

戦略研レポート

2015.2.4

2015年に注目すべき 4つの技術キーワード

CONTENTS

はじめに

- I. 次世代シークエンサー
—ゲノム研究を支える要素技術の進化—
- II. Internet of Everything
—あらゆるモノがインターネットにつながる世界—
- III. UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人飛行ロボット)
—空の産業革命—
- IV. 浮体式洋上風力発電
—洋上風力のイノベーション—

2015年に注目すべき4つの技術キーワード

新事業開発部

はじめに

三井物産戦略研究所では、11分野173領域の技術・イノベーションのテーマを抽出し、継続的にそれらの動向調査（技術フォーサイト）を行っており、毎年、その中から注目すべき技術キーワードをピックアップし解説してき

た（図表1）。本稿は2015年に注目すべき4つのキーワードについて取り上げるものであるが、まずその前段として、昨年取り上げたキーワードの近時の動向を整理する。

図表1 戦略研が取り上げた注目すべき技術キーワード

	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
ICT	スマートグリッド関連	スマートグリッドからスマートインフラへ	スマートグリッドビッグデータ	自動運転システム 行動予測・予知技術 (ビッグデータの発展)	Internet of Things VPP	Internet of Everything
エネルギー	二次電池	二次電池の用途拡大	定置型蓄電池		洋上風力発電	浮体式洋上風力発電
環境	二酸化炭素回収・貯留		燃料・化学品の原料多様化	非可食原料による バイオマテリアルの商業化	水素エネルギー	
資源	海洋資源探査・採掘	海底資源の探査・ 開発技術 レアアースの確保 と代替材料開発	海洋資源開発	海底資源開発		
ライフサイエンス	ゲノム		核酸医薬 新しい治療機器の開発	再生医療		次世代シークエンサー
材料					グラフェン	
ロボット						UAV

「水素エネルギー」：2014年12月にトヨタから燃料電池車（FCV）「MIRAI」の販売が開始された。これにあわせて、FCV普及の課題となっている水素ステーション等のインフラ整備も、規制緩和や補助金によって民間投資の環境が整いつつある。また、将来の二次エネルギーとしての多用途展開等、「水素社会」に向けた研究開発も活発になった。特に発電用燃料や再生可能エネルギーとの組み合わせによる蓄エネルギー機能に注目が集まり、国内ではSIP（戦略的イノベーション創造プログラム。2014年より開始された総合科学技術・イノベーション会議が府省の枠を超えて主導的に科学技術イノベーションを実現するプログラム）のテーマにも選定された。2020年開催の東京オリンピック・パラリンピックでの活用や2030年頃の水素社会実現を目指し、製造・輸送・貯蔵・利用・安全性の観点から5年間の研究開発が行われることとなった。

「洋上風力発電」：欧州で導入が先行しており、2014年末時点の欧州の累計発電能力は8GW（大型原発8

基分）を超えたと推定される。国内では、2014年に策定された「エネルギー基本計画」において、「陸上風力の導入可能な適地が限定的な我が国において、洋上風力発電の導入拡大は不可欠」と明記されるとともに、新たに再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）の対象となった（36円（税別）/kWh、20年）。太陽光発電偏重の導入による系統接続問題も顕在化していることから、より多様な再生可能エネルギー源として期待が高まっている。また、設備の大型化に伴い、その発電サイトはより風況の良い沖合へと移り、着床式から浮体式の実証へ技術も進展していることから、本稿では、2015年のキーワードの一つとして、遠浅の海岸が少ない我が国での活用が期待される「浮体式洋上風力発電」を取り上げる。

「VPP（Virtual Power Plant）」：再生可能エネルギーの導入と送配電分離等の電力自由化が進んでいる欧州で先行しており、その先駆け企業としてドイツのNext Kraftwerke社やフランスのEnergy Pool社が挙げられる。前者はドイツ国内の再生可能エネルギー発電所をネット

ワーク化し、スポット市場での販売と TSO (Transmission System Operator) が運用するバランシング市場での予備力オークションで事業を進めている。2013 年決算で売り上げが 1 百万ユーロ (2012 年 : 35 千ユーロ)、税引後利益が 1.1 百万ユーロ (同▲ 1.8 百万ユーロ) と、順調に立ち上がりつつある。後者はフランス、ベルギー、英国において産業分野でのデマンドレスポンス事業を実施しており、対象となる電力削減容量は 1,200MW に達している。同社は日本国内でも東京電力、双日等と実証事業を開始しており、電力システム改革の進捗をにらんだ事業機会を模索中である。

「Internet of Things (IoT)」: 「共通化」と「エコシステム」をキーワードとして大きな進展が見られた。「共通化」ではグローバルな Machine to Machine (M2M) の標準化組織である「oneM2M」が 2014 年 8 月に共通化に必要なアーキテクチャーやプロトコル要求条件などを示した Aubergine というサービスプラットフォームを公表した。業界を問わず利用する汎用的な機能を 12 個ピックアップ、共通プラットフォームとして用意したものだ。「エコシステム」は、業界のアライアンスによって M2M/IoT 市場のユースケースを作り、事業化を早めようとする動きである。産業分野では 2014 年、GE、AT&T、IBM、インテル、シスコシステムズが中心となって設立した「Industrial Internet Consortium」(3 月) や、Apple、IBM の「Homekit」(6 月)、

Google、ネストラボの「Thread Group」(7 月) 等が活動を開始した。また、2014 年には IoT を拡張した「Internet of Everything」という概念に注目が集まったことから、本稿では、2015 年のキーワードの一つとして、これを取り上げ解説する。

「グラフエン」: 大量製造技術の開発により低コスト化が進み、普及の目安とされる 1,000 円 /g を切る製品が販売されるようになった。放熱材量等の分野で適用が始まったものの、期待されていた液晶ディスプレイやタッチパネルで利用される ITO (酸化インジウムスズ) の代替分野は、製品加工技術が追い付かず、普及には至っていない。他方、これまで日米欧が中心であった実用化研究分野において、マレーシアが「国家グラフエン行動計画 (NGAP) 2020」を発表、中国でも第 13 次 5 カ年計画を見据え、グラフエンの産業用地を浙江省常州市に設けるなど、2014 年は新興国でも新たな国家的研究課題として拡大した年となった。

*

2015 年に注目すべき技術キーワードとして、上述の「浮体式洋上風力発電」、「Internet of Everything」に加え、ライフサイエンス分野で大幅なコストダウンが図られつつある「次世代シークエンサー」を、ロボット分野で技術進展とともにさまざまな用途で利用が進み始めた「UAV (Unmanned Aerial Vehicle)」の 4 つを取り上げた。

I. 次世代シークエンサー—ゲノム研究を支える要素技術の進化—

1. 次世代シークエンサーとは

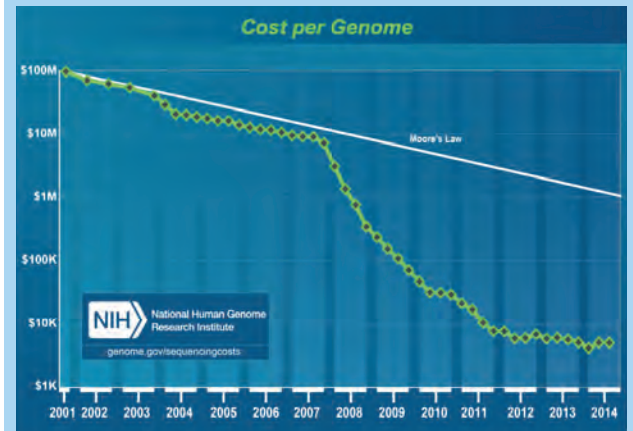
ゲノム研究の進展とともに、医療や農業が変わろうとしている。「ゲノム」とは、タンパク質を作り出す「遺伝子」の情報と、それ以外の「非遺伝子領域」の情報から成り立っており、これら全ての遺伝情報は子孫に伝えられる。ゲノムは、化学物質 DNA (デオキシリボ核酸) で構成され、DNA 上の A (アデニン)、T (チミン)、G (グアニン)、C (シトシン) と呼ばれる 4 種類の塩基の並び方で遺伝情報は表現されている。4 種類の塩基は、A と T、G と C というように 2 つずつ対となり、はしご状の二重らせん構造を作り出している。ゲノム解析とは、このはしごの一段一段の並び方、つまり塩基配列を決定することを指す。1986 年、世界で初めて自動化されたシークエンサー (塩基配列を

