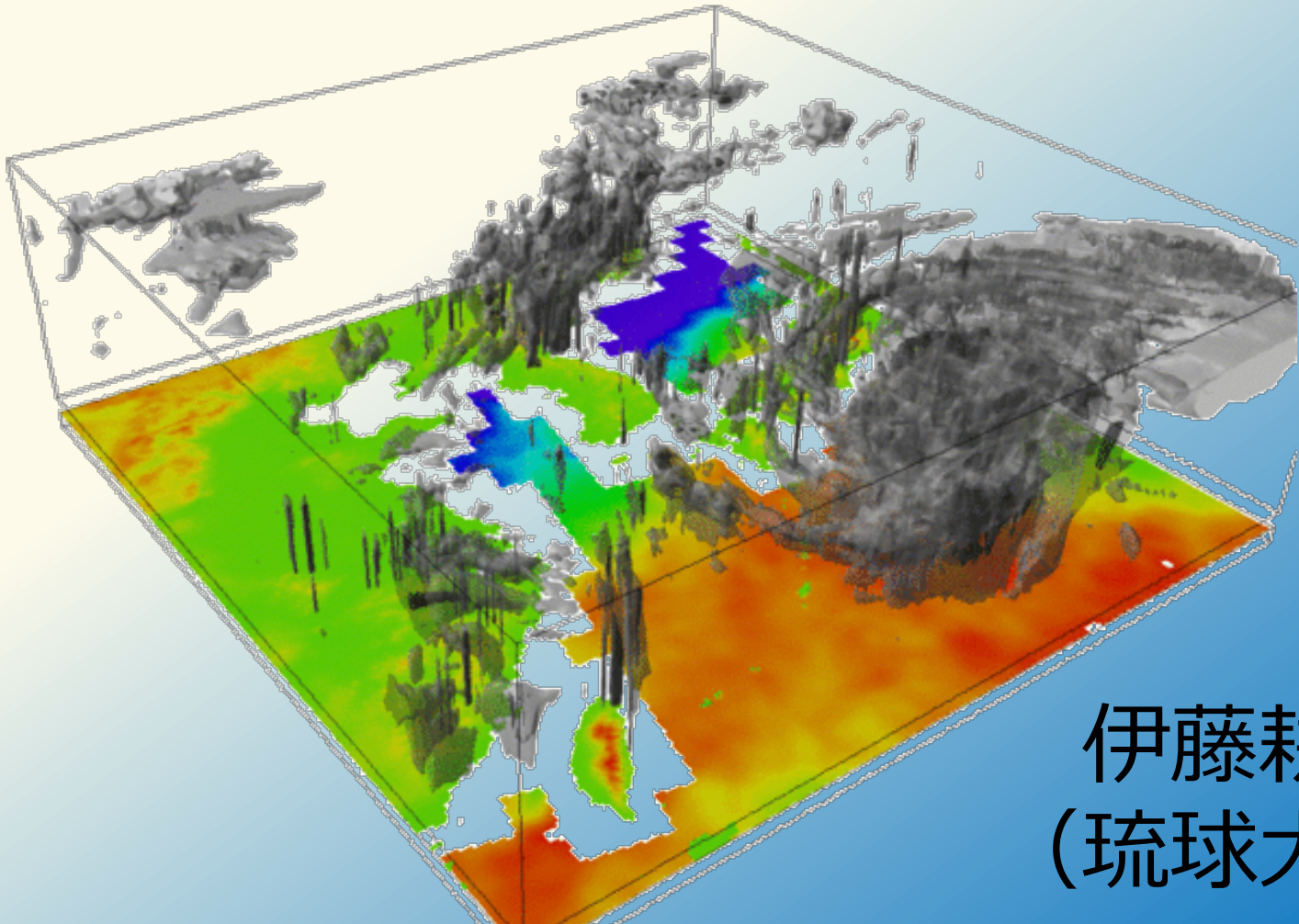
