

微化石標本・資料センター (MRC: Micropaleontological Reference Center) の活動と課題

齋藤めぐみ*・谷村好洋*・鈴木紀毅**・相田吉昭***・須藤 斎****

*国立科学博物館地学研究部・**東北大学大学院理学研究科地学専攻・***宇都宮大学農学部地質学研究室・****名古屋大学大学院環境学研究科

Activity of Micropaleontological Reference Center (MRC) and its future

Megumi Saito-Kato*, Yoshihiro Tanimura*, Noritoshi Suzuki**, Yoshiaki Aita*** and Itsuki Suto****

*Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science, 4-1-1 Amakubo, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0005, Japan (memekato@kahaku.go.jp); **Department of Geoscience, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aramaki Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8578, Japan; ***Department of Geology, Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350 Mine, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8505, Japan; ****Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8601, Japan

Abstract. Micropaleontological Reference Centers (MRCs) provide scientists with an information concerning geologic ages and a global distribution of microfossils. The collections, with more than 20,000 samples, cover four microfossil groups of calcareous nannofossils, foraminifers, radiolarians, and diatoms that occurred from sediment cores obtained from the Deep Sea Drilling Project (DSDP), the Ocean Drilling Program (ODP), and the Integrated Ocean Drilling Program (IODP). MRCs welcome more active use of MRC collections to study global distribution and its historical changes of marine microfossils as well as preparation for biostratigraphic analyses on board.

Key words: Deep Sea Drilling Project, microfossil, MRC (Micropaleontological Reference Center), Ocean Drilling Program, Integrated Ocean Drilling Program

はじめに

微化石標本・資料センター (Micropaleontological Reference Centers, MRC) には、半世紀以上前に始められた深海掘削によって得られた貴重な微化石コレクションを保管している。この微化石コレクションは、微化石の研究史において、もっとも網羅的なものとなっている。たとえば、微化石の1グループである放散虫化石においては、40年以上にわたる深海掘削の成果として、1192種の有効名が報告されていることが明らかとなった (Lazarus *et al.*, 2015)。深海掘削で得られる微化石のほとんどが新生代のものに限られているのにも関わらず、この種数は1万5000種ほど知られている放散虫類 (鈴木, 2016) のおよそ1割に近い。また、グローマー・チャレンジャー号を用いた掘削が開始された1968年から1983年までに96回の掘削航海が実施され、この間に得られた微化石標本から950種あまりの新種が記載されてきた。したがって、MRCは、これらの新種記載において指定されたホロタイプに準ずる標本 (パラタイプ) も数多く保管されている。このような科学的に重要な標本は研究者に広く公開されており、人類の共有財産とも言える。一方で、標本の利用は決して多くはなく、この網羅的なコレ

クションがもつ強みを生かしきれていないこともまた事実である。

1975年以前、深海掘削計画 (DSDP: Deep Sea Drilling Project) により掘削されたコアサンプルはアメリカ合衆国のコロンビア大学ラモント・ドーティー地球科学研究所とカリフォルニア大学スクリプス海洋研究所のみに保存されていた。そのため、研究に必要なサンプルの検討や実際に作られたスライドなどの分析は、現地を訪れて行わなければならなかった。また、微化石研究者が新しい掘削航海に参加しようと考えた際に、その地域から研究対象とする分類群が産出するのか、その保存性や群集はどのようなものかなどを確認 (予習) することもできなかった。これらのことから、アメリカから離れた場所で研究を行っている者にとっては、コアを用いた研究を推進することが困難であった。そのような現状を改善するため、また、国際深海掘削において採取された微化石標本をより利用しやすくするために1975年にMRCが設立された。日本においては1983年より国立科学博物館がこの活動に参加し、1999年には宇都宮大学が放散虫化石のサテライトセンターとして活動に加わった。そして、現在までに、9ヶ国の16の研究機関がMRCの活動に関わっている (表1)。

