

研究ノート 緑のサハラは失われたが地球の気候は暴走しなかった

杉山大志 2026 年 9 月 9 日

要旨

サハラにはかつて、現在よりはるかに広い範囲に草原や樹木、湖沼が存在した。アフリカ湿潤期の終わりには、そうした環境が失われ、広大な地域が乾燥した。降水や植生だけでなく、砂塵の放出、地表の日射反射、炭素の貯蔵にも及ぶ大規模な転換である。それでも、その後の地球全体の気候が自己増幅的な温暖化に移行したことを示す記録はない。

本稿は、この歴史的事実をティッピングポイントの議論に位置づける。ティッピングポイントとは、ある限界を越えると、それまで維持されていた状態から大きく転換する境目をいう。緑のサハラの消失は、その仕組みを考える重要な事例である。ただし、サハラ全域が同時に一つの境目を越えたわけではない。海底堆積物には急激な乾燥化を示す記録がある一方、湖の堆積物などには長期間にわたる段階的な変化も残されている。

完新世の全球平均気温の長期的な変化についても、復元方法による相違がある。中期以降の緩やかな寒冷化を示す研究と、緩やかな温暖化を示す研究が併存する。しかし、これらの相違を考慮しても、サハラの転換を境に、全球の温暖化が大幅かつ持続的に自己増幅する状態へ移ったという経過にはならない。この判断は、本稿で比較する古気候記録から導く推論であり、サハラの効果だけを取り出して測定した結果ではない。

地域の環境を変える正のフィードバックが存在することと、地球全体が不安定化することは別の命題である。植生が減って乾燥化が進む作用があっても、地表の反射率の変化、海洋による熱や炭素の吸収、宇宙への放熱などを含めた応答は、同じ向きにそろうとは限らない。サハラの事例が示すのは、大規模な地域の環境転換と、全球の気候が比較的限られた変動の範囲にとどまることが両立し得る、という点である。

この事例だけで、将来のアマゾン森林の衰退や他のティッピング要素の影響を否定することはできない。過去と現在では外部条件も変化の速さも異なる。それでも、地域の転換から全球の連鎖的な不安定化を論じるには、両者を結びつける仕組みと規模の裏づけが必要である。緑のサハラの消失は、その区別を実際の地球史に即して考えるための有力な材料となる。

【キーワード】 アフリカ湿潤期、サハラ、ティッピングポイント、完新世、気候の安定性、植生と気候の相互作用

目次

要旨	1
1 問題の所在	3
2 緑のサハラで何が失われたのか	3
3 ゆっくり変わる日射と急変する地域環境	5
4 その後の全球の気候はどう推移したか	5
5 地域の大変化と全球の比較的な安定は両立する	8
6 アマゾンの議論に何を示唆するか	9
7 緑のサハラの消失から導く結論	10
付録 正のフィードバックと暴走の違い	10
参考文献	11

図表一覧

表 1 区別して検討すべき三つの変化	3
図 1 サハラの砂塵指標と全球気候の推移	6
表 2 完新世の長期的な気温変化をめぐる主要な復元	7

本文中の著者名・年と参考文献の DOI から原論文を参照できる。図 1 のデータ取得元は参考文献末尾にまとめた。

1 問題の所在

広大な土地から植生が失われ、湖が干上がり、砂塵が増える。これほどの環境転換が起きれば、地球全体の気候にも大きな不安定化が及ぶのではないか。緑のサハラの消失は、その疑問を実際の過去に照らして考えられる事例である。

現在の気候変動をめぐっては、アマゾンの森林衰退、氷床の縮小、海洋循環の転換などがティッピングポイントとして論じられている。転換が起こり得るこうした構成部分は「ティッピング要素」と呼ばれる。その相互作用によって、より高温の地球へ移行する可能性を検討した代表的な論者が [Steffen ほか \(2018\)](#) である。同論文は個々の地域の転換が必ず全球の連鎖を起こすと主張しているわけではなく、全球の気候を一定の範囲に保つ経路でも、一部の生態系などの転換は起こり得るとしている。

したがって、検討すべきなのは、ティッピングポイントの存在そのものを一括して肯定するか否定するかではない。どの地域の何が変わり、その変化がどの経路を通じて、地球全体にどれだけ影響するかである。本稿では、サハラの大規模な乾燥化と、その後の全球気候の推移を対象を絞る。

