



AITC成果発表会 2016.9.16

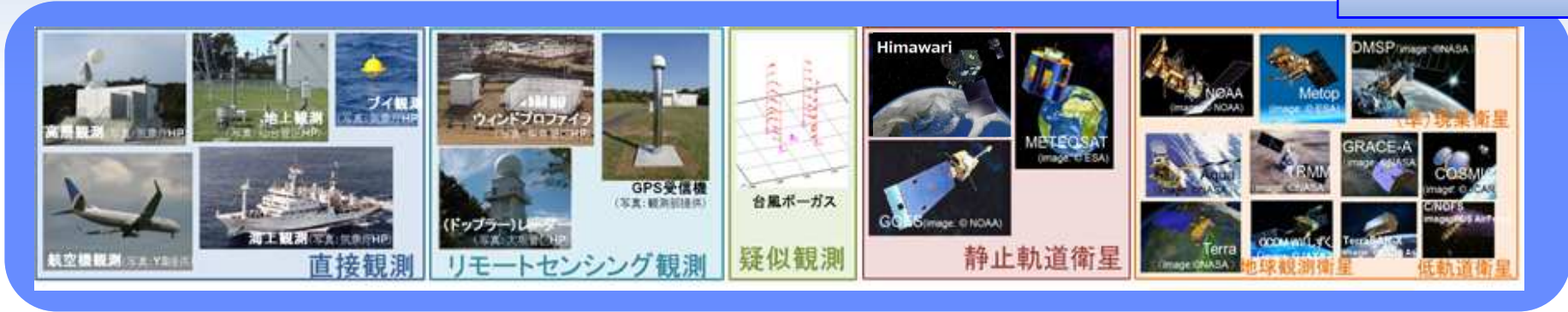
# 気象庁における機械学習の利用

気象庁予報部数値予報課  
アプリケーション班  
高田伸一

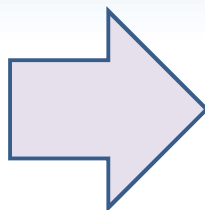
# 天気予報・防災情報への機械学習 の利用（概要）

# 天気予報・防災気象情報の流れ

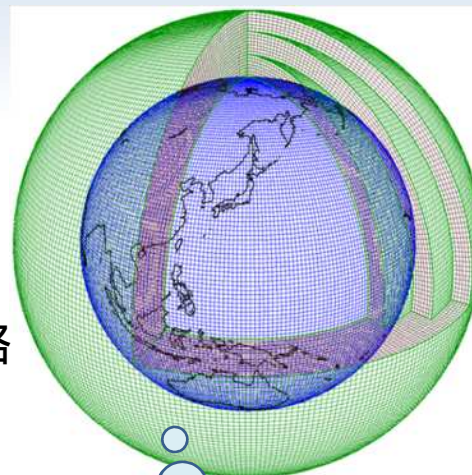
## 気象観測



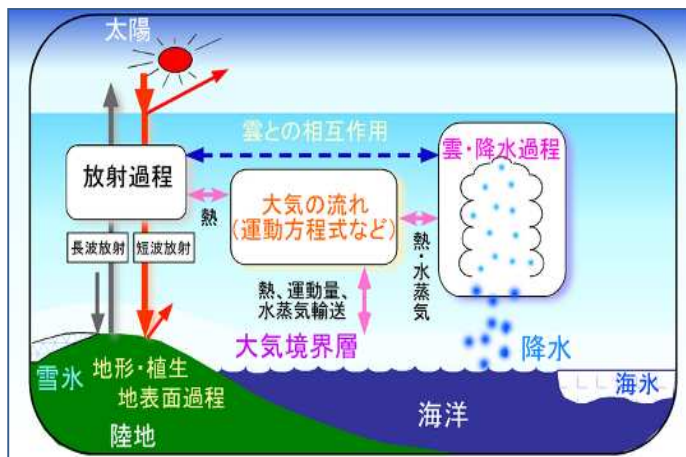
# 数値予報とは？



現実大気の連続量を格子点上に離散化して配置（初期値の作成）



将来の予測を数値計算



大気の様々な過程を計算

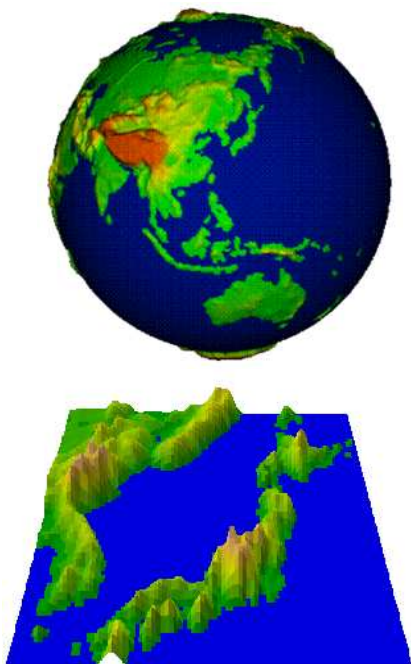
大気を記述する方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F$$

$$\phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

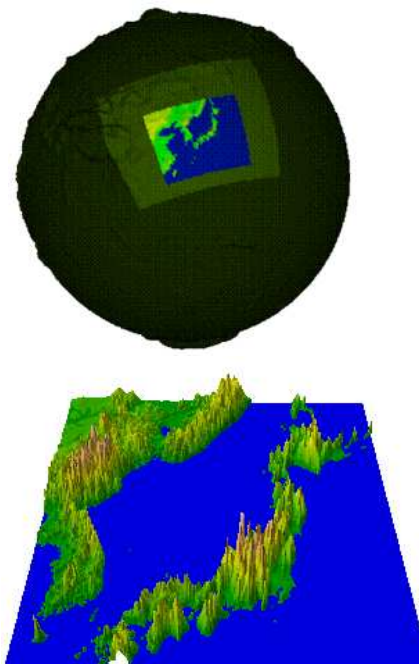
# 数値予報の種類

## 全球モデル



- 格子間隔：約20km
- 11日（3.5日）先まで予測
- 1日4回実行

## メソモデル



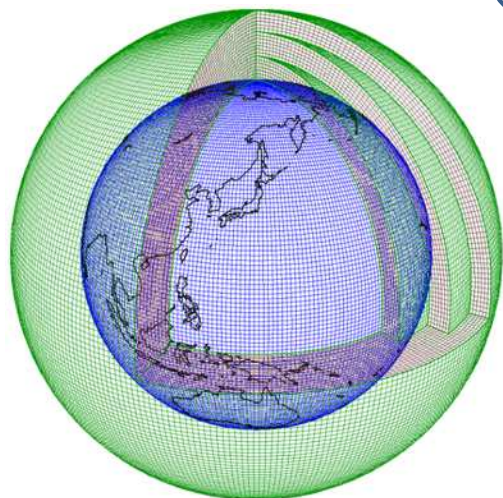
- 格子間隔：約5km
- 39時間先まで予測
- 1日8回実行

このほか、

- 格子間隔2kmの局地モデル（9時間先まで予測）
- 週間アンサンブルモデル（11日先まで予測）
- 台風アンサンブルモデルなどがある。

# 数値予報を使った応用処理とは？

## 数値予報



計算結果は未来の大気状態に対応する様々な数値の羅列（1億以上の格子点：ビックデータ）

### 機械学習

ニューラルネット  
カルマンフィルタ  
ロジスティック回帰  
...

