

気候変動の統合評価モデルにおけるTipping elementsの相互作用: グリーンランド氷床融解と大西洋熱塩循環崩壊を中心としたモデル化と分析

大槻貴司 松尾雄司 森本壮一

日本エネルギー経済研究所

2021年1月 エネルギー・資源学会 第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス 講演番号15-1

本発表資料は第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンスで発表されたものを転載許可を得て掲載いたしました。

問題意識と研究目的

問題意識

- 気候変動政策や温度目標を議論する際には、緩和費用・適応費用・被害額の総合的なバランスを踏まえることも重要と考えられる
- そのような検討には費用便益分析が用いられ、DICEやFUND、PAGEなどの統合評価モデルが開発されてきた。しかしながら、費用便益分析には課題も多い

費用便益分析の課題

- ・被害関数の妥当性
- ・**Tipping Elements (不可逆, または臨界点を持つ要素)のモデル化と影響分析**
- ・長期割引率
- ・地域間の衡平性 など

研究目的

- 本研究ではTipping Elementsの相互作用のモデル化を通して、費用便益分析の精緻化を目指す
- 具体的にはグリーンランド氷床(GIS)と大西洋熱塩循環(AMOC)の挙動や相互作用を定式化した。既往研究には単独のTipping Elementに焦点を当てたもの(Nordhaus (2019)など)や、相互影響を簡易表現したもの(Cai, et al (2016)など)が多かった

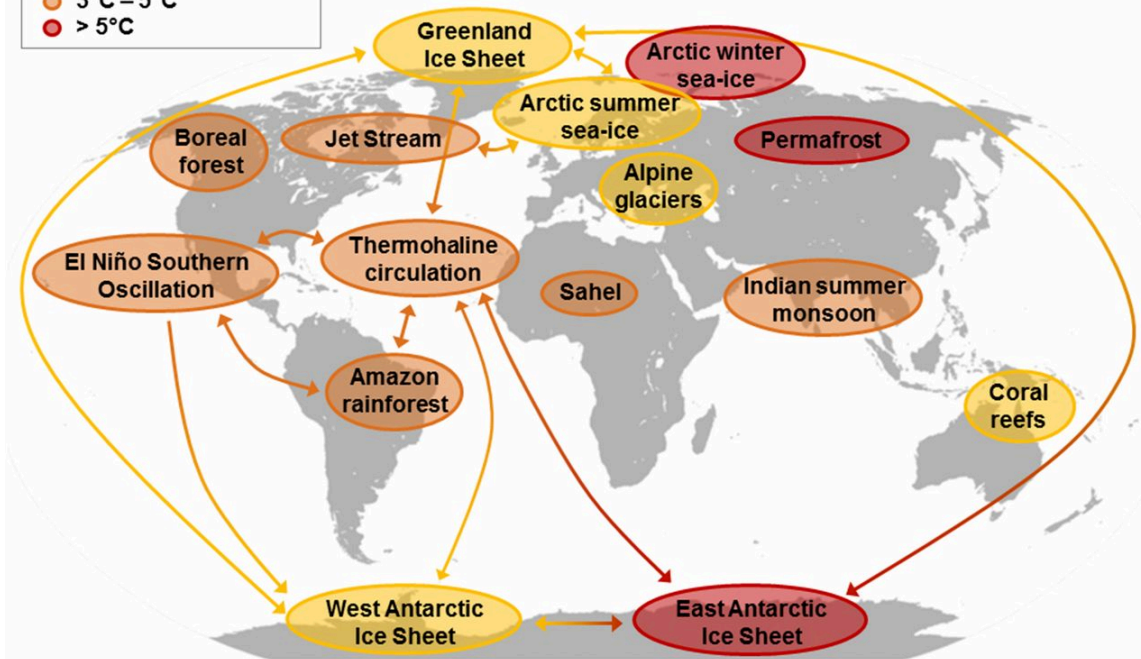
Tipping Elementsとは

- 不可逆的もしくは臨界点を持つ事象のこと. 臨界点を超えると正のフィードバックがかかり, 変化(被害)が加速的に進行する可能性がある
- 不可逆的もしくはヒステリシスのため, 発現した場合, 気温を下げても直ちには元に戻らない

