



Japan Atomic Energy Agency

未来へげんき
To the Future / JAEA

令和3年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

放射性廃棄物の中深度処分規制支援に係る研究 —将来の地形変化・地下水流動に対する影響評価—

令和3年11月2日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 安全研究センター
廃棄物・環境安全研究グループ

高井 静霞

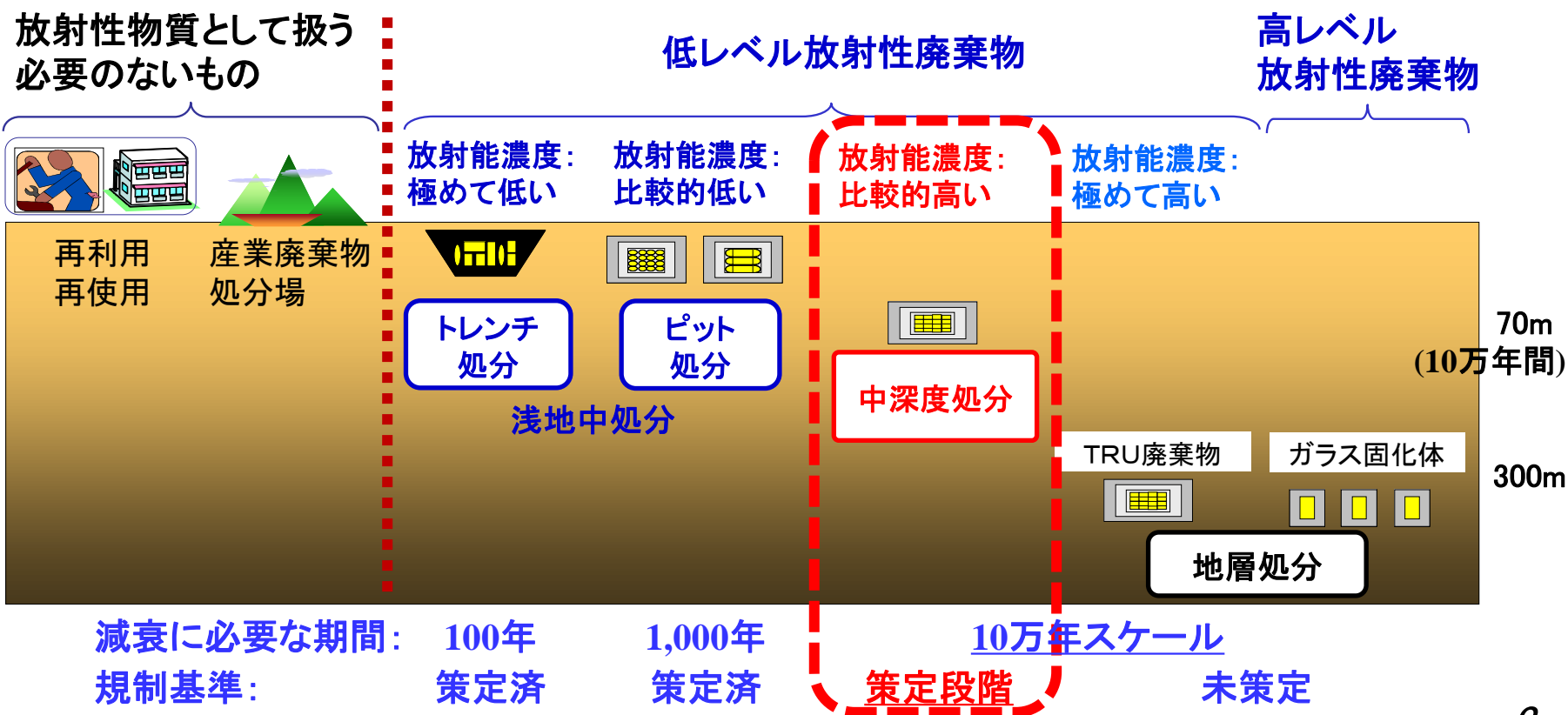
本研究は原子力規制庁から受託した「平成31年度廃棄物埋設における核種移行に係る性能評価に関する研究事業」、「令和2年度廃棄物埋設における性能評価に関する研究事業」の成果を含む。

発表の流れ

- 放射性廃棄物処分と安全評価
(中深度処分)
- 背景・目的
- 方法
- 結果
- まとめ

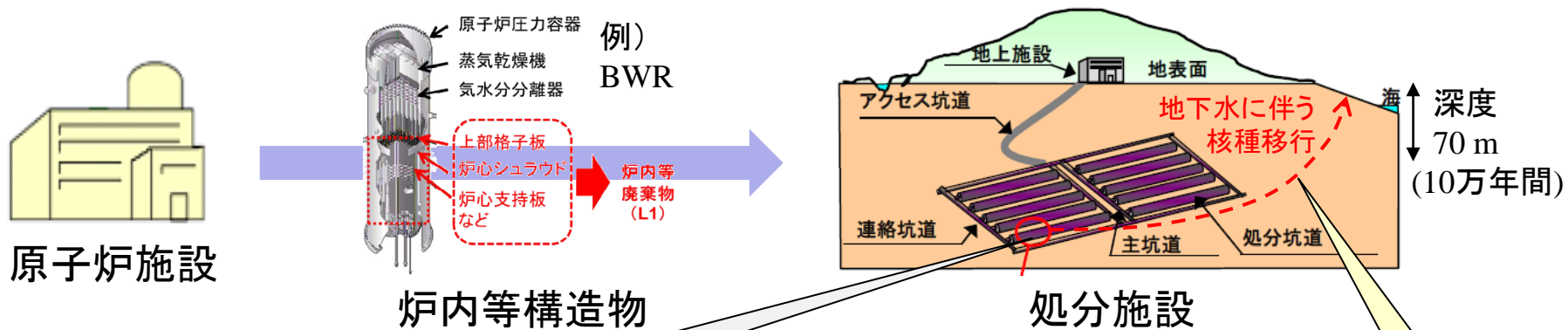
放射性廃棄物の処分

- 原子炉施設で発生した廃棄物：放射能濃度・特徴別に区分
- 埋設処分：減衰には長期を要する（地上での管理の負担）
 - ・ 区分に応じた適切な工学的対策・埋設深度

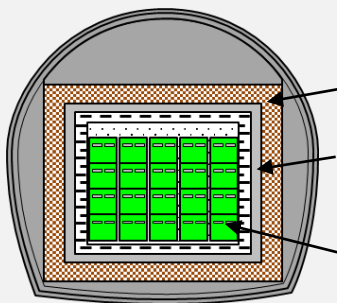


中深度処分の概要

- 対象: 炉内等構造物 (放射能濃度: 比較的高い)
- 処分システム: 人工バリア・天然バリア (放射性物質の隔離・閉じ込め)
- 立地条件 (サイト選定): 断層・火山 / 侵食 (深度: 70mを確保) / 資源



人工バリア

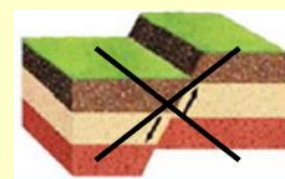
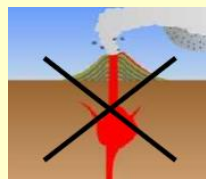


廃棄体からの溶出・移行・拡散を抑制

低透水性: ベントナイト系
低拡散層: セメント系
溶出抑制:
廃棄体 (鋼製容器)

天然バリア (岩盤)

地表からの隔離・放射性物質の移行抑制
(避けるべき自然事象: 断層 / 火山 / 侵食)



