

# 地下水位上昇期の観測値を用いた 雨水の涵養モデル検討

## STUDY ON THE RAINWATER RECHARGE MODEL USING THE GROUNDWATER VARIATION

堤 敦<sup>1</sup>・神野健二<sup>2</sup>・大枝良直<sup>3</sup>

Atsushi TSUTSUMI, Kenji JINNO and Yoshinao OHEDA

<sup>1</sup> 正会員 九州大学大学院工学研究院博士課程(後期) (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>2</sup> 正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境システム科学研究センター (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>3</sup> 正会員 工博 九州大学講師 新キャンパス計画推進室 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

A numerical model with a groundwater recharge module has been developed to predict both fresh and salt water movement at a planned new campus of Kyushu University in the western part of Fukuoka City. Emphasis is placed on how to utilize the monitored groundwater variation for the modeling of hourly groundwater recharge from rainfall.

The result of the study reveals that the model can reproduce the variations of the monitored fresh groundwater level appropriately and the depth of fresh-salt water interface. Moreover, the possible extent of both the drawdown of groundwater level and the induced saltwater intrusion are predicted.

**Key Words :** *fresh-salt groundwater flow, rainwater recharge model, surface runoff coefficient, land surface alternation*

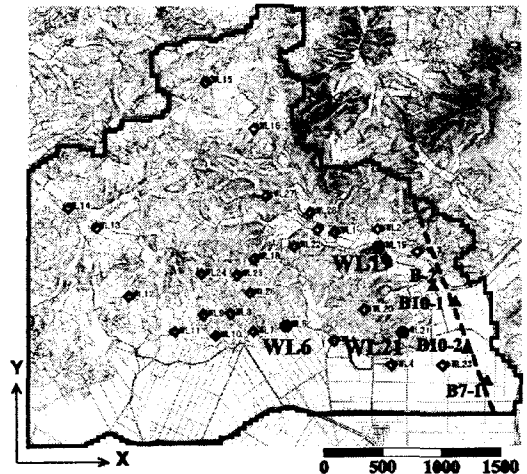
### 1. はじめに

数値計算モデルによる地下水流動のシミュレーションを行う場合、降雨の浸透特性の時間的・空間的分布を明らかにしておく必要がある。地表面から不圧地下水面までの不飽和帯における降雨の浸透過程を再現するために、不飽和浸透計算を行うことがあるが、この場合には、地盤の不飽和浸透特性などを記述するパラメーターの同定を行う必要がある。また、実際の不飽和浸透過程を追跡するためには、鉛直方向の節点間隔を数 cm オーダーとする必要がある。これに対して、現実のフィールドを対象とした地下水の流動解析を行う場合、地下水面から基盤面までは数 10m に及ぶことが少なくない。電子計算機が大幅に進歩した現在においても、このようなモデルを構築し、計算する場合、計算機に及ぼす負担は非常に大きなものになる。

本報で提案する涵養モデルは地下水位の上昇期のデータと時間雨量のみを用いて地下への涵養量を推定する 1 段タンクモデルである。地盤内部における複雑な不飽和浸透過程をこのタンクモデルを使ってブラックボックス化することにより、簡易に涵養量を求めることができる。

### 2. 解析対象地区

本報で述べる解析には、現在、福岡市西部地区に建設中である九州大学新キャンパス敷地内およびその周辺地区において 1995 年に降観測されている地下水位および電気伝導度等のデータを使用した。主要な観測地点を図-1 に示すが、このうち、WL1~WL27 では地下水位の連続観測を、B7-1 や B10-2 等では電気伝導度を定期的に観測している。



\* 破線は塩水侵入の検討断面位置

図-1 地下水位観測地点

なお、この涵養モデルは、新キャンパス周辺に広がる集落および農地の地下水環境の変化を予測するために構築された準3次元淡塩2相流地下水流動モデルに適用した。

### 3. 地下水涵養モデル<sup>1)</sup>の考え方

本報では、降雨の浸透特性を表す地下水涵養モデルとして、図-2 に示す1段タンクモデルを考える。このモデルは地下水位の上昇期のみデータと時間雨量データを用いて、降雨による地下水への涵養量を推定するものである。なお、降水中の数時間を対象とするので蒸発散量  $ET(t)$  は考慮していない。

