

地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究

藤原 治^{*1} 柳田 誠^{*2} 三箇智二^{*3} 守屋俊文^{*4}

日本における地層処分の観点から、隆起運動や侵食作用の捉え方とその研究の重要性について整理した。隆起・沈降・侵食の速さ、規模（時間・空間的広がりなど）、メカニズムなどを地形や地層から読み出す方法論の整備を含めた基礎研究が、これらの地質現象の予測をする上で不可欠である。また、科学的な根拠に基づいて隆起・沈降・侵食の発生（時期や規模）と、それらによる地質環境への影響（程度と範囲）を予測する技術の開発も重要である。基礎研究から応用技術まで、学際的な研究分野が相互に理解し合い、成果をフィードバックしていくことがバックエンド研究の進展に重要である。

Keywords : 地層処分、年代推定、隆起、侵食、将来予測

This paper reviews the present state of researches on tectonic uplift and denudation, and shows perspective goals and direction of future researches from the viewpoint of geological disposal of HLW in Japan. Detailed history of tectonics and denudation in geologic time scale, including the rates, temporal and spatial distributions and processes, reconstructed from geologic and geomorphologic evidences will enable us to make the geological predictions. Improvements of the analytic methods for the geological histories, e.g. identification of the tectonic and denudational imprints and age determinations, are indispensable for the accurate prediction.

Developments of the tools and methodologies for assessments of the degree and extension of influences by the tectonic uplift, subsidence and denudation on the geological environments such as ground water flows are also fundamental problem in the study field of the geological disposal of HLW.

Collaboration of scientific researches using the geological and geomorphological methods and applied technology, such as numerical simulations of ground water flows, is important in improving the safety and accuracy of the geological disposal of HLW.

Keywords: tectonic uplift, denudation, age estimation, geological disposal, geological prediction

1 はじめに

日本列島は中緯度のプレート収斂境界に位置することから、地殻変動が活発で降水量が多く、これらに起因する侵食も盛んである。こうした現象が累積すると、地形や地層の分布状態や構造が変化し、地下水流動などの地質環境にも影響が生じる可能性がある[1]。そのため、放射性廃棄物を地層処分するための安全性を確保するには、将来に生じうる隆起・沈降や侵食などの規模や、それによる地質環境への影響の度合いを適切に予測し、対策を講じておく必要がある。

このような地質現象について将来を直接予測することは不可能であるが、過去の履歴を詳しく調べることで、将来発生する現象をある程度予測し、それに基づいて安全のための対策を施すことは、ある程度可能と考えられる。過去の地殻変動や侵食・堆積作用について、その履歴を如何に詳しく復元出来るかが、地質環境の長期予測の確からしさに関わっている。このような研究では、まず、過去に生じた自然現象の特徴を詳しく調査し、その現象が発生してから地質環境に影響を及ぼすに至るまでのプロセスを理解しておく必要がある。しかし、これら

の自然現象は人間からみれば非常に長い地質時代に時間をかけて生じるため、最近約100年間の観測データだけでは将来予測に必要なデータを得ることは難しい。

隆起・沈降・侵食・堆積などの作用は、その速さや規模によって特徴的な地形や地層（あるいは地質構造）を形成する。たとえば、地殻変動によって作られる地形は変動地形[2]と呼ばれる。このような自然現象は、背景となる地殻変動、気候変動、海面変動によって異なる現われ方をする。また、対象とする時間の長さによっても現象の現れ方が異なる。従って、対象とする自然現象の種類や期間に見合った研究方法が必要である。地層処分技術の開発においては、将来数万年から10万年程度の期間の予測が求められるので、それに見合った長さの期間（地質時代としては第四紀の約170万年間を目安）を対象とする必要がある。ただし、テクトニクスの変遷と関連して、かつては沈降していた場所がやがて隆起に転じるような現象もあり、こうした現象の予測にはより長期間（遠い過去まで遡った）を対象とした研究が必要である。

このレビュー論文では、地層処分にかかわる隆起・沈降に関する研究の重要性との到達点、そして今後の展望について整理した。本論では、原子力研究者（多くは工学系研究者であろう）への研究の紹介と解説を主眼としつつも、地学分野の研究者に対する研究の需要の提起も意図した。個々の研究内容の詳細については、できるだけ多くの文献を引用したので、それらを参照されたい。

本論ではまず、日本列島の隆起や侵食などに関してどのような地形や地層の記録があり、それぞれがどのような特徴を持ち、どのような研究がなされてきたか、を短く述べる。次に、これらの研究で明らかになった問題点と課題を整理する。最後に、こうした自然科学の研究が

Researches on tectonic uplift and denudation with relation to geological disposal of HLW in Japan by Osamu Fujiwara, Makoto Yanagida, Tomoji Sanga, Toshifumi Moriya (moriya.toshifumi@jnc.go.jp)

*1 (元)核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute.

*2 (株)阪神コンサルタンツ 東京支店 Hanshin Consultants Co., Ltd. 〒170-0005 豊島区南大塚3-24-4

*3 日鉱探開(株) 地質部 Nikko Exploration and Development Co., Ltd. 〒105-0001 港区虎ノ門2-7-10

*4 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute. 〒509-5102 土岐市泉町定林寺 959-31

Table 1 Representative methods for estimating the rates of uplift and subsidence

変動の基準	対象期間	年代推定法	事例（主な文献と場所）	日本列島での適用性と問題点
海成段丘	約 32 万年間	火山灰層序など	[4]など；全国を対象	○：精度がよいのは 125ky まで
河岸段丘	約 10 万年間	火山灰層序など	[15, 21]など；全国を対象	○：山間部では誤差が大きい
前浜堆積物	主に完新世、又は約 12 万年間	¹⁴ C 年代測定、火山灰層序など	[22, 23, 25]；房総半島	○：変動量の分解能は高い、海浜平野で有効
地層の堆積曲線	主に完新世	¹⁴ C 年代測定	[26, 27]；房総半島、[28]；濃尾平野	○：相対的海水準変動と地層の発達過程の正確な復元が必要
反射法断面	主に新第三紀以降	放射年代測定、微化石層序、火山灰層序など	[7]など；全国の平野や盆地	○：時間・空間分解能が必ずしも高くない

地層処分技術とどのようにリンクするかについて検討する。

2 研究の現状と課題

2.1 隆起・沈降速度の研究例

日本列島には、地殻変動を反映した様々な地形や地層、活断層、火山などが密に分布している。地殻変動の速度については広域火山灰の発見と火山灰層序の充実[3]などによって段丘や地層の対比精度が向上したことで、定量的な解析が進んでいる[4]。また、活断層の分布や活動性に関する情報の充実[5, 6]によって、山地、盆地の形成と断層活動との関連についての議論などが可能になってきた[7]。さらに、陸上だけでなく日本列島周辺の海底についても活構造やネオテクトニクスに関するデータの蓄積が進んでいる[8]。次に、これらの研究の特徴を地殻変動の解説に主に用いる証拠の種類によって、地形学的方法と地質学的方法に分けて述べる。これらの方法の特徴をまとめて Table 1 に示す。

1) 地形学的手法

隆起・沈降速度の推定には、変動量を算定する基準によっていつかの異なる研究手法が試みられてきた[9]。海岸部に発達する海成段丘は、隆起速度の優れた指標であり、特に、海洋酸素同位体ステージ（以下、MIS）5e に形成された海成段丘は日本列島のほぼ全域に分布し、その旧汀線高度の分布は過去約 12.5 万年間の隆起量（速度）

