

# 環境調和型産業技術研究ラボ 沿岸環境研究チームの紹介

青木 伸行<sup>1)</sup>・井口 亮<sup>2)</sup>・田村 亨<sup>2)</sup>・町田 功<sup>3)</sup>・山本 聡<sup>2)</sup>・チョン 千香子<sup>1)</sup>

## 1. 沿岸環境研究チームの概要

人口と経済が集中する沿岸域は、企業立地・産業基盤の中核となっており、継続的な産業利用が求められている。一方で、多種多様な生物種を育み、水産資源や観光資源などの生態系サービスを提供している沿岸域の環境を守ることも重要なミッションである。こうした状況において、持続可能な沿岸域の利用を実現するには、人間活動による沿岸域の環境変化を許容しつつ、産業利用との折り合いをつけていかなければならない。加えて、近年では気候変動などの地球規模での環境変化が顕著となってきており、地球温暖化や海洋酸性化・海洋貧酸素化、海面上昇等による河岸・海岸の後退による立地減少等の気候変動に起因する各種環境問題の中長期的評価も必要となっている。

そこで、環境調和型産業技術研究ラボ (E-code) 沿岸環境研究チームでは、気候変動下における環境保全および産業利用に資する環境基盤情報の整備を行い、さらにそれらを適宜適用した気候変動を考慮した環境影響評価技術の開発を目指す。そのために、まずは気候変動の影響が顕著に表れる沖縄本島およびメコン川流域において、研究を開始する。沖縄本島では、サンゴ礁をテストケースとして、分子生態学的手法を中心とした信頼性の高い環境モニタリング・評価技術を開発し、環境保全・修復・管理技術への展開を目指す。河岸海岸侵食が深刻化し、地球温暖化による海面上昇の影響を特に受けやすいメコン川流域では、近過去から現在までの土地利用の変化や気候変動など複数の要因を理解すること、ならびに沿岸域を対象とした地下水環境情報・衛星データを通じて、沿岸域の持続的産業利用に貢献する。また、地下水の情報をとりまとめた水文環境データベースの整備、および温度などのさまざまな情報を広域で得られる衛星データの品質管理および検証研究を実施して、E-code で整備する環境データベースの構築に貢献する。さらに、沿岸環境研究チームおよび海洋環境研究チームの環境影響評価において、生物活動の制限因子として重要な栄養塩等の化学分析技術の高度化や妥当性評価等を計

量標準分野の知見を活かして行う予定である。

これらの研究は、地質調査総合センター地質情報研究部門海洋環境地質研究グループ、リモートセンシング研究グループ、地圏資源環境研究部門地下水研究グループ、計量標準総合センター物質計測標準研究部門無機標準研究グループ、ガス・湿度標準研究グループに所属する計 18 名(内 2 名は海洋環境研究チームに所属)で実施する。沿岸環境研究チームで実施する (1) 分子生態学的手法を用いた環境モニタリング・評価技術の開発、(2) メコン川流域における地質情報の整備、(3) 水文環境データベースの整備、(4) 衛星データの整備、(5) 栄養塩分析技術の高度化について以下で紹介する。

## 2. 研究内容の紹介

### (1) 分子生態学的手法を用いた環境モニタリング・評価技術の開発

人間活動が活発な沿岸域の産業利用を持続的に進めていくためには、環境ベースライン調査や環境影響評価に資するための環境リスク評価技術の開発が必要となる。現在、生態系の生物多様性を定量的かつ高精度に評価するための技術革新が進んでおり、特に次世代シーケンサーと呼ばれる遺伝子情報を短時間で大量に得られる技術の進展が著しい。その技術普及に伴い、環境 DNA のような比較的容易に生物種の把握が行える手法が発展してきた(井口ほか, 2019)。また、ある特定の種内の遺伝的変異を定量化することで、集団間の連結性を評価できる分子集団遺伝学的解析や、ある特定の個体が環境変化に曝された時にどのように応答するのかを、網羅的遺伝子発現解析を実施することで、そのメカニズムの詳細を把握できることも可能となっている。こうした分子生態学的手法は、基本どの生物種にも適用可能であり、多種多様な生物種が生息する沿岸生態系においても頻りに利用されている。

