

# 災害時における地下水利用に向けた水循環解析 モデル構築と物理探査技術の適用について

応用地質株式会社 五十嵐 崇博

## 1. はじめに

大規模地震等の災害時には水道施設の機能が停止し、生活に不可欠な水供給が停止する恐れがある。このような非常時における水源として地下水利用が有効であるが、無計画な地下水利用は、広域地盤沈下を引き起こし、その後の浸水リスクの増大など様々な問題を引き起こすことが懸念される。この課題に対し、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」では、どこでどの程度の揚水が可能であるかを判定するシステムの開発を進めている。

上記システムは、水循環解析モデルをベースとしているが、解析精度の向上には地盤構造を適切に把握する必要がある。しかし、既往資料等が不足する場合も多く、モデル構築が適切に行えないことも想定される。このような状況の中、見えない地下構造をいかに効率的に把握するかも重要な課題である。

SIP では、広範囲な地下構造を時間をかけずに把握する手法として、微動アレイ探査や浅層反射法に加え、ドローンを用いた空中電磁探査を、濃尾平野に適用し、断層付近の透水性を含む水理構造の把握を試みている。

## 2. SIP における取り組み

2018 年からスタートした SIP にて、「災害時地下水利用システム開発」を進めている。

このシステム開発は、環境に大きな影響を及ぼすことなく地域の実情に応じて利用できる地下水を定量的に明らかにし、地震、洪水等の非常時に際し強靱な水供給システムを開発することにより、水供給サービスの被害最小化に資することを目的とするものである。政府、自治体や流域協議会（水循環基本計画に定める流域水循環協議会）が実装し、BCP の策定（防災用井戸の配置計画、ポンプの仕様等の検討）を含む事前準備や非常時における意思決定に利用されることを想定している。

このシステムは、図 1 に示すように地下水・地盤の挙動を数値シミュレーションによる解析するシステム、地下水・地盤の挙動を監視するモニタリングシステム、それらをもとに給水可能施設を地図上に

整理して表示・提供するシステムにより構成され、非常時における水需要と水供給を含めた水源の確保状況をリアルタイムで把握し、利用可能な地下水の量と場所を特定するのに資するものである。

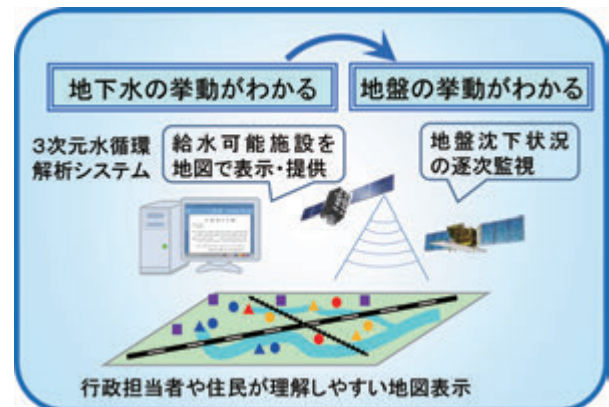
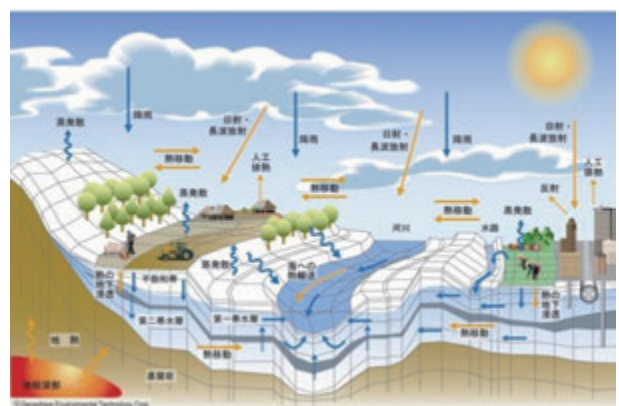


