

基礎研 レター

ティッピングポイントのモデル化 気候変動のレジームシフトをどのようにモデル化するか？

保険研究部 主席研究員 篠原 拓也
(03)3512-1823 tshino@nli-research.co.jp

1——はじめに

気候変動問題への注目度が高まっている。ハリケーン、台風、豪雨などの極端な気象現象による災害の激甚化・頻発化、海水温の上昇による海水の膨張や南極・グリーンランドの氷床の融解等が引き起こす海面水位の上昇、大規模な干ばつや山林火災の発生など、世界各地でさまざまな影響があらわれている。そうしたことが、その背景にあるものと考えられる。

気候変動問題の中心には、人為的な温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化がある。2015年の国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)で採択され、2016年に発効した「パリ協定」では、世界全体の平均気温の上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つとともに、 1.5°C に抑える努力を追求することが示された。この 2°C や 1.5°C といった上昇幅の背景には、ティッピングポイント(転換点)という考え方がある。ティッピングポイントには、物理的なものばかりではなく、社会経済的なものもある。

アメリカのアクチュアリー会(SOA)では、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第6次評価報告書(AR6)などを参考に、ティッピングポイントを数理的にモデル化して、保険会社の保険料設定やリスク管理に取り入れようとする取り組みも始まっている。本稿では、こうしたティッピングポイントや、そのモデル化の取り組みについて、見ていくこととしたい。

2——ティッピングポイントとは

まず、気候変動問題におけるティッピングポイントから見ていこう。

1 | 気候変動問題の波及経路は複雑

一般に、気候変動問題の波及経路は複雑だ。さまざまな要因が連鎖的に波及したり、要因間で波及が循環するうちに勢いが増幅したりすることがある。波及が非線形的に起こることもある。

(1) 連鎖的(カスケード)

波及は、1つの要因が次の要因に影響し、更にその次の要因の発現につながる、といった連鎖的な構造を持っている。ドミノ倒しのような波及だ。このような構造では、一旦走り出してしまうと、次々に波及が進んでしまう。

(2) 循環増幅的（フィードバック）

波及には、正のフィードバック効果もある。いくつかの要因の間を循環するうちに、波及の勢いが増幅していくというものだ。雪だるま式の増大と言うこともできる。転がり出した雪だるまがなかなか止められないのと同様、加速した気候変動の波及を止めるのは難しいものと考えられる。

(3) 非線形的（ノン・リニア）

波及は、非線形的に進む。例えば、気温が2度上昇した場合には、1度上昇した場合に比べて、台風などの極端な気象の発生の可能性が2倍ではなく、それを超えて高まる。この非線形性は、非常に小さな出来事が予想もつかない大きな出来事につながる、という「バタフライ効果」にも通じる¹。

2 | ティッピングポイントに達すると不可逆的な変化が起こることも

これらの波及が生じる原因の1つとして、ティッピングポイントが挙げられる。ティッピングポイントに達すると、突然の変化が起こったり、不可逆的な変化があらわれたりする。IPCCが2019年に公表した「海洋・雪氷圏特別報告書」²では、「地球または地域の気候が1つの安定状態から別の安定状態に変化する際の重要な閾値(しきいち)を指します。ティッピングポイントは、影響について言及するときにも使用されます。この用語は、自然または人間のシステムで影響の転換点(がまなく)到達することを意味する場合があります。」として、IPCCの報告書として初めて「ティッピング・ポイント」という表現を用いている。

IPCCのAR6では、15個のティッピングポイントの要素が示されている。そこでは、モンスーンや植生から、海氷、氷床、海洋酸性化など、さまざまな要素が挙げられている。各要素について、突然の気候変動の可能性や不可逆性の評価が示されている。

