

Science & Technology Trends

科学技術動向

11
2010
No.116



レポート

p2,9 電子顕微鏡における収差補正技術開発の世界的動向と日本の現状

p3,23 海洋深層循環と熱輸送に関する観測研究の動向

トピックス

ライフサイエンス分野

p4 アルツハイマー病の新たな治療薬への期待

環境分野

p6 低タンパク配合飼料のオフセットクレジット認定

ものづくり分野

p8 非識字者のためのテキストフリーインターフェース

情報通信分野

p5 はんだを不要にする常温接続技術の開発

ナノテク・材料分野

p7 熱アシスト記録とビットパターンニングによる高密度磁気記録

Science & Technology Trends

科学技術動向 11 /2010



2010年11月号 第10卷第11号/毎月26日発行 通巻116号 ISSN 1349-3663



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター

2010
No.116

11

Science&Technology Trends

科学技術動向

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産学官から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々に読んでいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター センター長
奥和田 久美

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「科学技術動向・月報一覧」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

【連絡先】 〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】 03-3581-0605 【FAX】 03-3503-3996

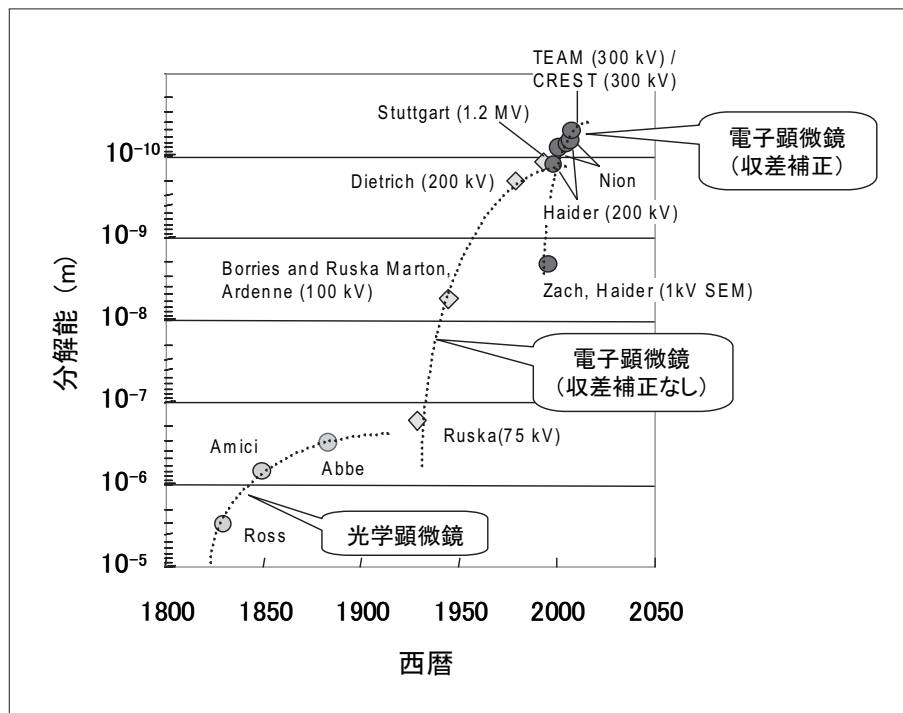
【URL】 <http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】 stfc@nistep.go.jp

電子顕微鏡における収差補正技術開発の世界的動向と日本の現状

電子顕微鏡は、戦前の黎明期から産官学が結集して開発に取り組み、日本が長きにわたって世界をリードしてきた領域であった。その技術はお家芸と言われる域にまで発展し、日本が開発した高圧～超高圧電子顕微鏡は、1990年に入ると0.1nmに迫る最高分解能を成し遂げ、世界各地の主要研究機関に多数設置された。しかし1990年代後半、ドイツで開発された球面収差補正レンズは電子顕微鏡の分解能を飛躍的に向上させるもので、ナノテクノロジーの時代背景も相まって世界中の注目を集めることとなった。欧米諸国において次々と収差補正顕微鏡開発プロジェクトが発足し、それまで熱心ではなかった米国までもが電子顕微鏡開発へと新規参入した。一時的に遅れをとった日本は危機感を募らせたが、もともと高い技術力を有していた日本メーカーが、大学や公的研究機関とのプロジェクト研究のもと高性能機器の開発に成功し、装置性能自体は再び世界のトップレベルに比肩するに至っている。しかしながら、すでに欧米諸国では収差補正機開発そのものは一段落し、今後10年～20年先を見据えながら最先端顕微鏡を多機能・多様化させ、ナノテク研究やバイオ研究の個別テーマへの応用展開を図るべく議論を深めている。

今後、日本でも新たなナノサイエンス局面を拓きつつ、装置開発も含めて世界をリードしていくためには今後の基礎研究の進め方が重要となる。各大学や研究機関がそれぞれの得意分野に立脚した拠点を設け、これらを横断的・有機的につなぐオールジャパン体制が今こそ強く望まれる。



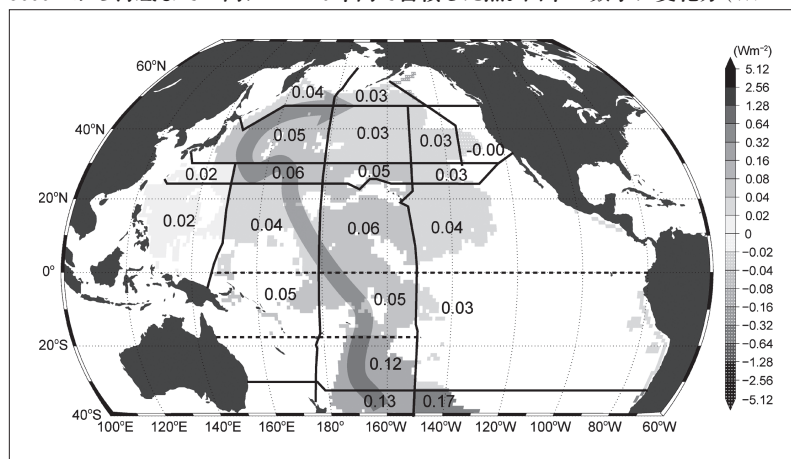
出典：参考文献¹⁾、Copyright ©Macmillan Publishers Ltd.

海洋深層循環と熱輸送に関する 観測研究の動向

気候変動は人類にとって喫緊な対応が必要な問題である。海洋の貯熱量変化は、地球上の熱の分配に大きく影響し、ひいては我々の生活圏である地上気温に強く影響を与える。近年、海洋の上層については貯熱量変化が精度よく検出可能となったが、気候変動に重要とされる海洋深層の知見は少ない。海洋深層循環は、地球の気候を決める要因の一つとして、両極で冷やされた海水が深海に沈み込み、地球全体を循環し、海水が冷やされる時の大気への大量の熱放出により極域の大気を加熱する。この深層循環を含む海洋の子午面循環の変化は、比較的急速かつ大きな気候変動に関係するとされている。大西洋においては、グリーンランド沖で沈み込み、大西洋の中・深層を南下し表面近くを北上する大西洋オーバーターンと呼ばれる循環がこの50年間に約30%弱まった可能性がある。これにより急激な寒冷化の可能性が指摘され、欧米では変動を詳しく調査する観測研究が実施されつつある。また、太平洋の最深部はほぼ全域で貯熱量が増加しており、深度3000m以深は全球規模で貯熱量が増加している。特に深層水が形成される南極周辺海域での増加は顕著で、南極周辺で沈み込み、各大洋の最深部を北上し中・深層を南下する南極起源の南極オーバーターン全体の弱化を示唆し、深層循環研究の国際的研究計画が立案されている。

このような循環の変化を捉える観測研究は大規模かつ長期間にわたり、世界的にも不十分である。現在、我が国では個々の研究機関がそれぞれの経常的な研究の一部として深層循環研究を実施しているが、規模と継続性という観点からは極めて脆弱である。大規模研究を推進する枠組みが必要であり、その枠組みをもとに国際連携による研究を推進していくことが求められる。

5000mから海底までの間にこの10年間で蓄積した熱。図中の数字は変化分(W/m²)



参考文献⁹⁾を基に科学技術研究動向センターにて作成

認知症を引き起こすアルツハイマー病は、神経毒であるアミロイドβが脳内に蓄積することによって発症するとされているが、発症原因と病態は未解明な部分が多く、それらの解析と治療薬開発が同時に進行している。米国のロックフェラー大学をはじめとする研究チームは、アミロイドβの産生を増加させるγ-セクレターゼ活性化タンパクを発見し、Nature 2010年9月2日号に発表した。γ-セクレターゼを標的としたアルツハイマー病治療薬は重篤な副作用が懸念されていたが、今後はより副作用が少ない効果的な治療薬として、血液脳関門を通過してγ-セクレターゼ活性化タンパクを選択的に阻害する薬剤が開発されていく可能性がある。

トピックス I アルツハイマー病の新たな治療薬への期待

高齢社会を迎える先進国においては、アルツハイマー病の急増が懸念されており、医療政策上重要な疾患のひとつとされている。アルツハイマー病の発症原因と病態は未解明な部分が多く、その解析と治療薬開発が同時に進行しているのが現状である。この度、米国のロックフェラー大学を中心とする研究チームは、アルツハイマー病の新しい治療標的として、γ-セクレターゼ活性化タンパク（以下、GSAP）を発見し、Nature 2010年9月2日号に発表した¹⁾。

アルツハイマー病の発症原因については、アミロイドβという神経毒が脳内に蓄積する^注ことにより発症するというアミロイド仮説が有力視されている。アミロイドβの産生にはγ-セクレターゼというタンパク質切断酵素が関わっていることから、アルツハイマー病治療薬のひとつとしてγ-セクレターゼを標的とした薬剤の開発が進められてきた（γ-セクレターゼ阻害薬）。しかし、同薬剤は正常細胞にも影響することから重篤な副作用が懸念されている。上記の研究チームは、γ-セクレターゼそのものではなく、その活性を制御するGSAPを標的とした治療薬を開発することで、より副作用の少ない薬剤が期待できると考えている（図表）。

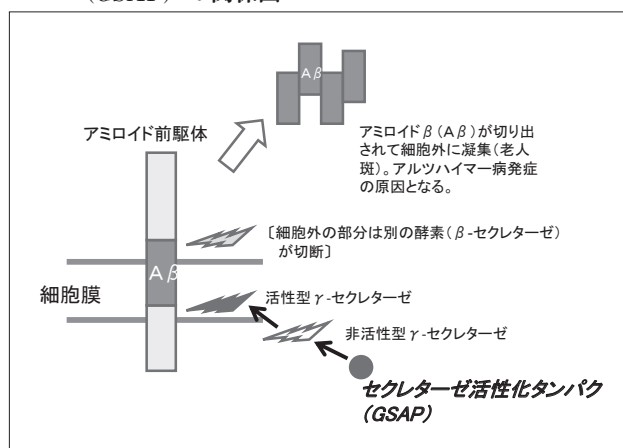
GSAPの発見は、抗がん剤として使われているイマチニブ（グリベック[®]）の研究から得られた。同剤は、細胞増殖の制御等を担うチロシンキナーゼをターゲットにして抗がん作用を発揮する。研究チームは過去の実験を通じて、イマチニブがアミロイドβの産生を阻害する作用があることを明らかにした²⁾。その作用は、イマチニブの抗がん作用の標的となるチロシンキナーゼ以外の分子を標的にすることに因ると推測し、GSAPの発見につながった。

研究チームは、試験管内の実験および動物実験を行った結果、GSAPがヒトの脳内においてアミロイドβ

の産生を増加させ得ることと、GSAPの阻害薬がアルツハイマー病の治療薬になり得ることを示した。

脳と血液の間には血液脳関門があり、血液中から脳神経細胞への物質の流れを制限して脳を守っている。これまで開発されたアルツハイマー治療薬はこの関門を通過しないか、あるいは通過しにくく、脳神経細胞へ送達され難いという欠点があった。また、イマチニブが血液脳関門を通過するという報告もないため、研究チームは、同剤をアルツハイマー病治療薬として適応拡大することは難しいと考えている。研究チームは、アルツハイマー病治療薬としてGSAPの阻害薬を開発するために、血液脳関門の通過性が良好な薬剤や脳神経細胞に効率よく送達する方法の開発が今後必要であると述べている。

図表 アミロイド仮説とγ-セクレターゼ活性化タンパク(GSAP)の関係図



科学技術動向研究センターにて作成

注：アミロイドβが脳内に蓄積したものを老人斑という。

参考

- 1) He G, et al., nature 467, 95-99 (September 2, 2010)
- 2) Netzer WJ, et al., Proc.Natl.Acad.Sci. USA 100, 12444-12449 (2003)

(株)アドバンスシステムズジャパンは横浜国立大学の八高隆雄教授と共同で、はんだを用いない新たな接続技術を開発した。プリント基板への電子部品の実装は、はんだ溶融のために150℃程度から260℃程度の高温処理工程が必要であるため、熱に弱い部品などは別工程で、コネクタ接続などによる実装を行う必要があった。また、はんだ実装した後は部品の脱着ができない。今回開発された接続技術は、室温下で接続が行えるため工程の簡略化が期待できるうえ、部品の脱着を繰り返すことが可能であることからコネクタ部品点数の低減も期待できる。

トピックス 2 はんだを不要にする常温接続技術の開発

(株)アドバンスシステムズジャパンは横浜国立大学の八高隆雄教授と共同で、はんだを用いない接続技術を開発した¹⁾。この方法を用いれば、電気・電子部品を高温にさらすことなく電子機器などのプリント基板に実装することができ、また、部品の脱着を繰り返すことが可能である。

LSIなどの電子部品を、はんだを用いてプリント基板へ実装する際には、はんだ溶融のために高温処理が必要で、はんだペースト付きの部品をプリント基板へ仮置きした上で、プリント基板全体に150℃程度から260℃程度の熱を加えるというリフロー炉への投入工程が必要である。そのため、熱に弱い部品などはリフロー炉に入れられず、また、耐熱性や熱ストレスを考慮した部品や部材の設計が要求されてきた。例えば、耐熱性の低い一般的なプラスチックレンズを使うカメラモジュール部品などはこのリフロー炉に入れられず、別工程でコネクタ接続による実装を行う必要がある。さらに、一度はんだ付けした部品は、取り外しのためにも加熱が必要なことから脱着は困難であり、交換対象とする部品などはコネクタを用いて実装していた。

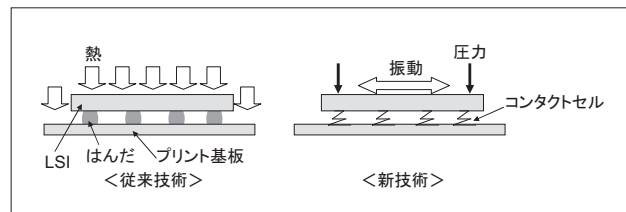
今回開発された常温接続技術は、金属相互の比較的ゆっくりした摺動により接合が行えることを特徴としており、八高教授のアイデアを基にしている。また、自動車のアルミフレームの溶接などにも使われる、摩擦攪拌溶接と呼ばれる金属相互の接合技術などにもヒントを得て、改良を加えた。接続は、接続対象を相互に圧接した状態で接合部に20ヘルツの機械振動を加える(図表1)。金属部の摺動により生ずる部分・局所的な摩擦熱で接合できるため室温下で接続が行え、熱に弱い部品も同工程で実装できる利点が生まれる。ま

た、図表2に示すスパイラル形状のコンタクトセルを用いれば、接続が完了したあとに接続部を垂直に引き上げることでコンタクトセルにはばねによるねじれの力が加わり、接合部がうまく切り離される。そして、切り離れた部分を再度押し付けて振動を加えれば、また接合することができる。

さらに、スパイラル形状のコンタクトセルにはばね性があるため、図表2のように多点接続する場合のコンタクト面の不揃い較差を吸収する効果も得られることから、将来的には多ピン接続や金属面の接続などにも展開が図れる。

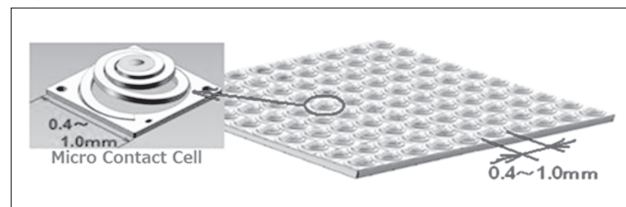
現在は試作した接合装置を使って基本的な技術の確認を行った段階であるが、はんだを不要にする常温接続は実装工程の簡略化が期待できるうえ、コネクタ部品点数の低減も期待できる。

図表1 想定する常温接続技術の適用例(LSI実装の側面図)



科学技術動向研究センターにて作成

図表2 多点接続のためのコンタクトセル配列例



出典：(株)アドバンスシステムズジャパン提供

参考

- 1) (株)アドバンスシステムズジャパンホームページ：<http://www.asjp.co.jp/ja/products/development-1/>

亜酸化窒素 (N₂O) は、CO₂ の 310 倍もの温室効果係数をもつ温室効果ガスであり、家畜の排泄物からも発生する。N₂O の排出削減に有効であるとして、環境省の「オフセット・クレジット (J-VER) 制度」の対象プロジェクトに「低タンパク配合飼料」が認定された。家畜からの窒素排泄量自体を根本的に低減するために、含有量の少ない必須アミノ酸成分を添加物で補足した配合飼料である。認定により、低タンパク配合飼料を導入する事業者は、一定の要件のもとで、温室効果ガスの削減量の認証を公的に受けることができる。

トピックス 3 低タンパク配合飼料のオフセットクレジット認定

家畜のふん尿を堆肥にして農地で利用する際には、堆肥化過程と農地の双方で、亜酸化窒素 (N₂O) が発生する。N₂O は、CO₂ の 310 倍もの温室効果係数をもつ温室効果ガスである。2008 年の我が国の農業起源の N₂O 排出量は、CO₂ 換算で約 1 千万 t であり、全温暖化ガス排出量の約 1% にあたる。

家畜からの N₂O を削減するのに、「飼料」に着目し、窒素の排泄量自体を根本的に低減する技術が有効であるとして、2010 年 7 月、農林水産省・環境省の審査を経て「低タンパク配合飼料」が「オフセット・クレジット (J-VER) 制度」¹⁾の対象プロジェクトとして認定された。同認定により、低タンパク配合飼料を導入する事業者は、一定の要件のもとで、温室効果ガスの削減量の認証を公的に受けることができ、得られたクレジットを国内で売却することができる。なお、J-VER 制度で N₂O の削減プロジェクトが認定されるのは初めてのことである。

