

Science & Technology Trends

科学技術動向

3-4
2014
No.143

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

レポート

- p 5

再生可能エネルギー利用拡大のための
エネルギーストレージの研究開発動向
- p13

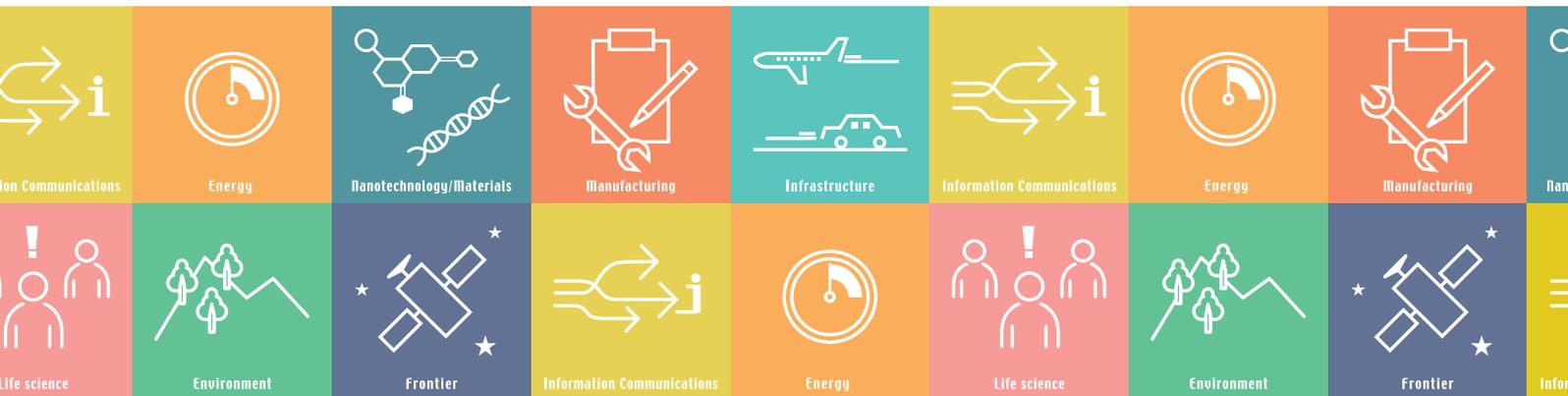
日本の製造業システムの医療分野展開、
国際展開の可能性について
—TQC、TQMの日米の病院における取組みと日本の課題—
- p19

予防医療・先制医療に向けたスマートなヘルスケアの実現
—パーソナル検査システムの開発と社会実装の促進について—
- p28

農業をめぐるIT化の動き (2)
—ハイパフォーマンスコンピューティングの活用事例を中心に—
- p36

インフラ長寿命化における道路橋の
新たな点検技術の開発
- p44

各国の地球観測動向シリーズ (第7回)
オランダの地球観測活動の方向性
—精密農業を支える地球観測画像への先行投資と海外ビジネスの展開—



本文は p.5 へ

再生可能エネルギー利用拡大のための エネルギーストレージの研究開発動向

太陽光や風力など気象により変動する再生可能エネルギーの利用の拡大にともない、ピークシフトや平準化等を目的としたエネルギーストレージの必要性が増している。先進国を中心に電力貯蔵用の蓄電池や水素等へのエネルギー変換による貯蔵の研究開発や実証試験が進められている。また、系統用の他に今後のスマート社会における効率的なエネルギー利用においても、エネルギーストレージはキーデバイスとして注目され、各地域特性に対応した様々な利用形態における実証試験が実施されている。しかしながら現状では、普及拡大のためには、コストの低減や性能・安全性の向上など多くの研究開発課題がある。

電力用のエネルギーストレージでは、自動車など移動体用途として研究開発が進む小型軽量化・高性能化だけではなく、低コスト化や安全性の高い蓄電システムあるいはエネルギー変換貯蔵など、中長期的なエネルギーシステムとしての研究開発施策が求められる。また、電力の消費におけるエネルギーストレージ利用では、低コスト化と併せて直流給電システム構築などの電力利用の効率化や、防災利用など生活の利便性向上等の付加価値の付与が、普及促進には不可欠である。

本文は p.13 へ

日本の製造業システムの医療分野展開、 国際展開の可能性について

—TQC、TQM の日米の病院における取組みと日本の課題—

これから世界的に高い成長が見込まれる分野として、医療・ヘルスケア分野が注目されているが、その中心を成す医薬、医療機器のハードウェア技術だけでなく、それらを造ることを支援するノウハウや、高い水準の品質を確保するノウハウ等も高い付加価値の源泉を成すことを考慮する必要がある。

特に基幹産業として日本を支え続けてきた自動車産業やエレクトロニクス産業で取り組んできた QC (Quality Control: 品質管理)、QM (Quality Management: 品質マネジメント) は、世界の最先端を行う実力があり、その運用も含めた優れたノウハウを持っている。

この QC、QM の概念を医療システムに導入し、病院経営変革の実践を行っている病院の例として、日本の飯塚病院 (福岡県飯塚市、1116 床、地域医療支援病院) と米国のヴァージニア・メイソン病院 (ワシントン州シアトル市、病床数は 336 であるが 5500 名のスタッフを擁する) がパイオニアとして挙げられる。

これらの病院の取組の本質は、医療に理論的品質管理を導入し標準化を進めることにある。我々は次世代のために、社会の健康を追及・推進する医療システムの構築を目指すとともに、アカウンタブルな (説明責任のある) 医療組織の実現を目指す必要がある。

そのためにも、現場の医療関係者が問題を解決し、課題を達成する持続的品質改善を追及し続けるシステムの構築、それを実現するアカウンタブルな組織の構築のために、日本の製造技術から生まれた優れた生産管理システム、品質管理システムが貢献することは非常に重要な論点であると考えられる。そしてグローバルにナレッジを共有してさらに高度なシステム構築を目指す方向性も重要な論点であると考えられる。

これらの展開により、日本の医療産業が国際競争力のある基幹産業となることが期待される。

予防医療・先制医療に向けた スマートなヘルスケアの実現 ーパーソナル検査システムの開発と社会実装の促進についてー

我が国は世界に先駆けて超高齢化社会に突入しつつあり、社会として新たな対応に迫られている。医療の効率化・最適化を図るために、限られた医療資源を最適配分するとともに、健康管理から医療までを全体として高度化し、予防医療・先制医療に向けたスマートなヘルスケアシステムに変革していくことが求められる。

個人でも利用可能な簡便な検査は、受診や治療の意思決定に寄与し、医療の効率化・最適化に貢献しうる。米国では、個別センサー技術やセルフケア用総合診断機器のコンペが開催され、革新的な技術の開発とその普及利用を促進する動きとなっている。我が国でも、バイオセンサー等の技術の進歩は著しく、経済性やユーザビリティに優れた製品の開発が期待される。さらに、時系列検査データの統合利用による予防医療・先制医療等、高度なヘルスケアシステムの構築も期待される。そのようなヘルスケアシステムの構築に向けて、新たな課題に注意しつつ、技術開発と社会実装を行っていくことが必要である。

農業をめぐる IT 化の動き (2) ーハイパフォーマンスコンピューティングの活用事例を中心にー

農業技術が進歩した現在でも、年々の豊凶や品質の良否は、多くの部分はその年の気象条件に左右されるため、農業において予測は長い間の関心事である。現在、農業分野にハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) を活用した高精度の予測を取り入れる動きが起きている。

一つ目は、米国カリフォルニア州での灌漑システム管理である。ここでは HPC の活用による地域の気象予測と観測データを統合・処理し、きめ細かな水散布計画を作成しており、大量の水と電力費用の削減を実現している。二つ目は、日本の研究チームによる 3 か月先の短期季節予測による穀物の世界的豊凶予測手法の開発である。収量と土壤水分・気温の過去の実測データの関係式を求めて収量予測を行い、HPC を用いた季節予測と収量予測を結合し世界レベルの豊凶予測の可能性を示した。

農業の生産性予測においては、シミュレーションモデル、データ、そして両者間の整合などの高度化が重要である。農業の情報通信技術 (IT) による高度化は、日本の経済発展へ大きなインパクトを与えるものと捉えられ、国の競争力維持の源泉として戦略的に考えていくべきである。

本文は p.36 へ

インフラ長寿命化における道路橋の 新たな点検技術の開発

2013年11月29日にインフラ長寿命化基本計画が決定された。ここでは、安全・安心を確保するためには個別施設毎の長寿命化計画を含むメンテナンスサイクルを構築し、継続的に発展させていくことが示されている。

道路橋の点検は各施設管理者が実施しており、国管理の道路橋では、近接目視による5年に1回の定期点検が点検要領で定められている。人による近接目視は、表面の劣化・損傷は確認できるが、施設内部で起こっている劣化・損傷の確認ができない。施設の長寿命化を図りコスト縮減をさらに推し進めるためには、定期点検に施設内部の点検項目を取り入れ、劣化・損傷をできるだけ早期に発見し対処することが重要である。また、劣化・損傷のメカニズムを早期に解明し、劣化予測の精度向上に向けた研究開発を推進することが望まれる。

さらには、施設の補修・補強、新材料等に関する技術開発も進めることで、メンテナンス産業を我が国の新たな産業とし、国際競争力の強化に繋げることが期待される。2020年の東京オリンピック・パラリンピックの開催が決定した。我が国の長寿命化計画を紹介するよい機会である。社会インフラの新しい維持管理手法を確立し広く海外に示すことができれば、海外市場も視野に入れた投資ができ、メンテナンス産業関連の技術開発がより一層進むことになる。

本文は p.44 へ

各国の地球観測動向シリーズ (第7回) オランダの地球観測活動の方向性 —精密農業を支える地球観測画像への先行投資と 海外ビジネスの展開—

オランダは独自の地球観測衛星を保有していない。それにもかかわらず世界最先端の地球観測活動を行っているといえる。その理由は、自国内の精密農業や水管理などの応用だけでなく、欧州諸国・米国・ロシア・中国などの宇宙先進国に対しても地球観測応用の製品やサービスを提供するビジネスを行ってきた実績があるからである。オランダはESAの地球観測衛星の画像データを受信する他、国家予算で外国衛星の画像データを購入し、独自の地球観測衛星を保有した場合とほとんど変わりなく地球観測活動を展開することが可能となっている。特に、情報通信 (ICT) 企業においてはそのデータを活用して実用的なソフトウェアの開発に取り組むことができ、オランダの強みを獲得している。

オランダは高付加価値の農産物の生産拠点であり、農産物の輸出額が米国に次いで世界第2位という規模を誇っている。この背景には、地球観測画像データを利用した精密農業による単位面積当たりの収量の向上、農作業に必要な人件費の低減などがある。

本稿ではオランダ政府とオランダ企業が連携して推進している精密農業における衛星利用の動向などを通じて、オランダの地球観測活動の方向性を分析する。

再生可能エネルギー利用拡大のためのエネルギーストレージの研究開発動向

蒲生 秀典

概要

太陽光や風力など気象により変動する再生可能エネルギーの利用の拡大にともない、ピークシフトや平準化等を目的としたエネルギーストレージの必要性が増している。先進国を中心に電力貯蔵用の蓄電池や水素等へのエネルギー変換による貯蔵の研究開発や実証試験が進められている。また、系統用の他に今後のスマート社会における効率的なエネルギー利用においても、エネルギーストレージはキーデバイスとして注目され、各地域特性に対応した様々な利用形態における実証試験が実施されている。しかしながら現状では、普及拡大のためには、コストの低減や性能・安全性の向上など多くの研究開発課題がある。

電力用のエネルギーストレージでは、自動車など移動体用途として研究開発が進む小型軽量化・高性能化だけではなく、低コスト化や安全性の高い蓄電システムあるいはエネルギー変換貯蔵など、中長期的なエネルギーシステムとしての研究開発施策が求められる。また、電力の消費におけるエネルギーストレージ利用では、低コスト化と併せて直流給電システム構築などの電力利用の効率化や、防災利用など生活の利便性向上等の付加価値の付与が、普及促進には不可欠である。

キーワード：エネルギーストレージ，電力貯蔵，蓄電池，水素貯蔵，直流給電，再生可能エネルギー

1 エネルギーストレージの特徴と設置状況

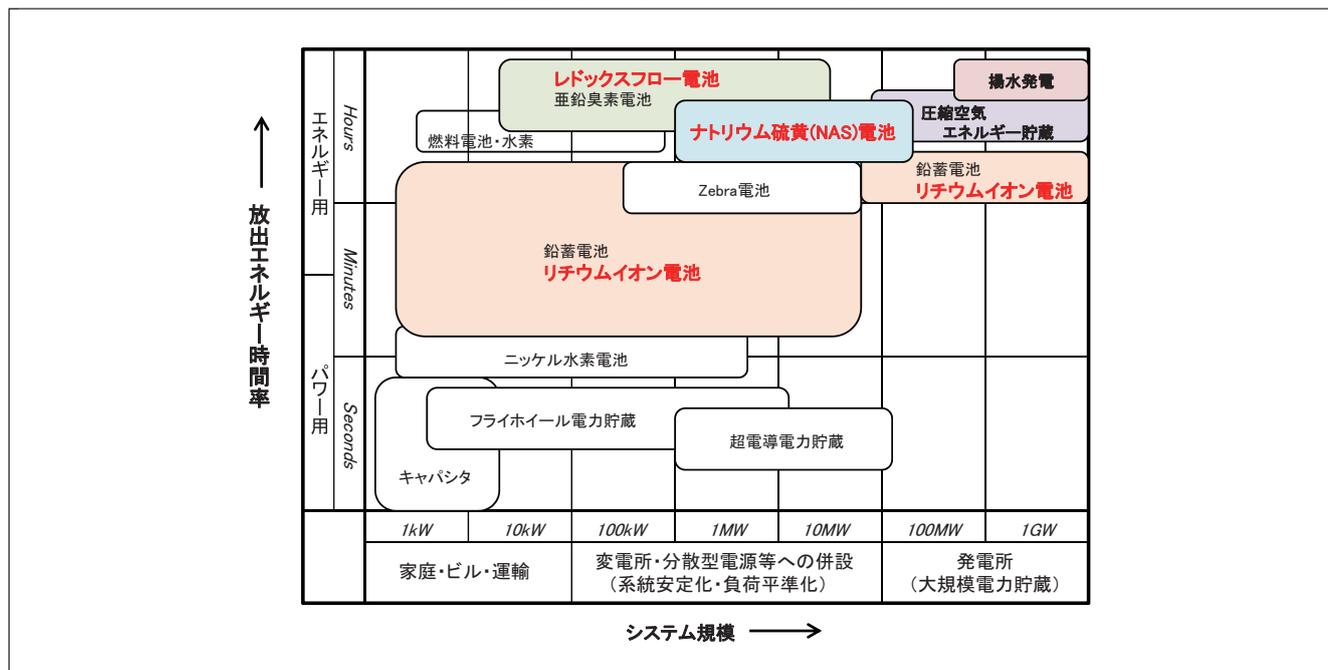
1-1 電力用エネルギーストレージの種類と特徴

再生可能エネルギーの普及・拡大を背景に、エネルギーストレージ、特に電力貯蔵の必要性が増している。化石燃料などの化学エネルギーは安定で、貯蔵・輸送が容易であるが、電力は電気のまま貯蔵することが難しく、経済性も含めたシステムの構築が課題となっている。太陽光や風力で発電した電力の貯蔵システムには、気象による発電量の変動を安定化するための余剰吸収、出力安定化、負荷平準化と、災害時などの非常用電源や移動用電源としての機能が求められる。現在研究開発中のものを含む主な電力貯蔵システムの特徴と用途を図表1に示す。

このうち経済性を含め実用化されている系統用電力貯蔵システムは、国内では主力である揚水発電と海外で実績のある圧縮空気貯蔵のみである¹⁾。また、ナトリウム硫黄（NAS）電池とレドックスフロー電池は、比較的成本が安いと、事業所や工場の非常時の補助電源として使用されている。その他のシステムは、コスト低減や材料開発などの研究が進められている。現在、国内外の実証試験に利用が進んでいるものは、いずれもエネルギー効率の高いNAS電池、レドックスフロー電池、リチウムイオン電池である（図表2）。

ナトリウムと硫黄を電極材料としたNAS電池は、日本で開発され、非常時の補助電源として海外にも普及していたが、2011年9月に発生した発火事故後安全対策が施され、最近米国を中心にコンテナ型電力貯蔵の実証などで利用が再開されている²⁾。レドックスフロー電池は、電気を蓄えるセルスタックと電解液タンクを組み合わせた大規模な蓄

図表1 主な電力貯蔵システムの特徴および用途



参考文献3を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 電力貯蔵用蓄電池の原理・特徴と課題

	ナトリウム硫黄(NAS)電池	レドックスフロー電池	リチウムイオン電池
電池原理図			
	ナトリウムイオン電導	バナジウムの酸化還元反応	リチウムイオン電導
安全性	△	◎	△
エネルギー効率	90%	82%	96%
コスト	4万円/kWh	(評価中)	20万円/kWh
特徴	大容量・低コスト	安全性が高い	高エネルギー密度、大容量
課題	高温(300°C)動作	大型(設置面積大)	コスト高

参考文献1、3を基に科学技術動向研究センターにて作成

電池で、電解液を循環させて充放電するために、安全性が高く長寿命である。日本では1990年代に精力的に研究がなされたが、最近欧米を中心に研究開発が再度活発化している⁴⁾。リチウムイオン電池は、電極間の電位差が他の電池に比べて約2倍近く大きく内部抵抗が小さいため、エネルギー密度、出力密度とも大きく、格段に高い性能を示す。小型化が容易であるため、これまで携帯端末や小型電子機器用に実用化されてきたが、近年、自動車・鉄道・航空機などの移動体にも用いられるようになった。米国では、電力貯蔵用として実証試験に

広く用いられている。リチウムイオン電池は高性能で広範囲の用途に利用できることから、国内外で低コスト化、高性能化のプロジェクトが多数進行している^{5,6)}。

一方、電気エネルギーを水素などの化学エネルギーに変換することで、貯蔵することも検討されている。余剰の電力を利用して水などを電気分解し、水素を生成し貯蔵する。水素はそのまま燃料として利用できる他、燃料電池を用いて発電することが可能である。水素の他、貯蔵や輸送が容易とされるアンモニアも検討されている。

1-2 国内の系統用エネルギー ストレージの設置状況

現在国内には、発電量が1 MW を超えるメガソーラーやウインドファームは全国に700 か所以上あるが⁷⁾、系統用や売電が目的であり、エネルギーストレージを備えた施設は、平準化・ピークシフトなどの検証を目的とした実証試験用の10 か所程度に留まっている。2012年7月の固定価格買取制度の施行以降、再生可能エネルギーによる発電設備が急速に増加し（新設の97%は太陽光発電）、北海道では太陽光や風力発電の許容量を超える恐れがでていいる。これを受けて経済産業省では、北海道電力南早来変電所にレドックスフロー電池（出力15 MW/容量60 MWh）を、東北電力西仙台変電所にリチウムイオン電池（40 MW/20 MWh）を2014年度末までに配備し、その後3年間で系統安定化の実証試験を行うことを決めている⁸⁾。また環境省では、再生可能エネルギーの拡大のために、蓄電池（リチウムイオン、NASなど）を用いた太陽光や風力発電の変動を吸収する実証事業を、東北や九州の離島など全国8地域で、2014年度から4年間で実施する⁹⁾。

2 世界の研究開発プロジェクトの 動向

米国の調査会社によると、今後10年間に全世界で1300 GWの再生可能エネルギーによる電力が系統に接続され、その変動の吸収のために2023年までに21.8 GWの電力貯蔵システムの導入が見込まれている¹⁰⁾。現在、世界各国でエネルギーストレージに関する研究開発が進められており、米国エネルギー省（DOE）では、世界のエネルギーストレージプロジェクトのデータベースをWeb上で公開している¹¹⁾。ここにあげられている世界のプロジェクト数は725件で、内水力利用が45%と最も多く、続いて、米国、欧州、日本などの先進国を中心に、蓄電池に関するプロジェクトが36%（258件）となっている。国別では、米国247件、欧州244件（スペイン51件、ドイツ40件、イタリア29件他）、中国73件、日本60件である。蓄電池では、リチウムイオン電池が最も多く74件で、レドックスフロー電池19件、NAS電池17件となっている。

2-1 米国

DOEでは2009年よりエネルギーイノベーション・ハブを運営し、大学と企業が連携し、基礎から実用化に至る一連の研究を行っている。この中で、2012年11月よりエネルギーストレージの研究領域を設け、アルゴンヌ国立研究所がリーダー機関となり、リチウムイオン電池の貯蔵性能を5倍、コストを1/5とする達成目標を掲げた、産学官による研究プロジェクトが進められている。また、エネルギー高等研究計画局（ARPA-E）では、定置用エネルギーストレージの技術領域において21件の研究プログラムが進行中で、このうち半数以上の12件がフロー電池の材料に関する研究である。他に移動体用蓄電池の領域では、リチウムイオンおよびリチウム硫黄、リチウム空気など、次世代電池関連の23件の研究が行われている¹²⁾。また、系統安定化のための実証試験が、カリフォルニア州（出力40 MW/リチウムイオン）、テキサス州（4 MW/NAS）、オハイオ州（1 MW/レドックスフロー）などで進行中である。

カリフォルニア州では、2020年までに再生可能エネルギーによる発電比率を33%にする目標を掲げ、2012年には既に20%に達している。電力安定化のためのエネルギーストレージ法が2010年に成立、2013年10月には2020年までに1.3 GWの電力貯蔵設備を導入することを電力会社に義務付けている。

2-2 欧州

欧州議会は2013年11月に採択した科学技術イノベーション推進のための新たな基本計画「HORIZON 2020」のワークプログラム2014-15において、「Providing the energy system with flexibility through enhanced energy storage technologies」が提示され、次の3テーマに分類されている。①大規模ストレージでは、再生可能エネルギーの拡大のための必要性が、②小規模ストレージでは、送電網と地域・住宅レベルの統合による新しいエネルギー利用の流れが示され、それぞれの新しいストレージの概念に対する障壁の低減を課題に掲げている。そして、③エネルギーストレージのための次世代技術では、より高い性能、耐久性、安全性、低コスト化等の技術課題をあげ、新規または改良による貯蔵技術の開発の必要性を示し、さらに再生可能エネル

