

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—

藤原 治*1 柳田 誠*2 三箇智二*3 守屋俊文*4

日本列島では最新の地質時代である第四紀において、活発な地殻変動と大きな侵食速度のために、大きな地形・地質布の変化が生じてきた。そして今後もこうした変化は継続し、その結果、動水勾配や水理地質構造を通じて地下水の流動や水質にも影響が生じると考えられる。その影響の評価が安全で現実的な高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現可能性を考える上で重要な問題である。そのためにまず、将来数万年間について評価対象地域の最大侵食深や平均侵食深を予測する必要がある。過去に生じた侵食の特徴を詳しく統計的に解析することが、将来の侵食量を予測する上で基礎データである。しかし、こうしたデータを得るためには、調査手法の開発も含めて課題が多い。

将来の侵食量の予測可能性を検討する一例として、初期形状が比較的正確に推定できる海成段丘を対象に、開析谷の体積から計算した侵食速度と隆起速度との関係を解析した。また、丘陵などの侵食に関するデータも併せて検討した。これらのデータからは、隆起した陸地の体積のうち侵食される割合は、一般に離水時（段丘化）から最初の12.5万年間では10～20%程度である。この比率は、その後の10万年では数十%程度に増加し、最終的に隆起速度と侵食速度は、丘陵では数十万年、山地では100万年程度で平衡状態に達する。

Keywords: 開析谷, 侵食速度, 水理地質構造, 地層処分, 隆起速度

Because of the high denudation rates in Japan, the landform and geological characters will be largely changed in the geological time-scale. These changes are major controlling factors on the hydrogeology, and affect the hydrological and chemical conditions of the groundwater. Estimation of these effects on geological environments by the denudation is one of the important problems for the safety of geological disposal of HLW in Japan.

Development of the methodology to predict the long-term (10^{4-5} year order) denudation rates is the first priority for solving this problem. Statistical analyses of the denudation rates and patterns in the geologic and geomorphic records are the basis for the prediction.

The relationship of uplift rates and denudation rates of the marine terraces was analyzed as a case study. Denudation rates were calculated from the volume of dissected valleys on the marine terraces by using a 50-m DEM. Time-dependency of the denudation rates was also examined from the geomorphologic data of terraces, hills and mountains in the various landform development stages.

Percentages of the denuded volume to a total uplifted volume of the land is 10-20% in the first 125 kilo years since the emergence, come to several tens of % in next 100 ky and amount to 100% in the equilibrium stage, ca. 0.5 to one million years after the emergence.

Keywords: denudation rate, dissected valley, geological disposal, hydrogeology, uplift rate

1 はじめに

日本列島は、世界的に見ても侵食速度が大きい地域である。プレート収束帯に位置し、隆起速度が大きく地形が急峻であること[1, 2]に加えて、地質構造が複雑で破碎帯などの脆弱な岩石が分布し降水量も多い[3]ことなどがその理由である。この大きな侵食速度は、日本列島における安全で現実的な高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現可能性を考える上で重要な問題である。

地層処分の安全性を議論する上では、数km四方以上の広がり万年オーダーの時間スケールで侵食量を予測するとともに、それに伴う地下水理などへの影響を評価する必要がある。しかし、長期にわたる侵食のプロセスについては、隆起した土地のうちどの程度の割合が侵食されるかと言った基本的なことさえよく分かっておらず、将来の侵

食量などの予測は厳密には不可能である。

地層処分の安全確保の観点からは、評価対象期間に日本列島で想定される地質現象について、発生から地層処分システムに影響を及ぼすまでのプロセスを考慮して、最終的に安全評価が行われる。こうした予測と評価は、地下施設の露出や地表への接近の危険性（接近シナリオ）と、動水勾配や水理地質構造の変化に伴う地下水の流動や水質への影響（地下水シナリオ）の2つのシナリオに大別される。これらのシナリオでは、侵食量などについて観測事実の積み重ねと科学的根拠に基づいた「現実的な」予測値を求め、その値を地層中での核種移行解析など様々な数値解析に反映することになる。

本稿では、地層処分の安全確保にとって地盤の侵食がどの様な点で重要であるかを、主に長期的な地下水の水理・水質との関連から整理する。次に、地下水理・水質への影響と言う観点から、侵食量の予測における問題点を述べる。そして最後に、こうした影響評価のために必要な侵食量の予測方法について、限られた事例ではあるけれども、これまでの研究の成果を述べる。

なお、侵食作用については別稿[4, 5]や本稿の引用文献にも示したように多くの研究があり、個々の現象論に関してはそれらを参照されたい。

Land surface denudation and geological disposal of HLW in Japan; with special reference to estimation of denudation rates in the marine terraces 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 ㈱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㈱ 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

