

自然エネルギー開発における土木技術の役割

東京大学工学系研究科 石原 孟

はじめに

20世紀は成長の世紀と言われている。この成長は我々の生活を豊かにしたと同時にエネルギーの大量消費をもたらした。世界のエネルギーの約9割は石油や石炭に代表される化石燃料に依存するようになり、地球温暖化を引き起こし、人類の生存を脅かしている。

21世紀はこのような化石燃料に依存する現代文明に大きな転機が迎えられようとしている。地球温暖化問題の他に、化石燃料、とりわけ石油は産出のピークを過ぎており、中国やインドなどの新興国の急激な成長に伴う世界規模のエネルギー需要の増大を賄えなくなり、やがて枯渇してしまうことが挙げられる。これらの問題を解決するためには、エネルギーのクリーン化、すなわち、化石燃料使用時の二酸化炭素排出の削減および自然エネルギーの有効活用は不可欠である。

国際エネルギー機関IEAは、2010年11月3日に2007年で280億t程度だったCO₂排出量を2050年までに140億tに半減させるエネルギー技術展望2010(図1)を発表した¹⁾。文字通り半分にするということではあるが、現状の努力を継続した場合(ベースライン)に、2050年には570億tになることを考えると、実際には75%削減である。このシナリオを達成するためには、供給サイトの電力部門の役割は重要であり、とりわけ自然エネルギーの開発が重要な役割を果たしている。

しかし、風力、太陽光に代表されている自然エネ

ルギーは天候に左右されるため、電力需要を満たすためには調整電源および電力システムの制御技術が不可欠である。調整電源としては、水力の他に天然ガスを利用したコンバインド・サイクルが最も期待されている。天然ガスは、発電時に地球温暖化を引き起こす二酸化炭素や光化学スモッグの原因となる窒素酸化物の排出量が石油や石炭に比べて少なく、酸性雨を引き起こす硫黄酸化物や煤塵の発生が全くないクリーンエネルギーである。また天然ガスの埋蔵量は豊富であり、新しいガス田の開発も進められている。さらに産出国が中東に偏った石油と異なり、天然ガスは世界各地に広く存在しているため、供給安定性にも優れている。一方、電力システムの制御技術としてはスマートグリッド(またはマイクログリッド)が挙げられる。スマートグリッドはリアルタイムで電力需要を把握制御することによりピーク電力を抑制すると共に、リアルタイムで発電所の発電量を制御することにより、電力システムの安定運用と自然エネルギーの大量導入を同時に実現する。

本小特集の総論では、自然エネルギー利用の現状を紹介すると共に、洋上風力エネルギー利用のための土木技術、洋上風力発電の将来展望について概説する。また本小特集では自然エネルギーの活用事例として沖縄電力における離島マイクログリッドシステム、そして環境に優しい天然ガスの利用事例として世界最大25万kL東京ガス扇島工場TL-22LNG地下タンク建設工事を紹介する。

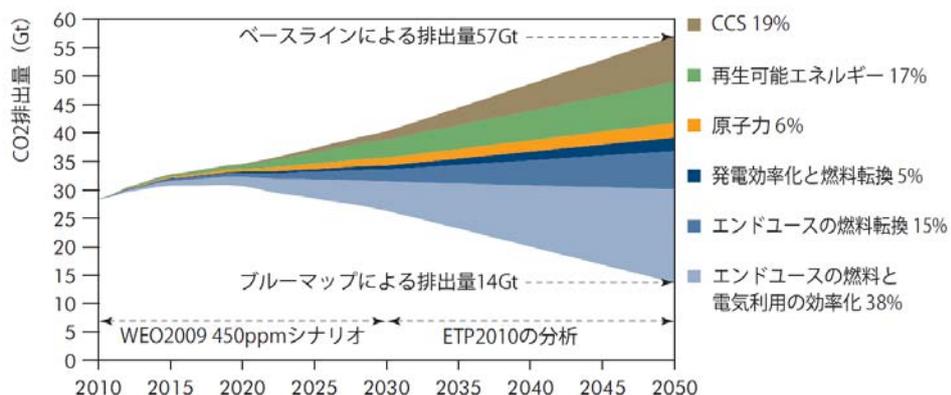


図1 エネルギー起源CO₂排出半減の技術シナリオ¹⁾

自然エネルギー利用の現状

自然エネルギー世界白書 2010²⁾によると、2009 年末の自然エネルギーの発電設備容量は世界全体の発電設備容量の 26%を占め、1230GW となった (図 2(a))。また世界の新設発電設備容量における自然エネルギー発電の割合は 47%に達している (図 2(b))。2008 年における自然エネルギーへの年間投資は 1300 億ドルである。その内訳は風力発電の 41%、太陽光発電の 31%、バイオ燃料の 12%、バイオマスと地熱発電の 6%、太陽熱温水器の 5%、小水力発電の 5%となっている。また 2004 年末から 2009 年の 5 年間の平均成長率は、風力発電は 27%、太陽光発電は 60%に達している。

