

沿岸域における深層地下水の研究とその社会的な役割

丸井敦尚*、町田功、井川怜欧

これまで、産総研では社会的な要請にこたえる形で、地下水研究を進めてきた。かつては、地下水資源の開発（工業用水の確保等）や環境保護のためであったが、現在では、エネルギー利用（地中熱利用等）や地下空間の活用（二酸化炭素の地中貯留や放射性廃棄物の地層処分等）にも地下水研究が貢献している。この論文では、地質調査所以来これまでに行ってきた地下水研究を紹介するとともに、現在解決すべき課題とその取り組みについて報告する。

キーワード：沿岸域、深層地下水、概念モデル、地質環境モデル、社会的役割

Study of deep groundwater on the coastal area and its social role

MARUI Atsunao*, MACHIDA Isao and IKAWA Reo

Geological Survey of Japan (GSJ) has carried out groundwater studies responding to social demands. Groundwater studies had been conducted for the development of resources and the protection of the environment in the past. These days, in addition, they are contributing to thermal energy use and practical use of the deep groundwater environment for high-level radioactive waste (HLW) and carbon dioxide capture and storage (CCS) projects. In this paper, we present the history of groundwater research at GSJ, current issues, and our approach to groundwater use.

Keywords: Coastal area, Deep groundwater, Conceptual model, Site descriptive model, Social role

1 はじめに

我が国初の水文地質図は、“日本水理地質概観図”として当時の地質調査所が1957年に出版している。以来、全国の主要な地下水盆において、地下水の分布深度や地下水量、温度勾配等が示された水理地質図を41葉出版している。2001年に産業技術総合研究所に移行してからは、地下水の滞留時間や水質等の追加情報を盛り込んで、水文環境図と名称を変更し、最新版の大阪平野に至るまで、7地域の水文環境図が出版されている。これに加えて、地下水のデータベース“いどじびき”を公開しつつ（現在は非公開）、基盤情報の充実をはかり、国際協力も実施してきた。これまでの研究においては、地下水学の課題である、地下水流動経路の特定と滞留時間の推定・確認が大きなテーマであり、各地の地下水盆を対象に、地下水流動経路や滞留時間を解明してきた。

地下水は、地球上の「水の大循環」の一部として存在しており、山から海に向かって流動している。陸域の地下水流動は、地質構造に大きく左右されると考えられている。し

かし、地下水流動の末端に当たる沿岸部の地下水は（特に深層の地下水は）、複雑な賦存状態を呈している。これは、①沿岸堆積平野の地質が、深海性の堆積物の上位に浅海性の堆積物、沖積層を持つものが一般的であり、かつては塩水で満たされていたこと、②氷期を経して大きな海水準変動の影響を受けたため、塩水層と淡水層が重なっていることが多いことが原因である。すなわち、流動性の高い淡水地下水帯の下位に、現海水が侵入した塩水帯や非流動性の淡水地下水帯、化石塩水帯等が層状に賦存している^[1]の一般的である。このように沿岸部と内陸部の地下水流動や賦存状態を理解したうえでの地下水の水理構造把握は、地下水資源の開発にとって最も重要な知見の1つである。

また、沿岸域は大規模な人間活動域であり、地下水資源の開発にとどまらず、環境保護や地下空間活用（地層処分や地中貯留）のためにも重要な地域である。これまでの地下水研究やデータベースの整備状況に鑑みれば、陸域の地下水についてはほぼ把握できる状況にあるが、沿岸陸域や海底下の地下水については、陸域に比べて特に深層地下

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 〒305-8567 つくば市東1-1-1
Geological Survey of Japan, AIST 1-1-1, Higashi, Tsukuba 305-8567 Japan * E-mail: marui.01@aist.go.jp

Original manuscript received August 22, 2019, Revisions received April 17, 2020, Accepted April 30, 2020

水データの密度や精度が劣り、まだまだ研究や基盤データが充実しているとは言えない状況である。とりわけ、地層処分や地中貯留といった社会的に大きな問題については、沿岸海底下が大きな候補となるだけに、さらに科学的な根拠を持って安全性を担保するためにも地下水の賦存状態を解く研究を急がなくてはならない。さらに、各種インフラ整備に関連する大規模事業や対策においては、ステークホルダーのコンセンサスを得るために、地質環境モデル (Site Descriptive Model) を使った工学設計からの性能評価、安全評価へと続くので (詳細は4章で説明)、この地下水研究では、概念モデル (Conceptual Model) を地質環境モデルに発展させるよう高精度化させることが最重要課題と考える。この研究においては、これまでの地下水研究史を振り返りつつ、沿岸域研究の課題を整理し、概念モデル (以下CM) から地質環境モデル (SDM) への発展ならびに高精度化を目的とする。

2 地下水の流動と賦存状態、海底湧出地下水

2.1 水の大循環と地下水の特性

一般的に、表層から降水がしみ込んで、地下に滞留する水が形成されるが、その下位には遠くの高山等所から流動してくる地下水が通過する。これらの地下水は、通常完全に混合することは少なく、塊状になって地形に沿って流下している。これらを、自由地下水 (不圧地下水) や被圧地下水と称し、水源 (地下水資源) として利用される。さらに、その下位には、流動性の低い停滞した地下水があり、一般的には第三紀層等、より緻密な地層内に存在することが多い。地球上の水循環の観点からそれぞれの水の状態について滞留時間や水質をまとめると図1のようになる。また、ごく深部には、温泉水や化石水等さまざまな特性を持つ地下水が存在している。これら地下水の種類と特性を表1にまとめる。

さらに、著者 (丸井) は日本列島の帯水層の状態を把握するため、日本列島の堆積層 (第四紀層と新第三紀層) の分布を調査した^[11]。列島内で掘削された17,000本以上の深井戸資料等からその堆積層の状況を見える化したものを使って、日本列島の地下水量を推定すると、新第三紀層、第四紀層と層厚は大きく異なるものの、ともにほぼ同量の地下水を保持しており、両層あわせて13兆トン存在していることが推定できた (図2^[12])。また列島全域にもたらされる総降水は、年平均約6,000億トンと推定されることから、列島全体の平均的な地下水滞留時間は200年以下と考えられる。通常我々が利用する第四紀層内の地下水滞留時間よりも格段に大きいことが明らかになった。

*年間約6000億トンの降水が列島にもたらされるが、そ

表1 丸井 (2012) による地下水の種類と特性
アンダーラインを付した用語はこの論文と関係の深い用語である。

用語	定義	出典
浅層地下水	地表に最も近接した地層または帯水層内に賦存する不圧地下水 (自由地下水)	H. Bouwer (1978) ^[3]
不圧地下水 (自由地下水)	帯水層内の水分 (地下水体) が大気圧以上に加圧されていない地下水	山本 (1986) ^[4] 一部改
被圧地下水	帯水層内の水分 (地下水体) が大気圧以上に加圧されている地下水	山本 (1986) ^[4] 一部改
深層地下水	不圧地下水の下位に存在する (第2帯水層以深の) 被圧帯水層内の地下水	Marui (2009) ^[5]
深部地下水	通常 (農業用水や雑用水) の利用範囲を超える深度の地下水	Marui (2009) ^[5]
化石水	地下水流動に関与していない地下水	高村・丸井 (2006) ^[6]
かん水	海水の塩分濃度を越える塩化した地下水。かつては海水の5倍以上の塩分濃度を持つ地下水と山本 (1986) が定義していた。	高村・丸井 (2006) ^[6]
化石海水 (古海水)	化石水であり、かつ塩分濃度が海水と同程度以上の地下水	丸井・林 (2001) ^[7]
地層水	地層が形成されたときに取り込まれた水分が間隙中に残ったもの	高村・丸井 (2006) ^[6]
処女水	マグマ中の水分が上昇して帯水層に移動し、地下水となったもの	山本 (1986) ^[4]
鉱水	普通の水とは物理的、化学的性質を異にする天然の特殊な地下水。日本では温泉水の定義に満たない深部地質や鉱山起源の地下水	権根 (1980) ^[8] の記述を簡略化
硬水	WHOでは、アメリカ硬度換算法で120mg/L以上の水を硬水と定義している。	WHO ^[9]
温泉水	温泉法により、水温が摂氏25℃以上か、あるいは19種類の特定成分を含む地中から湧出する温水、鉱水及び水蒸気その他のガス (炭化水素を主成分とする天然ガスを除く) と定義される	温泉法 (1948) ^[10]

