

社会的ティッピング・ポイント（社会的転換点）研究の国際動向

山本 良一
東京大学名誉教授

ダボス会議に合わせて今年もグローバルリスク 2023 報告書が公表された。短期（2 年）では生活費高騰の危機がトップなのに対して長期（10 年）では気候変動緩和の失敗がトップに挙げられているのが印象的である。ちなみに長期的リスクに挙げられた 5 番目までのリスクを順に並べると、気候変動適応の失敗、自然災害と極端気象イベント、生物多様性損失とエコシステム崩壊、大規模な意図せぬ移住である。実にトップ 10 の長期的リスクの 1 番目から 5 番目までが気候変動関連のリスクが占めているのである。これは 1200 名を超える世界のエキスパート、政治家、産業界のリーダーの見解を反映しているのであるから、この 10 年間で気候危機が深刻化するだろうというのは世界のコンセンサスになっていることが分かる。

2022 年の世界の平均気温は産業化前（1850～1900 年）と比較して 1.16℃高かった（英国 Met Office）。これは観測史上 6 番目に暑かった年である。2023 年については世界の平均気温は 1.08℃～1.32℃の間、約 1.20℃になると予想されている。一方、James Hansen らは 2023 年後半にエルニーニョ現象が再発生すると予想している。そのため世界は前例のない熱波に襲われ 2024 年には世界の平均気温が上昇してパリ協定の 1.5℃目標が突破される可能性があるとしている。英国 Met Office の予測では世界の平均気温がパリ協定の気候ターゲット、1.5℃を 2022 年～2026 年の間に突破する確率を 48%と評価している。IPCC の評価では 2022 年より CO₂ の排出量を 3200 億トンに抑えれば気温上昇が 1.5℃未満にとどまる確率は 67%だが、4200 億トン放出するとその確率は 50%に低下する。現在の世界の CO₂ の年間排出量は約 400 億トンなので、67%の確率で 1.5℃以下に温度上昇を抑えるにはあと 8 年しかない。ワシントン大学の研究グループは主要な温室効果ガスを考慮して世界が排出をゼロにした時の世界の平均気温上昇が 1.5℃を超える確率を評価している。2022 年に排出を停止した場合は 42%、2029 年に停止した場合は 66%である。これらの研究は現状の世界の気候政策では 1.5℃目標が突破されるのが 2030 年頃に迫っていることを示している。

UNDP の 2021 年の調査によれば気候変動が非常事態にあると考える人口の比率は、ラテンアメリカとカリブ諸国、西ヨーロッパと北アメリカ、サブサハラのアフリカ、東ヨーロッパと中央アジア、アラブ諸国、アジア太平洋で 63%、72%、61%、65%、64%、63%である。西ヨーロッパと北アメリカでは実に 7 割を超える人々が気候が非常事態にあることを感じているのである。

数十年にわたる国際的な気候変動交渉にもかかわらず世界の二酸化炭素排出量は年率 0~2%で増加し続けている。パリ協定の 1.5℃目標を達成するためにはできる限り早く排出量をピークアウトさせた後で年率 7%程急速に削減する必要がある。すなわち社会の大転換が必要なのである。

気候と環境がティッピング・ポイント（転換点）を超える非常事態を迎えて、この危機を前向きな（ポジティブな）社会的ティッピング・ポイントを超えることによって突破しようという動きが世界的に活発化している。本稿ではその国際動向を概観する。気候のティッピング・ポイントを CTP（Climate Tipping Points）、社会的ティッピング・ポイントを STP（Social Tipping Points）と略記することにする。CTP や STP の研究には自然科学と人文社会科学の総合的アプローチが不可欠である。

1. 気候のティッピング・ポイント（CTP）

CTP に関する注目すべき研究が 2022 年 9 月に Science 誌に掲載された（ref.1）。McKay らはこの 15 年間の 200 余りの関連研究により CTP を再評価して、世界の平均気温が 1.5℃を上回ると複数のティッピング・ポイントが突破される可能性が高いと結論した。

表 1 気候ティッピング・ポイント
（McKay らによる参考文献 1 より山本が作成）

気候ティッピング・ポイント	しきい値 の最良評 価値（℃）	しきい値の範囲（℃）	タイムスケール最良評価値 （年,y） k=1000
グリーンランド氷床崩壊	1.5	0.8~3.0	10ky
西南極大陸氷床崩壊	1.5	1.0~3.0	2ky
熱帯サンゴ礁枯死	1.5	1.0~2.0	10
北方永久凍土の突発的融解	1.5	1.0~2.3	200
パレンツ海氷消失	1.6	1.5~1.7	25
ラブラドル海流崩壊	1.8	1.1~3.8	10
山岳氷河消失	2.0	1.5~3.0	200
西アフリカモンスーンのシフト	2.8	2.0~3.5	10
東南極大陸氷河崩壊	3.0	2.0~6.0	2ky
アマゾン熱帯雨林枯死	3.5	2.0~6.0	100
北方永久凍土崩壊	4.0	3.0~6.0	50
大西洋海流崩壊	4.0	1.4~8.0	100
北方森林枯死—南	4.0	1.4~5.0	50
北方森林拡大—北	4.0	1.5~7.2	50
冬の北極海氷崩壊	6.3	4.5~8.7	20
東南極大陸氷床崩壊	7.5	5.0~10.0	10ky 以上

世界の平均気温は産業化前より約 1.2℃高いので、既に突破されている可能性のある CTP は、

グリーンランド氷床崩壊

西南極大陸氷床崩壊

熱帯サンゴ礁枯死

北方永久凍土の突発的融解

ラブラドル海流崩壊

の 5 つである。世界の平均気温がパリ協定の 1.5℃目標に達するとラブラドル海流崩壊を除く 4 つの CTP はほぼ確実に（発生確率 66%以上）超えられてしまうと評価されている。これが本当ならば人類にとって恐るべきことである。現在の各国が表明している気候政策では今世紀中に世界の平均気温が 2～3℃上昇してしまうからである。

パリ協定の気候ターゲット 1.5～2℃を一時的に世界の平均気温が超えた場合（オーバーシュート）、気候のティッピング・ポイントを超えるリスクが増大する。オーバーシュートの大きさと長さ（期間）によってこのリスクがどれ程増加するかが問題となる。Nico Wunderling らは 4 つの CTP、AMOC（大西洋海流）、WAIS（西南極大陸氷床）、GIS（グリーンランド氷床）、AMAZ（アマゾン熱帯雨林）が相互作用するネットワークモデルを使用してこの問題を検討している。その結果、一時的オーバーシュートはオーバーシュートしない場合に比べて 72%リスクが増大することを見出した。これは長期的には世界の平均気温がパリ気候ターゲットの範囲に戻ったとしてもである。高い気候リスクを回避するにはより低い温度でオーバーシュートするしかない。オーバーシュートした場合にはグリーンランド氷床やアマゾンの熱帯雨林がティッピングのしきい値を超えるリスクが増大する。

アマゾンの熱帯雨林は森林伐採や気候変動により 2000 年代初頭より回復力が著しく失われている。2021 年に Nature に発表された LV Gatti らの研究によるとアマゾンの一部の地域は森林伐採により CO₂ の吸収源ではなく放出源となっていることが分かった。気候のティッピング・ポイントは互いに影響を及ぼしあい、ドミノ倒しの危険が迫っていると指摘されていた。最近の研究ではアマゾンの熱帯雨林と距離的に 2 万 km も離れたチベット高原が上空の大気の流れを通じてテレカップリングしていると報告されている。アマゾンが気温上昇するとチベット高原も気温上昇する。しかしアマゾンで降水量が増えると逆にチベット高原では降雪量が減少する。チベット高原の氷河は融解し 2008 年以降ティッピング・ポイントに近付きつつある。このように 2030 年頃までに 1.5℃気候ターゲットが突破されると複数の CTP が突破され他の CTP にカスケード的に影響を及ぼすことが懸念されるのである。

2. ティッピング・ポイント概念の歴史

ティッピング・ポイント概念の歴史について Milkoreit は次のように述べている (ref.2)。

(1) 1950 年代から 1970 年代、社会学者と経済学者がこの概念を用いて暴動などの集団行動

を説明

- (2) 1990 年代、生態学者とレジリエンス学者が生態系のレジームシフトを説明
- (3) 2000 年に Gladwell が「The Tipping Point」を出版、メディアがこの用語、ティッピング・ポイントを取り上げる
- (4) 気候科学は 2005 年以降大規模な気候システムにおける非線形変化を記述するために使用を開始
- (5) 気候変動と持続可能性に取り組んでいる社会学者が 2007 年から研究を始める
- (6) 気候変動、生物多様性の課題の明確な解決策として社会的ティッピングに焦点があたり、学際的な研究分野が生み出されている

Gladwell の本が出版されて以来ティッピング・ポイントという用語が頻繁に使用され始める。ちなみに 2004 年に米国国防総省から「急激な気候変動シナリオと米国の国家安全保障への影響」というレポートが公表された。同じ年には科学的には正確ではないが映画「デアフター・トゥモロー」が公開されている。

3. ティッピング・ポイント (TP) の定義

ティッピング・ポイント（転換点）は例えば次のように定義されている。

“In sociology, a tipping point is a point in time when a group or many group members rapidly and dramatically changes its behavior by widely adopting a previously rare practice (Wikipedia).”

