

地下水は誰のものか？
 <第6回>

前回(第5回)で秦野盆地の地下水を例にして地下水調査や収集した資料から盆地の水の循環の様子を明らかにしました。その循環において当時の地下水利用が秦野盆地の地下水涵養地域の地下水位を年間40cmずつ低下させる原因となっていたのです。しかし、この計算は盆地を一つの水盆とした井勘定です。現在の地下水学では水盆を小領域に区分して数値モデル化し水収支式を解いて、地下水盆の地下水の流れる状況(流動機構)や井戸による揚水量の増加に伴う地下水の水位低下や湧水量の減少を小さく区分した地域ごとに予測をすることができます。水収支式は差分法、有限要素法など高等数学を使って解くこととなりますが、原理は連立一次方程式を解くことなのでそんなに難しいものではなく、ブラックボックスとして避けておってはいけません。最近ではアメリカ合衆国地質調査所が作ったMODFLOWとよばれるパソコン用ソフトも市販されています。計算をするために適切な観測データなどを集めて数値モデルを作ることには専門的な知識・経験と手間を必要とし、息の長い大変な作業となりますが地下水には手間をかけてそれをおこなう価値があります。

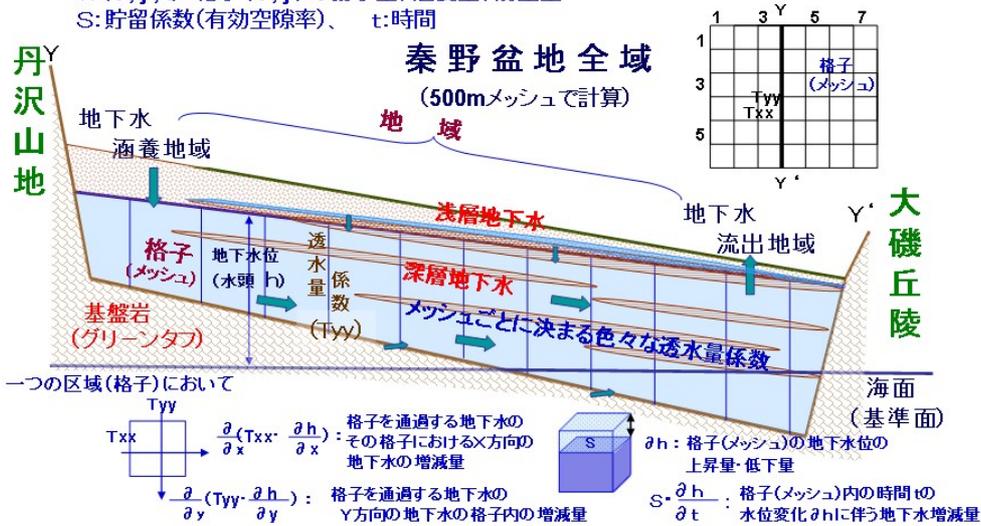
1 水収支式を解く

地下水の流れについて、対象地域をメッシュ(網目)に細かく分割した一つ一つの格子で数学的に水収支式①が成り立つ。

図1 二次元水収支式

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + w(i, j, t) \dots \text{①}$$

h: 地下水の水位(水頭) T_{xx}, T_{yy} : x方向、y方向の透水量係数
 $w(i, j, t)$: 格子(i, j)の揚水量、涵養量、湧出量
 S: 貯留係数(有効空隙率)、 t: 時間