ギーと分散エネルギーのコスト効率の向上への貢献を求めている¹³⁾。

ドイツ連邦政府が2013年8月に発表した「エネルギー研究報告書」によると、研究イニシアティブ/エネルギーストレージの研究提案は394件あり、水素貯蔵が72件と最も多く、続いて蓄電池が68件となっている。報告書では電気分解による水素製造と利用、蓄電池では特にレドックスフロー電池が、再生可能エネルギー普及のためには注目される技術であるとしている¹⁴⁾。ドイツでは、実証試験においても電気エネルギーを化学エネルギーに変換する水素貯蔵が複数進められている。

2-3 日本

日本では、前節で述べた実証試験の他、自動車用が主体であるが定置用電力貯蔵も視野に入れた、ポストリチウムイオン電池関連のプロジェクトと、電力の水素などへの化学エネルギー変換も含めたエネルギーキャリア関連プロジェクトが、それぞれ2013年度より10年間の予定で開始された。いずれも、文部科学省と経済産業省が基礎科学的解析と実用化技術開発で役割分担し推進される。

3 電力貯蔵による新しいエネルギー利用 ～分散型電源の拡大と電力利用の効率化～

事業所や家庭、あるいは地域などで太陽光発電などの分散型電源を利用する際には、エネルギーストレージ（蓄電システム）を導入することで、電力利用の効率化および非常時利用が可能となる。国内各地域では、分散型電源として家庭や地域に設置した太陽光・風力発電と蓄電池、あるいは燃料電池を配したシステムを構築し、実証試験が進められている。

3-1 地域特性に対応したエネルギー利用

九州、沖縄などの離島では、再生可能エネルギーを地域の分散型電源として利用する、小規模電力網（マイクログリッド）の実証試験が複数進められている。人口約5.5万人の宮古島では、50 MWの系統規模に対し、風力（4.2 MW）と太陽光（4 MW）の発

電設備があり、再生可能エネルギーの比率は16%に達している。この系統に蓄電池（4 MW/NAS電池）を設置してマイクログリッドを形成し、出力変動・周波数変動の抑制と負荷の平準化制御の実証試験を行っている。この規模でのマイクログリッドの実証例は世界で初めてであり、今後元来電力コストが高い（本島の1.7倍）国内外の離島への技術展開も検討中である¹⁵⁾。また、系統電力の20%（32.4 MW）を風力発電で賄う長崎県五島市では、島内に導入した140台のプラグインハイブリッド車（PHV）、および電気自動車（EV）と54基の充電器を、島内に構築中のスマートグリッドに組み込み、総電力量の削減と電力需要のピークシフトを検証するエコタウン実証試験を実施している¹⁶⁾。

横浜市では、約4000世帯を対象に、地域のエネルギー効率の最適化を目指すスマートコミュニティ実証事業を実施しており、地域内の系統側と需要化側に設置された蓄電池を一元的に管理する「蓄電池SCADA（監視制御システム）」が導入されている。これは地域内のメーカー・仕様の異なる大容量リチウムイオン電池（計650 kW/550 kWh）を、1つの大型蓄電池に見立て、個々の蓄電池の充放電を制御し、日間運用、短周期需給調整や緊急時の対応を行う。現在、この蓄電池制御システムとインターフェース等の規格案については、国際電気標準会議（IEC）にて議論中である¹⁷⁾。

宮城県岩沼市内では、農地に太陽光発電設備とリチウムイオン電池、さらにEVに充電する農業用充電ステーションを設置し、化石燃料によらず地産地消の再生可能エネルギーを農業に利用する国内初の試み（スマートアグリ）が行われている。農業用軽トラック型EVの他、農機具やハウス栽培の電力にも利用する。今後、風力や小水力による電力の利用にも展開していく予定である¹⁸⁾。

3-2 直流給電による電力利用の効率化

(1) エコラボ

東北大学環境科学研究科では、2010年6月にエコハウス（エコラボ）を建築し、太陽光発電（5.8 kW）とリチウムイオン電池（10 kWh）を備えた蓄電システムを直流で利用する実証試験を行っている。太陽光発電で得られる電力は直流であり、系統に流す際にはパワーコンディショナーによって交流に変換する必要がある。一方、パソコン、テレビ、携帯電話、LED照明などの電子機器も直流で動作する。したがって、系統からの電力を家

庭内で利用する場合、交流を直流に変換する必要がある。このような変換の度に10%以上の電力損失が生じている。エコラボでは、太陽光発電と蓄電池を併設し電力を直流のまま利用するシステムを構築し、電力の使用効率の向上を実証するとともに、蓄電池の必要容量設計を行い最適化した。また、2011年3月の東日本大震災では、家庭や事業所のほとんどの太陽光発電が売電用で機能しない中、自立電源を持つエコラボでは、平時どおりの稼働ができた。このシステムは被災地に貸し出され、今も電力供給を断たれた地域に電力を供給している¹⁹⁾。

(2) データセンター

クラウドサービスの世界的な進展に伴い大規模化するデータセンターでは、電力利用の効率化と給電の信頼性向上が急務となっている。最近では、Apple社やFacebook社など独自にメガソーラーや風力発電、あるいは燃料電池などのクリーンエネルギーを導入する事業者も増えている。従来から、データセンターでは系統からの電力供給が途絶えた場合に備え、大容量の蓄電池や自家発電機等を備えている。さくらインターネットでは、太陽光パネルや蓄電池が直流電源であることを利用し、元来直流で動作する半導体電子機器に直流のまま給電するシステムを開発し、交直流相互変換ロスをなくすことで、10%以上の消費電力の削減に成功している²⁰⁾。

(3) 直流マイクログリッド

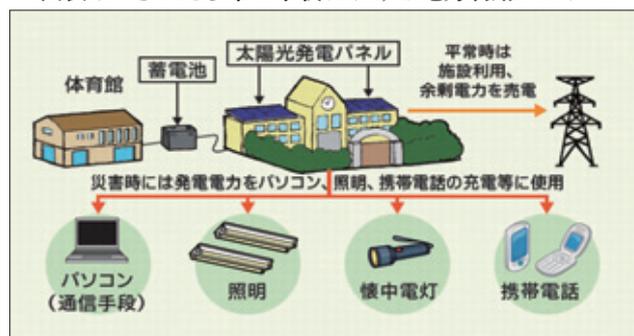
沖縄科学技術大学院大学とソニーコンピュータサイエンス研究所では、複数の住宅を使った直流マイクログリッドの実証試験を2014年度に沖縄県で実施する。変動の大きい太陽光や風力で発電した電力を蓄電池に貯え、その電力を直流で送電する。具体的には、大学のキャンパス内の住宅29棟に設置されたリチウムイオン電池で蓄電し、直流送電網を介して住宅間で電力を融通し合い、電力利用効率を評価する²¹⁾。

3-3 分散型電源の災害時利用

公立の小中学校における太陽光発電などの再生可能エネルギー設備の設置率は、2013年4月現在18%で、太陽光発電のうち停電時に利用可能な設備は25%、さらに蓄電池を持つ設備はわずか2%に留まっている²²⁾。さいたま市では2013年度から3年間で、市内の小中高152校に太陽光発電設備と

蓄電池を導入する。再生可能エネルギーを地域の電力源として拡大し、環境教育と併せて、すべての発電設備に蓄電システムを導入することで、災害時に防災拠点となる学校で電力を確保する。太陽光発電容量は合計で2.5MWを超える。発電した電力は学校内で使いながら、蓄電池に貯めて災害時にも利用できるようにするほか、余剰分を電力会社に売電する(図表3)²³⁾。他の自治体でも再生可能エネルギーの導入と併せて蓄電池を導入する動きが広がっている。

図表3 さいたま市の学校における電力利用システム



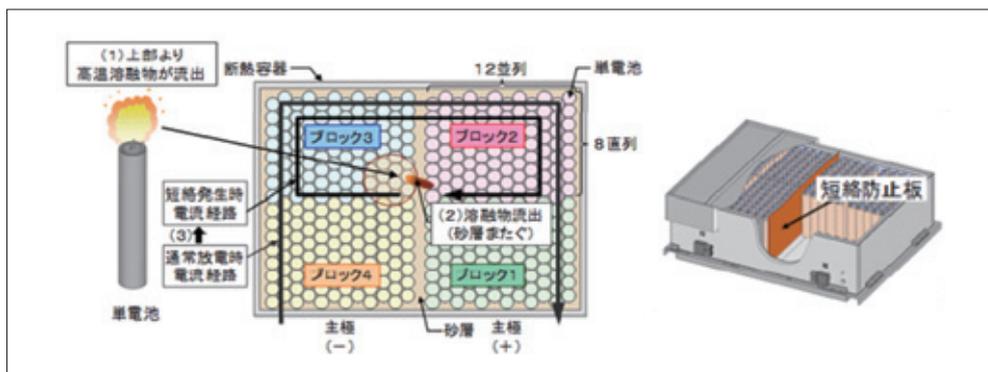
出典：参考文献 23

4 大容量蓄電池における事故と安全対策の現状

電力貯蔵用としても利用されている大容量蓄電池において、最近重大な事故が発生している。2011年9月、事業所に設置された電力貯蔵用NAS電池(200kWh)において、鎮火に約2週間を要する火災事故が発生した。メーカーは原因究明を行い、単電池384本からなる電池モジュール1台の中の製造不良の単電池1本が破壊し、高温の溶融物が流出、隣接する単電池との間で短絡が発生し電池全体に延焼したとの結果を公表している。その対策として、短絡防止板、延焼防止板、ヒューズを新たに設けるとし、第三者委員会の検証の後、2013年9月に販売を再開している(図表4)^{2, 24)}。

また、2013年1月、米国ボストン・ローガン空港において、補助動力用のリチウムイオン電池システムを搭載したボーイング787型機で発火事故が、さらに日本の国内線でも電池の不具合の警告によって高松空港に緊急着陸する事態が発生した。日米の運輸安全委員会はそれぞれ報告書を公表し^{25, 26)}、いずれも事故を起こしたリチウムイオン電池を分解した結果を示し、「熱暴走があった」としている。さらに同3月、自動車用リチウムイオン電池が相次いで過熱・発煙、溶損する事故が発生、原因につ

図表4 NAS電池の発火事故の原因と対策



出典：参考文献 24

いてメーカーでは、異物が混入し、内部短絡した可能性があるとの見解を示している²⁷⁾。

航空機や自動車など移動体用には、軽量・省スペースで高性能なリチウムイオン電池が使用されているが、一方、エネルギーストレージとしての定置用には、性能面では劣るが発火の可能性が小さく安全性が高いとされる、オリビン型リン酸鉄やチタン酸リチウムを正極に用いたリチウムイオン電池の利用が進んでいる。オリビン型リン酸鉄正極リチウムイオン電池では、米国の第三者安全科学機関 UL²⁸⁾ やドイツの国際的認証機関テュフ・ラインランド²⁹⁾ の安全規格の認証を得た製品が販売されている。

今後、系統用ではより大規模化し、また分散電源用では家庭などの一般消費者の身近な環境で蓄電システムが利用されるようになるため、安全性の確保はより重要な課題になる。

5 まとめと提言

二次エネルギーとして需要が増大する電力の貯蔵を目的としたエネルギーストレージは、今後再生可能エネルギー利用の拡大や、スマート社会における効率的エネルギー利用において、キーとなる重要なデバイスとなる。現状では、コストの低減や性能・安全性の向上など多くの研究開発課題がある。科学技術イノベーションに資する施策として、特に以下に示す研究開発の推進が求められる。

① 系統および地域の電力安定化のための電力貯蔵システムの研究開発の推進

先進国を中心に各地域で民官共同プロジェクトとして、電力貯蔵デバイスやシステム開発、実証試験が進められている。日本の蓄電池の研究開発は自動車用の高性能次世代リチウムイオン電池に集中しているが、欧米では系統安定化のために低

コストのレドックスフロー電池や、水素変換・貯蔵の研究開発が活発化している。日本でも、地球環境問題を考慮した再生可能エネルギーの普及・拡大は不可避であり、これを支える実用性が高く低コストで安全性の高い電力貯蔵システムや、さらに中長期的視野に立った水素等エネルギー変換貯蔵の研究開発を推進する必要がある。また現在の各省庁単位の研究開発や実証試験の結果を十分に検証・活用し、国の総合政策としての方向性を示すことが望まれる。

② エネルギーストレージを活用した直流給電システム開発および自動車用蓄電池利用の推進

電力の消費におけるエネルギーストレージ利用では、低コスト化と併せて電力利用の効率化や防災利用など生活の利便性の向上等の付加価値の付与が普及促進には不可欠である。事業所や家庭あるいは地域では、太陽光発電、蓄電池、家電機器、LED照明などが直流駆動である点に着目し、直流給電システムの構築による、電力消費の高効率化、自立電源の構築によるセキュリティの向上のための研究開発を推進することが求められる。直流送電・給電については、電圧規格等の標準化を世界を先導し進める必要がある。また、一般家庭ではEVやPHVの自動車を電源として利用することで、設置コストの低減と利便性の向上が図れ早期普及が期待できる。

③ 電力貯蔵システムの安全性向上のための研究開発の推進

電力貯蔵システムに適用されているリチウムイオン電池やNAS電池では、近年発火事故が起きており、安全性の確保が急務である。電池は構成上薄い液体の電解質層を介して電極が対向しており、短絡しやすい構造である。安全性の向上には、電池内部で複雑に入り組む固液界面の材料解析が必須で、基礎科学的知見から実セルの解析をする手法を確立する必要性があり、公的研究機関において安全解析および実セルの負荷試験を行える研究施設を早急に整備することが求められる。

参考文献

- 1) 太田健一郎監修、「再生可能エネルギーと大規模電力貯蔵」、日刊工業新聞社、2012年
- 2) 玉越富夫、「最近のNAS電池の状況」、第29回電力貯蔵技術研究会、2013年12月
- 3) NEDO再生可能エネルギー技術白書、NEDO HP; <http://www.nedo.go.jp/content/100544824.pdf>
- 4) 「欧米を中心に電力貯蔵用フロー電池の研究開発が再び活発化」、科学技術動向、2012年7・8月号、p6;
<http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/2309/1/NISTEP-STT130-6.pdf>
- 5) 河本洋、「自動車用高出力・大容量リチウムイオン電池材料の研究開発動向」、科学技術動向、2010年1月号、p19;
<http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/2113/1/NISTEP-STT106-19.pdf>
- 6) 辰巳国昭、「二次電池ロードマップ」、第29回電力貯蔵技術研究会、2013年12月
- 7) Electrical Japan HP; <http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/energy/electrical-japan/type/8.html>
- 8) 経済産業省 HP; <http://www.meti.go.jp/press/2013/07/20130731007/20130731007.pdf>
- 9) 環境省 HP; <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16516>
- 10) Navigant Research 社 HP; <http://www.navigantresearch.com/research/energy-storage-for-wind-and-solar-integration>
- 11) DOE Global Energy Storage Database、米国エネルギー省 HP; <http://www.energystorageexchange.org/projects>
- 12) 米国高等研究計画局 (ARPA-E) HP;
http://arpa-e.energy.gov/Portals/0/Documents/Projects/OPEN2012_ProjectDescriptions_FINAL_112812.pdf
- 13) 欧州議会 HP; http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/main/h2020-wp1415-energy_en.pdf
- 14) ドイツ連邦政府 HP; <http://www.bmw.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/bundesbericht-energieforschung-2013,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- 15) 宮古島マイクログリッド; http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2701U_X20C12A4000000/
- 16) 五島市エコタウン構想; http://www.cev-pc.or.jp/chosa/pdf_n/japanese/8-1.pdf
- 17) 横浜スマートシティ HP; <http://jscp.nepc.or.jp/article/jscp/20130128/338314/print.shtml>
- 18) ニチコン HP; <http://www.nichicon.co.jp/new/new160.html>
- 19) 東北大学環境科学研究科 HP; http://www.kankyo.tohoku.ac.jp/pdf/ecollab_j.pdf
- 20) NTT データ先端技術 (株) HP; http://www.intellilink.co.jp/all/topics/2013/03/21/data_center.html
- 21) ソニーコンピュータサイエンス研究所 HP; http://www.sonycs.co.jp/research_gallery/open-energy-system.html
- 22) 再生可能エネルギー設備等の設置状況に関する調査結果、文部科学省 HP;
http://www.mext.go.jp/a_menu/shisetu/ecoschool/detail/_icsFiles/afildfile/2013/10/18/1296649_01.pdf
- 23) さいたま市 HP; <http://www.city.saitama.jp/001/009/003/p030777.html>
- 24) 「NAS電池の火災事故の原因、安全強化対策と操業再開について」;
日本ガイシ (株) HP; <http://www.ngk.co.jp/news/2012/20120607.html>
- 25) N T S B Interim Factual Report; http://www.nts.gov/investigations/2013/boeing_787/interim_report_B787_3-7-13.pdf
- 26) 国土交通省 HP; http://www.mlit.go.jp/jtsb/flash/JA804A_130116-130327.pdf
- 27) 三菱自動車工業 (株) のリコール業務の改善施策の実施状況報告について、国土交通省 HP;
http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08_hh_001279.html
- 28) 米国第三者安全科学機関 UL; http://www.ul.com/japan/jpn/pages/newsroom/newsitem.jsp?cpath=/japan/jpn/content/newsroom/news/general/data/pr_wirelessjapan_20120521153300.xml
- 29) ドイツ安全規格 TUV; http://www.tuv.com/media/japan/service/151batterytesting/Battery_Jp_2011_final_web.pdf

..... 執筆者プロフィール



蒲生 秀典

科学技術動向研究センター 特別研究員

企業の研究所にてカーボンナノチューブや半導体薄膜を微細加工した微小電子源と表示・照明デバイス応用の研究に従事。その間、産総研・物材機構・大学にて外来・客員研究員として共同研究に携わる。2010年4月より現職。日本学術振興会真空ナノエレクトロニクス第158委員会委員、表面技術協会学術委員。京都大学博士（工学）。

日本の製造業システムの医療分野展開、 国際展開の可能性について

—TQC、TQMの日米の病院における取組みと日本の課題—

橋本 新平 小笠原 敦

概 要

これから世界的に高い成長が見込まれる分野として、医療・ヘルスケア分野が注目されているが、その中心を成す医薬、医療機器のハードウェア技術だけでなく、それらを造ることを支援するノウハウや、高い水準の品質を確保するノウハウ等も高い付加価値の源泉を成すことを考慮する必要がある。

特に基幹産業として日本を支え続けてきた自動車産業やエレクトロニクス産業で取り組んできたQC (Quality Control: 品質管理)、QM (Quality Management: 品質マネジメント) は、世界の最先端を行く実力があり、その運用も含めた優れたノウハウを持っている。

このQC、QMの概念を医療システムに導入し、病院経営変革の実践を行っている病院の例として、日本の飯塚病院 (福岡県飯塚市、1116床、地域医療支援病院) と米国のヴァージニア・メイソン病院 (ワシントン州シアトル市、病床数は336であるが5500名のスタッフを擁する) がパイオニアとして挙げられる。

これらの病院の取組の本質は、医療に理論的品質管理を導入し標準化を進めることにある。我々は次世代のために、社会の健康を追及・推進する医療システムの構築を目指すとともに、アカウンタブルな (説明責任のある) 医療組織の実現を目指す必要がある。

そのためにも、現場の医療関係者が問題を解決し、課題を達成する持続的品質改善を追及し続けるシステムの構築、それを実現するアカウンタブルな組織の構築のために、日本の製造技術から生まれた優れた生産管理システム、品質管理システムが貢献することは非常に重要な論点であると考えられる。そしてグローバルにナレッジを共有してさらに高度なシステム構築を目指す方向性も重要な論点であると考えられる。

これらの展開により、日本の医療産業が国際競争力のある基幹産業となることが期待される。

キーワード : QC, TQM, 品質管理, 医療, 標準化, 国際競争力

1 はじめに

近年日本では輸出額から輸入額を引いた貿易収支の低下が進行し、2011年以後は赤字となっている。また輸出価格指数と輸入価格指数の比をとった交易条件指数からは、資源や材料等の輸入価格上昇分を製品・サービス等の輸出価格に十分に転嫁しきれていない、付加価値を創出できていないことが指摘されている。

これは日本の製造業の産業構造が加工貿易型の構造となっていることに多くは起因しており、ハードウェアとしての製品を、製造原価を下げる努力によって付加価値を捻出するという従来の日本型の手法の限界を示しているともいえる。

一方日本と同じく製造業を基幹産業とするドイツでは、近年輸出額を大きく伸ばしているが、輸出に占めるサービス割合の上昇、付加価値額の増大を実現している。単に製品を売るのではなく、製品にノウハウをサービスとして提供したり、さらに踏み

込んでコンサルティングをしたりすることにより高い付加価値を創出することに成功している。

日本が今後大きな産業構造展開を図るに際し、単に新しい成長分野にシフトするだけではなく、従来培われた技術資産やノウハウやいかに成長分野に展開できるかが問われている。

これから世界的に高い成長が見込まれる分野として、医療・ヘルスケア分野が注目されているが、その中心を成す医薬、医療機器のハードウェア技術だけでなく、それらを造ることを支援するノウハウや、高い水準の品質を確保するノウハウ等も高い付加価値の源泉を成すことを考慮する必要がある。

特に基幹産業として日本を支え続けてきた自動車産業やエレクトロニクス産業で取り組んできたQC (Quality Control: 品質管理)、QM (Quality Management: 品質マネジメント) は、世界の最先端に行く実力があり、その運用も含めた優れたノウハウを持っている。

このQC、QMの概念を医療システムに導入し、病院経営変革の実践を行っている病院の例として、日本の飯塚病院(福岡県飯塚市、1116床、地域医療支援病院)と米国のヴァージニア・メイソン病院(ワシントン州シアトル市、病床数は336であるが5500名のスタッフを擁する)がパイオニアとして挙げられる。

