

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2021.9.NO.139

目次

センターの活動状況	①
沿岸部地下水研究の成果と科学的特性マップに対応したデータベースの整理	③

センターの活動状況

I 成果等普及活動の実施状況

2021 年度 第 1 回原環センター講演会の開催

2021 年度第 1 回原環センター講演会を以下のとおり開催しました。

開催日時：2021 年 6 月 30 日（水）14：00 ～ 16：00

開催形式：オンライン開催

演 題：沿岸部地下水研究の成果と科学的特性マップに対応したデータベースの整理

講 演 者：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

招聘研究員（元総括研究主幹） 丸井 敦尚 氏

産業技術総合研究所の丸井招聘研究員をお迎えし、2021 年度第 1 回原環センター講演会をオンラインで開催しました。講演では、産業技術総合研究所がこれまで実施してきた沿岸部の地下水に関わる研究成果、沿岸部地下水環境の特性や沿岸部の地質環境モデルや地下水質、流動解析の成果、さらにはこれまでに公開された文献をまとめてデータベース化したものを紹介していただきました。特に、国や公的な団体がこれまでに公開した全国大のデータだけで、沿岸部の地質環境をどこまでモデル化できるかなど、データの品質や精度の限界についてもお話しいただきました。



2021 年度 第 2 回原環センターセミナーの開催

放射性廃棄物処分の安全評価から処分の全体像を把握する第一歩として、安全評価の基礎知識を持ち、それを深めたいと考えている技術者・研究者を対象とした、第2回原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅱ」を以下のとおり開催しました。講義後の総合討論では、講義への質疑応答を通じて、理解を深めていただきました。

開催日時：2021 年 7 月 21 日（水）10：00～18：00

開催形式：オンライン開催

講 師：公益財団法人原子力安全研究協会

技術顧問 朽山 修 氏

プログラム：

講義 4：放射性廃棄物処分の安全評価

講義 5：放射性廃棄物処分のセーフティケース

講義 6：NUMO 包括的技術報告書に見るセーフティケースの記述

総合討論



Ⅱ 調査研究活動の実施状況

地上試験施設の模擬坑道における埋め戻し施工試験の実施

経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業「令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業（JPJ007597）（地層処分施設閉鎖技術確証試験）」の一環として、原環センターと協力協定を締結している西松建設株式会社の技術研究所厚木機械センター内に設置した模擬坑道（高さ5m、幅5m、長さ12mの鉄筋コンクリート製）を活用した埋め戻し施工試験を実施しています。地上施設での試験のメリットとしては、制御された環境条件の下で信頼性の高いデータを効率的に取得可能なことが挙げられます。埋め戻し材には低透水性が要求されるため、実際の坑道の埋め戻し施工後にサンプリングなどにより乾燥密度を測定する施工管理では施工品質を損ねる可能性があります。そのため、工法規定と非破壊の検査による施工管理により埋め戻し材の低透水性を確保することを目的として、埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築に向けた取り組みを進めています。



実寸大模擬坑道の外観



坑道の埋め戻し施工試験の実施状況

沿岸部地下水研究の成果と科学的特性マップに 対応したデータベースの整理

国立研究開発法人産業技術総合研究所
丸井 敦尚

1. はじめに

科学的特性マップが2017年に公開され、これに対応した地球科学情報（データベース）の整理が関心を持つ皆様への説明に必要となってきました。産総研では、各地の沿岸部で地層処分に関わる要素開発研究を実施してきていますので、この沿岸部地下水研究の成果をご報告いたします。国の地層処分事業におきましては、現在文献調査が始まったところです。ここで重要なのは、全国を等しい目で見ること、透明性を確保し信頼性を得ることです。さらに、地下の见えない情報ですので、デジタル化して誰もが見える化（モデル化）できるようにする必要があります。我々の有している情報はとかく数値情報（エクセル形式）だったりしますが、近年のデジタルハンターたちが地下情報を正しく拡散してくれるようにするためには画像情報が必須です。

2014年に発布された水循環基本法では、水の循環を蒸発・降下（雨など）・流下（河川流出など）・浸透（地下水など）と4つのプロセスに定義していますが、地下水の情報だけが明らかに画像情報にすることが遅れています。例えばアメダスは、全国に1000以上の観測点がありますが、このうち850地点でハイスpekの観測がなされています。だいたい15～20km間隔で日本列島を観測しています。さらに、レーダーアメダスともなれば、1kmメッシュで解析雨量などの情報をマップとして提供しています。河川データについても、特に一級河川では国交省が情報管理して河川の分布や流量がすでにマップ化されています。

これに比べて地下水データはなかなか全国規模でマップ化されていません。国交省も産総研も地下水に関するマップを公表しておりますけれども、平野単位などのポイントポイントでしか発表されておきませんので、全国を統一基準で見て、日本列島全体をマップ化することができていない状況です。これを鑑みて、本年（2021年）6月には水循環基本法が改正されたときに、地下水情報をわかりやすく発信することが地方自治体や事業者に求められるようになりました。さらに9月からはデジタル庁ができて個人のデータの紐づけ等々がまず先にされると言われておりますが、何といたっても日本全体をデジタル化するということが大きな目標ですので、地下水データ、特に地下水のデータは積極的に今後デジタル化

を進めなければならない分野です。

また、地層処分に関わる我々（原環センター、電中研、産総研）の研究「沿岸部処分システム評価確証技術開発」では、分野間連携と言い、地質系の者が得た情報を工学系の人たちに正確に伝える手法を考えています。あるいは、工学分野から地質分野へのリクエストも考察しています。まだまだ課題は山積みですが、この連携手法についてもお伝えします。

2. 沿岸部の特性と課題

NUMOによれば、地層処分は人工バリアと天然バリアによってその安全性が担保されます。この時に考慮しなければならない要素はTHMCと呼ばれ、温度・地下水の流れ・岩盤の性質・地下水の水質であるとHPに記載されています¹⁾。このTHMCについては、現段階で相対的な方向性は見えていますが、はっきりとした基準作りは今後の課題かと考えます。その意味でも、地質環境調査と工学設計の連携には、今後の期待が高まります。

そこで、沿岸部の特性を考えると、大きく以下の3点を考慮しなければなりません。一つ目は、沿岸部の地下水には塩淡水境界があるということです。陸域から海底に向かって、処分場を作るために掘削を進めていくと、最初は淡水ですが、どこかの時点で地下水が塩水へと変化します。この変わり目が塩淡水境界です²⁾。その濃度変化は、地下水の流速などにより差異が生まれます。また、海水の塩分濃度は、通常3%程度ですが、現海水の塩分濃度ををはるかに超える塩水（鹹水^{3,4)}）が賦存している所もあります。この塩水領域の境目や濃度、濃度分布を的確にとらえる調査をしなければなりません。

次に問題となるのは、沿岸部の淡水地下水は必ず海洋へ湧出しているということです⁵⁾。沿岸部の地下に処分場を建設した場合、周辺地下水を汚染し、この汚染が淡水領域にまで達すると、汚染が海洋におよぶことを意味しています。この淡水地下水等が海洋に流出する現象を海底湧出地下水(SGD)と呼び、陸上で見られる河川や谷の地形のように、海底谷の地形などともに調査されています。氷期と間氷期を繰り返す日本列島周辺の海水準は、だいたい100mから200mの間で（最近ですと130m前後）上下し

ております。氷期には陸域が広がりますので、川も伸びていくことによって、かつての陸域の谷が現在の海の中にも繋がっているのが想像できるかと思えます。これが海底湧水地下水の流出場になっていて、ここから流出してくる淡水地下水の汚染を止めなければなりません。

