

永久凍土大規模融解による 温室効果ガス放出量の 現状評価と将来予測

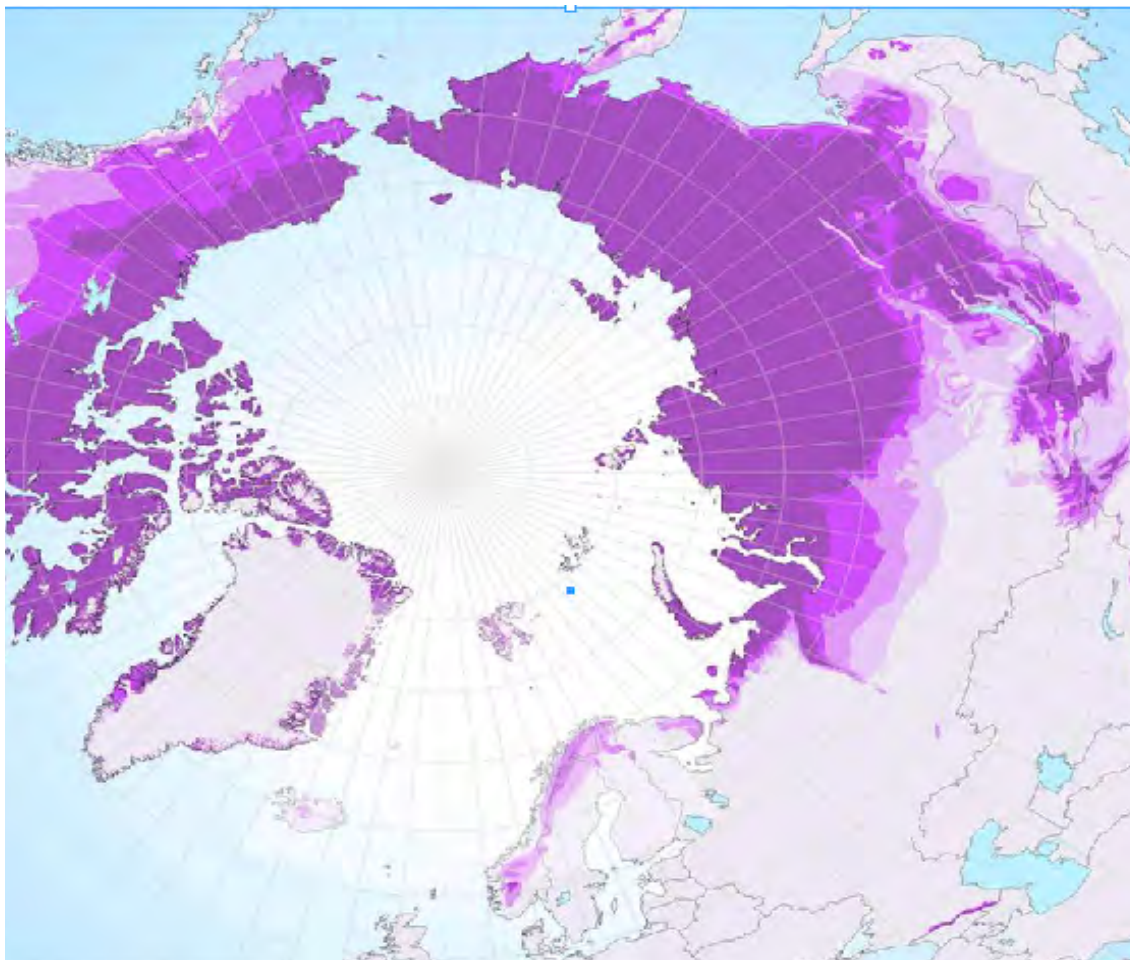
齊藤和之(PI, サブ1) 海洋研究開発機構
大野浩(北見工大, サブ2), 横畠徳太(国立環境研, サブ3)

岩花剛(アラスカ大学, サブ1), 町屋広和(海洋機構, サブ1)

H28-H30 累積予算額: 115,363,000円

シベリア レナ川右岸
伐採によって引き起こされた凍土融解による不均一な地面陥没

永久凍土と地球温暖化

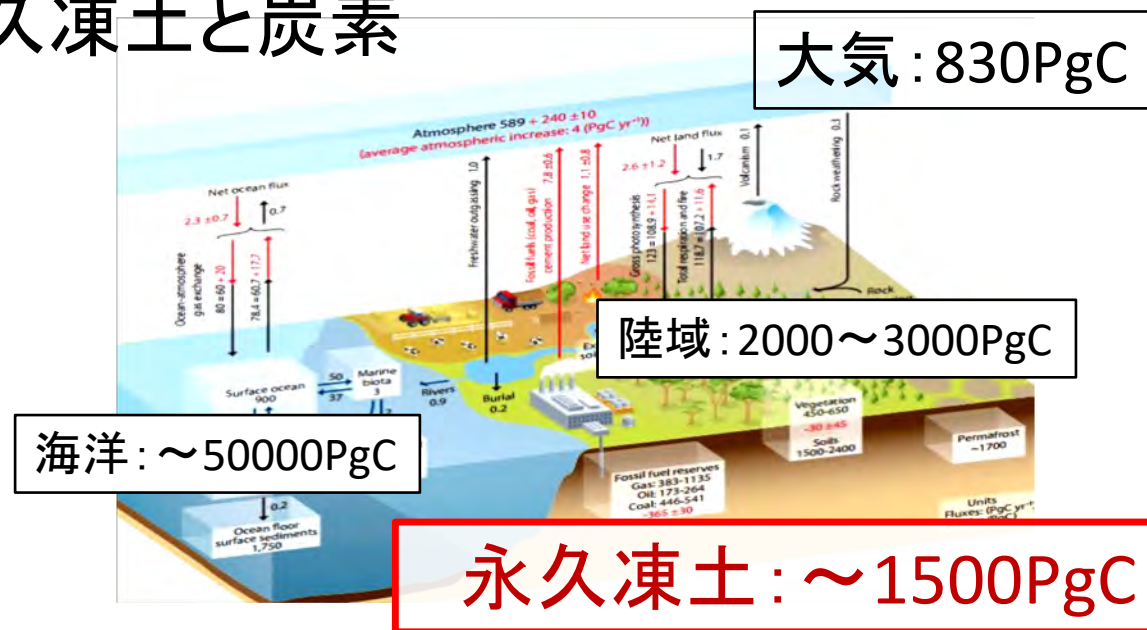


連続永久凍土 (90-100%)
不連続永久凍土 (35-90%)
散在永久凍土 (10-35%)
点在永久凍土 (0-10%)

温暖化の影響

- ✓ 凍土層の温度上昇
- ✓ 活動層(夏に季節的に融ける土壌表層)の深化
- ✓ 生物活動の活発化
- ✓ エドマ(高含水永久凍土)の融解

永久凍土と炭素



永久凍土融解による温室効果ガス放出

IPCC AR/SR等：

地球の炭素収支や将来の気候予測における大きな不確定要素

永久凍土融解による
GHG 放出の将来予測

3

脆弱性分布・現状評価
1b

実地調査

1a

2

エドマ(高含氷永久凍土)の融解

Direct release
(一次放出)

氷中捕捉メタン・CO₂の直接放出

Secondary release
(二次放出)

凍結堆積有機炭素の暴露
新規分解による生成・放出



本研究の対象「大規模」融解

[観測・モデル]

実測・理解ともに世界で限定的

- 局所・急速
- 地盤陥没・侵食
- 不可逆

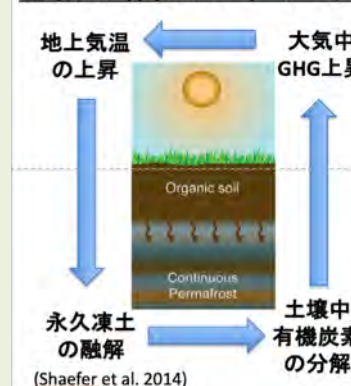
IPCC評価への組込は不十分

熱伝導による地温の上昇・活動層深化

Gradual release
(広域放出)

土壌有機炭素の生物分解
温室効果ガスの生成・放出

温暖化に伴う正のフィードバック



[観測・モデル]

これまでの蓄積

- 広域・緩慢
- 活動層深化
- 可逆的

従来のIPCC評価に組込済

本研究課題の目的・構成 3つのサブテーマ

研究開発目的:

地下氷と有機炭素を大量に含む永久凍土が広く分布するアラスカと北東シベリアを対象に、衛星観測と現地調査さらに気候モデルを組み合わせて永久凍土融解による温室効果ガス放出量の現状評価と将来予測を行う

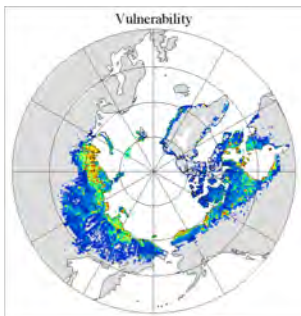
サブテーマ1:

永久凍土大規模融解のメカニズムと脆弱性の現状評価
(海洋研究開発機構: 斉藤和之)

1a: エドマ融解のメカニズムの評価
擾乱(火災)に起因する大規模融解
沈降速度・空間規模(測量, 衛星)



1b: 環北極域での脆弱性分布の評価
地下氷・土壌炭素収支の数値モデル開発・検証
過去12万年(最終間氷期以来)の蓄積
現気候下での分布の把握



サブテーマ2:

巨大地下氷体および凍土堆積物中の有機炭素量の把握
(北見工業大: 大野浩)

地下氷・堆積物の現地採取
水中メタン濃度実測・分析



サブテーマ3:

凍土動態を考慮した全球陸域統合モデルによる将来予測(国立環境研究所: 横畠徳太)

