

# 水循環解析モデルの今

東京大学工学系研究科 登坂 博行

## 1. はじめに

水の大循環は、水圏から蒸発し大気圏内を輸送される水（水蒸気や微細な液滴）が陸域に降水としてもたらされ、河川・湖沼・地下水となり、最終的に海洋に回帰するプロセスである。

人間の生活の主たる舞台は陸域とその直上の大気圏（接地境界層）、沿岸部の海域からなり、これを地圏と称することにすれば、我々の見る水循環は、水の大循環の一部を見ていることになる。本論の話は、いわば「地圏水循環」と限定した呼び方にした方が良いかも知れない。

昨年の東日本大震災の大津波による沿岸域の被災、そして原発の被災は、水循環による洪水氾濫のスケールを超えた水圏襲来による災害であった。水の解析を扱う我々は、さらなる対処すべき水問題を目の当たりにすることとなった。

現在は、地球規模の気候変動、局地の激甚気象、さらに次なる大地震・津波が予想されている時期であり、行政には水資源確保・防災・環境を考慮した総合的水マネジメントが要請されている。

本稿が主題とする水循環解析技術は、自然の挙動再現・予測・対策立案をし、社会システムの設計に資することを最大の使命とするものである。我々には自然現象が生起する時間やスケールは必ずしも予測できないが、計算機上に擬似自然を創り出すことで、それらが起きたことを想定して被害の程度を算定し、複数の対策の優劣を客観的に判定することができる。ここでは、筆者らの開発した水循環モデルを中心に概要を紹介し、最後に計算事例をいくつか示すことにしたい。

## 2. 地圏水循環と解析技術の発展

### 2.1 地圏水循環の様相

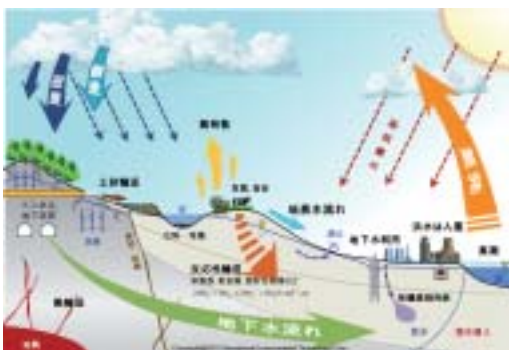


図1. 水の大循環と地圏の流動の概念図

図1には、地圏に起こる様々な流れ・現象を概念的に描いてある。地圏は大きく見ると、静的な固相の場（土壌、岩石、植物体、人工物）と二つの流体（水と空気）からなる。流体はそれ自身と運動量・熱・他の物質の輸送も行う。水は主たる地質営力として、岩石圏を浸食・崩壊させ、山を急峻化する。洪水時には大量の固相を河川を通じて運搬し、谷から平地の出口付近に扇状地を形成したり、海まで一気に土砂を運び込み海底に海成層を形成する。一方、地下に涵養された水は、浸透後、地下の地層状態に従いさまざまな経路長や滞留時間で流動し、やがて谷筋に湧き出し河川水となる。また、大きな地下水流動系は沿岸部地下で海水と衝突し、上昇流として沿岸陸地か沿岸海底に湧出し回帰が完了する。

### 2.2 解析技術の進展

このような地圏水循環の下における水資源確保や防災の観点から、流域にわたる水の挙動を追跡する技術の研究が行われてきており、大きく、河川流出解析と地下水解析に分けられる。それぞれの分野の解析技術発展の概要は日本応用地質学会編（2011）15章を参照願いたい。

河川流出解析は、流域の降水時系列に対する河川流出応答を再現・予測するもので、集中型概念モデルと分布型物理モデルに分類される。これらのモデルは、従来から「水循環モデル」とも言われてきた。

前者は入力（降水）と出力（観測点の流出）の対応関係を内部の伝達関数によって表現するもので、その代表として菅原のタンクモデル（菅原、1972）がある。河川流出の各成分（直接流出、中間流出、基底流出）を多段（3段以上）の穴空きタンクで表現するもので、複雑な地形と水路網をもつ流域を、それらの形態を全く無視してモデル化するが流出ハイドログラフをうまく再現できる方法である。もし、流域内の特性の差異を表現したい場合には、個々の小流域に3段タンクを多数配置し、それらをつないだ形で計算をすることができる。これがマルチタンクモデル（岡本、1982）で、これは分布型物理モデルの原型ともいえよう。

