

[様式2]

提案書	
技術分野	⑥
提案件名	地下水流動及び放射性核種移行の観測、解析、可視化による一体的な地下水管理システム
提案者	公益財団法人リバーフロント研究所、八千代エンジニアリング（株）、（株）日立製作所、（株）WATER、公益財団法人原子力バックエンド推進センター

目次

1. 技術等の概要	1
(1) 現在及び将来の地下水・放射性核種の循環解析	3
1) 特徴	3
2) 仕様	4
3) 性能	6
4) 保有者	8
(2) 現在及び将来の地下水・放射性核種の可視化	9
1) 特徴	9
2) 仕様、性能	9
3) 保有者	12
(3) 現在の地下水・放射性核種の観測	13
(3-1) 地下水の観測	13
1) 特徴	13
2) 仕様	13
3) 性能	14
4) 保有者	16
(3-2) 放射性核種の観測	17
1) 特徴	17
2) 仕様	17
3) 性能	17
4) 保有者	17
2. 備考	18
(1) 現在及び将来の地下水・放射性核種の循環解析	18
1) 開発・実用化の状況	18
2) 開発・実用化に向けた課題・留意点	22
3) その他	22
(2) 現在及び将来の地下水・放射性核種の可視化	23
1) 開発・実用化の状況	23
2) 開発・実用化に向けた課題・留意点	32
3) その他	32

(3) 現在の地下水・放射性核種の観測	33
(3-1) 地下水の観測	33
1) 開発・実用化の状況	33
2) 開発・実用化に向けた課題・留意点	37
3) その他	37
(3-2) 放射性核種の観測	38
1) 開発・実用化の状況	38
2) 開発・実用化に向けた課題・留意点	38
3) その他	38

1. 技術等の概要

本件は、地下水流動及び放射性核種移行の観測、解析の結果を3次元で可視化する総合的な地下水管理システムを提案する。

本提案は、提案関係機関（代表：リバーフロント研究所）において、目視の難しい表流水・地下水一体の水循環に関し、これを観測し、水循環状況を解析し、わかり易くビジュアルに可視化する総合的な技術分析・施策評価提案システムとして研究開発しているものである。

提案に含まれる観測技術による地下水、核種の観測結果や、既往の地形、地質、構造物、水文等の各種資料に基づき、見えない水循環の状況を物理法則に従って空間3次元、過去～現在～将来予測の時間軸の場での表流水・地下水の流動状況を量的、質的に解析し、解析結果は、技術の専門ではない施策決定責任者にも体感的にわかり易くビジュアルに可視化する技術群から構成されている。

総合的な表流水・地下水一体の解析・可視化・施策提案を行う技術システム群としては、世界の最先端を行くものと考えている。

福島第一原発の汚染水対策を念頭に置いた場合、現状の地下水（汚染水）流動状況の把握、対策工を行った場合の地下水（汚染）状況の評価が可能である。現在の対策工（陸側遮水壁（凍土壁）、サブドレン）の詳細な事後評価、事後検証が可能であるとともに、将来の対策工を実施する上で、複数の対策工の事前評価、効果検証が可能であり、最適な将来対策工の選定が可能である。

その概念図は、図1の通りである。

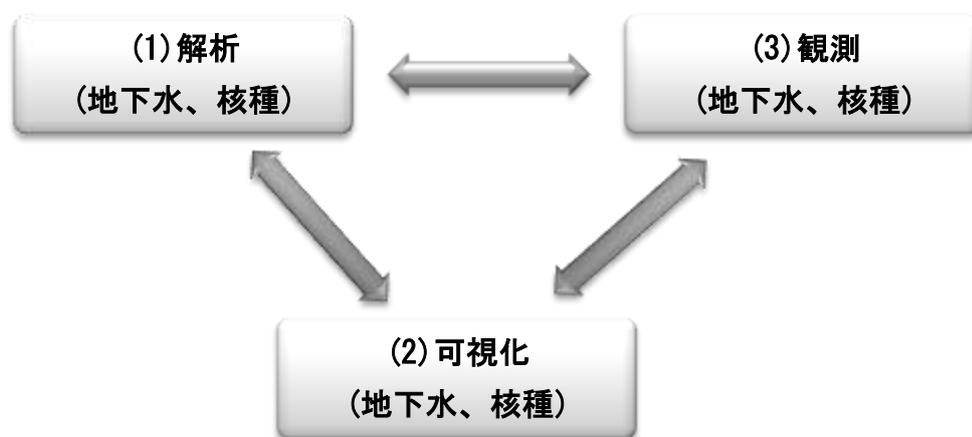


図1 地下水、放射性核種の観測、解析、可視化の総合管理システム

(注)相互関連に関して、地下水及び核種の循環解析は、観測データに基づき、地形地質モデルを構築した上で行う。解析結果は、観測データと突き合わせて、結果の精緻化のため、キャリブレーションを実施する。地下水、核種の循環状況の可視化は、解析結果に基づき、実施する。可視化された地下水、核種の循環状況から、観測地点の精査を行う。

本提案書(1)「現在及び将来の地下水・放射性核種の循環解析」で示す解析に関する技術を用いると、福島県第一原発近傍の地下水の流動制御及び放射性核種の漏出対策のため、地下水及び放射性核種の挙動を把握可能である。

建物建屋への地下水の流入抑制のため、遮水壁の構築、地下水の抽出が検討されているが、このような構造物や人為的な水利用変更をモデルに組み込むことで、様々な施策の実施による地下水流動の変化を

予測可能である。

(2)「**現在及び将来の地下水・放射性核種の可視化**」で示す可視化に関する技術を用いると、表流水と一体となった地下水の水循環の全体像を3次元可視化することを通して、非専門家の施策の意思決定者であっても、現在の水循環構造を理解可能である。このように、科学的知見に基づいた解析の結果を分かりやすく表示することを通して、建物建屋地下への地下水流入を抑制する最適な施策の方向性を明らかにできる。

(3)「**現在の地下水・放射性核種の観測**」で示す観測に関する技術を用いると、地下水は、ボーリングを行うことなく地上からの新電気探査法により、賦存分布、建屋やタンクからの漏水場所がピンポイントで特定可能である。放射性核種は地中の放射線量測定、GE半導体を用いた広域用地表面の γ 放射能迅速測定法を利用して、把握可能である。

(1) 現在及び将来の地下水・放射性核種の循環解析

1) 特徴

ここで提案している4次元水循環マネジメントシステムは、表流水、地下水の流動を一体的に、空間3次元及び、過去、現在、未来の時間軸で、解析できるシステムである。その4次元水循環マネジメントと一般的な解析との相違は、表1の通りである。

表1 4次元水循環マネジメントと一般的な解析との相違

一般的な解析	4次元水循環マネジメント
一般的な浸透流解析 <ul style="list-style-type: none"> 地下地層媒体中の水の流れのみを解く。 地上面における地下水涵養量を境界条件として与えなければならない。 空気の移動、水との相互干渉は考慮されない。 しみこみは、境界条件で設定されるが、湧出後の地下水の解析は行われない。 	<ul style="list-style-type: none"> 陸域における水循環システムを多相多成分流体体系として定式化し、地上および地下の水の流れを一体化（相互交換挙動）した解析が可能。 地上面に地下水涵養量を境界条件として与える必要がない。
一般的な流出解析（分布型） <ul style="list-style-type: none"> 河道内の洪水流、堤内の氾濫流を解析する様々なモデルがあり、それぞれは、別々に解かれる。 河川からの越流は、越流条件（越流公式）により判定され、堤外から堤内へ水を出し入れする。 多くの場合、地下水との相互作用を考慮されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 堤内外の区別はなく、地表水流動モデル（拡散波近似）で一体的に解かれるので、水の挙動は地形および水面勾配によって算定される。 水の挙動の計算上、堤内外の越流条件を与える必要がない。 また、地下水との相互作用を考慮できるので、河川水の伏没・湧水の表現が可能となる。 水に乗って流動する浮遊砂、核種の解析も同時に可能。
結果の表示 <ul style="list-style-type: none"> 一般的には、専門家向けのグラフ化など。 	<ul style="list-style-type: none"> 非専門家でも理解しやすい3次元可視化。

表流水と地下水の流れを一体的に解析

2) 仕様

①解析手法

本業務で構築する水循環モデルは、表流水・地下水一体の水循環の全体像、将来像を科学的に解析し、放射性核種による地下水への影響の事前把握、水循環の観点から優先的に対策を実施すべき場所の想定に資するものとする必要がある。

本業務では、以下の要件を満足する「統合型水循環シミュレータ」を採用する。

- 1) 地下水盆の立体構造を組み込むことが可能である。
- 2) 表流水・地下水一体の水収支を解析可能である。
- 3) 汚染物質（特に放射性核種）の移流、拡散、吸着、放射性崩壊、土砂移動等を組み込むことが可能である。
- 4) 表流水・地下水の流動速度、日変動、季節変動等に対応した時間軸の設定が可能である。
- 5) 物理法則に基づき、解析結果の検証が可能である。
- 6) モデルの詳細化、土砂移動、栄養塩、熱等の解析要素の追加が可能である。
- 7) 河川水や地下水利用等の水利用システムを考慮することが可能である。
- 8) 実用レベルで高速計算処理が可能である。

4次元水循環マネジメントの概念モデルは図2の通りである。

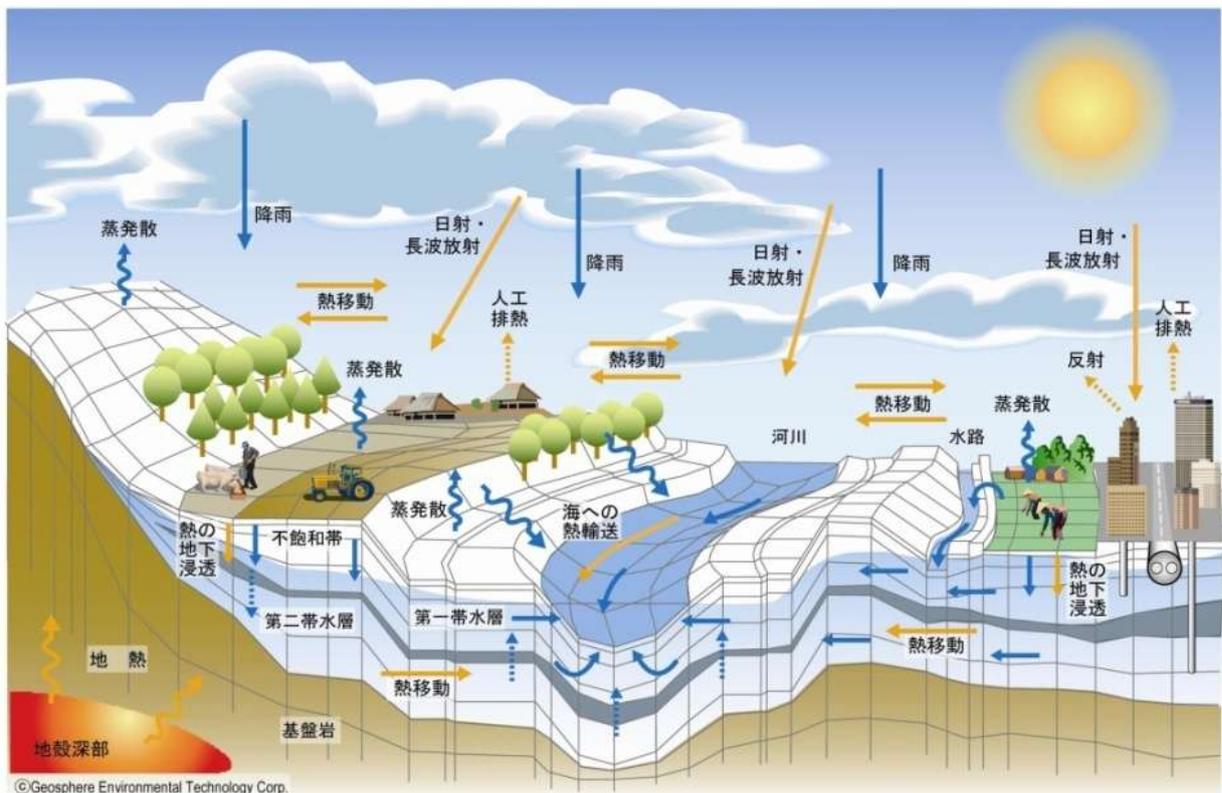


図2 4次元水循環マネジメントによる解析の概念図

表流水、地下水、放射性核種の挙動を示す物理法則に基づいた挙動の方程式群の一例は以下の通りである。下記方程式群は、目的に応じて、組み込み可能である。

支配方程式	$-\nabla M_p - \rho_p q_p = \frac{\partial(\rho_p \phi S_p)}{\partial t}$
地上流体	$M_w = -\frac{\rho_w R_x^2 W_x h}{n} \sqrt{\left \frac{\partial h_f}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \cos^2 \theta \right } \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \cos^2 \theta \right)$ <p>(マニング型の開水路流れを記述する浅水波方程式に拡散波近似を適用)</p>
地下流体	$M_p = -\frac{\rho_p K k_r}{\mu_p} \nabla(P_p + \rho_p g Z)$ <p>(水、空気 2 相 2 成分流体系にダルシー型の流速公式を適用)</p>
放射性核種	<p>水相中の放射性核種 (Cs_{134}、Cs_{137})</p> $\nabla \cdot \left(\rho_{cw} \frac{K k_{rw} R_{cw}}{\mu_w} \nabla \psi_w \right) + \nabla \cdot D_w \nabla (\rho_{cw} R_{cw}) - \rho_{cw} q_{ws} R_{cw} + \lambda \rho_{cw} R_{cw} + m_{ss,i}^{adsorp} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{cw} \phi S_w R_{cw})$ <p>浮遊砂に吸着した放射性核種 (Cs_{134}、Cs_{137})</p> $\nabla \cdot \left(\rho_{ss,i} \frac{K k_{rw} R_{ss,i} R_{cs,i}}{\mu_w} \nabla \psi_w \right) + \nabla \cdot \varepsilon_{ss,i} \nabla (\rho_{ss,i} R_{ss,i} R_{cs,i})$ $- \rho_{ss,i} q_{ws} R_{ss,i} R_{cs,i} + \lambda \rho_{cs,i} R_{cs,i} - m_{ss,i}^{adsorp} - R_{cs,i} m_{ss,i}^{sprash} - R_{cs,i} m_{ss,i}^{erosion} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{cs,i} \phi S_w R_{ss,i} R_{cs,i})$ <p>表土層 (土砂交換層) 中の放射性核種 (Cs_{134}、Cs_{137})</p> $\lambda \rho_{cs,i} R_{cs,i} - m_{ss,i}^{adsorp} + R_{cs,i} m_{ss,i}^{sprash} + R_{cs,i} m_{ss,i}^{erosion} = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_{cs,i} (1 - \phi) R_{cs,i}]$