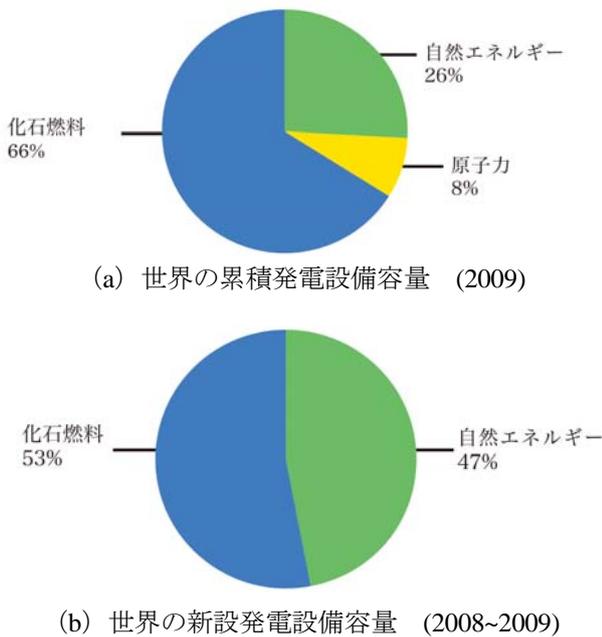


図 2 エネルギー源別世界の発電設備容量²⁾

自然エネルギー開発は今や世界経済・環境に大きな影響を与えると共に、エネルギー開発の主役にもなっている。2009 年に世界での発電に対する投資額はおよそ 3200 億ドルのうち、自然エネルギーへの投資は 50%以上を占めている。自然エネルギーの開発を 10 年以上行っているドイツでは 2009 年に自然エネルギー産業の雇用者数が 30 万人となり、その数はドイツの最大の製造業である自動車産業の雇用者数に匹敵する。

自然エネルギーの開発は、石油・天然ガス等の資源を十分に持たない国の経済、環境、エネルギー安定供給を考える上で、極めて重要である。自然エネルギーの導入は今や欧米からアジアに拡大している。自然エネルギーへの取り組みを強化している国々の中でもとりわけ中国における自然エネルギーの導入拡大が著しく、風力発電機および太陽光発電パネルの生産量は既

に世界一になっている。中国は自然エネルギーの分野において製造のみならず、研究開発に力を入れており、クリーン技術の特許と知的所有権の分野でも世界をリードしようとしている。

自然エネルギーを利用した発電には、風力発電、太陽光発電、バイオマス発電、地熱発電、小水力発電がある。中でも風力発電の成長および発電機の大型化は著しい。2010 年末に世界の風力発電設備容量は 1 億 9439 万 kW³⁾に達している。陸上風力発電だけではなく、2008 年以後洋上風力発電の導入も急速に拡大している。欧州風力発電協会は、2020 年までに 4000 万 kW、2030 年までに 1 億 5000 万 kW の洋上風力を開発するという野心的な目標を掲げ、次々と大規模洋上風力発電所の建設を始めている。図 3 には欧州における将来の洋上風力発電導入見込量を示す。この図には欧州における陸上風力発電の導入実績を併記しており、かつての陸上風力発電のようにいま洋上風力発電の普及が始まっていることが分かる⁴⁾。

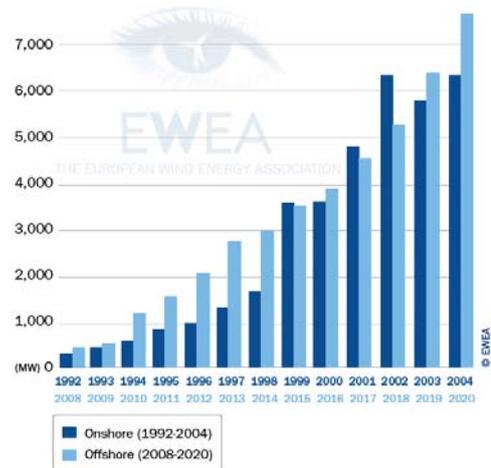


図 3 欧州の洋上風力発電導入量の予測⁴⁾

一般に、洋上の風速は強勢で乱れが小さいことから、風力発電に適している。また敷地の制限も少なく、大規模風力発電所を建設でき、陸上に比べ景観や騒音等の環境問題が少ないという利点がある。さらに道路等の制約条件を受けないため、大型風車の運搬・設置が容易である。

