

## 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

山口正秋<sup>\*1</sup> 加藤智子<sup>\*1</sup> 鈴木祐二<sup>\*2</sup> 牧野仁史<sup>\*1</sup>

地層処分の性能評価における隆起・侵食の影響の検討では、地下水流动や処分場から地表への核種移行経路などへの影響の観点から、地形と処分場深度の変化が重要となる。本研究では、初期の地形や隆起速度等の条件や評価期間の想定に対して地形と処分場深度の変化を効率的に評価するためのツール（地形・処分場深度変遷解析ツール）を、簡易的な地形発達シミュレーションモデルを組み込んだ ArcGIS のモデルとして構築した。このような評価は、性能評価における隆起・侵食に起因する地下水流动や地表への核種移行経路への影響の評価に向けて、条件や評価期間に応じた地形や深度の変化についての定量的情報を提示するとともに、性能評価の実施においてどの影響に重点をおくことが効果的・効率的ななどを判断するためにも重要となる。

**Keywords:** 地層処分、性能評価、隆起・侵食、地形変化、処分場深度変化、ArcGIS

An efficient analytical tool to calculate temporal change of topography and repository depth due to uplift and erosion was developed for use in performance assessment of high level radioactive waste geological disposal. The tool was developed as ArcGIS model, incorporating simplified landform development simulation, to enable trial calculation of various conditions such as initial topography, uplift rate and its distributions, and repository location. This tool enables to support decision on which processes, features, and their changes should be taken into account for performance assessment, by calculating topography change and repository depth change under various conditions.

**Keywords:** HLW disposal, performance assessment, uplift and erosion, topographic change, repository depth change, ArcGIS

### 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、隆起・侵食による著しい変動として、過去 10 万年間の隆起量が 300 m を超える地域はサイト選定のプロセスを通じて除外される[1]。一方、緩慢な隆起・侵食は日本列島の広い地域で認められる現象であり[2]、その影響を完全に回避することは困難である。隆起・侵食によって地形や処分場深度が変化する場合、それらは地下水流动場の変化を介して処分場から地表への核種の移行挙動や移行経路、地表への流出場所に影響を及ぼす可能性がある。そのため地層処分システムの性能評価において、隆起・侵食に起因するこれらの変化とその核種移行への影響を定量的に評価できるようにしておく必要がある。

一般に地下水流动は、規模の異なる流动系が階層構造をもって累重し、深度が深いほど広域の緩慢な流动系が卓越するため[3]、隆起・侵食にともなって処分場深度が浅くなると、地下深部の広域的な移行から地下浅部の局所的な移行に遷移することが想定される。このため処分場深度の変化は、地下から地表への核種移行経路の変化や移行経路上での地下水速の変化を生じ、それにより地下から地表への核種移行が時間とともに変化するほか、地下から地表

への核種移行経路の変化により地質環境と生活圏とのインターフェース（以下、GBI とよぶ）の位置が変化することで、生活圏評価で考慮すべき河川や帶水層での希釈水量も GBI の位置に応じたものに変化する。また、隆起・侵食によって地形が変化すると、地形の影響を受ける地下水流动系も変化するため（たとえば[4, 5]）、これによっても核種移行経路や GBI の位置が変化する。さらに、表層における流出特性や水収支は流域の地形に依存するため（たとえば[6]）、地形変化にともなって同じ場所の河川や帶水層での希釈水量も変化することが考えられる。以上を踏まえると、隆起・侵食から性能評価への影響に関係する主なプロセスや特性の変化のうち、どの変化が性能評価上重要になるかについても、地形や処分場深度の変化の程度により異なること

ここで、地形や処分場深度の変化は、評価の対象となる場所における初期値としての地形、処分場位置、処分場深度、隆起速度等の条件に依存するため、それらの組み合わせによってどの変化が顕在化するのかが異なる。このため、隆起・侵食から性能評価への影響に関係するプロセスや特性の変化のうち、どの変化が性能評価上重要になるかについても、地形や処分場深度の変化の程度により異なること

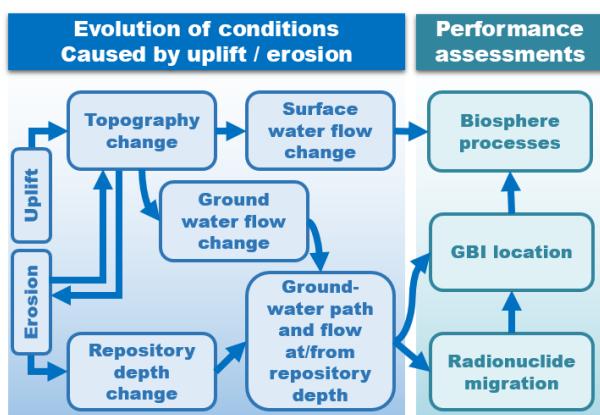


Fig.1 Potential impacts of uplift and erosion

Analytical tool of evolution of topography and repository depth to assess impacts of uplift and erosion for HLW disposal by Masaaki YAMAGUCHI (yamaguchi.masaaki@jaea.go.jp), Tomoko KATO, Yuji SUZUKI and Hitoshi MAKINO

\*1 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター 基盤技術研究開発部

Department of Geological Disposal Research, Nuclear Backend Technology Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Sector of Nuclear Fuel Decommissioning and Waste Management Technology Development, Japan Atomic Energy Agency  
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

\*2 株式会社 NESI  
NESI Company Limited  
〒312-0005 茨城県ひたちなか市新光町 38 番地

(Received 19 August 2020; accepted 11 November 2020)

になる。

一方、これまでに実施されている隆起・侵食を考慮した評価では、前述のような条件が具体的に与えられる場についての評価ではなく、地形や処分場深度の変化が核種移行特性に与える影響に着目しているため、それらの影響を評価しやすいように、シンプルな地形や地形変化、処分場深度の変化を仮定した評価が行われている。たとえば、遠い将来における処分場の地表への接近にともなう影響に着目した評価[7, 8]では、その評価の中で地形や地形変化そのものは明示的には扱わず、地形や地形変化の結果としての処分場深度の違いやばらつきを核種移行解析のパラメータとして設定するという単純化された取り扱いとなっている。また、地形と処分場深度の変化にともなう処分場近傍の水理・化学特性の時間的な変化に着目した評価[9]においても、地形や地形変化そのものは明示的には扱わず、水理・化学特性の時間的な変化を、簡易的に、あらかじめ整理された平野や丘陵等の地形の区分と深度と水理・化学特性との関係等に基づき仮定することで評価が行われている。さらに、処分場深度と地形変化にともなう広域的な核種移行の時間的な変化に着目した評価[10]においても、比較的シンプルな地形断面を複数仮定した2次元の評価が行われている。このように、これまでの隆起・侵食を考慮した評価は、それぞれの評価で着目する影響を評価しやすいように地形や地形変化が簡略化されている。このため、評価の対象となる場所の条件の違いによって、地形や地形変化に起因するどの変化がどの程度顕在化するのか、性能評価の実施においてどの変化に重点をおくことが効果的・効率的かについては十分検討されていない。

そこで本研究では、隆起・侵食に起因する地形と処分場深度の変化を、処分場閉鎖時の地形や隆起速度等の条件に対して効率的に評価し、それらの定量的情報を提供するツール（地形・処分場深度変遷解析ツール）を構築することを目的とする。こうした情報が得られることは、性能評価の実施において地形や地形変化に起因するどの変化に重点をおくことが効果的・効率的かなどの判断のためにも重要なとなる。

## 2 手法

### 2.1 地形・処分場深度変遷解析ツールの開発

地形・処分場深度変遷解析ツールでは、さまざまな初期条件や変化を与えて地形変化を計算するとともに、地形の状況に対応した侵食およびそれにともなう処分場深度の変化等を計算できるようにするために、地形発達シミュレーションモデル（長期間に及ぶ地形変化を予測するための数値シミュレーションモデル）[11-14]を応用することとした。地形発達シミュレーションモデルを用いるメリットは、初期条件や境界条件の設定を工夫することで、大きさや位置、標高をもつ具体的な地形を設定でき、さらに多様な地形を仮想的につくり出すことができること[15]のほか、隆起速度等のパラメータを変えて多様な地形変化を計算することができる点が挙げられる。一方、地形発達シミュレーションモデルを用いることは、モデルが複雑になりがちで計算

