

災害時の地下水の活用とそのマネジメント —非常時地下水利用システムの開発—

おき たいかん えんどうたかひろ ふもと ひろし とさ かひろゆき
沖 大幹※¹・遠藤崇浩※²・麓 博史※³・登坂博行※⁴
きぐちまさし ひらばやし ゆきこ いで きよし おんだゆういち ごみたかし
木口雅司※¹・平林由希子※⁵・井手 淨※⁵・恩田裕一※⁶・五味高志※⁷
とくながともちか あいちまさあつ しまだせいいち あきたやけんと いがらしむねひろ
徳永朋祥※¹・愛知正温※¹・島田誠一※¹・秋田谷健人※¹・五十嵐崇博※⁸
※¹: 東京大学 ※²: 大阪公立大学 ※³: (公財) リバーフロント研究所
※⁴: ㈱地圏環境テクノロジー ※⁵: 芝浦工業大学 ※⁶: 筑波大学
※⁷: 名古屋大学 ※⁸: 応用地質(株)

1. はじめに

今後我が国に深刻な被害をもたらす可能性の高い地震として、南海トラフ地震、首都直下地震の発生が懸念されており、中央防災会議等により様々な観点から被害想定が行われている。上水道被害(断水)については 1) 南海トラフ地震による各地の断水人口は 2500~3400 万人以上¹⁾ 2) 首都直下地震では震源位置にもよるが断水率が東京区部で最大 35%程度²⁾ になり、復旧まで数週間~1 カ月程度を要する、などの試算がある。

震災時の広域的な断水は復旧に時間がかかり、過去の被災者へのアンケートでは生活上最も切実であったとの回答も多い。一般的な断水対応として貯水施設の配備や給水車による配水が考えられているが、被災人口が多い場合の水量不足や交通インフラ被害も考えられる。そのため、補助水源として民間井戸の登録や非常用井戸を用意している自治体も多い。

平成 29 年 5 月の国土審議会答申「リスク管理型の水の安定供給に向けた水資源開発基本計画のあり方について」では、これまでの需要主導型の水資源開発の促進からリスク管理型の水の安定供給へ転換を図ることとし、危機時における柔軟な対応として、地下水等の代替水源の活用が打ち出されている³⁾。一方、地下水利用では、地下状態を把握し地盤沈下が生じないような利用に留意する必要がある。こうした状況を踏まえ、令和 2 年 6 月に改定された水循環基本計画では、政府が総合的かつ計画的に講ずべき施策の一つとして、

「地下水の収支や地下水の水量、水質に関する挙動、地盤変動の把握、そのための調査・解析技術の開発」及び「災害時地下水利用システム」が位置づけられた。令和 3 年 6 月には水循環基本法が改正され、基本的施策に「地下水の適正な保全及び利用」に関する規定が追加された。更に令和 4 年 6 月に水循環基本計画が一部見直しされ「災害時地下水利用システム」の研究開発で得られた知見等を活用する旨記載された。

大きな地震被害が予想される地域で実地的な地下水利用体制を準備しておくことは大変重要と考えられるが、1)計画段階で適正な井戸配置や地下水利用量、地盤沈下リスクなどを評価するための地下情報が必要であり、2)様々な発災条件での効果予測のできるシステムや、発災時の井戸モニタリング手法の整備なども必要となろう。

以上を踏まえ、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)Ⅱ期で実施した本研究開発では、地震被害の予測されている濃尾・関東地域を事例として先進的な地下水評価技術の開発と基盤情報の発信、地域地下水利用をマネージするユーザーインターフェースシステムの開発を行ったので、その内容と成果を紹介する。

2. 非常時地下水利用システムの概要

本研究開発の全体像は図 1 に示す通り、地域の地質・地下水評価技術の開発(3 次元水循環モデル構築)と、モデルから得られた地域基盤情報や非常時地下水利用シナリオに基づくモデル解析の



図1 非常時地下水利用システム全体像

結果を表示する「社会実装ユーザーインターフェース」の開発である。

地域の地質・地下水評価技術の開発としては、1) 南海トラフ地震による被害の予想される濃尾平野、および 2) 直下型地震の予想される首都圏を含む関東平野全域を開発フィールドとし、3次元水循環モデル構築を含めいくつかの技術開発を行った(3章)。

社会実装ユーザーインターフェースの開発では、1) 震災地域における水需要と水供給を含めた複数の地下水利用シナリオの検討、2) 温暖化の影響や危機的渇水を含む過去長期間の気象外力データの検討、3) 震災シナリオの下で3次元水循環モデルを稼働させ、結果を表示するためのシステムの開発、4) 地下水利用の広報資料「非常時地下水利用指針(案)」を策定した。(4～6章)。

3. 流域地下水評価技術の開発と情報発信

3.1 技術開発の内容

地下水利用にあたっては、地下地質条件を考慮した適切な揚水位置・速度・量を考える必要があるが、地下状態の情報は限られており大きな不確実性が避けられない。自然の場の状態を可能な限

り定量的に捉え信頼性の高い地下水情報を発信するためには、フィールド情報・科学的知見・先端数値解析・調査観測技術の総合化を目指して流域地質・地下水評価技術の開発を行った。具体的には、①森林域の調査・解析技術開発、②濃尾平野および関東平野における流域地下水評価技術の開発(3次元水循環モデル、地盤沈下解析)、③地下水調査・沈下観測技術の開発である。ここでは、個々の技術開発の概要と発信された成果の一部について紹介する。

