

国立環境研究所による民間貨物船舶を用いた 大気・海洋温室効果ガス観測と海洋 CO₂ 吸収量評価への貢献

Atmospheric and oceanic greenhouse gas observations
by NIES and its contribution to the evaluation of global oceanic CO₂ uptake

中岡 慎一郎*・高尾 信太郎
Shin-ichiro NAKAOKA* and Shintaro TAKAO

国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域
Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

摘 要

国立環境研究所（国環研）では、民間貨物船舶の協力を得て、北太平洋航路、オセアニア航路、東南アジア航路で大気・海洋温室効果ガス観測を実施している。大気観測では、温室効果ガスの大規模排出による影響が少ないバックグラウンド大気中の温室効果ガス濃度推移を把握し、泥炭・森林火災や油井・ガス井からの温室効果ガス放出量を評価した。さらに、温室効果ガス観測技術衛星による温室効果ガス観測データの検証も行っている。海洋観測では北太平洋の二酸化炭素（CO₂）分圧等の分布を再現して気候変動による応答を明らかにするとともに、日本の都市内湾における CO₂ 吸収量と海洋生物活動による寄与を評価した。国環研は海洋 CO₂ 観測データベースに観測データを提供するとともに、北太平洋域の責任機関として観測データを品質認定する役割を果たしており、本データベースを基に Global Carbon Budget 年次レポートにも貢献し、海洋の CO₂ 吸収が増加していることを明らかにした。

キーワード：海洋観測，協力貨物船舶，国際データベース，全球炭素収支，
二酸化炭素吸収

Key words：ocean observation, volunteer ship, international database,
global carbon budget, CO₂ uptake

1. はじめに

現在の海洋は、地球温暖化によって生じた熱の多くを吸収するだけでなく人間活動によって排出される二酸化炭素(CO₂)を吸収しており、熱や炭素の巨大な貯蔵庫と言われている。しかし、いづれどこでどれだけCO₂を海洋が吸収・放出しているのかについては知見が乏しい状態が続いていた。また海洋がCO₂を吸収することによって海水の性質が少しずつ酸性に傾き、炭酸カルシウムの殻を持つプランクトンや貝類、サンゴ礁など生育を阻害することで海洋生態系に悪影響をもたらすと指摘されており(Orr *et al.*, 2005), 「海洋酸性化問題」として注目を集めている。

海水中でCO₂は分子(や遊離炭酸)としてだけでなく重炭酸イオン(HCO₃⁻)や炭酸イオン(CO₃²⁻)として存在して、水温や塩分、水素イオン(H⁺)濃度の変化でそれら3つの存在比が変化するとともに、海洋生物物理化学的な効果により3つの形態の総和である

全炭酸(DIC)濃度が変化する。その過程を概説すると、海水に漂う植物プランクトンは光合成を行う際に、主にHCO₃⁻を取り込む(DIC濃度は低下する)ことで成長・増殖し、それを動物プランクトンや魚類が捕食する食物連鎖が成りたっている。さらに植物プランクトンを含む海洋生態系は呼吸によってCO₂を放出するとともに、死骸や排泄物などの有機物として表層や亜表層、深層で無機物へと分解され、硝酸塩などの栄養塩濃度やDIC濃度が上昇する。また、サンゴや円石藻などの一部の生物は炭酸カルシウムを生成して骨格を形成し、深層への沈降や海洋酸性化により溶解することでDIC濃度の変動に寄与している。海洋には数千年スケールで全球海洋の表層から深層を一巡する海洋大循環と呼ばれる循環が存在し、北大西洋の高緯度域や南極海(南大洋)で冷却され重くなった海水が深層へ沈み込み、大洋間を移動して多くが北太平洋高緯度域やエルニーニョで有名なペルー沖などで湧昇する。湧昇した水塊には栄養塩などを豊富に含むため、それを用いてブルー

受付：2021年11月2日，受理：2021年12月28日

* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2, E-mail: nakaoka.shinichiro@nies.go.jp

ミングとよばれる植物プランクトンの大増殖が引き起こされる。北太平洋やペルー沖が好漁場であるのは一連の循環が要因であり、太平洋域で大気・海洋CO₂観測を実施することが炭素循環を把握するためにも極めて重要であった。そこで国立環境研究所(国環研)では民間貨物船舶による協力の下、地球環境モニタリングの一環として洋上大気と海洋表層中の温室効果ガス観測を1995年から実施、継続している。民間貨物船舶をいわば「地球環境観測船」として活用する例としては、投下式の水温塩分計を使って鉛直分布構造を把握する観測やプランクトンレコーダーを曳航する観測などが知られているが、大気・海洋の温室効果ガス観測を長期間継続している例は珍しく、太平洋域のCO₂循環を把握する重要な観測の1つとして国際的にも認知されている。観測開始当初は日本とカナダの共同研究として開始した日本と北米間を結ぶ北米航路のみでの観測であったが、2001年にトヨタ自動車株式会社の自動車輸出を手がけるトヨフジ海運株式会社(トヨフジ海運)が参画して以降、日本とオーストラリア・ニュージーランドを結ぶオセアニア航路で大気・海洋表層観測を、日本と東南アジアを結ぶアジア航路で大気観測を実施して展開してきた。船舶による観測というと、気象庁や水産庁などの調査船による観測がまず思い浮かぶと思うが、研究調査船は学術調査の目的に適う海域で観測を行うため主に単発での観測航海に利用されており、運航経費の面からも長期的な高頻度観測には不向きである。これに対して貨物船舶では特定の海域を集中的に観測することは難しいものの、海運会社の協力を得ることができれば太平洋を広範囲にかつ高頻度に観測できることが大きな強みである。本稿では貨物船舶を用いたそれぞれの航路での観測について紹介するとともに、各国研究機関の協力の下誕生した海洋表層CO₂データベースと大気海洋間CO₂交換量研究について解説する。

