

# 新エネルギー発電電力取引とリスクヘッジ

山田 雄二

風力や太陽光などの新エネルギーは、CO<sub>2</sub>を排出しないクリーンエネルギーとして、近年、注目を浴びている。これらのエネルギーは、供給量が将来の気象条件に依存し不確定であるため、エネルギー需要に即してコントロールすることが難しい。そのため、思い通りのエネルギーが得られなかった場合、当該事業等に損失を与える可能性がある。また、これらは、現在のところ導入コストも高く、経済面での非効率性も懸念される。本稿では、新エネルギーの中でも、特に発電分野として導入が推進されている風力発電に焦点を当て、風力発電による出力を効果的に取引するための枠組みについて考察する。特に、発電出力予測と予測誤差に伴う損失をヘッジするための天候デリバティブについて、その実現可能性とヘッジ効果について解説していく。

キーワード：新エネルギー、風力発電、出力予測誤差、天候デリバティブ

## 1. はじめに

2008年の年明けとともに、京都議定書における向こう5年間にかけての第1次約束期間が開始となった。この期間中、日本は、1990年度比6%の温室効果ガス削減が必要となる。温室効果ガス削減には、様々な対策が講じられているが、その骨格をなすのが、いわゆる京都メカニズムと呼ばれる京都議定書で定められた排出権取引の枠組である。京都メカニズムは、排出量削減に市場原理を導入することによって、排出量削減事業にインセンティブと柔軟性を与え、結果として排出量削減を促す役割を担っている。

温室効果ガス削減事業は、大きく分けて以下の3つに分類することができる。

- 1) 発生した温室効果ガスを回収・分解する事業。
- 2) 温室効果ガスを発生するようなエネルギー消費を抑える事業。
- 3) 温室効果ガスを発生しないエネルギーの供給に関する事業。

上記において、2)と3)は、温室効果ガスと密接な関係にあるエネルギー消費・供給システムに関するもので、実現すれば最も広く普及することが期待される。中でも3)の項目に関連して、風力・太陽光エネルギーなどの新エネルギーは、CO<sub>2</sub>を排出しないクリーンエネルギーとして、近年、注目を浴びている。

新エネルギーは、従来は広く用いられていない、もしくは利用するのが困難であったエネルギーを指す。そのため、新エネルギーの利用には技術的な革新が求められる一方、これまで利用されてこなかったエネルギーであるため、新たなリスクマネジメントに関する知見も必要となる。特に風力や太陽光エネルギーは、そもそものエネルギー供給元が自然現象であるため、利用するのにも制約がある。

本稿では、新エネルギーの中でも特に発電分野として利用されている風力発電に焦点を当て、風力発電による出力を効果的に取引するための枠組みについて考察する。特に、発電出力予測と予測誤差に伴う損失をヘッジするための天候デリバティブについて、その実現可能性とヘッジ効果について解説していく。

## 2. 新エネルギーと風力発電

法令上における新エネルギーは、1997年に施行された「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」において、「技術的に実用化段階に達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なもの」と定義されている<sup>1</sup>。その後、総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会において概念の範囲の見直しが行われ、新エネルギーは、「再生可能エネルギーのうち、その普及のために支援を必要とするもの」として整理された。また、2003年4月より施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特

やまだ ゆうじ  
筑波大学 大学院ビジネス科学研究科  
〒112-0012 文京区大塚 3-29-1

<sup>1</sup> 資源エネルギー庁 HP「新エネルギーを巡る動向」より。

別措置法」(通称 RPS 法<sup>2)</sup>)においては、風力、太陽光、地熱、規模の小さい水力、バイオマスが新エネルギー等として位置づけられている。

RPS 制度とは、電気事業者に対して、新エネルギー等から発電される電気の利用を、毎年一定割合以上、義務付けるものである<sup>3</sup>。RPS 制度で特徴的なのは、電気事業者が必ずしも新エネルギーによる電気そのものを使用しなくとも、発電事業者から「新エネルギー等電気相当量 (RPS 証書)」を購入することで義務を履行することができるようになっている点である。発電事業者側は、新エネルギーによって発電された電気と RPS 証書を一体として同一の電気事業者に売却する、もしくは RPS 証書だけ切り離して別の電気事業者に売却することの選択ができる。すなわち、新エネルギー発電により生じた環境価値の分だけ、別に取引することが可能になったのである。ちなみに、文献[8]によれば、平成 18 年度分における RPS 相当量のみの取引価値の平均は 4.9 円/kWh であり、平成 15 年から 5 円/kWh 前後で推移している。これは、RPS 証書を含めた風力発電における売電価格の平均に対し、約 4-5 割程度を占める。

