

1 西部北太平洋の生物地球化学的時系列観測

本多牧生



2019年(令和元年)5月24日～6月14日に実施されたMR19-02航海では、新元号を祝して係留系に用いるガラス球を並べて「令和」の文字をつくった(実はフェイク画像)。

はじめに

現在、大気中で増加する二酸化炭素による地球“沸騰”化が環境や生態系を破壊しつつあることが、地球規模で問題となっている。地球表面の約70%を占める海洋は人類が毎年放出している二酸化炭素の約4分の1を吸収しているとともに、これまでに大気中に蓄積されてきた二酸化炭素の約60倍の二酸化炭素を貯蔵してきた。よって海洋が大気中の二酸化炭素量を制御してくれていると言っても過言ではない。ただし海洋の二酸化炭素吸収能力は大きく時空間変動する。加えて近年の地球環境変化に伴う、海洋温暖化・酸性化・貧酸素化により海洋の二酸化炭素吸収能力が大きく低下することが懸念されている。よって海洋の二酸化炭素吸収能力を精査し、将来変化を予測するためには、様々な海域で二酸化炭素を含む物質の大気—海洋間、海洋内動態を時系列的に観測する必要がある。

西部北太平洋亜寒帯域は深層水大循環の終着点にあたり深層水の持つ豊富な栄養塩が海洋表層に供給されるため生物生産力が高く、国内外の大学や研究機関の調査により、生物活動に伴う二酸化炭素吸収能力が高い海域と考えられてきた。しかし観測や調査は単発的なものが多く、系統だった時系列的な観測研究は行われてこなかった。JAMSTECでは同海域の二酸化炭素をはじめとする様々な物質の大気—海洋間および海洋内での動態を精査するために、「みらい」の就航とともに同海域および西部北太平洋亜熱帯海域に観測定点を設置して、各測点を中心とした生物地球化学的時系列観測研究を行ってきた。輝かしい「みらい」の歴史は、1997年11～12月の我々のMR97-02航海で幕を開けた(図1)。以下は過去約30年間に於いて実施された生物地球化学的時系列観測研究航海を当時の中心的な研究プロジェクト、研究テーマごとにまとめて回顧する。

KNOTプロジェクト(1997～2000年)

1980年代になり大気中で増加する二酸化炭素による地球温暖化が世界的に問題視され始め、海洋による大気中二酸化炭素の吸収能力が注目され始めた。そこで地球規模での炭素循環や気候変動に対する海洋の役割を理解するために、多くの国際機関や科学者により1987年から2003年にかけて国際的な海洋生物地球化学研究プログラムJoint Global Ocean Flux Study(JGOFS)が実施された。米国JGOFSチームは北部北大西洋、赤道域、インド洋、南極海などで、それぞれ数年間、観測船や係留系を用いた生物地球化学観測研究を行った。これに対し日本JGOFSチームでは西部北太平洋の炭素循環や気候変動に対する海洋の役割を理解することを目的に、大学、国立研究所が共同して北太平洋プロセス研究(NPPS)を



図1 MR97-02航海集合写真。「みらい」の歴史ここに始まる。

実施することになった。そして観測定点として西部北太平洋亜寒帯循環(NPSAG)南西縁に観測定点KNOT(北緯44度/東経155度)が設置され、1997～2000年に様々な観測船および係留系により同地点の生物地球化学的時系列観測研究、通称KNOTプロジェクト、を行うこととなった。ちなみにKNOTとはKyodo(共同)North Pacific Ocean Time-series stationの頭字語である。最初の文字が日本語由来というのは、いくら委員会の後の酒の席とはいえ日本を代表する大学教員や国立研究所主任研究員クラスが命名したのだから少々おそまつな話である(閑話休題)。

定点観測(再訪観測)には北海道大学の北星丸、東海大学の望星丸や東京大学(当時)の白鳳丸も使用されたが、就航したばかりの「みらい」は海洋観測、特に荒天が多く海況が悪い秋季・冬季観測の中心的存在であった。総トン数約8,700トンは国内最大、世界でも最大級の観測船、そして約100トンの重錘がレール上を移動することで船のローリングを抑える「減揺装置」搭載により荒天域での長期間の観測を可能にした。研究者・観測技術員40名超の同時乗船が可能であり、「浮かぶ実験室」と呼ばれるように広い実験室に栄養塩、全炭酸、色素測定装置、質量分析装置および二酸化炭素測定装置、表層連続モニター装置などの分析装置が常設されているため航海中に精度の高いデータ取得が可能となった。また第1・第2ブイ格納庫のおかげで、屋内での各種観測装置の整備が可能であるとともに、多くの観測資材機材の搭載が可能であった。そしてJAMSTECのほかの船と異なり、木甲板であったため足にやさしく、夏の灼熱甲板を回避することができた。さらに広い甲板、多くの作業用ウインチ、高いAフレームのおかげでセジメントトラップ係留系をはじめとする各種係留系や漂流系の設置・回収作業を迅速に、かつ安全に実施することができた。

1999年5月に行われたMR99-K02航海では、植物色素(クロロフィル)濃度にして10mg/m³以上という外洋域では極めて珍しい植物プランクトンの大増殖(春季ブルーム)海域に遭遇し、そこで集中観測が行われた。結

果、植物プランクトンの増減に伴う基礎生産力の変化および海水中二酸化炭素濃度の変化を精密測定することに成功した。国立研究所から参加した主任研究員は珍しい春季ブルーム内での観測に大興奮、その勢いでスケジュールにない停船そして採水を深夜にもかかわらず要求し、首席研究者や船長を困らせた。2000年1～2月のMR00-K01航海は、甲板に雪が積もり、除雪そして滑りやすい甲板上での観測作業を強いられた。基礎生産力、浅層水深の沈降粒子捕集のための漂流系は日の出直前の投入が必要であった。日の出前、体感温度マイナス10℃の甲板に出るのは億劫であった。船では「10分前集合」が基本だが、皆ギリギリまでお互いを牽制しながら室内で待機。ただ一人「10分前集合」していたチョッサー（チーフオフィサー：観測士官）に雪が積もり、まるで『八甲田山死の彷徨』の神田大尉のようであった。

KNOTプロジェクトでは各季節を網羅した航海が行われKNOTにおいて4年間で計21回の観測が実施された。その結果、KNOTにおける植物・動物プランクトン、基礎生産力、二酸化炭素ほか炭酸系、栄養塩などの大きな季節変動を高密度で時系列観測し、同海域の平均像を明らかにすることができた。その季節変動の大きさは世界でもトップクラスであり、これは春季以降の植物プランクトン

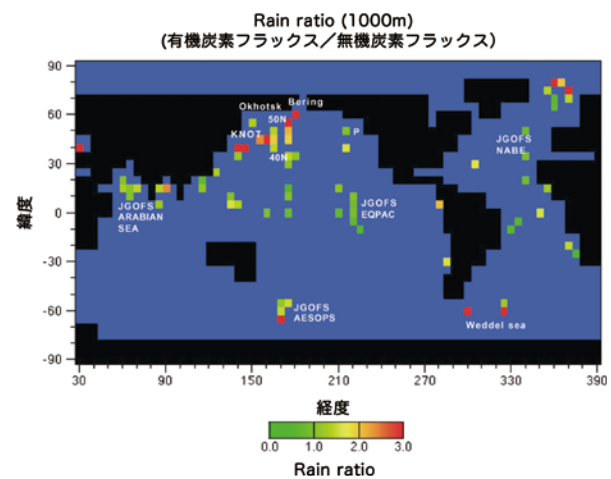


図2 Rain ratio (Honda et al., Deep-Sea Research II 49, 5595-5625, 2002を改訂)

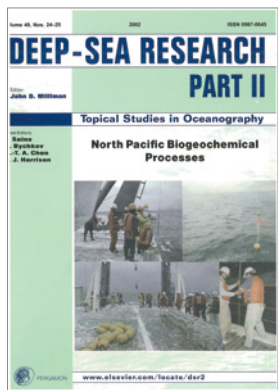


図3 KNOTプロジェクト『Deep-Sea Research II』特集号の表紙

の大増殖と冬季の活発な鉛直混合によるところが大きいことを明らかにした。

JAMSTECおよび名古屋大学が担当した海底設置型セジメントトラップ実験や漂流型セジメントトラップ観測により、KNOTの輸出生産率（基礎生産力に対する表層混合層底部における有機炭素フラックスの割合）やRain ratio（無機炭素フラックスに対する有機炭素フラックスの割合）が米国の太平洋亜熱帯ハワイ沖観測定点ALOHAや大西洋亜熱帯バミューダ沖観測定点BATS、カナダの東部北太平洋亜寒帯観測定点OSPのものより高く、KNOTを含む西部北太平洋の生物炭素ポンプ（植物プランクトンの光合成を皮切りに、主に沈降粒子：マリンスノーとして二酸化炭素が海洋内部へ輸送されるメカニズム）効率が世界的にも高いことが示唆された（図2）。

一方で、NPSAGの南西縁に位置するKNOTでは時折、亜熱帯や沿岸海水の侵入が観測され、NPSAGの海洋学特性を代表していない時があることも明らかになった。

KNOTプロジェクトの成果は、国内におけるほかのプロジェクト（水産庁によるA-line観測、国立環境研究所による篤志船観測）の結果とあわせて、2002年、『Deep-Sea Research II』の特集号として発表された（図3）。

HiLATSプロジェクト（2001～2006年）

2000年10月、むつ事務所が、むつ研究所に改組された。むつ研究所の主要研究として、当時米国ウッズホール海洋研究所（WHOI）主任研究員兼JAMSTEC非常勤理事であった本庄丕博士（故人）の提案により、最先端の自動試料採集・測定装置を搭載した係留系および「みらい」を駆使した西部北太平洋の物質循環研究（High Latitude Time-Series study：HiLATSプロジェクト）を実施することになった。

初年度（2000年度）にはそれまでも時系列観測に使用されてきたセジメントトラップに加え、自動採水装置（RAS）、植物・動物プランクトン採集装置（PPS・ZPS）、基礎生産力測定用自動培養装置（SID）、水中光測定装置（BLOOMS）そして自動昇降型CTD/ADCP（MMP）の購入が行われた。年度末には国内外の研究者約50名が参加した北太平洋物質循環国際ワークショップが開催され、HiLATSプロジェクトでは、NPSAGを代表する観測点としては不安定なKNOTに代わって、NPSAGの中心付近に新たな観測定点K2（北緯47度／東経160度）を設置しそこで時系列観測を実施することとなった（ちなみにK2のKはKamchatka Peninsula（カムチャツカ半島）由来である）。

