

太陽光発電システムの 発電量予測に関する研究

Output energy forecasting for photovoltaic systems

評価・システムチーム

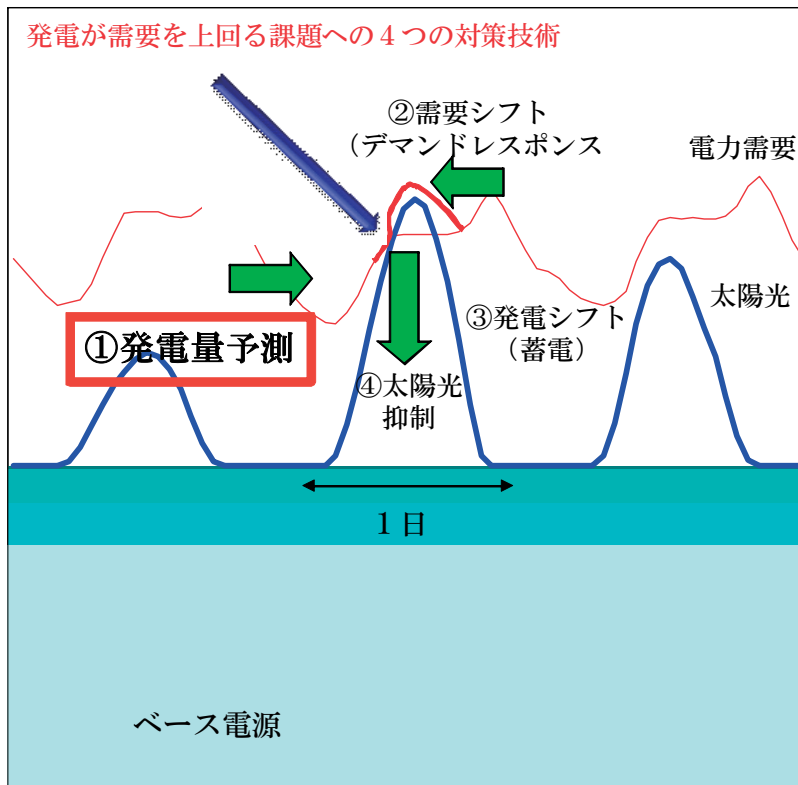
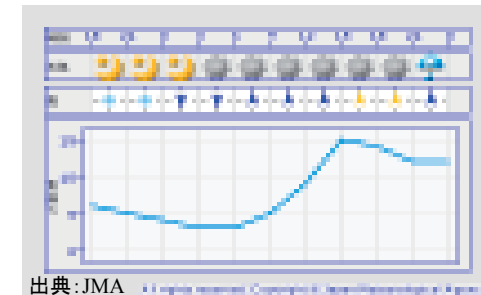
大関 崇

Takashi OOZEKI

はじめに ;Introduction

- PVの大量導入時において、電力系統全体で、需要電力量を発電電力量を上回る可能性が高い。
- 翌日の発電量を予測することが重要となる。

翌日の気象予報



天気予報⇒発電量

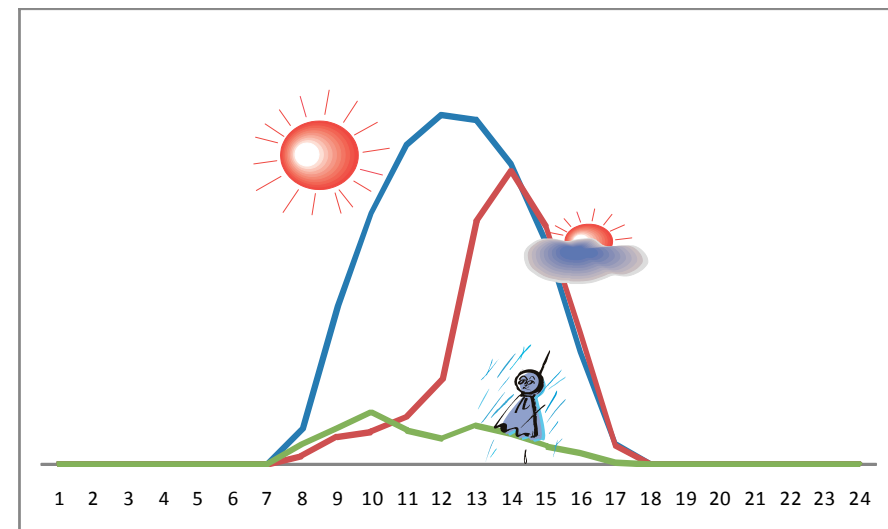
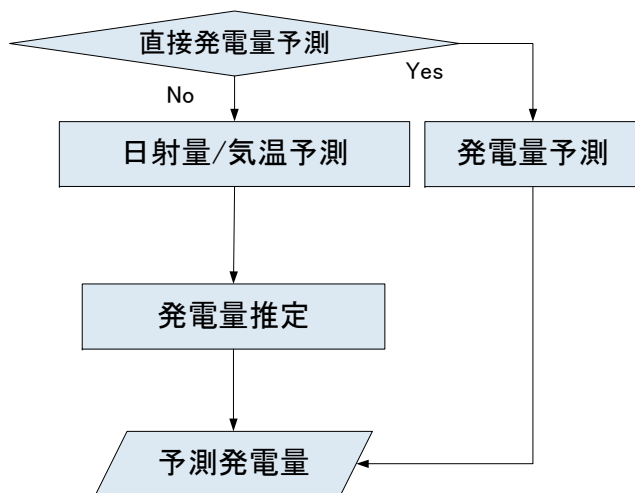


Fig. important technologies to energy management with large amounts of PV systems in energy systems

発電量予測手法; Energy forecasting method

予測手法

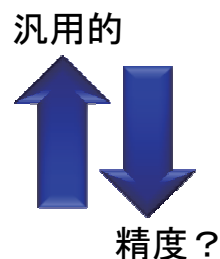
- 直接予測
- 間接予測



- 実際の太陽光発電の出力で検証が少なく、ほとんどが日射量での検討。
- 手法としては、直接でも間接でも利用可能なものが多い。

利用データ

- 天気予報利用
- Grid point Value (GPV) 利用
- 気象数値シミュレーション利用
- 衛星画像利用
- 地点実測データ直接利用
 - 前日予測は難しい。当日補正, 短時間補正