(注) 地表水中を乱流拡散によって輸送される放射性核種の挙動は、水相中の溶存態核種、浮遊砂に吸着した懸濁態核種の形態をとり、地表水及び浮遊砂のそれぞれの移流拡散方程式に放射性核種の生産・消滅項を加えた上式で表される。また、浮遊砂の供給源となる表土層 (土砂交換層) 中では、放射性核種の物質収支は上式により記述される。

Cs 以外の放射性核種に関しては、放射性廃棄物のピット処分場からの放射性核種の移行を評価する際に利用される手法を活用する。その手法においては、廃棄物層 (例えば貯水タンク) からのストロンチウム等各核種の浸出率を表す放出係数のデータを用い、帯水層の地下水への浸透量を求め、その後は、地下水流速により各核種が移行し、河川または海へ流出することを考える。この場合、帯水層の土壤空隙率データを用い、帯水層に残存する核種数量を評価する必要がある。

②解析可能な項目

解析可能な項目は、地下水の流動経路、流動速度、時間応答、地下水に付随した浮遊砂の移動や核種の移流拡散である。

地下水の流動経路の分析事例としては、図4で、鳥取県東部の千代川流域の地下水の流動解析結果を示す。

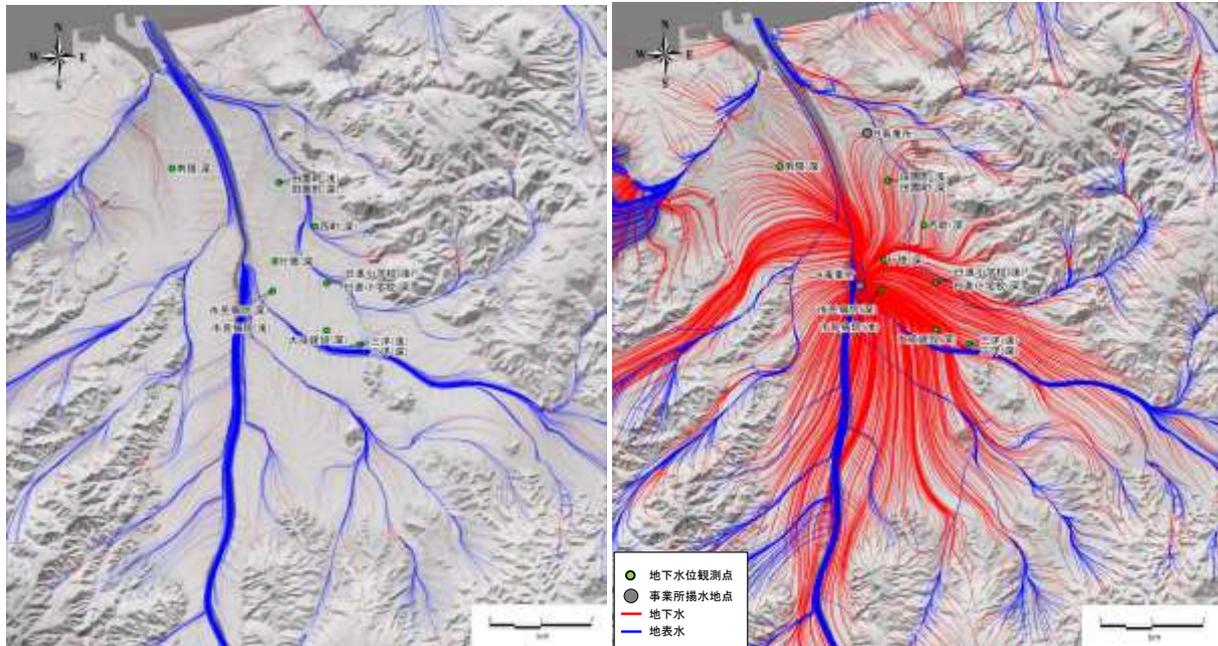


図4 地下水の流動経路の分析結果イメージ（鳥取県東部千代川の事例）

(注)左図は深層帯水層の流線図《揚水が無い場合》であり、右図は深層帯水層の流線図《揚水がある場合(H17)》である。

3) 性能

①解析密度

大きな水循環域及び地盤沈下発生域での表流水、地下水の挙動を把握できるように、格子サイズは、平面的には、河川、山岳地、平野、特に重要な地域などに応じて離散化を行い、鉛直方向には土壌・岩層分布などに応じて地下深部まで、大きさを变化させて離散化を行うものとする。

平面での格子サイズについては、理論的には数ミリ単位から数キロ単位で設定可能である。実際の分析では、分析対象地域にある構造物や地盤沈下状況などの人工構造物の要素を再現する上で、グリッド水準にあわせて設定するものとなる。

②解析時間

現在開発済みの計算システムを活用する場合、計算に必要な時間は流体相、流体成分、モデル格子の規模、物性値、外力条件により相違する。一定条件の外力を与えた領域初期化を行う場合、現在のシステムでは、計算時間は表2の通りとなる。

表2 現行システムの計算時間

計算格子数	流体相、成分	計算時間
10～30万	2相2成分	数時間～24時間
30万～80万	2相2成分	24時間～3日
100万～200万	2相2成分	24時間～5日
200万～300万	2相2成分	5日～7日
300万～500万	2相2成分	7日～10日
500万～	2相3成分	7日～

(注) 100万～は並列計算での計算時間である。

③解析精度（観測値と予測値の比較表）

現在の水循環の解析結果として、木曾川の基準点である笠原において、河川流量の観測値と解析値の比較結果は、図5の通りである。検証期間5年間に於ける流量変動に対して、解析流量が観測流量を概ね良好に再現していることが確認される。

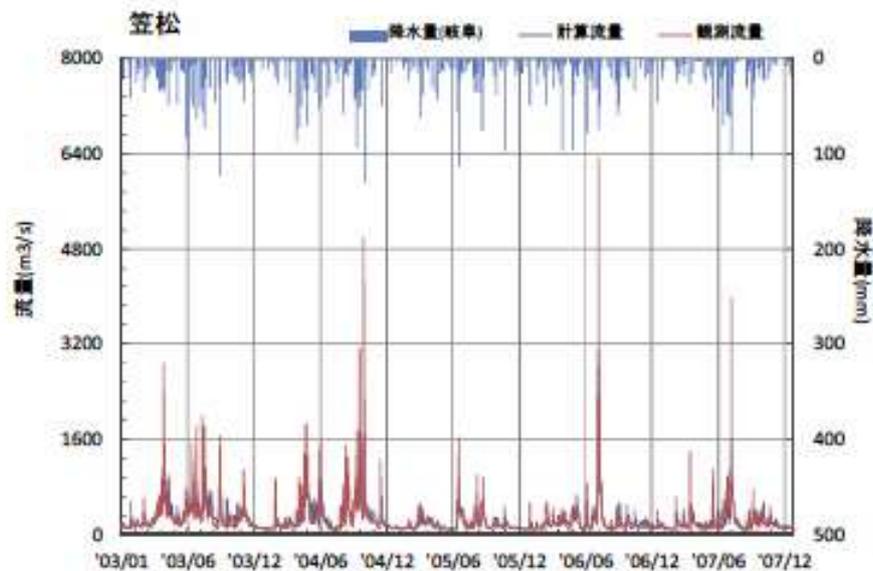


図5 河川流量の解析値と観測値の比較

図6は、現時点の濃尾平野のG1礫層の地下水位の観測値と解析値の比較結果である。濃尾平野の主要な地下水観測井において、解析水位と観測水位との差異は5m以内であり、解析水位は長期的な水位の変動傾向を概ね良好に再現している。

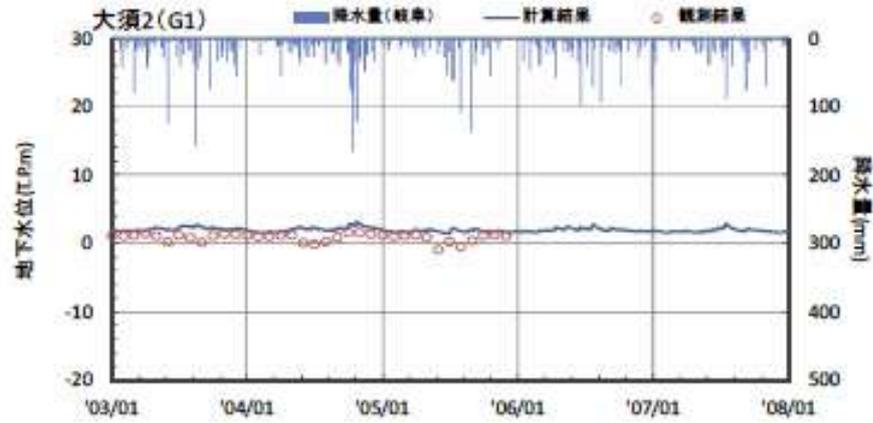


図6 地下水位の解析値と観測値の比較

4) 保有者

解析技術は一般公表されており、誰でも利用できるものである。(公財)リバーフロント研究所、八千代エンジニアリング(株)は、補足資料に示した通り、国交省などで豊富な業務経験を有す。

(2) 現在及び将来の地下水・放射性核種の可視化

地上、地下を移動する水の循環や、水循環を通して流動する放射性核種の循環の状況は、直接見ることができないため、専門家でなくても分かりやすく理解できる見える化が重要である。表流水・地下水一体の水循環及び、土砂や放射線核種の物質循環の解析結果を可視化する「水循環可視化システム」は、施策の適切な立案、意思決定や流域住民等の関係者の意識共有、合意形成に貢献可能である。

1) 特徴

本システムの特徴は、第1には地下の状況も表示できる GIS 上で、水循環と関連要素の状況を、任意の視点から空間的にビジュアルに表示すると共に、その時間変化を表示可能であること、第2にはこのシステムの座標系は世界座標系(WGS84)であること、第3には地理情報に関する規格を策定する業界団体である OGC(The Open Geospatial Consortium)に認可された NetCDF(Network Common Data Form)形式で作成することから、新たな解析データなどについても、可視化の対象として、容易に拡張可能であることである。

2) 仕様、性能

本可視化システムは、以下の諸点が可能である。

- ①専門家でもなくても容易に理解可能、システムを操作可能
- ②水循環の立体的な状況を容易に理解可能
- ③水循環域の水資源ポテンシャルを容易に理解可能
- ④地下水の流動経路を容易に理解可能
- ⑤水収支を容易に理解可能
- ⑥広範囲から局所まで多様な縮尺での表示が可能
- ⑦時間変化が表示可能
- ⑧多様な情報の重ね合わせが可能
- ⑨施策による地下水位回復効果を容易に理解可能
- ⑩今後のシステム拡張可能性

表3 現在及び将来の地下水・放射性核種の可視化の仕様、性能

項目	仕様、性能
①専門家でもなくても容易に理解可能	<ul style="list-style-type: none"> ・意思決定、合意形成の円滑化に資するものであり、施策の意思決定者や流域住民に地下水、地下水盆の状態を分かりやすく表示可能。 ・水循環や GIS の専門知識をもたない利用者であっても、容易に操作可能。 ・目に見えない地下水の流動、地下水位等の表現をウォークスルーの要領で可視化することにより、専門家でもなくても地下水の水循環の状態を実感をもって理解可能。 ・地上と地下を区別するとともに、深度により流速の異なる地下水の流れを考慮した描画とすることで、地下水の流れを分かりやすく表現可能。
②水循環の立体的な把握	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の立体的な流動構造を把握するため、地下水盆の規模や地下の多層構造に応じて、水循環の3次元構造を理解しやすく表示。

	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元の解析結果を、地下も表示可能なGISを用い、解析結果に応じたスケールや視点(地下から地表を見上げる視点を含む)で、解析対象の立体的な構造をビジュアルにアニメーション表示し、容易に理解可能。
③表流水や地下水、汚染物質の移動経路の理解が可能	<ul style="list-style-type: none"> ・直接目にする事ができない表流水や地下水、その流動に伴い移動する放射性核種がどこから来てどこへ移動していくのか、その因果関係を時間的、空間的に分かりやすく表示可能。 ・汚染水対策に向けて、“地下水が、どのくらいの速度で、どこから来て、どこに流動するのか”を分かりやすく表示可能。 ・今後、放射性核種が漏出する想定をおき、流動経路を分かりやすく表示可能。
④水循環域の水資源賦存量を容易に理解可能	<ul style="list-style-type: none"> ・施設建屋への地下水流入を想定する上で、水循環の観点から水資源賦存量を分かりやすく表示可能。 ・水循環解析結果から、水資源の賦存量と分布域を表示可能。
⑤水循環域の水/物質の収支の理解が可能	<ul style="list-style-type: none"> ・水循環の適切な理解のため、流量や流量変化等の水収支、放射性核種の収支の状況や、収支の時間的な変化を把握可能。 ・河道区間毎に流入、流出の収支を示す水収支図の作成、主要地点の水収支の時系列変化のグラフ表示が可能。
⑥広範囲から局所まで多様な縮尺での表示が可能	<ul style="list-style-type: none"> ・地方ブロックや県などの広域的な範囲から、福島第一原発の近傍など局所的な領域にわたって分かりやすく表示可能。
⑦時間変化が表示可能	<ul style="list-style-type: none"> ・過去から現在の変化や将来の予測などの経時変化に沿って分かりやすく表示可能。
⑧多様な情報の重ね合わせ	<ul style="list-style-type: none"> ・水循環に関連する地形、地質、土地利用等の情報と、流動経路を重ね合わせてわかり易く関連性を表示可能。 ・地下も表示可能なGISを用い、水循環に関連する地形、地質、土地利用、気象、水文、水利用等の情報と表流水、地下水や汚染物質の状況を地理的に重ね合わせて分かりやすくビジュアルに表示可能。 ・理解しやすくするために、流域界、ランドマーク等といった場所に関する情報が表現可能。
⑨環境変化や対応策による水循環への効果の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・気候変動などによる自然環境変化、水利用、土地利用などの社会環境の変化及び施策の効果による水循環や汚染物質の状況の変化を時間軸に沿って分かりやすく示すこと。 ・対応策がなされた場合の水や物質の状況変化を、わかりやすく表示可能。 ・対応策がとられた場合と取られなかった場合の差異を、時間経過による効果の変化も含めて表示可能。 ・画面分割によるGIS上での同時表示、時系列グラフ上での同時表示が可能。