秦野盆地においては一辺が500mの格子で、横(X軸方向)に15、縦(Y軸方向)に11の約165の格子に分割して計算した。水収支式を解くと色々な条件下の地下水位を予測計算できる。例えば井戸からの揚水条件を変えた時の地下水位の変化の様子(湧水の減少や涸渇状況)を計算できる。ここでは地下水の流動機構の計算をした。計算に必要な各格子の地下水の初期水位、揚水量、湧出量は観測・調査資料等から比較的簡単に決めることはできる。しかし、地下の地層の透水量係数(地層を流れる地下水の流れ易さの度合い)は井戸やボーリング資料が少なく全格子について決めることは困難である。そこで私は反復計算法を考案した。これは予測が容易な一日後の地下水位を観測資料をもとに既知数として与え、データのない格子の透水量係数を地下の地質構造の反映を念頭におきながら逆算して与える方法(反復計算法、長瀬1980)である。同様な方法で推定しにくい浅層地下水からの地下水涵養量も計算した。水収支式は数式であるから合理的な数値を与えて水文地質モデルを作れば計算の結果は当然数値として得られることになる。

図2 秦野盆地の深層地下水の流動状況 流量 (m³/日)

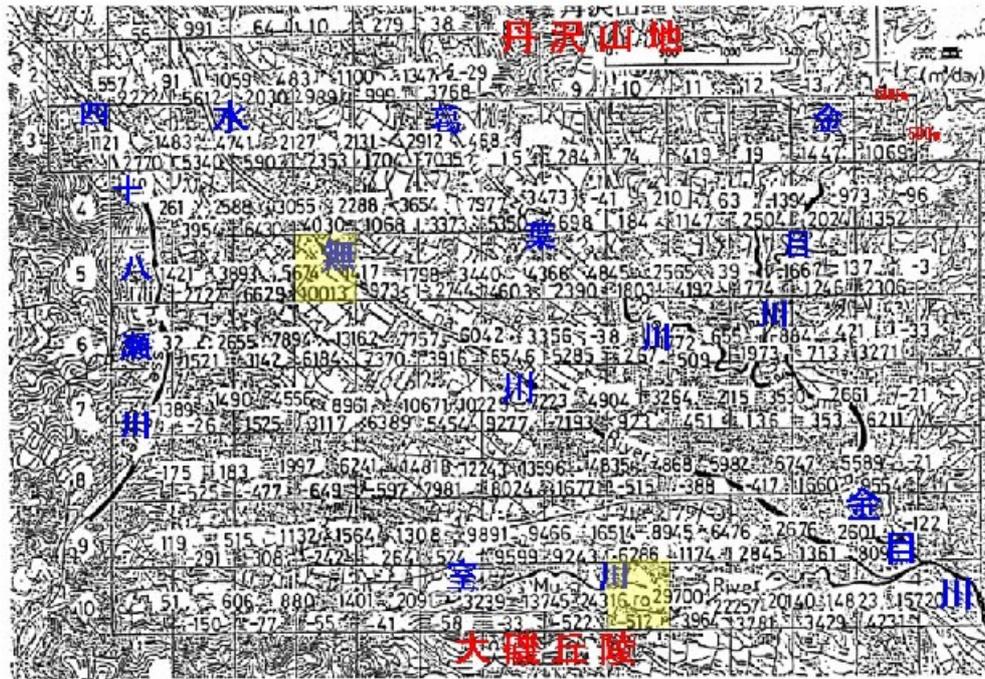
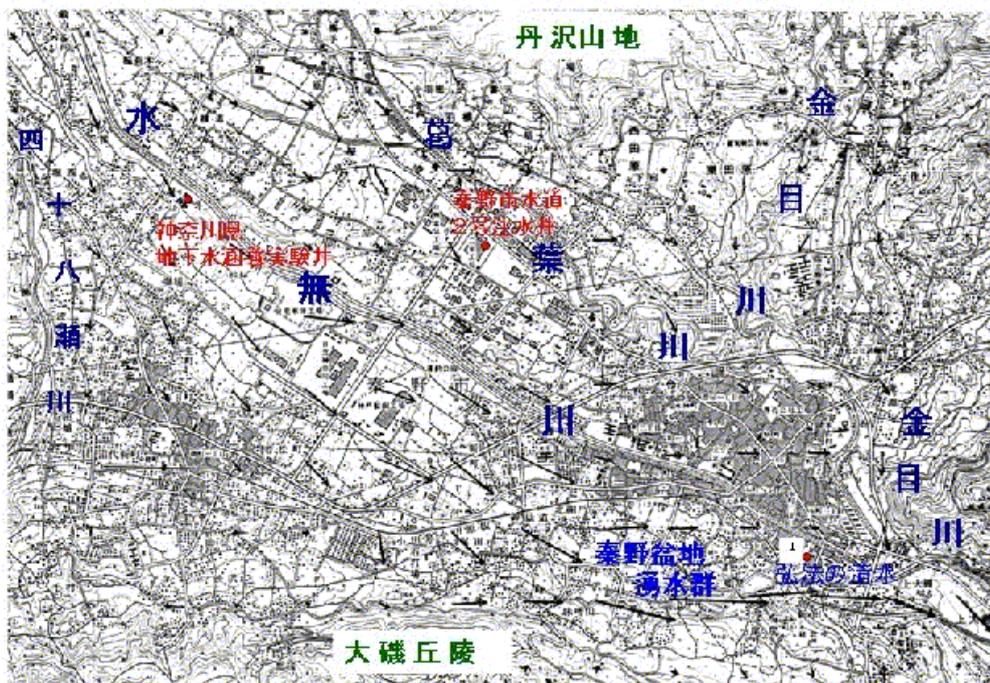


