

沖積平野における不圧地下水の流動特性

Unconfined Groundwater Flow in Alluvial Plain

鳥取大学工学部 正員 道上 正規

鳥取大学工学部 正員 鈴木 幸一

鳥取大学工学部 正員 松谷 治

1. はじめに

滞水層が比較的良好に発達している沖積平野では、従来地下水の利用が活発に行なわれてきているが、平野の土地利用形態等の変化によって揚水量が減少したり、水需要の増加のために新たに地下水を開発する必要が生じている地域も少なくない。地下水の今後の開発可能性を推定するためには、対象地域内での地下水の流動特性を予じめ明らかにしておく必要がある。本研究は、鳥取県西部（米子市）の日野川によって形成された箕紋屋平野を対象として、沖積平野における不圧地下水の流動特性を現地の水位観測および数値シミュレーションによって明らかにしようとするものである。

箕紋屋平野は、図-1に示すように西方の日野川と東方の佐陀川とはさまれていて、日野川が運んできた土砂によってできた沖積平野である。図中の太い実線は現在の地形の等高線および自然堤防を考慮して推定した旧河道であり、大きくわけると三度転流していることがわかる。この転流については歴史書等からも裏付けられている。¹⁾ 箕紋屋平野では従来地下水の利用が盛んで、現在主なものだけでも図中●印で示している7箇所一帯で地下水および河川伏流水が揚水されていて、水道水および工業用水として利用されている。その総揚水量は1日約20万 m^3 で、米子市の全上水道水1日約7万 m^3 （夏期）は全てこの地下水でまかなわれている。

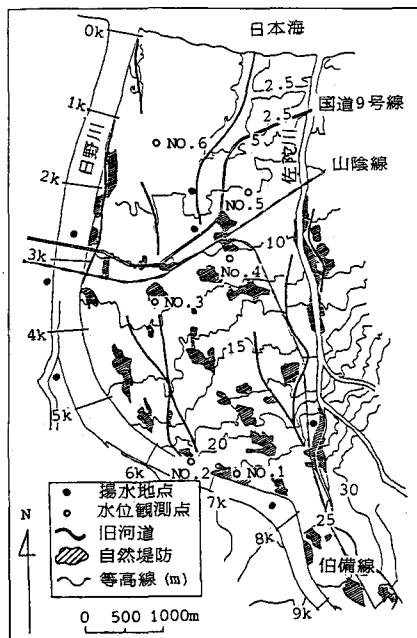


図-1 箕紋屋平野の概況

2. 箕紋屋平野の地下水位調査

図-1の○印で示す6箇所の浅い古井戸に自記水位計を設置し、昭和58年1月から10月までの10ヶ月間の不圧地下水位を連続的に測定した。図-2に測定した不圧地下水位の日変化を日雨量とともに示している。全体的にいえることは、雨量によって水位はかなり変動はしているものの夏期（5月中旬から9月下旬まで）と冬期とでかなり異なり、夏期の方が50cmから場所によっては1m程度高い。一般に、地下水位は地下水補給源の状態、地下水の揚水の状態によって異なる。箕紋屋平野はその約70%が水田であり、この水田が一つの大きな地下水補給源と考えられ、水田に水が張られ始める5月中旬頃から水位が急に上昇し水田に水のなくなる9月末以降水位が低下している。すなわち、夏期は比較的揚水量が大きいにもかかわらず、ちょうど水田に水が入っている期間だけ水位が高くなっている。日野川にごく近い観測点No.1だけは冬期の水位変動が大きく河川の影響を強く受けていると考えられる。図-3は日雨量と地下水位変動との相関を求めるため、6月1日から9月30日の期間（夏期）と1月1日から4月30日の期間（冬期）とにわけて、日雨量と日水位との相互相関係数を求めたものの一例である。地下水位と日雨量との相関は夏期ではかなりあるものの冬期ではほとんどない。この原因として、夏期の地下水位が高いこと、あるいは図-2にみられるように水位に