地下水の立体的な循環の解析結果のイメージは図7で、関係要素との重ね合せのイメージは図8の通りである。

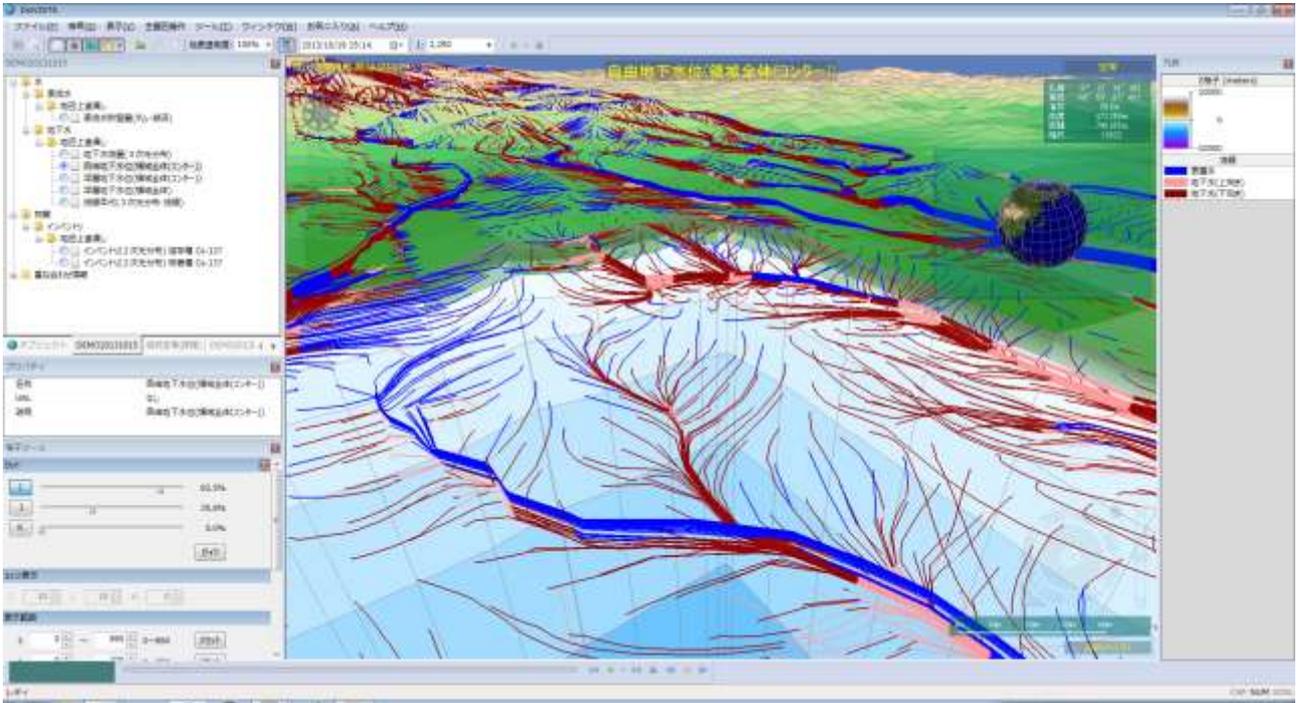


図7 地下水の立体的な循環の解析結果のイメージ

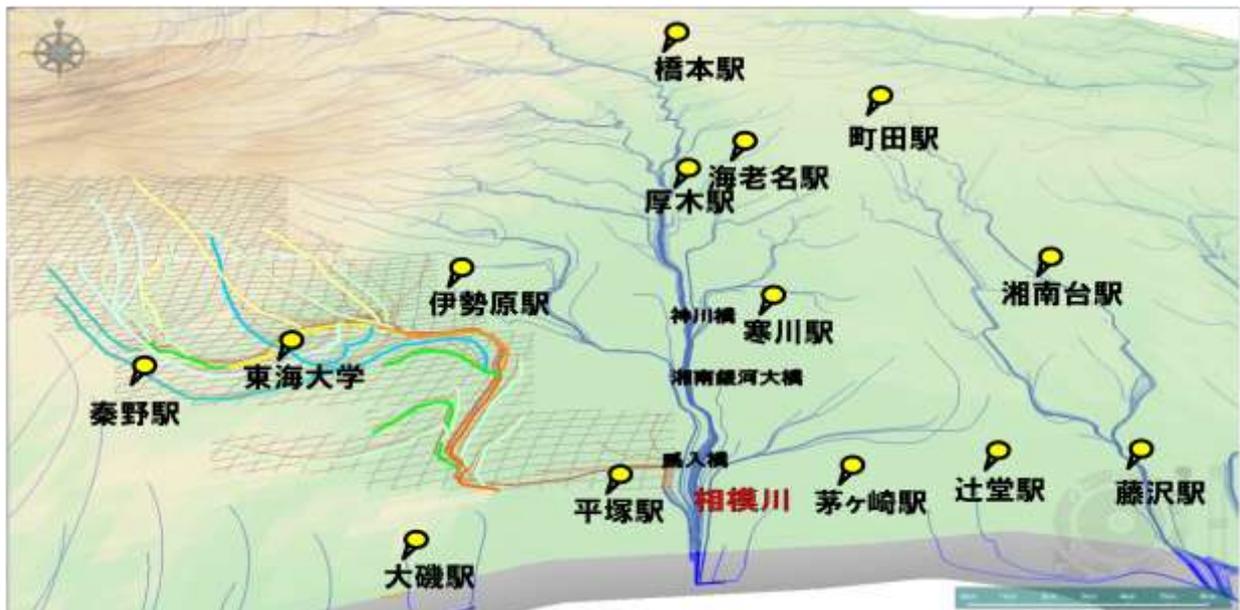


図8 関係要素との重ね合せのイメージ

可視化の表示性能

可視化の表示に要する時間の測定に使用した OS、CPU、メモリ、HDD、ビデオカード等のコンピュータ環境を表 4 に示す。

表 4 コンピュータ環境の条件

OS	日本語版 Microsoft Windows7 (64 ビット) Professional
CPU	Intel Core i7
メモリ	16GB 以上推奨
HDD	外付け HDD を含み 10TB 以上の空き容量を推奨 (格納するデータにより再見積り)
ビデオカード	NVIDIA GeForce GTX シリーズより選定

上記コンピュータ環境下における表示させる格子数と可視化に要する時間の関係を表 5 に示す。

表 5 表示させる格子数と可視化に要する時間

表示させる格子数	可視化に要する時間
100 万	5 秒

なお、過去実績で表示可能な格子数は 2,800 万格子である。

3) 保有者

DioVISTA Groundwater 上に地下水を可視化できる技術を開発したのは株式会社日立製作所である。この DioVISTA Groundwater の製品形名は「C-DS2C-DVGW」である。

(3)現在の地下水・放射性核種の観測

(3-1) 地下水の観測

1) 特徴

電気探査は、地下水調査において物理探査法として広く利用され、地下の層序、層厚、地層境界、断層等を比抵抗の変化から調査する手法である。この手法の特徴は、ボーリングを行うことなく地下水のピンポイント観測が可能な点にある。一般に岩石は水を含むと比抵抗が低下するが、一概に比抵抗だけから帯水層を判断することは困難である。

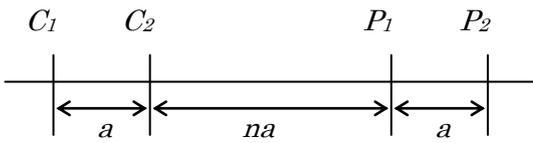
新たに開発した本技術は帯水層の比抵抗値が周波数に依存することを実証したもので、低周波数（100Hz 以下）でスイープさせながら地盤に通電し、比抵抗値を測定、解析することにより帯水層の位置、規模をピンポイントで把握するものである。

これまで国内において地下水源開発、老朽ため池の堤防漏水調査、護岸堤防の漏水調査等、約 80 件の実績がある。

2) 仕様

新たに開発した周波数可変型多チャンネル電気探査装置（AQUA Visualizer1）の仕様は表 6 の通りである。

表 6 探査機器スペック（AQUA Visualizer 1）

最大通電電圧	400V
通電電流	定電流方式最大 250mA
通電周期	2、3、4 秒／測定
電極	4～255 極まで可変
電源電圧	DC12V
探査可能最大範囲	探査測線延長 約 1km （深度約 400m）
電極配置	<p>電極配置は、手動モードで任意の電極配置設定が可能である。自動測定モードはダイポール・ダイポール法を採用している。</p> <p>【ダイポール・ダイポール法】</p> <p>一対の電流電極ともう一対の電位電極を離して配列する配置である。電流および電位電極間隔が電流電極系と電位電極系の距離よりも小さくなり、ダイポール（双極子）と考えるができるので、ダイポール・ダイポールは位置と呼ばれる。</p> <p>可探深度 = $(N+1)a/2$</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>a : 電極間隔</p> <p>n : 隔離係数</p> <p>C₁C₂ : 電流電極</p> <p>P₁P₂ : 電位電極</p> </div> </div>

3) 性能

①周波数と比抵抗の関係性について

周波数と比抵抗の関係性を検証するために、サンプル実験を行った。サンプルは、試料の粒径や含水比等を数パターン変えて周波数依存性を確認した。

下図は、送信電流の周波数と比抵抗の関係を示したもので、**図 9** は地下水のみ、**図 10** は地下水+黒ボク土（含水比 60%）を一例として示す。

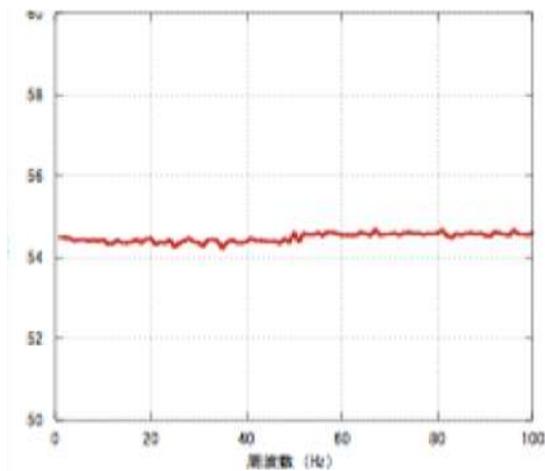


図 9 地下水の比抵抗変化

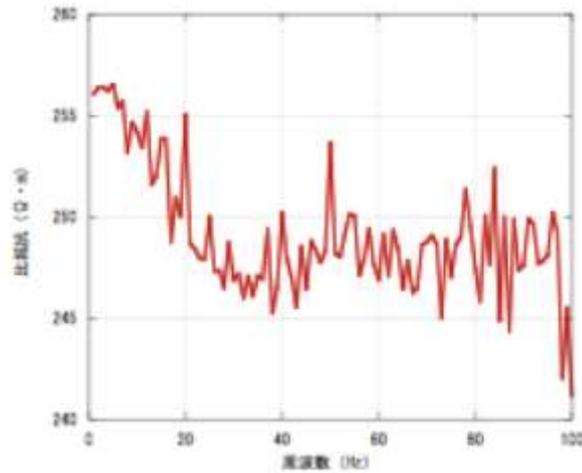


図 10 黒ボク土+地下水の比抵抗変化

地下水のみの場合、比抵抗値に周波数依存性がなく、ほぼ一定の値であることがわかる。これはサンプル媒質が 100%地下水であるため、媒質中の粒子が及ぼす表面伝導の影響がなかったことを意味する。つまり、媒質中に礫などの粒子が含まれることで周波数依存性が生じることがわかる。

黒ボク土+地下水の場合は、周波数に伴う比抵抗変化が現れる。同時に含水比を変えたパターンで実験を行った結果、含水比の増加と比抵抗値の変化も確認することができる。間隙中に占める導電体の割合が比抵抗の周波数依存性に影響することが判明した。同様に砂礫+地下水のパターンでは、礫の粒径の違いによる比抵抗変化も確認される。

②帯水層モデル実験による検証

アクリル水槽 (W170×D30×H50cm) 内に、素焼の器 (W30×D22×H18cm) に砂礫と地下水を入れ、これを帯水層とみなして黒ボク土の中に埋設してモデル実験を行った。この帯水層モデルの配置図は**図 11**の通りである。

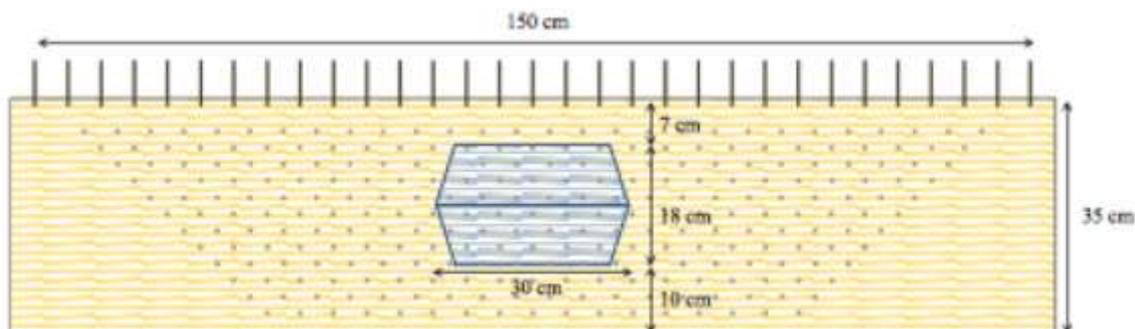


図 11 帯水層モデルの配置図

帯水層モデルによる比抵抗断面図を図 12 に示す。

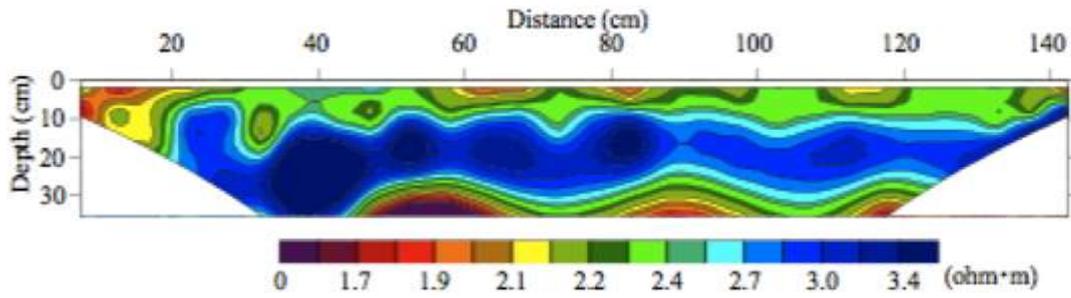


図 12 処理前の比抵抗断面図

中央部の帯水層周辺の比抵抗変化を明らかにすることを目的として、インバージョン解析をするにあたり、影響を及ぼす可能性のある領域の測点を除きインバージョン解析を行った結果を図 13 に示す。

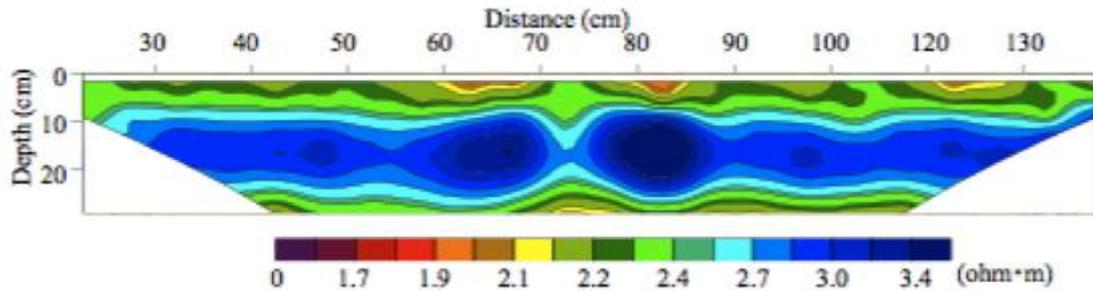


図 13 インバージョン解析後の比抵抗断面図

インバージョン解析結果に基づき、周波数帯において標準偏差分布を作成してみると下図に示すとおり、特定の周波数帯で帯水層が存在する場所で大きく変動していることが判明した。図 14 において、赤点線で囲む長方形が帯水層位置である。