翻訳

予報をガイドすることから（予報）ガイダンスと呼ばれる

天気予報・防災情報に必要な情報

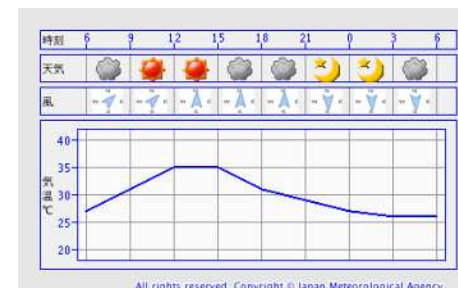
晴・曇り・雨



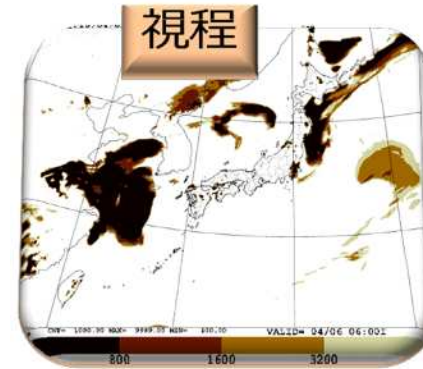
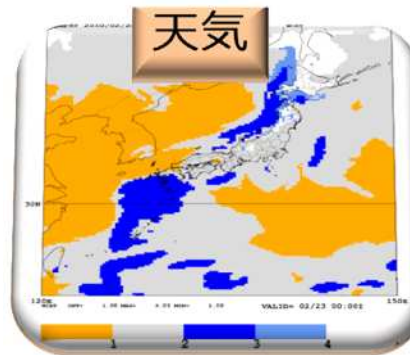
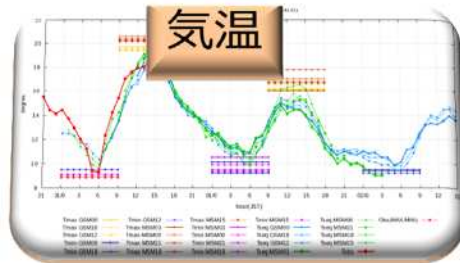
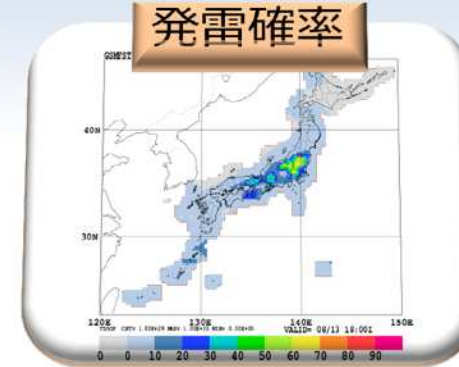
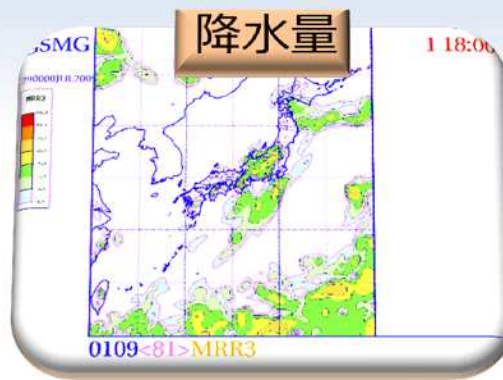
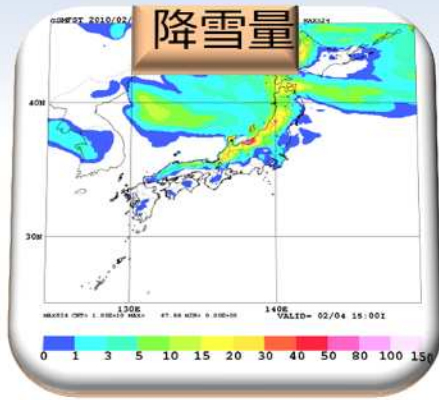
最高気温27



発雷確率30%...

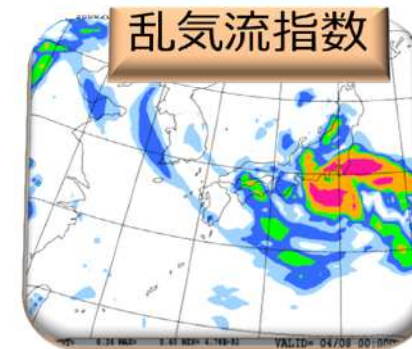
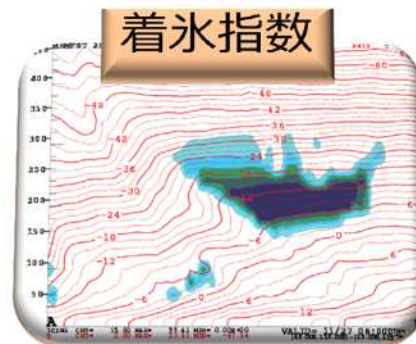


# 予報ガイダンスの例



### 飛行場向け

日時	10/11	12/16									
最大	2	2									
最小	2	2									
月平均風速(DEC)	340	340	170	170	190	350	350	340	210	290	280
月々最大風速(m)	10	18	20	21	21	17	17	19	17	17	10
最小視程(m)	9999	6200	6200	6200	6200	5100	5500	4800	2700	2300	6200
平均視程(m)	9999	8500	2400	800	700	1200	6200	7000	8600	3700	3600
第1層雲底高(m)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	200	300
雲量(Oct)	2	3	1	1	1	2	3	1	1	5	1
第2層雲底高(m)	500	300	700	800	400	400	700	1500	500	300	2500
雲量(Oct)	2	2	2	2	2	2	4	2	4	2	0
第3層雲底高(m)	800	400	500	500	1000	1000	3000	700	400	400	1000
雲量(Oct)	5	6	6	6	5	5	5	5	5	6	6
シーリング(m)	800	700	800	800	800	1000	3000	700	700	700	1000
天気	2	4	4	4	4	4	61	61	4	4	4
気温(deg C)	18.4	17.7	17.6	18.1	19.8	19.7	19.0	18.1	18.7	18.0	17.8
月々降水確率(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
発雷確率(アンサンブル)(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
発雷確率(%)	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
視程5km未満確率(%)	9	45	55	75	77	63	73	30	59	82	32
視程1.6km未満確率(%)	0	22	41	30	32	39	27	11	27	33	22
シーリング1000m未満確率(%)	37	70	81	66	69	71	33	37	66	49	63
シーリング600m未満確率(%)	28	61	61	46	46	46	23	23	49	49	23
最高気温(deg C)	20.1										
最低気温(deg C)	16.9										



# 天気予報・防災情報の作成

予測資料

予報ガイダンス

ナウキャスト

数値予報

観測資料

気象衛星

レーダー

アメダス

.....

予報作業用システム



予報官 



予報ガイダンス取込み 編集



警報判定図



発表予報（例）

### 天気予報

Today	Precipitation Probability	Temperature Increases
Northwest/north wind, sunny, wavelight 0.5m	07-09 0~4%	Tokyo Max Temp <b>7</b>
	09-12 0~1%	
	12-18 10%	
	18-24 10%	
Tomorrow	Northwest wind, sunny, wavelight 0.5m	00-06 0%
		09-12 0%
		12-18 0%
		18-24 10%
Day after tomorrow	Northwest wind, sunny, wavelight 0.5m	00-06 0%
		09-12 0%
		12-18 0%
		18-24 10%

### 注警報

### 時系列予報

Temperature (unit: °C)

Wind (unit: m/s)

All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency

### 分布予報

### 週間予報

Day	Temp	Wind	Precip	Cloud
Today	12~21	10~15	0~4%	晴
Tomorrow	10~18	10~15	0~1%	晴
Day after tomorrow	12~21	10~15	0~1%	晴
1st week	12~21	10~15	0~1%	晴
2nd week	12~21	10~15	0~1%	晴
3rd week	12~21	10~15	0~1%	晴
4th week	12~21	10~15	0~1%	晴

### 海上警報



# 航空気象情報の作成

予測資料

予報ガイダンス

ナウキャスト

数値予報

観測資料

気象衛星

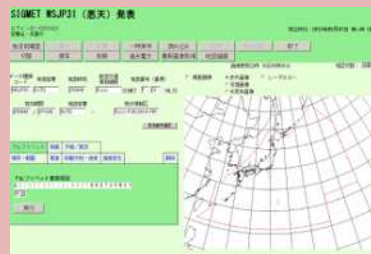
レーダー

アメダス

.....

予報作業用システム

予報官



発表予報 (例)

TAF

```
TAF RJTT 191754Z 191803 15018KT 8000
-SHRA FEW010 SCT020 BKN030 BECMG
1921 18022G32KT 4000 SHRA TEMPO 2124
18034G45KT 2000 +TSRA FEW005 BKN008
BKN010 FEW020CB BECMG 0002 8000 -
SHRA=
```

