

この問題は、2023 年度一般選抜より新設する「共通テスト＋一般（C 方式）」の個別試験をイメージするために作成したサンプルであり、実際に出題される問題とは異なります。

[早稲田大学教育学部]

理 科
[地球科学専修]
(問 題)

20XX 年度

(Sample 試験時間 90 分間)

【出題の意図や狙い、入学者に求める力】

理学科地球科学専修では、自然科学的な思考力・判断力・表現力を問う問題を出題する。地球環境や生態系の改変、国家の枠組みを超えた俯瞰的な地球観に基づき持続可能な社会の構築が求められる中、これからの自然科学を学修・研究する者には、自然科学における事象の本質を見抜き、物理・化学・生物・地学の垣根にとらわれず思考する力と、自らの意見を的確に発信できる総合力を求めたい。

今回のサンプル問題では、大問Ⅰにて自然科学の総合力を問う題材として、地球における白金族元素の挙動・分布を取り上げた。文章とグラフの意味を適切に読み取れば、白金族元素の分布の異常とその要因となった太陽系規模の変動が理解できるはずである。大問Ⅱでは、論理的に構築・検証された自然科学的事象を深く読み取り、思考する題材として、海洋における炭素の輸送・移動に関する研究成果を取り上げた。文章を深く読み取り、図表を適切に解読すれば、何が海洋炭素の輸送を担っていて、それが地球史における地球表層環境の変動に及ぼす影響を理解できるはずである。

後期重爆撃事変に関する文を読み、以下の問いに答えよ。(75 点)

46 億年前、小天体の集積によって地球は誕生した（図 1A）。地球は誕生直後に金属鉄と岩石が層分離し、前者は地球深部に核（コア）として、後者は外側のマントルとして存在している（図 1B）。これに伴って、地球上に存在する元素は、金属鉄（Fe）と親和性を示す元素と、岩石（主に Si）と親和性を示す元素とに分離・再配分された。⁽¹⁾ 鉄と共に核に濃集した元素を親鉄元素、マントルに濃集した元素を親石元素（図 2）という。