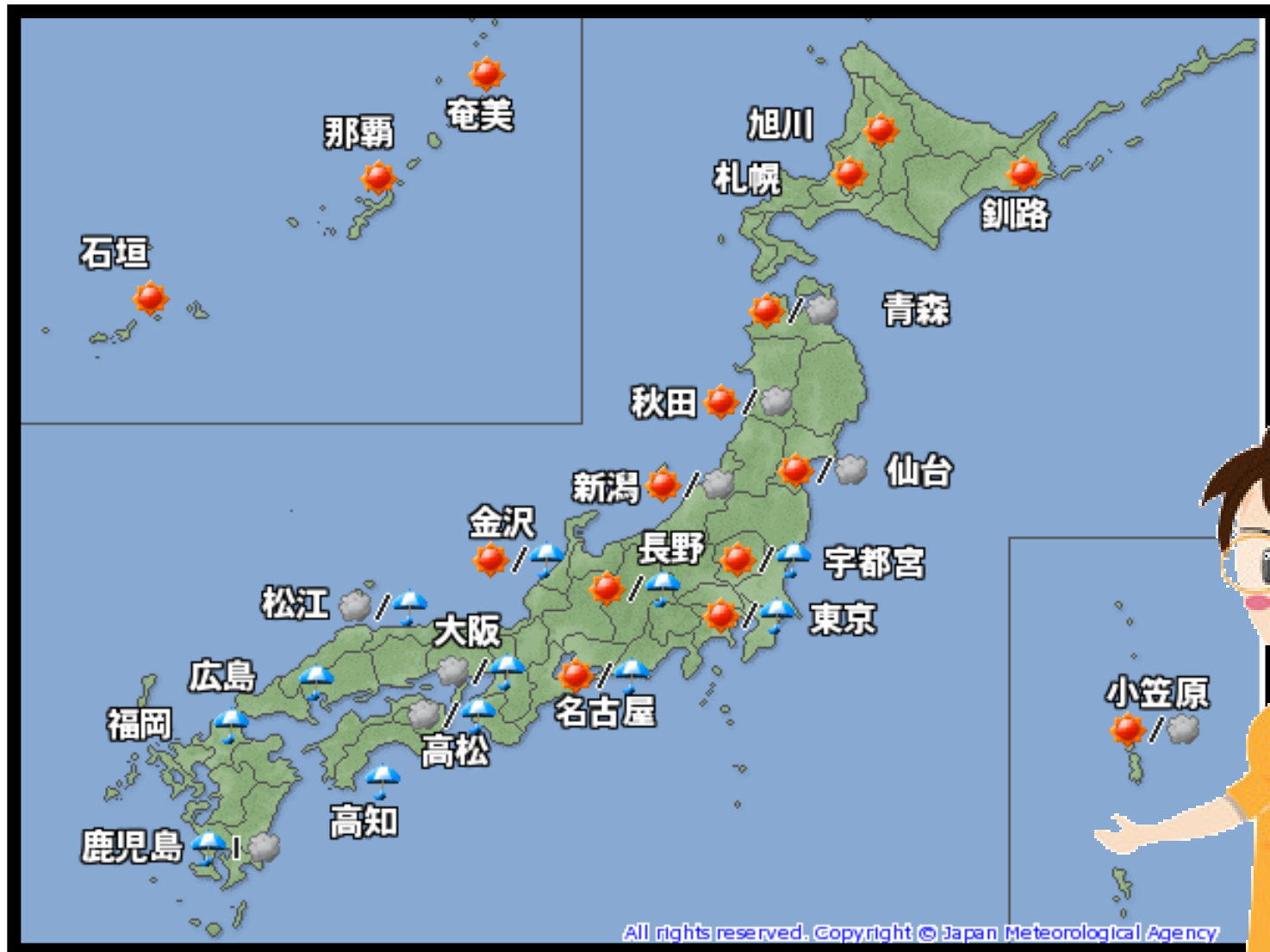


