The Clean Paper

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

薄く半ば溶けた最初の地殻 —— 内部熱ではなく天体衝突が冥王代を動かしたというモデル

地球最初の累代である冥王代は、ほとんど岩石記録を残していない。このモデリング研究は、通常無視される天体衝突を入れると地殻がどうなるかを問う。時間とともに減衰する確率的衝突フラックスと、検証済みの地殻・マントル熱流シミュレーションを使うと、冥王代の大部分で衝突熱は地球内部熱すべてを少なくとも一桁上回り、地殻は約 *5 km* 未満と薄く、数キロ下から部分溶融していたと推定される。著者らは、この地殻はプレートテクトニクスには弱すぎ、自らマントルへ再循環するため冥王代物質がほとんど残らないと論じる。約 *3.9 Ga* 以降に衝突が衰えると持続的な大陸地殻が形成可能になり、最古の現存珪長質岩石の時期と重なる。保守的な下限加熱でも定性的結果は頑健だが、地球幼年期の直接観測ではなく強く一貫したモデルである。

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

地球史の、ほとんどページが残っていない章

地球は、私たちが知る限り大陸を持つ唯一の惑星だ。私たちが暮らす、浮力が高くシリカに富む陸地である。しかし大陸が最初にどう形成されたかは、地質学でもっとも古い未解決問題の一つだ。その理由は苛烈なほど単純で、証拠がほとんど消えている。

地球最初の累代である冥王代（Hadean）は、惑星誕生から約 40.3 億年前（4.03 Ga）まで続く。その最初の約 5 億年間から、残っているものはほとんどない。完全な形で残る最古の珪長質（大陸型）岩石は約 4.03 Ga。まれな玄武岩質岩石には約 4.2 Ga までさかのぼるものがある。あらゆる物質の中で最古なのは、主に西オーストラリアの Jack Hills で有名なジルコン結晶の散在で、4.4 Ga と年代測定される。地球の幼年期の全アーカイブは、ほんの数地点と砂粒ほどの鉱物しかない。

この研究は、そのアーカイブへ新しい岩石を加えたのではない。別のことをしている。その物理条件の下で冥王代の地殻がどのようだったはずかを物理モデルで組み立て、初期地球モデルがしばしば除外する問いを投げかける。初期地球が激しく天体衝突を受けていた事実を無視しなければ、何が起きるのか？

著者らの答えは印象的だ。冥王代の大部分では、衝突で供給された熱が地球内部から出る熱すべてを圧倒し、地殻を薄く、半ば溶融した状態に保った。そのような地殻は、現代のプレートテクトニクスのようなものを維持するには弱すぎた、と著者らは論じる。これは記憶ではなくモデルである。しかし少なくとも、描こうとする時代の暴力性を物理へ入れたモデルだ。

A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

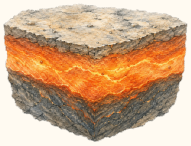
Impact heat dominates

At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.

Consequence

Thin, shallowly molten crust

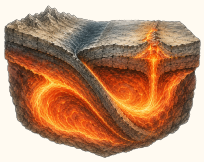
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

モデルでは衝突熱がエネルギー収支を支配し、薄く浅部が溶けた地殻は自らを再循環させ、持続する大陸地殻は 4.0〜3.9 Ga の転換期になって初めて現れる。冥王代のモデルであって、直接の記録ではない。

The Clean Paper CC BY 4.0

著者たちは何をしたのか

研究チームは、通常は別々に扱われる三つの要素を組み合わせた。

第一は、冥王代から太古代初期にかけて内太陽系へ落ちた小惑星やより大きな天体の雨を表す、**確率的な衝突フラックスモデル**である。重要なのは、古い「後期重爆撃期」のような一度きりの急増ではないことだ。初期ほど激しく、時間とともに**減衰していく**フラックスで、大衝突は決められた時刻表ではなくランダム（確率的）に到来する。月や内太陽系の衝突統計を地球向けにスケールし直し、ジルコン年代分布や利用可能な古地磁気証拠とも整合するよう選ばれている。

