

富山市東黒牧における小型風力発電システムの実証的運用

Proving Experiment of a Small Wind-Generation System in
Higashi-Kuromaki, Toyama Prefecture上坂博亨
UESAKA Hiroyuki

1. はじめに

我が国の電源別発電電力量（2007年）は、原子力と天然ガスが最も多くそれぞれ約25.6%および27.4%を占める。次いで石炭25.3%、石油13.1%、水力7.6%と続くが、風力や太陽光など再生可能エネルギーを含む新エネルギー部門は1%にも満たない¹⁾。風力発電については1980年代から導入が始まっており、10kW以上の風力発電装置の累積導入台数は1990年には9基（設備容量：1015kW）であったが、1997年の地域新エネルギー導入促進事業に加速されて2000年度には導入台数が259基に達した。それ以降に急速に導入台数が伸び、2008年度には1517基（設備容量：185万kW）に達している²⁾。この値は2007年度の国内総発電設備容量（約23750万kW）の約0.7%に当たる。導入基の容量規模別の内訳をみると、2002年度ごろから1000kW以上の大型風車の割合が半数以上を占めるようになってきたことが特徴である。特に2004年度以降には導入基数の9割以上を1000kW以上の大型風車が占めるようになってきた。その一方で、年度別の導入推移をみると2006年度の265基をピークに減少に転じており2007年度には105基、2008年度には117基と、2006年度の半分以下の導入基数で推移している²⁾。大型風力発電に適した地点は日本国内には多くないことから、ほぼ充足の状態に移行しつつあると見ることができる。

我々はこれまでに最大出力1.5kWの小型風力発電機を用いた発電システムの構築を行ってきた³⁾⁴⁾。小型風力発電装置は一般に地上高が低いため地上付近の比較的低速な風況の中での運用となることが多く、発電量も小さい。そのため実用的に発電するというよりはむしろ環境教育やモニュメントとしての用途が多い。我々の実験地点である富山市東黒牧は、平野部から山間部へと移行する位置にあり比較的乱流が発生しやすい条件があり風力発電に必ずしも好適の地点とは言えない。このような中で効率よく発電を行うために、回転開始風速（1.8m/s）から充電開始風速（3.5m/s）までの低圧の発電電力をチョッパー回路によって昇圧し充電に供する仕組みを導入した。

近年、小規模の太陽光やバイオマス発電、あるいは小水力発電などを組み合わせて一つの電力供給網を形成させるスマートグリッド技術が注目されている⁵⁾。この仕組みはかつてのマイクロ

グリッド⁶⁾に比較して情報ネットワークによる発電および需用監視と制御がきめ細かくなったところに特徴の一つがある。自然エネルギーによる発電は出力や周波数の変動が大きく、そのまま系統電力と連携することには問題が多かった。しかしスマートグリッド技術が向上することでそれらの問題が解消される可能性が期待できる。このような社会システムの中においては、出力変動の激しい小型風力発電システムも一つの電源としての価値を発揮できる可能性がある。

以上の背景の中で、本研究では従来から極めて不安定な電源要素である小型風力発電システムの技術的問題点を明らかにし、スマートグリッドをはじめとする電源システムの要素としての実用可能性を評価することを目的とする。本論では富山市東黒牧地点における風況・発電量などの基礎データを集積し、その実用性について評価する。

2. 小型風力発電装置およびデータ記録装置の設置

小型風力発電装置

風車はナセル部に可動マグネット式発電機を内蔵する3翼プロペラ型（ウインドパワー社製）で、定格出力は1.5kW、地上高11mの鉄製ポール上に設置している。風車部は全長2.4mで、尾部には垂直尾翼が取り付けられている。垂直尾翼は横風を受けると軸が回転する仕組みとなっている。これによって横からの突風による力を逃がす構造になっている。ブレードは長さ1.3mで、回転直径はナセル部も合わせて2.7mである。また風車装置全体の重量は38.6Kgである。