広域陸面過程・炭素収支モデルの開発・改良
将来の放出予測
筋道の違いの相対的寄与や影響の評価

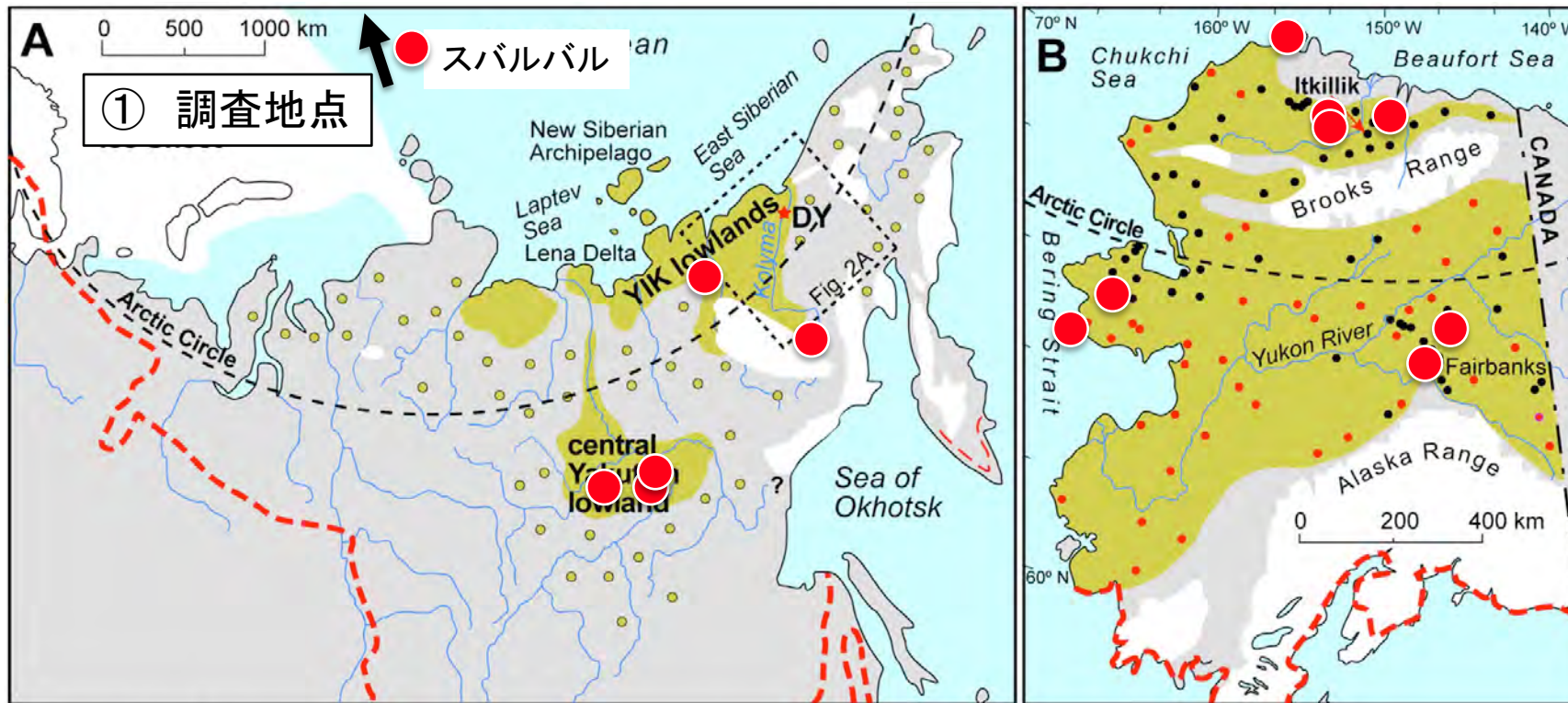
これまでの研究

ゆっくりとした凍土の融解
凍土動態モデル
炭素過程モデル

観測研究
モデル研究

本課題での測量調査・試料採取

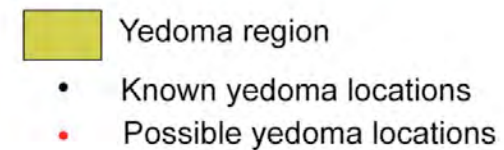
アラスカ, シベリア, スバルバルの14サイト(特徴, 重要性, 地理的代表性より)
氷・堆積物の採取, 濃度の実測
速度・空間規模(測量, 衛星)



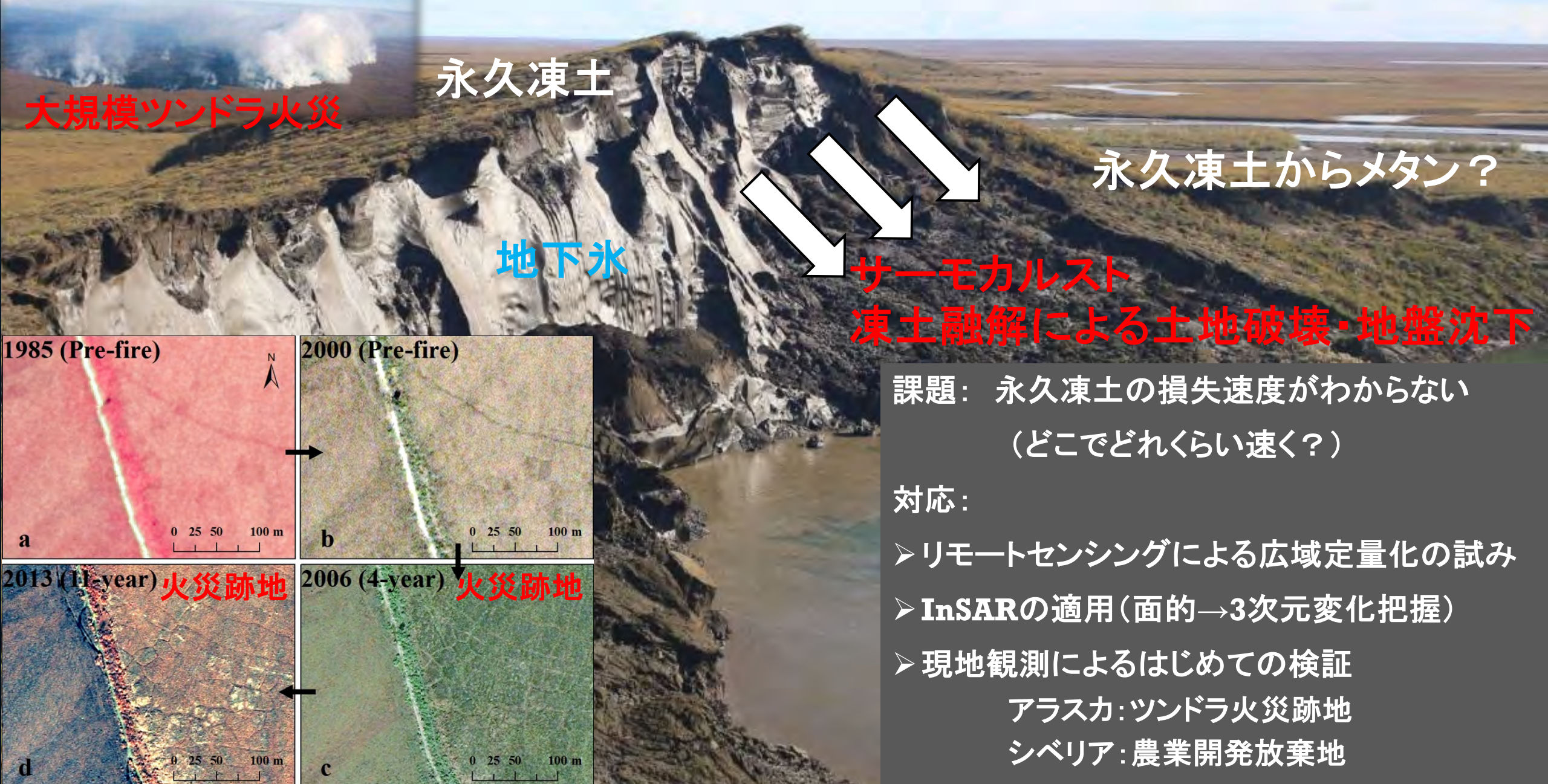
Northern Asia



Alaska



【サブ1a】永久凍土大規模融解のメカニズムと脆弱性の現状評価



大規模ツンドラ火災

永久凍土

地下氷

永久凍土からメタン？

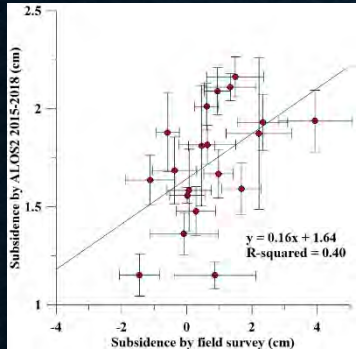
サーモカルスト
凍土融解による土地破壊・地盤沈下

課題： 永久凍土の損失速度がわからない
(どこでどれくらい速く？)

対応：

- リモートセンシングによる広域定量化の試み
- InSARの適用(面的→3次元変化把握)
- 現地観測によるはじめての検証
アラスカ：ツンドラ火災跡地
シベリア：農業開発放棄地

【サブ1a】永久凍土大規模融解のメカニズムと脆弱性の現状評価



4年間の現地測量およびInSAR解析から
* 初めての詳細検証
→サーモカルスト沈下の定量評価に対するInSARの有効性を確認

永久凍土融解による地盤沈下量の空間平均値

Alaska

1a②

Siberia

火災跡地: 1-6cm/yr

農耕放棄地: 0-3cm/yr

サブ1bおよびサブ3へ

今後、広く高緯度陸域に適用可能
日本国内の凍結融解による地盤変位把握にも応用

＜高分解能InSARによる新発見＞

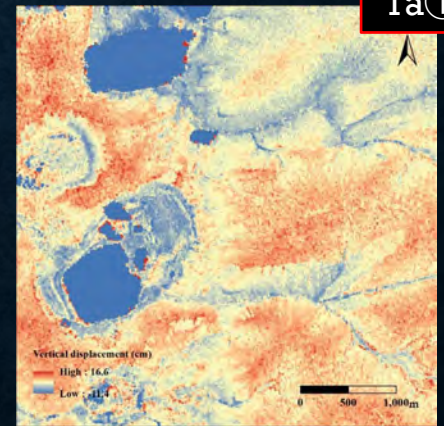
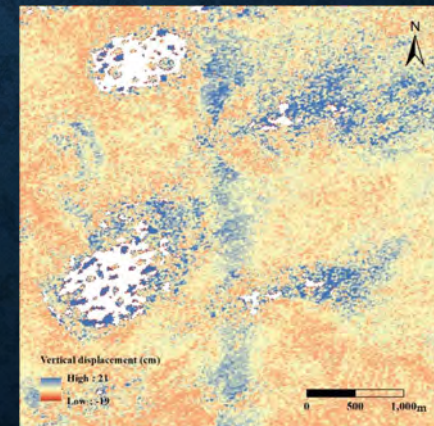
サーモカルスト沈下空間分布の時系列変化を把握