TP は Morton Grodzin らによって使用され Thomas Schelling や Jean Pierre Dupuy によって広められたとされている。論文で使用されている tipping point 類似の用語についての研究によれば、多く使用されている順に並べると次のようになる (ref.2)。

regime shift

critical transition

tipping point

punctuated equilibrium

alternative stable state

ecological threshold

state shift

CTP を超えることを防ぐために前向きな STP の引き金を引くという本稿の目的に沿った用語としては、

Socio-ecological tipping points (Tabara 他)

Leverage points (Donella Meadows)

Positive tipping points (Tabara, Lenton)

Sensitive intervention (Farmer)

Social tipping point (Otto ら)

Transformative tipping points (Van Ginkel ら)

などがある (ref. 2)。

地球規模の持続可能性に向けた変革には、社会の変化を劇的に加速させることが必要である。そのため小さな介入が自己強化型フィードバックを引き起こし、システムの変化を加速させるポジティブ・ティッピング・ポイントに関心が高まっているのである。私たち全員がポジティブ・ティッピング・ポイントの引き金となり得る役割を果たすことが出来る。2018年8月にスウェーデン国会前に独りで座り込んだ当時15歳の少女、グレタ・トゥンベリは気候ストライキが社会的ティッピング・ポイントになって欲しいと述べている。

4. 4つの種類のティッピング・ポイント (TP)

Van Ginkel らは文献レビューの結果、転換点を次の4つの種類に分類している。気候転換点、生態学的転換点、変革の転換点、適応転換点 (ref.3)。変革の転換点は Gladwell の一般的な転換点の理解に近い。Van Ginkel は生物物理的 TP を気候 TP とエコロジカル TP に分類し、社会経済的 TP を気候変動インパクトと気候変動への転換点応答に分け、社会経済的インパクト TP と適応 TP、緩和 TP と細かく分類している。SETP を「気候変動によって誘発された、社会経済システムの急激な変化が新しい根本的に異なる状態へ変化すること（利害関係者が重要と考える特定のしきい値を超えて）」と定義している。利害関係者との協議によりヨーロッパの政策に関連する 22 の潜在的な SETP が特定された。

取り上げられた SETP (Socio-Ecological Tipping Point) の例

- (1) 他的大陸での気候変動の悪影響によるヨーロッパの移住
- (2) 再エネ需要によるエネルギーネットワークの再構成
- (3) 極端な暑熱による死亡率と労働生産性への影響
- (4) 洪水による道路網とサプライチェーンの混乱の影響など

5. 社会的ティッピング・ダイナミクスに関する Otto らの研究 (ref.4)

STP については Otto らが 2020 年に包括的な研究を公表している。社会的ティッピングの要素 (STE=Social Tipping Elements) として取り上げられたものを次の表に示す。STE が意図的な介入を受けて STP を超えると理解される。

表 2

社会的ティッピング・ポイントの候補（Ottoらによる）

気候政策の強化	暮らしから化石燃料の除去
情報フィードバック	製品・サービスのカーボンフットプリントの見える化
金融市場	化石燃料産業の市場価値が他に比べて低下
エネルギーの生産貯蔵	再エネコストが化石燃料と比べて減少する
知識システム	マイノリティの世界観が指導者のマジョリティへ拡大
テクノロジー	持続可能生産のための水準までエネルギー需要が低下
価値と規範	マイノリティから指導者のマジョリティへ拡大
居住	新たなインフラプロジェクトで再エネが優先して使用される
ライフスタイル	マイノリティから人口のマジョリティへ拡大
市民関与	一部の運動からグローバル市民運動へ
教育システム	気候変動などの需要概念が主要カリキュラムの一部となる
人口抑制	持続可能な人口まで減少

Otto らによって見出された 6 つの STE 候補は以下の通りである。

STE1：エネルギー生産と貯蔵システム／脱中心エネルギー生産、化石燃料補助金の撤廃

STE2：住居／カーボンニュートラル都市

STE3：金融市場／化石燃料ダイベストメント

STE4：規範と価値のシステム／化石燃料の倫理的意味の認識

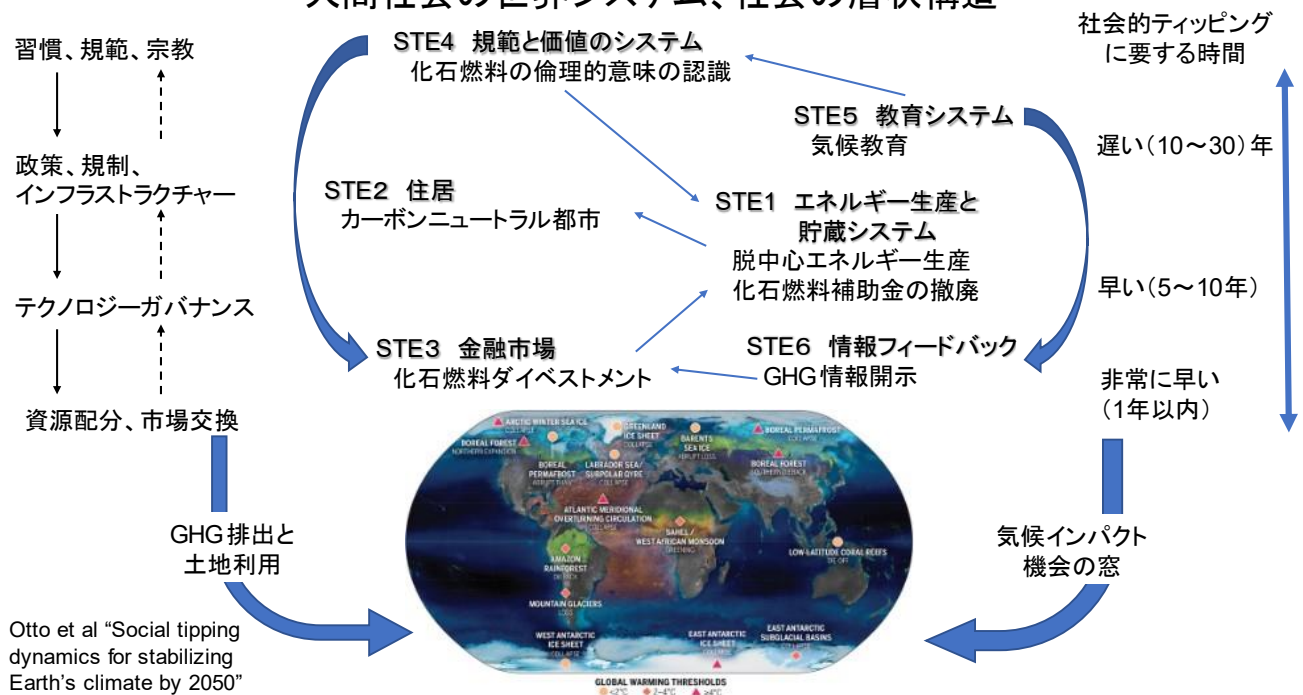
STE5：教育システム／気候教育

STE6：情報フィードバック／GHG 情報開示

図 1 にその概念図を示す。

図 1

人間社会の世界システム、社会の層状構造



ここで STP について他の研究も紹介しておこう。

【気候変動対策に向けた社会的ティッピングプロセス：概念的枠組み（Social tipping processes towards climate action: a conceptual framework）】（ref.5）

社会システムと気候システムのティッピングプロセスは、その構造と基礎となるメカニズムにおいて基本的な異なっている。エージェンシーが社会的ティッピングプロセスの主な原因ドライバーである。社会的ネットワークの質と関連する情報交換が人間以外のシステムにはない。気候と社会のティッピングプロセスは異なる空間・時間スケールで生じる。社会的ティッピングのダイナミクスは気候のものより著しく複雑である。

【社会的ティッピングプロセスのシステムダイナミクス手法による分析】（ref.6）

2021 年 11 月 18、19 日に専門家 13 名により詳細なシステムダイナミクス分析が行われた（IIASA）。作成したサブシステムモデルにはエネルギー生産、都市インフラ、金融、規範と価値観、教育・情報フィードバックがある。

【社会の転換点に向けて：変革のための環境づくり（Toward the Social Tipping Point: Creating a Climate for Change）】（ref.7）

行動や社会の変化を支援するためにはより多くの、より良いコミュニケーション、動機付けが必要である。コミュニケーターは人間の健康や子供の将来など、人々の持続的な関心事に関連付けられる気候変動の影響に焦点を当てるべきである。