2. 民間貨物船舶による大気・海洋温室効果ガス観測

2.1 新たな気液平衡器の開発と大気・海洋観測の開始

国環研による温室効果ガス観測は1990年に設置された地球環境研究センターによって検討が進められた。民間貨物船舶を用いた大気観測が1993年には開始されており、海洋表層の大気と海洋のCO₂観測を実現して時空間分布を把握する体制の構築が急務であった。そんな中、船舶観測の担当者であった野尻幸宏博士のもとにカナダ海洋科学研究所のC. S. Wong博士から「カナダと日本を往来するSeaboard International社の材木運搬船Skaugranで海洋表層CO₂観測を行いたいので日本側の責任者となって欲しい」と依頼があり日本とカナダの共同研究という形で観測が実施されることになった。しかし、民間

貨物船舶で海洋表層CO₂観測を行うには以下に述べる技術的な課題があった。

先に述べたとおり、海水中でCO₂は3つの形態で存在しており、以下の平衡関係が成り立っている。



大気海洋間CO₂の交換量を評価するには海水に溶解する分子状CO₂濃度(xCO₂)だけを測定し、以下の式で表されるCO₂分圧(pCO₂)を評価する必要がある。

$$p\text{CO}_2 = x\text{CO}_2 \cdot (P_{\text{atm}} - P_{\text{wv}}) \quad \dots (4)$$

ここでP_{atm}は大気圧、P_{wv}は飽和水蒸気圧である。そのために、海水中のxCO₂と同じ濃度をもつ空気を気液平衡器と呼ばれる装置を用いて生成することで、大気中CO₂濃度と同様に海水中xCO₂濃度を非分散型赤外分析計(NDIR)等で測定している。1990年代に国内外の機関で主に使用されていた気液平衡器はシャワー型平衡器と呼ばれるものであり、現在でも調査船で広く用いられている。シャワー型平衡器では、汲み上げられた海水が平衡器上部に据え付けたシャワーヘッドから導入され内部の空気と触れることで海水中の遊離炭酸と交換するが、シャワーから流下する海水が水面に落ちるまでの時間は1秒足らずで交換時間が短いため、平衡に達するまで接触する空気を循環させる必要がある。その際、導入される海水に含まれる溶存ガス量に変化してガス交換過程で内部圧力とともに平衡器内の水位が変化する。また海洋生物活動が活発な海域では汲み上げ海水中に含まれる生物がシャワーヘッドに溜まることで目詰まりを起こす。そのため平衡器内の水位やシャワーヘッドの状況を常時監視・メンテナンスする体制が必要となるが、貨物船舶での観測では観測経験のない船員にそのような作業をお願いするのは難しいため、可能な限りメンテナンスが必要のない観測システムを構築する必要がある。

試行錯誤の末に開発された現行の海洋観測システムの概略図を図1に示す。取水口から取り込まれた海水は、気液平衡器や水温塩分計(Seabird社製SBE45)、海水試料採取口の三方に分岐される。前述した通り、海水中でCO₂は水温変化により3つの形態の存在比が変化することから、水温計(2010年以前は約3ヶ月ごとにSeabird社製の水温塩分計で校正した白金測温抵抗体、2010年以降はSeabird社製SBE38)を取水口付近と気液平衡器の手前に取り付けて水温変化を監視し、pCO₂を補正している。気液平衡器では後述する方式で平衡空気が生成され、CO₂測定装置(紀本電子工業株式会社製MOG-701)