なぜ天気予報は当たるのか？ そして、なぜ天気予報は外れるのか？



伊藤耕介
(琉球大学)

天氣予報



All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency



過去150年分の台風を重ね書きしたものの
→赤いほど強い台風。

(D'Asaro et al., 2011)

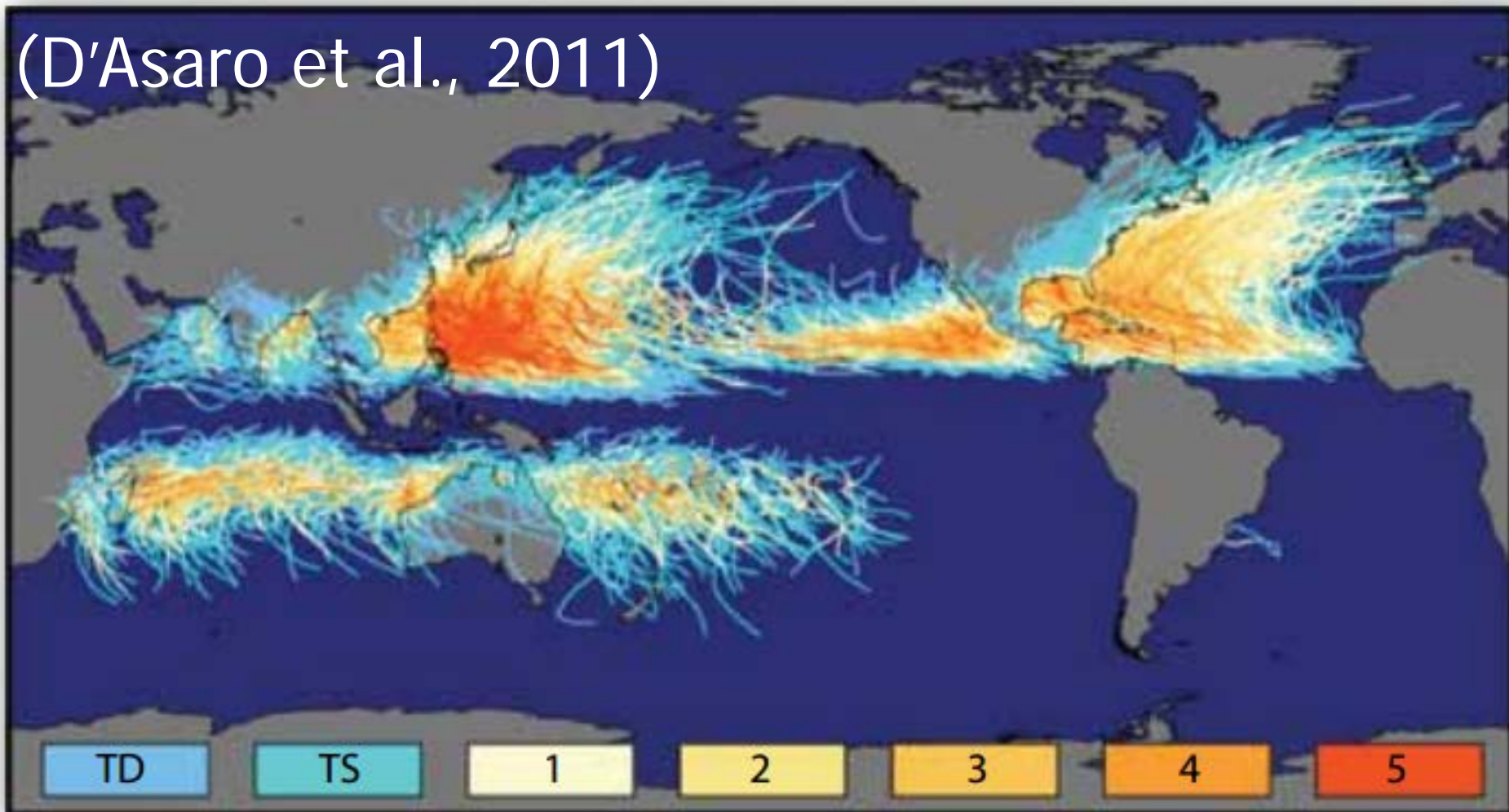


Figure 1. Worldwide tropical cyclone tracks through 2006 from the National Hurricane Center and



石垣島

(沖縄タイムス)

