The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

# 地球はいつまで緑でいられるのか。気候モデルが示すのは終末の日付ではなく範囲

*29* 通りの三次元気候シミュレーションでは、地球の光合成生物圏の限界が今から約 *13.5* 億〜*18.7* 億年後のどこかに置かれる。値は、岩石風化、温度、植物が利用できる二酸化炭素の最低濃度について意図的に単純化した将来経路に依存する。すべての植物、すべての生命、文明、あるいは地球そのものが終わる時期を予測した研究ではない。

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

# 地球はいつまで緑でいられるのか。気候モデルが示すのは終末の日付ではなく範囲

一枚の葉が生きるには、狭い条件の折り合いが必要だ。光、水、二酸化炭素、そして生化学反応が耐えられる温度が要る。人間の一生という尺度では、太陽はその条件の中で固定された部分に見える。だが 10 億年という尺度では、そうではない。

太陽は主系列星として年を重ねるにつれ、ゆっくり明るくなる。日射が増えれば地球は暖まるが、地球には長期的な応答がある。雨水、二酸化炭素、ケイ酸塩岩石の反応によって、大気中の二酸化炭素が除かれうるのだ。これは温室効果を弱め、温暖化の一部を相殺する。しかし、地球を冷やすこの仕組みは、最終的には光合成生物が生体組織をつくるために使う炭素を不足させる可能性もある。

新しいJournal of Geophysical Research: Atmospheres 論文は、どちらの限界が先に来るのかを問う。暑くなりすぎるのか、それとも二酸化炭素が少なくなりすぎるのか。答えは「地球が死ぬ日」ではない。意図的に単純化した 2 つの将来経路では、採用した光合成生命の限界は今からおよそ **13.5 億〜18.7 億年後**に入る。

この範囲が指すのは**植生生物圏**、つまり光合成生物によって支えられる地球生命系の部分である。とりわけ、光と二酸化炭素を生物学的物質に変える植物やその他の生物だ。すべての微生物の予報ではない。人類文明の寿命でもない。惑星そのものの寿命でもない。

# 惑星のサーモスタットには、不確かな設定が 2 つある

中心となる不確実性は**ケイ酸塩風化**だ。二酸化炭素は雨水に溶け、ケイ酸塩岩石と反応し、最終的に海や堆積物へ運ばれる。火山活動は地質学的時間スケールで二酸化炭素を大気へ戻す。これらの過程は炭酸塩–ケイ酸塩循環の一部をなし、しばしば惑星のサーモスタットと呼ばれる。