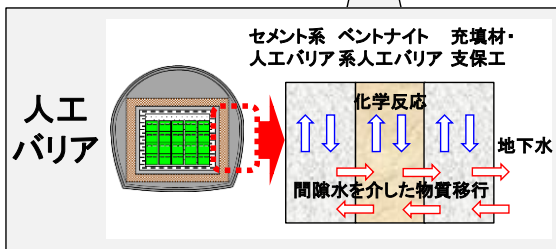
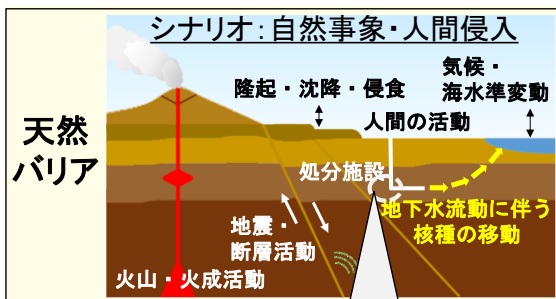
中深度処分－閉鎖後長期の安全性

- 処分システムの妥当性判断 <規制側>
 - ① 設計プロセスの妥当性 (埋設地の配置・人工バリアの設計)
 - ② 被ばく線量との比較 (自然事象: 将来の不確かさ)
- 評価期間: 少なくとも10万年(放射能の減衰・自然事象の予測可能性)

処分システム

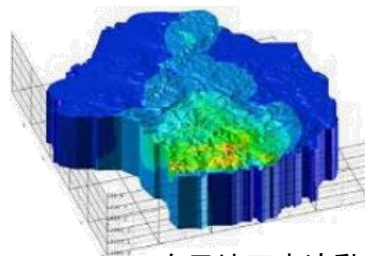
- 複数の設計案
- 複数のシナリオ

将来何が
起こるか？



状態設定／性能評価

- 各バリアの機能 (離隔・閉じ込め)
- 初期状態／長期変遷 (熱, 地下水, 力学, 化学)



将来長期の現象把握

- ① 実験的検討, ② 理論的評価,
- ③ ナチュラルアナログ

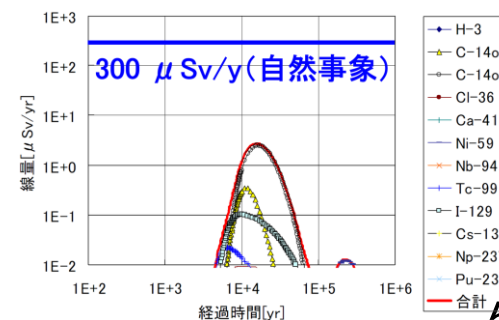
妥当性の判断

システムの
安全性

- 設計プロセスの妥当性
- 代表的個人の被ばく - 通常の状態(不確かさ)

複数案から設計を決定

- 厳しい状態(機能損失)



廃棄物・環境安全研究グループの取り組み

- 中深度処分の規制支援: 安全評価手法の確立・科学的知見の整備
 - 天然バリア: **隆起・侵食/海水準変動** (サイト選定で回避できない)

本研究の内容: **地形変化・地下水流動への影響評価**

天然バリア 地形変化/地下水流動評価技術

地形変化評価
気候・海水準変動 河川・斜面
地質の違い (侵食・堆積)

地域・地質データに基づく地形評価手法の整備・適用性確認

海域での土砂移動 地殻変動

地下水流動解析
地形変化・海水準変動に対応した地下水流動・塩分濃度の評価手法

不飽和・塩分濃度の影響

人工バリア構成材の性能評価技術

処分坑道 (人工バリア) 廃棄体容器

セメント系人工バリア	ベントナイト系人工バリア	充填材・支保工	掘削損傷領域 (EDZ)
セメント 化学反応 ↑ ↓ 間隙水 物質移行	ベントナイト 化学反応 ↑ ↓ 間隙水 物質移行	セメント 化学反応 ↑ ↓ 間隙水 物質移行	掘削損傷領域 (EDZ) 物質移行- 変質連成 評価手法

材料構造、鉱物反応、間隙水組成、物質移行(拡散)、透水性、核種存在形態、収着特性の評価技術

- ✓ 初期から長期にわたる材料の閉じ込め性、収着等に関する**性能評価手法**
- ✓ **ボーリング孔の閉鎖確認**に関する研究

核種移行・被ばく線量評価技術

人工バリアからの核種移行から生活環境中までの核種移行、被ばく線量に関する評価手法

帯水層 井戸 河川など

70m以深 堆積岩 or 結晶質岩 断層

処分施設

→ 地下水中の核種移行

発表の流れ

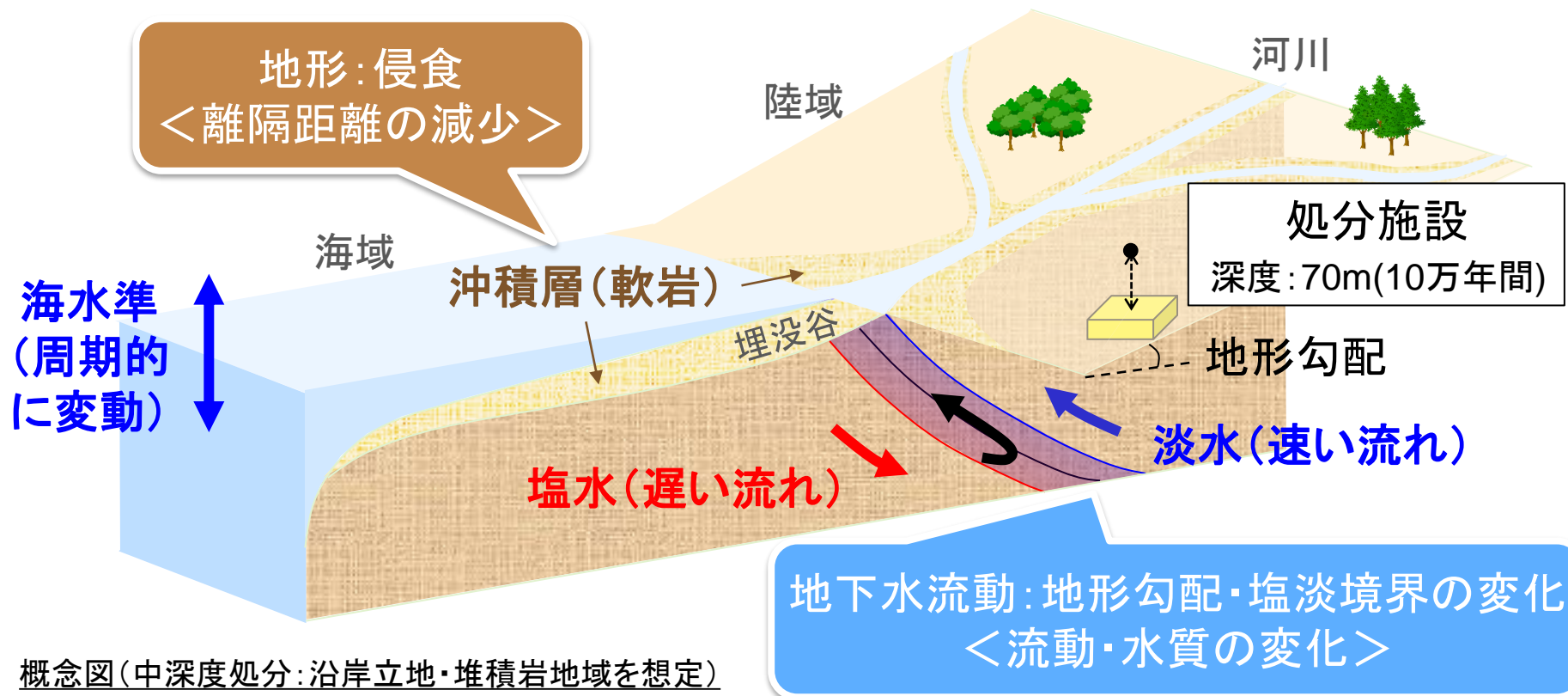
- 放射性廃棄物処分と安全評価
- **背景・目的**
- 方法
- 結果
- まとめ