2001年8月、米国アラスカ州ダッチハーバーにて、共同研究相手のWHOIから輸送された40フィートコンテナ4台分の各種観測機器ならびに係留系資機材を「みらい」

に搭載し、同月28日、WHOIの研究者、マリンテクニシャンとともに出港した（MR01-K04 Leg 2航海）。本プロジェクトの係留系を水深約5,000mの深海底から立ち上げ、張力1トンで「緊張係留」させ、係留系上部を水深30m（有光層下部）に正確に設置する必要があった。設置地点に到着後は音響装置で広域にわたって平坦な場所を探索し、設置地点はCTD採水器に装着したCTDと高度計により精密な測深後に決定した。係留作業はWHOIのマリンテクニシャンの指示で行われた。作業前は言葉の壁、作業方針の違いによる軋轢を心配したが、「みらい」乗組員、マリン・ワーク・ジャパン（MWJ）観測技術員とWHOIのマリンテクニシャンたちの共同作業は友好的であり、正確、迅速、かつ安全なものであった。結果、±10mの精度で西部北太平洋の2点（K1：北緯51度／東経165度、K2）に2種類の係留系（生物地球化学観測用係留系：BGC係留系、海洋物理観測用係留系：PO係留系）計3基を設置することができた。航海終盤の9月11日に米国ニューヨークで「同時多発テロ」が発生。ボストン空港からやってきたWHOI研究者、マリンテクニシャンたちにとって大変ショッキングな出来事だったとともに、ボストン空港閉鎖のため下船後も1週間、むつでの滞在を余儀なくされた。

2002年10月11日、再びダッチハーバーから航海（MR02-K05 Leg 2）が開始される。本航海は荒天に悩まされたが、WHOIマリンテクニシャン、船長、観測士官、甲板長ほか乗組員、およびMWJの息の合った共同作業により、前年度設置した係留系を無事回収することができた。「みらい」の甲板は水面から7mあるため、係留系先端の直径2mの浮カブイ（通称赤玉）を確保するためには作業艇の投入が必須と思われたが、「みらい」の舷側に沿わせた赤玉先端アイをWHOIのマリンテクニシャンが約10m長の竹竿で引っ掛けて確保した。パワーの差、カウボーイの国アメリカならではの、と感心させられた。

その後、西部北太平洋の3カ所（K1、K2、K3：北緯40度／東経160度）にBGC・PO係留系、計6基を設置した。特にK2に設置した係留系には、RASそして放射性炭素を使用することから特別許可を得たSIDとともに、海洋有光層直下から深海までのマリンスノーの鉛直変化過程を精査するために時系列式セジメントトラップを10台装着した。まるで「デコトラ」（装飾品をいっぱいつけたトラック）のような係留系であった（図4）。

2003年、「みらい」は南半球周航観測航海BEAGLE 2003で長期出張。我々の観測は「かわいい」KR03-11航海で実施することになった。「みらい」と異なり、「かわいい」は地質、地球物理探査に特化した観測船である。係留系の設置・回収作業のためには甲板が狭く、また「みらい」に常設されているが同船にはないトラクションウインチの搭載、そして採水器の準備、放射性管理区域指定の



図4 時系列観測機器。ユニークな時系列観測装置として『Sea Technology』の表紙となる。

「アイソバン」の搭載で苦労した。

9月下旬、三たびダッチハーバーでの乗船、出港となった。ただしこの時はアンカレッジからの飛行機が強風のためダッチハーバーに着陸できず、数回の“タッチアンドゴー”の末、3時間かけてアンカレッジに引き返した。またダッチハーバー現地代理店に納品されるはずのアルゴス位置信号発信装置の電池パックが行方不明。結局、代用品でまかなうことにしたが、これらはその後の悲劇の前兆であった。出航後、前年K1に設置した2種類の係留系を無事回収。海洋観測を実施した後、K2へ。K2ではMMP搭載のPO係留系を難なく回収。そしてセジメントトラップ10台ほかを搭載した“デコトラ”係留系の回収に着手した。切離装置との交信に成功した後、切離コマンドの送信。順調に作動したことを確認。正常であれば水深30mに位置している“赤玉”は切り離し後、数秒で海面に浮上するはずであった。しかし浮上せず。そして待つこと2時間、数個の浮カブイ（ガラス球）でかろうじて浮力を持った切離装置が浮上した。この時点で様々な観測装置を搭載した全長約5kmの“デコトラ”係留系の亡失が発覚した。それからは陸上への事故報告、付近の搜索、その合間にK3に設置してある係留系2基の回収（こちらは無事回収）などを行う。風呂に入る間もないほどの忙しさであった。陸上でも係留系亡失の報告を受け、その対応で大騒ぎとなる。特に、生態系にまったく影響はないほどの低レベルとはいえ、放射性物質（放射性炭素）を紛失した、ということで文部科学省への報告、プレス対応など、むつ研究所の所長以下管理課、および横須賀本部の安全管理室、運航部ほか関係部署に多大なる迷惑をかけることとなる。現場では、搜索するものの手がかりはなし。結局、係留系を再設置することなく、失意の中、横須賀本部に帰港した。ほぼ全ての観測機器は米国で購入し、公海上で設置・回収をする予定であったので、予定外の観測機器の持ち帰りであった。そのため膨大な輸入手続きと巨額の輸入関税の支払いも本プロジェクトにとっては大打撃であった。

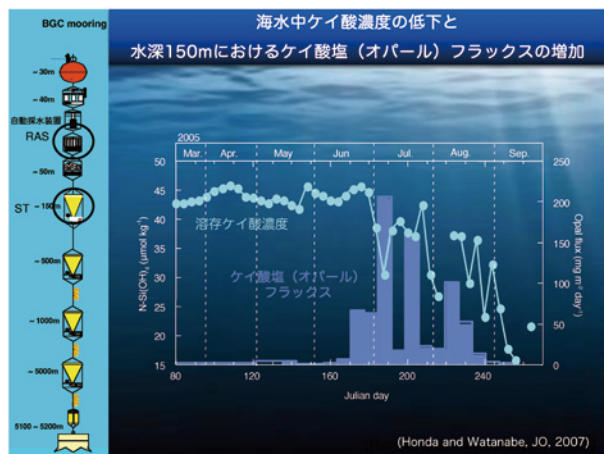


図5 溶存ケイ酸塩とオパールフラックスの変化 (Honda and Watanabe, Journal of Oceanography 63, 349-362, 2007を改訂)

その後は事故原因調査と再発防止対策の検討のため、結局係留系観測は1年半ほど中断することになった。

2005年3月、MR05-01航海で再発防止対策を講じた係留系を試験的に短期係留。同年9～10月に実施されたMR05-04航海で2種類の係留系を無事回収した。おかげで、半年間ではあったが、高頻度の時系列観測データ、試料の回収ができた。特にRASで得られた外洋域における海洋表層の栄養塩濃度の変化と、水深150mにおける沈降粒子の変化の同時観測は世界初であった(図5)。

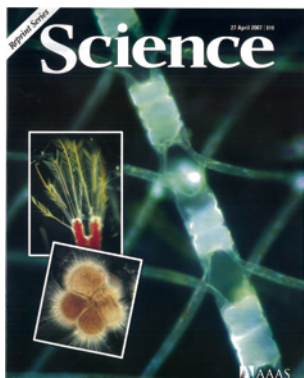


図6 VERTIGO。K2観測結果が『SCIENCE』に掲載。

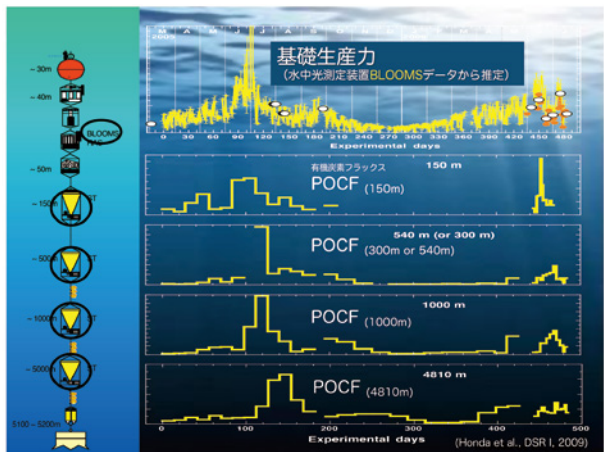


図7 基礎生産力と各水深における有機炭素フラックスの時系列変化 (Honda et al., Deep-Sea Research I 56, 2281-2292, 2009を改訂)

また同航海は北部北太平洋を横断する航海(関根浜出港—サンディエゴ入港)であったので、K2を含むNPSAGとカナダの北太平洋東部亜寒帯観測定点OSPを含むアラスカ湾循環域の生態系・物質循環過程の比較可能なデータを取得することができた。

HiLATSプロジェクトのおかげで観測定点K2はNPSAGの生物地球化学観測定点として世界的に知られるようになり、国際的な海洋定点観測ネットワークOceanSITESに登録された。2005年にはWHOIの研究員が主導する国際的な生物炭素ポンプ研究プロジェクトVERTIGOのK2観測が行われた。結果、K2の生物炭素ポンプ効率はハワイ沖観測定点ALOHAのものより高いことが示され、その結果は著名な学術雑誌『SCIENCE』に掲載された(図6)。

翌2006年5月から7月にかけて、約2カ月間のMR06-03航海を実施。観測定点K2には約2週間滞在して繰り返し観測を行い、春季ブルーム時期の物質循環過程・生物ポンプ過程の変遷観測を試みた。結果、基礎生産力、栄養塩、植物プランクトン色素、および炭酸系など同過程に関わるデータが取得できた。また前年に設置した係留系を無事回収した。その結果、前年3月から1年半にわたる海水、マリンスノーおよび水中光データから推定した基礎生産力の高頻度時系列試料・データを取得することに成功した(図7)。