タイトルでいう「暴走」は、地域の環境転換をきっかけに、地球全体が大幅で自己持続的な温暖化へ移行することを指す。気温が数学的に無限に上昇すること限定せず、別の高温状態へ自己増幅的に移る場合も含める。一方、海洋の蒸発と水蒸気の増加が強く結びつく、惑星気候論の厳密な意味での「暴走温室状態」を本稿の検討対象とはしない。これらを混同すると、将来予測の評価対象が曖昧になる。([Goldblatt ほか, 2013](#))

表 1 区別して検討すべき三つの変化

変化	主に見る指標	それだけでは分らないこと
地域の状態転換	降水、植生、湖水位、海洋循環など	全球の温度がどれだけ変わるか
全球の追加的な変化	全球平均気温、CO ₂ 、放射収支など	別の要素の転換を引き起こすか
全球の自己持続的な大幅温暖化	要素間の増幅と長期的な全球の推移	個々の地域の転換だけからは判定できない

注：本稿の論点を整理したもの。三つの変化は関連し得るが、同義ではない。

また、「暴走しなかった」と「影響がなかった」も区別する。サハラの環境転換は、そこに存在した生態系にとって巨大な変化だった。遠隔地の降水や大気循環にも影響した可能性がある。全球平均の変化が限られていても、地域の変化が小さかったことにはならない。

2 緑のサハラで何が失われたのか

2.1 湿潤期を示す記録

過去のサハラは、現在の砂漠景観だけからは想像しにくい環境だった。湖成堆積物や花粉、海へ運ばれた砂塵などは、北アフリカに湿潤な時期があったことを示す。ここでいう「緑」は、全域が均一な密林だったという意味ではない。降水量や地形に応じた草原、低木、樹木、湿地、湖沼などが存在した環境をまとめて表す。([Tierney ほか, 2017](#) ; [Kröpelin ほか, 2008](#))

北西アフリカ沖の海底堆積物を調べた [deMenocal ほか \(2000\)](#) は、およそ 1 万 4800 年前から 5500 年前に砂塵の流入が少なかったことと、その始まりと終わりの急な変化を報告した。この記

録は、ゆっくり変わる日射条件に対し、北アフリカの環境が急激に応答し得ることを示す代表例となった。ただし、一つの海底地点の記録をサハラ全域の同時変化とみなすことはできない。

乾湿の違いは、降水量の復元にも表れる。Tierney ほか (2017) が西サハラに沿う 4 地点から推計した湿潤期の降水量の中央値は年約 640 mm で、現在の年 35~100 mm より多い。この値は地点と時期をまとめた推定値であり、サハラ全域の平均ではないが、湿潤期と現在の環境の隔たりを具体的に示している。

本稿では年代を原則として「年前」で記す。古気候研究で用いる BP は 1950 年を基準とし、ka BP はその千年単位である。例えば 5.5 ka BP は、1950 年から 5500 年前を意味する。現在から数えた厳密な年数とは少し異なるが、本稿が扱う数百年から数千年の議論にはこの表記が適している。

2.2 乾燥化は地域ごとに進んだ

湿潤期の終わりを一つの年で表すと分かりやすいが、実態はもっと複雑である。Shanahan ほか (2015) は、各地で乾燥化の時期が異なることを示した。北アフリカの湿潤域が縮小する過程では、ある場所の降雨が急減しても、より南の場所では湿潤な条件がしばらく続き得る。地域ごとの急変と、大陸全体で見た段階的な乾燥化は両立する。

チャド北部のヨア湖を調べた Kröpelin ほか (2008) は、過去 6000 年にわたる生態系の変化を復元した。そこでは植生の後退と環境の変化が段階的に進み、現在に近い砂漠の生態系と風の状態が約 2700 年前に成立したとされる。湿潤期の終焉には、急激な変化だけでなく、長期間にわたる遷移も含まれていた。

広い地域が最終的に乾燥したことは、転換の大きさに関する事実である。一方、どの場所でどれだけ速く変わったかは、転換の仕組みに関する別の問いである。大規模だったという理由だけで、全域が一斉に単一のティッピングポイントを越えたと扱う必要はない。

2.3 砂塵と炭素にも及ぶ変化

植生の減少と湖沼の縮小は、風で運ばれる土壌や砂塵の量を変える。海底堆積物に含まれる陸起源物質は、その過程を調べる手がかりになる。ただし、堆積地点で測られる量は、発生源の状態に加えて、風や輸送経路、海中での堆積過程にも左右される。砂塵の記録は乾燥化の重要な証拠だが、植生面積そのものを直接測ったものではない。(Kinsley ほか, 2022)