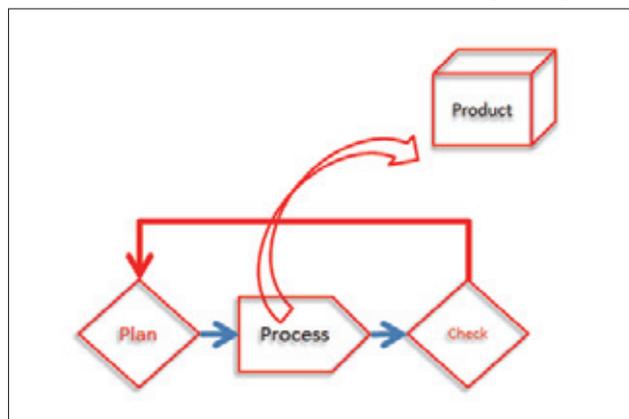
2 QCとは

QC (Quality Control) は、狭義の意味ではコントロールとしての品質管理を指し、JISでは「品質保証行為の一部をなすもので、部品やシステムが決められた要求を満たしていることを、前もって確認するための行為」と規定している。広義の意味での品質管理は、品質マネジメント (Quality Management) と呼ばれ、JISでは「品質要求事項を満たすことに焦点を合わせた品質マネジメントの一部」と規定している。¹⁾

日本ではこの品質マネジメントを、石川馨に代表される日本で開発された特性要因図等の要因分析手法を発展させて、プロセスおよび品質管理の標準化が産業界で試行され、トヨタ生産方式に代表される生産管理手法、品質管理手法が生み出されてきた。

これらの手法は脳の思考過程を十分に考慮して設計がなされている。人間はある目的をもって行動するとき、まず行動プロセスを描き、これを実行するが、往々にして「To err is Human: 人は誰でも

図表1 Production Flow Unit Chart (PFUC)



脳の機能としてのプロセスからヒトの技術と必要なモノから製品が実現される。一方プロセスに対して脳内で科学的な改善(品質管理)が機能する。両者を合わせたものを通常生産システムと呼んでいる。

出典: 参考文献3を基に科学技術動向研究センターにて作成

間違える」事が起こる。これの対応として長いヒトの歴史の中では問題や方向性をチェックする能力を主に前頭連合野で培ってきた^{2,3)}。

この流れを、設計図を描くPlan、標準を基に作業するDo、これを監視・測定するCheck、抽出された問題を解決する(Act)に体系化し、このサイクル(PDCAサイクル)を持続的に廻すことによって、さらに高度な製品品質の保証、標準化を図る仕組みが提案された⁴⁾。

トヨタ生産システムに代表される日本の生産システムは、プロセスから製品を製造する技術的部分(生産管理)と、そのプロセスに改善を加える科学的的部分(品質管理)の両機能が包含されたものとなっている(図1)。

3 飯塚病院の取組み

飯塚病院では1992年からQC (Quality Control: 品質管理) 活動を導入した。飯塚病院ではこの製造業における生産管理システム、品質管理システムの医療分野への導入にあたっては、最終的に個々の問題や課題の品質管理ではなく、戦略的方針展開に加えて総合的な品質管理活動を目指す観点から、TQM (Total Quality Management: 総合的品質管理) と呼んでいる)。

QC活動とは各部署の問題や課題を、標準化された問題解決手法で解決しプロセスに改善を加えることである。この標準化された問題解決手法は、「QCストーリー」と名付けられ、①テーマ選定、②現状

把握、③要因分析、④対策立案、⑤対策実行、⑥効果判定、⑦歯止め・標準化が主な内容である。

テーマ選定は、当該プロセスから発生する問題・課題の抽出と考えられ、現状把握はプロセスと品質管理に関わるヒト、モノ、情報および、そこに潜む問題・課題を把握することと考えられる。また、要因分析ではプロセスおよび品質管理に潜む問題の発生する要因を追及し、その根本要因を見出す事であり、この根本要因に対して対策を立案、実行、効果判定を行って、改善が認められた場合、プロセスやこれに関わるヒト、モノ、情報等の品質管理の機能の変更を行い新たな標準化を進める流れとなる。

製造業において品質管理システムは国際ISO9001、9002で規定されているが、各組織の品質管理システムの構成要素は、ISO9001の要求項番 Requirement4 から8の項目に含有されている⁵⁾。

①品質管理システム【QMS】、②管理者の責任【Management Responsibility】、③資源の運用活用【Resource Management】、④製品実現【Product Realization】、および⑤監視・測定・分析・改善【Monitoring, Measurement, Analysis, and Improvement】である。

飯塚病院は2007年よりISO9001を採用し、品質管理システム【QMS】の基本構造に則り運用している。

「管理者の責任」を明確にするために、「相互チーム内部監査 Mutual Team Audit」を行っている。例えば心臓血管外科部長、病棟師長、外来師長、共働するリハビリ指導者および必要に応じて事務部署長

を含めたチームと、それとは別に形成された消化器内科のチーム等とが監査、被監査を行う相互内部監査である。このシステムを採用した理由は、品質管理の中心はリーダーシップであるとの認識である。

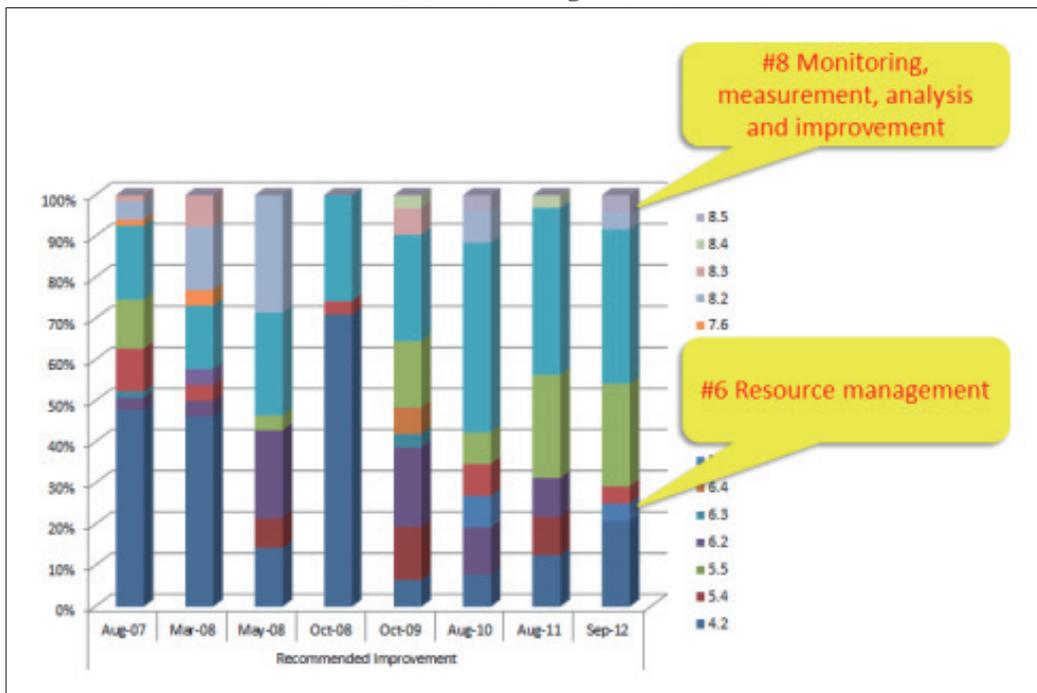
リーダーが組織のQMSを監査できる力量を持ち、問題点を把握し、これを課題としてスタッフと共に改善を加える基本的な持続的品質管理の機能を構築することが重要である。

さらにチームを組むことで当該診断・治療プロセスとそれを支援するプロセスを含めた全工程を監視・測定し各作業現場の問題や課題を共有することで、要因分析や問題解決能力を結集でき、迅速で確実な改善を目指すことができる。これは生産システムにおける単位作業間の連結をスムーズにするためのコミュニケーションの強化が図れることに重なる。

次に、内部監査の結果は、改善推進本部がまとめて最終的に院長に報告される。内容としては、各部署の持つ良い点と、問題点が報告される。良い点はそれを生み出す当該組織の持つ要因な詳細の機能から抽出し、必要に応じて横展開を行う。問題点も同様に抽出し、改善して新たな標準化の方向性を提言することになる。

これまでの内部監査で議論された内容を項目別に表にしたものが(図表2)である。これからわかることは、要求項目6(資源の運用・活用)と項目8(監視・測定・分析・改善)の、特に監視・測定についての議論が少ないことが判る。資源の運用・活

図表2 相互内部監査で議論 Dialogue された要求項番の推移



Dialogue が少ないことは、ナレッジ・マネジメントの観点から暗黙知や形式知に乏しいことを意味する。

出典：参考文献6

用のうち、特に人的資源に関しては、技術と品質管理の力量が不可欠であるが、チーム内の共通の課題として認識されていないと思われる。これは技術と品質管理に関する標準化が行われていない（または、形式知化されていない）ものと理解される。

「QCストーリー」では、現状把握において監視・測定を必須としているが、実は多くの病院組織には品質管理指標としての監視・測定が不備なことを示唆している。この結果を踏まえ、現在、飯塚病院では資源の運用・活用に関しては、教育カリキュラムをピッツバーグ大学メディカル・センター（ピッツバーグ市）の協力で実施、監視・測定・分析・改善に関してはチーム医療導入の一環として不可欠なアウトカムメジャーメントシステムを MD Anderson Cancer Center（ヒューストン市）の協力を得て実施し、世界標準を目指して運用を行っている⁶⁾。

4 ヴァージニア・メイソン病院の取組み

ヴァージニア・メイソン病院では2002年よりトヨタ生産方式を取り入れ、検討を行ってきた。その背景には医療過誤をいかに防ぐかという課題や、医療スタッフのより高い生産性の実現によって実際の医療行為により多くの時間を割くことが可能になるかという課題への問題意識がある。

同病院のゲイリー・カプラン院長は、米国の製造業でもトヨタ生産方式を導入して劇的な経営改善を実現したとの話を聞き、経営陣、医師、スタッフまで含めて大挙してトヨタ自動車の工場を訪れ、カンバン方式やカイゼンの手法を取り入れた。

彼は当時トヨタ生産方式を病院経営改善に取り入れ変革に成功した病院経営者として認められ、米国IHI（Institute for Healthcare Improvement）の品質管理会議年次フォーラムの中心的指導者の一人でもある。

ヴァージニア・メイソン病院の取組みでは、ただ「顧客満足」を掲げるだけではなく、問題抽出の手法であるVSM（Value Stream Map）を開発して全ての診断・治療プロセスから患者を待たせるプロセスを別プロセス External Set-up にすること等で取り除き、所謂 Just In Time を構築し、患者中心の医療プロセスを確立する事であった。

品質管理に関しては、ヴァージニア・メイソン研究所（VMI）を設立し、改善推進室が中心となり生産システムの品質改善と教育を行っている。

毎年30名程度が名古屋のトヨタ工場を訪れトヨタ生産方式を学び続けているなど、日本で開発されたものづくり技術であるトヨタ生産方式が、米国シアトルで異業種である医療分野においてヴァージニア・メイソン生産方式（VMPS）として展開されている。

日本の医療機関とは2009年から飯塚病院麻生泰会長の下、飯塚病院と医療のTQM推進協議会（理事長：上野鳴夫氏）との共催でVMMS kaizen Seminarを行っており、シアトルに毎年20名を超える医療関係者が日本側からも訪れてVMPSを学び、各々の病院の生産性の改善、品質管理の改善に取り組んでいる。

5 国際的な展開からの示唆

米国での熱心な取組は、当初日本側では医療以外の別収入が獲得できるからであろう（生産管理手法、品質管理手法がコンサルティング事業となる）と考えていたが、その効果がナレッジ・マネジメントにおけるスパイラル・アップの構造⁷⁾や持続的品質改善に不可欠なプロセス指向や標準化を推進する機能⁸⁾を持っていることに気付かされることとなった。

ヴァージニア・メイソン病院が用いている教材は、ISO9001に含有される品質管理システム【QMS】、管理者の責任【Management Responsibility】、資源の運用活用【Resource Management】、製品実現【Product Realization】、および監視・測定・分析・改善【Monitoring, Measurement, Analysis, and Improvement】を網羅する【VMPS】の標準化であり、これが事例の集積を重ねるに従って持続的改善が行われていることが判明した。

また、病院の視察からスタッフは、当該部署においてモノ・情報のみならず、本来不可視なヒトの作業プロセスおよびその改善点を説明することで、文書化と標準化およびプロセスが明確に連動していることを学習することも判明した。それは、彼らが日々の改善活動から暗黙知（Implicit or Tacit Knowledge）を獲得し、共同化（Socialization）し、文書化し、発表（Dialogue）することで形式知化（Explicit Knowledge）を促進するプロセスに他ならない。さらに米国IHIの品質管理会議年次フォーラム等で世界からの新たな形式知との結合化（Combination）を進め、ナレッジ・マネジメン

トにおけるスパイラル・アップを着実にやっているといえる。

このフォーラムは国家の医療戦略と方針を共有し、国家と現場が一体となって最善の方向性を模索し課題達成の実現を目指しており、品質管理の基本にかなった取組であると考えられる。政府が方針を出し、現場である各医療関係施設が方針を展開し、問題を解決して課題達成に挑む、まさに国家レベルでの TQM の実現と見なすことができる。

現在①品質や満足度を含めた患者のケアの改善【Improving the patient care (including quality and satisfaction)】、②地域社会の健康の改善【Improving the health of populations】、並びに③国家財源に占める医療費の削減【Deducing the per capita cost of health care】を大きな“3つの課題 (Triple Aim)”として掲げ、方針展開している。

また米国の医療研究の中心であるテキサス・メディカルセンターにある MD Anderson がんセンターとの連携では、チーム医療 (Multidisciplinary Medicine) の高度化を目指しているが、ここでは、これまでの診療科毎の診断・治療の数と成績を評価する部門中心の評価 (Division-centered) から、患者一人一人に対する一連の診断・治療のアウトカムを評価する真の患者中心 (Patient-centered) な評価の医療への変革を目指している。

飯塚病院と MD Anderson がんセンターは、アウトカムメジャーメントシステム (OMS: Outcome Measurement System) の開発を開始し、説明責任のある医療組織 (ACO: Accountable Care Organization) への懸命な努力を続けている。MD Anderson がんセンターでは、国際的なアカデミックプログラム (GAP: Global Academic Program) を世界各国のがん治療施設と運営している。これはがん治療に関わる全ての部署のナレッジ・マネジメントを通して、世界各国の形式知と結合化 (Combination) を行っているところに大きな意義があり、結果としてヴァージニア・メイソン病院の仕組みと同様の成果を得ている。

6 日本の課題

ナレッジ・マネジメントに不可欠な要素は、暗黙知を把握し、これを形式知に変え、さらに発表 (Dialogue)、「見える化」して、他の形式知と比較検討・結合し、新たな知見を得て高次の形式知に至ることである。ヴァージニア・メイソン病院や MD

Anderson がんセンターは言葉の壁に悩まされることなく国際レベルでの結合化 (Global Combination) を容易に行っている。日本でも多くの品質管理責任者が多くの国内の品質学会に参加しその知見や力量を向上させているが、世界標準のために IHI フォーラムに参加し、Global Combination が行えているかといえば、言葉の壁が立ちばかり、必ずしも主導的立場に立てていないのも現状である。

しかしトヨタ生産方式をはじめとした、製造業における生産管理手法、品質管理手法は世界トップの競争力を誇る。グローバルな非常に激しい競争で培った、日本の自動車産業、電機産業等製造業のノウハウを今後最も成長が期待される医療分野に展開するためには、医療界側の努力だけでなく、製造業側も積極的にノウハウの応用・展開を図って行く必要があると考えられる。

単に製品を売って加工貿易型で利益を得るのではなく、ノウハウをサービスやコンサルティングとして展開していくことも今後の産業構造の転換という観点からも求められるところである。

そして生産管理、品質管理で世界のトップに立つことは標準化で世界のトップに立つという概念にもつながっており、早期の展開が望まれる。

7 おわりに

本稿で述べてきた趣旨の最大の点は、医療に理論的品質管理を導入し標準化を進めることにある。我々は次世代のために、社会の健康を追及・推進する医療システムの構築を目指すとともに、アカウントブルな (説明責任のある) 医療組織の実現を目指す必要がある。

そのためにも、現場の医療関係者が問題を解決し、課題を達成する持続的品質改善を追及し続けるシステムの構築、それを実現するアカウントブルな組織の構築のために、日本の製造技術から生まれた優れた生産管理システム、品質管理システムが貢献することは非常に重要な論点であると考えられる。また、グローバルにナレッジを共有してさらに高度なシステム構築を目指す方向性も重要な論点であると考えられる。

これらの展開により、日本の医療産業が国際競争力のある基幹産業となることが期待される。

本稿の執筆にあたり、VMPS を開発したヴァージニア・メイソン病院のゲイリー・カプラン院長、ダイアン・ミラー副院長、また長年に亘り日本の医療

における TQM 活動を持続し、国際連携も積極的に推進された、飯塚病院の田中二郎院長ならびに安藤廣美

特任副院長から詳細なる多くの情報を頂くとともに、全般的にご指導を頂いたことに深謝する次第である。

参考文献

- 1) <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%93%81%E8%B3%AA%E7%AE%A1%E7%90%86>
- 2) Chip Heath and Dan Heath. (2010) . Switch: How to change things when change is hard. New York: Broadway Books.
- 3) Hiromi Ando, Yutaka Aso, and Jiro Tanaka. (2012) . Meta-Management: Management for management using Production Flow Unit Chart (PFUC) . Storyboard in 24th Annual National Forum on Quality Improvement.
- 4) 石川 馨. (1981) . 日本的品質管理：TQC とは何か？ 日科技連
- 5) 上原鳴夫、黒田幸清、飯塚悦功、棟近雅彦、小柳津正彦. (2003). 医療の質マネジメントシステム：医療機関における ISO 9001 の活用 . 日本規格協会
- 6) Hiromi Ando, Jiro Tanaka, Fumio Fukumura, and Nana Tateishi. (2013) . Meta-Management II: Management for Management using Checklist based on ISO 9001. Storyboard in 25th Annual National Forum on Quality Improvement.
- 7) Ikujiro Nonaka and Hirotaka Takeuchi. (1995) . The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford University Press.
- 8) Paul Plsek. (2014) . Accelerating health care transformation with lean and innovation: The Virginia Mason experience. New York: CRC Press.

..... 執筆者プロフィール



橋本 新平

科学技術動向研究センター 客員研究官

高校・大学時代はヒコウ少年、大学では流体力学を専攻せるも商事会社に就職、アメリカでゼロスタートの事業を立ち上げ、2度の米国駐在を経験。現在は医療と教育関連事業に従事。



小笠原 敦

文部科学省科学技術動向センター長

ソニー株式会社にて SOI MOS デバイス、半導体レーザーの研究に従事した後、本社 R&D 戦略部にてコーポレートラボのマネジメント、CTO 補佐に従事。その後経済産業省、独立行政法人産業技術総合研究所の技術革新型企業創生プロジェクト（ルネッサンスプロジェクト）、サービスイノベーション、国際産学官連携拠点つくばイノベーションアリーナの立ち上げに携わった後、独立行政法人理化学研究所を経て現職。

予防医療・先制医療に向けた スマートなヘルスケアの実現

—パーソナル検査システムの開発と社会実装の促進について—

本間 央之

概要

我が国は世界に先駆けて超高齢化社会に突入しつつあり、社会として新たな対応に迫られている。医療の効率化・最適化を図るために、限られた医療資源を最適配分するとともに、健康管理から医療までを全体として高度化し、予防医療・先制医療に向けたスマートなヘルスケアシステムに変革していくことが求められる。

個人でも利用可能な簡便な検査は、受診や治療の意思決定に寄与し、医療の効率化・最適化に貢献しうる。米国では、個別センサー技術やセルフケア用総合診断機器のコンペが開催され、革新的な技術の開発とその普及利用を促進する動きとなっている。我が国でも、バイオセンサー等の技術の進歩は著しく、経済性やユーザビリティに優れた製品の開発が期待される。さらに、時系列検査データの統合利用による予防医療・先制医療等、高度なヘルスケアシステムの構築も期待される。そのようなヘルスケアシステムの構築に向けて、新たな課題に注意しつつ、技術開発と社会実装を行っていくことが必要である。

キーワード：健康，医療，検査，バイオセンサー，コンペ

1 はじめに—ヘルスケアの 効率化の必要性

1-1 日本での医療資源の制約と効率化

我が国は世界に先駆けて超高齢化社会に突入しつつある。医療費は、抑制策が講じられつつも、医療の高度化等も加わって、将来にわたって増大する見通しである¹⁻³⁾。必ずしも余裕のない財政や、2008年からの医学部定員増にもかかわらず予想される実働医師不足⁴⁾といった資源の制約のもと、質を維持・向上させつつ、ヘルスケア（医療、健康管理）全体を効率化・最適化することが求められる。効率化に向けて、医療費・療養費（柔道整復等）の顕著な地域差^{5, 6)}や医師の不足・偏在（地域、診療科）のように、制度面の役割が大きい分野もある一方、べき分布的に偏在する高額医療^{7, 8)}に対する遺伝子

治療・再生医療や介護に対するロボットのように、予防・診療の研究開発が貢献しうる分野もある。

1-2 米国での効率化につながる動き

米国での医療費適正化につながる動きとしては、各診療科学会の協力による、不必要な費用とリスクを生じさせる過剰な検査と治療のリスト作成の取り組み‘Choosing Wisely’⁹⁾や、費用削減が主目的ではないが、米国予防医学専門委員会（U.S. Preventive Services Task Force：USPSTF）による、エビデンスの体系的評価に基づく検診の推奨グレード決定等がある（USPSTFは、普及している検診について、害が利益を上回ると勧告して、各診療科の学会と対立することもある¹⁰⁾）。また、米国医師会内科誌では、‘Less Is More（少ない医療が

良い健康をもたらす)' が2010年以來トピックスとしてシリーズ化している。このような個別診療行為の適正化に加え、ICT化や新技術の開発によって、健康管理から医療までを高度化し、全体としてスマートなヘルスケアシステムの構築につながるような動きもある。例えば、2009年2月に成立した米国再生・再投資法の中の「経済的および臨床的健全性のための医療情報技術に関する法律 (Health Information Technology for Economic and Clinical Health Act : HITECH 法)」に基づき、基準「意義ある利用 (Meaningful Use)」を設定して電子健康記録 (Electronic Health Record : EHR) の導入にインセンティブを支払っている¹¹⁾。

