

SRRREN

ipcc

気候変動に関する政府間パネル
第3作業部会 - 気候変動の緩和（策）

再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書
最終版

風力エネルギー（仮訳）

風力エネルギー（仮訳）

統括執筆責任者:

Ryan Wiser (USA), Zhenbin Yang (China)

執筆責任者:

Maureen Hand (USA), Olav Hohmeyer (Germany), David Infield (United Kingdom), Peter H. Jensen (Denmark), Vladimir Nikolaev (Russia), Mark O'Malley (Ireland), Graham Sinden (United Kingdom/Australia), Arthouros Zervos (Greece)

執筆協力者:

Naïm Darghouth (USA), Dennis Elliott (USA), Garvin Heath (USA), Ben Hoen (USA), Hannele Holttinen (Finland), Jason Jonkman (USA), Andrew Mills (USA), Patrick Moriarty (USA), Sara Pryor (USA), Scott Schreck (USA), Charles Smith (USA)

執筆協力者:

Christian Kjaer (Belgium/Denmark) and Fatemeh Rahimzadeh (Iran)

本章の引用時の表記方法:

Wiser, R., Z. Yang, M. Hand, O. Hohmeyer, D. Infield, P. H. Jensen, V. Nikolaev, M. O'Malley, G. Sinden, A. Zervos, 2011: Wind Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs - Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

注意

本報告書は、IPCC「Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation」Final Release を翻訳したものです。この翻訳は、IPCC ホームページに掲載されている報告書 <http://srren.ipcc-wg3.de/> を元に行っています。また、翻訳は 2011 年 5 月 9 日リリースの初版に基づいて行っており、その後 IPCC によって行われた修正、追加、削除等の変更には対応しておりませんので、ご注意ください。

本報告書「再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書」は上記報告書の仮訳であり、IPCC の公式訳ではありません。正本は英文のみで提供されており、本日本語仮訳を引用して問題が生じて責任を負いかねますのでご了承ください。

第7章: 風力エネルギー

目次

目次	2
要約	4
7.1 序論	5
7.2 資源ポテンシャル	7
7.2.1 世界規模の技術的ポテンシャル	7
7.2.2 地域の技術的ポテンシャル	11
7.2.2.1 地域別の世界的な評価の結果	11
7.2.2.2 地域別の評価結果	12
7.2.3 気候変動が資源ポテンシャルに与える可能性のある影響	13
7.3 技術及び応用	14
7.3.1 技術開発とその状況	14
7.3.1.1 基本設計原理	14
7.3.1.2 陸上風力発電技術	15
7.3.1.3 洋上風力発電技術	18
7.3.2 国際的な風力エネルギー技術基準	19
7.3.3 電力変換及び関連する系統連系の問題	20
7.4 市場及び産業の発達の世界的・地域的状況	21
7.4.1 世界的な状況と動向	21
7.4.2 地域及び国の状態と動向	22
7.4.3 産業発展	24
7.4.4 政策の影響	25
7.5 系統連系問題の短期的課題	25
7.5.1 風力発電の特性	26
7.5.2 風力発電を有する電力系統の計画	27
7.5.2.1 電力系統モデル	28
7.5.2.2 風力発電の電気特性とグリッドコード	28
7.5.2.3 送電インフラ	28
7.5.2.4 発電アデカシー	29
7.5.3 風力発電を有する電力系統の運用	30
7.5.3.1 系統連系、柔軟性、及び変動性	30
7.5.3.2 風力発電を有する電力系統の運用実績	32
7.5.4 系統連系研究の結果	33
7.5.4.1 方法論についての課題	34
7.5.4.2 風力発電による需給調整コストの増加	34
7.5.4.3 風力発電による発電アデカシー関連コスト	35
7.5.4.4 風力発電の送電コスト	36
7.6 環境及び社会的影響	36
7.6.1 風力エネルギーによる環境上の正味の便益	36
7.6.1.1 直接的影響	37
7.6.1.2 間接的なライフサイクルの影響	37
7.6.1.3 間接的な変動性の影響	38
7.6.1.4 正味の環境上の便益	39
7.6.2 生態学的影響	39
7.6.2.1 衝突による鳥やコウモリの死亡確率	39
7.6.2.2 生息地及び生態系の変化	40
7.6.2.3 風力発電発電所が地域の気候に与える影響	41
7.6.3 人間の活動及び幸福に与える影響	41
7.6.3.1 陸地や海の利用	41
7.6.3.2 景観への影響	42
7.6.3.3 騒音、点滅、健康及び安全性	42
7.6.3.4 不動産の価値	43
7.6.4 一般の人々の態度や受容	43
7.6.5 社会的及び環境的懸念を最小化する	44
7.7 技術の改良及び改革の見通し	44

7.7.1 研究及び開発プログラム	45
7.7.2 系統レベルの設計及び最適化	45
7.7.3 構成部品レベルのイノベーション機会	46
7.7.3.1 新型タワーコンセプト	47
7.7.3.2 新型ロータ及び翼	47
7.7.3.3 エネルギー損失の低減と利用可能性の向上	47
7.7.3.4 最新型動力伝達装置、発電機、及びパワーエレクトロニクス	47
7.7.3.5 製造学習	48
7.7.3.6 洋上の研究開発機会	48
7.7.4 基礎となる科学の重要性	49
7.8 コストの動向	51
7.8.1 風力エネルギーのコストに影響する要因	51
7.8.2 過去の傾向	52
7.8.2.1 投資コスト	52
7.8.2.2 運転保守	54
7.8.2.3 エネルギー生産	54
7.8.3 現在の状況	55
7.8.3.1 投資コスト	55
7.8.3.2 運転保守	56
7.8.3.3 エネルギー生産	56
7.8.3.4 均等化発電原価の推定値	56
7.8.4 風力エネルギーにおけるさらなるコスト低下のポテンシャル	57
7.8.4.1 学習曲線の推定値	57
7.8.4.2 エンジニアリング・モデルの推定値	59
7.8.4.3 風力エネルギーの均等化発電原価予測	59
7.9 普及のポテンシャル	60
7.9.1 短期予測	60
7.9.2 二酸化炭素排出抑制からみた長期的な普及	61
7.9.3 普及に関する結論	65
REFERENCES	66

地図に関する免責条項: 本技術要約の地図上に表示された国境と名称、及び使用された記号は、国連から公式に承認または承諾を得たものではない。本章で他の出典から複製された地図は、国連の慣行に細部にわたり準拠しているわけではないことに留意。

要約

風力エネルギーは、短期的（2020年）及び長期的（2050年）な温室効果ガス排出量削減に大きなポテンシャルを秘めている。様々な多数の風力エネルギー技術が様々な用途で使用可能であるが、気候変動緩和に関する風力エネルギーの一次使用は、洋上または陸上のいずれかに導入される大規模に系統連系された風車による発電である。これらの技術に注目すると、2009年末までに導入された風力発電容量は、世界の電力需要の約1.8%を占めている。また、温室効果ガス排出量を削減し、風力エネルギーの普及の拡大の障壁を克服するための取り組みが意欲的に行われれば、2050年までにその寄与は20%を超える可能性がある。陸上及び洋上風力発電は、すでに多くの国で急速に普及しており、エネルギー供給システムへの風力エネルギーの普及レベルの増加を阻む、克服不可能な技術的障壁は存在しない。加えて、平均風速は場所によって大きく異なるものの、世界のほとんどの地域で大規模な風力エネルギーの普及を可能とする大きな技術的ポテンシャルが存在する。良好な風資源を有する地域の中には、風力エネルギーのコストがすでに相対的な環境への影響を考慮しなくても、現在のエネルギー市場価格に対して競争力を持っている地域もある。それでもなお、世界のほとんどの地域において、急速な普及を確実にするための政策措置が必要である。しかし、陸上及び洋上風力発電技術は継続的に進歩し、風力エネルギーのコストはさらに削減され、その温室効果ガス排出量削減ポテンシャルも向上すると予想されている。

風力エネルギー市場は急拡大している。現代の風車は、30年を超える基礎研究開発及び応用研究開発（R&D）にも牽引され、小型で簡素な機械から大型で非常に洗練された装置へと発展を遂げた。典型的な風車の公称容量定格は1980年代以来大幅に上昇し、約75kW～1.5MW超になった。風車のロータは現在、80mを超えるものが多く、高さ80m超のタワーに設置される。その結果として、コスト削減と再生可能エネルギー（RE）供給拡大を図る政府の政策が、急速な市場発展につながっている。世界規模の風力発電設備容量は1999年末までの累積容量14GWから、10年間で12倍に増え、2009年末までにほぼ160GWに達している。追加された設備容量の大半は陸上であるが、ヨーロッパ諸国が洋上風力発電の普及に向け意欲的なプログラムに着手したことに伴い、2009年末までに2.1GWの容量が洋上に設置された。2000年から2009年の間、世界で新規に追加設置された正味容量（GW単位）のうち、約11%が新たな風力発電発電所によるものであり、2009年単年ではこの数字は20%を超えた可能性が高い。2009年における風力発電発電所設置に対する投資総額は約570億USドル（2005年）で、風力エネルギー部門での直接雇用は50万と推定されている。それにもかかわらず、世界の電力供給に占める風力エネルギーの割合は比較的小さく、成長もヨーロッパ、アジア、及び北アメリカに集中している。2009年末までの累積設置容量で見た上位5か国は、アメリカ、中国、ドイツ、スペイン、及びインドだった。政策の枠組みは、風力エネルギー活用に引き続き大きな役割を果たしている。

風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャルは、現在の世界の発電電力量を超えている。開発のより強い制約を比較的考慮している研究のなかで、世界規模の技術的ポテンシャルの推定値は、低い値で70EJ/年（19,400TWh/年）（陸上のみ）から、高い値で450EJ/年（125,000TWh/yr）（陸上及び沿岸）である。洋上風力発電のみの技術的ポテンシャルの推定値の幅は、比較的浅い海域及び沿岸での利用のみを考えた場合、15～130EJ/年（4,000～37,000TWh/年）となっている。浮体式風車設計に基づくと考えられる、さらに深い場所での利用も考えた場合、より大きい技術的ポテンシャルが利用可能である。経済的制約、送電アクセスと運用上の統合に関連する制度的課題、及び社会的受容と環境への影響に関する懸念は、風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャル以上に成長をより制限する可能性が高い。世界のほとんどの地域に大規模な風力エネルギーの普及を可能とする大きな技術的ポテンシャルも存在する。しかし、風資源は、世界中に均等に分散していてもいなければ、人口密集地周辺に均一に集中しているわけでもないため、風力エネルギーは各国の需要を均等に満たすわけではない。世界的な気候変動が風資源の地理的分布及び風資源の変動性に与える影響については、研究の初期段階であるが、これまでの調査では、その影響が風力エネルギーの普及の世界規模のポテンシャルにひどく影響するほど大きくなる可能性は低いとされている。

解析及び運用経験から、風力発電の系統連系は良好に実現できることが実証されている。風力エネルギーの特性は、電力システムの計画者や運用者には新たな課題を課している。たとえば、変動性のある出力電力、限定的な（しかし改善しつつある）出力の予測可能性、および地域的な依存性などである。条件を満たした風力発電の普及は限定的で、連系による運用コストは系統によるが、風力発電は既存の電力システムに良好に連系している。4か国（デンマーク、ポルトガル、スペイン、アイルランド）では、風力エネルギーは2010年に既に、年間需要電力量の10～約20%を供給可能だった。主にOECD加盟国の一部による詳細な分析及び運用経験からは、低～中程度（電力需要全体の最大20%）の普及度の場合、一般に風力発電の系統連系に克服不可能な障壁はなく、経済的に維持可能であることが示されている。風力発電の系統連系（及びそのコスト）に対する懸念は、風力エネルギー普及に伴い増大するが、普及レベルが低い場合でも、連系上の課題は解決が必要である。柔軟性のある発電技術を通じた積極的な管理、風力発電の予測と出力抑制、電力システム間の調整と連系の増加が予想される。マスマーケットのデマンドレスポンス、大容量のエネルギー貯蔵、電気自動車の大規模な導入、風力の余剰エネルギー転用（燃料生産や地域熱供給）、風力発電発電所の立地状況の地理的分散性は、風力発電の普及が高まるに伴い、有益に作用する。系統連系の標準が牽引する風力エネルギー技術の進歩で、風力発電発電所は、電力システムの実施可能性維持により積極的に参加できるようになる。最終的には、質の高い風資源を持つ地域にアクセスするため、新たな送電インフラが陸上、洋上とも

必要になるだろう。風力発電の普及度が低～中程度の場合、変動性と不確実性の管理、発電の適切性の確保、風力エネルギーに対応する新規送電線の追加に要する追加コストは、一般に 0.7～3US セント (2005 年) /kWh の範囲と推定されている。

環境上の課題及び社会的な課題が風力エネルギー普及の機会に影響を与える。 風車の直接の製造、輸送、設置、運用と解体で 사용되는エネルギー及び温室効果ガス排出量は、風力発電発電所の耐用年数内における発電と排出回避に比べ少ないことが分かっている。風力エネルギーの温室効果ガス排出強度は、大半の例で 8～20g CO₂/kWh の範囲と推定され、エネルギー回収期間は 3.4～8.5 か月である。それに加えて、風力発電の出力の変動性管理がその温室効果ガス排出上の便益を大きく損なうとは、認められていない。ただし、これらの便益と同時に、風力エネルギーは環境、人間の活動と幸福に若干の悪影響を与える可能性はある。風力発電発電所を建設、運用することで、鳥やコウモリの衝突や生息地や生態系の変化により、野生生物に影響が生ずる。これらの影響の性質や規模は場所や種に特有である。洋上風力発電の場合、海底資源、漁業関係者、海洋生物への影響を広く検討する必要がある。顕著な社会的懸念として、景観への影響、様々な迷惑な影響とレーダー干渉の可能性がある。また、風力発電発電所が地域の気候に与える潜在的影響も、研究が進められている。風力エネルギーの普及が進み、大規模な風力発電発電所が検討されるようになると、すでに顕在化している懸念は深刻化し、新たな懸念が生ずる場合もある。多様な電力供給技術の相対的影響を測定する試みが行われ、風力エネルギーの環境フットプリントは概して比較的小さいことが示されたが、影響は実際にある。適切なプランニング及び立地の手続きを取ることで、風力エネルギー開発が生態系及び地域のコミュニティーに与える影響を低減でき、残る懸念を評価、最小化、及び緩和する技術がさらに向上可能だろう。最終的には、コミュニティーの懸念及び科学的な懸念は解決されるべきだが、風力エネルギー活用のより急速な成長を可能にするためには、より積極的なプランニング、立地、許可手続きが必要になるだろう。

技術イノベーションで、風力エネルギーのコストがさらに削減可能になる。 現在の風車技術は主に陸上用として開発され、可変速運転の 3 枚翼 (ブレード) のアップウィンド (風上型) ロータに収束している。陸上風力発電技術はすでに商業的に成熟し、大規模に導入されている。風車設計の手順改善、資材利用の効率化、信頼性とエネルギー回収の向上、運転保守 (O&M) コストの低減、構成部品の耐用年数の長期化といった漸進的な進歩が、引き続き推測される。加えて、洋上風力が脚光を浴びるにつれ、技術上の新たな課題が発生し、より急速な技術イノベーションが可能である (浮体式風車など)。洋上風力発電発電所の場合、風車の公称定格容量は 2～5MW が一般化しているが、10MW 以上の風車が検討されている。風車の運用環境への理解を深めるより基礎的な調査を通じて、進歩も可能である。2009 年に建設された陸上風力発電発電所では、好条件な風資源のタイプを持つ場合、均等化発電原価の平均は、5～10US セント (2005 年) /kWh と推定され、条件の劣る風資源を持つ地域では 15US セント (2005 年) /kWh に達した。比較的浅水域に最近建設されたか、建設予定の発電所の場合、典型的な均等化発電原価は 10～20 超/kWh/US セント (2005 年) と推定される。文献では、陸上風力発電の均等化原価は 2020 年までに 10～30%削減されると、数多く報告されている。洋上風力発電のコスト削減ポテンシャルはさらにいくらか大きく、2020 年までに 10～40%削減とされることが多い。

風力エネルギーは、短期的及び長期的な温室効果ガス排出量削減に大きなポテンシャルを秘めている。

陸上風力発電技術の商業的な成熟度及びコストを考えると、風力エネルギーは短期的な温室効果ガス排出量削減に大きなポテンシャルを有する。このポテンシャルは技術の飛躍的進歩には左右されず、電力供給システムへの風力エネルギーの普及を妨げる技術上克服不可能な障壁も存在しない。技術の進歩が進めば、温室効果ガス排出は長期的に大幅に減少する可能性がある。様々な温室効果ガス濃度安定化シナリオの下、世界のエネルギーのニーズ対応における再生可能エネルギー供給の将来の可能性ある貢献についての文献調査が行われ、これに基づくと、風力エネルギーが世界の電力供給に果たす貢献は、温室効果ガス濃度の安定レベルが 440～600ppm という中間値を示すシナリオでは、2009 年末の 1.8%から 2050 年までには 13～14%に上昇する。75 パーセントイルとする検討済みのシナリオでは、温室効果排出削減に同様に意欲的な取り組みに基づき、風力エネルギーの貢献は 2050 までに 21～25%に成長することが示されている。適正規模の経済支援政策や予見可能性だけでは、上界のレベルでの風力エネルギー活用を世界的に達成することはできない。地域における風力エネルギーの活用拡大、洋上風力発電の信頼性の向上、送電の制約や運用統合上の懸念に対応する技術的・制度上の解決策、社会的、環境的懸念の緩和、管理のための積極的な取り組みも必要である。洋上風力発電では、追加的な研究開発も漸進的なコスト低下につながると推測される。洋上風力発電技術では、研究開発の支出増強が特に重要になるだろう。最終的には、風資源のポテンシャルは良好だが、風力エネルギーの導入がこれからの市場では、知見と技術移転の双方が、風力発電発電所の早期設置を促すことにつながるだろう。

7.1 序論

本章では、風力エネルギーが温室効果ガス削減に果たす潜在的な役割を取り上げる。風力エネルギーは (多くの用途で) 成熟した再生可能なエネルギー源で、多くの国で普及に成功している。技術的にも経済的にも継続的に大幅な拡大が可能であり、その開発の進展は世界規模の温室効果ガス削減戦略の極めて重要な側面になるだろう。平均風速は地域でかなり異なるが、風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャルは世界規模の発電を上回り、世界

の大半の地域では、大幅な風力エネルギー普及を可能にする十分な技術的ポテンシャルが存在する。

風力エネルギーは間接的に太陽エネルギーに依存する。主に、高緯度の純出射及び低緯度の純入射の不均衡が原因となり、地球が受け取った太陽放射の一部が運動エネルギーに変換される (Hubbert, 1971)。地球の回転、地理的特徴、および温度勾配が、結果として生ずる風の場所及び性質に影響する (Burton et al., 2001)。風力エネルギーを使用するには、移動する空気の運動エネルギーを有効なエネルギーに変換する必要がある。その結果、電力供給に風力を使用する際の経済性は、地域の風況及び、幅広い典型的な風速でエネルギーを確実に抽出する風車の能力に対して非常に感度が高くなる。

風力エネルギーは数千年間にわたって使用されてきた (歴史的概観については、Gipe, 1995; Ackermann and Soder, 2002; Pasqualetti et al., 2004; Musgrove, 2010 など参照)。帆船は紀元前 3,000 年前から風力に依存している。風力エネルギーの力学的な用途として、穀物の製粉、揚水、及び工場の機械の動力がある。動力の場合、最初は垂直軸の装置、次いで水平軸風車に応用された。紀元前 200 年前には、たとえば、中国の単純な風車は水を汲み上げ、ペルシャ及び中東の垂直軸の風車は穀物を製粉していた。中東では、風車は 11 世紀まで食料生産に使用された。商人及び十字軍の兵士が帰国し、このアイデアをヨーロッパに持ち帰った。オランダなどは風車を改良し、木の伐採、製紙、湖や湿地帯の干拓など、さらに産業用途に応用した。19 世紀後半には、入植者が新世界にこの技術を持ち込み、風車を農場及び大牧場での水汲みに使用しだした。産業化及び農山漁村の電化は、まずヨーロッパで、次いでアメリカで始まり、機械的な用途での風車の使用は次第に減少した。風力発電に最初に成功した実験は、James Blyth (1887)、Charles Brush (1887)、及び Poul la Cour (1891) の功績であると言われることが多い。農山漁村における風力発電の使用及び大規模用途での実験は、1900 年半ばにわたって続いた。しかし、商業規模での発電のための風力エネルギー利用は、技術の進歩と政府の支援によって 1970 年代になって初めて可能になった。これは、デンマークで初めて比較的小規模で、カリフォルニアで (1980 年代に) かなり大規模に実施され、その後は (1990 年代に) デンマーク、ドイツ、スペインで実現した。

気候変動緩和に関連する主な風力エネルギーの利用は、大規模な系統連系風車による発電である。形態としては、小型の風力発電所群を多数展開するか、かなり大型の発電所群を少数展開するかの、いずれかである。2010 年の時点で、こうした風車は、高さ 80m 超の円筒状のタワーに 3 枚翼のロータが備わり、ロータ直径は 80m を超えることが多い。商用の風車は、ロータの直径、タワーの高さともに 125m を超えるものが運用中であり、さらに大型の風車も開発中である。風力発電所は一般に陸地 (本章では「陸上」とする) に立地する。2009 年末までで洋上または淡水域に立地する風力発電所が世界の風力発電設置に占める割合は比較的小さい。それにもかかわらず、風力エネルギーの普及が拡大し、技術が進歩するにつれ、洋上風力発電は風力エネルギー供給全体でより大きな源に成長すると予測される。

気候変動緩和で風力は潜在的に重要性を持つことから、本章は、系統連系された陸上及び洋上の風力発電用風車に注目する。本章の重点には関係なく、風力エネルギーは他のエネルギーのサービスのニーズに対応しているし、今後も対応する。集中的な電力供給のない世界の遠隔地では、小型の風力発電を単独または他の技術との併用で導入し、個々の家庭またはコミュニティの電力需要に対応可能である。小型風車のこうした性質も、海洋エネルギーのニーズに対応する。風力エネルギーは、小さな島または遠隔地の電力網でも、他のエネルギー源と併用して展開できる。すでに電力アクセスを持つ都市部の環境でも、立地に配慮すれば、より小型な風車は建物のエネルギーのニーズの一部に対応するため、使用可能である。高高度の風力エネルギー装置の新しいコンセプトも検討中である。風力エネルギーはさらに、電力供給に加え、特殊な用途の機械的及び推進力のニーズにも対応可能である。これらの追加的な用途及び技術については、本章では重点的に扱わないが、Box 7.1 に簡潔にまとめた。

本章は、利用可能な文献を基に、風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャル、風力エネルギー源の地域分布、及び気候変動が風力エネルギーに与える可能性のある影響を始めに説明する (7.2 節)。次いで、現代の陸上及び洋上の風力エネルギー技術について、その状況及び傾向を検討する (7.3 節)。風力エネルギーの市場及び産業の発展状況を世界と地域双方の観点から説明するとともに、政策がこれらの発展に与える影響も論じる (7.4 節)。電力系統への風力発電の連系に関する短期的な課題も取り上げ (7.5 節)、風力エネルギーの環境的影響及び社会的影響に関する証拠も利用可能である (7.6 節)。さらなる技術の向上及びイノベーションに関する見込みの概要を示し (7.7 節)、過去、現在、及び潜在的な未来のコストの傾向も検討する (7.8 節)。最後に、前の節で示した基礎に基づき、温室効果ガス削減及びエネルギーのシナリオ文献に注目し、風力エネルギーの潜在的な将来の普及を検討する (7.9 節)。

Box 7.1: 風力エネルギーの代替的な用途及び技術

風車では現在、電力供給用の大型で近代的な風車の使用という範疇を超え、多数の追加的な用途及び技術が導入、検討されている。その一部を以下に説明する。これらの技術及び用途は市場開発の様々な段階にあり、それぞれが普及規模を見込める一定のレベルにある。しかし、温室効果ガス排出削減という観点で見た場合、少なくとも短～中期的には、陸上及び洋上の従来の大型の風力発電技術と競争する可能性の高いものはない。

電力供給用の小型風車。小型風車は幅広い用途に用いられる。数百 W から数十 kW 規模の風車は、大型風車のコスト削減を支えている規模の経済の恩恵を受けないが、集中的な電力供給へのアクセスのない地域では、その他の代替的な供給と経済的に競合可能であり、家庭またはコミュニティの幅広いエネルギーのニーズに対応する電力サービスを提供する (Byrne et al., 2007)。農山漁村の電化または孤立した地域の場合、小型風車はバッテリー充電用の単独使用や、ハイブリッドシステムでの他の供給の選択肢 (太陽熱やディーゼルなど) との併用が可能である。たとえば、中国では、2008 年末までに、小型風車 (100kW 未満) の累積設置容量は 57MW で (Li and Ma, 2009)、2009 年には 33MW の設置が報告されている。小型風車も、住宅用及び商用双方の電力消費者向けの系統連系用途に導入できる。これらのまったく異なる用途で風力エネルギーを使用すれば、経済的発展及び社会発展の便益が得られる。しかしながら、都市部の環境では、風資源は非常に局所的で乏しい可能性がある。系統連系の電力代替に関連する温室効果ガス削減は、風車の製造設置を考慮する場合、低いか、ゼロになる可能性がある (Allen et al., 2008; Carbon Trust, 2008a)。AWEA (2009) は、主要製造者の 100kW 未満の風車の世界の年間設置 (2008 年) を 40MW 未満と推定している。

機械的及び推進力のニーズに対応する風力エネルギー。風力のエネルギーを利用する技術のなかで、初期のものは、風の運動エネルギーを海洋の推進力、穀物の製粉、及び揚水的手段として利用していた。これらの技術が初めて開発されたのはかなり昔だが、機械的及び推進力の幅広いニーズに対応する風力エネルギーの使用拡大を図る機会には、依然として存在する。家庭、農業、及び大規模放牧のニーズに対応する揚水では、たとえば、一定の遠隔地などの場合、風の力の使用は依然として重要である (Purohit, 2007 など)。風力エネルギーの機械的利用または電力利用は、とりわけ、水の脱塩及び浄化にも応用可能である (Miranda and Infield, 2002 など)。推進力のために風力エネルギーを利用する新たなコンセプトも、海洋輸送の際にディーゼルエンジンを補完する大型の軽帆の使用などが、開発中である。実証プロジェクト及び分析研究では、これらのシステムは最大で 50% の燃料削減が可能かもしれないが、これは技術及び風況に大きく依存することが分かっている (O'Rourke, 2006; Naaijen and Koster, 2007)。

高高度の風力発電。高高度の風力エネルギーシステムは最近、風力発電の代替的方法として若干の注目を浴びている (Roberts et al., 2007; Archer and Caldeira, 2009; Argatov et al., 2009; Argatov and Silvennoinen, 2010; Kim and Park, 2010)。この技術の開発の主要な動機は、高高度に存在するかなりの規模の風資源にある。高高度の風力エネルギーに対しては、(1) ケーブル経由で地球に送電するテザー係留の (tethered) 風車、及び (2) 帆で回収した風から地上へ運動エネルギーを電力に変換する基地局という、2 つの主要な方法が提案されている。500m 弱から 10,000m を超える高高度での運用など、様々なコンセプトが検討中である。これらの技術及び潜在的な資源の規模に関する調査は、いくつか実施されているが、技術は今のところ初期段階である。パイロットプロジェクトが幅広く展開され、高地の風力エネルギーの温室効果ガス排出削減ポテンシャルに関する現実的な推定が作成可能になる前に、科学、経済、制度上の課題を克服しなければならない。

7.2 資源ポテンシャル¹

風力の理論的ポテンシャルの推定値は、世界規模の年間フラックスで推定したとおり、6,000EJ/年である (Rogner et al., 2000)。一方、風力エネルギーの世界的な技術的ポテンシャルは一定ではなく、技術の状況と風力エネルギー導入に対する他の制約に関する前提に関係している。しかし、世界の技術的ポテンシャルは現在の世界の電力生産を上回ると実証する世界の風資源評価の数は増えてきている。世界のほとんどの地域において、大規模な風力エネルギーの普及を可能にする大きな技術的ポテンシャルが存在している。しかし、風資源は、世界中に均等に分散しておらず、様々なその他の地域的な要因が、世界的な技術的ポテンシャルの絶対的な限界に突き当たるよりかなり前に、成長を制限する可能性が高い。この結果、風力エネルギーは各国の需要を均等に満たすわけではない。

本節は、風力エネルギー資源の世界の技術的ポテンシャルの規模に関する利用可能な証拠 (7.2.1 節)、風力エネルギー資源の地域分布 (7.2.2 節)、及び気候変動が風力エネルギーに与える可能性のある影響 (7.2.3 節) の概要を示す。長期的な年間平均の技術ポテンシャルに重点を置く。風資源の経年、季節と日中の変動性及びパターン、短期的な風力発電の出力変動性の議論については、7.5 節参照。

7.2.1 世界規模の技術的ポテンシャル

風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャルは、多数の研究で評価されている。一般に、2 つの方法が使用可能である。第一の方法として、利用可能な風速測定を用いて地表の風力分布構築に補間することができる。第二の方法としては、物理的な数値気象予測モデルが応用可能である。世界規模の風力エネルギー資源に関する研究は、これらの 2 つの方法を様々な組み合わせで使用している²。さらに、風力エネルギーの技術的ポテンシャルの推定

¹ 様々な種別の「資源ポテンシャル」の参照に使用される用語の定義については、Annex I 参照。

² 風力発電発電所の開発事業者は、潜在的に有望な開発が見込まれる場所を全般的に把握するために、世界及び地域の風資源推定値に依存するだろう。しかしながら、大規模な風力発電発電所の大半では、風車のハブ高さまたはその近く

値は確定と考えるべきではない点も、認識することが重要である。技術的ポテンシャルは、風力エネルギー技術の発展に伴い変化し（背の高いタワーによる風へのアクセス向上、基礎のイノベーションによるより深水域での洋上発電所開発など）、開発に影響を与えかねない技術的懸念、環境への懸念、及び社会的懸念（土地の競合、資源の所在地から電力需要の中心地までの距離など）に関しても学習が進むためである。

IPCC の AR4 は利用可能な文献を総合的に扱い、陸上の風力エネルギーの技術的ポテンシャルを 600EJ/年と特定した (IPCC, 2007)。IPCC (2007) では一次エネルギーの等価性による直接等価法（電力供給 (TWh) を一次エネルギー (EJ) に直接変換する。附属書 II 参照) を用い、陸上の風力エネルギーの技術的ポテンシャルを 180EJ/年 (50,000TWh/年) と推定している。この推定値は、2008 年の世界の発電総量 (73EJ または 20,200TWh) の 2 倍を超える³。2008 年の風力エネルギー供給に使用されたのは、この 180EJ/年のうち、わずか 0.8EJ (220 TWh、技術的ポテンシャル推定の 0.4%) だった。

より一般的には、分析の多数で、風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャルの推定が行われている。これらの世界的な評価に関する方法及び結果は、洋上の風力エネルギーを含むものもあれば、陸上の風力エネルギーに限定されているものもあるが、表 7.1 にその概要を示す。

表 7.1: 風力エネルギーの技術的ポテンシャルに関する世界の評価

研究	対象	方法及び想定*	結果**
Krewitt et al. (2009)	陸上及び洋上	2050 年までの洋上風力発電所の配置を 16MW/km ² に修正し、Hoogwijk and Graus (2008) を更新。Hoogwijk et al. (2004) に基づく。	技術的 (より制約的): 121,000TWh/年 440EJ/年
Lu et al. (2009)	陸上及び洋上	20%を超える設備利用率 (クラス 1)、ハブ高さ 100m、粗視化シミュレーションモデルのデータセットに基づく。都市部と開発地域、森林、内水、万年雪、万年氷は対象外。洋上は、ハブ高さ 199m、6MW/km ² 、岸より 92.6km 未満、深さ 200m 未満を想定し、その他の除外はなし。	技術的 (限定的な制約): 840,000TWh/年 3,050EJ/年
Hoogwijk and Graus (2008)	陸上及び洋上	洋上風力発電を取り入れ、Hoogwijk et al. (2004) を更新。陸上は、ハブ高さ 100m を想定し、コスト想定も変更。洋上は、Fellows (2000) により研究の更新及び以前の分析の追加あり。その他の想定は以下に列記した Hoogwijk et al. (2004) に基づく。陸上と洋上それぞれに対し、経済的な意味で本表で定義された制約的な技術的ポテンシャル。	技術的 (より制約的)・経済性: 110,000TWh/年 400EJ/年
Archer and Jacobson (2005)	陸上及び洋上	クラス 3 超、ハブ高さ 80m、配置 9MW/km ² 、平均設備利用率 48%、地表の観測所及びバルーンによる観測所の風速に基づく。沿岸近くの風力エネルギーは、資源データにブイが含まれるため、効率的に盛り込まれる (詳細は研究を参照)。制約的な技術的ポテンシャル=技術的ポテンシャル全体の 20%	技術的 (限定的な制約): 627,000TWh/年 2,260EJ/年 技術的 (より制約的): 125,000TWh/年 450EJ/年
WBGU (2004)	陸上及び洋上	数 MW 風車、気象観測塔の風速補間に基づく。都市部、森林地域、湿地帯、自然保護区、氷河、及び砂丘は対象外。人口密度関連の修正を通じた対象外地域も考慮。洋上は深さ 40m で、海の氷及び岸からの最低距離は地域別に考慮。制約的な技術的ポテンシャル (著者らは「持続可能な」ポテンシャルと定義=	技術的 (限定的な制約): 278,000TWh/年 1,000EJ/年

で実際の風速データをオンサイトで収集することが引き続き不可欠である。

³ IPCC (2007) では、UNDP/UNEP/WEC (2000) からデータを取得した Johansson et al. (2004) を引用し、今度は WEC (1994) 及び Grubb and Meyer (1993) を参照している。TWh から EJ に転換するには、IPCC (2007) の引用した文書では標準的な転換が使用され、次に 0.3 で除算される (再生可能エネルギー供給は化石発電所に投入される化石燃料の一次エネルギーを代替すると想定した場合のエネルギー計算方法で、発電所の転換効率を説明する)。直接等価法はこの最後のステップを取っておらず、代わりに電力自体を一次エネルギーとして計算している (Annex II 参照)。このため、本章では IPCC (2007) の数値を 180EJ/年、あるいは約 50,000TWh/年と報告している。

		技術的ポテンシャル全体の 14%	技術的 (より制約的) : 39,000TWh/年 140EJ/年
Hoogwijk et al. (2004)	陸上	10m で 4m/秒超 (クラス 2 より若干低い)、ハブ高さ 69m、配置 4MW/km ² 。利用可能性や配列の効率性の想定。気象観測塔の風速補間に基づく。高度 2,000m 超、都市部、資源保護区、一定の森林は対象外。その他の多数の土地利用への使用減少。本表で定義の経済的ポテンシャルは 10US セント (2005 年) /kWh 以下。	技術的 (より制約的) : 96,000TWh/年 350EJ/年 経済的 (より制約的) : 53,000TWh/年 190EJ/年
Fellows (2000)	陸上及び洋上	ハブ高さ 50m、配置 6MW/km ² 、高層大気モデルのデータセット。都市部、森林地域、自然地域、水塊、及び急傾斜は対象外。採光密度に関する追加基準。洋上は、ハブ高さ 60m、配置 8MW/km ² 、深さ 40m まで、岸からの距離 5~40km で、75%の例外あり。経済的な意味での本表で定義の制約的な技術的ポテンシャルは 2020 年で 23US セント (2005 年) /kWh 未満。4 つの地域に重点を置き、その他は類推。一部の国は省略。	技術的・経済的 (より制約的) : 46,000TWh/年 170EJ/年
WEC (1994)	陸上	クラス 3 超、配置 8MW/km ² 、平均設備利用率 23%、初期の風資源世界マップに基づく。制約的な技術的ポテンシャル=技術的ポテンシャル全体の 4%。	技術的 (限定的な制約) : 484,000TWh/年 1,740EJ/年 技術的 (より制約的) : 39,000TWh/年 140EJ/年
Grubb and Meyer (1993)	陸上	クラス 3 超、ハブ高さ 50m。転換効率及び風車配置に関して想定あり。都市、森林、及び未踏の山岳地帯は対象外。また、地域によって異なる社会的制約、環境的制約、及び土地利用の制約も対象外 (制約的な技術的ポテンシャルの結果=世界全体の技術的ポテンシャル全体の~10%)	技術的 (限定的な制約) : 498,000TWh/年 1,800EJ/年 技術的 (より制約的) : 53,000TWh/年 190EJ/年

注:

※ 風資源のクラスは、使用される場合、ハブ高さ 50m で以下の風力エネルギー密度を示す。クラス 1 (200W/m² 未満)、クラス 2 (200~300W/m²)、クラス 3 (300~400W/m²)、クラス 4 (400~500W/m²)、クラス 5 (500~600W/m²)、クラス 6 (600~800W/m²)、及び 7 (800W/m² 超)。

※※ 資源ポテンシャル及び EJ と TWh 間の転換に関する報告は、直接等価法に基づく (附属書 II 参照)。理論的ポテンシャル、技術的ポテンシャル、経済的ポテンシャル、持続可能なポテンシャル、及び市場ポテンシャルに関する定義は附属書 I に掲載されているが、表 7.1 で引用された各著者はこれらの用語を異なる定義で用いることが多い。特に、表中の研究のいくつかは、最大のコスト閾値を下回る技術的ポテンシャルのみ報告している。これらは表内では「経済的ポテンシャル」として特定しているが、この定義は附属書 I 掲載のものとは異なることが確認されている。

世界の風力エネルギーの技術的ポテンシャルを推定するための標準化された方法は開発されていない。データ、手法、前提、さらには技術的ポテンシャルの複雑な比較の定義に至るまで多種多様である。その結果、研究では幅広い結果が示されている。具体的には、開発のより強い制約 (表では「より制約的」としている) を比較的考慮している研究のなかで、世界の技術的ポテンシャルの推定値は、低い値で 70EJ/年 (19,400TWh/年) (陸上のみ) から、高い値で 450EJ/年 (125,000TWh/yr) (陸上及び沿岸) までの幅となっている。この範囲は、2008 年の世界の発電の約 1~6 倍に相当する。開発の制約をより限定的にしている研究も含まれている場合、技術的ポテンシャルの絶対的範囲は依然として大きく、70~3,050EJ/年 (19,400~840,000TWh/年) になる。結果は、洋上風力発電が含まれているか (及びどのような想定に基づくか)、使用される風速データ、風力エネルギー開発に使用可能と想定され

る地域、設置風車の土地面積あたりの定格電圧、および、風力発電発電所の想定性能でも異なってくる。想定性能については、ハブ高さ及び風車の技術も一部関係する。これらの要因は、技術的想定、開発の制約の主観的判断に左右されるため、技術的ポテンシャルについては単一の「正確な」推定値というものはない。

研究では一般に、陸上の風力エネルギーに比べ洋上の風力エネルギーは小さいことが分かっているが、それでもなお技術的ポテンシャルは規模が大きい。表 7.1 の研究の 3 つは、洋上の風力エネルギーの技術的ポテンシャルを対象外としている。洋上の風力エネルギーを対象とする研究でさえも、風力エネルギー技術は比較的浅い海域及び沿岸での短中期的に導入される可能性が高いと考えていることが多い。実際、洋上の風力エネルギー源の規模は、少なくとも理論的には莫大であり、制約は技術的なものではなく、主に経済的なものである。特に、水深、アクセス性、及び系統連系は中期的に比較的沿岸の立地の開発を限定するだろうが、時の経過とともに、深水域及び遠隔地での設置を可能にする技術的向上が見込まれる。洋上風力発電のみの技術的ポテンシャルの推定値の幅は、比較的浅い海域及び沿岸での利用のみを考えた場合、15~130EJ/年 (4,000~37,000TWh/年) となっている。浮動風車設計に基づくと考えられる、さらに深い場所での利用も考えた場合、より大きい技術的ポテンシャルが利用可能である⁴。

陸上及び洋上の風力エネルギーに関するこれらの研究の一部が世界規模の技術的ポテンシャルを低く評価しているだろうと判断する理由は、主に 2 つある。まず、これらの研究のいくつかは時代遅れであり、風力エネルギー技術 (ハブ高さなど) 及び資源評価方法の双方でかなりの進歩が見られる。このこともあって、表 7.1 に示したより最近の研究では、以前の研究に比べ大きな技術的ポテンシャルが計算されている。次に、より最近の研究の一部でさえ、方法論の限界を理由に、風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャルを低く評価していることがある。本節に示した世界の評価は、比較的単純な分析技術を粗い空間分解能と経ようすることが多く、限定的な数 (及び質) の地表の観測所からの風速データ補間に依存し、優良な風資源を有する地域の風速観測による限定的な検証を適用している。演算能力の向上にも支えられ、より高度で洗練された地理的解像度の気象モデリングの手法が、国や地域レベルで適用されはじめている (また、質の高い観測データの検証も増えている)。これについては、7.2.2 節で詳細に説明する。経験からは、これらの技術の技術的ポテンシャルが以前の世界的な評価に比べ大きいと認識されることが多いと分かっている (7.2.2 節参照)。

ただし、世界規模の技術的ポテンシャルが過大評価されていると示唆するようなその他の課題も、最低 2 つは存在する。まず、世界的な評価は、人口密集地から離れた遠隔地の風資源へのアクセス性を過大評価していることがある。次いで、これらの評価は一般に、風資源の点源的な推定値を使用することが多く、地域の風力の技術的ポテンシャルを合計して風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャルを評価している。大規模な大気動力学、熱力学の極限、及び配列の影響は、地域または世界で風力発電発電所が抽出可能なエネルギー総量を制限しかねない。こうした制約の性質は比較的わずかしち知られていないが、初期の研究では、影響の規模は世界の電力部門における風力エネルギー使用を大幅に制限するほど大きい可能性は低いと示唆している (7.6.2.3 節参照)。

利用できる文献に限られているが、上記の検討に基づく結論は、IPCC (2007) の推定値 180EJ/年 (50,000TWh/年) は風力エネルギーの技術的ポテンシャルを低く評価している可能性が高い。さらに、技術的ポテンシャルの正確な規模にかかわらず、世界の風資源は陸上または洋上の風力エネルギー展開にとって、限定的な要因である可能性は低いことが明白である。代わりに、風力エネルギーのコストに関連する経済的制約、送電アクセスと運用統合に関連する制度的制約とコスト、及び社会的受容と環境への影響に関連する問題は、世界的な技術的ポテンシャルの絶対的な限界に突き当たるよりかなり前に、成長を制限する可能性が高い。

⁴ 世界規模の洋上の風力エネルギー資源の技術的ポテンシャルを調査した研究は比較的少なく、Archer and Jacobson (2005) も WBGU et al. (2004) も、表 7.1 の技術的ポテンシャル全体とは別に洋上のポテンシャルを報告していない。開発の制約を考慮して世界規模の技術ポテンシャルを推定した一つの研究として、Leutz et al. (2001) は深さ 50m 未満の洋上の風力エネルギーのポテンシャルを 130EJ/年 (37,000TWh/年) と推定している。Fellows (2000) 及び Hoogwijk and Graus (2008) から引用して構築し、Krewitt et al. (2009) は、2050 年までの世界規模の洋上の風力エネルギーの技術ポテンシャルを 57EJ/年 (16,000TWh/yr) と推定した。(Fellows (2000) の推定値は 15EJ/年で、4,000TWh/年超であるが、Hoogwijk and Graus (2008) の推定値は 23EJ/年で、6,100TWh/年である。想定については、表 7.1 参照)。別の研究では、Siegfriedsen et al. (2003) がヨーロッパ以外の洋上の風力エネルギーの技術的ポテンシャルを 17EJ/年 (4,600TWh/年) と計算している。Lu et al. (2009) では、水深及び沿岸からの距離を大きく見なし、深さ 200m 未満、沿岸からの距離を 92.6km 未満とした場合の洋上の風力エネルギーの資源ポテンシャルを 540EJ/年 (150,000TWh/年) とした。このうち 150EJ/年 (42,000TWh/年) は 20m 未満の深さで利用可能である。しかし、この研究は、ここに列記した他の推定値と同じ開発の制約または対象地域を考慮していない。Capps and Zender (2010) は同様に、多数の開発の制約を考慮しておらず (ただし、著者らは洋上 30km 以内の地域すべてを対象外としている)、最大水深が 45m から 200m になった場合、洋上の風力エネルギーの技術的ポテンシャルは 224EJ/年 (62,000TWh/年) から 1,260EJ/年 (350,000TWh/年) に増加すると示している。同様に、地域レベルの研究も多数終了しており、EU (Matthies et al., 1995; Delft University et al., 2001; EEA, 2009)、アメリカ (Kempton et al., 2007; Jiang et al., 2008; Schwartz et al., 2010)、及び中国 (CMA, 2006; Xiao et al., 2010) などの洋上風力発電資源の規模が推定されている。

7.2.2 地域の技術的ポテンシャル

7.2.2.1 地域別の世界的な評価の結果

7.2.1 節に示す世界的な評価では、様々な地域の陸上の風力エネルギーの相対的な技術的ポテンシャルに関し、様々な結論に達している。表 7.2 は、これらの評価のサブセットの結果をまとめている。これらの研究結果における地域ごとの相違は、風速データ及び重要な入力パラメータの相違によるもので、これには活用可能と想定される最低風速、土地利用の制約、風力エネルギー開発の密度、及び風力発電発電所の想定性能などがある (Hoogwijk et al., 2004)。様々な地域のカテゴリも比較を複雑にしている。それにもかかわらず、北アメリカ (OECD 加盟国)、及び東欧・ユーラシアにおける陸上風力発電の技術的ポテンシャルは特に大きいことが分かっているが、アジア (非 OECD 加盟国) 及びヨーロッパ (OECD 加盟国) の地域の中には、技術的ポテンシャルがより限定的な地域もある。世界の風資源マップを 5km×5km の解像度で示した図 7.1 を見ると、ラテンアメリカ及びアフリカの特定の地域では技術的ポテンシャルが限定的であるが、それらの大陸の他の地域には大きな技術的ポテンシャルがあることを示している。ただし、これらの結果の解釈には注意を要する。その他の研究では、世界規模の技術的ポテンシャルの地域的配分が大幅に異なっており (Fellows, 2000 など)、国別、地域別のより詳細な評価でも、たとえば東アジアやその他の地域の風力エネルギー資源に関して、様々な結論に達している (Hoogwijk and Graus, 2008)。

表 7.2: 陸上風力発電の世界規模の技術的ポテンシャルの地域別配分*

Grubb and Meyer (1993)		WEC (1994)		Krewitt et al. (2009) **		Lu et al. (2009)	
地域	%	地域	%	地域	%	地域	%
西ヨーロッパ	9	西ヨーロッパ	7	OECD ヨーロッパ	5	OECD ヨーロッパ	4
北アメリカ	26	北アメリカ	26	OECD 北アメリカ	42	北アメリカ	22
ラテンアメリカ	10	ラテンアメリカ及び カリブ海	11	ラテンアメリカ	10	ラテンアメリカ	9
東ヨーロッパ及び 旧ソビエト連邦	20	東ヨーロッパ及び CIS	22	移行経済	17	非 OECD ヨーロッパ 及び旧ソビエト 連邦	26
アフリカ	20	サハラ以南アフリ カ	7	アフリカ及び中東	9	アフリカ及び中東	17
オーストラリア	6	中東及び北アフリ カ	8	OECD 太平洋	14	オセアニア	13
その他アジア	9	太平洋	14	その他アジア	4	その他アジア	9
		その他アジア	4				

注:

※ 表の地域は、個別の研究の定義による。一部の地域は、4つの研究間での比較可能性を高めるため、統合されている。

※※ Hoogwijk and Graus (2008) 及び Hoogwijk et al. (2004) も同様の結果を示している。

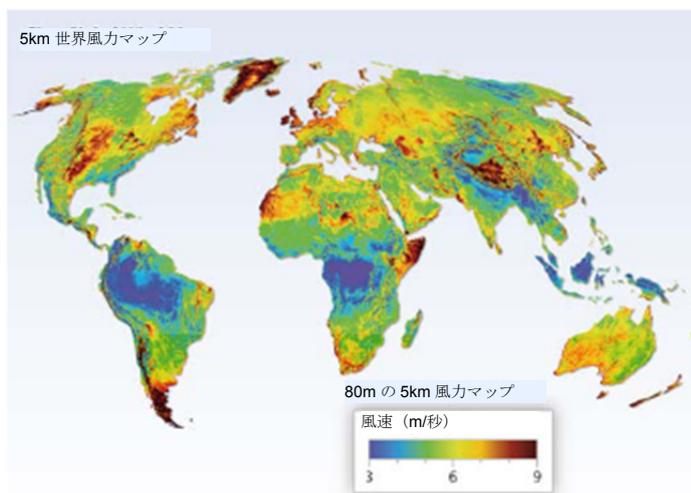


図 7.1: 5km×5km の解像度の世界の風資源マップの例 (3TIER, 2009)

Hoogwijk et al. (2004) も、陸上の技術的ポテンシャルと 1996 年の地域別電力消費を比較している。評価対象の 17 地域の大半で、陸上風力発電の技術的ポテンシャルは、1996 年の地域別電力消費を超えている。東アフリカ、オ

セアニア、カナダ、北アフリカ、南アフリカ、旧ソビエト連邦 (FSU)、中央アメリカ、西アフリカ、アメリカ、及び中東の 10 地域では、5 倍を超えた。陸上風力発電の技術的ポテンシャルが 1996 年の電力消費の 2 倍以下と推定された地域は、南アジア (1.9)、西ヨーロッパ (1.6)、東アジア (1.1)、南アフリカ (1)、東ヨーロッパ (1)、東南アジア (0.1)、及び日本 (0.1) だが、再度、これらの結果の解釈には注意を要する。より最近の資源評価及び地域別の電力消費データは、これらの数値を変えるだろう。

表 7.2 の推定値は、洋上風力発電の技術的ポテンシャルを除いている。Krewitt et al. (2009) は深水域での用途を無視し、2050 年までの洋上資源の技術的ポテンシャルを 57EJ/年 (16,000TWh/年) と推定している。最も大きい機会は OECD ヨーロッパ (世界のポテンシャルの 22%) で、その他アジア (21%)、ラテンアメリカ (18%)、及び移行経済 (16%) が続く。機会は低いながらも依然として大きな技術的ポテンシャルを持つ地域として、北アメリカ (12%)、OECD パシフィック (6%)、及びアフリカと中東 (4%) が挙げられる。

全体的に、これらの研究では、世界のほとんどの地域において、現在のレベルに比較して大規模な風力エネルギーの普及を可能にする大きな技術的ポテンシャルが存在していることが示されている。風資源は、世界中に均等に分散しているわけではなく、その他の様々な地域的な要因 (人口密集地から資源への距離、系統連系、社会的受容など) が、風力エネルギーの世界規模の技術的ポテンシャルに対する絶対的な制限が出現する前に、成長をかなり制限する可能性が高い。このため、風力エネルギーは、各地域または各国のエネルギーのニーズ及び温室効果ガス削減の需要に均等に貢献するわけではない。