図 1. 「災害時地下水利用システム」のイメージ

## 3. 水循環解析モデル

地盤沈下等を引き起こさない程度に、いつ、どこで、どれほどの揚水が可能であるのかを定量的に把握するために、水循環解析モデルを用いることとしている。対象地域の基盤モデル（地質・地形・土地利用等）を基に数値モデルを構築し、そこへ気象条件や揚水条件を与え、地下水の水位変動をシミュレーションし、その結果をもとに地盤沈下量も推定することで、揚水量と沈下量の関係を時空間的に評価することが出来ると考えている。

現在、濃尾平野を対象に水循環解析モデルの構築を進めているところであるが、その数値シミュ



株式会社地圏環境テクノロジー HP  
<https://www.getc.co.jp/getflows/>

図 2. 「GETFLOWS」が扱う水循環システム

レーション手法として、流域を対象とした水循環解析の分野において国内で多くの実績を有する「GETFLOWS」(GEneral purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator)を採用している。この手法は、図2に示すように陸域における水循環システムを多相多成分体系として定式化し、従来困難であった地上および地下の水の流れを完全に一体化させて計算するものである。

このため、流域全体の水資源に係る収支を考慮しながら、地下水の流動状況を精緻に計算し、その分布と変動を出力することが出来る。

「GETFLOWS」は精緻な計算を可能にする手法である一方、その計算結果が実態を表しているかどうかは、構築した解析モデル次第である。つまり、計算結果の“確からしさ”は、解析モデルの“確からしさ”であると考えている。

解析モデルの“確からしさ”は、モデル作成に入力する情報の量・質、検証に用いた情報の量・質に大きく左右される。モデル作成に入力する情報とは、主に地層構造、水理構造であり、検証に用いる情報とは、主に地下水位であるが、流域全体を対象とした解析では、上記の情報の空白域が問題となりがちである。

広域的な地盤情報(地層構造、地下水位等)の取得には、後述する物理探査技術が有効であると考えている。

4. 濃尾平野での取り組み

”確からしさ”を持った水循環解析モデルを構築するべく、現在、濃尾平野を対象に物理探査による調査と解析を進めている(図3、図4)。

広大なゼロメートル地帯を有する濃尾平野は、

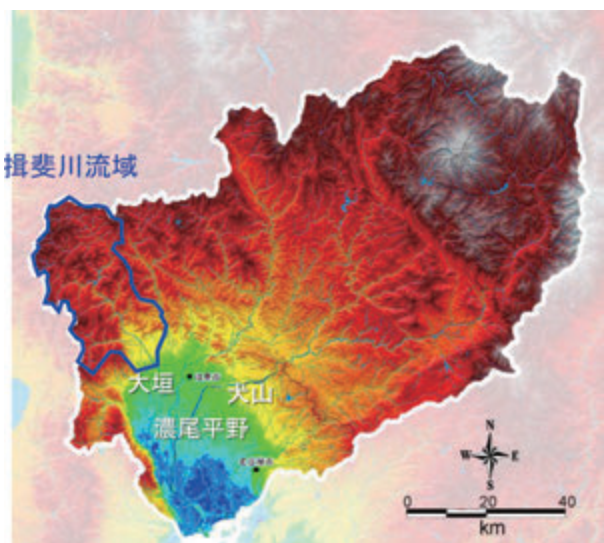


図3. 濃尾平野を対象とした水循環解析モデルの構築範囲

伊勢湾台風により甚大な浸水被害を受けたことは周知の事実である。

濃尾平野に分布する更新世の砂礫層は、被圧地下水を豊富に胚胎しており、特に西濃地域では古くから自噴井戸が多く分布している(図5)。これらの自噴帯は、主として木曾川、長良川、揖斐川が形成する扇状地により涵養し、養老断層や池田山断層といった平野西縁の境界付近に集中する地下水流動がもたらしている。

