

太陽光発電の発電予測技術概要

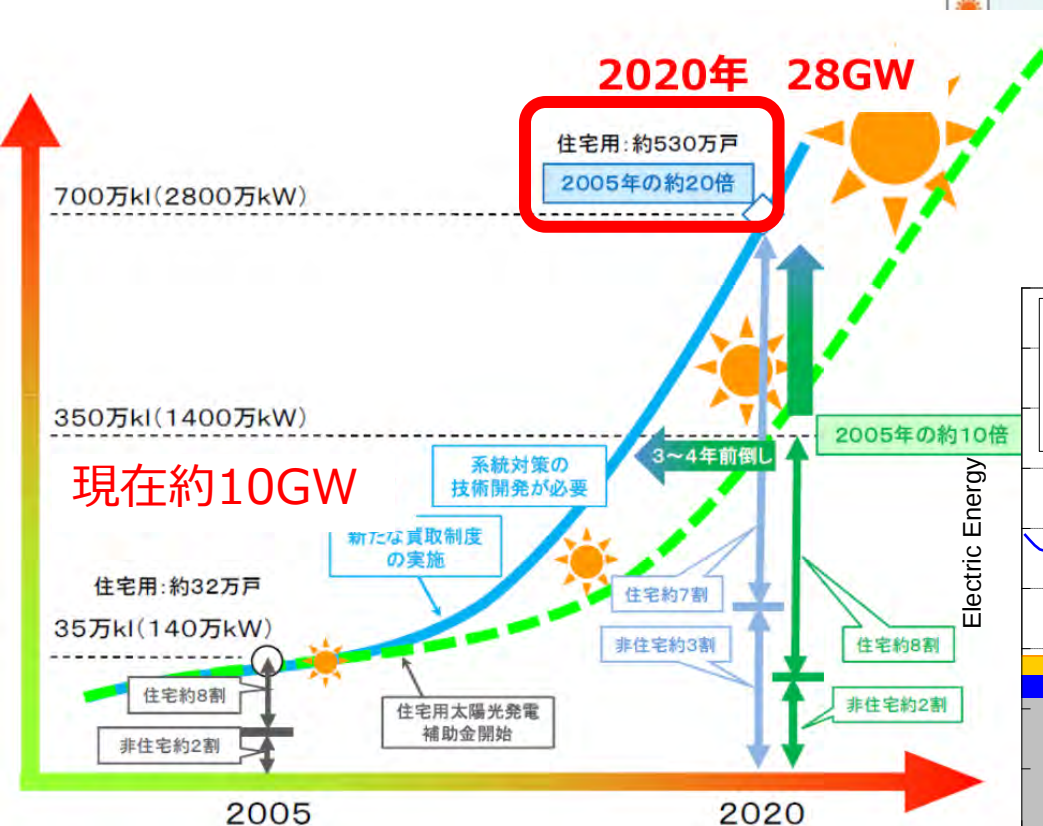
大関 崇

独立行政法人 産業技術総合研究所
太陽光発電工学研究センター

2014/03/25

はじめに

- 将来的には50GW~
- 需給バランスの問題

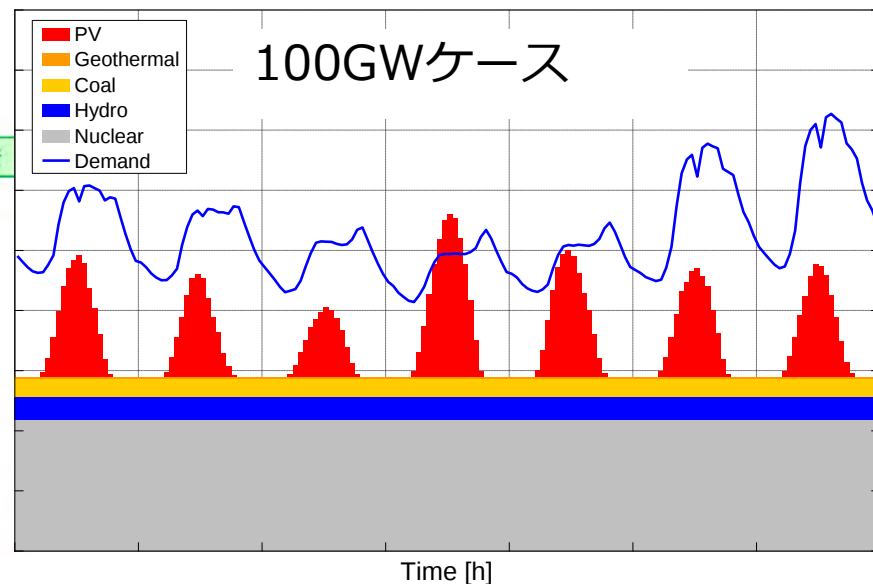


出典: METI

原発依存度低減と対になるグリーンシフトの具体像

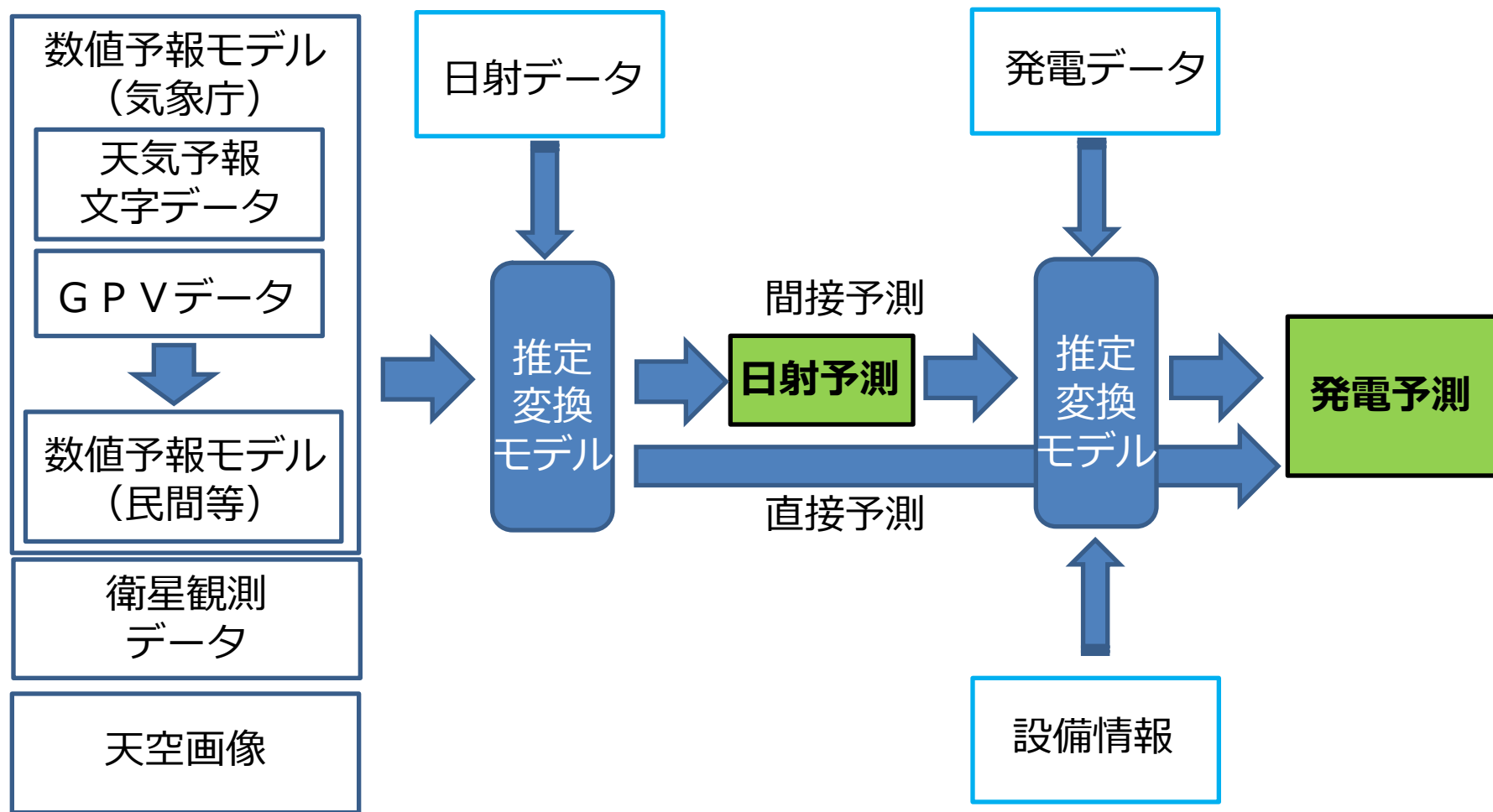
現状(2010年) 再生可能エネルギー10% (うち水力以外で2%)	15シナリオ 20~25シナリオ(2030年) 再生可能エネルギー30% (うち水力以外で10%)	ゼロシナリオ(2030年) 再生可能エネルギー35% (うち水力以外で24%)
原発一基を設備容量120万kW、稼働率70%で想定。 (コスト等検証委員会モデルプラント) 90万戸 (38億kWh) 原発0.5分に相当	現在設置可能な屋根 全ての住戸の屋根に導入 1000万戸 (666億kWh) 原発9基分に相当 太陽光発電の設置に12.1兆円の追加投資 固定価格買取制度 立地規制改革を推進 優先接続、優先発電	耐震性が弱い等により 現在設置不可能な住戸までも 改修して導入 1200万戸 (721億kWh) 原発10基分に相当 太陽光発電の設置に更に1.7兆円の追加投資 集中度に劣る住戸を建て替えて、太陽光発電を設置するため、固定買取価格をより高水準に

出典: 国家戦略室

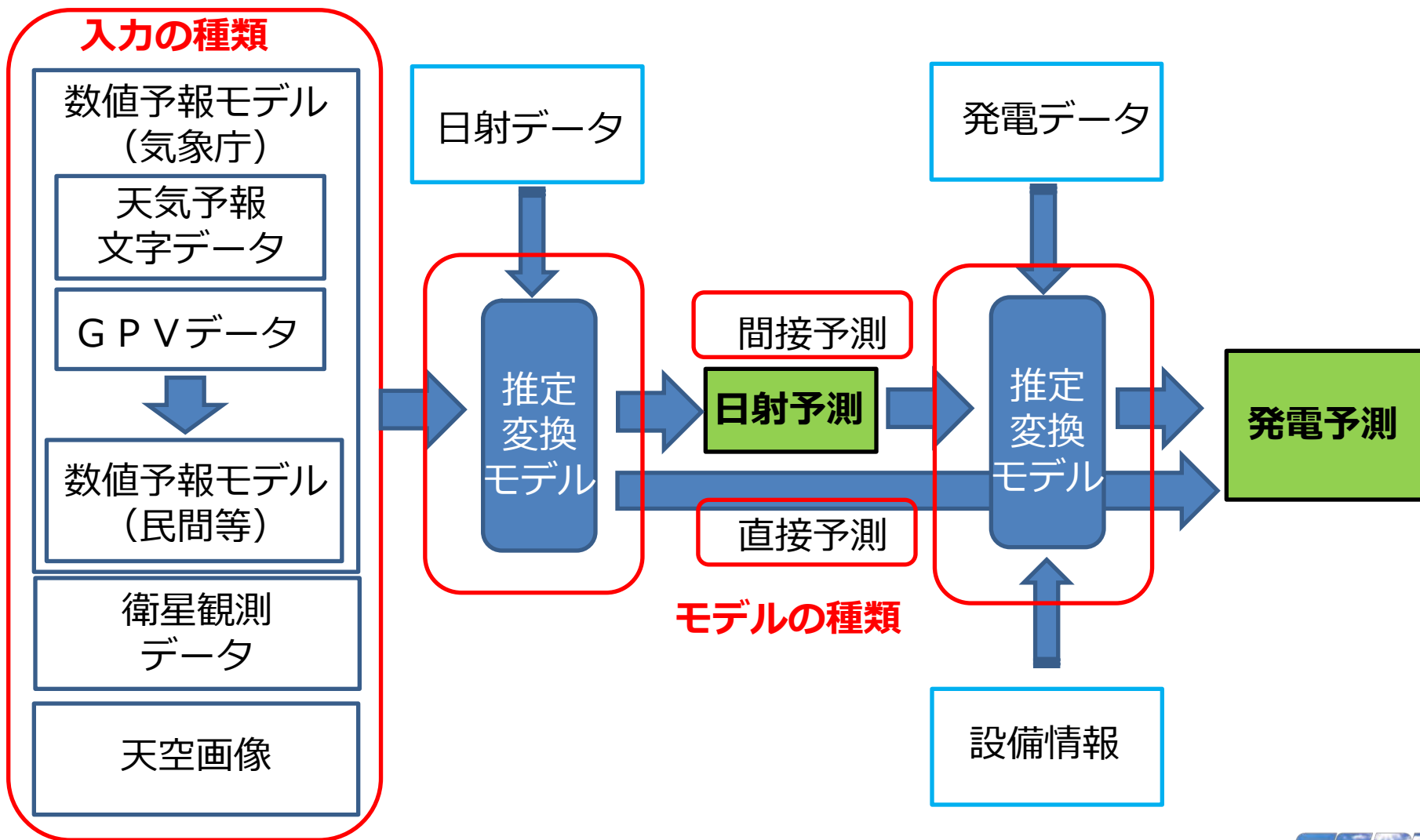


予測手法概要

発電予測の全体像



発電予測の全体像

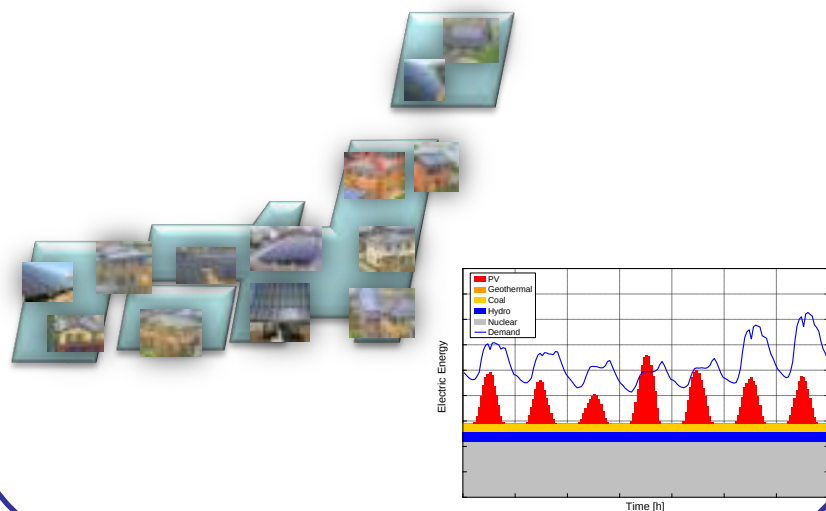


予測手法の分類

広域への応用

広域予測 (Regional forecast)