Tipping Elementsの例

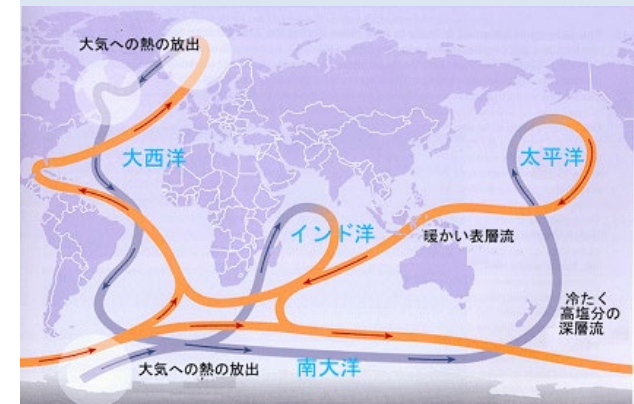
Tipping elements at risk:

- 1°C – 3°C
- 3°C – 5°C
- > 5°C



- Tipping Elementsにはグリーンランド氷床の融解, 大西洋熱塩循環の崩壊, 西南極氷床の崩壊, 永久凍土融解, エルニーニョ・南方振動の頻発化などが含まれる

【参考】熱塩循環模式図



グリーンランド氷床(GIS)の融解と大西洋熱塩循環(AMOC)の崩壊

- 本研究では相互作用が比較的明確なGIS融解とAMOC崩壊に着目
- GIS融解は海面上昇や地表アルベド変化の直接的な影響のみならず、大西洋への淡水注入によってAMOCを停止させる恐れが指摘されている(Kopp, et al, 2016)

グリーンランド氷床融解の主な影響

世界的な海面上昇
(全量融解で7mほど上昇)

地表アルベド変化に伴う
正のフィードバック

北大西洋への淡水注入



大西洋熱塩循環の崩壊

- 熱の運搬停止による北大西洋地域の寒冷化、及び気象・植生・河川流量等が変化する可能性
- なお、AMOC弱化にはGIS以外にも、北極海水の消失等の他の影響もある点には留意

使用モデル: DICE-2016R2を基に構築

- DICEは世界を1地域1財・サービスに集約化した非線形の効用最大化モデル. 2015~2500年までを最適化. 緩和・適応・被害費用が産出, そして消費(効用)を低減させる
- GISとAMOCの影響を被害関数に追加. GISは海面上昇1m毎にGDP1%分(Nordhaus, 2019), AMOCは臨界点を越えた場合にGDP3%分の損害と想定

目的関数に係る主な数式

目的
関数

$$\max. w = \sum_t u[C(t)]r(t) \dots$$

全時点の割引後効用の累計値 w を最大化. t は時点. 効用 u は消費 $C(t)$ の関数(なお, モデルの中では $C(t)$ を外生変数の人口で除し, 一人あたり消費の関数となっている). $r(t)$ は割引係数