飛行場時系列予報



国内悪天予想図

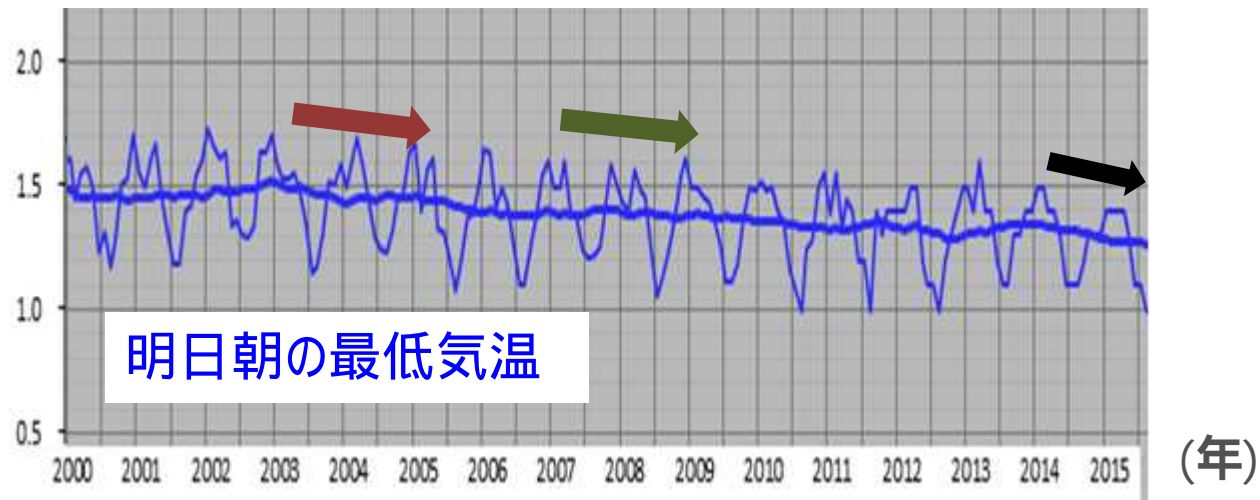
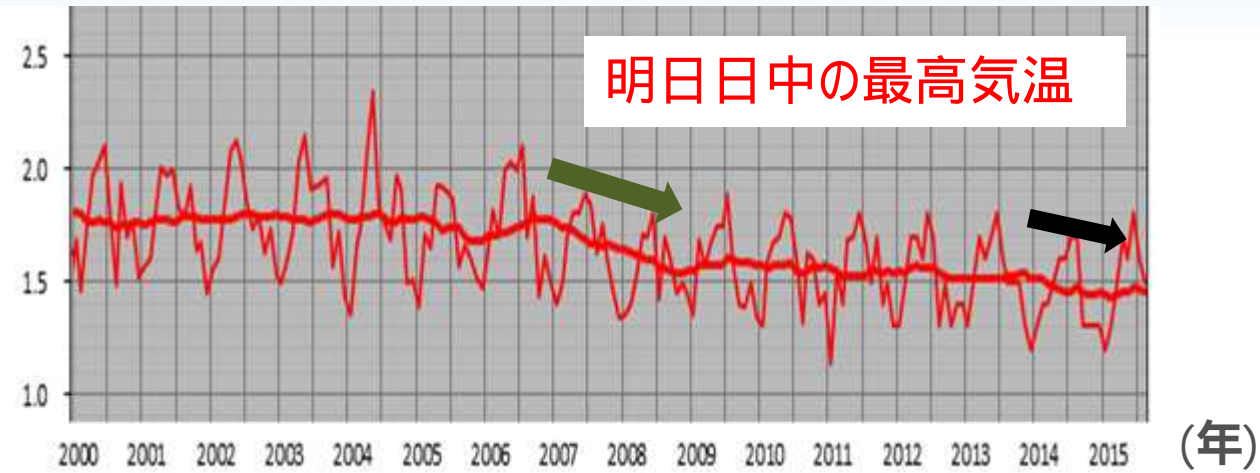


Aerodrome warning

SIGMET

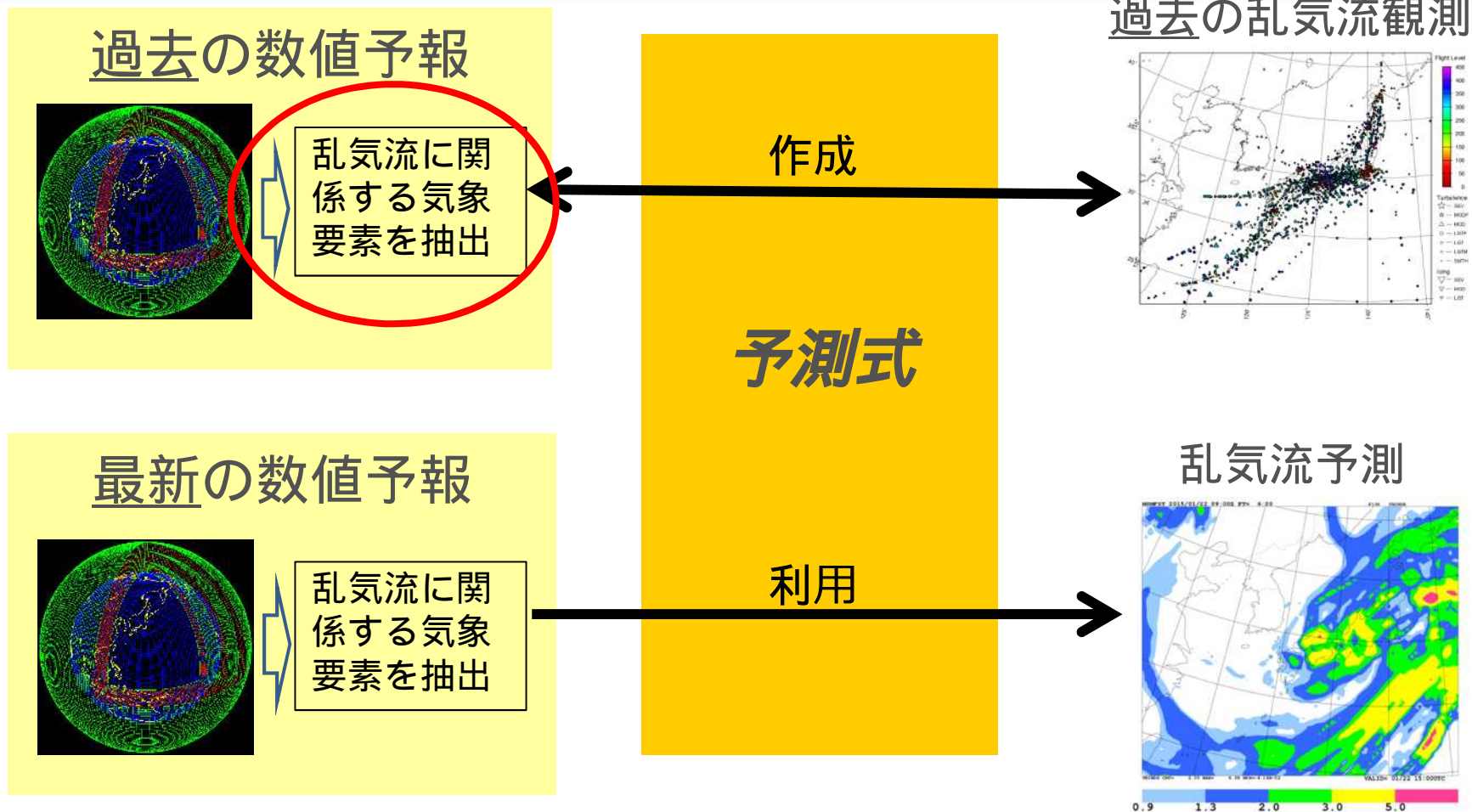
# 気温予報の精度の変化

誤差 ( )