2 平野部の地形・地質と地下環境

平野とその周辺で地下水の水利や水質の空間分布が、侵食などで作られる地形や地質分布に規制されている様子を、日本列島に広く分布する段丘地形を例に説明する。段丘の模式的な形態と内部構造 (Fig.1 A) は、基盤岩石とそれを覆う段丘堆積物、段丘の離水後に堆積した火山灰や崖錐堆積物などの被覆物質からなる。基盤岩石 (の上部) およびそれを覆う地層は、風化を受けていることが多く、強く風化された表層部は強風化層、その下の風化が比較的弱い部分は弱風化層と呼ばれる[6]。また、基盤岩石には (場合によっては地表まで達する) 断層や節理などの不連続面があり、そこに沿って風化が進んでいることが多い。風化は化学的・物理的・生物的要因で起こり、その下限 (新鮮な地層との境界) は風化フロントと呼ばれる[6]。地下の水位や水質の空間的な分布は、こうした地形や地質によって規制を受けている (Fig.1 B)。従って、侵食が進んで地形や地質の構成が変化すると、水利・水質環境に影響が及ぶ可能性がある。

3 侵食による地下水理・水質への影響

地下水位は地形面の勾配だけでなく、開析谷などの微地形の分布や内部構造にも強く影響を受けている (Fig.1 B)。例えば、地下水面の等高線を描くと、その凹凸が段丘面を

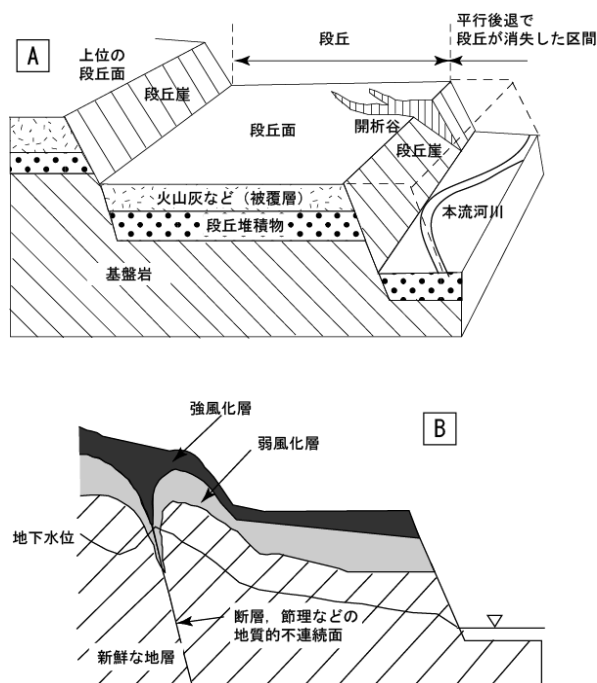


Fig. 1 Inner structure of fluvial and marine terraces
Inner structures of terraces are closely related to hydrologic and geochemical features of grand water.
 Modified from original figure [6].

刻む開析谷の分布と良く対応することが知られている[7]。地下水面の勾配が地表面の勾配に強く規制されていることは、扇状地でも知られている[8, 9]。また、地下水位は風化層の厚さや節理によっても影響を受ける (Fig.1B)。段丘堆積物は、下位の基盤岩石より顕著に空隙率と透水性が高い砂礫層を主とするため、帯水層となることが多い。このため、段丘堆積物が侵食で失われると、地形勾配が変わって動水勾配に影響が生じるだけでなく、地層全体の透水性や保水能力も変化する。

風化層は下位の新鮮な地層に対して透水性だけでなく、酸化状態などの化学条件も異なる。風化層が侵食されるにつれて、酸化状態の表層水がより地下深く染み込むようになり、風化フロントが下位の新鮮な地層へと進むことにもなる。また、侵食による除荷のために物理的なバランスが崩れ、地下の岩石に割れ目が発生するなどして、さらに深部へ風化が進むことにもなる。このように、侵食の量によっては水理地質構造や化学的・物理的な環境も変化し、地下水流動や水質にも影響が生じることがある。

4 侵食量の予測における課題と問題点

地下水流動解析で必要となる動水勾配や水理地質構造、また、水質が変化するプロセスとその程度を評価するためには、最大侵食深だけでなく、平均侵食深や場合によっては何処がどの程度侵食されるか (将来、谷がどこに発生するか) といった侵食量の空間分布の予測も重要である。

例えば、動水勾配は地形勾配に強く規制されているが、その値をボーリング孔の地下水位などから直接計算できる場合はむしろ少ない。そのため、現在を対象とした地下水流動解析でも、経験則に基づいて地形勾配に見合った動水勾配を仮定するのが一般的である。将来の地下水流動状況の予測解析では、その時点での動水勾配を設定する必要があり、その前提として侵食量を考慮した地形勾配の予測が必要である。