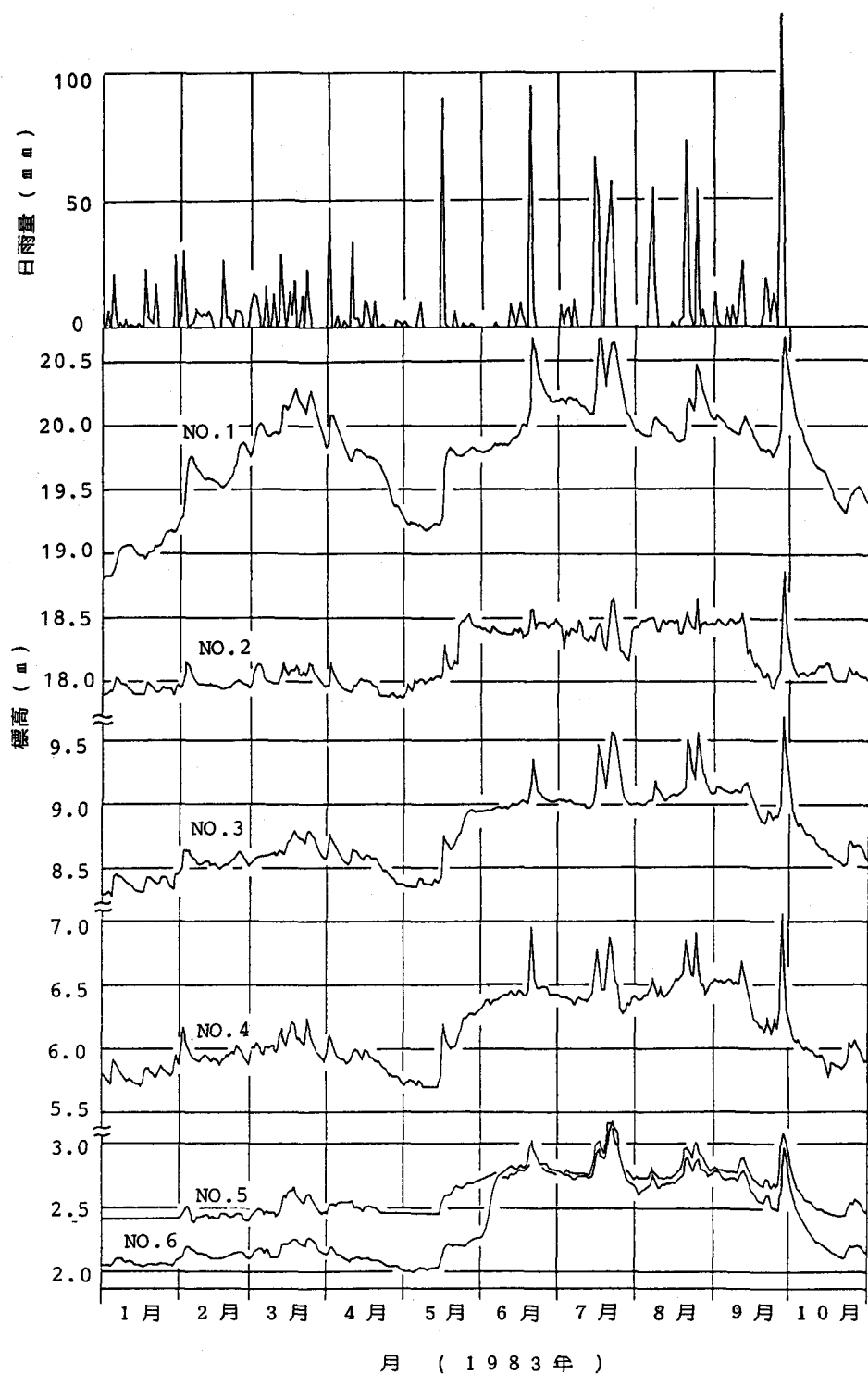


図-2 不圧地下水位の日変化

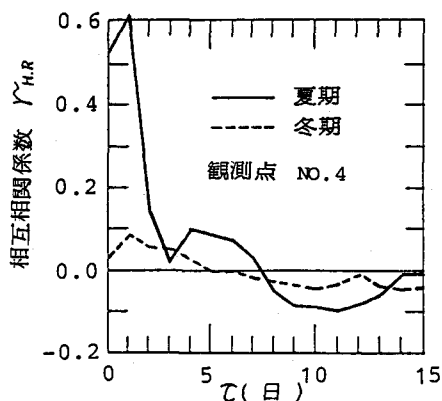


図-3 地下水位と日雨量の相関係数

影響を及ぼすと思われる50mm程度以上の日雨量は夏期に多いというこの地方の降雨特性などが考えられる。ずらし日数 τ が1日のとき相関係数が最大となっており、1日あるいは2日以内という比較的短い時間で地下水位に雨水の影響が及んでいることが認められる。ここに示した例は、観測点が平野のほぼ中央部である $\Delta 4$ について示したが、