風車の発電装置はPCS (Power Control System: charge /load controllers C40: e-Marine, Inc) を介してバッテリーに接続されている。バッテリーは直流24Vの鉛蓄電池を2本用いており、PCSの制御の元で連続的に充電される。PCSには風力発電装置と太陽光発電装置の両方から電力が給電される。

なお、本装置の設置地点は富山国際大学東黒牧キャンパス（富山市東黒牧65-1）の大学構内駐車場付近で、緯度経度は表1の通りである。

表1 風力発電装置の設置位置（世界測地法）

東経	137度 16分 35.954秒
北緯	36度 35分 59.028秒

発電データおよび風況データの記録装置

風力発電機の電力出力はPCS (Power Control System) を経由して利用されるが、発電データの記録のために発電機出力を図1のようにIsolation Ampに誘導した後、データロガー

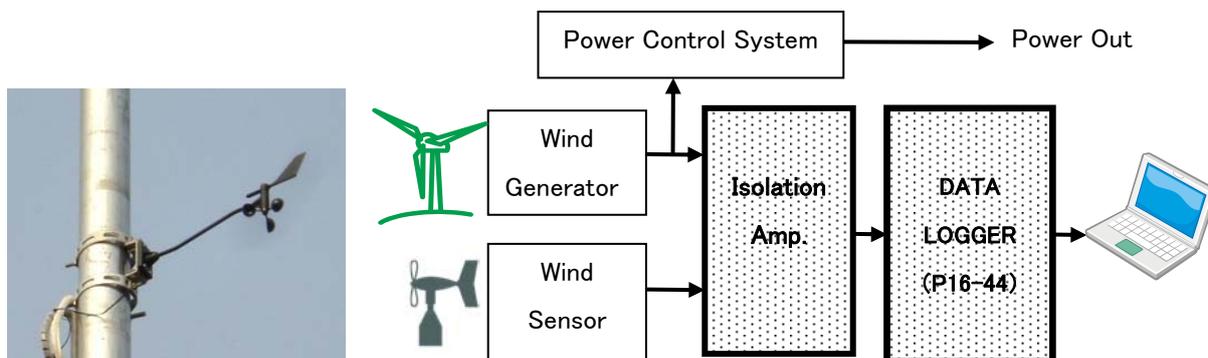


写真1 風向風速計

図1 データ記録システムのブロックダイアグラム

(P16-44:クリマテック(株)製)にて記録した。データはサンプリング周期 1 秒で収集し、ロガー内で積算および演算処理をして内部のメモリに蓄積する。メモリへの書き込み周期は、10分、60分、24時間の3パターンとした。風況測定用の風向風速計として Weather Station (DAVIS Instruments 製) を設置した (写真 1)。風向風速計は風車のブレードによる乱流の影響を受けないよう、鉄製ポールの中間部 (地上高約 7m) に設置した。風向風速計で計測したデータは通信ケーブルを使ってパワーセンター内に誘導し、電力と同様に Isolation Amp を経由してデータロガーに導入し内蔵メモリに記録した。サンプリング周期、記録周期は電力データと同様である。

ロガーの内蔵メモリは 2MB で、電力および風況データを約 10 ヶ月間蓄積することができる。メモリを使い切ると、古いメモリから順に上書きされるので、定期的にパソコンをデータロガーに接続してデータ収集を行った。