大豆粕などの従来の飼料は、生育に必要な各種アミノ酸の量と飼料中の含有量との割合がアンバランスなため (図表 1 左)、リジンなど欠乏しやすい必須アミノ酸の量を満足するように家畜に与えると、他のアミノ酸成分が過剰となる (図表 1 中)。そして過剰に投与されたアミノ酸に含まれる窒素分は、ふん尿として排泄され、N₂O の発生原因となる。それに対し、低タンパク配合飼料は、大豆粕の総量を減らし、代わりに欠乏しやすい必須アミノ酸成分を結晶アミノ酸で補足した飼料であり、過剰に投与されていたアミノ酸量を削減することができ (図表 1 右)、その結果、N₂O の削減につながる。低タンパク配合飼料を飼育豚に用いた試験で、食肉への窒素蓄積量を損なうことなく、ふん尿への窒素の放出を約 3 割削減できることが確認された (図表 2)³⁾。

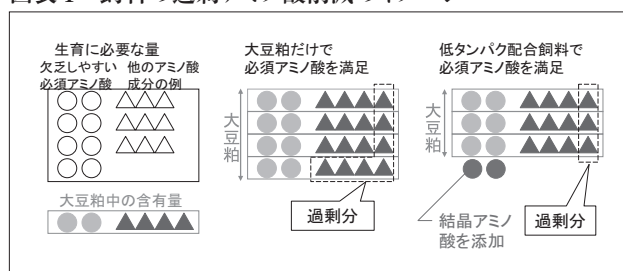
飼料へのアミノ酸の利用は、1950 年代から行われてきた。その後、湖沼や閉鎖海域の富栄養化問題の発生

を機に、水質汚濁対策への有効性が唱えられたが、諸外国に比べると日本での普及は進まなかった⁴⁾。

今回は、低タンパク配合飼料のライフサイクル評価 (LCA) が行われ、添加用のアミノ酸の生産・加工・輸送などにより増加する CO₂ を上回る N₂O の削減効果が認められた。J-VER 制度に認定されたことで、事業者を導入のインセンティブを与えることができる。

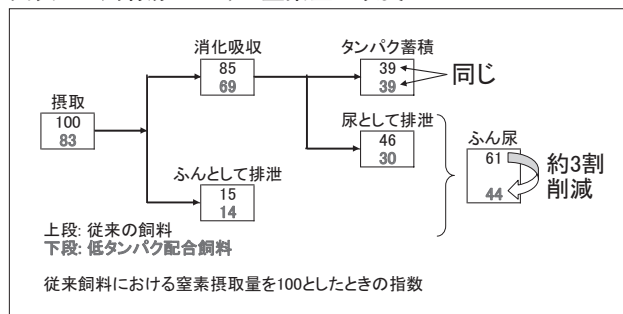
低タンパク配合飼料の利用促進は、温暖化防止はもとより、富栄養化による水質汚染への対策、飼料用の作付面積の低減など、他の面でも環境負荷低減に寄与すると期待される。

図表 1 飼料の過剰アミノ酸削減のイメージ



参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 2 飼育豚における窒素量の収支



参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参 考

- 1) 気候変動対策認証センター <http://www.4cj.org>
- 2) 味の素(株)ホームページ <http://www.ajinomoto.co.jp/kfb/amino/aminosan/kenkyu/pdf/ajiconews14.pdf>
- 3) 九州農業試験場ニュース No.79, 2000
- 4) 農林水産省ホームページ <http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kankyo/pdf/100723-01.pdf>

2010年7月、Hitachi Global Storage Technologies, Inc. と(株)日立製作所の共同研究グループは、熱アシスト記録とビットパターンニングという2つの技術を組み合わせた高密度記録の原理確認に成功したと報告した。この技術はハードディスクに用いられている垂直磁気記録の記録密度を100倍以上に高めると期待されているものである。共同研究グループでは、加工技術の改良により100Tb/inch²の記録密度が達成可能と考えている。

トピックス4 熱アシスト記録とビットパターンニングによる高密度磁気記録

2010年7月、Hitachi Global Storage Technologies, Inc. と(株)日立製作所の共同研究グループは、熱アシスト記録とビットパターンニングの2つの技術を組み合わせた磁気記録の原理確認に成功したと報告した¹⁾。現在実用化されている垂直磁気記録は1Tb/inch²の記録密度が限界と言われている。しかし、熱アシスト記録とビットパターンニングの両方の技術を導入することにより、その限界を越して100Tb/inch²の記録密度が達成できると考えられてきた。今回の報告は、これらの技術の原理を実証したものである。

磁気記録密度を高めるためにはビットあたりの記録面積を小さくする必要があるが、磁性体薄膜上に記録された磁気情報は記録面積が小さいと安定に保存されない。これは近くの磁気どうしが反発して、磁気情報が自然に変化するのに耐えられなくなるという超常磁性のためである。磁気安定性を高めるには磁性体の保磁力を強くすればよいが、磁気記録ヘッドの磁力には限界があるため、保磁力の強い磁性体には磁気情報の書き込みが難しくなる。このような問題により、現在用いられている垂直磁気記録は1Tb/inch²程度が限界と考えられている。

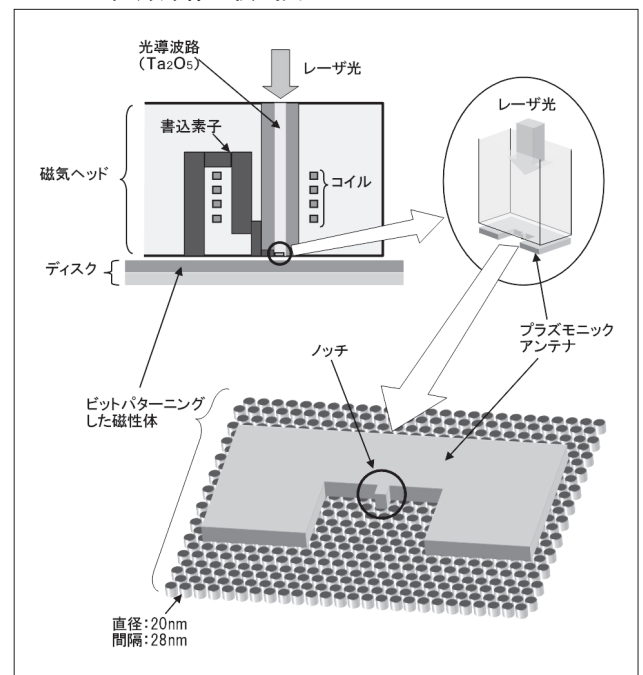
熱アシスト記録では、記録するときだけ磁性体にレーザー光を照射して加熱し、保磁力の強い磁性体の保磁力を一時的に弱くすることで書き込みの問題を解決しようとする。これは磁性体の保磁力が温度上昇につれて弱くなる性質を利用している。一方、ビットパターンニングは微細な凹凸を持つ基板に磁性体を製膜し(パターンドメディア)、一つ一つの凸部に1ビットを記録する方法である。一つのビットが周囲のビットから分離されているため、磁気的安定性が向上する。また周囲のビットへの熱伝導が抑えられるため、熱アシスト記録と組み合わせると効率よくビットの加熱ができる。

共同研究グループは微小な面積にレーザー光のエネルギーを集中させるため、プラズモニックアンテナ(図表)

と呼ばれる金属部品を用いた。プラズモニックアンテナを用いると、照射した光の電界をアンテナの特定の部分に集中させることができる。今回の報告ではアンテナ中央のノッチ部に電界を集中させ、さらにノッチ近傍の磁性体だけに光のエネルギーを伝えることができた。研究グループは規則的に整列したビットの形成方法を新たに開発してパターンドメディアを作製し、実際に記録してビットごとに記録が行なわれていることを確認した。

今回の報告の記録密度は1Tb/inch²であったが、これはノッチとビットの大きさで制限されていて、原理的な限界ではない。研究グループでは加工技術の向上により、ノッチ部とビットの大きさをさらに小さくすることで、100Tb/inch²の記録が達成可能と推定している。

図表 熱アシスト磁気記録用ヘッドとビットパターンニングされた記録媒体の模式図



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参考

- 1) B.C. Stipe et al. "Magnetic recording at 1.5 Pb m⁻² using an integrated plasmonic antenna", Nature Photon., Vol. 4, 484 (2010)

Microsoft Research India 社の Indrani Medhi 研究員は、非識字者のためのテキストフリーインターフェイス研究により、2010年9月、米国で開催された Emerging Technologies Conference at MIT において 2010 Young Innovators Under 35 の一人に選ばれた。15歳以上の非識字者は開発途上国を中心に 7.6 億人存在し、テキストフリーインターフェイスは非識字者を対象とした製品やサービスを提供するための重要な技術と考えられている。Medhi 研究員らが開発した就業支援 Web システムでは、インドの非識字者によるユーザビリティ評価をテキストフリーユーザーインターフェイスのデザインに反映した。また、携帯電話を利用した電子マネーサービスにもテキストフリーインターフェイスを導入し、インド・ケニア・南アフリカ・フィリピンの非識字者を対象にユーザビリティ調査を行った。今後、非識字者のためのテキストフリーインターフェイスは、医療などの分野への応用も期待されている。

トピックス 5 非識字者のためのテキストフリーインターフェイス

Microsoft Research India 社の Indrani Medhi 研究員は、非識字者のためのテキストフリーインターフェイスの研究により、2010年9月に米国で開催された Emerging Technologies Conference at MIT において 2010 Young Innovators Under 35 の一人に選ばれた¹⁾。この会議では、バイオ・エネルギー・素材・ICT 分野から、社会を変革すると期待される新たな技術を生み出した 35 歳未満の若手研究者を、毎年 35 名選定している。

2000～2004年の間に、全世界で 15 歳以上の非識字者数は 7.6 億人とされ、インド (2.7 億人)、中国 (7100 万人)、バングラデシュ (4900 万人)、パキスタン (4700 万人)、およびサブサハラ・アフリカに多く分布している²⁾。一方で、世界的に ICT 技術の成果が普及し、非識字者が先進的な ICT サービスを利用できる状況が現実的になりつつある。ただし、非識字者を想定した ICT サービスの提供はこれまでになく、人口増加が見込まれる開発途上国に提供される製品やサービスにおいて、今後の重要な技術の一つになると考えられている。

例えば、インドの都市部に居住する非識字者の場合、雇用主との間に正式な契約がなく、不利な条件での労働を強いられるという問題が指摘されている。このような状況を改善するために NGO が非識字者の就業を支援しているが、数名の NGO メンバーだけでは十分な対応ができない。Medhi 研究員らが開発した Web システム³⁾では、雇用主から提示された労働条件を非識

字者が理解できるようにした。ここで、使用されているテキストフリーユーザーインターフェイスでは、賃金を表す数字を除き、清掃・洗濯や食事の準備などの作業内容、時間などをイラストで表示する。そのため、非識字者でも希望する条件に適合する仕事を選択できる。インドのバンガロールに居住する非識字者が協力したユーザビリティ評価の結果を、テキストフリーユーザーインターフェイスのデザインに反映している。

また、Medhi 研究員らは、携帯電話を利用した電子マネーサービスにもテキストフリーユーザーインターフェイスを導入し、インド・ケニア・南アフリカ・フィリピンの非識字者を対象としたユーザビリティ調査を行った⁴⁾。この調査により、メニューの階層構造やスクロール操作といった一般的なデザインは理解されにくいことを示し、ユーザーの入力を促す場合には適切な音声ガイドが有効であることを確認した。

言語に依存せずに内容を直感的に伝える視覚記号としては、従来からピクトグラム (例えば非常口のサイン) があり、ISO として国際標準化され、公共の施設などで使用されている。テキストフリーインターフェイスでも、言語の障壁を越えたデザインが要求される点は共通している。しかし、今回のフィールドテストの結果からは、標準化よりもむしろ地域の文化的な背景を考慮した個別デザインの重要性が指摘されている。今後、非識字者向けのテキストフリーインターフェイス技術は、医療などの分野への応用も期待されている。

参 考

- 1) Emerging Technology Conference at MIT 2010, <http://www.technologyreview.com/emtech/10/>
- 2) UNESCO, Education for All Global Monitoring Report 2010
- 3) Indrani Medhi and Renee Kuriyan, Text-free UI : Prospects and Challenges for Social Access, Proceeding of the 9th International Conference on Social Implications of Computers in Developing Countries, 2007
- 4) Indrani Medhi, S. N. Nagasena Gautama, and Kentaro Toyama, A Comparison of Mobile Money-Transfer UIs for Non-Literate and Semi-Literate Users, Proc. CHI 2009, pp. 1741-1750, 2009

電子顕微鏡における収差補正技術開発の世界的動向と日本の現状

阿部 英司
客員研究官

1 はじめに

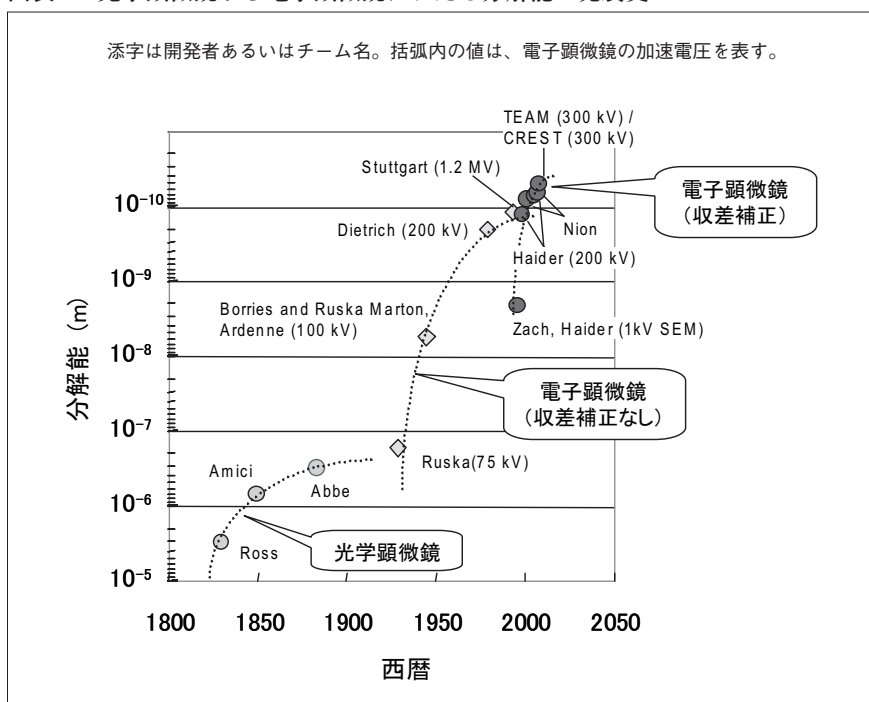
学校の理科室にある光学顕微鏡は、おそらくは誰もが一度は覗いた経験があるだろう。植物の切片を拡大し、そこに「小さな部屋(セル：細胞の語源)」を見いだすことで、子どもたちは目には見えずとも小さな世界が存在することを知る。およそ300年以上前、Leeuwenhoekは自身で磨き上げたレンズを用いて初めての顕微鏡を作製し、次々と微生物を発見したのであった。ただし、どれほど精巧にレンズを磨いても、この顕微鏡で捉えることのできる小さなものには限界が訪れる。可視光を線源とする光学顕微鏡では、その波長であるおよそ $1\mu\text{m}$ (可視光波長： $380\sim 750\text{nm}$)が原理的分解能であり(図表1¹⁾)、これより小さな対象を捉えることはできない。

電子が、粒子であると同時に波としても振る舞うことは、20世紀科学のハイライトである量子力学の発見であった。この電子の波としての性質を利用し、量子力学の恩恵を最も直接的な形で応用展開した例が電子顕微鏡である。20世紀初期に、ドイツのRuskaは世界で初めての電子顕微鏡を作製し、光学顕微鏡では越えられなかった分解能の壁を打ち破った(図表1)。

その功績により、Ruskaは1986年のノーベル物理学賞を受賞している。電子顕微鏡開発の黎明期に、我が国はいち早く産官学プロジェクト(日本学術振興会第37小委員会)を立ち上げ、本分野のその後の発展を世界的にリードすることに成功した。1970年代にOECD(経済協力開発機構)が公表した「最も社会に貢献した100の技術」に、日本からは「新幹線」「トランジスター

ラジオ」「ビデオカメラ」「電子顕微鏡」の4つがランクインしている。1980年以降、日本のメーカーによる電子顕微鏡が生物分子や物質の原子配列などの高分解能観察を次々と可能とし、その性能の高さゆえ世界の主要研究機関にあまねく設置されるに至ったのである。電子顕微鏡開発は日本の科学史に残る成功を収め、「電顕ニッポン」は世界中に知れ渡った。

図表1 光学顕微鏡から電子顕微鏡にわたる分解能の発展史



出典：参考文献¹⁾、Copyright ©Macmillan Publishers Ltd.