参考：『むつ研究所 開所十周年記念誌』海洋研究開発機(2011)

K2S1プロジェクト(2010～2014年)

現在、地球環境変化と同様に、海洋でも温暖化、酸性化、貧酸素化などの複合ストレスが進行中であり、海洋の持つ大気中二酸化炭素吸収能力の将来変化が懸念されている。ただし、これらのストレスが海洋の生態系や物質循環にどのように影響するのかは海域によって異なる可能性が指摘されている。そこで従来の西部北太平洋亜寒帯循環域とは生態系や水塊構造が異なる亜熱帯循環域にも観測定点を設けて、両者の生物地球化学比較観測研究「気候変動に対する生態系変動を介した物質循環の変動とフィードバック」を実施することとなった。議論の結果、K2のカウンターパートとして黒潮統流南側に亜熱帯観測点S1(北緯30度/東経145度)を設置した。よってこのプロジェクトは「K2S1プロジェクト」と呼ばれるようになった。そして上記の目的のために各季節を網羅した「みらい」による船舶観測、そして係留系観測、衛星観測および数値シミュレーションを行うこととなった。

最初の航海は、2010年1～2月に実施された(MR10-01航海)。厳冬期の観測であったため荒天に悩まされたが(図8)、K2、S1で採水、漂流系による現場基礎生産測定・沈降粒子捕集、プランクトン採取など総合的な生物地球

化学的観測を行うことができた。そしてK2、S1には水深200m、500m、4,810mにセジメントトラップが位置する係留系、ならびにS1には水中ウインチにより表層から200m間で定期的に上昇下降を繰り返し水温、塩分、酸素、クロロフィルそして基礎生産能力を測定するセンサブイ(基礎生産プロファイラー)を搭載した係留系(POPPS係留系)を設置し、時系列観測が開始された。セジメントトラップ係留系設置日は節分であった。係留作業の安全と観測の成功を祈願して豆まきが行われたが、セジメントトラップ担当者としては、豆が混入するのでは、とヒヤヒヤハラハラドキドキした。

同年秋に行われたMR10-06航海は久しぶりにダッチハーバーからの出港であった。本航海も荒天に悩まされたが、K2、S1に設置されたセジメントトラップ係留系およびPOPPS係留系を無事回収・再設置することができた。長い航海、観測で体を使うとはいえ、カロリーの高い食事のためどうしても体重が増加気味。船上では久しぶりに“ビリーズブートキャンプ”が流行し、夜な夜な運動室では老若男女がエクササイズに励んでいた。

MR11-02航海は晩冬季の2011年2～3月に実施された。本航海での係留系作業としては、POPPS係留系の回収・再設置および米国海洋大気庁(NOAA)のKEOブイの点検、JAMSTECのJKEOブイの回収・設置が行われた。

K2S1プロジェクトでは大型多段式プランクトンネット(IONESS)による動物プランクトンや小魚の採集も特徴的な観測であった。開口部が約2m²、全長約5m大の“こいのぼり”のようなプランクトンネットが8枚束ねられ、任意の深さで開閉し20分程度水平曳きすることで網の先端にあるコットエンドにターゲット層の動物プランクトンや小魚を採集するのである。8～12人が左右二手に分かれ人力で網を甲板上に揚収。コットエンド内のサンプルを回収後、大きなバケツ内で網を洗浄。動物プランクトンの日周鉛直変動を把握するために、昼間のみならず深夜にも実施された。K2の深夜は氷点下、雪のちらつく中でのIONESS作業となる。過酷極まりない、まさに演歌『北の漁場』の世界観であった。

航海終了前日、八戸に寄港中の地球深部探査船「ちきゅう」を表敬訪問する。翌日、2011年3月9日、関根浜に帰港。艀装解除時、地震が発生する。しかし津波もなく、作業は予定どおり終了、午後には東北新幹線で無事帰京した。しかしこの地震が東北地方太平洋沖地震の前震であるとは、その時は知る由もなし。そして表敬訪問した「ちきゅう」や本航海に参加していた岩手県大槌町の東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センターの教員が2日後に被災することになる。

MR11-03航海は2011年4～5月に実施された。本航海は、後述するように福島原発事故調査を兼ねる航海となったが、同航海では南北方向の航跡に沿ってラジオゾ



図8 荒天の中の航海(MR10-01)

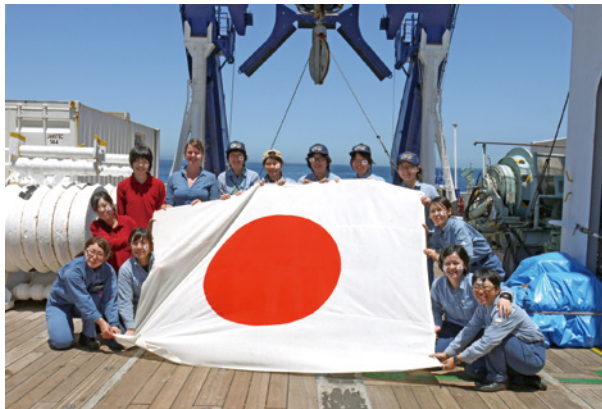


図9 なでしこみらい

ンデの放球を頻繁に行った(通称ゾンデ祭り)のが特徴的であった。

MR11-05航海では、前半(Leg 1: 2011年6月27日～7月16日)はKNOTやK2など亜寒帯の観測、後半(Leg 2: 7月17日～8月4日)はS1そして東北沖の観測を行った。福島原発事故調査を兼ねたものではあったがK2、S1では採水、プランクトン採取、係留系の回収・再設置、漂流系観測、そしてマルチプルコアラーによる採泥を行った。Leg 2ではモード水など亜熱帯海域の水塊構造の三次元解析プログラム(INBOX)のため、S1付近で大量(約20本)のArgoフロートが投入された。またLeg 2では観測技術員、学生そして航海士あわせて13名の女性に乗船。翌日(日本時間7月18日)の女子ワールドカップ決勝での日本女子チーム(なでしこジャパン)の勝利を祈願して、船所有の日章旗を持ち出し、フェイスペイントを施し、記念撮影をした(図9)。そして未明の決勝戦。1-2でリードされた延長後半、澤穂希選手のゴールで同点、そしてPK戦の結果、なでしこジャパン、ワールドカップ初制覇! 船内のあちこちから歓声上がる。結果を見届け、早朝の採水へ。朝の挨拶は「おめでとうございます!」。まるで元日の朝のようであった。

MR12-02航海も前半(Leg 1: 2012年6月4～24日)、



図10 寄せ書き旗



図11 MR13-04航海クルーズレポート表紙

後半 (Leg 2: 6月24日～7月12日) に分けて実施した。前半ではK2のセジメントトラップ係留系に加え、JAMSTEC 大気—海洋研究グループのJKEO係留系の回収・再設置が行われた。後半はS1観測および前年のMR11-05航海で新たに設置した観測定点F1 (北緯36.5度／東経141.5度) を含む東北沖での観測を行った。後の分析でF1のセジメントトラップ試料からは、K2やS1より1桁高い放射性セシウムが検出された。さらに観測点KEOでNOAAのKEO係留系の回収・再設置を行った。NOAAから派遣された年配のマリンテクニシャンは、1980年5月18日、米国ワシントン州のセントヘレンズ山の大噴火時に登山中で、噴煙に巻き込まれたサバイバー (生存者) であった。船上セミナーではその時の迫力ある写真を見せながら、自身の体験を生々しく紹介してくれた。写真は高く売れ、テレビ出演、雑誌のインタビューなどで当時はずいぶん“生活がうるおった”、とのことであった。

MR13-04航海はこれまでの物質循環航海の3分の2～2分の1の長さの航海であった。しかし天候にめぐまれたおかげで観測定点K2とS1の係留系3系列の回収・再設置、福島沖のセジメントトラップ1系列の回収・再設置を実施することができた。加えてK2、S1、KEO、JKEO、KNOTで多目的な採水、K2とS1では動物・植物プランクトン採集、基礎生産測定、現場濾過を実施することが

できた。また北海道東方沖に存在する中規模渦内でのCTD・採水観測を実施した。この航海では、横須賀本部一般公開で作成してもらった“応援メッセージ寄せ書き旗”をマストに掲揚し観測を行った (図10)。K2S1プロジェクト航海に限らず、多くの時系列観測航海では、観測終了後 (入港直前)、夕食を兼ねてバーベキューパーティー (BBQ) を行った。日頃いっしょに観測作業をしているとはいえ、航海中はあまり打ち解けて話す機会がない乗組員と観測技術員と乗船研究者・学生である。BBQは親睦、お互いの労のねぎらいが目的であった。この時は、老若男女が入り乱れ、職位の違いを忘れ、無礼講で大いに懇親した。ゲームをしたり、クルーズレポート表紙コンテストの発表などのイベントを行って楽しんだ (図11)。

2014年は主に係留系作業のみが行われ、K2は白鳳丸、S1は「かいよう」、F1は新青丸が使用された。そしてK2S1プロジェクトは終了した。K2S1プロジェクトにより、西部北太平洋亜寒帯海域と亜熱帯海域の生物地球化学的特性が精査された。また同プロジェクトにより ①貧栄養な亜熱帯海域への予想以上に高い栄養塩供給メカニズム、②中層で生息する低次生物への必要炭素量の需要と供給のミスマッチなど、新たな課題も抽出された。K2S1プロジェクトの成果は日本海洋学会誌『Journal of Oceanography』特集号などで発表された。

参考：K2S1プロジェクト時のホームページ (航海ブログ含む)
<https://www.jamstec.go.jp/egcr/jj/oal/observation/>

福島原発事故調査 (2011～2015年)

2011年3月11日に発生したマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震と津波により、東京電力福島第一原子力発電所 (FDNPP) の冷却システムが停止、その結果のベント作業や水素爆発、そして外部から供給された冷却水漏れ、意図的排出により、大量の人工放射性核種が環境中に放出された。観測船を多く所有するJAMSTECに、海洋における人工放射性核種の拡散や蓄積状況などの動態調査が文部科学省から依頼された。同月後半には福島沖での採水・エアロゾル調査が開始された。

