

## 風力予測技術の最新動向

2015年3月27日(金)

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社(CTC)

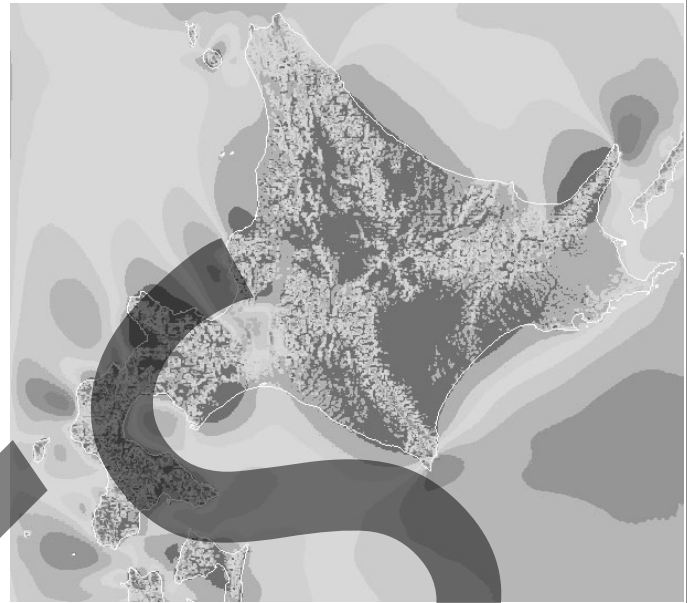
エネルギービジネス推進部 広域エネルギー推進課

課長 早崎 宣之

**CTC**

Challenging Tomorrow's Changes

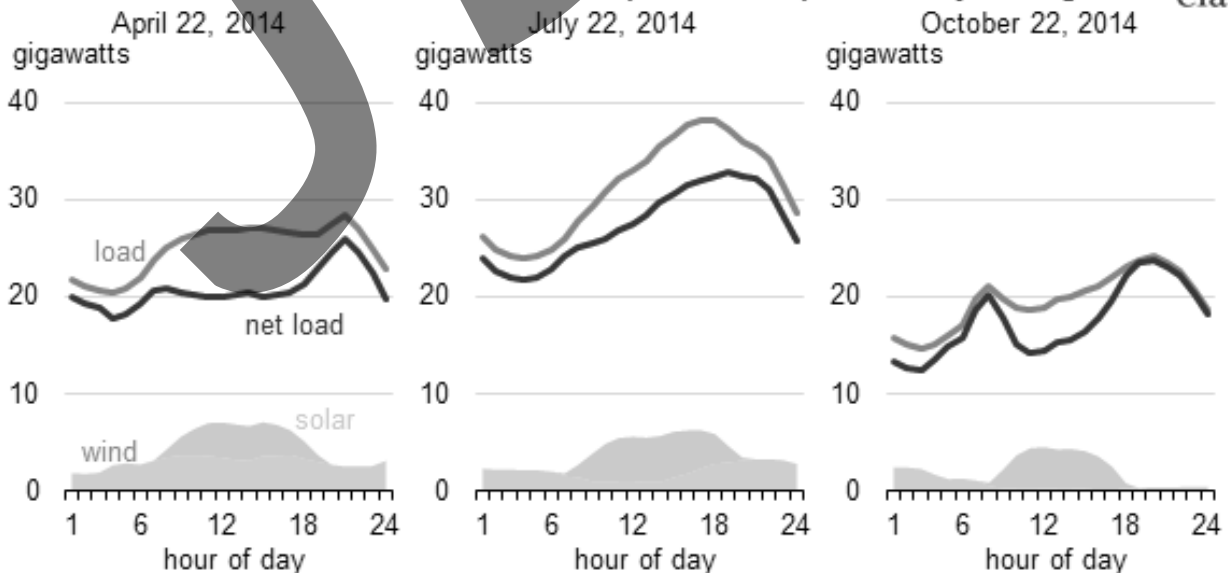
Proprietary and Confidential — 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社



## 再エネ導入先進国の課題

- ✓ 2014年のCAISOのネット負荷(電力需要-風力・PV出力)
- ✓ 天候によって大きく変化する再エネ出力により、日々異なる負荷形状に応じた需給調整が必要となっている。

CAISO load, net load, and wind and solar output on example weekdays during 2014



1GW=100万kW

**CTC**

Challenging Tomorrow's Changes

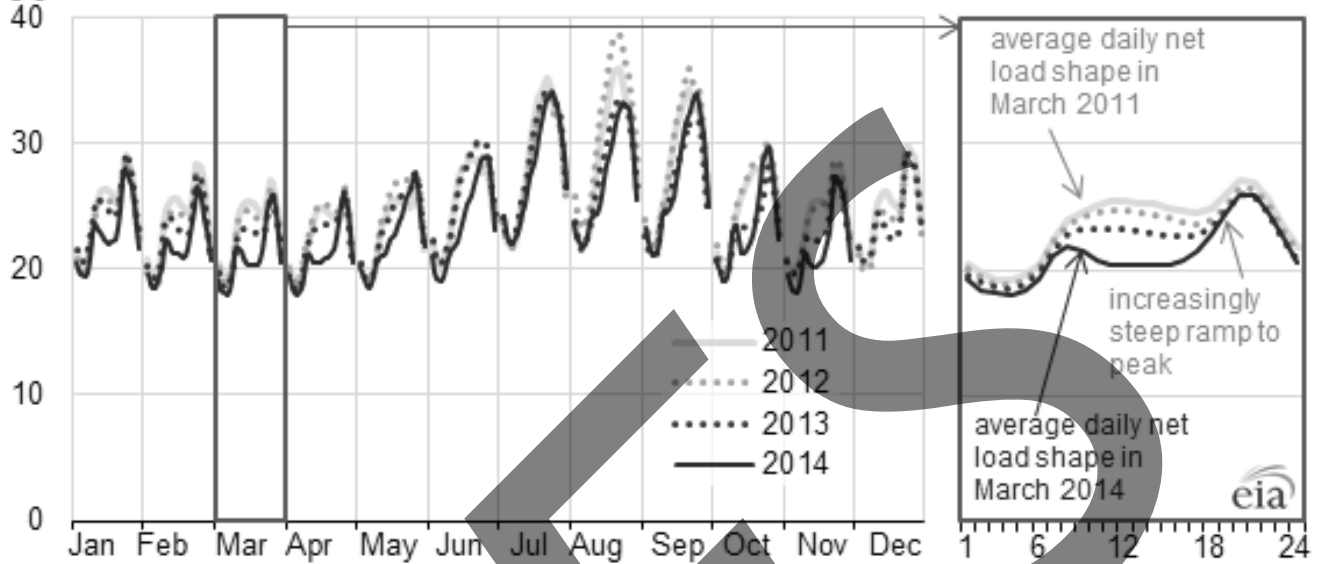
Source: California Independent System Operator (CAISO), [Daily Renewables Watch](http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=19111)  
<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=19111>