隆起・侵食／海水準変動－評価の必要性

➤ 処分システムへの影響

- 1. 地形 < 離隔距離の減少 >
- 2. 地下水流動 < 流動・水質の変化 >

**規制: 妥当性判断が必要
(埋設地の配置)**



概念図(中深度処分: 沿岸立地・堆積岩地域を想定)
※地形・地質分布、塩淡境界は全て単純化して記載

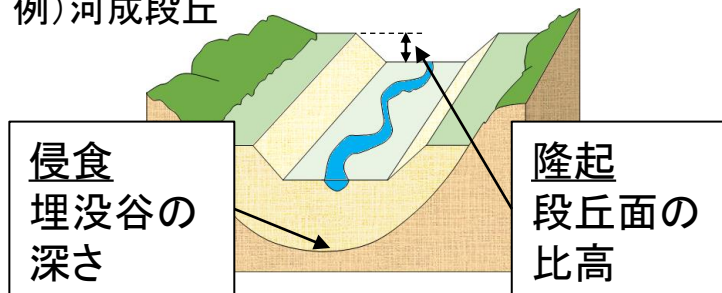
評価の考え方

最終目標：将来十万年スケールの隆起・侵食/海水準変動の影響評価

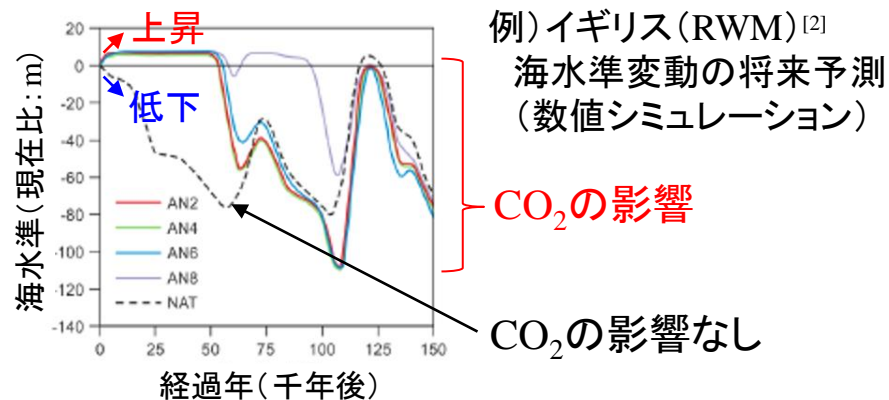
■ 将来をどう評価する？ → **過去の外挿が基本(サイト: 将来の予測可能性)**

- ✓ 侵食・堆積：
空間／時間的に一様でない
(地形・地質学的調査：限定的)

例) 河成段丘



- ✓ 将来の海水準変動：
不確かさ(温室効果ガスの影響等)

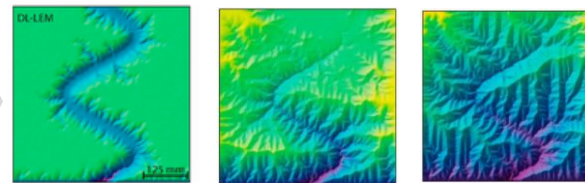


地形発達モデルに基づく
数値シミュレーション
(Landscape evolution models)

DEM(標高)

+

地形変遷
のモデル



地形の時間変化 [3]

先行研究の課題／本研究の目的

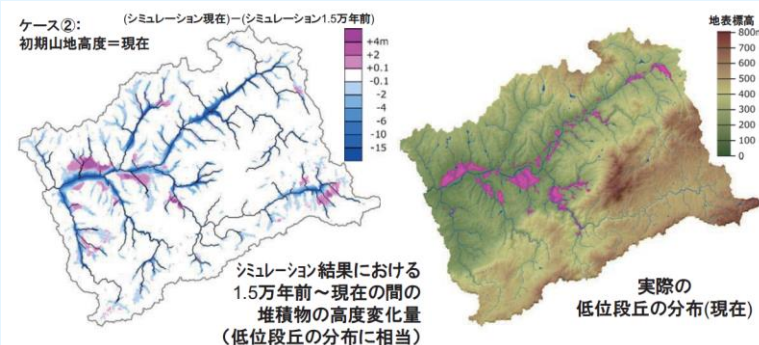
課題: 十万年スケールの沿岸域の地形変化評価手法が確立していない

地形学

- 過去数十年で開発された地形変化評価コード: 主に陸域を対象
- 沿岸域: 短期～完新世(約1万年前)以降の堆積を対象

放射性 廃棄物 処分 (検討例少)

- スウェーデン(SKB): 堆積厚の評価 ⇔ 国内の海域: 急峻な地形多
→ 侵食の考慮が必要
- 日本(JAEA):
 - ・ 東濃(山地)での検討
 ⇔ 海域: 主に2次元(縦断形)
→ 3次元的な評価が必要



目的

- 将来十万年スケールの地形変化評価の方法論の構築(実地域での適用)
- 海水準変動の不確かさに伴う将来の地形変化・地下水流動への影響評価

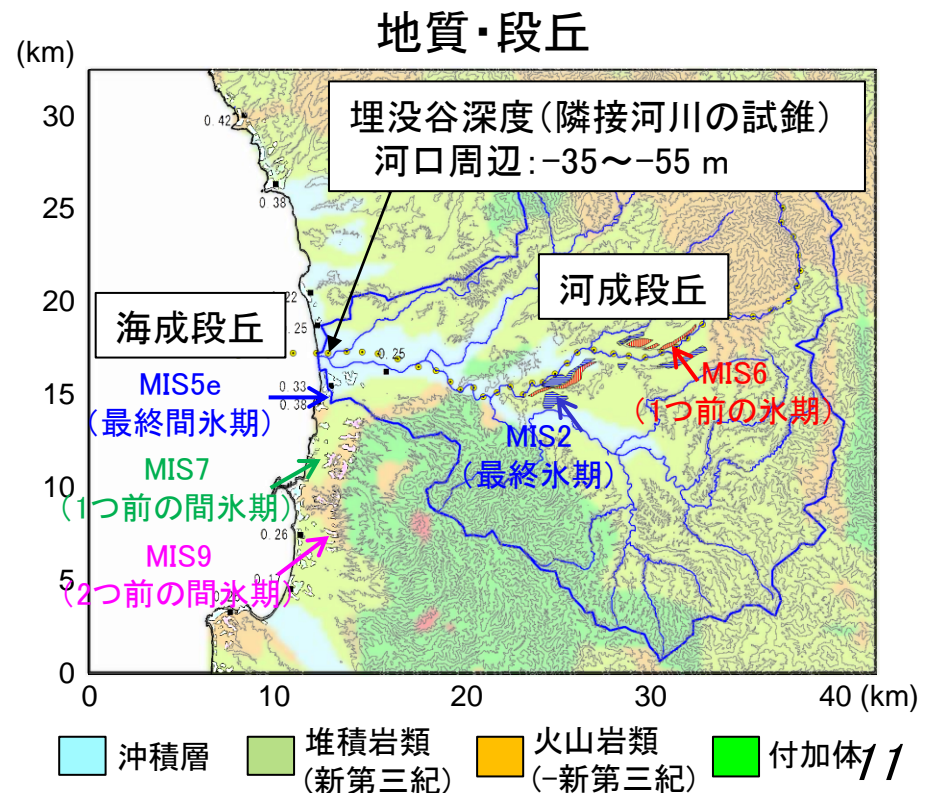
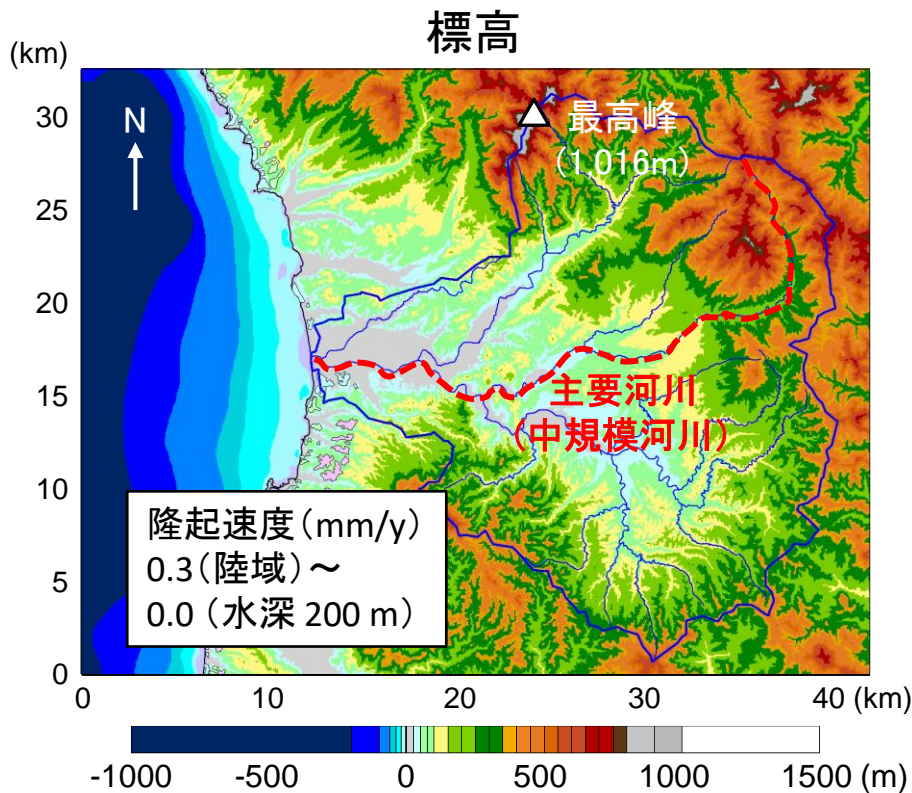
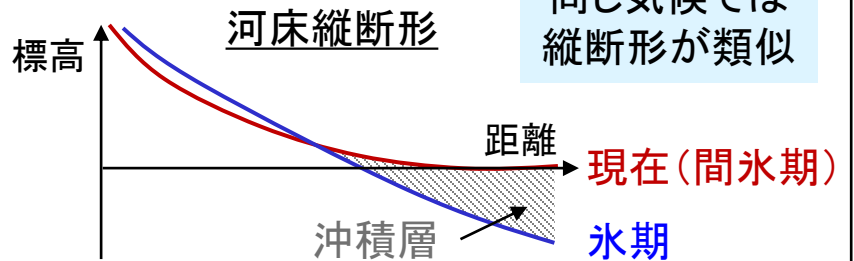
対象地域

