



# 愛研技術通信

## 掲 示 板

法令・告示・通知・最新記事・その他

### ○ 海洋環境でのトリチウムおよび放射性セシウムの海産生物への蓄積の比較について

2023年9月6日福島大学報道発表資料抜粋

福島大学と、公益財団法人 海洋生物環境研究所の研究グループは海洋環境におけるトリチウムの動きを知るために、東日本北太平洋沿岸海域（青森、岩手県の沿岸、図1（左側））において、トリチウムの動きや海産生物への蓄積について、放射性セシウムと比較しました。

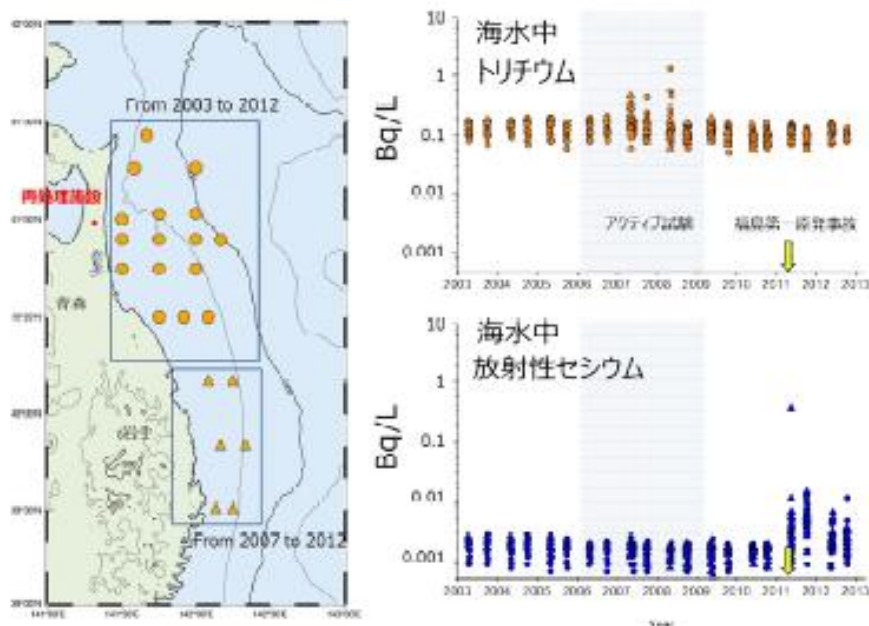


図1（左）東日本北太平洋側沿岸海域での調査地点（右）海水中の放射性核種濃度。

## 【 トリチウムとは 】

普通の水素は陽子1個と電子1個で構成されています（プロチウム（軽水素いわゆる水素））。この他に、陽子1個、中性子1個、電子1個で構成された「デューテリウム（重水素）」、陽子1個、中性子2個、電子1個で構成された「トリチウム（三重水素）」の2種類の同位体が存在しています。

デューテリウム（重水素）もトリチウム（三重水素）も水素と化学的性質はほとんど同じです。

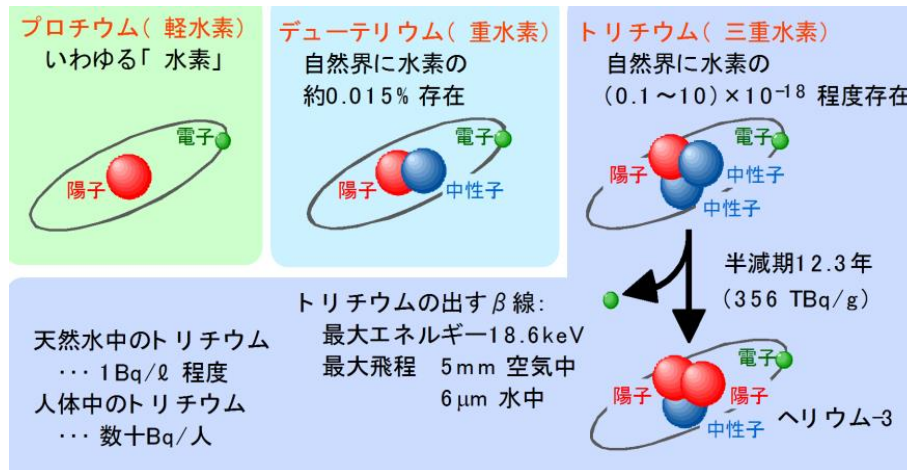


図. トリチウムの物性等について

(図は経済産業省ホームページ「トリチウム水タスクフォース報告書について」  
参考資料集より引用)