最後の1つ、視点は全く変わりますが、地層処分場を作る時の掘削工事は必ず下り勾配で実施されるということです。例えば山岳トンネル（山の中に鉄道や高速道路のトンネルを作る時）は必ずと言っていいほど上り勾配で工事されます。それは、掘削ズリや突発湧水の排出が簡単で、作業員の安全性が担保されるからです。しかし、地層処分場を作る時の掘削は必ず下り勾配です。最悪の場合、断層などにぶつかって突発湧水が起こった時にその水が一気に出てきてしまうと作業員や機器の安全性が確保できずに危険な状況になります。

沿岸部の特性を把握するためには、広域的な物理探査、そしてボーリング調査、海底調査（海底湧水と海底微地形）を実施することが一般です。その結果を使って、モデル化や解析を実施します。しかし、

このモデル化をするのは、地質や地下水の専門家であって、次のステップに携わる皆さんに伝わらないという懸念もあります。地質の専門家であれば◎◎層と言えばその特徴が伝わりますが、他分野の方には（一般の方にも）伝わりません。これが分野間連携の抱える課題となります。

図-1 に示す JAEA (1999) ⁶⁾ によれば、最近（約 35 万年間）の海水準変動は約 12 万年周期で上下していることが報告されています。これを考慮すれば、海岸平野の沖積層の地盤標高が平均して数メートルであることも納得できます。さらに、ガイベン-ヘルツベルクの法則（図-2）という古典的な方法で計算すると（淡水地下水の領域（深度）は、地下水標高の 40 倍程度の深さまで存在する）、現在の海岸平野の地盤標高が数メートルであることが多いことから、地下水面標高を 5m とすれば、約 200m 深までの淡水地下水が流動していることになります。また、過去には 100m 以上海水準が低下していた時期がありましたので、標準的な海岸平野では、深度 300m 程度までは淡水地下水が流れていたことになります。このことから、最終処分法で対象深度を 300m 以

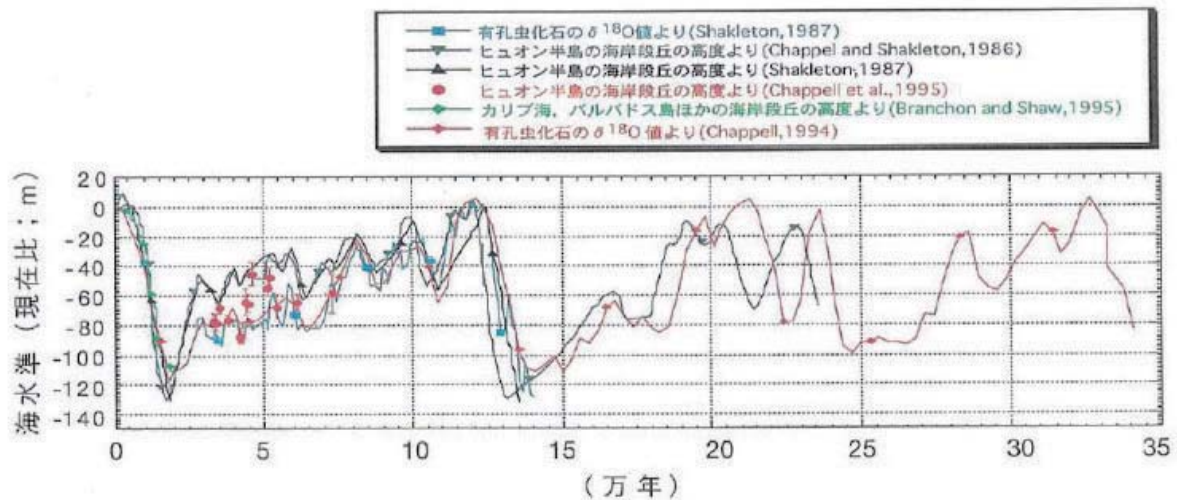
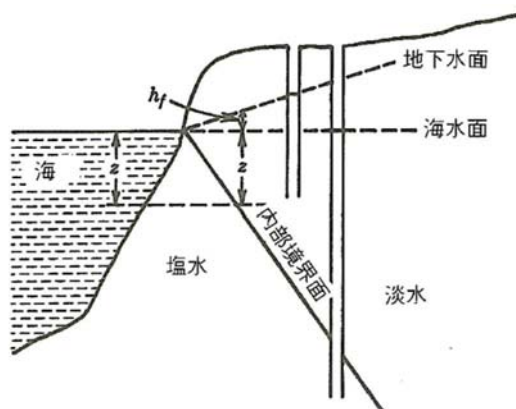


図-1 近年の海水準変動（JAEA, 1999 ⁶⁾より）



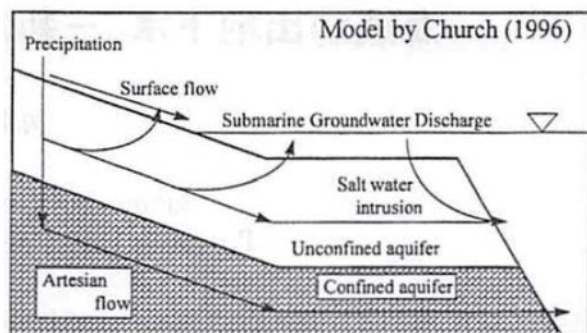
海水の比重を 1.025 とすれば、淡水深度 z は地下水面標高 h_f との間で、 $1.025 z = 1.000 (z + h_f)$ となり、地下水面標高の 40 倍の深さまで淡水が存在することになる。

図-2 ガイベン-ヘルツベルグの法則

深と決めたことにも納得できます。

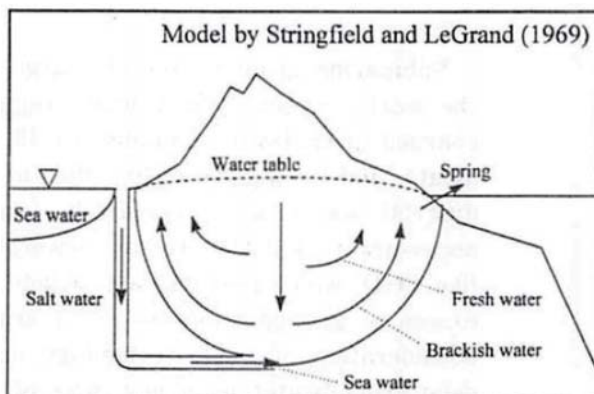
図-3 は、特に浅部の塩淡水境界の3パターンを示したものです⁵⁾。古典的な1960年代の地下水の教科書からの引用ですが、1番上が流動型、これは地下水が流動することによって地下の塩水と境界面を作るというものです。産総研では、幌延の研究においてこれを観測しています。2つ目は比重型と言ひ、島しょ部でよく見られます。陸域にもたらされた降水

流動型



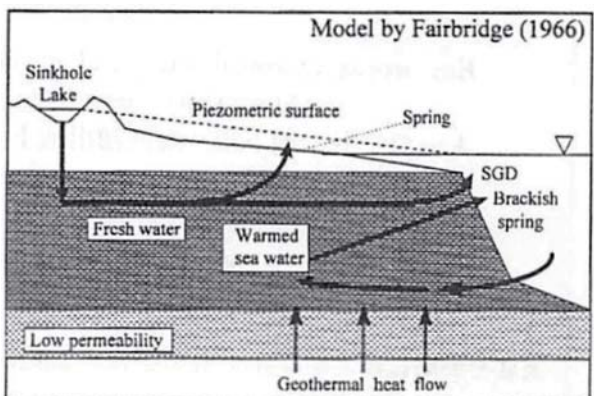
1a

比重型



1b

対流型



1c

図-3 塩淡水境界の3つのパターン⁵⁾

が地下水となって、重力勾配に沿って深部に達し、塩水と混ざることによって汽水を作って上昇流を発生させます。一番下が対流型と言ひ、地熱地帯などでよく見られます。海洋から侵入してきた塩化地下水が暖められて対流することによって淡水地下水もつられて流れてしまうということです。産総研では、原因は異なりますが、対流型と同じ流れのパターンを駿河湾の研究で観測いたしました。これは、実際に処分場を作る場合、深部の塩化地下水も流動してしまうというところに問題があります。

