

埼玉県平野部における適正地下水揚水量の検討

Investigation on optimal groundwater pumping in Saitama basin

さ とう くにあき* さき よう た ろう**
 佐 藤 邦 明* 関 陽 太 郎**
 つば い すみ お ふう***
 坪 井 澄 雄*** 藤 崎 克 博****

1. はじめに

埼玉県は関東平野の西部に位置し、県土3800 km²の内秩父山地を除く2/3は平野部である。首都圏にあって昭和30年代半ばから人口流入、経済発展が急速に進み、地下水資源の利用が加速度的に増加し、それに伴い地盤沈下が表面化してきた。

本県の地盤沈下は、その初期に川口市を中心とした県南地域から浦和、越谷、所沢と徐々に北上しつつ拡大の一途をたどり、今日では幸手、栗橋町付近に地盤沈下の中心がある。昭和59年度の水準測量成果（昭和59年1月1日～60年1月1日）によると、20 mm以上の沈下域の面積は254.5 km²であり、最大沈下量は栗橋町における60mmである¹⁾。

一方、地盤沈下による被害は、いわゆる内陸型の建物、道路、河川構造物の不同沈下や機能障害といったものに加え、豪雨時における内水排除の困難があげられる。もともと県北東部は中川水系を中心に低平地が広がり、米作のための中小河川や水路が複雑に発達し、急激な都市化に伴って地盤沈下による排水・疎通機能の低下は広域的な生活基盤の劣化、環境保全の悪化をもたらしている。

他方、地下水の利用経緯は、昭和40年代以前には農業用を除いて水資源といえばほとんど地下水であったが、その後地盤沈下防止のため県南の一部地域で工業用水法、建築物用地下水の規制に関する法律、県公害防止条例による規制を受け、昭和39年に工業用水道が給水開始し、昭和50年代当初には水資源の地下水への依存度は60%程度であった。以後、表流水源への転換が進み、今日では30%程度が地下水に依存している。

こういった経緯、実状にあって栗橋、幸手を中心とする関東平野北部地域の地盤沈下は、埼玉県、群馬県、栃木県、茨城県、千葉県との5県にまたがり、本邦屈指となっている。したがって、昭和56年11月に地盤沈下防止等関係閣僚会議が開かれ、地盤沈下防止等関係省庁連絡会議が設けられて「濃尾平野」、「筑後・佐賀平野」、「関東平野北部」の3地域部会がそれぞれについて設置され、対策要綱の策

定審議が行われ、前者の2地域については昭和60年4月に要綱が閣議決定された。また、関東平野北部地域については引き続き検討が進められている。

本調査・研究は昭和50年代に始まる地下水・地盤沈下の観測体制の整備から揚水量の把握、地下地質構造の解析と進められ、地下水シミュレーション手法の開発を経て今日に至っている。早期に地盤沈下を防止し、健全な地下水保全と適正利用を確立するため、長年にわたって努力を重ねた。本報は、これまでに得られている成果の主要なところをとりまとめて報告する。

2. 地形・地質の概要

2.1 地形

調査地域は埼玉平野と呼ばれ、関東平野の西部に位置し、西は秩父山地で区切られている。今回の調査対象地域は、65市町村、2106 km²である（後述図-4参照）。地形的には、図-1に示すように、比企丘陵などの丘陵、大宮台地に代表される台地および沖積低地に区分される。

丘陵は、秩父山地から岬状にはり出すように分布し、開析が進み谷が発達している。地質的には新第三紀～中期更新世の地層で構成されている。

台地は、丘陵の前面に分布する入間台地、^{くしびき}櫛挽台地などの扇状地性の台地と、平野中央に位置する大宮台地がある。これら台地の地形面高度は、大宮台地北部を中心に周辺に向かって高くなっている。これは、第四紀を通じて継続している「関東造盆地運動」を反映している。

沖積低地は、利根川や荒川などの河川により形成されたはん濫原で、中川低地や荒川低地などに代表される。

2.2 地質構造・水理地質

(1) 地質調査ボーリング

埼玉県では、昭和53年度から59年度にかけて所沢、鷲宮、行田、越谷東、川島の5箇所において地盤沈下観測井設置のため、深度350～600mのオールコアボーリングを実施した（位置は図-1参照）。これらのボーリング孔では原位置試験（物理検層、現場透水試験など）を実施し、また、採取したコア試料を用いて花粉、珪藻、重鉍物の分析や土質試験を行い、地下深部に至る地質状況について数多くの情報を得ている。これらの結果から、各々のボーリング柱状の対比が可能となってきた。