### Step1 Create initial settings

Set boundary conditions and set initial topography

### Step2 Calculate topographic change

Calculate tectonic uplift, fluvial erosion, and slope process

### Step3 Extract repository area

Set repository, extract catchment and repository area, calculate repository depth

### Step4 Calculate topographic properties

Calculate topographic properties such as mean altitude, and dispersion of altitude

Fig.2 Calculation steps

に時間を要する等のデメリットもある。

このため、本研究の地形・処分場深度変遷解析ツールの開発では、隆起・侵食に着目した性能評価で考慮することが必要な集水域スケールの勾配や処分場深度等について、それらの長期的かつ広域的な変化を適切に把握できるようする一方で、それらには直結しない段丘の形成等のより短期的かつ局所的な変化の取り扱いは可能な限り単純化することなどにより計算量の低減を図った。

なお、地形・処分場深度変遷解析ツールは、簡易的な地形発達シミュレーションモデルを組み込んだ ArcGIS®（ESRI 社製の地理情報システムソフトウェア）のモデルとして構築することとした。ArcGIS のモデル構築機能を使うことで、既存の ArcGIS のツールを利用して効率的にモデルが構築できるとともに、ArcGIS が使用できれば誰でも容易に計算を実行することが可能となる。また、ArcGIS の機能を用いて容易に計算結果の表示や分析等の処理が行えるメリットもある。

地形・処分場深度変遷解析ツールでは、地形変化の計算およびそれに対応した処分場深度等の計算を、4つの機能（ステップ1～4）で行うこととした（Fig.2）。このうちステップ1では、初期条件として想定する地形を設定し、ステップ2では、この初期条件に従って地形変化を計算する。さらにステップ3では、計算された地形変化を入力値として、集水域や水系の変化等を計算・抽出する。一方ステップ4では、計算された地形変化について、平均標高や高度分散量（単位面積中に含まれる標高値データの標準偏差を表される地形の起伏を表す指標の一つ[16]）、処分場深度、およびそれらの変化のトレンドを表示する。これによって、地形変化や処分場深度変化の特徴を概括的に把握することが可能となる。

以下に、各ステップでの計算方法を述べる。

#### 2.1.1 ステップ1（初期設定）

ステップ1では、ステップ2の地形変化の計算に必要な初期条件や境界条件の設定を行う。このうち初期条件として考慮する処分場閉鎖時の地形の設定に当たっては、既存

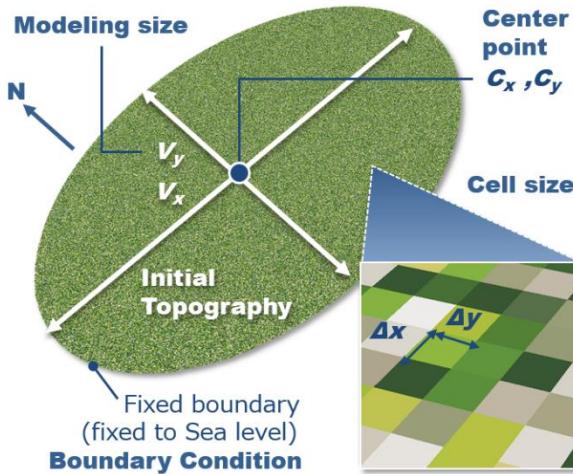


Fig.3 Initial setting for virtual condition

のデータを用いることができない仮想的な条件では、任意の大きさの領域を設定してその中に地形を設定する必要がある。ここでは中心点のX座標( $C_x$  [°E])とY座標( $C_y$  [°N]), および領域のX軸方向のサイズ( $V_x$  [m]), Y軸方向のサイズ( $V_y$  [m])により楕円形の領域を設定し、このモデル化領域内に任意の大きさ( $\Delta x \times \Delta y$  [m])のセルを設定することとした(Fig.3)。なお、計算を開始するに当たり、傾斜が全くない状態では侵食やそれにともなう物質の移動を考慮することができないため、地形・処分場深度変遷解析ツールでは乱数により、0~1mの微小な起伏を与える。

一方、実際の場を対象とした評価では、公開データとなっている全国の数値標高モデル[17]から必要な領域を切り出して用いることも可能である。

## 2.1.2 ステップ2(地形変化の計算)

ステップ2では、地形発達シミュレーションモデルを応用して地形変化を計算する。地形発達シミュレーションモデルの基本的な考え方は共通しており、ある地点の標高の変化が隆起速度、河川による侵食速度、斜面上の土砂移動による侵食速度によって表現され、(1)式のように定式化することができる[18, 19]。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - E - q_s \quad (1)$$

ここに、 $z$ は標高 [m],  $t$  は時間 [y],  $U$  は隆起速度 [ $m\text{y}^{-1}$ ],  $E$  は河川による侵食速度 [ $m\text{y}^{-1}$ ],  $q_s$  は斜面上の土砂移動による侵食速度 [ $m\text{y}^{-1}$ ]を表す。

一方、(1)式における各項の定式化の方法については地形変化をどこまで精緻に表現するかによって多くの選択肢がある。前述のように、地形・処分場深度変遷解析ツールでは数百km<sup>2</sup>程度の集水域を包含する広域的なスケールで、かつ数十万年~数百万年程度の長期的な地形変化の把握に主眼をおいている。このため、ここでは、長期的な変化で相殺されるサイクリックな影響や局所的な影響を省いたり、単純化したりすることで、迅速に計算できるように工夫した。

本研究ではこれらの点を踏まえ、隆起速度( $U$ )、河川による侵食速度( $E$ )、斜面上の土砂移動による侵食速度( $q_s$ ) (Fig.4)を定式化し、(1)式の各項に反映した。各計算は、

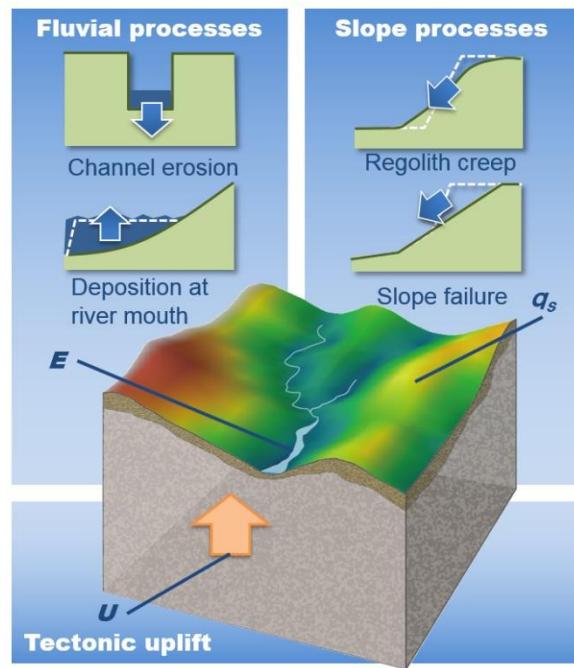


Fig.4 Uplift and erosion processes modeled in this study

領域内に設定されたセルごとに行なうこととし、集水面積や標高のように地点(セル)ごとに設定されるパラメータと、侵食係数のように、すべてのセルに同一の値を設定するパラメータを考慮する。

以下に地形・処分場深度変遷解析ツールで採用した地殻変動による隆起速度、河川による侵食速度、斜面上の土砂移動による侵食速度についての定式化の方法とその考え方を述べる。

### (1) 地殻変動による隆起

地殻変動には、断層運動にともなう鉛直または水平方向の変位、傾動、背斜構造や背斜構造を形成する曲隆や褶曲、曲降などの変動様式が含まれる[20]。このうち隆起をともなう鉛直方向の変位や傾動・曲隆は侵食や山地の発達につながることから、その影響を適切に考慮する必要がある。また、広域地下水流动に影響を与える地表水系の発達は変動様式の影響を強くうけることから[21]、地形・処分場深度変遷解析ツールでは鉛直方向の一様な隆起に加え、変動様式が異なるパターンとして、広域的な変化をともなう傾動と曲隆を加えた3つのパターンを設定できるようにした。このうち南北方向に隆起速度の分布を与える場合、傾動および曲隆は(2)式のように表現することができる。

$$U = \begin{cases} \frac{l}{V_y} (U_{max} - U_{min}) + U_{min}; \text{tilt} \\ \sin \frac{l}{V_y} \pi (U_{max} - U_{min}) + U_{min}; \text{upwarp} \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 $l$  はモデル化領域南端からの距離 [m],  $V_y$  はモデル化領域の南北幅 [m],  $U_{max}$  は領域内の隆起速度の最大値 [ $m\text{y}^{-1}$ ],  $U_{min}$  は領域内の隆起速度の最小値 [ $m\text{y}^{-1}$ ]である。

