JAEA-Research 2010-066



# 広域地下水流動モデル検証のための データ整備方法の検討

- 房総半島の例-

Study on Validation Method of Regional Groundwater Flow Model - Case Study for Boso Peninsula -

酒井 隆太郎 宗像 雅広 木村 英雄 市川 八州夫 中村 克

Ryutaro SAKAI, Masahiro MUNAKATA, Hideo KIMURA Yasuo ICHIKAWA and Masaru NAKAMURA

> 安全研究センター サイクル施設等安全研究ユニット

> > Fuel Cycle Safety Research Unit Nuclear Safety Research Center

**March 2011** 

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

# 広域地下水流動モデル検証のためのデータ整備方法の検討 - 房総半島の例-

日本原子力研究開発機構 安全研究センター サイクル施設等安全研究ユニット 酒井 隆太郎\*\*・宗像 雅広・木村 英雄・市川 八州夫\*・中村 克\*

(2010年12月17日 受理)

放射性廃棄物の地層処分では、人間社会への核種の地下水移行を信頼性高く評価するため、地下 300m 以深の処分深度を含む広域地下水流動モデルの検証(モデルの妥当性の確認)方法の構築が重要である。このため、本稿では井戸データが比較的多く存在する房総半島を対象として、水理、地化学、熱、地下水年代等の複数の指標を検証データとし、地下水流動境界等を検証項目とする検証方法を検討するとともに検証データの整備方法について考察した。

検討の結果、房総半島全域を対象とする広領域の場合、淡水、塩水の地下水賦存状況や地下水 流動形態を検証するための地化学データや熱データ等の検証データが存在し、それらを用いたモ デルの検証・評価が可能である。一方、房総半島沿岸域を対象とする狭領域の場合、地下水流動 特性、地下水流動境界を検証するために必要な水理、地化学、熱、地下水年代等の複数種の検証 データが存在し、これらのデータを組み合わせることによって、モデルの検証・評価が可能であ ることが示された。

本研究は原子力安全・保安院「平成21年度地層処分に係る水文地質学的変化による影響に関する調査」

として実施した。

原子力科学研究所(駐在):〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※ 特定課題推進員

\* 応用地質株式会社

## JAEA-Research 2010-066

# Study on Validation Method of Regional Groundwater Flow Model - Case Study for Boso Peninsula -

Ryutaro SAKAI\*, Masahiro MUNAKATA, Hideo KIMURA, Yasuo ICHIKAWA\* and Masaru NAKAMURA\*

> Fuel Cycle Safety Research Unit Nuclear Safety Research Center Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2010)

In the safety assessment for a geological disposal of radioactive waste, it is important to establish validation methods for regional groundwater flow system more than 300m at depth to estimate radionuclide migration to human environment through groundwater flow system. The study discussed application of data and assessment methods for model validation based on multiple indicators such as hydrology, groundwater chemistry, temperature and age of groundwater in case of the Boso Peninsula in Chiba Prefecture where a lot of in-situ data about groundwater were measured.

This results show that existing hydrochemical and thermal data are applicable to validate freshwater and saltwater distribution and groundwater flow pattern in case of regional scale of whole Boso Peninsla. It also demonstrates that multiple indicators such as hydrology, groundwater chemistry, temperature and age of groundwater are applicable to validate the groundwater flow property and groundwater flow boundary in case of site scale coastal region of Boso Peninsula.

Keywords: Validation Method, Geological Disposal, Multiple Indicators, Groundwater Flow Boundary

This work was performed by Japan Atomic Energy Agency under contract with the Nuclear and Industrial Safety Agency in Ministry of Economy, Trade and Industry.

\* Special Topic Researcher

\* Oyo corporation

# 目 次

1. 序論	1
2. 房総半島を対象とした地下水環境特性の調査	2
2.1 調査対象地域の概要および検討方法	2
2.2 房総半島全域(広領域)	4
2.3 房総半島北西部(狭領域 1)	8
2.4 房総半島中西部(狭領域 2)	. 12
3. 検証データ整備方法の検討	. 16
4. まとめ	. 18
謝辞	. 19
参考文献	. 19

# Contents

1. Introduction	1
2. Investigation of hydrological environment in Boso Peninsula	2
2.1 Introcuction of investigation area and the methodology	2
2.2 Whole part of Boso Peninsula	4
2.3 North-west part of Boso Peninsula	8
2.4 Mid-west part of Boso Peninsula	12
3. Discussion of validation method for analytical groundwater flow model	16
4. Summary	18
Acknowledgements	19

This is a blank page.

## 1. 序論

高レベル放射性廃棄物の地層処分において処分場閉鎖後の安全性を評価するためには、放射性 物質を人工バリアから漏出した放射性物質を運ぶ地下水の流動や地層中における放射性物質の移 行についての長期間にわたる評価を行うことが重要である。長期に亘る地下水流動の評価は不確 実性を多く含み、規制機関が安全審査を行う際には、評価の妥当性を判断する必要が考えられる。 このため、処分深度である地下 300m 以深を含む長期的な地下水流動評価のための解析モデルの モデル化、地下水流動解析モデルの検証(解析モデルの妥当性の検討)方法の構築が重要となる。 地下浅部の地下水流動については、一般的には原位置で取得された水位・水頭分布の再現により、 モデルの検証がなされるが、地下 300m 以深の深部の地下水流動については、地下水の流れが非 常に緩慢であるため浅部と同様に水理・水頭分布のみによる検証は困難である。ただし、このこ とは地形支配による重力流の存在が地下深部において否定されるものではなく、重力ポテンシャ ルの影響が流動に現れる下限深度、深部の地下水流動特性が不明であるということである。この ため、深部地下水の賦存状況、水理、熱、地下水混合境界(水質の観点から見た地下水混合系ど うしの境界)、地下水流動特性(駆動力、流動の有無、流動形態)、地下水流動境界(地下水流動 系の違いによって形成される境界)をモデル検証のための評価項目(検証項目)として、これま で離散していた地下水関連データ(水圧、水質、水温、地下水年代)を収集し、地下水データの 主成分分析や深度方向のデータの一次元解析等を行い、得られた知見の整合性を図り、系統的な 検証項目の評価方法の検討を行った。

しかし、実際は、さまざまな社会的条件や技術的制約を受けるため、十分なデータの取得が困 難な場合が多い。すなわち、調査対象領域のスケールの違いにより、取得データの質(採取地点 の位置・深度の不確実性、観測時の表層地下水の混入、人的な揚水の影響によるデータのばらつ き等の品質)、データ量(連続観測データの有無、観測データの偏在等)に差が生じ、検証レベル (検証項目の定性的あるいは定量的な評価の程度)にも差が現れる。このため、本稿では、まず 空間スケールの異なる複数の領域を設定し、上記の地下水関連データの質、量の違いが検証レベ ルに与える影響についての検討も行った。そのうえで、検証データが不足する地域に対する検証 項目の取扱いと追加取得すべきデータの種類とデータの整備方法についての課題を考察した。

