

人新世における地球システムの道筋

Trajectories of the Earth System in the Anthropocene

著者 Will Steffen^{a,b,1}, Johan Rockström^a, Katherine Richardson^c, Timothy M. Lenton^d, Carl Folke^{a,e}, Diana Liverman^f, Colin P. Summerhayes^g, Anthony D. Barnosky^h, Sarah E. Cornell^a, Michel Crucifix^{i,j}, Jonathan F. Donges^{a,k}, Ingo Fetzer^a, Steven J. Lade^{a,b}, Marten Scheffer^l, Ricarda Winkelmann^{k,m}, and Hans Joachim Schellnhuber^{a,k,m,1}

著者所属, 本論文のライセンス, 著者連絡先, サポート情報等*

編集 William C. Clark (Harvard University, Cambridge, MA)

2018年7月6日受理 (2018年6月19日受領)

翻訳 三ツ井孝仁 (東京大学・大気海洋研究所, 2018年12月24日; 2019年9月4日訳修正)

我々は自己強化型のフィードバックが地球システムを地球規模の変化につながる閾値へと向かわせる危険性について探求する。その閾値を一旦超えてしまうと、温度上昇に対する気候の安定化が妨げられ、温室効果ガスの排出を抑制したとしても、継続的な温暖化が引き起こされ得る。この地球の進路をホットハウス・アースの経路(“Hothouse Earth” pathway)と呼ぶ。もしそうならば、地球平均気温は過去120万年のどの間氷期よりもずっと高くなり、海水準は過去1万2千年の完新世のどの時代よりも高くなるだろう。我々はそのような閾値の存在を示唆する証拠を吟味し、それがどこに存在するか調べる。もし閾値を超えるならば、将来の地球の道筋において、生態系や社会そして経済に深刻なダメージがもたらされるだろう。閾値を超えることを回避して、現在の間氷期のような生存可能な地球環境を安定に維持するためには人類の協力的行動が必要である。そのような行動は、生物圏、気候、社会など地球システム全体の管理を伴い、世界経済の脱炭素化、生物圏炭素吸収源の増強、生活スタイルの変化、技術革新、新しい管理協定、社会的価値観の転換を含む。

キーワード: 地球システムの道筋 | 気候変化 | 人新生 | 生物圏フィードバック | ティッピング・エレメント

人新世は、地球上の重要なプロセスにおける人類

^aStockholm Resilience Centre, Stockholm University, 10691 Stockholm, Sweden; ^bFenner School of Environment and Society, The Australian National University, Canberra, ACT 2601, Australia; ^cCenter for Macroecology, Evolution, and Climate, University of Copenhagen, Natural History Museum of Denmark, 2100 Copenhagen, Denmark; ^dEarth System Science Group, College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, EX4 4QE Exeter, United Kingdom; ^eThe Beijer Institute of Ecological Economics, The Royal Swedish Academy of Science, SE-10405 Stockholm, Sweden; ^fSchool of Geography and Development, The University of Arizona, Tucson, AZ 85721; ^gScott Polar Research Institute, Cambridge University, CB2 1ER Cambridge, United Kingdom; ^hAspen Ridge Biological Preserve, Stanford University, Stanford, CA 94305; ⁱEarth and Life Institute, Université catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium; ^jBelgian National Fund of Scientific Research, 1000 Brussels, Belgium; ^kResearch Domain Earth System Analysis, Potsdam Institute for Climate Impact Research, 14473 Potsdam, Germany; ^lDepartment of Environmental Sciences, Wageningen University Research, 6700AA Wageningen, The Netherlands; and ^mDepartment of Physics and Astronomy, University of Potsdam, 14469 Potsdam, Germany. Author contributions: W.S., J.R., K.R., T.M.L., C.F., D.L., C.P.S., A.D.B., S.E.C., M.C., J.F.D., I.F., S.J.L., M.S., R.W., and H.J.S. wrote the paper. The authors declare no conflict of interest. This article is a PNAS Direct Submission. Published under the PNAS license. ¹To whom correspondence may be addressed. Email: will.steffen@anu.edu.au or john@pik-potsdam.de. This article contains supporting information online at www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1810141115/-/DCSupplemental.

の影響が非常に深刻になったために(2)、農業や定住社会、そして社会的・技術的に複雑な人間社会が発展した完新世とはもはや異なるという観察に基づいて新たに提案された地質年代である(1)。新たな地質年代としての人新世の定式化は、層序学コミュニティによって現在も検討中の課題である(3)。しかし、その検討結果に関わらず、人新世の状況と完新世の状況が幾つもの観点から異なることは明らかになりつつある(2)。地球システムの道筋に対し、人間活動が今や地学的作用に匹敵する影響を持つという知見は、地球システム科学と社会的意思決定の両方に重要な意味を持っている。それぞれの社会でこれまで地球にかけてきた負荷は質的にも量的にも異なるし、将来の道筋を変えていく能力も異なるが(4)、将来の地球システムの道筋を調べるには、システムに対して人類が与える全影響を考慮する必要があるのである。

ここでは次のような疑問に答えることで、将来起こり得る地球の道筋について調べよう。

- 地球システムの道筋において地球規模の変化につながる閾値は存在するか？もしその閾値を超えたらなら、気温上昇の適度な範囲内での安定化は妨げられてしまうのか？
- 地球システム固有の地球物理学的フィードバックおよび生物圏フィードバックに関する我々の

理解に基づくと、どこに閾値が存在すると言えるか？

- もし閾値を超えたなら、特に人間社会の生活の幸福さに何を意味するか？
- どのような人類の活動が、閾値から地球システムを遠ざけ、現在の間氷期の状態を維持することにつながるか？

これらの質問に答えるには、生物・地球物理学的な地球システム科学に関する知見と、人間社会の発展と機能に関わる社会科学や人間性に関する知見を深く統合していくことが必要である(5)。関連する時間スケールの大変な広さから、必要となる知見の統合は難しい作業となり得る。人新世に関わる多様な分野の調査結果を統合する枠組みを、複雑系解析の概念が提供し出している(6)。地球システムのダイナミクスは、異なる状態間の道筋として記述し、研究し、理解することができる。これらの異なる状態は閾値によって隔てられ、非線形のプロセス、相互作用、フィードバックが閾値をコントロールする。この枠組みに基づき、今後10年ないし20年の社会傾向や技術傾向や意思決定が数万年から数十万年に亘る地球システムの道筋に重大な影響を与え、数百万年前の地球の様な現在の人間社会や多くの他の生物種にとって住みにくい気候条件へとつながる可能性を議論する。

ホットハウス・アースへ向かう危険性

極限周期軌道と地球規模の変化につながる閾値。

第四紀後期、特に完新世における地球システムの道筋は、人新世における人為起源の変化および地球システムの将来の道筋を探求するための背景知識を提供してくれる(詳しくは付録のサポート情報)。Figure 1は複雑な地球システムのダイナミクスを単純に表したものである。この図には表現されていないが、物理的な気候システムは地球の軌道と地軸のゆっくりとした変化の影響を受けている。過去120万年の第四紀後期にわたりシステムは氷期と間氷期の間に留められていた。過去数百万年の全ての氷期・間氷期サイクルが正確に同じ軌道をたどるわけではないが、概して類似の経路をたどる(7)。氷期と間氷期、そしてそれらの間の約10万年周期の振動は極限周期軌道を形成する(数学的には氷河期の漸近的なダイナミクスは非自励力学系のプルバックアトラクターとして最も良くモデル化できる)。この極限周期軌道はFigure 1の左下に青い曲線で模式的に描かれている。横軸縦軸はそれぞれ温度と海水準を表している。完新世は、極限周期軌道の上端のラベルAの近くに示されている。

