

バックエンド週末基礎講座

地層処分と地質環境の長期安定性：地質環境の長期予測と不確実性についての検討例

梅田浩司*1 安江健一*1 石丸恒存*1

1 はじめに

2012年9月日本学術会議は、内閣府原子力委員会の審議依頼に対して、「高レベル放射性廃棄物の処分について」と題した回答を取りまとめた[1]。ここで提言されていることの多くは、放射性廃棄物処分に係る政策手段や手続き論に関するものであり、処分技術そのものに関する記述は多くないが、一点、「万年単位に及ぶ超長期にわたって安定した地層を確認することに対して、現在の科学的知識と技術的能力では限界があることを明確に自覚する必要がある」と記されている点が注目される。これは地層処分の安全性に関する科学的知見には限界があるという認識を踏まえたもので、地層処分が我が国で成立するかどうかについて判断したものではないものの[2]、それについての広範な国民の理解を得ることの重要性が述べられている。この点について、松尾[3]は、専門家の間には「超長期にわたる不確実性を考慮しても、放射能が生物圏に影響を与えることのないよう確実に隔離することが可能である」と考えられているが、このような評価・検討がなされていること自体が国民が広く認識し、そのような評価の背景・前提条件や評価の方法について正しく理解するための取組みの必要性を指摘している。一方、日本地質学会は学術会議の回答に対して、「変動帯である日本列島には地層処分に適さない地域が存在する一方で、処分の安全性を担保できるような安定な地域も存在する」ことを2012年11月の意見・提言[4]の中で表明している。このような背景を踏まえ小論では、地質環境の長期安定性の評価・検討の前提となる地質学的現象の長期的な予測の考え方や具体的な検討例について、地層処分研究開発第2次取りまとめ[5]以降の最新の科学的知見も含めて紹介する。

2 地質学的現象の長期予測の考え方

一般に予測とは「将来のことを前もって推し量ること」と記されているが、いわゆる予知（物事が起こる前にそれを知ること）ではない予測、とくに対象とする空間が大きく、ゆっくりと変動するような自然現象について、数万年以上といった長期の時間スケールでの変動を予測する場合には、地質学的なアプローチがきわめて有効となる[6]。数万年以上の長期予測のニーズはこれまで皆無に近かったが、1987年に日本第四紀学会から出版された「百年・千年・万年後の日本の自然と人類」[7]は、人間の一生を超えた長い

将来を予測する意義や予測のための科学的知見を示したものであり、この時代としては特筆すべきである。その後、地層処分の分野を中心に数万年以上といった長期の予測に関する方法論や予測結果の信頼性が議論されている[8,9]。地質学的な時間スケールでの予測の方法論については、1) 外挿法による予測、2) 類推法による予測、3) 確率論による予測、4) モデルを用いたシミュレーションによる予測等、いくつかの方法が提案されている。対象となる現象に応じて予測方法も異なってくるが、例えば、地殻変動に支配される隆起・沈降運動やこれらに伴う侵食作用等は広域的で変動速度が遅い。そのため、プレート運動の枠組みで生じる永続性がある現象の場合には、外挿法が特に有効な予測方法と考えられている[10]。

田中[9]によると外挿法による予測は、①過去から現在までの現象の記載と法則性の抽出、②現象発現の要因、メカニズムの解明、③現象を支配する要因の永続性、④①～③に基づき過去の変動傾向を将来へ外挿、といった手順をとる。したがって、外挿法による予測結果の信頼性は、特に地質学的現象を支配する要因（例えば、プレート運動を含む広義の地殻変動）の永続性が予測の対象とする期間に対して保証できるかが鍵となる。地層処分の長期的な安全性は、将来の外的変動要因を考慮したさまざまなシナリオによって安全評価が行われるが、現在のところその評価期間については定められていない。今後、地層処分の安全評価の期間や方法を決めていく際に、地質学的現象の予測が、どの程度の将来まで科学的に信頼をもってできるか否かを予め検討しておくことが重要と考えられる。