表1. MRCが設置されている研究機関一覧。保管されている標本セットを並べて示した。F：有孔虫化石，R：放散虫化石，D：珪藻化石，N：石灰質ナノプランクトン化石。

研究機関	保管している微化石のセット
Smithsonian Institution	F, R, D, N
Texas A & M University	F, R, D, N
Natural History Museum, Basel	F, R, D, N
National Museum of Nature and Science (国立科学博物館)	F, R, D, N
Institute of Geological & Nuclear Sciences, Ltd., New Zealand	F, R, D, N
Scripps Institution of Oceanography, University of California	R
California Academy of Sciences	D
University of Nebraska	N, D
Florida State University	N, D
Federal University of Rio de Janeiro	F
Russian Academy of Sciences	D, F
Museum für Naturkunde, Humboldt Universität zu Berlin	R
Universität Bremen	F, R
Università degli Studi di Parma	N
The Natural History Museum	N
Utsunomiya University (宇都宮大学)	R

これらの機関では、有孔虫、放散虫、珪藻、石灰質ナノプランクトンの4種類の微化石を観察できる標本セットを保管し、それらを利用するための研究設備を整えている。つまりは、微化石標本およびスライドとそれらを観察するための各種顕微鏡、また深海掘削の研究成果を報告した出版物（Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports および Scientific Results, Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program）がMRCに設置されている。

保管されている標本は、国際深海掘削のルールにのっとり、MRCが一体となってサンプルリクエスト（その方法については<http://www.iodp.org/weblinks/Tasks-Scientists/Request-Access-to-Samples/> や http://www.jamstec.go.jp/kochi/jc_curation/j/index.html を参照）を行なって入手し、担当機関において適切な処理を施されたものである。例えば、有孔虫化石標本であれば、コア試料から目合い63 μm のふるいを用いて水洗された全量を、有孔虫標本を管理するMRC機関数に分割し、各機関へ分配している。また、珪藻化石標本であれば、同一の堆積物試料から作成された同一濃度のプレパラートが、珪藻化石を保管するMRCに分配されている。このようにして準備・配布されるため、各MRC機関に置かれている微化石標本セットの中身は同一のものであると言ってよい。これらのMRC微化石標本を作製しているのは、創設以来、有孔虫はスイス・バーゼルの自然史博物館、珪藻は国立科学博物館であり、それぞれ9セットが作られている。かつては放散虫標本の作製はスクリプス海洋研究所で行なわれていたが、現在は宇都宮大学とベルリン自然史博物館によって11セットが作られている。また、石灰質ナノプランクトンは幾つかのMRCの協力により同質のスライド標本セットが作製されている。日本においては、国立科学博物館に有孔虫、放散虫、珪藻、石灰質ナノプランクトン、宇都宮大学に放散虫の微化石標本

セットが備えられている（表1）。

また、標本についての情報も共有されている。標本情報のデータベースはテキサスA & M大学のサーバーに置かれており、だれもがインターネットを介して参照することができる（<http://iodp.tamu.edu/curation/mrc.html> のページにある Download MRC database lists からテキストファイルをダウンロードできる）。このような情報の共有は、現在では決して珍しくなく、標本そのものをも共有し研究に資することがMRCの大きな特徴と言えよう。

MRCの設立の背景や活動状況については、谷村（1998）やKnappertsbusch *et al.*（1998）にすでに詳しく述べられている。それから二十年近くたち、IODP（統合深海掘削計画：Integrated Ocean Drilling Program から国際深海科学掘削計画：International Ocean Discovery Program へ変更）は新しい局面を迎えている。日本の文部科学省が主導する掘削船「ちきゅう」が完成し、現在、地球深部の掘削によって、マントルなど地球内部の構造、巨大地震発生のおき、地下生命圏の実体、新しい海底資源の解明などに関して、多くの新知見が得られ続けている。そのなかで微化石研究者が担う役割は、第一に船上分析において、堆積岩の堆積地質年代と層序を明らかにすることである。地域・年代・精度などといった意味での「広範囲」のデータをまとめた研究が求められる昨今の状況下では、船上での微化石研究では、それ以上の成果や新発見が期待されていないと感じることもある。確かに、1本のコアを使って研究することには限界があるのかもしれないが、多くのデータを総合的に用いた俯瞰的研究は、データベースが整備されインターネットを介しそれが公開されるようになった今こそ、より精度の高いものを実現することが可能になっている。そのようなことから、本稿では、MRCに蓄積されてきた微化石標本群の価値と有用性、深海掘削において得られてきた半世紀近くもの研究の重みを再度確認したい。