地下水の水質は、水-岩石反応や異なる水質を持つ地下水の混合などによって形成されることが多い。従って、長期的な将来の水質の予測には、地下水の涵養域から流出域までにどのような種類の地層が分布するか (さらには反応時間に係わる地層の透水性や層厚) が重要な情報の一つとなる。こうした予測のためには、侵食量の見積もりに基づく将来の地形面の形態や地層の分布状態などの情報が必要である。

将来の侵食量を見積もるには、過去に生じた侵食に関するできるだけ多くの正確な観測データを用いて統計解析を行い、侵食速度などの規則性について何らかの経験則を構築するのが、現在の科学レベルからは最も妥当な方法と考えられる。この際、予測する時間スケールを廃棄物の放射能が十分に減衰する将来数万年程度と仮定するならば、少なくとも過去の氷期-間氷期 1 サイクル (10 万年程度)

での侵食量のデータが必要である。過去 10 万年程度と言う期間は、侵食量に関する定量的なデータを全国的に取得できる現在の技術的限界でもある。

形成年代や初期形態が明らかな（または合理的に仮定できる）地形（たとえば段丘など）が存在すれば、現在の地形との比較から現在までの侵食の量やプロセスを推定できる。勿論、過去に生じた現象についてはその結果を観察できるのみであり、途中のプロセスを直接確認することは出来ない。様々な発達過程にある侵食地形を時系列に沿って整理して初めて、そのプロセスが分かる。そして、将来も劇的な気候変動などが無く、過去と同じ侵食プロセスが継続するとの仮定に基づいて、将来の侵食量や侵食形態の見積もりが可能となる。しかし、このような地域は必ずしも多くはない。現状では、研究条件の良いところで、過去から現在まで起こりつつある侵食作用について、その速さや規制要因などを調査し、一般的な侵食の特徴を捉えておくこと、また、それを調査する方法を整えておくことが肝要である。次章では、その例を紹介する。

5 海成段丘を用いた侵食速度の推定法

海成段丘は形成年代や初期形態が比較的精度良く推定できるので、侵食速度の研究に好条件である。海成段丘面は、厳密に見れば浜堤、岩礁、波食溝などの微地形による凹凸があるものの、離水時にはほぼ平坦な地形面であったと仮定でき、山地や丘陵に比べて格段に高い精度で原地形を復元できる。また、日本列島ではテフクロロジーなどの発達によって海成段丘の離水（段丘化）の時期が推定されており[10]、これを侵食の開始時期と考えることができる。

透水性が高い段丘堆積物が段丘面を覆っていると、雨水がすぐにしみ込んでしまうので侵食は起こりにくい。こうした条件では、雨水が集まった流水の流路に沿って集中的に侵食が起こり開析谷が形成される（Fig. 1A）。開析谷が段丘崖から次第に内側へ延びていく結果、段丘面は次第に起伏が大きくなり丘陵になっていく。こうしたプロセスを念頭において、元の地形と現在の地形の差（開析谷の体積）を計測することで、この期間での下刻速度や段丘全体の平均侵食速度が求められる。

1 回の氷期—間氷期サイクル（約 10 万年間）で生じる最大侵食深については、比較的大きな河川の河口部での研究があり、隆起量（段丘面の標高で近似される）を 50 m 程度上回る値になると見積もられている[11]。しかし、それ以外の地域の最大侵食深はよく分かっていない。こうしたデータを補うのに海成段丘面の地形計測データが重要である。大きな河川から離れた地域では、最大侵食深は通常その段丘面の低位にある沖積低地または段丘面までの比高と近似する。厳密には、埋没谷底と段丘面との比高が

最大侵食深である。しかし、出口に滝や遷急点が無くスムーズな縦断形を持って下位の地形面に連続し、河床に堆積物による広い平坦面を持たない開析谷であれば、段丘の比高をほぼ最大侵食深と見なすことができる。

一方で、海成段丘面の地形計測には次のような問題もある。段丘面は開析谷によって「上面から下方へ」侵食されるだけでなく、縁辺が崩れることで「水平方向」にも侵食される。前面に海や大きな河川があると、段丘崖は波や流水で基部を削られて崩落し後退（平行後退）する。この影響を出来るだけ抑えるため、本研究ではまず、海岸や大きな河川から十分な距離で隔離されている（理想的には下位に新しい時代の段丘面が発達する）段丘を対象とした。また、段丘面の開析が進んだ状態にあり、開析谷が切り合っただけで尾根が消失するような段階あるものを選んだ。この状態では、段丘の残存率自体が低いので、平行後退で縁辺部が失われてもわずかな量であり、段丘全体の侵食量の見積もりへの影響は少ないと考えられる。