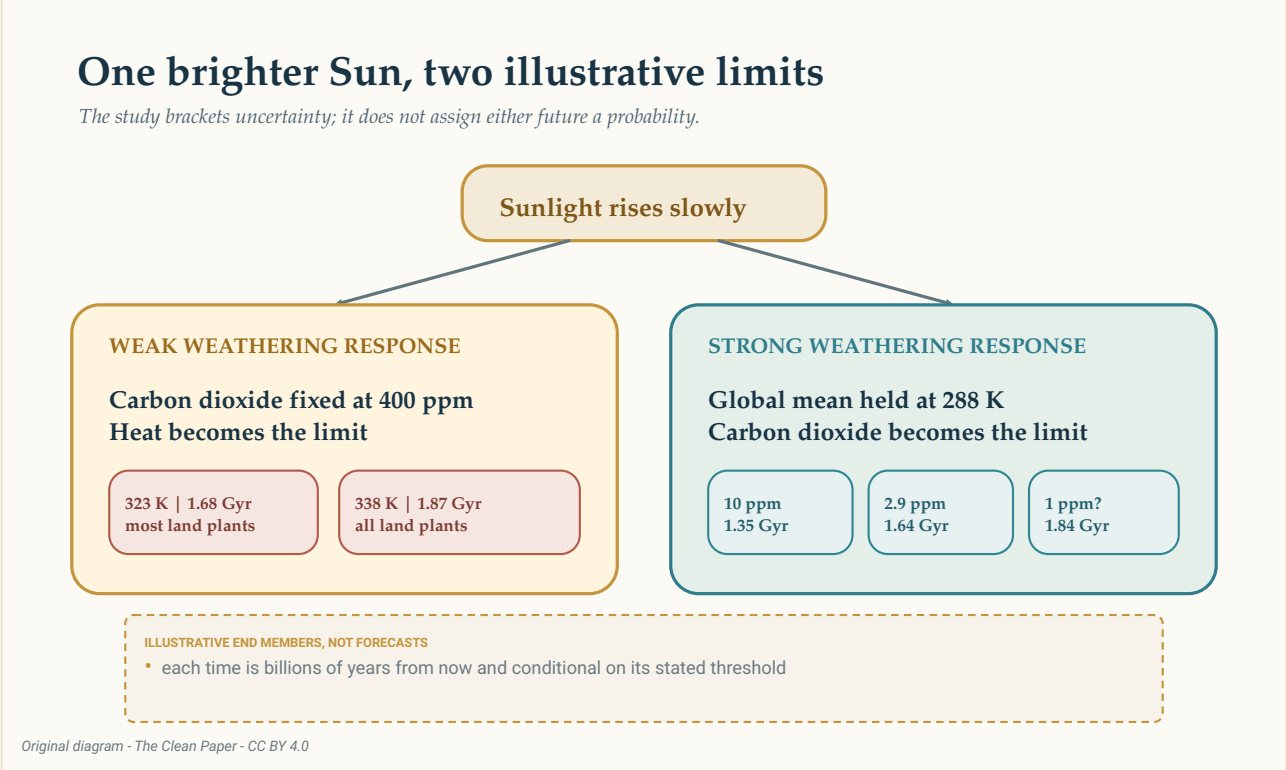
より暖かく湿った世界では、風化が速まり、二酸化炭素をより速く除くかもしれない。しかし、将来さらに明るくなる太陽のもとで、この応答が地球をどれほど強く支配するかは分かっていない。そこで Jacob Haqq-Misra と Eric Wolf は、一つの「正しい」経路を選ばなかった。代わりに 2 つの**端成分**、つまり不確実性を挟み込むために意図的に極端にしたケースをモデル化した。

- **弱い風化の端成分**では、大気中二酸化炭素を 400 ppm に保ったまま、明るくなる太陽によって温度が上がる。
- **強い風化の端成分**では、全球平均地表温度を 288 K、約 15 °C に保ったまま、日射が増えるにつれて二酸化炭素を減らす。

どちらの枝も、地球の実際の未来として提示されてはいない。前者は二酸化炭素が高いままなら熱が何をするかを問う。後者は、風化が全球温度を現在の平均付近に保つなら、炭素不足が何をするかを問う。

**風化が「サーモスタット」のように働くとは？**

この比喩が指すのはフィードバックであり、本物のつまみがあるという意味ではない。暖かい気候によって化学風化が速まれば、大気中の二酸化炭素が溶存物質、鉱物、堆積物へより多く移ることがある。この温室効果ガスの除去は、最初の温暖化の一部に逆らう。非常に長い時間スケールでは、火山からの脱ガスが二酸化炭素を戻す。
各段階の強さは、降水量、露出岩石、侵食、生物、テクトニクス、海洋化学に依存する。そのため論文は、サーモスタットを既知の機械として扱うのではなく、限界的な応答を試している。




論文は不確かな未来を 2 つの例示的な端成分で挟み込む。風化応答が弱ければ、温度上昇が採用した陸上植物のしきい値に達する。強ければ、低下する二酸化炭素が採用した光合成しきい値に達する。これは条件付きのモデル分岐であり、確率でもカウントダウンの日付でもない。

The Clean Paper CC BY 4.0

# 29 個の落ち着いたモデル世界 ——20 億年の一本の映画ではない

研究者らは三次元全球気候モデルExoCAMを使い、より強い日射とより低い二酸化炭素濃度の組み合わせについて **29 通りの定常気候**を計算した。各ケースは 70 モデル年走らせた。ここで 1 モデル年とは、条件を固定したまま人工的な気候を落ち着かせるための、シミュレーション上の 1 年周期

