将来の気候変動下におけるティッピングエレメントのティッピングポイントの超過可能性

木口 雅司¹・井芹 慶彦²・鼎 信次郎³・沖 大幹⁴

¹正会員 東京大学生産技術研究所 特任講師 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail:kiguchi@iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京工業大学環境・社会理工学院 研究員 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-6)

E-mail: iseri.y.aa@m.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学環境・社会理工学院 教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-6)

E-mail:kanac@cv.titech.ac.jp

⁴正会員 東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail:taikan@iis.u-tokyo.ac.jp

本研究では、地球温暖化に伴う気候変動が進行して、ある臨界点（ティッピングポイント）を過ぎた時点で不連続のような急激な変化が生じて、大きなインパクトをもたらすような気候変動の要素（ティッピングエレメント）の発現可能性について解析した。先行研究で述べられたティッピングポイントを用いて、4つの排出シナリオや緩和目標としての戦略シナリオと、ティッピングエレメントのうち北極海の夏の海氷の喪失とグリーンランド氷床の融解について関連性を導いた。その結果、ティッピングポイントの不確実性があるものの、各排出シナリオでのティッピングエレメントの発現可能性が示された。一方戦略シナリオでは、複数気候シナリオを用いて検討した結果、気候シナリオとティッピングエレメントの両方の不確実性を組み合わせて議論する可能性が示された。

Key Words : *tipping elements, climate change, Greenland ice sheet, Arctic summer sea-ice*

1. はじめに

2015年11月30日から12月11日まで、気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）等が開催され、「パリ協定」等が採択された。そのなかには、これまで議論されてきた世界共通の長期目標としての「2℃目標」だけで

なく、「1.5℃」への言及がなされた。このように、世界の削減排出量を議論する一つの目標とされている。

ティッピングエレメント（以降、TE）とは、いわゆる地球温暖化に伴う気候変動が進行してあるティッピングポイント（臨界点、以降、TP）を過ぎた時点で、不連続といっても良いような急激な変化が生じて、結果と

表 1 Lenton *et al.* (2008) で取り上げられているティッピングエレメントとその想定される影響。

	ティッピングエレメント	想定される影響
①	北極海の夏の海氷（の喪失）	温暖化の促進、生態系への影響
②	グリーンランドの氷床（の融解）	海面の上昇
③	西南極氷床（の不安定化、融解）	海面の上昇
④	大西洋熱塩循環（の減速）	地域的な寒冷化、海面水位変動、熱帯収束帯の移動
⑤	エルニーニョ・南方振動（の振幅増大）	東南アジア等における旱魃
⑥	夏のインドモンスーン（循環の弱体化）	降水量減少、乾燥化、旱魃
⑦	サヘル・西アフリカ モンスーン地域（の植生割合増大）	湿潤化
⑧	アマゾンの熱帯林（の植生割合の減少）	生物多様性の喪失、降水量の減少
⑨	北方林（の植生割合の減少）	植物群落の入れ替わり

して大惨事を引き起こすような気候変動の要素を指す。Lenton et al. (2008)¹⁾で取り上げられているTEは、表1 (木口ほか, 2015)²⁾のとおりである。このうち、「北極海の夏の海氷 (の喪失) 」と「グリーンランドの氷床 (の融解) 」は21世紀のうちにTPに到達する可能性が高く、「西南極氷床 (の不安定化、融解) 」、「大西洋熱塩循環 (の減速) 」、「エルニーニョ・南方振動 (の振幅増大) 」、「夏のインドモンスーン (循環の弱体化) 」、「サヘル・西アフリカモンスーン地域 (の植生割合増大) 」に関してもTPに近づいて急激な現象が観察される可能性がある。ただし、急激といっても、10年程度で遷移する可能性のある「北極海の夏の海氷 (の喪失) 」や「夏のインドモンスーン (循環の弱体化) 」、「サヘル・西アフリカモンスーン地域 (の植生割合増大) 」などもあれば、「グリーンランドの氷床 (の融解) 」や「西南極氷床 (の不安定化、融解) 」のように300年程度かけて変化すると想定されるものもあり、まさに地球物理学的時間スケールで「急激」、と言える。TEによる急激な変化は、必ずしも悪い面ばかりではない。たとえば、「北極海の夏の海氷 (の喪失) 」は固有の生態系への影響という悪い面もあれば北極海航路という必ずしも悪いとは言えない面もある。また、「サヘル・西アフリカモンスーン地域 (の植生割合増大) 」は湿潤化に伴う従来の乾燥地に適応した種が失われるなどの悪影響が考えられるが、植生割合が増加しCO₂吸収が増加するといった具合である。最新のIPCC第5次評価報告書 (AR5) 第1作業部会 (WG1) 報告書 (IPCC, 2013)³⁾では、「ティッピングエレメント」という言葉を使用せず、「急激あるいは非線形な遷移」とした。また、そのような急激あるいは非線形な遷移は、気象現象だけに限らず、熱塩循環のような地球システムを構成するその他の現象としても生じることが明示的に扱われている。