利用手法

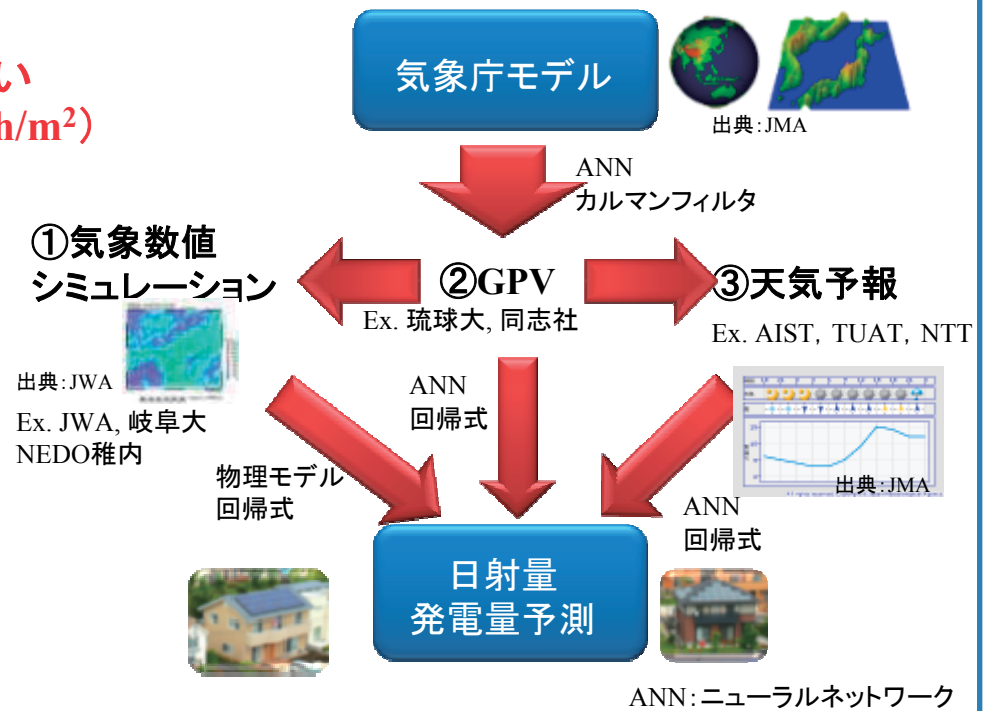
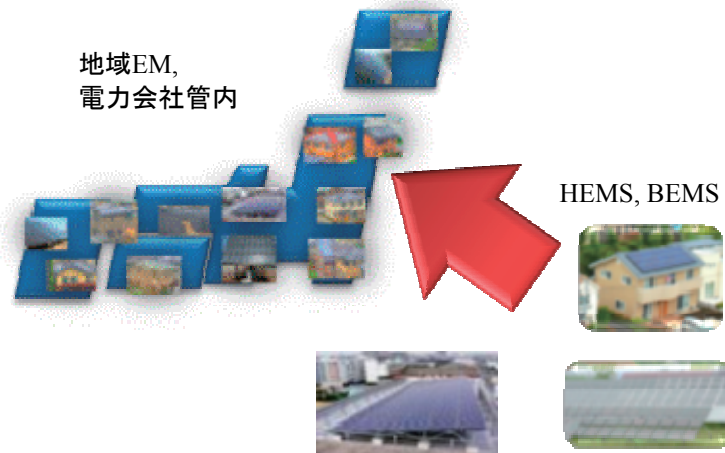
- 回帰式
- ソフトコンピューティング
- ニューラルネットワーク(ANN)
- サポートベクターマシン(SVM)
- カルマンフィルタ
- 遺伝的アルゴリズム
- 画像処理

本研究の目的; Purpose of study

従来の研究は、手法の検討はあるが、単地点での予測がメイン。
 24時間先の時間値; 広域エリア(電力管内程度)での予測手法の開発を目的とする。
 広域での予測誤差の見極め⇒天気予報モデルを基本とし、エリア拡大効果を検証。

現状の発電量予測手法

- ・各種手法が検討されている: 明確な差はない
 (24時間先の時間値予測: RMSE 約0.1kWh/m²)
- ・ピンポイントの予測のみ: 広域予測が重要



出典: 天気予報: 中川(1998), 工藤(2007), 嶋田(2007), 村田(2006), 内田(2010)
 GPV: 與那(2008), 片岡(2009), 産総研(2006), 山岸(2010)
 数値気象シミュレーション: 山口(2009), 橋本(2009), 小池(2010), Remund(2008), Lorenz(2008)
 地点データ利用: 若尾(2009), 宮本(2009), 飯嶋(2009)
 画像処理: 山本(1999), 高橋(2003), 小倉(2009)

天気予報の情報(時系列予報); Weather information

天気

3時間ごとの一次細分区域内の卓越する天気を「晴」「曇」「雨」「雪」のいずれかで表現。

風向風速

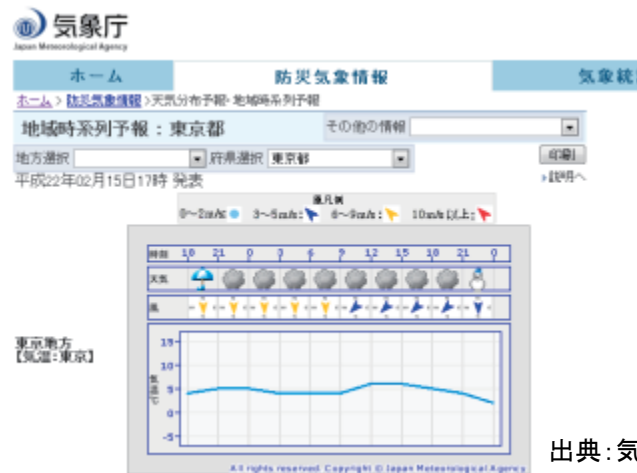
3時間ごとの一次細分区域内の代表的な風向を「北」「北東」「東」「南東」「南」「南西」「西」「北西」の8方位または「風向なし」で、風速を「0～2m/s」「3～5m/s」「6～9m/s」「10m/s以上」の4段階で表現。

気温

一次細分区域内の特定地点における3時間ごとの気温を1℃単位で表現。

湿度

相対湿度。0～100%。日本気象協会などが提供。



日本気象協会

<http://tenki.jp/>

<http://weather.yahoo.co.jp/weather/>
SYNFOS

ウェザーニュース

<http://weathernews.com/>

ユーザの情報を利用

その他：予報業務の許可事業者

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/minkan.html>

天気予報の情報; Weather information

天気予報利用可能データ

- ・ 天気, 気温, 風速, 風向, 湿度(予報種類により)

