
地質環境の長期安定性に関する研究
長期予測・影響評価モデルの開発
— H22年度の成果およびH23年度の計画 —

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門

地形変化シミュレーション技術の高度化

研究目的

第1期中期計画期間中に開発した地形変化シミュレーション技術の妥当性を検討

【平成22年度】

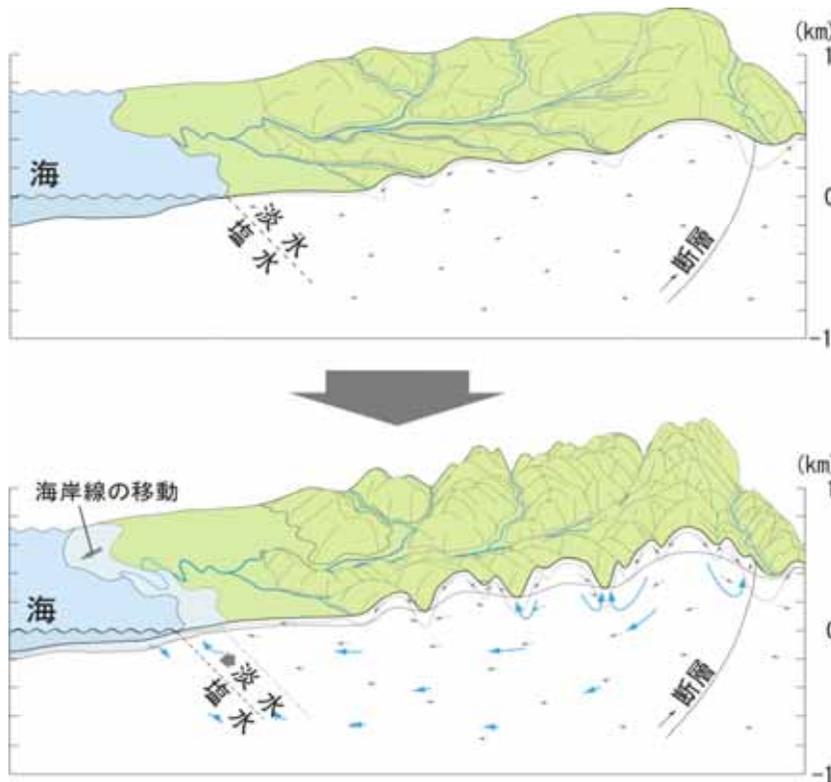
実施内容

- 段丘等の地形データから復元した過去の地形を起点とする地形変化シミュレーションを実施し、その結果について現在の地形の再現性を基にシミュレーションの妥当性を評価

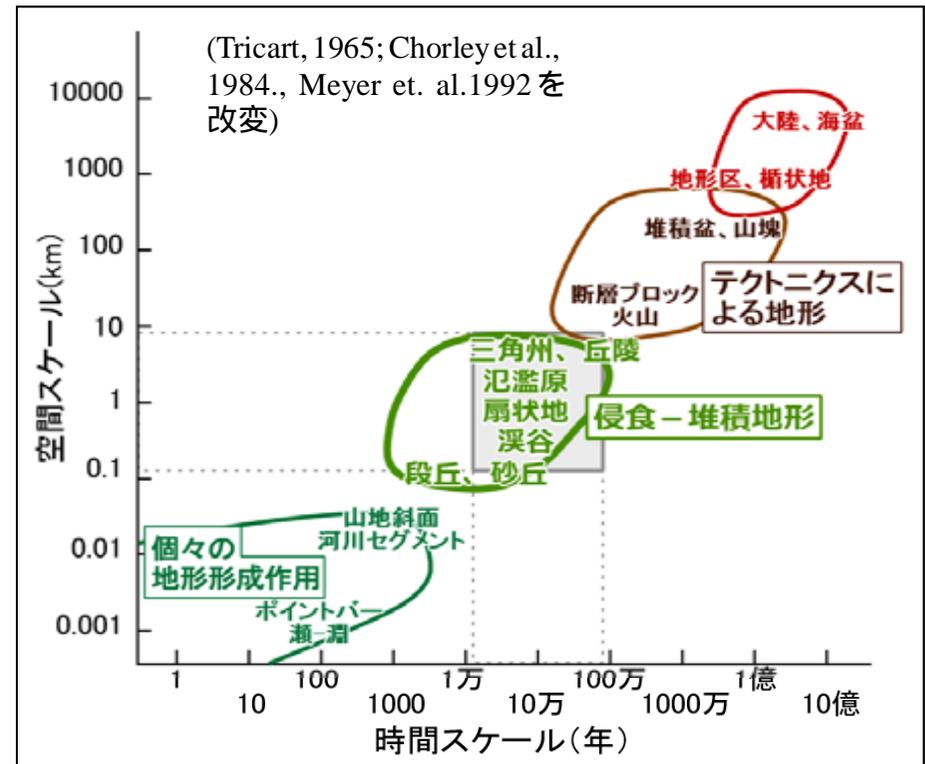
期待される成果

万年～十万年オーダーで形成される段丘～丘陵程度の地形の発達をシミュレートする技術の提示

地形変化シミュレーション技術の高度化



地形が地下水流動に与える影響（模式図）



シミュレーションでの推定が求められる
地形形成プロセスの時間および空間スケール

- 地下水流動には、表層の地形形状の変化(侵食・堆積)の影響が大きい
→氷期・間氷期変動1サイクル程度の時間で生じる地形変化現象(段丘～丘陵等の形成)の推定が求められる

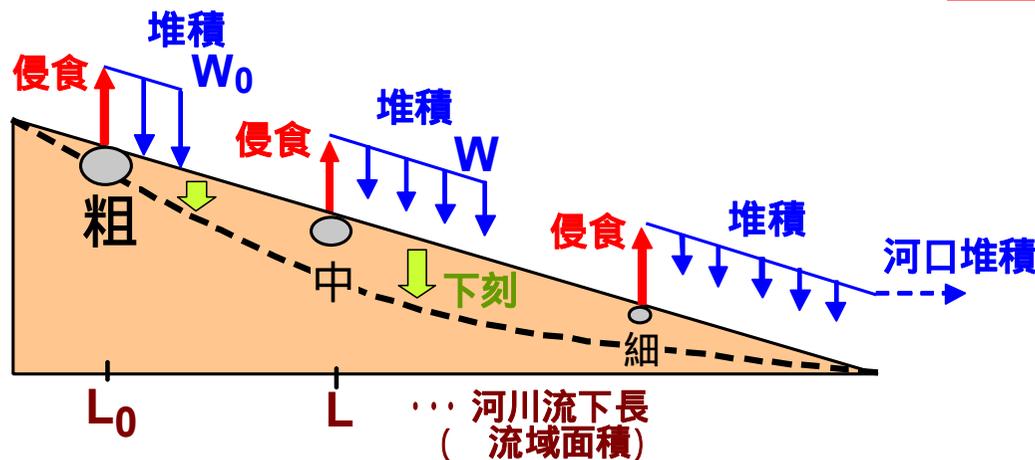
地形変化シミュレーション技術の高度化

粒径変化モデル

特許出願済み <出願番号;特願2009-239446>

発明の名称;地形変化シミュレーションにおける

粒径変化に基づく河川堆積プロセスのシミュレーション方法



$$W = W_0 \times (L / L_0)^\alpha$$

- W : 任意点での堆積区間長
- L : 任意点の流下長(√流域面積)
- W₀ : 谷頭位置での堆積区間長
- L₀ : 谷頭位置の流下長(√流域面積)
- α : 粒径係数(土砂運搬距離の増大率)

流下とともに、運搬距離を乗数的に増大させる (= 広範囲に土砂堆積)

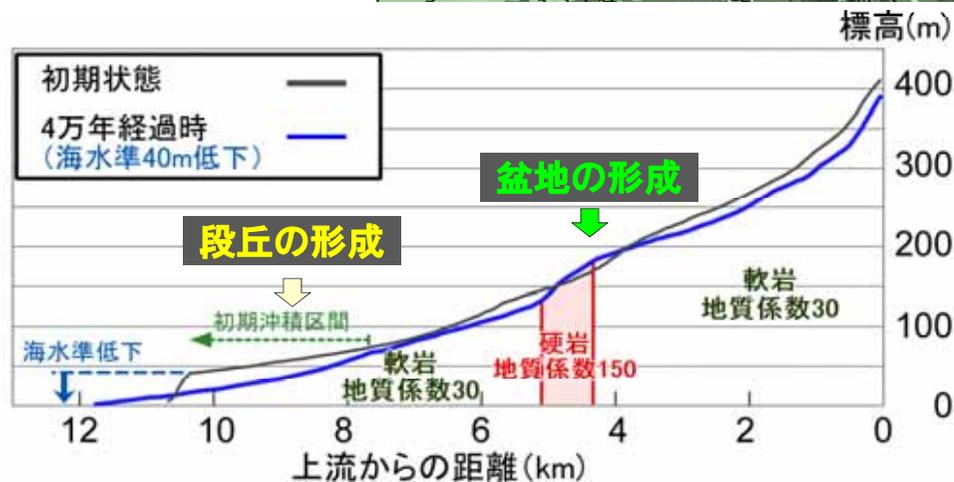
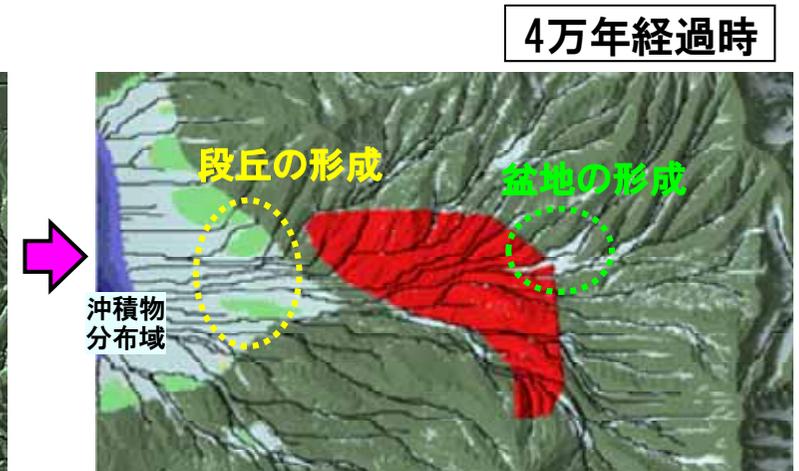
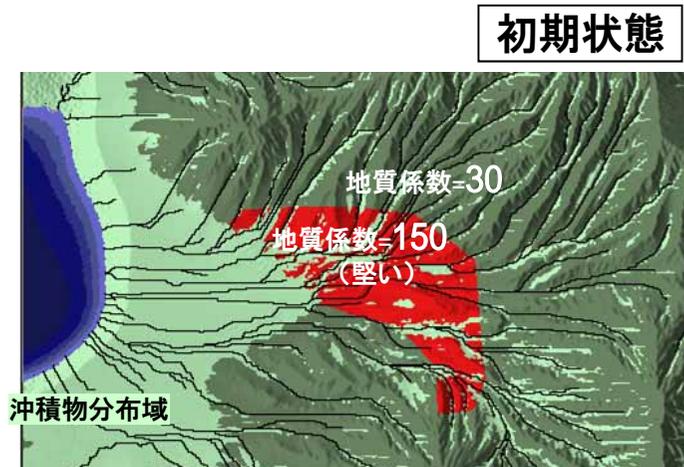
- ①河川での侵食量 ⇒ 勾配に比例させる
- ②河川での運搬・堆積量 ⇒ 侵食土砂の運搬距離を、侵食地点の流域面積の関数とする (下流側で増大)

- 第1期中期計画での改良点(1):河川において、侵食された土砂の運搬距離が下流側で増大するモデルのプログラムへの組み込み

地形変化シミュレーション技術の高度化

仮想地形での
シミュレーション例:

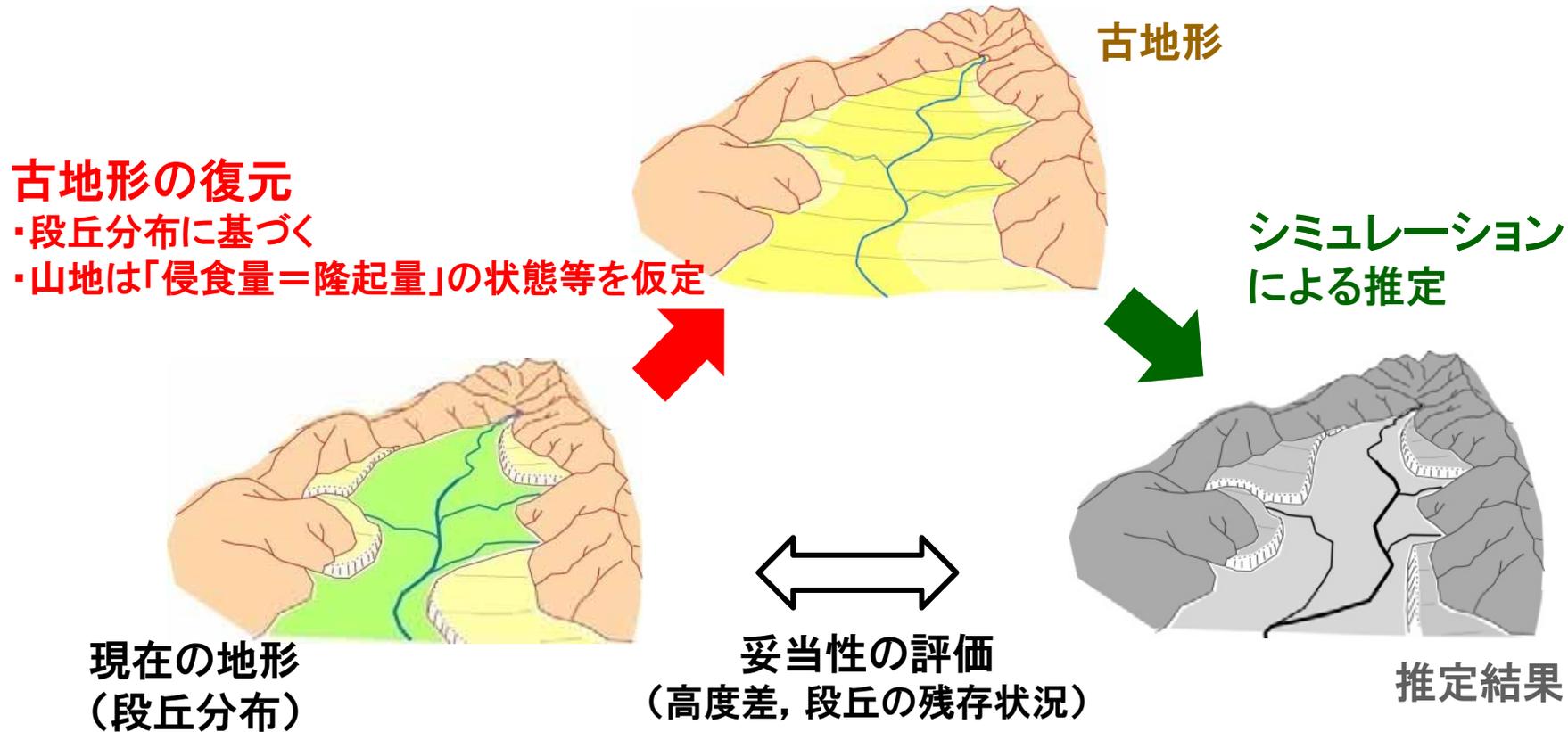
- ・侵食抵抗性のパラメータ(地質係数)を設定
- ・側方侵食させる
- ・海水準を低下させる



硬岩域では、
遷急点の後退(河床低下)が進まない
↓
上流側が緩勾配化(堆積)
↓
側方侵食による盆地の形成

- 第1期中期計画での改良点(2):側方侵食, 差別侵食(侵食抵抗性の差異)の考慮
→既知の河成地形(段丘, 盆地)の自律的な形成を確認

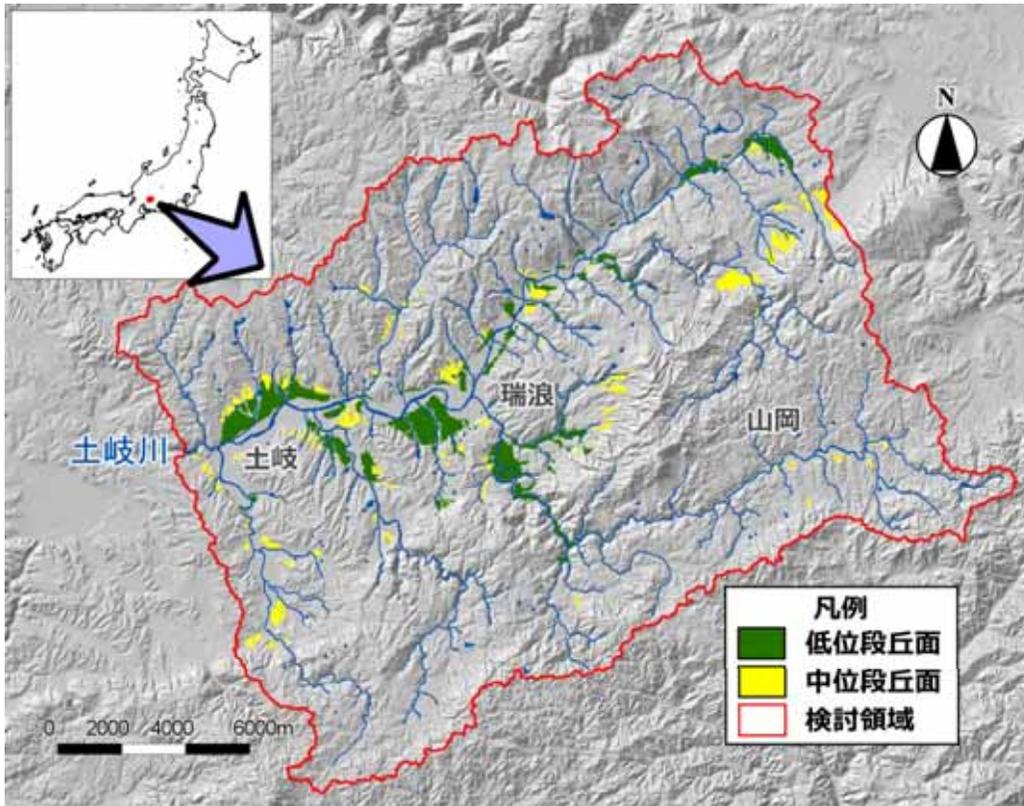
地形変化シミュレーション技術の高度化



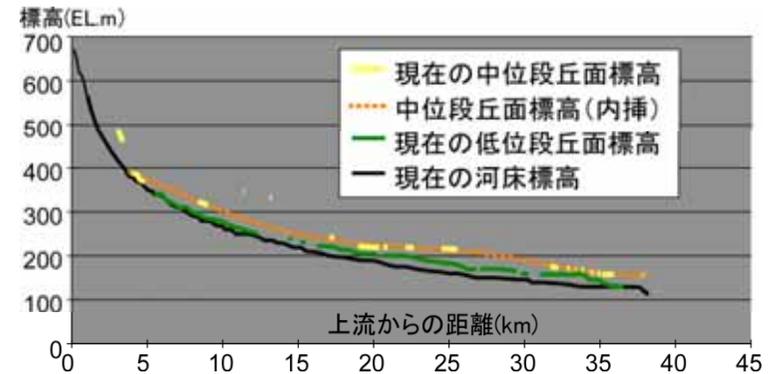
復元した古地形を用いたシミュレーションによる妥当性評価 (模式図)

- 段丘面の分布に基づき復元した古地形を起点とする地形変化シミュレーションを実施
- シミュレーションで得られた地形と現在の地形について、分布や比高を用いて定量的に比較

地形変化シミュレーション技術の高度化



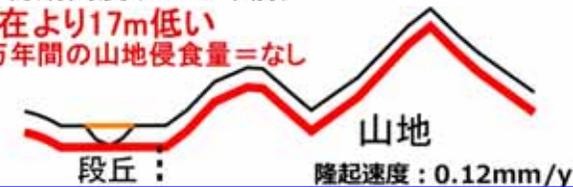
土岐川流域の河成段丘分布
(田力ほか, 2011)



土岐川の現河床および段丘の縦断形

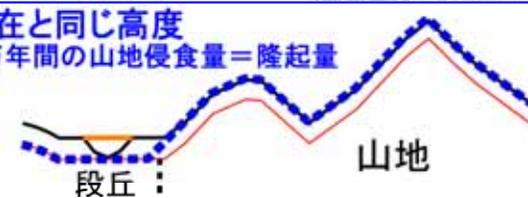
山地の初期高度(14万年前)

① 現在より17m低い
14万年間の山地侵食量=なし



初期地形のとりうる幅

② 現在と同じ高度
14万年間の山地侵食量=隆起量

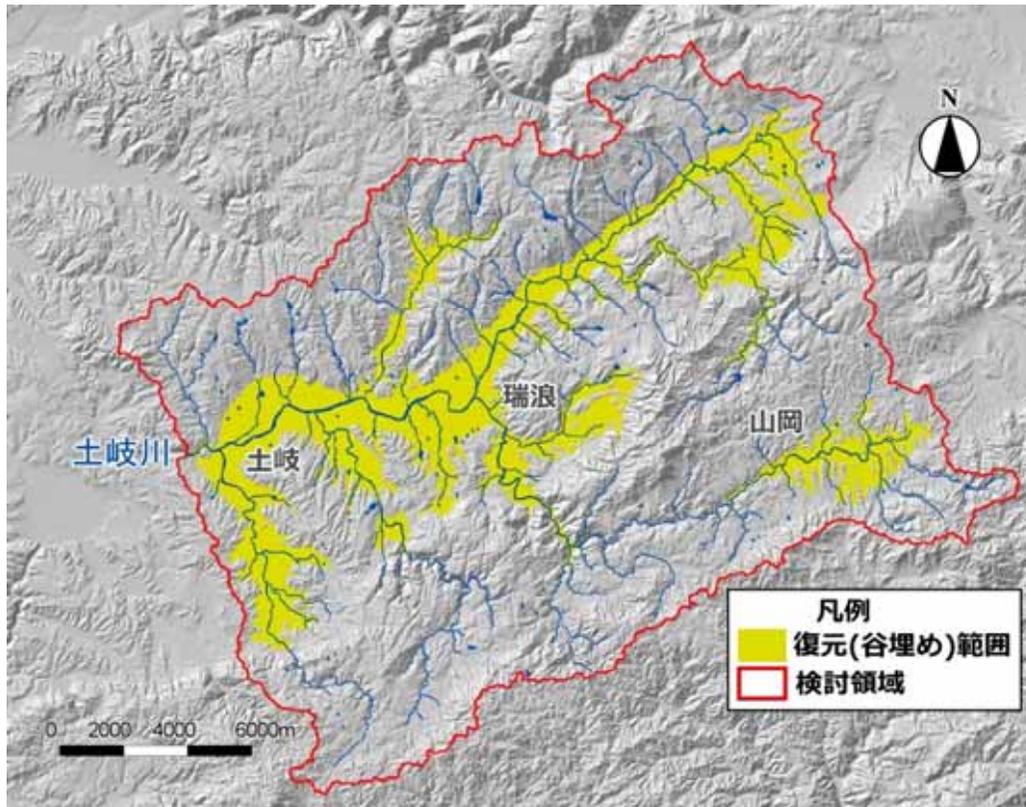


プログラムの
妥当性評価
に使用

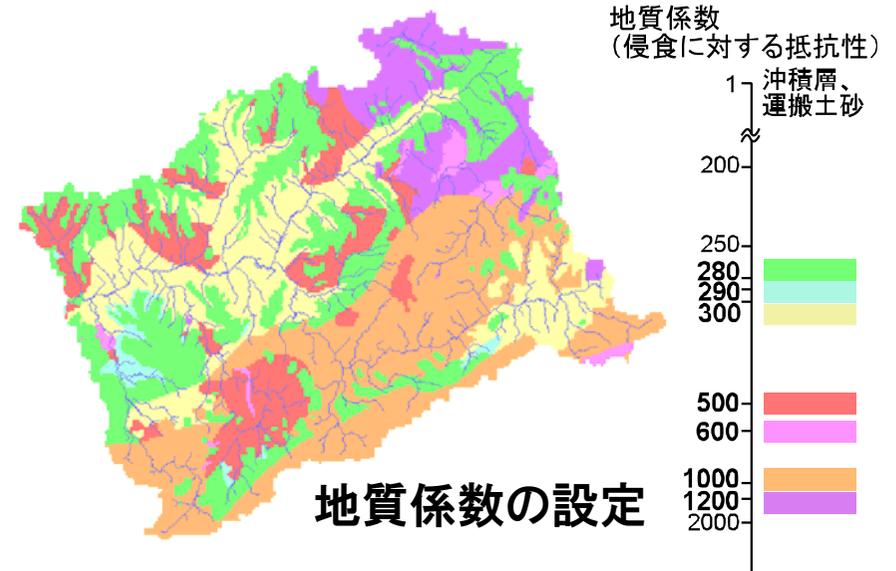
古地形復元の考え方(模式図)