国内での新エネルギー導入は、1 次エネルギー総供給に占める割合を、2010 年度で 3% まで引き上げること为目标に進められている。中でも、発電分野における太陽光発電、風力発電、バイオマス発電は、他の新エネルギーと比較して、相対的に高い目標が設定されている[5]。また、日本の太陽光発電の導入量は 2005 年にドイツに抜かれるまで世界一であり、国内においては、エネルギー資源を分散させるため、風力、太陽光、バイオマスエネルギーを中心として新エネルギーの導入推進が行われているようである。

一方、海外における導入実績の点からは、風力エネルギーはすでにいくつかの国で普及しており、今後も拡大していく見通しが高い。例えば、EU では、全電力消費量の 3% をすでに風力発電で賄っているとされており、2020 年には EU の全電力需要の 13% に達する見込みを立てている<sup>4</sup>。普及の最も進んでいるデンマークでは、国全体の電力の 2 割が風力発電によって賄われてもなお普及が進められている。新規追加導入量では、2006 年度実績でアメリカが最も多く、ブッ

シュ大統領は演説の中で、「アメリカの電力需要の約 20% は風力で賄うことができる」との見解を述べている<sup>5</sup>。

風力発電の資源量は世界的に見ても大きく、理論的には全世界での電力消費量の 5 倍程度が風力によって発電可能と推定されている[1]。また、風力発電は、新エネルギーの中でも比較的導入コストが低く、今後もしつそう、世界的な導入推進が期待される。

### 3. 風力エネルギーと計画発電

#### 3.1 風力発電の電力価値

風力発電を利用するにあたり、一番の問題点は、出力が風況をはじめとする気象条件に依存し変動する(もしくは不確定)という点である。また、風力発電事業を考えた場合、単に風が吹けばよいというわけではない。その理由は以下の通りである。

一般に電力は貯蔵できず、発電した電力はすぐに消費されなければならないことが知られている。そのため、売電契約を事前に結ぶ必要があるのだが、風力発電の場合、発電出力が風況に大きく依存するため、あらかじめどの程度の出力が得られるかは不確定である。言い換えれば、風力発電による発電出力は、取引市場に出そうにも、取引可能ボリュームが事前には確定できない商品ということになる。

このように、風力発電による出力は、天候や気象状況に大きく左右され、電力としての利便性は火力などの調整可能電源に比べて低い。したがって売買単価も低く見積もられる傾向にある。それに対して、前もって発電計画を立てて取引市場に出すことができれば、需要予測に合わせて電力を調達する計画発電に利用できる可能性が出てくる。すなわち、成り行き発電の場合に比べて、計画発電が可能である分、売電価値は向上するものと考えられる。

#### 3.2 予測の技術

風力エネルギーを計画発電に利用するためには、風況予測に基づく発電出力の推定は必要不可欠である。ここでは、文献[9]で紹介されている風力発電出力予測手法の概要を示す。

文献[9]の風力発電出力予測は、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (CTC) が開発した局地気象

<sup>2</sup> RPS は、Renewables Portfolio Standard の略。

<sup>3</sup> <http://www.rps.go.jp/> 参照。

<sup>4</sup> European Wind Energy Association (EWEA) 2006 Annual report (<http://www.ewea.org/>) 参照。

<sup>5</sup> ロイター、"Wind to make 20 percent of power by 2030: advocates (Scientific American, Jun 5, 2007)" より。