$r(t)$  を時間雨量、 $F_i(t)$  を開発前の地覆条件  $i$  の表面流出率、 $Y\{h_w(t) - R_0\}$  を  $h_w(t) \geq R_0$  のとき1、 $h_w(t) < R_0$  のとき0をとるステップ関数、 $h_w(t)$  をタンク内の水位、 $R_0$  を流出孔の高さ、 $a_L$  を流出係数、 $q_w(t)$  を不飽和帯から地下水面への涵養量として次式を考える。

タンク内の水位の変化式として

$$\frac{dh_w}{dt} = (1 - F_i(t)) \cdot r(t) - q_w(t) - ET(t) \quad (1)$$

地下水への涵養量を表す式として

$$q_w(t) = a_L \{h_w(t) - R_0\} \times Y\{h_w(t) - R_0\} \quad (2)$$

を用いる。

一方、観測井内の水位を  $h_f$  とすると、降雨に対するその上昇に対しては次式が成り立つ。

$$\frac{\partial h_f(x, y, t)}{\partial t} = \frac{q_w(t)}{n_e} \quad (3)$$

この場合、 $F_i(t)$ 、 $a_L$ 、 $R_0$ 、 $n_e$  の4つの未知数が存在するが、このうちの  $R_0$  と  $n_e$  については、観測期間内の各降雨イベントでの降雨量とそれによる地下水位の上昇高さを基に後述する方法で推定する。従って、上式による計算値が観測される地下水位の上昇に対して最も合う  $a_L$  と  $F_i(t)$  との組み合わせを求めることにより降雨  $r(t)$  に対する応答モデルを作ることができる。

そこで、 $a_L$  と  $F_i(t)$  の値を変化させ、次式で示される評価関数  $J$  が最小になる組み合わせを求める。

$$J = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\{h_{fobs}(t) - h_{fcal}(t)\}^2}{N}} \quad (4)$$

ここに、 $h_{fobs}(t)$  : 観測地点における地下水位上昇の実測値 (mm)

$h_{fcal}(t)$  : 式(3)による地下水位上昇量の計算値 (mm)

$N$  : 観測時間数

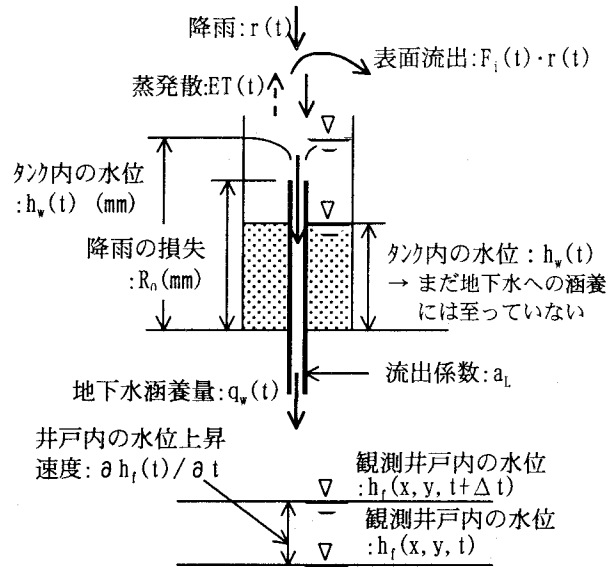


図-2 涵養モデル

### 4. 表面流出率についての考え方

涵養モデルに適用する表面流出率  $F_i(t)$  の値について次の3つの考え方を仮定し、それぞれ方法1、方法2、方法3とする。

- ・**方法1** : 表面流出率は降雨強度あるいは累積降雨量に依存せず、地覆状態に固有の値として解析する方法。 $F_i(t)$  の値は式(5)で表されるが、地下水位および時間雨量データから  $F_{i\infty}$  を同定する。

$$F_i(t) = F_{i\infty} (= \text{一定}) \quad (5)$$

- ・**方法2** : 表面流出率は降雨強度  $r(t)$  に依存して変化するものとして解析する方法。 $F_i(t)$  の値は式(6)で表されるものと仮定する。この場合、 $F_{i\infty}$  の値として表-1 に示すような技術資料の値を適用する。