$\Delta 1$ を除く他の観測点についてもほぼ同様であった。図-4は夏期と冬期における平野内の地下水位分布を示したもので、実線は昭和57年12月、破線は昭和58年8月の状態を平野内に点在する約30箇所の古井戸の水位を観測することによって描いたものである。平野全体にわたって夏期の水位が高くなっていることは前述のとおりであるが、水位の低い冬期には地下水汲み上げの局所的影響が平野部南端付近で見られるようである。

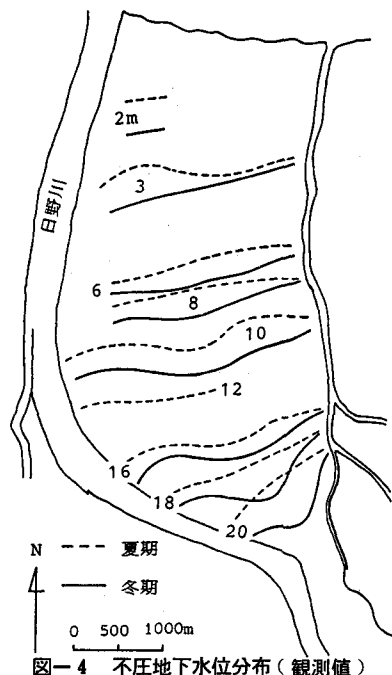


図-4 不圧地下水位分布(観測値)

3. 地下水位分布の数値シミュレーション

有限要素解析法によって、夏期および冬期のそれぞれの地下水位分布を数値解析するが、境界条件は日野川・佐陀川の両河川および日本海の水位を与えるためすべて基本境界条件とし、定常状態のシミュレーションである。

3・1 基礎式と有限要素法の定式化

水平面内における x 方向(東の方向)および y 方向(北の方向)の流速は鉛直方向(滯水層の厚さ方向)に変化しないこと、水の圧縮性は無視できること、および透水係数 K は等方性であることを仮定すると、定常状態における不圧地下水の連続式は、図-5の記号を用いて、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ Kh \frac{\partial}{\partial x} (h_0 + h) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ Kh \frac{\partial}{\partial y} (h_0 + h) \right\} + q_s - q_l = 0 \quad (1)$$

と表わされる。ここに、 $h_0(x, y)$ は基準水平面からの不透水層上面標高、 $h(x, y)$ は不圧地下水の水深、 q_s および q_l は単位時間、単位面積当りのそれぞれ浸透量および揚水量である。(1)式は h に関する非線形方程式であるから、式中の一部の h をまず $\hat{h}$ と仮定し(1)式を線形化して解く。²⁾ すなわち、(1)式で

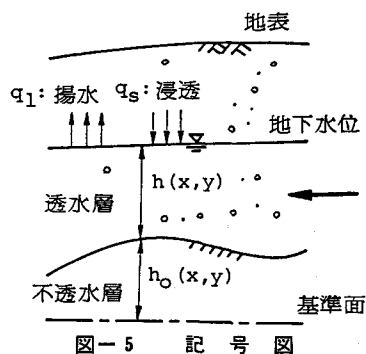


図-5 記号図

$$Kh \frac{\partial}{\partial x} (h_0 + h) = K\hat{h} \frac{\partial}{\partial x} (h_0 + h), \quad Kh \frac{\partial}{\partial y} (h_0 + h) = K\hat{h} \frac{\partial}{\partial y} (h_0 + h)$$

として、まず $\hat{h}$ を仮定して(1)式から第1近似の h を求め、求まった h を新たに $\hat{h}$ として第2近似を求める。以下これを繰り返して、 h が仮定した $\hat{h}$ と等しくなったときの h を解とする。