これらのパターンを踏まえて、調査の方針が決められます。以下、一般的なステップを示します。

- 物理探査：地域の地質（構造）や地下水の賦存状態を把握するため、広域の物理探査を実施する。はじめに弾性波探査等で地質や地質構造を把握し、その後電磁探査などで地下水の状態（塩化地下水か淡水地下水かの判別）を調査する。
- ボーリング調査：井戸掘削により地質や地下水の試料を採取・確認する。地質試料からは、地質年代に加えて、圧縮強度や種々の物性データなどを取得する。さらに地下水試料を用いた水質・同位体組成調査から、地下水の滞留時間（地下水流動速度）などを調査する。
- 海底湧出地下水調査：海底に湧き出す淡水地下水を採取・分析し、地下水の経路把握や滞留時間の把握を試みる。また、同時に海底の微地形も調査し、海水準が下がった時の谷の位置（かつての河川や海底湧出地下水の位置）を明確にし、海水準低下時の地下水流動を推定する。

3. 沿岸部調査の事例

3-1 物理探査

地質環境調査において最初に行うのが物理探査です。これには二種類の物理探査があり、まずは弾性波探査でその地の地質（構造）を把握します。次に、電磁探査あるいは電気探査によって塩水、淡水の領域を調べます。さらに、その要所（キーになる場所）にボーリングを行います。ボーリングによって得られる地質の試料、地下水の試料から地質環境の詳細を調べます。最後に海底湧水調査によって海底の地形をサイドスキャンソナーなどを使ってしっかり細かく調べることによって現在の湧き出し地点、過去の湧き出し地点などを調べるということができるようになってきました。その後、現在湧いている淡水地下水を採取することによって、その地下水がどこを通過して、どのくらいの時間をかけてきたのかを調べるのが重要になってきています。

産総研では、幌延の沿岸部におきまして、物理探査実験を実施しています⁷⁾。下の図-4がその観測機器の配置図で、図-5は独自に開発した海底電磁探査

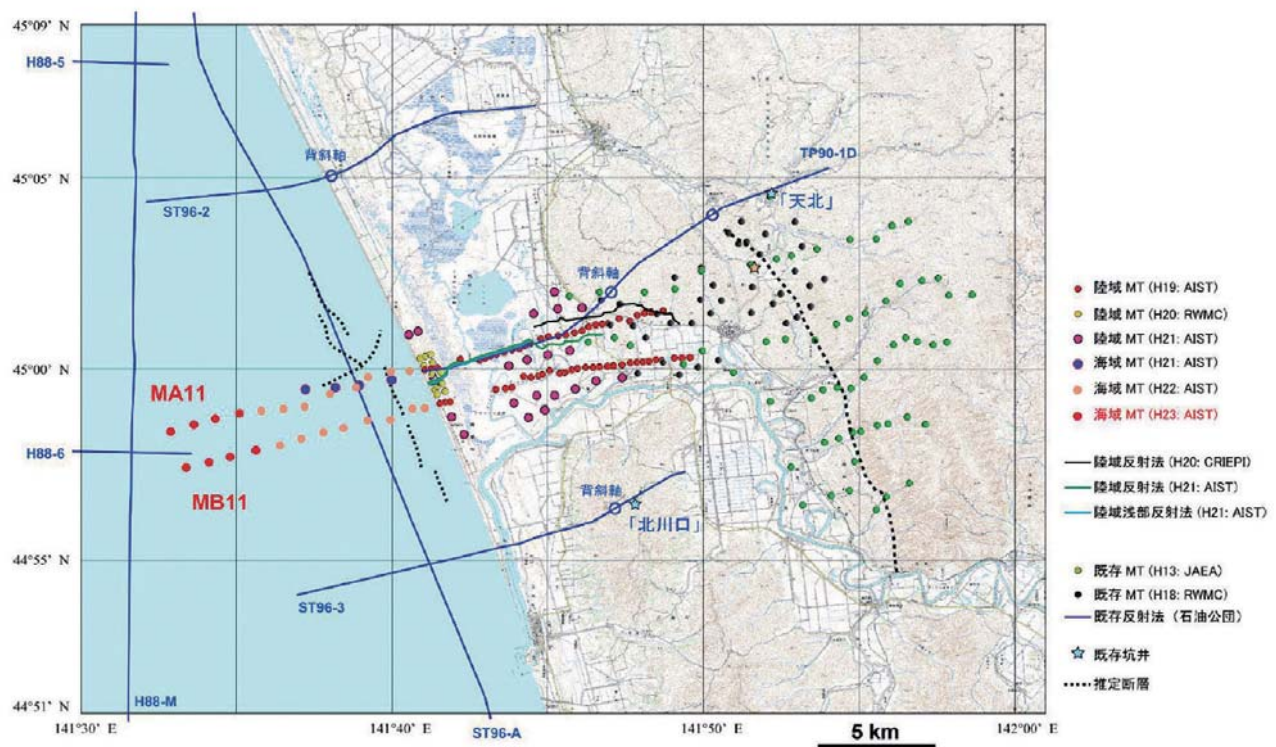


図-4 幌延の物理探査試験実施図⁷⁾



図-5 電磁探査用カイト型海底センサー
(Ueda et al. 2014⁸⁾ より)

用のセンサーの写真です。なるべく波浪の影響を受けないように設計されています。この結果得られた幌延地区の地質構造ならびに地下水の特性を図-6に示します。画面中央部に海岸線があり、右側が陸域です。沖積層の下位には更別層、勇知層、声問層が横たわっています。図中赤く表示された部分が塩水であり、黄緑色の部分が主に淡水であります。淡水が陸域（山側）のドライビングフォースを受けて海底下に舌状に伸びていることや現在の海面上昇を受けて海底化の淡水地下水の上を塩水が覆っていることがわかりました。

図-6では、ほぼ中央の海岸線の右側が陸域、左側が海域になっています。図中の赤いところが塩分濃度の高いところ、黄色や黄緑のところが淡水、あるいは淡水に近いところとお考えください。幌延では、陸域にもたらされた降水が一旦深くまで潜りますが、それでも海に向かって流出していき、だいたい7kmく

らい沖まで淡水が伸びて地下水が海へ流出していたのではないかと分かりました。また、深度500mくらいまで淡水が潜り込んでいるということも判明しました。さらに海底下に舌状に伸びた淡水領域を覆うように塩水部分が観測されていますが、これは海水準の上昇に伴い海水が淡水をパックしているという状況も観測されています。この幌延モデルについて、THMCに関連する項目（塩濃度、地下水の流速や年代）を解析しました。これを図-7に掲げます。

地下水の年代を計算したところ、淡水部分と現海水の部分については非常に若い水があるということが分かってきました。この場合、50kmくらいまで

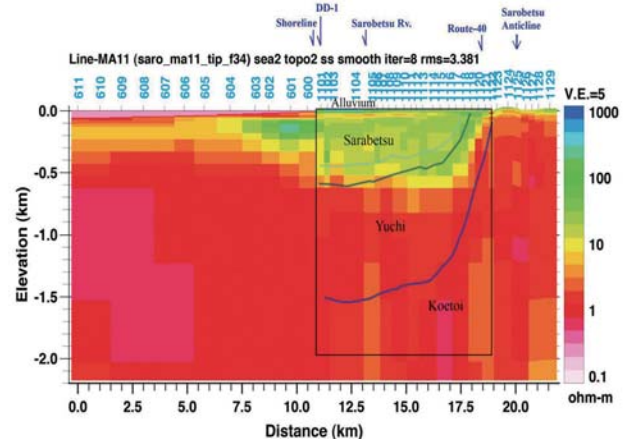


図-6 沿岸部における電磁探査結果（断面）の事例⁷⁾

影響が出ていますが、だいたい20km くらい沖までは活発に流れているということも分かって、我々の調査結果と整合している現象をシミュレートすることができたと考えております。このようにステップ

