

国土の水資源・環境基盤の構築に向けて 三次元地質情報基盤の必要性

西岡 哲¹⁾

1. はじめに

21世紀は水の世紀といわれ幕を開けた。これは、化石エネルギーを基盤として産業革命を高度に成し遂げて文明を発展させてきた20世紀に対し、生命の根源である水をめぐって、気候変動、未曾有の人口爆発問題とそれに伴う経済発展に対応できる利用方法を見出さなければ、21世紀の人類の発展はありえないということを示唆している。

20世紀の急速な技術革新がもたらした巨大で高度な技術は、大規模な自然改造をも可能にし、実際に数多くのプロジェクトが実施され、多大な経済的効果を上げる一方で、自然環境に対し甚大な影響を与え、一部では回復困難な環境破壊を引き起こしてきている。例えば大規模灌漑のための取水により湖底まで現れてしまったアラル海の姿や、黄河の断流などはこれらのことを象徴している。20世紀の人間の英知は、人間活動による様々な開発により、将来どのような環境変化を引き起こすかについてまで十分に予測することができなかったのだろうか？ また多くの国際河川では、上下流の国家間での水資源の取り合いが激化し国際紛争の火種となっている。これは、時空間的に偏在する水の実態を利害当事者やそれを調整しようとする政治家や学者、さらには企業家や一般市民が、共有できる情報と知識を持っていないことによるところが大きい。

国土基盤にかかわる基本情報である地形、地質、土地利用、気象、水文データなどは、すでに膨大な情報として蓄積されている。これらの情報を統合して水循環という自然現象をコンピュータ上に再現し、人間のイメージを超えた複雑系である地表水と地下水の流動状況を浮かび上がらせることにより、人類の共有知識にすることができないだろうか？ これまで独立

して蓄積された情報を、国土の水循環基盤モデルに統合しシミュレーションすることで、地表・地下の水循環の可視化が可能となる。数値解析技術の進歩とともに大規模モデルを超並列計算により高速で解くことができる時代になってきている。しかしこのシミュレーションは地質構造を基に構築された三次元の水理地質モデルに大きく支配される。これまで集められた地質・地盤情報を共有し、国土の三次元地質モデルを構築することは、水の世紀にあって極めて重要な課題となってくる。

2. 国土水循環コンピュータ地図構築

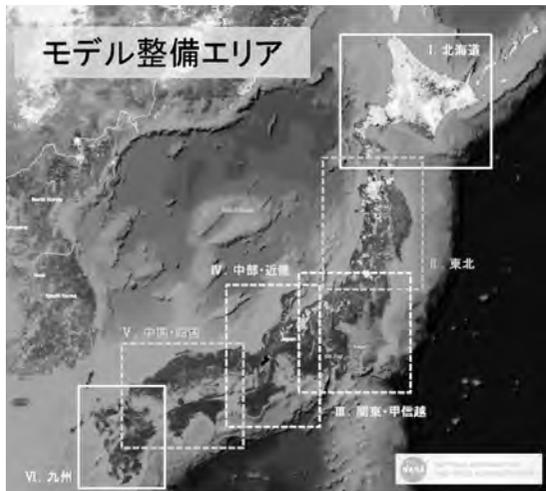
物事の本質を見誤らないためには、全体を俯瞰的に見ることと微視的に見ることの両極の視点を持っている必要がある。全体を俯瞰し戦略を練り、局所を見て戦術を立てるためには地図の作製は不可欠であり、人類はその時々最高の技術を用いて地形図、地質図などを作成してきた。

ここで紹介する国土水循環コンピュータ地図構築とは、現状で誰もがアクセスできる様々な種類の国土情報によりモデルを構築し、物理法則にのっとり誰が作成しても同じように再現される国土の水循環地図の構築を目指している。日本列島を丸ごとモデル化するのが理想であるが、計算容量の制約から当面は第1図に示したように日本列島を6分割し水循環コンピュータ地図を構築した。人間の作為を極力排除するため、モデルは海域まで含め十分な広さを確保している。