Figure 1の右上部分の中で、人新世にある地球システムの現在の位置は氷期・間氷期の極限周期軌道から離れて行く軌道上の小さなボールで示されている。Figure 2の地球システムの経路の安定性を模式的に表した地形(安定性地形)の中で、地球システムの現在の位置が実線矢印の終点にボールで描かれて

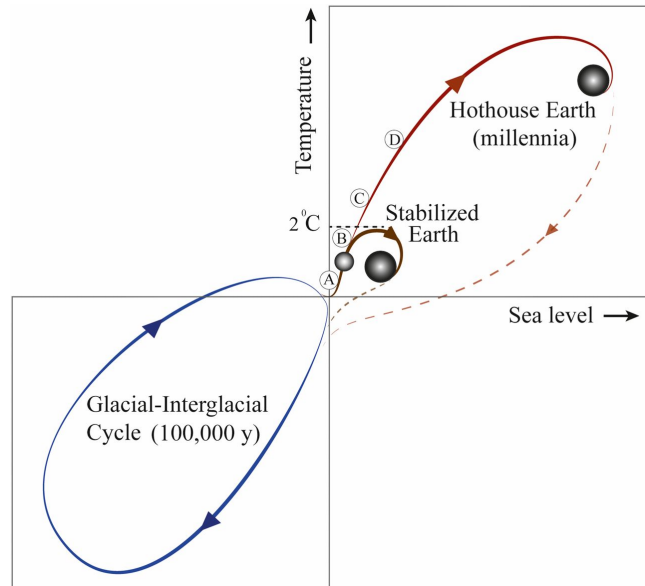


Figure 1: 典型的な氷期・間氷期サイクルの経路に対比して描かれた将来気候の可能な経路の模式図。地球システムの間氷期の状態は氷期・間氷期サイクルの上端に位置する。一方、氷期の状態は下端に位置する。海水準は熱膨張と氷河と氷帽の融解を通じて比較的ゆっくりと変化する。図の中央の高さに位置する水平ラインは産業革命以前の温度レベルを示している。地球システムの現在の位置は赤線上の安定化された地球の経路とホットハウス・アースの経路が離れてゆく点の近くの小さなボールで示されている。産業革命以前のレベルから約2°C高い位置にある地球規模の変化につながる閾値も示されている。安定化された地球の経路およびホットハウス・アース経路に沿って書かれたアルファベットは、これらの経路の各地点の状態に示唆を与える過去の地球の4つの期間を表している(付録のサポート情報): A 完新世中期; B エーミアン期; C 鮮新世中期; D 中新世中期。それらの経路上での位置は近似的なものに過ぎない。産業革命以前のレベルに対するそれらの温度の範囲は付録のサポート情報のTable S1に示されている。[訳注: Glacial-Interglacial Cycle (100,000 y) (氷期・間氷期サイクル (10万年)), Stabilized Earth (安定化された地球), Hothouse Earth (millennia) (ホットハウス・アース(数千年)), Temperature (温度), Sea level (海水準)]

いる。そこは人新世の吸引領域が深くなって行く部分に当たる。人新性は、人類により地球システムが氷期・間氷期の極限周期軌道から引き離され、より熱い気候と大いに違う生物圏へと向かう道筋の始まりである(2, 8, 9) (付録のサポート情報)。産業革命以前より1°C高い現在の位置(10)は、過去120万年における間氷期の上限に近づこうとしている(付録のサポート情報, Table S1)。より重要なことに、テクノロジーと従来型の社会・経済への依存により、過去半世紀の地球システムの急速な道筋は気候システムを過去の間氷期の上限の外へ追いやろうとしている。従って、地球システムは分岐点(Figure 1のA付近)の一つをすでに超え、従来の氷期・間氷期のサイクルから外れてしまったと考えられる(11)。

将来の地球システムにはいくつもの可能な道筋があり得るだろう(12, 13)。それらは気候モデルによるシミュレーションが示唆するように大きな気温上昇を伴うであろう(14)。ほとんど研究が示すように、これらの可能な道筋は、これまでに人類が排出し、そして今後も排出し続けるであろう温室効果ガスの量に大きく依存している(二酸化炭素の累積排出量と地球平均気温の間にはおよそ線形な関係があると推定されている(14))。しかしながら、ここで我々は、人類による生物圏の破壊とカップルした地球システムの生物・地球物理学的フィードバックプロセスが従来考えられているよりも重要な役割を持つだろうと提言する。それらは、将来可能な地球の道筋の範囲を制限し、中間的道筋の可能性を排除する可能性があるのである。これらの内在するダイナミクス、取り分けフィードバックプロセスの持つ強い非線形性は重大なリスクとなる。もしかすると、これから数世紀の間に地球システムがたどる道筋を決定する主要因にさえなるかもしれない。

このリスクは地球規模の変化につながる閾値としてFigure 1及び Figure 2に示されている(Figure 1においては、ホットハウス・アース経路上における産業革命以前から2°C高いあたりに描かれている水平な破線)。この閾値を超えると、地球システムに固有の生物・地球物理学的フィードバックプロセスがシステムの道筋を制御する主要なプロセスとなり得る。地球上のどこに地球規模の変化につながる閾値があるかは不確かである(15,16)。我々はそれが地球平均気温2°C上昇であると提案する(12,17)。なぜなら2°C上昇は重要なティッピング・エレメントを活性化し、それによる気温上昇がその他のティッピング・エレメントを活性化することでドミノ倒しのように更なる高温へとつながる可能性があるからである(ティッピング・カスケード)。そのようなカスケードは閾値を超えるような動力学的プロセスが複雑に絡み合ったものである(参考文献18の4.2章)。

この分析は、もしパリ協定の目標である1.5°C以下ないし2.0°C以下の温度上昇が達成されても、カスケードフィードバックが地球システムを不可逆的にホットハウス・アースの経路へ追いやるリスクを排除出来ないことを示している。人類の直面している挑戦は、地球システムをホットハウス・アースの閾値へと向かう現在の道筋から脱出させ「安定化された