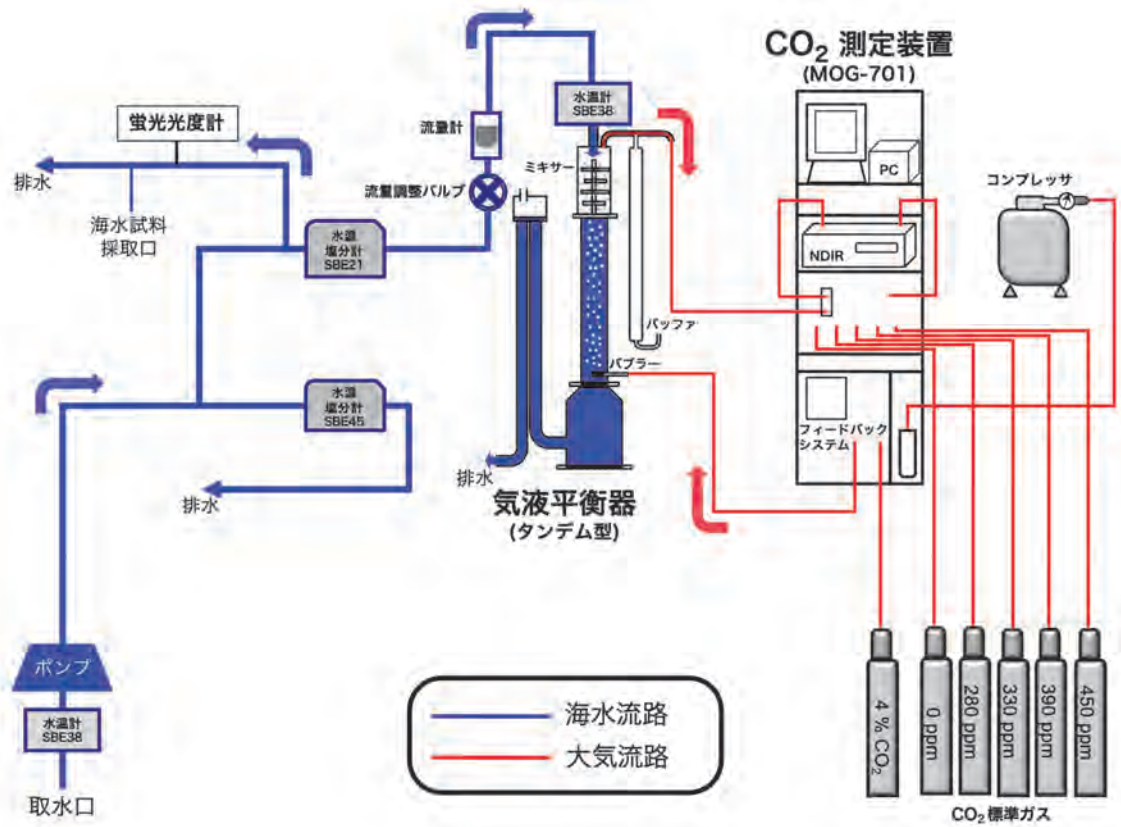


図1 貨物船舶で用いている海洋CO₂観測システムの概略図。

に搭載されたNDIR(Licor社製LI-7000)で10秒ごとにCO₂濃度が計測され、濃度を校正するために国環研で検定された4本の標準ガスとCO₂が含まれていないゼロガスが6時間ごとに導入される。さらにCO₂測定装置に搭載されたフィードバックシステムでは、直前に計測されたCO₂濃度とほぼ同濃度の空気を濃度4%のCO₂ガスとCO₂を除去した室内空気をを用いて生成し気液平衡器の下部から導入している。気液平衡器は下部にバブラーを、上部にミキサーを配置することからタンデム型と呼ばれている。タンデム型平衡器を用いるメリットは主に二点ある。一点目は効率的に平衡空気を生成できることである。タンデム型平衡器では毎分10リットル以上で導入された海水がミキサーに当たって飛沫となることで空気との接触面積を増やすとともに、フィードバックシステムで生成されバブラーから吐出する空気の泡が水面まで上昇する際にガス交換を行うため速やかに平衡に達している。本システムではこのような機構の為、空気を循環させる必要がなく、また気液平衡器の排水部で大気圧解放されるため平衡器内の圧力は基本的に室内とほぼ同じとなるため、水位変化が起きにくい。二点目は海水を飛沫化させるためにシャワーヘッドを用いないことである。これによりシャワーヘッドに生物由来物質が付着することで引き起こされる目詰まりを防止できる。タンデム型平衡器はシャワー型と比べてサイズが大きい為、設置場所が限られる調査船には不向

きであるが、比較的設置スペースに余裕もてる貨物船舶においてはメンテナンスをほとんど必要とすることなく測定できるメリットを活かすことができる。さらに本観測システムには漏水検知機構も合わせて備えることで、万が一漏水が起きても給水を自動的に停止し貨物船舶の運航に支障が生じないように設計されている。このように国環研の貨物船舶システムは、航行中のメンテナンスがほとんど必要ない観測体制を構築し、観測開始以来25年以上大きな事故を起こすことなく継続できている。

海洋観測の項目としては、CO₂以外にも船底から汲み上げる海水の水温や平衡器内水温、塩分を従来から連続測定しており、現在は海水中の蛍光高度、硝酸塩濃度、酸素濃度等の連続観測にも取り組んでいる。採水観測については1日3回程程度の栄養塩濃度、クロロフィル濃度向け採水を従来から実施しており、現在は上述に加えて、北太平洋航路において炭酸系パラメータの1つとなっている、海水に溶解する陽イオンと陰イオンの電荷量の差として規定されるアルカリ度について採水観測を実施している。大気観測システムでは船首に設けられた大気採集口から導入されパーマピュアドライや電子除湿機などで除湿された大気試料をNDIRや他成分の連続測定装置で計測して標準ガスで校正するとともに、目的の海域で大気採集ボトルを用いてサンプリングを実施している。連続的な大気観測では、CO₂濃度、オゾン濃度、気象(気温、湿度、気圧)の項目について

は当初より行なっており、現在は酸素濃度やメタン濃度、一酸化炭素濃度の連続測定にも取り組んでいる。大気サンプリング観測では、目的の海域で金属とガラスのボトル容器を用いて連続観測を行なっているガス成分の他にも二酸化窒素や六フッ化硫黄、CO₂の炭素同位体比等について、容器を研究所に持ち帰り測定している。

2.2 貨物船舶観測の変遷

国環研ではこれまでに計10隻の貨物船舶に協力をいただき、先に経緯を述べた北太平洋航路観測のみならずオセアニア航路や東南アジア航路でも観測を実現させ発展してきた。図2に2021年12月現在で観測を行っている貨物船舶の写真とこれまでに実施された観測航路を、表1に各航路での観測概要を示す。ここでは、各航路での観測に至る経緯や、担当船舶による観測活動について紹介する。

2.2.1 北太平洋航路

北太平洋を航海する船、Skaugran ではシャワー型

と開発途中の平衡器を載せて並行運転していたこともあり、野尻博士や業務請負業者の職員、アルバイトの学生らが常時2名乗船し観測を維持した。観測を終了した1999年10月までの4年半で36往復もの高頻度観測を実施することができた。Skaugran に設置した観測システムは自動化という点で不完全であったため、完全自動化した観測システムに改良し、Skaugran の航路変更に伴って同航路での観測を担うことになった株式会社商船三井のコンテナ船 Aligator Hope に設置した。改良した観測システムでは船首に設置した大気観測室と船底の海洋観測室を光ファイバーケーブルで結ぶことで、アクセスし難い海洋観測室の測器状況を把握することが可能となった。また観測制御装置の時刻をGPS情報で同期可能としたことで時刻合わせ作業やデータ処理を行う際の作業が軽減し利便性が向上した。そこで Aligator Hope では職員や学生ら2名による観測維持のための乗船体制から、観測専用の船員1名を配置

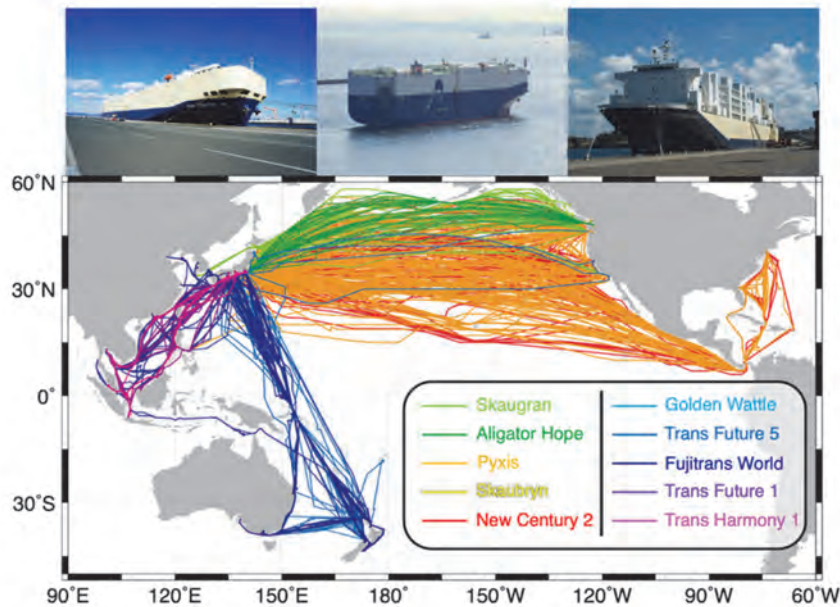


図2 現在観測を実施している貨物船舶 New Century 2(左上), Trans Future 5(中央上), Fujitrans World(右上)と1995年3月から2021年9月までに実施された各船舶での観測航路図。