のうち約半分は蒸発散し、約1/3が地表水として海洋に放出される。残った1/6程が地下水として涵養されるが、このうち200億トン以上が人間生活や工業・農業で利用されている。したがって、概ね800億トンの地下水が毎年涵養されるため、単純に計算すると163年分の降雨涵養に相当する地下水が日本列島に溜まっていることになる。一方で、海水準が大きく変動すると地下水の流動範囲 (深

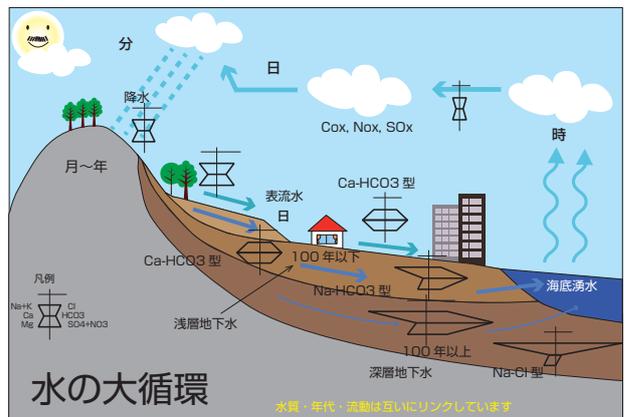


図1 水の大循環^[2]
地球上の水の大循環は、海洋から始まり大気圏、地圏へと移る。地表に到達した降水は、地表水や地下水となり、いずれは海洋へ戻る。これまで、さまざまな概念図が公開されているが、水循環の時間スケールや水質と地下水流動の関連等を示したものとしては類のない概念図である。

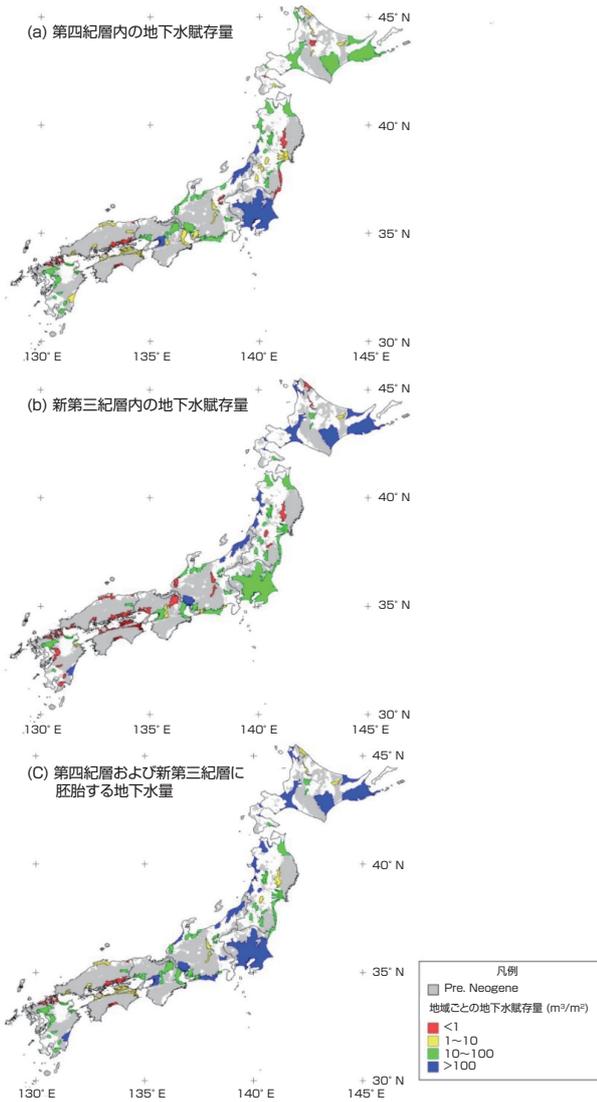


図2 地質年代ごとの帯水層中の地下水賦存量^[12]

度)が大きく変化する。これは、海水準が下がった場合、より深部までの地下水が流動して海域に流出するためであり、経済活動が集中する沿岸域ほどその影響は大きい。海水準変動の履歴(図3)を見て分かるように、約12万年周期で水期が終了すると一気に100 m以上海水準が高くなるため、流動していた淡水地下水は、その上位に侵入してきた海水によって覆われ、海底に淡水地下水が封じ込められるというのが定説であった^[14]。海底下に淡水の地下水が存在する場合、この淡水地下水は未利用資源として活用される可能性が高く、しかも陸域の地下水流動を阻害しないことから、塩水化等の地下水障害を引き起こす可能性が少ない。また、淡水地下水は約12万年の周期で流動と停滞を繰り返すものの、さらに下位の地下水は更新世中期以降の周期的な水期・間水期を繰り返して滞留していることから、少なくとも70万年以上停滞していると推定されるため、廃棄物処分等には好適の不動地下水領域と考えられる。このような、地下水の賦存状態が沿岸域深部において正確に把握できれば、現在の課題を解決する大きな知識となりうる。しかし、今世紀になるまで、人資の不足等から、これを検証する研究はなかなか行われてこなかった。

海底下の淡水地下水は、ほぼ陸水起源であるが、海底下深部には、処女水等陸域起源でない地下水が存在する可能性もあり、地中貯留や地層処分においては大きな課題となっている。また、海水準変動等による地下水流動の下限変動のため、その賦存状態が複雑化していることにもある。

2.2 海底湧出地下水研究

海底下の地下水特性を把握するためには、海底地形を探索し、地下水の湧出口の位置を特定し、その流出量を推定すること、流出水の水質等から滞留時間を把握すること、淡水地下水と塩水地下水の領域を把握すること等が

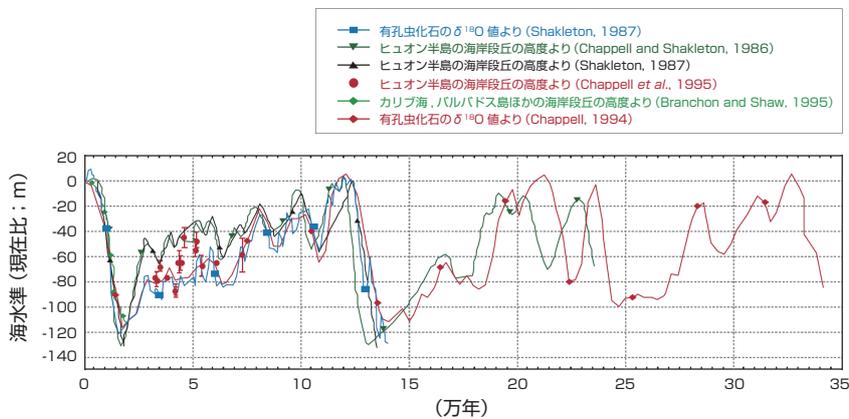


図3 過去35万年間の海水準変動^[13]

海水準は約12万年の周期で100 m以上変動している。約6000年前の縄文時代をピークに、現在は下降期に入っている。海水準が低下すると地下水の流動域はより深部にまで達するため、全体的な地下水流動はより活発になる。したがって、将来的には海底に湧き出す地下水の領域がより拡大あるいは移動すると考えられる