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は、平成16年~平成17年に比較的地質構造が 単純であり、既存井戸が多く存在する房総半島中部の養老川流域において水文・水質、地下水年 代等に関する地下水データを取得し、全長約50kmにわたる千葉県養老川流域の地下水流動特性 の調査・検討を行った。しかし、養老川流域の場合、地下水流動にかかわる水理、熱などのデー タの欠如から、地下水流動境界、流動を支配する要因等についての検討には至っていない。この ため、本検討では調査範囲を房総半島全域に拡大し、地下水関連データの調査を行い、既存デー タを用いて検証項目をどこまで評価可能かを明らかにするとともに、検証データの充足性につい て検討を行った。

本稿では、房総半島の中でも、とくに熱、水理、地化学、地下水年代に関する既存データの情報量が比較的多く存在する房総半島北西部と中西部の沿岸域を狭領域とし、地下水関連データに 関する情報量の少ない房総半島全域を広領域として、検証項目の評価と検証データの整備方法に ついて検証スケールに応じた比較を試みたのでこれについて報告する。 2. 房総半島を対象とした地下水環境特性の調査

# 2.1 調査対象地域の概要および検討方法

房総半島は、三梨他(1976)<sup>1)</sup>によって層序的、地質構造的に調査・解析が行われており、各 地の地質については5万分の1地質図幅として整備されている。図2.1は、既往の地質図幅をも とに編集した房総半島全域の地質平面図である。房総半島は、三浦半島とともに海成の厚い第三 系、第四系の砂岩、泥岩、砂岩・泥岩互層の発達によって特徴づけられ、房総半島は、南部に古 第三系~新第三系下部の嶺岡・保田層群が分布し、中・北部には、下部中新統~鮮新統の三浦層 群、上部鮮新統~中部更新統の上総層群、その上位に中部~上部更新統の下総層群が分布する。 房総半島南部には、東西方向に軸を持つ背斜が発達し、標高200~300mの房総丘陵が形成されて いる。背斜軸北翼の上総層群は、北東-南西~東西走向で北西~北に15°~5°で傾斜しており、 下総層群は、北東-南西走向で北西に5°以下で緩傾斜している(鈴木他、1995<sup>2)</sup>)。



図 2.1 調査対象域周辺の地質図および既存井戸の位置(日本原子力研究開発機構(2008)<sup>3)</sup>) (1.,2.:狭領域、3:広領域、矢印は地形から推定した地下水の流動方向)

房総半島中・南部は、地質構造を横断するように房総丘陵を源流域とする4河川(養老川、小 櫃川、小糸川、村田川)が東京湾へ北流している。房総半島北部には広く下総層群からなる下総 台地が分布しており、印旛沼から四街道にかけて標高数mの低地帯(図 2.1 の点線)が存在し、 ここに向かって西方から流下する河川と東方からの河川とが合流し、利根川に流れ込む。台地を 下刻する河川は、全長数 km 程度と短く、標高 40m 前後の佐原から八街の高まりを境として東は 九十九里浜に向かって流下するものと西へは利根川に向かって流下するものとに分かれる。

千葉県について公開された井戸(工業用、農業用、生活井戸等)の情報は国土交通省、千葉県、 市原市、大学関係機関などによるデータ、このほかに温泉井戸に関する情報も一部公開されてい る。しかし、地下水の水質、水温に関するデータが公開されているものは、図 2.1 に示すように 海岸線沿いの低地部と主要河川沿いの井戸が主である。本稿では、水質、水温データが存在し、 温度検層、水理(主に地下水位)データなどが比較的多く存在する房総半島北西部(図 2.1 の 1.) と房総半島中西部(図 2.1 の 2.)の2ヵ所を狭領域の対象地域として設定した。房総半島北西部 は、江戸川と利根川に挟まれる領域であり、地形学的見地から、関東平野北部で涵養された地下 水の流出域付近に相当する。一方、房総半島中西部は、養老川や村田川、小櫃川など房総丘陵に 端を発する主要河川の河口域に位置し、房総丘陵で涵養された地下水の流出域に該当する。広領 域については、南限を鴨川の低地部とし、北限を利根川とする房総半島全域(図 2.1 の 3.)とし た。

図 2.2 に検証データの整備方法に関する検討の流れを示す。個々の領域の既存の地下水関連デ ータを収集・整理し、独立した水文データ、水理データ、地化学データ、熱データ、地下水年代 データなどの検証データとなりうる複数の指標データを抽出・分析し、前述の地下水流動に関す る検証項目の評価結果を集約・整理する。ここで、図の「水文」データは地下水流動に影響を与 える地表付近の水収支に関する時空間データであり、「水理」 データは、地下水流動に関する直接 的な時空間データであり、水位、水圧に関する情報を含む。「地化学」データは地下水の水質や安 定同位体比(水素・酸素同位体比)、「熱」データは、地下水の水温、岩盤の温度、「年代」データ は地下水年代に関する時空間データである。ここで地下水流動特性の異なる独立する2つの地下 水流動系が存在し、両者間に不連続境界が存在すれば、水理データ、地化学データ、熱データ、 地下水年代データに関する空間分布、データの分析結果から個々の地下水流動特性、両者の不連 続境界が評価・認識できるはずである。ただし、①流動境界付近のデータ不足、②地下水流動に 対する検証データの応答特性の低さが原因で地下水流動特性、地下水流動境界が認識できない場 合がある。したがって、①、②を区別した上で、複数の指標データを用いた地下水流動特性、流 動境界の評価、検証データから導かれる知見の整合性の検討を行い、検証データの整備方法に関 する課題を抽出する。また、広領域については、情報の欠如によって地下水流動特性、流動境界 に関する検証項目が評価できない可能性がある。ただし、地下水の地化学データ等から地下水の 起源や地下水賦存状況など単独では地下水流動特性、流動境界を評価することができない場合で も、他のデータとの組み合わせで評価可能な場合、検証データとして定性的には有効であるとし た。以下に、検証データの整備方法に関する検討結果について報告する。



図 2.2 検証データの整備方法に関する検討の流れ

# 2.2 房総半島全域(広領域)

房総半島全域に関しては、数多くの既存の地下水データ、原子力機構が現地で取得したデータ が存在するが、データの位置が不明なものや揚水や地下水汚染等による人的な影響を受けている ものも存在する。このため、房総半島(千葉県)全域の地下水データの所在調査と利用可能なデ ータ調査を行った結果、位置データの存在する 511 件のうち 489 件については井戸の孔底深度が 既知であり(図 2.1)、このうちストレーナー深度が既知のものは 72 件である。また、井戸の深 度(孔底深度あるいはストレーナー深度)が既知であり、水位に関するデータが存在するものは 107 件、水温に関するデータが存在するものは 478 件、水質に関するデータが存在するものは 460 件、地下水の水素・酸素同位体比に関するデータが存在するものは 247 件、地下水年代に関する データが存在するものは 30 件(トリチウム濃度が 12 件, <sup>129</sup>I/<sup>127</sup>I が 10 件、<sup>14</sup>C が 18 件)である。

本稿で取り扱ったデータには、原子力機構が養老川流域において現地で取得した地下水データ (日本原子力研究開発機構(2008)<sup>3)</sup>)が含まれているため、水質と安定同位体比のデータに関 しては養老川におけるデータ量が他に比べて多い結果となっている。水位データは主に千葉県に よって取得されたデータ、井戸台帳などであり、東京湾周辺の沿岸部に多く、地下水年代データ は丸井他(2001)<sup>4)</sup>、ベル(2004)<sup>5)</sup>などが主な情報源である。