3.2 森林調査・解析技術開発と情報発信

我が国の流域分水界には山岳森林域が広がり、降水に伴う蒸発散・河川流出・地下浸透が下流部の河川水・地下水系の形成に寄与している。

山岳森林域の水循環は森林特性(樹種・樹齢・立木密度・林床状態など)に支配されるが、高地・奥地でもあり実用的情報は整備されていない。本研究では、ドローン・レーザー測量等の利用による高分解能の森林実態調査技術の開発、森林情報データベース整備、新しい森林蒸発散解析手法の開発を行い、濃尾・関東両地域の森林情報を整備し基盤情報として発信した。図2は関東平野森

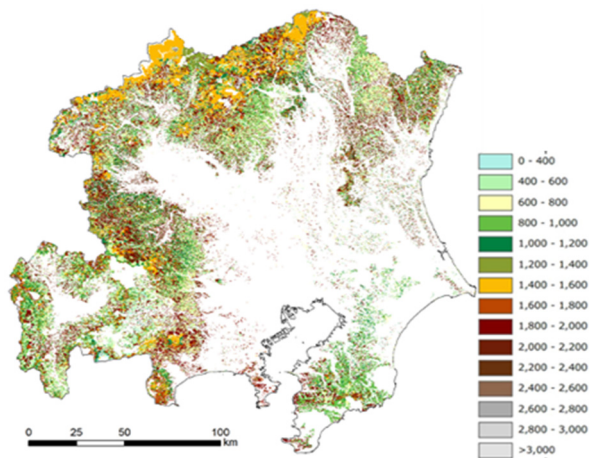


図2 関東平野樹木密度推定図

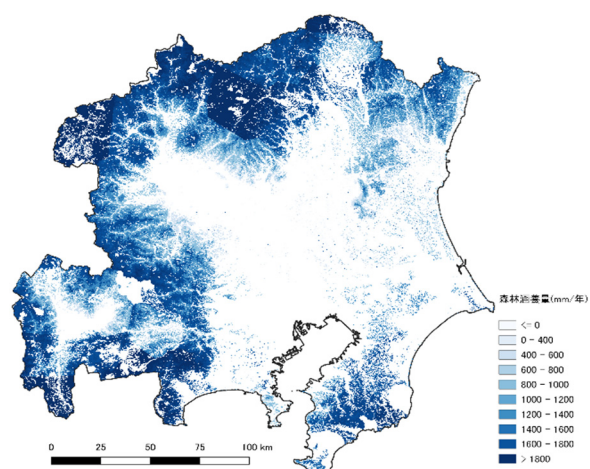


図3 関東平野森林域年蒸発散量の推定

林域の立木密度分布を描いたもの、図3は新たな解析手法による関東平野森林地域の年蒸発散量の推定分布である。本研究で開発された技術は汎用性・先進性が高く、他地域の森林管理のための森林情報整備への展開が期待される。

3.3 濃尾平野地下水資源評価および情報発信

3.3.1 3次元水循環解析および地盤沈下解析

濃尾平野には伊勢湾岸から内陸にかけて低地が広がり、南海トラフ地震時には、液状化、津波浸水、断水が予想されている。この一帯の地下には主に3層の砂礫帯水層が知られており地下水利用が行われているが、大きな地盤沈下も経験しており、地下水規制を踏まえた揚水計画が求められる地域である。

本研究では、気象・地形・地質・観測情報（地下水位、地盤沈下）、地下水利用情報等を収集し、濃尾平野で水平解像度 250m の 3 次元水循環モデ

ルを構築し、地盤沈下予測技術と組み合わせ本地域の地下地質状態を把握した。

図4に濃尾平野と周辺山岳森林域を水平解像度 250m の格子で分割した数値モデルの鳥瞰図を示した。これに地表土地利用や地下の推定地質構造を与え、観測水位および観測沈下量の経年変化をできるだけ再現する地質構造・地層水理パラメータ（透水係数、間隙率など）を同定した。

3.3.2 濃尾平野基盤情報の作成と発信

同定された濃尾平野の地下地層水理特性を図化し基盤情報として発信した。図5は透水量係数分布（第1～3 帯水層区間の透水性の高い砂礫層の透水係数×厚さの総和）であり、値が大きいほど帯水層は良好であることを示している。図6は泥質層厚分布であり、一般に厚いほど沈下が大きくなる懸念がある。これらは、本研究により初めて得られた広域地質推定図であるが、格子の粗さや地下の不確実性もあるため、局所の1地点を見るものではない。地下水利用にあたり、適切な井戸配置や揚水量など地域的な適性を面的に見る上で良い参考情報となる成果となった。