重要である。このため、列島の各地では、水収支法を使った地下水流出量の推定や流出する地下水を採取して分析する等の研究が行われてきた。

我々産総研での沿岸域地下水研究は、90年代から開始され、海底下に湧き出す陸域起源の地下水をとらえ、分析し、海底湧出地下水の年代測定結果やその水質から地下水の流動経路を解明した^{[15][16]}。また、利尻島や九十九里海岸等では海底堆積物から湧出する地下水の状態を可視化している^[7]。近年の成果としては、我が国に関する地質および地下水関連の文献を収集し、その総数が80万件を超えた^[17]。この文献集積結果はデータベース化され、調査の地域や手法等で検索できるシステムである(前述の“いどじびき”より)。これを使って、我が国の沿岸域における海底湧出地下水調査の結果を確認すると、海底湧出地下水に係る文献は260件ほどあり、その分布は下の図4になる。さらに、伊藤・丸井^[18]によれば、日本列島のほとんどすべての地域で流域にもたらされた降水量の方が、河川によって流出する流量と人々が利用する地下水量の和よりも大きく、日本列島の全域で海底に地下水が湧出

する可能性がある」と指摘している。海底の場合、調査が難しいことから、これまでになかなか実態が解明できていなかったが、陸域からの地下水流動を的確に把握する(再確認する)うえで、さらに未利用資源を開発するうえでも重要な調査対象であることは間違いない。

3 概念モデル (CM) の構築

3.1 沿岸域研究地 (北海道幌延町) の選定

海底に地下水を供給する沿岸部地下水の流動形態や賦存状態、水収支等を解明するための課題の一つに、沿岸での陸域から海洋への地下水流動の出口の把握がある。この可視化の一例として実施された、北海道北部の幌延町浜里モデルフィールドの成果を示す。北海道北部には広大なサロベツ湿原が広がり、堆積層による海岸平野が存在する(図5)。堆積層の厚さは6000mに達すると推定されており^[19]、地下水も深部にまで賦存していると考えられる。福沢他^[20]によれば、表層の沖積層の下位には、更新世の更別層が存在し、その下位には、鮮新世の勇知層、声間層、さらには中新世の稚内層と続くことが報告されて

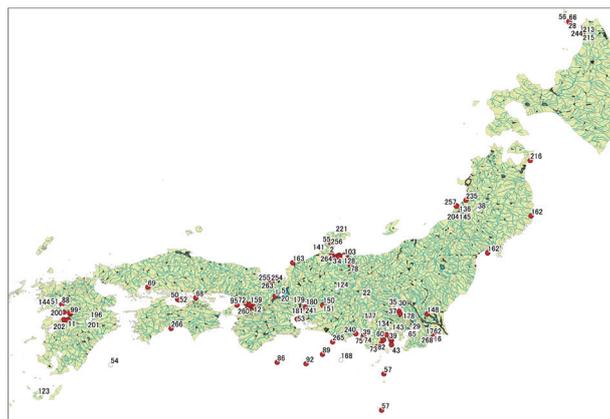


図4 既存文献で公表された海底湧出地下水の位置 (文献リストは http://www.groundwater.jp/colum_paper/maruis2019_01.pdf)

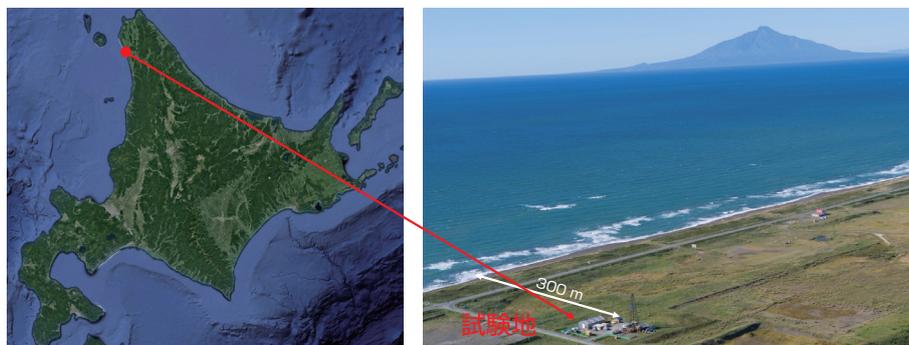


図5 幌延町沿岸域の試験地
試験地は利尻島を望むサロベツ湿原の沿岸域に位置している。
(地図は Google マップを使用。右下の写真は JAEA 提供による)

いる。この平野は我が国の典型的な遠浅海底地形を呈する堆積平野といえ、水期には陸域が広がり、現在の海域においても広範囲に地下水が流動していたことがうかがえる。また、この地下水流動域は水期の終了とともに上昇した海水で覆われており、当該地の海底地下水の賦存状態を把握することは、列島全体の沿岸域海底地下水の状態を理解する上で重要である。一般にフィールドを理解するためには、先ず地質構造に関する概念モデルを作る必要があり、この研究では、公開されている既存資料だけを使って3次元地質概念モデルを構築した。地質や地下水の概念がとらえられることで、適切なグリッドサイズや計算ステップの時間間隔が理解しやすくなるので、この概念モデルを数値化し、地下水流動シミュレーションを実施する。その際の初期条件として帯水層は塩水で満たし、天水による塩水の洗い流しと海水準変動を考慮とした初期的なシミュレーションを実施した。これを繰り返すことによりシミュレーション結果の最適条件を見出して、地下水の水利構造を提示することになる。

既存資料によれば、陸域の堆積層は海域に向かって傾斜しており、海岸部には海岸線に平行する断層かまたは大きな傾斜があると推定されていた。また、当該地には海上保安庁の海底地形データや物理探査データ、試掘データがあった。さらに産総研の海底地質データを考慮して、当該試験地のCMを構築した。これを図6に示す。この地質構造ならびに水利構造を考慮したCMは、その後につづく試験によって順次検証される。次節には、CMの高精度化のために実施した調査解析について概説する。なお、詳細については、越谷他^[21]、横田他^[22]、産総研^[23]、Ueda *et al.*^[24]、Ikawa *et al.*^[25]を参照されたい。

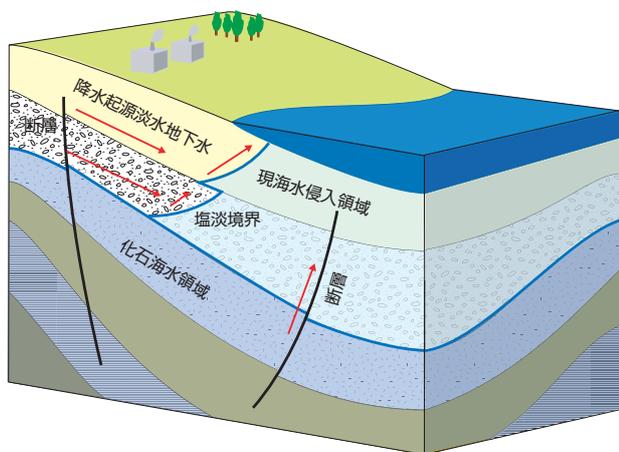


図6 幌延沿岸域の地下水流動概念モデル (CM)、対象となる深度は2000 m程度までを想定している。このモデルを基に、地質や地下水の水質・年代を確認するため、沿岸部での物理探査やボーリング掘削調査を計画した。

3.2 CM構築のための研究方法と結果

・物理探査による地質概要の調査

当該地では、地質の構造を理解するために2種類の物理探査試験を実施した。先ずは弾性波探査により地質の構造を解析し、その後電磁法探査によって塩水と淡水の存在域を確認した。その結果を図7に示す。弾性波探査では、地質の境界面がとらえられることから、地質の構造を見える化したモデルが構築できる。一方、電磁法探査とは地質の比抵抗値を明らかにすることから、この研究地においては、後述するボーリングデータと見比べることにより、塩水と淡水の賦存状態を確認することができた。