消費

$$C(t) = Q(t) - I(t) \dots\dots\dots$$

消費 $C(t)$ は正味産出 $Q(t)$ から投資 $I(t)$ を減じて算出. 投資は将来の産出量に影響する

正味
産出

$$Q(t) = Y(t) - m[E(t)] - d[T(t), V(t), X(t)] \dots\dots\dots$$

産出

緩和費用

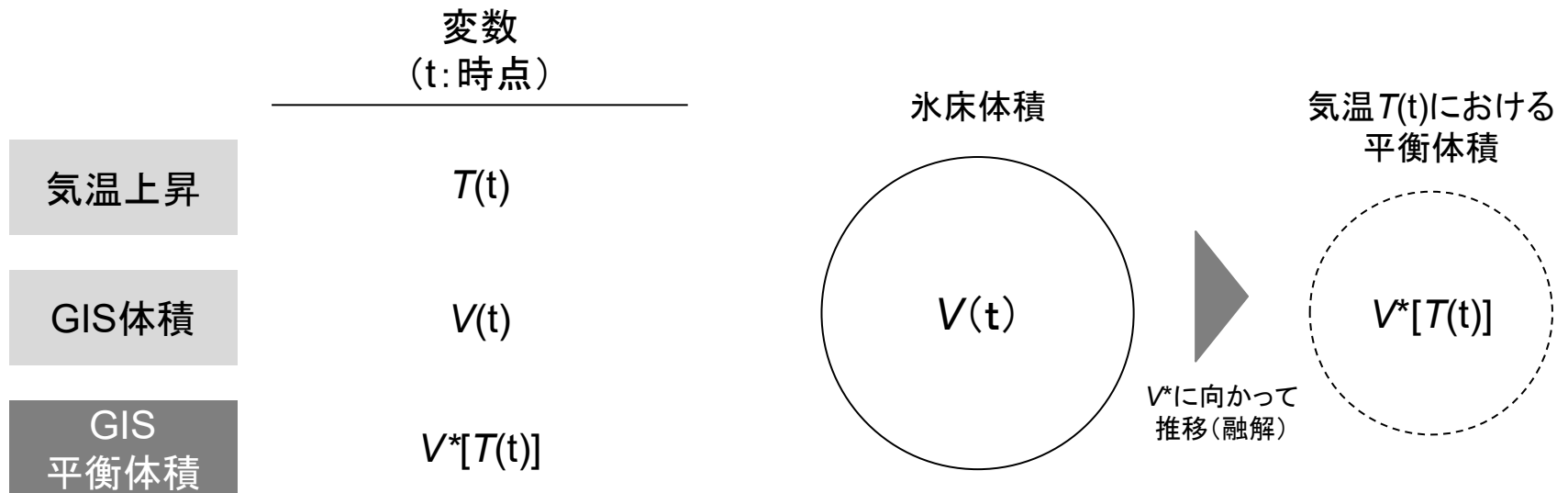
被害・適応費用

オリジナルのDICE-2016R2では気温上昇 T の二次関数. 本研究ではGISとAMOCの被害を追加

m は緩和費用関数. $E(t)$ はGHG排出削減量. d は被害・適応関数で, 気温上昇 $T(t)$ およびGIS・AMOCの状態 $V(t), X(t)$ の関数. 正味産出 $Q(t)$ は, 産出 $Y(t)$ から緩和費用と適応・被害費用を減じて算出

グリーンランド氷床 (GIS) : モデル化の概要

- 不確実かつ複雑な事象であるが、本研究ではNordhaus (2019)を参考に簡潔にモデル化した
- 時点 t におけるGISの体積 V および「平衡体積率 V^* 」を定義
- V^* は気温上昇 T においてGISが平衡状態となる体積を指し、 V と V^* の差分を基に融解量を算出



GIS氷床体積は $V(t)$ から平衡体積 $V^*[T(t)]$ に向かって融解。但し、GISの状態は急速に遷移するわけではないと考え、時間的な遅れは考慮(具体的には8000年程要すると想定)

グリーンランド氷床 (GIS) の定式化

- 平衡氷床体積率, 及び体積率変化の大きく2つの式から構成される
- パラメータ α , β はNordhaus (2019)やAlley, et al. (2010)を参照した

GISの挙動定式化

平衡氷床
体積率

$$V^*(t) = 1 - \alpha_1 T(t)$$

V : GIS氷床体積率(初期時点体積に対する比率)

V^* : V の平衡状態

T : 2015年からの気温上昇

α_1, β_1 : パラメータ

体積率
変化

$$\frac{\Delta V(t)}{\Delta t} = \beta_1 \text{sign}(V^*(t) - V(t))(V^*(t) - V(t))^2$$

パラメー
タなど

- α_1 の逆数は平衡氷床体積 V^* が0となる気温上昇値.
ここでは 3.4°C 上昇時に $V^*=0$ と想定し, $\alpha_1 = 1/3.4 = 0.294$ と設定した
- β_1 の逆数 $t_1 = 1/\beta_1$ を時間特性定数(単位:年)と定義.
 V は t_1 の時間スケールの遅れに従って推移する. ここでは $t_1 = 8192$, $\beta_1 = 0.000122$ とした

大西洋熱塩循環 (AMOC) と相互作用の定式化

- GISと同様の手法を採用. AMOCには臨界点があることが既往の地球システムモデルにて示唆 (Zickfield, 2004). その特性を平衡強度率の式にて織込んだ. パラメータは同文献の解析結果を模擬するように設定
- GIS融解の影響はパラメータ α_2 に反映. GIS融解量が多くなると, AMOCが弱化し易くなる構造