- 古地形の復元: 地形判読により認定した中位段丘面(約14万年前相当)を使用
山地域は, 侵食量が隆起量と等しい状態を仮定

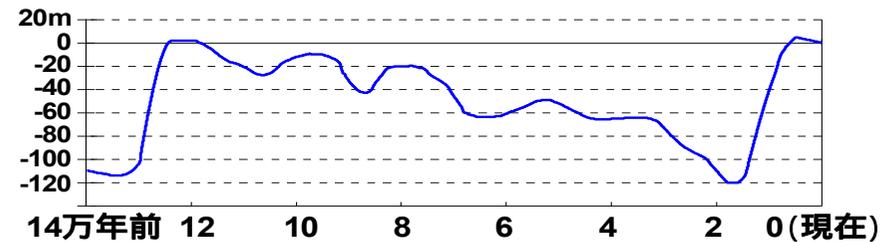
地形変化シミュレーション技術の高度化



復元した古地形のDEM(14万年前)
 (ケース②:初期山地高度=現在) (尾上ほか(2009a)を改変)



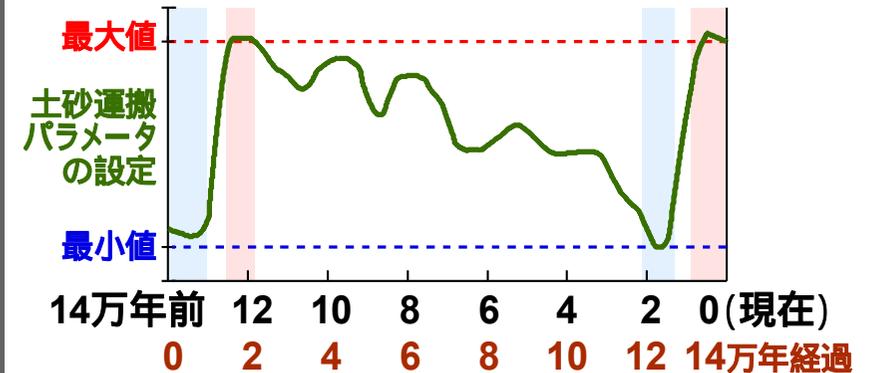
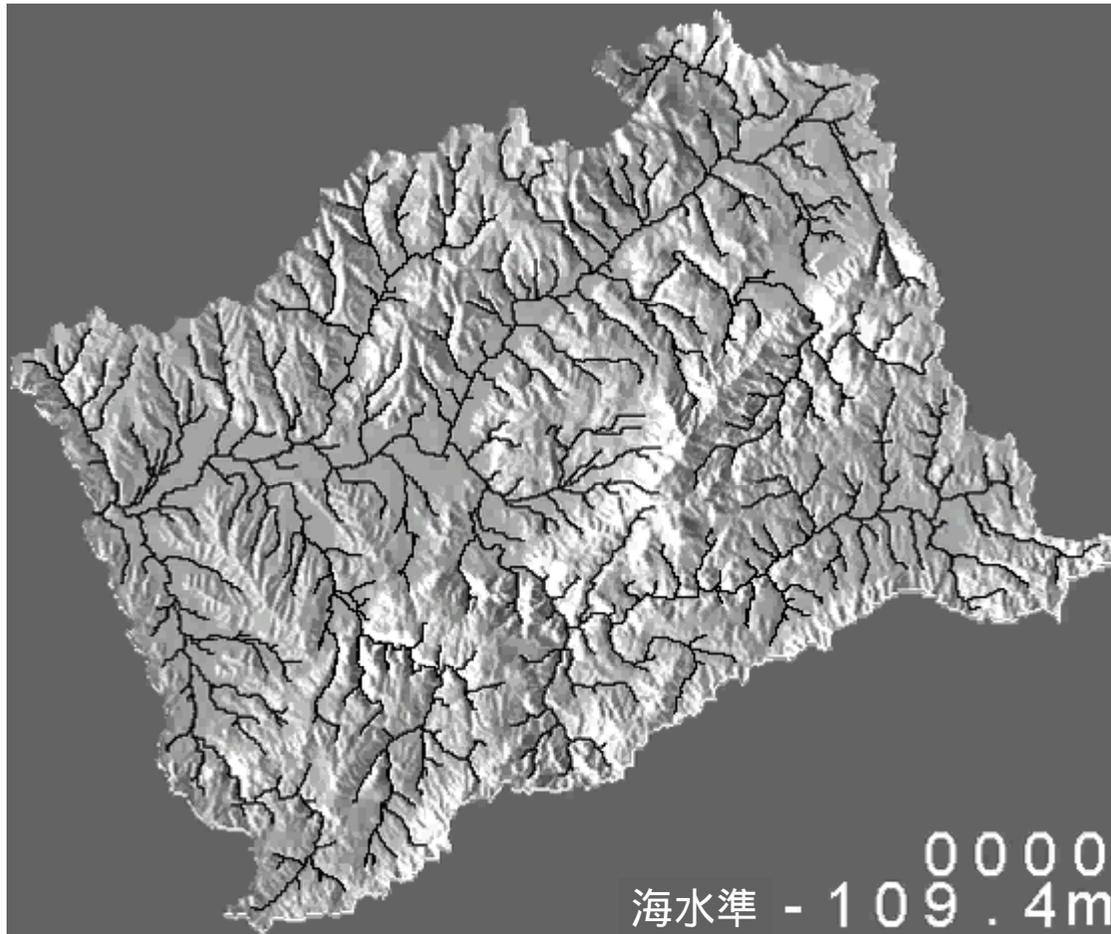
地質係数の設定



気候変動の設定に用いた海水準変動曲線

- 地質係数(侵食抵抗性のパラメータ)を, 地質と岩石物性値の対応および地質図に基づき設定
- 氷期/間氷期の河川営力の変動を, 粒径係数(土砂運搬のパラメータ)を変化させて表現

地形変化シミュレーション技術の高度化



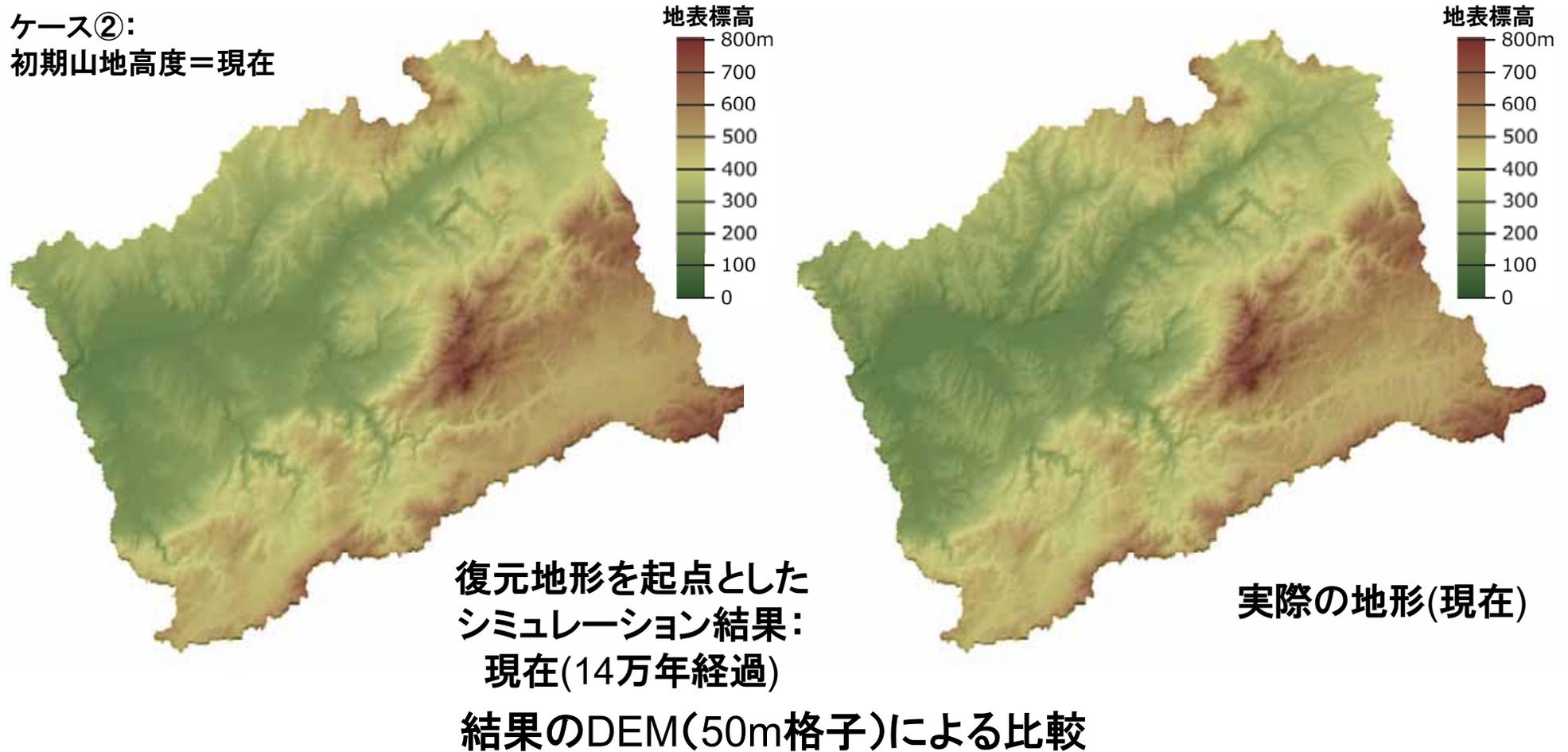
粒径係数の変動の設定(模式図)

300年毎の陰影図による
アニメーション
(ケース②:初期山地高度=現在)

