

Science & Technology Trends

科学技術動向

レポート・トピックス タイトルをクリックすると 各項目にジャンプします

9

2010
No.114



レポート

p2,10

資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題

p3,22

緊急地震速報の開発と効用

トピックス

ライフサイエンス分野

p4

網膜色素変性症の
遺伝子治療的アプローチ

ナノテク・材料分野

p6

In を使わないフレキシブルな
透明電極用大面積グラフェン

エネルギー分野

p8

トマトの茎を用いた高濃度バイオ
エタノール原料製造技術

情報通信分野

p5

電力効率を大幅に改善する
コンピュータ開発

ナノテク・材料分野

p7

イオン注入を利用した薄膜の
立体微細構造の作製技術

ものづくり分野

p9

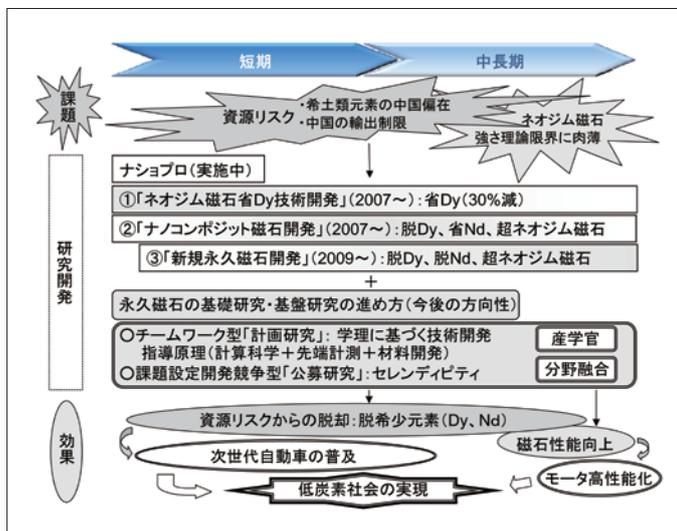
水素燃料レシプロエンジンを
搭載した飛行機の開発

資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題

磁石の強さの向上は、モータの高トルク・小型・軽量化を可能とし、家電等の省エネルギー化を進めることにつながる。結果として、国内総消費電力の約52%を占めるモータ電力の節約、次世代自動車のさらなる低炭素化、風力発電用の発電機の性能向上等をもたらし、グリーン・イノベーションを推進する重要な要素のひとつと期待されている。1983年に今でも世界最強を誇るネオジム磁石が日本で誕生した。モータ用のネオジム磁石は、低炭素社会実現に必要な次世代自動車や省エネルギー家電等を支える重要な材料である。需要が著しく増加しているネオジム磁石の直面している喫緊の課題は資源リスクである。特に、モータが高温環境にさらされる次世代自動車等で用いられる磁石に必要なディスプロシウム (Dy) に資源的な問題があり、使用量を減少させるなどの研究目標が立てられている。

1917年に初めて人工永久磁石が作り出されて以降、発明された磁石の種類は十数種であり、磁石の研究開発は、画期的な発明・発見に約20～30年を要する挑戦的な研究である。新しい永久磁石は大胆な分野融合的発想あるいは情熱と偶然からもたらされてきたが、その歴史をみると日本人研究者や日本発の技術は大きな役割を果たしてきている。永久磁石の研究開発における、画期的な発明・発見のほとんどは実用化につながっており、それらの用途は、今後のグリーン・イノベーションにおいて大きなインパクトが期待されている。そこで、現在すでに、永久磁石の基礎研究・基盤研究として3つの国家的な研究開発プロジェクトが実施されているが、そのような公的資金の投入は今後も継続および拡充すべきであろう。具体的には、先端計測技術による構造・機構解析と計算科学による理論解析を組み合わせ、材料開発の新しい指導原理を獲得し、新化合物の発見や磁石としての合金組織化へとつなげていくチームワーク型の計画研究と、異分野研究者の磁石研究への参画を促し、個々の研究者の自由な発想に基づく研究提案を推進する公募研究を同時並行的に推進していくことが望まれる。

モータ用永久磁石の課題と今後の基礎・基盤研究の進め方



科学技術動向研究センターにて作成

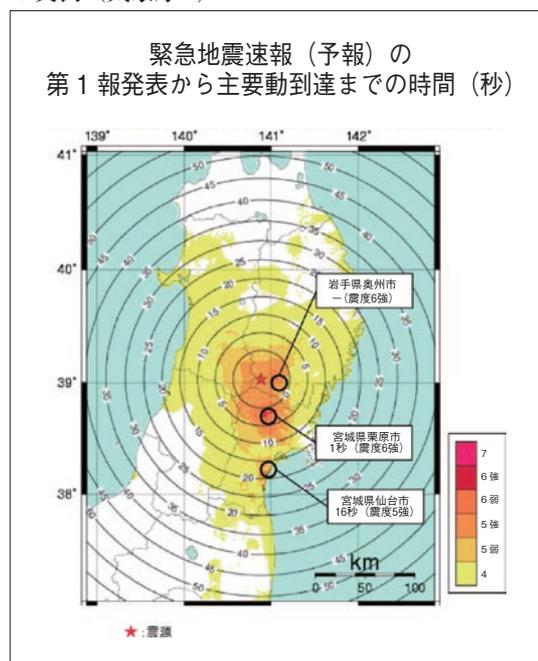
緊急地震速報の開発と効用

2007年10月、気象庁が一般運用に踏み切った「緊急地震速報」は、地震学の成果が直接、生活に役立てられた実例として好評を博している。「緊急地震速報」（以下、「速報」）とは、全国に配備した地震観測網を利用して、震源に最寄りの観測点で即時解析された地震情報から各地の震度を推定し、それらの地点に大きな揺れが到着する前に警報を送ろうとするものである。2010年3月までの2年半の間にテレビ等を通じて報道された「速報」は14回を数え、誤発信、予測震度誤差などによる多少の齟齬はあったものの、その性能はほぼ想定範囲内に収まった。しかしながら、「速報」が生み出す猶予時間は実用上ぎりぎりの範囲にあり、その現実的な効果がいかに発揮されるかは、今後の課題として残されたままである。

「速報」は、予測される震度の大きさによって「予報」と「警報」の2種類に区分される。前者は各分野の専門家向け、後者は一般向けとその配信先が区別され、両者における「速報」の利用形態は全く異なる。さらに、「速報」には、震度が大きいほど猶予時間が短くなるという逆進性があり、震源の近い内陸直下型地震の場合は震度6弱以上の揺れに対して「速報」はほぼ間に合わない。実際に起きたM7.2地震の際の状況を図に示すが、もっとも内側の円内では強い揺れに対して「速報」は間に合っていないという実態が読み取れる。一方、海溝型地震の場合は10秒を超える猶予時間が生まれる可能性があり、特に海底地震観測網の整備が進む次期東南海・南海地震に対しては、有効な減災効果が期待できる。

このように「速報」の性格と効用には、利用者側の状況によって、また発震状況によって大きな差異が存在する。2年半の実績ではまだ「速報」の本領が発揮されるべき場面が出現していない。今後の経験を重ねていく中で、それぞれの場における利用者が、「速報」の性格と限界を弁えた上で、もっとも効果的な利用方法を学習していく必要がある。

2008年岩手・宮城内陸地震（M7.2）の際の「速報」の実例（気象庁⁷⁾



網膜色素変性症は網膜に異常を生ずる遺伝性の疾患で失明に至る場合もあり、世界には100万人以上の患者がいると推定されているが、根本的な治療法は確立されていない。スイスのフリードリッヒ・ミーシャー生物医学研究所を中心とした研究チームは、本疾患の遺伝子治療へ向けて、基礎的な手法の提案とその検証成果を2010年7月23日のScience誌に報告している。網膜色素変性症では、光受容細胞である錐体細胞は機能を失いつつも残存する。光刺激を電気信号に変換する分子であるハロロドプシンの遺伝子を網膜色素変性症のモデルマウスの網膜に導入したところ、光に強く反応するようになり、信号の神経細胞への伝達も確認された。また光応答に関する複数の実験でも、このモデルマウスが光を感じていることを示唆する結果が得られた。ヒト網膜細胞でも同様の結果が得られ、ヒトの治療法としての可能性がある。

トピックス / 網膜色素変性症の遺伝子治療的アプローチ

網膜色素変性症は眼の中で光を感じる組織である網膜に異常を生ずる遺伝性の疾患で、個人差が大きい。夜盲や視野狭窄がゆっくと進み、失明に至る場合がある。数千人に一人の割合で発症し、世界には100万人以上の患者がいると推定されており、厚生労働省の難病指定を受けている。原因遺伝子としてはこれまで44以上が見出されているが、根本的な治療法は確立されていない。

スイスのフリードリッヒ・ミーシャー生物医学研究所を中心とした研究チームは、本疾患の遺伝子治療へ向けて、基礎的な手法の提案と、その検証に関する成果を2010年7月23日のScience誌に報告している。

通常、網膜色素変性症では、網膜で光を感じる細胞である錐体細胞は、機能を失いながらも残存する。研究者らは微生物由来のハロロドプシン遺伝子を網膜色素変性症のモデルマウスの網膜に導入した。ハロロドプシンは光感受性の塩素イオンのポンプであり、光刺激を電気信号に変換する分子である。その結果、すでに光応答性をほとんど失っている錐体細胞が、光に対して強く反応することが明らかになり、またその後の神経細胞への信号の伝達も正常に起こることが見出された。網膜色素変性症のモデルマウス個体を用いた光応答に関する複数の実験でも、網膜へ遺伝子導入したモデルマウスが光を感じていることを示唆する結果

が得られた。

ヒトでも同様な結果が得られるかを確認するため、研究者らはアムステルダム眼角膜バンクから正常なヒトの網膜組織を入手し、上記同様の遺伝子導入を行った。用いたヒト網膜細胞は実験の時点ですでに光感受性を失っていたが、マウスの場合と同様に導入遺伝子の発現と、光に対する反応性を示すことが明らかになった。

網膜色素変性症の遺伝子治療は、特定の変異遺伝子に対応する正常遺伝子の導入の報告があるが、本報告によれば、原因となる変異遺伝子とは無関係に、錐体細胞が残存していれば有効という可能性がある。前述の通り網膜色素変性症は多様な遺伝子変異によるもので、個人差も大きいことから、この手法を全ての患者に応用することは難しい。研究者らは、すでに錐体細胞の残存などの網膜の状態などを基にして、このような治療法に反応する可能性がより高い患者を絞り込んでいる。

視覚はQOLに大きく影響するものであるだけに、網膜色素変性症の治療法は遺伝子治療のほかにも網膜移植、人工網膜、さらにはES細胞やiPS細胞の利用も含め精力的に研究されている。本研究成果も一日も早い臨床応用が期待される。

参考

Busskamp, V. et al. "Genetic reactivation of cone photoreceptors restores visual responses in retinitis pigmentosa." Science 2010 Jul 23 ; 329 (5990) : pp,413-417

2010年8月6日、米国国防総省高等研究計画局(DARPA)は、Ubiquitous High Performance Computing(UHPC)プログラムを開始し、実行主体として5組織を公式に発表した。UHPCプログラムの目標は、現在のシステムよりエネルギー効率を大幅に改善し、プログラム化が容易な新しいコンピュータアーキテクチャとプログラミングモデルを開発することである。UHPCで開発するシステムの性能目標は、LINPACKベンチマークで1ペタFLOPS、電力効率目標は、50GFLOPS/Wである。電力効率目標は、TOP500、GREEN500リスト(2010年6月時点)で1位のシステムと比較すると、それぞれ約200倍、65倍の改善に相当する。プロトタイプは2018年までに完成する予定である。

トピックス 2 電力効率を大幅に改善するコンピュータ開発

米国国防総省高等研究計画局(DARPA)は、2010年8月6日にUbiquitous High Performance Computing(以下UHPCと略す)というプログラムを開始した。2010年3月に公募を開始したもので、この度、実行主体として5組織を公式に発表した¹⁾。

UHPCプログラムの目標は、コンピューティングを電力効率(エネルギー効率)の面で大きく改革し、プログラム化が容易な新しいコンピュータアーキテクチャとプログラミングモデルを開発することである。UHPCの対象は、大量のストリーミングデータの処理、大規模グラフの処理など、国防総省(DoD)における高性能コンピューティング処理を必要とする様々な領域である^{1, 2)}。

UHPCで開発するシステム(以下、UHPCシステムとする)のハードウェア諸元における性能目標は、LINPACKベンチマークで1ペタFLOPS^{注1)}(1筐体あたり)、電力効率^{注2)}目標は、50GFLOPS/W(1筐体あたり)である²⁾。図表は、スーパーコンピュータの性能を競うTOP500リスト、電力効率を競うGREEN500リスト³⁾の2010年6月時点で、それぞれ1位にランクされたシステムの電力効率と、UHPCシステムの目標との差である。UHPCの目標は、それぞれ約200倍、65倍の改善に相当する。

一方、プログラム作成の容易化については、ハードウェアの詳細な知識がなくても並列プログラミングができることを目指している。

UHPCプログラムは、UHPCシステムのコンセプト設計から始まり、プロトタイプ完成までを4フェーズに分けて進め、プロトタイプは2018年までに完成することとしている。今回選定された実行主体は、フェーズ1(24か月)とフェーズ2(24か月)を担当する。フェーズ2の結果によ

って、その後のファンディングや研究計画が決められ、第3、4フェーズに向けたプロポーザルの公募が行われる。

本プログラムの実行主体は、大きく2つの作業チームに分けられる。複数チームからなるUHPCシステム開発チーム(今回は4チームの実行主体が選定された)と他方は1チームの評価チームである。評価チームは、開発中のシステム評価に使用するアプリケーション・ベンチマーク・評価尺度を開発する。開発チームとして今回選定された組織は、Intel Corporation、NVIDIA Corporation、MITコンピュータサイエンス・人工知能研究所、サンディア国立研究所であり、評価チームはジョージア工科大学がリーダーである。

DARPAは、2010年6月にOmnipresent High Performance Computing(OHPC)プログラムの公募も開始している。OHPCプログラムは、超大規模コンピューティングへ向けた新研究を目標にし、UHPCプログラムとの連携が明示されている⁴⁾。

なお、DARPAの研究が成果に結び付いているこれまでの例としてはHPCS(High Productivity Computing Systems)プログラムがある⁵⁾。

図表 UHPCの電力効率と現状システムの比較

リスト	1位のシステム名	設置サイト	電力効率(MFLOPS/W)	UHPC目標との差(倍)
TOP500	Cray XT5	オークリッジ国立研究所(米国)	253	198
GREEN500	QPACE	ユーリッヒ研究センター(ドイツ)	773	65

科学技術動向研究センターにて作成

注1:FLOPS(フロップス):コンピュータの処理速度を表す単位であり、ペタFLOPS(フロップス)は1秒間に1千兆回の浮動小数点演算を行うコンピュータ能力。

注2:電力効率:性能(FLOPS)/電力(ワットW)として算出。

参考

- 1) <http://www.darpa.mil/news/2010/UHPCNewsRelease.pdf>
- 2) https://www.fbo.gov/download/914/914fa5f0a69d7bedce157d916cc97b6e/UHPC_BAA_final_3-9-10_Mod1.pdf
- 3) <http://www.green500.org/lists.php>
- 4) https://www.fbo.gov/download/07e/07e8cdc8b58b203e6251c78adf13e53d/OHPC_BAA_v9_1_FINAL_C.pdf
- 5) 科学技術政策研究所 科学技術動向 2007年1月トピックス

2010年8月、韓国・シンガポール・日本の共同研究グループは、大面積のグラフェンをプラスチックを含む多様な材質の基板上に形成できる技術の開発を発表した。開発した方法は、銅フォイル上に形成したグラフェンを、一旦熱剥離シートに移し取り、さらに目的の基板上に移し取るというものであり、今回はPETフィルム上に対角30インチのグラフェンを形成した。代表的な透明電極であるITOと同等の光透過率とシート抵抗を実現し、フィルムの変形による引っ張り歪への耐久性は大幅に向上した。

トピックス 3 Inを使わないフレキシブルな透明電極用大面積グラフェン

2010年8月、韓国・シンガポール・日本の共同研究グループは、大面積のグラフェンを、プラスチックを含む多様な材質の基板上に形成できる技術を開発したと発表した¹⁾。

グラフェンはグラファイトの1原子面を取り出したもので、電子デバイスへの応用が期待されている²⁾。光透過性と電気伝導度が高く、柔軟性にも富むため、プラスチック上に形成することで、タッチパネルなどに利用されるフレキシブルな透明導電膜への応用も考えられている。したがって、実用的な面積のグラフェンをプラスチック上に形成する方法が実用化への課題となっていた。

上記の共同研究グループが開発した方法は、銅フォイル上に形成したグラフェンを、一旦熱剥離シートに移し取り、さらに目的の基板上に移し取るというものである(図表)。まず銅フォイルを真空反応炉内で1000℃にしてメタンガスを吹き付け、グラフェンを製膜した。銅フォイルは対角線が30インチの長方形で、円筒状に丸めた状態で製膜することで、大面積に均一なグラフェンが形成できるようになった。次にグラフェンを銅フォイルごと熱剥離シートに圧着し、銅フォイルをウエットエッチングで除去する。さらに、グラフェンを目的のプラスチック上に熱剥離シートごと圧着し、熱処理後、熱剥離シートを剥ぎ取る。この方法でグラフェンを積み重ねても、層の間で原子の位置が揃わないため、層状化合物であるグラファイトの性質は示さない。