炭素貯蔵量も変化した。Chen ほか (2020) は植生モデルを用い、緑のサハラから砂漠への転換に伴って、植生・土壌・落葉などに蓄えられた炭素が約 58 PgC 減少したと推計した。PgC は炭素 10 億トンであり、この値は炭素約 580 億トンに相当する。これはモデルで計算した時期間の貯蔵量の差で、全量が短期間に大気へ放出され、そのまま残ったことを意味しない。

サハラの転換を考える際には、植生や降雨だけでなく、こうした物質循環の変化も含める必要がある。それでも、後述する全球の記録には、この転換後に自己持続的な大幅温暖化が始まった姿は認められない。

3 ゆっくり変わる日射と急変する地域環境

3.1 出発点は季節と緯度による日射の変化

アフリカ湿潤期の基本的な背景には、地球の軌道や地軸の向きの変化に伴う、北半球の夏の日射の変化がある。北アフリカの夏の加熱が強まると、海から大陸へ湿った空気を運ぶ季節風が強まり、雨域が北へ広がりやすくなる。その後、夏の日射が弱まるにつれて、湿潤な環境を維持する条件も変わった。（Claussen ほか, 1999；Tierney ほか, 2017）

これは、地球全体が受け取る年平均の日射が一様に大きく変わったという話ではない。季節と緯度による日射の配分が変わることで、季節風や降雨が大きく変わったのである。温室効果ガスの増加による現代の温暖化とは、出発点となる作用が異なる。

3.2 植生と降雨が互いを変える

植物は気候に受動的に従うだけではない。葉や根は水の循環に関わり、植生で覆われた地表は裸地とは異なる割合で日射を吸収する。そのため、植生が減ると蒸発散や地表の熱収支が変わり、雨が減って、さらに植生が維持されにくくなることがある。変化を同じ方向へ増幅する作用が、正のフィードバックである。

Claussen ほか（1999）の結合モデル実験は、軌道条件が徐々に変わるなかでも、植生と大気の相互作用によってサハラ環境が急変し得ることを示した。この意味でサハラは、緩やかな外部条件の変化に大きく応答する系の重要な研究対象である。

3.3 新しい状態にとどまることもティッピングの帰結である

正のフィードバックが働いた後、その地域が新しい状態で落ち着くことは十分にあり得る。降水が減って草原が失われれば、以前の環境へ戻りにくくなる場合があるが、そこから植生の減少が無限に続くわけではない。地表や大気は、それまでとは異なる水・熱収支のもとで推移する。

ただし、植生や炭素の量が有限であることだけで、他の地域への連鎖まで否定することはできない。一つの変化が別の系の境目を越えさせる可能性は残る。その有無は、結びつきの強さ、変化の向き、作用する時間によって決まる。「正のフィードバックがある」という説明だけでは、全球の帰結は定まらない。