*埼玉大学助教授 工学部

**埼玉大学教授 工学部

***埼玉県環境部水質保全課長

****国際航業株式会社

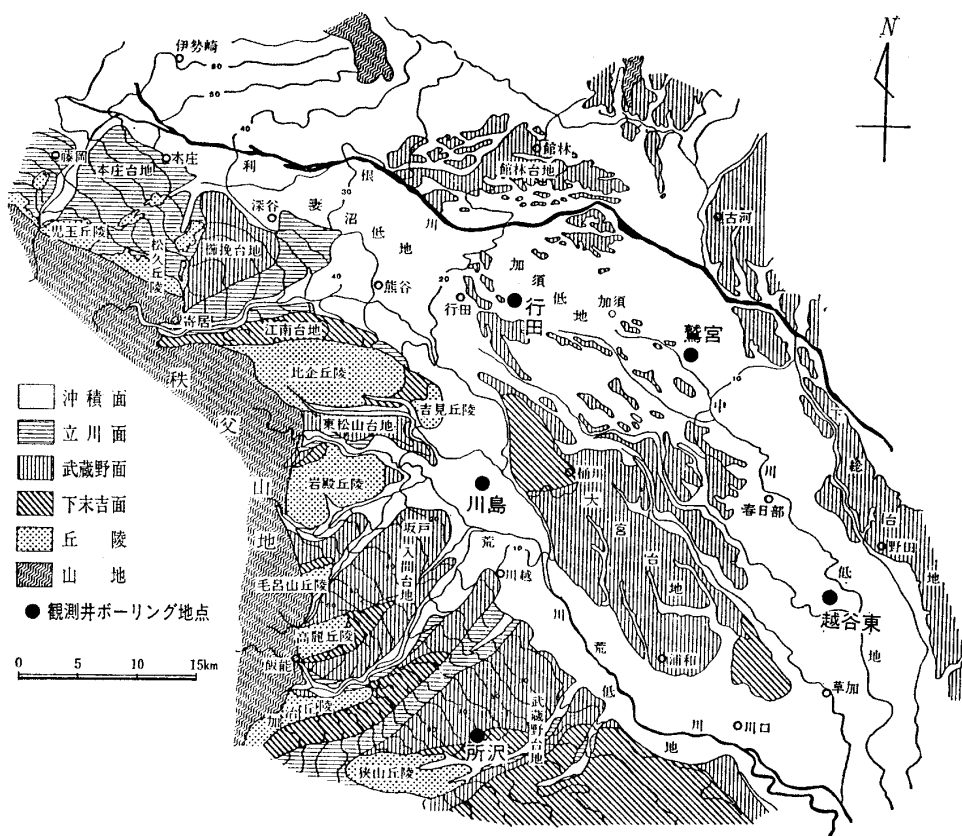


図-1 埼玉平野の地形面区分図 (堀口, 1981²⁾ より)

表-1 地下地質区分・モデル区分

地質時代	埼玉県地表面	地下地質区分	優勢な層相	水理地質区分	モデル区分			
1 万年 前	完新世	沖積層	上部層	礫・砂・泥炭	不圧帯水層	浅層地下水 不圧帯水層 第1加压層		
			中部層	粘土砂	難透水層			
			下部層	砂・シルト	被圧帯水層			
	10 四 新 紀	後期	立川ローム層	低位段丘層	砂・礫	不圧帯水層	深層地下水 第1帯水層 第2加压層 第2帯水層 仮想水理基盤	
			低位段丘礫層	低礫	砂・礫	不圧帯水層		
		中期	武蔵野ローム層	A層	上部層	砂・粘土		被圧帯水層
			武蔵野礫層		中部層	粘土		難透水層
			下末吉ローム層		下部層	礫		被圧帯水層
		前期	東京層	B層	上部層	粘土・砂		難透水層
			多摩ローム層		下部層	礫		被圧帯水層
70 紀	豊岡礫層	C層	上部層	粘土・砂	難透水層			
	仏子層		下部層	礫	被圧帯水層			
	飯能礫層		D層	上部層	粘土・砂・礫	難透水層		
第三紀	第三紀層	下部層		粘土・砂・礫	被圧帯水層			

(2) 地下地質区分

埼玉平野の地下地質は、表-1に示したように、上位から沖積層、洪積層(A~D層)、第三紀層、および基盤に分けられる。

i) 沖積層：沖積層は中川、荒川、利根川沿いに分布する。軟弱な粘土層を主とし、中川低地南部では40mの厚さに達する。この粘土層は、調査地域の地盤沈下の主要な原因となっている。

ii) 洪積層：A~D層に区分され、埼玉地域のA層は東京層に対比され、地下100m程度まで分布する。B層は豊岡礫層に対比され、地下200~280mくらいまでに分布する。

C層は仏子層に対比され、地下300~450m付近まで分布する。A~C層とも加須および川島付近に最深部が存在する。洪積層は、調査地域の地下水の主な取水層となっており、また、洪積層中の粘土層は調査地域北部の地盤沈下に大きく関与している。

iii) 第三紀層：川島観測井ボーリングの深度590mで確認されている。地下水開発は、この層にまでは及んでいない。

iv) 基盤：秩父山地に分布する中・古生層で地下水盆の底を形成している。平野部中央では地下2000~3000m付近に分布する。

3. 地下水の実態と調査

3.1 地下水利用

埼玉平野のほとんど全域は、埼玉県公害防止条例の規制地域となっており、吐出口断面積6cm²以上の工業用と建築物用揚水設備について水量測定が義務付けられている。水道用の揚水量は上水道業務統計により、また農業用のそれは環境庁による揚水量実態調査、埼玉県による農業用電力消費量調査などでかなり正確な地下水揚水量の把握が可能となっている。

昭和59年の揚水量は149万m³/日(62市町村)で、水道用が全体の42%を占め、次いで農業用38%、工業用16%、建築物用4%となっており、水道用揚水量の多いのが特徴である。

昭和50年から59年の経年変化をみると、工業用は昭和50年の41万m³/日から昭和59年には24万m³/日へ減少しており、揚水規制の効果が表れている(図-2参照)。水道用は昭和50年の66万m³/日から56年には51万m³/日まで減少したが、以後増加に転じて59年には63万m³/日に達している。これは水源転換や水利用の合理化を上回って、その利用量が気象条件や人口増によって増加したためである。農業用は、渇水年であった昭和53年に47万m³/日、59年に56万m³/日とピークがあり、平年は30~40万m³/日である。図-3に昭和58年の揚水量分布を示した。

