

黄砂が海に与えるプラスの影響

—陸と大気と海の科学, 時々古気候

長島佳菜 ながしま かな

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域

私たち人類にとって、視程の悪化や呼吸器への悪影響などネガティブな印象が強い黄砂だが、海洋の植物プランクトンにとっては、光合成や呼吸を行う際に必要な“鉄”を運ぶ恵みをもたらす存在であり、人間界と自然界とで黄砂の印象は大きく変わる。また、サハラ砂漠やアラビア砂漠、そのほか、各大陸の乾燥域で巻き上がる黄砂の親戚のようなダストを加味すると、これらダスト一族は、大気中二酸化炭素濃度の変動において重要な役割を担っている。本稿では、自然界から見た黄砂-ダストの働きに光を当て、筆者の研究を含めながら紹介したい。

黄砂

黄砂とは、中国～モンゴルに広がる広大な砂漠域において、低気圧通過などに伴う強風によって大気中へと巻き上げられ、偏西風によって東の風下域へ運搬される、鉱物を主とする砂塵(ダスト)のことを指す。巻き上げられた黄砂は、上空の偏西風によって東へと運ばれ、日本はもとより、北太平洋を横断して北米大陸やさらに東へと長距離輸送される場合もある。黄砂の組成を調べてみると、長石、石英、雲母、方解石など、様々な種類の鉱物粒子で構成されている。日本付近に飛来する黄砂粒子の直径は数 μm ～数十 μm の幅をもち、粒子の数では数 μm のものが大多数を占めている

($1\mu\text{m}=0.001\text{mm}$)。1mmよりもずっと小さい粒子の集まりであり、こうした小ささ故に、私たちの鼻や口から気管支や肺へと入ることで、気管支喘息などを悪化させてしまう。

黄砂というと、春の現象のイメージが定着している。どうして春に黄砂が高頻度で発生し、日本にやって来るのか?と問われると、春一番のような春の強風を思い出す人もいるかもしれない。そもそも春には、砂漠域で雪解けが進み(砂漠のイメージとなかなか相いれないが、ゴミ砂漠周辺では雪が降る)、地表面が露出して乾燥することで黄砂が発生しやすくなっている。また、低気圧が頻繁に発生して強風が吹きやすく、黄砂が舞い上がりやすい状況が揃う。その上、春には偏西風の主軸がちょうど日本上空を通過するため、砂漠域で発生した黄砂が、効率よく日本に運ばれる。日本において黄砂が春の風物詩となっているのは、様々な条件がぴたりと合うからである。一方で、高濃度の黄砂現象は、秋にも観察されるし、バックグラウンド黄砂と呼ばれる低濃度の黄砂が夏にも日本付近上空を通過していることも知られている¹⁾。春以外の季節であっても条件が整えば黄砂は輸送されるのである。

活躍の舞台は海

黄砂には、私たちの生活とも密接に関係するような海の中での役割がある。大気中へと巻き上げられた黄砂は偏西風経路に沿って地表面へと落下するが、ユーラシア大陸を通過して太平洋上空を輸送される黄砂の一部は海面に落ちる。すると、黄砂粒子中にわずかに含まれる鉄のうち、さらにごく一部が海洋に溶け出す。北太平洋亜寒帯域(図1)の特に西部は、植物プランクトンなどの光

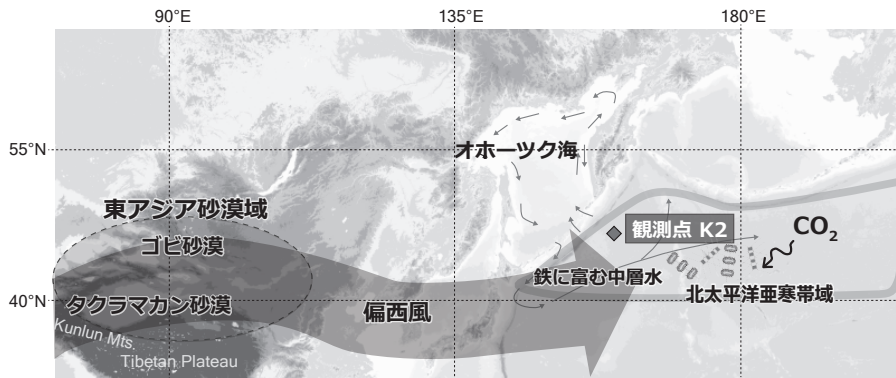


図1—東アジアの砂漠域と風下の北太平洋亜寒帯域および観測点 K2
地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工して作成。