- 火災直後: **火災跡地に限られた沈下** (空間平均～6cm/yr)
- 10年後: **未攪乱地**でより大きなサーモカルスト沈下 (空間平均～2cm/yr)

サーモカルスト沈下の発達様式に関する新発見:

1a③

- 未攪乱地地下において、地下水流路と考えられる季節的登場沈下帯の発達
- 火災跡地では、IWポリゴンの形状とは別の季節的凍上沈下卓越帯
- 近年の温暖化が未攪乱地におけるサーモカルストを誘発した可能性
- 永久凍土上端部(遷移層)のアイスレンズ融解によるサーモカルスト沈下
→安定化
→IWの融解によるさらなるサーモカルスト沈下



1a①

【サブ2】高含氷永久凍土(エドマ)層の有機炭素(温室効果ガス)量把握

研究背景

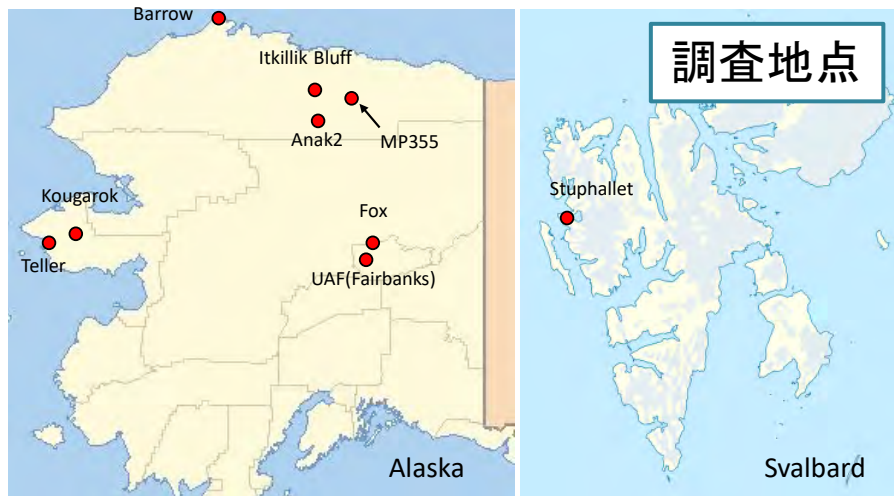
- エドマに含まれる有機炭素(温室効果ガス)の調査例はほとんどなかった(特に地下氷に対して).
- エドマの有機炭素含有量やその時間的・空間的分布はほとんど分かっていなかった.



本研究テーマ

- 広域で多点サンプリングを行い, ガス含有量, 温室効果ガス濃度, 温室効果ガスの同位体組成($\delta^{13}\text{C}$)を分析.
- エドマ中有機炭素(温室効果ガス)量の時間的・空間的分布や, 有機炭素の素性を把握.

2①



地下氷のガス含有量・温室効果ガス濃度・ $\delta^{13}\text{C}$ (平均値)

	ガス含有量 (cc/100g)	CH ₄ 濃度 (ppmv)	CO ₂ 濃度 (ppmv)	$\delta^{13}\text{C}$ -CH ₄ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ -CO ₂ (‰)
Iktillik Bluff	3.9	51	2301	-72.2	-16.6
MP355	3.4	14177	3817	-74.8	-22.4
Fox	3.1	14463	7526	-84.1	-26.9
Barrow	3.4	3736	2401	-68.6	-23.3
Anak2	3.7	4399	12793	-73.2	-25.3
UAF	2.9	2352	639	-57.7	-28.8
Teller	4.7	1060	593	-68.7	-25.1
Kougarak	4.1	13212	647	-63.2	-24.7

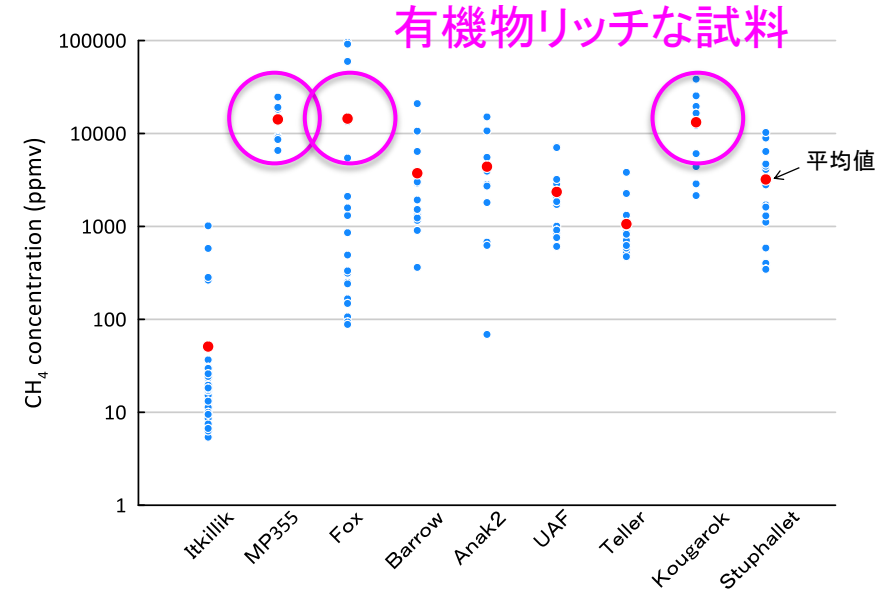
多点サンプリングの様子



サブ3の入力データに

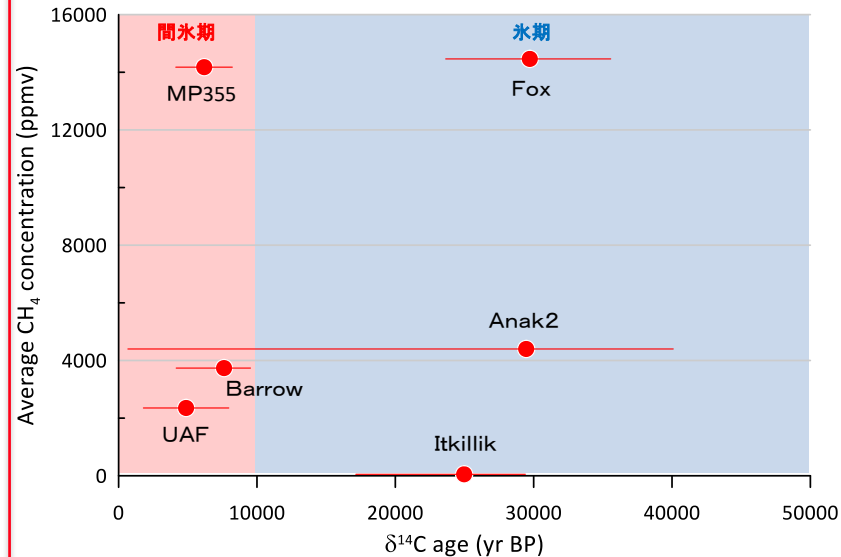
【サブ2】高含氷永久凍土(エドマ)層の有機炭素(温室効果ガス)量把握

各サイトにおける地下氷中のメタン濃度



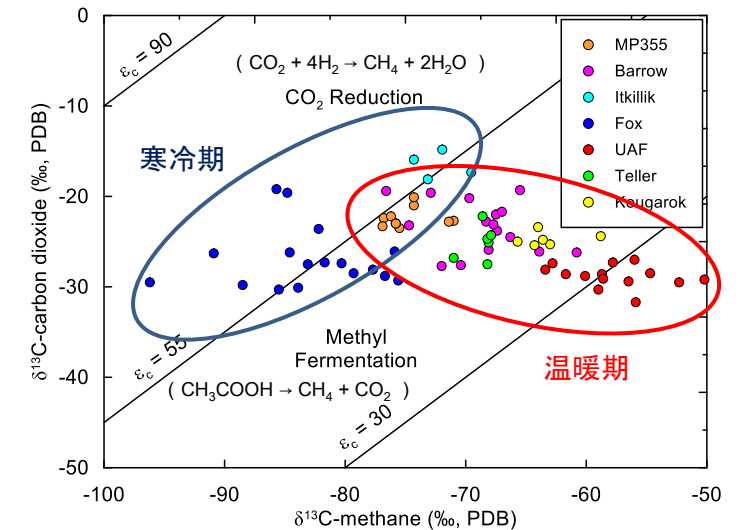
- サイト間・サイト内ではばらつきが大きい
- 比較的有機物に富むな地質でメタン濃度が高い傾向(要追加調査・分析)

永久凍土試料の年代(気候)とメタン濃度の関係



- 相関は見当たらない
- おそらく、永久凍土形成の時代(気候)は、メタン生産量を決定する要因ではない

永久凍土地下氷中メタンの $\delta^{13}\text{C}$ と二酸化炭素の $\delta^{13}\text{C}$ との関係



- メタンは微生物起源
- 寒冷期には二酸化炭素還元経路が、温暖期には有機酸発酵経路がそれぞれ優勢であったことを示唆

課題の受託範囲を超えて

将来の数値モデルの高度化に資する情報

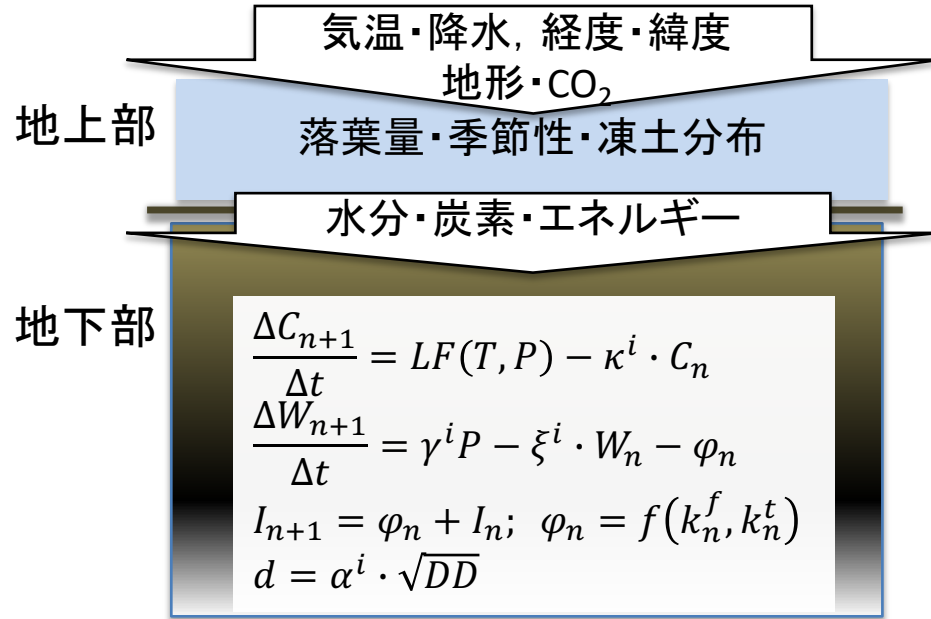
【サブ1b】永久凍土大規模融解のメカニズムと脆弱性の現状評価

- エドマの存在分布は未確定, また,
- 脆弱性評価の土台となる土壌有機炭素や地下水量の詳しい広域分布は未定もしくは未詳.