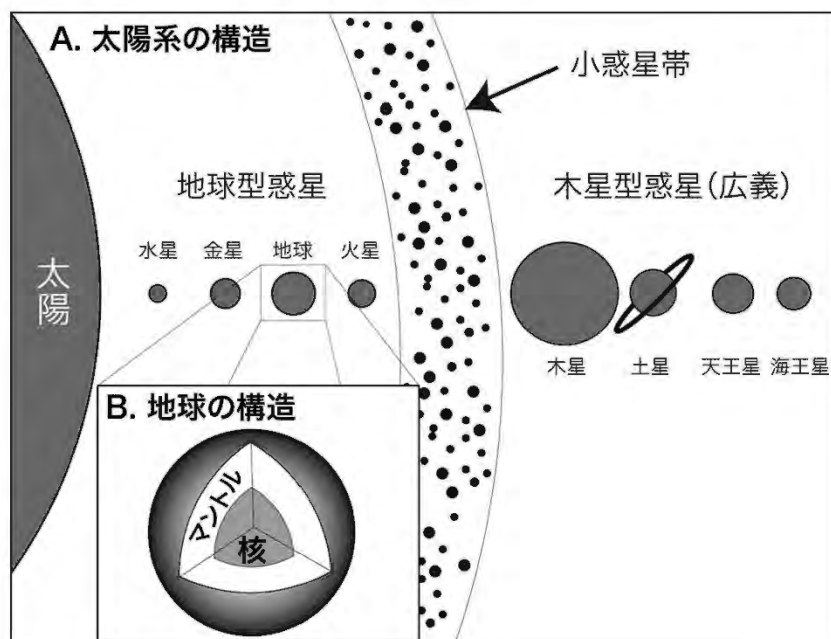


図1 太陽系の概略図。A. 惑星と小惑星帯の位置関係。B. 地球の層構造の概略図。

族

周期

H

水素

Li

リチウム

Be

ベリリウム

Na

ナトリウム

Mg

マグネシウム

K

カリウム

Ca

カルシウム

Sc

スカンジウム

Ti

チタン

V

バナジウム

Cr

クロム

Mn

マンガン

Fe

鉄

Co

コバルト

Ni

ニッケル

Cu

銅

Zn

亜鉛

Ga

ガリウム

Ge

ゲルマニウム

As

ヒ素

Se

セレン

Br

臭素

Kr

クリプトン

Rb

ルビジウム

Sr

ストロンチウム

Y

イットリウム

Zr

ジルコニウム

Nb

ニオブ

Mo

モリブデン

Tc

テクネチウム

Ru

ルルチウム

Rh

ロジウム

Pd

パラジウム

Ag

銀

Cd

カドミウム

In

インジウム

Sn

スズ

Sb

アンチモン

Te

テルル

I

ヨウ素

Xe

キセノン

Cs

セシウム

Ba

バリウム

La

ランタン

Hf

ハフニウム

Ta

タンタル

W

タングステン

Re

レニウム

Os

オスミウム

Ir

イリジウム

Pt

白金

Au

金

Hg

水銀

Tl

タリウム

Pb

鉛

Bi

ヒスマス

Po

ポロニウム

At

アスタチン

Rn

ラドン

Fr

フランシウム

Ra

ラジウム

Ac

アクチニウム

親石元素

親鉄元素

B

ホウ素

C

炭素

N

窒素

O

酸素

F

フッ素

Ne

ネオン

Al

アルミニウム

Si

矽素

P

リン

S

硫黄

Cl

塩素

Ar

アルゴン

※

ランタノイド

Ce

セリウム

Pr

プラセオジム

Nd

ネオジム

Pm

プロメチウム

Sm

サマリウム

Eu

ユウロピウム

Gd

ガドリウム

Tb

テルビウム

Dy

ジスプロシウム

Ho

ホルミウム

Er

エルビウム

Tm

ツリウム

Yb

イットリウム

Lu

ルルチウム

※※

アクチノイド

Th

トリウム

Pa

プロアクチニウム

U

ウラン

Np

ネプツニウム

Pu

プルトニウム

Am

アメリシウム

Cm

キュリウム

Bk

バークリウム

Cf

カリホルニウム

Es

アインスタイン

Fm

フェルミウム

Md

メンデルビウム

No

ノーベリウム

Lr

ローレンツウム

図 2 周期表における主要な親石元素と親鉄元素の分類。

したがって、親鉄元素は地球創成期に核に集積して、マントルにおけるその存在度は減少した。しかしながら、マントルの実際の化学組成はこの事実と反する結果を示している。特に顕著なのが、親鉄元素の中でも白金族と呼ばれる、ルテニウム (Ru)、ロジウム (Rh)、パラジウム (Pd)、オスミウム (Os)、イリジウム (Ir)、白金 (Pt)、およびレニウム (Re) のマントルにおける存在度である。

図 3 は、実際の白金族元素のマントル中の存在度（黒丸）と理論値（白丸）を示している。⁽²⁾ 白金族のマントル存在度は、理論値より優位に過剰となっている。マントルに理論値以上の白金族元素が存在する原因は、単純なマントルと核の層分離では説明できない。このマントルにおける白金族元素の存在度の矛盾点は、「マントル中の親鉄元素の過剰」と称され、地球科学における大きな謎とされている。

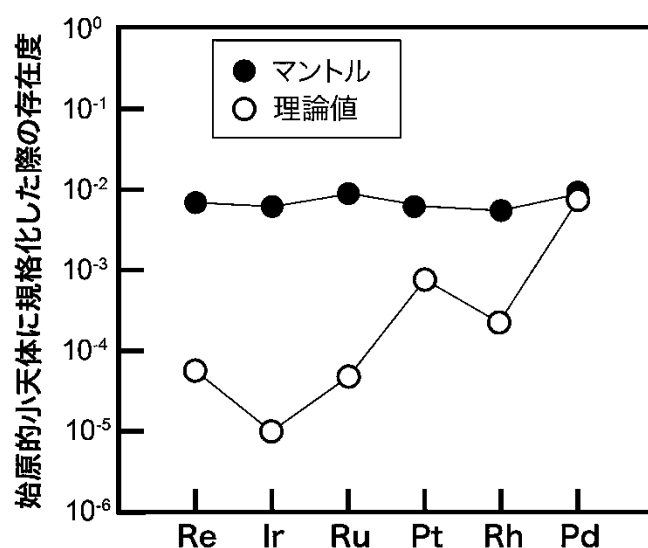


図 3 マントルにおける白金族の実測値（●）と存在度理論値（○）。ここで言う規格化とは、始原的小天体における存在度で割り算した値を指す。理論値は 20 GPa 条件下におけるものが示されている。 Mann et al., 2012, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 84 593-613 を改変。

Reprinted from , *Geochimica et Cosmochimica Acta* / Ute Mann, Daniel J. Frost, David C. Rubie, Harry Becker, Andreas Audéa / Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir and Pt between liquid metal and silicate at high pressures and high temperatures - Implications for the origin of highly siderophile element concentrations in the Earth's mantle / Copyright 2012, with permission from Elsevier

一方で、アポロ探査機による月試料の回収によって新発見がもたらされ、「マントル中の親鉄元素の過剰」問題は転機を迎えた。図4は、月探査による小天体衝突溶融物の形成年代とクレーター形成年代から見積もられた、月における小天体衝突の頻度の推移を示している。

46億年前の太陽系が誕生した直後では、宇宙空間をただよう小天体の数が多かったことから、その衝突頻度は高かったものの、その後、小天体が少なくなるとともに衝突イベントは指数関数的に減少してきた。

ところが、月においては、小天体衝突イベントが40～38億年前に再活発化していることがわかった(図4)。この現象は、誕生後もない月の表層に大変動をもたらすことになるので、「後期重爆撃事変」などと呼ばれるようになった。もしも、月が「後期重爆撃事変」を受けたのであれば、隣接する天体である地球も、同様の大変動を経験した可能性が高い。その場合、46億年前に核とマントルが層分離したのち、すなわち地球の外側のマントルから親鉄元素が取り除かれたのちに、小天体の重爆撃によって親鉄元素(とりわけ白金族)が地球の外側(マントル)に再度、供給されることになる。

このようにして「後期重爆撃事変」(図4)が、「マントル中の親鉄元素の過剰」問題(図3)の解決につながる可能性が出てきた。さらに注目されるのが、「後期重爆撃事変」が起こったとされる40～38億年前というタイミングである。⁽³⁾ この時期は地球の歴史上、特に重要な転換期であると認識されており、「後期重爆撃事変」が地球にどのような環境変動を与えたのかを解明することは重要な問題である。

「後期重爆撃事変」は、地球科学と惑星科学における諸問題解決にとって都合が良い仮説として認識されているが、不可解な点も存在する。月や地球に衝突する小天体の量は、46億年前が最頻値であり、その数が指数関数的に減少したのにかかわらず、その6億年後の時期に、なぜ衝突イベントが急増したのかが説明できない(図4)。言い換えれば、「後期重爆撃事変」を起こした小天体は太陽系形成ののち、6億年間におよび長期間、どの惑星にも衝突することなく、安定した軌道で存在し続けていたことになる。安定軌道に乗っていた大量の小天体が、なぜ、6億年後に、突如として不安定になって、月と地球に降りそそいだのかが不明であった。