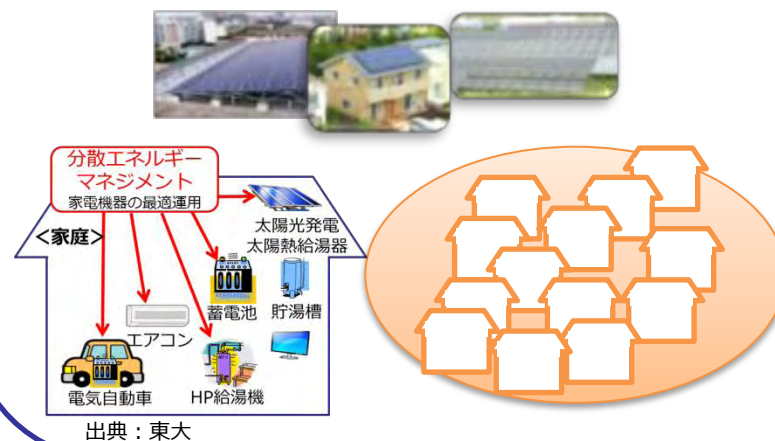
- 系統制御エリア
- 電力管区内
- 系統計画/運用



基本のモデルは同じ

地点予測 (Point forecast)

- 個別住宅、建物
- コミュニティ
- エネルギーマネージメント
- 安定化



予測手法の分類

週間予測
需給計画

数日先予測
(翌日)
需給計画

数時間予測
(当日)
需給運用

短時間予測
需給運用

出力把握
(Nowcasting)
需給運用
(事故時対応)

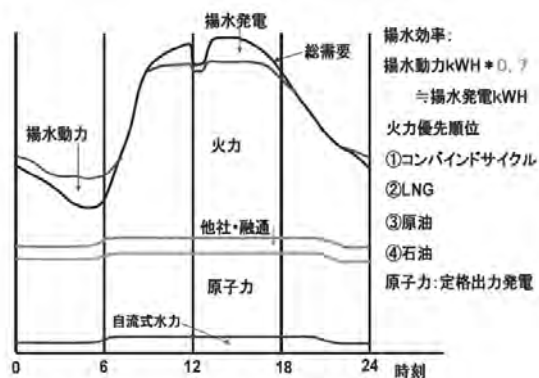


図 需給曲線と発電スケジュール例
(出典: テプコシステムズ)

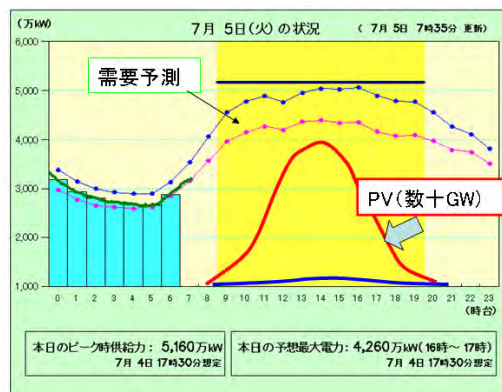


図 電気予報
(出典: 東京電力)

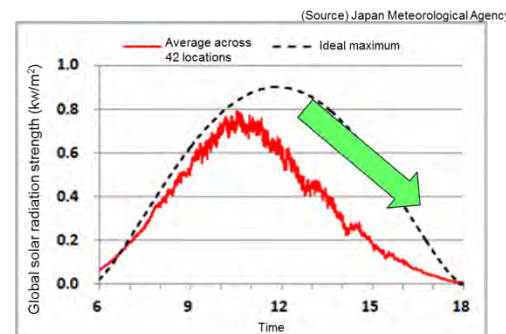


図 需給曲線と発電スケジュール例
(出典: 中部電力)

予測手法の分類（電力系統）

週間予測
需給計画

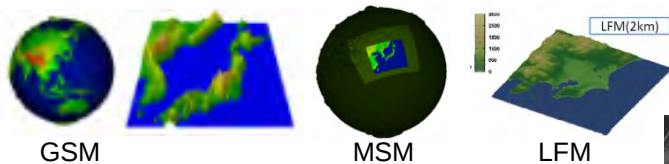
数日先予測
(翌日)
需給計画

数時間予測
(当日)
需給運用

短時間予測
需給運用

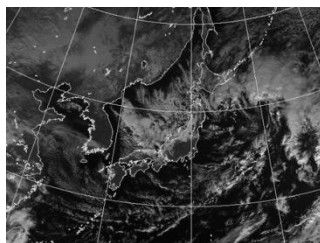
出力把握
(Nowcasting)
需給運用
(事故時対応)

数値予報モデル
(NWP: Numerical Weather prediction)



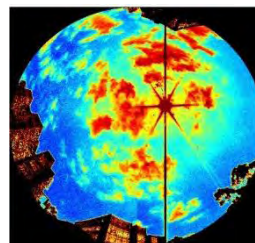
出典：JMA

衛星画像等



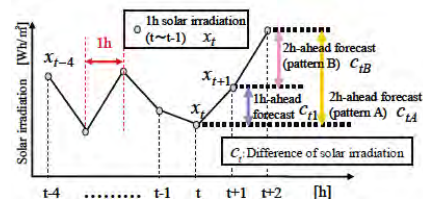
出典：JMA

天空画像



出典：Bryan

実測データ(持続モデル)



出典：waseda

予測手法の分類

- 出力把握～6時間
 - 天空画像
 - 衛星観測データ
 - 持続モデル
- 6時間～翌日予測
 - 数値予報モデル（モデル出力 + GPV）
- 広域予測

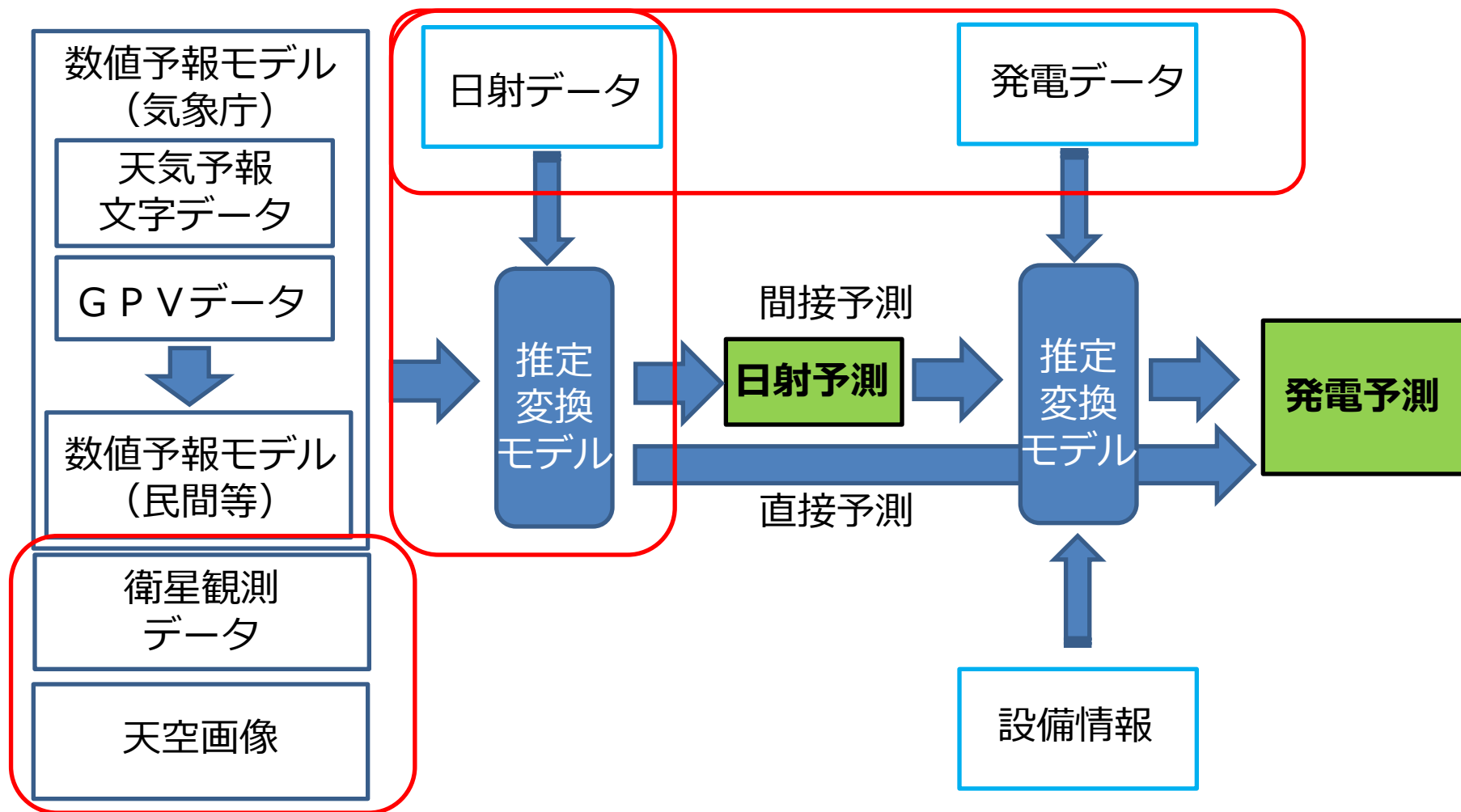
短時間予測

(出力把握～6時間程度)

短時間予測（～6時間程度）

- 天空画像データ利用
- 衛星観測データ利用
- 持続モデル（実測利用）

発電予測の全体像



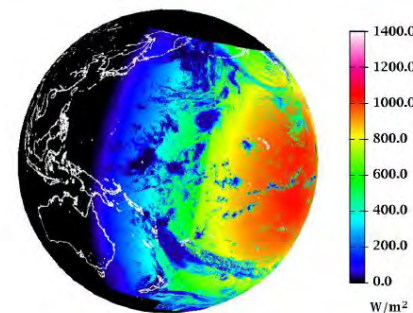
短時間予測（～6時間程度）

天空画像

画像と日射との相関
予測が画像を外挿（運動学的）

衛星観測データ

物理モデルに基づく
手法もあり（中島様）



出典：竹中他、千葉大

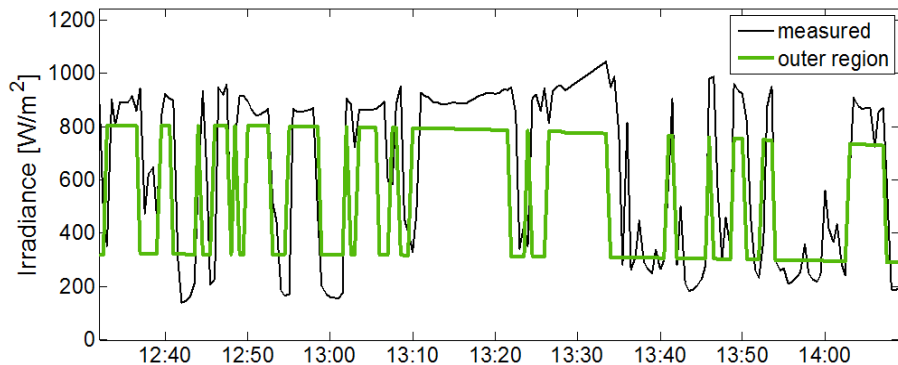
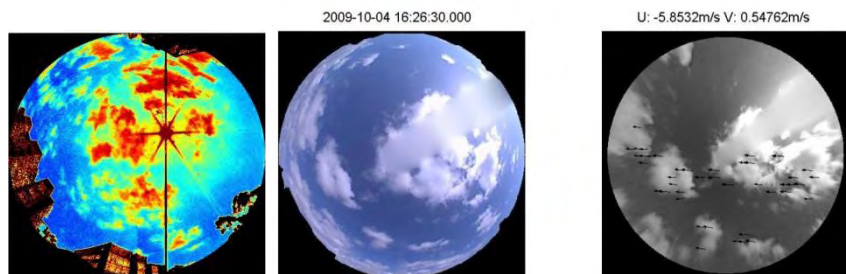
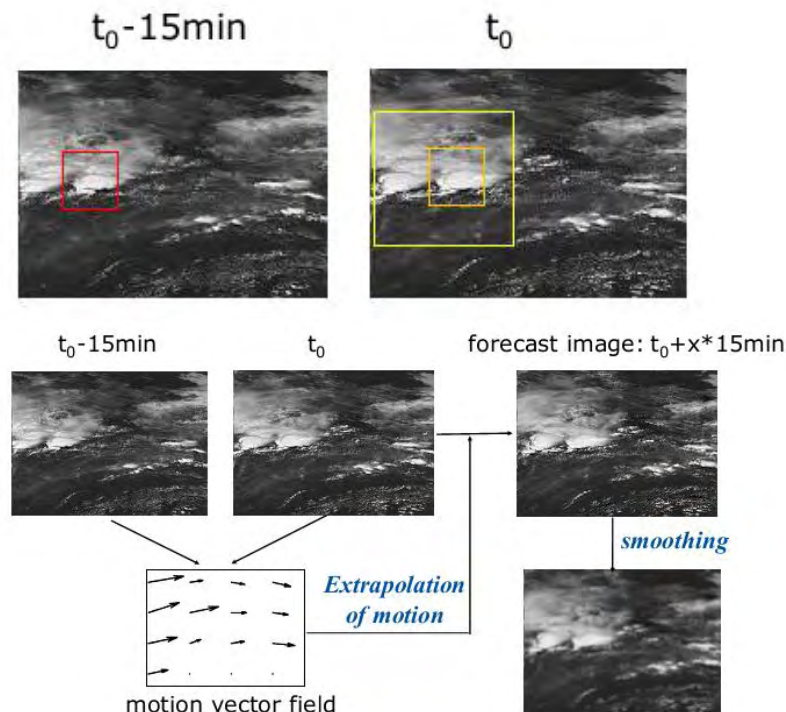


