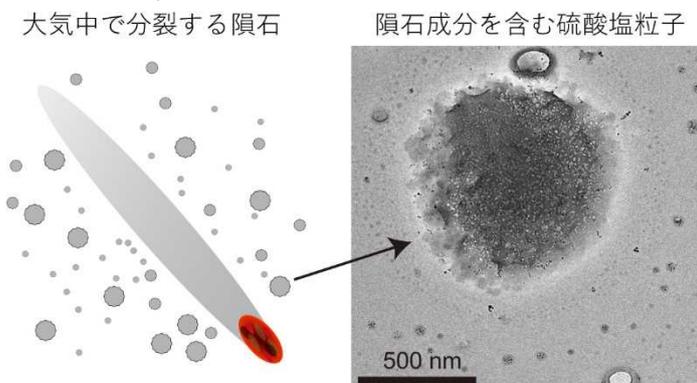


対流圏で採取したエアロゾル粒子から隕石由来の物質を電子顕微鏡分析で検出し、それらが成層圏から流れてきていることを示しました

本研究では、地上から約**8000**メートルまでの高度にあるエアロゾル粒子を航空機で採取して電子顕微鏡で分析を行った結果、隕石が大気圏突入時に溶融・分裂して生じた物質が硫酸塩粒子中に溶け込む形で対流圏中に存在することを明らかにしました。また、再解析データ、数値シミュレーションで大気の流れを解析した結果、成層圏から対流圏に空気が沈み込んできたときに、隕石成分を含む粒子が対流圏中でより多く検出されることを示しました。今回の研究で明らかとなった隕石成分の挙動は、大気物質循環やエアロゾルによる気候影響を理解するうえで重要な発見になると考えられます。

大気中の微粒子（エアロゾル粒子）は、太陽光を遮り、また雲粒の核になるなど、気候に大きな影響を及ぼします。特に、成層圏などの上空では、人為的なエアロゾルが少ないため、自然現象で生じたエアロゾル粒子の挙動を把握することが重要になります。

本研究では、**2013年7月**に北海道と東北を拠点に実施した航空機観測でエアロゾル粒子を採取し、透過型電子顕微鏡で分析を行いました。その結果、隕石成分が多く硫酸塩粒子中に存在することを明らかにしました。また、成層圏の空気が対流圏に下降してきたときに採取した試料に、より多くの隕石成分を含む粒子が検出されることを示しました。また、航空機観測を行った**5か月前**に発生した、この**100年**間で最大の隕石衝突イベント（チェリャビンスク隕石衝突）による隕石成分が、採取したエアロゾル粒子に含まれる可能性が数値シミュレーションの結果から示唆されました。



図：隕石が大気圏に突入する際大気との摩擦で溶融・分裂し（左）、硫酸塩粒子に取り込まれた（右、電子顕微鏡写真）。

本研究で得られた結果は、大気圏突入時に溶融・分裂した隕石由来の物質が、上空で硫酸塩粒子に取り込まれながら、数か月もしくはそれ以上の時間をかけて地上に落ちてきていることを示します。特に、成層圏やさらに高層の大気では、エアロゾル粒子の供給源が限られており、地球外から飛来してくる隕石がエアロゾルの重要な供給源の一つになります。今回の研究で明らかとなった隕石成分の挙動は、大気物質循環や気候影響を理解するうえで重要な発見になると考えられます。

本研究成果は、2022年06月16日付けでSpringer Natureが発行する「Communications Earth & Environment」誌に掲載されました。

<発表論文>

掲載誌：*Communications earth & environment*

タイトル：Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy

著者名：Kouji Adachi¹, Naga Oshima¹, Nobuyuki Takegawa², Nobuhiro Moteki³, Makoto Koike³