# 再エネ導入先進国の課題

- ✓ 再エネの導入が進むにつれて、CAISOでは年々のネット負荷の形状はより急峻な形状となっており、需給調整を困難にしている。
- ⇒ 再エネ出力予測の役割は年々重要になっている。

CAISO average daily net load by month (2011-14)

gigawatts



1GW=100万kW



Source: California Independent System Operator (CAISO), [Daily Renewables Watch](http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=19111)  
<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=19111>

## 目次

1. 風力発電出力予測技術の概要
2. 国内における技術開発と利用事例
  - 予測システムの技術開発と運用状況(東北電力様)
3. 海外における技術開発と利用事例
  - 予測システムの技術開発プロジェクト
  - 電力運用機関における出力予測の利用事例

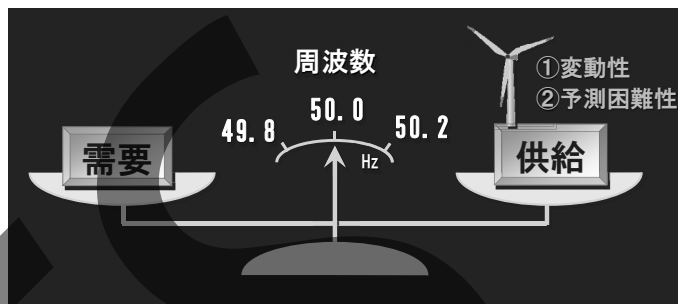
# 風力発電出力予測システムの必要性

## ✓ 風力発電の特徴

- ① 気象条件によって出力が変動する(→変動性)
- ② いつどれだけ発電するかわからない(→予測困難性)

## ✓ 風力発電の連系量拡大

⇒ 周波数調整などの電力系統の安定運用に影響を与える可能性があり, 系統運用の不確実性拡大リスクへの対応が急務



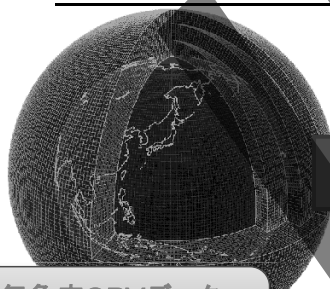
⇒ わが国固有条件(地形・気象条件等)に対応した「電力系統エリア向けの再エネ発電出力予測システム」が必要



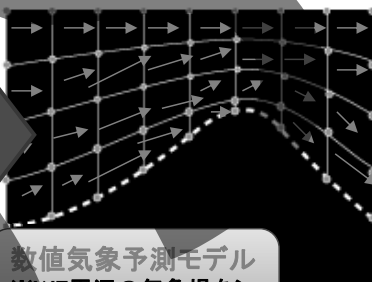
Challenging Tomorrow's Changes

Proprietary and Confidential — 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

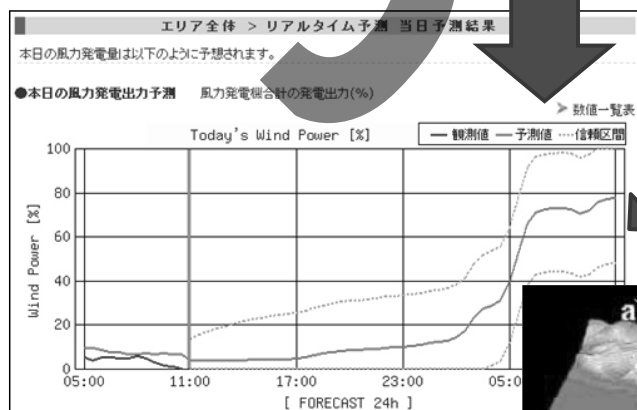
# 風力発電出力予測システムとは？



気象庁GPVデータ  
※地球全体の気象状況を予測



数値気象予測モデル  
※WF周辺の気象場をシミュレーションで予測



風力発電出力予測  
※風力発電出力を予測

現地観測データ  
※SCADA・発電出力情報

- 最新の気象予測・統計技術やIT技術を駆使して、発電出力変動が激しい風力発電の出力予測をするシステム。

- 風力発電出力予測の利用により、電力系統における火力発電所の運転計画の精度向上に役立てることが可能。

⇒風力発電の導入量の拡大や電力系統の運用コスト削減への貢献を目指している。

## 1. 風力発電出力予測技術の概要

# 風力発電出力予測手法の概要

### 物理モデル

入力値：気象庁GPVデータ、地形データ等

特徴：

- ・気象学、流体力学に基づく全体的な傾向の予測を行う
- ・実績値を使用しなくても予測が可能
- ・入力値の誤差に予測値が引きずられる

### 物理モデルの例

- メソスケール気象モデル(LOCALS、WRF、MM5など)  
数百km～数kmのスケールでの気象予測を行う
- マイクロスケールモデル(k-ε、LESなど)  
メソスケールモデルよりも小さい領域(~数km)の予測を行う

### 統計モデル

入力値：予測値および実績値

特徴：

- ・予測値と実績値の関係のみを使用して誤差補正を行う手法
- ・特異な気象現象の発生時など、誤差が補正しきれない場合がある

### 統計モデルの例

#### ○カルマンフィルター

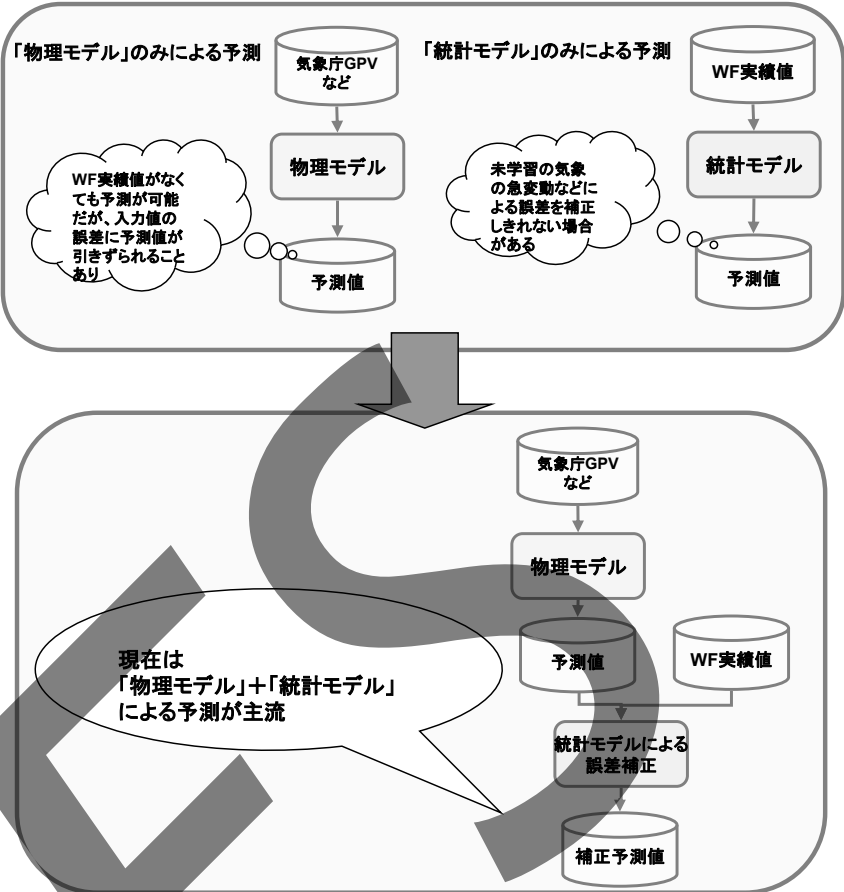
予測式を設定し、予測式から算出した予測値と実測値の誤差が最小になるように予測式のパラメータを調整する方法