3.2 地下水頭

埼玉平野の地下水頭分布状況を把握するため、昭和55年度から夏季(9月)と冬季(2月)の年2回、上水道水源井を対象に一斉測水調査を継続している(昭和58年度は実

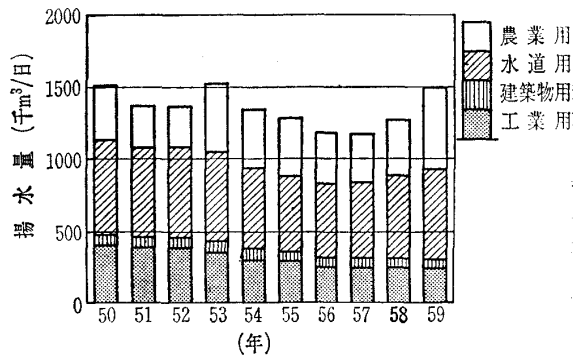


図-2 揚水量の経年変化

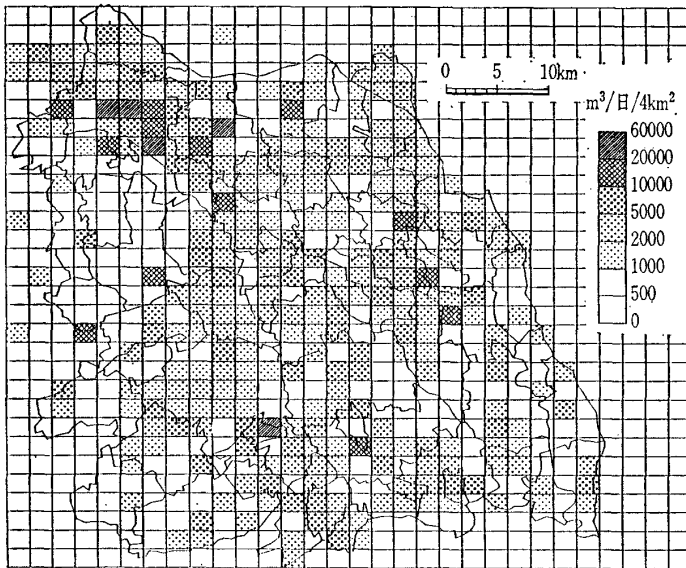


図-3 メッシュ別揚水強度分布図 (昭和58年年平均)

施せず)。対象井戸のストレーナー位置は、主として⑧・⑨層にあり、測水結果は⑧・⑨層の地下水頭分布を示している。測定箇所数は60～68箇所、市町村水道部が測定した142～249箇所のデータも加えて地下水頭分布を描いた。

図-4に昭和55年、57年、59年の夏季の地下水頭分布を示した。各時期とも、北西部の利根川沿いと南西部の入間台地で地下水頭が高く、東部の中川低地へ向かって低くなり、中川低地にはT.P. -20m以下の水頭低下帯が生じている。T.P.0mのコンターは荒川左岸から行田市、羽生市付近を通り、その分布がほとんど変わらない。中川低地の水頭低下帯では、昭和55年にはT.P. -25m以下の範囲が広く生じていたが、昭和57年には消滅しており、この間の水頭の回復傾向が見られる。しかし、昭和59年には上述の揚水量増加を反映して、再びT.P. -25m以下の水頭低下帯が生じている。

3.3 地盤沈下

埼玉平野には80市町村に848点(昭和59年度)の水準点を設置しており、水準測量により地盤沈下量の測定が行われている¹⁾。

昭和59年度の地盤沈下量等量線図を図-5に示し

た。栗橋町・大利根町を中心とする北東部地域、越谷市・春日部市を中心とした東部地域、所沢市を中心とする西部地域、浦和市・与野市を中心とする中央部地域の四つの沈下地域が認められる。4cm以上の沈下面積は50.8km²で、2cm以上の沈下面積は254.5km²にのぼり、埼玉平野2630km²の約10%となっている。最大の沈下地域は北東部地域であり、最大沈下量は栗橋町で6.0cmであった。

3.4 帯水層の水理パラメーター

既存揚水試験結果から求めた⑧・⑨層の透水量係数(透水係数×層厚)の分布を図-6に示した。熊谷市、行田市と上尾市から浦和市を経て川口市に至る地域では900m²/日以上大きい値を示す。北川辺町から大利根町を経て蓮田市に至る地域と西部の台地では300m²/日未満の小さい値を示している。

4. 地下水シミュレーションと線形計画法の応用

4.1 適正地下水揚水量算定の考え方

地盤沈下を防止しつつ地下水を有効に保全・利用するという立場から地下水の適正揚水量を算定する手法としては、地下水数値シミュレーションが広く用いられてきた³⁾。この場合、最適な揚水量を求めるには数多くの試行が必要となる。この点を避けるため、最近では線形計画法を用いた最適化手法が採用されるようになってきた⁴⁾。

最適化計算においては、制約条件(例えば限界水頭)と地下水理パラメーターの精度に結果が大きく左右される。従来、水理パラメーターは、地下水モデルの検証の過程で試行錯誤的に決められてきた。このパラメーターの決定についても、最適化手法を用いて最適なパラメーターを求めるという方法(パラメーター逆同定法)が用いられるようになってきている^{6),7)}。