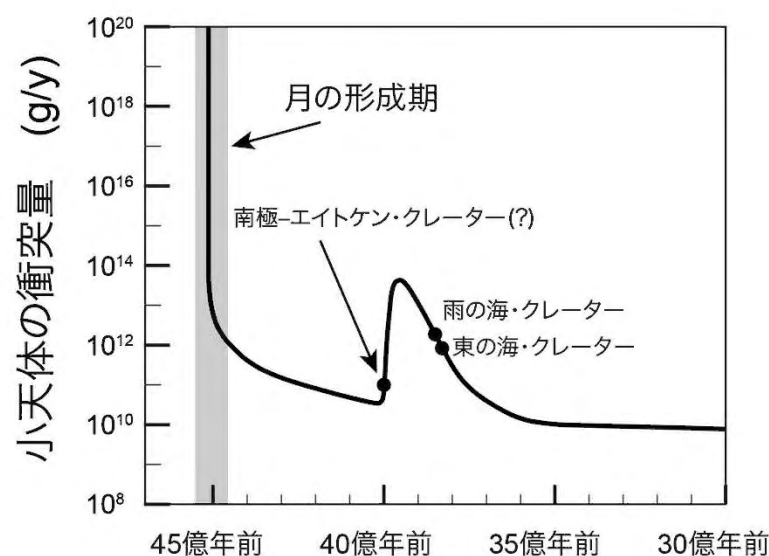


図4 月サンプルの衝撃溶融物の年代とクレーター年代から見積もった隕石衝突量の年代変化、ならびに、一部の月のクレーターの形成年代。Ryder, 2002, *J. Geophys. Res.*, 107, 5022.を改変。

図 5 は、近年、示された木星型惑星（木星、土星、天王星、海王星）の公転半径の時系列変化をシミュレーションした結果である。誕生初期の土星、天王星、海王星の周囲には氷小天体が豊富に残っていた。これらは、土星、天王星、海王星の重力によって、太陽系の外側や内側に弾き出される。太陽系の外側に弾き出される場合、天王星・海王星の重力は弱すぎて、太陽系外まで小天体を弾き出すことができない場合が多い。この場合、氷小天体はいずれ元の位置に戻り、惑星は小天体を弾き出した際に獲得した角運動量が相殺されるので、惑星自体の軌道は変化しない。しかし、土星、天王星・海王星の重力によって、小天体が太陽系の内側に弾き出された場合、その先には、超巨大惑星である木星が存在する（図 1）ので、その重力によって、小天体は太陽系外に弾き出される。結果、土星、天王星・海王星の軌道は小天体から角運動量をもらったままになり、これらの惑星の軌道は徐々に外側にずれる。

このようにして、⁽⁴⁾ 土星、天王星、海王星の公転軌道は大きくなり、小惑星を太陽系外に弾き出し続けた木星は公転軌道が小さくなっていく。木星と土星の公転軌道が変化すれば、両者の公転周期も変化し、いずれはその比が 1 : 2 という整数値になる。この 2 つの超巨大惑星の公転周期が整数値になると、軌道共鳴が発現して土星は強い重力摂動を受けることになり軌道が変化する（図 5）。この影響を受けて、天王星と海王星の公転軌道も、急激かつ大規模に変化した（図 5）。⁽⁵⁾ このような軌道の変化を「惑星の大移動」と呼んでいる。

「惑星の大移動」によって木星型惑星の公転軌道が大きく変化した但、この影響は、木星の内側に存在する小惑星帯にも及んだと考えられる（図 1）。木星型惑星が構築した新たな公転軌道への変化によって、安定軌道に乗っていた小惑星帯の多くの小天体の軌道が不安定になり、地球型惑星に降り注いだと考えられている。これが、「後期重爆撃事変」の駆動力であったと考えられている。

このようにして、「マントル中の親鉄元素の過剰」、「後期重爆撃事変」、「惑星の大移動」といった諸現象が結びついて、地球科学・惑星科学における問題の解消につながったと考えられている。

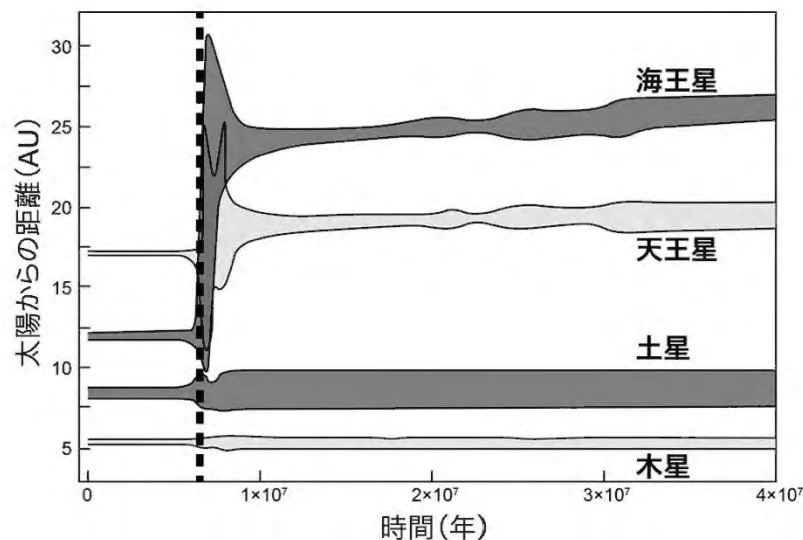


図 5 太陽系誕生以降の木星型惑星の軌道進化のシミュレーション。個々の惑星の軌道の幅は長半径と短半径を示す。縦の破線は木星と土星の公転周期が 1 : 2 になった時期を示している。AU(天文単位)は太陽から地球までの距離に相当する単位。Tsiganis et al., 2005, *Nature*, 435, 459-461.を改変。

Adapted by permission from Nature: Springer Nature, Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System, K. Tsiganis et al. <https://www.nature.com/articles/nature03539>, © 2005