図表 1. AR6 に示された 15 個のティッピングポイントの要素

地球システム構成・ティッピングポイント要素	突然の気候変動の可能性	強制力が反転した場合の不可逆性(時間軸を加味)	温暖化が続いた場合の今世紀の変化予想	評価の変更
世界的モンスーン	あり(AMOS 衰退) [中]	可逆(数年～数十年間) [中]	世界的モンスーンの増加 [中]、アジア・アフリカの強大化と北米の弱小化 [中]	AR5 よりも多面的な証拠
熱帯雨林	あり [低]	不可逆(何十年間も) [中]	植物の炭素蓄積の増加は人間しだい [中]	AR5 よりも確信度上昇
北方林	あり [低]	不可逆(何十年間も) [中]	低緯度域の枯死と極域の拡大の相殺は人間しだい [中]	AR5 よりも確信度上昇
永久凍土の炭素	あり [高]	不可逆(数百年間) [高]	炭素の純変化で、永久凍土中は低下 [ほぼ確実]	SROCC よりも確信度上昇
北極の夏季海氷	なし [高]	可逆(数年～数十年間) [高]	完全な喪失 [可能性が高い]	SROCC よりも特定度上昇
北極の冬季海氷	あり [高]	可逆(数年～数十年間) [高]	通常の冬季での喪失 [高]	SROCC よりも特定度上昇
南極の海氷	あり [低]	不明 [低]	通常の冬季・夏季での喪失 [低]	CMIP6 のシミュレーション改善

¹ そもそもバタフライ効果という言葉は、気象の数値予報から生じた。1972年に気象学者のエドワード・ローレンツ氏が行った『ブラジルでの蝶の羽ばたきはテキサスでトルネードを引き起こすか』というタイトルの講演に由来している。蝶の羽ばたきのような初期条件のわずかな違いが、遠く離れた場所での竜巻の発生につながるかもしれない。そのため、計測の精度をどれだけ向上させても、気象を正確に予測することは困難、という趣旨だ。

² “The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate” (IPCC, 2019) 正確な日本語の名称は、「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書」。

地球システム構成・ティッピングポイント要素	突然の気候変動の可能性	強制力が反転した場合の不可逆性(時間軸を加味)	温暖化が続いた場合の今世紀の変化予想	評価の変更
グリーンランドの氷床	なし [高]	不可逆(数千年間) [高]	全シナリオで大規模喪失 [ほぼ確実]	SROCC よりも多面的な証拠
西大西洋の氷床・氷棚	あり [高]	不可逆(数十年～数千年間) [高]	全シナリオで大規模喪失 [可能性が高い]、3℃超上昇の予想下での動向 [不確実性が深刻]	3℃超上昇の予想下で、不確実性が深刻を追加
世界の海洋熱容量	なし [高]	不可逆(数百年間) [非常に高]	海洋の高温化が進む [非常に高]	平衡気候感度(ECS)や過渡的気候応答(TCRE)との整合性改善
世界の海面水位上昇	あり [高]	不可逆(数百年間) [非常に高]	上昇が継続 [非常に高]、3℃超上昇の予想下での動向 [不確実性が深刻]	3℃超上昇の予想下で、不確実性が深刻を追加
大西洋子午面循環(AMOC)	あり [中]	可逆(数百年間) [高]	低下 [可能性が非常に高い]、衰退がない [中]	SROCC よりも多面的な証拠
南大洋子午面循環	あり [中]	可逆(数十年～数百年間) [低]	強度が減少 [中]	SROCC よりも多面的な証拠
海洋酸性化	あり [高]	表層は可逆、深層は不可逆(数百年～数千年間) [非常に高]	CO ₂ 増加とともに継続 [ほぼ確実]、極域の炭酸カルシウム飽和 [可能性が高い]	SROCC よりも多面的な証拠
海洋貧酸素化	あり [高]	表層は可逆、深層は不可逆(数百年～数千年間) [中]	貧酸素化度と低酸素状態の増加 [中]	CMIP6 のシミュレーション改善

* []内の斜字は、確信度や可能性の評価。

** AR5 は第 5 次評価報告書(2013)。SROCC は、「海洋・雪氷圏特別報告書」(2019)を指す。また、CMIP6 は、結合モデル相互比較計画の第 6 期(最新)を指す。

*** 平衡気候感度(ECS)とは、大気中 CO₂ 濃度を倍にして、気候システムがふたたび平衡化した時の全球地表気温上昇量。過渡的気候応答(TCRE)とは、大気中 CO₂ 濃度を漸増(1%/年)して、倍になる 70 年目の全球地表気温上昇量。(「今さら解説ー気候感度って何? ～定義から WCRP 評価論文、パターン効果まで～」渡部雅浩(東京大学大気海洋研究所, 2021 年 4 月 27 日)より。)