の分布を近似的に表している[4, 10, 11]。時代が古くなるにつれて侵食のために海成段丘の保存は悪くなるので、長い期間の隆起速度の推定は難しくなる。それでも、三陸海岸など一部の地域では、MIS9（約 32 万年前）、あるいはより古い時代に形成された海成段丘が残っている。こうした地域ではほぼ一定速度で隆起が継続していることが推定されている[4]。

これに対して、内陸部では隆起速度を定量的に推定する証拠が乏しい。第三紀末に形成されたと想定される“侵食小起伏面”や第四紀層と第三紀層の境界を基準面とし、それらの現在の高度分布を第四紀における垂直変動量として、隆起・沈降量分布図が描かれたこともある[12]。

日本における河岸段丘の成因は、周期的に訪れた氷期・間氷期による気候変動と海面変動で説明されている。よく知られているモデルは、間氷期には山間部で侵食が活発化して多量の土砂が生産され、それが海岸部で堆積するのに対して、氷期には山間部では河床における堆積が相対的に卓越し、海岸部では海面低下に応じて侵食が起こると言うものである[14]。

東北日本、中部日本の主な河川には最終氷期に形成された砂礫層からなる段丘が連続的に良く残っている。そして、これら氷期の段丘砂礫の下には最終間氷期（MIS5）に侵食で作られた谷が埋没している。この埋没谷底と現在の河床は、ともに間氷期（後氷期）に形成された地形なので、類似の環境条件したでは河床形態も良く似た形態になると仮定すると、埋没谷底と現河床の比高は、そ

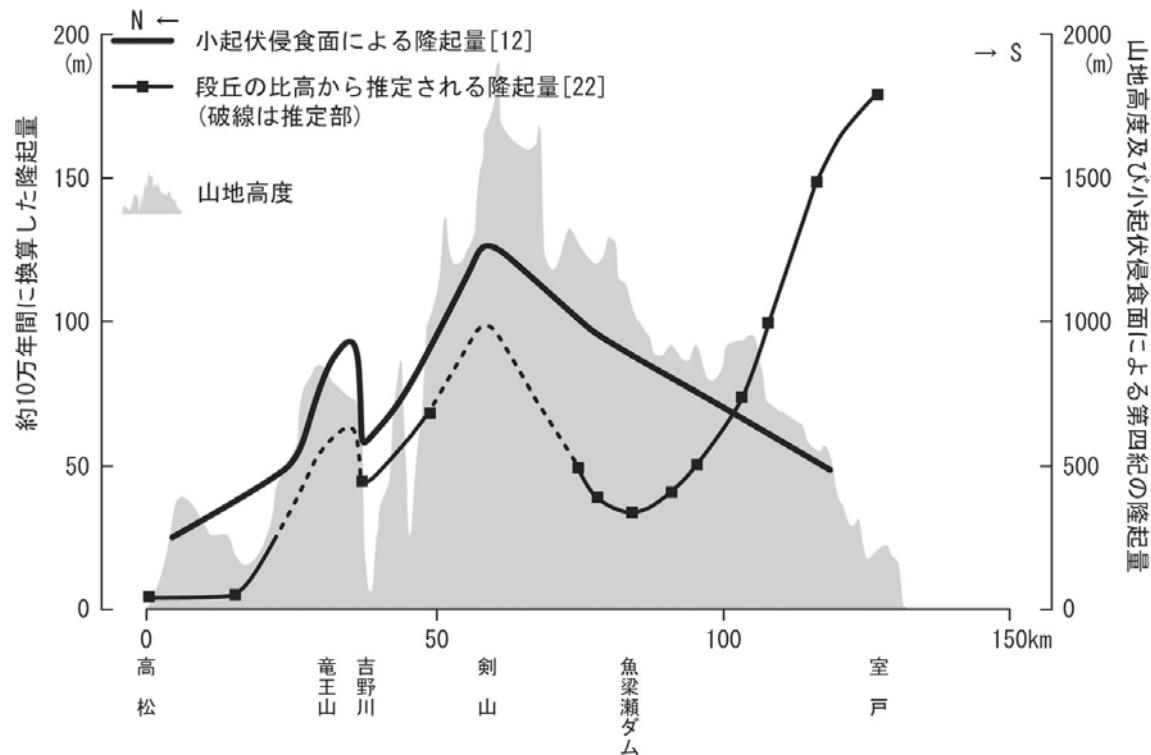


Fig. 1 Methods for estimating the uplift rates

の間の約10万年間の隆起量を示すとされる[13, 15]。さらにその考えを発展させ、最終氷期(MIS2)と一つ前の氷期(MIS6)に形成された河岸段丘は、ともに類似の気候条件化で形成されたものであるから、河川の状況や縦断形が類似しているとみなし、両者の比高から過去10万年間程度の隆起速度を算定する方法(TT法)なども提案されている[16]。この方法はいくつかの地域に適用され、東北地方[17, 18]、関東地方[19]、北海道東部[20]などで隆起速度の推定に活用されている。また、より古い時代への応用も試みられている[21]。

このような隆起速度の推定手法を、四国南岸(室戸)から瀬戸内(高松)への南北地形断面を例に、Fig. 1に示した。海岸部では海成段丘の高度、主要河川の中一下流では河岸段丘の比高(TT法)が隆起量の指標となる。一方、山地の内部では地形的な指標が少ない。山地の両側で河岸段丘が山頂方向へ傾動していることから、山頂ではより大きな隆起速度が推定されるが、正確な値を求めるることは困難である。

こうした地形学的な方法によるデータを総合して、全国を対象に最近約10万年間の隆起・沈降量分布図も試作されている[22]。海岸部ではMIS5e段丘、平野から河川中流部ではTT法、さらに内陸部では周辺で得られた隆起速度を内挿・外挿するなどして隆起速度を推定している。この図をカラー表示にし、日本列島の地形陰影図と重ねて示す(Fig. 2)と、最近の地質時代における隆起(一部

では沈降)の速さと、大局的な地形や構造線との対応が分かる。

2) 地質学的手法

沖積層や海浜堆積物などの新しい時代の堆積物に覆われる地域では、地殻変動の量や速度を地形学的な手法だけで推定することは出来ない。そこで、地表および地下の地層に記録された情報をも活用する必要がある。地層がいつ、どこで、どのようにして形成されたかを詳しく理解することで、地形学的な方法よりも高精度で隆起・沈降運動を解析できることもある。波打ち際で形成された地層(前浜堆積物)は、堆積構造や上下の地層との累重関係などの特徴から他の成因による地層とかなり確実に識別できる。また、それは海面とほぼ同じ高度で形成されたことが明らかなので、離水後の地殻変動量を推定する優れた指標となる。最終間氷期に堆積した前浜堆積物が広く分布する関東平野東部では、この地層の高度分布データから、最終間氷期以降(約12.5万年間)の隆起量の分布と傾動運動や活構造の特徴などについて議論されている[23, 24]。

また、海岸部の完新統を貫くボーリングコアに多数の¹⁴C年代測定値を入れ、堆積相解析[25]と組み合わせることにより、海水準変動や地殻変動に対応した地層の形成プロセスを詳細に議論できるようになってきた。こうした研究によって、例えば、完新世に生じた地震性隆起・沈降の時期や規模を解読する試みが、九十九里浜[26]、三

