

高松平野における被圧地下水の 水位上昇の機構

MECHANISM OF INCREASE IN CONFINED GROUNDWATER LEVELS IN TAKAMATSU PLAIN

河原能久¹・渡邊健一²・松下健一郎³

Yoshihisa KAWAHARA, Kenichi WATANABE and Kenichiro MATSUSHITA

¹フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 修 (工) 中国電力株式会社 広島北電力所 (〒731-0233 広島市安佐北区亀山西2-3-30)

³学生会員 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 高松市林町2217-20)

Continuous measurement at four stations in Takamatsu plain demonstrates that the confined groundwater levels in the central part of the plain has been recovering over the last decade. The present study aims to clarify its mechanism to provide fundamental information for the water resources development. Two-dimensional numerical simulation is carried out for the confined groundwater using the estimated groundwater withdrawals, the measured unconfined groundwater levels and the interpolated hydrogeologic parameters. The numerical results are found to well reproduce the trends in water level at four stations as well as the water levels at other points that were measured this year. The increase in groundwater level can be explained by the reduction in pumpage by some factories located in the central part of the plain.

Key Words : *confined groundwater, two-dimensional numerical simulation, groundwater exploitation, Takamatsu plain*

1. 序論

香川県は日本でも有数の水不足地域であり、古くから水資源の有効利用が図られてきた。香川用水による吉野川からの導水によって香川県の利水は大幅に安定化した。しかし、香川用水の取水制限が頻発化するにつれ、安定した水資源の確保が重大な社会的要請として強まってきた。

高松平野における地下水調査・解析はこれまでも公的機関によって行われてきた。四国通商産業局¹⁾は、高松市と東部隣接の1市3町を対象として、地下水系の区分や安全揚水量を計算するための地下水位の測定や、帯水層の水理定数を算定するための揚水試験及び水質分析を行っている。香川県²⁾は、香川県中部における主要河川の低地において、その賦存量と補給量並びに適正な地下水利用可能量を算定することを目的として、対象地域の主要部分において、産出率、地下浸透量、域外流出量、域外流入量等を考慮して利用可能な地下水量を推定している。さらに、香川県³⁾は、地下水賦存量や地下水開発可能量を正確に求め、地下水の適正な利用を検討す

るために、気象、水文、水理地質、帯水層、地下水位、地下水利用量のデータを収集し、準3次元モデルを用いて地下水流動解析を行っている。著者ら^{4,5)}も高松平野において被圧・不圧地下水の水位や水質を継続的に測定し、時空間的な変動特性を明らかにし、データベースを作成している。

香川県³⁾によれば、高松平野の被圧地下水位は1980年代から回復の傾向を示している。とりわけ、1995年以降顕著な水位上昇を記録し、今日に至っている。このため、被圧地下水は有望な水資源として着目されている。しかし、香川県³⁾による数値解析では被圧地下水の経年変化を十分には再現できておらず、水資源開発に有効な知見を与えるには至っていない。

本研究は、被圧地下水の流動を対象として、今後の水資源確保の可能性を論ずることが可能な簡易モデルを構築すること、また、近年の水位上昇の原因を明らかにすることを目的としている。そのため、標高、地質、揚水量、地下水位の観測結果、初期条件、境界条件などのデータを収集・加工した。以下では、まず、ArcGISを用いて整備したデータを説明する。次に、数値解析手法の説明を行った後、計算結果の妥当性を検証し、水位上昇