ここでは信頼性のある制約条件を設定するため、パラメ

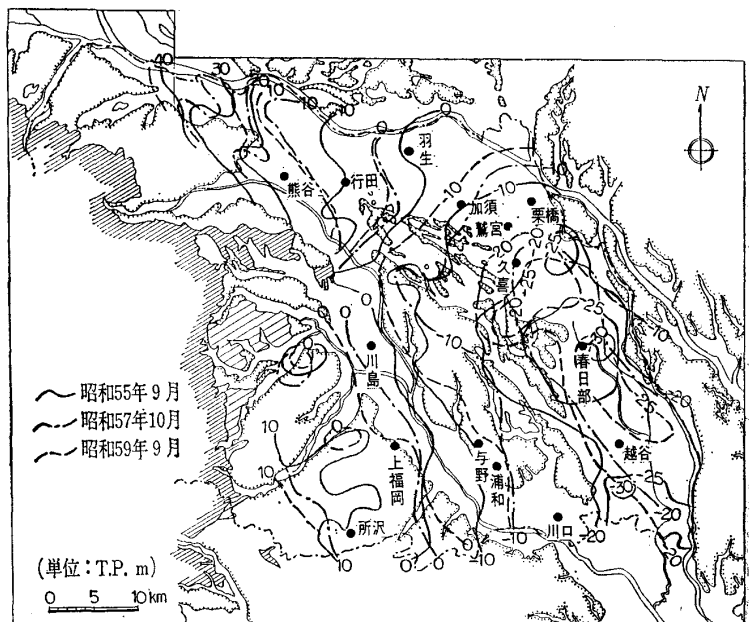


図-4 地下水頭分布図

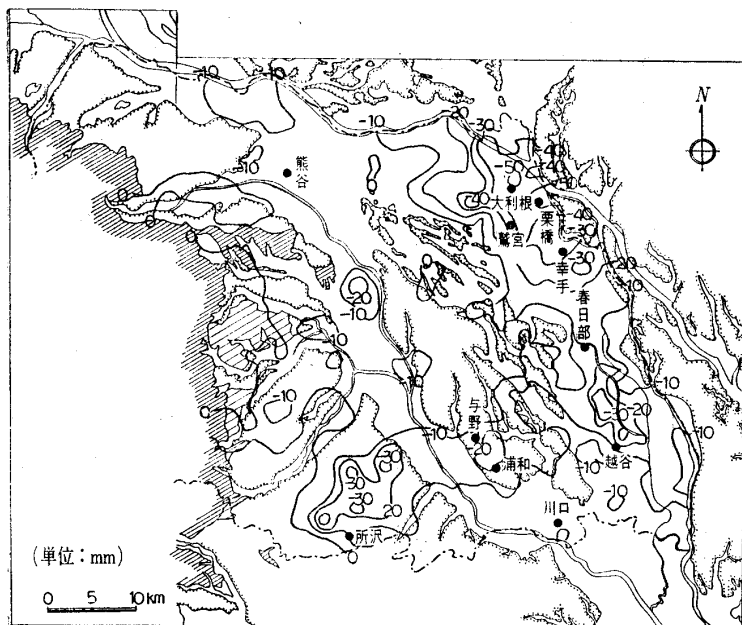


図-5 地盤変動等量値線図 (昭和59年)

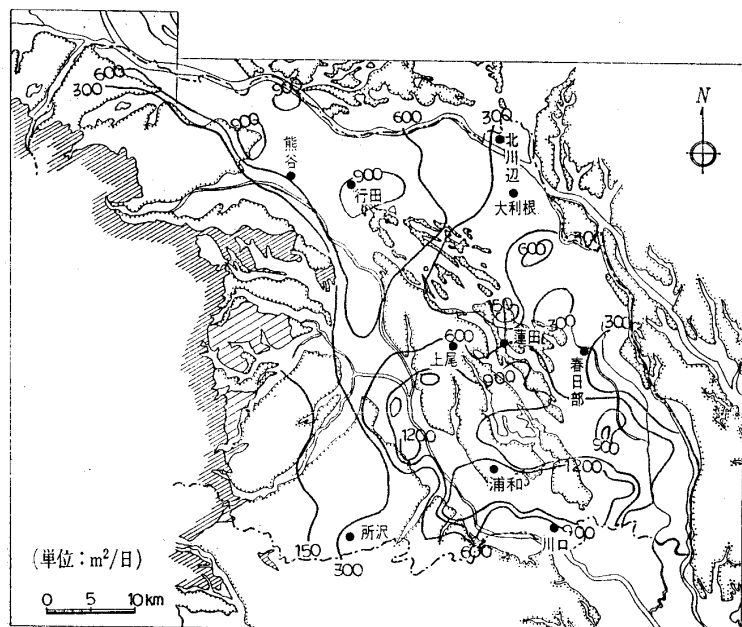


図-6 B・C層透水量係数分布図

一ター逆同定モデルの検討をし、地下水シミュレーションによって再現された地下水頭と実測沈下量から沈下の停止する限界水頭を求め、最適化計算を行った。

4.2 地下水モデルと数値解析

地下水の運動を帯水層で水平、加圧層で垂直として取り扱う準三次元多帯水層系では、*i* 番目の帯水層の地下水流の基本式は次式で示される。

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_i \frac{\partial h_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_i \frac{\partial h_i}{\partial y}) + (\frac{k'}{b'})_i (h_{i-1} - h_i) + Q_i - S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、*h_i* : 地下水頭、*T_i* : 透水量係数、*S_i* : 貯留係数、*Q_i* : 揚水量または涵養量、*k'* : 加圧層の透水係数、*b'* : 加

圧層の層厚であり、添字 *i* は *i* 番目の帯水層または加圧層を示す。式(1)の数値解法として Galerkin (ガレルキン) 法を適用する⁴⁾。

透水量係数と漏水係数 (*k'/b'*) を逆算するため、近似解を次のように定める。

$$h_i \simeq \hat{h} = \sum_{j=1}^n \phi_j h_j \quad T_i \simeq \hat{T} = \sum_{j=1}^n \phi_j T_j$$

$$(\frac{k'}{b'})_i \simeq \hat{k} = \sum_{j=1}^n \phi_j k_j \dots\dots\dots(2)$$

