

## 衛星 SAR データを利用した地下水シミュレーションの試み

渡辺仙州（京大工） 米田稔（同） 森澤眞輔（同）

### 1. はじめに

地下水シミュレーションを行うには、境界条件、涵養条件、揚水条件などが必要になる。本研究では水田からの涵養が大きな影響を持つと考えられる地域において、水田の分布を JERS-1 衛星 SAR データを用いて推定することを試みた。様々な人工衛星からのリモートセンシングデータの内、SAR データは天候に左右されずに定期的にデータ採取が可能であるという利点を持っている。本研究では SAR データの輝度の時間変化から水田を認識する方法を考えた。この方法を岐阜県各務原市の地下水シミュレーションに応用した結果を SAR データによる水田の認識方法とともに報告する。

### 2. 地下水流動シミュレーション

地下水流動モデルによる入力データについては、初期地下水位、有効空隙率、透水量係数、境界条件、降雨量、水田からの涵養（一定期間中の条件付き）、揚水量、地表面の標高、土地区分である。透水量係数については 1993 年の通産省が各務原市で行った帯水層試験結果を、降雨については各務原市消防本部の気象月報（1996～1998）を、揚水量については通産省の揚水量分布のデータを用いた。他のデータについては後述する。パラメータフィッティングおよびシミュレーション結果の信頼性の評価については、1995 年 11 月 13 日～1997 年 11 月 3 日における各務原市各地に設置された Fig. 1 に示す 7 本の地下水位観測井戸（炉端遺跡・市役所・山下町・鶺沼丸子・新加納少林寺・五反田・木曾川河川敷。ただし木曾川河川敷については境界条件の河川水として扱う）での地下水位の実測値を用いて計算値との比較を行う。



Fig.1 各務原市観測井戸位置図(白丸は観測井戸の位置，太線は数値シミュレーションに用いる領域)  
(国土地理院：数理地図200000(「地図画像」)，CD-ROM版，平成9年7月の地図を加工)

(1) 基礎式

各務原市の帯水層構造は単層構造の不圧地下水である。このことから、数値シミュレーションモデルを水平二次元流で再現する方法がこれまでもとられてきた。今回もその方法を採用することとする。地下水流動の基礎方程式はダルシーの式と連続の式より、次式が得られる。

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + r - q \quad (1)$$

ここでSは貯留係数、 $T_x, T_y$ はx,y方向の透水量係数、rは単位面積・単位時間あたりの降雨による涵養量、qは単位面積・単位時間あたりの揚水量となる。この計算には、空間微分には有限要素法を、時間微分には中心差分法をもちいた離散化を行う。

(2) タンクモデル

地下水流動モデルの垂直方向についてFig. 2のような二段のタンクモデルを用いる。一段目のタンクは降雨の浸透、蒸発散、表面流出を表し、二段目のタンクは地下水水位への浸透による時間遅れを表す。ここで  $E_p$  は蒸発散量、rは降雨量、Kは表面流出率、Fは流出孔の高さ、S1,S2は下方への浸透率である。パラメータフィッティングによって決定された各値を Table 1 に示す。なお降雨量 r について各務原市消防本部の気象月報にある実測値を、蒸発散量  $E_p$  については各日々の値を Thornthwaite 法<sup>1)</sup>を用いて算出した計算値を用いる。またDの不浸透面積率については、SAR データによって得られた各地点での地表面状態を、都市・畑・水田・山地・都市-畑・都市-田の6種類に分類し、各についてパラメータの設定を行った(土地区分については後述)。