問 1 下線部 (1) について、図 2 の周期表のうち、主要な親石元素は、性質が類似する第 1 族のアルカリ金属元素と、第 2 族のアルカリ土類金属元素の一群であることがわかる。この例のように典型元素においては、周期表の同じ族（縦方向）に並ぶ元素は、性質が類似することが一般的である。この理由を解説せよ。

問 2 下線部 (2) と図 3 について、以下の選択肢から正しい記述のものを全て選べ。

- (a) 白金族のマントル存在度は、予想される存在度より、元素によって最大で 1000 倍、最小で 1 倍ほど過剰となっている。
- (b) 白金族のマントル存在度は、予想されている存在度より、元素によって最大で 10000 倍、最小で 100 倍ほど過剰となっている。
- (c) 図 3 に示されている白金族のうち、予想されている存在度よりマントル存在度が最も過剰となっているのはイリジウム(Ir)である。
- (d) 図 3 に示されている白金族のうち、予想されている存在度よりマントル存在度が最も過剰となっているのはパラジウム(Pd)である。

問 3 下線部 (3) について、以下の選択肢から最もふさわしい記述のものを選べ。

- (a) 「後期重爆撃事変」の時期、地球では多くの種・属の大量絶滅事変が起こったとされている。
- (b) 「後期重爆撃事変」の時期、地球では生命が誕生したとされている。
- (c) 「後期重爆撃事変」の時期、地球大気が二酸化炭素とメタンを主成分とするものから、酸素を主成分にするものに変化したとされている。

問 4 下線部 (4) について、惑星の公転周期 (T) と太陽からの距離 (a) には、 k を定数とした $T^2 = k a^3$ という関係が成り立つ。この関係式が全ての惑星について成り立つことを証明するために、定数 k を、万有引力定数 (G) と太陽質量 (M) を用いて答えよ。ただし、簡単のため、図 6 のように惑星は太陽の周りで円軌道を取るものとする。円軌道で等速運動する惑星（質量= m ）では、引力と遠心力が釣り合っている。また、公転周期 (T) とは、惑星が速度 v で円軌道を周回するのに要する時間に相当する。

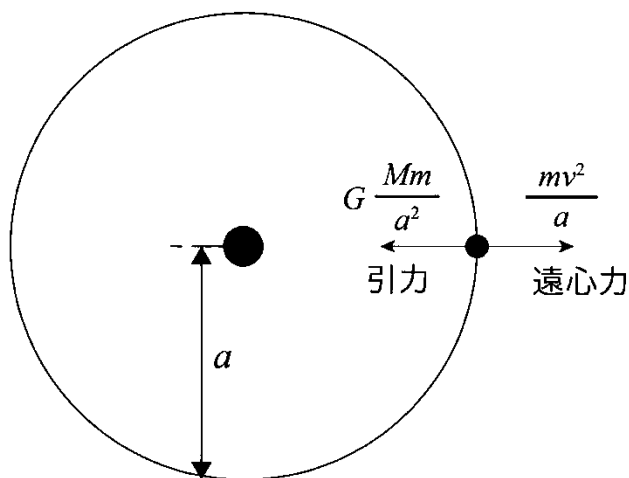


図 6 惑星の公転軌道の概略図。

問 5 下線部 (5) と図 5 について、このシミュレーションから読み取れる正しい記述を、以下の選択肢から全て選べ。

- (a) 天王星と海王星の太陽からの位置関係は、誕生当時では今と逆だった。
- (b) 土星・天王星・海王星は誕生当初、太陽の周りを円軌道に近い公転軌道をとっていたが、「惑星の大移動」によって、楕円軌道に変化した。
- (c) 「惑星の大移動」によって、海王星は地球と太陽の距離の 13 倍ほど外側に移動した。
- (d) 「惑星の大移動」によって、天王星は地球と太陽の距離の 20 倍ほど外側に移動した。

問 6 天王星と海王星は太陽から遠いところに位置しているので、この位置で大型惑星を形成させるのには、極端に長い時間が必要と言われている。この理由を考察して答えよ。また、天王星と海王星の実際の形成時期は、そのほかの惑星と大きくは変わらないと考えられているがその理由も答えよ。

Ⅱ

以下の文章と図は、海洋表層から深層への炭素の輸送を担う生物ポンプに関する研究の一部について述べたものである。文章をよく読み、図を参照しながら問いに答えよ。(75 点)

海洋の生物ポンプによる炭素輸送

地球の海洋と海棲生物の相互作用と、その地球史における変遷は、大気の化学組成、気候システムの改変、長期間における惑星の居住適性などに重要な役割を果たしてきた。この相互作用の変遷の中でも、重要な要素の一つは海洋における炭素の生物ポンプである。海洋における炭素の生物ポンプでは、太陽光の豊富な海洋表層における光合成と、その後の粒子状有機物の沈降により、大気中の炭素が海洋深層や海底へと移送されていく。これにより、海洋の化学組成や、大気中の二酸化炭素や酸素の濃度が調整されている。現世の海洋観測に基づく、生物ポンプの有効性は様々な物理的、化学的、生物学的因子により支配されている。これらの効果には、有機物に富むマリンスノー¹粒子の凝集や分解、生物による代謝作用、海棲生物の鉛直日周運動、動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食と糞粒の生成や、マリンスノー凝集物と海洋中に懸濁する他の高密度物質との相互作用などが挙げられる。これらのすべての因子は、地質時代を通じて大きく変化してきたことから、全地球的な生物地球科学²的循環に大きな変化をもたらした可能性がある。