ここで、*h_j*、*T_j*、*k_j* : それぞれ節点での水頭値、透水量係数值、漏水係数值である。

式(1)へ式(2)を代入して Galerkin 法を適用すると次式を得る⁸⁾。

$$[C_1 : C_2] \begin{Bmatrix} T \\ k \end{Bmatrix} = \{D\} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $[C_1 : C_2]$ は $n \times 2n$ (*n* : 節点数) のマトリックスであり、代表要素では

$$C_{1jk} = \iint \left[\frac{\partial \phi_j}{\partial x} \phi_k \left(\sum_{l=1}^m \frac{\partial \phi_l}{\partial x} h_l \right) + \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \phi_k \left(\sum_{l=1}^m \frac{\partial \phi_l}{\partial y} h_l \right) \right] dx dy$$

$$C_{2jk} = \iint \phi_j \phi_k \left(h_{i-1} - \sum_{l=1}^m \phi_l h_l \right) dx dy$$

$$D_j = - \iint Q_i \phi_j dx dy \dots\dots\dots(4)$$

となる。ここで、*m* : 要素の節点数である。また、定常状態を考えているため、式(1)左辺第5項は無視し得る。

p 組の地下水頭観測値があれば、*p* 組の式(3)が成立し、次のように書き改められる。

$$[C'] \begin{Bmatrix} T \\ k \end{Bmatrix} = \{D'\} + \{e\} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $[C']$ は $p \cdot n \times 2n$ のマトリックスであり、 $\{e\}$ は誤差項を示している。 $\{e\}$ を最小にするため、最小自乗法を適用すると、次式を得る。

$$[C']^T [C'] \begin{Bmatrix} T \\ k \end{Bmatrix} = [C']^T \{D'\} \dots\dots\dots(6)$$

一方、最適揚水配分は線形計画法により、制約条件下で総揚水量 *Q_T* を最大とする問題としてシンプレックス法を用いて解く。

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i \rightarrow \max \dots\dots\dots(7)$$

$$h_i \geq h_{pi} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、*h_{pi}* : 各節点における限界水頭である。

4.3 パラメーター逆同定の数値解例

パラメーターの逆同定に当たって次の諸点に注意した。

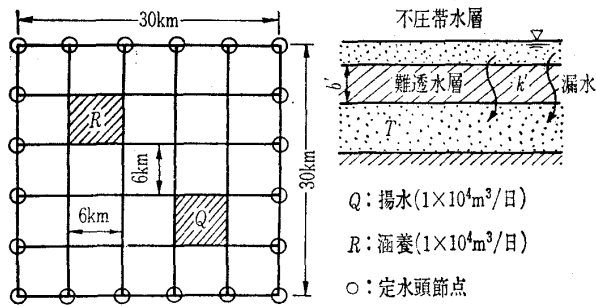


図-7(a) 帯水層モデル

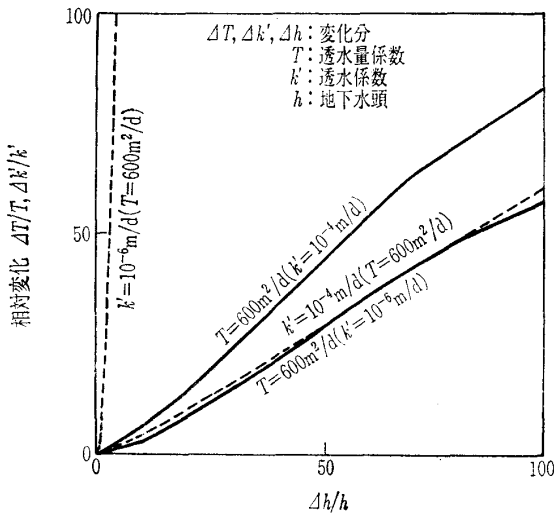


図-7(b) 相対変化 $\Delta T/T$, $\Delta k'/k'$ と $\Delta h/h$ の関係 ()内は固定値を示す。

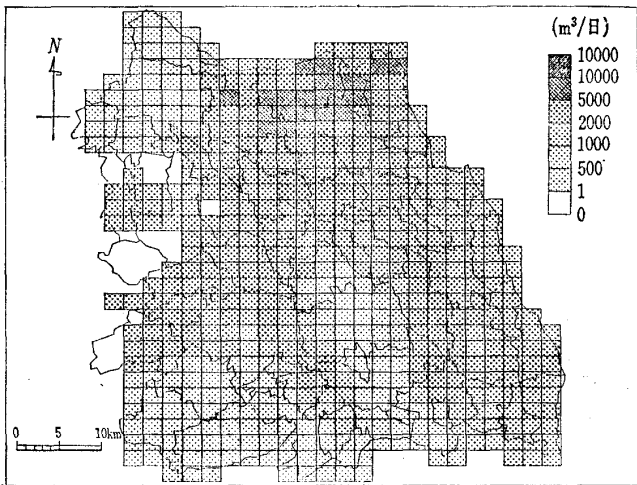


図-8 地下水涵養量分布図 (昭和58年平均, 降水・灌漑水による涵養)

この一例を示す。計算条件は図-7(a)に示すように、領域内で一様とし、図中に示したとおりとする。

計算は、漏水係数を固定して透水量係数を算定する場合と、逆に透水量係数を固定して漏水係数を算定する場合について検討した。図-7(b)に示したように、水頭差に対する漏水係数の変化は透水量係数のそれより大きく、水頭差に関する感度は漏水係数の方が大きいことが示されている。このため、誤差を含む観測値を用いて透水量係数と漏水係数を同時に算定する場合、透水量係数が正しく求めら