7.2.2.2 地域別の評価結果

先述の世界規模の風資源評価は主に、比較的粗く不正確な風資源の推定値に依存しており、一部は、比較的風への露出が貧弱な観測所に大きく依存している (Elliott, 2002; Elliott et al., 2004) ⁵。このため、これらの世界的な評価による地域別の結果は、7.2.2.1 節に示すとおり、若干注意して検討するべきである。これは特に、風観測データの量及び質が限定的な地域について言える。対照的に、特定の国や地域の評価は、資源の推定を念頭に置いて収集された風速データ、風資源を数値で予測する高度な技術、モデル検証の改善、及び演算能力の大幅な向上に支えられている。これらの進歩により、国や地域別のより最近の資源評価では、小規模な地形の特徴や予測された風速の一時的変動、可能性のある様々な風車の高さを把握することができる。

これらの技術は当初、EU⁶及びアメリカ⁷で適用されたが、現在は、多数の地域及び国を対象とした高解像度の風資源評価が公的に利用可能である。たとえば、国連環境計画のソーラー/風力エネルギー資源アセスメントでは、風資源情報を世界の多数のパートナー国に提供している⁸。欧州復興開発銀行は、活動中の国における再生可能エネルギー評価を開発した (Black and Veatch, 2003)。世界銀行の Asia Sustainable and Alternative Energy Program では、太平洋諸島及び東南アジアの資源アトラスを作成している⁹。地中海地域の一部の風資源評価は、地中海地域のエネルギー促進協会を通じて利用可能である¹⁰。公的に利用可能な国レベルの評価は多数あり、アメリカの国立再生可能エネルギー研究所¹¹、デンマークのデンマーク工科大学(DTU) Riso 国立研究所¹²、及びその他で作成されている。これらの評価は、風力エネルギーに対して興味を触発する際に、特に有効な場合があることが分かっている。EU 及びアメリカ以外で見られた進歩を説明するため、Box 7.2 では中国 (風力エネルギーが大幅に普及した国) 及びロシア (風力エネルギーの技術的ポテンシャルが大きい国) の風資源評価の状況を詳細に示した。

これらのより詳細な評価は一般に、風資源の規模を以前の世界的評価または地域的評価における推定よりも大きく見積もっている。これは主に、データ、空間分解能、及び分析技術の向上によるものだが、風車技術の開発の成果 (ハブ高さの増加、機械効率の向上など) もある (Elliott, 2002; Elliot et al., 2004 など参照)。それにもかかわらず、これらの評価の対象地域の拡大に伴い、空間分解能と時間分解能の拡大、モデル結果の検証強化がさらに必要である (Schreck et al., 2008; IEA, 2009 など参照)。これらの発展により、技術的ポテンシャルの推定値はさらに洗練され、以前は未特定だった高品質の技術的ポテンシャルを持つ地域に焦点が当たる可能性が高い。

⁵ 気象観測所の観測データ及び気象予測の数値モデルの相対的なメリット、デメリットに関する詳細は、Al-Yahyai et al. (2010) を参照。

⁶ ヨーロッパの最新風資源マップは、www.windatlas.dk/Europe/Index.htm 参照。EU 各国の公的に利用可能な評価は、EWEA (2009) にまとめられている。EEA (2009) も参照。

⁷ アメリカの風資源マップは、公的に利用可能なものが多数あり、国や州レベルで作成されている。その多くはその後、国立再生可能エネルギー研究所により検証されている (www.windpoweringamerica.gov/wind_maps.asp 参照)。

⁸ <http://swera.unep.net/> 参照。

⁹ go.worldbank.org/OTU2DVLIV0 参照。

¹⁰ www.omenergie.com/ 参照。

¹¹ www.nrel.gov/wind/international_wind_resources.html 参照。

¹² www.windatlas.dk/World/About.html 参照。

Box7.2: 中国及びロシアにおける風資源評価の進歩

EU 及びアメリカ以外で使用度が高まっている風資源評価の高度なツールを説明するため、中国及びロシアで風資源の特徴を明確化するために実施された過去から現在の取り組みを紹介する。どちらの場合も、風力エネルギー資源は現在の電力消費に比べて規模が大きいことが分かっており、最近の分析では、これらの資源の規模及び場所の理解が深まっている。

中国の気象局 (CMA) は、1970 年代に初の風資源評価を完了した。1980 年代には、約 900 か所の気象観測所のデータに基づき第二次の風資源調査が実施され、資源の空間的分布が正確に描写された。CMA は、陸上の技術的ポテンシャルとして 253GW の使用可能性 (設備利用率 23% で 510TWh/年、1.8EJ/年) があると推定した (Xue et al., 2001)。第三次評価は、2,384 か所の気象観測所のデータに基づいており、他の出典のデータを補足している。依然として主な観測風速は 10m だが、大半のデータは 50 年以上を対象期間としており、この評価は陸上の技術的ポテンシャルを 297GW (設備利用率 23% で 600TWh/年、2.2EJ/年) と推定した (CMA, 2006)。より最近では、メソスケールの大気モデルが改良され、高地の気象観測所データも入手できるようになったため、高解像度の評価が容易になってきた。図 7.2 (a) は、陸上の風資源に重点を置いて、これらの調査結果を示している。CMA はこの調査に基づき、陸上及び洋上の技術的ポテンシャルをそれぞれ、2,380GW (設備利用率 23% で 4,800TWh/年、17EJ/年)、200GW (設備利用率 35% で 610TWh/年、2.2EJ/年) と推定している (Xiao et al., 2010)。他の最近の調査でも同様に、技術的ポテンシャルの推定値は過去の評価に比べてはるかに大きくなっている。

ロシア (及びその他の独立国家共同体 (CIS) とバルチック諸国) では、風力エネルギー資源の規模及び分布の理解にかなりの進歩が見られる。これらの一部は、約 3,600 か所の地表の気象観測所及び 150 か所の高層大気観測所のデータに基づく。Nikolaev et al. (2010) による評価では、これらのデータ及び気象モデリングと統計モデリングが使用され、風資源の地域的分布の推定が行われた (図 7.2 (b))。この作業に基づき、また風車の特性と配置に関する想定を行った後、Nikolaev et al. (2008) では、ロシアの風力エネルギーの技術的ポテンシャルを 14,000TWh/年 (50EJ/年) 以上と推定している。風力エネルギー開発でより有望な地域は、ロシア西部、南ウラル地域、シベリア西部と北極海、及び太平洋の沿岸である。

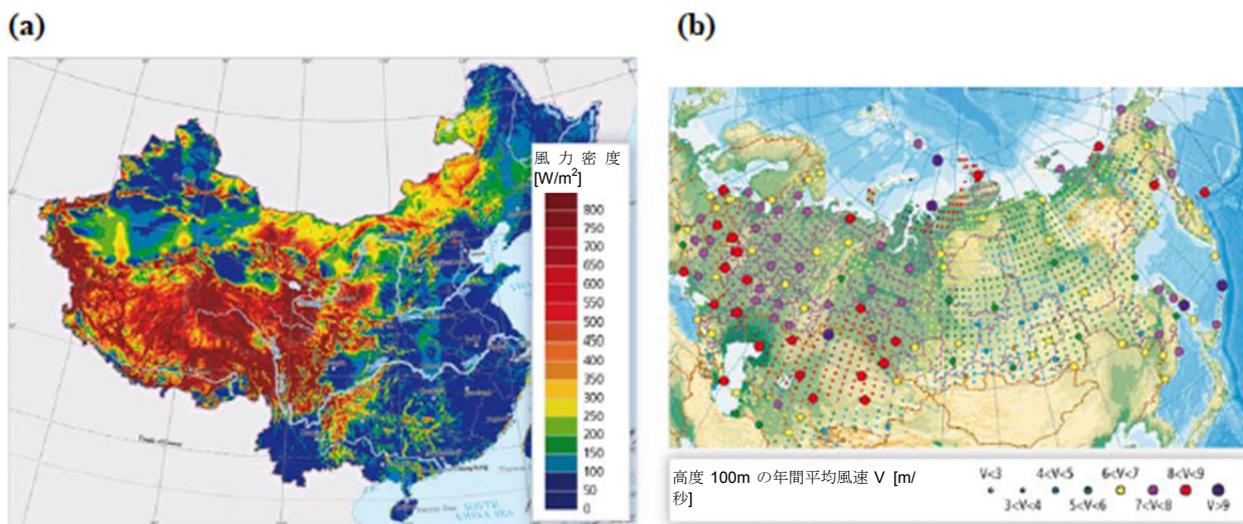


図 7.2: 風資源マップ (a) 中国 (Xiao et al., 2010)、及び (b) ロシア、CIS、バルチック (Nikolaev et al., 2010)。

7.2.3 気候変動が資源ポテンシャルに与える可能性のある影響

世界的な気候変動によって、風資源の地理的分布や経年変動と年内変動、風資源の質、風車の設計及び動作に影響する可能性がある極値的な気候現象の範囲が変わる可能性がある。この分野の研究は初期段階ではあるが、世界及び地域の気候モデルは、現代の風況 (Goyette et al., 2003) または過去の傾向 (Pryor et al., 2009) を完全に再現していない。世界的な気候変動シナリオに基づく風資源の見込みには、さらなる不確実性があり、これは様々な気候モデルの使用時にシミュレーションされた循環と流れの枠組みで、大幅にばらつきがあることもある (Pryor et al., 2005, 2006; Bengtsson et al., 2009; Pryor and Schoof, 2010)。それにもかかわらず、これまでの研究では、今世紀中にヨーロッパ及び北アメリカの大部分にわたって複数年に及ぶ年間平均風速が最大±25%以上変化する可能性は低いことが示されており、北ヨーロッパを扱った研究では、複数年にわたる年間平均風力密度は現在の値から±50%の範囲に留まる可能性が高いことを示している (Palutikof et al., 1987, 1992; Breslow and Sailor, 2002; Pryor et al., 2005,

2006; Walter et al., 2006; Bloom et al., 2008; Sailor et al., 2008; Pryor and Schoof, 2010)。世界のその他の地域を対象とした研究はほとんどないが、ある研究では、ブラジルの風資源が世界的な気候変動に対して（また、世界的な気候変動の結果としての上昇にさえ）比較的影響を受けにくいことが示された（de Lucena et al., 2009）。南アメリカ西岸のシミュレーションでは、平均風速が最大 15% 増加することが分かっている（Garreaud and Falvey, 2009）。

気候変動が長期的な平均風速に与える可能性のある影響に加え、風速の経年変動、年内変動、10 年変動にも関心が集まっている。たとえば、北ヨーロッパの風況には季節性があり、冬季に風速が最大になる（Rockel and Woth, 2007）。北東大西洋の分析の一部（1874～2007 年）では、冬季と夏季の一時的な傾向が顕著に異なることが示されている（X. Wang et al., 2009）。内部の気候モード（internal climate mode）は、中緯度の風況における経年、年間、10 年の比較的高い変動性の原因であることが分かっている（Petersen et al., 1998; Pryor et al., 2009 など）。現在及び可能性ある将来の気候におけるこれらの状況を正確に再現できる気候モデルの能力は、集中的に調査されている（Stoner et al., 2009）。それと同時に、過去の変動の及び地表近くの風況の変化が気候変動またはその他の要因に起因する程度（Pryor et al., 2009; Pryor and Ledolter, 2010）や、この変動が世界の気候の持続的な進化に伴い変更するかについても、調査中である。

最終的に、極値風の普及及び着氷の可能性から、風車の設計及び運用に影響がある（X. Wang et al., 2009）。北ヨーロッパ及び中央ヨーロッパの予備的研究では、風速の極値が高まるという証拠がいくつか示されているが（Pryor et al., 2005; Haugen and Iversen, 2008; Leckebusch et al., 2008）、本質的に稀な事象発生の変化は定量化が難しく、さらに研究が必要な正当な理由となる。海氷は、洋上発電所の風車基礎の負荷に影響を与える可能性があり、海氷や永久凍土の状況の変化も、風力発電所の運転保守のアクセスに影響するだろう（Laakso et al., 2003）。北ヨーロッパを重点的に扱った研究では、合理的な気候変動シナリオの下で海氷の大幅な減少が示された（Claussen et al., 2007）。風車負荷に関するその他の気象的な駆動要因も、気候変動の影響を受けるだろうが、資源規模、極端な気候、着氷の課題の変化と比べると、副次的なものである可能性が高い（Pryor and Barthelmie, 2010）。

気候変動が風資源の規模、地理的分布、及び変動性に与える可能性のある影響については、さらに調査が必要である。気候変動が極値的な気象現象に与える可能性のある影響、それにより風車運転環境に与える可能性のある影響についても、調査が必要である。しかしながら、全体的には、これまでの研究では、これらの影響が風力エネルギーの普及の世界的なポテンシャルに大きな影響を与える可能性は低いとされている。

7.3 技術及び応用

最新の商用の系統連系風力発電は、小型で簡素な機械から、大型で非常に洗練された装置へと発展を遂げている。科学的、工学的な専門知識や進歩に加え、改良された計算ツール、設計基準、製造方法及び運転保守手順はすべて、これらの技術開発を支えてきた。その結果、一般的な風力発電の公称定格容量は、1980 年代から急速に増加してきた（約 75kW から 1.5MW 以上へ）。一方、風力エネルギーのコストは大幅に減少している。陸上の風力エネルギー技術は、すでに商用ベースにて製造され、普及している。しかし、システムや構成物の性能及び信頼性を向上させる一方で、風力エネルギーのコストをさらに削減するため、研究開発の発展が期待されている。洋上の風力エネルギー技術はまだ開発中であり、さらに発展していく機会が多い。

この節では、大規模系統連系型の陸上と洋上で風力発電の過去の開発、及び現在の技術の状況についてまとめ（7.3.1）、国際的な風力エネルギー技術標準について説明し（7.3.2）、また、電力変換及び関連する系統連系の問題について検討する（7.3.3）。後半の節（7.7）にて、今後の技術発展の機会について説明する。

7.3.1 技術開発とその状況

7.3.1.1 基本設計原理

風から電気を作るためには、流れる空気の運動エネルギーを機械的エネルギーに変換し、その後電気エネルギーに変換する必要がある。この変換を行うための費用対効果の高い風車及び発電所の設計が、風力エネルギー産業の工学的な課題である。理論的に抽出可能な風の運動エネルギーの量は、風速の 3 乗に比例して増加する。しかし、風車単体では、抽出可能なエネルギーの一部しか抽出できない（図 7.3 を参照）。

特に、最新の大型風車では一般に風速が約 3～4m/s（カットイン・スピード）の風で、エネルギー抽出を開始するロータを採用している。ランチェスター・ベッツ限界では、抽出可能なエネルギー量の理論的上限（59.3%）を示している（Burton et al., 2001）。風車では、その定格値に到達するまで、風速とともに発電する量が増加する。その定格値は大抵、11～15m/s の風速に相当する。さらに大きい風速において、制御システムは風車の過負荷を防ぐため、ストール制御かピッチ制御のいずれかを使用、またはその両方を組み合わせて使用し、出力を制限する（Burton et al., 2001）。次に、多くの風車はロータへの負荷を制限し、風車の構造部品の損傷を防ぐため、約 20～25m/s の風速（カットアウト・スピード）にて、発電を停止する。

風力発電の設計は、風車が受ける風力の範囲全体でのエネルギー回収量の最大化、及び風力エネルギーのコストの最小化の模索に重点を置いている。Burton et al. (2001) により一般的に説明されているように、風車が定格値で稼働している場合には発電電力量の増加により、より多くのエネルギーが回収できる（範囲3）。一方、特定の発電設備容量に対しロータの直径を大きくして空力設計の改良をすると、定格出力に到達する時点の風速が下がり、風速が低くても大量のエネルギーを回収できるようになる（範囲2）。可変風速で風車が稼働することにより、広範囲の風速全体で、最大効率でエネルギー抽出が可能になる（範囲2）。また、特定の場所における平均風速は、地表面からの高さによって変化するため、一般的に、タワーが高いほどエネルギー回収量が増える結果となる。

風車の大きさの拡大、部品とシステムの信頼性向上、及び風力発電所の運用の改善を継続して行っていく一方で、コストを最小にするため、材料の低減という要求も風車設計の動機になっている。システム段階での設計及び分析の方法は、風力発電技術、発電所の設置、個々の風車及び風力発電所全体の運転保守手順の最適化に必要である。また、風車、風力発電所及び風力エネルギー市場がすべて拡大するにつれ、特定の立地条件に対する風車及び風力発電所の設計の最適化も一般的になりつつある。ここで、風車や発電所の設計に影響を与える可能性のある立地特有の条件には、風速の地理的、時間的な変化、立地点の地形、アクセスと後流効果による個々の風車同士の相互作用、及びより大規模な発電システムへの統合が含まれる (Burton et al., 2001)。風車及び発電所の設計は、騒音、視覚、環境、及び社会的受容性の問題に対し影響を与え、またこれらから影響を受ける（7.6節を参照）。

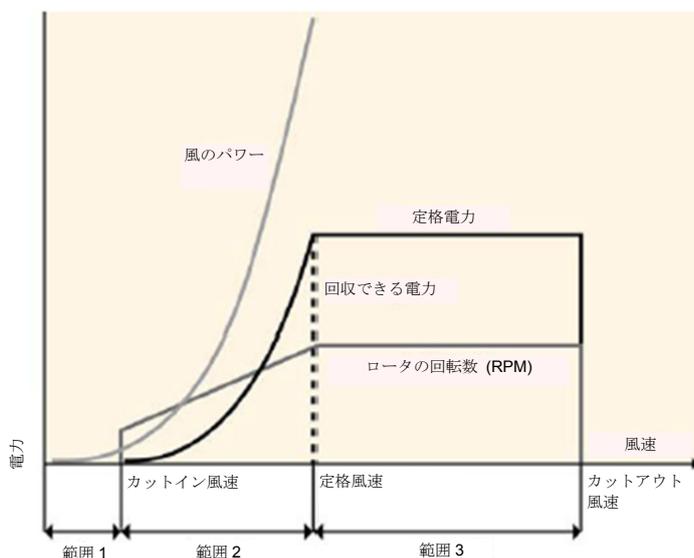


図 7.3: 近代的な、可変速風車の理論的出力曲線 (US DOE, 2008)

7.3.1.2 陸上風力発電技術

1970年代及び80年代に、水平軸及び垂直軸設計の両方を含む様々な陸上風力発電の構成が研究された（図7.4を参照）。次第に、水平軸設計が優勢となるが、特に、翼（ブレード）の数、及びその翼がタワーからみてアップウインド（風上）、ダウンウインド（風下）のどちらになっているかにより、構成が変化している（EWEA, 2009）。さらなる整理統合の時期を経て、風車の設計は主に、3枚翼のアップウインド型ロータを軸にして展開した（一部、重要な例外もある）。タワーに対し、向かい風になるよう風車を設置することで、タワーが翼に対して流れる風を遮蔽しないよう、また、余分な空力騒音が発生しないようにし、また、負荷がかからないようにした。一方、3枚翼装置は一般に、2枚翼装置よりも騒音が低い。3枚翼はハブ及び主要シャフトに取り付けられ、その力は、ハブ及び主要シャフトから発電機へと送られる（増速機を経るものもある。設計による）。主要シャフト及び主要ベアリング、増速機、発電機および制御システムは、ナセルと呼ばれる筐体に収められている。図7.5にて、最新の増速機つき風車、及びロータが直接、発電機のシャフトに取り付けられているダイレクトドライブ風車の構成部品を示す。

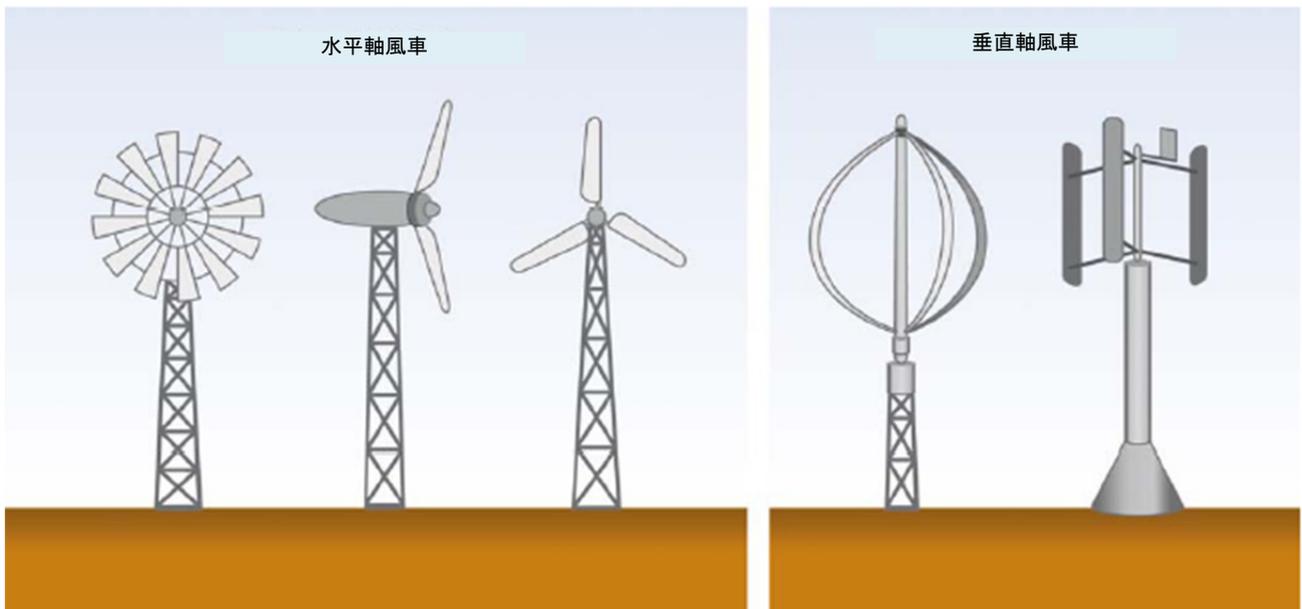


図 7.4: 水平軸及び垂直軸の風車を含む、初期の風車設計 (South et al., 1983)

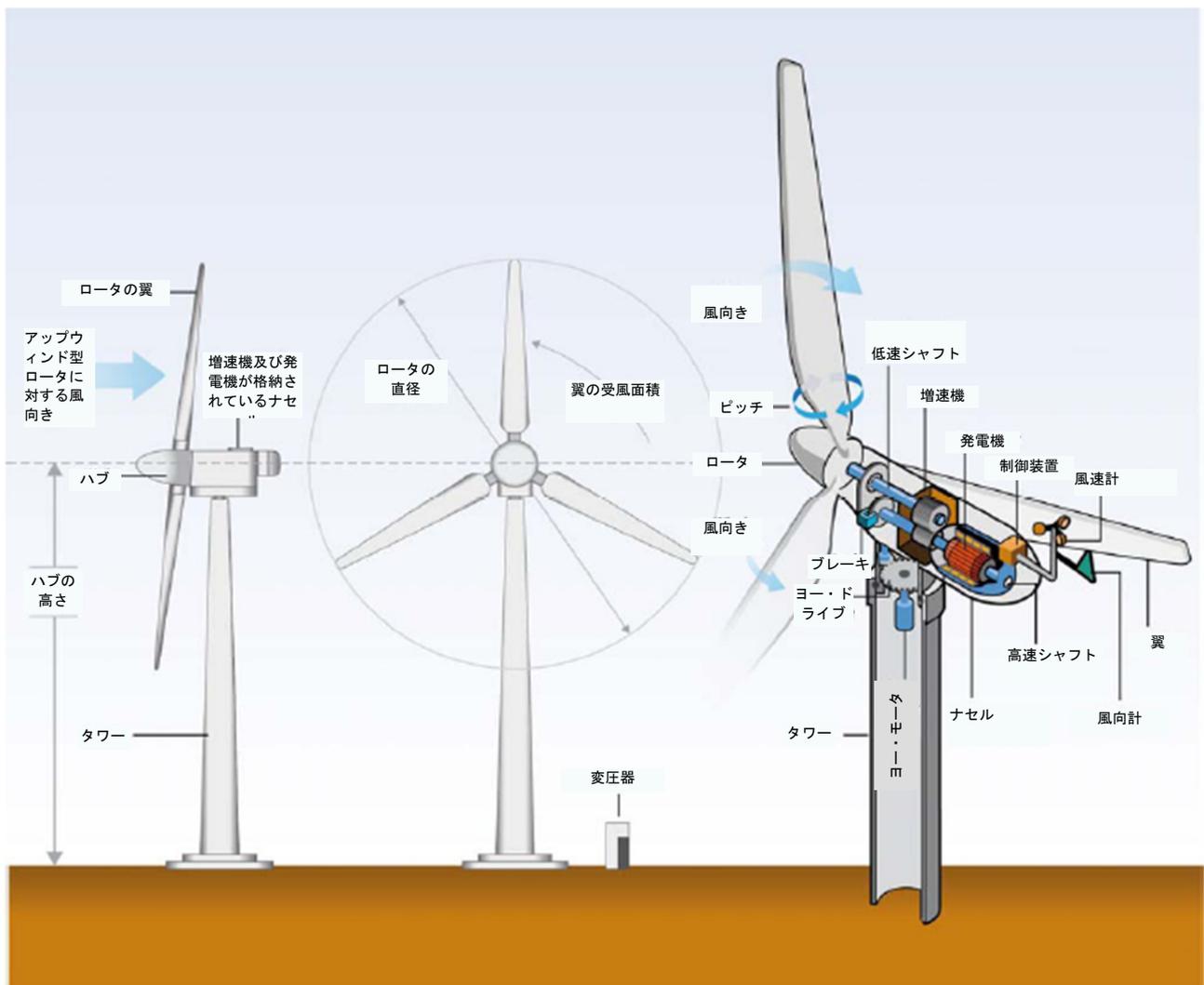


図 7.5: 最新の増速機付水平軸風車の基本構造 (国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) が設計)

1980年代、大規模な装置は定格値を約 100kW としており、固定翼からの発電を制御するため、主に空力による翼の失速を利用して、これらの風車は一般に 1つまたは 2つの回転速度にて稼働していた。次第に風車規模が拡

大していき、開発はストール制御からフルスパンピッチ制御へと移行した。フルスパンピッチ制御とは長軸に沿って翼のピッチ（回転）を制御することで、風車の出力を制御するものである（EWEA, 2009）。また、発電コストの減少により、可変速風車を運転させることができるようになった。最初は、可変速システムは、乱流により発生する駆動系機器のトルク変化を円滑にするため、また刻々と変化する風や突風時においてより効率的な運転を行うために利用されていた。最近では、ほぼすべての系統運用者が、電氣的障害においても継続して大規模な風力発電を運転できるよう、また、無効電力を提供できるよう望んでいる。これらの要望はパワーエレクトロニクス変換を伴う可変速運転の採用を促進させた（パワーエレクトロニクス変換の概要は 7.3.3 節を、系統連系問題についてのより詳しい説明は 7.5 節を、無効電力及び再生可能エネルギーの系統連系に関するより広範な問題の説明は第 8 章を参照のこと）。最新の風車は一般に、翼のフルスパンピッチ制御を利用し、可変速にて稼働する。翼は、一般に複合材料にて組み立てられ、タワーは通常、鋼鉄製で、底部から最上部のナセルに行くにしたがって細くなる円筒構造である（EWEA, 2009）。

過去 30 年にわたり、平均的な風車のサイズは大幅に増加しており（図 7.6）、2009 年において世界に設置されている多くの陸上風車は、定格容量が 1.5~2.5MW であり、2009 年に設置された風車の平均サイズは 1.6MW である（BTM, 2010）。2010 年時点では、陸上で一般に使用される風車は 50~100m のタワーに設置されており、ロータ直径は 50~100m であることが多いが、ロータ直径及びタワー高が 125m を超える商用機も運転されており、さらに大型機も開発中である。最新の風車は毎分 12~20 回（RPM）の範囲の回転速度で運転されており、1980 年代に設置された小規模風車で一般的な 60RPM を超える高速で、見た目にも破壊的と思われる速度に匹敵する¹³。陸上風車は、一般的に風力発電所としてまとめてグループ化される。このグループはウィンドプロジェクト（wind projects）またはウィンドファーム（wind farms）とも呼ばれる。これらの風力発電所は 5~300MW の規模であるが、これより小規模なものも大規模なものも存在する。

現時点で、風車が引き続き大型化する主な理由は、以下の方法により、均等化発電原価を最小限に抑えるためである（EWEA, 2009）。

- ・発電電力量の増加（高いタワーほどより質の高い風資源を入手しやすく、ロータが大きいほどより多く風を利用でき、質が低い風資源のサイトでもよりコスト効率よく風を利用できる）
 - ・単位容量当たりの投資コストの削減（風車を大きくし設置数を減らすことで、投資コスト全体のある程度の削減が可能）
 - ・運転保守コストの削減（風車を大きくすることで、単位電力量当たりの管理コストを削減可能）（EWEA, 2009）
- しかし、陸上風車では、風車をさらに大型にすることは、最終的には、工業的な制約や材料利用の制約だけではなく（7.7 節にて説明）、非常に大きな翼、タワー及びナセル部品を輸送する経路や所定の位置にその部品を持ち上げるための大型クレーンを調達するコスト、また、その調達の困難性という物流的制約（または、その制約を解決するためのコスト）によっても制限される可能性がある。これらと同様の制約は、洋上風車を拘束するものではないため、図 7.6 に示す大型化する将来の風車は、洋上風車設計の検討に左右される可能性がより高い。

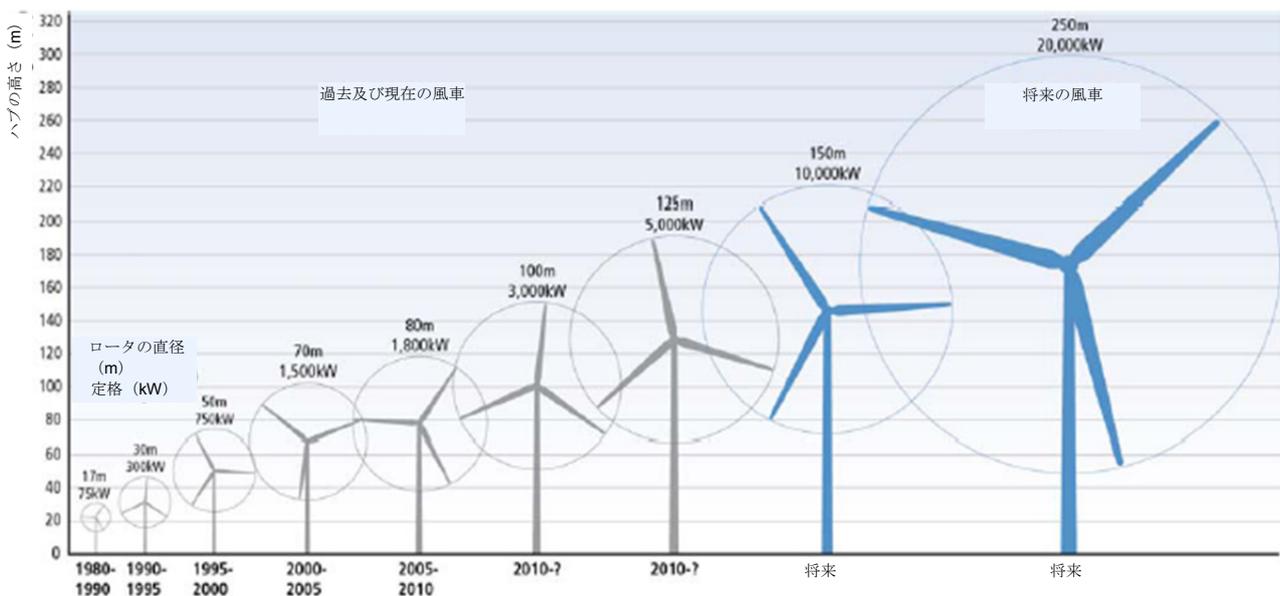


図 7.6: 一般的な商用風車のサイズの発達（NREL により作図）

¹³ 回転速度はロータの直径が大きくなるほど低下する。70~80m/s を超える先端速度により発生する音響ノイズは、ロータの速度を抑制する主要な設計基準である。

上記及びその他の開発の結果、陸上風車技術はすでに商用的に大規模な生産及び普及の段階に入っている。また、最新式の風車は理論的な最大空力効率にほぼ達しており、その効率は2000年代半ばまでに、1980年代の0.44から約0.50まで上昇している¹⁴。0.50という値は、翼の抵抗により決まる実用限界値に近く、ランチェスター・ベッツの理論的限界の0.593に匹敵する(7.3.1.1節を参照)。この風車の設計要件は、通常20年間で、地方の風資源の特性により年間運転時間4,000から7,000時間(定格容量以下の場合)の範囲となる。この設計要件を確実に満たすという課題に直面し、運転保守チームは、一部では部品の故障率が予測よりも高いにも関わらず、発電所の高い可用性を維持するよう作業を行っている(Echavarria et al., 2008)。風車は、報告によるとある状況下で期待以下の性能となっている(Li, 2010)が、2008年以降に収集したデータでは、成熟市場の陸上風車は97%以上の可用性を達成することができる(Blanco, 2009; EWEA, 2009; IEA, 2009)。

これらの結果は、この技術が商業的に十分成熟し、大規模な生産及び普及が可能になったことを示す。しかし、信頼性の向上と発電電力量の増加、及びコスト削減がさらに進んでいくことが予想される。これについては7.7節で説明する。また、過去の技術発展の多くは、先進国にて見られる。しかし、次第に発展途上国でも風力エネルギーの利用についての研究がなされるようになり、風車設計、部品製造及び風力発電所の設置における技術移転の機会が出てきている。凍結や台風などの極値的環境条件はこれらの市場の一部において、さらに顕著となる可能性があり、研究継続に弾みをつける。交通インフラが最低限のものでしかないなど、発展途上国に特有のその他の側面は、これらの市場が成長した場合に、風車設計にも影響を与えるだろう。

7.3.1.3 洋上風力発電技術

最初の洋上風力発電所は1991年にデンマークで建設され、11台の450kW規模の風車で構成されていた。洋上風力発電技術は、陸上に比べると成熟しておらず、投資コスト及び運転保守コストが高い(7.8節を参照)。2009年末までに、世界中で設置済みの風力発電容量の1.3%が洋上に設置されており、合計で2,100MWであった(GWEC, 2010a)。

洋上風力発電の開発に対する主な動機は、技術ポテンシャルの限界や他の土地利用との計画的及び立地的干渉により、陸上風力発電開発が制約される場所において、新たな風資源を入手できるようにすることである。他の洋上風力発電開発に対する動機には、以下のようなものがある。海上に存在する高い品質の風資源(たとえば、ハブ高さ付近における平均風速が大きく、ウィンドシアアが少ない。ウィンド・シアアとは、高度とともに風速が一般的に大きくなることを指す)。陸地の送電制約を回避するため、さらに大きな風車を利用でき、規模の経済の新たな獲得の可能性があること。陸上よりも大規模な発電所を建設でき、発電所並みの規模の経済を得られること。また、遠く離れた陸上風力発電へアクセスするための、新たな長距離間陸上送電インフラの必要性が減少する可能性¹⁵(Carbon Trust, 2008b; Snyder and Kaiser, 2009b; Twidell and Gaudiosi, 2009)。

これらは、洋上風資源のポテンシャルと組み合わせると、一般的に陸上風力発電と比較してコストが高いにも関わらず、EUでの風力エネルギー技術へ大きな関心を寄せる要因となっており、他の地域においてもしだいに洋上風力発電技術への関心を高める要因となっている。

洋上風車は一般的に陸上の風車よりも大型で、2007年から2009年に建設された洋上風力発電所では2~5MWの公称定格出力を持つ風車が一般的である。また、さらに大きな風車の開発中である。2007年から2009年までに設置された洋上風力発電所は一般に20~120MW規模であり、徐々に風車及び風力発電所が大きくなる傾向がはっきりと見られる。2005年の1年間に設置された洋上風車の多くの水深は10m未満であったが、2006年から2009年に設置されたものでは水深は10mから20mを超えるものが一般的であった。海岸からの距離は20km未満である風車をもっとも多いが、平均距離は次第に増加している(EWEA, 2010a)。経験を積むにつれ、水深はより深くなるのが予想され、強い風にさらされることの多い場所を利用ようになる。これらの傾向は、洋上風力発電所が直面する風資源の特性、支援構造設計及び洋上風力発電のコストに影響を与える。風車及び発電所レベルの規模の経済を通しての、洋上風力発電のコスト削減手段として、より大きな風車(5~10MW、またはさらに大きなもの)や風力発電所へ引き続き移行していくことも予測されている。

今日まで、洋上風車技術は、一部の変更と特別な基礎構造を有するが、陸上の設計と非常に類似していた(Musial, 2007; Carbon Trust, 2008b)。モノパイル式基礎構造がもっとも一般的だが、コンクリート製の重力式基礎構造も一部で使用されている。他にも、様々な基礎構造設計(浮体式設計を含む)が検討され、7.7節で示すような特に水深が深くなる一部の場合にて使用されている(Breton and Moe, 2009)。基礎構造の違い以外にも、洋上風車の変更(陸上風力と比べての)には、波による負荷を対処するためのタワーの構造的改良、腐食性のある潮風の影響によ

¹⁴ 風車は、定格出力を下回る出力に応じた風速で稼働する場合に、最大空力効率を達成する(図7.3の範囲2を参照)。空力効率は、定格出力を上回る風速で稼働する場合には制御システムによって制限される(図7.3の範囲3を参照)。

¹⁵ もちろん、送電インフラは洋上風力発電所と大規模電力需要地をつなぐために必要であり、洋上送電の1km当たりのコストは、一般的に陸上の電線コストよりも高い。陸上風力風車へのアクセスに必要な送電よりも洋上の送電の必要性がより大きくなるかどうかは、場所により異なる。

る風車装置の劣化を防ぐためのナセルの空調管理・加圧、及びその他の制御、設備保守のためのスタッフ用作業台などがある。海の航行上の安全のため、さらに設計を変更する（警告灯、霧中信号など）することや、高価なサービスを最低限に抑えること（広範囲の状況監視、メンテナンス用の常備クレーン（onboard service cranes））が一般的に行われている。風車の先端速度は、洋上の風力発電では騒音に対する心配は少ないため、陸上風車よりも速い速度を選択できると思われる。先端速度をより速くすることで、出力はそのまま、トルクの低減及び駆動部品の軽量化を図ることができる場合も多い。さらに、タワーの高さは、陸上に比べて洋上ではウィンドシアアが減少するため、陸上風力発電で使用するものよりも低くなることもある。

陸上風力発電と比較して、洋上風力発電では、発電所の安定供給が低く、運転保守コストが高いというのが一般的になっている。これは、洋上風力発電の成熟状態が比較的 low、洋上風車の維持・改修の物流的課題が本質的により大きいことによる（Carbon Trust, 2008b; UKERC, 2010）。特に洋上での用途のための風力エネルギー技術は、洋上市場が拡大するにつれ、広く普及していく。また、この分野ではより大型の 5~10MW の風車が支配的になると予想される（EU, 2008）。洋上風力発電の将来における技術発展の可能性は、7.7 節にて述べる。

7.3.2 国際的な風力エネルギー技術基準

1970 年代及び 80 年代の風車は、簡易設計モデルを用いて設計されており、機械の故障や設計の保守化を招くこともあった。これら両方の問題への取り組みの必要性は、コンピュータ処理能力の向上と組み合わせ、設計者が 1990 年代に自身の見積もりを改良する動機となった（Quarton, 1998; Rasmussen et al., 2003）。改良された設計及び検査方法は、国際電気標準会議（IEC）規格にて成文化されてきており、風車認証制度の規則及び手順（IEC, 2010）はこの標準をもとに作成されている。認証機関は、公認の設計検査組織を信頼し、風車、部品または風力発電所全体を認証するため、IEC 規格にて概説された規則及び仕様の遂行についての追跡可能な文書を提供する。認証システムは、風車設計または特定の場所に設置される風車が、安全性、信頼性、性能及び検査に関する共通のガイドラインを満たしていることを保証する。図 7.7 (a) に、風車形式の認証を得るために必要な設計及び検査手順について図示する。図 7.7 (b) に示した発電所の認証は、風車の形式認証を必要とし、特定の敷地に関連する敷地条件、風車設計パラメータの評価手順、土壌特性と設置、及び発電所試運転などの敷地特有のその他条件の評価手順を含む。

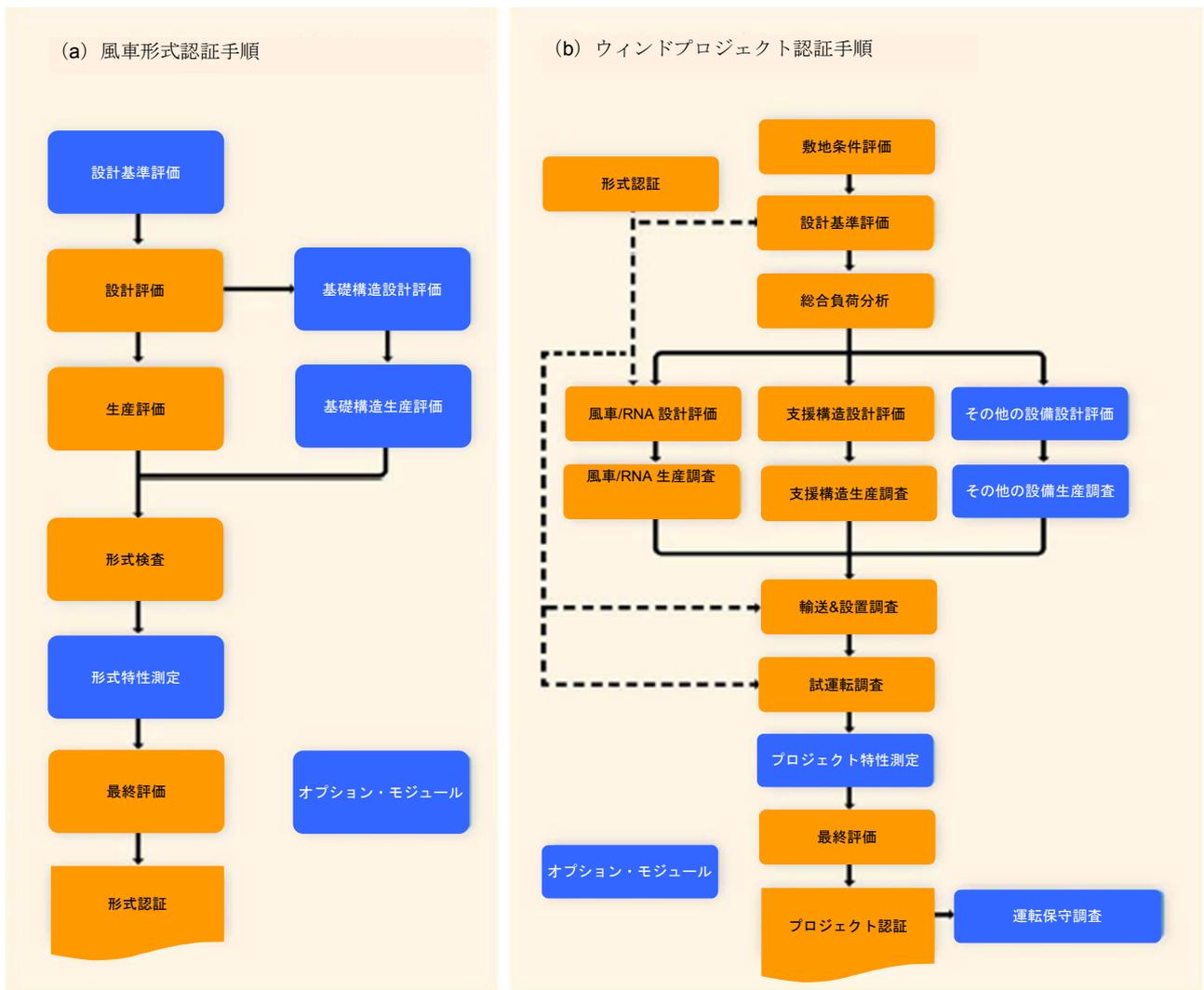


図 7.7: (a) 風車形式認証及び (b) 風力発電認証のモジュール (IEC, 2010)

注:RNA とはロータのナセル組立品を指す。筆者は IEC に IEC 国際基準 IEC 61400-22 ed.1.0 (2010) からの情報を複製させていただいたことを感謝する。これらの抜粋部分は、IEC (スイスのジュネーブ) がすべての著作権を持つ。無断複製・複製・転載を禁ず。IEC についての詳しい情報は www.iec.ch にて参照可能である。IEC は、筆者が複製する抜粋部分と内容の配置、及び背景事情について、一切の責任を持たない。また、IEC はその他の内容またはその正確性について一切の責任を負わない。Copyright © 2010 IEC Geneva, Switzerland, www.iec.ch.