6 適用例

6.1 調査対象

日本各地の 18 地域（Fig. 2, Table 1）に分布する最終間氷期最盛期（約 12.5 万年前）に形成された海成段丘[10]（以下では MIS5e 段丘と略記）を調査対象とした。海成段丘は、隆起速度による侵食速度の違いが比較できるように、様々な隆起速度を示すものを選択した。これらの海成段丘では、一部の例外を除いて被覆層は薄く、それによる侵食速度への影響は小さいものと考えられる。段丘堆積物は主に未固結の上部更新統で、その厚さや粒度組成には地域差がある。基盤岩類は固結の比較的弱い第四系であることが多く、より固結の強い第三系あるいは、より古い地層からなるものもある。

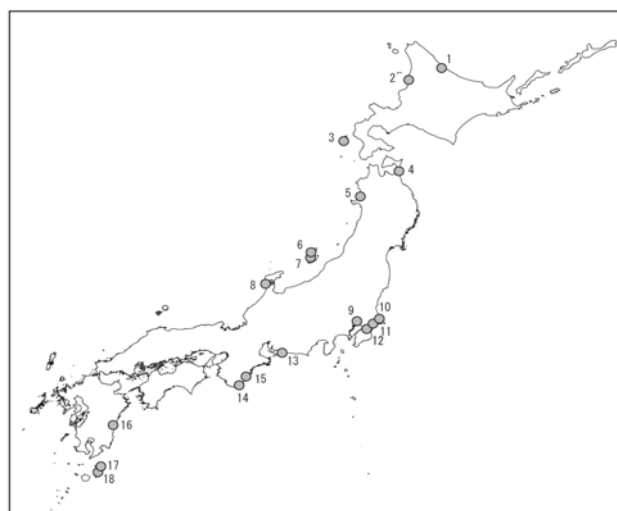


Fig. 2 Index map.

Table 1 Measured data on denudation rates.

調査地域	標高 (m)	沖積地 との比高 (m)	被覆層厚 (m)	段丘面 開析度 (%)	最大 侵食深 (m)	隆起量 (m)	隆起速度 (mm/yr)	段丘面 侵食速度 (mm/yr)	開折谷 侵食速度 (mm/yr)
1	14.0	14.0		11.0	11.4	9.0	0.072	0.014	0.027
2	40.0	40.0	1.5	29.6	29.0	33.5	0.268	0.040	0.075
3	87.0	87.0		27.1	81.8	82.0	0.656	0.065	0.151
4	45.0	45.0	2.0	25.9	40.4	38.0	0.304	0.048	0.098
5	33.0	10.0		21.1	21.9	28.0	0.224	0.029	0.049
6	105.0	105.0		38.8	85.7	100.0	0.800	0.068	0.172
7	69.0	69.0		23.6	39.2	64.0	0.512	0.048	0.110
8	21.0	21.0		20.1	14.4	16.0	0.128	0.020	0.035
9	29.0	21.0	7.0	13.1	22.3	17.0	0.136	0.030	0.078
10	54.0	48.0	3.8	43.0	49.8	45.2	0.362	0.085	0.173
11	52.0	37.0	4.9	36.6	35.8	42.1	0.337	0.062	0.116
12	120.0	117.0	10.4	56.2	79.9	104.6	0.837	0.127	0.179
13	22.0	22.0		22.5	16.7	17.0	0.136	0.036	0.069
14	55.0	55.0		31.2	39.1	50.0	0.400	0.054	0.100
15	44.0	44.0		26.3	31.3	39.0	0.312	0.068	0.121
16	90.0	72.0	5.0	29.1	65.6	80.0	0.640	0.064	0.140
17	62.5	62.5		26.5	52.0	57.5	0.460	0.072	0.126
18	80.0	80.0		31.5	58.9	75.0	0.600	0.060	0.127