(1) 地下水の水理データ

房総半島における地下水の水理データのうち水位データに関しては、全井戸のうち、前述のと おり107件存在するが、それらデータは主に沿岸部、低地部に集中する。また、地下水の間隙水 圧については、測定されていて、データが公開されているものは存在しない。産業技術総合研究 所(2008)<sup>6</sup>は、房総半島中北部を含む関東平野全域について既存の地下水位データをもとに、 地下水ポテンシャル分布図を作成し、下総層群下限面と下総層群下限面から50m上部の面につい て地下水ポテンシャルの平面分布図を作成している。さらに、作成した2種類の地下水ポテンシ ャル分布図の差分を求め、下総層群下限面における鉛直方向の動水勾配分布図を作成している。 これにより、表層から地下深部への地下水涵養あるいは地下深部から浅所への地下水流出の広域 的な傾向の把握も行っている。

本稿においても、同様な検討を行うため房総半島中~南部まで含めた動水勾配分布図の作成を 試みたが、房総丘陵周辺の高地には水位データが少ない点、特定の時期しか水位データが存在し ない房総半島南部においては、同一時期のデータを揃えることが困難であることなどから、房総 半島全域について上記の分布図作成は行わなかった。ただし、産業技術総合研究所(2008)<sup>6</sup>の 結果による下総層群下部の動水勾配分布図によれば、房総半島中央部の高標高部が涵養域となっ ていることが示唆されている。

(2) 地化学、熱データ

図 2.3 は、地下水の水質に関するデータをもとに、房総半島を南北に縦断する位置における 地下水の塩素イオン濃度(ppm)分布と地質構造図との関係を示したものである。井戸の水質デ ータに関しては、必ずしも孔底の値を示している保証はなく、浅所地下水の混入の可能性も否定 できない。多くの場合、同時に水温や NO<sub>3</sub>が測定されていることが多く、水質が測定された深度 における地下水の水温が周辺の地温勾配分布から見て極端に温度が低い場合、浅所の地下水の混 入が想定されるため、該当するデータは用いないこととした。また、NO<sub>3</sub>は、地下数 100mの還 元環境下においては数 ppm 以上入っていることは考えられないため、深度 100m 以深において NO<sub>3</sub>が数 ppm 以上含まれている水質データについては棄却した。



図 2.3 塩素イオン濃度分布図(コンター数値:塩素イオン濃度(ppm)、太平洋側から見た鉛 直断面図、コンターマップは断面から5km内の地下水データを投影)

なお、水質測定深度は基本的にストレーナー中央深度の値と判断したが、文献によっては孔底深 度しかデータが存在しないものもある。深井戸データのうち、山間部データのほとんどは、温泉 データでありストレーナー深度が明示されていないため、孔底深度でプロットした。このため、 山間部の地下水水質の試料分析位置は断面図上若干浅くなる可能性がある。

図中、地下水データは断面位置の両側 5km 以内の井戸のデータを投影した。キーダイアグラム 上 Na-Cl型地下水と淡水系地下水である Na-HCO<sub>3</sub>~Ca-HCO<sub>3</sub>型地下水との境界(水質境界:後述 する地下水混合境界と区別して定義)は Cl 濃度にして本地域の場合、約4,000~5,000 ppm に対応 する。図中、Cl 濃度の低い Na-HCO<sub>3</sub>型地下水からなる淡水は、房総丘陵下においては EL-2,000 m 前後の三浦層群分布域を超えて深部まで広く存在する一方、半島中央付近の茂原~成東間では上 総層群上部の EL-1,000 m 以浅に限定される。また、地下水の低水素・酸素同位体比分布域が低 Cl 濃度である淡水分布域と一致することから、南部の房総丘陵においては、房総半島中央部に比 べてより深部まで地表水の浸透が及んでいるものと考えられる。

図 2.5 は、房総半島を南北に縦断する位置における水温分布図である。水温データの場合、ほ とんどの井戸、ボーリング孔において坑口で測定されているため、実際の深度における水温を表 していない可能性がある。しかし、後述するように一部のデータを棄却すると房総半島北西部に おける温度検層データと採水した地下水温とは EL-1,000 m 以浅において、同一深度においてはお おむね一致していることから、EL-1,000 m 以浅の水温データは原位置における地下水温を近似的 に表しているものと考えられる。図に示すように房総丘陵と房総半島中央部の EL-1,000 m 付近を 比較すると、房総丘陵では 20℃前後、房総半島中央部では 20~25℃であり、EL-2,000 m 付近の データの信頼性は低いが、房総丘陵では 20~40℃、房総半島中央部では 40℃を超えており、房総 半島中央部に比べて房総丘陵のほうが相対的に地表から地下水の浸透による水温低下の影響が地 下深部まで及んでいる可能性が高い。このことは、水質、同位体比に基づく結果と整合的である。

なお、地下水年代について同様な整理と空間分布の作図を試みたが、データの分布の粗密が激 しく検討にまで至っていない。

(3) 地下水環境特性

房総半島全域について熱、地化学に関するデータから地下水環境特性についてまとめると房総 丘陵においては三浦総群上部まで淡水が浸透しているが、房総半島中央部から北部にかけては、 涵養域である房総丘陵に比べて相対的に淡水の浸透深度は浅く、上総層群下部層中には塩水が広 く分布する。



図 2.4 房総丘陵の地下水環境特性(実線:地質境界、破線:水質境界)



図 2.5 地下水温分布図(数値:水温(℃)、断面は太平洋側から見た鉛直断面図、地下水デー タは断面から5km内のデータを投影)

図 2.4 は、房総丘陵の地下水環境特性を概念的に示したものである。図に示すように水理、熱、 地化学に関するデータに粗密はあるもののある程度地下水賦存状況、地下水環境特性の推定が可 能である。ただし、水質境界を境として上下の地下水年代等の他の情報がないため、水質境界と 地下水流動境界については不明である。次に、房総半島北西部(狭領域 1)と中西部(狭領域 2) についての結果を示す。

# 2.3 房総半島北西部(狭領域1)

(1) 地下水の水理データ

図 2.6 は、房総半島北西部における地下水観測井の位置と過去 1971 年以降の地下水位変動の図 である。千葉県は、東京湾およびその周辺に工業用井戸が数多く存在し、揚水による地盤沈下の 影響を評価するため、過去約 30 年間の水位変化量、地殻歪変化量の経時観測を行っている。過去 の千葉県の地下水位に関しては、井戸台帳や市原市などの井戸データが存在するが、水位の連続 観測データが公表されているのは、千葉県の井戸データ(千葉県地質環境インフォメーションバ ンク<sup>7)</sup>)のみである。井戸の深度は数 10m~400m であり、ほとんどが上総層群と下総層群中にス トレーナーが設置されている。地下水位は、井戸の孔口標高、孔底深度、周囲の地形・地質、地 質構造に影響され、降雨などによる季節変動、潮汐などの影響も受ける。また、図 2.6 右図に示 すように、東京湾北部の多くの地域では 1970 年代が人為的な揚水により水位が最も低下した時期 であり、その後緩やかに水位は上昇し、過去 10 年間はほぼ安定している。