$$F_i(t) = \frac{r(t)}{r(t) + (r)_{1/2}} \cdot F_{i\infty} \quad (6)$$

ここに、

$F_i(t)$  : 降雨強度  $r(t)$  (mm/hr) のときの表面流出率

$F_{i\infty}$  :  $r(t) = \infty$  の場合に対応する  $F_i(t)$  の極限值

$(r)_{1/2}$  :  $F_i(t) = F_{i\infty}/2$  の場合に対応する  $r(t)$  の値

- ・**方法3** : 表面流出率は累積降雨量 ( $\Sigma r(t)$ ) に依存して変化するものとして解析する方法。 $F_i(t)$  の値は式(7)で表されるものと仮定する。この場合、 $F_{i\infty}$  の値は方法2と同様の取り扱いとする。

$$F_i(t) = \frac{\Sigma r(t)}{\Sigma r(t) + (r_s)_{1/2}} \cdot F_{i\infty} \quad (7)$$

ここに、

$F_i(t)$  : 累積降雨量  $\Sigma r(t)$  (mm) のときの表面流出率

$\Sigma r(t)$  : 累積降雨量 (mm)

$F_{i\infty}$  :  $\Sigma r(t) = \infty$  の場合に対応する  $F_i(t)$  の極限值

$(r_s)_{1/2}$  :  $F_i(t) = F_{i\infty}/2$  の場合に対応する  $\Sigma r(t)$  の値

表-1 地表面の種類別基礎流出係数<sup>2)</sup>

| 地表面の種類        |           | 流出係数      |
|---------------|-----------|-----------|
| 路面            | 一般舗装      | 0.70~0.90 |
|               | 透水性舗装     | 0.30~0.40 |
|               | 砂利道       | 0.30~0.70 |
| 路肩・法肩         | 細粒土       | 0.40~0.65 |
|               | 粗粒土       | 0.10~0.30 |
|               | 硬岩        | 0.70~0.85 |
|               | 軟岩        | 0.50~0.75 |
| 砂質土の芝生        | 勾配 0~2%   | 0.05~0.10 |
|               | 2~7%      | 0.10~0.15 |
|               | 7%以上      | 0.15~0.20 |
| 粘性土の芝生        | 勾配 0~2%   | 0.13~0.17 |
|               | 2~7%      | 0.18~0.22 |
|               | 7%以上      | 0.25~0.35 |
| 屋間運動芝・樹木の多い公園 | 根地        | 1.00      |
|               | 運動場       | 0.20~0.40 |
|               | 芝・樹木の多い公園 | 0.40~0.80 |
|               | 勾配のゆるい山地  | 0.10~0.25 |
|               | 勾配の急な山地   | 0.30      |
|               |           | 0.50      |
| 田面・水面         |           | 0.70~0.80 |
|               | 畑地        | 0.10~0.30 |

方法2と方法3によれば、地覆状態が変化する開発後の予測が可能になる。

## 5. 解析の方法

このモデルは降雨により地下水位が上昇している期間のみを解析する。地下水位の水平方向の流動が生じているかどうかは水位上昇の状況を見て判断する。

### (1) 初期損失雨量 $R_0$ と有効空隙率 $n_e$

涵養高さ ( $\Sigma r - R_0$ ) (mm) は1つの継続する降雨イベントの総降雨量  $\Sigma r$  (mm) から初期損失雨量  $R_0$  (mm) を差し引いて求める。この場合、 $R_0$  は一雨の総降雨量  $\Sigma r$  の中で、地下水位の上昇が認められなかった最大の  $\Sigma r$  の値とする。また、有効空隙率  $n_e$  は、本来ならば、先行降雨を考慮して検討すべきであるが、当座は広域的な流動モデルを作ることが必要であるため、涵養高さ ( $\Sigma r - R_0$ ) を地下水位上昇量  $\Delta H$  で割って算出する。

観測孔 WL19 における一雨の総降雨量と地下水位上昇量との関係を図-3 に示す。この図から、 $R_0$  は5 mm程度と推定される。また、観測孔 WL19 における涵養高さと地下水位上昇量との関係を図-4 に示す。この図の場合、 $n_e$  は0.114 から0.471 の間にあることから、平均値0.257をこの地点の有効空隙率とする。