3 地殻変動の一樣継続性

過去の地質学的現象の因果関係や連続性について、笠原・杉村[11]、松田[12]は第四紀後期の地殻変動には、①変位の向きの一様性、②変位の等速性といった経験則を見いだし、これらを「一樣継続性」と呼んでいる。このような変動の一樣継続性という概念は、数年～数十年の測地学的な観測によって認められる短期的な変動傾向ではなく、地形学・地質学的な調査から得られる数千年以上の時間間隔でとらえたときに得られる運動像である。そのうえで、日本第四紀学会編[7]は、変動の一樣継続性が成立している場合には、過去から現在までの変動傾向を同程度の期間の将来まで外挿することが可能であることを示唆した。ここで重要なのは、外挿法による予測期間の目安を与えるためには、変動の一樣継続性がどの地域でいつ頃に成立したかを地形・地質学的な情報から明らかにすることが必要となる。

日本列島の原形は、日本海の拡大とともに、古第三紀漸新世から新第三紀中新世にかけて形成された[13]。その後、日本列島の下に沈み込む太平洋・フィリピン海プレートの

Geosphere stability for long-term isolation of radioactive waste: Geological predictions and their uncertainties. by Koji UMEMA(umeda.koji@jaea.go.jp), Ken-ichi YASUE, Tsuneari ISHIMARU.

*1 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究所

Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

運動方向や速度が変わったと考えられている[14]、日本列島周辺のプレートシステムの基本的な枠組みは、この時代に成立したと考えられている[15]。地殻変動とは、地球内部のエネルギーによって地殻が変形・変位を起こす現象のことであり、それによって隆起・沈降運動や断層運動が引き起こされる。また、地殻変動は火山活動とも密接に関連すると考えられている[16,17]。前述したようにプレートシステムの大枠は、今から1,000万年以上に成立したが、それ以降の地殻変動は必ずしも一様に変形・変位を生じてきたわけではない。第四紀は現在を含む最新の地質時代であるが、それ以前の新第三紀後期に比べて地殻変動は著しく活発であり、①増起伏の時代、②陸化の時代、③断裂の時代、④変位速度のmm/年オーダーの時代等と呼ばれている[18]。これらは千島弧や伊豆-小笠原弧等の衝突をはじめとするプレート間の収束-衝突現象、すなわち圧縮テクトニクスによるものである[12,18]。このうち、とくに第四紀後半には、①変動が一方に進行してきた(変位の累積性)、②その運動方向はほぼ等速的であった(速さの一意性)、③その運動をもたらした応力場は第四紀を通じて持続している(地殻応力の持続性)、④そのような地殻変動は地域ごとに特有のくせをもっている(変動様式の地域性)といった特徴が明瞭になっていったと考えられている[7,19]。また、活断層の累積した変位の総量はせいぜい数kmであることから、平均変位速度が数mm/年程度であるならば、日本列島の山地形成や断層の活動開始は、たかだか百万年前頃からはじまったことになる[20]。すなわち、ここで議論する変動の一意継続性が成立した時期は、当然のことながら地域によっては異なるものの、大局的には中期更新世以降と考えられている。

4 変動傾向の永続性はどこまで保証できるか？

地層処分安全評価では、外的変動要因を考慮した将来のシステムの挙動を記述したシナリオに基づく評価が基本となるが、信憑性をもったシナリオがどの程度の期間(将来)において提示できるかが重要となる。日本列島のネオテクトニクス(現在進行中の変動およびそれと同様な特性の続く最近の時代の変動)の枠組みにおいて多くの地域で地殻変動の方向や速度が一定になったのは中期更新世、すなわち数十万年前以降であった。それでは、予測すべき地質学的現象の重要な要因となる変動傾向の永続性はどこまで保証できるのだろうか？