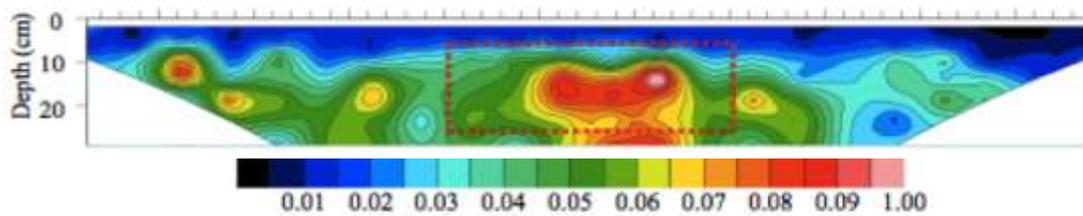


図 14 特定の周波数帯における標準偏差分布図

次に、インバージョン解析後に得られた比抵抗値を用い、 $\rho H/\rho L$ の値が特徴的な2つの周波数の組み合わせによる周波数分布図を図15に示す。帯水層位置において比抵抗に顕著な反応が現れる。

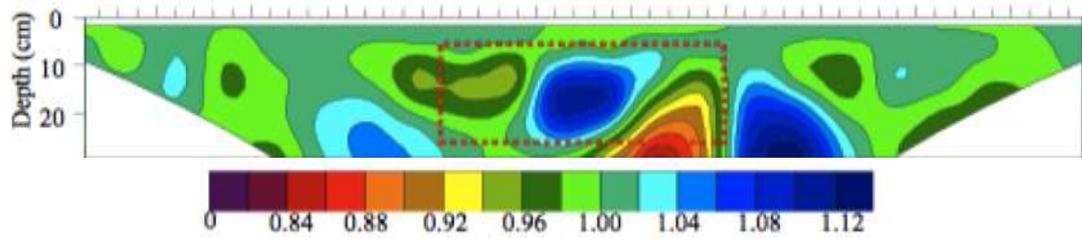


図15 特定の2周波数による比抵抗分布図

4) 保有者

特定した2つの周波数から得られる比抵抗値から地下水帯水層を抽出する技術は、経験則に基づきこれまで株式会社セウテック（代表者 房前友章）が開発を行ってきた。今回の新しい手法は、房前友章と数名の研究者により発明された技術である。

(3-2) 放射性核種の観測

1) 特徴

Ge 半導体検出器は汎用性のあるガンマ線検出器であり、エネルギー分解能が高く、極めて感度が高いという特徴を有しているため、地表面や、地中の極微量な放射能核種のスペクトル分析と強度分析に広範囲に用いられている。その GE 半導体法は、**図 16** の通りである。つまり、原発事故由来の放射性核種の地表からの核種移行挙動を把握、評価可能な技術である。



図 16 地表面の迅速な放射性核種及び濃度分析方法 (Ge 半導体法)

2) 仕様

原子力の分野では、汚染された原子力発電所等の規制解除に必要な土壤の汚染濃度基準の適合検査において重要な機器となっている。広範囲の面積を対象とした測定を行う場合は、見込み角度 120° 程度のコリメータを用いて地上高さ 1m で走行しながら、面的に測定する。地中試錐の場合は所定深さ位置での計測ができる。

3) 性能

Co-60 に対して $10 \mu\text{Sv}/\text{年}$ (概算 : $0.1\text{Bq}/\text{g}$ 又は $0.1\text{Bq}/\text{cm}^2$) の数値が通常汚染有無の基準となっているが、測定としてはその 1 桁程度下での検出感度がある。

4) 保有者

本技術の保有者は、放射線計測機器会社 (日立アロカ社、富士電機、Siemens 社、他多数)、原子力機器メーカー全般、原子力発電所等施設 (主に海外機関) である。

東京電力福島第一サイトでの汚染検査対象核種が Sr-90 等の難測定核種の場合、Sr-90 等の核種と Co-60 等の容易に計測できるガンマ核種との間の相関原理を利用するスケーリング法によって迅速な評価が可能となる。

2. 備考

(1) 現在及び将来の地下水・放射性核種の循環解析

1) 開発・実用化の状況

本解析システムは、既に開発済みであり、表7の通り、適用実績がある。

表7 水循環解析結果の政策への適用事例

適用分野	解析結果の政策への適用事例
水資源・水循環管理	<ul style="list-style-type: none"> ● 表流水地下水総合管理の条例化を目指して正常流量の設定 ● 地下水涵養量の把握、地下水の管理水位の把握、渇水時の揚水削減基準の把握、新規産業立地の可否の検討 ● 水源涵養施策の効果検証、効果的な施策立案の検討 ● 表流水、地下水一体管理の方向性の検討 ● 流域での水管理計画の立案
自然再生・水循環再生	魚類等の生息生育環境を育む流域水循環の保全、再生対策立案 重要地下水源地域の保全・管理。
水害対策	<ul style="list-style-type: none"> ● 台風経路の僅かな違いによる利根川の流出変化の予測、住民説明会で江戸川区の潜在的な水害リスクを説明。 ● 区内保水機能の評価、総合治水施策の効果予測、ゲリラ豪雨の対策。
地盤沈下	水循環域での地下水流動動態の解明、地盤沈下の影響予測、地盤沈下の進行を抑制するための表流水・地下水一体の利用計画、導水利用計画。
放射性物質の移転	放射性濃度が高い地域と低い地域の把握、評価（実施中）

また、公益財団法人リバーフロント研究所による水循環解析業務の内、当財団の機関誌「リバーフロント」vol.74で公表されているのは、「熊本地域における水循環機構について」、「木曾川流域における健全な水循環系の構築に向けて」である。それらの抜粋を以下で示す。

熊本地域における水循環機構について

国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所調査第一課長 中元道男

1. はじめに

熊本市は九州の中央に位置する熊本県の県都であり、平成24年4月には全国で20番目（九州では3番目）に政令指定都市となった。熊本市の発展には、古くは加藤清正が熊本城主として「川を治め城下を守り発展」させるべく、まちづくりと一体的な河川の付け替え、白川中下流域のかんがい施設の築造により、現在の都市基盤並びに豊富な地下水循環の仕組みを構築し、現在まで引き継がれている。



写真-1 加藤清正像（本妙寺）

熊本河川国道事務所では、阿蘇カルデラを流域の80%を占め、熊本市を貫流し有明海に注ぐ一級河川白川の管理を行っている。



図-1 白川水系流域図

河川の整備と管理にあたっては、平成12年に白川水系河川整備基本方針を、平成14年に白川水系河川整備計画を策定している。河川の低水管理の目標となる正常流量については、白川水系河川整備基本方針において、白川中流域の水田は熊本地域の地下水の重要な涵養域であることや、地下水は河川の流域界を越えて広域的に流動していることが過去の調査や研究で定性的に分かっていることから、熊本地域全体として河川水（表流水）と地下水の水循環機構の実態を明らかにした上で決定すべきであるとしている。

このように、河川水と地下水が密接に関係する白川流域を含む熊本地域においては、双方一体として定量的に水循環機構を解明した上で、健全な水循環となるように河川水と地下水のバランスについて検討していく必要がある。

今回、熊本地域の水循環機構の概要と解析のとりくみ状況、熊本地域における地下水保全の取り組み、健全な水循環の構築に向けた方向性について報告する。

2. 熊本地域の水循環機構及びモデルの概要

熊本市を含む熊本地域（13市町村、約100万人）では、生活用水のほぼ100%を地下水に依存している全国的にも特異的な地域である。これは4度にわたる阿蘇火山の大規模な噴火活動（約27万年前から約9万年前）により形成された熊本地域の地形・地質特性によるところが大きい。主帯水層を形成する高透水性の阿蘇火砕流堆積物層が阿蘇外輪山から西麓域に向けて緩やかに傾斜していることから、降雨が地表面から直接浸透し、または河川から取水されたかんがい水が水田を介して地下に浸透・流下し熊本地域の豊富な地下水を育んでいる。その結果、水前寺成趣園や江津湖などに代表される自然湧水帯が形成され、この地点に点在する熊本市の水道水源井に地下水を供給している。



図-2 熊本地域水循環のイメージ



写真-2 江津湖（熊本市）

一方、熊本地域の地下水は河川（地表水）の流域界を超えて広域的に流動していることが分かっているため、「統合型水循環モデル」を作成し、その解明を進めている。モデルは、地表の地形・土地利用や地下の地質構造等を3次元格子で表現した3次元格子モデルである。

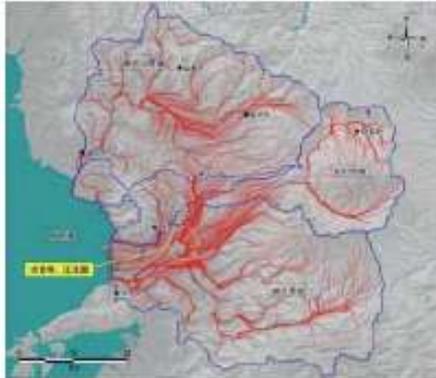


図-3 解析による第2帯水層地下水の流線軌跡

図-3は本モデルで解析を行った結果から第2帯水層（深層）地下水の流線軌跡を概略的に示したものであり、地下水の主流線が菊池川や白川の流域界を超えて経川流域にある水前寺・江津湖方面に向かっていることが分かる。なお、モデル計算によって得られたこのような広域的な地下水流動特性は、これまでの調査・研究結果と整合している。

3. 熊本地域における地下水保全への取り組み

熊本地域では、昭和40年代から熊本県・熊本市等が主体となり地下水保全のための調査研究が開始され、昭和52年に「熊本市地下水保全条例」が、翌年には「熊本県地下水条例」（現行の「熊本県地下水保全条例」）が制定された。また近年においては、水源涵養林整備事業や水田湛水事業などを地元行政と公益財団、農家、市民等が協働して取り組むなど、全国でも先駆的な地下水保全活動として評価され、熊本市は平成20年に「第10回日本水大賞」でグランプリを受賞している。なお、平成24年3月に熊本県地下水保全条例が改正され、地下水採取の許可制や地下水涵養対策の義務化等が導入されることとなった。

このような中、これまで地下水保全の取り組みを行ってきた「(財)熊本地下水基金」、「熊本地域地下水保全活用協議会」、「熊本地域地下水保全対策会議」を統合した「公益財団法人くまもと地下水財団」（理

事長：熊本市長）が4月に発足した。これにより、地下水の保全と管理の一元化が図られ、併せて財団の諮問会議として「くまもと地下水会議」（議長：熊本県知事）が設置され、産・学・民・官が連携した取り組みが始まることである。当財団の平成24年度事業としては、①地下水環境調査研究事業、②地下水水質保全対策事業、③地下水涵養促進事業、④地下水採取・使用適正化推進事業に取り組むこととされている。

4. 健全な水循環の構築に向けて

熊本地域の地下水保全を行う上では、「くまもと地下水財団」の主要事業である「地下水環境調査研究事業」により、河川水も含めた広域的な水循環のあり方について整理していく必要がある。地下水保全は重要な施策である一方で、かんがいのために取水した後の河川も適切な状態に保っておく必要があり、河川水と地下水の両者が良いバランスを保つことが熊本地域の健全な水循環を構築するうえで重要である。

2章で述べた「統合型水循環モデル」では、降雨量やかんがいの取水量、流域の開発等の入力条件を任意に設定することで、地下水水位や河川流量への応答を解析できるため、このモデルを河川管理者と県・関係市町村の双方が共有し、河川水とかんがいを通じた地下水の最適な水配分の量を調整することができれば、健全な水循環の構築を進めるうえで有効であると考えている。一方で、「質」の視点では、近年一部地域で地下水の硝酸性窒素濃度の上昇傾向が顕在化し対策も講じられているが、本モデルの活用により窒素負荷源対策をより効率的・効果的に進めることができる可能性がある。そのためには水質パラメータを追加設定して検討する必要があるが対応は可能である。

引き続きモデルの精度向上を図り、くまもと地下水会議の中で必要な提案を行っていききたい。

5. おわりに

熊本地域の水循環機構の解明にあたっては、元熊本大学工学部教授の下津昌司先生の逝去からの研究成果並びに、熊本県、熊本市等で重ねられてきた多くの調査・研究成果を有効に活用させて頂きながら進めてきた。

資料提供頂いた関係各位に感謝申し上げるとともに、「くまもと地下水会議」の一員として、「水の国くまもと」のさらなる発展に貢献できればと考えている。

木曾川水系における健全な水循環系の構築に向けて

国土交通省中部地方整備局 木曾川上流河川事務所 調査課長 菊池 秀之

1. はじめに

濃尾平野では、高度成長期における過剰な地下水の汲み上げにより地盤沈下が進行したが、その後の規制等により現在では沈静化し、地下水位も回復傾向にある。一方、近年の小雨化傾向や地球温暖化に伴う気候変動等の新たな問題も顕在化しており、治水、利水及び河川環境の保全といったバランスの取れた適正な水資源管理が求められている。そのためには、木曾川水系における健全な水循環系の構築を図ることが重要である。本稿では、表流水（河川水を含む）や地下水等を含めた水循環解析モデルの構築を行うとともに、解析結果から判明した課題・特徴等の抽出を行った。

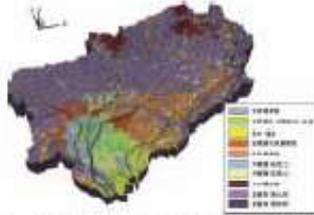


図-1 木曾川流域水循環解析モデル（地質構造）

2. 木曾川流域水循環モデルの概要

水循環解析モデルは、木曾川流域の気象、地形、地質、土地利用、水文、水利用などのデータ（表-1）に基づき、表流水・地下水の水循環構造を物理法則に従って再現できるモデルを用いた（図-1：地質構造モデルを例示）。なお、濃尾平野全体の水循環構造を再現するため、木曾川流域に加えて庄内川流域も解析領域に含めるものとした。

水循環解析は、人為的水利用のなかった過去における自然状態の水循環、人為的水利用を考慮した現状の水循環の2段階で再現解析を行った。解析結果の再現性については、表流水分布（河川の位置）、河川流量、地下水位の実績値と解析値を比較し、十分な精度であることを確認した。

3. 木曾川流域の水循環構造の推定

自然状態及び現状の2パターンの解析結果から、木曾川流域の水循環構造を解析するとともに、水利用に伴う変化を分析した。以下に主な解析結果の特徴を示す。

(1) 過去～現状の流域水収支の変化（表-2）

- ・自然状態に比べて、現状の河川流出量は3割減少し、地下流出量は10倍に増加している。
- ・木曾川流域全体では、地下水の伏設量及び湧出量は半減しているが、水利用の多い濃尾平野では増加している。
- ・水利用の影響は、地表水・地下水間の流出入の減少、特に河川流量の減少にみられる。