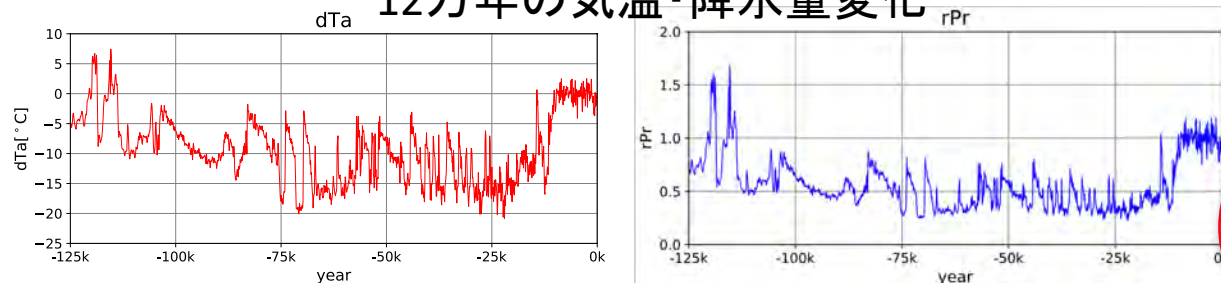


- 現在状況の始まりとも言える間氷期(12万年前)から現在まで, 土壌炭素と地下水の推移を計算する
- モデルの開発・検証. 時系列と空間分布の把握.

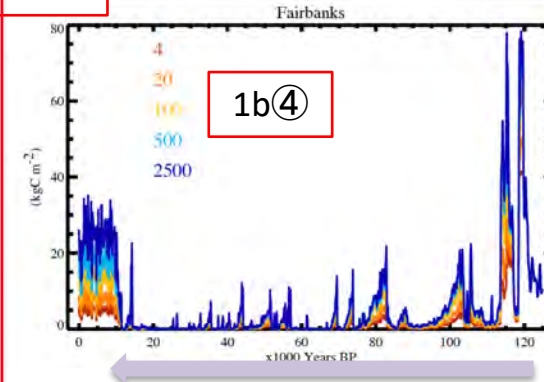
数値モデルの概要



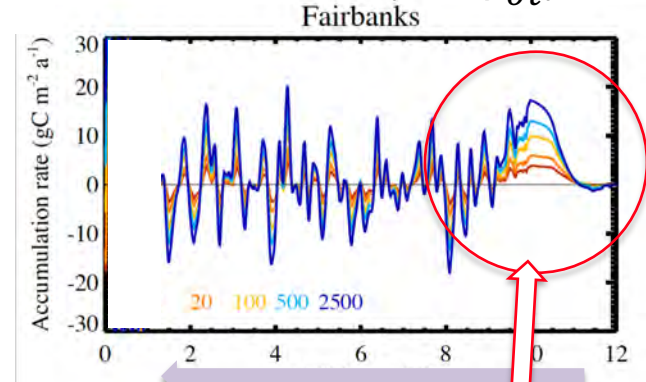
12万年の気温・降水量変化



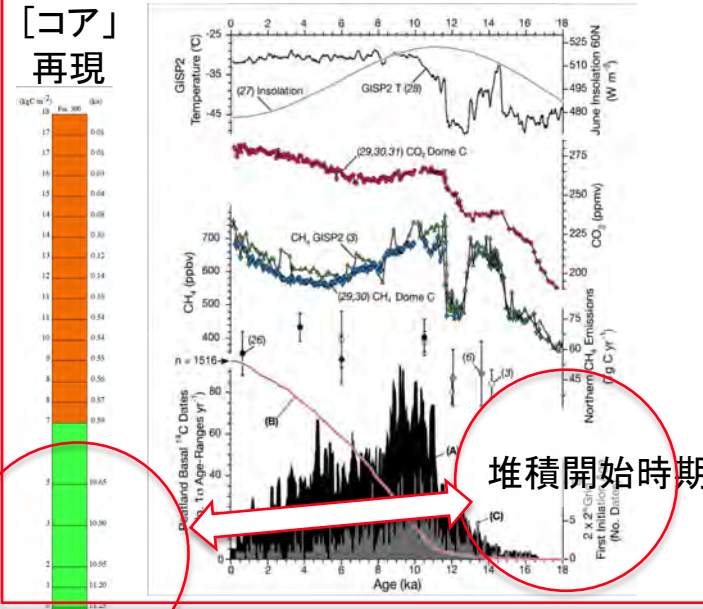
1b① 土壌炭素 (SOC) 変化



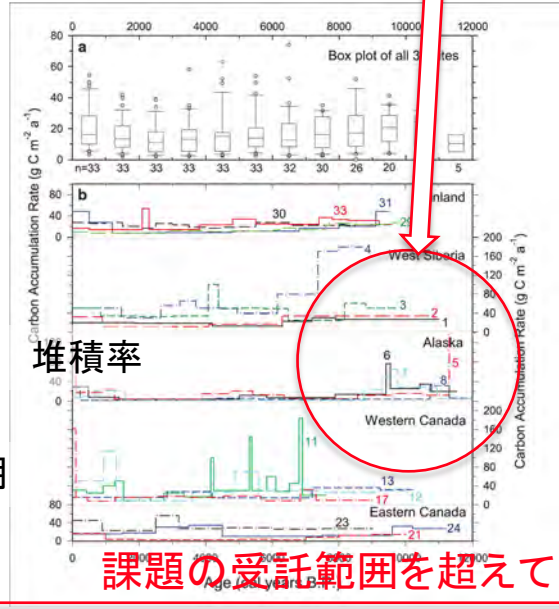
堆積率の変化 ($\partial SOC / \partial t$)