しかし、20世紀末、電子顕微鏡発祥の地であるドイツから再び革命がもたらされた。電子顕微鏡に用いる磁場レンズの「球面収差補正機」が開発され²⁾、頭打ちの感があった分解能の飛躍的な向上が、優れたコストパフォーマンスのもと実現されたのである(図表1)。この新技術に対して世界が素早く反応し、欧米諸国で次々と収差補

正顕微鏡開発プロジェクトが発足した。特に、本領域において従来は傍観者であった米国が、政府主導のもとに前例のない投資を行い、電子顕微鏡開発・研究のイニシアティブをとるべく動き出した³⁾。この予想外の展開に対して、収差補正機開発初期において我が国は完全に一步出遅れてしまった。

本稿では、電子顕微鏡発展の歴

史を紐解きながら、現在の世界および日本における収差補正電子顕微鏡の開発動向を概説する。収差補正技術がもたらした電子顕微鏡の多様化・多機能化にも触れ、日本がお家芸の真の奪回に向けてとるべき長期的展望について私見を述べたい。

2 電子顕微鏡の発展史

2-1

電子顕微鏡の発明

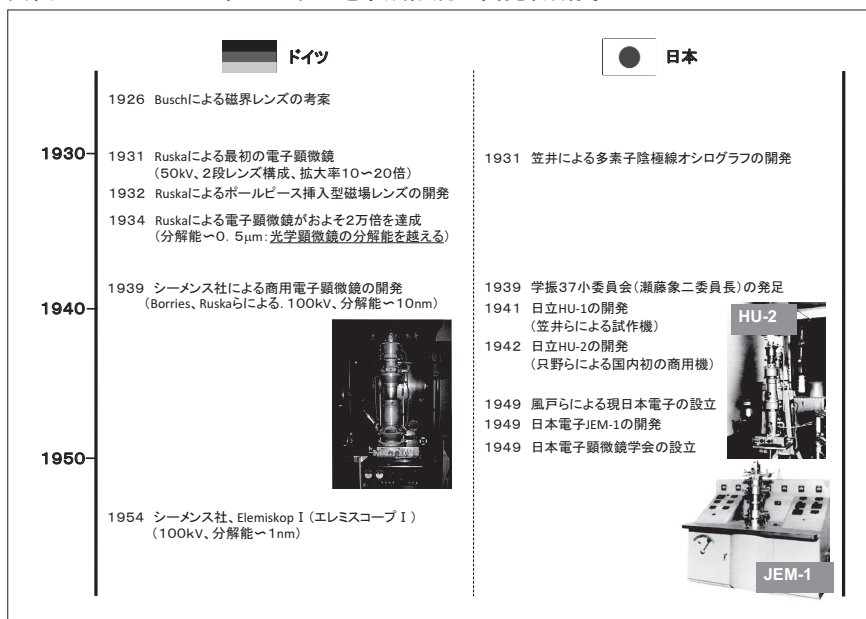
量子力学は、素粒子である電子が波としての性質も有することを我々に教えたが、その運動量と波長の関係は de Broglie の「物質波」の概念によって定式化された。これによれば、一定電圧のもと加速され運動する電子は、可視光を遙かに凌ぐ波長を有することが直ちに導かれる。すなわち、電子に作用するレンズがあれば、極めて高い分解能の顕微鏡が作製できることを意味する。ソレノイド(導線を巻き付けたコイル)磁場による電子収束効果が、光学系における凸レンズと等価な作用を持つことから、さっそく電子と磁場レンズの組み合わせによる「超顕微鏡」の開発が試みられた。しかし、最初の試作機の拡大率は10~20倍程度であり、全く実用的な意味をなさなかった(図表2)。磁場レンズの性能が全く追いついていなかったためである。最終的な決定打となったのは、コイルが発生する磁束をより効果的に集中させるため、Ruska が独自に考案した「ポールピース(図表3)」と呼ばれるパーツであり、これを挿入した磁場レンズが極めて優れた電子収束特性(レンズ拡大

一収差補正以前一

特性)を実現した。このポールピース型磁場レンズを2段で用いた超顕微鏡が、1934年に電子顕微鏡と

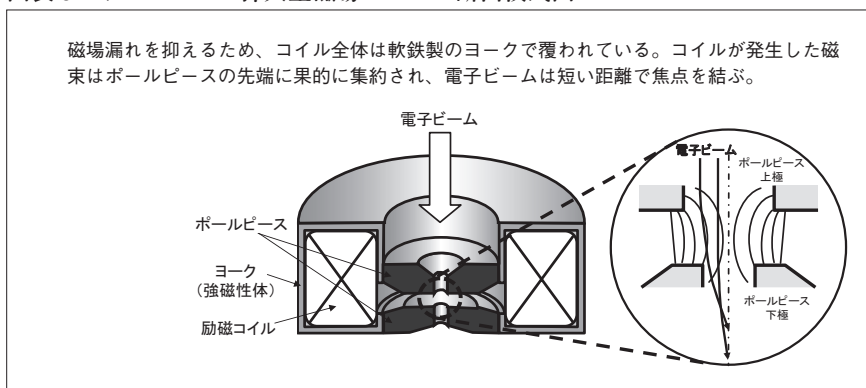
して初めて光学顕微鏡の分解能を越えた。その後、Ruska はシーメンス社において電子顕微鏡の開発

図表2 ドイツと日本における電子顕微鏡の開発初期史



科学技術動向研究センターにて作成。写真左は参考文献⁴⁾より転載、写真右は(株)日立製作所、日本電子(株)の各社提供

図表3 ポールピース挿入型磁場レンズの断面模式図



科学技術動向研究センターにて作成

を続け、1939年に最初の商用機、さらに1954年には現行機の原型となる高分解能型商用機(エレミスコープI:分解能は約1nm)までへと育て上げた(図表2)。

Ruskaの成功は、高性能磁場レンズの作製にあった。彼は、電子顕微鏡開発にあたってそれほど量子力学(電子=波)を意識していなかったとも言われており、とにかく既存の理論に沿って磁場レンズを設計し、独自の技術的工夫によってその性能を高めたのである。300年以上前に、Leeuwenhoekがひたすらレンズを磨き上げた姿勢に重なる。

2-2

日本の躍進-産官学プロジェクトの輝かしい成功

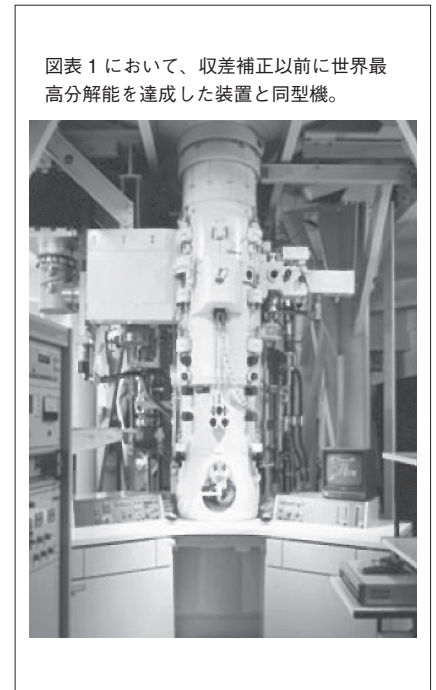
日本の電子顕微鏡の開発は、1939年、瀬藤(東大)を委員長とする日本学術振興会第37小委員会(以下、学振37小委員会)の発足に始まる⁵⁾。この委員会には、電子工学・物理・化学・医学等の広い学問分野から学者・研究者が集結するとともに、東京芝浦電気(株)(現在の(株)東芝)、(株)日立製作所、(株)島津製作所、日本電気(株)等のメーカーの技術者も多数加わり、産官学一体となって国産電子顕微鏡の開発を目指した。委員会運営には、大学、競合企業を問わず、得られたデータは全て公表するという非常にオープンな方針が採られた。また、当時は第二次世界大戦に突入した時期でもあり、ドイツで開発された最新の電子顕微鏡を輸入することが出来なかったため、それがかえって独自の開発を促すよい結果へとつながったとも言われている。これらの状況がうまくプラスに作用し、電子顕微鏡開発は日本の科学史に残る成功を取めたのである。世界の情報が溢れ、研

究の秘密主義が強くなった現在では、同様の状況を実現させることは難しいかもしれない。皮肉なことである。

学振37小委員会の中心メンバーであった笠井(電気試験所(現:(独)産業技術総合研究所))は、電子顕微鏡の黎明期に、目的は違えども全く同様の装置である陰極線(電子線)オシログラフを作製していた(図表2)。電子顕微鏡開発の重要性にいち早く気づいた彼は、(株)日立製作所へと異動し、すぐさま最初の試作機(HU-1)と、国産初の商用機(HU-2)の開発へと結びつけた。ドイツよりおよそ10年遅れて電子顕微鏡開発に着手した日本であったが、委員会発足からわずか数年で世界トップに比肩する装置開発を成し遂げたのである。成功要因には、①すでに電子光学基盤技術があったこと、②産官学間で常に互いの最新データを共有し、委員会が高いレベルで実質的な機能をしたこと、などがある。戦後の復興期に入ると、風戸らによって電子顕微鏡製作を主幹事業とする日本電子工学研究所(現在の日本電子(株))が設立された。同社の商用一号機(JEM-1)は、顕微鏡としてだけではなく、電子回折測定装置としての機能も有しており、現在の多機能電子顕微鏡の先駆けとなった。ちなみに、50年代後半までは東芝社も独自路線(静電レンズ)での電子顕微鏡開発を進めていたが、後に撤退した。その理由としては、静電レンズ性能の限界などの技術的な問題もあろうが、戦後急激に成長した半導体等の他分野へと技術者を振り分けなければいけないという、大会社ゆえの判断が大きかったものと思われる。同様の理由で、電子顕微鏡産みの親であるドイツのシーメンス社も、現在ではその製造を行っていない。

初期開発以降、電子顕微鏡はユーザーの要望に応じてより高性能・高分解能化への道を歩む。学振37

図表4 日本電子製の超高压電子顕微鏡(加速電圧125万ボルト)



図表1において、収差補正以前に世界最高分解能を達成した装置と同型機。

写真: 東京大学大学院工学系研究科提供

小委員会を通して、総合的に高いレベルでの基盤技術を築きあげた日本企業のこの間の躍進は目覚ましく、日立社、日本電子社に代表されるメーカーの日本製電子顕微鏡が、世界の市場を日の出の勢いで制していった。1966年に京都にて国際電子顕微鏡学会が開かれた頃には、国内で生産された電子顕微鏡はすでに2500台以上にのぼり、その半数以上が海外へと輸出されていたらしい⁵⁾。当時の電子顕微鏡開発は、日本のお家芸と言われる域にまで発展していた。1970年以降、電子顕微鏡の分解能はさらに進歩を遂げ、生物分子や物質中の原子までも捉えるに至った。

この期間における高分解能化への主流技術は、電子を加速する電圧を高くし、すなわち電子運動量を増加させ、波長を短くすることで分解能を向上させようとするものであった。日本が、その高い技術力を持って開発した高压から超高压電子顕微鏡(加速電圧400~1250kV)は、1990年に入るとほぼ0.1nmに迫る最高分解能を達成し

(図表1)、世界各地の主要研究機関にフラッグシップ機(図表4)として多数設置された。

3 収差補正電子顕微鏡の登場

超高圧機の開発により、1990年頃には電子顕微鏡の分解能は0.1nmにまで至った。ここで図表1に目を戻すと、1990年代に分解能の伸びがこの0.1nmあたりで頭打ちになっていたことに気づく。過去に、光学顕微鏡の分解能が1 μ m程度に留まったのは、前述のように可視光波長による原理的境界であった。物質波の概念に基づき、125万ボルトで加速された電子の波長を見積もると、1pm(ピコメートル:10⁻¹²m)のオーダーにまで達していることが導かれる。すなわち、0.1nmという値は、原理的分解能からまだ2~3桁もかけ離れていたのである。当時の電子顕微鏡の分解能は、磁場レンズの大きな球面収差によって著しく制限されており、その解決は電子顕微鏡研究者の長年にわたる悲願だった。本章では、1990年代後半に0.1nmの壁を越える飛躍的な分解能向上をもたらした磁場レンズ収差補正機の原理と、その開発に至る経緯を述べる。

3-1

球面収差とは

波長オーダーの原理的分解能へと近づくためには、レンズが取り込める入射波の範囲を十分に大きくする必要がある(回折限界による分解能 \propto 波長/レンズ開口)。しかしながら、凸レンズの端側を通過する波は、焦点面における理想収束位置からのずれが大きくなるため(図表5左)、取り込むことのできる範囲は制限されてしまう。このずれをもたらすのが、レンズの

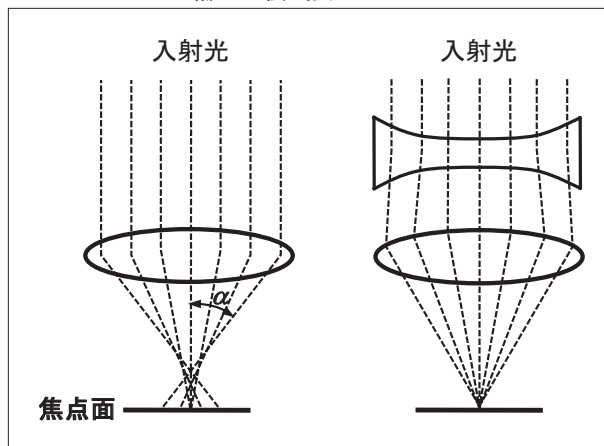
球面収差である。球面収差(Cs)の影響はレンズの端側、すなわち大きな収束角 α で伝播される波ほど顕著となり、その理想収束点からのずれはCs α^3 に比例することが知られている(光学では、球面収差は3次の収差と定義される)。一般の光学系では、凹レンズと組み合わせることによって球面収差は補正される(図表5右)。電子顕微鏡に用いる磁場レンズも凹レンズで補正できればよいのだが、電子入射軸に対して回転対称である磁場レンズ(図表3参照)では、基本的に凸レンズ作用しか得られないのである。近年実用化された収差補正技術では、非軸対称な多極子レンズを用いて凹レンズ作用を発生させるのだが、その基礎理論1940年代から与えられていた。

3-2

多極子レンズによる収差補正機開発

電子顕微鏡が未だ開発初期段階にあった1940年後半に、ダルムシュタット工科大学(独)の物理学者Scherzerは遙か先を見越した研究を次々と展開していた。例えば今日「Scherzer条件」として知られる、電子顕微鏡で原子配列を映し出すための理論的光学条件は、装置性能がそのレベルに達するずっと以

図表5 凸レンズの球面収差と、凹凸レンズの組み合わせによる補正の模式図



科学技術動向研究センターにて作成

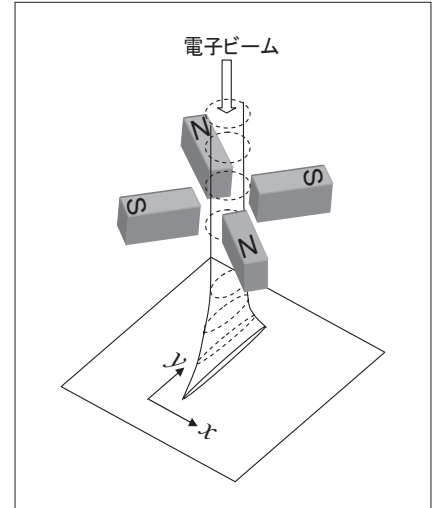
前⁶⁾に提案されていた。彼はレンズ特性に関しても早い時期から卓見しており、軸(回転)対称な磁場レンズでは負の収差(凹レンズ効果)を発生することができないことを理論的に示すとともに、多極子レンズを多段に組み合わせることによって球面収差補正が可能となることを初めて提案した。多極子レンズとは、平面内に配置された複数の磁極によって構成される非軸対称な構造を持つレンズであり、磁極の数によって4極子、6極子、8極子等がある。多極子レンズを用いた収差補正法は、Scherzerのアイデアを土台とする4極子-8極子の組み合わせ方式と、フランス国立科学研究センター(CNRS)のHawkesの提案から始まった6極子方式とに大別できる。それらおよその発展史を図表6にまとめた。以下、4極子-8極子型、6極子型それぞれの原理を簡潔に述べる。より技術的な詳細は、参考文献を参照頂きたい^{7~9)}。

図表6 多極子レンズによる収差補正技術開発史

電子顕微鏡 収差補正レンズの開発史	
1940	
1947	Scherzer, 非軸対称多極子レンズによる収差補正の提案
1951	Seelger, Scherzer, 円筒レンズ+8極子の組み合わせによる試作機
1956	Archard 4極子-8極子レンズによる収差補正の提案
1960	
1964	Deltrap, 4極子-8極子レンズによる収差補正効果の実験的検証
1965	Hawkes, 6極子レンズによる収差補正効果の提案
1972	Creweら 4極子-8極子収差補正レンズを搭載した電子顕微鏡の試作 (収差補正による分解能改善は達成できず)
1979	Beck 2枚の6極子レンズによる収差補正効果の提案
1980	Crewe 1枚の6極子レンズによる収差補正効果の提案
1980	
1982	岡山, 川勝 自己整合型4極子レンズの提案と実験による検証
1990	Rose 6極子レンズ+転送レンズによる収差補正法の提案 (収差補正機実用化へつながったアイデア)
1995	Haiderら Rose型収差補正レンズを搭載した電子顕微鏡の開発 (収差補正による分解能向上を初めて達成した)
1999	Krivanekら 4極子-8極子収差補正レンズを搭載した電子顕微鏡 (収差補正による分解能改善を達成)
2000	
2006	Krivanekら 4極子-8極子収差補正レンズによる高次収差補正 (5次の球面収差補正による、さらなる高分解能化)
2009	沢田ら 6極子+転送レンズによる高次収差補正 (5次の6回対称非点収差補正による、さらなる高分解能化)

科学技術動向研究センターにて作成

図表7 非軸対称4極子レンズによる入射電子ビームの偏向効果



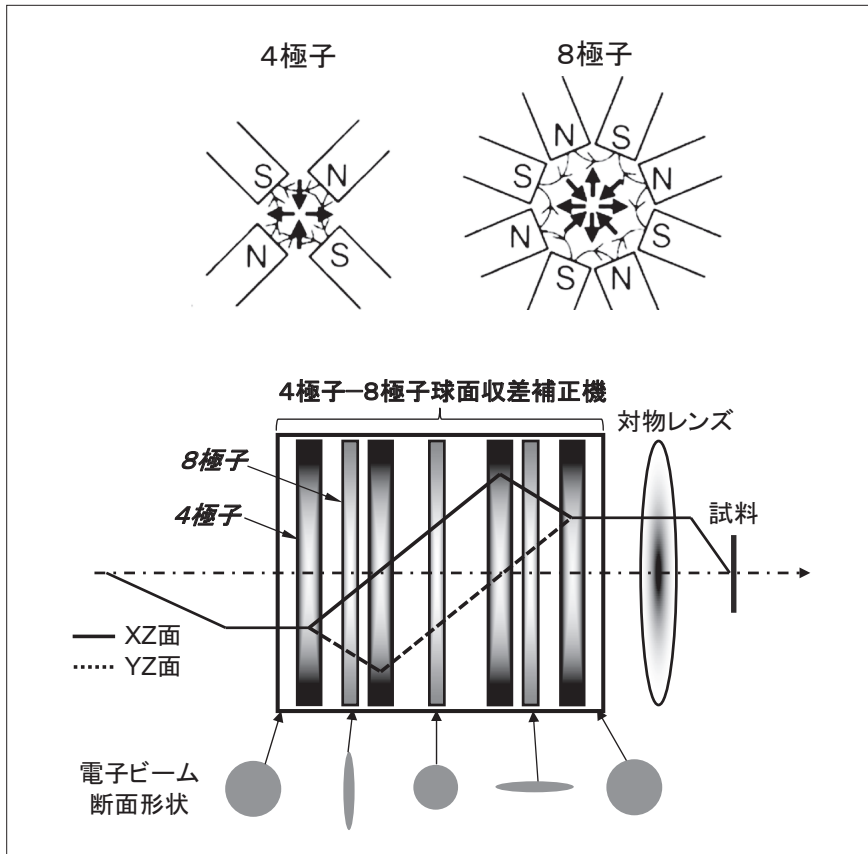
科学技術動向研究センターにて作成

3-2-1 4極子-8極子レンズによる収差補正

多極子レンズを通過する電子ビームは、レンズを構成する磁極ペアの数で決まる対称性に従って、軸中心から発散および収束のそれぞれの方向に偏向される。一例として、図表7に4極子レンズによる電子ビーム形状変形の模式図を示す。8極子場においては、凹レンズ作用である発散方向(図表8)への偏向が生み出す収差は、球面収差と同じ3次の α 依存性を持つため、この方向に対しては収差補正が可能となる。補正方向の制御は、多極子レンズにおける偏向力が磁極近傍で強く作用し、中心へ近づくほど弱くなるという特性を利用する。具体的には、まず4極子場でX方向へのみ強くビームを絞り込み、伸びたY方向を8極子場の発散方向に対応させ通過させることで、Y方向の収差が補正されることになる。これを極性が反転した4極子レンズを通せば、再び円状のビーム(Y方向のみ収差補正済み)へ戻る。引き続き、同様の収差補正作用をX方向に対しても行えば、全体の球面収差が補正できることになる。これら一連の流れを、図表8に模式的に示した。