先に実施された弾性波探査によれば、当該地域の堆積層は、多少の上下があるものの、内陸から海域にわたりほぼ同様の層厚で水平に堆積しており、単調な構造を示していることが判明した。既存の文献記録^{[26][27]}とも一致した。また、事前の文献調査では、浅海域での断層の存在が懸念されていたが、これは確認されなかった。さらに、このような地質状況では、陸域にもたらされた降水が(特に)固結度の低い更別層内を流動して海域に流出していると考えられた。

続けて実施された電磁探査では、陸域から海域にかけての比抵抗値が測定され、海水と淡水の存在域を可視化することができた(図7)。これによれば、陸域にもたらされた降水は、内陸部の標高が比較的高い勇知層の露出部分では深部まで浸透することなく流出し、更別層の堆積域においてはじめて地下に浸透していることが判明した。さらに、降水浸透域は、ほぼ更別層に沿って存在し、海底下にまで舌状に伸張していることもわかった。この舌状に伸張した淡水領域の上には海水が浸み込んだとみられる塩水域が薄く存在していることも特徴的である。この舌状淡水域の下位には塩水域が存在していると推定された。

・ボーリング掘削による地質の確認と地下水調査

当該研究地では、海岸線から約300 mの地点(小学校跡地)で深度1200 mのボーリング掘削調査を実施している。オールコアボーリングと呼ばれる手法で、地表から末端部までのすべての地質試料を採取し、地質分析を実施した。また、このコア(地質試料)から地下水を採取し、さらには掘削後の井戸ケーシングに孔隙を作り、周囲の地下水を採取して分析している。図8、図9には採取した試料の分析結果を示す。

EC(電気伝導度)とは地下水中の溶存イオンの総量に依存する値であり、当該研究地においては、塩水と淡水を区別する指標として役立つ。ちなみに、海水のECは

45000 μ S/cm 程度であり、降水のそれは 10 μ S/cm 以下であることが多く、コントラストがはっきりしている。当該研究地における EC 値のプロファイル変化は概ね深度に依存しており、大きく 3 つの区間で特徴的な変化を示している。30 ~ 80 m 区間で減少し、80 ~ 300 m 区間で一定の値となり、300 m 以深で再び増加する。上層の区間で、間隙水の EC 値は 30 m 付近をピークとして減少する。この地域における同様の傾向は幌延地圏環境研究所^{[28][29]}においても報告されている。幌延地圏環境研究所^[29]によりサロベツ原野の沖積層中の深度 30 m 付近には、透水性の低い堆積物の存在が確認されている。したがって、30 m 付近における高い EC 値は堆積物中に取り残されている海成成分の溶出が原因と考えられる。次の区間 (80 m ~ 300 m) では、EC 値は相対的に最も小さな値を示し、値もほとんど変化しない。300 m 以深では EC 値は深度とともに増加傾向を示すが、その傾向は深度によって異なる。深度 500 m まで深度に伴う EC 値の増加は緩やかで、500 m 付近で EC 値の急激な低下が見られる。500 m 以深では EC 値は再び深度と共に増加し、その増加傾向はより顕著である。800 m 以深では、深度に伴う EC 値の増加はな

くなり、EC の低下が見られる深度もある。当該地域の地下水は、このような層構造を呈していることが確認できた。

注目すべきは、地下水中の水素同位体比である。一般に海洋で蒸発した水蒸気中の酸素や水素には質量数がわずかに重い、同位体の関係にある原子が混入している。気団が運ばれ、陸域に達するとこの重いものから先に降水として降下するため、内陸や山奥では通称“軽い雨”が観測される。地下水の流動を考えると、上流側から流動してくる“軽い雨”の地下水体の上位に沿岸部(その場)にもたらされた“重い雨”が重なって地下水体を作ることから、地下水は層状になって流れていると考えるのが一般的である。深度 100 m 程度までの流動域の地下水では、この同位体比が減少し軽くなっていく傾向が確認され、流動性の高い地下水が存在していると考えられるが、その下位では、現降水よりも軽いものの再度重い地下水が観測され、地下水の特性が異なることを示している。例えば Rozanski^[30] が指摘するように、温度効果によって低温期(水期)の降雨の同位体組成は軽くなることから、この流動域下部の地下水は水期にもたらされた降雨によって形成されている可能性がある。さらに、深度 800 m 以深の地下水は電気伝導度

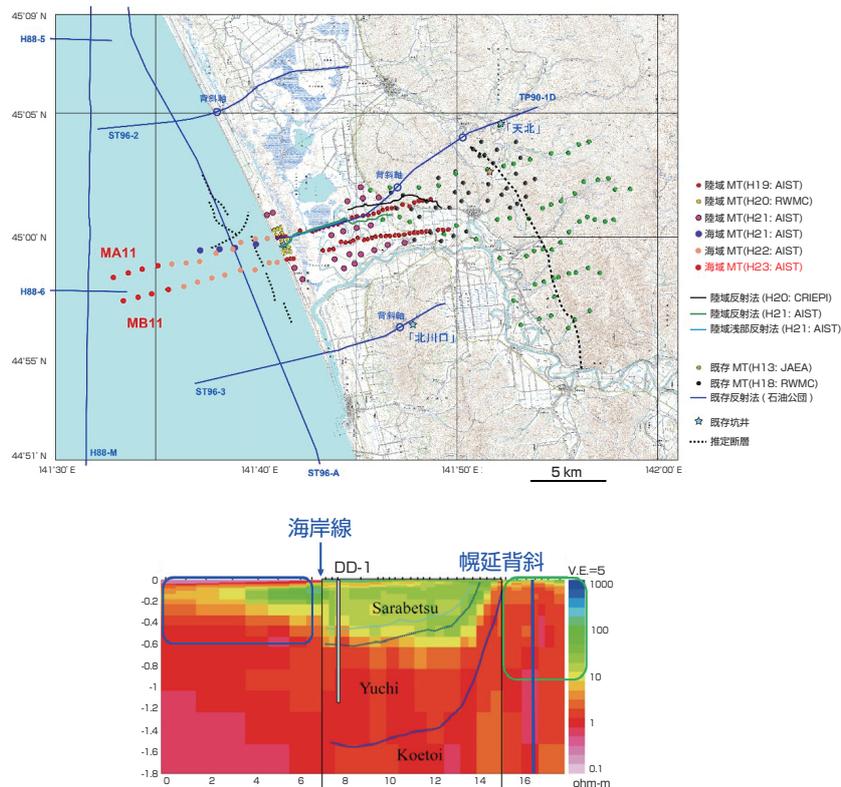


図7 上：幌延町沿岸域における物理探査側線の配置図。下：幌延町沿岸域における物理探査の結果判明した深度約 1.8 km までの地質の構造と地下水の賦存状態。中央部 DD-1 は調査ボーリングの位置 (深度 1200 m)、図中、赤色は塩水、黄緑色は淡水の存在域を示している。緑色で囲われた陸域の部分は降水が深部まで浸透せずに下流側に流動していることがわかる。また、青枠の部分では陸域から淡水地下水が海底下に伸張していることもわかった。さらにこの舌状の淡水地下水帯は水期に形成された地下水流動の名残であると考えられている。