決定する機器) が誕生し、2005 年に「次世代シークエンサー」と呼ばれる機器が市場に登場して以降、ゲノム情報が驚くほど迅速かつ安価に調べられるようになった。

旧来型のシークエンサーは、マクサム・ギルバート法やサンガー法と呼ばれる原理が活用され 1986 年以降発売された。次世代シークエンサーと比べると、解析したい DNA を一旦大腸菌に組み込んで増幅させる処理や、断片化された DNA をキャピラリーと呼ばれる細い管の中で一つ一つ電気泳動し分離することで塩基配列を決定するなど、プロセス全体に手間と時間とコストがかかり、大規模解析には向かないものであった。

2005 年、米 454 Life Sciences 社 (現 Roche 社) が「Genome

図表2 ヒトゲノム解析コストの推移
(米 NHGRI におけるゲノム解析コストの実績データ)



出所: National Human Genome Research Institute (NHGRI)
ホームページより引用 (2015年1月26日アクセス)

Sequencer 20 systems」と呼ばれる次世代シーケンサーを発売して以降、30億塩基の長さのあるヒトゲノムをさらに迅速・安価に解析することを目標として、各社による機器開発が加速した。次世代シーケンサーは、超並列シーケンシングと呼ばれる原理に基づいて開発された機器で、複数の細胞から抽出されたDNAをランダムに裁断し、断片化されたDNAをフローセルと呼ばれるスライドガラス上で大量に同時並行で読み込むことで、DNAの塩基配列を超高速・低コストで解析する。初代の次世代シーケンサー Genome Sequencer 20 systems では、ヒト1人分のゲノム解析に2カ月、100万ドルを費やしていたが、現在、次世代シーケンサーのシェア7割を占める米 Illumina 社の最新機器「HiSeq X Ten」では、わずか数日、1,000ドルでの解析を実現させるとして期待が集まっている。

現在、「1分子シーケンシング」と呼ばれる新たな原理を活用した機器の開発・実用化も進んでいる。次世代シーケンサーでは、多分子DNAの平均値を計測しているのに対し、1分子シーケンシングでは、目的とする1分子DNAの塩基配列を半導体技術やナノテクノロジーを活用してピンポイントで解析する。英 Oxford Nanopore Technologies 社の技術を例に取ってみると、膜上に配置されたナノメートルサイズのタンパク質の穴（ナノポア）に

DNA断片が通過する際、A、T、G、Cの各塩基が産み出すイオン電流の変化を検出することで塩基配列を決定している。

2001年以降、米国立ヒトゲノム研究所（National Human Genome Research Institute : NHGRI）はヒト1人分の全ゲノム解析コストを公表しているが、2001年の解析コスト95万ドルであったものが、2008年に次世代シーケンサー導入を機に大幅なコスト低減につながり2014年には4千ドルとなり、「ムーアの法則（18カ月で半減）」を大幅に上回るコスト減を実現している（図表2）。今後、さらなるゲノム解析能力の向上が見込まれ、以前とは比較にならないほど手軽にゲノムの全情報を得ることが可能となる一方、得られたビッグデータをいかに活用するかが課題となるだろう。

2. 次世代シーケンサーの期待される利用法

(1) クリニカルシーケンス

次世代シーケンサーによるゲノム解析が最も進んでいるのは医療分野である。次世代シーケンサーの登場により、新たな希少疾患の発見、ゲノム情報に基づいた個別化医療の進展、医薬品開発プロセスの変革が起こっている。特に、個別化医療の進展は目覚ましく、診断・治療の際に遺伝子検査を実施する「クリニカルシーケンス」の普及が見込まれている。従来、特定の遺伝子を対象に遺伝子検査は実施されてきたが、次世代シーケンサーの登場により、ヒトゲノムを網羅的に調べて診断・治療に生かすことが可能となった。

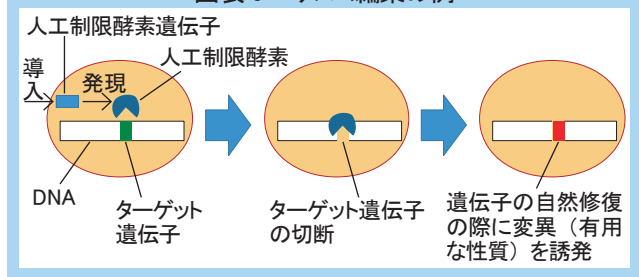
2009年に設立された米 Foundation Medicine 社（以下、FM社）は、次世代シーケンサーを用いたがんのクリニカルシーケンス受託事業のパイオニアである。FM社は、前述の Illumina 社のシーケンサーを10台保有し、自社内のラボにて遺伝子検査を実施している。具体的には、

病院から受け取ったがん患者の病変部サンプルからDNAを抽出し、次世代シーケンサーを使ってゲノム解析を実施、その後、本情報を基に患者に最適な抗がん剤の情報を医師へ提供している。FM社によると、がん患者の約7割に推奨抗がん剤が判定され、3割弱の医師が検査結果に基づき治療方針を変更している。次世代シーケンサーによる遺伝子検査は、患者にとって治療の選択肢を広げると同時に、医師にとってもより精密な医療を提供するためのツールとなり得る。

(2) ゲノム編集

農業分野でも、次世代シーケンサーによって、農業上有利／不利なゲノム情報のデータが膨大に蓄積されており、このデータ解析に基づいた新しい育種技術である「New Plant Breeding Techniques (NBT)」が開発されている。これまでは、交配や突然変異による育種が長年行われており、米国等ではこれに遺伝子組換え技術を組み

図表3 ゲノム編集の例



合わせて育種を行ってきた。これらの手法は、必ずしもターゲットとする遺伝子を変えることはできず、また、ターゲットとしない遺伝子までも変えてしまうことがあり、育種には多大な労力と時間を要してきた。NBTは、ターゲットとする遺伝子のみを変えることができるなど、効率的効果的な育種を可能とし、これまでの育種の問題を解決すると期待されている。農業分野で特に注目されているNBTにゲノム編集が挙げられる(図表3)。ゲノム編集では、特定の遺伝子を切断するハサミの機能を果たす人工制限酵素を用いて遺伝子を切断する。切断された遺伝子は、自然修復しようとするが、その際、完全に修復できず、ターゲットとなる遺伝子が増えたり、その遺伝子が欠損したりすることがある。遺伝子の変化により農業上有利な性質を持つ作物を作り出したり、遺伝子の欠損により不利な性質を排除したりできるのである。