収差補正機は、複数のレンズから構成される複雑な構造を持つこ

図表8 4極子、8極子レンズの発散・収束作用、および4段4極子-3段8極子多段レンズ構成による収差補正効果の模式図



科学技術動向研究センターにて作成

とが一目瞭然であろう。多段レンズにより、入射ビームを歪ませては元に戻す、といった過程を複数回繰り返す、ようやく球面収差は補正される。その際、多段レンズの各磁極一つ一つを相関させながら、極めて高い精度で制御しなければならない。それまでの電子顕微鏡が、基本的には一つのレンズ(図表3)のみを制御・調整すればよかったことを思えば、収差補正レンズが要求する制御レベルは極めて複雑かつ高度である。1970年代の初め、粒子ビーム制御の分野ですでに際だった成果を挙げていたイリノイ大学(米)のCreweによる収差補正機は、設計上の装置性能は十分であったが、実際の分解能改善は果たせなかった。補正機を構成する磁極材料の不均一性に起因する多極子作用の不具合や、複数レンズを同時に微調整する手段が十分に確立されていなかった等、当時の技術的未熟さが主要因であった。

これら基盤技術にその後の進展がもたらされ、次節に述べるRose-Haider型補正機の成功に続いて、1999年に4-8極子型収差補正機はケンブリッジ学派の流れをくむKrivanekらにより実用化された¹⁰⁾。彼らは、現在ではさらに高次収差(5次の球面収差)も補正する高分解能補正機を開発するまでに至っている¹¹⁾。なお4-8極子型補正機は、試料上へ電子ビームを収束する作用のみに働くため、試料透過後の電子波面の収差補正を必要とする透過型電子顕微鏡法(TEM)に用いることは出来ない。この原理的制限もあり、4-8極子型補正機は制御が比較的優しい低加速走査型電子顕微鏡(SEM: 加速電圧1kV)にてまずは実現された¹²⁾という経緯がある(1994年: 図表1)。

3-2-2 6極子レンズによる収差補正

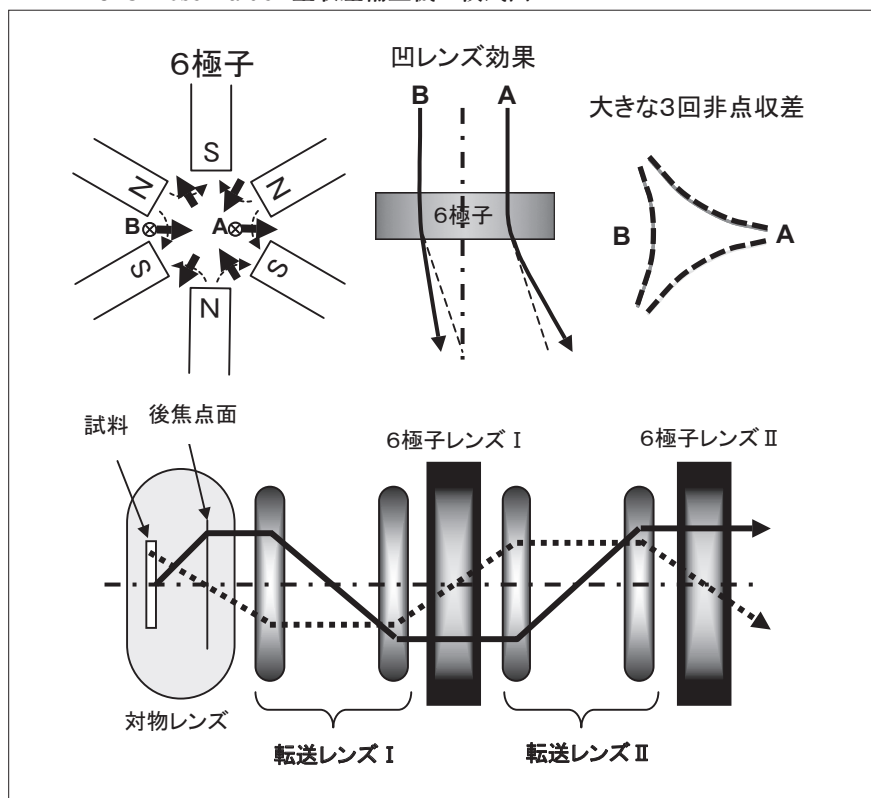
6極子レンズでは、前述の4-8

極子構成とは異なり、相対する磁極に異なる極性が配置される(図表9左上)。すなわち、光軸を挟んで両極側近傍を通過する電子は、それぞれ同一方向への偏向を受けることになる。前節で述べたように、多極子レンズにおける偏向作用の強さは、磁極へ近づくほど強く、また中心へ向かうほど弱くなる。図表9上の模式図において、光軸より遠ざかる力を受けるA入射の電子は、6極子場を通過中にその偏向力が次第に増していく一方、光軸へ向かうB入射の電子が受ける偏向力は次第に減少していく。これらの作用は総じて、光軸から離れる方向へと働く凹レンズの効果を生み出す。この発散偏向の α に対する依存性が3次であるため、球面収差補正が可能になるという仕組みである。6極子レンズはその特性上、4-8極子のような特定方向へのビーム変形過程(図表7)を必要としない利点があるが、極めて大きな3回非点収差(α に対する2次の収差)を生じ、ビーム形状

を3角形へと歪ませてしまうという致命的欠点がある(図表9右上)。それゆえ6極子場は、種々の理論的試みはあったものの、実現は無理であろうとの認識が主流を占めつつあった。しかし、Scherzerの研究室を引き継いだRoseが「転送レンズ(transfer-lens)の挿入」という見事な解決策を着想し¹³⁾、一気に実用化へとつなげたのである。

図表9下に、Rose型6極子補正系の構成を示す。互いに反対称な磁極配列となるように2つの6極子レンズが配置され、最初の6極子Iで発生した3回非点収差を次の6極子IIで打ち消せるようになっている。この働きを可能にするのが、収差補正を行うべき対物レンズの後焦点面を、それぞれの6極子レンズの光学的主面へと逐次伝達する転送レンズである。この転送レンズの見事なアシストを含めた一連の動作により、6極子型は3次の球面収差補正を成し遂げる。Rose型補正機は、最終的に彼の学生であったHaiderが設立し

図表9 6極子レンズの発散・収束作用、および6極子-転送レンズ多段構成によるRose-Haider型収差補正機の模式図



科学技術動向研究センターにて作成

た CEOS 社¹⁴⁾により実機開発がなされ、1995 年、収差補正による電子顕微鏡分解能向上を世界で初めて実現するに至った²⁾。6 極子型補正機は、電子ビーム収束タイプ (STEM) と試料透過波補正タイプ (TEM) のいずれの電子顕微鏡にも用いることができることから、現在の主流補正機となっている。

3-3

収差補正開発の鍵 —なぜ日本でできなかったのか?

その原理の提唱からおよそ 50 年の歳月を経て、20 世紀末に多極子レンズ収差補正技術は実現に至った。理論はあっても技術の未成熟さが実機開発を阻む、といった状況はいずれの領域にでも数多例はあろう。電子顕微鏡は日本が最も進んだ基盤技術を有していたのであれば、収差補正技術を最初に開発できたはずではないか、といぶかしむ声が出るのも無理はない。以下、収差補正技術開発の鍵となった要因や背景をいくつか挙げてみる。

1) 自動制御ソフトウェアの開発

極めて高精度な制御が要求される多極子多段レンズ群を自動的に光学チューニングするソフトウェアの開発が、商用機実現の最終的な鍵であった。この点、コンピュー

ターの計算能力が急激な成長をなし遂げた昨今の状況が、収差補正機開発を強力に後押ししたことは特筆すべき時代背景である。日本のメーカーは概してハード(装置本体)至上主義であり、ソフト開発を軽んずる傾向にあったことが裏目に出たと考えられる。

2) ベンチャー型の起業

収差補正機開発社である CEOS 社(独)や Nion 社(米)¹⁵⁾は、いずれも個人の発想を小規模な人員構成で展開するベンチャー企業であった。Nion 社の技術者の殆どは博士号取得者であり、個々の高い専門能力が技術開発を根本から支えている。博士取得者がむしろ日本企業から敬遠されがちな現状も含めて、我が国におけるベンチャー起業の難しさが収差補正機開発を阻んだ一因とも指摘できる。

3) 基礎研究と人材

前述のように、英国やドイツを中心とする収差補正機開発は、大学での数世代にわたる基礎研究が実を結んだ結果である。実用化へ決定的なアイデアとなった Rose の転送レンズは、Ruska のポールピースに匹敵する大きなブレークスルーであった。過去 50 年を振り返ると、日本においても電子光学・収差補正に関する基礎研究として一部に萌芽的な試み、例えば岡山による SEM (30kV) 用補正機¹⁶⁾、志水・高井ら大阪大グループによ

る変調結像型収差補正¹⁷⁾などがあつた。しかし、現在の主流となった高エネルギービーム用多極子補正機に関する継続的研究は大学等でなされておらず、収差補正機実現の最終的な発想を生み出すための土壌は極めて乏しかったと言わざるをえない。

上記 1)、2) はしばしば日本の企業・産業体質に照らして議論されることであり、収差補正機開発に出遅れた原因の一部となったかもしれないが、筆者はおそらく直接的な主因ではないと考えている。技術的なブレークスルーをもたらした Rose の転送レンズは、電子光学に携わる者にとってはまさに「コロンブスの卵」の着想である。このアイデアは、地に足を着け、継続的な基礎研究を怠らなかつたドイツにおいてこそ生まれ得たのだと考える関係者は、筆者だけではない。収差補正技術は、ある日突然に現れたものでは決してない。収差補正理論は頭の片隅にあり、かつ潜在的な開発能力は十分に有していたものの、その技術実現は困難、もしくはかなり先のことであると決めてかかっていた日本の研究者・技術者では実機開発に至れるはずもなからう。長きにわたり、電子顕微鏡の世界市場で「一人勝ち」状態であった当時の日本の関係者が失っていたのは、学振 37 小委員会時代の挑戦心と情熱であつたかもしれない。

4 収差補正顕微鏡の世界的展開 (2000 年~)

2000 年の米国によるナノテクノロジー・イニシアチブの提唱以降、ナノテク研究必須ツールである電子顕微鏡は存在力を高めていた。その最中での、収差補正機の登場は世界の注目を大いに集めることとなった。前世代の高加速電圧に

頼る高分解能化は、結果として非常に高いエネルギーを持つ電子ビームを用いるため、観察中の試料損傷が激しく、半導体やバイオ系試料への適用が著しく制限されてしまっていた。レンズ収差補正によれば、比較的低い加速電圧、

すなわち低エネルギーでも従来を遙かに凌ぐ分解能を得ることができ、電子顕微鏡の観察対象範囲を飛躍的に拡大できる。その重要性に世界がいち早く反応し、欧米諸国に次々と収差補正顕微鏡関連プロジェクトが発足した。

4-1

世界の収差補正プロジェクト動向

図表 10 に、世界各国で展開された収差補正電子顕微鏡の主要プロジェクトをまとめた。以下、それぞれを簡潔に概説する。

・ SuperSTEM (英)

英国は、原理・開発を先導してきた収束電子ビームを走査するタイプの透過電子顕微鏡法(STEM)に特化し、その高性能化を目的として SuperSTEM プロジェクトを進めている¹⁸⁾。収差補正レンズにより、0.1nm 以下にまで絞り込んだ高輝度・高干渉電子ビームを用いることから、近年その進化が著しい放射光施設と対比して“A Synchrotron in a Microscope (顕微鏡でのシンクロトロン)”と銘打っている。SuperSTEM は世界でもいち早くスタートした収差補正関

連プロジェクトのひとつである。

・ TEAM (米)

2000年、米国はエネルギー省(DOE)主導のもと“TEAM”(Transmission Electron Aberration-corrected Microscope)プロジェクトを立ち上げ、主要国立研究所に収差補正電子顕微鏡を設置しつつ、装置開発でもイニシアティブをとるべく動き出した³⁾。実態としては、FEI社や米国内に拠点を持つ日本電子社、日立社等のメーカーとの連携を密にし、最新装置を随時導入していくスタイルをとった。TEAM プロジェクトは、特に FEI 社の躍進の源となった。

・ SATEM/SESAM (独)

ドイツでは2000年前後より、収差補正機を開発した CEOS 社と国策会社である LEO 社を中心として、高分解能電子顕微鏡の開発を目指した SATEM (Sub-Ångstrom-TEM)、および分光測定の高分解能化も併せて行う SESAM (Sub-Electronvolt and Sub-Ångstrom Microscope)の2つのプロジェクト

が発足した。

・ ESTEEM (欧州連合)

米国の TEAM に対抗すべく、2006年に EU 連合も“ESTEEM”(Enabling Science and Technology for European Electron Microscopy)を立ち上げ、EU 諸国間の連携と要素技術開発に着手した¹⁹⁾。そのプロジェクト名が示すように、単に装置技術開発に留まらず、そこから新しいサイエンス展開を生み出すことを主目的としている。そのため、研究者ネットワークの構築を重視している。

収差補正機実現に伴う世界規模での電子顕微鏡プロジェクト展開のなかでも、従来はその開発に傍観者であった米国が前例のない投資を行い、当該分野へ本格的に参入してきたことは日本の関係者に少なからぬ衝撃をもたらした。上述のように、米国 TEAM プロジェクトの背景にはナノテクノロジー・イニシアチブの立ち上げがある。時のクリントン大統領によるナノテック提唱の際に引用された、ファ

図表 10 世界の主な収差補正電子顕微鏡プロジェクト

プロジェクト	国/地域	期間	おもな参加機関		特徴	予算(概算)
			研究機関、監督機関	装置メーカー		
SuperSTEM	英国	1997~	SuperSTEM研究所の設置(ダースペリー)、リバプール、リーズ、グラスゴー、ケンブリッジの4大学が共同で運営。	Nion	STEMによる微小領域の化学分析用装置の開発と応用	~25億円
TEAM	米国	2000~	ローレンス・バークレー、アルゴンヌ、ブルックヘブン、オークリッジの4国立研究所、イリノイ大学(フレデリック・サイツ物質研究所)。	CEOS, Nion, FEI等	分解能50pmの収差補正電子顕微鏡の開発	~25億円
SATEM	ドイツ	2000~	CEOS社、LEO社	CEOS, Zeiss/LEO	球面収差補正による0.1nm(1Å)以下の分解能が目標	~18億円
SESAM		2000~	マックスプランク研究所		エネルギーフィルターによる電子ビームの単色化(< 0.2 eV)	
ESTEEM	FP6/EC	2006~	7カ国11研究機関	特定せず	ヨーロッパの主要な電子顕微鏡センターと材料関係の研究機関を結びつけ、電子顕微鏡の応用利用を促進する。	~18億円
CREST	日本	2004~	東京工業大学・科学技術振興機構(JST)	日本電子	分解能0.5Å以下を達成。軽元素(リチウム)の観察に成功。	~9億円
		2006~	産業技術総合研究所・科学技術振興機構(JST)		低加速電によるソフトマテリアルの観察。独自の収差補正機の開発に成功。	

科学技術動向研究センターにて作成

インマン博士の有名な1959年の講演“Plenty of room at the bottom”²⁰⁾中には電子顕微鏡の重要性も明確に指摘されており、これがTEAMのきっかけとなったことは想像に難くない。

一台の設置費が数10億円かかっていた超高压電子顕微鏡と比べれば、収差補正顕微鏡は3～6億円程度であり、格段にコストパフォーマンスに優れている。それゆえ、国主導型プロジェクトであるにもかかわらずその費用はいずれも20億円前後と比較的少額規模であり、総じて優れた対投資効果が期待された。こうした需要熱の高まりのもと、収差補正機導入に素早い対応をしたFEI社の電子顕微鏡の基盤技術・生産性が急激に高まり、日本メーカーの独壇場であった世界市場を大きく再編していった。

FEI社は、総合電機メーカーであるフィリップス社(オランダ)の電子顕微鏡部門が切り離された際、イオンビームを扱っていた米国企業のFEI社を買収することで、技術者たちがフィリップス社から独立したという経緯を持つ。前フィリップス時代は汎用性重視の電子顕微鏡開発との印象が強く、日本メーカーを大きく凌駕する高性能機に本格的に着手することはなかった。しかし大会社の足かせが外れたことで、FEI社の技術者た

図表11 FEI社の収差補正電子顕微鏡 TITAN (加速電圧300kV)



出典：FEI社提供

ちは思う存分、高性能を追求する収差補正顕微鏡を作る機会を得た。ここでもベンチャーマインドが良い方向に働いたと言える。こうして生まれた“TITAN”(図表11)と名付けられた同社のフラッグシップ機は世界から極めて高い賞賛を受け、TEAMプロジェクトの中核をなす機種になるとともに、日本製の電子顕微鏡に替わって世界の主要研究機関に次々と設置されていった。

4-2

日本における収差補正顕微鏡開発 (2004年～)

米国TEAMプロジェクトの後ろ盾もありFEI社が目覚ましく躍進する傍ら、日本メーカーは収差補正機導入初期の流れに完全に乗り遅れた。FEI社がTITANの開発には箝口令を敷き、研究開発を秘密裏に進め情報公開を制限していたという経緯もある。FEI社の旋風は海外のみならず、日本国内の顕微鏡ユーザーの中核をなす研究機関、例えば東北大学金属材料研究所、(独)物質・材料研究機構、JFEスチール(株)や新日本製鐵(株)の解析研究所などまでもが、次世代先端機としてTITANを導入するに至り、日本のメーカーも事の深刻さを強く認識した。しかしある意味、この「黒船」の襲来は国内の緊張感を高め、再び世界トップを目指そうとする気概を生み出す効果をもたらしたとも言える。やや出遅れたものの、その傷が深まる前に、我が国においても収差補正機開発の個別プロジェクトが直ちに(独)科学技術振興機構(JST)の支援のもと開始された(図表10)。もともと高い基盤技術を有していた日本電子社は、短期間のうち立て続けに独自の収差補正装置を製作し、すぐさま分解能競争の先頭