である。地球の将来を 1 年ずつ予測する際の 1 ステップではない。シミュレーション気候が十分落ち着いた後、最後の 20 年を平均した。

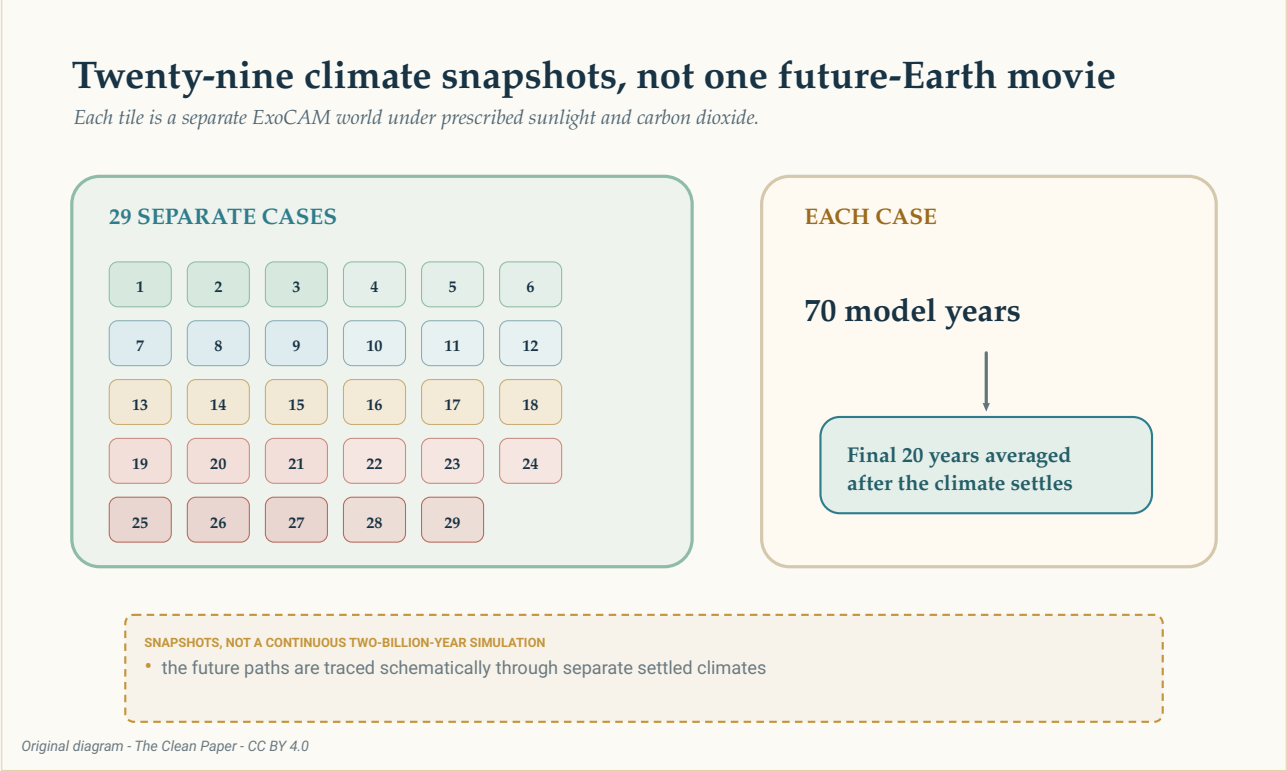
この 29 ケースは別々のモデル世界だ。各ランはグリッド上の 1 点であり、「この日射量と二酸化炭素濃度の組み合わせなら、落ち着いた気候はどうなるか」という問いに答える。コンピューターが現在の地球から出発し、今後 20 億年にわたって大気、岩石、海、生物を連続的に進化させたわけではない。著者らは、あらかじめ計算した 29 点の間を 2 つの模式的な風化経路でたどった。点と点の間の経路そのものはシミュレーションされていない。