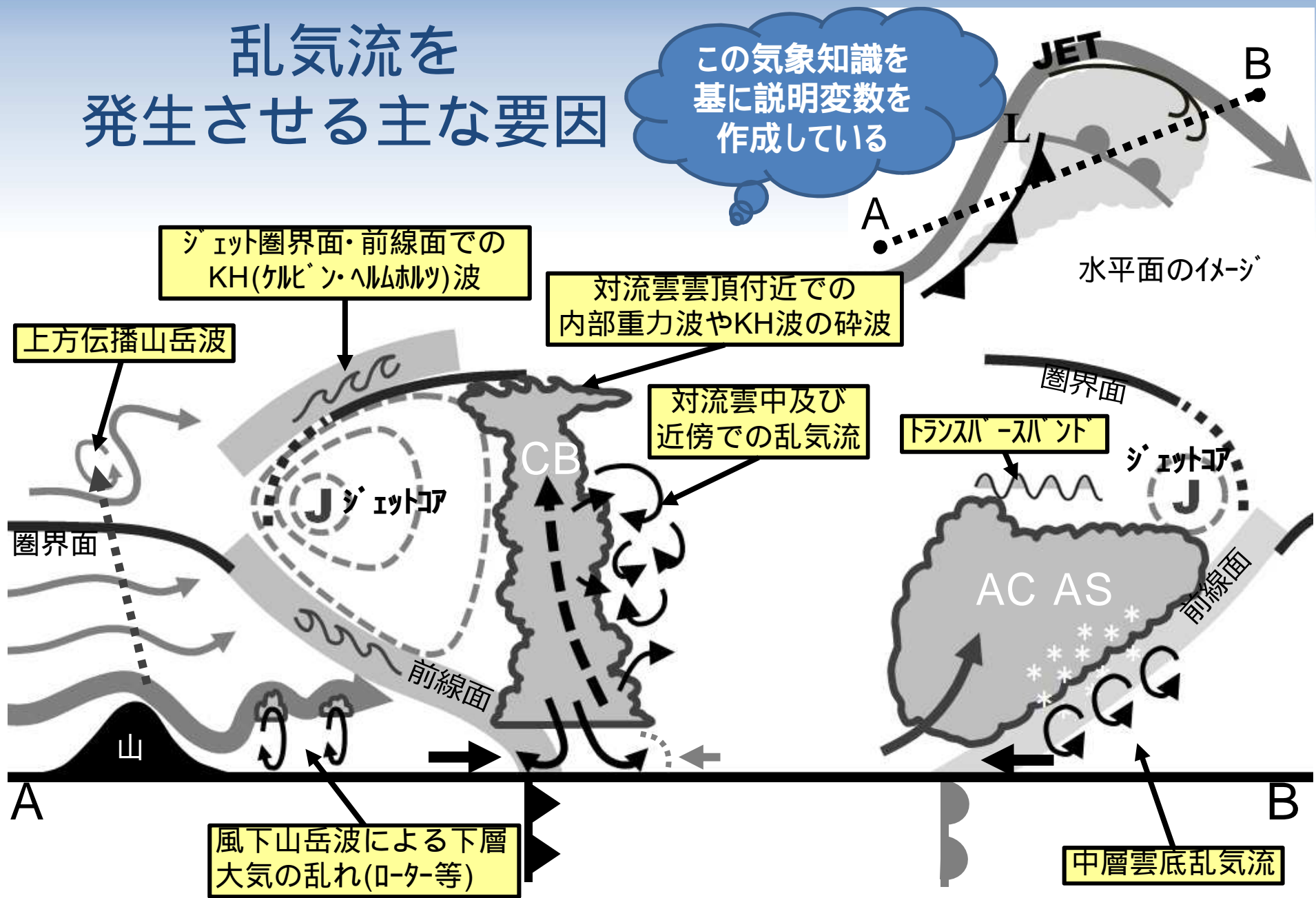
# 予報ガイダンスと機械学習

# 予報ガイダンスの概念（乱気流の例）

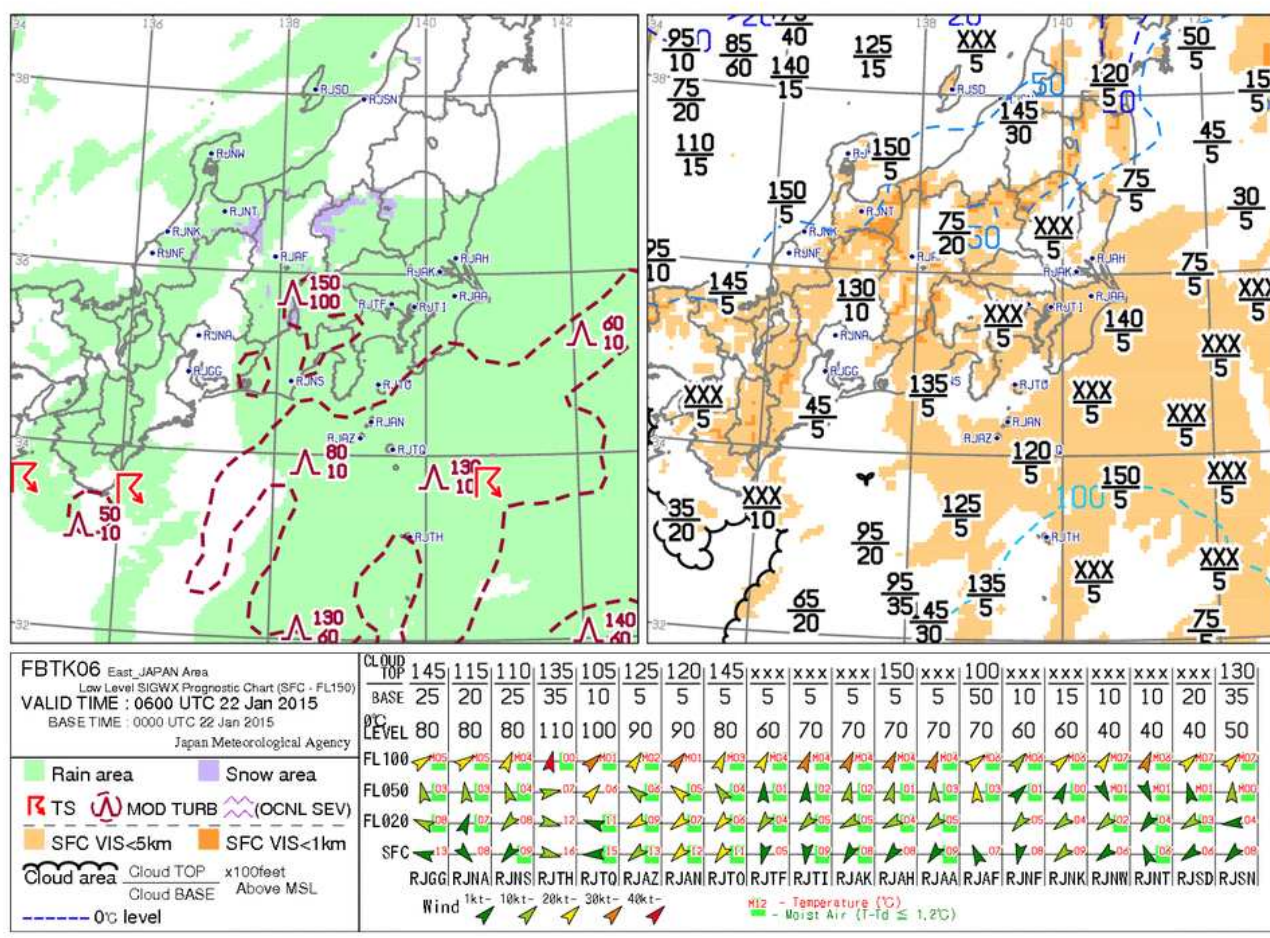


# 乱気流を発生させる主な要因

この気象知識を  
基に説明変数を  
作成している



# 気象庁の乱気流予測プロダクト（例） 下層悪天予想図



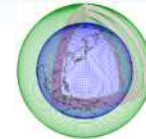
# 予報ガイダンスで使っている機械学習

- ニューラルネット
  - 降雪量、雲、日照、最小湿度など
- カルマンフィルター
  - 気温、風、降水量、降水確率、視程など
- ロジスティック回帰
  - 発雷確率、乱気流指数、ガスト確率、雲底確率
- 線形重回帰
  - 降水量（24時間最大）
- 機械学習を使っていないもの
  - 降水種別、着氷指数、積乱雲量など

# 数値予報と予報ガイダンスの来歴

1959年  
数値予報が開始

計算機の発展・数値予報の改良



現在



1970年代後半：数値予報と線形重回帰を使った予報ガイダンスが開始。**経験予報から客観予報へ移行。降水確率予報等の新たな予報の発表開始。**

線形重回帰

1995年度：数値予報モデルの改良等に対応できるような逐次（オンライン）学習型の手法を導入。

ニューラルネット、カルマンフィルタ等の導入。重回帰型も残る。





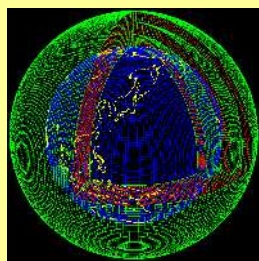
# 予報ガイダンスの概念（係数固定型 発雷確率）

説明変数

目的変数

過去数年分のデータで予測式を作成し、固定

過去の数値予報

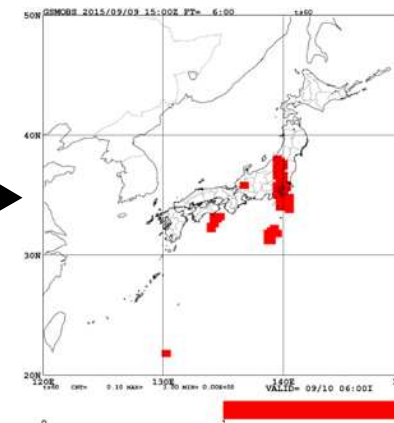


発雷に関する気象要素を抽出

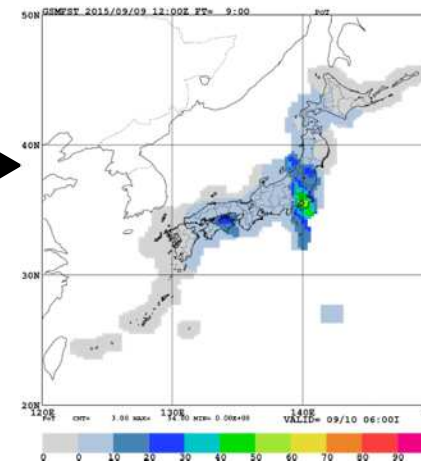
作成

予測式  
(固定)