一次生産を行う真核生物の誕生、動物プランクトンの誕生、あるいは一次生産者に広く見られるようになった鉱物バラスト作用³などの、地球史に見られる生物の革新的進化が、時代を通じて炭素の生物ポンプの本質を改変してきたと考えられてきた。地球史の多くの時代において、海洋の一次生産者としては単細胞の原核生物が優勢であったと考えられるが、新原生代（10 億年前から 6.35 億年前）の間には真核生物（藻類）の一次生産者（したがって、原核生物より細胞のサイズが大きい植物プランクトン）がより優勢になる転換期があった。その後の、先カンブリア時代とカンブリア紀境界付近での植物プランクトンを捕食する動物プランクトンの放散によって、海洋表層の生態系がさらに改変され、動物プランクトンの糞粒中への有機物の濃集が始まった。古生代（5.4～2.4 億年前）に起きた、より大型で水柱中を鉛直日周運動する動物プランクトンの登場は、炭素の海洋深層への輸送をより加速することとなった。

一次生産者による生体鉱化作用⁴は、地球史のさらに最近になって広く見られるようになった。例えば、炭酸塩の殻を持つ植物プランクトンは 1.5～1.0 億年前に、珪酸塩の殻を持つ植物プランクトンは新生代（6500 万年前）以降に重要な一次生産者となった。これらのすべての変化は、海洋の炭素生物ポンプの動態に大きな影響を与えた可能性があり、大気—海洋系の酸化、同位体異常、大規模な気候摂動や多細胞生物の進化の遠因になった可能性もある。しかし、長い地質時代を通じての海洋における炭素の生物ポンプの様相や効率の大きな変化の要因として、生物学的作用、生態学的作用、非生物的環境要因のいずれがより重要であったかを系統的に比較した研究は限られている。

海洋の炭素生物ポンプの機構的モデル

本論では、海洋の炭素生物ポンプのあらたな機構的モデルを提唱し、地球史を通じて生物ポンプの効率がどのように変化してきたかを評価する。確率論的な粒子の凝集・運搬過程と、温度・酸素

¹マリンスノー：肉眼で観察可能な海洋中を沈降する懸濁物質。

²生物地球科学：生命圏、雪氷圏、水圏、土壌圏、大気圏、地圏などからなる自然環境の組成を支配する、化学的、物理的、生物的、および地球科学的な過程や反応を研究する分野。

³鉱物バラスト作用：珪酸塩や炭酸塩の生体鉱物や塵などにより生物の総密度が増加すること。

⁴生物が鉱物を形成する作用。バイオミネラライゼーション。

濃度に依存した有機物の分解を組み合わせたことが、本論における重要な点である（図 1a）。このモデルの本質的要素をなす海水中の凝集体は、植物プランクトンの細胞（例えば、珪藻、大型の骨格をもたない藻類、様々な捕食戦略と生態をもつ小さいサイズのピコプランクトン⁵または動物プランクトン）と陸源の塵粒子の集合である。海洋の最表層では、ピコプランクトンや藻類全体の一次生産、藻類による炭酸塩の生産、海洋表層への塵の供給があることを仮定し、これらの物質から構成されると想定される粒子の原型を生成する。この粒子は、その後、海洋表層から沈降し、凝集／分解や呼吸による有機物の分解などを通じて互いに影響を及ぼし合う。

(1) 海洋深層では、粒子の凝集体は粒子同士の衝突頻度と凝集体生成効率（ひつつきやすさ）により制御される。粒子同士の衝突頻度は、一連の粒径に依存する過程により制御される。すなわち、極小の粒子はブラウン運動により互いに接し、大きい粒子は海洋中の流れ（せん断流⁶）や差別的沈降（大きな粒子はより早く沈降し、より小さい粒子を吸着していく）により互いに接することとなる。また、モデルでは凝集体に関与する動物プランクトンの作用を組み込み、一次生産、動物プランクトンの遊泳速度、海水中の乱流、動物プランクトン糞粒サイズのすべてをパラメーター化した。動物プランクトンは幾つかのグループに細分され、それらは、小型、大型、凝集体を消化せず排出するか否かなどである。さらに、海洋中での鉛直方向の日周運動の影響を評価するために、移動性と非移動性の動物プランクトンも設定した。小型、大型の動物プランクトンいずれも凝集体をより小型の凝集体娘粒子群に分解するか、あるいは消化後、前体部⁷の長さに応じて様々な大きさの糞粒を形成する能力を持つように設定した。動物プランクトンと凝集体との相互作用の頻度は、行動的（例えば活発か静穏かなど）、および物理的（例えば乱流など）遭遇の両者をパラメーター化して表現する。したがって、本論のモデルは、単一の先行研究によるモデルの追従ではなく、様々な先行研究により開発された複数のプランクトンや動物プランクトンのモデルを統合したものである。

本論のモデルは、生物ポンプに与える水温や酸素濃度の効果も系統的に評価できるように設計されている。モデルにおける有機物の分解速度はべき乗則に従うと想定しており、これは酸化環境における有機物の分解効果を考慮している。また、炭素の生物ポンプの効率に対する温度の効果を考慮するために、このべき乗則に温度依存係数、 Q_{10} ⁸を組み込んだ（多くの生物系において Q_{10} は 1.5 ～ 2.5 程度）。様々な生態系において、温度は有機物の分解速度を制御する重要な因子である。しかし、大気中の酸素濃度変化や海洋表層生態系の変革などの影響と比べて、海洋深層への炭素の移送に対する温度変化の効果はよくわかっていない。これは、べき乗則に従う有機物の無機化過程に比べて、炭素の分解に関する温度変化の効果がよく理解されていないのと同様である。

このようなモデルの設計のもとで、地球生命系の歴史的変遷という観点から炭素生物ポンプの効果左右する主要な因子を明らかにするために、地球の海棲浮遊生物生態系の主な進化段階における変化を解析するシミュレーションを行った。特に、示すべきシナリオは、(2) (ア) ピコプランクトンが一次生産者の大半で陸上植生の欠如による海洋への塵輸送量が多かった先カンブリア時代、(イ) 真核生物の藻類が主要な生産者となった新原生代後期、(ウ) 真核生物の影響がより大きくなると同時に動物プランクトンによる糞粒の形成が始まった顕生累代初期、(エ) 鉱物パラストを持つ真核生物の藻類が日周運動をする動物プランクトンと共存し、陸上生態系に維管束植物が存在し海洋への塵輸送量が減少した複雑な現代型システム、の 4 つである。各々のシナリオにおいて、