#### ○OMOS

予測と対応する実測との間の統計的関係式を作り、予測値を関係式に代入して実測値を推定する方法

#### ○ニューラルネットワーク

予測値、実測値を蓄積し、誤差傾向を学習して予測値を修正する



Challenging Tomorrow's Changes

7

## 2. 国内における技術開発と利用事例

# 風力発電出力予測システムの開発経緯

CTCと東北電力は、風力発電所(WF: Wind Farm)単体の予測技術開発からスタートし、エリア全体を予測するシステムの開発に取り組んできた。

FY1997~2000

WF予測技術開発

FY2001~2003

オンラインWF予測システム実証試験

FY2003~2006

エリア予測技術開発

FY2007~2009

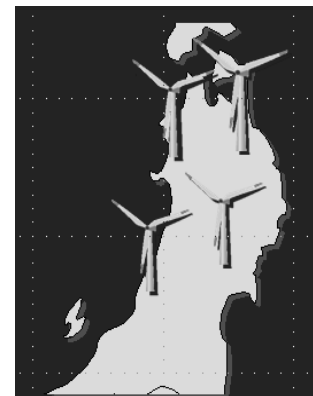
オンラインエリア予測システム実証試験

FY2010~

本運用(→電力系統運用の参考情報として活用)



東北電力-竜飛ウインドパークを対象としたWF予測



東北電力管内に導入されたWFを対象としたエリア予測

Challenging Tomorrow's Changes


Proprietary and Confidential — 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

8

# 新工ネ大賞受賞 —平成24年度新工ネ大賞

◆平成24年度 新工ネ大賞「新エネルギー財団会長賞」を東北電力様と共同で受賞

(受賞件名)  
「風力発電出力予測システムの電力系統運用事業への導入について」

 平成24年度新工ネ大賞 <b>新エネルギー財団会長賞</b>	導入活動部門
	東北電力株式会社 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

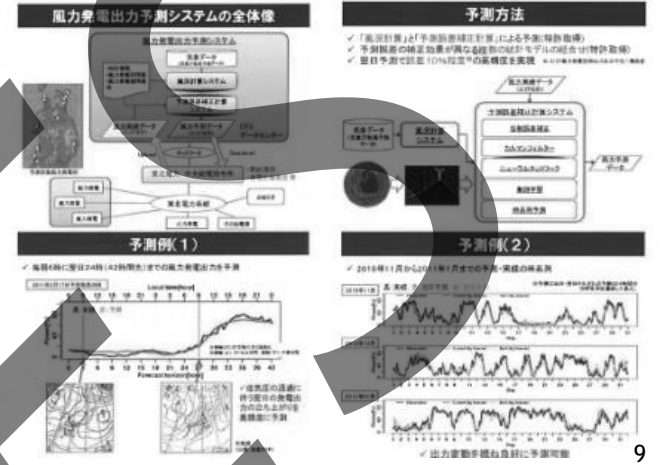
風力発電出力予測システムの電力系統運用事業への導入について

**受賞のポイント**

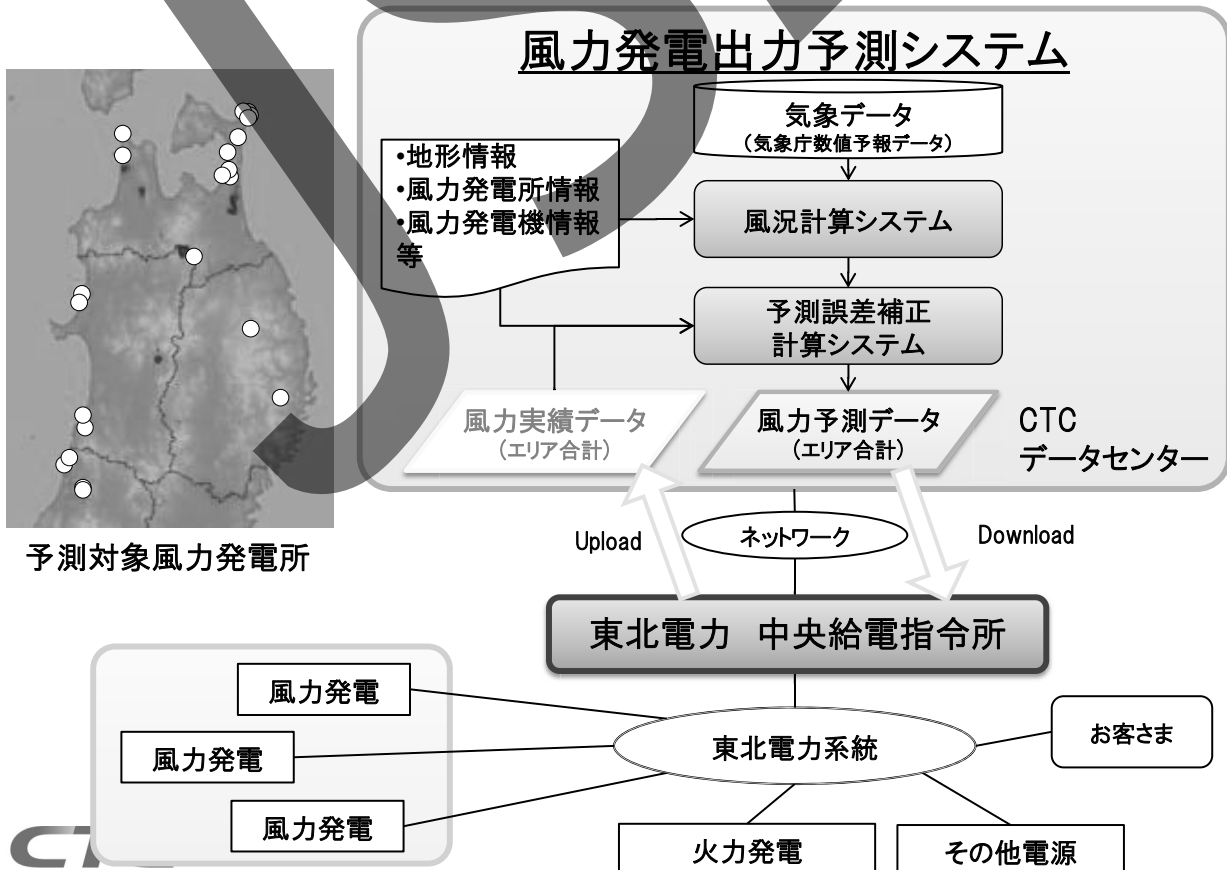
複数の統計モデルを組合せた高精度な風力発電出力予測システムを導入し、電力需給運用や発電計画支援を実施している。電力系統運用の経済性がはかれるとともに今後の風力発電の導入拡大に貢献するもので、その将来性が評価された。