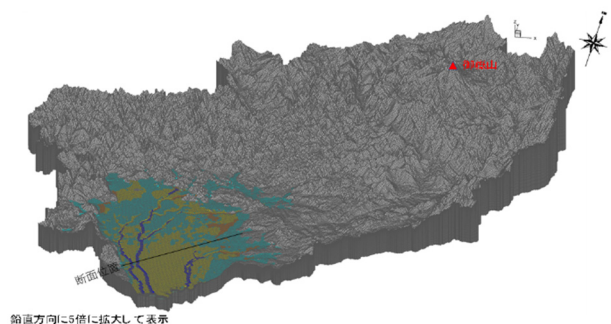


図4 濃尾平野3次元水循環モデル鳥瞰図

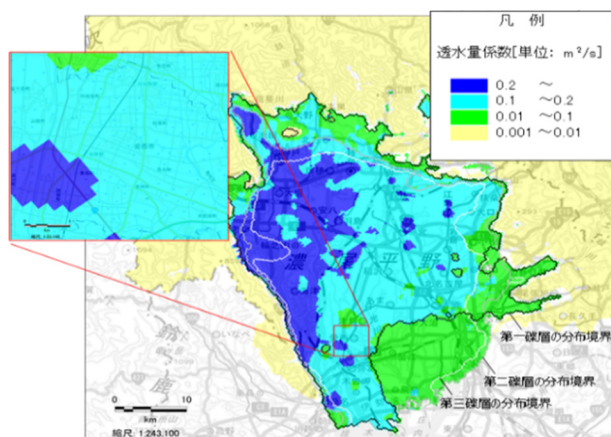


図5 透水量係数分布推定図

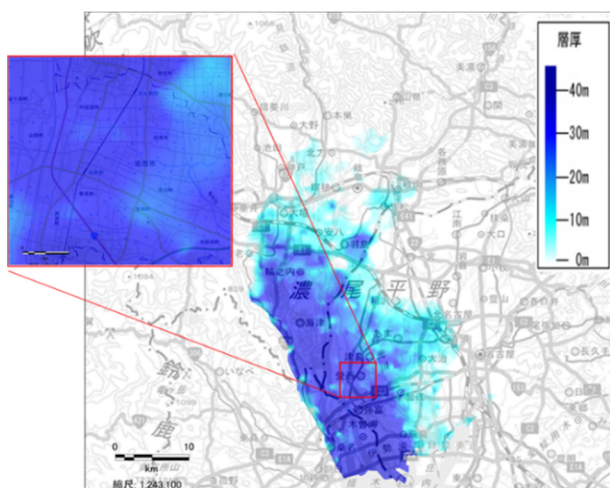


図6 推定される泥質層厚分布

3. 4 関東平野地下水資源評価および情報発信

3. 4. 1 3次元水循環解析

図7は関東平野および山岳森林域と海域（東南部）を包含した3次元水循環モデルで、地表地形標高情報を基に水平解像度250m、鉛直60層の格子で分割して描いたものである。中央部に首都圏を有し、1970年ごろまでの地下水利用により沖積低地部などで大きな地盤沈下を経験しており、非常時地下水利用においても注意が必要な地域である。

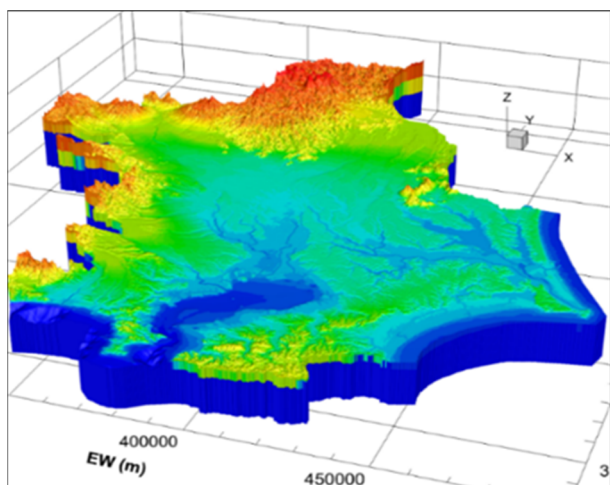


図7 関東平野3次元水循環モデル鳥瞰図

関東平野は濃尾平野の10倍程度の面積を有し、地下状態は地質時代にわたる隆起・沈降・火山活動・海水準変動などによりきわめて複雑である。この地域全域の地質・地下水賦存状態を推定できる情報はないため、平野中央部のボーリング情報、観測情報の多い地域（詳細モデル化地域）におけ

る地質構造を地質専門家による孔間対比や経験知を踏まえた補間・補外により推定し、情報の少ない周辺部の推定にも利用した。モデルに入力した地質構造・地層水理物性（透水性、貯留性など）は、長期再現解析（約120年間）により、多数の地下水位観測点の観測値経時変化をモデルが追跡できることを統計的検定等により確認した。

3. 4. 2 地盤沈下予測技術開発

関東平野3次元モデルにより同定された地質構造・地層水理パラメータには、モデル解像度の粗さや情報不足による不確実性があり、揚水を行った時に予測される地盤沈下にも同様の不確実性が避けられない。

本研究では、同定された3次元水循環モデルの地層状態および揚水した時の地下水位低下を地下水流動-弾塑性変形の連成解析シミュレータに入力することで沈下予測を行った。地盤沈下解析における不確実性は、同等の過去データの再現性を持った複数の異なる数値モデルの統計集団（アンサンブル）を構築し、アンサンブル中のモデルの計算結果の差異によって可視化を行った。また、地質情報に高度な不確実性がある地域に対応するため、遷移確率地球統計学を用いて層相分布のアンサンブルも構築することで、層相分布の不確実性に起因する地盤沈下予測の不確実性を可視化する手法も開発した。