集中型モデルを特徴づけるパラメータは、流体や地面・岩石の物性ではなく、実験や観測で求まるものでもない。その地域の観測値に合うように決められるものであり、パラメータが物理的に一般化し難

しい点が問題となる。

そこで、自然の実態をより物理的に表現するため、分布型物理モデルの研究が行われてきた。これは流域を細かく分割し、地形に合わせて水理学的に水路・斜面のネットワークを構成し解くものである。集中型モデルに比べ計算量ははるかに大きい、地形や水系が直接的にモデル化され視覚的にもわかりやすく、流域内の多数の地点の流量なども推定することができる。代表的なモデルとして、MIKE-11 (DHI,2001)、国内のものとして、椎葉ら (2001)、立川ら (2007)、賈ら (1998) などがある。このタイプのモデルには、地下水系の影響や動きを表すモデル (タンクモデル的なものや、ある程度物理的なもの) が含まれており、狭義にはこれが水循環モデルと呼ばれている。

地下水に関する解析には、多孔質媒体間隙中の水のみを対象とした解析と、多相流体 (水と空気、他の非水相液体) を対象としたものがある。

初期の地下水解析は、被圧帯水層中の飽和ダルシー流れの解析を基本として開発された。代表的なものにMODFLOW (USGS) がある。その後、飽和・不飽和解析と呼ばれる不飽和領域を取り込んだ解析技術が開発された。これは、水の流れのみを追跡し空気の流れは扱わないが、空気の干渉効果を水分依存のパラメータを使い表現するものである。代表的なものにDtransu3D (西垣ら、1995)、FEFLOW (Diersch, 2005) がある。

西垣らのDtransu3D-ELは飽和・不飽和流動、および密度効果を有する溶質の移流拡散を解くものである。また、FEFLOWは飽和・不飽和解析と溶質、熱の移動などを取り扱うFEMコードである。

多相流体を扱う解析は、例えば、地下水、地熱、石油・ガス貯留層、地下水汚染、地下エネルギー備蓄 (原油、LPG、圧縮空気など)、CO<sub>2</sub>地中処分、地下構造物による環境影響評価、放射性廃棄物処分などがターゲットとなる。これらは多相流れ (不飽和域の空気と液相水の同時流れ、或いは空気・水・油の三相状態の流れ) を表現するもので、もともと石油・ガス層を扱う油層工学分野の技術が応用されたものである。代表的なものとして、TOUGH2(LBL)がある。なお、後節で述べる筆者らのモデルも多相モデルである。

地下水のモデルでは、降雨・河川・湖沼との相互作用は適宜ソース項として解析者が与えねばならず、その点で水文流出モデルより不完全である。

### 2.3地表水・地下水連成解析 (地圏水循環解析)

河川流出モデルも地下水モデルも、一面では物理

的であるが、相互作用のモデル化が不十分で、水循環系の全体像を捉えるには至っていなかった。登坂ら (1996a) は3相3成分地下水解析を基本に、地表と地下の流れを完全連成した。このモデルは、地表上面の大気接地境界層から地下岩石圏までを空気・水2相流体系として捉え、地表流は開水路の拡散波近似、地下流動は多相ダルシーモデル (通常の水循環系は空気・水2相モデル、非水相液体が入る場合には3相モデル) により表現し、完全陰的連成を行ったものである。空間の離散化においては、地表より上に無限大気層と地表層 (表流水の流れる格子) を配置し、地下には地質に応じた多層格子を配置することで、地表面を格子システムの内部に取り込み、水の相互作用がスムーズに表現されている。なお、従来の地下水解析および多相解析の基礎的説明は、登坂 (2003, 2005a, 2005b, 2006) などを参照いただきたい。

2000年前後から、地表水・地下水連成解析に関する研究報告が世界的に多数出始め、分布型流出モデルと3次元地下水モデルの陽的結合によるものや、より強い連成によるものがいくつも提案されたが、多相モデルを基盤としたものは、今のところ筆者らのものだけである。

このモデルは、塩淡密度流解析、地表・地下の熱循環解析、土砂輸送などに拡張され、現在までに500例程の適用例を有している。また、並列化により大領域の解析も可能となっている。