**商品・システムの概要**

東北電力の電力系統運用に活用するため、電力系統エリアの風力発電出力を予測する「風力発電出力予測システム」(東北電力と伊藤忠テクノソリューションズ(CTC)で共同開発)を導入した。風力発電等の再生可能エネルギーは、気象条件とともに出力が変動し、電力系統運用の計画性を阻害する要因になるため、出力を高精度に事前把握する風力発電出力予測システムが必要とされていた。本システムの予測は、東北電力の伊藤忠電指所において、日々の電力系統運用業務に活用され、適切な供給予備力の確保などを支えて電力系統の安定運用に貢献している。今後、ますますの風力発電の導入拡大が予想され、国内の他の電力系統エリアや海外への導入も期待される。



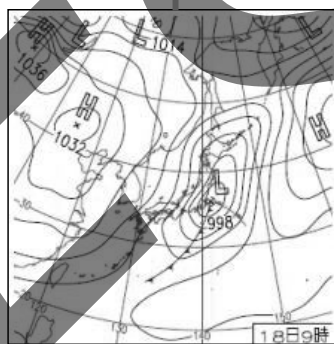
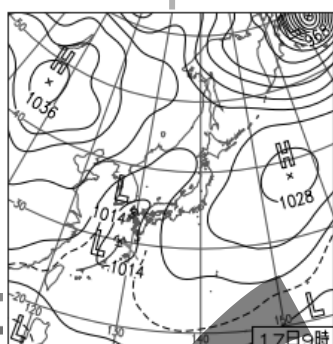
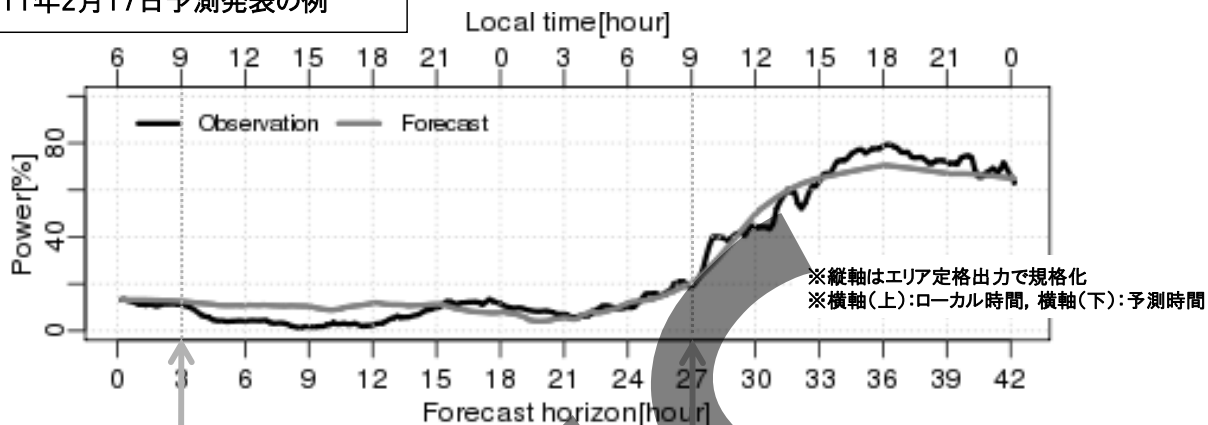
# 風力発電出力予測システム —概要



# 風力発電出力予測システム ー出力予測例

✓ 毎朝6時に翌日24時までの風力発電出力を予測

2011年2月17日予測発表の例



低気圧の通過に伴う翌日の発電出力の立ち上がりを高精度に予測

天気図 (出典:気象庁HP)



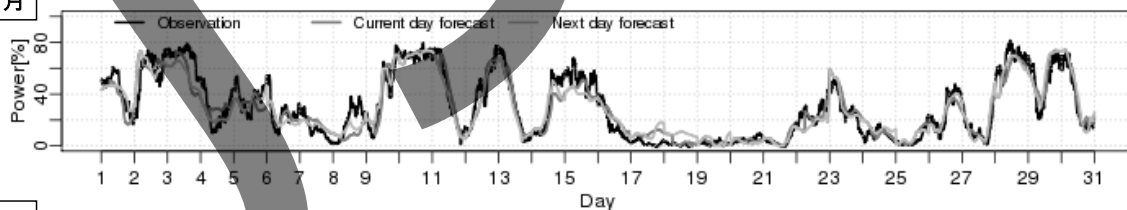
出典：新エネルギー財団 新エネ大賞HP <http://www.nef.or.jp/award/kako/h24/p04.html> 11

# 風力発電出力予測システム ー出力予測例

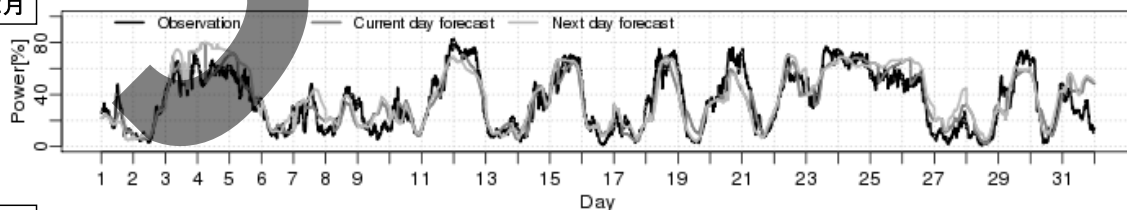
✓ 2010年11月から2011年1月までの予測・実績の時系列

2010年11月

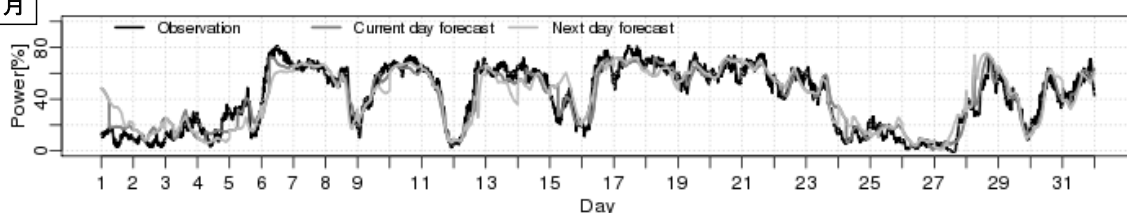
黒:実績, 赤:当日予測, 橙:翌日予測 ※予測は当日・翌日それぞれの予測の24時間分の時系列を連結して表示。



2010年12月



2011年01月



✓ 出力変動を概ね良好に予測可能



出典：新エネルギー財団 新エネ大賞HP <http://www.nef.or.jp/award/kako/h24/p04.html> 12

# 風力発電出力予測システム ー精度検証

◆年度により気象条件や予測対象WF数が異なるため精度検証値に多少の変動はあるが、長期にわたって安定した予測精度が得られることを確認した。

- ◆BIAS      ほぼゼロに近く、予測の偏りは小さい。
- ◆MAE      当日予測で5～6%程度、翌日予測で6～7%程度。
- ◆相関係数      約0.9程度の相関係数。