### (2) 流出係数 ( $a_L$ ) と表面流出率 ( $F_i(t)$ )

上で求めた有効空隙率  $n_e$  と初期損失雨量  $R_0$  を地下水涵養モデル式(1)~(3)に適用して、評価関数  $J$  の値が最小になるタンクの流出係数  $a_L$  と表面流出率  $F_i(t)$  との組み合わせを決定する。この場合、方法1では  $a_L$  と  $F_{i\infty}$  を、方法2では  $a_L$  と  $(r)_{1/2}$  を、方法3では  $a_L$  と  $(r_s)_{1/2}$  を求める。

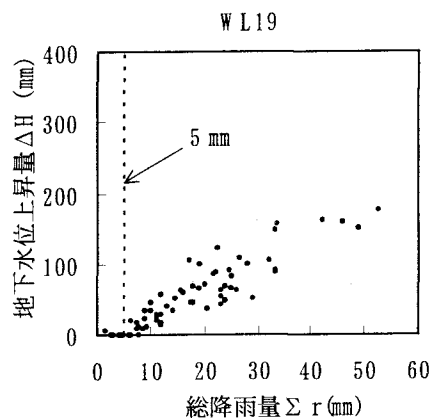


図-3 一雨の総降雨量 ( $\Sigma r$ ) と地下水位上昇量 ( $\Delta H$ ) との関係

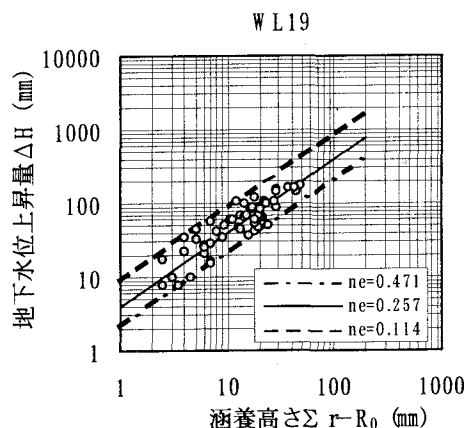
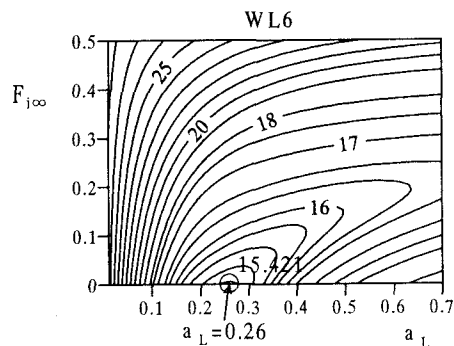


図-4 地下水位上昇量 ( $\Delta H$ ) と涵養高さ ( $\Sigma r - R_0$ ) との関係

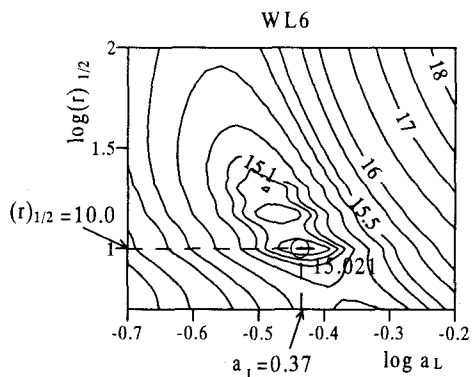
観測孔 WL6 における種々の  $a_L$  とこれらの値による評価関数  $J$  の等値線を図-5 に示す。なお、この場合の方法2と方法3の  $F_{i\infty}$  の値については、WL6 が民家の敷地内に位置する観測孔であるため、表-1 での間地の平均値0.3を適用した。図-5 から、観測孔 WL6 の場合における  $a_L$  と  $F_{i\infty}$ 、 $a_L$  と  $(r)_{1/2}$ 、 $a_L$  と  $(r_s)_{1/2}$  の最適な組み合わせは表-2 のようになった。

また、表-2 に示す値を用いた場合の表面流出率  $F_i(t)$  と降雨強度  $r(t)$  との関係 (方法3では  $F_i(t)$  と  $\Sigma r(t)$  との関係) を図-6 に示す。図中の記号は同定に用いた降雨イベント (9 イベント) での実績の雨量強度 (あるいは累積降雨量) に対する  $F_i(t)$  の値を示している。なお、方法1の場合の  $F_i(t)$  は図-5 から0.0である。