天気予報の予測傾向

- ・ 天気: 70~50%程度の的中率
- ・ 晴天⇒雨天, 雨天⇒晴天の確率は低い
- ・ 湿度は, バイアス誤差あり。
- ・ バイアス誤差補正後は, 誤差標準偏差。約12%(絶対値)
- ・ 気温の予報精度は良い。誤差標準偏差は, 約2°C

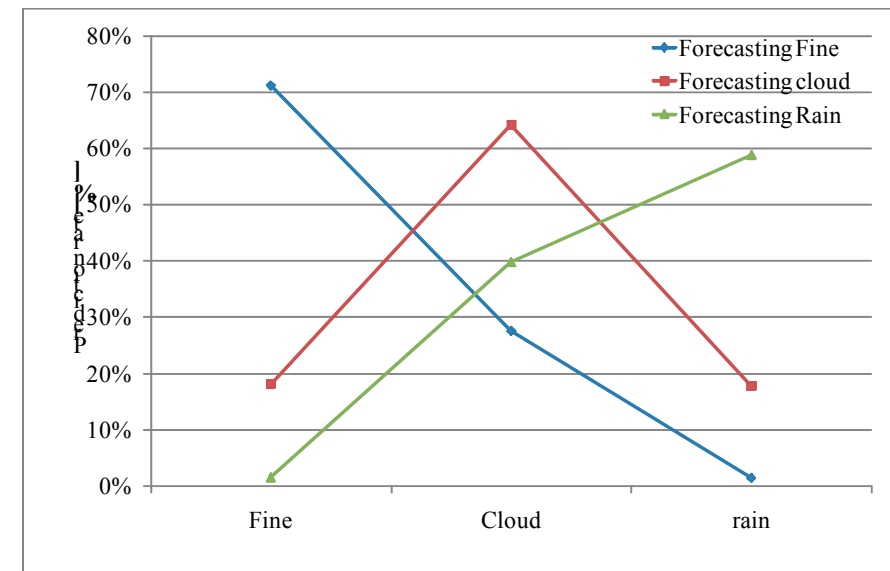


図 予報A, 福岡(2009年3~10月)

Fig. An example of Prediction rate of Weather Forecasting (Fukuoka, 2009/3-2009/10)

基本モデル; Fundamental model

疑似晴天指数を天気予報関連のパラメータを利用して予測するモデル。

$$Y_P = A \cdot Y_g \cdot K = A \cdot Y_{og} \cdot K_T \cdot K$$

$$Y_P = Y_{Ag} \cdot K = Y_{Ag_th} \cdot K_{TA} \cdot K$$

快晴日相当の日射量/発電量の推定により規格化 ⇒ パラメータ同定用のデータ増加
傾斜面や季節。時間変動を考慮して、大気外日射で除す晴天指数でなく、推定日射量で除す。

Y_P	: 等価システム稼働時間	[kWh/kW]
A	: 傾斜面変換係数	[-]
Y_g	: 等価水平面日照時間	[kWh/m ² /kW/m ²]
K	: システム出力係数	[-]
Y_{og}	: 大気外水平面日照時間	[kWh/m ² /kW/m ²]
K_T	: 晴天指数	[-]
Y_{Ag}	: 等価傾斜面日照時間	[kWh/m ² /kW/m ²]
Y_{Ag_th}	: 疑似快晴傾斜面日照時間	[kWh/m ² /kW/m ²]
K_{TA}	: 疑似晴天指数	[-]
K	: システム出力係数	[-]

基本モデル cont. ; Fundamental model cont.

有効パラメータの決定

- 3説明変数として, 単純多重回帰(求めるのは, 疑似晴天指数)
- 月ごとにStep-wise(変数増減条件:P値:0.250)
- 優位な変数は, **天気および湿度であった**。月によっては, 気温も含まれる。

$$K_{TA} = a + b \cdot X_w + c \cdot X_h + d \cdot X_t$$

X_w	: Weather information (3 levels)
X_h	: Humidity
X_t	: Ambient temperature
a, b, c, d	: Parameter

表 月ごとのStep-wiseによる変数 (Parameter chosen by step-wise method)

Month		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
coefficient	intercept	0.190	0.045	0.271	0.622	0.322	0.625	0.571	-0.735	0.576	0.578	0.234	0.264
	Weather (3 levels)	0.834	0.947	0.743	0.417	0.660	0.488	0.474	0.492	0.570	0.601	0.642	0.659
	Humidity	-0.005	-0.002	-0.005	-0.009	-0.007	-0.010	-0.009	-0.002	-0.008	-0.008	-0.005	-0.005
	Temperature				0.008	0.009	0.007	0.008	0.038			0.007	0.008
P value	Weather (3 levels)	1.3E-48	1.1E-45	3.6E-66	1.3E-22	1.6E-55	2.1E-26	8.5E-22	4.6E-31	1.9E-43	1.3E-45	6.0E-41	4.0E-31
	Humidity	2.5E-09	2.1E-03	1.6E-15	3.1E-42	3.3E-20	7.7E-28	3.0E-11	2.5E-02	6.9E-25	6.6E-22	3.1E-11	4.6E-10
	Temperature	5.5E-01	8.6E-01	7.5E-01	1.3E-03	6.5E-04	2.3E-02	7.1E-02	2.0E-15	7.6E-01	2.6E-01	8.7E-03	4.6E-02

小さい p 値をもつ場合(すなわち、モデルに加えられた場合にゼロ係数をもつ可能性がない場合)

大きい p 値をもつ場合(すなわち、係数ゼロをもつという仮説は棄却されない場合)