**** 「不確実性が深刻」という状況は、専門家や利害関係者が次の点を知らない、または合意できない場合に発生する。(1) システム内の主要な推進力の関係を説明する適切な概念モデル、(2) 主要な変数とパラメータに関する不確実性を表すために使用される確率分布、(3) 望ましい代替結果の重み付けと評価方法。

※ “Climate Change 2021 - The Physical Science Basis” (IPCC WG1, 2021)の Table 4.10 をもとに、筆者作成

3 | 社会経済的ティッピングポイント (SETP) は社会経済システムが急激かつ根本的な変化を指す

前節のティッピングポイントは、主に物理学的なものや生態系に関するものであった。かつては、政治家や経済学者は、物理的なティッピングポイントが存在する可能性は低く、実証的な証拠もないと考えてきた。しかし、その可能性を裏付ける実証的な証拠が増えるにつれ、国家や産業部門の炭素排出予算を定めるうえで、ティッピングポイントへの注目が高まっていったという³。

ティッピングポイントには、社会経済的ティッピングポイント(socio-economic tipping point, SETP)と呼ばれるものがある。SETP は、社会経済システムが急激かつ根本的な変化を起こすことを指す。例えば、海面水位上昇により高潮・洪水の脅威が増すことで沿岸地域の住宅価格が急落することや、温暖化により雪線高度が上昇して低標高のスキー場が経営破綻することなどが挙げられる。

4 | 保険に関する SETP もある

アメリカのアクチュアリー会研究機関が 2024 年 8 月に公表した報告書⁴(以下、「SOA 報告書」)では、SETP の事例として、保険のティッピングポイント(保険 SETP)が取り上げられている。これは、物理的

³ 2023 年にドバイ(アラブ首長国連邦の首都)で開催された COP28(国連気候変動枠組条約第 28 回締約国会議)では、ティッピングポイントへの到達の危機と化石燃料産業の命運が対立する格好となったとされる。

⁴ “Tipping Points in Climate-Related Insurance Modeling” (SOA Research Institute, Aug. 2024)

リスクと移行リスクの両方から生じうるもので、消費者の嗜好、政策、技術進歩の変化を正確に評価することが困難となり、保険会社が市場から撤退する可能性を指す。

小規模な保険 SETP は、保険会社が撤退した地域で、保険や金融市場を不安定にする可能性がある。一方、大規模な保険 SETP は、大規模気象災害に伴う保険金支払いの増加等により保険会社が破綻し、民間保険が利用できなくなることで、個人、企業、地域社会が適切な保障カバーを得られないまま、重大なリスクにさらされる可能性をいう。これは経済の不安定化や保険適用の不平等化を招く場合もある。さらに、保障カバーの確保が困難となることが、気候関連災害後の地域住民の復興努力を妨げることとなり、被災地域の社会経済面の悪影響を長期化させる恐れもある。

3—ティッピングポイントの数理モデル化

前章で見たティッピングポイントについて、アメリカのアクチュアリーは、これを数理モデル化して、保険会社の保険料設定やリスク管理に取り入れようとする取り組みを始めている。

1 | 数理モデル化は特定の気候関連事象に限定したうえで地域を絞って行われる

ティッピングポイントにはさまざまなものがある。ティッピングポイント相互の関連性や、ティッピングポイント到達時の可逆性の有無・程度を見積もることは簡単ではない。モデル化したとしても、一部のティッピングポイントの動態が完全にはモデルに反映されていない可能性があり、また閾値の不確実性や、そもそもティッピングポイントが存在することの不確実性も残る。

そのため、地球規模の空間スケールと地質学的な長期の時間スケールにおいて、精度の高いティッピングポイントを数理モデル化することは極めて困難(ほぼ不可能)となる。

そこで、特定の気候関連事象に限定したうえで、地域を絞って、ティッピングポイントを数理モデル化することが試みられている。SOA 報告書では、山火事による住宅保険への影響、暑熱関連疾病率の生命保険・健康保険への影響が取り上げられている。⁵