与那国島

与那国島

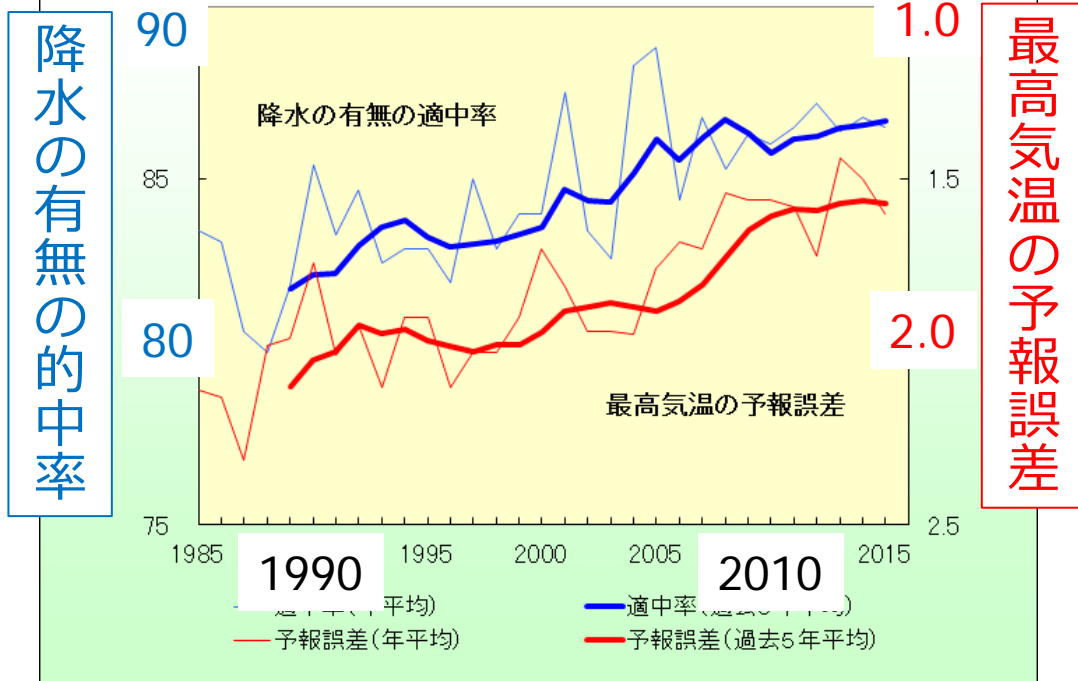
2015年台風第21号 (読売新聞)

2016年台風第16号 (琉球新報)

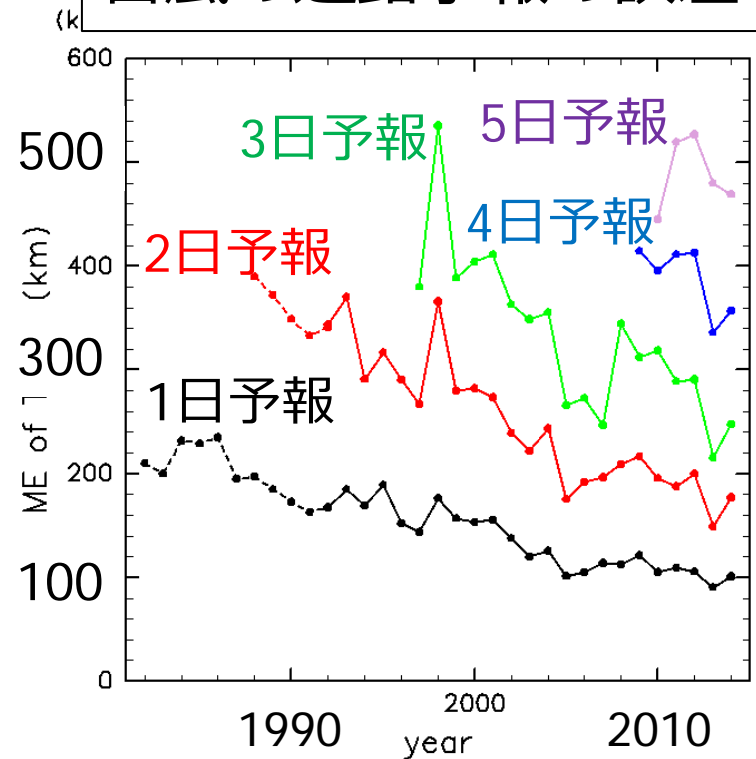
天気予報はだんだん良くなっている！

- 降水的中率は87%，気温の予報誤差は1.5℃
- 台風の進路予報の誤差は30年でほぼ半減

東京地方の予測精度 (夕方発表の明日予報)