評価予測システム (LOCALS) をベースとした風力発電出力シミュレーションモデルによって行われる。風向や風速、気温、気圧、湿度、降水などの気象現象は、日射、放射、大気中の水蒸気量などが複雑に相互作用して生じる。これらの気象現象は、熱力学・流体力学に関する偏微分方程式として表現され、適切な境界条件を適用することにより数値的に再現することが可能である。また、計算精度は、対応する偏微分方程式を解く際に用いるグリッドの大きさや境界条件に用いる数値の正確さに依存し、同等の条件のもとでは、よりグリッド間隔が小さいほど、予測を行った際の精度も向上する。一方、グリッドをより細かくすることは、計算負荷の意味で予測精度との間にトレードオフを生じさせる。LOCALS は、20 km 間隔のグリッドを用いて計算される気象庁発表による予測データを元に、広領域の計算から狭領域における計算を逐次的に行うことで、計算効率と精度の向上を行う気象予測システムである。

LOCALS においては、気象庁が数値予報に用いている領域モデル (Regional Spectral Model; RSM) 予報値を初期値および境界値として、局地的な地形や土地利用状況を加味しながら、より精度の高いグリッド間隔に対する将来の風向・風速予測値が計算される。ただし、RSM 予報値は、毎日 9 時、21 時を初期値とした 51 時間先までの予報結果であり、3 時間間隔のデータ配信が民間気象会社に対して行われている。具体的には、第  $k$  日の風向・風速予測値を次の手順で計算する。

1. 前々日 ( $k-2$  日) の 21 時を初期値とする RSM 予報結果を順次入力する。
2. 対象領域のグリッド間隔を狭めながら、前日 (第  $k-1$  日) の朝 6 時までに、予測の対象となる第  $k$  日の 24 時間分の風向・風速予測値を計算する。

風速予測値が求めれば、既知の発電機出力特性から、翌日 1 時間ごとの予測発電出力が導出される [2]。

### 3.3 蓄電池の併用

3.2 節で述べた発電出力予測によって、翌日の発電出力の推定値が得られるので、発電事業主は、この値を目安として、発電出力の事前通告を行えばよい。ところが、予測は必ずしも的中するとは限らず、予測値と実測値の間には、一般に誤差が存在する。また、計画発電での利用を考えた場合、事前通告が守られなかった場合は厳しいペナルティが課せられることが想定

される。このような問題を解決するため、最近では、蓄電池の利用による出力制御技術が、実用化に向けて検討されている。

蓄電池を用いた出力制御は、主に以下の 2 つの目的で取組みが行われている [10]。

1. 電力品質 (電圧・周波数) への影響の緩和目的、
2. 事前に通告したとおりの発電量を供給することによる、電力価値向上目的。

前者は、短周期の変動を、蓄電池との合成出力による移動平均フィルタや一次遅れフィルタを用いて平滑化することで、風力発電出力の電力系統に対する電圧変動や周波数変動への影響を抑制するものである。一方、後者は、蓄電池との合成出力を一定期間 (30 分~数時間程度) 一定もしくは計画値とするためのもので、計画値と実績値との誤差を補償するためには、蓄電池の kW 容量では、最大で風力発電設備と同程度、時間容量についても数時間~10 時間程度必要となる [7]。文献 [7] では、蓄電池の容量を変えることによって、このような蓄電池併用型風力発電にかかるコストと計画発電の事業性の関係について考察している。

## 4. 天候デリバティブの導入

### 4.1 天候デリバティブとは

天候デリバティブとは、将来のある時点、もしくは定められた期間における天候データの値に支払額が依存する派生商品である。例えば、月平均気温を取引対象とした先物契約において<sup>6</sup>、気温上昇を見込む投資家が、1 度あたり掛値 100,000 円で、今年の夏 (例えば 8 月) の月平均気温先物を 25 度で買ったとしよう。このとき、実際の 8 月の気温が 25 度を上回れば、投資家は 25 度との差に 100,000 円を掛けた額を受け取ることができる。逆に、25 度を下回った場合は支払いとなる。