表1 各航路における観測概要(期間, 船名, 運航会社, 観測項目)。

航路	観測期間	船名	運航会社	観測項目
北太平洋	1995.3~1999.9	Skaugran	Seaboard International Co. Ltd.	大気・海洋
北太平洋	1999.11~2001.4	Aligator Hope	(株)商船三井	大気・海洋
北太平洋(北大西洋)	2001.11~2013.4	Pyxis	トヨフジ海運(株)	大気・海洋
北太平洋	2005.5~2010.7	Skaubryn	Seaboard International Co. Ltd.	大気
北太平洋(北大西洋)	2014.4~	New Century 2	トヨフジ海運(株)	大気・海洋
オセアニア	2001.10~2002.5	Golden Wattle	(株)商船三井	大気・海洋
オセアニア	2003.2~2005.11	Fujitrans World	トヨフジ海運(株)	大気
オセアニア	2015.11~2017.3	Fujitrans World	トヨフジ海運(株)	大気
オセアニア	2005.11~	Trans Future 5	トヨフジ海運(株)	大気・海洋
東南アジア	2007.9~2015.10	Fujitrans World	トヨフジ海運(株)	大気
東南アジア	2018.3~2019.5	Trans Future 1	トヨフジ海運(株)	大気
東南アジア	2019.5~	Trans Harmony 1	トヨフジ海運(株)	大気

する体制へと切り替え、省力化と維持経費削減を図った。このようにして Aligator Hope は順調に観測を開始することができたが、航路変更により 16 往復で北太平洋航路での観測を終了することとなった。その後 Aligator Hope は Golden Wattle と船名を変更して、日本-オーストラリア間での観測を行なったが、5 往復の航海後に再び航路変更となったためその後の観測を停止することとなった。

観測を担っていた 2 隻の貨物船舶が航路変更した経緯を踏まえ、観測を安定的に継続するために航路変更の可能性が低い貨物船舶を検討した結果、日本の自動車を生産する自動車運搬船が最も航路が安定していることが分かった。そこで野尻博士がトヨタ自動車株式会社に相談したところ、関連会社であるトヨフジ海運の協力の下、自動車運搬船 Pyxis で観測を行えることとなった。Pyxis ではブリッジ後方の無線室を大気観測室として、船底の軸室を海洋観測室として利用し、両観測室を光ファイバーケーブルで結んだ。大気観測室にはデータサーバを設置し、大気観測装置だけでなく海洋観測装置による観測データも収録することで、リアルタイムにグラフを描画することが可能となった。さらに、グラフ出力結果を衛星回線によってメール配信することで次回訪船時に必要なメンテナンスを予め想定することが可能となり、帰港時の訪船作業を大幅に効率化することに成功した。これ以降に整備した船舶での観測には本システムが採用されている。Pyxis は 2001 年から 2013 年までに 94 航海もの大気・海洋観測を実施したが、高船齢に伴う廃船が検討されていたタイミングで同社が運航する New Century 2 に交代した。New Century 2 では電気室の一隅を大気観測室として利用することで Pyxis よりも広いスペースを確保できたため、従来型の CO₂ 計やオゾン計に加えて高精度酸素計や新型の多成分温室効果ガス観測機器などを設置することが可能となった。Pyxis での観測終了から New Century 2 での観測再開までには 1 年近くの時間を要したが、2014 年に観測を再開して以降、2021 年末までに 60 往復以上の観測を実施している。これまでの北米航路船舶の主な海外寄港地はバンクーバー(カナダ)、シアトル(米国)、サンフランシスコ(米国)、ロサンゼルス(米国)であり、トヨフジ海運の自動車運搬船が担当することになって以降、上述の寄港地の他に東海岸のジャクソンビル(米国)やニューアーク(米国)にも寄港し、北大西洋域でも観測を行うようになった。1 航海に要する期間は西海岸の都市に寄港する航路で約 4 週間、東海岸の航路で約 8 週間となっており、近年は年間平均 8 往復程度の観測を実施している。北太平洋航路ではこの他にも Skaugran の姉妹船であった Skaubryn が 2005 年 5 月から 2010 年 7 月まで大気観測を行った。

2.2.2 オセアニア航路

オセアニア航路での大気観測は 2003 年からトヨフジ海運が運航する Fujitrans World にて実施した後、2005 年 11 月からはトヨフジ海運が新たに建造した Trans Future 5 を用いての大気観測が開始された。なお、Fujitrans World は航路変更により 2015 年～2017 年にも同航路で大気観測を実施した。Trans Future 5 による観測や後述する東南アジア航路での観測は、第 3 回地球観測サミットで承認された全球地球観測システム(Global Earth Observation System of Systems: GEOSS)10 年実施計画に基づいており、日本による GEOSS への積極的な貢献として、観測が乏しいアジア・オセアニア域での観測強化の一環で実現した。GEOSS や文部科学省による「地球観測システム構築推進プラン」事業等の積極的な支援を受け、新造船の Trans Future 5 では専用の大気観測室として十分なスペースを確保し、温室効果ガスだけでなく大気中酸素濃度の連続観測を観測初期から開始できた。また、海洋観測システムを船底軸室に整備し、当時北太平洋航路観測を担っていた Pyxis と同等の観測体制を構築した。Trans Future 5 の主な寄港地は大阪、名古屋、川崎、メルボルン(豪)、ブリスベン(豪)、オークランド(NZ)、ネルソン(NZ)であり、1 航海 6 週間で周回しており、就航から 2021 年末までに 130 往復以上の観測を実施している。