これまでは流域の水循環モデルを作成する時、その都度様々なデータを集め、一からモデルを構築してきた。国土水循環コンピュータ地図が整備できれば、この段階から作業をスタートでき新たな情報を国土

1) 株式会社地圏環境テクノロジー

キーワード：水循環、水資源、地質、コンピュータ地図、地表水、地下水、涵養、湧出、北海道、シミュレーション



第1図 国土水循環コンピュータ地図整備エリア。

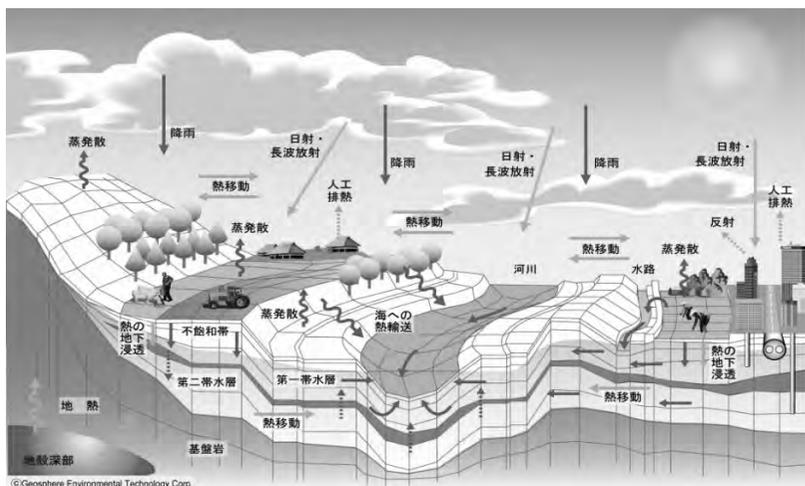
水循環コンピュータ地図に戻すことにより、コンピュータ地図自体も成長していく。

水資源・環境・災害問題は、水循環の中で起きている現象である。これらの現象を国土全体にわたってコンピュータ上に作り出し、過去から現在までを再現し、気候変動から人間活動による様々なインパクトに対し、水循環が将来どのように変化するのかを予測できれば、適切と考える対策を立案しステークホルダー内での合意形成も得られ最適な方向に進むものと思われる。

3. 自然水循環シミュレーション

自然環境は、①土壌・岩石圏という基盤、②陸水が創り出すダイナミックな流動サイクル(降水、蒸発散、地表流れ、地下水流れ)を母胎として、③自然の動植物が創り出す生態系、④人間活動が創り出した人工環境により形成されている。こうした自然現象のすべてがコンピュータ上で地球全域にわたって作られれば理想であるが、まず日本列島の国土水循環基盤コンピュータ地図を作り、順次世界に広げていきたいと考えている。

国土水循環コンピュータ地図を作成するための水循環シミュレーション技術は、地表水・地下水連成解析技法(以下GETFLOWSと記す)として登坂(2006)により開発され、地上、地下の流れの速さが極端に異なる水の動きを統合して解析できるところまで来ている。GETFLOWSは、これまで個々の数値モデルによって定式化されてきた地上、地下の水の動きを、数値精度を維持したまま数学的に統一化させた点に最大の特徴を持ち、これによって地上に降り注いだ雨水の行方を時間的、空間的スケールの大小を問わずに追跡できる。すなわち、陸面における地表水と地下水の交換をその場所の降雨、地形起伏、土地利用、地質等の違いによって決まるレスポンスとして解析し、雨水がしみ込みやすい場所、地下水が湧き出しやすい場所、その強さを捉えることが可能となった。また、水の動きのみならず、空気、油、重金属、有機性溶剤等の汚染物質を含めた流体(多相多成分