6. 社会的ティッピングの引き金を引く

ある社会的な規範や行動を採用することで、次の人がそれを採用しやすくなるという社会

的伝染の基本的なポジティブフィードバックは模倣によって生じる。私たちの多くは環境保護行動をとるために自己効力感（問題に個人で対処する能力）を必要とするが、集団効力感（問題に集団で対処する能力）は自己効力感を強化することができる。いったん人口比率の臨界値に達すると、集団的なアイデンティティに適合しようとする圧力が社会的伝染を促進する可能性がある。Lenton らは伝統的な S 字カーブによって社会的伝染を議論している（ref.8）。問題なのは臨界量に達するのは人口の何割かということである。Lenton らは、それはたった一人の場合もあるが典型的には人口の 10~40%の範囲（Rogers, 1962）であり、複雑な伝染については約 25%の人口で社会慣習の変化をティッピングすることができると述べている（ref.9）。

Lenton らは STP コンセプトの具体的運用のための研究を行いティッピングの引き金を引くためのフレームワークを次の表 3 にまとめている。

表 3

ティッピングの引き金を引くためのフレームワーク(Tim Lenton, ref.8)

可能にする条件を創造するための 制御変数	社会的ティッピング・カスケード 向上のための強化フィードバック	介入 ポジティブ・ティップ
1. 人口サイズ 2. ソーシャルネットワーク構造 3. 情報／ケーパビリティ 4. 価格 5. パフォーマンス／品質 6. 望ましさ／シンボリズム 7. アクセシビリティ／利便性 8. 補完性	社会的伝染 採用による増大するリターン 実践によって学習する 規模の経済 技術的な強化 ネットワーク効果 インフォメーション・カスケード 共進化 エコロジカル・ポジティブ・フィード バック 社会生態学的ポジティブ・フィード バック	1. 社会イノベーション 2. 技術イノベーション 3. エコロジカル介入 4. 社会・技術・エコロジカルイノベーション 5. 政策介入と公共投資 6. 民間投資と公共投資 7. 公共情報 8. 行動ナッジ

ティッピング・ポイントは社会的な議論で強力なメタファーになり得る。一般市民は、気候変動は進行の遅い累積的な現象で長期間では人間社会や自然システムにとって有害というふうに捉えている。これでは世界の平均気温のわずかな増加によるリスクを過小評価していることになる。ティッピング・ポイントは、気候変動は非線形で急激な現象もあり得るということを一般市民に示している。科学的により正確な気候ダイナミクスを理解することにつながるが、一方において市民にとってこれは警告主義的であり、不安やどうしようもないという感情をかきたてるネガティブな効果をもたらすという批判もある。ティッピング・ポイントを使用して急進的な社会変革を求める際には具体的な解決策があり、個人も解決に寄与できるということを強調することが必要であろう。

【食料及び土地利用のシステム変換の前向きなティッピング・ポイント】

(Positive Tipping Points for Food and Land Use Systems Transformation, July 2021)

イノベーションの拡散理論によって肉食から植物食へのシステム変換が論じられているので紹介しよう。

イノベーター	人口比率 2.5%	肉食を回避する消費者、アニマルウェルフェア、環境問題、健康などへの配慮から植物食へ
初期適応者	13.5%	肉食を減らすという行動変容は自由だが、変化することは容易、魅力的、便利である
初期多数者	34%	
後期多数者	34%	伝統的な肉食者、変換するのが最も困難な人々、健康配慮によって訴える他はない
ラガード、ずっと遅れる人々	16%	伝統的な肉食者、変換するのが最も困難な人々、健康配慮によって訴える他はない

前向きなティッピングが起きるための5つの条件が挙げられている。

- ① 経済的な競争力、代替プロテインの値段が通常の肉より安いこと
- ② パフォーマンス、美味しさや健康影響に優れていること
- ③ 手に入れやすさ、便利さ
- ④ 文化的社会的規範、肉の過剰消費が社会的に受容されなくなるなど
- ⑤ ケーパビリティ、代替プロテイン料理の知識・技術

スコットランドのエジンバラ市は気候変動と戦うための植物由来条約（草の根条約 **Plant Based Treaty**）を承認したヨーロッパの最初の首都となった。植物ベースの食事への移行が温室効果ガスの排出を大幅に削減できることがその理由である。ロサンゼルスを含む世界の20の地方自治体がすでに署名している。

植物由来条約には次の3つの原則がある。

- (1) 放棄する、畜産のための土地利用の変化、生態系の劣化、または森林破壊がない
 - (2) リダイレクト、動物ベースの食品システムから植物ベースのシステムへの積極的な移行
 - (3) 戻す、重要な生態系を積極的に復元すること、特に森林の復元と景観の再野生化
- 残念ながら日本国内ではこのような自治体は出現していない。

7. オランダの STP アライアンス

Otto らの論文に触発されてオランダでは2021年には早くも STP アライアンスが結成されている。比較的単純な社会の変化が持続可能性への移行を加速させるという考えは魅力的である。STP アライアンスの創設者、フェムケ・スリーガーズは「気候政策に社会転換点戦略を求める私たちの呼びかけに対する社会からの反応は圧倒的でした」と語っている。当時のオランダの新内閣に対する STP アライアンスからの公開書簡には実際100以上の NGO、大学、草の根組織、アーティストが署名した。

《新内閣への要求》

- 化石燃料への補助金の停止
- 化石燃料の広告の禁止
- 気候教育の義務化

銀行や年金基金のダイベストメントの義務化

エネルギーの分散生産と貯蔵のために法規制の調整

これによって期待できることとして以下のようなものが挙げられている。

持続可能な規範と価値

持続可能な行動

持続可能なソリューションが化石燃料より安くなる

持続可能なソリューションの分散的供給がどんどん増加

人々の動機付けにスノーボール効果がもたらされる

できる限りの気候政策に対する支援

日本でも STP アライアンスのような組織を結成する必要があるのではないか。

8. スイス政府が CTP に関する IPCC 特別報告書作成を提案

2022 年 5 月 25 日にスイス、ジュネーブ環境ネットワーク主催の「気候ティッピング・ポイント、不可逆性、および社会、環境、経済への影響」に関するシンポジウムが開催された。このシンポジウムで IPCC に「気候のティッピング・ポイントと居住性と資源への影響」に関する特別報告書の作成を求めるスイス政府イニシアティブが提案された。

スイス政府連邦環境局のセバスチャン・ケーニッヒは次のように発言している。「IPCC は 20 年前に CTP コンセプトを導入したが、大規模な気候の不連続的変化が起こるのは、世界の平均気温が 5℃ 上昇した場合に発生する可能性が高いと考えていた。しかし最近の研究では 1~2℃ 上昇で CTP を超える可能性があると考えられている。CTP をなぜ懸念するかと言えば気候と生物圏のシステムは相互に関連しており、CTP が超えられれば重大な社会的、経済的影響がもたらされるからである。CTP とその地域的な影響に関する包括的な科学的評価はなされていない。包括的な合意形成プロジェクトも行われておらず、IPCC の第 7 の評価サイクルを逃してはならず、IPCC の WG2 と WG3 を関与させて CTP の包括的評価を行い、政策決定者に実用的な知識を提供すべきである。第 2 回のグローバルストックテイクとして役立たせるためには 2026 年頃までに CTP に関する IPCC 特別報告書の公表をして欲しい。シンポジウムに出席していたベルン大学物理研究所のトーマス・ストッカーもこの提案を強く支持している。ストッカーによれば CTP の科学は発展途上にあり科学者の間でのコンセンサスの度合いが低く包括的な評価報告書の必要性は高い。

会議に出席していたアレキサンドラ・ビラック（内部移動監視センター）も 2022 年国内避難民に関するグローバルレポートなどを紹介した。2021 年は 2370 万人が主に気象と気候関連の災害で移動した。WHO のマリア・ネイラ環境・気候変動・健康局長は次のような数字を紹介した。

化石燃料の外部コスト	5 兆ドル／年
化石燃料の補助金	4000 億ドル／年
避難民、直接人道支援	210 億ドル／年
大気汚染による死亡者	700 万人／年

CTP は人間の健康の非常事態であり、CTP の世界的監視を強化すべきであると述べている。

9. エクセター大学における CTP、STP に関するグローバルカンファレンス

2022 年 9 月 12～14 日に英国エクセター大学でグローバル・ティッピング・ポイント会議「Tipping Points From Climate Crisis To Positive Transformation（気候危機からポジティブな転換へのティッピング・ポイント）」が開催された。呼びかけ人は Tim Lenton（エクセター大学、グローバルシステム研究所長）と Johan Rockstrom（ポツダム気候影響研究所長 PIK）である。3 日間にわたる会議には 250 名の参加者があった。この会議については NGO である Carbon Brief のホームページにその討議の概要が紹介されている。この会議では CTP、STP に関連する様々なグループから発表があった。以下にその例を示す。