2 | SETP の数理モデル化は 7 段階のフレームワークを通じて行われる

SETP の数理モデル化は、レジーム(制度や体制のこと)のシフトとして行われる。

レジームのシフトとは、システム内のある定常状態⁶から別の定常状態への移行を示すもので、システム内の大きな突然の変化を指す。レジームのシフトをどのように識別するかが、数理モデル化を行ううえでの検討ポイントとなる。これについては、その指針となる 7 段階のフレームワークがオランダの研究者らから示されており、よく用いられている。⁷

⁵ 山火事はカリフォルニア州サンディエゴ郡での山火事、暑熱はワシントン州シアトルでの熱波による暑熱関連疾病率が取り上げられている。

⁶ 動的な現象で、状態を決める物理量が、時間とともに変わらないもの。例えば、流体の流れの速さ、電流の強さが時間的に一定に保たれている状態。(「広辞苑 第七版」(岩波書店)より。)

⁷ “A stepwise approach for identifying climate change induced socio-economic tipping points” Kees C.H. van Ginkel, Marjolijn Haasnoot, W.J. Wouter Botzen (Climate Risk Management, 37, 100445.
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100445>)

図表 2. レジームのシフト識別のフレームワーク（1 から 7 の順に進める）

1	システム定義	時間と空間の境界やシステムの外観を描写、関係者の見通しを説明
2	システム記述	XLRM フレームワーク ⁸ を用いてシステムを記述
3	ティッピングポイント管理	システム測定の中で SETP を管理
4	ティッピングポイント特定	SETP の発現条件を特定
5	影響分析	システム内や、幅広いシステムの状況の中で SETP の影響を評価
6	行動特定	SETP 回避または適応の行動を特定し、SETP への近接を検知する指標を策定
7	決定支援	政策助言を組立て

* 表中の 3 と 4 のティッピングポイントは、レジームシフトと同義。

※ 注記 7 に記載のフレームワークを参考に、筆者作成

3 | レジームシフトの特定には、統計的な手法が用いられる

SOA 報告書では、レジームシフトを特定するために、さまざまなパラメトリックおよびノンパラメトリックな統計解析手法⁹を適用することが示されている。山火事については 3 つ、暑熱については 1 つの指標が示されている。¹⁰

レジームシフトを特定するための統計手法として、自己相関の変化、分散の変化、平均の変化を観測することが掲げられている。これらの 3 つの統計量が選択された理由として、実装が簡単であること、IPCC の報告書や前節のオランダの研究者らが示した報告書で概説されている基準に対応していること、レジームシフトに関する文献で広く採用されていることが挙げられている。3 つの基準すべてが、同時にレジームシフトを特定した場合、過去の観測に対する評価であれば「有意なレジームシフトが発生した」、将来の気候予測モデルであれば「レジームシフトが発生すると有意に予測される」と結論づけることができる。

図表 3. レジームシフトを特定するための統計手法

手法	レジームシフトの特定
ラグ 1 自己相関の変化 ^(*)	システムの急激な変化を検出するために、自己相関を使用。これは、突然の別の安定状態への移行の前に発生する。具体的には、自己相関が正の傾向から負の傾向に変化することで決定される。
分散の変化	レジームシフトは、安定状態が別の安定状態に移行することによって特徴付けられる。分散の有意な変化は、2 つの連続した期間の間の分散を比較するテストを用いて決定される。このテストでは、基になるデータが正規分布に従う必要はない。分散の変化が 0.05 未満の p 値に対応する場合、変化は有意と見なされる。
平均の変化	レジームシフトの前後の 2 つの状態が根本的に異なるかどうかを見る。これは、2 つの期間の間の変数の平均の有意な変化によって決定される。有意な変化は、2 つの期間の間で計算された t 統計量と、同じ期間を使用して計算されたブートストラップ t 統計量を比較することによって決定される。ブートストラップ t 統計量の 5% 未満が実際の t 統計量より大きい場合、有意な変化と見なされる。