を踏んだモデルを作ることから、THMCに関連するシミュレーションを行うことが現状ではできるようになってきました。これによれば、深度500m くらいまで淡水が入っていて、氷期には20km くらいまで海底下に淡水が伸びていたということがお分かり頂けるかと思います。

透水係数や間隙率はP波速度やS波速度から解釈できるのかという問題があります。大きな目でみれば解釈できるのですが、やはりリアルなデータを取る時にはボーリング調査が重要になります。このボーリング調査をしっかりすることによって、全体的なイメージを高精度に確立することができるかと思います。

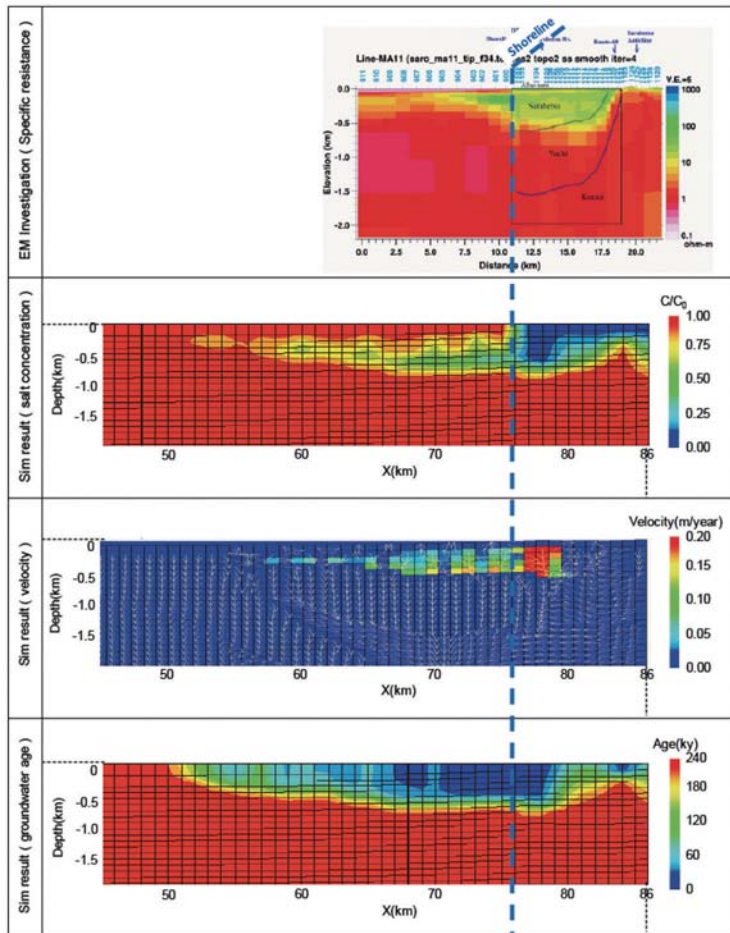


図-7 THMCに関連する地下水解析の結果 (Kohara et al. 2012)

比抵抗探査

塩化物濃度

地下水速度

地下水年代

3-2 ボーリング調査

産総研が実施した幌延におけるボーリング調査の写真を図-8に示します。遠くに利尻島が見え、海岸線から300mの地点に調査現場が設置されました。右側にあるように5孔を設けて調査をしました。

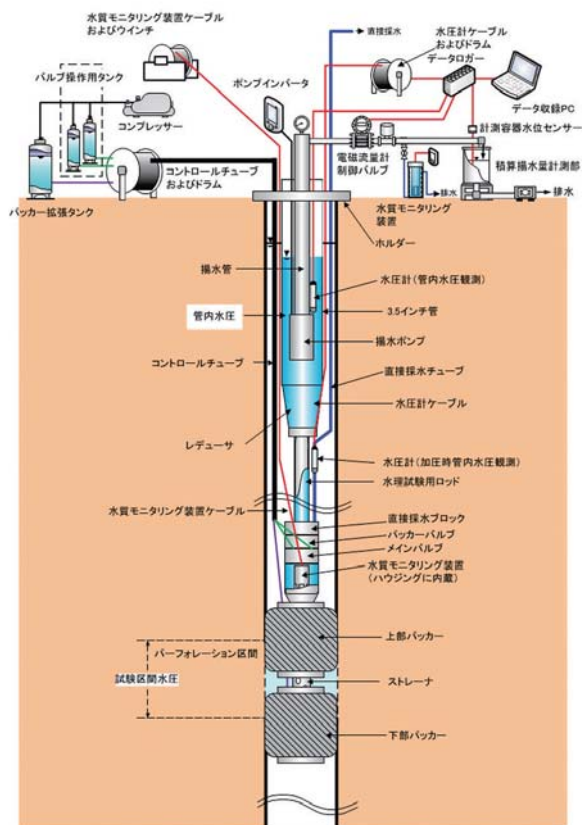
掘削をいたしまして、パッカーをかけた調査深度（原位置）での地下水の水質、水温、



- (H19) D型ハウスと採水用浅井戸の設置
- (H21) 掘削：DD-1孔 (157~600m)
掘削：DD-2孔 (30~100m)
- (H22) 掘削：DD-1孔 (600~1000m)
掘削：DD-3孔 (100~160m)
水理試験：DD-2孔
- (H24) 掘削：DD-1孔 (1000~1204m)
水理試験：DD-1とDD-2孔
採水：DD-1~DD-3孔
- (H28) 採水：DD-1 (943m)
- (H29) 水理試験：DD-2孔
- (H30) 採水：DD-1 (1143m)
掘削と採水：DD-4 (360m)
- (H31) 水理試験：DD-2孔

H19~24
沿岸部塩淡水境界・断層評価技術高度化開発
H27~30
沿岸部処分システム高度化開発
H31~
沿岸部処分システム評価確認技術開発

図-8 幌延試験地における掘削の様子



現地で測定する項目

- ・水温
- ・pH
- ・電気伝導度(EC): 溶存イオンの総量
- ・溶存酸素(DO)
- ・酸化還元電位(ORP)
- ・アルカリ度

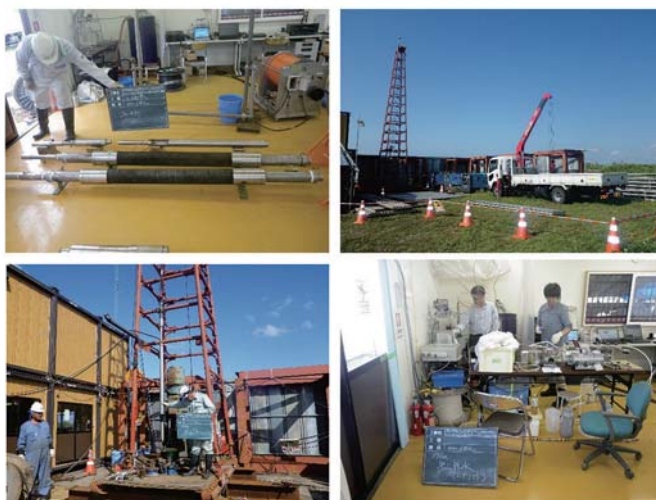


図-9 幌延試験地におけるボーリング調査の様子、坑内水を地表に上げると水質が異なるため、原位置試験を実施している。

pHなどを測ることができます。また持ち帰った試料により、実験室で年代測定をすることになります。また同様に、右側の写真にあるように、オールコアでサンプルを取っておりますので、そのコアを使った一軸圧縮などの物性試験を行っております。また今年からなのですが、二重管を使った圧密試験も実施しています。幌延と同様のボーリング調査は駿河湾でも行われており、物理探査で作った地質モデルの検証や地下水質・同位体組成の観測などに利用されています。