熱帯・亜熱帯の沿岸生態系においては、サンゴ礁やマングローブ、干潟、海草藻場など、特徴的な景観を織りなす

1) 産総研 計量標準総合センター 物質計測標準研究部門

2) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

3) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

キーワード：沿岸環境、環境影響評価、沖縄、メコン川、衛星データ、地下水、栄養塩、河岸海岸侵食

生態系が隣接している。これらの生態系は、いずれも地球規模・地域的規模の環境変化によって、生物多様性の減少が危惧されている。特にサンゴ礁生態系は、非常に高い生物多様性で特徴づけられることが知られているが、その基盤構成種である造礁サンゴ類(以下、サンゴ)が人為的二氧化碳素の増加に起因するとされる高温ストレスや海水の酸性化に鋭敏であるため、世界的に減少が危惧されている。また、これらの地球規模の環境変化に加えて、陸域からの赤土の流出や農業・畜産由来の栄養塩の負荷のような、地域的規模の環境変化も合わさって、複合的な悪影響がサンゴの生育を妨げている可能性も指摘されている(De'ath *et al.*, 2009)。しかし、陸域と沿岸域が地下水等によってどの程度連結しているのかは不明な点が多く、陸域の開発が沿岸域に及ぼす影響はまだ十分には研究が進んでいない。

以上の背景から、沖縄本島のサンゴ礁をテストケースとして、分子生態学的手法を中心とした信頼性の高い環境モニタリング・評価技術を開発し、環境修復・管理技術に資することを目指している。具体的には、著者らは沖縄本島の広域から代表的なサンゴ種のサンプリングを行い、各地域間の連結性を、分子集団遺伝学的手法によって明らかにしてきた(Nakajima *et al.*, 2017 他)。さらに、最新の塩基多型情報解析の技術導入も進めており(Iguchi *et al.*, 2019 他)、より狭い空間スケールでの集団連結性の把握も試みている。サンゴの環境応答に関しては、国内でもいち早く飼育実験系の確立を進め、これまで高温ストレスや酸性化海水、栄養塩負荷を与えたサンゴ飼育実験を進めてきた(Inoue *et al.*, 2012 他)。その中で、サンゴの遺伝子型の違いによって環境応答に対して顕著な種内変異があることも見出しており(Sekizawa *et al.*, 2017)、現在そのメカニズム解明を進めている段階である。また、沖縄本島の各種生態系や陸域との連結性を明らかにするために、水サンプルを対象とした遺伝子解析を広範囲で進めており、細菌類から真核生物まで幅広く遺伝子情報を取得・解析している。

今後の課題としては、より広範囲での沿岸生態系の基盤構成種の分布情報を効率的に把握するために、リモートセンシング技術と野外調査、集団遺伝学的解析の連携が求められる。また、陸域と沿岸域のつながりを把握するために、地下水等を含む両域を横断する形での水等のサンプリングを行い、遺伝子解析によって様々な生物種の群集解析を進めていくことが必要である。また、野外や飼育実験において、各種環境要因を高精度で測定していくことが必要である。特に栄養塩は、サンゴ礁海域では元々低濃度であるた

め、そうしたサンプルの測定をどのように高度化していくかが今後の課題である。これらの課題を踏まえて、現有の分子生態学的手法を合わせた融合研究を推し進め、沿岸生態系を取り巻く様々な社会課題の解決に資することを目指していきたい。

## (2) メコン川流域における地質情報の整備

アマゾン川、ナイル川、ガンジス川などに代表される世界の大河流域には 27 億の人口が居住し、その多くが途上国の経済発展を支えている。こうした経済発展に伴う人間活動と地球規模での気候変動により、大河流域での環境変化はかつてない規模で進行している(Best, 2019)。一方で大河は複数の国にまたがる、国際河川であることが多い。国際河川では流域全体での管理が難しい。上流の国の益になることが、下流の国にとっては損になるなど、利益相反をきたすことが多いためである。こうした河川流域は経済発展や産業立地のポテンシャルが大きく、それらの障壁となる環境問題の緩和に資する科学的なデータ集積や環境システムの理解は、大きな社会課題である。