自然界に存在する水素原子のほとんど(99.9以上)がプロチウムで、デューテリウムは水素の0.015%存在しています。トリチウム（三重水素）は、 $0.1 \sim 10 \times 10^{-18}$ 程度とされています。

放射性同位体であるトリチウムは、不安定でβ線を放出してヘリウムに変換します。半減期は12.3年です。トリチウムのβ線のエネルギーは小さく（最大18.6keV）、最大飛程は空气中で5mm程度なので、紙1枚で遮蔽できます。

トリチウムは宇宙線が大気成分と核反応し自然界で生成しています。年間 $7 \times 10^{16}$ Bq 程度生成されています。また原子炉の中でも生成し、その一部は、大気圏や海洋へ計画放出されます（施設起源トリチウム）。年間 $2 \times 10^{16}$ Bq 程度放出されているとされています。過去、最も大量に生産されたのは、1945年から1963年ごろに大気中で行われた核実験で、およそ $1.8 \sim 2.4 \times 10^{20}$ Bqというとても大きい量です。それが今でも環境中に残っています（フォールアウトトリチウム）。

核実験後に環境中の存在している量（2010年）は $2 \times 10^{19}$ Bqです。核実験前（自然由来のみ）は $1 \times 10^{18}$ Bqなので、核実験によるトリチウム放出により環境中のトリチウム量が20倍にも増えたのです。そして、現在でも核実験の影響が残存していることを意味します。

トリチウムは、単体では存在することなく、すぐに大気中の酸素と反応し、トリチウム水になります。トリチウム水は、地球環境中では、大気水蒸気・降水・地下水・河川水・湖沼水・海水・飲料水、そして生物の体内に広く分布しています。天然水中の濃度は1Bq/L、海水中は0.1Bq/Lとされています。

## 環境中<sup>3</sup>Hインベントリー

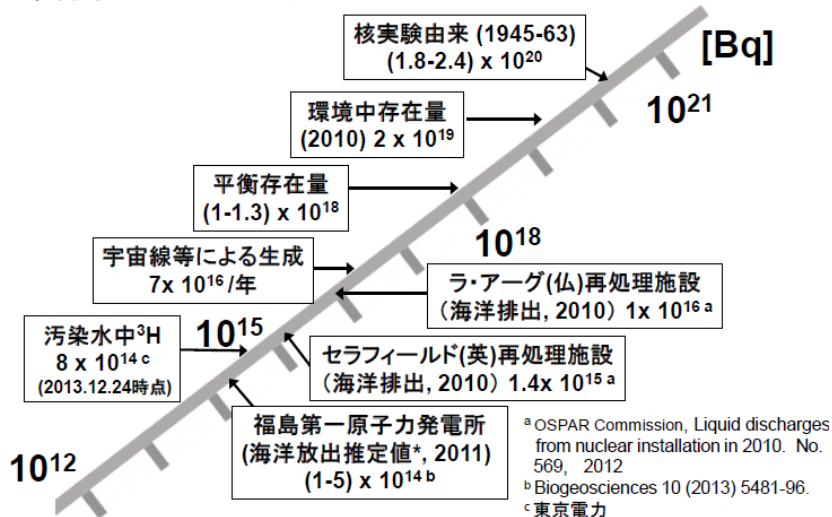


図. 環境中のトリチウムインベントリー

(図は経済産業省ホームページ「トリチウム水タスクフォース報告書について」  
参考資料集より引用)

## 【 海水中のトリチウムと放射性セシウム（セシウム-137）濃度の経年変化 】

2003年度から2012年度までの海水中のトリチウム濃度と放射性セシウム濃度の時間的变化を図1（右側）に示しました。

### ・トリチウム濃度

トリチウムは六ヶ所村の原子燃料再処理施設のアクティブ試験（2006～2008年度）前の平均値は表層が0.14Bq/L、下層が0.12Bq/L でした。アクティブ試験期間中ではいくつかの測点で試験の影響が見えましたが、最大でも1.3Bq/Lの上昇でした。試験後の2009年度以降はすぐに試験前の値に戻り、また、福島第一原発事故の影響は見られず、平均は表層が0.11Bq/L、下層が0.10Bq/Lでした。