AMOCの挙動定式化

平衡
強度率

$$X^*(t+1) = X^*(t) - \alpha_2(T(t+1) - T(t)) + \gamma_{up}(1 - X^*(t)) \text{ for } X^*(t) > X_{th}$$

$$X^*(t+1) = X^*(t) - \alpha_2(T(t+1) - T(t)) - \gamma_{down}X^*(t) \text{ for } X^*(t) < X_{th}$$

強度率
変化

$$\frac{\Delta X(t)}{\Delta t} = \beta_2(X^*(t) - X(t))$$

X : AMOC強度率 (初期時点強度に対する比率)

X^* : X の平衡状態

T : 2015年からの気温上昇

α_2, β_2 : 係数

係数など

- α_2 はAMOCへの淡水注入度に関するパラメータ. α_2 が大きいと弱化し易くなる. GISからの淡水注入度変化率 H_{GIS} , およびGIS以外からの淡水注入度変化率 h_{Oth} を用いて

$$\alpha_2 = 1.67(h_{GIS} + h_{Oth}) + 0.0517 \text{ とした}$$

↑ GISからの淡水注入度変化率 (Sv/°C)

- 時間特性定数 t_2 は23年, $\beta_2 = 1/t_2 = 0.043$ とした

ケース設定

- GIS及びAMOCのモデル化(被害関数への織込みや相互作用の有無)について5ケース, AMOCへの淡水注入度変化率について5通りの5ケース×5通り=25パターンを想定
- GISからの淡水注入度変化率には不確実性があり, その点を考慮(Zickfield, 2004)

	Tipping Elements :5ケース			×	GISからの淡水注入度変化率 基準値(h_{GIS}):5通り
	AMOC 被害	GIS 被害	相互 作用		
Tipping Elementsなし	-	-	-		① 0.002 Sv/°C
ケースa	○	-	-		② 0.004 Sv/°C
ケースb	-	○	-		③ 0.006 Sv/°C
ケースc	○	○	-		④ 0.008 Sv/°C
ケースd	○	○	○		⑤ 0.01 Sv/°C

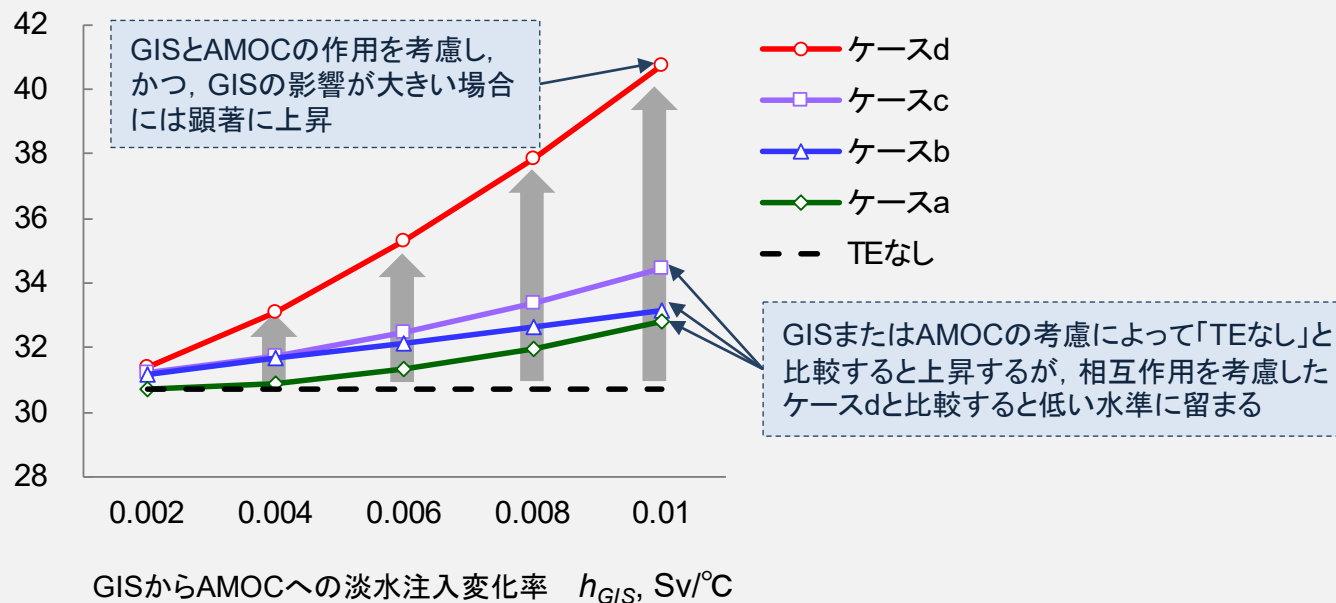
- ケースdにて相互作用を考慮. ここではGIS体積変化とAMOCへの淡水注入変化率が連動するように想定している
- その他のケースでは, GISの体積変化とAMOCへの淡水注入量を独立的に取り扱っている