- 復元した14万年前の地形を初期状態として、14万年分のシミュレーションを実施

地形変化シミュレーション技術の高度化

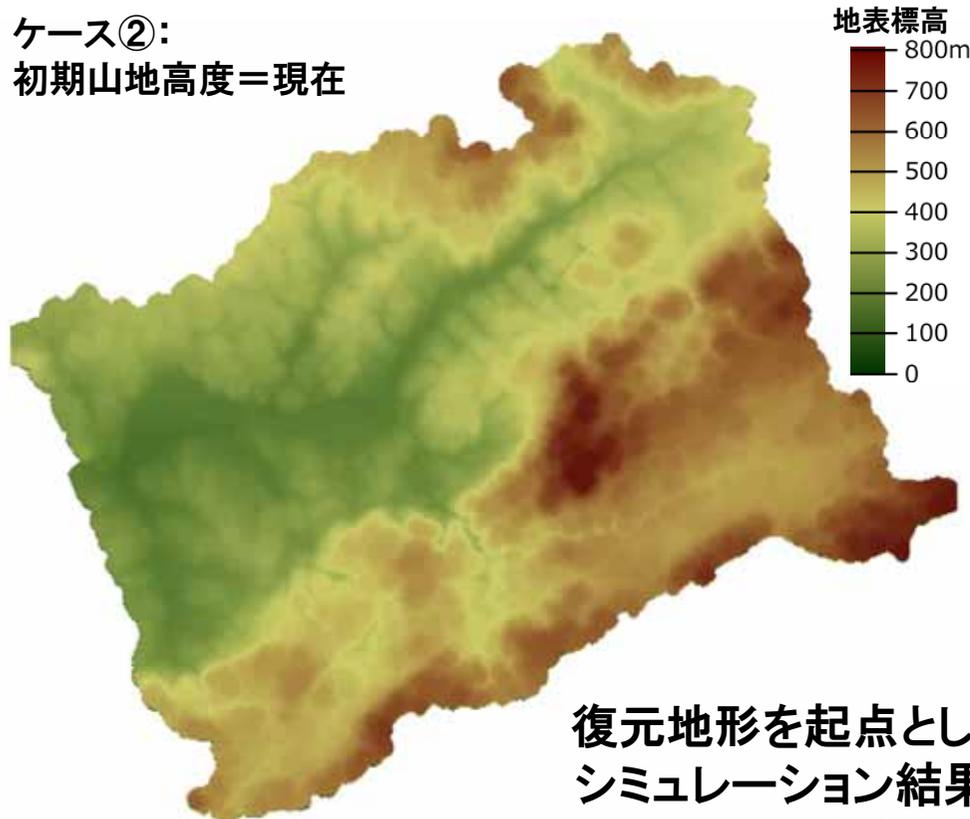
ケース②:
初期山地高度=現在



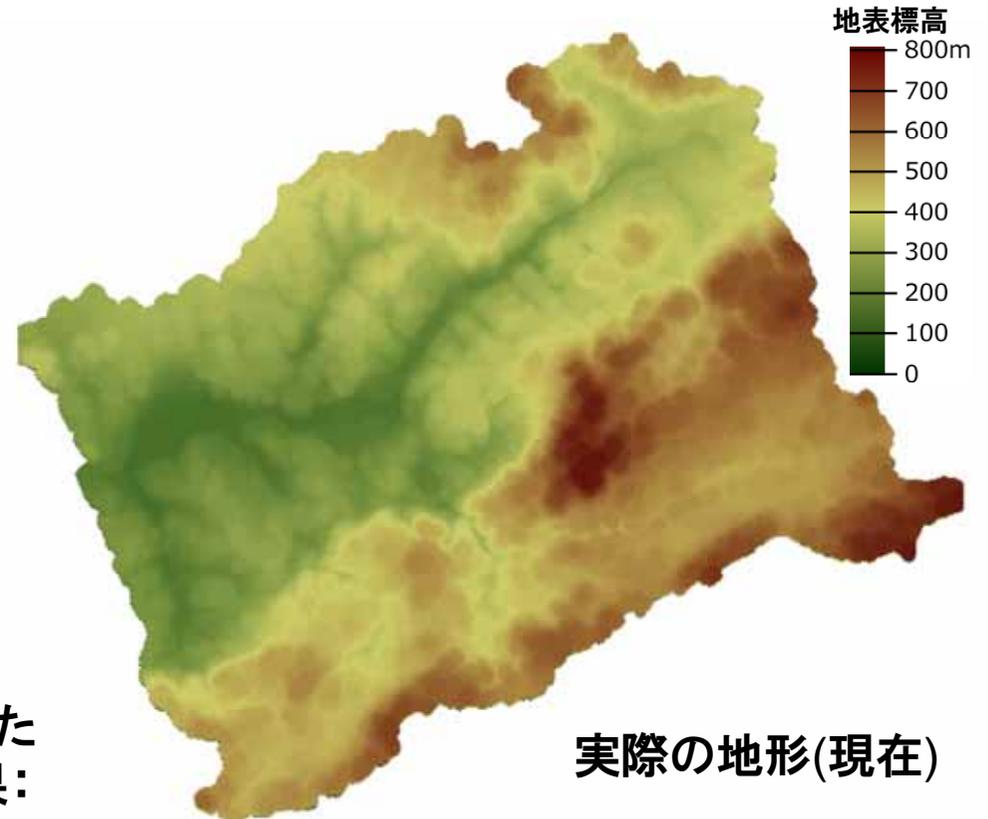
- 14万年間のシミュレーション結果と、現在の地形を比較
→山地の侵食状態に差異が見られるが、高度分布は概ね変わらない

地形変化シミュレーション技術の高度化

ケース②:
初期山地高度=現在



復元地形を起点とした
シミュレーション結果:
現在(14万年経過)



実際の地形(現在)

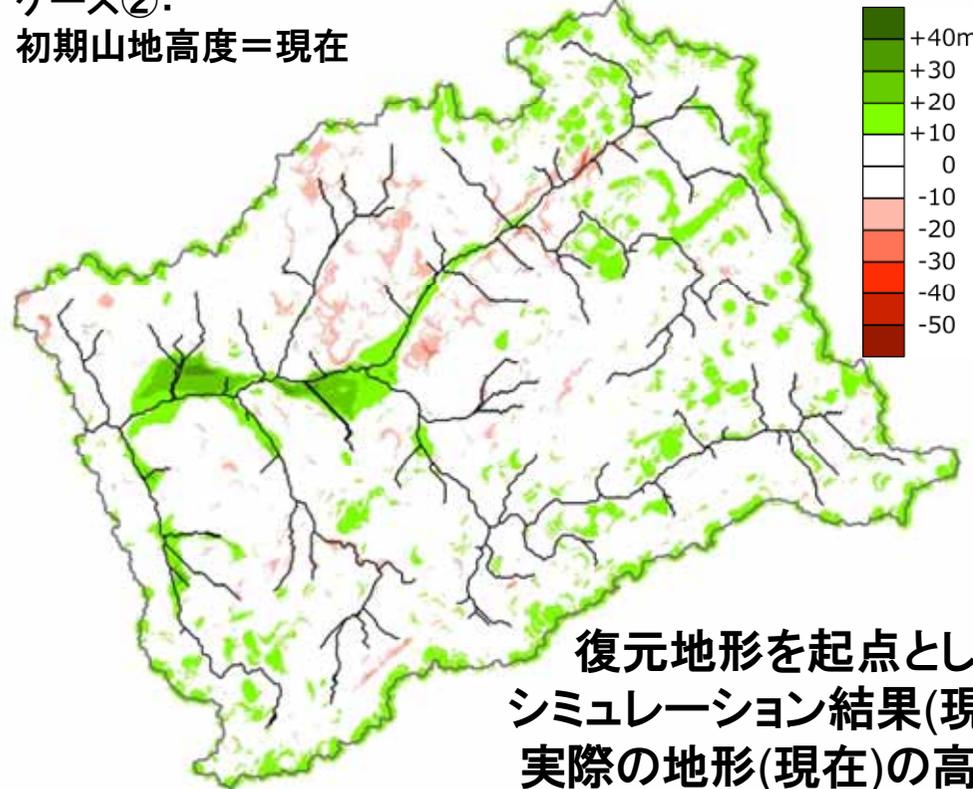
接峰面図(半径200m)による比較

- 接峰面図(半径200mの最高点分布)を作成し、比較
→0.1kmオーダーの地形形状において、両者にほとんど差異は見られない

地形変化シミュレーション技術の高度化

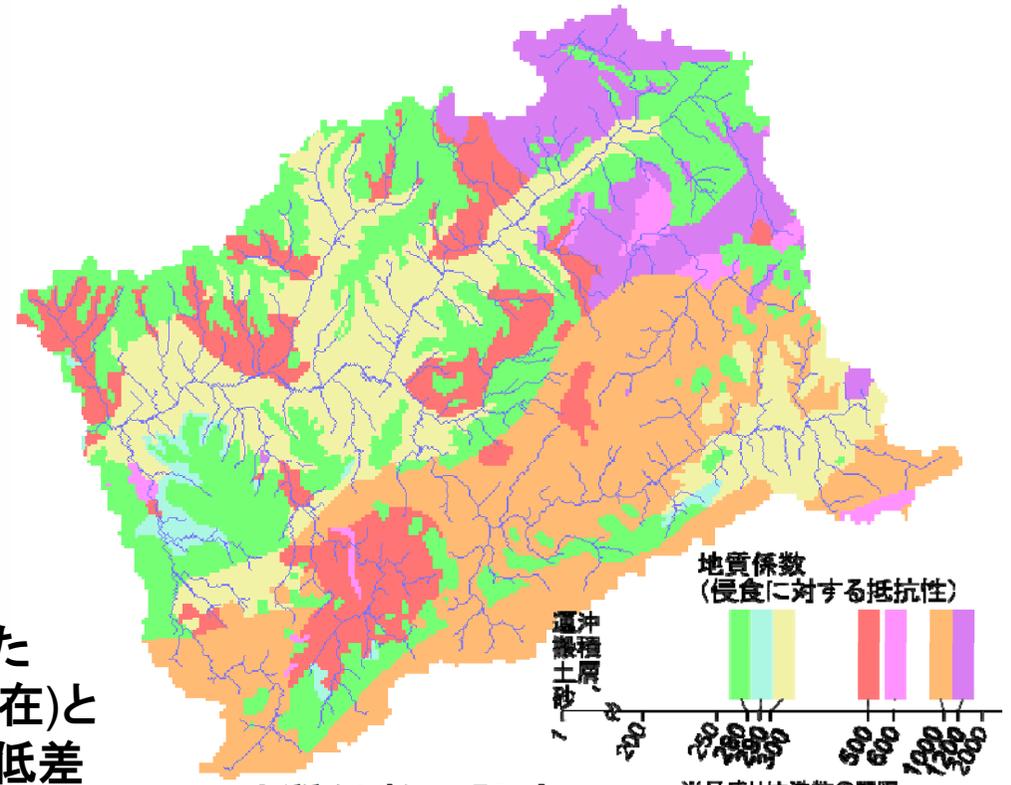
ケース②:
初期山地高度=現在

接峰面: (シミュレーション結果)-(実際の地形)



復元地形を起点とした
シミュレーション結果(現在)と
実際の地形(現在)の高低差

※接峰面図を比較



地質係数の設定

地質係数
(侵食に対する抵抗性)

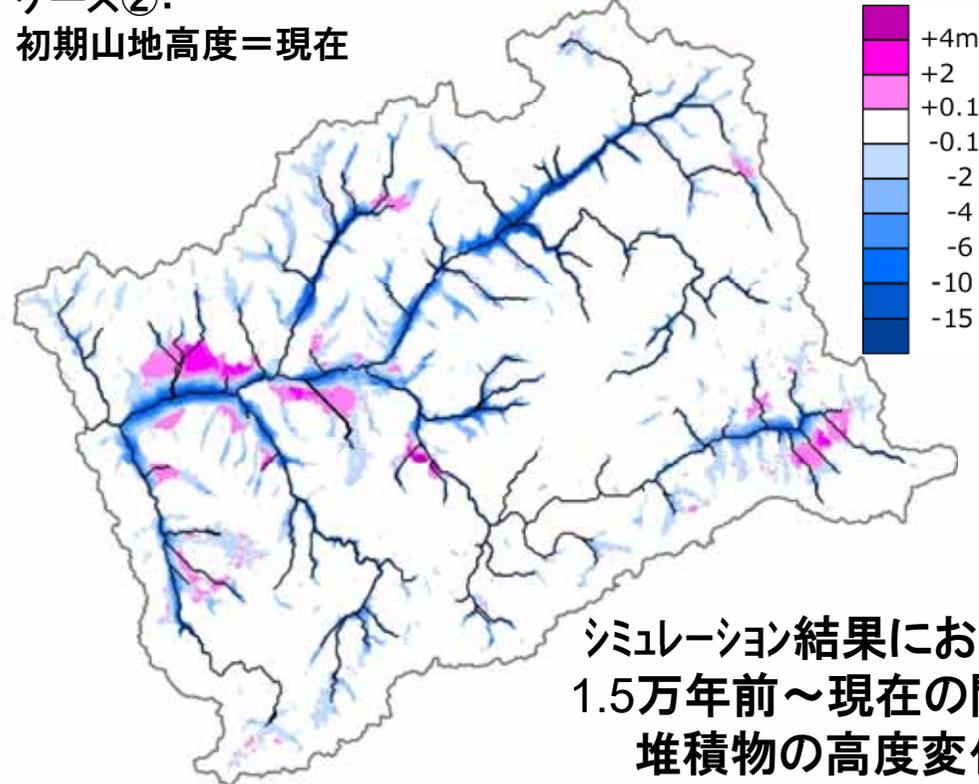
※目盛りは逆数の間隔

- 盆地域の標高が、現在の地形に比べて高くなる傾向がみられるものの、ほぼ全域について±10m以内の差異で表現できている
→10万年程度の期間におけるシミュレーションおよび地質係数の設定の妥当性を確認