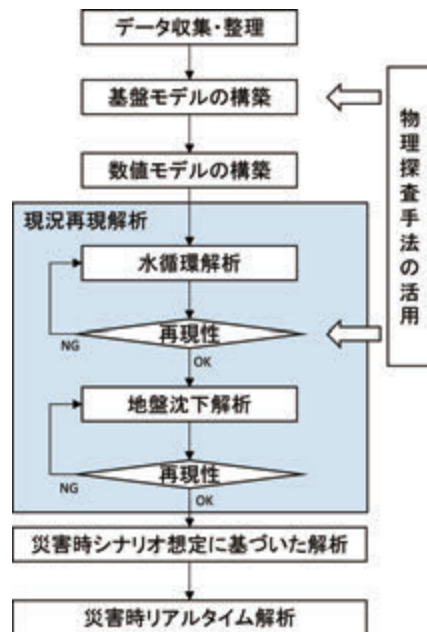


図4. 濃尾平野の水循環解析モデル構築の流れ



図5. 濃尾平野における昭和初期の自噴帯分布(東海三県地盤沈下調査会, 1985)

このように地下水が豊富な濃尾平野では、高度経済成長期における多量の地下水の汲み上げにより広域地盤沈下が発生し、これを抑制すべく取水規制も含めた地下水管理がなされている。これにより近

年は広域地盤沈下が経年的には沈静化しているものの、平成6年の濁水時においては年間の取水量は管理基準値を下回ってはいながらも、夏季の一時的な地下水の汲み上げが進み、地盤沈下が発生している。災害時等の非常時において地下水の利用が過剰になれば再び地盤沈下が発生する恐れがあるといえる。

## 5. 物理探査による地盤情報の取得

濃尾平野の地下水の涵養源である扇状地砂礫、地下水を被圧させている（加圧している）沖積粘性土、地下水の流動を規制し得る断層について、その構造と水理特性（地下水の流れやすさ等）を把握するために、西濃地域において空中電磁探査、微動アレイ探査、牽引式電気探査、浅層反射を適用している。

今後は、これらの探査により把握した比抵抗値及びS波速度構造を統合化することにより地層構造を推定する手法を開発する予定である。

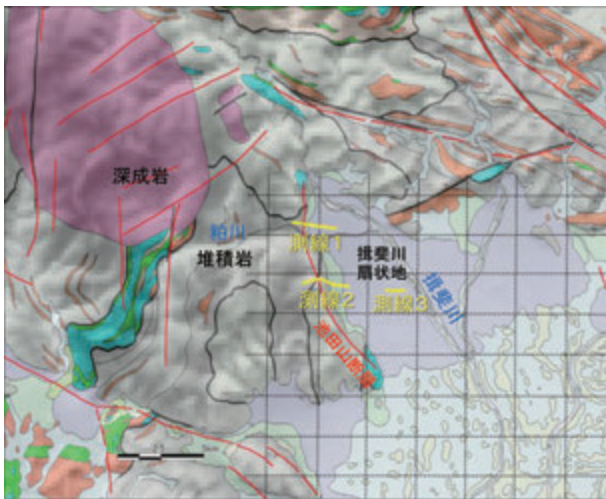


図6. 揖斐川流域における探査箇所

### 5.1 空中電磁探査

地下の電気の流れにくさの指標である比抵抗の違いから地下構造を把握することを目的とし、ドローンのマルチコプターを利用した空中電磁探査（以下ドローン空中電磁探査）を実施した。ドローン空中電磁探査は、地上あるいは空中から電磁波を発信し（1次磁場という）、地下で誘起される磁場（2次磁場という）を空中から測定することにより、深度50~200m程度までの地下構造を短時間に効率よく把握することができる手法である。

空中電磁探査は、これまで有人ヘリコプターを用いて行われてきたが、ドローンの性能向上と探査装置の小型化により、ドローンに機材を搭載して探査できるようになった（結城,2018）。ドローン空中電磁探査は搭載量の制限からこれまで地上に送信源を設置する空中電磁探査法を実施してきたが、本研究では新たにドローンに搭載できる発