保険会社、金融機関及び発電所の所有者は、通常、進展させるためにある種の発電所の認証を必要とし、そのため IEC 規格では、不確実性の減少と市場で入手可能な風車製品の品質向上の認証に対する共通基準を設けている (EWEA, 2009)。新興市場においては、高い能力を持つ検査研究所及び認証機関の不足により、製造者が IEC 規格による認証を獲得する機会が制限され、製品の質の低下を招く可能性がある。コスト低減のため市場の成熟及び設計余裕が圧迫されている場合には、国際的に認められている規格を信頼することにより、安定した性能、安全性及び信頼性がより広範囲で保証されるようになる可能性が高い。

7.3.3 電力変換及び関連する系統連系の問題

電力系統の信頼性の点からみると、風車の重要なポイントは電力変換システムである。大型の系統連系風車において、電力変換システムは、3つの総合的形式にてもたらされる。固定速誘導発電機は、ストール制御風車及びピッチ制御風車の両方の初期において一般的であった。これらの発電機の配置において、風車は、電力系統が供給しなければならなかった無効電力の最終消費者であった (Ackermann, 2005 を参照)。最新の風車では、現在はこれらの設計は、そのほとんどが可変速装置に置き変わっている。フルスケールのパワーエレクトロニクスコンバータをもつ二重給電誘導発電機 (DFIG) 及び同期発電機の 2つを配置することが一般的であり、これらはともにほぼ全てにおいてピッチ制御ロータと一体になっている。この可変速設計は、電力系統から本質的に風車の回転質量を切り離し、その結果、電力品質に関して初期の風車設計よりも多く優位性を持つ (Ackermann, 2005; EWEA, 2009)。例えば、これらの風車は有効電力及び無効電力の供給に加え、フォルトライドスルー (FRT) 機能も提供できるが、

次第に系統運用者から要求されるようになってきている（風力発電の連系要件及び制度的要素は7.5節で取り上げる）。しかし、風車が固有慣性応答能力を有しないという結果になるという点、つまり、系統電力のインバランスに同期して出力を増加（減少）することができないという点において、これらの風車の設計は多くの大型火力発電所にて見られる同期発電機とは異なっている。電力系統における全般的な慣性の少なさにより、安定した系統運用管理がより困難になるため、この慣性応答の欠如は電力系統の計画者にとって重要な検討事項である（Gautam et al., 2009）。風車製造事業者はこの固有慣性応答の欠如を風力エネルギーに対して起こりうる長期間の障害と認識しており、様々な解決策を模索している。たとえば、慣性応答をもたらす新たな風車制御を導入することなどである（Mullane and O'Malley, 2005; Morren et al., 2006）。

7.4 市場及び産業の発達の世界的・地域的状況

2000年代に風力エネルギー市場が大幅に拡大し、技術と産業の商業的、及び経済的実現可能性を示した。また、多くの国において政策支援手段を通して、風力エネルギー開発が重視されていたことについて示した。風力エネルギーの拡大は、限られた地域のみ集中しており、風力エネルギーの供給は、他と比較すると世界的な電力供給に占める割合はごくわずかのままである。風力エネルギーをさらに拡大するには、今日まで特に風力エネルギーがあまり普及していない地域及び洋上地域において、新しい政策措置が必要となる可能性が高い。

この節では、風力エネルギー普及の世界的（7.4.1節）・地域的（7.4.2節）状況についてまとめ、風力エネルギー産業の動向について説明し（7.4.3節）、風力エネルギー市場の政策活動の重要性を明確にする（7.4.4節）。

7.4.1 世界的な状況と動向

風力発電は主流の電力産業の1つとして、急速に確立されてきている。1999年末の累積容量14GWから、10年間に世界の風力の設備容量は12倍になり、2009年末までに約160GWとなった。年平均累積容量増加量は28%である（図7.8参照）。世界の年間風力発電増加量は、2007年の20GW、2008年の26GWから上がって2009年には38GW超であった（GWEC, 2010a）。

容量の大部分は陸上に設置された風車によるものであり、洋上設備は全市場に占める割合が小さい。2009年末までに約2.1GWの洋上風車が設置され、そのうち2009年に0.6GWが設置されている。これは、ヨーロッパ以外に設置された（中国に設置）最初の洋上風力発電所を含む（GWEC, 2010a）。これらの洋上設備の多くはイギリス及びデンマークに設置されている。しかし、多くの洋上風力発電所の開発活動が少なくともイギリスやデンマーク以外のヨーロッパの国々、アメリカ、カナダ、中国で行われている（Mostafaeipour, 2010など）。洋上風力発電は、この先数年間で、技術の進歩として大きく発展することが期待されている。また、陸上風力発電の敷地が局所的な資源可用性や敷地問題により制約されるようになる場合に大きく発展することが期待されている。（BTM, 2010; GWEC, 2010a）。

2009年に設置された新規風力発電所の投資コストの合計は、570億USドル（2005年）であった（GWEC, 2010a）。風力エネルギー部門における2009年の直接雇用の数は、EUで約190,000名、アメリカで約85,000名と推定されている。世界では、直接雇用はおよそ500,000名と推定されている（GWEC, 2010a; REN21, 2010）。

これらの動向にもかかわらず、風力エネルギーは世界の電力供給に占める割合が比較的小さいままである。2009年末までの風力発電の全設備容量は、平均的な年において、世界の電力需要の約1.8%を満たしており、2006年末までの0.9%、2007年末までの1.2%、2008年末までの1.5%から上昇している（Wiser and Bolinger, 2010）。

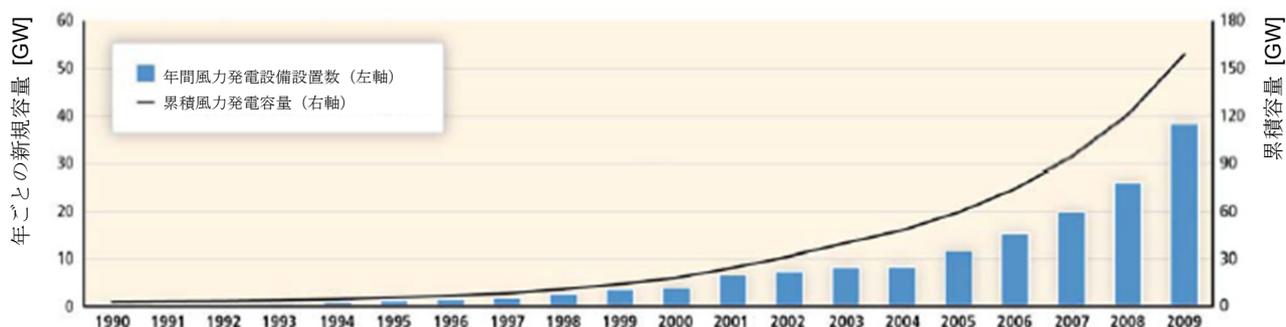


図 7.8: 世界の風力発電の年間増加容量と累積容量（出典: GWEC, 2010a; Wiser and Bolinger, 2010）

7.4.2 地域及び国の状態と動向

2009 年末までの風力発電の設備容量の合計がもっとも高い国は、アメリカ (35GW)、中国 (26GW)、ドイツ (26GW)、スペイン (19GW)、及びインド (11GW) である。風力エネルギーは、1980 年代にアメリカで運用開始したのち、1990 年代から 2000 年代初頭にかけて EU の国々及びインドを中心に成長した。しかし、2000 年代後半では、アメリカ、その後中国で、新たに年間設備容量がもっとも増えている (図 7.9)。

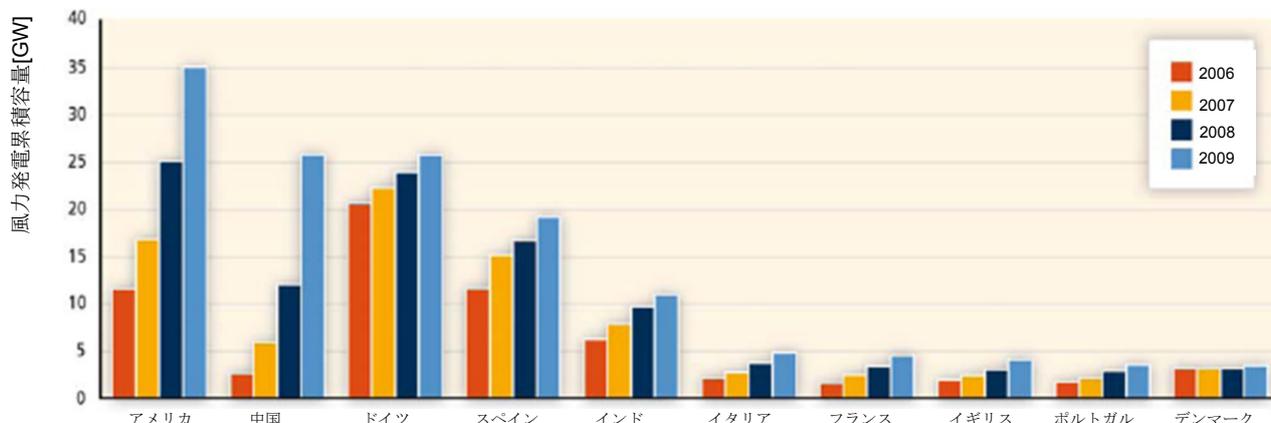


図 7.9: 風力発電累積容量の上位 10 か国 (出典: GWEC, 2010a)

地域的には、ヨーロッパは、2009 年末までに市場の風力発電累積設備容量が 76GW となる市場を引き続き主導し、世界における総設備容量の 48%を占めている (アジアで 25%、一方、北米では 24%である)。ヨーロッパで継続して成長しているにもかかわらず、ヨーロッパ内のいくつかの主要市場に対する風力エネルギー産業の依存度が次第に減少していき、世界のその他の地域において、次第に風力エネルギーが成長し、風力エネルギーが支配的な市場になっていく傾向にある。例えば、ヨーロッパの風力エネルギー市場における 2009 年の年間成長率は、この年の風力発電の新規増加容量合計の 28%を占めるに過ぎず、2000 年代初めの 60%超より減少している (GWEC, 2010a)。2009 年、70%を超える風力発電年間容量の増加がヨーロッパ以外で発生しており、特にアジア (40%) 及び北米 (29%) で顕著な伸びを示している (図 7.10)。

ヨーロッパでも、ドイツとスペインは 2000 年代ではもっとも強気の市場であったが、この 2 か国に対する依存度も減少する傾向にある。

風力発電の設備容量の増加は世界的な傾向になっているにもかかわらず、市場は一部の地域に集中したままである。図 7.10 で示す通り、ラテンアメリカ、アフリカ及び中東、また、太平洋地域では各地域に高い技術的ポテンシャルがあるにもかかわらず、上記 7.2 節で示した通り、設置されてきた風力発電の容量は比較的小さい。また、成長が著しい地域においても、その成長の多くは、一部の国に限られてきた。たとえば、2009 年には、新規に増加した風力発電容量の 90%が上位 10 位までの市場で占められており、62%が中国 (14GW、36%) とアメリカ (10 GW、26%) のたった 2 か国に集中していた。

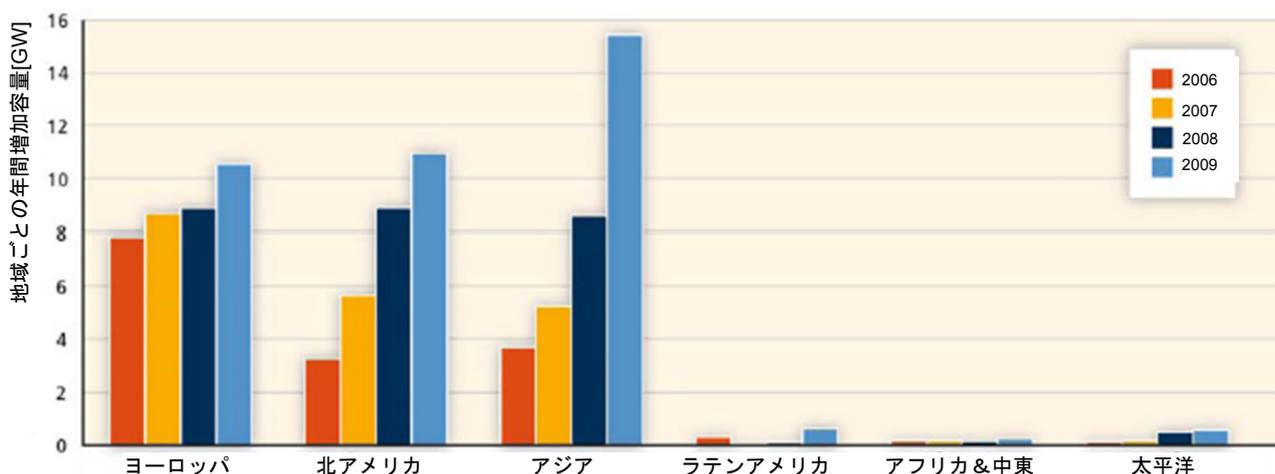


図 7.10: 地域ごとの年間風力発電容量の追加 (出典: GWEC, 2010a)

注: 図に示されている地域は、研究ごとに定義されている。

ヨーロッパとアメリカの両方において、風力発電は電力容量を増加させる主要な新しい電源である。2000年から2009年の期間で、風力エネルギーはアメリカ(増加容量全体の10%)とEU(増加容量全体の33%)で新たに追加された、銘板容量の値において2番目に割合の大きい資源であった。これは、天然ガスの次だが、石炭を上回っている。2009年には、アメリカにおける総増加容量の39%、EUにおける総増加容量の39%が風力エネルギーによるものであった(図7.11)。中国では、2000年から2009年の純増加容量の5%、2009年の純追加容量の16%が風力エネルギーによるものであった。世界規模では、2000年から2009年に新たに設置された純追加容量約11%が新設の風力発電によるものであり、2009年単独ではこの数値はおそらく20%を超えていた¹⁶。

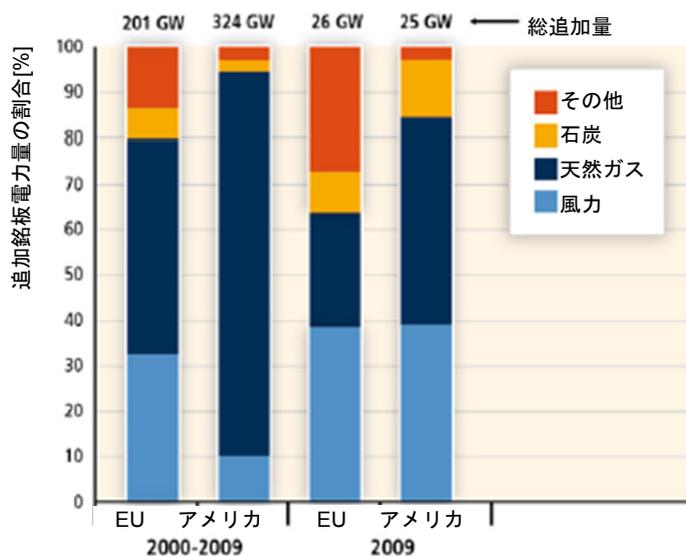


図 7.11: EU 及びアメリカにおける総追加容量に対する電源方式の寄与の比較 (出典: EWEA, 2010b; Wiser and Bolinger, 2010)

注: 「その他」カテゴリは、風力以外の再生可能エネルギー、原子力エネルギー及び燃料油を含む。

多くの国々のそれぞれの電力系統において、風力発電の年間普及率が比較的高くなり始めている。図 7.12 は、風力発電設備容量、予測される年間供給電力量への換算、及び消費電力量で割った値について、2009年末(及び2006年末、2007年末、2008年末のデータ)のデータを示している。これをもとに、また、2009年末時点で累積風力発電容量がもっとも多い20か国のみを焦点を当てると、デンマークは年間電力需要の約20%に相当する電力が風力

¹⁶ 世界での2000年から2007年における追加容量の値は、米エネルギー省エネルギー情報局から入手した過去のデータによるものである。2008年と2009年の追加容量は2000年から2007年の過去の容量増加をもとに算出している。ここでは、GW単位の追加容量に焦点を当てているが、発電技術は本当に様々な平均発電率を持つことが多く、新たな電力需要(GW単位)に対する風力エネルギーの寄与はここで示したものと異なる可能性があることを認識されている。

発電容量によって供給可能になっており、この数値はポルトガルでは14%、スペインでは14%、アイルランドでは11%、ドイツでは8%となっている (Wiser and Bolinger, 2010) ¹⁷。

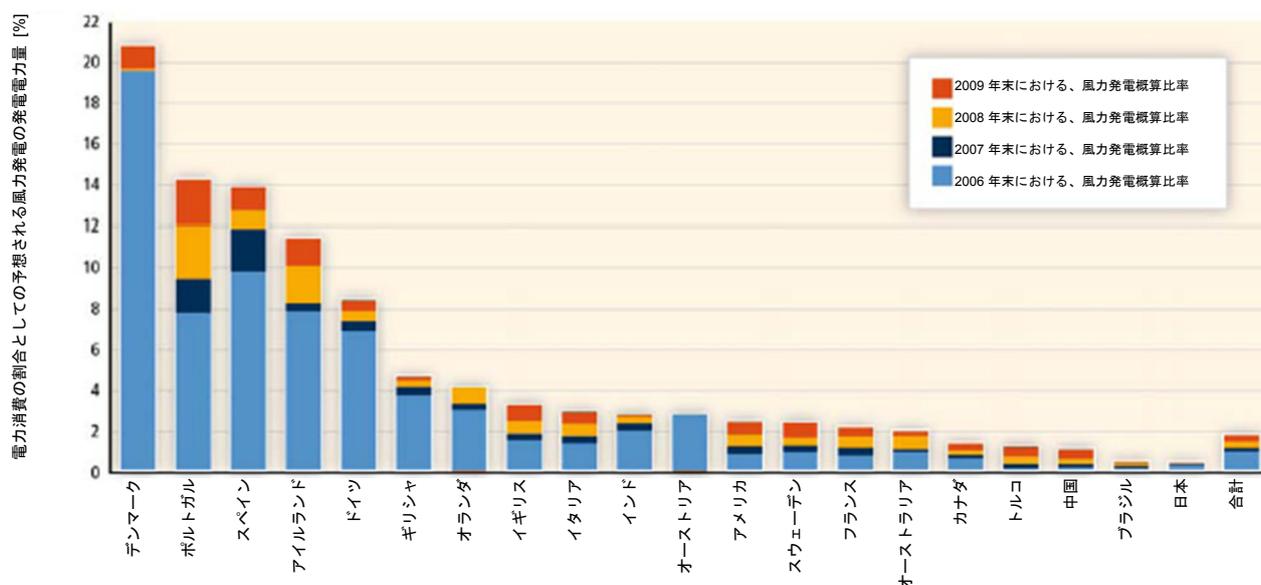


図 7.12: 風力発電設備容量の上位 20 か国における年平均風力発電概算シェア (Wiser and Bolinger, 2010)

7.4.3 産業発展

風力エネルギー部門の成熟度の向上を、追加の風力発電による発電電力量だけではなく、風力エネルギー産業における傾向により説明する。特に、従来の風力発電産業以外の主な既存の企業が、この部門に次第に含まれるようになってきている。例えば、風力発電所を開発、所有及び運用している業種において、比較的小規模な独立系発電所の開発事業者から、より大規模な発電企業（電気公益事業を含む）及び大規模な独立系発電所の開発事業者への移行がなされてきた。風車及び部品製造に関して、風力エネルギー市場の規模の拡大と地理的な普及は、一部の国では製造の現地化の必要性とともに、新規参入者を呼び込んできた。同様に、これらの新規参入者の関与により、産業のさらなるグローバル化が促進されてきた。製造者の生産戦略はより大規模な発電所、設備容量がより多い洋上風車、及び低風速への取り組みに移行している。一般的には、世界のいくつかの地域において、電力容量への新しい投資に対する風力エネルギーの寄与の大きさが、地方に目を向けた技術系会社から、垂直的に統合されたグローバルな公益事業までの産業サプライチェーン全体で様々な参入者を引き付けてきた。数多くの会社もも有益な垂直統合と専門化のバランスを模索するため、産業サプライチェーンも徐々に競争率が高くなってきている (BTM, 2010; GWEC, 2010a)。

これらの傾向にもかかわらず、世界的な風車市場は、若干、地域的に分断されたままであり、たった 6 か国が風車製造の大部分を受け入れている (中国、デンマーク、インド、ドイツ、スペイン及びアメリカ)。市場は別々に発展し、風車供給の市場割合は国内産業の勝者の出現、高度に集中したイノベーターの参入、及び実証済みの技術にライセンス供与する他の地域からの新興企業の出現により決められてきた (Lewis and Wiser, 2007)。しかし、産業は継続してグローバル化する。ヨーロッパの風車及び部品製造者は北アメリカ及びアジアの市場に進出している。また、ヨーロッパ及び北アメリカにおけるアジアの製造者の存在が、今後数年間で明らかに大きくなると予想されている。中国の風車製造者は、特に彼らの国内市場で優勢であり、輸出の機会を徐々に模索していくことになる。そのため、量が増えていくにつれ、風車のセールスチェーン及びサプライチェーンの戦略は、国際的な様相をさらに帯び続けていくと予想される。

風力エネルギーが成長している中でも、産業は課題に直面する。7.8 節で詳しく説明する通り、2005 年から 2008 年にかけて、風力エネルギーの需要が高まることで発生するサプライチェーンの問題は、産業に負担をかけ、風車及び風車の部品の価格がこの不均衡を相殺するために上昇した。商品価格は上昇し、熟練技能者の有無及びその他の要素も風車の価格を押し上げる一因となった一方、洋上風力発電所の開発中のサプライチェーンは産業のその部分への負担となった。サプライチェーンの問題の解決は、拡大する需要レベルを満たすため、風車の部品の生産を単純に増減するだけではない。大規模な投資の判断は、産業の長期にわたる順調な見通しをもとにより安易に行われている。しかし、多くの市場では、風力エネルギーの予測と実際の需要はともに多くの要因に左右され、その要因の一部は政治的な枠組みや政策措置など産業のコントロールの範囲外である。

¹⁷ 電力系統間で系統連系を行っているため、これらの割合は、各国国内で消費される風力発電の発電電力量とは必ずしも一致しない。

7.4.4 政策の影響¹⁸

風力エネルギーの普及は、風力エネルギーの用途及び地域に左右される、形式及び規模の点で異なる多くの課題を克服しなければならない。¹⁹風力エネルギーの普及に対するもっとも重要な課題をここにまとめる。おそらくもっとも重大なのは、世界の多くの地域（全地域ではない）において、少なくとも環境への影響が内部化及び貨幣化されていない場合には、風力エネルギーが現在のエネルギー市場の価格よりも高額であるということである（NRC, 2010a）。風力エネルギーはまた、その他多くの課題に直面し、その一部は風力エネルギー特有のもの、または少なくともこの部門に特に関連するものである。もっとも重大な課題の一部は以下のとおりである。（1）電力の信頼性に対する風力発電の変動性の影響についての懸念、（2）最も魅力的な風資源地域へアクセスできることが必要な、陸上及び洋上への（及び国内ならびに国際的な）新規送電インフラの敷設に対する課題、（3）風力エネルギーの普及を妨げる面倒で時間のかかる計画立案、立地決め及び認可の手続き、（4）洋上風力発電技術の技術的優位の必要性和高いコスト、及び（5）現在まで十分な風力エネルギーの普及を経験したことがない地域における制度的及び技術的知識の不足。

これらの課題の結果のように、風力エネルギー部門の成長は、政治的な枠組み及び広範囲にわたる政府政策に敏感で、これらから影響を受ける。過去 20 年間に於いて非常に多くの先進国、より最近ではますます多くの発展途上国が、風力エネルギー市場の拡大にて大きな役割を果たす再生可能エネルギー政策の枠組みを提示してきた。これらの取り組みは、風力エネルギー普及の環境保護と燃料の多様性、及び経済的発展の影響、また時間の経過とともに風力エネルギーのコストが減少する潜在性が動機となっていた。商業規模の風力エネルギーを普及させる初期の大掛かりな取り組みはカリフォルニアで行われ、固定価格買取制度 (FIT) 及び積極的な政策減税が 1980 年代の成長に拍車をかけた (Bird et al., 2005)。1990 年代には、風力エネルギーの普及はヨーロッパに移行し、固定価格買取制度がデンマーク及びドイツにて最初に制定され、のちにスペインへ拡大、さらにその後多くの他の国々へと拡大した (Meyer, 2007)。再生可能エネルギー利用割合基準 (RPS) は他のヨーロッパの国々にて実装されており、より最近では、EU の拘束力のある再生可能エネルギーの 2020 年までの目標の 20% を達成することが、部分的にヨーロッパの再生可能エネルギー政策の動機となっている。2000 年代、アメリカ (Bird et al., 2005; Wiser and Bolinger, 2010)、中国 (Li et al., 2007; Li, 2010; Liu and Kokko, 2010)、及びインド (Goyal, 2010) での成長は、再生可能エネルギー利用割合基準、政策減税と固定価格買取制度及び政府が主導の入札などの多様な政策の枠組みを基にしていた。その他の政策はいまだに、多くの国々で活用されており、風車及びその部品製造の現地化を直接助長している (Lewis and Wiser, 2007)。

経済的支援政策は様々で、また様々な政策手法の相対的なメリット全体において健全な討論がなされているが、重要な結論は、政策の透明性及び予測可能性が共に重要だということである（第 11 章参照）。また、風力エネルギーの経済的政策に焦点を当てるのは一般的ではないが、上記及び本章と第 11 章の各所にて説明したとおり、風力エネルギー市場もその他の様々な要因に左右されることが実例からわかる（例えば Valentine, 2010）。これらは、地方の資源可用性、立地計画、認証の手順、電力系統への運用統合、送電網拡張、風力エネルギー技術向上と風力エネルギーに馴染みのない市場における制度的知識、及び技術的知識の可用性を含む（IEA, 2009 など）。風力エネルギー産業では、これらの問題は各国の市場機会の規模と、その機会への参加ルールを決めるのに重要なものとなっている。多量の風資源をもつ多くの国では、これらの要因の結果、あまり多くの風力エネルギーを普及させてこなかった。先にリスト化された風力エネルギーに対する課題を考えると、成功した風力エネルギー普及の枠組みで以下のような要素を検討したと考えられる。例えば、適切な利益をもたらす投資家の信用を確保する支援システム、風力エネルギー計画や立地及び認可の適切な管理手順ならびに導入を容易にする風力発電所の社会的受容性の程度、現存する送電システムと戦略的送電計画へのアクセス及び風力エネルギーへの新規投資、風力エネルギーの本来の出力の変動と不確定性を管理する積極的取り組み、などが挙げられる。また、政府及び産業による研究開発は陸上風力発電技術を徐々に発展させ、洋上風力発電技術に必要な改善を進めるために欠かせないものである。さらに、風力エネルギーの普及にとって新興市場となるこれらの市場にとって、知識（風資源マップの見解など）と技術の移転（地域の風車製造事業者の発展及び系統連系の簡便化など）は早期導入の促進を支援することができる。

7.5 系統連系問題の短期的課題²⁰

風力発電の普及に伴い、電力系統への連系が問題となってきた（Fox et al., 2007 など）。系統連系問題の性質及び規模は電力系統特有のものであり、風力発電の導入率の程度により変化する。さらに、第 8 章で取り上げるように、系統連系問題は風力発電に特有のものではない。電力系統にあらゆる方式の発電技術、特に設置場所が制約された変動電源をどのように追加するかは課題なのである。しかしながら、主に一部の OECD 諸国（現在までに、風力発電の普及の多くはこの地域で行われている。7.4.2 節を参照）での解析や運用実績の結果、風力発電導

¹⁸ 非技術特有政策の問題は、本報告書の第 11 章にて取り上げる。

¹⁹ 再生可能エネルギーに関する障壁及び市場の失敗についての詳しい説明は、それぞれ 1.4 節及び 11.1 節を参照のこと。

²⁰ 現在及び将来のエネルギーシステムにおける再生可能エネルギー源に関する非技術特有政策の問題は、本報告書の第 8 章にて取り上げる。

入率が低～中程度の場合（ここでの定義では電力の平均総需要の 20%まで）²¹、風力発電の連系に概して克服不可能な技術上の障壁はなく、経済的にも維持できることが分かっている。また、技術改善、変更された運用と企画の実践、及び新たな研究とともに風力発電の運用実績が増えることにより、さらに多くの風力発電の系統連系が促進されることが望ましい。しかし、導入率が低～中程度であっても一定の（時には電力系統特有の）技術的・制度上の課題も解決する必要がある。

この節で取り上げる連系問題は、風力発電の変動性及び不確実性の取り組み方法、遠隔地に設置した風力発電所による大規模電力需要地のニーズを満たすため、新たに送電容量が必要となる可能性、及び電力系統と風力発電所を接続するための技術標準の確立を含む。風力発電導入率が低程度から中程度（最大 20%）の場合において直面するこれらの問題に焦点を当てている。導入率が高い場合でも、柔軟性の向上と需給バランスの維持は、技術的・制度上の追加的な選択肢を利用できるかに依存し、あるいはそれによって有利になる場合もある。すなわち、その他の発電所（化石燃料その他）の柔軟性のさらなる向上、大量市場の需要反応。電気自動車の大規模な普及とバッテリー充電制御を通してのシステムの柔軟性に対する関連する貢献、風力発電出力抑制や出力制御のさらなる利用または過剰な風力エネルギーの燃料生産や地域暖房への転用、大量のエネルギーを蓄積する技術、電力系統間の相互接続におけるさらなる発展、などが挙げられる。多様な再生可能エネルギー技術の普及により、全体的な電力系統統合の促進を支援することもできる。これらの選択肢の多くは、風力だけではなく他のエネルギー部門での幅広い発展に関連する。ただし、これらの選択しについては第 8 章で取り上げる。

本節では、系統連系上の課題を示す風力発電の特定の特性を取り上げることから始める（7.5.1 節）。次に、これらの特性が、風力発電に適合した電力系統の計画上の問題に与える影響（7.5.2 節）、運用上の問題に与える影響（7.5.3 節）について取り上げる。これらは、実際の運用実績についての選択的議論を含む。最後に、7.5.4 節にて、技術的問題の定量化及び拡大する風力エネルギーをまとめた経済的コストの多様な研究結果についてまとめる。

7.5.1 風力発電の特性

風力発電の重要な特性には、他の多くの電源の特性とは異なるものがある。電力系統の信頼度を保った経済的な運用のために電力系統の計画・運用の視点から検討しなければならない性質がある。

最初に検討すべき特性は、風資源の質及びそれに伴う風力エネルギーのコストが土地に左右されるということである。結果として、最も良好な風資源が得られる地域は、電力需要の高い人口密集地付近には位置していない場合がある（Hoppock and Patiño-Echeverri, 2010; Liu and Kokko, 2010 など）。そのため、大規模需要地の近くに位置し新たな送電線への出費の必要が少ない低い風資源の利用とは反対に、新たな送電インフラにより良好な風資源地域から大規模電力需要地へと風力エネルギーを移動させることは、経済的に理にかなっていない（また、多くの場合、それが必要となる）（7.5.2.3 節及び 7.5.4.3 節を参照）。

2 つ目の重要な特性は、風力発電が天気依存するため変動性を持つということである。つまり、風力発電所の出力は、支配的な気候条件に左右され、ゼロからその定格容量の範囲で変動する。変化は、一時間未満の短時間での変動から、一日毎、季節毎、さらに年間での変動に至るまでの、さまざまなタイムスケールにて発生する（Van der Hoven, 1957, Justus et al., 1979, Wan and Bucaneg, 2002, Apt, 2007, Rahimzadeh et al., 2011 など）。これらの変動及びパターンの特徴はサイトび地域に関するの特異性が高い。図 7.13 は、ドイツにおける連続 10 日間にわたり、個々の風車、風力発電所の小規模なグループ、及び風力発電所の大規模なグループの定格出力を示して、この変動の一部の要素を図示している。電力系統の運用に対する風力発電変動の重要な要素は、比較的短時間のその時々における、風力発電出力の変化率である。図 7.13 は、複数の風力発電所を集合化した出力総計が劇的に変化するのは短時間（分）よりも比較的長時間（数時間）であることを示している。一方、電力部門の計画の目標に対する風力発電の変動性の重要な要素は、電力系統の信頼度に対するリスクが最大となる時間（一般的には電力需要の高い時間）と風力発電の出力の相関関係である。この場合、風力発電の出力の日毎、季節毎と年間のパターン（及び電力需要とこれらのパターンとの相関関係）は、7.5.3.4 節にて詳しく説明するように、系統計画者が風力発電所に割り振る容量クレジットに影響を与えることがある。

²¹ この導入率は、比較的短期的な風力発電の系統連系の必要性を、電力系統の変化についての国際的、長期的、及び非風力に特化した議論（第 8 章で提示）から緩やかに分離するために選択された。また、風力エネルギーの統合についての運用経験及び文献の多くは、20%を下回る普及率について取り組んでいる。

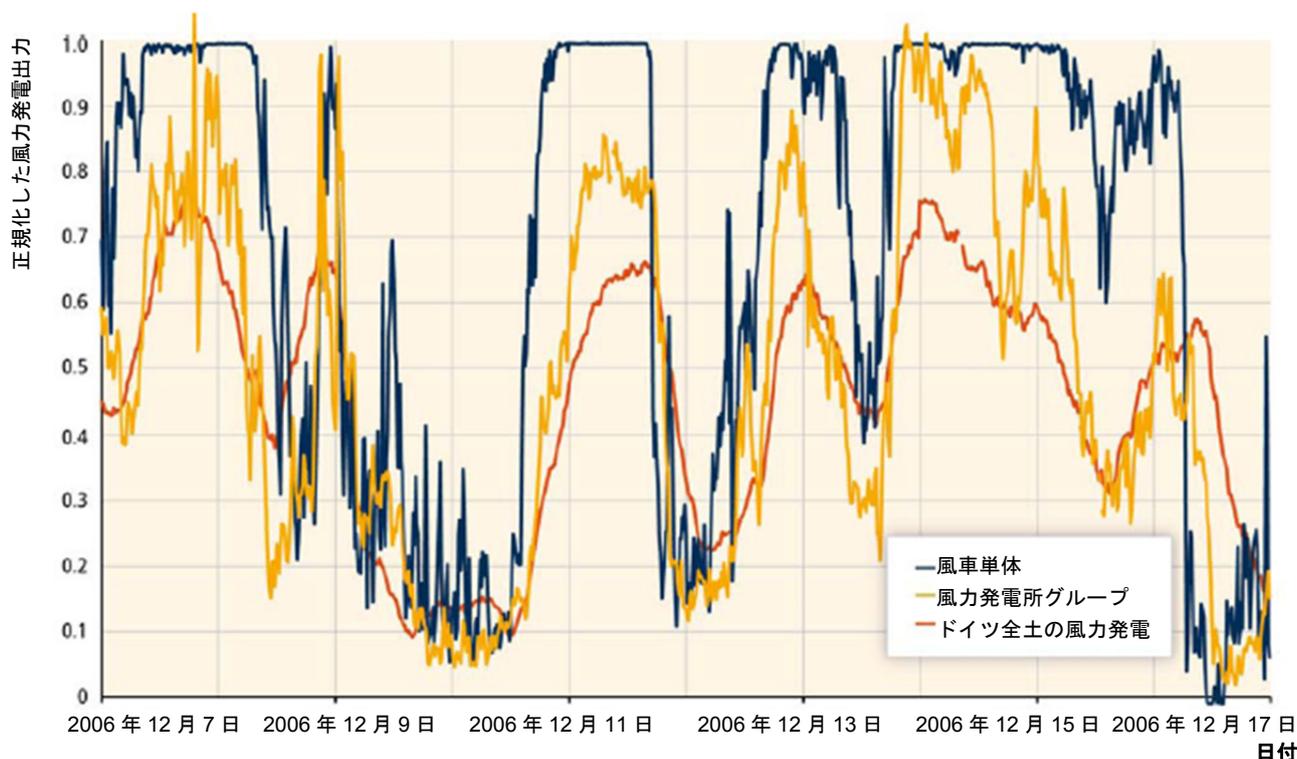


図 7.13: 2006 年の 10 日間における、時系列の、ドイツにおける風車単体、風力発電所グループ及びドイツ全土の全風力発電所の出力に対する定格出力の例 (Durstewitz et al., 2008)

3 つ目は、その他の多くの発電方式と比較すると、風力発電の出力は予測可能性が低いということである。風力発電の出力予測はさまざまな方法を用い、さまざまな結果が得られるが、ここ数年で予測精度は大幅に向上している (Costa et al., 2008 など)。精度は向上したが、予測にはまだ不完全さが残されている。特に、より長時間のタイムスケールの予測 (数時間から数日) は短時間のものよりも精度が劣っている (H. Madsen et al., 2005 など)。電力系統の特性によるが、予測がその系統の能力や風力発電の変動性及び不確実性を管理する関連取引市場に対し影響を与える可能性がある (Usaola, 2009; Weber, 2010)。

風力発電の集合化された変動性及び不確実性は、ある程度、地理的に分散した様々な風力発電所の出力の相関の程度に左右される。同様に、風力発電所同士の出力の相関は、発電所の地理的分布、及び地域の気象パターン、特に風速に左右される。一般に、距離的に遠い風力発電所の出力ほど相関は低く、短時間 (分単位) の変動性も長時間 (数時間) に比べ相関は低くなる。 (Wan et al., 2003, Sinden, 2007, Holttinen et al., 2009, Katzenstein et al., 2010 など)。このように相関性が完全でないことによって、図 7.13 に図示するように、複数の風車及び風力発電所の出力が組み合わせられた場合、結果として地形的多様性に関連する平滑効果となる。地域全体の風力発電所グループに見られる合計定格値の変動は風車単体の定格出力よりも小さい。総出力の明らかな平滑効果は、各風力発電所同士の距離が延びるほどその発電所間に見られる出力の相関が低下することによるものである。一方、複数の風車及び発電所で完全相関が見られる場合、総変動性は風車単体の定格変動性と同等である。風力発電所間の送電能力が大きい場合、観測される地理的平滑効果は、電力系統が適応しなければならない風力発電の総出力の変動性に対し影響を与える。また、検討される風力発電所の数及び多様性により精度が向上するため、予測精度にも影響を与える (Focken et al., 2002 など)。

7.5.2 風力発電を有する電力系統の計画

将来の電力系統の信頼度を保った経済的な運用を行うために、新しい送電インフラのための詳細な系統計画が行われている。特に、電力系統の設計者²²は、さまざまな運用条件のもとで、需要地に電力を送る送電システムの適性、及び需給バランスを維持する発電の適性を評価する必要がある。完全なリストではないが、風力エネルギーの信頼度向上を検討する際に、以下の 4 つの技術的な設計問題が特に重要となる。風車及び風力発電所の適切な電力系統モデルの必要性、風力発電所と電力系統を接続するための技術標準 (グリッドコード) の確立、風力発電を伴う電力系統の広範囲にわたる送電インフラの必要性、及び風力発電導入率の上昇を伴う全体の発電適性の維持、で

²² ここでは、電力系統の設計者 (または電力系統を立案する組織) を、電力系統を制御、一部の運用またはそのインフラを整備するすべての組織に属する設計者を意味する一般的用語として使用している。

ある。

7.5.2.1 電力システムモデル

コンピュータによるシミュレーション・モデルは、電力システムの新たな発電と需要の変動及び運用方法の変更に対する適応能力を評価するのに広く利用される。電力システムモデルの重要な役割は、深刻な事象または不測の事態から復旧する電力システムの能力を実証することである。典型的な同期発電機の汎用モデルは数十年にわたり開発及び検証されており、システム事象と不測の事態において電力システム、及びその全構成物がどのように挙動するかを研究するために、業界標準のソフトウェアツール（電力システムのシミュレータ及び解析モデルなど）として利用されている。風車及び風力発電所の同様の汎用モデルは、開発及び検証段階にある。風車は典型的な同期発電機とは異なる電気特性を持つため、このモデリングを構築するためには多大な努力が必要となる。結果的に、著しく進歩しているもののこの進歩は完全ではない。風力発電の導入率増大のためには、システム設計者が風力発電に適合する電力システムの性能をより評価できるよう、モデルの改良及び検証が必要である (Coughlan et al., 2007; NERC, 2009) 。

7.5.2.2 風力発電の電気特性とグリッドコード

風力の発電の設備容量の増加に伴い、風力発電所が電力システムの運用性や電力品質の維持に（受動的に依存するのではなく）能動的に関わる必要性が出てきている。ここで主に系統連系の技術的の局面に焦点を当てると、電力システムとの相互作用としての風車の電気性能は、風車特性の国際標準に従って検証されることが多い。国際標準では、電力品質に対する1基以上の風車の影響を評価する方法が明記されている (IEC, 2008)。また、風車や風力発電所（及びその他の発電所）が系統に接続される場合、通常運転時及び不測の事態時に発電所の装置や設備が電力システムに悪影響を及ぼすことがないようにしなければならないという技術標準（「グリッドコード」とも呼ばれる）を施行している系統運用者も増えてきている（第8章も参照）。これらの要件に対応するために、電力システムモデル及び運用実績が利用される。その結果、風車設計の改良や、コンバータなどの補助装置の追加が行われることもある。場合によっては、特定の発電方式に特有の特性がグリッドコードに盛り込まれることもあり、その場合は、風力発電に特化したグリッドコードとなる (Singh and Singh, 2009 など) 。

グリッドコードでは、多くの場合、フォルトライドスルー (FRT) 機能、すなわち電力システムの電圧が短時間ではあるが大きく変化する時でも接続を維持し運転を続ける風力発電所の能力が要求されている (Singh and Singh, 2009)。FRT 機能の要件は、風力発電の導入率の増加や個々の風力発電所の大規模化に対応している。小規模な個々の風力発電所が系統故障に対する保護のために停止または系統から解列した場合でも、電力システムは一般的に信頼度の高い運用を維持することができる。しかし、系統故障時に大量の風力発電が解列する場合、この解列は系統の故障状態をさらに悪化させる可能性がある。したがって、風力発電所が他の大型発電所と同様に最小限の FRT 標準を満たさなければならない、と規定する系統設計者は増えつつある。また、系統全体の対策も取られている。たとえばスペインでは、故障時の信頼度の潜在的な問題を避けるため、風力発電の出力抑制を行うことがある。しかし、この出力抑制を行う必要性は、新規及び既存の風力発電所に FRT 機能が追加されることによって低下していくものと予想されている (Rivier Abbad, 2010)。電圧管理に役立つ無効電力制御もまた、グリッドコードに要求されることが多く、これにより、脆弱な電力システムにおいて風車が特に電圧の安定度のマージンを改善できるようになっている (Vittal et al., 2010)。系統擾乱後の系統安定度を高める風車の慣性応答に対する要件は一般的ではないが、検討中である (Hydro-Quebec TransEnergie, 2006; Doherty et al., 2010)。有効電力制御（風力発電所の出力を急変させないような制約を含む）及び周波数制御も必要となる場合がある (Singh and Singh, 2009)。最後に、系統故障時の動的挙動に対して系統エリア内に発生する振動を有効に減衰させるために、風力発電所を制御することも可能である (Miao et al., 2009) 。

7.5.2.3 送電インフラ

前に記した通り、良好な風資源（陸上あるいは洋上のどちらにしても）は、大規模な電力需要地から離れた場所に位置していることが多い。そのため、風力発電の導入率が低程度から中程度の場合においても風資源が最も強い地域で大量の風力エネルギーが追加されるため、送電システムの大規模な新設または大幅な更新が必要となる可能性がある（第8章も参照）。送電アデカシー評価によって、送電線への投資額をそれほど多く必要としない質の低い風資源を利用する場合のコストと、送電システムの拡張が必要な質の高い風資源を利用する場合のコストのトレードオフについても、検討しなければならない。(Hoppock and Patiño-Echeverri, 2010 など)。また、新規送電容量の評価には、広域で集合化された風力発電所の相対的平滑化による便益、常に変動する風力発電の出力を管理するための送電容量、及び送電システムの拡張にあたって風力に特有ではないさまざまな得失を考慮する必要がある (Burke and O'Malley, 2010) 。

風力エネルギーの普及の進展に合わせた送電システム拡張のコスト及び便益とは関係なく、主要な課題の1つは、新たな風力発電設備を追加するのにかかる時間が短いことが多いのに対し、新規送電インフラを計画、立地、許可及び建設するには長い時間がかかる可能性があるということである。特定の地域の法規制の枠組みにもよるが、

送電システムの拡張にあたり、コスト配分及び立地を含む制度上の課題が大きくなる可能性がある。(Benjamin, 2007、Vajjhala and Fischbeck, 2007、Swider et al., 2008 など)。風力発電の導入率増加を可能にするためには、受動的な送電計画よりも積極的な送電計画に対する規制及び法的枠組みの作成が必要とされる (Schumacher et al., 2009)。世界の各地域において低程度から中程度の風力発電導入率を達成するのに必要となる新規送電システムのコスト推定については、7.5.4 節にまとめる。

7.5.2.4 発電アデカシー

方法も目的も地域ごとに異なるが、発電アデカシー評価は、一般に電力需要に確実に見合う電源容量を評価するのに使用されている。設計者は、電力システムが将来の予想される需要を満たす可能性を見積り、システムの負荷容量と呼ばれる統計的基準により測定される電力システムの長期にわたる信頼度を評価することが多い。それぞれの電源の公称容量の一部は、システム全体の利用可能性に対してに寄与しており、それは各電源の容量クレジットとして示される²³。容量クレジットにに対する厳格な一定の定義はないが、発電機の容量クレジットは一般にシステムに依存する特性であり、発電機の特性だけでなくその発電機が接続している電力システムの特性、具体的には電力需要の時間毎に変化するプロファイルによっても決まる特性である (Amelin, 2009)。

風力発電の長期的システム信頼度への寄与は標準的手法を用いて評価されている。一般に、風力発電所は公称容量の5~40%の容量クレジットを持つことが明らかとなっている (図 7.14 参照)。風力発電の出力と電力需要の相関は個々の風力発電所の容量クレジットの重要な決定要因である。多くの場合、風力発電の出力は、電力需要の多い時間帯とは相関性がないか弱い負の相関にあり、このため風力発電所の容量クレジットは減少する。しかし、これは必ず見られるわけではなく、例えば、イギリスでは風力発電出力と電力需要の多い時間との間には弱い正の相関が見られる (Sinden, 2007)。これらの相関は、日毎と季節毎及び年毎の風力発電出力と電力需要の両者の特性に左右され、個別の状況に特有のものである。風力発電の容量クレジットに関する2つ目の重要な特性は、風力発電の導入率が増えるに従って容量クレジットが減少するということである。なぜならば、発電機の容量クレジットは発電出力と電力供給不足リスクが上昇する時間との間に高い相関がある場合に上昇するためである。しかし、風力発電所の発電出力が互いに正の相関を持つと仮定すると、風力発電の導入率が増えるにつれリスクが最大となる時間は平均の風力発電出力が低い時間へとシフトすることとなる (Hasche et al., 2010)。より広域の風力発電所を集合化することにより、上記のとおり風力発電所同士の出力の相関を減少でき、風力発電の導入率が上昇するにつれ発生する容量クレジットの減少を抑制することが可能である。しかし、この方法で風力発電所の発電出力を集合化するには適切な送電能力が必要となる (Tradewind, 2009; EnerNex Corp, 2010)²⁴。

²³ たとえば、多くの信頼度のある設備を有する電力システムにおいて、信頼度がとても高い100MWの火力発電所を新たに追加した場合、システムの負荷容量は、通常は少なくとも90MWまで上昇し、火力発電所の容量クレジットの90%を超える結果となる。

²⁴ 電源アデカシー評価として、より多くの風力発電を受け入れるための適切な柔軟性及び運転予備力を供給できるシステムの能力も考慮されつつある (NERC, 2009)。風力発電が増えるにつれ必要となる運転予備力と柔軟性については、7.5.3 節で取り上げる。

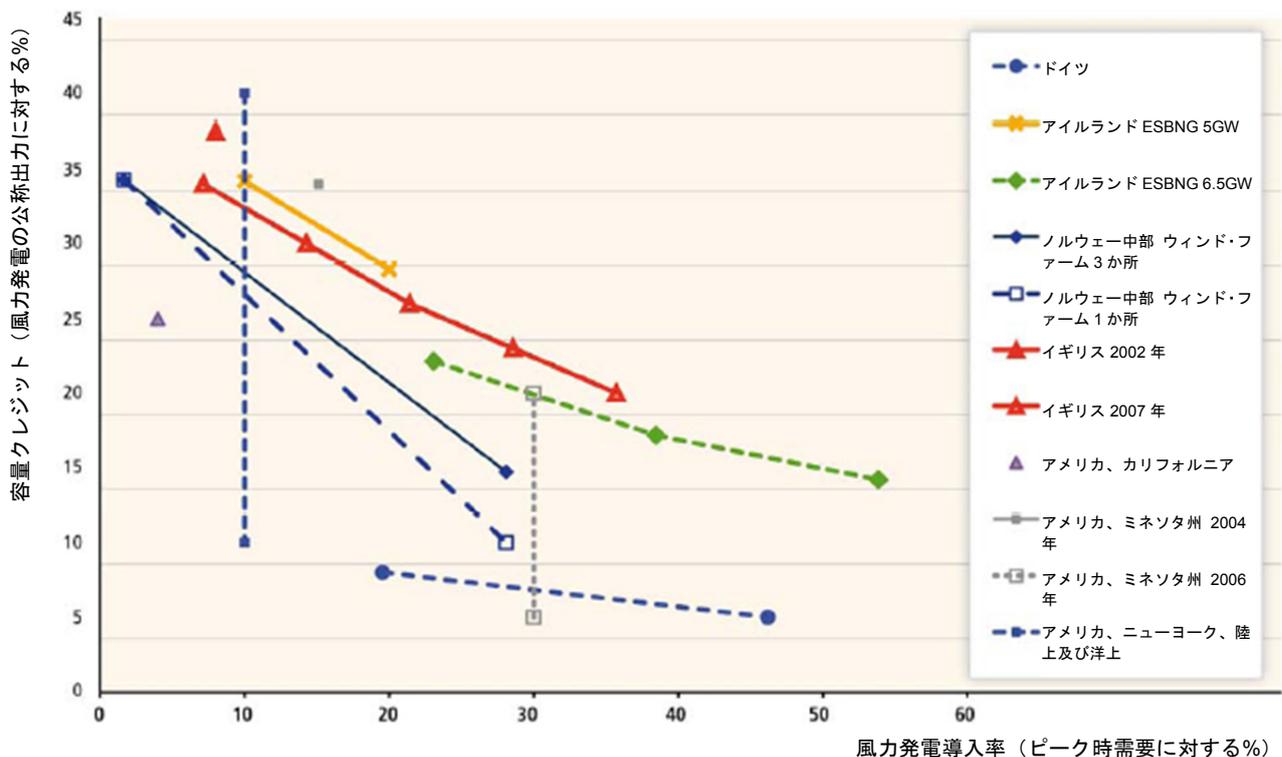


図 7.14: ヨーロッパ及びアメリカにおける複数の風力発電系統連系研究による風力発電所の容量クレジットの推定 (Holtinen et al., 2009)

風力発電所の平均容量クレジットが（たとえば、化石燃料に比べて）比較的低い場合、大量の風力発電が導入された電力系統は、そうでない電力系統に比べ同規模のピーク時電力需要に対応する総公称容量（風力及び非風力）が大きくなると考えられる。この発電容量の一部はあまり頻繁に発電されないが、大量の風力発電が導入された電力系統において、他の発電方式と併せた電源構成は（経済的な見地から）「ベース電源」からより柔軟性のある「ピーク電源」及び「ミドル電源」へとシフトする傾向となると予想される (e.g., Lamont, 2008; Milborrow, 2009; Boccard, 2010)。

7.5.3 風力発電を有する電力系統の運用

風力発電独特の性質と特に出力の変動性、及び不確実性もまた、電力系統の運用に対して重要な点を示唆している。これらの一般的な意味についてまとめ (7.5.3.1 節)、その後実際の電力への風力発電の系統連系についての 3 つの具体的なケーススタディについて詳細説明を行う (7.5.3.2 節)。

7.5.3.1 系統連系、柔軟性、及び変動性

風力発電は非常に低い限界運転コストで発電できるため、発電可能な時に需要に応じて発電される。その結果、限界コストがより高い発電システムに代わって利用される。この結果、系統運用者及び市場は主に、他の発電方式は風力発電の利用可能量を差し引いた需要（すなわち、正味の需要）に対応するようにディスパッチ（給電指令）する。

風力発電の導入量が増加するに従い、風力発電の変動性により正味の需要の変化量が全体的に増加し、正味の需要の最小値は低下する。例として、アイルランドの負荷持続曲線及び負荷変化率持続曲線を図 7.15 に示す²⁵。風力発電の導入率が比較的低い場合、正味需要の変化率は 15 分負荷変化率持続曲線に示されるとおり、全需要の変化率とほぼ同じである (図 7.15 (c))。一方、風力発電の導入率が比較的高い場合、正味需要の変化率が全需要の変化率を上回る (図 7.15 (d))。風力エネルギーの普及による正味需要の変化に対する同様の影響が、アメリカにおいても報告されている (Milligan and Kirby, 2008)。この図は、また、風力発電の導入率が高い場合には、年間を

²⁵ 図 7.15 は、風力発電を含む場合（正味需要）及び含まない場合（需要）のアイルランドの負荷持続曲線及び負荷変化率持続曲線を示している。負荷持続曲線は需要が縦軸の水準を超える事象の年間における割合を示している。たとえば、アイルランドでは、需要が 4000MW を超えることがあり、これは年間で約 1 割発生する。負荷変化率持続曲線は、負荷の変化が縦軸の水準を超える事象の年間における確率を示している。たとえば、アイルランドにおける 15 分負荷変化は、15 分あたり 100MW を超えることがあり、この年間発生率は 1 割に満たない。

通して、正味需要の量が全需要よりも低くなり、一部の時間帯では正味需要はほぼゼロまたはゼロを下回ることを示している (図 7.15 (b))。

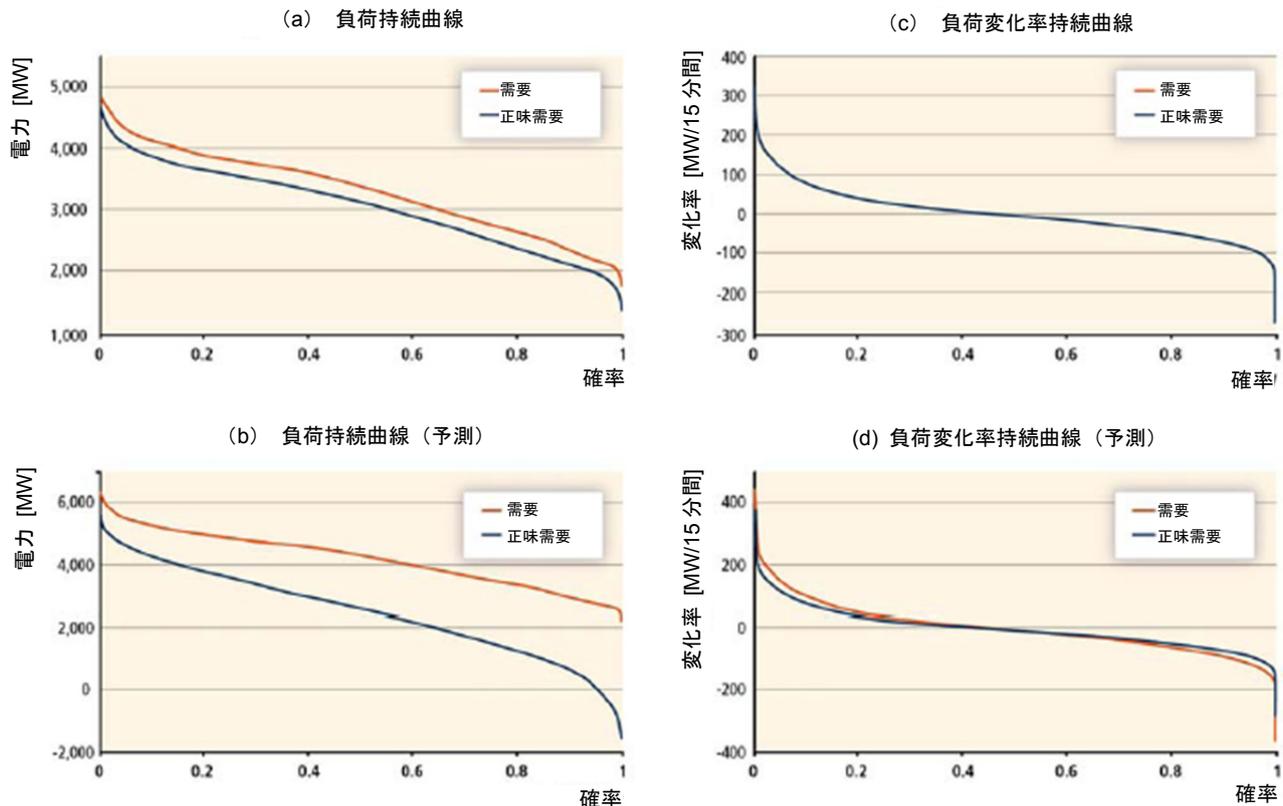


図 7.15: アイルランドにおける 2008 年の負荷持続曲線及び 15 分負荷変化率持続曲線。(a) 及び (c) 年間平均総需要電力量の 7.5% を風力が占める場合、(b) 及び (d) 風力発電の導入率が高い (年間平均総需要電力量の 40% を風力が占める) 場合²⁶。 原典: www.eirgrid.com

