JAEA-Research 2013-012



高レベル放射性廃棄物処分場を対象とした 隆起・侵食および気候・海水準変動による 影響評価手法の検討

―わが国における河川侵食による地形変化モデルの構築―

Advancing an Evaluation Methodology to Assess the Potential Effects of Uplift, Erosion, and Climate and Sea-level Changes on HLW Disposal -Modeling Geomorphic Change Caused by Fluvial Erosion in Japan-

注連本 英典 山口 正秋 若杉 圭一郎 柴田 雅博 Hidenori SHIMEMOTO, Masaaki YAMAGUCHI, Keiichiro WAKASUGI and Masahiro SHIBATA

> 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

October 2013

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

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, 2013

JAEA-Research 2013-012

高レベル放射性廃棄物処分場を対象とした隆起・侵食および気候・海水準変動による 影響評価手法の検討

―わが国における河川侵食による地形変化モデルの構築―

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

注連本 英典*、山口 正秋*、若杉 圭一郎、柴田 雅博

(2013年5月28日受理)

地下深部に設置された処分場が地表に近接する想定における影響の定量的評価に資する ために、隆起・侵食/気候・海水準変動により生じる場の変化の中で、河川侵食による地 形変化に注目し、その概念モデルを構築した。

河川侵食による地形変化の概念モデルは、河川の下流部、および源流部を対象として、 過去12万年程度の隆起・侵食および気候・海水準変動の影響による地形変化の記録を模式 化することにより構築した。

さらに、処分場の地表近接プロセスの評価において必要となる侵食量を見積もるために、 沖積層の情報をもとに河川の流路付近の下刻および側方侵食の深さと幅を測定し、モデル における侵食量の深さと幅の例を示した。源流部の概念モデルでは、中部山岳地帯の数値 標高モデル(DEM)をもとに侵食量の深さと幅を例示した。

以上の検討を通じて、わが国の河川侵食の特徴を踏まえた地形変化の概念モデルの開発 と、河川侵食による処分場の地表近接による影響を評価するための基盤情報を整備した。

核燃料サイクル工学研究所(駐在):〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 ※ 技術開発協力員

i

JAEA-Research 2013-012

Advancing an Evaluation Methodology to Assess the Potential Effects of Uplift, Erosion, and

Climate and Sea-level Changes on HLW Disposal

- Modeling Geomorphic Change Caused by Fluvial Erosion in Japan-

Hidenori SHIMEMOTO^{*}, Masaaki YAMAGUCHI^{*}, Keiichiro WAKASUGI

and Masahiro SHIBATA

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 28, 2013)

Conceptual models of geomorphic change caused by fluvial erosion were developed to provide a basis for an assessment model that handles the uncovering and subaerial assumption of a HLW repository due to uplift/erosion, and climatic and sea-level changes in the long-term.

Considerations of the different mechanisms at work in fluvial erosion along a river, the regions of the headwaters and outflow (at river-mouth) were the focus. The models were created by conceptualization of geomorphic change due to uplift and erosion, and climate and sea-level changes over about the last hundred and twenty thousand years, as can be determined from the geomorphic record.

The depth and width of erosion around river channels were measured using data from the alluvium records, and then examples of depth and width in the conceptual model were illustrated for the downstream section model. Regarding the headwater (OR "upstream") model, the depth and width of erosion were established for valleys in the central Japanese mountains using a digital elevation model (DEM).

Based on this, conceptual models taking into consideration the features of fluvial erosion in Japan were developed covering the variety of geomorphic changes possible, and the fundamental knowledge needed to evaluate the potential impact of the subaerial assumption of a repository was also prepared.

Keywords: Natural Phenomena, Uplift, Erosion, Fluvial Erosion, Conceptual Model, Downstream Section, Geomorphic Change, Subaerial Assumption

* Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに
2. 時間スケールに関する考え方と前提条件4
3. 概念モデル構築のための現象理解
3.1 河川による地形発達に関する知見の整理
3.1.1 下流部の地形発達に関する知見の整理
3.1.2 上流~中流部の地形発達に関する知見の整理
3.1.3 源流部の地形発達に関する知見の整理10
3.1.4 モデルの適用範囲に関する検討10
4. 概念モデルの構築
4.1 下流部における概念モデル
4.2 解析モデル構築のための谷地形の深さおよび幅の見積もり13
4.2.1 下流部モデルと地下情報との対応14
4.2.2 下流部モデルにおける侵食および堆積量の測定例19
4.2.3 断面における谷地形の深さおよび幅の設定
4.3 源流部における概念モデル
5. まとめ
謝辞
参考文献

Contents

1. Introduction ······1
2. Time frame and assumptions ······4
3. Understanding of natural phenomena for development of a conceptual model
3.1 Arrangement of knowledge concerning geomorphic change along a river5
3.1.1 Downstream section ······8
3.1.2 Upper to middle-sections ······9
3.1.3 Headwater section ·····10
3.1.4 Discussion on the range of model applications10
4. Development of a conceptual model
4.1 Conceptual model on downstream section
4.2 Estimation of depth and width of river valleys for development of analytical model
for evaluation of erosion
4.2.1 Correspondence between erosion model on downstream section and
subsurface information14
$4.2.2$ Example of measurement of erosion and sediment for downstream section $\cdots 19$
$4.2.3$ Assignment of depth and width of river valley cross-sections $\cdots 23$
4.3 Conceptual model on headwater section
5. Summary
Acknowledgements ····································
References 32

図リスト

図 1.1.1	隆起・侵食により想定される処分場の時間・空間変遷のプロセス1
図 1.1.2	天然現象の影響評価手法の例
図 3.1.1	間氷期・氷期・後氷期における河川の堆積・侵食による河成段丘の形成モデル6
図 3.1.2	第四紀の各 isotope stage における気候・海面変動に対応して
	形成された河成地形面
図 3.1.3	概念モデルと地形・流域の対応、および流域ごとの氷期-間氷期の河川縦断面
	の概念
図 3.1.4	沖積低地の分類と発達過程の模式図8
図 3.1.5	底生および浮遊性有孔虫殻酸素同位体から描かれた海面変化
図 4.1.1	12 万年前以降の海水準変動と下流部の地形変化の模式図
図 4.1.2	河川下流部の地形変化の概念モデル(わが国の河川に多いパターン)12
図 4.2.1	東京湾と周辺部の沖積層の基底深度
図 4.2.2	下流部の概念モデルと東京低地の沖積層地質断面図16
図 4.2.3	海水準変動と下流部の概念モデルと地下情報との対応17
図 4.2.4	最終間氷期以降の河川侵食による谷の形成とその後の埋積に係る概略図18
図 4.2.5	河川断面の地形変化から判読可能な侵食および堆積量
図 4.2.6	古奥鬼怒湾地域の地質断面図
図 4.3.1	各地域のV字谷横断面の比較
	(黒部峡谷付近、木曽駒ヶ岳付近、赤石岳付近)
図 4.3.2	黒部峡谷付近における V 字谷の横断面
図 4.3.3	木曽駒ヶ岳付近における V 字谷の横断面
図 4.3.4	赤石岳付近における V 字谷の横断面
図 4.3.5	わが国における河川源流部のV字谷モデル(中部山岳地帯の例)29

表リスト

表 4.1.1	最近 12~13 万年の海水準変動の期間区分(高海面期~低海面期~高海面期)	
	による下流部の地形変化の概念	13
表 4.2.1	河川侵食深さと幅の測定例:古東京川(東京低地)と古鬼怒湾地域	$\cdot 21$
表 4.2.2	古東京川(東京低地)と古鬼怒湾地域における河川侵食深さと幅の比較	
	(埋没谷の分析例)	22
表 4.3.1	変動の著しい谷の地形変化	$\cdot 25$
表 4.3.2	V字谷の幅・深さ・傾斜(黒部峡谷・木曽駒ヶ岳・赤石岳付近の例)	$\cdot 28$

This is a blank page.

