NHON+1
661 IF(NNN.GT.900) GO TO 31
662 IF(KCASE.NE.1) GO TO 31
663 CALL DPPP(NNN,XX,NHON,1,NEN)
664 WRITE(6,6) NNN,SUM
665 31 CONTINUE
666 4 FORMAT(1X,14,3F10.2)
667 5 FORMAT(20X)
668 6 FORMAT(1H1,11,10X,15,' S00',10X,'TOTAL YOSUI',F15.2,' (=10000.0)')
669 RETURN
670 9999 CONTINUE
671 WRITE(6,600) NHON,IYOSO
672 600 FORMAT(' 32X1 332 DATA N' 22X1 32X 11',11,5X,'NHON=',13,5X,
673 ' 'YOSO=NO=',13)
674 STOP
675 END

```

```

676      ** CHIKASU **
677      SUBROUTINE KEISAN(NENN)
678      DOUBLE PRECISION H,A7,P7,HXX7
679      COMMON /NO1/ I1L(20),N,H,NG,NC
680      COMMON /NO2/ X(330),Y(330),I1(590),JJ(590),KK(590),H0AD1(330)
681      COMMON /NO3/ NGKUBN,NSKXY(3,15),NEKXY(3,15)
682      COMMON /NO31/ DAKX(3,15),DAKY(3,15)
683      COMMON /NO4/ NCKUBN,N0Z(330),NSKZ(3,90),NEKZ(3,90)
684      COMMON /NO41/ DAKZ(3,90)
685      COMMON /SYU1/ HSTA(3,330)
686      COMMON /NO5/ SG(3,15),SC(3,90),HC(3)
687      COMMON /NO6/ KHON,IDAY,ISTAY,ISTAH
688      COMMON /NO7/ NBKO,NBNO(70)
689      COMMON /NO8/ COPTH(3,330),GDPTH(3,590)
690      COMMON /VOK1/ A7(590,35),P7(590),HXX7(590),H(330)
691      COMMON /VORK/ H0(330),XK(590),YK(590),S(590),DUHY(15237)
692      COMMON /VK1/ V(590),HB(330),VD(330)
693      DIMENSION MONDAY(12)
694      DATA MONDAY /31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/
695      NEND=KHON*30/IDAY
696      MON=ISTAH-1
697      MONST=30/IDAY
698      NEN=ISTAY*NENN-1
699      NN=0
700      DO 10 NHON=1,KHON
701      DO 10 NHONST=1,MONST
702      NN=NN+1
703      I1DAY=30/IDAY
704      KJJJ=MOD(NN,I1DAY)
705      IF (KJJJ.EQ.0) MON=MON+1
706      IF (MON.LE.12) GO TO 11
707      MON=1
708      NEN=NEN+1
709      11 CONTINUE
710      DT=IDAY
711      IF (NHONST.NE.MONST) GO TO 12
712      JJDAY=(MONST-1)*IDAY
713      DT=MONDAY(MON)-JJDAY
714      JJNEN=NEN+1925
715      JJKK=MOD(JJNEN,4)
716      IF (MON.EQ.2 .AND. JJKK.EQ.0) DT=29-JJDAY
717      12 CONTINUE
718      DO 13 J=1,N
719      V(J)=0.0
720      NSTEP=NN
721      NGBASE=(NN-1)*4+1
722      DO 14 I=1,NC
723      IJK=I
724      CALL GCCAL(IJK, NSTEP,DT)
725      14 CONTINUE
726      DO 15 I=1,NG
727      IJK=I
728      I01=7+I
729      READ(16,I01) S
730      NGD=NGBASE+I
731      READ(11'NGD) H0
732      IF (NN.GT.1) GO TO 21
733      DO 20 J=1,N
734      HSTA(I,J)=H0(J)
735      20 CONTINUE
736      21 CONTINUE
737      NDXK=(I-1)*2+1
738      NDYK=NDXK+1
739      READ(16'NDXK) XK
740      READ(16'NDYK) YK
741      CALL VDATA(NSTEP,IJK)
742      CALL NBDATA(NSTEP,IJK,1)
743      CALL GTOKU(N,H,DT,IJK)
744      DO 16 J=1,N
745      H0(J)=H(J)
746      16 CONTINUE
747      NGKAI=NGD+4
748      WRITE(11'NGKAI) H0
749      IF (KJJJ.NE.0) GO TO 17
750      WRITE(2,1) NEN,MON,I

```

```

      ** CHIKASUI **
751      WRITE(2,2) (HO(J),J=1,N)
752 17 CONTINUE
753      NGGABE=1+1
754      IF(NN.EQ.NEND) WRITE(11'NGGABE) HO
755 15 CONTINUE
756 10 CONTINUE
757      1 FORHAT(1615)
758      2 FORHAT(4E20.8)
759      RETURN
760      END
761      SUBROUTINE GCCAL(NN,NSTEP,DDT)
762      DOUBLE PRECISION HC
763      COMMON /NO1/ TITL(20),N,M,NG,NC
764      COMMON /NO2/ X(330),Y(330),II(590),JJ(590),KK(590),NOAD1(330)
765      COMMON /NO3/ NGKUBN,NSKXY(3,15),NEKXY(3,15)
766      COMMON /NO31/ DAKX(3,15),DAKY(3,15)
767      COMMON /NO4/ NCKUBN,NOZ(330),NSKZ(3,90),NEKZ(3,90)
768      COMMON /NO41/ DAKZ(3,90)
769      COMMON /NO5/ SG(3,15),SC(3,90),HC(3)
770      COMMON /NO6/ KHON,IDAY,ISTAY,ISTAN
771      COMMON /NO7/ NBKO,NBHO(70)
772      COMMON /NO8/ COPTH(3,330),GDPH(3,590)
773      COMMON /VORK/ GNS(330),GNE(330),XI(3300),HCO(90),HC(90),XKZ(590),
774      * VU(590),VL(590),SSC(590),ABE(330),DUHY(10579)
775      DO 10 I=1,N
776      XKZ(I)=0.0
777 10 CONTINUE
778      DO 11 I=1,NCKUBN
779      NS=NSKZ(NN,I)
780      NE=NEKZ(NN,I)
781      ZZ=DAKZ(NN,I)
782      ZSC=SC(NN,I)
783      DO 11 J=NS,NE
784      IJ=NOZ(J)
785      XKZ(IJ)=ZZ
786      SSC(IJ)=ZSC
787 11 CONTINUE
788      HEND=HC(NN)+1
789      KC=HC(NN)
790      IF (NSTEP.NE.1) GO TO 1
791      ID1=NN
792      ID2=NN+1
793      READ(11'ID1) GNS
794      READ(11'ID2) GNE
795      DO 12 I=1,N
796      NB=(I-1)*10
797      XS=GNS(I)
798      XE=GNE(I)
799      DP=(XE-XS)/KC
800      XX(NB+1)=XS
801      DO 13 J=1,KC
802      XX(NB+1+J)=XS+DP*FLOAT(J)
803 13 CONTINUE
804      DH=COPH(NN,I)
805      DZ=DH/FLOAT(KC)
806      VU(I)=XKZ(I)=(XX(NB+1)-XX(NB+2))/DZ*(-1.0)
807      VL(I)=XKZ(I)=(XX(NB+KC)-XX(NB+KC+1))/DZ*(-1.0)
808 12 CONTINUE
809      ID1=(NN-1)*2+1
810      ID2=ID1+1
811      WRITE(15'ID1) VU
812      WRITE(15'ID2) VL
813      NBASE=(NN-1)*10
814      DO 14 I=1,10
815      IS=(I-1)*330
816      DO 15 J=1,330
817      IJ=IS+J
818 15 ABE(J)=XX(IJ)
819      ND=NBASE+I
820      WRITE(12'ND) ABE
821 14 CONTINUE
822      RETURN
823
824      C
825 1 CONTINUE
      ID=NN

```