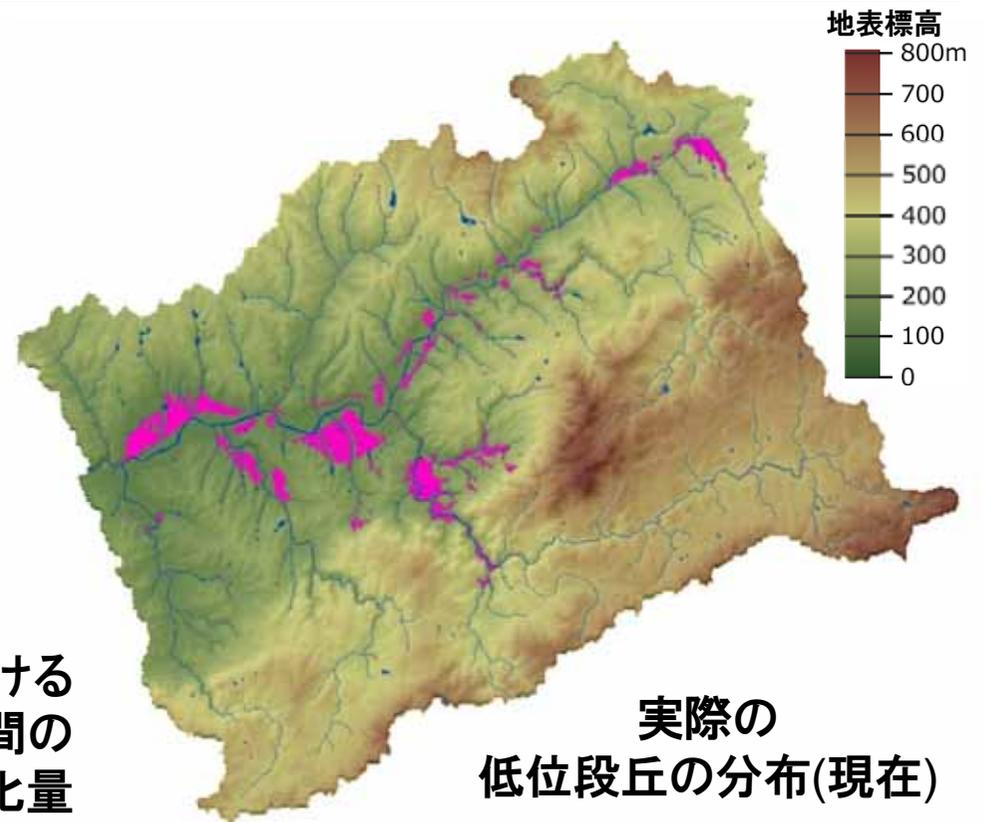
地形変化シミュレーション技術の高度化

ケース②:
初期山地高度=現在

(シミュレーション現在)-(シミュレーション1.5万年前)



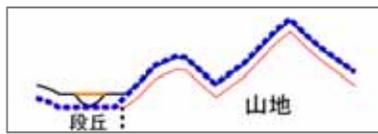
シミュレーション結果における
1.5万年前～現在の間の
堆積物の高度変化量
(低位段丘の分布に相当)



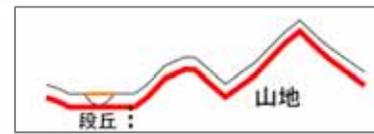
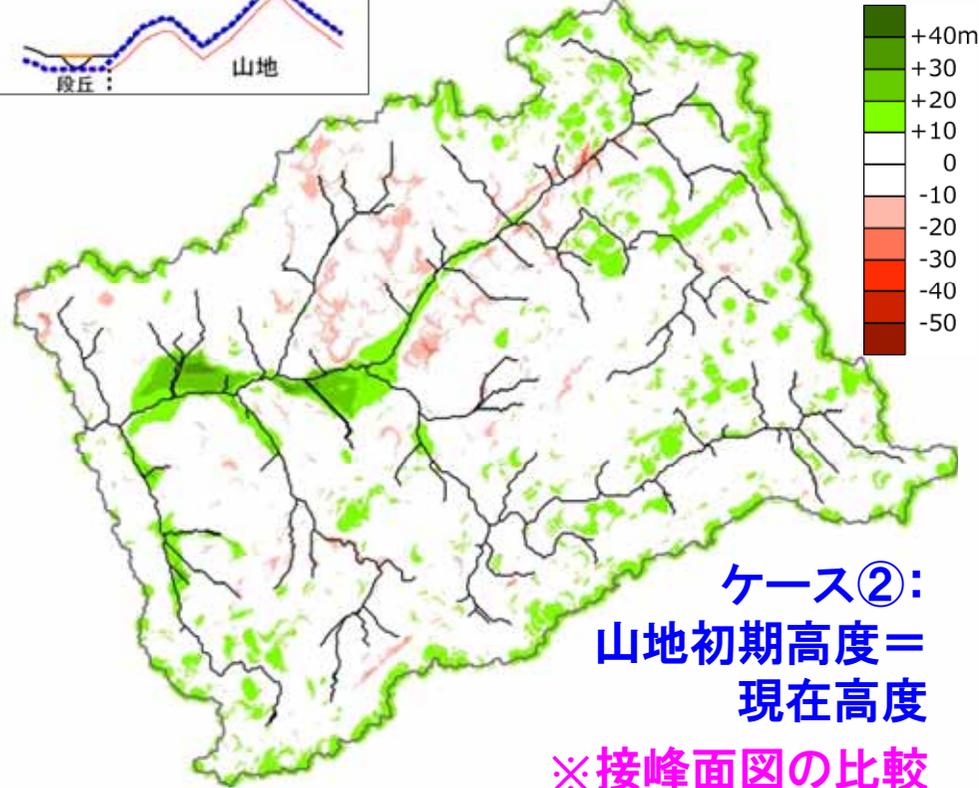
実際の
低位段丘の分布(現在)

- シミュレーション結果における低位段丘の分布は、土岐盆地・瑞浪盆地において実際とほぼ一致
- 低位段丘の現河床との比高は10m程度(実際の比高は10m~15m)
→後氷期における、気候変動による地形変化がよく再現されている

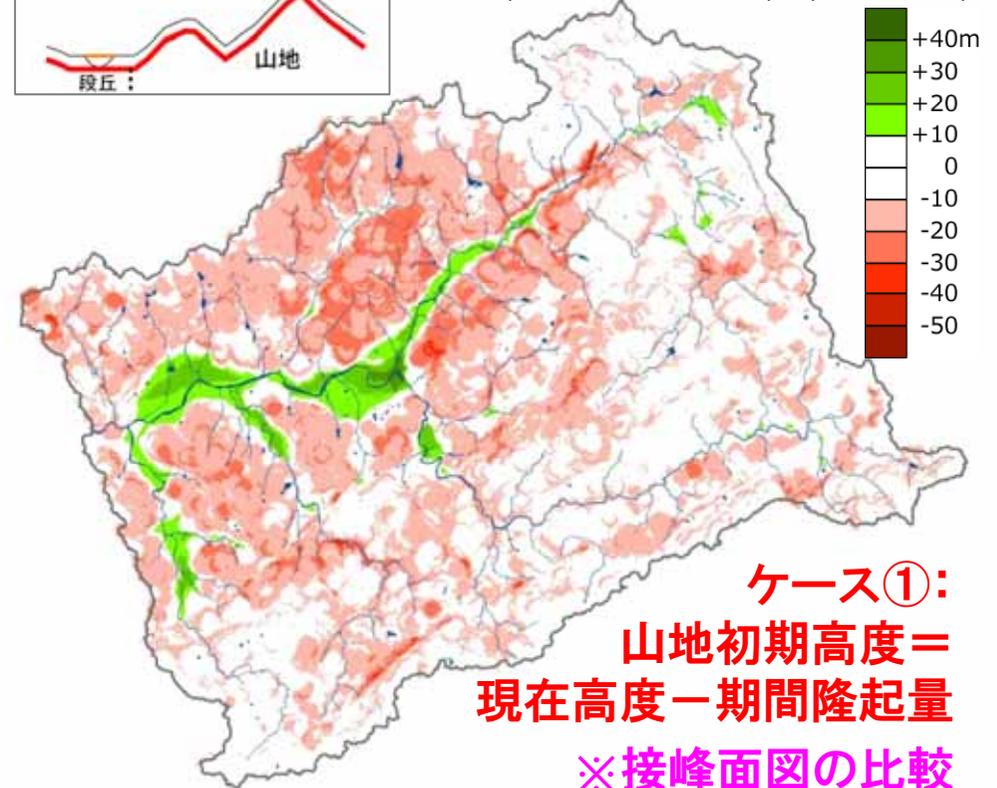
地形変化シミュレーション技術の高度化



接峰面: (シミュレーション結果)-(実際の地形)



接峰面: (シミュレーション結果)-(実際の地形)

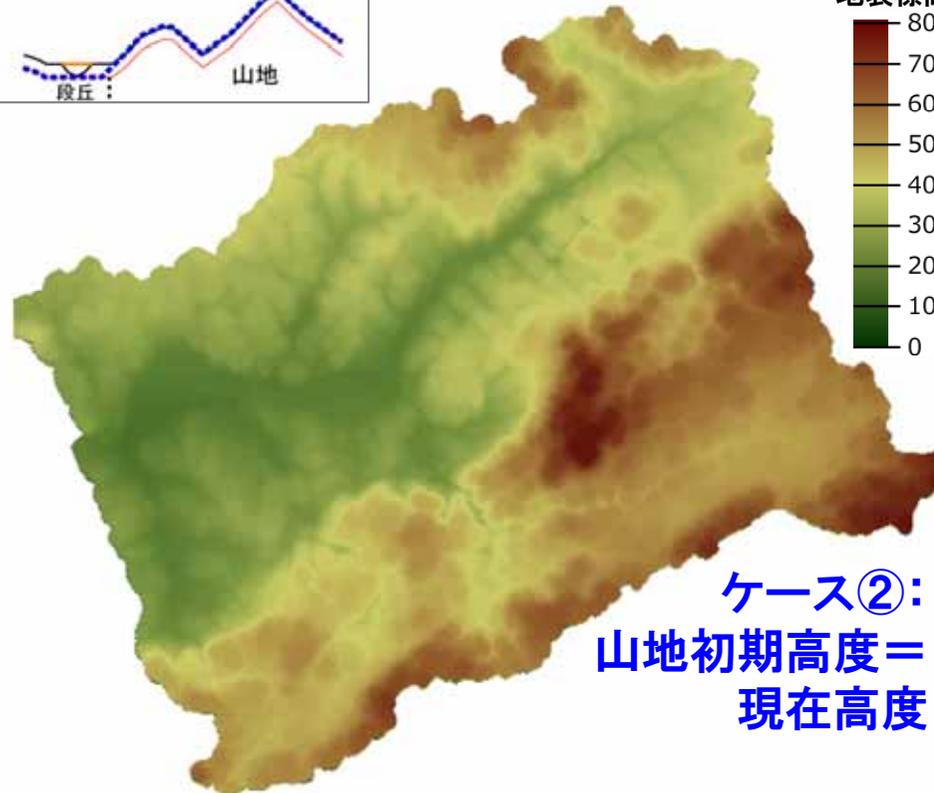
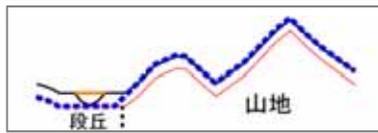


復元地形を起点としたシミュレーション結果(現在) と実際の地形の高低差:2ケース比較

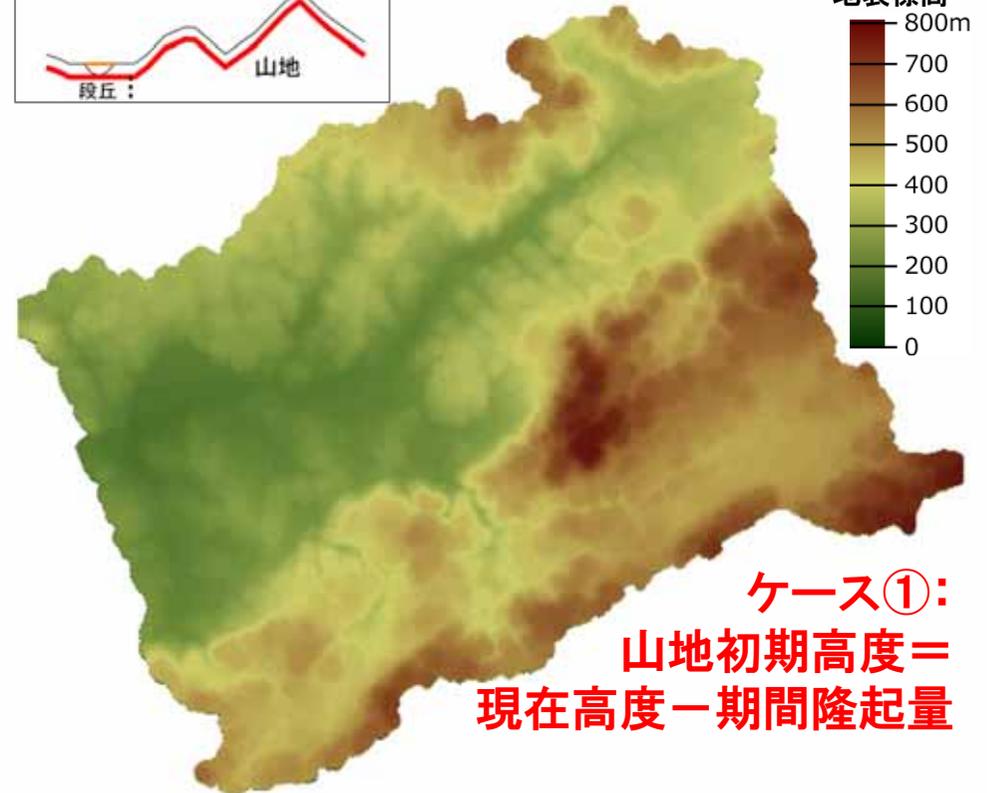
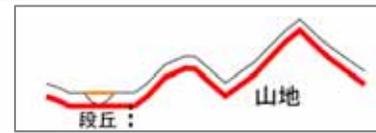
- 山地の初期高度を隆起量分だけ下げると(ケース①), シミュレーション結果における山地高度は, 実際の地形およびケース②の結果より概ね10~20m程度低い