3. 風況および小型風力発電システムの運用状況

風速の分布

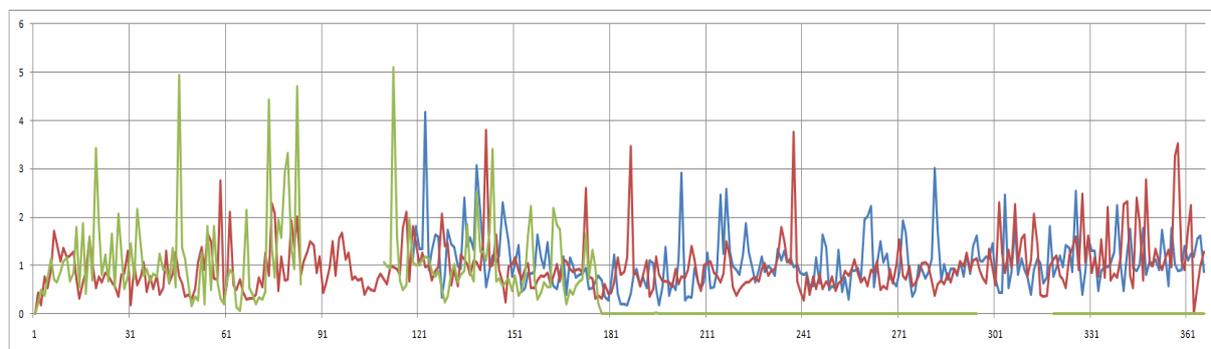
2007年4月から2009年6月までの日平均風速の変動状態を図2に示す。ここに見られるとおり、風速はおおむね 1m/s 前後で変動しており、時折 5m/s 程度の風況となる様子がわかる。またしかも、風速の変動には、明らかな周年の規則性は観測されず不規則な変動を示すように観測された。これを月別の風況 (1 時間平均) で観測したものを図3に示す。いずれの月も大きな違いはないが、12月~3月の風速分布が比較的大きい。

日毎の平均風速を単純加算によって月毎の平均風速に直したものが表2である。これが表すとおり、年間を通じて極端に風の強い月はなく、平均して約 1m/sec 程度の風速となった。1時間毎の平均風速を単純加算によって平均すると年間平均風速は 1.02m/sec となった。

ここで観測期間中の風速分布を集計した結果を図4に示す。これに見られるとおり観測期間においては風速 0-1m./s の出現頻度が最

表 2 月平均の風速

月	平均風速(m/s)
1月	0.99
2月	0.92
3月	1.19
4月	1.06
5月	1.13
6月	0.81
7月	0.81
8月	1.02
9月	0.90
10月	1.01
11月	1.13
12月	1.28
平均風速	1.02



1月 2月 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月

図2 年間風速 (日平均) の重ね合わせ図。2年分を重ね合わせて表示している。

も高く 59.7%を示した。次いで風速 1-2m/s が 29.5%を示し、風速 2m/s 以下の累積風速分布が 89.2%を占めた。さらに風速 2-3m/s が 6.5%、3-4m/s が 2.7%、4-5m/s が 0.9% となり、5m/s を超える風速の出現頻度はわずかに 0.6%であった。なお本風速は 1 時間毎の平均風速であるが、実際には風速はそれ以上に小刻みに変動するため瞬間風速は本集計値よりも大きくなる。詳細な風速分布については精査中である。

風向の分布

同観測期間中の風向の分布を集計した結果を図 5 および表 3 に示す。集計方法としては、全方位 360 度を真北を 0 度として 8 方位に分割して各方位にあてはまる平均風向の出現頻度を積算し百分率で示した。方位の範囲は、代表とする方位 (例えば真北=0 度) を中心として左右 11.25 度 (幅 22.5 度) を方位幅とし、中心方位で代表させるものとした。その結果、真南 (S) 方向の風向の頻度が最も高く 28.0%を示した。次いで南南西 (SSW) の 12.5%、南南東 (SSE) の 11.8%と続き、この 3 方位 67.5 度の間に 50%以上の風向が分布していることがわかった一方で東および北方向を中心として風向分布が低くとりわけ東方向から風が少ないことが読み取れる。