図2は計算当時の地下水揚水量、地下水湧出状況下における盆地深層地下水の流動の様子を左(西)から右(東)、上(北)から下(南)が+(省略)、その逆が-、単位はm³/日で示したものである。水無川の上流の格子(5, 5)(格子内が黄色くなっている部分)では北から4,030m³/日、西から5,674m³/日流入し、南へ10,013m³/日、東へ1,417m³/日流出することを示す。このあたりはほとんど丹沢山地に降った雨が起源となった地下水といえる。深層地下水(水瓶の水)は上位の浅層地下水と基盤の丹沢層群から浸み出る地下水の涵養を受けながら北西から南東に流れ、盆地の南西部格子(10, 10)では北から6,286m³/日、西から24,316m³/日、南の大磯丘陵から512m³/日流入し、東へ29,700m³/日流出する。

数値の羅列ではわかりにくいのでこの地下水の流れの方向と量を矢印で表したのが図3である。水無川に沿って大きな深層地下水の流れがあり、水無川の南を北西から南東に流れ、室川に湧出する。図3には神奈川県地下水涵養実験井、秦野市水道2号注水井、環境庁の名水百選に指定されている盆地南部の湧水群の位置を示した。図3が示すように盆地内の事業所などで揚水している地下水は水循環の過程にある水で、土地所有者の私有財産といえないことが明らかである。

図3 秦野盆地の深層地下水の流動状況 流向・流量を矢印で表現



その後、秦野市水道局は調査委員会を設置して200mメッシュの3次元の水収支シミュレーションを実施し、想定される18の条件のもとで2007年度までの予測計算を行った。数式は2次元から3次元になって複雑になるが計算の原理は2次元と変わらない。水収支式(①、②)を解く方法はずっとアメリカのヒューストンでロケットの打ち上げ時の上空の大気の流れを解析し気象予測するために開発され、その手法が地下水の分野に応用されたもの言われている。メッシュ(セル)の数だけ一次方程式を作り連立させて解くために、3次元になると膨大な計算が必要となる。かつては大型電算機で長時間かけて計算したが、最近ではパソコンの性能が良くなったのでMODFLOWと呼ばれアメリカ合衆国の地質調査所が開発したパソコン用ソフトが市販され、これを使って以前に比べるとずっと簡単に計算できるようになった。しかし、3次元の数値モデルを作るためにセルごとに地下水位(水頭)、透水係数などのデータが必要となり、データの数は2次元に比べ桁違いに多くなり、野外調査、データ収集をして満足できる水文地質モデルを作るための専門的な知識と継続的な努力が必要となっている。