結果①

2015年の社会的炭素費用(SCC)

- Tipping Elementsを考慮しない場合のSCCは30.7ドル/tCO₂。GISまたはAMOCを考慮したケースa~dではSCCが上昇し、相互作用を考慮したdにて顕著 ($h_{GIS}=0.01$ では40.1ドル/tCO₂)
- 既往研究にてTEは独立的に取扱われることが多いが、本研究は相互作用を考慮した評価の重要性を示唆。他のTipping Elementsと相互作用により、SCCがどの水準まで上昇するかを今後検討する必要がある

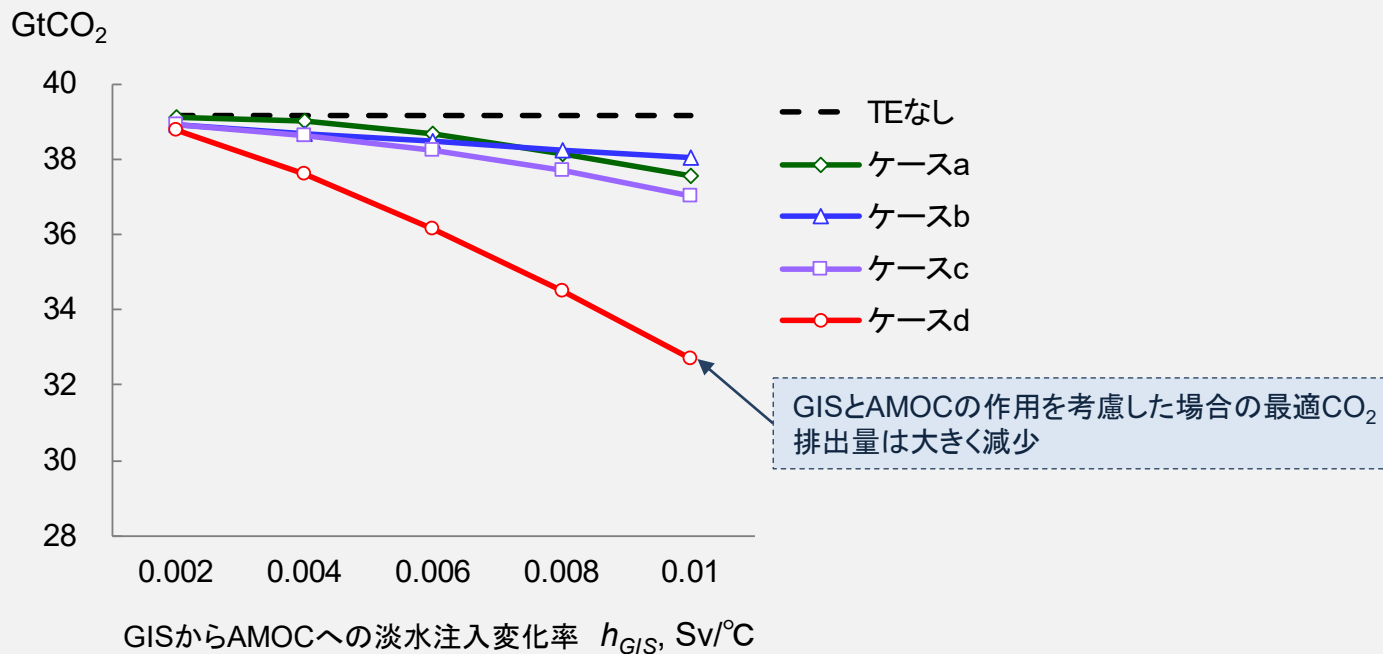