所属：1 気象研究所 2 東京都立大学 3 東京大学

DOI：doi.org/10.1038/s43247-022-00469-8

URL：<https://www.nature.com/articles/s43247-022-00469-8>

<関連情報>

本研究は、（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20205001, JPMEERF20202003, JPMEERF20215003, JPMEERF20172003）、科学研究費助成事業（JP26701004, JP16K16188, JP16H01772, JP18H04134, JP18H03363, JP18H05292, JP19H01972, JP19H04236, JP19K21905, JP19H04259, JP21H03582）、環境省地球環境保全試験研究費（国1753）、及び北極域研究加速プロジェクト（ArCS II）（JPMXD1420318865）の助成を受けて実施されました。

問合せ先：気象研究所 全球大気海洋研究部 主任研究官 足立光司

メール：adachik@mri-jma.go.jp

（広報担当）

気象研究所 企画室 広報担当 電話：029-853-8535

1. 背景

地球には毎日約43トンもの隕石が飛来しています。ごく少数の大きな隕石は地表に落下して隕石衝突現象をもたらしますが、ほとんどの隕石は大気圏で流れ星となって燃え尽きます。一方で、高温で燃え尽きたように見える隕石も、微小な粒子やイオンとして成層圏などに漂います。このような、隕石由来の物質は、隕石の主成分である鉄やマグネシウムなどが成層圏で検出されることでその存在は知られていました。しかしながら、これらの隕石成分がどのように微粒子（エアロゾル）として大気中に存在するか、またどのように対流圏に到達して地上に落ちていくかは、十分な観測的知見が得られていませんでした。成層圏などにおいては、巨大な火山噴火活動や森林火災などの災害的な現象を除いて、地上からのエアロゾル供給はほとんどなく、宇宙から衝突してくる隕石はエアロゾルの重要な供給源となります。このような上空でのエアロゾル粒子の振る舞いは、気候に与える影響も大きく、その知見は重要となります。

2. 結果

北海道（女満別空港）及び東北（仙台空港）を拠点とした飛行機観測（AFORCE-2013S観測キャンペーン）で得られたエアロゾル試料を透過型電子顕微鏡で観察した結果、硫黄（S）を指標とする硫酸塩に鉄（Fe）やマグネシウム（Mg）が均一に混ざっている粒子を見つけました（図1）。鉄やマグネシウムは成層圏などでは隕石由来の物質の指標となることが知られており、本分析の結果も隕石に由来する物質の存在を示すものと考えられます。加えて、隕石に比較的多く含まれる元素であるアルミニウム（Al）、ニッケル（Ni）、クロム（Cr）なども見つかりました。この観測結果は、隕石由来の物質を含むエアロゾル粒子を初めて粒子画像としてとらえたものです。

電子顕微鏡で、135試料に含まれる2万3千個以上の粒子を分析し、鉄とマグネシウムを含む隕石由来と考えられる粒子が全体の2%を占めていることが分かりました。特に、隕石成分を含む粒子は、高い高度（6-8キロメートル）でより多く見つかりました（約9%、図2）。

隕石が多く含まれる試料を採取した時の空気を詳しく調べると、ものが燃えたときに発生するすす（ブラックカーボン）のような地上からの粒子が少なく、一方で空気が乾燥している（相対湿度25%以下）ことも分かりました。これらの空気がどこから来たのかを調べるため、再解析気象データ（JRA55）を用いて空気の流れを解析した結果、成層圏からの乾燥した空気が下降する気流（対流圏界面の折れ込み現象）が発生した時に、観測で得られた隕石成分を含む粒子が多く見つかったことを明らかにしました（図略）。

航空機観測を行った2013年7月は、この100年間で最大の隕石衝突イベントであるチェリャビンスク隕石が地上に衝突して被害をもたらした2013年2月から5か月後にあたります。電子顕微鏡分析では、チェリャビンスク隕石と他の小規模な隕石との区別がつかなかったため、この隕石の影響を気象研究所で開発した地球システムモデルによるシミュレーションで再現しました。隕石から発生したエアロゾルの量を、100トン、1,000トン、10,000トンと三つに仮定して、隕石から発生した微粒子がどのような時空間分布をたどるのかを数値シミュレーシ