こうした傾向を加味すると、風力発電の出力が増加し (または前日市場の場合、増加すると予測され)、別の電力市場への連系線の送電容量に制限がある場合、価格が低下またはマイナスとなる頻度が増え、電力卸価格は低下する傾向にある (Jónsson et al., 2010; Morales et al., 2011 など)。電力システムに対し限界コストが低い電源が追加されるに従い、より限界コストが高い電源を風力発電が置き換えるため、風力発電の導入率の増加により、(他の電源との組み合わせに対する変化が起こる前の) 短期平均電力卸価格が低下する傾向にある。風力発電出力の変動性及び不確実性により、風力発電が常に限界コストの高い発電方式に置き換わわけではないため、価格の変動性も増加する傾向にある。しかし、運転が長期になると、投資コスト、運転保守コスト及び電力卸価格シグナルの関係が、連系線の拡張や発電所の閉鎖、建設される新たな発電方式についての意思決定に影響を与え始めるため、電力卸価格に対する風力発電の平均的な影響は明確にはならない (Morthorst, 2003; Forsund et al., 2008; Lamont, 2008; Sáenz de Miera et al., 2008; Sensfuß et al., 2008; Söder and Holttinen, 2008; MacCormack et al., 2010)。

これらの価格の影響は、風力エネルギーの導入率の増加が他の発電所に対し、風力発電が存在しない場合に比べ、より柔軟性のある方法で運用が求められるという事実を反映している。風力発電の導入率が低～中程度であれば、*分単位* の変動の増加幅は風力発電の正確な導入率と地理的平滑効果の程度、及び電力システムの規模に左右されるが、一般的に、その幅は比較的小さく、大規模な電力システムにおいても比較的安価で管理できると予想されている (J. Smith et al., 2007)。より重要な運用上の課題は変動性に関連しており、それに伴って *1~6 時間* のタイムスケールの風力発電出力の変動管理を柔軟に行う必要性が高まっていくことに関連するものである (Doherty and O'Malley, 2005; Holttinen et al., 2009)。さまざまなタイムスケールを考慮した最新の風力発電の出力予測を電力システムの運用に組み入れることで、他の発電方式に求める柔軟性が少なくなる。また予測技術をシステム運用へ組み入れることは、風力発電の導入率が増えるに従って、特に重要であることが明らかになってきている (Doherty et al., 2004; Tuohy et al., 2009; GE Energy, 2010 など)。しかし、質の高い予測技術や風力発電所の地理的な分散が実現できたとしても、需給バランスを維持するため、起動停止や部分負荷運転、出力変化を行うための火力発電所の追加は必要とされる (Göransson and Johnsson, 2009; Troy et al., 2010 など)。

²⁶ 負荷持続曲線及び負荷変化率持続曲線の予測は、2008 年のデータを相対的に増減させたものをベースにしている (負荷は 1.27 倍に増減させ、風力発電は平均 7 倍で増減させている)。変化率持続曲線は負荷及び正味需要の 15 分あたりの変化の累積確率分布を示している。

新たに追加される柔軟性は無料ではない。なぜならば、低効率の部分負荷状態で火力発電所が運転される時間が増加し、ボイラーおよび他の装置の損傷度が上昇し、維持コストがかさみ、発電所の寿命が短縮されるためである（その結果、火力発電所の発電コストの低減および排出量の削減が、予想された量より低い結果となる。この点に関しては、7.5.4 節と 7.6.1.3 節でそれぞれ説明する）（Denny and O'Malley, 2009）。系統運用者が他の発電事業者の運転柔軟性の恩恵を受けられるように、様々な種類の経済的インセンティブを利用することがある。たとえば、前日市場、日中市場、一時間前電力市場、及び予備力や需給調整、及びその他のアンシラリーサービスに対する市場を持つ電力系統も存在する。これらの市場は、風力発電出力が急激に変化したり風力発電の出力予測が充分でない場合に、出力を増減できる柔軟性に対する価格シグナルを送信が可能であり、したがって、風力発電の連系コストを削減することができる（J. Smith et al., 2007; Göransson and Johnsson, 2009）。スケジューリング時間の短い市場ほど変動性及び不確実性に対し応答性が高く、したがって風力発電の系統連系が促進されることも明らかになってきている。（Holtinen, 2005; Kirby and Milligan, 2008; Tradewind, 2009）。また、広域の系統運用の協調は、風力発電の系統連系に便益をもたらすことが知られている。このため、風力エネルギー供給量の増加によって、連系線に対する投資や連系線を介した電力取引の契機が増加する傾向となる可能性もある（Milligan and Kirby, 2008; Denny et al., 2010）。電力卸価格市場が存在しない場合、増加する風力発電を受け入れるのに十分な柔軟性を各発電所が有するよう、他の系統計画方法またはインセンティブが必要となる。

予想される風力発電の導入を受け入れるのに十分な柔軟性を新規の発電所が持つようにするため、系統計画やインセンティブの採用が必要となることもある。さらに、柔軟性のある火力発電所に加え、水力発電所や大容量のエネルギー貯蔵、電気自動車の大規模な導入と蓄電池充放電制御を通じた電力系統の柔軟性に関連した寄与と燃料生産や地域暖房に対する風力の余剰エネルギー転用、及び様々な形式のデマンドレスポンスなども、風力発電系統連系促進に利用されることがある。多様な再生可能エネルギー技術が普及することで、全体的な系統連系の促進支援も可能になる。電力系統のこれらの技術の一部（及び上で述べた運用および計画方法の一部も含む）の役割は、第 8 章で詳しく説明する。なぜならば、そのすべてが風力エネルギーに特有なものではなく、本章で検討する（最大 20%の導入率）よりも高い風力発電導入率に適用される可能性が高いものもあるためである。一方、風力発電所は、短時間の出力抑制により、若干の柔軟性を得ることができ、下方の需給調整を行うことができる。または極値的ケースの場合、出力抑制時間を長くすることで上方の需給調整を行うことも可能である。細心の風力発電所の制御では、出力抑制により出力変化速度の制限または部分的均等化を行うことも可能である（Fox et al., 2007）。風力発電の出力抑制は単純なものであり、多くの場合、柔軟性を容易に得ることができるが、燃料コストの高い他の発電所の出力抑制よりも前に運転コストの低い風力発電所を出力抑制させることは、膨大な機会コストを伴う場合がある。風力発電の出力抑制を大々的に利用する場合には、この機会コストと出力抑制によって得られる可能性のある便益（部分負荷効率による不利益や火力発電所の損傷が抑制できるか、送電線への投資が回避できるか、など）を比較することが望ましい。

7.5.3.2 風力発電を有する電力系統の運用実績

世界中の様々な場所での実際の運用経験から、風力発電の寄与が高い電力系統が信頼度を保った運用ができることが実証されている世界各地における実績より、風力発電の割合が増加しても電力系統の信頼度の高い運用ができることが実証されている（Söder et al., 2007）。上記のとおり、2010 年には 4 か国において、風力発電はすでに年間需要電力量の 10%からおよそ 20%に達している。風力発電の発電電力量が年間需要電力量のすでに 10%からおよそ 20%に達している。ここで報告する 3 例により、運用上の統合に関する問題と新規の風力発電に起因する変動性、及び不確実性の管理方法が実証されている。当然ながら、これらの影響及び管理方法は地形、電力系統の設計や規制構造の違いにより地域ごとに異なっている。また、運転と出力抑制、及び送電に関する風力発電の系統連系の新たな事例については、第 8 章で取り上げる。また、様々な地域及び電力系統において風力発電が普及するにつれ、電力系統に対する風力発電出力の影響に関する新たな知見が追加されていく。たとえば、今日まで、風力発電の瞬時導入率が高い時間帯において、重大な偶発事故（系統故障）はあまり経験していない。現在までの経験は、電力系統が風力発電により運用可能だと実証している。しかし、風力発電がある場合とない場合で、あるいは様々な管理対策によって、電力系統が同程度の全体的なセキュリティを維持しているかどうかを判断し、重大な偶発事故に耐える系統の能力を評価するには、さらに詳しい解析が必要である。限定的な解析（EirGrid and SONI, 2010; Eto et al., 2010 など）によると、特定の系統はそのような状況に耐えられるが、火力発電が風力発電に順次置き換えられ一次周波数制御予備力が減少する場合、適切な周波数応答の維持に別の管理対策が必要となる可能性があることが示唆されている。風力発電の瞬時導入率が高くなる電力系統のセキュリティーについての詳細は、第 8 章で説明する。

デンマークは風力発電の導入率が世界で最も高い国であり、その風力エネルギー供給量は年間総需要電力量の約 20%に相当する。2009 年末までに設置された風力発電の総設備容量は 3.4GW であり、デンマークにおけるピーク需要は 6.5GW であった。風力発電の多く（2.7GW）がデンマーク西部に位置しており、その結果、風力発電の出力が瞬間的にデンマーク西部の全需要を超えることもある（図 7.16 参照）。デンマークにおける事例は、柔軟性のある電源が市場へのアクセスを持つことと、近隣諸国と強固な連系線を持つことによる便益を実証している。デンマークの電力系統は信頼度に関する重大な問題もなくある程度運用されているが、理由の一つは、この国が 2 つ

の異なる電力系統に良好に連系されているからである。このことにより、風力発電出力予測と併せて、風力発電他の市場へ輸出することができ、デンマークの系統運用者は風力発電の変動管理をすることができる。ノルディック系統との連系は、特に、水力発電へのアクセスを可能にしており、連系線の1つが切断されると、デンマークの系統の需給調整はかなり困難になる。しかし、もしデンマークが風力発電の導入率を目覚ましく向上させるとしたら、柔軟性のさらなる向上が必要になると予想される (Ea Energianalyse, 2007)。

他の系統との強固な連系線を持つデンマークとは対照的に、アイルランド島では単一の同期系統を持つ。アイルランドの系統は規模はデンマークの系統と同等であるが、他の市場との連系線容量は、高圧直流送電線 1 回線 500MW に限定されている。2009 年末までの風力発電の設備容量は、アイルランドの年間需要電力量のおよそ 11% を供給できるものである。また、アイルランドの系統運用者は、その風力発電の導入率をうまく管理している。アイルランドにおける日々の電力需要の大きな変動は、アイルランドの系統が単独であるという性質と相まって、電力系統が、特に風力発電の系統連系によく適合し、相対的に柔軟性を持つという結果をもたらしている。柔軟性の高い天然ガス発電所は、2010 年上半期の発電電力量の 65% を発電している。連系線容量が大幅に不足しているにも関わらず、結果としてアイルランドの系統は、40% を超える風力発電の瞬間導入率で運用が可能となっている (図 7.16 参照)。それにもかかわらず、風力発電の導入率が増えるにつれ、新たな課題も浮上することがわかっている。特に懸念しなければならない項目は以下の通りである。風車の慣性応答がないために風車制御ができなくなる可能性 (これは系統に重大な偶発事故が発生した際の周波数変位の上昇を導く可能性がある) (Lalor et al., 2005)、需給バランスを維持するために必要となるさらに高い柔軟性、新規の高圧送電線の建設の必要性 (AIGS, 2008)、などである。また、デンマークにおける実例と同様に、風力発電所の多くは配電系統に接続または接続予定であり、電圧制御問題に対する注意が必要となる (Vittal et al., 2010)。図 7.16 に、アイルランド及びデンマーク西部における風力発電の高い瞬間導入率を示す。

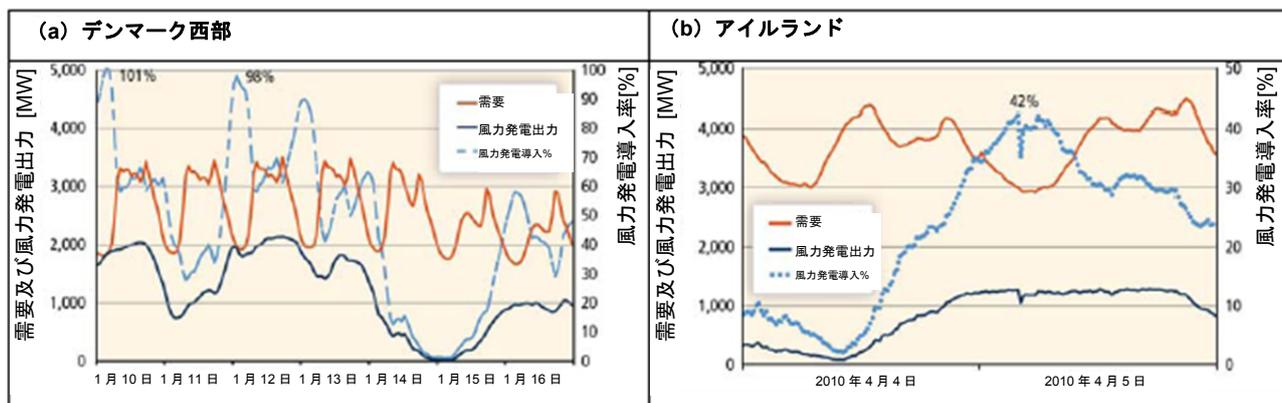


図 7.16: (a) 2005 年 1 月の一週間におけるデンマーク西部の、及び (b) 2010 年 4 月の 2 日間におけるアイルランド島の風力エネルギー、電力需要及び瞬間導入率。出典: (a) www.energinet.dk、(b) www.eirgrid.com 及び System Operator for Northern Ireland

テキサス電力信頼度評議会 (ERCOT) は、63GW のピーク需要と 8.5GW の風力発電設備容量を持つ同期系統を運用している。この系統の風力発電の導入率は 2009 年末までの年間電力需要の 6% にあたる。テキサス電力信頼度評議会の経験は、系統運用に対し風力発電の出力予測を組み込むことの重要性、及び系統の不確実性を調整するための適切な予備計画を立てる必要性を実証している。2008 年 2 月 26 日、すべてが風力発電に関する要因ではないが、いくつかの要因が組み合わせられ、その結果、テキサス電力信頼度評議会は緊急出力抑制計画を実施した。この計画は、テキサス電力信頼度評議会の「電源のように動作する負荷」プログラムに任意で組み込まれる 1,200MW の需要の抑制を含んでいる。この事象に関する要因としては、風力発電のスケジューリング誤差と正確でない電力需要の前日予測、及び火力の予定外の供給停止があった。風力発電の役割に関し、テキサス電力信頼度評議会はその日、3 時間にわたって 1,500MW の風力発電の出力抑制を経験した。これは、2008 年 2 月にすでに設置された風力発電設備容量 5GW の約 30% にあたる (Ela and Kirby, 2008; ERCOT, 2008)。この事象は、運用時間の 1 時間前にテキサス電気信頼性評議会に対して電源スケジュールの更新を報告するスケジューリング運用団体が、実際の風力発電の出力よりも多く出力予測報告し続けていたという事実により悪化した。最新の予測は利用可能であり、その予測ははるかに正確に風力発電の出力を予測していたが、テキサス電力信頼度評議会の系統運用にはまだ組み込まれていなかった。この経験に基づき、テキサス電力信頼度評議会は高度な風力発電予測システムを風力発電の運用に組み込む計画を加速させた。

7.5.4 系統連系研究の結果

実際の運用経験に加え、風力発電に必要な送電線および電源の拡充について幅広い方法論と多様な目的のもとに行われた多くの質の高い研究が遂行されており、このほとんどが主に OECD 諸国を対象としている。以下にまとめた

詳細のとおり、これらの研究は様々な方法論を採用しており目的も異なっているが、一般には、増加する風力エネルギーの導入率をまとめ、風力発電による系統運用のコスト及び便益を定量化するため、電力系統の能力を評価しようとするものである。これらの研究で多数検討される課題とコストを本節で確認する。その課題とコストは以下のとおりである。正味需要における風力発電に起因する変動性及び不確実性へ対応するために必要な、運転予備力、調整コストの増加と十分な発電アデカシーを維持する要件、及び新たに必要と考えられる送電インフラ、などである。また、この研究は、化石燃料の消費や二酸化炭素排出の回避などの風力発電を追加することによって発生する便益についても多数分析している。しかし、本節ではこれらの便益についての文献調査は行わない。本節では、全体としてこれらの研究の一般的な結果に注目していく。ここで検討する以上に風力発電導入率が高いものについて調査した個々の研究結果の簡単な説明については、第8章を参照のこと。

7.5.4.1 方法論についての課題

徐々に増加する風力発電の系統連系の影響及びコストの評価は、電力系統及び研究データの条件の複雑性により困難なものとなっている。これらの研究の進行において、最も重要な課題の一つに、将来の風力発電導入率の選択、及び解析結果から最悪の条件や風力と電力需要との相関を適切に導き出すのに十分な時間についての風力発電出力データを、高い時間分解能にて模擬することにある。これらのデータは、その後、系統の計画や運用を模倣するための電力系統の解析に用いられる。この解析により、風力発電の系統連系の影響、コスト、及び便益の定量化を図ることができる。

すべての系統連系の影響を対処するには、様々なタイムスケールにて行われるいくつかの異なる解析モデルが必要となるため、個々の研究の多くは、内在的な問題の一部に焦点を当てている。風力発電系統連系研究の結果は、電力系統の設計及び規制環境における、元々存在する差異に左右される。特に重要な違いには、電源構成及びその電源の柔軟性、需要変動及び送電系統の堅牢さと面的広さなどがある。また、研究結果は様々で、標準方法や定義が定まっていないため比較が困難である。しかし、多くの高レベルな研究の設計原則の合意形成において、大きな進展が見られる (Holttinen et al., 2009)。第一世代の系統連系研究は、例を挙げると、風力発電の変動性及び不確実性を十分に反映して設計されていないモデルを用いたため、大規模系統のほんの一部しか処理していない研究になってしまっている。一方、最近のより多くの研究では、前日のタイムスケールから送電の数時間前までの風力発電出力の不確実性を組み込めるモデルを使用している (Meibom et al., 2009; Tuohy et al., 2009 など)。系統連系研究はまた、(単なる個々の範囲や小規模な調整エリアではなく) 同期系統全体にわたって、風力発電の高導入率シナリオを次第に模擬するようになってきている (Tradewind, 2009; EnerNex Corp, 2010; GE Energy, 2010 など)。最終的に、ごく最近になって、風力発電の導入率が高い系統の偶発事故が発生した場合の、電力系統の一次周波数制御を維持する能力をさらに調査する研究が開始されている (EirGrid and SONI, 2010; Eto et al., 2010 など)。

以下に詳細を述べるが、これらの研究を実施及び比較する場合の課題に関係なく、ほとんどのケースで風力発電を最大20%まで系統連系するコストはあまり大きくないが無視できる程ではない、ということを実証している。特に、風力発電の導入率が低～中程度の場合(再び、主に OECD 諸国の一部の国では)、電力系統の変動性及び不確実性を管理し発電アデカシーを確実にするための追加コスト及び風力発電の導入による新規送電線の追加コストは、系統により異なるが一般に 0.7~3 米セント/kWh (2005 年のレート。以下同じ) になると示唆している。²⁷ 系統連系に関する技術上の課題とコストは、風力発電の導入率に伴い増加することが明らかとなっている。また、導入率が低い場合でも、連系問題は積極的に取り組まなければならない。

7.5.4.2 風力発電による需給調整コストの増加

風力発電の増加により発生する正味需要における新たな変動性及び不確実性は、需給調整コストを増加させる結果をもたらしている。それは主に、系統運用者が用いる短時間予備力の増加に起因する。ヨーロッパ及びアメリカで行われた膨大な大規模系統連系研究では、系統に導入された風力発電の導入率が20%までであれば(さらに、事例数は限られるが20%を超える場合でも) 技術的に実現可能であるが、問題がないわけではない (R. Gross et al., 2007; J. Smith et al., 2007; Holttinen et al., 2009; Milligan et al., 2009)。Holttinen et al. (2009) によりまとめられた8研究において推定された必要とされる短時間予備力の増加は、風力発電の導入率が10%の場合、風力発電設備容量に対して1~15%であり、導入率が20%の場合で4~18%である。高水準の予備力が必要と予測するこれらの研究では、一般に風力発電出力の前日不確実性や数時間前における変動性は、短時間予備力によって処理されると仮定してい

²⁷ コスト幅は、3種類のコスト構成要素(調整コスト、発電アデカシーコスト及び送電コスト)のすべてが、その3つのコストそれぞれについて文献内で報告されている幅の下限に同時に存在する、または逆に3種類のコスト構成要素のすべてが同時にその幅の上限に存在する電力系統が存在するという仮定に基づいている。以下に報告する通り、風力発電の変動性及び不確実性の管理のためのコスト幅(0.14~0.56US セント(2005年)/kWh)、発電アデカシーの確保コスト幅(0.58~0.96US セント/kWh(2005年))及び新たな送電線追加のコスト幅(0~1.5US セント(2005年)/kWh)は、合計で約0.7~3US セント/kWh(2005年)となる。同様の方法をいくらか用いて、IEA(2010b)は、この範囲内にも広く分布する評価を展開している。

る。対照的に、風力発電に最適化された市場は、一般に需給バランスを調整する新たな機会を持ち、より高額な短時間予備力への依存度を下げるよう設計されることになる (Weber, 2010 など)。結果及び手法が異なるにもかかわらず、Holtttinen et al. (2009) により見直された研究では、一般に、風力発電の導入率が最大 20% ならば、約 0.0014 ~ 0.0056 US ドル/kWh²⁸ の風力発電の増加する需給調整コストに対応できることがわかっている (図 7.17)。最新の風力発電出力予測は、多くの場合、市場運営に対する風力発電の影響を最小限に抑える主要要因となることがわかっている。増加する需給調整コストの算出の定義及び方法が異なり、また、明らかになっている問題のいくつかはこれらのコストを引き続き評価しているが、同様の結果が R. Gross et al. (2007), J. Smith et al. (2007), 及び Milligan et al. (2009) により報告されている。

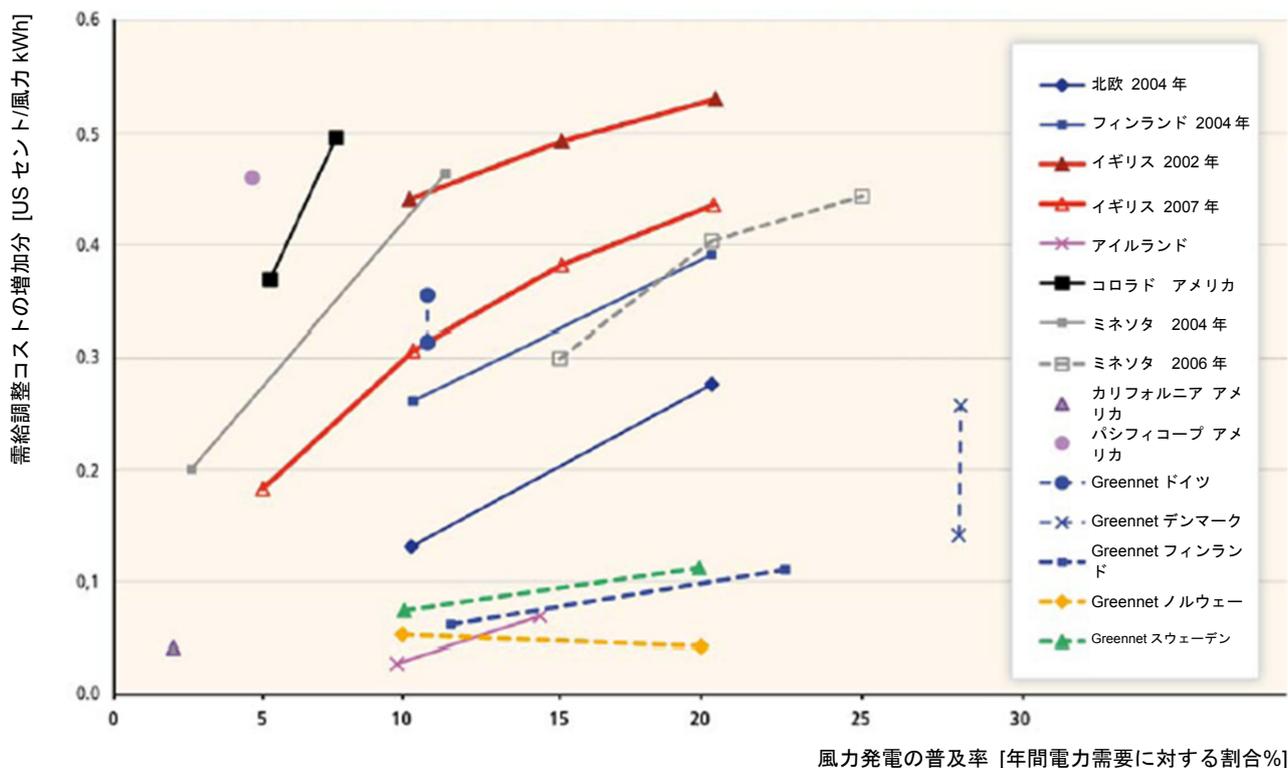


図 7.17: ヨーロッパ及びアメリカでの風力発電系統連系研究における風力発電に起因する需給調整コストの増加分の推定 (Holtttinen et al., 2009)²⁹

7.5.4.3 風力発電による発電アデカシー関連コスト

電力系統に風力発電所を追加する便益は、多くの場合、ベースロード発電すなわち最大限利用される発電所の便益と比較される。この発電所は、年間計算でのエネルギー同等量を発電する (コンパレータ発電所)。コンパレータ発電所は一般的に、その公称容量の約 100%にあたる高い容量クレジットを持つとされている。一方、風力発電はその公称容量の 5~40%の容量クレジットを持つことが 7.5.2.4 節で示されている。そのため、発電アデカシーに対する風力発電の結果としての寄与は、多くの場合、電力量が等価なコンパレータ発電所の発電電力量単位当たりの寄与率よりも低い。また、風力発電は一般に発電アデカシーの目標を満たすという観点から、コンパレータ発電所よりも有用性が低い。この枠組みを用い、R. Gross et al. (2007) は、風力発電所と電力量が等価なベースロード発電所の発電アデカシーに対する寄与の違いにより、風力発電の導入率が 20%までの場合において、コンパレータ発電所と比較して風力発電の発電アデカシーコストが 0.58~0.96 US セント (2005 年) /kWh になると推定している。Boccard (2010) は別の何らかの方法を用いて、ヨーロッパの数か国において同程度の風力発電の発電アデカシーコストの推定値を算出している。上述のとおり、発電アデカシー、電力需要に対する風力発電出力の相関、風力発電所のサイトの地理的分布、及び風力発電の導入率の評価に用いられる方法は、すべて、風力発電で推定される容量クレジット及び、その結果としての発電アデカシーの関連するコストに影響を与える。

²⁸ 研究ごとに様々な範囲の仮定がなされているため、2005 年 US ドルへの換算は不可能である。

²⁹ 研究ごとに様々な範囲の仮定がなされているため、2005 年 US ドルへの換算は不可能である。

7.5.4.4 風力発電の送電コスト

最後に、風資源の豊富な地域と需要地との間の大規模な送電インフラの整備や設置の必要性和コストに関する多くの評価では、コストは同様に低い、が、わずかではないことが明らかになっている³⁰。

たとえば、アメリカにおける導入率が 20%に達した場合の風力発電の送電コストは、風力発電所の投資コストに約 150~290US ドル (2005 年) /kW が上乘せされると評価されている (US DOE, 2008)。この送電線拡張のコストは、送電線拡張を行わずに済む低質の風資源を利用する場合のコストと比較すると、送電線が建設されると仮定した場合の良好な風資源を利用するコストが妥当であることがわかっている。アメリカにおける風力発電の普及を適切に進めるために必要な送電線の詳細な評価では、推定されるコストは非常に低いものから、400US ドル (2005 年) /kW まで (あるいはそれ以上のケースもある) の広範囲になることがわかっている (JCSP, 2009; Mills et al., 2009a; EnerNex Corp, 2010)。風力発電が増加することを見越した大規模送電網も、ヨーロッパ (Czisch and Giebel, 2000) 及び中国 (Lew et al., 1998) で検討されている。ヨーロッパの各国特有の送電線評価より、新たな大規模送電網のコストの評価が変化するという結果が出ている。Auer et al. (2004) と EWEA (2005) は、多数のヨーロッパの研究における送電コストが、アメリカで判明しているコストよりも幾分過少評価を受けていることを確認している。Holtinen et al. (2009) は、いくつかのヨーロッパの国々におけるケース・スタディの風力発電の送電コストを確認し、コストが 0US ドル (2005 年) /kW から 310US ドル (2005 年) /kW 程度の範囲になることを明らかにしている。

風力発電のための送電線の拡張は、送電線の拡張をしない風力発電の普及と同レベルで発生する送電混雑によるコストを削減できることにより、妥当性を持つことができる。ヨーロッパ全体の研究では、たとえば、いくつか特定の国際送電線及び良質な洋上風資源の地域間を結ぶ送電網を用いることにより、送電混雑を緩和し風力発電の系統連系を容易にすることができることを明らかにしている (Tradewind, 2009)。同様に、アメリカを拠点として行われた高い導入率における風力発電の系統連系研究の 2 つの事例において、送電線拡張に伴う混雑回避のコストに対して送電線への投資が妥当であることが明らかとなっている (Milligan et al., 2009)。同時に、風力発電の導入にあたって、送電線の拡張に完全にコストを割当てることは必ずしも適切ではない。ある事例では、新たな送電線が電力の信頼度の向上と従来から存在する混雑の低減、及び市場支配力の緩和を含む、より大きな便益を持つことができるため、これらの送電線拡張コストは風力発電以外の理由でも妥当となる可能性がある (Budhraj et al., 2009)。また、風力発電は新規の送電線に対する投資の潜在的な必要性という点で、唯一のものではない。他の発電方式も新たな送電網が必要であり、上記にまとめたそのコストは、増加コストのすべてを正確に表しているものではない。

これらの重要な留意点があるにもかかわらず、送電線の拡張コストは、利用可能な文献から得られる範囲の上限值 (400US ドル (2005 年) /kW) で約 1.5US セント (2005 年) /kWh が風力発電の均等化原価に追加されている。下限としては、風力発電を支援するために新規の送電コストを特別に配分する必要は事実上ないと考えられる。

7.6 環境及び社会的影響³¹

風力発電は、化石燃料ベースの発電に取って替わることにより、温室効果ガス排出と共にその他の大気汚染物質の排出を削減する (また、すでに削減しつつある) 大きな可能性を持つ。技術的に商用化の準備段階にあること (7.3 節) やそのコスト (7.8 節) のため、風力発電はたちどころに大規模な普及が進む可能性がある (7.9 節)。しかし、その他の産業活動と同様に、風力エネルギーは、環境及び人間の活動と幸福にも若干の悪影響を与える可能性があり、地域行政や政府の多くが、こうした影響を低減するために計画立案、許認可、立地要件を定めてきた。特に風力発電が大規模に拡張される場合は、風力発電の長所と短所に対して確実にバランスのとれた見解を持つために、これらの潜在的な懸念事項を考慮する必要がある。

この節では、風力発電による最も関連性のある環境上の正味の便益についての入手可能な最良の情報を要約している (7.6.1 節)。一方で、生態学的影響 (7.6.2 節) 人間の活動や福祉への影響 (7.6.3 節)、一般市民の態度や受容 (7.6.4 節)、社会的及び環境的懸念を最小限に抑えるためのプロセス (7.6.5 節) も取り上げている。

7.6.1 風力エネルギーによる環境上の正味の便益

風力エネルギーによる環境上の便益は、主として化石燃料ベースの発電から生じる排出量をなくすことによって生じる。しかし、風車の製造、輸送、設置、運用、撤去は、間接的な悪影響を若干引き起こし、風力発電出力の変動性も、化石燃料の火力発電所の運用及び排出量に影響を与える。正味の便益を推定するために、こうした影響は、風力エネルギーの総便益から差し引く必要がある。以下に示されるように、後者の影響は、風力エネルギーの正味の温室効果ガス削減の便益と比較すると少ない。

³⁰ これらのコストは、送電系統と個々の風力発電所を接続するコストとは異なるものである。接続コストは、多くの場合、風力発電所の投資コストの推定値を含んでいる (7.8 節を参照)。

³¹ 本報告書で取り上げられているすべての再生可能エネルギー源の社会的及び環境的影響の包括的評価は、第 9 章で参照可能である。

7.6.1.1 直接的影響

風力エネルギー（その他の再生可能エネルギーと同様）による主な環境上の便益は、化石燃料を基盤とした発電所からの発電に取って替わることによって生じる。風車の運転によって、温室効果ガスやその他の大気汚染物質が直接排出されないためである。同様に、その他の一部の電源とは違い、風力発電は、わずかな量の水しか必要とせず、廃棄物をほとんど生成せず、燃料の供給を得るために採鉱や掘削も必要としない（第9章参照）。

風力発電の環境上の便益を推定することは、電力系統の運用特性や、電力需要を経済的に満たすために新規発電所への投資について下される決断などにより、いくぶん複雑である（Deutsche Energie-Agentur, 2005; NRC, 2007; Pehnt et al., 2008）。短期的に見れば、風力発電が増加すれば、従来限界収益点上にあった既存の化石燃料ベースの発電所の運用に通常取って替わることになる。しかし長期的に見れば、新規の発電所が必要とされる場合もあり、風力発電の存在が建設される発電所の種類に影響を与える可能性がある。厳密に言えば、風力発電が増加すれば、経済的理由から、柔軟に対応できるピーク電源・ミドル電源（ベース電源と比べればあまり稼動していない）に有利に働く傾向がある（Kahn, 1979; Lamont, 2008）。これらの要因による影響は複雑で系統ごとに特有であるため、風力発電の便益もまた系統ごとに特有であり、正確に予測することは難しい。

それにもかかわらず、風力発電の直接的影響は、大気汚染物質や温室効果ガス排出量を削減することであるという事は明確である。風力発電が連系される電力系統の特徴や風力発電の発電電力量により、大気汚染物質及び温室効果ガス排出量の削減量は多くなる可能性がある。世界的には、すでに2009年末までに導入済みの約160GWの風力発電設備容量により、340TWh/年（1.2EJ/年）の発電が可能であり、0.2Gt CO₂/年（GWEC, 2010b）を超える削減ができるかと推定されてきた³²。

7.6.1.2 間接的なライフサイクルの影響

風力エネルギーによる若干の間接的な環境上の影響は、風車の製造、輸送、設置、運用、その後の撤去から生じる。ISO 14040 及び ISO 14044 規格（ISO, 2006）に基づくライフサイクル評価（LCA）手順は、これらの影響を分析するために使用されてきた。これらの研究には広範な環境上の影響領域が含まれる可能性があるが、風力エネルギーのライフサイクル評価研究は、多くの場合、風力発電の発電電力量単位の（他の発電方式と比べた完全な燃料サイクルを考慮した上での）ライフサイクル温室効果ガス排出量を決定するために使用されてきた。1980 年以降に公表されたライフサイクル評価の包括的検討の結果については、図 7.18 に要約されている。

³² この計算では、風力エネルギーは平均して、合理的に天然ガスと同じ排出係数を持つ化石発電を相殺し、風力発電発電所は平均して約24%の設備利用率を有することを想定している。

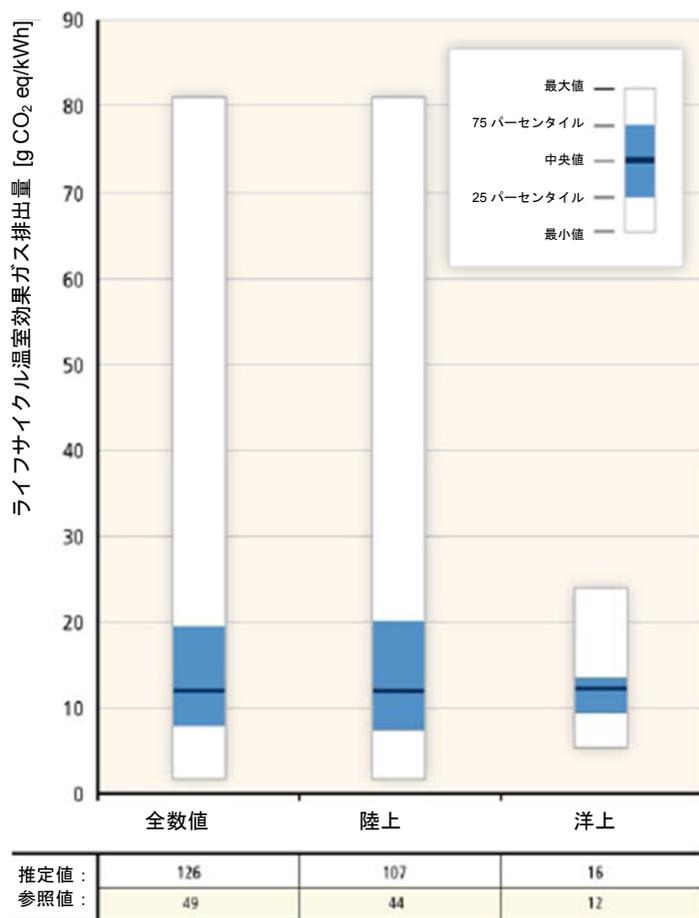


図 7.18: 風力エネルギー技術のライフサイクル温室効果ガス排出量（未調整の文献の数値、精度検査済み）。「洋上」は、浮体式洋上風車 1 基についての推定値を除き、比較的浅水域における設置を指す。表示された推定値に関する文献検索、文献引用についての詳細は Annex II.5.2 を参照。

図 7.18 では、ライフサイクル温室効果ガス排出量の大部分は、8~20g CO₂eq/kWh の範囲に集中し、一部の数値は 80g CO₂eq/kWh に到達していることを示している³³。研究によって、風力発電所の様々な段階のライフサイクルの有意性が認められた場合、製造段階の排出量が、全体の温室効果ガス排出量の大部分を占めていることは明らかである (Jungbluth et al., 2005 など)。推定値のばらつきは、研究を背景とした差異 (風資源、技術的成熟度など)、技術的性能 (設備利用率など)、及び手法 (ライフサイクル評価、システム境界など) が原因である³⁴。

ライフサイクル温室効果ガス排出量に加えて、これらの研究の多くは、風力発電所のエネルギー回収時間に関する報告もしている (つまり、風力発電所の建設、運用、撤去に必要とされるエネルギー総量と同等のエネルギーを生産するための発電所の運用総年数)。精度と適合度の検査をパスした 20 の研究から出された約 50 の推定値のうち、風力発電所のエネルギー回収時間の中央値は 5.4 か月であり、25~75 パーセントイルの数値は 3.4~8.5 か月の範囲であった (第 9 章も参照)。

その他のエネルギー技術と比較した、風力エネルギーのライフサイクル影響は、温室効果ガス排出量、エネルギー回収だけでなく、地域的大気汚染物質、水消費、土地利用、及びその他の影響領域なども含めて、第 9 章で取り上げられている。

7.6.1.3 間接的な変動性の影響

時に生じる別の懸念は、風力エネルギーの一時的な変動性及び限定的な予測可能性は、(風力発電を使用しない場

³³ 図 7.18 で示された分布は可能性評価を示すわけではないことに留意する。数値は単に、精度及び適合度の検査をパスした現在公表されている文献の推定値の分布を示している。文献の検索手法の詳細な説明については Annex II.5.2 を参照。

³⁴ 中心傾向及び変動性のより堅牢な推定値が実現されるように、これらの研究の手法及び仮定を調和させる取り組みが推奨される。一部の技術 (浮体式洋上風車など) に関する推定値の数を増加させるさらなるライフサイクル評価の研究もまた有益である。

合の必要な調整予備力と比較して) 系統運用者が信頼度を維持するために必要な短期的な調整予備力を増やすことによって、風力発電の温室効果ガス排出の便益を限定してしまうことである。短時間予備力は一般に、系統と同期している発電所から供給されるが、こうした予備力を供給する発電所は短期的な変動に対応する柔軟性を維持するために、部分負荷で運転するある場合がある。化石燃料ベースの発電所を部分負荷運転することは発電所の効率を低下させるため、全負荷の発電所と比較して、燃料効率及び温室効果ガス排出量ペナルティが発生する。風力発電の排出便益の分析は、常にこの効果を考慮しているわけではない。

R. Gross et al. (2007) は、変動電源のコストや影響の広範な文献の検討を行い、200 を超える報告書や記事を検討している。この検討には、必要な調整予備力の増加や化石燃料を動力源とした発電所の部分負荷による効率低下の主な原因となる、風力発電による燃料節約や温室効果ガス排出便益³⁵の多くの分析が含まれている。この問題に明確に対処する 4 つの研究における風力発電の出力変動性が原因の効率ペナルティは、風力発電導入率が 20%までの場合は、0%近くから 7%までの範囲となった (R. Gross et al., 2006)。Pehnt et al. (2008) は、風力発電の導入率が 12%の場合は、将来建設されるその他の様々な方式の発電所を反映した範囲で、3~8%の排出ペナルティがあることを計算した³⁶。要するに、低~中程度の風力発電導入率では、「総計で負荷追従による効率低減が数パーセントを超えることを示唆する入手可能な証拠は、これまでにない」 (Gross and Heptonstall, 2008) ³⁷。

7.6.1.4 正味の環境上の便益

風力発電の正及び負の環境影響と健康へ影響の正確なバランスは、系統ごとに特有であるが、一般的に、風力発電やその他の電源に対すして推定される外部コストの差により実証されることが可能である (第 10 章参照)。気候変動による損害、人間の健康に及ぼす影響、物質的な損害、農業損失を貨幣化した数値により、風力発電の大きな便益が示されている (Krewitt and Schlomann, 2006 など)。Krewitt 及び Schlomann (2006) も、その他の損害領域 (生態系に対する影響、大事故、安定供給、及び地政学的な影響) に関連する可能な影響の方向を定性的に評価し、再生可能エネルギー源の正味の便益は、貨幣化された結果にこれらの影響を含まないことにより過小評価される傾向にあることがわかっている。その他の発電に関連する環境的損害、及び風力発電に関連する便益は、幅広い外部文献 (EC, 2003; Owen, 2004; Sundqvist, 2004; NRC, 2010a など) において数多く要約されており、これは第 9 章及び第 10 章で重点的に取り上げる。

7.6.2 生態学的影響

それにもかかわらず、風力エネルギーを評価する場合に考慮される必要のある生態学的影響がある。陸上風力発電所に対する潜在的な生態学的影響の懸念として、衝突による鳥やコウモリの死亡確率についての個体群の結果やより間接的な生息地や生態系の変化が挙げられる。洋上風力発電の場合、海底資源、漁業関係者、海洋生物への影響と同様に前述の影響も広く検討しなければならない。最後に、風力発電が局地的な気候に与える可能性のある影響は注目を集めてきた。ここで着目されているのは、風力発電所自体に関連する影響であるが、関連するインフラにも検討すべき影響がある (送電線、サイトへの輸送など)。さらに、特に地球規模の気候変動に対するこれらのエネルギー源の変化する寄与の中で、様々なエネルギー供給の関連する影響を評価するためのより組織的な評価が必要であるが、そのような比較はここでは示されず、第 9 章で検討されている。

7.6.2.1 衝突による鳥やコウモリの死亡確率

風車への衝突による鳥やコウモリの死亡確率は、風力発電所に関連した環境上の懸念として最も認知されている。多くの種の鳥やコウモリの個体群が減少しており、風力エネルギーが危急種に与える影響についての懸念につながっている。

これらの影響がどの程度自然や個体群に影響を与えるかについては、今も不明な点が多々ある状況だが、鳥類の死亡確率は、発電所及び種に固有のものであり、地域、場所の特徴、季節、天候、風車の規模と高さや設計、及びその他の要因によって様々である。鳥類の種全体に注目し、米国学術研究会議 (the US National Research Council: NRC) は利用可能な (限定された) 文献を 2007 年初めまで調査したが、鳥類の死亡確率の推定値は 0.95~11.67 羽/MW/年であると報告された (NRC, 2007)。ヨーロッパなどからのその他の結果でも、適度に似通った範囲の推定値が示された (De Lucas et al., 2004; Drewitt and Langston, 2006; Everaert and Stienen, 2007; Kuvlesky et al., 2007 など)。文

³⁵ 温室効果ガス排出量は通常、単一の化石燃料火力発電所の燃料消費に比例しているため、温室効果ガス排出ペナルティは、燃料効率ペナルティと同様である。

³⁶ 化石発電機の開始及び最低負荷必要量 (部分負荷の効率ペナルティを含まない) を明らかにして、Göransson 及び Johansson (2009) は排出ペナルティを 5%と推定した。

³⁷ Katzenstein 及び Apt (2009) により、効率ペナルティは 20%の規模であると結論付けられたが、すべての風力発電所には、風力所の公称容量と同等の運転予備力を必要とすると事実と反する仮定を行っている。地理的多様性の平滑効果による便益 (7.5 節参照) と火力発電所にかかわる、及びかわらない能力を明らかにすることによって、推測された効率ペナルティは大幅に低下する (Mills et al., 2009b)。

献で報告されている鳥類の死亡確率のほとんどは、鳴禽類（スズメ科）であるが、それらは陸上生態系の中で最も数の多いグループであり（Erickson et al., 2005; NRC, 2007 など）、猛禽類の死亡確率は、その個体群が比較的小さいため最も大きな懸念事項であると考えられている。鳴禽類の死亡確率と比較して、猛禽類の死亡確率は相対的に低いが、それにもかかわらず、その影響は場所に特有であり、猛禽類の死亡確率（及び個体群に与える影響の可能性）が懸念を引き起こしている事例もある（Barrios and Rodriguez, 2004; Kuvlesky et al., 2007; NRC, 2007; Smallwood and Thelander, 2008 など）。洋上風力発電の増加に伴い、海鳥への懸念も高まっている（Garthe and Hüppop, 2004 など）。さらなる研究が必要であり、影響はこの場合も種に特有であるが（Desholm, 2009）、これまでの限定的な研究によれば、洋上発電所が陸上の風力発電に比べて過度に鳥類に大きな危険を及ぼすことはないことが示されている（Dong Energy et al., 2006 など）。たとえば、Desholm 及び Kahlert（2005）によると、海鳥が大規模な洋上風力発電所を発見し回避している傾向にあることが分かっている。

コウモリの死亡確率については、風力発電所における鳥類死亡確率ほど大規模な調査は行われていないが、コウモリの死亡確率について信頼できる評価であると認められるデータは若干限定的である（Dürr and Bach, 2004; Kunz et al., 2007b; NRC, 2007; Cryan and Barclay, 2009）。いくつかの風力発電所では、コウモリの大量死が報告されたが、その他の研究では死亡率が低いことが示された。2007 年初めまでの閲覧可能な文献を調査すると、米国学術研究会議（2007）により、コウモリの死亡確率は 0.8~41.1 匹/MW/年であると報告されており、Arnett et al.（2008）がその後 21 の研究を検討した結果、死亡確率は年間 0.2~53.3 匹/MW/年であることが分かった。広範な類似の研究が不足しているため、場所の特徴、天候の状態、風車の規模、配置、及び運用など様々な影響の特有の役割が、現在でもいくぶん不明確なままである（Kunz et al., 2007b; Arnett et al., 2008 など）。風力発電所がコウモリの個体群に与える影響は、現代に特有の懸念である。コウモリの寿命は長い、繁殖率が低いことや、風力発電所におけるコウモリの死亡パターン（たとえば、研究によると、コウモリは風車のロータに引き寄せられている可能性があるということが示された）、及びコウモリの個体群の現在の規模が不明確（Barclay et al., 2007; Horn et al., 2008 など）なためである。

死亡確率や緩和措置の効果の根底にある原因となるメカニズムについては不明確な部分がかかなり残っているため、鳥類やコウモリの死亡確率の予想能力を限定する結果となっている。にもかかわらず、これまで報告されてきた死亡確率を減らす可能な方法には、発電所を鳥類やコウモリの個体群密度の低いエリアに設置すること、風車を餌密度の低いエリアに設置すること、様々な数、タイプ、サイズの風車を使用することなどがある。最近の研究では、弱風時には風車の運転を抑制することにより、コウモリの死亡確率の大幅な低下につながる可能性があることも示唆されている（Baerwald et al., 2009; Arnett et al., 2011）。

衝突による鳥やコウモリの死亡確率についての規模と個体群の結果は、人間の活動によって引き起こされる他の死亡確率の観点からも検証できる。既存の風力発電所における鳥の衝突死の数は、その他の人為的な鳥の死亡原因（車、建築物や窓、送電線、通信塔、飼い猫、公害やその他の汚染物質）より桁違いに少ないと考えられる（Erickson et al., 2005; NRC, 2007）。さらに、陸上の風力発電所は現在、鳥の個体群で有意の減少をもたらしていないこと（NRC, 2007）、また他の電源方式も、衝突、生息地の変化、世界的な気候変動への寄与により鳥やコウモリに影響を与えるということ（Lilley and Firestone, 2008; Sovacool, 2009; NABCI, 2010）が示されている。これらの評価は全体的な比較に基づいたものであるが、生物学的に重大な影響がありうる一部の種に対して、風力発電の発展が与える個体群への累積的影響は、未だに不明確なままである（特にコウモリの場合）。これらの個体群への影響や考えられる緩和を評価する方法は改善の必要があり（Kunz et al., 2007a）、風力発電の影響とその他の電源方式の影響との確固とした比較も同様に必要である。

7.6.2.2 生息地及び生態系の変化

風力発電所による生息地及び生態系の変化が動植物に与える影響には、エリアの回避やエリアからの退去、生息地破壊、及び繁殖の減少などがある（Drewitt and Langston, 2006; NRC, 2007; Stewart et al., 2007 など）。関連するこれらの影響の生物学的重要性は、衝突による鳥やコウモリの死亡確率と比較すると、いまだに不明確である。さらに、これらの影響の性質は、風力発電所が統合される生態系にある程度左右される。風力発電所は、多くの場合、農地や放牧地に設置される。このようなケースでは、以前は未攪乱の森林に覆われた尾根や野草地に位置する風力発電所と比較すると、非常に異なる生息地や生態系の影響が予測される。たとえば、大部分が未攪乱の森林における風力発電所の開発は、連絡道路、風車基礎、及び送電線のための森林開拓が原因となり、損なわれていない森林に依存した種のさらなる生息地の破壊や崩壊につながる可能性がある（Kuvlesky et al., 2007; NRC, 2007 など）。生息地の変化による影響は、非常に場所や種に特有であるため（また、風力発電所が陸上か洋上に影響されるため）、立地プロセスにおいて（緩和措置によって）理想的に対処される。これらの影響に対する懸念は、生態学的に影響を受けやすい地域における風力発電所の建設を禁止している一部の国々で、幅広い計画条例にもつながってきた。

風力発電の開発が洋上に出現し始めるにつれ、また洋上風力発電所の許認可手続きの一部、及び風力発電所が海洋生物や生態系に与える可能性のある影響についての多くの研究が行われるにつれ、風力発電所が海洋生物に与える影響が明確になってきた。Michel et al.（2007）が指摘するように、「洋上ウィンドパークが海洋資源に与える潜在

的な影響についてはいくつかの素晴らしい文献がある。そのほとんどが、ヨーロッパにおける既存の洋上ウィンドパークの環境影響評価や監視プログラムに基づいている。洋上風力発電が海洋生物に与える局所的な影響は、設置、運用、撤去段階で異なり、場所特有の状況に大きく左右されるため、プラスにもマイナスにもなりうる (Wahlberg and Westerberg, 2005; Dong Energy et al., 2006; Köller et al., 2006; P. Madsen et al., 2006; Michel et al., 2007; Wilhelmsson and Malm, 2008; Punt et al., 2009; Tougaard et al., 2009; Wilson and Elliott, 2009; Kikuchi, 2010 など)。潜在的なマイナスの影響としては、水中の音響と振動 (特に建設中)、電磁場、物理的破壊、及び侵入生物種の形成などがある。しかし、物理的構造により繁殖地や住処が作られる場合もあり、人工岩礁または人工魚礁の機能を果たす (Wilhelmsson et al., 2006 など)。特に他のエネルギー供給源と比較したこれらの影響と長期的並びに個体群レベルの結果に関する追加的な研究が必要とされたが、その影響は不相応に大きいようには見えない。しかし、最終的な研究結果に先立ち、洋上風力発電が海洋生物 (及び鳥の個体群) に与える影響についての懸念は、最も影響を受けやすい地域を開発から排除している一部の国々における、国内の地域分けの取り組みにつながった。