### 方法1



方法 2



方法 3

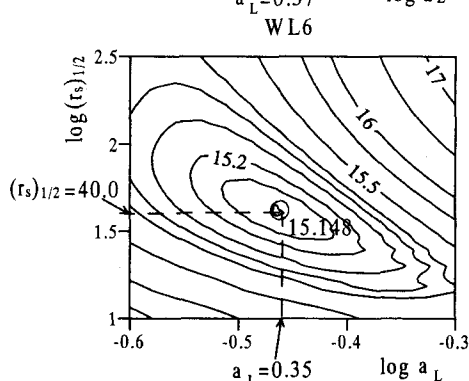


図-5 感度解析の結果 (評価関数 J の等値線)

表-2 パラメーターの最適組み合わせ (WL6)

| 検討方法 | $a_L$<br>(1/hr) | $F_{i\infty}$ | $(r)_{1/2}$ または<br>$(r_s)_{1/2}$ (mm) | 評価関数<br>J の値 |
|------|-----------------|---------------|---------------------------------------|--------------|
| 方法 1 | 0.26            | 0.0           | —                                     | 15.421       |
| 方法 2 | 0.37            | 0.3           | 10.0                                  | 15.021       |
| 方法 3 | 0.35            | 0.3           | 40.0                                  | 15.148       |

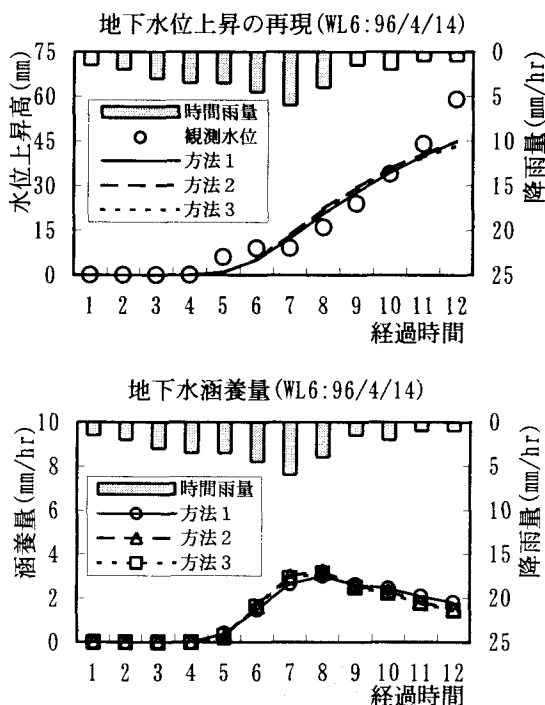


図-7 観測孔 WL6 における地下水位上昇の再現状況と地下水涵養量の時系列変化

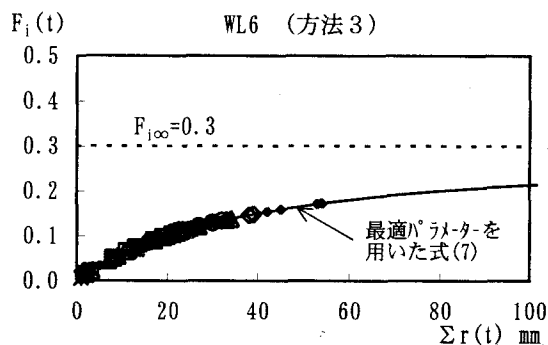
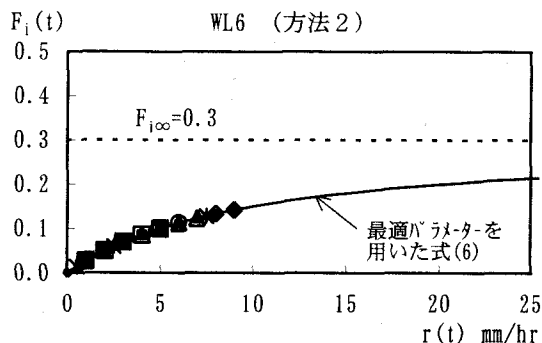