同調査のために「みらい」も動員された。ご存じのように「みらい」は1974年に放射線漏れ事故を起こした日本初の原子力船「むつ」を改造した船である。当初は、「みらい」自体が放射線汚染しているのでは、と揶揄する声も聞かれたが、汚染検査の結果 (当然のことではあったが) まったく問題はなかった。

翌4月に予定されていたK2S1プロジェクトのためのMR11-03航海は、FDNPP事故調査も兼ねることとなった。4月中旬、横浜港を出港後、急遽福島沖へ。半外洋から外洋に向かって複数点で海底までの採水が行われた。この際、海底付近に高濁度層が観測され、地震の影響で

海底堆積物が再懸濁している様子が明らかになった。本航海中も陸から地震 (余震) 発生のニュースが続き、暗澹たる気持ちになった。

その後、「みらい」は観測定点KNOT、K2、S1へ。航行中は定期的に表層採水・大気塵 (エアロゾル) 採集。観測定点ではこれらに加え、海底までの採水、プランクトン採集およびIONESSによる動物プランクトン・小魚採集、現場濾過器による海中粒子採集が行われた。サンプル回収前にはサーバイメータなどで船上や海上大気の汚染検査、回収後はサーバイメータやガイガーカウンターでサンプルの汚染検査を行い、万が一にも被曝しないように万全の注意を払った (図12)。

当時、海水中の放射性セシウム測定のためには海水20リットルが必要であった。放射性セシウムの水平鉛直分布を把握するため航海中は約100個の海水を採集した。総重量約2トン。これを陸揚げし、輸送トラックに搭載するのは一苦勞であった。それ以上に、送り先である測定を担当する放射線医学総合研究所では、誰がトラックから降ろして、測定を行う部屋に運ぶのであろうか……? 考えただけで気の毒に思った。しかし苦勞のおかげで、この調査では、表層海水中の原発事故由来の人工放射性核種セシウム (以下、放射性セシウム) 濃度は東北沖で最も高いこと、そして事故1カ月後にはFDNPPから約2,000km離れた亜寒帯観測定点K2、約1,000km離れた亜熱帯観測定点S1にも放射性セシウムが到達していたことが明らかになった (図13)。

同年7月に行われたMR11-05航海では、2010年11月に設置されたK2とS1のセジメントトラップ係留系が無事回収・再設置された。その後、実験室に持ち帰り分析した結果、両地点とも水深500mでは2011年3月25日～4月5日の間に捕集された沈降粒子、水深4,810mでは4月6～17日の間に捕集された沈降粒子から放射性セシウムが検出され始めた (図14)。数値シミュレーションの結果、これらは、海水流動ではなく、大気経路でエアロゾルによって同地点に輸送されたこと、粒状態放射性セシウムの沈降速度は表層から500mまでは数十m/日、500mから4,810mでは数百m/日、であることが推定された。

航海中、宮城沖で「ドン」続いて「ブルブル」という船体動揺を体感。「何?」。間もなくテレビに宮城沖で地震発生とのテロップが流れる。地震により海上の船が震動することを初めて経験する。

調査航海時は、首席研究者 (PI) や主任観測技術員 (クルリ) はポケット線量計を持ち歩き、常に船内での被曝量をチェックした。ある日のこと、クルリが青い顔をしてPIのもとに。日頃ぼぼゼロの数値が、その時はプラスの値に。どこから放射線が出ているのか? しばらく二人で考えるが原因わからず。こんなことを船内に報告すればパニックに



図12 汚染検査

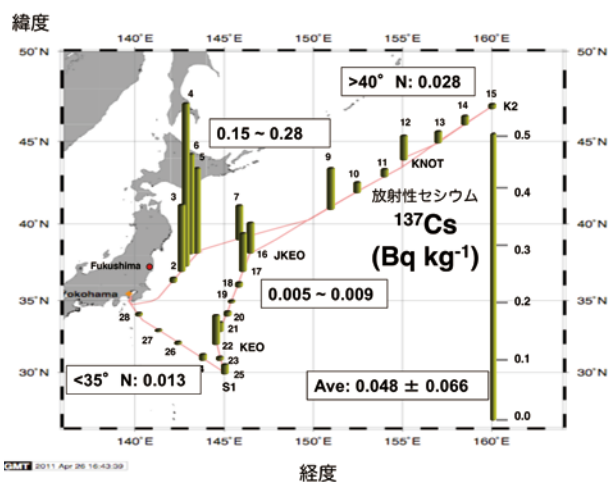


図13 事故1カ月後の放射性セシウム濃度水平分布 (Honda et al., Geochemical Journal 46, e1-e9, 2012を改訂)

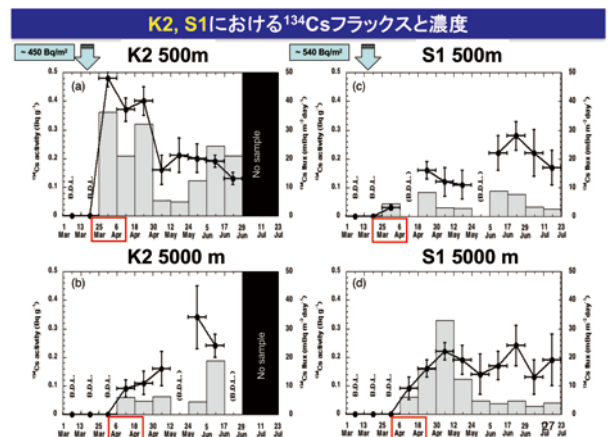


図14 セジメントトラップ試料中の放射性セシウム濃度 (黒丸) とフラックス (棒グラフ) (Honda et al., Biogeosciences 10, 3525-3534, 2013を改訂)

なるのでは? しかし黙っていは報告義務違反か? とにかくその日のクルリの行動を再現することに。採水室、実験室、試料保管庫……数値変わらず。しかしフライングブリッジ (船橋上甲板) に行ったところ線量計の値が急上昇! えっ……そうだ、レーダーだ。レーダーの電磁波だ。今朝、クルリがエアロゾル採集用フィルターを交換するた

めフライングブリッジに来た時に電磁波を検出してしまったようである。ポケット線量計を身につける時、携帯電話は携行しないように、とは言われていたが、まさか線量計がレーダーに反応するとは。とりあえず一件落着で笑い話に。このヒヤリハットは海洋研究に従事する放射化学者にとっても盲点であり関係者間で話題となった。

MR11-05航海ではFDNPPから南西約100kmの大陸棚斜面に新たな観測定点F1（北緯36.5度／東経141.5度、水深1,350m）を設置し、水深500mと1,000mにセジメントトラップを搭載した係留系を設置し、同地点における粒状態による放射性セシウムの挙動調査に着手した。これはWHOIとの共同観測であった。同セジメントトラップの回収・再設置はMR12-02航海、MR13-04航海でも行った。係留系作業はWHOIのマリンテクニシャンと行った。彼は米国製セジメントトラップ会社の社員でもあるのだが、MR12-02航海では国産セジメントトラップ会社の社員も乗船していた。昔は両社間でイロイロあったが、二人の関係は終始良好。両社のセジメントトラップを背景に仲良く写真撮影をしていた。

F1係留系観測は2015年まで継続した。4年半の時系列観測の結果、次のようなことが明らかになった。①セジメントトラップ試料中の放射性セシウムフラックスはK2やS1の10倍以上であった。②K2やS1のセジメントトラップ試料からは1年後には放射性セシウムは検出されなかったが、F1では事故から5年経過してもセジメントトラップ試料から放射性セシウムが検出された。③放射性セシウムフラックスは秋季や冬季に増加する傾向があった。考察の結果、FDNPP付近を台風や低気圧が通過時にFDNPP付近の汚染された海底堆積物が再懸濁し、それが大陸棚斜面まで水平輸送されF1セジメントトラップに捕集された、と推定された。

この結果を論文発表とともにプレス発表したところ、“2ちゃんねる”に「寝た子を起こすな」といった批判的なコメントが書き込まれた。また国会議員から問い合わせがあり、危うく“政争の具”にされそうにもなった。一方では、日米共同観測ということで当時の米国駐日大使キャロライン・ケネディ氏に謁見・報告する機会にもめぐまれた。

事故当初は十分な情報も経験もなかったためFDNPP事故関係の調査航海には勇気ある英断が必要であったと推察される。しかし「みらい」はいち早く調査航海を開始した。そのおかげで人工放射性核種の海洋内の動態に関する貴重なデータを取得することができたのである。

放射線漏れ事故を起こし、20年近く幽閉を強いられ、所期の目的を十分に果たせなかった「むつ」。その「むつ」が「みらい」として原発事故調査に貢献するとは、誰が想像できたであろうか？

栄養塩の供給メカニズム観測研究：KEO 観測（2014年～現在）

前述のとおりK2S1プロジェクトでは、貧栄養な亜熱帯海域の基礎生産力が意外に高いことが明らかになり、それを支える栄養塩の供給メカニズムの解明が新たな研究課題となった。考えられるメカニズムとしては中規模渦、台風、エアロゾルによる栄養塩供給である。そこで2014年6月、S1から2.5度ほど北に位置する観測定点KEO（北緯32.5度／東経144.5度）で時系列セジメントトラップ観測を開始した。KEOはNOAAの太平洋海洋環境研究所（PMEL）が設定した観測定点であり、2003年から表層ブイ（KEOブイ）を係留し、主に海上気象やそれに基づく大気－海洋間の熱収支、そして同海域の海洋物理を観測研究していた。したがってJAMSTECの時系列セジメントトラップに捕集される沈降粒子の変動が、KEOブイが観測する気象・海象、海洋物理の変動と、どのように連動しているのかが明らかになると考えられた。

2014年から3年間、水深約5,000mでの時系列セジメントトラップ観測の結果、栄養塩が枯渇している夏や秋に形成されたと考えられる沈降粒子が増加することが観測された。KEOブイの観測データの解析の結果、この時には栄養塩濃度が豊富な中層（水深約500m）の冷たい海水が亜表層（水深約100m）まで湧昇していることが明らかになった。また人工衛星データからこの時に海面高度が著しく低下することも明らかになった（図15）。これらの結果から、栄養塩の枯渇する時期に中規模低気圧性渦がKEO付近を通過すると、栄養塩が豊富な中層水が亜表層まで湧昇し、亜表層の基礎生産力が増加し、ひいては沈降粒子が増加するとのシナリオが考えられた。数値シミュレーションにより推定された同海域に発生する中規模低気圧性渦の頻度とそれによる栄養塩供給と基礎生産力の増加は、観測された沈降粒子の増加と整合的であった。年越しで実施されたMR21-06 Leg 2航海ではKEO付近に存在する中規模渦内を横断しながら高頻度で採水、プランクトン採取、海中粒子採取・撮影などを行い、渦の生物地球化学への影響、下降流による粒子輸送について調査した。船上でクリスマスケーキを食べたのは初めて、元旦には豪華なおせち料理を楽しむことができた。