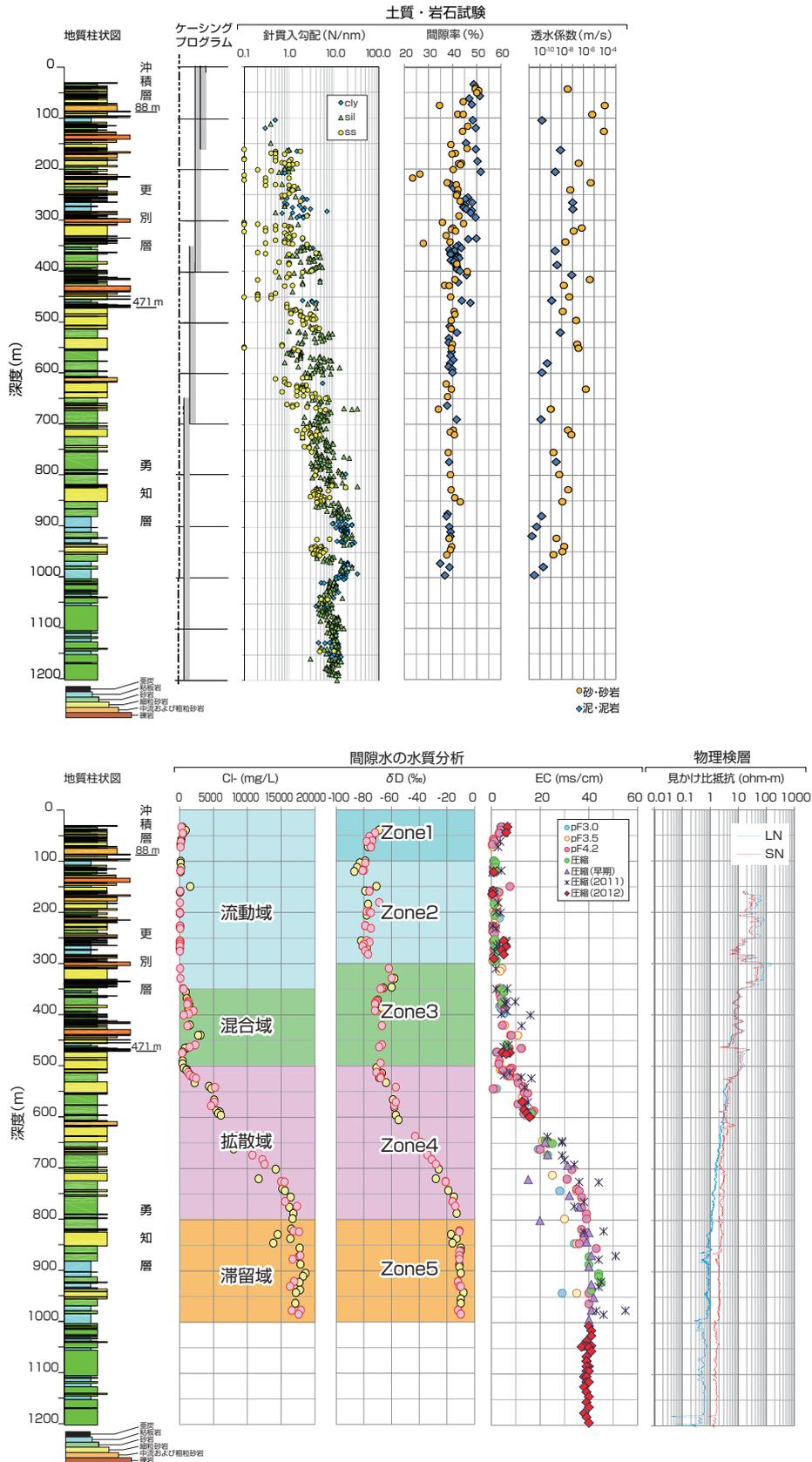


図8 1200 m 孔で採取した試料の分析結果。間隙率や透水係数はばらつくものの深度方向に低下する(上段)、ECや水素の同位体比は深度によって大きく変化している(下段)。この結果、地表付近の流動性地下水の下には、混合域、拡散域、停滞域と続いて賦存していることが確認できた。また、拡散域よりも下位においては有意にECが増加しており、浅層部の流動性淡水地下水と深部の滞留性地下水のコントラストが明らかとなった。

や塩化物イオン濃度とともに現海水のそれに匹敵していることも観測された。この化石塩水の部分については、海水をトラップしている可能性が高いと考える。これにより、当該地域の地下水は、上層より上位流動層(現降水によって構成された地下水)、下位流動層(主に氷期の降水が起源であると考えられる地下水)、混合層、拡散層、滞留層であって、しかも層状態を呈していると考えられる。

これまで、地下水の流動は地質条件によって支配され、地質境界が水理的境界とされてきた。しかしこの研究では、沖積層・更別層・勇知層と3つの地層内に同位体比傾向が異なる5つの区間が存在していることが確認できた。

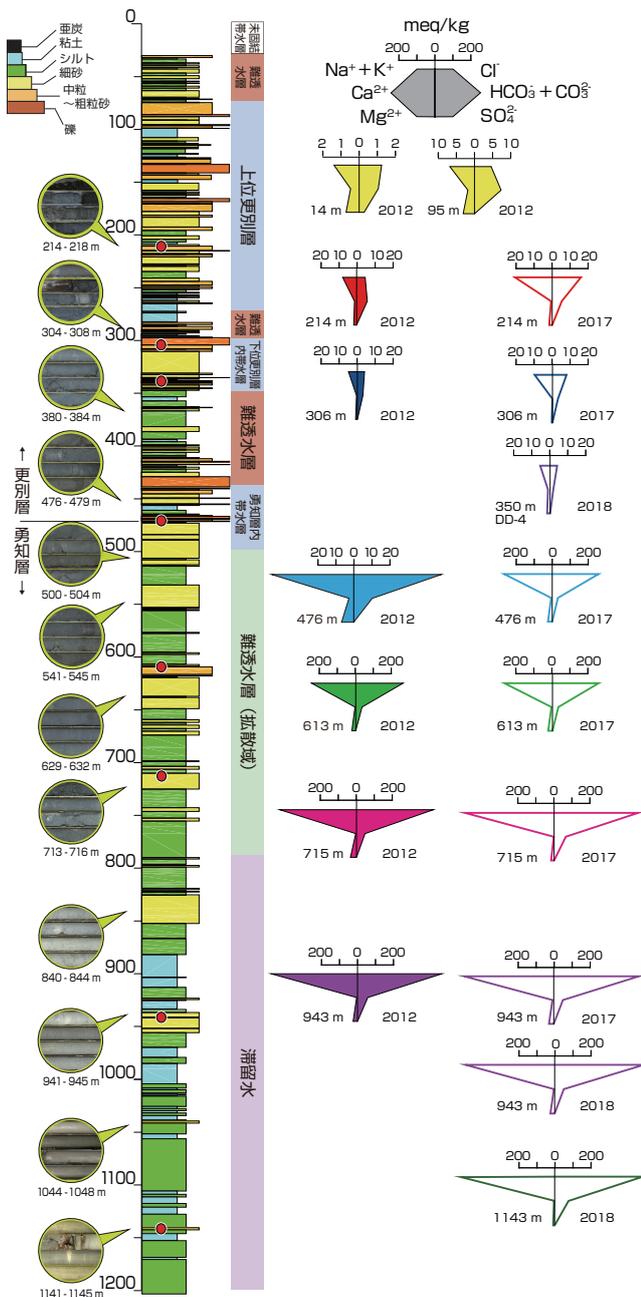


図9 深度ごとの地下水の特性 (シュティフダイヤグラム^{[17])})

浜里における地質境界の深度は、沖積層と更別層の境界が86 m、ならびに更別層と勇知層の境界が470 mである。

次に針貫入試験結果から物性値における境界面を推定したところ、地表~470 m区間では、シルト層で深度に伴う固結度の上昇が見られるものの砂層では確認されなかった。470~850 m区間では、砂層・シルト層ともに深度に伴う固結度の上昇が見られた。850 m以深では、泥層が卓越し、砂層の固結度には大きな変化は見られないがシルト層や泥層では高い固結度が維持された。したがって、固結度による境界面は深度300・470・850 mとなった。深度470 m境界面は更別層と勇知層の地質境界面と一致することから勇知層では更別層より砂層・シルト層ともに固くなるのがわかった。

これらの地質に対して、深度300 mまでは流動性の高い地下水であり、とりわけ下部は同位体比から見て、氷期の降水と考えられる。一方で、深度800 m以深では超長期的に安定した塩水が存在しており、地層水や化石水ともいえるものである。これら二つをエンドメンバーとして、この間には上位に混合域、下位に拡散域があることが確認できた。一方で、このような水質や同位体比の鉛直プロファイルは、新潟県沿岸部の大深度ボーリングの結果からは見られるものの、福島県や千葉県の大深度ボーリングからは得られていない^[31]。今後、このようなプロファイルの地域性や一般性を慎重に議論していく必要がある。