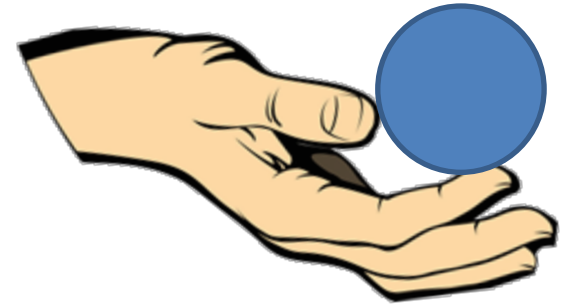
台風の進路予報の誤差



(伊藤, 2016)

「予測」の第一歩：物体の落下

- ボールを静かに落とす
- 重力だけがかかるとすると、ニュートンの運動法則から速度は t 秒後に $v = 9.8t$ (m/s) 落ちる距離は $z = 4.9t^2$ (m) と計算できる。
- 「ボールを落とす前から」将来の落下速度や距離が分かる
→物理的に予測ができています。



物理的予測はどこまでも正確か？ (物体の落下を例に)

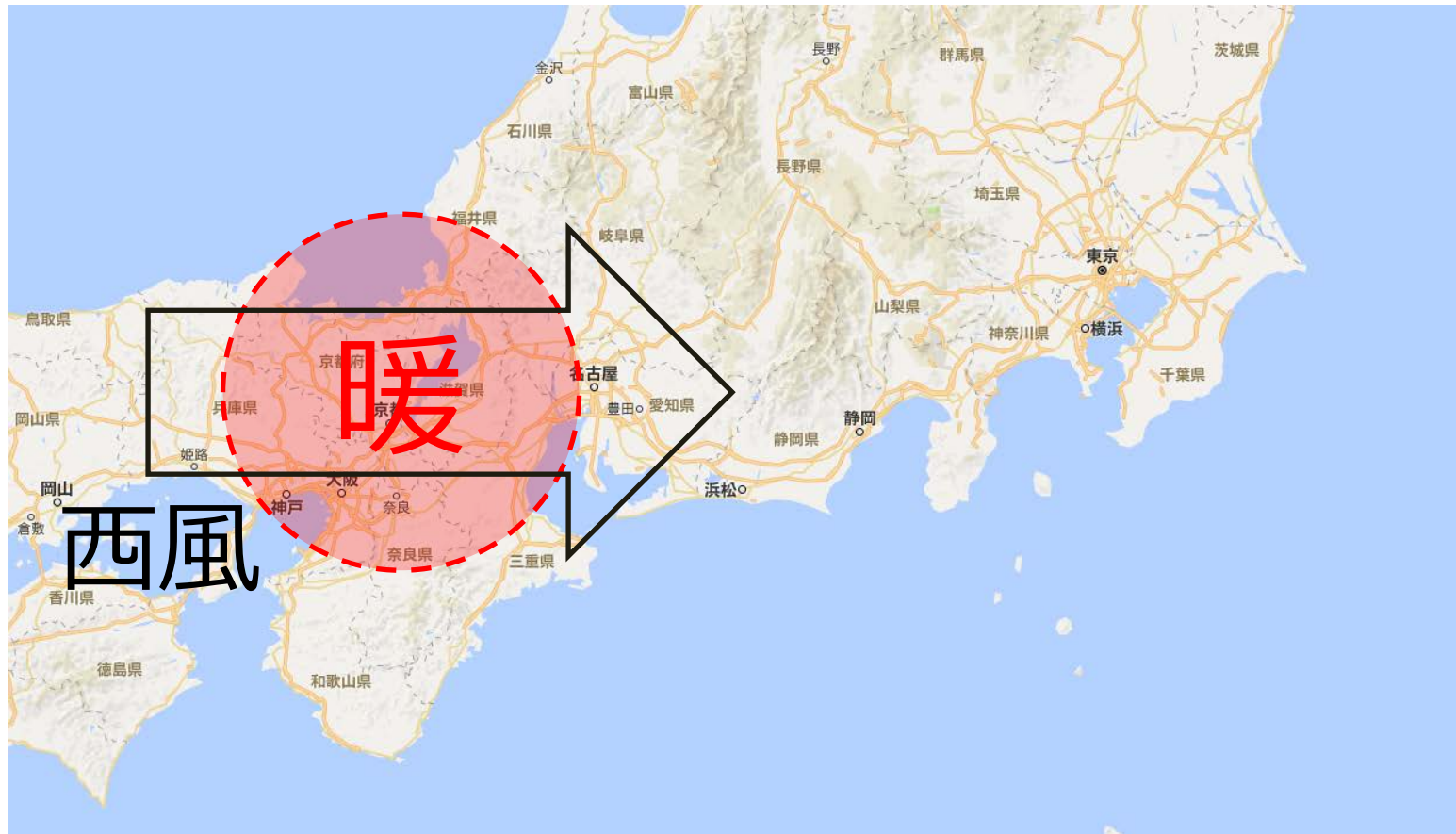
- 初期の状態
⇒ 静止状態か運動中か。
- 考慮する物理法則 (物理モデル)
⇒ 重力だけを考えるなら、先ほどの簡単な式で落下速度と距離が計算できる。空気抵抗も考えるともっと正確に計算できるはず！
- 正確な初期状態と物理 ⇒ 正確な予測