ョンで調べてみると、隕石由来のエアロゾル粒子は5か月後には北半球の上空全域に拡散し、その多くが大気中にとどまっていることが分かりました。また、観測期間の隕石由来物質の大気中の分布をみると、ちょうど電子顕微鏡観測で多くの隕石物質が検出された時間帯に、乾燥空気を伴って成層圏から下降してきていることを示し、観測とモデル計算が一致する結果が得られました（図3）。

3. 今後の展望

今回の研究結果は、隕石由来の物質が地上に落ちてくる姿をとらえた貴重な成果です。このような成果が得られた背景には、日本では数少ない航空機観測で上空の空気を直接とらえることができたことがあります。また、気象研究所が取り組んでいる電子顕微鏡によるエアロゾル観測と地球システムモデルによるシミュレーションとの比較ができたことも、今回の研究の成果をもたらした要因にあげられます。

人為的な影響が少ない対流圏上部や成層圏では、今回の研究で見られたような隕石由来の物質も数少ないエアロゾル粒子供給源として重要な寄与をします。今後、大規模な隕石衝突や多くの隕石衝突が起こった際に、さらに上空のエアロゾル粒子が増えて気候バランスに影響を及ぼす可能性が考えられます。また、今回の研究で示した隕石成分は硫酸塩に取り込まれており、これらの粒子のほとんどは対流圏をしばらく漂った後に雲になり、雨として地上に降ってきます（図4）。

気象研究所では、今後も大気現象や気候変動に関する様々な研究を推進し、その成果を科学的な理解や対策に貢献出来るように努めていきます。

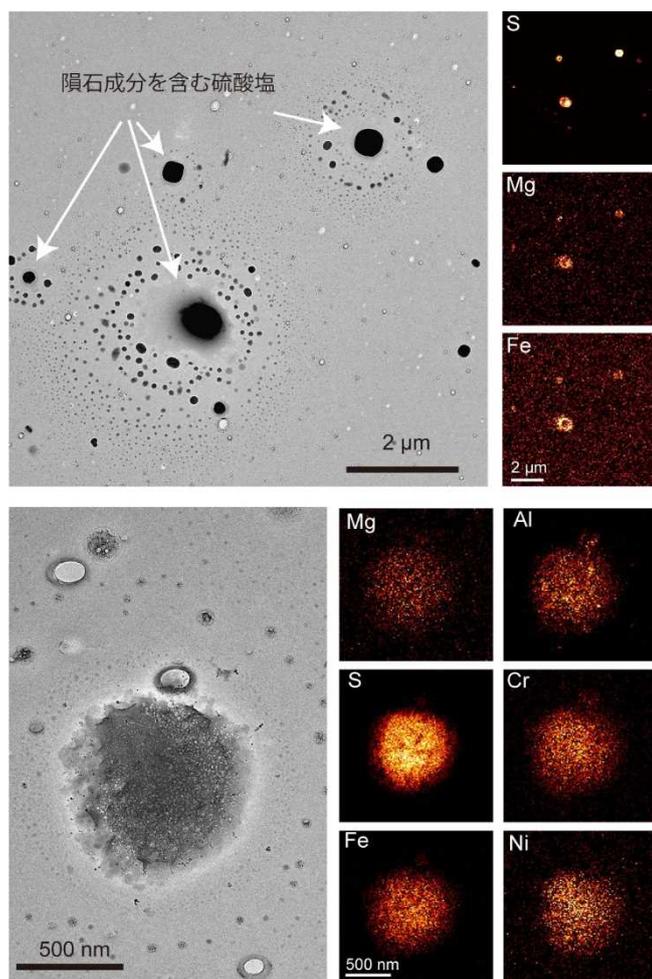


図1 隕石成分（鉄（Fe）やマグネシウム（Mg））を含む粒子の電子顕微鏡画像（左）。右側にはそれぞれの元素の分布を示す。多くの元素は硫黄（S）と共存し、硫酸塩に溶け込んだ状態で存在していることを示す。