第二は、地殻・上部マントル内で熱がどう動くかを調べる**地球力学シミュレーション**。検証済み lattice-Boltzmann コード Planet_LB を使い、単純な 1D の温度–深さ計算と、4.1 Ga におけるマントルの完全な 2D 対流スナップショットの両方を実行した。放射性崩壊と核からの熱という通常の内部熱源に加え、重要な**マグマ移流** —— 上昇する融体が上へ運ぶ熱 —— も含めた。多くの地殻熱モデルが省く要素である。

第三は、現実的な初期地殻 ——Nuvvuagittuq グリーンストーン帯の含水冥王代メタ玄武岩 —— についての**相平衡モデリング**で、その岩石がどの温度・深さから溶け始めるかを求めた。

論文全体の読み方に関わる方法上の選択が一つある。著者らは意図的に、自分たちの結論に不利な条件を積み重ねた。標準的なコンドライト基準より発熱性放射性元素が少ない「非コンドライト型」マントルを仮定し、内部加熱を標準モデルの半分未満にし、保守的な加熱率を使い、若く地球に近かった月による潮汐加熱も無視した。したがって計算された地殻温度は**最低値、下限**である。実際の冥王代は、モデルより熱かった可能性のほうが高い。

何が分かったのか

冥王代のエネルギー収支を支配したのは内部熱ではなく衝突だった。衝突熱を時間積分すると、冥王代の大部分で内部熱を少なくとも一桁上回る。この図では、初期の地殻活動を駆動する主役は放射性崩壊ではなく衝突加熱で、それが小さな役割へ後退するのは約 **3.9 Ga** 以降である。

その熱は地殻を薄く、浅い場所から溶けた状態に保った。衝突と融体移流を入れないモデルでは、冥王代地殻が部分溶融するのは深さ約 10〜15 km 以深だけだ。しかし衝突熱を加えると溶融域は劇的に上昇し、わずか**数キロメートル下**（およそ 2〜5 km 以深）から部分溶融する。約 5 km 深では、モデル上の融体率が 30% を超える。この状態の岩石は、剛体プレートとしてまとまりを保つには弱すぎる。5〜10 km では約 1000〜1100°C となり、組成にほぼ関係なく広範に溶ける。固体として残る地殻は**約 5 km 未満**と薄かったはずだ。

半ば溶けた地殻は自分自身を消していく。広範な溶融により、鉄・マグネシウムに富む高密度物質は沈み分離し、軽くシリカに富む融体は上昇する。時間とともに平均地殻はより進化したシリカに富む組成へ寄り、ジルコンを結晶化できるような珪長質融体も生まれる。この薄い地殻のほぼすべては、その後、対流するマントルへ再び取り込まれたはずで、それは化学的（同位体）記録とも整合する。このモデルでは、冥王代岩石がほとんど残っていないことは記録の欠落ではなく、予測である。4.2 Ga の岩石と 4.4 Ga のジルコンは、形成されるそばからほぼ破壊された地殻の珍しい生存

者になる。

爆撃の終わりと、最初の持続的な大陸の出現が重なる。 4.0〜3.9 Ga の転換期に衝突が衰えると、地殻はようやく厚くなり、長く残れるようになる。現存する最古の大陸性岩石も、ほぼ同じ転換期に現れる。著者らは慎重に、この時期に持続的な大陸地殻が現れることは「おそらく偶然ではない」と書く。

そして見出しになる推論は、この条件 —— 数キロ下から溶けた薄い地殻 —— では、**冥王代のプレートテクトニクスは考えにくい**というものだ。

著者らは、以前の研究がなぜ逆の結論へ近づいたかも示している。確率的衝突を扱った先行研究では、任意の時点で溶けている地殻は 2.5% 未満と、影響は小さいとされた。そこではこの研究が含めた二つが抜けていた。大衝突が深部マントル融解へ与える全球的効果と、上昇マグマによる熱の上方輸送だ。それらを戻すと、熱的な絵は大きく変わる。