Fig. 2において1段目のタンクの水位をh1、2段目のタンクの水位をh2とすれば h1 h2は次式で表される。ここでtは時間(日単位)のパラメータである。

$$\begin{aligned} h1(t+1) &= h1(t) + r(t) - E_p(t) - S1 \cdot h1(t) \\ &= (1 - S1) \cdot h1(t) + r(t) - E_p(t) \quad (2) \end{aligned}$$

$$h2(t+1) = S1 \cdot h1(t) + (1 - S2) \cdot h2(t) \quad (3)$$

ただし  $h1(t) > F$  のとき、(2)式は次式のように変形される。

$$h1(t+1) = (1 - S1 - K) \cdot h1(t) + r(t) - E_p(t) \quad (2)'$$

ここで算出された値  $S2 \cdot h2(t+1)$ を t+1 日目の新たな地下水への降雨浸透量として数値計算に用いる。数値計

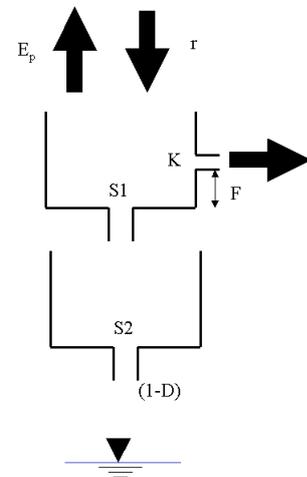


Fig.2 タンクモデルの概念図

パラメータ		値
D	都市	0.5
	畑	1.0
	水田	1.0
	山地	1.0
	都市-畑	0.75
	都市-田	0.75
K		0.2
F		50.0
S1		0.9
S2		0.1

Table1 同定したタンクパラメータ

算に際しては、各地点での不浸透面積率を  $D$  としたときに、この新たな降雨量に  $(1-D)$  をかけることにより、各地での降雨の浸透量を表現するものとする。

### (3) 不飽和浸透による地下水位上限の制御

数値シミュレーションにおいて、地下水位がその地点での地表面の標高を大きく越えることがある。これを防ぐためには地下水位は地表面の高さ以上にはならないという条件を設定する。今、標高値を  $H_s$ 、有効空隙率を  $S$ 、地下水位を  $h$ 、地表面の制約が無い場合の単位離散化時間当たり涵養量を  $Kh$  とすると、

$$H_w = H_s - Kh / S \quad (4)$$

ここで得られた値  $H_w$  よりも地下水位  $h$  が大きくなったときに浸透量の減少が起こるものとして、地表面標高値による制約下での単位離散化時間当たり涵養量  $Kh'$  を以下のようにする。

$$Kh' = S \cdot (H_s - h) \quad (5)$$

### (4) 水田からの涵養

各務原台地西および北側の平地部では、田に水を引く5月ごろから地下水位が急激に上昇しはじめ、水を抜く9月ごろから下降しはじめる。この5ヶ月の間に行われる水田からの涵養は、各務原地下水位上昇寄与率の約50%にもなるという。今までの研究では降雨と水田からの涵養が各務原の地下水上昇の主要原因となっていることより、水田からの涵養については無視することはできない。今回の数値シミュレーションでは、パラメータフィッティングによって得られた涵養量  $17.5(\text{mm}/\text{日})$  を、同じくパラメータフィッティングによって得られた涵養期間5月31日~8月19日の2ヶ月半に対して、土地区分における「水田」で適応することとする (Table 2。土地区分については後述)。またその半分の涵養量を土地区分「都市-田」に与えることとする。さらに「都市」においても一部小さな田が含まれ、水田涵養が幾分かあると推測されることから田の1/4の涵養量  $4.375(\text{mm}/\text{日})$  を与えた。また土地区分の水田において、涵養期間中は水田に水が張っていることから、地下への降雨の浸透は起こりにくいと考えられるため、涵養期間中のみ土地区分での降雨の浸透率  $(1-D)$  は Table 2 のように変化するものとする。

土地区分	涵養量 (mm/日)	浸透率(1-D)の変化 (涵養期間中のみ)
都市	4.375	× 1.0
畑	0.0	× 1.0
水田	17.5	× 0.2
山地	0.0	× 1.0
都市-畑	0.0	× 1.0
都市-田	8.75	× 0.4

Table2 同定した土地区分ごとの涵養量  
(涵養期間5月31日~8月19日)