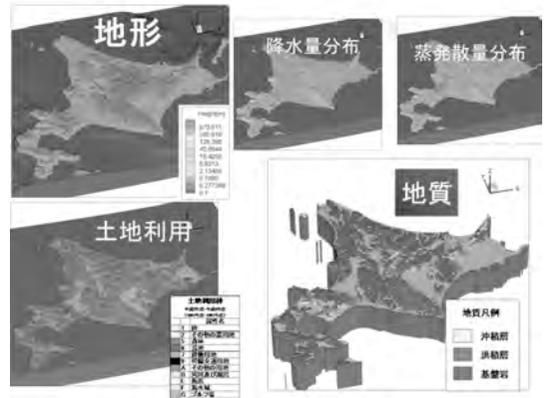
第2図 水循環モデルの概念図。

系流体)のダイナミクスをシミュレーションすることが可能である。第2図にコンピュータ上で作り上げるモデルの概念図を示す。これは自然の姿をできる限りありのままに模倣し、人間のイメージを超えた複雑系のまだ良くわからない状態を浮かび上がらせようとするものである。

4. 北海道エリアの水循環コンピュータ地図の作成

日本列島の水循環コンピュータ地図の第一バージョンを整備したが、ここでは北海道を例に作成の手順を紹介する。

北海道モデルの構築にあたって、陸域については国土地理院の50m DEMを、海域についてはETOPO2 (NOAA)を使用した。水循環モデルの構築にあたり最も重要でかつ不確実性が高いのは三次元水理地質構造モデルの構築である。第一段階として、全国を同一の基準で標準的な水理地質構造を三次元化することを考え、地質構成は地質調査所の20万分の1のシームレス地質図(脇田ほか, 2009)をベースに基盤、洪積層、沖積層、表土の三次元地質構造モデルを構築した。本来、地質は様々な構造運動の影響を受け不均質なものであるが、まずは欠陥のない均質な地層構造が連続しているものと仮定し、この条件であればどのような水循環となって物理的に安定するのかという、初期状態を描き出すこととした。透水係数及び有効空隙率は、地下水ハンドブックの各岩層区分に応じた特性により設定した。第3図に試作された北海道モデルを示した。土地利用は国土交



第3図 北海道モデルの構築。

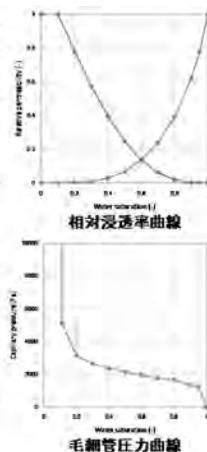
通省によって公開されている国土数値情報 (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>)より電子データを取得し、土地利用ごとに等価粗度係数を設定した。各地層の水理パラメータを第4図に示した。

降水データは、気象業務支援センターの過去30年の記録から空間補間処理した平均降水量を求めた。蒸発散量は降水データの得られている観測点の月平均気温からハーモン式により求めた。境界条件となる降水量は、平均降水量から蒸発散量を差し引いた有効降雨量として地表格子に与えた。