### ・放射性セシウム濃度

アクティブ試験の前中後で試験の影響は見えませんでした。福島第一原発事故により最大0.37Bq/Lまで上昇し、その後は緩やかな減少が見られました。

## 【 アクティブ試験とは 】

原子力発電所で使い終えた燃料（使用済燃料）から、燃え残りのウランや原子炉の中で新たに生まれたプルトニウムを取り出すことを「再処理」といいます。再処理工場では、操業を開始する前にいくつかのステップを踏んで、次第に実際の運転に近づけながら段階的に試験運転を行っています。アクティブ試験は、操業前の最終段階の試験として実施するものです。

アクティブ試験では、実際の使用済燃料を用いて、プルトニウムや核分裂生成物の取り扱いに係る、再処理施設の安全機能および機器・設備の性能を確認するものです。具体的には、核分裂生成物の分離性能、ウランとプルトニウムの分配性能、環境への放出放射能量、放射性廃棄物および固

体廃棄物の処理能力などの確認が行われます。

アクティブ試験で発生した廃棄物は、法令などに従って操業段階と同様に管理します。このうち、液体廃棄物については、可能な限り放射性物質を取り除き、安全を確認のうえ、沖合い約3 kmの海洋放出管から放出されました。

(日本原燃株式会社ホームページより引用

<https://www.jnfl.co.jp/cyclerecycle/testing/active-test.html>)

## 【海産生物中のトリチウムと放射性セシウム濃度の経年変化】

2003年度から2012年度までの海産生物中のトリチウム濃度と放射性セシウム濃度の時間的変化を図2に示しました。

### ・トリチウム濃度

アクティブ試験前での平均は、組織自由水が0.14Bq/kg-生鮮物、有機結合型が0.04Bq/kg-生鮮物でした。アクティブ試験中ではいくつかの試料で試験の影響が見られ、最大で組織自由水が8.1 Bq/kg-生鮮物、有機結合型が0.49Bq/kg-生鮮物（ともにカタクチイワシ）でした。試験後の2009年度以降はすぐに試験前の値に戻り、また福島第一原発事故の影響は見られませんでした。試験後の平均は、組織自由水が0.10Bq/kg-生鮮物で、有機結合型が0.05Bq/kg-生鮮物となりました。

### ・放射性セシウム濃度

海水中放射性セシウムと同様に、アクティブ試験の影響は見えませんでした。福島第一原発事故により最大11Bq/kg-生鮮物まで上昇しました。その後は海水同様に緩やかな減少でした。