図-6 表面流出率の変化

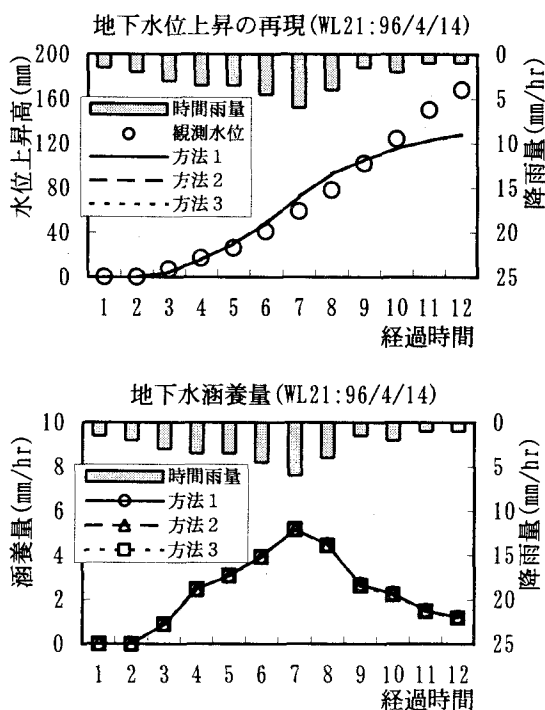


図-8 観測孔 WL21 における地下水位上昇の再現状況と地下水涵養量の時系列変化

## 6. モデルの検証

降雨の降り始めにおける観測孔 WL6 と WL21 での地下水位上昇の状況を再現した結果を図-7 と図-8 の上段に示す。また、その場合の地下水涵養量の時系列変化をそれぞれの下段に示す。

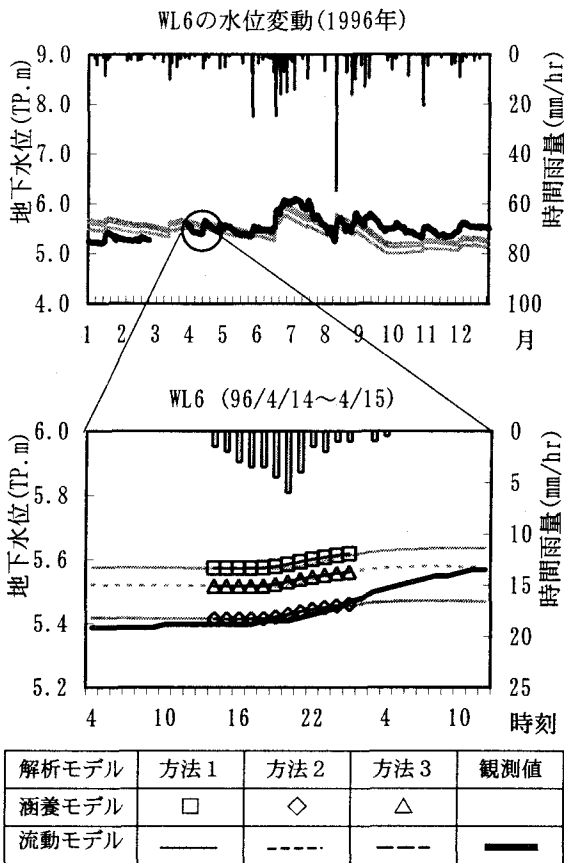


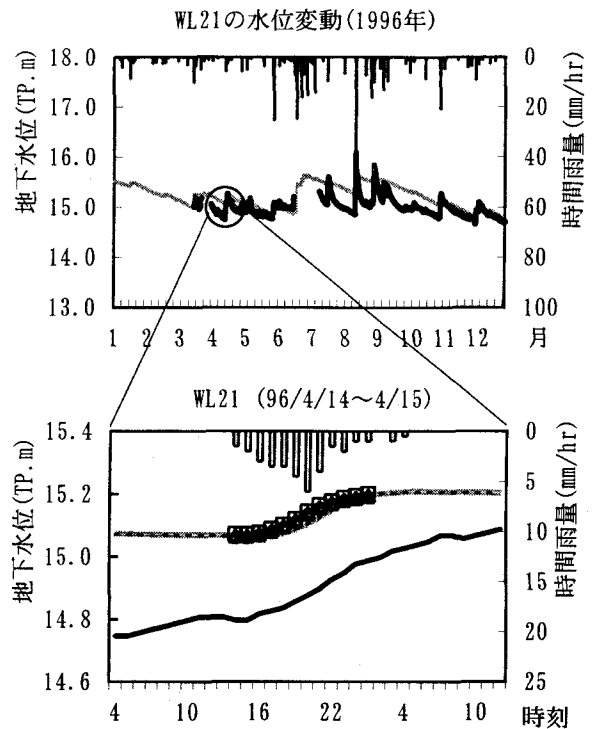
図-9 涵養モデルの適用例と流動モデルによる水位変動の比較 (WL6)