### (5) 境界条件

各務原市は、南を木曽川が、東と北とを山地が囲んでいるので、それに関しては前述のような境界条件をつかうことができる。西側のほうに関しては粗いメッシュをつかって、遠く西へ離れた延長線上に固定された境界条件を設定することとする (計算領域については Fig.1)。木曽川の水位は東の方が高く、西に行くにしたがって下がっていく。地下水位もおよそ同じ傾向

を持って、東から西に河川水位に沿うような形で下がっていくと考えられる。西側境界が木曽川と交わる地点での木曽川の水位が約 0m であるので、西側の境界条件としては 0m の定水位条件を採用した。

## (6) 土地区分

様々な人工衛星からのリモートセンシングデータの内、SAR データは天候に左右されずに定期的にデータ採取が可能であるという利点を持っている。土地区分については 1994 年から 1997 年までの 3 ヶ月おきの 10 種類の SAR データを用いて地表面状態を都市、畑、水田、山地、都市-畑、都市-田の六種類に分類した。複数の SAR データを比較するに際しては、SAR データ特有のスペックル雑音の低減や画像の重ね合わせなどの前処理を行う必要がある。順を追って以下に記す。

### 1) フィルタリング

SAR データにおけるスペックル雑音を低減するためのフィルタリング処理を行う。フィルタリング処理には Frost Filter<sup>2)</sup>を用いて、5×5 の範囲の平滑化を行った<sup>3)</sup>。なおこれらの処理には市販の地理空間解析ソフト TNT mips (Micro Images 社) を用いた。

### 2) SAR 画像の重ね合わせ

フィルタリング処理を行った SAR 画像から、計算に用いる領域だけを切り取る。切り取られた画像の重ね合わせについては TNT mips を用いた。重ね合わせにおいては、一つの SAR データに GCP を設定し、それを参照にして残りの SAR データに GCP を付加した。なお SAR データでは標高差のある区域では歪みを生じるので、GCP を付加する場合に注意しなければならない。本研究では GCP を設定するポイントとして、木曽川などの川にかかるいくつかの橋を利用して重ね合わせを行った。そののち、参照にした SAR データのサイズに他のデータのサイズを合わせた。

### 3) 地表面状態の分類

重ね合わせを終えた 10 種類の SAR データを用いて、都市、畑、水田、山地、都市-畑、都市-田の六種類に地表面状態を分類する。なお計算領域内の山地に関しては、今回は山地からの涵養を無視しているため、畑と同じ扱いにした。

SAR は高分解能のマイクロ波映像レーダで、人工衛星による地表面観測などに使われている。本研究における SAR データは JERS - 1 (地球資源衛星「ふよう 1 号」) による level2.1 の L-band SAS データを用いた。JERS - 1 は赤道高度約 568km の軌道上から衛星進行方向に対して右方向に、衛星鉛直直下 35° の角度でマイクロ波ビームを照射し、地表面からの散乱波を受信している。SAR の特徴としては、その電波が雲などを透過するため、全天候で利用することができる。また照射したマイクロ波の散乱波を受信しているため、レーダがそのまま反射する水面などでは輝度は低く、逆に都市部など建物の多い場所では高くなる。本研究の研究対象地である各務原市は、水田からの涵養が大きな影響を持つと考えられる。水田は水を張っている時期と張っていない時期とでは SAR データの輝度がちがうため、この時間変化から水田を認識できるものと考えられる。