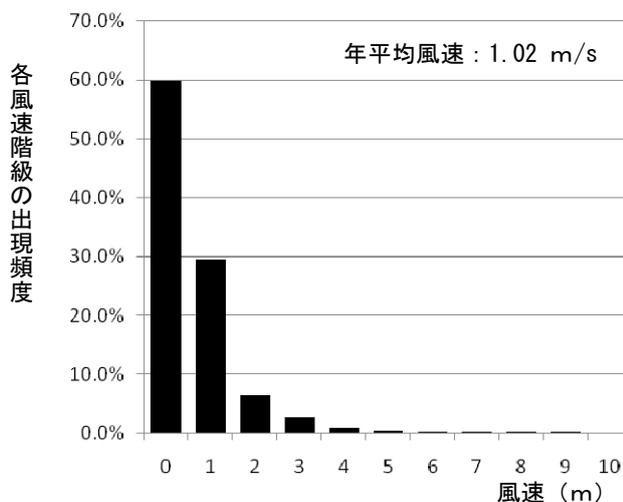


図 4 年平均風速分布

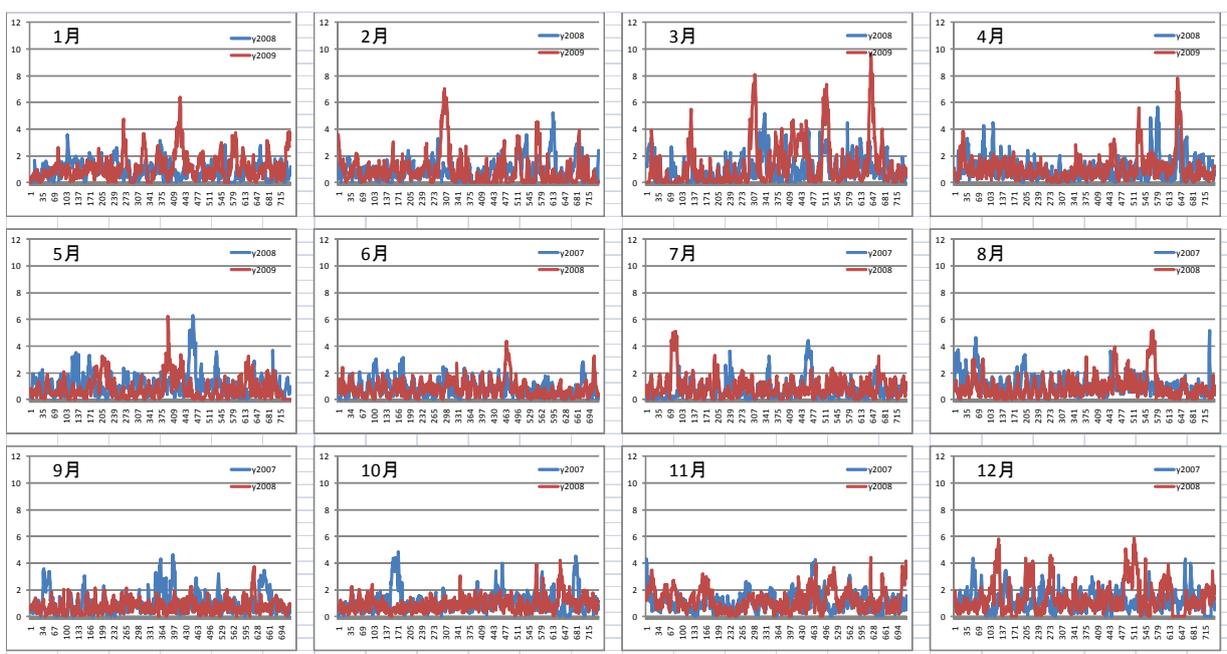


図 3 月間風速(1 時間平均)の2年分の重ね合わせ図

発電の状況

同期間の発電量を表4に示す。2007年には期間中に約1317Wh、2008年には約417Wh、2009年は6月までに783Whの発電を行い、駐車場のLED照明で消費した。LED照明装置は定格消費電力9Wと極めて省エネルギー型の照明装置である。本発電システムではLED照明装置を2基、電力網の中に取り入れているが、合計の定格消費電力もわずかに18Wであり、電力消費が非常に少ない。その為発電した電力がほとんど消費されず、それに伴って発電量も少なくなったものと考えられる。目視的に充電状態を監視した限りにおいても、バッテリーは常時ほぼ充電状態にあり、バッテリーチャージャーにもフル充電の表示が見られた。これらの事から、LED照明だけでは電力を消費できていない様子うかがわれる。