1-3 新たな検査技術による効率化

比較的多くの費用や時間を要する検査に対し、診療現場 (point-of-care : POC) や市販 (over-the-counter : OTC) で利用可能な簡便・迅速な検査は、患者の受診や医師の治療の意思決定を適正化したり、生活習慣改善等のセルフケアの充実につながったりと、ヘルスケアの効率化に貢献しうる (特に我が国の高齢者においては、必要性の低い受診が多発している可能性が示唆されている¹²⁾)。米国では、費用効果的で信頼性のある迅速な家庭用検査が、米国食品医薬品局 (U.S. Food and Drug Administration : FDA) により多数承認されている。2013年9月には、Theranos社が、米国最大手薬局チェーン Walgreen の店舗で、1滴の血液から数時間で結果を得られる、臨床検査施設改善修正法 (Clinical Laboratory Improvement Amendments : CLIA) 認定の血液検査サービスを展開することが発表された。技術革新によりさらに、簡易検査の適用領域や使用者の拡大につながることを期待できる。実際に、日常生活にイノベーションを起こそうという動きがあり、特に携帯デバイスや携帯端末を用いたヘルスケア「モバイルヘルス (mHealth)」において顕著である。以下、そのようなイノベーション推進の例を紹介し、我が国への示唆を示す。

2 パーソナル・ヘルスケアのブレークスルーに向けた動機づけ

我が国においても、2013年に開始した文部科学省の「革新的イノベーション創出プログラム (COI STREAM)」にあるように、センシング技術の健康への活用を促進する動きは活発化している。一方ここでは、我が国にないような、社会・ビジネスから個人までの話題に富んで繰り返されている、時間をかけた世界的コンペについて紹介する。検査関連の大型のコンペとしては、下記以外に、米国で関心が高い脳震とうに関する、賞金総額最高2,000万ドルの 'Head Health Challenge' (主催：ナショナル・フットボール・リーグ、ゼネラル・エレクトリック社、アンダーアーマー社) も進行中である。

2-1 Xプライズ財団によるコンペ

民間による最初の有人弾道宇宙飛行を競うコンペで有名になった米国のXプライズ財団は、人類のための根本的なブレークスルーをもたらすことによって、新たな産業の創出と市場の再活性化を刺激することを使命とし、賞金を付けたコンペを開催している。毎年、'Visioneering' と呼ばれる会議に世界中から思想的リーダーを集めて議論し、世界のどの挑戦課題がコンペで解決されるのか優先順位を付けている。現在、パーソナル検査機器関連で2件のコンペを実施しており、それぞれモバイル関連企業の米国クアルコム社のクアルコム財団とフィンランドのノキア社が資金を提供している。

2-2 クアルコム・トリコーダー・Xプライズ

2-2-1 コンペ概要

クアルコム・トリコーダー^{注1)}・Xプライズは、「ヘルスケアを手のひらに」というキャッチフレーズの、賞金1,000万ドルの世界的コンペである¹³⁾。発展途上国の医療従事者不足と米国の膨張する医療費が発足の動機となっている。診断の技能を不要とし、健康評価を消費者の日常の一部とするこ

注1 トリコーダー：米国のSFテレビドラマシリーズ『スタートレック』に出てくる、宇宙船の乗組員が使用する携帯多機能分析装置であり、全身を診察できる。

とを目的としている。本コンペは、信頼性のある診断を「健康消費者」自身が家庭でできるように、精密診断技術のイノベーションと統合を刺激する。ヘルスケアの変化に火を付けるために、「技術破壊」だけでなく「規制破壊」「ビジネスモデル破壊」「インフラ破壊」にてこ入れできるとしている（「破壊」は Clayton M. Christensen の文脈での意味）。

コンペは2012年に開始され、約3年半かけて行われる。2013年8月に登録を締め切り、2014年4-6月に予選で最大10チームが残り、2015年上半年期に決勝が行われる予定である。最大3チームの受賞者は、「消費者体験スコア」で決定された上位5チームから「アセスメントスコア」に従って順位が決定される（賞金は、1位700万ドル、2位200万ドル、3位100万ドル）。全ての構成要素を含めて5ポ

ンド（約2.3kg）以下の機器で、図表1のような検査項目が評価される（所要時間等の必要条件が項目毎に定められている）。

2-2-2 注目の参加チーム

参加登録チームは2013年12月現在、34チームである（米国が21、カナダ、英国が各3、オランダ、スロベニア、ポーランド、ギリシア、インド、台湾、韓国が各1）。

注目のチームとしては、Scanadu社¹⁴が挙げられる。2011年にベルギーで設立され、現在は米国シリコンバレーにある同社は、既に2種類の消費者向けデバイスを開発している。その一つ‘Scanadu Scout’（図表2）は、約10秒間、額にあてることで、7項目（心拍数、皮膚温・深部体温、血中酸素飽和

図表1 トリコーダー・Xプライズでの機器の評価項目

アセスメント		
コアセット 1. 貧血 2. 下部尿路感染 3. 2型糖尿病 4. 心房細動 5. 脳卒中 6. 閉塞性睡眠時無呼吸 7. 結核 8. 慢性閉塞性肺疾患(COPD) 9. 肺炎 10. 耳炎 11. 白血球増加症 12. A型肝炎 13. 症状なし	選択セット(3項目を選択) 1. 百日咳 2. 高血圧 3. 単核症 4. 空中アレルゲン 5. 甲状腺機能低下症/亢進症 6. 食中毒 7. 帯状疱疹 8. メラノーマ 9. 連鎖球菌性咽頭炎 10. コレステロール 11. HIV 12. 骨粗しょう症 ※ 1項目の追加を請願可能	バイタルサインセット 1. 血圧 2. 心電図(心拍/変動) 3. 体温 4. 呼吸数 5. 酸素飽和度 ※ 連続モニタリング、クラウドロギング ☆ 人工知能による限られた範囲内の質問が許される。
消費者体験		
A. 訴求力	形態、質感、携帯性、着用性、ディスプレイ、等。	
B. わかりやすさ	一目瞭然性、説明を覚えられる、提供情報の適切さ・深さ、情報提示、次段階の行動に向けて結果の意味を理解できる、積極的に使う気になる、等。	
C. 機能性	起動・入力・指示の簡単さ、信頼感、一貫性、全部品のシームレスな操作性、統合性、電源、非侵襲性、小型・軽量、不具合・望ましい水準に満たない機能、その他の付加的機能、等。	
D. 行動	追加情報へ容易にリンク、代替交流形態(ゲーム、クラウドソーシング、ソーシャルメディア)、さらに使いたくなる、他者に話したくなる、健康関連の行動へ導く、等。	

出典：参考文献13のガイドライン18版を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 Scanadu Scout



出典：参考文献14

度、呼吸数、血圧、心電図、情緒的ストレス)の測定ができ、データはスマートフォンに送信される。基本ソフトとして米国航空宇宙局(NASA)の火星サンプル分析装置にも使われているリアルタイムOSを採用し、電極、可視光・赤外光センサー、加速度計、サーミスタ、ジャイロスコープ、マイクロフォンを搭載している。人体に送られるエネルギーは低エネルギーLED光パルスのみであり、安全と考えられる。2014年には、スクリプス・トランスレーショナル科学研究所のワイヤレス・モニタリングに関する臨床試験‘Wired for Health’(糖尿病、高血圧、不整脈が対象)に参加し、医療費削減と患者の自己管理向上が評価される。もう一つの開発品‘Scanadu Scanaflo’は、尿検査キット(ブドウ糖、タンパク質、白血球、硝酸塩、潜血、ビリルビン、ウロビリノゲン、比重、pH)であり、肝臓、腎臓、尿管、代謝の異常を早期に検知でき、特に妊娠中の女性、高齢者、糖尿病患者、リスクを伴う薬物治療を開始した人たちに役立つ。同社は2013年11月現在、ベンチャーキャピタルやITビジネスでの成功者のファンド等から1,470万ドルを調達し、他にクラウドファンディングでは100カ国8,500人以上から約166万ドルを調達しており、イノベーションのエコシステムに組み込まれていると言える。

2-2-3 注目の参加者

注目の個人としては、高校生を対象とした世界最大の科学コンテスト「インテル国際学生科学フェア(Intel International Science and Engineering Fair: Intel ISEF)」^{注2)}で、膵臓がんの画期的な検査方法を開発したことによって、2012年の大会最優秀賞を受賞した、米国メリーランド州のJack Andraka¹⁵⁾(当時15歳)が挙げられる。Andrakaは、2人の他のIntel ISEF決勝戦出場者とチームを結成し、トリコーダー・Xプライズに参加している。Andrakaが開発した検査は、抗体とカーボンナノチューブ(CNT)を染み込ませた試験紙を使って、膵臓がんのバイオマーカーである血液中や尿中のメソテリンレベルを測定し、初期段階の膵臓がんにかかっているかどうかを判定する。メソテリンの検出精度はほぼ100%で、現在の標準的な検査方法と比べて168倍速く、2万6千分の1の費用で、400倍の感度を実現しているという(NHKでも放映されたTED Talksでの本人談)¹⁵⁾。当初

思いついた研究計画で実験するために、ジョーンズ・ホプキンス大学と米国国立衛生研究所(National Institutes of Health: NIH)の200人の教授にメールを出したが、199人から断られ、ただ一人インド出身のAnirban Maitra ジョーンズ・ホプキンス大学教授からのみ「助けることができるかもしれない」と返事をもらい、受賞研究をすることができた。こういった逸話等から、Andrakaはスター若手科学者となっている。

2-3 ノキア・センシング・Xチャレンジ

2-3-1 コンペ概要

ノキア・センシング・Xチャレンジは、賞金225万ドルの世界的コンペである¹⁶⁾。個人の健康状態の情報取得は、世界の多くの国で不足しており、先進国においても、よりタイムリー、簡便、費用効果的、高信頼性である必要があることを背景として、新規・既存センシング技術の潜在能力を発揮させるための動機づけを目的としている。センシング・Xチャレンジで開発された技術が、トリコーダー・Xプライズで使われることも期待されている。

コンペは、同じ要領で2回行われる。1回目の「チャレンジ1」は、2013年7月に予選審査、同年10月に決勝審査が行われた。2回目の「チャレンジ2」は、2013年6月登録開始、2014年2月登録締め切り、5月予選審査、7月最終審査の予定である。

図表3のようなセンシング領域が受け付け可能であり、図表4のような観点から点数が付けられ、大賞1チーム、優秀賞5チームが決定される(賞金は、大賞52万5千ドル、優秀賞各12万ドル)。

2-3-2 「チャレンジ1」の優勝チームと日本の決勝進出チーム

「チャレンジ1」では、予選審査により8カ国33チームから4カ国12チーム(米国が9、英国、イスラエル、日本が各1)が選出され、決勝審査により米国マサチューセッツ州ケンブリッジのNanobiosym Health RADARが大賞を受賞した。

同チームは、数々の政府系の賞を受賞したインド系米国人Anita Goelが率いるNanobiosym社のチームである¹⁷⁾。同社は、2004年の設立以来、水

注2 我が国からは、「高校生科学技術チャレンジ」(主催:朝日新聞社、テレビ朝日)および「日本学生科学賞」(主催:読売新聞社)の2大会から、各3組6名(個人またはチーム構成)までが参加枠となっている。2013年の大会では、日本人初の部門最優秀賞受賞者が出た。

図表3 センシング・X チャレンジの技術領域

センシング領域	領域定義	センサーの例
バイオセンサー	特異的な疾患状態や健康状態を検出または測定する目的で、特異的な生化学反応を利用して生体試料中の化合物を検出するためのデバイス。	Lab-on-a-chip(分析用マイクロチップ)*、ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)、非侵襲血液センシング、唾液診断、循環核酸(CNA)・DNA分析。
イメージング	放射線学、核医学、調査的放射線法、超音波、内視鏡、サーモグラフィ、写真撮影、顕微鏡を組み込んだ生理学的イメージング。	磁気共鳴画像法(MRI)、コンピュータ断層撮影(CT)、ポジトロン断層法(PET)、超音波画像法。
環境	特に汚染、水、空中アレルギー、紫外線強度を含む、健康に関連するヒト生体外状態の検出と特性解析。	食品由来を含む病原体、化学物質またはアレルギー誘発性物質を検出するセンサー。危険な放射線レベルの検出。
運動学	健康状態と機能を同定する目的でのヒト空間運動(地理的絶対位置、速度、加速度)の測定。	任意レベルの生体力学、動作追跡、方向または活動分類を含む慣性計測装置(IMU)。
行動	現在自己申告・調査で実現可能なものより、正確、高信頼性、高頻度に気分や感情を描写するセンサーでのデータ測定。	声認識、顔パターン、動作検出、汗。ガルバニック皮膚反応(皮膚電気伝導度)、聴覚、視覚、行動手掛かりを含められる。
生理学	バイタルサインや伝統的・非伝統的健康尺度を含む生理状態の定量測定と視覚化。	心電図検査(ECG)、脳波検査(EEG)、筋電図検査(EMG)、体温、相対意識レベル。

* Lab-on-a-chip: マイクロ流体デバイス。微細加工技術により、基板上にポンプ、バルブ、反応領域、検出装置を集積化することで、システム全体の小型化、低価格化、反応の効率化、簡便化、廃棄物減少等が可能となる。 μ TAS (micro total analysis system) や Bio-MEMS (biomedical/biological microelectromechanical system) と大きく重なる。

出典: 参考文献 16 を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表4 センシング・X チャレンジの評価基準

正確性と一貫性	目的を達成する上でのデータ収集と報告の正確性、信頼性、有効性。
技術的イノベーション	既存方法に対する定量的改善や市場でこれまで明示されていない新種技術。
人的要因への配慮	医師やエンドユーザーにとって使いやすい(装着、クリーニング、操作の単純さ)。特別な技術的・医学的知識を要しない。
独創性と創造性	どれくらいクールか。理想的には、既存技術の漸進的改良というより、ユニークで新種の解決法。消費者や産業の想像力をかき立てる。
パッケージング・形態、携帯性	侵襲か非侵襲か。無線接続か有線接続か。小型軽量。グラフィカル・ユーザー・インターフェース、ユーザビリティ。
市場機会、公衆衛生ニーズへの適合	市場での成功可能性。重要なニーズへの対処。
多機能性、統合(予選)/クラウドソーシング(決勝)	一連のデータの差異を識別できる。単独型センサーと比べて個別機能が同等以上。他のセンシングデバイスや解釈デバイスとの統合。/クラウド審査員による評価。
提案(予選)/実演(決勝)	必要情報を明快、簡潔、説得力をもって示す。/提示の質、インパクト、信頼性。

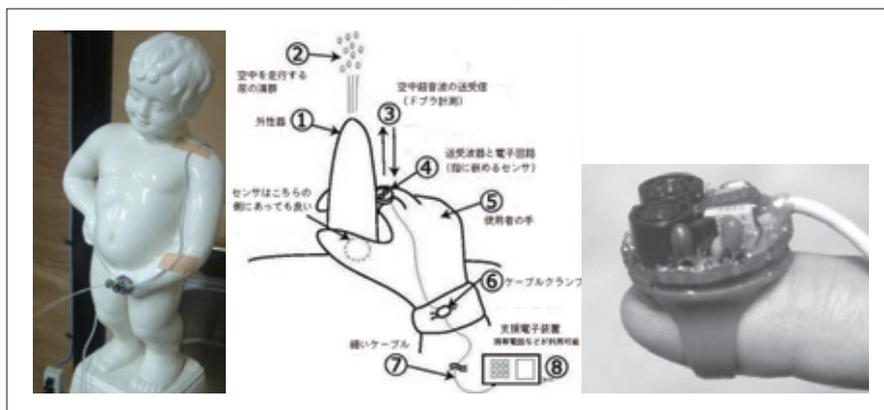
出典: 参考文献 16 を基に科学技術動向研究センターにて作成

面下で活動していたが、今回提案した診断プラットフォーム 'Gene Radar' で幾分姿を現した。'Gene Radar' は、一滴の血液・体液をナノチップに載せてデバイスに挿入することにより、従来のポリメラーゼ連鎖反応(PCR)と同等の正確性で、迅速かつ100倍安価に、ヒト免疫不全ウイルス(HIV)を検出できる。さらに、がん等他の遺伝子フィンガープリントの解析にも使用できる。同社は、米国国防高等研究計画局(DARPA)等様々な政府機関や個人富裕層の後援を得ており、シリコンバレーとは別のタイプのイノベーション・エコシステムが存在していると言える。

我が国からは、旭川医科大学の松本成史と竹内康人からなるチームが決勝に残った。提案内容は、下部尿路機能障害の診断・病態把握に利用可能な、

空中超音波ドップラーシステムを用いた尿流測定(流速、流量、排尿総量)装置である(図表5)。指はめ型のウェアラブルセンサーにより、被験者は自律的に任意の場所・時間に自らの排尿パターンを計測できる。技術的にはローテクとも言うべき基礎技術で、歩行・走行の対地速度等も測定できる。

図表5 尿流測定装置



出典：松本成史氏、竹内康人氏

3 パーソナル検査システムの開発と実装の促進に向けた課題

3-1 多様な技術の進歩 一選択と集中の難しさ

同一目的の検査のために、多様な技術が利用可能であり、それぞれ日々進歩しているため、どの技術が最有力かは予想が難しい。パーソナル検査システムには、‘ASSURED’という言葉に集約される、手頃 (Affordable)、高感度 (Sensitive)、特異的 (Specific)、利用し易い (User-friendly)、迅速かつ頑強 (Rapid and robust)、設備が不要で (Equipment-free)、持ち運びができる (Deliverable) といった特性が求められるが、多岐に渡る技術がそれに貢献する可能性を秘めている。例えば、現在のインフルエンザ治療薬の投与にあたって、一般に早期診断が望まれるが、最も確立されているイムノクロマト分析においても高感度化・定量化が進む一方、様々な光学イムノセンサーシステム、電気化学的方法、電界効果トランジスタ (FET) 技術、巨大磁気抵抗センサー技術が、バイオセンサーとしての可能性を持っている¹⁸⁾。さらに、マラリアであれば、非侵襲に検出する‘ASSURED’な方法も出現している (ナノ粒子代謝産物へのピコ秒レーザー照射により生ずるナノバブルの音響検出)¹⁹⁾。

例えば、光学イムノセンサーシステムにおいては、分子吸着検出センサーとして普及している表面プラズモン共鳴 (surface plasmon resonance : SPR) センサーと類似した原理だが、実用化されてこなかったエバネセント場結合型導波モード (evanescent field-coupled waveguide-mode : EFC-WM) センサーが、産業技術総合研究所の栗津浩一と藤巻真らにより、様々なブレークスルーを経て、実用性を持つに至っている²⁰⁾。また、核酸検出法も、

PCR法と等温増幅法ともに、Lab-on-a-chip化の研究が進んでおり、普及の可能性を秘めている。

装着スタイルも様々な可能性が検討されている。例えば、連続的グルコースモニタリングシステムとして、目に装着する「スマート・コンタクトレンズ」(グーグル社の未来技術開発部門グーグルX等が開発) や皮下埋め込み型の「スマート・タトゥー」が研究開発されている (一酸化窒素モニタリングでは、マウスで400日以上機能するCNTベースの埋め込み型センサーが報告されている²¹⁾)。

3-2 未熟なICT活用や パーソナル検査への懐疑

ICTのヘルスケアへの導入は、期待に合わない場合もありうる。パーソナル検査システムではないICTに関しては、既にそういった側面も報告されてきている。例えば米国では、EHRの費用削減への効果に対しては、2012年3月までの調査で、懐疑的な開業医の割合の方が高い²²⁾。また、有効であるとの報告もあった慢性閉塞性肺疾患 (COPD) の遠隔モニタリングについて、より正確な対照比較では有効でないことも示されている²³⁾。また、大部分の減量用モバイルアプリは、2012年1月時点で、エビデンスに基づく20種類の減量戦略のうちわずかし採用しておらず、改善の余地がある²⁴⁾。

また、未熟な検査は、被験者にとって有害となる可能性もある。グーグル社が出資する遺伝子検査企業23andMe社は2013年11月、FDAに製品販売の停止を命じられ、集団代表訴訟を起こされてもいる。

試行錯誤は必要であろうが、検査システムは、真に期待されるエンドポイントの達成 (健康寿命延伸、医療費削減等) に役立つ必要がある。検査自

体が負担になったり、情報取得だけで終わったり、過剰あるいは過少な診療や心配につながったりしないようにしなくてはならない。

4 提言—社会ニーズ適合への誘導—

医療変革へのニーズと多様な技術シーズを結び付け、イノベーションを刺激する機会として、未開拓分野でのコンペの意義は大きいと思われる。問題解決への社会的関心が高まることで、研究開発や市場の確立が促進される。2013年12月の予選会で、グーグル社が買収した東京大学発の企業 SCHAFT が1位になった災害用ロボットのコンペ 'DARPA's Robotics Challenge' のように、主催は政府機関でも、あるいは民間や官民共同でもありうる。また、世界的なコンピューティングの評価 'Top500' や米国国立標準技術研究所の「オープン機械翻訳評価」のように、研究開発の動機付けには、賞金は必要なく、評価だけでよい可能性もある。

パーソナル検査システムにおいて、正確性とユーザビリティは不可欠な要素であり、Xプライズ財団のコンペで示されているような評価軸は、社会ニーズへの適合を誘導する上で参考になる。大して有益でない単なるガジェット作りに終わらせないためにも、新しいパーソナル検査システムの開発と実装の促進には、さらに以下のような視点が望まれる。

4-1 予防医療・先制医療の開発の方向性

パーソナル検査システムから収集可能なきめの細かい時系列データは、予防医療・先制医療に利用可能な動的ネットワークバイオマーカー^{注3)}の開発につながることも可能であると考えられる。統計手法の開発が進むビッグデータを利用した研究