7.6.2.3 風力発電発電所が地域の気候に与える影響

風力発電所が地域の気候に与える可能性のある影響は、一部の研究の焦点となってきた。風力発電所は気流から運動量を抽出するため、風車の背後では風速が低下し、広範な規模で乱流を取り入れることで垂直混合も増加させる (Petersen et al., 1998; Baidya Roy and Traiteur, 2010)。これらの2つのプロセスは、「風車後流」という言葉で説明される (Barthelmie et al., 2004)。直観的に風車後流が地表近くの層の垂直混合を増加させることを避けられないため、大気と地表間の熱と水蒸気、及びその他のパラメータの交換を増加する可能性があるが、効果の規模は不明確なままである。翼素運動量理論を用いた研究によると、世界規模のエネルギー需要を供給するのに十分な非常に規模の大きい風力エネルギーの普及でさえも、大気の下層 1km 以内でエネルギー総量の 1 万分の 1 未満を移動させるに過ぎないということが示されている (Sta. Maria and Jacobson, 2009)。その他の研究では、一連の強化された地表面粗度長または地域及び地球規模のモデルにおける高運動量シンクとして大規模な風力発電所を扱うことにより、より局地的な影響を定量化しようとしてきた。これらの研究では通常、相当量の風力エネルギーの普及のシナリオをモデル化し、最高 1°C または 1°C を超過する地域の地表温度における変化、及び風力発電所の設置された地域の (またその範囲を超えた) 1 秒当たり数メートルの地上風における変化を確認している (Keith et al., 2004; Kirk-Davidoff and Keith, 2008; C. Wang and Prinn, 2010)。これらの地域における影響は、降雨、放射、雲と風向き、及びその他の気候変数にも影響をあたえることになる。こうした地域的な変化による地球規模の平均的な影響はさらに不明瞭であるが、地域的な変化により生態系及び人間の活動に影響を与えることになる。

しかし、これらの研究に使用された仮定や手法は、風車が気と相互作用するメカニズムを正確に示していない可能性がある。研究は多くの場合、風車が不変の運動量シンク³⁸としての機能を果たし、風車の密度が標準以上であり、風力エネルギーの普及が見込みよりも大規模かつ地理的に集中した規模で起こる、という不正確な仮定をしている。たとえば、大規模洋上風力発電所からの観測データやモデルによって、それらの風力発電所は、大気境界層全体 (比較的浅い層) とははっきりとわかる程度に相互に作用するほど規模が大きい可能性があると示されているが (Frandsen et al., 2006)、オンサイトでの計測、及び遠隔測定された風速により、大規模開発による後流の影響は、地表近くの風速と乱流の強度が風下約 20km ではもはや認識できない可能性があることが示されている (Christiansen and Hasager, 2005, 2006; Frandsen et al., 2009)。結果として、風力エネルギーが地域の気候に与える影響は不明瞭なままである。さらに広く言えば、風車は潜在的に地域の気候変数に影響を与える唯一の建造物ではなく、風力エネルギーの普及が拡大することによりもたらされるいかなる影響も、人為的な気候への影響を考慮して判断されなければならない、ということもまた認識されるべきである (Sta. Maria and Jacobson, 2009)。

7.6.3 人間の活動及び幸福に与える影響

生態学的結果に加え、風力エネルギー開発は、人間の活動及び福祉に様々な形で影響を与える。ここで取り上げられる主な影響は、陸地や海の利用、景観への影響、騒音、点滅、健康や安全性など、風車の近くで生じる可能性のある近隣への「迷惑」の影響及び資産価値への影響などである。

7.6.3.1 陸地や海の利用

風車はかなり非常に建造物であり、風力発電所は広範な地域に及ぶ可能性があるため (多くの場合、1km² 当たり 5 ~ 10MW と想定される)、風力発電所に使用されていなければ他の目的に使用されていたであろう場所を使用する³⁹。しかし、具体的に陸上風車及びそれらを支える道路やインフラによって攪乱された土地のフットプリントは通常、風力発電所の敷地総面積の 2~5% の範囲であり、農業、大規模放牧、その他の活動をその敷地内で続けることが可能である。住宅開発と空港アプローチ、及びレーダー装置など一部の土地使用は、そのエリアから除外される

³⁸ これらの例では、事実上、風車は常に運転しているため風速を低下させると仮定し、風車の空気力学的な影響は、想定される表面粗度における増加により処理されている。

³⁹ 第9章では、複数のエネルギー源に関連する相対的土地利用を取り上げる。

可能性がある。自然保護区、史跡や聖地は多くの場合特に取り扱いが難しい。多少似た問題が洋上風力発電所にも当てはまる。

風力発電所が航空、船舶、漁業と通信、及びレーダーに与える可能性のある影響も検討されねばならないが、その影響は風車や風力発電所の配置に左右される。航空機の着陸回廊、航路を避けることによって、風力発電所による船舶や航空への妨害が最小限に保たれる (Hohmeyer et al., 2005)。統合的な海洋空間計画や統合的な沿岸水域管理手法にも、洋上風力発電が含まれつつあるため、代替的な海洋及び沿岸利用による沿岸地域に対する生態学的影響や、経済及び社会的便益を評価し、またそれらの利用間の対立を最小限に抑えることに役立つ (Murawski, 2007; Ehler and Douvere, 2009; Kannen and Burkhard, 2009 など)。

風車に関連する電磁妨害 (EMI) は、様々な形式を取り得る (Krug and Lewke, 2009 など)。通例、風車は、電磁波の反射や妨害、及び風車翼の回転により生じたドップラー現象などの大規模な反射レーダーエコーが発生することにより、信号の探知を妨害する可能性がある。電磁妨害の影響の多くは、適切な立地 (たとえば、風車を送信機または受信機の近くに設置しない、景観的地形に頼って風車を覆い隠すなど) によって、回避することができる (Summers, 2000; Hohmeyer et al., 2005)。さらに、電磁妨害影響の緩和を妨げる基本的な物理的制約はない (Brenner et al., 2008)。軍用 (または民間) レーダーの場合、報告書は、レーダーシステムは、航空機の安全と国防が確実に維持されるように時には変更される場合もありうる、と結論付けた (Butler and Johnson, 2003; Brenner et al., 2008)。具体的には、レーダーシステムは、コストをかけて、交換または性能を向上させたり、ギャップフィリングシステムや信号融合システムを導入しなければならない場合もある。さらに、研究により、風車のレーダーシステムに対する反射を少なくすることにより、悪影響を緩和する可能性がある風車の設計変更が調査中である。電磁妨害の影響はテレビ、全地球測位システム、通信システムにも拡大する可能性があるが、そうした影響が存在する場合は、風力発電所の適切な立地や技術的解決法により、たいいては管理することができる。

7.6.3.2 景観への影響

景観への影響、具体的には、風車と関連するインフラが周囲の景観にどうすればしっかりと収まるかという問題は、多くの場合、風力発電所を検討しているコミュニティー (Firestone and Kempton, 2007; NRC, 2007; Wolsink, 2007; Wustenhagen et al., 2007; Firestone et al., 2009; Jones and Eiser, 2009)、既存の風力発電所近くに住民 (Thayer and Hansen, 1988; Krohn and Damborg, 1999; Warren et al., 2005)、及び風力発電開発の監視に対して責任がある組織 (Nadaï and Labussière, 2009) の最大の懸念の1つである。陸上及び洋上風力発電に対する懸念が表明されてきた (Ladenburg, 2009; Haggett, 2011)。最も強く安定した風を捉えるために、風車は多くの場合、高地に設置され、そこには周囲の地域と比較すると、障害物がほとんどない。さらに、風車と風力発電所の規模は拡大し、風車及び関連する送電インフラはますます目立つようになる。最終的には、風力発電所の数や地理的な分布における増加に伴い、所は、さらに高い価値を持つ地域を含め、様々な景観 (洋上風力発電に関しては、固有の海景にも) に設置されつつある。

目立つことについての懸念が完全に緩和されることは不可能であるが、多くの管轄区域では、影響の地理的範囲の定義と風力発電開発前、及び開発後のモニタージュ写真やモニタージュビデオの作成など、立地プロセスの一環として、景観への影響の評価が必要になる。景観への侵害を最小限に抑えるために生じたその他の提案には、同じ規模、形状の風車を使用すること、淡色の塗料を使用すること、多数の小型風車ではなく、少数の大型風車を選択すること、接続ケーブルを埋設すること、確実に同方向に翼が回転するようにすることなどがある (Hohmeyer et al., 2005 など)。一般的には、風車を含む「景観」についての従来のコンセプトの再考は、時折提言されてきた (Pasqualetti et al., 2002)。たとえば、特にこのような計画が一般の人々の関与を考慮する場合、開発が可能である地域や開発が不可能である別の地域を前もって確保するなどである (Nadaï and Labussière, 2009)。

7.6.3.3 騒音、点滅、健康及び安全性

様々な近隣への「迷惑」の影響もまた、風力発電開発 (その最も顕著なものは騒音である) に関連して時折生じる。風車からの騒音は、特に近隣に住む人々にとっては、問題になりうる。与える影響は、可聴音及び可聴下音 (インフラサウンドなど) として特徴づけられている。可聴下音、つまり名目上可聴周波数帯域以下のものは、健康上の影響を引き起こす可能性があるという主張があるが (Alves-Pereira and Branco, 2007)、様々な研究 (Jakobsen, 2005; Leventhall, 2006) 及び政府報告書 (FANM, 2005; MDOH, 2009; CMOH, 2010; NHMRC, 2010 など) では、この点に対してそれらの主張を支持する十分な証拠が見い出せなかった。風車からの可聴騒音については、騒音に関する環境上の指針 (EPA, 1974, 1978; WHO, 1999, 2009) は、通常、生理学的な健康への直接的影響 (難聴など) が確実に回避されるようにするには、十分であると考えられている (McCunney and Meyer, 2007)。しかし、近隣の住人の一部は、風車の音から迷惑を被っており (Pedersen and Waye, 2007, 2008; Pedersen et al., 2010)、それが睡眠パターンや福祉に影響を与える可能性がある。この迷惑は、聴覚要因 (騒音レベルや特徴など) や非聴覚要因 (風車の目立ちやすさ、風車に対する態度など) とも相互に関連している (Pedersen and Waye, 2007, 2008; Pedersen et al., 2010)。ハブ高さ風速は早い、地表速度が遅い場合 (つまり高度なウィンドシアの状態)、騒音排出についての懸念は、

特に重大である可能性がある。このような状況下では、風車からの高い騒音レベルに伴う、地表における風による暗騒音の欠如は、可聴度の増加や場合によっては迷惑に関連してきた (van den Berg, 2004, 2005, 2008; Prospathopoulos and Voutsinas, 2005)。

風車により排出された騒音レベルを低減するために、大きな努力が行われてきた。その結果、近代的風車からの機械音(変速機や発電機など)が大幅に低減された。空力音響的騒音は、今や主要な懸念事項であり (Wagner et al., 1996)、風車の特定の空力音響的特徴の一部 (van den Berg, 2005 など) は、特に検出可能で (Fastl and Zwicker, 2007)、不快であることが判明した (Bradley, 1994; Bengtsson et al., 2009)。空力音響的騒音を低減することは、翼のスピードによって、いとも簡単に達成することができるが、様々なチップ形状や翼設計も研究されてきた (Migliore and Oerlemans, 2004; Lutz et al., 2007)。さらに、こうした影響を管理するために使用される予測モデルや環境規制は、ある程度改善されてきた。具体的には、規制を制定する場合、一部の管轄区域では、あらゆる運転状況でのウィンド・シアや最大の音響出力レベルが考慮される (Bastasch et al., 2006)。日中の絶対最大音響レベル (55 A-weighted decibels, dBA など)、及び夜間の絶対最大音響レベル (45 dBA など) も、既存の暗騒音レベルに応じて設定された最大レベルと関連する可能性がある (Bastasch et al., 2006)。その他の管轄区域では、より簡潔でおおまかなセットバックは、風車とその他の建造物の間が最少距離であることを要求する (MOE, 2009)。これらの取り組みにもかかわらず、騒音の影響に関する懸念は、一部の地域において風力エネルギー普及に対して依然として障壁となっている。

騒音による影響に加え、回転する風車翼は、移動影 (つまり、シャドーフリッカー) も落とす可能性があり、それは風車の近隣住民にとっては不快であるかもしれない。風車は、これらの懸念を最小限に抑えるように立地を決定でき、風車の運転は、緊急時には停止することもできる (Hohmeyer et al., 2005)。最終的に、風車は、事故または着氷の結果として、翼の一部または全部を切り捨てることできる (またはもっと大雑把に言えば、翼が氷結した氷を落とすか、または風車全体が倒壊するかである)。風力発電技術証明基準は、このような事故を減らすことを目的とし (7.3.2 節参照)、セットバック要求により、残りのリスクもさら低減する。実際のところ、死亡や負傷は珍しい (エネルギー発電技術の事故の危険性の比較については第 9 章参照)。

7.6.3.4 不動産の価値

風力発電所の目立ち度が地域レベルで住居用不動産の価値への悪影響につながるという懸念は、時折示されてきた (Firestone et al., 2009; Graham et al., 2009; Jones and Eiser, 2009)。さらに、風車の騒音やシャドーフリッカーなど様々な近隣への迷惑の影響が著しい場合、地域の不動産の価値に与える追加的な影響が生じる可能性がある。その他の環境的な不快さに対して見出される影響を考慮した場合、こうした懸念はもっともなことであるが (高压送電線、化石燃料発電所、埋め立て地など。Simons, 2006 参照)、公表された研究では、風力発電所に対する幅広いどんな影響に対しても強固な証拠は見い出されなかった (Sims and Dent, 2007; Sims et al., 2008; Hoehn et al., 2011 など)。これは通常家屋と風車の間で利用されるセットバックによって説明されるだろう。たとえば、送電線が不動産の価値に与える影響に関する研究により、その影響は 100m 離れた地点では消える可能性があるということが確認される場合もある (Des Rosiers, 2002 など)。あるいは、いかなる影響もあまりにもまれで小規模であるため、過去のデータに基づき統計的に識別することができない。最終的に、風車の騒音やその他の影響は、家屋が売却された場合、評価が難しいため、市場への価格設定が完全には行われまいだろう。この問題についてはさらなる研究が必要とされるが、その他の不快さの研究に基づき (Boyle and Kiel, 2001; T. Jackson, 2001; Simons and Saginor, 2006 など)、実際に存在するいかなる影響は、風車から近距離内において、風力発電所の公表直後の時期に、最も顕著である可能性が高いが、その時期は、リスクを定量化するのが最も難しい (Wolsink, 2007)。

7.6.4 一般の人々の態度や受容

上記で説明された可能性のある影響にもかかわらず、風力エネルギーは市民から一貫して広く受容されていることがさまざまな調査から示されている (Warren et al., 2005; Jones and Eiser, 2009; Klick and Smith, 2010; Swofford and Slattery, 2010 など)。しかしながら、この追い風を普及につなげるには (「社会的ギャップ」を狭める。Bell et al., 2005 など参照)、多くの場合、発電所が立地する地域のコミュニティや政策決定者の支持が必要になる (Toke, 2006; Toke et al., 2008)。結局のところ、陸地や海の利用、以前検討された景観的影響と近隣への影響、及び不動産価値に与える影響など風力エネルギーに関するステークホルダーの熱狂的な興味を鎮静化する多くの懸念事項が存在する。

一般的に、研究により、風力発電開発に対する社会的関心は、風力発電所の公表直後に最大になるが、実際の影響が評価されることが可能な場合、建築後に承認が増加することが分かっている (Wolsink, 1989; Warren et al., 2005; Eltham et al., 2008)。一部の研究では、既存の風力発電所を非常によく知る人々 (風力発電所の近隣住民など) は、風力発電所になじみがなく、また遠く離れた場所に住む人々より、受容的である (あるいはあまり心配していない) という結果が確認されたが (Krohn and Damborg, 1999; Warren et al., 2005)、その他の研究では、真実は逆であるという結果がわかった (van der Horst, 2007; Swofford and Slattery, 2010)。この明らかな食い違いに対して考えられる

理由としては、計画中の発電所対既存の風力発電所に対する態度の違い (Swofford and Slattery, 2010)、地域コミュニティの以前からの特徴や価値観 (van der Horst, 2007)、開発プロセスやその結果に関して、地域コミュニティが抱く信頼度 (Thayer and Freeman, 1987; Jones and Eiser, 2009) などが挙げられる。研究によって、建設前の態度は風車建設後も続く可能性があるという結果も確認された。たとえば、風力発電所の開発に反対する人々は、建設前に同じ発電所に対して好意的だった人々とくらべて、最終的に建築された発電所を騒がしく景観的に煩わしいと考える率が高いことが分かった (Krohn and Damborg, 1999; Jones and Eiser, 2009)。一部の研究では、懸念事項は複合的でありうるということが分かった。たとえば、風車を景観的に煩わしいものであると考える人々は、それらの風車からの騒音もより迷惑なものであると考える (Pedersen and Waye, 2004)。最終的に、少なくとも一部の状況では、陸上風力発電開発よりも洋上風力発電開発に対していく分好意的であるようだ。ただし、このような好意的な反応は、特定の洋上発電所の場所に左右されるものであり (Ladenburg, 2009)、普遍的な傾向とはとても言い難い (Haggett, 2011)。

7.6.5 社会的及び環境的懸念を最小化する

風力発電開発が進み、大規模な風力発電所が検討されるにつれ、既存の懸念は深刻化し、新たな懸念が生じる可能性がある。しかし、社会的及び環境的な懸念の種類や程度には関係なく、直接そうした懸念に対処することは、いかなる風力発電計画や発電所立地プロセスの成功にも不可欠な部分である⁴⁰。そのために、計画及び立地プロセスに地域コミュニティを参加させることが、結果を改善するために示されたこともあった (Loring, 2007; Toke et al., 2008; Jones and Eiser, 2009; Nadai and Labussière 2009)。たとえば、これには、コミュニティが代替の風力発電所や風車の配置の検討を可能にしたり、既存の風力発電所への視察を主催することで教育改善を行うことなどが含まれる。開発プロセスが透明性のあるものと認められた場合、一般の人々の態度が改善したことが確認された (Wolsink, 2000; C. Gross, 2007; Loring, 2007)。さらに、実例により、風力発電所の地域的な所有権やその他の便益共有メカニズムによっても風力発電開発に対する一般の人々の態度を改善することができることが示されている (C. Gross, 2007; Wolsink, 2007; Jones and Eiser, 2009)。

陸上及び洋上風力発電開発に関する適切な計画は、社会的及び環境的影響を最小化することにも役立ち、多くの立地指針も作成されてきた (S. Nielsen, 1996; NRC, 2007; AWEA, 2008 など)。適切な計画や立地により通常、風車を住宅地、道路、鉄道、空港、レーダーサイト、航路に非常に密接した場所に設置しないようにし、鳥やコウモリが多く集まる地域は避けるようにする。建設前の様々な研究が、これらの影響や緩和を定義するためにしばしば行われる。生息地崩壊や陸上及び洋上に与える生態学的影響は、風車や発電所を慎重に設置することや風力発電開発に対する積極的な政府の計画により多くの場合最小化することができる。このような計画の例は、世界各地の多くの管轄区域で見出すことができる。しかしながら、厳格さのレベルや、中央集権化対地域主導のレベルに大きくばらつきがあるため、計画及び立地規制は管轄区域ごとに大きく違う。こうした違いは、風力発電開発の環境的及び社会的結果と共に、開発のスピードや簡便性にも影響を与える可能性がある (Pettersson et al., 2010 など)。

一部の影響は通貨に換算するのが困難であるため、風力エネルギーの完全な外部コストや便益の無限定の数値比較は不可能であるが、入手可能な証拠により、風力エネルギーの環境的及び社会的なプラスの影響は、通常、慎重な計画や立地手続きが行われた後でも残っているマイナスの影響を通常は上回ることが示唆された (Jacobson, 2009 など参照)。しかし、実際には複雑で時間のかかる計画及び立地プロセスは、一部の国や事情において風力発電開発に対する主な障壁となる (Bergek, 2010; Gibson and Howsam, 2010 など)。1 つには、これは、風力発電の環境的及び社会的影響が適切な計画や立地手続き、及びコミュニティの関与によって最小化されたとしても、一部の影響は残るからである。よって、これらの残りの影響の性質及び程度をより深く理解する取り組みと共に、こうした環境を最小化し緩和する取り組みは、風力発電開発の増加と併せて遂行される必要がある。

7.7 技術の改良及び改革の見通し⁴¹

過去 30 年にわたり、個々の風車の容量及び物理的な大きさが顕著に拡大した一方で、風車の設計にもたらされたイノベーションにより、コストが大幅に削減されてきている (EWEA, 2009)。「2 乗 3 乗の法則」は、数学的關係であり、風車の直径が大きくなるに伴い、その理論的なエネルギー出力はロータの直径の 2 乗で増加し、一方で、同じ比率で増加する必要がある材料 (及びその量とコスト) は、ロータの直径の 3 乗で増加し、その他はすべて等しいことが提示されている (Burton et al., 2001)。その結果、一部のサイズでは、サイズの大きい風車のコストは、その結果生じるエネルギー出力や収入より速いスピードで増加し、さらなるサイズの拡大は不経済なものとなる。今日まで、技術者たちは、この関係性を元に成功してきたが、風車サイズを拡大しながら設計を最適化し、資材の使用を削減し、軽量化したが強化された資材を使用することで、風車サイズの拡大に伴う風力発電のコストの大幅な増加を防ぐことになる。

⁴⁰ 第 11 章では、再生可能エネルギーの計画及び立地に関する広範な文献の補足的な要約が記載されている。

⁴¹ 10.5 節では、再生可能エネルギー技術全般の技術的進歩におけるドライバー及び傾向に関する補足的な見通しを提供する。

陸上及び洋上風車や風力発電所の設計を最適化する機会は依然大きく残されており、何年か先にコストの大幅な削減が可能である。ただし、改善は基礎設計における急進的な変化というより本質的な漸増である可能性が高い。「2乗3乗の法則」に基づく工学は依然として、特に大幅な向上が予測される洋上の設置に関しては、風力の均等化発電原価のさらなる削減を目的とした研究努力の基本目的が残されている。その他の分野の飛躍的な技術により、新しい機器（超電導発電機など）やセンサ（翼の全長に亘ってアクティブ空力制御が可能となる）などの用途が見い出される可能性もあり、将来、10MW以上のさらに大型の風車が生まれる可能性がある。

この節では、風力発電における研究開発プログラム（7.7.1節）、風力発電の均等化発電原価におけるさらなる削減を生み出す可能性のある系統レベル設計及び最適化の手法（7.7.2節）と風力発電技術におけるイノベーションに関する構成部品レベルの機会（7.7.3節）、及び風力発電技術の科学的基礎を改善する必要性（7.7.4節）について説明する⁴²。

7.7.1 研究及び開発プログラム

官民の研究開発プログラムは、過去数十年にわたる風力エネルギーに見られる技術的な進歩を大きく後押ししてきた（Klaassen et al., 2005; Lemming et al., 2009）。産業界と協力した研究開発への政府支援は、システム及び構成部品の技術改良だけでなく、資源量評価、技術標準、電力系統への連系と風力発電の出力予測などの分野における改良につながってきた。1974年から2006年にかけての国際エネルギー機関（IEA）加盟国における政府の風力エネルギーへの研究開発予算は合計で38億USドル（2005年）であり、再生可能エネルギー研究開発予算の推定10%、エネルギー研究開発の支出総額の1%に相当する（IEA, 2008; EWEA, 2009）。2008年には、風力エネルギーに対するOECDの研究費の合計は、1億8000万USドル（2005年）、エネルギー研究開発費合計の1.5%であった。追加費用についてはOECD非加盟国から提供された。政府出資の研究開発プログラムは、多くの場合、長期的なイノベーションを重視してきたが、一方で産業界が資金援助した研究開発は、短期的な生産、運用、及び設備の問題を重視してきた。産業界の研究開発に対する財政支援に関するデータは少ないが、EWEA（2009）、Carbon Trust（2008b）及びWiesenthal et al.（2009）によると、純収入に対する風車製造者の研究開発費用の割合は通常2~3%であることが分かっている。一方、Wiesenthal et al.（2009）により、EUにおける企業の風力エネルギー研究開発は、政府による研究開発投資額の3倍の規模であることが分かっている。

風力エネルギー研究の戦略は、多くの場合、これまではヨーロッパやアメリカを中心として、政府と産業界の協力によって開発が進んできた。ただし、その他の国々でも同様に官民の研究開発も同様に増加してきた（Tan, 2010など）。風力エネルギーによりアメリカの電力需要の20%を満たす技術的及び経済的実現可能性を調査する研究において、アメリカエネルギー省（US DOE）は、さらなる研究の主要分野には、風車技術の継続的な開発、製造プロセスの改良及び拡大、風力発電の電力系統への連系と立地、及び環境の懸念などがあることを確認した（US DOE, 2008）。一方で、欧州技術プラットフォーム：風力エネルギー（European Wind Energy Technology Platform (TPWind)）は、以下の焦点領域に関して将来のヨーロッパにおける風力エネルギーの研究開発戦略の基礎を成すと推測される、2020年までのロードマップを作成した。風力発電システム（新たな風車及び構成部品）、洋上への展開及び運用（洋上の建築物、装置、及び運転保守プロトコル）、風力発電の連系（系統連系）、及び風力エネルギー資源（風資源評価及び設計条件）（EU, 2008; EC, 2009）などである。一般的に、これらの計画への取り組みのいずれも、風車の基礎設計における根本的な変化を必要としない。代わりに、方針は多くの進化段階として考えられ、徐々に進む技術的進歩を通して達成される。それにもかかわらず、これらの進化段階は、10MW以上の風力発電や大規模風車の均等化原価における重大な改良につながる可能性がある。

7.7.2 系統レベルの設計及び最適化

風力発電所と風車は、コストと性能を最適化する統合設計アプローチを必要とする、最新式かつ複雑なシステムである。発電所レベルでは、検討事項には、特定の風況に対する風車の選択、風車の立地、間隔、設置手順と運転保守方法論、及び電力系統への連系が含まれる。それゆえ、風車、発電所の最適化には、個々の空気力学的装置、機械構造、制御システムとしての風車を評価するだけでなく、発電所レベルで個々の風車の相互作用を考慮するシステムの全体像が必要となる（EU, 2008）。

これまでの研究により、技術進歩が投資コスト、年間発電電力量、信頼性、運転保守コスト、風力発電の系統連系に変化を与える多くの領域があることが確認された。進歩的なコンセプトの影響を調査した研究の例には、the Wind Partnership for Advanced Component Technologies (WindPACT) プロジェクトの下でアメリカのエネルギー省によっ

⁴² 本節では、風力エネルギーのコスト削減に直接関連する科学的及び工学的課題に焦点を当てているが、追加的な重要性の研究分野には以下のものがある。風力エネルギーの電力系統への統合及び送電網の適合性に関する研究（予測、エネルギー貯蔵、パワーエレクトロニクスなど）、政策措置及び社会的容認に関する社会科学的研究、風力エネルギーが環境、人間の活動及び幸福に与える影響を理解するための科学研究である。これらの問題は、本節で短く言及しているだけである。

て行われたものも含まれる (GEC, 2001; Griffin, 2001; Shafer et al., 2001; D. Smith, 2001; Malcolm and Hansen, 2006)。技術的進歩が陸上の風力発電及び風車の投資コストに与え得る影響の1つの評価は、表 7.3 で要約されている (US DOE, 2008)。これらの改良のすべてが達成されたわけではないが、継続した研究開発を保証する十分な潜在性がある。表 7.3 に示されているように、最も可能性の高いシナリオは、投資コストが緩やかに低下し、発電生産が大幅に増加するというものである (2002 年レベルと比較、表 7.3 における推測値の基準となる)。一方、EU が資金提供した UPWIND プロジェクトの下で、非常に規模の大きい (20MW までの) 陸上及び洋上風車システムに関する潜在的な課題 (製造プロセス、設置プロセス、及び構造上の統合など)、及び設計上の解決法のシステムレベルの分析が進行中である。同様に、このプロジェクトには、風力エネルギーのシステムレベルのコストに関する潜在的技術イノベーションの影響を評価するために、モデルの開発が含まれる (Sieros et al., 2011)。

表 7.3: 2002 年ベースラインの陸上風車からの潜在的技術改良の領域 (アメリカエネルギー省に基づく、2008 年)。
※

技術領域	潜在的進歩	ベースラインからの増加 (最大・期待値・最小)	
		年間エネルギー生産 (%)	風車投資コスト (%)
新型タワーコンセプト	<ul style="list-style-type: none"> ※困難な立地における高いタワー ※新たな器具やプロセス ※新型構造物・土台 ※自立式、初期、またはサービス用 	+11/+11/+11	+8/+12/+20
新型 (拡大した) ロータ	<ul style="list-style-type: none"> ※先端材料 ※改良型構造的・空力的設計 ※アクティブ制御 ※パッシブ制御 ※周速増加・音響効果低下 	+35/+25/+10	-6/-3/+3
エネルギー損失の低減、及び利用可能性の向上	<ul style="list-style-type: none"> ※翼の汚損による損失の低減 ※耐損傷センサー ※堅牢な制御システム ※予後的運転保守 	+7/+5/0	0/0/0
最新式動力伝達部駆動系 (変速機、発電機、及び電子工学)	<ul style="list-style-type: none"> ※増速段の現象またはダイレクトドライブ ※低・中速発電機 ※分散型増速機トポロジー ※永久磁石方式発電機 ※中圧機器 ※最新型の歯車の歯 ※新型回路トポロジー ※新型半導体素子 ※新しい器具 	+8/+4/0	-11/-6/+1
製造学習	<ul style="list-style-type: none"> ※持続的増分設計、及びプロセス向上 ※大規模製造 ※設計荷重の減少 	0/0/0	-27/-13/-3
合計		+61/+45/+21	-36/-10/+21

※これらの推定値のベースラインは、アメリカの 2002 年の風車システムであった。2002 年以来、設備利用率において、30%超からほぼ 35%までの大幅な向上がすでにあつたが、一方で、アメリカドルの価値の下落に伴い、商品原価の高騰により、投資コストが増加した。よって、2008 年のベースラインに基づき稼働すれば、設備利用率において緩やかな増加が期待できるが、特に高めの 2008 年起点に基づく、10%の投資コストの低減が (控え目でないにしても) いまだに十分可能である。最終的に、表では、全体的な風車の設計コンセプトにおける変化 (2 枚翼風車など) は考慮されていない。

7.7.3 構成部品レベルのイノベーション機会

表 7.3 で要約されたイノベーションの潜在的領域は、7.7.3.1 節から 7.7.3.5 節にかけてさらに詳しく説明されている。表 7.3 では、陸上用途に設計された風車を対象としているが、そこで確認された構成部品レベルのイノベーションは、陸上及び洋上風力発電に影響を与える。実際のところ、これらのイノベーションの一部は、その技術の初期の状態及び、その技術に直面する重大な運用上の課題が原因となり、洋上の風力発電技術にとってより重要となる。洋上風力発電により特有な追加的進歩については、7.7.3.6 節で説明されている。

7.7.3.1 新型タワーコンセプト

高いタワーによって、ロータが一定の場所で高風速にアクセスできるようになり、年間のエネルギー回収が増加している。しかし、大きなクレーンや輸送のコストによって、タワーの高さが制約される。その結果として、超高所用、重量用クレーンが不要ないくつかの新規のタワー設計の研究が行われている。1つのコンセプトは伸縮性または自立型タワーであり、一方別の設計には、ナセルやロータをタワーの頂上まで持ち上げるために、タワー据え付け形軌道を使用する、釣り台車やタワー据え付け形クレーンなどがある。依然として、その他の開発の目的は、コンクリートやガラス繊維などの様々な原料、またはスペースフレーム構造、またはパネル部など様々な設計を使用することにより、材料需要を過度に犠牲にすることなく、タワーの高さをさらに高くすることである (GEC, 2001; Malcolm, 2004; Lanier, 2005 など参照)。

7.7.3.2 新型ロータ及び翼

技術の進歩により、翼の質量は、「2乗3乗」の法則に基づく3.0の指数と比較して、ロータの直径に対して約2.4の指数で増加している (Griffin, 2001)。この開発の重大性は、時間と共に、風車翼が特定の長さに対してより軽量化してきたことである。進んだ研究開発により、さらに良い材料 (炭素繊維複合材など) や進んだ製造方法と併せて、さらに適切な翼設計方法が提供された場合、翼設計における2乗3乗の法則に基づき継続して新技術を取り入れることが可能である。コストを削減する1つの方法には、強さが一番必要な翼根近くの場所がさらに分厚くなっている新しいエアfoil型の翼の開発がある。それにより、本質的にさらに適切な構造特性が可能になり、全体の質量が減る (K. Jackson et al., 2005; Chao and van Dam, 2007)。これらのエアfoil型は潜在的に同等の空気力学的性能を提供するが、まだその領域では証明されていない。材料需要の増加を制限する一方で翼の長さを伸ばすもう1つの方法は、翼にかかる疲労負荷を減らすことである。翼の疲労負荷は、風の流入に関連して翼の羽根の迎え角を変化させるメカニズムを使って、乱流に対する翼の空気力学的反応を制御することによって、低減することができる。これは、近年、翼のフルスパンピッチ制御により達成された。しかし、明確なコンセプトは、負荷を直接翼の構造にかけることを減らすという受け身の手段を構築することである (Ashwill, 2009)。たとえば、複合材料の独特の特質を用いた翼の構造特質を慎重に調整することにより、翼は、翼のピッチ制御の動きを受動的に模倣するねじり変形と風起因する翼の曲げ変形を結びつける方法で、作り上げることができる。もう1つの方法は、空気力学的負荷変動がねじり運動を翼に適用するような曲線形に翼を作ることである。これによって、迎え角は変化する (Ashwill, 2009)。風の流入により、ロータ領域全体のスピードや特徴が変化に富んだものであることが示されるため、負荷削減を最大化する一部の翼スパンの作動や感知戦略は、前途有望である (Buhl et al., 2005; Lackner and van Kuik, 2010)。たとえば、後縁フラップ及びマイクロタブのような装置は研究されつつあるが、新型センサーもこの目的のために、局地的な空気力学効果を制御するためにセンサー及び作動装置が内蔵された「スマートな」翼を作る目的で、開発される必要がある (Andersen et al., 2006; Berg et al., 2009)。こうした新規の設計を完全に実現するために、複雑な翼の動作に対する風車の空力弾性応答、空力応答、空力音響応答を深く理解することは必要である。同様に、風車の運転に新しいセンサー及び作動装置を組み込むために、制御アルゴリズムが必要である。

7.7.3.3 エネルギー損失の低減と利用可能性の向上

最新式の風車制御や状態監視によって、陸上及び洋上の個々の風車や風力発電所の、風車の信頼性と利用可能性の向上、運転保守コストの削減、及び最終的にエネルギー回収増加のための主な方法が示されると推測される。最新式の制御装置は、乱流時に風車を適切に制御することにより、疲労負荷低減や翼寿命の延長を実現し (Bossanyi, 2003; Stol and Balas, 2003; Wright, 2004)、エネルギー回収を増やし、翼の汚損や腐食の影響を低減するために、風の状況を監視し、それに順応し (Johnson et al., 2004; Johnson and Fingersh, 2008; Frost et al., 2009)、翼前方の風速を直ちに検知する新型センサーを使用することにより損傷を与える突風を予測し防ぐ (T. Larsen et al., 2004; Hand and Balas, 2007) ことが可能であると想定されている。将来の状況監視システムは、風車の危険個所における進行中の状況を追跡・監視し、初期不良の可能性及び損傷過程を報告することが推測され、その結果、保守手順が改善され、機能停止時間や運転休止時間を最小限に抑えられる (Hameed et al., 2010)。この種の最新式の制御及び監視システムの本格的な開発には、相当な運用上の経験が必要であり、最適化アルゴリズムは風車特有である可能性が高い。しかし、一般的な手法は、風車の設計及び構造のどちらにも移転可能でなくてはならない。

7.7.3.4 最新型動力伝達装置、発電機、及びパワーエレクトロニクス

信頼性向上を図る一方で、動力伝達装置の重量及びコストを減らす独自の風車設計のいくつかは、開発中あるいは商業展開の初期段階にある (Poore and Lettenmaier, 2003; Bywaters et al., 2004; EWEA, 2009)。すでに限定的な用途で商業化されている1つの選択肢は、増速機を不要にしたダイレクトドライブ発電機である。2009年に導入された設備容量の10%超が第一世代のダイレクトドライブ風車を使用したものであるが (BTM, 2010)、さらなる設計上の向上は構想中である。低速で回転する発電機は多極機となり直径を大きくしなければならず、重量的に不利となるというトレードオフがある。永久磁石の設計はより小型化及び潜在的な軽量化の傾向にあるだけでなく巻線の電力損失を低減するため希土類永久磁石を採用する可能性とコストは、将来にわたるダイレクトドライブ発電機の

設計のサイズやコストに大きな影響を与えると推測される。

様々な付加的な動力伝達装置の構造は、研究が進み商業的に展開されつつある。現在の増速機とダイレクトドライブ方式のハイブリッドは、低速または中速の発電機を使用する一段式動力伝達装置を使用するものである。これにより、似たようなダイレクトドライブ設計よりも大幅に小型化・軽量化した発電機の使用が可能になり、増速機への依存が減少する（しかし、なくなるわけではない）。もう1つの手法は、分散型動力伝達装置であり、ロータトルクが（1つの大型発電機ではなく）複数の小型発電機に分散されており、構成部品のサイズを減らし、（潜在的に）重量を減らすことができる。その他の革新的な動力伝達装置のコンセプトが依然として開発中である。

様々な周波数の交流電流（AC）から一定周波数の50または60Hzへ電力変換ができるパワーエレクトロニクスによって、系統アンシラリーサービスも可能となっている。風車の大型化によって、より大容量のパワーエレクトロニクス機器や革新的な高圧回路トポロジーが推進されている。将来は、現在使用されているものよりさらに電圧の高い発電機やコンバータを風車が採用されるため（Erdman and Behnke, 2005）、より高電圧・大容量の回路やトランジスタが使用されることが予想される。新型の電力変換装置は、風力発電所が電力系統の信頼度を低下させないように、新たなグリッドコードに完全に準拠する必要がある。

7.7.3.5 製造学習

製造学習とは、反復型生産を伴う連続的生産ラインで達成された実践的学習による学習のことである（風力エネルギー技術における学習についての幅広い検討については、7.8.4節参照）。風車製造事業者はすでに大規模に運用を開始しつつあるが、業界の拡大に伴い、さらなるコスト削減が期待できる。たとえば、特に風車サイズの拡大に伴い、風力発電所のサイトでの製造及び分割翼のようなコンセプトは、輸送課題及びコストを削減するために研究が進みつつある。製造自動化及び最適化プロセスにおけるさらなる増加は、風車及び構成部品の製造におけるコスト削減にも寄与する。

7.7.3.6 洋上の研究開発機会

運転保守コストと、より高価な設備、及び支持構造物などにより、洋上風力発電のコストは、陸上風力発電のコストより高い。上記に記載されている潜在的な構造部品レベルの技術進歩は、洋上風力発電のコストに寄与し、可能な進歩の一部は、洋上風力発電用途の独自の必要性によって大いに促進される可能性がある。また、いくつかの領域の可能な進歩は、運転保守戦略、設置、組立計画と支持構造物設計、及び場合により新型風車コンセプトなども含む大規模風車の開発など、洋上風力発電にさらに固有なものである。

洋上風車は、風車へのアクセスを長期間困難にし、あるいは不可能にさえする風力及び波浪状態によって引き起こされる過酷な環境において稼働している（Breton and Moe, 2009）。ゴムボートやヘリコプターなど、様々な状況下でより多くのアクセス機会を維持する様々な方法は、検討及び開発中である（Van Bussel and Bierbooms, 2003）。好ましい状況においてアクセスを最大化する、風車の操作性の遠隔評価や予防的保守の計画などの最新式運転保守手法も調査及び採用が進められている（Wiggelinkhuizen et al., 2008）。信頼性の高い風車の構成部品の開発も、原価ベースでより高価であるとしても、洋上風力発電全体の均等化原価を削減する大きな追い風となることが推測される。たとえばより信頼性の高い設計に寄与するための、増速機ダイナミクスを徹底的に分析する取り組みが進行中である（Peeters et al., 2006; Heege et al., 2007）。最新型ダイレクトドライブ発電機や翼のパッシブ制御など、前述の多くの構成部品レベルのイノベーションもまた、技術の信頼性全体も向上させる可能性がある。

洋上風車の輸送及び設置は、道路やその他の陸上のインフラの制約に直接的に制限されていない。その結果、洋上風車は現在、個別の構成部品として設置されているが、完全に組立済みの風車が特殊用途の船舶で輸送され、事前に設置された支持構造物に取り付けられるというコンセプトは検討中である。このような設置実施に必要な船舶の建設に加え、効率的に組立過程を行うために、港湾や集積基地が設計される必要がある。

洋上風車の支持構造設計を改善するためには、さらなる研究開発が不可欠である。基礎構造のイノベーションにより、深水域にアクセスする可能性が生まれるため、風力エネルギーの技術的ポテンシャルが向上する（Breton and Moe, 2009）。洋上風車は、これまで主に深さ30mまでの比較的浅水域の、本質的にはタワーの延長であるモノパイル構造上に設置されてきたが、重力式構造のほうが一般的になった。深水域の深さにより適切なその他のコンセプトには、ジャケットやトリポッドなど固定式スペースフレーム構造、円盤ブイなど浮体式プラットフォーム、緊張係留型プラットフォームと半潜水型、あるいはこれらのコンセプトを混ぜ合わせたものが含まれる。洋上風車の支持構造は、風力及び波浪負荷に関連する動的な反応を受ける可能性があり、洋上支持構造に特有な土の剛性や洗掘状態の推定値の向上により追加されたロータ、タワー、支持構造の連性解析を必要とする（F. Nielsen et al., 2009）。浮体式風車の場合、基礎の余計な挙動により風車設計の複雑さがさらに増す。しかし、費用対効果が高ければ、(1)非常に大きな風資源地域へのアクセスが提供され、(2)風車や支持構造の設計の大部分が水深や海底の状態と無関係である技術の標準化を推進し、(3)簡易化した設置（完全な風車組立は閉鎖海域において行われるなど）及

び撤去の実施につながると予想される (EWEA, 2009)。2009 年において、最初の完全な浮体式風車のパイロットプラントが水深 220m のノルウェー沖に配置された。図 7.19 (a, b) では、(a) 今後短期間に使用または検討中の基本概念、また (b) 長期的に検討が進んでいる浮体式風車のコンセプトを説明する基本概念の一部が説明されている。

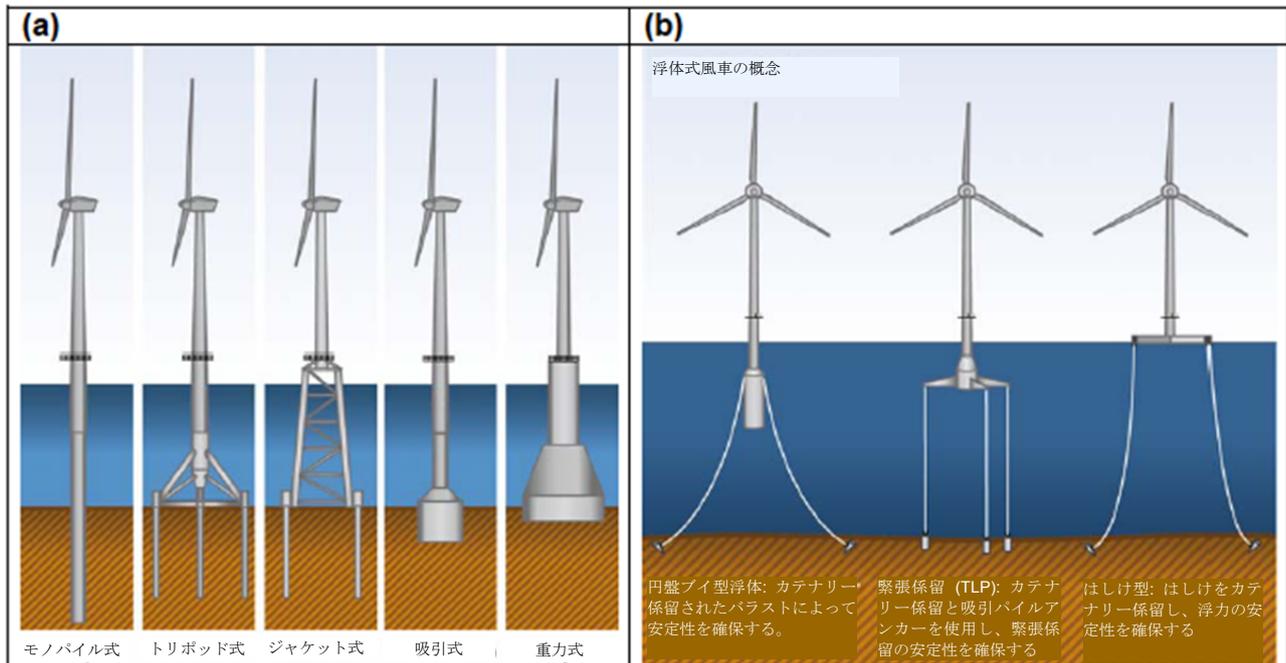


図 7.19: 洋上風車の基礎設計：(a) 短期的コンセプト、(b) 浮体式洋上風車のコンセプト

出典: (a) UpWind (UpWind.eu) 及び (b) NREL.

