

① 共同研究の報告 国立研究開発法人海洋研究開発機構 熊本 雄一郎

② お気に入りの分離手法 海洋環境領域 木谷 洋一郎

③ サパティカル報告 陸域環境領域 西川 潮

④ 論文紹介 大気環境領域 石野 咲子

共同研究の報告

Collaborative research

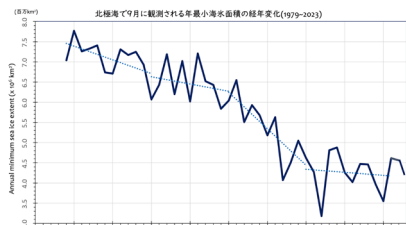
北極海における海洋観測研究



熊本 雄一郎

国立研究開発法人
海洋研究開発機構

近年、北極海における海洋観測研究が活発になっています。北極海における夏季の海水減少については科学的な関心だけでなく、経済的な関心も国際的に高まっていることがその背景にあります。また、夏季の海水減少が顕著になるにつれて、北極海の高緯度海域において調査船による海洋観測が可能になったことも、その理由として挙げることができます。平成9年（1997年）に就航した、海洋研究開発機構（当時は海洋科学技術センター）の海洋地球研究船「みらい」は、就航以来毎年のように北極海で観測を実施してきましたが、偶然にもそれは北極海において海水が急激に減少する時期と一致していました。その「みらい」は、

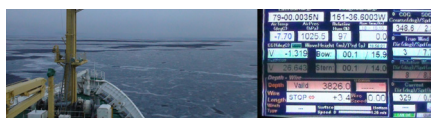


人工衛星で得られた北極海で9月に観測される年最小海水面積（百万km²）の経年変化。©JAMSTEC（データ元：北極域データアーカイブ（ADS: Arctic Data archive System）準リアルタイム極域環境監視モニター <https://ads.nipr.ac.jp/vishop/#/extent>）

令和7年度（2025年度）中にその役割を終え退役することが決まっています。本稿ではその研究成果を紹介するとともに、「みらい」に代わり我が国の北極海研究の重要なプラットフォームとなることが期待され

ている「みらいII」を紹介します。

夏季北極海における年最小海水面積は、西暦2000年代に急激に減少しました。また、海水減少は北極海の太平洋側で顕著でした。この原因は以下のように説明されています。ベーリング海峡を通過して太平洋側から流入する海水が温かくなってきたことを引き金として、太平洋側北極海の高気圧性の海洋循環が強化されました。その結果、海水が形成されにくくなり、さらに海水が減少したことがわかりました。また、海水が減ったことで太陽光が直接当たる海面が広くなり、海水温が上昇したことも海水を減少させる大きな要因となっています。2007年には太平洋側北極海上で高気圧が卓越した結果、北極海から大西洋に向けて吹き出す風が強くなりました。その結果、北極海から大西洋に流出する海水が増え、北極海の海水は著しく減少しました。これらの研究成果には、海水が少なくなった太平洋側北極海を広くカバーした「みらい」観測航海によって得られたデータが大きく貢献しました。



「みらい」MR09-03 航海における最北観測地点（北緯79度）での海水の様子（2009年9月20日）。©JAMSTEC（撮影：菊地 隆（IACE））

海洋研究開発機構は、退役する「みらい」に代わる北極域研究船「みらいII」を建造中で



令和7年3月19日に、ジャパンマリンユナイテッド株式会社横浜事業所船子工場で執り行われた、北極域研究船「みらいII」の命名・進水式の様子。©JAMSTEC/JMU

す（令和8年11月に造船所から引き渡し予定）。「みらいII」は全長128m、幅23m、総トン数は13,000トンとなり、「みらい」（全長129m、幅19m、総トン数8,700トン）より幅、総トン数が大きくなります。氷海船舶は、極地氷海船舶階級（ポーラークラス、PC）によって7段階に区分されます。「みらい」がPC7より低いクラスに相当する「耐氷船」であるのに対して、「みらいII」はPC4の「砕氷船」となり、多年氷が一部混在する厚い一年氷がある海域を周年航行することが可能です。また海水の観測、監視のために用いられるヘリコプターの離着陸ポート、海面に漂う海水の影響を受けずに観測機器を投入・回収できるように、船体中央付近に「ムーンプール」と呼ばれる開口部を備えています。北極域研究船「みらいII」は、「みらい」以上に北極海での活躍が期待されています。