表-1 水循環解析モデル基本条件・データ

項目	仕舞・データ	
基本条件	図体システム	水・気候2相2次元系
	表流水モデル	マンニング式による剛水計算
	地下水モデル	一層化ダルシー法
	空間分解能	約 200m 格子（下流の主要な河川は約 100m 格子）
気象データ	降水・湿度	気象庁アメダス 国土交通省アメダス
	気温	気象庁アメダス
地形データ	流域	国土院地形数値地図 (5m/10m/50m メッシュ)
	河道断面	国土交通省河川断面・シブ
土地利用	利用区分	国土交通省国土数値情報 (100m/1km メッシュ)
	地質	産業総合技術研究所 30 万分の1 地質図 総務省自然環境委員会 木曾川流域濃尾平野水害地質分類図 国土省 5 万分の1 地質分類図
水文	河川水位・流量	国土交通省アメダス
	地下水位・位置	秋田調査資料
水利用	ダム運営	国土交通省河川事業課
	河川水取水	河川水取水実績・水利用集
	地下水取水・位置	地下水取水実績

表-2 木曾川流域(庄内川流域含む)水収支(年間値)

要素	①自然状態	②現状	差(②-①)
降水量	226 億 m^3	226 億 m^3	(変化なし)
	26 億 m^3	26 億 m^3	(変化なし)
河川から海への流出量	172 億 m^3	124 億 m^3	-48 億 m^3
	(同上)	(同上)	(同上)
地下から海への流出量	0.2 億 m^3	2 億 m^3	+1.8 億 m^3
	(同上)	(同上)	(同上)
地下水伏設量	87 億 m^3	43 億 m^3	-44 億 m^3
	16 億 m^3	23 億 m^3	+8 億 m^3
地下水湧出量	87 億 m^3	37 億 m^3	-50 億 m^3
	16 億 m^3	18 億 m^3	+2 億 m^3
河川水取水量	=	25 億 m^3	=
	=	10 億 m^3	=
地下水取水量	=	5 億 m^3	=
	=	(同上)	=
地下水枯水率	1080 億 m^3	1080 億 m^3	(変化なし)
	913 億 m^3	913 億 m^3	(変化なし)

上段：木曾川流域、下段：濃尾平野

(2) 過去-現状の表流水・地下水流線の変化

- ・地表面直下を起点とする流線(図-2(a))に着目すると、自然状態の流線は地上に湧出し表流水として河川へ流れる傾向にあるが、現状の流線は地下水の状態のまま海へ流れる傾向にある。
- ・主要な帯水層となっているG1帯層を起点とする流線(図-2(b))に着目すると、自然状態の流線は地表に湧き出すものと、地下水のまま流動するものが混在しているが、現状の流線は地下水のまま海へ流れる流線が多く、木曾川へ湧き出す地下水流れがない等の特徴が見られる。
- ・G2、G3帯層を起点とする流線は、ほとんどが地下水のまま海へ流れる傾向にある。
- ・水利用の影響は、水収支の変化でも見られるように、地下水から地表水への湧出が減少し、地下から海への流出が増加する傾向にみられる。

(3) 各河川の湧出、伏没状況(図-3:緑の棒グラフ)

- ・木曾川では、大山-笠松間(55k-40k)で伏没が卓越し、その下流(39k-26k)で湧出が卓越し、全体としては伏没量の方が大きい傾向(縦断積算量 $0.53\text{m}^3/\text{s}$)にある。
- ・長良川では、鏡島大橋-墨保間(48k-39k)の湧出が卓越しており、全体を通じて伏没量は小さく、湧出量が多い傾向(縦断積算量 $2.67\text{m}^3/\text{s}$)にある。
- ・揖斐川では、岡島-万石間(57k-40k)で湧出と伏没が交互に見られる複雑な構造を呈しており、全体としては湧出量の方が大きい傾向(縦断積算量 $0.84\text{m}^3/\text{s}$)にある。

4. おわりに

以上のように、表流水や地下水を含めた水循環解析モデル構築による基礎検討を行った。今後は、近年の小雨化傾向や地球温暖化に伴う気候変動等も考慮したうえで、木曾川水系における健全な水循環系の構築に向けた検討を進めていく予定である。

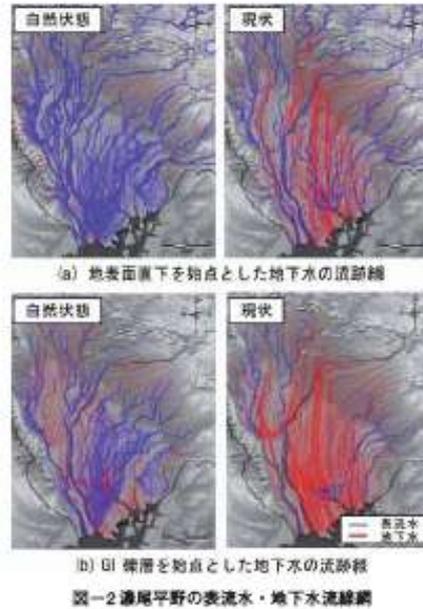


図-2 濃尾平野の表流水・地下水流線線

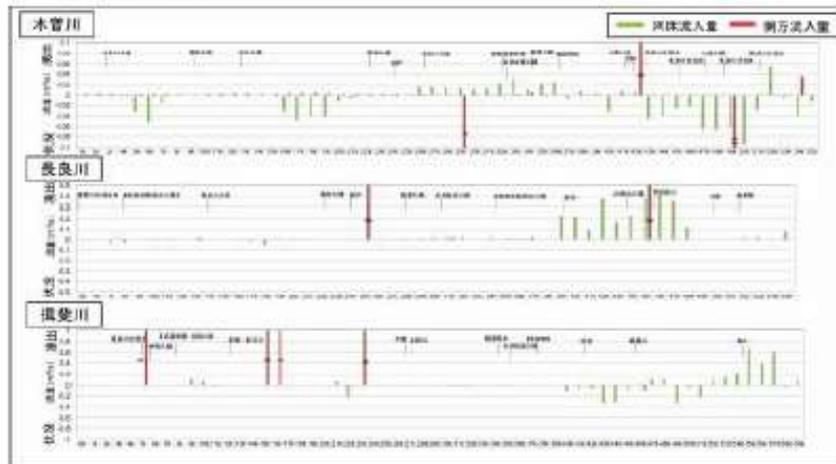


図-3 各河川における地下水の湧出・伏没量の縦断分布(現状再現)

2) 開発・実用化に向けた課題・留意点

既に開発済みの技術である。現行の解析システムは、汎用型コンピュータの並列計算で構成されており、更に高度な計算を実施する上で、スーパーコンピュータによる解析も可能である。

3) その他

一般公開されている技術である。

(2) 現在及び将来の地下水・放射性核種の可視化

1) 開発・実用化の状況

2013年のIEEE R10-HTC2013 Technical Sessionsにて発表した「Water Resource Cycle Simulation System」、2012年9月号の日立評論にて発表した「水資源循環シミュレーションシステム」は以下の通りである。

IEEE R10-HTC2013

Sendai, Japan, August 26-29, 2013

Water Resource Cycle Simulation System

Wataru Kawato

Information and Communication Technology Systems
Department, Intelligence and Information Systems Division,
Defense Systems Company, Hitachi, Ltd.,
Yokohama City, Japan

Junichi Aoki

Intelligence and Information Systems Division,
Defense Systems Company, Hitachi, Ltd.,
Tokyo, Japan

Motohiro Mizuno

Information and Communication Technology Systems
Department, Intelligence and Information Systems Division,
Defense Systems Company, Hitachi, Ltd.,
Yokohama City, Japan

Tetsu Nishioka

President of Geosphere Environmental Technology
Corporation, Tokyo, Japan

Abstract— We are constructing the water resource cycle simulation system that can contribute to both water resource management as well as water disaster countermeasures. This simulation system makes it possible to analyze both surface water and groundwater in a unified manner, and includes visualization functions that enable the rapid and easy-to-understand display of a wide range of representations. These functions provide an accurate picture of the current conditions as well as future predictions of water resources and water disasters. We plan to use this simulation system to contribute to finding solutions to issues affecting the entire planet, including the securement of water resources and the resolution of various problems stemming from water disasters.

Keywords— *water resource cycle; simulation; visualization; GIS (geospatial information system); groundwater*

I. INTRODUCTION

The world has been faced with a large number of increasingly serious problems in recent years due to issues such as global warming, rapid population growth, and societal developments, including a lack of industrial and drinking water, the growth of drought regions and corresponding crop failures, and flooding or inundation caused by torrential rain. A diverse range of complicated measures will be required in order to resolve these problems.

Japan faces threats such as a disorganized supply of water resources and frequent sudden torrential rains, all of which require solutions in the areas of water resource usage and water disaster countermeasures. In order to solve these problems, the “Emergency Measure Bill Regarding Regulating the Use of Groundwater” was submitted to the National Diet of Japan in January 2012 as lawmaker-initiated legislation intended to protect water resources. In addition, implementation of water measures is gaining momentum, including the installation of X-band multi-parameter radars that can observe regional rainfall amounts almost in realtime.

It is against this background that a need has arisen for functions that can correctly predict changes in water resource distribution both inside and outside the country, as well as the occurrence of water disasters, while supporting rapid and smooth decision-making regarding policies. To this end, we are trying to help popularize the use of a water resource cycle simulation system.

This article discusses a water resource cycle simulation system that can contribute to water resource management and water disaster countermeasures, as well as the specific technologies that comprise this system.

II. NEEDS AND TECHNOLOGICAL ISSUES

A. Needs

Functions that support the decision-making that goes into solving various problems related to water resources and water disasters must meet the following two needs:

1) *Accurate understanding of the current conditions and future predictions*

The ability to grasp the current amount and quality of groundwater resources that cannot actually be seen, and the ability to make predictions about the future based on the changing climate and human activities, are extremely important elements involved in the formulation of water resource plans. Accurate predictions about the future are also important when it comes to developing countermeasures for water disasters. Simulation technology must meet these needs.

2) *Ability to attach meaning to huge amounts of data and visualization functions*

It is important that functions exist with the ability to systematically organize and easily attach meaning to the relationships between data and events based on huge amounts of data, including observational data and simulation results. In other words, a drawing function that utilizes the geospatial

information system (GIS) is a key part of helping water policy decision-makers and local residents easily understand the data.

B. Technological Issues

1) Simulation issues

a) Modeling interactions between surface water and groundwater

In the past, simulations of the water cycle were limited to specific areas based on objective, such as groundwater or flow analysis. For this reason, interactions between surface water and groundwater (river influent seepage, springs, and so on) were often not considered, making highly accurate analysis difficult.

b) Analysis including material transfer

In order to enable quick and safe decision-making during the determination of a water policy or disaster response, it is necessary to analyze the transfer processes of materials such as nutrient salts and radioactive nuclides.

c) High-speed calculation

Huge amounts of calculations must be performed in order to implement the consideration of surface water and groundwater and the analysis of the material transfer process as described in (a) and (b). Algorithms that can quickly execute these huge amounts of calculations are necessary to contribute to rapid decision-making.

2) Water resource cycle visualization issues

a) Groundwater flow time series display

Easy-to-understand representations of water resource cycle simulation results that deal with surface water, groundwater, and how this water changes over time must display the conditions of surface and underground water flows in a time series format. In the past, GIS often lacked the ability to display underground conditions or time series data.

b) Statistical processing of information distributed in three-dimensional space

Information distributed in three-dimensional space must be statistically processed so that the simulation results can be understood by the decision-makers.

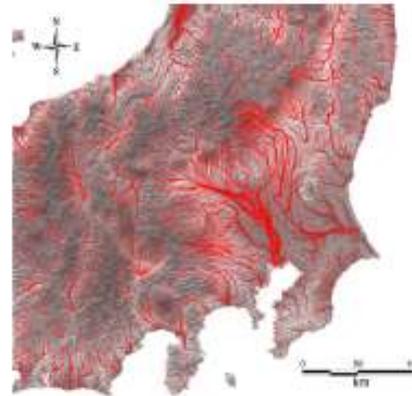
c) High-speed responsiveness

Information processing technology that can support rapid decision-making is necessary, including the ability to process and draw large amounts of data at high speed.

III. SIMULATION AND VISUALIZATION TECHNOLOGIES

A. Simulation Technology from a New Perspective

Calculations of water flow are generally executed by defining models of flow channels, such as river channels, drainage paths, pipeline networks, and others. The general purpose terrestrial fluid-flow simulator[1] (GETFLOWS) system developed by Graduate School of Engineering, The University of Tokyo's Professor Hiroyuki Tosaka (Chairman of Geosphere Environmental Technology Corporation), on the



© Geosphere Environmental Technology Corp.

Fig. 1. Groundwater Flow Analysis. Groundwater flow analysis can be used to track the routes taken by rainwater that has seeped into a mountain as it discharges in a river or ocean.

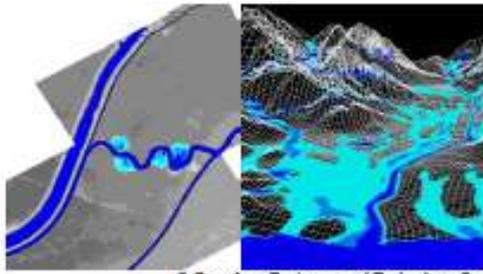
other hand, can take terrain, the shape of strata, hydrological properties, precipitation conditions, and other information to automatically create models of natural river networks, lakes, and groundwater flow systems[2].

1) Unified analysis of surface water and groundwater

By comprehensively analyzing the equations of motion that are derived from rivers, lakes, and other surface water, groundwater in the ground, and compressible fluids such as air, water cycle analysis can be used to unify surface water and groundwater in a manner that was not possible with previous simulations. This makes it possible to consider interactions between surface water and groundwater.

Fig. 1 shows an example of groundwater flow analysis[3]. By analyzing surface water and groundwater in a unified manner, it is possible to derive the routes taken by rainwater that has seeped into mountainous terrain as it discharges in rivers or the ocean. This sample analysis shows how the system can contribute to decision-making with regards to water policies, such as excessive groundwater intake requires countermeasures to deal with ground subsidence, or the securement and regulation of water resources for use as agro-industrial water.

A sample flood prediction analysis is shown in Fig. 2[4]. The left side of this figure shows the flooding calculation with consideration given to the levee break point, and the right side shows an example of a flooding calculation that gives consideration to the moistness of the soil. This unified analysis of surface water and groundwater makes it possible to represent the rapid increase in the groundwater level during torrential rains together with inundation inside a levee, in order to predict the location where flooding will start, the flooded region, and the amount of flooding at a high level of accuracy.



© Geosphere Environmental Technology Corp.

Fig. 2. Flood Prediction. Inundation calculations can give consideration given to the levee break point (left) and the moistness of the soil (right).