いま、計算領域を図-6に示すような三角形要素で分割し、この要素内の水深 h を各節点の水深 h_i (未知数) と線形の形状関数 N_i とで、次式(2)で表す。

$$h = N_i h_i, \quad N_i = a_i + b_i x + c_i y \quad (2)$$

(i について総和規約)

$$\text{ただし, } a_i = (x_j y_k - x_k y_j) / 2S, \quad b_i = (y_j - y_k) / 2S, \quad c_i = (x_k - x_j) / 2S$$

$$2S = (y_2 - y_3)(x_1 - x_3) - (y_3 - y_1)(x_3 - x_2), \quad (i=1,2,3, j=2,3,1, k=3,1,2)$$

同様に、三角形要素内の仮定水深 $\hat{h}$ および不透水層標高 h_0 も各節点の $\hat{h}_i$ (仮定) および h_{0i} (既知) と N_i とで $\hat{h} = N_i \hat{h}_i$ および $h_0 = N_i h_{0i}$ で表わすすると、(1)式に Galerkin 法²⁾ を適用すれば、

$$\iint N_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K N_k \hat{h}_k \frac{\partial}{\partial x} (N_i h_{0j} + N_j h_j) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K N_k \hat{h}_k \frac{\partial}{\partial y} (N_i h_{0j} + N_j h_j) \right\} + q_s - q_f \right] dx dy = 0 \quad (3)$$

である。ただし、積分領域は一つの三角形要素である。(3)式の積分を行なうと、最終的に、未知数 h_j に関する三つの方程式(4) ($i=1,2,3$) が得られる。

$$D_k \hat{h}_k (b_i b_j + c_i c_j) h_j = (q_s - q_f) D_i / K - D_k \hat{h}_k (b_i b_j + c_i c_j) h_{0j} \quad (4)$$

(k, j については総和規約)

($i=1,2,3, j=1,2,3, k=1,2,3$)

$$\text{ただし, } D_i = 2S(a_i/2 + b_i x_i/6 + c_i y_i/6 + c_i y_3/3)$$

全ての三角形要素について(4)式を求め同一節点についての影響は線形に加え合わせることによって全体方程式が、全節点の水深 h を未知数とする連立一次方程式として求まる。

3.2 諸定数と境界条件

有限要素メッシュは、図-7に示すように三角形要素 283 個、節点数 165 個であって、揚水地点周辺で要素の大きさをやや細かくしている。破線で示す境界は、日野川・佐陀川の両河川および日本海であって、全て基本境界条件となっている。すなわち、河川境界での地下水位は平均河床高とし、海境界での地下水位は海水位で 0m として与える。

不透水層上面の標高 h_0 は、従来の地質調査の資料^{3), 4)} を基にして推定したが、その分布は図-7 に点線で示している。不透水層上面の等高線が南に凸であり、平野中央部の標高が比較的小さく滞水層も平野中央部に厚く、両河川に近づくほど薄くなっていることがわかっている。

箕蚊屋平野は約70%が水田で、その他が市街地および畑地となっているが、図中の斜線部は水田ではないため、たとえ夏期において水田に水が入っている場合でもそこからの浸透水 q_s は

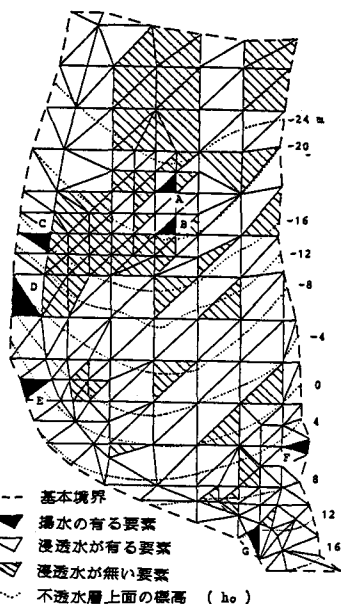
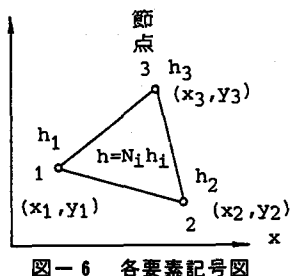


図-7 有限要素メッシュ

ないものとする。冬期においては平野全体で地表からの浸透水はないものとし、夏期においては水田の部分から浸透水 q_s があるものとする。浸透量 q_s はこの平野の減水深⁵⁾を考慮して $q_s=1.5\times 10^{-7}m/s$ とする。図-7の黒くぬった要素(A~G)で示す場所での揚水があり、各場所での揚水量 $Q(=q_f\cdot S, S$;要素の面積)は揚水実績資料⁵⁾に基づいて $Q_A=0.070m^3/s, Q_B=0.100m^3/s, Q_C=0.730m^3/s, Q_D=0.195m^3/s, Q_E=0.455m^3/s, Q_F=0.017m^3/s, Q_G=0.463m^3/s$ とした。