れなくなることが分かる。したがって、今回は実測値のとり得る範囲値を制約にパラメーター分布を同定する方法を採用した。

4.4 埼玉平野の地下水理モデル

既に述べた地質構造から、上述表-1に示したとおりのモデル区分をし、準三次元2帯水層モデルを適用した。

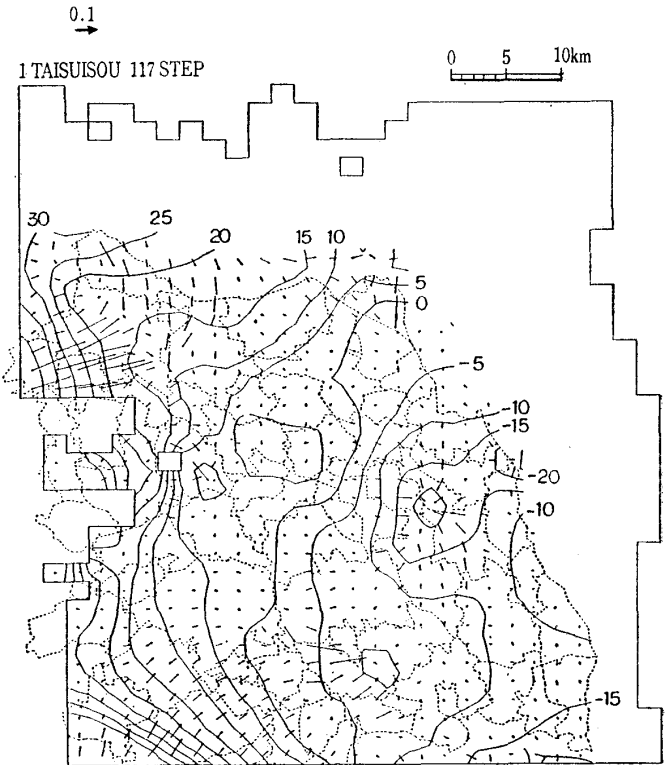


図-9(a) 地下水位計算結果 (第1帯水層, 昭和59年9月)

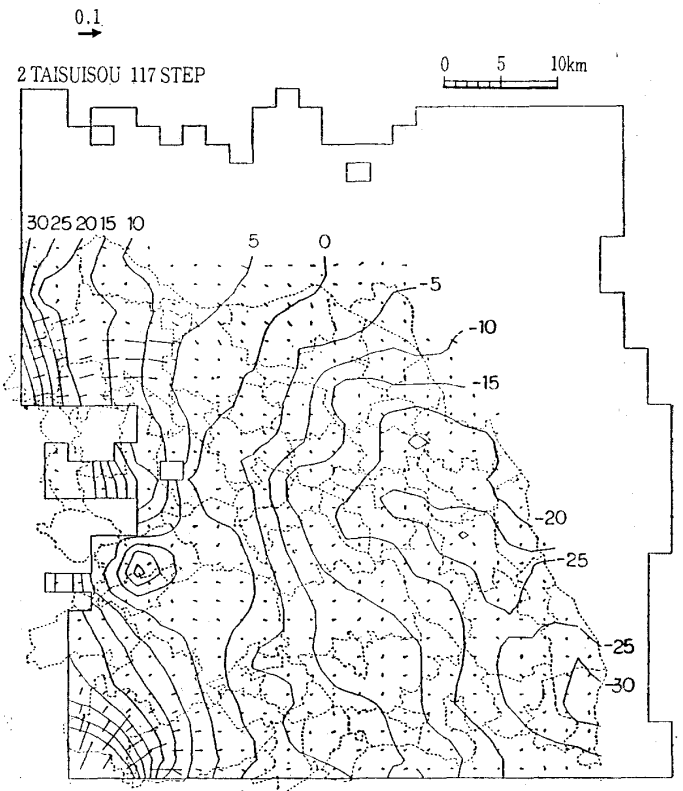


図-9(b) 地下水位計算結果 (第2帯水層, 昭和59年9月)

沖積粘土層を第1加圧層, ③層粘土層を第2加圧層とし, ④層までを第1帯水層, ⑤・⑥層をまとめて第2帯水層とした。対象領域を529個の2kmメッシュで分割した。境界条件は, 西側は山地に接する不透水境界とし, 南側は観測井水位から既知水頭境界とし, その他では領域外側にクッションゾーンを設定した。水理定数は実測値から, 帯水層の透水量係数は図-6の値により, 加圧層の透水係数は第1加圧層 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{m/日}$, 第2加圧層 $2.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{m/日}$ を用いた。地下水涵養量は, 降雨および水田からの涵養を算定し, 台地部のみに与えた。低地部では不圧地下水位一定とし, 沖積粘土層を通しての漏水補給により地下水涵養量を与えた。図-8に地下水涵養量の分布を示した。

5. 地下水の適正揚水量とその地域配分

5.1 地下水位の計算

準三次元モデルに上述のパラメーターを入力して試算を行い, 実測水頭分布と比較してモデルを同定した。図-9は計算水頭の分布を示した。これは, 上述図-4に対応しており, 計算値と実測値はよい一致を示している。図-10には, 7回の一斉測水結果と計算値との差を平均値として示した。これらはほぼ±3mの範囲におさまっており, 一応評価し得るといえよう。

5.2 限界水頭の設定

既に述べたように, 地盤沈下を引き起こさない最低の地下水頭を限界水頭と定義する。限界水頭は, 次の和達の式を用いて求めた。

$$-\frac{ds}{dt} = K(h_p - h) \dots \dots \dots (9)$$

ここで, ds/dt : 沈下速度, h_p : 限界水頭, h : 水頭, K : 定数である。

2kmメッシュごとに水準測量成果と計算水頭から h_p を決定し, 限界水頭の分布を描き図-11に示した。これは, 実測水頭と調和的な分布を示している。

5.3 最適揚水量の算定

図-11の限界水頭を満たす最大の揚水量の配分(最適揚水配分)を線形計画法を用いて算定した。その分布は図-12に示したようになる。最適揚水配分で, 揚水量がゼロになる地域は, 第1帯水層では越谷市を中心とする地域にみられ, 第2帯水層では越谷市を始めとする県南東部と大利根町などの北東部にみられる。これらの地域は地盤沈下の激しい地域であり, 限界水