2) Analysis of material transfer processes

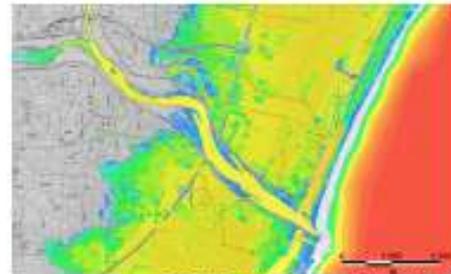
The system also offers the ability to consider kinetic changes in material that are caused by degradation and chemical reactions. The incorporation of material transfer processes such as river transportation, leakage of substances into the ground, sorption/desorption, and advection-dispersion make it possible, for instance, to analyze the behavior of radioactive nuclides.

Fig. 3 shows an example of a flooding simulation for three hours after a tsunami occurs[5]. By inputting the tsunami waveform as it varies over time, it is possible to analyze the tsunami's dynamic behavior in coastal regions, including intrusion into rivers and inundation flows. The analysis can also simulate how salinity decreases due to factors such as rainfall in regions flooded by a tsunami, based on the soil characteristics of each land-use classification. This capability can be utilized during the consideration of a wide range of environment restoration effects, including salt removal planning during reconstruction projects.

Fig. 4 shows a simulation of nitrogen contamination in surface water and groundwater due to economic activities. The left side of the figure shows the results of an analysis of the total nitrogen concentration in surface water, and the right side shows the same for groundwater[6]. By analyzing the transportation and distribution of materials in this way, it is possible to follow the details of the material movement processes while tracing contaminant materials as they spread through surface water and groundwater, so that decontamination policies can be considered in case the contaminant material flows.

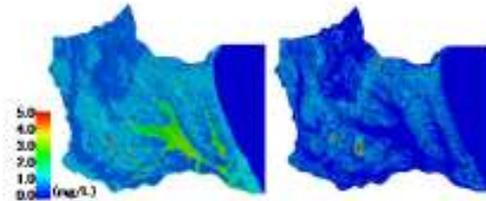
3) High-speed calculation using clusters of personal computers

Although the amount of data in high-speed calculation simulation results created using a cluster of personal computers (PCs) will depend on the size of the model, the results of simulating a grid of approximately 20 million points will require an output of around 1 Tbyte. For this reason, parallel calculation with a PC cluster is used to achieve high-capacity and high-speed computation in order to support rapid decision-making.



© Geosphere Environmental Technology Corp.

Fig. 3. Simulation of Tsunami Flooding. This figure shows the distribution of water depth three hours after a tsunami occurs.



© Geosphere Environmental Technology Corp.

Fig. 4. Simulation of Nitrogen Contamination of Surface Water and Groundwater Due to Economic Activities. The left side of this figure shows the total nitrogen concentration in surface water, and the right side shows the same in groundwater.

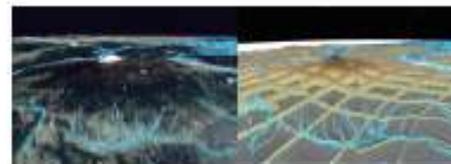


Fig. 5. Cross-section of Underground Grid and Translucent Satellite Image. A cross-section of the underground grid is displayed over the flow of groundwater in a translucent satellite image to create an easy-to-understand representation.

IV. CHARACTERISTICS OF VISUALIZATION TECHNOLOGY

We worked to develop visualization technology that uses GIS named "DioVISTA* Groundwater" as a means of visualizing groundwater, which usually cannot be seen directly. This technology offers the following three characteristics:

1) Highly accurate display of surface, underground, and time series data

A map of the entire world is managed in a uniform manner using a geographical coordinate system, and a global model has been adopted that enables three-dimensional display so that both surface and underground can be included in a highly accurate, textured display. Furthermore, functions have been added to show underground structures that are ordinarily not visible. Also, by adding a time axis to the three-dimensional

*DioVISTA is registered trademark of Hitachi Power Solutions Co., Ltd. in Japan.

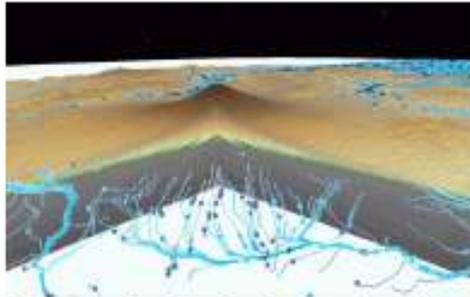


Fig. 6. Animation. The flows of surface water and groundwater are animated for easy visualization.

geospatial information, it is possible to display simulation results that vary over time, such as the conditions of a disaster.

Fig. 5 shows analysis results including the crosssection view of an underground grid covering areas including the watershed of the Sagami River in Kanagawa Prefecture, as well as a translucent satellite image[7]. The cross-section view of the underground grid makes it possible to represent both surface and underground. By overlaying the simulation results on the translucent satellite image, it is possible to intuitively understand the flow of surface water and groundwater.

Fig. 6 shows an example of animation[8]. The flow routes of surface water and groundwater can be represented through animation, and by displaying this on top of three-dimensional geospatial information, it is possible to visualize dynamic changes in behavior over both space and time.

2) Spatial analysis functions

Spatial analysis functions make it possible to spatially summarize the results of governmental or watershed boundary simulations, in order to represent simulation results such as the amount of available groundwater resources in an easy-to-understand manner.

Fig. 7 shows a color-coded display of a summary of the distribution of water resources available underground based on spatial analysis[9]. The ability to understand the distribution of usable groundwater resources can contribute to the formulation of water resource usage plans.

3) High-speed responsiveness

Although previous GIS systems would experience delays during rendering processes such as zooming in, this system improves rendering speed through data culling based on scale reduction.

V. EXPECTATIONS FOR THE WATER RESOURCE CYCLE SIMULATION SYSTEM

We are working to develop this water resource cycle simulation system as a product that combines data organization, simulation, spatial analysis, and visualization functions in a cloud service that can be used by a wide range of users (see Fig. 8). This system consists of servers in data center, and client PCs. Servers have data organization, simulation, spatial



Fig. 7. Color-coded Distribution of Amount of Available Groundwater Resources Based on Spatial Analysis. Amount of available groundwater resources are summarized and displayed with color codes corresponding to amounts.



Fig. 8. System Functions and Flow. This figure shows each function and a system flow chart. The data organization and simulation functions make use of water resource cycle simulation technologies, and the spatial analysis and visualization functions make use of visualization technologies based on the geospatial information system (GIS).

analysis functions. And the client PC has a visualization function. For example, Servers acquire the rainfall data, predict flooding and deliver flood prediction information to client PCs to make a decision. Further improvements in simulation accuracy and the provision of even faster and easier-to-understand visualized information to decision-makers will enable this system to support the correct management and prediction of water (the "oil of the 21st century") while contributing to the achievement of a sustainable public infrastructure and a society that is safe and secure.

VI. CONCLUSIONS

This article mainly focused on a water resource cycle simulation system that can contribute to water resource management and water disaster countermeasures, as well as the specific technologies that comprise this system. In summary, the water resource cycle simulation is a fusion of water resource cycle simulation technologies that unifies analyses of surface water and groundwater with visualization technology based on GIS. It is a tool that can rapidly provide easy-to-understand representations of the current conditions and future predictions of surface water and groundwater.

In a world faced by water resource shortages and water disasters, this water resource cycle simulation system is an exceedingly important tool. We will continue contributing to

solutions to the various global problems related to water resources and water disasters.

REFERENCES

- [1] H. Tosaka et al., "Fully Coupled Formulation of Surface Flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation," *Hydrological Processes* 14, pp. 449-464 (2000).
- [2] Characteristics (Geosphere Environmental Technology Corporation), <http://www.getc.co.jp/english/e-products/aboutget/feature/>
- [3] Open access "Iku-HydroJAPAN" (Geosphere Environmental Technology Corporation), <http://www.getc.co.jp/vision/openkanto/>
- [4] Flooding (Geosphere Environmental Technology Corporation), <http://www.getc.co.jp/solution/example/flood/>
- [5] Simulation of Tsunami Flooding at northern part of Sendai Plain (Geosphere Environmental Technology Corporation), <http://www.getc.co.jp/news/3551/>
- [6] K. Mori et al., "A High Performance Full-3D Nutrient Transport Modeling based on the Surface Water and Groundwater Coupling Technique for the Water Quality Assessment: An Application to the Lake Kasumigaura, Japan," *International Symposium on Hydro Change 2008 in Kyoto*.
- [7] Y. Tawara et al., "Consideration of Restoration Possibilities for the Natural Water Cycle Behavior of the Kanagawa Expanded Basin Zone," *Japanese Association of Groundwater Hydrology* (Nov. 2008) in Japanese.
- [8] W. Kawato, "Global 4 Dimensions Water Cycle Management System Forward use of Cloud based on Information Sharing Infrastructure," *Global 4 Dimensions Water Cycle Management Seminar 2011 in Tokyo*
- [9] Project for Sustainable Coexistence of Human, Nature, and the Earth, "Development of a Model to Predict Changes in
- [10] Hitachi Hyouren(Japanese), Sept. 2012 <http://www.hitachihyoren.com/2012/09/index.html> in Japanese.

水資源循環シミュレーションシステム

Water Resource Cycle Simulation System

川戸 渉 水野 基裕
 Kawato Wataru Minno Motohiro
 青木 純一 西岡 哲
 Aoki Junichi Nishioke Teru

日立グループは、株式会社地産環境テクノロジーと連携し、水資源管理・水災害対策に貢献する水資源循環シミュレーションシステムの構築に取り組んでいる。このシミュレーションシステムでは、地表水と地下水を完全に一体化させた解析が可能であり、多様な表現を高速にかつ分かりやすく表示できる可視化機能を併せ持っている。これらの機能により、水資源や水災害の精度のよい現状把握や将来予測が可能である。日立グループは、このシミュレーションシステムを用いることにより、地球規模での課題となっている水資源確保、水災害に関する諸問題の解決に貢献していく。

1. はじめに

近年、地球規模の温暖化や急激な人口増加、社会の発展などにより、工業用水や飲料水の不足、渇水地域の広範囲化による農作物の不作、豪雨による洪水・氾濫などが頻発し、その被害規模も次第に甚大となる傾向にある。これら諸問題に対処するには、多様で複雑な施策が要求される。

国内においても、水資源の無秩序な取得の脅威、ゲリラ豪雨の多発などの問題があり、水資源の利活用や水災害への対策が求められている。これらの問題に対応するために、水資源保護を目的とした「地下水の利用の規制に関する緊急措置法案」が、議員立法で国会に提出された（2012年1月）。また、局所的な雨量をほぼリアルタイムに観測可能なXバンドマルチパラメータレーダの整備など、水施策の動きが活発化してきている。

このような背景から、国内外の水資源分布の変化や水災害の予測を適切に捉え、施策の意思決定を迅速かつ円滑に行う支援機能が求められている。これに対し、日立グループは、株式会社地産環境テクノロジーと協力し、水資源循環シミュレーションシステムの普及拡大に取り組んでいる。

ここでは、水資源管理・水災害対策に貢献する水資源循環シミュレーションシステムと、それを構成する要素技術

を中心に述べる。

2. ニーズと技術的課題

2.1 ニーズ

水資源や水災害に関する諸問題を解決するための意思決定の支援機能には、次の二つのニーズがある。

(1) 精度のよい現状把握と将来予測

実際には見ることのできない地下水の水資源の量と質の現状把握、および気候変動および人間活動を考慮した将来予測は、水資源計画を策定するうえで極めて重要な要素である。また、水災害への対策についても精度のよい将来予測が重要である。これらのニーズに対応するシミュレーション技術が求められている。

(2) 膨大なデータの意味づけと可視化機能

観測データやシミュレーション結果など膨大なデータを体系的に整理し、容易にデータと事象を意味づけできる機能が重要である。すなわち、水施策に関する意思決定者や地域住民が容易に理解可能とするため、GIS（Geospatial Information System：地理空間情報システム）を活用した描画機能が重要である。

2.2 技術的課題

2.2.1 シミュレーションの課題

(1) 地表水と地下水の相互作用のモデル化

従来の水循環に関するシミュレーションでは、地下水解析や流出解析など、目的を限定した解析のみが行われていた。そのため、地表水と地下水の相互作用（河川の伏没や湧水など）を考慮していないものが多く、精度の高い解析が困難であった。

(2) 物質移動を含めた解析

水施策の決定や災害時に迅速・安全な意思決定を行うに

は、例えば栄養塩類や放射性核種といった物質移動過程の解析が必要である。

(3) 高速計算

(1)と(2)に挙げた地表水と地下水の考慮、物質移動過程の解析を実現するためには、膨大な計算を実施する必要がある。迅速な意思決定に貢献するためには、膨大な計算を高速に実施するアルゴリズムが求められる。

2.2.2 水資源循環可視化の課題

(1) 地下水流の時系列表示

地表水・地下水およびその時間変化を扱う水資源循環シミュレーション結果を分かりやすく表現するためには、地表および地下内部の水流の様子を時系列で表示する必要がある。従来のGISでは、地下の状況や時系列データを表示できないものが多い。

(2) 三次元空間に分布した情報の統計処理

シミュレーション結果を意思決定者が理解できるように、三次元空間に分布した情報の統計処理が必要である。

(3) 高速な応答

大容量データの高速処理や高速描画など、迅速な意思決定を支援する情報処理技術が必要である。

3. シミュレーション技術と可視化技術

3.1 新たな視点でのシミュレーション技術

水の流れを計算するには、管路、すなわち河道、排水路、管路網などをモデルに定義して実行するのが一般的である。一方、東京大学大学院の登坂博行教授(地圏環境テクノロジー代表取締役会長)により開発された「GETFLOWS[®] (General Purpose Terrestrial Fluid-flow Simulator)¹⁾」は、地形、地層形状、水理物性、降水条件などを与えることにより、自然の河川網、湖沼、地下水流動系のモデルを自動的に作成するという特徴を備えている²⁾。

(1) 地表水と地下水の一体解析

河川や湖沼などの地表水、地盤中の地下水、空気などの圧縮性流体から成る運動方程式を包括的に解析することで、従来のシミュレーションでは不十分であった地表水と地下水を一体化させた水循環解析を可能とした。これにより、地表水と地下水の相互作用を考慮することができる。

地下水の流動解析の事例を図1に示す。地表水と地下水を一体的に解析することにより、山地に浸透した雨水が河川や海へ湧出する経路を捉えることができる。この解析事例は、地下水の過剰な取水による地盤沈下の対策、農工業用水の水資源の確保・制限などの水施策の意思決定に貢献できる。