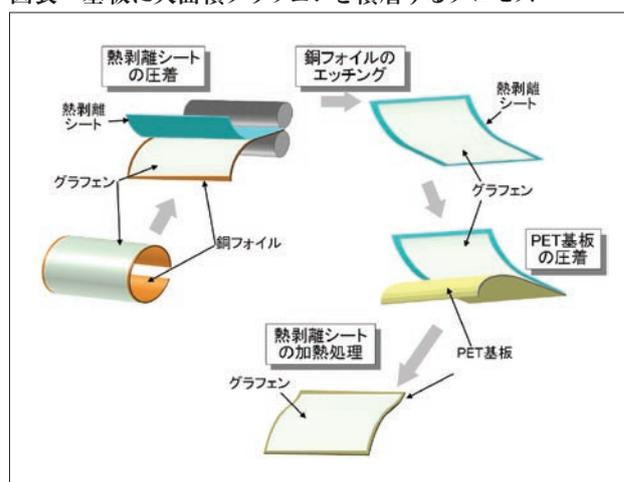
これまでは、グラフェンを他の基板上に移し取るために、一旦アクリル樹脂などをコートして、この樹脂フィルムに移し取っていた。しかし樹脂フィルムは強度が弱いため大面積のシートにできず、また最終的に有機溶剤で除去するため、ガラスなどの有機溶剤に対して安定である基板に应用は限られていた。熱剥離シート

は100℃程度に加熱することで粘着力が弱くなるシートで、半導体の製造プロセスなどにも利用されている市販品である。大面積での取り扱いが簡単であり、剥離に有機溶剤を用いないため、プラスチックを含む多様な基板上にグラフェンを移し取ることが可能である。

試作したPET上のグラフェンに6%の引っ張り歪を加えてもシート抵抗はほとんど変化しなかった。従来からの透明電極であるITOでは、クラックが発生し、3%程度の歪でシート抵抗が増加し始め、4%では3倍に増大してしまう。

グラフェン1層での光透過率とシート抵抗は97.5%と125Ω/□、4層積み重ねると90%と50Ω/□、さらに硝酸のドーブでシート抵抗は30Ω/□まで低減した。これは同じ光透過率のITOとほぼ同じ値である。共同研究グループではこのシートで3.1インチのタッチスクリーンを試作し、動作確認も行っている。

図表 基板に大面積グラフェンを積層するプロセス



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) J-H Ahn et al., "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes", Nature Nanotech., Vol. 5, 574, (2010)
- 2) 家近泰、「グラフェンの高速トランジスタ応用への注目と課題」、科学技術動向 2010年5月号、No.110、p29

2010年7月、米国カリフォルニア州で開催された、第23回真空ナノエレクトロニクス国際会議において、(独)産業技術総合研究所 機能集積システムグループは、イオン注入を利用した薄膜の立体微細構造の作製技術を発表した。部分的にアンダーエッチしたシリコンあるいは金属薄膜の表面へのイオン注入により薄膜が変形する技術を用いて、リソグラフィーパターンを設計し、イオンの注入量とエネルギーを制御することで、基板上に立体微細構造を容易に、高精度に作製できることを示した。この技術では、現在のリソグラフィー技術では困難な数10nm以下の線幅で、高さ10 μm (アスペクト比約1000)以上の立体構造が作製できる。また、広範囲の薄膜材料とイオン種が選択可能で、今後、電子・光学集積デバイスやMEMS等に応用される。

トピックス4 イオン注入を利用した薄膜の立体微細構造の作製技術

立体構造デバイスでは、基板上にアスペクト比の高い μm オーダーの立体構造の形成が必要とされる。しかしながら、従来の半導体微細加工は、基板上への平面集積技術が主であるため、高アスペクト比を有する立体構造の作製に、長時間の成膜とエッチングが必要で、スループットと制御性に課題があった。

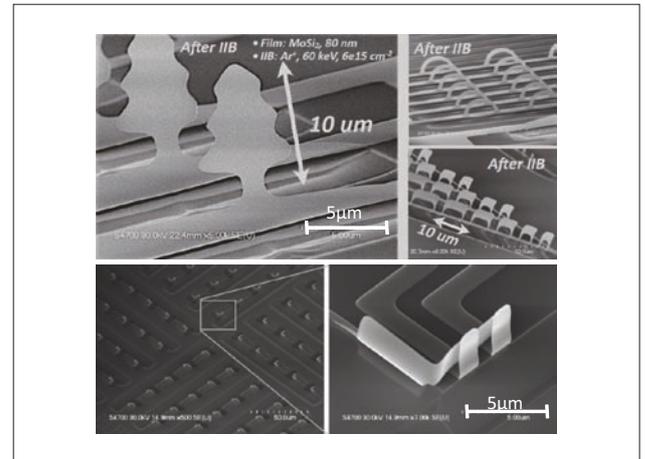
(独)産業技術総合研究所 機能集積システムグループは、2010年7月に米国カリフォルニア州で開催の第23回真空ナノエレクトロニクス国際会議において、イオン注入を利用した薄膜の立体微細構造作製技術で微小電子源を作製したことを発表した(図表1)。

研究グループでは、これまでに、基板上に形成した薄膜にイオン注入することで、薄膜を基板に対し垂直方向に曲げ、高アスペクト比の立体構造が作製できる基本技術を開発していた¹⁾。まず、単結晶シリコン基板上に、酸化シリコン層を形成し、その上にスパッタ法により非晶質シリコンまたは金属薄膜を成膜する。次に、リソグラフィーにより薄膜を所定の形状に加工し、曲げる部分の下地の酸化シリコン層をエッチング除去した後、基板表面にArイオンを注入する。注入量($10^{14} \sim 10^{16}\text{cm}^{-2}$)とエネルギー(15~150keV)を調整することにより、角度を精密に制御して薄膜を曲げることが可能である(図表2)。この技術では、現在のリソグラフィー技術では困難な数10nm以下の線幅で、高さ10 μm (アスペクト比約1000)以上の立体構造が作製可能である。

今回の発表では、この技術を微小電子源作製に応用し、シリコン基板上に薄膜トランジスタとフィールドエミッタを集積して、高安定な電子放出特性が得られることを示した²⁾。さらに、リソグラフィーパターンと作製プロセスを設計することにより、簡便なプロセスで、

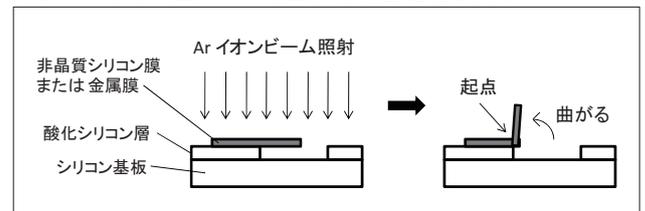
様々な立体微細構造、例えば3次元スイッチやメモリの基本構造が作製できることを示した。この技術では、広範囲の薄膜材料とイオン種が選択可能で、イオンの注入量とエネルギーを制御することで、立体構造の曲がり角と形状を高精度かつ再現性よく作製できる。また、現状の半導体製造のイオン注入技術が適用可能なため、300mm径の面積に均一に作製できる。今後は、電子・光学集積デバイスやMEMS等へ応用される。

図表1 作製された立体微細構造の走査型電子顕微鏡像



出典：産業技術総合研究所 機能集積システムグループ提供

図表2 イオン注入による立体微細構造作製方法



参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参考

- 1) T. Yoshida et al., "Development of Thin-Film Bending Technique Induced by Ion-Beam Irradiation", Appl. Phys. Express, 2,066501(2009)
- 2) T. Yoshida et al., "Integration of TFT and VTF-FEA using Ion-Induced Bending", IVNC 2010 Book of Abstracts (2010)p199.

2010年6月、愛知県産業技術研究所は、畑での再利用が困難なトマトの茎から、バイオエタノール原料となる糖液を従来より高濃度で回収することに成功したと発表した。トマトの茎のようなセルロース系バイオマスでは、前処理工程で大量の水を加えて糖分に分解していたため、糖液濃度が低く最終的に得られるエタノールも低濃度で、蒸留に多くの熱エネルギーを必要とするという課題があった。今回の新技術では、非水溶性の溶媒を添加して糖分を発生させた後、少量の水を加えることにより高濃度の糖液が得られ、発酵後のエタノール濃度が従来より8倍高くなった。エネルギーのロスを減少させ、発酵・蒸留装置の小型化も可能であり、畑での再利用が困難だった農業廃棄物を有効活用できる。また、他のセルロース系バイオ原料への応用が期待できる。

トピックス5 トマトの茎を用いた高濃度バイオエタノール原料製造技術

2010年6月、愛知県産業技術研究所は、畑での再利用が困難なトマトの茎から、バイオエタノール原料となる糖液を従来より8倍高濃度で回収することに成功したと発表した。合理的にエタノールが製造できる見通しが得られ、トマトの茎など県内の主要な農業廃棄物の有効利用と廃棄物処理費の削減ができる。

バイオエタノールは、非化石由来の液体燃料であり、石油代替燃料のひとつとして期待されている。自動車燃料を主な利用先とし、食用に供すべき穀物などからではなく、未利用の茎や葉などのセルロース系バイオマスから得ることが望まれている。トマトの茎は、愛知県ではキャベツ、ブロッコリーに次いで発生量の多い農業系廃棄物であり、畑での再利用が困難で、トン当たり数万円の処理費がかかることから、有効な利用法が求められていた。

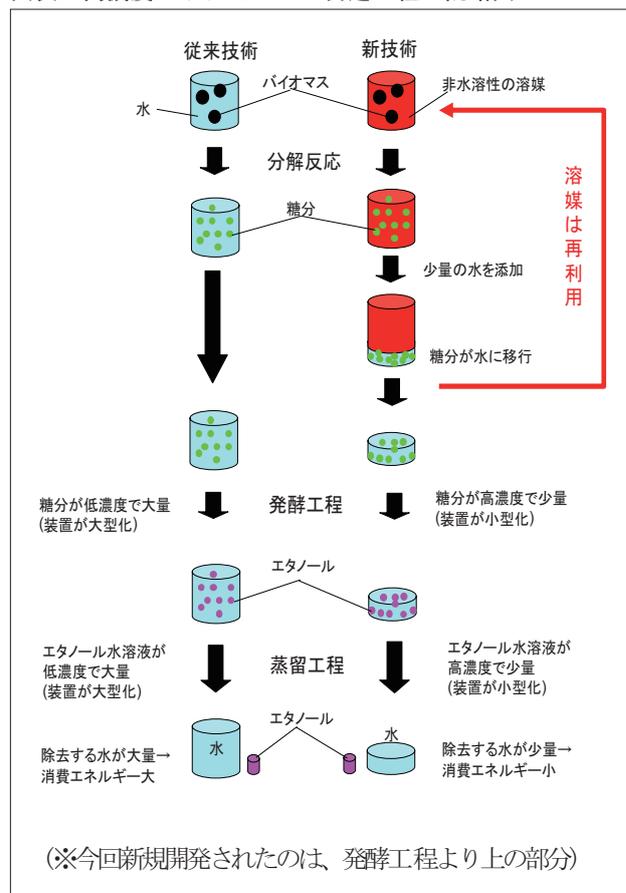
しかし、トマトの茎からエタノールを得ようとする場合、そのままでは長大な分子構造のため発酵・分解しにくいことから、前処理として、繊維を分解して糖分にする必要がある。従来の技術では、原料に大量の水を加えて分解反応を起こしていたが、糖液の濃度が数%と低く、発酵後のエタノール水溶液も低濃度となる。エンジン用燃料として使用するエタノールは99%程度の濃度が求められるため、低濃度の場合、蒸留して水分を除去する工程が必要となり、この工程で大量の熱エネルギーが消費されることから、合理的なエタノール化ではなかった。

同研究所が開発した新しい技術では、前処理で使用する大量の水の代わりに、非水溶性の溶媒を添加して分解反応を行う。糖分が生成したのち少量の水を添加すると糖分は水に移行し、その水を回収して発酵工程で使用する。この方法により従来技術よりも糖分濃度が8倍高い糖液が得られ、発酵後のエタノール水溶液

も高濃度になり、蒸留のために投入する熱エネルギーを差し引いても燃料として成り立つ。また、発酵・蒸留工程の機器の容量も1/8程度にコンパクト化され、溶媒も繰り返し利用できる。現在、同研究所では、県内で技術移転先の企業を募っている

この技術は、他のセルロース系バイオ原料への適用できる。同様の課題を抱える地域にとっても参考となる。

図表 高濃度バイオエタノール製造工程の概略図



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) 愛知県産業技術研究所プレスリリース(6月22日) http://www.aichi-inst.jp/newsrelease/up_docs/P220624.pdf

2010年7月、米国ボーイング社は水素燃料のレシプロエンジンを搭載した無人飛行機に関する発表を行った。両翼は長さ約46m、フォード社製150馬力の2.3リッター4サイクル水素燃料エンジンを2基搭載し、飛行速度は280km/h、積載重量は約200kgである。自動車用に開発した水素エンジンの技術を流用でき、低燃費化により高度約20,000mの成層圏で連続4日間の飛行が可能である。飛行時にCO₂を排出しない環境負荷の低いクリーンな飛行機であり、2011年の初飛行に向け地上でのテストが行われる。成層圏での気象観測や軍事用偵察機としての利用が想定されるが、今後、高高度成層圏における長時間飛行が可能になれば、人工衛星の代替として地球観測や災害時における通信・放送分野での利用も考えられる。

トピックス6 水素燃料レシプロエンジンを搭載した飛行機の開発

米国ボーイング社は2010年7月に水素燃料のレシプロエンジンを搭載した無人飛行機に関する発表を行った¹⁾。水素から動力を得る方法としては、水素と酸素の化学反応により電気を取り出す水素燃料電池とモーターの組み合わせ、水素を燃焼させる水素燃料ジェットエンジン、水素燃料レシプロエンジンの3種類がある。すでに同社は欧州の大学・企業グループと共に、水素燃料電池を用いたモーターグライダーを開発して有人飛行を実現している²⁾が、高度は1,000m程度で飛行時間も20分間と短かった。また、1930年代のジェットエンジン開発初期に水素燃料が使用された例があるが普及はしなかった。今回発表された飛行機では、水素燃料のレシプロエンジンを搭載し、高度約20,000mの成層圏で連続4日間の飛行が可能である。

開発された飛行機(図表)の両翼の長さは約46mあり、出力が150馬力のフォード社製2.3リッター4サイクル水素燃料エンジンを2基搭載している。これらのエンジンによりプロペラを回転させて推進力を得る。飛行速度は約280km/h、積載荷重は約200kgである。ジェットエンジンではなくレシプロエンジンであるため、自動車用に開発した水素燃料のエンジン技術を流用できる点が特徴である。これまでは、水素エンジンの低燃費化技術が長時間飛行の課題とされていたが、低燃費化を実現することで長時間飛行が可能となった。水素燃料を使用する飛行機の場合、液体水素の密度が低いと燃料タンクが大型化する。そのため、大型の燃料タンクを考慮した機体の設計にしなければならない。また、水素燃料を低温に保つための断熱シ

ステムも重要な技術要素である。

水素燃料のエンジンを用いることで、飛行時のCO₂排出は抑制されるが、過酸化水素類や窒素酸化物が排出される問題は残る。さらに、水素燃料製造時のコストやエネルギー消費の問題もあり、よりクリーンな飛行機にするためには包括的な環境負荷性能の検討が必要である。

米国カリフォルニア州のNASAドライデン飛行研究センターに導入され、2011年初めの初飛行に向けた地上でのテストが行われている。開発された飛行機の用途としては成層圏での気象観測や軍事用偵察機として利用が想定されている。今後、高高度成層圏における長時間飛行が可能になれば、人工衛星の代替として地球観測や災害時における通信・放送分野での利用も考えられる。

図表 水素燃料のレシプロエンジンを搭載した飛行機



出典：参考文献¹⁾

参 考

- 1) ボーイング社 ニュースリリース 2010年7月12日：<http://boeing.mediaroom.com/index.php?s=43&item=1306>
- 2) ボーイング社 ニュースリリース 2008年4月3日：http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080403a_nr.html
- 3) 水素燃料航空機調査会、水素燃料航空機の国内外検討調査、宇宙航空研究開発機構特別資料(2008)

資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題

小澤 純夫
客員研究官

1 はじめに

低炭素社会実現に必要な次世代自動車、省エネ家電等の基盤技術の一つがモータ用のネオジム磁石である。需要が著しく増加しているネオジム磁石の直面している喫緊の課題は、資源リスクである。特に、モータが高温環境下となるハイブリッド自動車、プラグイン・ハイブリッド自動車、電気自動車といった次世代自動車等で必要となる磁石のディスプレイウム(Dy)の資源問題が深刻である。

磁石の強さの向上は、モータの高トルク・小型・軽量化を可能と

し、家電等の省エネルギー化を進め、国内総消費電力の約52%を占めるモータ電力の節約、次世代自動車のさらなる低炭素化、風力発電用の発電機の性能向上等をもたらし、グリーン・イノベーションを推進すると期待されている。1917年の本多光太郎氏によるKS磁石鋼の発明以来、磁石の開発・製造・応用は日本が世界に誇れる技術であり、一貫して世界をリードしてきた。資源リスクへの対応とグリーン・イノベーションの推進が求められる中で、産業界など

の有識者らから、産学官の磁石研究者の総力を結集して磁石イノベーションを推進するために、磁石の研究開発のための人材育成を図るよう期待が寄せられている。

このような課題認識に基づき、2010年6月17日に産学官からなる「東北モータ磁石イノベーション戦略会議」が設立された¹⁾。本稿では、当会議での議論を参考に、モータ用永久磁石の研究動向と課題について述べる。