```

      ** CHIKASUI **
826      NBASE=(NN-1)*10
827      DO 20 I=1,10
828      IS=(I-1)*330
829      ND=NBASE+I
830      READ(12,ND) ABE
831      DO 20 J=1,330
832      IJ=IS+J
833      XX(IJ)=ABE(J)
834  20 CONTINUE
835      ID1=(NSTEP-1)*4+NM
836      ID2=ID1+1
837      READ(11,ID1) GNS
838      READ(11,ID2) GNE
839      ID151=(NSTEP-2)*6+(NM-1)*2+1
840      ID152=ID151+1
841      READ(15,ID151) VU
842      READ(15,ID152) VL
843      DO 21 I=1,N
844      HGI=GNS(I)
845      HGI1=GNE(I)
846      NB=(I-1)*10
847      DO 22 J=1,HEND
848      HCO(J)=XX(NB+J)
849  22 CONTINUE
850      OH=COPTH(NM,I)
851      VVU=VU(I)
852      VVL=VL(I)
853      IF (NM.EQ.3) VVL=-0.0
854      IF (ABS(OH).LT.1.0E-5) WRITE(6,600) NM,I,OH
855      IF (ABS(SSC(NM)).LT.1.0E-5) WRITE(6,601) NM,I,SSC(NM)
856  600 FORMAT(' GCCAL NM,I,OH',2I5,F10.3)
857  601 FORMAT(' GCCAL NM,I,SSC',2I5,F10.3)
858      CALL CIOKU(KC,OH,HGI,HGI1,HCO,HC,SSC(NM),XKZ(I),DDT,VVU,VVL)
859      DO 23 J=1,HEND
860      XX(NB+J)=HC(J)
861  23 CONTINUE
862      DZ=OH/FLOAT(KC)
863      VU(I)=-XKZ(I)*(HC(1)-HC(2))/DZ
864      VL(I)=-XKZ(I)*(HC(HEND-1)-HC(HEND))/DZ
865  21 CONTINUE
866      ID151=(NSTEP-1)*6+(NM-1)*2+1
867      ID152=ID151+1
868      WRITE(15,ID151) VU
869      WRITE(15,ID152) VL
870      NBASE=(NM-1)*10
871      DO 24 I=1,10
872      IS=(I-1)*330
873      DO 25 J=1,330
874      IJ=IS+J
875      ABE(J)=XX(IJ)
876  25 CONTINUE
877      ND=NBASE+I
878      WRITE(12,ND) ABE
879  24 CONTINUE
880      RETURN
881      END
882      SUBROUTINE CIOKU(KC,OH,HGI,HGI1,HCO,HC,S,XKZ,DDT,VVU,VVL)
883      DOUBLE PRECISION HC, A, P, ZZ
884      COMMON /NO10/ AL
885      DIMENSION HCO(90),HC(90),A(90,3),P(90)
886      DZ=OH/KC
887      ZZ=XKZ*DDT/(S*DZ*DZ)
888      H=HC+1
889      IF(HC.EQ.1) GO TO 1
890      DO 10 I=1,H
891      A(I,1)=-ZZ
892      A(I,2)=2.0*ZZ+1.0
893      A(I,3)=-ZZ
894      P(I)=HCO(I)
895      IF(1.NE.2 .AND. 1.NE.HC) GO TO 10
896      IF(1.EQ.2) GO TO 11
897      IF(1.EQ.HC) GO TO 12
898  11 CONTINUE
899      IF (VVU.GT.0.0) GO TO 10
900      ZZ=XKZ*DDT/(AL*S*DZ*DZ)

```

```

901      ** CHIKASUI **
902      A(2,1)=-.222
903      A(2,2)=2.0*222+1
904      A(2,3)=-.222
905      GO TO 10
906 12 CONTINUE
907      IF (VVL.LT.0.0) GO TO 10
908      222=XK2+D91/(AL*S=D2=D2)
909      A(HC,1)=-.222
910      A(HC,2)=2.0*222+1
911      A(HC,3)=-.222
912 10 CONTINUE
913      A(1,1)=0.0
914      A(1,2)=1.0
915      A(1,3)=0.0
916      P(1)=HGI
917      A(H,1)=0.0
918      A(H,2)=1.0
919      A(H,3)=0.0
920      P(H)=HGI
921      CALL BBAND(H,A,P,HC)
922      RETURN
923 1 CONTINUE
924      HC(1)=HGI
925      HC(2)=HGI
926      RETURN
927      END
928      SUBROUTINE BBAND(H,B,C,X)
929      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
930      DIMENSION B(90,3),C(90),X(90)
931      NBA=2
932      NX=1
933      NE=N-1
934      DO 10 K=1,NE
935      NXI=NX
936      KBN=N-K
937      IF (KBN-NBA) 11,12,12
938 11 NXI=KBN
939 12 CONTINUE
940      PIV=1.0/B(K,NBA)
941      DO 13 I=1,NXI
942      KK=K+I
943      NBAI=NBA-1
944      PIVV=B(KK,NBAI)*PIV
945      DO 14 J=1,NXI
946      JJ=NBA+J-1
947      NBAJ=NBA+J
948      B(KK,JJ)=B(KK,JJ)-B(K,NBAJ)*PIVV
949      C(KK)=C(KK)-C(K)*PIVV
950 13 CONTINUE
951 10 CONTINUE
952      X(N)=C(N)/B(N,NBA)
953      DO 15 I=2,NBA
954      ZZ=0.0
955      JK=N+1-I
956      DO 16 J=2,I
957      JKJ=JK+J-1
958      NXJ=NX+J
959      16 ZZ=ZZ+B(JK,NXJ)*X(JKJ)
960      X(JK)=(C(JK)-ZZ)/B(JK,NBA)
961 15 CONTINUE
962      KBE=N-NBA
963      DO 17 I=1,KBE
964      JK=N-1-NBA+1
965      ZZ=0.0
966      DO 18 J=2,NBA
967      JKJ=JK+J-1
968      NXJ=NX+J
969      18 ZZ=ZZ+B(JK,NXJ)*X(JKJ)
970      X(JK)=(C(JK)-ZZ)/B(JK,NBA)
971 17 CONTINUE
972      RETURN
973      END
974      SUBROUTINE VDATA(NH,IJK)
975      COMMON /N01/ TITL(20),N,M,NG,NC
976      COMMON /N02/ X(330),Y(330),II(590),JJ(590),KK(590),NOAD1(330)

```

```

976      ** CHIKASUI **
977      COMMON /VK1/ V(590),HB(330),VD(330)
978      DIMENSION AA(330),VU(330),VL(330)
979      READ(16,7) AA
980      ID1=(NN-1)*3+1JK
981      READ(14,101) VD
982      ICL=(NN-1)*6+1JK*2
983      ICU=ICL+1
984      READ(15,101) VL
985      IF (1JK.NE.3) READ(15,101) VU
986      IF (1JK.EQ.3) GO TO 1
987      DO 10 I=1,M
988      V(I)=-(VL(11(I)) + VL(JJ(I)) + VL(KK(I)))/3.0
989      *
990      + (VU(11(I)) + VU(JJ(I)) + VU(KK(I)))/3.0
991      10 CONTINUE
992      RETURN
993      1 CONTINUE
994      DO 20 I=1,M
995      V(I)=-(VL(11(I)) + VL(JJ(I)) + VL(KK(I)))/3.0
996      20 CONTINUE
997      RETURN
998      END
999      SUBROUTINE HBDATA(NN,1JK,NTYPE)
1000      COMMON /H07/ HBKO,HBNO(70)
1001      COMMON /VK1/ V(590),DATA(330),VD(330)
1002      DIMENSION DATA0(330),DATA1(330)
1003      IF(NTYPE.EQ.2) GO TO 1
1004      IDO=(NN-1)*3+1JK
1005      ID1=IDO+3
1006      READ(13,100) DATA0
1007      READ(13,101) DATA1
1008      DO 10 I=1,NBKO
1009      DATA(I)=(DATA0(I)+DATA1(I))/2.0
1010      RETURN
1011      1 CONTINUE
1012      ID1=NN*3+1JK
1013      READ(13,101) DATA
1014      RETURN
1015      END
1016      SUBROUTINE GTOKU(N,H,DT,1JK)
1017      DOUBLE PRECISION H,A,P,ZA,ZB,A11,A12,A13,A21,A22,A23,A31,A32,
1018      *
1019      A33,HXXX
1020      COMMON /VK1/ V(590),HB(330),VD(330)
1021      COMMON /H08/ GPTH(3,330),GDPH(3,590)
1022      COMMON /H011/ HALKO,HALNO(20),HPTNO(20,2)
1023      COMMON /H0112/ ALVAL(20,3),ALQ(20,3)
1024      COMMON /HBANDV/ HBB
1025      COMMON /H02/ X(330),Y(330),11(590),JJ(590),KK(590),HOADI(330)
1026      COMMON /H07/ HBKO,HBNO(70)
1027      COMMON /VOK1/ A(590,35),P(590),HXXX(590),H(330)
1028      COMMON /VORK/ HO(330),XI(590),YI(590),SS(590),DUMY(15237)
1029      DO 10 I=1,M
1030      NI=HOADI(I)
1031      P(NI)=0.0
1032      DO 10 J=1,NBKO
1033      A(I,J)=0.0
1034      HBC=HBB/2+1
1035      DO 20 I=1,H
1036      S = SS(I)
1037      NI=11(I)
1038      NJ=JJ(I)
1039      NK=KK(I)
1040      NI1=NI
1041      NJ1=NJ
1042      NK1=NK
1043      NI=HOADI(NI)
1044      NJ=HOADI(NJ)
1045      NK=HOADI(NK)
1046      PX=(X(NI1)+X(NJ1)+X(NK1))/3.0
1047      PY=(Y(NI1)+Y(NJ1)+Y(NK1))/3.0
1048      XI=X(NI1)-PX
1049      XJ=X(NJ1)-PX
1050      XK=X(NK1)-PX
1051      YI=Y(NI1)-PY
1052      YJ=Y(NJ1)-PY
1053      YK=Y(NK1)-PY

```