システムや物理現象の特性を予測するための手法として時系列解析がある。時系列とは時刻の変化とともに値が変化するデータの集合であり、時系列データを分析し、仮説の検証や予測に役立てる方法論が時系列解析である。地質学的現象の将来予測の基本となる外挿法は、パラメトリックな時系列解析モデルを使った予測であり、このようなモデルには自己回帰モデル、移動平均モデル、自己回帰移動平均モデル等がある[21]。

時系列解析モデルによる予測は、時間の経過とともに観測された時系列データに基づき、過去から現在までの現象の履歴が、どのような相互関係があったかを解析し、その

関係性が比較的短い時間は継続すると仮定して、それを予測値としてとり扱う方法である[21]。この場合、過去から現在までの期間(N)に成り立っていた関係性(定常性)は、将来の期間が長くなればなるほど、その関係性そのものが変化していくと考えられ、これらの関係性が継続する確率が高い期間は、0.1N~0.2N程度とされている[22]。この考えに従えば、中期更新世以降に一定になった地殻変動の方向と速度は、将来十万年程度であれば継続する可能性(永続性)が高いということになる。

以上のように、外挿法によって地質学的現象の将来予測は長くとも十万年程度が妥当に思われる。すなわち、十万年を超えるような百万年、千万年といったより長期においては、プレート運動を含む地殻変動の永続性が保証できなくなり、予測に対する不確実性も著しく増大していくと考えられる。以上のことから、評価期間が十万年程度であれば、安全評価の前提となるシナリオに地質学的現象によって生じる地層処分システムの変化に関する予測結果を反映することは十分意味がある。さらに、類推法や確率論、シミュレーション等による予測を併用することにより、その信頼性を向上させることも可能である。しかしながら、十万年以上の長期の安全評価が求められた場合にはどのようにすればよいのであろう。仮に変動傾向を単純に線形外挿して数十万年以上の変動幅を予測し、安全評価のシナリオに反映しても逆にシナリオの蓋然性が乏しくなるだろう。その場合には、保守的な(裕度をもった)安全評価が行えるよう、例えば、沈降域から隆起域への地殻変動の転換等といった仮想的なシナリオを想定した評価を行うことも考えられる。

5 地質環境の長期予測と不確実性の検討：山地形成による地下水理の変化を例に

前述したように、地質環境の変動のように緩慢かつ永続性の高い現象は、外挿法による予測が有効であると考えられている。そのため、予測の前提となる過去から現在までの変動傾向(方向、速度等)を適切に把握することが重要となる。また、対象とする地質環境については、その変動との因果関係がある地質学的現象を国際FEPリスト[23]等によって予め特定し、それらの現象の振る舞いをモデルに適切に反映しておくことが重要となる。ここでは、国際FEPリストに示されている地質の変化に伴う水文学的/水文地質学的変化(Hydrological/hydrogeological response to geological changes: 1.2.10)のうち、地殻変動による山地形成(地形変化)に伴う地下水理の変化についての検討例を紹介する。具体的には、中部日本の代表的な山地である木曾山脈から濃尾平野・伊勢湾に至る庄内川(土岐川)の流域について、過去から現在までの地下水理を数値解析的に復元しつつ[24]、これらの変動方向や速度を外挿することによって、将来十万年程度の地下水理がどうなっていくかを検討していく。

一般に地下水の流れは、地形の起伏、地下への雨水等の浸透量(涵養量)、地質構造や岩石の透水性、温度構造等のさまざまな因子によってコントロールされる。とくに、地

下水流動の駆動力となる動水勾配は地形に支配されることから、地殻変動による隆起・沈降や侵食作用によって長期的には地下水理も変化していく。そのため、過去から現在までの地形発達史（古地形）を復元し（例えば、[25]）数値解析の上部境界条件としてモデル化していくことになる。また、古地形の復元に際しては、変動地形論、気候地形学、理論地形学、地形プロセス論、実験地形学等といったさまざまなアプローチによって、その信頼性の向上を目指していくことが重要となる。