2 永久磁石の歴史

2-1

永久磁石のエネルギー積の年次変化

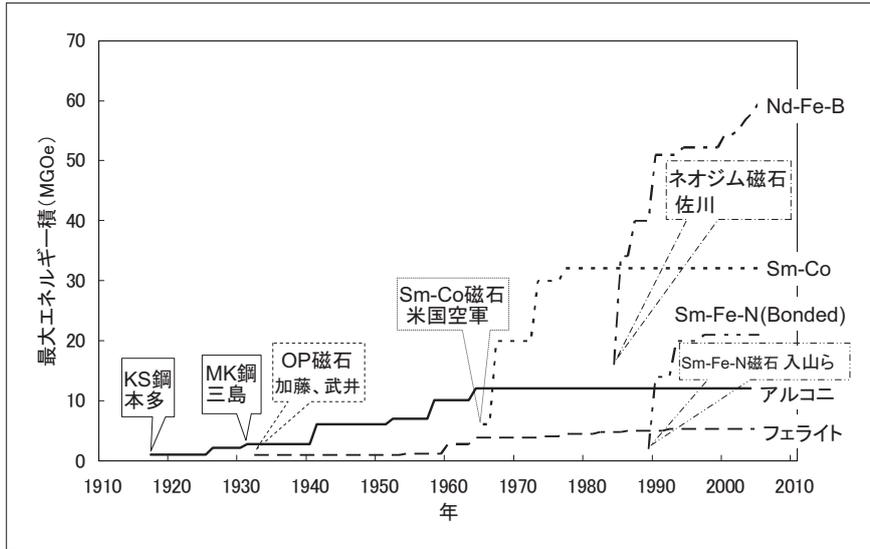
人類が天然の永久磁石を見つけたのは紀元前であり、紀元前600年には、ギリシアのマグネシアと呼ばれる地方で天然に磁化された磁鉄鉱を利用していたと言われていた^{2~4)}。しかし、人類初めての

人工的な永久磁石は、1917年に本多光太郎氏が発明したKS鋼である。本多氏は、可能性のあるすべての組み合わせを試験するという徹底した実験主義と、「人間はねばりだ、努力だ」という精神によって、KS鋼の発明を生んだと言われている。

図表1の永久磁石の開発の歴史を見ると、約90年間で永久磁石の強さは約60倍となっている。20世紀に入り工業的に応用できる強

力な永久磁石が登場したが、永久磁石の発展の歴史では、日本人研究者や日本の技術は常に大きな役割を果たしてきた。KS鋼の発明の後、1930年には、加藤・武井両氏が、フェライト磁石の基礎となるOP磁石を発明した。1932年には三島徳七氏が、アルコニ磁石の原点となるMK鋼を発明した。このMK鋼は保磁力がKS鋼の2~3倍であった。さらに、翌1933年、本多・増本氏らによりMK鋼の約1.5倍

図表1 永久磁石のエネルギー積の年次変化



参考文献^{1, 6, 7)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

の保磁力を有する新KS鋼が発明された。

その後、永久磁石の性能は、1960年代の後半から、希土類磁石であるサマリウム・コバルト磁石の登場によって大きく飛躍した。サマリウム・コバルト磁石は米国の空軍研究所により1968年に発明されたが、その性能向上には俵好夫氏等の日本人が貢献してきた。そして1983年に、佐川真人氏の発明により、現在まで世界最強を誇るネオジウム磁石が誕生した。

特許庁が日本の工業所有権制度創設百周年を機に選んだ十大発明家の中に、本多光太郎氏(特許第32234号:KS鋼)と三島徳七氏(特許第96371号:MK磁石鋼)と磁石関係で二人が入っている⁵⁾。20世紀に発明された磁石の種類は十数種であるが、耳目を集める画期的な発見・発明は、約20~30年に一度の長期間を要する挑戦的な研究の成果であったと言える。

2-2

永久磁石の研究開発におけるセレンディピティ^{8, 9)}

永久磁石においては、セレンディ

ピティ(偶然に幸運な予想外の発見をする才能)により画期的新材料が発明されてきたと言える。

1932年に三島氏によって発見されたMK磁石の開発舞台裏は次のとおりである。三島氏は、Fe-(25~26)%Ni合金において、磁気変態点が過熱・冷却によって著しく異なる理由を検討するために、添加元素により、その変態点の差を縮める実験に着手した。その添加元素としてアルミニウム(Al)を選択し、Alを添加した実験試料(Fe-Al-Ni)を所定寸法に削りだそうとした際に、削り屑が落ちてこないで試料にくっついていることを偶然に発見し、MK磁石(Fe-Al-Ni合金)が生まれた。三島博士は永久磁石分野の専門家ではなかったが、幅広い知識と洞察力により偶然を見過ごさなかった。

1970年に当時の松下電器産業(株)が、1960年にフィリップス社が開発したマンガン・アルミ磁石に炭素を加え、熱間押出加工法および熱間鍛造加工法によるマンガン・アルミ・カーボン磁石を工業化した。この磁石は加工性に優れていることから現在でも一部用途で使われている⁴⁾。当時、マンガン・アルミ磁石は高い結晶磁気異方性を示し、コバルトを含有しない永

久磁石の候補として注目されていたが、実用化までには至っていなかった。松下電器産業(株)の久保氏らのグループは、マンガン・アルミ磁石の実用化研究において、試料を通常のるつぼで溶解し作製していたが、Siなどが不純物が混入してしまうため、カーボンるつぼを用いて溶解することにした。その結果、るつぼからカーボンが混入しインゴットが一晩で粉末化した。これが強力な磁石粉末であることがわかり、マンガン・アルミ・カーボン磁石が誕生した。

1983年の佐川氏によるネオジウム磁石の発明は、間違っただけの仮説によりもたらされたと言える¹⁰⁾。佐川氏は1978年に「希土類磁石の基礎から応用まで」と題された研究会に出席し、磁石の研究開発のヒントを得た。研究会における浜野正昭氏の講演に、希土類元素Rと鉄(Fe)による金属間化合物 R_2Fe_{17} が永久磁石にならない理由は、FeとFeの原子間距離が小さすぎて強磁性状態が安定的でないとの説明があった。佐川氏は、鉄鋼中でCがFeとFeの原子間距離を広げていることから連想し、 R_2Fe_{17} にCやBなどの原子半径が小さい元素を合金化すれば、FeとFeの原子間距離を広げられるのではないかと仮説を立てた。佐川氏は翌日からすぐに実験を開始し、多種類のR-Fe-CやR-Fe-B合金をアーク溶解炉で作り、それらの磁気測定、結晶構造観察等を行い、ついにネオジウム磁石の発明に至った。しかし、後日、ネオジウム磁石の主相の $Nd_2Fe_{14}B$ 中でFeとFeの原子間距離はBを含まない R_2Fe_{17} 中とあまり変わらず、 $Nd_2Fe_{14}B$ 中でのFeのBによる磁氣的性質改善はFeの電子とBの電子の化学的相互作用によるものであることが解明された。佐川氏の研究開始時の仮説は間違っていたものの、結果的には多くの磁石研究者の中でも初めてR-Fe-B系を探索し、粘り強

く研究を続けて、世界最強の磁石を生み出した。

1990年には、サマリウム・鉄・窒素系永久磁石が旭化成(株)の入山氏らによって発見された。入山氏は、高橋実氏が発表したFeを窒化すると飽和磁化が向上するとの報告を聞き、窒化によって新しい磁石ができることを知った。そこで、Fe-30%mass%X合金(Xは周

期律表のうち入手可能な元素)を溶解および窒化し、結果的にサマリウム・鉄・窒素系永久磁石を発見した。入山氏も永久磁石分野の専門家というわけではなかった。もし専門家であれば、鉄・窒素(Fe₁₆N₂)はソフト相であり、窒化により飽和磁化が上昇しても結晶磁気異方性が大きくならないと考えがちであるため、入山氏のよう

な発想には至らなかったと思われる。これも異分野出身の大胆な発想が新化合物の発見につながった例と言えよう。

このように歴史的に見て、新しい永久磁石は、大胆な分野融合的発想あるいは情熱と偶然からもたらされてきた。

3 モータ用永久磁石の現状

3-1

世界のモータを変えた世界最強のネオジム磁石

モータの回転部分には、以前は電磁石が使われていたが、最近特に小型用モータにおいてネオジム磁石板が使われ、小型軽量化と低騒音化が進んできている。ネオジム磁石を使ったモータが、早くから使われていた機器はエレベーターである。その後、洗濯機のモータにも用いられるようになり、脱水力が向上するとともに駆動音が小さくなった。また、重機でも用いられるようになってきている。従来の油圧方式ではエンジンを回し続けるため駆動音の問題があっ

たが、ネオジム磁石を用いたモータを使用することにより、住宅地や夜間工事でも重機を稼動しやすくなっている。

数量的には情報機器でネオジム磁石が多く用いられている(図表2)。ボイスコイルモータ(VCM)は、永久磁石の磁界中におかれたボイスコイルが流される電流に比例して直進運動をするリニアモータであり、パソコン用のハードディスクのヘッドの位置決め、カメラのズーム・絞り・シャッター、微細加工機のアクチュエータ等として用いられている。また、携帯電話の薄型化にもネオジム磁石は貢献している。携帯電話を薄くする際の課題はスピーカの薄型化であったが、超小型のネオジム磁石の利用により、厚さ1ミリ程

度の世界最薄スピーカの実現が可能となった。

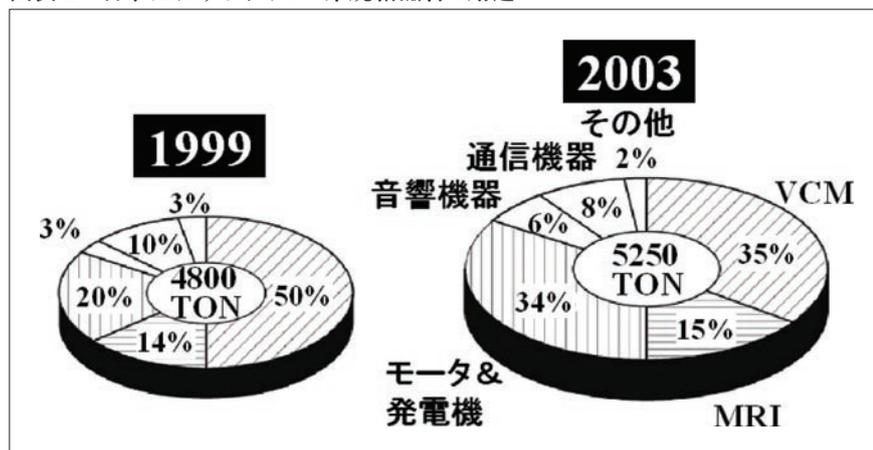
3-2

省エネルギー化の切り札であるネオジム磁石

日本においては、1990年代にパソコンの普及等の情報機器用途を中心としてネオジム磁石の生産が拡大してきたが、最近ではモータ用途の比率が高まっている。ネオジム磁石の生産量も急拡大してきている(図表3、図表4)。この背景には、気候変動枠組条約京都議定書の批准に伴い、CO₂等の温室効果排出量低減のために、電力消費の低減や機器の省エネルギー化が強く求められるようになったことが挙げられる。

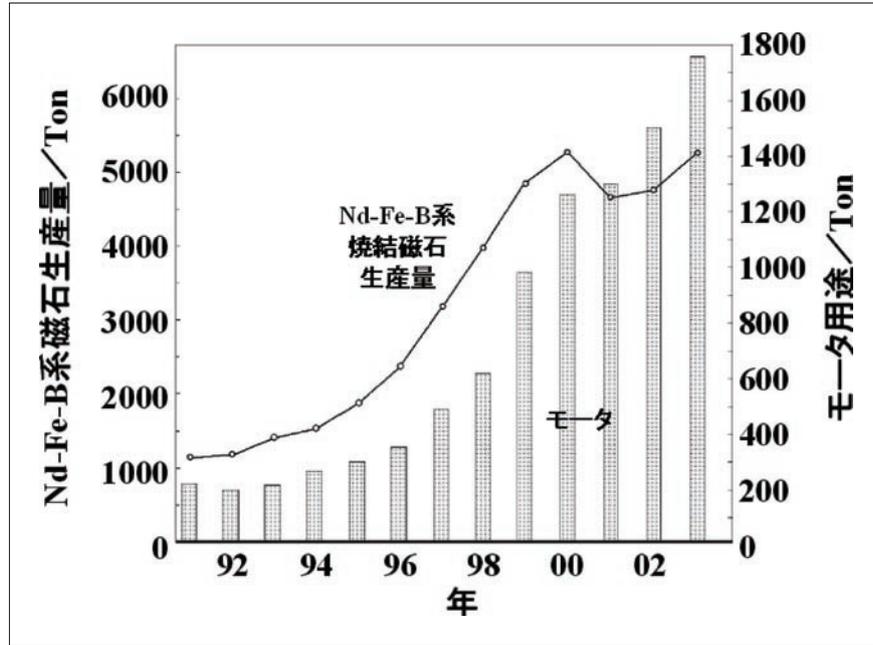
ネオジム磁石により、大きな省エネルギー化が実現された機器として、エアコンが挙げられる。エアコンでは電力の大部分がコンプレッサ用モータの駆動に消費される¹²⁾。以前は交流モータである誘導モータが使われていたが、1981年に初めてインバータ方式エアコンが販売され、1990年代には高効率なブラシレスDCモータが開発された。1999年の改正省エネルギー法の施行および2003年の省エ

図表2 日本におけるネオジム系焼結磁石の用途



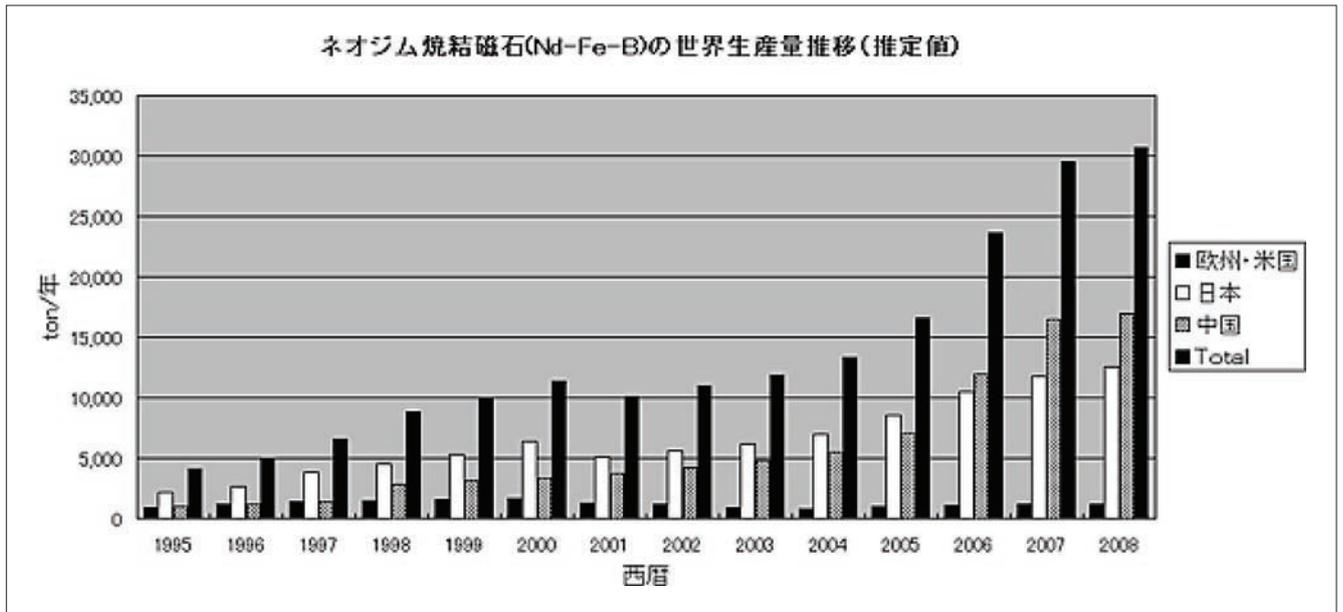
出典：参考文献^{2, 11)}

図表3 日本におけるネオジム系焼結磁石の生産量とモータ用途の関係



出典：参考文献^{2, 11)}

図表4 ネオジム系焼結磁石の世界生産量推移



出典：参考文献⁴⁾

エネルギー法基準導入に伴い、エアコンメーカーは一斉にエアコンの改良に乗り出し、大幅な省エネルギー化の実現のためにモータ性能の向上に取り組んだ。2003年以降、国内のほぼ全てのエアコンメーカーがネオジム磁石を採用し、省エネルギー化が達成されている。ネオジム磁石を利用した新型モータは、旧型モータと比較して特に低回転で効率が高く、約30%改善したとの報告例もある^{13, 14)}。しか

し、世界的に見れば、非インバータエアコンがまだ主流である。

現在、産業分野では永久磁石を使用しない誘電モータが数多く使用されているが、これらの多くをネオジム磁石を使用した永久磁石モータに置き換えれば、使用するエネルギー量を大幅に削減し、CO₂排出を大きく抑制できると期待されている¹⁴⁾。現在、国内総消費電力の約52%がモータで消費されているため、モータ効率を平均1%

向上させると50万kW火力発電所の約1基分相当の電力を節約することができる¹⁴⁾と試算されている。

近年、ネオジム磁石の利用が急拡大している製品は自動車用モータである。ハイブリッド自動車はネオジム磁石がなければ実現できなかったものの一つであり、ハイブリッド自動車の生産拡大に伴い、ネオジム磁石の生産も急拡大している。将来的にも、ハイブリッド自動車や電気自動車等の次世代自

自動車は生産増加が見込まれており、ネオジム磁石の生産もこのまま増加していくものと考えられる。

4 モータ用永久磁石の課題と研究プロジェクト

4-1

ネオジム磁石の課題

図表5に、ネオジム磁石の用途と組成の関係を示す。次世代自動車の用途では使用中に磁石の温度が200℃まで上昇する。しかし、ネオジム磁石は熱に弱いという欠点がある。どのような磁石材料でも温度上昇とともに保磁力は減少するが、特にネオジム磁石では主相のNd₂Fe₁₄B化合物のキュリー温度(磁化がほとんどゼロになる温度)が312℃と低い。そのため、次世代自動車やエアコン等の高い温度で用いられるネオジム磁石では、高温での保磁力を上昇させるため希土類元素ディスプロシウム(Dy)が添加されている。図表6にDyの製品別需要割合を示す。