最大発電電圧は2007年が97V、2008年が85V、2009年には101Vであった。本風車発電機の発電特性からすると101Vの発電電圧はほぼ最大であるが、この電圧を記録したのは2009年4月21日の未明であり、この時の最大瞬間風速は8.4m、風向はほぼ真南(179度)を示していた。しかしながらその前後の風速を調査すると最大瞬間風速が10m/sを超えたインターバルが3回観測されているが、その時点での発電電圧は85V~93Vとなっている。このことは、観測された風況とそれを追従する風車の応答性能に差があるために発生していると考えられ、今後、小型風力発電の効率向上に関して重要な示唆を与えるものと推察している。

表4 発電の状況

	Wat-sum	Volt-MAX
y2007/4-12	1317.7	96.9
y2008/1-12	417.4	85.0
y2009/1-6	783.6	101.1

表3 風向の分布

方位	頻度 (%)
N	2.4%
NNE	4.7%
NE	3.1%
ENE	1.9%
E	2.3%
ESE	4.1%
SE	4.6%
SSE	11.8%
S	28.0%
SSW	12.5%
SW	5.4%
WSW	4.8%
W	4.4%
WNW	5.0%
NW	3.0%
NNW	2.0%

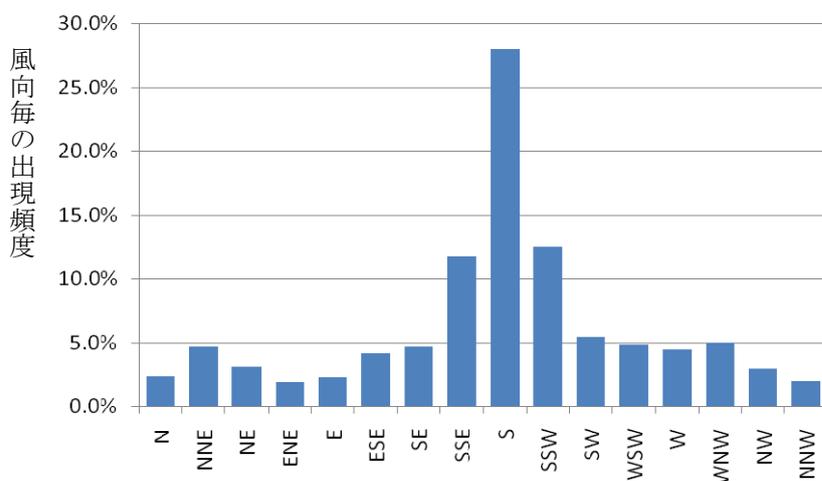


図5 1時間平均風向の分布

4. 考察と展望

富山市東黒牧における風況

今回の観測地点における風況は、年間平均風速が 1.02m/s、最頻風向が南方向で、風向・風速ともに比較的安定性の低い条件であることが明らかとなった。風速に関しては最大風速が 10m/s 強に達するのに対して、風速 1m/s 未満の状況が期間中の 60% 近くを占めていることから、総括的には安定的な発電には好条件とは言い難い条件下と考えられる。

インターネット上に NEDO が公開している LAWEPS (局所的風況予測モデル) を用いて今回の観測地点の局所的風況予測を求めた結果を図 6 に示す。本予測は大型風車を対象として地上高 30m・50m・70m の風況を、500m メッシュの精度で予測するもので、図 6 に示す結果は地上高 30m のものである。これによると、本地点の平均風速は 3.5m/s で、3m/s 以下の風速が全体の 50% 程度を占める状況と予測された。これに比較して今回の風況観測地点では風速 2m/s 以下の風速分布が 89.2% を占めたが、これは地上高 7m の高さで風向風速センサーを設置していることに主な理由があると考えられ、LAWEPS の予測値 3.5m/s と比較しても矛盾のない値である。また風向に関しては、最頻風向は真南でその頻度は 15% 程度、また最も頻度の低い風向は真東と読み取れる。この点についても今回の観測地点の最頻風向が真南でその頻度は 28% であった事、また最も頻度が低い風向が真東であったことと良く一致し、東黒牧付近の特徴ある風況であると示唆された。