さらに、産総研他^[17]では、各地で採取した沿岸域深層地下水と幌延で採取した各深度の地下水体の年代測定も実施している。これによれば、浅層付近の地下水年代は³H(トリチウム)や¹⁴C(炭素14)で測定することができ、かつその起源を現在の降水か氷期の降水かに区別することができる。また、Cl(塩素)やI(ヨウ素)を使って、化石海水の判別も可能になってきており、数千万年に及ぶ年代測定もできる可能性が示されている。地下水年代の測定技術に関しては、現在各手法の測定範囲等を含めて議論が尽きない状態であり、今後の進展を待たなければならないが^[17]、いくつかの仮定をおくことにより、当該研究地の深層地下水年代が100万年を超えることが把握できた。

3.3 沿岸域深部地下水のCMの提示

幌延町沿岸域において、物理探査やボーリング掘削、地下水の水質・同位体分析等を実施した結果、初めに想定していたCM(図6)を覆す概念モデルが導き出された(図10)。当該地の地下水は、内陸にもたらされた後に、海底下まで流動し、海底下に淡水の張り出し(リッジ)を形成する。また、この地下水は地表付近から深部にかけて流動性の高いものから滞留性の高いものまで層をなして分布していることも観測された。さらに、流動域の地下水のうち、

深部に存在する地下水は氷期にもたらされた可能性が高いことも把握できた。氷期に海水準が低下すると地下水流動はより活発になり、処分事業等では、深部にまで流動が及ぶことが懸念されているが、今回の手法をとることで、氷期・間氷期を通して地下水流動の及ぶ範囲が変化することを明らかにした意義は大きい。

これまでの地下水研究においては、現状を把握することが主流であったが、地層処分研究のように数万年から10万年レベルでの環境変化を予測しながら安全性を評価する研究においては、固体地質と流体である地下水のそれぞれのモデルをカップリングさせなければならない。深部の利活用を検討する際には、地上からの調査で概念モデルを構築し、さらに斜坑掘削等による現地での詳細な調査を実施して地質環境モデルの精度を高め、工学設計の要素（または基礎）の一つとしていく必要がある。すなわち、地下水学をふまえた地質環境の精緻なモデル化は、気候変動や社会構造の変化等に代表される流動的な要素を真っ先に取り込めるものであり、その重要性は今後ますます明らかになると考える。

この研究において、CMを作成するために、公的な機関の発行した既存データ（産総研発行の地質図（陸域および海域）、国土地理院発行の地形図、海上保安庁発行の海域地形図、JOGMECデータ（資料請求が必要であり、データがない地域も存在する）が利用・検討されている。それは誰でも利用可能なデータを使って、同じ土俵で議論できることを前提にしているためである。これらにより地域のCMが作成できれば、詳細な調査として、弾性波探査による地質構造の把握、電磁探査による比抵抗値の推定がお

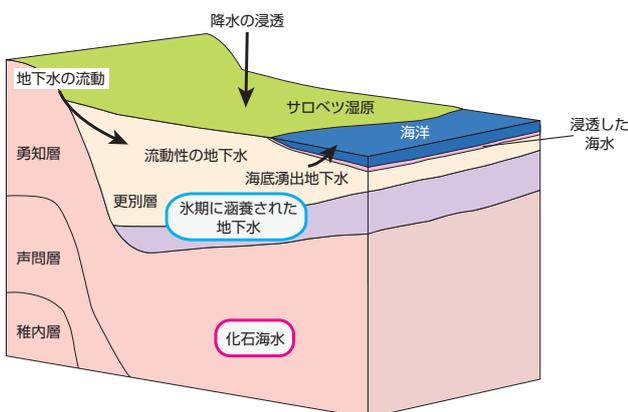


図10 幌延沿岸域における地下水流動と賦存状態のモデル。これは、Edmunds^[32]のモデルと共通する部分が多く、氷期から現在までの地下水が層をなして存在しており、図7の概念モデルとは大きく異なる事となった。現在の地層処分事業計画においては、概要調査の地域が選定されれば、幌延沿岸研究のように、先ず地上からの調査でCMを構築し、その後続く斜坑掘削に伴う調査で、SDMへ高度化する予定になっている。

こなわれ、さらに要所と考えられる地点でのボーリング調査等によりCMを高度化してSDMとすることができる。とりわけ、ボーリング調査では地質試料の分析と地下水試料の分析から、工学設計に受け渡すデータとして、時間軸を考慮すべきデータとそうでないデータの区分が必要であった。この手法は対象とする調査により時間軸を設定することができるため、今後の地下水研究の道しるべとなる。必要とする要素は場所や研究の目的によって異なるが、調査フローに大きな違いはない。

4 沿岸域深層地下水研究の社会的役割

大規模な工事や対策において、地域住民を含めたステークホルダーのコンセンサスを得るためには、

- ①概念モデル (Conceptual Model, CM)の策定
- ②地質環境モデル (Site Descriptive Model, SDM)の構築
- ③工学設計 (Detail Design)
- ④性能評価 (Performance Evaluation)
- ⑤安全評価 (Safety Evaluation)

というプロセスが必要であり、最終的な安全評価のわかりやすい成果物として市民はリスクマップを見ることができ。CMから高精度なSDMを構築することは、社会的な大規模事業の基礎をなすと考えている。著者（丸井）は、これまでに福島第一原発の汚染水処理問題や地層処分研究に関する国の技術ワーキンググループ討議（日本列島の科学的特性マップ）、中央新幹線敷設工事等において、CMからSDMへと発展させる議論を重ねてきた。実際に、福島第一原発の対策工事においては、原発建設時の資料からCMを作り、その後400本以上の観測井を掘削して敷地内の詳細な地下水流動モデルを構築している。これらの成果を踏まえて、凍土壁の性能評価や安全評価がおこなわれた。また、中央新幹線のルート選定や地域住民への安全性説明や工程説明においては、当初の概念的なCMに詳細な調査データ（ボーリングによる地質データや地下水の水質・年代測定データ等）を加味して不確実性を低減する取り組みが必要条件の一つとなっている。

現在の産総研の地下水研究グループは、地質調査所時代に工業用水課と呼ばれ、工業用水の開発調査に携わってきた歴史がある。日本経済が高度に成長した時期には工業用水を使いすぎて、地盤沈下や塩水化等の地下水障害が発生し、社会問題となったことから、地下水に関わる環境問題にも積極的に取り組むようになり、人口や経済が集中する沿岸部の地下水問題についても研究を重ねてきている。近年では前述のような環境問題への取り組みが大半を占めている。

今後、我が国の人口は減少する傾向にあるが、沿岸域

での社会活動は山間部に比べて衰えづらいつと考える。また、地球環境保護のための新たな取り組みも始まりつつあることから、沿岸域の環境を保護しつつ利活用することを考えなければならない時期に来ている。また、地下水に係る既存の法律も深度 300 から 400 m までであったが、当面 2000 m 程度までを意識して法整備をする必要があると考える。したがって、基礎研究においても、今後は地下深部を対象としなければならず、対象範囲が大きくなれば、取り扱う時間スケールも大きくならざるを得ない。また一方、日本列島は地質が複雑であり、同時に地下水の賦存状態も複雑であると容易に予想できる。近年の地下水研究は他分野の研究の基礎としてデータベースをそろえることやデータが充実した領域の解析研究が中心であったが、前述を考慮した未知の領域に挑む総合的な地下水研究が求められる。