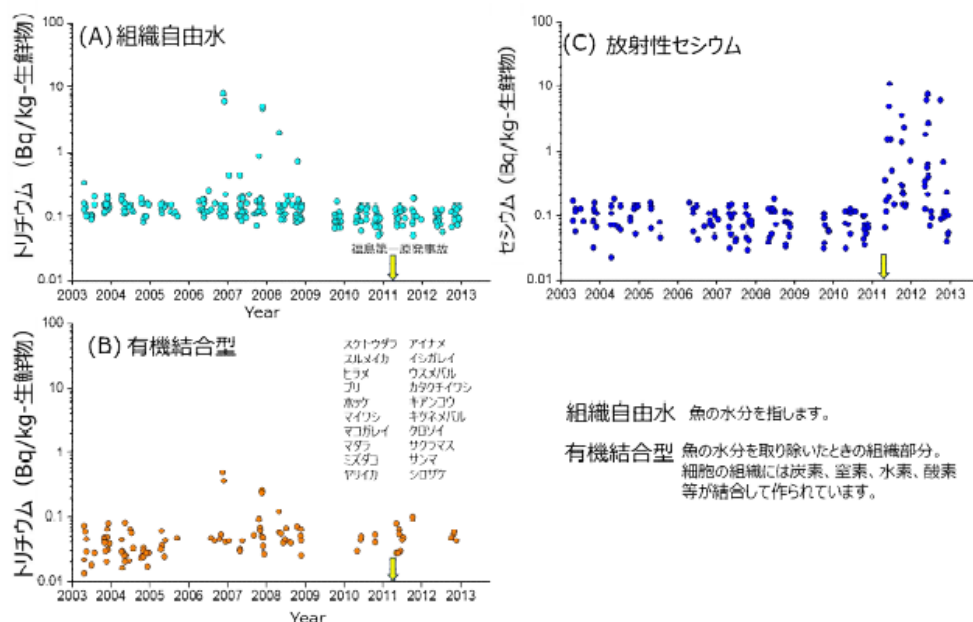


図2. 海産生物の (A) 組織自由水のトリチウム濃度 (B) 有機結合型 (組織) のトリチウム濃度 (C) 放射性セシウム濃度。

## 【 組織自由水・有機結合型とは 】

トリチウムは、そのほとんどが水分子（組織自由水）の中に存在する一方で、生体内のタンパク質、糖、脂肪などの有機化合物の水素原子と置き換わることで生体の構成分子として存在します。このような有機化合物中のトリチウムを有機結合型トリチウム（Organically Bound Tritium、OBT）といい、人の場合、生体内に取り込まれたトリチウム水のうちの約5～6%がOBTになると考えられています。

生体内に取り込まれたトリチウム水は比較的早く体外に排出されるため、トリチウムの生物学的半減期（体内に摂取した放射性物質の放射能が放射性物質の体外への排泄により半分になる時間）は、10日程度です。一方、OBTの生物学的半減期は、短期成分で約40日、長期成分で約1年とされています。（図、文は一般社団法人日本放射線影響学会「トリチウムによる健康影響」から引用）

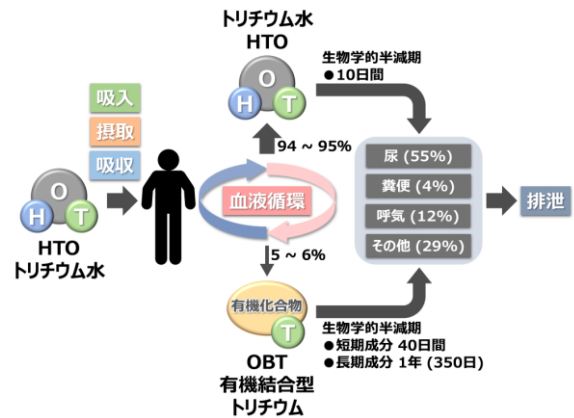


図. ヒトでのトリチウムの代謝

## 【 トリチウムと放射性セシウムの海産生物への蓄積過程について 】

トリチウムと放射性セシウムの海水から海産生物への蓄積を確認するために、海水濃度と海産生物の濃度変化が少ない時期（トリチウムは2003～2005年度、2009～2012年度；放射性セシウムは2003～2010年度）において、海産生物 - 海水濃度比（または濃縮係数）を求めました。その結果、組織自由水のトリチウム濃度比は種類毎の平均が0.84～1.3でした。これは、トリチウムは海産生物へ蓄積しないことを示しています。一方、放射性セシウムは同じ種類毎の濃度比が32.5～74.4であったことから、放射性セシウムは海産生物へ蓄積することがわかり、トリチウムと放射性セシウムの海産生物への蓄積過程が異なることを示唆しました。

種名	濃度比（濃縮係数）			
	トリチウム （組織自由水）		放射性セシウム	
	平均	誤差	平均	誤差
カタクチイワシ	1.3	0.4	—	—
スケトウダラ	0.8	0.2	74	10
マダラ	0.9	0.2	73	8
キアコウ	0.9	0.3	33	7
シロサケ	1.1	0.2	49	6
ヒラメ	0.9	0.2	74	6
マコガレイ	1.1	0.3	46	12
ミズダコ	1.1	0.4	—	—
スルメイカ	0.9	0.2	—	—
各種の平均範囲	0.8～1.3		33～74	