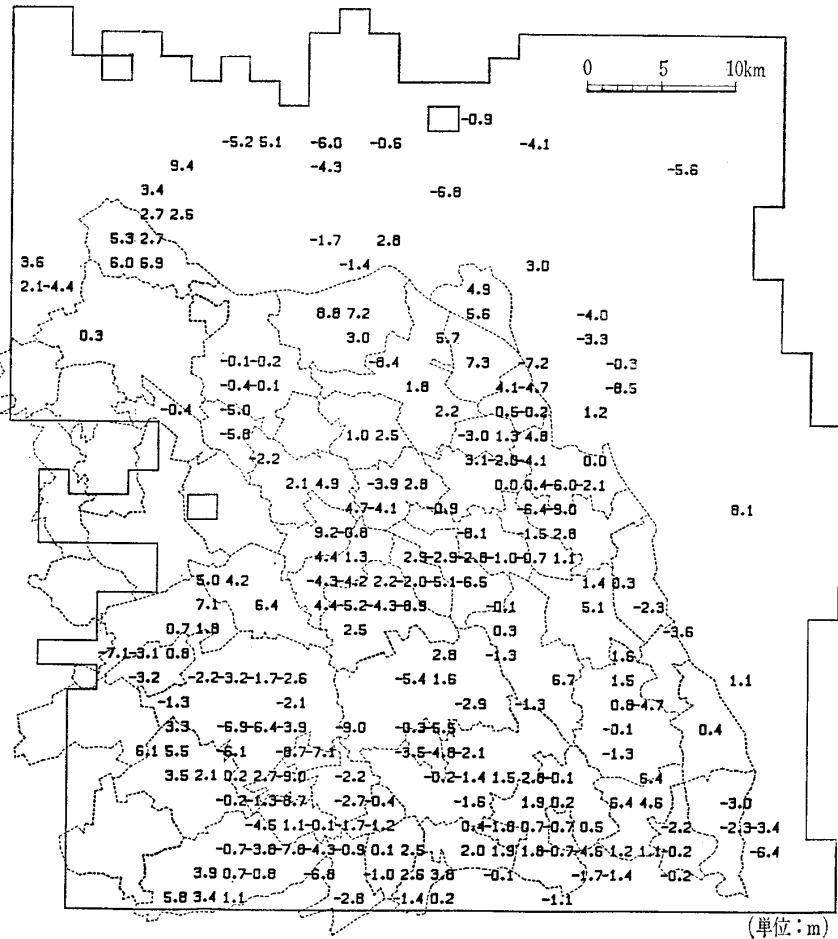


図-10 実測水位と計算水位の誤差(7回平均)

位が高いことによる。

昭和59年現況揚水量5億4千万 $\text{m}^3/\text{年}$ に対して, 最適揚水量は日平均最大で126万 $\text{m}^3/\text{日}$ であり, これを越える揚水量を削減量とすれば, 削減量は2億1千万 $\text{m}^3/\text{年}$ となる。

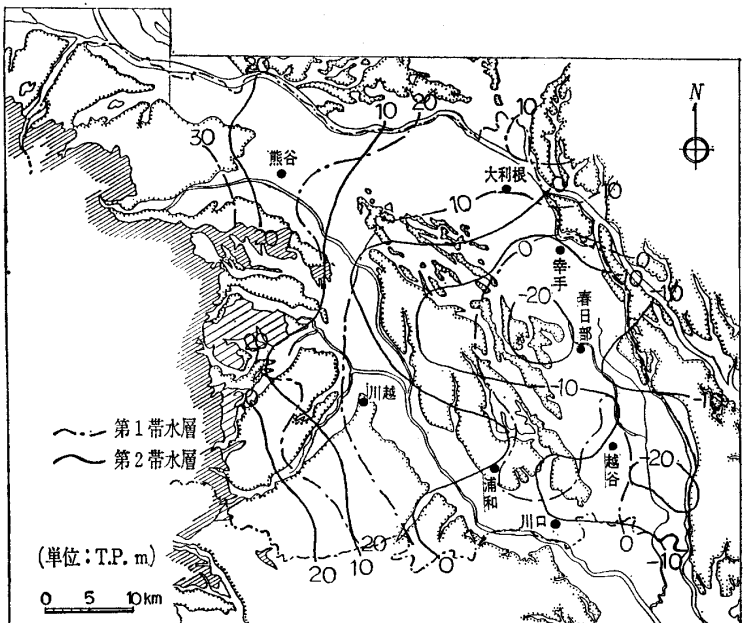
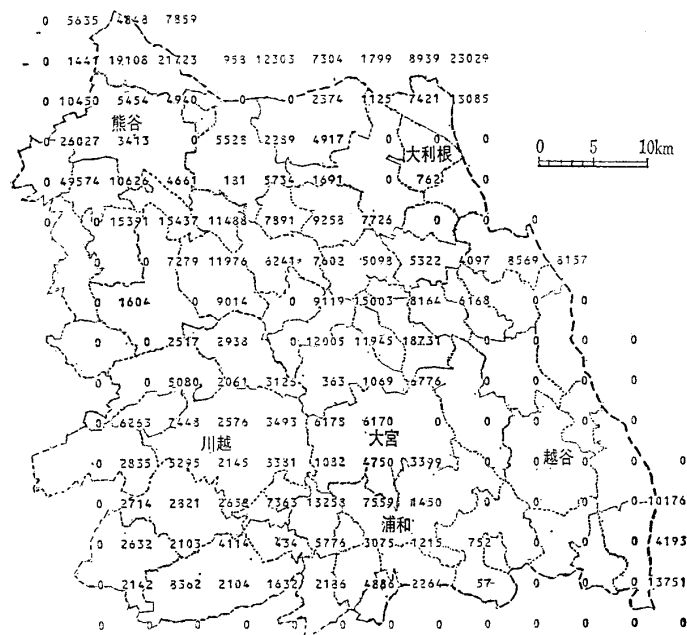
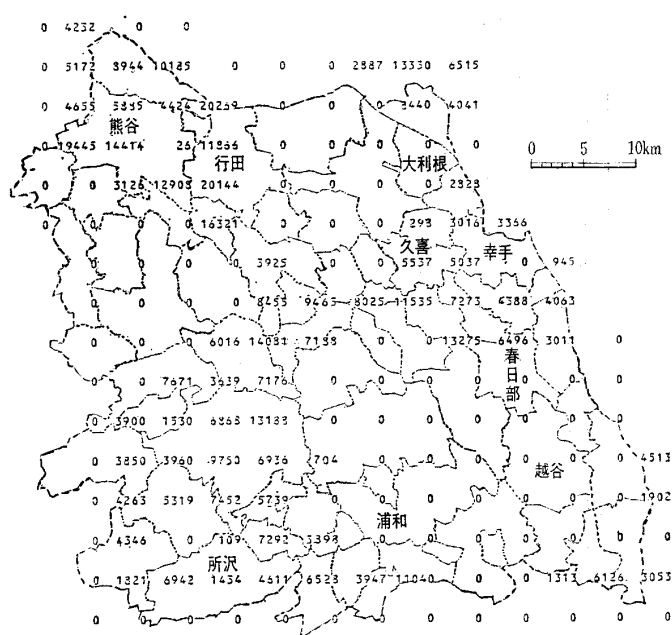