本論文においては総括的な風況として 1 日平均および 1 時間平均の観測値を用いて分析を行った。総括的には風力発電に好条件とは言い難い風況であるが、実際に稼働中の小型風車を目視していると風の状況が時々刻々と変化することで風車がしばしば向きを変えていることが観察できる。このことは本地点での風の乱れの多さを示唆するものであると考えられる。これについては集計の周期がより短いデータを用いて風況を詳細に検討する必要があることを意味する。このことは低い地上高で乱流の多い風況の中での小型風車の発電効率を検討する場合に重要な要因を与える可能性ある。小型風車が効率よく発電するためにはできるだけ風に対して風車が正対することが望ましいが、慣性力の大きな風車は風に対する追従性が悪く、頻々と向きが変わる状況下ではほとんど風と正対することなく回り続ける可能

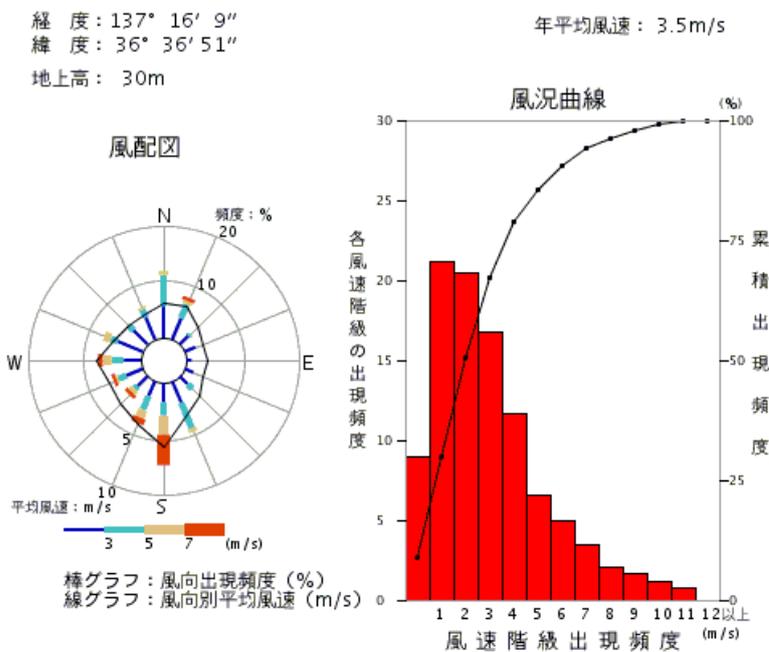


図 6 地上高 30m における東黒牧付近の局所的風況予測 (NEDO:LAWEPS (局所的風況予測モデル)による)

性がある。その様な場合にも最大限の発電効率を得るためには、小型風車のヨーイング性能を風況に合わせて調整する必要がある。これについては今後の検討を必要とする。

発電量について

本研究の発電装置は風速 1.8m/s から回転を始め、このときの発電機の開放電圧はメーカー測定により約 13V である。しかし本システムで用いている鉛蓄電池は起電力が 24V であるため、この風速ではまだ充電が始まらない。そこで前報³⁾で報告したように、入力電圧をチョッパ回路によって充電寄与電圧まで昇圧している。これによって本風車発電機の実効的風速は 1.8m/s 以上とみなすことができる。これに対し東黒牧付近の風況は 2m/s 以下の風が 90% 程度を占めるため発電に供する風は約 1 割程度とみなすことができる。そこで風速 2m/s 以上の風況下での年間の総発電量をメーカー仕様に基づいて概算すると、年間に約 80kWh 程度とみなすことができる。一方、2007 年 4 月 27 日から 2009 年 6 月 24 日までの発電量は約 2.5kWh であった (表 5)。この発電量はほとんどが需用装置である LED 街灯照明で消費した分に相当するため、本実験の風力発電装置はまだ他の需用装置を駆動するだけの十分な余力が残っていることを意味する。今後は電力需用装置を追加した系を検討して実証的運用を継続するとともに、風車の発電効率を向上させるための基礎データを収集する必要がある。