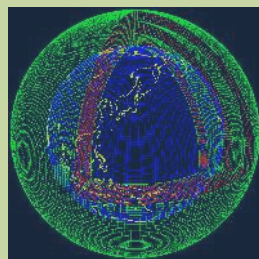
過去の発雷の有無



発雷確率



最新の数値予報



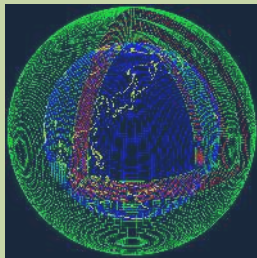
発雷に関する気象要素を抽出

利用

数値予報の特性が変わったら以前の予測式を使うと精度劣化

# 予報ガイダンスの概念（逐次学習型 降水量）

過去・直前の数値予報



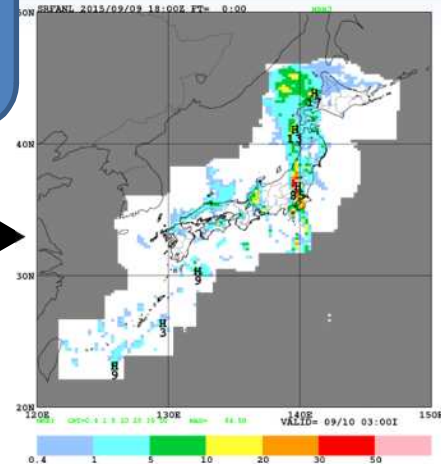
降水量に関  
係する気象  
要素を抽出

新たな実況データが入ったら、  
直前の数値予報の説明変数と  
目的変数から予測式の係数を  
逐次修正する（逐次学習型）

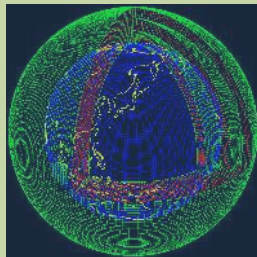
作成・修正

予測式  
(変化)