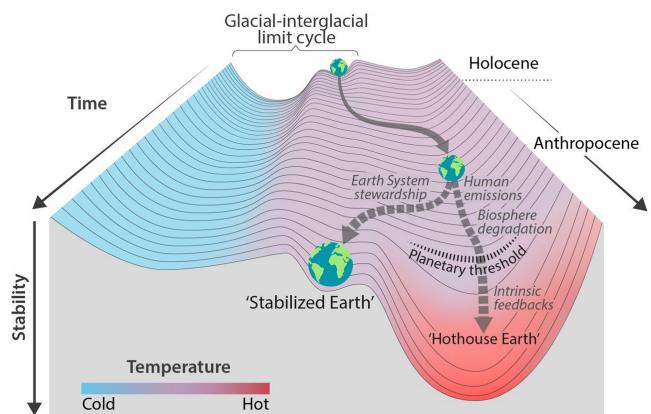


Figure 2: 完新世をスタートとする地球システムの経路の安定性を表す地形。すなわち、氷期・間氷期の極限周期軌道をスタートとしてより暑い人新世の現在の位置へと至る経路。Figure 1における経路の分岐は、離れて行く二つの地球システムの経路として描かれている(破線)。現在、地球システムは人為起源の温室効果ガス排出と生物圏の規模縮小に駆動されてホットハウス・アースの経路にあり、約2°C上昇の位置にある地球規模の変化につながる閾値Fig. 1の2°Cの位置にある破線へと近づいている。その閾値を超えると生物・地球物理学的フィードバックに駆動されシステムは本質的に非可逆な経路をたどる。もう一方の経路は安定化された地球へと至る。この経路は人類によって創成されたフィードバックによって管理される経路であり、人類によって維持される準安定的な吸引領域へと至る。ここで“安定度”(縦軸)はシステムのポテンシャルエネルギーの逆として定義される。より安定なシステム(深い谷)は低いポテンシャルエネルギーを持つ。そして、この安定状態からシステムを抜け出させるには非常に大きなエネルギーが必要である。不安定なシステム(丘の頂上)は高いポテンシャルエネルギーを持つ。そして、この丘からシステムを低いポテンシャルエネルギーの谷へと突き落とすにはほんの少しのエネルギーしかいらぬ。[訳注: Holocene (完新世), Anthropocene (人新世), Glacial-interglacial limit cycle (氷期・間氷期のリミットサイクル), Stabilized Earth (安定化された地球), Hothouse Earth (ホットハウス・アース), Earth system stewardship (地球システムの管理), Human Emissions (人為的排出), Biosphere degradation (生物圏の縮小), Planetary threshold (地球規模の変化につながる閾値), intrinsic feedback (内在的フィードバック), Time (時間), Stability (安定性), Temperature (温度), Cold (寒い), Hot (暑い)]

地球」の経路を作り出すことである(Figure 2)。地球システムの安定性を表す地形の中で、安定化された地球の経路は人類による維持・管理なしには存在しにくい吸引領域へとつながっている。そのような経路と吸引領域を創造するには、この惑星における人類の役割を抜本的に変えることが必要である。この管理者としての役割には、安定化された地球の経路にシステムを固定するためのフィードバックを創造し、人類自ら地球システムの統合的・適応的部分となるための計画的且つ持続的な行動が必要である(「別の可能性: 安定化された地球の経路」のセクション)。

それではこの重要な問題について詳細に探究するために、関連する生物・地球物理学的フィードバックとティッピング・カスケードについて考えよう。

生物・地球物理学的フィードバック 地球システムの道筋は、システム内にある生物・地球物理学的フィードバックにより影響をうける。フィードバックには、システムを与えられた状態に保とうとする負のフィードバックと、摂動を増幅させて別な状態への遷移を駆動する正のフィードバックがある。地球システムを完新世のような条件に留めておく鍵となるいくつかの負のフィードバック(特に陸域や海洋の炭素吸収など)は、人為的強制力に比べて弱まって来ている(19)。それにより、正のフィードバックが地球システムの道筋を決める上で重要な役割を担うであろう。Table 1は温暖化を加速させる可能性のある炭素循環フィードバックについてまとめている。また、付録のサポート情報のTable S2では今世紀中に到達すると思われる強制力レベルによって引き金を引かれる可能性のある生物・地球物理学的フィードバックのより完全なリストについて詳細に記載している。

ほとんどのフィードバックが連続的な応答とティッピング・ポイント的応答の両方を示す。後者では、臨界的な閾値を越えた後、フィードバックプロセスが自己永続的に働く。このような振る舞いを示すサブシステムは「ティッピング・エレメント」と呼ばれる(17)。連続的応答やティッピング・ポイント(または突然の変化)といった振る舞いのタイプは、外力の変化する度合いやスピード、またはその両方に依存する。多くのフィードバックがティッピング・ポイントに達する前に何らかのゆっくりとした変化を見せるだろう。

フィードバックに伴う変化のいくつかは50年から100年といった短い時間スケールでは可逆である(例えば気候の温暖化や寒冷化に伴う北極域の海水量の変化などがそれに当たる。それに比べて南極の海水は南大洋への熱の蓄積が起るため可逆性が弱いだろう)。しかし、ほとんどの変化は現代社会で問題となる時間フレームでは非可逆的である。例えば永久凍土層の炭素の損失がそれに当たる。いくつか少数のフィードバックははっきりとした閾値を持っていない(二酸化炭素の施肥効果による炭素吸収力の増加や、降雨の減少による吸収力の減少などのような、陸域や海洋の生物起源の炭素吸収がその例である)。いくつかのティッピング・エレメントにおいて、ティッピング・ポイントを越えることは突然の非線形

応答を引き起こす(アマゾン雨林の広いエリアのサバンナや季節的な乾燥林への交代など)。一方で他のティッピング・ポイントではよりゆっくりだが自己永続的な応答へとつながる(永久凍土層の大規模な損失)。大量の氷の融解を含むそれらのティッピング・エレメントでは特に、閾値を越えてから大きな変化が起こるまでに非常に長い遅れを伴うことがある。しかしながら、氷期のハインリッヒイベントの様に、大規模な氷山の崩壊・流出が起こる時には、氷の損失は非常に急速に起こる場合がある。

いくつかのフィードバックプロセスに関しては、その規模や方向までが気候変動の変化率に依存する。気候変動の変化率が小さければ生物群系の変遷は温度や湿度の変化に追従できる。そして生物群系はゆっくりと遷移し、気候が暖かくなり大気二酸化炭素濃度が増加するに連れて大気から炭素を吸収する事ができるだろう。しかしながら、気候変動の変化率が大き過ぎたり速過ぎたりすればティッピング・ポイントを超えてしまい、広範囲の擾乱(森林火災や虫害、旱魃など)を伴って生物群系の急速な遷移が起こるのであろう。陸域の場合には森林火災などにより炭素のパルス的放出が起こり得る。それが十分大きければ地球システムの道筋に影響を及ぼすだろう(29)。

変化する気候に対する応答率の違いは生物圏の複雑なダイナミクスへとつながり、他のフィードバックプロセスにも影響を与えるであろう。例えば永久凍土の融解の遅れは北方林の北上を遅らせるであろう(30)。その一方で、北方林の南側の温暖化は非常に炭素貯蔵量の乏しいステップ帯への変化を引き起こすであろう。結果は全体として気候システムへの正のフィードバックとなるであろう。

大気二酸化炭素濃度の増加による植物成長の増強(31)、いわゆる惑星の「緑化」は、陸域の炭素吸収を増加させている(32)。しかしながら、大気二酸化炭素の増加は温度を上昇させ、熱くなった葉は光合成の効率が下がる。他のフィードバックも関連して来る。例えば、土壌の温暖化は微生物の呼吸を促進し、二酸化炭素を大気へと再放出することになる。

我々の解析は現在と2100年の間のフィードバックの強さに焦点を当てている。しかしながら、2100年の時点で無視できるか、非常に小さいフィードバックも、2100年よりずっと前にその引き金を引かれる可能性がある。そしてそれらは数世紀や数千年のより長い期間で重大な強度のフィードバックを生み出し、地球システムの長期的道筋に影響を与える可能性がある。これらのフィードバックには、永久凍土の融解、海洋メタンハイドレートの分解、海洋バクテリアの呼吸の増加、海水準の増加を伴う極域氷床の損失、海洋循環の変化を通じた温度上昇の増幅が含まれる(33)。