過去から現在までの地下水理の復元については、木曾山脈から濃尾平野に至る北東～南西方向に約 140km、北西～南東方向に約 70km の領域を数値解析的に検討する。解析領域の地形は、主に断層を境界とした定高性の山地からなり、全体として伊勢湾に向かう傾動地形となっている。その中央部には北東から南西に向かって庄内川が流下し、流路に沿って河成段丘が発達するほか、下流では沖積低地が発達する。主な山地はジュラ紀の美濃帯付加コンプレックス、白亜紀の領家花崗岩類・濃飛流紋岩類からなり、それを被覆する中新統の可児・瑞浪層群、鮮新統の東海・瀬戸層群が丘陵をなす。さらに、これを覆う第四系が濃尾平野に広く分布している。

地下水理を含む地質環境はさまざまな地質学的現象と複合的に相互関連しながら変化していくが、特に水理にとって重要なイベントは、この地域のネオテクトニクスの枠組みの中での隆起・沈降運動や断層運動に伴う地形変化であり、これらを考慮した時間断面ごとのシナリオの作成が必要となる。この地域におけるネオテクトニクスは、1.1 Ma 頃まで遡り [26]、北西～南東走向の華立断層をヒンジ (hinge) とするシーソー型の傾動によって断層の北東側は隆起によって木曾山脈を始めとする主要な山地を、南西側は沈降によって濃尾平野を形成した。さらに、0.6 Ma 頃になると木曾山脈の隆起が顕著になったと考えられる [27]。一方、阿寺山地以西には東海・瀬戸層群が広く分布するが、これらの最上位の堆積年代は 1.5 Ma 頃であることから、少なくともこの時期までは、阿寺断層以西は比較的平坦な地形であったと推定できる。以上の情報から、地下水理の変化に重要なイベントは、60 万年前、110 万年前、150 万年前であり、この時代まで遡って地形・地質を復元することになる。図 1 にそれぞれの時代について復元した地形・地質断面図（空木岳～奥三界岳～恵那～養老山）を現在のものとともを示す。

地下水流動解析を行うための数値モデルは、複数の地質断面図から GEOMASS システムの Earth Vision [28] によって作成した。また、地質体ごとの透水係数は、日本の地盤を対象とした透水係数データベース [29] や原位置試験の結果 [30] を基に設定し、定常状態を仮定した飽和不飽和三次元浸透流解析を実施した [24]。境界条件については、上部を自由浸出面として解析領域全体に一定の涵養量（約 200 mm/年；[31]）を与え、それ以外については不透水境界とした。

復元した地形・地質断面図に対応した数値モデルによって地下 10 km まで解析した全水頭分布を図 2 に示す。これによると、1.5 Ma では阿寺断層の東側の標高 300 m の丘