1. はじめに

わが国における地層処分の基本的な考え方は、対象廃棄物を安定な地下深部に埋設し、 人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによって、人間の生活環境か ら隔離することとされている¹⁾。このために、処分場の選定においては、火山・火成活動、 地震・断層活動、著しい隆起・侵食等の天然現象を考慮して、これらの天然現象が処分シ ステムの性能に大きな影響をもたらす可能性のある場所を避けることを基本としているが、 地層処分システムの閉鎖後長期安全性の評価においては、天然現象が処分システムの安全 性に及ぼす影響を適切に考慮することが求められている²⁾。

天然現象のうち、隆起・侵食に関しては、事業主体の概要調査地区選定上の考慮事項³⁾では「過去 10 万年の隆起総量 300m を超えている地域の除外」が述べられている。しかしながら、隆起・侵食は地殻変動や気候・海水準変動に応じて広域的に生じるため、長期的にその影響を完全に排除することは難しいと考えられることから、その評価手法を準備しておくことが重要となる。

隆起・侵食が地層処分システムに及ぼす影響を検討するにあたっては、時間とともに処 分場の深度が浅くなることによって、地質環境に期待している機能がどのような変化する のかという観点から、図 1.1.1 に示す 3 つの時間区分に着目した検討を行うことが合理的で あると考えられる。

時間			\rightarrow
深さの区分	①地下深部	②地表近傍	③地表到達
	(還元環境)	(風化帯・酸化帯)	
処分場位置の	地表		
概念図	酸化带		
	風化帯 L		
			and the second second
	个処分場		
	深部地質		
	^境 (晋元冬卅)	STATISTICS STATISTICS	ALC: NOT THE OWNER OF THE OWNER
			and the second second
	埋設深度		
処分場近傍の	水理地質構造の変化	化学環境および水理地質構造の	廃棄物、処分場の地表への露出
地質環境条件	・動水勾配の変化	変化	/削剥
の変化	・土かぶりの減少に伴う応力変	・還元性環境から酸化性環境へ	
	化による亀裂の発生と高透水	変化	
	領域の形成 等	・帯水層(高透水性)への到達	
処分システム	・地下水流動の変化に伴う核種	・酸化還元に鋭敏な放射性核種	・多重バリアシステムに期待し
の安全性への	移行の促進	の酸化による溶解度の上昇お	ている安全機能の喪失
影響	・地表までの移行距離の短縮	よび吸着分配係数の低下	・核種の生物圏への直接移行
		・地下水流動の変化に伴う核種	
		移行の促進	
		・地表までの移行距離の短縮	

図 1.1.1 隆起・侵食により想定される処分場の時間・空間変遷のプロセス

ただし、処分場の地表近接は、処分場が建設される深度と、その地域での将来に渡る隆 起・侵食速度に依存するものの、数十万年を超える遠い将来となることが想定されること から、安全規制の基本的考え方の検討²においても、「廃棄物、処分場の露出を考慮した接 近シナリオは、安全評価における時間枠との関連で検討が必要である」とされている。し たがって、遠い将来に渡っての処分システムの頑健性を示すという観点から処分場の地表 到達についても検討を進めておくことは必要である。

上記の背景と考え方に基づいて、以下に「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-」⁴(以下「第2次取りまとめ」 とする)およびそれ以降の隆起・侵食の影響評価に関する既往研究を概観する。

第2次取りまとめにおいては、変動シナリオとして、隆起・侵食が継続することで、処 分場が地表付近の酸化性の環境に到達し、酸化・還元に影響を受ける元素(Np等)の溶解 度、分配係数が変化するとともに、母岩の透水性が変化するという設定の解析を実施し、 酸化性環境に到達した際のこれらのパラメータの変更が線量のピークをもたらすことを示 した 4.5)。また、処分場が地表到達する想定については、評価の対象とするシナリオからは 除外したものの、仮想的シナリオとして評価事例を示している。この評価事例においては、 隆起と侵食が同じ速度、また一定の速度で進むという仮定を遠い将来まで外挿することに より、処分場を含む岩盤が地表に露出し、処分場全体が平面的に均一に削剥されると仮定 した評価を行っている 4.5)。

このような、第2次取りまとめにおける、一般的な地質環境を対象とした簡便で保守的 なシナリオの検討とその影響評価の例示に対し、第2次取りまとめ以降は、天然現象の科 学的な理解に基づいた、より現実的な評価手法の整備が進められてきた 6.7)。具体的には、 図1.1.2に示すように、天然現象のプロセスの記述に基づいて、天然現象によりもたらされ る環境条件の変化を、温度、水理、力学、化学および幾何形状(Thermal - Hydrological -Mechanical – Chemical – Geometrical;以下「THMCG」)の観点で整理し、これらの環境 条件の変化を安全評価のシナリオ、モデル等に反映していくというアプローチである。

このアプローチに従った隆起・侵食評価の検討事例として、川村ほか(2009)[®]および江橋 ほか(2009)[®]がある。これらの検討では、隆起・侵食が継続することにより、処分場が地下 深部から酸化帯に到るまでの処分場近傍の THMCG の環境条件の変化を設定する方法を提 案し試行例を示している。将来の処分場周辺の地質環境条件は、その地域の地史に基づい て想定される将来の場の変遷を考慮して、現在、その地域で観察される地質環境条件の空 間的な分布を参考として設定することが可能とする考え方である。

処分場が地表到達する想定の検討事例としては、Miyahara et al.(2009)¹⁰⁾および Miyahara et al.(2011)¹¹⁾がある。これらの研究では、処分場の環境条件としてG(幾何形状) に着目し、地表における削剥現象を、第2次取りまとめの検討で行ったような平面的な均 一な削剥ではなく、わが国において一般的に認められる、地形変化に関する科学的な知見 を取り入れ、河川による侵食・堆積を考慮した概念モデルの構築を行っている。

本研究は、これらの研究のように、考慮すべき天然現象に係る地球科学的な知見を適切 に取り込みながら、天然現象によりもたらされる環境条件の変化を処分システムの性能評 価に取り込んでいくという一連の性能評価手法の整備の一環をなすものであり、図 1.1.1 に 示した、隆起・侵食の影響評価で考慮すべきプロセスのうち、超長期の後に発生が想定さ れる現象ではあるものの、放射性物質が地表の生活圏に直接もたらされるという点で、放 射線学的影響が大きいと懸念される処分場の地表到達に着目することとした。処分場の地 表到達を想定したものとしては、上述のとおり Miyahara らの研究 ^{10,11)}があり、河川中流 部を対象とした河川による侵食・堆積による地形変化モデルの提示がなされていることを 踏まえ、これらの既往研究の基本的な考え方を踏襲しつつ、従来議論されていない河川下 流部および源流部の地形変化について検討を行うことで、わが国において一般的に認めら れる地表での削剥現象を広く対象とした、影響評価のための地形変化の概念モデルを構築 することを目指すものである。なお、本研究は、処分場の露出、削剥に係る地形変化の概 念モデルの構築までとし、露出、削剥に伴う放射線学的影響についての議論は行わない。



図 1.1.2 天然現象の影響評価手法の例(宮原ほか(2006) 12)に一部加筆)

以下、2章では概念モデル構築に前提となる時間スケールの考え方等を整理し、3章では わが国における河川による地形変化モデルを構築するための知見の理解・分析、4章では、 わが国における河川による地形変化の概念モデルの提示、および影響評価のための河川に よる地形変化の大きさの例を示し、処分場の地表到達プロセスの評価を具体的に進める足 掛かりとした。 2. 時間スケールに関する考え方と前提条件

隆起・侵食により処分場が地表到達する想定について、評価の議論を行う際には、その 事象が発生する可能性のある時期について十分に留意する必要がある。前述のように、処 分場が建設される深度と、その地域での将来に渡る隆起・侵食速度に依存するものの、処 分場が地表に到達するのは数十万年以降、100万年を超える遠い将来となることが想定され る。超長期を対象とした評価では地質環境条件やその変化の予測に伴う不確実性が高くな ることから、地層処分を対象とした影響評価における概念モデルの構築では、時間スケー ルの設定が大きな問題となるため、ここでは概念モデルで対象とする時間スケールと現象 の生起や継続の設定について検討した。

原子力委員会 バックエンド対策専門部会(1997)¹³は、隆起・沈降・侵食および気候・海 水準変動のような緩慢かつ広域的な現象の将来については、"十万年程度であれば、その及 ぼす影響の性質や大きさ、また影響範囲の移動や拡大の速度などを推測することができる と考えられる"としている。

また、原子力発電環境整備機構(2011)¹⁴⁾はさらに長期の安全評価を行う可能性を考慮して、 自然事象の将来予測の考え方を整理し、調査・評価の進め方を示した。それによると、"自 然事象の将来予測は、地域ごとおよび事象ごとに異なる過去の情報量と精度、そして地質 構造発達過程を考慮し、予測に用いる仮定を明らかにした上で外挿などにより行う"とし ている。