下の表は公式のモデルデータ・アーカイブにある日射量と二酸化炭素の組み合わせを再掲したものだ。ケース ID は、ここでアーカイブ順に読みやすくするため追加した。**S/S0** は相対太陽定数、つまりモデルで使う入射太陽エネルギーを現在値 S0 で割った値である。1.2 なら、現在より 20% 多い入射太陽エネルギーを意味する。**CO2 (ppm)** は、大気分子 100 万個あたりの二酸化炭素分子数として表した混合比だ。

| ケース ID | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---:|---:|---:|
| 1 | 1.0 | 400 |
| 2 | 1.0 | 180 |
| 3 | 1.0 | 11.25 |
| 4 | 1.0 | 1.40625 |
| 5 | 1.044 | 400 |
| 6 | 1.044 | 180 |
| 7 | 1.044 | 135 |
| 8 | 1.044 | 11.25 |
| 9 | 1.044 | 1.40625 |
| 10 | 1.081 | 400 |
| 11 | 1.081 | 180 |
| 12 | 1.081 | 11.25 |
| 13 | 1.081 | 1.40625 |
| 14 | 1.091 | 400 |
| 15 | 1.091 | 180 |
| 16 | 1.091 | 34 |
| 17 | 1.091 | 11.25 |
| 18 | 1.091 | 1.40625 |
| 19 | 1.143 | 400 |
| 20 | 1.143 | 180 |
| 21 | 1.143 | 11.25 |
| 22 | 1.143 | 6 |
| 23 | 1.143 | 1.40625 |
| 24 | 1.2 | 400 |
| 25 | 1.2 | 180 |
| 26 | 1.2 | 11.25 |
| 27 | 1.2 | 1.40625 |
| 28 | 1.2 | 0.45 |
| 29 | 1.2 | 0 |

モデル地球は地球らしさを保つ一方で、意図的に制限されている。大きさは地球と同じで、現在の地理を使う。完全に循環する海洋ではなく単純化したスラブ海洋を用い、大気圧は現在の地球に近い 1 bar 程度に固定し、メタン濃度も固定している。軌道は完全な円（離心率 0）で、自転軸の傾きもない（赤道傾斜角 0）。土壌や植生を明示的に含まず、生物圏の変化によるフィードバックもない。最も重要なのは、気候モデルと岩石風化モデルが動的に結合されていないことだ。つまり ExoCAM が風化を計算し、それで二酸化炭素を更新して次の気候をフィードバックループで走らせるわけではない。研究者らは 2 つの限界経路をあらかじめ設定し、29 ケースの気候グリッド上をたどった。

> **気候モデルの「定常状態」とは？**
>
> 定常状態ケースとは、一つの選んだ太陽条件と大気条件のもとで、モデル気候を十分落ち着かせたものだ。シミュレーション内では日々・年々の天気は変化し続けるが、長期平均が大きく漂わなくなる。
> これは「この条件ならどんな気候になるか」を問うのに有用だ。ただし、現実の地球がある条件から次の条件へ実際にどの道筋で移るかを予測することとは異なる。




各タイルは独立した ExoCAM 気候ランで、70 モデル年走らせ、最後の 20 年を平均した。研究は設定した日射量と二酸化炭素条件のもとで 29 個の落ち着いた気候をサンプリングしたのであり、20 億年間に連続進化する一つの地球をシミュレーションしたのではない。

The Clean Paper CC BY 4.0

# 端成分 1：二酸化炭素は十分、しかし暑すぎる

弱い風化の枝では、二酸化炭素は 400 ppm に固定される。太陽入力が増えるにつれ、熱が制限要因になる。

論文は先行研究から 2 つの全球平均温度しきい値を採用している。

- **323 K**、全球年平均で約 **50** °C になると、世界はほとんどの陸上植物にとって暑すぎると扱われる。モデルは約 **16.8 億年後**にこのしきい値へ達する。
- **338 K**、全球年平均で約 **65** °C になると、すべての陸上植物にとって暑すぎると扱われる。モデルは約 **18.7 億年後**にこのしきい値へ達する。