再現状況はいずれの場合も良好である。また、表面流出率  $F_1(t)$  の設定方法による地下水位上昇の状況、涵養量の時間変化ともに大きな違いは見られない。なお、再現期間の後半部において観測水位と計算水位とが徐々に離れていく傾向が見られるが、これについては、降雨の降り始めからの時間経過に伴って、地下水の水平流動が始まったためと解釈される。

## 7. 準3次元淡塩2相流モデルへの適用例<sup>3)</sup>

九州大学新キャンパス建設地周辺の集落および農地では地下水を生活用水あるいはハウス栽培等の農業用水として利用している。この地区では以前から地下水の塩水化等の問題が深刻な環境問題として取り上げられており、九州大学の移転による地下水位低下あるいは塩水化の増大が懸念されている。

このような環境問題に対して、準3次元淡塩2相流モデルによる地下水塩水化のシミュレーションを実施した。1995年4月～1998年3月を対象に、地下水位の変動、淡塩境界面の分布状況に関するモデルの検証を行った。



記号等の表示は図-9の場合と同様

図-10 涵養モデルの適用例と流動モデルによる水位変動の比較 (WL21)

このモデルの基礎式は次のような連立方程式になる。

$$n_e \frac{\partial (h_f - h_s)}{\partial t} = - \frac{\partial \{ (h_f - h_s) \cdot u_f \}}{\partial x} - \frac{\partial \{ (h_f - h_s) \cdot v_f \}}{\partial y} - \sum_m Q_m(x, y, t) \delta(x - x_m) \delta(y - y_m) + q_w(x, y, t) \quad (8)$$

$$n_e \frac{\partial h_s}{\partial t} = - \frac{\partial \{ [h_s - b(x, y)] \cdot u_s \}}{\partial x} - \frac{\partial \{ [h_s - b(x, y)] \cdot v_s \}}{\partial y} \quad (9)$$

ここに、 $h_f$ ：基準面から鉛直上方にとった淡水面の高さ、 $h_s$ ：基準面からの淡塩境界面の高さ（ここでは非混合を仮定）、 $u_f$ 、 $v_f$ 、 $u_s$ 、 $v_s$ ：淡水域および塩水域の水平方向流速成分、 $Q_m(x, y, t)$ ：井戸の揚水量、 $(x_m, y_m)$ ：井戸位置、 $\delta$ ：デルタ関数で、井戸の位置表示のため使用、 $q_w(x, y, t)$ ：降雨の地下水への涵養量（涵養モデルで検討）、 $b(x, y)$ ： $(x, y)$ 地点の基準面からの基盤面の高さ、 $n_e$ ：有効空隙率である。

また、 $u_f$ 、 $v_f$ 、 $u_s$ 、 $v_s$ はダルシーの法則により、淡水域および塩水域の速度ポテンシャル  $\phi_f$ 、 $\phi_s$  と次の関係がある。

$$\begin{aligned}
u_f &= -k \frac{\partial \phi_f}{\partial x}, \quad v_f = -k \frac{\partial \phi_f}{\partial y} \\
u_s &= -k \frac{\partial \phi_s}{\partial x}, \quad v_s = -k \frac{\partial \phi_s}{\partial y} \\
\phi_f &= h_f, \quad \phi_s = \frac{\rho_f}{\rho_s} \cdot h_f + \frac{\Delta \rho}{\rho_s} \cdot h_s
\end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 $\rho_f$ ：淡水の密度、 $\rho_s$ ：塩水の密度、 $\Delta \rho = \rho_s - \rho_f$ である。

準3次元2相流モデルによって計算された地下水位の変動状況を図-9と図-10に示す。各下段の図中に示した記号の時系列は図-7および図-8の検証期間のものである。なお、涵養モデルによる検証開始時刻の地下水位は流動計算による計算水位に合わせている。また、流動計算による水位変動は涵養モデル検証期間の前後約10時間ずつを示している。