チベット高原を源流として南シナ海に注ぐメコン川は、国際河川の典型である。中国からミャンマー、ラオス、タイ、カンボジア、ベトナムの 6 カ国を流れ下る全長約 4,600 km の大河川で、流域には 6,000 万の人口を抱える。わが国にとってメコン川流域は重要な支援地域である。中国を除く流域 5 カ国との「日本・メコン地域諸国首脳会議」は毎年開催され、2019 年に採択された「2030 年に向けた SDGs のための日メコン・イニシアティブ」ではメコン地域の持続的な反映を実現するためにわが国が貢献することがうたわれている。

東南アジアのメコン川流域ではモンスーン気候の影響により、夏の雨季と冬の乾季との差がはっきりとしている。雨季に集中する降雨によって、河川水位は 1 年単位で最大 10 m にもおよぶ上昇と低下を示し、流域からは多量の土砂が侵食されて流出する。河川水位の上昇は河川沿いの低地での河川氾濫を伴い、農業に不可欠な栄養塩の供給や、独特の生態系を支える役割も大きい。しかし近年、河川の水量や土砂量の変容が大きな問題となっている。その原因として、温暖化に伴う気候変化、上中流域でのダム構築、河川土砂の採取などが上げられる。気候変化では例えば、台風の経路が変化することにより、上中流域での雨量の減少に伴って流出土砂量が 1981 年から 2005 年の間に約 30 % も減少したという見積り(Darby *et al.*, 2016)もある。また、メコン川流域の経済発展を支えるため、発電や灌漑を目的として本流と支流に多数のダムが建設されているが、計画中のものも含めて流域内の全てのダムが稼働した

場合、流出土砂の少なくとも 50 % がダム貯水池に堆積して下流への運搬量が減少すると見積られる (Kummu *et al.*, 2010). さらに、建材などに用いられる河川土砂の採取量も膨大であり、最下流域だけで少なくとも年間 2,000 万 m<sup>3</sup> に及び (Brunier *et al.*, 2014), 流域全体での流出量の 1 割に相当する。こうした流域での土砂量の変容は、メコン川上流域で最初の本流ダムが建設された 1990 年代以降、懸念されてきた問題であるが、最近数年では事態がさらに悪化している。特に 2019 年以降、メコン川の中下流域では雨季に歴史的な河川水位の低下に見舞われている。これは流域全体の干ばつの他、2012 年に完成した上流域で最大級のダムの影響などと言われるが、今後こうした河川水量と土砂量の急減が中長期的に継続する可能性は大いにある。

メコン川最下流の沿岸部では、他の大河川同様に、河川からの多量の流出土砂の堆積による三角州平野が形成されている。河川土砂量の減少の影響で懸念されるのは、それまでの土砂供給により維持されてきた海岸の侵食だが、実際に近年ではその深刻化が衛星画像の解析から報告されている (Anthony *et al.*, 2015 ; Li *et al.*, 2017). さらに、三角州平野での地下水くみ上げにより、年間数 cm という速度で沿岸の地盤沈下が見積られ (Minderhoud *et al.*, 2017), こうした海岸侵食のさらなる悪化が見込まれる。一方で、三角州平野の沖積層・地形の年代測定や古地形図に基づく長期的な海岸線変化の解析 (Tamura *et al.*, 2020) では、最近数十年間に観察される海岸侵食と上流のダム構築との関係に不明な点が多くあることが指摘されている。また、一部、河口域などの重要地域においては、海岸侵食が衛星画像により検知可能な陸上に見えている部分ではなく、水深約 5 m までの浅海域で大きく進行していること、また最近数年のメコン川水量の激変も相まって、今後 10 ~ 20 年間で海岸侵食の被害が激増することも示唆される。沿岸部の特に浅海域の土砂収支評価や、また数値モデリングによる地形変化予測のための水深などの地質情報が不足しており、早急に整備が必要である。