さらに、栄養塩の供給源としてエアロゾルについても検討された。過去には黄砂が降ったり、三宅島が噴火した後に亜熱帯海域で植物プランクトンが増加することが報告されてきた。また数値シミュレーションでも亜熱帯海域ではエアロゾルによる基礎生産力の増加が示唆されていた。MR21-01航海（2021年2月13日～3月24日）の主目的はアジアから飛来するエアロゾルによる海洋生物地球化学への影響評価であった（プロジェクト名：IMPACT-SEA）（図16）。従来の大気観測手法であるハイボリュー

低気圧性渦による栄養塩供給＝>亜表層基礎生産力増加＝>沈降粒子増加

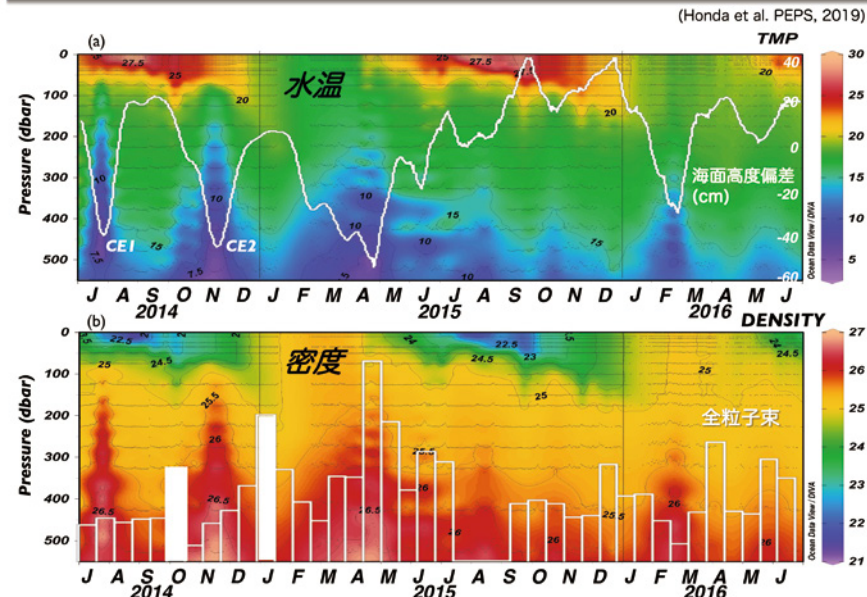


図15 KEOブイで観測された水温（上図）と密度（下図）の鉛直分布時系列変化と水深5,000mにおける沈降粒子の全粒子束（下図の棒グラフ）。上図の白折れ線は海面高度偏差（Honda et al., Progress in Earth and Planetary Science 5:42, 2018を改訂）

ムサンプラーに加え、時系列雨サンプラー、そしてカメラや海霧収集器（通称ヨーコの竖琴）を搭載した係留気球（通称オットット）による観測などを行った。また雨によるエアロゾルの海洋沈着と生物地球化学への影響を把握するために雨雲を追いかける観測（レインチェイス）も行った。多くの乗船者が晴天を望む中、研究担当者たちは隠れて雨乞いをしていた。コロナ禍下であったため、乗船前はPCR検査と1週間のホテル隔離と孤独のグルメ、船上ではマスク着用、毎日検温、サウナ使用禁止、不要不急の会話厳禁の黙食、複数箇所に分かれたオンライン会議、集団での懇親会禁止などなどニューノーマルな航海であった。救いは運動室の使用が許可されたこと。人気（ひとけ）のない早朝、黙々とトレッドミルでランニング。40日間の走行距離は160kmに達した。

一方、西部北太平洋亜熱帯海域は海洋プラスチックゴミの集積場所としても注目されている。JAMSTECの海洋プラスチック研究グループも「みらい」航海に参加し、ネットや現場濾過器などで海洋プラスチックゴミの三次元分布・中規模渦の役割について調査した。また同グループによりKEOセジメントトラップ試料中のマイクロプラスチック測定も試みられ、同海域におけるマリンスノーによるマイクロプラスチックの鉛直輸送量の定量化に成功した。

酸性化と生態系と物質循環研究：ハイブリッド係留系とBGC-Argo観測（2014年～現在）

K2S1プロジェクト後、K2の時系列観測のため基礎生産プロファイラー、RAS、ADCP、CTD、pHセンサー、

セジメントトラップそしてリカバリーブイ、ガラス球で構成されたハイブリッド係留系が設置された。このような複雑で大型の係留系の設置・回収作業を効率的に、迅速に、かつ安全に行えたのも大型であり熟練した乗組員のいる「みらい」のおかげであった。また酸素センサー、蛍光光度計、後方散乱計など生物地球化学成分を測定できるBGC-ArgoフロートもK2付近に数多く投入され、海洋表層から深層までの海水特性や生物炭素ポンプの季節変動を観測した。時には基礎生産プロファイラーを亡失する、というトラブルも発生したが、人工衛星では観測できない海中の、そして荒天が多く特に観測が困難な冬季の植物プランクトンや海中粒子、そして海洋構造の鉛直分布の季節変動を時系列的に観測することができた。データからは晩春および秋の年2回、植物プランクトンの増加（ブルーム）が起ることが明らかになり（図17）、考察の結果、秋のブルームは微量栄養塩の鉄の再供給によるものと推定された。

K2を含む西部北太平洋亜寒帯海域は、鉄が少ないため、主要栄養塩が大いに存在する割には植物プランクトンが少ないHNLC（High Nutrient Low Chlorophyll）海域と知られている。本プロジェクトでも「みらい」船上でクリーン採水や簡易クリーン区画の設置が行われ鉄添加培養実験などが実施された。また同海域への鉄供給メカニズムは、オホーツク海からの海中内水平輸送である、と言われてきたが、エアロゾルおよび海洋表層付近の懸濁粒子に含まれる鉱物粒子と鉄同位体の分析・解析から、エアロゾル中の鉄も同海域の鉄供給源になっていることも明らかになった。



図16 MR21-01航海クルーズレポート表紙

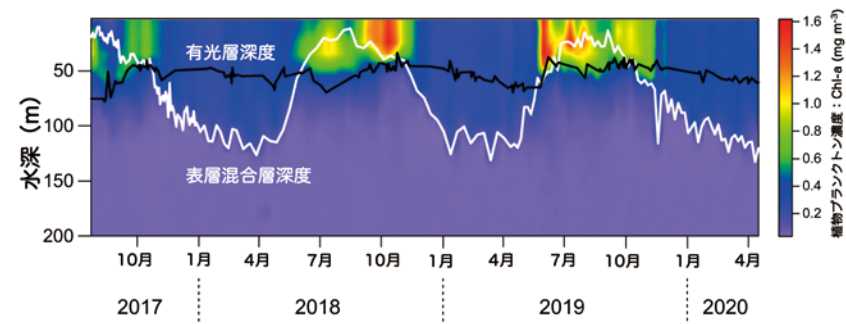


図17 BGC-Argoフロートにより観測されたK2付近 (NPSAG) の植物プランクトン濃度鉛直分布の季節変動 (Fujiki et al., Journal of Oceanography 78, 63-72, 2022を改訂)

一方、1997年の「みらい」就航以来、KNOTおよびK2で観測してきた海水中の炭酸系データの解析の結果、世界中の海域と同様に同海域でも海洋酸性化が進行中であることが明確になり (図18)、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書 (AR5) で報告された。西部北太平洋の海洋酸性化の生態系への影響、特に炭酸カルシウムの殻を持つ動物プランクトンへの影響を把握するために、セジメントトラップおよびプランクトンネットで得られた動物プランクトン (浮遊性有孔虫) の殻密度をJAMSTECで開発したマイクロフォーカスX線CT装置 (MXCT) で解析してきた。その結果、殻密度は季節変動、水深変動することが明らかになった。これらの変動のうち、海洋酸性化による長期変化成分を検出し (図19)、ひいては将来変化を予測するために、2024年に新たなCRESTプロジェクト「気候変動に伴う低次栄養段階生物の応答と炭素吸収能の評価」(通称C-LIFE) が立ち上がり、分析・解析、数値シミュレーション、そして新たな係留系による観測研究が引き続き行われている。

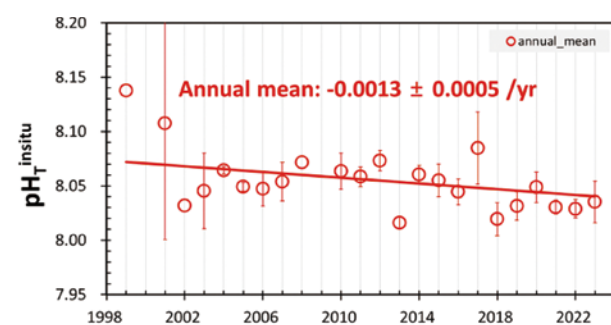


図18 NPSAGでも海洋酸性化進行中 (Wakita et al., Biogeosciences 10, 7817-7827, 2013を基に作成)

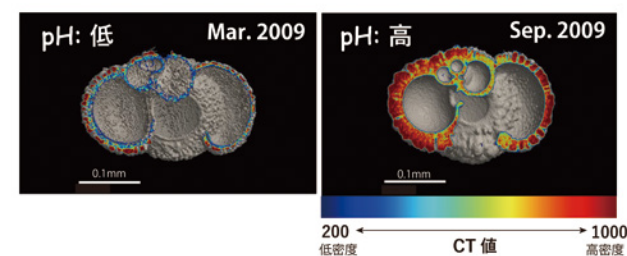


図19 季節の違い (酸性度の違い) により“骨密度”が変化した有孔虫殻 (Kimoto et al., Frontiers in Earth Science 11:1184671, 2023を改訂)