本検討では、上述の点を踏まえて、モデル化の対象とする時間・空間スケールを設定す ることとする。具体的には、過去の地形発達とそのプロセスに関する情報の多い最終間氷 期以降(過去約12万年前以降)の情報をもとに概念モデルを構築した上で、将来において も隆起・侵食の要因となる地殻変動や気候・海水準変動がそのまま継続することを前提に 外挿することとする。すなわち、遠い将来における処分場の地表到達時点においても、わ が国においては、最終間氷期以降現在までに観察されているのと類似した地形変化を想定 するという考え方である。

地層処分の処分場が地表近傍に接近するような長期間経過後においてこうした前提条件 が変化すると仮定する場合には、その変化を想定した新たな前提条件に基づいて、概念モ デルの適用性を検討する必要がある。しかしながら、不確実性の大きな遠い将来について、 過去から現在までに観察されている代表的ないくつかの地形変化を概念モデル化し、それ らを適用することによって、処分システムの性能を確認しておくことは重要な意味のある ことである。

3. 概念モデル構築のための現象理解

3.1 河川による地形発達に関する知見の整理

一般に、湿潤地域においては河川等の流水による侵食作用が普遍的にみられる。とくに わが国を含む中緯度地域においては、中流部〜上流部では気候条件の変化に、下流部では 海面変化に対応したサイクリックな地形変化が生じる。すなわち、中流部〜上流部では氷 期に堆積が進んで河床が上昇し、間氷期(後氷期)には下刻が進んで河床が低下する一方、 下流部では海水準変動に対応して氷期には下刻が生じて河床が低下、間氷期(または後氷 期)には堆積が進んで河床が上昇することが知られている(例えば Dury(1959)¹⁵⁾;貝塚 (1969)¹⁶⁾)。本検討では、こうした氷期ー間氷期サイクルに対応した河川の地形発達に関す る既存の知見をふまえて、影響評価のための概念モデルを構築する。以下に概念モデルの 構築に必要な知見を整理する。

地殻変動の活発な湿潤地域における河川の地形変化については、貝塚(1977)¹⁷によって河 川の侵食と堆積による河成段丘の形成モデルが示されている(図 3.1.1)。このモデルでは、 氷期-間氷期サイクルに伴う気候変化および海面変化と、隆起との相互作用により河成段 丘等の地形が形成されることが示されている。このモデルによれば、氷期-間氷期サイク ルに対する地形変化が、河川の中流~上流部と下流部とで異なることが示されている。

すなわち、氷期には、下流部では海面変化の直接的な影響として海面低下に伴って開析 谷が形成されるのに対して、上流部では、気候変化に伴う岩屑供給量の増加と河川流量の 減少により、谷の埋積と河床の上昇が生じる。間氷期には、下流部では海面上昇に伴って 開析谷に海水が侵入して溺れ谷が形成され、その後埋積されて低地が形成され、中流部~ 上流部では、岩屑供給量の減少と河川流量の増大によって下刻が生じる。さらに、こうし たサイクリックな河床高度や河床縦断形の変化と隆起が同時に生じることで段丘地形が形 成されることが示されている(貝塚, 1969)¹⁶。



図 3.1.1 間氷期・氷期・後氷期における河川の堆積・侵食 による河成段丘の形成モデル(貝塚(1977)¹⁷⁾: "日本の地形-特質と由来"、図VI-6, p.166, 岩波書店より転載)

このモデルについては、東日本を中心に多くの地域で最終間氷期以降の地形発達におい てあてはまることが確認されている(例えば吉山・柳田(1995)¹⁸⁾;豊島(1994)¹⁹⁾;久保 (1997)²⁰⁾)。一方、西南日本における研究例は少なく(例えば植木(2008)²¹⁾)、これは堆積段 丘の分布が限定的なためと考えられている(田力, 2005)²²⁾。

上述のように、河川の上流〜中流部と下流部とでは、氷期ー間氷期サイクルに対応して、 それぞれ異なる地形変化が生じる(図 3.1.1、図 3.1.2)。したがって、概念モデルの構築に あたっては各地域を分けて記述する必要がある。また、上流部のうち段丘が発達しない源 流部についても分けて記述することとする。なお、本検討では、氷期と間氷期の河床縦断 面を比較して、氷期に河床が低下する地域を下流部、氷期に河床が上昇する地域を中流〜 上流部、さらに上流側にあって氷期〜間氷期を通じた顕著な河床変動がみられない地域を 源流部として取り扱うこととする(図 3.1.3)。以下に、各地域における地形発達について、 既存の知見を整理する。



対応して形成された河成地形面(吉山・柳田(1995)¹⁸⁾、





図 3.1.3 概念モデルと地形・流域の対応、および流域ごとの氷期-間氷期の河川縦 断面の概念(鈴木(1997)²³⁾: "建設技術者のための地形図読図入門 第1巻 読図の基礎"、古今書院より転載、および吉山・柳田(1995)¹⁸⁾を参考に作成)

3.1.1 下流部の地形発達に関する知見の整理

上流からの土砂供給量の多い河川では、下流部に扇状地や氾濫原、三角州等からなる沖 積低地がよく発達している(米倉ほか,2001)²⁴⁾。こうした地域では、一般に氷期の海面 低下に伴って開析谷が形成された後、海面上昇に伴って溺れ谷が形成され、間氷期(また は後氷期)に埋積される過程で三角州や氾濫原等の堆積地形が形成されることが知られて いる(米倉ほか(2001)²⁴⁾;海津(1992)²⁵⁾)。海津(1981)²⁶⁾は、地形形成の特徴から、沖積低 地をデルタタイプ、扇状地タイプ、氾濫原タイプ、バリアータイプ、溺れ谷タイプ、海岸 平野タイプに分類している(図3.1.4)。

本検討では、このうち氷期-間氷期を通じた海岸線移動が大きく、ダイナミックに地形 が変化するデルタタイプの沖積低地を中心に検討を進める。



図3.1.4 沖積低地の分類と発達過程の模式図(米倉ほか(2001)²⁴⁾: "日本の地形1 総説"、p246,東京大学出版会より転載)

ここでは概念モデルの構築にあたり、約12万年前以降の海水準変動と地形発達の関係に 関する知見を整理した。約12万年前以降の海水準変動は、①海水準が徐々に低下する海面 低下期(約12万年前以降〜最終氷期極相期(約2万年前)までの時期)、②海水準が急激 に上昇する海面上昇期(最終氷期極相期〜後氷期までの時期)、③海水準が高い位置にある 高海面期(最終間氷期および後氷期)に区分できる(図3.1.5)。

このうち①海面低下期には、海面変化に伴って沖積低地を流れる各河川の基準面が低下 し、顕著な谷地形(開析谷)が形成、その後、②海面上昇期には、急激な海面上昇にとと もに開析谷に海水が侵入し、溺れ谷が形成、さらに、③高海面期には、河川による土砂供 給により、溺れ谷が埋積され、開析谷を埋める沖積層が発達したことが日本の多くの地域 で確認されている(例えば米倉ほか(2001)²⁴);海津(1992)²⁵)。また、①の海面低下期には、 亜氷期や亜間氷期の海面変化に伴って複数の段丘が形成された地域も認められる。さらに、 地殻変動との相互作用により、隆起地域では高海面期に形成された平坦面が広く分布する ほか、亜間氷期に形成された平坦が段丘面や埋没段丘面として残されている地域も認めら れる(米倉ほか,2001)²⁴。亜間氷期に形成された段丘面や埋没段丘面については、分布の 有無に地域性がみられることや、埋没段丘については年代の対比が行われていない場合も 多く、本検討の概念モデルでは考慮しないこととする。



図3.1.5 底生および浮遊性有孔虫殻酸素同位体から描かれた海面変化 (町田ほか(2003)²⁷⁾: "第四紀学"、p148, 朝倉書店

((Shackleton, 1987)²⁸⁾を一部補訂)より転載および加筆) *1: 図中の年代1から5eは MIS (Marine Isotope Stage);

海洋酸素同位体ステージによる区分。ステージ区分は有孔虫等の酸素同位体比の解析に 基づく。

3.1.2 上流~中流部の地形発達に関する知見の整理

上流〜中流部においては、氷期には植生の減少や周氷河作用による岩屑供給の増加(平 川・小野,1974)²⁹⁾や台風や豪雨の減少による河川の土砂運搬量の減少(Sugai,1993)³⁰⁾ によって堆積物が増大し、河床が上昇する。一方、間氷期には、植生の増加や河川の土砂 運搬量の増加によって侵食的な環境になり、河床が低下する。上流〜中流部では、こうし たサイクリックな河床変動と、隆起との相互作用によって河床段丘が形成されると考えら れている(貝塚,1969)¹⁶⁾。Miyahara et al.(2011)¹¹⁾は、こうした知見をふまえて上〜中流 部におけるサイクリックな地形変化を考慮した概念モデルを構築した。上〜中流部におけ る知見の整理と概念モデルの構築については、Miyahara et al.(2011)¹¹⁾および Kawamura et al.(2010)³¹⁾に詳述されており、本稿ではこれを踏襲することとする。 3.1.3 源流部の地形発達に関する知見の整理