「コア」再現



MacDonald et al. 2006



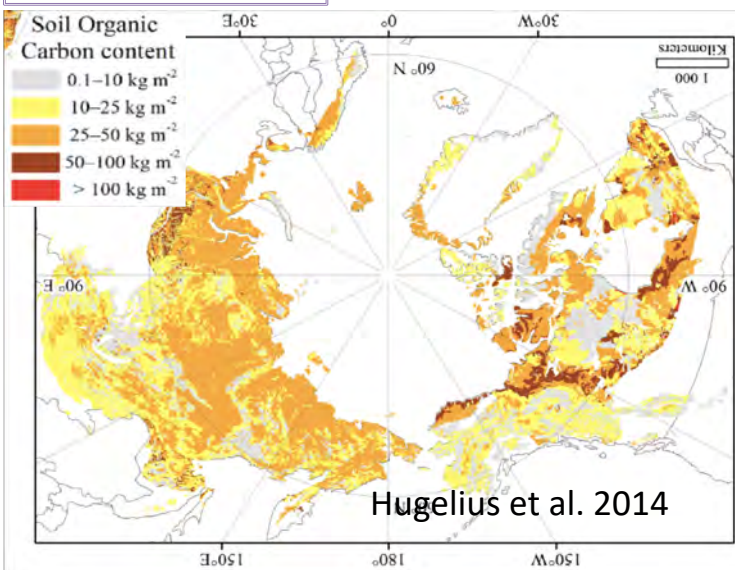
Yu et al. 2008

課題の受託範囲を超えて

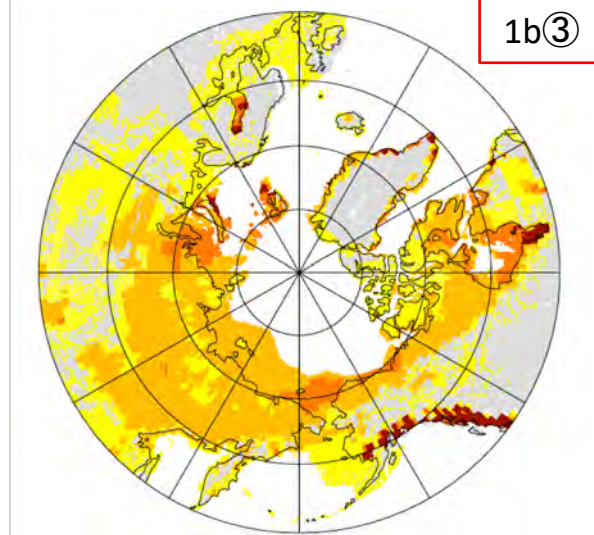
【サブ1b】永久凍土大規模融解のメカニズムと脆弱性の現状評価

凍土・脆弱性の広域的な把握

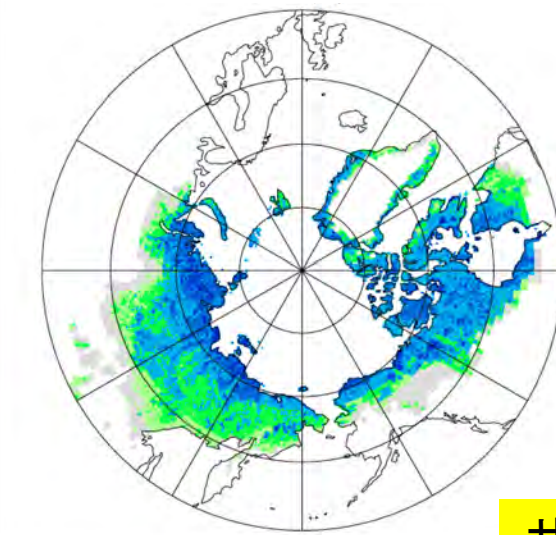
モデルの検証



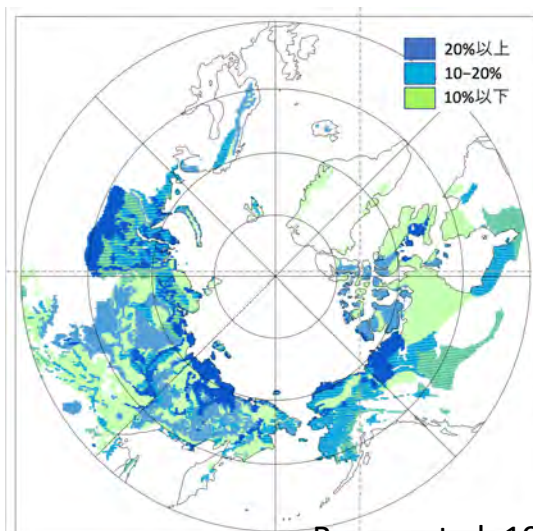
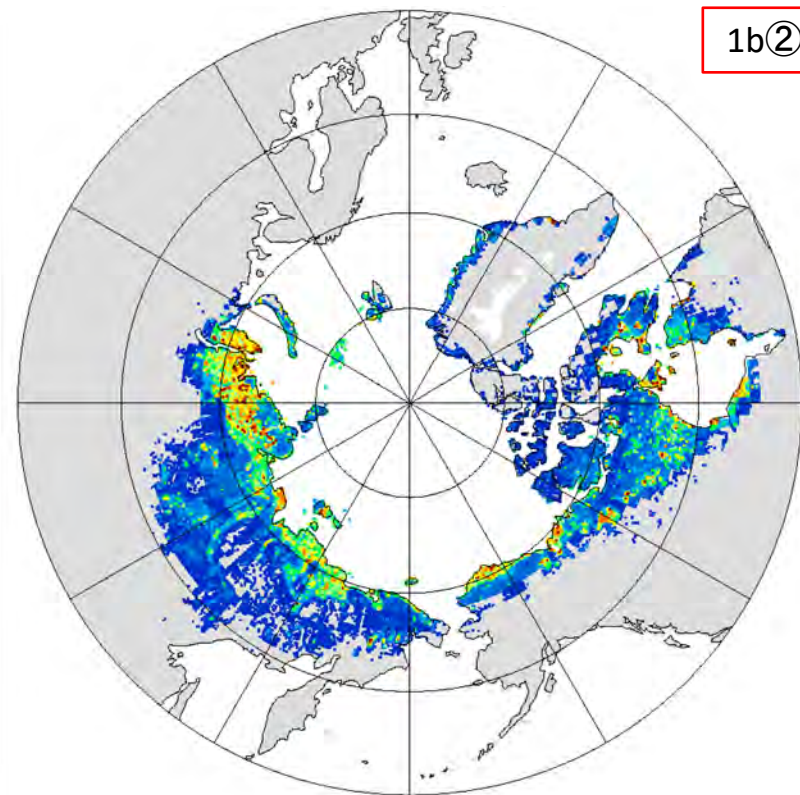
現在の土壤炭素