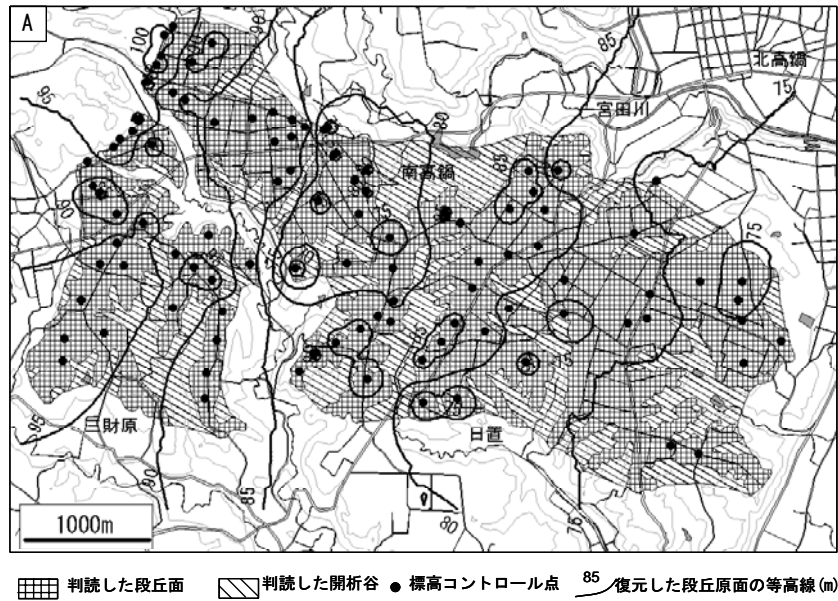
6.2 データの計測と集計

ここでは、以下に述べる仮定の下に、開析谷の体積を段丘の形成時から現在までの侵食量と見なす。開析谷の深さや体積は、接峰面図を用いて MIS 5e 段丘の原地形を復元し、それを現在の段丘面と比較して求めた。まず、空中写真判読により段丘面と開析谷の分布を 1/2.5 万地形図に記載した (Fig. 3A)。次に、段丘面上の水準点 (1/2.5 万地形図による) などを標高コントロールポイントとして、これらを内挿法による滑らかな曲面で結んだ等高線を引いた (Fig. 3A)。この等高線が“段丘原面”を示すと仮定し、開析谷の出口を閉じた範囲を侵食される前の段丘の範囲と仮定した (つまり、平行後退は無視した)。

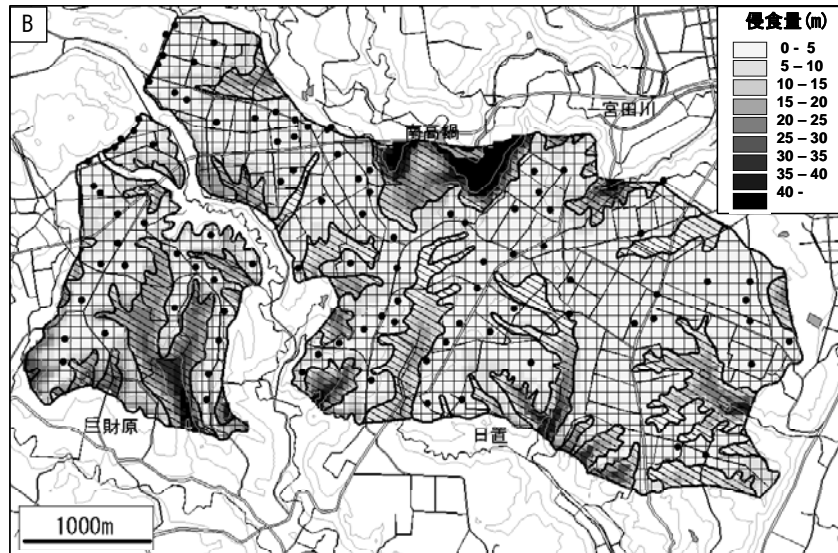
段丘の分布面積や開析谷の分布密度には地域差があり、侵食深の値は計測する範囲や単位面積の取り方によって変化する。計測対象とした海成段丘を国土地理院発行の 1/2.5 万地形図で読図すると、どの地域でも 100–200 m 程度の間隔で開析谷が見られる。そこで、格子サイズが約 50 m の“数値地図 50 m メッシュ (標高)” [12]を用いて谷の深さなどを計測すれば、谷の深さや体積から侵食量を計算するには十分な数のデータが得られると考えた。この数値地図を以下では単に 50m-DEM と呼ぶ。なお、一部の地域で比較のために 5m 四方のメッシュでも計測を行ったが、解析結果は 50m-DEM を用いた場合と大差無かった (Fig. 4)。以降では、簡便のために 50m-DEM で計測・解析を行う。各地域で地形計測を行った範囲は、最も狭い紀伊 B で 1 km² 程度、最も広い房総で約 29 km² である。

計測項目は Table 1 に示す。各項目の計測法は以下の通りである。

- ①メッシュ侵食深：コンピュータ上で 50m-DEM から作られた現在の地形面と“段丘原面”とを重ね合わせ、その差を 50 m メッシュごとに求めた (Fig. 3B)。段丘面は離水後に降下する火山灰などで「かさ上げ」されるが、開析谷ではそれらが流されてしまうので、被覆層の厚さの分だけ侵食深が多めに求められる。このため、被覆層が厚い地域 (Fig. 2 の Loc. 2, 9, 10, 11, 12, 16) についてはその厚さを除いた。その他の地域では被覆層の正確な厚さは不明であるが、地質図などからは数 m 以下で薄いと推定されるので、侵食深の補正はしていない。
- ②最大侵食深：各地域で得られたメッシュ侵食深の最大値。
- ③比高：段丘面と下位の沖積低地との最大比高 (地形図から判読)。堆積が盛んな場所では、開析谷底のかさ上げが起こるため、隆起量より比高が小さくなる。
- ④開析度：“段丘原面”に対する開析谷の面積比 (上面投影面積で比較)。段丘の侵食された程度の指標。
- ⑤隆起量：原則として段丘アトラス [10] から引用し、MIS5e 当時の海面高度 (現在より約 5 m 高い) と被覆層厚を補正した。段丘面が傾動していて調査地域内で隆起量に幅がある場合は、最大侵食深が現れた付近の値を用いた。
- ⑥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。



A: Reconstruction of marine terrace surface from summit level. Contours show summit level and are assumed to an original surface of marine terrace. Example from Miyazaki area (Loc. 16 in Fig. 2). Distribution of marine terraces [10] is also shown in the figure.