図-1 高松平野の概要

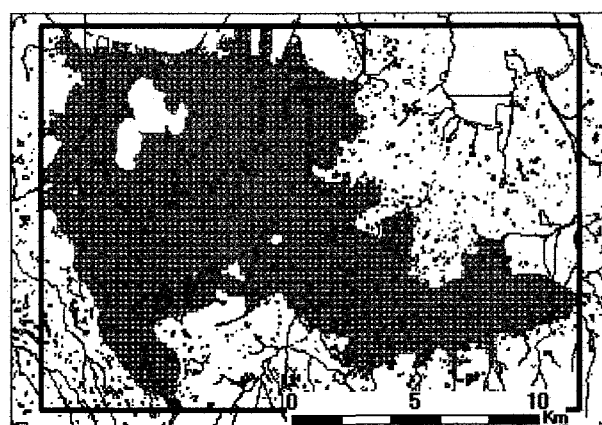
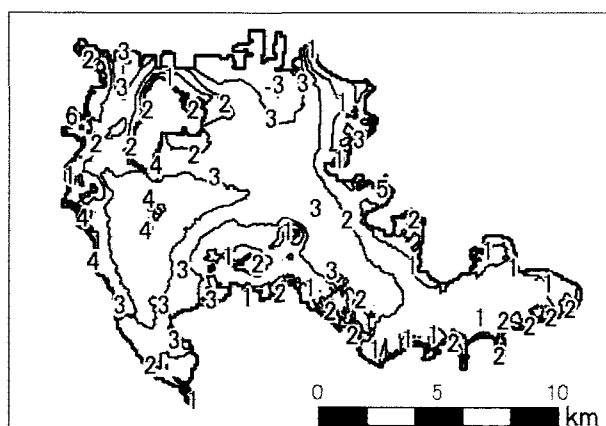
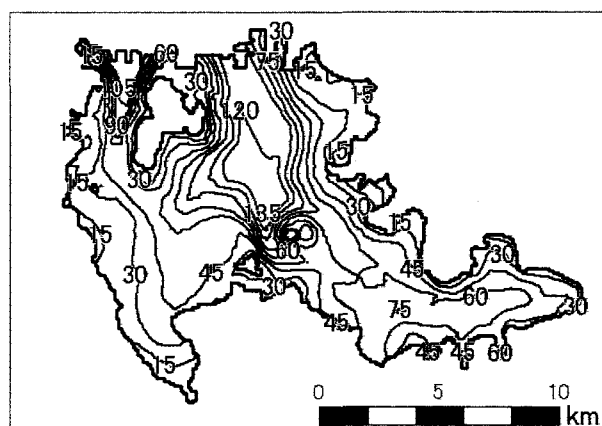


図-2 対象領域



(a) B層の厚さ



(b) C層の厚さ

図-3 各層の厚さ (単位: m)

が企業の移転に伴う揚水量の大幅な削減によって説明できることを示す。

2. 高松平野の概要

(1) 対象領域

図-1に示すように、高松平野は、西部に位置する香東川によって形成された扇状地、北部に連なる三角州、東部に広がる春日川・新川による沖積地から成っている。

本研究で対象とする被圧帯水層は、図-2において、100m正方のメッシュを張ってある部分であり、その範囲は東西方向に21.6km、南北方向に15.6kmである。

(2) 水理地質

a) 帯水層

香川県の解析³⁾を参考にして、本研究では、地質を上位から「沖積層～洪積相当層」（以下、A層とよぶ）、「新第三紀層（三豊層）」（C層）、その間の「難透水層」（B層）と区分した。A層は、主に砂礫、砂層中に粘土・シルトが不規則に重なり、厚さが20m程度となっている。C層中の帯水層は深度40m～100m程度であり、

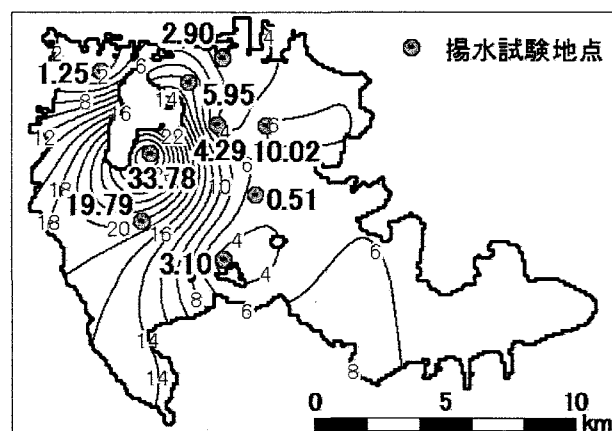


図-4 C層の透水量係数分布 (単位: m/day)