著者（丸井）は、90 年代より利尻島における海底湧出地下水研究、九十九里海岸における海底湧出地下水と塩淡境界面の形状・位置に関する研究、茨城県東海村における塩淡境界面の形状と地下水流動に係る研究等を通して、沿岸部の地下水研究を実施してきた。近年では、北海道・幌延における深部地下水まで含めた沿岸部の地下水環境研究や駿河湾における富士山からの大規模地下水流動と海底湧出地下水に関する研究を行っている。これら沿岸部での研究は、活発に流動する淡水地下水と長期的に停滞している深部の塩化地下水の対比や境界の特性を追求したものである。地層処分研究においては、長年にわたる沿岸部の地下水研究を通じて、沿岸部の地球科学的特性を高精度に把握することで、天然バリアの機能評価の面から事業に貢献している。他の研究においても、地質環境モデル (SDM) の作成から検証を実施し、工学技術への情報提供を行うシステムを構築中であり、これまでの個別要素の研究課題では成しえなかった効率化や適正化を重視してより実践的な橋渡し研究が実施できるようにと考えている。

また、地盤沈下対策や土砂災害対策、未利用資源（海底湧出地下水）の利活用等にもこの研究で述べた手法は貢献できると思われる。時代に即して教育システムも変化しており、市民のコンセンサスを得なければ公的な事業はもちろん民間レベルの対策工等も進められなくなっている。コストパフォーマンスにつながる性能評価をしたうえでの安全評価を実施する重要性を皆が認識していると言えよう。その意味でも地下水学をふまえた地質環境の精緻なモデル化は気候変動や社会構造の変化等に代表される流動的な要素を真っ先に取り込めるものであり、その重要性は今後ますます明らかになると考える。

5 おわりに

一般に地下水は山から海へ向かって流れているが、人口が最も集中する沿岸域の地下水は、豊富であり重要であるにもかかわらず、その淡水の賦存状態は塩水との平衡の上に成り立っており、さらに海水準変動の履歴を反映しているため、脆弱でかつ科学的な知見に基づいた理解も進んでいない。今後の適正かつ効率的な利活用を進めるためには、その根本を理解する必要がある。まずは地下水の流動を把握し、その上で海水準変動等の外的要因を加味してモデリングすることが必要とされている。この研究はその手法の高度化を提示したものであり、現在、我が国の国民が直面している課題を解決するために必要不可欠な手法であると考えられる。今後は各地でのデータをさらに集積するとともに、そのデータが示す意味について理解の促進を高める情報発信が必要である。その意味でも産総研が保有し蓄積しているデータや研究手法のノウハウを事業者や社会に還元することで、公益に資すると考える。

一般市民が通常目にするのは、リスクマップであり、途中の過程や科学的根拠は常に求められるものの、実質的に説明がわかり辛くなることが多いため、メディアによっては省かれてしまうことが多い。しかし、我々基礎研究を行う者としてはこの状況を追認するのではなく、根気よく、丁寧に説明する必要がある。その意味で、基礎となる地質環境のモデリング、そしてこの研究で言う、CM の高度化は、今後欠くことができない現象理解のための基礎的なステップ（研究手法）となる。そのためにも、モデル内の地質等固定されたものや地下水のように流動しているもの、特に短期的に見れば変化のない地下水の賦存状態や長期的に見ると海水準変動などの影響を受けて変化する場合等、時間軸や対象を的確にふまえてモデルを構築したり計算ステップを適切に設定する等の必要がある。外的要因を明確に分離することやモデル内要素の連携を確実にすることが重要である。

謝辞

この論文では、資源エネルギー庁受託研究「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発」に係る一連の事業成果を活用しています、記して感謝を表します。

参考文献

- [1] 丸井敦尚: 水循環における深層地下水の役割, *日本水文科学会誌*, 42 (2), 61–68 (2012).
- [2] 丸井敦尚: 水循環基本計画ならびに地下水保全のためのデータ整備状況, *地下水学会誌*, 58 (3), 289–299 (2016).
- [3] H. Bouwer: *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, 480 (1978).
- [4] 山本荘毅: *地下水学用語辞典*, 古今書院, 40–91 (1986).
- [5] A. Marui: Keynote speech, Groundwater Assessment and Control in the CCOP Resion, 2009 Groundwater project on CCOP and GSJ., Bangkok, Thailand, (2009).
- [6] 高村弘毅, 丸井敦尚: 地下鹹水の定義と事例, *日本海水学会誌*, 60 (2), 86–90 (2006).
- [7] 丸井敦尚, 林武司: 塩淡水界面の三次元的形状把握に関する研究, *資源と素材*, 117 (10), 816–821 (2001).
- [8] 梶根勇: *自然地理学講座 3水文学*, 大明堂, 282 (1980).
- [9] WHO: Hardness in Drinking-water Background document for development of WHO Guideline for Drinking-water Quality, 1 (2011).
- [10] 温泉法 (1948): https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=323AC0000000125, 閲覧日2020-01-20.
- [11] 越谷賢, 丸井敦尚: 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル (第一版), *地質調査総合センター研究資料集*, 564 (2012).
- [12] 越谷賢, 丸井敦尚, 伊藤成輝, 吉澤拓也: 日本列島における3次元水文地質モデルの構築と地下水賦存量の試算, *日本地下水学会誌*, 53 (4), 357–37 (2011).
- [13] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊1, II-170 (1999).
- [14] N. J. Lusczynski and W. V. Swarzenski: Salt-water encroachment in southern Nassau and southeastern Queens Counties, Long Island, N. Y., USGS Water Supply Pap., 1613 (F), 76, pl. 2&3 (1966).
- [15] 丸井敦尚, 今村杉夫, 林武司: 浅海部の海底湧出地下水と塩淡水境界形状の関係に基づく地下水流動研究, *月刊地球*, 23 (12), 867–873 (2001).
- [16] A. Marui: Groundwater conditions along seawater/freshwater interface on a volcanic island and a depositional area in Japan, *Geological Quarterly*, 47 (4), 381–388 (2003).
- [17] 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 沿岸部処分システム高度化開発成果報告書, 288 (2019).
- [18] 伊藤成輝, 丸井敦尚: 日本列島における海底地下水湧出量の分布, *日本水文科学会誌*, 40 (1), 1–18 (2010).
- [19] 山本裕彦: オホーツク海および天北日本海側海域の地質構造と堆積盆について, *石油技術協会誌*, 44 (5), 260–267 (1979).
- [20] 福沢仁之, 保柳康一, 秋山雅彦: 北海道中央部の新第三系の層序と古環境, *地質学論集*, 37, 1–10 (1992).
- [21] 越谷賢, 丸井敦尚, 五十嵐八枝子, 秋葉文雄, 吉澤明, 岡孝雄, 萩原育夫: 北海道幌延町の沿岸域における大深度ボーリングの岩相・微化石・テフラ, *地質調査研究報告*, 63 (9/10), 233–267 (2012).
- [22] 横田俊之, 稲崎富士, 溝端茂治, 内田敏弘, 上田匠: 幌延沿岸陸域における反射法地震探査, *物理探査*, 65 (3), 161–172 (2012).
- [23] 産業技術総合研究所: 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発成果報告書, 産業技術総合研究所, 1–275 (2013).
- [24] T. Ueda, Y. Mitsuhata, T. Uchida, A. Marui and K. Ohsawa: A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, *Journal of Applied Geophysics*, 100, 23–31 (2014).
- [25] R. Ikawa, I. Machida, M. Koshigai, S. Nishizaki and A. Marui: Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, *Hydrogeology Journal*, 22, 987–1002 (2014).
- [26] 石油公団: 平成2年度国内石油・天然ガス基礎調査 陸上基礎物理探査「天北地域」調査報告書 (1991).
- [27] 産業技術総合研究所: サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査, 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書, no.H17-1, 25 (2006).
- [28] 幌延地圏環境研究所: 平成18年度 地圏環境研究事業研究成果報告書, 1–166 (2006).
- [29] 幌延地圏環境研究所: 平成18年度 地圏環境研究事業研究成果報告書, 1–209 (2007).
- [30] K. Rozanski: Deuterium and oxygen-18 in European groundwaters—links to atmospheric circulation in the past, *Chemical Geology*, 52, 349–363 (1985).
- [31] 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 沿岸部処分システム高度化開発成果報告書, 1–393 (2018).
- [32] W. M. Edmunds: Palaeowaters in European coastal aquifers—the goals and main conclusions of the PALAEAUX project, in W. M. Edmunds, C. J. Milne (eds): *Palaeowaters in coastal Europe: evolution of groundwater since the late Pleistocene*, Geological Society, London, 189, 1–16 (2001).