へと躍り出ること成功した²¹⁾。図表1に、現時点における世界最高分解能を表すCRESTと示された点は、このJST支援の成果である。

JSTの戦略的創造推進事業(CREST)の成果としてさらに特筆すべきは、既存技術の模倣にとどまらず、独自のアイデアを盛り込んだ新しいタイプの収差補正レンズ開発を遂げたことである²²⁾。原理的には転送レンズを用いるRose方式をベースとするが、従来の2段にもう1段加えた3段の6極子レンズ構成とし、これらを絶妙な回転角で配置することによって6回対称の非点収差を打ち消せることを見いだしたのである(図表6の2009年に記載)。収差補正レンズ特性を一段と改善するこのアイデアは、世界的にも非常に高い評価を受けており、電顕ニッポンの基礎技術力の高さを改めて内外へアピールすることとなった。また、現在CRESTでは次に補正すべきレンズの色収差に関して技術開発が進行中であり、同技術の開発²³⁾を進めるCEOS社の後塵を再び拝することのないよう、研究開発が進められている。

日本国内プロジェクトの成果として、高性能収差補正顕微鏡の開発は成功を収め、初期の出遅れは十分に取り戻したと言える。しかしながら冷静に収差補正顕微鏡フィーバーを顧みれば、FEI社にしても収差補正レンズそのものは100%CEOS社に依存しており、この現状は日本メーカーの主たる商用機にもあてはまる。すなわち、いまだCEOS社が全体のキャスティングボードを握っていることを忘れてはならない。次章に述べるように、電子顕微鏡の高性能化・多機能化に伴い、顕微鏡本体よりもその周辺・付属装置の重要性が増すという傾向が、より一層強くなってきている。

5 今後の展開 — 最先端電子顕微鏡の多機能化・目的特化

現代の電子顕微鏡は、単に拡大して原子を見るための装置ではない²⁴⁾。計測の3大基本である Diffractometry (回折法)、Spectroscopy (分光法) および Microscopy (顕微鏡法) といった一連の測定を、試料中の微小同一領域について行うことができる総合的計測装置である²⁵⁾ (図表 12)。Spring-8 に代表される現代の放射光施設が、測定目的や対象試料に特化してビームラインを持つと同様に、最先端電子顕微鏡も特定手法に主眼を置き、目的性能を最大限引き出すための装置設計を行う機会が増えている。これを踏まえた今後の電子顕微鏡展開を、技術開発と基礎・応用研究のそれぞれの側面から述べてみたい。

5-1

周辺機器を含めた技術展開

前節で触れたように、収差補正レンズの登場は、それまでは顕微鏡本体に含まれるべきパーツであったレンズの一部分が周辺装置となり、顕微鏡本体よりも付属装置の重要性が増すという主従逆転の構図をもたらした。この兆候は、実は収差補正機登場の以前より芽生えていた。例えば、特性 X 線や電子エネルギーの分光器は今に至るまで、専門のメーカーが電子顕微鏡メーカーに提供する周辺装置である。それゆえ、分光性能を重視するユーザーにとって、顕微鏡本体の選択は二の次となっていた。分光器の殆どは海外メーカー製であるため、国内電子顕微鏡メーカーはここでも主導権を握られつつあった。米国 Gatan 社は、世界のマーケットをほぼ独占する電子エ

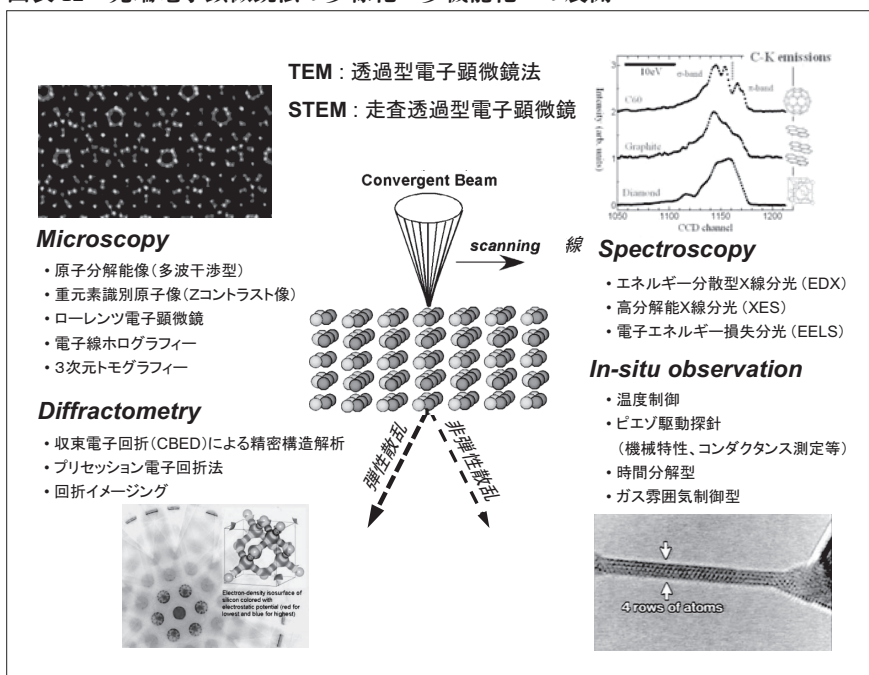
ネルギー分光器メーカーであるが、収差補正レンズの出現と同期して次々と高性能機へとバージョンアップし、一定量の世界ユーザーを常に確保し続けている。現在は、「顕微鏡本体は副次的」という状況がより一層顕在化しつつあるが、米国 FEI 社は CEOS 社や Gatan 社との連携を密にすることで、現在の成長を遂げている。

収差補正機の登場と、付随する周辺装置の高性能化も相まって、電子顕微鏡本体はより一層の高度化を迫られている。国内メーカーがとるべき道は①顕微鏡本体性能の一層の向上を図る、と同時に、②独自の高性能分光器開発にも着手する、の2点となる。これらは、2006年より文部科学省が始めた「次世代の電子顕微鏡要素技術の開発」プロジェクトによって対応が図られている。その採択テーマ中には、電子銃や記録媒体といった要素基盤技術に加えて、国内独自の特性 X 線高分解能分光器の開発も含ま

れており、順調に成果を挙げつつある。しかし、一度のプロジェクトでは、周辺機器も含め多種多様に展開する電子顕微鏡法の全て(図表 12)を網羅しきれないことを考えると、今後も継続的な対応が必須であろう。特に、最重要手法の一つである電子エネルギー分光器の商用機開発までを見越したプロジェクトが行われていない。今現在で高いポテンシャルを有する Gatan 社に無理に対抗し関係を損ねる必要は全くないが、中長期的には、部分的にせよ国内機器開発に着手すべきであろう。

収差補正機の効果は、単に最高到達分解能を上げるのみに留まらなかった。まず、その場観察(in-situ observation)の可能性がより一段と拡大した。対物レンズはその構造上において、レンズ内部に試料を設置する(図表 2)のだが、従来はこの試料スペースを極小化し犠牲とすることで、球面収差をできるだけ小さく抑えて原子分解能

図表 12 先端電子顕微鏡法の多様化・多機能化への展開



科学技術動向研究センターにて作成

を実現していた。収差補正後は、原子分解能を維持したまま、この試料スペースを数 cm オーダー（以前は数 mm オーダーであった）まで拡充した設計が可能となった。それゆえ、収差補正以前は挿入が困難であった、複雑形状をもつようなその場観察用の試料ホルダーの使用が可能となっている。最近の際だった試みとしては、国内外を含めて、触媒作用のガス雰囲気その場観察に特化した顕微鏡・ホルダー設計に関する個別プロジェクトが立ち上がっており、「環境・雰囲気制御型電子顕微鏡」という技術領域を形成しつつある。

もう一つの大きな流れは、従来の透過型電子顕微鏡を大幅に低加速電圧化した状態での高分解能観察を実現し、従来の 100～200kV 機でも試料損傷が顕著であった有機ソフト・バイオ系試料の原子像観察の道を拓こうとするものである。Nion 社はごく最近、60kV 電子顕微鏡の開発により、ボロンと窒素からなる原子一枚シート物質（炭素におけるグラフェンと相似の構造）の原子識別解析に成功し、Nature 誌の表紙を飾る大きなインパクトを与えている²⁶⁾。日本でも、CREST により開発された（独）産業技術総合研究所の 30～60kV 電子顕微鏡がカーボン材料の詳細解析²⁷⁾を行っており、この研究領域では世界の先陣を走っている。

ここで超高压電子顕微鏡にも触れておく。従来に比べてその守備範囲が狭まったとはいえ、超高压仕様でしかできない観察法があることは疑いの余地がない。例えば、無機系・生物系ともバルクに近い状態の厚い試料の観察、種々の計測法の加速電圧依存性の物理、等々がある。超高压電子顕微鏡は、日本が長きにわたり築き上げた世界に誇る技術であり、その継承の観点からも、収差補正ができたからといってこれらを直ちにゼロとすべきではないだろう。現在、主要

大学・研究機関の超高压電子顕微鏡拠点において、順次、目的特化型の設計に基づく装置の更新が進められている。

本稿では全ての技術を紹介しきれないが、上記のように、収差補正後の先端電子顕微鏡の多機能化および多様化の流れは世界で急速に進展している。研究者や技術者は常にアンテナを張り、世界の流れに遅れることなく、独自のアイデアを生み出す機会を常にうかがうべき重要な時期である。今後の装置開発で強く留意しておかねばいけない点は、既存技術集積で平均的に優れた「万能型」商用機もさることながら、観察対象・目的に特化した「オンリーワン型」の顕微鏡設計も肝要であるということである。特に研究者は、後者にこそ独自アイデアを盛り込んで世界をリードしなければいけない。

5-2

収差補正顕微鏡による 基礎・応用研究展開

科学史において、計測性能の飛躍的向上は、しばしば新たな科学的知見をもたらしてきた。収差補正レンズ開発から十数年が経ち、その技術がほぼ確立した現時点の世界動向は、高性能化・多機能化した最先端電子顕微鏡を用いていかにしてナノ・バイオ研究の新展開を図るか、というフェーズへと移行している。EU 連合の ESTEEM は、この視点からのプロジェクトとなっていることは前述の通りである。米国 TEAM プロジェクトも 2010 年で役目を終えた後、現在は共同利用ネットワークを拡充することに主眼が移され、顕微鏡ユーザーの裾野拡大を目指している。この流れは、電子顕微鏡の収差補正技術が「目的特化した専門性の高いユーザー」の要求に応えただけで

なく、「汎用性向上による一般ユーザー層の拡大」という効果をもたらしていることを意味する。我が国もお家芸の真の復興という意味で、この機を逃すことなくナノテク分野やバイオ分野へと広く応用展開する機会を設けると同時に、専門家によるしっかりとした基礎固めを図ることが肝要と考えられる。

5-2-1 応用展開：ユーザー層裾野の拡大

収差補正電子顕微鏡では、その光学的調整はコンピューターによる自動方式であり、従来の原子像観察に求められた職人的技術はもはや必要とされない。その結果、専門家でなくとも技術的には電子顕微鏡の操作が容易となった。また、収差補正による電子ビーム輝度の 1～2 桁の向上による分析効率の大幅な改善は、従来は一日仕事であった測定が数分～数時間程度で行えるという大きな時間的メリットももたらした。これらの効果に代表されるように、収差補正技術はそれまで専門家限定であった高性能電子顕微鏡を、より一般的な分析装置として広めることを助けた。汎用性を重視する企業研究所が、大学や国立研究所に先行して収差補正顕微鏡の導入を進めていったのは、特筆すべき出来事である。汎用装置として成熟し、ユーザー裾野が広がることは、従来は使用機会が殆ど無かった様々な研究分野においても、先端電子顕微鏡で解析するケースが増えることを意味する。すなわち、いずれの分野の研究者でも新たな発見に出会える可能性が格段に増す。ナノテク材料の代名詞であるカーボンナノチューブも、飯島博士が常に電子顕微鏡に近い環境であったからこそ発見されたことが思い起こされる。日本における共同利用システムとしては、収差補正機以前より始められていた文部科学省の「ナノテクノロジー総合支援プ

プロジェクト(通称ナノ支援)²⁸⁾が継続されており、現在も収差補正顕微鏡の利用機会を促進している。また、最近では民間の依頼分析にも収差補正顕微鏡の環境が整いつつある。

5-2-2 基礎研究：専門家ネットワークの構築

収差補正開発後、多機能・多様化へ広く展開した電子顕微鏡を最大限活用し、新たな発見の機会を促進するためには、それぞれの専門領域における基礎的理解をより一層深めることが最重要課題となる。例えば、収差補正レンズを用いれば今や電子ビームを50pm以下の領域にまで絞り込むことが可能であり、ほぼ量子力学の限界に迫る状態にある。このような極微小ビームを入射した際、電子は試料中をどのように伝播していくのだろうか？ 試料内での弾性散乱、非弾性散乱や、特性X線の発光などは従来の電子散乱理論の延長で理解できるのだろうか？ こういった疑問があらゆる場面で出てくるであろう。まだ教科書に存在しないこれら一つ一つの現象を、理論・実験の両面で検証していく基礎研究が、次世代ナノ研究を世界的にリードする鍵となる。つま

り、「何を観ているのか」を正しく把握しておかないと、新しい発見に出会ったとしても研究者はそれを見落としてしまう。科学的発見(セレンディピティ)は、それを見るべき人(そうだと分かる人)によってのみ見いだされるのである。

現代の基礎研究は、広範に多様化、細分化した領域全てを一人の研究者が行うことはできないようになってきている。図表12に示した項目でさえ、筆者が思いついて記した一部の研究領域にすぎないかもしれない。お家芸と呼ばれただけに、日本国内には電子顕微鏡に携わる研究者は多く存在する。多様化した専門領域について、各大学や研究機関がそれぞれの得意領域の研究に立脚した拠点を設け、これらを横断的・有機的につなぐオールジャパン体制が今こそ強く望まれる。力を十分に発揮するためには、装置だけではなく人的ネットワークを通して、深いところで根はつながるべき各専門の知識・情報を共有し、世界に先駆けた新しいアイデアの創出を図ることが必要となる。発想としては、米国のTEAMというよりは、欧州連合のESTEEM 寄りが望ましいと言えるかもしれない。オールジャパン体制下で、各拠点が国内電子

顕微鏡メーカーと連携し、得意分野を活かすオンリーワン型の装置設計を目指すことで得られる技術的ノウハウが、測定困難であったナノ試料の観察を可能にする新たな装置開発へとつながりうる。これら新装置は新たなユーザー層への興味を引きつけることとなり、さらなる裾野拡大へと直結することが大いに期待される。このような試みの先駆けとして、現在特定領域研究が始められている²⁹⁾。

本節を小括すると、電子顕微鏡の今後の展開として、①汎用性を高めた装置でユーザー裾野を拡大すること、②目的特化した装置で各専門手法を深めていくこと、の2点が肝要だと思われる。装置開発としては相反するコンセプトに見えるが、この2点が相容れないものだという事は決してない。山を大きくするためには、裾野を広げることと、頂を高くすることの両方が大事である。頂を高くしようとする基礎研究は、必ずやユーザー裾野を広げるための新しい装置開発へもつながるのである。電子顕微鏡の今後を議論する際、「汎用性」と「専門性」が混同されている場面をしばしば見受けるが、よく整理しながら方向性を見極める必要がある。

6 おわりに

1990年代後半、電子顕微鏡性能を飛躍的に向上させた収差補正レンズ機は革命をもたらし、ナノテクノロジーの時代背景も相まって世界中の注目を集めることとなった。発祥の地のドイツのみならず、米国までもがその開発に着手する自体となり、電子顕微鏡をお家芸としていた日本が大いに危機感を募らすこととなった。しかし、初動の遅れはあったものの、もともと高い技術力を有していた日本

メーカーは大学・公的研究機関とのプロジェクト研究のもとに高性能機器の開発に成功し、収差補正発明から十数年が経った現在、十分世界のトップレベルに比肩するに至っている。一時期は米国FEI社の著しい攻勢を受けた世界市場も、徐々に鎮静化・回復へと向かいつつある。

電子顕微鏡の歴史を顧みれば、ドイツの発明を、後追いではありながらも日本が高い技術力で先達

を追い越し、自らのお家芸とした経緯がある。冷静に見れば、収差補正機開発の初期動向においても同じことが繰り返されているにすぎない。すなわち、電子顕微鏡、収差補正レンズともにその発明自体は海外である。特に収差補正機は、ドイツ、英国の50年にわたる基礎研究が結実した産物であることを再認識すべきである。世界の科学先進国となった日本の技術を、もはや「物真似」と揶揄する声はな

いが、科学大国となった日本が次に成すべきは、既存技術の短期的開発だけにとどまらず、ゼロから新しいものを生み出す真の発明・発見であろう。それには、中長期的展望で基礎科学を継続的に、忍耐強くサポートしていく体制が必要である。対投資効果や短期成果主義のみでの判断は、本来得べき将来の大きな実りを逸する危険

性を孕んでいる。このことを、日本は過去の経験から学ばなければいけない。収差補正電子顕微鏡を軸にした多様な計測法の展開は、近い将来に必ずや大きな発明・発見が見込まれる領域である。次回こそ日本発で新技术を発信するためにも、各専門分野に跨がる研究者間のネットワークを強め、そこでのオープンな討論を通して、横