このように、次世代シーケンサーによって新しい技術の開発速度が加速しているが、新しい技術に対する規制動向にも留意する必要がある。欧州では、NBTを遺伝子組換えとして扱うかどうかで議論が起こっている。NBTと一口にいても図表4に示すようにいくつかの種類があり、それぞれ科学的に内容が異なり、各技術に応じて規制内容が変わってくると予想される。欧州委員会は、2015年にNBTに関する方針を決定する見込みである。欧州委員会の決定は、我が国をはじめ多くの国に影響を及ぼすと予想され、遺伝子組換え技術の研究開発で米国に大きく差を付けられた欧州が、NBTに対してどのような判断を下すかは要注目である。

図表4 従来の育種技術と新しい育種技術(NBT)の例

従来の育種技術	新しい育種技術(NBT)
<ul style="list-style-type: none"> ・交配 ・マーカー支援選抜 ・突然変異(放射線、化学物質等) ・遺伝子組換え技術(アグロバクテリウム法、パーティクルガン法等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ゲノム編集 ・オリゴヌクレオチド指定突然変異 ・エピゲノム編集 ・逆育種 ・SPT (Seed Production Technology) ・アグロインフィルトレーション ・組換え体を用いた接ぎ木 ・シスジェネシス/イントラジェネシス ・合成ゲノミクス

(3) メタゲノム解析

メタゲノム解析も次世代シーケンサーの発展とそれに伴う膨大なデータの蓄積により注目され始めた技術である。メタゲノム解析は、従来の手法とは異なり、単一の微生物の分離・培養過程を経ずに、生物体内、土壌、海洋、河川等の微生物の集団から直接シーケンシングする。そのため、従来の方法では培養が困難であった微生物のゲノム情報が入手可能となった。微生物の90%以上は、単独では培養できないが、メタゲノム解析はこれまで解明されていなかった環境中の膨大な数の微生物や遺伝子を解明する手法として期待されている。大腸がんや炎症性腸疾患等の消化器系疾患の医療分野では、臨床データに腸内細菌の情報を取り入れ、治療に役立たせるアプローチが開始されている。2007年に米国立衛生研究所(National Institutes of Health: NIH)がHuman Microbiome Projectをスタートさせて以来、Seres Health社(医薬品)やuBiome社(診断サービス)といったメタゲノム解析を利用した医薬品開発・診断サービス企業が米国を中心に立ち上がっている。このプロジェクトの第二フェーズ(2013年~2015年)では、ヒトの腸内微生物群に関するデータが整備される予定であり、その研究成果に注目したい。また、メタゲノム解析では、海中・海底、農場土壌、鉱山廃水等を対象とした研究開発も行われており、医療分野だけではなく、養殖、農業、環境予測・浄化等への応用が期待されている。

3. 今後の展望—重要度を増すバイオインフォマティクス—

次世代シーケンサーの出現によって、ゲノム情報を読むことが容易となり、多様かつ膨大なデータが蓄積されるようになった。今後は、ゲノム情報に加えて遺伝子の働きを制御する因子、タンパク質の三次元構造とその機能、代謝経路とそれに関与する物質等に関するデータも膨大に蓄積されるだろう。これらのデータの中から生物学的に意味のある情報を抽出するためのバイオインフォマティクス(生物情報科学)がさらに重要視されるようになり、これまでに蓄積されたデータベースを参照する機会が大幅

に増えると予想される。

本稿で取り上げたように、ゲノム解析能力の向上とともに、医療分野や農業分野では、臨床的シーケンス、ゲノム編集、メタゲノム解析などといった新たな応用事例が生まれてきている。さらに、食品、化学品、バイオ燃料、水産業、畜産、林業、環境といった分野でも、ゲノム情報は広範に活用されるため注目する必要がある。今後もゲノム情報を読むことを出発点として、さまざまな分野においてイノベーションが起こることが期待される。

II. Internet of Everything—あらゆるモノがインターネットにつながる世界—

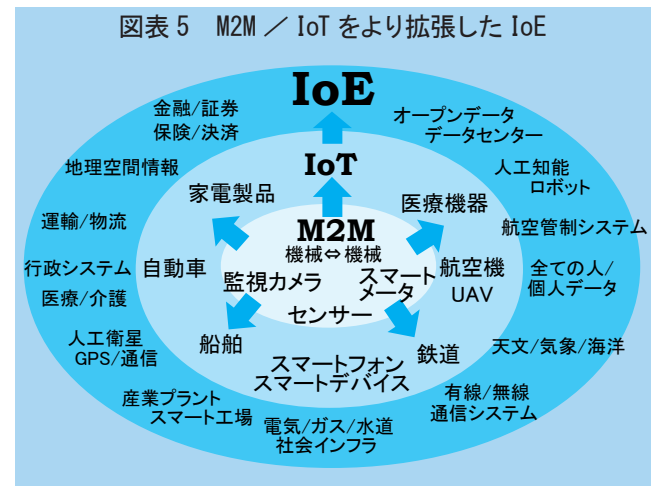
1. Internet of Everything とは

インターネットの完全商用化（1985年）から30年が経過した現在、人間だけでなく、さまざまな機械もインターネットに接続して相互に通信する世界となっている。従来は、高価な専用回線を通じて通信を行っていたが、インターネットを利用することにより安価で世界中の機械との通信が可能となることから利活用が拡大を続けている。このインターネットを通じた機械同士の通信を Machine to Machine (M2M) という。この場合の機械とは、自動販売機やコンビニエンス・ストアのPOS (Point Of Sale) レジスター、街頭に設置してある監視カメラ、スマートメーター（次世代の電力メーター）などを含む。M2Mの事例として有名なのがコマツのKOMTRAX (Komatsu Tracking System) である。コマツは、販売する建設機械の全てに通信装置とGPS (Global Positioning System) を装備し、建設機械の現在位置と稼働状況をリアルタイムにモニタリングし、機械が故障する前に部品交換の指示を行う予防保守などに利用している。

そして現在は、コンピュータやスマートフォンなど情報通信機器や機械だけではなく家電製品や自動車、航空機、医療機器、工作機械などのモノがインターネットに接続する世界に拡大している。これらモノに通信機能とセンサー機能を持たせ、インターネットに接続し相互に通信することで自動制御や遠隔計測などを行う技術を IoT (Internet of Things) という。IoTは、M2Mの世界を人間が運用・制御する機器類まで拡大した概念である。このIoTは、新たなビジネス領域として、世界的な注目を浴びており、NTT コミュニケーションズの調査によれば、M2M

とIoTの世界市場は年成長率30%を超え、2018年には20兆円の市場規模となるとの見通しを示している。

インターネットに接続するモノが拡大するにつれ、M2M/IoTをより拡張した Internet of Everything (以降IoE) という概念を、シスコシステムズ社が2013年6月に提唱している。シスコシステムズのIoTインキュベーションラボ著『Internet of Everythingの衝撃』によれば、IoEとは、世界中のヒトと情報システム（データと業務プロセス）、あらゆるモノをインターネットを通じてひとまとめにつながる世界を作り出すことで、新しい価値を生み出すネットワークであるとしている。このIoEというネットワーク世界から生み出される経済価値は、2013年から2023年の10年間で14.4兆ドルに達するとしている。つまりIoEは、IoT/M2Mを極限まで拡張した概念であるといえる（図表5）。



2. IoE を支える技術と活用場面

IoEという概念が提唱される背景には、情報通信技術の進展がある。CPU (Central Processing Unit: 中央処理装置) は複数の処理を並行して行える能力を備え、記憶装置も小型化しつつ大容量化を実現し、有線・無線ネットワークの通信能力も増大している。しかもこれら情報通信技術の利用コストは劇的に低下しており、これがスマートフォンやソーシャルメディアの利用を拡大する要因ともなっている。また全てのヒトとモノをつなぐためには、それ