とその成果利用の好循環が期待される。

また、真に期待されるエンドポイントの達成につなげるために、我が国の社会的強みを活かすことも望まれる。2013年1月の全米アカデミーズの報告書²⁵⁾で示されたように、米国は他の先進国と比較して、医学研究は最高水準にあり医療費は世界一高額であるが、健康長寿社会としては最低水準にある(社会経済的に高い層でも良くない)。従来は喫煙や肥満といった個人の行動と選択に原因の焦点が当てられていたが、社会的要因を含めた原因の研究と、研究以前にできることの実行が求められている。我が国は、今のところ幸い世界最高水準の健康長寿社会である。健康寿命延伸や医療費削減といった真の利益につなげるために、我が国の強みと考えられる生活習慣や社会特性を活かし、さらにはQOL向上に係る社会心理学的研究等とも結び付けた、広い視野からのシステム構築が望まれる。

4-2 介入システム・医療との連携・統合

検査値の先にある健康上の利益を得るためには、減量用モバイルアプリのような介入システムとの統合や医療との連携も必要になる(尚、健康機器の相互接続性には、国際的業界団体 Continua Health Alliance の規格がある)。介入システムに関しては、エビデンスの蓄積がまたれるところであるが、携帯電話へのメールによる介入で、糖尿病発生のハザード比が0.64となったランダム化比較試験も報告されており、期待が膨らむ²⁷⁾。

さらに、日常におけるモニタリングと治療介入との結合も、既に開発が進んでいる血糖コントロールから、新たな研究が始まりつつある脳検査と精神神経疾患治療の組み合わせ²⁸⁾まで、幅広く発展可能であろう。医療との連携に関しては、人工知能が、ヘルスケアチームの一員として組み込まれ、緊急時も含めて適切なコミュニケーションスキル^{注4)}を発揮できることが望まれる。

注3 動的ネットワークバイオマーカー：個々の単一のバイオマーカーとしての性能は高くなくても、それらのネットワークとしては極めて高機能で、様々な複雑疾病において疾病の早期診断や病態悪化の予兆検出が可能バイオマーカー²⁶⁾。最先端研究開発支援プログラム (FIRST) 合原最先端数理モデルプロジェクトで提案された概念。

注4 適切なコミュニケーションスキル：米国国防省と医療品質研究調査機構が協同で作成した、チームパフォーマンスを向上させ、医療安全を推進するためのフレームワーク 'teamSTEPPS' における 'SBAR (Situation, Background, Assessment, Recommendation: 状況、背景、評価、提言の伝達)' や「コールアウト (緊急の重要な場面での伝達)」のような実践的スキル。

4-3 規制・制度面での支援

規制・制度や個人情報の取扱いには、関係省庁との協調が求められる。既に約100の医療モバイルアプリを認可しているFDAは2013年9月、モバイルアプリに関するガイダンスを発表した²⁹⁾。現時点では、適切に機能しないと有害でありうるアプリのみ審査する方針を示し、数万種類あると言われる健康アプリの大多数は規制対象外となる（ア

プリ関連の投資家と企業にとって不透明感はある程度解消されたが、消費者にとっては品質保証と有益性に不透明感が残る）。

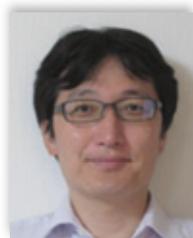
また、才能を見出すためのイノベティブな研究開発評価も国に求められる。技術の飛躍的進化の前提として、支援すべき要素技術の種類には、ある程度の多様性の確保が望まれる。限りある人的資源を最大限活かすためにも、Andrakaのアイデアが拾い上げられるような、従来の枠に囚われないイノベティブな評価が望まれる。

参考文献

- 1) 太田勲ら『諸外国と日本の医療費の将来推計』財務省財務総合政策研究所 2013年6月：
http://www.mof.go.jp/pri/research/discussion_paper/ron249.pdf
- 2) 大谷敏彰『我が国の医療費の現状』経済のプリズム（参議院）2012;105:21-40.
- 3) 『国民医療費の伸びの真相』日本医師会 2008年9月：http://dl.med.or.jp/dl-med/teireikaiken/20080917_2.pdf
- 4) Yuji K, et al., "Forecasting Japan's physician shortage in 2035 as the first full-fledged aged society." PLoS ONE 2012;7 (11) : e50410.
- 5) 『平成23年度医療費の地域差分析』厚生労働省 2013年9月：
<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/hoken/iryomap/11/dl/01a.pdf>
- 6) 『大阪府医療費適正化計画中間評価（案）』大阪府 2011年1月：<http://www.pref.osaka.jp/attach/5212/00018618/3.pdf>
- 7) 『平成24年度高額レセプト上位の概要』健康保険組合連合会 2013年9月：
<http://www.kenporen.com/include/press/2013/2013091303.pdf>
- 8) 吉岡春紀『まず医療人が医療制度の真実を知らねば国民を守れない』山口県医師会報 2007;1765:894-903.
- 9) "Choosing Wisely." ABIM Foundation 2013年：
<http://www.choosingwisely.org/wp-content/uploads/2013/02/Choosing-Wisely-Master-List.pdf>
- 10) "U.S. Preventive Services Task Force Advises against PSA Screening." NCI Cancer Bulletin 2012;9 (11) :
<http://www.cancer.gov/ncicancerbulletin/052912/page4> & "Special issue: The science behind cancer screening."
NCI Cancer Bulletin 2012;9 (23) : <http://www.cancer.gov/ncicancerbulletin/112712>
- 11) 和田恭『米国における医療分野のIT導入に係る動向』2012年5月 情報処理推進機構：
<https://www.ipa.go.jp/files/000001951.pdf>
- 12) 石橋未来『超高齢社会医療の効率化を考える』大和総研 2013年8月：
http://www.dir.co.jp/research/report/japan/mlothers/20130815_007565.pdf
- 13) Qualcomm Tricorder X PRIZE : <http://www.qualcommtricorderxprize.org/>
- 14) Scanadu : <http://www.scanadu.com/> & "Scanadu Scout, the first Medical Tricorder." Indiegogo :
<http://www.indiegogo.com/projects/scanadu-scout-the-first-medical-tricorder>
- 15) "Jack Andraka: A promising test for pancreatic cancer ... from a teenager." TED 2013年7月：
http://www.ted.com/talks/jack_andraka_a_promising_test_for_pancreatic_cancer_from_a_teenager.html
- 16) Nokia Sensing XCHALLENGE : <http://www.nokiasensingxchallenge.org/>
- 17) Nanobiosym : <http://www.nanobiosym.com/> & "Still in stealth, Nanobiosym sheds light on 'disruptive' HIV test."
American City Business Journals 2013年12月：
<http://www.bizjournals.com/boston/blog/bioflash/2013/12/still-in-stealth-nanobiosym-sheds.html>
- 18) Gordon J, et al., "Discerning trends in multiplex immunoassay technology with potential for resource-limited settings." Clin Chem. 2012;58 (4) :690-8.
- 19) Lukianova-Hleb EY, et al., "Hemozoin-generated vapor nanobubbles for transdermal reagent- and needle-free

- detection of malaria.” Proc Natl Acad Sci U S A. 2014;111 (3) :900-5.
- 20) 藤巻真ら『高感度分子吸着検出センサーの開発—高度な診断・診療のためのバイオ分子検出技術の開発』Synthesiology 2009;2 (2) :147-158. & 『インフルエンザから重金属の判別まで、高感度に検出—小型高感度センサの開発に成功—』新エネルギー・産業技術総合開発機構 2013年8月：
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100218.html
 - 21) Iverson NM, et al., “In vivo biosensing via tissue-localizable near-infrared-fluorescent single-walled carbon nanotubes.” Nat Nanotechnol. 2013;8 (11) :873-80.
 - 22) DesRoches CM, et al., “Meeting meaningful use criteria and managing patient populations: A national survey of practicing physicians.” Ann Intern Med. 2013;158 (11) :791-799.
 - 23) Pinnock H, et al., “Effectiveness of telemonitoring integrated into existing clinical services on hospital admission for exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease: Researcher blind, multicentre, randomised controlled trial.” BMJ 2013;347:f6070.
 - 24) Pagoto S, et al., “Evidence-based strategies in weight-loss mobile apps.” Am J Prev Med. 2013;45 (5) :576-82.
 - 25) Woolf SH, Aron L, Eds. “U.S. Health in international perspective: Shorter lives, poorer health.” National Research Council and Institute of Medicine, National Academies Press, 2013.
 - 26) 『複雑疾病の早期診断や病態悪化の予兆検出を可能にする、新しい動的ネットワークバイオマーカー理論』東京大学生産技術研究所 2012年12月：http://www.u-tokyo.ac.jp/public/public01_241211_j.html
 - 27) Ramachandran A, et al., “Effectiveness of mobile phone messaging in prevention of type 2 diabetes by lifestyle modification in men in India: A prospective, parallel-group, randomised controlled trial.” The Lancet Diabetes & Endocrinology. 2013;1 (3) :191-198.
 - 28) “Subnets aims for systems-based neurotechnology and understanding for the treatment of neuropsychological illnesses.” DARPA. 2013年10月：<http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2013/10/25.aspx>
 - 29) “FDA issues final guidance on mobile medical apps.” FDA. 2013年9月：
<http://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm369431.htm>

..... **執筆者プロフィール**



本間 央之

科学技術動向研究センター 特別研究員

博士(医学)。免疫やがんの創薬研究に従事し、2012年11月より現職。長年にわたり、生命・社会の自己組織化および‘disruptive innovation’ (胚盤胞補完法による臓器作製、標的構造の制約や送達の限界を突破する創薬等) に関心を持つ。

農業をめぐるIT化の動き(2)

—ハイパフォーマンスコンピューティングの活用事例を中心に—

野村 稔 金間 大介

概要

農業技術が進歩した現在でも、年々の豊凶や品質の良否は、多くの部分はその年の気象条件に左右されるため、農業において予測は長い間の関心事である。現在、農業分野にハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) を活用した高精度の予測を取り入れる動きが起きている。

一つ目は、米国カリフォルニア州での灌漑システム管理である。ここでは HPC の活用による地域の気象予測と観測データを統合・処理し、きめ細かな水散布計画を作成しており、大量の水と電力費用の削減を実現している。二つ目は、日本の研究チームによる3か月先の短期季節予測による穀物の世界的豊凶予測手法の開発である。収量と土壌水分・気温の過去の実測データの関係式を求めて収量予測を行い、HPC を用いた季節予測と収量予測を結合し世界レベルの豊凶予測の可能性を示した。

農業の生産性予測においては、シミュレーションモデル、データ、そして両者間の整合などの高度化が重要である。農業の情報通信技術 (IT) による高度化は、日本の経済発展へ大きなインパクトを与えるものと捉えられ、国の競争力維持の源泉として戦略的に考えていくべきである。

キーワード：農業、情報通信技術、IT、ICT、ハイパフォーマンスコンピューティング、HPC、スーパーコンピュータ、シミュレーション、気象・気候予測、収量予測、リモートセンシング

1 はじめに

科学技術動向誌 (2014年1・2月号以下、「前号」という)¹⁾に農業をめぐる情報通信技術 (IT) を活用する動きを述べた。そこでは、農業における技術革新が期待される領域を、図表1の①②③と分類し、特に②の生産領域に焦点を当て、圃場・施設栽培などでセンサーやカメラ等のIT機器が導入され、ネットワークシステムやクラウドサービスを活用して農業生産の高効率化が進められている現状を示した。本稿は、前号の続編として、同じく②の生産領域に焦点をあて、地域や国・地球レベルでの事例をとりあげてその現状を述べる。

農業技術が進歩した現在でも、年々の豊凶や品質の良否は、多くの部分はその年の気象状況 (気温や降水量など) に左右される。気候変動や気象の予測

は既にも実施されており、その結果から気象状況の変化をキャッチした先読みにより生産性を向上させることが行われてきている。そこには過去からの経験に裏打ちされたベテランの営農者の目と勘 (暗黙知または経験則) が必要である。すなわち、気象・気候予測を暗黙知によって補完することで生産性向上に結びつけていた。そのため、限られた地域・領域での実現に留まる傾向や、高齢化によりその適用機会が減少しつつあるといった課題もみえてい

図表1 農業における技術革新が期待される領域

領域①	領域②	領域③
品種改良や遺伝子組み換え技術等の農産物そのものを対象とした領域	栽培技術や土壌など生産環境に焦点を当てた領域	輸送や保存など流通・販売に関する領域

(本稿の対象)

た。今、ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) の活用による高精度な気象予測と農業データとの統合により、広域支援を可能とする新しい動きが現れてきている。HPC とは、自然現象のシミュレーションや生物構造の解析など、非常に計算量が多く高性能な計算が要求される処理をさし、その処理にはスーパーコンピュータが使用される。

以下では、農業への気象・気候が与える影響と予測の重要性、HPC を活用した高精度な気象予測を用いた事例および気象予測と収量予測とを統合した事例を紹介し、課題と今後へ向けた提言を示す。

2 農業への気象・気候が与える影響と予測の重要性

2-1 農業への気象・気候が与える影響

農業への気象・気候^{注1)}が与える影響は大きい。

(独)農業・食品産業技術総合研究機構 (農研機構) では、日本の農業への温暖化の影響を明らかにすることを目的として、すでに顕在化している温暖化の影響等についての調査を各都道府県の公立農業関連研究機関を対象に実施した。その結果、温暖化が原因で発生している現象があるとした都道府県数の割合 (全回答数 47 比) は、果樹では 10 割、野菜・花きで 9 割、水稻で 7 割にものぼっている²⁾。

農業は一般に、長い経験から、ある程度の気象の年変動については織り込んで生産をしているが、その想定を超えた極端な現象が現れると被害が発生するとされている。温暖化の影響として重要な点は、高温被害の発生頻度 (発生確率) が高くなっていることと、過去に経験したことのない高温が現れ

ることとされている。また、温度だけでなく降水量も農業生産にかかわる重要な要素である²⁾。

2-2 農業への気象予測の研究

気象が農作物に与える影響については、様々な研究が行われてきている。その一例を水稻栽培の例で示す。

図表 2 は、水稻の生育ステージに応じた気温による影響を示している。

東北地方では、近年夏季天候の年次変動が大きくなっており、気象被害の危険性が高まっている。そこで、気象予測データを利用して、圃場の栽培品種や作業履歴に対応した 1 週間先までの水稻生育予測、気象被害予測、病害発生予測が可能なシステムを開発している。空間的にきめ細かく、かつ定量的な気温の予測情報を作成するために、東北農業研究センター (東北農研) が作成した東北地方の 1 キロメートルメッシュの平年値と、気象庁が作成している 2 週目までの気温の予測値を用いて、1 キロメートルメッシュの気温予測値を作成して提供している。そして予測値を基に水稻栽培管理警戒情報を作成しウェブサイトを通じて利用者に提供し、事前に適切な対応をとれるように支援している^{4, 5)}。

2-3 農産物への予測の研究

農産物への予測である農業のシミュレーションモデル (農業モデル) の研究は、収量の予測も含めて、長い間、多岐にわたって進められてきている。詳細は、参考文献⁶⁾に詳しいが、対象は、作物・病虫害・農業気象と幅広く相互の影響を考慮できる

図表 2 水稻の警戒気温

時期	警戒気温 (7日間平均)	懸念される症状
7月中旬から8月上旬 (幼穂形成期～出穂期前)	20°C以下	障害不稔発生
8月上旬 (出穂期)	20°C以下	障害不稔発生
8月上旬から8月下旬 (出穂期～登熟初期)	27°C以上	高温登熟障害

出典：参考文献 4 から引用

注1 気象とは広い範囲での大気の状態を指し、気候とは年間や数年間を通した天気 (晴れ、雨など) の長期的な傾向で、その地域を特徴づける大気の状態を表す³⁾。

統合モデルも存在し、手法は、ミクロなモデルを積み上げるシステマティックなモデルや観測データから関係性を推定する統計モデルなどがあり、モデルの規模もさまざまとなっている。

研究事例をみると、日本で行われたデータ統合・解析システム (DIAS) の研究では、農作物の栽培可能性を、農業モデルを使用して予測する研究が行われた。開発したツール「イネの栽培可能性予測シミュレータ」は、気温や日射量などの観測データを使用してイネの栽培可能性の情報を提供している⁷⁾。また、過去の作物・気象データを利用者が用意して、当該地域のパラメータ値を自動決定し、生育シミュレーションを行うプログラムの研究開発も行われている⁸⁾。

データ規模の増加に伴って農業モデルに必要とされる計算パワーも増してきている。

2-4 予測の重要性

気象条件と収量が予測できると適切な事前対応が可能となる。もし種をまく前に収量予測ができれば、その年の気象に適した穀物を選ぶことができる。今や、穀物の豊凶問題は一国に閉じたものではなく、世界の穀物輸出国の不作は国際市場価格に大きく影響し、特に開発途上地域の低所得層の栄養状態を悪化させる一因となっている。そのため、気象・収量予測技術の精度向上による世界の穀物生産の動向の監視が望まれている。食糧の備蓄に関しても豊凶を事前に予測できれば有効な対策が可能にな

る。気象・気候予測、収量予測が農業に与える影響は計り知れない。

以下では、HPC を活用することで高精度な気象予測により新たな可能性を生み出している事例を紹介する。

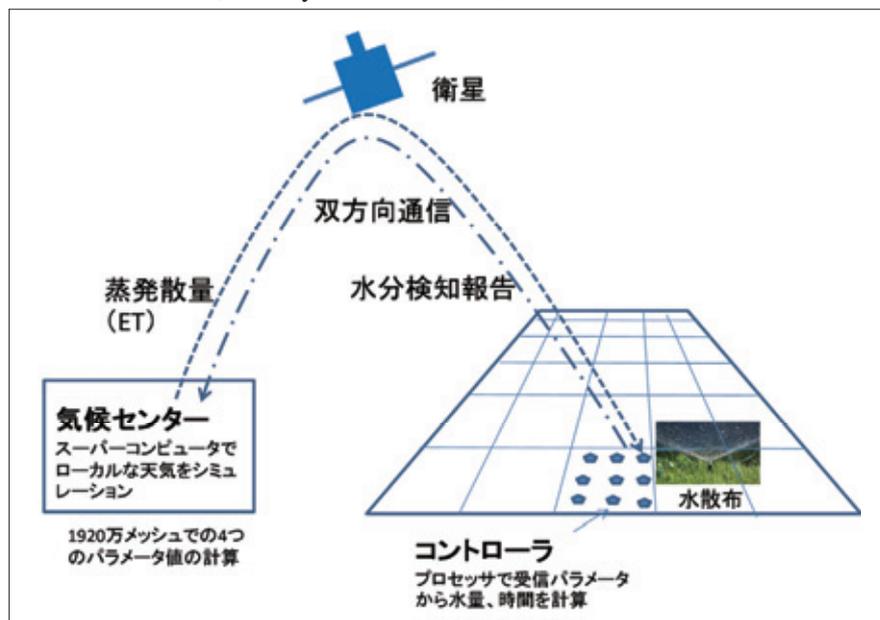
3 高精度な気象予測を活用した事例

農地に外部から人工的に水を供給する灌漑は、農産物や植物の生育にとって重要である。灌漑では、生産性向上とともに水の浪費を防ぎ費用の削減を図るために、適量の水をいつ散布するかが重要な課題となる。米国カルフォルニア州の HydroPoint 社は、スマートイリゲーションとよぶ新しい灌漑サービスを提供している。

HydroPoint 社は、HPC を使用して北米全体にわたって1平方キロメートル毎の地域の天気を予報する気候モデリングセンター (以降、気候センター) を運用し、顧客の灌漑場所に配置され地下に埋設されたワイヤを経由して水ラインのバルブの開閉を制御するコントローラとの間を双方向衛星通信で結んでいる。(図表3)

気候センターは、毎晩、各コントローラのマイクロプロセッサに向けて、地域の気象関連データである蒸発散量 (EvapoTranspiration: ET と略し、水分の蒸発だけでなく植物の生育による蒸散を足し合わせたもの) を算出して送信する。その ET は、コントローラ内のマイクロプロセッサ上で、植物の種

図表3 HydroPoint 社の灌漑サービスの模式図



出典：参考文献9を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 4 収集データとその周期

収集データ	周期
米国海洋大気庁 (NOAA) とその他の公開ソースから衛星を介してリアルタイムの数百万のデータポイントをダウンロード	1 日毎
世界中の地上気象観測・海洋ブイ・気象観測気球からのデータ	1 時間毎
グローバルな衛星画像データ	15 分毎
米国のドップラー・レーダーからのデータ	1 時間毎

出典：参考文献 9 を基に科学技術動向研究センターにて作成

類ごとに、土壌種類や地形などの要素を考慮して適量の水をいつ散布するかを正確に計算するために使用される。また、水センサーが水分を検出した時はコントローラに灌漑の抑制信号を送信するとともに気候センターにも連絡する。

気候センターでは、ET を、每晚、1 平方キロメートルの詳細さで正確に推定するために、気温、風速、日照時間、相対湿度をパラメータとする計算式を使用する。そのためには、北米の 1920 万の 1 平方キロメートル格子の各々で、これら 4 つの入力パラメータを求める必要がある。パラメータの算出には、数値気象予報モデル^{注2)}を使用しているが、毎日 1 平方キロメートルの解像度でこの数値気象予報モデルを実行するには強力な計算パワーが必要とされるとともに、その基となる膨大な入力データの収集が必要になっている。

図表 4 は、ET 計算用に気候センターが収集しているデータと収集の周期を示す。

収集したデータの品質は重要であり、収集データを終始チェックして特異な測定値を取り除き品質向上を図っている。算出した ET 値が正確であるかは最も大切であり、実際の観測点（計算で使用する格子数に比べて極めて少ない）における実観測データとの整合に力を注いでいる。

HydroPoint 社は、8,000 以上の顧客を有し、2011 年には全顧客の合計で 644 億リットルの水量削減と 1.11 億ドル以上の水費用を低減すると共に、6800 万キロワット時間の揚水電力量を節約したとある⁹⁾。

4 気象予測と収量予測を統合した事例

(独) 農業環境技術研究所 (以下、「農環研」という)