```

** CHIKASUI **
1051 AREA=ABS(YI=(XJ-YK)+YJ=(YK-XI)+YK*(X1-XJ))/2.0
1052 AR=1.0
1053 AAA=AREA/DT/3.0=S
1054 P(NI)=P(NI)+HO(NI1)*AAA
1055 P(NK)=P(NK)+HO(NK1)*AAA
1056 P(NJ)=P(NJ)+HO(NJ1)*AAA
1057 AI=XJ-YK-XK=YJ
1058 BI=YJ-YK
1059 CI=YK-XJ
1060 AJ=YK-YI-XI=YK
1061 BJ=YK-YI
1062 CJ=XI-YK
1063 AK=XI=YJ-XJ=YI
1064 BK=YI-YJ
1065 CK=XJ-XI
1066 ZA=XT(1)/AREA/4.0
1067 ZB=YI(1)/AREA/4.0
1068 A11=(ZA*BI+BI+ZB*CI+CI)*AR+AAA
1069 A12=(ZA*BJ+BI+ZB*CJ+CI)*AR
1070 A13=(ZA*BK+BI+ZB*CK+CI)*AR
1071 A21=(ZA*BI+BJ+ZB*CI+CJ)*AR
1072 A22=(ZA*BJ+BJ+ZB*CJ+CJ)*AR+AAA
1073 A23=(ZA*BK+BJ+ZB*CK+CJ)*AR
1074 A31=(ZA*BI+BK+ZB*CI+CK)*AR
1075 A32=(ZA*BJ+BK+ZB*CJ+CK)*AR
1076 A33=(ZA*BK+BK+ZB*CK+CK)*AR+AAA
1077 A(NI,HBC)=A(NI,HBC)+A11
1078 A(NJ,HBC)=A(NJ,HBC)+A22
1079 A(NK,HBC)=A(NK,HBC)+A33
1080 JI=NJ-NI+HBC
1081 A(NI,JI)=A(NI,JI)+A12
1082 KI=NK-NI+HBC
1083 A(NI,KI)=A(NI,KI)+A13
1084 IJ=NI-NJ+HBC
1085 A(NJ,IJ)=A(NJ,IJ)+A21
1086 KJ=NK-NJ+HBC
1087 A(NJ,KJ)=A(NJ,KJ)+A23
1088 IK=NI-NK+HBC
1089 A(NK,IK)=A(NK,IK)+A31
1090 JK=NJ-NK+HBC
1091 A(NK,JK)=A(NK,JK)+A32
1092 VW=V(1)*AREA/3.0
1093 P(NI)=P(NI)+VW
1094 P(NJ)=P(NJ)+VW
1095 P(NK)=P(NK)+VW
1096 20 CONTINUE
1097 DO 21 I=1,N
1098 NI=NOADI(1)
1099 P(NI)=P(NI)+VD(1)
1100 21 CONTINUE
1101 IF (NALKO.EQ.0) GO TO 30
1102 DO 40 I=1,M
1103 DO 41 J=1,NALKO
1104 IF (HALNO(J).NE.1) GO TO 41
1105 IS1=HPTNO(J,1)
1106 IR1=HPTNO(J,2)
1107 XLLL=SQRT( (X(IS1)-X(IR1))*(X(IS1)-X(IR1))+(Y(IS1)-Y(IR1))*
1108 * (Y(IS1)-Y(IR1)) )
1109 NIS1=IS1
1110 NIR1=IR1
1111 NIS1=NOADI(NIS1)
1112 NIR1=NOADI(NIR1)
1113 P(NIS1)=P(NIS1)-XLLE*ALQ(J,IJK)/2.0
1114 P(NIR1)=P(NIR1)-XLLE*ALQ(J,IJK)/2.0
1115 A(NIS1,HBC)=A(NIS1,HBC)+XLLE*ALVAL(J,IJK)/3.0
1116 41 CONTINUE
1117 40 CONTINUE
1118 30 CONTINUE
1119 DO 50 I=1,NBKO
1120 NI=NBNO(1)
1121 ZZ=HB(1)
1122 NI=NOADI(NI)
1123 DO 51 JK=1,NBB
1124 A(NI,JK)=0.0
1125 51 CONTINUE

```

```

1126      ** CHIKASUI **
1127      A(NI,HBC)=1.0
1128      P(NI)=ZZ
1129      50 CONTINUE
1130      CALL BAND(N,HBB)
1131      DO 52 I=1,N
1132      NI=NOAOI(I)
1133      H(NI)=HXXX(I)
1134      52 CONTINUE
1135      RETURN
1136      END
1137      SUBROUTINE BAND(N,HBB)
1138      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
1139      COMMON /VOK1/ B(590,35),C(590),X(590),DUHY(330)
1140      NBA=HBB/2+1
1141      NX=NBA-1
1142      NE=N-1
1143      DO 10 K=1,NE
1144      NXX=NX
1145      KBN=N-K
1146      IF(KBN-NBA) 11,12,12
1147      11 NXX=KBN
1148      12 CONTINUE
1149      PIV=1.0/B(K,NBA)
1150      DO 13 I=1,NXX
1151      KK=K+I
1152      NBAI=NBA-I
1153      PIVV=B(KK,NBAI)*PIV
1154      DO 14 J=1,NXX
1155      JJ=NBA+J-I
1156      NBAJ=NBA+J
1157      B(KK,JJ)=B(KK,JJ)-B(K,NBAJ)*PIVV
1158      C(KK)=C(KK)-C(K)*PIVV
1159      13 CONTINUE
1160      10 CONTINUE
1161      X(N)=C(N)/B(N,NBA)
1162      DO 15 I=2,NBA
1163      ZZ=0.0
1164      JK=N+1-I
1165      DO 16 J=2,I
1166      JKJ=JK+J-1
1167      NXX=NX+J
1168      ZZ=ZZ+B(JK,NXX)*X(JKJ)
1169      X(JK)=(C(JK)-ZZ)/B(JK,NBA)
1170      15 CONTINUE
1171      KBE=N-NBA
1172      DO 17 I=1,KBE
1173      JK=N-I-NBA+1
1174      ZZ=0.0
1175      DO 18 J=2,NBA
1176      JKJ=JK+J-1
1177      NXX=NX+J
1178      ZZ=ZZ+B(JK,NXX)*X(JKJ)
1179      X(JK)=(C(JK)-ZZ)/B(JK,NBA)
1180      17 CONTINUE
1181      RETURN
1182      END
1183      SUBROUTINE POUT(MENN)
1184      COMMON /NO1/ TITL(20),N,H,NG,NC
1185      COMMON /NO3/ MGKUBH,MSKXY(3,15),NEKXY(3,15)
1186      COMMON /NO31/ DAKX(3,15),DAKY(3,15)
1187      COMMON /NO4/ MCKUBH,NOZ(330),MSKZ(3,90),NEKZ(3,90)
1188      COMMON /NO41/ DAKZ(3,90)
1189      COMMON /NO5/ SG(3,15),SC(3,90),MC(3)
1190      COMMON /NO6/ KHON,IOAY,ISTAY,ISTAH
1191      COMMON /SOD1/ ZZOO(4,30,20)
1192      COMMON /NO7/ NBKO,NBHO(70)
1193      COMMON /NO9/ IHAX,JHAX,INO(27),JSHO(27),JENO(27),
1194      * KSHO(27),KENO(27),IYPRIT
1195      COMMON /VORK/ XX(330),DA(10),ZZZ(27,15),ZZO1(27,15),DUHY(16187)
1196      MENO=KHON/30/IOAY
1197      KEY=30/IOAY*12
1198      IKEY1=30/IOAY
1199      MEN=ISTAY+MENH-1
1200      KK=0
1201      MON=-1

```