合成による二酸化炭素吸収能が世界最大級、かつ海域別漁獲量が多い豊かな海として知られる。この海域の海水は、リンや窒素やシリカといった植物プランクトンの生長に必要な主要栄養素は豊富に含むものの、光合成に必須の微量栄養素である“鉄”が不足しがちである²。そのため、黄砂から溶け出した鉄は、植物プランクトンを増やす役割を果たしている可能性がある。実際、衛星データから黄砂が飛来した直後に植物プランクトンの光合成が活発化したことが捉えられており³、黄砂が西部北太平洋亜寒帯域の植物プランクトンに「なんらかの」影響を与えていることは確かである。

西部北太平洋亜寒帯域への鉄供給については、海洋に沈着した黄砂に加え、ほかにもいくつかの供給源が知られている。なかでも、オホーツク海を起源とする鉄に富む水が西部北太平洋で中層水を形成し、その中層から表層へと上向きに運ばれた鉄が、植物プランクトンが利用する溶存鉄の主要な供給源になっているという報告が相次いでいる⁴。そうだとすると、黄砂が植物プランクトンに与える影響はほんのわずかなのではないかと？黄砂が海洋の植物プランクトンを育てている、というのは黄砂研究者による“希望的観測”なのではないかと？

黄砂による鉄供給の重要性を量的に判断するためには、海に沈着する黄砂量を特定する必要があるが、その実測が難しい。なぜなら、海中には

黄砂粒子のほかに、周辺陸域からの火山噴出物や、海流によって遠方から運ばれてきた粒子など多様な起源の粒子が存在しており、海水中の極微量の粒子の起源を区別することが難しいからだ。そこで筆者らは、独自の試みとして、黄砂の主要構成鉱物である石英に注目し、海水の表層付近に漂う石英粒子の1つ1つについて、電子顕微鏡に付属する「カソードルミネッセンス」測定を行い、石英の供給源を特定した。つまり、火山や河川が運んできた石英粒子と、黄砂に含まれていて海洋に沈着した石英粒子を区別し、海洋にどれだけの黄砂が沈着したのかを明らかにしようという作戦である。

カソードルミネッセンスとは、物質に電子線を照射した際に、物質中の不純物や結晶構造のゆがみなどに応じて起こる、主に可視光域の発光現象のことである。石英などの鉱物粒子中の不純物や結晶構造のゆがみは、粒子生成時の環境(温度や冷却のスピードなど)や、生成後に粒子が受ける温度や圧力に応じて形成されるため⁵、石英の産地による違いが出る可能性が高い。つまり、石英粒子に電子線を照射した際に何色に発光するのかによって“どこ産”の石英粒子なのかを特定できる、という仕組みである。そこで筆者らは、まず西部北太平洋亜寒帯域に輸送される石英粒子の産地候補地(ゴビ砂漠、タクラマカン砂漠、火山、そしてオホーツク海やベーリング海など)の石英粒子のカソードルミネッセンスを測定してその違いを明らかにした⁶。次

に、2003～2022年の様々な季節に行われた研究航海で、西部北太平洋亜寒帯域の観測点K2で採取した海水のろ過試料を用いて、フィルター上の石英粒子、合計約2300個についてカソードルミネッセンス測定を行った。そして得られた粒子ごとのカソードルミネッセンススペクトル(発光色)をもとに、火山起源の石英粒子などほかの起源の粒子と黄砂由来の石英粒子を区別し、黄砂起源粒子の数や量をもとめ、最終的には黄砂が海洋への季節にどれだけ沈着するのかを推定した⁶。さらに、海洋への黄砂沈着量をもとに、黄砂から海洋表層に供給される可溶鉄の量を推定したところ、植物プランクトンによる光合成が活発化し最も鉄を必要とする4～7月において、1日あたり $0.9 \pm 0.3 \mu\text{g m}^{-2}$ であることがわかった⁶。

さて、この鉄の量が多いのか少ないのかを調べる必要がある。そこで当海域の主要な鉄供給源とされる、海洋中層から表層へと供給される溶存鉄の量も同時に推定したところ、計算の詳細はここでは省くが、海洋の中層から供給される鉄は1日あたり約 $2.2 \mu\text{g m}^{-2}$ と算出された⁶。つまり黄砂から海洋の表層へと溶け込む鉄の量は、海洋中層から表層へと輸送される溶存鉄の半分近くに達し、黄砂は海洋中層水に次ぐ溶存鉄の供給源であることがわかった。