地下水は被圧状態となっている。この層の地下水流動が本研究の解析対象である。B層及びC層の分布を図-3に示す。B層は、沖積層と三豊層との境界に形成されている細粒分が卓越した層であり、広く分布している。

b) 透水係数及び比貯留係数

既往の揚水試験結果¹⁾によれば、透水係数は $6.89 \times 10^{-4} \sim 3.91 \times 10^{-2}$ (cm/sec) の範囲であり、平均値は 1.04×10^{-2} (cm/sec) である。揚水試験結果を基に、透水係数の空間分布を推定した結果を図-4に示す。御坊川中流域付近

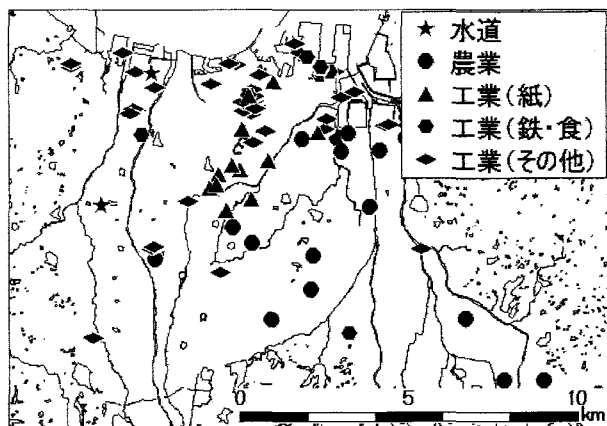


図-5 揚水地点

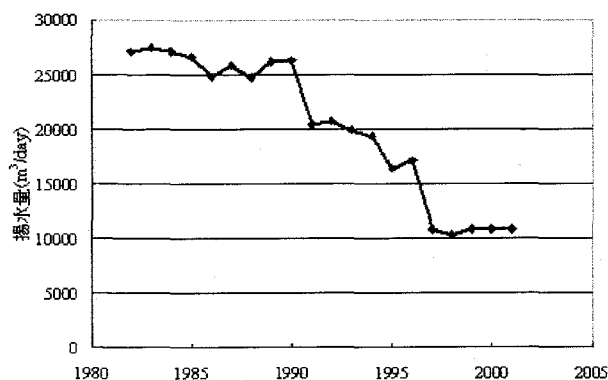
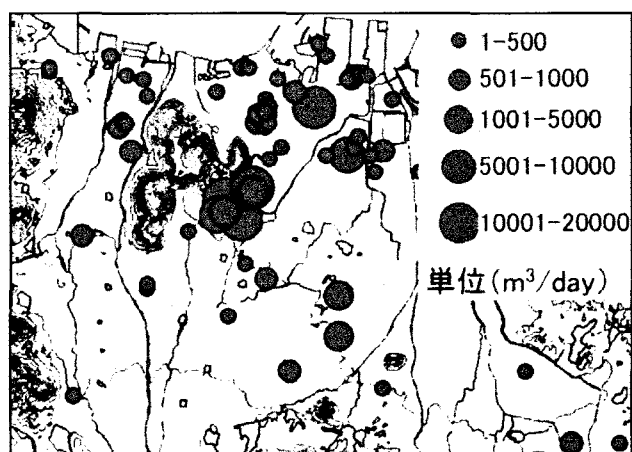
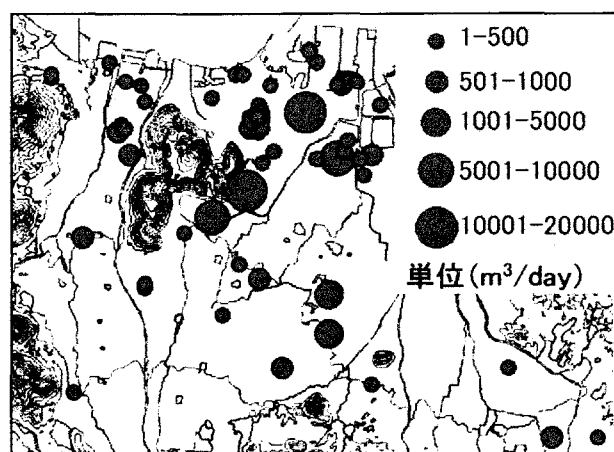