過去の解析雨量



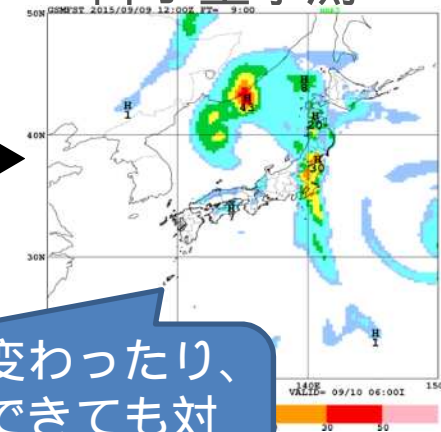
最新の数値予報



降水量に関  
係する気象  
要素を抽出

利用

降水量予測



数値予報の変更によって、特性  
が変化しても徐々に予測式変化

目的変数の特性が変わったり、  
新たな予測地点ができてても対  
応可能

# 予報ガイダンスで使っている機械学習

**逐次学習型**  
随時学習できる  
頻度で発生し、  
安定して教師  
データが入手で  
きるもの

- ニューラルネット

説明変数と目的変数の関係  
が非線形な現象に利用

- 降雪量、雲、日照、最小湿度など

- カルマンフィルター

線形関係で表せる現象に利用

- 気温、風、降水量、降水確率、視程など

- ロジスティック回帰

確率に利用

- 発雷確率、乱気流指数、ガスト確率、雲底確率

- 線形重回帰

- 降水量（24時間最大）

- 機械学習を使っていないもの

- 降水種別、着氷指数、積乱雲量など

気象学的な調査・研究  
に基き予測式を作成

# カルマンフィルター

予測式（係数が時刻の関数）

$$y = a_0(t) + a_1(t)x_1 + a_2(t)x_2 + \dots + a_p(t)x_p$$

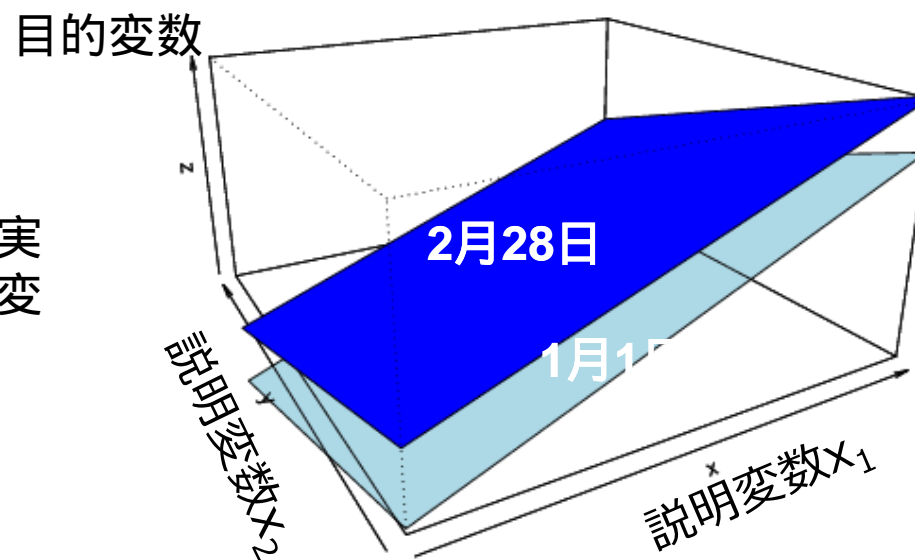
目的変数

係数 $a$

説明変数  $x$

目的変数（予測値） $y$ と実況値を比較し、その違いに応じて、カルマンフィルターを使って係数 $a_i$ を逐次変化させる。

成田空港の気温予測の実例。予測式（平面）が変化している。

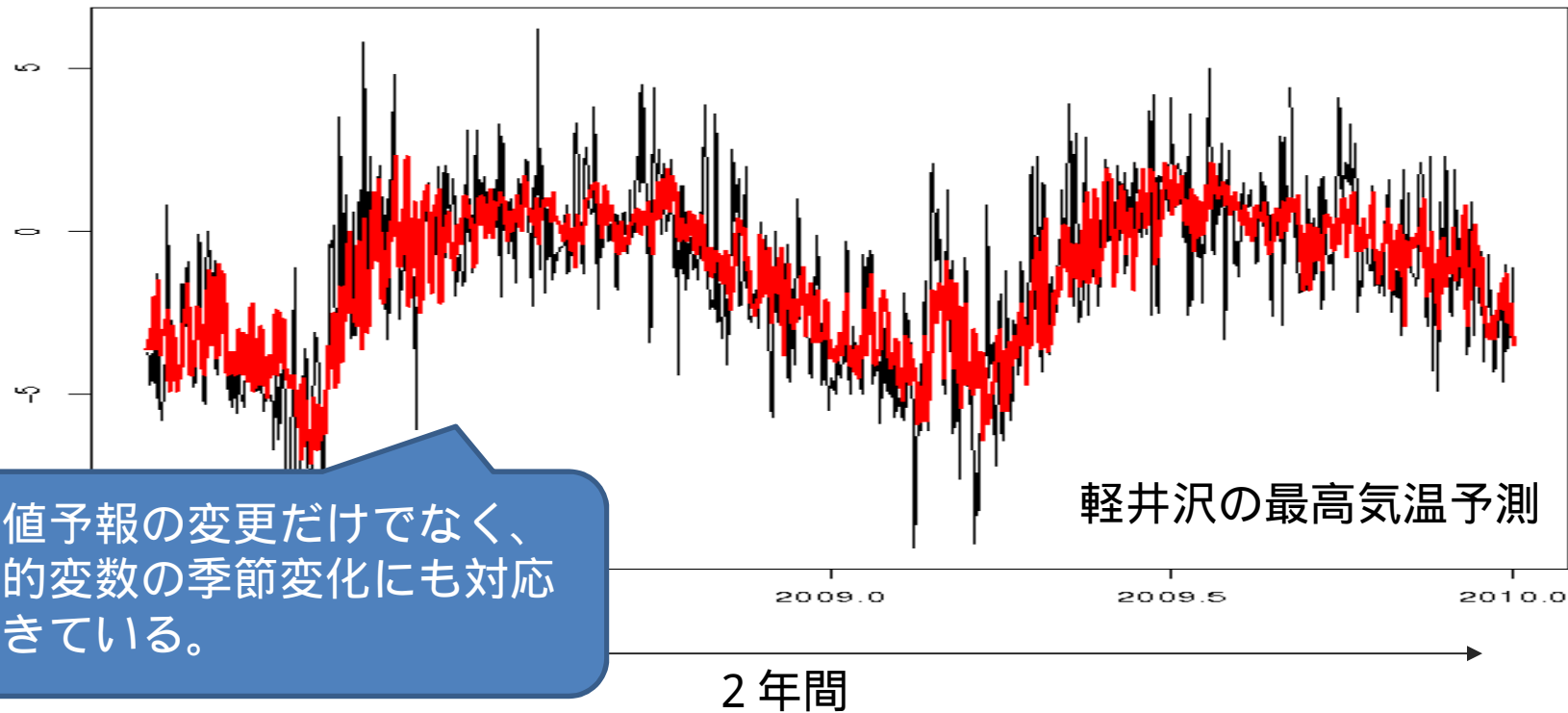


# カルマンフィルターの利用（気温）

数値予報でも気温は予想しているが、カルマンフィルターを使って数値予報の誤差を予測することによって、数値予報の誤差を軽減し精度向上している。

黒線：数値予報の気温誤差（目的変数）・・・季節変動

赤線：カルマンフィルターによる誤差の予測

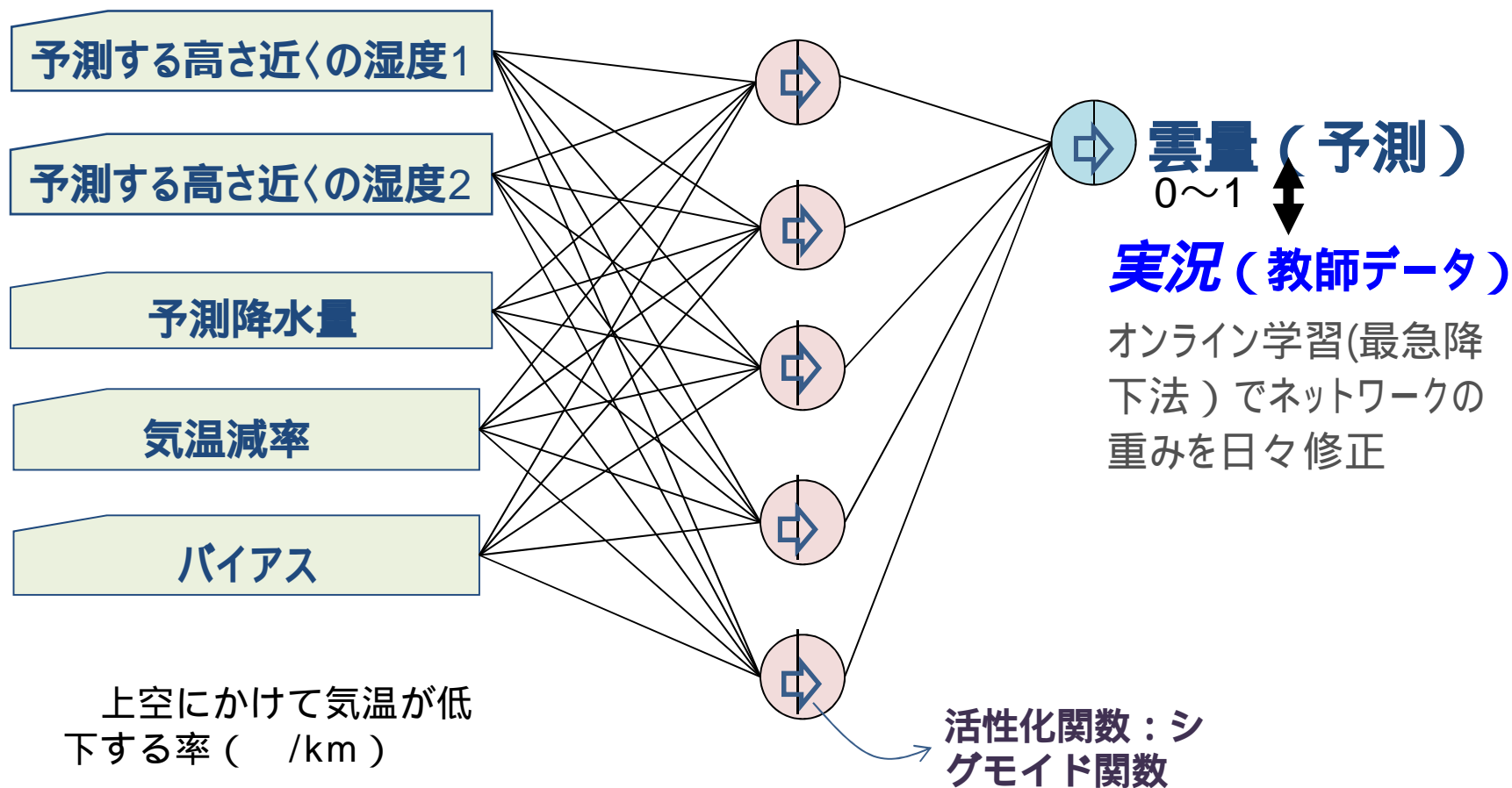


# ニューラルネット（雲量の予測）

入力層（説明変数）

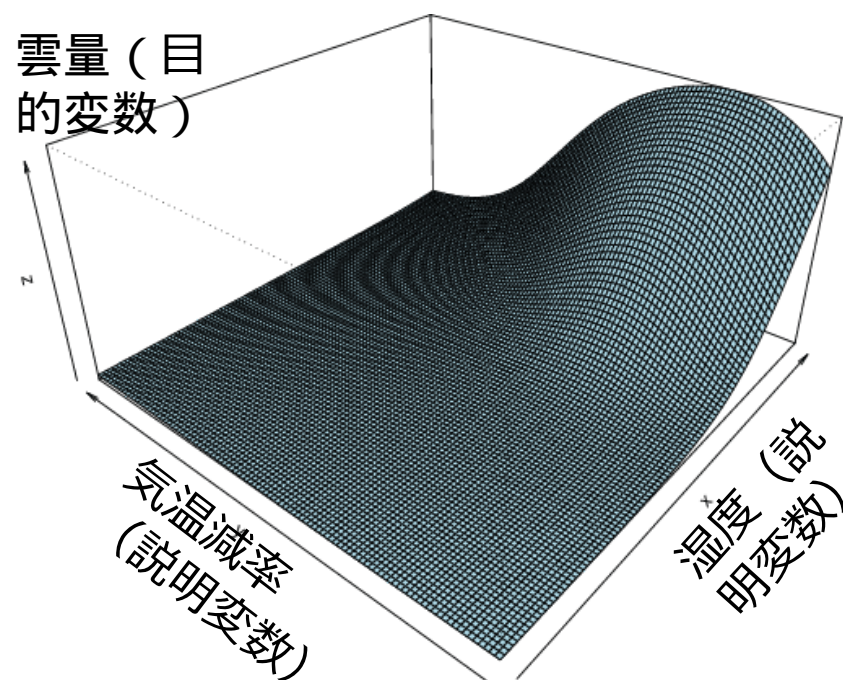
中間層

出力層（目的変数）

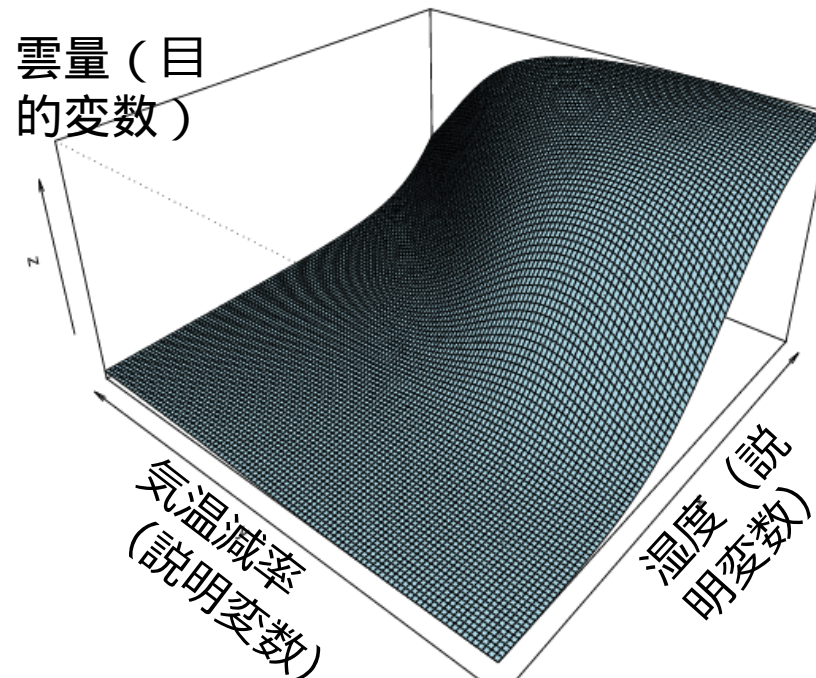


# ニューラルネットワーク（実例）

新千歳空港の高さ1,000ftの雲量の予測例



2005年7月1日00Z



2005年7月6日00Z

# 逐次学習型機械学習の経験から



# 逐次（オンライン）学習の難しさ

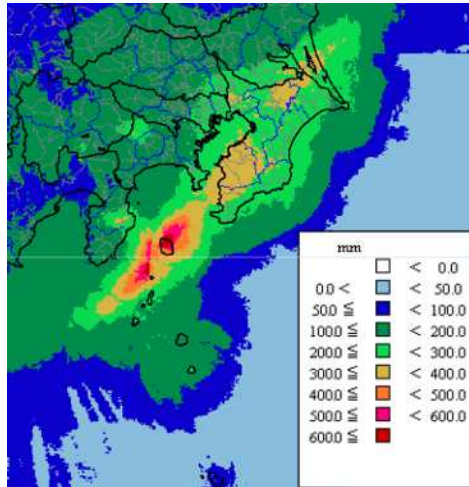
カルマンフィルター、ニューラルネットの逐次学習により、説明変数と目的変数の関係が変化しても追従可能