現在の天気予報も物理的予測がベース

- 先ほどの例：物体の落下速度・距離
- 天気予報の場合に予測する量：
 - 風速
 - 気温
 - 気圧
 - 気体の水の量（湿度）
 - 液体の水の量（雲・雨）
 - 固体の水の量（雪・あられ・ひょう）
- これらを多数の地点で計算したい

単純な天気予報の概念図

- 京都に暖かい空気があり、西風が吹いていたら、やがて東京の気温が上がる。

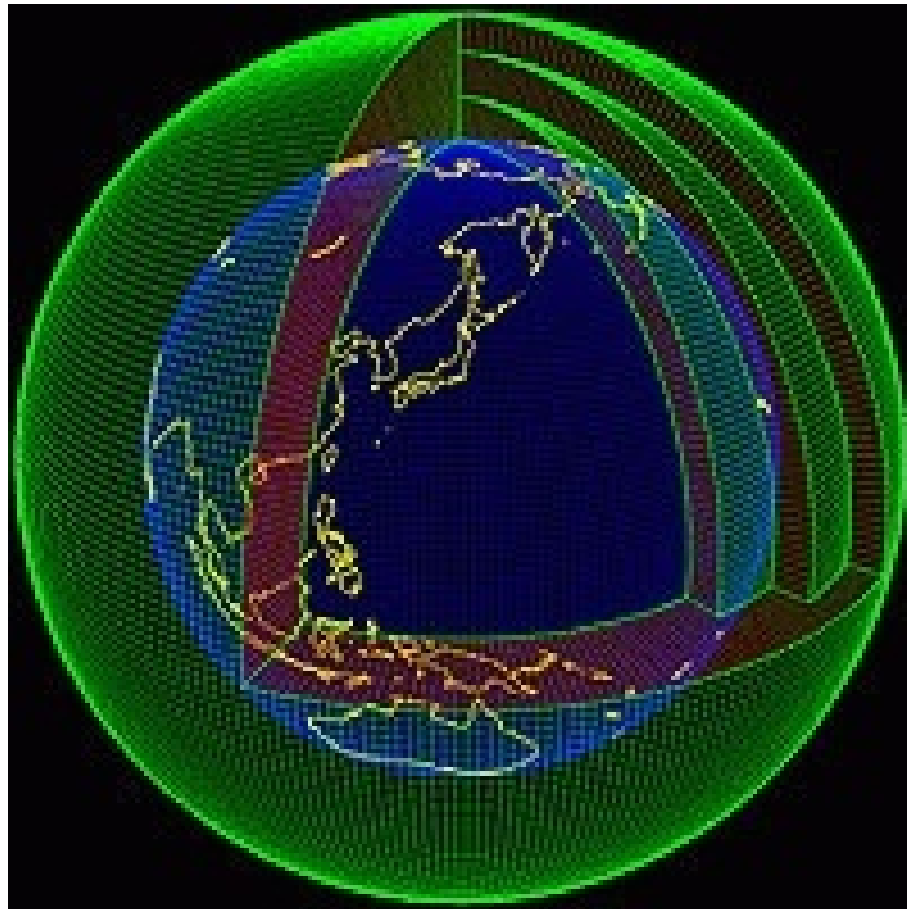


世界中の空気を地域ごとに分割

⇒各地点で基礎方程式を計算

⇒高校数学のように手計算で解けない

⇒コンピュータに計算を頑張ってもらおう！



(気象庁HP)

天気予報の作り方

- 観測 + それを基にした解析 → 正確な初期値
- 数値モデル → 正確な物理法則

観測

- 気象衛星、地上観測などで情報を得る

解析(同化)

- 観測をもとに、各地点の状態を推定
(例：気圧配置)

シミュレーション

- 各地点の状態を物理モデルに基づき予測

補正

- データベース + 予報官の経験に基づき補正

天気予報の作り方

- 観測 + それを基にした解析 → 正確な初期値
- 数値モデル → 正確な物理法則

観測

- 気象衛星、地上観測などで情報を得る

解析(同化)

- 観測をもとに、各地点の状態を推定
(例：気圧配置)