図3. トリチウムと放射性セシウムの濃度比

## 【 成果の意義 】

海水と海産生物中のトリチウム濃度の関係から、トリチウムは海産生物中へ蓄積しないことを示し放射性セシウムとの蓄積過程の違いを示唆しました。また、2012年度の東日本北太平洋沿岸の海水および海産生物の組織自由水トリチウム濃度はそれぞれ約0.1 Bq/L と0.1 Bq/kg-生鮮物であり、この数値は再処理施設等からの処理水の海洋放出後のトリチウムの動きを評価するうえで非常に重要な情報となります。

## ○ 黄砂が海の生態系を育むって本当？

～ 海水中の石英粒子から海洋への黄砂沈着フラックスを推定 ～

2023年9月29日北海道大学報道発表資料抜粋

国立研究開発法人海洋研究開発機構は、北海道大学、広島大学、九州大学の研究者と共同で、海洋に沈着する黄砂のフラックスを定量的に評価する分析手法を新たに開発し、海洋への黄砂沈着フラックスとその季節性の解明に成功しました。

## 【 背景 】

西部北太平洋は、植物プランクトンなどの一次生産者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高い豊かな海です。また中・高緯度偏西風帯に属し、その風上にはタクラマカン砂漠やゴビ砂漠といった広大な砂漠域が広がるため、これらの砂漠域から毎年多量に排出される黄砂が、風で数千キロメートル運ばれたのちに海洋に沈着し、海洋生態系にどのような影響を与えるのか、長らく注目されてきました。

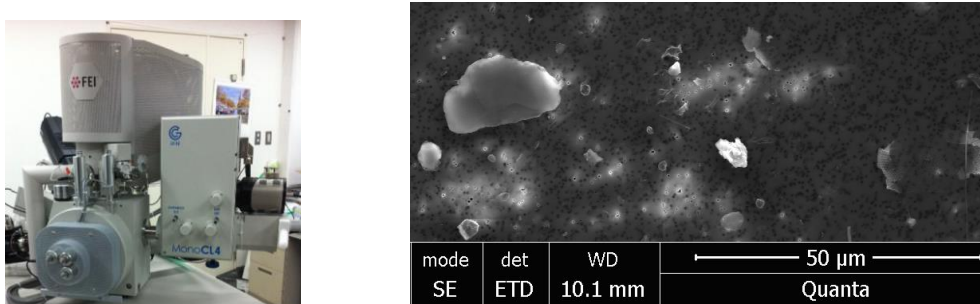
中でも北太平洋亜寒帯域では、生物に必須な微量栄養塩・鉄の不足が海洋の基礎生産を制限している事が知られ、黄砂の量が基礎生産の量を規定している可能性が考えられます。一方、当該海域への鉄供給プロセスは、海洋に沈着した黄砂や人為起源エアロゾルなどから溶け出す大気を通じた供給に加え、オホーツク海を起源とする鉄に富む中層水に由来する海洋中層からの供給が知られ、黄砂など大気を通じた鉄供給量が、鉄供給全体のどの程度を占めるのかを明らかにし、大気からの鉄供給がこの海域の基礎生産に影響を与え得るのか否かを調べる事が、当海域の生態系を理解する上で重要です。しかし、海に沈着する黄砂量の実測の難しさが、大気からの鉄供給量を把握する際の妨げとなってきました。なぜなら、海中には黄砂粒子の他に、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ものなど多様な粒子が存在しており、従来の手法では、これらの粒子の起源を区別することが出来なかったため、黄砂量を測定する直接的な方法がありませんでした。

そこで本研究では、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、海水中に僅かに存在する石英粒子について電子顕微鏡-カソードルミネッセンス分析（SEM-CL分析）を行い、石英の供給源を特定しました。次に、黄砂由来の石英量を求め、海に沈着する黄砂フラックスを推定しました。



## 【 SEM-CL 分析とは 】

カソードルミネッセンス（CL）とは、試料に電子線を照射した際に放出される光のことです。身近な例としては、テレビのブラウン管の内表面に塗られた蛍光体に走査電子線が衝突することにより発光する現象が挙げられます。多くの材料がCLを示し、蛍光体、半導体、セラミクス、地質鉱物などで確認されます。放出光を解析することで、発光特性、結晶欠陥等の材料解析や酸化物、誘電体材料の不純物が測定できます。電子顕微鏡（SEM）と組み合わせることで、微細な試料へ電子線の照射が可能になります。