予測誤差の確認方法; Evaluation method for forecasting error

実際の天気予報データではなく、模擬的な誤差を発生。

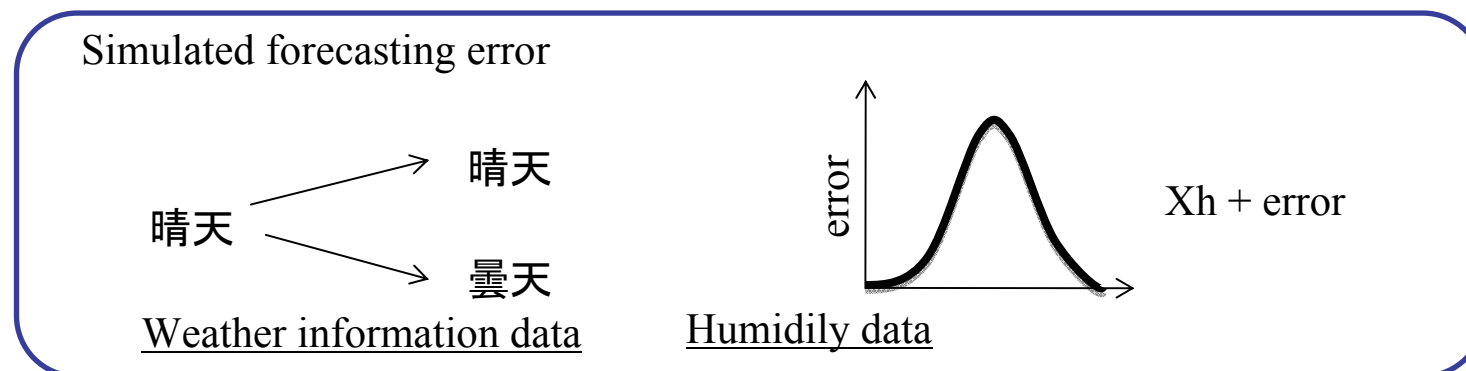
天気

- 晴天⇒雨天, 雨天⇒晴天は無し。曇天は, 晴天/雨天が同程度。
- 的中率をパラメータにしてデータセットを用意し, Mersenne Twisterによるランダムにより選択。

湿度

- 標準偏差をパラメータに, 誤差が正規分布の従うとして, 標準正規分布で一定のサンプリングおよび母数を割り振り, 標準偏差を変化させることで, 該当区間の母数を発生させる。そのデータセットから, Mersenne Twisterによるランダムにより選択。

データは, 2006/1~2006/12の東京都のデータを利用。



予測誤差の確認(基本モデル) ; Evaluation for forecasting error (basic)

RMSE: 0.090kWh/m²

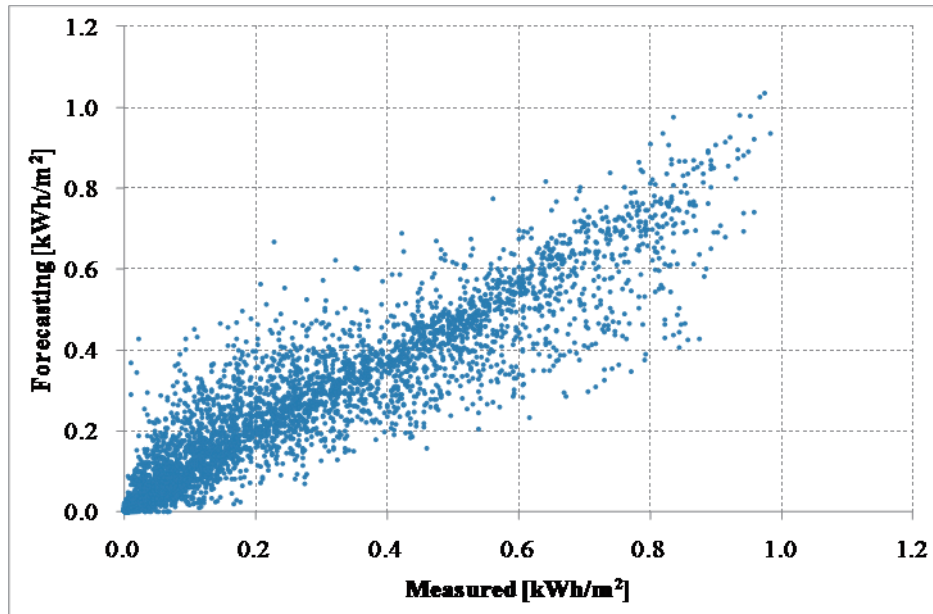


図 2006年東京予測誤差
(実測天気, 湿度)

Fig. An example of forecasting result
by using measured data (Tokyo, 2006/1-2006/12)

RMSE: 0.122kWh/m²

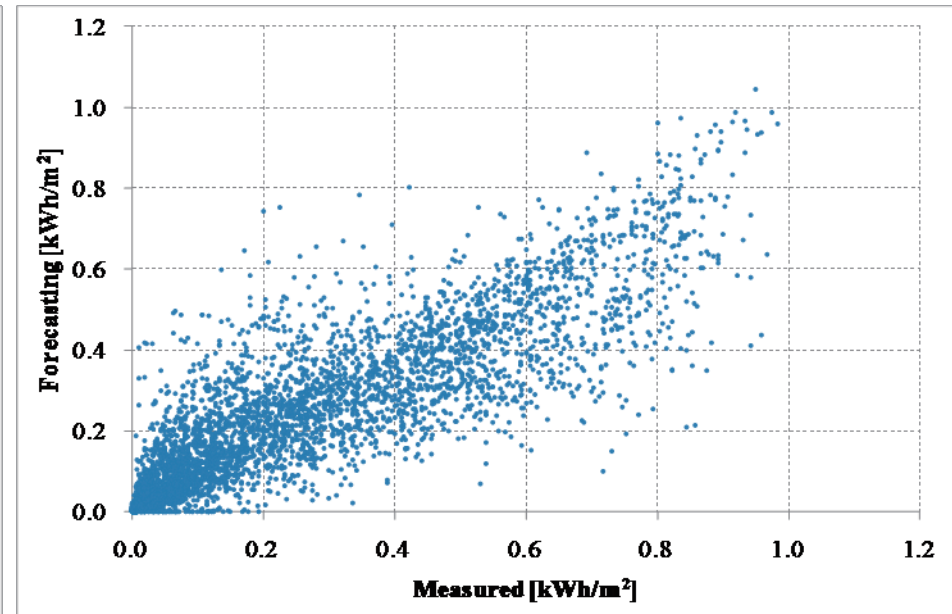


図 2006年東京予測誤差
(模擬天気:的中70%, 湿度:誤差標準偏差10%)

Fig. An example of forecasting result
by using simulated forecasting data,
Weather; 70% and humidity; 10%.
(Tokyo, 2006/1-2006/12)