ぞれモノを識別できなくてはならないが、現状のインターネットの通信プロトコル (通信規約) では最大42億9,496万7,296台しか識別できない。これを最新バージョンの通信プロトコル Internet Protocol Version 6 (IPv6) に切り替えると2¹²⁸個のモノにアドレスを付与できる。またセンサーの小型化と能力向上もIoEを実現する重要な技術である。今では1mm³の大きさにCPU、メモリー、無線装置、バッテリー、アンテナなどを実装できるレベルに達している。

この IoE の活用場面として、画像認知能力を持つ監視カメラによる防犯と救急救命の効率化が考えられる。路上を通過する人物の顔をリアルタイムに認知処理し、警察の犯罪者データベースと照合して指名手配犯を割り出す。確からしい照合結果が得られると、近くの警察官が駆けつけると同時に周辺の警察署に警戒情報が流される。監視対象者が車で移動する場合は、緊急配備が行われ自動車ナンバー自動読取装置（通称 N システム）などの道路監視システムや UAV（Unmanned Aerial Vehicle）で追跡を行う。

また監視カメラが急病人発生を認知すれば消防へ正確な位置と急病人の画像データを通知。救急車は、最新の交通状況から一番最適な経路を判断し自動走行する。かつ通過する信号機を全て青信号にして現場に急行。同時にマイナンバー情報や関連データベースを検索して

個人を特定し、急病人の病歴や診断情報を緊急搬送先に送信し、事前に医療チームが治療体制を組めるようにする。これは一般の監視カメラが捉えた画像・位置データと警察や消防や交通システムなど関連システムとがインターネットを通じて連携することで実現する。M2M の場合には、監視カメラは監視・記録はするものの高度な情報処理機能を持たず、かつ外部の情報システム（データやプロセス）とは連動せず、イベントに応じたアクションがとられることはない。

M2M/IoT を経て IoE の時代が幕を開けようとしている現在、既に IoE の概念を先取りする取り組みがなされている。GE の「Industrial Internet」構想と、ドイツ連邦政府が産学官を挙げて取り組みを始めている「インダストリー 4.0（独語 : Industrie4.0）」である。以降においてこの 2 つを概観する。

3. IoE 時代の先駆け：GE 社の Industrial Internet

GE 社が 2012 年に発表した「Industrial Internet」は、「産業機械と大規模データと人間を結びつけるオープンでグローバルなネットワークである」と定義されている。Industrial Internet は、高度な処理機能を持つ産業機械、低コストでありながらも高機能なセンサー、大規模データをリアルタイムに分析処理する技術、それと大容量通信が可能なインターネットの 4 つが組み合わされることで実現される。これにより、鉄道や航空機における輸送プロセスの変革、効率的な電力システムへの転換を可能にし、無駄を排除し、生産性の向上を実現することを目指す構想である。

また Industrial Internet では、全ての産業機器に予測機能を付与し、障害を予防検知することで、機器の性能を維持しつつ寿命を延ばし、不測の事故を未然に防ぐ効果があると期待されている。これはコマツの建設機械などで実現している技術であるが、GE は企業の枠組みを超えてグローバルに Industrial Internet 展開する点で大きく異なっている。

既に GE は、さまざまなセンサーを搭載したジェットエンジンや医療機器、タービンなどの産業機器 25 万台を世界中に設置している。これら自社製品の稼働に関するデータをインターネット経由で米国の製品エンジニアリングセンターに集約し、さまざまな解析技術を駆使して分析することにより、製品の改善・改良に利用している。航空

分野においては自社製のジェットエンジンで運航される航空機の燃料、操縦システム、エンジンの状況をリアルタイムで監視し、このセンサーデータを分析することで、事前予防保守を実現している。飛行中のジェットエンジンのある部品の交換が必要とシステムが判断すると、その部品の到着地の空港に事前搬入し、到着と同時に駆け付けた GE の保守要員が部品を迅速に運んで交換することが可能となっている。GE の試算ではジェットエンジンを最適状態に維持し続け、仮に燃料効率を 1% 向上させると年間 30 億ドルの経済効果があるとしている。

GE は第 3 の革命と称する Industrial Internet を実現するために Industrial Internet Consortium (IIC) を IBM、AT&T、シスコシステムズ、インテルと立ち上げ、エネルギー、医療、製造、運輸、行政の 5 分野を対象として活動を開始している。IIC は、後述するドイツの Industrie4.0 と同様に標準化戦略を持ち IoE 時代における産業覇権を目論んでおり、GE および IIC の動向には注意が必要である。

4. IoE時代の産業政策：ドイツのIndustrie4.0

Industrie4.0は、ドイツ連邦政府による研究開発とイノベーションに関わる省庁横断の戦略である「ハイテク戦略2020」（2011年11月）、そして最新の「新ハイテク戦略」（2014年9月）に含まれるイノベーション政策の一つである。このIndustrie4.0は「第4次産業革命」という意味であり、第1次産業革命は蒸気機関による機械化、第2次産業革命は機械の電力化、第3次産業革命はコンピュータによる自動化、そして第4次産業革命であるIndustrie4.0は情報通信技術の全面活用による製造業（工場）の技術革新と位置付けている。

ではIndustrie4.0は何を実現しようとしているのか。現状の政策やプロジェクトを見ると一義的には「スマート・ファクトリ」を実現することである。ドイツが実現を目指すスマート・ファクトリとは、情報通信技術を最大限に利用して、消費から生産・物流までの全てを統合的に管理する次世代の生産管理システムであり、工場内のあらゆる生産設備や機器類をネットワークで接続し、柔軟に生産機器を再構成することができる工場を実現させる構想である。今の工場でもファクトリー・オートメーション（FA）という観点からネットワーク化やITの導入が進められてはきたが、スマート・ファクトリはこのネットワーク化とIT化を生産設

備だけでなく工場の外にまで拡大する構想である。

このスマート・ファクトリを実現する技術の重要な要素がIoEである。人、モノ、機械、センサー、識別コードが付与された部材など工場全体がインターネットに接続されることで実現される。ドイツでは、連邦教育研究省や経済技術省の主導で自律生産システムや人工知能システムとインテリジェントセンサーによる生産管理システムの開発プロジェクトがスタートしている。また米国の先進製造を強く意識した上で、3Dプリンタなどの技術革新にも取り組んでいる。特にレーザーによる金属積層成型技術では世界最高レベルの技術を有しており、前述のGEもドイツEOS社の3Dプリンタを数十台規模で購入している。このような革新的製造技術と先端材料開発、それとIoEを取り入れた次世代生産システム「スマート・ファクトリ」の開発を同時並行で進めることでドイツ発の第4次産業革命を成功に導く戦略である。翻って我が国は「ものづくり大国」などといわれるが、政府は製造業の骨幹である中小企業に対する有効な政策を持たない。その点ドイツは、ミッテルシュタントと呼ばれる中小企業も巻き込む施策を盛り込んでIndustrie4.0戦略を立案しており、その政策配慮には学ぶべきところが多い。

5. 今後の展望—産業政策、事業戦略立案の鍵に—

ドイツのIndustrie4.0は、国家主導での製造業革新であり、GEのIndustrial Internetは民間主導でのグローバルな産業横断の取り組みという違いはあるにせよ、IoEという今までつながらなかったヒト、モノ、情報システム（データとプロセス）の3つが「つながる」ことの価値と影響と可能性を見極めた上での戦略である点では共通している。

しかし、IoEにも課題はある。さまざまなモノがつながり、情報システム相互でデータの交換を行うには、システムやアプリケーションに依存しないデータ交換の仕組みが必要である。M2M/IoTは、垂直統合型のアプリケーションであり産業を横断してのデータ交換を行う前提でシステムは設計されていないのが実情で、IoEの実現には、第一に相互接続の標準化と実装、第二に莫大な数のモノを識別する識別情報の一元管理、第三にインターネットでの通信の安全性と信頼性の確保、そしてプライバシー保護な