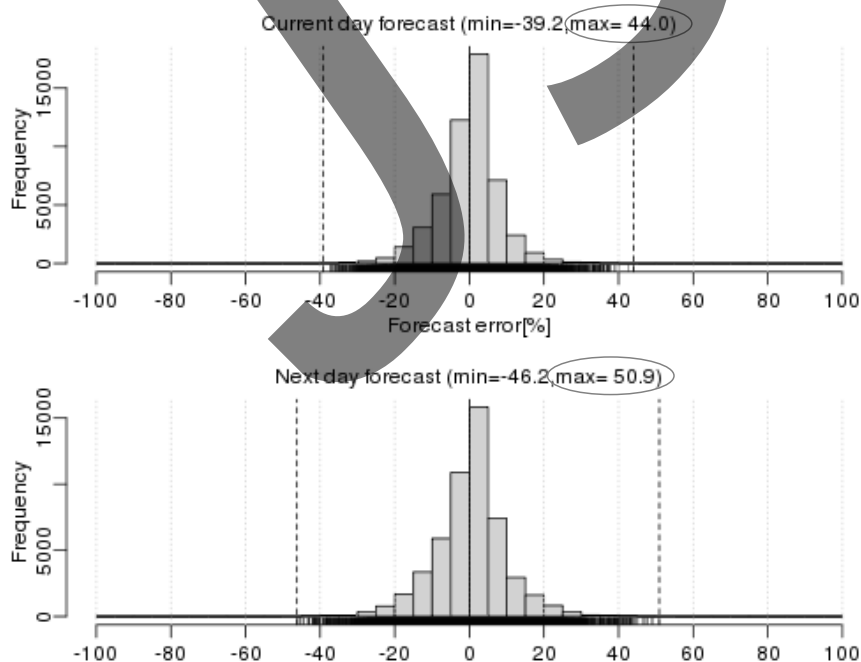
	期間	エリア 定格出力 [MW]	BIAS [%]	MAE [%]	RMSE [%]	相関係数 CORR
当日予測	FY2007	415	0.3	6.1	8.4	0.900
	FY2008	415	-0.2	5.4	7.5	0.924
	FY2009	431	0.3	6.2	8.6	0.919
	FY2010	449	0.0	5.7	7.8	0.929
翌日予測	FY2007	415	-0.2	7.4	10.0	0.855
	FY2008	415	-0.2	6.7	9.3	0.883
	FY2009	431	0.4	7.2	10.2	0.886
	FY2010	449	0.3	6.9	9.5	0.896



Challenging Tomorrow's Changes 出典：青木、他：「風力発電出力予測システムの開発と運用状況」, 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌) Vol.133 No.4, pp.366-372(2013)

# 風力発電出力予測システム ー精度検証

- ◆誤差は中心に凸に分布し、出力予測の大外れが発生する割合は比較的少ない。
- ◆誤差が定格の±10%以内に収まる確率は当日予測で83%・翌日予測で77%程度。
- ◆最大誤差は当日予測で定格の±45%以内、翌日予測で±51%以内に収まる。



### 誤差幅内に誤差が収まる確率

誤差幅[%]	確率[%]	
	当日予測	翌日予測
±10%	82.7	76.5
±20%	97.6	94.9
±30%	99.7	99.2
±40%	99.994	99.8
±50%	100.0	99.998
±60%	100.0	100.0

### 予測誤差頻度分布

(上：当日予測，下：翌日予測)



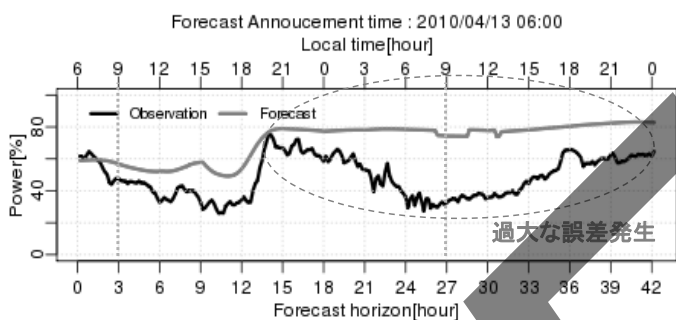
Challenging Tomorrow's Changes 出典：青木、他：「風力発電出力予測システムの開発と運用状況」, 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌) Vol.133 No.4, pp.366-372(2013)

# 出力予測精度 — 大外しの事例

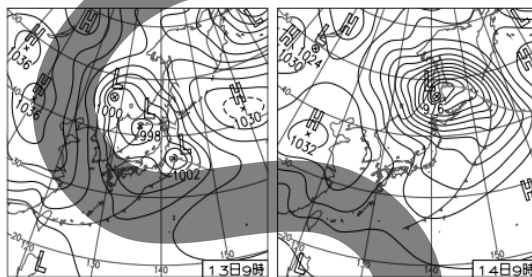
## ◆ 出力予測の大外しが発生した事例

- 定格の70%を超える高出力を予測したが、実績では出力低下による過大な誤差が発生。
  - 強風によるWF制御等による出力低下(風力発電機のカットアウトおよび保安停止等)の影響が推測される。
  - 本システムでは風力発電機の稼動情報等の個々のWF実績情報を使用していないため、誤差が発生する可能性もあることも踏まえて、予測結果の活用方法について検討が必要。
- ※ その他にも、気象予測外れ(前線の位置のズレ等)によっても大きな誤差が発生する。

### e. 2010年4月13日6時発表予測



※横軸(上):ローカル時間, 横軸(下):予測時間



天気図出典:気象庁HP

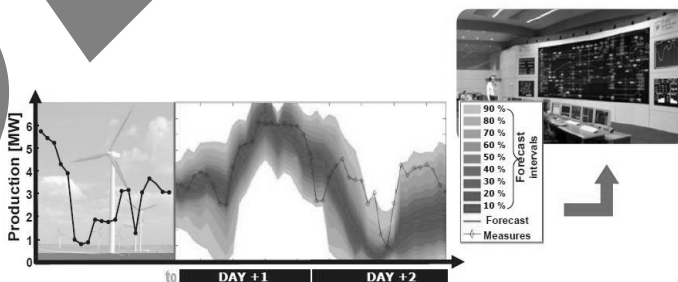
出典:青木、他:「風力発電出力予測システムの開発と運用状況」、電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌) Vol.133 No.4, pp.366-372(2013)