しかし、相反して安定性の問題が発生し、それによる失敗も。

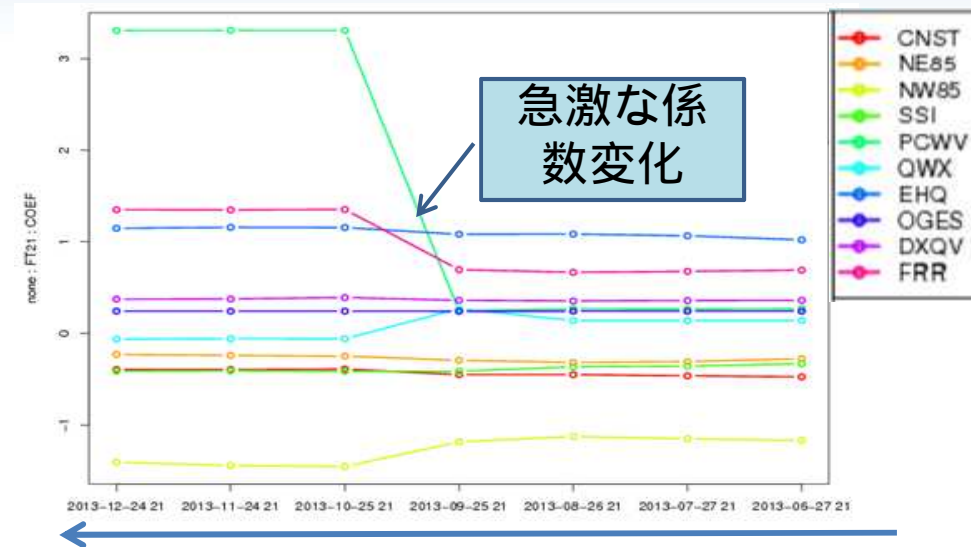


# カルマンフィルター 降水量予測における不適切な係数の変化



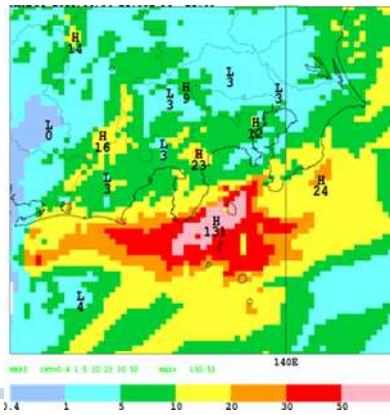
大島の実況日降水量：824ミリ  
(2013年10月15日-16日)

学習

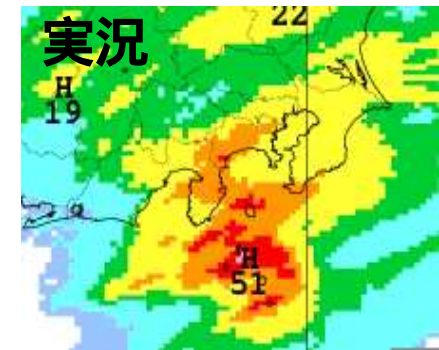
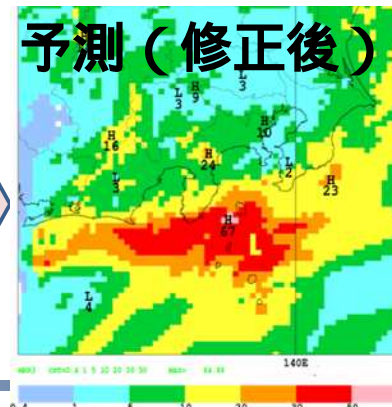


降水量の予測式の係数の変化 (大島)

大島付近で降水量予測が過大な傾向に変わった

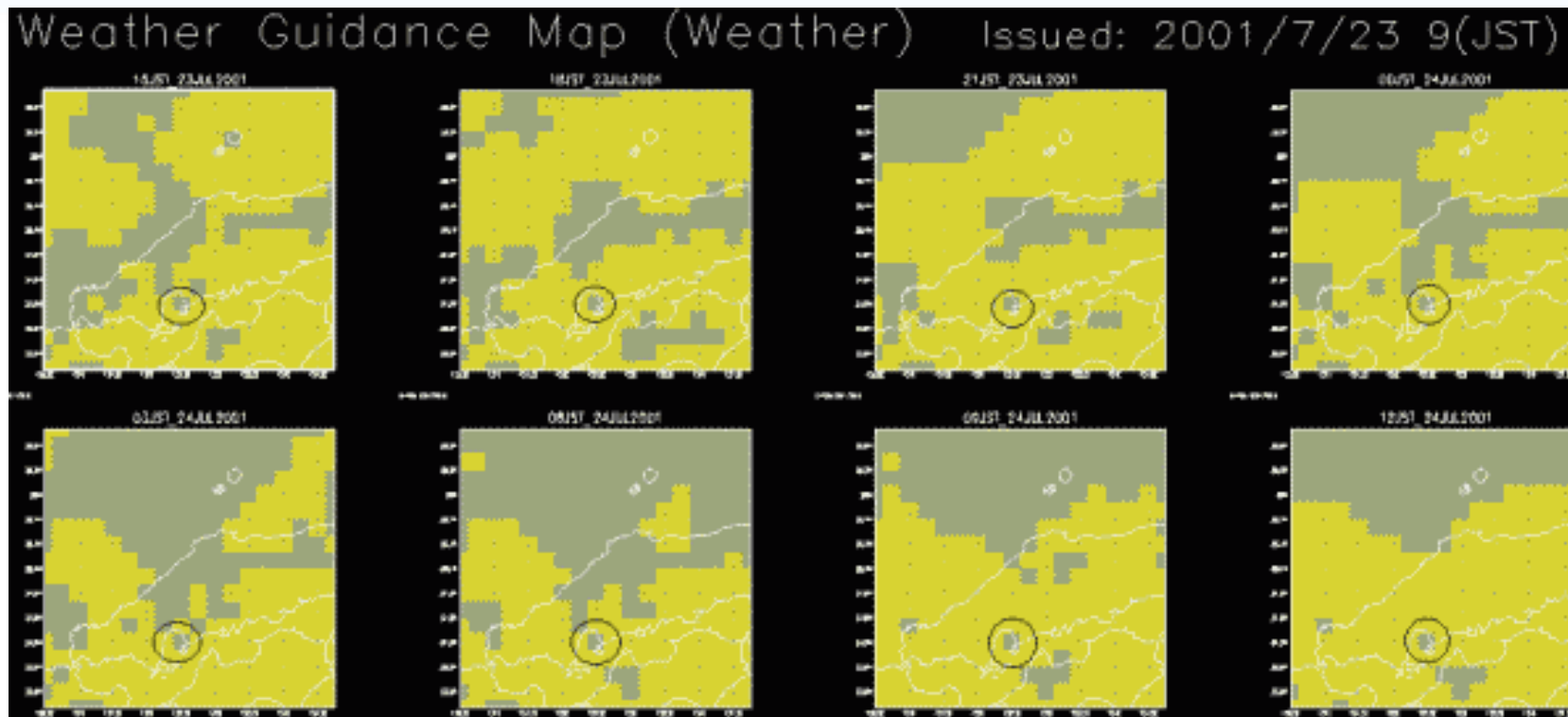


係数修正



# ニューラルネット

## 日照率予測を利用した天気ガイダンス

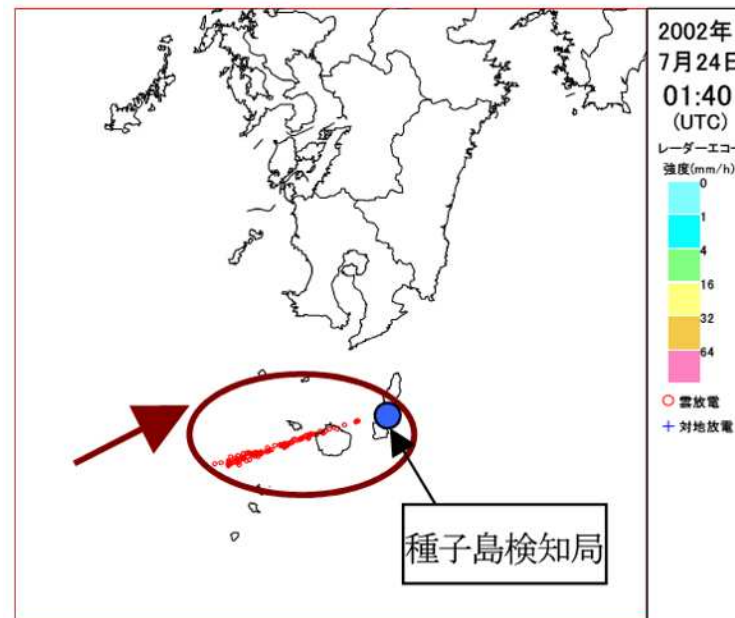


黄色：晴れ 灰色：曇

広島県呉市で曇の予測が継続している（極小値への落ち込み）

# 目的変数の品質管理

目的変数（教師データ）にエラーがあった場合、適切な機械学習ができない。特に逐次学習では、変な学習をして、その後の予測精度が落ちることがある。学習前に除いておく必要がある。