わが国の山岳地帯には極めて隆起速度や侵食速度の大きな(例えば、侵食速度2~3mm/ 年(藤原ほか,2001)³²⁾)地域が見られる。そのような山岳地帯には、例えば、中部山岳地 帯には深いV字谷が特徴的に見られる。

∇字谷では下方侵食作用が強く働き、深く掘り込まれた谷、不安定化した谷壁(斜面)の崩壊、段丘の発達に乏しいなど、中流部や下流部とは異なる地形的な特徴を有する。

中部山岳では氷食のあとを残し、現在周氷河作用が見られる高山帯を除くと、谷と斜面の地形を支配しているのは、流水による谷底の侵食と斜面崩壊である(町田ほか,2006)³³⁾。

∇字谷は、顕著な隆起・侵食(削剥)が発生している場所である。原子力発電環境整備機構(2004)³⁾によれば、10万年間の隆起量が300mを超える地域は概要調査地区選定上の考慮事項により除外することになっていることから、こうした地域は処分場の選定において候補地域からは外される可能性が高い。本検討では、河川システムの異なる流域のモデルを示すために、既往の中流部、本研究の下流部に追加する形で、河川の源流部におけるV字谷の概念モデルを提示する。

3.1.4 モデルの適用範囲に関する検討

上述の氷期ー間氷期サイクルに対応した地形変化は、日本の多くの地域に適用できると 考えられる一方、十勝平野等、必ずしも上記のパターンに対応した地形変化がみとめられ ない地域があることも指摘されている(米倉ほか,2001)²⁴。

わが国においては、一般に現在の河口付近の河床勾配より海底地形の勾配が大きい²⁴、 しかし、十勝平野等、河床勾配が海底勾配より大きな地域が一部に認められ、このような 地域では海面低下に対応して堆積が生じ、海面上昇時には海食崖の後退によって下刻が生 じているとされる(野上(1964)³⁴⁾;長岡(1986)³⁵⁾)。本検討では、こうした比較的稀な事例 については扱わないこととする。 4. 概念モデルの構築

4.1 下流部における概念モデル

前述の現象理解に基づいて、一定の隆起速度を仮定すると、12万年前以降の海水準変動 に着目することで、下流部で生じ得る下刻・側刻・堆積について、図4.1.1のように描くこ とが出来る。ここでは"海水準低下に伴い下刻が進んだ後、海水準上昇に伴い側刻や谷埋 めなどが進む"、さらに"海水準が再び低下すると、埋積された谷の内部で再び下刻が生じ る"、という考え方に基づいて模式図を作成している。

図4.1.1では、割愛されているが1.の下刻から2.の下刻までに堆積と侵食が繰り返され、3. の海面上昇に伴い谷が埋積される各時間断面の連続スナップにより、海水準変動による下 流部の地形変化を模式化している。



図4.1.1 12万年前以降の海水準変動と下流部の地形変化の模式図

yBP^{*2}:放射性炭素による年代測定の結果を現在から起算した年数で示すときに用いる略語。記号 BP は、 before AD 1950 と読み、before physics の略語として考えるように統一されている(平凡社, 1996)³⁶⁾ 概念モデルの構築にあたっては、最終間氷期以降の海水準変動に基づいて作成した地形 変化の模式図を、他のサイクルにも適用可能とするために一般化することとした。ここで は、図 4.1.1 を河成段丘の形成に着目し複数の段丘形成過程を 1 回に単純化した上で、図 4.1.2 のように模式化した。

表 4.1.1 には、模式化にあたって考慮した、海水準変動に対応して生じる下刻・側刻・堆 積プロセスの変化を示す。



図4.1.2 河川下流部の地形変化の概念モデル(わが国の河川に多いパターン)

表4.1.1	最近12~13万年の海水準変	動の期間区分(高海面期~低海面期~	~高海面期)によ
	る下流部の地形変化の概念	(貝塚(1977)17)、	米倉ほか(2001) ²⁴⁾ な	どを参考に作成)

海水準変動のステージ区分	侵食基準面	河床	河床側方	段丘
①-a:高海面期 →海面低下期 (例えば、MIS 5e→ MIS 5d)	海面レベル、あるいは河川 の水面とほぼ同じレベル	海水準低下に伴い、流路付 近が下刻される(狭い谷の 形成)	顕著な変化は生じない	この時点では低地の状態
①-b:海面低下期 →低海面期 (例えば、MIS 5d→ MIS 4 →MIS 2)	海面レベル (①-aよりも基準面低下)	海水準低下に伴い、流路付 近が下刻される(谷の掘り 込み)	下刻だけでなく側刻が生 じる事がある	下刻と次の下刻の間に側刻や 堆積作用が生じ、隆起を伴う場 合は、河川の流路肩に段丘が 形成される
②: 低海面期→海面上昇期 (MIS 2→MIS 1の途中)	海面レベル (①-bよりも基準面上昇)	海水準上昇に伴い、堆積 (下刻された流路付近の埋 積)	海進に伴い側刻が生じる (平坦面の形成)	隆起が継続し、海水準昇降に伴 う下刻・側刻や堆積作用が繰り 返されると段丘は多段化
③:海面上昇期→高海面期 (MIS 1)	海面レベル、あるいは河川 の水面とほぼ同じレベル	海水準上昇に伴い、堆積 (下刻された流路付近や溺 れ谷の埋積)	海進に伴い側刻が生じる 事がある(河川の蛇行な ど)	海面上昇により段丘面の下位 (新しい方)は水没(溺れ谷)、 陸側侵食基準面以下の段丘は 堆積物により埋没

4.2 解析モデル構築のための谷地形の深さおよび幅の見積もり

上記の概念モデルを用いて影響評価を行うための解析モデルを構築するためには、谷の 深さや幅を具体的に設定する必要がある。一般に谷の深さや幅、形状等には地域性がある ことから、地形や地質の発達過程に関する知見のある場所について多くの情報を収集し、 具体的な時間帯(例えば数千年、数万年)ごとに下刻や側刻の量を計測することで、こう した値を幅で設定することが可能と考えられる。

本検討では、最終間氷期以降の地形や地質の発達過程が比較的詳細に明らかになってい る東京低地と古鬼怒湾を例に、具体的な情報をもとに谷の幅・深さを測定し、侵食量を見 積もる流れを例示するとともに、4.3節で河川侵食による谷地形の深さおよび幅の検討手順 を示した。

事例のうち、東京低地は、日本最大の流域面積を有する利根川によって形成された沖積 低地であり(貝塚ほか,2000)³⁷⁾、比較的規模の大きな沖積層や沖積低地が形成されている。 一方古鬼怒湾は、東京低地に比べて規模が小さいのが特徴である。いずれの地域も、上部 更新統~完新統の層序や堆積年代、および地形発達が比較的詳細に明らかにされている(遠 藤ほか(1988)³⁸⁾、木村ほか(2006)³⁹⁾など)。特に東京低地については、関東大震災以降多数 のボーリング調査が行われ(復興局建築部(1929)⁴⁰⁾など)、地下地質に関する詳細な情報を 入手可能である。 4.2.1 下流部モデルと地下情報との対応

(1) 東京低地における沖積層の層序と地形発達

東京低地中央部には、荒川(放水路)の地下に「古東京川」の埋没谷があり(図 4.2.1)、 中川低地から続く谷は葛飾区亀有付近で合流する。その両側には数段の平坦面が分布する (図 4.2.2)³⁸⁾。

「古東京川」の埋没谷とそれを埋積する沖積層の層序や形成過程については、関東大震 災以降、多くの調査・研究がおこなわれてきた。それによれば、「古東京川」の埋没谷は、 最終間氷期以降の海面低下に伴って両岸に段丘を発達させながら更新統を開析しつつ形成 されたものであり、その後、最終氷期極相期(約2万年前)以降の急激な海面上昇に伴っ て開析谷に海水が侵入し、溺れ谷が形成され、さらに上流からの土砂供給に伴って溺れ谷 が埋積される過程で沖積層が形成された(上杉ほか(1983)⁴¹⁾、木村ほか(2006)³⁹⁾など)。