```

1201      ** CHIKASUI **
1202      NNEND=NNEND+1
1203      ICKK=1
1204      IF(1DAY.EQ.30) ICKK=0
1205      DO 10 I=1,NNEND
1206      II=1-1
1207      KJJJ=MOD(I,1KEYI)
1208      IF(KJJJ.EQ.1CKK) MON=MON+1
1209      DO 11 J=1,4
1210      JJ=J-1
1211      KK=KK+1
1212      READ(11,'KK') XX
1213      DO 12 HI=1,IMAX
1214      DO 12 HJ=1,JMAX
1215      ZZZ(HI,HJ)=-99999.9
1216      ZZO1(HI,HJ)=-99999.9
1217      12 CONTINUE
1218      DO 13 HI=1,IMAX
1219      JS=JSNO(HI)
1220      JE=JENO(HI)
1221      NKO=JE-JS+1
1222      NJBASE=JS-1
1223      KS=KSNO(HI)
1224      KE=KENO(HI)
1225      NKBASE=KS-1
1226      DO 14 JJ=1,NKO
1227      JJH=NJBASE+JJJ
1228      KKH=NKBASE+JJJ
1229      ZZO(HI,JJH)=XX(KKH)-ZZO(J,HI,JJH)
1230      ZZO(J,HI,JJH)=XX(KKH)
1231      14 ZZZ(HI,JJH)=XX(KKH)
1232      13 CONTINUE
1233      IF(KJJJ.NE.1CKK) GO TO 11
1234      IF(1.EQ.1) GO TO 11
1235      CALL DPPP(JJ,ZZZ,MON,2,NN)
1236      IF(1.EQ.NNEND) WRITE(20,2) (XX(LL),LL=1,N)
1237      2 FORCAT(8F10.3)
1238      11 CONTINUE
1239      10 CONTINUE
1240      1 FORCAT(1H1)
1241      RETURN
1242      END
1243      SUBROUTINE SYUSHI(NENN)
1244      COMMON /WORK/ CO(6,330),C1(6,330),A(590),AA(330),
1245      * C(6,330),P(3,330),GTOTAL(3,72,10),AATT(4),
1246      * TT2(7,72),XX(590),TI(7,72),TOTAL(7),CTOTAL(7,330),
1247      * GK(590),GY(590),HO(330),H1(330),H(330),
1248      * S(590),BTOTAL(3,72),ATOTAL(3,72),HTOTAL(3,72)
1249      COMMON /NO1/ TITL(20),N,H,NG,NC
1250      COMMON /NO2/ X(330),Y(330),II(590),JJ(590),KK(590),NOAD1(330)
1251      COMMON /NO6/ KHON,1DAY,1STAY,1STAN
1252      COMMON /NO7/ NOKO,NBNO(70)
1253      COMMON /SYU1/ HISTA(3,330)
1254      COMMON /SYU2/ SYQ(90),BBTI(3,5),SHYQ(12,30)
1255      COMMON /NO9/ IHAX,JHAX,IHO(27),JSNO(27),JENO(27),
1256      * KSN(27),KENO(27),IYPRIT
1257      COMMON /IBDATA/ NHKO,NHNO(200),NHS(200),NHE(200),NNNO(200)
1258      COMMON /HARA/ DHC(12,4,330),SDHC(4,330),SSDH(12,330)
1259      DIMENSION MONDAY(12),IA(7),BHTI(72,3,5)
1260      DATA MONDAY /31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/
1261      NEND=KHON*30/1DAY
1262      MONST=30/1DAY
1263      JNENJ=1STAY+NENN-1
1264      KJENJ=JNENJ+1925
1265      KKNENJ=MOD(KJENJ,4)
1266      WRITE(20,2) KHON,NENN
1267      2 FORCAT(16I5)
1268      DO 300 I=1,12
1269      DO 300 J=1,30
1270      SHYQ(I,J)=0.0
1271      300 CONTINUE
1272      DO 10 I=1,7
1273      DO 10 J=1,72
1274      TT(I,J)=0.0
1275      10 TT2(I,J)=0.0
1276      DO 11 I=1,4

```

```

1276      ** CHIKASUI **
1277      DO 11 J=1,330
1278      SDHC(1,J)=0.0
1279      11 CTOTAL(1,J)=0.0
1280      DO 77 I=1,KMON
1281      SSOH(1,J)=0.0
1282      77 CONTINUE
1283      DO 12 I=1,6
1284      12 READ(15'I) (C0(1,J),J=1,330)
1285      READ(16'7) A
1286      DO 13 I=1,N
1287      13 AA(I)=0
1288      DO 14 I=1,N
1289      I1=II(I)
1290      J1=JJ(I)
1291      K1=KK(I)
1292      AB=A(I)/3.0
1293      AA(I1)=AA(I1)+AB
1294      AA(J1)=AA(J1)+AB
1295      14 AA(K1)=AA(K1)+AB
1296      IJ=0
1297      DO 15 NMON=1,KMON
1298      DO 15 NMONST=1,MONST
1299      IJ=IJ+1
1300      IKDAY=IDAY
1301      IF(NMONST.NE.MONST) GO TO 75
1302      IKDAY=MONDAY(NMON)-(MONST-1)*IDAY
1303      IF(NMON.EQ.2 .AND. KKNENJ.EQ.0) IKDAY=29-(MONST-1)*IDAY
1304      75 CONTINUE
1305      KBASE=(IJ-1)*6
1306      DO 16 I=1,6
1307      KJ=KBASE+I
1308      16 READ(15'KJ) (C1(1,J),J=1,330)
1309      DO 17 I=1,6
1310      DO 18 J=1,N
1311      18 C(1,J)=C1(1,J)*IKDAY
1312      17 CONTINUE
1313      IBASE=(IJ-1)*3
1314      DO 19 I=1,3
1315      KJ=IBASE+I
1316      READ(14'KJ) (P(1,J),J=1,330)
1317      DO 20 J=1,N
1318      20 P(1,J)=P(1,J)*IKDAY
1319      DO 21 J=1,NBKO
1320      I1JJ=NBNO(J)
1321      P(1,I1JJ)=0.0
1322      21 CONTINUE
1323      19 CONTINUE
1324      DO 22 I=1,N
1325      CTOTAL(1,I)=CTOTAL(1,I)+C(1,I)*AA(I)
1326      22 XX(I)=C(1,I)*AA(I)
1327      KSJJ=IJ
1328      SUM=0.0
1329      DO 23 I=1,N
1330      23 SUM=SUM+XX(I)
1331      TI(1,IJ)=SUM
1332      DO 24 I=1,N
1333      XX(I)=C(2,I)-C(1,I)
1334      CTOTAL(2,I)=CTOTAL(2,I)+XX(I)*AA(I)
1335      SDHC(1,I)=SDHC(1,I)+XX(I)*1000.
1336      DHC(NMON,1,I)=XX(I)*1000.
1337      24 CONTINUE
1338      SUM=0.0
1339      DO 25 I=1,N
1340      25 SUM=SUM+XX(I)*AA(I)
1341      TI(2,IJ)=SUM
1342      DO 26 I=1,N
1343      26 XX(I)=0.0
1344      DO 27 J=1,N
1345      I1=II(J)
1346      J1=JJ(J)
1347      K1=KK(J)
1348      AB=A(J)/9.0
1349      AAB8=(C(3,I1)+C(3,J1)+C(3,K1)-C(2,I1)-C(2,J1)-C(2,K1))*AB
1350      XX(I1)=XX(I1)+AAB8

```