黄砂が鉄の主要な供給源の1つであるという結果が得られたことで、次に気になるのは、将来の黄砂輸送量の変動である。地球規模での温暖化が進む中、黄砂による鉄供給は今後増えるのだろうか、減るのだろうか？ 温暖化と聞くと、砂漠化が進んで黄砂が増えるイメージをもつ方が多いかもしれない。しかし、過去数十年間に黄砂の発生量は減少しているという観測結果が得られている⁷。黄砂の発生頻度が長期的に減っているおおもとの理由の1つとして、温暖化による北極の気温上昇のスピードが、赤道域など低緯度域の気温上昇スピードよりも速いという点が挙げられる⁸。気温の差は風を生じさせ、差が大きいほど風が強くなる。そのため北極から低緯度側に向けた気温の差が減少すると、中緯度・砂漠域での強

風頻度が減り黄砂の発生頻度も減少する⁸。一方で、日本での黄砂観測日数の経年変化が気象庁から発表されているが*¹、長期的な減少傾向は見られない。黄砂の風下への輸送においては、発生源における黄砂発生頻度に加え、偏西風の強さや経路などによる影響を受けるため、慎重な観測や数値実験が必要だ。このまま黄砂発生量の減少が続くのか、それともどこかで増加に転じるのか、また偏西風はどのように変化するのか、こうした点が西部北太平洋亜寒帯域における植物プランクトンの盛衰と二酸化炭素吸収能力の将来を決める、重要なパーツの1つになる。

黄砂-ダストの働きと気候危機

黄砂が海に溶ける鉄をどれだけ供給しているのか？という“最近”の見積もりの話をしてきたが、この節では過去数十万年という、想像しようとする眩暈がしてくるような、氷期-間氷期サイクルの話をする。そうした長い時間の気候変動を記録しているのは、海底の堆積物や、グリーンランドや南極といった両極域の水床である。海底堆積物・水床を筒状に採取したコア試料の分析や、近年大きな進化を遂げている数値モデルから、氷期-間氷期サイクルに連動して、ダスト一族の発生量および輸送量が変動し、大気中二酸化炭素濃度に影響を与えたことが明らかになってきている。氷期には、間氷期に比べて90 ppm余り大気中二酸化炭素濃度が低くなるが(図2)、その時代のダストは、正のフィードバック(ここでは、さらに大気中二酸化炭素濃度を下げる働き)を引き起こしたと予想されている。氷期には、各大陸の内陸部の乾燥が進み、また風向きや強さも変化し、海洋に輸送されるダストが増加したことが多くの研究から報告されている。さらに最近の研究成果は、氷期には山岳を覆う氷河によって岩石から削られた鉱物粒子がダストとして風下の海洋へと輸送され、可溶鉄

*1—https://www.data.jma.go.jp/env/kosahp/kosa_shindan.html

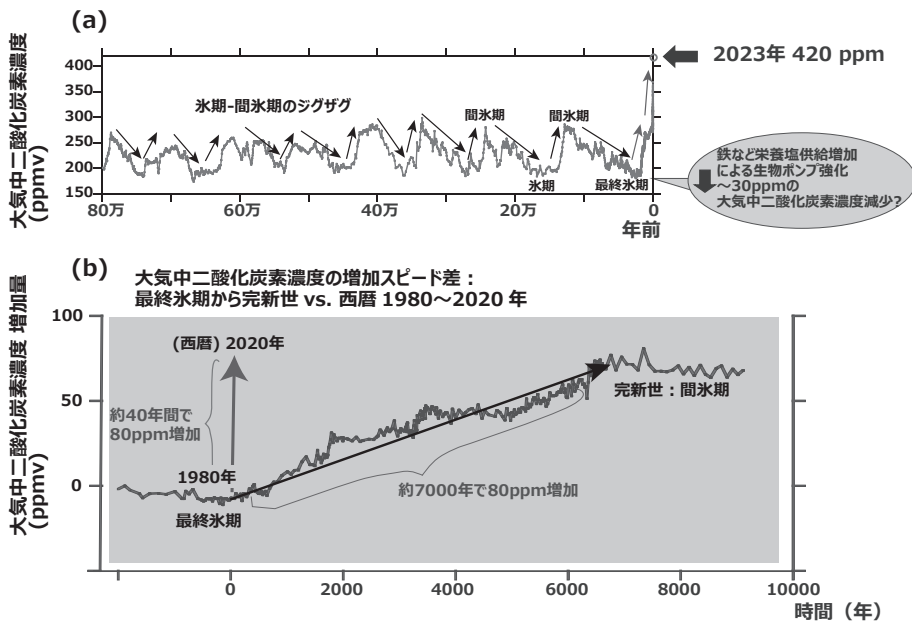


図2—(a)南極の氷床コアから復元された過去80万年間の大気中二酸化炭素濃度変動と現在の濃度、(b)最終氷期から完新世および西暦1980～2020年の大気中二酸化炭素濃度の増加スピード比較
現在の二酸化炭素濃度の増加が圧倒的なスピードであることがわかる。(出典：(a) Bereiter et al. 2015¹² のコンパイルデータにもとづき作成、(b) Marcott et al. 2014¹³ および NOAA Global Monitoring Laboratory (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>) のデータにもとづき作成)