2015年時点の社会的炭素費用

2010USD/tCO₂

結果②

2050年の最適CO₂排出量

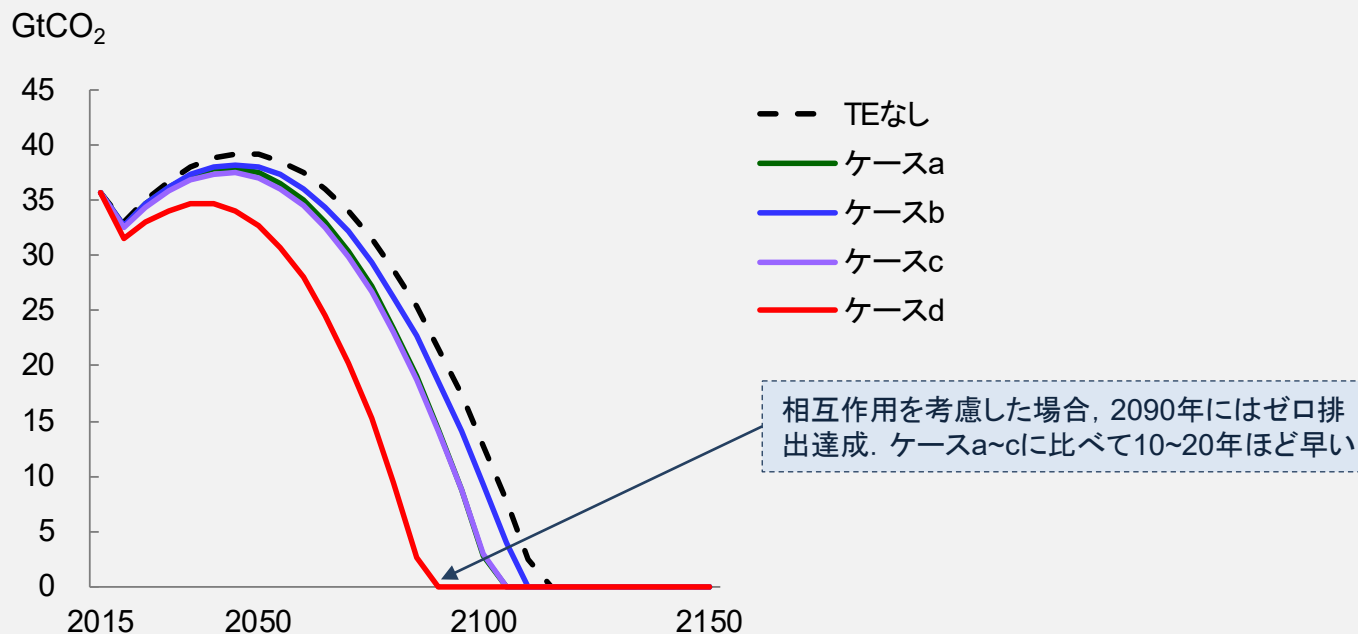
- Tipping Elementsを考慮しない場合, 2050年の最適CO₂排出量は39GtCO₂
- 対して, GISとAMOCの相互作用を考慮したケースdでは, $h_{GIS}=0.01$ の条件下にて33GtCO₂

2050年のCO₂排出量

結果③

最適CO₂排出パス ($h_{GIS}=0.01$)