### 3. 計算事例

ここでは、基本的な事例と大規模な計算の事例を示す。

#### 3.1連成モデルによる基本事例

完全連成モデルでは次の様な事が出来る。ある流域のモデルを作成し、観測値などの再現性を検討したい場合、観測開始時点のモデルの状態 (近現在状態) を設定せねばならない。しかし、水文条件の下で、現時点でどのような河川流量や地下水位分布があるのかは人間には知り得ようがないから、入力データを作ることもできない。そこで、容易な設定から計算を初めて、“近現在状態”を生成することが必要となる。筆者らの連成モデルではその特性を生かし次のような方法で実現する。まず、①はるか過去に流域地形上に地表水がなく、地下は水が飽和し静水圧状態にあったことを仮定し、②この状態から、地表に年平均降雨を与えながら計算を開始すると、時間の経過とともに、地下水は地表の底部や斜面に湧きだし、やがて谷部に水流を形成し始める。地下では尾根部に不飽和帯が発達しはじめ、全域で地下



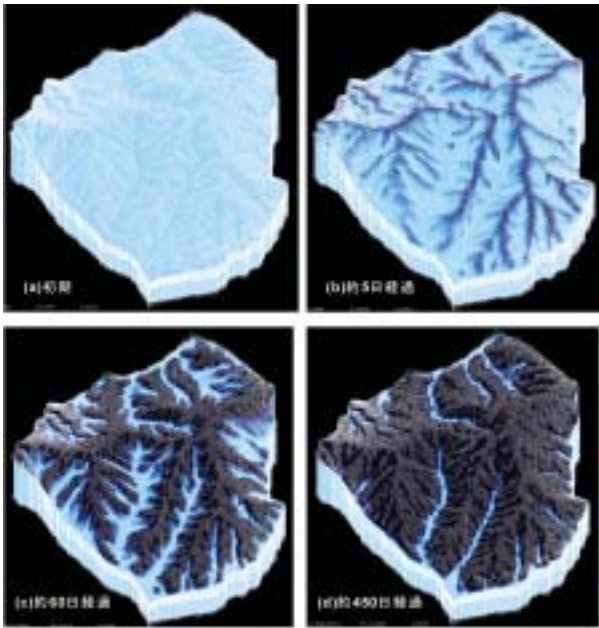


図2. 近現在状態生成の様子：左上が初期状態（地下水飽和状態）で、右上、左下、右下に時間が経過するにつれ地表が現れ、河川が形成される

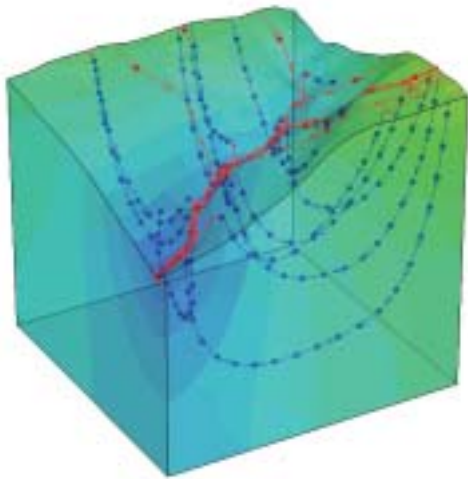


図3. 山岳地の斜面地下と河川

水面が地下に形成されてゆく。このような計算を長期にわたり（数十年～数十万年）実行すると、降雨・地形・地質構造（水理構造）に整合的にバランスした流れ場が現れる。図2は時間とともに地表に河川が形成されてゆく様子を示している。計算の時間ステップは、初期は数分～数時間、後半には1000年以上にまで伸ばすことができる。出来上がった状態に、③さらに降雨の季節変動（月平均値）を与えながら、数年～数十年程度の計算を行い、さらに日変動を与えて次第に現在に近づけるのである。図3は山岳地に表れる流れ場の様子を示している。水粒子が地表から地下浸透し低地の河川に湧き出す軌跡が描かれている（図2とは異なる計算モデルの例）。