※) GETFLOWSは、株式会社地圏環境テクノロジーの登録商標である。

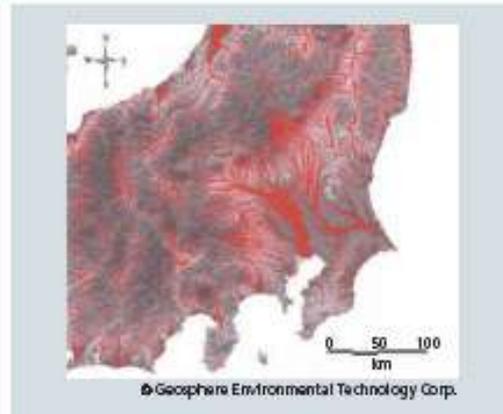


図1 | 地下水流動解析

山にしみこんだ雨が、川や海へ湧出する経路を捉えることができる。

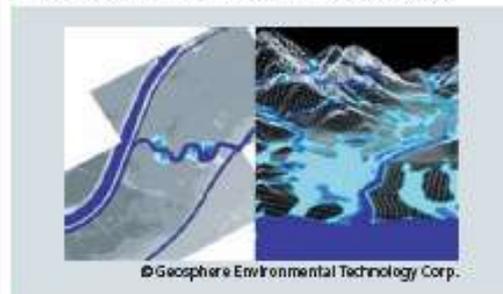


図2 | 洪水予測

破綻点を考慮した洪水氾濫計算(左)や、土壌の湿潤状態を考慮した氾濫計算(右)が可能である。

洪水予測の事例を図2に示す。同図左は破綻点を考慮した洪水氾濫計算であり、同図右は土壌の湿潤状態を考慮した氾濫計算の例である。地表水と地下水を一体化した解析により、豪雨時の急激な地下水位上昇と内水氾濫を合わせて表現し、その発生地点や浸水域・浸水量を高精度に予測することができる。

(2) 物質移動過程の解析

分解・化学反応による物質の動態変化を考慮できる点のもう一つの特徴である。河川輸送、地盤内侵入、収着・脱離、移流分散などの物質移動過程を取り込むことにより、例えば放射性核種の挙動を解析することも可能となる。

津波発生3時間後の浸水シミュレーションの事例を図3に示す。時々刻々と変化する津波波高をインプットすることにより、沿岸域の河川遡上、氾濫波の動的挙動を解析している。この解析では、土地利用区分ごとの土壌特性を基に、津波によって浸水した領域の降雨などによる塩分濃度が低下する様子をシミュレーションすることも可能である。これにより、復興事業における除塩計画を含むさまざまな環境修復効果の検討に活用できる。

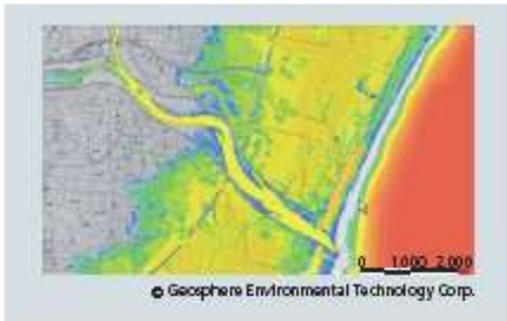


図3 | 津波浸水シミュレーション
津波発生3時間後の水の深さ分布を示す。

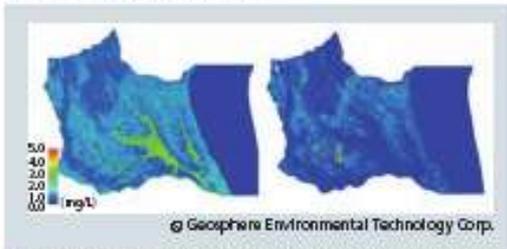


図4 | 経済活動による地表水と地下水の窒素汚染状況のシミュレーション
地表水(左)および地下水(右)中の窒素濃度を示す。

経済活動による地表水と地下水の窒素汚染の状況のシミュレーションを図4に示す。同図左は地表水中、同図右は地下水の全窒素濃度の解析結果である³⁾。このように、物質の輸送過程・分布の解析により、物質の移動過程を詳細に追うことができ、また、地表水や地下水中に広がる汚染物質をトレースすることにより、汚染物質が流出した場合の除染方針の検討に活用できる。

(3) PC (Personal Computer) クラスタを用いた高速計算
シミュレーション結果のデータ量はそのモデル規模に依存するが、一般的に2000万格子程度のシミュレーション結果は1テラバイト程度の出力となる。そのため、PCクラスタを用いた並列計算によって大容量かつ高速の演算を実現することで、迅速な意思決定支援を可能とした。

3.2 可視化技術の特徴

通常は直接見ることができない地下水の可視化を行う手段として、日立グループは、GISを用いた可視化技術の開発に取り組んでいる。その特徴は以下の3点である。

(1) 高精度な地表・地下および時系列データの表示

全世界の地図を世界測地系で一元管理し、三次元表示を可能とする球体モデルを採用することにより、地表と地下を含め、高精度で質感のある表示を可能とした。さらに、通常では見えない地下構造を表現する機能を追加している。また、三次元の地理空間情報に時間軸を加えることに



図5 | 地下グリッド断面表示および衛星画像の透過表示
地下グリッド断面図や透過表示した衛星画像と地下水の流れを重ね合わせ、分かりやすく表現する。

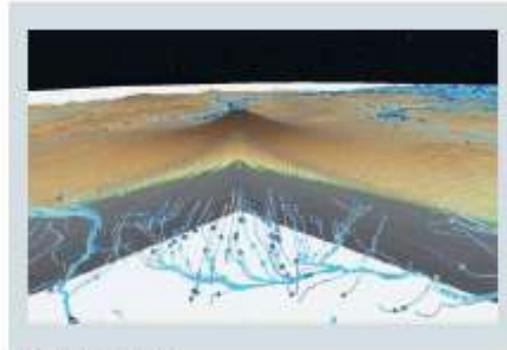


図6 | アニメーション表示
地表水と地下水の流れを、アニメーションによって「見える化」できる。

より、災害状況などの時間変化するシミュレーション結果を表示できるようにしている。

神奈川県相模川流域などを対象とした解析結果⁴⁾について、地下グリッド断面表示をした例、および衛星画像の透過表示をした例を図5に示す。地下グリッド断面表示により、地表と地下の両方の表現が可能となる。また、衛星画像の透過表示にシミュレーション結果を重ね合わせることで、地表水・地下水の流れを直感的に理解することができる。

アニメーション表示の例を図6に示す。地表水・地下水の流動経路をアニメーションとして表現できる。これを三次元地理空間情報と重ね合わせることで、時々刻々と空間的に変化する動的な挙動を可視化することができる。

(2) 空間解析機能

空間解析機能は、行政区や流域界などのシミュレーション結果を空間的に集計することにより、水資源賦(ふ)存量(利用可能な水資源の量)などのシミュレーション結果を分かりやすく表現する。

空間解析による地下水資源賦存量分布を集計し、色分け表示した例を図7に示す⁵⁾。利用可能な地下水資源の分布を把握することで、水資源利用計画策定に寄与することが可能となる。

(3) 高速な応答

従来のGISでは、ズームインなどの描画処理の際に応答

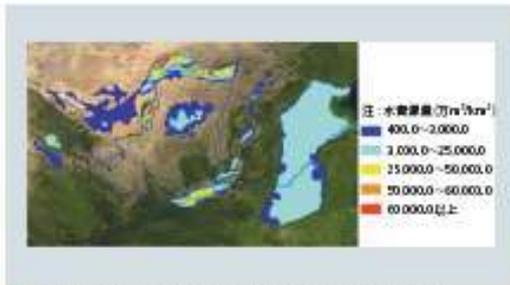


図7 | 空間解析による地下水資源賦(ふ)存量分布の色分け表示
地下水資源の賦存量を算出し、量に応じて色分け表示する。

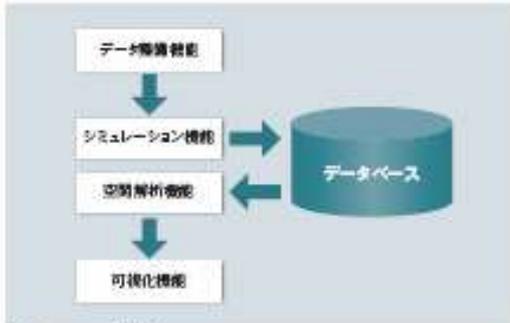


図8 | システムの機能とフロー
システムの高機能とそのフローを示す。データ整備機能とシミュレーション機能には水資源循環のシミュレーション技術が、空間解析機能と可視化機能にはGIS (Geospatial Information System: 地理空間情報システム) による可視化技術がそれぞれ生かされている。

が遅れることがあったが、表示縮尺に応じてデータを間引くことなどにより、描画速度の向上を実現した。

4. 水資源循環シミュレーションシステムへの期待

日立グループと地産環境テクノロジーは、多様なユーザーが利活用可能なクラウドサービスとして、データ整備機能、シミュレーション機能、空間解析機能、可視化機能を融合した水資源循環シミュレーションシステムの製品開発を推進している(図8参照)。シミュレーション精度のさらなる向上と、可視化された情報を意思決定者へより迅速に分かりやすく提供することは、「21世紀の油」と呼ばれる水の的確に管理・予測し、持続可能な社会インフラを支え、安全・安心な社会の実現に貢献するものである。

5. おわりに

ここでは、水資源管理・水災害対策に貢献する水資源循環シミュレーションシステムと、それを構成する要素技術を中心に述べた。

水資源循環シミュレーションの特徴を要約すると、地表水と地下水を一体的に解析する水資源循環シミュレーション技術とGISによる可視化技術を融合し、地表水や地下水

の現状や将来予測を迅速に分かりやすく表現するツールである。

世界的な水資源の不足や水災害に対応するには、水資源循環シミュレーションシステムは極めて重要なシステムと考えられる。日立グループは、地球規模の課題である水資源、水災害に関する諸問題の解決に貢献していく。

参考文献

- 1) H. Tosaka, et al. Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Processes, 14, 449-464 (2000)
- 2) 特許(地産環境テクノロジー), <http://www.gatec.co.jp/software/aboutgetf/feature/>
- 3) K. Mori, et al. A High Performance Full-3D Nutrient Transport Modeling based on the Surface water and Groundwater Coupling Technique for the Water Quality Assessment (An Application to the Lake Kasumigaura, Japan : International Symposium on Hydro Change 2008 In Kyoto)
- 4) 田原, 外: 神奈川総合大学環境における自然水資源管理の復元可能性の検討, 日本地下水学会秋季大会(2008.11)
- 5) 人・自然・環境共生プロジェクト: アジアモンスーン地域における人工・自然収束に伴う水資源適応的予測モデルの開発, 平成17年度研究業績報告書, RR2002

執筆陣

- 川野 妙**
2006年日立製作所入社, ディフェンスシステム部 情報システム本部 危機管理事業推進室 所属
現在, 水資源循環シミュレーション開発業務に従事
- 水野 基博**
2012年日立製作所入社, ディフェンスシステム部 情報システム本部 ICT基盤部 所属
現在, 水資源循環シミュレーション開発業務に従事
- 青木 純一**
2004年日立製作所入社, ディフェンスシステム部 情報システム本部 所属
現在, 危機管理業務の事業の推進に従事
- 西岡 京**
2000年株式会社地産環境テクノロジー設立, 同社代表取締役社員
現在, 水資源モデリング開発の事業化に従事

spurs.aznny

2) 開発・実用化に向けた課題・留意点

既に開発済みの技術である。

将来的な発展性として、開発投資が必要ではあるが、システム開発をすすめることで、①現在コンピュータ画面上で可視化している成果を空間上の立体映像としての表示可能、②表流水や地下水の流動、土砂移動、放射性核種の移流拡散に加えて、地震の波動等の他分野の可視化でも応用可能である。また、開発投資が必要ではあるが、福島第一原発近傍で収集したデータを東電内に構築する解析システムに転送し、解析することで、その結果を可視化することが可能となる。

3) その他

DioVista上に地下水を可視化できる技術を開発したのは株式会社日立製作所である。このDioVISTA Groundwaterの製品形名は「C-DS2C-DVGW」である。

(3) 現在の地下水・放射性核種の観測

(3-1) 地下水の観測

1) 開発・実用化の状況

平成 21 年 10 月に農業農村工学会九州支部主催で開催された『第 90 回農業農村工学会九州支部講演会』において発表した溜池漏水調査と対策工事に関する論文は以下の通りである。

2-22

熊本県阿蘇郡高森町別所池漏水調査と対策工事

水土里ネット熊本 伊佐坂光輝 西 彩

㈱セウテック 房前友章 顧問 古川博恭

㈱藤田建設 ○田辺龍平 ㈱応用地研 吉田絃彬

1. はじめに

七夕祭りで賑わう高森町湧水トンネル公園の 300m 上流に 1 羽のガチョウが住み着いた別所池がある。この池の底樋吐出口付近で毎分 80ℓ程の漏水があり、上流側斜面裾部に生コンを入れるなど、対策が成されたものの効果がなかったことから、DI 法電気探査を実施したところ、特異な水脈の存在が明らかとなり、薬液注入で効果的に止水できたので報告する。

2. 別所池の諸元と漏水状況

別所池は、堤高約 5.0m・堤長約 100.0m・貯水量=約 30,000 m³の農業用水ため池で、上流側斜面の湛水域はブロック張りがなされ、右岸側に余水吐がある。最上流と左岸側には流れ込み用の水路があり、左岸側水路に架かる橋の下には湧水トンネルから揚水されていると思われるφ200mm程度のパイプが敷設されている。堤体延長の 1/3 左岸寄りには取水施設が設けてあり、底樋は約φ700mmのコンクリート管が堤体下流の水田付近に口を開き、側溝に流れ込む仕掛けになっている。調査時、水面は堤体天端道路より 2.2m 低い位置にある。舗装面に修復の跡はあるが、余水吐等他の構造物に亀裂、破損箇所等は認められず、底樋排出口より約 4m 右岸寄りに暗渠で導かれた毎分 80ℓ程度の漏水が認められた。

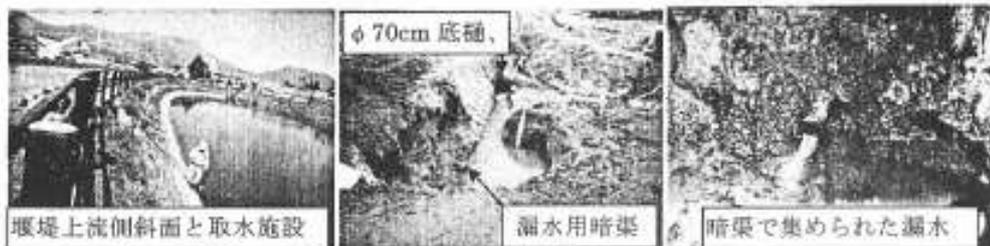


写真-1・2・3 堰堤と漏水状況

3. DI 法電気探査

ダイポールダイポール配置による電気探査の
に加えて、使用電流の同波数効果(インピーダンス法)による比抵抗比映像を描き、地質構造と共に水脈の位置や規模を可視化できるようにした調査法である。