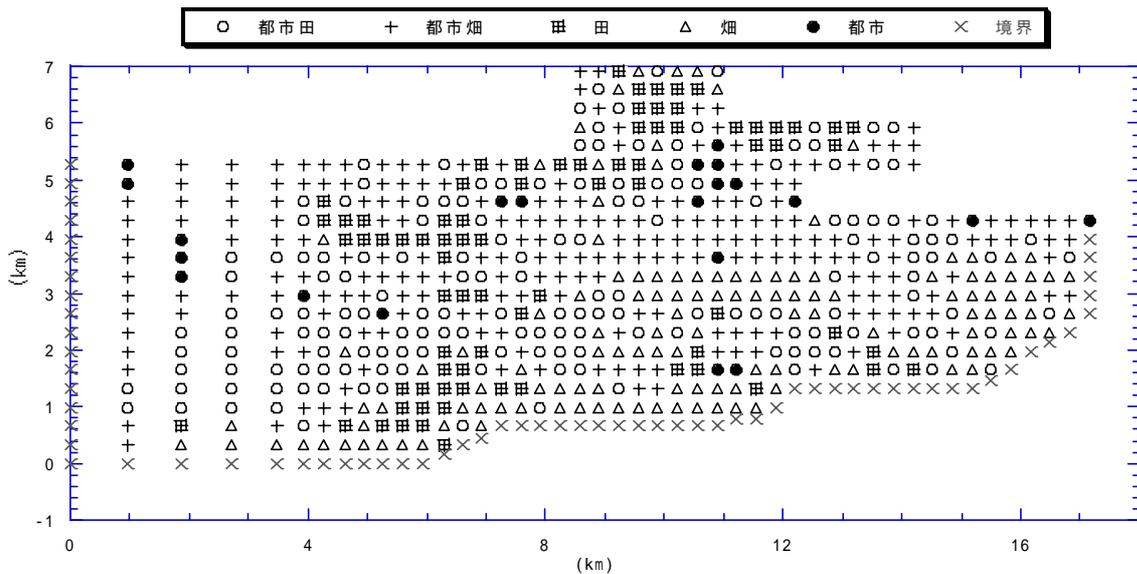


Fig.3 土地区分

分類には Stepwise Linear 法<sup>4)</sup> (段階的線形分類法)を用いた。これは線形判別解析の手法を使用して画像データを分類する統計方法である。計算には TNT mips を用いた。教師付きの分類方法なので、まずは地図上より 6 種類の地表面状態のサンプル区域を指定しなければならない。サンプル区域を指定するにあたっては実際の現場の情報が必要となる。本研究においては国土地理院の 25000 分の 1 の数値地図 (98 年度版) を SAR データと重ね合わせ、サンプリング区域を 1 種類につき 3 ヶ所指定した。処理においては、ここで指定したサンプリング区域の時系列情報を解析して、クラス間の分離度が可能な限り最高になるような判別関数のセットを選択する。判別関数は段階的に時系列情報を追加したり削除しながら必要最小限の時系列情報で最高の分離度が得られるような方法を探し出す。処理においては、山地や河川などの計算領域外にはマスクをかけることによって領域内の分類精度を向上させた。結果を Fig.3 に示す。

#### (7) 数値シミュレーションの手順

Fig. 1 に示した各務原市の領域において Galerkin 有限要素法による数値シミュレーションを行うため、四角要素による離散化メッシュ (節点数 694、要素数 621) を作成した。数値シミュレーションは 1995 年 11 月 13 日から 1998 年 11 月 3 日の約 3 年の範囲において行う。初期値地下水位については、まず仮の初期水位として、南北方向に対して境界条件である河川水位と同じ値をあたえることとする。次にこの 3 年間のうち、最初の 1 年間のシミュレーションを 10 回行い、得られた解を 1995 年 11 月 13 日の地下水位と仮定して、これを新たに初期値地下水位として用いることとする。水田からの涵養に関しては前述のように毎年 5 月 31 日から 8 月 19 日までの二ヶ月半の期間に行うこととする。また貯量係数としては洪積砂礫層での有効空隙率の値が 0.15 から 0.2 とされている<sup>5)</sup>ので、本研究では全領域について 0.15 を用いた。