を多く供給することを指摘している⁹。これはダストの量だけではなく「質」が変わることを意味する。つまり、氷河によって岩石から削られたばかりで風化作用を受けていない“フレッシュ”な粒子は、風化が進んだ粒子よりも多くの“海水に溶けやすい鉄”を含んでいる。その結果、ダスト量の増加と鉄の溶け出しやすさが合わさって海洋への鉄供給が増え、植物プランクトンが増殖し、そのプランクトンの遺骸が海水中を沈むことで、炭素を海洋深層へと輸送した。言い換えると、光合成により大気中の二酸化炭素を吸収し、海水の深層に固定するような働き(「生物ポンプ」と呼ばれる)が、ダスト量や氷河性ダストの増加によって、氷期に強化された。氷期には、ダスト以外に海水準低下によって地表に顔を出した陸棚域などからも鉄やほかの栄養塩が海に多く供給される。複合的な要因で強化された生物ポンプは、最終氷期における約90 ppmの二酸化炭素濃度の減少幅のうち、約30 ppmの減少を担っているとする算出結果も報告されている¹⁰。

実はこの「生物ポンプ」を人工的に強化できれば、現在猛スピードで増え続ける大気中二酸化炭素濃度を減らす一助になるのではないかと期待されている。しかし、氷期-間氷期という両極端の気候間の大気中二酸化炭素濃度の差がたった90 ppmである中で^{*2}、産業革命以降の大気中二酸化炭素の増加分は早くも140 ppm近くに上り、近年では毎年約2.2 ppmもの増加が記録されている。たとえると、生まれたての子どもが中年に差し掛かるまでに、氷期から間氷期にかけて増加した分の大気中二酸化炭素濃度上昇を経験するのである(図2)。私たちは、好むと好まざるとにかかわらず、ありとあらゆる手段を総動員して、地球温暖化問題に真正面から向かっていかなければいけない時代に両足を突っ込んでいる。

*2—誤解のないように補足すると、大気中二酸化炭素濃度だけが氷期-間氷期の違いを作り出しているわけではなく、地球の自転軸や公転軌道の周期的な変化に対応する日射量変動が氷期-間氷期サイクルのきっかけになっている¹¹。

研究を通じて考えること

生き物が好きだから生物学者になる人はいても、黄砂が好きだから黄砂の研究者になったという人の話は聞いたことがない。黄砂を手にとって眺めても、あまり心は踊らない。しかし、黄砂の研究には、地質学的な要素も、気候学的な要素も、また海洋とのリンクを調べる上で、生物学的な要素もある。さらには、長い時間スケールの中で気候システムを捉える、古気候学的な要素までである。黄砂の軌跡を追うために、様々な分野を1つ1つ編み込んでいくプロセスが、黄砂研究の醍醐味である。黄砂のことを考えていたはずが、気づけば海洋生態系のこと、大気中二酸化炭素濃度のこと、そして地球の歴史についてあれこれ考えている、ということがよくある。

私たちは毎日忙しい。時間はどんどん細分化され、筆者の場合であれば、子育て、家事、研究、雑務、食事、移動……と割り振って日々生きている。しかし、そうした細分化する時間とバランスするように、どっしりとした、先祖代々から一本の糸のようにして続く長い時間を日々意識することが大事であると感じる。繋いでゆく大きな時間軸で考えることが、気候危機とも呼ばれる現在の様々な気候問題に対峙する際の心構えとして、役に立つのではないだろうか。

文献

- 1—A. Matsuki et al.: Journal of Geophysical Research, **108**, 8663(2003)
- 2—R. A. Duce & N. W. Tindale: Limnol. Oceanogr., **36**, 1715 (1991)
- 3—J.-E. Yoon et al.: Geophys. Res. Lett., **44**, 1474(2017)
- 4—J. Nishioka et al.: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **117**, 12665 (2020)
- 5—J. Götze et al.: Mineral Petrol., **71**, 225(2001)
- 6—K. Nagashima et al.: Scientific Reports, **13**, 15424(2023)
- 7—C. Wu et al.: Geophys. Res. Lett., **45**, 9953(2018)
- 8—C. Wu et al.: Nat. Commun., **13**, 7105(2022)
- 9—E. M. Shoенfelt et al.: PNAS, **115**, 11180(2018)
- 10—A. Yamamoto et al.: Clim. Past, **15**, 981(2019)
- 11—L. E. Lisiecki: Nature Geoscience, **3**, 349(2010)
- 12—B. Bereiter et al.: Geophys. Res. Lett., **42**, 542(2015)