ティッピング・カスケード Figure 3はいくつかの可能性のあるティッピング・カスケードのグローバルマップである。これらのティッピング・エレメントは推定される閾値温度に応じて3つの集団に分類される(12, 17, 39)。カスケードの形成は、低い閾値温度の集団の閾値に温度上昇が到達した時に、グ

Table 1. 地球温暖化を促進する地球システムにおける炭素循環フィードバック

| フィードバック | 2100年における フィードバック強度*(°C) | 参考文献 (詳細は付録のサポート情報, テーブルS2) |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 永久凍土の融解 | 0.09 (0.04-0.16) | 20-23 |
| 陸域及び海洋の生理学的炭素吸収源の相対的弱体化 | 0.25 (0.13-0.37) | 24 |
| 海洋におけるバクテリアの呼吸の増加 | 0.02 | 25, 26 |
| アマゾンの森林の立ち枯れ | 0.05 (0.03-0.11) | 27 |
| 北方林の立ち枯れ | 0.06 (0.02-0.10) | 28 |

フィードバック強度は2100年における約2°Cの温暖化に対して推定されている。

*フィードバックによって2100年までに生じる付加的な温度上昇(°C)。

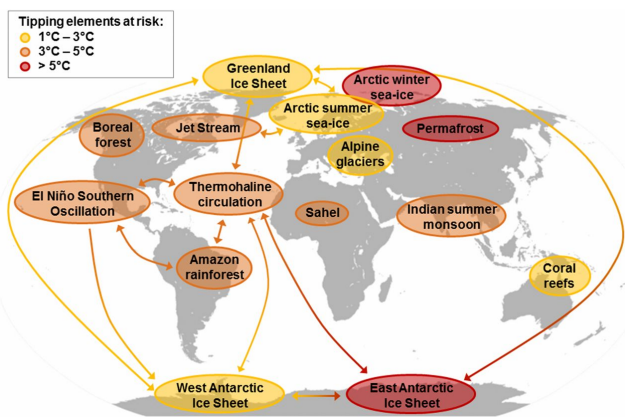


Figure 3: 起こり得るティッピング・カスケードの世界地図. 個々のティッピング・エレメントは地球平均地表面気温に対する推定閾値に従って色付けられている(ティッピング・ポイント) (12,34). 矢印は専門家の聞き取り調査に基づくティッピング・エレメント間の相互作用を示している. これらの相互作用によりカスケードが引き起こされることがあり得る. 東南極氷床のティッピング(損失)のリスクは5°C以上と提案されているが,いくつかの海に面した区域ではより低い温度に対しても脆弱かもしれない(35-38). [訳注: Tipping elements at risk (危険性のあるティッピング・エレメント), Greenland Ice Sheet (グリーンランド氷床), Arctic summer sea ice (北極における夏季の海氷), Arctic winter sea ice (北極における冬季の海氷), Permafrost (永久凍土), Alpine glaciers (アルプスの氷河), Jet Stream (ジェット気流), Boreal forest (北方林), Thermohaline Circulation (熱塩循環), El Niño Southern Oscillation (エルニーニョ・南方振動), Amazon rainforest (アマゾンの熱帯雨林), Sahel (サヘル), Indian summer monsoon (インド夏季モンスーン), Coral reefs (サンゴ礁), West Antarctic Ice Sheet (西南極氷床), East Antarctic Ice Sheet (東南極氷床)]

グリーンランド氷床の融解や北極の海氷などのティッピング・エレメントの活性化を伴いながら起こるだろう. これらのティッピング・エレメントは, いくつかの非ティッピング・エレメントのフィードバック(例えば陸域や海洋の炭素吸収源のゆっくりとした弱体化)と共に地球平均気温をより押し上げ, 中または高レベルの温度閾値を持つ集団のティッピングを誘起する. 例えば, グリーンランド氷床のティッピング(損失)は大西洋子午面循環における臨界遷移を引き起こす. それと同時に海水準上昇や南大洋における蓄熱を引き起こすことで, 数世紀の時間スケールで東南極氷床(32,40)の損失を加速する(41).

過去の気候の観測データは, 海洋循環の変化がフィードバックカスケードに対して重要な寄与をしているという考えを支持している. これまでに起きた氷期の間には気候システムはノルウェー海の対流活動や大西洋子午面循環の変化を反映して二つの状態間を行ったり来たりしていた. これらの変動は「両極シアーソー」と呼ばれる典型的な温度の応答パターンを引き起こした(42-44). 北半球の極寒期には南大洋に熱が蓄積され南極は暖かくなった. その蓄積された熱は, 終いには北へと向かい, 海洋の表層下を温めることで北半球氷床の辺縁を不安定させる要因となった(45).

将来, グリーンランド氷床と西南極氷床が融解するならば, 近傍の海面の塩分を薄め, そして冷却することで, 海洋循環に重大な影響を及ぼすだろう. 深刻な海洋循環の変化が起る確率の評価は難しいが, 気候モデルシミュレーションは現在のグリーンランドの融解率は海洋温度と循環の変化に観測可能な影響を与えるのに十分であると示している (46, 47). このプロセスに起因した北半球高緯度の持続的な温暖化は, 永久凍土の縮小と, 北極海氷の減少, 北方林の枯死など, その領域のフィードバックを加速したり, ティッピング・エレメントを活性化させる. これは極端なシナリオに見えるかもしれないが, 低い温度閾値の集団の範囲に入る温度上昇 (すなわちパリ協定の目標)でも, 中から高温度閾値の集団のティッピングへとつながる可能性がある. ティッピング・カスケードに関するこの分析とリスク回避のアプローチの観点から, 地球規模の変化につながる潜在的閾値は産業革命のレベルから2°C上昇で起こり得ると提言する(Figure 1).

要するに、安定化された地球の経路は第四紀後期の氷期・間氷期の極限周期軌道とホットハウス・アースの間の状態を保つために、人類が積極的な管理責任を担う地球システムのレジームなのである(Figure 2). 我々は、安定化された地球は地球システムの生来的な状態ではなく、人類が地球システムのそれ以外の部分との関係をマネジメントしていく道筋であるということ強調したい。

重大な問題は、ホットハウス・アースへの閾値を超えてしまうと、安定化された地球の道筋へアクセスすることは人間社会がどのような行動を起こしても非常に難しくなるかもしれない事だ。閾値を超えると、人類が影響を与えたり、制御することが不可能な、地球システム内部の正の(自己強化型の)フィードバックが、地球システムの道筋の主要な駆動因になり得る。各ティッピング・エレメントがリンクし雪崩れを起こして更に温度を上昇させるのである(Figure 3). 言い換えれば、地球システムがホットハウス・アース経路に入ってしまうと、安定化された地球の経路はFigure 2に描写したようにほぼ確実にアクセス不能になるだろう。

そこにある危機とは？ ホットハウス・アースは制御不可能になりやすい。特に、それが僅か1, 2世紀の間に起こるなら、多くの人々にとって危険である。取り分け、気候変動に脆弱な人々の健康、経済、政治的安定性(12,39,49,50)を深刻なリスクに晒すことになる。究極的にはこの惑星における人類の生存可能性をも脅かすかもしれない。