シミュレーション

- 各地点の状態を物理モデルに基づき予測

補正

- データベース + 予報官の経験に基づき補正

観測

気象衛星→

気象レーダー→

↓AMeDAS

風向／風速計

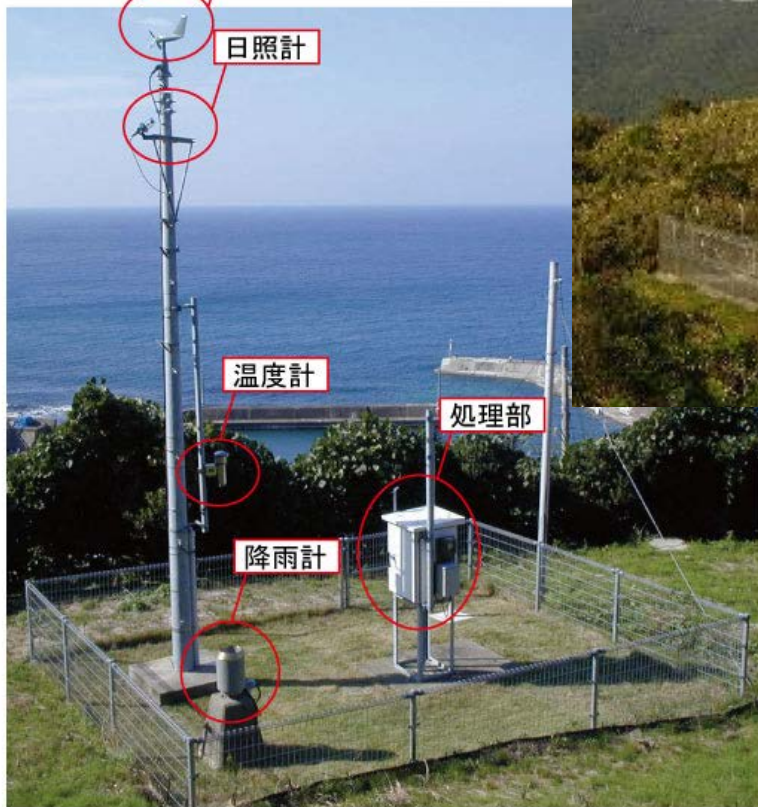