図-9と図-10に示した計算例では、観測水位の上昇量に比べていずれも計算値の上昇量が小さくなっているが、水位上昇の状況は概ね再現できている。特に、観測水位との水位差は概ね50cm以内に収まっており、かなり高い精度の計算ができたものと考えている。

次に、準3次元淡塩2相流モデルの検証計算のうち、1998年3月31日時点での塩水の侵入および淡水面の分布状況を図-11に示す。なお、計算地点は図-1で検討断面位置として示した地点である。

このモデルは非混合モデルであるが、計算による淡塩境界面は図のように電気伝導度(EC)が20,000  $\mu\text{S/cm}$ 以上に急増する深度付近を通過しており、塩水侵入の再現についても概ね良好な結果が得られた。

なお、本地区の低平地では地盤標高が低く、淡水面も地表面下1m以内に分布している。また、水路が縦横に走っている。モデルでは水路の部分の地表面標高よりも下げた。従って、水路に排水効果が現われ、凸状の淡塩境界面となっている。このことが当地区の地下水に対する塩水侵入を助長している原因と判断している。

## 8. おわりに

本報では1段タンクモデルによる地下水涵養モデルを提案し、実際の降雨と地下水位観測データを使ってモデルの検証を行った。更に、流動モデルに涵養モデルを組み込んだ場合の計算例を示した。その結果、地下水位変動をかなり高い精度で再現できることが確認された。

また、本報では3つの表面流出率 $F_1(l)$ の設定方法を検討した。それによれば、いずれの方法を採用してもパラメーターを適切に推定すれば、結果には大きな違いが生じないことが判った。

なお、各々のモデルには以下のような特徴がある。

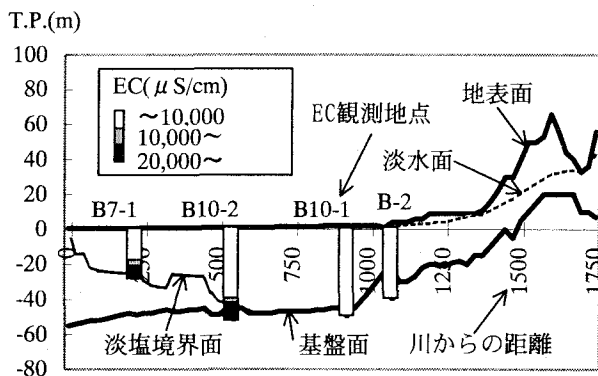


図-11 準3次元淡塩2相流モデルによる塩水侵入の再現結果

### 方法1について：

例えば、地表面が粘性土あるいは砂質土の場合、表面流出率 $F_{i\infty}$ に関しては前者で大きく、後者で小さいと考えるのが一般的であろう。一方、タンクの流出係数 $a_l$ (絞り)に関しては地盤の透水性が小さい前者で小さく、後者で大きいであろう。これに対して、図-5の方法1では、 $F_{i\infty}$ が大きいときには $a_l$ も大きくしないと誤差が大きくなる傾向を示しており、上述の物理的特性と相反している。

### 方法2および3について：

数値モデルによる地下水流動シミュレーションを行う場合、将来予測として、あるいは、影響に対する対策工の検討として、現況とは異なる地覆状態の地盤に対して計算することがある。この点、地覆状態に応じた値を $F_{i\infty}$ (表-1の数値)として与えることができる方法2あるいは方法3は実用性が高いと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり貴重な資料および助言を頂いた九州大学移転推進室ほかの方々に御礼申し上げます。また、本学卒業生西崎朋和君（現在、大成建設株式会社）には、計算の一部を協力していただきました。ここに記して感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 安藤義久・虫明功臣・高橋裕：丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響，第25回水理講演会論文集，pp.197～208，1981.
- 2) 文部省大臣官房文教施設部技術課：平成9年3月 文部省 土木設計資料，pp.47，1997.
- 3) 上田年比古・藤野和徳・平野文昭・神野健二：地下水塩水楔の侵入に関する数値解，水道協会雑誌第561号，pp.21～28，1981.

(2000. 10. 2受付)