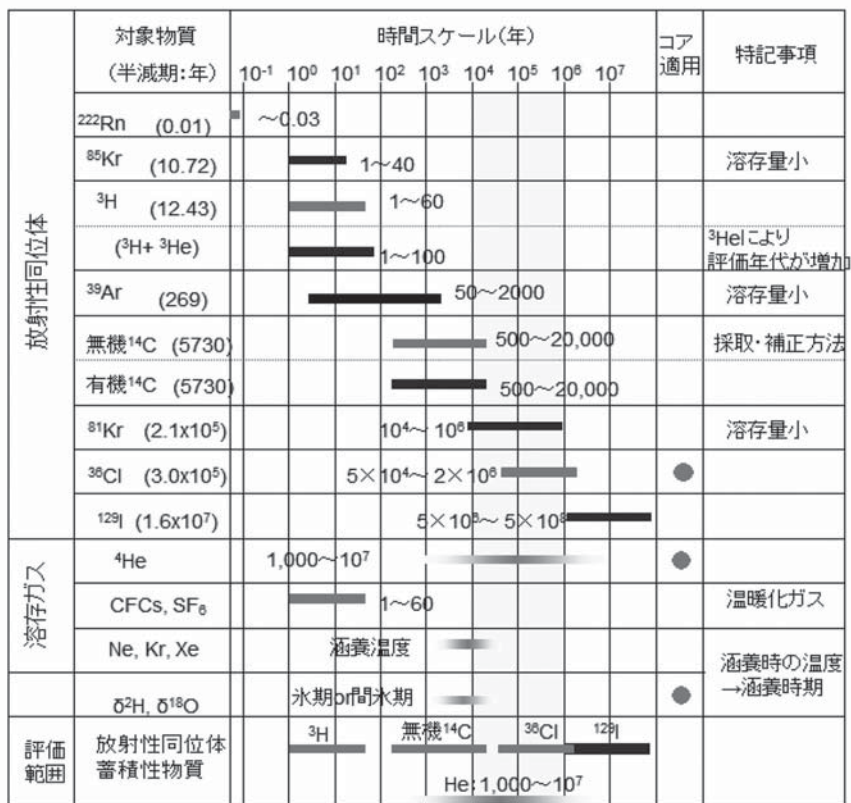
地下水には色々な種類がございます。表-1¹⁰⁾には、いろいろな地下水と書いてございますけれども、地質ですとか、その深さ、あるいは塩分との混ざり方によって違います。まず「化石水」と言われるものがあります。一般の方の印象では「非常に古い水」と捉える方が多いと思いますが、専門的には、現在の地下水流動に関係していない（関与していない）地下水のことを化石水と呼びます。通常の地下水は流れていますけれども、流れている地下水とは関係ないのが化石水です。次は「かん水」。これは起源を言えば非常に古いのですが、中国にかん湖という湖があり、かん湖の水で蕎麦を練るとしょっぱい塩水なので、蕎麦がうまくなるということから、かん水という名前をつけるようになったと言われております、要は地下にある塩水のことでございます。特に、かん

水が現状の海水の塩分濃度を超えているというところが多くて、これを、かん水と呼んでおります。古くは山本荘毅先生のデータから言うと、現海水の10倍以上、高村弘毅先生のデータから言うと、3倍～5倍以上と言われております^{3,4)}。あとは「温泉水」です。これは温泉法¹¹⁾によって決まっておりますけれども、先ほど言いましたように、化石水、かん水、温泉水というのは、深部地下水とか被圧地下水とは全く別の定義がございますので、ご記憶に留めて頂けるとありがたいと思います。このような地下水の種類を表-1にまとめました。

次にお示しする図-10は、放射性物質等を使って地下水の年代測定をする方法です¹¹⁾。我々の分野では、10万年から100万年くらいまでの長期的な滞留を判定する必要があります。よく使われるのがトリチウム、それから炭素14、もっと古い方が知りたいよという時にはClを使うことがよくあります。測定の方法等もそれなりに安定しているという状況でして、この辺りはご記憶に留めて頂ければと思います。最近、若い水の場合にはトリチウムが使えなくなってきましたので（降水中のトリチウム濃度が低下しすぎた）、フロンガスの使ったCFC_sやCF6も活用されるようになりました。

表-1 いろいろな地下水¹⁰⁾

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	G.Matthess (1986)
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)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)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 (2009b)
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 (2009b)
化石水	地下水流動に関与していない地下水	高村・丸井(2006)
かん水	海水の塩分濃度をを超える塩化した地下水。かつては海水の5倍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)
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	丸井ほか(2001)
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に残ったもの	高村・丸井(2006)
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)
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	榎根(1980)、 日本大百科事典を簡略化
硬水	WHOでは、以下の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。 硬度(mg/L)≒Ca濃度(mg/L)×2.5+Mg濃度(mg/L)×4.1	WHO HP
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)

図-10 地下水年代の測定方法(長谷川ほか、2013¹¹⁾より)

3-3 海域探査

我々が3点セットとした、もう1つの海底湧出地下水調査について紹介します。海底湧水調査も、図-11に示すように、漁船を使って海底の塩分濃度とラドン測定をします。ラドンは地下水の中に多く

含まれておりますので、海水の塩分濃度が低下している場合に、河川からの淡水の流れ込みか、海底に湧出する地下水が原因であるかを判断することができます。図-12は、サイドスキャンソナーを使って海底地形を調べたものですが、海底に谷があることが分かりました。先ほどのラドン濃度の濃いところに、この図に示す赤丸のところに、海底湧水が湧き出している可能性があるので、ROVを使って詳細調査をしました¹²⁾。

図-13は海底湧出地下水の画像です。実際の動画では、海底に湧き出す地下水が観測できたという状況です。実際にこの調査のポイントで、塩分濃度プロファイルを観測すると右の図に示すように200mくらいから、どんどんどんどん塩分濃度が下がっていき、325mくらいで急激に下がり、海底に湧き出す

淡水地下水を見つけることができました。この淡水地下水を採水・分析して、どんな地下水の性質だったかということから、湧き出すまでの年代や、その経路を調べることによって、地下水流動モデルを高度化することができました。