図-6 工業用水量の経年変化



(a) 1995年4月～1997年3月



(b) 1997年4月以降

図-7 揚水量の分布

で最も高く、本津川・香東川下流で最も低くなっている。
比貯留係数は、既往の揚水試験の結果⁹⁾から、全範囲で一定値の 2.5×10^{-4} (m⁻¹) と推定した。

(3) 揚水量の推定

揚水位置の特定と揚水量の推定を水道、農業、工業の各用途別に行った。揚水地点の位置を図-5に示す。

a) 専用水道

揚水位置・揚水量ともに、香川県統計年鑑⁷⁾に基づいて算定した。専用水道の揚水総量は少ないものの、1982年には400 (m³/day) の揚水量が、1999年には652 (m³/day) と約1.6倍に増加している。

b) 農業

全国地下水資料台帳⁸⁾より、農業用の深井戸をすべて抽出した。農業用地下水の利用実態^{9,10)}によると、高松平野の深井戸の揚水量は1975年では5282 (m³/day) となっているが、1996年では9489 (m³/day) となっている。1975年の申告された揚水量が少なかったことが考えられるため、本研究では1996年の揚水量を用いることとした。

c) 工業

全国地下水資料台帳⁸⁾より、工業用の井戸として1979～2001年に申請されている深井戸を抽出した。大規模な

揚水を行っている業種は、パルプ・紙・紙加工製造業 (約75%)、食料品・たばこ製造業・鉄鋼業 (約20%) となり、それらで全体の95%を占めている。

図-6に工業揚水使用量の経年変化を示す。これより、1990年以降に使用量が急激に減少している事がわかる。

しかし、このような資料から推定したある工場の揚水量と独自の調査から推定した揚水量には大幅な相違が見られた。そこで本研究では、独自の調査からの推定量を基に、公表されている統計値の約3倍の揚水量を用いることとした。