Lenton and Schellnhuber (2007)⁴⁾は、今世紀中に生じる地球温暖化によって誘発される可能性のある、政策関

連性の高いTEを示した。それによれば、今世紀中にはTPに達しないものがある一方、北極海の夏の海氷の喪失やグリーンランド氷床の融解は、産業革命以降の全球平均気温が1~2℃程度上昇すると発生するとされ、その閾値の取り方が正しいとするならば、今世紀中にTPに達する可能性が高いことが予想される (これら二つのTEのTPについては、Lenton and Schellnhuber (2007) 以降の議論も含め、本節の後半で別途取り上げる。)。現在すでに産業革命以降1℃弱上昇している地球は、気温上昇がたとえ止まっても北極海の夏の海氷の喪失やグリーンランド氷床の融解が止まらない状態に入りつつあることが言えるだろう。そういった中で、新たな国際枠組を議論する上で温度上昇の目標をどのように設定するかが重要となる。しかしLenton and Schellnhuber (2007) で指摘しているようにその温度上昇幅にはまだ不確実性も大きく、また政策決定者が判断するに足る知見を研究者は提供できていない。つまり、その現象が起きた際にどれくらいの損害を受けるかをまだ定量的に示すことが困難であり、政策決定者は地球温暖化による被害と被害軽減のための投資との比較を可能とする知見を得ていない。

本研究では、排出シナリオ (代表的濃度シナリオ (RCP; Representative Concentration Pathways) に対応させたもの) や環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクトS-10 (<http://www.nies.go.jp/ica-rus/index.html>) が社会が採りうる気候変動リスク管理の選択肢を示すために開発した戦略シナリオ (表2に記載。詳細は、「地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢 第1版」⁵⁾を参照) とTEとの関連性を導き、洪水や熱ストレスなどの今世紀既に発現している現象とTEとを直接的あるいは間接的に比較できるような知見の提供を目指す。

表2 環境省 S-10 プロジェクトで開発された戦略シナリオ (ICA-RUS REPORT 2015 の表3を改変)。

戦略名	目標温度水準 (工業化前比)	AD-DICE の排出経路分析での 気候感度想定 [リスク回避性向]	AD-DICE での気温変化 推計時の簡易気候モデル の気候感度の設定	気候不確実性を考慮 した際に想定される 目標の達成可能値
T15S30	1.5℃	3.0℃	3.0℃	およそ 50%
T15S45	1.5℃	4.5℃	3.0℃	およそ 80%
T20S30	2.0℃	3.0℃	3.0℃	およそ 50%
T20S45	2.0℃	4.5℃	3.0℃	およそ 80%
T25S30	2.5℃	3.0℃	3.0℃	およそ 50%
T25S45	2.5℃	4.5℃	3.0℃	およそ 80%

※ベースライン (BaU、対策無しを想定) の社会経済シナリオとしては SSP2 シナリオを想定。

2. 使用データ、手法

本研究では、特に今世紀中にTPに達する可能性が高い「北極海の夏の海氷（の喪失）」と「グリーンランド氷床（の融解）」に注目し、そのTPの文献渉猟を行った。その結果、ある幅を持ったTPを抽出した。「北極海の夏の海氷（の喪失）」のTPは、IPCC（2013）がComiso and Nishio（2008）⁶やMassonnet et al.（2012）⁷を引用し、1986～2005年（産業化以前と比べて約0.6℃高い）と比べて1.6～2.1℃をTPとした。一方、「グリーンランド氷床（の融解）」のTPは、IPCC（2013）で2つの論文が示されているが、元論文と値が異なったため、IPCC（2013）で述べられている産業化以前と比べて約1.0～4.0℃の昇温値を用いた。

一方将来シナリオとして、2つのシナリオを用意した。まず、国際的な活用実績を踏まえて選定した5気候モデル（GFDLESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM、NorESM1-M）による4排出シナリオ（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）想定での気候シナリオである。排出シナリオを用いた解析では、5気候シナリオの全球平均気温の平均値を用いた（Zickfeld et al., 2013⁸; IPCC, 2013）。

そしてもう一つの将来シナリオが環境省S-10で開発された戦略シナリオ（表2）である。環境省S-10では、6つの異なる選択（つまり緩和目標であり、長期（2100年もしくは2200年まで）の世界の温室効果ガス排出量の経路を設定し、現実の排出量がこれに沿うことを目指すもの）について対策や影響に関する分析を行い、各セクターでの結果を取り纏めて「戦略」として示した。戦略シナリオの作成手順の詳細は「地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢第1版」にあるが、それによれば、1) AD-DICE（DICE（Dynamic Integrated model of Climate and Economy）は地