これらは採用した生物学的限界であって、すべての光合成生物が必ず失敗する普遍的温度ではない。全球平均は大きな地域差も隠してしまう。研究では温度と水分の組み合わせが適した場所がどこに残るかも別途調べているが、気候地図のラベルだけで未来のあらゆる避難場所や適応を列挙することはできない。

# 端成分 2：温度は耐えられるが、二酸化炭素が少なすぎる

強い風化の枝では、全球平均温度を 288 K、約 15 °C に保ちながら、大気中二酸化炭素を低下させる。ここでは、異なる光合成経路がどれほど少ない炭素でも利用できるかによって答えが変わる。

- 従来使われてきた **10 ppm**—— 大気分子 100 万個につき二酸化炭素分子 10 個 —— というしきい値では、C4 光合成の限界は約 **13.5 億年後**に来る。C4 光合成はトウモロコシやサトウキビなどが使う経路で、炭素固定酵素の周囲に二酸化炭素を濃縮する。
- 先行研究で議論された別の C4 しきい値 **2.9 ppm** を使うと、約 **16.4 億年後**へ延びる。
- 暫定的な **1 ppm** しきい値を使うと、約 **18.4 億年後**になる。これは、夜に二酸化炭素を取り込み昼に利用する仕組みを分けるベンケイソウ型酸代謝（CAM）を使う一部植物や、溶存重炭酸イオンを利用できる水生植物が残る可能性と結び付けられている。

最後の数字には、生物学的に最も大きな但し書きが付く。著者ら自身、1 ppm という限界を暫定的と明記している。未来の地球条件で、すべての CAM 植物や水生植生に実験的に確立された生存しきい値ではない。

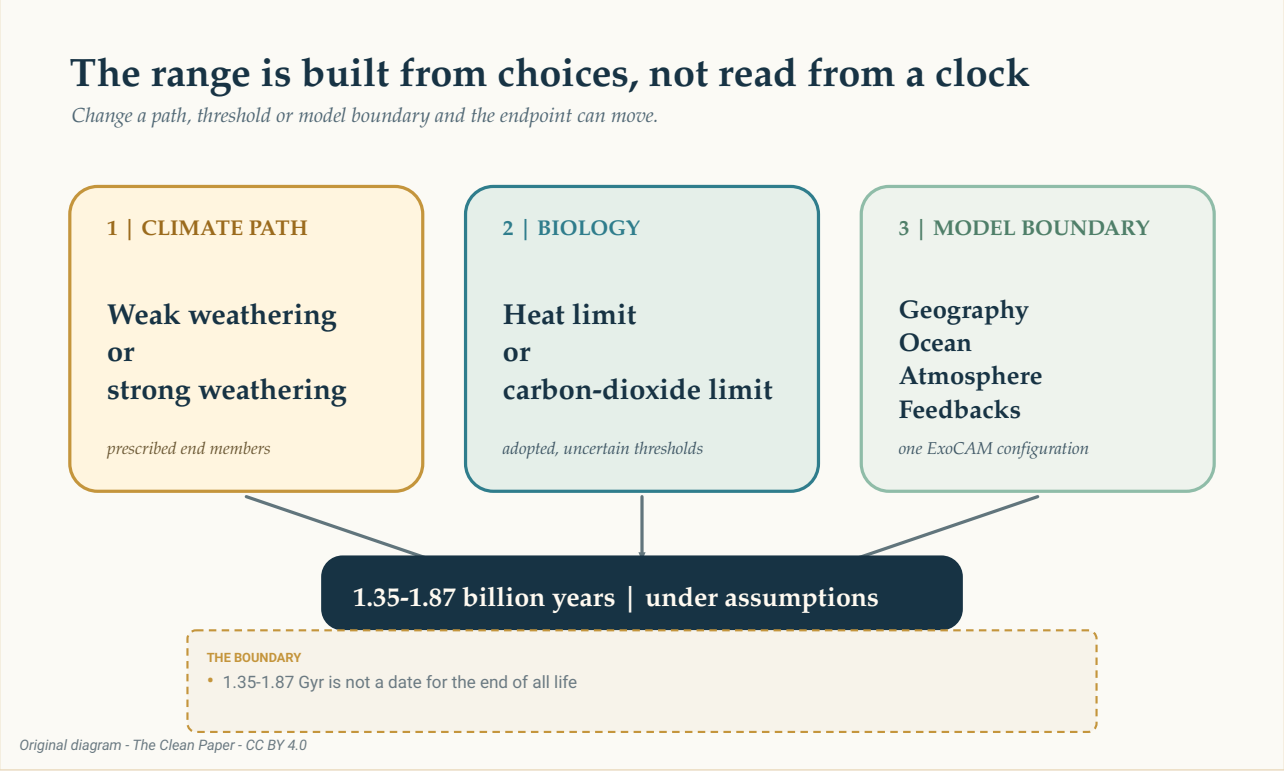
> **C3、C4、CAM は戦略であって序列ではない**
>
> 植物は炭素を取り込むために異なる生化学経路を使う。**C3 光合成**が最も一般的だ。トウモロコシやサトウキビなどの **C4 光合成**は、炭素固定酵素の周囲に二酸化炭素を濃縮し、二酸化炭素が少ない条件で有利になりうる。**ベンケイソウ型酸代謝（CAM）**は炭素の取り込みと利用を夜と昼に分け、多くの植物で節水に役立つ。