断的な基礎力強化を図るための枠組みの構築が急務であると考えられる。

謝辞

本稿執筆に関して、東京大学の幾原雄一教授に有益な意見を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) D. A. Muller, "Structure and bonding at the atomic scale by scanning transmission electron microscopy", *Nature Mater.*, 8(2009)263
- 2) M. Haider et al., "Electron microscopy image enhanced", *Nature* 392(1998)768
- 3) 米国 TEAM プロジェクトホームページ: <http://ncem.lbl.gov/TEAM-project/>
- 4) brewbooks, "Electron Microscope Deutsches Museum", <http://www.flickr.com/photos/93452909@N00/176059674/>, (使用許諾、Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 Generic (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>))
- 5) 朝倉健太郎, 安達公一, 「電子顕微鏡を作った人々」, 医学出版センター (東京, 1989)
- 6) O.Scherzer, "The theoretical resolution limit of the electron microscope", *J. Appl. Phys.* 20(1949)20
- 7) 沢田英敬, 三宮工, 細川史生, 「球面収差補正 TEM および STEM」, *セラミックス*, 40(2005)908
- 8) 岡山重夫, 「多極子レンズによる収差補正技術の実用化」, *応用物理*, 76(2007)1142
- 9) 岡山重夫, 「収差補正電子光学」, *顕微鏡*, 45(2010)119
- 10) O. L. Krivanek et al., "Towards sub-Å electron beams", *Ultramicroscopy* 78(1999)1
- 11) N.Dellby et al., "Optimized quadrupole-octupole C3/C5 corrector for STEM", *CPO-7 proceedings*, p.97(2006)
- 12) J. Zach and M. Haider, "Aberration correction in a low voltage SEM by a multipole corrector", *Nucl. Instr. Meth. A*363(1995)316
- 13) H. Rose, "Outline of a spherically corrected semiplanatic medium-voltage transmission electron microscope", *Optik* 85(1990)19
- 14) Ceos 社ホームページ: <http://www.ceos-gmbh.de/>
- 15) Nion 社ホームページ: <http://www.nion.com/index.html>
- 16) S. Okayama, "A new type of quadrupole correction lens for electron-beam lithography", *Nucl. Instr. Meth. A*298(1990)488
- 17) 「次世代超電子顕微鏡の開発」プロジェクト (1996 ~ 2001): http://www.jsps.go.jp/j-rftf/saishu_hyouka_08/04_sougou/p_pdf/s_09.pdf
- 18) 英国 SuperSTEM プロジェクトホームページ: <http://www.superstem.com/>
- 19) ヨーロッパ ESTEEM プロジェクトホームページ: <http://esteem.ua.ac.be/>
- 20) ファインマンの基調講演 (米国物理学会, 1959 年): "There's plenty of room at the bottom", 例えば <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- 21) H. Sawada et al., "STEM imaging of 47pm-separated atomic columns by a spherical aberration-corrected electron microscope with a 300-kV cold field emission gun", *J. Electron Microsc.* 58(2009)357.
- 22) H. Sawada et al., "Correction of higher order geometrical aberration by triple 3-fold astigmatism field", *J. Electron Microsc.* 58(2009)341
- 23) B. Kabius et al., "First application of Cc-corrected imaging for high-resolution and energy-filtered TEM", *J. Electron Microsc.* 58(2009)147

- 24) 特集企画「電子線で今何ができるか」, 結晶学会誌, 47 No.1(2005)2
- 25) 阿部英司, 「最先端電子顕微鏡による局所構造・組成評価」, 応用物理, 79(2010)293
- 26) O. L. Krivanek et al., “Atom-by-atom structural and chemical analysis by annular dark-field electron microscopy”, Nature 464(2010)571
- 27) K. Suenaga et al., “Visualizing and identifying single atoms using electron energy-loss spectroscopy with low accelerating voltage”, Nature Chemistry 1(2009)415
- 28) 文部科学省 ナノテクノロジーネットワークセンター: <http://www.nanonet.go.jp/japanese/>
- 29) 文部科学省 特定領域研究「機能元素のナノ材料科学」: <http://nanodopant.com/>

執筆者プロフィール



阿部 英司

客員研究官

東京大学大学院工学系研究科 准教授

<http://www.t.u-tokyo.ac.jp/tpage/index.html>

物質・材料研究機構を経て2005年より現職。2002年には、客員研究員としてオークリッジ米国立研究所に滞在。大学院時代より電子顕微鏡のおもしろさにとりつかれ、準結晶を始めとする種々の複雑構造に関する研究で世界をリードしている。「研究は情熱」が信条。

海洋深層循環と熱輸送に関する 観測研究の動向

河野 健
客員研究官

1 はじめに

気候変動は人類にとって喫緊な対応が必要な問題である。海洋は大気に比べて比熱が約4倍、質量は約260倍であり、地球上の海洋の全熱容量は大気の大熱容量の約1000倍となる。そのため、海洋の貯熱量変化は、地球上の熱の分配、ひいては我々の生活圏の地上気温の変化に強く影響を与えている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 第4次報告書(AR4)¹⁾によれば、観測網が整備され貯熱量変化を精度よく検出可能になった結果、「全海洋の3000mまでの平均水温は上昇しており、海が気候システムに加えられた熱の80%超を吸収している」こと、「表面から700mまでの海洋全体の水温は平均でこの数十年間に0.1℃上昇している」ことなどが明らかになった。一方、AR4では、深層循環の変化については、「信頼できる予測はまだない」とされている。

海洋には、大規模で組織だった循環がある。一つは、風によって駆動され、海洋中の上層を水平方向に循環する風成循環で、例えば、黒潮などの海流は、この風成循環の一部である。もう一つが、海水の密度差によって駆動され表面か

ら海底までを鉛直方向に循環する対流のような循環で子午面循環と呼ばれる。この循環の海洋深層に達する部分を「深層循環」と呼ぶ。子午面循環は海面において大気から溶けた酸素や二酸化炭素などの物質を海洋内部に運ぶ役割を担っている。例えば、日本海において温暖化などの影響で循環が深層にまで達しなくなれば、深層に酸素が供給されなくなり、バクテリアや底生生物などの生態系が脅かされる可能性があり、最近、新聞等で報道²⁾されている。また、二酸化炭素の海洋内部への輸送は、比較的長い時間スケールでの海洋の二酸化炭素吸収力に影響する。

さらに、深層循環を含む海洋の子午面循環は気候変動に重要な役割を果たしていると考えられている。海洋子午面循環に伴い、両極付近に輸送された暖かい海水は、そこで大気に大量の熱を放出して冷却され、深海にまで沈み込み地球全体を循環する。すなわち、この循環に伴う熱輸送は、両極付近の大気を加熱していることになり、地球の気候を形成する上で大きな役割を担っている。そのため、この循環の変化は比較的急激な気候変動と強く関連している可能性が

ある。1万年以上前に、氷期の終了に伴い温暖化が進行する時期に温暖な亜氷期から突然寒冷化し、亜氷期になったヤンガードリアスと呼ばれる時期があった。この気候の変化は海洋の子午面循環の大きな変化が原因という説が有力である。

最近の研究によれば、大西洋において、グリーンランド沖で沈み込み大西洋の中・深層を南下し海洋の表面近くを北上する子午面循環が、この50年間に約30%弱まった可能性がある。この可能性に関する論文が2005年にNature誌³⁾に掲載されて以来、事実であれば急速な気候変動(この場合、寒冷化)につながるかもしれないとの懸念から、その変動を詳しく調査するための観測研究が始められつつある。また、各大洋において深層の水温上昇が観測されているが、この水温上昇は、南極周辺で沈み込み、各大洋の最深部を北上後、中・深層を南下して戻るといった南極を起源とする循環の変化を示唆している可能性がある。このような近年明らかにされつつある事実から、海洋深層の変化に関する研究の必要性があらためて認識されている。

本報告では、子午面循環のうち、

特に海洋の最深層部に達するよう
な循環の変化が我々の生活圏の温

度に直接与える影響に着目して、
海洋深層研究の必要性と国内外に

おける研究の動向について詳しく
述べる。

2 深層循環と気候

2-1

熱塩循環のしくみ

地球は球体であることから、地表が太陽から受け取る熱は両極で小さく、赤道付近で大きくなる。一方、地球が宇宙空間へ放射する熱は緯度に依存する割合が小さい。そのため、中緯度およそ40度を境にして、赤道寄りではいつも温められ、南北の極寄りでは、常

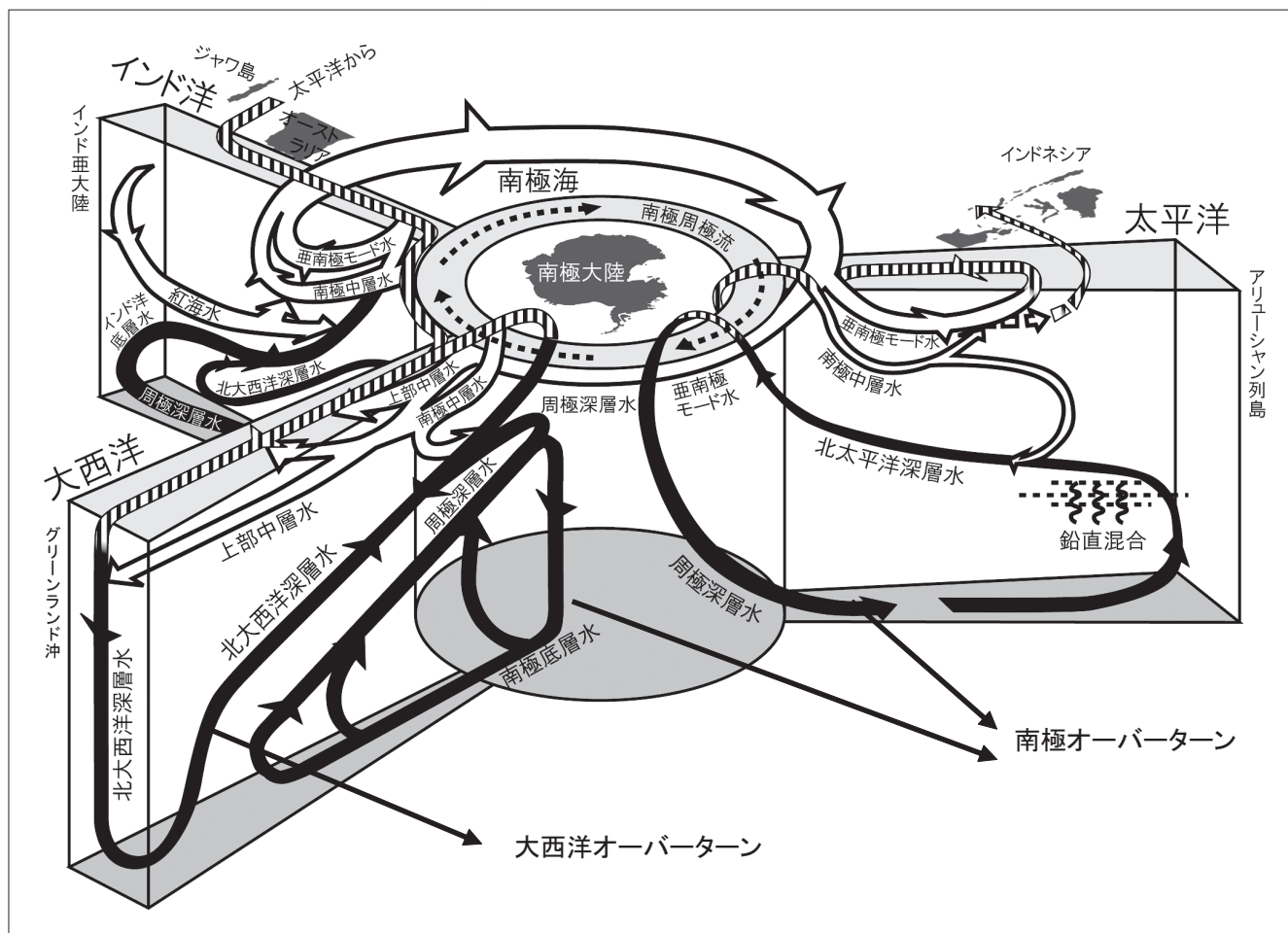
に冷やされる状態となる。極付近の海域では、海水が冷却され、また凍結する結果、低温、高塩分の重い海水が形成される。実際には、南極大陸周辺海域やグリーンランド沖でこうした重い海水が形成され、深層水となって沈み込んでいる。沈み込んだ海水は海中を移動し、周囲の海水との混合や海底の地熱によって軽くなり再び湧き上がってくる。このようにしてできる循環を「熱塩循環」という。

この循環は、低緯度で海水が得

た熱を高緯度地域で大気へと放出していることから、低緯度と高緯度の南北の熱の偏りを戻そうとする機能を持つ、海のなかの大きな対流であり、全海洋にわたり、南北方向に海面から海底までに至る大規模なものである。そのため、子午面循環(Meridional Overturn Circulation)とも呼ばれている。また、深層にまで達するため、この部分を称して深層循環とも呼ばれることもある。図表1は後述の世界海洋大循環実験の結果、明らか

図表1 熱塩循環の模式図

北大西洋で沈み込み、上層を北上してくる循環を大西洋オーバーターン、南極周辺で沈み込み最深部を北上して深層を南下して戻る循環(太平洋、大西洋、インド洋に存在する)を南極オーバーターンと言う。赤道付近の海面水温は30℃近くになるが、両極付近で冷やされた海水が常に深層に供給されるため、海底付近の水温は約1℃となる。



(独) 海洋研究開発機構より提供、参考文献⁴⁾を基に作成された図

となった子午面循環の模式図である。南極を中心として、太平洋、大西洋、インド洋の循環が模式的に描かれている³⁾。南極や北極で冷やされた海水が沈み込み、各大洋の子午面内を縦方向に循環している。場所によって海水の冷やされ具合や塩分が違うので沈み込む水の密度に差が生じ、そのため異なる深度で複数の経路を持つ複雑な循環となっている。図中、斜線の矢印が上層、白が中層、黒が深層の流れを示す。このような循環を担う海水は、水温や塩分、溶存物質等で特徴づけることが可能なため、それぞれ「水塊」として名称がつけられている。このうち、各大洋において最深層に達する深層循環には、南半球においては、南極周辺で海水が最深層まで沈み太平洋、大西洋、インド洋の各大洋の海底を北上し、中・深層を南下してくる、という循環がある。これは南極オーバーターンと呼ばれている。沈み込んで太平洋底を北上する海水は周極深層水と呼ばれ、これは、北上しながら海底から熱を得たり、周辺の海水と混合したりすることで軽くなり、太平洋の深層を南下する。北半球においては、グリーンランド沖で最深部まで沈み込み大西洋の中・深層を南下し上層を北上する循環がある。

これは大西洋オーバーターンと呼ばれている。大西洋には南極オーバーターンによる循環もあり、南極周辺で沈み込んだ海水が大西洋の最深部を北上している。そして、太平洋同様に序々に変質して軽くなり、中層・深層を南下している。

2-2

熱塩循環が気候に与える影響

IPCC4 次報告書¹⁾の中で気候変動と関連して、海洋観測から判明したこととして挙げられている項目を整理すると、以下の通りである。

- ・観測網が整備され、水温や海面水位の変化を以前より精度よく検出可能になった。
- ・全海洋の3000mまでの平均水温は上昇しており、海が地球の気候システムに加えられた熱の80%超を吸収している。
- ・表面から700mまでの海洋全体の平均水温は、この数十年間に0.1℃上昇している。
- ・海面上昇は、1961から2003年で1.8mm/年、1993から2003年では3.1mm/年で、1993から2003年の上昇のうち約半分は熱膨張による。

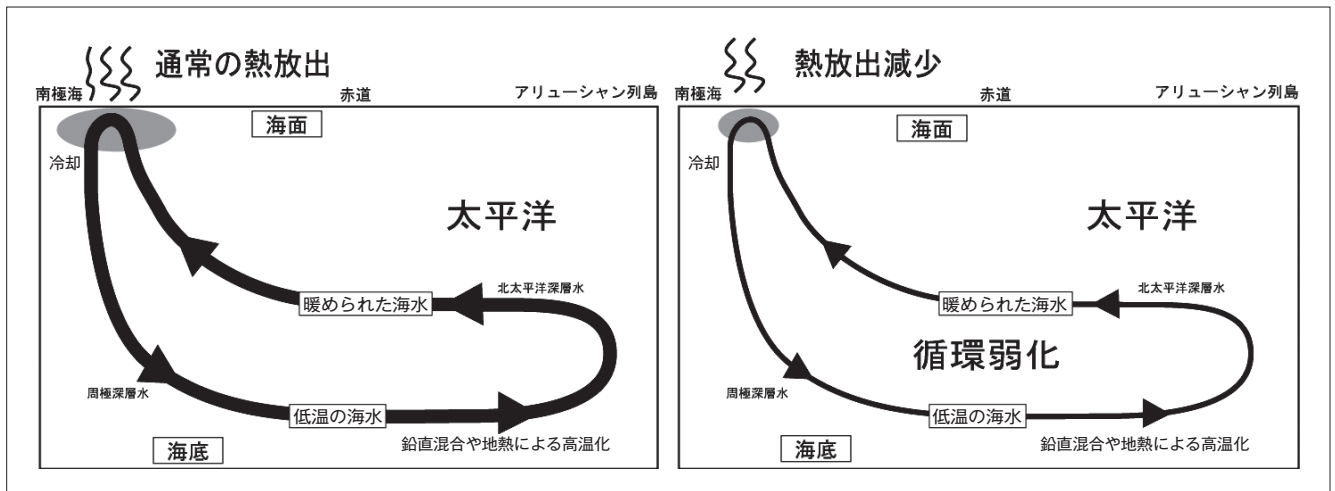
・塩分は、中・高緯度で減少、低緯度で増加傾向。降水と蒸発量の関係の変化を示唆している。

このように、海洋の比較的浅い部分における変動については知見が積み重ねられてきている。その一方で、「深層循環の変化についての信頼できる予測はまだない」、と指摘されている。しかし、深層循環も気候変動に大きな影響を及ぼすことは明らかである。特に極における深層水の形成は、海水の冷却に伴い海洋は大気に膨大な熱を放出し、大気を暖め、高緯度での比較的温暖な気候の維持に重要な役割を担っている。

深層循環の高緯度での気候維持への役割について、図表1で示した子午面循環のうち、太平洋の最深層に達する循環を例にとり図表2に模式的に示した。南極周辺で冷やされた海水は、重くなって沈み込み、太平洋底を北上する。その後、地熱や直上の海水との混合(鉛直混合)によって変質するとともに水温も上昇して軽くなり、太平洋の中層・深層を戻ってくる。そして南極周辺で熱を大気に放出し、すなわち再び冷やされ、重くなって沈み込む。この循環がいわば暖房器具におけるクーラントのような役割を果たして大気を加熱している。