ど解決が難しいセキュリティ問題をはらんでいる。またサイバー攻撃を受ければ水平横断的に相互接続する情報システム全体に影響が及ぶ可能性がある。

IoE時代へ突入するのは必然と思われ、この大きな技術潮流の中から、やがて新しいビジネスやサービスが生まれるだろう。その萌芽がIndustrial InternetでありIndustrie4.0である。これら先駆的取り組みは、地球規模で産業構造が大きく変わる可能性を強く示唆しており、政府においては産業政策の立案、民間においては事業戦略を考える上で参考とすべきである。

Ⅲ. UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人飛行ロボット) —空の産業革命—

1. UAV とは

UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人飛行ロボット) は、空からの偵察・攻撃といった軍事利用を契機として技術開発が進み、近年は企業による商用利用の動きが活発化している。とりわけ自律飛行技術（あらかじめプログラムしたルートどおりに UAV を飛行させる技術）の高度化、安定飛行のために風速や機体の傾き具合を測定するセンサー技術の進化、機体の小型・軽量化といった技術進化が商用利用の後押しとなり、人が立ち入れない領域での作業、危険地域における労働代替など、幅広い領域で UAV 活用が進んでいる。UAV の用途拡大に伴い、機体の形状やサイズにも多様化の傾向が見られる。国際的に統一された規格などはないものの、大まかに①固定

翼型（航空機に近い形状）、②ヘリ型（ヘリコプターに近い形状）、③マルチローター型（複数のプロペラを備える形状）の3つのカテゴリーへの分類が可能だ（図表6）。機体の進化・多様化とともに、UAV に搭載されることでさまざまな付加機能を提供するセンサー技術の進化も商用利用の拡大に貢献している。具体的には、映画やテレビ番組の制作にも耐える高精細な映像を撮影可能なカメラ、農作物の生育状況を把握可能なセンサー、暗所でも人や動物を認識可能なサーモセンサーや暗視カメラなど、高機能なセンサーの小型化が進み、UAV への搭載が可能となったことで商用利用が拡大している。

図表 6 商用利用される UAV



2. UAV 利用の現状

(1) UAV 活用が先行する領域

UAV の高機能化、小型化の進展により、その用途にも多様化の傾向が見られる。実験中の想定利用形態を含む UAV の用途について次ページ図表 7 にまとめる。これらの中でもとりわけ UAV の活用が進んでいるのが①農業②点検・メンテナンス③空撮・測量の3つの領域である。

農業領域では、空からの農薬散布や農作物の生育状況確認といった用途で導入が進む。この領域では日本が世界をリードしており、現在約 3,000 台弱の農薬散布用 UAV（主にヘリ型）が稼働している。

点検・メンテナンスの用途では、老朽化対策が進む橋梁、ダム、プラント等の高所・危険箇所における点検に UAV が活用されている。人による点検の際に避けられな

い一時的な操業停止に起因する経済的損失が回避されるなど導入効果が高く、米国の VDOS Global 社、英国の Cyberhawk 社など UAV を利用したインフラ点検を専門に扱う業態の台頭も見られる。日本では 2014 年に国土交通省が実施した『次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム』の公募において、多数の UAV 関連企業が参画。老朽化が進む橋梁やダムなど、社会インフラ点検の効率化に向け、国内数カ所で検証が行われている。

空撮用途では、テレビ局や映像制作会社による番組や映画制作用途での導入が先行。有人機による空撮との比較で格段にコスト効果が高く、狭所や有人機が飛べない領域からの撮影も可能となり、導入例が増加してい

図表 7 UAV の利用形態（実験中の想定利用形態含む）

用途	利用形態
空撮・測量	・カメラマンが立ち入ることのできない場所からの撮影による番組・映画制作 ・空撮画像を用いた 2D/3D 地図の作成、不動産物件の上空からの撮影
点検・メンテナンス	・橋梁、ダム、大型プラント、送電線等の危険箇所、高熱地、寒冷地、有毒物質の影響を受ける場所等、劣悪な労働環境での点検 ・メガソーラなど対象箇所が広域に渡る領域での点検
農業	・空中からの農薬散布、農作物の生育状況確認
災害対策	・自然災害や大規模事故、テロ等の発生時の空からの被害状況把握・生存者確認
輸送・デリバリー	・離島、山岳地、治安悪化地域、その他危険な場所への輸送 ・医薬品や血液、AED 等の緊急輸送、収穫物（農作物・海産物等）等の即時搬送
資材管理	・広域に散在する商品や資材の空からの効率的な管理（UAV を利用した棚卸し）
監視・警備・捜索	・国境等の広域警備、企業・私有地の監視および不審者の撮影 ・逃亡犯の追跡および撮影、山岳地・樹海等での行方不明者、徘徊老人の捜索
旅行・エンターテインメント	・徒歩では行けない場所、危険箇所への仮想訪問体験の提供 ・テーマパークのアトラクションとしての利用（仮想飛行体験）

る。2014 年に開催されたソチオリンピックでは、スキー競技（スロープスタイルというジャンプを含む滑走競技）の中継用に UAV が導入され、臨場感の高い映像が世界中に配信されたことで話題となった。これら映像制作用途に加え、自然災害や大規模事故発生時の空からの状態確認など、災害対策や救助目的での UAV 空撮も始まっている。2011 年の東日本大震災発生時、2014 年の広島における土砂災害発生時、御嶽山の噴火時等において、上空から被害状況を確認する目的で UAV が投入されたことも明らかとなっている。

（2）大手企業による UAV 関連の取り組み

2014 年以降、世界的に知られる業界トップ企業による UAV への取り組みが相次いで報じられている。電機大手の GE は発電プラントの保守用途で UAV を活用することを発表。同社による米国の UAV 開発企業 Airware 社に対する投資（金額は非公表）も明らかとなっており、この分野への取り組みには積極的だ。石油大手の BP は、同社が保有するアラスカの油田のパイプラインや関連設備の維持管理、油田周辺の環境調査用に UAV を導入。欧米に展開する携帯電話大手の T-Mobile（ドイツテレコム傘下）は、鉄塔など通信設備の維持管理のために UAV の活用を開始している。このほか 2014 年には、米国の半導体大手 Intel、Qualcomm や中国最大の検索サービス企業 Baidu（百度）などが名を連ねる UAV 用のソフトウェア開発プロジェクト「Dronecode」も発足。スマートフォン OS として世界を席巻する Android のような世界共通の

プラットフォームとして利用されることを目指し開発が進められている。

日本企業では、セキュリティ大手のセコムが、商業設備等の警備を目的としたマルチローター型の小型 UAV を開発。警備システムと連携し、不審者が検知された場合に UAV が撮影し、監視センターにリアルタイムの映像を伝送する、といった形でサービス提供される見込みだ。同社は 2020 年の東京オリンピック・パラリンピック開催を視野に、長時間かつ広範囲の監視が可能な飛行船型の大型 UAV の開発にも着手するなど、この分野への注力化を図っている。

このように、ユーザーサイドと開発サイドの両面で、世界的に影響力の大きい大手企業の参入が相次いでおり、今後はこれら先行する企業の競合企業をはじめ、さらに参入プレーヤーが増加、多様化することも予想される。