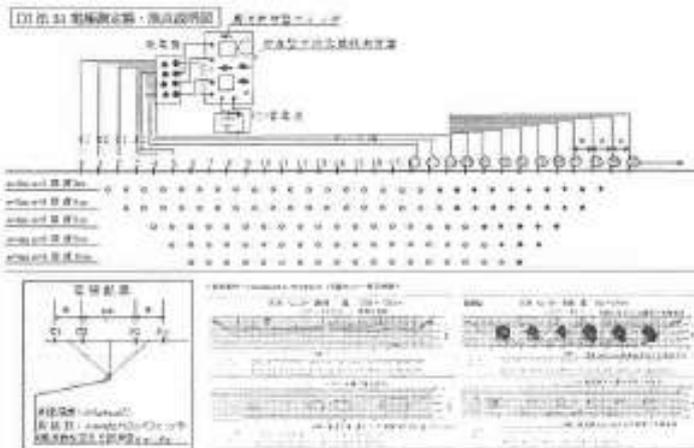


図-1 DI 法説明図

4. DI法による漏水調査

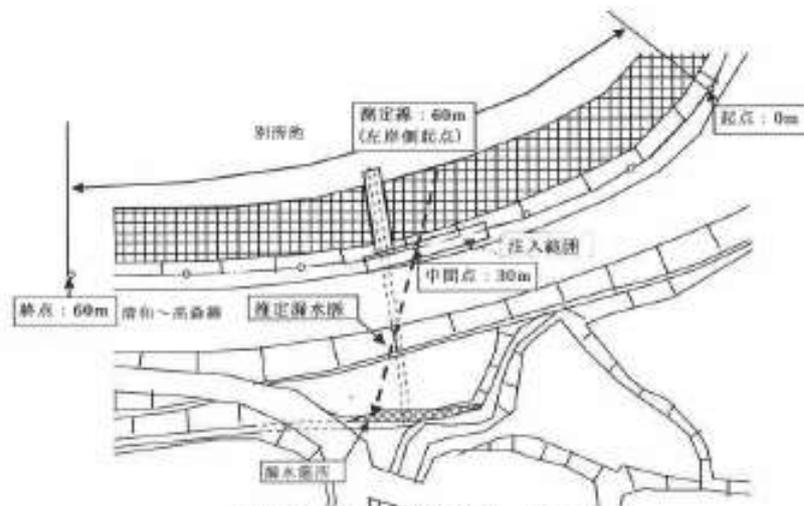


図-2 DI法測定線位置図・平面図

測定線は取水施設をほぼ中心に左右30m計60mとし、堤体上流側肩部に左岸側を起点として2m間隔に電極を接地した。各電極からリード線を切り替えスイッチ付き配電盤に導き、4電極をダイポールダイポール配置に組み合わせて、横河電機製3244型大地比抵抗測定器(自社改良)を用いて、40Hz以下の2周波数で二次元断面の比抵抗を測定した。解析結果は、地層を読む等比抵抗線図と水脈を読む等比抵抗比線図(インピーダンス効果)として表す。

5. 等比抵抗線図と等比抵抗比線図

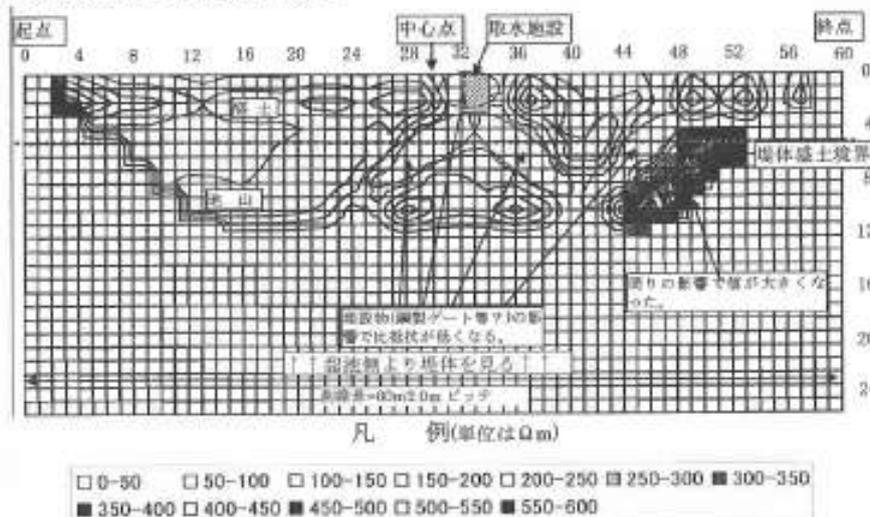
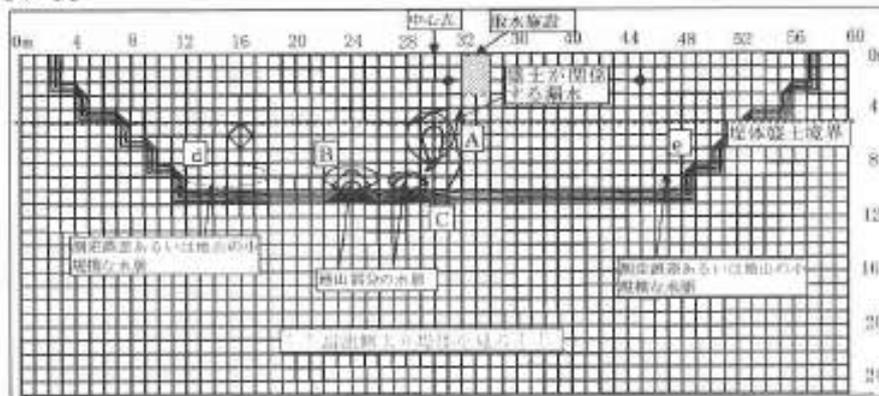


図-3 等比抵抗線図

* 取水施設付近はそこに使われている金属棒の影響で比抵抗が乱れているが、比抵抗が地表部分の次に低くなる深度(4m)よりやや下がった位置(5m)に、盛土と地山の境界が推

察される。



凡 例(単位なし)

□0.9-0.925	□0.925-0.95	□0.95-0.975	□0.975-1	□1-1.025	□1.025-1.05	□1.05-1.075
□1.075-1.1	■1.1-1.125	■1.125-1.15	■1.175-1.2			

図-4 等抵抗比線図(インピーダンス効果)

* A・B・Cなど大文字で表したヶ所は $\rho H/\rho L \geq 1.025$ であり水脈が推察されるところであり、d~eなど小文字で表したヶ所は $\rho H/\rho L < 1.025$ で測定誤差と区別し難いところである。Aは縦に長い水脈を形成し、盛土と地山の境界に至ることから、底樋を斜めに横切り吐き出し口付近に湧く漏水に関係していると判定した。

6. 止水の為の注入工事

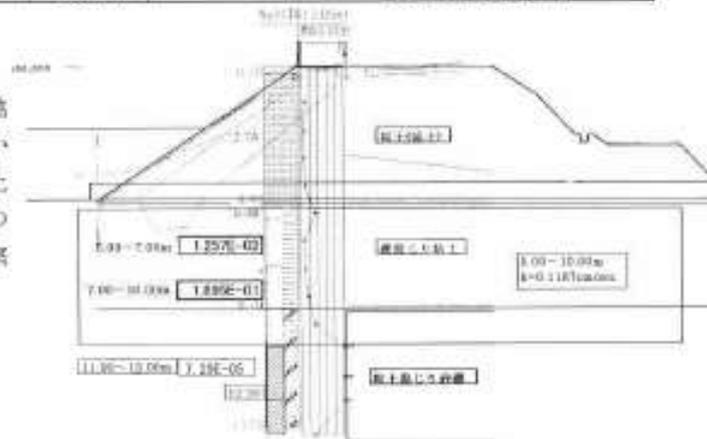
測点距離 30m(中心点)で調査ボーリングをして透水試験をした結果は次の通りであり、5m 付近を掘削中に堰堤下流側の湧水が濁った。

表-1 測点距離 30m(中心点)に於ける透水試験結果

試験深度 m	試験区間m	透水係数k cm/sec	透水量係数 T=mk cm ² /sec	水位 GL-m	備 考
5.00~7.00	200	1.257E-02	2.515	2.75	定水位注水：透水層
7.00~10.00	300	1.895E-01	56.845	5.48	定水位注水：透水層
11.00~13.00	110	7.291E-05	8.020E-03	12.26	変水位注水：実用的不透水層
平均透水係数		0.1187			深度10mまでの平均

図-5 推定地質断面図

深度 10m 付近に元々地下水脈があり、その部分から細粒土を流しながら上方へ伸び、堰体部分からの漏水へ至ったものと推察する。



<注入剤の選定>

現地は既に、パイピングによる漏水が発生しているため、地下水の流動を考慮すると「瞬結性」の材料が必要と考えられ、無機質で、毒物・危険物を含まない安全性の高い注入材“ハイブリッドシリカーS-1”を選定し、二重管単相式工法で注入することにした。

<注入量(V)>

砂泥じり粘土(注入率 27%)

$$V1=1.5 \times 10.8 \times 4.3 \times 0.27=18.8$$

礫泥じりシルト(注入率 12.5%)

$$V2=1.5 \times 10.8 \times 1.8 \times 0.125=3.6$$

$$V=V1+V2=22.4\text{m}^3$$

<注入孔配置>

測点距離 23.6~34.4m 間の両端部 0.4m 開けた 10m 区間に、深度 10.5m の注入孔を 1m 間隔の千鳥配置(21 孔)とする。



写真-4 注入後止まった漏水

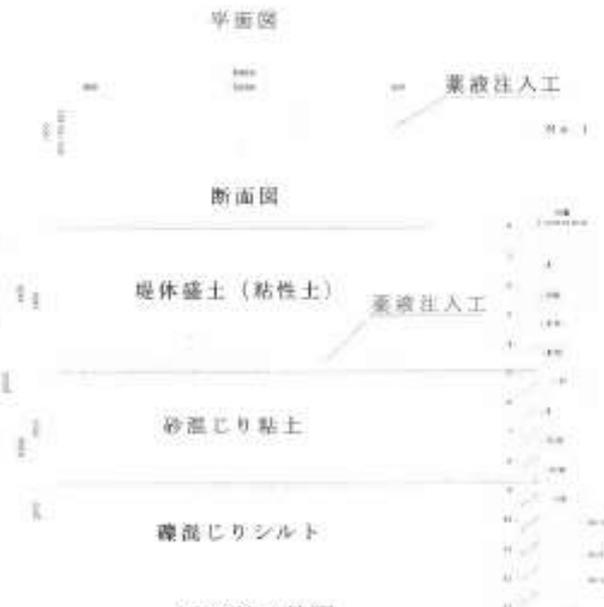


図-6 注入範囲

7. 注入結果

上記の注入計画に基づき薬液注入した結果、堤体下流の漏水は完全に止まり(写真-4)、注入後実施した電気探査(DI 法)の結果、注入前に見られた漏水・水脈箇所が消滅しているのが確認された(図-7 参照)。



図-7 注入後電気探査による等比抵抗比線図(インピーダンス効果)

8. おわりに

溜池の堤体部では基礎処理が行われていないため、湛水による圧力で、基礎地盤にあった水脈が細粒土を流し上に伸びたり、左右岸を通して堤体盛土に影響していると思われる例を、しばしば電気探査(DI 法)で発見することがある。

2) 開発・実用化に向けた課題・留意点

既に開発済みの技術である。

3) その他

申請中の特許は以下の通りである。

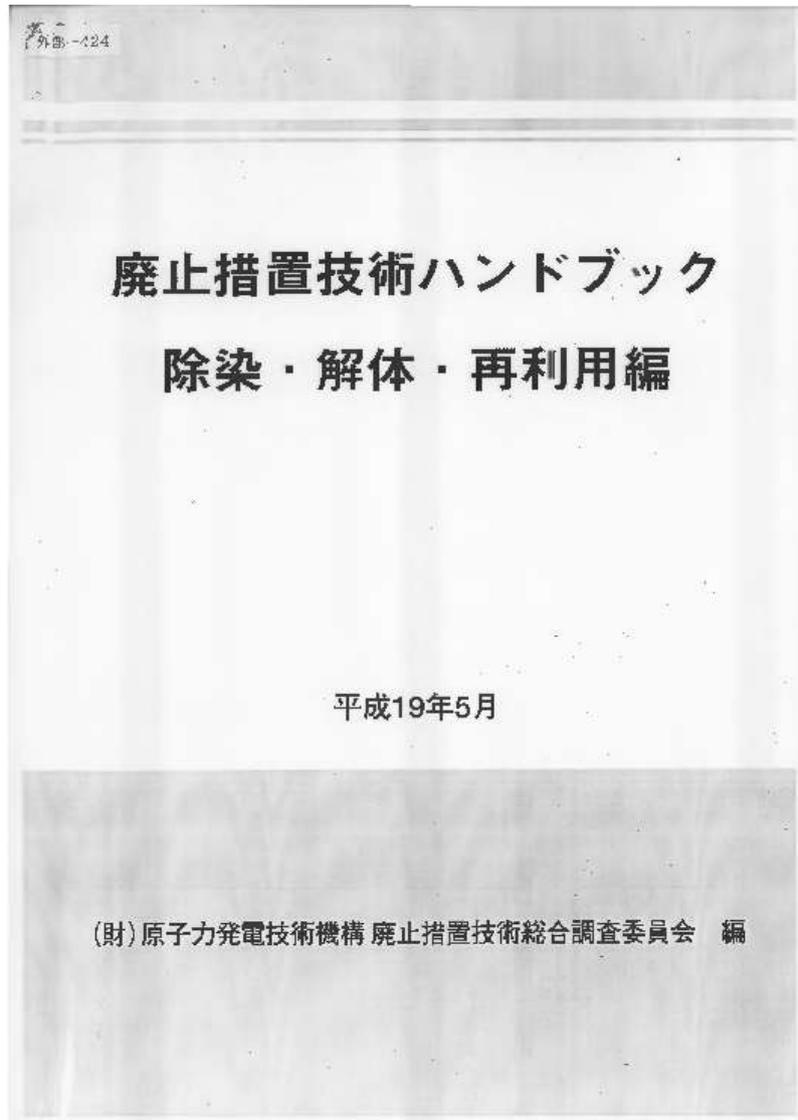
申請機関	日本国特許庁(JP)
特許出願公開番号	特開2011-112357(P2011-112357A)
公開日	平成23年6月9日(2011. 6. 9)
出願番号	特願2009-265880(P2009-265880)
出願日	平成21年11月24日(2009-11. 24)

申請機関	日本国特許庁(JP)
特許出願公開番号	特開2003-227877(P2003-227877A)
公開日	平成15年8月15日(2003. 8. 15)
出願番号	特願2002-67670(P2002-67670)
出願日	平成14年2月5日(2002. 2. 5)

(3-2) 放射性核種の観測

1) 開発・実用化の状況

(財)原子力発電技術機構 廃止措置技術総合調査委員会編「廃止措置技術ハンドブック、除染・解体・再利用編 (平成19年5月)」の共同執筆者の1人に、公益財団法人原子力バックエンド推進センター (前組織：財団法人原子力研究バックエンド推進センター) の技術開発部部長が参画した。



(全体で約600ページ)

2) 開発・実用化に向けた課題・留意点

汎用機器であり、特に、課題となる技術的問題はない。

3) その他

特になし。