以上の問題点から、本サブテーマではメコン川三角州の沿岸部において、浅海での測深や堆積物を中心とした地質情報の整備を行う。沿岸部地形や堆積物運搬量の経年変化などの定量に衛星画像を有効活用し、また堆積物の年代測定において計量標準の放射線計測の技術をいかした高度化をはかるなど、チーム内、領域間での融合を進める。

### (3) 水文環境データベースの整備

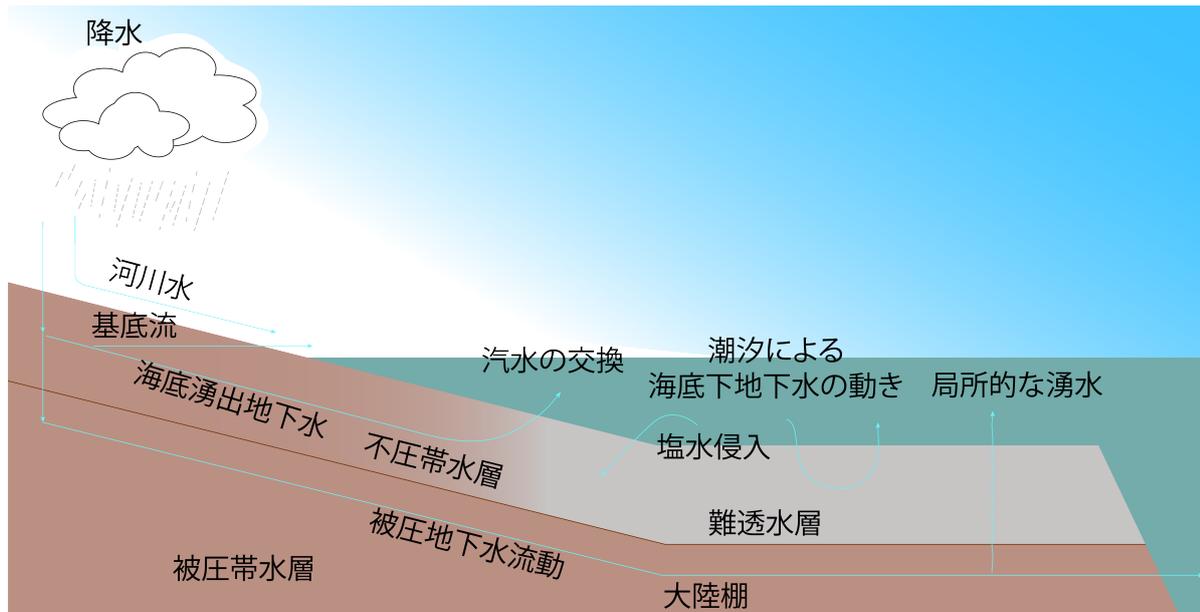
地下水は年間を通じて安定した温度、良好な水質であり、井戸があれば入手できる優れた水資源として沿岸部の人間

活動や経済活動を支えてきた。利用されている地下水の多くは (燃料資源や鉱物資源とは異なり), 雨によって補充される更新型の資源である。そのため、適切に利用すれば、地域の生活や経済発展に持続的に貢献することができる。このような理由から、地質調査総合センターでは地下水の情報を取りまとめた水文環境図を編集し、ウェブサイトで公開してきた。2020 年 11 月現在、8 地域 (関東平野、熊本地域、石狩平野、富士山、筑紫平野、勇払平野、大阪平野、山形盆地) が公開されており、次年度にかけて、紀の川平野 (和歌山県)、静清地域 (静岡県) の公開を予定している。

このたび、沿岸環境研究チームが発足するにあたり、ここに「沖縄本島」および「仙台平野」を編集対象に加えることとした。この目的として①沿岸域における環境影響評価手法の開発に資するため、そして、②表層土壌評価基本図との融合を指向するため、という 2 つが挙げられる。