図表 8 UAV 輸送の実現に向けた企業・機関の取り組み例

企業	国	概要
Amazon.com	米国	顧客宅への購入品の配送
Google	米国（豪で実験中）	災害時の支援物資輸送、一般顧客への物品配送
マターネット	米国	（主に新興国での）UAV 輸送網の構築
QuiQui	米国	サンフランシスコ市内を対象とした薬品の緊急搬送
ドイツポスト DHL	ドイツ	離島への医薬品の輸送
GeoPost	フランス	軽量物の宅配
Domino's Pizza	英国	ピザの配送
BIZZBY	英国	スマートフォンアプリを利用した軽量物配送サービスの提供
Dodo Pizza	ロシア	ピザの配送
Francesco's Pizzeria	インド	ピザの配送
Zookal.com	オーストラリア	レンタル書籍・教材の配送
NIIGATA SKY PROJECT	日本	100kg 程度の重量物輸送に耐えるカーゴ UAV の開発
Kamome Air プロジェクト	日本	高松市と沖合の離島を結ぶ軽量貨物空輸サービスの提供 （2016 年頃に開始の予定）

3. UAV の将来

（1）今後 UAV の活用が期待される領域

さまざまな用途での UAV 活用が期待されるなか、Amazon や Google といった大手が参入意向を表明した UAV 輸送には高い関心が寄せられている。ドイツの物流大手、ドイツポスト DHL は 2014 年 9 月、同国北部の港町ノルトダイヒから北海に浮かぶユイスト島へ、UAV を利用して医薬品等を空輸する計画を発表。本土から島までの約 12km の間を UAV で結び、定期船が就航できない場合などに利用される見込みだ。同社が利用する UAV は直径 1 m 程度の小型機であり、医薬品等の軽量かつ緊急度の高い搬送品に限られるが、輸送用途で 10km を超える距離を自律飛行させる例は稀少であることから国内外で広く報道されている。

米国では、UAV 輸送サービスに特化した業態の台頭も見られる。シリコンバレーを拠点とするマターネット社は、道路整備が遅れている新興国の輸送手段として UAV を活用すべく、無線インフラの整備等も含めた事業構想を発表している。同社はドイツポスト DHL と同様、小型の機体を用いた輸送を想定しており、ドミニカ、ハイチ、ブータンといった道路未整備地域の多い国で、各国政府や国境なき医師団といった医療関連団体の協力の下、病院への薬品輸送などの具体的な取り組みを進めている。

現時点では、5kg 未満程度の軽量物を対象とするモデルが主流であるなか、100kg 程度の重量物を UAV で

輸送しようとする試みも見られる。2014 年 9 月、新潟市と（独）産業技術総合研究所を中心に UAV の開発を進める NIIGATA SKY PROJECT は輸送用途を想定したカーゴ UAV を発表。全幅 10 m 程度の機体に 100kg 程度の荷物を搭載し自律的に飛行する形態だ。こちらは実験の段階だが、前述のマターネットと同様、新興国等の道路未整備エリアや離島等、UAV 輸送が有効と考えられる地域への導入に向け開発が進められている。

これら以外にも主に軽量物を対象とした UAV 輸送の構想を発表する企業が相継いでおり（図表 8）、これまで困難とされてきた無人機輸送がいかに実現されるかにも注目が集まっている。

（2）市場規模

UAV を含む無人ロボット技術を推進する米国の業界団体 AUVSI（Association for Unmanned Vehicle Systems International：国際無人機協会）は 2013 年、2025 年までに UAV に関連する事業の市場が米国内だけでも約 8 兆円規模にまで拡大し、約 10 万人の新規雇用を創出するとの予測を発表。その市場規模の大きさから「空の産業革命」と呼ばれる。このほか、米国民間調査会社の Teal Group は 2014 年、UAV に搭載されるカメラやセンサーなどのペイロード（搭載機器）市場が 2023 年までに約 6,000 億円に達するとの予測を発表するなど、周辺産業への波及効果も見込まれている。

4. 今後の展望—鍵を握る規制の動向—

(1) UAVに関連する規制の現状

UAVの運用に関して、2015年1月時点では国際的に統一されたルールは整備されていない。現状は、各国の航空関連の規制機関が独自にルールを制定、もしくはルールが未整備の状態などばらつきが見られるものの、旅客機や貨物輸送機などの有人航空機の飛行空域（おおむね上空300m以上の空域）の飛行を禁じ、一定重量以上のUAVの製造に規制（重量規制。日本の場合150kg上限）が設けられているケースが一般的だ。航空関連の法規制のほかに、UAVを飛行させる際に必要な無線の使用にも規制（日本では電波法）が関与する。こちらも国ごとに基準が異なるが、おおむね目視範囲内（数百メートル以内）の飛行に関しては、免許不要の周波数帯の電波を用いUAVを飛行させている例が多い。

一方で2014年以降、フランスの原発や韓国の大統領府といった重要警備拠点や、サッカー・テニスなどのプロスポーツ会場や練習場上空でUAVを飛行させ、許可のない撮影が行われた事象も発生。さらに、米国、日本ではスポーツイベントを空撮中のUAVが落下し、人身に被害が及んだケースも発生している。こうした事象もあり、免許制度なども含むUAV固有の運用ルールの整備や産業ごとの自主規制の整備を求める声も挙がっている。

規制の整備と両輪で検討が進んでいるのが、万が一UAVの落下事故が発生した場合を想定した保険制度の整備である。現状は、日本などUAVの法的位置付けが曖昧である国も見られるなか、UAV関連規制の整備が進むフランスでは、既に保険会社がUAVに特化した保険サービスの提供を開始するなどの例も見られる。今後はUAVの普及が予想される一方で、事故による被害の増加も見込まれることから、保険適用の円滑化といった観点での法制度の整備（UAVの法的位置付けの明確化）や、業界ごとの自主規制の整備（次項参照）も求められる。

(2) 国際/国内ルールと自主規制の整備動向

UAVの運用に関わる国際ルールが現状未整備であるなか、国際民間航空に関する制度設計を行う国際機関ICAO（International Civil Aviation Organization：国際民間航空機関）がUAVに関わる国際ルールの整備に着手したことが報じられている。ICAO内にUASSG（Unmanned Aircraft Systems Study Group）という委員会が設置され、時期は未定ながら、UAV運用の際の安全性確保や技術仕様に関する国際ルールが制定される見込みだ。

国土交通省の発表によると、日本におけるUAVの商用全般に関わるルールは現在検討中の段階で、2015年1月現在では具体的な方針が定まっていない。一方、前述のとおり、日本では農薬散布UAVなど世界に先行してUAVが活用されている例もあり、こういった領域では業界団体が独自に制定した自主規制の下でUAVが運用されている。国土交通省は、国内ルールが未整備であるなか、民間企業によるUAV活用への期待が高まっている現状も踏まえ、業界ごとの自主規制による運用にも一定の理解を示しており、今後は農業に続き、自主規制の下でUAV活用を進める業界が出てくるケースも考えられる。現在日本では、UAV関連の業界団体が計3団体設立されており、UAVの商用利用推進に向けての国への働き掛けや業界ごとのUAV活用に向けた自主規制の整備・運用といった活動を展開している（図表9）。国レベルでのルール整備の動向に加え、こういった業界団体や先行する企業がいかにUAV導入を進めるかにも注目したい。

図表9 UAVの商用利用を推進する業界団体（日本の例）

団体名	活動内容	主要メンバー
日本産業用無人航空機協会（JUAV）	農薬散布をはじめとする産業用UAVの安全航行確保のための基準制定、認定制度の整備、市場拡大に向けた取り組み	富士重工業、ヤマハ、ヤンマー、ヒロボーなど（UAV製造企業が中心）
ミニサーベイヤーコンソーシアム	小型マルチローター型UAV「ミニサーベイヤー」シリーズの開発、法制度への対応、国内外への展開など	千葉大学、NECなど
日本UAS産業振興協議会（JUIDA）	民生分野全般におけるUAVの利活用推進、研究開発、安全ルールの整備、ベンチャー支援など	東京大学、産業技術総合研究所、ブルーイノベーションなど（個人会員も加入対象）