おわりに

「みらい」のおかげで、多くの研究者、学生、観測技術員が同時乗船し船上の機器や実験室を利用することで、航海中に多くの分析・実験の実施が可能となった。そして係留系作業が迅速に、かつ安全に行えたため係留系による時系列観測が可能となり、西部北太平洋の生物地球化学に関して多くの知見を得ることができた。また筆者を含め多くの研究員や学生の学位取得にも「みらい」は貢献してきた。ただし、西部北太平洋の物質循環平均像は解明されつつも、現在進行中の複合ストレスに対する“変化”を検出するには至っていない。ハワイにおける大気中二酸化炭素の連続測定のおかげで、人類の活動により大気中二酸化炭素濃度が増加していることが明らかになったように、「継続は力なり」である。いろいろな人がバトンをつないできた観測定点K2の時系列観測は20年を超え、2025年には北太平洋海洋科学機構 (PICES) から海洋モニタリングサービス賞 (POMA) が授与された。しかし海洋は大気以上に“変動”が激しく、また物理、化学、生物の相互干渉が大きいので、“変化”を検出するためにはより長期間の時系列観測が必要である。米国の観測定点ALOHAやBATS、欧州共同体のESTOCでの時系列観測と連携しながら、今後も北極域研究船「みらいII」などを利用して同海域の生物地球化学の時系列観測を続けていくことはJAMSTECの使命と考えられる。

参考：本観測研究のデータベース「北太平洋における化学海洋学データセット集」<https://www.jamstec.go.jp/4dvep/project15.html>
担当部署 (地球表層システム研究センター) のホームページ (2025.12.20 現在) <https://www.jamstec.go.jp/ess/j/>



本多牧生
海洋研究開発機構
地球環境部門
地球表層システム研究センター
物質循環・人間圏研究グループ
上席研究員 (シニア)

3 大気物質循環観測

金谷有剛・竹谷文一

JAMSTEC地球環境系の大気組成の研究者が、中国やロシア、富士山などの陸上から、船上観測に参入し「みらい」での観測を始めたのは2010年のMR10-04航海から。太陽散乱光スペクトルを低仰角まで精度よく計測するMAX-DOAS自作器からスタートした。差分吸収法に基づきNO₂（二酸化窒素）などの大気汚染物質の全球での広がりや自然のバックグラウンド状態を高精度に測定するものである。当初懸念のあった凍てつく北極海での動作もクリアし、船の動揺を打ち消す大型のジンバル架台は、数年後にプリズムのみを動かす小型のフィードバック制御方式に置き変わった（図1）。南北半球の広域でIO（一酸化ヨウ素）ラジカルを計測し、西部太平洋高水温域に「ヨウ素の泉」を発見、第三の温室効果ガスである対流圏オゾンの未把握な消失プロセス解明と定量化に大きく貢献した（Takashima et al., 2022, 2025; Sekiya et al., 2020, 2025）。

また、オゾンの全球海上マッピングでも先鞭をつけ（Kanaya et al., 2019）、IGAC（地球大気化学国際協同研究計画）のTOAR-II（対流圏オゾンアセスメント第2期）ではOcean WGを立ち上げ、「みらい」だけでなく計9カ国からのデータを収録する世界初の海上オゾンデータセットをJAMSTECから公開している（Kanaya et al., 2025、図2）。これらの活動は、短寿命気候強制因子（SLCF類）の動態解明に貢献し、IPCC報告書などでの活躍に結び付いた。

エアロゾル・北極も、観測展開において重要なキーワードとなった。陸から発生する土壌・鉱物ダストや産業起源の鉄や反応性窒素類は、風に乗って大気中を数千km運ばれ、雨による湿性沈着などで海にもたどり着く。これらの物

質がプランクトンの栄養の供給源となる可能性が指摘されていたが、これまでの「みらい」の観測現場からその証拠をつかんだ。ブリッジの真上のコンパスデッキでのエアサンプルによる大気中のエアロゾルや雨サンプルの捕集だけでなく、海水中の鉱物ダストの解析にも挑戦した（Nagashima et al., 2023; Taketani et al., 2018, 2025a）。

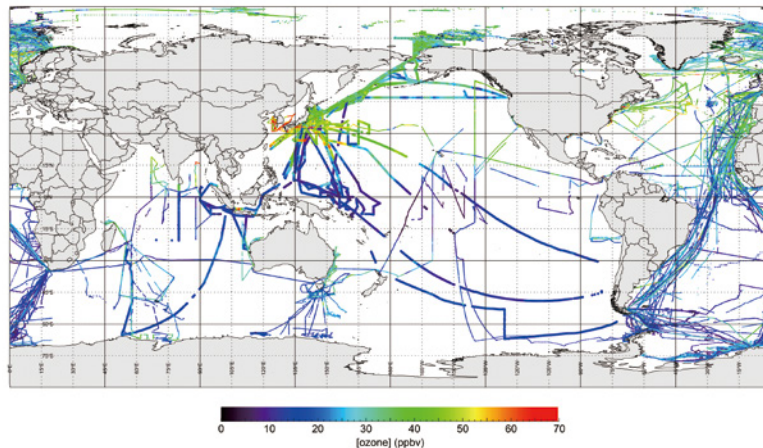
2021年以降の航海では西部北太平洋を対象とした気象・物質・海洋生態系をまたぐ学際研究としてIMPACT-SEAプロジェクトと銘打って研究を活性化した。特にMR21-01航海では、コロナ禍の影響が残る中、首席（竹谷）として大気組成観測を中心とした西部北太平洋亜寒帯・亜熱帯両方での物質循環研究航海を2021年2～3月に実施した。汎用観測室には様々な大気観測機器が設置され、非常に密な観測が実施された（図3）。凄まじい海況により、観測スケジュールの変更が1日数回も行われたが、最終的には予定していた観測がほぼ達成された。これはひとえに、「みらい」そのものの性能に加えて、船員・観測技術員・乗船研究者の方々の一致団結の賜物と感じている。

一方、アジア起源物質が北極へ流入する大気輸送経路を往復する北極航海は、理想的な観測プラットフォームとなった。エアロゾル粒子のうち、ブラックカーボン（BC、すす）は、雪氷面に付着することで黒ずませ、アルベドフィードバックを通じ地球温暖化の加速をもたらす。そのような役割をもつBCを、フェムトグラムの質量の桁で、粒子一つ一つを計測、その合計として、1ng/m³を下回る極低濃度まで初めて高精度で北極海上で測定し（Taketani et al., 2016, 2022）、数値モデルの国際評価



図1 小型化したMAX-DOAS受光部、横浜の夕暮れと共に。

図2 「みらい」の約30航海（丸）および他船航海（+）からの全球海洋大気でのオゾン濃度データをデータ論文・データベース化。https://doi.org/10.17596/0004044



に使われた（Whaley et al., 2021, AMAP 2021）。黒色のBCだけでなく、最近では、褐色の有機物ブラウカーボン（BrC）のアジアから北極までの広がりや消失過程も評価した（Zhu et al., 2025）。

エアロゾル粒子は、大気から海に届くだけでなく、逆に海からも波飛沫として大気中に巻き上げられ、雲や気候にも影響する。波飛沫の主成分はNaClなどの無機塩だが、有機物や生物起源物質も含まれており、それらの動きには不明点が多い。生物起源粒子の指標となる、粒子ごとの自家蛍光性に基づく自動連続観測や氷晶核の計測を行い、南大洋・中央太平洋・北極海まで、物質と生態系・雲の結び付きを広く解明した（Miyakawa et al., 2023; Kawana et al., 2021, 2024; Taketani et al., 2025b; Ito et al., 2025）。その際には、海洋生態系起源の指標として、クロロフィルだけでなく、TEP（透明細胞外重合体粒子）を指標にするなど、海洋と大気研究者が先端的な分析を通して結び付いた。海上大気中の海塩粒子の数濃度の変動に対しては、これまで主に風速が支配因子とされてきたが、ダイナミックに変動する大気混合層の厚さも重要な因子であることを解明した（Miyakawa et al., 2023, 2025）。NaClは大気中での塩素ロス反応により他の塩に置き換わってゆき、放射収支にも影響するが未解明である。2025年には自己開発の質量分析計により3種の塩の初計測にもチャレンジする（Kobayashiほか）。

エアロゾルの船上観測は充実化したが、次なる課題の一つは大気の上層までの「高度分布計測」である。「みらい」では係留気球を高度1,100m程度まで飛揚させ、サンプルの持ち帰りや小型計測器による上空現場データ取得も行い、「みらい」での大気組成観測のシンボルともなった（図4）。雲が生成する高度で何が起きているのか、エアロゾルライダーとの協働や、ヘリコプター計測など、広がりつつある観測計画の夢を、今後、「みらいII」で実現したい。「みらい」では、大気組成計測機器は常設機器ではないため、ドック定期検査のたびに、取り外し、再機装するといった困難があった。コロナ期にはマスク・人数制限などで機装のハードルがさらに高まった。その努力の甲斐あって成果も高まり、「みらいII」での常設化計画にも漕ぎつけた。これまで北極航海などで活躍した国立環境研究

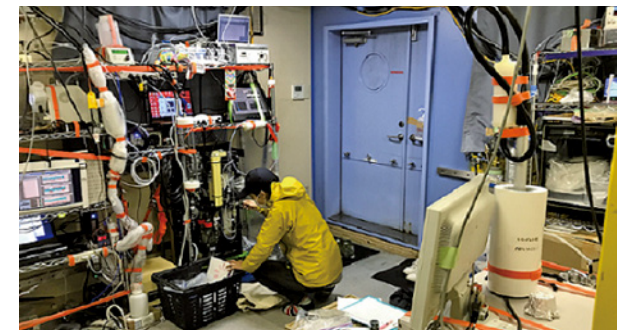


図3 MR21-01航海での汎用観測室内に設置された観測機器



図4 上甲板から放球された係留気球。気球の下に観測装置を吊り下げ、上空のデータ・上空までの大気データを取得する。

所のGHG大気連続計測機器（Tohjima et al., 2021）を受け継ぎ、CO₂やメタンの大気連続観測も加え、総合的な大気組成観測プラットフォーム化を今後目指す。海洋pCO₂などとの校正スケール統合についても準備を進めている。