仮に、気温に対する収益の相関がそれぞれ逆の事業主が存在すれば、これらの事業主間で天候デリバティブの取引を行うことで、互いのもつ気温変化に対する損失リスク (もしくは収益変動リスク) を抑制することが可能である。実際に、東京電力と東京ガスは、夏季の日次平均気温に対する天候デリバティブ契約を相対で行い、気温に依存する損失リスクを互いに低減化することを試みた [6]。東京電力は、冷夏になることによって想定される電力需要減から生じる収益減少リ

<sup>6</sup> <http://www.tfx.co.jp/weather/> 参照。

スクを、東京ガスは、逆に猛暑になることによって生じる湯沸し時間短縮等から生じる収益減少リスクをヘッジするために、気温を対象とした天候デリバティブ取引が成立したのである。

このような東京電力と東京ガスによる取引は、商品の需要が気温に依存する場合の、損失リスクをヘッジする天候デリバティブ取引の典型例である。一方、天候デリバティブ利用法のもう一つの典型例として、農作物の収穫高など、供給量がその年の気温や降水量などの気象条件に依存するケースがある。

一般に、エネルギー会社が想定する天候デリバティブによるヘッジニーズは、気象条件に対するエネルギー需要の変化に対してのものが多く[4][6]。それに対して、風力や太陽光などの新エネルギー利用による発電事業に対しては、供給面も気象条件に左右される。言い換えれば、新エネルギーによる計画発電においては、需要側、供給側ともに気象変動のリスクにさらされることになる。

#### 4.2 風のリスク

風力発電は風が吹かなければ成り立たない。そのため、風力発電事業における損失のリスクとして、まず考えられるのが風が吹かないというリスクである。このようなリスクヘッジのための天候デリバティブとしては、例えば当該期間における平均風速等を原資産とする天候デリバティブが考えられる。

一方、3節で述べたような計画発電を考えた場合、風が吹かないことだけがリスクとは限らない。仮に風が吹いたとしても、どの程度の風が吹き、結果としてどの程度の出力が風力発電によって得られるかが事前に分からなければ、計画発電に利用することはできない。極端な話、例え風が吹かなくても、そのことがあらかじめ分かっていたら、少なくとも事前通告が外れた場合のペナルティを支払わなくて済む。

3.3節で、発電出力予測と実測値にずれが生じた場合の対処方法として、蓄電池併用による出力の制御について述べたが、十分な制御性能を得るためには容量の大きな蓄電池を準備する必要がある。例えば、発電出力予測と実測値との間のずれを100%補償するためには、風力発電出力と同程度の蓄電池容量が必要となり、そのための追加投資によって、風力発電の初期コストが倍になることもありうる。

それに対して、蓄電池の容量を下げれば、コストは下がるが、事前通告値に完全に追従するような出力制御は難しくなる。このように、出力誤差と発電コスト

の間にはトレードオフがあり、出力誤差を小さくしようとすると発電コストが上がり、発電コストを小さくしようとすれば、出力誤差が大きくなる可能性が生じる。

出力誤差は、事前通告が外れた場合のペナルティへとつながるので、風力発電事業主にとって、出力誤差もコスト（もしくは損失）として評価することができる。このような損失補填に対し、天候デリバティブを効果的に利用することはできないであろうか。そもそも出力予測は風況予測を元に行われるため、出力予測誤差の原因の一つは風況予測誤差である。このような出力予測誤差から生じる損失ヘッジを考える上では、風そのものを原資産とするのではなく、風況予測誤差を原資産とする天候デリバティブを考える必要がある。本稿では、このような風況予測誤差に基づく天候デリバティブとそのヘッジ効果についてさらに考察することにする。

### 5. 天候デリバティブを用いたヘッジシミュレーション

#### 5.1 データ

本稿で使用するデータは、国内のあるウィンドファームにおける総発電出力（すべての発電機から得られる発電出力の総和）および観測塔風速の実測値/予測値約1年分である。ここでは、これらのデータを以下のようにおく<sup>7</sup>。