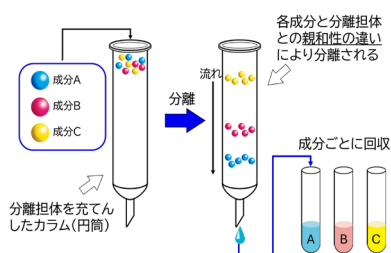
熊本雄一郎先生は、当センターの共同研究（2024年度重点共同研究）に採択されています。

液体カラムクロマトグラフィー



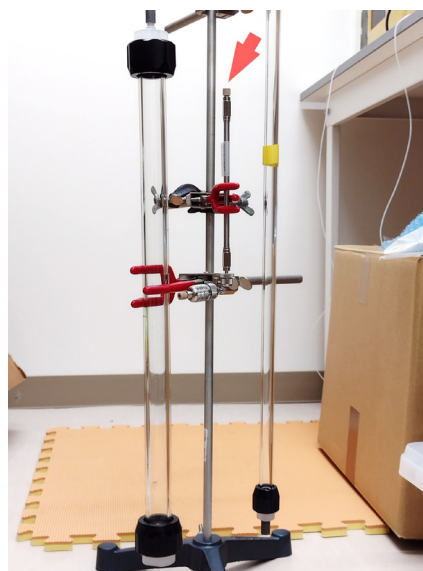
木谷 洋一郎
海洋環境領域

クロマトグラフィーとは“物質を分離する方法”のひとつで、ある物質の混合物をクロマトグラフィー担体（分離を担う粒子など）との物理的、電気的、化学的もしくは生物学的な性質に基づく親和性の違いにより分離します。分離の機序や形式は種々ありますが、本稿では円筒形の容器に担体を充填し、液体中に溶けている物質を分離する液体カラムクロマトグラフィー（以下、液クロ）について紹介したいと思います。クロマト



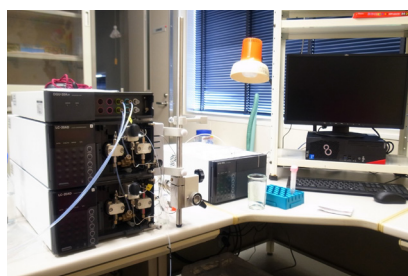
カラムクロマトグラフィーの模式図

グラフィーの中でも特に液クロは生物から生きた生体高分子を得ることができる数少ない方法の一つです。たとえば、タンパク質は物質そのものが存在しても、その構造が破壊されていたら機能を失いますが、液



左右は師から受け継いだガラス製空カラム。任意の担体を詰めて使う。矢印は充填済 HPLC 用カラム。

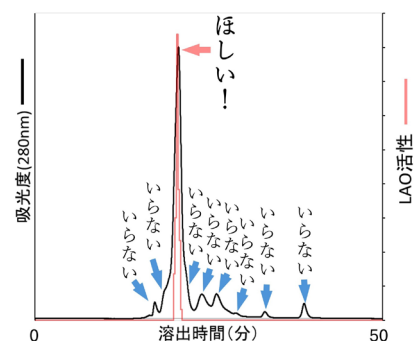
クロは生体に近い条件（pH、温度、塩濃度など）で分子の分離が可能で、担体も目的物質を変性させないで適用できるものがほとんどです。カラム自体も大きなものから小さなものまで精製の規模にあわせて自由に選択できます。さらに、表面積を増やすために担体を微粒子とし、これに負けない圧力で送液できるポンプと、高分解能検出器を組み合わせた「高速液体クロマトグラフィー（HPLC）」を適用することで極微量な目的物質を非常に高い純度で得ることができます。このようにいろいろな担体や



避難先の角間キャンパスで使用している HPLC システム

カラムの組み合わせを工夫することで多様な物質の分離が可能となります。

おおまかに私の研究分野を言うならば、宝探しを行う研究分野、ということができます。これは生体試料がもつ様々な生物活性をしらべ、着目した活性を示す物質について液クロで単離精製し、その構造や機能について詳しく明らかとしていく、というものです。ただし、生物はとても複雑な機序でその生命を維持しているため、組織や体液中には数えきれないほどの目的外物質が混在しており、それらの中からたった一つの宝物を見つけ出す必要があります。私は