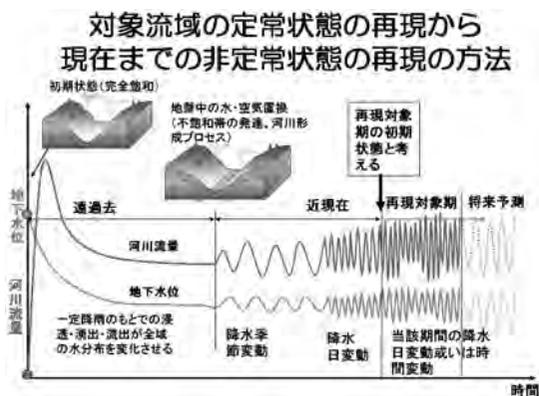
5. 三次元モデル構築と領域初期化

三次元格子モデルは、海域まで含む全解析領域を1km四方で分割した平面格子システムを深度方向に引き伸ばして作成した。深度方向への引き伸ばしは、

地質条件	密度	2.5[Mg/m ³]			
	圧縮率	10[GPa ⁻¹]			
	地質区分	表土層、沖積層、洪積層、基盤岩			
	絶対 浸透率	表土層	1 × 10 ⁻² [cm/s]		
		沖積層	1 × 10 ⁻³ [cm/s]		
		洪積層	1 × 10 ⁻⁴ [cm/s]		
基盤岩		1 × 10 ⁻⁶ [cm/s]			
有効 空隙率	表土層	0.50			
	沖積層	0.20			
	洪積層	0.10			
	基盤岩	0.01			
土地利用	等価粗度	田	0.04	農用地	0.04
		森林	0.10	荒地	0.037
		建物	0.02	幹線交通	0.02
		用地	0.04	河川・湖沼	0.03
		海浜	0.03	海水域	0.03
		ゴルフ場	0.037		



第4図
モデルに組み込んだパラメータ。



第5図 水循環再現の方法。

地下の地層分布を勘案して行い、地質境界面に格子分割が沿うように格子モデルを作成した。また地表面付近の地下浅部は、不飽和帯が発達すること、沖積層などの透水性が高く薄い地層が分布することを勘案し、深度分割を細かく設定し緻密に空間表現ができるようにモデルを構築した。構築した三次元格子モデルに対し、地質モデルを割り当てた。

GETFLOWSでは地下のレイヤーの上部に、大気層と地表層のレイヤーを設けている。大気層は、地表における空気の圧力を設定するレイヤーであり、低気圧や台風などの気圧の変化を表現するために必要なレイヤーである。また地表層は、河川や斜面を流下する地表流を表現するレイヤーであり、地表層内の水はマニング則にしたがい流動する。地下水は、空気の流動を考慮した一般化ダルシー則にしたがう。領域初期化では境界条件として、モデル上面の大気層には標準大気圧を設定した。また、側部及び底部は閉境界とし、海域は水位0mの固定水頭境界とした。

領域初期化は対象流域の定常状態を再現するための方法であり、まず初めに、地上に水がなく、地下は地表面まで海水で完全飽和の状態を設定し、1kmグリッドごとにその場所の有効降水量を与え続け、地表水、地下水の流動を追跡した。時間発展の計算を数百万年進めると、低地では湧水が起こり河川が形成される。同時に標高の高いところでは地盤内に空気が侵入し不飽和帯が発達し、次第に与えられた降水量・地形・地質構造とバランスし、地表水・地下水が完全に一体化された流況が描き出され、領域の初期状態が作り出される。このようにして構築されたモデ

ルは、解析値と地表水分布、河川流量、地下水位、湧水などのフィールドで観測されている諸量とが工学的に許容できるところまで一致するように不確実性の高い地質構造などを再検討し、繰り返し計算していくことにより再現性を高めていく。第5図に領域初期化の手順を示した。

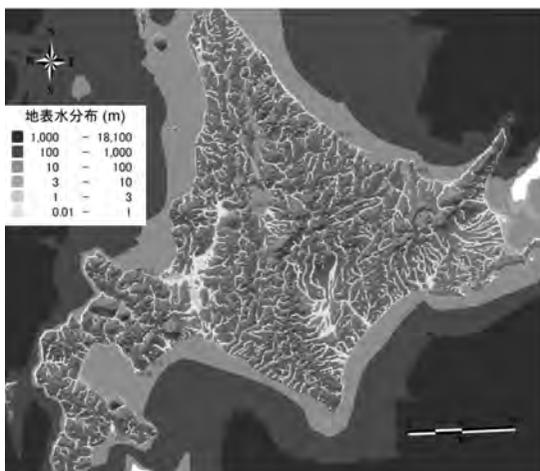
領域初期化によって得られる状態は、大局的には人間活動が行われていない自然状態における北海道の平年値に相当する水・物質循環の場であると捉えることができる。