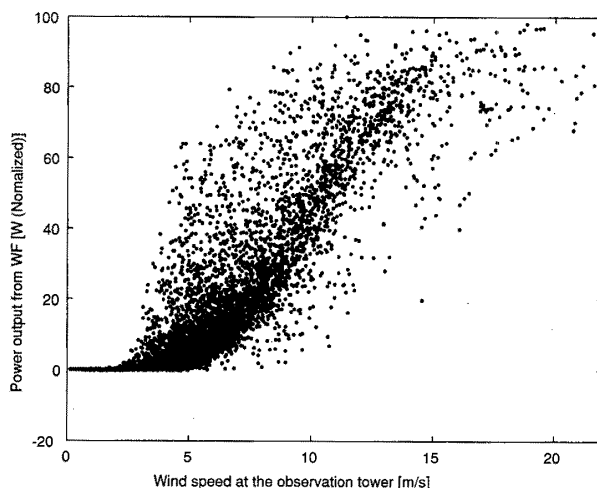


図1 観測塔風速  $W_n$  vs. 総発電出力  $P_n$

<sup>7</sup> これらの実データは、CTCより提供されたものを用いた。ただし、WF発電出力実測値および予測値については、WF発電出力実測値の最大値が100となるように規格化されている。

観測塔風速実測値  $W_n$ , 予測値  $\hat{W}_n(n=1, \dots, N)$

総発電出力実測値  $P_n$ , 予測値  $\hat{P}_n(n=1, \dots, N)$

データは1時間ごとのものであり、予測値は前日昼12時までに翌日24時間分の値が計算される<sup>8</sup>。図1は、観測塔風速実測値  $W_n$  (横軸) と総発電出力実測値  $P_n$  (縦軸) の関係を表す散布図である。

### 5.2 予測誤差

図2は、総発電出力実測値  $P_n$  と予測値  $\hat{P}_n$  の関係を表す散布図である。図中の直線は、回帰直線

$$P_n = a_p \hat{P}_n + b_p + \epsilon_{p,n}, \quad n=0, \dots, N \quad (1)$$

であり、回帰係数  $a_p$  および切片  $b_p$  の値は以下の通りである。

$$a_p = 0.832, \quad b_p = 3.03 \quad (2)$$

ただし、 $\epsilon_{p,n}$  は  $\text{Mean}(\epsilon_{p,n})=0$  を満たす残差である。なお、 $a_p, b_p$  は0.1%水準で有意である。これに対して、仮に予測値と実測値が平均的にみて等しい、すなわち、 $\text{Mean}(P_n)=\text{Mean}(\hat{P}_n)$  であれば、 $a_p \approx 1, b_p = 0$  が成り立つはずである。ところが、 $a_p$  の標準誤差は0.00889であり、対立仮説  $a_p \neq 1$  に対する帰無仮説  $a_p - 1 = 0$  は、有意水準0.1%で棄却される。したがって、実測値に対して予測値はバイアスを持つことになる。このように、線形回帰によって、

$$\text{Mean}(P_n) = a_p \cdot \text{Mean}(\hat{P}_n) + b_p \quad (3)$$

となるように  $a_p, b_p$  を求めるのは、予測値と実測値の間のバイアスを、線形補正することに対応する。

残差  $\epsilon_{p,n}$  の分散を計算すると、 $\text{Var}(\epsilon_{p,n})=249$  である。これに対して、出力予測値を用いない場合の分散

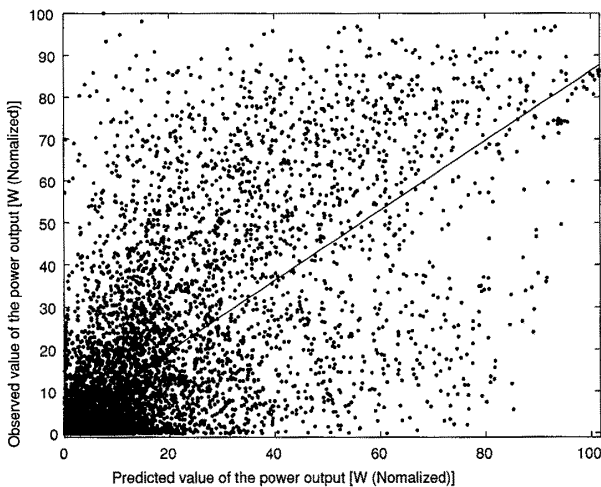


図2 総発電出力予測値 vs. 実測値

は  $P_n$  の分散によって与えられ、これを計算すると、 $\text{Var}(P_n)=504$  が得られる。このことは、出力のばらつきが、予測を用いることによって元の値の半分以下程度まで低減化されることを意味する。