⁵ピコプランクトン：大きさが直径 0.2～20μm のプランクトン。

⁶せん断流：流れと垂直方向に流速の値が変化するような流れ。

⁷甲殻類等の頭部と胸部が結合した頭胸部。

⁸ Q_{10} ：温度が 10℃上昇した際に、化学反応の速度が何倍になるかを示す指標。

大気中の酸素濃度を境界条件⁹とした推測統計学的処理を行い、他のモデル内のパラメーターについては、ランダムに設定した初期値を与えて有機炭素の移送効率と海洋中での酸素到達水深を計算した。さらに、個別の生物学的革新（たとえば、生体鉱化作用）や捕食戦略（例えば、凝集体を消化せず排出する機能の有無）の効果がより明瞭に現れるシミュレーションの探索も行った。

（出典 Fakhraee et al., 2020, Nature Geoscience, vol. 13, p. 812-816 を改変）

Adapted by permission from Springer Nature : Geoscience, The role of environmental factors in the long-term evolution of the marine biological pump, Mojtaba Fakhraee et al, ©2020

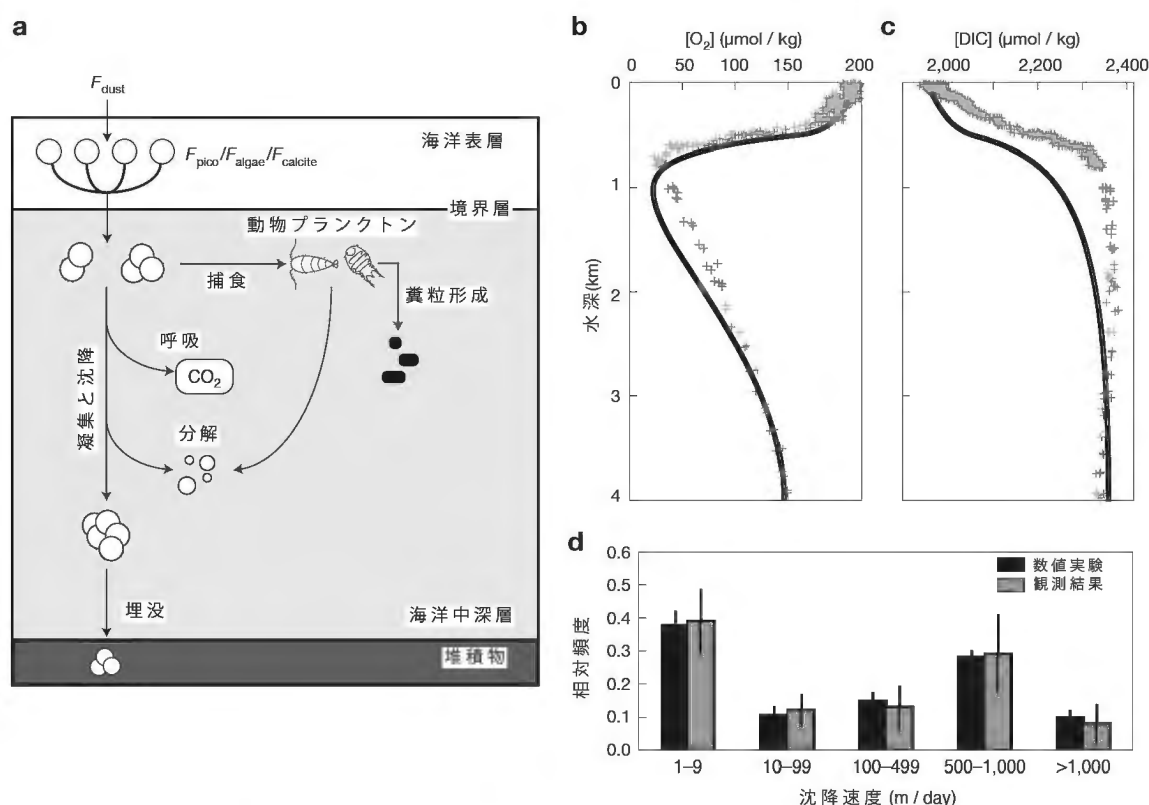


図1 本論に用いた数値実験の概要。a; 堆積物中への有機炭素埋没効率を制御する主たる要因。様々な大きさの白丸は有機炭素を示す。 F_{dust} , F_{pico} , F_{algae} , $F_{calcite}$ は、それぞれ、風により運ばれ海洋表面に落下する塵、ピコプランクトンにより生成される有機炭素、真核生物の藻類より生成される有機炭素、方解石の相対的流量を示している。b; 海洋中の酸素濃度の鉛直分布に関する、この研究における数値実験結果と、実際の観測結果との比較。黒線が数値実験の結果で、灰十字は北太平洋における観測結果を示す。c; 海洋中の溶存無機炭素濃度の鉛直分布に関する、この研究における数値実験結果と、実際の観測結果との比較。黒線が数値実験の結果で、灰十字は北太平洋における観測結果を示す。d; 沈降速度ごとに区分した際の、各沈降速度を示す沈降粒子相対頻度分布。黒塗は本研究の数値実験を示し、灰塗は北太平洋における観測結果を示す。誤差を示すエラーバーは標準偏差を示す。

⁹境界条件：ある関数についての微分方程式で、考えている領域の境界におけるその関数またはその導関数が満たすべき条件。数値実験においては、実験開始時に人為的に変化させる初期パラメーターを指す。