➤ 国内の典型的な集水域(山地・河川・平野・海域)

➤ 特徴

- 主要河川: 平衡状態
- 埋没谷の形成
- 一様な地殻変動

平衡河川
同じ気候では
縦断形が類似



発表の流れ

- 放射性廃棄物処分と安全評価
- 背景・目的
- **方法**
- 結果
- まとめ

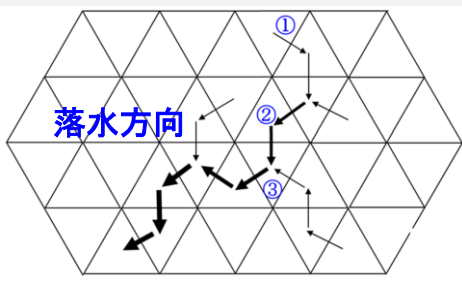
評価方法：地形変化

- JAEA・(現)JX金属探開による評価モデル^[4,5]
 - 対象期間：数万年スケール、東濃地域等での検証
- 海域の土砂移動：国内沿岸域の堆積構造を模擬するモデル
 - 再現性の向上・海水準変動に伴うデルタ構造の再現

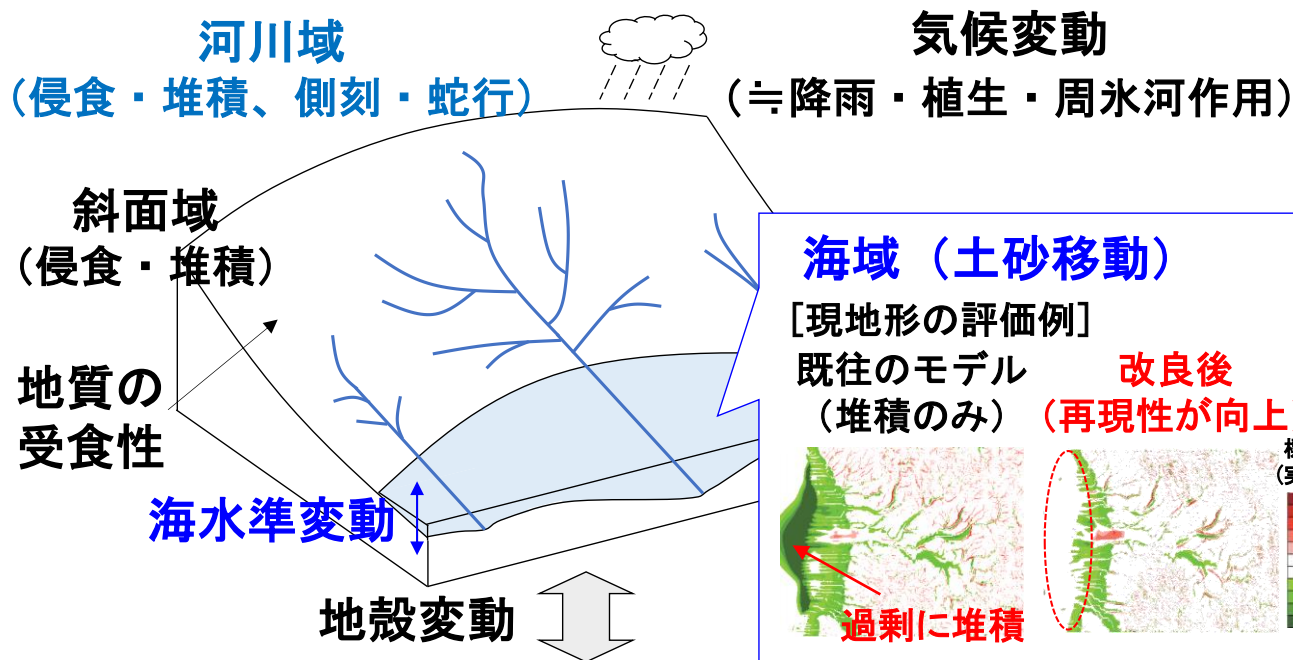
改良

概要

- ・ 領域：
河川／斜面／海域
- ・ 土砂移動量の計算
(体積が保存)
- ・ 流れ方向の算出



対象とする地形変遷プロセス

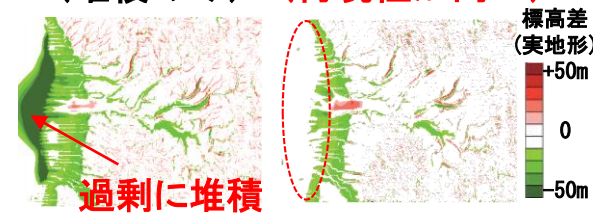


海域（土砂移動）

[現地形の評価例]

既往のモデル
(堆積のみ)

改良後
(再現性が向上)



[4] 三箇・安江, 地形, 29(1) (2008). [5] 地形変化シミュレーション方法, 特許第5422833号 (2014).