3. 4. 3 関東平野地下水基盤情報の発信

3次元水循環モデルと地盤沈下予測解析から関東平野の地質・地下水基盤情報として帯水層分布、泥質層分布、一定揚水量下の水位低下予測図、地盤沈下予測図などを作成し発信した。図8は透水量係数分布（地下300mまでの地層の透水量係数×厚さの総和）であり、値が大きいほど帯水

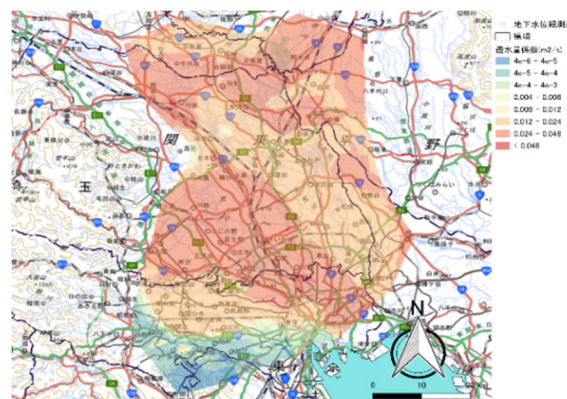


図8 関東平野詳細モデル地域透水量係数分布

層は良好であることを示している。図9は泥質層厚分布であり、一般に厚いほど沈下が大きくなる懸念がある。図10は、全格子点に日量100トン、

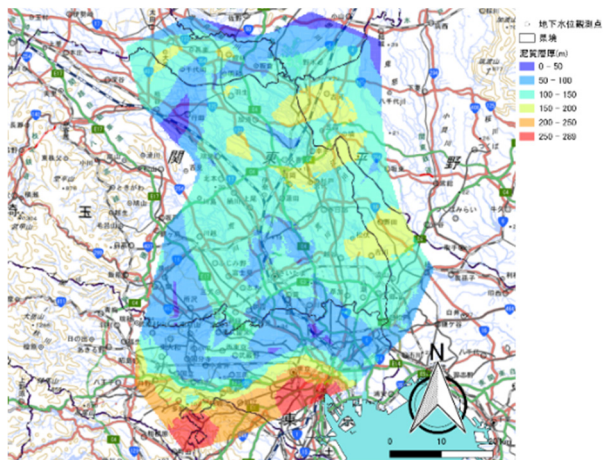


図9 関東平野詳細モデル地域泥質層分布

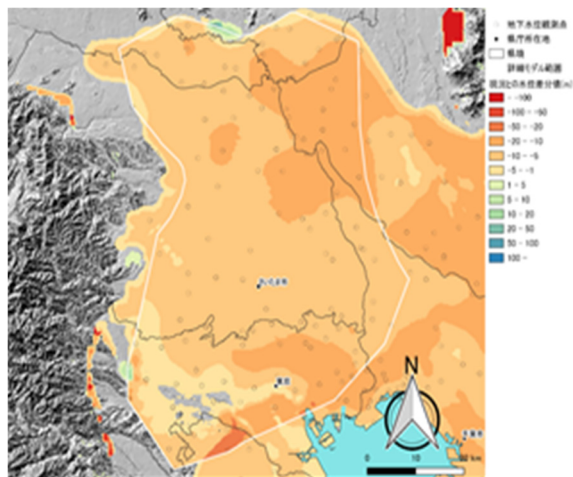


図10 一定揚水時の地下水位低下分布

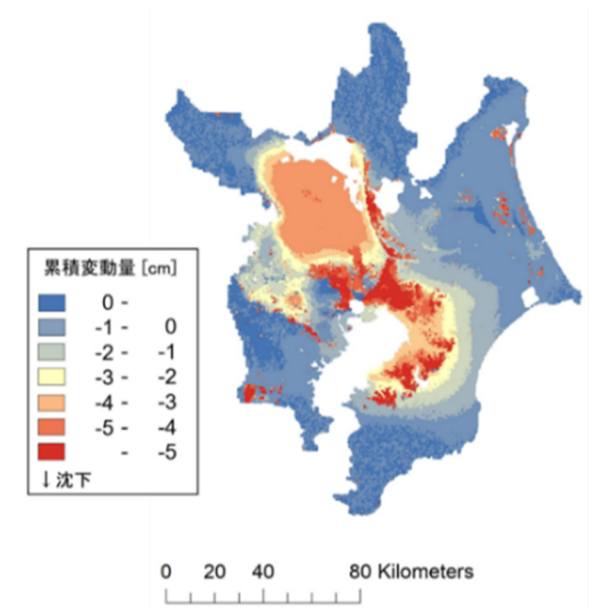


図11 一定揚水量—地盤沈下分布予測図

1 か月間の揚水を与えた時の地下水位低下分布図であり、図11はその時予想される沈下量の期待値の分布である。なお、沈下量の大きな地域（濃色）は地質不確実性が高い地域であり予測のばらつきは大きい結果となった（ここでは図の詳しい見方については省略する）。