図 天空画像からの短時間予測の例

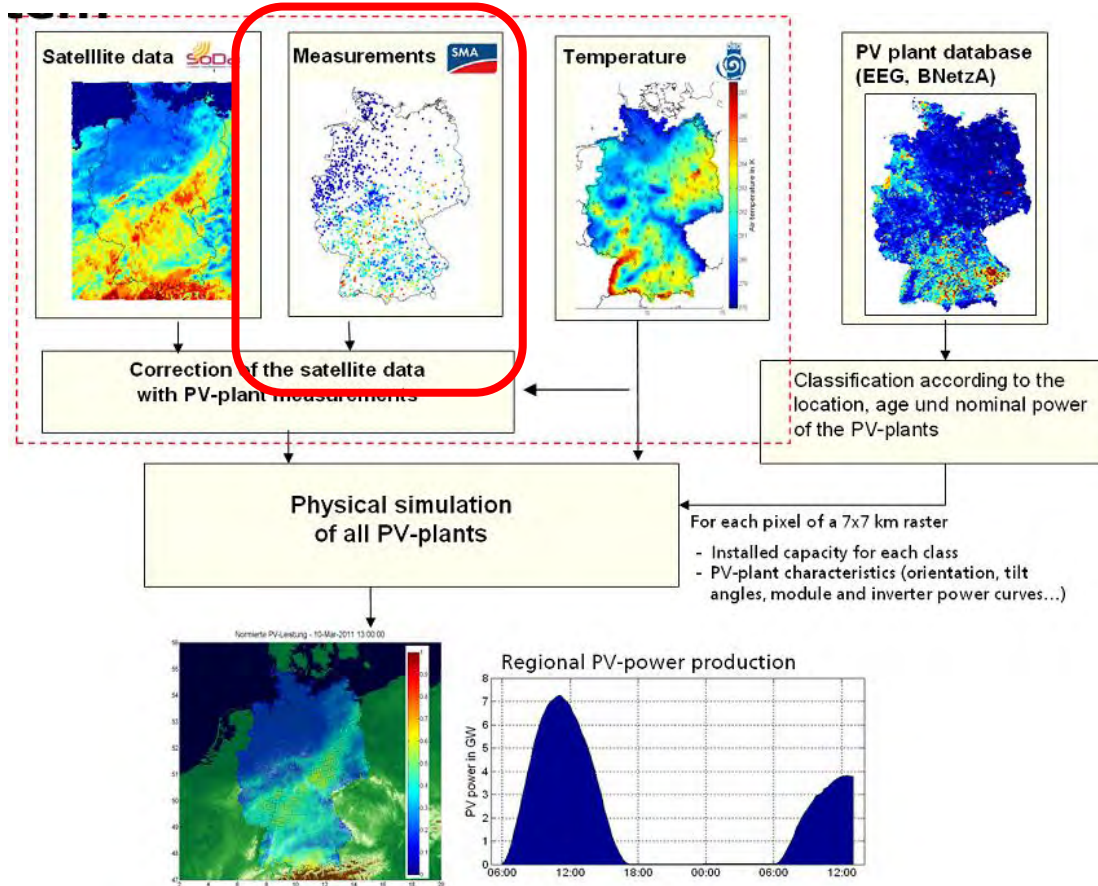


出典：UC san Diego, Intra-hour Solar Forecasting

出典：Enlike Lorenz (2012)

持続モデル（実測利用）

実測データ

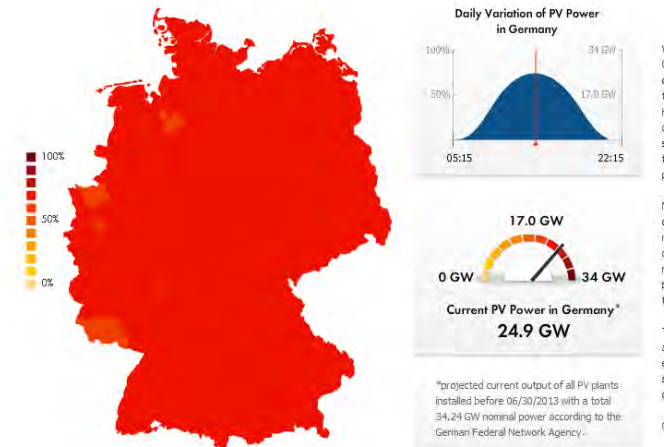


多数システムの
実測データの利用。

Nowcastingに利用。

↓
国内は、まとまった実測データが
無い。

Relative output from 07/21/2013-13:45 CET



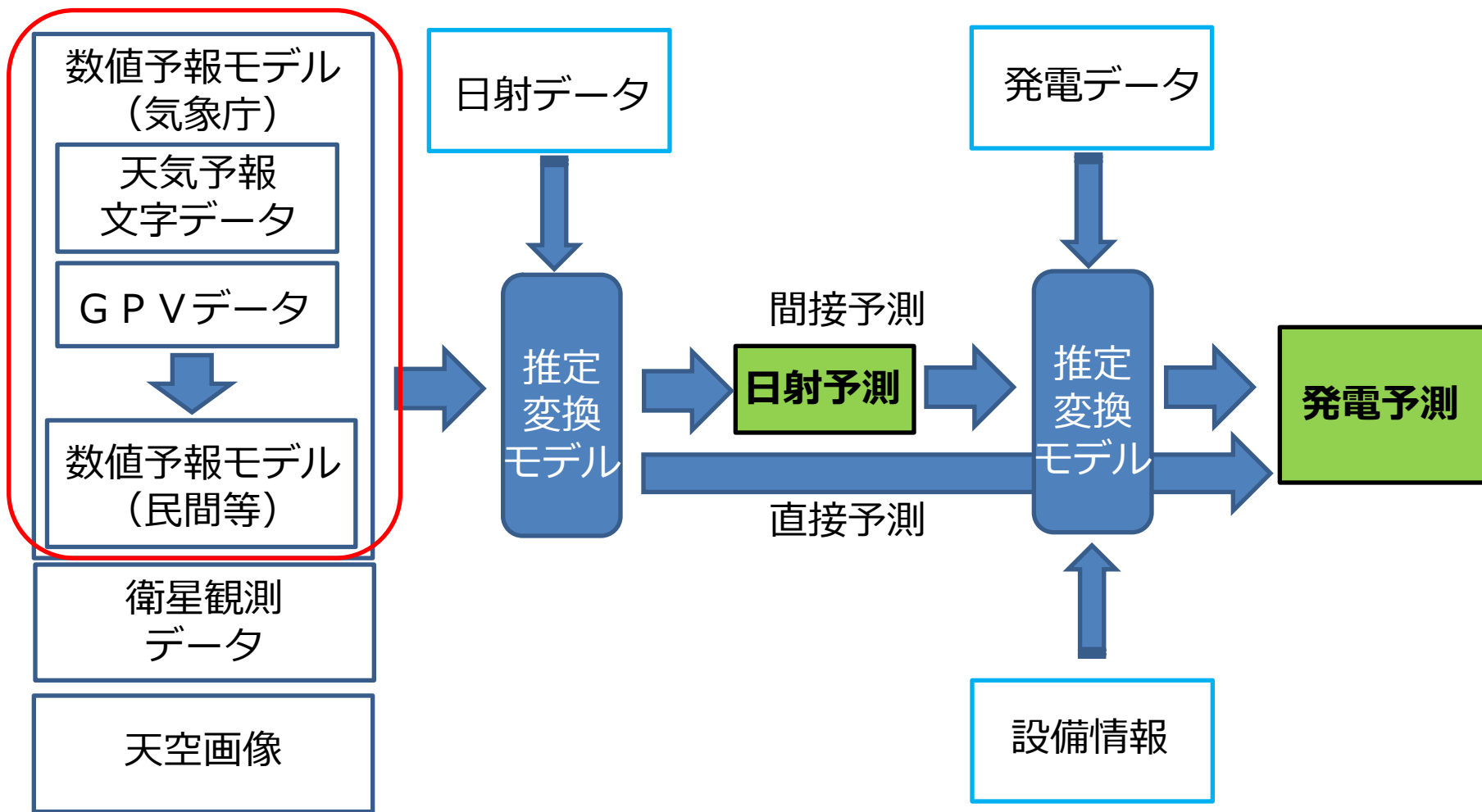
導入量 34.24GW@2013/6/30
2.3GW, 28,000plant（全体の13%） @2011

6時間～翌日予測

6時間～翌日予測

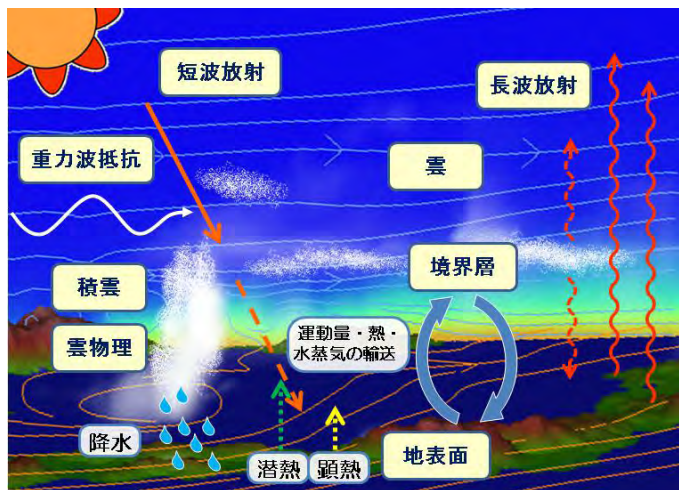
- 数値予報モデル
 - 数値予報モデル
 - GSM, MSM, LFM
 - GPVデータ
 - 天気予報文字データ

発電予測の全体像



数値予報モデル

- 気象庁モデルは、山田様から

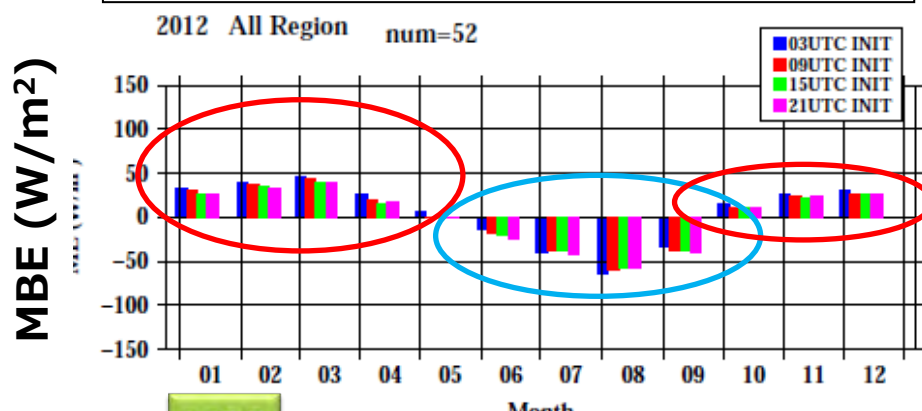


(2013年5月29日現在)

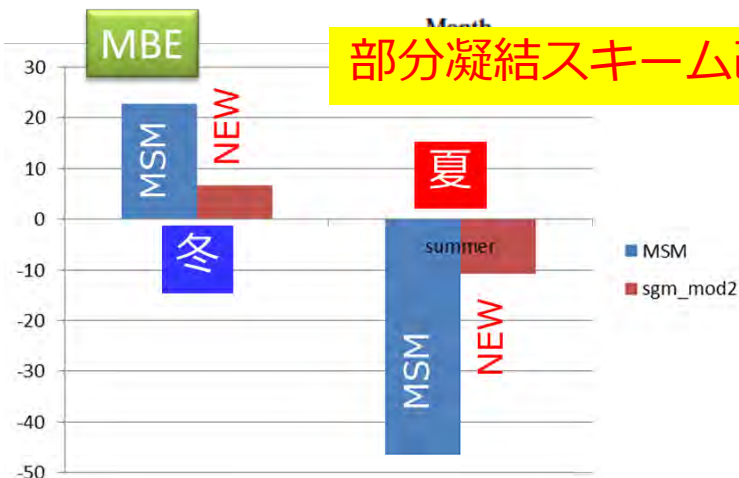
	全球	メソ	局地
目的	週間天気予報 府県天気予報 航空気象予報 台風予報	防災気象情報 航空気象予報	航空気象予報 防災気象情報
数値予報モデル	全球モデル(GSM)	メソモデル(MSM)	局地モデル(LFM)
予報領域			
水平解像度	TL959 20 km (0.1875 deg)	5 km	2 km
鉛直層数 (モデルトップ)	60 (0.1 hPa)	50 (21.8 km)	60 (20.2 km)
予報時間 (初期時刻)	84 時間 (00, 06, 18 UTC) 264 時間 (12 UTC)	39時間	9時間
初期条件	全球解析(4次元変分法)	メソ解析(4次元変分法)	局地解析(3次元変分法)

日射予測誤差傾向評価

☑ $-60\text{W/m}^2 \sim 40\text{W/m}^2$ 程度
夏季の過小傾向、冬季の過大傾向



部分凝結スキーム改良



出典：気象庁

数値予報モデル

民間の数値予報モデル

- 気象庁データ (GPV)を境界に独自モデルで再計算 (空間解像度を上げるなど)
- 米国オープンソース; WRFベースが多い
- WRF短波放射過程モデル出力は過剰傾向
- バイアス補正が必要。
- JWAは部分凝結スキーム検討 (滝谷様)

機関	モデル
気象庁	NHM
日本気象協会	Synfos
電中研	WRF
岐阜大	WRF
日本気象株式会社	fcst-SACRA(サクラ)
気象工学研究所/ 京都大学	WRF
名古屋大学/中電	CRess

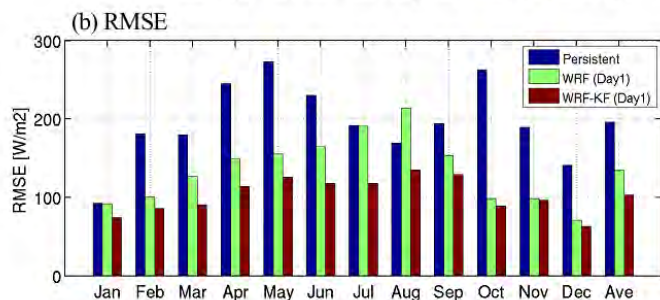
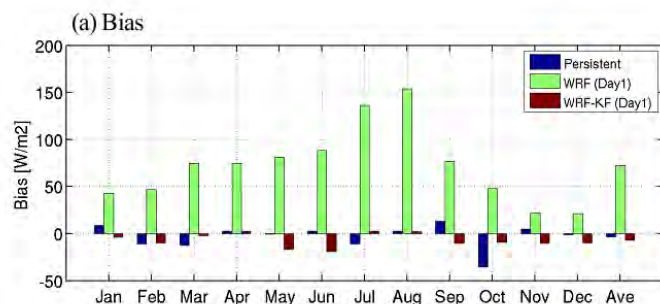
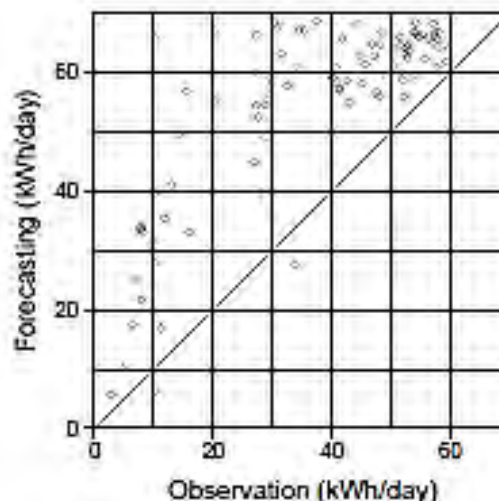


Fig. 4 Comparison of biases and RMSEs in the GHIs from the persistent model, WRF and WRF-KF.