将来十万年スケールの評価の流れ

将来：過去～現在の地形変化を再現するパラメータセットの外挿
 → **過去約十万年(氷期・間氷期1サイクル)のキャリブレーション**

Step 1. 過去～現在の地形変化評価(キャリブレーション)

入力
↓
シミュレーション

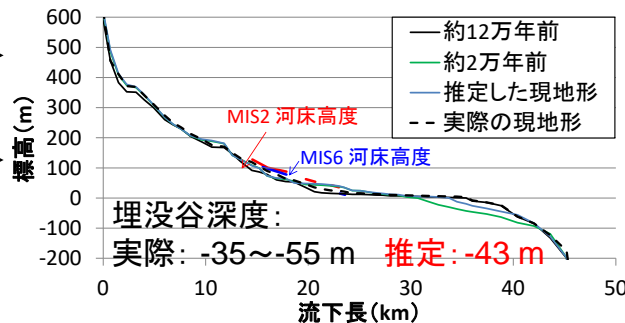
- マップデータ (初期地形、隆起量、沖積層厚 など): 調査に基づき設定
- パラメータ (侵食・堆積、気候の影響などを表す係数)



最適なパラメータ値を決定

過去～現在の地形変化の再現性確認

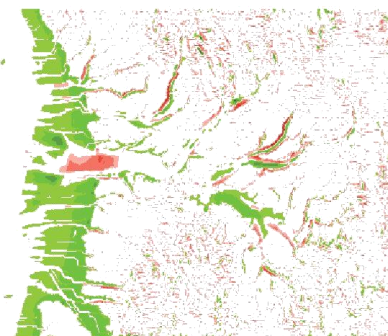
- 侵食速度 (期間・領域平均) → 実際: 0.09 mm/y **推定: 0.08 mm/y**
[流域全体の侵食の大きさ]
- 河床縦断形 → [平衡状態の再現]
- 埋没谷深度 → [気候・海水準変動の影響]
- 谷底侵食低地の幅 → [側刻・蛇行の大きさ]



実際の現地形との比較

標高差
(再現 - 実際)

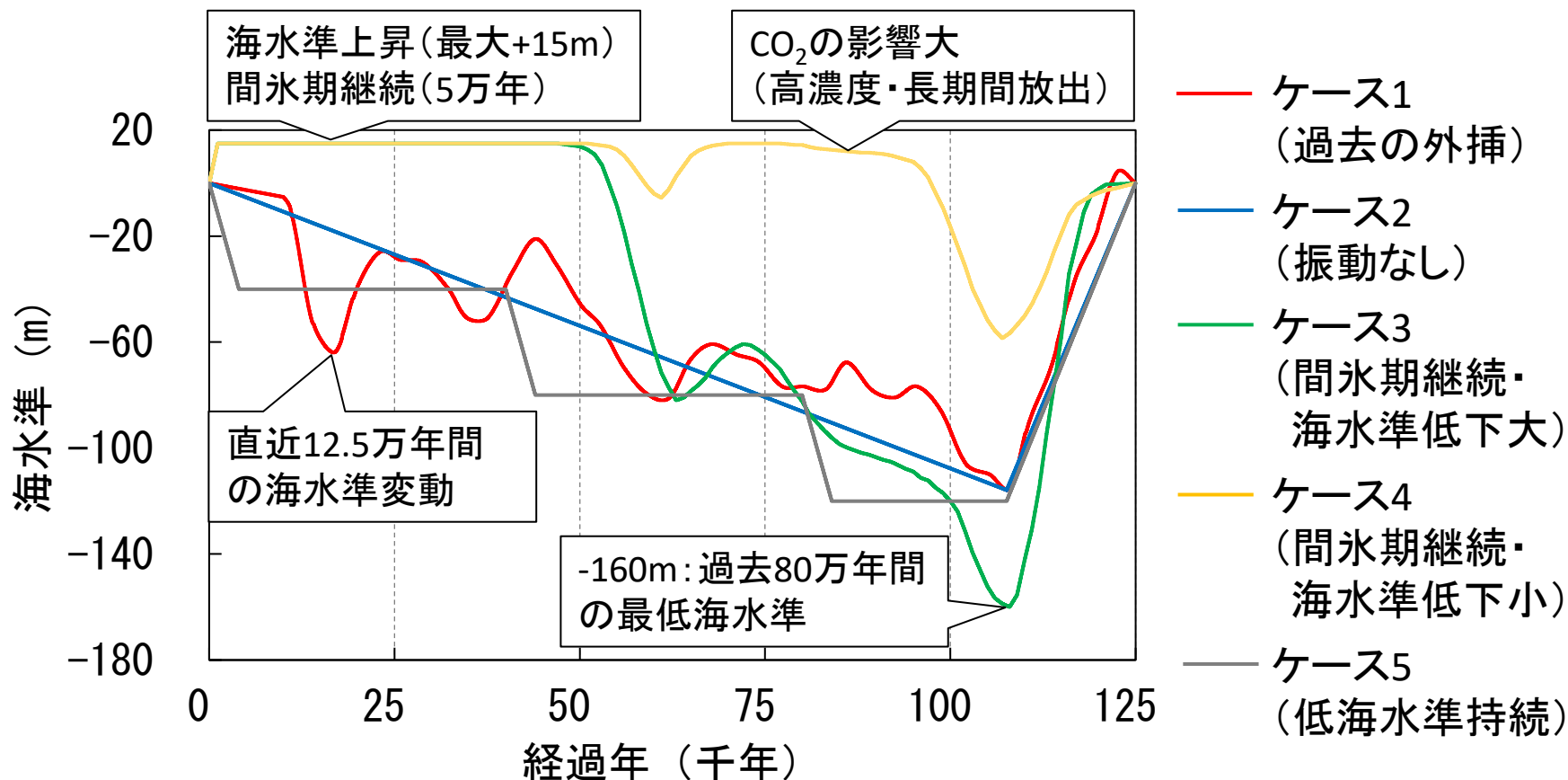
→ 86%が
±15m
以内



Step 2. 将来の地形変化評価・地下水流動解析(海水準変動の不確かさ)

将来の海水準変動

- 氷期－間氷期1サイクルを対象(12.5万年間)
- グローバルな海水準変動を5ケース設定^[6-11]
(過去の変動＋不確かさ: 振動／間氷期継続／低下の程度・持続)

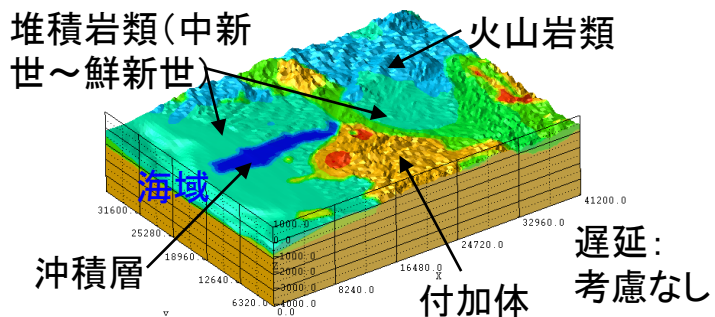


評価方法：地下水流動

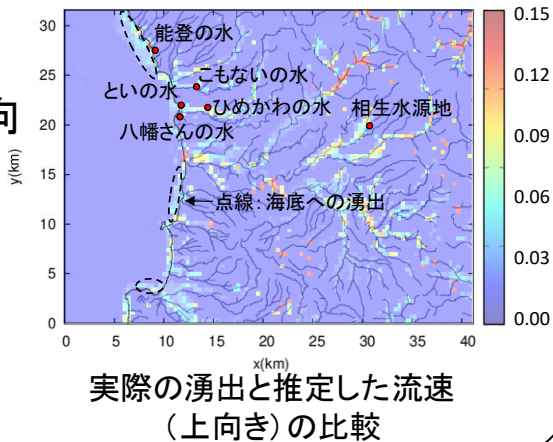
- 非定常な地形変化・海水準変動を考慮した地下水流動-塩分濃度解析
 - 従来考慮できなかった、3次元の地形・地質構造の非定常な変化を評価可能