物質を単離する様子。精製の最終段階でも「いらない」物質がたくさん混入している。

過去に海産魚クロソイから抗菌タンパク質の単離を試みました。これは、当時の先輩方がクロソイ体表粘液は非常に強力な抗菌

活性を示すものの、感受性を示す細菌の種類などから既知の物質とはまったく異なる物質が含まれることを見出しました。菌が死ぬ、ということ以外まったく手探りで、その正体については想像もつきませんでした。そこで私に課せられたミッションはこの物質の単離でした。目的物質は抗菌活性でしかモニターできないため、液クロを実施する数日前から抗菌活性試験の仕込みを行い、その結果を確かめるには分離からさらに一晩が必要でした。最終的に3年間を費やしましたが、クロソイ体表粘液の抗菌物質は分子表面に結合している糖鎖を認識するレクチンアフィニティー担体、分子表面の電荷で分離するイオン交換担体、そして立体構造の違いなどを認識するハイドロキシアパタイト担体の組み合わせでこれを単離することができました。その後、純粋な抗菌物質を材料に構造を決定し、これがL-アミノ酸オキシダーゼというタンパク質であることを（やっとの思いで）明らかとしました。

今日では様々な生物の全ゲノム配列が明らかとなってきた、この配列から遺伝子配列やタンパク質構造を推定することで生物活性を予想することが可能です。また、ゲノム配列がわからない生物についても技術革新により物質の単離なしで未知分子の構造が推定できる時代となりました。しかし、遺伝子配列はあくまで設計図であるため、これをもとに推定されたタンパク質分子がどのような翻訳後修飾（タンパク質が生まれたあと成熟に必要な過程）を受けているのか、また成熟タンパク質がどのような作用や活性をもつのか、実際に活躍する姿を知るには困難な部分が多々多いといえます。クロソイの例は、非モデル生物から目的物質の構造を決定する昔ながらの方法がまだまだ活躍する機会を持つことを示しています。

クロマトグラフィーによる物質の単離は一般プロトコル化できないことから敬遠されがちで、技術としてはどこでもやっているものではなくりつつあるように感じています。ただ、前述した通りこれは生理活性物質を生きた状態で純粋な状態へ磨きこむことができる稀有な方法ですので共同研究を大募集中です。

西オーストラリア州滞在記



西川 潮
陸域環境領域

西オーストラリア州のパース市は、世界一美しい街とも称され、世界中から観光客や、留学生、移民が集まります。2024年3月から2025年2月まで、パース市南部にあるマードック大学で、客員教授と



マードック大学の中庭

して1年間のサバティカル研修の機会をいただきました。マードック大学は、オーストラリアで最大面積を誇る大学で、特に、動物科学・獣医学、環境科学、国際援助、持続可能な開発学などの分野に強みがあります。2023年に完成した「Boola Katitjin（先住民 Whadjuk Noongar の言



マードック大学の象徴的な木造建築物「Boola Katitjin」

葉で「多くの学び」の意）」は、西オーストラリア州最大の木造建築物で、WA アーキテクチャーアワードにおいて、最高峰のジョージ・テンプル・プール賞を受賞しました。マードック大学の受入先は、環境・保全科学部のベリンダ・ロブソン准教授で、著名な国際誌「Freshwater Biology」の編集長に就任されています。

当初、サバティカルの研修先は、ニュー・サウス・ウェールズ州にあるチャールズ・スタート大学に決まっていたのですが、受入教員であったロビン・ワトソン教授の



教職員カフェでの研究打合せ（ベリンダ・ロブソン准教授（前列左）、西川（前列右）、ショーン・アトキンソン博士（後列左）、エド・チェスター講師（後列右））

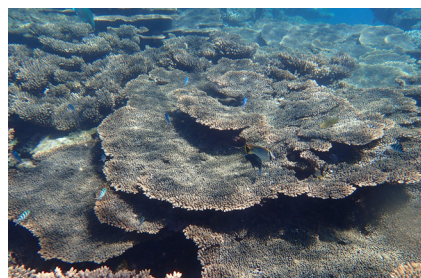
不慮の事情により、渡航3ヶ月前の段階になって研修先の変更を余儀なくされました。代替の受け入れ先を決めるにあたり、真っ先に頭に浮かんだのが、2018年に7カ国の研究者が協働して、ため池景観の保全政策に関する国際共著論文を発表した際、共著者の1人だったベリンダさんです。ベリンダさんとは面識はありませんでしたが、メールで事情を伝えたところ、快く受け入れ体制を整えてくださいました。