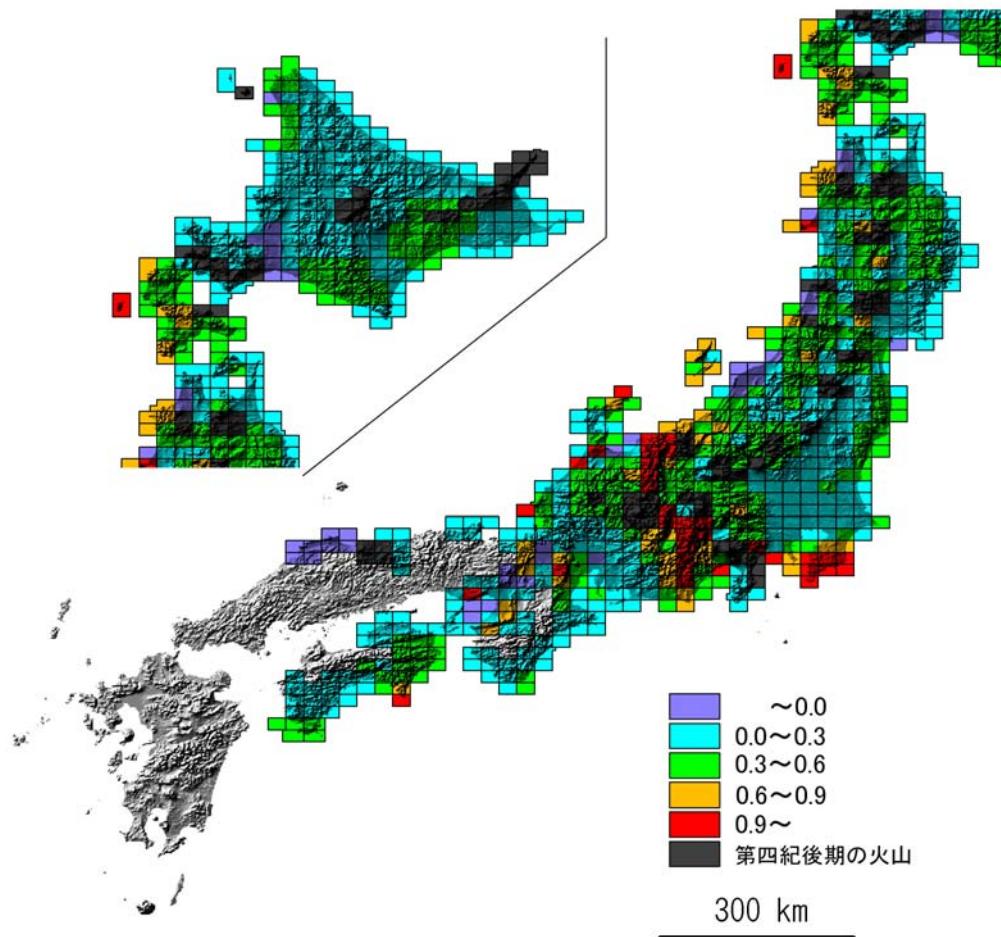


Fig. 2 Regional distribution of uplift rates during the last 100,000 years in Japan

浦半島[27], 房総半島東岸[28], 濃尾平野[29]などで行われている。

反射法音波探査は、厚い堆積層が分布する平野、盆地および海底の地下構造を断面として捉えるのに優れた方法である[30]. 近年ではその結果をボーリングデータなどと組み合わせて、詳しい地下の地質断面の解釈が可能になっている[31]. こうした地質断面に見られる地層の変形の累積状態を解析することで、褶曲や断層などの活動開始時期の推定や、活構造の成長履歴の解読が行われている [7, 32]. 濃尾平野の例ではボーリングコアの堆積相、年代測定、反射法地震探査の組み合わせにより、過去 90 万年にわたる傾動（平均 0.86×10^{-4} /千年）や沈降（最大 1.1 m/千年）の履歴が解読されている[33, 34].

上記のような地質断面にシーケンス層序学の解釈[35, 36]を導入すると、堆積相の種類と重なり方などから、相対的海水準の変動が復元される. 相対的海水準変動は、主に氷床の消長による世界的な海水準変動（ユースタシー）と、堆積場周辺での地殻変動が重なったものである. 堆積シーケンスが示す相対的海水準変動から、ユースタシーを分離できれば、地殻変動を近似的に求めることも

可能と考えられる[37]. この方法はまだ完全には成功していないが、今後発展が期待される.

こうした地質学的手法の改良には、地震性地殻変動などの種々の地質学的イベントがどのように地層中に記録されるかを理解することが重要である[38]. 完新統は、 ^{14}C 年代測定によって堆積年代を精度よく推定できるので、地層の発達過程などを理解するのに良い材料である[39]. 特に、日本列島の海岸平野に堆積している最上部更新統～完新統には、一般に一回の海進・海退サイクルが認められるので、海水準変動にともなう地層と地形の形成プロセスを研究するのに非常に適したフィールドである[40-44].

2.2 傷食速度の研究例

傷食速度の推定には対象とする期間の長さや地域によって、様々な調査・研究手法が試みられている (Table 2). 良く使われるのはダム堆砂量のデータで、ダム湖の完成時以降に堆積した土砂の量と、経過時間から流域における土砂生産速度（傷食速度）を算定する[45, 46]. この方法はダム集水域という地形、気候、地質などの情報が明

Table 2 Representative methods for estimating the denudation rates

侵食量の基準	対象期間	年代推定法	事例（文献と場所）	日本列島での適用性と問題点
谷壁の洞窟と現河床との比高	0 – 380ky 以上	U/Th	[60] ; 中国	△, 石灰岩地帯で有効
ダム堆砂量	最大 40 年程度		[45, 46] ; 日本全国	○ : 対象期間が短い
「天然ダム」の堆積土砂量	数万～数百万年	火山灰層序など	[49] : 台湾, [50, 51, 52] ; 日本	△ : 堆積量と堆積期間の正確な見積もりが困難
開析谷の深さ（海成段丘）	主に 12.5 万年	火山灰層序など	[1] ; 日本全国	○ : 平行後退などの影響で, 計測誤差がある
開析谷の深さ（河岸段丘）	1 ~ 3 万年	表面露出年代法 (^{10}Be 法など)	[53, 55] ; ヨーロッパ, 大西洋沿岸	△-× : 日本列島では, ^{10}Be 法などの表面露出年代測定に適した試料の確保が困難
同上	約 1 万年	^{14}C 法	[54] ; 台湾,	○
開析谷の深さ（火山体）	数千 ~ 100 万年	複数の放射年代測定法	[57, 58] ; 日本	△ : 火山地域に限定

確な流域を対象とするので、流域の平均的な侵食速度と自然条件との関係を定量的に把握できるという利点がある[46-48]。一方で、ダムの堆砂量の観測期間がせいぜい40年程度であり、長期的な侵食速度の傾向を捉えきれない欠点もある。

平野や盆地、池、湖などに堆積した土砂の体積から、後背地の侵食量を推定することも行われている[49-52]。この方法は、万年から数百万年に亘る期間の侵食速度を推定できる利点があるが、実際に侵食で生じた土砂のうちどの程度の割合が堆積するのか、また堆積に要した時間がどれくらいか等について仮定が必要であり、侵食速度の推定に誤差を伴う。

段丘面、溶岩台地、孤立した火山体などの地形面のうち、形成年代と形成時の形態が比較的正確に推定できたものについて、侵食速度を求めることが行われた。地形面が形成されて以降に侵食を開始した開析谷を計測して、その深さから下刻速度が推定された[53-55]。また、開析谷の体積からは段丘面[56]や火山体[57, 58]の侵食量と平均的な侵食速度が求められている。また、開析谷の分布密度などからは段丘面の開析度[59]が計算されている。

カルスト地帯の河谷には、溶食によって形成された洞窟がしばしば認められる。この洞窟は、幾つかの高度レベルに認められることがあり、かつての河床の高さが断続的に変化したことを示している。洞窟に残された堆積物の年代を ^{14}C 法や U/Th 法などで測定することで、河床高度の時間変化、すなわち河川の下刻速度を推定した例