①に関して、沖縄本島の中央から南側の地質は、島尻層群と呼ばれる新第三紀層が分布し、その上位を第四紀石灰岩 (琉球層群) が覆っている。沿岸環境研究チームでは、この地域にてサンゴの生育状況をプロキシとした環境モニタリング・評価技術の開発および、地球観測衛星を用いた環境評価の高度化をおこなう予定である ((1) 参照)。沿岸域の開発は、海域への汚染物質流出を招きうるが、その輸送経路として地下水は重要な役割を果たしている (第 1 図)。そのため、近年は陸域地下水の塩淡境界に沿った流動パスや海底湧出地下水に関して盛んに研究が行われているものの、その実態を把握できていないと言いがたない。その理由として、地下水の流れは目に見えないため、河川水経由での輸送と比べて影響評価が困難なことが挙げられる。そこで、当該地域にて水文環境図を作成するなかで、海洋環境への影響を考慮した、広域の地下水調査を実施する。現時点では地下水中の銅、栄養塩濃度の把握などを行うとともに、環境モニタリング・評価技術の開発を実施するメンバーと調整し、地下水調査項目に関連する微生物分析を取り込んでいくことも検討している。

②は地圏環境研究チームが実施している表層土壌評価基本図との融合である。詳細は地圏環境研究チームの紹介 (川辺ほか, 2021) に譲るが、この試みでは表層土壌中の重金属濃度の分布と地下水の水質を比較することより、両者の関係性を見出すことを目的の一つとしている。一般に我が国では土壌帯と地下水面 (帯水層の上面) の間には、厚い不飽和帯が存在し、これが地下水を重金属汚染や病原体汚染から守る、バリア機能を有している。表層土壌と地下水の化学的空間的關係を明らかにし、さらに、これに地



第1図 陸域から海域への地下水の流れ (Church, 1996 を基に作成)

理情報(例えば不飽和帯の厚さなど)を加えた考察を行う。特に、影響が表れやすい浅層地下水に着目して、地下水の水質情報を抽出していく。

#### (4) 衛星データの整備

人工衛星に搭載されたセンサによる地球観測技術を衛星リモートセンシング(以下「衛星リモセン」と呼ぶ。これらの衛星リモセンでは、人間の目で検知できる光(可視光)を利用した観測に加え、人間の目では検知できない赤外線や熱赤外線を利用した観測も行われ、様々な光の観測データを総合的に解析することで地表面の細かい情報を読み解く。例えば可視光と赤外線のデータを組み合わせることで、人間活動による沿岸域の土地利用状況の変化や植生分布やマングローブ林の変化、沿岸域の面積変化の情報が得られる。また、熱赤外線のデータを使うと、地表面・水域・植生の温度モニタリング観測を行うことができる。特に沿岸域の温度モニタリングでは、水温の異なる河川域からの水が海域に流れ込む過程を動的に捉えることができるため、地下水や河川域からの物質が沿岸域においてどのように分布し混合するかを知ることができる。さらには、気候変動下における環境影響評価の代表的指標の一つであるサンゴの白化現象のメカニズム解明においても、衛星リモセンによる温度情報は重要な情報を与える。また、衛星リモセンの長所である観測対象の広域性を活かすことで、テストケースとして特定地域で実施された現地調査結果を、広域(全世界の沿岸域あるいは全球)へ展開することが可能となり、さらに同一センサによる長期間に渡る過去

の連続モニタリングデータを活用する事で、時間方向に対する広域展開が可能となる。この場合、過去より激変した気象環境変化のトレンド把握にもつながると期待される。以上のことから、衛星データから得られる環境影響評価に関連する情報を、地圏環境データ、海洋環境データ、地下水等の水文データ等と融合解析することで、信頼性の高い沿岸域の環境モニタリングが可能となり、環境保全・修復・管理技術に対する知見が得られると期待される。

一方、衛星データの情報を本テーマに応用展開する場合、データの精度・信頼性・首尾一貫性といった品質面の確保が重要となる。また、衛星画像の1画素の中に異なる対象物が混在する場合や温度・形状等の不均一があった場合、衛星データの解釈に対する現地調査に基づく検証作業が重要である。ところが、多くの衛星リモセンでは、データ取得後において品質管理や検証が十分に実施されていない場合が多い。さらには、沿岸域の時間変化を評価する場合、年単位といった長期間にわたるデータ品質の確保とその一貫性・安定性が求められるが、国内外の衛星データではそのような品質管理が徹底して行われているものは限定的である。