このことから、欧州においては 20 年前から洋上風力発電の研究開発が行われてきた。図 4 には 2000 年にデンマークに建設された世界初の本格的な商業洋上ウインドファーム (Middelgrunden 洋上風力発電所) を示す⁵⁾。2000kW の風車 20 基が海岸から 2km 地点に建設され、世界一美しい洋上風力発電所と言われている。2010 年に欧州における洋上風力発電の設備容量は 296

万 kW に達し、51%の年成長率を記録した。現在建設中の洋上風力発電は 300 万 kW、また計画中の洋上風力発電は 1900 万 kW に上る。現在建設中の世界最大級の洋上風力発電所 London Array の設備容量は 68 万 kW に達している。



図 4 世界初の商業洋上ウインドファーム

このように欧州における洋上風力発電所の規模の増大とともに、風車のサイズと定格出力も大きくなっている。過去 20 年間に風車ローターの直径は約 10 倍、定格出力は 100 倍に増えている。現在最大級風車の定格出力は 5000kW、直径は 126m に達する⁵⁾ (図 5)。風車の大型化に伴い、風車ローターに流入する風速が大きくなり、より多くの風力エネルギーが得られるとともに、風車に作用する風荷重も大きくなり、それを低減するための空力制御やアクティブ制御に関する研究も盛んに行われている。



図 5 世界最大級の 5MW 風車

洋上風力エネルギー利用のための土木技術

2004 年 4 月 1 日に国内初の洋上風力発電所である瀬棚洋上風力発電所が完成し、600kW の風車 2 基が海岸から約 700m 離れた水深 13m の瀬棚港内に建設された。

また同年山形県酒田市に建設されたサミット風力発電所では、2000kW の風車 5 基が水深 4m の水路内に設置された。さらに 2009 年に茨城県神栖市に建設された神栖洋上風力発電所では、2000kW の風車 7 基が堤防から 40-50m 沖に建設されたが、基礎及び風車本体の工事は陸上クレーンにより行われた。このように、これまでにわが国に建設されている洋上風力発電所の全ては沿岸洋上風力発電所であり、今後本格的な洋上風力発電所を建設するために、大型洋上風車の開発、洋上風力発電設備支持構造物の設計・運搬・施工並びに洋上風力発電所の維持管理等に関する技術開発が不可欠である。

特に日本では、欧州と異なり、海底地盤条件と水深変化が複雑な上、暴風、高波浪、地震等の自然環境条件が大変厳しい。図 6 には、わが国における洋上風力発電に関する研究課題を示す。海上風の観測、風車と支持構造物の連成振動予測、基礎構造の研究開発、疲労照査技術、遠隔監視制御と故障予知診断システムの開発等が挙げられている⁶⁾。例えば、日本は混合気候であるため、台風と台風以外の気象現象に起因する風に分けて成因別極値風速を評価する必要があり、北海道を除き、殆どの地域の年最大風速の 50 年再現期待値は、台風によって規定されている。また陸上に設置される風力発電設備に比べ、洋上に設置される風力発電設備は暴風と波浪の作用を同時に受ける。風荷重と波荷重の最大値から単純和により求めた暴風波浪時の最大値は、暴風と波浪が同時に作用した時に求めた最大値より大きく、風荷重と波荷重の組み合わせを考えると、風荷重と波荷重の相関を考慮することにより、最大荷重を低減させることが可能であることが分かる⁷⁾。