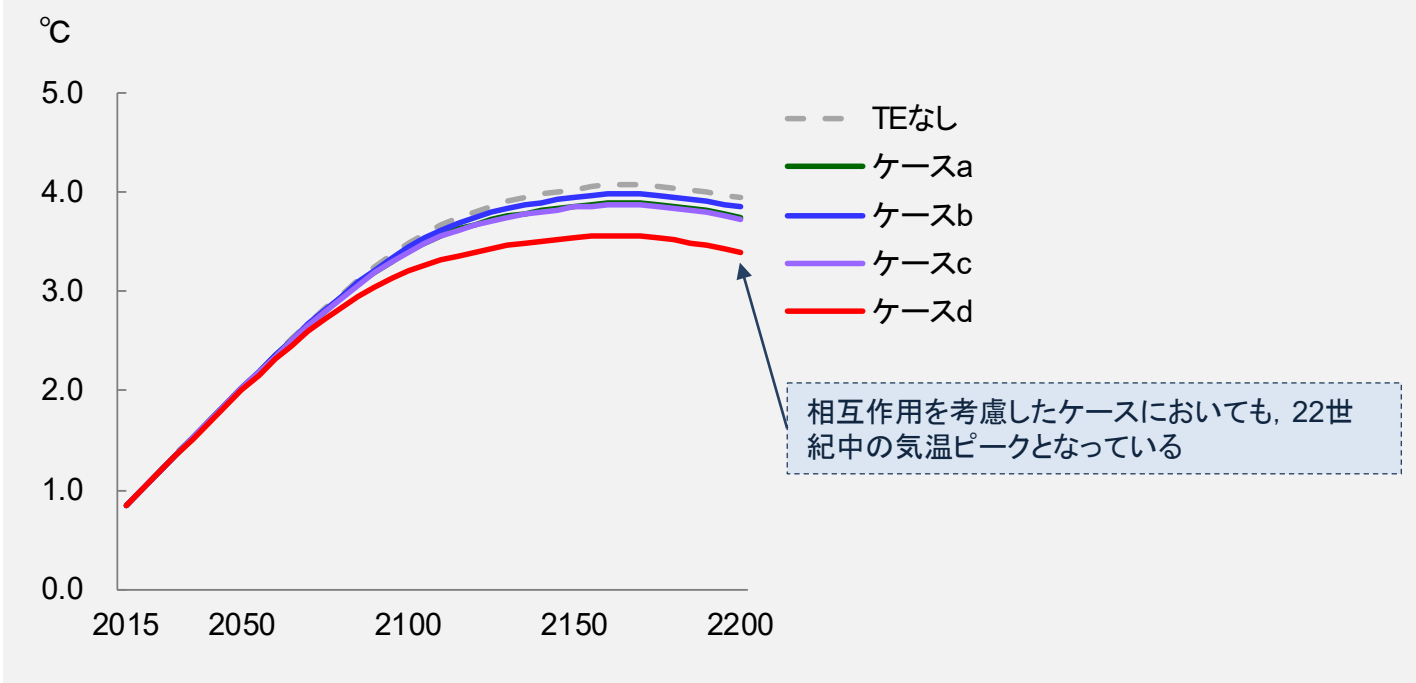
- ケースdで $h_{GIS}=0.01$ の条件下では、排出ピークおよびゼロ・エミッションのタイミングが前倒し
- 2030~50年に削減を進める姿にはならないものの、今世紀後半にはゼロ・エミッション化が最適解となっている

最適CO₂排出パス ($h_{GIS}=0.01$)

結果④

気温上昇 ($h_{GIS}=0.01$)