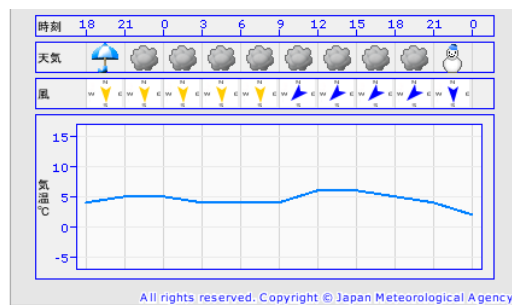
数値予報モデル以外

- 数値予報モデルのモデル出力には放射（日射）がある。
- 気象庁は一般には公開していない。（WRF利用者は自分で計算）
- 一般には、天気予報、GPVとして予測された気象パラメータは公開されている。
- 気象パラメータ（雲量等）からの変換モデル、Post-processing手法が重要

天気予報（文字）

- 時系列予報
- 晴れ、曇り、雨

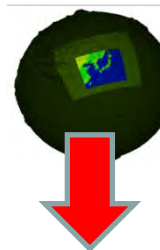
東京地方
【気温:東京】



GPV(格子点データ)

- 現在39時間（3時間ごと）
- MSM:5kmメッシュ
- 相対湿度、雲量など

計算領域



日本周辺
水平解像度5km
水平721x577格子
鉛直50層
1日8回
15時間予報
(初期時刻: 3,9,15,21時)
33時間予報 (現在39時間予報)
(初期時刻: 0,6,12,18時)

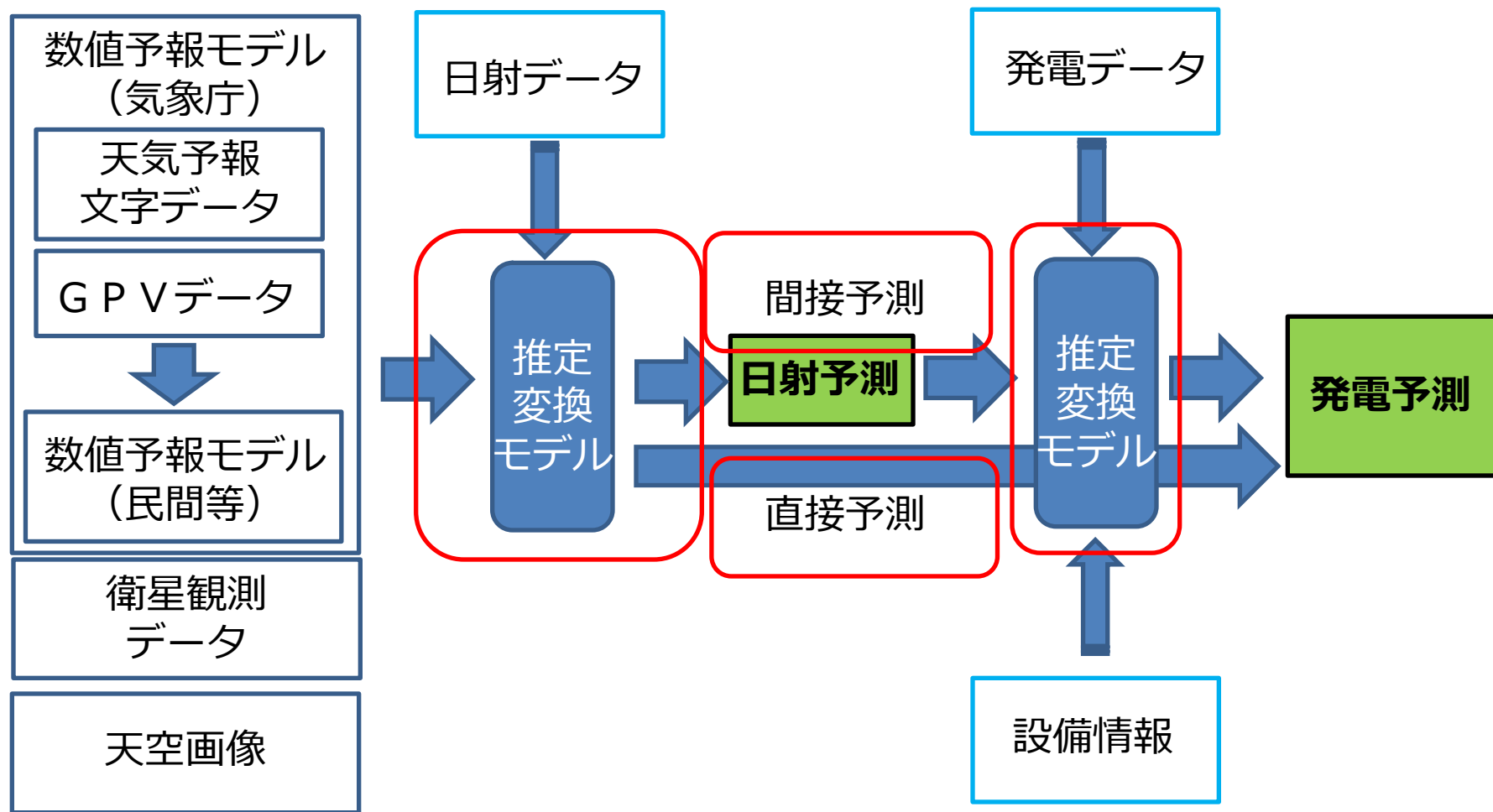
◇地上物理量

地上	海面更正気圧	地上気圧	風	気温	相対湿度	時間降水量	雲量
○	○	○	②	○	○	○	④

◇気圧面物理量

気圧面	高度	風	気温	上昇流	相対湿度
1000	○	②	○	○	○
975	○	②	○	○	○
950	○	②	○	○	○
925	○	②	○	○	○
900	○	②	○	○	○
850	○	②	○	○	○
800	○	②	○	○	○
700	○	②	○	○	○
600	○	②	○	○	○
500	○	②	○	○	○
400	○	②	○	○	○
300	○	②	○	○	○
250	○	②	○	○	○
200	○	②	○	○	○
150	○	②	○	○	○
100	○	②	○	○	○

発電予測の全体像



Post-processing/推定・変換モデル

- 統計モデル (MOS)
- 単純多重回帰
- カルマンフィルタ
- AR, MA, ARMA ARIMAモデル
- 遺伝的アルゴリズム
- ニューラルネットワーク
- Just in Time
- サポートベクターマシン SVM (SVR)

- 入力データ選択
 - 相間係数、AIC、グラフィカルモデリング

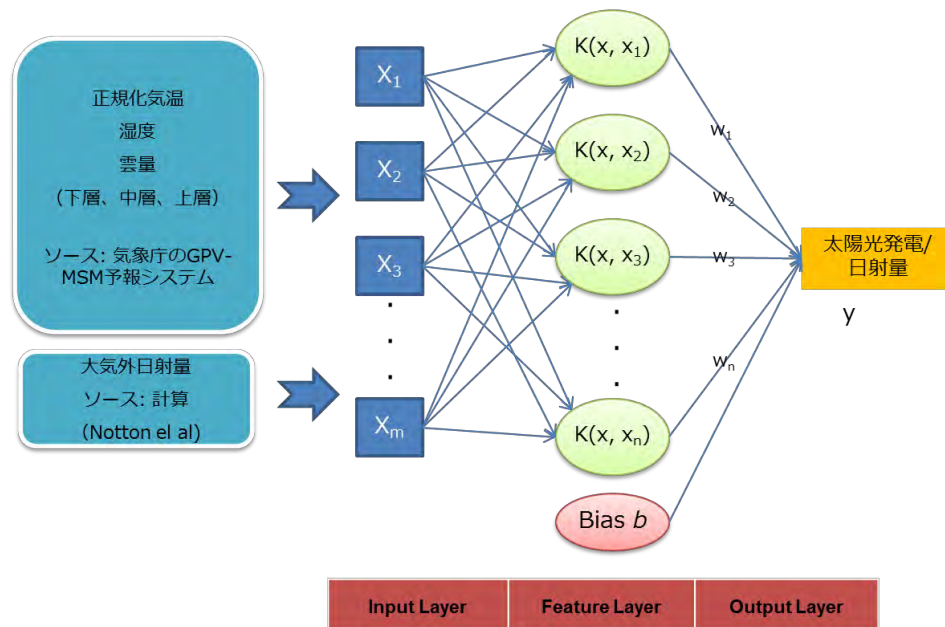
推定・変換モデル(GPV)

産総研モデル

- GPV(MSM)を入力にして, 日射, 発電に変換するモデル。
- 機械学習モデル: SVM(SVR)

サポートベクターマシンの設定

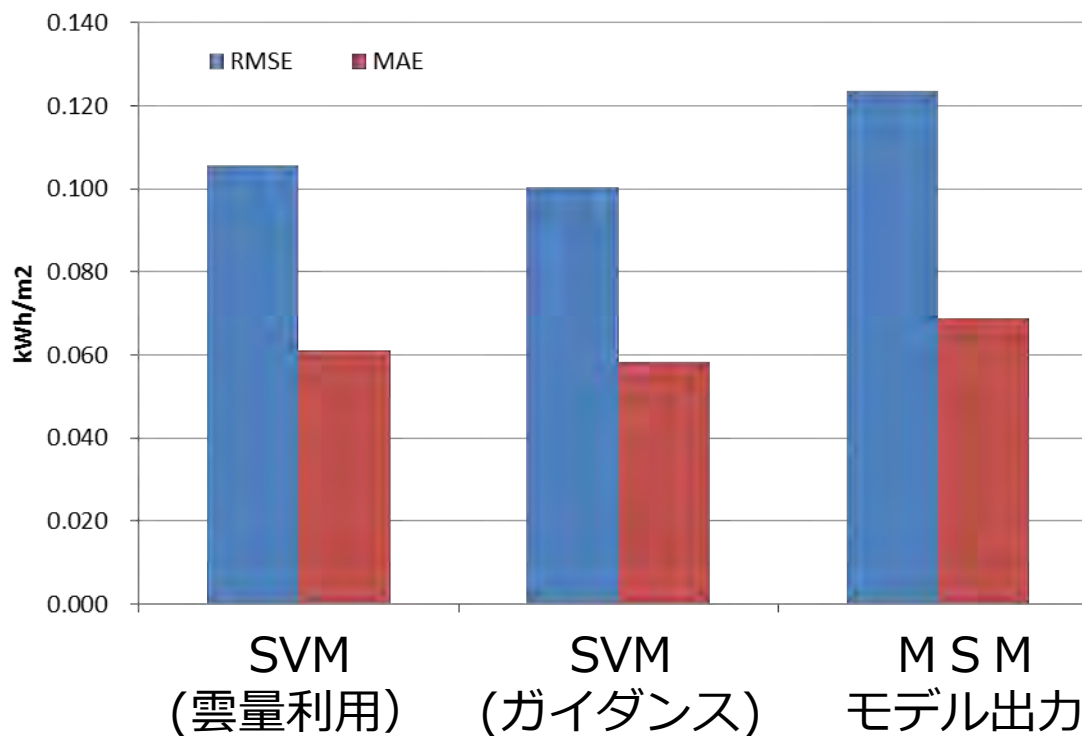
- 学習データ量
(例 15日間から365日間迄)
- 学習データの種類
(例 直前のデータ 対 類似があるデータ)
- SVMのカーネル関数の種類
(例 3つ種類)
- 手法の初期設定
(例 交差検定対単純なグリード検索等)
- 予測時間の影響
(例 2時間前迄 対 25時間前迄)
- 入力変数の効果
(例 雲量等使うかどうか)
- 1日に1SVM 対 1時間に1SVM



推定・変換モデル(数値予報モデル)

年間予測誤差(RMSE)

- SVM(雲量利用)はMSMモデル出力から17%改善
- ガイダンス予測は、SVM(雲量利用)より5%改善



出典：Fonseca (AIST)