* 「ラグ 1」とは、2 つの期間の間にタイムラグがなく、2 つの期間が連続することを表す。

※ SOA 報告書に記載のフレームワークを参考に、筆者作成

⁸ 不確実要素(X)、応答・政策の手段(L)、モデル(R)、実績測定(M)をもとに、シナリオ設定の評価を行うフレームワーク。

⁹ 母集団について、何らかの分布に従っているとの前提を置いた手法をパラメトリック、何らかの分布に従っているとの前提を置かない手法をノンパラメトリックと呼ぶ。

¹⁰ 山火事については、キーチ=バイラム干ばつ指数(KBDI)が 600 を超える年間平均日数、標準降水-蒸発指数(SPEI)が-1 を下回る年間平均日数(いずれも干ばつの指標)、山火事による過去の焼失面積と予測総面積の 3 つの指標。暑熱については、湿球黒球温度(WBGT)の日最大値の指標が掲げられている。

4 | 「料率誘導型ティッピングポイント」には、段階的な適応努力では不十分

SOA 報告書では、このレジームシフトの特定を通じて、「料率誘導型ティッピングポイント」が明らかになったとされている。これは、気候変動リスクの増大に応じて、保険料率が引き上げられることにより、保険 SETP が生じることをいう。特に、ある地域全体が大幅な保険料率引き上げの対象となるような広範囲に渡る変化に対しては、保険料を支払えない個人が同時に多発することことがあり得る。このため、段階的な適応努力では不十分となる。

代替となる適応策がない場合、適応限界または不適応の状態に陥る。これは、保障カバーが得られなくなるような社会経済システムの閾値となる。例えば、従来の洪水緩和策が社会的抵抗や経済的制約などに直面するシナリオでは、住民や企業は脆弱な地域からの移住を選択せざるを得なくなる可能性がある。

5 | 暑熱による健康保険・死亡保険として、パラメトリック保険や企業向け保険の創設が例示されている

暑熱については、モデル化を通じて、熱中症関連の罹患率・入院率や死亡率の急上昇、屋外労働災害の急増などが予測される。数理モデルに、その原因となるエアコン使用率の低さや、停電を引き起こす電力供給の不安定さを織り込むことも考えられる。

なお、暑熱に対応する健康保険・死亡保険として、パラメトリック保険¹¹や企業向け保険を創設することが例示されている。特に、暑熱に対して脆弱と見られる高齢者や子どもに対して対して、保障カバーが漏れることがないようにする取り組みも重要とされている。

4——おわりに（私見）

以上、気候変動問題のティッピングポイント、特に SETP について見ていった。また、その保険における数理モデル化の動向として、保険 SETP や料率誘導型ティッピングポイントについて概観した。

現在、気候変動問題ではティッピングポイントの研究自体が進行中であり、波及経路や閾値水準などについて、さまざまな実証研究が進められている。ティッピングポイントの数理モデル化についても、さまざまな試行錯誤が行われることとなろう。

そのモデル化が進めば、保険 SETP の発現が事前に予測できるようになる可能性がある。気候変動リスクは、影響が長期に渡り広範に及びやすいことを踏まえれば、予測を有効に活用することで、早期の段階からリスクの緩和や適応が可能となることが期待される。

今後も、気候変動問題やその数理モデル化に関する研究は進められるものと思われる。引き続き、気候変動問題の科学者・研究者が発するメッセージに注目していくこととしたい。

¹¹ ある指標（パラメーター）が、契約時に設定した条件を満たした場合に、一定額の保険金を支払う保険。

(参考資料)

“Climate Change 2021 - The Physical Science Basis” (IPCC WG1, 2021)

“The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate” (IPCC, 2019)

「絵でわかる地球温暖化」 渡部雅浩著(講談社, 2018 年)

“Tipping Points in Climate-Related Insurance Modeling” (SOA Research Institute, Aug. 2024)

「広辞苑 第七版」(岩波書店)

“A stepwise approach for identifying climate change induced socio-economic tipping points” Kees C.H. van Ginkel, Marjolijn Haasnoot, W.J. Wouter Botzen (Climate Risk Management, 37, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100445>)

「特集 ティッピングポイントを考える ― 第 1 回ティッピングポイントとは?」 早川光俊(地球環境市民会議, CASA レター, No. 107, 2020. 9)