図-11 海底湧出地下水調査の様子（沿岸部処分システム確証技術開発、2020¹²⁾ より）

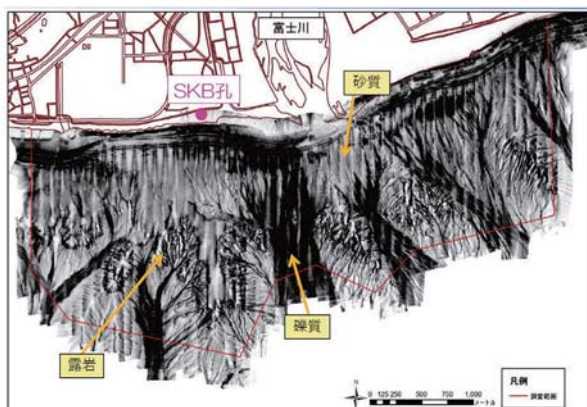


図-12 駿河湾北部において推定された海底湧出地下水の存在域（出典は同上）

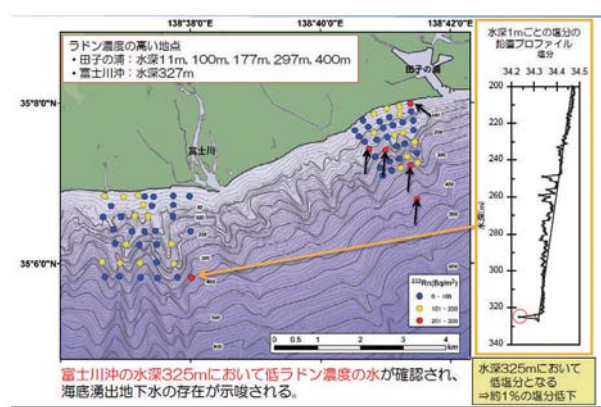


図-14 海底湧出地下水の観測地点での塩分濃度プロファイル（産総研、2020¹²⁾）



図-13 岩盤の割れ目から湧出する地下水
（画像提供：静岡県環境衛生科学研究所）

4. データベースの構築によるモデル化と解析

実際の処分システム研究においては、まず先に概念モデル（Conceptual Model）を作るという作業があります。Conceptual Modelにおいては、物理探査、ボーリング調査、海底湧水調査を前提に、どのくらいの細かさでモデルを表現したら適切なものか、あるいはどれくらいの時間間隔だったら適切な計算がで

きるかという概念をしっかりと持つことが重要です。Conceptual Modelによって、水はいつどこから入ってきて、どこを通過してどこへ流れていくのか。そして、それぞれのパートパートでどのくらいのスピードや滞留時間をもっているとか、水質がどんなふうになるか、あるいは淡水の下位にある塩水は動いているのか動いていないのか。動いていないとすればどのくらいの温度なのかという概念を構築します。後に、個々の要素を判定して、あるいは3段階の調査結果やデータなどを使ったりして、詳細モデル（Descriptive Model）を作ります。最終的に過去の文献と相違がないかどうかを調べて、実際の工学設計に対してデータを渡し、処分場の設計や安全評価に資すると考えています。

我々の研究では、先ず国の機関が発行している全国規模のデータを使って、概念モデルを作るところに着目しました。資源エネルギー庁は2017年に科学的特性マップを発表し、沿岸部の重要性が認識されるようになりました。産総研では、これまでに

60 地点強の沿岸部地質環境モデルを作っております（図-15）。これは産総研が地質調査所時代から発行している地質図、海底の地質図、海底の地形図、国土地理院が出している陸域の地形図と地勢図、ならびに水路部（現海上保安庁）が公開している海底の地形図と地質図、さらに公的な機関が公表しているデータを使ってモデリングしています。さらに、JOGMEC のデータ等で検証しています。ここではスペースの都合上、北海道だけ例示しますが、現在は全国規模で揃っています。

当該研究課題の一環として、全国の沿岸部のデータベースを作り始めました。我々が実際に調査したのとデータベースとでどのくらい乖離があるかというところも含めて、全国を統一の視点で見渡すというデータベースのまとめなのですが、我々が作った全国規模のデータベースと実際の調査とどれだけ違っているかを今日ご紹介したいと思っております。まず左側の図面なのですが、これは今北海道のところだけピックアップしていますが、今回全国で50のポイント、この何年間分をトータルしますと、だいたい70ポイントくらいのモデルを作っており、これは産総研が地質調査所時代から発行している地質図と特殊地質図、それから海上保安庁が出している海底の地質図、海底の地形図、国土地理院が出している陸域の地形図と地勢図、等を利用しました。公的な機関が公表しているデータ、それからこれを作るに合わせまして JOGMEC が行っているデータで検証させて頂いておりますが、そういったような

産総研、国土地理院、水路部（現海上保安庁）、と JOGMEC のデータを参考にいたしましてザックリとしたモデルを作るとどうなるよというのが左側でございます。今はスペースがないので北海道だけ出していますけれども、これが全国規模で構築されているということです。特に幌延に注目すると、公開データだけ作った幌延モデルというのが右側にありますが、これまでに我々が調査して作り上げたモデルと非常に良く合致しているのがわかります。さらにこのモデルを使って解析した地下水の塩分濃度、全水頭、流線がほぼ正しく表現されていることも報告されています（産総研、2020¹²⁾）、全国の公的機関が作ったデータをザックリ組み合わせただけでも、（深度方向の誤差がありますが）ほぼ同じような傾向のモデルが作れました。これをしっかり調査するのが本来の概要調査の目的ではないかと思いますが、公的機関が作ったデータベースで組み合わせることによって3次元的な Conceptual Model を作る意義は十分にあると考えています。

このような概念モデルを作れば、ボーリング調査の適切な位置なども予察でき、概要調査に大きく貢献できると考えています。地下水中の塩分濃度や水頭、ひいては地下水流速や地下水年代、地下水温も概観できますので、それぞれの地質環境の概要をつかむことができます。手前味噌のようですが、各公的機関は信頼性の担保されたデータを公開しています。幌延であれば陸側から入り込んできた地下水が深くまで浸透し、また海の方へ向かって浅く出て

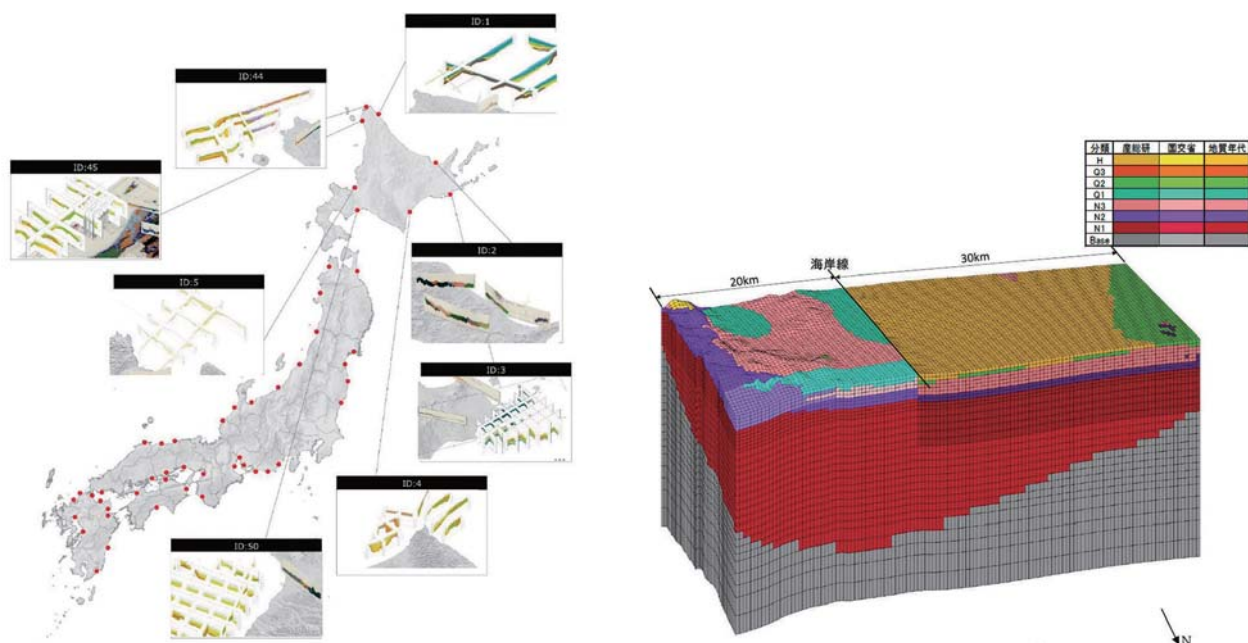


図-15 公的機関のデータだけを用いて作成した概念モデル、北海道の事例
赤点は全国の調査ポイント幌延の概念モデルは調査結果と合致している
沿岸部処分システム確証技術開発（2020）¹²⁾ より