【TipMip (Tipping Element Model Intercomparison Project)】

ティッピング要素モデル相互比較プロジェクトが開始されている。ティッピング要素に関連する重要な生物物理的プロセスとフィードバック、転換点のしきい値の評価における定量的な不確実性は何かなどの問題に答えることが課題である。エクセター大学での会議中に TIPMIP ワークショップが開催された。TIPMIP ではベースライン実験、様々な温度 CO₂ レベルを超えた場合の長期的な結果を評価するためのコミットメント実験、影響の可逆性と潜在的なヒステリシス挙動を調べるための可逆性実験が提案された。TIPMIP のフェーズ 1 では次のティッピング要素が取り上げられる。グリーンランド氷床、南極氷床、AMOC、熱帯林、北方林、温帯林、永久凍土。この取り組みは AIMES、EARTH COMMISSION、WCRP によって支援されている。

【TiPACC】

南極海と南極氷床における近未来の不可逆的な変化、ティッピング・ポイントの可能性を評価することが目的である。EU Horizon2020 資金提供プロジェクトで 2019 年 8 月から 2023 年 7 月まで実施。マルチモデルアプローチによって結果の信頼性を大幅に向上させる。ノルウェー、イギリス、ドイツ、フランスの研究者のチームからなる。

【CTP、STP に関するレポートを COP28 までに作成】

エクセター大学、Systemiq, Systems Change Lab チーム、ベゾス地球基金からの 100 万ポンド（115 万米ドル）を利用、IPCC と同じく 3 つの作業部会を設置して行う。この決定的な 10 年間に必要な約 50 の移行における重要なティッピング・ポイントを特定することが目的である。一部のセクターや場所ではポジティブな転換がすでに発生している。チームはポジティブな STP と CTP によってもたらされるリスクと機会の両方に関する包括的なレポートを 2023 年 12 月の COP28 までに作成する予定である。

10. STP についての批判

フランツィスカ・メイ（Franziska Mey）はこのエクセター会議に参加して次のようにコメントしている（ref.11）。

- (1) 革新的な変化が一部の利害関係者にチャンスをもたらす可能性があるのと同時に、他の利害関係者、特に確立されたシステムに依存している人々にとっては破壊的になる可能性がある。
- (2) STP の共有された明確な定義がない。複雑な社会の STP を特定するのは困難ではないか。
- (3) STP コンセプトを実際に運用することは困難ではないか。小規模、簡単なシステムでは可能かもしれない。ノルウェーの EV の導入と市場への浸透、太陽光発電の成功、洋上風力発電の成功など。実証的ケーススタディがもっと必要である。例えば石炭に依存していたドイツのエッセンとデュイスブルクの社会経済的プロセス（ティッピング・プラス・プロジェクト）。

STP を特効薬と見なしてはならないが、社会的ティッピングのアイデアは魅力的でありメリットがある。自然科学と社会科学の統合と社会の深い変革の可能性を秘めている。

歴史的なエクセター会議の終了後の 2022 年 11 月にオスロ大学の Manjana Milkoreit は「STP は至る所にある一使い過ぎのパターンとリスク」と題する論説を発表し STP コンセプトの乱用を戒めている（ref.12）。

STP コンセプトの適用の 4 つの有害なパターンが挙げられている。

- (1) 時期尚早なラベル付け
- (2) システムの境界と分析のスケールを定義していない
- (3) ティッピングの証拠を提供していない、非線形性と正のフィードバックメカニズムの証拠がない
- (4) 既存の社会理論の使用、しきい値とティッピング・ポイントの違いを明確にしていない

脱炭素化の STP を成功裏に実証した研究はまだないのではないかと最も説得力のある研究は金融市場や電力網の失敗の分析から出るのではないかと述べている。

STP フレームワークはスピーディ、深い、全身の変化を捉えるものであり社会科学のツールボックスの有用な拡張になり得る点で人気が高い。すべての科学は社会的文脈の中で行われ、関与する個人と彼らが組み込まれている機関の価値観、規範、動機によって形成される。特定方向への大規模な社会的変化を引き起こすことも、導くことも、封じ込めることも結局できないことに気付くかもしれないと否定的な見方をしている。

レジリエンス・アライアンスはレジームシフトの 100 以上のケーススタディを収録している。2030 年に向けて気候ソリューションのために科学と政策におけるシステム思考が必要である。OECD は 2020 年に政策立案のための体系的思考に関するレポートを発表している。

ウプサラ大学のステファン・ヘドラングは気候行動の転換点と題して活動家の抗議行動より技術開発が重要だと述べている（A tipping point for climate change activism by Stefan

Hedlung)。スウェーデンの環境保護への 2 つの貢献は 1 つはゼロカーボン・スチール技術であり、もう一つはグレタ・トゥンベリだという。ゼロカーボン・スチールの先進技術は Vattenfall（電力）、LKAB（鉱業）、SSAB（鉄鋼）によって開発されてきた。グレタ・トゥンベリは一人で国会前に座り込み世界的な Fridays For Future 運動の先駆けとなった。ヘドラングは環境問題の対策には活動家の数を増やすよりエンジニアの数を増やす方が有効であると主張する。この種の議論は全く新しいものではなく、これまでに繰り返し主張されてきたものである。グローバル環境問題もコロナパンデミックも人々の行動変容と技術開発の両方を必要とする。そのような意味で活動家とエンジニアの両方を必要とするのである。

11. 2023 年 EU 議会は CTP、STP に注目 (ref.13)

EU 議会の 2023 年に注目する 10 の問題の一つとして気候及び社会・経済的転換点 (Climate and socio-economic tipping points) が挙げられている。CTP のヨーロッパへの影響としては、グリーンランド氷床崩壊による海面水位の上昇、アルプス氷河の消失、スバルバル及びスカンジナビアの永久凍土の融解、ピートランドの消失、北方森の北への移動、AMOC の崩壊によるヨーロッパの寒冷化と地中海地方の乾燥化の長期化などがある。ヨーロッパの森林は 2000 年頃に既に転換点に達し、0.5℃気温が上昇した。これは森林火災へのレジリエンスを低下させ 334 億トンの森林バイオマスに影響を与えている。

12. OECD は CTP に関する詳細なレポートを公表 (ref.14)

OECD は 2022 年 12 月 2 日に「気候ティッピング・ポイント、効果的な政策行動のための洞察」と題する詳細なレポートを公表した。CTP が超えられるリスクを低く評価することはもはや適切ではない。グリーンランド氷床崩壊、西南極大陸氷床崩壊、北極の永久凍土の融解は特に懸念される CTP で、海面上昇や温暖化の加速をもたらし、人間の適応に重大なる課題を生ずる。気候政策において CTP の扱い方を変える必要がある。レポートは次のような 3 章から構成されている。

第 1 章：CTP、行動ためのクリティカル・モーメント

第 2 章：CTP とカスケード効果

第 3 章：CTP を超える脅威を扱うアプローチ

OECD のレポートのエグゼクティブ・サマリーには次のように述べられている。

『本報告書は、気候システムのティッピング・ポイントに関する科学的理解は、中程度の温暖化レベルではティッピング・ポイントを超える確率が低いという一般に受け入れられている考え方に疑問を投げかけるものであり、気候変動問題への緊急性をさらに高め、今日の気候政策におけるティッピング・ポイントの扱い方をティッピングする必要があると結論付けている。気候戦略がティッピング・ポイントのリスクを適切に反映するためには、NDC の強化やネットゼロへのティッピングの加速など、この 10 年間で排出量の大幅な削減を推進し、同時に気候の影響に適応していく必要が。またこうしたティッピングを支援し、ティッピング・ポイントを監視するための技術のスケールアップとさらなる開発も重要である。

気候システムのティッピング・ポイントに関連する壊滅的な影響の可能性を考えると、そのような戦略を実行する機会を逃すことは、近い将来計り知れない経済的・倫理的コストにつながる可能性がある。』この OECD レポートは各国の気候政策に大きな影響を与えることが予想される。

13. ティッピング・ポイントの研究例

ここで STP についての研究例をいくつか紹介しよう。

a. TP 研究例 (Horizon2020)

石炭および炭素集約型地域におけるグリーンエネルギーへの移行に向けたポジティブな転換を実現。これは EU が資金提供する TIPPING. Plus プロジェクト、社会生態学的転換点 (STEP) に焦点をあてる。ポジティブな転換点とネガティブな転換点の両方について分析。

b. 洪水に対するヨーロッパの道路網の堅牢性を評価 (オランダのデルタレス研究所、Van Ginkel らによる)

スロベニア、マケドニア、アルバニアなどの小さな山岳国が特に脆弱、100 年に 1 度の局地的な洪水は道路網の回復力の欠如により地域全体を孤立させる可能性がある。英国、ドイツ、フランスなどの国の道路網は堅牢だが、局所的には脆弱性がある。Van Ginkel の研究では相転移の研究に用いられたネットワーク・パーコレーション・アプローチが使用された。チェンジメーカーにとっては社会的および経済的システムをどのように「傾けて」急速に進歩的な変化を促進できるかが問題。

c. レジームシフトのダイナミクス、転換点、漁業管理の成功 (AM Bloeker ら、Scientific reports, 2023)