将来の浮体式洋上風車は、大型化、軽量化、及び柔軟性に富む可能性がある。洋上風車の規模は、陸上風力発電技術と同様、制約されていない。洋上基礎のコストは比較的高いため、大型風車にさらなる動機が必要であり (EWEA, 2009) 結果として、10MW 以上の風車が検討されている。将来の洋上風車設計は、前述のように、可能な構成部品レベルの進歩の多くから恩恵を得ることができる。にもかかわらず、洋上用途の大型風車の開発は、依然として大きな研究課題であり、構成部品の設計及びシステムレベルの分析における継続した進歩が必要である。大型化に伴い、翼、タワー、及びナセルの重量を減らすコンセプトがより重要になり、陸上風力発電技術に組み込まれる可能性のある進歩より大きな進歩の機会が提供される。風車の大型化に加え、騒音及び景観への影響の懸念が小さい場合、洋上用途の設計基準は緩やかになる可能性がある。その結果として、2 枚翼ダウンウィンド風車などその他の新型風車のコンセプトが調査中である。風下風車の設計により、コストのかからないヨーメカニズムと弾性、及び柔軟性のある翼の使用を可能にする (Breton and Moe, 2009)。最終的に、革新的な風車コンセプトや既存の設計の大幅な向上には、風力及び波浪負荷に対する風車の動学的反応など、洋上風車が設置された動作環境を取り込むために改善した風車モデルが必要になる (7.7.4 節参照)。

7.7.4 基礎となる科学の重要性

風力エネルギー技術は、今日急速な規模で普及が進みつつあるが、コスト削減及び性能向上の継続的なイノベーションのための大きな潜在的可能性が残っている。国際的な風車の設計及び安全基準により、新しいコンセプトの商業化の前に必要な分析及び検査のレベルが決定づけられる。同時に、技術イノベーションは、設計基準や分析ツールを物理的解釈の限界に達せさせる。それゆえ、信頼性の高い安全な費用効率の高い新世代の風車を促進し、風力発電の立地及び設計を最適化するために、風車や発電所の動作環境の基本的理解を深めるための大規模な取り組みが必要である。

風車は困難な環境において稼働し、最小の注意で幅広い状況に耐えるように設計されている。風車は、重力、遠心分離機と惰性、及びジャイロ負荷、また不安定な空気力学的や液体力学的 (洋上)、腐食効果により強いられた、複雑で非線形力学系システムである。近代的な風車は、複雑で、ミクロンから数千キロメートルの範囲の規模にわたって発生する現象の影響を受ける大気圏 (50~200m まで) の層でも稼働する。これらの規模全体にわたる正確で信頼性の高い風速測定や計算は重要である。さらに、多くの領域における基礎的な科学研究は、この運用環境 (異常気象など) とそれが風車及び風力発電所に与える影響の物理的理解を深めることができる。たとえば、空力弾性、非定常な空気力学、空力音響学、最新の制御システム及び大気科学などの領域における研究は、過去に設計

容量の向上を達成した。こうした領域における継続的な研究は、数学的モデル及び実験データを継続的に改善することが見込まれているが、これによって、予想外の風車不良のリスクを低減し、技術の信頼性を高め、さらなる設計のイノベーションを推し進めることになる。

物理特性は強固に結びついているが、4つの主要な時空間レベルには、以下の追加的な研究が必要である。(1) 個々のタービンに影響を与える風況、(2) 風力発電所の立地と配置の効果、(3) 中規模の大気に関するプロセス、(4) 世界規模及び地域の気候への影響。

個々の風車に影響を与える風況には、風流場の詳細な特徴、風車とそれらの風流の相互関係が含まれている。風車の空気力学は、不安定で動的失速に関連する負荷振動を作り出す回転翼流場における3次元効果により複雑化する。しかし、こうした空気力学的効果を理解することは、風車設計に使用できるほど正確な負荷予測を行う際に重要である。この点において、これらの効果は、風洞及び現地実験に基づき確認・定量化されており (Schreck et al., 2000, 2001; Schreck and Robinson, 2003; H. Madsen et al., 2010)、これらの効果の実証モデルが開発されてきた (Bierbooms, 1992; Du and Selig, 1998; Snel, 2003; Leishman, 2006)。現在、これらの空気力学的モデルは、翼の長さに合わせた空気力学的力を計算するための、解析及び実験に基づくモデルにより補強された翼要素のモーメント法 (Spera, 2009) に依存している。しかし、効果的なコンピュータによる流量ダイナミクスコードの利用可能性や、改善された予測的正確性を伝える可能性により、幅広い用途が促進されつつある (M.O. Hansen et al., 2006)。一方、空力弾性モデルは、風車システムを通して、空気力学的力を構造的反応に変換することに使用される。風車の規模の拡大と最適化に伴い、構成部品の構造的適応性は必然的に増加し、風車の振動数の増加を引き起こし、大きな役割を果たすことになる。こうした影響を説明するために、将来の空力弾性ツールにより、ロータ全体における風力流入量、高次振動モード、非線形翼偏向と空力弾性の減衰、及び不安定度における大きな変動をより適切にモデル化しなければならない (Quarton, 1998; Rasmussen et al., 2003; Riziotis et al., 2004; M.H. Hansen, 2007)。翼に対する新規の負荷緩和制御技術 (変形可能な後縁など) (Buhl et al., 2005) の応用には、これらの構造に適応される空力弾性ツールに基づく分析が必要である。同様に、光検出や測距 (Harris et al., 2006) や圧力プローブ測定 (T. Larsen et al., 2004) など、翼より前での風速計測に使用する制御システムの調査には、改善された空力弾性ツールも必要である。洋上風力発電は、空力弾性ツールが、風力及び波浪の複合負荷にさらされるため、風車及び基礎・支持プラットフォームの動的連成応答をより適切にモデル化することが必要となる (Passon and Kühn, 2005; Jonkman, 2009)。最終的に、空力音響的騒音 (つまり、風車翼の騒音) は、風車の問題であり (Wagner et al., 1996)、これらの影響をより深く理解・管理するために、さらに多くの最新式ツールが開発中である (Wagner et al., 1996; Moriarty and Migliore, 2003; Zhu et al., 2005, 2007; Shen and Sørensen, 2007)。風車の空気力学的と空力弾性、及び空力音響的モデルが進化するにつれ、研究用風車の空気力学的手法 (Hand et al., 2001; Snel et al., 2009) の重要な役割 (Simms et al., 2001 など) が、これまで以上に明白になり、将来における高度な研究所及び現地実験の必要性も同じく明白になっている。風車は現在、理論上最大値に到達するレベルで、風力からエネルギーを抽出しているが、空気力学的現象の理解の向上によって、負荷の計算がより正確になるため、より軽量化された、低価格の、信頼性の高い、高性能の風車の開発が可能になる。

風力発電所の立地及び配置の効果は、発電所レベルで、エネルギー生産や設備の信頼性に影響を与える。風力発電所の規模が拡大し、洋上に移動するにつれ、このような影響はより重要になる。ロータ後流によって風下風車に空力弾性の影響が及ぶ (G. Larsen et al., 2008)。よって、風車後流の改善モデル (Thomsen and Sørensen, 1999; Frandsen et al., 2009; Barthelmie and Jensen, 2010) によって、エネルギー回収のより信頼性の高い予測、及び大規模かつ複数列の陸上及び洋上風力発電所における疲労負荷の適切な推定値を出すことができる。こうした理解の向上が、次に、エネルギー回収低下を最小限に抑え、後流ベースの負荷影響を制御することを目的とした、風車及び風力発電所の設計につながる可能性がある。

惑星境界層研究は、様々な大気安定度効果及び複雑な地表特性の存在下で、風流量や乱流を正確に判断する際に重要である。中規模の大気プロセスにおける研究の目的は、中規模及び地域の風流量の基本的な理解を向上させることである (Banta et al., 2003; Kelley et al., 2004)。風車レベルの空気力学的及び配置の後流効果の理解に寄与したことに加え、中規模の大気プロセスを深く理解すれば、風エネルギー資源の評価の向上や予測方法の改善にもつながる。100~1,000mの範囲 (つまり、現在の性能における顕著な格差) (Wyngaard, 2004) における空間的スケールを決定する物理的及び統計的モデルは、この研究の中心的役割を果たすだろう。

最終的に、地球規模及び地域的な気候への影響と、風力エネルギーの相互作用に関するさらなる研究は正当化されている。具体的には、将来の風力発電性能予測の信頼性を高めるために、風資源の変動性における過去の傾向を確認及び理解するための研究が必要とされる。本章で前述されたように、気候変動が風力エネルギー資源の状態に与える可能性のある影響、及び風力エネルギー開発が、局地的、地域的、及び地球規模の気候に与える影響に関するさらなる研究もまた正当化されている。

上記の領域の大部分における大きな進歩には、総合的な研究が必要である。計算や理論の裏付けを与え実証するために、状況に合わせて実験や観測を利用する必要性もまた重要である。このように開発されたモデルは、(1) 風

車の設計、(2) 風力発電所の性能推定値、(3) 風資源評価、(4) 短期的風力発電出力予測、(5) 風力発電の大規模な普及が地域の気候に与える影響の推定値と、潜在的な気候変動効果が風資源に与える影響、を向上させるのに役立つ。

7.8 コストの動向⁴³

風力発電のコストは 1980 年代以降に大幅に低減したものの、世界の大半の地域では、風力発電を迅速に普及するための政策措置が現在でも必要である（NRC, 2010b など）。ただし、良質な風資源に恵まれた一部の地域では、風力発電のコストは現在のエネルギー市場価格に対して競争力を持っている（Berry, 2009、IEA, 2009、IEA and OECD, 2010 など）。さらに、陸上及び洋上の風力発電技術に関して今後も見込まれる継続的な進歩により（7.7 節）、コストはさらに低下すると予想される。世界及び各地域で風力エネルギーがどの程度利用されるかは、ひとえに他の電源と比較した風力発電の経済的パフォーマンス次第であろう。

本節では、風力エネルギーのコストに影響する要因について述べ（7.8.1 節）、風力発電所のコストと性能の過去の傾向を取り上げる（7.8.2 節）。また、2009 年における風力発電のデータ集計と均等化発電原価の推定（7.8.3 節）、さらなるコスト削減の可能性に関する予測の概要（7.8.4 節）を紹介する。他の電力源と比較した風力エネルギーの経済的競争力については、補助金や環境外部性などの他の要素も必然的に含んでおり、本節では扱わない⁴⁴。また、本節の中心テーマは、風力エネルギーの発電コストである。系統連系や送電のコストについては、基本的に本節ではなく 7.5 節で検討するが、本節で示す投資コストの金額の中に系統連系に関するコストが含まれることもある。

7.8.1 風力エネルギーのコストに影響する要因

陸上及び洋上の風力発電所の均等化発電原価は、年間発電電力量、投資コスト、運転保守コスト、資金調達コスト、発電所の想定耐用年数という 5 つの主な要因の影響を受ける⁴⁵。利用可能な支援政策や他の電力供給手段のコストも風力エネルギーのコスト（と価格）に影響を与える可能性があるが、本節では取り上げない。

風資源の性質は、場所と時間によって異なる。風力発電所を新設するにあたって、風資源の性質が年間発電電力量を大きく左右し、また、最も重要な経済的要因となる（Burton et al., 2001）。最大の発電電力量を得るには、風力発電所の精密なマイクロサイティングと、さらに個々の風車が極めて重大となる。直径の大きいロータと高いタワーを備えた風車が増えてきたことで、単位設備容量あたりの年間発電電力量が増加し、風資源の少ない地域にある発電所の経済的競争力も向上した。同時に、大規模の風力発電所に関して、風上の風車が風下の風車の発電電力量に影響を及ぼすアレイ効果について考慮するようになった。一般に、洋上発電所は陸上発電所よりも良質な風資源を享受する（EWEA, 2009）。

風力発電所は資本を多く必要とする。耐用年数の間において、初期投資コストは全体支出の 75～80%を占め、次に大きいのが運転保守コストである（Blanco, 2009、EWEA, 2009）。投資コストには、風車のコスト（風車代、設置場所までの輸送費、設置費）、系統連系（ケーブル、変電所、連系）、土木工事（基礎、道路、建物）、及びその他のコスト（エンジニアリング、認可、許可、環境評価、測定器）が含まれる。表 7.4 は、最新式の風力発電所における投資コスト要素の大まかな内訳を示したものである。陸上発電所の総投資コストのうち、風車のコストが 70%以上を占めている。残りの投資コストは、サイトによって大きく異なる。洋上風力発電所の場合は、上述のその他のコストの占める割合が大きく、風車のコストは全体の 50%未満である場合が多い。水深や陸からの距離など、サイト固有の特性は、系統連系、土木工事、及びその他のコストに大きく影響する。また、洋上風車の基礎と構内電力系統についても、陸上発電所に比べてコストが大幅に高くなる。

表 7.4: 陸上及び洋上の風力発電所に関するコスト配分（出典: Blanco, 2009、EWEA, 2009）

コスト要素	陸上 (%)	洋上 (%) [※]
風車	71-76	37-49
系統連系	10-12	21-23
土木工事	7-9	21-25
その他の投資コスト	5-8	9-15

※洋上コストのカテゴリは、元の研究データを統合整理したものの。

⁴³ 本節におけるコストの説明は、民間投資家の観点に限定したものである。1 章、及び 8～11 章では、統合コストや外部コストと便益、経済全体のコストや政策コストなど、コストの問題について補足的な観点で説明している。

⁴⁴ 再生可能資源及び非再生可能資源の環境影響とコストについては、それぞれ第 9 章、第 10 章に概要を述べている。

⁴⁵ 撤去コストも発生するが、ほとんどの場合、多額にはならないと思われる。

風力発電所の運転保守コストには、借地代、保険料、税金、管理費、予測サービス代などの固定費と、予備部品などの風車の維持修理に関する変動費が含まれる。風力発電所の耐用年数の間、発電所の総支出の約 20%は運転保守コストが占め (Blanco, 2009)、運転保守コスト総額のおよそ 50%は、保守、修理、予備部品に直接関係している (EWEA, 2009)。洋上風力発電所に関しては、技術の成熟度が低く、また特に悪天候時に洋上風車へのアクセスが難しくコストもかかるため、陸上発電所に比べて運転保守コストが高くつく (Blanco, 2009)。

借入や株式発行のコスト、借入金や株式の比率に応じた利用などの資金調達手段、そして風力発電所の予想耐用年数も風力エネルギーのコストに影響を与えることがある。例えば、アメリカでは、資本コストを最小化しながらもインセンティブを利用できる、オーナーシップと資金調達の体制が発達している (Bolinger et al., 2009)。風力エネルギーを支援する政策手法の予測可能性が資金調達コスト、最終的には風力エネルギーのコストに大きく影響する可能性があることは、他の研究でも判明している (Wiser and Pickle, 1998, Dinica, 2006, Dunlop, 2006, Agnolucci, 2007)。洋上風力発電所は比較的新しいため、陸上発電所に比べて稼働実績のリスクも資金調達コストも高く (Dunlop, 2006, Blanco, 2009)、洋上風力発電の開発と所有において大企業が優位となる傾向がある (Markard and Petersen, 2009)。

7.8.2 過去の傾向

7.8.2.1 投資コスト

商用風力発電の普及開始から 2004 年頃までは、陸上風力発電所の平均投資コストは減少した一方で、風車のサイズは大幅に大きくなった⁴⁶。この間、風車技術は世代を経るごとに設計が向上し、風車も大型化したことで投資コストが減少した。こうした傾向は、デンマークとアメリカの過去の投資コスト・データにも現れている (図 7.20)。しかし、2004 年から 2009 年にかけて投資コストが増加した。こうしたコスト増加の原因については、7.8.3 節で説明する。

⁴⁶ 本節及び後に 7.8 節で示す投資コスト (及びそれを元に算出される均等化発電原価の推定値) には通常、風車のコスト (風車代、設置場所までの輸送費、設置費)、系統連系 (ケーブル、変電所、連系。ただし汎用的な系統拡張コストは除く)、土木工事 (基礎、道路、建物)、及びその他のコスト (エンジニアリング、認可、許可、環境評価、及び測定器) が含まれる。系統への連系コストが含まれるか否かは出典によって異なり、不明瞭な場合もある。「基幹」送電系統増強に関連するコストは通常含まれない。

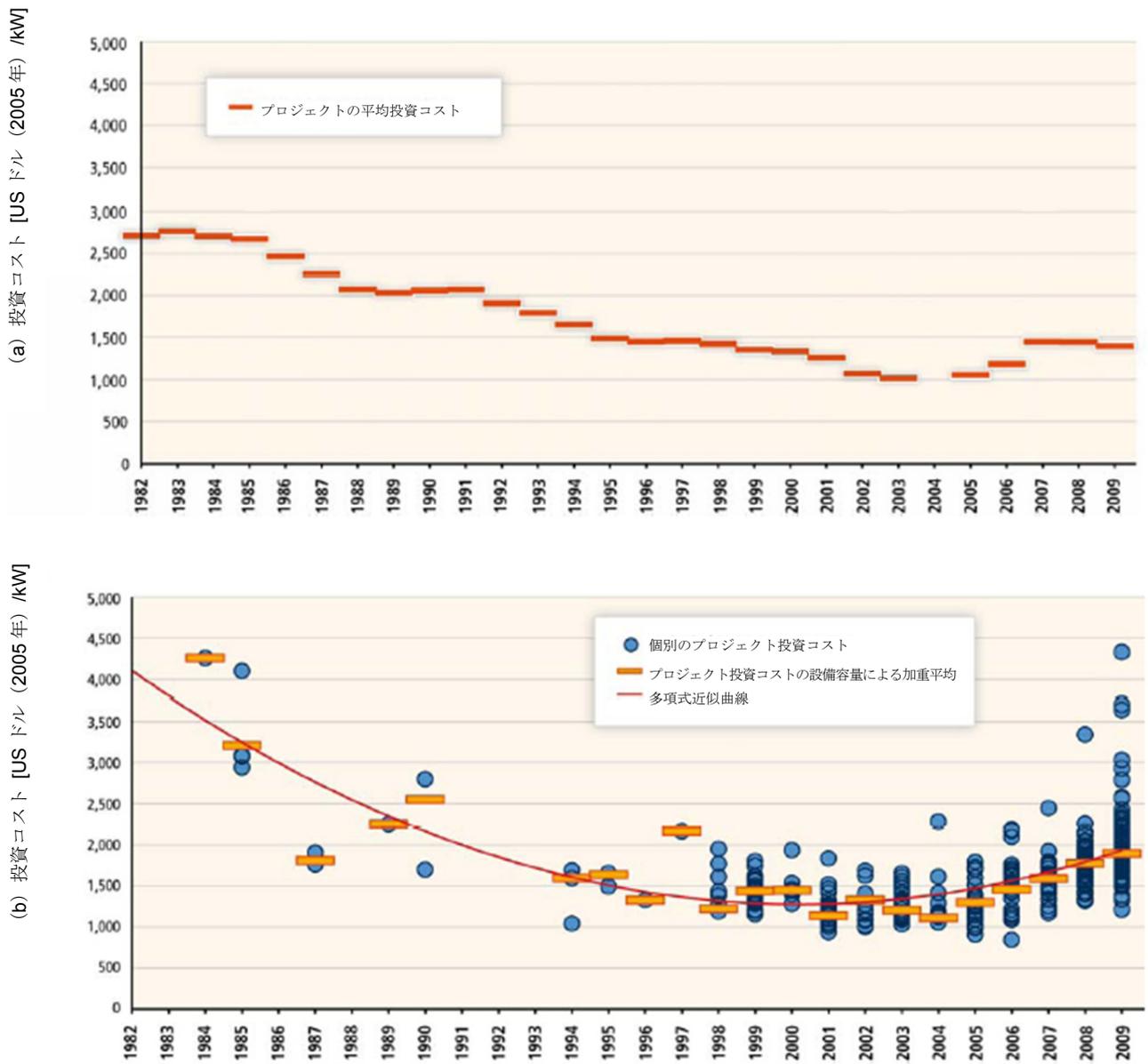


図 7.20: (a) デンマーク（出典: Nielson et al., 2010）と (b) アメリカ（Wiser and Bolinger, 2010）における陸上風力発電所の投資コスト

洋上風力発電所の実績は非常に少ないうえに、洋上発電所の投資コストはサイトによって大きく異なる。限定的データではあるが、洋上発電所の過去の投資コストを見ると、陸上発電所に比べて 50~100%以上高い (BWEA and Garrad Hassan, 2009, EWEA, 2009)。また、これまでに建設された洋上風力発電所は、比較的浅水域の、比較的陸の近くに建設されたものが多いため (7.3 節参照)、深水域の陸から遠くに建設するとコストが高くなると予想される。図 7.21 は、稼働中及び計画中の洋上風力発電所における投資コストのデータを示す。7.8.3 節に述べるが、2004~2009 年の陸上コスト上昇と同じ要因 (及びいくつかの独自要因) に洋上コストも影響を受けており、2004~2009 年に洋上発電所の平均投資コストが倍増する結果を招いた (BWEA and Garrad Hassan, 2009, UKERC, 2010)。

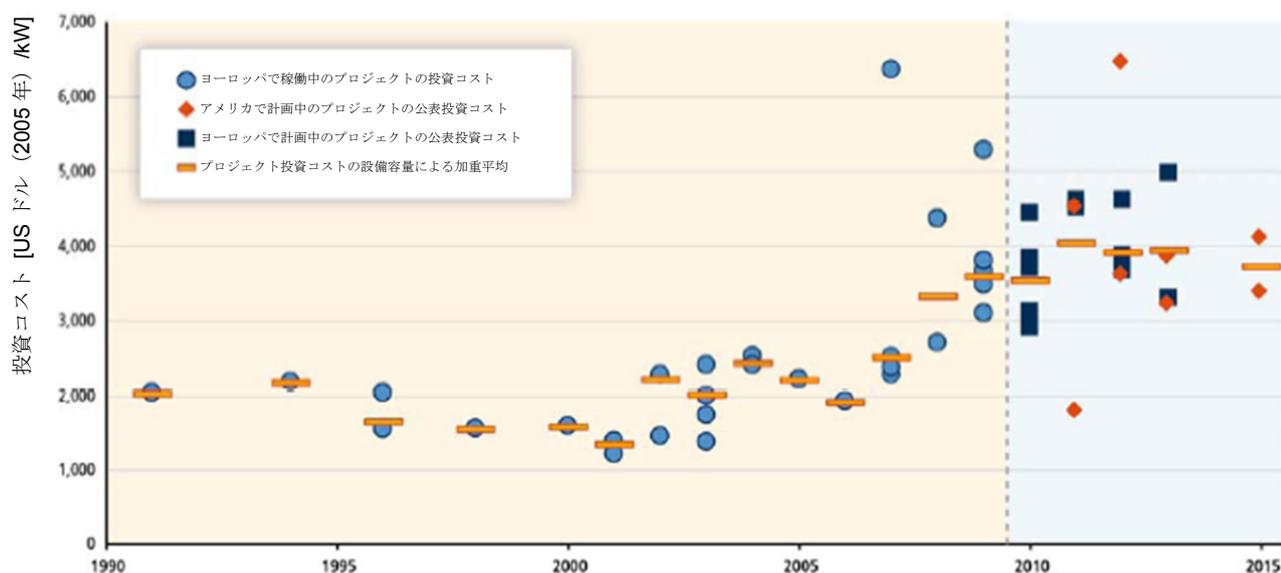


図 7.21: 稼働中及び計画中の洋上風力発電所の投資コスト (Musial and Ram, 2010)

7.8.2.2 運転保守

IEC 規格に合致する最新の風車は 20 年耐久設計であり、運転保守コストが許容レベルであれば、発電所の耐用年数は 20 年を超えると予想される。しかし、20 年以上前に建設された風力発電所はほとんど存在しないため、20 年の耐用年数にわたって稼働した発電所の実績はわずかしかない (Echavarria et al., 2008)。さらに、20 年の耐用年数以上を経た発電所の風車は現在の風車よりも小さく、性能も低い傾向にある。また初期の風車は、今より控え目な基準を用いて設計されている上に、準拠する規格も今日に比べて厳正ではない。つまり、最新式風車の運転保守コストを推定する際に、初期の発電所はあまり目安にならない。

通常、風力発電所稼働開始後 2 年間にかかる運転保守コストの一部は、風車購入費に含まれるメーカー保証の範囲であり、その間のコストはその後の期間に比べて低くなる。また、風車の形式が新しいほど、古い形式に比べて初期の運転保守コストは低くなる傾向があり、風車が古くなるにつれて維持コストが増加する (Blanco, 2009, EWEA, 2009, Wiser and Bolinger, 2010)。過去に生じた洋上風力発電所の運転保守コストは、陸上発電所よりも高い (Junginger et al., 2004, EWEA, 2009, Lemming et al., 2009)。

7.8.2.3 エネルギー生産

風力発電所の運転性能はサイトに大きく左右され、場所と時間によって異なる地域の風況の特性に最も影響される。また、風力発電所の運転性能は、風車の設計最適化と運転性能及び利用可能性に影響を受けると同時に、運転保守手順の有効性にも影響される。1970 年代から 1980 年代にかけて向上した資源評価及び立地選定の手法が風力発電所の生産性向上において大きな役割を果たした。タワーの高層化やロータの大型化といった風力エネルギー技術の進歩も、エネルギー回収量の向上に貢献している (EWEA, 2009)。

設備利用率は、発電所レベルではそれぞれ大きく異なるが、アメリカの陸上風力発電所の大規模サンプルにおけるフリート全体の平均設備利用率⁴⁷データからは、平均設備利用率は徐々に高くなる傾向が伺える。これは、最近建設された風力発電所ほど、過去に建設された発電所より平均設備利用率が高いためである (図 7.22)。設備利用率が向上した最大の要因はハブ位置が高くなったこととロータの大型化である。この時期に建設された図 7.22 に含まれる風力発電所のうち、最近建設された発電所は概して、風況が比較的悪い場所に立地していた。

⁴⁷ 風力発電所の設備利用率は、運転性能の指標の一部に過ぎない (EWEA, 2009)。風車製造事業者の大半は、一定の発電機容量に対して、ロータの直径とハブ高さの選択肢を複数用意している。通常、一定の発電機容量に対してハブの位置を高くするかロータを大型化する、または平均風速を上げると、設備利用率は上がる。しかし、様々な風車の比較において、大容量の発電機を採用すれば年間エネルギー回収量を高めることができるが、設備利用率は下がることになる。

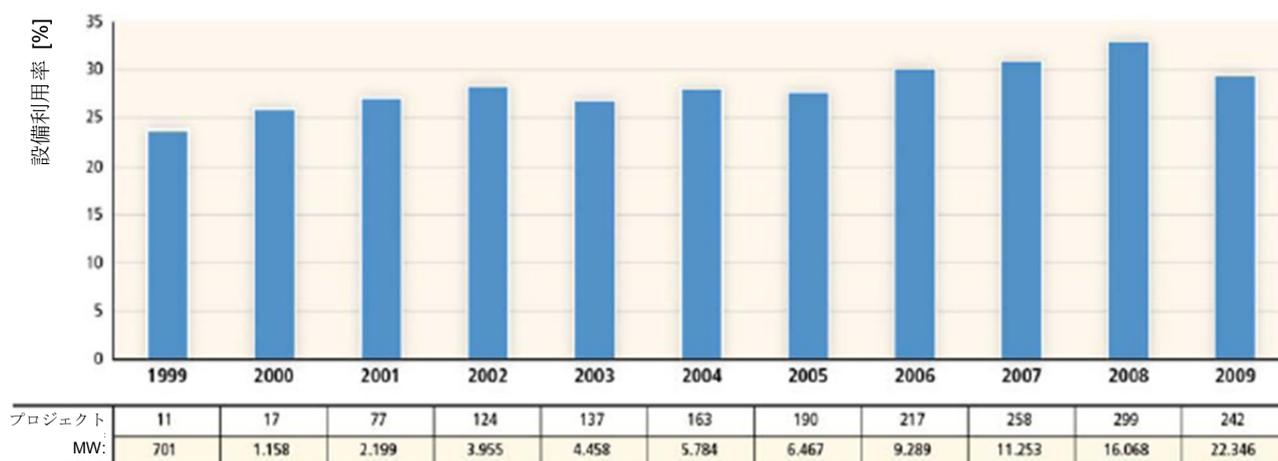


図 7.22: アメリカ陸上風力発電所の大規模サンプルにおけるフリート全体の平均設備利用率（1999～2009 年）（Wiser and Bolinger, 2010）。

別の基準を用いて風力発電所のパフォーマンスを測定すると、ある特定の風況サイトに関して、ロータの受風面積 1 平方メートルあたりの年間発電電力量 (kWh/m^2) が直近の 15 年間で 1 年あたり 2～3%改善されたとの記録がある (IEA, 2008、EWEA, 2009)。

7.8.3 現在の状況

7.8.3.1 投資コスト

2009 年に全世界で設置された陸上発電所における平均投資コストはおよそ 1,750US ドル (2005 年) /kW であり、多くの発電所で 1,400～2,100US ドル (2005 年) /kW の範囲内であった (Milborrow, 2010)。IEA Wind (2010) のデータもこの範囲にほぼ一致している。2009 年にアメリカに設置された風力発電所の平均投資コストは、1,900US ドル (2005 年) /kW であった (Wiser and Bolinger, 2010)。世界平均よりも低コストを達成した市場もある。例えば、2008～2009 年の中国においては、風車製造の中国系有力企業数社が低コストの風車を提供したこともあり、平均投資コストは約 1,000～1,350US ドル (2005 年) /kW だった (China Renewable Energy Association, 2009、Li and Ma, 2009、Li, 2010)。

風力発電所の投資コストは 2004～2009 年にかけて増加したが (図 7.20)、これは主に風車価格の上昇による (Wiser and Bolinger, 2010)。風車価格上昇の要因は複数ある。ロータの直径が大きくなり、ハブ位置も高くなったことで新型風車のエネルギー回収量が増えたのもその一つである。しかし、パフォーマンスの向上には、風車のコスト (kW あたりの US ドル額) 増加が伴った。また、2004～2008 年半ばにかけて、世界経済の目覚ましい成長の結果、鉄、銅、セメント、アルミニウム、炭素繊維などの原料コストも急騰した。さらに、この間の強い風車需要が人件費への上向き圧力となり、風車製造業者や部品供給業者の利ざや増大を可能にした。供給可能量を超える強い需要は、増速機や軸受などの重要な部品に対しても圧力となった (Blanco, 2009)。さらに、風車製造業者の多くは、歴史的にヨーロッパを基盤としており、重要な部品も同様にヨーロッパで製造されてきたため、特定の国々においては、ユーロの外貨に対する相対価値変動も風車価格の値上がりにも寄与した。風車製造事業者や部品製造事業者は、この間、製造設備の拡充や追加を行って供給不足に対応した。その結果、2008 年後半に世界金融危機により原料コストが低下し始めたこととも相まって、風車価格は 2009 年に下落し始めた (Wiser and Bolinger, 2010)。

稼働中の洋上風力発電所の数が比較的小さいため、投資コストのデータは乏しい。限定的なデータではあるが、洋上風力発電所の平均コストは陸上発電所に比べて非常に高い。また、陸上発電所のコスト増加要因が洋上発電所部門にも同様の影響を与えている。洋上発電所市場向け風車製造事業者の供給力が不十分で、洋上発電所を設置する船舶の供給数も限られていたこと、また、洋上発電所の設置場所の水深が次第に深くなり、陸から遠くなっていったために、コスト上昇は 2004 年以降に激化し、初期 (2005 年以前) の実証プラントに関わった企業間での競争も熾烈化した (BWEA and Garrad Hassan, 2009、UKERC, 2010)。その結果、2006～2009 年の間に建設、または 2010 年代初頭に計画された 50MW 超の規模の洋上風力発電所の投資コストは、およそ 2,000～5,000US ドル (2005 年) /kW であった (BWEA and Garrad Hassan, 2009、IEA, 2009、Snyder and Kaiser, 2009a、Musial and Ram, 2010)。最も新しく建設されたか、計画が発表された発電所は、この範囲の上方 3,200～5,000US ドル (2005 年) /kW に集まっている (Milborrow, 2010、Musial and Ram, 2010、UKERC, 2010)。この時期の投資コストは、2000～2004 年のコストに比べておおよそ 100%ほど高い (BWEA and Garrad Hassan, 2009、Musial and Ram, 2010、UKERC, 2010)。洋上発電所の水深は深くなってきているものの、稼働中の発電所の大多数は、比較的浅水域に建設されている。深水域の洋上発電所はコストが高つくが、一般的になりつつあり、計画中の発電所のコストはある程度その影響を受け

ている。

7.8.3.2 運転保守

保険料や借地代、定期保守費などの固定的な運転保守コストは比較的推定しやすいが、修理や予備部品などの変動コストは予想が難しい (Blanco, 2009)。運転保守コストは、風力発電所ごとに異なり、とりわけ風車の種類と使用年数、地域のインフラ供給状況に左右される。陸上風力発電の均等化運転保守コスト推定値は、たいていの場合 1.2~2.3US セント (2005 年) /kWh の範囲であり (Blanco, 2009)、この数字は EWEA (2009)、IEA (2010c)、Milborrow (2010)、及び Wisner and Bolinger (2010) が報告したコストにほぼ一致する。

洋上風力発電の運転保守コストについて経験的なデータはほとんど無い。その大きな理由は、稼働中の発電所数が少ないことと、発電所の稼働年数が短いことにある。2002 年以降に設置された洋上発電所の運転保守コストは、2~4US セント (2005 年) /kWh (EWEA, 2009, IEA, 2009, 2010c, Lemming et al., 2009, Milborrow, 2010, UKERC, 2010) と報告または推定されている。

7.8.3.3 エネルギー生産

陸上風力発電所のパフォーマンスは地域の資源状況に大きく左右され、設備利用率が 20%未満~50%以上と非常に幅が広い。国別で比べた場合の平均パフォーマンスの差異には、風資源状況や導入している風車技術の違いが現れている。ドイツ国内の発電所の平均設備利用率の推定値は 20.5% (BTM, 2010)、ヨーロッパの国レベルでの平均設備利用率は 20~30% (Boccard, 2009) である。中国の平均設備利用率はおよそ 23% (Li, 2010)、インドの平均設備利用率は約 20% (Goyal, 2010) と報告されており、アメリカの風力発電所の平均設備利用率は 30%を超えている (Wisner and Bolinger, 2010)。洋上風力発電所については、設備利用率の範囲が狭いことが多い。標準的な値は、これまでにヨーロッパに設置された発電所の平均値の 35~45%である (Lemming et al., 2009) が、イギリスの一部の洋上発電所は約 30%の設備利用率を経験している。部品の故障率の高さと、現地へのアクセスにおける制約の大きさが要因の一端である (UKERC, 2010)。

このように、国や個々の発電所によって運転性能は異なる。主な要因は地域の風資源状況であるが、風車の設計と稼働状況の影響も受けている。そのため、風力エネルギーの均等化発電原価の推定値には、発電電力量の推定範囲を記さなければならない。また、陸上発電所より大きな発電電力量を得られる可能性によって洋上発電所の魅力が増すため、陸上と洋上の風力発電間の運転性能の差異も考察しなければならない。

7.8.3.4 均等化発電原価の推定値

Annex II で概説した手法を用いて算出した風力エネルギーの均等化発電原価を図 7.23 に示す。陸上風力発電には 2009 年に建設された発電所の推定値を、洋上風力発電には、2008 年から 2009 年にかけて建設された発電所と 2010 年代前半に竣工予定の発電所の推定値を用いた⁴⁸。風資源の性質の差がもたらすコストの差異がわかるよう、推定発電電力量に対する推定均等化発電原価を示した。2つのグラフの X 軸は、6~10m/s の年間平均風速とほぼ相関がある。陸上風力発電の想定投資コストは、1,200~2,100US ドル (2005 年) /kW (中間レベル値 1,750US ドル (2005 年) /kW) であり、洋上風力発電の想定投資コストは、3,200~5,000US ドル (2005 年) /kW (中間レベル値 3,900US ドル (2005 年) /kW) である⁴⁹。発電所の耐用年数の間における陸上と洋上の風力エネルギーの均等化運転保守コストは、それぞれ平均 1.6US セント (2005 年) /kWh、3US セント (2005 年) /kWh と想定した。発電所の設計耐用年数は 20 年と想定し、3~10%の割引率 (推定中間値 7%) を用いて、均等化発電原価の推定値を算出している⁵⁰。税金、政策上の優遇措置、電気系統への連系コストは、計算に含まれていない⁵¹。

⁴⁸ 近年、投資コストが上昇しているため、最近建設した発電所及び計画中の発電所のコストを用いることで、「現在の」洋上風力発電のコストがほぼ反映される。

⁴⁹ 本節で先に示したデータによると、陸上、洋上の風力発電発電所の投資コストの中間レベル値は、値域の最高値と最低値の相加平均ではない。

⁵⁰ 陸上及び洋上の風力発電に対して同じ割引率範囲と中間値を用いているが、現在、洋上風力発電発電所の資金調達コストは陸上発電所よりも高くなっている。そのため、洋上発電所の実際の均等化発電原価は、少なくとも陸上発電所の比較において、図に示す範囲のより上方に位置する傾向にある。

⁵¹ 一般に、撤去コストは低いと想定されるため、この計算には含まれていない。

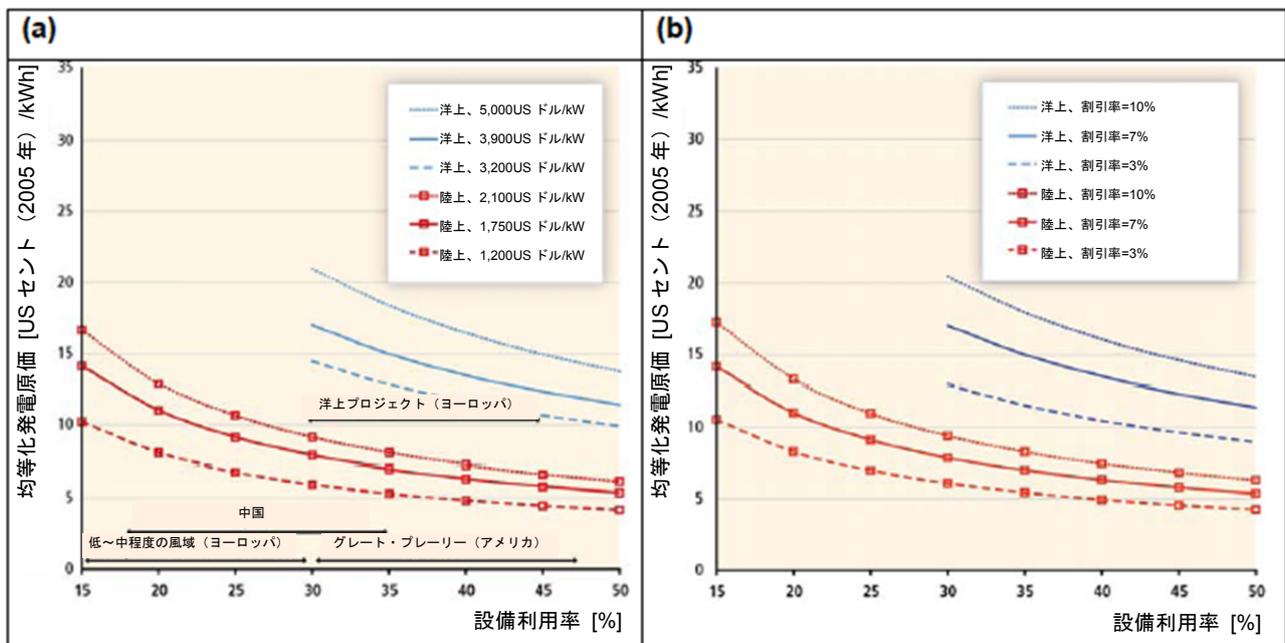


図 7.23: (a)設備利用率と投資コストの関数(※)としての、また(b) 設備利用率と割引率の関数(※)としての陸上、洋上風力風車の均等化発電原価推定値 (2009 年)

注:

※割引率は 7%と想定。

※※投資コストは陸上 1,750US ドル (2005 年) /kW、洋上 3,900US ドル (2005 年) /kW と想定。

陸上及び洋上の風力発電の均等化発電原価は、想定投資コスト、発電電力量、割引率によって大きく異なる。陸上風力発電の場合、風況が良好～極めて良好である地域における均等化発電原価の推定値は、平均 5～10US セント (2005 年) /kWh である。風況の劣る地域においては、均等化発電原価が 15US セント (2005 年) /kWh に達する可能性もある。中国とアメリカの風力エネルギーコストは、低い平均投資コスト (中国) 及び高い平均設備利用率 (アメリカ) のおかげで、推定値範囲の下方に位置する傾向にある。また、ヨーロッパでは概して平均設備利用率が低めであるため、推定値範囲の上方に位置する傾向にある。洋上コストの推定値についてはさらに不確実性が増すが、一般に洋上風力発電は陸上の場合よりもコストが高く、浅水域に近年建設されたか、現在建設予定である発電所の場合、標準的な均等化発電原価は、10～20US セント (2005 年) /kWh 超と推定される。利用可能な陸上風資源が限られている場合、洋上風力発電所は、陸上発電所と競合できる可能性もある。

7.8.4 風力エネルギーにおけるさらなるコスト低下のポテンシャル

風力エネルギー業界は、30 年以上にわたって発展し続けてきた。過去数十年に経験した劇的なコスト低下は今後いつまでも続く訳ではないが、7.7 節で述べたように様々な分野で技術進歩が見込まれることを考えると、さらなるコスト低下のポテンシャルは残っている。こうしたポテンシャルは、陸上、洋上の風力発電の両技術に存在する。しかし、洋上風力発電の技術が比較的未熟であることを考えると、洋上分野の方が大幅なコスト低下が期待できる。将来の風力エネルギーコストの予測には、一般に以下の 2 つの手法が使われ、これに専門家の判断をある程度合わせて用いることが多い。(1) 将来の風力エネルギーコストは過去のコストに基づく歴史的な学習曲線に相似する軌道をたどると想定した、学習曲線の推定値 (2) 新たな風力エネルギー技術や生産能力、またはそれらの向上がもたらすコスト低下の具体的な可能性を、エンジニアリングに基づいて推定した値 (Mukora et al., 2009)。

7.8.4.1 学習曲線の推定値

様々なエネルギー技術について過去のコストの傾向を把握し、将来のコスト低下を予測する際に、学習曲線は幅広く使われてきた (McDonald and Schratzenholzer, 2001, Kahouli-Brahmi, 2009, Junginger et al., 2010 など)。学習曲線は、特定の技術の累積生産量が増えるとそのコストが低下するという前提に基づいている。学習曲線の研究で算出する最も重要なパラメータは、学習率である。累積発電電力量または累積設備容量が倍増するごとに関連して下がるコストの割合が学習率である。10.5 節では、学習曲線を再生可能エネルギーに適応する際の一般的な考察を行う。

これまでに発表された複数の研究において、陸上風力発電の過去の学習率の評価が行われた (表 7.5 は、入手可能

な文献についての局所的な概要)⁵²。結果は様々であったが、これは、学習モデルの仕様の差異（複数の学習曲線の係数が1つまたは複数など）、選択した変数と想定システム境界の差異（投資コストや風車コスト、均等化発電原価の説明がされているか、世界または地域レベルの累積設備容量が用いられているか、風力発電所の設備容量ではなく国レベルの風車生産量が用いられているかなど）、及びデータの質やデータの対象期間の差異によって説明することができる。表 7.5 に示す風力エネルギーの学習率は 4～32%の範囲にあるが、上述及びその他の差異が存在するため、解釈と比較を正確に行なうには特別な注意が必要である。風力発電所の総投資コストと世界の累積設備容量に基づいて学習曲線の推定値を算出した、2004 年以降に完了した小規模な研究のみに着目すると、学習率の幅は 9～19%に狭まる。そのうちの最低値 (9%) は、風力発電所の投資コストが増加した 2004～2009 年のデータを含む唯一の数値である。

表 7.5: 陸上風力発電の学習曲線についての文献の概要

著者	経験による 学習率 (%)	世界または国内		データ期間
		独立変数 (累積容量)	従属変数	
Neij (1997)	4	デンマーク†	デンマーク (風車コスト)	1982-1995
Mackay and Probert (1998)	14	アメリカ	アメリカ (風車コスト)	1981-1996
Neij (1999)	8	デンマーク†	デンマーク (風車コスト)	1982-1997
Wene (2000)	32	アメリカ***	アメリカ (発電コスト)	1985-1994
Wene (2000)	18	EU***	EU (発電コスト)	1980-1995
Miketa and Schratzenholzer (2004) ***	10	世界	世界 (投資コスト)	1971-1997
Junginger et al. (2005)	19	世界	イギリス (投資コスト)	1992-2001
Junginger et al. (2005)	15	世界	スペイン (投資コスト)	1990-2001
Klaassen et al. (2005) ***	5	ドイツ、デンマーク 及びイギリス	ドイツ、デンマーク及びイギリス (投資コスト)	1986-2000
Kobos et al. (2006) *	14	世界	世界 (投資コスト)	1981-1997
Jamasb (2007) *	13	世界	世界 (投資コスト)	1980-1998
Söderholm and Sundqvist (2007)	5	ドイツ、デンマーク 及びイギリス	ドイツ、デンマーク及びイギリス (投資コスト)	1986-2000
Söderholm and Sundqvist (2007) *	4	ドイツ、デンマーク 及びイギリス	ドイツ、デンマーク及びイギリス (投資コスト)	1986-2000
Neij (2008)	17	デンマーク	デンマーク (発電コスト)	1981-2000
Kahouli-Brahmi (2009)	17	世界	世界 (投資コスト)	1979-1997
Nemet (2009)	11	世界	カリフォルニア (投資コスト)	1981-2004
Ek and Söderholm (2010) *	17	世界	ドイツ、デンマーク、スペイン、 スウェーデン及びイギリス (投資コスト)	1986-2002
Wiser and Bolinger (2010)	9	世界	アメリカ (投資コスト)	1982-2009

注:

※研究開発も含む 2 係数の学習曲線。他は 1 係数の学習曲線。

***独立変数は電力の累積生産量。

† 独立変数として累積風車生産量を使用。他は累積導入量。

これらのモデルを将来のコスト予測に使用する際は、制約がいくつか存在する (Junginger et al., 2010 など)。第 1 に、学習曲線は、導入量の増加に伴い過去にコストがどのように低下していったかを典型的に (そして単純化して) 表したものであるが、コスト低下の背後にある理由を包括的に説明するものではない (Mukora et al., 2009)。実際、コストの低下は、過去の学習による部分と、研究開発への支出や風車、発電所、製造設備の規模の大型化など他の要因による部分があるだろう。学習率の推定値にそうした要因の説明がない場合、除外変数バイアスが生じる可能性があり、ゆえに学習率推定値が不正確となる。第 2 に、学習曲線が将来のコストの傾向の予測に使われる場合、コストに影響を与えるであろう他の要因を考慮する必要があるとともに、過去のデータから算出した学習率が将来の傾向の推定に適切に用いられ得ることも想定しなければならない。しかし、技術が成熟するにつれてコスト低下における収穫逓減が期待できるため、学習率は下がるだろう (Arrow, 1962, Ferioli et al., 2009, Nemet, 2009)。第 3 に、風力エネルギーの発電コストは、投資コスト、運転保守コスト及び発電電力量の影響を受けるため、風力エネルギーに最適なコスト測定法は、間違いなく均等化発電原価であると思われる (EWEA, 2009, Ferioli et al., 2009)。

⁵² 洋上風力発電に関して、洋上発電所の実際のデータに基づいた有意な学習曲線を作成するには、時期尚早である。将来の洋上のコスト推定に学習率を用いた研究もあるが、そうした学習率は通常、判断と関連業界や洋上のサブシステムの学習率に基づいて合成されたものである。(Junginger et al., 2004, Carbon Trust, 2008b など)。

残念ながら、発表された研究のうち、均等化発電原価を用いて風力エネルギーの学習率を計算しているものは2つのみで (Wene, 2000, Neij, 2008)、ほとんどの研究は、より簡単に利用できる投資コストや風車コストを測定規準として用いていた。第4に、これまで発表された多くの研究は、各国または世界各地域における風力の累積設備容量または累積発電電力量に基づいて風力コストの傾向を説明しようとしてきた。しかし、風力エネルギー業界の対象は全世界であるため、現在行なわれつつある学習の多くは世界の累積設備容量に基づいている可能性が高い (Ek and Söderholm, 2010 など)。最後に、2004~2009年にかけて、風車と発電所の投資コストは学習効果に反して大幅に増加した。これは、原料費と人件費が上昇したこと、また製造事業者の利益率が上がったことがその原因の一端である。生産コストのデータは通常公表されないため、学習曲線の推定値は、多くの場合、原料費や製造事業者の利益率の変動に影響され得る価格データに依拠しており、動的な価格効果が考慮されていない場合、学習率の推定が厳密でない可能性がある (Yu et al., 2011)。

7.8.4.2 エンジニアリング・モデルの推定値

学習曲線は、将来の傾向を予測するために過去のデータの集計を考察するものだが、エンジニアリングに基づくモデルは、特定の設計の変更や技術進歩がもたらすコスト低下の可能性に着目するものである。エンジニアリングに基づく手法にも制約は存在するものの (Mukora et al., 2009)、このモデルは、コスト低下や発電電力量増加につながる技術進歩を定義することで、学習曲線の予測を裏付けることができる。

エンジニアリング・モデルは、7.7 節で述べたとおり、技術向上のポテンシャルが風力発電所の投資コストと発電電力量に与える影響を推定するのに用いられてきた。アメリカエネルギー省 (2008) は、前述した技術進歩の可能性を (製造における学習効果と組み合わせて) 考慮の上、陸上風力発電の投資コストは、2008年の始点と比較すると2030年までに10%下落し、発電電力量はおよそ15%増加するだろうと推定した (表7.3及び表の下の注を参照)。

風力エネルギー技術、特に支持構造、電力系統設計及び運転保守コストにおける技術進歩のポテンシャルは、陸上よりも洋上の方が大きいのは間違いないだろう (7.7 節参照)。大規模な洋上風力発電所の建設も、より効率的な設置手順と専用船採用の契機となり、コスト低下につながると見込まれている。こうした技術向上がもたらすコスト低下のポテンシャルに基づいて、将来の均等化発電原価低下の推定が行われたこともあった。その際、他の業界のサブシステム・レベルの学習曲線推定値に依拠することもあった (Junginger et al., 2004, Carbon Trust, 2008b など)。

7.8.4.3 風力エネルギーの均等化発電原価予測

学習曲線の推定値、工学モデル、専門家の判断を様々に組み合わせた陸上および洋上風力発電のコスト軌道予想予測が、多くの研究で開発されている。これらの推定値は、想定したレベルの風力エネルギー普及率と関連があることがある (必ずではない)。そうした文献の代表的な例が、Junginger et al. (2004)、Carbon Trust (2008b)、IEA (2008, 2010b, 2010c)、US DOE (2008)、EWEA (2009)、Lemming et al. (2009)、Teske et al. (2010)、GWEC and GPI (2010) 及び UKERC (2010) である。

これらの研究の予測の開始年、方法論的アプローチ及び想定普及レベルは様々であるが、そうした差異を踏まえつつこうした最近の研究を見ると、均等化発電原価の低下幅は、陸上風力発電は2020年までに10~30%、洋上風力発電は2020年までに10~40%としている。洋上風力発電技術を対象とする研究の中には、少なくとも短期から中期的に見て、市場要素が洋上風力発電コストの継続的な上昇につながるというシナリオを割り出しているものもある (BWEA and Garrad Hassan, 2009, UKERC, 2010)。長期予測は想定普及レベルにさらに依存しており不確実性も大きい。上記の研究では、2030年には陸上風力発電の均等化発電原価は15~35%低下、洋上風力発電は20~45%低下としている。

これらの推定値を用いて、均等化発電原価のコスト低下率と陸上、及び洋上の風力発電の均等化発電原価の曲線を推測することができる。コスト予測は本質的に、予測期間が長期になるほど不確実性が増し、これまた不確実である普及レベルや研究開発支出に依拠する部分があるため、ここでは比較的短期の、2020年までのコスト予測に着目する。具体的には、7.8.3.4 節の2009年における均等化発電原価推定値の報告によると、陸上風力発電は5~15USセント (2005年) /kWhであったが、洋上風力発電の推定値は10~20USセント (2005年) /kWhであった。控えめに見ても、上述の報告におけるコスト低下率をこれらの2009年の均等化発電原価推定値に適用して、将来の均等化発電原価の低値と高値の予測を立てることが可能である⁵³。

⁵³ 本節で前述したコスト・ドライバーが存在したため、2009年の風力エネルギーコストは、その前の数年間よりも高かった。ゆえに、利用可能な文献のコスト低下率を2009年の開始点に適用する手法を用いると、将来のコスト低下の可能性が控えめに推定されることは間違いないであろう。別の手法として、利用可能な文献上のコスト推定値の絶対値を用いることも可能である。以上の理由から、また、この手の予測には潜在的な不確実性が付きものであることから、将

こうした想定に基づくと、陸上風力発電の均等化発電原価の範囲は、コスト低下率が高い（2020年までに30%）場合は2020年までにおよそ3.5～10.5USセント（2005年）/kWhに、コスト低下率が低い（2020年までに10%）場合は、4.5～13.5USセント（2005年）/kWhである。洋上風力発電については、ある程度のコスト低下がさらに見込まれるため、コスト低下率が高い（2020年までに40%）場合は、2020年までに約6～12USセント（2005年）/kWh、コスト低下率が低い（2020年までに10%）場合は9～18USセント（2005年）/kWhの均等化発電原価となる可能性がある⁵⁴。

将来の風力エネルギーのコストについては不確実性が存在する上に、風資源の質のばらつきによってコストに幅が生じることで、不確実性がより高くなっている。風力発電の設備容量が増えるに従って良質な資源に恵まれた立地から利用される傾向があり、コストが高い立地の開発が遅れることになる。その結果、学習効果だけではなく資源の枯渇も原因となって、風力エネルギーの均等化発電原価平均額が普及量に左右されるようになる。この「供給曲線」効果は、上記に示した推定値には盛り込まれていない。そのため、ここで示した推定値は、陸上及び洋上風力発電における技術進歩のポテンシャルの指標にはなるが、注意をもって用いなければならない。

7.9 普及のポテンシャル⁵⁵

風力エネルギーには、短期及び長期的に温室効果ガス排出量を削減する大きなポテンシャルがある。2009年度末の風力発電の設備容量は、世界の電力需要の約1.8%を充足することができ、本節で述べたとおり、2050年までに20%を超える可能性がある。世界規模では、風資源のさらなる普及が阻まれる可能性は低い（7.2節）。陸上風力発電技術はすでに急速な普及の途上であり（7.3節、7.4節）、電力部門の温室効果ガス排出量を早急に削減する上で一つの選択肢となっている。風況が良好～極めて良好である地域における陸上風力発電の平均発電コストは、5～10USセント（2005年）/kWh（7.8節）であり、電力系統への風力発電の連系を妨げる技術上克服不可能な障壁も存在しない（7.5節）。陸上及び洋上風力発電における継続的な技術進歩とコスト低下が期待でき（7.7節、7.8節）、長期的には風力エネルギーの温室効果ガス排出量削減ポテンシャルの向上が見込まれる。

本節では最初に、風力エネルギー普及の短期予測を考察する（7.9.1節）。次に、より長期的な視点で、風力エネルギー普及の展望と障壁、及び温室効果ガス濃度安定化レベルの各レベルの達成において風力エネルギー普及が果たす役割のポテンシャルについて説明する（7.9.2節）。どちらのサブ節も、エネルギー市場予測、及び2007～2010年に発表された温室効果ガスとエネルギーに関するシナリオを記載した文献に大きく依拠している。本節の最後に、簡潔な結論を述べる（7.9.3節）。本節では、Box 7.1で述べたとおり、大規模な陸上及び洋上の発電用風車について考察するが、風力エネルギーに関してはこのほかにも技術や応用分野が存在する。