### 3.2 日本列島の大局流動系解析の試み

最近の地圏水循環解析の一例として、ここでは、日本全土の陸域・沿岸水循環の大局構造を捉える試みの一部を紹介する。森ら(2010)は、日本列島（北海道、本州、四国、九州）を対象に、陸域および沿岸海洋部を平面的に1kmオーダーのグリッドに分割し、地下深部まで含めた3次元モデルによる計算を試みている。1kmオーダーの格子は河川や局地地下水の表現には大きすぎるが、大地形による地表や地下の流動系の大局推定には有効であろう。また、より精細な地域モデルの親モデルとしての利用も考えられる。なお、このモデルには海底地形と海域の塩水条件が反映されており、陸域周辺の沿岸海底での地下水湧出の様子も表現できるようになっている。図4は九州を含む領域の陸域地形・海底地形を示している。格子は600万個に達する。地質は100万分の一表層地質図により、土地利用は公表されている国交省データを利用している。前記の近現在生成計算により得られる流動系は図5のようになる。図中の線は、地表に落ちた水粒子が地下浸透し再び河川に出る流線を天空から見た正射影として描いたものである。河川に集まる流線は現在の実際の大河川の形に近いものが得られている。実際の観測値と定量的な比較はできないが、一級河川の平均流量のオーダーはおおよそ観測値と整合的である。図6は涵養域と湧出域を表したもので、陸域周辺に海底湧出の可能性が示唆される。

### 5. まとめ

ここでは、地圏の水循環解析に関して筆者らの解析技術を中心に紹介した。冒頭でも述べたが、水循環モデルは、自然という大スケールかつ曖昧なシステムを基盤とする社会システムの設計において、極

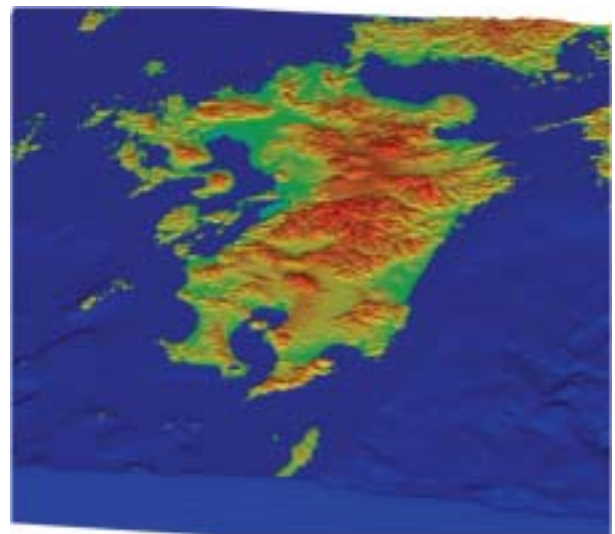


図4. 九州地域のモデル（森ら、2010）

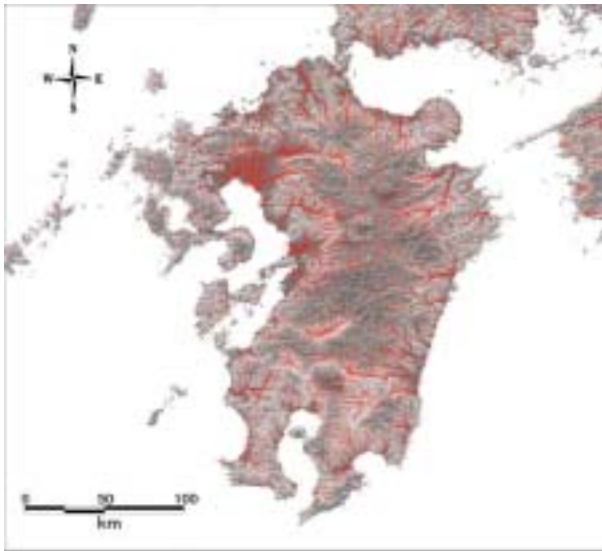


図5. 3次元流線の正射影 (森ら、2010)