もある[60]。

一方で、河川の側刻速度に関する研究は非常に限られている[61]。その主な要因は侵食に要した時間の見積もりが困難なためである。

3 隆起・侵食に関する研究の問題点と課題

地形や地質の記録からは、万年オーダー、あるいはそれ以上の長期に亘って過去に生じた現象の履歴が得られるが、一方で特有の問題点もある。Table 1, 2 に示した各手法の問題点を見ると、隆起・沈降や侵食の量を算定する基準となる地形や地層の「初期条件」(形成時の形態)の復元と、形成年代を推定する年代測定技術が特に重要な課題である。

3.1 初期条件の設定

隆起量の推定に長らく使われてきた“侵食小起伏面”は、形成プロセスや形成年代に不明瞭な点が多く、また面の対比自体も不確実な場合があり、現在の知識からは隆起量の指標として不適切なことが多いとされる[62]。こうした理由のために、Fig. 1 では侵食小起伏面を基準にした隆起量[12]と、第四紀後期の段丘から推定される値との間にかなり差が生じている。

沈降量の推定に使われる、“第四紀層”と“第三紀層”的境界[12]、あるいは浅海成第四紀層の基底高度[63]も、堆積年代の推定に加えて、古水深の補正などが難しい。堆積場と堆積プロセスの復元だけでなく、地層の厚密状

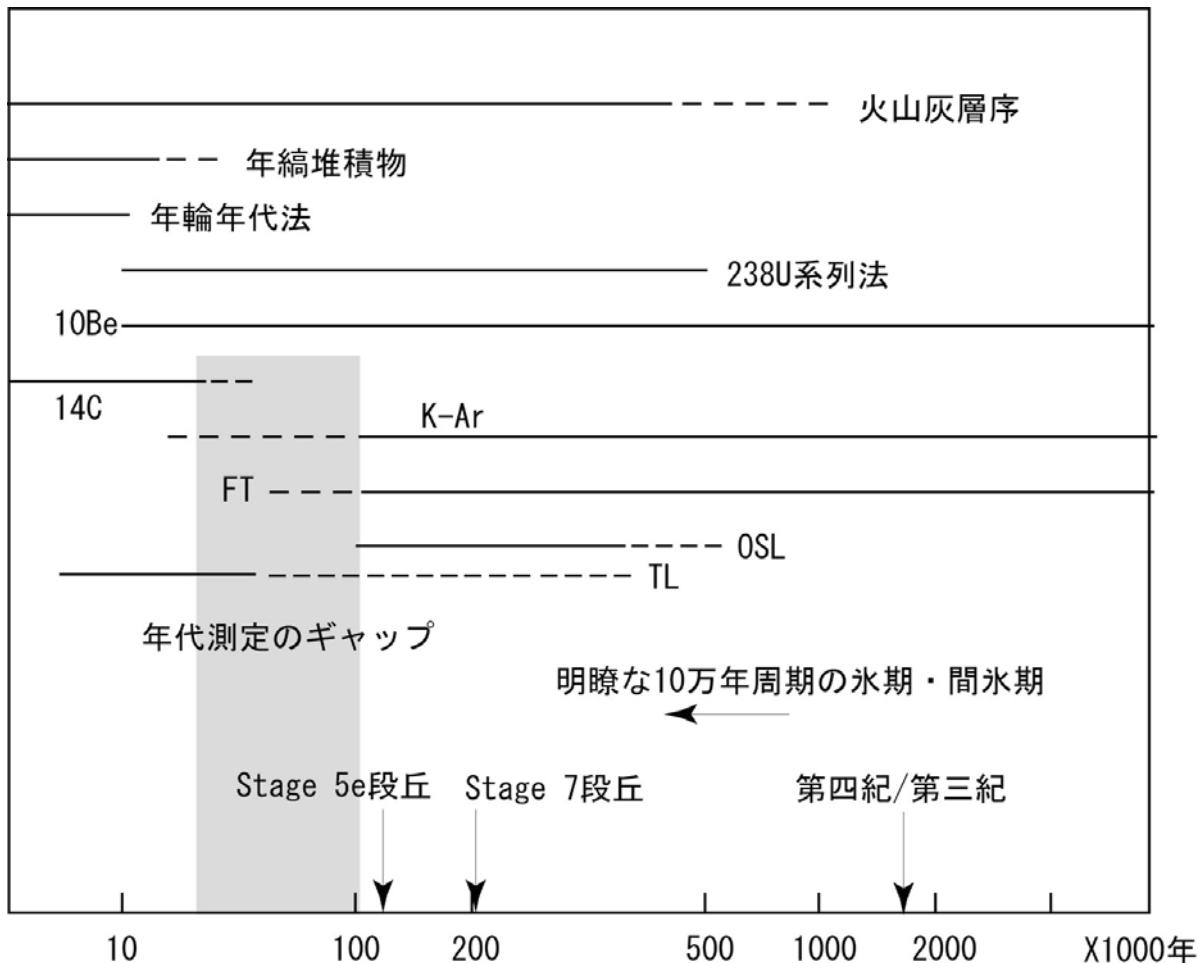


Fig. 3 Available time range of representative dating or age estimation methods for the Quaternary sediments

態や削剥量などを補正するデータと技術が必要である。

3.2 編年技術の改良

隆起・沈降運動の開始時期や速度を特定するには、変動の基準となる地形面や地層の年代を正確に求めることが必須条件である。第四紀以降の地質時代としては若い年代を扱うのに良く用いられる方法をFig. 3にまとめた。

日本列島は、 ^{14}C 年代測定データの蓄積や火山灰層序研究などの発展により、第四紀後期の地形や地層の編年が世界的にも非常に進んだ地域である[4]。しかし、 ^{14}C 年代測定法の限界を超える古い地形や地層で、年代指標となる火山灰も未発見な場合には、形成年代の推定や対比が不確実なこともある。 ^{14}C 年代測定法とその他の測定法では、3万年前から10万年前の期間が通常の測定技術で埋められない測定のギャップである。このギャップに相当する期間は、地層区分に係わる研究の対象として重要な時代であるが、これを埋めることは技術面などで難しい場合が多い。

こうした問題の解決には、光ルミネッセンス (OSL) 年代測定法や宇宙線生成核種 (TCN) 法などが有望であ

る。OSL 法は地層中に普遍的に含まれる石英などの鉱物を用い、かつ測定可能な年代のレンジが 10^3 ~ 10^6 年と広い。OSL 年代測定法の場合は、侵食・堆積過程で鉱物粒子が太陽光に曝されることにより鉱物中の放射線損傷が解消され、堆積して太陽光から完全に遮断されたときから鉱物中の放射線損傷の生成・蓄積が再度始まること (光ブリーチング仮説) が前提とされる。この手法では、海岸段丘堆積物を例に光ブリーチング仮説が成立すると見なせるデータが得られつつあり[64]、まだ測定誤差が大きいものの、地形編年データも加味すれば MIS5 (約 12.5 万年前) と MIS7 (約 20 万年前) の段丘を区分出来ることがある[65, 66]。

宇宙線生成核種 TCN 法は、地表に降り注ぐ宇宙線によって露出した岩石の表層に ^{10}Be や ^{26}Al などの宇宙線生成核種がある一定の率で生成・蓄積することを利用して、岩石が地表に露出していた期間 (表面露出年代) を算定する[67-70]。宇宙線を遮る水 (雪や氷も含む) や堆積物で厚く覆われることなく、また殆ど侵食も受けずに露出し続けている岩石が測定の対象となる。こうした岩石の作る段丘面を刻む谷の深さなどから、下刻速度を求める