東京低地の沖積層の層序は、上部の海成層(有楽町層)と下部の陸成層(七号地層)に 区分され、前者は主として海面上昇期の河床の上昇に伴って形成された河川成の堆積物、 後者は溺れ谷に堆積した内湾性の堆積物とそれを覆う三角州の堆積物とされている(上杉 ほか(1983)⁴¹⁾、木村ほか(2006)³⁹⁾など)。以下では、こうした沖積層の層序および発達過程 と、上述の概念モデルとの比較を行った。



図 4.2.1 東京湾と周辺部の沖積層の基底深度(貝塚ほか(2000)³⁷⁾: "日本の地形 4 関東・伊豆小笠原"、p212,東京大学 出版会より転載)

(図中の断面線は、図 4.2.2~図 4.2.4 に含まれる断面図(松田(1993)⁴²⁾)の 位置、図中の数字はメートル、網は台地・丘陵地、点線は現在の海岸線)

(2) 概念モデルとの比較

図 4.2.2 に下流部の概念モデルと東京低地の沖積層地質断面図を併せて示した。

東京低地の沖積層の層序とその発達過程は、概念モデル構築の概念同様"海水準低下に 伴い下刻が進んだ後、海水準上昇に伴い側刻や谷埋めなどが進む"、さらに"再び海水準が 低下すると、埋積された谷の内部で再び下刻が生じる"、という考え方で説明しうる。すな わち、海水準変動に伴い河床付近で侵食・堆積を行う過程の中で、埋積された谷の内部で 再び下刻が生じる際に、河床の外側には段丘面が形成される。その繰り返しで段丘が複数 形成され、谷全体の外側ほど古い段丘が位置している。そのような"掘りこまれた谷の外 側に段丘"、という基本構造が実際の東京低地の沖積層地質断面図にも見て取れる。

下流部の概念モデルと東京低地の沖積層地質断面図を比較すると(図 4.2.2)、図中の黄緑 色で示した箇所の谷は、概念モデルにおける河床部に、水色に着色した箇所の谷は、黄緑 色に着色した部分とその上部を含む谷全体に相当すると考えることが出来る。



図 4.2.2 下流部の概念モデルと東京低地の沖積層地質断面図(地質断面図は、 松田磐余(1993)⁴²⁾:貝塚爽平編『東京湾の地形・地質と水』、 "東京湾と周辺の沖積層"、築地書館から転載)



図 4.2.3 海水準変動と下流部の概念モデルと地下情報(松田, 1993) 42)との対応

一方、海水準変動と沖積層および地形の発達過程は、図 4.2.3 のように対応づけられる。 ここで、侵食される深さと幅、侵食速度について考えるために、貝塚ほか(2000)³⁷⁾を参考 に情報の抽出・整理を行った。

まず、顕著な埋没谷である A を含む B の谷について、その形成にかかった時間、谷の深 さおよび幅に関する情報を抽出した。そのプロセスは図 4.2.4 のようにまとめた。図 4.2.4 には、A の谷の開析とその時間的な情報、および東京低地の場合の地形の大きさを付記した。

【A を含む B の谷の形成に要した時間】

最終間氷期(約12万年前)~最終氷期極相期(2万年前)にかけての海水準低下により 侵食基準面が低下し、河床の削り込みと側方侵食が生じる。この間に両岸に段丘を形成 しつつ、約10万年かけてA~Bの開析谷が形成されたと考えられる。

(A)の谷の深さと幅】

このうち、Aの谷の侵食による削り込みの量は、東京低地の場合、鉛直方向の深さが最大

時其	まおよび海面変化	東京低地の概略地史	地形変化	海面、または 地層の基底の標高
1	13~2万年前頃	埋没段丘となる平坦面が形成される(下 末吉段丘や武蔵野段丘等)。		
2	2~1.5万年前頃 (最終氷期) グローバルな海 退	最終氷期種相期にうがたれた谷に扇状地 性堆積物が埋積する(層厚5~15m程 度)。 侵食と堆積	谷の下刻、側刻および、基底部の堆積	·60m(地層基底)
3	1.5~1.1万年前 海面上昇	基底礫層を形成した最終氷期極相期の谷 は、この頃の海進により7号地層に埋積 された。 東京低地では3~4千年の間に少なくとも 厚さ50mの泥質堆積物を形成。 <u>堆積</u>	^{2022年} 埋没谷下部に砂・シルト、粘土層の堆 積 -	
4	1万年前頃 海面低下	海面低下があり、7号地層の上部を侵食 して、完新世基底礫層、あるいは中間砂 層が堆積した。 中川・荒川低地下流部においては、有楽 町層の基底礫層は埋没谷全体にわたって 谷を広けていることが多く、その基底面 形状からは、河川の蛇行と側方侵食の卓 魅した時代であったと推定される。垂直 的には七号地層を最大35~45mにわたり 侵食。 侵食	理没谷の上部に堆積していた地層が礫層・砂層により侵食される +************************************	- -50m(海面)
5	1万年~6千年前 海面上昇(縄文 海進)	急速に海面が上昇し、海は荒川低地・中 川低地の河谷沿いに侵入し、「奥東京 湾」を形成した。 堆積	海進に伴う溺れ谷の形成、波食作用による谷の拡幅、低地付近の粘土層の堆積	-35m(9千年前の海 面) +3m(6千年前の海 面)
6	6千年~現在	5300年頃に起きた海面の低下(1m)により 三角州の急速な前進が始まった。三角州 の前置層を構成するのは上部有楽町層 (砂層)である。	勝れ谷の埋積、海岸線の後退	Om(現世の海面)

図 4.2.4 最終間氷期以降の河川侵食による谷の形成とその後の埋積に係る概略図 (貝塚ほか(2000)³⁷⁾および上杉ほか(1983)⁴¹⁾を参考に作成)

4.2.2 下流部モデルにおける侵食および堆積量の測定例

本節では既往資料を例に、前出のAの谷およびBの谷についてその深さと幅を測定する。 Aの谷およびBの谷は、図4.2.3の"概念モデル"および"実際の地下地質断面"に示したものであり、それらの深さと幅の測定を行った。

"概念モデル"および"実際の地下地質断面"の中には、測定を行っていない谷も含まれているので、読み取ったAの谷およびBの谷を抽出し、図4.2.5に模式図として示した。

また、Aの谷および Bの谷の谷地形の深さおよび幅の意味は、図 4.2.5 の凡例に示している。

Aの谷とBの谷は前出の古東京川だけでなく、古鬼怒湾地域の諸河川(図 4.2.6) についても見出すことが出来る。ここでは事例的に古東京川および、古鬼怒湾地域の諸河川について、最終氷期極相期頃の下刻や側方侵食の量、あるいは最終氷期極相期頃の侵食終了から現在までの埋積の厚さを測定し、その結果を表 4.2.1 に示した。

測定した埋没谷は、古東京川と古鬼怒湾地域(図 4.2.6)の間でスケールに違いがあるが、 これは開析谷を形成した河川の規模や河床勾配等に依存する地域差と考えられる。



図 4.2.5 河川断面の地形変化から判読可能な侵食および堆積量



図 4.2.6 古奥鬼怒湾地域の地質断面図(上杉陽ほか(1983)⁴¹⁾: "アーバンクボタ、No.21、特集「最終氷期以降の関東平野」"、 p31より転載、矢印および一部の断面番号を原図に加筆)

古東京川や古鬼怒湾地域の河川侵食について、最終間氷期〜最終氷期極相期にかけての 侵食量と最終氷期極相期〜現在までの埋積量しか統一的に読み取ることが出来ないのは、 それぞれの断面に含まれる複数の谷、段丘面などの形成年代が必ずしも特定できないため である。

なお、侵食速度(下刻および側刻)は、個々の地形変化イベントに係る情報がない場合 は、侵食の開始から終了までの間の平均値のみが求められることになる。

計測断面	Aa: 最終氷期頃に削り こまれた谷の深さ(m)	Ab: 最終氷期頃に削 りこまれた谷の幅(m)	Ba: Aの谷を含む谷全 体の深さ(m)	Bb: Aの谷を含む谷全 体の幅(m)
古東京川(東京低地)の埋没谷	36.0	4,300	64.8	16,400
古鬼怒湾地域の諸河川				
К-2	12.2	885	29.6	3,980
К-3	11.3	708	41.7	3,980
К-4-①	14.8	1,370	50.4	9,030
К-4-2	15.6	1,240	29.6	9,030
К-5	12.2	640	55.7	8,270
К-6	23.5	1,840	60.9	6,200
S-2	12.2	660	19.1	2,700
S-3	15.7	580	24.3	2,960
S-4	16.5	880	27.80	3,550
S-5	20≧	1,330	34.8≧	2,300
S-6	23.5≧	700	44.4≧	9,300