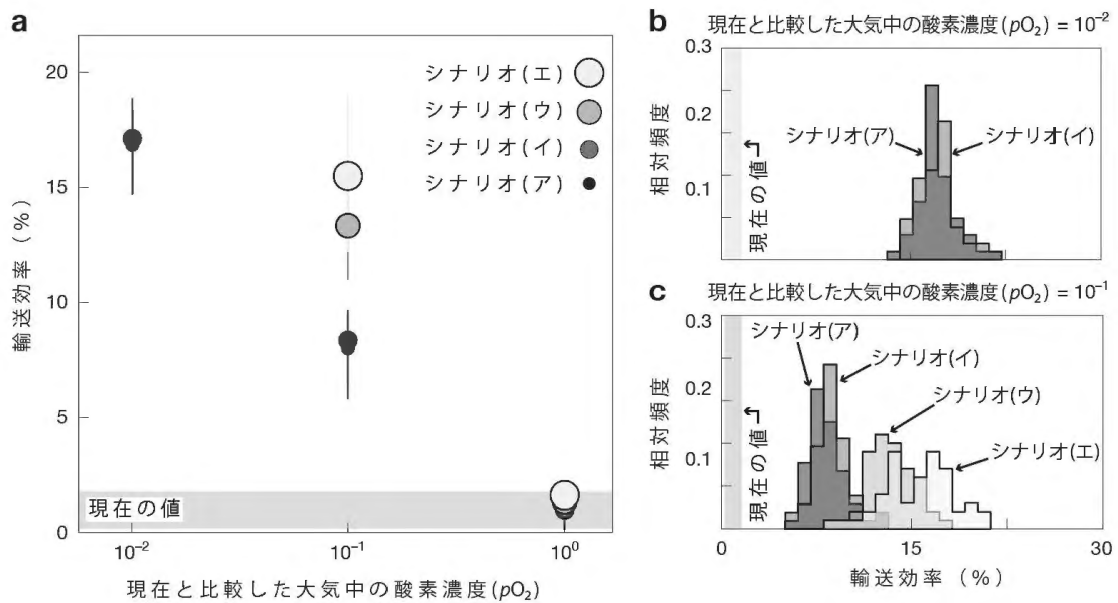


図2 シナリオ(ア)から(エ)までのプランクトンの生態系の変化と炭素生物ポンプの輸送効率。
 a; 大気中の酸素濃度の変化に対する輸送効率の変化。記号の色は本文の各シナリオに対応する。灰塗帯は現在の海洋における観測値を示す。b; 大気中の酸素濃度を現在の1%とした条件下での数値実験結果の詳細図。c; 大気中の酸素濃度を現在の10%とした条件下での数値実験結果の詳細図。

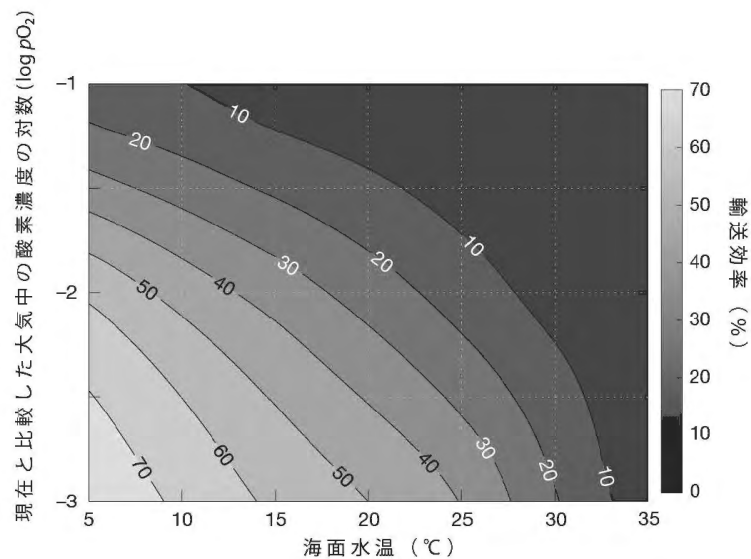


図3 海面水温と大気中の酸素濃度の変化が炭素生物ポンプに及ぼす影響。大気中の酸素濃度は対数表示であることに注意。輸送効率は海洋表層で生産された有機炭素のうち、海底面まで到達した有機炭素の割合として算出。