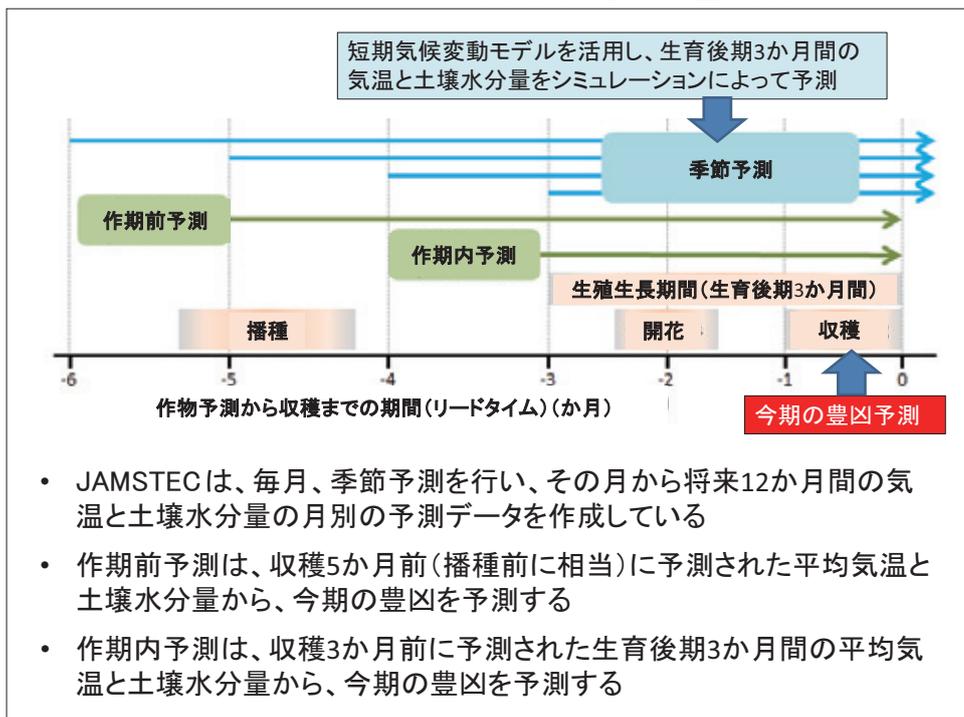
と(独)海洋研究開発機構 (以下、「JAMSTEC」という) を中心とする研究チームは、オーストラリア、英国、米国の研究者と協力して、3 か月先の短期気候予測 (季節予測) による穀物の世界的豊凶予測手法を開発した。従来から、季節予測による主要穀物の豊凶予測は行われていたが、ある特定地域 (オーストラリアなど) に限られていた。穀物の種をまいてから収穫までに要する数か月間のうち、収穫前の 3 か月間 (生育後期) の気象条件 (気温、土壌水分量) から、その年の収量 (前年比) を予測するものである。(図表 5)

本研究は、まず過去に収集された農業と気象の実データを用いて相互間の関係を求めている。図表 6 に今回実際に行った収集データとそれらの収集方法を示す。図表から明らかであるが、農産物の収量データ (農業データ) はシミュレーションによる収量予測に使えるデータベースが存在していなかったため、その作成に多大な労力を要している。農業データの品質を上げるために特異なデータを除外する作業も発生している。各国が提供するデータに基づいた収集のため、データ間の品質の差異も発生したとある。それ以上に困難だったのは、収集した農業データは、国や州といった行政区画ごとに集計されているため気象データの格子への合わせこみ (整合) が必要になったことである。結果として 1982 年から 2006 年までの農業データベースを作成した。

これらの実データを用いて、コムギとコメについて生育後期 3 か月間の気象条件 (気温・土壌水分量) の前年差と、当該年の収量と前年の収量との比を推定する式 (重回帰式を作成：収量変動予測モデルと呼ぶ) を作成した。この式を用いることで、気象条件のみに基づく豊凶の推定が世界規模で可能となり、世界の栽培面積の 30% (コムギの場合)、33% (コメの場合) で精度良く推定できたとしている^{10,11)}。

注2 数値気象予報モデルとしては、ペンシルベニア州立大学とボルダーの国立大気研究センター (NCAR) により開発された MM5 (Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model) を使用している。また、NCAR、米国海洋大気庁 (NOAA) とパートナーによって開発された MM5 より高度な気象予報モデルも使用とある。

図表5 シミュレーション予測結果に基づいた豊凶予測



出典：参考文献 10 等を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表6 収集データと収集方法

収集データ		収集方法
気象データ		気象庁と電力中央研究所が作成した気象データを利用
農業データ (収量データ)	① 一部の先進国の収量データ	公開データをダウンロード
	② 紙資料でしか存在していない地域のデータ	データの提供を受けてコンピュータ入力
	③ 不足している地域の収量データ	国連食糧農業機関(FAO)が持つ国別の収量データをもとに衛星から得られた植物の生産活動の場所ごとの違いを考慮して、格子(グリッド)ごとに収量を推定

出典：参考文献 11 を基に科学技術動向研究センターにて作成

JAMSTEC は、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ 2」を用いて JAMSTEC が欧州連合 (EU) と共同開発した短期気候変動モデルを活用して生育後期 3 か月間の気温と土壌水分量を予測している。その予測結果を前記の式に入力することで、収穫 3 か月前の時点で、栽培中のコムギとコメの不作 (または豊作)^{注3)}を推定した。その結果、世界の栽培面積の約 2 割 (コムギ 18%、コメ

19%) で推定値が実測値と整合していることを確認した。

この研究成果は、英国科学誌「Nature Climate Change」に受理されて 2013 年 7 月 21 日発行のオンライン版に発表された¹²⁾。今回の研究は、「短期気候変動予測 (季節予測) を用いた豊凶予測の潜在性が全球でどの程度あるかを定量的に見積もった」ことが評価されたとしている。

注3 豊凶予測と不作 (または豊作)について

豊凶予測とは、作柄の良し悪し、特に単位面積当たりの生産量 (収量) の良否を収穫前に見積もること。不作 (豊作)とは、ここでは、前年に比べて、当該年の収量が5%以上、低下 (増加) することとしている。(出典：参考文献10)

5 課題と今後へ向けて

3章では気象予測の活用事例を、4章では気象予測と収量予測の統合事例を述べた。これらは、HPCを活用した高度な予測に基づいて国・地球レベルの広域な規模を対象にしており、今後の方向性を示すものとして注目できるが幾つかの課題がみえる。以下ではそれらを探り上げ今後へ向けての対応を検討する。

5-1 シミュレーションモデルの高度化

営農者は入手して意味のある気象・気候予測情報の提供を期待している。3章の事例では1キロメートル平方毎のETという気象情報が必要とある。予測における解像度の高精度化は重要であるが、例えば、このように求めるべき情報を明確に設定し、それへ向けた気象・気候予測のセグメント化(特定目的化)などの一步踏み込んだ情報の提供も有用ではなかろうか。また、農業への応用では、季節予測と日々の天気予測の中間スケールに位置する開花時期などの予測も重要である。この予測は難しい課題ではあるが、新たな研究が開始される動きもあり、注目していく必要がある。

収量予測モデルの高度化については、4章の事例では、ダイズとトウモロコシについては十分な精度の豊凶予測が出来なかったとある¹¹⁾。本研究者は、気温、土壌水分量以外の条件を加味した収量予測モデルの精緻化の必要性を指摘しており、その研究の推進によりさらに現実に近い収量の予測を期待したい。また、これまでにない広域へ適用する新モデルの構築のためには、新モデルに入力するパラメータをどのように決めるかがキーとなる。従来の狭い地域を対象としたモデルの入力パラメータは、そのまま広域へ適用することは難しいため、高度な統計処理などを駆使した新しい研究の展開が望まれる。

5-2 データの高度化

3、4章の事例では、ともにデータ収集に多大な労力を要している。広域なデータ収集の容易化と収集データの品質向上が求められる。その課題の解決へ向けた方策の1つに、衛星によるリモート

センシングが挙げられる。衛星画像から、圃場での農作物の収量や品質の予測・自然災害の程度・休耕地の位置確認ができるとの報告もある¹³⁾。地上の観測点での測定データとの間での較正や補完などによるデータ精度のさらなる向上が必要になる。

また、収集したデータと気象データとの整合は重要である。4章に述べた気象データと農業データの相違で判るように、気象予測と収量予測との組み合わせは、相互のデータ間の格子の整合によってはじめて可能となり、それが広域での高精度な予測へとつながることになる。従来から気象データから農業データで必要となる格子間隔への補間を目指すダウンスケリング技術¹⁴⁾の適用も行われてもいるが、あるべき予測の姿を想定した上でのデータ収集方法と加工の整合化も必要であろう。農業データのグローバルグリッド(格子)データベース化は重要な研究領域である。

そして、地球規模での豊凶予測などの有意な農業データの収集では、収集方法や品質確保などでの国際協力も必要な要素であり、そうした推進も望みたい。

5-3 モデルとデータ間の整合の高度化

観測データの数はモデルが必要とする格子点数に比較して極めて限定されている。そのため、観測データとモデルを組み合わせ、現実的なデータセットを作ることが必要であり、その手法を「データ同化」と呼ぶ。データ同化によって、観測データをもとにしてモデルで用いるパラメータなどの最適化、数値予報のための初期条件・境界条件の作成などが可能になるとしている¹⁵⁾。コンピュータの計算能力の向上とともに大規模で精緻化するモデルと、同じく大規模化が予想される観測データの融合技術の開発が必要とされている。

6 おわりに

農業をめぐる IT 化の動きは着実に進んでおり生産性向上への期待は大きい。3、4章でとりあげた事例は、HPC を活用する分野の一つとして農業を捉えた動きであり注目したい。ここでは予測とデータ収集・統合がキーとなっており、HPC とビッグデータ

の活用がますます重要になってきたことを示している。

予測については、文部科学省は、すでにスーパーコンピュータ「京」を中核とするハイパーフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) を最大限に活用するために、HPCI 戦略プログラムの中で、高精度の気候変動シミュレーションにより地球温暖化に伴う影響予測や集中豪雨などの予測研究を行っている¹⁶⁾。そして、今後10年程度を見据えた日本の「革新的ハイパーパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI)」計画の中間報告¹⁷⁾にも、気象現象の高精度予測も大きな課題として記載されている。気象・気候予測は、農業はもとより自然災害・生態系保全などとその適用は大きく広がる。

データ収集については、「平成25年度の我が国における地球観測の実施方針」において、気候変動は農業生産にも大きな影響を与えるため地球観測が重要であるとし、G20 農業大臣会合において、我が国を含めた世界における食料の安定供給のために、農業に関する情報改善のツールとしてリモートセンシングの活用が提案されているとの記載がある¹⁸⁾。

観測データや衛星画像データ等のさまざまなデータを統合・融合し、それを起点に有意な情報を引出す処理基盤の充実をはかる動きもみえる⁷⁾。

これらの動きを着実に推進することで大きな成果につなげるべきである。

農業の生産性予測においては、シミュレーションモデル、データ、そして両者間の整合などの高度化が重要である。農業のITによる高度化は、日本の経済発展へ大きなインパクトを与えるものと捉えられ、国の競争力維持の源泉として戦略的に考えていくべきである。そして、農業のITによる生産性向上や予測精度の向上には、農業とITの双方からの歩み寄りによるソリューション開拓が必要である。アカデミア、産業界ともに積極的に取り組むべき研究開発テーマである。

謝辞

本稿の執筆にあたり、(独)農業環境技術研究所 大気環境研究領域 飯泉仁之直様、(独)海洋研究開発機構 アプリケーションラボ 兼 地球環境変動領域 佐久間弘文様から多くの情報と助言を頂きました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 金間大介、野村稔「農業をめぐるIT化の動き：データ収集、処理、クラウドサービスの適用事例を中心に」科学技術動向、No.142、2014年1・2月号
- 2) 「気候変動の状況と農作物への影響」農業・食品産業技術総合研究機構：
<http://www.ja-aichi.or.jp/asc/noushinki/2.pdf>
- 3) 「天気、気候」、<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E6%B0%97>
- 4) 「農業分野における気候リスクへの対応の実例：2週目の予測を使って水稲の冷害・高温障害へ対応する」気象庁：
http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/taio_jiturei.html
- 5) 「Google マップによる気象予測データを用いた水稲栽培管理警戒情報システム」農研機構：
<http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/tarc/2010/tohoku10-03.html>
- 6) 田中慶「農業シミュレーションモデルにおける分散協調システムのためのフレームワークに関する研究」中央農研研究報告、20:1-115 (2013)
- 7) 地球環境情報融合プログラム、<http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/dias/>
- 8) 「広域水稲生育・収量変動予測モデルの自動較正およびシミュレーションプログラム」農業環境技術研究所：
http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result28/result28_30.html
- 9) 「Smart Irrigation: A Supercomputer Waters the Lawn」Scientific American：
<http://www.scientificamerican.com/article/smart-irrigation-a-super/>
- 10) 「世界のコムギとコメの不作を収穫3か月前に予測する手法の開発—季節予測による穀物の世界的豊凶予測—」(独)農業環境技術研究所、(独)海洋研究開発機構：<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/130719/press130719.html>
- 11) 「世界のコムギとコメの不作を収穫3か月前に予測する手法の開発—3ヵ月先の気候予測から世界的な豊凶を予測—」農環研ニュース、No100、2013.10
- 12) T.Iizumi, H.Sakuma et al., 「Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production」Nature Climate Change, 21 July 2013, DOI:10.1038/NCLIMATE1945

- 13) 本郷千春「宇宙からアジアの農地を見つめる」日経サイエンス、2014 年 3 月号
- 14) 金丸秀樹、小泉達治「気候変動と食料安全保障」世界の農林水産、No.833、JAICAF p26-29
- 15) 石川洋一「データ同化によるシミュレーションと観測の統融合」：
https://www.jamstec.go.jp/esc/sympo2013/pdf/ishikawa_130912pub.pdf
- 16) 「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) の構築について」：
http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/hpci/1307375.htm
- 17) 「今後の HPCI 計画推進のあり方に関する検討ワーキンググループ中間報告」：
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/gaiyou/___icsFiles/afiedfile/2013/07/10/1337595_1.pdf
- 18) 「平成 25 年度の我が国における地球観測の実施方針」文部科学省：
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/attach/1325008.htm

..... **執筆者プロフィール**



野村 稔

科学技術動向研究センター 客員研究官

企業にてコンピュータ設計用 CAD の研究開発、ハイパフォーマンス・コンピューティング領域、ユビキタス領域のビジネス開発に従事後、現職。スーパーコンピュータ、ビッグデータ、半導体技術、LSI 設計技術等の科学技術動向に興味を持つ。



金間 大介

科学技術動向研究センター 客員研究官

博士 (工学)。専門は産学連携と知的財産、科学技術予測、ナノテクノロジー分野の研究動向など。産学連携活動の分析や技術予測プロジェクトに従事し、中・長期的な技術トレンドと経済社会との関係に興味を持つ。

インフラ長寿命化における道路橋の新たな点検技術の開発

坪谷 剛 市口 恒雄

概 要

2013年11月29日にインフラ長寿命化基本計画が決定された。ここでは、安全・安心を確保するためには個別施設毎の長寿命化計画を含むメンテナンスサイクルを構築し、継続的に発展させていくことが示されている。

道路橋の点検は各施設管理者が実施しており、国管理の道路橋では、近接目視による5年に1回の定期点検が点検要領で定められている。人による近接目視は、表面の劣化・損傷は確認できるが、施設内部で起こっている劣化・損傷の確認ができない。施設の長寿命化を図りコスト縮減をさらに推し進めるためには、定期点検に施設内部の点検項目を取り入れ、劣化・損傷をできるだけ早期に発見し対処することが重要である。また、劣化・損傷のメカニズムを早期に解明し、劣化予測の精度向上に向けた研究開発を推進することが望まれる。

さらには、施設の補修・補強、新材料等に関する技術開発も進めることで、メンテナンス産業を我が国の新たな産業とし、国際競争力の強化に繋げることが期待される。2020年の東京オリンピック・パラリンピックの開催が決定した。我が国の長寿命化計画を紹介するよい機会である。社会インフラの新しい維持管理手法を確立し広く海外に示すことができれば、海外市場も視野に入れた投資ができ、メンテナンス産業関連の技術開発がより一層進むことになる。

キーワード：インフラ，老朽化，道路橋，長寿命化，メンテナンスサイクル，点検，非破壊検査，超音波，電磁波，レーダー

1 はじめに

我が国の社会インフラ（以下、「インフラ」）は、1960年代の高度経済成長期以降に集中的に整備されたものが多く、完成から50年目を迎える施設が年々増加している。道路橋では、18年後に橋長2m以上の橋梁（約70万橋）の約65%が50年目を迎える¹⁾。また、国土交通省の試算では、2010年度の社会資本への投資総額が同額で継続した場合、2037年度には維持管理・更新費が投資総額を上回ることになる²⁾。

科学技術イノベーション総合戦略（2013年6月7日閣議決定）は、「持続的に生活や産業を支える

インフラを低コストで実現する」ことを目標としている³⁾。また日本再興戦略（2013年6月14日閣議決定）では、2030年の目標として「国内の重要インフラ・老朽化インフラは全てセンサー、ロボット、非破壊検査技術等を活用した高度で効率的な点検・補修が実施されている」と掲げている⁴⁾。そして2013年11月29日に政府の「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」において「インフラ長寿命化基本計画（以下、「基本計画」）」が決定された⁵⁾。ここでは、安全・安心を確保するためには個別施設毎の長寿命化計画（以下、「個別施設計画」）を含むメンテナンスサイクルを構築し、継続的に発展させていくことが示されている。この様に、インフラの老朽化対策は政府を上げての喫緊の課題となっている。

2013年12月から総合科学技術会議（CSTP）主導で、府省・分野の枠を超えた横断的プログラムである「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」が開始された。同プログラムには、10の対象課題が候補に挙げられているが、その1つに「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」があり、非破壊検査技術や構造物の性能評価等の省庁横断的な取り組みが始まろうとしている⁶⁾。また、同年12月に国土強靱化基本法が閣議決定され、国土強靱化政策大綱の中で分野横断的な課題として、非破壊検査技術等によりインフラ管理の安全性、信頼性、効率性の向上を実現することが示されている。

本稿では、施設数が多く生活に密接に関係している道路橋を例に、新たな点検技術（非破壊検査技術）の開発について考察する。なお、網羅的な道路構造物の老朽化対策については「科学技術動向」2007年5月号「道路構造物のストックマネジメントのための技術動向」を参照されたい⁷⁾。

2 道路橋におけるメンテナンスの状況

2-1 予防保全型維持管理

国土交通省では、2006年度から橋梁の長寿命化およびコストの削減を目的に、予防保全型維持管理の取り組みを実施しており、国管理の全ての道路橋を対象に長寿命化修繕計画を策定している。地方自治体には、2007年度から長寿命化修繕計画を策定するための補助制度を実施しており、2013年4月時点で、都道府県・政令市は98%、市区町村は79%の策定状況となっている⁸⁾。本計画では、橋梁の点検を実施した上で、健全度の把握、コスト削減効果、点検時期、修繕時期等を明記し

公表することになっている。

なお、2013年9月2日に道路法等の一部が改正・施行され、道路管理者はトンネル・橋等を含む道路施設の点検を適切な時期に適切な方法で行う事が明記された⁹⁾。

2-2 巡視・点検の現状

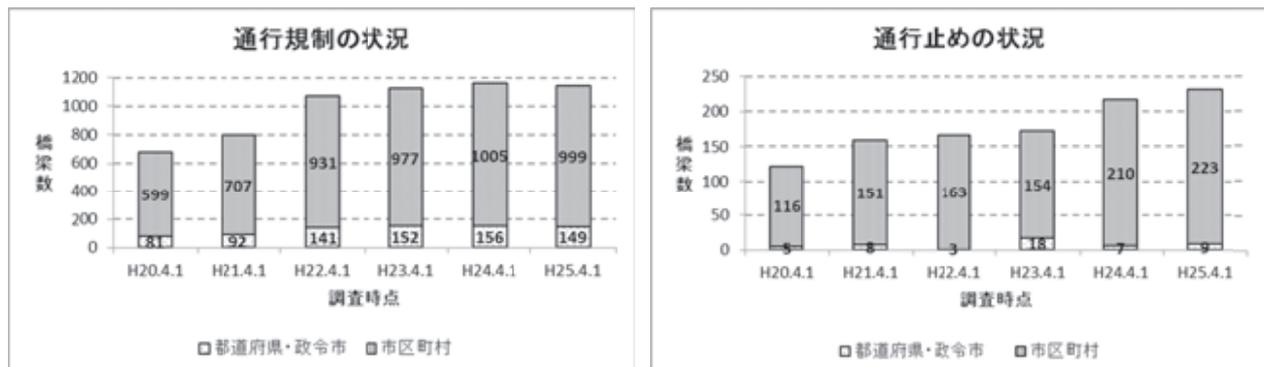
道路橋の点検は各施設管理者が実施することになっており、国管理の道路橋では、近接目視による5年に1回の定期点検が点検要領で定められている¹⁰⁾。

地方自治体へのアンケート（2012年度）によると、市区町村の5.5%が道路の巡視・点検を実施していなかった。また、点検を行っている市区町村の17.3%はマニュアル等がなく、巡視・点検方法が定められていないという結果であった。今後点検が義務づけられても、限られた予算・人員で施設を適切に維持管理することが難しい市区町村もある。また、点検は行っても修繕・更新費が削減される可能性がある。このような現状の中、都道府県や市区町村は国に対して「交付金等の拡充」、「効率的な維持管理・更新のためのマニュアル等の策定」の支援を希望している¹¹⁾。

2-3 通行規制等の現状

全国的には道路橋の修繕が十分にできていない自治体がある。図表1に示すとおり、2013年4月時点で通行規制（大型車の規制等）が1,148橋梁、通行止めが232橋梁ある¹²⁾。通行規制の数も多いが、通行止めの数が増え続けている事は憂慮すべ

図表1 地方自治体における道路橋（橋長15m以上）の通行規制・通行止めの状況



出典：参考文献12を基に科学技術動向センターにて作成

きことである。市区町村の点検状況やマニュアルの整備状況を考慮すると、適切な判断の基、通行止めが実施できているのか危惧される。点検が義務化されれば、修繕が必要な橋梁が増えることとなるが、予算不足が要因で修繕出来ず、通行止めとなる橋梁がさらに増加することが予想される。