北海で激しく漁獲されているか、さらには枯渇している 6 つの漁業資源の回復の可能性について調査。6 つの魚種すべてにレジームシフトのダイナミクスが存在することを示した。カレイ、メルルーサ、ニシン、ハドック、セイズ、タラが取り上げられた。

d. 社会的転換点と気候難民に関する研究 (Horizon2020 プログラムの 1 つ、HABITABLE) 気候変動、居住性、社会転換点を結び付ける、気候移住のシナリオに関して 18 ヶ国の 21 のパートナーが 2020~2024 年の 5 年プロジェクトとして実施されている。既に「A conceptual model of climate change and human mobility interactions (気候変動と人の移動の相互作用の概念モデル)」レポートを 2022 年 5 月 31 日に公表している。

e. SETP (Socio-Ecological Tipping Points, 社会生態学的転換点) の概念とそれを研究する方法論の提唱 (JD Tabara ら、バングラデシュとインドネシアにおけるエネルギーシステム導入の具体例より)

バングラデシュにおいてはオフグリッド地域の農村人口の 14% に 450 万のソーラーホームシステムをマイクロクレジットと市場戦略により放置することに成功している。インドネシアでは地元の NGO が分散型バイオガス技術の開発に成功している。この 2 つの事例を基に SETP の特定、評価、有効化の方法論を提案している。(On the discovery and enactment of positive socio-ecological tipping points: insights from energy

14. CTP は地政学を塗り替える可能性がある (ref.15)

Taylor Dimsdale らは CTP が地政学を塗り替える可能性について論じている。「最前線での生活；地政学を再形成する CTP」と題した論文が 2022 年 9 月 21 日に公表された。各国政府や国際機関はそれに備えていないと指摘している。

CTP のリスクの一例を挙げる。

第一は技術である。ティッピング・ポイントのリスクへの対応として、太陽光を宇宙に反射させることで地球を冷却する日射管理、あるいは大気中の二酸化炭素を除去する技術など、ジオエンジニアリング的解決策を展開する誘惑があるだろう。しかし、ジオエンジニアリングは未検証であり、予期せぬ結果を招き、地理的に偏在する危険性がある。気候モデルは、安全な気温を維持するためには、ある程度の炭素除去が必要であることを示唆している。しかし、これらのアプローチの中には、現在、適切なガバナンスメカニズムを欠いているものがある。

第二は国際的な気候変動資金である。このうち適応のための資金は 5 分の 1 程度に過ぎず、現在、ほとんどの資金援助は緩和のためのものとなっている。また、最貧国には適応資金のごく一部しか届いていない。現在、すでに発生している損失や損害に対応するための資金は提供されていない。気候変動への適応と損失・損害のための資金をめぐる交渉は、すでに論争的となっているが、リスクが増大すればするほど、この問題はより緊急性を増すことになるだろう。

3 つ目は、食料安全保障である。世界の多くの地域で、農業生産性はすでに気温の上昇によって脅かされており、一年のうちに複数の穀倉地帯が破綻するリスクは高まっている。各国が極端な気温シナリオやティッピング・ポイントによるリスクの連鎖に懸念を抱くようになれば、2010 年の大干ばつに見られるような食料輸出禁止措置が取られる可能性もある。このような資源ショックは、政治的・社会的な不安定さを助長する可能性がある。

4 つ目は、エネルギー安全保障である。レアアースやバイオエネルギーの需要拡大を含む再生可能エネルギーへの移行は、これまで石油、ガス、石炭の埋蔵量に依存していたエネルギー生産者と消費者の間のパワーバランスを変化させるだろう。ティッピング・ポイントや極端な温度シナリオを回避するために開始されたクラッシュ緩和プログラムは、この移行を大幅に加速させるだろう。このため、一部の中・大規模な化石燃料輸出国は準備不足のまま、バッテリーやその他のクリーンテクノロジーへの初期投資家に新たな影響力を与えることになるかもしれない。

5 つ目は、移住である。影響が悪化するにつれて、国内でも国境を越えても、より多くの人々が移動するようになる。太平洋のいくつかの島は、海面上昇によってすでに消滅しており、今後もさらに多くの島が消滅することが予想される。氷床が予想外に急速に融解すれば、海面上昇が加速され、この問題はさらに深刻になる。しかし、移住は、潜在的な「社会的」ティッピング・ポイントの一例でもある。そこでは、気候の影響そのものと同様に、人々が

変化に対する認識によって意思決定を行う。どちらの場合でも、国境を越えた大規模な人の移動は、地政学的な緊張を引き起こす可能性がある。

政府も国際機関も、気候リスク管理の緊急性の劇的な変化や、そのような変化から生じるより広範な結果に対して、現在のところ準備ができていない。一部の国や機関は、気候リスク評価を計画に組み込んでいるが、そのほとんどは中期的な気温シナリオを検討しているに過ぎない。また、ティッピング・ポイントのリスクを真剣に検討している例は見当たらない。一部の国では、政策立案に際して、戦略的フォーサイトのような極端なシナリオに適したツールを用いているが、そのほとんどは北半球のいくつかの主要経済圏に見られるものである。このような場合でさえ、気候変動はこれらの立案に体系的に統合されていない。

IPCC は、2024 年末までに、ティッピング・ポイントとその起こりうる分野横断的な影響に関する特別報告書を作成する必要がある。国連の下に世界的な気候リスク観測所を設立することで、交流を促進し、気候リスクの国境を越えた性質への対処を助け、2027 年までに早期警戒システムを整備するという目標に貢献することができる。

政府は、気候変動リスク管理を経済・安全保障の計画や意思決定に完全に組み込むべきである。これには、ティッピング・ポイントの脅威評価を含む潜在的な温度シナリオの全範囲と、戦略的なフォーサイトを広く活用することが含まれるべきである。国際金融機関は、気候の極端なリスクを金融リスクとして統合する必要がある。これは、民間部門と公的部門の両方において長期的にリスク管理を主流にすることに役立ち、世界の回復力に貢献するだろう。先進国は、国際的な適応資金のコミットメントを拡大し、新規または既存のメカニズムを通じて損失と損害に対する資金を提供する必要がある。影響に対処するための革新的な民間資金源について合意する必要がある。先進国は、気候変動によって強制的に避難させられた人々に対して提供される人道的支援を拡大すべきである。このように CTP は地政学に大きな影響を及ぼしている。

15. 緊急時の対応における民主主義と代議制 (ref.16)

このレポートの主要な主張を列挙すると以下ようになる。

緊急事態への対応の正当性と、それがどの程度まで民主的な慣行に根差しているかが問題である。現代の民主主義の理解は、法の支配、透明な政治手続き、報道の自由、結社の自由、包括的な投票方法、自由で公正な選挙、司法と立法のチェックアンドバランスといった理想を横断するものである。地域民主主義は、都市や地域が、その自治のレベルに応じて、人々が自分たちに影響を与える公的な決定に参加し影響を与えるために提供する実践や仕組みとして理解される。民主主義は、一般的に「ノーマルモード」のガバナンスを中心に発展してきたが、複雑な緊急事態という例外的な状況（気候変動、格差の拡大、金融不況、公衆衛生上の危機）に対する世界的な戦いに直面し、民主主義はかつてないほど試されている。緊急事態宣言は、地方や地域の団体を含む政府が迅速に行動し、調整、協議、精査の確立されたプロセスを回避すること、迅速なプロセスを可能にするものである。過激な介入の必要

性から、政治的アクターは例外的な権力を付与される。こうした権力は、通常の立法や司法による審査や透明性の範囲外となる傾向があり、非自由主義的独裁的な流れを生み出す可能性がある。緊急事態の権限を悪用することは、長期的に民主主義制度を弱体化させる。複雑な緊急事態は、テクノクラートの意志決定を強化する。科学に従う緊急対応では「専門家」とテクノクラートの制度に大きな力が与えられる。このようなシフトは、究極的には、政治的な決定が民主的な制度を通じて行われなくなり、代わりに技術委員会、アドバイザー、選挙で選ばれたのではない役人が行うようになるリスクがある。政府は専門家に依存し、一般市民は市民社会のニュースとメディアに依存するため、情報経済の有効性を脅かす偽ニュースの可能性が高くなる。複雑な緊急事態を管理するための民主的慣行の強化として、特に有望なのが、ミニ公共または緊急集会の設立である。市民社会による直接的な関与と貢献は、複雑で多面的な問題に対する迅速な解決策を生み出すために、しばしば必要とされる。また、分権的な対応によって、集団行動の敏捷性と特定の地域事情への対応力を高めることができる。複雑な緊急事態は地域の民主主義を活性化させる。

即座の行動と目に見える成果は、集団に対する信頼を高めることができる。複雑な緊急事態には、分散化されたデータと情報が必要である。緊急事態は、最も脆弱な人々、通常は構造的な不平等や差別に既に直面している人々に注意を向けることができる（高齢者、非正規労働者、女性、貧困にあえぐ人々など）。