2.2.3 東南アジア航路

オセアニア航路と並び GEOSS10 年実施計画の一環で実現した東南アジア航路船舶での大気観測は、大気観測の実績があった Fujitrans World が担うこととなり 2007 年 9 月から開始した。さらに 2010 年 11 月からは Trans Future 1 も加わることで 2 隻体制での高頻度観測を実現したが、観測予算の縮減や観測保守のための人的資源不足の影響もあり Trans Future 1 での観測は 2014 年 3 月で終了することになった。さらに Fujitrans World は 2015 年以降たびたびオセアニア等への航路変更を余儀なくされ、安定的な観測継続が難しくなった。そこでトヨフジ海運の新造船である Trans Harmony 1 に大気観測室を整備し 2018 年 3 月から同航路での大気観測を開始したが、中国をはじめとする東アジア域での自動車需要の増加により航路変更となり、同航路に復帰した Fujitrans World が 2019 年 5 月から再び同航路での観測を担っている。東南アジア航路船舶の主な寄港地は名古屋、横浜、シンガポール、ジャカルタ(インドネシア)、バタンガス(フィリピン)であり、1 航海 4 週間で周回している。

2.3 観測成果とこれからの船舶観測

上述した観測から、温室効果ガスの挙動に関して多くの知見を得ることができた。大気観測においては東南アジア航路船舶観測によって、マレーシア沖やインドネシア沖に存在する油井・ガス井からのメ

タン漏出量をこれまでより精緻に評価した(Nara *et al.*, 2014)。また、エルニーニョ期であった2015年に東南アジア域で起こった大規模な森林火災について、船舶観測とCONTRAILプロジェクトによる航空機観測により得られた大気CO₂濃度分布を基に、逆解析手法を用いてCO₂排出量を評価し、わずか2ヶ月で日本の年間排出量に匹敵するCO₂が放出されたことを突き止めた(Niwa *et al.*, 2021)。さらに、人工衛星GOSATによる温室効果ガス観測データの検証にも役立てられており、陸上と洋上でのCO₂気柱(カラム)量の推定に異なる系統差が存在することを見出した(Müller *et al.*, 2021)。海洋観測においてはpCO₂データと、海面水温、塩分、クロロフィル濃度のデータをニューラルネットワーク手法で関連付け、観測が行われていない海域や時期のpCO₂分布を2002年から2008年まで1日ごと、0.25°四方の高時空間解像度で再現し、pCO₂やpCO₂から推定されるDIC濃度の時空間分布の年々変動がエルニーニョ南方振動や太平洋10年規模振動などの気候変動によるものであることを明らかにした(Nakaoka *et al.*, 2013; Yasunaka *et al.*, 2013)。また、貨物船舶が高頻度で日本に寄港することを活かし、東京湾や大阪湾、伊勢湾などの都市域内湾域での海洋によるCO₂吸収量を推定し、活発な海洋生物活動が当該湾内のCO₂吸収促進に貢献していることを見出した(Tokoro *et al.*, 2021)。

貨物船舶による観測は、これまでリーマンショックや、新型コロナパンデミック、半導体不足による自動車輸出の減退など世界経済状況の影響を受けてきたが、その中でも各地域間を継続的に往来することで貴重な地球環境観測データを取得しており、国環研の温室効果ガス研究を支える大きな柱の1つとなっている。さらに2022年からはGOSATによる温室効果ガス観測検証や日本のCO₂排出量評価を目的とした国内航路船舶観測を行うことにしておりその成果も期待される。

3. CO₂観測データの共有と全球海洋CO₂吸収量評価

3.1 CO₂観測データ公開と国際データベースSOCATへの貢献

国環研による洋上大気と表層海水中のCO₂観測データは、濃度確定後速やかに国環研の海洋CO₂データベースサイト(<http://soop.jp>)やデータ統合・解析システム(DIAS: Data Integration and Analysis System; <https://diasjp.net>)等に登録されており、また、海洋CO₂観測データについては海洋表層CO₂アトラス(SOCAT: Surface Ocean CO₂ Atlas; <https://www.socat.info>)と呼ばれる国際データベースに提出している。SOCATは国連教育科学文化機関/政府間海洋学委員会(UNESCO/IOC)と国際科学会議/海洋

研究委員会(ICSU/SCOR)が設立した国際海洋炭素共同プロジェクト(IOCCP: International Ocean Carbon Coordination Project)が2007年4月に立ち上げたボランティアベースの組織であり、それまで個々の研究者が収集し、利用していた海洋pCO₂観測データを、SOCATが規定したCookbookと呼ばれる統一指針に基づいて客観的にpCO₂データの品質認定を行った上でデータベースに統合し、定期的に更新しながら公開・配布することを狙いとしている。国環研はSOCATの発足以来、北太平洋域(北緯30度以北)の海域責任機関として全てのpCO₂観測データの品質認定を行っている。品質認定は航海ごとの観測データとメタデータと呼ばれる測定項目に関する情報(観測時期、観測地域、観測項目、観測方法、標準ガスの使用本数と濃度情報の明示有無、それぞれの観測装置の精度)を対象としてなされており、海洋表層pCO₂データの他、大気圧や海面水温、塩分、平衡器水温、平衡器気圧の観測データについて異常値がないか確認するとともに、メタデータの記述内容をCookbookに照らし合わせて品質の良い順からA~F, S, Xのフラグ付けを行う。CookbookではxCO₂を測定する手法や導入する標準ガスの本数、水温、塩分、圧力の測定精度を規定しており、観測データに問題がなくメタデータの記述が完全で、必要とされる7項目の基準を満たしていれば測定誤差は2 μatm以下であると評価されフラグBとなり、高品質なデータとして認定される。一部の規定は満たさないがメタデータ・観測データともに問題がなければ測定誤差は5 μatm以下と評価されフラグC、一部の規定を満たさずメタデータの記述にも不備があるが観測データ自体に問題がなければ測定誤差は5 μatm以下と評価されフラグD、センサーによる測定データは測定誤差が10 μatm以下であると評価されフラグE、観測データそのものに不備があればフラグF(Failure)、不備があるもののデータ更新予定であればフラグS(Suspend)、観測データが重複していればフラグX(exclude)とされる。フラグAは、同時期に近い海域で観測された(クロスオーバー)データがあり、品質認定済みのデータ同士で観測データの妥当性が確認された場合にのみ付与される。この品質認定において国環研による貨物船舶観測データのほとんどがフラグBやAを得ており、高品質な観測であると評価されている。SOCATは上記の品質認定プロセスを経てデータ公開がなされており、2011年9月に第1.5版が初めて一般向けに公開された(Pfeil *et al.*, 2011)。続いて2013年6月に第2版が、2015年9月に第3版が公開され、それ以降は毎年新版がリリースされている(Bakker *et al.*, 2016)。これは、持続可能な地球社会の実現をめざす国際協働研究プラットフォームFuture Earthの研究プロジェクトGlobal Carbon Projectの全球収支報告書Global Carbon Budget年次レポートに観測デー