### (2) 河川による地形変化

河川による地形変化には、下刻による河床の低下や堆積による河床の上昇、側方侵食が含まれる。このうち地形・処分場深度変遷解析ツールでは、広域的かつ長期的な地形

変化の計算を迅速に行えるようにするために、長期的な山地の形成や水系の発達を考慮するうえで重要となる河川による下刻の影響を中心に考慮することとし、サイクリックな挙動のうち、側方侵食の影響を省略し、河口付近の河床変動のみを簡易的に取り扱うこととした。

河川による下刻は、各地点における堆積物の運搬能力が供給量を上回った際に生じること、および下刻速度は河床に作用する流水のせん断応力に比例することから[22]、(3)式のように定式化され、広く用いられている（たとえば[11]など）。そこで地形・処分場深度変遷解析ツールにおいても、(3)式を用いて下刻を計算する。

$$E = \begin{cases} k_b(\tau - \tau_c) & \text{if } \tau < \tau_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $E$ は各地点の侵食速度 [ $\text{m y}^{-1}$ ]、 $k_b$ は侵食係数 [-]、 $\tau$ は各地点のせん断応力 [ $\text{N m}^{-2}$ ]、 $\tau_c$ は限界せん断応力 [ $\text{N m}^{-2}$ ]であり、 $\tau$ が  $\tau_c$ 以下の場合、侵食は生じないものとした。このうち、せん断応力  $\tau$ は、各点における流量と勾配の関数により(4)式のように計算できる（たとえば[11]など）。

$$\tau = k_t Q^{\frac{1}{3}} S^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

ここに、 $\tau$ は各地点のせん断応力 [ $\text{N m}^{-2}$ ]、 $k_t$ は定数、 $Q$ は各地点の流量 [ $\text{m}^3 \text{y}^{-1}$ ]、 $S$ は勾配 [-]である。このうち流量  $Q$ は、単位面積当たりの降雨強度が一定と仮定した場合、各地点における集水面積と降雨強度の積として(5)式のように計算できる（たとえば[11]など）。

$$Q = PA \quad (5)$$

ここに、 $Q$ は各地点の流量 [ $\text{m}^3 \text{y}^{-1}$ ]、 $P$ は降雨強度 [ $\text{m y}^{-1}$ ]、 $A$ は各地点の集水面積 [ $\text{m}^2$ ]である。

一方河口付近で生じるサイクリックな河床の変動については、日本の河川では氷期に形成された開析谷が埋積され、河口付近に低地が形成されることが多いことから、サイクリックに変化する海水準が上昇した時点で海面下となるすべての地点について、河床の標高を海水準と同じとすることで、簡易的に取り扱うこととした。

### (3) 斜面による地形変化

斜面で生じる地形変化は、クリープや表面侵食による緩慢な斜面物質の移動と、斜面崩壊や土石流による急激な斜面物質の移動に大別される。とくに降雨強度が大きくかつ急峻な山地の多い日本においては、後者による土砂供給が多いと考えられることから、こうした現象をモデルに組み込むことが重要と考えられる。このため日本を対象とした地形発達シミュレーションでは、上記の両方の現象が組み込まれている場合が多い（たとえば[13]など）。そこで、地形・処分場深度変遷解析ツールにおいても、クリープ等の緩慢な斜面物質の移動と、斜面崩壊等の急激な斜面物質の移動の両方をモデル化した。

このうち、緩慢な斜面物質の移動には、クリープや雨滴侵食・リル侵食等の表面侵食、凍結融解作用が含まれ、それらの効果を総称して従順化プロセスと呼ばれる[23]、拡散方程式を用いて(6)式のように定式化できる（たとえば[11]など）。

$$q_s = k_d \nabla^2 z \quad (6)$$

ここに、 $q_s$ は斜面上の土砂移動による侵食速度 [ $\text{m y}^{-1}$ ]、 $z$ は標高 [ $\text{m}$ ]、 $k_d$ は拡散係数 [-]であり、拡散係数  $k_d$ はとくに従順化係数と呼ばれる。一方、斜面崩壊等の急激な斜面物質の移動については、閾値  $S_t$  [-]以上の勾配を持つ斜面を、閾値以内の勾配に設定しなおすことで表現した。

### 2.1.3 ステップ3（情報の抽出）

ステップ3では、地形変化に対応する処分場深度の変化を計算するとともに、地形変化と処分場深度の変化の関係から集水域や地下の処分場の範囲を投影した地表の領域（以下、フットプリントとよぶ）の地形変化を抽出する。具体的にはステップ2で計算した地形を入力値として、その中の任意の位置の任意の深度に処分場を設定し、ステップ2で設定した隆起速度にしたがって処分場の標高を変化させる。さらに、地形と処分位置との関係によって、処分場深度と、処分場が含まれる集水域を計算・抽出する。

これらの計算を行なうために、ステップ3では(1)処分場位置を設定する機能、(2)集水域を抽出する機能、および(3)処分場深度を計算する機能を構築した。

以下に各機能について述べる。

#### (1) 処分場位置の設定

ここでは、ステップ2で計算した地形変化（設定したタイムステップごとに計算された地形データの集合）を入力値として、その中から任意の時間ステップの地形を選び、その中の任意の位置に処分場のフットプリントを設定する。具体的には、ステップ2で得られた地形変化を参照しながら任意のタイムステップの地形を選び、その中の任意の位置 ( $C_x$ ,  $C_y$ ) の任意の深度 ( $D_0$ ) に処分場の中心点を設定するとともに、この点を中心とする  $L_x$  [km] ×  $L_y$  [km] の処分場のフットプリントを設定する。なお、処分場の標高は、処分場のフットプリントの中の最も標高の低い地点から  $D_0$  [m] 下に処分場が設定されるようにした。すなわち、処分場の土かぶりの最小値が  $D_0$  [m] であり、処分場内の位置によってはそれ以上の土かぶりが確保されることになる。

#### (2) 集水域の抽出

ここでは、(1)で設定した処分場のフットプリントを包含する集水域を抽出する。地形・処分場深度変遷解析ツールでは、ArcGIS の水文解析ツールで採用されている8方向フロー モデル[24]にしたがって水系を発生させた上で、上記の処分場のフットプリントを包含する集水域を抽出する。この時、処分場位置の設定によっては、処分場のフットプリントが複数の集水域にまたがる場合もあり、このような場合は、複数の集水域が抽出される。また、地形が変化することで、集水域の形状や大きさは変化すると考えられるため、ステップ2の各タイムステップで求められた地形のすべてについて(2)の処理が実施されたようにした。

#### (3) 処分場深度変化の計算

ここでは、2.1.3(1)で設定した処分場の位置と標高を踏まえ、地形変化にともなう処分場深度の変化を計算する。具体的には、(1)で設定した処分場の位置と標高を初期条件として、ステップ2で設定した隆起速度（またはその空間分布） $U$  [ $\text{m y}^{-1}$ ]を与えて処分場の標高を変化させるとともに、

各タイムステップについて処分場と地表面との距離を計算することで、処分場深度とその変化を計算する。こうした処理により、処分場の標高 [m]が上記のタイムステップごとに出力される。傾動や曲隆等により隆起速度が空間分布をもつ場合は、時間とともに処分場内に標高差が生じることとなる。また、本ツールでは、処分場の一部が地表面に接近・到達すると、その部分が徐々に侵食・喪失する状況を表現することも可能とした。

#### 2.1.4 ステップ4（データの取得）

本ステップは、ステップ2および3で計算された地形の特徴を数値化することで、各ケースの中での時間変遷や、そのケース間の違いを定量的に比較・分析できるようにする。本研究では、数値化する地形の特徴として、山地発達に係る既往の研究で考慮されている平均標高と高度分散量（起伏の大きさを表す指標の一つ）に着目した。

このうち、平均標高は、計算領域内の標高値の算術平均値である。一方高度分散量は、計算領域内の標高値の標準偏差であり（7）式のように定義されている[16]。

$$D_s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (h_j - H)^2}{n-1}} \quad (7)$$