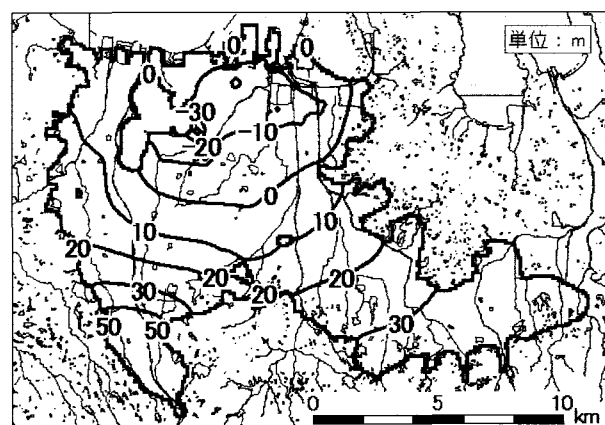
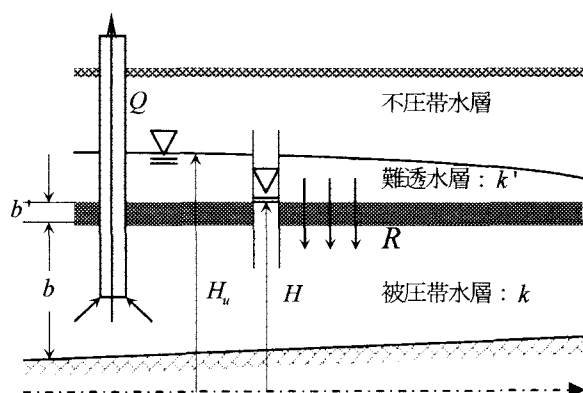
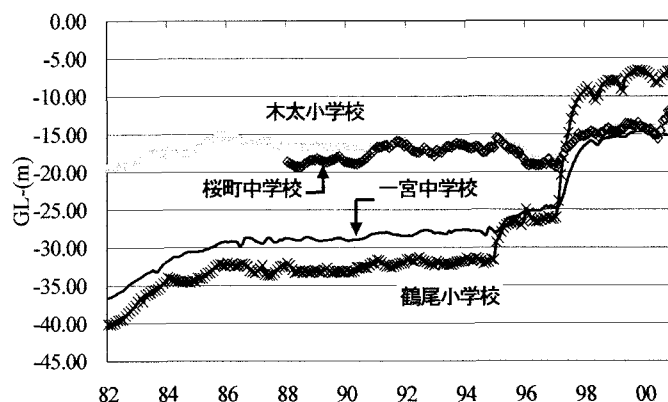
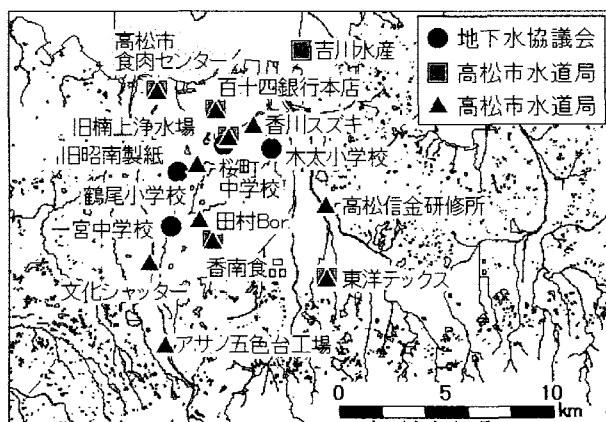
図-7に本研究で使用了全揚水量の分布と水量を示す。

(4) 不圧地下水位

不圧地下水位分布は65地点での観測結果⁵⁾を内挿して求めた。3ヶ月ごとの観測結果に対応して1年分として4パターンを作成した。

(5) 被圧地下水位の経年変化

被圧地下水位の観測地点を図-8に示す。香川中央地域地下水利用対策協議会は、4地点 (一宮中学校、鶴尾小学校、桜町中学校、木太小学校) において、1982年4月から今日に至るまで連続観測を実施している¹¹⁾。高松市



水道局は2000年9月～2003年3月の期間に3カ月おきに観測した¹²⁾。また、高松市水道局は2004年1月に広範囲にわたって水位の一斉観測を行った（図-8中の▲印）。

地下水利用対策協議会による連続観測の観測結果¹¹⁾を図-9に示す。いずれの地点でも地下水位は1982年～1986年にかけて上昇している。さらに、1995年から1997年にかけて、一宮中学校と鶴尾小学校での水位は増加し、1997年に大幅に上昇している。これは、鶴尾小学校付近の工場の操業停止による揚水量の大幅な減少が影響したもの と推測される。しかし、木太小学校と桜町中学校では、1995年から1997年にかけて水位は減少し、1997年以降微増している。

3. 数值解析手法

水理地質データや揚水量データ等が十分に高い信頼性を有しているのであれば3次元解析を行うことが望ましいが、現段階では情報が限られているため、被圧帯水層での地下水流動に対して平面2次元モデルを適用した。図-10に示すように、被圧帯水層と不圧帯水層の間には難透水層を通して水のやりとりが発生するものとした。

(1) 基礎方程式と離散化

基礎方程式は次の通りである.