タに基づいた最新の海洋 CO₂ 吸収量評価を反映させるためである。さらに SOCAT のバージョン名は 2019 年からは西暦年に改められ、本稿執筆時点の最新版である 2021 年版は 2021 年 6 月に公開された。本版には 1957 年から 2020 年末までの観測データ 6,752 航海分、約 3,270 万点が収録されており、その中に国環研の観測データが 794 航海分、約 98 万点のデータが含まれている。SOCAT 全体に占める国環研の航海数が 10% を超える一方、国環研の観測データ数が全体の約 3% となっているのは、国環研がデータの扱いやすさと記憶媒体の容量逼迫を避けるためにデータ確定を行う際の時間間隔をこれまで 10 分としてきたためであるが、2021 年 4 月以降の観測データからは主要機関の観測データ方式と足並みを揃え 1 分値でデータ確定を行い SOCAT に提出することとしている。SOCAT 2021 年版に収録された pCO₂ 観測データの年分布と月分布をそれぞれ図 3 に示す。これらの図から、多くの海域で pCO₂

観測が行われているものの、北半球に比べて南半球での観測例が少ないこと、近年のインド洋での観測が太平洋や大西洋と比べて極端に少ないことを示している(図 3(a))。さらに、盛んに観測が行われている南大洋では夏季(12 月~2 月)に観測が集中し、観測航海が難しい冬季(6 月~8 月)の観測データが少ないことが図 3(b) から分かる。海洋による CO₂ 吸収量推定の不確実性には、低頻度観測域の存在や観測季節の偏在が影響を与えていると考えられている。

3.2 Global Carbon Budget による全球海洋 CO₂ 吸収量評価

前節で示した時空間的にまばらな pCO₂ 観測データから全球の CO₂ 吸収量を評価するためには、pCO₂ 観測データを何らかの手法を用いて時空間的に補間し、データ欠損がない pCO₂ データセットを作成する必要がある。また、海洋が CO₂ を吸収または放出しているかを評価するには、以下の式を用いて各領

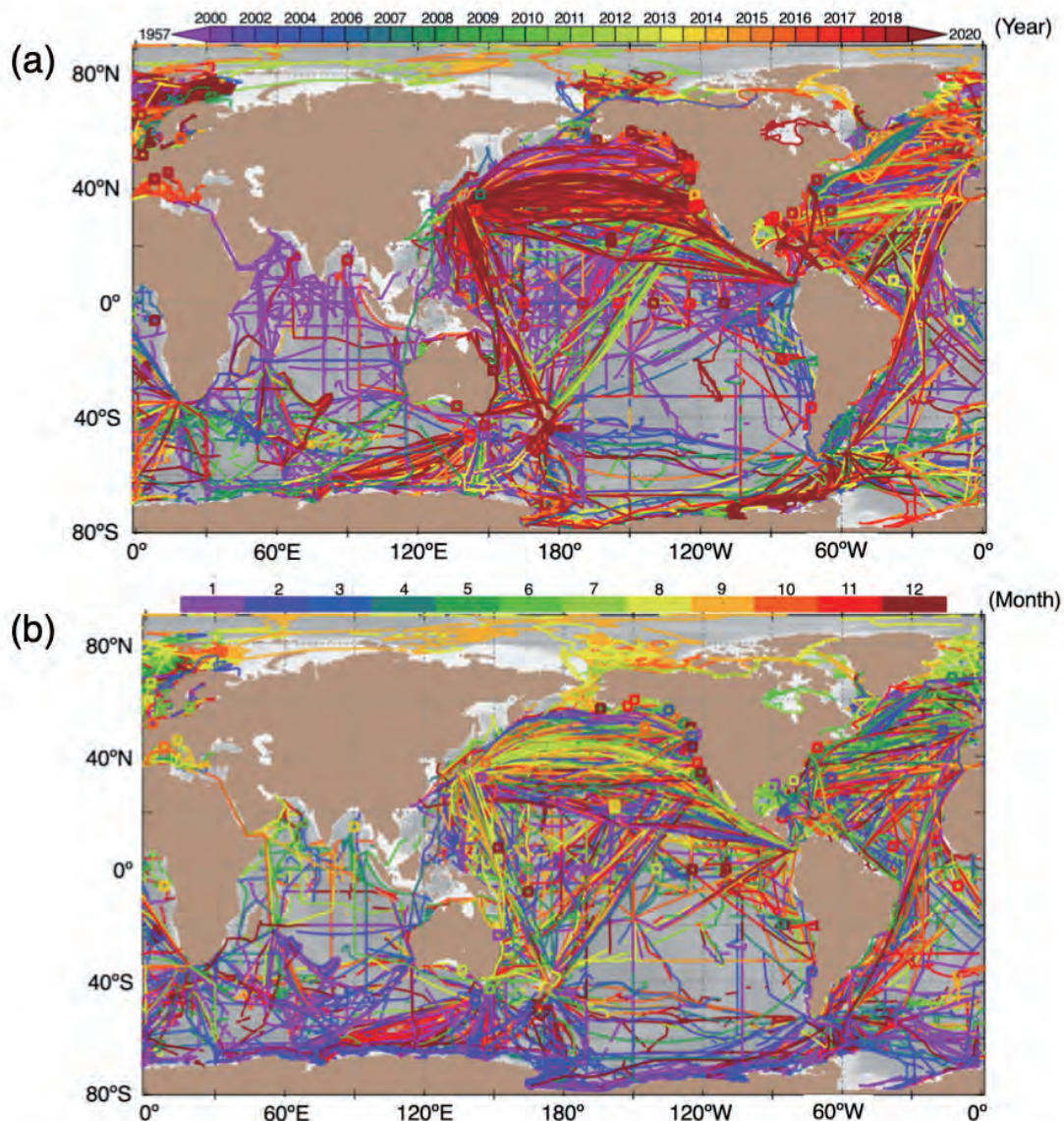


図 3 SOCAT 2021 年版に収録された pCO₂ 観測データの年分布 (a) と月分布 (b)。それぞれの図の色が観測西暦年 (a) と月 (b) を表している。また実線は船舶、四角は固定ブイによる観測を表している。