現在の地下氷



脆弱性～ $f(\text{土壤炭素} \times \text{地下氷})$



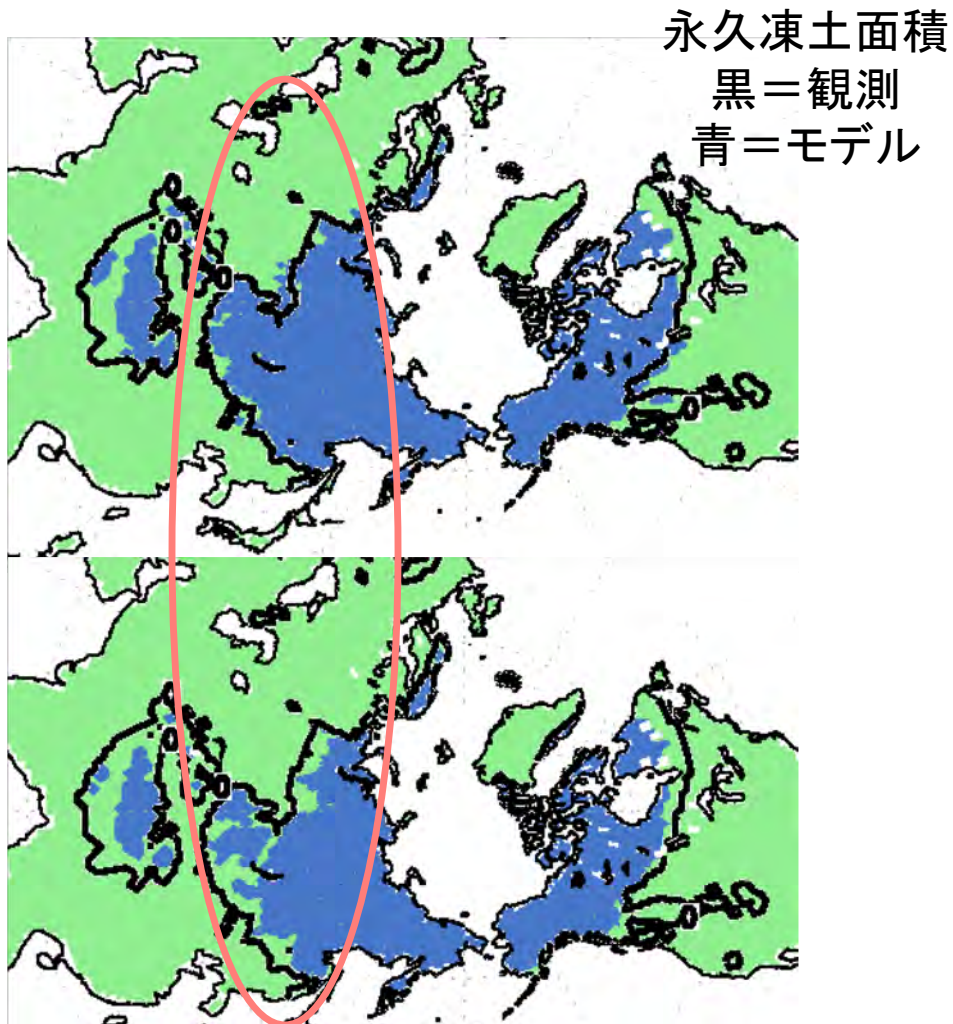
サブ3での初期値・境界条件データに

【サブ3】 全球陸域統合モデルによる将来予測

現実的な凍土動態を考慮したモデル高度化

- 土壌水分の凍結による物理特性の変化を考慮
- ツンドラ・タイガ域に特有な有機層を導入

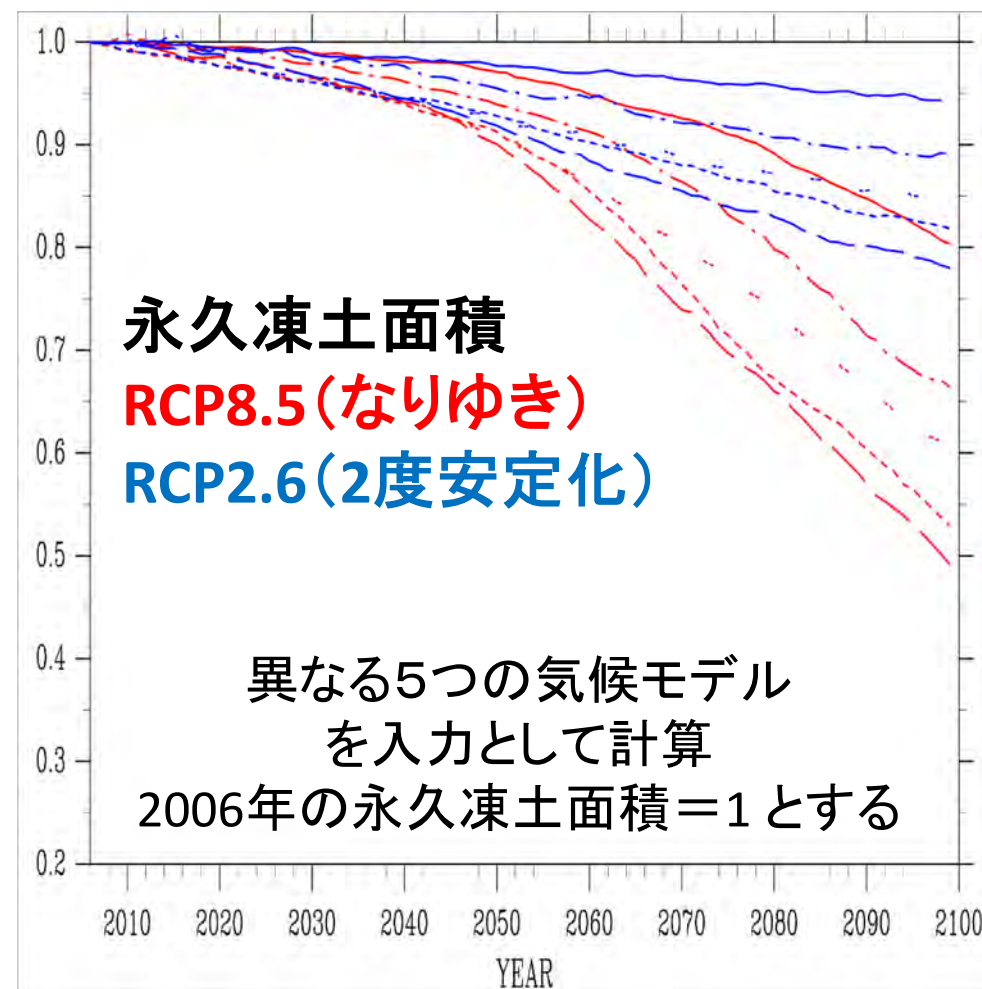
改良後



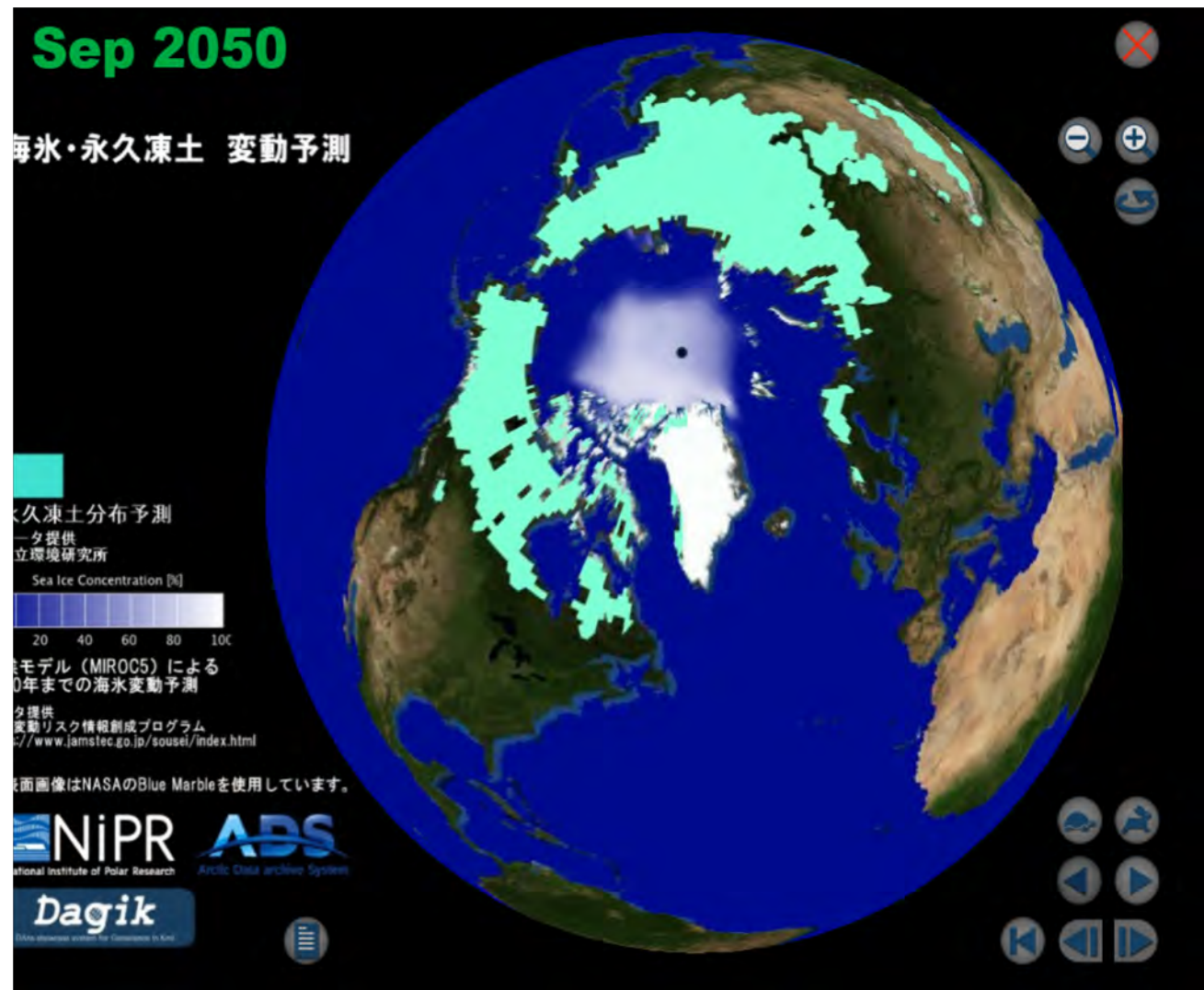
改良前

改良したモデルによる将来予測

- 永久凍土面積が最大で半分程度に減少
- 結果を動画で表示して公開



【サブ3】 全球陸域統合モデルによる将来予測

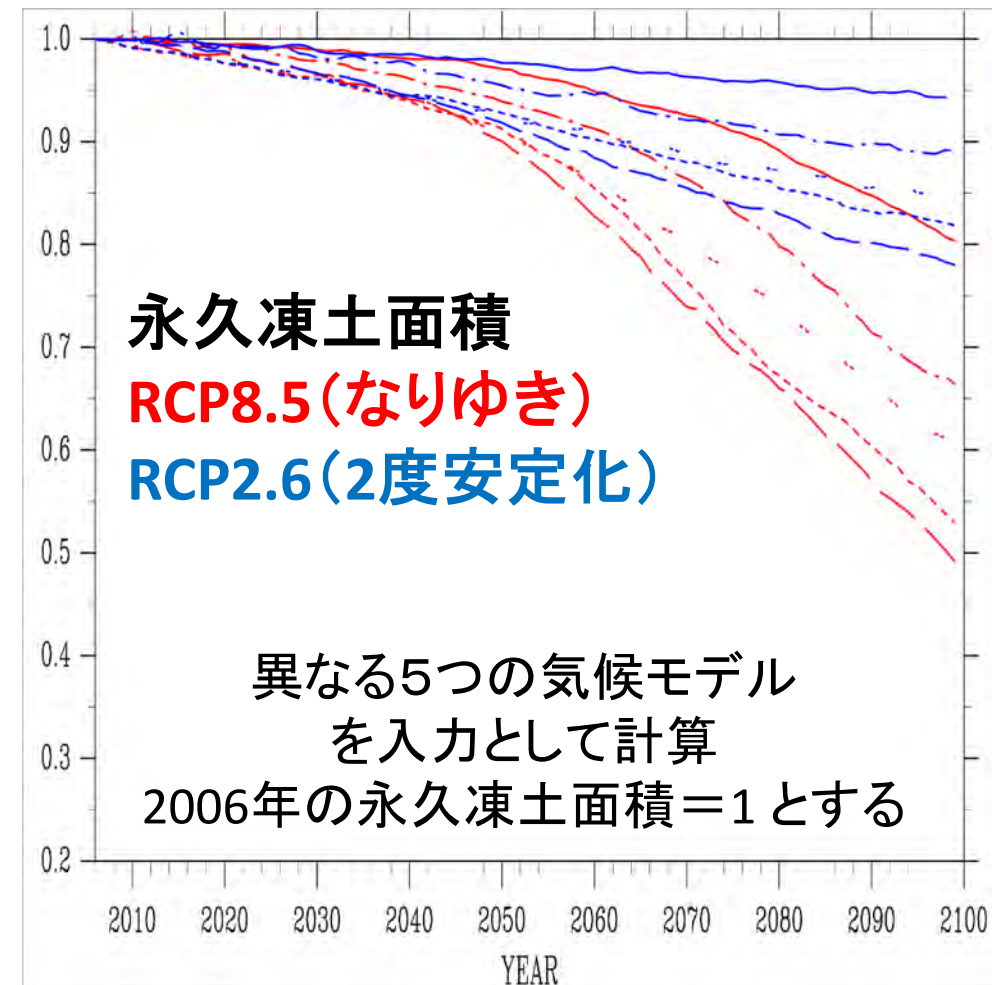


https://ads.nipr.ac.jp/node/dagik/?type=MIROC5/PERMAFROST_SEP_JP

国立極地研究所 国際北極環境研究センターと共同研究

改良したモデルによる将来予測

- 永久凍土面積が最大で半分程度に減少
- 結果を動画で表示して公開



【サブ3】 全球陸域統合モデルによる将来予測

サブ1+2データを利用したGHG放出量モデル化

- エドマ層の不可逆的崩壊による CO₂/CH₄ 放出
- 擾乱が起こる確率を線形・非線形応答を仮定

GHG放出量 = 擾乱の起こる確率 (サブ1a)

× エドマ層の融解沈降速度 (サブ1a)

× エドマ層の面積 (サブ1b)

× { 地下水&土壌中ガス濃度 (サブ2) +

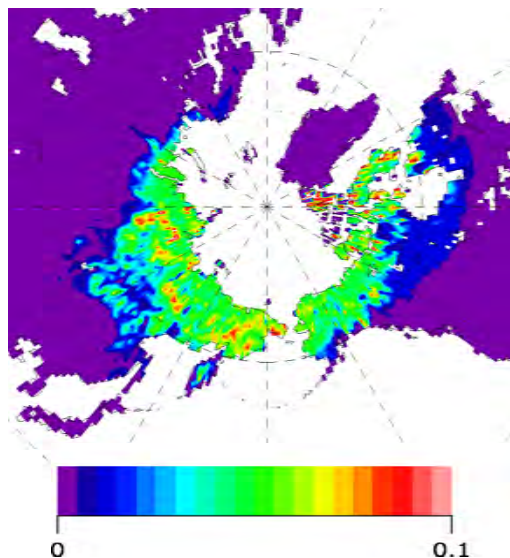
(土壌炭素分布 (サブ1b)