MRCに保管されている貴重な標本群

MRCには、2015年11月現在、2万点あまりの標本が集約されている。内訳は、有孔虫標本が5,425点、放散虫標本が4,111点、珪藻標本が5,048点、石灰質ナノプランクトン標本が5,321点である。国立科学博物館にある有孔虫標本の多くは管瓶に入った状態であるが、その他については、観察に適した濃度に調整された群集プレパラートとなっており、すぐにでも顕微鏡を用いて観察できる状態になっている（図1）。

標本はとくに連続性が良いコア、それぞれの微化石の保存が良い層準を選んで採取されており、その地質年代はジュラ紀中期から第四紀までにわたる。当然のことながら、海底を掘り進めていくために、回収率の良い表層近くのより新しい時代の標本が多くなっており、ジュラ



図1. 国立科学博物館に保管されているMRCコレクション。プラスチック管瓶および有孔虫スライドに収められた有孔虫標本（右奥）、スチラックス樹脂に封入された珪藻標本（左2枚）、光硬化樹脂に封入された石灰質ナノプランクトン標本（右中）、カナダバルサムで封入された放散虫標本（右手前）。

紀の標本は数えるほどしかなく、それより古い時代の標本はMRCには存在しない (<http://iodp.tamu.edu/curation/mrc/collections.html>)。これは、海嶺で生まれた海洋底地殻とその上にたまった微化石を含む堆積物が、いずれは海溝から地球内部へ沈んでいき、現在の海洋底には2億年より古い堆積物が分布しないためである。そのため、そこに含まれる微化石標本も得られないことになり、標本の地質年代区分の下限の多くが白亜紀であることは、深海掘削の宿命とも言える。MRCコレクションとなった標本は、少なくとも各化石帯を代表するような層準を主

な選択基準としており、同一コアにおける標本ごとの層位的間隔を時間で示すならば、一部の例外を除いて、数十万から百万年程度である。一方、MRCの設立から40年を過ぎた今では、生層序学の発展により、それぞれの化石帯はより細分化されてきている。たとえば、珪藻化石層序については秋葉ほか（2012）に、その発展の歴史が述べられている。このような状況を踏まえて、コレクションのさらなる拡充が必要である。また、微化石研究全体への貢献を考えるならば、深海掘削では得られない古生代・中生代の微化石標本を陸上露頭より採取し、コレクションに加えることにも意義がある。

上述の標本数からも分かるように、MRCコア試料は地理的にも広範囲から得られている（図2）。その範囲は深海掘削地点（site）の数で言えば、有孔虫標本は371、放散虫は286、珪藻は280、石灰質ナノプランクトンは354である。石灰質の微化石（有孔虫、石灰質ナノプランクトン）は、大西洋から得られた試料が相対的に多くなっている。一方、珪質微化石（放散虫と珪藻）は北太平洋高緯度域の試料が相対的に多い。海洋底堆積物の生物源粒子の分布（Suzuki and Oba, 2015）が示すように、このような地理的分布パターンは、それぞれのタクサの各海域での生産量や炭酸塩補償深度の差によって概ね説明できる。これらのうち、地理的な偏りが特に著しいのは珪藻化石で、試料が得られたところは北西太平洋、ベーリング海、東部赤道太平洋、大西洋の高緯度域と沿岸部、南大洋に偏っている。しかし、限られた地域からのみ保存の良い珪藻化石が得られるといっても、その範囲は十