IV. 浮体式洋上風力発電—洋上風力のイノベーション—

1. 浮体式洋上風力発電とは

世界で初めて洋上に風車が設置されたのは1990年で、スウェーデン南部のバルト海の洋上に出力220kWの小型風車1基が建設されたのが始まりである。翌年、1991年には、Bonus社製の450kW風車11基がデンマークの洋上に建設された。

遮るものがほとんどない洋上では、陸上に比べて強い風が安定して吹いている。この風を求めて陸から海に進出したのが洋上風力発電である。

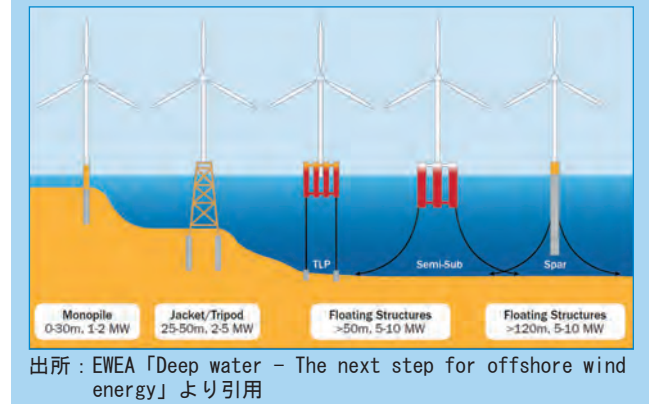
洋上風力発電は欧州で急拡大している。2014年末に約8GWに達した発電能力は、2020年末に約23GWに拡大すると予想されている。2020年になると大型原発23基分に相当する発電能力を有する洋上風力発電所が欧州の洋上に建ち並ぶことになる（1GW=100万kW：大型原発1基分に相当）。

風車の設置方法には、着床式と浮体式がある。図表10は着床式風車と浮体式風車の代表的な構造を示しているが、左側の2種類が着床式、右側の3種類が浮体式である。

水深が浅い海域には着床式洋上風力発電（Bottom-Fixed Offshore Wind）が適している。まず、海底地質や海象条件に適した土木建設工法を選択し、建設サイトに適した基礎構造物を設計して建設する。基礎構造物の上に大型風車を設置するためには、SEP¹船等の高額な大型建設船が必要である。ただし、着床式の場合、水深が30m以上になると建設コストが急激に上昇する。

水深が深い海域には浮体式洋上風力発電（Floating Offshore Wind）が適している。浮体は図表10の右からスパー型、セミサブ型（半潜水型式の浮体構造物でトラ

図表10 着床式風車と浮体式風車の構造



ンス構造やラーメン構造の下部が海面下に沈んでいる)、TLP型（Tension Leg Platform。海底に設置したシンカー等の重量基礎から海上の浮体に係留索を垂直に張り詰めて浮体を安定させる緊張係留方式）と呼ばれ、海底掘削や浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備（FPSO：Floating Production, Storage and Offloading System）などの多くのプロジェクトで実証された確立技術である。浮体式の場合、海底の地質や地形に関係なく同一の浮体を利用できるため、大量生産による大幅なコストダウンが期待できる。浮体式洋上風車は、洋上に浮かせたまま曳航でき、係留索に接続すれば設置できるので、着床式風車の設置に用いられるような高額で大型の建設船は必要ない。ノルウェー沖で開始された浮体式大型洋上風車の実証試験では、2011年に世界最高の年間稼働率を記録し、浮体式であれば、着床式より風況の優れた海域で発電できることが証明された。これを契機として、日本を含む世界数カ国で大型風車による浮体式洋上風力発電の海域実証試験が開始されている。

2. プロジェクトの進捗と技術開発動向

(1) ノルウェーの開発状況：Hywind

2009年にフルスケールの浮体式洋上風力発電装置の海域実証試験が世界で初めて実施された。ノルウェーの石油・ガス開発大手であるStatoil社が実海域に設置したHywindである。Statoilは、Siemens社製の出力2.3MW、直径82mの風車とスパー型浮体を組み合わせた

洋上風車を開発し、ノルウェー沿岸から約10km沖の大西洋の水深約200mの海域に係留して実証試験を開始した。海面下のドラフトは約100m、海面付近のスパー型浮体の直径は約6m、海上のタワーの高さは約60m、ブレード先端の最高点は海面上約100mである。

Hywindは操業が順調であったため、2011年にカット・

1. SEP: Self Elevating Platform。海上に浮いた作業台（プラットフォーム）から複数の足を海底に下ろして、プラットフォームを完全に固定させてから、プラットフォーム全体を上昇させて海面上に作業台を確保する。欧州では建造費が1億ユーロ以上を要すSEP船が複数存在し、着床式洋上風車の建設に利用されている。

図表 11 浮体式洋上風力発電所
Hywind Scotland の完成イメージ



出所：Statoil ホームページより引用

オフ・スピード²を引き上げたところ、年間設備稼働率 50%超を達成した。欧州着床式の平均設備利用率は 35%程度にとどまるのに対し、Hywindはその 5 割増し近くの 50%超を 2011 年に記録し、浮体式であれば水深に関係なく最高の風況が得られる海面に設置できることを実証し、現在順調に安定稼働

中である。次の計画は、英国沖の商業発電事業 Hywind Scotland である。直径 154 m、出力 6MW の大型風車をスパー型浮体と組み合わせた 5 基の浮体式洋上風車による商業発電を 2017 年から開始する予定である（図表 11）。

（2）ポルトガルの開発状況：Wind Float

ポルトガル電力公社 EDP は米国の設計企業である Respol 社等と Wind Float と呼ばれるコンソーシアムを結成し、2011 年 10 月にポルトガル西岸 Agucadoura5km 沖洋上で実証試験を開始した。揺動を最小化する構造のセミサブ型浮体に Vestas 社製の 2MW 風車を搭載したもので、荒れた大西洋で順調に稼働している。次のプロジェクトはポルトガル沖に複数の浮体式風車で構成される合計出力 27MW のアレイを建設する計画である。また、米国オレゴン州沖の太平洋上で合計出力 30MW のデモンストレーション・プロジェクトを検討中である。

（3）フランスの開発状況

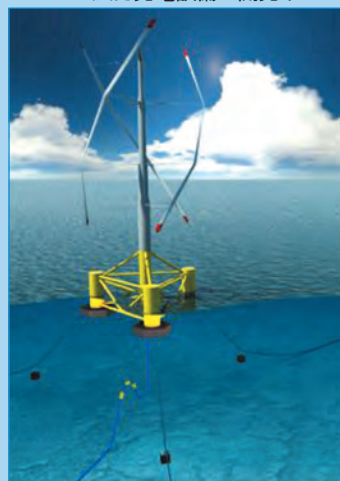
フランス電力会社 EDF³ の子会社 EDF Energies Nouvelles (EDF EN) はフランス沖における浮体式洋上風力発電所の開発計画を 2014 年に発表し、フルスケール実証機の開発に着手した。EDF EN は、垂直軸型風車を搭載した浮体式洋上風車を開発している（図表 12）。垂直軸型の風車は発電機を低い位置に設置できるため、システム全体を低重心化することができ、浮体式洋上風力発電に適した方式として注目されている。