信装置を開発し、1機は送信機、もう1機は受信機を搭載した2機のドローンで探査を行った。今回は地上発信空中受信型と併用して探査を行った。

地上発信空中受信型の探査法は、地上に300~500m程度のケーブルを敷設してケーブルの両端は大地にアースする。このケーブルに送信機から通電する。受信は、このケーブルから100~200m程度離れた位置の上空からドローンで2次磁場を測定した。空中発信空中受信型の探査法は、1機のドローンからループ送信源を曳航し、残る1機に受信機を搭載したドローンで測定する。ドローンの1回の測定時間は15分程度で、測線の距離に応じてバッテリーを入れ替えて測定を行った。

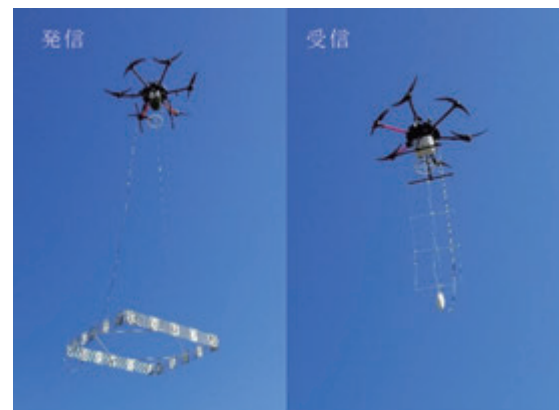


図7. ドローン空中電磁探査測定装置

得られた2次磁場データを解析し、測線ごとの比抵抗断面図を求めた。測定結果の一部を図8、図9に示す。図の暖色系は高比抵抗（電気が流れにくい）、寒色系は低比抵抗（電気が流れやすい）を表す。可探深度は地盤の比抵抗に影響を受け、低比抵抗の地盤では可探深度が浅くなる。

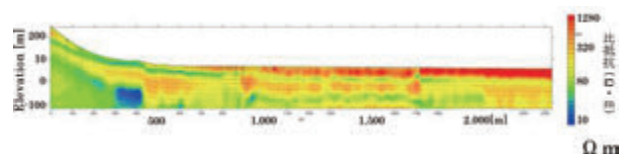


図8. ドローン空中電磁探査結果図(1)  
(地上発信空中受信型)

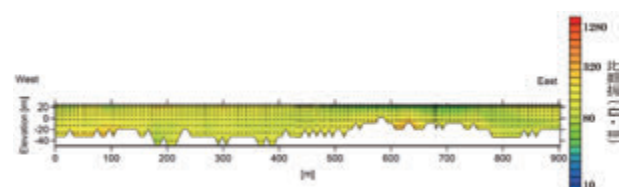


図9. ドローン空中電磁探査結果図(2)  
(空中発信空中受信型)

### 5.2 微動アレイ探査

地下の弾性波速度分布の違いから地下構造を把握することを目的として、微動アレイ探査を実施した。微動アレイ探査は、人工的な起震源が必要なく、

自然界にある低周波数の微振動を利用することで、大がかりな装置を使うことなく、深度 100m 程度までの地下構造を把握することも可能な手法である。一般的な微動アレイ探査は、数台の受振器を用いて特定地点の 1 次元の S 波速度構造を推定する手法として知られている。これに対し、本研究では、多数の受振器を用いた直線配置の微動アレイ探査（小西・斎藤，2018）を複数の測線で実施することで、調査地域の 3 次元的な S 波速度構造を推定した。

微動アレイ探査に使用した受振器は独立型の地震探査装置（McSEIS-AT）である。今回の測定では、46 台の受振器を 10m 間隔に直線状に配置し、約 30 分間の微動を測定した。測定毎の受振器の重複区間を 100m とし、受振器を移動させて測定を繰り返した。最も長い測線（1800m）でも 1 日で測定が可能であった。