一方、添加されたDyはNd₂Fe₁₄B化合物の結晶構造においてNdサイトに入り、Dyの磁気モーメントはFeと反平行に結合する性質があるため、磁石はDy添加によって磁化が減少し、最大エネルギー積(BH) maxが小さくなるという欠点が生じる。したがって、現在使用されているハイブリッド自動車のネオジム磁石は、Ndの約40%をDyで置換して高保磁力を得ているが、最大エネルギー積が約40%小さくなっている。

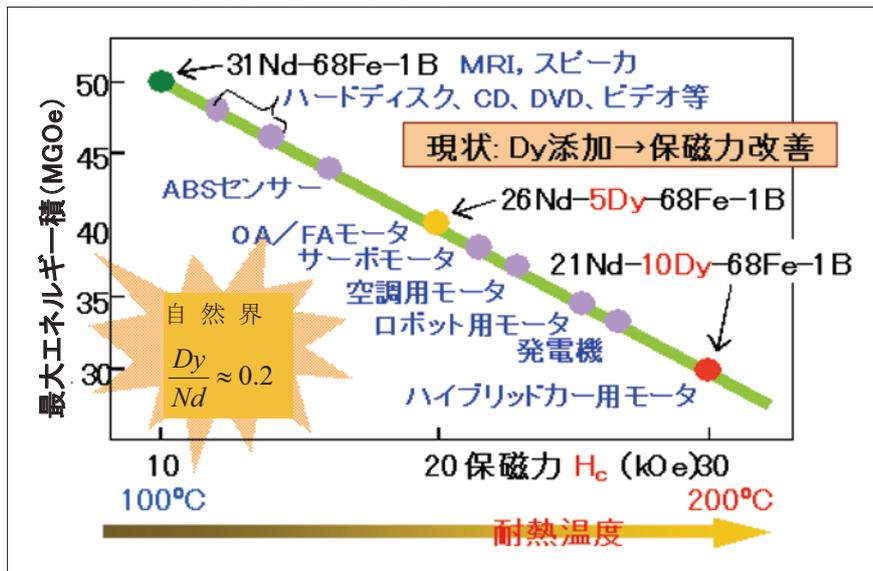
しかし、最大エネルギー積の減少以上に深刻な問題として、資源問題がある。Dyは希土類鉱石中の含有量が少なく、Ndに対するDyの自然存在比は20%程度である。しかも原産地が中国にほぼ限定されている。将来の次世代自動車等の需要拡大に対し、Dyの供給不足

が発生することが懸念されている。例えば、自動車各社の社長クラス等を委員とした次世代自動車戦略研究会は、産学官連携によるDyフリー磁石の研究開発の必要性を強く訴えている¹⁷⁾。

さらには、産業界および有識者からは、さらに性能の高い磁石も要望されている。現在の自動車1台で25~30個のモータが使われ

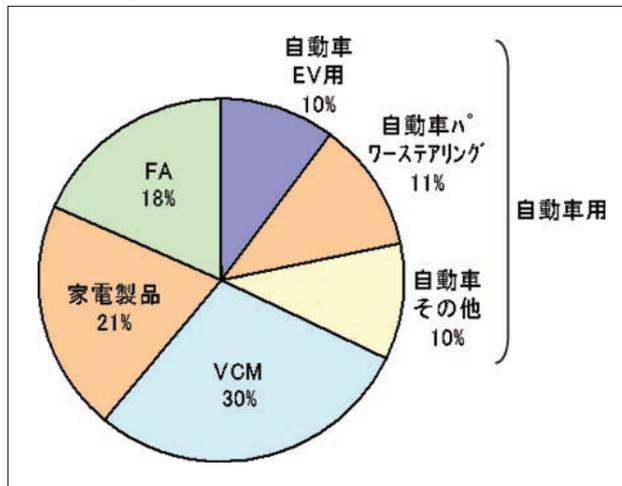
ており、永久磁石を高性能化すると自動車の軽量化を進めることができる^{14, 18)}。また、エアコン等のモータ効率も磁石技術に依存している¹⁹⁾。日本における家電製品のモータ効率はすでにかなり高いと言えるものの、モータはその絶対数が非常に多い。3-2で述べたように、日本の総電力の50%~60%はモータで消費されていることか

図表5 ネオジム系焼結磁石の用途と組成



参考文献¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて加筆作成

図表6 ディスプロシウムの製品別需要割合 (2004年日本市場)



出典: 参考文献¹⁶⁾

ら、1%の効率改善でも大きな省エネルギー効果が期待できる。近年は、次世代自動車に代表されるように、エンジンからモータへ、あるいは油圧ポンプからモータへ、という置き換えにより、様々な分野で電動化が進んでいる。したがって、エネルギー使用量に占めるモータの割合は今後さらに増えることが予想され、永久磁石およびモータのさらなる高性能化が求められるのである。

4-2

日本における3つの国家的な研究開発プロジェクト

以上のようなネオジム磁石が直面する課題の解決を目指して、現在、磁石の研究開発として3つの国家的なプロジェクトが進められている。

- 希少金属代替材料開発プロジェクト「希土類磁石向けディスプレイプロシウム低減技術開発」
 - ・経済産業省・NEDO 実施事業
 - ・2007年に開始
 - ・喫緊の課題であるDy資源問題に対応するためのプロジェクト
 - ・以降では、これを「ネオジム磁石の省Dy技術開発」と記載する
- 元素戦略プロジェクト「低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発」
 - ・文部科学省実施事業
 - ・2007年に開始
 - ・Dy資源問題への対応とともに磁石の高性能化も目的としたプロジェクト
 - ・以降では、これを「ナノコンポジット磁石開発」と記載する
- 希少金属代替材料開発プロジェクト「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の開発」

- ・経済産業省・NEDO 実施事業
- ・2009年度補正予算(第2号)により開始
- ・Dy資源問題への対応とともに磁石の高性能化も目的としたプロジェクト
- ・以降では、これを「新規永久磁石開発」と記載する

なお、経済産業省・NEDOによる「希少金属代替材料開発プロジェクト」と文部科学省による「元素戦略プロジェクト」とは、プロジェクト間の連携を図るために、産学の有識者からなる合同戦略会議が設置された。毎年2月頃に東京大学において公開合同シンポジウムを開催するなどの方法で成果の共有を行い、連携を強めている。

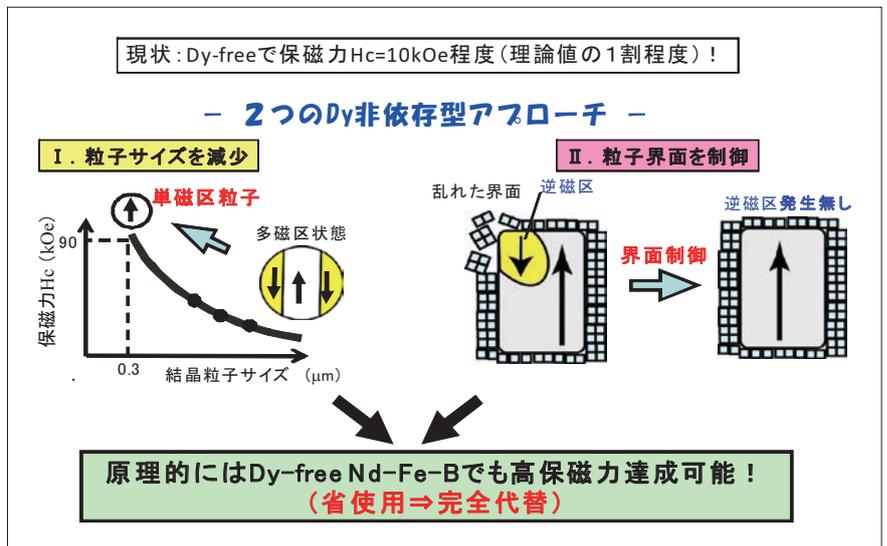
4-2-1 希土類磁石向けディスプレイプロシウム低減技術開発(ネオジム磁石の省Dy技術開発)

このプロジェクト研究は、高い温度で用いられるネオジム磁石のDy使用量を5年間で30%削減することを数値目標として、省Dyでありながら高保磁力を有するネオジム磁石の開発を目指している。保持力は、逆磁区の発生確率を減らすことにより、増加させることができることが分かっている。

逆磁区の発生確率を減らす方法としては、磁石粒子のサイズを小さくし単磁区粒子にすること(図表7のI)、および磁石の主相Nd₂Fe₁₄B界面の状態を良好にすること(図表7のII)が考えられている。

Iの方法は、粒径を小さくすることによって相対的に欠陥のサイズを小さくするとともに、一つの磁区(単磁区)からなる結晶粒を増やすことにより保磁力が高くなるという知見に基づいている。インゴット作製方法であるストリップキャストの結晶粒層間隔を減少させること、粉末作製時に用いるジェットミルの高速化により微粉末を得ること、焼結段階での粒成長を抑えるため低温焼結することなどの製造プロセスの研究開発が試みられている²⁾。これらの結晶粒微細化の過程では、粒子の表面積が増えてしまうことから、酸化を抑制する課題と、同時に表面に析出するNd-rich相の均一性を上げる課題に取り組んでいる。IIの方法では、薄膜技術を用いてモデル界面を作製し、保磁力増加にどのような界面が望ましいかを見極め、プロセス改良への指針を得ようとしている。これまでに、粒界に析出するNd-rich相(液相)に溶け込む酸素量によって界面状

図表7 ネオジム磁石保磁力増加の方法



出典: 参考文献¹⁵⁾

態が変化すること、界面にアモルファス相が存在することなどが判明した。また、強磁場を印加しながら熱処理するプロセスで保磁力が増加することも見出された²⁰⁾。

本プロジェクト研究の特色としては、上記のⅠおよびⅡのような製造プロセス技術開発を、新たな指導原理の獲得や自動車用磁石への応用開発と連携させる形で進めていることが挙げられる。新たな指導原理を見出すために、ネオジム磁石の界面ナノ構造や磁化過程の解析を行うことによって、現状の保磁力が異方性磁場の理論値(90kOe)の10%程度の値に留まっていることや結晶粒を小さくしても保磁力がある結晶粒径で急激に低下してしまうこと等の理由を解明しようとしている。さらには計算科学を用いて保磁力向上の指導原理を獲得し、製造プロセス技術開発へ還元することも目指している。一方、自動車用磁石への応用開発では、ユーザーである企業との垂直連携により、製造プロセスの研究開発によって開発された磁石の耐久性評価やモータ適用時の磁石の最適形状設計等を検討し、結果を各製造プロセスの研究開発に還元している。

本プロジェクト研究の成果は、2009年10月に実施された研究評価委員会による中間評価において、「Dy使用量削減を可能にする磁石保磁力発現の原理に基づく結晶粒の微細化と粒子界面制御の両面からのアプローチで、中間目標(2009年度にDy使用量原単位20%削減を達成)をクリアする成果を得ている。日本が独走している超強力磁石分野のリーダーシップを更に強化するものであり、研究発表や論文も多く、新規性が強い世界トップクラスの成果である」等の評価を受けている²¹⁾。

4-2-2 低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発(ナノコンポジット磁石開発)

この文部科学省の元素戦略プロジェクトでは、より長期的に行なう研発開発が対象である²²⁾。

磁石材料の特性を現在よりも向上させるためには、2つのアプローチがあると考えられている¹⁸⁾。一つはNd₂Fe₁₄B化合物を凌駕する全く新しい強磁性化合物を見出すアプローチで、これについては、次節のプロジェクト研究の目標に含まれている。もう一つのアプローチはナノコンポジットの形成であり、この元素戦略プロジェクトで試みられている。

現状のネオジム焼結磁石の最大エネルギー積(BH) maxの世界最強レベルは約60MGOeで、Nd₂Fe₁₄B化合物の理論限界と言われる64MGOeに近づいており、10%程度の特性改善余地しか残っていない。しかし、Nd₂Fe₁₄B化合物のハード磁性材料とそれよりも飽和磁化の高い鉄などのソフト磁性材料をナノコンポジット化し、ハード相(硬質磁性相)とソフト相(軟質磁性相)を磁氣的に結合できるならば、Nd₂Fe₁₄B化合物の理論限界を凌駕することが可能であると考えられている。

ナノコンポジット磁石は液体急冷法により製造される等方性磁石開発の過程で見出された概念である。佐川氏によるネオジム焼結磁石の発明と同時期に、米国GM社のクロートらはボンド磁石材料として液体急冷法によるネオジム磁石を開発した^{18, 23)}。

工業的に用いられている磁石材料は焼結磁石とボンド磁石に大別される。焼結磁石とは、Nd₂Fe₁₄B化合物の結晶粒の結晶磁化容易軸を一方向に配向させた異方性磁石であり、最大エネルギー積が高い。

一方、ボンド磁石は、磁石化合物相のナノ結晶がランダムである原料粉を液体急冷し、樹脂によって固めた磁石であるため、磁氣的には等方性の磁石であり、磁石の強さは焼結磁石の半分である。しかし、フェライト磁石よりは強く、安価で、形状自由度にも優れている。

ナノコンポジット磁石は、ナノオーダーの微細なハード相とソフト相からなり、両相間に交換結合作用が働き、あたかも一つの磁石単相のように振る舞う磁石である。粒子間の交換相互作用により、完全に等方的な微細構造から理論的に予測される値よりも高い残留磁化が得られる。等方性ナノコンポジット磁石は従来のボンド磁石よりもNd濃度が低いため、安価で耐食性にも優れており、中特性のボンド磁石用原料粉として商品化されている^{18, 24)}。希少金属が少ないという意味では利点があるが、等方性という特徴から、等方性ナノコンポジット磁石は焼結磁石の強さを超えることはできない。ただし、10年以上も前から、ナノコンポジット磁石の結晶磁化容易軸を一方向に制御して異方性化できれば、焼結磁石の特性を上回る特性が得られるはずとは言われてきた。

しかし、まだ、どの研究者もナノサイズで結晶方位を揃えることに成功していない。また、ナノコンポジット磁石は大きな保磁力を出せないという課題もあり、ネオジム磁石のこれまでの研究では、ソフト相の体積比率を増やすと保磁力が急激に低下するという障害を克服できていない²⁵⁾。これは、材料設計概念において、保磁力発現のための材料内部組織制御という観点が欠如しているためであると解釈されている。Dy削減が求められる中で、磁化を高める以上に保磁力を上げることがより緊急度の高い課題となっている。

そこで、文部科学省元素戦略プロジェクトにおける低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発では、FeとNd₂Fe₁₄B化合物の異方性ナノコンポジットを創製し、Dyを用いず、しかもNdの使用量を削減し、ネオジム焼結磁石以上の強さを実現することを狙いながら、高保磁力基材磁石粉末および高磁化金属ナノ粒子の製法の開発することとともに、その基盤となる組織生成および保磁力発現メカニズムの解明を進めている²⁶⁾。本プロジェクト研究では、ネオジム焼結磁石より結晶粒径を一桁小さくし、Dyを用いなくても保磁力を保てる技術を実現しようとしている。また、酸化されやすいNd₂Fe₁₄B化合物を従来方法で微細化するという方法では限界があるため、異方性集合組織を有しかつ高保磁力を持つ粉末粒子の作製にHDDRプロセスが試みられている。HDDRプロセスとは、単結晶粒子を高温水素中でナノ結晶組織に分解した後に、水素を除去して異方性集合組織を有する多結晶体とするプロセスである。HDDRプロセスは、反応条件の微妙な操作により、再結合した結晶を概ね元の方位に戻すことができる、という興味深いプロセスであり、その結晶粒径は、ネオジム焼結磁石において一般的に得られる結晶粒径の約10分の1の細かさである。

本プロジェクト研究では、さらには、Nd等の希土類の結晶磁気異方性に依存せずに保磁力を高める理論を見出そうとしている。Dyの使用量を減らす目的で結晶粒微細化を行なっても、Nd等の希土類は温度を上げると磁気異方性が急激に下がる、という状況には変わりはない。しかし、もしも、希土類鉄化合物中の鉄の結晶磁気異方性を利用することができれば、鉄の磁気異方性は温度に対して依存性が小さいことから、磁石の保磁力の温度による影響を減少させるこ

とができる。ハード相については、異方性の内部組織をもつ粉末粒子を作製している。これは1980年代に発明された技術だが、実際に取り組んだ研究者の数は少なく、組織生成に関してのいくつかの仮説がある程度で、分かっていることが非常に少ない。一方、ソフト相については粒子サイズを5~10nmにする技術はあるが、複合化プロセスへの適性やハード相との複合化技術が確立しておらず、ナノ粒子を作る過程でどうしても表面が酸化するなど、まだ難易度の高い課題が山積している。

本研究プロジェクトは、組織生成のメカニズム、保磁力の発現原理、異方性磁石粒子の製造技術など、解明あるいは解決されていない課題が多いため、新しい磁区観察手段の研究や微細領域での組織解析等を実施することで、まずはメカニズム解明を試みている。本研究プロジェクトは挑戦的な基礎研究であるため、プロジェクト期間内に実用化に到達することは目指しておらず、プロジェクト終了時点で、将来ナノコンポジット磁石により実用磁石材料を工業的に生産できる可能性があるか否かを見極めることを目的としている。

4-2-3 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の開発(新規永久磁石開発)

2010年3月より経済産業省・NEDO事業として、「希少金属代替材料開発プロジェクト ①Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の開発及び②超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発」が開始された²⁷⁾。本研究テーマは、Dy等の希少金属安定供給確保に資するものとして、緊急経済対策(2009年度補正予算(第2号))の一環で実施開始された。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)・テマリーダー・採択