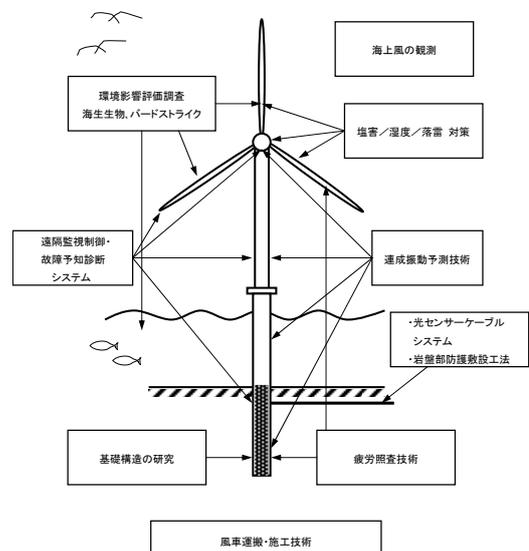


図 6 洋上風力発電に関する研究課題⁶⁾

さらに洋上風力発電所建設の際に用いる施工方法はプロジェクトの成否を左右する。欧州で実施された実証研究では、天候の影響で実証機が予定通りに設置出来なかったことが起きている。わが国の外洋においてもうねりが卓越するため、設備の運搬・施工の稼働率の向上および海上での作業時間の短縮が重要な研究課題となっている。



図7 洋上風車の一体施工⁸⁾

図7にはフローティングクレーンを利用した洋上風車の一体施工状況を示す。海上での作業時間を短縮するため、あらかじめ陸上で一体化した風車をシェアレグで吊り、そのまま現地へ輸送した。風車の影が緩やかな海面に反映している状況から分かるように、この工法は海象が緩やかでないと成立しにくい。設計・運搬・施工の問題を総合的に解決するため、近年洋上風力発電システムの統合設計の試みが行われた。



図8 BARD 5M 風車とトリパイル支持構造物

例えば、図8に示す Bard Engineering 社の場合⁸⁾には、風車、支持構造物、施工に関する統合設計を行い、自社開発した 5MW 風車とトリパイル支持構造物を合わせて、自社製の風車据付用船 WINDLIFT-I を用いて施工する。WINDLIFT-I の許容吊上げ荷重は 500ton であるため、風車ナセル、パイル、トランジションピース等の部品の重量は全て 500ton 以下に抑えている。風車と支持構造物はそれぞれドイツの Cxhaven と Emeden

の港で製造するとともに、港から出荷されてから水深 40m、離岸距離 87km の洋上にそれぞれ 48 時間で据付することが可能である。

今後わが国における大規模洋上風力発電所を建設する際には、現有の施工船の性能を十分に念頭に置き、海底地盤、水深、海象条件に対応できる最適な施工方法を検討すると共に、風車・支持構造物・施工法に関する統合設計の研究開発も不可欠である。

洋上風力発電の将来展望

NEDO の調査によると、風速 7m/s 以上、離岸距離 30km、水深 200m までの洋上風力発電の賦存量は、約 12 億 kW に達し、水深 50-200m の範囲の賦存量は水深 50m までの賦存量の 4 倍以上である⁹⁾。着床式洋上風力発電の適応限界水深と考えられる 50m までの賦存量は約 2 億 1000 万 kW であると試算されている。設置可能海域内の 5% が利用可能とした場合には約 1000 万 kW の設備容量が確保できる。さらに浮体式洋上風力発電が実用化されれば、水深 200m まで設置可能海域となり、利用可能率を 4% とすると 4800 万 kW の設備容量が確保されることになる。洋上風力発電所の設備利用率と原子力発電所の稼働率をそれぞれ 30% と 80% と仮定した場合には、4800 万 kW の洋上風力発電設備は、100 万 kW の原子力発電所 18 基分に相当する。

図9には日本沿岸における洋上風力賦存量を示す。この図から、海岸から離れるにつれ、水深 50m 以下の海域が急速に減少しており、より深い水深の海域に建設が可能な浮体式基礎構造を用いる必要があることが分かる。

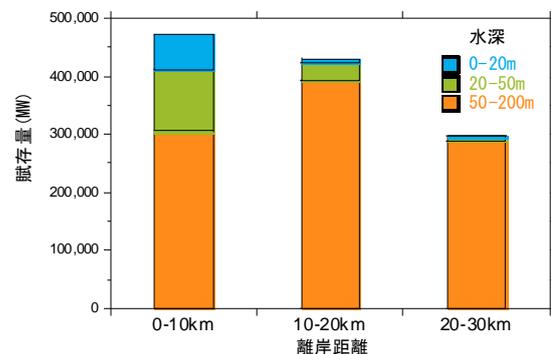


図9 日本沿岸における洋上風力賦存量

浮体式基礎構造に関する研究開発はすでにくつかりの研究機関で行われ、セミサブ型、スパーブイ型、TLP 型の浮体構造が提案され、実用化に向けた研究開発が進められている。図10には浮体式洋上風力発電所の完