予測誤差低減効果(前後時間データ) ; Evaluation for forecasting error

入力データを増やす

3時間前後の天気を入力に加える。基本モデルより標準偏差約0.1%改善。

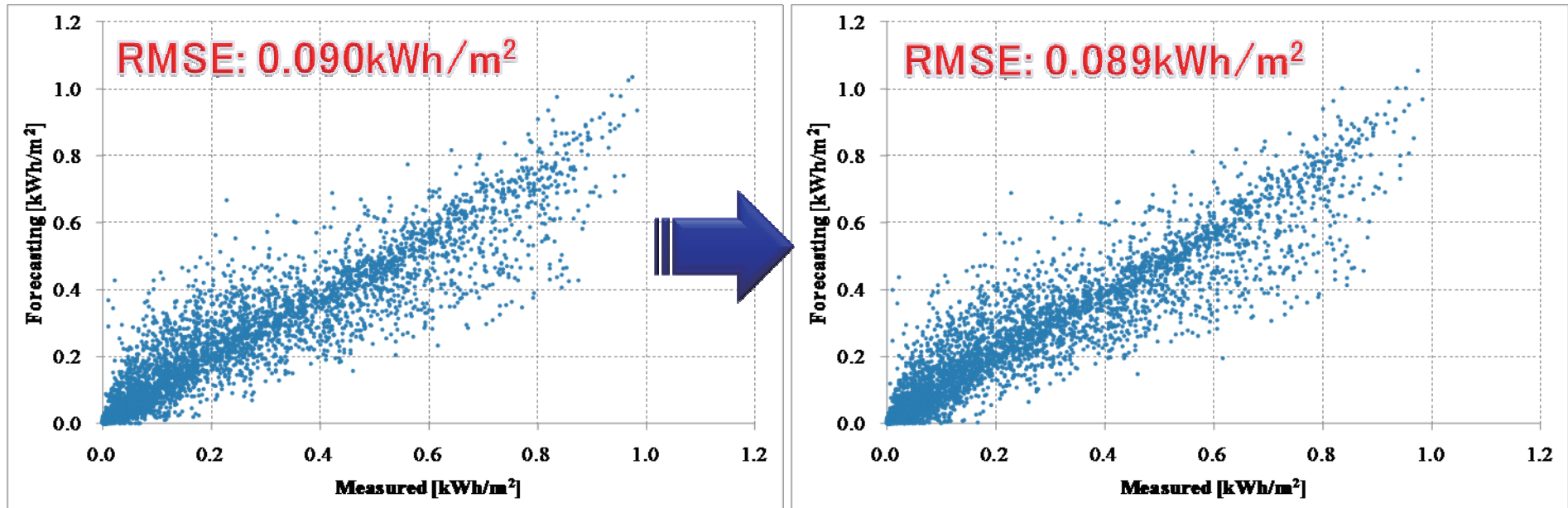


図 前後天気情報無し(実測天気利用)

Fig. Basic model using measured weather data

図 前後天気情報有(実測天気利用)

Fig. Model using time series information

表 Step-wiseにより選択されたパラメータ: Selected parameter by step-wise method

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Intercept	0.116	-0.072	0.188	0.689	0.404	0.613	0.789	0.586	0.542	0.554	0.238	0.052
humidity	-0.004	-0.001	-0.004	-0.009	-0.006	-0.009	-0.010	-0.008	-0.008	-0.007	-0.005	-0.003
Weather forecasting on time	0.690	0.680	0.540	0.375	0.411	0.329	0.349	0.418	0.488	0.580	0.434	0.421
Weather forecasting (3hours ahead)	0.133	0.288	0.151	0.070	0.279	0.220	0.096	0.083	0.043	0.022	0.138	0.236
Weather forecasting (3hours backward)	0.087	0.088	0.169	0.041	0.117	0.155	0.180	0.140	0.091	0.017	0.225	0.263

予測誤差低減効果(周囲データ利用); Evaluation for forecasting error

周囲データの利用

- 情報を増やすために、周囲の天気データを利用。相関の高い、甲府・前橋は選択される頻度が低いが、利用した。基本モデルより標準偏差約0.5%改善。
- ただし、今回実際天気を利用のため、天気予報の地点ごとの独立性の確認などが必要。

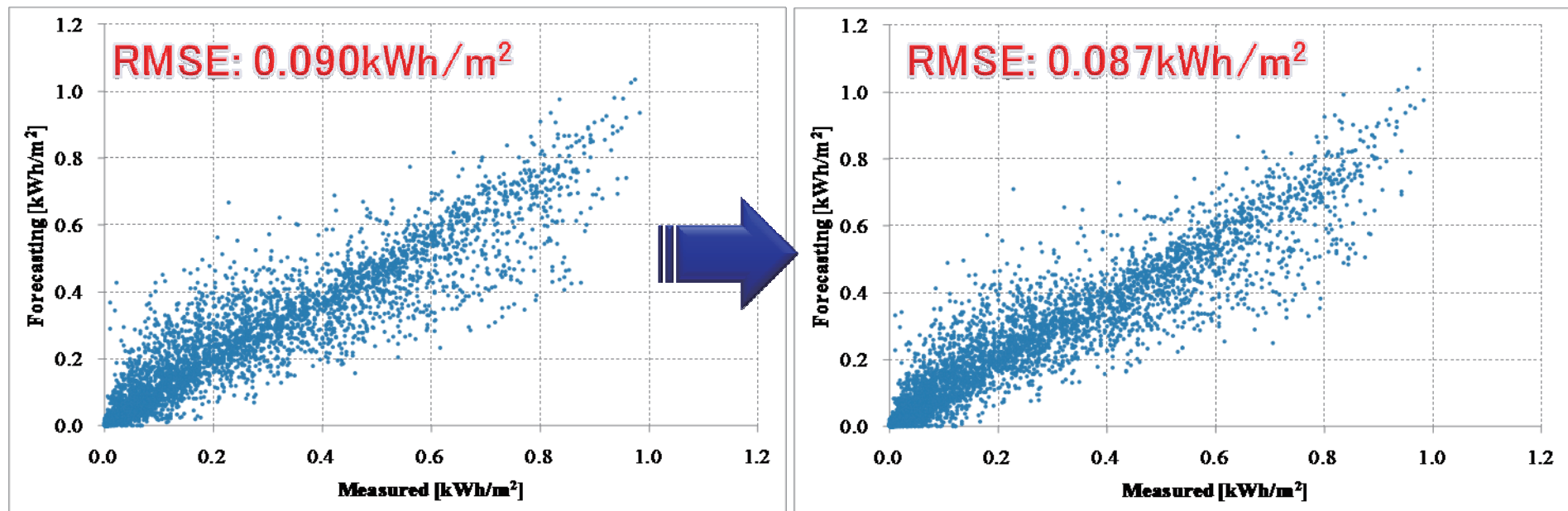


図 周囲天気予報データなし(東京, 実測天気利用)
Fig. Basic model using measured weather data

図 周囲天気予報情報有(東京, 実測天気利用)
Fig. Model using areal information

予測誤差低減効果(広域エリアによる誤差のならし効果); Evaluation for forecasting error (Large area)