表 4.2.1 河川侵食深さと幅の測定例:古東京川(東京低地)と古鬼怒湾地域

古東京川の地質段面は図 4.2.3 参照

古鬼怒湾地域の諸河川の地質段面は図 4.2.6 参照

東京低地と古鬼怒川の各河川のAの谷・Bの谷の幅・深さはそれぞれ下記であった。

- ・東京低地
 - A の谷:深さ 36m、幅 4,300m
 - Bの谷:深さ65m、幅16,400m
- ・古鬼怒川の諸河川の谷の深さ・幅の範囲
- Aの谷:深さ11~24m、幅 580~1,840m
- Bの谷: 深さ19~61m、幅 2,300~9,300m
- (ただし、谷の最深部まで計測していない谷も含まれる)

上述のように、谷の幅や深さ等の値には地域性がみられるものの、ここでは前述の沖積 層の層序とその形成過程を踏まえて、最終氷期に形成された谷の形状について埋没谷およ び谷全体の深さ・幅の間の規則性の有無について検討した

東京低地や古鬼怒湾地域の谷について、その概略を下記に記載するとともに、表 4.2.2 に 埋没谷および谷全体の深さ・幅を用いた比を示した。

- ・最終氷期頃の侵食について、下刻(深さ)と側方侵食(幅)の比は、
 東京低地は 8.4×10⁻³、古鬼怒湾地域は 1~3×10⁻²程度である。
- ・最終氷期頃の側方侵食の幅と最終氷期頃に形成された谷を含む谷全体の幅の比は、(東京低地、古鬼怒湾地域の場合)、7.5×10⁻²~3×10⁻¹程度である。

計測断面	Aa/Ab: 最終氷期頃に削り こまれた谷の深さ/最終氷 期頃に削りこまれた谷の幅	Ab/Bb: 最終氷期頃に削り こまれた谷の幅/Aの谷を含 む谷全体の幅	Aa/Ba: 最終氷期頃に削り こまれた谷の深さ/Aの谷を 含む谷全体の深さ	Ba/Bb: Aの谷を含む谷全 体の深さ/Aの谷を含む谷全 体の幅
古東京川(東京低地)の埋没谷	8.37*10 ⁻³	0.26	0.56	3.95 *10^{−3}
古鬼怒湾地域の諸河川				
К-2	1.38*10 ⁻²	0.22	0.41	7.44*10 ⁻³
К-3	1.60*10 ⁻²	0.18	0.27	1.04*10 ⁻²
К-4-①	1.08*10 ⁻²	0.15	0.29	5.58*10 ⁻³
К-4-2	1.26*10 ⁻²	0.14	0.53	3.28*10 ⁻³
K-5	1.91*10 ⁻²	7.74*10 ⁻²	0.22	6.73*10 ⁻³
K-6	1.28*10 ⁻²	0.30	0.39	9.82*10 ⁻³
S-2	1.85*10 ⁻²	0.24	0.64	7.41*10 ⁻³
S-3	2.71*10 ⁻²	0.20	0.65	8.21*10 ⁻³
S-4	1.88*10 ⁻²	0.25	0.59	7.83*10 ⁻³
S-5	1.50*10 ⁻²	0.58	_	1.51*10 ⁻²
S-6	3.36*10 ⁻²	7.53*10 ⁻²		4.77*10 ⁻³

表 4.2.2	古東京川	(東京低地)	と古鬼怒湾地域における河川侵食深さと幅の比較
	(埋没谷の)	分析例)	

古東京川の地質段面は図 4.2.3 参照

古鬼怒湾地域の諸河川の地質段面は図 4.2.6 参照

- 4.2.3 断面における谷地形の深さおよび幅の設定
- 資料収集:河川の侵食作用による地形変化やその地史に係る情報が含まれている文献・資料を収集し、その信頼性を確認する。
- ② 知見の分析:河川侵食の地形(谷や段丘)の大きさ(深さと幅)および対応する 海水準変動や地形変化に要した時間の適用

 \downarrow

Ţ

③ 評価・解析への適用検討:地形形状やその大きさ(谷地形の深さおよび幅)の評価への適用の可否や設定の検討。

前項では事例として、古東京川および古鬼怒湾地域の諸河川について測定を行ったが、 この2つの例においても認められたように、氷期-間氷期の海水準変動サイクルに伴う河 川下流部の断面における谷地形の深さおよび幅は、対象とする河川や位置によって地形規 模の違いがある。したがって、処分システムの性能評価に用いる谷地形の深さおよび幅を、 不確実性を考慮して幅として設定するためには、より多くの測定事例を蓄積し、ある程度 の数のデータを母集団として取り扱うこととが望ましい。この際、前項のデータ整理結果 から示唆された、最終氷期に形成された開析谷と、開析谷を埋積する沖積層の幅や深さ等 の形状の規則性を応用することが有効となるものと考えられる。

これらの作業の支援に有効と考えられるツールとして、例えば、地理情報システム等を 用いた統計的アプローチの活用が考えられる。地理情報システムの活用の利点としては、 大量のデータ処理と数値的処理などの客観的処理が可能になるほか、隆起・侵食に関連す る解析のツールとして、評価モデルの地形量の設定の妥当性確認、河川の幅や勾配などか ら埋没している谷地形の推定などさらなる評価手法構築への応用や発展も期待される。 4.3 源流部における概念モデル

源流部の V 字谷における地形発達については、地形学的に一般化されたものが特に示さ れていないが、本検討では数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)を用いて谷の 横断面形を計測するとともに、谷の形状変化に係る知見をふまえて概念モデルを構築した。

具体的な作業は、谷の発達に係る地史の整理(A)と谷形状のモデル化(B)である。

(A):氷期-間氷期を通しての谷の形状変化の地史は、氷期-後氷期の谷の形状や形状変化 に係る知見を整理した。その地史は、中部山岳を例に表 4.3.1 のように整理される。
(B):谷の横断形状は、国土地理院の DEM データ ⁴³(基盤地図情報:10m メッシュ)を用 いて谷壁を図化し、以下の作業を行った。

最初に中部山岳地帯の 3 つの谷について (図 4.3.1)、V 字谷のモデルとなる横断面を幾 つか設定し DEM データを ArcGIS Ver.10.0 (ESRI ジャパン株式会社) に取り込んだ。

次に、ArcGIS 上で基本機能を用いて横断形状を断面図に表示し(図 4.3.2~図 4.3.4)、 標高や起点距離の読みとりを行った後、読みとった谷の標高や起点距離をもとに測定した 谷の深さ、幅、谷壁斜面の傾斜角を記した。

上記の作業を経て測定された黒部峡谷付近、木曽駒ヶ岳付近および、赤石岳付近における V 字谷の幅・深さ・傾斜角のデータを表 4.3.2 に示した。

表4.3.1	変動の著しい谷の地形変化(町田ほか(2006) ³³⁾ :"日本の地形5 中	1部"、
	[4-8 中部山岳の河谷がつくる地形]、pp.198-201 から抜粋引用)	