これらの図は、図5、6と同様に水平解像度250mで描かれており、広い範囲を対象としたマップとしては既往研究より高い分解能ではあるが、この地域の地質の複雑さや情報欠如があるため、局所の地点を詳細に見るものではない。地下水利用にあたり、適切な井戸配置や揚水量などの地域的な適性を見る上で良い参考情報となる成果と考えられる。

3. 5 地下水調査・地盤沈下観測技術の開発

本研究では、モデル解析と併せ、地下水調査、地盤沈下観測技術の開発を行った。ここでは簡単に概要を紹介する。

(1) 空中電磁法による地下水探査技術

地下水位は一般にボーリングによる点情報として得られるが、流域内の不圧地下水面深度の面的な情報を迅速に得ることを目的として、ドローンを利用した空中電磁探査による地下比抵抗マッピングから浅部地下水状態を把握する技術の開発を行った。基本的な有効性は井戸水位との比較などから確認されており、今後より実用に向けた開発を計画している。

(2) 地盤沈下観測技術の開発

地下水利用時の地盤変化の観測のため、全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) による地盤沈下モニタリング技術の開発を行った。これは従来の水準測量を用いた地盤沈下検出技術や地盤沈下観測施設の地盤沈下計による連続観測に代わって、合成開口レーダー (SAR) 衛星を用いたリモートセンシングによる面的な地盤沈下観測技術と相互補完して、地盤沈下を連続的にモニターする新しい有力な観測手法である。

4. 非常時地下水利用シナリオ解析

4. 1 シナリオ解析の考え方

災害時の地下水利用シナリオについては、濃尾平野では南海トラフ地震を、関東平野では首都圏直下地震を対象に、社会活動の変化を反映した地

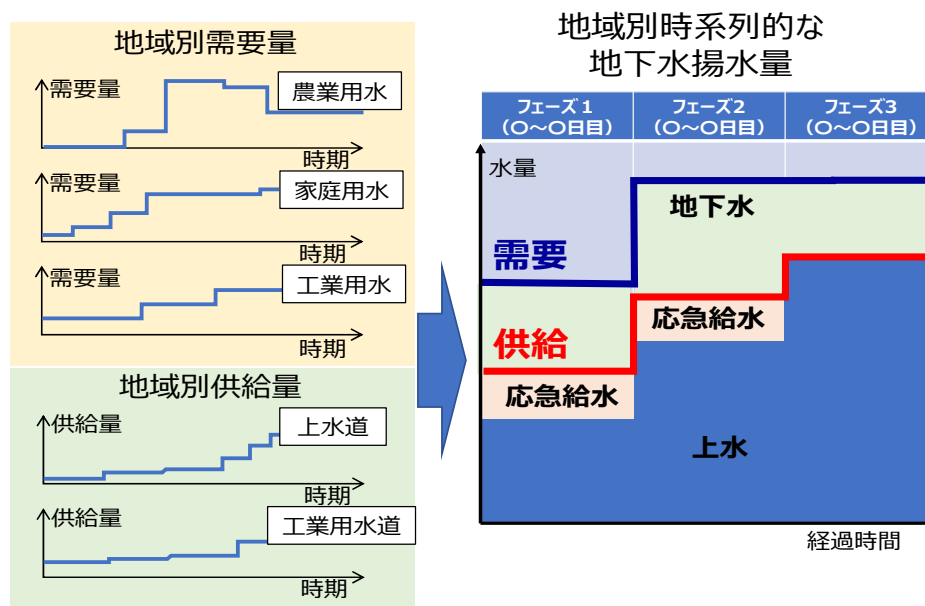


図 12 地域別不足量(必要地下水量)の算出方法

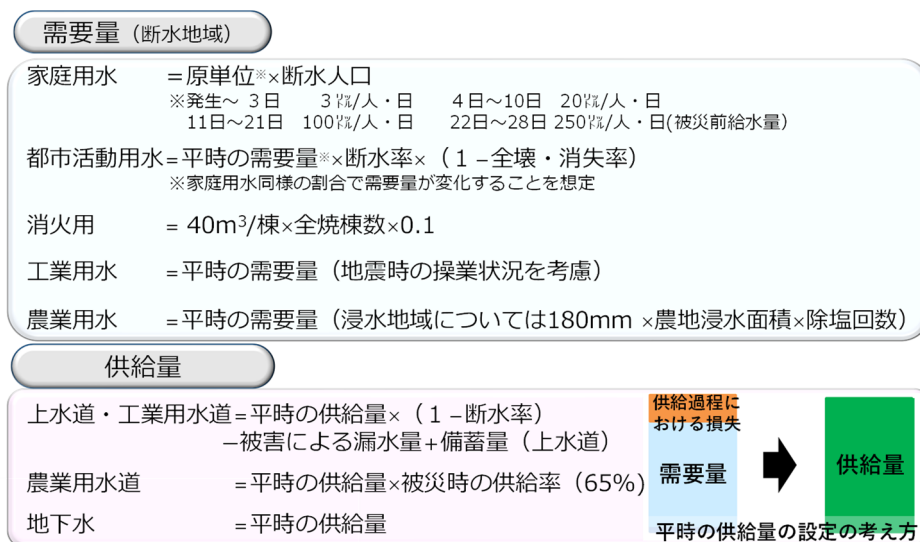


図 13 需要量・供給量の推計方法

域別需要量と地域別供給量の差から必要な地域別不足量（必要地下水量）を算出した。ここでは濃尾平野の場合について紹介する。

図 12 は需要量については被害発生以降の社会活動の変化を踏まえ公表資料等から原単位を設定し、原単位に中央防災会議「南海トラフ巨大地震の被害想定」の断水人口・率や全焼棟数等を掛け合わせて算出した。非断水地域については平時の需要量を想定して算出した。供給量については、平時の供給量に上水道・工業用水道については、中央防災会議「南海トラフ巨大地震の被害想定」の断水率を、農業用水については被災時の供給率