者の間での協議の上、実施期間において、実現可能な詳細目標を定めるものとされた。

①の採択テーマは、実質的には、鉄-窒素系化合物を活用した新規永久磁石材料の開発である。豊富な資源である鉄と窒素を主原料とし、現行のネオジム磁石の特性を凌駕するポテンシャルを持つ高飽和磁束・高磁気異方性新規磁石の探索が行われている。具体的には、鉄-窒素系化合物として窒化鉄系材料と希土類R-Fe-Nに着目し、ナノレベルの微細構造・形成過程の解析と磁気特性評価を通して所望の相の窒化鉄を合成する技術へ指針を獲得し、R-Fe-Nのバルク化技術を構築する。最終目的として、電気自動車やハイブリッド自動車の駆動用モータに用いられる新規永久磁石を開発し、低炭素社会の実現に貢献することを目指している。

②は永久磁石の研究開発ではなく、将来的に現行のモータ部材に置き換わる可能性のある次世代モータを実現するため、イットリウム(Y)系複合材料の開発を行うものである。

4-3

海外の生産および研究開発状況²⁸⁾

図表4に示したように、現在のネオジム系焼結磁石の生産は主に日本と中国で行われており、欧米の生産量はわずかである。1990年代は、日本の生産量が最も多く、中国と欧米が同程度であった。その後、日本と中国の生産量が伸びたが、2006年には中国の生産量が日本の生産量を追い抜いている。磁石の特性面では現時点でも日本製がトップレベルと言われているものの、コストと資源産出を背景に、量的には中国製が世界一となっ

ている。また、中国・韓国・台湾等のアジア諸国の磁石の研究活動が活性化してきている。

3章で述べたように、日本生産のネオジム焼結磁石はハードディスク等の情報機器用に数は増えているが、機器の小型・軽量化の影響により、ネオジム焼結磁石生産量に占める割合は減少してきており、エアコン用・自動車用の割合が増えている。一方で、現在の生産量が世界一の中国は、2004年の統計によると、電動自転車・VCM・MRI用などが約29%、スピーカ・磁気セパレータ用などが約44%、低グレード品の応用品が20%程度となっている。次世代自動車のモータなどの分野にはまだ中国製は使われておらず、高性能

の磁石を要する用途には今のところ、主に日本のメーカーの製品が使われている。

米国は、1960年代は世界一で世界を牽引していきだが、現在では磁石産業がほとんど無くなった。米国でのネオジム系焼結磁石の生産は2004年の約100トンを最後に、2005年以降は生産されていない。ただ、ごく最近、軍関係を含めて、電磁変換関係のデバイスを中国と日本からの供給に全面的に依存するという状況を懸念する意見もでてきている。そこで、米国の研究者の中には、米国の磁石研究をもう一度復活させようという動きが見られる。例えば、2009年1月30日には、デラウェア大学のGeorge C. Hadjipanayis教授が中心となっ

て、産学官から44名の研究者が集まり、米国における先端磁石材料研究の復活を目的とした「The Future of High Performance Permanent Magnets in the USA」と題するワークショップが開催された。

欧州では、有名な磁石メーカーも残っているが、ネオジム系焼結磁石の生産量は2007年で約800トンであり、これは日本および中国の生産量より二桁小さい。欧州市場では中国製品輸入量が増えている。しかしながら、持続的社会的構成要素としての永久磁石の研究は重要であるという観点は存続しており、欧州のモータ企業から日本の磁石研究者へのアプローチが活発化してきている。

5 今後の永久磁石の基礎・基盤研究の進め方

以上のモータ用永久磁石の研究動向と課題を踏まえ、今後の永久磁石の基礎・基盤研究の進め方についての提言を筆者の所見として述べたい。

永久磁石の研究は長期間を要する挑戦的な研究である一方、画期的な発明・発見のほとんどが実用化につながっており、またその用途もグリーン・イノベーションにおいて大きなインパクトを有している。したがって、グリーン・イノベーションへの貢献を目的とする基礎研究・基盤研究として、まずは、前述の国家的な研究開発プロジェクトのような公的資金の投入を今後も継続・拡充すべきであろう。

図表8に各学会の最近の参加者数あるいは発表件数を示した。このような数にははっきり表れていないものの、永久磁石の研究開発に関する課題設定型の国家プロジェクトが開始された2007年以降、日本の関連学会での活動には再活性化のきざしが見られると言

われている。この領域が再活性化されてきているとの認識は、2010年6月17日に磁石および地域経済の産学官関係者219人を集めて開催された「東北モータ磁石イノベーション戦略会議」の議論でも共有された。

永久磁石の研究開発のような、グリーン・イノベーションの課題解決としての重要な目的基礎研究に、政策的に光を当て、トップダ

ウン型で推進していくことの意義は大きい。仮に研究開発投資効率が一定だとすれば、研究開発投資額が増額され、参画する研究者数が増加すれば、画期的な発明や発見に要する期間の短縮が期待される。

もちろん研究開発投資額だけでなく、研究開発投資効率を高めるよう努めていくことも必要である。ネオジム磁石は極めて完成度の高

図表8 日本の各学会における磁石関係参加者数および発表件数の推移

日本磁気学会 ハード磁性材料研究会														
年度	1984	1987	1988	1991	1994	1996	1998	2001	2003	2005			2008	
	参加者数	192	178	144	118	111	63	96	98	64	第1回	第2回		第3回
											75	38	68	46

日本金属学会										
年	2006		2007		2008		2009		2010	
	春	秋	春	秋	春	秋	春	秋	春	秋
ハード磁性材料の発表件数	12	4	9	5	14	19	33	25	16	

(注)2007年春の9件にはシボジウム1件、2009年春の33件にはシボジウム27件を含む

電気学会 A部門大会「磁性材料他」			
年	2007	2008	2009
セッション発表件数	13	8	17

各学会データを基に科学技術動向研究センターにて作成

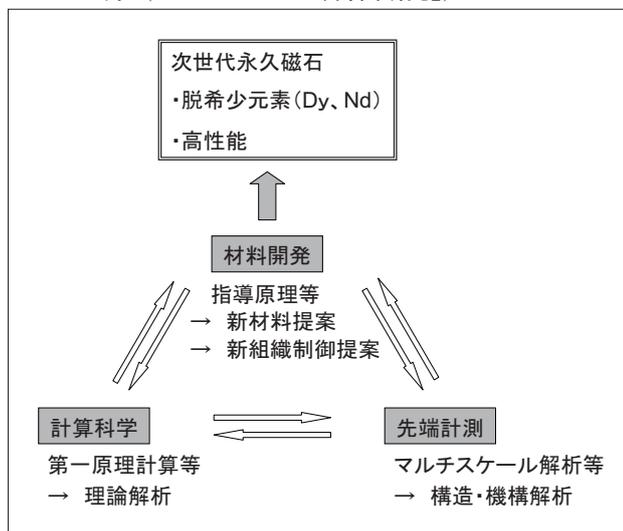
い磁石であり、指導原理なしに組成探索を行ってもブレイクスルーを起こすことは困難と考えられる。これまでの磁石研究は産業界が経験と勘で進めてきた感があるが、もはや限界に達しており、大学に新たな指導原理を求めているテーマの一つであると言えよう。幸い、計測技術には大きな技術革新が起きており、例えば、マルチスケール解析・NMR測定・中性子線回折等を用いて、今まで測定できなかったものが測定できるようになってきている。また、第一原理計算等に基づく計算科学の発展により、新たな理論解析が進み、材料開発に寄与することも期待されている。例えば、前記の「ネオジム磁石の省Dy技術開発」では、粒界の組成・組織と保磁力・内部構造との相互関係の解明、微小粒子集団磁気特性測定による異方性と表面の関係解明などの点で成果が出始めている。このように、先端計測技術による構造・機構解析と計算科学による理論解析を組み合わせ、材料開発に新たな指導原理を獲得し、新化合物の発見、磁石としての合金組織化へとつなげていくべきである(図表9)。このチームワーク型の計画研究は、すでに「ネオジム磁石の省Dy技術開発」のような国家的研究開発プロジェクトでも一部で試みられているが、今後、さらに継続し強化していくことが望ましい。

一方、2-2で述べたように、歴史的に見て、新しい永久磁石は大胆な分野融合的発想あるいは情熱と偶然からもたらされてきた。磁石の研究には、素材としては物理学・金属冶金学、開発においては電磁工学、応用には機械・電子工学というように、多くの専門知識を必要とする。磁石はエネルギーを運動に変換し、あるいは運動をエネルギーに変換するための、電気エネルギーと機械運動をつなぐ重要な材料要素であると言えるが、

4-2で述べたように未だ理論的に解明されていない数多くの現象が存在する。したがって、多様な専門分野の研究者の参画が必要である。例えば、工学部だけでなく理学部の研究者の磁石研究への参画も促進する必要があるだろう。したがって、プロジェクト以外でも、個々の研究者の自由な発想に基づく研究提案を推進する公募研究の必要性もある。異分野の研究者の参加を促進するボトムアップアプローチとしては、課題設定開発競争型補助金²⁹⁾のような制度がよいと思われる。

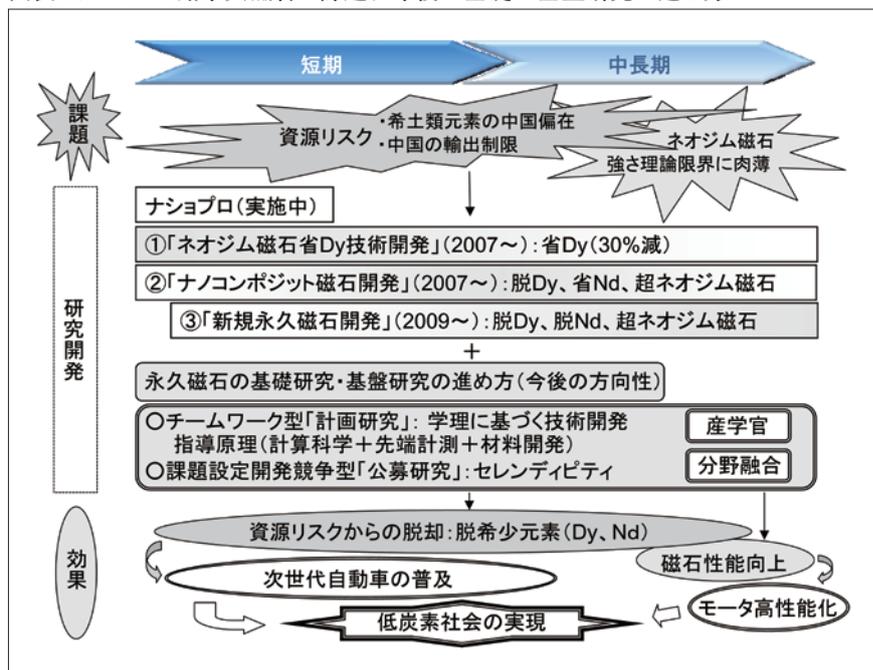
イメージ的には、計画研究および公募研究で構成される科学研究費補助金・特定領域研究を、産学官連携で大規模に集合させたような進め方がよいのではないかと思われる。すなわち、産学官による研究拠点や集中研究室のスタイルによる計画研究と、計画研究のプロジェクトリーダー等を中心に産学官連携体制で設定した課題の公募研究とを、同時に進めていくよ

図表9 モータ用永久磁石の今後の基礎・基盤研究の進め方(チームワーク型「計画研究」)



科学技術動向研究センターにて作成

図表10 モータ用永久磁石の課題、今後の基礎・基盤研究の進め方



科学技術動向研究センターにて作成

うな仕組みである。図表10には、以上で述べた永久磁石の課題、その解決に向けた研究開発の進め方をまとめて図示する。

謝辞

本稿の執筆にあたり、経済産業省後藤芳一審議官(現大阪大学)、宮城県伊藤克彦副知事、(社)東北経済連合会遠藤芳雄専務理事、トヨタ自動車(株)村松正隆部長、日本ボ

ンド磁性材料協会原田英樹 CEO、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構飯田康夫プログラムマネージャー、日立金属(株)西内武司主任研究員、インターメタリックス(株)佐川真人代表取締役、(独)物質・材料研究機構宝野和博フェロー、経済産業省数井寛東北経済産業局長、東北イノベーションキャピタル(株)熊谷巧代表取締役社長、東京エレクトロン技術研究所(株)川上聡執行

役員、東北大学井上明久総長、杉本諭教授、高橋研教授、岡田益男教授、宮本明未来科学技術共同研究センター長ほかの皆様の東北モータ磁石イノベーション戦略会議でのご挨拶、講演および議論を参考にさせていただいた。改めて謝意を表す。(所属は2010年6月17日時点)

参考文献

- 1) 東北モータ磁石イノベーション戦略会議 <http://tmj.niche.tohoku.ac.jp/groups/tmj/>
- 2) 杉本諭、「永久磁石の高性能化を目指して」、翠巒、2009年1月
- 3) 福田務、「永久磁石の昔と今」、(社)日本電気技術者協会 <http://www.jeea.or.jp/course/contents/01126/>
- 4) NeoMag、「永久磁石の歴史と磁気科学の発展」 http://www.neomag.jp/magnet_history/history_top.html
- 5) 特許庁、「十大発明家」、1985年4月18日 <http://www.jpo.go.jp/seido/rekishi/judai.htm>
- 6) M. Sagawa, Proc. 18th Int'l Workshop on High Performance Magnets and their Applications, Annecy, France, 2004
- 7) 磁石の小部屋、「歴史：近代磁石の歴史」、<http://homepage3.nifty.com/bs3/Magnet/basic2/hst2.html>
- 8) 岡田益男、第一回東北モータ磁石イノベーション戦略会議講演資料「永久磁石におけるセレンディピティ」、2010年6月17日
- 9) 岡田益男、「新永久磁石材料開発におけるセレンディピティ」、セラミックス、33、No.5、1998年
- 10) 佐川真人、「イノベーションの瞬間 世界最強の永久磁石「ネオジム磁石」-たった1gで鉄1kgをもちあげる磁石はこうして生まれた」、化学、Vol.65、No.1、2010
- 11) Y. Kaneko, Proc. 18th Int'l Workshop on High Performance Magnets and their Applications, Annecy, France, 2004
- 12) TDK、「じしゃく忍法帳 第89回「エアコンと磁石」の巻」、TDK Techno Magazine <http://www.tdk.co.jp/techmag/ninja/daa00812.htm>
- 13) 電気学会論文誌 D、Vol.118-D、No.6 pp.813、1998年6月
- 14) 日立、「ネオジム系希土類永久磁石 NEOMAX」 <http://www.hitachi.co.jp/environment/showcase/solution/materials/neomax.html>
- 15) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「研究評価委員会「希少金属代替材料開発プロジェクト」(中間評価)分科会」、資料6-1-3、2009年7月24日 <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/21h/chuukan/9/1/6-1.pdf>
- 16) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「研究評価委員会「希少金属代替材料開発プロジェクト」(中間評価)分科会」、資料5-1、2009年7月24日 <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/21h/chuukan/9/1/5-1.pdf>
- 17) 経済産業省次世代自動車戦略研究会、「次世代自動車戦略2010」、2010年4月12日 <http://www.meti.go.jp/press/20100412002/20100412002-3.pdf>
- 18) 宝野和博、「ナノ組織制御による磁気特性制御 ①省希土類磁石材料」、元素戦略アウトLOOK、物質・材料研究機構、2007年12月31日 http://e-materials.net/outlook/elements/outlook_kinds.html
- 19) 小宮山宏、「「課題先進国」日本」、中央公論新社、2007年9月
- 20) H. Kato, T. Miyazaki, M. Sagawa, and K. Koyama, Appl. Phys. Lett 84, 4230 (2004)
- 21) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会、「希少金属代替材料開発プロジェクト」中間評価報告書、2009年10月 <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/houkoku/21h/chukan/09.pdf>

- 22) 広沢哲、レアメタルニュース、2008年1月16日
- 23) J.J. Croat, J.F. Herbst, R. W. Lee and F.E. Pinkerton, J. Appl. Phys. 55 (1984) , 2078
- 24) 広沢哲、金森裕和、重本恭孝、三次敏夫：粉体および粉末冶金、51、143、(2004)
- 25) 広沢哲、西内武司、大久保忠勝、Li Wanfang、宝野和博、山崎二郎、竹澤昌晃、隅山兼治、山室佐益：日本金属学会誌、73、135、(2009)
- 26) 日立金属、「元素戦略プロジェクト」http://www.hitachi-metals.co.jp/corp/corp06_11_1.htm
- 27) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「[希少金属代替材料開発プロジェクト (Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発)]に係る委託先の決定について」、2010年3月18日
<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/koubo/EF/nedokoubo.2010-03-15.4134338935/>
- 28) 杉本諭：私信
- 29) 経済産業省産業構造審議会産業技術分科会基本問題小委員会、「イノベーション力を強化する産業技術政策の在り方（中間報告）」、2009年8月 <http://www.meti.go.jp/press/20090819002/20090819002.html>

執筆者プロフィール



小澤 純夫

科学技術動向研究センター 客員研究官
 東北大学未来科学技術共同研究センター 教授
<http://www.niche.tohoku.ac.jp/>

欧州連合日本政府代表部、国際エネルギー憲章事務局、石油公団、経済産業省、NEDOを経て、2008年7月より現職。大学のポテンシャルを基に外部と連携して産業・社会の課題解決のために実施するプロジェクト研究の開発企画に携わっている。博士（工学）。