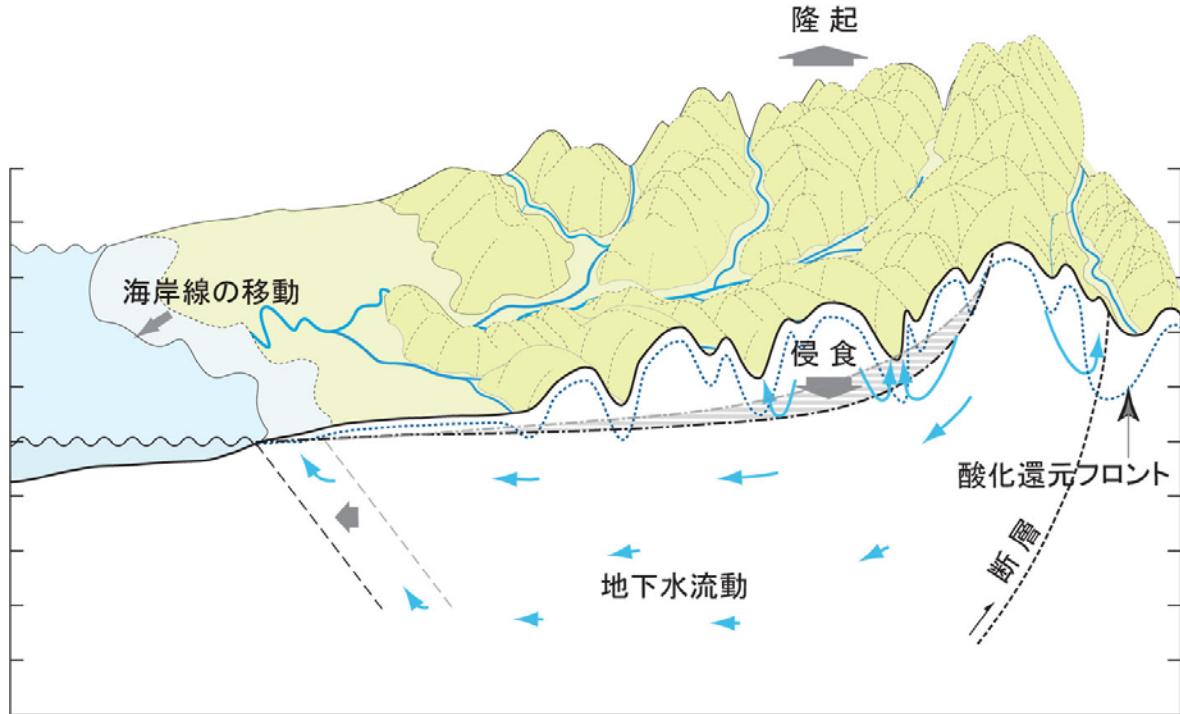


Fig. 4 Schematic illustration of the influences of uplift and erosion on the geological environments

ことも行われている[53, 55]。

FT法やK-Ar法などの鉱物結晶の放射年代測定手法は、岩体がゆっくりと冷却する過程で鉱物中の放射起源核種の散逸が止まり閉鎖系になった時期を示す。この時の温度は閉鎖温度と呼ばれ、鉱物によってある幅に決まっている。一つの岩体について閉鎖温度の異なる複数種の鉱物を用いて多くの放射年代測定を行うと、閉鎖温度が高い鉱物から低い鉱物へと年代値が若返っていく結果が得られる。これらのデータを年代と温度を縦・横軸としたグラフにプロットすると、岩体の冷却過程が復元される[71]。こうした冷却過程を、山体の熱伝導モデルや地温勾配などから理論的に導かれる冷却経路と比較すると、岩体が何時どのような深度に定置したかが推定でき、そこから隆起や侵食の時期や規模を推定できることもある[72-75]。この方法は、放射年代測定に適した鉱物を含む火山岩や深成岩が露出している地域で適用でき、侵食が速い山体の中心部などが適している。ただし、計算過程で多くの仮定が必要である。

いずれの手法も測定のための理論と技術は進展しており、機器の測定精度は第四紀の地殻変動や気候変動の研究にとって十分な精度に達しつつある[76]。しかし、上述したような測定に適した条件を満たす試料を入手することが日本列島では難しい。例えば、OSL法では、段丘の離水時期を正確に示し、光ブリーチングが成立している試料を得ることが難しく、また、TCN法は日本列島のような侵食速度が大きい地域では、¹⁰Beや²⁶Alが蓄積するより先に削剥されてしまう。地層あるいは地形面の形成

後、どのような履歴を辿ったかが正確に分かることも課題である。

地質環境の将来予測の研究に必要な年代測定の精度は、上記の例のように MIS5（約12.5万年前）と MIS7（約20万年前）の段丘を区別できる程度でよい場合もある。この程度の測定精度であっても、地形や地層の発達と氷期一氷期との対応関係を通じて、対象とする地形面の形成時期を地質年代の世界的な標準である海洋酸素同位体ステージに、かなり正確に対応させることもできる。このように、地層処分の観点から、どの程度の測定精度が必要かを検討することも重要である。さらに、各種の年代測定法を相補的に用いることで、地形や地層の年代をより正確に推定できるようになるだろう。

3.3 その他の問題点

内陸部の隆起量の推定には、TT法[16]が利用できるが、この方法が有効に使えるのは主に平野部から河川の中流部までである。山地部では形成年代が正確に決定された河岸段丘が少ないことや、河岸段丘の比高が必ずしも隆起量を表わしていない可能性がある[16, 77, 78]。また、河岸段丘の比高が示す隆起速度は主な河谷沿いの値であり、地形的に高い山稜部ではより隆起速度が大きいはずである（Fig. 2）。しかし、山稜部の隆起量を直接求める確実な手法はまだ開発されていない。こうした内陸部の隆起速度の推定については、正確な年代測定や火山灰層序に基づく段丘対比の見直し[78, 79]や、内陸部において隆起と侵食とのバランス状態について研究が進むことで、あ

る程度可能になると考えられる。

海岸平野の地殻変動を地層記録から復元する際には、汎世界的な海面変化（ユースタシー）とローカルな地殻変動の分離が課題である。堆積相などの情報と変動地形とを組み合わせることで、地殻変動のより詳しい解明が進むであろう[26, 28]。反射法探査では、探査記録に見られる反射面が何か（侵食面、火山灰層など）を特定することが、地層の堆積と変形の履歴を復元する上で不可欠である。地表付近の地形と地層のデータ、さらに物理探査による地下深部のデータを組み合わせて行くことで、隆起・沈降運動の開始時期や様式などがより詳しく解明できるようになると期待される。

4 地層処分技術へのリンク

最近では、概要調査地区等の選定と安全規制に係わる要件が整理されるとともに、地層処分における地質環境の長期安定性研究の重要性と今後の展望に関する検討も進んでいる[80, 81]。その中で、地層処分システムの安全性評価のために特に重要な視点は、「地質学的な長さの時間で変化する現象を記述すること」、「地質環境への影響の程度やその範囲を予測評価すること」である。

前者については、将来の隆起や侵食の量（最大値や平均値）と様式（隆起や侵食の速さとその空間分布）を予測することが重点となる。また、後者については、隆起や侵食によって地形や地層が変化（変形）した結果、土被り厚や地下水の流動などが「どのような範囲で」、「どのように変化するか（あるいは変化しないか）」を評価することが重要である。