ここに、 $D_s$ は高度分散量 [m]、 $h_j$ は各点の標高 [m]、 $H$ は任意の区画内の平均標高 [m]である。高度分散量  $D_s$  は区画の面積の増加にともなって大きくなるため、面積の異なる領域間の比較を行う際には基準化が必要である。本研究では、経験式[18]である（8）式を用いて任意の領域で計算された高度分散量を 1 km<sup>2</sup>当たりの値に基準化した基準高度分散量を計算した。

$$D \approx \frac{D_s}{S^{0.16}} \quad (8)$$

ここに、 $D$  は基準高度分散量 [m]、 $D_s$  は高度分散量 [m]、 $S$  は領域の面積 [km<sup>2</sup>]である。

## 2.2 ArcGISによるツールの実装

2.1 項で示した機能の地形・処分場深度変遷解析ツールでの実装および試解析の実施に当たっては、ArcGIS（ArcGIS 10.2 for Desktop）を用いた。ArcGIS のバージョン 9 以降にはモデル構築機能（ModelBuilder）が用意されており、入出力データや計算式、および空間解析やデータ編集などをを行うツール等を連結したワークフローを作成することで、視覚的にプログラミングを行うことができる。地形・処分場深度変遷解析ツールでは、ステップ1～4の各機能に対応するメインモデルと、各機能に組み込まれた個別の計算に対応するサブモデルを構築した。**Fig.5**には、地形・処分場深度変遷解析ツールで構築した主なサブモデル（A～K）について、主な入出力データ（a～l）とそれらの入出力関係の概要を示す。このうち（a）は、各ステップの計算で使用される隆起速度や侵食係数等の入力データであり、テーブル形式でまとめて指定される。

以下に、各ステップでの計算方法を示す。

- ステップ1は任意の大きさの領域に初期条件としての起伏データ（b）を発生させるサブモデル（A）や、既存の地形データ（c）が利用できる場合にそれを選択するサブモデル（B）からなり、いずれかの出力が選択され、ステップ2以降で考慮する地形変化の初期条件として、ラスターデータ（d）が outputされる。
- ステップ2は、2.1.2に示した地殻変動による隆起（C）

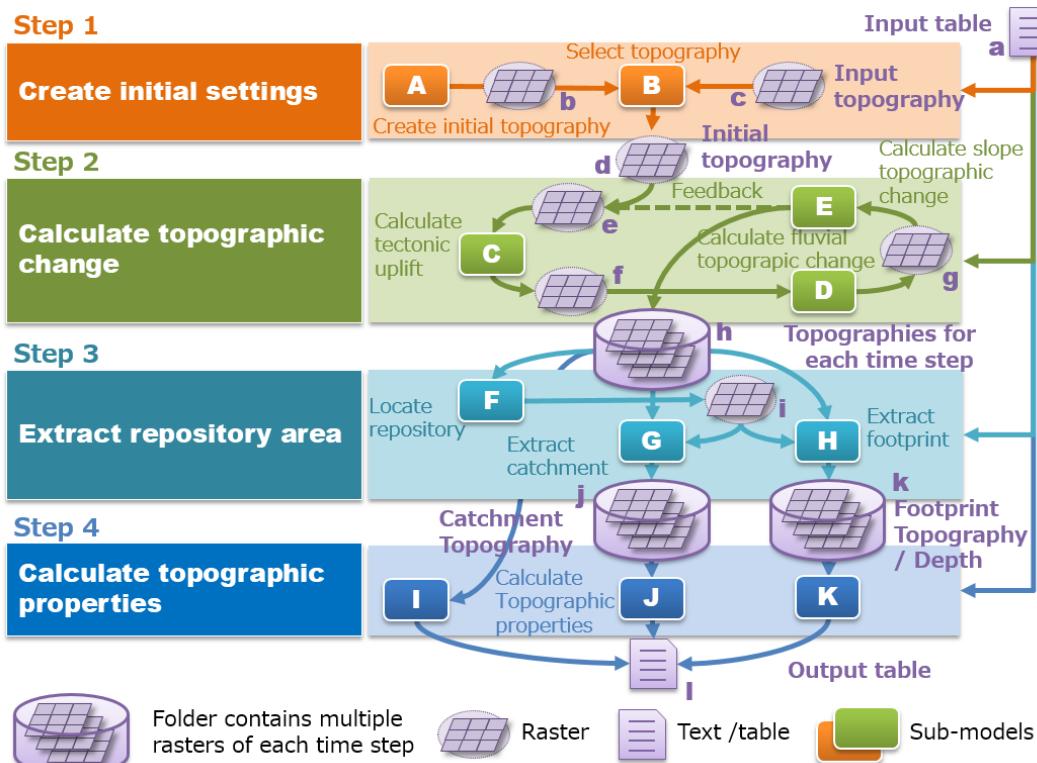


Fig.5 Outline of workflow showing input/output of main- / sub-models created for the tool

や、河川による地形変化 (D), 斜面による地形変化 (E) の各計算を行なうサブモデルからなる。計算では、ステップ 1 の地形データを初期条件の入力値として、C～E の計算が必要なタイムステップ数について反復され、タイムステップごとに outputされる一連の地形データ (h) がフォルダに格納される。

- ステップ 3 では、一連の地形データを読み込んで任意のタイムステップの任意の位置に処分場を設定し (F)，それをもとに集水域の地形 (G) やフットプリント (H) を抽出するサブモデルからなり、タイムステップごとに計算される集水域の地形データ (j) およびフットプリントの地形と深度 (k) の一連のデータが、それぞれのフォルダに格納される。
- ステップ 4 では、計算領域全体の地形変化データ (h) を読み込んで平均標高や高度分散量等の統計量とその変化を計算するサブモデル (I) と、集水域の地形データ (j) を読み込んで同様の計算を行うサブモデル (J)，および処分場深度データ (k) を読み込んでそのフットプリント内でのばらつきや変化を計算するサブモデル (K) からなり、それらの結果がテーブル (l) として出力される。

### 3 地形・処分場深度変遷解析ツールを用いた試行

ここでは、地形・処分場深度変遷解析ツールを用いた試行を行う。本試行の目的は、隆起速度の設定を変えた計算を行い、地形・処分場深度変遷解析ツールを用いて広範な地形変化と深度変化のバリエーションが計算・抽出できることを確認することと、そのうえで隆起速度の設定に対する、深度変化・地形変化の違いを比較・分析し、得られる知見の性能評価への活用の可能性について考察することである。

#### 3.1 データの設定

ここでは、前章で述べた初期設定（ステップ 1）、地形変化的計算（ステップ 2）、情報の抽出（ステップ 3）の各計算を試行するに当たって使用したデータとその設定の考え方を述べる。なお、現状ではサイトが特定されていないことから、既存のデータを用いず、仮想的な条件での評価を行うこととした。さらに、ここでは異なる条件での比較を試行するために幅広いデータを設定した。仮想的な条件で評価を行う場合、初期設定（ステップ 1）として任意の大きさの領域を設定してその中に初期条件としての地形を設定する必要がある。

初期設定（ステップ 1）では、モデル化領域の中心点の X 座標 ( $C_x$ ) と Y 座標 ( $C_y$ )、モデル化領域の X 軸方向のサイズ ( $V_x$ )、Y 軸方向のサイズ ( $V_y$ )、セルサイズ ( $\Delta x, \Delta y$ )、標高の初期値 ( $A_0$ ) を設定する必要がある。このうち、モデル化領域の中心点の X 座標 ( $C_x$ ) と Y 座標 ( $C_y$ ) は、日本国内の任意の地点の座標を設定した。モデル化領域のサイズ ( $V_x, V_y$ ) は、生成される水系の集水域面積を左右するパラメータである。試解析では、一般的な大きさの集水域となるように、全国の一級河川の流域面積のうち、大きい

方からの累積で 70 パーセンタイル（約 800 km<sup>2</sup>）～95 パーセンタイル（約 300 km<sup>2</sup>）程度の大きさの集水域が抽出されるよう領域の大きさを調整し、 $V_x$  および  $V_y$  をそれぞれ 100,000 m, 50,000 m と設定した。また、セルサイズ ( $\Delta x, \Delta y$ )、標高の初期値  $A_0$  はそれぞれ 100 m, 0 m と設定した。初期設定に係る設定値を Table 1a に示す。本試行では、隆起・侵食の主要な原因となる隆起速度の設定に応じた多様な地形変化を扱えるかどうかを確認することを目的としているため、Table 1a 以外のパラメータについては、既往研究における設定値を参考に一般的な値を用いて仮置きしている。