Challenging Tomorrow's Changes

# 欧州における風力発電出力予測の技術開発

- ✓ 過去20年に以上にわたって、出力予測技術の技術開発が取り組まれてきた。
- ✓ 気象学の活用や、電力運用での出力予測の利用を視野に入れた開発を推進。

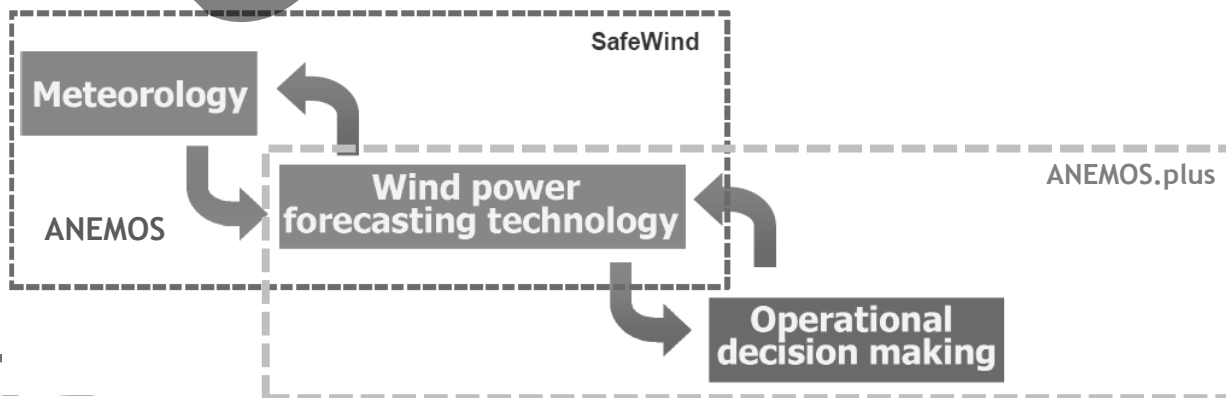


HIGHLIGHT PROJECTS :

ANEMOS : FP5, 2002-2006

SafeWind : FP7, 2008-2012

ANEMOS.plus : FP6, 2008-2011



Challenging Tomorrow's Changes

出典: George Kariniotakis, SafeWind, Anemos.plus projects, InnoGrid2020+, 20.02.2013



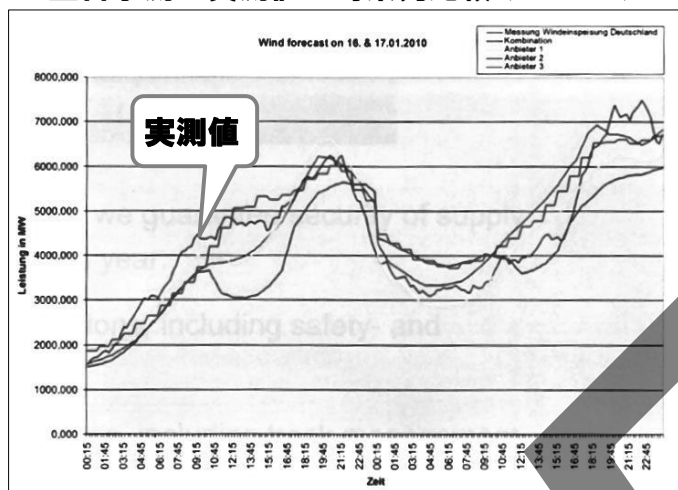
# ドイツ 50Herz ー出力予測の利用事例

## ■ 50hertzは、4社の気象予測を適用している。

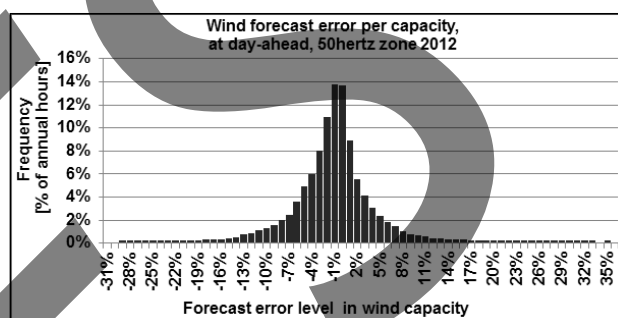
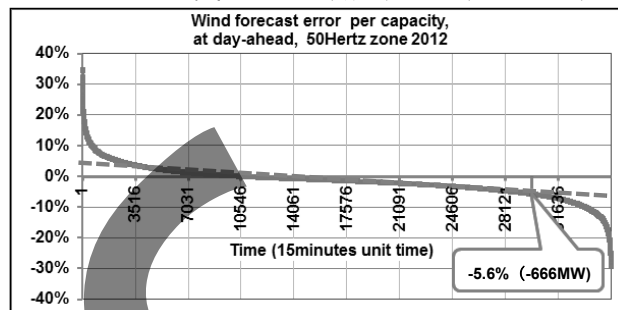
(EuroWind、Fraunhofer IWES、metomedia、WEPROG)

- 翌日予測の定格出力に対する平均絶対誤差は3.6%、二乗平均平方根誤差で5.1%
- 翌日予測値には、85パーセンタイル値で発電出力が予測よりも、666 MW(5.6%)低い可能性がある。

翌日予測と実測値の時系列比較 (2010-1-17)



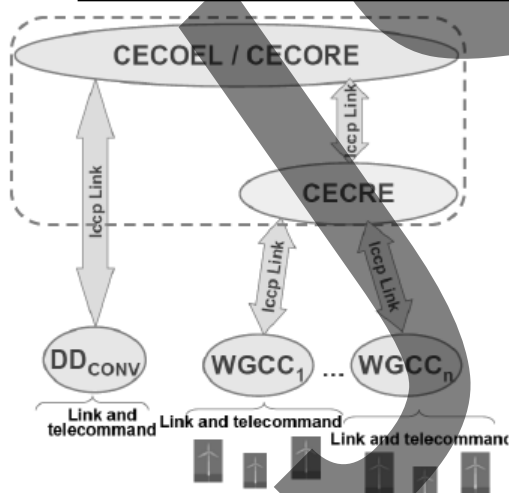
翌日予測と実測値の誤差分布 (2012年)



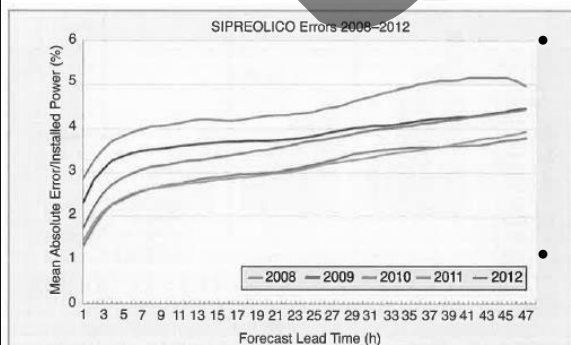
出典：JWPA協会誌2013-8 WWFジャパン小西雅子、立命館大学竹濱朝美  
平成26年 電気学会全国大会 欧州における風力発電出力予測の利用

JWPA齊藤 哲夫、立命館大学竹濱朝美、WWFジャパン小西雅子

# スペインCECRE ー出力予測の利用事例



- REE社(スペイン唯一の系統運用会社)は、電力系統全体の制御に風力出力予測技術を活用。
  - 数値気象モデルとWFのデータ収集システムを活用した出力予測を実現(48h先予測, 15分更新)。
  - **24~32h先の出力予測**
    - Unit Commitment(発電機起動停止)に活用。
    - 電力系統安定化対策の費用低減に貢献している模様。
  - **5h先までの出力予測**
    - 発電計画値を修正。予測の大外しを低減。