7.9.1 短期予測

世界の風力発電容量は2000年から2009年にかけて急速に増加してきたが、多くの研究は、この増加が短期から中期的に続く見込んでいる（表7.6）。IEA（2010b）の「新政策」シナリオ及びEIA（2010）の「基準ケース」シナリオでは、2009年末に約160GWである風力発電の設備容量が2015年までにそれぞれ358GW（予想発電電力量2.7EJ/年）、277GW（予想発電電力量2.5EJ/年）に増えると予測している。風力エネルギーの業界団体はさらに急激な普及率の伸びを予測しており、IEAとEIAの過去の予測と実際の伸びの間には大きな差があると述べている（BTM, 2010、GWEC, 2010a）。しかし、こうした強気な予測においても、風力エネルギーが2015年までに世界の供給電力量に占める割合は5%未満であると推定している。2015年までの間に、アジア、北アメリカ、ヨーロッパが風力発電設備容量の増加を牽引することが予測される。

来のコストがここで示す範囲以外になる可能性がある。

⁵⁴ 前述のとおり、2009年の開始点における洋上風力発電の値は、比較的浅水域に近年に建設または計画された発電所の値に一致している。

⁵⁵ 普及のポテンシャルについては、本報告書の10.2節と10.3節において、エネルギーシステムに関する数多くのモデル・ベースのシナリオの総合的評価に基づいて補足的な見通しを述べる。

表 7.6: 世界の短期風力エネルギー予測

研究	風力エネルギー予測			
	設備容量 (GW)	発電電力量 (EJ/年)	世界の電力供給量における割合 (%)	年
IEA (2010b) ※	358	2.7	3.1	2015
EIA (2010) ※※	277	2.5	3.1	2015
GWEC (2010a)	409	データなし	データなし	2014
BTM (2010)	448	3.4	4.0	2014

注:

※「新政策」シナリオ

※※「基準ケース」シナリオ

7.9.2 二酸化炭素排出抑制からみた長期的な普及

多くの研究が風力エネルギーの長期的ポテンシャルの評価に取り組んでおり、温室効果ガス濃度安定化シナリオの文脈において評価することが多い。変動的でサイトに依存し、送電性の乏しい資源であるため、風力エネルギー拡大の経済的側面のモデル化にあたっては、独特の課題が存在する (Neuhoff et al., 2008 など)。風力エネルギーの長期的な普及に関しては、複数の研究の間で結果に差異が生じるが、そこに投入想定値や想定した政策、制度の状況が同じでないことのみならず、モデリングやシナリオ分析の手法が様々であることが表れている。

IPCC の第 4 次評価報告書は、陸上及び洋上の風力発電は 2030 年までに世界の供給電力量の 7%、8EJ/年 (2,200TWh/年) を占めると想定している (IPCC, 2007)。この数値は当然ながら、一般に引用される成り行き参考ケース予測より高い (IPCC の推定値は成り行き参考ケースのものではないが、地球の気候変動を緩和するための取り組みの文脈の中で算出されたもの)。例えば、IEA World Energy Outlook の「現行政策」シナリオでは、風力エネルギーは 2030 年までに 6.0EJ/年 (1,650TWh/年)、つまり世界の供給電力量の 4.8% に達するとしている (IEA, 2010b) ⁵⁶。アメリカエネルギー情報局 (EIA) は、2030 年の基準ケース予測において、風力エネルギーを 4.6EJ/年 (1,200TWh/年)、つまり中心的な生産者の純エネルギー生産量の 3.9% と予測している (EIA, 2010)。

第 10 章では、温室効果ガス濃度安定化シナリオの範囲において、再生可能エネルギー供給が将来的に世界のエネルギーニーズの充足に貢献する可能性について文献の概要を述べるが、ここでは風力エネルギーに注目する。世界の風力エネルギー供給量をモデル化した結果を図 7.24 に EJ/年で、また世界の供給電力量に占める割合を図 7.25 にパーセンテージで表す。図 7.24 と 7.25 は、約 150 の異なる長期的シナリオに基づくものである。様々なモデル化チームがこれらのシナリオの結果を算出しており、想定した変数は、エネルギー需要の拡大、競合低炭素技術のコストと利用可能性、再生可能エネルギー (風力エネルギーを含む) のコストと利用可能性など多岐に渡る。第 10 章では、こうした変数の変化が再生可能エネルギーの普及結果にどう影響を与えるのかについて説明し、10.2.2 節ではシナリオの引用元である文献について述べる。図 7.24 と 7.25 は、2020 年、2030 年、2050 年の各時点での IPCC 第 4 次評価報告書に基づく温室効果ガス濃度安定化の 3 つの範囲、つまりベースライン (二酸化炭素濃度が 600ppm 超)、カテゴリ III と IV (440~600ppm)、及びカテゴリ I と II (440ppm 未満) の各シナリオ (いずれも 2100 年までに達成) における風力エネルギーの普及結果を示す。結果については、シナリオ中央値、シナリオの 25~75 パーセンタイルの範囲とシナリオの最低値、及び最高値を表示する⁵⁷。

⁵⁶ IEA (2010b) の「現行政策」シナリオは、政府の既存政策のみを反映したものであり、過去の IEA の「基準ケース」予測に最も近い。また、IEA (2010b) は、発表済みの政府公約を盛り込んだ「新政策」シナリオも提示しており、その場合、2030 年までに風力エネルギーは 8.2EJ/年 (2,280TWh/年)、つまり世界の供給電力量の 7% に達するとしている。

⁵⁷ 数値の基礎となっている調査のようなシナリオアンサンブル分析では、シナリオは本当の意味でランダムサンプルではないという事実と、むしろシナリオ間にばらつきがあることで、将来に関する集合知または知識の欠如について現実的に、かつ多くの場合は明確に洞察を行うことができるという意義との間に一定の葛藤が存在する (詳しい説明については 10.2.1.2 節を参照)。

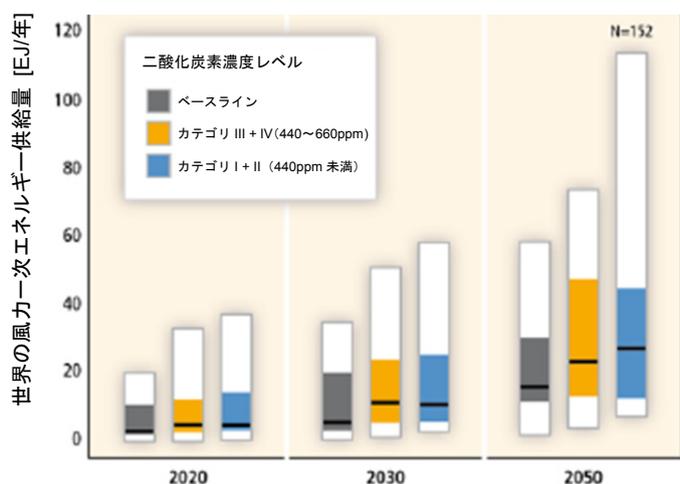


図 7.24: 長期的シナリオにおける世界の風力一次エネルギー供給量（中央値、25～75 パーセントイルの範囲、及びシナリオの結果の全範囲。色分けは 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。数値の基礎となるシナリオの具体的な数を右上の角に示す）。（Krey and Clarke, 2011 より作成。第 10 章も参照のこと。）

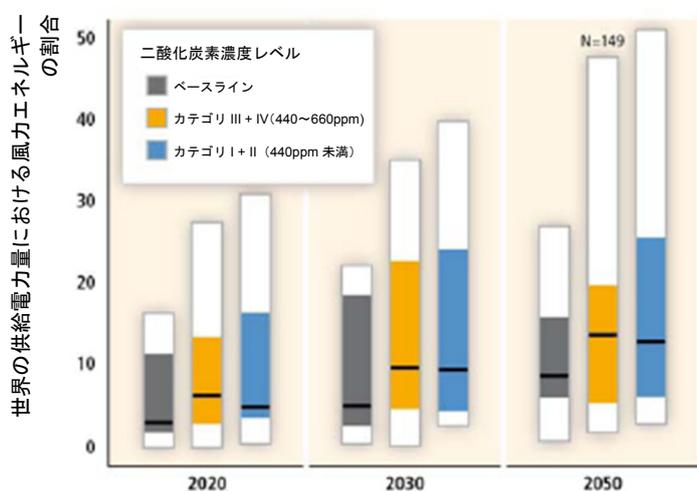


図 7.25: 長期的シナリオにおける世界の総供給電力量に占める風力発電のシェア（中央値、25～75 パーセントイルの範囲、及びシナリオの結果の全範囲。色分けは 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。数値の基礎となるシナリオの具体的な数を右上の角に示す）。（Krey and Clarke, 2011 より作成。第 10 章も参照のこと。）

世界のエネルギー供給に風力エネルギーが果たす役割の予測において、ベースライン・ケースまたは基準ケースの幅は広いが、調査したシナリオの中央値は、2020 年が約 3EJ/年（800TWh/年）、2030 年が 5EJ/年（1,500TWh/年）、2050 年が 16EJ/年（4,400TWh/年）である（図 7.24）。ゆえに、気候変動緩和政策が存在しなくても風力エネルギーは大幅に増加し、世界の供給電力量における風力エネルギーの寄与率の中央値は、2050 年までに 9% 近くまでに上昇すると予想されている（図 7.25）。温室効果ガス削減政策が厳しくなると想定すると、風力エネルギーの寄与率はさらに増加する。二酸化炭素濃度安定化レベルが 440～600ppm 及び 440ppm 未満の場合、調査したシナリオにおける風力エネルギーの寄与率の中央値は 2030 年までにおよそ 11EJ/年となり（世界の供給電力量の～9～10%、3,000～3,100TWh/年）、2050 年までには 23～27EJ/年に達する（世界の供給電力量の～13～14%、6,500～7,600TWh/年）⁵⁸。

⁵⁸ 世界規模のシナリオに関する文献に加えて、地域の電力系統における風力発電普及の技術的、経済的限界を把握しようとする研究が相次いで行われている。こうした研究の中には、世界規模のシナリオで検討されたレベルよりも高いレベルの普及率の評価を行ったものもあり、多くの場合はより複雑なモデル化ツールが用いられている。これらのシナリオの一部の概要については Martinot et al. (2007) を参照のこと。こうした研究の例として、Deutsche Energie-Agentur (2005)（ドイツ）、EC (2006)、Nikolaev et al. (2008, 2010)（ロシア）、及び US DOE (2008)（アメリカ）が挙げられる。これらの研究の多くは、世界規模のシナリオ文獻における基本的な研究結果の立証を行っている。コスト要因、政策要因が有利な場合、風力エネルギーが世界の供給電力量の 10% まで普及し、さらに 20% 以上の普及を達成するというシナリオは妥当で、真実味がある。

これらのシナリオ作成に用いられた手法と想定は非常に様々で、その結果も幅広い。ベースライン・ケースにおける 2050 年の世界の風力エネルギー供給量は、2~58EJ/年（中央値 16EJ/年）、つまり世界の供給電力量の 1~27%（中央値 9%、500~16,200TWh/年）である。最も厳しい 440ppm 未満の安定化レベルシナリオでは、2050 年の風力エネルギー供給量は 7~113EJ/年（中央値 27EJ/年）となり、これは世界の供給電力量の 3~51%（中央値 13%、2,000~31,500TWh/年）に相当する。

このように推定値に幅はあるものの、IPCC（2007）が推定した 2030 年までの風力エネルギーの供給量のポテンシャルである、およそ 8EJ/年（2,200TWh/年、主に 2005 年までの文献に基づいた推定値）は、ここで紹介した文献上の比較的新しいシナリオに比べて、いくぶん控えめに思われる。この他にも、再生可能エネルギー団体による新しい予測によって、風力エネルギーが世界のエネルギー需要を充足する上で果たす役割の可能性に関する IPCC（2007）の推定値が GWEC and GPI（2010）及び Lemming et al.（2009）による推定値の約 3 分の 1~2 分の 1 であることが確認されている。IPCC（2007）の推定値は IEA の World Energy Outlook における「新政策」シナリオに比較的近いが、IEA の 450ppm シナリオの数値よりも 30%低い（IEA, 2010b）。

図 7.24 と 7.25 で集計した文献では、温室効果ガス濃度安定化レベルが低くなるにつれて風力エネルギーの供給量が増加しているが、風力は、温室効果ガス濃度安定化のレベルが厳しくなるにつれて技術の普及が劇的に加速するバイオマスや地熱、太陽エネルギーほど、安定化レベルの低下の影響を大きく受けにくい（第 10 章参照）。その背景のひとつの解釈として、陸上風力発電は経済的な競争力がすでに比較的強くなっているため、温室効果ガス排出量削減に向けた意欲的な取り組みがなくても、継続的な普及が予測されていることが挙げられる。

また、シナリオ文献は、風力エネルギーが世界の温室効果ガス排出量削減において長期的に重要な役割を果たし得ることを示している。2 つの温室効果ガス濃度安定化シナリオにおける 2050 年までの風力エネルギーの寄与率の中央値は、23~27EJ/年（6,500~7,600TWh/年）で、75 パーセンタイル値は 45~47EJ/年（12,400~12,900TWh/年）に増加し、最も高い成長率を示すシナリオでは 100EJ/年（31,500TWh/年）以上に達する。このレベルの寄与率を達成するために、2050 年までに達成しなければならない世界の供給電力量における風力エネルギーの割合は、調査したシナリオの中央値が約 13~14%、75 パーセンタイルが 21~25%である。これに見合うには、2030 年までの風力発電のシェアが、調査したシナリオの中央値で 9~10%、75 パーセンタイルで 23~24%まで増える必要がある。風力エネルギー団体及び再生可能エネルギー団体が作成したシナリオは、この中央値から 75 パーセンタイルの範囲に一致しており、Lemming et al.（2009）、Teske et al.（2010）及び GWEC and GPI（2010）を例に挙げると、2050 年までの風力エネルギー供給推定値は 31~39EJ/年（8,500~10,800TWh/年）となる可能性があるとしている。

このレベルの普及率を達成するには、温室効果ガス排出量を削減し、再生可能エネルギー供給量を増やす政策が必要となる可能性が高い。その場合、多額の民間投資を引き出すよう経済的な魅力と、さらに予測可能性をも十分に備えた政策にする必要があるだろう（第 11 章参照）。風力エネルギーが急速に成長する上でのその他の様々な潜在的課題についても議論する価値がある。

資源ポテンシャル: 図 7.24 の長期的な風力エネルギー供給量推定の最高値ですら、7.2 節に示した風力エネルギーの世界的技術ポテンシャルの推定値を下回っている。つまり、少なくとも世界規模では、技術ポテンシャルが風力エネルギー普及の制限要因になる可能性は低い。また、世界の大半の地域において、風力エネルギーを現在のレベルより大幅に普及できる十分な技術ポテンシャルが存在する。しかし、一部の国や地域では、普及レベルが高くなると、最も経済的な資源の供給が制限され始めるため、風力エネルギーは、全ての国で同じようにニーズの充足に寄与する訳ではない。

地域的な普及: ヨーロッパにおいては歴史的な基盤を超えて、アメリカと中国では徐々に風力エネルギーを拡大する必要があるだろう。IEA WEO の「現行政策」シナリオでは、2035 年までの風力エネルギーの導入量の大半は OECD ヨーロッパ（36%）におけるもので、それより少ないながらも量が多いのが OECD 北アメリカ（24%）及び非 OECD アジアの一部（中国 18%、インド 4%など）である（IEA, 2010b）。しかし、風力シェアが高いシナリオでは、地理的により広い範囲における風力エネルギーの普及が必要となる可能性が高い。例えば、Teske et al.（2010）、GWEC and GPI（2010）及び IEA（2010c）のシナリオによると、風力エネルギーが最も普及する地域は、非 OECD アジア（特に中国）、OECD 北アメリカ及び OECD ヨーロッパであるが、風力シェアが高いシナリオにおいて風力エネルギーの伸びに大きく寄与することが予測されるその他の地域もいくつか特定されている（表 7.7）⁵⁹。風力エネルギーを初めて導入する地域においてこのレベルの風力エネルギーの普及を実現するのは難題であり、風力エネルギーに関してすでに数多くの経験を積んでいる地域から制度や技術に関する知識を継承すれば便益を得られるだろう（Lewis, 2007、IEA, 2009 など）。

⁵⁹ こうしたその他地域のうち、多くの地域では想定電力需要が低い。その結果、世界の風力による供給電力量に対する寄与が小さいと予測される地域でも、当該地域の供給電力量の大部分を風力発電から得ると予測される場合がある。

表 7.7: 世界の風力による供給電力量の地域分布 (世界の風力による供給電力量に占める割合)

地域*	GWEC and GPI (2010)	Teske et al. (2010)	(IEA, 2010c) ***
	2030年「自然エネルギー革命 (advanced)」シナリオ	2050年「Energy Revolution」シナリオ	2050年「BLUE Map」シナリオ
世界の風力エネルギー供給量	20EJ/年 (5,400TWh/年)	31EJ/年 (8,500TWh/年)	18EJ/年 (4,900TWh/年)
OECD 北アメリカ	27%	19%	13%
ラテンアメリカ	4%	9%	8%
OECD ヨーロッパ	22%	15%	21%
東ヨーロッパ/ユーラシア	4%	8%	4%
OECD 太平洋	5%	10%	7%
アジアの開発途上国	35%	34%	39%
アフリカ	3%	2%	2%
中東	1%	3%	5%

注:

※地域の定義は各研究による。ただし、以下を除く。GWEC and GPI (2010) の「非 OECD アジア」の推定値は「アジアの開発途上国」に含まれる。IEA (2010c) の「アメリカ」及び「その他の OECD 北アメリカ」の推定値は「OECD 北アメリカ」に、「東 EU 及び旧ソビエト連邦」の推定値は「東ヨーロッパ/ユーラシア」にそれぞれ統合した。Teske et al. (2010) の「移行経済」の推定値は「東ヨーロッパ/ユーラシア」に含まれる。これら 3 つの研究における中国とインドの数値は全て「アジアの開発途上国」に統合した (地域と国のグループ分けについては、Annex II も参照のこと)。

※※IEA (2010c) については、2050 年までの期間における世界の風力発電への設備投資額の割合を表示。

サプライチェーンの問題: 原料や労働力の供給、設置インフラ、製造能力に関しては、短期的な制約への対応が必要ではあるが、風力エネルギーに関する政策の枠組みに経済的な魅力及び予測可能性が十分にあれば、克服不可能な長期的な制約はおそらくないと思われる (US DOE, 2008 など)。風力エネルギー業界については、過去数十年にわたって急速に規模を拡大してきた結果、サプライチェーン全体でグローバル化が進み、競争が激化した (7.4 節参照)。サプライチェーンは、熟練した人材の確保や風車部品の入手可能性、また、特に洋上風力発電所における風車の供給や設置インフラといった課題を抱えてきた (7.8 節参照)。にもかかわらず、2009 年には年間の追加及び生産分が 38GW に達している。風力発電の比率が高いシナリオにおいて増大する需要を満たすために必要な、サプライチェーンの大幅な規模拡大 (10.3 節も参照) は困難に見えるが、長期的には実現可能と思われる。

技術と経済: 一部の国や地域、特にヨーロッパでは、資源と立地の制約があるために洋上風力発電に大幅に依存しなければならなくなる可能性が高い。Lemming et al. (2009) は、2050 年には世界の風力エネルギー総供給量のうち、18%を洋上風力発電が占める可能性が高いと推定する。一方、IEA の Energy Technology Perspectives における BLUE Map シナリオは、洋上風力発電が発電容量において 32%のシェアを占めると予測している (IEA, 2010c)。IEA の World Energy Outlook による別の予測シナリオでは、洋上風力発電容量は 2035 年までに風力発電の総容量の 15~24%を占めるとしている (IEA, 2010b)。洋上風力発電がこの規模の成長を遂げるには、技術進歩とコスト低下が必要となる。陸上風力発電技術のコストは研究開発が進むにつれて徐々に低下すると思われるが、洋上風力発電技術に関しては、陸上風力発電より技術が未熟であることを考えると、政府と業界による研究開発支出の強化が特に重要となるだろう (7.7 節参照)。

系統連系と送電: 送電の制約や系統連系上の懸念に対する積極的な技術的、制度上の解決策を実施する必要があるだろう。解析結果と過去の経験からは、約 20%までの風力エネルギーのシェアの場合、多くの電力系統は比較的控えめな連系コストで運用できることがわかっている (7.5 節及び第 8 章参照)。風力発電の導入率が 20%を超えるケースを考察している研究もあるが、風力発電の連系に関する本格的な研究に比べて精密さの劣る分析を用いたものが多く、また、発電ポートフォリオ、蓄電または蓄熱、プラグイン・ハイブリッド自動車及び交通の電化、需要対応、その他の風力発電の出力変動管理技術における構造変化を用いたものが多い。(Grubb, 1991, Watson et al., 1994, Lund and Munster, 2003, Kempton and Tomic, 2005, Black and Strbac, 2006, DeCarolis and Keith, 2006, Denholm, 2006, Lund, 2006, Cavallo, 2007, Greenblatt et al., 2007, Hoogwijk et al., 2007, Benitez et al., 2008, Lamont, 2008, Leighty, 2008, Lund and Kempton, 2008, Kiviluoma and Meibom, 2010 など)。これらの研究の多くは、風力エネルギー供給量の増加を阻む克服不可能な技術的障壁は存在しないことを立証している。ただし、風力発電の普及が進むにつれて系統拡張コストや系統連系のコストも増加し、経済的な面で成長が阻害される。また、これらの研究では、大容量エネルギー貯蔵やデマンドレスポンスといった、風力発電の導入率が低い時には特に必要とされない新しい技術的解決策が、導入率が高くなるにつれて徐々に価値を持つことが判明している。全体的には、系統連系及び電力系統の信頼度維持に関する懸念 (とコスト) が風力発電の導入に伴って増大するため、系統全体のアデカシーのある柔軟性の確保、抑制的な系統連系基準の採用、改良型風予測システムの開発と利用、需要の柔軟性と大容量エネルギー貯蔵の推奨に向けた取り組みを取らざるを得なくなる。また、風資源のサイト依存性を考えると、前

述の最も控えめな風力エネルギー普及シナリオの場合でも、陸上、洋上どちらにも大量の新しい送電インフラが必要となるであろう。必要な送電インフラを開発するには、コスト及び制度上の障壁を克服する必要があると思われる（7.5節、第8章、第11章参照）。

社会的及び環境的懸念: 最後に、7.6節で述べた風力発電所の社会的及び環境的影響の概要を考えると、風力エネルギーの普及に合わせてこうした影響の本質と規模の理解を深め、また影響を最小化、緩和する努力が必要だと思われる。風力エネルギーにおける顕著な環境懸念には、鳥やコウモリの衝突事故と生息地や生態系の変化があり、顕著な社会懸念には、景観への影響や、様々な不快事象、レーダ干渉の可能性がある。世界的、地域的に風力エネルギーの普及が進み、大規模な風力発電所が検討されるようになると、すでに顕在化している懸念は深刻化し、新たな懸念も生ずる可能性がある。コミュニティが抱く懸念や科学的な懸念を解決しなければならないが、前述のシナリオに描かれた風力エネルギーの普及を実現するには、陸上、洋上どちらの風力エネルギーに対しても、より積極的な計画策定やサイト選定、許可手続が必要になるだろう（第11章も参照）。

7.9.3 普及に関する結論

本節で取り上げた文献では、コスト要因及び政策要因が風力エネルギーの普及に有利な場合、風力発電のシェアが2030年までに世界の供給電力量の10%近くになるか、10%を超え得ることが示唆されている。さらに、シナリオでは、より意欲的な政策や技術の向上によって、2050年までに風力エネルギーの比率が世界の供給電力量の20%以上に達する可能性があるとしている。このレベルの供給電力量は、気候変動防止シナリオの文脈において経済的な魅力があると思われる。しかし、風力エネルギーがこれらの意欲的な導入率を獲得するには、様々な難題を克服しなければならない。特に将来の風力エネルギーの利用度は、他の電源と比較した風力発電の経済的側面、直接的または間接的に風力エネルギーの普及を支援する政策、立地選定と許可の課題、そして風力発電の系統連系能力に関する実際の問題や懸念に大きく左右される。

REFERENCES

- 3TIER (2009).** *The First Look Global Wind Dataset: Annual Mean Validation*. 3TIER, Seattle, WA, USA, 10 pp.
- Ackermann, T. (ed.) (2005).** *Wind Power in Power Systems*. John Wiley and Sons, London, UK.
- Ackermann, T., and L. Soder (2002).** An overview of wind energy-status 2002. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **6**, pp. 67-127.
- Agnolucci, P. (2007).** The effect of financial constraints, technological progress and long-term contracts on tradable green certificates. *Energy Policy*, **35**, pp. 3347-3359.
- AIGS (2008).** *All Island Grid Study (AIGS). Workstream 4: Analysis of Impacts and Benefits*. Department of Communications, Energy and Natural Resources, Dublin, Ireland and UK Department of Enterprise, Trade and Investment, London, UK, 88 pp.
- Allen, S.R., G.P. Hammond, and M.C. McManus (2008).** Prospects for and barriers to domestic micro-generation: A United Kingdom perspective. *Applied Energy*, **85**, pp. 528-544.
- Alves-Pereira, M., and C. Branco (2007).** In-home wind turbine noise is conducive to vibroacoustic disease. Presented at the *Second International Meeting on Wind Turbine Noise INCE/Europe*, Lyon, France, 20-21 September, 2007.
- Al-Yahyai, S., Y. Charabi, and A. Gastli (2010).** Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 3192-3198.
- Amelin, M. (2009).** Comparison of capacity credit calculation methods for conventional power plants and wind power. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, pp. 685-691.
- Andersen, P.B., C.B. Mac Gaunaa, and T. Buhl (2006).** Load alleviation on wind turbine blades using variable airfoil geometry. In: *2006 European Wind Energy Conference and Exhibition Proceedings*, Athens, Greece, 27 February – 2 March 2006.
- Apt, J. (2007).** The spectrum of power from wind turbines. *Journal of Power Sources*, **169**, pp.369-374.
- Archer, C.L., and M.Z. Jacobson (2005).** Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D12110.
- Archer, C., and K. Caldeira (2009).** Global assessment of high-altitude wind power. *Energies*, **2**, pp. 307-319.
- Argatov, I., and R. Silvennoinen (2010).** Energy conversion efficiency of the pumping kite wind generator. *Renewable Energy*, **35**, pp. 1052-1060.
- Argatov, I., P. Rautakorpi, and R. Silvennoinen (2009).** Estimation of the mechanical energy output of the kite wind generator. *Renewable Energy*, **34**, pp. 1525-1532.
- Arnett, E.B., W.K. Brown, W.P. Erickson, J.K. Fiedler, B.L. Hamilton, T.H. Henry, A. Jain, G.D. Johnson, J. Kerns, and R.R. Koford (2008).** Patterns of bat fatalities at wind energy facilities in North America. *Journal of Wildlife Management*, **72**, pp. 61-78.
- Arnett, E.B., M.M.P. Huso, M.R. Schirmacher, and J.P. Hayes (2011).** Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **9**(4), pp. 209-214.
- Arrow, K.J. (1962).** The economic implications of learning by doing. *The Review of Economic Studies*, **29**, pp. 155-173.

- Ashwill, T.D. (2009).** Materials and innovations for large blade structures: research opportunities in wind energy technology. In: *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Palm Springs, CA, USA, 4-7 May 2009, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 20 pp.
- Auer, H., M. Stadler, G. Resch, C. Huber, T. Schuster, H. Taus, L.H. Nielsen, J. Twidell, and D.J. Swider (2004).** *Cost and Technical Constraints of RES-E Grid Integration: Working package 2*. European Commission, Brussels, Belgium, 82 pp.
- AWEA (2008).** *Wind Energy Siting Handbook*. American Wind Energy Association, Washington, DC, USA, 183 pp.
- AWEA (2009).** *AWEA Small Wind Turbine Global Market Study: Year Ending 2008*. American Wind Energy Association, Washington, DC, USA, 24 pp.
- Baerwald, E.F., J. Edworthy, M. Holder, and R.M.R. Barclay (2009).** A large-scale mitigation experiment to reduce bat fatalities at wind energy facilities. *Journal of Wildlife Management*, **73**, pp. 1077-1082.
- Baidya, R.S., and J.J. Traiteur (2010).** Impacts of wind farms on surface air temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**, pp. 17899-17904.
- Banta, R.M., Y.L. Pichugina, and R.K. Newsom (2003).** Relationship between low-level jet properties and turbulence kinetic energy in the nocturnal stable boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60**, pp. 2549-2555.
- Barclay, R.M.R., E.F. Baerwald, and J.C. Gruver (2007).** Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. *Canadian Journal of Zoology*, **85**, pp. 381-387.
- Barrios, L., and A. Rodriguez (2004).** Behavioral and environmental correlates of soaring bird mortality at onshore wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, **41**, pp. 72-81.
- Barthelmie, R.J., and L.E. Jensen (2010).** Evaluation of wind farm efficiency and wind turbine wakes at the Nysted offshore wind farm. *Wind Energy*, **13**, pp. 573-586.
- Barthelmie, R.J., G. Larsen, S.C. Pryor, H. Jörgensen, H. Bergström, W. Schlez, K. Rados, B.Lange, P. Völund, S. Neckelmann, S. Mogensen, G. Schepers, T. Hegberg, L. Folkerts, and M. Magnusson (2004).** ENDOW (efficient development of offshore wind farms): Modelling wake and boundary layer interactions. *Wind Energy*, **7**, pp. 225-245.
- Bastasch, M., J. van-Dam, B. Søndergaard, and A. Rogers (2006).** Wind turbine noise – An overview. *Canadian Acoustics*, **34**, pp. 7-15.
- Bell, D., T. Gray, and C. Hagggett (2005).** The ‘social gap’ in wind farm siting decisions: Explanations and policy responses. *Environmental Politics*, **14**, pp. 460-477.
- Bengtsson, L., K.I. Hodges, and N. Keenlyside (2009).** Will extratropical storms intensify in a warmer climate? *Journal of Climate*, **22**, pp. 2276-2301.
- Benitez, L.E., P.C. Benitez, and G.C. van Kooten (2008).** The economics of wind power with energy storage. *Energy Economics*, **30**, pp. 1973-1989.
- Benjamin, R. (2007).** Principles for interregional transmission expansion. *The Electricity Journal*, **20**, pp. 36-47.
- Berg, D.E., D.G. Wilson, M.F. Barone, B.R. Resor, J.C. Berg, J.A. Paquette, J.R. Zayas, S.Kota, G. Ervin, and D. Maric (2009).** The impact of active aerodynamic load control on fatigue and energy capture at low wind speed sites. In: *European Wind Energy Conference*, Marseille, France, 16-19 March 2009, pp. 16-19.

- Bergek, A. (2010).** Levelling the playing field? The influence of national wind power planning instruments on conflicts of interests in a Swedish county. *Energy Policy*, **38**, pp. 2357-2369.
- Berry, D. (2009).** Innovation and the price of wind energy in the US. *Energy Policy*, **37**, pp. 4493-4499.
- Bierbooms, W.A.A.M. (1992).** A comparison between unsteady aerodynamic models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **39**, pp. 23-33.
- Bird, L., M. Bolinger, T. Gagliano, R. Wiser, M. Brown, and B. Parsons (2005).** Policies and market factors driving wind power development in the United States. *Energy Policy*, **33**, pp.1397-1407.
- Black and Veatch (2003).** *Strategic Assessment of the Potential for Renewable Energy: Stage I*. European Bank for Reconstruction and Development, London, UK, 163 pp.
- Black, M., and G. Strbac (2006).** Value of storage in providing balancing services for electricity generation systems with high wind penetration. *Journal of Power Sources*, **162**, pp. 949-953.
- Blanco, M.I. (2009).** The economics of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, pp. 1372-1382.
- Bloom, A., V. Kotroni, and K. Lagouvardos (2008).** Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **8**, pp. 1249–1257.
- Boccard, N. (2009).** Capacity factor of wind power realized values vs. estimates. *Energy Policy*, **37**, pp. 2679-2688.
- Boccard N. (2010).** Economic properties of wind power: A European assessment. *Energy Policy*, **38**, pp. 3232-3244.
- Bolinger, M., J. Harper, and M. Karcher (2009).** A review of wind project financing structures in the USA. *Wind Energy*, **12**, pp. 295-309.
- Bossanyi, EA. (2003).** Individual blade pitch control for load reduction. *Wind Energy*, **6**, pp. 119-128.
- Boyle, M.A., and K.A. Kiel (2001).** A survey of house price hedonic studies of the impact of environmental externalities. *Journal of Real Estate Literature*, **9**, pp. 117-144.
- Bradley, J.S. (1994).** Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sounds containing rumble. *Noise Control Engineering Journal*, **42**, pp. 203-208.
- Brenner, M., S. Cazares, M. Cornwall, F. Dyson, D. Eardley, P. Horowitz, D. Long, J. Sullivan, J. Vesecky, and P. Weinberger (2008).** *Wind Farms and Radar*. US Department of Homeland Security, McLean, VA, USA, 21 pp.
- Breslow, P.B., and D.J. Sailor (2002).** Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States. *Renewable Energy*, **27**, pp. 585-598.
- Breton, S.P., and G. Moe (2009).** Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America. *Renewable Energy*, **34**, pp. 646-654.
- BTM (2010).** *International Wind Energy Development. World Market Update 2009*. BTM ConsultApS, Ringkøbing, Denmark, 124 pp.
- Budhreja, V.S., F. Mobasher, J. Ballance, J. Dyer, A. Silverstein, and J. Eto (2009).** Improving electricity resource-planning processes by considering the strategic benefits of transmission. *The Electricity Journal*, **22**, pp. 54-63.
- Buhl, T., M. Gaunaa, and C. Bak (2005).** Potential load reduction using airfoils with variable

- trailing edge geometry. *Journal of Solar Energy Engineering*, **127**, pp. 503-516.
- Burke, D.J., and M.J. O'Malley (2010)**. Maximizing firm wind connection to security constrained transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, pp. 749-759.
- Burton, T., D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi (2001)**. *Wind Energy: Handbook*. J. Wiley, Chichester, UK and New York, NY, USA, 642 pp.
- Butler, M.M., and D.A. Johnson (2003)**. *Feasibility of Mitigating the Effects of Wind Farms on Primary Radar*. UK Department of Trade and Industry, London, UK, 210 pp.
- BWEA and Garrad Hassan (2009)**. *UK Offshore Wind: Charting the Right Course*. British WindEnergy Association, London, UK, 42 pp.
- Byrne, J., A. Zhou, B. Shen, and K. Hughes (2007)**. Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS-and lifecycle cost-based assessment of Western China's options. *Energy Policy*, **35**, pp. 4391-4401.
- Bywaters, G., V. John, J. Lynch, P. Mattila, G. Norton, J. Stowell, M. Salata, O. Labath, A. Chertok, and D. Hablanian (2004)**. *Northern Power Systems WindPACT Drive Train Alternative Design Study Report, Period of Performance: April 12, 2001 to January 31, 2005*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 404 pp.
- Capps, S.B., and C.S. Zender (2010)**. Estimated global ocean wind power potential from QuikSCAT observations, accounting for turbine characteristics and siting. *Journal of Geophysical Research*, **115**, D09101.
- Carbon Trust (2008a)**. *Small-scale Wind Energy: Policy Insights and Practical Guidance*. CarbonTrust, London, UK, 108 pp.
- Carbon Trust (2008b)**. *Offshore Wind power: Big Challenge, Big Opportunity*. The Carbon Trust, London, UK, 40 pp.
- Cavallo, A. (2007)**. Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES). *Energy*, **32**, pp. 120-127.
- Chao, D.D., and C.P. van Dam (2007)**. Computational aerodynamic analysis of a blunt trailing edge airfoil modification to the NREL Phase VI rotor. *Wind Energy*, **10**, pp. 529-550.
- China Renewable Energy Association (2009)**. *Annual Report of New Energy and Renewable Energy in China, 2009*. China Renewable Energy Association, Beijing, China.
- Christiansen, M.B., and C.B. Hasager (2005)**. Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. *Remote Sensing of Environment*, **98**, pp. 251-268.
- Christiansen, M.B., and C.B. Hasager (2006)**. Using airborne and satellite SAR for wake mapping offshore. *Wind Energy*, **9**, pp. 437-455.
- Claussen, N.E., P. Lundsager, R.J. Barthelmie, H. Holttinen, T. Laakso, and S.C. Pryor (2007)**. Wind power. In: *Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources. Their Role in the Nordic Energy System*. J. Fenger (ed.), Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark, pp. 105-128.
- CMA (2006)**. *The Report of Wind Energy Resource Assessment in China*. China Meteorological Administration, China Meteorological Press, Beijing, China.
- CMOH (2010)**. *The Potential Health Impacts of Wind Turbines*. Ontario Chief Medical Officer of Health (CMOH), Ontario Ministry of Health and Long-Term Care, Toronto, Canada, 14 pp.
- Costa, A., A. Crespo, J. Navarro, G. Lizcano, H. Madsen, and E. Feitosa (2008)**. A review on the young history of the wind power short-term prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, pp. 1725-1744.

- Coughlan, Y., P. Smith, A. Mullane, and M. O'Malley (2007).** Wind turbine modelling for power system stability analysis—A system operator perspective. *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**, pp. 929-936.
- Cryan, P.M., and R.M.R. Barclay RMR (2009).** Causes of bat fatalities at wind turbines:hypotheses and predictions. *Journal of Mammalogy*, **90**, pp. 1330-1340.
- Czisch, G., and G. Giebel (2000).** A comparison of intra-and extraeuropean options for an energy supply with wind power. In: *Proceedings of Wind Power for the 21st Century*, Kassel, Germany, 25-27 September 2000, pp. 69-73.
- De Lucas, M., G.F.E. Janss, and M. Ferrer (2004).** The effects of a wind farm on birds in a migration point: the Strait of Gibraltar. *Biodiversity and Conservation*, **13**, pp. 395-407.
- de Lucena, P., A. Frossard, A.S. Szklo, R. Schaeffer, and R.M. Dutra (2009).** The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. *Renewable Energy*, **35**, pp. 904-912.
- DeCarolis, J.F., and D.W. Keith (2006).** The economics of large-scale wind power in a carbon constrained world. *Energy Policy*, **34**, pp. 395-410.
- Delft University, Garrad Hassan & Partners, Tractebel Energy Engineering, Risø National Laboratory, Kvaerner Oil & Gas, Energi & Miljø Undersøgelser (2001).** *Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe*. Delft University, Delft, the Netherlands, 289 pp.
- Denholm, P. (2006).** Improving the technical, environmental and social performance of wind energy systems using biomass-based energy storage. *Renewable Energy*, **31**, pp. 1355-1370.
- Denny, E., and M. O'Malley (2009).** The impact of carbon prices on generation-cycling costs. *Energy Policy*, **37**, pp. 1204-1212.
- Denny, E., A. Tuohy, P. Meibom, A. Keane, D. Flynn, A. Mullane, and M. O'Malley (2010).** The impact of increased interconnection on electricity systems with large penetrations of wind generation: A case study of Ireland and Great Britain. *Energy Policy*, **38**, pp. 6946-6954.
- Des Rosiers, F. (2002).** Power lines, visual encumbrance and house values: a microspatial approach to impact measurement. *Journal of Real Estate Research*, **23**, pp. 275-301.
- Desholm, M. (2009).** Avian sensitivity to mortality: Prioritising migratory bird species for assessment at proposed wind farms. *Journal of Environmental Management*, **90**, pp. 2672-2679.
- Desholm, M., and J. Kahlert (2005).** Avian collision risk at an offshore wind farm. *Biology Letters*, **1**, pp. 296-298.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (2005).** *Energy Management Planning for the Integration of Wind Energy into the Grid in Germany, Onshore and Offshore by 2020*. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Cologne, Germany.
- Dinica, V. (2006).** Support systems for the diffusion of renewable energy technologies – investor perspective. *Energy Policy*, **34**, pp. 461-480.
- Doherty, R., and M. O'Malley (2005).** A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity. *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**, pp. 587-595.
- Doherty, R., L. Bryans, P. Gardner, and M. O'Malley (2004).** Wind penetration studies on the island of Ireland. *Wind Engineering*, **28**, pp. 27-41.
- Doherty, R., A. Mullane, G. Lalor, and D. Burke (2010).** An assessment of the impact of wind generation on system frequency. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, pp. 452-460.
- Dong Energy, Vattenfall, Danish Energy Authority, and Danish Forest and Nature Agency (2006).** *Danish Offshore Wind: Key Environmental Issues*. DONG Energy, Vattenfall, the Danish Energy Authority and the Danish Forest and Nature Agency, Copenhagen, Denmark, 142 pp.

- Drewitt, A.L., and R.W. Langston (2006).** Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis*, **148**, pp. 29-42.
- Du, Z., and M.S. Selig (1998).** A 3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction. In: *Proceedings of the 1998 ASME Wind Energy Symposium*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) and ASME International, Reno, NV, USA, 12-15 January 1998, pp. 9-19.
- Dunlop, J. (2006).** Wind power project returns – What should equity investors expect? *Journal of Structured Finance*, **12**, pp. 81-89.
- Dürr, T., and L. Bach (2004).** Bat deaths and wind turbines – a review of current knowledge, and of the information available in the database for Germany. *Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz*, **7**, pp. 253-264.
- Durstewitz, M., B. Hahn, B. Lange, K. Rohrig, and A. Wessel (2008).** *Windenergie Report Deutschland 2007*. Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Kessel, Germany.
- Ea Energianalyse (2007).** *50% Wind Power in Denmark in 2025*. Ea Energianalyse, Copenhagen, Denmark, 121 pp.
- EC (2003).** *External Costs: Research Results on Socio-Environmental Damages Due to Electricity and Transport*. European Commission (EC), Brussels, Belgium, 28 pp.
- EC (2006).** *European Energy and Transport: Scenarios on Energy Efficiency and Renewables*. European Commission (EC), Brussels, Belgium, 124 pp.
- EC (2009).** *Communication from the Commission on Investing in the Development of Low Carbon Technologies (SET-Plan). A Technology Roadmap*. Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, 1295 pp.
- Echavarria, E., B. Hahn, G.J.W. Van Bussel, and T. Tomiyama (2008).** Reliability of wind turbine technology through time. *Journal of Solar Energy Engineering*, **130**, 031005.
- EEA (2009).** *Europe's Onshore and Offshore Wind Energy Potential: An Assessment of Environmental and Economic Constraints*. European Environmental Agency (EEA), Copenhagen, Denmark, 90 pp.
- Ehler, C.N., and F. Douvère (2009).** *Marine Spatial Planning: A Step-by-Step Approach Towards Ecosystem Based Management*. Intergovernmental Oceanographic Commission and Marine and Biosphere Programme, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Paris, France, 99 pp.
- EIA (2010).** *International Energy Outlook, 2010*. Energy Information Agency, US Department of Energy, Washington, DC, USA, 231 pp.
- EirGrid and SONI (2010).** *All Island TSO Facilitation of Renewables Studies*. EirGrid and System Operator for Northern Ireland (SONI), Dublin, Ireland, 77 pp.
- Ek, K., and P. Söderholm (2010).** Technology learning in the presence of public R&D: The case of European wind power. *Ecological Economics*, **69**, pp. 2356-2362.
- Ela, E., and B. Kirby (2008).** *ERCOT Event on February 26, 2008: Lessons Learned*. USA: National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 12 pp.
- Elliott, D. (2002).** Assessing the world's wind resources. In: *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002*, New York, NY, USA, 27-31 January 2002, pp. 346-347.

- Elliott, D., M. Schwartz, and G. Scott (2004).** Wind resource base. In: *Encyclopaedia of Energy*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 465-479.
- Eltham, D.C., G.P. Harrison, and S. J. Allen (2008).** Change in public attitudes towards a Cornish wind farm: Implications for planning. *Energy Policy*, **36**, pp. 23-33.
- EnerNex Corp (2010).** *Eastern Wind Integration and Transmission Study*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 242 pp.
- EPA (1974).** *Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety*. Office of Noise Abatement and Control, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 242 pp.
- EPA (1978).** *Protective Noise Levels*. Office of Noise Abatement and Control, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 25 pp.
- ERCOT (2008).** *ERCOT Operations Report on the EECF Event of February 26, 2008*. The Electricity Reliability Council of Texas (ERCOT), Austin, TX, USA, 13 pp.
- Erdman, W., and M. Behnke (2005).** *Low Wind Speed Turbine Project Phase II: The Application of Medium-Voltage Electrical Apparatus to the Class of Variable Speed Multi-Megawatt Low Wind Speed Turbines*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 119 pp.
- Erickson, W.P., G.D. Johnson, and D.P. Young Jr. (2005).** *A Summary and Comparison of Bird Mortality from Anthropogenic Causes with an Emphasis on Collisions*. General Technical Report, United States Forest Service, Washington, DC, USA, 14 pp.
- Eto, J., J. Undrill, P. Mackin, R. Daschmans, B. Williams, B. Haney, R. Hunt, J. Ellis, H. Illian, C. Martinez, M. O'Malley, K. Coughlin, and K. LaCommare (2010).** *Use of Frequency Response Metrics to Assess the Planning and Operating Requirements for Reliable Integration of Variable Generation*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, 90 pp.
- EU (2008).** *European Wind Energy Technology Platform for Wind Energy. Strategic Research Agenda - Market Development Strategy from 2008 to 2030. Synopsis*. European Union (EU), TP Wind Secretariat, Brussels, Belgium, 15 pp.
- Everaert, J., and E.W.M. Stienen (2007).** Impact of wind turbines on birds in Zeebrugge (Belgium). *Biodiversity and Conservation*, **16**, pp. 3345-3359.
- EWEA (2005).** *Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: Analysis, Issues and Recommendations*. European Wind Energy Association (EWEA), Brussels, Belgium, 172 pp.
- EWEA (2009).** *Wind Energy, the Facts*. European Wind Energy Association (EWEA), Brussels, Belgium, 488 pp.
- EWEA (2010a).** *The European Offshore Wind Industry – Key Trends and Statistics 2009*. European Wind Energy Association (EWEA), Brussels, Belgium, 9 pp.
- EWEA (2010b).** *Wind in Power: 2009 European Statistics*. European Wind Energy Association (EWEA), Brussels, Belgium, 14 pp.
- FANM (2005).** *Human Health Repercussions of Windmill Operation*. French Académie Nationale de Médecine (FANM), Paris, France, 17 pp.
- Fastl, H., and E. Zwicker (2007).** *Psychoacoustics: Facts and Models*. 3rd ed. Springer, Berlin and Heidelberg, Germany and New York, NY, USA, 428 pp.
- Fellows, A. (2000).** *The Potential of Wind Energy to Reduce Carbon Dioxide Emissions*. Garrad Hassan and Partners Ltd, Glasgow, Scotland, 146 pp.

- Feroli, F., K. Schoots, and B.C.C. Van der Zwaan (2009).** Use and limitations of learning curves for energy technology policy: A component-learning hypothesis. *Energy Policy*, **37**, pp. 2525-2535.
- Firestone, J., and W. Kempton (2007).** Public opinion about large offshore wind power: Underlying factors. *Energy Policy*, **35**, pp. 1584-1598.
- Firestone, J., W. Kempton, and A. Krueger (2009).** Public acceptance of offshore wind power projects in the USA. *Wind Energy*, **12**, pp. 183-202.
- Focken, U., M. Lange, K. Mönnich, H. Waldl, H.G. Beyer, and A. Luig (2002).** Short-term prediction of the aggregated power output of wind farms – a statistical analysis of the reduction of the prediction error by spatial smoothing effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **90**, pp. 231-246.
- Førsund, F.R., B. Singh, T. Jensen, and C. Larsen (2008).** Phasing in wind-power in Norway: Network congestion and crowding-out of hydropower. *Energy Policy*, **36**, pp. 3514-3520.
- Fox, B., D. Flynn, L. Bryans, N. Jenkins, D. Milborrow, M. O'Malley, R. Watson, and O.Anaya-Lara (2007).** *Wind power integration: connection and system operational aspects*. The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 288 pp.
- Frandsen, S.T., R.J. Barthelmie, S.C. Pryor, O. Rathmann, S. Larsen, J. Højstrup, and M.Thøgersen (2006).** Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind Energy*, **9**, pp. 39-53.
- Frandsen, S.T., H.E. Jørgensen, R.J. Barthelmie, O. Rathmann, J. Badger, K. Hansen, S. Ott, P. Rethore, S.E. Larsen, and L.E. Jensen (2009).** The making of a second-generation wind farm efficiency model complex. *Wind Energy*, **12**, pp. 445-458.
- Frost, S.A., M.J. Balas, and A.D. Wright (2009).** Direct adaptive control of a utility-scale wind turbine for speed regulation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **19**, pp. 59-71.
- Garreaud, R.D., and M. Falvey (2009).** The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *International Journal of Climatology*, **29**, pp. 543-554.
- Garthe, S., and O. Hüppop (2004).** Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index. *Journal of Applied Ecology*, **41**, pp.724-734.
- Gautam, D., V. Vittal, and T. Harbour (2009).** Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, pp. 1426-1434.
- GE Energy (2010).** *Western Wind and Solar Integration Study*. General Electric (GE) Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 536 pp.
- GEC (2001).** *WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area 3–Self-Erecting Tower Structures*. Global Energy Concepts (GEC), National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 72 pp.
- Gibson, E., and P. Howsam (2010).** The legal framework for offshore wind farms: A critical analysis of the consents process. *Energy Policy*, **38**, pp. 4692-4702.
- Gipe, P. (1995).** *Wind Energy Comes of Age*. Wiley, New York, USA, 560 pp.
- Göransson, L., and F. Johnsson (2009).** Dispatch modeling of a regional power generation system- Integrating wind power. *Renewable Energy*, **34**, pp. 1040-1049.
- Goyal, M. (2010).** Repowering--Next big thing in India. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, **14**, pp. 1400-1409.

Goyette, S., O. Brasseur, and M. Beniston (2003). Application of a new wind gust parameterization: Multiscale case studies performed with the Canadian regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, **108**, pp. 4374.

Graham, J.B., J.R. Stephenson, and I.J. Smith (2009). Public perceptions of wind energy developments: Case studies from New Zealand. *Energy Policy*, **37**, pp. 3348-3357.

Greenblatt, J.B., S. Succar, D.C. Denkenberger, R.H. Williams, and R.H. Socolow (2007). Baseload wind energy: modeling the competition between gas turbines and compressed air energy storage for supplemental generation. *Energy Policy*, **35**, pp. 1474-1492.

Griffin, D.A. (2001). *WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area 1 – Composite Blades for 80-to 120-Meter Rotor*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 44 pp.

Gross, C. (2007). Community perspectives of wind energy in Australia: The application of a justice and community fairness framework to increase social acceptance. *Energy Policy*, **35**, pp. 2727-2736.

Gross, R., and P. Heptonstall (2008). The costs and impacts of intermittency: An ongoing debate: “East is East, and West is West, and never the twain shall meet”. *Energy Policy*, **36**, pp. 4005-4007.

Gross, R., P. Heptonstall, D. Anderson, T. Green, M. Leach, and J. Skea (2006). *The Costs and Impacts of Intermittency: An assessment of the evidence on the costs and impacts of intermittent generation on the British electricity network*. Imperial College London, London, UK, 112 pp.

Gross, R., P. Heptonstall, M. Leach, D. Anderson, T. Green, and J. Skea (2007). Renewables and the grid: understanding intermittency. *Energy*, **160**, pp. 31-41.

Grubb, M.J. (1991). Value of variable sources on power systems. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, **138**, pp. 149-165.

Grubb, M.J., and N.I. Meyer (1993). Wind energy: Resources, systems and regional strategies. In: *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. T.B. Johansson, H. Kelly, A.K. Reddy, and R.H. Williams (eds.), Island Press, Washington, DC, USA, pp. 157-212.