いく。例えばこの角度を塩水の角度がどのくらいになっているかを調べたいのだったら、陸域から斜めのボーリングをするか、海上ボーリングをするかといったようなところで、陸域から掘った坑道が海底下に行って、処分場を作るといったようなイメージがある方は、そういった時にどこのポイントの塩分濃度が分かれば工学設計に役立つかといったようなことも推察できるでしょうし、そこでの温度や圧力の分布を見ることによって将来的にどんな設計ができるとかどんな安全評価ができる、あるいはどんなデータが足りないなどの議論ができればよいと考えています。

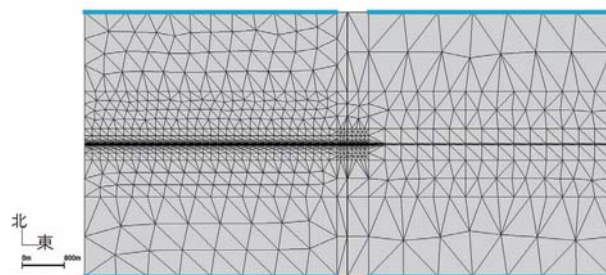
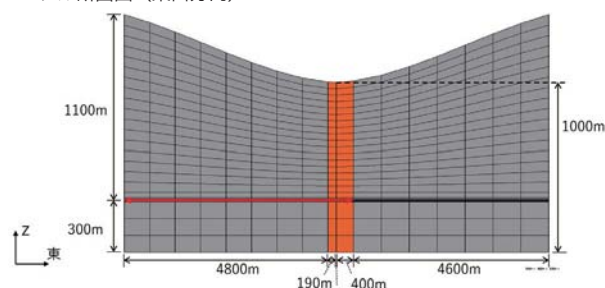
5. 突発湧水モデルの試作（おわりに代えて）

地層処分事業の特徴の一つとして、処分場の建設は必ず下り勾配で実施されることを述べました。一般の土木工事とは異なり、下り勾配の工事をする際には、その安全性を担保するために、突発湧水について事前に検討する必要があります。

図-16 は、概念的に計算するために、陸域の土被りが大きなトンネルを想定したものです。このモデルは、両岸に土被りが大きい谷地形にトンネルを掘削し、中央部の水が集中する窪地に断層破碎帯を想定しています。図面の左側から掘削を開始し、断層破碎帯にトンネルが当たった時の突発湧水について考慮しました。表-2 には各地層について想定した物性値を挙げました。

透水係数は、堅岩部は $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{m/sec}$ 、横方向だけ、断層破碎帯に水を流す方向だけ1オーダー高くしました。さらに、断層破碎帯の部分については 10^{-5}m/sec とし、粘土層に関してはxyzの方向の差がないと考えています。また、有効間隙率は堅岩部のところについては5%、断層破碎帯のそれは40%、断層粘土については60%と想定しました。これで計算すると、図-17 のような湧出水が予想されました。オレンジ色の曲線が断層破碎帯から流出した水です。

モデル断面図（東西方向）



水位一定条件設定位置図

上図はモデルの断面を示す。全長 10km のモデルを作り、両サイドに堅岩部、中央にオレンジ色の断層破碎帯、さらにその中央付近に幅 10m の粘土層を想定し、図面左からトンネル掘削を開始し、中央の断層破碎帯にあたったことを想定し、トンネル湧出水量をシミュレートした。下図は上から見た平面図である。

図-16 突発湧水の再現モデル

表-2 設定した地質の物理定数

地質	透水係数 (m/s)			有効間隙率
	x 方向	y 方向	z 方向	
堅岩部	1.00E-07	1.00E-08	1.00E-08	0.05
粉碎帯	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-05	0.40
断層粘土	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	0.60
地表堆積物	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	0.40

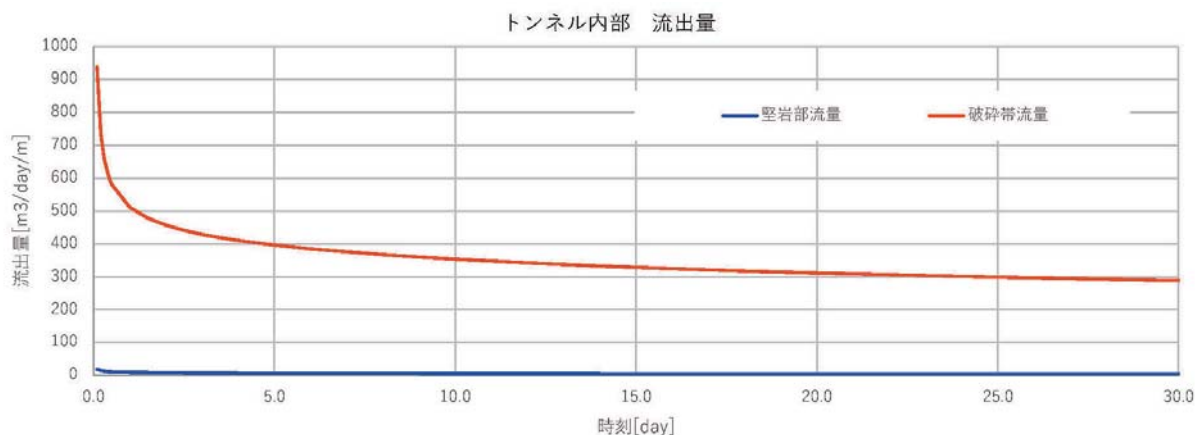


図-17 トンネル内湧出地下水

一方、ほぼ0のところにある青線が堅岩部から湧出してくる地下水です。堅岩部からの湧出は極めて小さいことがわかります。さらに、断層破碎帯からは始め 950t/day/m の割合で出水します。

赤線は断層破碎帯からの湧出水、青線は堅岩部からの湧出水量を示しています。単位長さあたり、断層破碎帯からは当初大量の湧水が想定されましたが、2日程度で湧出水の量は減少し、その後の出水量が

落ち着いていることがわかります。また、堅岩部からの出水量は全期間を通じてほぼ落ち着いていることもわかりました。

図-18はモデル内の圧力水頭の分布を示しています。トンネル湧水は2日もあればほぼ収まり、30日後くらいになると一定となり、透水係数に従って水が流れたと考えられます。ちなみに、青函トンネルの工事では、青森県側から北海道側にまずは下り勾