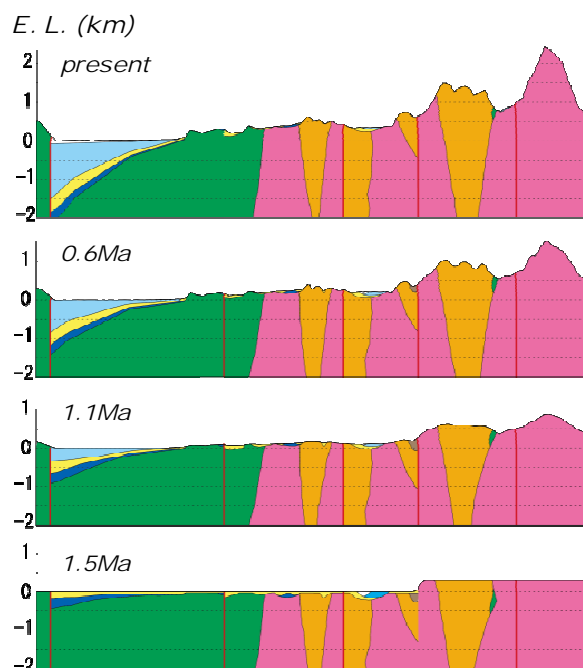


図 1 現在、60 万年前、110 万年前、150 万年前の地形・地質断面図

陵が分布しているが、西側は全域にわたって標高 0 m の低地であり、解析領域全体として地下水の流れは殆ど生じていない。しかしながら、1.1 Ma 以降についてはそれぞれの山地が成長するにつれて地下水の駆動力になる山地部での地形の起伏が大きくなるため、解析領域の東側から西側に向かってポテンシャルが小さくなる。そのため、阿寺山地を涵養域、濃尾平野を流出域とする大局的な地下水流動系が生じることがわかる。このシミュレーション結果によると庄内川の中流域では、地下 1000 m 付近でのダルシー流速は、1.5 Ma で $10^{-10.5}$ m/s、1.1 Ma で $10^{-8.5}$ m/s、0.6 Ma と現在では $10^{-8.0}$ m/s と計算できる。このことは、百万年オーダーの時間スケールでは、1 つの山脈・山地や平野等が形成されるといったイベントが地下水流動特性に特に影響を及ぼす要因であることがわかる。さらに、木曾山脈は 0.6 Ma 頃には、ほぼ現在の標高まで達していたと考えられるが、それに対応して地下水のポテンシャルやダルシー流速も過去 60 万年程度はほぼ一定であったと推定され、十万年オーダーの時間スケールでは上記のようなイベントの影響は小さいことがわかる。

将来の地下水理の予測については、地形発達シミュレーション [32] のように拡散現象を数式化し、数値解析によって将来の地形を予測するといった試みも最近ではなされている [33]。このように将来の地質や透水性、気候等を演繹的なアプローチによって予測し、それをベースに地下水流動解析を行うことも考えられるが、それぞれの予測には個別に不確かさを伴うことから、全体としての予測の信頼性を定量化することは難しい。むしろ、過去から現在まで地下水理の変動方向と速度に着目し、それを外挿するといった帰納的なアプローチの方がそれぞれの不確実性を包含することから、地層処分のようにシステムとしての影響の観点から長期的かつトータルに安全性を評価する場合には扱

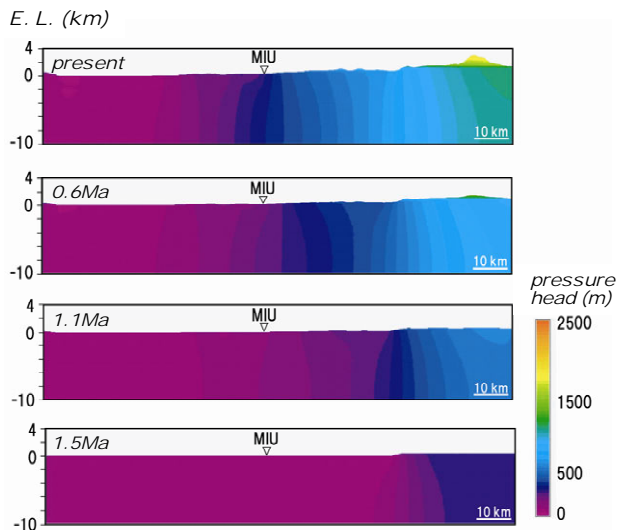


図2 地形・地質断面図(図1)に基づく水理モデル(数値モデル)によって計算した各時代の全水頭分布

しやすい。

図3には、上記に示した庄内川中流域での地下1000m付近でのダルシー流速をそれぞれの時間断面でプロットしたものであり、過去150万年以降の地下水理の時間変化を大局的に示したものである。