図3は、風速実測値  $W_n$  と風速出力予測値  $\hat{W}_n$  の関係を示す。なお、図中の直線は、回帰直線

$$W_n = a_w \hat{W}_n + b_w + \epsilon_{w,n}, \quad n=0, \dots, N$$

$$a_w = 0.808, \quad b_w = 0.904 \quad (4)$$

である。この場合も、元の観測塔風速実測値  $W_n$  の分散が11.0で与えられるのに対し、予測値を用いた線形回帰による残差  $\epsilon_{w,n}$  の分散は5.12と、予測の効果によりばらつきが半分程度まで抑えられていることが分かる。

上と同様の分析を、線形回帰手法ではなく、ノンパラメトリック回帰の一種である平滑化スプライン回帰(例えば文献[3])を用いて行うこともできる。このように平滑化スプライン回帰分析を用いることは、実測値と予測値の誤差のバイアス補正に、ノンパラメトリックな非線形関数を用いることに対応している。表1は、平滑化スプライン回帰を適用した場合を含めて、出力および風速に対する残差の分散をまとめたものである。どちらの場合も、まず線形回帰によって分散が半分程度まで低減化され、平滑化スプライン回帰の適

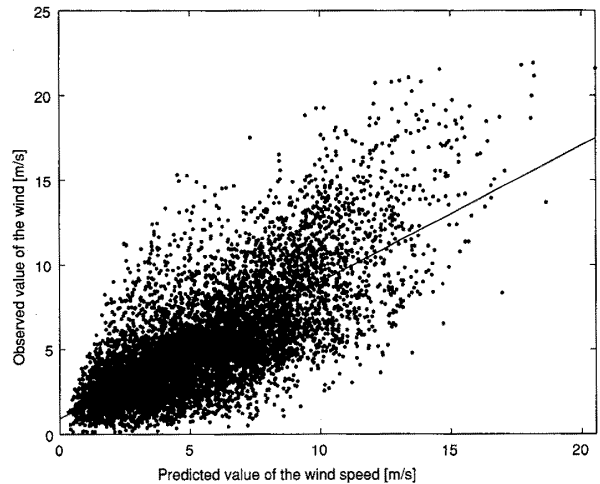


図3 観測塔風速予測値 vs. 実測値

表1 予測誤差分散の比較

回帰手法	残差分散 (出力)	残差分散 (風速)
予測値なし	504	11.0
線形	249	5.12
Spline	239	4.95

<sup>8</sup> 現在は、前日の朝6時までに予測値を計算することが可能。

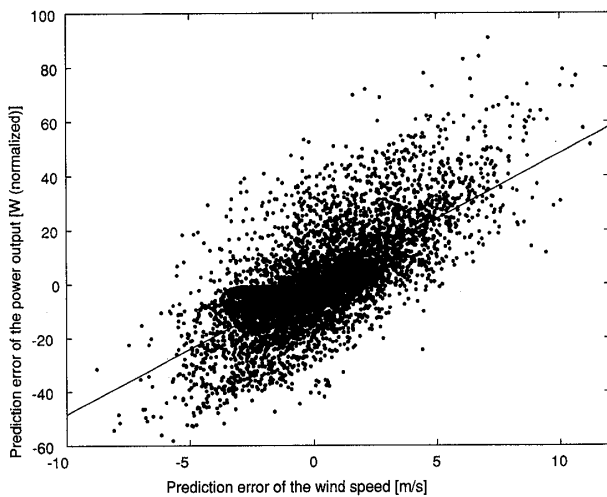


図4 風速予測誤差 vs. 発電出力予測誤差

用でさらに数パーセントの改善が見られることが分かる。

### 5.3 ヘッジシミュレーション

図4は、風速予測誤差、出力予測誤差ともに平滑化スプライン回帰でバイアス補正した場合の散布図を表す。ただし、横軸は（バイアス補正された）風速予測誤差、縦軸は出力予測誤差を表す。