域(格子点)での単位面積当たりのCO₂フラックス F を以下の式を用いて求める必要がある。

$$F = k \cdot L \cdot (p\text{CO}_2^{\text{air}} - p\text{CO}_2) \quad \dots (5)$$

ここで k は海上10mの風速の関数であり(例えば, Wanninkhof, 1992), L は水温と塩分から計算される海水のCO₂溶解度(Waiss *et al.*, 1974), $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ は大気中CO₂分圧である。

SOCATによるデータ公開が始まった2011年頃を境にして海洋観測に基づいた海洋CO₂吸収量の評価は大きく発展した。例えばTakahashi *et al.* (2009)は多くの研究機関から独自に収集した観測データを内外挿する輸送モデルを開発・適用し、非エルニーニョ期における長期平均的な月ごとの全球 $p\text{CO}_2$ 分布と大気海洋間CO₂フラックス分布を推定して海洋CO₂吸収量を評価した。一方, Rödenbeck *et al.* (2013)は大気中CO₂濃度の変動からフラックス推定を行う逆推定手法を拡張して海洋に適用し、全球 $p\text{CO}_2$ 分布やCO₂フラックス分布の年々変動を再現することに初めて成功し、その後もニューラルネットワーク手法(Landschützer *et al.*, 2016)による推定など多くの推定手法が提案されている。Global Carbon Budget 2020(Friedlingstein *et al.*, 2020)には、海洋観測に基づく推定として上述したRödenbeck *et al.* (2013)やLandschützer *et al.* (2016)による推定など5つの推定結果が採用されている。また海洋モデルでは9つの推定結果がGlobal Carbon Budget 2020に採用されている(e.g. Doney *et al.*, 2009)。図4に海洋観測及び海洋モデルに基づく全球海洋のCO₂吸収量の時系列変化を示す。まず両者の推定ともに海洋によるCO₂吸収が年々増加していることが分かる。

また、海洋観測に基づく推定は海洋モデルによる推定よりも吸収量を大きく見積もっているが、1980年代から2000年代初頭までは両者の差がほぼ一定であったのに対して、それ以降は徐々に差が広がっており、近年ではその差が年間あたり1PgC(Pg=10¹⁵g)に迫っていることが分かる。その原因の1つは、特に南大洋において現場とモデルに基づいて推定されたCO₂吸収量の明瞭な不整合と指摘されており(Friedlingstein *et al.*, 2020)、海洋観測に基づく推定では前節で指摘した南大洋における冬季観測データの充実が課題の1つである。いずれにしても海洋CO₂吸収量は、人間活動によって増え続ける大気中CO₂濃度に呼応して増加の一途を辿っており、海洋温暖化だけでなく海洋酸性化がますます深刻化することが想定される。また海洋温暖化によって炭酸の平衡関係が変化し xCO_2 が増加($\text{HCO}_3^- \cdot \text{CO}_3^{2-}$ が低下)することで、大気中のCO₂濃度が増加しても海洋CO₂吸収が今後抑制される可能性が考えられる。さらに、カーボンニュートラル社会が実現し将来的に大気CO₂濃度が減少する際には、それに呼応して海洋がこれまで蓄積してきたCO₂を放出することが考えられるため、温室効果ガス排出削減に伴う温暖化の緩和が期待通りには進まない可能性も、今後詳細に検討する必要がある。このように、海洋におけるCO₂の挙動は今後の気候変動を予測する上で重要な要素である。その挙動を把握するためには、今後も貨物船舶や調査船による高精度観測を継続するとともに、海洋物理生物化学パラメータの3次元観測を可能にするBiogeochemical Argoのような新しい観測プラットフォーム技術を発展・駆使して海洋表層から深層に至る物理的・化学的・生物的な変化を可能な限り網羅的に監視していく必要がある。

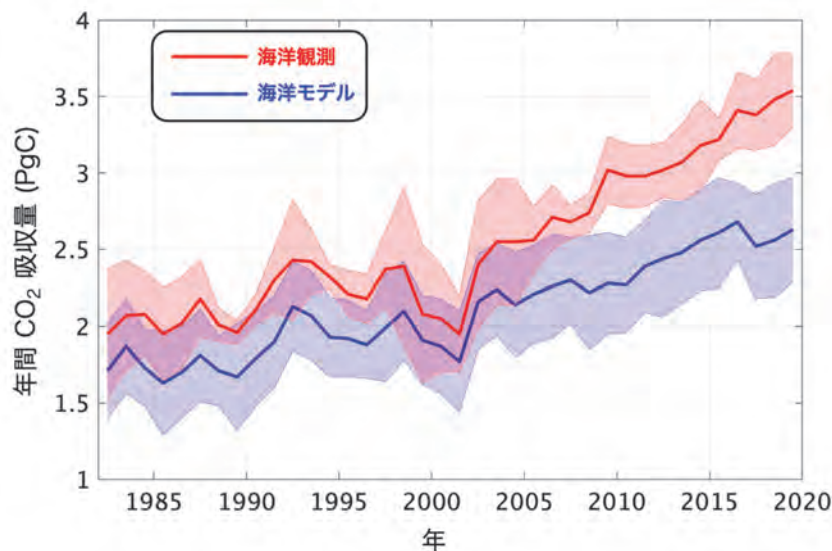


図4 海洋観測(赤線)と海洋モデル(青線)に基づいて評価した全球海洋の年間CO₂吸収量の時間変化。

縦軸の単位PgCは10¹⁵g(炭素換算)であることを意味しており、値が大きいほど海洋が強くCO₂を吸収している。それぞれの影の領域は推定手法間の評価結果のばらつき(標準偏差)を表す。本グラフはGlobal Carbon Budget 2020(Friedlingstein *et al.*, 2020)の海洋CO₂吸収量データに基づき著者が作成した。