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H}{\partial y} \right) + R - Q \quad (1)$$

$$T = k(x, y) \cdot b(x, y) \quad (2)$$

$$S = S_g(x, y) \cdot b(x, y) \quad (3)$$

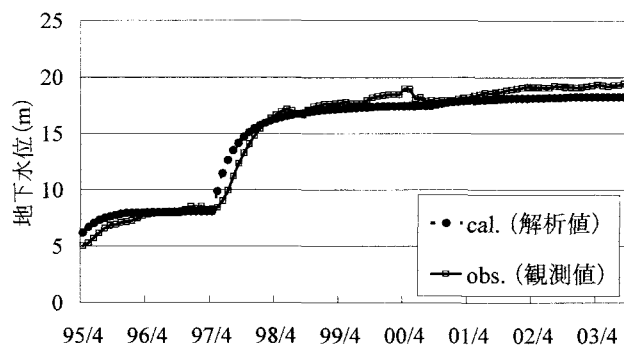
$$R = k' \frac{H_u - H}{h'} \quad (4)$$

ここで、 H : ピエゾ水頭、 R : 不圧地下水からの涵養量、 Q : 被圧地下水の揚水量、 T : 透水量係数、 k : 透水係数、 S_s : 比貯留係数、 b : 帯水層の厚さ、 Hu : 不圧地下水のピエゾ水頭、 k' : 難透水層の透水係数、 b' : 難透水層の厚さである。なお、 k' の値は同地点の k の値の 10^{-5} 倍とした。

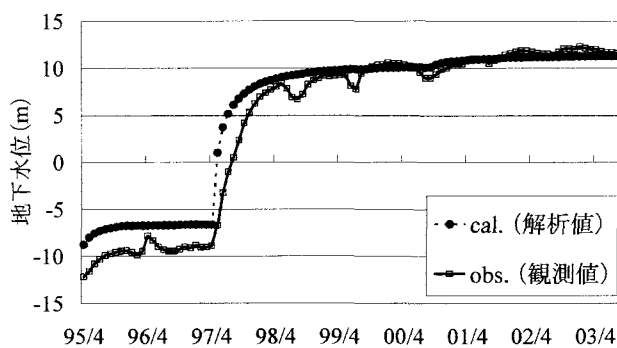
基礎方程式の離散化は有限体積法および完全陰解法により行った。

(2) 対象領域と計算条件

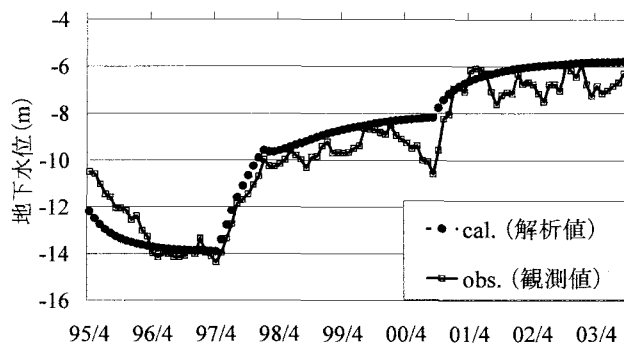
計算対象領域とメッシュ分割を前述の図-2に示す。計算範囲は、東西方向21.6 (km) , 南北方向15.6 (km) であり、格子点間隔は東西方向、南北方向共に100 (m) である。時間刻みは30.4日である。