執筆者略歴

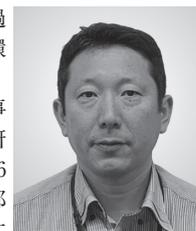
丸井 敦尚 (まるい あつなお)

1987年に筑波大学大学院修士と同時に理学博士の学位取得、その後立正大学地理学科助手を経て1989年(平成元年)に地質調査所に入所。21世紀になり産総研に移行し、2019年(平成31年)に定年を迎える。この間、カリフォルニア大学サンタバーバラ校や独キール大学、韓国ソウル大学、建国大学、国内の大学等で教鞭をとり、ボリビア国市民栄誉勲章等を受ける。平成の時代とともに沿岸域地下水研究に従事してきた。



町田 功 (まちだ いさお)

1999年、千葉大学自然科学研究科博士過程修了。博士(理学)。2000年、千葉大学環境リモートセンシング研究センター研究員、2003年、千葉大学工学部(科学技術振興事業団研究員)、2004年、神奈川県温泉地学研究所(日本学術振興会研究員)を経て、2006年、産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門入所。2011–2012年ドイツベルリン工科大学客員研究員、2018年より地圏資源環境研究部門地下水研究グループ長。2003年日本地下水学会研究奨励賞、2008年 International Association of Hydrologists, Best lecture award。2015、2017年、法政大学非常勤講師。2016年、日本水文科学会企画・広報委員長。この論文では第3章の一部を担当。



井川 怜欧 (いかわ れお)

2003年秋田大学工学部地球資源学専攻卒業。2008年熊本大学自然科学研究科環境共生科学専攻修了。博士(理学)。同年、特別研究員として産業技術総合研究所に入所し、2010年より常勤職員として採用。入所より約10年間にわたり、地層処分研究に従事。水文科学会、日本地下水学会、国際水文地質



学会 (IAH) 会員。この論文では第 3 章の一部を担当。

査読者との議論

議論1 全体について

コメント (渡部 芳夫: 産業技術総合研究所)

この論文が取り扱っている対象や現象は社会的に重要なものであり、内外で実施されてきた多様な研究成果を取り纏める意義も大きいものです。これまでの研究成果をとりまとめ、新たな技術的研究成果を加えたこの論文は、社会へのインパクトを踏まえた課題の全体象と達成度などを提示しており、シンセシオロジー誌として掲載に値するものと判断されます。

コメント (景山 晃: 産業技術総合研究所)

この論文では基礎研究としての沿岸域での深層地下水の研究の意義を具体的事例に基づいて専門外の読者にも分かりやすく論じています。これらの研究成果や研究方法は地層処分など社会的課題への解決策の策定、社会インフラ整備の際に考慮すべき事項、環境影響に配慮した未利用資源の活用策など重要な判断を行う際に大きく貢献できるものと考えられます。

議論2 この研究が貢献する地下利用事業について

コメント (渡部 芳夫)

シンセシオロジー誌としては、課題や研究目的と社会との関係が合理的に記述される必要があります。社会的課題解決の要素は具体的には「海底下の未利用な地下水資源の把握」(分布と量)と、「海底下の地層利用に必須の地下水性状の把握」(流動と組成)の二つになります。これらを合わせて表現する概念はないのでしょうか。

回答 (丸井 敦尚)

ご指摘の二つの要素について分かりやすい表現・構成にしました。具体的には、社会の要請事項や科学的な課題の整理と実際の調査・研究の進展について整理し直して記述しました。

コメント (景山 晃)

もし可能であれば、沿岸域深層地下水研究という基礎研究が果たす社会的役割・貢献に関して、もう少し具体的なケースを示すことはできませんか。原稿では福島第一原発での汚染水処理、地層処分研究、中央新幹線敷設工事を挙げていますが、それぞれ2~3行で内容の概要を記述することはできませんか。

回答 (丸井 敦尚)

コメントをありがとうございます。四章に追記しました。蛇足かもしれませんが、当該研究グループでは、一連の研究として、後輩山地の標高が低く堆積岩地域であるため、地下水流動が遅い北海道のサロベツ平野沿岸域と地下水流動が活発な駿河湾沿岸域での対照的な研究を実施しており、沿岸部における地下水流動や水理学的構造の一般性を見出すことを心がけました。

議論3 モデル化の普遍性について

コメント (渡部 芳夫)

第一章で水の大循環における沿岸域の水収支を説明した上で、特定の地域で地下水流動のモデル化に進む際の手順を示しています。これが、大規模事業等に特有なものではなく、地下水資源の把握にとっては普遍的な手段である事をもう少し説明されるべきではないでしょうか。

回答 (丸井 敦尚)

水循環の理解が地下水資源の把握にとって重要であることを第一章下から2番目のパラグラフの最後に付け加えました。また、モデル化の用語につきましては、その後の議論に出てくる関連した重要なものだけに絞りました。

コメント (景山 晃)

第概念モデル、地域詳細モデル、工学設計、性能評価、安全評価は一章の後半の段落と四章とに出てきます。一章の部分で四章の

表現を用いて定義を示し、四章では例えば「一章に述べた概念モデルから安全評価に至るプロセスが必要であり、最終的な安全評価の・・・」のような記述とする方が読者には親切です。

回答 (丸井 敦尚)

ご指摘の通り、第一章で詳しく書きすぎると読者の思考を止めてしまうので、四章に詳細を追記しました。

コメント (渡部 芳夫)

概念モデル (CM)、地域詳細モデル (SDM) の二つは、それぞれ検証すべき重要なモデルではないでしょうか。これらの付図の説明が、本文の記述に対応した精密さで、両者に必須とも言うべき「天水の流動経路」「古海水の存否」「塩淡水境界」が明瞭にされていると理解が進みます。なお、概念モデルを実証した結果の地域詳細モデルについて、地域詳細モデルの評価と概念モデルの妥当性についての論述は必要ないでしょうか。

回答 (丸井 敦尚)

貴重なコメントをありがとうございます。CM につきましては、その後の調査の礎となるもので、覆ること、高精度化されることを前提としていますので、検証の要はありません。一方 SDM については、その後の工学設計を確定させるものですから、検証の必要があります。地層処分研究において、現段階ではこの検証を斜坑掘削時に行う予定にしていますので、現段階で検証することができません。これらの点に留意して検証の方法などを記述しなおし、図 10 も加筆しました。

議論4 水の大循環について

コメント (景山 晃)

第二章での水の大循環の記述は、この論文を理解するための導入部と考えられ、図 1 にある水の大循環は言い換えれば水の物質収支であり、降水量 = 蒸散量 + 河川等の表流水 + 地下への浸透水かと思えます。また、地下水賦存量 = 地下への浸透水量から地下水揚水量と沿岸域海底での湧水量を差し引いたものと理解します。

物質収支の観点から沿岸域海底湧出量 = 海底湧出地下水を精度よく算出することの重要性をもう少し丁寧に論述しては如何でしょうか。

回答 (丸井 敦尚)

まず、降水量の 1/6 (すなわち約 1000 億トン) が地下に浸透しますが、このうち 200 億トンが使われますので、約 800 億トンが毎年地下水に涵養されます。列島全体の地下水量は約 13 兆トンですから、163 年分の降水涵養量が溜まっていると言うことになります。すなわち、163 年でいっぱいになり、その後あふれ出るとてもいいかもしれません。この論説ではこの計算の手順を含めて、より詳細に書き直しました。