改良

水理地質構造モデル



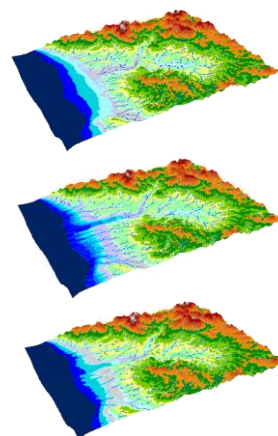
現在:
流出の傾向
を確認



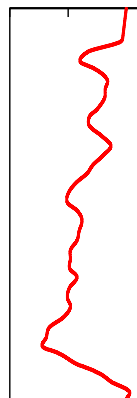
将来の地下水流動-塩分濃度解析

- 3D-SEEP (JAEA, 有限要素法・多孔質)
 - ✓ 不飽和・密度流を考慮
(非定常計算: 現在～12.5万年後)
 - ✓ 地形・海水準の変化を反映

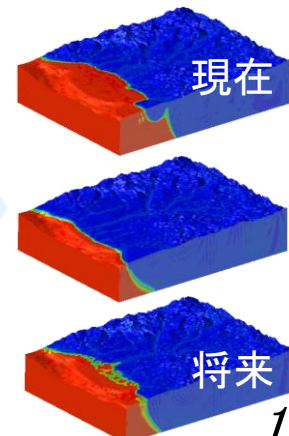
地形変化評価



海水準



地下水流動解析

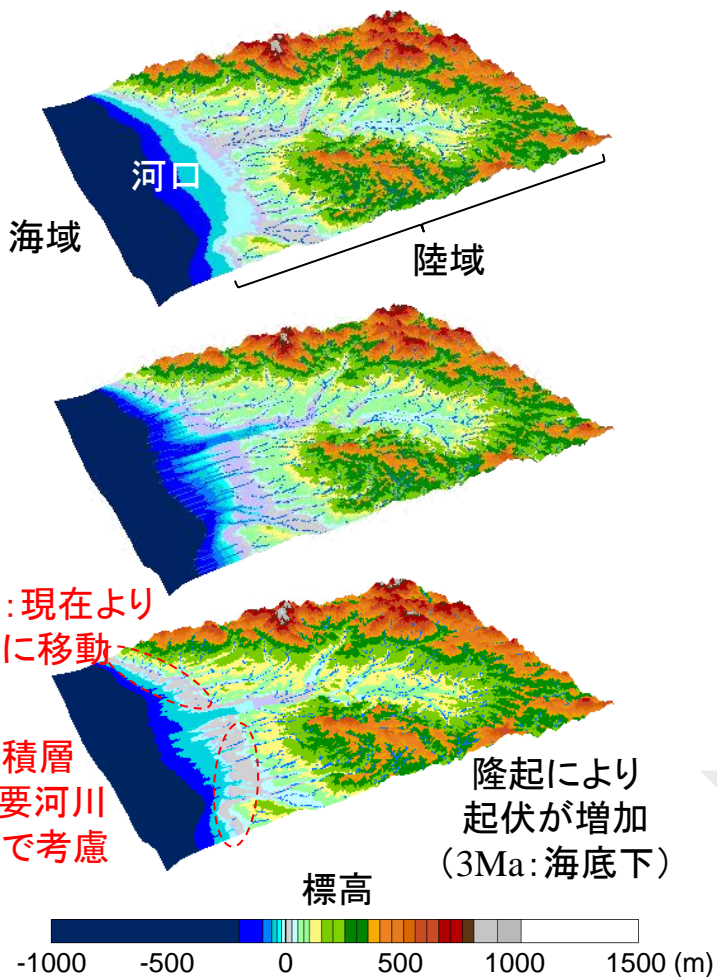
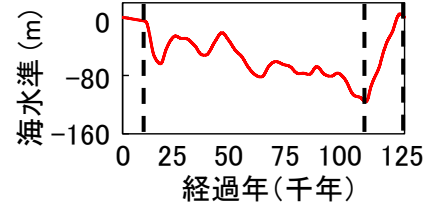


発表の流れ

- 放射性廃棄物処分と安全評価
- 背景・目的
- 方法
- 結果（将来の地形変化・地下水流動）
 - 過去と同じ海水準変動
 - 海水準変動の不確かさ
- まとめ

結果：過去と同じ海水準変動（地形変化）

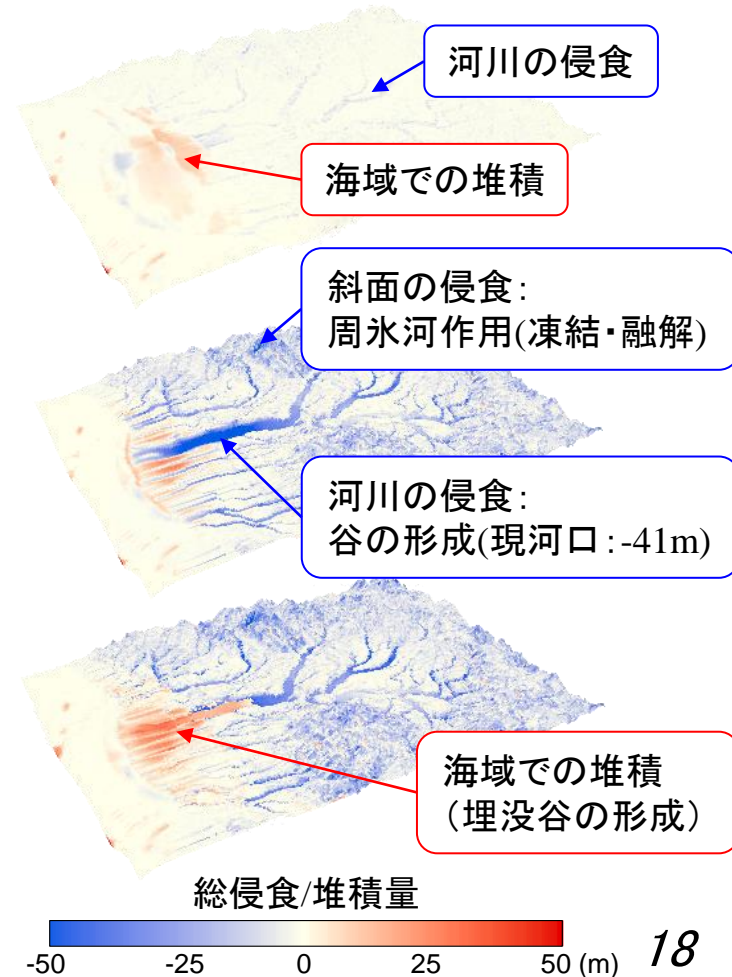
- 1サイクル後：過去～現在と同様の地形変化が生じる
（平衡河川（＝同気候で縦断形が類似）等の前提と一致）



1万年後

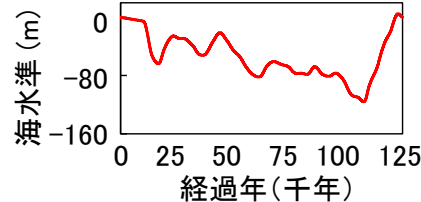
最寒冷期
(10.8万年後)

1サイクル後
(12.5万年後)



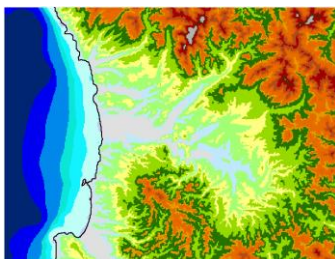
結果：過去と同じ海水準変動（地下水流動）

- 海水準の低下／上昇に伴う変化：既往知見と整合
（大陸棚での地下水湧出増加／塩淡水境界の陸側への移動）
- 1サイクル後：流れは必ずしも現在と一致しない

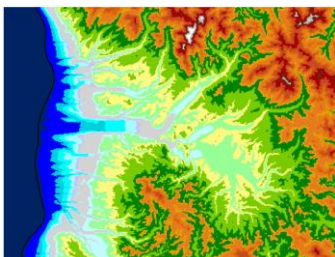


地形変化

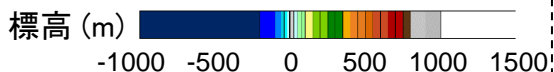
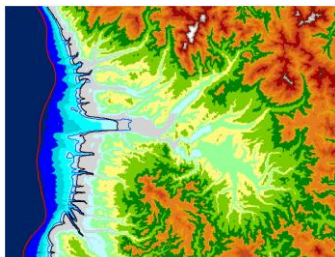
現在