マードック大学でのサバティカル研修のテーマは「農業景観における生物多様性の保全・再生」です。本研修では、1）ため池データベースのデータ解析・論文執筆、2）環境配慮型農法と水田の生物多様性に関わる総説の執筆、および3）国際ネットワークの構築を目標としました。1）に関しては、サバティカル研修中に、農学分野の著名な国際誌 Agriculture, Ecosystems and Environment 誌に、湛水管理の違いが水田の生物多様性に与える影響に関する国際共著論文を発表することができました。2）に関しては、当初の受け入れ先であったロビンさんに改めて連絡を取り、オーストラリア東部の水田地帯を視察するとともに、生物多様性や環境に配慮した農法を行なっている農家さんにインタビューを行い、これらをもとに、総説論文の執筆を進めていくことになりました。3）に関しては、ベリンダさん、ロビンさんをはじめとして、日豪国際共同研究が新たに立ち上がりました。

パースへは、家族帯同（小学生2名を含む4名）で渡航しました。2024年時点で、オーストラリアの物価は日本の約2倍です。たとえば、現地のマクドナルドのアルバイトの賃金は時給25Aドル（約2700円）以上です。サバティカル研修中は金沢大学から日本円で給料をもらっていたこと

と、1Aドル約107円という円安もあり、自炊中心の生活を心がけていました。

環境科学科の教員は、普段は自宅の仕事をしていて、授業またはフィールドワークのある日しか大学に来ないため、校舎内はいつも人が少なかったです。私は運動を兼ねて、平日は毎日、自転車で片道25分の距離を往復していました。多くの職場のコアタイムは8時から15時です。皆早めに帰宅して家族との時間を大切にそうです。私たちは、学期休みに、キャンピングカーを借りて、西オーストラリア州北西部と南西部に旅行に行きました。総走行距離は各



世界最大の裾裾が広がる西オーストラリア州北西部コラルベイ（ニンガルー・リーフ世界遺産）



透明な水と白く美しい砂浜が広がる西オーストラリア州南部シスル・コープ（ケープ・ル・グラン国立公園）

旅行で2,000 km以上ずつに及び、西オーストラリア州の広大さと原生自然を満喫しました。

コロナ禍以降はオンラインツールが発達し、研究打ち合わせ等は気軽にオンラインで行えるようになりました。しかし、顔を突き合わせてこそ生まれる信頼感や連帯感は大いだと思います。サバティカル研修中に構築された人脈を活かして、今後も国際共同研究を進めていきたいと考えています。物価は高かったですが、西オーストラリア州滞在はとても良い経験になりました。