文献[11]では、平滑化スプライン回帰でバイアス補正したものを新たに出力予測誤差（および風速予測誤差）とし、出力予測誤差と関連する損失関数によって定義される（事前通告違反ペナルティー等による）損失の分散を最小化するような、風速予測誤差のデリバティブ設計法を提案している。例えば、図4の実線は線形回帰直線を表しているのだが、この直線の傾きは、損失が出力予測誤差に比例すると仮定した場合の、風速予測誤差を原資産とする先物の最適ボリュームを与える。また、この場合のヘッジ効果は、誤差どうしの相関係数から計算することができる。この相関係数が高ければ高いほど高いヘッジ効果が得られ、相関係数が1の場合は完全ヘッジが可能である。ちなみに、図4の場合は、相関係数は0.70である。文献[11]では、平滑化スプライン回帰の一つである一般化加法モデル（例えば文献[3]）を用いて、風速予測誤差に基づく天候デリバティブについて考察し、高いヘッジ効果が得られることが示されている。結果として、出力予測誤差によって生じる損失補填に対し、天候デリバティブが有効である可能性が示唆されている。

## 6. おわりに

本来、環境とエネルギー、および天候は密接な関係

にある。現在、環境に対しては排出権という形で、エネルギーについては自由化の推進やRPS証書の発行、そして天候については天候デリバティブと、形態は違うにせよ、それぞれの分野においてそれぞれの指標に基づく市場取引が可能になりつつある。新エネルギーの取引は、今後、これら3分野すべてと関連していくものと考えられる。

欧州では排出権の取引市場（EUETS）が2005年に開設され、今年から第2フェーズへ突入している。また、アメリカの天候デリバティブ取引は、シカゴ商業取引所（CME）において活発になりつつあり、日本の都市からは東京と大阪の月平均気温が取引可能となっている。日本では、段階的に電力自由化が進み、全面自由化の検討もすでに始まっている。新エネルギー導入にはもちろん技術的な革新が重要であるが、これらの取引市場を利用した安定的な事業性の確保およびリスクマネジメント技術も、今後、新エネルギーに対する取引を活性化する上で重要な役割を果たすことが期待される。

**謝辞** 本稿を執筆するにあたり、有益なご意見、コメントをいただいたCTC科学システム事業部福田寿氏、谷川亮一氏、早崎宣之氏に謝意を表します。

### 参考文献

- [1] C. L. Archer and M. Z. Jacobson, "Evaluation of global wind power," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, D 12110, 2005.
- [2] 榎本, 猪股, 山田, 千葉, 谷川, 大田, 福田, "局地気象解析を用いた風力発電量の予測," 太陽/風力エネルギー講演論文集, 211-214, 2000.
- [3] T. Hastie and R. Tibshirani, *Generalized Additive Models*, Chapman & Hall, 1990.
- [4] 土方, "総論 天候デリバティブ," シグマベイズキャピタル, 2003.
- [5] 井上, "環境にやさしい新エネルギー供給システム," 電気学会論文誌, Vol. 126, No. 4, 218-221, 2006.
- [6] 刈屋編著, "天候リスクの戦略的経営—EaRとリスクスワッパー," 朝倉書店, 2005.
- [7] 小島, 仲林, 井上, 荒井, 谷川, 福田, 岡垣, 高橋, "蓄電池併設型風力発電事業の一検討," 平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会, 40-19/40-20, 2006.
- [8] 資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部新エネルギー等電気利用推進室, "RPS法下における新エネルギー等電気等に係る取引価格調査結果について," RPS

法ホームページ, 2007.

[9] 谷川, “LOCALS™ による風況シミュレーションモデルの開発と風況評価,” *ながれ* 22: [特集]複雑地形状の風況予測法, 405-415, 2000.

[10] 高野, “自然エネルギー発電と電力貯蔵技術,” *電気学会論文誌 (B)* 126 巻 9 号, 857-860, 2006.

[11] 山田, “風速予測誤差に基づく風力タービンの最適化設計,” *ジャフイージャーナル* 第 7 巻, 152-181, 2008.