> これらは種ごとに多様性をもつ戦略の群であり、「より優れた」植物へ順番に上がる階段ではない。論文の極端に低い二酸化炭素しきい値は、あり得る限界を探るための仮定であって、未来の生態系が必ずその利用能力を進化させるという保証ではない。

# 18.6 億年が「有効期限」ではない理由

論文で目立つ約 **18.6 億年**という推定値は、2 つの楽観的な上限端点 —— 二酸化炭素制限枝の 18.4 億年と、高温制限枝の 18.7 億年 —— の平均である。異なる 2 つのシナリオを短く要約した数字にすぎない。より精密な第 3 のモデル結果でも、最良推定日でもない。

13.5 億〜18.7 億年という広い幅にさえ、一つの確率が対応するわけではない。下限と上限は異なる風化仮定、異なる生物学的しきい値、そして一つの気候モデル設定に依存する。この範囲は時間を測っているのと同じくらい、実験設計上の選択を測っている。




13.5 億〜18.7 億年という幅は、風化経路、生物学的しきい値、モデル境界を選んで初めて生じる。これは仮定の地図であり、全生命の絶滅へ向かう時計ではない。

The Clean Paper CC BY 4.0

# その前に別の限界が来るかもしれない

植生生物圏が最も長く続く推定値は、別の不確かな境界に近づく。湿潤温室または暴走温室によって、大規模な海洋喪失が起こりうる境界だ。日射が増えたとき、特に現在条件から遠く離れた領域で、これらの状態がいつ始まるかについて気候モデル同士の見解はかなり異なる。一部の推定では、最も楽観的な光合成限界より前に来る。

したがって、上限側の枝を「地球は今後 18.7 億年まで海や見慣れた大陸、居住可能な地表条件を保てる」という保証として読むことはできない。またモデルには、将来のプレートテクトニクス、陸地面積の変化、進化する生態系、完全に動的な海洋も含まれていない。大気がエネルギーを吸収・放出する計算も、強い日射と極端に低い二酸化炭素という、モデル間の差が大きくなる領域へ押し広げられている。

進化的適応や技術的介入は、論文の考察で可能性として触れられる。しかし 29 通りの気候シミュレーションが出力した結果ではない。モデルは未来の生物が 1 ppm でも使える光合成経路を進化させることを示していないし、文明が 10 億年間大気を管理することも示していない。