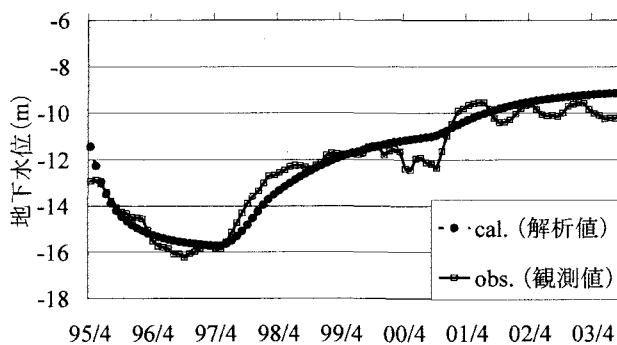
(a) 一宮中学校



(b) 鶴尾小学校



(c) 桜町中学校



(d) 木太小学校

図-12 計算結果と実測値の比較

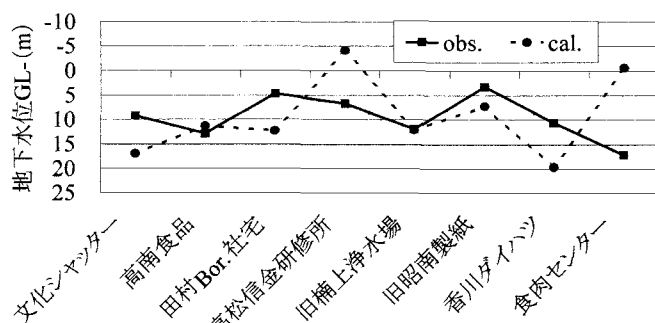


図-13 観測結果との比較

(3) 初期条件, 境界条件

初期条件となる1995年4月の地下水位分布は別途推定した。その分布を図-11に示す。

境界条件は、海に接する境界では水頭を0 (m) , 香東川上流端では水頭を不圧地下水位より20 (m) 低い値に指定した。その他の境界では、境界を横切る流量を0 (m^3/day) と指定した。

4. 計算結果と考察

(1) 水位の経年変化

図-9に示した、一宮中学校、鶴尾小学校、桜町中学校、木太小学校の4地点における計算結果を図-12(a)～(d)に示す。計算結果は地下水位の経年変化を良好に再現している。図-7からわかるように、1995年から1997年にかけて高松平野の中央付近に立地していた製紙会社などが移

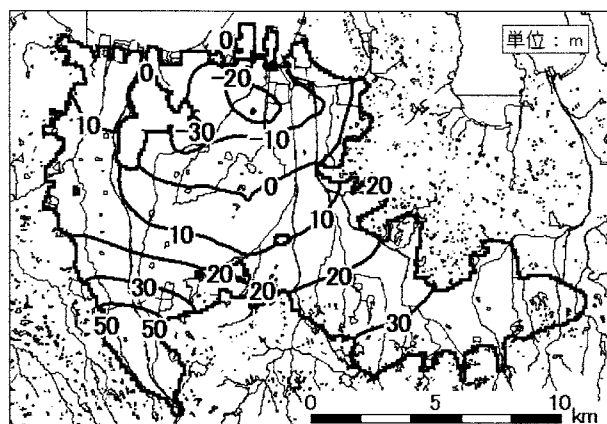
転し、揚水量が大きく減少した。この揚水量の減少を考慮し、境界条件等の他の条件は変化させない本計算が4地点での水位の変化を良好に再現したことから、水位の上昇は特定の工場による揚水量の削減によると判断することができる。

(2) 空間分布

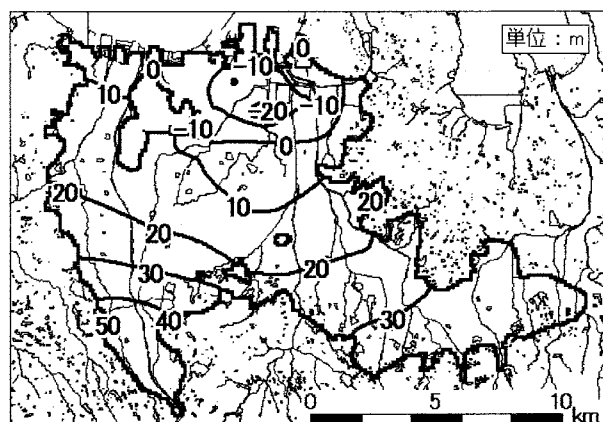
水道局が2004年1月に測定した被圧地下水の水位と計算結果を比較したものが図-13である。観測地点は図-8中の▲印で表されている箇所である。高南食品、高松信金研修所、高松市食肉センター地点では計算結果が水位を過大評価している。計算では、それらの地点での揚水量が小さいため、ゼロとしているが、それが揚水井の水位と計算メッシュ平均の水位の間に差異が生じているものと考えられる。文化シャッター、旧楠上浄水場では計算結果の水位の方が高い値となっている。その理由は現時点では不明である。田村ボーリング社宅については、井戸に不圧地下水が流入しているとのことであり、不一致は理解される。すなわち、計算結果と観測結果との間には若干の差異があるものの、説明がつくものであり、本解析の妥当性を否定するものではない。