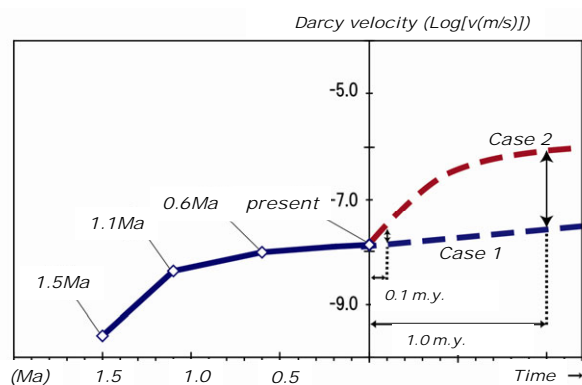


図3 地下1000mのダルシー流速の時間変化と外挿法に基づく将来予測の例

ここで、最近数十万年間の変動傾向をそのまま外挿してみるとケース1のように将来十万年程度、さらには百万年程度まで外挿してもダルシー流速には大きな変化が認められない。しかしながら、より長期の時間スケールでの予測を考えた場合、解析領域で1.1 Ma頃に始まったような山地や平野の形成といったイベントが生じる可能性も想定できる。地層処分の安全性の検討に際しては、このような稀頻度なシナリオを想定した保守的な評価も併せて行うことが重要となる[34]。現在のテクトニクスに転換が生じて隆起速度が大きくなり、山地や平野を形成するようなイベントが現時点で発生したシナリオを考えると、ケース2のようにダルシー流速も急激に大きくなるのが想定される(しかしながら、山地が動的平衡(隆起と侵食が釣り合った状態)に達すればその変化も小さくなっていく)。この場合、ケース1とケース2の外挿値の幅がシナリオによる総合的な不確実性の1つと捉えることができる。このような不確

実性の大きさも当然のことながら、予測する時間スケールによって異なっていくと考えられ、図3によると将来十万年程度と百万年程度ではダルシー流速に換算して2オーダー程度の幅を見込む必要がある。

6 おわりに

小論では、従来の地形・地質データに基づき、地殻変動の持続性と将来予測の目安となる期間について検討した。さらに、地質の変化に伴う水文学的/水文地質学的変化に着目し、実際のフィールドを例に、地下水理の変動方向・速度の外挿によって将来予測を試みた。また、稀頻度のイベントを考慮したシナリオの検討を含めて予測に伴う不確実性を議論してきた。

自然科学においては実験によって検証がなされるので、その理論と検証の間にはきわめて高い蓋然性が認められるが、科学的な不確実性は存在する。地震予知のみならず明日の天気も確実に予測できないのは観測や実験等による限られたデータからの論理的な帰結が複数あり得ることに起因する。放射性廃棄物処分は科学的知見を人間社会に適用して解決すべき問題であり、その適用において最善の努力とさまざまな創意工夫がなされるが、科学的な不確実性を完全に克服することはもちろんできない。これらに係る研究者・技術者の使命は、これらの不確実性の下でも社会から与えられた安全性や経済性等の条件を満たして人間社会が有効に使える技術や仕組みを提案することであり、これらの成果は最終的には社会の中で実証されていく[2]。

参考文献

- [1] 日本学術会議: 回答 高レベル放射性廃棄物の処分について(2012).
- [2] 山地憲治: 高レベル廃棄物処分には学術の総合力が必要. 学術の動向 2013年6月号, 50-52 (2013).
- [3] 松尾雄司: 日本学術会議のレポートと高レベル放射性廃棄物処分の問題. クリーンエネルギー・電力 Flash 「原子力」(2012年9月)(2012).
- [4] 日本地質学会: 「高レベル放射性廃棄物の地層処分について」-地質環境の長期的安定性の観点から(学術会議の報告を受けて)-. 日本地質学会 (2012).
- [5] 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-総論. JNC TN1400 99-020, 核燃料サイクル開発機構 (1999).
- [6] Koide, H.: Geologic problems of radioactive waste disposal in Japan. *Episodes* **14**, 299-302 (1991).
- [7] 第四紀学会編: 百年・千年・万年後の日本の自然と人類. 古今書院, 東京(1987).
- [8] 楠瀬勤一郎, 小出仁: 地質環境予測期間と不確実性の取扱い. 資源と素材 **117**, 808-815 (2002).
- [9] 田中和広: 地質環境の将来予測は可能か? -重要構造物の立地選定や安全な設計に向けて-. 電力土木 **351**, 8-13 (2011).