地形変化の計算（ステップ 2）では、時間ステップ ( $\Delta_t$ )、計算期間 ( $T$ )、隆起速度 ( $U$ )、変動様式 ( $U_{mode}$ )、侵食係数 ( $k_b$ )、限界せん断応力 ( $\tau_c$ )、従順化係数 ( $k_d$ )、降雨強度 ( $P$ )、斜面崩壊に係る勾配の閾値 ( $S_t$ ) を設定する必要がある。このうち時間ステップ ( $\Delta_t$ ) は 1 万年とした。ただし河川による下刻については、その影響の上流側への伝播が適切に反映されるようにするために 1,000 年で計算した。また、計算期間 ( $T$ ) は地形変化がおおむね収束する十分長い期間として 500 万年を考慮し、12 万年サイクルの海水準変動を簡易的に考慮するために 500 万年以上でかつ 12 万の倍数となる 504 万年とした。なおこの期間は、一定の隆起速度を前提に過去の隆起速度を将来に外挿できる期間（一般に数十万年程度）を大幅に超える期間となる。本検討では、大きな不確実性を伴うことも踏まえつつ、性能評価への影響を抽出するという観点から、顕著な地形変化が生じるまで簡易的に計算を継続することとした。また侵食係数 ( $k_b$ ) は Tucker et al. (1997) [11] における設定値から  $6 \times 10^{-5}$  [-] と設定した。従順化係数 ( $k_d$ ) は、野原ほか (2008) [25] における温暖期の斜面域における設定値をもとに  $2.0 \times 10^{-4}$  [-] を設定した。降雨強度 ( $P$ ) は日本における平均年降水量 1,700 mm [26] のうちの 80 % が流出し [27]、さらにその半分程度が直接流出によるものと仮定して  $0.7$  [m y<sup>-1</sup>]

**Table 1 Parameters for Step1 (a), Step2 (b), and Step3 (c) for the test calculations**

<b>a</b>	<b>Parameters</b>	<b>Symbols</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
<b>Size of the modeling domain (x)</b>	$V_x$	[m]	100,000	
<b>Size of the modeling domain (y)</b>	$V_y$	[m]	50,000	
<b>Cell size (x)</b>	$\Delta x$	[m]	100	
<b>Cell size (y)</b>	$\Delta y$	[m]	100	
<b>Initial altitude</b>	$A_0$	[m]	0	

<b>b</b>	<b>Parameters</b>	<b>Symbols</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
<b>Time step</b>	$\Delta_t$	[y]	10,000	
<b>Duration</b>	$T$	[y]	10,000,000	
<b>Uplift rate</b>	$U$	[m y <sup>-1</sup> ]	Table 2	
<b>Uplift mode</b>	$U_{mode}$	[-]	Table 2	
<b>Bedrock erodibility</b>	$k_b$	[-]	$6.0 \times 10^{-5}$	
<b>Critical shear stress</b>	$\tau_c$	[N m <sup>-2</sup> ]	Eq.(10)	
<b>Hill slope diffusivity coefficient</b>	$k_d$	[m <sup>2</sup> y <sup>-1</sup> ]	$2.0 \times 10^{-4}$	
<b>Runoff rate</b>	$P$	[m y <sup>-1</sup> ]	0.7	
<b>Slope threshold value</b>	$S_t$	[-]	0.57	

<b>c</b>	<b>Parameters</b>	<b>Symbols</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
<b>Initial repository depth</b>	$D_0$	[m]	1,000	
<b>Repository size (x)</b>	$L_x$	[m]	2,000	
<b>Repository size (y)</b>	$L_y$	[m]	2,000	

**Table 2 Cases for the test calculations**

Cases	Value			
	Initial altitude $A_0$ [m]	Uplift rate $U$ [m y <sup>-1</sup> ]	Uplift mode $U_{mode}$ [-]	Duration $T$ [10 <sup>4</sup> y]
Preparation	0	$1 \times 10^{-4}$	Uniform	504
Case1		$3 \times 10^{-4}$	Uniform	504
Case2	Use initial topography calculated after Case0	$6 \times 10^{-4}$	Uniform	504
Case3		$9 \times 10^{-4}$	Uniform	504
Case4		from 0 to $6 \times 10^{-4}$	Tilt	504

を設定した。さらに、斜面崩壊に係る勾配の閾値 ( $S_t$ ) は、日本の大起伏の山地（一般に起伏量が 600 m を超える領域が卓越する山地）では傾斜約 35 度の斜面が卓越し、それよりも急な斜面は不安定化しやすいとされること[28]を踏まえ、0.57 [-]（約 30 度）を設定した。また、限界せん断応力 ( $\tau_c$ ) は (9) 式のように設定した。

$$\tau_c = \begin{cases} 15.019 \cdot \ln \bar{D}_{up} + 145.33 & \text{if } \bar{D}_{up} > 0.0001 \\ 7 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 $\tau_c$  は限界せん断応力 [N m<sup>-2</sup>]、 $\bar{D}$  は各点の集水域の平均削剥速度 [m y<sup>-1</sup>] である。

一方、隆起速度 ( $U$ ) やび変動様式 ( $U_{mode}$ ) については後述する解析ケースごとに異なる値を設定した。地形変化の計算（ステップ 2）に係る設定値を Table 1b にまとめた。

情報の抽出（ステップ 3）では、任意の位置に処分場の設置深度 ( $D_0$ )、処分場のサイズ ( $L_x, L_y$ ) を設定する必要がある。ここでは設定された処分場の位置と地形の関係により、処分場が含まれる集水域が計算・抽出される（2.2.3(2) 参照）。処分場の設置深度 ( $D_0$ ) は、地層処分研究開発の第2次取りまとめ[7]のレファレンスケースにおける設定を踏まえて 1,000 m とした。また、処分場のサイズ ( $L_x, L_y$ ) については、2,000 m と仮定した。情報の抽出（ステップ 3）に係るデータと設定値を Table 1c に示す。

### 3.2 解析ケースの設定

試解析では、計算の起点となる自然な地形を再現するための前処理として、平坦な面に微小な起伏を与える（2.1.1 参照）、隆起速度  $1 \times 10^{-4}$  [m y<sup>-1</sup>] で 504 万年間一様に隆起させることで試解析の起点となる地形を生成する。そのうえで生成された地形を起点に、隆起速度とその分布を変えた 4 ケース（Case1～Case4）を設定し、さらに 504 万年間隆起させた。このうち Case1～Case3 は領域内の隆起速度が一様に分布することを仮定した上で、日本における広域的な隆起速度の分布（0～0.9 mm/y）[2]をおおむねカバーできるように、隆起速度  $U$  をそれぞれ、 $3 \times 10^{-4}$  [m y<sup>-1</sup>]、 $6 \times 10^{-4}$  [m y<sup>-1</sup>]、 $9 \times 10^{-4}$  [m y<sup>-1</sup>] に設定した。一方、Case4 は領域内の隆起速度が一様ではなく、北側から南側にかけて大きな値  $U_{max}$  から小さな値  $U_{min}$  が分布している状況を考慮したものであり、ここでは分布の幅として  $6 \times 10^{-4}$  [m y<sup>-1</sup>]～ $0$  [m y<sup>-1</sup>] を考慮した。解析ケースと隆起速度・変動パターンの設定値を