- 中央給電指令所の配下にある「CECRE(再生可能エネルギーコントロールセンター)」で再生エネルギーの制御がされている。  
⇒10MWを超える発電設備はCECREにより直接制御。
- CECREには、WFのデータがオンラインで伝達され出力予測に活用。  
⇒WFの発電量、有効電力、無効電力、風速・気温等

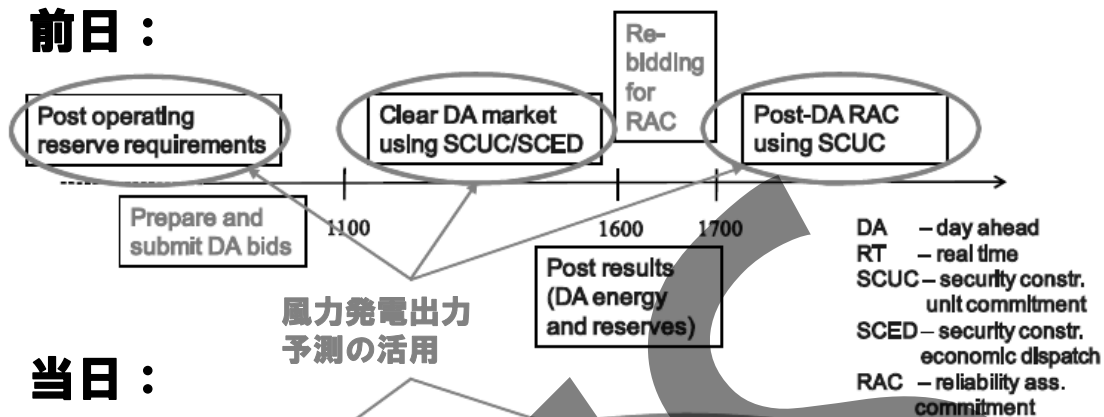


出典：IEEE Power&Energy Magazine Vol11, No6, P57

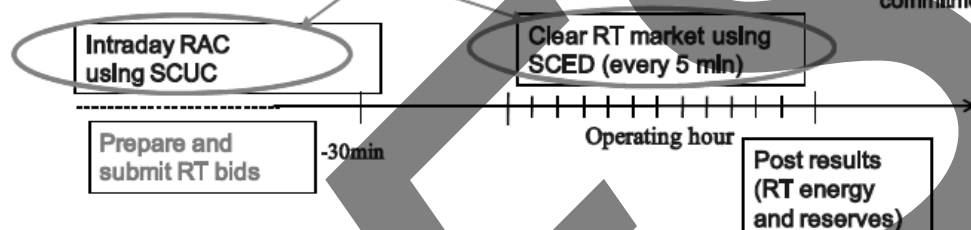
# 米国MISO ~前日から当日までの出力予測利用事例

- 風力発電の出力急変に対応した需給運用を行うために、翌日予測から、当日の高精度の予測までが積極的に活用。
- 出力予測には誤差があるが、その不確かさを見込んで、需給運用が行われている。

## 前日：



## 当日：



出典：Argonne National Laboratory, A Quick Guide to Wind Power Forecasting: State-of-the-Art 2009

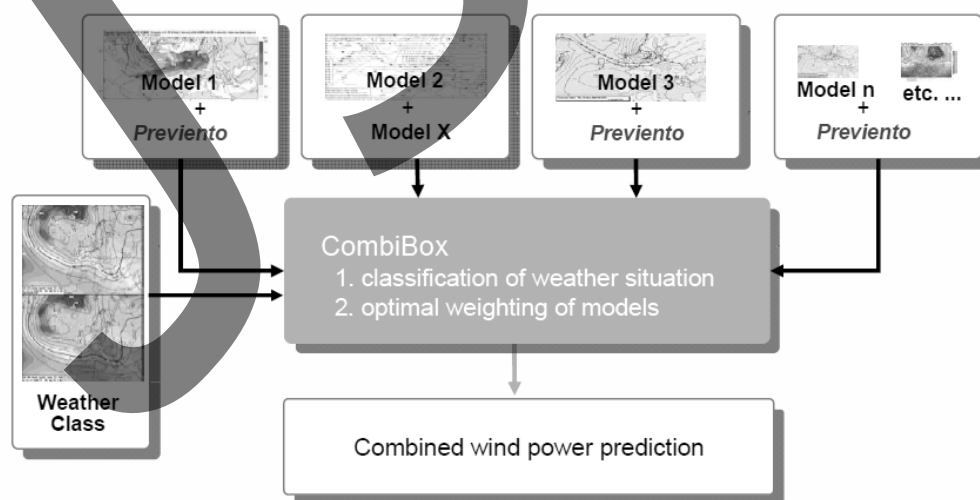


Challenging Tomorrow's Changes

Proprietary and Confidential — 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

# 米国MISO ~出力予測の仕組み

## Combination of forecasts



- Weighting of different forecasts according to capabilities of NWP in different weather situations



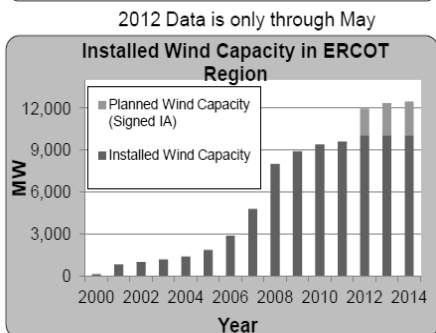
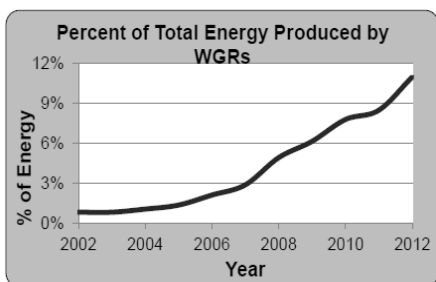
Midwest ISO Wind Generation Forecasting Workshop, July 15 2010



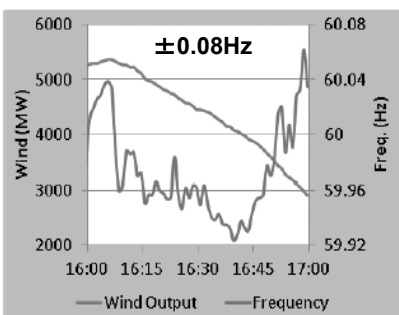
Challenging Tomorrow's Changes

Proprietary and Confidential — 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