谷の状態、ある	谷の侵食、および斜面崩壊	谷の埋積
いは変化		
後氷期(現在も含	・飛騨山脈・木曽山脈・赤石山脈には激	・松本盆地や伊那盆地、木曽谷などに沿
めるものとする)	しい下刻状況にある谷(河川や支流)が	ってみられる段丘の地形発達は、グロー
	ある。谷底は河川敷の幅が狭く、河床に	バルな気候変化とよく同調し、谷の下刻
	は巨礫はあるが、堆積物は薄く基盤岩の	と堆積が反復してきたことを示してい
	露出が普通である。	る。すなわち、最終間氷期には後氷期と
	・激しい下刻が発生している部分には、	同様に谷が深く下刻され、扇状地でも侵
	谷壁に崩壊地が連続する。中部山岳の谷	食が起こったが、氷期に差し掛かる 10
	壁斜面では、他の山地より長く比高が大	万年前頃以降、斜面から多量の砂礫が供
	きいため、地震や豪雨などによって誘発	給されるようになって次第に河床が上昇
	された崩壊は大規模である。	する。
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境 のもとで強い面的な侵食を受けていた。	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ る段丘やその堆積物が見出されるところ
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境 のもとで強い面的な侵食を受けていた。 これにより、突発的な崩壊物に加えて多	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ る段丘やその堆積物が見出されるところ が多い(梓川、黒部川、常願寺川など)。
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境 のもとで強い面的な侵食を受けていた。 これにより、突発的な崩壊物に加えて多 量の岩屑を下流の河谷から盆地に堆積さ	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ る段丘やその堆積物が見出されるところ が多い(梓川、黒部川、常願寺川など)。 段丘地形は不明瞭だが、現在深く侵食し
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境 のもとで強い面的な侵食を受けていた。 これにより、突発的な崩壊物に加えて多 量の岩屑を下流の河谷から盆地に堆積さ せた。岩屑を運ぶ谷の流量は、豪雨が卓	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ る段丘やその堆積物が見出されるところ が多い(梓川、黒部川、常願寺川など)。 段丘地形は不明瞭だが、現在深く侵食し ている谷でも土石で埋まった過去があ
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境 のもとで強い面的な侵食を受けていた。 これにより、突発的な崩壊物に加えて多 量の岩屑を下流の河谷から盆地に堆積さ せた。岩屑を運ぶ谷の流量は、豪雨が卓 越するようになった後氷期に比べると少	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ る段丘やその堆積物が見出されるところ が多い(梓川、黒部川、常願寺川など)。 段丘地形は不明瞭だが、現在深く侵食し ている谷でも土石で埋まった過去があ る。
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境 のもとで強い面的な侵食を受けていた。 これにより、突発的な崩壊物に加えて多 量の岩屑を下流の河谷から盆地に堆積さ せた。岩屑を運ぶ谷の流量は、豪雨が卓 越するようになった後氷期に比べると少 なかった。	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ る段丘やその堆積物が見出されるところ が多い(梓川、黒部川、常願寺川など)。 段丘地形は不明瞭だが、現在深く侵食し ている谷でも土石で埋まった過去があ る。 ・各河谷の下流に分布する堆積段丘を上
氷期	された崩壊は大規模である。 ・更新世の氷期には、現在の海抜1200~ 1500m以上という広い斜面が周氷河環境 のもとで強い面的な侵食を受けていた。 これにより、突発的な崩壊物に加えて多 量の岩屑を下流の河谷から盆地に堆積さ せた。岩屑を運ぶ谷の流量は、豪雨が卓 越するようになった後氷期に比べると少 なかった。 ・氷期においても地震が斜面崩壊の重要	する。 ・現在深く掘れている谷の高い斜面にも、 断片的ながら肩の部分に過去の河床であ る段丘やその堆積物が見出されるところ が多い(梓川、黒部川、常願寺川など)。 段丘地形は不明瞭だが、現在深く侵食し ている谷でも土石で埋まった過去があ る。 ・各河谷の下流に分布する堆積段丘を上 流にのばすと、河谷は氷期に現在より数



図 4.3.1 各地域の V 字谷横断面の比較 (黒部峡谷付近、木曽駒ヶ岳付近、赤石岳付近)



図 4.3.2 黒部峡谷付近における V 字谷の横断面



図 4.3.3 木曽駒ヶ岳付近における V 字谷の横断面



図 4.3.4 赤石岳付近における V 字谷の横断面

V字谷のエリア	計測断面	谷の幅(m):左岸	谷の幅(m):右岸	谷の大まかな 深さ(m)	谷壁斜面の傾斜 (°):左岸	谷壁斜面の傾斜 (°):右岸
	section1	600	388	500	55	48
	section2	350	575	575	52	57
里部峡公台近	section3	300	488	550	52	56
羔叩峡谷门近	section4	238	300	290	48	46
	section5	468	463	750	46	58
	section1	292	167	240	40	32
	section2	220	120	210	42	44
木曽駒ヶ岳付近	section3	352	258	270	36	34
	section4	376	385	270	34	35
	section5	270	302	250	37	38
	section1	387	271	300	39	43
	section2	378	564	500	48	42
赤石岳付近	section3	707	500	580	40	45
	section4	988	600	660	35	40

表4.3.2 V字谷の幅・深さ・傾斜(黒部峡谷・木曽駒ヶ岳・赤石岳付近の例)

以上の検討を基に、概念モデルを構築した(図4.3.5)。なお、このV字谷における概念モ デルの特徴は以下のようにまとめられる。

図4.3.5に示した源流部のV字谷を対象とした概念モデルは、河川の地形発達の観点からは、 貝塚¹⁷⁾によるモデルの上流〜中流部に属する。一方で、段丘の発達に乏しい点、深い侵食谷 などが、中流部と異なる。したがって、本概念モデルは、中流部を対象としたMiyahara et al.(2011)¹¹⁾による概念モデルの幾何形状変更版とみることも可能である。

なお、図4.3.5に示した概念モデルには、読みとった谷の谷地形の深さおよび幅である谷の深さ、幅、谷壁斜面の傾斜角の範囲を記した。

谷壁斜面の傾斜角の範囲、および谷の幅と深さの範囲の最大値については、概ね各谷に 共通する範囲を採用している。谷の幅と深さの範囲の最小値については、谷底付近にその 上部とやや傾斜角の異なる相対的に小さな谷が認められる場合があるので(黒部峡谷の section1やsection 3)、幅と深さの最小値をともに100mとした。



図4.3.5 わが国における河川源流部のV字谷モデル(中部山岳地帯の例)

5. まとめ

隆起・侵食および気候・海水準変動による処分場(地層処分システム)への影響のうち、 影響が大きいことが予想される地表到達を想定したプロセスの評価の基本となる概念モデ ルを構築した。

わが国で普遍的に生じうる侵食作用として河川による侵食に着目し、河川の源流部、中 流部および下流部の、それぞれの地域での侵食・堆積現象の違いを考慮して、地域に応じ た侵食による地形変化の概念モデルを構築した。

中流部については、Miyahara et al.(2011)¹¹⁾により概念モデルが提示されていることから、 本研究では、河川の下流部および源流部に着目して概念モデルを構築した。

河川の下流部は、中流部とは異なる地形発達が考えられていることから、氷期-間氷期 の気候・海水準変動に対応した河川の下流部の地形変化について、文献調査に基づいて現 象理解を行うとともに、概念モデルを構築した。この概念モデルは、最終間氷期以降の海 水準変動に伴う地形発達をモデル化したものである。河川の下流部の侵食モデルについて は、影響の評価に資するために、沖積低地の層序や地形発達に関する既存の知見をもとに、 海面の低下に伴う侵食量(下刻および、側方侵食の量)について整理し、解析・評価に必 要となる谷の幅や深さ等を設定する手法を例示した。

河川源流部については、源流部でみられるV字谷は、隆起速度が大きいこと、および段 丘が未発達という形態的特徴に着目して概念モデルを構築するとともに、DEMに基づく評 価に必要な谷地形の深さおよび幅等の設定を例示した。

本研究における、河川の下流部および源流部の概念モデルの整備によって、河川の侵食・ 堆積システムや形成される地形形状の違いを考慮した、河川の源流部から下流部に到る一 連の河川侵食モデルが整備された。これらの概念モデルと関連する情報は、処分場の地表 到達を想定した場合に考慮すべき処分場の削剥の取り扱いにおいて、基盤となる重要な情 報になるものと考えられる。

謝 辞

本検討を進めるにあたり、地層処分基盤研究開発ユニットの亀井玄人ユニット長、シス テム性能研究グループの畑中耕一郎グループリーダー、前川恵輔 前システムチームリーダ ー(現ニアフィールド研究グループ)には、終始ご支援とご指導をいただきました。地震 予知総合研究振興会 地震調査研究センター 解析部の田力正好博士には、わが国の河川 作用による地形変化をはじめ、地形学に関する多くのことをご教示いただきました。また、