(65%) を掛け合わせて算出した (図 13)。更に市区町村単位で推定した用途別の地下水揚水量を、市区町村内における各用途の地域分布を反映した形で各メッシュでの揚水量を推定した (図 14)。地域分布の重みとしては、国土数値情報の都市土地利用細分メッシュ(同メッシュの対象外の地域は土地利用細分メッシュ)の土地利用種別を利用した。

4. 2 濃尾平野シナリオ解析例

図 15 は不足水量を全て地下水で賄う場合、図 16 は不足水量の 60%を地下水に頼った場合の地盤

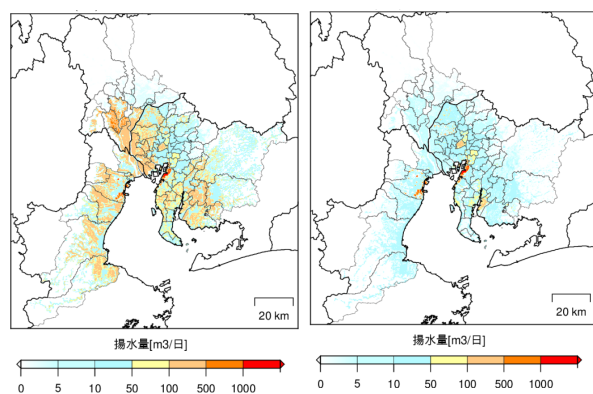


図 14 南海トラフ巨大地震発生時に想定される不足量
(左：8月、右：冬季)

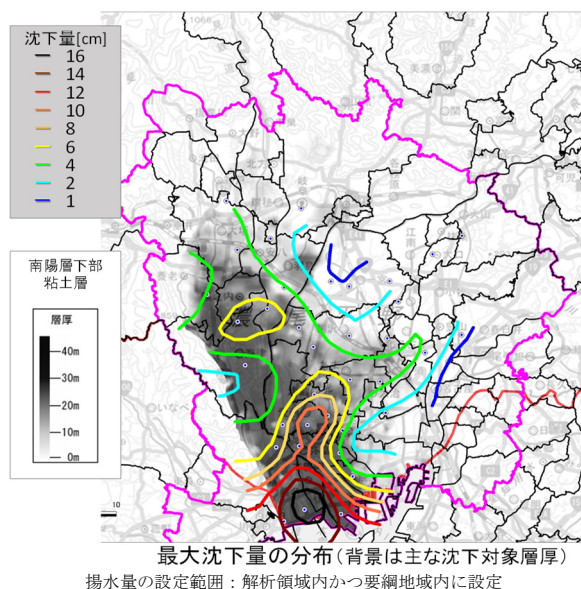


図 15 不足水量の全量を地下水に頼る場合の沈下予測図
(夏場に発災を想定)

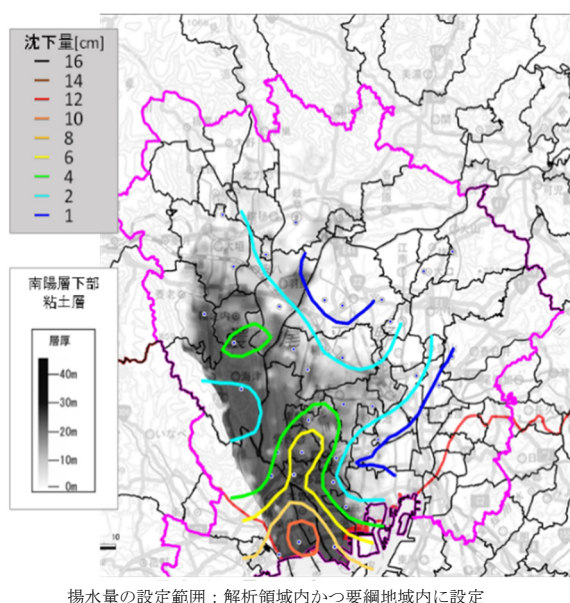


図 16 不足水量の 60%を地下水に頼る場合の沈下予測図
(夏場に発災を想定)

沈下予測図である。なおこの事例で各地点に与えた揚水量は、土地利用種別で割り振られ、各地点の水利地質条件（帯水層の良否など）を考慮したものではない。

水利地質条件や地点毎の井戸の有無、井戸能力等を考慮したシナリオや、地震時の津波や液状化なども想定したより具体的なシナリオなど多数考えられるが、自治体等の要請があれば対応可能である。