# 現在の気候危機についての結果ではない

太陽の増光は数億〜数十億年をかけて作用する。現代の人為的温暖化は、数十年から数世紀の間に温室効果ガスが急増することで起きている。強制力も時間スケールも大きく異なり、答えようとしている問いも違う。

この研究は、現在進行する気候変動の証拠を弱めるものでも、対策を遅らせる理由を与えるものでもない。遠い未来の一つのモデルシナリオで一部の光合成生命が残りうることと、現在の社会や生態系が安全に保たれる気候であることは同じではない。

この論文の価値は、非常に遠い問いをより規律ある形にしたことにある。日射が増えても二酸化炭素を固定した単純な過去モデルは、温まりすぎる傾向があった可能性を示し、光合成生命には一つの標準的な炭素しきい値だけでは捉えきれない持続の道があるかもしれないことを示す。同時に、寿命が数億年延びるたびに、一連の仮定が付いてくる理由も明らかにする。

一枚の葉を養う太陽は、ゆっくり変わり続けている。地球があと 13.5 億年、18.7 億年、あるいは別の何十億年まで緑でいられるかは、岩石、水、大気、生命が一緒にどう応答するかにかかっている。正直な結果は日付ではない。その折り合いを、より広く見渡せるようになったことだ。

# 要点

三次元気候研究が、太陽がゆっくり明るくなるにつれて、地球の植生 —— 光合成 —— 生物圏がどれくらい持続しうるかを問う。研究者らは 29 通りの別々の定常気候を計算し、その上に 2 つの例示的な端成分経路をたどった。風化が弱く二酸化炭素を 400 ppm に固定した場合、陸上植物について採用した高温限界は今から約 16.8 億年後と 18.7 億年後に来る。風化が強く全球平均温度を 288 K、約

15 °C に固定した場合、光合成について採用した二酸化炭素限界は約 13.5 億年後、16.4 億年後、暫定しきい値を使えば 18.4 億年後となる。よく引用される 18.6 億年は、楽観的な 2 つの上限端点を平均して丸めただけだ。これらはシナリオ依存のモデル範囲であり、地球、人類、全生命が終わる日ではない。モデルは設定された経路、現在の地理、スラブ海洋を使い、土壌–植生や気候–風化の明示的な結合を含まない。最長推定は、不確かな温室状態・海洋喪失限界にも近づく。

# 冷静に見ると

**論文が示していること：**この ExoCAM 設定では、日射を増やし二酸化炭素を固定したとき、三次元気候は比較に使われた単純モデルほどには一般に温暖化しない。設定した 2 つの風化端成分と複数の生物学的しきい値のもとで、植生生物圏の限界は今からおよそ 13.5 億〜18.7 億年後に入る。

**もっともらしいが確立していないこと：**一部の CAM 植物や溶存重炭酸イオンを使う水生植物が、大気中二酸化炭素約 1 ppm でも光合成を続けられること。適応や技術によって光合成生命をさらに延ばせること。現実の気候–風化経路が 2 つのモデル端成分の間に収まり続けること。

**示していないこと：**すべての植物、全生命、人類文明、地球の海、惑星そのものが終わる固定日。今後 20 億年を一本につないだ連続シミュレーション。現在の人為的気候変動を軽視する理由。

**主な限界：**一つの気候モデル系統による 29 通りの定常ケース。動的に結合したものではなく、あらかじめ設定した風化経路。現在の地理。スラブ海洋。固定メタン。赤道傾斜角・離心率ともに 0。土壌、植生、生物圏フィードバックを明示的に含まないこと。高温・二酸化炭素しきい値の不確実性。湿潤・暴走温室付近でのモデル間の大きな不一致。

**一般の読者はどの程度信頼すべきか？**この研究が妥当なモデル範囲を広げ、その範囲を支配する仮定を明示したことには高い信頼を置いてよい。このモデル内での有用な括りとして数値範囲には中程度の信頼がある。正確な日付への信頼は低い。最も遠い端点ほど、意図的に極端な気候経路と不確かな生物学に依存するからだ。

# 出典

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870