→山地の初期状態のとり得る幅がシミュレーション結果に与える影響について提示

地形変化シミュレーション技術の高度化



ケース②:
山地初期高度＝
現在高度



ケース①:
山地初期高度＝
現在高度－期間隆起量

接峰面図(半径200m)そのものによる比較

- 山地の初期高度を隆起量分だけ下げると(ケース①), シミュレーション結果における山地高度は, 実際の地形およびケース②の結果より概ね10~20m程度低い
→山地の初期状態のとり得る幅がシミュレーション結果に与える影響について提示

地形変化シミュレーション技術の高度化

まとめ

- 第1期中期計画で構築した地形変化シミュレーションプログラムの妥当性評価を実施
- 復元した14万年前の地形を初期状態としたシミュレーション結果は、実際の現在の地形と高度において概ね一致し、また同規模の河成段丘を形成することを確認
- 山地の初期状態のとり得る幅がシミュレーション結果に与える影響について提示

平成23年度実施計画(案)

- 10万年程度の地形変化の推定に係る不確実性が地下水流動に与える影響の検討(水理解析)
- 万年スケールの堆積速度が既知の堆積盆地、沖積平野などにおける妥当性評価: 地形発達のシミュレーションによる再現
- 地質係数の空間分布など、パラメータ取得手法の検討および関連データの蓄積

超長期における予測・評価手法に関する検討

研究目的

将来十万年を超えるような超長期について、外挿法による予測・評価の妥当性を検討するための科学的知見の提示

【平成22年度】

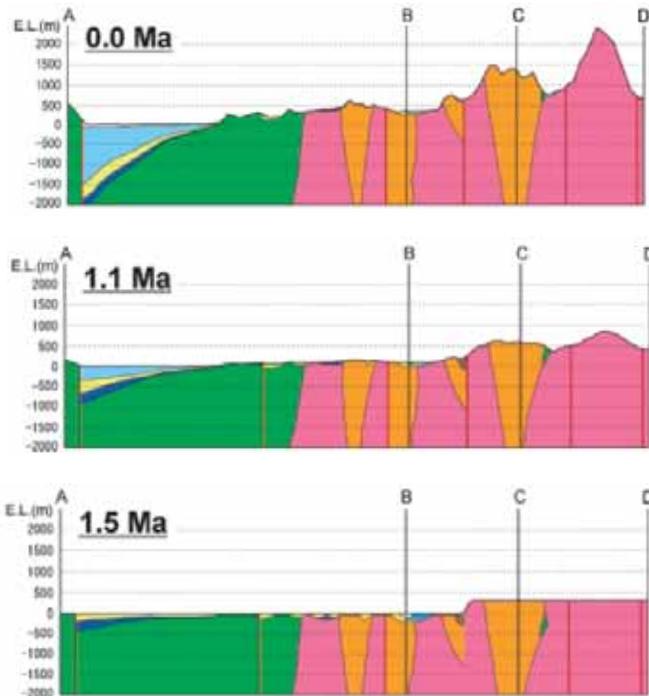
実施内容

- 長期的な隆起・侵食に着目し、日本列島に分布する山地を事例に、山地の動的な平衡状態を定量的に把握
- 既往情報を収集・整理し、全国の活断層を対象に活動開始年代を示した断層分布図を作成

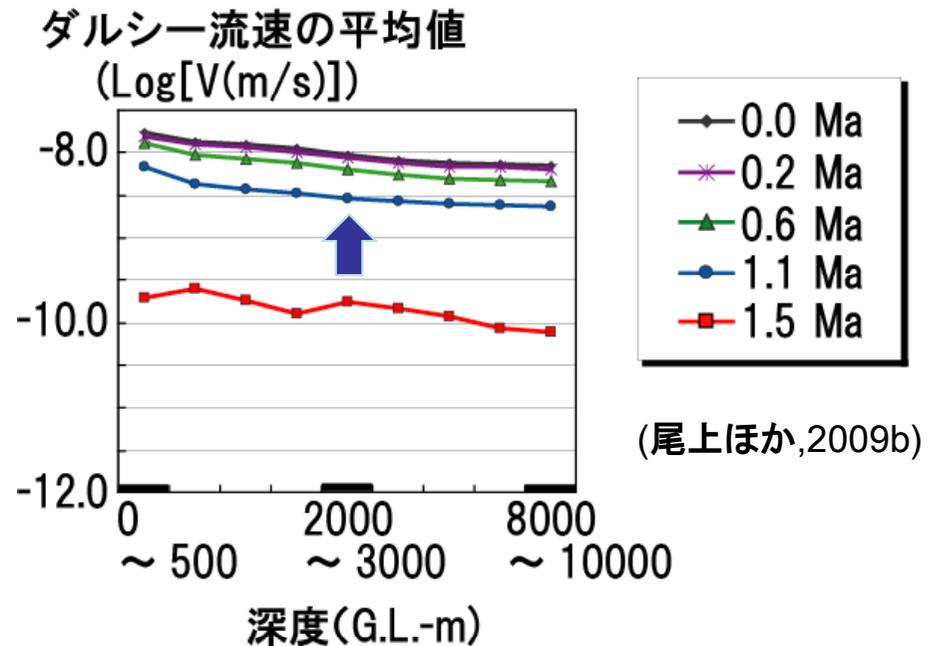
期待される成果

山地の動的平衡状態及び断層の活動開始時期に関する概括的な傾向

超長期における予測・評価手法に関する検討



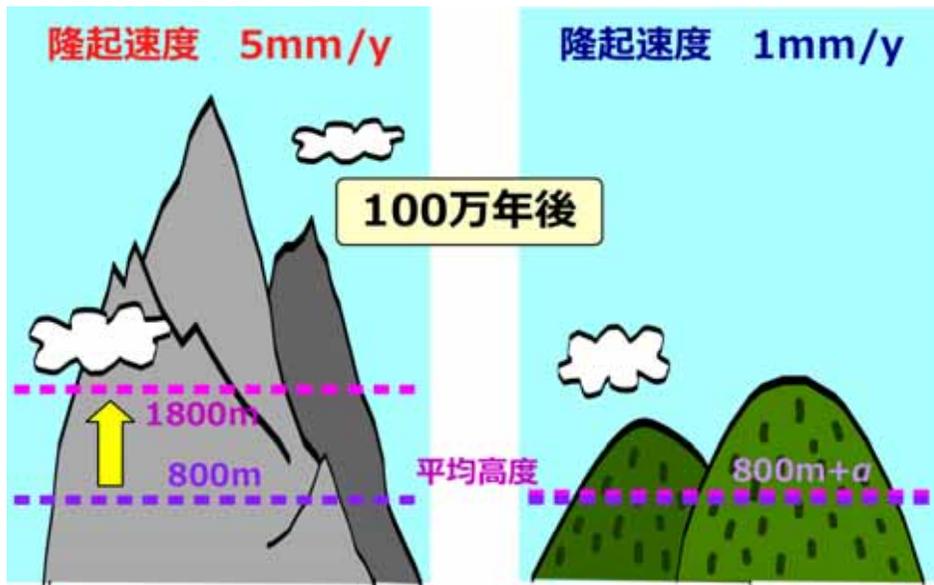
過去150万年間の地形・地質の復元
(伊勢湾～木曾山地までの領域)



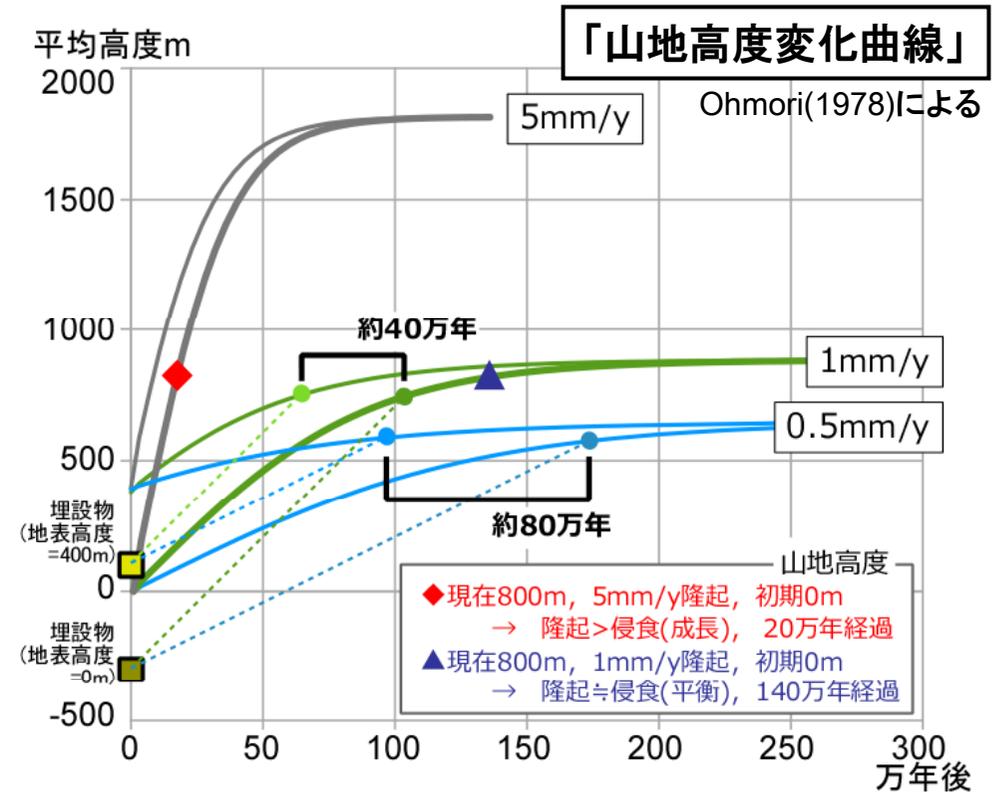
過去150万年間の地形変化に伴う
ダルシー流速の平均値の変化

- 数十万年の地形変化に伴う地下水流動特性の変動幅は僅か
- 山が形成されるような時間スケールにおいては、変動幅は2オーダー程度を示す
- 対象とする時間スケールによって、地下水流動特性の変動幅が大きく異なる

超長期における予測・評価手法に関する検討



隆起速度による
山地の高度変化の違い(模式図)

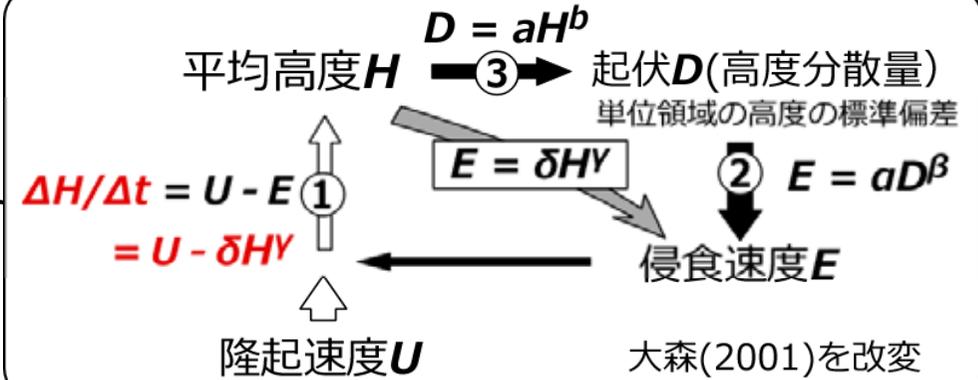


標高0m, 400mから等速で隆起した場合の
平均高度の経時変化 (Ohmori, 1978を改変)