地質調査総合センターリモートセンシング研究グループでは、National Aeronautics and Space Administration (NASA) と共同で運用している地球観測衛星センサ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) から得られた衛星データの品質管理を行っている。ASTER は、NASA の地球観測衛星 Terra に

搭載され、可視光から熱赤外まで様々な波長の光を利用して地表面を1画素15m～90mで観測するセンサである。2000年から20年間に渡って観測を繰り返しており、沿岸域の環境モニタリングにおいても重要なデータを提供する。また、リモートセンシング研究グループの強みとして自らASTERの観測計画を策定できる立場にある為、テスト沿岸サイトの連続モニタリングを実施することができ、他にはない衛星データの貢献を行える。以上のことから、今回のE-codeへの参画にあたり従来実施してきたASTERの可視光～赤外線データの品質管理および検証研究を、さらに熱赤外線データにまで拡張し、ASTERデータの一元管理に基づいた品質管理および検証研究を実施する。

一方、衛星データの品質管理研究は、他の地質情報や地理情報の場合と違うアプローチが必要である。というのも、地球を周回する衛星に搭載されているセンサ自体を直接検査・試験することは事実上不可能であるからである。そのことから、リモートセンシング研究グループでは大きく2つのアプローチでこの問題に取り組む。1つは、ASTERに搭載されているハロゲン電球や黒体と呼ばれる熱赤外線を出す装置を使った定期モニタリング観測を行い、センサの特性変化(劣化)の評価およびその補正を行うといった「センサ劣化評価法の研究開発」を行う。また、2つ目として地表面において分光計・放射計を使った現地観測(「代替校正実験」と呼ばれる)を基にして、衛星データの品質管理や検証研究を行う。さらに、検証研究等においては、ASTERだけでなく、観測頻度や分解能、観測波長などの異なる海外の他の衛星(Landsat, MODISなど)の統合利用や、現地観測と衛星データをつなぐものとして、沿岸域におけるドローンを使ったリモートセンシング観測を組み合わせる事により、高いデータ品質の確保と信頼性の高い検証に基づく衛星データの整備を推し進める計画である。

### (5) 栄養塩分析技術の高度化

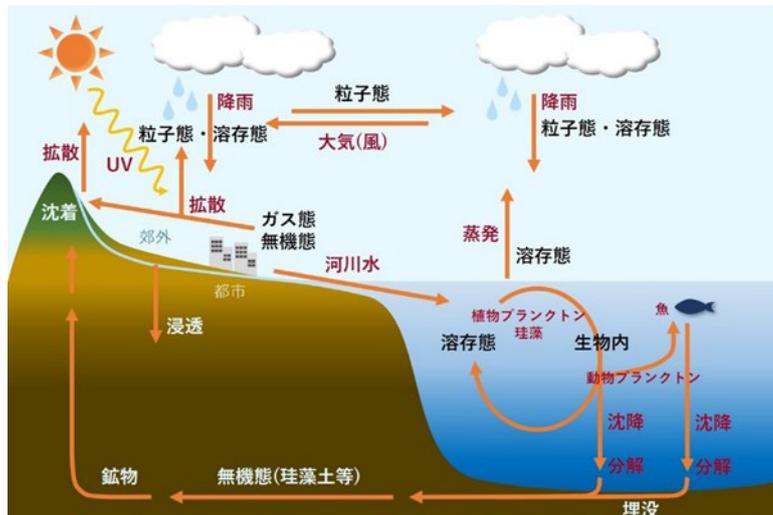
海水中に含まれるリン酸塩、亜硝酸塩、硝酸塩、溶存シリカ等の無機塩は栄養塩と呼ばれ、動植物の栄養源として、生命の維持に必須の成分である。そのため、生態系の機能の解明や、物質大循環の把握、地球温暖化に関わる二酸化炭素の増減の予測等における重要な指標として、時間や海域をまたいだ栄養塩の濃度変動の把握が求められており、世界各国の協力のもと、全球規模で網羅的な海洋観測が行われている。また、沿岸域の産業利用においては、富栄養化によって引き起こされる海洋生物の生育環境の悪化や、アオコ・赤潮等の被害は深刻な問題となる。従って、その影響評価と対策のために栄養塩濃度の把握が求められている。