透水係数 K については、平野全体での資料がないのでここでは便宜的に、従来得られている平野内の数箇所^{4), 8)}の値を参考にして $K=3.0\times 10^{-3}m/s$ で一定であるとして計算を行なう。

なお、連立一次方程式はピボット選択を行ないながらガウスの消去法によって解いた。

3.3 シミュレーションの結果と考察

図-8および図-9はそれぞれ夏期および冬期における地下水位分布を示しており、図中実線はシミュレーションの結果で破線は実測結果を示している。局所的には実測結果と計算結果とでかなり違うところもあるが、夏期の水位が冬期に比してかなり高くなっていることや等高線の分布形状がほぼ等しいことなど、全体としては、計算結果は実測結果をよくシミュレートしていると考えられる。図中のA~G地点で揚水があるが、その内大量に揚水しているC、EおよびG地点付近ではとくに冬期において等高線が局所的にゆがんでおり揚水の影響が現われている。地表から浸透水がある夏期や揚水量の少ない地点では揚水の影響はあまり大きくないことが計算結果より認められる。局所的にみると、図-9の冬期にはG地点の揚水の影響と思われるものが、水位18m付近まで及んでいるが計算では揚水の影響はそれほど広範囲には及んでいない。計算においては、透水係数を平野全体で一定としているが、実際には長期間旧河道であった場所とそうでない場所とでかなり異なっており、冬期にG地点の揚水の影響が強く現われている上記の場所は図-1に示すように二つの旧河道に挟まれた地域で透水係数が小さくなっているものと考えられる。

図-10および図-11はそれぞれ夏期および冬期における各地点における地下水流動の方向およびその方向に垂直な断面の単位幅流量を矢印の方向と大ききで示したものである。これは、各要素の重心の位置の水面

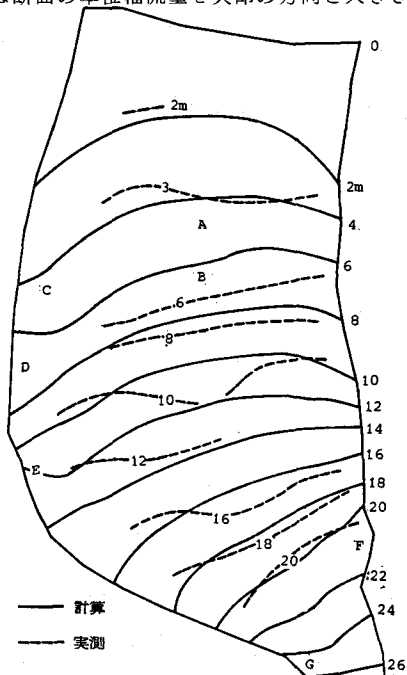


図-8 不圧地下水位分布(夏期)

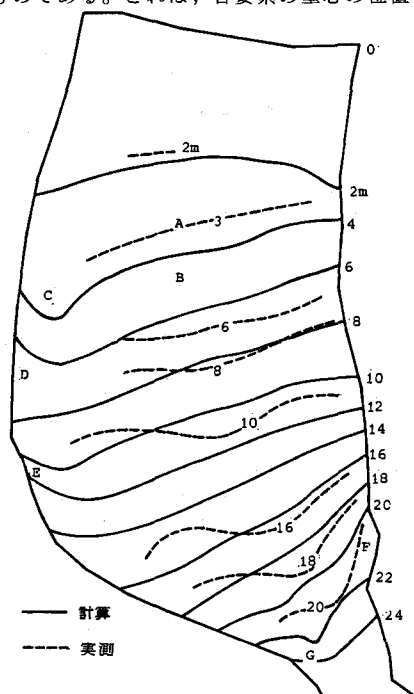


図-9 不圧地下水位分布(冬期)