図-11 限界水頭分布図



図一12(a) 最適揚水量算定結果, 第1帯水層最適揚水量分布図
 単位: $\text{m}^3/\text{日}/16 \text{ km}^2$
 L.P. 手法による全揚水点揚水量



図一12(b) 最適揚水量算定結果, 第2帯水層最適揚水量分布図
 単位: $\text{m}^3/\text{日}/16 \text{ km}^2$
 L.P. 手法による全揚水点揚水量

6. むすび

地下水資源と地盤沈下は、表裏一体に昭和の初めより半世紀以上にわたって社会問題として対策が施されてきた。これは今日でも古くて新しい問題である。ここ数年来、地盤沈下など地下水障害の防止と地下水の保全を図りつつ適正揚水しようとする考え方が定着しつつある。一方で、技術的にコンピューターの性能向上や普及によって地下水の数値シミュレーション手法が改良・研究されてきた。埼玉県の場合は、従来の試行錯誤的な地下水シミュレーションに始まり、線形計画法を用いた最適揚水配分の算定、パラメーター同定における最適化手法の導入へと研究・調査が進められてきた。

このようにして求められた適正揚水量やその地域配分は今後実施へと向かうわけであるが、新しい調査結果が得られた段階で新たに検証し、実態に沿うものに修正・改良して行くこととなる。

なお、本報を通じて用いた適正揚水と最適揚水という用語は、科学的論拠を中心に地盤沈下の防止と地下水の保全という観点に立っていることを付言する。

最後に、本調査研究は、埼玉県による地下水・地盤沈下にかかわる観測・研究の埼玉大学工学部地盤水理実験施設への研究委託（昭和50～56年度）に始まり、県企画財政部水資源課による昭和54年度から57年度に至る4年間の地下

水適正揚水量の解析に引き続き、県環境部による「地盤沈下対策調査専門委員会」で昭和57～60年度に進められた11年間に及ぶ一連の成果をふまえてまとめたものである。その間、中央大学（埼玉大学客員教授）林泰造教授、東京電機大学小野久彦教授、東洋大学赤木俊允教授、埼玉大学堀口万吉教授および毎熊輝記助手から有益な助言を賜った。ここに心よりお礼申し上げる次第であります。

参考文献

- 1) 埼玉県環境部：埼玉県地盤沈下調査報告書（昭和59年度観測成果），1985。
- 2) 堀口万吉：埼玉県の地形と地質，埼玉技術研修会テキスト，1981。
- 3) 水収支研究グループ：地下水盆の管理，東海大出版会，1976。
- 4) 佐藤邦明・仁科重磨・藤崎克博：埼玉県平野部における地下水利用計画と地下水管理システムへのアプローチ，第2回水資源に関するシンポジウム前刷集，pp. 492～434，1982。
- 5) 佐藤邦明：埼玉県平野部における地下水揚水配分の適正化解析について，土と基礎，Vol. 31, No. 8, pp. 25～32，1983。
- 6) 藤縄克之・丸山利輔・三野 徹：地下水流動におけるパラメーターの同定について，農業土木学会論文集，No. 74, pp. 47～52，1978。
- 7) Neuman, S.P. and S. Yakowitz: A Statistical Approach to the Inverse Problem of Aquifer Hydrology 1, Theory, Water Resour. Res., Vol. 15, No. 4, pp. 845～860, 1979。
- 8) Sato, K, M. Yamasaki, A. Kamata and K. Fujisaki: A Numerical Approach to Total Control System of Groundwater Resources in Saitama Basin, Proc. Subject A 21st IAHR Congress, Melbourne, pp. 115～120, 1985.
 （原稿受理 1986. 7. 28）