図 2.6 房総半島北西部における観測井位置と地下水位変動量



図 2.7 東京湾北部における地下水位変動幅と深度との関係(データ:千葉県地質 環境インフォメーションバンク<sup>7)</sup>より、ストレーナー標高:ストレーナー 区間の中央標高値)

しかし、林・宮越(2004)<sup>8</sup>らが指摘しているように、当地域に関する水頭分布に関しては、 地下200~300m付近に未だ極小値が存在し、現在も揚水の影響が残存している。したがって、当 地域の地下水位は本来の地下水ポテンシャルまで回復していない可能性があり、原位置データは 利用できない。しかし、季節変動による地下水位の応答特性は活用可能であり、その深度変化を 見れば、特定の深度に水理的な境界がある場合、それを挟んで上下で地下水位、水圧の応答に違 いが現れることが予想される。

図 2.7 は、過去 5-10 年間の地下水位の季節変動による変動量と井戸のストレーナー標高(中央 値)との関係を投影した図である。図に示すように、EL-400 m よりも浅所においては地下水位の 応答量が1m~数mであるのに対して EL-400 m 以深では1 m 以下である。下総層群中においては、 観測点が主要河川近くにある場合、河川から離れている地点よりも地下水位の応答量が大きいこ とから、帯水層中の地下水は、河川の水位変化の影響を受けている。当地域の下総層群と上総層 群との地質境界は EL-300 m 付近に位置し、地下水位の応答量が急激に低下する深度と対応して いる。このことは、EL-300m 前後の上総層群と下総層群との境界付近に水理的な境界が存在し、 下総層群では比較的滞留時間の短い表層地下水による影響を受けるが、上総層群では表層地下水 の流動による影響を受けない地下水流動に支配されていると推定される。

(2) 地化学、地下水年代データ

房総半島北西部の深部地下水の水質、同位体、地下水年代に関しては、関他(2001)<sup>9</sup>、Marui and Seki (2003)<sup>10</sup>、丸井他(2001)<sup>4</sup>、ベル(2004)<sup>5</sup>)道前他(2003)<sup>11</sup>によって井戸の地下水 データが報告されている。図 2.8 (左図)は東京湾北部を通る北東-南西方向の地下水水質、地 下水年代に関する鉛直断面である。東京湾北部の地質は深部から先新第三系基盤岩、三浦層群、 上総層群、下総層群に区分され、地下水分布は深部から浅部に向かって塩水系地下水(NaCl型地 下水)、Na-HCO3型地下水、Ca-HCO3型地下水分布域に分類される。当地域では、塩水系地下水 と Na-HCO3型地下水との境界は上総層群の下部に位置し、Na-HCO3型地下水と Ca-HCO3型地下 水との境界は上総層群と下総層群との境界付近あるいは上総層群中に位置する。塩水系地下水の 地下水年代(<sup>14</sup>C年代)は、1.4万年~3万年、Na-HCO3型地下水は6千年~3万年、Ca-HCO3型 地下水は、2,000年前後を示している。

図 2.8 (右図) に地下水の水質、年代データにもとづく主成分分析による地下水の端成分の抽 出結果を示す。図 2.8 (左図) における水質、地下水年代により区分された地下水領域 (Ca(Na)-HCO<sub>3</sub> 型地下水、Na-HCO<sub>3</sub>型地下水、NaCl型地下水)の境界は、水質が連続的に移り変わっているのか 不連続か判定できない。境界付近で観測された地下水年代も混合年代であり、見かけの年代であ る。もし、深部の地下水流動場において帯水層が複数存在し、個々の帯水層が独自の地下水進化・ 混合系を保持しているのであれば、地下水の主成分分析によって帯水層ごとに地下水の端成分と 地下水進化・混合系とが識別でき、地下水混合境界が判別できるはずである。そこで、SKB など が実施している方法 (Laaksoharju,M, et al, 1999<sup>12)</sup>) に倣って、地下水の Ca、Na など主要 5 成分 と酸素、水素同位体比に加え、地下水の年代値の変わりに TU、<sup>14</sup>C 濃度として pmc (現在の地下 水の<sup>14</sup>C 濃度を 100 としたとき <sup>14</sup>C 濃度を 100 分率換算した値)の値を加えた 9 成分を用いて主 成分分析を行った。

図中、当地域において地下水の水質、同位体比、年代値のデータが揃っているのは、丸井他(2001) <sup>4)</sup>、道前他(2003)<sup>11)</sup>による地下水データのみであり、主成分分析にはこれらのデータを用いた。 ここで端成分として現海水、河川水、それ以外にもともと当地域の堆積岩は数10万年以前の海域 において堆積した海成層であるため、この当時の古い海水(古海水)が地層中に閉じ込められて おり、少なくともこれら3種類以上の地下水の混合と考えられる。現海水の地下水年代は0年と し、TU(トリチウムユニット)=10、<sup>14</sup>C (pmc)=100、化学組成は現海水と同じとした。古海水 については、房総半島北西部には代表的なデータは存在しないため、房総半島東部の茂原周辺の 鹹水と水質、年代とも同程度の値を持つものとし、鹹水の CI 年代である約数 10 万年(馬原他、 2007<sup>13)</sup>)を勘案し、地下水年代については、炭素年代測定の検出限界である 5 万年よりは古いも のとみなして<sup>14</sup>C (pmc) =0、TU (トリチウムユニット) =0 とした。

主成分分析の結果、当地域の地下水は、現海水との混合はなく、古海水、地表水以外に第2主成 分に乏しい Na-HCO<sub>3</sub>型地下水が端成分として抽出された(図 2.8(右図))。端成分として抽出さ れた Na-HCO<sub>3</sub>型地下水は 1.7~3万年の年代値を示すことから、最終氷期最寒冷期に涵養された 地下水である可能性が高い。NaCl型地下水は古海水と氷期の地下水との混合線近くにプロットさ れ、Na-HCO<sub>3</sub>型地下水は、氷期の地下水と地表水との地下水混合で説明可能である。すなわち、 図 2.8 における NaCl型地下水と Na-HCO<sub>3</sub>型地下水は、互いに独立した地下水混合系を構成して いるものと考えられる。また、深部の NaCl型地下水は現海水の混入の影響を受けておらず、ま た浅部の Na-HCO<sub>3</sub>型地下水、Ca-HCO<sub>3</sub>型地下水も現海水の混入による影響を受けていないと推定 される。



図 2.8 東京湾北部周辺の地下水の水質、地下水年代分布図(左図)(地下水データは丸 井他(2001)<sup>4)</sup>、道前他(2003)<sup>11)</sup>より、破線:水質境界、実線:地質境界)、 および主成分分析による地下水分類(右図)