成予想図¹⁰⁾を示す。



図 10 浮体式洋上風力発電所の完成予想図

図 11 は NEDO の風力発電ロードマップ検討分科会報告書に示されたわが国における風力発電導入量の予測である。この報告書¹¹⁾によると、わが国の風力発電導入量は、2020 年度と 2030 年度までにそれぞれ 1000 万 kW と 2000 万 kW と予測され、2010 年度以後の風力開発は、陸上風力に併行して、洋上風力の開発も開始される。2010 年度から 2020 年度までには、陸上と洋上の導入量はそれぞれ 320 万 kW と 380 万 kW であるのに対して、2020 年度から 2030 年度までにはそれぞれ 80 万 kW と 920 万 kW になり、わが国の風力発電の中で洋上風力発電が果たす役割は今後益々重要となることが分かる。

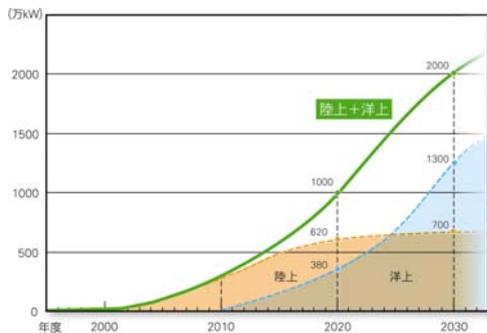


図 11 わが国における風力発電導入量の予測

おわりに

本稿では、自然エネルギー利用の現状を紹介すると共に、洋上風力エネルギー利用のための土木技術、洋上風力発電の将来展望について概説した。2010 年における自然エネルギーへの年間投資は約 2000 億ドル (15.6 兆円) であり、2002 年の約 10 倍に達している。自然エネルギーへの投資規模の拡大に伴い、発電機の大規模化も著しい。過去 20 年間に風車ローターの直径は約 10 倍に増え、現在最大級風車の直径は 126m に達し

ている。このような巨大な発電機を安全でかつ経済的に設置するためには、これまでに長大橋に代表される巨大土木構造物の建設で培った土木施工技術が不可欠である。

今年 3 月にスペインにおける風力発電は発電量全体の 21% を占め、原子力発電の同 19% を抜いて第 1 位の電源となった¹²⁾。またスペインでは、自然エネルギーである風力、水力、太陽光の発電量の合計は電力供給の 4 割を超えている。一方、日本では、東日本大震災の後に電力供給不足が深刻な社会問題となっている。この問題を解決するために、かつての大型水力、原子力開発のように、土木技術が果たすべく役割が大きいと思われる。これまでの電源開発で培った高い技術力とノウハウを活かし、日本における自然エネルギーの開発に挑戦していくことを期待したい。

<参考文献>

- 1) 国際エネルギー機関：エネルギー技術展望 2010、<http://www.iea.org/>
- 2) 環境エネルギー政策研究所 (ISEP) 翻訳：自然エネルギー世界白書 2010、<http://www.isep.or.jp/>
- 3) GEWC： <http://www.gwec.net/>
- 4) EWEA：Oceans of Opportunity, <http://www.ewea.org/>
- 5) 欧州洋上風力発電最新事情調査団：欧州洋上風力発電最新事情調査報告、風力エネルギー、Vol.31、No.4、pp.63-76、2007.
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 19 年度洋上風力発電実証研究 F/S に係る先行調査報告書、イー・アンド・イー ソリューションズ、風力エネルギー研究所、ネクストエナジー、2007.
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S 調査 (銚子)、東京電力、東京大学、鹿島建設、2008.
- 8) 2009 年欧州洋上風力発電最新事情調査団：2009 年欧州洋上風力発電最新事情調査報告、風力エネルギー、Vol.33、No.4、pp.38-45、2009.
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S 評価、イー・アンド・イー ソリューションズ、2008.
- 10) 石原孟、Muhammad Bilal Waris、助川博之：ヒーププレートと非静水圧の効果を考慮した浮体動揺予測モデルの開発、第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム、pp. 209-212、2009.
- 11) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：風力発電ロードマップ検討分科会報告書、2005.
- 12) 石原孟：「風力発電大国」スペインにおける電力系統制御への挑戦、日経エレクトロニクス、World Report、2011.