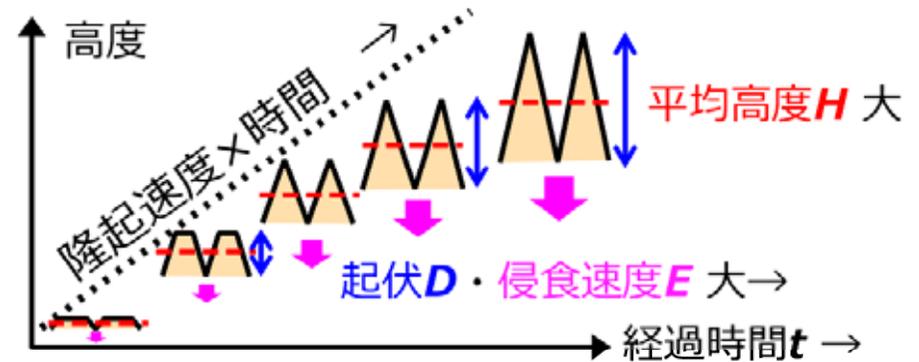
- Ohmori(1978)の提示したモデル: 山地が隆起により高度を増すと、起伏の増大に伴い侵食速度も増加し、やがて隆起速度と等しくなる (“平衡高度”への到達)
- 山地の高度変化は、地下水流動だけでなく埋設物の露出時期にも影響を及ぼす

超長期における予測・評価手法に関する検討

- 山地の平均高度 H の変化速度
 $\Delta H / \Delta t = \text{隆起速度 } U - \text{侵食速度 } E \dots \textcircled{1}$
- 山地の侵食速度 E は起伏 D の関数
 $E = \alpha D^\beta \dots \textcircled{2}$
- 山地の起伏 D は平均高度 H の関数
 $D = aH^b \dots \textcircled{3}$
 $\therefore \Delta H / \Delta t = U - \delta H^\gamma \dots \textcircled{1}'$



- 1) $\textcircled{2}$, $\textcircled{3}$ 式のべき係数を求める
 (山地高度 H に応じて侵食速度 E が決まる)
 → 別に求めた隆起速度 U との関係
 (動的平衡状態) について評価できる
- 2) $\textcircled{1}'$ 式に基づく「山地高度変化曲線」により,
 隆起開始からの経過時間 t を算出
 (初期高度 0m , 等速隆起と仮定)

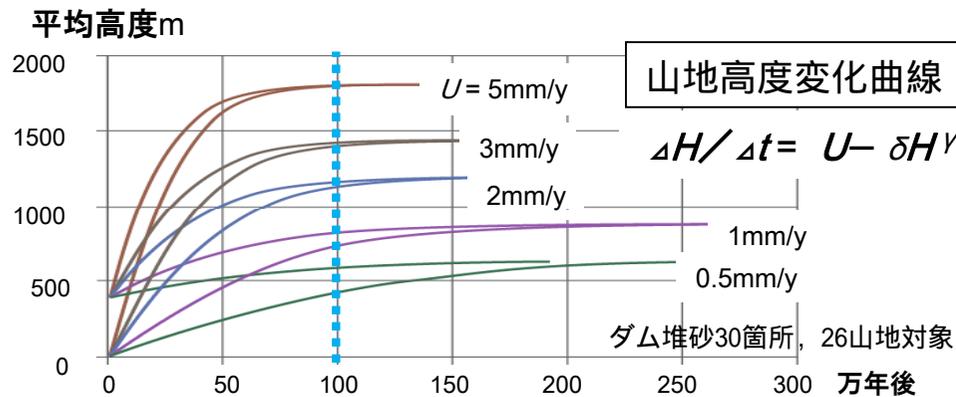
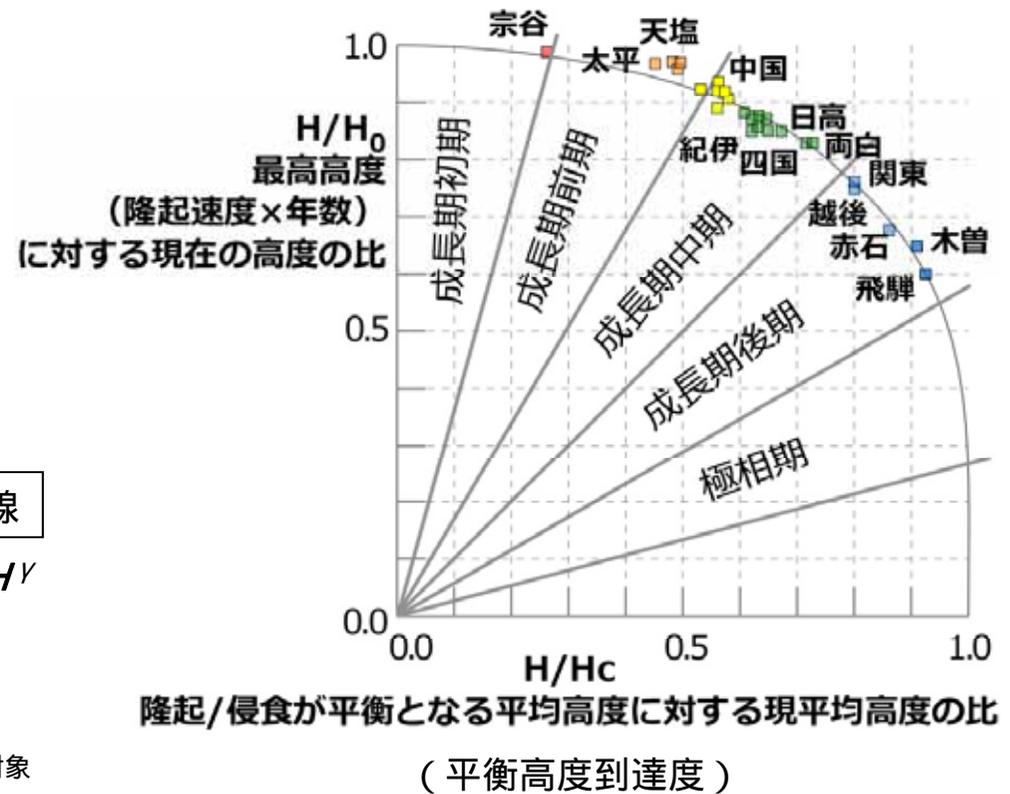
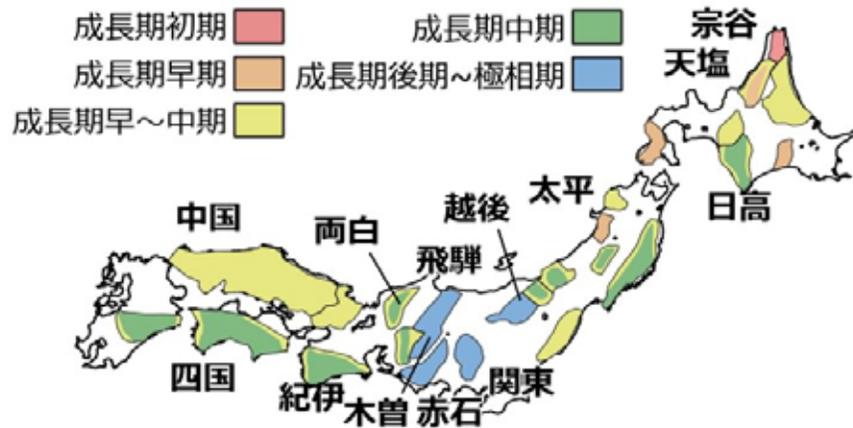


Ohmori (1978)のモデルの詳細

「山地高度変化曲線」の表す山地発達(模式図)

- 山地高度－高度分散量－侵食速度のべき関数的関係から,
 山地の隆起・侵食における平衡状態と, 隆起開始からの経過時間 t を概括的に求められる

超長期における予測・評価手法に関する検討



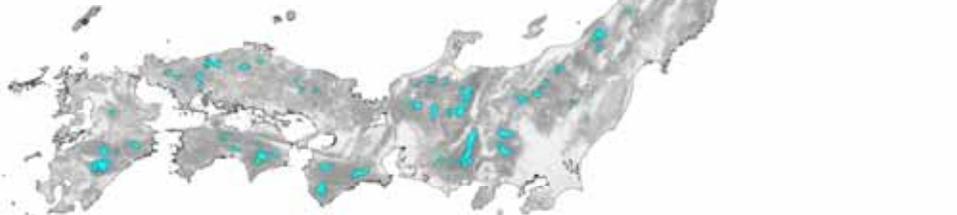
隆起開始時期 = 100万年前と仮定した場合の山地の発達段階区分(Ohmori, 1978)

- Ohmori(1978)の予察的検討以降, 隆起速度, 侵食量に関するデータ及びDEMの整備進む
 → 隆起速度を用いて, 山地ごとに隆起・侵食における平衡状態や隆起開始時期の検討が可能

超長期における予測・評価手法に関する検討

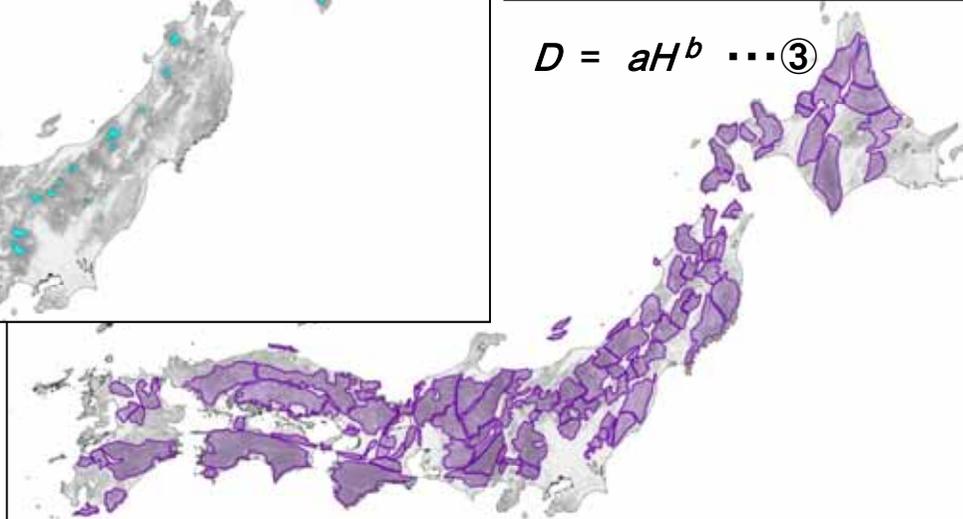
対象ダム流域(83箇所)
計測期間: ~2003年まで

$$E = aD^{\beta} \dots \textcircled{2}$$

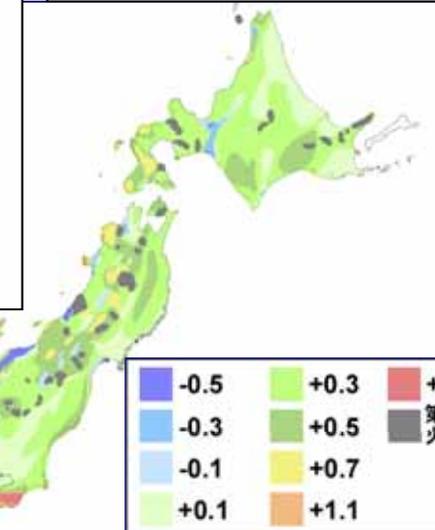


対象山地 (107箇所)