また、都道府県、市区町村ともに今後懸念されることとして予算の不足等により安全性に支障が生じることや、職員数の不足、新規投資が困難などが上がっている¹¹⁾。

2-4 海外における点検状況

海外における点検状況を図表2に示す。環境や法整備が異なることから一概に単純比較はできないが、各国とも主な点検方法は「近接目視」であり、基本的な点検方法に違いはない。

他国に比べ点検頻度が多い米国では、1930年代のニューディール政策により社会インフラが大量に

建築されたため、日本よりインフラ老朽化が30年早く訪れていると言われている。実際に、1967年にシルバー橋の落橋等を受け、2年に一度の定期点検を実施している。また、水中点検の実施や点検者の資格制度も設けている。しかしながら、1983年にマイアナス橋、2005年にI-70コンクリート跨道橋、2007年にミネアポリス橋が落橋するという事故が相次いでいる。

3 メンテナンスサイクル向上のための研究開発

3-1 メンテナンスサイクルの概要

基本計画では、メンテナンスサイクルを「点検・診断」・「個別施設計画」・「修繕・更新」の3つに分類し継続的に発展させることになっている（図表3参照）。道路橋においては、点検結果等から劣化・損

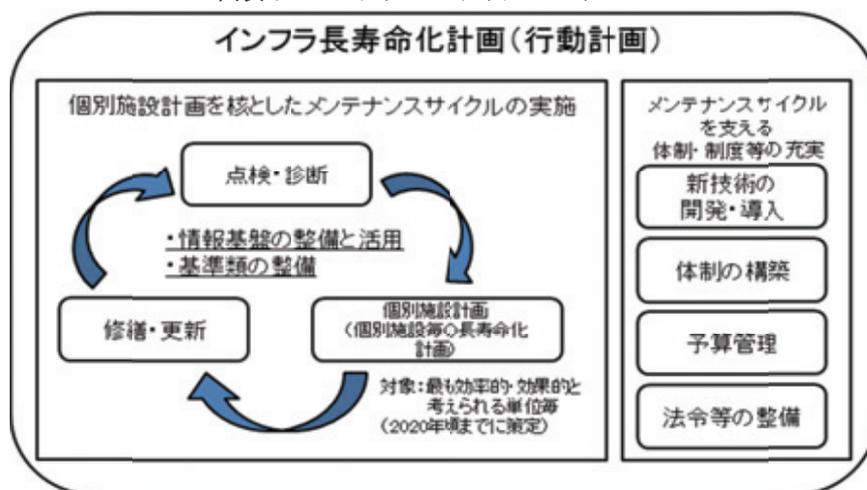
図表2 海外における点検状況（国が管理する道路橋）

項目	日本 (直轄国道)	米国	英国	フランス	ドイツ (州が実施)
点検の基準	橋梁定期点検要領(案)	全国橋梁点検基準(NBIS)	道路構造物の点検	道路構造物の点検と保全に関する技術指示書	ドイツ工業規格DIN1076
点検名称	定期点検	定期点検	主要点検	IQOA橋梁状態評価点検	主要点検及び中間点検
点検頻度	5年以内毎 (供用後2年以内に初回)	2年毎 [※]	6年毎 [※]	3年毎 [※]	3年毎 [※]
主な点検方法	近接目視	近接目視	近接目視	近接目視	近接目視

※印は、条件により点検間隔を短く、または長くする場合がある。

出典：参考文献13を基に科学技術動向センターにて作成

図表3 メンテナンスサイクルのイメージ



出典：参考文献5を基に科学技術動向センターにて作成

傷の程度や原因等（健全性）を把握し、劣化・損傷が進行する可能性や施設に与える影響等（劣化予測）について評価（診断）する。そして修繕の内容・時期を明確にした個別施設計画を立案して、計画的に修繕・更新を実施することとなる。このメンテナンスサイクルをさらに向上させるために重要となるのが定期的な点検であり、劣化・損傷箇所をできるだけ正確に診断することである。

3-2 新たな点検技術の開発

人による近接目視は、表面の劣化・損傷は確認できるが、施設内部で起こっている劣化・損傷の確認ができない。例えば、コンクリート橋の三大劣化要因（疲労、塩害、アルカリ骨材反応）の一つである塩害は、橋梁内部の鉄筋が腐食・膨張することによりコンクリートにクラック（ひび割れ）が発生する。この内部鉄筋の腐食を早期に発見し修繕することができれば、クラック等の発生を抑え施設を長持ちさせることができる。施設内部の非破壊検査にはさまざまな方法があるが、ほとんどの機器は小型で測定範囲が狭いことから大規模な構造物の点検には適さない。このため、施設内部の劣化・損傷を広範囲かつ非破壊で点検する技術開発を行う必要がある。

また、これまで点検が困難な部材も確実に施設内部の点検を行う必要があり、コンクリート橋では中空床版内、山岳などに設置された高さの高い橋脚、水中・土中の橋台・橋脚、鋼橋においては塗装下のクラック、斜張橋では高さ数十mもあるワイヤー内部の破断等も構造や条件に合わせた非破壊検査の製品開発が望まれる。

近年では、近接目視を補完する小型無人飛行体等による赤外線・高感度カメラを使った点検技術、センサーを多数設置して橋梁の挙動から劣化・損傷を見つける点検技術の開発も行われているが、これらは今のところ施設内部を点検するものではない。

3-3 劣化予測の研究開発

劣化予測の精度はメンテナンスサイクルの重要な部分でありインフラ施設の長寿命化に繋がる。橋梁の劣化予測手法には、寿命を設定する、理論的な劣化予測式、点検結果等の実績を統計的に分

析、遷移確率を用いる¹⁴⁾等があるが、劣化・損傷は多数の要因が複雑に影響しているため、高い精度の劣化予測を行う事は難しい。また、橋梁は複数の部材が複合的に繋がっているため、部材毎の評価はできても全体として複合的な評価は難しい。点検結果や環境条件等から劣化・損傷との相関を解明するには、劣化・損傷のメカニズム解明、各部材の劣化予測、施設全体としての劣化予測等、施設毎にも異なり多くの実証実験が必要となる。課題は多いが、劣化予測の精度向上に向けた研究開発を推進する必要がある。

4 道路橋点検における非破壊検査技術の動向

これからのインフラ点検は、施設内部を広範囲かつ非破壊で点検できることが重要である。現在、非破壊検査のうち道路橋点検で実用化されている代表的な事例を以下に紹介する。

4-1 点検に有効な非破壊検査の主な種類

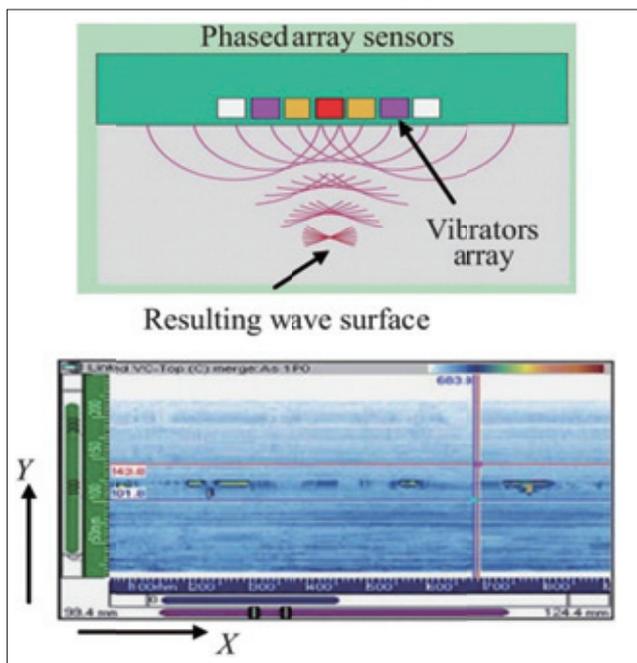
1) 中性子線透過法

独立行政法人理化学研究所と独立行政法人土木研究所は、橋梁内部非破壊観察のための高速中性子線イメージング検出器の開発について、2013年9月に連携協力の協定を結んだ¹⁵⁾。中性子線の特徴は、鉄やコンクリートなどに対しての透過率が大きく、軽元素からの散乱が原因で水に対する透過率が小さいことである。この透過率の差を利用して、コンクリート中の鉄や水分が存在する箇所のイメージングが可能となる。実用化には、小型中性子源のビーム強度の増強と検出感度の向上が課題となる。また、屋外で使用する場合は、放射線遮蔽や管理区域の設定などの問題がある。

2) フェーズドアレイ超音波探傷法

鉄骨の溶接不良や鉄パイプの傷などには、超音波の反射を利用した非破壊検査が利用されるようになってきた。フェーズドアレイ超音波探傷の場合、図表4上図のように多数の超音波発振子を線状または面状に配置し、それぞれの発振子の位相を調節することにより、超音波を特定の深さと位置に収束させることができる¹⁶⁾。この収束位置を上下左右にスキャンして画像処理することにより、

図表4 フェーズドアレイ超音波探傷法



出典：参考文献16

鋼材内部の断面図(図表4下図)を得ることができ、傷・亀裂の形状・大きさを容易に判定できる。

超音波探傷法は同一欠陥を多数の位置や方向から検出できるため、検出精度が高いのも特徴である。また、放射線を使わないので人体への安全性が高く、法規制もないため手軽に使用できる。小型のフェーズドアレイ超音波探傷装置は市販されているが、コンクリート構造物に対しては、超音波の減衰やコンクリート中の小石による乱反射の影響が大きく、画像処理による補正が重要となる。

3) 赤外線サーモグラフィ法

コンクリート表面に剥離・ひび割れ・空洞があると、その部分だけ他の箇所と温度が異なってくる。赤外線カメラは、その温度差を検知できるので、コンクリート表面付近の非破壊検査が可能である。ただし、コンクリート内部からの赤外線は検知で

きないので、表面付近の情報しか得ることができない。

4) 電磁波レーダー法

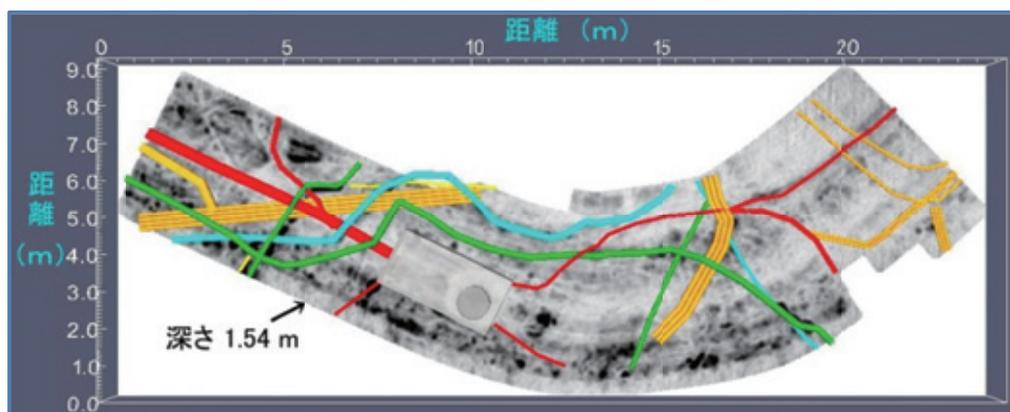
コンクリート内部の鉄筋などの点検は、パルス電磁波をコンクリート中に向けて放射し、反射波の走時を測定することによって実施されることが多い。また、図表5のように周波数300 MHz～2.5 GHz程度の電磁波を用いて、地中埋設管(下水道管、ガス管等)や空洞の調査にも使われる¹⁷⁾。周波数が低いほど地中深くまで届き、地中の水分量などにも依存するが、300 MHzの電磁波で深度約2 mまでの調査が可能である。分解能は原理的にはほぼ半波長となるため、300 MHzの電磁波を使った場合には、約50 cmの分解能しか得られない。逆に、2.5 GHzの電磁波では約6 cmの分解能が得られるが、コンクリート中および地中での吸収が大きく、あまり深くまでは測定できない。

しかし、複数周波数の利用またはワイドバンド化、複数の発振器と受信器のアレイ化、3次元データ解析や画像処理などにより解像度や判定精度の改善が期待でき、日本や米国では、橋梁の非破壊検査や道路下の空洞・埋設物調査を目的とした電磁波レーダーの開発が進み、一部実用化している。

4-2 非破壊検査の実施例

米国ラトガース大学工学部は米国交通省の連邦ハイウェイ局(Federal Highway Administration)と共同で、数種類の手法を組み合わせた橋梁床版検査ロボット「RABIT™」(Robotics Assisted Bridge Inspection Tool)を開発した^{18,19)}。電磁波レーダーアレイ(Ground Penetrating Rader)、超音波アレイ、電気抵抗測定、高精細カメラなどを併用

図表5 電磁波レーダーによる地中調査



写真提供：ジオ・サーチ株式会社

して橋梁床版の検査を自動的に行う。超音波アレイを路面に密着させる必要があるため、検査時には、4足歩行をしながらの測定となる。

図表6は、2013年に行われたワシントンD.C.のアーリントンメモリアルブリッジの検査風景である¹⁹⁾。米国交通省は、ワシントンD.C.を含む東海岸数州の24の橋梁をこのRABIT™を用いて検査しており、将来的には、全米の1,000以上の橋梁の検査にも利用したいとしている。RABIT™を用いた検査は橋梁床版に限られるが、それでも検査精度の向上や大幅な省力化が可能である。

また、米国連邦ハイウェイ局は、ローレンス・リバモア国立研究所と共同で電磁波レーダーを用いた橋梁床版検査を開発した。図表7は、橋梁床版を点検する検査車「HERMES」(High speed Electromagnetic Roadway Mapping and Evaluation System)である²⁰⁾。現在は、カリフォルニア州交通局とローレンス・リバモア国立研究所が共同で、HERMES IIとして、周波数のワイドバンド化、アレイ数の最適化、画像処理方法の改善などさらなる改良を行っている²¹⁾。交通を遮断せずに、時速55マイルで走行しながら橋梁床版の検査が可能な段階になっている。

日本でも、ジオ・サーチ株式会社が、開発した電磁波レーダーを用いたスキャナー技術「スケルカ®」は、地中1.5m程度までの直径5cmの埋設物の検知が可能である。図表5は、深さ0～1.5m

における信号から判明した地中埋設管を重ねて図示してあるが、斜め上方からの3次元俯瞰図や各深さにおける平面写真を表示することも可能である。現在、「スケルカ®」を搭載した20台以上の「スケルカー」(図表8参照)が、時速60kmで走行しながら橋梁調査や道路調査を行っており、需要の増加にともない台数を増やす予定である。既に、日本全国の高速自動車道路、直轄国道、都市高速道路を中心に、約800橋梁(2013年3月時点)の床版調査実績を持つ。特に、床版コンクリートの滞水・砂利化・鉄筋腐食・空洞・ポットホール(舗装表面の陥没穴)周辺の劣化範囲・かぶり厚不足などの検出に威力を発揮している。また、道路の路面下空洞調査にも使用されており、2013年3月末時点での調査道路総延長103,777kmに対して発見空洞が17,703箇所にも及ぶ。東日本大震災での路盤液状化地域、津波被害地域、激震地域での道路調査にも活躍した。

5 まとめと提言

5-1 施設内部の点検用非破壊検査の開発

施設の長寿命化を図りコスト縮減をさらに推し

図表6 アーリントンメモリアルブリッジ(ワシントンD.C.)の点検風景



出典：参考文献19

図表8 高速・高精度道路スキャナー搭載の「スケルカー」



写真提供：ジオ・サーチ株式会社

図表7 橋梁床版検査車「HERMES」点検風景



出典：参考文献20

進めるためには、定期点検に施設内部の点検項目を取り入れ、劣化・損傷をできるだけ早期に発見し対処することが重要である。そのためには、施設内部を広くかつ非破壊で点検する技術開発を推進する必要がある。また、複雑な構造である橋梁の橋脚・橋台や水中・土中等の点検も重要で、構造や条件に合わせた非破壊検査の製品開発も望まれる。

国土交通省は、民間からの技術公募や分野を超えた協定締結を始めている。道路橋は施設毎に環境条件等が違うことから、各施設管理者は点検に必要な条件を積極的に提示することで、土木分野だけでなく他分野の技術シーズを掘り起こし、新たなインフラ点検のための技術開発・製品開発にまで導く必要がある。

5-2 劣化予測の精度向上に向けた研究

メンテナンスサイクルにおいて劣化予測の精度は重要であり、精度向上に向けた研究を進めていく必要がある。そのためには、劣化・損傷のメカニズムを早期に解明し、部材毎および全体として複合的な劣化予測を行い評価（診断）することが重要である。

橋梁には施設管理者（国、都県、市区町村等）や目的（道路、鉄道、港湾、空港、農業、林業等）毎に多くの橋梁がある。このため省庁横断的な取り組みにより、劣化予測の精度向上に向けた研究開発を推進することが望まれる。

5-3 市区町村における長寿命化の推進

市区町村における維持管理状況はかなり深刻な問題である。当面の間、国による財政支援や点検等の講習会など幅広いバックアップを行い、点検・診断に必要な技術力の向上や点検データを積み重ねる必要がある。ただし、早急な対応が難しい市区町村もあるため、最悪の事態を避けるためにも落橋防止装置の設置やセンサー・カメラ等の設置を国が補助する等の施策が必要となる。

5-4 国際競争力の強化

基本計画では、補修・補強、新材料等に関する技術開発も進める必要があると示されている。個々の技術を開発することはもちろんであるが、点検・診断～評価～修繕までをパッケージとして開発することは、新たな産業を産み、今後老朽化が問題化する海外市場への輸出も可能となる。メンテナンス産業を我が国の新たな産業とし、国際競争力の強化に繋げることが期待される。

2020年の東京オリンピック・パラリンピックの開催が決定した。海外の来訪者が数百万人規模で東京を訪れるであろう。あと6年しかないが、我が国の長寿命化計画を紹介するよい機会である。社会インフラの新しい維持管理手法を確立し広く海外に示すことができれば、海外市場も視野に入れた投資ができ、メンテナンス産業関連の技術開発がより一層進むことになる。

参考文献

- 1) 内閣官房「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議（第1回）」参考資料
平成25年10月16日：http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/dail/sankou.pdf
- 2) 2012国土交通白書「第I部 第2章 第1節 6 社会資本の適確な維持管理・更新」：
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/hakusho/h24/index.html>
- 3) 科学技術イノベーション総合戦略「科学技術イノベーションが取り組むべき課題（工程表）」平成25年6月7日閣議決定：<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/koteihyo.pdf>
- 4) 日本再興戦略「戦略市場創造プラン（ロードマップ）」平成25年6月14日閣議決定：
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/rm_jpn.pdf
- 5) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議「インフラ長寿命化基本計画」平成25年11月29日決定：http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/pdf/houbun.pdf
- 6) 総合科学技術会議 HP「戦略的イノベーション創造プログラム（S I P：エスアイピー）」：
<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html>

- 7) 池田一嘉「科学技術動向 2007 年 5 月号」道路構造物のストックマネジメントのための技術動向：
<http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/1835/1/NISTEP-STT074-20.pdf>
- 8) 記者発表資料「道路橋の長寿命化に関する取組状況について」平成 25 年 7 月 2 日：
<http://www.mlit.go.jp/common/001003141.pdf>
- 9) 国土交通省「道路法等の一部を改正する法律の施行期日を定める政令及び道路法等の一部を改正する法律の施行に伴う関係政令の整備に関する政令について」平成 25 年 8 月 21 日：
http://www.mlit.go.jp/report/press/road02_hh_000008.html
- 10) 国土交通省「橋梁定期点検要領（案）」平成 16 年 3 月：http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_6.pdf
- 11) 国土交通省「今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について（答申）」2013 年 12 月 25 日：
<http://www.mlit.go.jp/common/001023146.pdf>
- 12) 国土交通省「全国橋梁の通行規制等橋梁数の推移（15m 以上）」：
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1.pdf
- 13) 国土交通省「道路橋の予防保全に向けた有識者会議（第 1 回、第 2 回）」：
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/>
- 14) 国土技術政策総合研究所「道路構造物群の状態評価手法及び橋梁の将来状態予測手法に関する調査検討」：
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryuu/tnn/tnn0661pdf/ks066111.pdf>
- 15) 理化学研究所「理研と土木研究所が連携協力協定を締結」平成 25 年 9 月 13 日：
http://www.riken.jp/pr/topics/2013/20130913_1/
- 16) 「フェーズドアレイ超音波探傷法による鋼構造物の非破壊検査方法」JFE 技法 No.27（2011 年 2 月）p56-57：
<http://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/027/pdf/027-14.pdf>
- 17) ジオ・サーチ（株）「[スケルカ®] 技術とは」：<http://www.geosearch.co.jp/tech/>
- 18) H. Ghasemi（Federal Highway Administration）“Robot-Assisted Bridge Inspection Tool”；
[08_06.05.2013_FHWA_HG.pdf](http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbis/pubs/nhi12049.pdf)
- 19) (米) Rutgers 大学工学部ホームページ：<http://www.ece.rutgers.edu/node/1135>
- 20) Bridge Inspector's Reference Manual（米国土交通省連邦ハイウェイ局発行 2012 年 2 月）p.15.2.6
<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbis/pubs/nhi12049.pdf>
- 21) カリフォルニア州交通局（California Department of Transport）ホームページ：
<http://www.dot.ca.gov/hq/research/maintenance/hermes.htm>

..... 執筆者プロフィール



坪谷 剛

科学技術動向研究センター 上席研究官

専門は土木工学。主に河川における治水計画や治水対策に関する業務に長く携わる。2012 年 4 月より現職にて、科学技術動向の調査研究に従事。



市口 恒雄

科学技術動向研究センター 特別研究員

理学博士。専門は半導体、超伝導、磁性体の物理。サブミリ波やマイクロ波を用いた物性測定を中心に、米国の大学や日本の電機メーカーで研究に従事。現在は、当研究センター常勤として、科学技術予測や科学技術動向研究に従事。

各国の地球観測動向シリーズ(第7回)