6. 自然流況復元解析の結果と考察

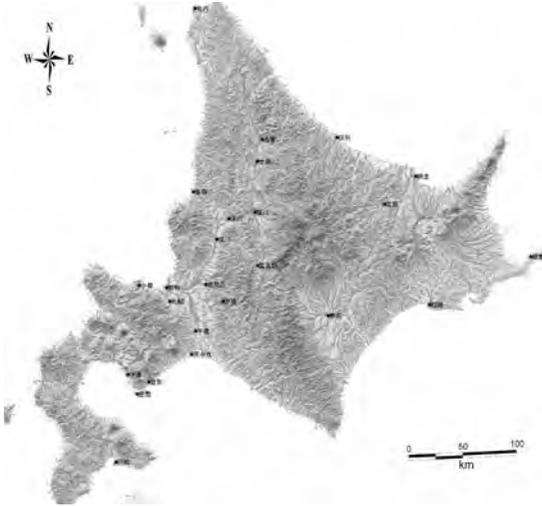
領域初期化シミュレーションによって得られた3次元地下水流動場は、揚水等の人為的なオペレーションを含まない自然状態の平衡流動場であり、降水、地形、地質により地下水流動がバランスする流況である。この結果から地表水分布(等水深線図)、地下水位(水理ポテンシャル)、飽和度(土壌水分量など)、浸透域、湧出域及び各フラックス、流速(水、空気)、流量(水、空気)、塩分濃度、水量(指定基準値を満足する水量など)、3D流動経路、滞留時間などの主題図を作ることができる。

1) 地表水分布

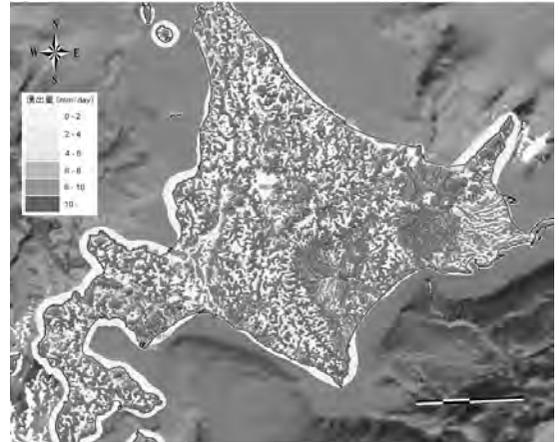
第6図に地表面における水深分布を示す。石狩川、十勝川、天塩川などの大河川だけでなく中小河川も



第6図 地表水分布図(解析結果)。



第7図 地表・地下水の流動軌跡(解析結果).



第8図 湧出域分布(解析結果).

描き出されている。石狩川は釧路湿原などと同様に湿地帯になっていて、河川改修などの人工改変がなされる以前は湿地帯であったことを解析結果は示している。一方旭川は巨大な湖となっている。これは1 km四方で平面格子を組み、各交点の標高を50 m DEMで与えていることから、地形の狭窄部においては十分な解像度で表現できていないことによる。逆の言い方をすれば、地形と水理地質的条件から見て、旭川は石狩川への出口である神居古潭付近の狭窄部の河床地形を少し高めるだけで巨大な湖になりうるという自然条件を備えていることを示唆している。

2) 流線軌跡

地下へ涵養された地下水は、地中や地表面を移動する。その経路を領域初期化シミュレーションにより得られた三次元流動場を用いて粒子追跡法により流線軌跡を作成した。粒子の出発点は地表面直下とし、その経路を上面より投影して平面的に表示したものが第7図である。地表水として現れた河川をどこで涵養した水が支えているのかが示されている。ここでも大河川から中小河川までの地表・地下の水の動きが描き出されている。北海道を不連続構造がない均質なモデルとして領域初期化すると、天塩川は中流部よりオホーツク海に流動する結果となり、日本海側に流下する事実と異なった結果となっている。このことは、天塩川が造構運動により不連続構造となってい



第9図 塩分濃度10%の海水が取り残されている領域(着色部)(海水を100%とした時).