```

1351      ** CHIKASUI **
1352      XX(J1)=XX(J1)+AABB
1353      XX(K1)=XX(K1)+AABB
1354      27 CONTINUE
1355      SUM=0.0
1356      DO 28 I=1,N
1357      SUM=SUM+P(1,I)
1358      28 XX(I)=XX(I)+P(1,I)
1359      TT(3,IJ)=SUM
1360      DO 29 I=1,N
1361      29 CTOTAL(3,I)=CTOTAL(3,I)+XX(I)
1362      SUM=0.0
1363      DO 30 I=1,N
1364      30 SUM=SUM+XX(I)
1365      TT(3,IJ)=SUM
1366      DO 31 I=1,N
1367      XX(I)=C(4,I)-C(3,I)
1368      CTOTAL(4,I)=CTOTAL(4,I)+XX(I)+AA(1)
1369      SDHC(2,I)=SDHC(2,I)+XX(I)=1000.
1370      DHC(NHON,2,I)=XX(I)=1000.
1371      31 CONTINUE
1372      SUM=0.0
1373      DO 32 I=1,N
1374      32 SUM=SUM+XX(I)+AA(1)
1375      TT(4,IJ)=SUM
1376      DO 33 I=1,N
1377      33 XX(I)=0.0
1378      DO 34 J=1,M
1379      J1=JJ(J)
1380      K1=KK(J)
1381      AB=A(J)/9.0
1382      AABB=(C(5,I1)+C(5,J1)+C(5,K1)-C(4,I1)-C(4,J1)-C(4,K1))/AB
1383      XX(I1)=XX(I1)+AABB
1384      XX(J1)=XX(J1)+AABB
1385      XX(K1)=XX(K1)+AABB
1386      34 CONTINUE
1387      SUM=0.0
1388      DO 35 I=1,N
1389      SUM=SUM+P(2,I)
1390      35 XX(I)=XX(I)+P(2,I)
1391      TT(5,IJ)=SUM
1392      DO 36 I=1,N
1393      36 CTOTAL(5,I)=CTOTAL(5,I)+XX(I)
1394      SUM=0.0
1395      DO 37 I=1,N
1396      37 SUM=SUM+XX(I)
1397      TT(5,IJ)=SUM
1398      DO 38 I=1,N
1399      XX(I)=C(6,I)-C(5,I)
1400      CTOTAL(6,I)=CTOTAL(6,I)+XX(I)+AA(1)
1401      SDHC(3,I)=SDHC(3,I)+XX(I)=1000.
1402      DHC(NHON,3,I)=XX(I)=1000.
1403      38 CONTINUE
1404      SUM=0.0
1405      DO 39 I=1,N
1406      39 SUM=SUM+XX(I)+AA(1)
1407      TT(6,IJ)=SUM
1408      DO 40 I=1,N
1409      40 XX(I)=0.0
1410      DO 41 J=1,M
1411      J1=JJ(J)
1412      K1=KK(J)
1413      AB=A(J)/9.0
1414      AABB=(C(6,I1)-C(6,J1)-C(6,K1))/AB
1415      XX(I1)=XX(I1)+AABB
1416      XX(J1)=XX(J1)+AABB
1417      XX(K1)=XX(K1)+AABB
1418      41 CONTINUE
1419      SUM=0.0
1420      DO 42 I=1,N
1421      SUM=SUM+P(3,I)
1422      42 XX(I)=XX(I)+P(3,I)
1423      TT(7,IJ)=SUM
1424      DO 43 I=1,N

```

```

** CHIKASUI **
1426 43 CTOTAL(7,1)=CTOTAL(7,1)+XX(1)
1427     SUM=0.0
1428     DO 44 I=1,N
1429 44 SUM=SUM+XX(1)
1430     TT(7,1J)=SUM
1431         DO 2000 I=1,N
1432             DHC(NHON,4,1)=DHC(NHON,1,1)+DHC(NHON,2,1)+DHC(NHON,3,1)
1433 2000     SDHC(4,1)=SDHC(1,1)+SDHC(2,1)+SDHC(3,1)
1434     DO 45 I=1,6
1435     DO 45 J=1,N
1436     CO(1,J)=C1(1,J)+AA(J)
1437 45 CONTINUE
1438     SHYQ(NHON,1)=SHYQ(NHON,1)+TT(1,1J)*0.0001
1439     SHYQ(NHON,2)=SHYQ(NHON,2)+TT(1,1J)*0.0001
1440     SHYQ(NHON,3)=SHYQ(NHON,3)+TT(2,1J)*0.0001
1441     SHYQ(NHON,9)=SHYQ(NHON,9)+TT(4,1J)*0.0001
1442     SHYQ(NHON,15)=SHYQ(NHON,15)+TT(6,1J)*0.0001
1443 15 CONTINUE
1444     DO 2010 NHON=1,KHON
1445     DO 2010 I=1,N
1446     DO 2010 J=1,NHON
1447     SSDH(NHON,1)=SSDH(NHON,1)+DHC(J,4,1)
1448 2010 CONTINUE
1449     DO 1250 LHON=1,KHON
1450     N1HON=LHON+128H-1
1451     NHON=MOD(N1HON-1,12)+1
1452     JNENL=JNENJ+(N1HON-1)/12
1453     CALL DHCOUT(LHON,JNENL,NHON,N)
1454 1250 CONTINUE
1455     CALL SDHCOUT(JNENL,NHON,N)
1456     DO 46 I=1,7
1457     DO 47 J=1,N
1458 47 XX(J)=CTOTAL(1,J)/1000.0
1459     LL=1
1460     CALL SPPP(LL, XX)
1461 46 CONTINUE
1462     DO 1046 I=1,4
1463     DO 1047 J=1,N
1464 1047 XX(J)=SDHC(1,J)
1465     LL=1
1466     CALL SPPPC(LL, XX)
1467 1046 CONTINUE
1468     WRITE(6,100)
1469     WRITE(6,101)
1470     ISUND=0
1471     I=0
1472     DO 48 LHON=1,KHON
1473     N1HON=LHON+128H-1
1474     NHON=MOD(N1HON-1,12)+1
1475     JNENL=JNENJ+(N1HON-1)/12
1476     DO 48 NHONST=1,NHONST
1477     I=I+1
1478     IKDAY=IDAY
1479     IF(NHONST.NE.NHONST) GO TO 99
1480     IKDAY=HONDAY(NHON)-(NHONST-1)*IDAY
1481     IF(NHON.EQ.2 .AND. KKNENJ.EQ.0) IKDAY=29-(NHONST-1)*IDAY
1482 99 CONTINUE
1483     ISUND=ISUND+IKDAY
1484     IF(ISUND.GE.HONDAY(NHON)) ISUND=HONDAY(NHON)
1485     DO 88 J=1,7
1486 88 TA(J)=TT(J,1)*0.0001
1487     WRITE(6,102) I,JNENL,NHON,ISUND,(TA(J),J=1,7)
1488     IF(ISUND.EQ.HONDAY(NHON)) ISUND=0
1489 48 CONTINUE
1490     DO 49 I=1,7
1491 49 TOTAL(I)=0.0
1492     DO 50 J=1,7
1493     DO 51 I=1,NEND
1494 51 TOTAL(J)=TOTAL(J)+TT(J,1)*0.0001
1495 50 CONTINUE
1496     WRITE(6,103) (TOTAL(J),J=1,7)
1497     SYQ(1)=TOTAL(1)
1498     SYQ(2)=TOTAL(1)
1499     SYQ(3)=TOTAL(2)
1500     SYQ(9)=TOTAL(4)

```