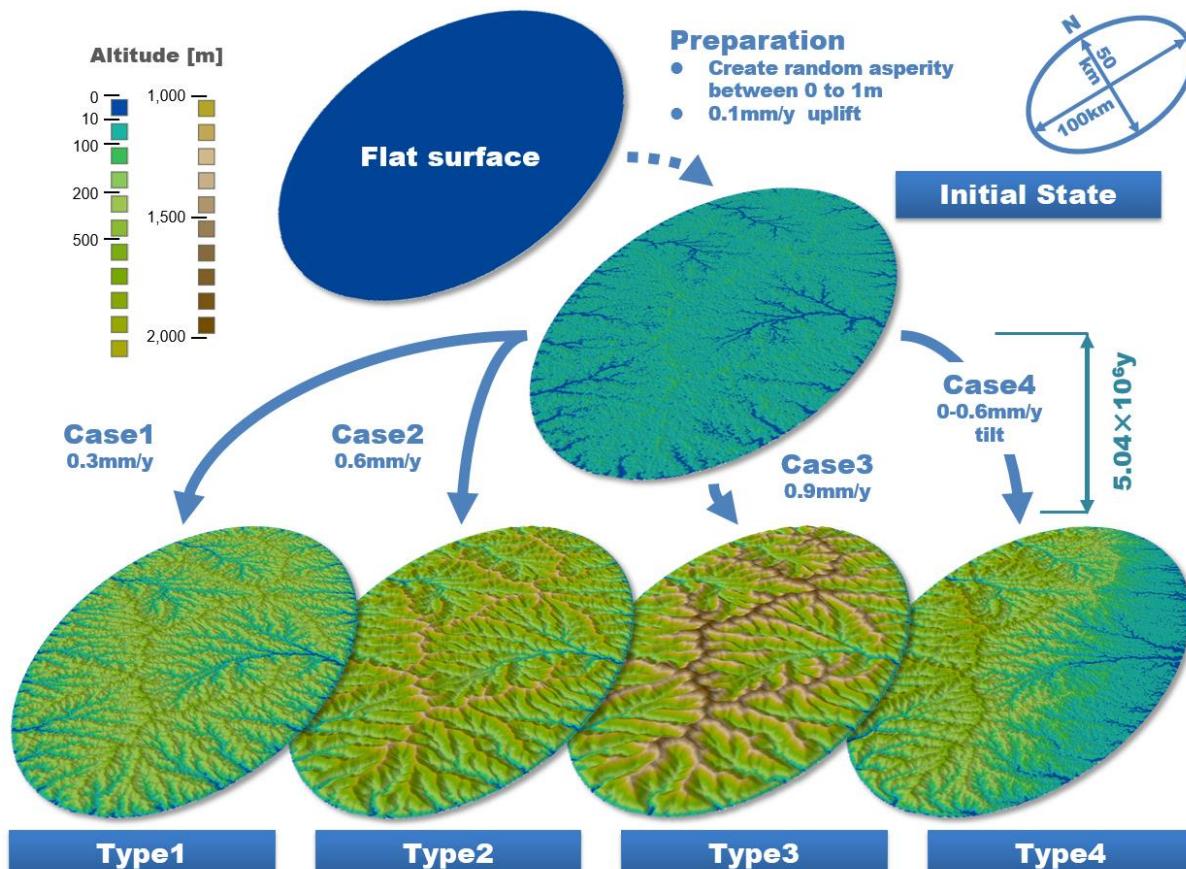


Fig.6 Various topographies created by Case1 to Case4

**Table 2** に示す。

### 3.3 試解析の結果

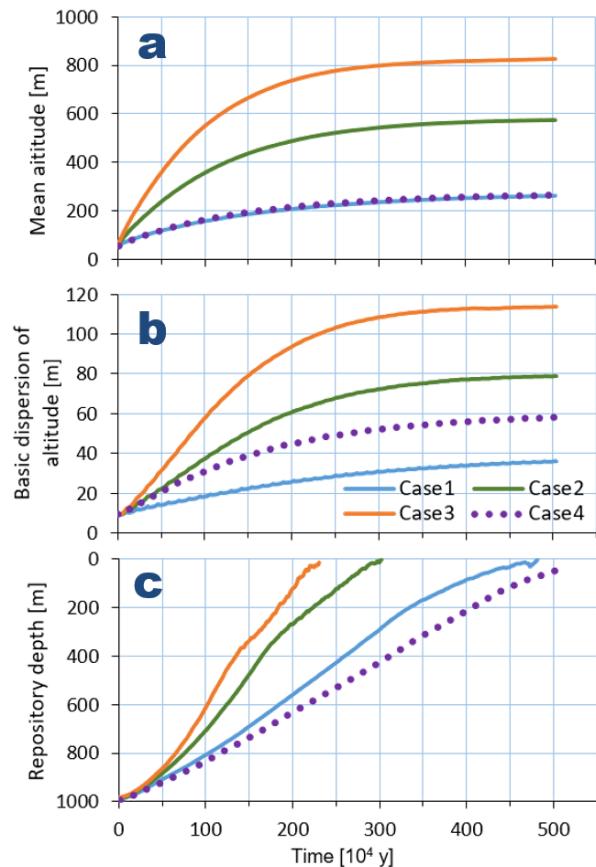
地形・処分場深度変遷解析ツールを用いて計算した処分場深度と地形変化の結果を踏まえ、隆起速度の設定に対する、深度変化・地形変化の違いを比較・分析する。**Fig.6**には、計算の起点となる平面と、この平面を起点に前処理を行って作成した初期の地形、さらにこの地形を起点として、**Table 2**に示す異なる隆起速度や分布を与えて 504 万年間計算した Case1～Case4 によって生成された地形 Type1～Type4 を南西側からの俯瞰図として示した。

生成された地形を見ると、低平な地形である初期の地形（算出された地形の平均標高は 51.2 m）から、設定した隆起速度に応じて標高の異なる丘陵～山地の多様な地形（Type1～Type3）が生成された。さらに、隆起速度を北側から南側にかけて大きな値から小さな値を設定した Case4 によって生成された地形である Type4 を見ると、設定された隆起速度の分布に応じて北側には山地が、南側には低平な地形が生成されていることが確認できる。**Fig.7** には、Initial State を起点に各時間で Case1～4 の各ケースについて計算された、計算領域全体の平均標高（a）と地形の陥しさの指標である基準高度分散量（b）、および処分場深度（2km × 2km の処分場領域内の平均値）（c）の変化を示す。

このうち、平均標高（a）と高度分散量（b）は各ケースとも時間の経過とともに徐々に増加量が小さくなり、ほぼ一定の値に収斂していくことが確認できる。こうした変化の傾向は、日本の主要な山地を対象に推定されている変化傾向[16, 29, 30, 31]と整合的であり、隆起速度が大きいほど、対象とする領域に含まれる山地が高くなるとともに、山地が高くなるほど、その高度分散量が大きくなる（陥しくなる）状況が確認できる。一方、処分場深度（c）は、各ケースの条件に応じたほぼ一定の速度で時間とともに減少していく。また、期間ごとの変化をみると、0～約 100 万年の期間では、上記（a）～（c）いずれの値も設定した隆起速度に応じて変化する一方、約 100 万年以降の期間では、平均標高（a）や高度分散量（b）の変化量が徐々に小さくなるため、深度のみが変化する状況に移行していく。

このような処分場閉鎖時からの地形変化（a）、（b）と処分場深度変化（c）は、着目する時期の違いやケースの違いに応じた変化の程度に着目すると、大きく以下の 3 パターンに分類できると考えられる。

- Pattern A：地形変化と処分場深度変化の両方とも変化の程度が相対的に小
- Pattern B：地形変化は小、処分場深度変化は大
- Pattern C：地形変化と処分場深度変化の両方で変化大  
たとえば、これらのパターン分類を **Fig.7** の結果に当てはめると、比較的短い期間（数十万年程度）での変化は多くのケースが Pattern A に該当し、長い期間（数百万年程度）で処分場深度の変化が大きく地形変化も大きな値に収斂するケース（たとえば Case3）は Pattern C に分類できる。



**Fig.7** Changes of mean altitude (a), basic dispersion of altitude (b), repository depth (c)

### 3.4 地形・処分場深度変遷解析ツールにより得られる知見の性能評価への活用の可能性

2 章で述べたように、隆起・侵食から性能評価への影響に関係する主なプロセスや特性の変化、およびそれらを介した影響の伝播経路が複数考えられる。一方、そのうちどの変化やどの経路を介した影響が性能評価上重要になるかは、上述の地形や処分場深度の変化のパターンによって異なると考えられる。**Fig.8** には、隆起・侵食が、核種移行評価で考慮される地下水流速や処分場から地表への核種移行経路、生活圏評価で考慮される GBI での希釈水量や灌漑水量に及ぼす影響について、どのようなプロセスや特性の変化を介することが考えられるか、またどのような影響伝播の経路が考えられるかを、上記の地形変化と処分場深度変化の Pattern A～Pattern C のパターン分けをキーとして整理した。

以下、各パターンにおける変化の特徴を、変化の大きい Pattern C から順番に説明する。

- 処分場深度変化と地形変化の双方が顕著な場合（Pattern C）は、処分場深度変化に加えて、地形変化に起因する地下水流动場の変化、標高の変化にともなう地表の植生や土地被覆の変化、起伏や傾斜に依存する河川の流出特性の変化やそれによる河川水量の変化が生じる可能性がある。
- 一方、地形変化が顕著でなく、処分場深度変化のみが顕著な場合（Pattern B）は、地下水流动や地表水の流动の変化は限定的と考えられる。しかし、そのような