球規模での温暖化影響と緩和費用の統合的評価を可能とする経済モデルであり、AD-DICEはそれをさらに適応への投資による影響の軽減を同時に評価できるように拡張したものである）内の簡易気候モデル式を用いて、4つの排出シナリオ（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）での世界平均気温経路を計算し、2) 4つの排出シナリオでの世界平均気温上昇のうち、「戦略」に対応してAD-DICEが示した全球平均気温上昇（表2の目標温度水準）に最も近い2つの排出シナリオを選び、その2つの排出シナリオの気温上昇量と「戦略」の気温上昇量との距離に応じてその2つの排出シナリオの重みづけ係数を計算することで作成される。本研究では、リスク回避性向が同じである「T15S30」、「T20S30」、「T25S30」と対策無しを想定したベースラインである「BaU」を用いた。

3. 結果

まず排出シナリオとTEとの関連性について述べる。排出シナリオ（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）の全球平均気温の平均値（Zickfeld et al., 2013; IPCC, 2013）と、「北極海の夏の海氷（の喪失）」、「グリーンランド氷床（の融解）」（表1を参照）のTP（IPCC, 2013）を用いて発現年を図にしたのが図1である。各排出シナリオでTEが発現しない場合は、「回避」と記した。「グリーンランド氷床（の融解）」は、RCP2.6の時TPが下限値を取る場合、2030年に発現するとなっているが、TPの平均値（上限値と下限値の平均）や上限値では発現しないなど、TEのTPの不確実性が示された。IPCC（2013）ではTPの複数の文献値が列記されているが、複数の文献から生じる不確実

図1 TPから推計されたTE ((a) 北極海の夏の海氷（の喪失）と(b) グリーンランド氷床の融解)の発現年。縦軸は設定したTPの昇温値。

性をどのように反映させるかが、今後の課題である。

次に戦略シナリオとTEとの関連性について述べる。排出シナリオとの関連性の調査と同様に、表2に示した戦略シナリオ「T15S30」、「T20S30」、「T25S30」と「BaU」の全球平均気温の上限値、平均値、下限値と「北極海の夏の海氷（の喪失）」、「グリーンランド氷床（の融解）」（表1を参照）のTP（IPCC, 2013）を用いて発現年を推計した。そのうち、「北極海の夏の海氷（の喪失）」と戦略シナリオ「T15S30」、「T20S30」、「T25S30」および「BaU」との関連性を示したのが図2、「グリーンランド氷床（の融解）」

と戦略シナリオ「T15S30」、「T20S30」、「T25S30」および「BaU」との関連性を示したのが図3である。

「北極海の夏の海氷（の喪失）」と3つの戦略シナリオとの関連性について述べる。「T15S30」の場合、いずれもTPを超えることはなく、発現しない。

一方「T20S30」の場合、5つのGCMの平均値ではTPの下限値を上回ることにはないが、昇温量が最大となるMIROC-ESM-CHEMでは2070年にTPの下限値を上回る。目標値を2.5℃とした場合の「T25S30」では、2090年に5つの気候シナリオを平均した全球平均昇温量がTPの下限値に達する。それぞれのGCMを見てみる

図2 北極海の夏の海氷（の喪失）のティッピングポイントの幅（下限値と上限値とその中間）と戦略シナリオ（目標気温が（水色）1.5℃（T15S30）、（黄）2.0℃（T20S30）、（赤）2.5℃（T25S30）と（黒）BaU、細実線は各 GCM、太実線はその平均）との関係性。縦軸は産業革命からの全球平均昇温量。

とGFDL-ESM2MとNorESM1-Mは、TPの下限値に達しないが、HadGEM2-ESとMIROC-ESM-CHEMはTPの平均値をどちらも2060年過ぎに上回り、MIROC-ESM-CHEMは2090年にはTPの上限値に近づく。別の観方をすると、TPが中間値（工業化前比の全球平均気温上昇 2.45°C ）であった場合、T15S30あるいはT20S30であれば、21世紀中のTP到達が回避出来そうだが、T25S30の場合には気候予測の不確実性幅のうち高目（HadGEM2-ESとMIROC-ESM-CHEM）のものが現実化した場合には2060年過ぎにはTPに到達してしまう。

一方、「グリーンランドの氷床（の融解）」はTP

が下限値を取る場合、気候モデルの不確実性を考慮したとしても、どの戦略シナリオでも既にTPを超えていることになる。一方で、TPが産業革命以降の全球平均気温上昇 2°C とした場合、T15S30では気候モデルの不確実性を考慮しても21世紀中にその温度に達することは無さそうである。一方で、T25S30だと、大きい気候変化を予測する気候モデルを前提とした場合には2030年代中頃にTP到達、5つの気候モデルの平均でみた場合でも2060年代中頃にTP到達が見込まれる。T20S30の場合、大きい気候変化を予測する気候モデルを前提とした場合にはT25S30とあまり変わらず2030年