人新世に生じている急速な気候変動がもたらすリスクに関する洞察は、現在の観測(51-55)だけでなく、人間社会と地域的および季節的な水文気候学的変動との間の過去の関りからも得られている。この変動は完新世の全球的且つ長期的な変動よりも著しいものである(付録のサポート情報)。農業生産と水供給は、高温/乾燥や低温/湿潤の極端現象へとつながる水文気候の変化に特に脆弱である。社会の衰退、崩壊、移転、再編、文化の変化はしばしば深刻な局地的早魃に関連している。今から4200年前から3900年前の全球的な大早魃が例である。これらはすべて完新世の温度変化の狭い範囲、約プラス・マイナス1°Cの中で起きている(56)。

付録のサポート情報のTable S4は、地球がホットハウス・アースの経路を取る場合に、人間社会の幸福に重大な影響を持つ生物群系や、地域的な生物圏・物理的気候システム、それによって引き起こされ得るリスクについてまとめている。これらの生物群系や地域的システムの多くが安定化された地球の経路では保存されるかもしれないのに対し、ホットハウス・アースの経路ではそれらのほとんどまたは全てが大幅に変化したり縮小したりして、人間社会の生存可能性を脅かすことになるだろう。

例えば、農業システムは取り分け脆弱である。なぜなら、相対的に安定な完新世の一次生産力の空間パターンに基づいて組織化されているからである。それらは肥沃な土壌の場所や大気二酸化炭素濃度に関係すると共に、長期に渡り定着した予測可能な温度と降雨の空間分布に依存しているのである。現在

の理解では、安定化された地球の経路は、人間が適応することで、生産性の向上と減少の間の近似的なバランスにつながる。一方、ホットハウス・アース経路では、適応の限界を超え、全体として大幅な農業生産の減少をもたらすだろう(57)。

世界の沿岸地域、取り分け低地にあるデルタ地帯や近隣の沿岸海洋や生態系は人間の幸福な生活に特に重要である。そこには世界の多くの人の住居があり、新興巨大都市の多くや国家経済や国際貿易に不可欠な非常に多数のインフラが存在する。ホットハウス・アースの道筋は、今世紀末かそれ以前までに、ほとんど確実にデルタ地帯の環境を水没させ、沿岸において嵐の被害のリスクを増加させ、サンゴ礁(そしてそれらが社会に与えてくれる恩恵)を失わせるだろう(58)。

地球システムにおける人間によるフィードバック気候変動について語られる時、多くの場合、人類は変化を駆動する線形で決定論的な外力とされる。つまり人為的温室効果ガスの外力が大きくなればなるほど、地球平均気温は高くなるということである。しかしながら我々の分析は、人類社会と我々の活動は、複雑で適応的な地球システムにおける統合的且つインタラクティブな構成要素として配役を変更される必要があることを示している。この構想は温室効果ガス排出削減への我々の活動に焦点を当てるだけでなく、地球規模の変化につながる閾値を超えてホットハウス・アースへ向かう道筋に閉じ込められてしまうリスクを軽減するための負のフィードバックを創生したり増強する活動にも焦点を当てる。

その時、人類の挑戦は、完新世と非常に暑い状態の間に新たに現れる不安定な状態を事実上の安定な中間状態(安定化された地球)(Figure 2)にするよう、地球システムの動的性質に影響を与える事である。このためには、中間状態を安定化させるように、フィードバックループを効率的にモニターしながら行動様式を変更して行くことで、人類が地球システムに危険な影響を与えないよう、慎重で、統合的で、適応的なステップを踏む必要がある。

これをどのように行うかについては、技術的、倫理的、経済的、そして公平性の観点から、多くの不確定性と議論がある。そして、規範、政策、制度の側面において非常に挑戦的であることに疑いの余地はない。しかしながら社会は、地球システムを安定化された地球の状態に誘導するために、付録のサポート情報、Table S5にまとめたような負のフィードバックを構成する幅広い活動を取れるだろう。これらの活動のいくつかは既に排出に関する道筋を変えている。負のフィードバックを構成する活動は3つの広いカテゴリーに分類される: (i) 温室効果ガスの排出削減, (ii) 炭素吸収源の増強や創生(例えば、生物圏炭素吸収源の保護や活性化や新しい吸収源の創生)(59), (iii) 地球のエネルギー収支の変更(例えば太陽放射管理など。ただし、そのフィードバックに関しては、地球システムのいくつかのキーププロセスを不安定化したり縮小させたりする大きなリスクがある)(60,61)。排出削減は優先事項であるが、アマゾンや北方林のように(Table 1)、炭素吸収や水分フィー

ドバック通じて地球システムの状態を調節している重要な生物群系に対する人類の圧力を軽減するために、より多くのことが出来るだろう。そして総じて、海洋や陸域の生物圏に対して今よりずっと有効な管理方法を構築することが出来るだろう。

しかしながら、現在の主要な社会経済システムは高炭素の経済成長と搾取的な資源利用に基づいている(9)。このシステムを変更しようという試みは、温室効果ガス削減や生物圏のより有効な管理システムの構築においていくつかの地域的な成功はあるものの、グローバルにはほとんど成功していない。現在の社会経済システムを徐々に線形に変化させるだけでは地球システムを安定化させるのに十分ではないのである。広範囲且つ急速、そして根本的な転換が、閾値を越えてホットハウス・アース経路に入ってしまうリスクを下げるために必要になるだろう。これらの転換には行動様式、テクノロジー、イノベーション、ガバナンス、価値観の変化が含まれる(48, 62, 63)。

地球システムに対する人類の影響を軽減し、同時に生活満足度を向上させる国際的な努力は、国連の持続可能な開発目標や温度上昇を2°C以下に保つパリ協定の約束を含む。これらの国際的なガバナンスの取り組みは各国、各都市、ビジネス、個人の炭素削減の取り組みにより果たされるが(64-66)、依然パリ協定の目標には届いていない。高い野心には、そのような変化をサポートするための新しい共有価値、原理、枠組みおよび教育が必要である(67, 68)。本質的に、有効な地球システムの管理は、安定化された地球の経路における人間社会の豊かな発展のための必須の前提条件である(69, 70)。

グローバルガバナンスレベルの制度的革新や社会的革新に加え、人口構成や消費、行動、考え方、教育、機関、そして社会的に埋め込まれた技術における変化は、安定化された地球の経路を成し遂げるチャンス最大化のために全て重要である(71)。多くの必要なシフトは世界的にまとまったインパクトとなるには数十年かかるだろう(付録のサポート情報, Table S5)、しかし社会がいくつかの重要な社会的ティッピング・ポイントに近づいている兆候がある。例えば、女性の社会地位の向上や、受胎調節技術へのアクセス向上、教育を受ける機会の拡大、収入レベルの上昇の結果、出生率の減少を通じて人口増加は律速または減少に向かう方向に比較的早く進んでいる(72,73)。これらの人口動態の変化は、持続可能な消費形態によって、とりわけ一人あたりの消費量の多い消費者によって、補われなければならない。いくらかの消費者行動の変化は確認されている(74,75)。その結果として社会規範に主要な遷移が起きる機会も、広いスケール生じるだろう(76)。技術革新はより高スピードの脱炭素技術や大気から二酸化炭素を取り除く可能性に貢献している(48)。