（4）日本の開発状況

日本では、二つの浮体式洋上風力発電の海域実証プロジェクトが政府主導により実施されている。

一つ目は経済産業省による福島沖の実証研究事業である。第一期事業として 2013 年に三井造船製のセミサブ型浮体に日立製作所製の 2MW ダウンウインド型風車を設置

図表 12 EDF EN による浮体式洋上
風力発電設備の開発イメージ



出所：EDF EN 「PROVENCE GRAND LARGE Floating offshore wind project」より引用

図表 13 経済産業省による浮体式
洋上風力発電の実証研究事業
(福島県福島沖 2MW 風車)



出所：経済産業省 2013 年 11 月 11 日ニュースリリースより引用

した浮体式洋上風車が福島沖約 20km の海域に設置され、2014 年に運転が開始された（図表 13）。第 2 期事業では、さらに大型の風車 2 基をおのおの大型浮体に搭載する予定である。

二つ目は、環境省による実証研究事業である。2013 年 10 月に長崎県五島市杵島沖に 2MW の浮体式洋上風車が設置された。風車は日立製作所製のダウンウインド型風車、浮体はコンクリートと鉄鋼を組み合わせたハイブリッド式のスパー型（図表 14）で、コンクリート部分を戸田建設が、鉄鋼製部分を日立造船が製造した。

経済産業省は、エネルギー基本計画で、「風力発電は大規模に開発できれば発電コストが火力並みであることから、経済性も確保できる可能性のあるエネルギー源である」と位置付け、さらに、「洋上風力の導入は、陸上ポテンシャルが限定的な我が国において、風力発電の導入を図る上で不可欠」と位置付けている⁴。NEDO（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）の再生可能エネルギー技術白書（2014 年 2 月）では、2030 年の洋上風力発電コストは kWh 当たり 8.6 ～ 23.1 円、石炭力は 10.3 円、一般水力は 10.6 円と試算されている。

（5）その他開発状況

海外では上記以外にも複数の企業等が浮体式洋上風力発電の開発を開始している。その中にはフルスケール規模での洋上実証試験を計画している企業もあり商業化が期待されている。ここでは浮体式洋上風車の開発事例を簡単に紹介する。

Floating Haliade 150

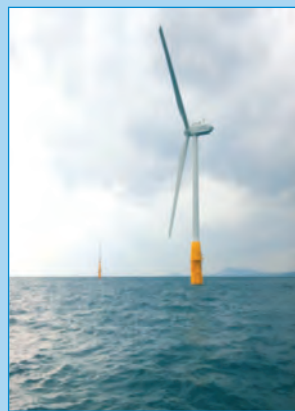
フランスの Alstom 社が開発中のシステム。直径 150 m、出力 6MW の大型風車にスパー型浮体を組み合わせたモデルである。開発中の係留方式は、水深 50 ～ 80 m に適した Tension Leg Buoy と水深 80 ～ 300 m の海域に適した Tension Leg Platform の 2 種類である。

2. cut-off speed. 強風時に風車の運転を停止させる風速条件。

3. フランス最大の電力会社。1946 年に設立された国有企業 EDF（旧フランス電力公社）が、2004 年に部分民営化され現在の EDF となった。

4. 経済産業省エネルギー基本調査会（2014 年 12 月 2 日小委員会など）。

図表 14
環境省による浮体式洋上
風力発電の実証研究事業
(長崎県五島市杵島沖 2MW 風車)



写真撮影および提供：
木下健 東京大学名誉教授
日本大学特任教授

WINFLO

フランスの Nass & Wind 社、DCNS 社、Vergnet 社が開発中のシステム。特殊形状のセミサブ型浮体に 2.5MW の 2 枚ブレードの風車を組み合わせた設計で、2.5MW の商業風車の実用化を目指している。

Pela Star

米国の Glostten Associates 社が開発中のシステム。TLP 型浮体と 6MW 大型風車の組み合わせによる実証試験を計画している。

IDEOL

フランスの IDEOL 社が開発中のシステム。中央にムーン・プール⁵を配した正方形の浮体と 5 ~ 6MW 大型風車を組み合わせたコンセプトである。TLP 型浮体はコンクリートでも製造することができる。

3. 今後の展望—期待される潜在市場—

(1) 欧州の海域

欧州で着床式洋上風力発電が計画されている海域は水深の浅い北海とバルト海が主体である。ただし、水深の浅い北海ですら、約 3 分の 2 は水深 50 m 以上であり、浮体式に適している。ここに浮体式の洋上風車を建設すると、理論的には EU の総電力需要の 4 倍の電力を供給できるだけの洋上風力エネルギーが存在することになる⁶。

ポルトガルやフランスの大西洋沿岸は水深が深いため、領海と排他的経済水域 (EEZ)⁷ の大半は浮体式に適した海域である。ポルトガル電力公社やフランス電力会社等が浮体式洋上風力発電を開発する理由はここにある。

(2) 日本の海域

日本風力発電協会の試算では、日本の洋上風力ポテンシャルは 613GW であり、日本の総発電能力の 3 倍以上のエネルギーポテンシャルが洋上に存在する。うち、浮体式に適した水深 50 m 以上の洋上風力ポテンシャルは 519GW で、着床式に適した水深 50 m 未満の洋上風力ポテンシャルである 93GW を圧倒的に凌駕している。日本は浮体式に適した海に囲まれている。

(3) 世界の海域

世界では、北海や東シナ海などのように水深が浅く面積が広大な海域は少ない。一方、北南米の西岸、地中海、日本や東南アジアの海域は、プレート境界が沿岸付近の海底に横たわっているため沿岸付近でも水深は深い。グローバル市場における浮体式洋上風力発電のポテンシ

アルは莫大である。

(4) 今後の見通し

風況と系統連系能力に恵まれたデンマークでは、2016 年に建設される陸上風力発電所の発電コストが石炭火力発電の約 2 分の 1 となり、同国で最も安い電源になるという見通しが、同国エネルギー省により 2014 年 7 月に発表されている。ただし、陸上風車は道路輸送の限界によりこれ以上の大型化は不可能⁸であるため、今後、大型化による発電コストの低減は難しい。

それに対し洋上風力発電は、風車の大型化や発電ファームの大規模化により発電コストが大幅に低減できるため、将来、最も競争力のある再生可能エネルギー源となり、補助金が不要な再生可能電源に育つ可能性が高いと期待されている。

浮体式洋上風力発電はフルスケールの洋上実証が開始されたばかりの段階であるため今後のコストダウンの余地が着床式より大きい。このため、大規模化が進む 2020 年以降になると、浮体式洋上風力発電の発電コストは、着床式より安くなると予測されている。従って、2020 年以降は、発電コスト競争力がドライバーとなり、洋上風況と系統連系能力に優れた国々から順次、浮体式洋上風力発電が普及していくと予想される。

浮体式洋上風力発電に適した海域は巨大であり、グローバル市場の潜在規模は莫大である。浮体式洋上風力発電がゲーム・チェンジャーになる日が近づいている。

5. 船体や浮体の中央に海面と接する空間を設けたもの。主にドリルパイプなどを船上から海底に降ろすために海底掘削船などに設けられているが、IDEOL 社の場合は浮体の安定化を目的としている。

6. EWEA 作成レポート「Deep water - The next step for offshore wind energy」による分析。

7. EEZ: Exclusive Economic Zone。EEZ は領海 (沿岸基線から 20 海里) の外にあるが、沿岸国が自国の資源開発等を行う権利を有する海域である。

8. 例えば長さが 75 m の風車ブレードをトラック輸送しようとしても、道路の交差点やカーブを曲がることができないため、陸上風車の建設現場まで輸送することが困難になる。