(3) 地下水位コンター

図-14に計算結果から得られた1997年と2004年の地下水位を示す。被圧地下水は香東川上流部から瀬戸内海に向って流れる。揚水に伴い局所的に水位が著しく低い地域が存在しているが、1997年から2004年にかけてこの地



(a) 1997年



(b) 2004年

図-14 地下水位のコンター

域が移動している。なお、図-11の1995年の水位分布と1997年のそれと比較すると、揚水量の削減に対応して沿岸域で水位が大きく増加している。

(4) 涵養量と水収支

1995年と2004年における涵養量の計算結果を比較したところ、両時期ともに、高松平野の中央部である御坊川中流域で多くなっている。

計算結果に基づいて被圧帯水層全体での水収支をみると、2004年では、不圧帯水層からの涵養量が約40,000 (m^3/day)、揚水量が約54,000 (m^3/day)であり、揚水量が涵養量を約14,000 (m^3/day) 越えている。この不足分は計算領域の境界を通しての流入、すなわち、香東川上流からの流入量の約8,000 (m^3/day)と海側からの流入量約6,000 (m^3/day)とで補給されている。なお、沿岸部での観測地点（百十四銀行本店）での水質⁴⁾を見る限り、海水侵入の影響は認められていない。計算領域の境界をより海側に設定することの必要性を示唆しているものと考えられる。

5. 結論

高松平野における被圧地下水の流動解析に必要な各種データ（水理地質、用途別の揚水位置と揚水量、不圧地下水位の空間分布と季節変動など）の整備を行った。また、それらのデータを用いて2次元数値解析を行い、地点での連続観測結果を良好に再現するとともに、1997年以降の急激な水位上昇が周辺の製紙工場の揚水量の減少によるものであることを明らかにした。これらの成果は同時に、本解析を用いて高松平野における被圧地下水の揚水位置や揚水量に関する検討することが可能であることを示している。

今後、深井戸に対する揚水試験を実施し、本解析手法の信頼性を確認するとともに、水量だけでなく水質の観

点からも揚水の可能性を検討する必要がある。

謝辞：本研究の実施に際して科学研究費補助金基盤研究(C)(2)（代表者：河原能久）の援助を受けた。また、香川中央地域地下水利用対策協議会、高松市水道局、株式会社四国総合研究所、株式会社四電技術コンサルタントからデータの提供を受けた。さらに、日本工営株式会社から解析上の助言を得た。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 四国通商産業局：香川県高松地域地下水利用適正化調査報告書，pp.34-37，pp.46-52，1975。
- 2) 香川県企画部：地下水利用等基礎調査報告書（昭和54年度国土庁委託），pp.88-95，1980。
- 3) 香川県企画部水資源対策課：平成10年度香川県地下水利用推進調査総括報告書，1999。
- 4) 河原能久，渡邊健一，森長和雄：高松地域における地下水環境の観測，水工学論文集，第46巻，211-216，2002。
- 5) 河原能久，渡邊健一，橋本美智子：高松地域の不圧地下水の水位・水質に及ぼす灌漑の影響，水工学論文集，第47巻，283-288，2003。
- 6) 香川県（東京教育大学地理学研究室）：高松平野および綾川流域における水の賦存量に関する地理学的研究，pp.161-176，1965。
- 7) 香川県企画部統計調査課：香川県統計年鑑，1970～1999。
- 8) 国土交通省・水資源局国土調査課：全国地下水資料台帳（香川），<http://tochi.mlit.go.jp/tockok/tochimizu/catalog.html>。
- 9) 農業用地下水研究グループ：日本の地下水（高松平野），p.654，1984。
- 10) 農林水産省中国四国農政局農村計画部資源課：第4回中国四国地方における農業用地下水の利用実態，p.101，2002。
- 11) 香川中央地域地下水利用対策協議会：地下水位データ（未公開），2003。
- 12) 高松市水道局：地下水位データ（未公開），2003。

（2004.9.30 受付）