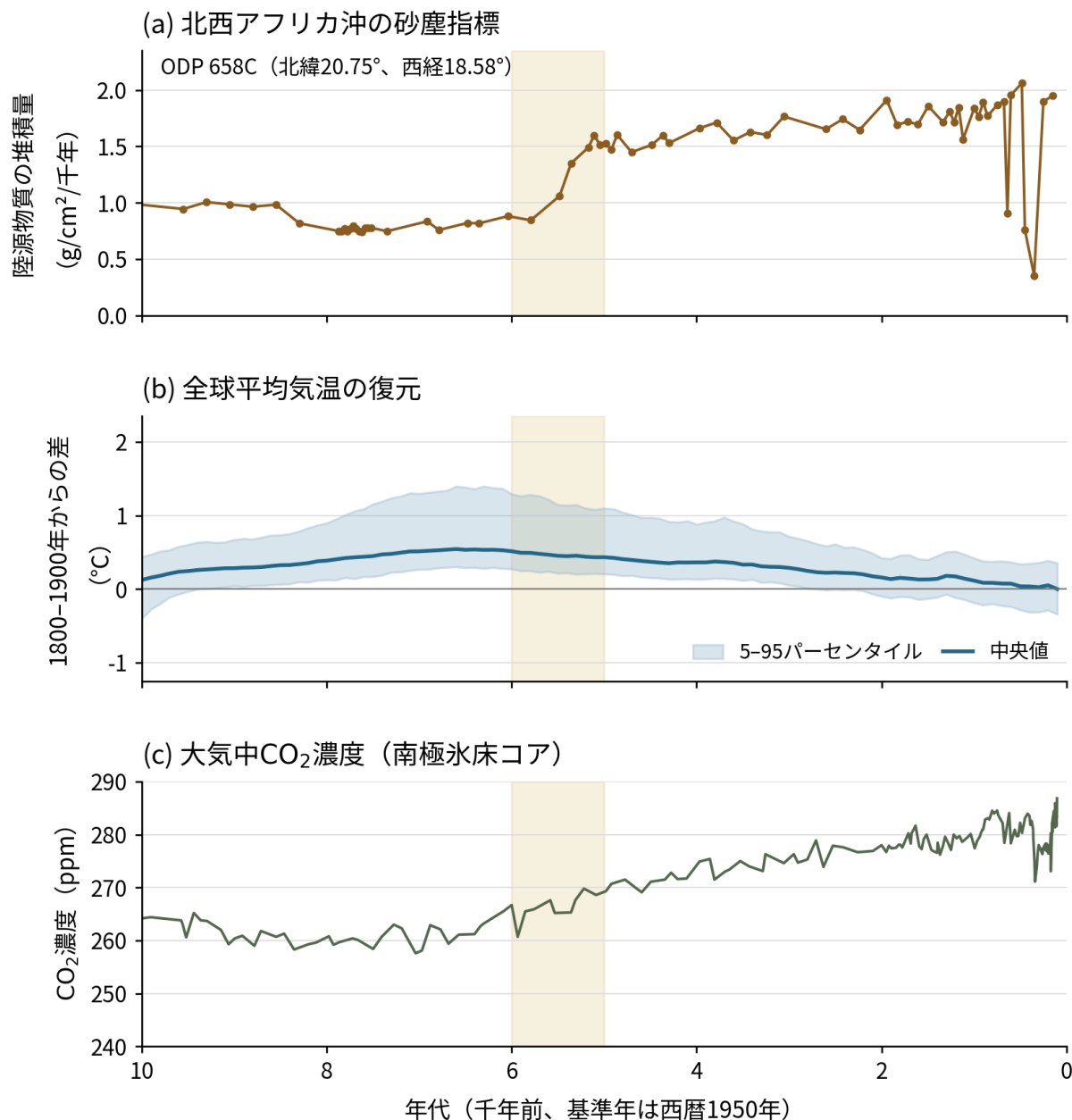
4 その後の全球の気候はどう推移したか

4.1 寒冷化を示す復元

古気候の全球平均気温は、世界各地の堆積物などに残された間接的な指標から復元される。Kaufman ほか（2020）は複数の統計手法を用い、過去 1 万 2000 年の気温を復元した。代表的な結果では約 6500 年前を中心とする温暖な時期の後、産業化前まで長期的な寒冷化が進んだ。

この復元に従えば、緑のサハラが失われた時期とその後は、全球平均気温が上昇し続けた時期ではない。ただし、同時期に寒冷化したことだけで、その寒冷化がサハラの砂漠化によって生じたとは結論できない。日射の変化など、複数の要因が同時に作用していたからである。

図1 サハラ砂塵指標と全球気候の推移



注：上段は北西アフリカ沖 ODP 658C の陸源物質の堆積フラックスで、砂塵供給の指標。中段は Kaufman ほか (2020) の復元中央値と 5～95% 範囲。下段は南極氷床コアの CO₂ 合成記録。薄茶色の帯は 6000～5000 年前の目安であり、サハラ全域の同時転換を示すものではない。

年代は 1950 年基準。砂塵指標と CO₂ は 1850 年以前、気温は 100 年前を中心とする 1800～1900 年の平均区間までを使用。独自の平滑化や外れ値除去は行っていない。各記録の年代誤差と時間分解能は異なる。この対比だけでサハラの寄与を分離できるわけではなく、他の気温復元との相違は第 4.2 節と表 2 で扱う。

出典：Adkins ほか (2006) の陸源物質記録を収録した Kinsley ほかの公開データ、Kaufman ほか (2020)、Bereiter ほか (2015) より作成。(Kinsley ほか, 2022)

4.2 温暖化を示す復元もある

完新世の長期的な全球気温変化には、なお論争がある。[Osman ほか \(2021\)](#) は、海面水温の間接指標と気候モデルを組み合わせたデータ同化によって、約 9000 年前以降に約 0.5°C の全球平均気温上昇を復元した。これは、中期以降の寒冷化を示す復元とは異なる。