モデルは記憶ではない

ここまで述べたことはすべてシミュレーションの出力で、冥王代岩石から読んだ測定値ではない。その岩石がほぼ存在しないからだ。だからといって弱い結果ということではないが、結果の種類は決まる。

論理の鎖はこうだ。衝突フラックスのモデルが、マントル・地殻熱流のモデルへ入り、さらに特定岩石がどう溶けるかというモデルと照合される。各リンクには物理的根拠があり、可能なところではベンチマークもされている。しかし全体としては、もっともらしい物理を仮定したとき冥王代がこうでなければならなかったという一貫した議論であって、実際にこうだったと測定したものではない。

だからこそ、著者らの保守的仮定が見た目以上に重要になる。加熱を下限にしても浅部が広範に溶けるため、定性的な結論 —— 冥王代地殻は熱く弱かった —— は仮定の選び方に対して頑健だ。一方、この研究だけで固定できないのは正確な数字である。厳密な地温勾配、融体率、地殻厚。結果の方向には強い確信を置き、小数点以下は暫定的に読むべきだ。

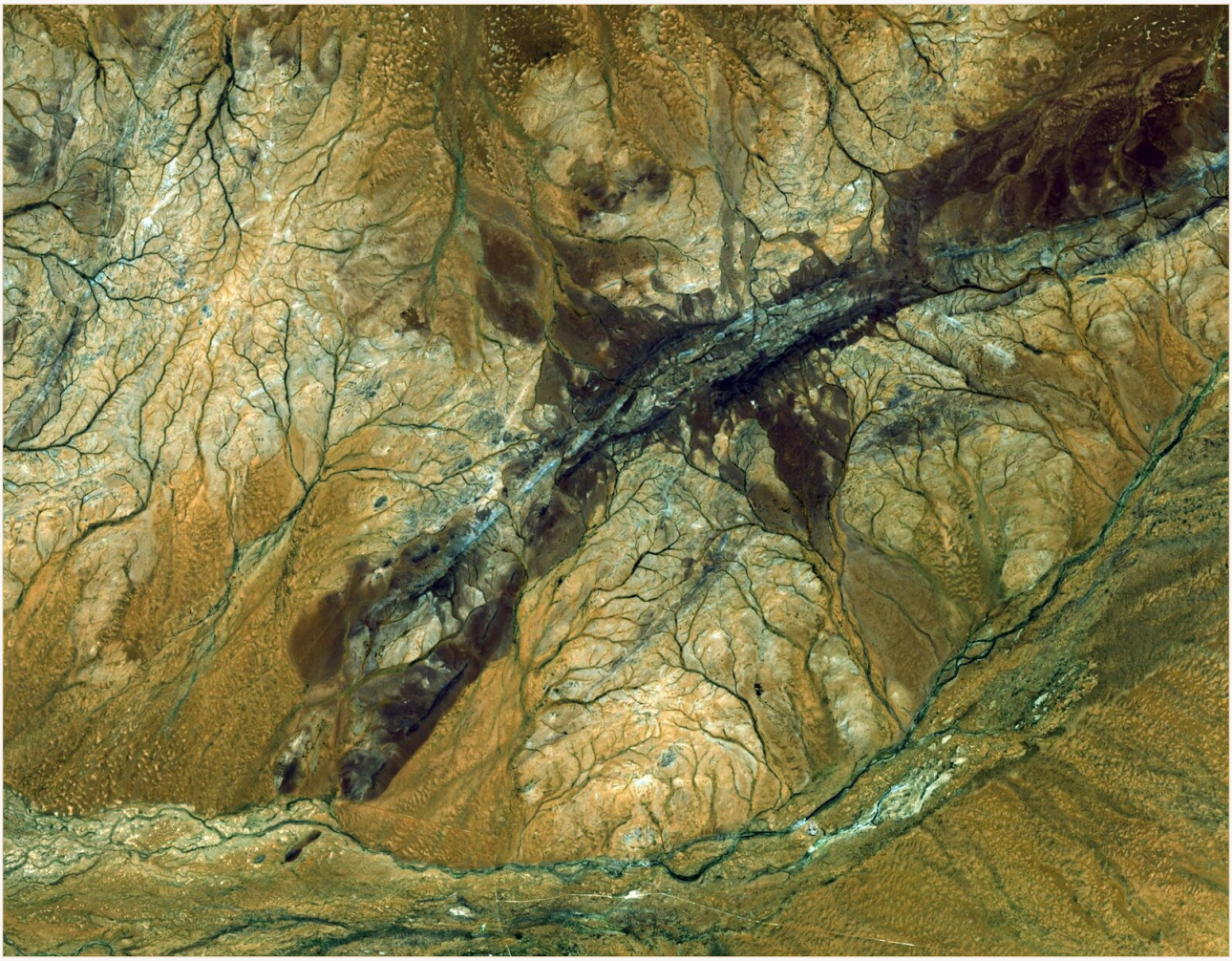
この研究からは言えないこと

- 冥王代地殻を直接観測したわけでは**ない**。この時代の岩石はほぼない。物理が何を含意するかについてのモデル結果で、測定ではない。
- 「**後期重爆撃期**」を前提にして**いない**。使った衝突フラックスは時間とともに減衰する確率的なもので、突然の爆撃ピークを必要とも想定ともしていない。
- プレートテクトニクス論争を決着させて**いない**。ここでの「考えにくい」は、高温の stagnant-lid（停滞蓋）型または squishy-lid（軟弱蓋）型の初期地球を支持する、物理に基づく強い推論だが、冥王代のテクトニック様式は今なお本当に議論中である。
- 4.0〜3.9 Ga の転換期に衝突が**大陸出現を引き起こした**と証明していない。時期の一致は強い関連で、著者自身が「おそらく偶然ではない」と慎重に表現している。説得力ある相関であって、

因果の実証ではない。