大気の「酸性度」が大気硝酸の北極への輸送されやすさを制御する

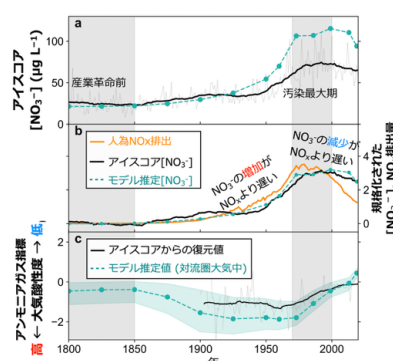


石野 咲子

大気環境領域

硝酸は、エアロゾルの主要成分の一つとして、大気質や気候に対して重要な影響を及ぼします。近年、ヨーロッパ・北米・中国を含む多くの都市域において、工場や自動車から排出されるNO_xを大幅に削減しているにも関わらず、硝酸エアロゾルが思ったように減らず、大気質がなかなか改善されないという問題が起きています。この問題が生じるメカニズムとして、大気の「酸性度」による制御が注目されています。大気硝酸は、ガス態(HNO₃)と粒子態(p-NO₃)の2つの形態で存在しますが、その比率は大気酸性度に依拠して変化します。近年では、「硫酸エアロゾル(SO₄²⁻)」が効果的に削減されたことに伴い、大気酸性度は低下傾向にあり、結果として粒子態の硝酸(p-NO₃)の割合が増加しています。そしてガス態よりも粒子態の方が沈着速度が遅いという特徴があるため、p-NO₃の割合増加は、沈着せずに大気中にとどまる硝酸量を増加させます。この現象は都市域で広く観測されてきましたが、北極などの遠隔域では観測データが乏しく、この現象の影響範囲は調査されてきませんでした。また、排出削減が始まる1970年代以前を含めた、長期的な変動も不明なままでした。

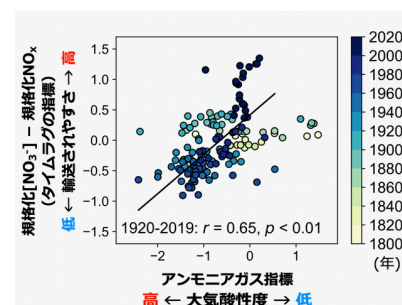
そうした遠隔域かつ長期的な大気成分の変動を調査するうえで、極域や山岳域で得られるアイスコーン試料が非常に有用な手段として活用できます。本研究では、とりわけ積雪量が多く物質の保存状態が良好なグリーンランド南東部のアイスコーンを用いて、産業革命から現在まで(1800年から2020年にかけて)の連続した硝酸イオン(NO₃⁻ = HNO₃ + p-NO₃)濃度の変遷を復元しました。結果、硝酸量は1850年代から1980年頃にかけて最大に達したのち、2000年代以降、



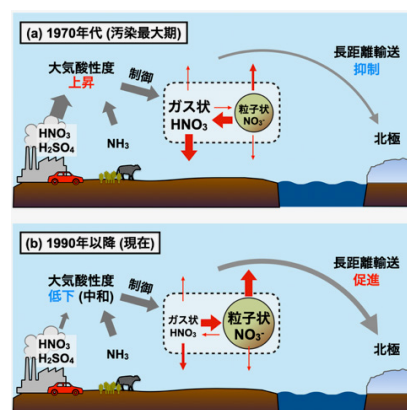
グリーンランド南東ドームに記録された過去220年間の硝酸イオン濃度と、人為的NO_x排出量および大気酸性度指標との比較。

高い値を維持しました。人為的NO_x排出量も同様に1850年代から増加しており、1970年代に極大となりました。過去220年間のアイスコーン硝酸量の概ねの変動は、人為的NO_x排出量で説明できます。しかしより詳細にみると、1920年から1970年までの硝酸量の増加はNO_x排出量の増加よりも遅く、逆に、2000年代以降の硝酸量の減少はNO_x排出量の大幅な減少よりも緩やかでした。このように、NO_x排出量とアイスコーン硝酸量にタイムラグがあることが初めて明らかになりました。さらに、アイスコーン硝酸量とNO_x排出量の差分(タイムラグの代替指標)を、大気の酸性度を示す「アンモニアガス指標」と比較したところ、両者には有意な相関があることを明らかにしました。この結果は、NO_xと硝酸量のタイムラグが、大気酸性度に起因する大気硝酸(ガス + 粒子)の長距離輸送の変化によって説明されることを示唆しています。

最後に本研究では、このNO_xに対するアイスコーン硝酸量のタイムラグが、現行の大気化学輸送モデルシミュレーションでも概



規格化されたアイスコーン硝酸量と人為的NO_x排出量の差分(タイムラグの指標)と、大気酸性度指標との相関



大気酸性度の変化に応じた北極への大気硝酸メカニズム輸送プロセスの変化

ね再現されることを確認しました。ただし、モデルで推定されるアイスコーン硝酸濃度は実際の観測値の2倍程度となっており、まだモデル改良の余地が大きいことも浮き彫りになりました。今後、本研究のアイスコーン硝酸濃度データを制約条件としてモデルを改善することで、硝酸を通じた人為的環境汚染の評価、そして削減策の構築に大きく役立てられると期待されます。

本研究成果は、日本時間2025年5月19日(月)公開のNature Communications誌に掲載されました。