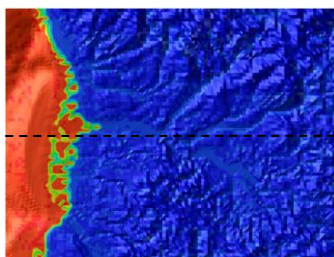
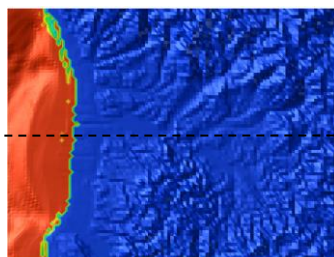
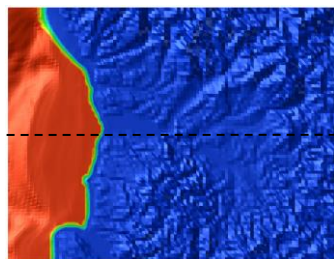
最寒冷期
(10.8万年後)



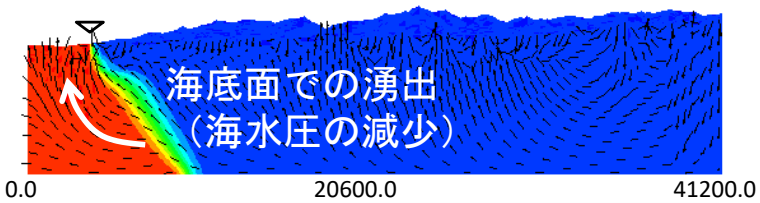
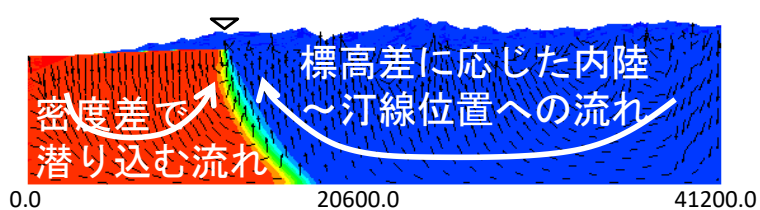
1サイクル後
(12.5万年後)



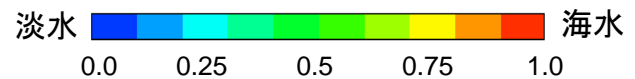
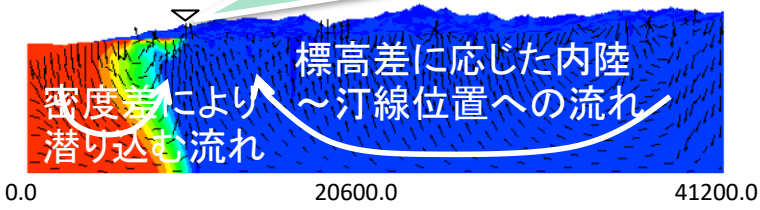
地下水流動



塩分濃度(規格化)



海進時の変化：密度差による流れで生じる
(海退時より変化に時間を要する)

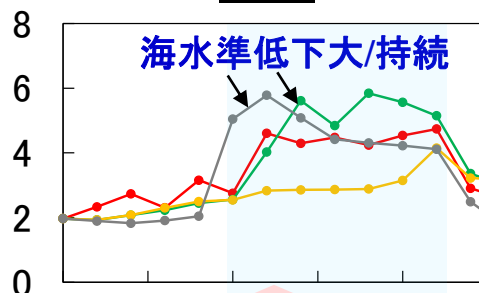


結果：将来の海水準変動の不確かさの影響

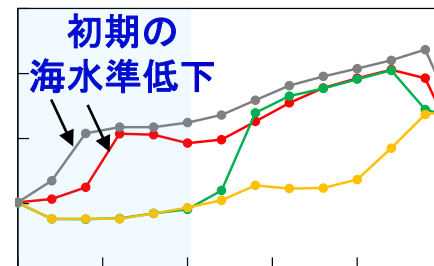


地形勾配
 (°)

海域

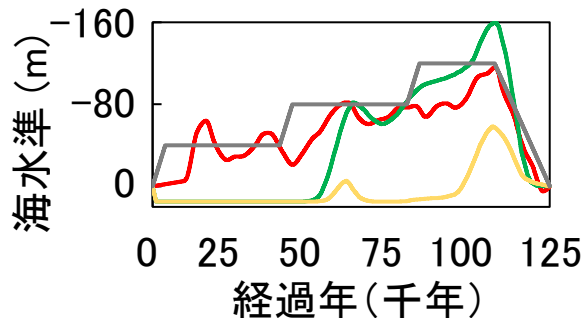


陸域



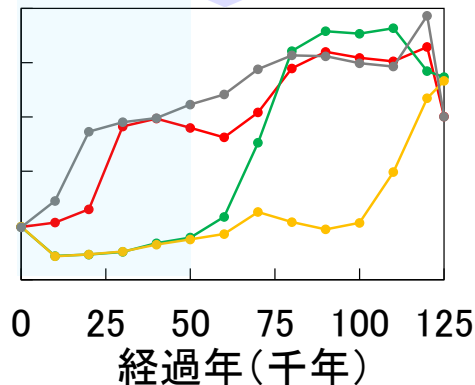
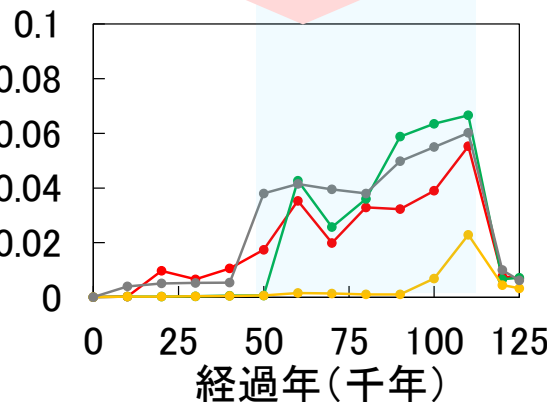
塩淡境界の移動