第2図 NMIJ 栄養塩分析用海水 CRMs (7601-a, 7602-a, 7603-a)

これまで、計量標準総合センター(NMIJ)では、これらの要求における栄養塩分析値の信頼性担保のために、上述の4つの栄養塩に対して国際単位系にトレーサブルな濃度(質量分率, mg/kg)を付与した栄養塩分析用海水認証標準物質(CRM)を開発し、提供してきた。このCRMは、全球の海洋観測における精度管理を念頭に、太平洋深層のような栄養塩高濃度域、大西洋中層のような栄養塩中濃度域、表層水のような栄養塩ゼロ近傍濃度までの3栄養塩濃度水準に対応している(Certificates for NMIJ CRM7601-a, 7602-a and 7603-a, 2014, 第2図)。また、国家計量標準機関間で実施された海水中栄養塩分析に関する国際比較(CCQM-P89, Determination of nitrite and nitrate in calibration solutions and natural water)に参加し、栄養塩の分析値の国際整合性の確保に向けた取り組みを実施してきた。その結果、現在ではmmol/L単位レベルの栄養塩濃度域である海洋中深層においては、有意な濃度変動を把握することが可能になってきた。

一方で栄養塩は、第3図に示すように、大気・陸・海洋の間を様々な形態で循環するため、全球での濃度変動のより正確な把握には、フィールドをまたいだ連携が必須である。そこで、沿岸環境研究チームでは、沿岸域と海洋域における栄養塩の循環に焦点を当てて、海洋環境研究チームと密接に連携し、生物活動の盛んな海洋表層～沿岸域の栄養塩超低濃度域(nmol/L単位レベル)における栄養塩の濃度変動の正確な把握のための技術開発に取り組む。近年、栄養塩超低濃度域での現場観測の実現に向けて、栄養塩分析法として汎用される自動比色分析法(連続流れ分析法等)に光路長の長いセルを適用した分析技術の開発が進んでいる(Ma et al., 2014)。NMIJでは、足掛かりとして海水中の超低濃度のリン酸塩を取り上げ、上述の分析技術を利用した観測手法の高精度化と信頼性の向上に向けた検



第3図 栄養塩の循環 (Cheong, 2020 を基に作成)

討を行うとともに、誘導結合プラズマ質量分析法などの異なる検出原理を利用した新規分析技術の開発を進め、超低濃度栄養塩の分析技術の妥当性の検証に向けた取り組みを計画している。また、これまでの検討において、比色分析法では海水塩分の濃度やマトリックス組成によって分析感度に違いが生じることが分かっている (Cheong *et al.*, 2014)。分析対象域を海洋沿沿岸域とした場合、採水地点によって塩分の濃度・組成は大きく異なるため、妥当性評価等の計量標準分野の強みを活かして、各地点における精密かつ正確な栄養塩分析の実現に貢献にしたい。