図左：SEM-CL装置の写真 図右：分析のイメージ図。

フィルター上の石英粒子（黒っぽいフィルターに対し、白く見えているのが石英粒子）1粒ずつに電子線を照射し、粒子から放出されるCLスペクトルを得る。

## 【 成果 】

本研究では、(1)SEM-CL法を応用した独自の技術により海洋への黄砂沈着フラックスを海洋観測から明らかにし、(2)黄砂がどの程度西部北太平洋亜寒帯域の海洋生態系に影響を与え得るのか量的に示すことに成功しました。

### (1) 海洋への黄砂沈着量を解明

図1のように、観測点K2に輸送される石英粒子の主な供給源には、黄砂の主な発生源であるタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠などの東アジア域、オホーツク海やベーリング海とそれらの周辺の陸域、さらに千島列島やアリューシャン列島に多く存在する火山の噴出物が考えられます。

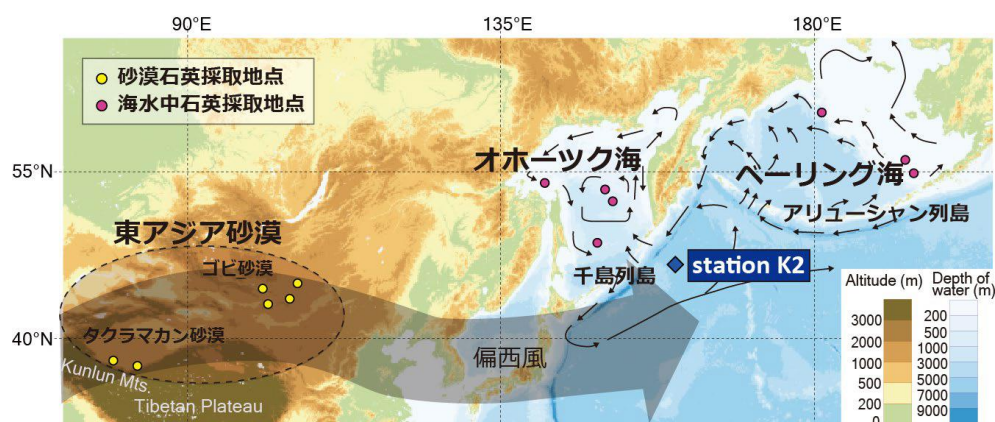


図1：西部北太平洋亜寒帯観測点K2および当海域に輸送される石英粒子の供給源候補地  
(地理院地図<https://maps.gsi.go.jp/>を加工して作成)

そこで、それら供給源で得られた砂漠砂や海水濾過試料を用いて、各々数十～数百個の石英粒子について SEM-CL 分析を行いました。SEM-CL 分析手法の優れているところは、石英の粒子毎の「ばらつき」を利用する点です。一般に、各種元素の同位体比などを用いた供給源推定法では、粒子群の「平均的な値」から供給源を推定するため、それぞれの供給源を区別し、その混合比を議論するのが難しいという問題点があります。そこで本研究では、SEM-CL 分析の粒子毎の「ばらつき」を海水中の石英に応用することで、複数存在する石英粒子の供給源を区別することを可能にしました。

電子線照射によって得られた CL スペクトルは、それぞれ変成岩、深成岩、火山岩などを母岩とする石英粒子を示す 3 つのクラスターに大別することができます (図 2)。岩石のタイプによって異なる CL スペクトルを示す理由は、岩石タイプ毎に、石英結晶が生成した際の温度や冷却スピード、生成後に受ける熱や圧力環境が異なり、各タイプに特有の結晶構造の乱れや不純物が石英結晶中に生じるためです。各供給源域の石英粒子のクラスター組成 (3 つのクラスターのまざり具合) を計算すると、供給源によって異なるクラスター組成を持ち、その組成を用いることで供給源の識別が可能になりました。そこで、2003～2022 年の間にさまざまな季節で実施した 9 つの航海 (海洋地球研究船「みらい」ほか) において、観測点 K2 の水深 10～20m から採取した石英粒子について同様に SEM-CL 分析を行ってクラスター組成を調べ、供給源候補地の値と比較しました。その結果、観測点 K2 に輸送される石英粒子は、東アジアの砂漠域と火山由来の石英を結ぶ線上に分布したことから、それらの混合であることが分かりました (図 2)。この結果を利用し、火山由来の石英の寄与を差し引くことで、東アジアの砂漠域起源の石英粒子数の算出が可能となりました。