地形勾配の増加



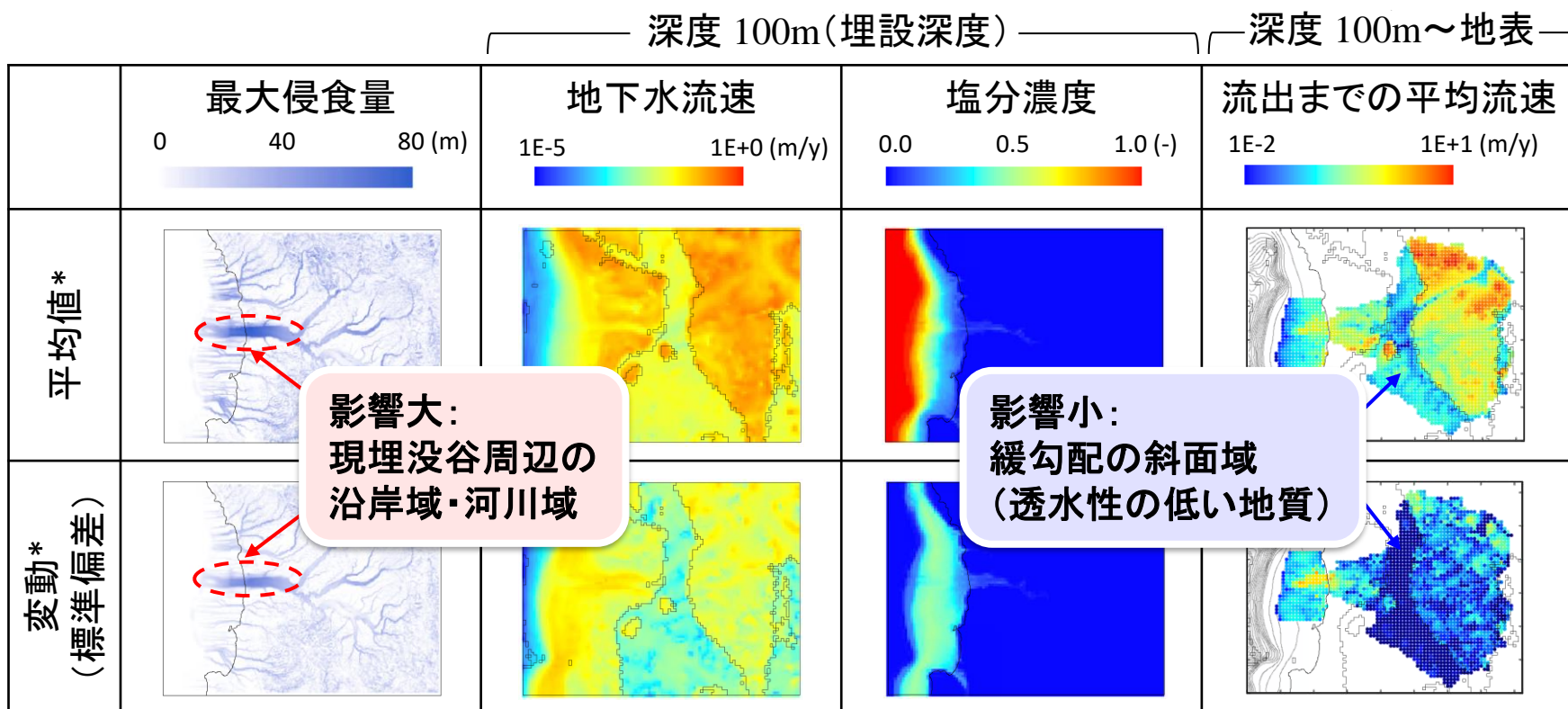
地下水
 流速
 (m/y)

*深度100m



- 地形勾配・地下水流速：海水準変動と連動して変化
 (侵食／堆積(海退／海進)、塩淡境界の変化)
- 海水準低下(時期／程度／持続期間)：地形勾配・地下水流速への影響大

結果：将来の海水準変動の不確かさの影響



*将来の海水準変動の全ケース(1~5)・1万年毎の統計値

➤ 将来の海水準変動の不確かさに伴う、最大侵食量・地下水流動場への影響を空間的に把握

→埋設地の配置の妥当性判断への活用の可能性
(地形(離隔距離の減少)／地下水流動(流動・水質の変化)への影響範囲)

発表の流れ

- 放射性廃棄物処分と安全評価
- 背景・目的
- 方法
- 結果
- まとめ

結論

- 将来の海水準変動の不確かさに伴う地形変化・地下水流動への影響評価手法を整備 **＜中深度処分規制支援＞**
 - －従来対応できなかった、沿岸域における十万年スケールの地形変化評価・非定常な地形変化を反映した3次元地下水流動解析が可能
- 国内の典型的な沿岸域に適用：
 - ・ 不確かさ：海水準の低下（時期・程度・持続）の影響大
 - ・ 離隔距離や流動場への影響を踏まえ、**審査において埋設地配置の妥当性判断へ活用できる見通しを得た**

【参考文献】

- [1] 日本原子力研究開発機構(JAEA), 平成31年度原子力規制庁委託成果報告書, 廃棄物埋設における核種移行に係る性能評価に関する研究 (2020).
- [2] 日本原子力研究開発機構(JAEA), 令和2年度原子力規制庁委託成果報告書, 廃棄物埋設における性能評価に関する研究 (2021).
- [3] 高井ほか, 将来の海水準変動の不確かさを考慮した長期的な地形変化評価, 2020秋の原子力学会.
- [4] 高井ほか, 将来長期の地形変化・海水準変動に伴う地下水流動への影響の解析的検討, 2020秋季地下水学会.

今後の展望

中深度処分：審査における妥当性判断のための技術基盤の構築

→ 地層処分(高レベル放射性廃棄物)への将来展開

地形変化・地下水流動変化の評価手法の高度化

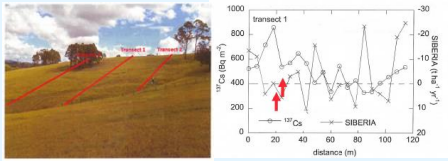
➤ 異なる特徴を持つ地域での適用性検討

→ **国内のサイト特性に適した手法整備・測定に基づく検証**

モデル

• 複数の検証例との整合性検討

例) ^{137}Cs
侵食速度
との比較
(十年スケール)

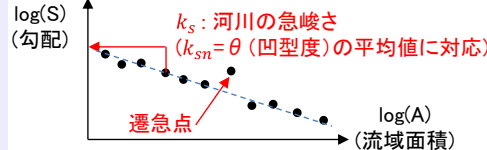


Hancock et al., ESPL, 46 (2021).

条件・パラメータ

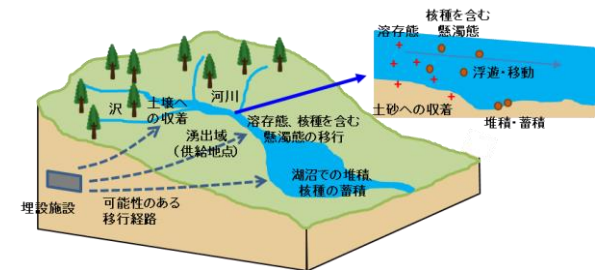
• 長期評価に適した設定

例) 河床縦断形解析



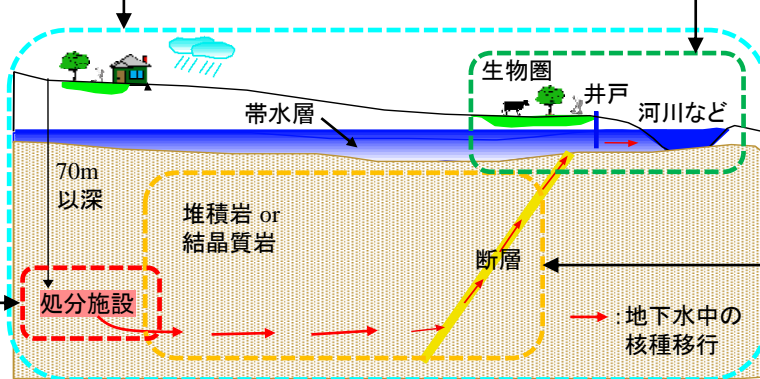
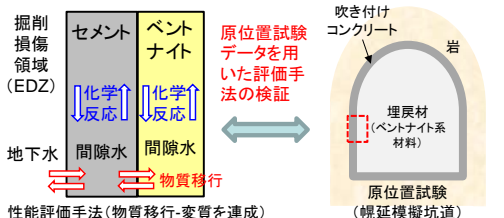
生活環境中の核種移行・被ばく線量評価手法の高度化

陸域・水域におけるフォールアウト核種の移行に係るフィールドデータ等を活用した生活環境中の核種移行・被ばく線量評価手法の高度化



人工バリア構成材の性能評価手法の高度化

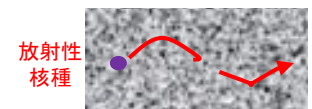
施工条件・方法が微視的構造及び物質移行へ与える影響や飽和度等が化学反応に与える影響を実験的・理論的に検討、モデルを高度化



地下水流動に伴う処分施設からの核種移行

天然バリアの核種の収着特性評価

環境条件を踏まえた岩石等への収着分配係数の空間的不確かさの評価



地表までの移行経路における

- 岩石構成鉱物種
- 地下水中の共存イオン等の影響

ご清聴ありがとうございました。