### 3. 結果・検討

数値シミュレーションによって得られた各地点での地下水位の変化をFig. 4に示す。山下町以外は、時間変化に伴う地下水位の変動がうまく再現されている。地下水位の変動は各務原市の西部にいくほど上下の変動が激しくなる傾向が見られるが、これは各務原市東部（炉端遺跡・丸子町）を畑が多く占めていることにより地下水への主な涵養源は降雨となることに対し、西部（市役所・山下町・新加納・五反田）では水田が大半を占めているため、湛水期における水田からの涵養が地下水の主な涵養源となるからである。ただ西部は都市部が多いため、水田涵養が行われる一方で、各地で大きな揚水が行われていることも考慮に入れなくてはならない。西部の地下水位の起伏の大きさは、この水田涵養と揚水とのマスバランスによって成り立っているといえる。またFig. 4の1000日目以降において、五反田の計算値が実測値を上回っている。現在の初期条件ではこの変動を表現することはできないため、この時期に何らかの大きな汲み上げが、五反田周辺であったのではないかと考えられる。同志社大学教授・横山の話によれば、この年は砂利取りをするために五反田で大きな揚水が行われたとのことである。現実での揚水量の大きな変動が、数値シミュレーションの結果上にも反映された例といえる。なお、本研究の計算には京都大学大型計算機センターの汎用コンピューター GS8800を使用した。

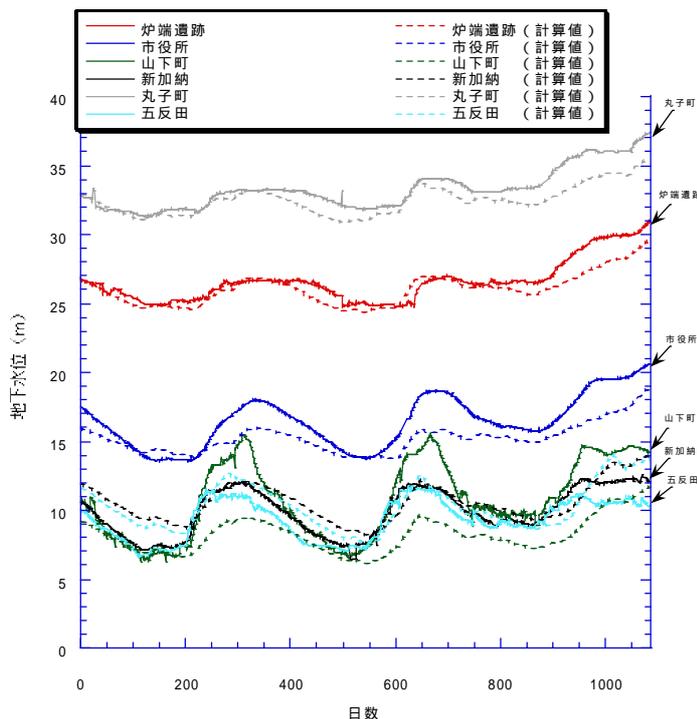


Fig.4 1995年11月13日~1998年11月3日における地下水位の実測値と計算値との比較

#### 4. 謝辞

本研究は公益信託エスベック地球環境研究・技術基金、および（財）クリタ水・環境技術振興財団の研究助成を受けたものである。また本研究で用いたJERS-1/SARデータの所有は通商産業省/宇宙開発事業団、提供は宇宙開発事業団によるものである。ここに感謝の意を表す。

#### 5. 文献

- 1) C.W.Thornthwaite ; An approach toward a rational classification of climate, Geograph. Rev., 38, 55 ~ 94, 1948
- 2) Frost V.S, et al ; A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. IEEE Tr. On PAMI , Vol.4 , No.2 , p.157-166 , 1982
- 3) 三塚直樹 ; JERS - 1 SAR と森林調査簿の相関, 重点研究支援協力員成果報告書(3) 画像からの森林構成要素計測の高度化, 2000

- 4) Johnston, R. L. ; Multivariate Statistical Analysis in Geography: A Primer on the General Linear Model. Chapter8, "Discriminant Analysis." New York: Longman, Inc. p.234-252, 1978
- 5) 地下水ハンドブック編集委員会 ; 地下水ハンドブック、建設産業調査会、p 75、1979