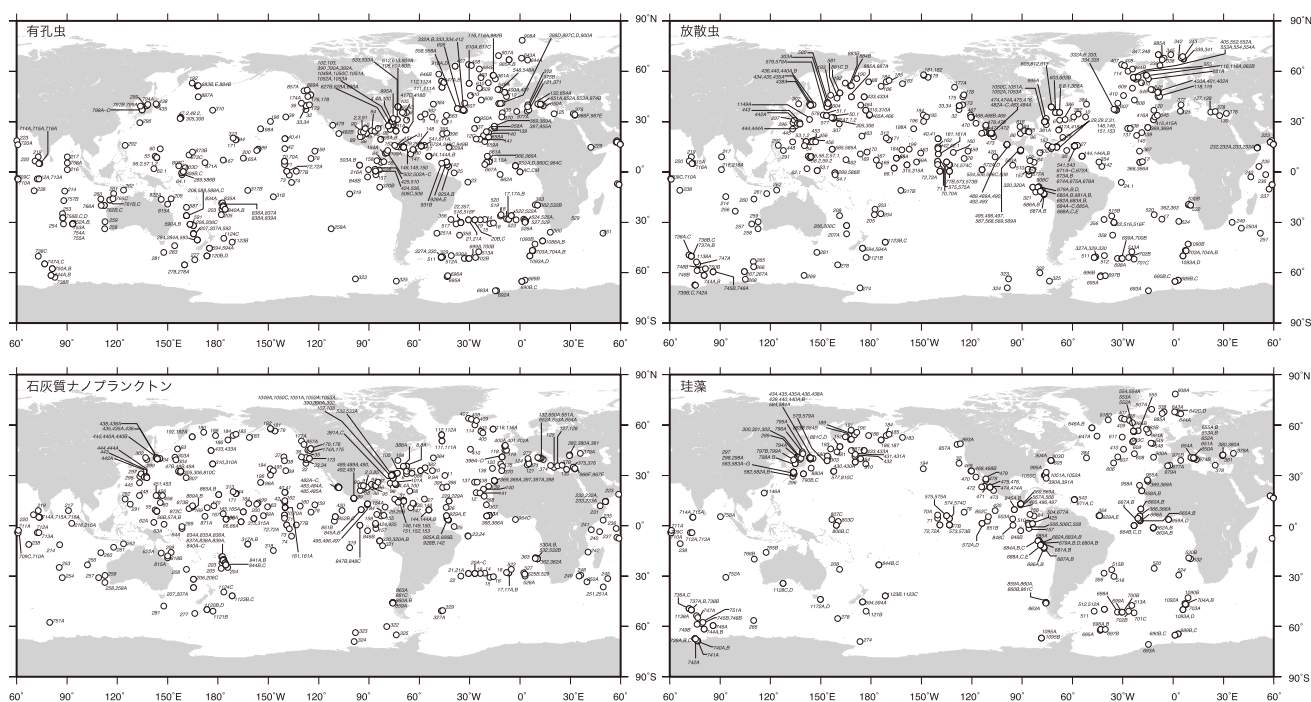


図2. MRC標本の地理的分布。

分に広く、これだけ多数の標本を1人の人間が収集することは到底出来ないであろう。そのような意味からも、MRCを訪れて、様々な海域の試料を検討・研究することは大きな意義がある。

MRC 標本を用いた研究事例と今後の展望

様々な海域における半世紀以上にわたる研究の積み重ねにより、深海掘削研究は海洋底の拡大を証明し、プレートテクトニクス理論を実証するなど、当初の目的を達成した感がある（高柳, 1999 など）。そのなかで、海生微化石についての知見も集積されていき、標準的な海生微化石生層序が確立されてきた。一方で、1980年代より第四紀の気候変動を研究ターゲットとした多くの掘削航海が実施されており、氷期・間氷期の海況変化にともなう海生微化石群集変動が明らかになった。同時に、古水温や古氷床量の指標となりうる有孔虫の酸素同位体比が数多く測定され、そのスタック曲線は気候変動の標準曲線として扱われるまでになっている（例えば、Lisiecki and Raymo, 2005）。ただし使用されたデータは国際深海掘削計画で掘削された試料に基づくものだけではない。