COVID-19 は、対面での関与を阻害し、複数の形態の民主的関与を危うくした。対照的に、気候変動による緊急事態は、市民と政府を動かし、民主的ガバナンスのための革新的な形式を探索させた。地方自治体は、明確なコミュニケーション、一時的な権利制限のないオープンな提示、政策選択間のトレードオフの議論、すでに信頼されているステークホルダーとの幅広い連携などを含む、信頼構築の継続的プロセスに取り組むのに適した立場にある。地方自治体は緊急集会・緊急事態に対応できるインフラの用意とコミュニティの参加者がいつでも参加できる状態にしておくべきである。

表 4 に緊急時のガバナンスのための民主的な柱、表 5 に民主主義と緊急事態ガバナンスの緊張（Tensions）と相乗効果（Synergies）を示した。

表 4

緊急時のガバナンスのための民主的な柱 (ref.17)

権利	良い統治	代表	審議参加 仕分けに基づく	参加 自己選択による
人権 市民権 正義 法の支配	説明責任 透明性 コミュニケーション 応答性 開放性 手数料 事実 科学	議会 関係者 パワーバランス リーダーシップ	市民集会 市民陪審員	国民投票 公聴会 参加型予算編成 公開相談 市庁舎

表 5

民主主義と緊急事態のガバナンスの緊張と相乗効果 (ref.17)

Tensions 緊張	Synergies 相乗効果
緊急アクション 過激な介入 非常時の権力の利用 妥協した権利 権限委譲の停滞 技術的な決定 限られた政治的議論 情報格差 明確な政治的使命の欠如	エンゲージメントのきっかけ 変革の主体としての市民 地域民主主義の活性化 集団への信頼 分散化されたデータの必要性 最も脆弱な人々への配慮

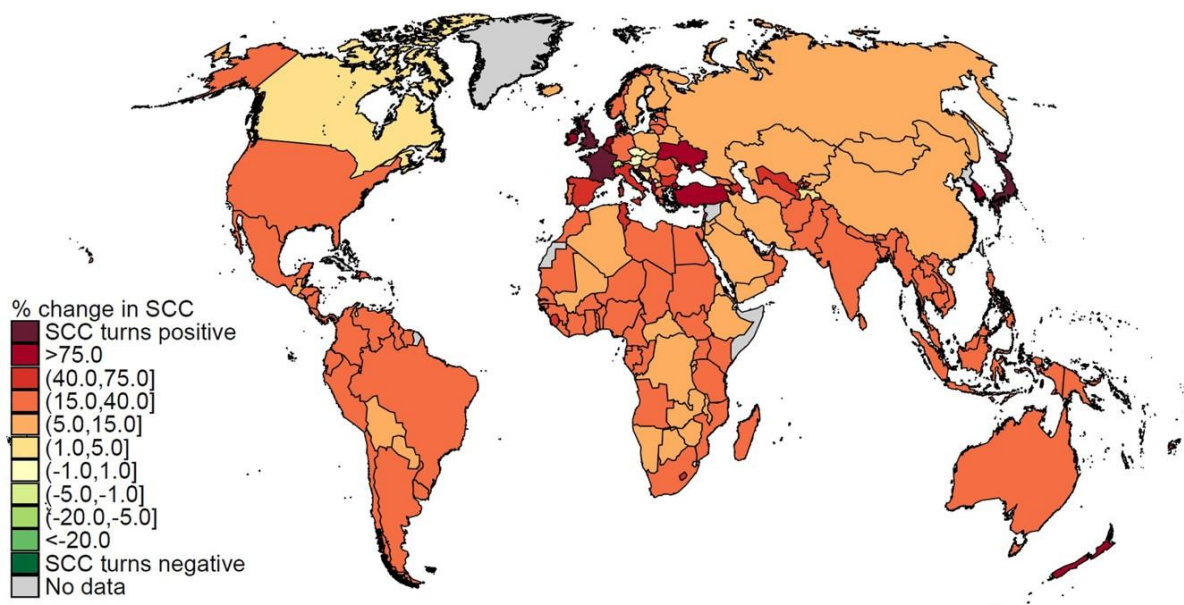
16. CTP の経済的インパクト

SCC (Social Cost of Carbon) について少し説明しておこう。以下は東京都市大学環境学部の伊坪徳宏教授の講演資料による (ref.18)。SCC は社会的炭素費用と呼ばれ CO₂ の 1 トンの追加排出による被害額の増加分であると同時に、CO₂ の 1 トンの削減による経済的便益でもある。削減の費用が SCC よりも小さければそのような対策は導入できるので政策の意思決定に利用されてきた。アメリカではオバマ政権では SCC は 42 ドル、トランプ政権では 7 ドル、バイデン政権では 51 ドルとされてきた。Nicholas Stern、Joseph Stiglitz、Kristina Karlsson、Charlotte Taylor はネットゼロ気候目標と整合性のある SCC について考察し、2030 年に 62 ドル、2050 年に 85 ドル (平均の割引率を 3%として) という数値を出している。米国政府の SCC は安すぎるという訳である。伊坪らは LCA を用いて SCC を 146US\$/tCO₂ という結果を得ている。これは LIME3 を用いた結果である。この値はオランダ環境省、ラドバウド大学による 140 ドル、スウェーデンのチャルマース工科大学による 135 ドルと良く対応した数値である。気候のティッピング・ポイントを考慮するとこの SCC が更に増加するというのである。

気候システムの転換点の経済的影響についての Simon Dietz らによる研究を紹介する (ref.19)。モジュール構造のメタ分析統合評価モデル (IAM) を使用してこれまでに経済文献で取り上げられた 8 つの CTP すべての経済的影響の統一された推定値を与えている。このモデルには、詳細な計量経済学的証拠とシミュレーションモデリングに基づいて調整された、180 ヶ国の気温上昇と海面上昇による国家レベルの気候被害が含まれている。全体として CTP は炭素の社会コスト (SCC) を 25% 増加させる。したがって CTP は世界的な経済リスクを増大させる。最大の影響を与える CTP は海洋メタンハイドレートと永久凍土の融解である。この研究で考慮されていない CTP、CTP 間相互作用などを考えると、この数値は過小評価されている可能性がある。この研究は Steve Keen、Timothy Lenton らによって批判されている。CTP を突破された時の経済的ダメージの仮定がやはり過小評価だということである。気候科学者は経済学者ともっと緊密に共同研究を行う必要がある。

図 2

気候ティッピング・ポイントの経済的影響 (ref.19)
 “Economic impacts of tipping points in the climate system ”
 炭素の社会的コスト SCC (Social Cost of Carbon) が何%増加するか



17. 2023 年の STP、CTP の国際動向

ダボス会議で注目すべきレポートが公表された (2023 年 1 月 19 日) (ref.20)

「The breakthrough effect: how to trigger a cascade of tipping points to accelerate the net zero transition」3 つのスーパー・レバレッジポイント、世界の GHG 排出量の 70% をカバーする分野で脱炭素化のカスケードを起こす可能性が示されている。これは明るい未来を切り拓くもので世界のメディアが大きく報道した。

(1) ゼロ・エミッション車の義務化

EV は中国とヨーロッパでの販売にけん引され、昨年販売された全自動車の 10% を占めている。需要が増加するにつれてリチウムイオン電池のコストは 90% 低下するなど EV のコストが低下する。EV 販売の義務化は特に強力な政策になる。

(2) 植物性タンパク質の公共調達

畜産は人為的な温室効果ガスの排出量の 14.5%を占めている。植物性タンパク質は肉よりも排出量が最大 90%減少。味だけでなくコスト面でも肉に追いついているが市場シェアが低い。公的機関がグリーン購入することが普及の追い風になる。

(3) 肥料製造におけるグリーンアンモニア使用の義務化

商用肥料の主要成分であるアンモニアは現在化石燃料から生産されている。グリーン水素で生産されるアンモニアに取って代わられる可能性がある。グリーン水素を海運、鉄鋼、航空などで利用できればティッピング・ポイントを超えることができる。