緊急地震速報の開発と効用

松村 正三
客員研究官

1 はじめに

地震の揺れは、雷鳴と似ている。夜空に映える稲光を見た人は、続いて起きる雷鳴を予期して心の中で身構える。この猶予時間は、光と音の速度差によって生じたものである。地震の場合は、P波(Primary wave)とS波(Secondary wave: 一般にP波よりも振幅が大きく、近い地震では、最大揺れ(主要動)はS波到着直後に来ることが多い)の波速の差が猶予時間を生み出すことになり、前触れとしてのP波を感知した時点で主要動を迎える準備をスタートすることができる。さらに、地震計を震源近傍に置いておけば、ここで感知したP波情報を解析することで、離れた場所ではP波の到着前に警報を出すことも可能となる。

揺れの事前警報がうまくいけば、建物の倒壊等による死傷者を減らすことができるかもしれない。それほど揺れでない場合でも機械を自動停止することで経済損失を軽減できるかもしれない。さらに、関連するシステム開発は新たなビジネスチャンスを創出するかも

れない。このようにさまざまな期待を担った地震動の直前警報は、アイデア自体は昔からあったものであるが、これを現実のものとするためには、観測網、解析システム、通信システムの3つが適切な形で出揃うことが必須要件であった。そして、1995年の阪神・淡路大震災をきっかけとして我が国の地震観測・研究の基盤が一新された結果、このアイデアが具現化される下地が整った。

2007年10月、気象庁はそれまで進めてきた研究開発の成果に基づいて、上記アイデアの実用化、すなわち「緊急地震速報」(以下では「速報」)の一般運用に踏み切った¹⁾。その後、2010年3月までの2年半の間にテレビ等を通じて報道された「速報」は14回を数え、「速報」の存在は広く世間に知れ渡り、定着することとなった(ただしこれは「速報」の内、後述する「警報」に該当するものである)。この間、誤発信、予測震度誤差などによる多少の齟齬はあったものの、その性能はほぼ想定範囲内に収まり、

「速報」は、地震学の成果が直接、生活に役立てられた実例としてマスコミからも好評を博している。しかしながら、「速報」が生み出す猶予時間は、実用上ぎりぎりのきわどい範囲にあり、その現実的な効用がいかに発揮されるかは、今後の課題として残されたままである。

「速報」の実用化は技術開発としての側面からも注目を浴び、「科学技術動向」誌でもこれまで3度にわたってその内容が紹介されてきた^{2~4)}。また、「速報」の仕組み⁵⁾、その利用心得⁶⁾などについては、気象庁のホームページ⁷⁾に詳しく解説されているので、そちらを参照されたい。本稿では、「速報」の仕組み、開発の経緯、運用の実態などを概説するかたわら、実際上の問題点として、震度が大きいほど猶予時間が短くなるという「逆進性」を取り上げ、筆者の所見を混じえつつ「速報」の限界を見据えた議論を展開したい。

2 「速報」の内容と位置づけ

2-1

「速報」の仕組み

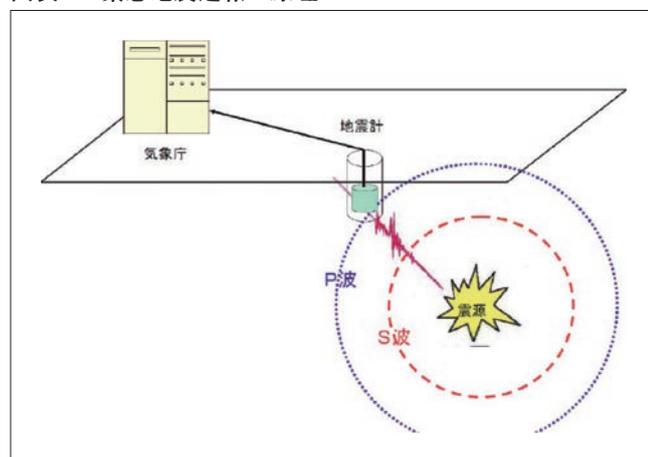
「速報」の原理は、図表1のように、全国に張り巡らせた地震観測網の中で震源に最寄りの観測点に到着したP波を使って震源情報(位置とマグニチュード)を推測し、この推測に基づいて各地の揺れを算出し、その結果を主要動の到着前に通知する、というものである。主要動は通常、S波の直後に来る場合が多いので、S波の到着前を「速報」発信の目標としている。気象庁では、最寄り観測点1個の情報だけからでも震源の位置およびマグニチュードを推測できる方法を開発しており、これから得た結果を第1報としている。ただし、第1報にはかなりの不確定要素があるので、2番目以降の観測点に到着する地震波をも使って第2報、第3報を発信する。

このように原理は単純明快であるが、実際の状況はなかなか厳しいことを具体例で示そう。全国に配備された観測点は、気象庁の多機能型地震計約200点と(独)防災科学技術研究所の高感度地震計(Hinet)約800点をあわせて合計約1000点である。これらの平均間隔は約20kmとなるので、内陸直下型地震の場合、最寄り観測点までの平均水平距離は約10kmとなり、これを代表値とする。震源の深さを10kmと想定すると、最寄り観測点までの震源距離は約14kmである。図表2では、「速報」を受信する地点を、観測点の後方、震源距離30kmと設定してタイムチャー

トを描いた。地震波速度は深さによって異なるが、深度10kmにおけるP波速度6km/秒、S波速度3.5km/秒を用い、さらに浅層部通過時の遅延⁸⁾を加味して概算した。最寄り観測点には地震発生から数えて3.0秒でP波が到着する。現状では第1報発信までに平均5.5秒かかっているため、これが対象地点に届くのは8.5秒後となる。同じ地点にS波が到着するのは、10.7秒後なので、この場合、「速報」はかろうじて間に合うことになるが、現実には、伝達のための遅延も加わるので、図表2のケース、すなわち震源から半径30km以内では、実質的に間に合わないと思われる。阪神・淡路大震災(M7.3)の折に出現した「震災

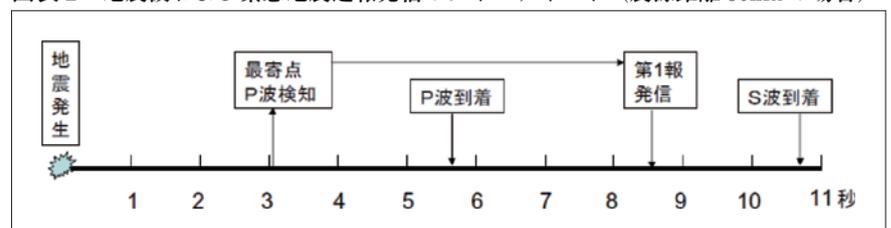
の帯^{注)}は、ほぼこの30km圏内と一致し、仮にこの当時「速報」があったとしても、残念ながら間に合っていなかったことになる。こうした事情から、気象庁では、“震源に近いところでは、速報の発表が強い揺れの到達に間に合わない”との但し書きを付けている。勿論、距離が遠くなれば猶予時間は延びてゆき、この試算でも10km遠ざかるとともに猶予時間は約3秒ずつ増加する計算となる。なお、図表2の場合でも、P波が対象地点に到着するのは5.7秒後なので、前触れとしてのP波の揺れは「速報」が届く前にすでに始まっている。したがって、後述する地震動感知制御システムがP波で作動する場合には、S波到着まで5秒程度の

図表1 緊急地震速報の原理



科学技術動向研究センターにて作成

図表2 地震波および緊急地震速報発信のタイムチャート（震源距離30kmの場合）



科学技術動向研究センターにて作成

注：「震災の帯」…阪神・淡路大震災で出現した神戸市街地に沿う帯状の被害集中域のことを指す。断層と堆積盆地が織り成す独特の地下構造によって揺れが増幅されたと考えられている。

図表3 公的機関が発信する地震関連情報

項番	項目	時間幅	分類	内容	発信者	媒体
1	地震動予測	30年～50年前	30年確率	当該期間内に、震度5弱・5強・6弱・6強が発生する確率	文部科学省地震調査研究推進本部	冊子・新聞・防災科学技術研究所HP
			50年確率			
2	地震予知	数時間～数日前	東海地震観測情報	前兆とは即断できない現象の発生・東海地震と関連はないが想定震源域内での顕著な地震の発生	気象庁	テレビ・ラジオ・新聞・気象庁HP
			東海地震注意情報			
			東海地震予知情報	東海地震発生のおそれがあるという発表		
			警戒宣言	東海地震発生の警戒宣言	内閣総理大臣	
3	緊急地震速報	数秒～数十秒前	地震動予報	最大震度3以上、またはM3.5以上が予測される場合に発信	気象庁(許可事業者)	専用端末等
			地震動警報	最大震度5弱以上が予測される場合、予測震度4以上の地域への発信	気象庁	テレビ・ラジオ・携帯電話等
4	地震情報	数秒～数分後	震度情報	発生した地震動の地域情報	気象庁	テレビ・ラジオ・新聞・気象庁HP
			震源情報	発生した地震の震源・マグニチュード情報		

科学技術動向研究センターにて作成

猶予時間を確保することができる。

2-2

「速報」の位置づけ

現在、我が国の公的機関が発信する地震関連情報には、①地震動予測、②地震予知(現在、対象は東海地震のみ)、③緊急地震速報、④地震情報、の4種類がある(図表3)。項目の並びは地震発生からみた時間の順で、①、②は地震発生前、③、④は発生後の情報である。③の「速

報」は、一般的な地震予知が不可能であるという現状を前提とした保障措置であるとも言えるが、同時に、地震発生に伴う被害状況把握を目的とした④地震情報の先行情報と見ることもできる。

2-3

「速報」の区分

図表3でも示したように、「速報」には、「地震動予報(以下、予報)」と「地震動警報(以下、警報)」の2

種類がある。この区分は厳密に定義されているが、簡単に言えば、境目は震度5弱以上の揺れが予測されるか否かであり、これ未満では「予報」のみが、これを超えると「予報」に加えて「警報」が発信される。「予報」は、(財)気象業務支援センターを介して専用端末を有する専門ユーザーに向けて発信される。「警報」は、テレビ・ラジオ・携帯電話・防災無線を通じ、震度4以上の揺れが予測される地域の住民に向けて報道される。前者は2006年8月から、後者は2007年10月から運用が始まった。

3 「速報」開発の背景と経緯

3-1

地震動感知制御

地震発生後いち早く地震動を感知してシステムの自動停止などを制御しようというアイデアは、「速報」以前からすでにいくつかのシステムで採用されてきた。例えば、どこの家庭にもあるマイコン

メーターでは、ガスメーター内に地震動感知器が取り付けられ、一定の揺れを感知した時点でガス供給が自動遮断される。1980年代に東京ガス(株)が導入して以来、今では、プロパンガス会社を含めた全国のガス供給会社が標準装備として提供している。

原子力発電所では、炉心地下に埋設した地震計が強震動(200ガル前後)を感知した場合に原子炉を自

動停止する、というシステムを取り入れている。最近では、2003年三陸南地震(M7.1)により女川発電所が、2007年中越沖地震(M6.8)により柏崎・刈羽発電所が、2009年駿河湾の地震(M6.5)により浜岡発電所が緊急停止した実例がある。いずれも自動停止システムは想定どおりの機能を発揮した。ただし、停止のための制御棒の挿入は強い揺れの最中に行われたことを意識

しておく必要がある。

日常生活で利用する機会の多いエレベーターにも、地震動感知による最寄り階自動停止機能が組み込まれている。しかし現実には、地震時に停止し、かつ扉が開かないまま長時間エレベーター内に閉じ込められるという事故が絶えない。

以上、代表的な3例を挙げたが、このほかにもさまざまな場面で独自の制御機構が取り入れられているはずである。感知する地震動のレベルを低く設定している場合にはP波で制御がスタートし、主要動到達前にシステムを停止することも可能となる。これは、「速報」の機能と類似しているが、「速報」には、うまくいけばP波にも先んじて対処措置を始動できるという優位性がある。

3-2

先行事例：ユレダス・システムの開発と実績

ユレダス・システムは、JR新幹線沿線に配備された地震観測点からの情報に基づいて、地震時に列車を緊急停止させるためのシステムであり、「速報」の考え方を具現化した世界でも初めてのシステムと言える。その開発は1980年代に遡るが、2004年10月23日中越地震(M6.8)で最初の試練に遭遇した。開発者の中村豊によると^{9, 10)}、震央から水平距離で10数km離れた場所を走行していた上越新幹線「とき325号」は、主要動到着2.5秒前に緊急停止信号を受け1600mを走行して停止、結果的に脱線はしたものの死傷者を出す惨事には至らなかった。初速195km/時から2.5秒間で減速できた分は8km/時程度と推測される。僅かな減速であるが、高速走行ではその効果が無視できない。いずれにせよ、「速

報」の考え方が現実の場で効を奏した世界で初めての事例と言うことができる。

3-3

「速報」開発への過程

阪神・淡路大震災をきっかけとして組織された文部科学省地震調査研究推進本部(以下、「推本」)は、地震対策に関わる研究開発の指針として「地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策」(1999年4月23日)¹¹⁾を策定した。この中で掲げられた4つの基本施策のひとつに「リアルタイムによる地震情報の伝達の推進」が謳われており、「速報」の開発はこの施策の下で推進された。ただし、この施策における「リアルタイム地震情報」の概念は、「速報」よりもむしろ発災時の状況把握に重点が置かれていた。この当時、カリフォルニア工科大学の金森博雄によって「リアルタイム地震学」というキーワードが提唱されており、これは、すでに起きてしまった地震の実態をすばやく分析し、被害の程度や広がりリアルタイムで把握することで現実に即応した災害対策に役立てるという目的をもった研究を指す。上記施策で「リアルタイム」というキーワードが採り入れられた背景には、阪神・淡路大震災で実際の状況把握が遅れがあったという深刻な反省があり、これが推本立ち上げのそもそもの動機でもあった。その意味で、「速報」の開発は、施策策定の当初時点ではむしろ二義的な位置づけにあったと考えられる。しかし、全国に展開された基盤観測網の充実とともに「リアルタイム研究開発」の軸足は全体的に「速報」の実用化へと移っていった。

こうした流れと併行して、気象庁では、気象審議会第21号答申(2000

年5月)に込めるべく全国200箇所の多機能型地震計網をベースにした「ナウキャスト地震情報」の開発が進められていた。また、(独)防災科学技術研究所では、800箇所のHi-net観測網をベースにした「リアルタイム地震情報」の開発が進められていた。双方ともに、地震発生情報をいち早く発信するという「速報」の趣旨を目的とするプロジェクトであり、これらが独立に推進されていたわけである。その後、それぞれの開発が一段落した時点で両プロジェクトは統合され、新たに「高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト」(2003～2007年度)¹²⁾が設立され、ここから「緊急地震速報」が生み出されることとなった。このプロジェクトでは、「速報」の手法開発のみならず、その利活用が新たな研究分野として取り組まれた。

3-4

海外の動向

「速報」と同様の地震動直前警報システムの研究・開発・運用は、米国、メキシコ、台湾、ルーマニア、トルコなどの諸外国においても進められている。米国では¹³⁾、リアルタイム地震学を提唱した金森博雄らが、地震動直前警報の可能性について言及し、その普及を呼びかけているが、運用までには至っていない。

後述するように、「速報」と同様のシステムは、内陸直下型地震よりも海溝型地震に対して効果が高いという特徴から、日本と同じくプレート沈み込み帯に位置するメキシコや台湾において特に注目を浴びている。メキシコでは¹⁴⁾、1985年に起きたミシヨアカン地震(M8.0)の教訓に端を発し、CIRES (centro de instrumentacion y registro sismico: 地震観測センター)¹⁵⁾

が、SAS (SISTEMA DE ALERTA DE LA CIUDAD DE MEXICO) と呼ばれる地震動直前警報システムの運用を1991年に開始した。このシステムは、太平洋沿いに起きる海溝型地震の発生を、約300km離れたメキシコシティにいち早く通知するという役割を担ってきた。1991年8月から4年間の運用で292回の警報が出されており、1995年9月に起きたM7.3の地震に際しては、主要動の72秒前に通知がなされた。台湾でも¹⁶⁾、同様の目的をもつシステムVSN (Virtual Subnetwork)が運用され、

約150km離れた都市に20秒以上の猶予時間をもって警報が届けられる。このシステムは2000年12月からの1年半の間に54個の地震に対して警報を発したという実績を持つ。

ルーマニアでは¹⁷⁾、ブカレスト近郊で150kmの深さにM8の地震発生が予測されているが、これに備えて25秒の猶予時間が期待できるEWS (Early Warning System) というシステムの構築が提言されている。また、トルコでは¹⁸⁾、イスタンブール近郊のマルマラ断層に起きる地震を想定して、8秒の

猶予時間を創出するためのIER-REWS (Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System) というシステムが提案されている。

このように同趣旨のシステムが各国で開発あるいは運用に供されているが、その性能や効果は地域性や国柄によってさまざまである。この中でも完備した全国観測網をベースにした緻密な解析に基づくという点で、日本の「速報」システムが抜きんできていると言える。

4 「速報」運用の実態

4-1

「予報」と「警報」

前述したとおり、日本における「速報」の発信は、「予報」と「警報」に区分される。区分は、対象となる震度の大きさに基づいているが、伝達の仕方が異なる結果として発信先対象が異なる。この違いは、「予報」と「警報」の基本的な性格にも差異をもたらす。簡単に言えば、前者は専門ユーザー向け、後者は一般向け、であり、それぞれの発信の仕方は、図表4にまとめたとおりである。

「警報」は震度5弱以上が予測された場合に、テレビ・ラジオ・携帯電話などを通じて対象地域の住民に向けて発信される。2010年4月までの2年半に実際に出された「警報」は14回であり、この中には予測震度6弱以上の3回(2008年6月岩手・宮城内陸地震、2008年7月岩手県沿岸北部、2009年8月駿河湾の地震)が含まれる。一方、震度5弱を観測しながら「警報」が出なかったケースが5回あるが、こ