様々な研究が進むなか、微化石となった海生プランクトンの生物地理分布変遷や進化史といったことにも注目が集まってきている。例えば、Tanimura *et al.* (2007) は、グラビティーコアやピストンコアの最上部を網羅的に用いて、汎世界的に分布する海生浮遊性珪藻 *Thalassionema* 属の太平洋における地理的分布を明らかにした。この他のタクサに関しても、地質時代をさかのぼって、種分化や生物地理の変遷が明らかにされることが今後期待されている。また、Oseki and Suzuki (2009) によって、MRC 標本を用いて、北太平洋の放散虫 58 タクサの時代ごとの分布変遷が明らかにされた。彼らによれば、地理的分布パターンは9通りに分類でき、祖先・子孫の関係にあると考えられるタクサが異なる地理的分布パターンを示している。これらをもとに、個体群の地理的な移動の時期と方向の特定や、祖先種と子孫種の地理的分布の比較から個々の種の起源となる海域の推定を行っている。また、このような生物地理の変化の要因となった海陸分布や水塊構造の変化も示唆されている。

MRC 標本は、試料の採取間隔が広いために、上述の研究例のような踏み込んだ議論をしがたい場合もあるかもしれない。そういった時には、MRC 標本から得られた予備的な研究結果をもとに、研究のターゲットをしばり、時間分解能を上げたサンプルリクエストをIODP に行くことで、地域個体群の成立過程をより詳細に明らかにしたり、種分化の機構や地質現象との関連性をより厳密に推定したりすることができるかもしれない。上述のようなプランクトンの進化や生物地理分布変遷に注目した研究例として、Sanfilippo and Riedel (1992) が挙げられ

る。彼らは、MRC 標本を中心とした海洋掘削試料を用いて、放散虫ナセリア目を中心に10属ほどの進化と分布を解明した。しかし、まだ解き明かすべき謎は多く、微化石研究者が取り組むべき心躍る研究テーマのひとつだろう。すでに、DSDP と ODP における微化石産出記録のデータベース（Neptune）を解析した研究では、地球規模でのプランクトン生態系や物質循環の変化、それらと環境変化との関連性について示唆的な仮説が提唱されている。例を挙げれば、新生代の海洋において珪藻が繁栄するが、それは陸域の乾燥化とそれにとまなう生物源シリカを代謝する草本の繁栄と同調的であるという（Falkowski *et al.*, 2004; 本特集号の須藤ほか [2016] も参照）。また、新生代において熱帯域の放散虫骨格は細く薄くなったとされ、この要因の1つに珪藻が台頭してきたことが挙げられている（Lazarus *et al.*, 2009）。それぞれ、統計学的な再検討により議論が深められており、珪藻の種多様性は新第三紀よりも古第三紀に高かったこと（Rabosky and Sorhannus, 2009; Lazarus *et al.*, 2014）や古第三紀における珪藻の多様化には大陸風化によるケイ酸塩の供給が強く寄与したこと（Cernero *et al.*, 2015）などが新たに指摘されている。このような議論において、一部実際の標本が検討されてはいるものの、さらなる仮説の検証のために網羅的な標本群を用いる余地が残されている。半世紀以上にわたる深海掘削の実績を生かしたスケールの大きな研究への夢を叶える標本群の観察機会をMRCは提供しており、この質と量を最大限に生かした研究が行なわれていくことが期待される。