ることを示唆している。北海道全域を均質モデルとして初期化した結果が得られることから、このスケールで水・物質循環を見る場合、これまでに得られている地質構造の解釈を、どこまで組み込むべきかの基礎情報を提供している。なお、海域に流線が出ているのは地下水が海底で湧出していることを示している。

3) 涵養湧出域

第8図に湧出域分布を示す。本図は、白色部は地下水が地表面へ流出している地点であり、灰色部は地表水が地下へ涵養している地点である。湧出点は

谷筋に沿って分布し、第6図で巨大な湖となっている旭川一帯は湧水域となっている。噴火湾、知床、利尻島などで、海底湧出域が見られるが、この地域が昆布の生産地と重なっていることは興味深い。

4) 塩分濃度

海水であった地下水は、陸地化し淡水である降雨により海域へと洗い出されていくが、領域が初期化された平衡状態の場合であっても塩水として陸地に残される部分がある。第9図に海洋の海水の塩分濃度を100%とした時、塩分濃度10%の地下水が存在する領域を示した。第9図は三次元の塩分濃度の分布を2次元平面に投影したもので、着色部は地下を掘っていくと、ある深度に到達すると10%の塩水に出会うことを意味している。ちなみに10%は作物にもよるが、かんがい水中の塩分濃度の上限に相当する。

7. まとめ

流域の水循環は、地形、地質、植生、土地利用、気象などの自然環境と治水、利水などの人間活動の結果として表れる複雑系である。ここで紹介したコンピュータ地図は北海道の水・物質循環情報基盤整備の初期段階である。この段階で得られたシミュレーション結果と実現象の違いがあるところを見出し、なぜ違っているのか仮説を立て検証し、モデルを成長させていくことが重要である。そのためには地質を含む様々な専門家や実務家の方々が目的に応じてこのコンピュータ地図を使い、より正確なコンピュータ地図へと成長させていく必要がある。将来このコンピュータ地図は、蓄積された膨大なデータからなる地圏の水循環統合情報基盤となり、ああすればこうなるという図式の人間の単純なイメージを超えた自然本来の複雑系を描き出しうる、コンピュータ上に作り出されるもうひとつの地球となり、以下に示した問題解決のための強力な情報基盤へと発展していく。

水資源の最適な管理運用 (スマートウォーター)

- ・ 空間的・時間的に不均一な水の実態の把握と過去の再現から未来予測
- ・ 上水、工業用水、農業用水等の水資源開発

- ・ 河川管理、洪水対策、ハザードマップ、国際河川における紛争回避
- ・ ダム、トンネル、大規模造成工事などによる地水環境変化の予測と対策
- ・ 都市開発マスタープランのための水資源情報など

水資源の品質保証

- ・ 地表水・地下水の水質・水量の実態把握と過去の再現からの未来予測
- ・ 上水道、飲料水メーカー等の水質管理、テロ対策
- ・ 工場、鉱山、産業廃棄物処分場、農業地帯、地下水汚染対策
- ・ 原油、LPG、圧縮空気、CO₂地下貯蔵施設等の建設、維持管理
- ・ 放射性廃棄物地層処分施設の建設、影響評価など

人口爆発とともに経済活動がさらに加速していく中において、循環財である水資源を持続可能な形で利用できなければ人類の発展は望むべくもない。国土の水・物質循環白地図は、複雑な現象を大局から局所まで可視化する第一歩であり、河川の上流から下流、海までを一つの流域単位として、関係する複数の自治体や住民、企業など関係者が一体となって水問題に取り組む統合水資源管理 (Integrated Water Resources Management) (例えば日本水フォーラムのホームページなど、<http://www.waterforum.jp/jpn/iwrm/contents/concept.htm>) の重要なツールとなることを願っている。

文 献

登坂博行 (2006) : 地圏水循環の数理 - 地圏水循環・熱循環モデル - 東京大学出版会 310p.
 脇田浩二・井川敏恵・宝田晋治 (2009) : 20万分の1日本シームレス地質図DVD版、数値地質図G-16、産業技術総合研究所地質調査総合センター。

NISHIOKA Tetsu (2010) : Creation of Primeval Land Map Construction of Three Dimensional Geological Intelligence Infrastructure.

<受付: 2010年7月23日>