次に、得られた砂漠を起源とする海水中の黄砂由来の石英粒子数を基に、黄砂の沈着フラックスを計算し、その季節変動を調べたところ、黄砂沈着フラックスは 4～6 月頃に増加し、その後、徐々に減少することがわかりました (図 3)。1 年あたりの黄砂沈着フラックスを計算すると、約  $0.4 \text{ g m}^{-2}$  になります。この数値を全球エアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS (Model for Interdisciplinary Research on Climate coupled with the Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) と比較したところ、観測から見積もられた観測点 K2 黄砂沈着フラックスは数値モデル結果と一致しており、数値実験と観測に基づく本研究、それぞれ独立した見積もりの信頼性の高さが裏付けられました (図 3)。

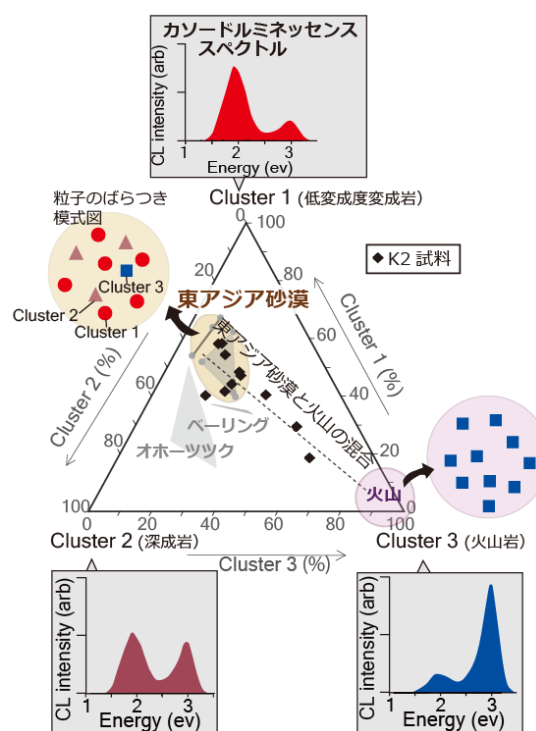


図 2: 個別石英粒子の SEM-CL 分析による供給源推定

個別石英粒子の CL スペクトルに基づく観測点 K2 試料 (◆マーク) のクラスター組成と、東アジア砂漠域、ベーリング海、オホーツク海、火山噴出物を表する石英粒子のクラスター組成 (三角形の各頂点に近いほど、各クラスターの割合が多いことを示す)。