さらに、MRC には、深海掘削の歴史において重要な役割を担った科学史に残る標本群も備えられており、ある意味これらは人類全体の歴史的遺産とも言える。これらの標本が含まれていたコアは今やそのほとんどが使い尽くされており、サンプルリクエストしても手に入れることは不可能となっているものも多い。MRCはこの伝説的な研究が行われた標本を手し、目の当たりにできる唯一の場所である。半世紀近く前の研究者の気持ちを想像しながら、科学の進歩を担った標本を観察するという経験は、微化石研究に対する気持ちを十分に盛り上げてくれるに違いない。例えば、南大西洋横断航海（DSDP 第3次航海）（高柳 [1999] に紹介されている）において掘削された1968年～1969年の有孔虫標本もMRCを訪問すれば誰でも観察することができる。その航海では、齋藤常正東北大学名誉教授（当時ラumont・ドハティー地質研究所およびアメリカ自然史博物館）が掘削されたコアに含まれる浮遊性有孔虫化石を検鏡し、次々に堆積年代を決定していった。その結果は、海洋底拡大説を裏付ける決定的な証拠となり、プレートテクトニクス理論の発展を勢いづけた（詳しくは、齋藤, 1998）。国立科学博物館では、これらの試料を大学生対象の博物館実習教材として使用したことがある。学生たちは顕微鏡で観察して、

おそらく初めて目にする有孔虫をなかば困惑気味にスケッチし、気づいたことを発表し合っていた。そして、これらの標本が当時の科学においていかに衝撃を与えたかについて解説すると、教科書に書かれているプレートテクトニクスが当たり前になる以前、彼らの生まれる前の出来事に感心したかのように見えた。歴史的遺産としてのMRC標本は、現在の私たちの知識の根源であり、追いつくべき先人の背中としての役割も持っている。

MRCの利用方法

MRC標本の利用方法は2つある。1つ目はMRCを訪問し、施設内にて標本を観察する方法である。観察に必要な顕微鏡は備え付けられており、自由に使うことができる。拾い出し用の面相筆や皿など使い慣れた道具を持参してくる研究者もいる。2つ目の方法として、100点以内の標本に限って12ヶ月間借り出すことができる。この場合、標本の運搬は借用者が責任をもって行ない、借用標本一覧を添付した借用書を作成して標本の所在を明らかにしなくてはならない。どちらの方法で利用するにしても、利用を希望する研究者は、事前に訪問の日時を調整したり、目当ての標本が貸出中でないことを確認したりするためにMRCのキュレーターに直接連絡を取る必要がある。それぞれのMRCのキュレーターの連絡先は、ホームページ（<http://iodp.tamu.edu/curation/mrc/institutions.html>）に掲載されている最新の情報を参照してほしい。日本では、国立科学博物館の齋藤めぐみ、宇都宮大学の相田吉昭がMRCキュレーターを務めているので、MRCの利用に関してメール等で連絡してもらいたい。

これまで国立科学博物館のMRCを来訪した研究者の多くは、深海掘削航海の予習のために微化石標本を利用している。乗船をひかえて、航海以前にその近傍で得られた試料を観察して航海中の作業に備えるのである。また、IODPにサンプルリクエストをする前の予備調査としての利用もある。研究対象のサイトで採取された標本がMRCにあれば、実際に自分の目で微化石の保存状態や自分の研究目的に適したサンプルであるかを確かめることができ、時間の節約にもなる。

また、MRC標本の利用に際しては、非破壊で観察することと群集組成を変えてはならないことが原則である。一般に堆積物コア試料には膨大な数の微化石標本が含まれており、非常に少量の試料で分析ができるため、気軽に他の研究者に分取したり、その一部を化学分析に用いたりすることに抵抗を感じないこともある。しかしながら、MRC標本に関しては、一部を分取して新たなスライドを作ることや、走査型電子顕微鏡観察用の蒸着試料を作ること、MRC以外の施設で占有することは禁止されてきた。一方で、標本の研究・教育への利用をより進める