れらはいずれも最大震度4と予測されたためである。「警報」では、震度分布や猶予時間の情報を省いて「震央地名と強い揺れの予測される地域名」のみが報道される。

一方、「予報」は、(財)気象業務支援センターと契約した事業者や個人に対して、専用端末を介して通知される。2010年4月までの2年半の発信数は1391件と多数にのぼるが、これは、M3.5以上、すなわち比較的小規模の地震と推測された場合も発信条件に含まれるからである。この中で震度4以上が観測されたケースは90件にのぼる。「予報」では、震源情報も通知されるため、この情報を用いて、よりきめ細かい震度情報へと内容をカスタマイズすることも可能である。ただし、現行では、こうした付加情報を提供するためには気象庁長官による許可が必要とされている。図表4で「許可事業者」と表示した事業者の数は2010年現在、50余社である。

4-2

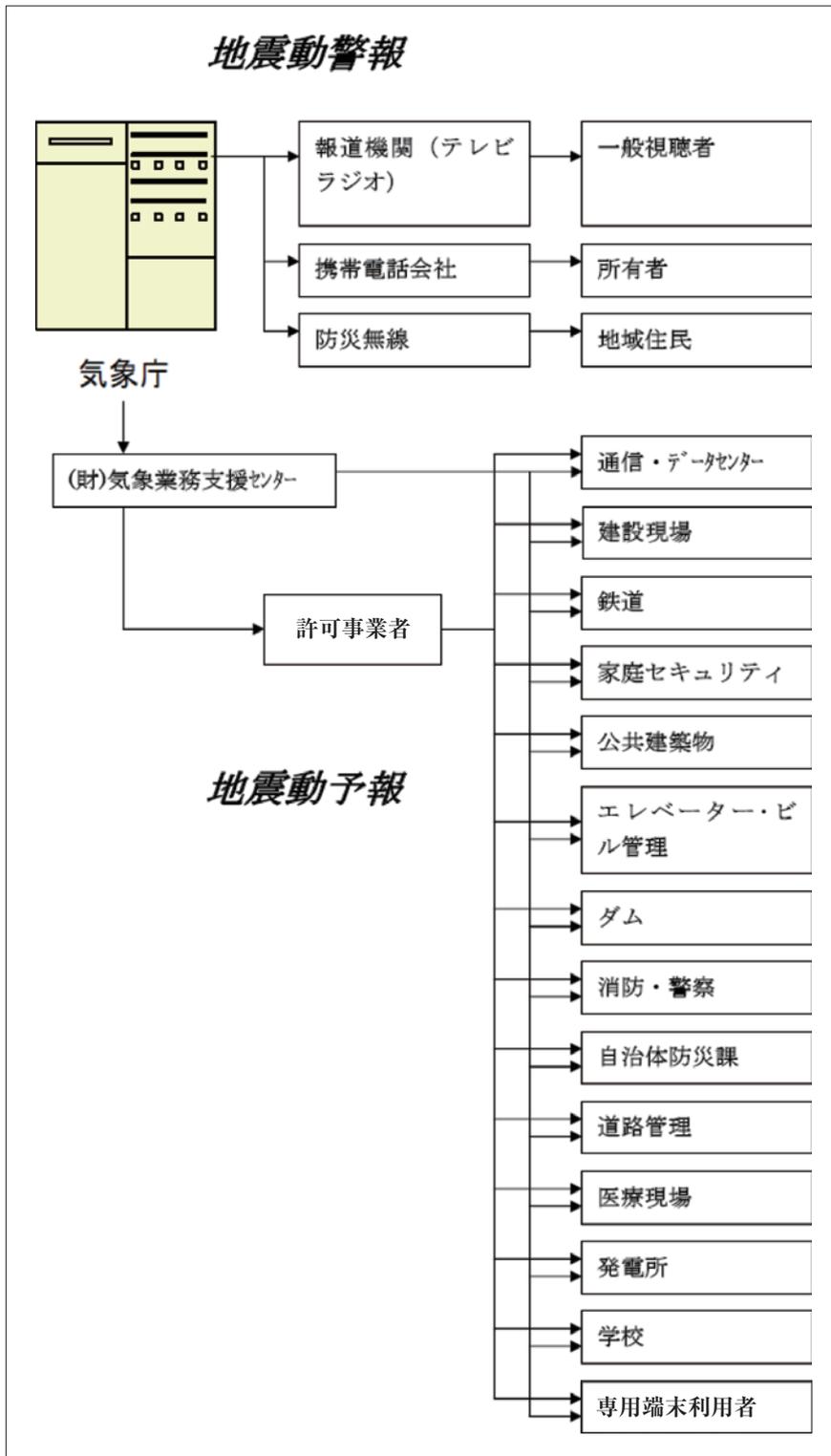
「予報」の利用形態

「予報」の発信先として図表4には各種の利用分野も挙げた。これらの発信先ではいずれも、利用者がそれぞれの分野のプロフェッショナルとして地震情報を利用する場面を想定している。

3-3節で紹介した「高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト」では、「予報」の利活用が研究課題のひとつとされていた。この研究課題を遂行するため、REIC (NPO法人「リアルタイム地震情報利用協議会」)が設立された。REICは、消防防災・防災現場・医療・家庭内自動制御・発電所や工場・通信・学校・ダム・FM文字多重チューナー・LPG自動遮断・ビル設備、の14分野を取り上げ、それぞれの現場で防災事業に携わる技術者と連携して、「予報」の具体的な利活用方法の開発を進めてきた¹⁹⁾、²⁰⁾。

「予報」の利用には、大きくわけて二通りの場面が考えられる。ひとつは、専用端末からの信号によ

図表4 緊急地震速報の発信形態



科学技術動向研究センターにて作成

る自動制御である。例えば、エレベーターの運転には地震動感知制御が取り入れられているが、それにもかかわらず、地震の揺れに起因する「閉じ込め事故」が一定の割合で現実には発生してきた。揺れる前に制御できる可能性のある「予報」を用いればこの事故件数を減らせるだろうという期待は、分かり

易い「予報」の効用のひとつである。「予報」は震度3からの揺れを通報対象としている。この程度の揺れは、通常の生活では問題とならないが、建設現場、特にクレーン作業では、事故を誘発する可能性がある。また、精密加工工場やデータセンターでは、小さな揺れでも位置のずれやデータ欠損を引き起

こすことで大きな経済損失に結びつく可能性がある。こうした意味で「予報」による自動停止などの制御が有用性を発揮する場面は決して少なくないだろう。

他方、自動制御がなじまないとしても、情報としての「予報」が意味をもつ場面もある。例えば、病院の手術現場に立ち会う医師らにとって、まもなく襲来する揺れに対して事前の通告があることは即応的な心構えを形成するうえできわめて有用であろう。このような場面は、図表4に掲げた分野以外にも数多く潜在すると想像される。ここで重要な点は、いずれの場面においても「予報」の通知対象者はそれぞれの場のプロフェッショナルであるということである。個人で受信することも可能であるが、基本的に「予報」では、通知を受けた側が適切な対応を取れるものと想定されており、したがって、受け手にはプロフェッショナルとしての意識と感覚が要請される。

4-3

「警報」の効用

「予報」がプロフェッショナルを対象としたものであるとすると、一方の「警報」の対象は一般人である。気象庁のホームページでは、「警報」を受信した場合の対応の仕方として、「家庭では」、「屋外では」…といった6つの場面に応じたそれぞれの心得を掲載している⁶⁾。しかし、咄嗟の状況で場面ごとに異なる対応を取ることは実際には難しいと思われる。訓練の成果を期待できるプロフェッショナルと一般人を同じに扱うことはできない。“突然の警報に驚いて、どうしてよいか分からず立ちすくんでしまう”、という状況が少なからず出現しそうである。解説書¹⁹⁾などによると、これは一般に望ましくない

対応とみなされているが、筆者は必ずしもそうとは思わない。冒頭で例示した稲光のように、たとえ立ちすくんでしまうとしても、その瞬間、ある種の心構えが形成されるだろうからである。

「警報」は、どこか1箇所でも震度5弱以上が予測される場合、震度4以上が出るすべての地域に対して通告される。結果的に、通告を受ける側の多くの揺れはせいぜい震度4ということになる。震度

4では現実的な被害はほとんど発生しないが、筆者の経験によれば、その場に出くわした時の心理的な不安には相当なものがある。不意に始まった揺れがどこまで大きくなるかが分からないからである。このような場面で、もしも地域ごとの最大震度が事前通告されるならば、それが心理面に及ぼす効果は十分に高いと思われる。現在の「警報」には予測震度に関する情報が含まれていないが、これを通知

するかどうかは今後の検討課題のひとつではないだろうか。

「警報」を受信する場面の中で最大の問題となりそうなのは、自動車の運転時である。これは、一般人でありながらプロフェッショナルとしての対応が求められる場面でもある。気象庁は“あわててスピードを落とさない”に始まる3つの心得を提示しているが、遭遇する状況は千差万別であり、今後とも悩ましい問題のひとつである。

5 「速報」の問題点と改善の方向性

5-1

震度と猶予時間の逆進性

序節で述べたように、「速報」には震度が大きいほど猶予時間が短くなるという逆進性がある。このことをグラフを使って解説してみよう。図表2では、震源距離30kmの地点に届く第1報のタイムチャートを表示したが、ここではさらに震度も検討に入れて試算を行う。図表5では、地震のマグニ

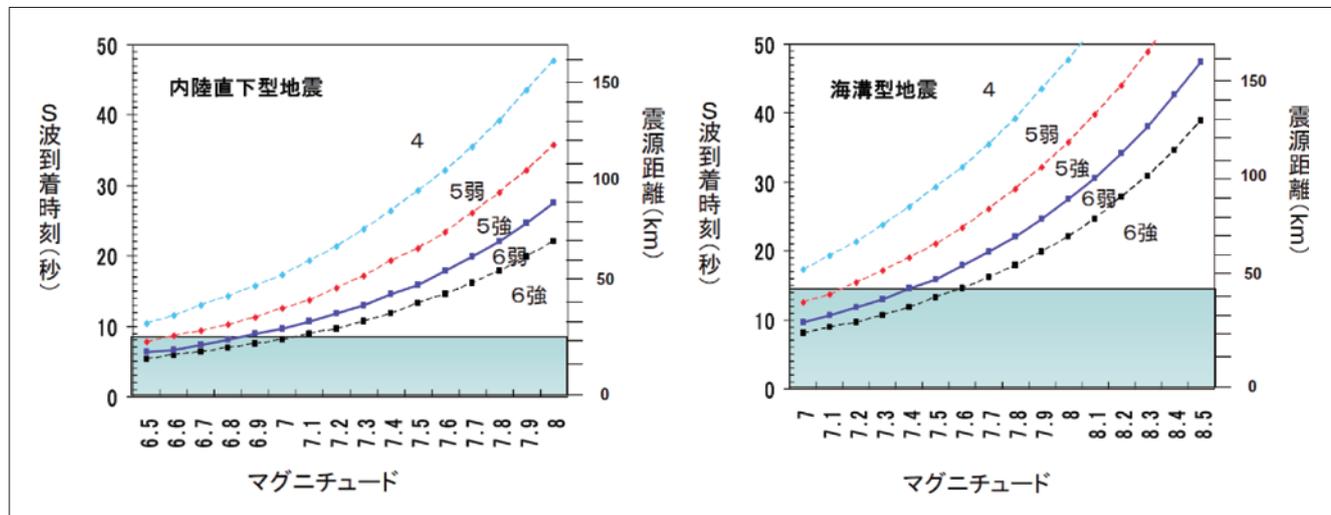
チュードに応じ、震度4・5弱・5強・6弱・6強となる範囲に対して、S波到着時刻と第1報発信(グラフ下部のマスキング部分)との時間関係を描いた。両者の時間差が猶予時間である。この計算には、気象庁が用いる揺れの距離減衰式や震源域の評価方法などをそのまま使っている。左図は内陸直下型地震の場合、右図は海溝型地震の場合で、震源の深さは10km、最寄り観測点までの水平距離をそれぞれ10km、50kmとした。なお、地盤増幅率は1.0、気象庁の報告に基づ

いて第1報発信までに5.5秒かかると仮定した。

このグラフから、同じ震度に対しては、マグニチュードが大きくなるにつれ、すなわち大きい地震になるほど猶予時間が延びることが分かる。一方、マグニチュードを固定したとき、すなわち発生した1個の地震に注目すると、震度が大きい地点ほど猶予時間は短いという逆進性がある。

気象庁資料「計測震度と被害等との関係」²¹⁾によれば、建物損壊などの深刻な被害が出るのは計測震

図表5 震度別のS波到着時刻。左図：内陸直下型地震（震源深さ10km、最寄り点までの水平距離10km、地盤増幅率1.0を仮定）、右図：海溝型地震（同、水平距離50kmを仮定）。マスキング部分は、第1報発信までの経過時間を示し、これよりも上方が猶予時間となる。



科学技術動向研究センターにて作成

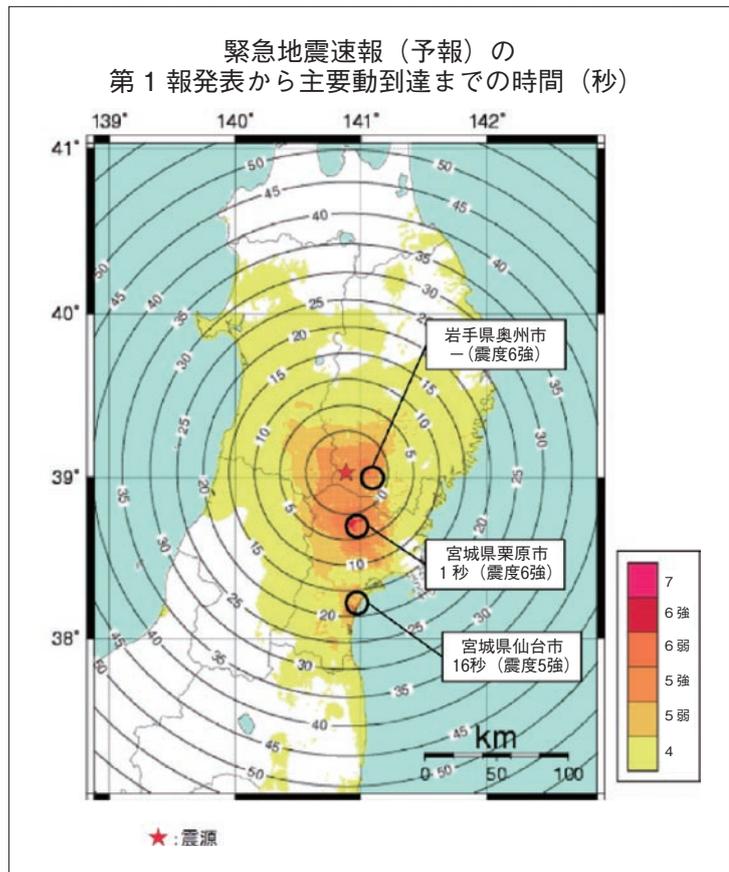
度5.5程度、すなわち震度6弱からである。これは、建築基準法が改正された1981年以前の建物に対してもあてはまる。例えば、図表5の左図でM7.2の場合、震度6弱で揺れる地域の最外縁にS波が到着するのは発震後11.6秒、第1報発信は8.5秒後であり、3秒程度の猶予時間が生まれることになる。同じ地震でも震度4の地域については21.3秒以後に揺れがくるため、12秒以上の猶予時間がある。図表6に、2008年6月14日に起きた岩手・宮城内陸地震(M7.2)の実例における猶予時間と震度分布を示すが、ほぼ図表5の計算どおりとなっていることが分かる。

近年大規模災害をもたらした1995年阪神・淡路大震災(M7.3)を含め、1900年以降、我が国で10人以上の死者を出した地震災害は36回を数える。図表7は、これを内陸直下型地震(左図)と海溝型地震(右図)に分類したときのマグニチュード分布を示す(日本海東縁に起きた地震は海溝型に含めた)。内陸直下型地震23個の平均マグニチュードは $M7.0 \pm 0.2$ であり、図表5を見ると、伝達のための遅延をも考慮した場合、これらの地震による震度6弱以上の揺れに対する猶予時間はほとんど無いということになる。したがって、仮にこれらの地震で「警報」が出ていたとしても死者数を減ずるまでの効果

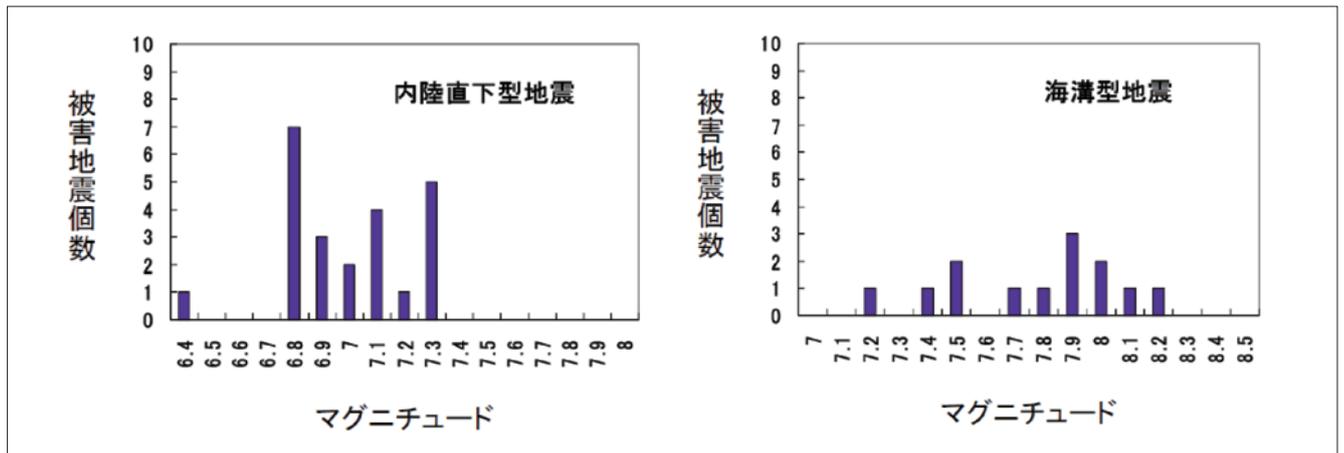
があったかどうかは疑問である。一方、海溝型地震13個の平均マグニチュードは $M7.8 \pm 0.3$ であり、同じ震度6弱以上に対しても場所によっては10秒を超える猶予時間が生まれる。図表5の右図では、最寄り観測点の震源までの水平距離を50kmとして計算したが、震源に近い海底に地震計が設置されていれば猶予時間はさらに延びる。