4. 3 関東平野湧水シナリオ解析例

関東平野を対象として、首都直下型地震および湧水を想定したシナリオ解析を行った。ここでは紙面の都合上、湧水を想定したケースについての結果のみを紹介する。

わが国では 1964 年、1994 年頃の大規模の大洪水や九州・四国などの頻繁な洪水があり、近年は世界各所（北米、中国、欧州、アフリカなど）で大きな洪水が起こっている。洪水時には、降雨直接流出の減少、森林域で常時河川へ湧き上がる地下水の減少により自然湖・ダム湖の流入表流水の減少が起こる。果たして、洪水時に表流量や地下水賦存量はどのように時間変化するのだろうか。本研究で作成された 3 次元水循環モデルは地表のダム湖・河川系などを必ずしも適切に表していないが、大きな河川の流量は観測流量と整合的であることは確認している。ここでは試行的に洪水シナリオとして、d4PDF（地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）^{11) 12) 13)} のデータから作成した夏場の 100 年規模洪水の気象条件（6 月・7 月・8 月に平年の 0.324 倍の降水量と +7.0 度の気温）を与えた。その結果の一部を図 17 に示す。図 17 は地表付近の土壌水分量の変化で、平年時に比べ洪水時には地表付近が水分の少ない状態に移行する様子を示している。3 ヶ月で表流水は 8 割以下に減少するが、平地の地下水賦存量は湧水がなければほぼ一定にとどまる様子が見られた。

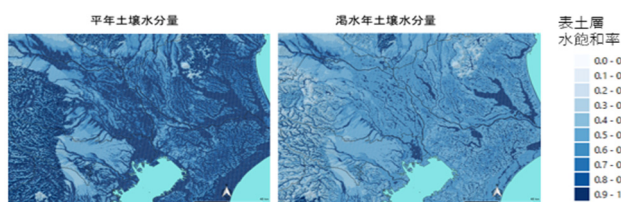


図 17 3 ヶ月洪水による土壌水分量変化

なお、渇水時の森林蒸発散を考慮したダム湖への流入量変化の追跡を行うローカルモデルの付加などにより、より実際の予測ができる可能性がある。

5. 社会実装ユーザーインターフェースの開発

ユーザーインターフェースについては、Cloudサーバー上に作成し、濃尾平野・関東平野の3次元水循環モデルと連携した（図18）。具体的な活用法については、自治体等と意見交換を行った結果、主に以下2点を想定して開発を行っている。

- ① 事前計画として経済等への影響を踏まえた効率的な水供給計画の立案（地下水利用規制の方法等）。
- ② 事前の災害対策として、新たな防災井戸の設置（位置・揚水量）

①については、災害時の地下水利用シナリオが予めユーザーインターフェースに入力されているため、水の不足量に対して地下水で対応する割合と地盤沈下量の関係を3次元水循環モデルによって算定し、自動的に算出される経済被害との関係から適切な地下水利用量の検討することができる。更に、想定した地震の震度が変わった場合の水の不足量を再計算する機能は配備しているため、地震発生後の水供給計画への影響を把握することも可能である。

②については予めユーザーインターフェースに平時の地下水利用量が入力されており、3次元水循環モデルを活用することで水が不足する地域で、新たに防災井戸を設置（位置、揚水量）した場合

の影響を検討することが可能である。

災害時の地下水利用シナリオを用いる場合は、出力機能としては用途別揚水量（家庭用水、都市活動用水、工業用水、農業用水、消火用水、全用水）及び地盤沈下量の時系列の分布を表示する機能を配備するとともに許容沈下量の超過箇所の分布を重ねられるため、面的に揚水量と沈下量の把握が可能となっている。

一方、非常時の地下水の利用に当たっては、地域で地盤沈下の恐れが考えられることから適切な地下水の保全と利用のバランスを検討・議論することが必要である。また、非常時に地下水を利用できる施設や体制を確保した上で、予め立案した水供給計画を具体的に運用する際には、各井戸の取水量を管理する等の地下水の取水量制限の実効性を確保する必要がある。特に農業用水に関しては、個人で保有する井戸等も多くあり、農業用水の取水量の多くなる代かき期の渇水時において水供給計画の具体的な運用については課題がある。なお、本システムは非常時の短期における地下水利用の検討に特化したものであり、平時の地下水利用等の長期の検討を行う際には別途地下水シミュレーションモデルの精緻化等、改良を行わなければならないことに留意することが必要である。

非常時地下水利用システムの詳細内容（モデルを含む）及び利用を希望される方については、リバーフロント研究所のホームページにマニュアル等を掲載しているのでご参照願いたい。

(<https://www.rfc.or.jp/sip.html>)