B: Denudation rates calculated from the difference between original and recent surfaces of marine terrace.

Fig. 3 Estimation of denudation rates based on volume of dissected valleys measured by using the 50m-DEM system.

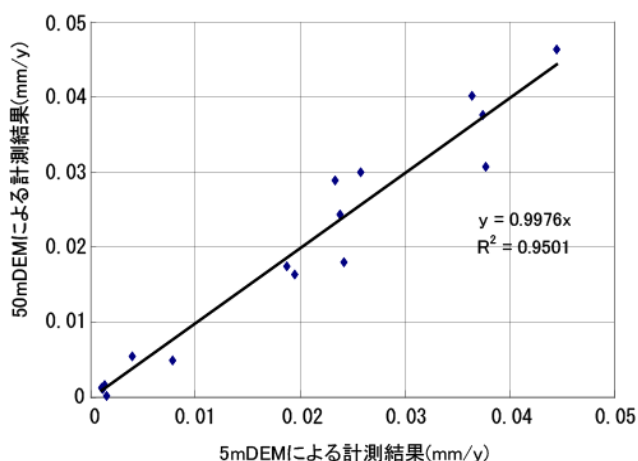


Fig. 4 Comparison of the calculated denudation rates between 5m- and 50m-DEM systems.

⑦段丘面侵食速度：段丘全体での侵食速度の平均値。「メッシュ侵食量の総和/(段丘面+開析谷の上面投影面積) / 12.5 万年」で計算。

6.3 解析結果と考察

12.5 万年間の侵食量について、主に隆起量との関連から考察する。まず、開析度は、段丘面の標高（ほぼ隆起量に相当）とかなり良い相関を持つ (Fig. 5A)。このことから、隆起量に比例して侵食量も増加することが分かる。

最大侵食深は比高と良い相関を持ち、比高の 65~90% (平均約 76%) の値を取る (Fig. 5B)。開析谷底には多少なりとも堆積物があり、その堆積面がローカルな意味での侵食基準面に相当することを考えると、標高 (隆起量) でなく比高の方が侵食深の指標として妥当である。

次に、「開析谷侵食速度」と「段丘面侵食速度」について、それぞれ隆起速度に対する比率を検討してみる (Fig. 5C, D)。「開析谷侵食速度」と「段丘面侵食速度」は、それぞれ隆起速度のおよそ 20~30%、8~19% である。この例からは、離水後約 12.5 万年間では、谷の平均深度は隆起量の 20~30% であり、隆起した体積の 10~20% 程度が侵食で失われると想定される。データに見られるバラつきは、隆起量や地質条件などと関係していると考えられる。

隆起が継続すると、主に勾配の増大によって侵食速度も増加し、ある程度の時間が経つと隆起速度と侵食速度が釣り合った平衡状態が出現すると一般的に考えられている。山地が隆起を続けると谷が尾根を両側から切り合い、尾根高度が増加できなくなることで、谷の深さが増してゆくと谷壁斜面の傾斜が急になり、岩石の強度が斜面を維持できなくなって崩壊すること、などが山地の侵食速度が平衡状態にあることを支持する理由である。隆起が速く、多雨によって侵食速度も大きい日本の山地は、この平衡状態に達していると考えられている [13, 14, 15, 16]。この平衡状態に達するまでの時間 (隆起の継続時間) は、隆起速度に

もよるが、丘陵では離水から 40 万年~65 万年 [4]、山地では 100 万年ないし数百万年 [14, 15] と考えられる。隆起速度が速いほど、また、岩石の強度が弱いほど早く平衡状態に達すると考えられる。

侵食速度は氷期と間氷期では異なると考えられるが、氷期・間氷期の 1 サイクルである 10 万年程度の平均値で考えると、上記の MIS5e 段丘、丘陵、山地のデータは、一連の時間変化として解釈できる (Fig. 6)。軟岩からなる丘陵地域では 40 万年~65 万年で隆起量と平衡状態に達する。山地には主な隆起の時期が第四紀以降 (木曾山脈など) のものと、それ以前 (飛騨山脈、北上山地など) のものがあり、その多くが隆起と侵食の平衡状態にある [17, 18, 19]。