× 有機物分解速度 (サブ3)) }

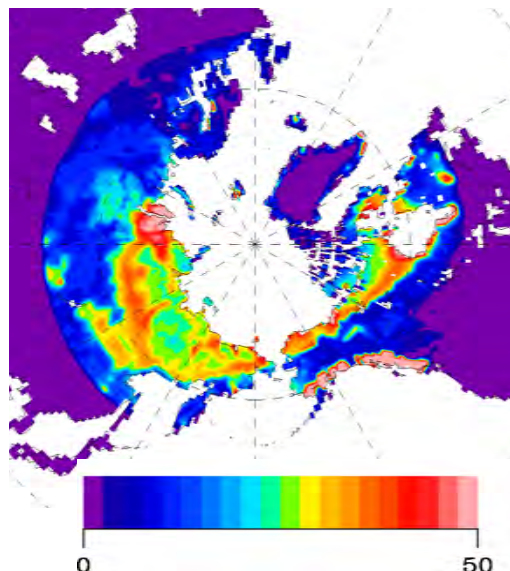
一次放出

二次放出

エドマ層面積割合

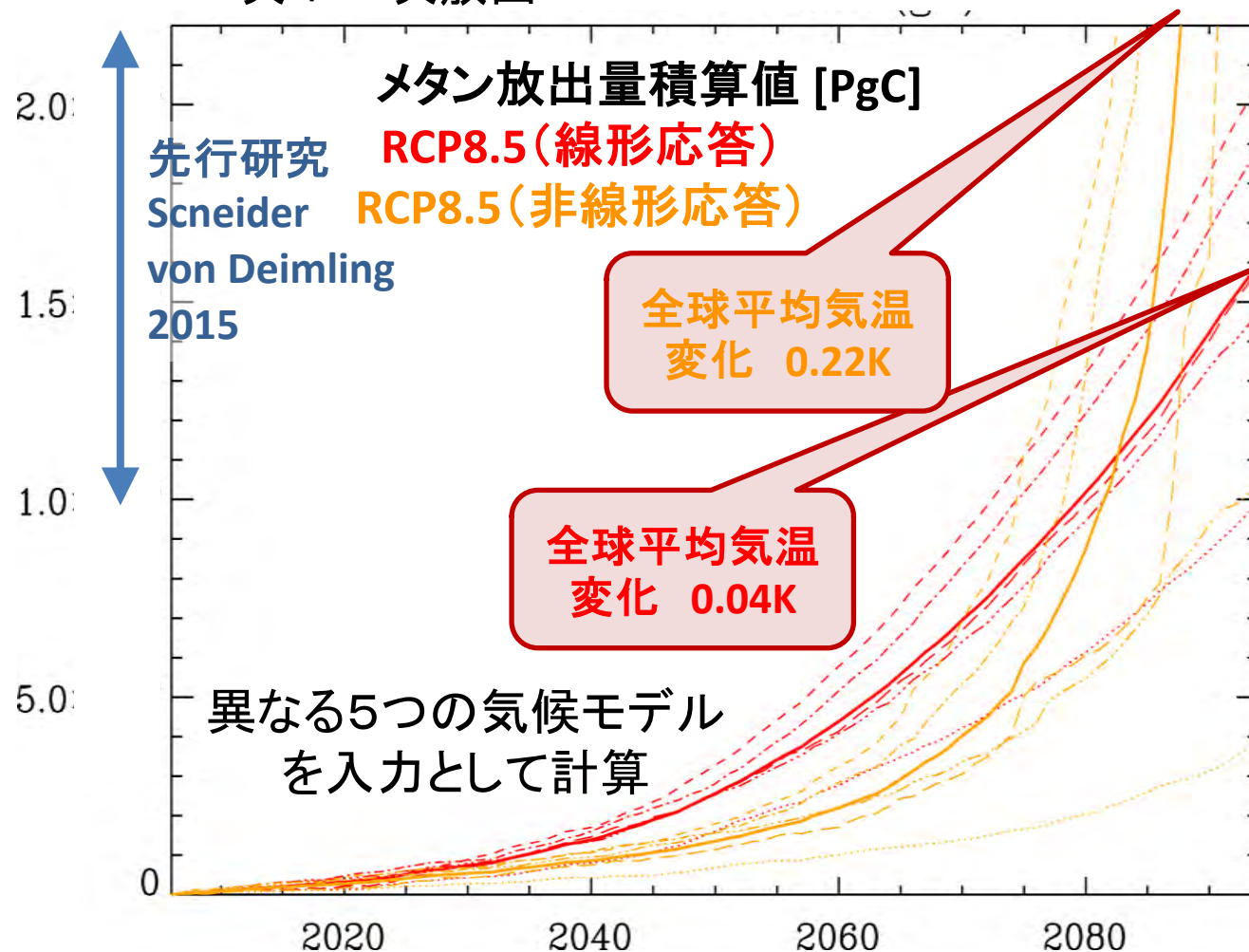


土壌有機物 [kg/m²]



GHG放出量の将来予測

- パラメータを幅広く変化させて計算
- 最大で 数PgC 程度: 既存推定と同程度
- 一次+二次放出



課題全体での成果のまとめ

1. InSARによる損失量評価ツールの確立
2. サーモカルスト進行過程(エドマ融解のメカニズム)の解明
3. 代表的なエドマ地帯における沈下速度 [サブ1a]
アラスカ(火災跡地: 1-6cm/yr), シベリア(農耕放棄地: 0-3cm/yr)
4. エドマに含まれる有機炭素(温室効果ガス)の実測 [サブ2]
氷中ガス3-4%, メタン濃度はサイト内・外でばらつきが大きい
5. 環北極域でのエドマ・脆弱性の定量化と分布の推定 [サブ1b]
地下氷・土壌炭素の収支推移, 地形・水文効果を考慮した高解像度分布
6. エドマ融解による一次・二次放出量の将来予測 [サブ3]
広域放出との相対的寄与やパラメータ感度の評価
2100年までの累積放出: 一次放出+二次放出(～数PgC ～0.22K)

今後の課題・新たに生まれた課題

エドマ分布マップの精緻化

- 現行(地質情報＋光学画像からの分布判断)→モデル結果＋InSAR地盤沈下分布情報を追加

エドマ融解メカニズム

- 火災跡地サーモカルスト水平拡大のメカニズムと定量化

氷期-間氷期規模での炭素動態

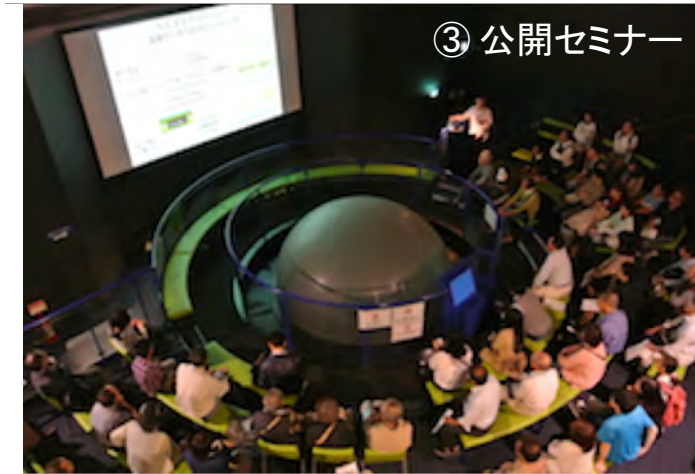
- エドマのメタンや有機炭素の蓄積環境, 形成過程や現存量などとの関連の理解
- 環北極域での土壌炭素・水分・氷の分布変化とその検証

エドマ融解過程を明示的に扱えるモデル

- 陸域生態系モデルにおける凍結土壌融解による有機物の分解過程の高度化
 - 二次放出過程の理解と組込

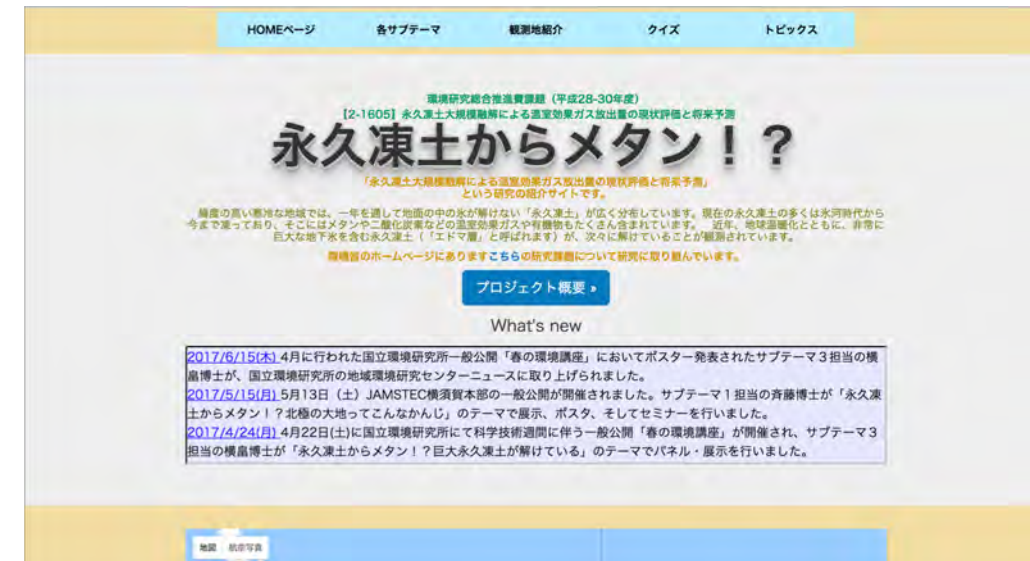
アウトリーチ

1. ①小・中・高等学校の理科授業での特別授業 (3/18)
 - ✓ 横浜市立本郷中学校(生徒・保護者・教育委員会)
- ③大学・研究機関の一般公開でのセミナー・展示
 - ✓ 4件(海洋研究開発機構, 国立環境研)
- ⑤インターネット上での研究成果の継続的な発信
 - ✓ HPでの発信 (<http://www.jamstec.go.jp/iccp/j/pfch4/>)



③ 公開セミナー

⑤ インターネット発信



アウトリーチ(続き)

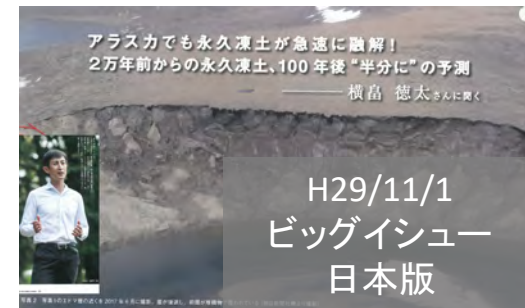
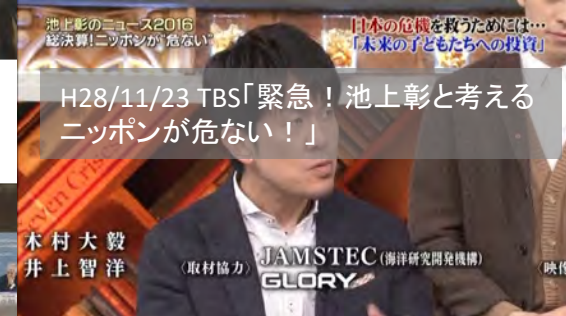
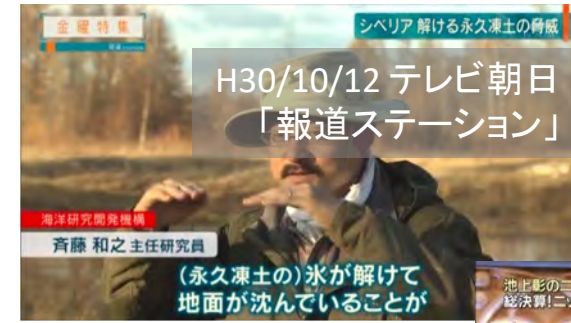
2. マスコミ発表