$$D = aH^b \dots \textcircled{3}$$



隆起速度 U (mm/y)
※10万年程度の期間
段丘等に基づく

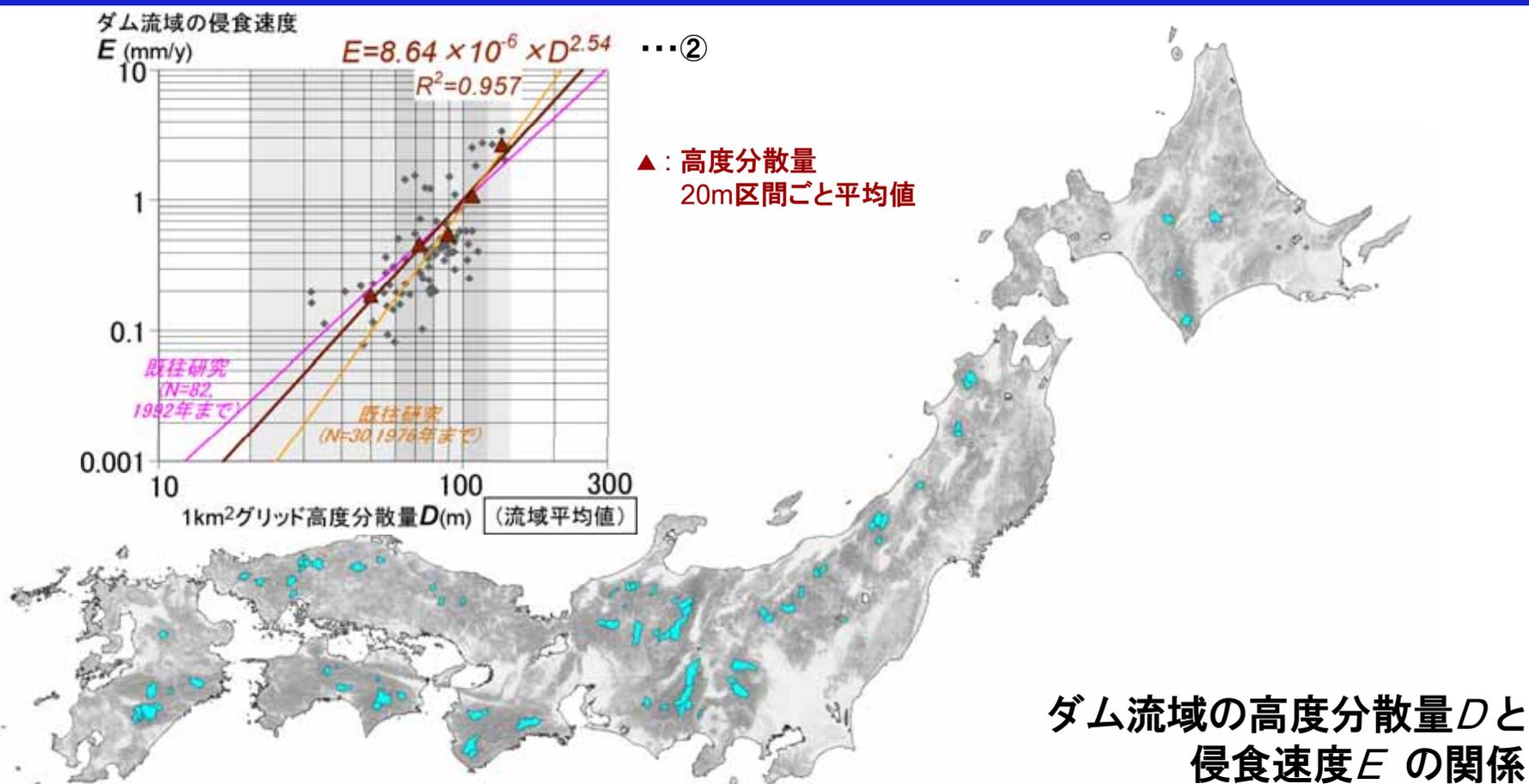


※標高データは国土地理院の「基盤地図情報10mDEM」を使用

本研究での解析対象ダムと山地,
および与えた隆起速度データ

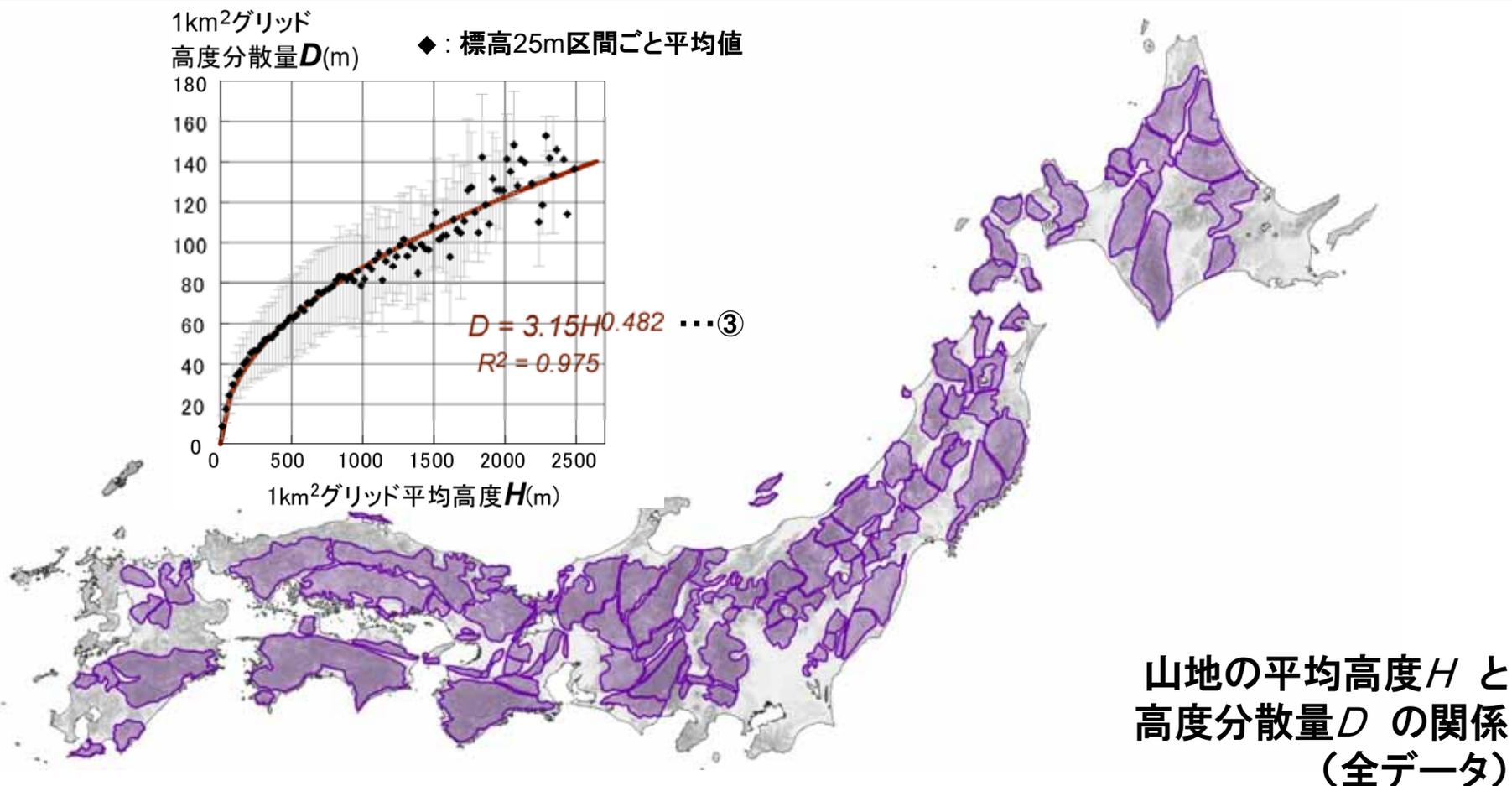
- ダム流域83箇所, 山地107箇所を対象 (第四紀火山の範囲を省く)
- 隆起速度は, 藤原ほか(2004)に西南日本のデータを追加

超長期における予測・評価手法に関する検討



- ダム(83箇所)の堆砂速度より求めた流域の侵食速度 E と、各流域の1km²高度分散量 D (流域平均値)との関係をべき関数により回帰

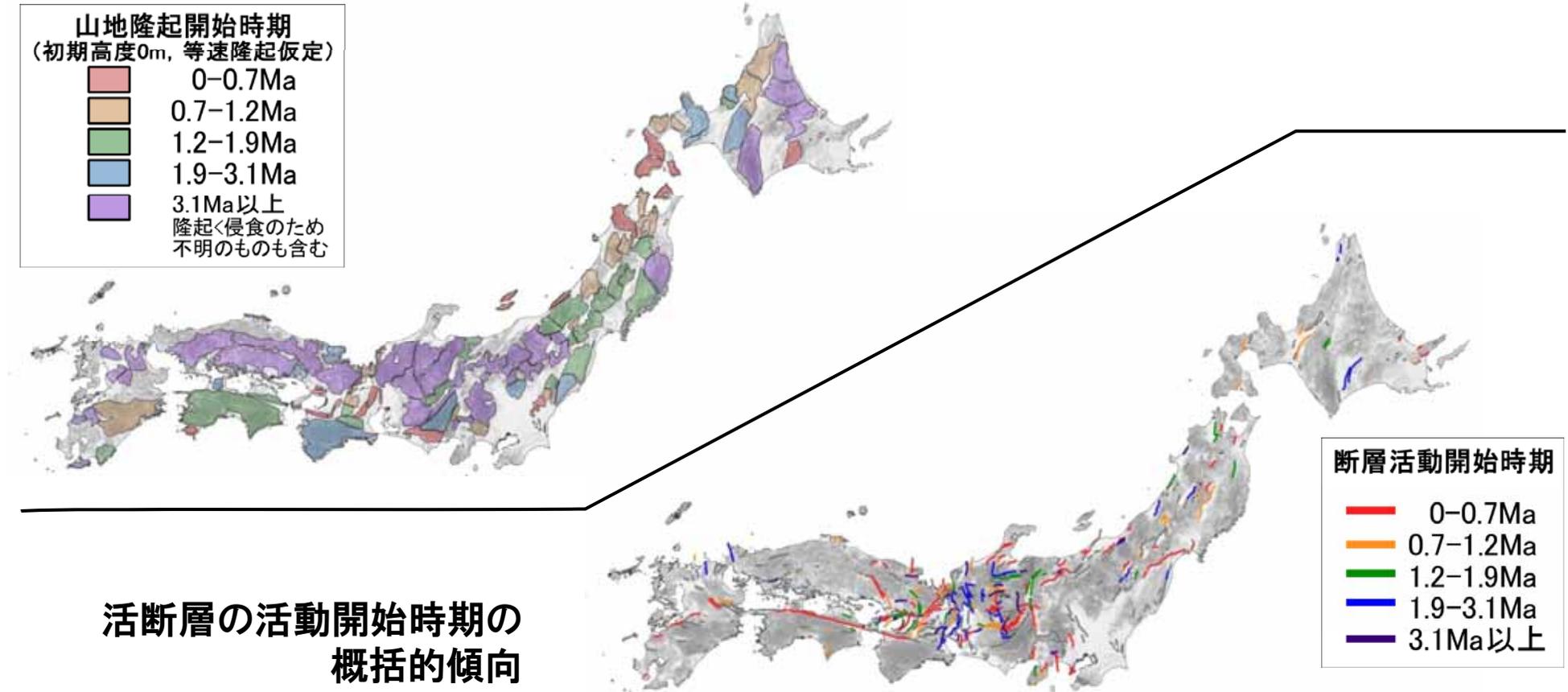
超長期における予測・評価手法に関する検討



- 対象山地全体における1km²高度分散量 D と平均高度 H との相関(べき関数)は高いが、 H に対する D のばらつきも大きい →地質などの寄与が考えられる

超長期における予測・評価手法に関する検討

山地隆起開始時期(概括的傾向)



- 山地隆起・断層活動開始時期が調和的: 近畿三角帯, 木曾山地など
(相対的に新しい時期の活動を示す) → 山地の隆起と断層活動との関連が推察される

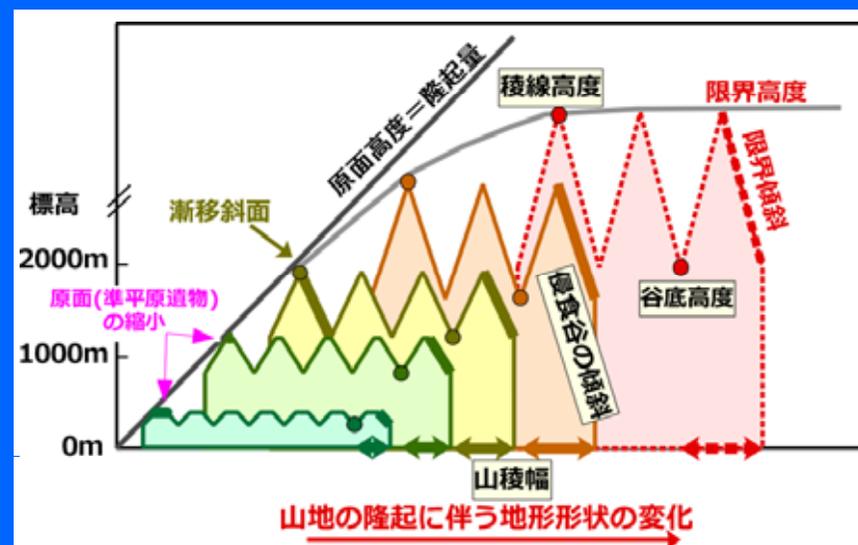
超長期における予測・評価手法に関する検討

まとめ

- 山地高度—高度分散量—侵食速度の関係に基づいて、既知の隆起速度を与えた場合の山地の隆起・侵食の動的平衡状態について検討し隆起開始時期の概括的な分布図を提示
- 活断層の開始時期の概括的な分布図を作成

平成23年度実施計画(案)

- 地質を考慮した山地の発達段階の分布図の作成
- 地形形状に基づく山地の発達段階の検討(帰納的手法:右図)
- 活断層の開始時期推定のための、現地における調査手法の整備



山地発達に伴う地形形状の変化(模式図)
(Sugai & Ohmori 1999を改変)