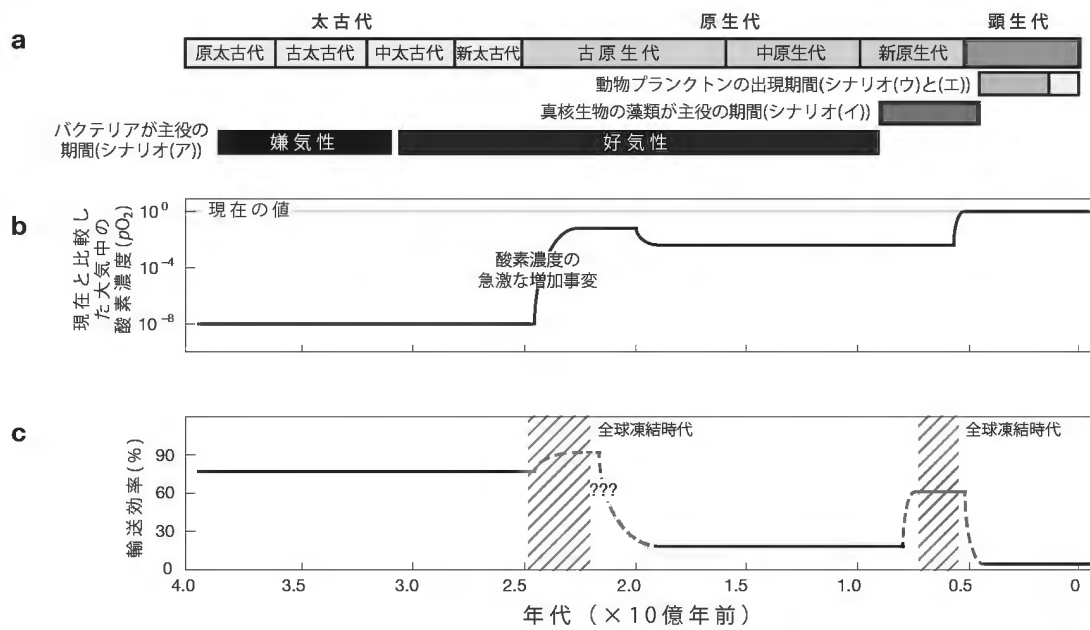


図 4 地質時代を通じた炭素生物ポンプの輸送効率。a；海洋生態系の変遷。b；大気中の酸素濃度の変遷（黒実線）。灰実線は現在の大気中の酸素濃度の値を示す。c；海洋における炭素の生物ポンプの輸送効率の変遷。黒実線で示された範囲が本研究の数値実験により求められた値で、灰破線は推定値を示す。斜線の帯は全球凍結時代を示す。

問 1 本論で用いたモデルの概略は図 1a に示されている。また、下線部 (1) に示される沈降する粒子 i と j が凝集する確率 P_{ij} は以下の式で表すことができる。

$$P_{i,j} = \gamma(z) \times \frac{\beta(i,j)}{\beta_{\text{ref}}} \times \frac{F_{\text{NPP}}(z)}{F_{\text{NPPref}}} \times \frac{F_{\text{dust}}(z)}{F_{\text{dustref}}}$$

F_{dust} , F_{pico} , F_{algae} , および F_{calcite} は、それぞれ、海洋表層で生産される粒子に含まれる、風により運ばれ海洋表面に落下する塵、ピコプランクトンにより生成される有機炭素、真核生物の藻類より生成される有機炭素、方解石の相対的流量を示している。これらの粒子は、動物プランクトンによる捕食、呼吸による無機化、分解などの影響を受けながら海洋表層から深層へと沈降するにつれて、凝集体を形成するようになる。最終的にはこの粒子は海底堆積物に埋没する。 γ は粒子の粘着性、 β は粒子 i と j の衝突確率、 F_{NPP} と F_{dust} は賞味の一次生産と塵の流量、 z は水深を示す。 β_{ref} , F_{NPPref} , F_{dustref} は、それぞれ、衝突確率、賞味の一次生産の流量、および塵の流量の標準値を示す。この条件下において、賞味の一次生産の増減が粒子の衝突確率に与える影響を述べよ。

問 2 本モデルは全地球史を通じた炭素生物ポンプの移送効率の再現を目的としている。図 1b-d は、境界条件を現世の環境条件に設定し行ったシミュレーション結果と、実際の現世北太平洋における観測結果を示している。図 1b は海洋中の酸素の濃度 ($[\text{O}_2]$ ($\mu\text{mol/kg}$)) の水深ごとの値を示し、図 1c は海水に溶存している無機炭素¹⁰の濃度 ($[\text{DIC}]$ ($\mu\text{mol/kg}$)) の水深ごとの値を示している。図 1b, c の黒線はシミュレーション結果を、灰十字は観測結果を示している。また、図 1d は海洋中に存在する全粒子の沈降速度の頻度分布を示している。黒塗はシミュレーション結果を示し、灰塗は現世の海洋における観測結果を示している。これらの結果から、本モデルにはどのような特徴があると考えられるかを述べよ。

問 3 図 2 は、有機炭素の無機化に温度依存性は無いと仮定して行った、プランクトンの生態の変化が炭素の生物ポンプに与える影響を検討したシミュレーション結果である。現在と比較した大気中の酸素濃度は、現在を 1 とした際の大気中の相対的酸素濃度を示している。図 2a は、海洋表層から深層への賞味の炭素移送量の変化を、大気中の酸素濃度の変化に対して示した結果である。賞味の炭素移送量は、海洋表層から搬出された有機物のうち、海底面に到達する有機物の割合として示している。文中の下線部 (2) にある (ア) ~ (エ) のシナリオで行ったシミュレーションの結果を示しており、傍線の示す誤差範囲は 90% の信頼区間を示す。図 2b, c は 2 つの異なる大気中の酸素濃度条件下のデータをより詳細に示した図である。現世の海洋における有機炭素移送効率は灰色の帯で示してある。この図から、シナリオ (ア) から (イ) へと変化した際の、炭素移送効率の変化についてわかることを述べよ。

問 4 シナリオ (ア) とシナリオ (ウ) を比較した場合、図 2 からわかること、および、その変化に伴い、海洋の水深ごとの酸素濃度にどのような変化が起きたと考えられるかを述べよ。

問 5 図 3 は、大気中の酸素濃度と海面水温の変化に対する、賞味の炭素移送量の変化を示したコンター図である。賞味の炭素移送量は、海洋表層から搬出された有機物のうち、海底面に到達

¹⁰ CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} の総和

する有機物の割合として示している。図 3 と図 2 を比較して、賞味の炭素輸送量に対し、海面水温や大気中の酸素濃度の変化はどのような影響力をもっているかを述べよ。

問 6 図 4 は、本モデルによる地質時代を通じた炭素生物ポンプの強度の変化予測である。a は海洋における生態系の変化を、b は大気中の酸素濃度の変化を、c は本研究による炭素生物ポンプの移送効率のシミュレーション結果である。大局的には極貧酸素状態であった先カンブリア時代は、移送効率は比較的高く、全球凍結時期には一時的に移送効率が上昇する。問 1 から 5 までの間で考察してきた内容、および図 4 から、本研究で明らかになったことの要約を述べよ。

[以下 余 白]