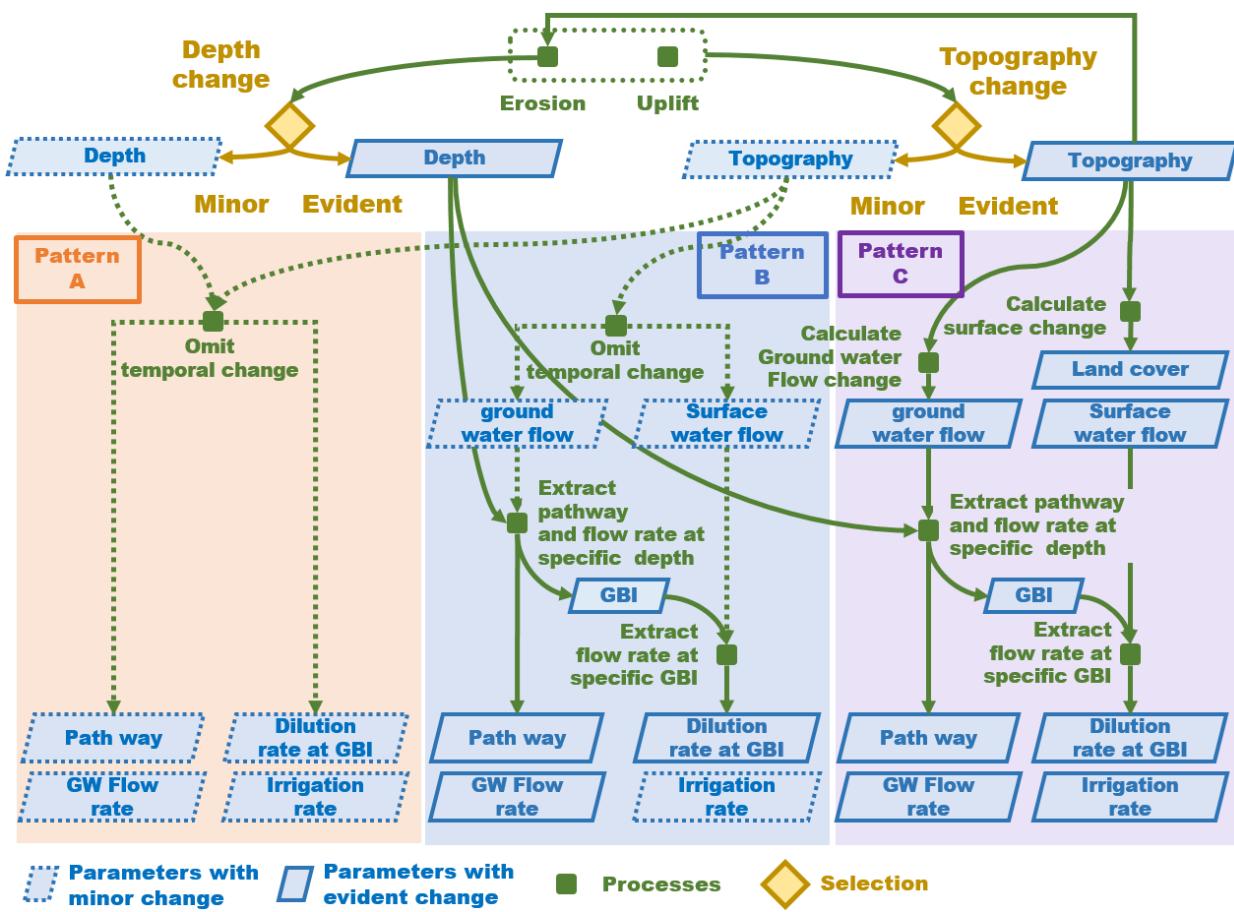


Fig.8 Potential assessment paths caused by various uplift and erosion

変化はなくとも、地下水流动にはもともと深度依存性があることから、深度が変化することで処分場を起点とする核種移行経路やそこで地下水水流速が変化するほか、それによって GBI の位置が変わるために、GBI の位置に応じて考慮すべき河川の希釈水量等も変化することになる。

- さらに、処分場深度変化と地形変化がいずれも顕著でない場合 (Pattern A) は、隆起・侵食に起因する核種移行経路や地下水水流速、希釈水量や灌漑水量の変化は限定的と考えられ、それらは簡便に定数として考慮することも可能となると考えられる。

このように、隆起・侵食から性能評価への影響に関する主なプロセスや特性の変化、およびそれらを介した影響の伝播経路が複数考えられるが、そのうちどの変化やどの経路を介した影響が性能評価上重要なかは、上述の Pattern A～Pattern C のような地形と処分場深度の変化のパターンと対応付けて分類できることと考えられる。

地形・処分場深度変遷解析ツールでは、地形と処分場深度の変化を定量的かつ効率的に計算できるため、初期条件としての地形や処分場の位置と深度、隆起速度等の条件に対して処分場深度変化や地形変化を計算することで、以下の 2 つに資することができる。

- 地下水流动や処分場から地表への核種移行経路の定量的評価で必要となる地形と処分場深度の変化の定量的情報の提供。
- 各条件での地形と処分場深度の変化が前述の Pattern

A～Pattern C のどのパターンが該当するかの分類により、性能評価における隆起・侵食の影響の検討においてどのプロセスや特性をどのように考慮していくことが重要になるかの判断を支援。

Fig.9 には、前述の Case1～Case4 の各ケースについての地形変化の程度を示す指標としての高度分散量 (横軸) と処分場深度変化 (縦軸) の関係を示すとともに、100 万年経過時のそれぞれの指標の値を図中に白丸で示した。また、その時点における Case3 と Case4 の地形を示した。Case1～Case4 の各ケースの結果は、図中の 3 つの領域 (Area1～Area3) で区分することができる。まず 100 万年経過時 (Fig.9 中の白丸) の結果については、始点から大きく変化しないことを示す Area1 に Case1, Case2, Case4 が含まれ、これらは前述の Pattern A に対応する。一方、Case3 は、図中で右上方向に大きく変化することを示す Area3 には Case3 が含まれ、前述の Pattern C に対応する。次に 100 万年を超える期間についてみると、主に縦軸方向に大きく変化することを示す Area2 に Case1 が含まれ、前述の Pattern B に対応する。また、右上方向に大きく変化する Area3 には Case2～4 が含まれ、それらは Pattern C に対応する。このように、地形・処分場深度変遷解析ツールにより各条件での高度分散量と処分場深度変化の情報を得ることにより、各条件での処分場深度変化と地形変化が Pattern A～Pattern C のどのパターンに該当するかを、その時間変遷の可能性も含めて推定することができる。これにより、Fig.8 の整理と照らし合わせることで、隆起・侵食の影響を考慮した性能評価に