図表8には、すでに観測が実施されているケーブル式海底地震観測点の位置を示した。釧路沖、三陸沖、相模湾、遠州灘、室戸岬沖と全て太平洋沿岸であり、中でも特に注目されるのは紀伊半島沖である。この場所は、近い将来の東南海・南海地震の震源になると目されており、同図表内の挿入図が示すように、ここには現在、(独)海洋研究

図表6 2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)の際の「速報」の実例



図表7 1900年以降、10人以上の死者を出し被害地震の個数。左図は内陸直下型地震。右図は海溝型地震(日本海東縁を含む)。



科学技術動向研究センターにて作成

図表8 想定される海溝型地震とケーブル式海底地震計(◎)。右下図は、南海トラフ地震に向け、(独)海洋研究開発機構が熊野灘に整備中の海底地震・津波観測網。



地震調査研究推進本部²²⁾ および (独) 海洋研究開発機構²³⁾ の資料を基に、科学技術動向研究センターにて作成

開発機構によって大規模な海底地震観測網が整備されつつある²³⁾。したがって、このような海溝型地震に際しては、「警報」の本領が発揮されるものと期待できる。

5-2

予測手法の課題と改善

すでに実運用されている「速報」では、現在もなお改善の努力が続けられている。改善のポイントは、予測の精度を上げることである。

第1報は、最寄り観測点で受けたP波信号だけを使って解析した情報であるが、現行手法では震源を推定するために、レベル法⁵⁾とB-Δ法⁵⁾という方法が用いられている。レベル法とは、100ガル以上の強い揺れを検知した時点で

情報を出すもので、ほとんど処理時間を要さないが、震源解析を行うためには複数観測点の情報が必要となる。一方、B-Δ法では1観測点情報だけから震源解析を行う。震源解析では、位置、発震時、マグニチュードと合計5個の未知数があり、1観測点だけの情報でこれら全てを決めることには基本的に無理がある。しかし、B-Δ法では、3成分の信号から波の到来方向を定めると同時に、遠い地震ほど散乱波成分が多くなるという波形の特徴から距離を推測して震源の位置を決めるといった巧妙なやり方で不足する情報を補いつつ、迅速な震源情報の提供を実現する。さらに、周りの観測点に未だ地震波が到着していないという情報をも活用するテリトリー法⁵⁾、グリッド・サーチ法⁵⁾、着未着法²⁴⁾などと呼ぶ手法を用いることで、

震源位置に関しては、現時点でもきわめて短時間に相当の確度をもった結果を得ることができている。

これに対して、難しいのはマグニチュードの推定である。通常、マグニチュード決定には地震波全体の情報が使われるが、第1報ではP波の立ち上がり部分だけで推測しなければならない。この結果、予測震度にある程度の誤差、あるいは不確定さの含まれることが避け難い。本来のマグニチュードは地震波全相の最大振幅から決定されるが、「速報」第1報のマグニチュードの値は、P波立ち上がりから3秒分の波形のみで算出される。断層面のずれ速度を1m/秒として単純に考えれば、最大3mのずれ量、すなわちM7.5までの地震が評価できる対象となる。また、破壊の伝播、すなわち断層面の成長がS波速度で進むとすると、最大20kmの断層長すなわちM7.0までが正しい評価の範囲となる。このような制約からM7クラス以上の大きい地震の速報では、マグニチュードの正確な評価が行えない。第2報、第3報と地震波の成長にあわせてマグニチュードの推定値は更新されていくが、大きい地震に対して第1報のマグニチュードが過少評価に偏りがちという問題からは免れ得ない。過去2年半の実績をみても、実際に震度5弱以上が出現した19件のうち5件で予測震度が「警報」基準に達しなかった。この問題は「速報」改良において特に重要な課題とみなされている。さまざまな新手法も提案されているが、即時性と精度の相反性という問題は最後まで残る。

同様に、巨大地震の震源域の把握も重要な課題のひとつである。地震の破壊は震源近傍にとどまるわけではなく、例えばM8地震の場合は100kmを超えるスケールの震源域が破壊されることになり、震源から遠く離れた地点であって

も震源域近傍となって震度6クラスの揺れに見舞われる可能性が出てくる。現在の解析手法では、震源距離の代わりに、マグニチュードに応じた大きさの球面からの距離を使って近似計算を行っているが、このやり方では、大きな地震になるほど実態からのずれが大きくなる。そこで、震源域を即時把握するためのいくつかの手法も考案されている。「速報」の精度向上の努力は休みなく続けられているが、地震が大きいほど扱いが難しく、また、実際の検証の機会が少ないという研究上の壁が立ちはだかっている²⁵⁾。

前述したように、「速報」の真価が期待されるのは海溝型地震に対してである。その中でも最大規模の地震として、次期東南海・南海地震が主要なターゲットとなるだろう。現在の「速報」は、あらゆる地震をターゲットとした「汎用速報」であるが、これとは別に東南海・南海地震に的を絞った特別な解析手法や特別な通報形式を前提とした「特別速報」といった形を検討する必要があるのではないだろうか。

5-3

利用者側から見た考え方

前述したように、「予報」は専門的利用者に向けてのサービスである。気象庁長官からの認定を受けた許可事業者は、気象庁が提供する情報を基にして、独自に解析した情報を付加することができる。特に重要な付加情報は、きめ細かい地盤情報に基づいた予測震度の精密化である。気象庁提供の予測震度は、約10km角で平均した粗い地盤情報に基づいているが、実際の地盤状況は細かい区画ごとに異なり、場所によっては一軒ごとに異なるといっても過言でない。高層ビルの場合は、階層ごとにも

異なるだろう。そこで、「予報」を配信する会社は、顧客の固有条件を加味した情報を提供することで、他社との差別化を図ることが可能となる。このように、「予報」提供ビジネスでは、利用者ごとに微妙に異なる「予報」へのニーズを的確に汲み取ることが鍵となろう。

「警報」の発信頻度は、「予報」のたかだか1%にすぎない。しかし、緊急地震速報がこれだけ人口に膾炙することとなった所以は、「警報」の発信によるところが大きい。逆に言えば、「警報」に対する評価がそのまま「速報」への評価となりがちである。そういった意味で運用開始後の2年半の報道をみると、マスメディアを始め、「速報」開発の関係者も含めて、“主要動に間に合ったかどうか”の一点にこだわりすぎるとの印象を抱かされる。直前通知が「警報」の最大の売りとなされる以上、世評の注目がこの点にばかり向いてしまうことにはやむを得ない面もある。もちろん、解析手法やシステムの改良を図ることで猶予時間を引き延ばすことへの挑戦は続ける必要がある。しかし、それも原理的な限界を超えることはできない。「警報」発足当初の物珍しさが落ち着いた今、「警報」利用への現実的な対処を考える時期ではないだろうか。例えば、猶予時間を見込めない直下型地震に対しては、「警報」が間に合うかどうかへのこだわりを捨て、むしろ「警報」のリアルタイム性に目を向けるべきであろう。これは、「警報」を地震動感知制御の一環として扱うことを意味する。地震動感知制御は「警報」が生まれる以前からさまざまな分野で利用されてきたわけであるが、「警報」が社会に浸透しつつある今、「警報による制御」という新たな利用形態があり得るのではないだろうか。例えば、テレビのデジタル化を利用して、「警報」に伴う制御信号を各家庭に配給するといったことも考えられる。

一方、「予報」や「警報」の汎用的利用にはなじまない分野も存在する。その極端な一例が原子炉である。原子炉にはすでに地震動感知制御が導入されているが、ここに「予報あるいは警報による制御」を組み込むことは、少なくとも現時点では問題が多すぎる。この場合はむしろ、「速報」の考え方に基づいて原子炉側が自前の制御システムを構築することが望まれる。すなわち、現在の地震動感知制御のための地震計を炉の遠隔地に設置することである。実際に、炉を取り囲む地震計網を敷設し、さらには数千mの深さを持つ井戸底に地震計を設置して、制御棒を挿入するための2秒前後の猶予時間を稼ごうという構想が、すでに具体化されつつある。

5-4

津波警報改良という波及効果

「速報」開発の波及効果として、津波警報の改良が進むことが期待される。1952年の気象業務法に基づいて発足した津波警報は、1980年のコンピューター化によって実質的な警報のレベルに到達した。しかしその後起きた1983年日本海中部地震(M7.7)、1993年北海道南西沖地震(M7.8)では、いずれも沿岸部住民への警報が間に合わず、死者・行方不明者がそれぞれ100名と259名に達した。日本海側では震源位置が海岸に近いと、地震発生後津波の襲来までの時間が短く、日本海中部で最速7分、北海道南西沖では同3分であった²⁶⁾。しかし短いとはいえ分のオーダーであり、「速報」が秒単位の猶予時間を問題にしていることに比較すれば、技術課題のしきいは低い。データ受信・解析・通信の確実性も含め、「速報」の迅速化に関わる改良の効果は、津波警報の迅速化

を促すものであり、その方向での改良が進んでいる。

6 まとめ

「速報」が世に出た時点では、これをひとつのビジネスチャンスととらえる動きがあった。ところが今では、“緊急地震速報提供サービス事業から撤退する企業が多く…防災に手を出すとリスクが大きいということが教訓として残ってしまっています”という分析さえなされている²⁷⁾。一方で、「速報」は、地震研究が直接、生活に関わって“役に立つ”成果を示し得た数少ない事例のひとつとして社会から歓迎され、日常生活の中に浸透しつつあることも事実である。「速報」ビジネスが、ビジネスとして成り立つかどうかの分かれ目は、「速報」の実態が少しずつ明らかになってきたこれからが正念場と言えよう。実際、直下の地震に対しては間に合わないという「速報」の弱点を逆手にとって、専用端末に地震計を組み込んだシステムなども開発され、市販化されている。

同じ意味で、「速報」には今後の地震防災対策の本命といわんばかりの期待がかけられているが²⁸⁾、期待ばかりが先行してしまうことが懸念される。こうした期待はややもすれば過大に陥り易く、実態との間に大きな隔たりが生じてしまう、ということがこれまでの防災対策の常でもあったからである。開発当初の期待が膨らむのはある意味当然であるが、運用がある程度進展した時点では、実績を踏まえ、「速報」の持つ意味とその限界を弁えた上での現実的な対応へと進化していく必要がある。以下には、「速報」の現実的な位置付けをどこに見るべきかという趣意のもとに、本稿に掲げた筆者の主な論点と提言をまとめた。

①「警報」と「予報」は、対象となる予測震度の範囲が異なるだけであるが、一般人か専門ユーザーかという発信先の違いがそれぞれの情報の性格、効果、利用形態に大きな差を生み出す。「速報」を論じる際には、両者を分けて考える必要がある。

②「速報」には揺れが大きいほど猶予時間が短くなるという逆進性がある。実際の場面では、「警報」によって震度4の揺れに対し余裕をもって対処できた、という経験が大部分となり、これが確実に約束された効果という印象となって定着してしまうことに懸念を感じる。

③2年半の実績ではまだ「速報」の本領が発揮されるべき場面が出現していない。今後の経験を重ねていく中で、それぞれの場における利用者が、「速報」の性格と限界を弁えた上で、もっとも効果的な利用方法を学習していく必要がある。また、「速報」の受信者が経験を積んで学習を深めていく上で震度情報をもたらす意義は大きい。現在の「警報」では震度情報が省かれているが、伝え方の工夫も含め、予測震度分布情報を発信することが望まれる。

④死傷者を出すといった深刻な被害は、概ね震度6弱以上で発生する。例外はあるものの、内陸直下型地震の場合、この大きさの揺れに対して「速報」は間に合わない。他方、海溝型地震の場合は、10数秒以上の猶予時間を生む可能性がある。特に期待されるのは、海底地震観測網が整備されつつある次期東南海・南

海地震に対してである。これらに特化した特別速報を開発する意義があるのではないだろうか。

⑤海溝型巨大地震の場合は、近辺だけではなく遠方の沖積平野や堆積盆地、特に関東平野における長周期地震動が問題となる。長周期地震動をもたらす災害の研究はまだ緒に就いたばかりであるが、この場合、数十秒の猶予時間をもたらす「速報」には大きな減災効果が期待できる。

⑥マスメディアや速報開発関係者は、「警報」が揺れの到着前に間に合ったかどうかということにこだわりすぎる。たとえ間に合わない場合でも、地震とほぼ同時に発信するという「警報」のリアルタイム性に注目すべきである。現在の「警報」には自動制御という考え方はないが、内陸直下型地震の強い揺れに間に合わないという「警報」の弱点を補完する意味で、将来的には「警報による制御」という考え方を取り入れることも必要ではないだろうか。

謝辞

この原稿をまとめるにあたって、NPO法人リアルタイム地震情報利用協議会の藤縄幸雄専務理事、東京大学地震研究所の東田進也准教授、(独)防災科学技術研究所の堀内茂木研究参事の御三方にお話いただいた貴重な情報を参考とさせていただきます。ここに記してお礼を申し述べます。

参考文献

- 1) 東田進也、地震情報の現状と課題、地震2、第61巻特集号、S575-S589、2009
- 2) 「リアルタイム地震情報ネットワーク」の整備に向けて、科学技術動向、2002年3月号、p10
- 3) 菅沼克敏、わが国における地震防災の最近の動向、科学技術動向、2005年10月号
- 4) 地震波（S波）の到達寸前の緊急地震速報を提供開始、科学技術動向、2006年8月号、p10
- 5) 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料、気象庁地震火山部、2008、http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats_EEW/reference.pdf
- 6) 緊急地震速報の利活用の手引き、気象庁、2007、<http://www.jma.go.jp/jma/press/0708/03a/rikatsuyou.pdf>
- 7) 緊急地震速報について、気象庁、<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/index.html>
- 8) Yamamizu, F., Down - Hole Measurements of Seismic Wave Velocities in Deep Soil Deposits beneath the Tokyo Metropolitan Area, Rep. Nat. Res. Inst. Earth Sci. Disast. Prev., 56, 1-32, 1996
- 9) 中村豊、新潟県中越地震の早期検知と脱線、地震ジャーナル、41、25-37、2006
- 10) 中村豊、早期警報が災害軽減に役立った事例と今後の展開、2006年6月、http://www.sdr.co.jp/papers/20060622_kyoto.html
- 11) 地震調査研究推進本部、地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策一、1999年4月23日、<http://www.jishin.go.jp/main/suihon/honbu99a/h9s3b.htm#2-1>
- 12) 高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト総括成果報告書、独立行政法人防災科学技術研究所、pp.222、2008
- 13) Allen, R. M. and H. Kanamori, The potential for earthquake early warning in southern California, Science, 300, 786-789 ; 2003
- 14) Espinosa-Aranda, J. M., A. Jimenez, G. Ibarrola, F. Alcantar, A. Aguilar, M. Inostroza, and S. Maldonado, Mexico City seismic alert system, Seim. Res. Lett, 66, No.6, 42-53, 1995
- 15) メキシコ地震警報システム、http://www.cires.org.mx/sas_es.php
- 16) Wu, Y. M., and T. L. Teng, A virtual subnetwork approach to earthquake early warning, Bull. Seism. Soc. Am., 92, 2008-2018, 2002
- 17) Wenzel, F., M. C. Oncescu, M. Baur, F. Fiedrich, and C. Ionescu, An early warning system for Bucharest, Seism. Res. Lett., 70, No.2, 161-169, 1999
- 18) Erdik, M., Y. Fahjan, O. Ozel, H. Alcik, A. Mert, and M. Gul, Istanbul earthquake rapid response and the early warning system, Bull. Earthq. Eng., 1, 157-163, 2003
- 19) 緊急地震速報、東京法令出版、pp.277, 2007
- 20) 分野別緊急地震速報利活用システムの普及促進に関する調査・検討、25pp. http://www.bosai.go.jp/kenkyu/sokuji/h17/H17LP-22_NPO3.5.1.3.0.pdf
- 21) 計測震度と被害との関係について、http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_kentokai/kentokai_houkoku/chapter1.pdf
- 22) 地震調査研究推進本部、http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm
- 23) 海洋研究開発機構、<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/maritec/donet/>
- 24) 第9回国土セイフティネットシンポジウム～災害軽減：震度の一歩先を目指して～、リアルタイム地震情報協議会、pp.40、2010
- 25) 巨大地震に対応した高精度リアルタイム地震動情報の伝達システムの構築、科学研究費（基盤研究B）、pp.130、2010
- 26) 今村文彦・阿部郁男、津波対策における緊急地震速報の活用、緊急地震速報、東京法令出版、239-255、2007
- 27) 地震本部ニュース、地震調査研究推進本部、2009、8月号
- 28) 朝日新聞、2010年5月28日朝刊

執筆者プロフィール



松村 正三

科学技術動向研究センター 客員研究官
(独) 防災科学技術研究所 研究参事
<http://www.bosai.go.jp/>

専門は地震学。微小地震観測を通じて大地震の前兆現象検知を目指している。特に東海地震を対象にして、地震活動パタンの変化からスロースリップや準静的滑りにともなう応力再配分の状況を把握したいと考えている。地震調査研究推進本部専門委員。理学博士。