- Jack Hills のジルコンは**保存された大陸そのものではない**。初期に珪長質物質と水が存在したことを示す珍しい生存粒子で、このモデルの要点は、それらを作った地殻の大部分が再循環で失われたということだ。
- 初期地球の完全な歴史を再構成して**いない**。シミュレーションは理想化され、1D プロファイルと、衝突を赤道付近へ置いた 2D 赤道断面の時間スナップショットであり、惑星全体の完全な 4 次元モデルではない。

証拠をどう評価するか

中心的主張 —— 衝突加熱が冥王代地殻を支配する第一級の要因で、薄く浅部溶融した状態に保った —— について、議論は一貫しており、重要な意味で保守的でもある。ベンチマーク済み地球力学コード、物理的に妥当な入力、下限側の仮定を使い、先行モデルの多くが単に無視していた熱源を統合している。また二つの頑固な事実 —— 約 4 Ga より古い岩石がほぼ残らないこと（ほぼ完全な再循環）と、爆撃が衰える頃に持続的な地殻が現れること —— を一つの絵で説明する点も信用を高める。



NASA の ASTER から見た西オーストラリアの Jack Hills。この地域のジルコンには地球初期地殻から残った既知最古級の物質が含まれ、岩石の大半が消された時代から届いた小さな手掛かりになっている。

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

限界も同じくらい明瞭で、深時間モデル全般の限界である。ほとんどない岩石記録へ、モデルの上にモデルを積み上げる。そしてもっとも引用されやすい「プレートテクトニクスは考えにくい」という結論は推論であって観測ではない。妥当な姿勢は、これを冥王代を見直す強く、よく論証された仮説として扱い、とくに衝突フラックスモデルの選択を含む仮定を他研究者が検証する出発点とすることで、決着済みの事実として扱うことではない。

もっとも有用な要約は「冥王代はこうだった」でも「ただのシミュレーション」でもない。もっともらしく保守的な物理の下では、激しい爆撃を受ける初期地球は、薄く、半ば溶け、自分自身を再循環する地殻を持つはずであり、その一つのアイデアが、実際に残るごく少ない証拠の驚くほど多くを説明できる、ということだ。