図表2 太平洋深層の循環の模式図

このほかにも様々な深度での循環があるが、ここでは、6000mにまで達するような最深部の循環のみを抜き出してある。



科学技術動向研究センターにて作成

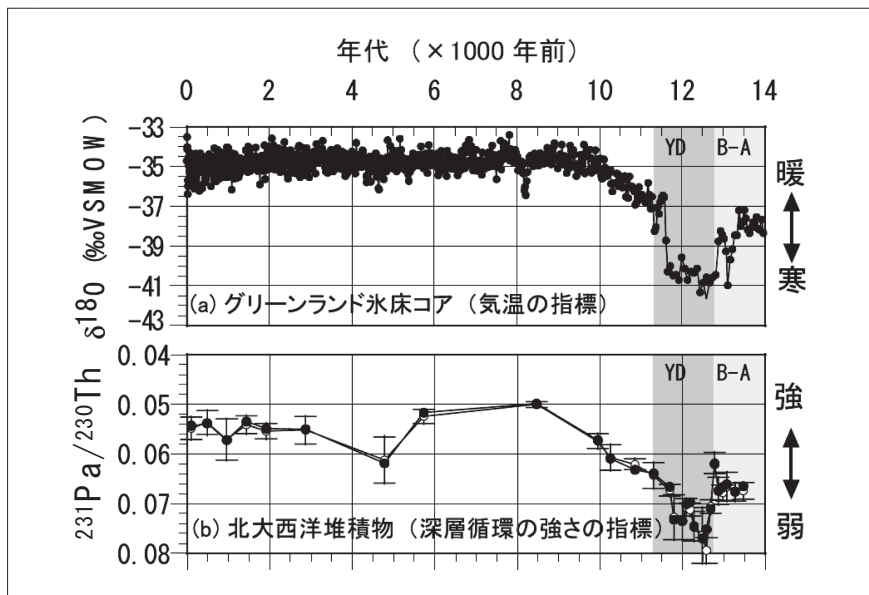
この循環が弱化すれば、熱を運ぶ能力が低下することとなり、南極周辺海域における熱放出が減少することとなる。この関係から、例えば、温暖化により南極周辺海域の気温が高くなると、海洋の表面水温との温度差が小さくなり、大気への熱放出が減る、すなわち海洋の冷却が弱まり循環が弱化的ことが予想される。このような気温の変化が深層循環と関わる熱輸送システムの変化を引き起こすという直接的な関係だけでなく、一方で、海洋内部での変化が高緯度での気候維持に重要な循環を変化させることも考えられている。例えば、水塊の変質や陸からの淡水の流入量増加などの要因で表面近くの海水の塩分が低下すれば、密度が大きく減り、沈み込み量の減少や循環の弱化的を引き起こし、熱放出を減少させることになる。

このような過程を含むため海洋の深層循環は、地球の南北方向の気候の分布や熱バランスを決める要因の一つとなっている。深層循環は数百年の時間スケールを持つゆっくりとしたものだが、循環の変化が熱放出の変化を通じて大気に影響を与えはじめると、それは、数十年という時間スケールで気候に変化をもたらすようになる。そのため、深層循環の変化は、気候の大きな変化に直結している可能性がある、と懸念されているのである。

例えば、南極周辺やグリーンランド沖で海水の沈み込み量が減る、あるいは循環速度が低下する場合、高緯度での大気加熱が減少し、広い範囲で気候が急激に寒冷化へと傾く可能性がある。古気候の研究から、このような変化が過去に実際に起こったと考えられている。1万年以上前の温暖化進行中の亜間氷期の後に、急激に気温が下がり亜氷期となった時期(ヤンガードリアス期)がその例である。

図表3は、過去の気温や循環の

図表3 古気候の研究から再現された循環の強さと気温の関係



(独) 海洋研究開発機構より提供、参考文献^{5, 6)}を基に作成された図

強さを示す指標を氷床に含まれる気体や海底堆積物に含まれる放射性核種を抽出して分析した結果である。水分子を構成する酸素には、質量数が16、17、18の3種類の同位体がある。温度が低いほど、質量数の小さい水分子がより多く気化する、という性質のため、蒸発-凝固-降水というプロセスによって氷床が形成される際、気温が低ければ、降水中の重い酸素の同位対比($\delta^{18}O$)は小さく、その結果、氷床に含まれる $\delta^{18}O$ も小さい。従って、氷床の酸素同位対比は、気温を示す指標となる。図表3(a)は、この性質を利用して、グリーンランドの氷床のコアに含まれる酸素の同位対比($\delta^{18}O$)から復元された過去の寒暖の変化である⁴⁾。ベーリング/アレレード期(図中B-A)と呼ばれる亜間氷期には温暖化が序々に進行していたが、急激に温度が低下し、それが1000年以上続いた(図中YD)ことがわかる。これがヤンガードリアス期と呼ばれる時期である。

この変化は数十年という時間スケールで生じており、この間に、北半球では5℃以上の気温低下が起こったと考えられている。IPCCのAR4では、1906年~2005年の

気温上昇幅は0.74℃であったとされている。数値モデルによる将来予測において、21世紀末までの温度上昇は、最悪シナリオ(高成長社会シナリオ化石エネルギー重視)で4℃前後、最善シナリオ(持続発展型社会シナリオ)で1.8℃前後である。これらに比べると、ヤンガードリアス期の変化は急激かつ大きな変化であったことがわかる。

また、プロトアクチニウム(²³¹Pa)とトリウム(²³⁰Th)は、両者ともウラン系列の放射性核種で海水中の単位時間あたりの生成量は時代を超えて一定と考えることができる。粒子に対する吸着の性質の違いのため、海中での滞留時間が異なり、²³¹Paは200年程度、²³⁰Thは40年程度である。滞留時間が長いほうが、移流により水平方向に輸送されやすいということの意味する。従って²³¹Pa/²³⁰Thが大きくなると移流の速度が遅くなることを意味し、速度そのものを算出することはできないが、この比率が循環速度の強弱を示す指標として使われている。図表3(b)のグラフはこの指標を利用して北大西洋底の堆積物を解析することで復元された深層循環の強さを示す⁵⁾。図表3(b)に示す通り、約1万2千

年前のヤンガードリアス期には深層循環が弱かった、ということがわかる。

深層循環が弱まった原因としては、カナダの大陸氷床が温暖化で

溶け、氷河湖(アガシー湖)が成長し、ついには決壊して、真水が大量に海洋に流れ込んだため、海水が軽くなって沈み込みが減ってしまったことが考えられている。こ

の高緯度地域への熱の供給を担っていた深層循環の弱化が高緯度域の気温の低下(図表3(a))を進めた、という説が有力である。

3 海洋観測から得られた深層の変化

IPCCのAR4では「深層循環の変化についての信頼できる予測はまだない」と指摘されているものの、近年、大西洋オーバーターンにおいても、南極オーバーターンにおいても、深層循環の弱化を示唆するような観測結果が得られている。本章ではそれらのうち代表的な観測結果を概説する。

例えば1957年には、1000m以浅の北向きの流量は22.9 m³/sであったのに対し、2004年には14.8 m³/sとなって循環が弱まっていることがわかる。この結果には異論もあり、さらなる検証が必要だ、とされたことから、第4節において述べるような欧米における研究に発展した。

際共同研究」、「各研究機関による独自の研究」などのデータ、また「世界海洋大循環観測計画」や気候変動および予測可能性研究計画などの枠組みの下で世界各国において行われた1990年以降の船舶観測によるデータを解析した結果である。

図表5は、観測線と陸によって太平洋を区分けし、その区分けの中での10年間の変化として規格化された貯熱量の変化の見積もりである⁹⁾。色が濃いほど増加量が大いことを示している。この図によると、太平洋の最深部は、ほぼ全域で貯熱量が増加していることがわかる。貯熱量が減少した海域は北部北太平洋東部にあるが、減少量はごくわずかである。特に深層水が形成される南極周辺海域での貯熱量増加が顕著で、太平洋の最深部を北上する周極深層水の経路(矢印)にそって貯熱量の増加が顕著である。数値モデルを使った解析の結果、この大規模な貯熱量増加、すなわち水温上昇は、南極周辺での深層水形成量の減少によ

3-1

大西洋オーバーターン弱化

Brydenらは、後述の世界海洋大循環観測計画や気候変動および予測可能性研究計画などにおいて過去に行われた、大西洋北緯25度における1957年・1981年・1992年・1998年・2004年の5回の船舶観測の結果を解析し、大西洋におけるオーバーターンがこの50年間で約30%弱まった可能性についてNature誌³⁾に発表した。

図表4は、北緯25度における流量の変化を示しており、正の値が北向きを示す。大西洋北緯25度は図表1で大西洋を北から南まで3等分した時の北極側から3分の1の位置にあたる。図表1に示す通り、深度1000mより浅い所で大西洋オーバーターンの一部である北向きの流れがあり、一方、5000mより深い所では南極オーバーターンの一部として海底付近を北上する流れがあり、1000-5000m間ではこれらを補償するように南向きに流れるという循環をしている。

3-2

南極オーバーターン弱化

太平洋においては、深澤らによって2004年に北太平洋深層で昇温が発見され⁷⁾、その後、この深層における水温上昇が、太平洋全域にわたっていることが判明した⁸⁾。図表5は、深度5000mから海底までの層の熱量の変化を示している。後述の我が国における「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」や「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国

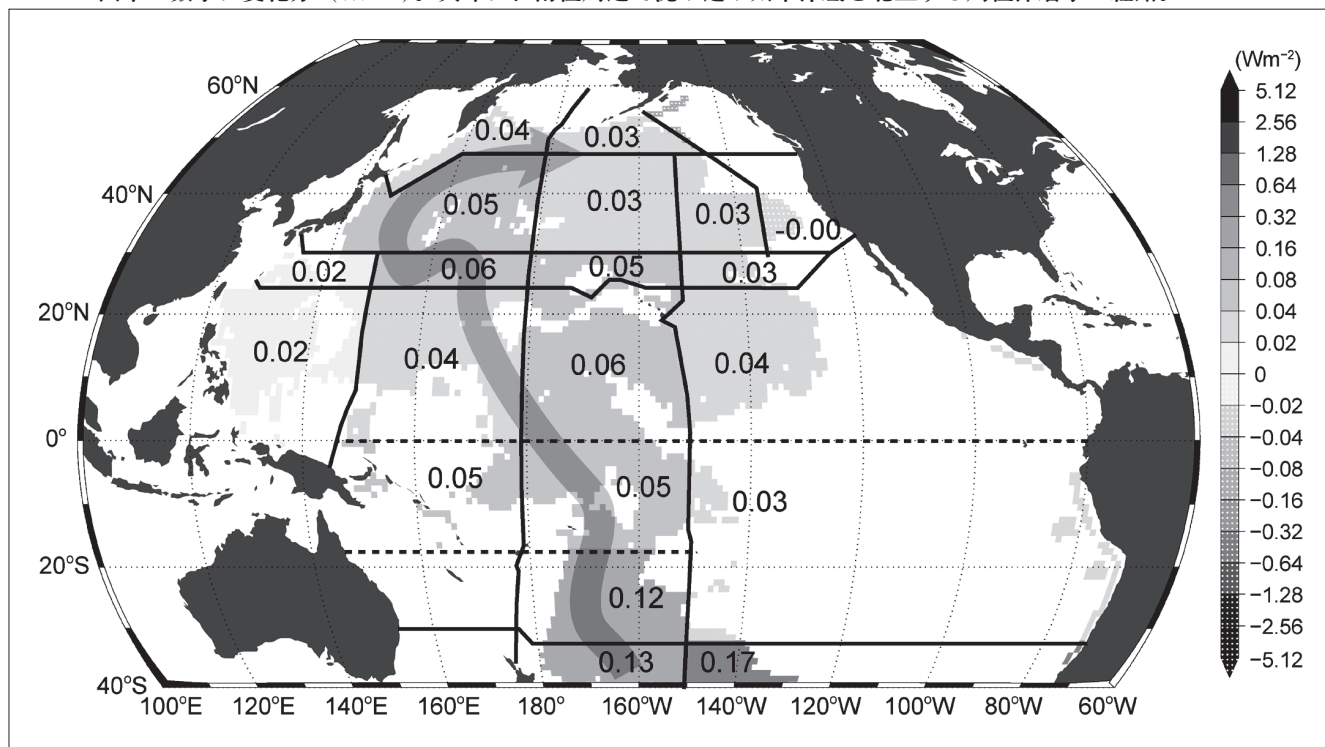
図表4 大西洋北緯25度における流量の観測結果

深度 \ 年	1957	1981	1992	1998	2004
1000m以浅	+22.9	+18.7	+19.4	+16.1	+14.8
1000 - 3000 m	-10.5	-9.0	-10.2	-12.2	-10.4
3000 - 5000 m	-14.8	-11.8	-10.4	- 6.1	- 6.9
5000m以深	+ 2.4	+ 2.1	+ 1.2	+ 2.2	+ 2.5

+が北向き、-が南向き。単位はm³/s。

参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターで作成

図表5 5000mから海底までの間に1990年代から2000年代の間に蓄積した熱を10年間の変化として正規化した値
 図中の数字は変化分(W/m²)。矢印は、南極周辺で沈み込み太平洋底を北上する周極深層水の経路。



参考文献⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

るものと判明した。さらには、その深層水形成量の減少は、南極大陸アデリーコースト(東経140度-150度)沖での大気海洋間の熱の交換が変化し、海水の冷却が減少し、すなわち大気加熱も減少したことによるものと推定されている。図表5の観測結果は、南極周辺での深層水形成の減少の影響が40年程度で伝わった様子を捉えたと考え

られるている¹⁰⁾。このような深層の貯熱量増加は、太平洋以外に、南大西洋、インド洋でも発見されていて^{11, 12)}、太平洋同様、その変化は南極周辺で大きいことから、これは、南極オーバートーン全体の弱化を示唆する、と考えられている。

なお、IPCCのAR4では、深層の貯熱量変化については定量的に

評価されていないが、最新の観測結果では深層まで含めて全球規模ですべて統合して見積もられている。その結果、深度3000m以深でも全球規模で貯熱量が増加しており、その貯熱量増加は、IPCCのAR4で言及されている深度700-800m以浅の貯熱量増加の5%-30%程度に及ぶ可能性があると言われている¹³⁾。

4 海洋深層観測研究の動向

4-1

国際的な観測研究

1) 世界海洋大循環観測計画

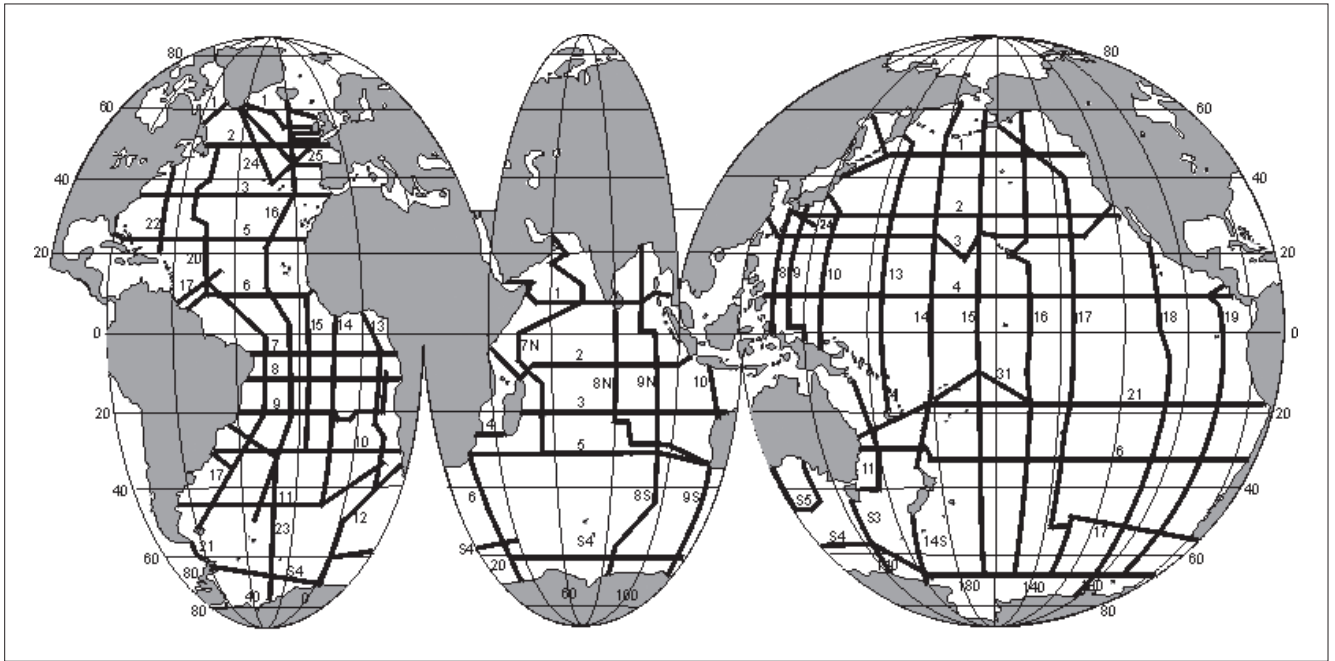
1990年から1998年には、世界気候変動研究計画(WCRP)の一環として、気候変動予測に使える海洋大循環モデルの開発、海洋循環の実体把握、モデルを検証するために必要なデータ収集を目的とし

て、世界海洋大循環観測研究計画(World Ocean Circulation Experiment: WOCE)が実施された。このプロジェクトには、日本、米国、英国などのいわゆる先進国のほかに30カ国以上が参加した。1990年から1998年の間に海洋の東西および南北に縦横に観測線を設け(図表6)、海洋の表面から海底までの詳細な海洋観測が実施された。観測線には、太平洋ではP、大西洋ではA、インド洋ではI、南大洋

ではSというアルファベットと数字からなる名称が付けられており、これらの観測線が以降の大規模海洋観測計画立案に際して基準線として用いられるようになった。

WOCEでは、水温・塩分・溶存酸素・栄養塩類(リン酸塩、硝酸塩、ケイ酸塩)などが必須の計測項目とされ、各観測項目ごとにその時点で最良と思われる観測精度を目標として設定し、その精度を得るための手法について指針を示すマ

図表6 世界で基準とされている WOCE の観測線



参考文献¹⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

ニユアルが作成された¹⁵⁾。レポートの記述内容についても方針が示され、各観測項目の責任者は観測および分析手法を明記して観測精度を明らかにし、かつ観測精度をどのように見積もったかも記述するよう求められた。

2) 気候変動および予測可能性研究計画

1998年には、観測データや気候システムモデルを通じて、季節・年々・10年・100年という時間スケールでの気候変動や予測可能性を研究することを目的とした気候変動および予測可能性研究計画 (Climate Variability and Predictability Project: CLIVAR) の研究実施計画が策定され、2013年までの15年計画で推進された。

この計画の中で、WOCE で得られた海洋の熱や真水の輸送量の知見をさらに高精度化すること、海洋の変化をモニターし、10年あるいはそれより短い時間スケールでの変化を調べること、気候システムモデルの評価のためのデータを提供すること、など、WOCE の研究成果の拡張が求められている。そのため、図表6の WOCE の観測