(3) 地下水の熱データ

図 2.9 は、東京湾北部における地下水の水温分布(地下水位観測井戸 19 地点、温泉井戸 16 地 点から採水した温泉水の水温)と温度検層データである。深度 1,000 m 以深の井戸の地下水温は、 孔口で採水・測定しているため、温度検層データよりも低い値を示している(図 2.9 右図)。1,000 m 以浅に関しては温度検層と地下水温分布とはおおむね一致しており、深度とともに温度は高く なる傾向にある(図 2.9 左図)。下総井の温度検層データ(鈴木・高橋、1983<sup>14)</sup>)によれば、上総 層群下部の深度 600 m 付近に温度勾配変曲点があり、それ以浅は 1.5 ℃/100 m、以深は 2.4 ℃/100m であり、深部は、浅部よりも高い地温勾配を示している。NaCl型地下水と Na-HCO3型地下水と の境界は、図 2.9 に示すように地温勾配の変曲点付近とおおむね一致する。海水組成に近い NaCl 型地下水は淡水と熱伝導率(淡水:1430W/cm・s・deg、海水:1400W/cm・s・deg)に違いはな く、地温勾配の違いを熱伝導率の違いに求めることはできない。また、この境界は地質境界とも 一致せず、地質の違いとも考えにくい。したがって、地温勾配の違いは、深部からの地殻熱流量 による熱伝導が地表面からの地下水涵養による熱輸送によって弱められている淡水領域とその影 響がほとんどない NaCl 型地下水の違いの表れとして理解できる。したがって、房総半島北西部 では、深度 600 m 付近までは熱的に地表からの地下水浸透の影響を受けているものと推定される。



図 2.9 房総半島北西部における地下水の水温分布と温度検層データ(地下水温データ:内 田他(2002)<sup>15)</sup>、ベル(2004)<sup>5)</sup>、温度検層データ:鈴木・高橋(1983)<sup>14)</sup>)

(4) 地下水環境特性

房総半島北西部における地下水特性を熱、水理、地化学、年代の観点から整理・検討した結果 を図 2-10の概念図にまとめる。地表から深度 300 m までは下総層群であり、この間は季節変動に よる地下水応答のある区間であり、0~2千年(酒井他、2006<sup>16</sup>)の比較的滞留時間の短い Ca (Na) -HCO3型地下水である。ただし、地表から涵養した地下水は上総層群下部の深度 600~1,200 m ま で浸透が及んでおり、数千年~2万年(酒井他、2007<sup>16</sup>)の Na-HCO3型地下水である。それ以深 は 2万年よりも古い NaCl型地下水であり、上総層群下部付近に Na-HCO3型地下水と NaCl型地 下水の境界が存在する。Na-HCO3型地下水と NaCl型地下水とは地下水混合系を異とし、この境 界は熱的な境界にもなっており、地下水流動境界の可能性がある。



図 2.10 房総半島北西部における水理、熱、地化学、年代の観点から見た地下水特性

2.4 房総半島中西部(狭領域2)

(1) 地下水の水理データ

房総半島中西部の東京湾に面している場所は主に房総丘陵からの地下水の流出域に相当し、北から村田川、養老川、小櫃川の下流に相当する(図2.11)。当地域は、深部から先新第三系基盤岩、 三浦層群(M)、上総層群(K)、下総層群(S)で構成されており、層序区分は房総半島北西部と 同じであるが、堆積盆中心の南翼に位置する。上総層群(K)の基底深度は400m~600mと房総 半島北西部よりも浅く、上総層群、下総層群の層厚は薄い傾向にある。



図 2.11 房総半島中西部における地下水位変動量とストレーナー標高との関係(データ:千葉 県地質環境インフォメーションバンク<sup>7)</sup>、ストレーナー標高:ストレーナー区間の中 央標高)

養老川下流域については、近藤(1985)<sup>17)</sup>により、既存の井戸の水位観測データをもとに地下 水ポテンシャル分布図が作成されており、1980年以降、下流低地部では上向きの地下水流動成分 が卓越することが報告されている。しかし、下総層群以深の上総層群、あるいは養老川以外の流 域について地下水水理に関する情報は知られていない。図 2.11 は、房総半島中西部における揚水 による影響のない過去 5~10 年間の水位の回復後の地下水位変動量の平均値と井戸のストレーナ ー標高との関係を示している。元データは、房総半島北西部同様、千葉県地質環境インフォメー ションバンク<sup>7)</sup>による観測井戸の水位連続観測記録に基づく。図に示すように、同一井戸におい て地下水変動量は、標高-100 ~-250m で増加し、-400~-500 m において下がる傾向にある。

近藤(1985)<sup>17)</sup>によれば、房総半島中西部においては、揚水による地下水位への影響は、養老 川、村田川の河口付近の一部地域のみであり、1980年以降、ほぼ安定、回復しているとされてい ることから、村田川、養老川、小櫃川の3河川沿いについて井戸データから地下水位分布図を作 成した。図2.12は、養老川下流における低水期および豊水期の地下水位分布を示したものである。 地下水位は、井戸のスクリーンの中央標高値における値を採用し、地表付近の地下水位は、位置 水頭=全水頭として地表の標高値を与えた。等水位分布図から推定される地下水流動方向は東京 湾方向(北西方向)であり、上総層群は下総層群に比べると上向き成分が卓越している。また、 上総層群中においては豊水期と低水期間の水位変動は下総層群に比べると小さい傾向にあり、図 2.11の-400~-500 m以深の低い地下水変動量を持つ2データは、いずれも上総層群中に位置する。 この付近の上総層群は低透水性の笠森層に相当し、上総層群と下総層群の境界が水理的な境界と なっている可能性が高い。



図 2.12 養老川(下流域)沿いの地下水位分布(データ:千葉県地質環境インフォメ ーションバンク<sup>7)</sup>より、矢印は想定される流向)

(2) 地化学、地下水年代データ

地下水の水質については、関他(2004)<sup>18)</sup>、Kashiwagi et al (2006)<sup>19)</sup>および養老川下流域については日本原子力研究開発機(2006)<sup>20)</sup>のデータを用いた。なお、養老川下流域の深度 200m の Ca-HCO<sub>3</sub>型地下水の<sup>14</sup>C 地下水年代は 1,250 年と上総層群中の Na-HCO<sub>3</sub>型地下水に比べると若い 年代値を示している(日本原子力研究開発機、2006<sup>20)</sup>)。





図 2.13 房総半島中西部、東京湾北部の地下水の主成分分析結果

図 2.13 は房総半島中西部の地下水の主成分分析結果である。房総半島中西部に関しては地下水 年代は1データのみ、また同位体データも淡水のみしか存在しないため、TU、<sup>14</sup>C (pmc)、 $\delta^{18}$ O、  $\delta$ Dを除いた一般水質 5 成分について主成分分析を行った。また、当地域には Na-HCO<sub>3</sub>型地下水 の分析値が存在しないため、房総半島北西部のデータを参考値として併せてプロットした。

図に示すように Ca-HCO<sub>3</sub>型地下水は河川水(NaCa-HCO<sub>3</sub>型地下水)を端成分として F2 が減少 する方向、かつ F1 が増加する方向にプロットされるのに対して、Na-HCO<sub>3</sub>型地下水は、F1、F2 共に増加する方向にプロットされ、両者は独立した地下水混合系であるものと推定される。一方、 NaCl 型地下水のデータはばらつくものの F1 方向に分布している。NaCl 型地下水と Na-HCO<sub>3</sub>型 地下水との関係は明瞭ではないが、Na-HCO<sub>3</sub>型地下水の並びの延長と NaCl 型地下水の並びの延 長とが F1=0.5、F2=1.3 付近で交差(交差点の端成分を地下水 A) することから、Na-HCO<sub>3</sub>型地下 水は、河川水(地表水)と端成分 A との混合、NaCl 型地下水は端成分 A と高濃度の NaCl 型地下 水との混合地下水と推定され、互いに異なる地下水進化・混合系下にあるものと推定される。