7 まとめと課題

地層処分にとっての侵食作用の重要性を述べ、侵食速度の推定法について一案を示した。本研究では、10 万年程度の平均値で見た侵食速度について、以下のことが分かった。

1. 最終間氷期に形成された海成段丘の地形計測結果は、過去約 12.5 万年間の侵食量が隆起量に比例して増加することを示す。
2. 侵食速度の隆起速度に対する比率は時間と共に増加し、軟岩からなる丘陵地域では 40 万年~65 万年、山地でも 100 万~数百万年程度隆起が継続すると、両者が平衡状態に達する。
3. 上記の結果からは、現在の海岸 (侵食量ゼロ) が離水すると、12.5 万年後にはおおよそ隆起した体積の 10~20% 程度が侵食されていると想定される。一方、平衡状態にある丘陵や山地であれば、隆起した分だけ (100%) 侵食される。
4. 離水 (段丘化) 後の経過時間によって、あるいは地形構成物質の強度の違いによって、その地形が将来侵食される速さ (量) は異なる。

本論で述べた隆起量に対する侵食量の比とその時間変化は、地層処分にとって重要な指標を与えるが、一般論の構築や他地域への応用には、事例の増加が必要である。こうした研究の進展によって、侵食プロセスの理解と、それに基づく侵食量の将来予測の確実度が向上していくと考えられる。

また、侵食されやすさは地形構成物質の強度と透水性によって異なる [5, 20, 21] が、今回の計測結果だけでは具体的な議論はできない。また、気候条件による侵食速度の違いもよく分かっていない。こうした情報の不備を補って行くには、フィールドデータに加え、室内実験や数値シミュレーションも駆使する必要がある。