[Bova ほか \(2021\)](#) は、海の記録が特定の季節を強く反映している可能性を検討し、南緯 40 度から北緯 40 度の記録を基礎として、全球を代表する年平均海面水温を推計した。その結果、過去 6500 年に約 0.25°C の上昇を示した。ただし、この値は全球平均地表気温そのものではなく、海面水温についての結果である。陸上気温を含む復元と、そのまま同じ量として比較すべきではない。

一方、[Erb ほか \(2022\)](#) は陸と海の記録を用いた別のデータ同化で、約 6400 年前の温暖な時期と、その後の寒冷化を復元した。単純に「間接指標なら寒冷化、モデルを用いれば温暖化」と分けられる状況でもない。

表 2 完新世の長期的な気温変化をめぐる主要な復元

研究	対象と方法	長期的な推移
Kaufman ほか (2020)	全球平均地表気温 間接指標を複数手法で統合	約 6500 年前の温暖な時期の後、産業化前まで寒冷化
Osman ほか (2021)	全球平均地表気温 海の指標とモデルを同化	約 9000 年前以降、約 0.5°C の温暖化
Bova ほか (2021)	年平均海面水温 海の指標の季節性を補正	過去 6500 年に約 0.25°C の温暖化
Erb ほか (2022)	全球平均地表気温 陸・海の指標とモデルを同化	約 6400 年前の温暖な時期の後、寒冷化

注：対象、期間、方法が異なるため、数値を単純に順位づけする表ではない。Bova ほかは南緯 40 度～北緯 40 度の記録を基礎とする。いずれも直接の全球観測値ではない。出典：([Kaufman ほか, 2020](#) ; [Osman ほか, 2021](#) ; [Bova ほか, 2021](#) ; [Erb ほか, 2022](#))

この相違には、各指標が表す季節、記録が存在する地域の偏り、年代の不確実性、モデルの影響などが関係する。本稿の論点は、この論争を一つの復元に決着させることには依存しない。寒冷化を示す復元でも温暖化を示す復元でも、緑のサハラの消失をきっかけとして全球が大幅な自己持続的温暖化に突入した、という経過は示されていない。

4.3 大気中の CO₂にも発散的な変化は見られない

南極の氷に閉じ込められた空気は、過去の大気中 CO₂濃度を知る手がかりになる。[Bereiter ほか \(2015\)](#) による合成データでは、完新世中期から産業化前にかけて CO₂はおおむね 260 ppm 台から 280 ppm 程度へ緩やかに増加した。濃度が全く変わらなかったわけではないが、サハラの転換後に大幅な増加が自律的に加速した姿ではない。

この増加分をサハラからの炭素放出と一対一に対応させることはできない。大気中の濃度は、他の陸域、海洋、人間活動を含む収支の結果である。[Brovkin ほか \(2019\)](#) は完新世の CO₂増加の起源を炭素循環モデルで調べ、海洋の炭酸塩に関わる過程などを検討している。第 2 章の炭素貯蔵量の推計から、そのまま大気中 CO₂の増加幅を算出するのは適切ではない。

4.4 大西洋の海洋循環にも持続的な崩壊は見られない

気温とは別の補助的な証拠として、大西洋の海洋循環の復元がある。大西洋南北循環（AMOC）は、表層と深層の海水の移動を通じて南北に熱を運ぶ大規模な循環である。Gerber ほか（2025）は、海底堆積物の放射性同位体と海洋モデルから、完新世の循環の強さを推計した。その結果は、約 6500 年前以降の循環が比較的安定していたことを示す。

この研究はサハラの影響を直接検定したものではない。それでも、サハラの大転換をまたぐ時期に、AMOC の持続的な崩壊が示されないことは、本稿の議論を補う。なお、記録には一時的な弱化の兆候もあり、短い変動を検出する能力には限界がある。「比較的安定」は、循環が一切変わらなかったという意味ではない。（Gerber ほか, 2025）

4.5 記録から導ける結論

以上から、「巨大な地域の環境転換が、全球の持続的な自己増幅温暖化を必ず引き起こす」という見方は支持されない。サハラでは大転換が起きたが、その後の全球気候は、そのような暴走を示さなかった。

この結論の範囲も明確にしておく必要がある。古気候記録の時間分解能では、短期間の変動や局地的な急変を見落とすことがある。また、気温の推移だけから、気候感度や外乱からの回復の速さが転換前後で不変だったとまでは言えない。本稿でいう「比較的な安定」は、数千年にわたる全球の推移が、持続的な大幅温暖化への移行を示さなかったという意味である。