4.1 隆起や侵食の量と様式の予測

地層処分においては、将来の地殻変動や侵食について、その量や速度（最大値、平均値）、向き（傾斜方向など）を、現実的な値として見積もることが重要である。この見積もりは、地形や地層の記録に基づいて次のように行うことになる。

隆起・沈降の予測では、対象とする地域に分布する変動地形や地層（地質構造）の種類を調べ、地殻変動のパターンを類型化することが最初のステップである。そして、対象とする地域の変動が日本列島で見られる典型的地殻変動パターン[4, 82, 83]のうち、どれに当たるかを分類する。次に、その変動の累積が何時から始まり、どのくらいの速さで進んでいるか、また、変動の空間的広がりはどのくらいか、を検討する。各パターンの変動地形や地質構造が、形成開始から時系列に沿ってどのように発達するかは、天然の事例や理論的な実験からかなり分かっている。ある地域で見られる変動が、こうした発達プロセスの中で何処にあるかを明らかにすることで、将来の変動がどう進展するかを推定し、変動の量や様式が

予測可能となる。

また、ある地域で見られる地殻変動は、その地域だけの局所的なものではなく、より広域に及ぶ変動の一部であることが多い。このような場合には、様々な空間サイズと発達段階にある変動地形や地質構造が集まって、全体として一つの広域的な変動帯を形成していると見るのが妥当である。日本海東縁変動帯は北海道東岸から北陸沿岸までを含む広域変動の例であり、様々な規模と発達段階にある活褶曲などの集合体である[32]。この変動帯に属する柏崎平野の例では、新第三紀末以降では西側から東側へと発達段階の若い構造が配列している（褶曲の主な活動場が東側へ移動している）ことが知られている[84]。こうした例では、個々の変動地形や地質構造が今後どのような推移を迎えるかが、広域の変動帯の中に見られる地形・地質構造発達の時系列と比較することで可能となる。

地殻変動の数値シミュレーションはめざましく進展しているが、そこでは変動地形や地質構造の観察データが重要な役目を果たしてきた[85-87]。数値解析の結果の妥当性評価に観察事実が反映され、一方で断片的な観察データを数値解析が補いつつある。万年オーダーでの長期的な地殻変動の予測の確実性を増すためには、このような数値解析と野外観察データとの相互補完が必要である。

侵食の将来予測についても、まず、地形や地層に残された過去の履歴を基に現象の類型化を行い、それに基づいて時系列に沿った変遷を把握することが重要である。侵食の研究でも、高速で3次元の地形変化を解析する数値シミュレーション[88]が行われるようになってきた。

4.2 地質環境への影響の評価

日本における地層処分の安全確保の基本的な考え方は、適切なサイト選定によって地層処分にとって安定な地域を選び、そこに性能に余裕を持たせた人工バリアを設置し、地下水への十分な工学的対策を講じることである[80]。法定要件や環境要件などに沿って、過去10万年間の総隆起量が300mを越える場所や、処分場およびその周辺の地質環境に著しい変動をもたらす恐れのある地域は、文献調査を主体とした概要調査地区選定段階で棄却される[89, 90]。概要調査およびそれ以降の段階では、残された地域について、特に、隆起や侵食によって地下水理や水質への影響が生じるかを評価する必要がある。

こうした予測評価では、動水勾配のほか、地下水の涵養域から流出域までの流路を含む水理地質構造に関する情報が重要である。動水勾配については、将来の地形勾配だけでなく、透水性などに関係する岩相の3次元分布なども重要な情報となる[1]。水理地質構造については、流路に分布する地層の種類と厚さなど、透水性や地下水との反応による水質形成に関する情報も重要である（Fig. 4）。

こうした地形や水理地質構造に関する情報を得るため

には、フィールドデータだけでなく、数値シミュレーションなどを相補的に用いることが重要である。そのために、サイクル機構では万年オーダーでの隆起や侵食による地形変化を3次元で解析するシミュレーション技術の開発を進めている[91, 92]。

5 おわりに

地形や地層の情報から、隆起・沈降運動や侵食作用の解説手法が整いつつあり、それらの情報を応用した将来予測までもが展望できるようになってきた。この展望を実現して行くには、上に述べた科学的な基礎研究から安全な地層処分の実現へ向けた応用研究までが、刺激しあい連携して進展していくことが必要である。基礎研究としては、隆起・沈降・侵食の速さ、規模（時間・空間的広がりなど）、メカニズムなどを地形や地層から読み出す技術の改良・開発が必要になる。応用研究としては、科学的な根拠に基づいて隆起・沈降・侵食の発生予測（時期や規模）と、それによる地質環境への影響（程度と範囲）を予測する技術の開発が重要である。

地層処分システムの性能評価などの工学的見地からは、必要とする情報の種類とスペック（分解能やデータ形式など）を自然科学分野に提言し、一方で、自然科学分野は野外観察データから得られた情報の持つ意味や限界などについて工学などの分野に説明することが、地層処分技術の開発における課題の一つである。このような学際的な研究分野が相互に理解し合い、成果をフィードバックしていくことがバランスの良い研究の進展につながる。

参考文献

- [1] 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 守屋俊文: 地層処分から見た侵食作用の重要性－海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例に－. 原子力バックエンド研究 **11**, 139-146 (2005).
- [2] 米倉伸之, 岡田篤正, 森山昭雄 編: 変動地形とテクトニクス. 古今書院, 東京 (1990).
- [3] 町田 洋, 新井房夫: 新編 火山灰アトラス 日本列島とその周辺. 東京大学出版会, 東京 (2003) .
- [4] 小池一之, 町田 洋 編: 日本の海成段丘アトラス. 東京大学出版会, 東京 (2001) .
- [5] 活断層研究会 編: 新編日本の活断層－分布図と資料. 東京大学出版会, 東京(1991).
- [6] 中田 高, 今泉俊文 編: 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 東京(2002).
- [7] 池田安隆, 今泉俊文, 東郷正美, 平川一臣, 宮内崇裕, 佐藤比呂志 編: 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 東京 (2002).
- [8] 徳山英一, 本座栄一, 木村政昭, 倉本真一, 芦寿一郎, 岡村行信, 荒戸裕之, 伊藤康人, 徐 壇, 日野亮太, 野原 壮, 阿部寛信, 坂井眞一, 向山建二郎, 海域地質構造マップワーキンググループ: 日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史 (CD-ROM 版). 海洋調査技術, **13** (2001).
- [9] 米倉伸之, 貝塚爽平, 野上道男, 鎮西清高 編: 日本の地形 I 総説. 東京大学出版会, 東京 (2001).
- [10] Ota, Y. and Omura, A.: Late Quaternary shorelines in the Japanese islands. The Quaternary Research, **30**, 175-186 (1991).
- [11] Ota, Y., Koike, K., Omura, A. and Miyauchi, T.: Last interglacial shoreline map of Japan. Contribution for IGCP276, 1 sheet (1992).
- [12] 第四紀地殻変動研究グループ: 第四紀地殻変動図. 国立防災科学技術センター(1969).
- [13] 貝塚爽平: 関東の第四紀地殻変動, 地学雑誌, **96**, 51-68 (1987).
- [14] 貝塚爽平: 空からみる日本の地形. 岩波書店, 東京 (1983).
- [15] 吉永秀一郎, 宮寺正美: 荒川中流域における下位段丘の形成過程. 第四紀研究, 25, 187-201(1986).
- [16] 吉山 昭, 柳田 誠: 河成地形の比高分布から見た地殻変動. 地学雑誌, **104**, 809-826 (1995).
- [17] 田中和広, 遠田晋次, 上田圭一, 千木良雅弘: 我が国の地質環境の長期的変動特性(その2)－隆起, 沈降特性評価手法の提案と適用性検討－. 電研報告, U96028, 809- 826 (1996).
- [18] 小池一之, 田村俊和, 鎮西清高, 宮城豊彦 編: 日本の地形 3 東北. 東京大学出版会, 東京(2005).
- [19] Tajikara,M.: Late Quaternary crustal movement around Kanto mountains, Japan. Proc. HOKUDAN International Symposium and School on Active Faulting, 503-505(2000).
- [20] 蛇谷竜太, 田中和広, 尹英亜: 十勝～網走付近の内陸部隆起量分布と地殻変動特性境界. 地球惑星科学関連学会 2002 年 合同 大会 予稿集 CD-R, Q037-P005(2002).
- [21] 高木俊男, 柳田 誠, 藤原 治, 小沢昭男: 海岸段丘から推定した河床高度変化の歴史, 地学雑誌, **109**, 366-382(2000).
- [22] 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二: 日本列島の最近約 10 万年間の隆起速度の分布. 月刊地球, **26**, 442-447(2004).
- [23] 増田富士雄, 中里裕臣: 堆積相からみた鹿島一房総隆起帯の運動像. 月刊地球, **10**, 616-623 (1988).
- [24] 藤原 治, 増田富士雄, 酒井哲弥, 岡崎浩子, 斎藤晃, 鈴木俊秀: 海浜堆積物からみた下総台地の隆起運動像. 堆積学研究, **43**, 39-46 (1996).
- [25] 増田富士雄: ダイナミック地層学－古東京湾域の堆積相解析から－ (その2 発展編), 応用地質, **30**,

- 29-40(1989).
- [26] 増田富士雄, 藤原 治, 酒井哲弥, 荒谷 忠: 房総半島九十九里浜平野の海浜堆積物から求めた過去6000年間の相対的海水準変動と地震隆起. 地学雑誌, **110**, 650-664(2001).
- [27] 藤原 治, 増田富士雄, 酒井哲弥, 入月俊明, 布施圭介: 過去10,000年間の相模トラフ周辺での古地震を記録した内湾堆積物, 第四紀研究, **38**, 489-501(1999).
- [28] Sakai, T., Fujiwara, O. and Kamataki, T.: Tectonic uplifts recorded in topography and borehole successions in the Isumi River Lowland, mid Boso Peninsula, central Japan Mem. Geol. Soc. Japan, no. 58, 51-62 (2004).
- [29] 鳴橋竜太郎, 須貝俊彦, 藤原 治, 栗田泰夫: 完新世浅海堆積物の堆積速度の変化から見た桑名断層の活動間隔. 第四紀研究, **43**, 317-330 (2004).
- [30] 横田 裕: 反射法地震探査と地下構造解析の重要性と問題点. 第四紀研究, **39**, 357-361(2000).
- [31] 岩淵 洋: 大阪湾と伊勢湾の活構造. 第四紀研究, **39**, 303-314(2000).
- [32] 大竹政和, 平 朝彦, 太田陽子 編: 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス. 東京大学出版会, 東京(2002).
- [33] 須貝俊彦, 杉山雄一: 深層ボーリング (GS-NB-1) と大深度地震探査に基づく濃尾傾動盆地の沈降, 傾動速度の総合評価. 平成10年度活断層, 古地震研究調査概要報告書, 工業技術院地質調査所, 77-87 (1999) .
- [34] 須貝俊彦, 杉山雄一, 水野清秀: 深度600mボーリング (GS-NB-1) の分析に基づく過去90万年間の濃尾平野の地下層序. 平成10年度活断層, 古地震研究調査概要報告書, 工業技術院地質調査所, 69-76 (1999) .
- [35] Jersey, M.T.: Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In Wilgus, C.K. et al., eds., Sea-level changes: An integrated approach. Soc. Econ. Paleont. Mineral., Spec. Pub., no. 42, 39-69(1988).
- [36] Walker, R.G. and James, N.P. eds. Facies Models: Response to sea level change. Geol. Ass. Canada (1992).
- [37] 保柳康一: 堆積盆解析におけるシーケンス層序学: 一次元解析から三次元解析へ. 地質学論集, no. 45, 30-42(1995).
- [38] 藤原 治, 池原 研, 七山 太 編: 地震イベント堆積物—深海底から陸上までのコネクション—地質学論集, no. 58, 169pp (2004).
- [39] 増田富士雄: 高密度で測定された ^{14}C 年代測定値による完新統のダイナミック地層学, 地学雑誌, **107**, 713-727(1998).
- [40] 増田富士雄, 藤原 治, 酒井哲弥, 荒谷 忠, 田村亨, 鎌滝孝信: 千葉県九十九里浜平野の完新統の発達過程. 第四紀研究, **40**, 223-233 (2001).
- [41] Tamura, T., Masuda, F., Sakai, T. and Fujiwara, O.: Temporal development of prograding beach-shoreface deposits: the Holocene of Kujukuri coastal plain, eastern Japan. Marine Geology, **198**, 191-207(2003).
- [42] 山口正秋, 須貝俊彦, 藤原 治, 大森博雄, 鎌滝孝信, 杉山雄一: 濃尾平野ボーリングコア解析にもとづく完新統の堆積過程. 第四紀研究, **42**, 335-346(2003).
- [43] 田村 亨, 増田富士雄: 多数の年代値を入れた波浪卓越型堆積シーケンスの研究—千葉県九十九里浜平野と宮城県仙台平野の完新統から得られた最近の成果—. 地学雑誌, **113**, 1-17(2004).
- [44] 山口正秋, 須貝俊彦, 藤原 治, 大森博雄, 鎌滝孝信, 杉山雄一: ボーリングコアの粒度組成と堆積速度からみた木曽川デルタの微地形と堆積過程. 第四紀研究, **44**, 37-44 (2005).
- [45] Yoshikawa, T.: Denudation and tectonic movement in contemporary Japan. Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, no. 6, 1-14(1974).
- [46] 藤原 治, 三箇智二, 大森博雄: 日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, no. 5, 85-93(1999).
- [47] Ohmori, H.: Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development. Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, no. 10, 31-85 (1978).
- [48] 大森博雄: 日本島山地における隆起と侵蝕のダイナミックス. 月刊地球, 号外 32, 14-21(2001).
- [49] Li, Y-H.: Denudation of Taiwan Island since the Pliocene Epoch. Geology, **4**, 105-107(1976).
- [50] 阿子島 功: 山形県馬見ヶ崎川流域における過去2万年間および最近の侵食速度. 地形, **4**, 97-106(1983).
- [51] 吉永秀一郎, 西城 潔, 小岩直人: 崖錐の成長から見た完新世における山地斜面の削剥特性. 地形, **10**, 179-193 (1989).
- [52] 小口 高: 山地流域の侵食域と堆積域における最終氷期末期以降の土砂移動の量的検討. 地形, **12**, 25-39 (1991).
- [53] Schaller, M., Blanckenburg, F., Veldkamp, A., Tebbens, L.A., Hovius, N. and Kubit P.W.: A 30000 year record of erosion rates from cosmogenic ^{10}Be in Middle European river terraces. EPSL, **204**, 307-320 (2002).
- [54] Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsien, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C., Stark, C.P., Lague, D. and Lin, J.C.: Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. Nature, **426**, 648-651 (2003).
- [55] Reusser, L.J., Bierman, P.R., Pavich, M.J., Zen, E., Larsen, J. and Finkel, R.: Rapid Late Pleistocene incision of Atlantic passive-margin river gorges. Science, **305**, 499-502 (2004).

- [56] 宮脇昌弘, 藤原 治: 段丘や台地の開析度から見た第四紀の侵食速度, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 600(1997).
- [57] 鈴木隆介: 日本における成層火山体の侵蝕速度. 火山(2), **14**, 133-147 (1969).
- [58] 鈴木隆介, 横山勝三: 火山体の削剥速さ. 地形, **2**, 53-58 (1981).
- [59] Tokunaga, E., Tamura, T., and Machida, H.: A morphometric study of dissection on the dated coastal terraces in South Kanto, Central Japan. Abst. 24th IGC, 1, 128-129 (1980).
- [60] Wang, F., Li, H., Zhu, R. and Qin, F.: Late Quaternary downcutting rates of the Qianyou River from U/Th speleothem dates, Qinling mountains, China. Quaternary Res., **62**, 194-200 (2004).
- [61] 鈴木隆介, 野田弘幸, 安倍義郎: 日本における河川の側刻速度. 地形, **4**, 3-47 (1983).
- [62] 米倉伸之: 展望: 日本における変動地形研究. 米倉伸之, 岡田篤正, 森山昭雄 編「変動地形とテクトニクス」, 古今書院, 東京, 203-222 (1990).
- [63] 藤原 治: 第四紀構造盆地の沈降量図. 小池一之, 町田 洋編「日本の海成段丘アトラス」, 東京大学出版会, 東京, 85-96(2001).
- [64] Tanaka, K., Hataya R., Spooner, N.A., Questiaux, D., Saito, Y. and Hashimoto, T.: Dating of marine terrace sediments by RSR, TL and OSL methods and their applicabilities. Quat. Sci. Rev., **16**, 257-264 (1997).
- [65] 蟠谷竜太, 田中和広: 段丘堆積物のOSL年代測定. 月刊地球, 号外 26, 139-144 (1999).
- [66] 蟠谷竜太, 白井正明: 浅海堆積物のOSL年代測定. 第四紀研究, **42**, 347-359 (2003).
- [67] Nishiizumi, K., Kohl, C.P., Arnold, J.R., Dorn, R., Klein, J., Fink, D., Middleton, R., Lal, D.: Role of in situ cosmogenic nuclides ^{10}B and ^{26}Al in the study of diverse geomorphic processes. Earth surface processes and landforms, **18**, 407-425 (1993).
- [68] Bierman, P.R.: Using in situ produced cosmogenic isotopes to estimate rates of landscape evolution: A review from the geomorphic perspective. Jour. Geophys. Res., **99**, B7, 13885-13896(1994).
- [69] Gosse, J.C. and Phillips, F.M.: Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. Quat. Sci. Rev., **20**, 1475-1560(2001).
- [70] Perg, L.A., Anderson, R.S. and Finkel, R.C.: Use of a new ^{10}Be and ^{26}Al inventory method to date marine terraces, Santa Cruz, California, USA. Geology, **29**, 879-882 (2001).
- [71] Harayama, S.: Youngest exposed granitoid pluton on Earth: Cooling and rapid uplift of the Pliocene-Quaternary Takidani Granodiorite in the Japan Alps, central Japan. Geology, **20**, 657-660 (1992).
- [72] 原山 智: 世界一若い露出 pluton の冷却史—北アルプス, 滝谷花崗閃綠岩の年代と冷却モデル. 地質学論集, no. 43, 87-97(1994).
- [73] Bando, M., Sekine, K., Bignall, G. and Tsuchiya, N.: Petrography and uplift history of the Quaternary Takidani Granodiorite; Could it have hosted a supercritical (HDR) geothermal reservoir? Jour. Volcanol., Geotherm. Res., **120**, 215-234 (2003).
- [74] Burbank, D.W., Blythe, A.E., Putkonen, J., Sitaula, B.P., Gabet, E., Oskin, M., Barrows, A., and Ojha, T.P.: Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas. Nature, **426**, 652-655 (2003).
- [75] 及川輝樹, 和田 肇: 飛騨山脈北部における 1 Ma 頃の急激な隆起—北部フォッサマグナ西縁, 居谷里層の礫組成を指標として—. 地質学雑誌, **110**, 528-535(2004).
- [76] 青木賢人: ^{10}Be 露出年代法を用いた氷成堆積物の形成年代の測定—木曽山脈北部, 千畳敷カール, 濃ヶ池カールの事例—. 第四紀研究, **39**, 189-198 (2000).
- [77] 田力正好: 河成段丘を用いた内陸部の地殻変動量の推定. 月刊地球, 号外 31, 173-181(2000).
- [78] 蟠谷竜太: 中, 後期更新世から現在までの内陸部隆起量評価の現状と課題. 月刊地球, **26**, 448-451(2004).
- [79] 蟠谷竜太, 鳥越祐司, 山本信哉, 柳田 誠, 佐藤 賢: 河成段丘を用いた隆起量評価手法の高度化とその応用. 日本応用地質学会平成 16 年度研究発表会講演論文集, 25-28 (2004).
- [80] 武田精悦, 中司 昇, 梅田浩司: 地質環境の長期安定性と地層処分—今後の研究開発に向けた視点—. 月刊地球, **26**, 332-338 (2004).
- [81] 梅田浩司, 大澤英昭, 野原 壮, 笹尾英嗣, 藤原 治, 浅森浩一, 中司 昇: サイクル機構における「地質環境の長期安定性に関する研究」の概要—日本列島のネオテクトニクスと地質環境の長期安定性—. 原子力パックエンド研究 **11**, 97-111 (2005).
- [82] Ota, Y.: Late Quaternary vertical movement in Japan estimated from deformed shorelines. Suggate, P. and Cresswell, M.M., eds., Quaternary Studies. Roy. Soc. New Zealand Bull., **13**, 231-239 (1975).
- [83] 貝塚爽平, 鎮西清高 編: 日本の山 <新版日本の自然 2>. 岩波書店, 277pp (1995).
- [84] 岸 清, 宮脇理一郎: 新潟県柏崎平野周辺における鮮新世～更新世の褶曲形成史. 地学雑誌, **105**, 88-112(1996).
- [85] Huan, S., Sacks, I.S. and Snee, J.A.: Topographic and seismic effects of long-term coupling between the subducting and overriding plates beneath Northeast Japan. Tectonophysics **269**, 279-297(1997).
- [86] Huang, S., Sacks, I.S. and Snee, J.A.: Compressional deformation of island-arc lithosphere in northeastern Japan resulting from long-term subduction-related tectonic forces: finite-element modeling. Tectonophysics,

- 287, 43-58 (1998).
- [87] 佐藤利典, 松浦充宏: プレート境界における応力の蓄積過程と大地震の繰り返しに伴う地殻変動サイクルのモデル化について. 地震, 2, 50, 283-292 (1998).
- [88] Nogami, M., Fujiwara O. and Sanga, T.: Simulation of a small drainage basin during the future of 120,000 yrs. Trans. Jap. Geomph. Union, 24, 105-106(2002).
- [89] 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律, 法律第117号.
- [90] 原子力安全委員会(2002)高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について. 21p.
- [91] 核燃料サイクル開発機構: 地質環境の長期安定性に関する研究. 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成14年度報告－. JNC TN1400 2003-004, (3)-45-58 (2003).
- [92] 核燃料サイクル開発機構: 地質環境の長期安定性に関する研究. 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成15年度報告－. JNC TN1400 2004-007, (3)-119-136 (2004).
- [93] 国土地理院：“数値地図 50 m メッシュ（標高）CD-ROM 版”. 日本 I (北海道), 日本 II (東日本), 日本 III (西日本) (1997, 1999).