究極的には、安定化された地球の経路を達成するために必要な変化には、経済的ガバナンス、国際貿易、投資、金融、そして技術的発展により重点をおき(78)、地球システムレベルでのより有効なガバナンスに向けて国内・国際機関の抜本的な方向転換と

再構造化をすることが必要である(77)。

急速に変化する地球システムで回復力(レジリエンス)を構築する安定化された地球の経路が達成できるとしても、人類はその過程で、政治・社会・環境面において人類社会の回復力に挑戦を与える急速で重大な変化と不確定性に直面するであろう(79-82)。安定化された地球の経路は少なくとも過去80万年の他のどの期間よりも温かくなるだろう(83)。それは現代人が存在したどの期間よりも温かいのである。

加えて、安定化された地球の経路は、何らかのティッピング・エレメントの活性化(ティッピング・カスケード, Figure 3)と、人類を支える生物群系の非線形ダイナミクスと突然の変遷にほぼ確実に特徴づけられるだろう(付録のサポート情報, Table S4)。地球システムの重要な特徴の変化のスピードは、現在既に、過去の突然の地球物理学的にイベントと同等かそれを凌ぐものである(付録のサポート情報)。これらの少なくとも今後数十年続くであろうトレンドからすると、現在の理論に基づいた発展の指針、ツール、経済効率に焦点を当てたゆるやかで漸増的な変化の考え方はこの経路に対処するのに十分でなくなるだろう。従って、変化への適応に加えて、回復力を増していくことが地球の将来を舵取りする鍵となる戦略になるであろう。

回復力を作り上げる一般的な戦略は、保険手段、緩衝装置、冗長性(バックアップ)の準備、多様性、そして温暖化とティッピング・ポイントがもたらす驚きに直面した人間システムを変化させていくために重要なその他の回復力の特徴を含む(84)。そのような戦略の特徴は、(i)多様性、モジュール性、冗長性の維持、(ii)連結性、開放性、遅い変数、フィードバックのマネジメント、(iii)複雑適応系としての社会-生態系システムの理解(取り分けその地球システムレベルの理解)(85)、(iv)温暖化に関する学習や適応のための実験の促進、(v)多心的統治システムへの参加を広めること、そのようなシステムへの信頼を構築することなどを含む(86, 87)。

結語

我々は、フィードバック、ティッピング・ポイント、そして非線形ダイナミクスに焦点をあてたシステム論的アプローチにより、導入部で挙げられた4つの疑問に答えてきた。

我々の分析が示唆しているのは、それを超えてしまうと現在よりずっと暖かい状態「ホットハウス・アース」へ急速に向かうことになる閾値に地球システムが近づいているかもしれないという事である。この経路は、人類の行動により影響を与えにくい、強くて内在的な生物・地球物理学的フィードバックにより牽引されるだろう。その経路は、可逆で、操縦可能で、実質的にゆっくりとしたものにはならないだろう。

どのレベルにそのような閾値があるかは不確かを伴う。しかし、それはほんの数十年後に起き得る産業革命より2°C高い温度上昇レベルである可能性がある。従って、それはパリ協定の温度目標の範囲で起

こり得る。

ホットハウス・アース経路の人間社会へのインパクトは、時に突然で、間違いなく破壊的な、凄まじいものになるであろう。

安定化された地球の経路を形成しこの閾値を避けるという目標は、人類は地球システムの統合的且つ相互作用的な構成要素であると認識した上で、地球システムの他の要素との関係を操るために人類社会が慎重で、協調した努力を行うことによってのみ達成・維持され得る。人類は今、今後数千年と言えど、今後数百年の将来に影響を与え得る決定的に重要な決断と行動をする必要に直面している(88)。

この分析はどの程度信頼できるものか？地球規模の変化につながる閾値のリスクを示す多くの文献からの証拠ある。従って、別な経路を形成する必要性を真剣に考えなければならない。

まず、第四期後期の地球システムの複雑系としての振る舞いは良くまとめられ、理解されている。このシステムの二つの境界状態—氷期と間氷期—はある程度良く定義できるし、その極限周期軌道の約10万年の周期性も正しいと認められている。そして、内部駆動力(炭素循環そしてアイスアルベドフィードバック)と外部駆動力(地球軌道要素の変化による日射量変動)も概して良く知られている。さらに、進行し出した氷床の崩壊や、その他のティッピング・エレメントの安定状態からの逸脱は、一旦温暖化が臨界レベルに到達したら戻すことは困難であることを我々は高い確信度を持って知っている。

第二に、地球の地質的過去(付録のサポート情報)の知見は、ホットハウス・アース経路と類似の気候条件が、既に実現されたレベルか今世紀中に予想されるレベルの二酸化炭素濃度と温度上昇でアクセス可能であることを示唆している(付録のサポート情報, Table S1)。

第三に、第四期の氷期・間氷期サイクルの間に作動していたティッピング・エレメントとフィードバックプロセスは、地球システムの将来の道筋に決定的に重要であると考えられているいくつかのプロセスと同じである(生物・地球物理学的フィードバック, ティッピング・カスケード, Figure 3, Table 1 として付録のサポート情報のTable S2)。

第四に、産業革命より約1°C高い現在の温度偏差におけるティッピング・エレメントの振る舞いの観測(29, 38)(Figure 3, Table 1, and 付録のサポート情報, Table S2)は、そのいくつかのエレメントが地球平均気温の1°Cから3°Cの上昇に対しても脆弱であることを示している(生物・地球物理学的フィードバックとティッピング・カスケード) (12, 17, 39)。その他のより多くのティッピング・エレメントはより高温になって脆弱性を示すのであるが、このことは、ティッピング・カスケードのリスクが2°C上昇で重大になり、それを超えるとリスクが急峻に増加し得ることを示唆している。我々は地球規模の変化につながる閾値が産業革命から2°C程の低い温度上昇の所にあり得ると主張する。

世界が地球規模の変化につながる閾値を超えることを避けようとするならば、すなわち安定化された

地球の経路を取るならば、人間と地球システムのその他の部分との関係の思慮深いマネジメントが必要である。我々は、人類の持つ価値観、平等性、行動、組織、経済、技術の根本的な方向転換に基づいた大幅な変化が必要であると提言する。そうであったとしても、安定化された地球へ向かう経路は地球システムの機能と構造の大幅な変化を伴うだろう。その意思決定において、回復力を構築する戦略は今よりもずっと高い優先度を持つことになるだろう。社会が必要な変化のいくつかを始めている兆候もある。しかしながら、これらの変化はまだ初期段階にあり、安定化された地球の経路へのドアが急速に閉じようとしている一方で、現在の道筋をホットハウス・アースから遠ざけるための社会的・政治的転換点には至っていない。

ここで行われた我々の最初の分析は、次の3つの疑問に答えるより深く定量的な地球システムの分析とモデル研究に裏打ちされる必要がある。(i) 地球規模の変化につながる閾値を超えて、ホットハウス・アースへと不可逆的に向かうリスクに人類は直面しているか？(ii) 地球システムの安定性を表す地形の上で、他にどのような経路が可能か？そしてそれらにはどのようなリスクがあるか？(iii) どんな地球の管理戦略が地球システムを操縦可能な「安定化された地球」の状態に留めておくために必要か？

謝辞

We thank the three reviewers for their comments on the first version of the manuscript and two of the reviewers for further comments on a revised version of the manuscript. These comments were very helpful in the revisions. We thank a member of the PNAS editorial board for a comprehensive and very helpful review. W.S. and C.P.S. are members of the Anthropocene Working Group. W.S., J.R., K.R., S.E.C., J.F.D., I.F., S.J.L., R.W. and H.J.S. are members of the Planetary Boundaries Research Network PB.net and the Earth League's EarthDoc Programme supported by the Stordalen Foundation. T.M.L. was supported by a Royal Society Wolfson Research Merit Award and the European Union Framework Programme 7 Project HELIX. C.F. was supported by the Erling-Persson Family Foundation. The participation of D.L. was supported by the Haury Program in Environment and Social Justice and National Science Foundation (USA) Decadal and Regional Climate Prediction using Earth System Models Grant 1243125. S.E.C. was supported in part by Swedish Research Council Formas Grant 2012-742. J.F.D. and R.W. were supported by Leibniz Association Project DOMINOES. S.J.L. receives funding from Formas Grant 2014-589. This paper is a contribution to European Research Council Advanced Grant 2016, Earth Resilience in the Anthropocene Project 743080.