4. まとめ

本稿では、国環研が民間貨物船舶の協力を得て北太平洋航路、オセアニア航路、東南アジア航路で実施している大気海洋温室効果ガス観測について紹介するとともに、観測データの国際共有とそれを利用した全球海洋 CO₂ 吸収量評価について解説した。大気観測においては、バックグラウンド大気中の温室効果ガス濃度の推移を把握するだけでなく、泥炭・森林火災による CO₂ 放出や油井・ガス井からの CH₄ 漏出を把握できる貴重なプラットフォームとなり、人工衛星 GOSAT による温室効果ガス観測データの検証にも有用であることが示された。また、海洋観測においては太平洋を高頻度で横断・縦断する観測データを生かし、北太平洋の pCO₂ 分布・全無機炭酸濃度分布を再現して気候変動による応答を明らかにするとともに、東京湾をはじめとする日本の都市内湾の CO₂ 吸収量と海洋生物活動による寄与を評価した。pCO₂ の観測データベース SOCAT において国環研は単なる観測データの提供機関に留まらず、北太平洋域で観測されたデータの品質認定責任機関として活動しており、観測精度向上のため必要に応じてデータ提出機関への助言や支援を行っている。さらに、国環研は SOCAT での活動を通して Global Carbon Budget 年次レポートによる海洋 CO₂ 吸収量の評価にも貢献している。海洋観測に基づく推定と海洋モデルによる CO₂ 吸収量評価には無視できない不一致が存在しており、今後の技術発展を伴う観測の充実や海洋モデルの精緻化による評価精度の向上に取り組む必要がある。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり、野尻幸宏博士(現：弘前大学教授)、向井人史博士(現：国立環境研究所気候変動適応センター長)、谷本浩志博士(現：国立環境研究所地球システム領域大気化学研究室長)から情報提供を頂いた。またこれまで貨物船舶観測を実施・継続するにあたり、Seaboard International 社、株式会社商船三井、トヨフジ海運株式会社、鹿児島船舶株式会社、各船舶の船長、船員の皆さまに多大なるご支援を賜り、厚く感謝申し上げます。

引用文献

- Bakker, D. C. E., Pfeil, B., Landa, C. S., Metzl, N., O'Brien, K. M., et al. (2016) A multi-decade record of high-quality *f*CO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data*, 8, 383–413. <https://doi.org/10.5194/essd-8-383-2016>
- Doney, S., Lima, I., Feely, R. A., Glover, D. M., Lindsay, K., et al. (2009) Mechanisms governing interannual variability in upper-ocean inorganic carbon system and air–sea CO₂ fluxes: Physical climate and atmospheric dust. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 56(8–10), 640–655. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.006>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., et al. (2020) Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12, 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Landschützer, P., Gruber, N., and Bakker, D. (2016) Decadal variations and trends of the global ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1396–1417. <https://doi.org/10.1002/2015gb005359>
- Müller, A., Tanimoto, H., Sugita, T., Machida, T., Nakaoka, S., et al. (2021) New approach to evaluate satellite-derived XCO₂ over oceans by integrating ship and aircraft observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 8255–8271. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8255-2021>
- Nakaoka, S., Telszewski, M., Nojiri, Y., Yasunaka, S., Miyazaki, C., Mukai, H., and Usui, N. (2013) Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO₂ in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique. *Biogeosciences*, 10, 6093–6106. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6093-2013>
- Nara, H., Tanimoto, H., Tohjima, Y., Mukai, H., Nojiri, Y., and Machida, T. (2014) Emissions of methane from offshore oil and gas platforms in Southeast Asia. *Scientific Reports*, 4, 6503. <https://doi.org/10.1038/srep06503>
- Niwa, Y., Sawa, Y., Nara, H., Machida, T., Matsueda, H., et al. (2021) Estimation of fire-induced carbon emissions from Equatorial Asia in 2015 using in situ aircraft and ship observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 9455–9473. <https://doi.org/10.5194/acp-21-9455-2021>
- Orr, J., Fabry, V., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S., et al. (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, 681–686. <https://doi.org/10.1038/nature04095>
- Pfeil, B., Olsen, A., Bakker, D. C. E., Hankin, S., Koyuk, H., et al. (2013) A uniform, quality controlled Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data*, 5, 125–143. <https://doi.org/10.5194/essd-5-125-2013>
- Rödenbeck, C., Keeling, R. F., Bakker, D. C. E., Metzl, N., Olsen, A., Sabine, C., and Heimann, M. (2013) Global surface-ocean pCO₂ and sea–air CO₂ flux variability from an observation-driven ocean

mixed-layer scheme. *Ocean Science*, 9, 193–216. <https://doi.org/10.5194/os-9-193-2013>

- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., et al. (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea–air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 56(8–10), 554–577. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>
- Tokoro, S., Nakaoka, S., Takao, S., Kuwae, T., Kubo, A., Endo, T., and Nojiri, Y. (2021) Contribution of biological effects to carbonate-system variations and the air–water CO₂ flux in urbanized bays in Japan. *Journal of Geophysical Research*, 126(6), e2020JC016974. <https://doi.org/10.1029/2020JC016974>
- Wanninkhof, R. (1992) Relation between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97, 7373–7383.
- Weiss, R. (1974) Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 2, 203–215.
- Yasunaka, S., Nojiri, Y., Nakaoka, S., Ono, T., Mukai, H., and Usui, N. (2013) Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal variation. *Journal of Geophysical Research*, 118(8), 3843–3850. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20279>



中岡 慎一郎/Shin-ichiro NAKAOKA

国立環境研究所地球システム領域主任研究員。茨城県出身。東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻修了、博士(理学)。国立極地研究所特任研究員、国立環境研究所特別研究員、同研究員を経て現職。専門は大気・海洋温室効果ガス観測による物質循環研究で、海洋表層 CO₂ 分圧と大気海洋間 CO₂ フラックスの広域分布推定及び時空間変動要因の把握に取り組んでいる。



高尾 信太郎/Shintaro TAKAO

国立環境研究所地球システム領域主任研究員。富山県出身。北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻修了、博士(環境科学)。北海道大学博士研究員、国立極地研究所助教、国立環境研究所研究員を経て現職。専門は生物海洋学、衛星海洋学。船舶観測に加えて、衛星観測、数値モデリングを組み合わせた、多角的な観点から海洋における物質循環の把握に取り組んでいる。