ために、これら利用制限の一部を緩和する措置もとられている。例えば、MRCホームページのGuidelines for Useによると、有孔虫スライドを作った残りの標本（working splits）を借り出して目的の有孔虫を拾い出し、走査型電子顕微鏡を用いて観察することが許されている。もちろんこの場合も、標本を破壊しないこと、拾い出した有孔虫も含めて全ての標本を観察後に返却することなど、標本利用の原則は守られている。さらに、マイクロCTスキャナを用いた研究（佐々木ほか、2016、本特集号参照）のように、ガイドラインに記載されていない非破壊利用についても、リード・キュレーター（ベルリン自然史博物館のDavid Lazarus）との相談窓口が開かれており、内容によっては利用を許可される可能性がある。このように多くの制限があってもなお、上述のようにMRC標本を用いて研究を進めることには様々な大きなメリットがあると言える。

おわりに

本稿を読んでMRCへ実際に行って標本の観察を行ってみたいと思われる研究者が増えることを期待している。現状を言えば、日本においても、海外のMRCにおいてもその利用頻度は決して高くない。利用状況の内訳は、MRCキュレーター本人による研究が半数を占めており、キュレーター個人が標本を独り占めしているような状況である（<http://iodp.tamu.edu/curation/mrc.html>）。そのため、より多くの研究者のために役立ち、より開かれたMRCを目指すことが課題となっている。微化石を研究している人、研究したい人は、ぜひとも、MRCの標本を使ってこんなことが研究できそうだとアイデアを膨らませてほしい。

著者の1人齋藤は、淡水珪藻化石を主に研究しているが、湖成層や淡水珪藻化石標本は、それぞれ個別に研究者のもとに保管されているものがほとんどで、系統だったコレクションがあるMRC標本が本当に羨ましいと感じている。MRC標本を順々に観察すれば、個体や群集、それらの地理的分布の変化を、時代を追って明らかにできる。微化石になった生物が生きていた当時の世界の様子が縦横無尽に広がっていくであろう。過去を覗くこと、しかもそれをパラパラ漫画のように静止画を早回しにして少しでも動的に見ることを化石の研究者の多くが夢見ていることだろう。その夢を叶えることに最も近いのがMRC標本なのかもしれない。

近年、画像などの様々なデータを、インターネットを介して入手することが当たり前になってきている。研究においても、これらのデータやインターネットが重要なツールであることは間違いなく、大いに活用されるべきである。一方で、論文を短絡的に引用したり、データベースから何の考慮無しにデータを得たりして研究を進める

ことには、明らかに問題が多い（本特集の須藤ほか[2016]と鈴木[2016]を参照）。標本というナマモノを見ることは、それ以上に創造性に富む作業であることは自明である。データベースは標本のラベルに相当する情報データのみからなり、あくまでも標本にたどり着くためのインデックスである。決して、群集スライドに含まれる全ての個体について語ってはくれないし、そこから環境変動や生物群集の変化などの解明といった研究成果を導き出してはくれない。さらに、深海掘削の成果をまとめた報告書に該当する標本の産出化石リストが添付されていたとしても、稀産出種には記載されていないかもしれない。また、実際に標本をその目で観察しなくては、多産する種であっても別種として認識されるかもしれない形態の微妙な個体変異についてまでは教えてくれない。標本に直に触れることが、研究にとって何より重要で、研究成果に無限の可能性を与えるものであり、MRCはその機会を無償で提供できる日本で唯一無二の機関であるということを最後に訴えたい。なお、最新情報は下記のホームページを見て欲しい。

IODP ホームページにおける微古生物標本・資料センター (Micropaleontological Reference Centers). <http://iodp.tamu.edu/curation/mrc.html>.

国立科学博物館地学研究部に設置されている微古生物標本・資料センター. http://www.kahaku.go.jp/research/departement/geology/collection/odp_microfossils.html.

謝辞

微古生物標本・資料センターの運営には研究者のみならず、何人もの非常勤職員やアルバイトの方々のお力添えをいただいている。標本の整理、スライドの作製といった地道な作業を続けてくださった皆さんに感謝致します。

文献

秋葉文雄・柳沢幸夫・谷村好洋, 2012. 北太平洋の珪藻化石層序の誕生から完成まで。谷村好洋・辻 彰洋編, 微化石—顕微鏡で見るプランクトン化石の世界—, 297–311. 東海大学出版会, 秦野。

Cermeño, P., Falkowski, P.G., Romero, O.E., Schallere, M.F. and Vallina, S.M., 2015. Continental erosion and the Cenozoic rise of marine diatoms. *Proceedings of National Academy of Science*, **112**, 4239–4244.