GWEC (2010a). *Global Wind 2009 Report*. Global Wind Energy Council (GWEC), Brussels, Belgium, 4 pp.

GWEC (2010b). *Global wind power boom continues despite economic woes*. Global Wind Energy Council (GWEC), Brussels, Belgium, 68 pp.

GWEC and GPI (2010). *Global Wind Energy Outlook 2010*. Global Wind Energy Council (GWEC) and Greenpeace International (GPI), Brussels, Belgium, 60 pp.

Haggett, C. (2011). Understanding public responses to offshore wind power. *Energy Policy*, **39**, pp. 503-510.

Hameed, Z., S.H. Ahn, and Y.M. Cho (2010). Practical aspects of a condition monitoring system for a wind turbine with emphasis on its design, system architecture, testing and installation. *Renewable Energy*, **35**, pp. 879-894.

Hand, M.M., and M.J. Balas (2007). Blade load mitigation control design for a wind turbine operating in the path of vortices. *Wind Energy*, **10**, pp. 339-355.

Hand, M.M., D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, S.M. Larwood (2001). *Unsteady aerodynamics experiment phase vi: Wind tunnel test configurations and available data campaigns*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 310 pp.

- Hansen, M.H. (2007).** Aeroelastic instability problems for wind turbines. *Wind Energy*, **10**, pp.551-577.
- Hansen, M.O., J.N. Sørensen, S. Voutsinas, N. Sørensen, and H.A. Madsen (2006).** State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity. *Progress in Aerospace Sciences*, **42**, pp.285-330.
- Harris, M., M. Hand, and A. Wright (2006).** *Lidar for Turbine Control*. National RenewableEnergy Laboratory, Golden, CO, USA.
- Hasche, B., A. Keane, and M. O'Malley (2010).** Capacity credit of wind power: calculation and data requirements; The Irish power system case. *IEEE Transactions on Power Systems*, **99**, pp.1-11.
- Haugen, J.E., and T. Iversen (2008).** Response in extremes of daily precipitation and wind from a downscaled multi-model ensemble of anthropogenic global climate change scenarios. *Tellus A*, **60**, pp. 411-426.
- Heege, A., J. Betran, and Y. Radovicic (2007).** Fatigue load computation of wind turbine gearboxes by coupled finite element, multi-body system and aerodynamic analysis. *Wind Energy*, **10**, pp. 395-413.
- Hoен, B., R. Wiser, P. Cappers, M. Thayer, and G. Sethi (2011).** Wind energy facilities and residential properties: The effect of proximity and view on sales prices. *Journal of Real Estate Research*, accepted for publication.
- Hohmeyer, O., D. Mora, and F. Wetzig (2005).** *Wind Energy. The Facts. Volume 4*. European Wind Energy Association, Brussels, Belgium, 60 pp.
- Holtinen, H. (2005).** Optimal electricity market for wind power. *Energy Policy*, **33**, pp. 2052-2063.
- Holtinen, H., P. Meibom, A. Orths, F. van Hulle, B. Lange, A. Tiedemann, M. O'Malley, J.Perik, B. Ummels, J.O. Tande, A. Estanqueiro, M. Matos, E. Gomez, L. Soder, G. Strbac, A. Shakoor, J.C. Smith, and M. Milligan (2009).** *Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power: Phase One 2006-2008*. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 200 pp.
- Hoogwijk, M., and W. Graus (2008).** *Global Potential of Renewable Energy Sources: A Literature Assessment*. Ecofys, Utrecht, The Netherlands, 45 pp.
- Hoogwijk, M., B. de Vries, and W. Turkenburg (2004).** Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy. *Energy Economics*, **26**, pp. 889-919.
- Hoogwijk, M., D. van Vuuren, B. de Vries, and W. Turkenburg (2007).** Exploring the impact on cost and electricity production of high penetration levels of intermittent electricity in OECD Europe and the USA, results for wind energy. *Energy*, **32**, pp. 1381-1402.
- Hoppock, D.C., and D. Patiño-Echeverri (2010).** Cost of wind energy: comparing distant wind resources to local resources in the midwestern United States. *Environmental Science & Technology*, **44**, pp. 8758-8765.
- Horn, J.W., E.B. Arnett, and T.H. Kunz (2008).** Behavioral responses of bats to operating wind turbines. *Journal of Wildlife Management*, **72**, pp. 123-133.
- Hubbert, M.K. (1971).** The energy resources of the Earth. *Scientific American*, **225**, pp. 60-70.
- Hydro-Quebec TransEnergie (2006).** *Technical Requirements for the Connection of Generation Facilities to the Hydro-Quebec Transmission System*. Hydro-Quebec TransEnergie,

Montreal, Canada, 17 pp.

IEA (2008). *Energy Technology Perspectives 2008. Scenarios and Strategies to 2050.*

International Energy Agency, Paris, France, 646 pp.

IEA (2009). *Technology Roadmap – Wind energy.* International Energy Agency, Paris, France, 52 pp.

IEA (2010a). *Energy Balances of Non-OECD Countries.* International Energy Agency, Paris, France, 554 pp.

IEA (2010b). *World Energy Outlook 2010.* International Energy Agency, Paris, France, 736 pp.

IEA (2010c). *Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios and Strategies to 2050.* International Energy Agency, Paris, France, 708 pp.

IEA and OECD (2010). *Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition.* International Energy Agency and Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France, 218 pp.

IEA Wind (2010). *IEA Wind Energy Annual Report 2009.* International Energy Agency Wind, Paris, France, 172 pp.

IEC (2008). *Wind Turbines – Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines; IEC 61400-21.* International Electrotechnical Commission, Delft, The Netherlands.

IEC (2010). *Wind Turbines - Part 22: Conformity Testing and Certification, IEC 61400-22.* International Electrotechnical Commission, Delft, The Netherlands.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, 851 pp.

ISO (2006). *Environmental Management - Life-Cycle Assessment - Requirements and Guidelines.* Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

Jackson, K.J., M.D. Zuteck, C.P. van Dam, K.J. Standish, and D. Berry (2005). Innovative design approaches for large wind turbine blades. *Wind Energy*, **8**, pp. 141-171.

Jackson, T.O. (2001). The effects of environmental contamination on real estate: A literature review. *Journal of Real Estate Literature*, **9**, pp. 91-116.

Jacobson, M.Z. (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science*, **2**, pp. 148-173.

Jakobsen, J. (2005). Infrasound emission from wind turbines. *Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **24**, pp. 145-155.

Jamasb, T. (2007). Technical change theory and learning curves: patterns of progress in electricity generation technologies. *The Energy Journal*, **28**, pp. 51–71.

JCSP (2009). *Joint Coordinated System Plan 2008, Volume 1 - Economic Assessment.* Joint Coordinated System Plan (JCSP), Report of the Midwest Independent System Operator, PJM Interconnection, Southwest Power Pool Electric Energy Network, Tennessee Valley Authority and Mid-continent Area Power Pool, 113 pp.

Jiang, Q., J.D. Doyle, T. Haack, M.J. Dvorak, C.L. Archer, and M.Z. Jacobson (2008). Exploring wind energy potential off the California coast. *Geophysical Research Letters*, **35**, L20819.

- Johansson, T.B., K. McCormick, L. Neij, and W. Turkenburg (2004).** The Potentials of Renewable Energy. Thematic Background Paper for the *International Conference for Renewable Energies*, Bonn, Germany, 36 pp.
- Johnson, K.E., and L.J. Fingersh (2008).** Adaptive pitch control of variable-speed wind turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, **130**, pp. 031012-7.
- Johnson, K.E., L.J. Fingersh, M.J. Balas, and L.Y. Pao (2004).** Methods for increasing region 2 power capture on a variable-speed wind turbine. *Journal of Solar Energy Engineering*, **126**, pp.1092-1100.
- Jones, C.R., and J.R. Eiser (2009).** Identifying predictors of attitudes towards local onshore wind development with reference to an English case study. *Energy Policy*, **37**, pp. 4604-4614.
- Jonkman, J.M. (2009).** Dynamics of offshore floating wind turbines-model development and verification. *Wind Energy*, **12**, pp. 459-492.
- Jónsson, T., P. Pinson, and H. Madsen (2010).** On the market impact of wind energy forecasts. *Energy Economics*, **32**, pp. 313-320.
- Jungbluth, N., C. Bauer, R. Dones, and R. Frischknecht (2005).** Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **10**, pp. 24-34.
- Junginger, M., A. Faaij, and W.C. Turkenburg (2004).** Cost reduction prospects for offshore wind farms. *Wind Engineering*, **28**, pp. 97-118.
- Junginger, M., A. Faaij, and W.C. Turkenburg (2005).** Global experience curves for wind farms. *Energy Policy*, **33**, pp. 133-150.
- Junginger, M., W.V. Sark, and A. Faaij (eds.) (2010).** *Technological Learning in the Energy Sector: Lessons for Policy, Industry and Science*. Edward Elgar, Northampton, MA, USA.
- Justus, C.G., K. Mani, and A.S. Mikhail (1979).** Interannual and month-to-month variations of wind speed. *Journal of Applied Meteorology*, **18**, pp. 913-920.
- Kahn, E. (1979).** The compatibility of wind and solar technology with conventional energy systems. *Annual Review of Energy*, **4**, pp. 313-352.
- Kahouli-Brahmi, S. (2009).** Testing for the presence of some features of increasing returns to adoption factors in energy system dynamics: An analysis via the learning curve approach. *Ecological Economics*, **68**, pp. 1195-1212.
- Kannen, A., and B. Burkhard (2009).** Integrated assessment of coastal and marine changes using the example of offshore wind farms: The coastal futures approach. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, **18**, pp. 229-238.
- Katzenstein, W., and J. Apt (2009).** Air emissions due to wind and solar power. *Environmental Science & Technology*, **43**, pp. 253-258.
- Katzenstein, W., E. Fertig, and J. Apt (2010).** The variability of interconnected wind plants. *Energy*, **38**, pp. 4400-4410.
- Keith, D.W., J.F. DeCarolis, D.C. Denkenberger, D.H. Lenschow, S.L. Malyshev, S. Pacala, and P. J. Rasch (2004).** The influence of large-scale wind power on global climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **101**, pp. 16115-16120.
- Kelley, N., M. Shirazi, D. Jager, S. Wilde, J. Adams, M. Buhl, P. Sullivan, and E. Patton (2004).** *Lamar Low-Level Jet Program Interim Report*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 216 pp.

- Kempton, W., and J. Tomic (2005).** Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, **144**, pp. 280-294.
- Kempton, W., C.L. Archer, A. Dhanju, R.W. Garvine, and M.Z. Jacobson (2007).** Large CO₂ reductions via offshore wind power matched to inherent storage in energy end-uses. *Geophysical Research Letters*, **34**, L02817.
- Kikuchi, R. (2010).** Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, pp. 172-177.
- Kim, J., and C. Park (2010).** Wind power generation with a parawing on ships, a proposal. *Energy*, **35**, pp. 1425-1432.
- Kirby, B., and M. Milligan (2008).** An examination of capacity and ramping impacts of wind energy on power systems. *The Electricity Journal*, **21**, pp. 30-42.
- Kirk-Davidoff, D.B., and D.W. Keith (2008).** On the climate impact of surface roughness anomalies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **65**, pp. 2215-2234.
- Kiviluoma, J., and P. Meibom (2010).** Influence of wind power, plug-in electric vehicles, and heat storages on power system investments. *Energy*, **35**, pp. 1244-1255.
- Klaassen, G., A. Miketa, K. Larsen, and T. Sundqvist (2005).** The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and the United Kingdom. *Ecological Economics*, **54**, pp.227-240.
- Klick, H., and E.R.A.N. Smith (2010).** Public understanding of and support for wind power in the United States. *Renewable Energy*, **35**, pp. 1585-1591.
- Kobos, P.H., J.D. Erickson, and T.E. Drennen (2006).** Technological learning and renewable energy costs: implications for US renewable energy policy. *Energy Policy*, **34**, pp. 1645-1658.
- Köller, J., J. Köppel, and W. Peters (eds.) (2006).** *Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impacts*. Springer, Berlin, Germany, 371 pp.
- Krewitt, W., and B. Schlomann (2006).** *Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern*. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research and DLR (German Center for Aeronautics and Astronautics), Karlsruhe and Stuttgart, Germany, 59 pp.
- Krewitt, W., K. Nienhaus, C. Kleßmann, C. Capone, E. Stricker, W. Graus, M. Hoogwijk, N. Supersberger, U. von Winterfeld, and S. Samadi (2009).** *Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply*. Climate Change 18/2009, ISSN 1862-4359, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Germany, 336 pp.
- Krey, V., and L. Clarke (2011).** Role of renewable energy in climate change mitigation: a synthesis of recent scenarios. *Climate Policy*, **11**, pp. 1-28.
- Krohn, S., and S. Damborg (1999).** On public attitudes towards wind power. *Renewable Energy*, **16**, pp. 954-960.
- Krug, F., and B. Lewke (2009).** Electromagnetic interference on large wind turbines. *Energies*, **2**, pp. 1118-1129.
- Kunz, T.H., E.B. Arnett, B.M. Cooper, W.P. Erickson, R.P. Larkin, T. Mabee, M.L. Morrison, M.D. Strickland, and J. M. Szwczak (2007a).** Assessing impacts of wind-energy development on nocturnally active birds and bats: a guidance document. *Journal of Wildlife Management*, **71**, pp. 2449-2486.
- Kunz, T.H., E.B. Arnett, W.P. Erickson, A.R. Hoar, G.D. Johnson, R.P. Larkin, M.D. Strickland, R.W. Thresher, and M.D. Tuttle (2007b).** Ecological impacts of wind energy

development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **5**, pp. 315-324.

Kuvlesky, W.P., L.A. Brennan, M.L. Morrison, K.K. Boydston, B.M. Ballard, and F.C. Bryant (2007). Wind energy development and wildlife conservation: challenges and opportunities. *Journal of Wildlife Management*, **71**, pp. 2487-2498.

Laakso, T., H. Holttinen, G. Ronsten, L. Tallhaug, R. Horbaty, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola, and B. Tammelin (2003). *State-of-the-art of Wind Energy in Cold Climates*. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 50 pp.

Lackner, M., and G. van Kuik (2010). A comparison of smart rotor control approaches using trailing edge flaps and individual pitch control. *Wind Energy*, **13**, pp. 117-134.

Ladenburg, J. (2009). Stated public preferences for on land and offshore wind power generation—a review. *Wind Energy*, **12**, pp. 171-181.

Lalor, G., A. Mullane, and M. O'Malley (2005). Frequency control and wind turbine technologies. *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**, pp. 1905-1913.

Lamont, A.D. (2008). Assessing the long-term system value of intermittent electric generation technologies. *Energy Economics*, **30**, pp. 1208-1231.

Lanier, M. (2005). *Low Wind Speed Technology Phase I Concept Study: Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel/Concrete Wind Turbine Towers*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 698 pp.

Larsen, G.C., H.A. Madsen, K. Thomsen, and T.J. Larsen (2008). Wake meandering: a pragmatic approach. *Wind Energy*, **11**, pp. 377-395.

Larsen, T.J., H.A. Madsen, and K. Thomsen (2004). Active load reduction using individual pitch, based on local blade flow measurements. *Wind Energy*, **8**, pp. 67-80.

Leckebusch, G.C., A. Weimer, J.G. Pinto, M. Reyers, and P. Speth (2008). Extreme wind storms over Europe in present and future climate: a cluster analysis approach. *Meteorologische Zeitschrift*, **17**, pp. 67-82.

Leighty, W. (2008). Running the world on renewables: Hydrogen transmission pipelines and firming geologic storage. *International Journal of Energy Research*, **32**, pp. 408-426.

Leishman, J.G. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge University Press, 536 pp.

Lemming, J.K., P.E. Morthorst, N.E. Clausen, and P. Hjulær Jensen (2009). *Contribution to the Chapter on Wind Power in Energy Technology Perspectives 2008*, IEA. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 64 pp.

Leutz, R., T. Ackermann, A. Suzuki, A. Akisawa, and T. Kashiwagi (2001). Technical offshore wind energy potentials around the globe. In: *European Wind Energy Conference and Exhibition*. Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001, pp. 2-6.

Leventhall, G. (2006). Infrasound from wind turbines—fact, fiction or deception. *Canadian Acoustics*, **34**, pp. 29.

Lew, D.J., R.H. Williams, X. Shaoxiong, and Z. Shihui (1998). Large-scale baseload wind power in China. *Natural Resources Forum*, **22**(3), 165-184.

Lewis, J.I. (2007). Technology acquisition and innovation in the developing world: Wind turbine development in China and India. *Studies in Comparative International Development (SCID)*, **42**, pp. 208-232.

- Lewis, J.I., and R.H. Wiser (2007).** Fostering a renewable energy technology industry: An international comparison of wind industry policy support mechanisms. *Energy Policy*, **35**, pp.1844-1857.
- Li, J. (2010).** Decarbonising power generation in China – Is the answer blowing in the wind? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1154-1171.
- Li, J., and L. Ma (2009).** *Background Paper: Chinese Renewables Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France, 95 pp.
- Li, J., H. Gao, J. Shi, L. Ma, H. Qin, and Y. Song (2007).** *China Wind Power Report, 2007*. China Environmental Science Press, Beijing, China, 55 pp.
- Lilley, M.B., and J. Firestone (2008).** Wind power, wildlife, and the Migratory Bird Treaty Act: a way forward. *Environmental Law*, **38**, pp. 1167-1214.
- Liu, Y., and A. Kokko (2010).** Wind power in China: Policy and development challenges. *Energy Policy*, **38**, pp. 5520-5529.
- Loring, J.M. (2007).** Wind energy planning in England, Wales and Denmark: Factors influencing project success. *Energy Policy*, **35**, pp. 2648-2660.
- Lu, X., M.B. McElroy, and J. Kiviluoma (2009).** Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, pp. 10933-10939.
- Lund, H. (2006).** Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply. *Renewable Energy*, **31**, pp. 503-515.
- Lund, H., and W. Kempton (2008).** Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. *Energy Policy*, **36**, pp. 3578-3587.
- Lund, H., and E. Münster (2003).** Modelling of energy systems with a high percentage of CHP and wind power. *Renewable Energy*, **28**, pp. 2179-2193.
- Lutz, T., A. Herrig, W. Würz, M. Kamruzzaman, and E. Krämer (2007).** Design and wind-tunnel verification of low-noise airfoils for wind turbines. *AIAA Journal*, **45**, pp. 779-785.
- MacCormack, J., A. Hollis, H. Zareipour, and W. Rosehart (2010).** The large-scale integration of wind generation: Impacts on price, reliability and dispatchable conventional suppliers. *Energy Policy*, **38**, pp. 3837-3846.
- Mackay, R.M., and S.D. Probert (1998).** Likely market-penetrations of renewable-energy technologies. *Applied Energy*, **59**, pp. 1-38.
- Madsen, H., P. Pinson, G. Kariniotakis, H.A. Nielsen, and T. Nielsen (2005).** Standardizing the performance evaluation of short term wind power prediction models. *Wind Engineering*, **29**, pp.475-489.
- Madsen, H.A., C. Bak, U.S. Paulsen, M. Gaunaa, N.N. Sørensen, P. Fuglsang, J. Romblad, N.A. Olsen, P. Enevoldsen, J. Laursen, and L. Jensen (2010).** The DAN-AERO MW experiments. In: *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Orlando, FL, USA, 4-7 January 2010, pp. 2010-0645.
- Madsen, P.T., M. Wahlberg, J. Tougaard, K. Lucke, and P. Tyack (2006).** Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology-Progress Series*, **309**, pp. 279-295.
- Malcolm, D.J. (2004).** *WindPACT Rotor Design. Period of performance: June 29, 2000 - February 28, 2004*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 44 pp.
- Malcolm, D.J., and A.C. Hansen (2006).** *WindPACT turbine rotor design study: June 2000 - June 2002*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 84 pp.

- Markard, J., and R. Petersen (2009).** The offshore trend: Structural changes in the wind power sector. *Energy Policy*, **37**, pp. 3545-3556.
- Martinot, E., C. Dienst, L. Weiliang, and C. Qimin (2007).** Renewable energy futures: Targets, scenarios, and pathways. *Annual Review of Environment and Resources*, **32**, pp. 205-239.
- Matthies, H.G., A.D. Garrad, M. Scherweit, C. Nath, M.A. Wastling, T. Siebers, T. Schellin, and D.C. Quarton (1995).** *Study of Offshore Wind Energy in the European Community*. Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany.
- McCunney, R.J., and J. Meyer (2007).** Occupational exposure to noise. In: *Environmental and Occupational Medicine*. 4th ed. W.N. Rom (ed.) Lippincott Williams and Wilkins, Baltimore, MD, pp. 1295-1238.
- McDonald, A., and L. Schrattenholzer (2001).** Learning rates for energy technologies. *EnergyPolicy*, **29**, pp. 255-261.
- McElroy, M.B., X. Lu, C.P. Nielsen, and Y. Wang (2009).** Potential for wind-generated electricity in China. *Science*, **325**, pp. 1378.
- MDOH (2009).** *Public Health Impacts of Wind Turbines*. Minnesota Department of Health(MDOH), Environmental Health Division, Minneapolis, MN, USA, 32 pp.
- Meibom, P., C. Weber, R. Barth, and H. Brand (2009).** Operational costs induced by fluctuating wind power production in Germany and Scandinavia. *IET Renewable Power Generation*, **3**, pp.75-83.
- Meyer, N. (2007).** Learning from wind energy policy in the EU: lessons from Denmark, Sweden and Spain. *European Environment*, **17**, pp. 347-362.
- Miao, Z., L. Fan, D. Osborn, and S. Yuvarajan (2009).** Control of DFIG-based wind generation to improve interarea oscillation damping. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **24**, pp.415-422.
- Michel, J., H. Dunagan, C. Boring, E. Healy, W. Evans, J.M. Dean, A. McGillis, and J. Hain (2007).** *Worldwide Synthesis and Analysis of Existing Information Regarding Environmental Effects of Alternative Energy Uses on the Outer Continental Shelf*. US Department of the Interior, Minerals Management Service, Herndon, VA, USA.
- Migliore, P., and S. Oerlemans (2004).** Wind tunnel aeroacoustic tests of six airfoils for use on small wind turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, **126**, pp. 974-985.
- Miketa, A., and L. Schrattenholzer (2004).** Experiments with a methodology to model the role of R&D expenditures in energy technology learning processes; first results. *Energy Policy*, **32**, pp.1679-1692.
- Milborrow, D. (2009).** Quantifying the impacts of wind variability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Energy*, **162**, pp. 105-111.
- Milborrow, D. (2010).** Annual power costs comparison: What a difference a year can make. *Windpower Monthly*, **26**, pp. 41-47.
- Milligan, M., and B. Kirby (2008).** The impact of balancing area size and ramping requirements on wind integration. *Wind Engineering*, **32**, pp. 379-398.
- Milligan, M., D.J. Lew, D. Corbus, P. Piwko, N. Miller, K. Clark, G. Jordan, L. Freeman, B.Zavadil, and M. Schuerger (2009).** Large-Scale Wind Integration Studies in the United States: Preliminary Results. In: *8th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Bremen, Germany, 14-15 October 2009, pp. 1-8.

- Mills, A., R. Wiser, and K. Porter (2009a).** *The Cost of Transmission for Wind Energy: A Review of Transmission Planning Studies*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 66 pp.
- Mills, A., R. Wiser, M. Milligan, and M. O'Malley (2009b).** Comment on “Air Emissions Due to Wind and Solar Power”. *Environmental Science & Technology*, **43**, pp. 6106-6107.
- Miranda, M.S., and D. Infield (2002).** A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*, **153**, pp. 9-16.
- MOE (2009).** *Development of Noise Setbacks for Wind Farms. Proposed Content for the Renewable Energy Approval Regulation - Section 47.3(1) - under the Environmental Protection Act*. Ontario Ministry of the Environment (MOE), Toronto, Ontario, Canada, 8 pp.
- Morales, J.M., A.J. Conejo, and J. Perez-Ruiz (2011).** Simulating the impact of wind production on locational marginal prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, **26**(2), pp. 820-828.
- Moriarty, P., and P. Migliore (2003).** *Semi-Empirical Aeroacoustic Noise Prediction Code for Wind Turbines*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 39 pp.
- Morren, J., S.W.H. de Haan, W.L. Kling, and J. Ferreira (2006).** Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**, pp. 433-434.
- Morthorst, P.E. (2003).** Wind power and the conditions at a liberalized power market. *Wind Energy*, **6**, pp. 297-308.
- Mostafaiepour, A. (2010).** Feasibility study of offshore wind turbine installation in Iran compared with the world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1722-1743.
- Mukora, A., M. Winkler, H.F. Jeffrey, and M. Mueller (2009).** Learning curves for emerging energy technologies. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, **162**, pp. 151-159.
- Mullane, A., and M. O'Malley (2005).** The inertial response of induction-machine-based wind turbines. *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**, pp. 1496-1503.
- Murawski, S.A. (2007).** Ten myths concerning ecosystem approaches to marine resource management. *Marine Policy*, **31**, pp. 681-690.
- Musgrove, P. (2010).** *Wind Power*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 338 pp.
- Musial, W. (2007).** Offshore wind electricity: a viable energy option for the coastal United States. *Marine Technology Society Journal*, **41**, pp. 32-43.
- Musial, W., and B. Ram (2010).** *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States: Assessment of Opportunities and Barriers*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 240 pp.
- Naaijen, P., and V. Koster (2007).** Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite. In: *2nd International Conference on Marine Research and Transportation*, Naples, Italy, 28-30 June 2007, pp. 45-53.
- NABCI (2010).** *The State of the Birds: 2010 Report on Climate Change*. North American Bird Conservation Initiative (NABCI), US Committee, US Department of the Interior, Washington, DC, USA.
- Nadaï, A., and O. Labussière (2009).** Wind power planning in France (Aveyron), from state regulation to local planning. *Land Use Policy*, **26**, pp. 744-754.

- Neij, L. (1997).** Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology. *Energy Policy*, **25**, pp. 1099-1107.
- Neij, L. (1999).** Cost dynamics of wind power. *Energy*, **24**, pp. 375-389.
- Neij, L. (2008).** Cost development of future technologies for power generation – A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments. *Energy Policy*, **36**, pp. 2200-2211.
- Nemet, G.F. (2009).** Interim monitoring of cost dynamics for publicly supported energy technologies. *Energy Policy*, **37**, pp. 825-835.
- NERC (2009).** *Accommodating High Levels of Variable Generation*. North American Electric Reliability Corporation (NERC), Princeton, NJ, USA, 104 pp.
- Neuhoff, K., A. Ehrenmann, L. Butler, J. Cust, H. Hoexter, K. Keats, A. Kreczko, and G. Sinden (2008).** Space and time: Wind in an investment planning model. *Energy Economics*, **30**, pp. 1990-2008.
- NHMRC (2010).** *Wind Turbines and Health: A Rapid Review of the Evidence*. National Health and Medical Research Council (NHMRC) of the Australian Government, Canberra, Australia, 11 pp.
- Nielsen, F.G., K. Argyriadis, N. Fonseca, M. Le Boulluec, P. Liu, H. Suzuki, J. Sirkar, N.J. Tarp-Johansen, S.R. Turnock, J. Waegter, and Z. Zong (2009).** Specialist Committee V.4: Ocean, wind and wave energy utilization. In: *17th International Ship and Offshore Structures Congress*, Seoul, Korea, 16-21 August 2009, pp. 201-257.
- Nielsen, S.R. (1996).** Wind energy planning in Denmark. *Renewable Energy*, **9**, pp. 776-771.
- Nielson, P., J.K. Lemming, P.E. Morthorst, H. Lawetz, E.A. James-Smith, N.E. Clausen, S. Strøm, J. Larsen, N.C. Bang, and H.H. Lindboe (2010).** *The Economics of Wind Turbines*. EMD International, Aalborg, Denmark, 86 pp.
- Nikolaev, V.G., S.V. Ganaga, and K.I. Kudriashov (2008).** *National Kadastr of Wind Resources of Russia and Methodological Grounds for their Determination*. Atmograph, Moscow, Russia, 590 pp.
- Nikolaev, V.G., S.V. Ganaga, K.I. Kudriashov, R. Walter, P. Willems, and A. Sankovsky (2010).** *Prospects of Development of Renewable Power Sources in Russian Federation. The results of TACIS project*. Europe Aid/116951/C/SV/RU. Atmograph, Moscow, Russia.
- NRC (2007).** *Environmental Impacts of Wind-Energy Projects*. National Research Council, The National Academy Press, Washington, DC, USA, 394 pp.
- NRC (2010a).** *Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use*. National Research Council, The National Academy Press, Washington, DC, USA, 506 pp.
- NRC (2010b).** *Electricity from Renewable Resources: Status, Prospects, and Impediments*. National Research Council, The National Academy Press, Washington, DC, USA, 388 pp.
- O'Rourke, R. (2006).** *Navy Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use – Background for Congress*. Congressional Research Service, Washington, DC, USA, 41 pp.
- Owen, A.D. (2004).** Environmental externalities, market distortions and the economics of renewable energy technologies. *The Energy Journal*, **25**, pp. 127-156.
- Palutikof, J.P., X. Guo, and J.A. Halliday (1992).** Climate variability and the UK wind resource. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **39**, pp. 243-249.
- Palutikof, J.P., P.M. Kelly, T.D. Davies, and J.A. Halliday (1987).** Impacts of spatial and temporal windspeed variability on wind energy output. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**, pp. 1124-1133.

- Pasqualetti, M.J., P. Gipe, R.W. Righer (2002).** *Wind Power in View: Energy Landscapes in a Crowded World*. Academic Press, San Diego, CA, USA, 248 pp.
- Pasqualetti, M.J., R. Richter, and P. Gipe (2004).** History of wind energy. In: *Encyclopaedia of Energy*. C.J. Cleveland (ed.), Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp. 419-433.
- Passon, P., and M. Kühn (2005).** State-of-the-art and development needs of simulation codes for offshore wind turbines. In: *Copenhagen Offshore Wind Conference*, Copenhagen, Denmark, 26-28 October, 2005, pp. 1-12.
- Pedersen, E., and K. Wayne (2004).** Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **116**, pp. 3460.
- Pedersen, E., and K.P. Wayne (2007).** Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, **64**, pp.480-486.
- Pedersen, E., and K.P. Wayne (2008).** Wind turbines – low level noise sources interfering with restoration? *Environmental Research Letters*, **3**, pp. 1-5.
- Pedersen, E., F. van den Berg, R. Bakker, and J. Bouma (2010).** Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound. *Energy Policy* **38**, pp. 2520-2527.
- Peeters, J.L.M., D. Vandepitte, and P. Sas (2006).** Analysis of internal drive train dynamics in a wind turbine. *Wind Energy*, **9**, pp. 141-161.
- Pehnt, M., M. Oeser, and D.J. Swider (2008).** Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany. *Energy*, **33**, pp. 747-759.
- Petersen, E.L., N.G. Mortensen, L. Landberg, J. Højstrup, and H.P. Frank (1998).** Wind power meteorology. Part I: Climate and turbulence. *Wind Energy*, **1**, pp. 2-22.
- M. Pettersson, K. Ek, K. Söderholm, and P. Söderholm (2010).** Wind power planning and permitting: Comparative perspectives from the Nordic countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 3116-3123.
- Poore, R., and T. Lettenmaier (2003).** *Alternative Design Study Report: WindPACT Advanced Wind Turbine Drive Train Designs Study*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 556 pp.
- Prospathopoulos, J.M., and S.G. Voutsinas (2005).** Noise propagation issues in wind energy applications. *Journal of Solar Energy Engineering*, **127**, pp. 234-241.
- Pryor, S.C., and R.J. Barthelmie (2010).** Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 430-437.
- Pryor, S.C., and J. Ledolter (2010).** Addendum to: Wind speed trends over the contiguous USA. *Journal of Geophysical Research*, **115**, D10103.
- Pryor, S.C., and J.T. Schoof (2010).** Importance of the SRES in projections of climate change impacts on near-surface wind regimes. *Meteorologische Zeitschrift*, **19**, pp. 267-274.
- Pryor, S.C., R.J. Barthelmie, and E. Kjellström (2005).** Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. *Climate Dynamics*, **25**, pp. 815-835.
- Pryor, S.C., J.T. Schoof, and R.J. Barthelmie (2006).** Winds of change? Projections of near-surface winds under climate change scenarios. *Geophysical Research Letters*, **33**, L11702.

- Pryor, S.C., R.J. Barthelmie, D.T. Young, E.S. Takle, R.W. Arritt, D. Flory, W. Gutowski Jr., A. Nunes, and J. Roads (2009).** Wind speed trends over the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, **114**, D14105.
- Punt, M.J., R.A. Groeneveld, E.C. van Ierland, and J.H. Stel (2009).** Spatial planning of offshore wind farms: A windfall to marine environmental protection? *Ecological Economics*, **69**, pp. 93-103.
- Purohit, P. (2007).** Financial evaluation of renewable energy technologies for irrigation water pumping in India. *Energy Policy*, **35**, pp. 3134-3144.
- Quarton, D.C. (1998).** The evolution of wind turbine design analysis – a twenty year progress review. *Wind Energy*, **1**, pp. 5-24.
- Rahimzadeh, F., A. Noorian, M. Pedram, and M. Kruk (2011).** Wind speed variability over Iran and its impact on wind power potential: A case study of Esfahan Province. *Meteorological Applications*, doi:10.1002/met.229.
- Rasmussen, F., M.H. Hansen, K. Thomsen, T.J. Larsen, F. Bertagnolio, J. Johansen, H.A.Madsen, C. Bak, and A.M. Hansen (2003).** Present status of aeroelasticity of wind turbines. *Wind Energy*, **6**, pp. 213-228.
- REN21 (2010).** *Renewables 2010: Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 80 pp.
- Rivier Abbad, J. (2010).** Electricity market participation of wind farms: the success story of the Spanish pragmatism. *Energy Policy*, **38**, pp. 3174-3179.
- Riziotis, V.A., S.G. Voutsinas, E.S. Politis, and P.K. Chaviaropoulos (2004).** Aeroelastic stability of wind turbines: the problem, the methods and the issues. *Wind Energy*, **7**, pp. 373-392.
- Roberts, B.W., D.H. Shepard, K. Caldeira, M.E. Cannon, D.G. Eccles, A.J. Grenier, and J.F. Freidin (2007).** Harnessing high-altitude wind power. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **22**, pp. 136-144.
- B. Rockel, and K. Woth (2007).** Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations. *Climatic Change*, **81**, pp. 267-280.
- Rogner, H.-H., F. Barthel, M. Cabrera, A. Faaij, M. Giroux, D. Hall, V. Kagramanian, S. Kononov, T. Lefevre, R. Moreira, R. Nötstaller, P. Odell, M. Taylor (2000).** Energy resources. In: *World Energy Assessment. Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, and World Energy Council, New York, NY, USA, pp. 135-171.
- Sáenz de Miera, G., P. del Río González, and I. Vizcaíno (2008).** Analysing the impact of renewable electricity support schemes on power prices: The case of wind electricity in Spain. *Energy Policy*, **36**, pp. 3345-3359.
- Sailor, D.J., M. Smith, and M. Hart (2008).** Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Renewable Energy*, **33**, pp. 2393-2406.
- Schreck, S.J., and M.C. Robinson (2003).** Boundary layer state and flow field structure underlying rotational augmentation of blade aerodynamic response. *Journal of Solar Energy Engineering*, **125**, pp. 448-457.
- Schreck, S.J., M.C. Robinson, M.M. Hand, and D.A. Simms (2000).** HAWT dynamic stall response asymmetries under yawed flow conditions. *Wind Energy*, **3**, pp. 215-232.
- Schreck, S.J., M.C. Robinson, M.M. Hand, and D.A. Simms (2001).** Blade dynamic stall vortex kinematics for a horizontal axis wind turbine in yawed conditions. *Journal of Solar Energy*

Engineering, **123**, pp. 272.

Schreck, S.J., J. Lundquist, and W. Shaw (2008). *U.S. Department of Energy Workshop Report: Research Needs for Wind Resource Characterization*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 116 pp.

Schumacher, A., S. Fink, and K. Porter (2009). Moving beyond paralysis: How states and regions are creating innovative transmission policies for renewable energy projects. *The Electricity Journal*, **22**, pp. 27-36.

Schwartz, M., D. Heimiller, S. Haymes, and W. Musial (2010). *Assessment of Offshore Wind Energy Resource for the United States*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 104 pp.

Sensfuß, F., M. Ragwitz, and M. Genoese (2008). The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany. *Energy Policy*, **36**, pp. 3086-3094.

Shafer, D.A., K.R. Strawmyer, R.M. Conley, J.H. Guidinger, D.C. Wilkie, T.F. Zellman, and D.W. Bernadett (2001). *WindPACT Turbine Design Scaling Studies: Technical Area 4 – Balance-of-Station Cost; 21 March 2000-15 March 2001*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 219 pp.

Shen, W.Z., and J.N. Sørensen (2007). Aero-acoustic modelling using large eddy simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, **75**, pp. 012085.

Siegfriedsen, S., M. Lehnhoff, and A. Prehn (2003). Primary markets for offshore wind energy outside the European Union. *Wind Engineering*, **27**, pp. 419-429.

Sieros, G., P. Chaviaropoulos, J. Sørensen, B. Bulder, and P. Jamieson (2011). Upscaling wind turbines: theoretical and practical aspects and the impact on the cost of energy. *Wind Energy*, accepted for publication.

Simms, D.A., S. Schreck, M. Hand, and L.J. Fingersh (2001). *NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 51 pp.

Simons, R. (2006). Peer reviewed evidence on property value impacts by source of contamination. In: *When Bad Things Happen To Good Property*. Environmental Law Institute Press, Washington, DC, USA, pp. 63-112.

Simons, R.A., and J.D. Saginor (2006). A meta-analysis of the effect of environmental contamination and positive amenities on residential real estate values. *Journal of Real Estate Research*, **28**, pp. 71-104.

Sims, S., and P. Dent P (2007). Property stigma: wind farms are just the latest fashion. *Journal of Property Investment & Finance*, **25**, pp. 626-651.

Sims, S., P. Dent, and G.R. Oskrochi (2008). Modelling the impact of wind farms on house prices in the UK. *International Journal of Strategic Property Management*, **12**, pp. 251-269.

Sinden, G. (2007). Characteristics of the UK wind resource: long-term patterns and relationship to electricity demand. *Energy Policy*, **35**, pp. 112-127.

Singh, B., and S.N. Singh (2009). Wind power interconnection in power system: A review of grid code requirements. *The Electricity Journal*, **22**, pp. 54-63.

Smallwood, K.S., and C. Thelander (2008). Bird mortality in the Altamont Pass Wind Resource Area, California. *Journal of Wildlife Management*, **72**, pp. 215-223.

Smith, D.A. (2001). *WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area 2: Turbine, Rotor*,

- and Blade Logistics; March 27, 2000 to December 31, 2000*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 224 pp.
- Smith, J.C., M.R. Milligan, E.A. DeMeo, and B. Parsons (2007)**. Utility wind integration and operating impact state of the art. *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**, pp. 900-908.
- Snel, H. (2003)**. Review of aerodynamics for wind turbines. *Wind Energy*, **6**, pp. 203-211.
- Snel, H., J.G. Schepers, and N. Siccama (2009)**. Mexico Project: the database and results of data processing and interpretation. In: *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Orlando, Florida, 5-8 January 2009, pp. 2009-1217.
- Snyder, B., and M.J. Kaiser (2009a)**. A comparison of offshore wind power development in Europe and the US: Patterns and drivers of development. *Applied Energy*, **86**, pp. 1845-1856.
- Snyder, B., and M.J. Kaiser (2009b)**. Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. *Renewable Energy*, **34**, pp. 1567-1578.
- Söder, L., and H. Holttinen (2008)**. On methodology for modelling wind power impact on power systems. *International Journal of Global Energy Issues*, **29**, pp. 181-198.
- Söder, L., L. Hofmann, A. Orths, H. Holttinen, Y. Wan, and A. Tuohy (2007)**. Experience from wind integration in some high penetration areas. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **22**, pp. 4-12.
- Söderholm, P., and T. Sundqvist (2007)**. Empirical challenges in the use of learning curves for assessing the economic prospects of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, **32**, pp.2559-2578.
- South, P., R. Mitchell, and E. Jacobs (1983)**. *Strategies for the Evaluation of Advanced WindEnergy Concepts*. Solar Energy Research Institute, Golden, CO, USA, 153 pp.
- Sovacool, B.K. (2009)**. Contextualizing avian mortality: A preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind, fossil-fuel, and nuclear electricity. *Energy Policy*, **37**, pp. 2241-2248.
- Spera, D. (ed.) (2009)**. *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind TurbineEngineering*. American Society of Mechanical Engineers Press, New York, NY, USA, 638 pp.
- Sta. Maria, M.R.V., and M.Z. Jacobson (2009)**. Investigating the effect of large wind farms on energy in the atmosphere. *Energies*, **2**, pp. 816-838.
- Stewart, G.B., A.S. Pullin, and C.F. Coles (2007)**. Poor evidence-base for assessment of windfarm impacts on birds. *Environmental Conservation*, **34**, pp. 1-11.
- Stol, K.A., and M.J. Balas (2003)**. Periodic disturbance accommodating control for blade load mitigation in wind turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, **125**, pp. 379.
- Stoner, A.M.K., K. Hayhoe, and D.J. Wuebbles (2009)**. Assessing general circulation model simulations of atmospheric teleconnection patterns. *Journal of Climate*, **22**, pp. 4348.
- Summers, E. (2000)**. Operational effects of windfarm developments on air traffic control (ATC) radar procedures for Glasgow Prestwick International Airport. *Wind Engineering*, **24**, pp. 431-435.
- Sundqvist, T. (2004)**. What causes the disparity of electricity externality estimates? *Energy Policy*, **32**, pp. 1753-1766.
- Swider, D.J., L. Beurskens, S. Davidson, J. Twidell, J. Pyrko, W. Prügler, H. Auer, K. Vertin, and R. Skema (2008)**. Conditions and costs for renewables electricity grid connection: Examples in Europe. *Renewable Energy*, **33**, pp. 1832-1842.

- Swofford, J., and M. Slattery (2010).** Public attitudes of wind energy in Texas: Local communities in close proximity to wind farms and their effect on decision-making. *Energy Policy*, **38**, pp. 2508-2519.
- Tan, X. (2010).** Clean technology R&D and innovation in emerging countries – Experience from China. *Energy Policy*, **38**, pp. 2916-2926.
- Teske, S., T. Pregger, S. Simon, T. Naegler, W. Graus, and C. Lins (2010).** Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency*, **4**, pp. 409-433..
- Thayer, R.L., and C.M. Freeman (1987).** Altamont: Public perceptions of a wind energy landscape. *Landscape and Urban Planning*, **14**, pp. 379-398.
- Thayer, R.L., and H. Hansen (1988).** Wind on the land: Renewable energy and pastoral scenery vie for dominance in the siting of wind energy developments. *Landscape Architecture*, **78**, pp.69-73.
- Thomsen, K., and P. Sørensen (1999).** Fatigue loads for wind turbines operating in wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **80**, pp. 121-136.
- Toke, D. (2006).** Explaining wind power planning outcomes: Some findings from a study in England and Wales. *Energy Policy*, **33**, pp. 1527-1539.
- Toke, D., S. Breukers, and M. Wolsink (2008).** Wind power deployment outcomes: How can we account for the differences? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, pp. 1129-1147.
- Tougaard, J., J. Carstensen, J. Teilmann, H. Skov, and P. Rasmussen (2009).** Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena* (L.)). *The Journal of the Acoustical Society of America*, **126**, pp. 11-14.
- Tradewind (2009).** *Integrating Wind. Developing Europe's Power Market for the Large Scale Integration of Wind.* Tradewind, Brussels, Belgium, 104 pp.
- Troy, N., E. Denny, and M.J. O'Malley (2010).** Base load cycling on a system with significant wind penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, pp. 1088-1097.
- Tuohy, A., P. Meibom, E. Denny, and M. O'Malley (2009).** Unit commitment for systems with significant wind penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, pp. 592-601.
- Twidell, J., and G. Gaudiosi (eds.) (2009).** *Offshore Wind Power.* Multi-Science Publishing, Brentwood, UK, 425 pp.
- UKERC (2010).** *Great Expectations: The Cost of Offshore Wind in UK Waters – Understanding the Past and Projecting the Future.* UK Energy Research Centre, London, UK, 112 pp.
- US DOE (2008).** *20% Wind Energy by 2030: Increasing Wind Energy's Contribution to U.S. Electricity Supply.* US Department of Energy, Washington, DC, USA, 248 pp.
- Usaola, J. (2009).** Probabilistic load flow in systems with wind generation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **3**, pp. 1031-1041.
- Vajjhala, S.P., and P.S. Fischbeck (2007).** Quantifying siting difficulty: A case study of US transmission line siting. *Energy Policy*, **35**, pp. 650-671.
- Valentine, S.V. (2010).** A STEP toward understanding wind power development policy barriers in advanced economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 2796-2807.
- Van Bussel, G.J.W., and W. Bierbooms (2003).** The DOWEC Offshore Reference Windfarm: analysis of transportation for operation and maintenance. *Wind Engineering*, **27**, pp. 381-391.
- van den Berg, GP. (2004).** Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, **277**, pp. 955-970.

- van den Berg, G.P. (2005).** The beat is getting stronger: the effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines. *Noise Notes*, **4**, pp. 15-40.
- van den Berg, G.P. (2008).** Wind turbine power and sound in relation to atmospheric stability. *Wind Energy*, **11**, pp. 151-169.
- van der Horst, D. (2007).** NIMBY or not? Exploring the relevance of location and the politics of voiced opinions in renewable energy siting controversies. *Energy Policy*, **35**, pp. 2705-2714.
- Van der Hoven, I. (1957).** Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of Atmospheric Sciences*, **14**, pp. 160-164.
- Vittal, E., M.J. O'Malley, and A. Keane (2010).** A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, pp. 433-442.
- Wagner, S., R. Bareiss, and G. Guidati (1996).** *Wind Turbine Noise*. Springer-Verlag Telos, Emeryville, CA, USA, 204 pp.
- Wahlberg, M., and H. Westerberg (2005).** Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series*, **288**, pp. 295-309.
- Walter, A., K. Keuler, D. Jacob, R. Knoche, A. Block, S. Kotlarski, G. Muller-Westermeier, D. Rechid, and W. Ahrens (2006).** A high resolution reference dataset of German wind velocity 1951-2001 and comparison with regional climate model results. *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, pp. 585-596.
- Wan, Y., and D. Bucaneg Jr. (2002).** Short-term power fluctuations of large wind power plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, **124**, pp. 427.
- Wan, Y., M. Milligan, and B. Parsons (2003).** Output power correlation between adjacent wind power plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, **125**, pp. 551-554.
- Wang, C., and R.G. Prinn (2010).** Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**, pp. 2053-2061.
- Wang, X.L., F.W. Zwiers, V.R. Swail, and Y. Feng (2009).** Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874–2007. *Climate Dynamics*, **33**, pp. 1179-1195.
- Warren, C., C. Lumsden, S. O'Dowd, and R. Birnie (2005).** 'Green on Green': Public perceptions of wind power in Scotland and Ireland. *Journal of Environmental Planning and Management*, **48**, pp. 853-875.
- Watson, S.J., L. Landberg, and J.A. Halliday (1994).** Application of wind speed forecasting to the integration of wind energy into a large scale power system. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, **141**, pp. 357-362.
- WBGU, H. Graßl, J. Kokott, M. Kulessa, J. Luther, F. Nuscheler, R. Sauerborn, H.J. Schellnhuber, R. Schubert, E.D. Schulze (2004).** *World in Transition: Towards Sustainable Energy Systems*. German Advisory Council on Global Change (WBGU), Earthscan, London, UK and Sterling, VA, USA, 352 pp.
- Weber, C. (2010).** Adequate intraday market design to enable the integration of wind energy into the European power systems. *Energy Policy*, **38**, pp. 3155-3163.
- WEC (1994).** *New Renewable Energy Resources: A Guide to the Future*. World Energy Council, Kogan Page, London, UK, 391 pp.
- Wene, C.O. (2000).** *Experience curves for energy technology policy*. International Energy Agency and Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France, 127 pp.
- WHO (1999).** *Guidelines for Community Noise*. World Health Organization, Geneva, Switzerland,

141 pp.

WHO (2009). *Night Noise Guidelines for Europe*. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 162 pp.

Wiesenthal, T., G. Leduc, H. Schwarz, and K. Haegeman (2009). *R&D Investment in the Priority Technologies of the European Strategic Energy Technology Plan*. European Commission, Joint Research Centre, Luxembourg, 84 pp.

Wiggelinkhuizen, E., T. Verbruggen, H. Braam, L. Rademakers, J. Xiang, and S. Watson (2008). Assessment of condition monitoring techniques for offshore wind farms. *Journal of Solar Energy Engineering*, **130**, 031004.

Wilhelmsson, D., and T. Malm (2008). Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **79**, pp. 459-466.

Wilhelmsson, D., T. Malm, and M.C. Ohman (2006). The influence of offshore windpower on demersal fish. *ICES Journal of Marine Science*, **63**, pp. 775.

Wilson, J.C., and M. Elliott (2009). The habitat-creation potential of offshore wind farms. *WindEnergy*, **12**, pp. 203-212.

Wiser, R., and M. Bolinger (2010). *2009 Wind Technologies Market Report*. US Department of Energy, Washington, DC, USA, 88 pp.

Wiser, R.H., and S.J. Pickle (1998). Financing investments in renewable energy: the impacts of policy design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2**, pp. 361-386.

Wolsink, M. (1989). Attitudes and expectancies about wind turbines and wind farms. *WindEngineering*, **13**, pp. 196-206.

Wolsink, M. (2000). Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support. *Renewable Energy*, **21**, pp. 49-64.

Wolsink, M. (2007). Planning of renewables schemes: Deliberative and fair decision-making on landscape issues instead of reproachful accusations of non-cooperation. *Energy Policy*, **35**, pp.2692-2704.

Wright, A.D. (2004). *Modern Control Design for Flexible Wind Turbines*. National RenewableEnergy Laboratory, Golden, CO, USA, 233 pp.

Wustenhagen, R., M. Wolsink, and M. Burer (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, **35**, pp. 2683-2691.

Wyngaard, J.C. (2004). Toward numerical modeling in the “Terra Incognita”. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**, pp. 1816-1826. **Xiao, Z., Z. Rong, and L. Song (2010).** *China Wind Energy Resource Assessment 2009*. China Meteorological Press, Beijing, China, 150 pp.

Xue, H., R.Z. Zhu, Z.B. Yang, and C.H. Yuan (2001). Assessment of wind energy reserves in China. *Acta Energiae Solaris Sinica*, **22**, pp. 168-170.

Yu, C., W. van Sark, and E. Alsema (2011). Unraveling the photovoltaic technology learning curve by incorporation of input price changes and scale effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, pp. 324-337.

Zhu, W.J., W.Z. Shen, and J.N. Sorensen (2007). Computational aero-acoustic using high-order finite-difference schemes. *Journal of Physics: Conference Series*, **75**, pp. 012084.

Zhu, W.J., N. Heilskov, W.Z. Shen, and J.N. Sørensen (2005). Modeling of aerodynamically generated noise from wind turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, **127**, pp. 517.