地域によるならし効果

- 曇天による誤差が大きいため、曇天は広い範囲で見るとならされる可能性が高い。
- 複数サイト合計出力での誤差低減効果: 単地点より, RMSEを半減。

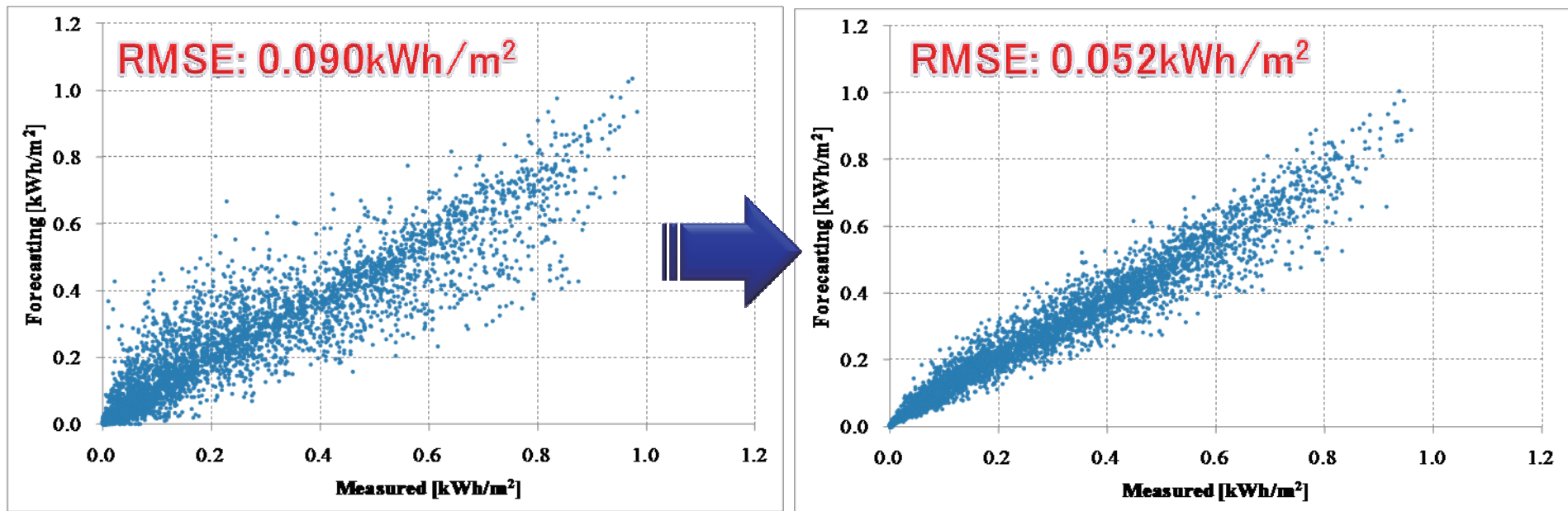


図 単地点の予測誤差(東京, 実測天気利用)
Fig. Basic model using measured weather data

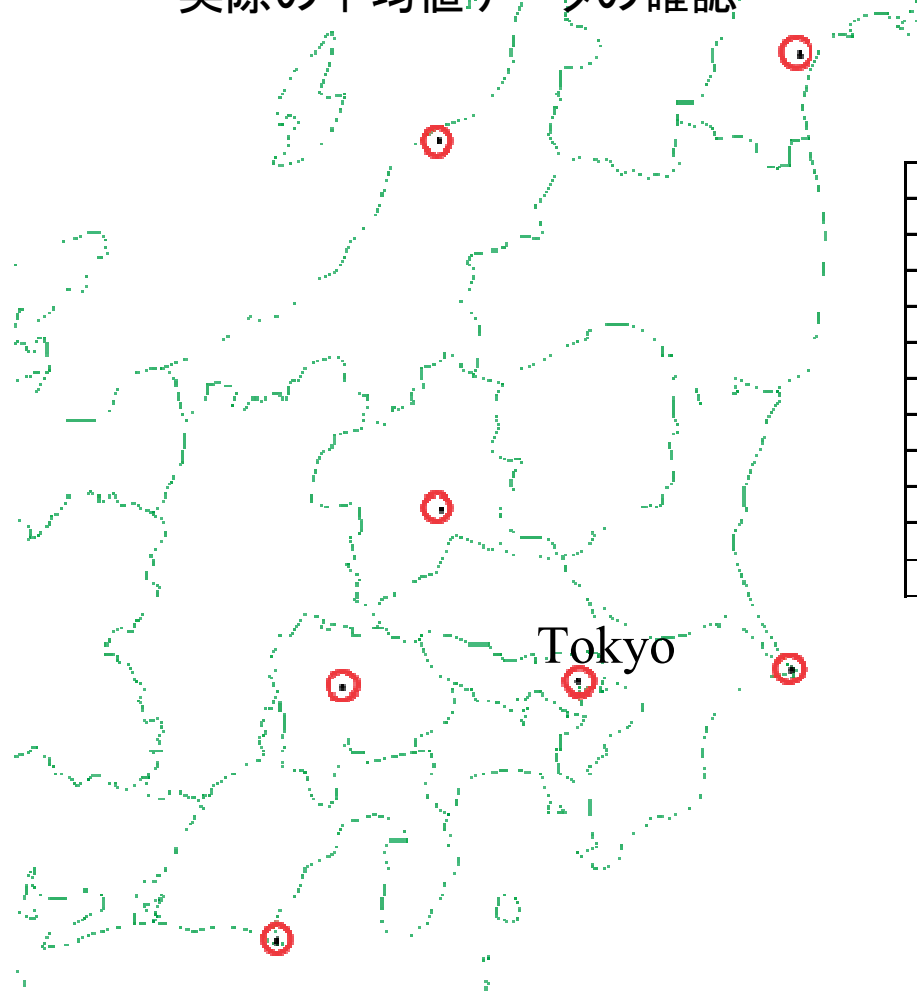
図 広域エリアの予測誤差(実測天気利用)
Fig. An example of forecasting result in a large area

広域エリアによる誤差のならし効果 cont.