線の再観測が提案され、その一部が実施された。その観測結果を解析することで、第3節で述べた大西洋オーバーターン弱化の可能性や各大洋における深層の水温上昇が発見された。

CLIVAR の研究活動の対象には人為起源の気候変化も含まれているため、WOCE 観測線の再観測時には、海洋中の二酸化炭素も観測することが重要視されている。観測を重複なく実行し、データを収集・公開して研究の促進に寄与するため、国際海洋炭素観測プロジェクト (International Ocean Carbon Coordination Project: IOCCP) が組織され、CLIVAR と密接に協力しながら主にインターネット上で観測計画の情報交換やデータ公開が行われている。

3) 全球を対象とした船舶観測に関する国際的パネル

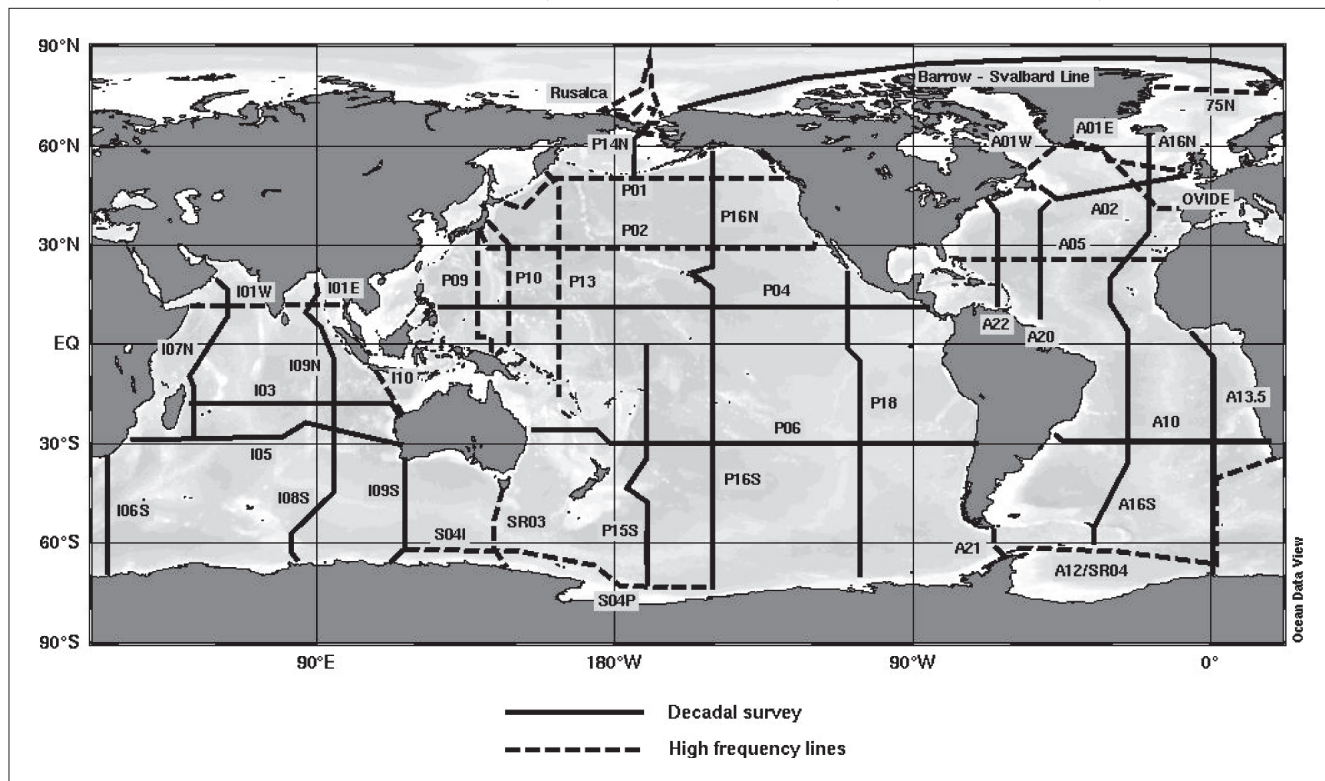
CLIVAR および IOCCP の中で船舶観測を実施しているグループが中心となって2007年に、全球を対象とした船舶観測に関する国際的パネル (Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Panel: GO-SHIP) が構成された。GO-

SHIP では下記のような目標を設定している。

- ・自然起源ならびに人為起源二酸化炭素の分布とその制御因子ならびに海洋内部の生物化学を理解すること
- ・2000m 以深の海洋の変化と全球規模の熱や海面上昇への寄与を理解すること
- ・水塊や海面での熱や物質のやりとり、水塊の移動経路の変動を理解すること
- ・海洋中の物質輸送の定量化
- ・数値モデルの評価

GO-SHIP では、WOCE 観測線の中からこの目標を達成するために必要な観測線を抽出し、さらにそれらを10年間に1回程度の精密観測を必要とする観測線、および、それより高頻度で観測する必要がある観測線に分類した(図表7)。また、WOCE 同様、必要な観測項目を定め、さらに測定方法に関するマニュアルも改訂し、これらを合わせてGO-SHIPの観測戦略とした。この観測戦略が海洋観測の包括的戦略の一部となるように Ocean Observations Panel for Climate (OOPC) と国際海洋炭素観測調整計画 (IOCCP) が協力すること

図表7 GO-SHIPにより策定された観測線
 実線が10年間に1回程度の観測を必要とする観測線、点線がそれより高頻度で観測を必要とする観測線¹⁶⁾



出典：参考文献¹⁶⁾

が2009年9月の第3回世界気象機関/政府間海洋学委員会合同海洋・海上気象専門委員会(The Joint WMO^①-IOC^② Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology : JCOMM)において決議された。さらに、2010年6月に実施されたIOC第43回執行理事会においてこの議決が紹介され、執行理事国から支持されている。

4) 大西洋における子午面循環に関する研究

2007年1月に、米国科学技術委員会(National Science and Technology Council : NTSC)の海洋科学技術に関する共同小委員会(NSTC Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology : JSOST)が、海洋に関する優先研究計画と実施戦略(Ocean Research Priorities Plan : ORPP)を策定した。この戦

略の中で大西洋オーバートーンと突然の気候変動の関係の研究が、4つの優先研究の1つとして取り上げられている。これを受けて米国では、実行中のCLIVARの事務局を通じて、実行計画の策定チームが編成され、観測・影響・データ統合・予測の面からの研究 Atlantic Meridional Overturn Circulation Science (AMOC)が実施されている

一方、英国でも、2001年から環境研究委員会(National Environment Research Council)によって Rapid Climate Change (RAPID) と呼ばれる大西洋オーバートーンに焦点をあてた海洋と気候変動との関係を調べる調査研究がなされている。2008年以降は、ハドレーセンターとの共同によって2004年から2014年までの大西洋オーバートーンに関する時系列の観測データを収集することを目的とした

RAPID-WATCH という計画に変更され研究が推進されている。

5) 南極海における観測研究

2006年に南極研究科学委員会(Scientific Committee on Arctic Research : SCAR)の支援の下、南極海における海洋観測システム構築に関するワークショップが開催され、南極海観測の重要性が認知された。そして、英・米・豪の研究者が中心となり、2010年に南極海に関する包括的な観測研究計画が、The Southern Ocean Observing System (SOOS) Planとして纏められた。この観測研究計画では

- (a) 全球の熱・水収支に対する南極海の役割の解明
- (b) 南極オーバートーンの安定性の解明
- (c) 南極の氷床の安定性に対する海洋の役割と海面上昇への寄与の解明
- (d) 南極海における二酸化炭素吸収の将来像の解明

① WMO : World Meteorological Organization

② IOC : Intergovernmental Oceanographic Commission

- (e)南極海の海水の将来像の解明
 (f)気候変動が南極の生態系に与える影響の解明

これらの中で、(a) (b) (d)はオーバーターンの観測研究に密接に関わるものである。SOOSでは、上記6つの目標に必要な観測項目や観測に最適なプラットフォーム(船舶・フロートなど)が何かを提案している。特に船舶観測については上述の WOCE 観測線の再観測を想定しており、今後、GO-SHIPなどと協力しつつ観測研究を進めていくと予想される。

4-2

日本における海洋深層観測

1) 海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究

1990年から1994年には、科学技術振興調整費事業「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」が当時の東京大学・東海大学・気象庁・水産庁・海上保安庁水路部・海洋科学技術センターなどが参加して行われた。この事業の枠組みの下で、オールジャパン体制により WOCE に参画した。WOCE の観測線のうち日本は、P2 (太平洋北緯 30 度線)、P9 (東経 137 度線)、P13 (東経 165 度線) および P24 (九州沖) の各観測線を観測した。

さらに 1996 年には、振興調整費事業は終了していたが、当時の水産庁・海上保安庁・海洋科学技術センターが経常研究費により P8 (東経 130 度線) の観測を実施した。

2) 北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究

1997 から 2001 年には前述の CLIVAR に貢献することを目的とした科学技術振興調整費事業「北太

平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究」が行われた。この事業の参加機関のうち、当時の水産庁・海洋科学技術センター・東海大学が、CLIVAR の一環として WOCE 観測線 P1 (太平洋北緯 47 度線) および P17 (アラスカ沖) の再観測を実施した。

3) 各研究機関による独自の研究

2002 年以降、日本には特に大型の研究費はなく、各研究機関が経常研究費にて継続している。この間、海洋研究開発機構や気象庁が、WOCE 観測線のうち、P6 (太平洋南緯 32 度線)、A10 (大西洋南緯 32 度線)、I3/4 (インド洋南緯 20 度線)、P10 (東経 149 度線)、P3 (太平洋北緯 24 度線)、P1 (太平洋北緯 47 度)、P9 (東経 137 度線)、P14 (東経 179 度線)、P21 (南緯 17 度線) の再観測を実施してきた。また、振興調整費事業などにより 1990 年以来行われてきた観測結果をさらに解析することで、日本の研究者を中心に第 3 節で述べた太平洋における深層における水温上昇の発見とオーバーターン弱化の可能性を示す成果が 2004 年、2006 年、2010 年に発表されている⁷⁻¹⁰⁾。

4-3

日本における海洋深層観測体制の問題点

深層循環の変化を監視するような研究は、大規模かつ長期にわたるもので、国際的な連携のもと、船舶による海面表面から海底までの観測が有効な手段である。しかし船舶観測に関しては世界的に見ても十分な推進状況とは言えない。

持続可能な気候観測システム構築を目的とした様々な海洋観測に関する実行計画が、政府間海洋学委員会 (IOC)、世界気象機関 (WMO)、国連環境計画 (UNEP)、

国連学術連合会議 (ICSU) の傘下で組織されている国際協力観測網 Global Climate Observing System (GCOS) によって策定されているが¹⁷⁾、2009 年に示された船舶による繰り返し海洋観測の達成度¹⁸⁾は 62% にとどまっている。我が国においては、海洋観測を実施する船舶は、大学・独立行政法人・気象庁・水産総合研究センターなどが保有している。第 4 章で述べた通り、1990 年代には科学技術振興調整費事業などによって国内の体制を整備し、これらの機関が役割を分担し、オールジャパン体制で WOCE などの国際的な観測研究に対応してきた経緯がある。しかし、現在の日本には、そのような枠組みは存在しない。そのため、現在、我が国における深層循環研究は、学術研究あるいは個々の試験研究機関の経常的な研究として実施されているのみである。個別の機関では、観測船を有効に利用し国際的な研究計画に対応していくのは困難である。2009 年には、前述の GO-SHIP に対応するため、有志による連絡会 (Japan Repeat Hydrography Implementation Group) が設立されたものの、このような体制は規模と継続性という観点からは脆弱である。このような問題点は、平成 22 年 3 月 17 日付けの日本学術会議科学者委員会による提言「学術の大型施設計画・大規模研究計画-企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について-」¹⁹⁾でも、「生命科学、地球環境科学など広範な学術の諸分野において、多くの研究者を長期にわたって組織する計画によって、長期定点観測・研究、大規模データ収集、広範なデータベースや大規模資料ライブラリーなどの大分野を支え、我が国の学術の将来的発展を実現する「大規模研究計画」と呼ぶべき研究計画の実施が、国際的視点も加えて緊急の課題」と指摘されている。深層循環研究は、このマスターブ

ランの中で重要と指摘されている「未来予測を目指した統合的な地球環境の観測・実験・モデル研究計画」の重要な構成要素である。

日本における現在の船舶観測は、厳しい状況にあると言える。例えば、気象庁では、5隻あった観測

船のうち3隻を2010年に引退させている。また、それ以外の機関においても、厳しい財政状況から、今後の船舶の稼働日数を下げざるを得ないという事態も予想される。このような状況下で、深層循環研究のような全球規模の気候変動の

解明と適切な適応策・軽減策策定に必須な大規模研究の実現のためには、まずオールジャパン体制をとれるような枠組みを整えることが必要であり。その上で、国際的な連携によって、研究を推進することが必要である。

5 おわりに

深層循環の変化は比較的急激な気候変動と強く関連している可能性がある。欧米などでは、大西洋オーバーターンの弱化的可能性が指摘されたため、急激な寒冷化に結びつく可能性を懸念し、オーバーンの変化を把握する事を目的とする国際的な研究計画が続けられている。一方、南極オーバーターンに関しても、オーバーターン弱化的可能性を指摘する研究結果がで

てきている。気候変動問題は、適応策・軽減策のみに注目が集まりつつあるが、現状をモニターするための観測研究は重要性が減じたわけではなく、むしろこのようなモニター型観測研究から得られる知見は、気候変動に対する適応策・軽減策の策定に必須である。世界的にみても、このような変化を捉える観測研究は不十分な状態である。特に日本では国内の体制を見

直し、国際連携による研究を推進していくことが求められる。

謝辞

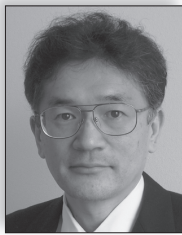
本稿を執筆するにあたり、(独)海洋研究開発機構の深澤理郎領域長、原田尚美チームリーダー、瀨瀬慎也研究員、土居知将技術主任の協力を得ました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) IPCC 編、気候変動2007 IPCC第4次評価報告書－政策決定者向け要約－ 邦訳版
- 2) 毎日新聞 2010年9月14日 朝刊 26面 「日本海深部 酸欠」
- 3) H. L. Bryden et al., Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N, *Nature* 438, 655-657, 2005
- 4) W. J. Schmitz, Jr., On the World Ocean Circulation: Volume II, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report, WHOI-96-08, 238pp, 1996
- 5) P. M. Grootes et al., Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature* 366, 552-554, 1993
- 6) J. F. McManus et al., Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes, *Nature* 428, 834-837, 2004
- 7) M. Fukasawa et al., Bottom water warming in the North Pacific ocean, *Nature*, 427, 825-827, 2004
- 8) T. Kawano et al., Bottom water warming along the pathway of lower circumpolar deep water in the Pacific Ocean, *Geophysical Research Letters*, 33, L23613, doi:10.1029/2006GL027933, 2006
- 9) T. Kawano et al., Heat content change in the Pacific Ocean between the 1990s and 2000s, *Deep-Sea Res. Part II*, 57, 1141-1151, 2010
- 10) S. Masuda, et al., Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters, *Science* 329, 319-322, 2010
- 11) G. C. Johnson and S. C. Doney, Recent western South Atlantic bottom water warming, *Geophysical Research Letters*, 33(14), L14614, doi:10.1029/2006GL026769, 2006
- 12) G. C. Johnson et al., Warming and freshening in the abyssal southeastern Indian Ocean, *J. Climate*, 21(20), 5351-5363, 2008
- 13) S. Kouketsu et al., Deep ocean heat-content changes estimated from observation and reanalysis data and their influence on sea level change, submitted

- 14) http://www.clivar.org/carbon_hydro/hydro_table.php
- 15) WOCE Operations Manual, <http://whpo.ucsd.edu/manuals.html>
- 16) <http://www.go-ship.org/Docs/cwp2A09.pdf>
- 17) Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC, GCOS - 92, WMO/TD No. 1219, 2004
- 18) http://www.earthobservations.org/documents/committees/stc/200909_11thSTC/07.2_Taskrpt_Dexter.pdf
- 19) <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t90-2.pdf>

執筆者プロフィール



河野 健

客員研究官
海洋研究開発機構 地球環境変動領域 プログラムディレクター
<http://www.jamstec.go.jp/rigc/j/occrp/index.html>

専門は海洋学。観測を通じて海洋環境の変動を明らかにする研究に従事。海洋底層の水温上昇と南極オーバーターンの変化を研究している。
東京大学大学院新領域創成科学研究科客員教授。

科学技術動向研究センターとは

2001年1月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため2001年1月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。当センターでは、「科学技術基本計画」の策定に資する最新の科学技術動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供しております。

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1

「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

我が国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱し、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加え、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布しています。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> においても公開しています。

2

重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

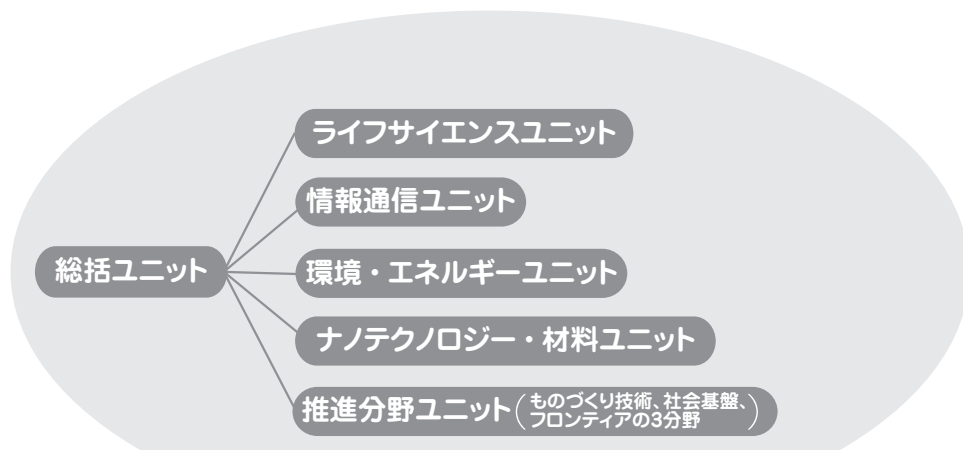
今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

さらに、重要な科学技術分野・領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、我が国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3

技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法を中心とする科学技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。2005年には2年間にわたった「科学技術の中長期的発展に係る俯瞰的予測調査」を報告しました。



*それぞれのユニットには、職員その他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

(2010年4月1日現在)