誤った雷データの例

# 予報ガイダンスの監視



Guidance Home Page

ガイダンスホームページ 更新履歴 2016.03.23  
[航空ガイダンスホームページ](#) [航空担当ホームページ](#)

ホーム

ガイダンス共通モニター

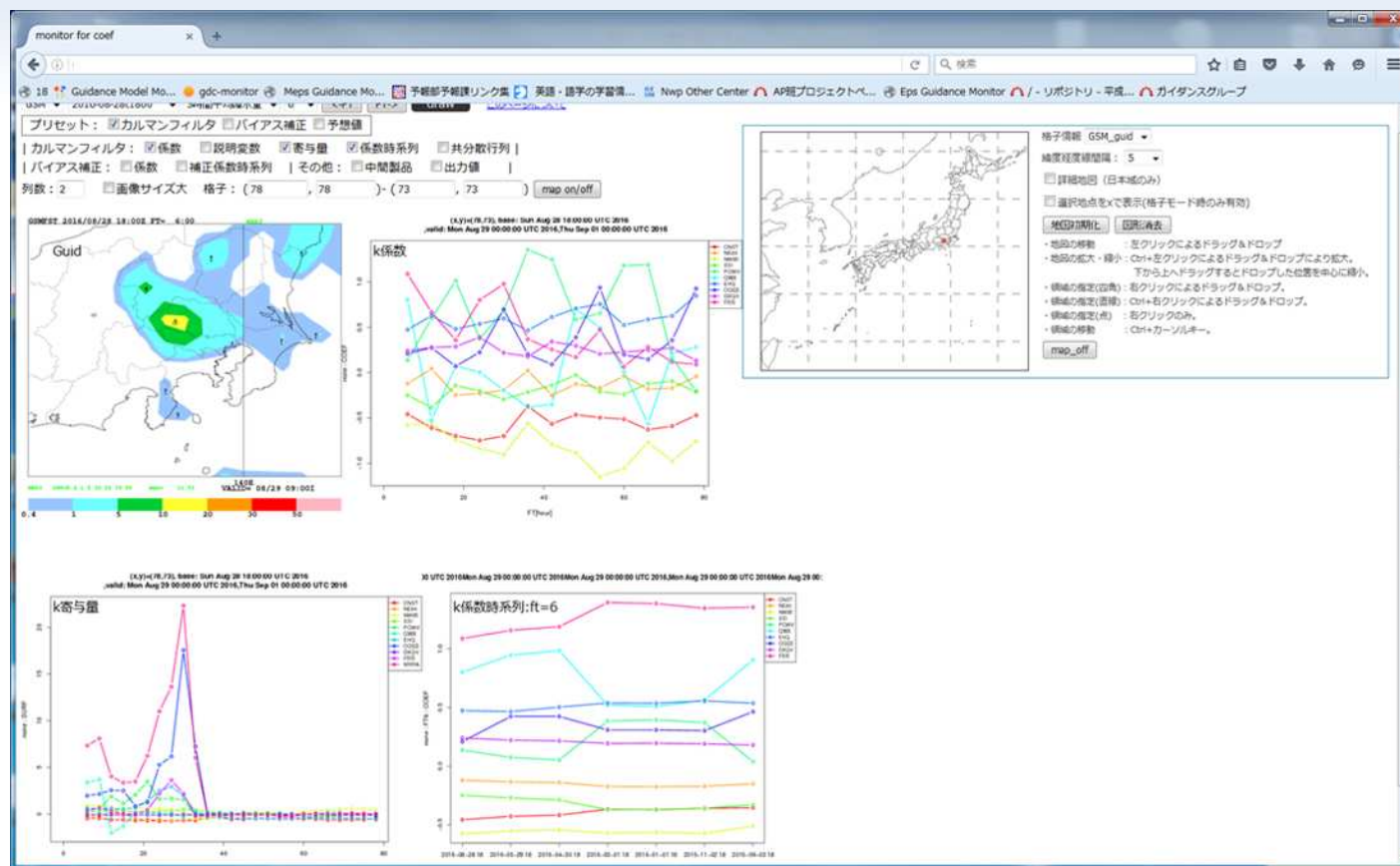
ガイダンス名	モデル	説明
ガイダンス	[GSM・MSM]	ガイダンス予測値を平面図で表示します。最大降水量と平均降水量の比率も平面図で確認できます。(Firefox推奨)
地点ガイダンス	[GSM・MSM]	XMLファイルに保存されている地点ガイダンスの値を表とグラフで表示します。実況値も確認できます。

ガイダンス種別

ガイダンス名	モデル	説明
風ガイダンス	[GSM] [MSM]	予報値の表示、日々の検証、月検証等を行います。
降水ガイダンス	[GSM・MSM]	最大降水量ガイダンス、平均降水量ガイダンス、降水確率ガイダンスの日々の予想、検証結果を表示します。また、指定した格子の係数、パラメータ、ガイダンス、実況の表示もできます。
気温ガイダンス	[GSM・MSM]	予報値の表示、期間を指定した検証などを行います。
発雷確率ガイダンス	[GSM・MSM]	2009/7/7から運用した発雷確率ガイダンスの解説、検証図、予測図等があります。
最小湿度ガイダンス	[GSM・MSM]	地点ごとの時系列図や、全国の誤差分布図も閲覧できます。
時系列湿度ガイダンス	[GSM・MSM]	時系列湿度、日平均湿度、実効湿度の予想値が見られます。(最小湿度ガイダンスも見られます)
天気・日照率ガイダンス	[GSM・MSM]	天気ガイダンス、日照率ガイダンスの平面図を表示します。お天気マップもあります。
降水種別・降雪量ガイダンス	[GSM・MSM]	降水種別ガイダンス、最大降雪量ガイダンス、格子形式気温ガイダンスの平面図や、降雪量地点ガイダンスの予報値を表示します。
視程分布予想	[GSM・MSM]	解説、検証ページ、予想図などがあります。

予報ガイダンスの予測、係数の変化、予測精度等を確認できるページを各要素ごとに用意。

# 係数の変化の確認



予報ガイダンスの予測値、係数の値、寄与量（係数×説明変数）、係数の時系列変化が確認できるページ

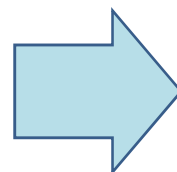
# 開発環境、今後

# 予報ガイダンスの開発環境と運用

## 開発環境



- 開発環境に数値予報及び実況データを蓄積しておき、予報ガイダンスを開発、改良
- 開発環境で予測精度と安定運用できるかを厳しく確認



開発が済む  
と本運用環  
境へ移植

## 本運用環境 (スパコン)



- 本運用環境に適合しているか、安定運用できるかの厳しいチェックと試験
- 厳しいスケジュール管理
- 迅速な障害復旧



# 今後

- 継続的に改良
  - 今年度も何種類かの予報ガイダンスの改善を予定しています。
- ディープラーニングの気象予測への適用
  - 外国でも取り組みが始まっている
  - まだまだ未知数
  - 民間の方との連携も

# まとめ

- 気象庁では天気予報、防災情報等を支援する予報ガイドランスの作成に機械学習を利用してきた（外国も同様）。
- この予報ガイドランスは、予測式等を作成すればそれで完了ではない。説明変数である数値予報モデルの変更、教師データ（目的変数）の変化などに対応してゆく必要がある。
- このため、気象庁では逐次（オンライン）学習を導入したが、これにも多くの問題が発生し、それを克服しながら進めている。
- より精度の高い予報のため、継続的に改良している。

終わり

