

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いわれている。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ともに、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宮古島メガソーラー実証研究設備、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。

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、1,230GW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

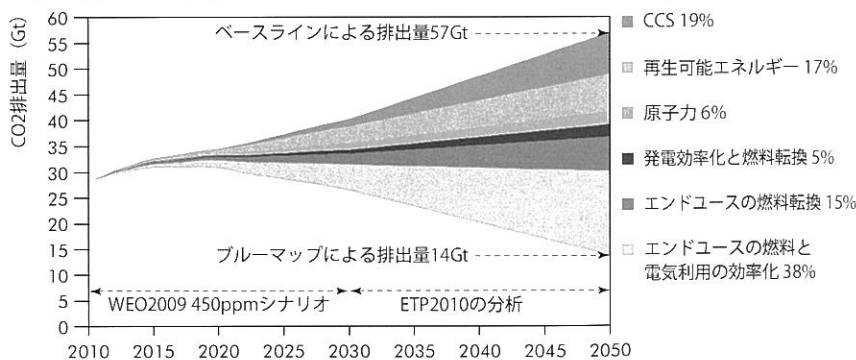
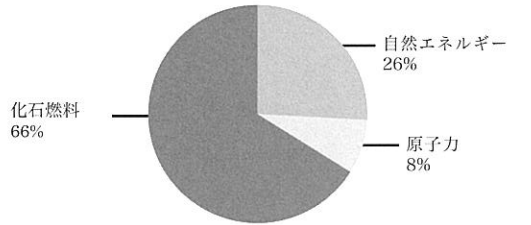
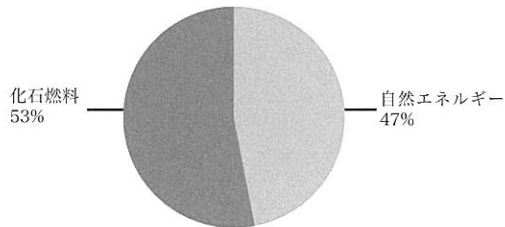


図-1 エネルギー起源CO₂排出半減の技術シナリオ¹⁾

ギーへの年間投資は1,300億ドルである。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。



(a) 世界の累積発電設備容量 (2009)



(b) 世界の新設発電設備容量 (2008~2009)

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ともに、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3,200億ドルのうち、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1億9,439万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4,000万kW、2030年までに1億5,000万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⁾。

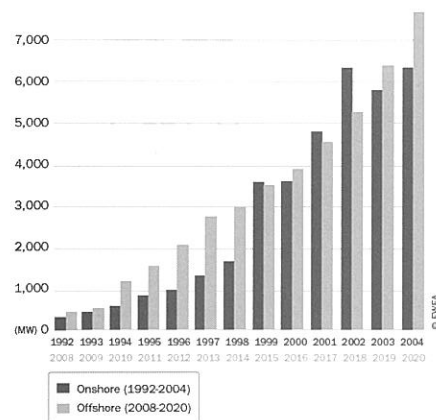


図-3 欧州の洋上風力発電導入量の予測⁴⁾

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。写真-1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⁾。2,000kW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いわれている。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1,900万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。



写真-1 世界初の本格的な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5,000kW、直径は126mに達する⁵⁾(写真-2)。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

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。



写真-2 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、2,000kW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、2,000kWの風車7基が堤防から40~50m沖に建設されたが、基礎およ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-4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、ほとん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⁾。

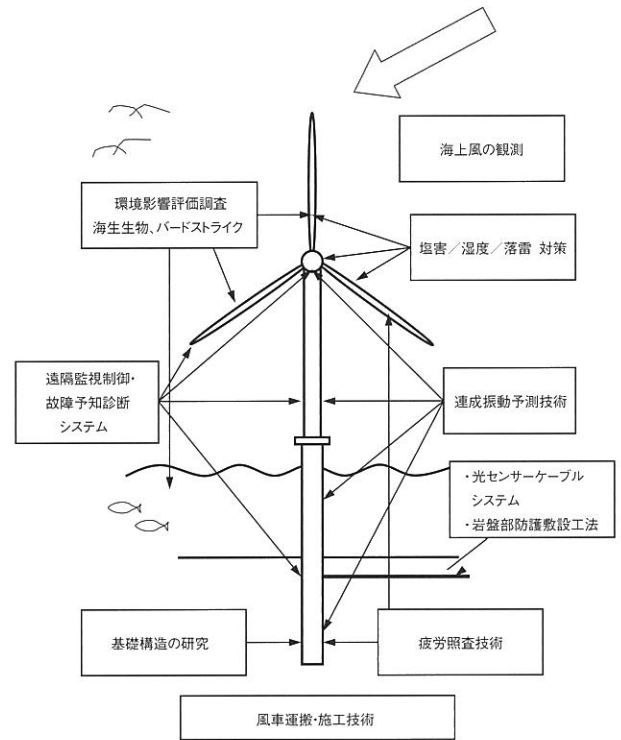


図-4 洋上風力発電に関する研究課題⁶⁾

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でき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。

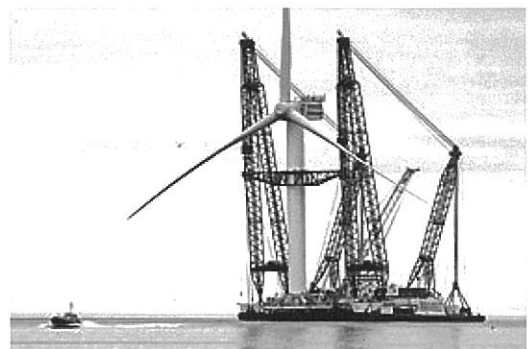


写真-3 洋上風車の一体施工⁸⁾

写真-3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なしにくい。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。

例えば、写真-4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500t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500t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。



写真-4 BARD 5M風車とトリパイル支持構造物

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2億1,000万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1,000万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4,800万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、4,800万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-5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

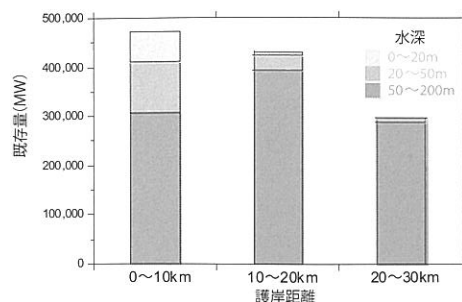


図-5 日本沿岸における洋上風力賦存量

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。

浮体式基礎構造に関する研究開発はすでにいくつか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-6には浮体式洋上風力発電所の完成予想図¹⁰⁾を示す。



図-6 浮体式洋上風力発電所の完成予想図

図-7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1,000万kWと2,000万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ますます重要となることが分かる。

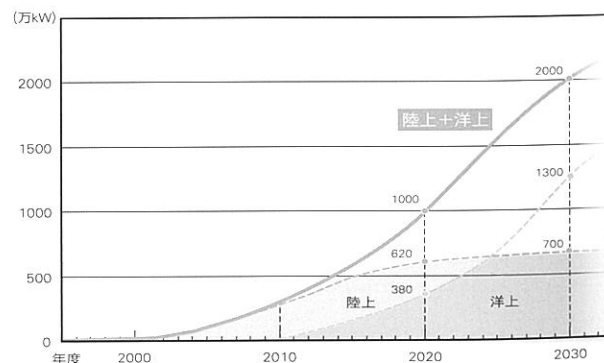


図-7 わが国における風力発電導入量の予測

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ともに、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2,000億ドル(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、発電機の大型化も著しい。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のと思われる。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.