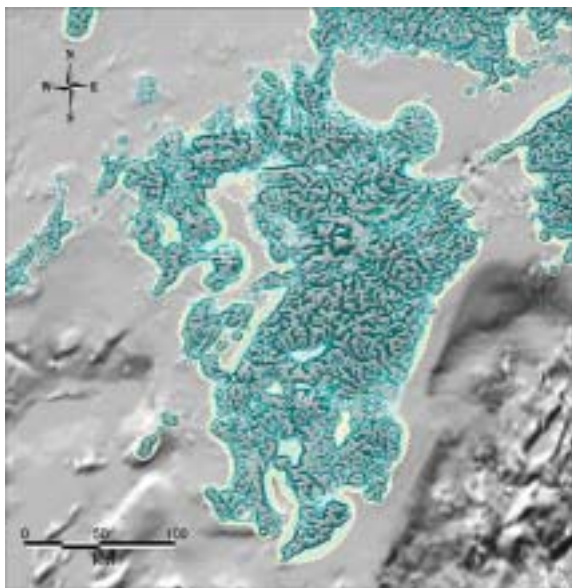


図6. 浸透域 (濃色) と湧出域 (単色) の分布。沿岸海底に湧水の可能性が示唆される

めて有用な評価手法である。今後の地球科学・工学などの成果、情報技術や計算技術の進展により、数値モデルはより精緻・大規模化し、信頼性も向上するであろう。しかし、大地震や津波を予想できなかったように、我々はまだまだ自然の入り口付近でおもちゃで遊ぶ幼児とも思える。自然は直感だけでも数理だけでも決まらないものであることは肝に銘じておきたいものである。

#### 参考文献

- 1) 日本応用地質学会編 (2011): 原点からみる応用地質学—その論理と応用、古今書院刊。
- 2) 菅原正己 (1972): 流出解析法、共立出版、257p.
- 3) 岡本芳美(1982): 技術水文学、日刊工業新聞社。
- 4) Danish Hydraulic Institute(2001): MIKE 11 Reference manual, Danish Hydraulic Institute.

- 5) 椎葉充晴・立川康人・市川温 (1998): 流域地形の新しい表現形式とその流域モデリングシステムとの結合、京都大学水文研究グループ研究資料、No.1、pp.5-44、pp.61-82.
- 6) 立川康人・佐山敬洋・宝馨・松浦秀起・山崎友也・山路昭彦・道広有理(2007): 広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用、自然災害科学、Vol.26、No.2、pp.189-201.
- 7) 賈仰文・玉井信行(1998): 水・熱収支を統合した分布型モデルの開発と東京都への適用、水文・水資源学会誌、Vol.11、No.2、pp.150-163.
- 8) Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000, MODFLOW-2000, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.
- 9) Karsten Pruess, Curt Oldenburg and George Moridis: TOUGH2 USER'S GUIDE, VERSION 2.0, LBNL-43134.
- 10) Diersch, H. J. G. (2005) FEFLOW Reference Manual. WASY, 292p.
- 11) 菱谷智幸・西垣誠・橋本学 (1999): 物質移動を伴う密度依存地下水流の3次元数値解法に関する研究、土木学会論文集、No.638/Ⅲ-49、pp.59-69.
- 12) 登坂博行・伊藤一誠・蝦原雅之・稲葉薫・伊藤彰・小島圭二 (1996a): 多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析、地下水学会誌、Vol.38、No.3、pp.167-180.
- 13) 登坂博行・小島圭二・三木章生・千野剛司 (1996b): 地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発、地下水学会誌、Vol.38、No.4、pp.253-267.
- 14) TOSAKA Hiroyuki, ITOH Kazumasa and FURUNO Takashi (2000): Fully-coupled formulation of surface flow with 2-phase subsurface flow for hydrological simulation、Hydrol.Process.、Vol.14、pp.449-464.
- 15) 登坂博行(2006): 地圏水循環の数理、東大出版会、2006.
- 16) 登坂博行、小島圭二、三木章生、千野剛司 (1996): 地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発、地下水学会誌、第38巻第4号、253-267.
- 17) 登坂博行、伊藤彰、岩井卓(1998b): 自然水理系の流体・熱移動統合モデリングの試み、その2 フィールドシミュレーション、地下水学会誌、第41巻第3号、159-176.
- 18) 登坂博行、伊藤彰、田中将希、岩井卓(1998a): 自然水理系の流体・熱移動統合モデルの試み、その1. 流体・熱移動の新しい定式化と実験的検討、地下水学会誌、第41巻第3号、147-158.
- 19) 森 康二・多田和広・田原康博・山下結司・佐藤 壮・西岡 哲・登坂博行 (2010): 日本列島の3次元水循環モデル構築の試み、日本地下水学会2010年秋季講演会講演要旨、238-243.