幌延深地層研究ユニット/堆積岩地質環境研究グループ、前サブリーダーの新里忠史博士 (現福島技術本部 福島環境安全センター 研究副主幹)、東濃地科学研究ユニット/自然 事象研究グループリーダー梅田浩司博士、同研究グループ副主幹安江健一博士、および三 菱マテリアルテクノ株式会社の川村淳氏からは検討内容に関して有益な議論とご示唆をい ただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 原子力発電環境整備機構: "地層処分事業の安全確保(2010年度版) 確かな技術による安全な地層処分の実現のために-, NUMO-TR-11-01, p.3-3.(2011).
- 2) 原子力安全委員会: "高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)"平成12年11月6日, (2000).
- 3) 原子力発電環境整備機構: "概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠"、-「概 要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料-、NUMO-TR-04-02, p.4-6.(2004). http://www.numo.or.jp/approach/technical_report/tr0402pdf/TR0402-08c4.pdf#page=2
- 4) 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-分冊3 地層処分システムの安全評価"、JNC TN1400 99-023 (1999).
- 5) 牧野仁史、加藤藤孝、宮原要: "天然現象の発生が地層処分システム性能に与える影響に ついての概略的検討–サイトを特定しない段階での検討例–"、核燃料サイクル開発機構、 JNC TN8400 2000-033 (2000).
- 6) 核燃料サイクル開発機構: "高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめー"、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400 2005-016 (2005).
- 7)川村淳、大井貴夫、新里忠史、安江健一、常盤哲也、丹羽正和、島田耕史、黒澤英樹、 浅森浩一、河内進、江橋健、北村暁、石丸恒存、牧野仁史、梅田浩司、瀬尾俊弘:"高レ ベル放射性廃棄物地層処分における天然現象影響評価に関する研究"、JAEA-Research 2008-018 (2008).
- 8) 川村淳、江橋健、牧野仁史、新里忠史、安江健一、大井貴夫: "高レベル放射性廃棄物処 分における隆起・侵食/沈降・堆積に起因するシナリオの検討"、JAEA-Research 2008-119 (2009).
- 9) 江橋健、川村淳、稲垣学、小尾繁、柴田雅博、板津透、仲島邦彦、宮原要: "仮想的な堆 積岩分布域における地層処分の地下水シナリオを対象とした隆起・侵食の影響評価手法 の例示"、JAEA-Research 2008-117 (2009).
- 10) K. Miyahara, M. Inagaki, M. Kawamura, T. Ebina, I. G., McKinley : 'Disruptive effects on a HLW repository due to uplift-erosion in the distant future,' Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, 1193, pp.177-184.(2009).

- 11) K. Miyahara, M. Kawamura, I. G. McKinley, M. Inagaki, T. Ebina, "Consequence Analysis of Fluvial Erosion Scenarios for an HLW Repository", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.48, No.7, pp.1069-1076.(2011).
- 12) 宮原要、吉川英樹、大井貴夫、柴田雅博、澤田淳、笹本広、飯島和毅、前川恵輔、川村 淳、加藤智子、江橋健: "高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価に関する研究計画書(当 面5ヵ年の計画: H17年度版)"、JAEA-Review 2006-015 (2006).
- 13) 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会: "高レベル放射性廃棄物の地層処分 研究開発等の今後の進め方について"、第3章 地層処分システムの安全評価 (1997).
 http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo97/siryo26/siryo32.htm
- 14) 原子力発電環境整備機構: "地層処分事業の安全確保(2010年度版) 一確かな技術による安全な地層処分の実現のために-"第5章 地質環境の調査・評価技術、p.5-9.(2011).
 http://www.numo.or.jp/approach/technical_report/tr1101_110926/tr1101_07.pdf
- 15) Dury, G. H.: "The Face of the Earth, Penguin Books, Harmondsworth", 251p. (1959).
- 16) 貝塚爽平: "変化する地形一地殻変動と海面変化と気候変動のなかで"、科学、42, pp.573-581.(1969).
- 17) 貝塚爽平: "日本の地形-特質と由来"、岩波新書(青版) 996, 岩波書店、234p.(1977).
- 18) 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, 6, pp.809-826.(1995).
- 19) 豊島正幸: "わが国における最終氷期後半の広域的な侵食段丘の形成"、季刊地理学、 46, pp.217-232.(1994).
- 20) 久保純子: "相模川下流平野の埋没段丘からみた酸素同位体ステージ 5a 以降の海水準 変化と地形発達"、第四紀研究、36, pp.147-163.(1997).
- 21) 植木岳雪: "徳島県西部, 那賀川上流部における河成段丘の編年"、地理学評論、81A, pp.25-40.(2008).
- 22) 田力正好:"河成段丘を用いて推定される内陸部の広域的地殻変動 -現状と課題-"、 地理科学、60, 3, pp.143-148.(2005).
- 23) 鈴木隆介: "建設技術者のための地形図読図入門 第1巻 読図の基礎"、第3章(地形の区分・分類・発達史)、古今書院、pp.129-132.(1997).
- 24) 米倉伸之、貝塚爽平、野上道男、鎮西清高 編: "日本の地形 1—総説"、第7章、東京 大学出版会(2001).
- 25) 海津正倫: "沖積低地の古環境学"、古今書院、270p.(1992).

26) 海津正倫: "日本における沖積低地の発達過程"、地理学評論、54, pp.142-160.(1981).

- 27)町田洋、大場忠道、小野昭、山崎晴雄、河村善也、百原新:"第四紀学"、5. 地表諸環 境の変遷、朝倉書店、pp.147-155.(2003).
- 28) Shackleton, N. J.: "Oxygen isotope, Ice Volume and Sea Level", Quaternary Science Reviews, 6, pp.183-190.(1987).
- 29) 平川一臣、小野有五: "十勝平野の地形発達史"、地理学評論、47, pp.607-634. (1974).
- 30) Sugai, T. : "River terrace development by concurrent fluvial processes and climatic changes", Geomorphology, 6, pp.234-252.(1993).
- 31) Kawamura, M., Tanikawa, S., Niizato, T. and Yasue, K.: "Development of Methodology to Construct a Generic Conceptual Model of River-Valley Evolution for Performance Assessment of HLW Geological Disposal" Proceedings of the ASME 13th International conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2010-40137, (2010).
- 32) 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 (CD-ROM 版)"、 JNC TN7410 2001-015(2001).
- 33)町田洋、松田時彦、海津正倫、小泉武栄 編: "日本の地形 5 中部"、4 中部山岳(日本アルプス)、東京大学出版会 (2006).
- 34) 野上道男:"十勝平野の低位段丘の調査から知り得た海面変化と地形発達史の関係"、地 理学評論、37, pp.271-272.(1964).
- 35) 長岡信治: "後期更新世における宮崎平野の地形発達"、第四紀研究、25,3, pp.139-163.(1986).
- 36) 地学団体研究会編:"新版地学事典"、平凡社、p.1088. (1996).
- 37) 貝塚爽平、小池一之、遠藤邦彦、山崎晴雄、鈴木毅彦 編:"日本の地形 4 関東・伊 豆小笠原"、第5章、東京大学出版会(2000).
- 38) 遠藤邦彦、小杉正人、菱田量: "関東平野の沖積層とその基底地形". 日本大学文理学部 自然科学研究所「研究紀要」、23, pp.37-48.(1988).
- 39) 木村克己、石原与四郎、田辺晋、中西利典、中島礼、宮地良典、中山俊雄、八戸昭一: "東京低地から中川低地に分布する沖積層のシーケンス層序と層序の再検討"、 地質学論集 第59号「沖積層研究の新展開」、212p.(2006).
- 40) 復興局建築部:"東京及横浜地質調査報告"(1929).
- 41) 上杉陽、米澤宏、千葉達朗、宮地直道、森愼一、斉藤享治、磯望、遠藤邦彦、関本勝久、

高野司、鈴木正章、平井幸弘、辻誠一郎、木村敏雄、伊藤谷生:"アーバンクボタ、No.21、 特集「最終氷期以降の関東平野」"(1983).

http://www.kubota.co.jp/urban/pdf/21/pdf/21_3_2.pdf

42) 松田磐余: "東京湾と周辺の沖積層"、(貝塚爽平編『東京湾の地形・地質と水』、築 地書館)、pp.67-109.(1993).

43) 国土地理院: "基盤地図情報ダウンロードサービス" (2011). http://fgd.gsi.go.jp/download/ This is a blank page.

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
盔半里	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. 基本甲位を用	いて表されるSI組立単位	立の例			
和辛雪	SI 基本単位				
和立里	名称	記号			
面 積平	方メートル	m^2			
体 積立	法メートル	m^3			
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^2			
波 数每	メートル	m ⁻¹			
密度,質量密度キ	ログラム毎立方メートル	kg/m ³			
面積密度キ	ログラム毎平方メートル	kg/m ²			
比 体 積立	方メートル毎キログラム	m ³ /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 ³			
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m ³			
輝 度力	ンデラ毎平方メートル	cd/m^2			
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1			
比透磁率(b)	数字の) 1	1			
(a) 量濃度 (amount concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度			
(substance concentration) Lt. FIFT Z					

(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 租立单位	
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
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	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 ² kg s ⁻³
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	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
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 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量 比エネルギー分与				
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ²
線量当量,周辺線量当量,方向	2 × 2 2 (g)	C	T/la a	2 -2
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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 ュ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。
 (a)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)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレ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。
 (d)かけ性核種の放射能(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	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	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	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
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 ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² 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 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
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 ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	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	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	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	M	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	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	v	

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	٥	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 ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
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

名称 記				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形法はいかおはない
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 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 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻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 ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ^{·1}			
(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					
名称				記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	-トル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m

この印刷物は再生紙を使用しています