上記の例からも分かるように、侵食量の推定値には不可避免的に曖昧さが伴う。しかし、推定された侵食量がどの程度正しいか、また、どういう意味を持つ値であるかを理解

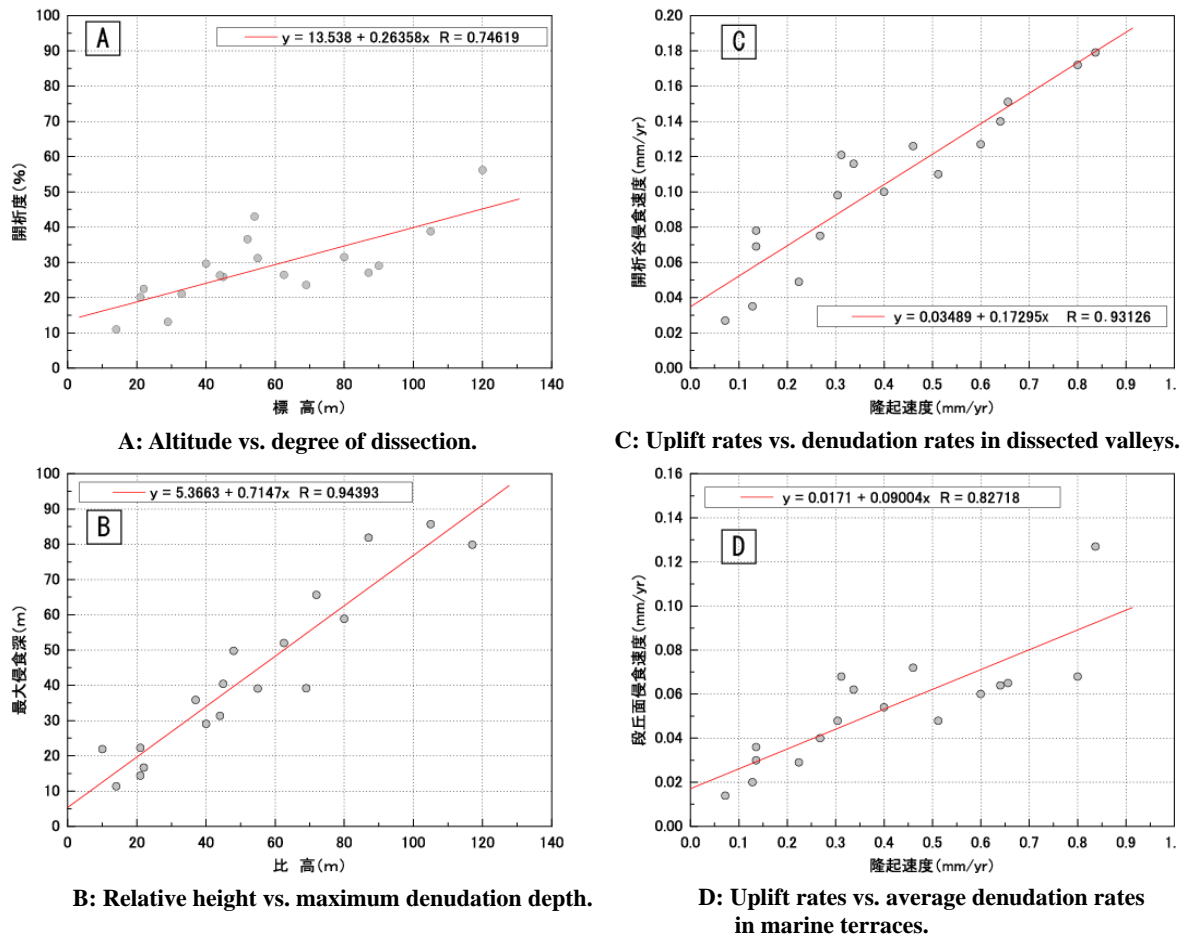


Fig. 5 Relationship between the denudation rates and tectonic features of the Last Interglacial marine terraces (125 k yrs ago) Measured data shown in Table 1.

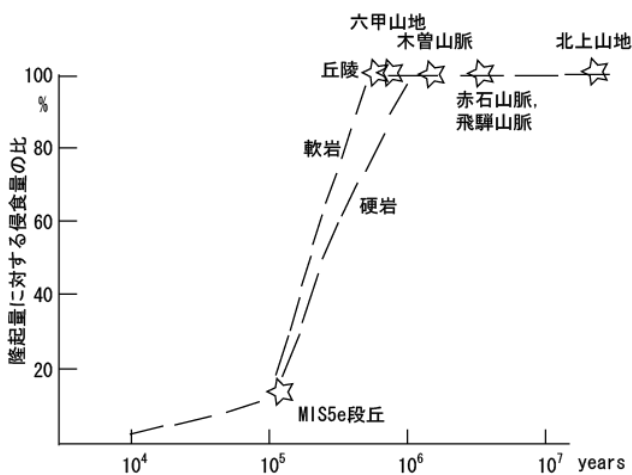


Fig. 6 Temporal change in ratio of denudation vs. uplift in geological time-scale.

した上で用いられ、将来の侵食量の推定や、地質環境への影響を検討することも不可能ではないだろう。また、侵食によって地形や地質の構成が変わった場合に、地下水理や水質にどのような影響が生じるかも、今後の重要な研究課

題である。

謝辞

2名の匿名の査読者からのコメントによって本稿は大きく改善された。記して感謝します。

参考文献

- [1] Ohmori, H.: Erosion rates and their relation to vegetation from the viewpoint of world-wide distribution. *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, no. 15, 77-91 (1983).
- [2] 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, 349p (2001).
- [3] 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, no. 32, 14-21(2001).
- [4] 柳田 誠, 藤原 治, 後藤憲央, 佐々木俊法: 谷密度と起伏量による丘陵の定義. 地学雑誌, **113**. 835-847.
- [5] 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 守屋俊文: 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**, 113-124 (2005).
- [6] 鈴木隆介: 建設技術者のための地形図読図入門第 3 巻 段丘・丘陵・山地. 古今書院, 555-942(2000).
- [7] Hosono, Y.: The water table in the Tokyo district. *Environmental Geology*, **21**, 22-36(1993).
- [8] 岩下茂子: 扇状地の縦断面からみた地下水と地形の関係. *ハイドロロジー*, **1** (1967).
- [9] 東浦将夫: 新庄盆地の地下水. 市川正巳・榎根 勇 編 「日本の水収支」, 古今書院, 165-174 (1978).
- [10] 小池一之, 町田 洋 編: 「日本の海成段丘アトラス」. 115p, CD-ROM 3 枚, 東京大学出版会(2001).
- [11] 鳥越祐司, 幡谷竜太, 柳田 誠, 佐藤 賢: 海水準変動 1 サイクルの沿岸域における最大侵食評価. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Q042-P007(2003).
- [12] 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).
- [13] Ohmori, H.: Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development. *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, no. 10, 31-85 (1978).
- [14] Ohmori, H.: A comparison between the Davisian scheme and landform development by concurrent tectonics and denudation. *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, no. 17, 19-28 (1985).
- [15] Ohmori, H.: Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. *Geomorphology*, **8**, 263-277 (1993).
- [16] Sugai, T. and Ohmori, H.: A model of relief forming by tectonic uplift and valley incision in orogenesis. *Basin Research*, **11**, 43-57 (1999).
- [17] 阪口豊, 高橋裕, 鎮西清高: 日本の地形—その生い立ちと特色—. *科学*, **46**, 223-234 (1976) .
- [18] 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, 277p (1995).
- [19] 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).
- [20] Suzuki, T., Tokunaga, E., Noda, H. and Arakawa, H.: Effects of rock strength and permeability on hill morphology. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, **6**, 101-130 (1985).
- [21] 田中幸哉: 北海道噴火湾沿岸地域における海成段丘面開析谷の横断形発達過程. *地形*, **11**, 97-115(1990).