(3) 地下水の熱データ

図 2.14 は、房総半島中西部における温度検層データである。図中、岩崎(養老川河口)については宮越(1999)<sup>21)</sup>による温度検層データ、千葉-1(村田川下流)については宮越・内田(2001)<sup>22)</sup>の温度検層のデータをもとに図化したものである。図に示すように、千葉に関しては、地表から深度 150 m付近まで、岩崎については地表から深度 200~300 m付近までは深度とともに温度はほとんど上昇せず、それ以深については深度とともに温度が上昇する傾向にあり、地温勾配は約 1.3℃/100m である。関東平野の東京低地において、深度 300 m 以浅の地下温度プロファイルの経年変化から帯水層中の地下水環境の変化が評価されている(宮越他、2006<sup>23)</sup>)。東京湾低地では、地下水流動の地下水温度プロファイルに与える影響を評価するために、タイプカーブ(帯水層厚、熱伝導率、地下水流速をパラメータとして地下水の水温と深度との関係を示したカーブ)と実測値とが比較されている。帯水層厚(L)、帯水層内の温度プロファイル、熱伝導率、地下水の密度、比熱が既知であれば、図 2-15 の(1)式より、(T-T<sub>0</sub>)/(T<sub>L</sub>-T<sub>0</sub>)を横軸、(z-z0)/Lを縦軸、 βをパラメータとしたタイプカーブと実測値との比較により、鉛直方向の流向と流速を計算することができる。βの絶対値が大きいほど流速が大きく、β>0の場合下向き、 $\beta < 0$ の場合は地下水の流動はほとんどないものと判断される。



図 2.14 房総半島中西部の温度検層データ(温度データは文献中のグラフからの読み取り値、千葉-1:図 2.11 における千葉、岩崎:図 2.11 における市原付近)



図 2.15 房総半島中西部のうち千葉-1、岩崎の地下温度に近似させたタイプカーブ

図 2.15 は、図 2.14 の千葉、岩崎の温度検層による既存の実測値をもとにタイプカーブを計算 したものである。図 2.14 より、千葉-1、岩崎個々の地温勾配変曲点は、深度 125m、260m 前後で あることから、この深度を境として上下で帯水層が異なるとし、浅部の帯水層の下限深度をそれ ぞれ 125m、260m とした。また、地表から深度 50m までの間は地表面温度による影響を受けてい るため、帯水層区間をそれぞれ 50m~125m、50m~260m とした。

図 2.15 に示すように千葉-1 に関しては、帯水層区間 50m~125m では、 $\beta$ =-3~-7 であり、 $\beta$ =-7 とした場合、熱伝導率を 1.7 (Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)、水の熱容量 cw  $\rho$  w を 4.18 (JK<sup>-1</sup>cm<sup>-3</sup>) (宮越他、2006<sup>23)</sup>) を用いると流速は鉛直上向きに 0.7 m/yr となる。これは、それ以深 (125-600 m 間) では、 $\beta \Rightarrow 0$  m/yr であり、地下水流動はあったとしても深度 125m 以浅に比べて非常に小さいと推定される。 一方、岩崎については、帯水層区間 50m~260m では $\beta$ =-2~-5 であり、 $\beta$ =-5 とした場合、流速は鉛直上向きに 0.25m/yr となる。図 2.12 の水頭分布からすると当地域周辺は流出域ではあるが、鉛直上向きの流動成分以外に東京湾方向に向かう水平流が卓越している地域であり、実流速は上記計算値よりも大きい可能性がある。

図 2.14 に示すように千葉-1、岩崎個々の地温勾配変曲点は、深度 125m、260m であり、深度 200 ~350 m 前後において地温勾配は 1.2~1.3℃/100m と一定となり、この深度付近に熱的に地下水流動特性が変化する境界があることが予想される。前項で述べたようにこの深度には下総層群と上総層群との境界があり(鈴木、2002<sup>24)</sup>)、地質境界が地下水流動境界になっている可能性が考えられる。

(4) 地下水環境特性

房総半島中西部における地下水特性を熱、水理、地化学、年代の観点から整理・検討した結果 を図 2.16 にまとめる。地表から深度 200~400 m までは下総層群であり、この間は季節変動によ る地下水応答があり、熱的に地温勾配は<1.3℃/100m であり、上昇流の兆候の表れる区間と一致 する。水質は Ca-HCO3型地下水であり、0~2,000 年程度の比較的若い地下水年代(酒井他、2006 <sup>16)</sup>)を示す。下総層群内においては、水質に関して季節変動による変化が存在する可能性はある が、同一地点において異なる時期に測定された水質データは存在しないため不明である。下総層 群の下限境界は、Ca-HCO3型地下水と Na-HCO3型地下水との地下水混合境界(主成分分析に基づ き水質的に互いに独立した地下水混合系の境界)となっており、熱的、水理的な境界とおおむね 一致することから、地下水流動境界である可能性が高い。また、上総層群下部以深には、Na-Cl 型地下水が存在し、Na-Cl型地下水と Na-HCO3型地下水との間にも前述の主成分分析結果から地 下水混合境界が存在し、この深度における熱に関するデータはないが、房総半島北部と同じとす れば地下水流動境界である可能性がある。



- 図 2.16 房総半島中西部における熱、水理、地化学、地下水年代から見た地下水環境特性(Na-HCO3型地下水の矢印:地表水起源であり、当地域では Ca-HCO3型地下水の下位に賦存)
  - 3. 検証データ整備方法の検討

房総半島の既往の地下水データ、知見をもとに熱、水理、地化学、年代の観点から地下水賦存、 地下水流動特性について調査・検討を行った。房総半島全域(広領域)に関しては、全域にわた って同質のデータを整備することは困難であり、特に内陸部においては水理、地下水年代データ が欠如する。とくに、地下1,000 m 以深には公開された地下水位データは1 地点しか存在しない。 地下水年代データに関しても、房総半島北部(ベル、2004<sup>5)</sup>)と養老川流域(日本原子力研究開 発機構、2006<sup>20)</sup>)の2 地域のみであり、有効なデータとしては水温と水質、同位体比のみである。 水質、同位体比、水温データからは、房総丘陵下においては EL-2,000 m 前後の三浦層群分布域を 超えて深部まで広く淡水が浸透している。一方、半島中央付近の茂原~成東間では、淡水は上総 層群上部の EL-1,000 m 以浅に限定される。

房総半島北西部(狭領域 1) では、地下 1,000 m 前後までの深部の地下水データが存在し、塩水と淡水との境界が水質境界、熱境界となり、同時に地下水流動境界となっている可能性がある

(表 3.1)。一方、房総半島中西部(狭領域 2)においては、これに加えて Ca-HCO<sub>3</sub>型地下水が存 在する下限深度が地下水混合境界、水理境界、熱的な境界となっており(図 2.16)、この境界が 地下水流動境界である可能性が高い。すなわち、この境界を横断するような地下水の流れは存在 しないと推定される。これは地下水流動解析によって評価された地下水流動経路の妥当性を確認 のためには重要な情報である。