得られた微動のデータを解析して各測線の 2 次元 S 波速度断面を求め、それらをまとめて 3 次元的な S 波速度構造を推定した。測定結果の例を図 10 に示す。深部の S 波速度が山側（図面左側）と平地側（図面右側）で異なっており、異なる地層を示しているものと推測される。

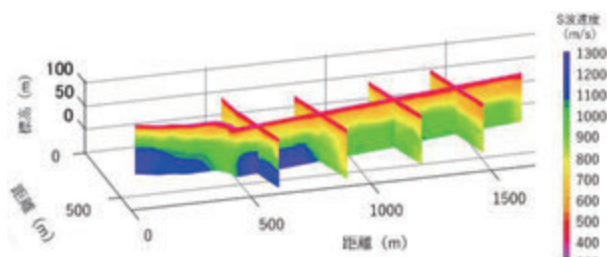


図 10. 微動探査によって得られた S 波速度断面

### 5.3 牽引式電気探査

牽引式電気探査は、前述の空中電磁探査と同様、地盤の比抵抗構造を把握する手法である。通常の電気探査では金属棒などの電極を地盤に打設する必要があるのに対し、牽引式電気探査では、キャパシタ電極と呼ばれるコンデンサーの原理を応用した電極を用いて、地盤とは非接触で測定できる（物理探査学会，2016）。この特徴から、測定システム全体を牽引しながらの測定が可能であり、また電極打設が困難な舗装道路上でも調査可能である。このため通常の電気探査と比較して測定作業効率に優れた手法である。図 11 に測定の様子を示す。牽引式電気探査システムに、位置情報取得用の RTK-GNSS システムを取り付けて測定位置の計測も同時に行っている。探査深度は 15m 程度で比較的浅部を対象としており、例えば河川堤防での縦断方向の調査といった長大構造物の調査でも活用される。

図 12 に牽引式電気探査の解析結果の一例を示す。空中電磁探査の結果図と同様、図中の暖色系は高

比抵抗、寒色系は低比抵抗の箇所を表す。表層 3 m 程度以深では 500  $\Omega \cdot m$  以上の高比抵抗を示す箇所が優勢であり、このような箇所では一般的に高比抵抗を呈する砂礫の存在が考えられる。



図 11. 牽引式電気探査の実施状況

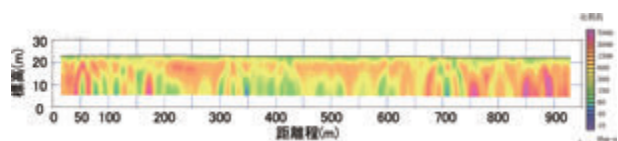


図 12. 牽引式電気探査 結果例

## 6. おわりに

西濃地域における物理探査の適用を経て、1 週間程度の現地計測を行うことで、深さ 100m、延長 6km の比抵抗断面図を作成することが出来た。微動アレイ探査や、浅層反射法を併用することにより、これまで不明確であった断層付近の透水性を含む水理構造の推定にも活用できるものと考えている。今後、災害時における地下水利用に向けた水循環解析モデルの構築に、物理探査技術が寄与することを期待する。

## 謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」(管理法人：防災科研) によって実施されました。

## 参考文献

- 東海三県地盤沈下調査会 (1985)：濃尾平野の地盤沈下と地下水
- 小西千里・斎藤秀樹：軽量小型の独立型地震探査装置を用いた直線微動アレイ探査，第 53 回地盤工学研究発表会，2018
- 物理探査学会 (2016)：物理探査ハンドブック 第 7 章 電気探査，420-422
- 山下善弘・Douglas Groom・稲崎富士・谷米晃・鈴木徹・林宏一 (2004)：キャパシタ電極を利用した電気探査装置 OhmMapper による浅部比抵抗探査，物理探査学会第 110 回学術講演会論文集，111-114