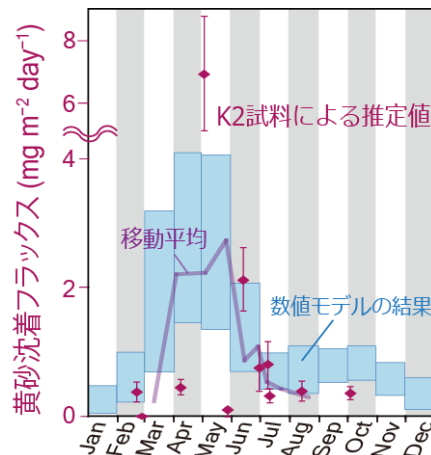


図 3: 観測点 K2 における黄砂沈着フラックスの推定結果と季節変動

観測点 K2 の 3 点の移動平均値（紫線）は、水色バーで示している MIROC-SPRINTARS で推定した黄砂沈着フラックスと類似した値、季節性を示す。

## (2) 黄砂による海洋生態系への鉄供給の推定

SEM-CL 分析で明らかにした黄砂沈着フラックスから、黄砂に含まれる鉄分の溶解度を考慮して、溶存鉄の供給フラックスを計算すると、植物プランクトンの生産が活発な 4～7 月には、1 日あたり、 $0.9 \pm 0.3 \mu\text{g m}^{-2}$  の鉄を供給していることが分かりました。この量が多いのか少ないのかを評価する際の物差しとなるのが、主要な溶存鉄の供給源と考えられている海洋中層からの溶存鉄供給フラックスです。そこで、冬季混合などによって中層から表層に供給される溶存鉄の量を、観測点 K2 の表層から深層までの鉄濃度分布とその季節変化から計算しました。その結果、図 4 で示されるように、中層から表層への溶存鉄供給フラックスの合計は、1 日あたり、約  $2.2 \mu\text{g m}^{-2}$  となり、黄砂による鉄供給は中層からの鉄の半分近くに達することが分かりました。また、大気を介した海洋への鉄供給源として、黄砂の約半分の溶存鉄を供給している事が報告されている人為起源エアロゾルの寄与を加えると、大気を介した溶存鉄の供給は、海洋中層からの鉄供給を含めた、溶存鉄供給フラックス全体の約 4 割を占めることが明らかになりました。

## 【 今後の展望 】

私たちの生活において、健康への被害や視程の悪さといったマイナスの面が目目されている黄砂ですが、海洋においては生物にとって重要な鉄の供給源になり、プラスの面があることが本研究で量的に確かめられました。温暖化により海洋の成層化が進むと、海洋中層から表層に供給される鉄の量は減少することが予想されます。その場合、黄砂による鉄供給の重要性がより高まっていくことが予想されますが、一方の黄砂も過去数十年間に温暖化に伴って発生量が減少した事が観測から示されており、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が、西部北太平洋亜寒帯域における基礎生産と二酸化炭素吸収能力の将来を握る鍵になります。

陸と大気と海を繋ぐ黄砂、今後もその複雑な挙動を丹念に調べ、私たちの身近に迫る気候変動を解き明かしていきます。

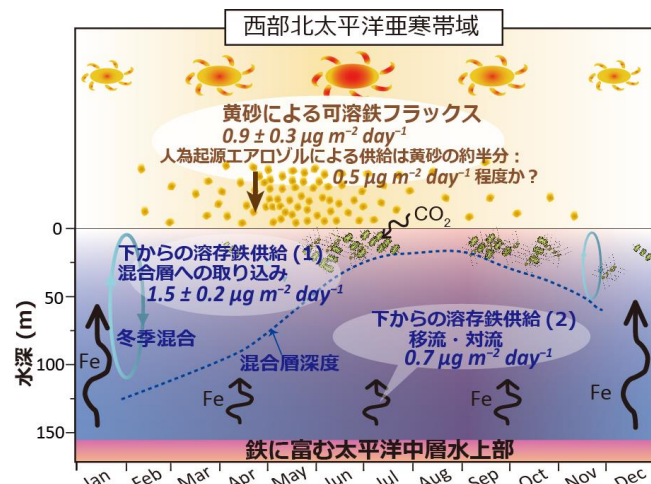


図 4: 西部北太平洋亜寒帯域の海洋環境（水温、混合層深度）、海洋基礎生産、大気と海洋中層からの鉄供給量の季節性を示した模式図

### 編集後記

10 月になりようやく秋の気配が訪れました。先日、紅葉見物を兼ねて北アルプス方面に行ってきました。息を切らして登っていると、山頂直下でライチョウの親子 5 羽に遭遇しました。急いでカメラを取り出し撮影しましたが、足場があまりよくない場所で疲労もピークだったので、手元、足元が定まらず、ようやく 2 羽を写真に収めることができました。親子といっても、この時期になるとほとんど同じ大きさになって遠目には見分けが付きません。ライチョウは、ハイマツの枝の下などで営巣して、6 個程度の卵を産みます。この親子はほぼ全員が巣立ったようです。無事に冬を乗り越えてほしいと思います。風はやや強かったものの、午前中はお天気に恵まれ、紅葉も始まっていました。かなり疲れましたが、充実した一日を過ごすことができました。（A.K）



写真：ライチョウ（黄色の○で囲いました）  
（筆者撮影）



株式会社 愛 研

(<https://ai-ken.co.jp>)

本 社 〒463-0037 名古屋市守山区天子田 2-710

電話(052)771-2717 FAX(052)771-2641

半田営業所 〒475-0088 半田市花田町 2-65

電話(0569)28-4738 FAX(0569)28-4749