		検証データ	水文		水理		熱		地化学		地下水年代	
スケール	領政	横訨項日	Т	М	Т	М	Т	М	Т	М	Т	М
広領域	房総半	地下水賦存状況					0		0		—	
	島全域	地下水流動形態	—		$\bigtriangleup$						—	
狭領域	房総半	地下水流動方向·特性	_	_	_	_	$\triangle$	_				
	島北西	水理、熱、地下水混合				0	~				0	
	部	境界				0			0		U	
		地下水流動境界					$\bigtriangleup$	—		—		-
	房総半	地下水流動方向·特性	$\triangle$	—	0	—	0	—				
	島中西	水理、熱、地下水混合				0	0				^	
	部	境界				U	U		0			
		地下水流動境界						—		—	—	—

表 3.1 検証データと検証項目との関係

T:1 時期のデータ、M:長期観測データあるいは多時期のデータ、"水理、熱、地下水混合境界":水理、熱、地下水混合いずれかの境界、"地下水流動境界":表層地下水と淡水系深部地下水との境界、○:検証項目に対して必要データが存在し、かつ有効、 △:検証項目に対して必要データが存在するが、対応するデータが偏在、あるいは応答性が低いため有効性については不明確 ~一部有効、▲:他のデータとの組み合わせで有効、-:検証項目に対して必要データが存在しない、空欄:データ不使用

表 3.1 に対象領域のスケールと検証項目、検証データとの関係を示す。表中、検証項目を評価 するために必要な検証データの有無、検証データの有効性について整理した。広領域では、水理 境界、地下水流動境界等の評価は困難であり、地下水賦存状況、地下水流動形態とした。表中の 地下水流動境界については、図 2-10、図 2-16に示す表層地下水と淡水系深部地下水との境界のケ ースを示した。検証データはそれぞれ 1 時期のデータ(T)と多時期のデータあるいは長期観測 データ(M)に分けて示した。地下水データが存在し、有効である場合は○とし、データの不足 あるいは応答の低さから有効性が不明瞭である場合△とした。さらに地下水流動境界は単独のデ ータだけでは判別は困難であるため、他のデータとの組み合わせで有効である場合▲で示した。

広領域の房総半島全域については、水質と水温データ基づき、地表からの地表水の浸透形態を 定性的に推定可能である一方、水文、水理、地下水年代に関するデータが欠如しているため、こ こでは地下水流動形態について熱と地化学のみを▲とした。狭領域の房総半島北西部では、水理 データの長期的なデータ、地化学、地下水年代データが存在する一方、熱データは地下水流動に よる熱の応答が明瞭には現れていない。また、同じ狭領域の房総半島中西部では、Ca-HCO3型地 下水と Na-HCO3型地下水との境界は地下水混合境界と一致することから、地下水流動境界の水理、 地化学、地下水年代を▲とした。ここでは地下水年代データが欠如しているが、熱データについ ては表層地下水と淡水系深部地下水との境界を境として流動特性の違いがみられるため、水理、 熱、地化学を▲とした。このほかに地下水流動境界として、地化学、地下水年代に関する長期観 測データが有効と考えられるが、いずれの領域についてもデータが存在しないため、-としてい る。なお、養老川中流域において流量観測データから、地質、地質構造と地下水流動方向との関 係が議論されており、砂岩優勢層が高い涵養機能を持ち、中間流動系が発達する傾向があるとさ れている(酒井他、2009<sup>25)</sup>)。養老川下流域のデータはないもののほぼ地質構造が養老川中流域 と同じであることから、参考データとして表中に付加している。ただし、地下深部の地下水流動 境界との関係は不明である。

産業技術総合研究所(2007)<sup>26)</sup>が指摘するように、初期の調査段階において広域地下水流動シ ステムの水理的連続性を評価する必要がある。しかし、これには房総半島北西部や中西部で取得 した調査データと同質のデータを揃える必要があるが、房総半島全域にわたっては困難である。 まず広領域の地化学や熱など比較的得やすい情報をもとに概略の地下水流動形態、地下水賦存状 況を推定し、調査の段階に応じて涵養域や流出域など広域の地下水流動系における重要地点の地 下水混合境界、流動方向、地下水流動境界などを評価するため、有用なデータを追加していくこ とが重要である。今回、評価に必要なデータの抽出、使用可能なデータの選択を行うとともに、 流動境界付近における複数の指標データの深度方向の分布特性を把握することによって、ある程 度地下水流動境界の存在の推定が可能であることを示した。ただし、すべての調査データを網羅 できているわけではなく、データは文献値によるところのものが多いため、データの測定精度、 測定位置等の不確実性についての課題が残る。

本稿で取り扱った房総半島は、流速が大きい流動場でのケースであり、流速の小さい流動場(例 えば、幌延や六ヶ所等)においては、同様な検討が適用可能であるとは限らない。今後、房総半 島以外の流速の小さい流動場や結晶質岩分布地域など地質環境の異なるケースについても同様な 検討を行う予定である。

# 4. まとめ

- 熱、水理、地化学、地下水年代に関する既存データが比較的整備されている房総半島沿岸域 (狭領域)と十分なデータが入手できない房総半島全域(広領域)を対象に、地下水流動特 性、地下水流動境界等に着目した検証項目の評価方法の比較を行った。
- 房総半島全域(広領域)においては、既往の地化学や熱データから概略の淡水と塩水の地下水賦存状況や流動形態の把握が可能であり、狭領域については複数種のデータの組み合わせが確保できれば、地下水流動境界についてもある程度推定が可能であることが明らかとなった。
- 房総半島沿岸域(狭領域)の場合、地下浅所から深部に向かって Ca-HCO<sub>3</sub>型地下水、Na-HCO<sub>3</sub>型地下水、Na-Cl型地下水の3種類の地下水が賦存しており、地表から涵養した地表水は Ca-HCO<sub>3</sub>型地下水、Na-HCO<sub>3</sub>型地下水と同一の地下水混合系にあり、重力ポテンシャルを駆動力とする地下水流動は塩水/淡水境界まで影響を及ぼしているものと推測される。
- 検討対象とする領域のスケールの違いによって評価に必要なデータの種類、活用できるデー タ量、種類が異なり、評価可能な検証レベルも異なる。とくに狭領域については、地下水流 動境界付近に複数の指標データが深度方向に密に存在していることが重要であり、今後、房 総半島以外の地下水環境のケースについても検討する必要がある。