```

1501      ** CHIKASUI **
1502      SYQ(15)=TOTAL(6)
1503      IJHAX=-99
1504      DO 52 I=1,NHKO
1505      KJ=NNNO(I)
1506      IF(KJ.GT.IJHAX) IJHAX=KJ
1507      52 CONTINUE
1508      DO 53 I=1,NG
1509      DO 53 J=1,NEND
1510      BTOTAL(I,J)=0.0
1511      HTOTAL(I,J)=0.0
1512      ATOTAL(I,J)=0.0
1513      DO 53 K=1,IJHAX
1514      53 GTOTAL(I,J,K)=0.0
1515      PAI=3.141592
1516      DO 54 NGG=1,NG
1517      DO 55 I=1,4
1518      55 AATI(I)=0.0
1519      NB=(NGG-1)*2+1
1520      READ(16,NB) GK
1521      NB1=NB+1
1522      READ(16,NB1) GY
1523      IJK=NGG
1524      ID1=7+IJK
1525      READ(16,ID1) S
1526      DO 56 NJ=1,NEND
1527      NB=(NJ-1)*4+NGG+1
1528      READ(11,NB) HO
1529      IF(NJ.GT.1) GO TO 200
1530      DO 201 J=1,N
1531      HO(J)=HSTA(NGG,J)
1532      201 CONTINUE
1533      200 CONTINUE
1534      NB1=NB+4
1535      READ(11,NB1) H1
1536      DO 57 J=1,N
1537      H(J)=(HO(J)+H1(J))/0.5
1538      DO 58 K=1,NHKO
1539      KKN0=NNNO(K)
1540      KJ=NNNO(K)
1541      XKK=GK(KJ)
1542      YKK=GY(KJ)
1543      AAR=0.5/A(KJ)
1544      III=11(KJ)
1545      JJJ=JJ(KJ)
1546      KKK=KK(KJ)
1547      XI=X(III)
1548      XJ=X(JJJ)
1549      XK=X(KKK)
1550      YI=Y(III)
1551      YJ=Y(JJJ)
1552      YK=Y(KKK)
1553      BI=(YJ-YK)*AAR
1554      BJ=(YK-YI)*AAR
1555      BK=(YI-YJ)*AAR
1556      CI=(XK-XJ)*AAR
1557      CJ=(XJ-XI)*AAR
1558      CK=(XI-XK)*AAR
1559      UU=- (BI+H(III)*BJ+H(JJJ)*BK+H(KKK))*XKK
1560      VV=- (CI+H(III)*CJ+H(JJJ)*CK+H(KKK))*YKK
1561      IS=NHS(K)
1562      IE=NHE(K)
1563      XS=X(IS)
1564      XE=X(IE)
1565      YS=Y(IS)
1566      YE=Y(IE)
1567      XLL=SQR( (XE-XS)*(XE-XS)+(YE-YS)*(YE-YS))
1568      XL=XE-XS
1569      YY=YE-YS
1570      ZZ=ABS(XL)
1571      IF(ZZ.LT.0.00001) GO TO 59
1572      IF(XL) 60,59,61
1573      60 CONTINUE
1574      ZXY=ABS(YY/XL)
1575      ZZZ=ATAN(ZXY)
1576      IF (YY) 62,63,64

```

```

** CHIKASUI **
1576 62 XANGL=PA1+222
1577 GO TO 65
1578 63 XANGL=PA1
1579 GO TO 65
1580 64 XANGL=PA1-222
1581 GO TO 65
1582 59 CONTINUE
1583 XCONT=0.5
1584 IF(YY.LT.0.00001) XCONT=1.5
1585 XANGL=XCONT*PA1
1586 GO TO 65
1587 61 CONTINUE
1588 ZXY=ABS(YY/XL)
1589 ZZZ=ATAN(ZXY)
1590 IF(YY) 66,67,68
1591 66 XANGL=2.0*PA1-ZZZ
1592 GO TO 65
1593 67 XANGL=0.0
1594 GO TO 65
1595 68 XANGL=ZZZ
1596 65 CONTINUE
1597 QQ=( UU*SIN(XANGL)-VV*COS(XANGL))*0.5*IDAY*XLL
1598 GTOTAL(NGG,NJ,KKNO)=GTOTAL(NGG,NJ,KKNO)+QQ
1599 58 CONTINUE
1600 DO 69 I=1,IJHAX
1601 BTOTAL(NGG,NJ)=BTOTAL(NGG,NJ)-GTOTAL(NGG,NJ,I)
1602 69 CONTINUE
1603 ASUM=0.0
1604 DO 70 J=1,H
1605 I11=I1(J)
1606 JJJ=JJ(J)
1607 KKK=KK(J)
1608 H10=HO(I11)
1609 HJ0=HO(JJJ)
1610 HK0=HO(KKK)
1611 H11=H1(I11)
1612 HJ1=H1(JJJ)
1613 HK1=H1(KKK)
1614 ASUM=ASUM+(H11+HJ1+HK1-H10-HK0-HJ0)*A(J)*S(J)/3.0
1615 70 CONTINUE
1616 HTOTAL(NGG,NJ)=ASUM
1617 56 CONTINUE
1618 54 CONTINUE
1619 DO 71 I=1,IJHAX
1620 ISUMD=0
1621 WRITE(6,104) I
1622 NJ=0
1623 STA1=0.0
1624 STA2=0.0
1625 STA3=0.0
1626 DO 72 LMON=1,KMON
1627 N1MON=LMON+ISTAN-1
1628 NMON=MOD(N1MON-1,12)+1
1629 JNENL=JNENJ+(N1MON-1)/12
1630 DO 72 NMONST=1,MONST
1631 NJ=NJ+1
1632 IKDAY=IDAY
1633 IF(NMONST.NE.MONST) GO TO 98
1634 IKDAY=MONDAY(NMON)-(MONST-1)*IDAY
1635 IF(NMON.EQ.2 .AND. KKNEJ.EQ.0) IKDAY=29-(MONST-1)*IDAY
1636 98 CONTINUE
1637 ISUMD=ISUMD+IKDAY
1638 IF(ISUMD.GE.MONDAY(NMON)) ISUMD=MONDAY(NMON)
1639 DO 97 K=1,3
1640 TA(K)=GTOTAL(K,NJ,1)*0.0001
1641 97 CONTINUE
1642 STA1=STA1+TA(1)
1643 STA2=STA2+TA(2)
1644 STA3=STA3+TA(3)
1645 WRITE(6,106) NJ,JNENL,NMON,ISUMD,TA(1),STA1,TA(2),STA2,TA(3),STA3
1646 IF(ISUMD.EQ.MONDAY(NMON)) ISUMD=0
1647 72 CONTINUE
1648 71 CONTINUE
1649 DO 73 HGG=1,HG
1650 WRITE(6,107) HGG

```