✓ TV報道・放映(3件)

NHK, TV朝日, フジテレビ

✓ 新聞・雑誌(5件)

NHK, TBS, 赤旗日曜版
ビッグイシュー,
共同通信(H31.3月掲載予定)
(取材協力:朝日新聞)



学会発表・論文発表

国内外における学会発表・査読付論文(国際誌)

✓ 11件(国際4件, 国内7件), 論文1本(作業中4本)

H29: 7/17 朝日新聞「地球異変」

環境行政への貢献

低炭素領域行政ニーズ

- ① 不確実性を考慮した影響の定量的な評価に関する研究
- ② 気候変動による自然災害の影響評価に関する研究
- ③ 地球温暖化対策の評価に向けた地球規模及びアジア太平洋地域における観測・モデル等を活用した研究
- ④ 地球温暖化現象の解明、統合的な予測、対策評価を通じたIPCCなどの国際枠組みへの貢献

(アウトプット) 永久凍土大規模融解による温室効果ガス放出の基礎情報・高度化した地球温暖化予測モデル

- ✓ 衛星・数理モデルを利用した, 永久凍土不可逆変化の広域的な把握～脆弱性分布 (サブテーマ1)
- ✓ 実測に基づく, エドマ・永久凍土中の有機炭素(温室効果ガス)含有量 (サブテーマ2)
- ✓ 統合して得られる環北極圏および全球規模での将来予測モデル (サブテーマ3)

(アウトカム)

- 放出量・予測量の不確定要素の減少(予測精度の向上)
- 北極コミュニティ・極北インフラに関する環境政策への提言
 - ・ アラスカやシベリアでの, エドマ融解を引き起こす可能性のある擾乱対策の助言・検討など
 - ✓ 自然火災
 - ✓ 農業等の土地利用, 経済政策
- 次期IPCC報告書への貢献

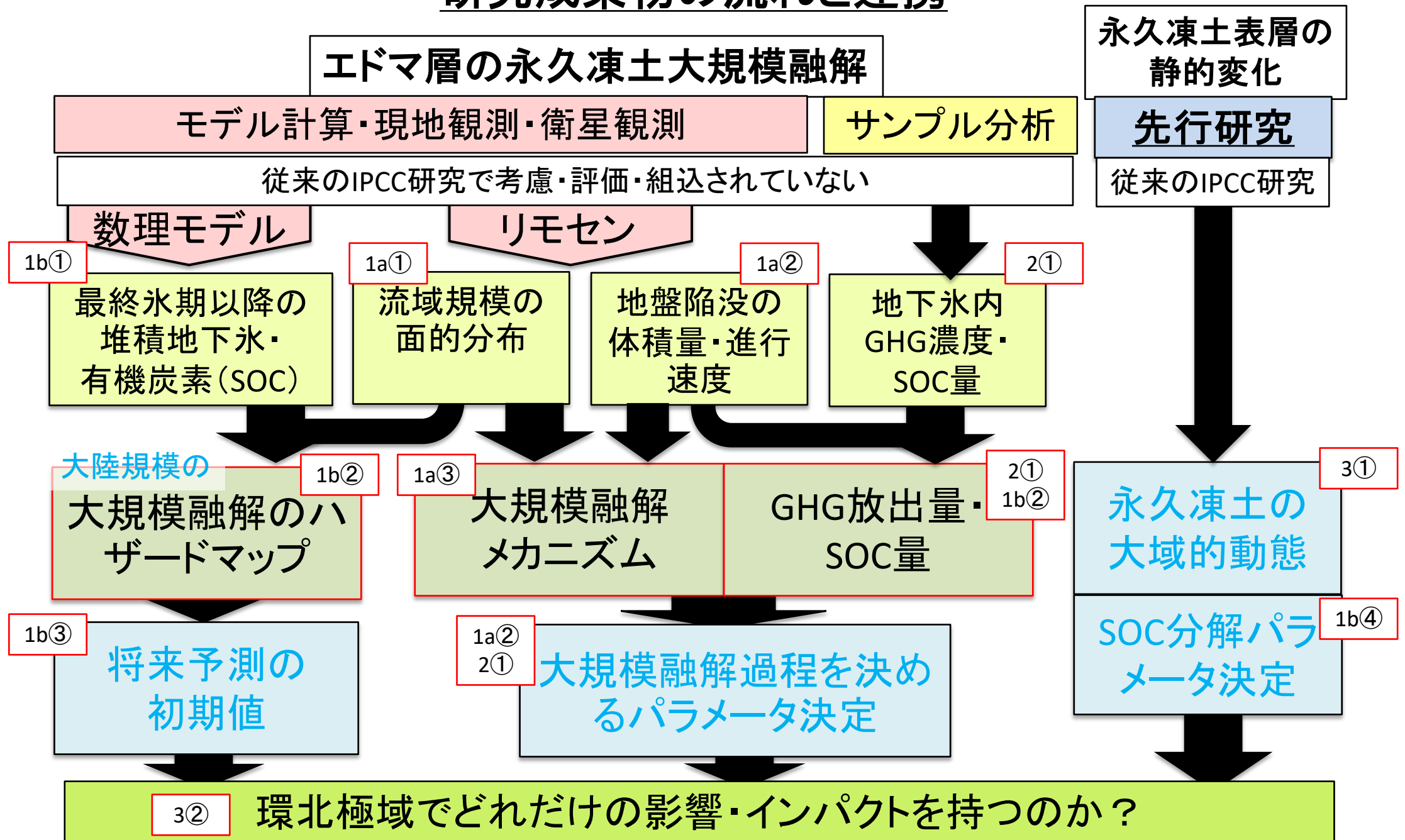
ありがとうございました.



ロシア・サハ共和国チョクルダ近郊の露頭

参考スライド

研究成果物の流れと連携



中間評価ヒアリング・個別コメント

- 実証的に未知の事実についてのデータが入手できており、気候変動影響についての知見を加えている。気候変動の対策の必要性をアピールするための素材としての意義が大きい。「適応」の検討への直接的な貢献といえるかどうかは少々疑問あり【全体】。
- メタンガスの放出予測量は根拠をもって早期に出してほしい【1, 2, 3, 全体】。メディア等で断片的に伝えられる内容は、関心を引くものの定量的な警告となっていない。
- 永久凍土が融解すると、どういう問題が起こって重要かを意識しながら研究を進めている点は評価できる。
- 衛星・数理モデルを利用した凍土の広域的な把握(サブテーマ1)についての報告がなかった【1】。
- モデルの検証をどうするのかが分からなかった。この点を着実に進めてもらいたい【1b, 3】。
- エドマ層内のメタン濃度は極めてヘテロな分布を示すが、これをモデル化する時の工夫があまりはっきりしない。【1b, 3】 国際的な共同研究の進展はどうなっているか【全体】。
- GHG 放出に対しての永久凍土の影響に新しい知見を与える優れた研究である。
- 現地における精確な観測データの取得可能性が本研究成果の価値を決定すると考えられるので、観測地点、連続的観測手法などについて、さらに見直す必要がある場合には、速やかに対応【1a, 2】して計画年次内にさらに良い成果が得られるよう期待する。
- 永久凍土層の融解により、GHG の放出の実態把握から統合モデルによる予測ができるとIPCCにとっても評価できると思われる。他に類似した研究結果と比較されて、評価が必要【1, 2, 3, 全体】。適応策に貢献できるよう【1, 2, 3, 全体】進めていただきたい。
- 日本への影響について新たな知見が加えられるか、を明確にして進めてほしい【1, 2, 3, 全体】。

中間評価ヒアリング・個別コメントを承けて

- 実証的に未知の事実についてのデータが入手できており、気候変動影響についての知見を加えている。気候変動の対策の必要性をアピールするための素材としての意義が大きい。「適応」の検討への直接的な貢献といえるかどうかは少々疑問あり【全体】。
- 永久凍土層の融解により、GHG の放出の実態把握から統合モデルによる予測ができるとIPCCにとっても評価できると思われる。他に類似した研究結果と比較されて、評価が必要【1, 2, 3, 全体】。適応策に貢献できるよう【1, 2, 3, 全体】進めていただきたい。
- エドマ層内のメタン濃度は極めてヘテロな分布を示すが、これをモデル化する時の工夫があまりはつきりしない。【1b, 3】 国際的な共同研究の進展はどうなっているか【全体】。
 - 現状を知ること、またそれに基づいて将来放出量を推定することは、適応策検討にあたって、どれほどの(予算, 人員の配置・配分なども含めて)資源が対策に必要なかという見極めのために重要な情報を与えると考える。
 - 当課題は国際共同研究ではないが、現地調査における米国・露国の研究機関と研究者との協力、またその他の国の研究者や国際的研究とは、分析支援や情報交換など連携して行なっている。H29年7月に札幌で行われたアジア永久凍土学会や、同年12月のAGU、またH30年7月のヨーロッパ永久凍土学会などはその大事な機会であった。
- 日本への影響について新たな知見が加えられるか、を明確にして進めてほしい【1, 2, 3, 全体】。
 - 日本を含む中緯度域や全球への影響も対象として、温度上昇への寄与度などの形で定量的な知見を出している。
- メタンガスの放出予測量は根拠をもって早期に出してほしい【1, 2, 3, 全体】。メディア等で断片的に伝えられる内容は、関心を引くものの定量的な警告となっていない。
 - 本課題で得られた実測値も用いて、21世紀末までの累積放出は一次放出が～数TgC、二次放出が～数PgC程度と見積もられた。H28 年9月のNHK番組は危機を煽っている感がある。ただし、二次放出については、過程の複雑さから、3年間の当課題で提示できるものは確定的なものとは言えず、さらなる研究が必要である。