#### 謝 辞

本稿作成にあたって、日本原子力研究開発機構関係者には原稿の査読、御指導・御協力を賜り ました。房総半島の地下水データの検討にあたって、千葉大学の近藤昭彦教授、産業技術総合研 究所の丸井敦尚氏には地下水関連のデータの一部のご提供・ご紹介を頂きました。以上の方々に 深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 三梨昂・奈須紀幸・楡井久(1976):東京湾とその周辺地域の地質(初版)、特殊地質図(20)、 地質説明書、地質調査所.
- (2) 鈴木尉元・小玉喜三郎・三梨昂・岡重文・ト部厚志・遠藤毅・堀口万吉・江藤哲人・菊地 隆 男・山内靖喜・中嶋輝允・徳橋秀一・楡井久・原雄・中山俊雄・奈須紀幸・加賀美英雄・木 村政昭・本座栄一(1995):東京湾とその周辺地域の地質,1:100,000(第2版),特殊地質図,20,109, 2 sheets,地質調査所
- (3) 日本原子力研究開発機構(2008):平成19年度地層処分に係る水文地質学的変化による影響 に関する調査報告書、平成20年3月.
- (4) 丸井敦尚・安原正也・林武司・樋口宏之(2001):東京湾岸の深層地下水、日本水文科学会誌、 第31巻、3号、pp.1-9.
- (5) ベル(2004) : 関東平野第三系以深における深層地下水の特徴、筑波大学大学院環境科学研 究科平成 17 年度修士学位論文、pp.1-54.
- (6) 産業技術総合研究所(2008): 平成 19 年度沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発 成果 報告書、pp.1-256.
- (7) 千葉県地質環境インフォメーションバンク: http://wwwp.pref.chiba.lg.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index
- (8) 林武司・宮越昭暢(2004):水質・同位体組成からみた関東平野における広域地下水流動系、 応用地質学会平成16年度研究発表会講演論文集、pp.407-410.
- (9) 関寿子・林武司・丸井敦尚(2001):関東平野における深層地下水の性状、日本水文科学会 誌、第31巻、3号、pp.11-24.
- (10)Marui A.and Seki H. (2003): Deep groundwater in the Kanto Plain, 日本水文科学会誌、第 33 巻、 3 号、pp.149-160.
- (11)道前香緒里・石賀裕明・石川憲一・千代延俊・丸岡幹男(2003):関東平野の温泉開発と泉 質の特徴およびカッティングスの地質学的検討(予報)、島根大学地球資源環境学研究報告、 22、pp.21-29.
- (12)Laaksoharju,M, Skarman,C., and Skarman,E. (1999) : Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information., Applied Geochemistry, 14, pp.861-871.
- (13)馬原保典・中野朋子・窪田卓見・徳永朋祥・天野光・鈴木崇史・中野孝教・安渡敦史(2007): 深部鹹水の地球化学的性状と流動性に関する検討(2)-茂原の地下水、日本地下水学会 春 季講演会講演要旨、pp.152-155.
- (14)鈴木宏芳・高橋博(1983): 下総深層地殻活動観測井の作井と地質、国立防災科学技術センタ 一研究速報、第48号、pp.1-61.
- (15)内田洋平・大久保泰邦・宮越昭暢(2002):地下水データと深部孔井データの孔底温度の比較

から求めた関東平野の地温勾配、物理探査、第55巻、第3号、pp.191-198.

- (16)酒井隆太郎・宗像雅広・木村英雄(2007): 堆積岩地域における広域地下水流動に関する研究: 養老川流域の例、JAEA-Research 2006-084、pp.1-16.
- (17)近藤昭彦(1985):千葉県、市原市地域における地下水流動系の水収支について、日本地下水 学会誌、第27号、第3号、pp.73-87.
- (18)関陽児・中嶋輝允・上岡晃・金井豊・間中光雄・月村勝宏(2004):関東地方東部における大 深度温泉の特徴-水質と地質との関係-、温泉科学、第54巻、第1号、pp.1-24.
- (19)Kashiwagi H, Shikazono N., Ogawa Y., Higuchi Y., Takahashi M. and Tanaka Y. (2006) : Mineralogical and biological influences on groundwater chemistry of the Boso Peninsula, Chiba, Central Japan: Implications for the origin of groundwater in sedimentary basins, Geochemical Journal, 40, pp.345-361.
- (20)日本原子力研究開発機構(2006):平成17年度地層処分に係る水文地質学的変化による影響 に関する調査 報告書、平成18年3月
- (21)宮越昭暢(1999):養老川流域における地下水流動系について-二次元地下水モデルの MODFLOWによる検討-、千葉大学理学部地球科学科卒業論文、40p.
- (22)宮越昭暢・内田洋平(2001):関東平野における地下水温分布と地下水流動系、地質調査研究 報告、第52巻、6/7号、pp.253-290.
- (23)宮越昭暢・内田洋平・林武司・丸井敦尚・佐倉保夫・川島眞一・河合将文(2006):地下温度 からみた東京低地における地下水環境変化の評価、応用地質、第47巻、5号、pp.269-279.
- (24)鈴木宏芳(2002): 関東平野の地下地質構造、防災科学技術研究所研究報告、第63号、pp.1-16.
- (25)酒井隆太郎・宗像雅広・木村英雄(2009): 堆積岩地域における広域地下水流動特性の評価方 法に関する検討: 房総半島の一事例、地下水学雑誌、51、4、pp.311-329.
- (26)産業技術総合研究所(2007):概要調査の調査・評価項目に関する技術資料-長期変動と地質 環境の科学的知見と調査の進め方-、pp.1-197.

表1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
巫平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例							
如女母 SI 表	基本単位						
和立重 名称	記号						
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>						
体 積 立法メートル	m <sup>3</sup>						
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s						
加速 度メートル毎秒毎	秒 m/s <sup>2</sup>						
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>						
密度,質量密度キログラム毎立方	メートル kg/m <sup>3</sup>						
面 積 密 度キログラム毎平方	メートル kg/m <sup>2</sup>						
比体積 立方メートル毎キ	ログラム m <sup>3</sup> /kg						
電 流 密 度 アンペア毎平方	メートル $A/m^2$						
磁界の強さアンペア毎メー	トル A/m						
量濃度(a),濃度モル毎立方メー	トル mol/m <sup>3</sup>						
質量濃度 キログラム毎立法	メートル kg/m <sup>3</sup>						
輝 度 カンデラ毎平方	メートル $cd/m^2$						
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1						
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1						

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立甲位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 鱼	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
· 協 角	ステラジア、/(b)	er <sup>(c)</sup>	1 (b)	$m^{2/m^2}$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
カーマ				
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{2}$
性線量当量, 個人線量当量		2.		
酸素活性	カタール	kat		s <sup>1</sup> mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SE接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性抜種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を種の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘质	E パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	E ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	E ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量,エントロピー	- ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	- ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	- ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	『ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	- ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	E クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
表面電荷	ラクーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	エクーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
誘 電 率	『ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 辛	ミ ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	- ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量率	ミグレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放射 強度	E ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝 度	<b>E</b> ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	たカタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表 5. SI 接頭語					
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	$10^{-1}$	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{.9}$	ナノ	n
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	а
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z
$10^{1}$	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨクト	У

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60s				
時	h	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	۰	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>				
リットル	L, 1	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>				
トン	t	$1t=10^{3}$ kg				

\_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される数値が美敏的に待られるもの					
名称	記号	SI 単位で表される数値			
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J			
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg			
統一原子質量単位	u	1u=1 Da			
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m			

	表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位						
	名称		記号	SI 単位で表される数値			
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m			
海		里	М	1 M=1852m			
バ	-	$\sim$	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>			
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np	ar送佐1			
ベ		ル	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.			
デ	ジベ	N	dB -				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N					
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s					
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>					
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup><math>-2</math></sup> 10 <sup>4</sup> lx					
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 2} \text{ms}^{\cdot 2}$					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$					
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>					

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
	3	名利	7		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\boldsymbol{\nu}$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	Ŧ		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
$\mathbb{P}$				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
÷	17		11	_	1	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
13	Ц		<i>y</i>		cal	(「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			$\sim$	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています