

中深度処分における隆起と侵食の考え方

廣田明成*1 伊藤一充*1,*2

我が国の中深度処分における隆起と侵食の考え方について整理した。河川の上流および中流域となる内陸部の河川においては、氷期には河床への堆積が進み、間氷期には河床が侵食される。地殻変動が生じている地域でこの現象が繰り返されることにより、同じ気候条件下で同じ河床縦断面形が再現される河川では、約10万年間の気候変動1サイクルを超える長期間で、侵食速度と隆起速度が等しくなる。しかし、間氷期の期間のみでは、侵食速度が隆起速度よりもはやくなる。したがって、中深度処分の評価期間である10万年以下の短期間では、間氷期の最大侵食深が廃棄物埋設地に対して大きな影響を与える可能性がある。一方、河川の下流域となる海岸部においては、侵食基準面となる海面高度が低下する氷期において、侵食速度が隆起速度よりもはやくなる。したがって、10万年以下の短期間では、氷期の最大侵食深が廃棄物埋設地に対して大きな影響を与える可能性がある。加えて、過去の研究成果から廃棄物埋設地周辺の隆起量を評価する場合においては、採用するデータの時間スケールを考慮し、適用可能性について検討することが重要となる。

Keywords: 中深度処分, 隆起と侵食, 氷期, 間氷期, 侵食基準面, 評価期間

This paper reviews tectonic uplift and surface erosion within the scope of intermediate depth disposal in Japan. With regard to the endorheic area in the middle reach of rivers, sediment supply increases during glacial periods while the riverbed is eroded during interglacial periods. The erosion rate is almost equal to the uplift rate in the long term, if the same longitudinal river profile reappears in the same climate period beyond one glacial-interglacial cycle for about hundred thousand years in the area occurring crustal movement. However, the erosion rate is higher than uplift rate for interglacial periods. Therefore, for interglacial periods shorter than hundred thousand years which corresponds to the evaluation period of intermediate depth disposal, the maximum erosion depth of the riverbed may have a large impact on the disposal site. On the other hands, in the lower reach of rivers near the coast, the erosion rate is higher than uplift rate for glacial periods with lowering of the sea level and the base level of erosion. Therefore, the maximum erosion depth may have a significant impact on the disposal site for glacial periods shorter than hundred thousand years. For evaluating tectonic uplift based on the previous studies at disposal sites, it is important to examine the applicability of the data considering their timescale.

Keywords: intermediate depth disposal, uplift and erosion, glacial period, interglacial period, base level of erosion, evaluation period

1 はじめに

日本列島はプレート境界に位置することから地殻変動が活発で、多くの地域で隆起活動が起きている[1]。また、破砕帯等の弱い岩石が多く分布し、かつ比較的降水量が多いことから、侵食作用も大きいと考えられる。放射性廃棄物の埋設において、隆起および侵食作用の評価は深度の確保の観点等から、重要な課題となる。

放射性廃棄物埋設において考慮が必要となる自然現象は数多く存在し、それぞれに特徴がある。例えば、火山活動や断層活動は、特定の場所で発生する自然現象であり、地質学的時間スケールと比較して短時間に終了する。一方で、隆起および侵食は広い範囲、日本列島においては陸上のほとんどの地域で、多くの場合は緩慢に進行する自然現象である。このことから、隆起および侵食は、特定の場所を避けることでその影響を完全に回避することは困難であり、廃棄物埋設地の場所がどこであろうとも、適切な影響評価が必要となる可能性が高い。そのため、放射性廃棄物埋設の観点から「隆起・侵食」の研究、隆起を考慮した地形変化および核種移行の研究は、これまでも多く行われてきた[例えば、1-9]。そして、これらの研究は主に地層処分に想定した研究となっているため、10年以上の長い評価期

間を想定しているケースが多い。一方で、中深度処分においては、10万年以下の期間での「隆起・侵食」の評価が必要となる。

そこで、比較的長期の評価期間が想定される地層処분을念頭に行われてきたこれまでの「隆起・侵食」の研究成果を、第二種廃棄物埋設の中で、比較的放射能濃度の高い廃棄物を埋設する中深度処分に適用した場合に留意すべき点について考察する。具体的には、まず、放射性廃棄物埋設の主な検討対象になってきた地層処分に関する評価期間の考え方について海外および我が国の事例から整理する。次に、我が国における地層処分および中深度処分の検討で、「隆起・侵食」がどのように扱われてきたかを整理する。さらに、「隆起・侵食」の研究例が多い海成段丘の発達した海岸部および河成段丘の発達した内陸部で、これまでの地球科学的研究成果を放射性廃棄物埋設の評価に適用する際の留意点について整理する。加えて、隆起量評価手法における留意点について整理する。最後に、隆起の空間的広がりおよび時間変化について過去の研究例から整理する。なお、本論は、自然現象である隆起および侵食について網羅的かつ総合的に論じるものではなく、今後、我が国で中深度処分事業が進んでいく際に、隆起および侵食に関して、具体的に上がりうる課題について取り上げている。また、本論は、地層処分分野、地質学分野等の先行研究を引用して、これらの研究成果を中深度処分における侵食および隆起の検討に適用した場合の留意点を考察するものであり、先行研究の詳細内容については、引用文献等を参照していただきたい。

Study on tectonic uplift and surface erosion within the scope of intermediate depth disposal by Akinari HIROTA (hirota_akinari_ni7@nra.go.jp) and Kazumi ITO

*1 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門
Division of Research for Radioactive Protection and Radioactive Waste Management Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル

*2 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (GSI, AIST)
〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 つくば中央第7

(Received 13 May 2022; accepted 12 October 2022)

Table 1 Time scale covered by spent nuclear fuel disposal assessment in other countries.

国名など		期間	備考
フランス	実施主体	100 万年	100 万年後において、放射性核種が十分減少しているといえる。処分場は 100 年以上、可能な限りの期間、安全な設計がなされるべきである。しかし、長い時間スケールは地球科学的な予測が困難である[10].
フィンランド	実施主体	100 万年	海外の評価期間と一致している。また、100 万年で使用済核燃料の放射性物質量が燃料を作る前の天然ウラン鉱石の放射性物質量と同程度になるため[11].
スウェーデン	実施主体	100 万年	SSMFS 2008:37[13]にしたがって評価期間を 100 万年としている。この期間はインベントリの放射能毒性が天然ウラン鉱石と同程度になる期間よりも長い[12].
	規制機関	定量的解析：1000 年 リスク解析： 少なくとも 10 万年 最大で 100 万年	1000 年間は人間の健康と環境への影響を定量的に解析しなければならない。リスク解析は少なくとも 10 万年、または氷期 1 サイクルに当たる期間を含むべきである。リスク解析の期間は可能な限り拡張されるべきだが、最大で 100 万年とする[13].

2 放射性廃棄物埋設の評価期間

地層処分の評価期間においては、100 万年という評価期間が設定されているケースが多い。実施主体が地層処分の評価期間を示している、フランス、フィンランド、スウェーデンの 3 か国を例にして、評価期間の考え方について整理する。フランスの実施主体である ANDRA は 100 万年後にはインベントリが十分減少しているため妥当な期間であるとしたうえで、100 万年よりも長い時間スケールは地球科学的な予測が困難であり、放射能減衰の面から顕著な効果は得られないと述べている[10]。フィンランドの実施主体である Posiva は、海外の例にならって評価期間を 100 万年としており、期間設定の解説において、100 万年後の核燃料と天然ウラン鉱石を比較している[11]。スウェーデンの実施主体である SKB は評価期間を 100 万年とし、この期間を、インベントリの放射能毒性が天然ウラン鉱石と同程度になるまでの期間よりも長いとしている[12]。スウェーデンの規制当局においては、1000 年間は人間と環境への影響を定量的に解析しなければならない期間と定めたうえで、リスク解析の期間を少なくとも 10 万年とし、可能な限り拡張されるべきであり、最大で 100 万年としている[13]。詳細は、Table 1 に整理している。

我が国の地層処分における評価期間の要件は、まだ定められてはいない。原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という。）が取りまとめた「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現[14]」（以下、「包括的技術報告書」という。）の「第 2 章 安全確保の基本的考え方」において、諸外国における定量的な評価をする期間について「多くの場合、100 万年という時間枠が採用されている（例えば、[15-17]）」と言及している。しかし、この報告書内では、評価期間を設定してはならず、線量の最大値が現れるまでの期間を対象として解析計算を実施している。これは、核燃

料サイクル機構（現、日本原子力研究開発機構）が 1999 年に取りまとめた「わが国における高レベル放射性廃棄物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[18]」（以下、「第 2 次取りまとめ」という。）も同様である。一方、包括的技術報告書の「付属書 6-10 隆起・侵食の影響に係る検討」においては、将来の隆起・侵食による処分施設の地表接近に関する概略的評価を具体的な地域・場所を特定することなく行っているが、「多くの国で定量的な安全評価の期間として設定されている 100 万年時点での処分場の深度」を対象としている[14]。また、包括的技術報告書の本編、第 3 章「地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化」において、「将来 10 万年程度を超えるような長期間を対象とした自然現象の発生可能性に係る技術評価」に係る現状の技術レベル・課題を整理しているが、このような自然現象に「隆起・侵食」が含まれている[14]。

我が国の中深度処分では、令和 3 年 9 月 29 日に開催された令和 3 年度第 35 回原子力規制委員会[19]で、「第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る関係規則等の改正及び中深度処分に係る審査ガイドの策定」が了承された。改正された規則の第十二条（中深度処分に係る廃棄物埋設地）の第 1 項第六号において「廃止措置までに廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであること。」とされている[19]。また、解釈 12 条 8 一において「廃止措置の開始後から数 10 万年を経過するまでの間において海水準変動に伴う侵食の影響を受けるおそれがある場所に廃棄物埋設地を設置する場合には、廃止措置の開始後から 10 万年が経過した時点において、放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設され、又は設置された物が混合したものと公衆との接近を仮定した設定に基づき、評価される公衆の受ける線量が 20 ミリシーベルト／年を超えないこと。」とされている[19]。

加えて、解釈 12 条 8 二イ(3)では「評価の対象とする期間は、廃止措置の開始後から公衆が受ける線量として評価した値の最大値が出現するまでとする。ただし、上記一に規定する評価を行った結果、評価される公衆の受ける線量が 20 ミリシーベルト／年を超えない場合においては、廃止措置の開始後から公衆が受ける線量として評価した値の最大値が出現するまで又は 10 万年が経過するまでのうちいずれか短い期間とする。」とされている[19]。さらに、ピット処分およびトレンチ処分に関しては、解釈 13 条 8 一において「(前略) 評価の対象とする期間は廃止措置の開始後 1000 年が経過するまでの期間とすること。(後略)」とされている[19]。以上から、条件はあるものの、我が国の中深度処分を含めた、第二種廃棄物埋設の評価期間は 10 万年もしくはそれ以下となる。

以上のように、諸外国の地層処分の評価期間は、それぞれ事情は異なるものの、10 万年を超える比較的長い期間となっている例が多い。また、我が国では評価期間は定められていないが、包括的技術報告書[14]でも「隆起・侵食」は 10 万年程度を超えるような期間を対象とした自然事象とされている。このような現状も影響してか、地層処分研究では比較的長い評価期間を想定した研究になっているケースが多い。一方で、中深度処分は評価期間が 10 万年以下であり、これらを対象とした研究例は少ない。したがって、地層処分の研究成果を 10 万年以下の評価期間が想定される中深度処分に適用した場合の適用可能性についての検討が必要となる。

3 我が国の放射性廃棄物埋設の検討に係る「隆起・侵食」の考え方

これまでに我が国で行われてきた地層処分の検討、中深度処分の基準作りについて、「隆起・侵食」がどのように検討されてきたかについて整理する。

3.1 地層処分における「隆起・侵食」の考え方

地層処分では、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(以下、「最終処分法」という。)施行令の第一条において、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律第二条第二項の政令で定める深さは、地下三百メートル以上とする。」と定められている。また、最終処分施設建設地の選定については、「文献調査」、「概要調査」および「精密調査」という段階的な調査を通じて、これを行うことを規定している。

段階的な調査に入る前の 2017 年 7 月に、科学的特性マップが公表された[20]。これは地層処分を行う場所を選ぶ際にどのような科学的特性を考慮する必要があるのか、それらは日本全国にどのように分布しているかを大まかに俯瞰できるように、マップの形で示したものである。この中で、「隆起・侵食(隆起・侵食の著しい範囲)」において、好ましくない範囲の基準を「海水準低下による最大 150 m の侵食が考えられる沿岸部のうち、隆起速度最大区分(90 m 以上/10 万年)のエリア」としている[20]。この基準の設定理由は、「海水準変動(10 万年で最大 150 m)を考慮すると、相対的な隆起量が 240 m/10 年以上となると考え

られる。この地域の中には相対的な隆起量が 300 m/10 万年を超える可能性がある地域を含むと考えられるため。」としている[20]。科学的特性マップに先立って公表された地層処分技術 WG とりまとめ「地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果」において、内陸部の侵食に関しては、「隆起があった場合には隆起した分だけ侵食する、隆起量の予測の不確実性が高い場合は保守的に侵食基準面まで侵食する、等と仮定する方法が考えられる。」としている[21]。また、沿岸部の侵食に関しては、「地形面と侵食基準面である海水面との比高から、侵食量の時間的な変化を積算して評価する方法等が考えられるが、不確実性が高い場合には、氷期において海水準が 150 m 程度低下した状態を想定し、侵食量を保守的に評価することが考えられる。沖積層の基底深度の情報も、将来の侵食量を推定する際の目安となると考えられる。」としている[21]。そのうえで、「好ましくない範囲」を「隆起が顕著な沿岸部で、海水面低下量と合わせて大きな侵食量が見込まれる地域」とし、その考え方において、隆起と海面低下量(150 m)がすべて侵食されることを想定している[21]。

このように、我が国の高レベル放射性廃棄物は、最終処分法で 300 m 以深に埋設することが定められており、科学的特性マップおよび地層処分技術 WG においては、隆起量と侵食量が等しいことを保守的な設定としたうえで、評価が行われている。このとき、沿岸部に関しては、単純に隆起量を侵食量とするのではなく、隆起量と侵食基準面となる海面の低下量の合計から侵食量を推定している。侵食基準面は侵食作用がおよぶ限界のレベルであるため、この方法は保守的な設定としては妥当と考えられる。内陸部に関しては、隆起した分だけ侵食する、としており海面低下を考慮していない。放射性廃棄物埋設の分野では、隆起量と侵食量を等しいとする考え方の例は古くからあり、「第 2 次取りまとめ」においても採用され、隆起速度と侵食速度が等しいとの仮定の下で安全評価が行われている[18]。

以上のように、「隆起・侵食」は、保守的な設定として隆起量と侵食量を等しいと仮定して扱われてきた。しかし、本来、侵食とは、流体の運動によって地形物質が物理的、化学的、生物学的に除去される作用である。そして、侵食を引き起こす主体となる流体によって、河食、海食、風食等の名称が付いている[22]。また、重力のみによる現象(地すべり、落石等)も広義の侵食に含まれる[22]。一方で「隆起・沈降」はプレートテクトニクスに起因する応力作用によって地盤が上昇もしくは沈降する現象である。このように、隆起と侵食は原因、プロセス等が異なる別の自然現象である。また、隆起は侵食基準面との比高を増大させる場合に侵食作用に影響を与える自然現象であるが、それのみでは侵食作用を引き起こすわけではない。このことを踏まえると、隆起量と侵食量を等しいとする考え方は、それが保守的な設定として適用可能なケースでは、簡便な手法である。しかし、この手法の適用可能性については、正しく評価する必要がある。

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書における「隆起・侵食」の検討では、包括的技術報告書の付属書 3-5 に、隆起・侵食の影響に係る調査・評価の基本的な考え方と文

献調査および概要調査の段階における調査・評価の流れが記述されている[14]。この中に、隆起と侵食、それぞれの評価方法が示されている。隆起に関しては、将来のプレート運動の継続性を仮定できる期間について検討し、地形・地質構造発達過程を外挿することにより評価するとしており、侵食量（最大下刻量）に関しては、予測された隆起・沈降に対して、過去の侵食履歴等を考慮して評価する、としている[14]。包括的技術報告書本編では、将来の隆起量を見積もった上で、侵食量を見積り、将来著しい侵食が想定される範囲を把握することとされている[14]。この考え方は、隆起は侵食に影響を与える自然現象であるが、侵食自体は、河川、海等の営力によって引き起こされる自然現象であることと整合している。

3.2 中深度処分における「隆起・侵食」の考え方

中深度処分においては、「2 放射性廃棄物埋設の評価期間」で記載したとおり、令和3年度第35回原子力規制委員会[19]で規則等の改正が了承された。改正された規則の第十二条（中深度処分に係る廃棄物埋設地）の第1項第2号において「侵食により地表からの深さが七十メートル未満に減少するおそれがないものであること。」とされている[19]。また、この規則の解釈において「第1項第2号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、隆起・沈降及び気候変動による大陸氷床量の増減に起因する海水準変動を考慮した侵食（廃棄物埋設地の近くに、河川がある場合は下刻の進展に伴って谷幅が広がる側方の侵食も考慮し、海岸がある場合は海食による侵食も考慮する）による10万年間の深度の減少を考慮しても、10万年後において廃棄物埋設地を鉛直方向に投影した地表面のうち、最も高度の低い地点から廃棄物埋設地の頂部までの距離が70メートル以上であることを求めている。」としている[19]。

このように、中深度処分の規則および解釈は、隆起・沈降および海水準変動を考慮した侵食による影響があっても、10万年間において、廃棄物埋設地の深度が70m以上確保されていることを求めている。また、その侵食等には河川の下刻および側方侵食、海食による侵食が含まれていることが、解釈で示されており、「隆起・沈降」に加えて「海水準変動」も侵食に関する考慮対象としている。

3.3 「隆起・侵食」の考え方のまとめ

以上のように、地層処分および中深度処分において、「隆起・侵食」は考慮が必要な自然現象として扱われている。また、侵食は重要な検討対象である一方、隆起に関しては、そのみでは侵食作用を引き起こす原因ではなく、侵食基準面との比高を増大させる場合に、侵食に影響を与える自然現象となる。これまで、地層処分で適用されてきた、隆起量と侵食量を等しいとする考え方は、それが適用できないケースでは、隆起量を評価したうえで、該当地域の侵食量を評価する必要がある。次章では、これまでに行われてきた「隆起・侵食」の研究を中深度処分に適用する際に留意すべき点について整理する。

4 隆起・侵食に係る先行研究の成果を中深度処分の検討に適用する際の留意点

侵食の形態はその地域によってさまざまであるが、河川侵食の下刻作用（いわゆる線的侵食）がその地域における最大侵食深の要因となる可能性が高い。大きな河川や谷による下刻作用の研究およびそれらを含めた地形変化の研究は、廃棄物埋設の分野に限らず、多く行われている[例えば5, 23-29]。また、河川下刻は流域や時期によってその形態は異なり、内陸部に相当する河川の上～中流域では温暖期に、海岸部に相当する下流域では寒冷期に下刻が進行するとされている（例えば[30]）。加えて、海岸部に関しては、海食が下刻作用以上に大きな侵食の原因となりえる。

ここでは、大きな侵食となる可能性が高い線的侵食と海食について、侵食に影響を与える隆起、海水準変動等を考慮しつつ、侵食の傾向が異なる内陸部と海岸部を分けて、中深度処分の検討で課題として上がりそうな観点について、検討した。

4.1 内陸部における「隆起・侵食」の検討における留意点

内陸部の河川は、河川の上流域もしくは中流域に該当するケースが多く、これらの流域では寒冷期に河床への堆積が進み、温暖期に河床が侵食される作用を繰り返す。同じ気候条件下で同じ河床縦断形が再現される河川では、最終氷期（MIS 2）で形成された河成段丘とその前の氷期（MIS 6）で形成された河成段丘の比高から隆起量を評価することが可能となる[例えば、25, 26, 31]。これは、氷期－間氷期サイクルが続いた場合、十分長い期間で、平均侵食速度（下刻速度）と隆起速度がほぼ等しくなることを示している。第2次取りまとめ[18]では、当時印刷中であった高木らの論文[26]を引用して、条件を満たす河川では隆起速度と侵食速度がほぼ等しいという考え方を示している。ただし、この考え方は、約10万年間の氷期－間氷期サイクルよりも短い期間では、間氷期に隆起速度よりも速い速度で侵食が進むことを示している。なお、高木らの論文[26]は、関東・中部地方に分布する河川を対象にしており、限定された地域の河川で得られた研究成果であることに注意が必要である。また、河川の下刻に限定しなければ、丘陵の谷密度と起伏の研究では、隆起速度の比較的速い台地では侵食速度が比較的速いことが示されている[27]。

このように、内陸部における隆起と侵食には、関係性があり、その結果として、ある期間で見れば侵食量が隆起量と等しくなる研究例は多い。しかし、約10万年の期間では、信濃川の山間部で隆起量の1.3 - 1.4倍の侵食量が示された研究例が存在する[26]。比較的短い期間では1000年あたり2.2 - 7.0 m という急速な河川下刻が生じた例もある[26]。以上から、内陸部の河川では、侵食と堆積を繰り返すことで平均的な侵食速度が隆起速度に近づくのであって、より短い期間では、隆起速度を超えた侵食速度に留意する必要があることを示している。

4.2 海岸部における「隆起・侵食」の検討における留意点

海岸部では、海成段丘の形成年代とその比高から隆起量

を算出する手法が広く受け入れられている。例えば、「日本の海成段丘アトラス」(小池・町田[32])では、既存研究を元にして、我が国の海成段丘を網羅的に記載して、海岸域の隆起速度を整理している。隆起地域が多く島国である我が国では、海岸部に海成段丘が広がっている場合が多いことから、放射性廃棄物が海岸部に埋設される場合、海成段丘は隆起速度を評価する際の有力な指標となりえる。

海成段丘面の侵食に関する研究として、最終間氷期(MIS 5e)に形成された海成段丘面の開析谷の侵食速度を求めた研究例がある[5]。海成段丘面の開析谷侵食速度(侵食が集中的に起こる開析谷での下刻速度の平均値。「開析谷の体積/開析谷の上面投影面積/12.5 万年」で計算)は隆起速度の 20-30%になるとされている[5]。また、開析谷の最大侵食深は隆起量よりも比高と相関関係があり、比高の 65-90%(平均約 76%)となることが示されている[5]。我が国は海成段丘が広がる島国であることから、海成段丘面の開析谷侵食速度を評価する手法は、適用性があると考えられる。

海岸部の河川下刻は、海水準がもっとも低くなる氷期に最大侵食深になる。現在から 1.9-2.65 万年前の最終氷期最盛期には現在よりも海水準が 130 m 以上低かったと考えられている[33]。総合資源エネルギー調査会[20]では、氷期において海面が最も低下した状態を最大 150 m としている。侵食基準面が海面の地域においては、海水準の低下は侵食基準面の低下であり、その変動量は一般的には隆起量よりも大きい場合が多いことから、隆起以上に侵食に与える影響も大きいと考えられる。しかし、現在の海岸線と最終氷期の海岸線は同一ではなく、現在の海岸部は最終氷期にはある程度汀線から離れていたケースが多いと考えられる。したがって、現在の海岸線付近の侵食量と海水準の低下量が等しくなるとは限らない。氷期における現海岸付近の下刻量の研究では、最終氷期最盛期以後に堆積した沖積層の基底深度と MIS 5e 海成段丘の高さに着目すると、現海岸付近における最大下刻は、隆起・沈降分に加えて最大で 100 m であることが示されている[34]。

海水準変動は海食の評価にも大きな影響を与える。海食は汀線を内陸側に移動させ、長期的には海食が起きる汀線と廃棄物埋設地との距離を減少させる可能性がある。福島県北部の海食崖の後退が激しい地域で、約 50 年間の土地喪失面積を調べた研究では、0.3 m/year から 0.7 m/year の海食が確認されている[35]。また、千葉県屏風ヶ浦で、航空写真から海食速度を求めた研究では、85 年間で平均 0.73 m/year の海食が確認されている[36]。また、汀線の位置は海水準変動によって大きく移動することから、海水準変動によって、海食の影響をうける地域も変化する。以上のことから、海岸部では、海食は廃棄物埋設地に影響を与える可能性のある侵食作用であり、海食の影響を評価するときは、将来的な汀線位置の移動についても留意する必要があると考えられる。

4.3 「隆起・侵食」の検討における留意点のまとめ

4.1 と 4.2 での検討を踏まえて、吉山ら[25] および幡谷ら

[31]を参考に、MIS 6 から現在までの河床縦断形の模式図を Fig.1 に示した。氷期である MIS 6 から間氷期である MIS 5e にかけては、中流域では侵食が進み下流域では堆積が進む(a'と a)。MIS 5e から寒冷期である MIS 2 にかけては、中流域で堆積が、下流域では侵食が進む(b'と b)。MIS 2 から現在までは中流域では侵食が、下流域では堆積が生じる(c'と c)。中流域では、MIS 6 から MIS 2 までの期間の隆起量と合計の侵食量(侵食量と堆積量を合わせた量)がほぼ等しくなり、これが d'となる。d'は河成段丘面の比高から求めることができる。同じ気候条件下で同じ河床縦断形が再現される河川では、前後 2 回の氷期の間で隆起量と合計の侵食量がほぼ等しくなることから、このサイクルを繰り返すと、気候変動 1 サイクルよりも長い期間では隆起速度と侵食速度が等しくなるが、短期的には隆起速度以上の侵食速度になる。また、下流域では MIS 5e から現在までの隆起量が d となり MIS 5e の段丘面と現汀線の比高から隆起量を求めることができる。加えて、下流域で河川下刻が最大となるのは海水準が下がる氷期であり、その最大侵食量の最大値は氷期までの隆起量に 100 m を加えたものとなる[34]。なお、全ての河川がこのような河床縦断系を形成するわけではない点には注意が必要である。

以上のことから、河川の中流域では、同じ気候条件下で同じ河床縦断形を再現する河川の侵食の評価が必要な場合、気候変動 1 サイクルよりも十分長い期間においては、河床の隆起速度と侵食速度を等しいと仮定することが可能である。しかし、気候変動 1 サイクルよりも短い期間では、間氷期における最大侵食深が、廃棄物埋設地へ大きな影響を与える可能性がある。また、河川の下流域となるような海岸部に廃棄物埋設地が設置される場合、侵食基準面が低下する氷期に河川の最大侵食深が廃棄物埋設地へ大きな影響を与える可能性がある。加えて、海食の影響評価では、海食が発生する位置、つまり汀線位置、の移動についても検討が必要である。

5 隆起量評価手法の留意点

ここでは、隆起量を見積もる方法について時間スケールごとに紹介する。また前章で述べた海成段丘を用いた海岸部の隆起速度を見積もる手法を適用する際の留意点について整理する。

隆起量の評価手法は、GPS 測量や水準測量等、測地学的手法の正確性が高いが、それらが適用可能な時間スケールは 100 年以下の短い時間スケールであり、約 10 万年程度の時間スケールでは、段丘面を使った隆起量評価手法が広く用いられてきた。その中でも、海成段丘を使った隆起量評価手法は、段丘面の形成年代が確定しやすく、我が国の海岸部では、海成段丘の発達した地域が多いことから、廃棄物埋設地近傍の隆起量を評価する手法として活用されやすいと考えられる。そこで、過去の研究例を参考にし、海成段丘を使った隆起量評価手法の留意点について検討した。

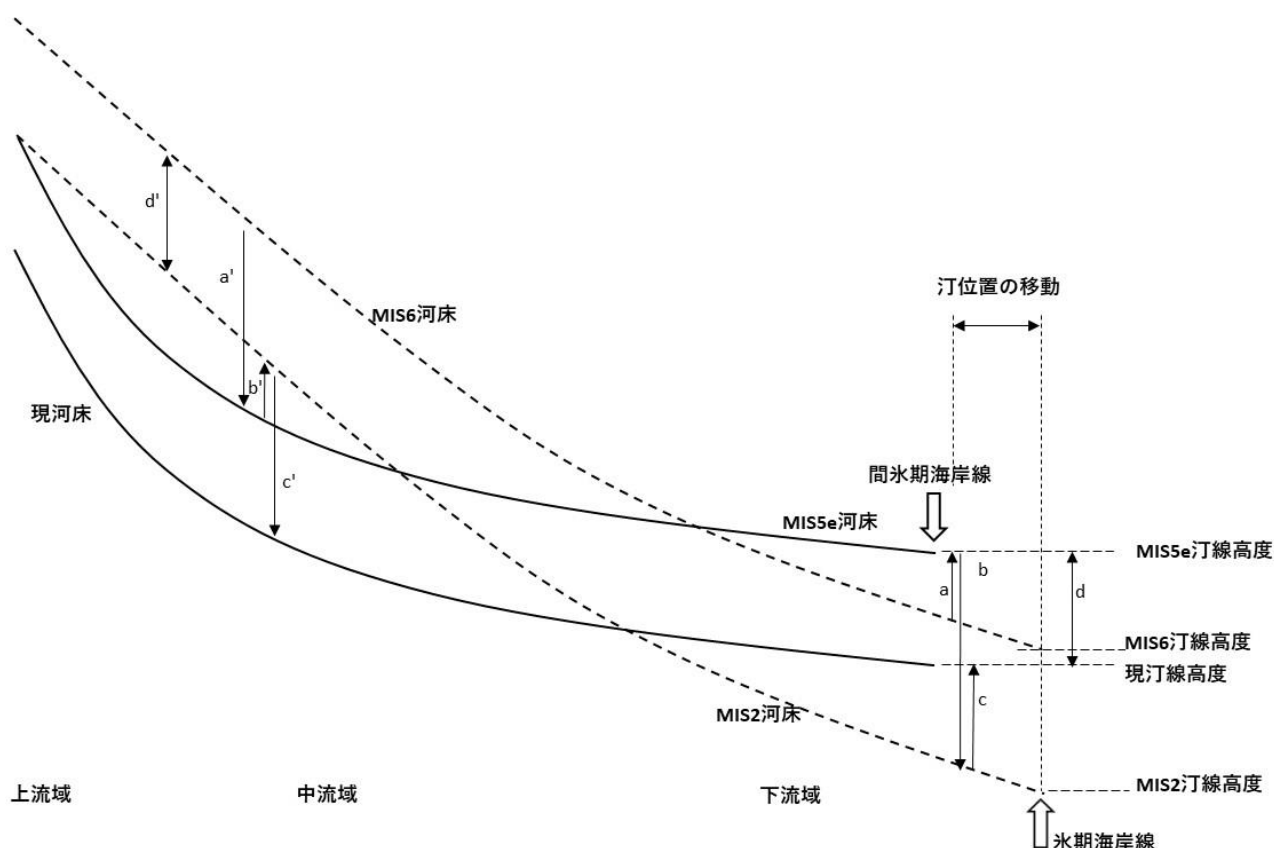


Fig.1 The development of riverbed elevation influenced by climate change and uplift [25,31]. For uplift evaluation in the middle reach of rivers, it is necessary to measure the relative elevation of fluvial terraces of Marine Isotope Stages 2 and 6. With regard to the endorheic area, sediment supply increases during glacial periods while the riverbed is eroded during interglacial periods. The surface erosion rate is almost equal to the uplift rate in the long term, if the same longitudinal river profile reappears in the same climate period beyond one glacial-interglacial cycle. For uplift evaluation in coastal areas, it is necessary to measure the relative elevation of marine terraces of Marine Isotope Stages 5e and modern shoreline.

5.1 隆起量の決定における留意点

海成段丘の段丘面上には離水後に堆積した風成被覆層等の陸成層が堆積している場合があり、陸成層の層厚は一定とは限らない。陸成層の正確な厚さを考慮せず、段丘面高度から陸成層の層厚を一定として隆起量の指標とした場合、その値は過大もしくは過少評価となる可能性がある。小池・町田[32]では、高度の精度を A：誤差±0.1 m 程度（実測）、B：誤差±1 m 程度（1/5,000 地形図からの読みとりなど）および C：誤差±10 m 程度（1/2.5 万地形図からの読みとりなど）とランク分けしており、精度 B および C の一部地点では、被覆層の厚さを正確には計測しておらず誤差が大きいことに注意が必要である[32]。そのため、海成段丘を用いて隆起量を決定する際には、離水後に堆積した陸成層を除いた、離水時の汀線（旧汀線）となる堆積物の高度と現汀線高度の比高を隆起量の指標とする必要がある。その際、現在の海面高度と比較するために、正確に旧汀線を確認する必要があり、旧汀線の指標としては、海食洞、ノッチ、ベンチ等の地形やヤッコカンザシ等の化石が挙げられるが、生痕化石を含む前浜・後浜堆積物もある（例えば[32]等）。これら堆積物の特徴を確認するための適当な手法としては堆積相解析が挙げられ（例えば[37,38]等）、旧汀線付近の露頭や、その地点で採取した複数のボーリング試料等から、

海面指標となる前浜・後浜堆積物を認定する。その際、前浜・後浜堆積物より深部で堆積する外浜堆積物を海面指標と誤認した場合、隆起量を過小に見積もる可能性がある。また、陸成層を前浜・後浜堆積物と誤認した場合、隆起量を過大に見積もる可能性がある。堆積相解析を行わず、地形判読のみから隆起量を把握する方法は簡便であり、傾向を把握するためには有用であるため、過去にそのような研究例は多いものの（例えば[32]等）、隆起量を誤って見積もる危険性があるため注意が必要である。隆起量評価で過去の調査例を引用する場合にはその手法を精査し、確度の高さを評価する必要がある。

過去と現在の海面高度を比較するためには、海成段丘が堆積した時代の海水準が今の海水準とどの程度ずれているかについても検討が必要である。前述の小池・町田[32]では、Chappell et al. [39]の図を読み取って、MIS 5e、MIS 7 および MIS 9 の海水準高度を、現海面から+5 m の位置で堆積したと設定している。また、MIS 5a および MIS 5c の海水準高度は複数の先行研究を参考にして、-15 m としているが、これは暫定的に決めた値であるとしている[40, 41, 42, 43]。一方、Waelbroeck et al. [44]では太平洋と大西洋の海水準変動と有孔虫の酸素同位体比の関係が示されており、公開され

ている元データでは、MIS 5e の最高海水準は約+6 m、MIS 7 の最高海水準は約-4 m となっている[45]。以上のように、どの文献値を採用するかによって、過去の海水準高度は変わることから、評価を行ううえでは、その時点で最も確からしいと考えられる文献値を引用することが適切である。また、無視できない誤差があると判断できる場合は、その誤差を考慮した保守的な評価が必要になると考えられる。

5.2 年代決定における留意点

隆起量を隆起速度に変換する際には、隆起量の指標となるものの形成から現在までの時間の情報が必要になる。海成段丘では、前述の海成層の堆積年代がそれに相当し、従来は主に火山灰層序に基づき決定されるか段丘面の形成順で推定されてきた[32]。しかし、適切な火山灰の堆積が確認できないケースは存在し、段丘面の形成順で堆積年代を推定する際には、一部の段丘面が喪失していた場合、堆積年代を誤ることになる。例えば、小池・町田[32]では、形成年代の確実性を3段階に区分しており、年代既知の火山灰が段丘堆積物を覆う場合に、最も確実度の高い格付け「確実度Ⅰ」としている。段丘年代決定のために、過去の研究を引用する際には、年代値の確実度について留意する必要がある。

近年、光励起ルミネッセンス（Optically stimulated luminescence、以下、「OSL」という。）法が堆積物の年代を推定する手法として発展してきた（例えば[46]等）。この手法は、堆積物中に普遍的に存在する石英・長石を用い、堆積物の堆積年代を直接推定できる手法として知られており（例えば[47]等）、日本の海成段丘への適用例もある[48, 49]。その際は、堆積物中の放射性核種濃度にも依存するが、現在から過去十数千年程度までが主な測定範囲となる石英を使った OSL 法ではなく、現在から過去数十千年前までが主の測定範囲となる長石を使った post-infrared infrared stimulated luminescence（以下、「pIRIR」という。）法を用いることが多い。現状では、最終間氷期（MIS 5e）までの適用例が主であるが、今後より古い海成段丘への事例が増えることで、小池・町田[32]の段丘編年を補完しうる可能性がある。

6 隆起量の分布

本章では、これまでの研究例を使って、全国的な隆起量の空間分布、ならびにより狭い地域的な空間分布および時間分布について紹介し、放射性廃棄物埋設における隆起量評価に係る空間・時間スケールの留意点について述べる。

6.1 全国的な隆起量の空間分布

後期更新世以降（12.6 万年以降）の平均隆起・沈降速度は、地質環境の長期安定性研究委員会による「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」の「付図 5 最近約 10 万年間の隆起速度分布」で示されている[50]。これは藤原ほか[1]で示された最近 10 万年間における日本列島の隆起速度分布に中国・四国地方以西のデ

ータを追加した図である。また、地質リーフレット 4 の付図 5 は科学的特性マップ[20]の作図でも利用されている。これらの図は既存の文献から集められた隆起速度データを使い、1/5 万地形図のグリッド（おおよそ 20 km 四方）で表示されていて、その地域の全体的な隆起傾向を確認するためには有効である。しかし、隆起速度データの密度は地域ごとに大きく異なっている。また、我が国のすべての地域の隆起量は示されていない。そのため、特定の地点で放射性廃棄物埋設を実施するとき、その地域で個別の隆起量評価が必要になる可能性がある。

6.2 地域的な隆起量の空間分布と時間分布

ここでは、より狭い地域的な隆起速度の空間分布について、小池・町田[32]を使い、比較的数据量が豊富な南関東地域（1/20 万図幅で千葉、東京および横須賀）における隆起速度から、隆起量評価に関する空間分布と時間分布の留意点について整理する。まず、過去の高海面期における隆起速度について、段丘編年の確実度Ⅰのデータについてまとめた（Table 2）。

最も確実度の高い格付けである確実度Ⅰとは、直接的に形成年代を推定したデータであり、年代既知のテフラが段丘堆積物に挟在あるいは段丘を直接覆う場合や、段丘堆積物中あるいは直上の試料を用いて行われた年代測定結果から段丘の形成年代を推定した場合等が該当する。また、段丘形成年代は MIS 5a の 8 万年前、MIS 5c の 10 万年前、MIS 5e の 12.5 万年前、MIS 7 の 21.4 万年前、MIS 9 の 32.8 万年前および MIS 11 の 40.6 万年前に比定できるデータを対象とした。地殻変動量を推定するための地点の高度に関する精度は A、B および C の 3 段階で示されており、Table 2 では、すべてのデータを採用している。地域としては 1/20 万図幅よりも詳細な 1/5 万図幅ごとに示し、この範囲内の複数地点で隆起速度が求められている場合は、最小値と最大値をハイフンでつなぎ、一地点だけ求められている場合はその値を示している。多くのデータは最小値と最大値の差が 3 m/万年以下であるが、差が大きいケースも存在し、平塚図幅の MIS 5e は 2.4 - 12.2 m/万年、藤沢図幅の MIS 5e は 0.5 - 6.8 m/万年であった。このことから、1/5 万図幅という比較的狭い範囲内においても隆起速度が異なる領域の存在が認められる。

新しい段丘ほど保存状態が良好であることが多いこともあり、Table 2 では MIS 5e とそれよりも新しいデータが充実している。隆起量の時間変化を評価するため、MIS 5e よりも新しいデータと MIS 7 以前のデータがどちらもある東京西南部図幅、藤沢図幅、横浜図幅および平塚図幅について、各段丘形成年代の隆起速度の最大値と最小値をグラフに示した（Fig.2 a）。ここでは、段丘の形成年代が新しいほど隆起速度が速くなっている傾向が認められる。もっとも顕著なのが平塚図幅で、MIS 7 が約 7 m/万年だが、MIS 5a では、最大値が 15 m/万年をこえている。このことから、隆起速度が年代によって変化する可能性があることが認められる。

ここで、段丘面高度の精度が最も高い A のデータのみを採用して Fig.2 a と同様の図を作成した（Fig.2 b）。段丘面

高度の精度の違いについては、5.1 章を参照されたい。藤沢
図幅の MIS 7 のデータのみ突出しているがそれ以外のデー
タはすべて 5 m/万年以下であり最大値と最小値の差は小さ
くなっている。また、Fig.2 a と比較して、新しい年代ほど

隆起速度が速くなる傾向は著しく小さくなっている。以上
の結果は、採用するデータの選択によって、隆起速度評価
の結果が変化することを示しており、データ選択がきわめ
て重要であると考えられる。

Table 2 Regional distribution of uplift rate calculated from elevation and marine terrace age in the southern Kanto area. The data source is from the most reliable data from Koike and Machida [31]. The uplift rate with no asterisk: Accurate rank A, the uplift rate with one asterisk (*): Accurate rank B, the uplift rate with two asterisk (): Accurate rank C in Koike and Machida[31].**

		MIS 5a	MIS 5c	MIS 5e	MIS 7	MIS 9	MIS 11
1/20 万図幅	1/5 万図幅	隆起速度 (m/万年)					
千葉	龍ヶ崎			0.9 - 1.3			
	佐原			1.5 - 2.3**			
	潮来			2.2 - 2.6**			
	佐倉		2.5 - 3.0**	0.9 - 1.3**			
	成田			1.6 - 2.4**			
	八日市場			2.2 - 3.3**			
	銚子	4.8*	5.8 - 6.1*	3.2**			
	千葉		2.5 - 2.9*	0.8 - 3.4**			
	東金			2.4 - 6.1**			
	姉崎			6.7 - 8.5**			
東京	茂原			7.5			
	東京西北部			0.9 - 1.9			
	東京西南部			0.2 - 3.1*		1.3 - 2.0*	
	東京東北部		2.7 - 3.0	0.9 - 1.4			
	秦野						1.6
	藤沢			0.5 - 6.8*	6.3		
	横浜		3.7	1.7 - 4.6**		1.1 - 2.0	0.6 - 1.7
横須賀	小田原					2.9**	3.6**
	横須賀	5.5 - 6.4	4.6 - 8.7				
	三崎	6.4	7.9				
	熱海		6.1				
	平塚	13.1 - 15.6		2.4 - 12.2	6.7 - 7.7		
	富津		14.3*				
	那古	7.1 - 10.8*					
	館山	10.2*					

以上のことから、隣接する 1/5 万図幅同士で、あるいは 1/5 万図幅内においても隆起速度が異なるケースがありえることが示された。また、隆起速度の傾向は時代によって変化する可能性もあることが示唆された。加えて、段丘面高度の精度が高いデータのみを採用すると、隆起速度の傾向が異なることから、採用するデータの選択が重要であることが示された。これらのことから、放射性廃棄物埋設の検討において、過去の研究成果から隆起量を評価する場合、採用するデータの評価が重要であると考えられる。ここでは、小池・町田[32]を使用しているため、図幅ごとの評価となったが、隆起は局所的な地殻変動ではなく、より広域な

地殻変動が発生している区域の一部であると考えられる。廃棄物埋設地の隆起量評価においては、該当地域だけの評価でなく、より広域の区域としての評価を行うことが必要となる可能性がある。また、隣接する地域でも隆起速度が異なる例が珍しくないことから、流域全体を等速隆起と仮定した Fig.1 の考え方は、そのまま現実の河川に適用できない場合があることに留意しなければならない。傾動運動が発生している河川流域での隆起に関する研究も行われており(例えば[31])、実際の廃棄物埋設地の評価においては、これまでの研究成果をふまえ、該当地域の現状に適した考え方を適用する必要がある。

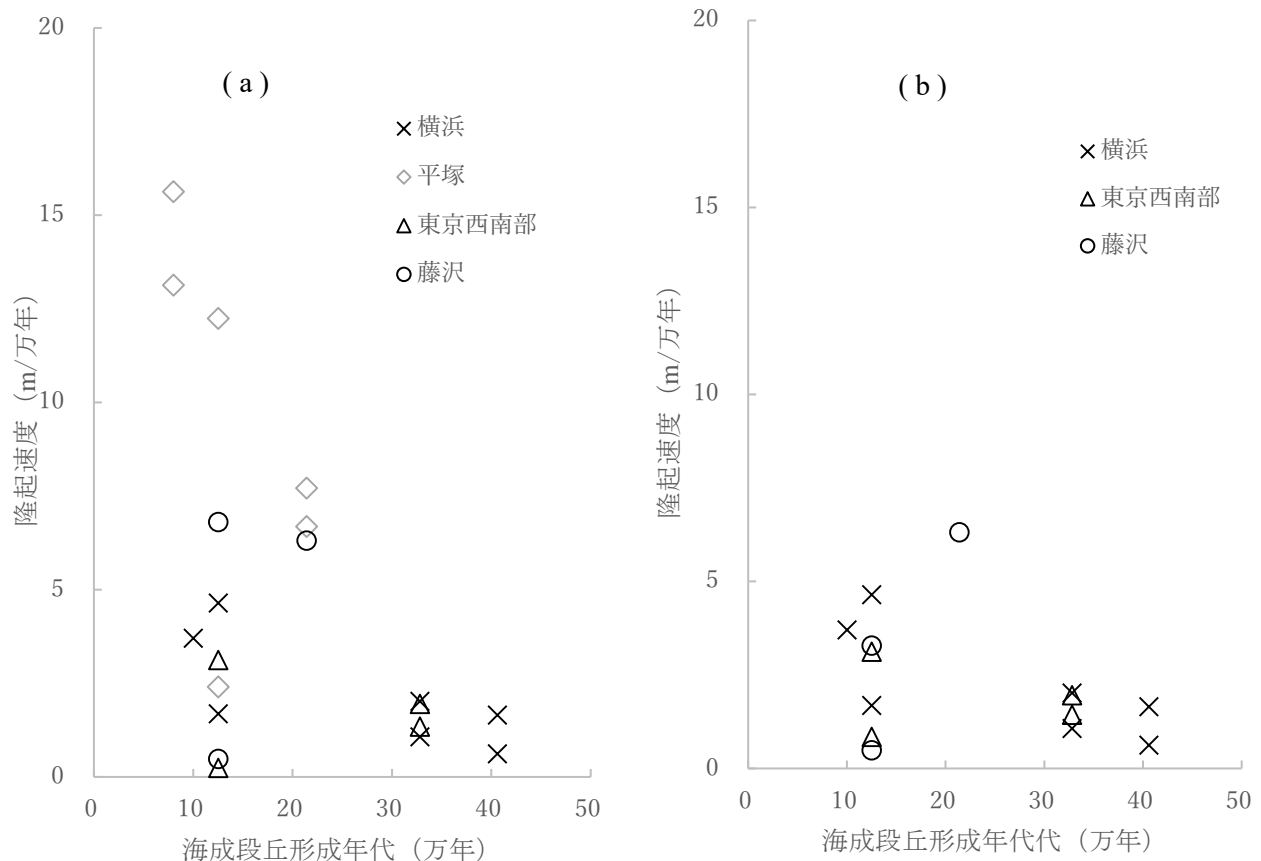


Fig.2 The distribution of maximum and minimum uplift rates for each marine isotope stage. (a) All data (accurate rank A, B, and C) is accepted. (b) Only data with accurate height (accurate rank A) is accepted [32].

7 まとめ

放射性廃棄物埋設において、「隆起・侵食」は重要な自然現象であり、これまでにも検討対象とされてきた。侵食は深度の確保の観点等において重要であり、隆起は侵食基準面との比高を大きくする等、侵食作用に対して影響を与える観点から重要となる。侵食量を隆起量と等しいとする考え方を適用している例も多いが、その考え方の適用が妥当であるかについて、対象地域、評価期間等を考慮して検討する必要がある。場合によっては隆起量以上の侵食が起きる可能性についても検討する必要がある。また、海岸部の場合は海水準変動を考慮して、侵食基準面の変化と海食の影響範囲の変化について検討する必要がある。

段丘面の形成年代は、段丘面の形成順だけでなく、確実度の高い火山灰等に基づいて推定されていることが望ましい。近年、堆積年代を直接推定する手法(OSL法, pIRIR法)も発展してきており、確実度の高い段丘編年の構築に有効な手法となりうる。海成段丘の高度を正確に見積るためには、堆積相解析により、前浜・後浜堆積物の位置を確認する必要がある。地形判読のみから隆起量を見積もる場合、また、外浜堆積物や陸成層を誤認した場合は、隆起速度を過大もしくは過小に見積もる可能性があるため注意が必要である。海成段丘を使った研究によると、隆起速度は隣接する 1/5 万図幅においても速度に幅があり、地域、年代によって速度が変化する可能性がある。加えて、放射性廃棄物埋設の種類により評価時間も異なることから、埋設事業

ごとに求められる時間スケールに応じた隆起速度評価を行う必要がある。

本論文で引用した文献に限らず、これまで、隆起・侵食の研究は数多く行われてきた。しかし、その多くはある地域、ある条件において適用可能な研究例であり、将来、廃棄物埋設地が設置される地域において、必ずしも適用可能とは限らない。廃棄物埋設地の評価においては、該当地域での調査等を実施し、その調査結果をふまえた評価を行う必要がある。

謝辞

本稿を執筆するに当たり 2015 年 11 月 9 日に逝去された原子力規制庁職員、須甲武志技術研究調査官が残された資料を参考にさせていただいた。ここに記して厚く御礼を申し上げるとともに、ご冥福をお祈りいたします。また、2 名の匿名査読者の方のコメントにより、拙稿は大きく改善された。ここに記して深く謝意を表したい。

参考文献

- [1] 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**, pp.442-447 (2004).
- [2] 梅田浩司 他: 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」の概要ー日本列島のネオテクトニクスと地質環境の長期安定性ー. 原子力バックエンド研究 **11**, pp.97-112 (2005).
- [3] 藤原治 他: 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究. 原子力バックエンド研究 **11**, pp.113-124 (2005).
- [4] 新里忠史, 安江健一: 幌延地域における地質環境の長期安定性に関する研究ー長期安定性の評価・予測における地域特性の考慮ー. 原子力バックエンド研究 **11**, pp.125-138 (2005).
- [5] 藤原治 他: 地層処分から見た侵食作用の重要性ー海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例にー. 原子力バックエンド研究 **11**, pp.139-146 (2005).
- [6] 笹尾英嗣, 天野健治, 太田久仁雄: 東濃ウラン鉱床におけるナチュララアナログ研究ーウラン鉱床での隆起・沈降の変遷と隆起速度の見積もりー. 原子力バックエンド研究 **11**, pp.167-180 (2005).
- [7] 安江健一 他: 第四紀後期における内陸部の隆起量の推定手法: 鐺川流域および土岐川流域を例に. 原子力バックエンド研究 **18**, pp.51-62 (2011).
- [8] 若杉圭一郎 他: 隆起・侵食による地質・地表環境の長期的変動を考慮した地層処分の安全評価手法の開発. 日本原子力学会和文論文誌 **16**, pp.15-33 (2017).
- [9] 山口正秋 他: 地層処分における隆起・侵食影響評価のための地形・処分場深度変遷解析ツールの開発. 原子力バックエンド研究 **27**, pp.72-82 (2020).
- [10] ANDRA: Dossier 2005 Argile Tome, Safety evaluation of a geological repository. (2005).
- [11] Posiva: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto-Synthesis 2012. POSIVA 2012-12 (2012).
- [12] SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01 (2011).
- [13] SSM: The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations Concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. SSMFS 2008:37 (2011).
- [14] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告, わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー 本編及び付属書. (2021).
- [15] BMU: Safety requirements governing the final disposal of heat-generating radioactive waste. (2010).
- [16] NRC: 10 CFR Part 63 - Disposal of high-level radioactive wastes in a geologic repository at Yucca Mountain, Nevada. (2016).
- [17] ENSI: Specific design principles for deep geological repositories and requirements for the safety case, Guideline for Swiss nuclear installations, G03/e. (2009).
- [18] 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ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめ. (1999).
- [19] 原子力規制委員会: 令和 3 年度第 35 回原子力規制委員会, 資料 2, 第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る関係規則等の改正及び中深度処分に係る審査ガイドの策定. (2021)
- [20] 経済産業省: 「科学的特性マップ」の説明資料(online), http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/setsumei.pdf, (accessed 2021-11-09).
- [21] 総合資源エネルギー調査会: 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術 WG とりまとめ). 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術 WG (2017).
- [22] 日本地形学連合: 地形の辞典 第 2 版, 朝倉書店, 東京, p.395 (2017).
- [23] 加藤茂弘: 北海道日高地方西部の静内川・新冠川における最終間氷期以降の段丘形成過程. 地理学評論, **64A-2**, pp.71-94 (1991).
- [24] 須貝俊彦: 利根川支流, 碓氷川における中期更新世以降の河成段丘発達史. 地理学評論, **65A-4**, 339-353 (1992).
- [25] 吉山昭, 柳田誠: 河成地形面の比高分布からみた地殻変動. 地学雑誌 **104**, pp.809-826 (1995).
- [26] 高木俊男 他: 河岸段丘から推定した河床高度変化の歴史. 地学雑誌, **109**, pp.366-382 (2000).
- [27] 柳田誠 他: 谷密度と起伏量による丘陵の定義. 地学雑誌, **113**, pp.835-847 (2004).
- [28] 若狭幸 他: 宇宙線核種濃度から推定される木曽川上流寝覚ノ床における下刻速度. 季刊地理学 **60**, pp.69-

- 76 (2008).
- [29] 安江健一 他: 内陸部における侵食速度の指標に関する検討: 環流丘陵を伴う旧河谷を用いた研究. 地学雑誌 **120**, 12, pp.435-445 (2014).
- [30] 貝塚爽平: 日本の地形. 岩波書店 (1977).
- [31] 幡谷竜太: 河成段丘を用いた第四期後期の隆起料評価手法の検討 (3) —過去 10 万年間の隆起量分布より明かされる内陸部の地殻運動—. 電力中央研究所報告, N05017 (2006).
- [32] 小池一之, 町田洋: 日本の海成段丘アトラス. 東京大学出版会, 東京 (2001).
- [33] Clark, P. U. et al.: The Last Glacial Maximum. *Science* **325**, pp.710-714 (2009).
- [34] 幡谷竜太 他: 後期更新世以降の現海岸線付近での下刻. 応用地質 **57**, 1, pp.15-26 (2016).
- [35] 山内秀夫: 原町市大甕海岸における海蝕崖の後退について. 地理学評論 **37**, 3, pp.138-146 (1964).
- [36] 堀川清司, 砂村継夫: 千葉県屏風ヶ浦の海岸侵蝕について (2) —航空写真による海蝕崖の後退に関する研究・第 3 報—. 第 17 回海岸工学講演会講演集, pp.289-296 (1970).
- [37] 増田不二雄: ダイナミック地層学—古東京湾域の堆積相解析から— (その 1 基礎編). 応用地質 **29**, 4, pp.28-37 (1988).
- [38] 増田不二雄: ダイナミック地層学—古東京湾域の堆積相解析から— (その 1 発展編). 応用地質 **30**, 1, pp.29-40 (1989).
- [39] Chappell, J.: Upper Quaternary Sea Levels, Coral Terraces, Oxygen Isotopes and Deep-sea Temperatures. *Journal of Geography* **103**, 7, pp.828-840 (1994).
- [40] Hearty, P. J., Kindler, P.: Sea-Level Highstand Chronology from Stable Carbonate Platforms (Bermuda and The Bahamas). *Journal of Coastal Research* **11**, 3, pp.675-689 (1995).
- [41] Richards, D. A. et al.: Maximum sea levels for the last glacial period from U-series ages of submerged speleothems. *Nature* **367**, p.27 (1994).
- [42] Stirling, C. H. et al.: Timing and duration of the Last Interglacial: evidence for a restricted interval of widespread coral reef growth. *Earth and Planetary Science Letters* **160**, pp.745-762 (1998).
- [43] Zazo C.: Interglacial sea levels. *Quaternary International* **55**, pp.101-113 (1999).
- [44] Waelbroeck, C. et al.: Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews* **21**, pp.295-305 (2002).
- [45] Waelbroeck, C. et al.: Sea-level and Deep Water Temperature 430KYr Reconstructions. (online). <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleosearch/study/10496> (accessed 2021-11-09).
- [46] 田村亨: 光ルミネッセンス (OSL) 年代測定法. *Radioisotopes* **70**, pp.107-116 (2021).
- [47] 伊藤一充: 光ルミネッセンス (OSL) 法を用いた堆積物の年代決定. *Radioisotopes* **70**, pp.47-157 (2021).
- [48] Thiel, C. et al.: Testing the application of quartz and feldspar luminescence dating to MIS 5 Japanese marine deposits. *Quaternary Geochronology* **29**, pp.16-29 (2015).
- [49] Ito, K., Tamura, T., Tsukamoto, S.: Post-IR IRSL dating of K-feldspar from last interglacial marine terrace deposits on the Kamikita coastal plain, northeastern Japan. *Geochronometria* **44**, pp.352-365 (2017).
- [50] 地質環境の長期安定性研究委員会: 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).