## 文 献

- Anthony, E. J., Brunie, G., Besset, M. Goichot, M. Dussouillez, P. and Nguyen, V. L. (2015) Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. *Scientific Reports*, **5**, 14745, doi:10.1038/srep14745.
- Best, J. (2019) Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, **12**, 7–21.
- Brunier, G., Anthony, E. J., Goichot, M., Provansal, M. and Dussouillez, P. (2014) Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilization. *Geomorphology*, **224**, 177–191.
- Certificates for NMIJ CRM 7601-a, 7602-a and 7603-a (2014) National Metrology Institute of Japan, Tsukuba. [https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/refmate/crm/cert/7601a\\_J.pdf](https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/refmate/crm/cert/7601a_J.pdf), [https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/refmate/crm/cert/7602a\\_J.pdf](https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/refmate/crm/cert/7602a_J.pdf), [https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/refmate/crm/cert/7603a\\_J.pdf](https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/refmate/crm/cert/7603a_J.pdf) (閲覧日: 2021年2月5日)
- Cheong, C. (2020) A study on accurate analysis of seawater nutrients, University of Tsukuba, Ph.D. thesis. Available: <http://hdl.handle.net/2241/00160497> (閲覧日: 2021年2月5日)
- Cheong, C., Nonose, N., Miura, T. and Hioki, A. (2014) Improved accuracy of determination of dissolved silicate in seawater using absorption spectrometry. *Accreditation and Quality Assurance* volume, **19**, 31–40.
- Church, T. (1996) An underground route for the water cycle. *Nature*, **380**, 579–580.
- Darby, S. E., Hackney, C. R., Leyland, J., Kumm, M., Lauri H., Parsons, D. R., Best, J. L., Nicholas, A. P. and Aalto R. (2016) Fluvial sediment supply to a mega-delta reduced by shifting tropical-cyclone activity. *Nature*, **539**, 276–279.
- De'ath, G., Lough, J. M. and Fabricius, K. E. (2009) Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, **323**, 116–119.
- 井口 亮・水山 克・頼末武史・藤田喜久 (2019) 遺伝子解析による琉球列島の海底洞窟性生物群集の多様性と集団形成・維持機構に関する研究の現状と今後の課題. *タクサ*, **46**, 28–33.
- Iguchi, A., Yoshioka, Y., Forsman, Z. H., Knapp, I. S., Toonen, R. J., Hongo, Y., Nagai, S. and Yasuda, N. (2019) RADseq population genomics confirms divergence across closely related species in blue coral (*Heliopora coerulea*). *BMC Evolutionary Biology*, **19**, 187.
- Inoue, M., Shinmen, K., Kawahata, H., Nakamura, T., Tanaka,

- Y., Kato, A., Shinzato, C., Iguchi, A., Kan, H., Suzuki, A. and Sakai, K. (2012) Estimate of calcification responses to thermal and freshening stresses based on culture experiments with symbiotic and aposymbiotic primary polyps of a coral, *Acropora digitifera*. *Global and Planetary Change*, **92**, 1–7.
- 川辺能成・保高徹生・黒澤忠弘 (2021) 地圏環境チームの紹介～地圏環境リスク課題の環境調和型管理および対策に資する基盤情報整備～. *GSJ 地質ニュース*, **9**, 332–338.
- Kummu, M., Lu, X. X., Wang, J. J. and Varis, O. (2010) Basin-wide sediment trapping efficiency of emerging reservoirs along the Mekong. *Geomorphology*, **119**, 181–197.
- Li, X., Liu, J. P., Saito, Y. and Nguyen, V. L. (2017) Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams. *Earth-Science Reviews*, **175**, 1–17.
- Ma, J., Adornato, L., Byrne, R. H. and Yuan, D. (2014) Determination of nanomolar levels of nutrients in seawater, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **60**, 1–15.
- Minderhoud, P. S. J., Erkens, G., Pham, V. H., Bui, V. T., Erban, L., Kooi, H. and Stouthamer, E. (2017) Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, **12**, 064006. doi:10.1088/1748-9326/aa7146.
- Nakajima, Y., Nishikawa, A., Iguchi, A., Nagata, T., Uyeno, D., Sakai, K., & Mitarai, S. (2017) Elucidating the multiple genetic lineages and population genetic structure of the brooding coral *Seriatopora* (Scleractinia: Pocilloporidae) in the Ryukyu Archipelago. *Coral Reefs*, **36**, 415–426.
- Sekizawa, A., Uechi, H., Iguchi, A., Nakamura, T., Kumagai, N. H., Suzuki, A., Sakai, K. and Nojiri, Y. (2017) Intraspecific variations in responses to ocean acidification in two branching coral species. *Marine Pollution Bulletin*, **122**, 282–287.
- Tamura, T., Nguyen, V.L., Ta, T. K.O., Bateman, M. D., Gugliotta, M., Anthony, E. J., Nakashima, R. and Saito Y. (2020) Long-term sediment decline causes ongoing shrinkage of the Mekong megadelta, Vietnam. *Scientific Reports*, **10**, 8085.
- 
- AOKI Nobuyuki, IGUCHI Akira, TAMURA Toru, MACHIDA Isao, YAMAMOTO Satoru and CHEONG Chikako (2021) Overview and activities of Coastal Environment Research Team, Research Laboratory on E-code.
- 
- (受付:2020年12月25日)