スマートグリッドへの展望

日本では古来より風力・太陽光を上回って水力の利用が進んでいる。中でも設備容量 10000kW 以上の大規模水力発電は古くから開発されており日本の電力の約 1 割を占める。さらに 2007 年には、RPS 法の対象となる 1000kW 以下の小水力発電が新エネルギーに認定され、その後、小水力発電への関心度も急速に高まってきている。しかし現在の段階では 1000kW 以上の中～大規模水力発電設備の国内の設置基数が 1400 箇所にとどまるのに対して、小水力発電所の数は 470 箇所程度にとどまっており⁸⁾非常に少ないと言わざるを得ない。ドイツにおいては設備容量 5MW 以上の中～大規模水力発電所が 155 箇所であるのに対して、小水力発電所は 2005 年に約 7200 箇所、翌 2006 年には約 7530 箇所に増えており、その後も毎年約 300 箇所の割合で増加しているといわれている。その総発電量も水力発電全体の約 18.5% を占めており、小水力発電の占める割合が少なくないことを表している⁹⁾。単純に日本とドイツを比較することはできないが、大規模水力発電所の地点数との比較で見ても、日本の小水力発電所が今後増加する可能性は極めて高いと考えられる。

太陽光発電は 2009 年 12 月より電力会社による余剰電力の売電価格が、買電価格の二倍に設定されたことを受けて急激に普及が伸び始めている。この様な小規模な発電システムは一般に不安定で家庭などでも利用しにくいという欠点があったが、2009 年頃からスマートグリッドの提案とともに再び注目が高まっている。小型風力発電も他の新エネルギー発電と同様に低炭素社会に貢献するエネルギー生産機構として重要な役割がある。特に小水力発電と比較して法的制約が少ないことが大きなメリットであり、スマートグリッドの要素としての可能性と期待感が高い。この点からも小型風力発電システムが、環境教育やモニュメントとしてのみならず実用的な電力供給源としての役割を果たすために、発電効率向上と利用技術開発が今後も継続して重要である。

参考文献

- 1) 二次エネルギーの動向, 「エネルギー白書 2009 年度版」, 資源エネルギー庁 (2009),
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2009energyhtml/p2-1-4-1.htm>
- 2) 日本における風力発電設備・導入実績, 新エネルギー・産業技術総合開発機構報告書 (2010),
<http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/index.html>
- 3) 上坂博亨・安藤満・吉牟田裕, 「小型風力発電システムの構築と高効率 PCS の検討」, 富山国際大学地域学部紀要, Vol.6 (2006), pp99-105
- 4) Uesaka H., Ando M., Yoshimuta Y., “Improvements in the Small Wind-turbine System to Adapt to the Japanese Climate”, J. Ecotechnology Research, 11[2] (2005) , pp52
- 5) 狩集 浩志, 清水 直茂, 野澤 哲生, 「スマートグリッド ON! -蓄電池とセンサが創る次世代電力網-」, 日経エレクトロニクス(1015), (2009), pp.29-56
- 6) Fred, G. and Andrew, R.; People Power –Reinventing the power Grid- , *News Week*, **Sep. 6/13** (2004), pp40-46
- 7) 局所的風況予測モデル, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006),
<http://app2.infoc.nedo.go.jp/nedo/top/top.html>
- 8) 出力別包蔵水力, 「日本の水エネルギー」, 経済産業省資源エネルギー庁 (2009),
<http://www.enecho.meti.go.jp/hydraulic/data/stock/top5.html>
- 9) 農村研究フォーラム 2008 「人口減少・低炭素社会に向けた農村地域における資源管理」, 農研機構農村工学研究所 (2008)