振り返ると、海・陸・大気の寄り合い所帯だった物質循環研究プログラム（2009～2014年）での横断的議論が大きな後押しとなったことは間違いない。そこから、分野間横断研究の議論が深まり、様々な切り口からの研究が推進され、学術論文の特集号（PEPS誌）を組めるまで成長を遂げることができた。「みらい」での大気物質循環研究のスタートは気象観測室・減揺装置上のみであったが、そこから汎用観測室・ブリッジ上暴露部さらには上甲板上での観測など、様々な場所での観測が展開された。これらの観測は各航海の首席研究者、GODI、NMEの観測技術員さんに支えられ、大きく飛躍したと実感している。我々が目指した、新しい切り口の大気海洋物質循環研究は、世界的にもユニークな形で花開きつつある。今後のさらなる躍進を誓いたい。



金谷有剛
海洋研究開発機構
地球環境部門
地球表層システム研究センター
センター長



竹谷文一
海洋研究開発機構
地球環境部門
地球表層システム研究センター
物質循環・人間圏研究グループ
主任研究員

「みらい」始動：北太平洋の物質循環研究へ

日下部正志

海洋生物環境研究所



北太平洋における物質循環研究は、国内の関連研究機関・大学等が広く参画する大規模な共同研究プロジェクトとして計画された。観測項目や観測点の選定にあたっては、関係研究者間で綿密な事前協議を複数回にわたり実施し、統一的かつ効率的な観測体制の構築が図られた。観測海域は季節的に荒天の発生が頻繁に予想される厳しい環境下にあり、この海域における本格的な広域観測を可能とする基盤として、国内最大級の観測能力を備えた研究船「みらい」の竣工は、関係者から極めて大きな期待をもって迎えられた。

私は、研究船「みらい」による北太平洋における物質循環の研究航海のため、1997年から2000年にかけて3回、首席研究者として乗船した。最初の航海はMR97-02（1997年11月10日～12月6日）であり、「むつ」から「みらい」へ改装後の慣熟航海も兼ねていた。青森県むつ市で初めて「みらい」を見た際、その巨大さに驚いたのを覚えている。船体には新しい船名の下に、かすかに「むつ」の文字が残っており、完全に変貌したとはいえ、その出自を控えめに主張していた（図1）。本航海には4つの大学の研究者や学生が乗船した。主な観測は、CTDによる観測と海水採取、表層連続観測（ pCO_2 、 TCO_2 、栄養塩、塩分、表面水温）、セジメントトラップの設置、海底堆積物の採取などである。荒天と機器の不調による一部遅延や予定変更はあったものの、計画されていた主要な観測項目はすべて実施され、「みらい」の観測船としての実力を示した（図2）。



図1 船体に記された新たな船名「みらい」の下に、かすかに残る旧名「むつ」の文字。かつての原子力船が、観測船として新たな使命を担う出発点となった。

2回目の航海（MR98-K01、1998年10月30日～12月16日）は、冬季の北太平洋北西部において、これまで得られていなかった生物地球化学的データの取得を目的とした。参加者数・観測項目共に前回より増加し、本格的な研究航海となった。航海は2つのレグに分かれ、レグ1では悪天候の影響で一部観測点を割愛せざるを得なかったが、全体としては冬季北西太平洋の広範囲にわたる観測データを得ることができた。主な観測には、採水、表層連続測定、海底堆積物の採取、漂流セジメントトラップ、大気観測、生物生産量の測定、XBT/XCPおよびCTP-ALACEフロートによる水塊構造の把握、地球物理観測などが含まれる。

3回目の航海（MR00-K03、2000年5月9日～6月10日）は、北太平洋北西部の物質循環過程において重要とされる千島列島およびオホーツク海周辺海域の詳細な観測を目的とした。この海域は北太平洋中層水の起源域であるにもかかわらず、ロシアの排他的経済水域（EEZ）内に位置するため、長らく日本の海洋研究船による調査は行われてこな

かった。観測実施にあたっては、外務省を通じた事前交渉が必要であり、私自身もサンクトペテルブルクを訪問してロシア側との協議を行った。最終的にロシア側から2名の研究者と2名の役人が乗船し、観測を実施した。この航海では、CTDによる採水・水温塩分構造の観測、堆積物コアの採取、XBTの投入、セジメントトラップの回収・再設置、大気化学成分の測定などを行った。ロシア側関係者との調整には慎重な対応が求められ色々を使うこともあったが、観測は予定どおり遂行された。これにより、千島列島を挟むオホーツク海と太平洋側の詳細な水塊構造と物質輸送の情報が得られた。

3回にわたる研究航海を通じて、北太平洋における物質循環の構造や季節変動を解明するための包括的かつ高精度な基礎データが多数収集され、それに基づく研究成果は国内外の学術論文として広く発表された。これらの成果は、研究船「みらい」が有する高性能な観測装置と高度な航海能力、さらに熟練した観測技術員による総合的な支援体制のもとで達成されたものである。

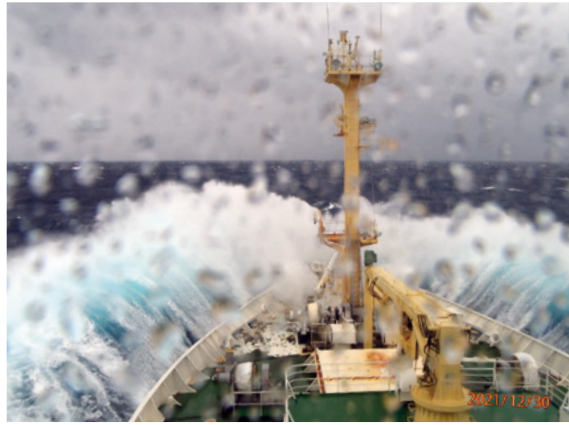


図2 MR97-02航海を終えて神戸港に入港。消防艇による放水やブラスバンド演奏など盛大な歓迎式典が行われた。

「みらい」の観測力

三野義尚

名古屋大学
宇宙地球環境研究所



荒天時のオモテに迫る高波

「みらい」との出会いは、1997年の慣熟航海でした。名古屋大学のD1学生としてアルバイトで参加し、それまでに乗った淡青丸や白鳳丸とは違う、広大な後部甲板や艙側リフターからせり上がるCTD採水システムに圧倒され、特別な観測船だと強く印象づけられました。食事も豪華で、特別感をさらに後押ししてくれました。

翌年には研究航海にも参加し、西部北太平洋の高緯度域と赤道域での観測を経験。計2航海、約100日間の乗船でした。当時始まった日本初の時系列観測点KNOTでは、JAMSTECをはじめとする研究機関の方々と出会い、大学教員とは異なるスマートで頼もしい姿に憧れを抱きました。指導教官の才野敏郎先生がKNOT設置に関わっていたこともあり、その後も研究発表などで関わりは続きましたが、「みらい」との縁はしばらく途切れました。

その間、学位を取得し、大学で係留観測システム（POPPSブイ）の開発に従事。相模湾での運用試験航海では現場法培養やセジメントトラップ実験も行いましたが、当時の私はデータの質よりも作業をこなすことに意識が向いていたように思います。転機は、才野先生がJAMSTECへ異動し、「外洋でのPOPPSブイ運用と浅層粒子研究を手伝ってほしい」と声をかけられたこと。

西部北太平洋の亜寒帯域K2と亜熱帯域S1を比較するK2S1プロジェクトに参加することになり、この観測を担ったのが「みらい」でした。2010～2011年の季節航海や以降の年1回の航海では、

4,500m超の長尺係留系回収・再設置、ディープCTD採水、多段プランクトンネット、FRF（高速フラッシュ励起蛍光光度計）や現場ろ過装置の投入など多岐にわたる観測が実施されました。

中でも印象深いのは、10層の筒型セジメントトラップを連凧のように設置し漂流させた実験。「みらい」の広い甲板とAフレームがなければ実現しなかったと思います。さらに感銘を受けたのがルーチン採水。10種類以上の項目に応じた採水作業を、数時間かけて班長が指揮しながら行う過程は、沿岸観測では得られなかった緊張感と丁寧さに満ちていました。ミスを何度も指摘され、「そこまでやる必要あるのか」と思ったこともありましたが、船上での分析結果はごまかしを許さず、採水精度がデータ品質に直結することを痛感しました。

「みらい」は、最新の観測機器だけでなく、経験豊富な船員の操船と甲板作業、そしてMWJスタッフの観測への真摯な姿勢によって成り立っています。「あの大きさなら揺れないでしょ」と言われますが、実際は荒天待機が毎回あります。それでも、海況が回復するまでその場にとどまり観測を継続できる、それが「みらい」の強さです。だからこそK2やS1では穴のないデータセットが得られ、季節変化や経年変化を精度高く分析できるのです。取得から10年以上たちますが、K2S1のデータセットは今もなお新たな成果を生み出しています。

「高品質なデータを高確率で取得できる」こと、これが私にとっての「みらい」の最大の長所です。その裏には、私の

見えないところでも多くの非乗船者の努力と想いがあるのでしょう。「みらい」が退役しても、この精神は次の船に受け継がれ、未来へ続いていくと信じています。それでもやはり、私にとって「みらい」は特別な船です。長い間、本当にお疲れさまでした。心から感謝を伝えたいと思います。



ハイブリッド係留系投入前の後部甲板

「みらい」によるオホーツク海での観測

原田尚美

東京大学
大気海洋研究所



MR00-K03クルーズレポートの表紙

私が海洋科学技術センター（現 海洋研究開発機構）に研究員として採用されたのは1995年。その2年後の1997年に「みらい」のMR97-02慣熟航海に参加して以来、「みらい」にはとてもお世話になってきました。

いろんな思い出がありますが、最も思い出深いのは、2000年にロシアの排他的経済水域内で観測した経験です（MR00-K03航海）。当時の計画書を見ると、「北西部北太平洋及び隣接海域における二酸化炭素の挙動」というタイトルで、調査主任はかつての上司である海洋観測研究部の日下部正志主幹でした。北西部北太平洋の隣接海域とはオホーツク海のこと、そこは北太平洋中層水の形成場として大変重要な海域でした。この中層水が二酸化炭素の運び屋としてまた貯蔵庫として北太平洋に流れ込みながら大きな役割を果たしていると言われていましたが、当時、系統立った観測は実施されていなかったことから、カムチャツカ海流のオホーツク海への入り口である牟知（クルゼンシュティエルナ）海峡、オホーツク海水の出口である北得撫水道（ブッソル海峡）の海域で航海が計画されたのでした。