予測精度（精度）

- 予測精度について
 - 精度；

太陽光発電の発電予測（NEDO FTデータ）

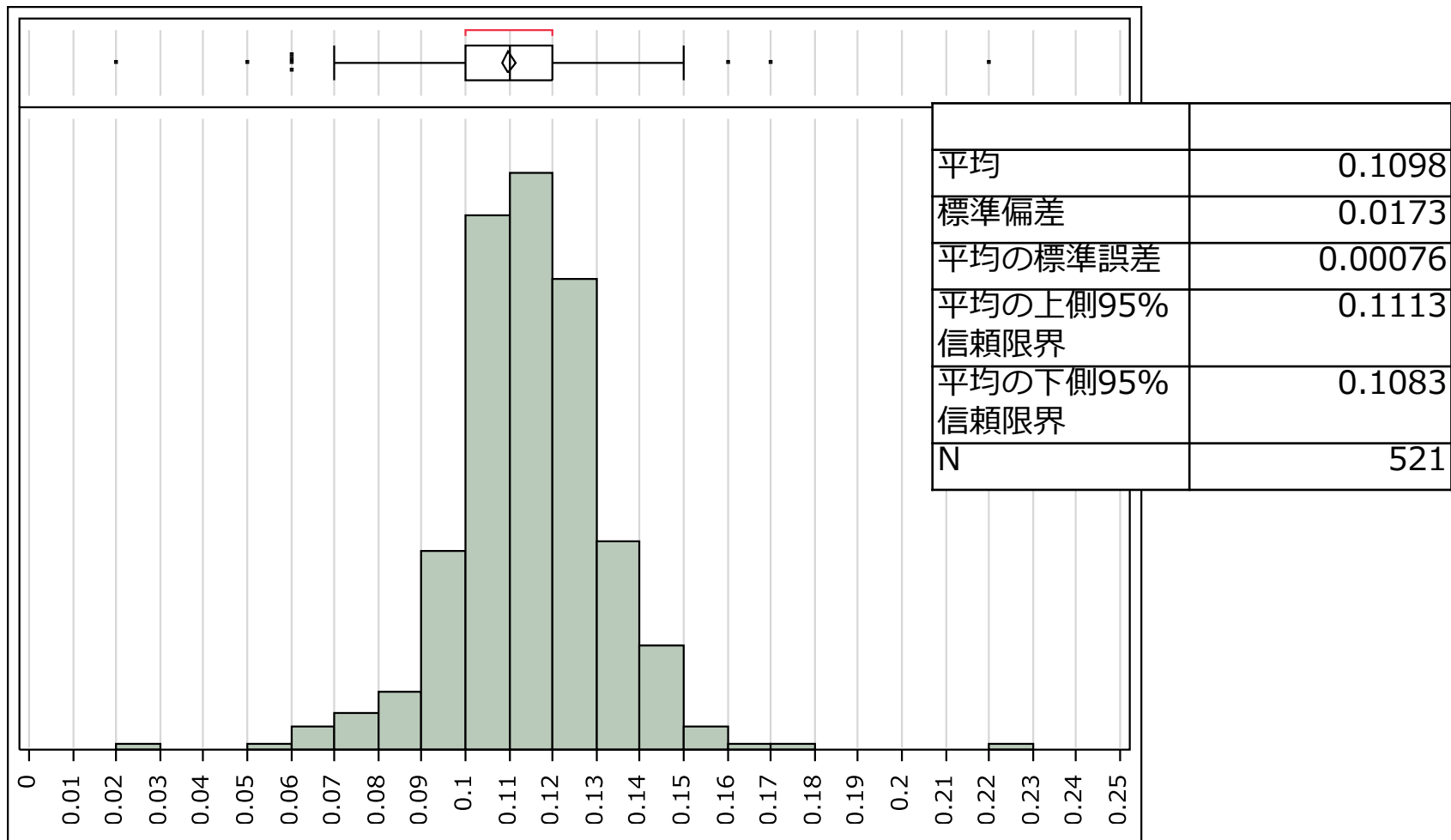
北海道から沖縄まで586箇所 全国2010年の予測結果

	北海道	東北	関東	中部	関西	四国	中国	九州	沖縄
システムの数	8	18	151	132	111	27	46	89	4
比率	1.35%	3.1%	25.75%	22.5%	19%	4.6%	7.85%	15.18%	0.67%

北海道から沖縄まで756箇所 全国2009年の予測結果

	北海道	東北	関東	中部	関西	四国	中国	九州	沖縄
システムの数	14	19	194	172	123	33	77	120	4
比率	1.85%	2.5%	25.66%	22.76%	16.27%	4.35%	10.20%	15.88%	0.53%

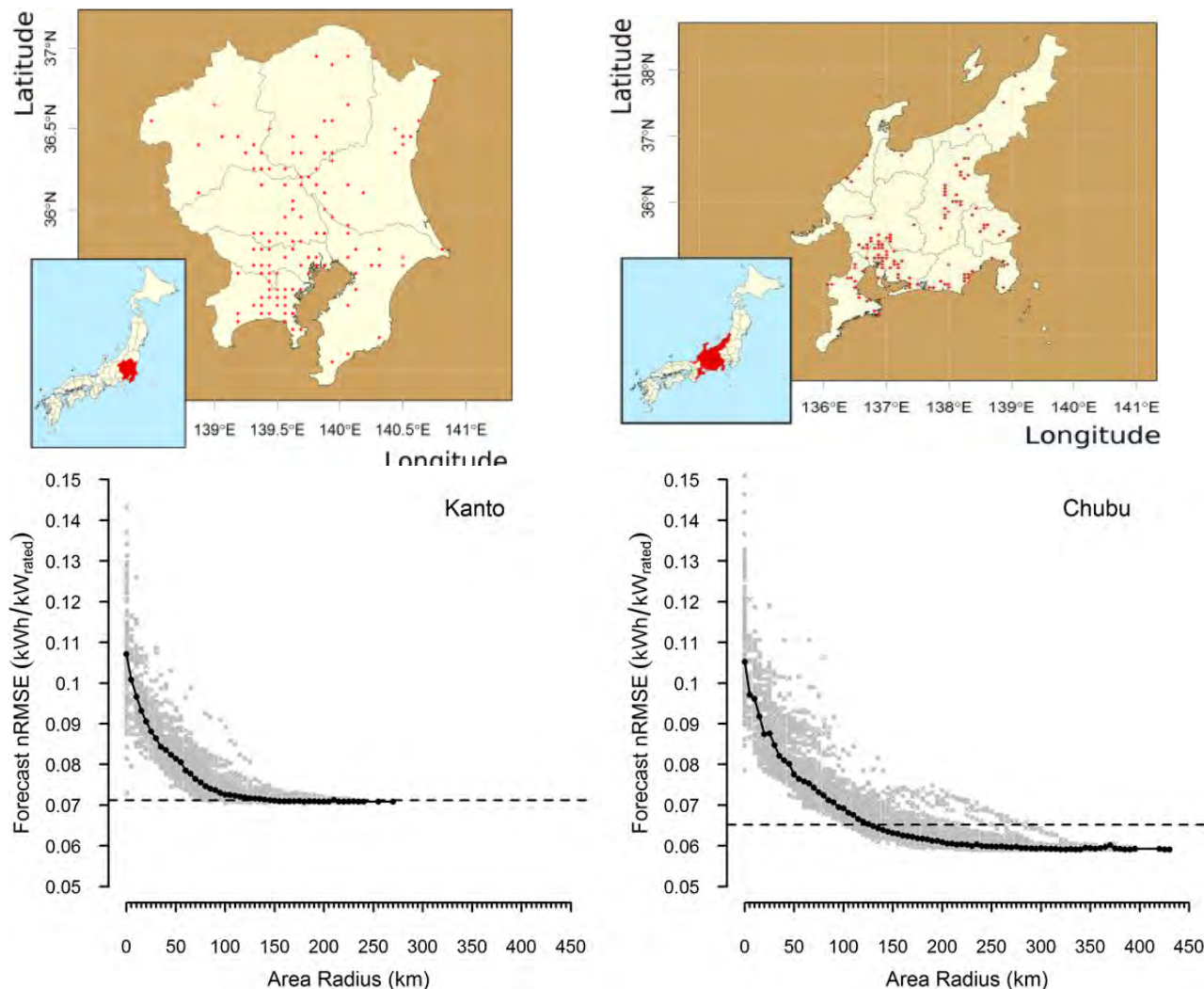
予測精度（精度）



年間 RMSE [kW/kW]（1時間値，定格容量で規格化）

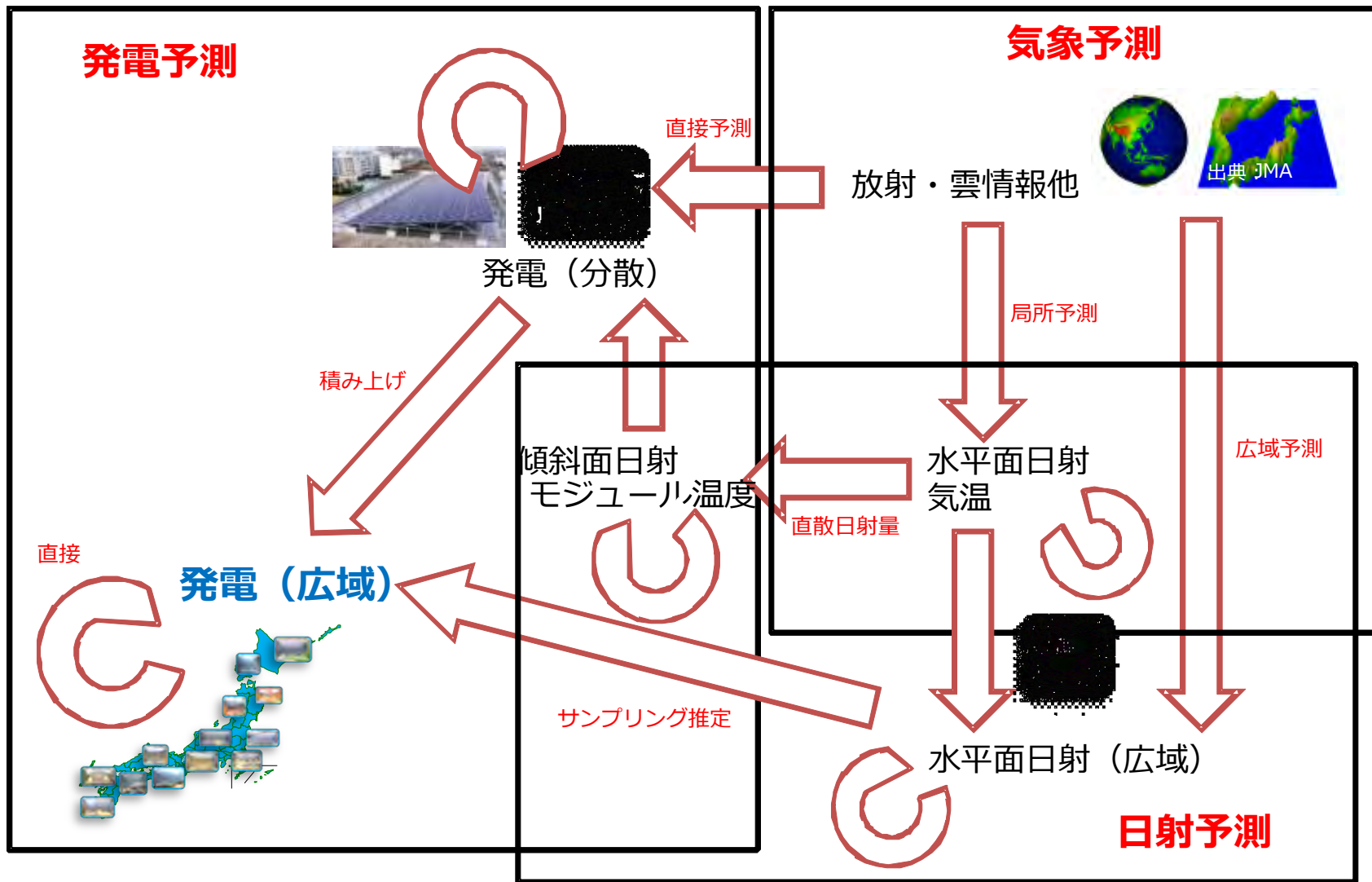
広域予測

予測精度（予測エリア規模と精度の関係）



Fonseca, Regional forecasts and smoothing effect of photovoltaic power generation in Japan: An approach with principal component analysis, Renewable Energy 68,2014

広域予測手法



広域予測手法の分類

手法	発電推定用 情報	学習用 データ	全地点利用	代表地点利用
				(Upscaling)
直接予測	N/A	地点 データ (発電)	①	③
		合計 データ (発電)	②	④
間接予測	地点情報	地点 データ (日射)	⑤	⑦
	分布情報		⑤'	⑦'
	地点情報	合計 データ (日射)	⑥	⑧
	分布情報		⑥'	⑧'

広域予測手法の分類

手法	発電推定用 情報	学習用 データ	全地点利用 理想に近い状態	代表地点利用
				(Upscaling)
直接予測	N/A	地点 データ (発電)	①	③
		合計 データ (発電)	②	④
間接予測	地点情報	地点 データ (日射)	⑤	⑦
	分布情報		⑤'	⑦'
	地点情報	合計 データ (日射)	⑥	⑧
	分布情報		⑥'	⑧'

いくつかのシステムが
計測出来てる状態

出力把握は出来る状態

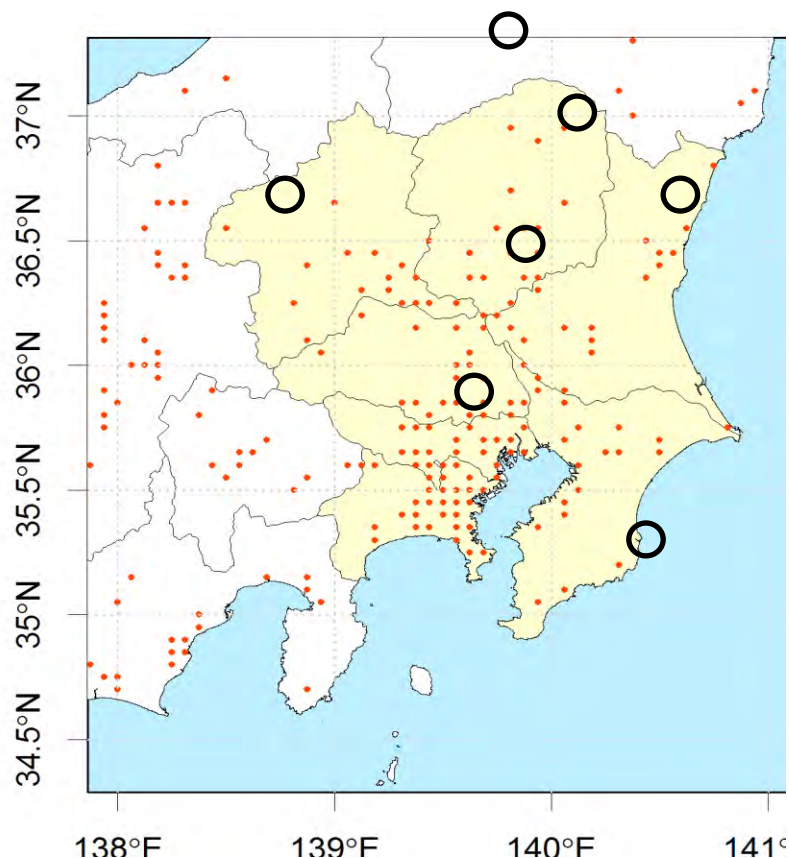
現状のインフラに近い状態

広域予測手法の分類

いくつかのシステムが計測出来てる状態

手法	発電推定用 情報	学習用 データ	全地点利用	代表地点利用
				(Upscaling)
直接予測	N/A	地点 データ (発電)	①	③
		合計 データ (発電)	②	④
間接予測	地点情報	地点 データ (日射)	⑤	⑦
	分布情報		⑤'	⑦'
	地点情報	合計 データ (日射)	⑥	⑧
	分布情報		⑥'	⑧'