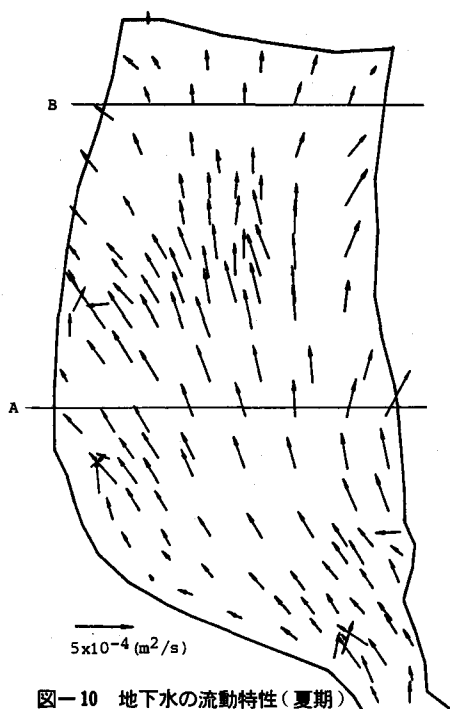


図-10 地下水の流動特性(夏期)

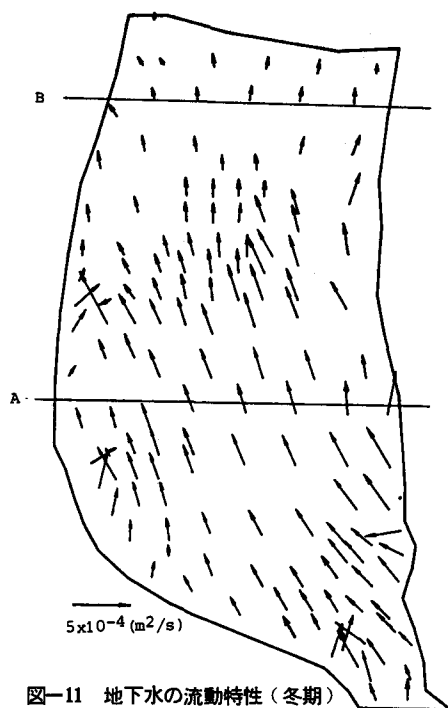


図-11 地下水の流動特性(冬期)

勾配から流向および流速を計算し、その位置の水深 h と流速をかけて単位幅流量を求めたものである。夏期においては、河川境界は地下水の補給源ではなくむしろ流出場所となっている。したがって、主な地下水の補給源は水田であり、単位面積当りの浸透量を $1.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ とすると平野全体の水田から 1 日約 $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ の水が地下水となっていることになる。しかも、この量のほとんどは図-7の水田の分布からわかるように平野の南半部で浸透している。図中の A 断面および B 断面での 1 日の地下水流量を計算するとそれぞれ $84,900 \text{ m}^3/\text{日}$ および $35,200 \text{ m}^3/\text{日}$ となっている。一方、冬期においては地表からの浸透水はないとしており、図-11からわかるように地下水は河川境界から補給されている様子がよくわかる。また、平野中央部の揚水の影響によってその東側の流向が夏期に比してかなり揚水地点の方に変化させられていることが認められる。冬期の A 断面および B 断面での流量はそれぞれ $79,500 \text{ m}^3/\text{日}$ および $26,000 \text{ m}^3/\text{日}$ と夏期よりかなり小さくなっている。

4 おわりに

水田が多く残っている沖積平野においては、水田に水が入っている夏期とそうでない時期とで地下水位がかなり異なっていることを観測によって明らかにした。また、有限要素法による数値解析によってその地下水位特性をある程度シミュレートできることを示すとともに、地下水の流動方向および流量をも推定した。

今後、不透水層の標高、透水係数あるいは境界での水位条件などをより詳細に評価できれば、さらにシミュレーションの精度は向上すると考える。

参考文献

- 1) 建設省倉吉工事事務所：地域社会と河川の歴史(Ⅱ)日野川，1978.
- 2) J.J.Connor, C.A.Brebbia (奥村敏恵 訳)：流体解析への有限要素法の応用，サイエンス社，1978.
- 3) 鳥取県：鳥取県水理地質図説明書，1964.
- 4) 米子市水道局：二本木地区地下水調査工事報告書，1982.
- 5) 鳥取県・米子市：西部地域水需給予測調査報告書，1980.
- 6) 米子市水道局：河岡地区地下水調査工事報告書，1980.