図3 グリーンランド氷床（の融解）のTPの幅と戦略シナリオ（目標気温が（水色） 1.5°C （T15S30）、（黄） 2.0°C （T20S30）、（赤） 2.5°C （T25S30）と（黒）BaU）、細実線は各GCM、太実線はその平均）との関係性。縦軸は産業革命からの全球平均昇温量。

代にTP到達してしまうが、5つの気候モデルの平均で見た場合には21世紀中にはTP到達しない。より厳しい目標の緩和水準を取ることでTP到達の時期を遅らせることが出来るが、TPを超えた場合でも実際の問題（大きな海面上昇とその被害）が生ずるのは数百年~数千年先になるため、この超過年を遅らせる効果の意義をどう解釈するかは議論が残る。このようにGCMとTPの両方の不確実性を組み合わせて議論することを可能とした。

4. まとめ

本研究では、TEの発現可能性について解析した。先行研究からTPを抽出し、4つの排出シナリオや緩和策となる戦略シナリオと、TEと言われる「北極海の夏の海氷（の喪失）」と「グリーンランド氷床（の融解）」について関連性を導いた。その結果、TPの不確実性があるものの、各排出シナリオでのTEの発現可能性が示された。一方戦略シナリオでは、複数の気候シナリオを用いて検討した結果、気候シナリオとTEの両方の不確実性を組み合わせて議論する可能性が示された。今後は、各TEのTPに、論文渉猟の結果から不確実性が含まれた情報を落とし込む手法を検討し、その結果を用いて、リスク推計を提示していく予定である。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費（S-10、S-14）と文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラムにより実施された。

参考文献

- 1) Lenton T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., and Schellnhuber, H. J. : Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad.*

Sci. U.S.A., 105, 1786-1793, 2008.

- 2) 木口雅司・井芹慶彦・宮崎千尋・田渡竜乃介・山本彬友・伊藤昭彦・鼎信次郎・沖大幹：ティッピングエレメント. 環境情報科学, 44, 29-35, 2015.
- 3) IPCC : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., 2013.
- 4) Lenton, T. M., and Schellnhuber, H. J. : Tipping the scales. *Nature Reports Climate Change*, 2007. doi:10.1038/climate.2007.65
- 5) 環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-10 : 地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢 第1版, pp.180-184, 2015.
<http://www.nies.go.jp/ica-rus/report/version1/index.html>
- 6) Comiso, J. C., and Nishio, F. : Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *J. Geophys. Res.*, 113, C02S07, 2008.
- 7) Massonnet, F., Fichefet, T., Goosse, H., Bitz, C. M., Philippon-Berthier, G., Holland, M. M., and Barriat, P.-Y. : Constraining projections of summer Arctic sea ice. *The Cryosphere*, 6, 1383-1394, 2012. Doi:10.5194/tc-6-1383-2012
- 8) Zickfeld, K., Eby, M., Weaver, A. J., Alexander, K., Crespin, E., Edwards, N. R., Eliseev, A. V., Feulner, G., Fichefet, T., Forest, C. E., Friedlingstein, P., Goosse, H., Holden, P. B., Joos, F., Kawamiya, M., Kicklighter, D., Kienert, H., Matsumoto, K., Mokhov, I. I., Monier, E., Olsen, S. M., Pedersen, J. O. P., Perrette, Philippon-Berthier, M. G., Ridgwell, A., Schlosser, A., von Deimling, T. S., Shaffer, G., Sokolov, A., Spahni, R., Steinacher, M., Tachiiri, K., Tokos, K. S., Yoshimori, M., Zeng, N., and Zhao, F. : Long-term climate change commitment and reversibility: An EMIC intercomparison. *J. Clim.*, 2013. doi:10.1175/JCLI-D-12-00584.1.

(2016.4.7 受付)

OCCURRENCE POSSIBILITY OF TIPPING ELEMENTS UNDER FUTURE CLIMATE CHANGE

Masashi KIGUCHI, Yoshihiko ISERI, Shinjiro KANAE and Taikan OKI

In this study, we analyzed occurrence possibility of tipping elements, what cause a big impact to society, by abrupt transition with passing a tipping point under future climate change. According to tipping point in previous studies, we derived relationship between tipping elements (Arctic summer sea-ice loss and melt of Greenland ice sheet), and RCP (Representative Concentration Pathways) using multi-GCMs and Strategic scenarios as mitigation target. As a result, occurrence possibility of tipping elements in each RCP were indicated even though there are uncertainty of tipping point. In case of analysis using strategic scenario, we showed that it is possible to discuss including of uncertainties of climate scenario and tipping element itself.