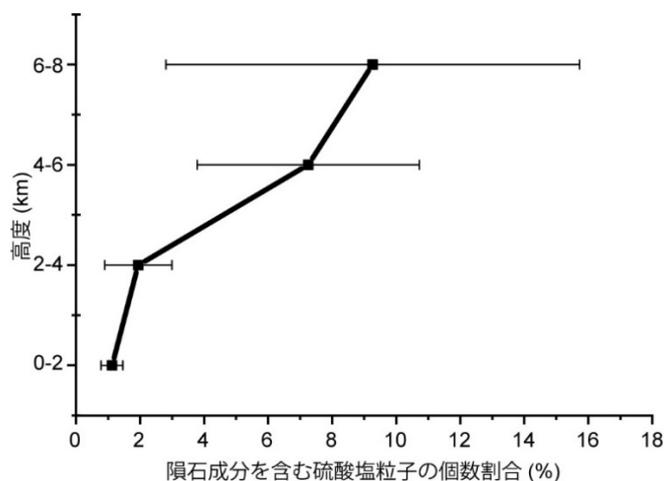


図2 高度別の隕石成分を含む硫酸塩粒子の割合。隕石成分を含む硫酸塩粒子の割合は上空に行くにつれて上昇する。横向きのバーは誤差範囲を示す。

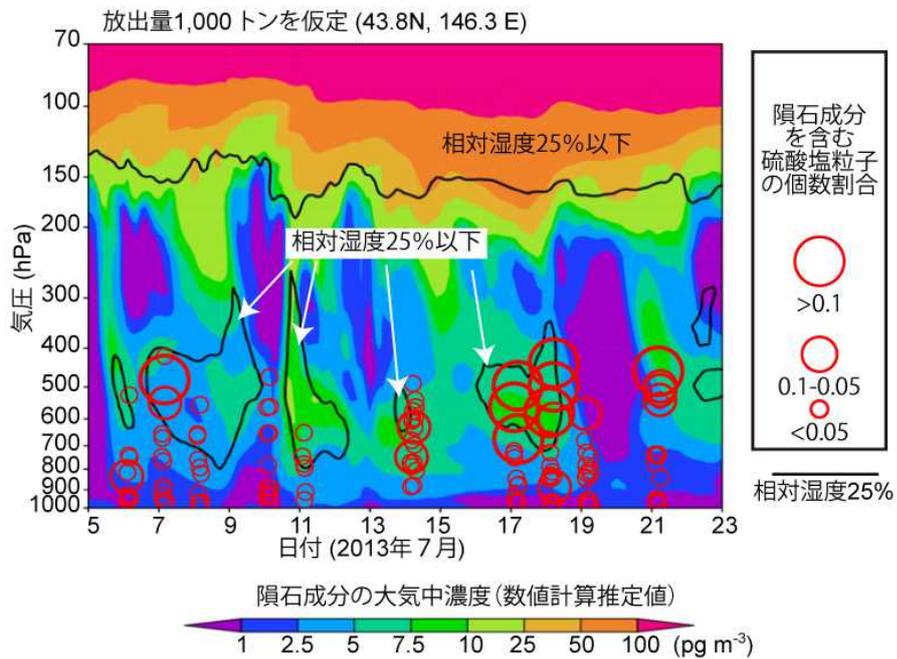


図3 モデルシミュレーションで示したチェリャビンスク隕石由来の隕石成分の大気中濃度（濃度は色で示す）と電子顕微鏡観測で得た隕石由来成分を含む粒子の数濃度（赤丸印で示す）。特に、相対湿度が25%以下の領域（黒線で囲まれた場所）で高い濃度で隕石成分がみられる。