- [10] 日本地質学会地質環境の長期安定性研究委員会編：地質リーフレット4，日本列島と地質環境の長期安定性．日本地質学会（2011）．
- [11] 笠原慶一，杉村新：変動する地球Ⅰ．岩波書店．(1978)．
- [12] 松田時彦：地殻運動からみた第三紀/第四紀ー第四紀地殻運動の様相の検討ー．月刊地球，**10**，599-603（1988）．
- [13] Taira, A.: Tectonic evolution of the Japanese Island arc system. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, **29**, 109-134 (2001)．
- [14] Cox, A. and Engebretson, D.: Change in motion of Pacific Plate at 5 Myr BP. *Nature* **313**, 472-475(1985)．
- [15] Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M.: Japan Sea, opening history and mechanism: a synthesis. *Journal of Geophysical Research* **99**, 22237-22259 (1994)．
- [16] Wilson, C. J. N.: Taupo's atypical arc. *Nature* **379**, 27-28 (1996)．
- [17] Umeda, K., Ban, M., Hayashi, S. and Kusano, T.: Tectonic shortening and coeval volcanism during the Quaternary, Northeast Japan arc. *Journal of Earth System Science* **122**, 1-11(2013)．
- [18] 松田時彦，衣笠善博：第四紀テクトニクスの特徴と問題点．第四紀研究 **26**，251-254（1988）．
- [19] 日本第四紀学会：日本第四紀地図．東京大学出版会，東京（1987）．
- [20] 太田陽子，小池一之，鎮西清高，野上道男，町田洋，松田時彦：日本列島の地形学．東京大学出版会，東京（2010）．
- [21] 北川源四郎：時系列解析入門．岩波書店，東京（2005）．
- [22] ビュー・コミュニケーションズ：時系列解析法としてのARIMAモデルと予測についての概説．ビュー・コミュニケーションズ（2010）．
- [23] OECD/NEA: Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste - An International Database - (2000)．
- [24] 尾上博則，笹尾英嗣，三枝博光，小坂寛：過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み．日本原子力学会和文論文誌 **8**，40-53（2009）．
- [25] 貝塚爽平：関東平野の地形発達史．地理学評論 **31**，59-85（1958）．
- [26] 森山昭雄：中部山岳地域における山地形成の時代性ー山はいつ高くなったか？ー．変動地形学，古今書院，東京，pp. 87-109（2000）．
- [27] 菅沼悠介，鈴木毅彦，山崎晴雄，菊地隆男：長野県南部，伊那層群のテフラとその対比．第四紀研究 **42**，321-334（2003）．
- [28] Beims, T.: 3-D Structural Modeling Mitigates Risk. *The American Oil & Gas Reporter* (1997)．
- [29] 梅田浩司，柳沢孝一，米田茂夫：日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成．地下水学会誌 **37**，69-77（1995）．
- [30] 竹内真司，下茂道人，西蔦望：1000mボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査．第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，296-300（2001）．
- [31] 宮原智哉，稲葉薫，三枝博光，竹内真司：広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動スケールの検討．サイクル機構技報 **16**，137-148（2002）．
- [32] 野上道男：地理学におけるシミュレーション．地理学評論 **78**，133-146（2005）．
- [33] 草野友宏，浅森浩一，黒澤英樹，國分陽子，谷川晋一，根木健之，花室孝広，安江健一，山崎誠子，山田国見，石丸恒存，梅田浩司：「地質環境の長期安定性に関する研究」第1期中期計画期間(平成17年度～平成21年度)報告書(H22レポート)．日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2010-044（2011）．
- [34] 原子力安全委員会：放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について．原子力安全委員会（2004）．