5 地域の大変化と全球の比較的な安定は両立する

5.1 同じ変化から異なる向きの作用が生じる

サハラの植生が失われた場合、炭素貯蔵量の減少は温暖化に寄与し得る。一方、明るい地表が広がると日射の反射が増え、吸収される太陽エネルギーが減る作用が生じる。蒸発散の減少は地表の冷却を弱めるが、その影響は雲、降水、大気循環の変化と組み合わせる。砂塵も太陽放射と赤外放射の両方に作用するため、その効果を一律に温暖化方向と決めることはできない。（Davies ほか, 2015 ; Gaetani ほか, 2024）

したがって、地域の「乾燥化を増幅する作用」と、全球の「温暖化を増幅する作用」は同じものではない。ある地域で降雨がさらに減る仕組みが、全球平均の放射収支を同じ向きに変えるとは限らない。この違いを飛び越えて、地域の正のフィードバックをそのまま地球全体の不安定性と読むと、物理的な説明が抜け落ちる。

5.2 遠隔地への影響には寒冷化方向の結果もある

Davies ほか（2015）は、サハラの砂漠化が北極の寒冷化に寄与した可能性をモデルで検討した。標準的な実験の比較では、9000 年前から現在相当の条件への変化のうち、サハラの植生変化に対応する北極の冷却は約 0.5°C だった。地表の反射率と北向きの大気の熱輸送が関わる結果である。この数値はモデル実験の差であり、観測記録からサハラだけの寄与を測定したものではない。

Gaetani ほか（2024）は、緑のサハラと砂塵の変化が北大西洋・欧州の循環に及ぼす効果を検討した。遠隔地への応答が生じる一方、植生と砂塵を変更しても、欧州の間接指標とモデルの一

致が改善するとは限らなかった。欧州の過去の気候を、サハラの状態だけで説明することは難しい。

これらの研究は、サハラの影響が地域内で完結したという説明を支持しない。しかし、遠隔地に影響が及ぶことは、それだけで全球の温暖化が暴走することを意味しない。地球上の各地域は結びついていても、すべての応答が温暖化を増幅する方向にそろうわけではない。

5.3 正のフィードバックがあっても安定な応答は可能である

地球が温まれば、他の条件が同じなら宇宙へ放出する赤外放射が増える。この放熱の増加は、温度の上昇を抑える基本的な作用である。水蒸気などによる増幅作用が存在しても、それを含む応答全体がなお放熱を増やすなら、一定の加熱に対して新しい温度で収支が釣り合い得る。正のフィードバックの存在だけでは、不安定性は決まらない。(Sherwood ほか, 2015)

海洋による熱や炭素の吸収も、応答の大きさと時間経過を変える。ここで述べた機構は、サハラ転換後の全球の変化を定量的に分解した結果ではない。当時の外部条件と地球内部の応答が組み合わさった結果として全球の暴走が起きなかったことは、地域に正のフィードバックが存在したと矛盾しないのである。

6 アマゾンの議論に何を示唆するか

アマゾンの森林衰退では、森林が水を大気へ戻す働きが弱まり、乾燥化が進んで、さらに森林が維持されにくくなる仕組みが重要である。森林伐採、温暖化、降水の変化などが重なることで、地域の生態系が別の状態へ移る可能性が検討されている。これは、それ自体として評価すべき問題である。(Flores ほか, 2024)

サハラの事例は、アマゾンの変化が全球にどれだけの追加温暖化をもたらすかを、別に問う必要があることを示す。両地域では植生の種類、炭素密度、水循環、変化の速さ、背景にある温室効果ガス濃度が異なる。面積や景観の変化が大きいという共通点だけから、将来の影響を同一視することはできない。

この区別に関係する研究として、Deutloff ほか (2025) がある。同研究は、アマゾンの森林衰退と永久凍土の急激な変化による炭素放出を組み込んだ簡易モデルを用いた。中程度の排出シナリオである SSP2-4.5 では、これらによる追加温暖化の中央値は 2300 年に約 0.22°C だった。また、対象となる 16 のティッピング要素について、2500 年までに閾値を越える確率の平均は 64% から 67% へ約 3 ポイント増えた。これは、閾値を越えると転換が始まると仮定した計算であり、「地球全体の連鎖が起きる確率が 3%」という意味ではない。