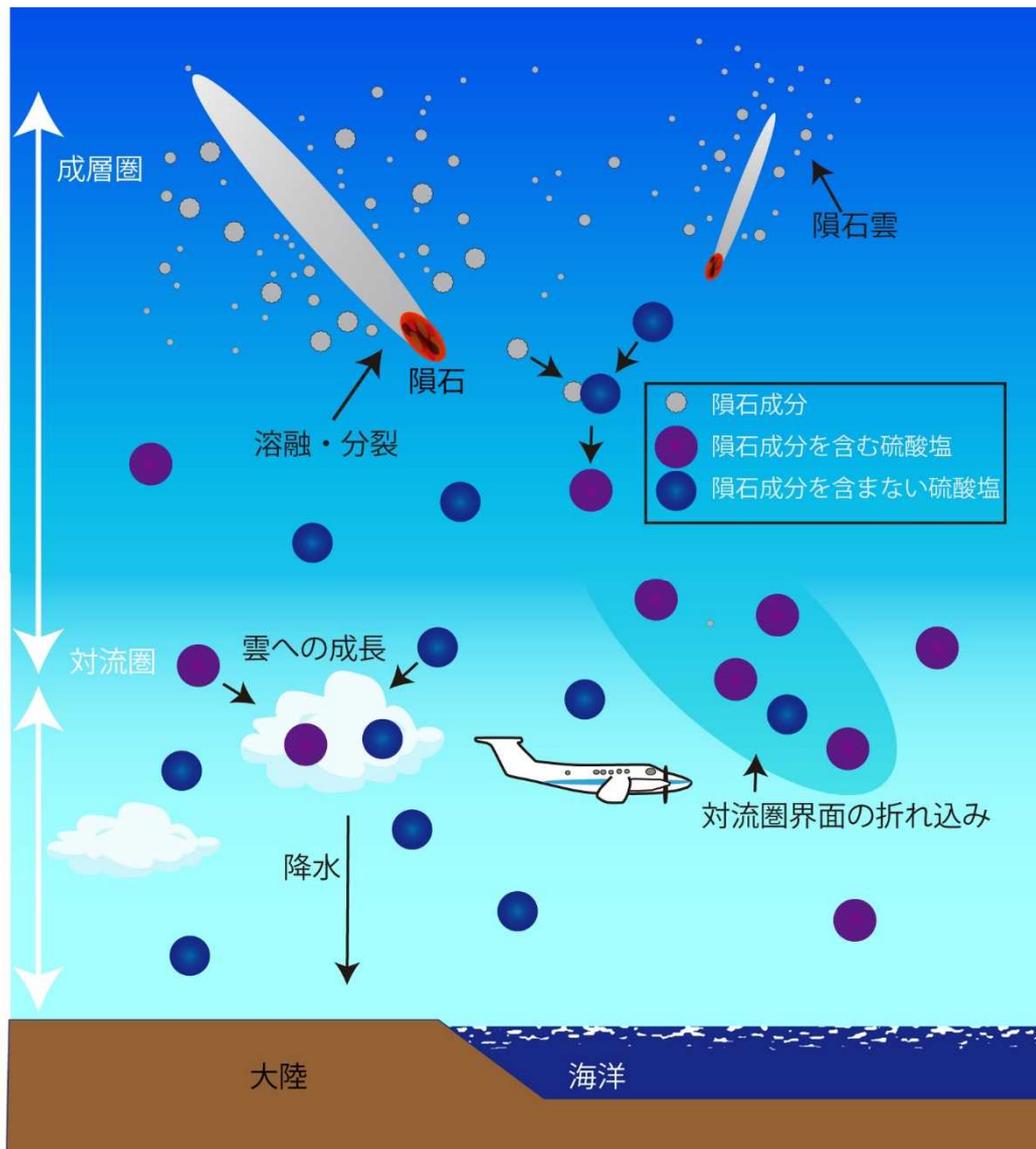


図4 隕石が溶融・分裂してできた物質が地上に落ちてくるまでを示した模式図。成層圏からの空気が対流圏に落ち込むとき（対流圏界面の沈み込み現象）に多くの隕石成分が対流圏にもたらされる。対流圏まで下降した隕石成分を含む硫酸塩粒子は雲の核となり、雨となって地上に降ってくる。