Evaluation for forecasting error (Large area) cont.

2地点間の予測誤差の無相関性
 実際の平均値データの確認

⇒ アンサンブル合計とできる
 ⇒ 地点数と飽和特性, $1/\sqrt{N}$ との関係



東京周辺気象庁 (21組, 天気予報+全天日射あり)

Point A	Point B	Distance[km]	Point A	Point B	Distance[km]
Tokyo	Maebashi	101	Choshi	Kofu	209
Tokyo	Choshi	99	Choshi	Omaezaki	272
Tokyo	Kofu	109	Choshi	Sendai	280
Tokyo	Omaezaki	186	Choshi	Niigata	290
Tokyo	Sendai	303	Kofu	Omaezaki	122
Tokyo	Niigata	255	Kofu	Sendai	356
maebashi	Choshi	178	Kofu	Niigata	253
maebashi	Kofu	94	maezaki	Sendai	472
maebashi	Omaezaki	214	maezaki	Niigata	375
maebashi	Sendai	263	Sendai	Niigata	167
maebashi	Niigata	167			

+

2点間が近い気象庁 (5組, 天気予報+全天日射あり)

Point A	Point B	Distance[km]
Rumoi	Asahikawa	62
Maizuru	Osaka	87
Shimonoseki	Fukuoka	65
Hiroshima	Matsuyama	68
Nagasaki	Kumamoto	79

広域エリアによる誤差のならし効果 cont. Evaluation for forecasting error (Large area) cont.

予測誤差に相関性がない

ただし、データは実測天気のため、天気予報の的中率のならし効果は含まない。

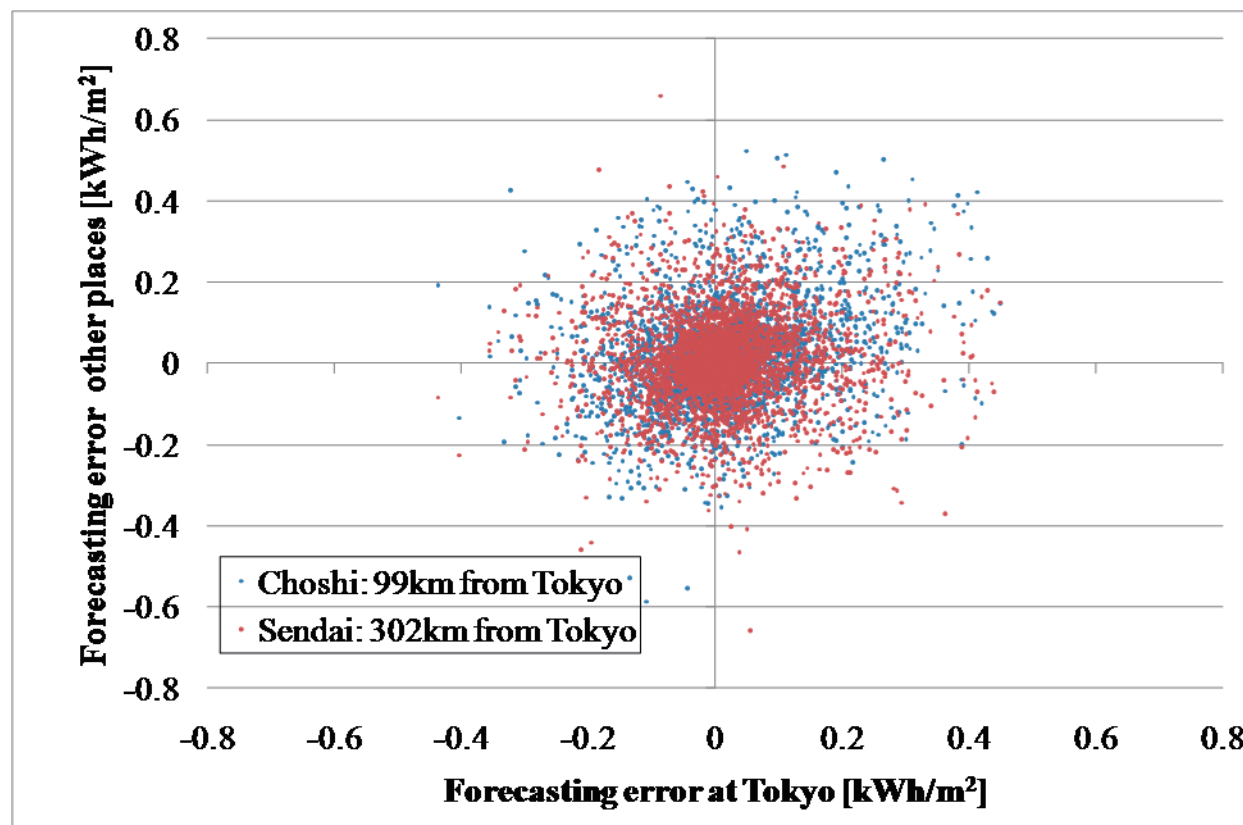


図 地点間の予測誤差の相関(横軸:東京)
Fig. Coefficient of forecasting error

広域エリアによる誤差のならし効果(2点間距離と誤差低減)

Forecasting error in Large area

2点間の距離に従い、瞬時誤差は無相関に近づく。
合計は、ランダム誤差のアンサンブル合計と扱える可能性を示す。
(独立性の考え方は今後検討)