この計算は、アマゾン全域の消失を確定させた実験でも、気候系のあらゆる連鎖を含む計算でもない。森林の吸収能力の低下や、炭素以外を通じた主要な相互作用には扱われないものがある。また、2500 年の追加温暖化の 5~95% 範囲は $0.03\sim 0.91^{\circ}\text{C}$ と広い。著者らは、調べた炭素放出経路の増幅は小さいとする一方、連鎖一般を否定してはいない。(Deutloff ほか, 2025)

過去のサハラとこの将来計算は、同じ現象を調べたものではない。それでも、地域の生態系の大きな転換と、全球の温暖化の増幅幅を分けて評価する必要性は共通する。全球の増幅が有限であることと、その地域の損失が重大であることも両立する。

7 緑のサハラの消失から導く結論

緑のサハラの消失は、地球上で現実起きた大規模な環境転換だった。植生と湖沼が失われ、降水や砂塵、炭素貯蔵が変わった。各地の時期と速さには違いがあるが、その変化の大きさを軽視する理由はない。

それでも、全球の気候は、その後に自己持続的な大幅温暖化へ移行しなかった。完新世の全球気温復元には長期傾向の相違があるが、本稿で比較したどの復元も、サハラの転換後にそのような暴走が起きた姿を示していない。

この事実は、大規模な地域の転換が、地球全体の不安定化を必ず伴うという考えに対する反例となる。サハラの歴史は、地域の転換と全球の連鎖を区別すべきだという具体的な根拠を与えている。

ティッピングポイントを論じる際には、何が閾値を越えるのかに加え、その変化がどこまで伝わるのかを問わなければならない。連鎖を主張するなら、次の要素を転換させる作用の向きと大きさ、必要な時間、当時あるいは将来の外部条件を示す必要がある。「正のフィードバック」や「不可逆」という言葉だけで、その説明を済ませることはできない。

地球の気候は不変だったのではない。サハラも元の景観を保てなかった。しかし、地域の巨大な変化を含みながらも、全球の気候は比較的限られた変動の範囲にとどまった。緑のサハラは失われた。それでも地球の気候は暴走しなかった。この事実は、気候の変化の大きさと、気候系全体の不安定性を同一視しないための、地球史からの重要な示唆である。

付録 正のフィードバックと暴走の違い

変化を増幅する作用があれば、必ず際限なく増幅するのか。この点は、単純な数式でも確認できる。最初の温度変化を ΔT_0 とし、その変化がもたらす追加効果を元の変化の g 倍とする。さらにその追加効果にも同じ増幅が働くと、合計は次のようになる。

$$\Delta T = \Delta T_0(1 + g + g^2 + \dots) = \frac{\Delta T_0}{1 - g} \quad (0 < g < 1)$$

ここで g は、最初の放熱応答を基準として、追加のフィードバックが変化をどれだけ再増幅するかを表す無次元の係数である。0 より大きく 1 より小さければ、各回の追加分は小さくなり、総和は有限の値に収束する。例えば g が 0.5 なら、合計は最初の変化の 2 倍となる。正のフィードバックは存在するが、この近似の範囲では暴走しない。

g が 1 に近づくと応答は大きくなる。ただし、 g が 1 以上になってこの式が使えなくなっても、現実の地球で無限の昇温が起きることが証明されたわけではない。非線形な作用により、別の有限な状態へ移る場合もある。逆に、一つの地域にこの単純式を適用できたとしても、他の地域や遅い過程を含む連鎖まで評価したことにはならない。

この式は、外部からの加熱とフィードバックを整理する基本的な考え方の説明であり、サハラの実際の変化を計算したモデルではない。放熱を含めた全体の応答で安定性を判断する必要があること、各作用の強さが気候状態や時間によって変わり得ることについては、[Sherwood ほか \(2015\)](#) が整理している。