表 6 に SYTEMIQ のレポートに掲載されたセクター毎の TP の表を示す。

表 6

セクター毎の鍵となるゼロエミッション解決策のティッピング・ポイントの状況(山本が原表を簡略化)1

セクター	世界の排出量に占める割合	焦点となる解決策	現在の状態	ティッピング・ポイント(TP)	TPへの信頼度
電力	26%	太陽光、風力+貯蔵	ニッチ／マス市場	5000億ドル／年投資 電力の標準化コストが石炭・ガスより低くなること 50ドル／MWh 以下	高い
軽量道路輸送 Light Duty Road	9%	バッテリーEV (BEVs)	ニッチ／マス市場	Sticker Priceが内燃機関自動車より安くなること 500万人が使用する	高い
重量道路輸送 Heavy-Duty Road	3%	バッテリー電気トラック (BETs)	ニッチ	所有のトータルコストがICEトラックより低くなること 200万人が使用する	高い
建物暖房	6%	ヒートポンプ 住居のレトロフィット	ニッチ	ヒートポンプの CapExがガスボイラーより低下すること 平均の効率歩数が300%以下 インストレーション時間1~3日	低い
肥料	2%	グリーンアンモニア	解決策開発	1トンあたりのコストが窒素ベースのグレイアンモニア肥料より低下すること	高い
鉄鋼	7%	グリーン水素DRI	解決策開発	グリーン水素 DRIによって生産した鉄のコストが高炉(CCUSを使用しない)生産よりも安くなる 炭素価格 \$ 100/tCO ₂ グリーン水素 \$ 1.2-2.2/kgH ₂	中程度 実行によって学ぶ規模の経済

セクター毎の鍵となるゼロエミッション解決策のティッピング・ポイントの状況(山本が原表を簡略化)2

セクター	世界の排出量に占める割合	焦点となる解決策	現在の状態	ティッピング・ポイント(TP)	TPへの信頼度
船舶	3%	グリーンアンモニア	解決策開発	1トンあたりのグリーンアンモニアのコストが化石燃料を下回る 炭素価格、補助金 \$ 100/tCO ₂ グリーン水素 \$ 1.6/kgH ₂	中程度 実行によって学ぶ規模の経済
航空	2%	Power-to-Liquid 燃料	解決策開発	電動飛行機所有のトータルコストがジェット機より安くなること PtL 燃料のコストがジェット燃料より安くなること 炭素価格 \$ 200/tCO ₂ グリーン水素 \$ 1/kgH ₂	中程度 実行によって学ぶ規模の経済
食料と農業	12%	代替プロテイン	ニッチ	植物ベースプロテインのコストが肉より安くなること 同等の魅力(味、テクスチャー、栄養)	中程度 社会規範の拡散 規模の経済
土地利用変化の回避	11%	自然に基づく解決策(NBS)を価値が高いとする	ニッチ	土地の保護 NBS クレジット、エコシステムサービス支払いが土地の転換による経済価値より高い	低い 強力な継続的な規制が必要
セメント	7%	CCUS	解決策開発中	N/A	低い 政策による明確なフィードバックループは無い
ケミカル	4%	CCUS/グリーン水素			

【いかにしてティッピング・ポイントを超えるか】

ゼロ・エミッションのための新しい解決策が社会的に普及するためのティッピング・ポイントの引き金を引くための条件はどのようなものであろうか。

(1) 手頃な価格 (Affordability)

現在の技術と新技術のコストパリティ（価格同等）を達成する。新技術のコスト低減努力と政策支援（例えば炭素税の導入、化石燃料補助金の廃止など）により現在の支配的技術のコストを上げる。価格が同等になると新技術の導入が促進され、これはストックの変化をもたらす。

(2) 魅力 (Attractiveness)

コスト以外の新技術の魅力によって普及を促進する。例えば家庭のセントラルヒーティングはタキギよりも安全で便利である。

(3) 入手しやすい (Accessible)

新技術を利用するための広範なインフラが整っている、例えばノルウェーでは EV 導入促進のため公共の充電設備が整備されている。

(4) 社会システム変革のドライバー

政策支援、市場の発展、購入者の選好

新技術が広範に社会に受容されることによって技術の改良、コストの低減が進み更に社会的受容が拡大するという自己加速的進歩が生じる。

【水素のコスト曲線 (SYSTEMIQ の分析による)】

水素価格は電解槽のコストに依存する。導入された電解槽のキャパシティが増大するに

たがって学習効果により電解槽コストは低減する。世界的に肥料生産においてグリーンアンモニアを 25%混ぜるとことを義務化すると電解槽の設置が進み、水素の価格を\$1.5/kgH₂以下にすることができるだろう。もし同時に\$100/tCO₂の炭素税を導入するか同等の政策手段を取れば船舶及び鉄鋼セクターの新技术は化石燃料ベースの現状技術とコストパリティが達成される。

水素コスト（ティッピング・ポイントを超えるために必要な）

\$2.2/kgH₂=化石燃料ベース肥料生産コスト+\$100/tCO₂炭素価格

\$1.6/kgH₂=化石燃料ベース船舶燃料コスト+\$100/tCO₂炭素価格

\$1.2/kgH₂=化石燃料ベース鉄生産コスト+\$100/tCO₂炭素価格

\$1.0/kgH₂=化石燃料ベース PtL ジェット燃料コスト+\$200/tCO₂炭素価格

セクター毎の水素需要予測	水素コスト低減に必要な累積電解槽キャパシティ（GW）
肥料 3000 万 t	~1.0
船舶燃料 1.4 億 t	~10
鉄 9000 万 t	~80
航空燃料 1 億 t	~200

グリーン水素生産コストは累積電解槽キャパシティと共に低下する。H₂1kg は 11.2Nm³に対応する。日本のグリーン水素の生産コストの目標は 2030 年 30 円/Nm³である。グリーン肥料のため\$2.2/kgH₂は 25 円/Nm³H₂となりだいたい日本の 2030 年の生産コスト目標に合っている（ただし 1\$=130 円とした）。しかしこれではグリーンスチールの生産やグリーンな航空燃料の生産はできない。表 7 に鉄鋼業のカーボンニュートラルに向けた国際動向を示した。日本ではグリーンスチールにおいて欧米に決定的に遅れをとっていることは明らかである。

自然エネルギー財団は 2022 年 11 月に日本のグリーンスチール戦略を次のように提言している。

- (1) 地域経済を発展させる「電炉フェーズイン・高炉フェーズアウト計画」
- (2) 国際的水素直接還元鉄（H₂-DRI）市場、サプライチェーンの構築で世界をリード
- (3) 洋上風力開発と合わせた国内における水素直接還元製鉄の最適地の選択
- (4) サーキュラーエコノミーへの転換で内需削減とスクラップ鉄の最大活用を推進
- (5) グリーンスチール需要拡大政策の展開

2025 年頃から欧米ではグリーンスチールの商業生産が開始されるので日本企業の対応も急ぐ必要がある。

表 7

鉄鋼業のカーボンニュートラルに向けた国際動向（経産省、2022年9月12日）
 一部のデータは鉄鋼業の脱炭素化に向けて、欧州の最新動向に学ぶ（自然エネルギー財団）から

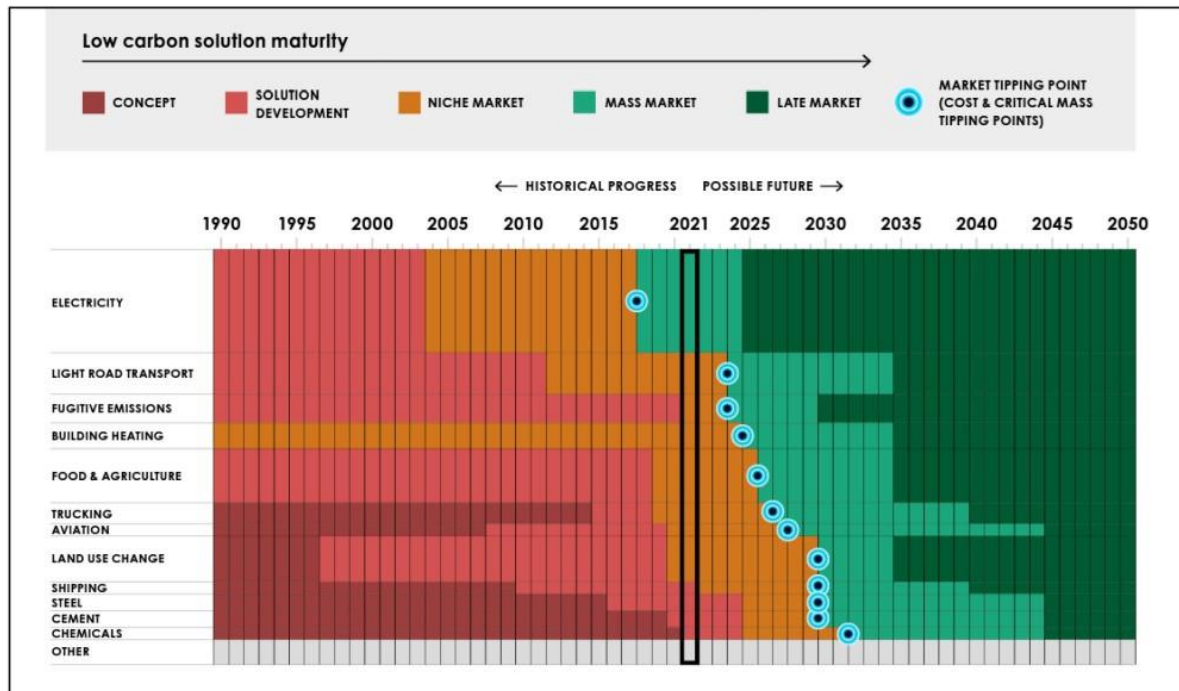
日本	中国、韓国	米国	ヨーロッパ
日本製鉄 2025年 高炉実機検証開始 2024年 小型試験電気炉〃 2025年 小規模試験直接還元炉〃	宝武鋼鉄集団 2024年より生産100万トンの直接還元プラント稼働 2019年よりミニ高炉利用の水素還元の研究開始	U.S.スチール 2024年稼働開始予定 年産300万トンの電炉鋼板工場新設 2021年にスタートアップのBig River Steelを買収	SSAB 直接水素還元技術を開発 2026年から商業生産開始 2020年から年産1万トン
JFEホールディングス 2025年までに実証試験完了予定、カーボンリサイクル試験高炉、水素直接還元小型ベンチ試験炉、試験電気炉	ポスコ FINEX（流動層還元法）により水素還元技術「HyREX」の開発中	2022年8月成立のインフレ削減法によりアメリカは多排出産業に53億ドルを投入	アルセロール・ミタル／ドイツ 直接水素還元の実証プラントをハンブルグに建設 2025年から操業開始予定
神戸製鋼所 2022年より低CO ₂ 高炉鋼材商品化、小型商用電気炉改造して試験開始			ティッセン・クルップ 2025年頃、年産120万トンの直接還元プラントを建設
			H₂ Green Steel 2024年から年産500万トン（2030）を目指して生産開始
			アルセロール・ミタル／スペイン 2025年から年産230万トン