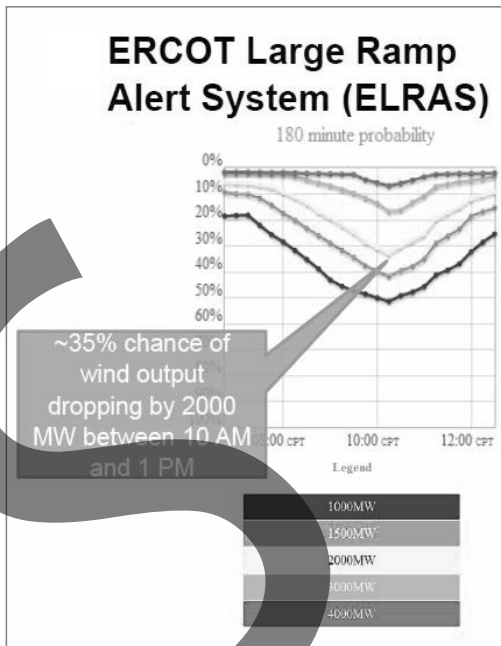
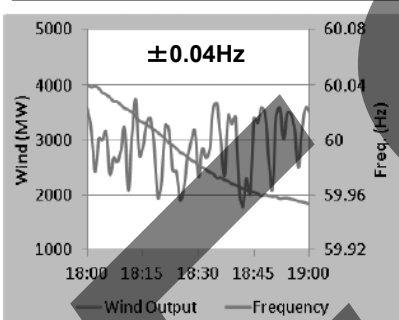
# 米国ERCOT ~出力予測の急変 (Ramp) 予測



Wind Ramp in Zonal – Feb. 28, 2010



Wind Ramp in Nodal – Mar. 3, 2012



ERCOTの風力発電設備導入状況

ERCOTの風力出力急変事例と周波数変動状況 (1hで2000MWの風力出力が低下)

ERCOTの風力出力急変警報システム



出典: John Dumas, Evolution of Wind Generation in an Energy Market, UVIG Workshop February 26, 2013,

# 米国ERCOT ~出力予測の急変 (Ramp) 予測

Select a Region and a Forecast Time (CPT): System Wide 2010-02-26 13:00

System Wide  
Ramp 1: 180 min  
Forecast Time: 2010-02-26 13:00 CPT

ランブの変化率毎に予測 (15分, 60分, 180分)

Ramp Event Specifications  
Event Type: DOWN  
Mechanism 1: Unknown cause  
Mechanism 2:

Ramp Description  
A down ramp is possible within the next six hours

✓ ELRAS Ramp Event Forecast のシステム画面

✓ 各ランブ現象に対して、ランブ現象の出力規模、継続時間、変化率、開始時刻を予測

Amplitude (MW)	Duration (min)	Max Ramp Rate (MW/15 min)	Start Time (CPT) DD/HH:MM
0	420	0	26/20:00
-660	390	-330	26/19:30
-1320	360	-660	26/19:00
-1980	330	-990	26/18:30
-2640	300	-1320	26/18:00
-3300	270	-1650	26/17:30
-3960	240	-1980	26/17:00
-4620	210	-2310	26/16:00
-5280	180	-2640	26/16:00
-5940	150	-2970	26/15:00
-6600	120	-3300	26/15:00
-7260	90	-3630	26/14:30
-7920	60	-3960	26/14:00
-8580	30	-4290	26/13:30
-9240	0	-4620	26/13:00

Observed Ramp for this Case

Amplitude: -3676 MW  
Duration: 230 min  
Max Ramp Rate: -515/15 min  
Start time: 1630 CST

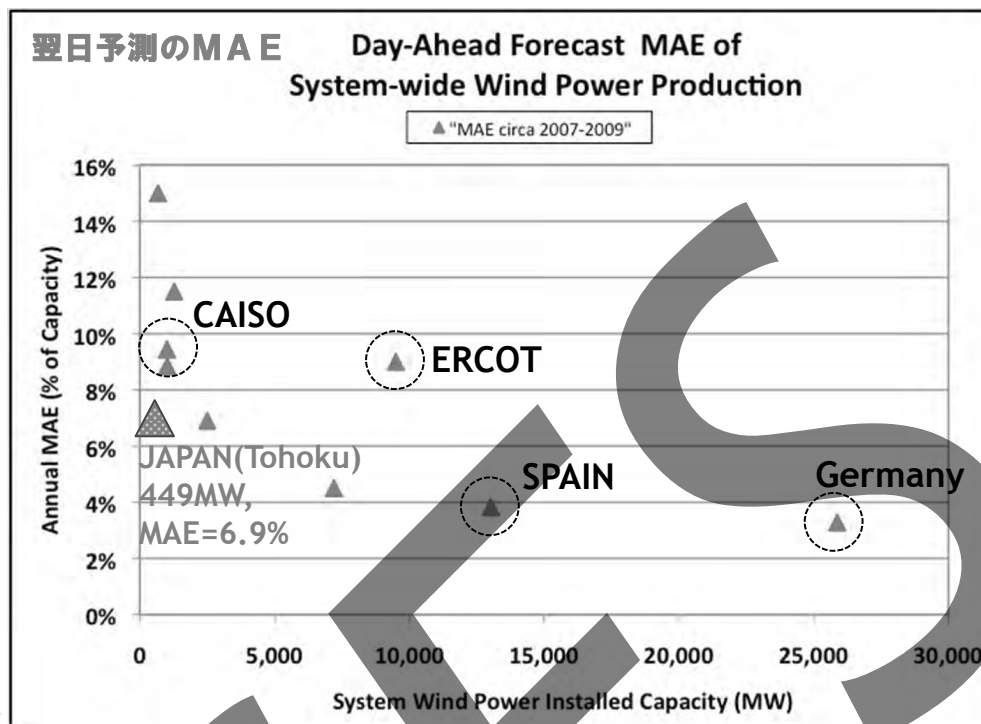
80%信頼区間を赤棒で表示



出典: JOHN ZACK, WIND PLANT FORECASTING:STATUS AND CHALLENGES, California Wind Energy Collaborative Forum, April 5, 2011

## 各国電力系統運用機関の出力予測精度

- ✓ 一般に、風力発電の導入が進むほど平滑化効果が働き、出力予測精度は高くなる。
- ✓ 日本の風力発電導入量は、ドイツ・スペインに比べて少ないにも関わらず、出力予測精度は比較的高いレベルにある。



**CTC**  
Challenging Tomorrow's Changes

出典: JOHN ZACK, WIND PLANT FORECASTING: STATUS AND CHALLENGES  
, California Wind Energy Collaborative Forum, April 5, 2011 を加筆

23

## まとめ

1. 風力発電の導入拡大にともない、国内外で気象予測・統計技術とIT技術を駆使した、出力予測の取り組みが始まっている。
2. 風力発電の出力急変に伴う、予測の大外しは大きな課題。予測の誤差要因としては、主に以下の2点。
  - ・ 気象モデルの予測誤差
  - ・ 実績データの収集不足(風車の運転情報等)
3. 予測の大外しに対する対処として、以下の取り組みがおこなわれている。
  - ・ 翌日～当日運用までの出力予測値の活用。
  - ・ 複数の予測値を利用し、気象条件等に応じて最適化した予測値の活用
  - ・ 出力急変(Ramp)に特化した予測技術開発。

**CTC**  
Challenging Tomorrow's Changes