参考文献

- Adkins, J., deMenocal, P., & Eshel, G. (2006). The “African humid period” and the record of marine upwelling from excess ^{230}Th in Ocean Drilling Program Hole 658C. *Paleoceanography*, 21, PA4203. <https://doi.org/10.1029/2005PA001200>
- Bereiter, B., Eggleston, S., Schmitt, J., et al. (2015). Revision of the EPICA Dome C CO_2 record from 800 to 600 kyr before present. *Geophysical Research Letters*, 42, 542–549. <https://doi.org/10.1002/2014GL061957>
- Bova, S., Rosenthal, Y., Liu, Z., Godad, S. P., & Yan, M. (2021). Seasonal origin of the thermal maxima at the Holocene and the last interglacial. *Nature*, 589, 548–553. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03155-x>
- Brovkin, V., Lorenz, S., Raddatz, T., et al. (2019). What was the source of the atmospheric CO_2 increase during the Holocene? *Biogeosciences*, 16, 2543–2555. <https://doi.org/10.5194/bg-16-2543-2019>
- Chen, W., Ciais, P., Zhu, D., et al. (2020). Feedbacks of soil properties on vegetation during the Green Sahara period. *Quaternary Science Reviews*, 240, 106389. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106389>
- Claussen, M., Kubatzki, C., Brovkin, V., et al. (1999). Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the Mid-Holocene. *Geophysical Research Letters*, 26, 2037–2040. <https://doi.org/10.1029/1999GL900494>
- Davies, F. J., Renssen, H., Blaschek, M., & Muschitiello, F. (2015). The impact of Sahara desertification on Arctic cooling during the Holocene. *Climate of the Past*, 11, 571–586. <https://doi.org/10.5194/cp-11-571-2015>
- deMenocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., et al. (2000). Abrupt onset and termination of the African Humid Period: Rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Reviews*, 19, 347–361. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00081-5)
- Deutloff, J., Held, H., & Lenton, T. M. (2025). High probability of triggering climate tipping points under current policies modestly amplified by Amazon dieback and permafrost thaw. *Earth System Dynamics*, 16, 565–583. <https://doi.org/10.5194/esd-16-565-2025>
- Erb, M. P., McKay, N. P., Steiger, N., et al. (2022). Reconstructing Holocene temperatures in time and space using paleoclimate data assimilation. *Climate of the Past*, 18, 2599–2629. <https://doi.org/10.5194/cp-18-2599-2022>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., et al. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626, 555–564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>
- Gaetani, M., Messori, G., Pausata, F. S. R., et al. (2024). Mid-Holocene climate at mid-latitudes: Assessing the impact of Saharan greening. *Climate of the Past*, 20, 1735–1759. <https://doi.org/10.5194/cp-20-1735-2024>
- Gerber, L., Lippold, J., Süfke, F., et al. (2025). Low variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation throughout the Holocene. *Nature Communications*, 16, 6748. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61793-z>
- Goldblatt, C., Robinson, T. D., Zahnle, K. J., & Crisp, D. (2013). Low simulated radiation limit for runaway greenhouse climates. *Nature Geoscience*, 6, 661–667. <https://doi.org/10.1038/ngeo1892>
- Kaufman, D., McKay, N., Routson, C., et al. (2020). Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach. *Scientific Data*, 7, 201. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0530-7>

- Kinsley, C. W., Bradtmiller, L. I., McGee, D., et al. (2022). Orbital- and millennial-scale variability in Northwest African dust emissions over the past 67,000 years. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 37, e2020PA004137. <https://doi.org/10.1029/2020PA004137>
- Kröpelin, S., Verschuren, D., Lézine, A.-M., et al. (2008). Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years. *Science*, 320, 765–768. <https://doi.org/10.1126/science.1154913>
- Osman, M. B., Tierney, J. E., Zhu, J., et al. (2021). Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. *Nature*, 599, 239–244. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4>
- Shanahan, T. M., McKay, N. P., Hughen, K. A., et al. (2015). The time-transgressive termination of the African Humid Period. *Nature Geoscience*, 8, 140–144. <https://doi.org/10.1038/ngeo2329>
- Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., et al. (2015). Adjustments in the forcing–feedback framework for understanding climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 217–228. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00167.1>
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 8252–8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Tierney, J. E., Pausata, F. S. R., & deMenocal, P. B. (2017). Rainfall regimes of the Green Sahara. *Science Advances*, 3, e1601503. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601503>

図 1 のデータ取得元

砂塵指標：Kinsley ほか（2021 公開、2022 年論文）の ODP 108-658C データ。Fluxes シートの Age と ²³⁰Th-norm Detrital Flux を使用。 [データ・説明を開く](#)

全球平均気温：NOAA 収録の Kaufman ほか（2020）。CSV の ages、global_median、global_5、global_95 を使用。 [データ・説明を開く](#)

気温データの説明：基準化、100 年区間、各手法の統合に関する説明。 [データ・説明を開く](#)

大気中 CO₂：NOAA 収録の Bereiter ほか（2015）合成データ。age_gas_calBP と co2_ppm を使用。完新世部分は Law Dome、EPICA Dome C などの既往記録を統合している。 [データ・説明を開く](#)

文献・データの最終確認日：2026 年 9 月 9 日。図 1 は公開数値データから作成した。