サンプリングによる広域予測



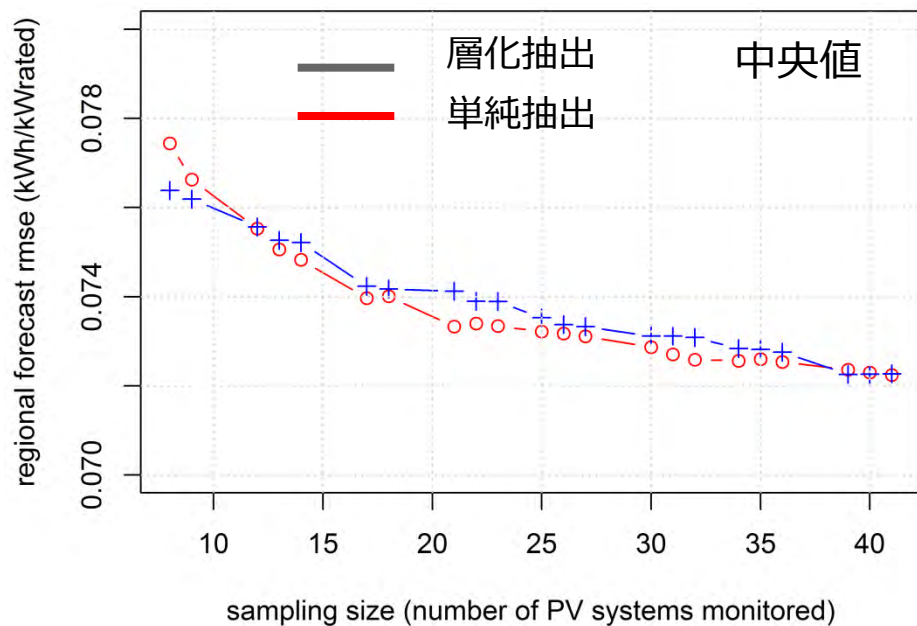
限られたシステムの発電データから
広域の合計発電を推定する

代表的なシステムの選択方法：

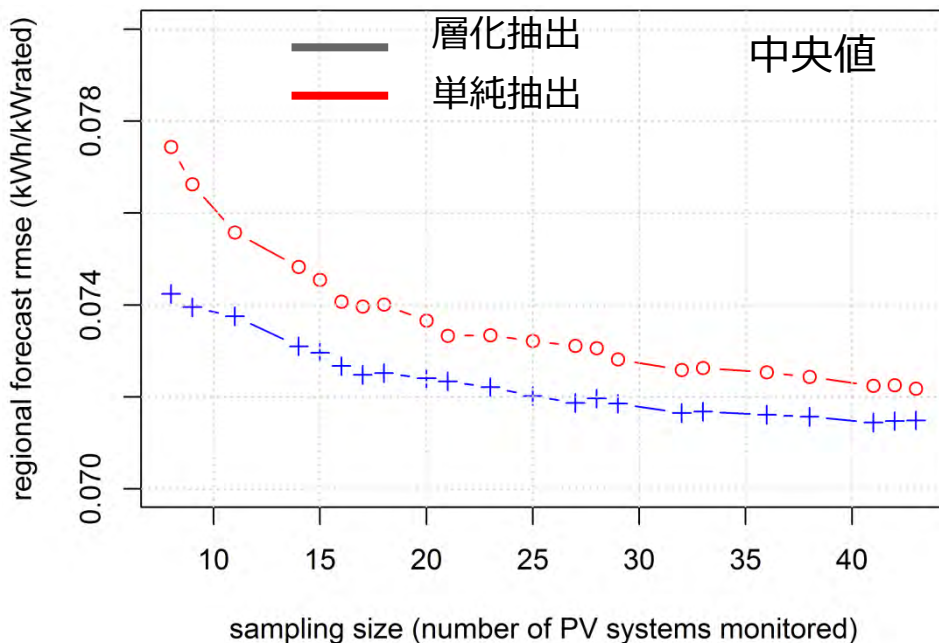
- ① **単純抽出**：全要素を平等に扱い、分割はしない方法。
- ② **層化抽出**：母集団が互いに重ならない複数のカテゴリに分ける。標本サイズは層の標準偏差、あるいは母集団において層の占める割合に比例したものにする。各層は、平均が互いに十分異なり、分散が全体の分散よりは小さいように選ぶ。

サンプリングによる広域予測

容量で分類



地域で分類 (容量補正)



地域での分類に容量補正を加えると改善した。
少数システムでの広域予測が可能。

全体：約140システム

広域予測（海外事例）

- Up scalingは、情報がわかるシステムのデータを利用
- 容量で単純に倍数
- エリアは1°×1°単位で処理。
- 方位やモジュールタイプ情報は既知（代表サイト）

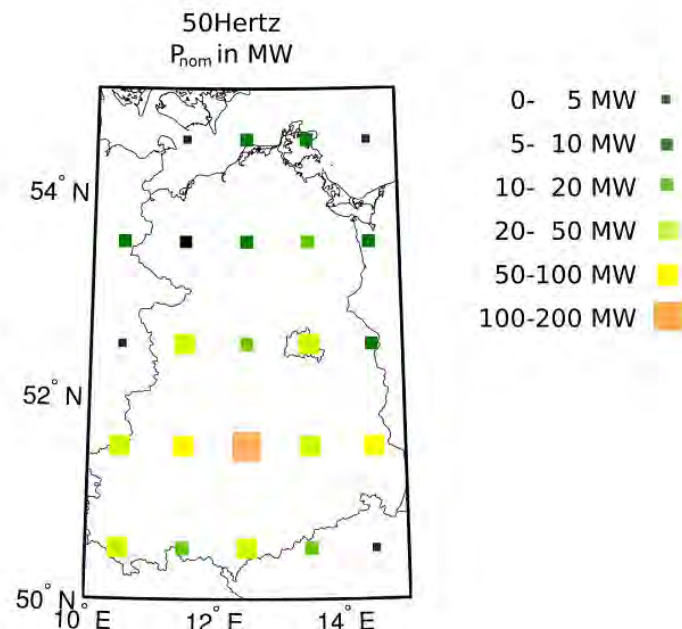
representative subsets:

$$P_{all,pred} = \frac{P_{all,nom}}{P_{rep,nom}} P_{rep,pred}$$

- ▶ spatial distribution of installed power from RES-data

➡ **detailed up-scaling:
resolution: 1°x1°**

- ▶ orientation and module types from monitoring data base of meteocontrol GmbH (> 14000 PV systems, 1.5GW_{peak})



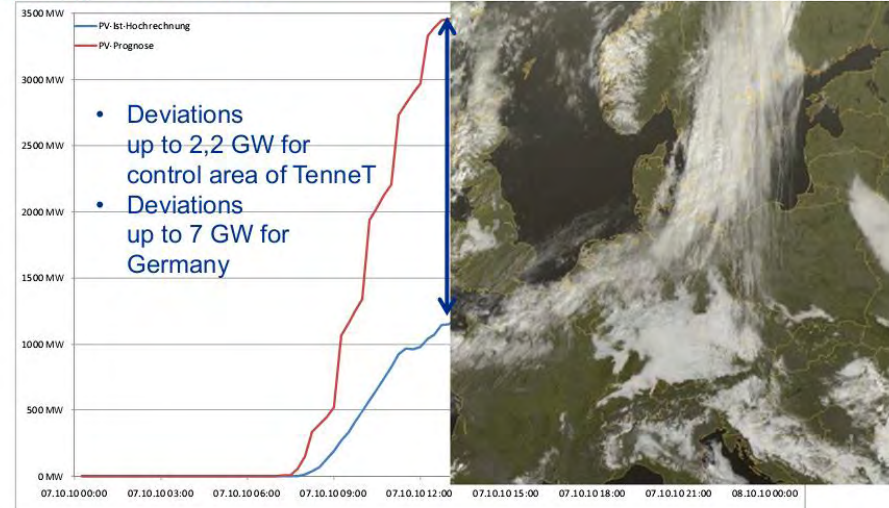
広域予測（海外事例）

- ドイツのTSOは運用に予測データを利用
- TenneTは予測会社(Meteocontrol) から予測データの購入



Photovoltaic forecast - fog

Installed power: 7.100 MW

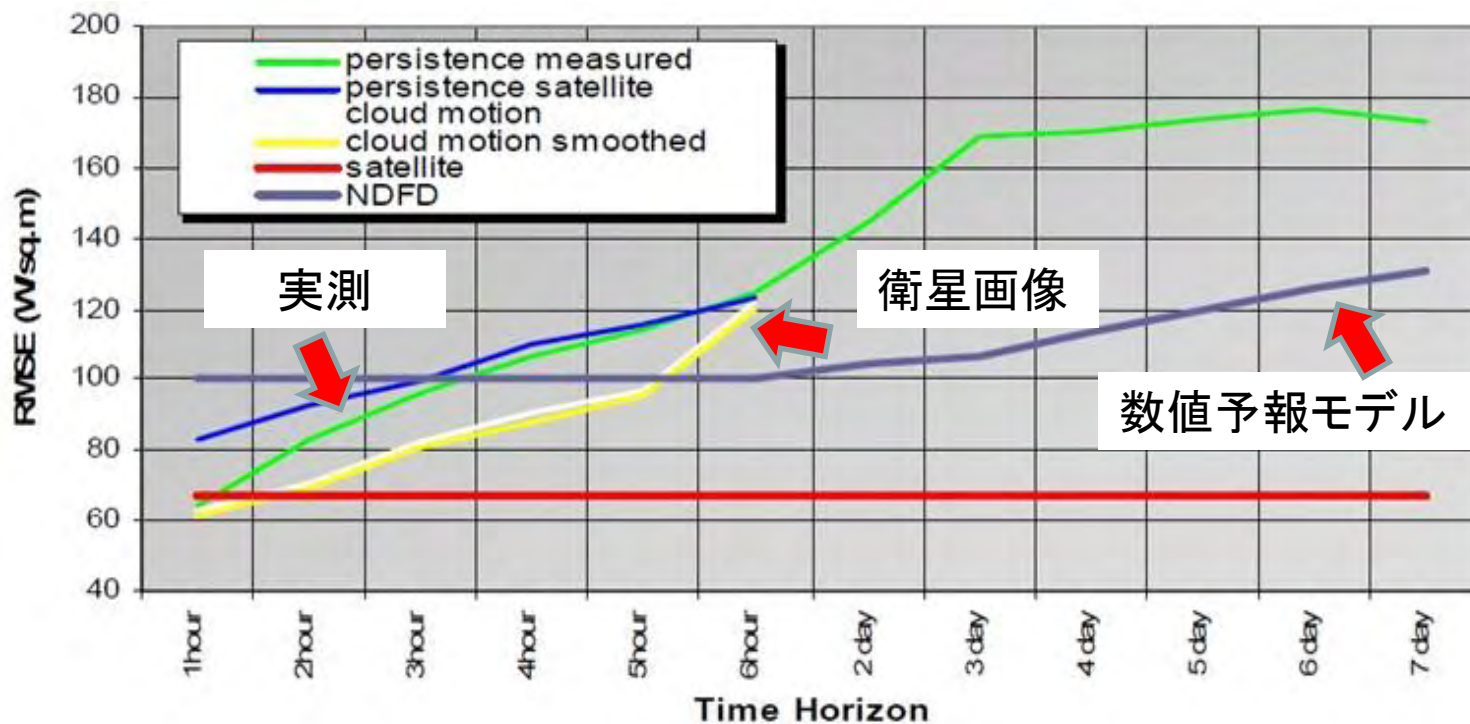


PV	2009	2010	2011	2012
Day-Ahead	6,69 %	4,82 %	4,90 %	4,21 %
short term	-	-	3,50 %	3,11 %