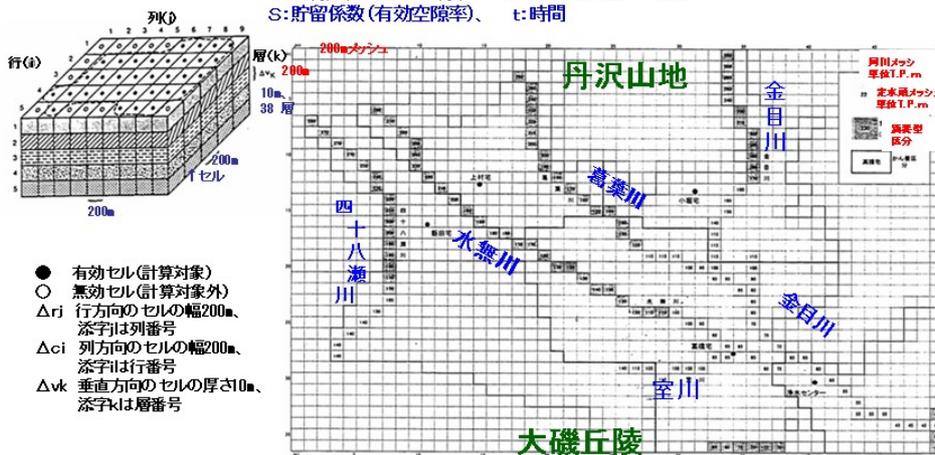
秦野盆地では南部地域の湧水を保全し、適切な地下水利用を行うために3次元のシミュレーションがおこなわれ、降水量、揚水量や人工涵養量の変化に伴う地下水位や湧水量の変化が18通りの条件下で予測された。その中の一つの条件として1997年を基準とし、盆地の中流地域で1000m³/日揚水する井戸を新たに6本掘削したとき平年の降水量があっても、地下水の人工涵養を全く行わない場合には、河川などからの地下浸透量は4%増加し、地下水位は盆地内の最も下がる場所で最大3m低下し、湧水量は80%に減じると予測計算された。秦野盆地内の地下水の利用は現在このような18通りのシミュレーションを考慮に入れ、盆地の地下環境に負荷が生じないような範囲の中で行われている。盆地南部地域の湧水は保全されているので、この意味で秦野盆地の地下水は管理されていると言える。

図4 三次元地下水水収支シミュレーション

三次元水収支式

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(T_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z}) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + w(i, j, k, t) \quad \dots \textcircled{2}$$

h: 地下水の水位(水頭) T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}: x方向、y方向、z方向の透水量係数
W(i, j, k, t): 格子(i, j, k)の揚水量、涵養量、湧出量
S: 貯留係数(有効空隙率)、 t: 時間



最近正確さを増している天気予報も同じような差分方程式を使って観測される気圧等のデータをもとに大気のシミュレーション計算をおこない、その結果を利用し蓄積された過去のデータを参考にして予報がおこなわれている。目で見ることのできる大気と違って地下を流れて直接見ることのできない地下水の流れのシミュレーションは地下水の流れが層流で単純ではあるがデータの収集等には困難を伴う。地下水をより有効に利用していくためには、継続的に調査を実施し、データ・ベースを作成し、更新される新しいデータを使って、社会の地下水利用状況も変わるのでほぼ10年に1度程度のシミュレーションが必要である。このような作業を継続することで初めて真にその地域の地下水盆(地下水流域)の管理が行われていると言える。地下水シミュレーションはMODFLOWとパソコンで手軽に計算できるようになったが、地域の地下水管理には社会的な責任が生じるので気象予報士のように国家が認定した地下水分野の技術士があたる必要がある。

世界の水利用の現状を見ると、子々孫々の代に至るまで未来永劫私たちが住んでいる地域の地下水盆(地下水流域)の良質な地下水をヒトや他の生きものが利用していくためには公共機関によるその程度の作業は不可欠で、公共のものとしての地下水には十分その価値があるとおもう。