参考文献

- 1 Crutzen PJ (2002) Geology of mankind. *Nature* 415:23.
- 2 Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C (2015) The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *Anthropocene Rev* 2:81–98.
- 3 Waters CN, et al. (2016) The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* 351:aad2622.
- 4 Malm A, Hornborg A (2014) The geology of mankind? A critique of the Anthropocene narrative. *Anthropocene Rev* 1:62–69.
- 5 Donges JF, et al. (2017) Closing the loop: Reconnecting human dynamics to Earth System science. *Anthropocene Rev* 4:151–157.
- 6 Levin SA (2003) Complex adaptive systems: Exploring the known, the unknown and the unknowable. *Bull Am Math Soc* 40:3–20.
- 7 Past Interglacial Working Group of PAGES (2016) Interglacials of the last 800,000 years. *Rev Geophys* 54:162–219.
- 8 Williams M, et al. (2015) The Anthropocene biosphere. *Anthropocene Rev* 2:196–219.
- 9 McNeill JR, Engelke P (2016) *The Great Acceleration* (Harvard Univ Press, Cambridge, MA).
- 10 Hawkins E, et al. (2017) Estimating changes in global temperature since the pre-industrial period. *Bull Am Meteorol Soc* 98:1841–1856.
- 11 Ganopolski A, Winkelmann R, Schellnhuber HJ (2016) Critical insolation-CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529:200–203.
- 12 Schellnhuber HJ, Rahmstorf S, Winkelmann R (2016) Why the right climate target was agreed in Paris. *Nat Clim Change* 6:649–653.
- 13 Schellnhuber HJ (1999) ‘Earth system’ analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402(Suppl):C19–C23.
- 14 IPCC (2013) Summary for policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds Stocker TF, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 3–29.
- 15 Drijfhout S, et al. (2015) Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models. *Proc Natl Acad Sci USA* 112:E5777–E5786.
- 16 Stocker TF, et al. (2013) Technical summary. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds Stocker TF, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK).
- 17 Lenton TM, et al. (2008) Tipping elements in the Earth’s climate system. *Proc Natl Acad Sci USA* 105:1786–1793.
- 18 Scheffer M (2009) *Critical Transitions in Nature and Society* (Princeton Univ Press, Princeton).
- 19 Raupach MR, et al. (2014) The declining uptake rate of atmospheric CO₂ by land and ocean sinks. *Biogeosciences* 11:3453–3475.
- 20 Schaefer K, Lantuit H, Romanovsky VE, Schuur EAG, Witt R (2014) The impact of the permafrost carbon feedback on global climate. *Environ Res Lett* 9:085003.
- 21 Schneider von Deimling T, et al. (2015) Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12:3469–3488.
- 22 Koven CD, et al. (2015) A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon-climate feedback. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 373:20140423.
- 23 Chadburn SE, et al. (2017) An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nat Clim Change* 7:340–344.
- 24 Ciais P, et al. (2013) Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds Stocker TF, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 465–570.
- 25 Segsneider J, Bendtsen J (2013) Temperature-dependent remineralization in a warming ocean increases surface pCO₂ through changes in marine ecosystem composition. *Global Biogeochem Cycles* 27:1214–1225.
- 26 Bendtsen J, Hilligsøe KM, Hansen J, Richardson K (2015) Analysis of remineralisation, lability, temperature sensitivity and structural composition of organic matter from the upper ocean. *Prog Oceanogr* 130:125–145.
- 27 Jones C, Lowe J, Liddicoat S, Betts R (2009) Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nat Geosci* 2:484–487.
- 28 Kurz WA, Apps MJ (1999) A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecol Appl* 9:526–547.
- 29 Lewis SL, Brando PM, Phillips OL, van der Heijden GMF, Nepstad D (2011) The 2010 Amazon drought. *Science* 331:554.
- 30 Herzsich U, et al. (2016) Glacial legacies on interglacial vegetation at the Pliocene-Pleistocene transition in NE Asia. *Nature Commun* 7:11967.
- 31 Mao J, et al. (2016) Human-induced greening of the northern extratropical land surface. *Nat Clim Change* 6:959–963.
- 32 Keenan TF, et al. (2016) Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Commun* 7:13428, and erratum (2017) 8:16137.
- 33 Hansen J, et al. (2016) Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimatedata, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous. *Atmos Chem Phys* 16:3761–3812.