- TSOのエリアで2.2GWの予測誤差もあった。（ドイツ全体で7GW）

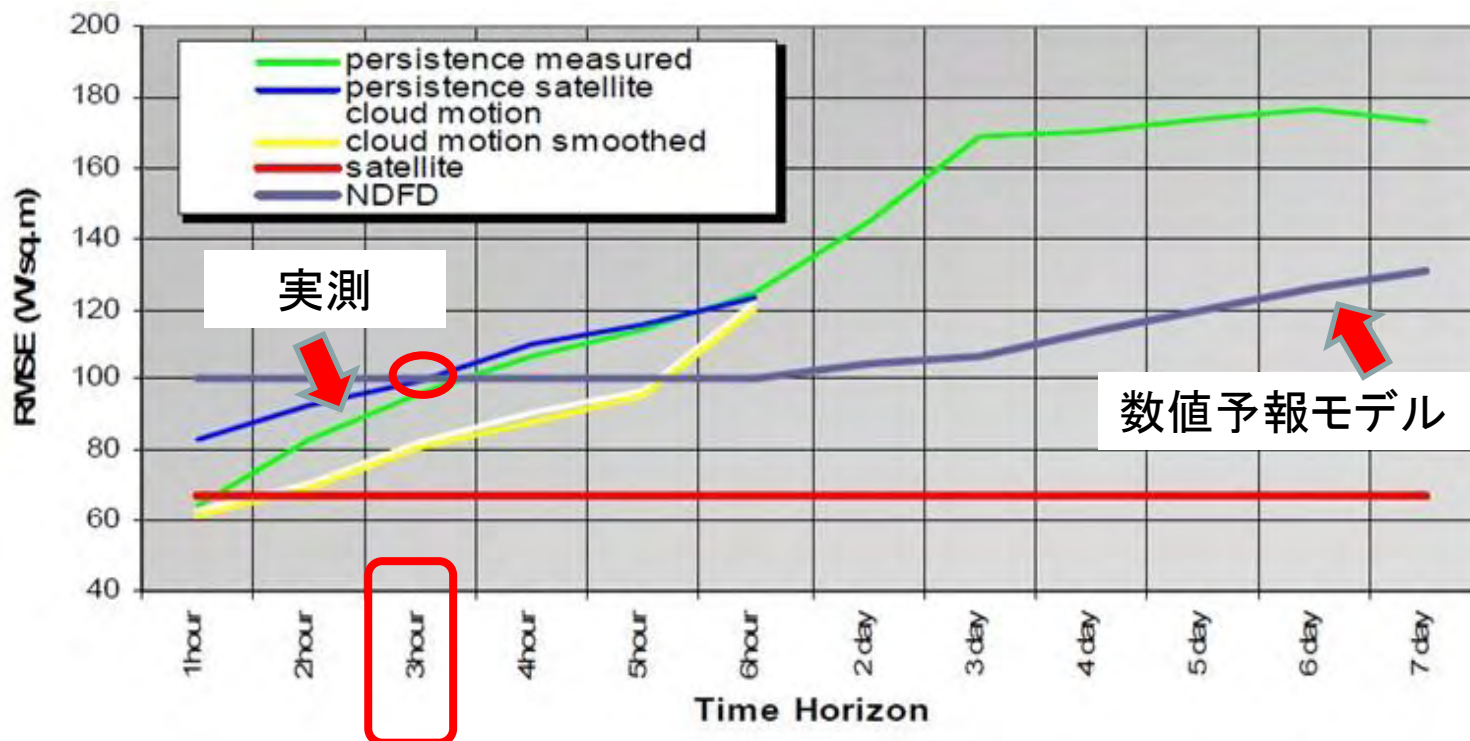
予測の比較

発電予測技術の比較



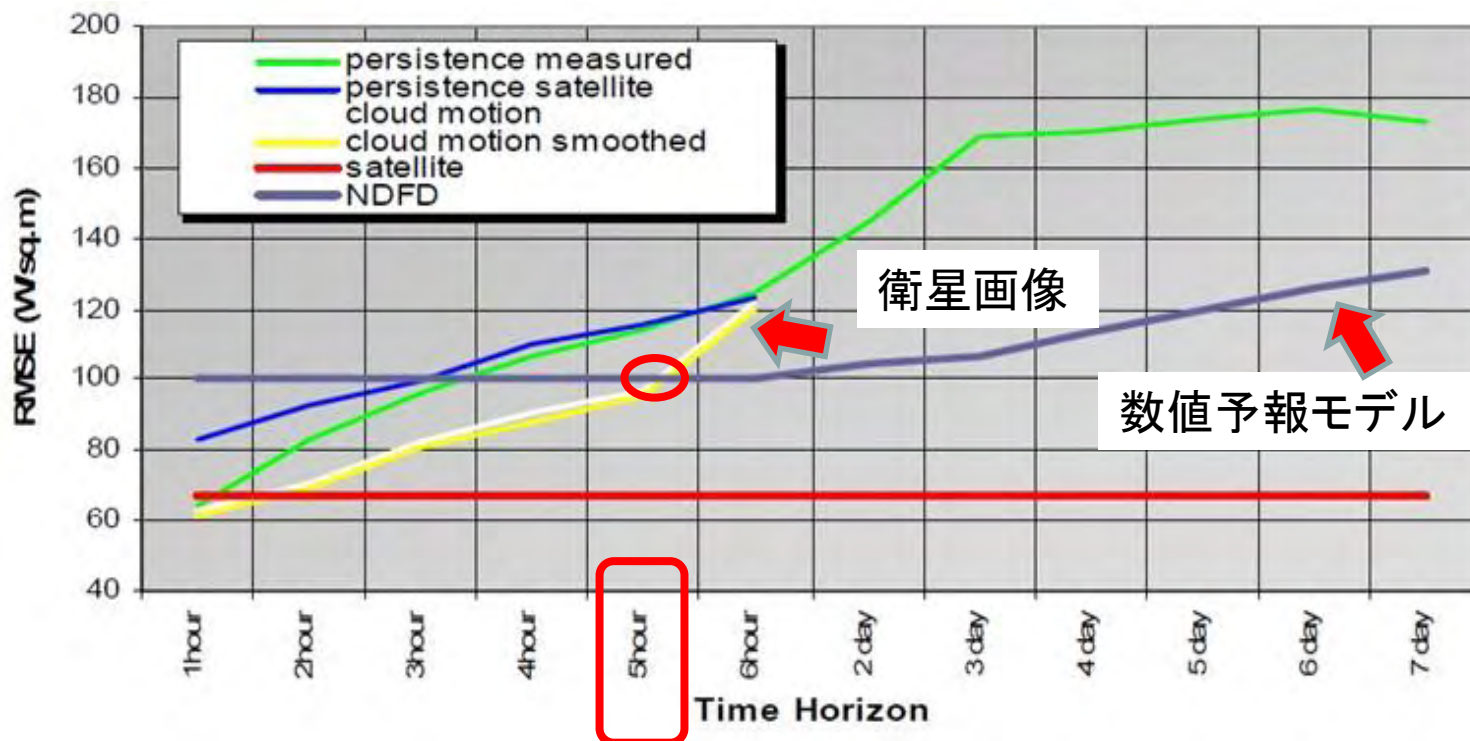
出典 : Perez R, S Kivalov, J Schlemmer, K Hemker Jr., D Renne, TE Hoff, "Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US", Solar Energy, in press, 2010a.

発電予測技術の比較



出典 : Perez R, S Kivalov, J Schlemmer, K Hemker Jr., D Renne, TE Hoff, "Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US", Solar Energy, in press, 2010a.

発電予測技術の比較



出典 : Perez R, S Kivalov, J Schlemmer, K Hemker Jr., D Renne, TE Hoff, "Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US", Solar Energy, in press, 2010a.

予測手法の分類（電力系統）

週間予測
需給計画

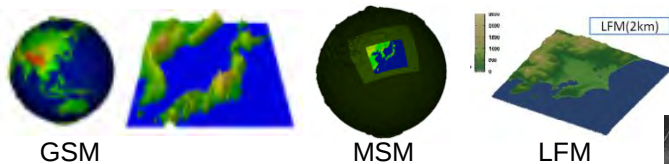
数日先予測
(翌日)
需給計画

数時間予測
(当日)
需給運用

短時間予測
需給運用

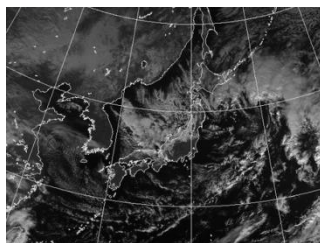
出力把握
(Nowcasting)
需給運用
(事故時対応)

数値予報モデル
(NWP: Numerical Weather prediction)



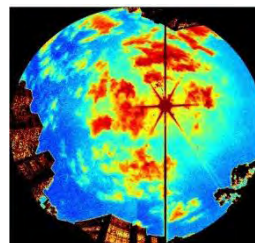
出典：JMA

衛星画像等



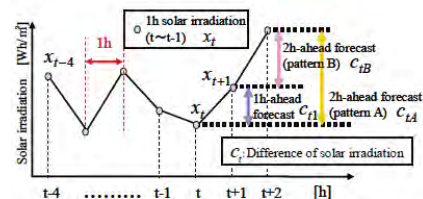
出典：JMA

天空画像



出典：Bryan

実測データ(持続モデル)



出典：waseda

予測区間・信頼区間について

信頼区間

- 予測区間,信頼区間の付与
- 大外れの予測

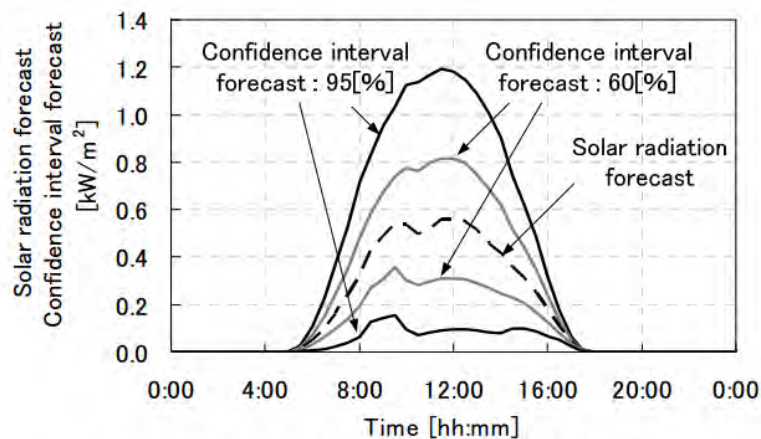


図1 日射量予測および信頼区間予測の例
Fig. 1. Example of solar radiation forecast and confidence interval forecast.

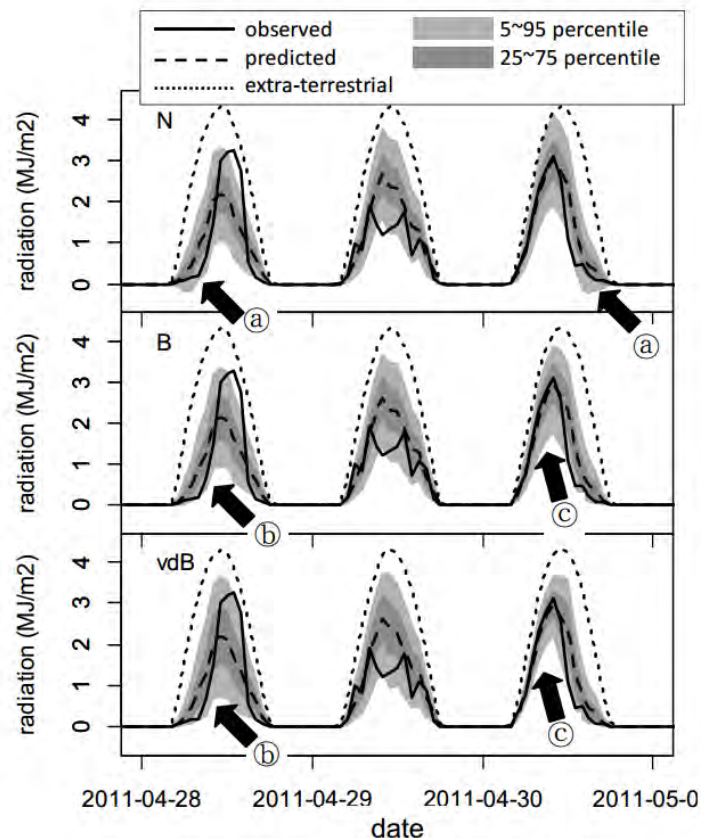


図1 誤差範囲を含む予測日射量と実測値
Fig.1. Observed vs. predicted radiation by model N, B, and vdB with predicted dispersion

国内外の動き

国内の動き

NEDO

- 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発
- 気象庁の協力もあり、**異分野融合**も活発に。

H22~H26



国内の動き

METI

- 太陽光発電出力予測技術開発実証事業
- METI PJ詳細は、中部電力杉本様から。

H23~H25

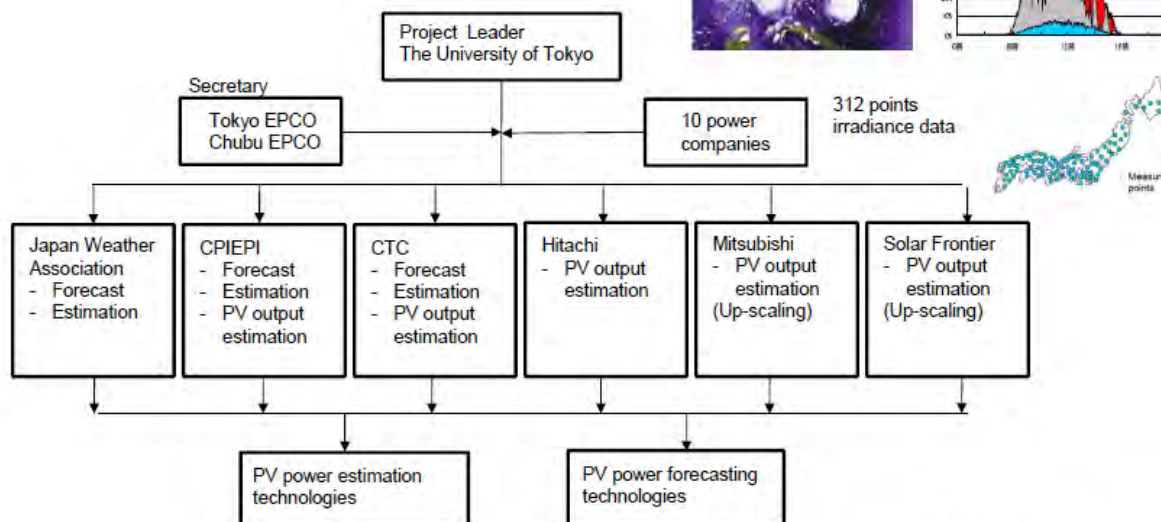
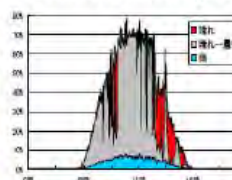
METI PV forecast demonstration project (2011-2013)

The project, cooperated by all Japanese power utilities, aims to establish early PV forecast technology involvement into all utilities power system operation.