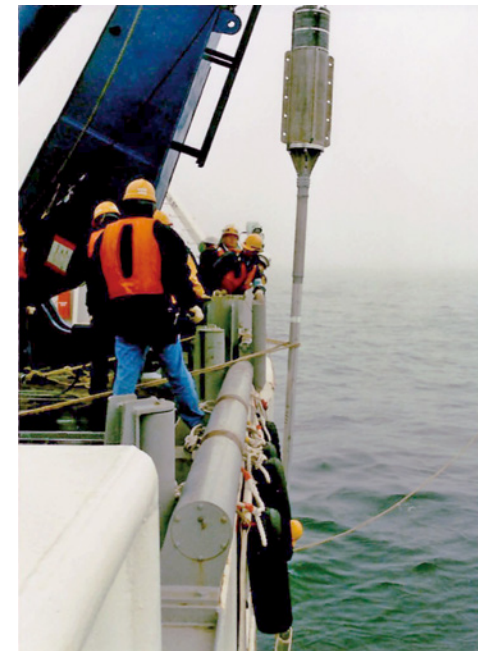
この研究航海では、CTDハイドロキャストをはじめ大気観測やネットによるプランクトンの採取、漂流型セジメントトラップ観測、海底堆積物の採取など多岐にわたる観測項目を実施。ロシア人研究者も参画しながら充実した観測を行うことができました。おかげで、私が担当した海底堆積物を用いたオホーツク海の過去の海洋環境を復元する研究の成果

が日本人のみならず、ロシア人を筆頭著者にした多くの論文として公表され、実り多い航海だったと感じています。この計画は1999年6月23日に東京で開催された第5回日露科学技術協力委員会で、今後の日露協力項目の一つとして合意されたものでした。当時は、このように日露間で科学技術に関する会議も開かれており密接に連携した研究を進めることができていました。

残念ながら2000年を最後に、この海域での観測は許可されなくなりました。北太平洋中層水の形成場として、千島列島沿いの海底地形が影響する活発な鉛直混合による栄養塩の供給場として、重要海域であることに変わりありません。その後、北海道大学低温科学研究所の

若土正暁先生、中塚武先生（現 名古屋大学）、西岡純先生がロシアとのコネクションにより、ロシア船を用いたオホーツク海の観測を精力的に進めてくださった結果、微量栄養塩の鉄の供給場としても重要な海域であることがわかり大きな成果が創出されてきました。

「みらい」のような最新の測器を搭載した観測船で最後に観測してから24年が経過した今、この海域がどう変化しているのか、あらためて「みらい」で観測したいと思う海域です。近い将来「みらいII」の就航により国際プラットフォームとしての運用が実現したところには、ロシア人研究者との連携研究の再開も夢ではなくっていると良いと思います。



20mピストンコアラ。海底堆積物を採取する装置。オホーツク海は外洋に比べて堆積速度が速く、高い時間分解能で詳細な過去の海洋環境を復元することができる。

「みらい」から始まった海洋研究

岩本洋子

広島大学
大学院統合生命科学研究所



図1 ダッチハーバーで撮った車のナンバープレートとMR07-05クルーズレポートの表紙

この度の「みらい」退役に際し、執筆の機会をいただき誠に有り難く存じます。私が初めて「みらい」に出逢ったのは、東京理科大学で過ごした学部生時代でした。卒業研究として、「みらい」MR03-K01航海で採取された大気エアロゾル粒子の個別粒子分析を行いました。分析対象の粒子は、当時の指導教員であった三浦和彦先生が採取されたものでした。研究を進めるうちに、「実際に研究船に乗ってみたい」という思いを強めていきました。その後、大学院に進学し、東京大学海洋研究所(当時)に所属したことをきっかけに、念願叶って毎年のように研究航海に参画しました。

私が初めて「みらい」に乗船したのは、博士課程2年生だった2007年の夏でした。関根浜を出港し、北緯47度線の観測を経てダッチハーバーに入港するMR07-04航海と、ダッチハーバーからベーリング海を経て西部北太平洋を観測し、関根浜に帰港するMR07-05航海の2つの航海、連続70日間の乗船でした。それまでに、他の研究船に乗った経験はありましたが、「みらい」は初めてでした。母港である関根浜があるむつ市も、瀬戸内育ちの私にとっては異郷の地でした。積込作業の後で立ち寄った銭湯で、年配の女性たちの交わす会話が一言も理解できなかったことはカルチャーショックとして強く印象に残っています。

乗船当初は、学生が少なく、やや「アウェイ」な雰囲気を感じていましたが、次第に乗組員や技術員の皆さんとも打ち解けていったように思います。当時はやっていた「ビリーズブートキャンプ」の船内

エクササイズに参加したり、散髪が上手いと評判の機関部の乗組員の方に髪を切ってもらったりもしました。寄港地のダッチハーバーは、一晩のみでしたが思い出に残るものでした。事前に、「ブルーベリーが沢山生えている」「海岸にウニがごろごろ落ちている」「ロシア正教の教会がある」などの情報を得ていました。夕方ようやく下船できることになって、同船していた名古屋大学の永尾一平先生をウニ拾いに誘い、缶ビールとプライヤーを持って出かけました。怪しそうに見えたのか、出かける際に石岡靖船長から「鮭獲ったらいかんよ」と注意されました。天気が悪く、とても海岸に近づけそうに無かったので、早々にウニは諦めて、ロシア正教の教会まで歩く間に、鮭が小川を遡上するのを初めて見て感動しました。ダッチハーバーでは、ゴールドドラッシュをデザインした車のナンバープレートを見つけて、思わず写真を撮りました(図1左)。

MR07-05航海では、亜寒帯の定点K2で、係留系の掛け替え作業が行われました。広い後部甲板には観測機器やガラス玉、それらを繋ぐロープが並べられ、Aフレームを出し入れしながら、一日がかりで作業が進められるのを眺めていました。そろそろ日本が恋しくなった頃合いに、当時の指導教員の植松光夫先生が東京からインマルサット電話をかけてくれました。航海終盤にクルーズレポートの表紙コンテストが開催され、ダッチハーバーで撮ったナンバープレートのデザインを真似て係留系と航海名を配置した表紙を出品したところ、幸いにもコン

テストで優勝し、表紙のデザインとして採用されました(図1右)。航海終盤には4tトラック1台分の機材を店じまいするのに一苦労でした。最後に、フォアマストに設置した測器をGODI(当時)さんの協力のもとで取り外し、トラックに積んだあとは、その場でへたり込んでしまうほどでした。

最後に研究について触れさせていただきます。当時の私の研究テーマは、海水中懸濁粒子の分析を通して海洋表層の物質循環過程を明らかにすることでした。2007年の二つの「みらい」航海で北太平洋亜寒帯海域の東西の試料を採取できたことで、懸濁粒子組成の海域による違いが明らかになりました。論文にまとめた際には、採取地点をマッピングした図を査読者に「この地図が好きだ」と褒めてもらえました。また、航海中に数々の測器トラブルを対処していく上で、現場での判断力や対応力が養われました。現在、研究船を使った大気海洋観測は私の研究の柱となり、航海を通じて得た人との繋がりが研究の発展に寄与しています。そのきっかけをくれた「みらい」に心から感謝しています。

2021年には、コロナ禍のさなか14年ぶりに「みらい」に乗船する機会に恵まれました。また、近年は地元の瀬戸内海のドックで偶然「みらい」を見かけることもありましたが、もう逢えないと思うと寂しいですが、これまでの長い活躍、本当にお疲れさまでした。



Steven J. Manganini

Emeritus Research Scholar,
Woods Hole Oceanographic Institution



WOODS HOLE
OCEANOGRAPHIC
INSTITUTION

Steven J. Manganini, Emeritus Research Scholar
Geology & Geophysics

To: Dr. Makio Honda
JAMSTEC, Yokosuka, Japan

March 29, 2025

Subject: RV Mirai Retirement letter

Dear Dr. Honda,

I thank you for inviting me to write this letter about my cruise participation on the RV Mirai, as she will be retiring soon. I am greatly honored to share my very productive, and pleasant experiences on the RV Mirai during my time as Research Specialist at the Woods Hole Oceanographic Institution.

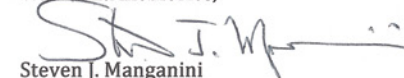
As you probably recall, it was an exciting time during those past cruises as new discoveries in the deep ocean were being made with the use of newly developed time-series equipment. The late Dr. Susumu Honjo was a pioneer in this innovative research with the development of Time-Series Sediment Traps (shown in photo) to collect settling particles on an annual basis in the deep ocean, significantly contributing to our understanding of biogeochemical process. We also realized that these time-series data needed to be integrated within the global ocean requiring simultaneous deployments in all oceans. To achieve this goal, collaboration with our institution and JAMSTEC was necessary and the RV Mirai was an important factor in achieving this goal. The RV Mirai had the equipment and personnel to be successful!

I participated on (2) RV Mirai cruises, where we deployed and recovered several time-series equipment at several stations in the North Pacific. The RV Mirai was the perfect ship to successfully accommodate our research. Precise locations as well as depths were needed along with specialized deck deployment and recovery equipment and personnel and the Mirai had everything we needed. In addition, the preparation of the highly sensitive electronic profiler, large volume pumps, and geochemical sediment traps needed dedicated laboratories requiring a range of top quality specialized equipment and personnel, which the Mirai always had on board. All our projects were very successful and we honor and congratulate the RV Mirai, and the Officers, Crew and Scientists who sailed on her during her extraordinary career and now retirement. Thank you RV Mirai!



Working on the deck of the RV Mirai, Dr. Makio Honda with colleague, and myself are preparing time-series sediment traps from JAMSTEC and the Woods Hole Oceanographic Institution for deployment in the North Pacific.

With fond memories,



Steven J. Manganini
Emeritus Research Scholar, WHOI

Our Ocean. Our Planet. Our Future.

whoi.edu