Falkowski, P.G., Katz, M.E., Knoll, A.H., Quigg, A., Raven, J.A., Schofield, O. and Taylor, F.J.R., 2004. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*, **305**, 354–360.

Knappertsbusch, M.W., Huber, B.T., Sanfilippo, A. and the DSDP/ODP MRC curatorial party, 1998. Micropaleontological Reference Centers. *Revista Espanola de Micropaleontologia*, **30**, 331–336.

Lazarus, D., Barron, J., Renaudie, J., Diver, P. and Türke, A., 2014. Cenozoic planktonic marine diatom diversity and correlation to climate change. *PLoS ONE* **9**, e84857. doi:10.1371/journal.pone.0084857.

Lazarus, D.B., Kotrc, B., Wulf, G. and Schmidt, D.N., 2009. Radiolarians decreased silicification as an evolutionary response to reduced Cenozoic ocean silica availability. *Proceedings of National Academy of Science*, **106**, 9333–9338.

Lazarus, D., Suzuki, N., Caulet, J.-P., Nigrini, C., Goll, I., Goll, R., Dolven, J.K., Diver, P. and Sanfilippo, A., 2015. An evaluated list of Cenozoic-Recent radiolarian species names (Polycystinea), based on those used in the DSDP, ODP and IODP deep-sea drilling programs. *Zootaxa*, **3999**, 301–333.

Lisiecki, L.E. and Raymo, M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003: doi:10.1029/2004PA001071.

Oseki, S. and Suzuki, N., 2009. Miocene to Pleistocene paleogeographic distributions of polycystine radiolarians in the North Pacific. *News of Osaka Micropaleontologists (NOM), Special Volume*, **14**, 183–238.

Rabosky, D.L. and Sorhannus, U., 2009. Diversity dynamics of marine planktonic diatoms across the Cenozoic. *Nature*, **457**, 183–187.

齋藤常正, 1998. 海洋掘削によるプレートテクトニクスの証明。地質学論集, **49**, 33–42.

Sanfilippo, A. and Riedel, W.R., 1992. The origin and evolution of Pterocorythidae (Radiolaria): A Cenozoic phylogenetic study. *Micropaleontology*, **38**, 1–36.

佐々木 理・岩下智洋・木元克典・鹿納晴尚・木原辰之, 2016. 計算微古生物学：最新3次元イメージング技術の浮遊性有孔虫研究への応用。化石, **99**, 63–72.

須藤 斎・岩井雅夫・秋葉文雄, 2016. 化石データベースを用いて生物進化を研究する時の注意点。化石, **99**, 7–14.

鈴木紀毅, 2016. シノニム・データベース Paleotax for Windows に基づく放散虫研究の現状。化石, **99**, 15–31.

Suzuki, N. and Oba, M., 2015. Oldest fossil records of marine protists and the geologic history toward the establishment of the modern-type marine protist world. In Ohtsuka, S., Suzuki, T., Horiguchi, T., Suzuki, N. and F. Not eds., *Marine Protists: Diversity and Dynamics*, 359–394. Springer, Tokyo.

高柳洋吉訳, 1999. 地球科学に革命を起こした船—グロマー・チャレンジャー号—. 483p., 東海大学出版会, 秦野。

谷村好洋, 1998. 「微化石標本のリファレンス・センター」としての自然史博物館。地学雑誌, **107**, 803–808.

Tanimura, Y., Shimada, C. and Iwai, M., 2007. Modern distribution of *Thalassionema* species (Bacillariophyceae) in the Pacific Ocean. *Bulletin of National Museum of Nature and Science, Series C*, **33**, 27–51.

(2015年9月10日受付, 2015年12月8日受理)