オランダの地球観測活動の方向性 —精密農業を支える地球観測画像への 先行投資と海外ビジネスの展開—

辻野 照久

概要

オランダは独自の地球観測衛星を保有していない。それにもかかわらず世界最先端の地球観測活動を行っているといえる。その理由は、自国内の精密農業や水管理などの応用だけでなく、欧州諸国・米国・ロシア・中国などの宇宙先進国に対しても地球観測応用の製品やサービスを提供するビジネスを行ってきた実績があるからである。オランダはESAの地球観測衛星の画像データを受信する他、国家予算で外国衛星の画像データを購入し、独自の地球観測衛星を保有した場合とほとんど変わりなく地球観測活動を展開することが可能となっている。特に、情報通信（ICT）企業においてはそのデータを活用して実用的なソフトウェアの開発に取り組むことができ、オランダの強みを獲得している。

オランダは高付加価値の農産物の生産拠点であり、農産物の輸出額が米国に次いで世界第2位という規模を誇っている。この背景には、地球観測画像データを利用した精密農業による単位面積当たりの収量の向上、農作業に必要な人件費の低減などがある。

本稿ではオランダ政府とオランダ企業が連携して推進している精密農業における衛星利用の動向などを通じて、オランダの地球観測活動の方向性を分析する。

キーワード：オランダ宇宙局、衛星データポータル、精密農業、穀物生育監視、海外プロジェクト

1 はじめに

オランダは独自の地球観測衛星を保有していない。それにもかかわらず、国家予算で外国衛星の画像データを購入することによって、世界最先端の地球観測活動を行っている。特に地球観測画像の商業利用に最も適した分野は農業であり、オランダでは精密農業（precision agriculture）¹⁾への応用において高度な技術力を有する。精密農業とは、農地の場所ごとに土壌や収量などの情報を細かく把握し、地図情報として管理し、場所によって肥料・農薬などの散布を細かく調整し、環境に影響を与える化学物質を必要最小限にとどめることで環境保全型の農業を行なおうとするものである。オランダの地球観

測情報処理企業は、自国内の精密農業への応用研究を20年以上前から行ってきた実績をベースに、最近では欧州諸国・米国・ロシア・中国などの宇宙先進国やラテンアメリカ・アジア・アフリカの開発途上国に地球観測応用の製品やサービスを提供するビジネスを開始しており、貿易立国オランダの面目躍如の感がある。特に、情報通信（ICT）企業においては無料で利用できるデータを活用して実用的なソフトウェアの開発に取り組むことができ、オランダの強みとなる製品を開発している。

オランダは国土面積が日本の9分の1、耕地面積で約半分しかないにもかかわらず、高付加価値の農産物（花卉など）や農産物加工品（タバコなど）の生産拠点であり、農産物輸出額が米国に次いで世界第2位という規模を誇っている。この背景には、地

球観測画像データを利用した精密農業による単位面積当たりの収量の向上、農作業に必要な人件費の低減などがある。

本稿ではオランダ政府とオランダ企業などが連携して推進している精密農業などの衛星利用ビジネスの動向などを通じてオランダの地球観測活動の方向性を分析する。

2 オランダの地球観測活動の概況

2-1 欧州におけるオランダの立場

オランダは1975年に欧州宇宙機関(ESA)が発足した際に最初の加盟国(10か国)の1つとなり、高い産業技術力を背景にESTECが設置され、衛星開発における欧州の中心地となった。特にオランダ産業界が欧州の中でも優れている分野は、気象衛星用観測機器やさまざまな社会分野に地球観測データの恩恵をもたらす応用ソフトウェア製品の開発などである。

オランダの宇宙活動は主としてベルギーに本部を置く欧州連合(EU)、フランスに本部を置くESAおよびドイツに本部を置く欧州気象衛星機構(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites: EUMETSAT)を通じた国際協力で進められている。オランダ政府としては、ESAの地球観測衛星やEUMETSATの気象衛星に加盟国の一員として資金を拠出していることから、国益確保のためにもこれらの国際組織の活動に主体的に関与すべき立場にある。

2-2 宇宙予算

宇宙予算は経済省、教育文化科学省、国防省によって拠出され、2014年度のESA拠出金は1億2510万ユーロである。このうち約2割をESAの地球観測プログラムに充てているとみられる。必須プログラムである宇宙科学や任意プログラムの有人宇宙飛行などにも同程度を拠出しており、地球観測分野はオランダの優先分野の1つである。オランダは「Sentinel-5」シリーズ衛星の先行実験(プリカーサ)衛星に使用される搭載赤外線センサをダッチ・スペース社¹⁾が受注する形で拠出に見合った自国産

業界への資金還流を行っている。

またEUMETSATへは年間約100万ユーロ程度を拠出し、静止気象衛星「メテオサット(Meteosat)」や極軌道気象衛星「メトッパ(MetOp)」の画像データの配信を受けている。これらの衛星によってもたらされる気象観測データは米国海洋大気庁(NOAA)が運用する気象衛星群に匹敵する世界最高水準の観測機器により取得されたものである。

2-3 宇宙開発体制

オランダ政府の省庁間宇宙委員会(Interdepartementale Commissie Ruimtevaart: ICR)は宇宙政策の策定を担当し、関連省庁は同委員会への参加を通じて同国の宇宙政策に関与する。ICRはオランダ宇宙局(Netherlands space Office: NSO)²⁾とオランダ宇宙研究機関(Netherlands Institute of Space Research: SRON)を諮問機関としており、ESA理事会や各プログラム委員会等には経済省を主とする各省庁やNSOおよびSRONの代表が参加している。NSOはESA拠出の取りまとめなどを行う政策立案部門である。NSOは経済省所管のセンターノヴェム(SenterNovem)の傘下であり、政策立案を担当する職員は25名程度である。この他、研究開発の現場などに300名程度の職員が所属している。

オランダ宇宙研究機関(SRON)³⁾は、NASAやESAの地球観測衛星ミッションに参加している。

オランダの総合的な宇宙企業であるダッチ・スペース社はエアバス(旧EADSアストリウム)社のグループ企業である。

2-4 地球観測政策

オランダ政府は、地球観測活動を行う民間企業に対し、さまざまな便宜を図ってビジネス的に成立する構造を構築しようとしている。その代表例はNSOが実施している「Satellietdataportaal」(衛星データポータル)⁴⁾である。

宇宙開発利用活動におけるオランダの意志や要望はESAの閣僚級理事会において宇宙担当大臣が表明する。ESAは現在コペルニクス計画(旧称GMES)の中心となる「センチネル(Sentinel)」衛星を開発中であり、ESAにより衛星が開発され初号機の性能が確認されれば、その後の定常的な運用の

ための後継衛星はEUと欧州委員会 (EC) の予算で調達されることになっている。

オランダは間もなく到来する「センチネル (Sentinel)」衛星のデータ受信が可能になる時代になる前に、外国衛星の画像データを購入し、自国の企業が衛星画像をより積極的に利用するための施策を先取りして実施している。

2-5 「衛星データポータル」の概要

NSOが地球観測データのユーザ向けに無料で提供している「衛星データポータル」の画像は、図表

1に示すように将来の「Sentinel」衛星の機能に近い4種類の衛星が取得した生データを購入したものである。データ提供を受ける機関は政府の12省庁(経済農業イノベーション省、インフラ環境省、水管理省、気象庁、警察庁、国防省、文化財管理室など)、15地方自治体(アムステルダム市、ハーグ市など)、14の大学・研究機関(ワーヘニンゲン大学、航空研究所など)、NPO4団体、企業98社、2つの水利組合があり、2014年3月時点で計145団体である⁵⁾。本稿では、この中に含まれる農業関係の企業の活動に注目する。

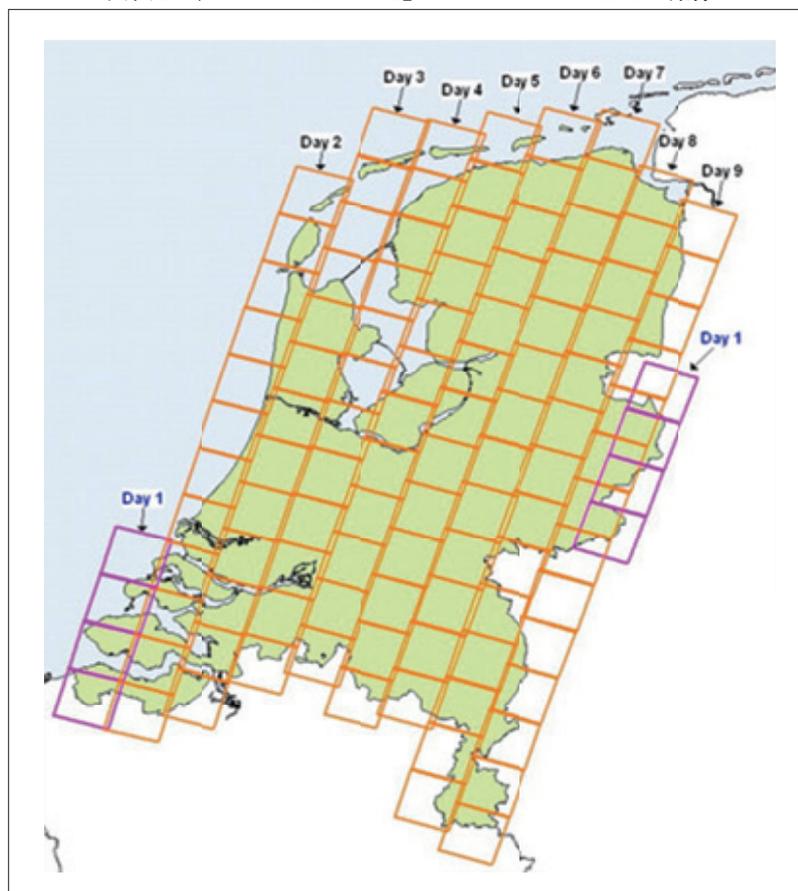
光学画像の中でも主要なデータ源となる台湾の「フォルモサット (FORMOSAT) -2」⁶⁾は、図表2に示すようにオランダ全土を110シーンでカバーす

図表1 「衛星データポータル」が提供する衛星画像データの種類

衛星名	保有国	種類	分解能	対応する Sentinel 衛星
Radarsat-2	カナダ	SAR	25m	Sentinel-1 (SAR)
FORMOSAT-2	台湾	光学	パンクロ 2m、マルチ 8m	Sentinel-2 (光学)
Deimos	スペイン	光学	マルチ 22m	
UKDMC-2	イギリス	光学	マルチ 22m	

出典：各種資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 「フォルモサット -2」によるオランダ全土の撮像



出典：Satellietdataportal のウェブサイト

<http://www.spaceoffice.nl/nl/Satellietdataportal/Beschikbare%20data/Formosat-2/>

る。1シーンは24 km 四方の大きさである。9日間の回帰でオランダの西側の海岸部から東側の内陸部までを順次撮像していく。

政府から無償で画像提供を受けることができる「衛星データポータル」とは別に、オランダの各機関は必要に応じて各種の外国衛星の画像を購入している。オランダ国立航空宇宙研究所（National Aerospace Laboratory : NLR）は航空宇宙関係の技術開発の一環として地球観測活動を行っており、イスラエルのイメージングインターナショナル社が運用する「EROS-C」衛星、フランスのスポットイメージ社が運用する「SPOT-5/6」、インドの「Cartosat」衛星などの画像データを購入している。この他、ドイツの「TerraSAR-X」の画像を購入している研究機関もある。

3 応用事例

3-1 オランダの精密農業

オランダは欧州諸国の中でも国土面積に比して大規模な農業を行っており、一経営体あたり平均経営面積は25.9 haで、日本に比べてかなり広い。主要な農畜産物は、花卉等（チューリップ等）、じゃがいも（輸出額世界第1位）、トマト（同1位）、キュウリ（同2位）、キノコ類（同2位）、牛肉（同4位）、チーズ（同3位）、ビール（同2位）、たばこ（同1位）等である（いずれも2010年の統計による）。

国土の約半分を占める農地での農作業は、精密農業と呼ばれるイノベティブな形態で行われており、生産性も品質も高い。

ワーヘニンゲン大学は食品加工領域の論文数が世界的に見て突出しており、先進的な精密農業のリーダー的な存在である⁷⁾。同大学の附置研究所である Arterra (Center for Geo-Information) の地球観測部門はその中でも農業への衛星データ利用の応用研究を行っている。気象・灌漑・土壌状態・生育状況・受粉管理・農薬散布状況など多岐にわたる。精密農業の技術的要素は高機能の農業用車両、ICT、選別用センサなど農作業の各サイクルで種々の工業製品が用いられるが、ICTの中核となる生育状況などの観測データは地球観測衛星が大部分を提供する。衛星による画像データがどのように精密農業に役立てられるか、具体的な例をあ

げると、赤外線センサにより植物の生育領域を区分し活性度を測定したり、作物に含まれるたんばく質含有量を測定して収穫時期を判断したりすることなどがある。従来の衛星を使わない情報収集方式では、農場を見て回って生育状況を観察するために知識や経験を持つ人手が必要であったが、衛星画像から一挙にデータをすることで人件費の低減にもつながる。

2011年に WaterWatch 社と BasFood 社が統合されて発足した eLEAF 社⁸⁾は「食の安全性と水の生産性」を掲げ、地球観測画像を利用した精密農業および水管理のコンサルティングを行っている。同社に集まった Arterra 出身の専門家らは、農業用の灌漑管理、穀物やじゃがいもの生育管理などの製品を集大成し、「PiMapping[®]」というソフトウェアを開発した。衛星画像データに基づいて精密農業に必要な情報処理を行い、農業法人や個人経営の農家などのユーザに施肥のタイミングや生育状況、収穫時期などの情報を提供している。同社によれば、農業のサイクルは、種蒔きから収穫まで不確実性に満ちており、従来の農業家は経験や知識だけでなく「勘」に基づく意思決定を行っているという。精密農業とは、「勘」を衛星データに基づくアドバイスに切り替えることを意味する。このような勘に頼らない意思決定を行うためには、衛星データを利用するだけでなく、温度や湿度などの現場観測データも収集する必要がある、情報閲覧に利用する端末装置自体に気象センサを組み込むなどの工夫もみられる。

このようなシステムを利用することにより、ユーザはそれぞれの栽培品目に適した精密農業に役立つ情報を得ることができる。オランダ国内での実績を踏まえ、オランダ以外の国に対してもその国の農業慣行や気象条件などを勘案し、衛星観測データと現場データを組み合わせた農作業のソリューションを提供することがオランダ企業のビジネスとなっている。各国の地球観測活動の技術的レベルを評価するうえで、その国の技術が外国でも利用され、収益をあげているかという観点から見ることも1つの評価項目となる。そのような事例を以下に紹介する。

3-2 オランダ企業の海外プロジェクト実施事例

オランダ企業は海外に向けて精密農業のビジネス化を実現している。オランダにおける1つの事例として、eLEAF 社が開発した精密農業や灌漑管理に役立つ各種のソフトウェアが、オランダ国内だけでなく、欧州諸国・米国・ロシア・中国などの宇宙

先進国やアジア・アフリカ・中南米など世界30カ国以上に普及していることは注目に値する。

eLEAF社の提供可能なサービスは多岐にわたり、導入先の農作業習慣や水資源の状況などに応じて異なったソフトウェアやサービスを提供する。同社の実績から以下にいくつかの事例を示す。

- ①「Fieldlook」⁹⁾(オランダ語ではMijnAkker)はWaterWatch社がユーザに精密農業用の作業支援情報を提供するために開発したポータルである。1995年に開始されており、20年近い利用実績がある。eLEAF社に統合されてからは、オランダだけでなく、カナダ・ポーランド・ウクライナでも導入されている。ポーランドにおけるポータル画面を図表3に示す。
- ②BasFood社が開発した「PotatoLook[®]」はじゃがいもの生育を支援するシステムである。この製品をベースにして、現在は「Croplook Potato」のポータル¹⁰⁾が世界各国向けに提供されている。
- ③果実の生育支援のための「Fruitlook」¹¹⁾はeLEAF社と南アフリカ共和国のクワ・ズールー・ナタール大学(UKZN)との共同開発である。最初はブドウの栽培を対象とした「Grapelook」が開発され、その後継ソフトとして他の果実の生育にも利用できる「Fruitlook」が開発された。このシステ

ムの特徴は、少ない灌漑水で生産量を向上させることを目的としていることである。同国は乾燥気候のため水が少ないが、ワイン製造の原料となるブドウの栽培には適している。情報提供は無料であるが、eLEAF社は地域政府(西ケープ州)と契約することにより、衛星データを利用した農家向けの情報を無料で提供するビジネスが成立している。これはオランダ政府の「衛星データポータル」政策を相似展開したものと思われる。

- ④「WaterWatch」は水資源管理を行うためのソフトウェアである。米国ではアイダホ州の水資源管理局がこのシステムを導入し、農業者の水利権の管理に用いている¹²⁾。アフリカでもナイル川流域公社(Nile Basin Authority:NBA)が中心となってエジプト・ケニアなどナイル川流域の7か国において灌漑用農業用水の効率的利用のために「WaterWatch」を導入している¹³⁾。これらの国はそれぞれ国情が異なり、良好な灌漑を行っている国もあれば貧弱な灌漑しかできない国もあり、エジプトのように同じ国内でも豊かな地域と貧弱な地域が混在している国もある。単一のソリューションではなく、衛星データを活用してそれぞれの地域に応じた適切な灌漑方法の助言を行うことがオランダ企業のビジネスとなっている。

図表3 ポーランド向けのFieldlookポータル画面



出典：参考文献9

図表4 オランダにおける地球観測応用の実施例

分野	観測手法	企業等の例	地球観測活動の内容
堤防管理	InSAR	Hansje Brinker	堤防の変形を監視し、異常な個所を検出（従来は堤防10kmを3人で監視）。
インフラ監視	光学 SAR	NEO	パイプラインの沈下状況、道路・下水道の安全、鉄道・港湾・電力などを監視。
水管理	空撮	Deltares	水量・水質・河川の安全等を監視。

出典：各種資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

3-3 その他の地球観測応用事例

オランダの地球観測の代表的な応用分野としては、精密農業の支援以外にも、堤防などの変形監視・インフラ監視・水管理などがある。国土の大部分が海面下のオランダでは堤防監視は国土保全上重要である。その他の事例についても、関係する政府機関、地方自治体、企業などが「衛星データポータル」を利用して既存の業務手法を改善している。主な地球観測応用を担う企業などの概要を図表4に示す。このような利用事例は自国だけにとどまらず、海外プロジェクトの受注にもつながっている。

4 おわりに

オランダの地球観測活動は企業が中心となってバリューチェーンを形成しており、政府は農業ビジネスに役立つ研究開発、輸出許可の手続き簡素化といった法制面での工夫、衛星画像の無償提供

などで農業経営体に対する支援を巧みにしている点は我が国でも参考になる。日本の9分の1程度しかない約400万haの狭い国土で、半分の約200万haを農地とし、生産人口の2%ほどにしなければならないわずか17万人ほどの農業人口で、世界第2位の農産物輸出を行っていることに注目すべきである。

我が国でも農林水産省主導の農林水産技術会議において精密農業の検討が行われており、衛星による生育状況の観測やコメのたんばく質含有量予測による分別収穫などの技術的な施策なども含まれている。また情報通信企業の中には農業ICTソリューションを製品化しているところもある¹⁴⁾。我が国の国際的な貢献といえば、国際災害チャーターのような非営利の活動では貢献が高く評価されているが、外国から収益が上がるようなビジネス展開は全くと言っていいほど行われていない。我が国も高齢化の進展による産業構造の変化や食糧自給率向上の数値目標などを勘案し、農業法人による大規模経営や消費者の意向をビッグデータ的に処理した流通ルート的高度情報化などについて政府主導でビジョンを掲げ、そこにオランダ農業の効率性の良さなどの長所を国情の違いも勘案して取り入れていくことが望まれる。

参考文献

- 1) ダッチ・スペース社のウェブサイト <http://www.dutchspace.nl/>（オランダ語）
- 2) NSOのウェブサイト <http://www.spaceoffice.nl/en/>
- 3) SRONのウェブサイト <http://www.sron.nl/>
- 4) Satellietdataportalのウェブサイト
<http://www.spaceoffice.nl/nl/Satellietdataportal/>（オランダ語）
- 5) NSO Satellietdataportalの会員リストのページ
<http://www.spaceoffice.nl/nl/Satellietdataportal/Deelnemende%20partijen/>
- 6) FORMOSAT-2、SPOT Imageのウェブサイト：
http://www2.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r2929_9_formosat2_product_sheet_en.pdf

- 7) オランダ・フードバレーの取り組みとワーヘニンゲン大学の役割、金間大介、科学技術動向 2013年7月号、No.136
- 8) eLEAF社のウェブサイト <http://www.eleaf.com/>
- 9) ポーランドにおける「Fieldlook」のウェブサイト <http://www.fieldlook.pl/>
- 10) 「Croplook potato」のウェブサイト <http://www.croplook.com/potato/en/home>
- 11) 南アフリカにおける「Fruitlook」のウェブサイト <http://www.fruitlook.co.za/>
- 12) Controlling Farmers' Water Rights in Idaho, USA
<http://www.waterwatch.nl/projects/north-america.html>
- 13) Agricultural Water Use and Water Productivity in the Large Scale Irrigation (LSI) Scheme of the Nile Basin、Nile Basin Authority (NBA)、2009年
<http://nileis.nilebasin.org/content/agricultural-water-use-and-water-productivity-large-scale-irrigation-lsi-schemes-nile-basin>
- 14) 農業をめぐるIT化の動き：データ収集、処理、クラウドサービスの適用事例を中心に、金間大介・野村稔、科学技術動向 2014年1/2月号、No.142

..... **執筆者プロフィール**



辻野 照久

科学技術動向研究センター 客員研究官

<http://members.jcom.home.ne.jp/ttsujino/space/sub03.htm>

専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理、旧宇宙開発事業団で世界の宇宙開発動向調査などに従事。現在は宇宙航空研究開発機構（JAXA）調査国際部調査分析課特任担当役、科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター特任フェローも兼ねる。趣味は全世界の切手収集。オランダはウィレム3世の時代から約2,600種類を保有。