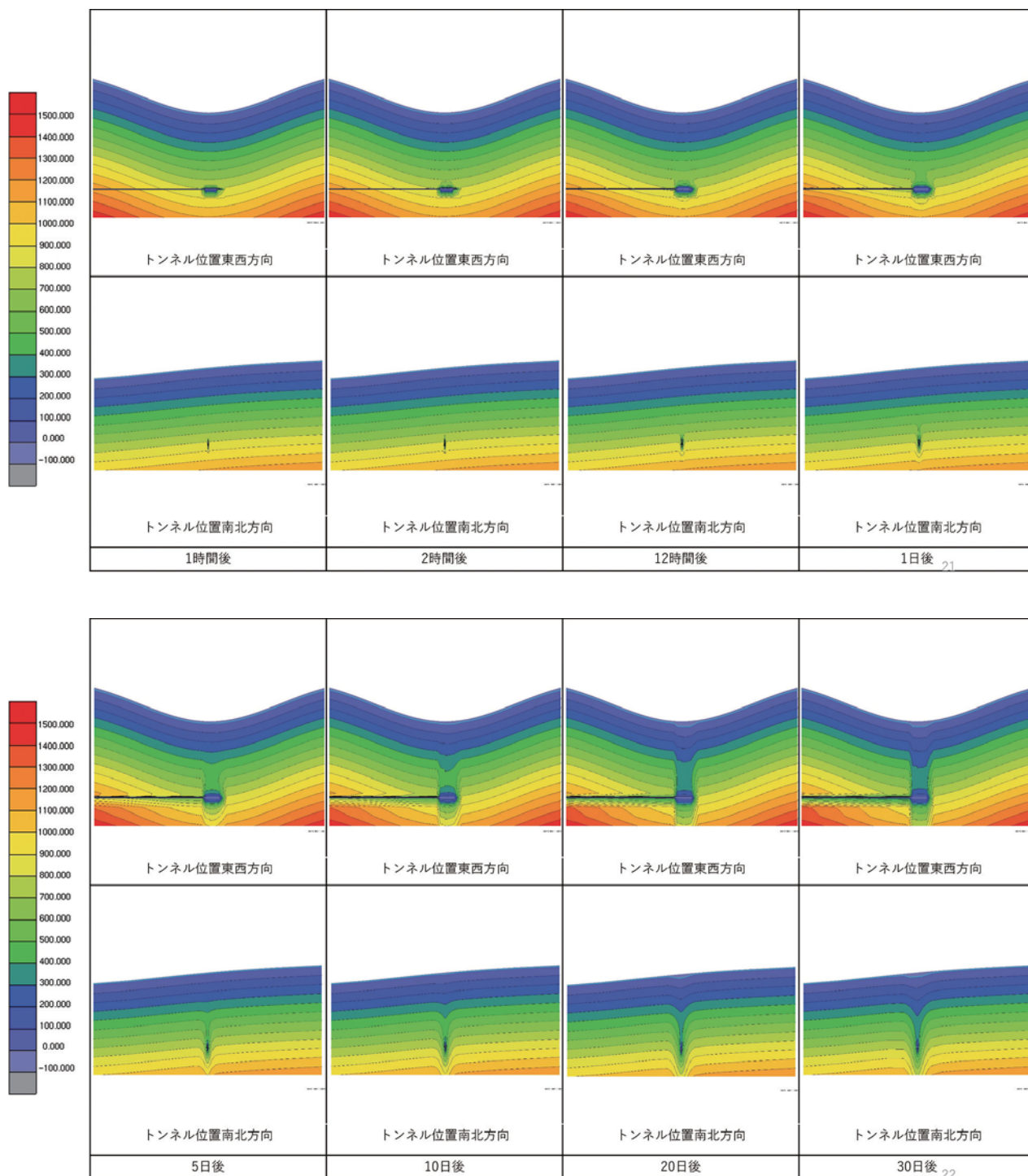


図-18 トンネル出水に伴う圧力水頭の時系列変化

配で掘っていった、北海道からも下り勾配で掘ってきて繋ぐという工事をしているのですが、青森県側の工事記録によりますと、突発湧水は2回発生しています。両方とも、最初は大量に湧出するのですが、だいたい2日後くらいにはその湧出量が収まって、1週間もするとほぼ一定になるという報告がありました。まさにこのような結果（今示しているオレンジ色の線のような結果）になっております。今回は、境界条件、透水係数と有効間隙率だけを指定して、非定常計算をしましたが、それではほぼ同じ結果を得ることができました。ジャストポイントでボーリング調査を行い、透水係数、間隙率、圧力水頭分布を調べておけば、この突発湧水のパターンは少なくとも近似できるということになるのが大変興味深いことです。

また、図-18の圧力水頭分布は、上の4枚がトンネルを横から見た断面図で、下の4枚がトンネルの掘削方向から見た断面図です。地表面に近いところが、圧力勾配が小さくて下の方にいくと圧力が高い、水圧が高くなるという図です。トンネルを掘って1時間後はこの断層破碎帯にぶつかったところの本当にごく一部で水が出ているだけなのです。しかも、上位から落ちてくる水より下位から上がってくる水の方が多いですね。当然なのですが、圧力勾配から言うと、上から下に向かって圧力が高くなっていますから、下から湧き上がってくる水の方が多いのは当然です。また、最初はもともとあった圧力に比べてトンネル内の圧力は大気開放されますのでその圧力が極端に集中して水が大量に出ます。そして、2時間後、12時間後、さらに1日経ってもトンネルの上位の200m以下の範囲にしか影響範囲が及んでいません。その後、5日後、10日後、20日後、30日後なのですが、だいたい10日過ぎたらほぼ一定になってしまいますが、圧力勾配の変化が及ぶのは10日過ぎくらいから、段々地表に向かって変化して、最終的には30日後は地表周辺に影響がおよびます。しかし、湧き出し量というのはそんなに変わりません。これより、急激に大気開放されたという非定常計算をすれば、概ね現象を計算できるということから、透水係数、間隙率の分布が分かればパターンは分かることになります。あとは実際のデータさえ取れば、先ほどのオレンジ色のグラフをどのくらいスライドさせたら良いかというのが分かりますので、実際のリアルなデータを取ることによって、突発湧水についてもご理解頂けるかと思います。最後に申し上げたかったことは、沿岸部の地下水あるいは地質環境の調査は、物理探査、ボーリング調査、海底湧出地下水調査から成り立ちます。一方で既存のデータで作る概念モデル（Conceptual Model）は、それらの調査に有益な示唆を与えます。今回ご紹介した

突発湧水のモデルも、かなりシンボライズした概念的な情報と計算で、ある程度のことが言えました。処分システムを構築する際には、シンプルなモデルでまず概念設計することが大事かと思いますので、公的な機関がこれまでに作ってきたデータベースをしっかりと組み立てていくということが重要であると考えます。重ねて申し上げますが、水循環基本法で水の流れを4つのプロセスから定義しており、その中で地下のデータ、特に地下水のデータについてはマップ化されていないというのが現状です。ここも何とかしなければ、今後の日本のデジタル化に障害を与えてしまうということがございますので、最後に申し上げたいと考えておりました。

謝辞

本日の講演は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業（JPJ007597）（沿岸部処分システム評価検証技術開発）」により、国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターの3機関が共同で行ってきた研究の産総研の成果をお伝えしました。

（本稿は、2021年6月30日に開催された2021年度第1回原環センター講演会の内容を再構成したものです。）

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構（NUMO）https://www.numo.or.jp/kagakutekitokusei_map/pdf/shittehoshii_a3rev.pdf
- 2) 丸井敦尚，海底湧出地下水～新たな資源としての可能性～，日本水文科学会誌，第27巻2号，p.85-94，1997年5月
- 3) 高村弘毅，丸井敦尚，地下かん水の定義と事例，日本海水学会誌，第60巻，p.86-90，2006年
- 4) 山本荘毅，新版地下水調査法，古今書院，470p，1983年
- 5) 丸井敦尚，安原正也，塩水－淡水境界に関わる地下水流動研究，日本水文科学会誌，第29巻1号，p.1-12，1999年2月
- 6) 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 わが国の地質環境，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-021，p.II-170，1999年
- 7) 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，p.322，2012年3月
- 8) Takumi Ueda, Yuji Mitsuhata, Toshihiro Uchida,

-
- Atsunao Marui, Kenji Ohsawa. A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study. JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS. 2014. 100. 23-31
- 9) 原子力発電環境整備機構 (NUMO, 2021), 包括的技術報告 わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html 最終確認 2021/06/06
- 10) 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, 第 42 巻 2 号, p.61-68, 2012 年 5 月
- 11) 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 村元茂則, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希, 沿岸域における地下水の流動性の年代測定による評価, 地学雑誌, 第 122 巻 1 号, p.116-138, 2013 年 1 月
- 12) 産業技術総合研究所, 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評価確証技術開発成果報告書, 492 p, 2020 年 3 月

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）
TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>