Forecast technologies



Estimation technologies



CRIEPI: Central Research Institute of Electric Power industry
CTC: ITOCHU Techno-solutions Corporation

国内の動き

JST CREST

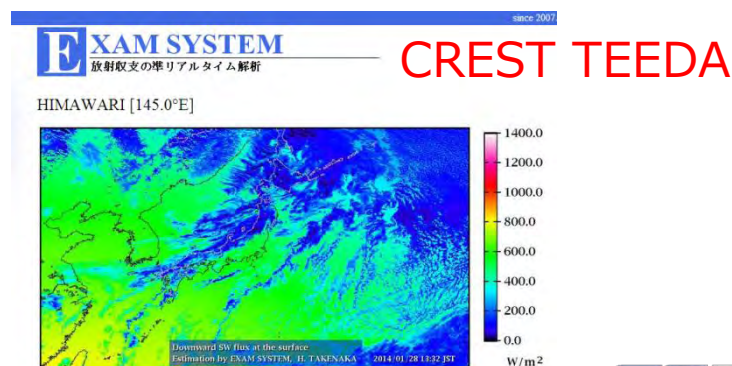
分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開



研究総括

藤田 政之（東京工業大学）

- 再生可能エネルギーの調和的活用に貢献する地球科学型支援システムの構築
中島 孝（東海大学）
- 洋上風力発電に必要な洋上風況把握と予測方法の開発
上田 博（名古屋大学）
- 太陽光発電の予測不確実性を許容する超大規模電力最適配分制御
井村 順一（東京工業大学）



海外の動き

米国

- Solar Forecasting project in SunShot Initiative
- IBM, UCAR, NCAR

Search Help ▾

PROJECTS TECHNICAL TOPICS INFORMATION RESOURCES NEWS EVENTS

SunShot Initiative High Penetration Solar Portal ▸ Projects

Printable Version Share

Solar Forecasting Projects

DOE is funding two solar projects that are helping utilities, grid operators, solar power plant owners, and other stakeholders better forecast when, where, and how much solar power will be produced at the desired locations in the United States. More accurate [solar forecasting](#) will allow power system operators to integrate more solar energy into the electricity grid, and ensure the economic and reliable delivery of renewable energy to American families and businesses.

Approach

These projects aim to improve accuracy of solar forecasting that could increase penetration of solar power by enabling more certainty in power prediction from solar power plants. Accurate solar energy forecasting from minutes up to days ahead and spanning a spatial domain from a few up to thousands of miles represents a grand challenge.

Innovation

These investments will enable collaborative teams from industry, universities, and national laboratories to work together to produce cutting-edge research results that significantly improve the accuracy of solar forecasts, and deploy them in real-life situations.

Awards

On December 7, 2012, DOE announced \$8 million to fund the following projects.

IBM Thomas J. Watson Research Center: Watt-Sun: A Multi-Scale, Multi-Model, Machine-Learning Solar Forecasting Technology ▸

To improve the accuracy of solar forecasting, the IBM Thomas J. Watson Research Center was awarded funding from the [DOE Solar Program](#) on December 7, 2012.

TOPICS: [SOLAR RESOURCE](#) [SOLAR RESOURCE FORECASTING](#)

University Corporation for Public Research: A Public-Private-Academic Partnership to Advance Solar Power Forecasting ▸

To improve the accuracy of solar forecasting, the University Corporation for Public Research was awarded funding from the [DOE Solar Program](#) on December 7, 2012.

TOPICS: [SOLAR RESOURCE](#) [SOLAR RESOURCE FORECASTING](#)

Solar Energy to get Boost from Cutting-edge Forecasts

February 22, 2013

BOULDER — Applying its atmospheric expertise to solar energy, the National Center for Atmospheric Research (NCAR) is spearheading a three-year, nationwide project to create unprecedented, 36-hour forecasts of incoming energy from the Sun for solar energy power plants.



A new research initiative is designed to lead to unprecedented 36-hour forecasts of incoming energy from the Sun, thereby helping utilities obtain energy more efficiently from solar energy power plants. [+ ENLARGE](#)

The research team is designing a prototype system to forecast sunlight and resulting power every 15 minutes over specific solar facilities, thereby enabling utilities to continuously anticipate the

ドイツ :

- weather and power prediction models for grid integration for weather dependent energy sources (EWeLiNE)«
- フランフォアを中心にDWD（ドイツの気象局）TSO, DSO等30機関

Presseinformation

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

Bessere Prognosen der Stromeinspeisung von Wind- und Sonnenenergie

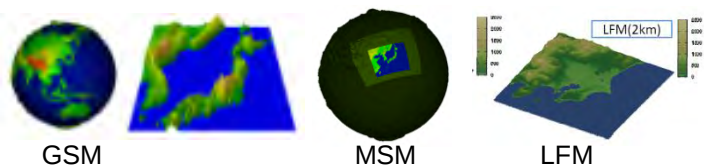
Kassel 23.1.2013

2013/1/23 press

まとめ

今後の展開（将来のモデルイメージ）

数値予報モデル

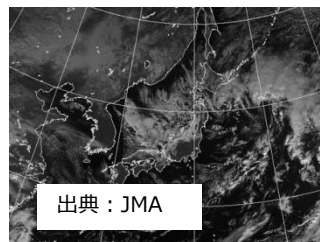


出典：JMA

全球統合アンサンブル

メソアンサンブル

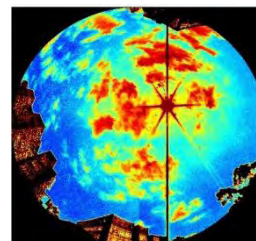
衛星観測



出典：JMA

次期静止衛星（ひまわり8,9）

天空画像



出典：Bryan

実測データ(PV)



インテグレーション

- ビックデータ処理
- データサイエンス
- データインフラ
- データマイニング
- 機械学習

実測データ(日射)

- ・ 全国321箇所に日射計等を設置
（このうち、116箇所では太陽光発電出力データも収集）



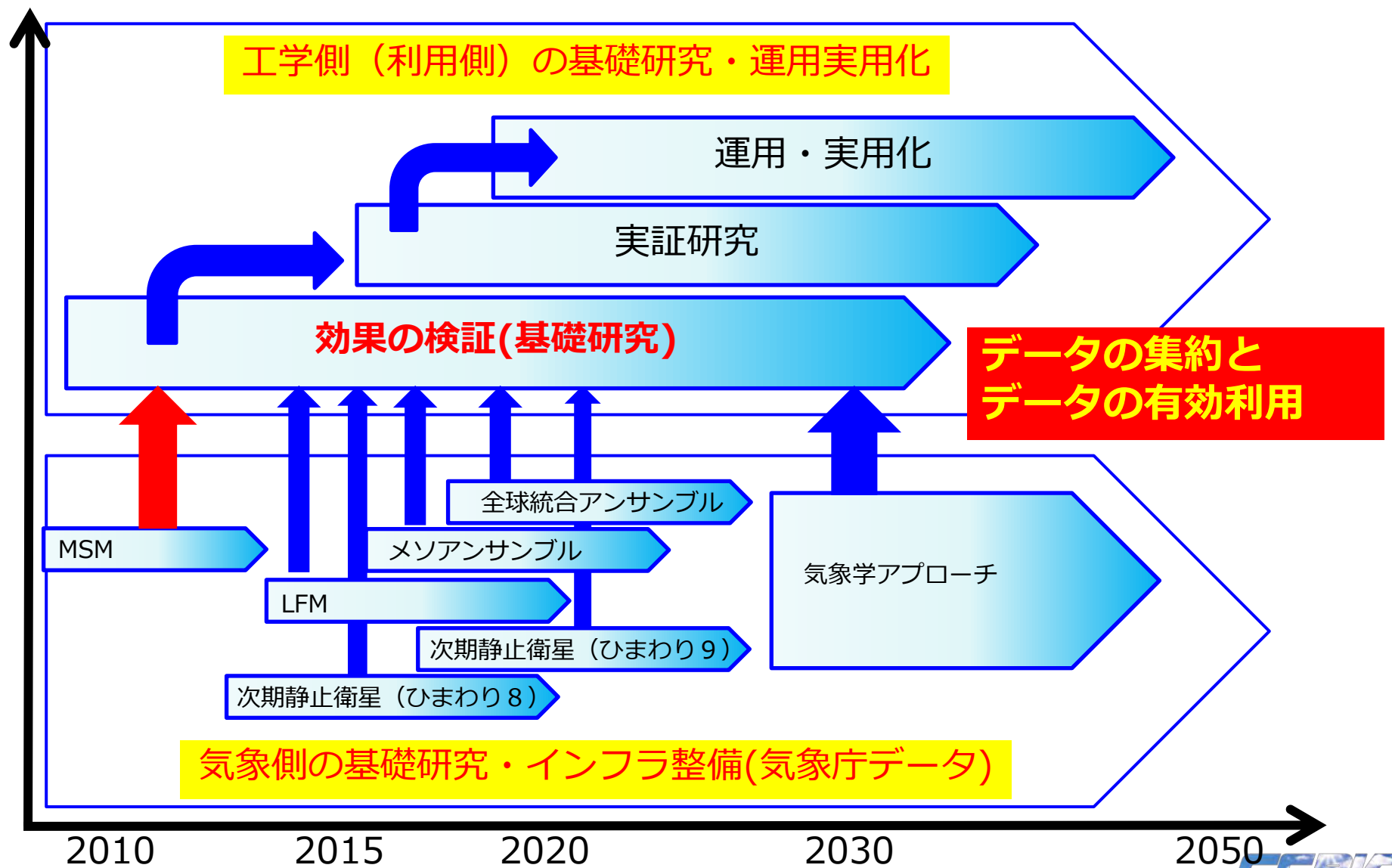
出典：電事連

数日

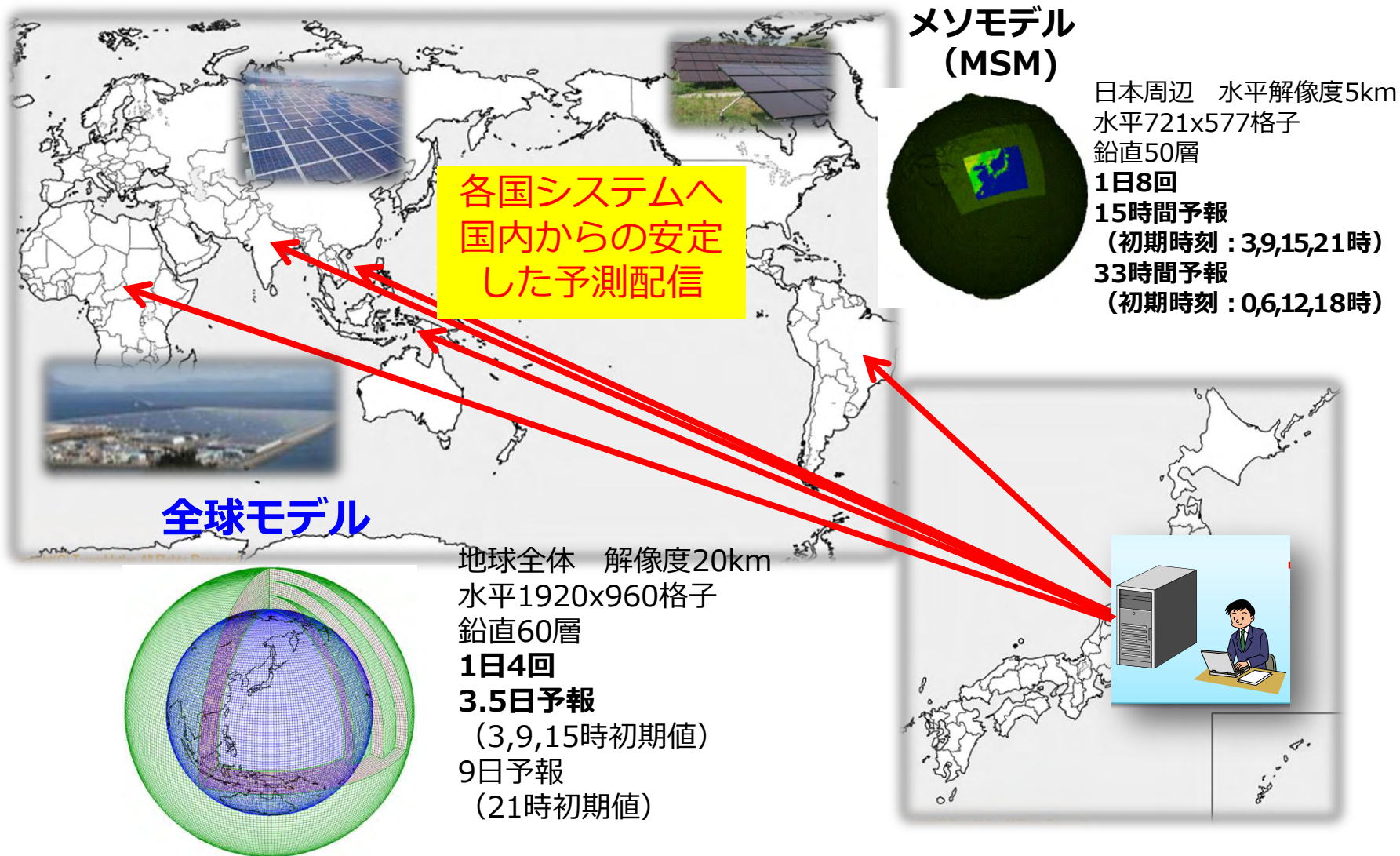
多様な発電予測

数分

今後の展開（技術開発の促進）



今後の展開（海外展開）



まとめ

- 短時間から翌日まで幅広く研究が進んでいる。
- 時間スケールにおいてある程度手法のすみわけ，現状のベンチマークは進んできた。
- 今後は、個々の技術改良に加えて、各種データのインテグレーションにより予測精度向上，予測区間推定が重要な課題となる。
- 特に気象庁インフラが有する膨大なデータは大きな可能性を有している
 - － どんどん新しいプロダクトが出てくる。
 - － LFM, メソアンサンブル, 次期衛星など
- ブレークスルーには，データの有効性の基礎研究として，産学官連携，分野間連携が最重要である（実証研究、運用実用化の前段階）。
- データインフラ整備や有効活用スキーム構築が重要となる。

参考

- 太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術の最新動向, 太陽エネルギー 2013 (平成 25 年) Vol.39 No.6 (通巻 218 号)
<http://www.jses-solar.jp/ecsv/ezcatfiles/jses-solar/download/attach/2/218mokuji2.pdf>
- Photovoltaics and Solar Forecasting State of Art Report T14 2013、IEA PVPS TASK 14
http://www.iea-pvps.org/index.php?id=1&eID=dam_frontend_push&docID=1733

謝辞

本研究は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発/発電量予測技術の研究開発」および、JST CREST「太陽光発電の予測不確実性を許容する超大規模電力最適配分制御」の一環で行ったものである。関係者各位に感謝する。