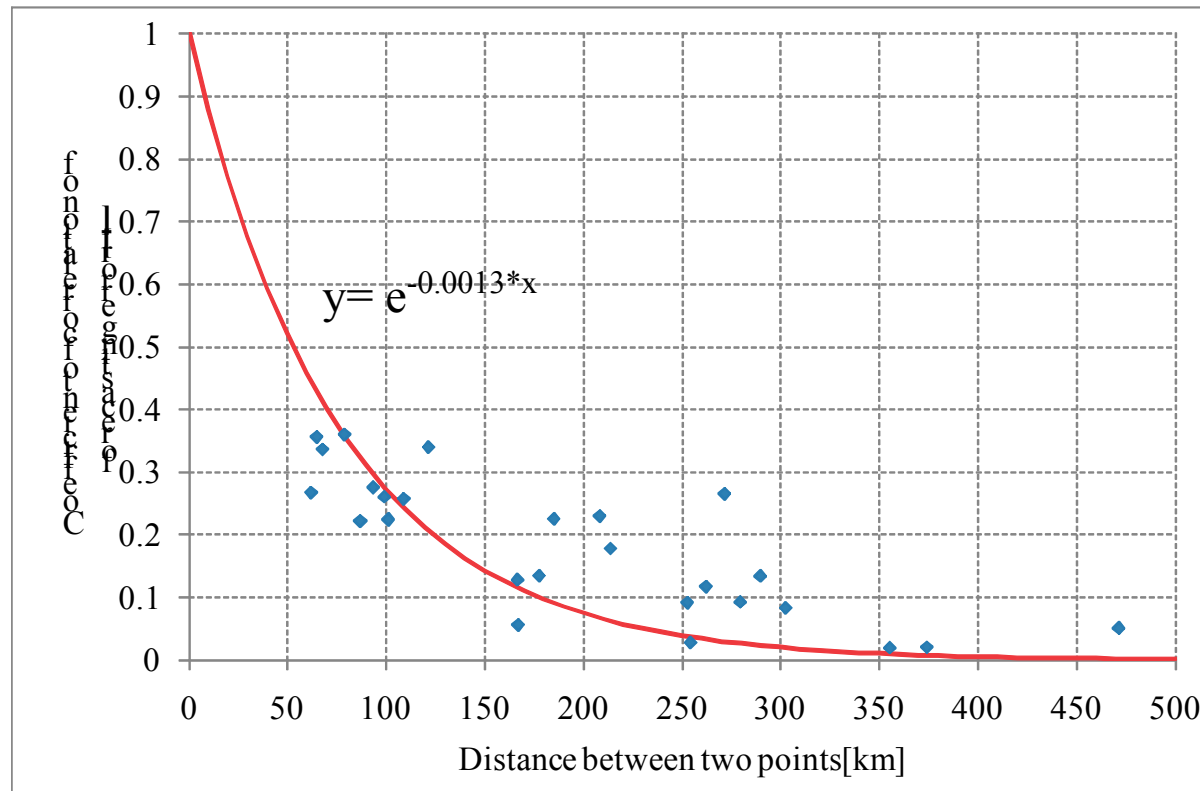


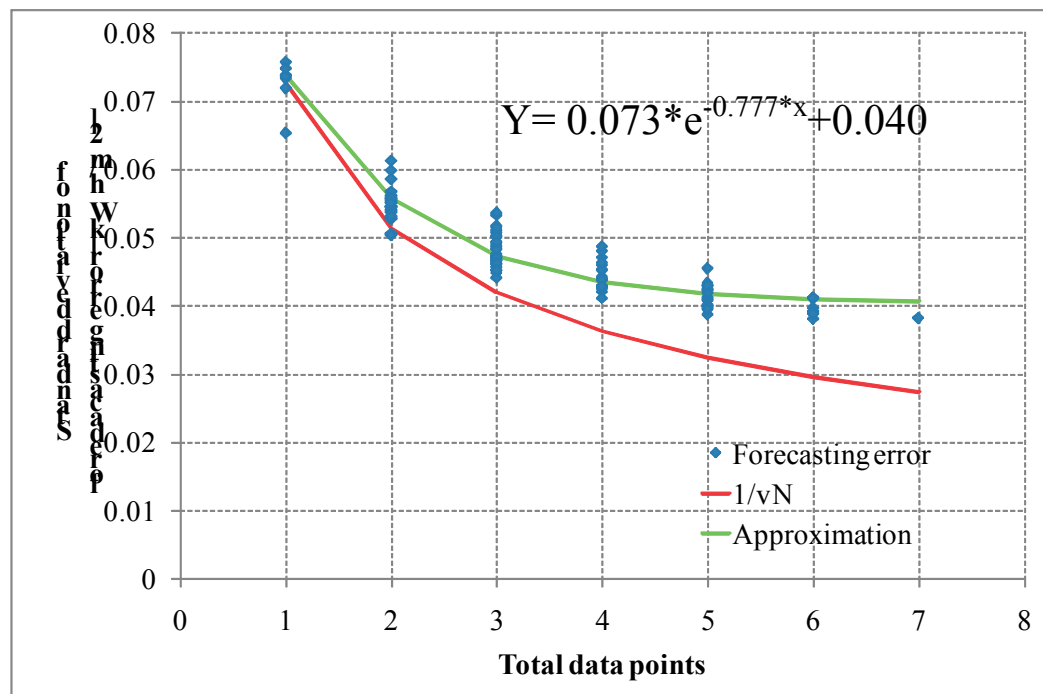
図 2点間距離と予測誤差の相関係数

Fig. Coefficient of correlation of forecasting error

広域エリアによる誤差のならし効果(2点間の距離と誤差) cont. Forecasting error in Large area cont.

地点数との関係について

- 地点間のデータが無相関であれば, 単地点の標準偏差の $1/\sqrt{N}$ (地点数: N)となることが予想される。
- $1/\sqrt{N}$ より先に飽和特性 \Rightarrow 個別誤差は正規分布でない, 等分散性を有さない, 距離との関係が分離できてない等。今後の検討課題。



東京周辺気象庁(天気予報+全天日射あり)
全組み合わせ

図 地点数と予測誤差の関係
Fig. Number of point and forecasting error

まとめ; Conclusions

太陽光発電の大量導入に必要な発電量予測技術について検討を行った。
 予測誤差の見通しを示し, 特に広域エリアによる予測誤差低減効果を示した。

表 誤差ならし効果による予測誤差の見通し(実測天気利用)

Table. Summary of forecasting results

		Point	Areal
Absolute error[kWh/m ²]; (Measure-Forecast)	Hourly	0.099	0.053
	Daily	0.727	0.442
Error rate; (Measure-Forecast)/Measure		44%	18%
Normalized by average (Tokyo); (Measure-Forecast)/Ave. of daily irradiation		23%	14%
Normalized by maximum (Tokyo); (Measure-Forecast)/Max. of daily irradiation		9%	6%

参考: 2006年各地点の日量の日射量 [kWh/m²]

Reference: daily irradiation in Japan

	Tokyo	Maebashi	Choshi	Kofu	Omaezaki	Sendai	Niigata
Max	7.77	7.97	7.85	7.79	7.72	7.89	8.16
Ave	3.17	3.51	3.5	3.77	3.81	3.27	3.35
Stdev	1.18	1.8	1.98	1.87	1.96	1.9	2.18