- 34 Krieger E, Hall JW, Held H, Dawson R, Schellnhuber HJ (2009) Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:5041–5046.
- 35 Pollard D, DeConto RM (2009) Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* 458:329–332.
- 36 Pollard D, DeConto RM, Alley RB (2015) Potential Antarctic Ice Sheet retreat driven by hydrofracturing and ice cliff failure. *Earth Planet Sci Lett* 412:112–121.
- 37 DeConto RM, Pollard D (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531:591–597.
- 38 Rintoul SR, et al. (2016) Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf. *Sci Adv* 2:e1601610.
- 39 US Department of Defense (2015) National security implications of climate-related risks and a changing climate. Available at archive.defense.gov/pubs/150724-congressional-report-on-national-implications-of-climate-change.pdf?source=govdelivery. Accessed February 7, 2018.
- 40 Mengel M, Levermann A (2014) Ice plug prevents irreversible discharge from East Antarctica. *Nat Clim Change* 4:451–455.
- 41 Armour KC, et al. (2016) Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. *Nat Geosci* 9:549–554.
- 42 Stocker TF, Johnsen SJ (2003) A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography* 18:1087.
- 43 Rahmstorf S (2002) Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419:207–214.
- 44 Hemming SR (2004) Heinrich events: Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Rev Geophys* 42:1–43.
- 45 Alvarez-Solas J, et al. (2010) Link between ocean temperature and iceberg discharge during Heinrich events. *Nat Geosci* 3:122–126.
- 46 Stouffer RJ, et al. (2006) Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *J Clim* 19:1365–1387.
- 47 Swingedow D, et al. (2013) Decadal fingerprints of freshwater discharge around Greenland in a multi-model ensemble. *Clim Dyn* 41:695–720.
- 48 Rockström J, et al. (2017) A roadmap for rapid decarbonization. *Science* 355:1269–1271.
- 49 Schleussner C-F, Donges JF, Donner RV, Schellnhuber HJ (2016) Armed-conflict risks enhanced by climate-related disasters in ethnically fractionalized countries. *Proc Natl Acad Sci USA* 113:9216–9221.
- 50 McMichael AJ, et al., eds (2003) *Climate Change and Human Health: Risks and Responses* (WHO, Geneva).
- 51 Udmale PD, et al. (2015) How did the 2012 drought affect rural livelihoods in vulnerable areas? Empirical evidence from India. *Int J Disaster Risk Reduct* 13:454–469.
- 52 Maldonado JK, Shearer C, Bronen R, Peterson K, Lazrus H (2013) The impact of climate change on tribal communities in the US: Displacement, relocation, and human rights. *Clim Change* 120:601–614.
- 53 Warner K, Afifi T (2014) Where the rain falls: Evidence from 8 countries on how vulnerable households use migration to manage the risk of rainfall variability and food insecurity. *Clim Dev* 6:1–17.
- 54 Cheung WW, Watson R, Pauly D (2013) Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature* 497:365–368.
- 55 Nakano K (2017) Screening of climatic impacts on a country’s international supply chains: Japan as a case study. *Mitig Adapt Strategies Glob Change* 22:651–667.
- 56 Latorre C, Wilmshurst J, von Gunten L, eds (2016) *Climate change and cultural evolution. PAGES (Past Global Changes) Magazine* 24:1–32.
- 57 IPCC (2014) Summary for policymakers. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds Field CB, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 1–32.
- 58 Schleussner C-F, et al. (2016) Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat Clim Change* 6:827–835.
- 59 Griscom BW, et al. (2017) Natural climate solutions. *Proc Natl Acad Sci USA* 114:11645–11650.
- 60 Barrett S, et al. (2014) Climate engineering reconsidered. *Nat Clim Change* 4:527–529.
- 61 Mathesius S, Hofmann M, Calderia K, Schellnhuber HJ (2015) Long-term response of oceans to CO₂ removal from the atmosphere. *Nat Clim Change* 5:1107–1113.
- 62 Geels FW, Sovacool BK, Schwanen T, Sorrell S (2017) Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science* 357:1242–1244.
- 63 O’ Brien K (2018) Is the 1.5 °C target possible? Exploring the three spheres of transformation. *Curr Opin Environ Sustain* 31:153–160.
- 64 Young OR, et al. (2006) The globalization of socioecological systems: An agenda for scientific research. *Glob Environ Change* 16:304–316.
- 65 Adger NW, Eakin H, Winkels A (2009) Nested and teleconnected vulnerabilities to environmental change. *Front Ecol Environ* 7:150–157.
- 66 UN General Assembly (2015) *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1. Available at <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Accessed July 18, 2018.
- 67 Wals AE, Brody M, Dillon J, Stevenson RB (2014) Science education. Convergence between science and environmental education. *Science* 344:583–584.

68 O' Brien K, et al. (2013) You say you want a revolution? Transforming education and capacity building in response to global change. *Environ Sci Policy* 28:48–59.

69 Chapin FS, III, et al. (2011) Earth stewardship: A strategy for social–ecological transformation to reverse planetary degradation. *J Environ Stud Sci* 1:44–53.

70 Folke C, Biggs R, Norström AV, Reyers B, Rockström J (2016) Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecol Soc* 21:41.

71 Westley F, et al. (2011) Tipping toward sustainability: Emerging pathways of transformation. *Ambio* 40:762–780.

72 Lutz W, Muttarak R, Striessnig E (2014) Environment and development. Universal education is key to enhanced climate adaptation. *Science* 346:1061–1062.

73 Bongaarts J (2016) Development: Slow down population growth. *Nature* 530:409–412.

74 Defila R, Di Giulio A, Kaufmann-Hayoz R, eds (2012) *The Nature of Sustainable Consumption and How to Achieve It: Results from the Focal Topic “From Knowledge to Action–New Paths Towards Sustainable Consumption”* (Oakum, Munich).

75 Cohen MJ, Szejnwald Brown H, Vergragt P, eds (2013) *Innovations in Sustainable Consumption: New Economics, Socio-Technical Transitions and Social Practices* (Edward Elgar, Cheltenham, UK).

76 Nyborg K, et al. (2016) Social norms as solutions. *Science* 354:42–43.

77 Biermann F, et al. (2012) Science and government. Navigating the anthropocene: Improving Earth system governance. *Science* 335:1306–1307.

78 Galaz V (2014) *Global Environmental Governance, Technology and Politics: The Anthropocene Gap* (Edward Elgar, Cheltenham, UK).

79 Peters DPC, et al. (2004) Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events. *Proc Natl Acad Sci USA* 101:15130–15135.

80 Walker B, et al. (2009) Environment. Looming global-scale failures and missing institutions. *Science* 325:1345–1346.

81 Hansen J, Sato M, Ruedy R (2012) Perception of climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 109:E2415–E2423.

82 Galaz V, et al. (2017) Global governance dimensions of globally networked risks: The state of the art in social science research. *Risks Hazards Crisis Public Policy* 8:4–27.

83 Augustin L, et al.; EPICA community members (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429:623–628.

84 Polasky S, Carpenter SR, Folke C, Keeler B (2011) Decision-making under great uncertainty: Environmental management in an era of global change. *Trends Ecol Evol* 26:398–404.

85 Capra F, Luisi PL (2014) *The Systems View of*

Life; A Unifying Vision (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK).

86 Carpenter SR, et al. (2012) General resilience to cope with extreme events. *Sustainability* 4:3248–3259.

87 Biggs R, et al. (2012) Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. *Annu Rev Environ Resour* 37:421–448.

88 Figueres C, et al. (2017) Three years to safeguard our climate. *Nature* 546:593–595.

訳注

attractor アトラクタ

basin of attraction 吸引領域

biogeophysical 生物・地球物理学的

biome 生物群系

bipolar seesaw 両極シーソー

cascade カスケード. 滝のように一方向に連なっていること

disturbance 擾乱

feedback フィードバック. 何らかの入力(原因)に対して何らかの仕組みで出力(結果)を与えるシステムあるとき, 出力(結果)が入力(原因)や仕組みに影響を及ぼして再び出力を変化させること.

Hothouse Earth ホットハウス・アース

interactive インタラクティブな. または「相互に作用する」という意味の形容詞.

limit cycle 極限周期軌道またはリミットサイクル. 漸近的に安定である周期軌道のこと

linear 線形の. 入力(原因)に対して出力(結果)が比例しているような状況を表す.

nonautonomous dynamical system 非自励力学系

nonlinear 非線形の. 入力(原因)に対して出力(結果)が比例していない状況を表す.

nonlinear dynamics 非線形ダイナミクス, 非線形力学

pathway 経路, 進路

planetary threshold 地球規模の変化につながる閾値

pullback attractor プルバックアトラクタ. または引き戻しアトラクタ

Quaternary 第四紀. 地質時代の一つで, 258万8000年前から現在までの期間

resilience 回復力

stability landscape 安定性地形. 安定度を地形の様に表した模式図

Stabilized Earth 安定化された地球. ホットハウス・アースに対峙するものとしてスタビライズド・アースと訳すこともできるが, このカタカナは耳慣れないので安定化された地球と訳すことにする.

Stabilized Earth pathway 安定化された地球の経路

tipping element ティッピング・エレメント

tipping cascade ティッピング・カスケード

tipping point ティッピング・ポイント. 転換点とも訳される

trajectory 道筋. 数学的用語としては軌道・軌跡