21世紀のグローバル成長ストーリーをNicholas SternとMattia Romaniが論じている。「今後5年間で、重要なグリーン技術の転換点の半分以上が達成され、主要な市場で競争力を持つようになる。構造的および体系的な変化のプロセスは数十年に及ぶ。しかしこの10年間は気候の不安定性が高まるリスクを制限する決定的な時期である。今こそ行動の加速が不可欠である。AI（人工知能）はこの加速の真の機会を生み出すことができる。クリーンエネルギーとデジタルトランスフォーメーションへの総投資額は世界で年間約5~7兆ドルである。世界的に必要な投資の増加はGDPの約2~3%であり、裕福な国ではそれより少なく途上国ではそれより多くなる。」

このレポートではSYSTEMIQのCOP26の時点でのレポート、The Paris Effectに掲載されたセクター別のティッピング・ポイントを引用している。例えば電力は2018年、軽量道路輸送は2023年、ビル暖房は2024年、食糧と農業は2025年、航空が2027年、土地利用変化、船舶、鉄鋼、セメントは2029年とされている（図3参照）。つまり2030年前に多くのセクターでグリーンイノベーションが起こるという将来に希望が持てる結論となっている。

Sternの論文には、ネットゼロ産業のリーダーを目指したグリーン水素、グリーンアンモニア、グリーンスチール、グリーンアルミニウムに関する20のランドマークプロジェクトが図示されている。チリ、ブラジル、サウジアラビア、UAE、モーリタニア、ナミビア、カザフスタンは再生可能エネルギーのポテンシャルを生かしてこれらのプロジェクトを実施する予定である（The global growth story of the 21st century: driven by investment and innovation in green technologies and artificial intelligence, January 2023）。

図3 セクター毎のティッピング・ポイントの予想（Stern らの論説より）



1月17～19日

アメリカのナショナル・アカデミーがティッピング・ポイント・ワークショップを開催
 テーマは「地球システムにおけるティッピング・ポイント、カスケーディングインパクトと相互作用リスク」、参考資料は国立科学財団の出版した次世代地球システム科学（2022）である。ワークショップのテーマは「TP=Tipping Points」

- (1) 物理的 TP、社会的 TP に関するキーとなる研究テーマは何か、相互作用する TP のリスク、カスケーディングインパクトは何か
- (2) これらの研究分野の進歩を加速させる主要なバリエーションと機会は何か
- (3) TP について理解、予測、未来における準備の歴史的な分析から学べるものは何か
- (4) 自然、社会、計算、工学の諸科学にまたがって統合し、TP のプラクティカルな理解を打ち立てるためにどのように進めることができるか
- (5) TP の予測、カスケーディングインパクト、相互作用リスクの理解のために計算、実験、組織的に転換をもたらすような新たな能力は何か
- (6) 研究のプライオリティをどのように設定できるか

会議の構成

- (1) ティッピング・ポイントとエクスパートの反応についてオーバービュー（Lenton）
- (2) 過去の生物物理及び社会的ティッピング・ポイントの歴史的な分析
- (3) CTP とカスケード影響の地域的視点
- (4) 分野間の研究プライオリティと機会

1月26日

気候転換点に関するウェビナー：地球ではなく社会をティッピングする方法
AIMES、Earth Commission、Future Earth、WCRP による
David Armstrong McKay が CTP について、Mark Meldrum が STP について講演する。

2 月 27 日

気候ティッピング・ポイントのガバナンス

Governance of Climate Tipping Points

講演 Manjana Milkoreit (オスロ大学)

Dirk Messner (UBA/ドイツ環境省)

3 月 27～29 日

AAAI2023 春季シンポジウム、人工知能推進協会主催

カリフォルニア州サンフランシスコ空港、ハイアットリージェンシーで開催される 9 つのシンポジウムの 1 つに、AI 気候転換点の発見 (AI Climate Tipping-Point Discovery (ACTD)) が予定されている。これは伝統的な気候モデリングと人工知能を統合し CTP をより良く理解しようとする試みである。地球システムに存在する重要な臨界的ティッピング・ポイントには海流の大規模シフト、クライオスフェア崩壊、森林枯死、永久凍土融解などがあるが、更にカスケードするティッピング・ポイントの概念に関する研究も含まれる。ポジティブなティッピング・ポイントの引き金は引いても良いが、ネガティブなティッピング・ポイントは炭素隔離、海の雲を白色化、成層圏へのエアロゾル注入によって抑制することも考えられる。この新たな研究分野は CTP のみならず社会、政治、経済システムへの応用できるであろう。ACTD シンポジウムのチェアはジョーンズホプキンス大学応用物理ラボの Jennifer Sleeman 教授である。

3 月以降 有価証券報告書でのサステナビリティ情報の開示が義務化

3 月 20 日 IPCC 第 6 次評価報告書の統合報告書が公表される

4 月 TSFD (社会関連財務情報開示タスクフォース) 始動

9 月 18 日 国連総会、気候野心サミット

9 月 19・20 日 国連総会 SDGs サミット

9 月 TNFD (自然関連財務情報開示タスクフォース) 始動

11 月 30 日～12 月 12 日 COP28 UAE

結 論

- (1) 既に5つの CTP が超えられた可能性があり気候は非常事態にある。CTP のカスケードが起きる前にポジティブな STP を超える必要がある。
- (2) CTP・STP の研究・教育には自然科学と人文社会科学の総合的アプローチが必要である。

参考文献

- (1) Updated assessment suggests $> 1.5^{\circ}\text{C}$ global warming could trigger multiple climate tipping points
David I. Armstrong McKay et al
- (2) Defining tipping points for social-ecological systems scholarship-an interdisciplinary literature review
Manjana Milkoreit et al
- (3) Climate change induced socio-economic tipping points: review and stakeholder consultation for policy relevant research
KCH van Ginkel et al
- (4) Social tipping dynamics for stabilizing Earth's Climate by 2050
Ilona M. Otto et al
- (5) Social tipping processes towards climate action: A conceptual framework
Ricarda Winkelmann et al
- (6) System Dynamics of Social Tipping Processes
Sibel Eker and Charlie Wilson
- (7) Toward the social tipping points: Creating a climate for change
Susanne C. Moser et al
- (8) Operationalising positive tipping points towards global sustainability
Timothy M. Lenton et al
- (9) Experimental evidence for tipping points in social convention
Damon Centora et al
- (10) Predicting social tipping and norm change in controlled experiments
J. Andreoni et al
- (11) Can positive social tipping points prevent climate collapse?
Franziska Mey
- (12) Social tipping points everywhere? – Patterns and risks of overuse
Manjana Milkoreit
- (13) Climate and socio-economic tipping points
[Ten issues to watch in 2023]
- (14) OECD, Climate Tipping Points, Insights for effective policy action
- (15) Living on the edge, How climate tipping points reshape geopolitics

Taylor Dimsdale et al

- (16) Democracy and Representation for Emergency Action, Emergency governance for cities and regions

UCLG United Cities and Local Governments

- (17) Economic impacts of tipping points in the climate system

Simon Dietz et al

- (18) 環境影響評価の今後の展望

カーボンプライジングと社会炭素費用

SPEED 研究会 2022 特別セミナー講演資料

- (19) Economic impacts of tipping points in the climate system

Simon Dietz

- (20) The breakthrough effect: how to trigger a cascade of tipping points to accelerate the net zero transition (ダボス会議、2023 年 1 月 19 日に公表された、SYSTEMIQ のホームページに掲載されている)