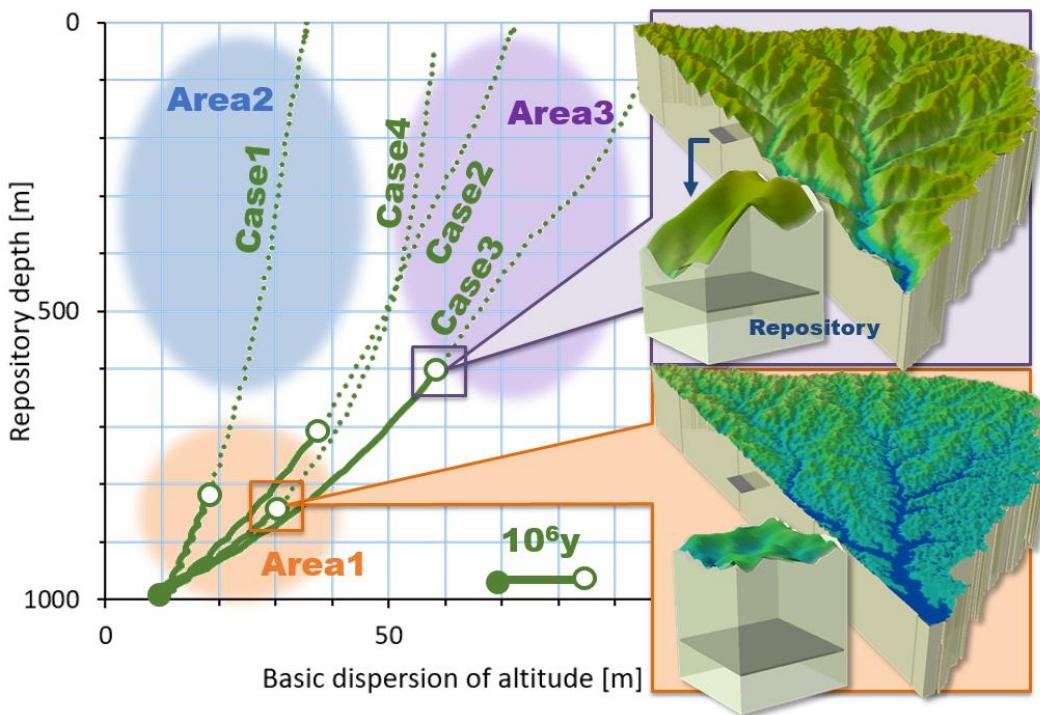


Fig.9 An example of repository depth and topography data provided by the tool

向けてどのプロセスや特性をどのように考慮していくことが重要になるかの道筋を見通すことができる。

#### 4 まとめ

- 1) 地層処分における隆起・侵食影響評価に向けて、地形と処分場深度の変化を処分場の位置や深度、隆起速度等の条件に対して効率的に評価するためのツール（地形・処分場深度変遷解析ツール）を、簡易的な地形発達シミュレーションを組み込んだ ArcGIS のモデルとして構築した。
- 2) 構築した地形・処分場深度変遷解析ツールを用いた試行を通じて、さまざまな条件での処分場深度変化と地形変化を計算できることで、地下水流动解析、表層環境の解析、地表水の解析などのインプットを整備できることを確認した。
- 3) 隆起・侵食から性能評価への影響については、関係する主なプロセスや特性の変化、およびそれらを介した影響の伝播経路が複数考えられるが、そのうちどの変化やどの経路を介した影響が性能評価上重要なのは、地形と処分場深度の両方の変化が相対的小さいパターン（Pattern A）、処分場深度の変化のみが大きいパターン（Pattern B）、地形と処分場深度の両方の変化が大きいパターン（Pattern C）に分類できると考えられた。構築した地形・処分場深度変遷解析ツールを用いた地形変化（高度分散量）と処分場深度変化の計算結果により、前述の Pattern A～Pattern C のどのパターンに近いかを推定することでき、隆起・侵食の影響を考慮した性能評価に向けてどの変化やどの経路を介した影響が重要になるかを見通すことができる可能性を示した。

#### 謝辞

本解析の実施および報告書をとりまとめるに当たり、日本原子力研究開発機構核燃料・バックエンド研究開発部門の諸氏には数多くのご助言をいただきました。また、匿名の査読者の方々からは、本稿の改善に有益なご指摘を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 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 (2004).
- [2] 地質環境の長期安定性研究会: 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).
- [3] Tóth, J.: A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophysical Research* **68**, pp.4795-4812 (1963).
- [4] 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂寛: 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流动特性に与える影響の解析的評価の試み. 日本原子力学会和文論文誌 **8**, pp.40-53 (2009).
- [5] 尾上博則, 小坂寛, 松岡稔幸, 小松哲也, 竹内竜史, 岩月輝希, 安江健一: 長期的な地形変化と気候変動による地下水流动状態の変動性評価手法の構築. 原子力バックエンド研究 **36**, pp.3-14 (2019).
- [6] 影山宗一郎, 池田誠, 富山眞吾: 北海道下川地域における未観測流域の流出量を考慮した流域水収支の検討. 水文・水資源学会誌 **23**, pp.301-311 (2010).
- [7] 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,核燃料サイクル開発機構 (1999).
- [8] 若杉圭一郎, 山口正秋, 小尾繁, 長尾郁弥, 加藤智子, 鈴木祐二, 江橋健, 梅木博之, 新堀雄一: 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] Ebashi, T., Kawamura, M., Inagaki, M., Koo, S., Shibata, M., Itazu, T., Nakajima, K., Miyahara, K., Apted, M. J.: "Relative Rates Method" for evaluating the effect of potential geological environmental change due to uplift/erosion to radionuclide migration of high-level radioactive waste. *Symposium NW - Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII (Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1665)*, (Duro, L., Giménez, J., Casas, I. and De Pablo, J. ed.) Barcelona, Spain, September 29 - October 3, 2013, pp.39-45 (2014).
- [10] Shimada, T., Takeda, S., Mukai, M., Munakata, M., Tanaka, T.: Analysis of radionuclide migration with consideration of spatial and temporal change of migration parameters due to uplift and denudation. *Symposium EE - Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVIII (Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1744)*, (Gin, S., Jubin, R., Matyáš, J. and Vance, E. ed.) Boston, USA, November 30 - December 5, 2014, pp.229-234 (2015).
- [11] Tucker, G. E., Slingerland, R. L.: Drainage basin responses to climate change. *Water Resources Res.* **33**, pp.2031-2047 (1997).
- [12] Willett, S. D.: Orography and orogeny: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *Journal of Geophysical Research* **104**, pp.28957-28981 (1999).
- [13] 野上道男: 河川縦断形発達の拡散モデルについて. 地理学評論 **81**, pp.121-126 (2008).
- [14] 草野友宏, 浅森浩一, 黒澤英樹, 國分(齋藤)陽子, 谷川晋一, 根木健之, 花室孝広, 安江健一, 山崎誠子, 山田国見, 石丸恒存, 梅田浩司:「地質環境の長期安定性に関する研究」第1期中期計画期間(平成17年度～平成21年度)報告書(H22 レポート). JAEA-Research 2010-044 (2013).
- [15] 中北英一, 杉谷祐二: 地形発達過程と流域地形則との関係に関する研究. 京都大学防災研究所年報 **53**, pp.467-481 (2010).
- [16] Ohmori, H.: Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development. *Bull. Dept. Geography, Univ. Tokyo* **10**, pp.31-85 (1978).
- [17] 国土地理院: 基盤地図情報数値標高モデル. <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>. (accessed 2020-07-15).
- [18] Dietrich, W. E., Perron, T.: The search for topographic signature of life. *Nature* **439**, pp.411-418 (2006).
- [19] 田中靖: グリッド型地形データによる地形発達シミュレーションモデル(GGM)の構築. 2011年度日本地理学会春季学術大会, 東京, 平成23年3月29～31日, 日本地理学会発表要旨集 **79**, p.249 (2011).
- [20] Ahnert, F.: Introduction to Geomorphology. Arnold, London (1998).
- [21] Schumm, S. A., Dumont, J. F., Holbrook, J. M.: *Active Tectonics and Alluvial Rivers*. Cambridge University Press, Cambridge (2000).
- [22] Howard, A. D., Kerby, G.: Channel changes in badlands. *Geological Society of America Bulletin* **94**, pp.739-752 (1983).
- [23] Culling, W. E. H.: Analytical theory of erosion. *Journal of Geology* **68**, pp.336-344 (1960).
- [24] Jenson, S. K., Domingue, J. O.: Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **54**, pp.1593-1600 (1988).
- [25] 野原壯, 梅田浩司, 笹尾英嗣, 浅森浩一, 花室孝広, 守屋俊文, 中司昇: 地質環境の長期安定性に関する研究年度報告書(平成17年度). JAEA-Research 2007-087 (2008).
- [26] 登坂博行: 地図の水環境科学. 東京大学出版会, 東京 (2006).
- [27] 高橋裕: 河川水文学(水文学講座11). 共立出版, 東京 (1978).
- [28] Katsube, K., Oguchi, T.: Altitudinal changes in slope angle and profile curvature in the Japan Alps: A hypothesis regarding a characteristic slope angle. *Geographical Review of Japan* **72** (Series B), pp.63-72 (1999).
- [29] 安江健一, 浅森浩一, 谷川晋一, 山田国見, 山崎誠子, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 道家涼介, 草野友宏, 花室孝広, 石丸恒存, 梅田浩司: 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成22年度). JAEA-Research 2011-023 (2011).
- [30] 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 **5**, JNC TN1340 99-004, pp.85-93 (1999).
- [31] Ohmori, H.: The paradox of equivalence of the Davisian end-peneplain and Penckian primary peneplain. In: *Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives*, (Evans, I. S., Dikau, R., Tokunaga, E., Ohmori, H. and Hirano, M. ed.), Terrapub, Tokyo, pp.3-32 (2003).