なぜ重要なのか

初期地球の一般的イメージは二極へ振れがちだ。今日に近いプレートテクトニクスを持つ穏やかな水の世界か、地獄のような溶岩惑星か。この研究が描くのは、物理に動機づけられた具体的な中間像である。数キロ深から繰り返し再溶融する薄い地殻が、絶えず壊され、作り直され、内部熱ではなく衝突が条件を決める世界だ。

この見直しには実際の説明力がある。地球幼年期の二大事実 —— 岩石記録がほぼ完全に欠けることと、最初の持続的な大陸が現れる時期 —— へ一つの機構を与え、これまで軽視されがちだった衝突加熱を物語の中心に置く。もし支持され続ければ、地球がいつ安定した大陸を持つ惑星になったのかを考える方法が変わり、それぞれ独自の爆撃史を持つ他の岩石惑星にも応用できる。

そのために、このモデルが最後の言葉である必要はない。検証する価値のある十分に良い仮説であればよく、生き残ったジルコンと同位体記録へ結びついているという意味で、その条件を満たしている。タイトルの「隠れた冥王代」はまさにそこだ。この時代へは大部分、モデルでしか到達できない。時代そのものが、自分の証拠を消してしまったからである。

要点

地球最初の累代である冥王代（約 4.03 Ga 以前）は、ほとんど岩石記録を残していない。このモデリング研究は、通常省かれる熱源 —— 天体衝突 —— を含めると地殻がどうなるかを問う。時間とともに減衰する確率的衝突フラックスモデルと、上昇融体が運ぶ熱も含むベンチマーク済み 1D・2D 地殻／マントル熱流シミュレーションを組み合わせると、時間積分した衝突熱は冥王代の大部分で地球内部熱すべてを少なくとも一桁上回った。結果として地殻は約 5 km 未満と薄く、わずか数キロ下から部分溶融し、約 5 km 深では 30% 以上が溶ける。著者らは、この弱さではプレートテクトニクスは考えにくいとする。そのような地殻は大部分がマントルへ再循環するため、冥王代物質がほとんど残らないことも説明できる。4.0〜3.9 Ga の転換期に衝突が衰えると持続的な大陸地殻が形成可能になり、現存最古の珪長質岩石が現れる時期と重なる —— 著者らの慎重な言葉では「おそらく偶然ではない」。加熱を意図的に下限側へ置いているため定性的結果は頑健だが、正確な数値は

固定されない。地球幼年期の強く一貫したモデルであり、直接観測ではない。

冷静に見ると

論文が示したこと：衝突加熱とマグマによる熱輸送を含む物理ベースのシミュレーションでは、冥王代地殻は薄く、数キロ下から部分溶融し、内部熱より衝突熱に支配され、大部分がマントルへ再循環し、このモデル上ではプレートテクトニクスを維持できない。

もっともらしいが未証明のこと：約 3.9 Ga に持続的大陸が現れる理由が衝突の減衰にあること。冥王代が初期プレートテクトニクスではなく stagnant-lid または squishy-lid 世界だったこと。冥王代岩石がほぼ残らない主因が溶融地殻の自己再循環だったこと。

論文が示していないこと：冥王代地殻の直接測定。プレートテクトニクス論争の決着。爆撃衰退と最初の大陸の因果関係の実証。Jack Hills ジルコンが保存大陸であること。初期惑星の完全なモデル。

主な限界：冥王代岩石記録がほぼないため、非常に少ないデータに制約されたモデル結果である。衝突フラックス → 地球力学 → 相平衡と、モデルを重ねる。衝突フラックス自体も代表的だが不確かな選択。シミュレーションは理想化（1D、2D 赤道断面、時間スナップショット）。保守的な下限仮定は定性的結論を強くするが、個々の地温勾配を精密にはしない。

一般読者はどの程度確信してよいか？もっともらしい物理の下で、激しい爆撃を受ける初期地球が熱く、薄く、浅部溶融した地殻を持つことには高い確信を置ける。このため冥王代プレートテクトニクスが起こりにくく、欠けた岩石記録を説明するという点は中程度。大陸がどう形成されたか、正確にいつ形成されたかを証明したという主張への確信は低い。これは冥王代を見直す強く保守的なモデルで、直接の窓ではない。

出典

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402