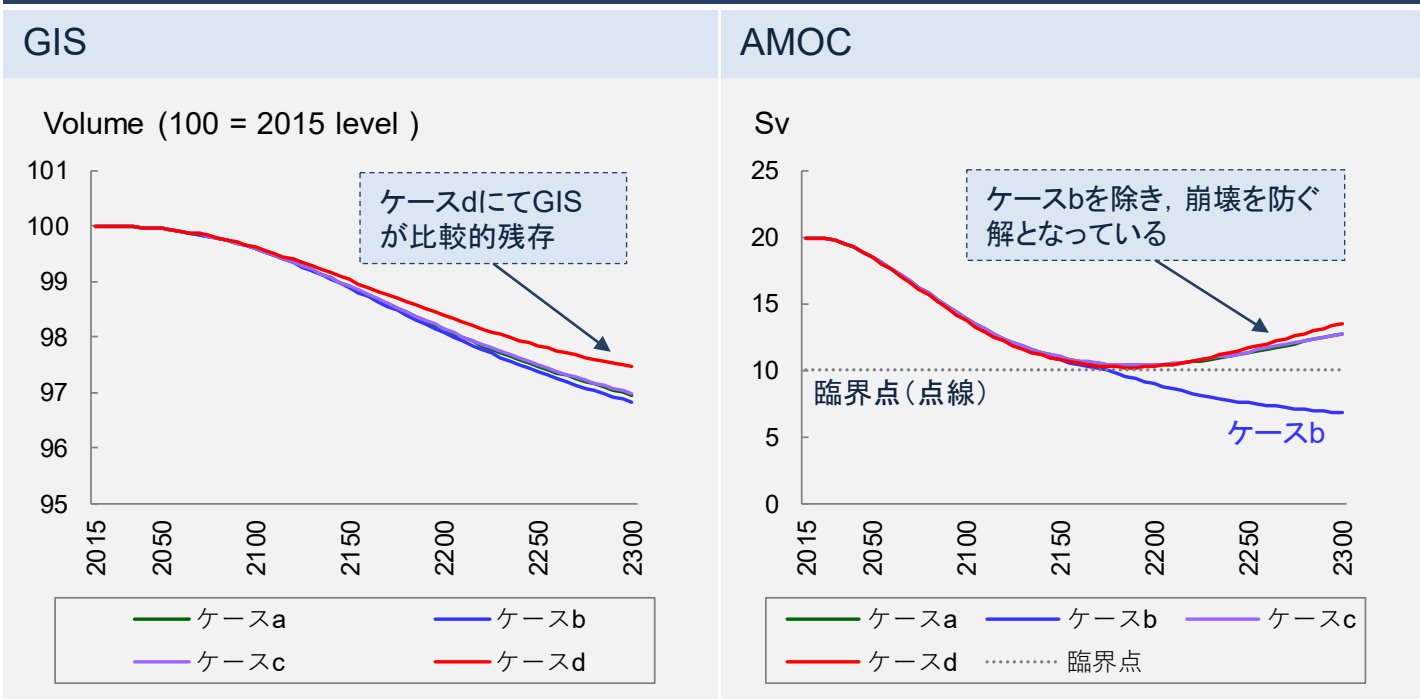
- 下図は $h_{GIS}=0.01$ における気温上昇。「TEなし」の気温上昇は最高4.1°Cに達した。ケースa~cでは気温上昇は抑えられたものの、依然として4°C近くに達する
- ケースdの気温上昇は最高で3.5°C付近となり、比較的抑制された様子が窺える

工業化以前からの世界平均気温上昇 ($h_{GIS}=0.01$)

結果⑤

GIS体積とAMOC強度 ($h_{GIS}=0.01$)

- GISの融解には長い時間を要する。2100年時点の融解量は各ケースにて大差なく、0.4%程度(海面上昇で0.03m)。2300年といった超長期の時間軸では融解量に差が窺える。ケースdでは比較的残存している。
- AMOC被害を織込まないケースbではAMOC強度が臨界点を下回り、弱化する傾向が窺える。対して、AMOC被害を考慮したケースa,c,dでは崩壊を防ぐパスが最適となっている。

GIS体積とAMOC強度 ($h_{GIS}=0.01$)

まとめ

- 本研究ではGIS及びAMOCの挙動をDICE-2016R2に組み込み、費用便益分析を行った。
- その結果、AMOCへの淡水注入増加率が高い場合には、最適解(社会的炭素費用やCO₂排出パス、気温等)に有意な影響を与えることが分かった。Tipping Elementsの相互作用は今後の気候変動政策を検討する上で重要な要素といえる
- 相互作用を考慮した場合(ケースd, $h_{GIS}=0.01$)には今世紀中のゼロ・エミッションが最適解となった。Tipping elementsの被害抑制やリスク管理の観点から、脱炭素もしくは負の排出を実現する技術の開発及び社会実装が重要である
- 今後の研究課題として、GISやAMOC以外のTipping elementに関するモデル化や分析が挙げられる
- 最後に、費用便益分析(特に結果の絶対値)には高い不確実性を伴う点に留意されたい。相互作用を考慮したケースd($h_{GIS}=0.01$)でも最高3.5°Cの気温上昇に達したが、その一方で、被害関数等の前提条件を変更する等によって2°Cや1.5°C水準を最適と報告する既往研究も存在する。分析結果はモデル構造や前提条件に依存することから、今後はこれらに関する議論を深化させ、温度目標の科学的合理性を議論する必要もある

ご清聴ありがとうございました

大槻貴司 松尾雄司 森本壮一

日本エネルギー経済研究所

2021年1月 エネルギー・資源学会 第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス 講演番号15-1