```

** CHIKASUI **
1651 WRITE(6,108)
1652 NGD=(NGG-1)*2+3
1653 AATT(1)=0.0
1654 AATT(2)=0.0
1655 AATT(3)=0.0
1656 AATT(4)=0.0
1657 ISUMD=0
1658 NJ=0
1659 STO=0.0
1660 STI=0.0
1661 ST2=0.0
1662 SBT=0.0
1663 SAT=0.0
1664 DO 74 LHON=1,KHON
1665 NIMON=LHON+1,STAN-1
1666 KHON=MOD(NIMON-1,12)+1
1667 JNENL=JNENJ+(NIMON-1)/12
1668 DO 74 NHONST=1,MONST
1669 NJ=NJ+1
1670 IKDAY=IDAY
1671 IF(NHONST.NE.MONST) GO TO 95
1672 IKDAY=MONDAY(NHON)-(MONST-1)*IDAY
1673 IF(NHON.EQ.2 .AND. KKNENJ.EQ.0) IKDAY=29-(MONST-1)*IDAY
1674 95 CONTINUE
1675 ISUMD=ISUMD+IKDAY
1676 IF(ISUMD.GE.MONDAY(NHON)) ISUMD=MONDAY(NHON)
1677 HTOXX=HTOTAL(NGG,NJ)*0.0001
1678 HTTXX=TI(NGD,NJ)*0.0001
1679 HT2XX=TI2(NGD,NJ)*0.0001
1680 BTOXX=BTOTAL(NGG,NJ)*0.0001
1681 ATOTAL(NGG,NJ)=HTOTAL(NGG,NJ)-BTOTAL(NGG,NJ)-TI(NGD,NJ)
1682 ATOXX=ATOTAL(NGG,NJ)*0.0001
1683 STO=STO+HTOXX
1684 STI=STI+HTTXX
1685 ST2=ST2+HT2XX
1686 SBT=SBT+BTOXX
1687 SAT=SAT+ATOXX
1688 BTOX2=BTOXX+ATOXX
1689 SBT2=SBT+SAT
1690 WRITE(6,109) NJ,JNENL,NHON,ISUMD,HTOXX,STO,HTTXX,STI,HT2XX,ST2,
1691 * BTOX2,SBT2
1692 AATT(1)=AATT(1)+HTOTAL(NGG,NJ)*0.0001
1693 AATT(2)=AATT(2)+TI(NGD,NJ)*0.0001
1694 AATT(3)=AATT(3)+TI2(NGD,NJ)*0.0001
1695 AATT(4)=AATT(4)+BTOTAL(NGG,NJ)*0.0001
1696 IF(ISUMD.EQ.MONDAY(NHON)) ISUMD=0
1697 BHIT(NJ,NGG,1)=HTOTAL(NGG,NJ)*0.0001
1698 BHIT(NJ,NGG,2)=TI(NGG,NJ)*0.0001
1699 BHIT(NJ,NGG,3)=TI2(NGD,NJ)*0.0001
1700 BHIT(NJ,NGG,4)=(HTOTAL(NGG,NJ)-TI(NGD,NJ))*0.0001
1701 74 CONTINUE
1702 ASUM1=AATT(1)+AATT(2)+AATT(4)
1703 ASUM12=AATT(4)+ASUM1
1704 WRITE(6,110) (AATT(JK),JK=1,3),ASUM12
1705 BBTT(NGG,1)=AATT(1)
1706 BBTT(NGG,2)=AATT(2)
1707 BBTT(NGG,3)=AATT(3)
1708 BBTT(NGG,4)=ASUM12
1709 73 CONTINUE
1710 SYQ(5)=-BBTT(1,3)
1711 SYQ(6)=BBTT(1,4)
1712 SYQ(7)=BBTT(1,1)
1713 SYQ(11)=-BBTT(2,3)
1714 SYQ(12)=BBTT(2,4)
1715 SYQ(13)=BBTT(2,1)
1716 SYQ(17)=-BBTT(3,3)
1717 SYQ(18)=BBTT(3,4)
1718 SYQ(19)=BBTT(3,1)
1719 SYQ(4)=SYQ(2)+SYQ(3)
1720 SYQ(8)=SYQ(4)-SYQ(7)+SYQ(6)-SYQ(5)
1721 SYQ(10)=SYQ(8)+SYQ(9)
1722 SYQ(14)=SYQ(10)-SYQ(13)+SYQ(12)-SYQ(11)
1723 SYQ(16)=SYQ(14)+SYQ(15)
1724 J=0
1725 DO 250 LHON=1,KHON

```



```

1801      ** CHIKASU! **
1802      KE=KEND(HI)
1803      NKBASE=KS-1
1804      DO 12 JJJ=1,NKO
1805      JJH=NJBASE+JJJ
1806      KKH=NKBASE+JJJ
1807      12 ZZ(HI,JJH)=XX(KKH)
1808      11 CONTINUE
1809      WRITE(6,3) (JK,JK=1,JHAX)
1810      WRITE(6,4)
1811      DO 13 I=1,IHAX
1812      DO 14 J=1,JHAX
1813      Y(J)=ZZ(I,J)
1814      IF (Y(J).GT.1.0E+10) Y(J)=PJ
1815      14 CONTINUE
1816      WRITE(6,5) I,(Y(J),J=1,JHAX)
1817      13 CONTINUE
1818      1 FORMAT(1H1,/,20X,'** 30-7-7 30 30 30 30 **')
1819      2 FORMAT(/,20X,A8,' 30-7-7 1-24 (H3)')
1820      3 FORMAT(/,7X,15I6)
1821      4 FORMAT(1H1,/)
1822      5 FORMAT(/,2X,13,2X,15F6.0)
1823      RETURN
1824      END
1825      SUBROUTINE TPV
1826      COMMON /WORK/ X(590),Y(590),TIX(590),TIY(590),G(590),DUMY(14387)
1827      REVIND 2
1828      WRITE(6,1)
1829      READ(2,100) N,H
1830      WRITE(6,2) N,H
1831      READ(2,101) (X(I),I=1,N)
1832      READ(2,101) (Y(J),J=1,H)
1833      WRITE(6,3) (X(I),I=1,N)
1834      WRITE(6,3) (Y(I),I=1,H)
1835      WRITE(6,4)
1836      DO 10 I=1,H
1837      READ(2,102) NO,II,JJ,KK,(X(J),J=1,6)
1838      WRITE(6,5) NO,II,JJ,KK,(X(J),J=1,6)
1839      10 CONTINUE
1840      READ(2,100) NG
1841      WRITE(6,6) NG
1842      DO 11 I=1,NG
1843      READ(2,101) (TIX(J),J=1,H)
1844      READ(2,101) (TIY(J),J=1,H)
1845      WRITE(6,7) (TIX(J),J=1,H)
1846      WRITE(6,7) (TIY(J),J=1,H)
1847      11 CONTINUE
1848      14 READ(2,100,END=15) KHON
1849      WRITE(6,8) KHON
1850      DO 12 MON=1,KHON
1851      DO 13 IS=1,NG
1852      READ(2,100) NNN,III
1853      WRITE(6,9) NNN, III
1854      READ(2,101) (X(J),J=1,N)
1855      WRITE(6,3) (X(J),J=1,N)
1856      13 CONTINUE
1857      12 CONTINUE
1858      GO TO 14
1859      1 FORMAT(1H1,/)
1860      2 FORMAT(1H0,5X,' N =',15,5X,' H =', 15)
1861      3 FORMAT(1H0,5X,12F10.3,/, (1H , 5X, 12F10.3))
1862      4 FORMAT(1H0)
1863      5 FORMAT(1H , 5X,4I5,5X,6F10.3)
1864      6 FORMAT(1H0,5X,' NG =',15)
1865      7 FORMAT(1H0,5X,8E15.6,/, (1H , 5X, 8E15.6))
1866      8 FORMAT(1H0,5X,' KHON=',15)
1867      9 FORMAT(1H0,5X,' MON=',15,5X,' G =',15)
1868      100 FORMAT(16I5)
1869      101 FORMAT(4E20.8)
1870      102 FORMAT(4I5,6F10.5)
1871      15 CONTINUE
1872      RETURN
1873      END
1874      SUBROUTINE SYPR
1875      COMMON /SYU2/ SYQ(90),BBIT(3,5),SHYQ(12,30)

```