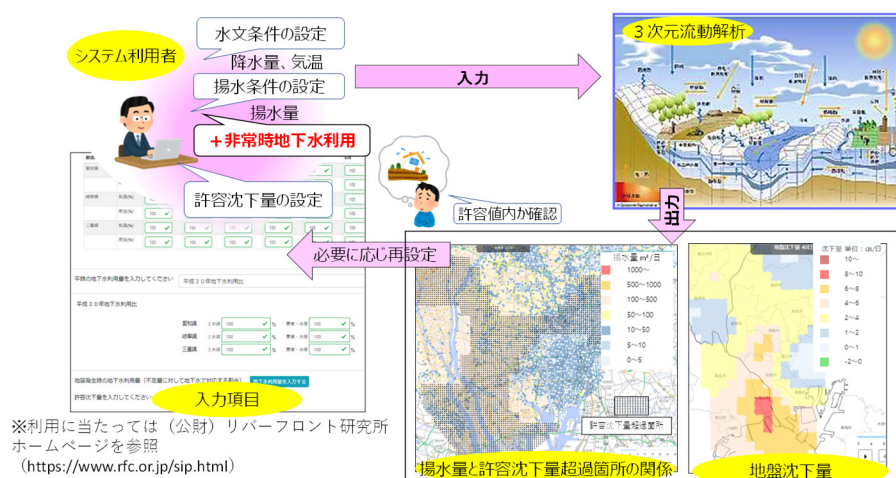


図18 非常時地下水利用システムの構成

6. 非常時地下水利用指針（案）

国土交通省が 2009 年に公表した『震災時地下水利用指針（案）』がある。これは特に地震を念頭に、震災時の水の確保に関する危機管理を充実させるべく、身近な水源である地下水を有効に活用するための方策と事例を紹介したものである。今回策定した『非常時地下水利用指針（案）』（図 19）は 2011 年の東日本大震災、2016 年の熊本地震、2018 年の西日本豪雨など、その後生じた大規模災害時の地下水利用事例を加え、情報の更新を試みたものである。



図 19 非常時地下水利用指針（案）

災害後（特に震災）に井戸が大きな役割を果たすことは新聞記事等で広く知られるようになったが、その詳細は不明な点が多い。同じ自然災害でも地震と渇水は、①前者は突発的に起こるものであり、②しかも自治体やインフラストラクチャーの機能が著しく低下している状態で対処しなくてはならない点で大きく異なる。しかも震災後の井戸水利用は被災直後の混乱期に、地域に散在する民間井戸が使われることが多く、公的な記録に残りにくい。こうした既存データの欠如が災害時地下水利用の有効性とその限界を見極めることを難しくしていた。

本指針（案）は文献調査、現地調査、災害用井戸登録者へのアンケート調査、被災者への聞き取り調査、インターネットアーカイブ調査など様々な方法を駆使して、災害時の地下水利用を様々な角度から紹介したものである。それは、①応急給水とは何か、②災害用井戸のしくみ、③災害用井戸と役割分担、④災害用井戸の準備、⑤災害用井戸の有効性と課題、⑥今後の普及に向けてという 6 テーマから構成され、それぞれの下に詳細なト

ピック（全部で 32 トピック）が並ぶ構造になっている。各トピックは Q and A 方式で内容が紹介され、長くても 2 ページ読み切りの形にするなど、一般の読者でも十分に理解できるような工夫が施されている。

いくつか例を紹介すると「応急給水とは何ですか」「災害用井戸とは何ですか」といった基本トピック、「どれくらい広まっているのですか」「現在の認知度は？」といった災害用井戸の現況に関するもの、「県はどのように関わっていますか？」「企業にできることはありますか？」といった各アクターの役割分担に関するもの、「候補の井戸を探す方法は？」「水質検査の項目は？」といった実際の運用面に関するもの、「どのように役に立つのですか？」「停電時には使えないのでは？」といった有効性とその限界に関するもの、「補助のしくみはありますか？」「井戸の場所の公開方法は？」といった普及策に関するものが含まれる。

本資料は大阪公立大学学術リポジトリ

(<http://hdl.handle.net/10466/00017904>) を基点に、内閣官房水循環政策本部「地下水マネジメント推進プラットフォーム」

(<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gmpp/guide/reports/report.html>)、公益財団法人リバーフロント研究所 (<https://www.rfc.or.jp/sip.html>) にリンクが貼られており、関心のある読者は誰でも無料でダウンロードできる。

7. まとめと展望

本研究開発の内容と成果は以下の通りである。

- (1) 南海トラフ地震による被害が想定される濃尾平野、および首都直下地震被害の想定される関東平野を対象に流域地質・地下水評価技術の開発（森林情報・解析、3 次元水循環・地盤沈下予測モデル、調査・観測技術）を行った。その成果として両地域の地質・地下水状態をマップ化し、地下水利用計画に資する基盤情報として発信した。
- (2) ユーザーインターフェースを開発し、複数の発災シナリオ（被災規模、気象・社会条件など）により 3 次元モデルを動かし、経済損失等も考慮した効率的な水供給計画を立案するための参考事例を作成した。
- (3) 一般広報資料として、地下水利用指針（案）

を作成し、地下水利用の必要性、事例などを解説した。

ここで開発された技術やシステムは、他の地域でも同様の手順により適用可能である。

基盤情報については、作成手法等の説明書と共に発信されている。

引き続き内閣官房水循環政策本部事務局が立ち上げた地下水マネジメント推進プラットフォーム等を通じて、適切な地下水利用を推進するための取組を実施する予定である。

参考文献

1) 中央防災会議・南海トラフ巨大地震対策検討ワーキン

ググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）、平成 25 年 3 月 18 日

2) 東京都防災ホームページ：東京都首都直下地震等による東京の被害想定（令和 4 年 5 月 25 日公表）

3) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部：「リスク管理型の水の安定供給に向けた水資源開発基本計画のあり方について」（答申）。2017.

4) Mizuta et al.(2017):Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, Bulletin of the American Meteorological Society, Volume98,Issue 7, pp.1383-1398.