```

** CHIKASUI **
1876 WRITE(6,600) (SYQ(1),I=1,4)
1877 WRITE(6,601) (SYQ(1),I=5,10)
1878 WRITE(6,602) (SYQ(1),I=11,16)
1879 WRITE(6,603) (SYQ(1),I=17,19)
1880 600 FORMAT(1H1,/,20X,'** 3X-7272 7272 7272 7272 **',
1881      &      /,30X,'(10,000H3)',
1882      &      /,10X,'1',48(' '),1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',39X,'777-77',
1883      &      3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',29X,'737272',F8.1,5X,'1',/1,
1884      &      10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1',/1,10X,'1',
1885      &      48X,'1',/1,10X,'1',39X,'C1-77',4X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,
1886      &      '1',29X,'737272',F8.1,3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',
1887      &      9(' '),F8.1,1X,30(' '),1')
1888 601 FORMAT(10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 327272',F8.1,23X,'G1-77',4X,'1',
1889      &      /,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 737272',F8.1,12X,'737272',F8.1,6X,
1890      &      '1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1',/1,10X,
1891      &      '1',48X,'1',/1,10X,'1',39X,'C2-77',4X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1892      &      /,10X,'1',29X,'737272',F8.1,3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1893      &      /,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1')
1894 602 FORMAT(10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 327272',F8.1,23X,'G2-77',4X,'1',
1895      &      /,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 737272',F8.1,12X,'737272',F8.1,6X,
1896      &      '1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1',/1,10X,
1897      &      '1',48X,'1',/1,10X,'1',39X,'C3-77',4X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1898      &      /,10X,'1',29X,'737272',F8.1,3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1899      &      /,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1')
1900 603 FORMAT(10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 327272',F8.1,23X,'G3-77',4X,'1',
1901      &      /,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 737272',F8.1,12X,'737272',F8.1,6X,
1902      &      '1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',48(' '),1')
1903 RETURN
1904 END
1905 SUBROUTINE SYPR12(J,LMON,MEN,MON,LDAY)
1906 COMMON /SYU2/ SYQ(90),BBIT(3,5),SHYQ(12,30)
1907 WRITE(6,599) J,MEN,MON,LDAY
1908 WRITE(6,600) (SHYQ(LMON,I),I=1,4)
1909 WRITE(6,601) (SHYQ(LMON,I),I=5,10)
1910 WRITE(6,602) (SHYQ(LMON,I),I=11,16)
1911 WRITE(6,603) (SHYQ(LMON,I),I=17,19)
1912 599 FORMAT(1H1,/,20X,'** 3X-7272 7272 7272 7272 **',
1913      &      /,30X,'(10,000H3)',
1914      &      /,10X,'777272',13,5X,'737272',13,' 7272',13,' 7272',13,' 7272')
1915 600 FORMAT(1H1,/,10X,
1916      &      '1',48(' '),1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',39X,'777-77',
1917      &      3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',29X,'737272',F8.1,5X,'1',/1,
1918      &      10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1',/1,10X,'1',
1919      &      48X,'1',/1,10X,'1',39X,'C1-77',4X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,
1920      &      '1',29X,'737272',F8.1,3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',
1921      &      9(' '),F8.1,1X,30(' '),1')
1922 601 FORMAT(10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 327272',F8.1,23X,'G1-77',4X,'1',
1923      &      /,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 737272',F8.1,12X,'737272',F8.1,6X,
1924      &      '1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1',/1,10X,
1925      &      '1',48X,'1',/1,10X,'1',39X,'C2-77',4X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1926      &      /,10X,'1',29X,'737272',F8.1,3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1927      &      /,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1')
1928 602 FORMAT(10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 327272',F8.1,23X,'G2-77',4X,'1',
1929      &      /,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 737272',F8.1,12X,'737272',F8.1,6X,
1930      &      '1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1',/1,10X,
1931      &      '1',48X,'1',/1,10X,'1',39X,'C3-77',4X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1932      &      /,10X,'1',29X,'737272',F8.1,3X,'1',/1,10X,'1',48X,'1',
1933      &      /,10X,'1',9(' '),F8.1,1X,30(' '),1')
1934 603 FORMAT(10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 327272',F8.1,23X,'G3-77',4X,'1',
1935      &      /,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1' 737272',F8.1,12X,'737272',F8.1,6X,
1936      &      '1',/1,10X,'1',48X,'1',/1,10X,'1',48(' '),1')
1937 RETURN
1938 END
1939 SUBROUTINE SPPPC(IP,XX)
1940 REAL*8 NAME
1941 COMMON /NO9/ IHAX,JHAX,IHO(27),JSHO(27),JENO(27),
1942      &      KSHO(27),KENO(27),IYPRIT
1943 COMMON /VORK/ ZZ(90,20),Y(90),DUHY(15447)
1944 DIMENSION XX(590),NAME(10)
1945 DATA PJ /3.78E11/
1946 DO 10 I=1,IHAX
1947 DO 10 J=1,JHAX
1948 10 ZZ(I,J)=1.1E+10
1949 NAME(1)=' C-1 77'
1950 NAME(2)=' C-2 77'

```

```

1951      ** CHIKASUI **
1952      NAME(3)=' C-3 ヲ'
1953      NAME(4)=' 3'221 '
1954      WRITE(6,1)
1955      WRITE(6,2) NAME(IP)
1956      DO 11 HI=1,IMAX
1957      JS=JSNO(HI)
1958      JE=JENO(HI)
1959      NKO=JE-JS+1
1960      NJBASE=JS-1
1961      KS=KSNO(HI)
1962      KE=KENO(HI)
1963      NKBASE=KS-1
1964      DO 12 JJJ=1,NKO
1965      JJN=NJBASE+JJJ
1966      KKN=NKBASE+JJJ
1967      12 ZZ(HI,JJN)=XX(KKN)
1968      11 CONTINUE
1969      WRITE(6,3) (JK,JK=1,JHAX)
1970      WRITE(6,4)
1971      DO 13 I=1,IMAX
1972      DO 14 J=1,JHAX
1973      Y(J)=ZZ(I,J)
1974      IF (Y(J).GT.1.0E+10) Y(J)=PJ
1975      14 CONTINUE
1976      WRITE(6,5) I,(Y(J),J=1,JHAX)
1977      13 CONTINUE
1978      1 FORMAT(1H1,11,20X,'** ヲ-1'2 3'2 3'2 3'2 **')
1979      2 FORMAT(1,20X,A8,' 3'2 3'2 (HH)')
1980      3 FORMAT(1,7X,15I6)
1981      4 FORMAT(1H',1)
1982      5 FORMAT(1,2X,13,2X,15F6.1)
1983      RETURN
1984      END
1985      SUBROUTINE DHCOUT(LMON,NEN,MON,N)
1986      COMMON /HARA/ DHC(12,4,330),SDHC(4,330),SSDH(12,330)
1987      DO 10 I=1,2
1988      WRITE(20,1) NEN,MON,I
1989      WRITE(20,2) (DHC(LMON,I,J),J=1,N)
1990      10 CONTINUE
1991      I=3
1992      WRITE(20,1) NEN,MON,I
1993      WRITE(20,2) (SSDH(LMON,J),J=1,N)
1994      1 FORMAT(16I5)
1995      2 FORMAT(4E20.8)
1996      RETURN
1997      END
1998      SUBROUTINE SDHOUT(NEN,NMON,N)
1999      COMMON /HARA/ DHC(12,4,330),SDHC(4,330),SSDH(12,330)
2000      WRITE(21,100) NEN,NMON
2001      DO 10 I=1,4
2002      WRITE(21,101) I
2003      WRITE(21,102) (SDHC(I,J),J=1,N)
2004      10 CONTINUE
2005      100 FORMAT(' 2',15,' 7',15)
2006      101 FORMAT(15)
2007      102 FORMAT(8F10.5)
2008      RETURN
2009      END

```

このプログラムは、第4章で述べたとおり、有限要素法に基づいた解法を用いている。計算の際、差分法におけるA・D・I法の概念を導入し解を求めているため、任意のメッシュ、時間間隔で計算ができる保証はない。しかしCPUはかなり短縮され、588要素、328節点が3層、 $\Delta t = 10$ 日で30年分の計算時間は、ACOS-650IIで3分程度である。

地下水シミュレーションの  
手引と濃尾平野への適用

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料第2576号  
昭和63年3月(1988)  
吉野文雄, 吉谷祐一, 細谷信夫  
寺川 陽, 田子秀徳

キーワード: 地下水, 地下水シミュレーション, 濃尾, 手引

要 旨

濃尾平野に適用した地下水シミュレーションによって地下水シミュレーションの持つ問題点や技術現況を明らかにし, 広域地下水シミュレーションを行う現場技術者のための手引書として取りまとめたものである。



郵便はがき

四十円切手  
をはって下  
さい

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所  
水文研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2576号                      部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名                      印