日照計

温度計

処理部

降雨計

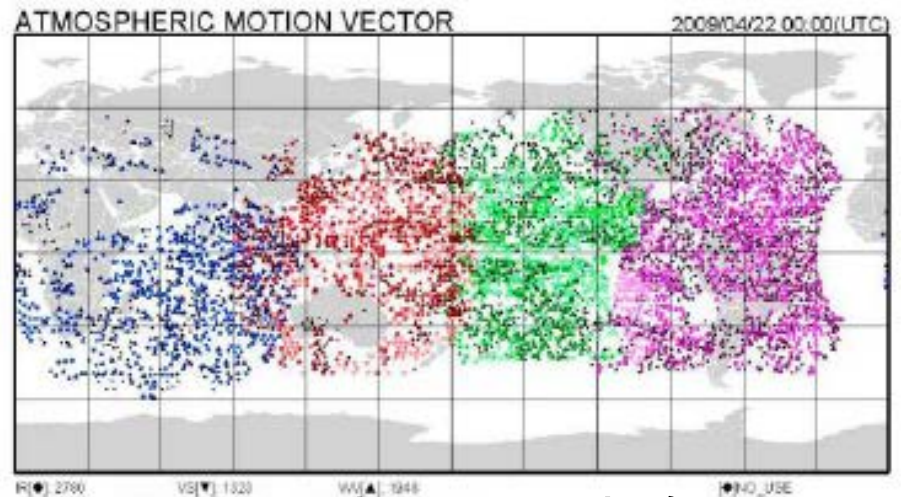
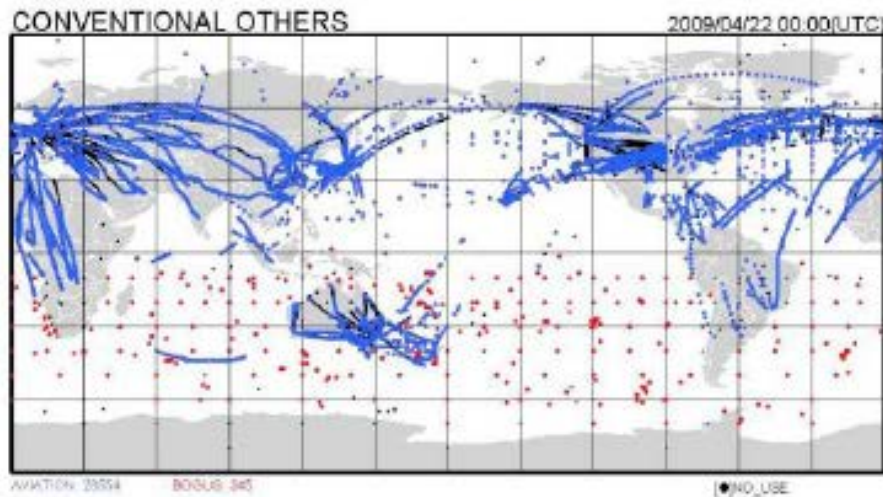
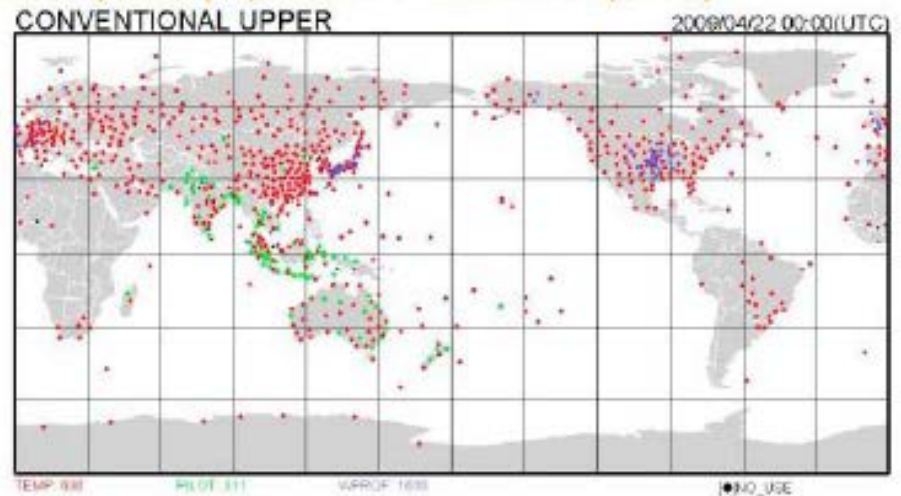
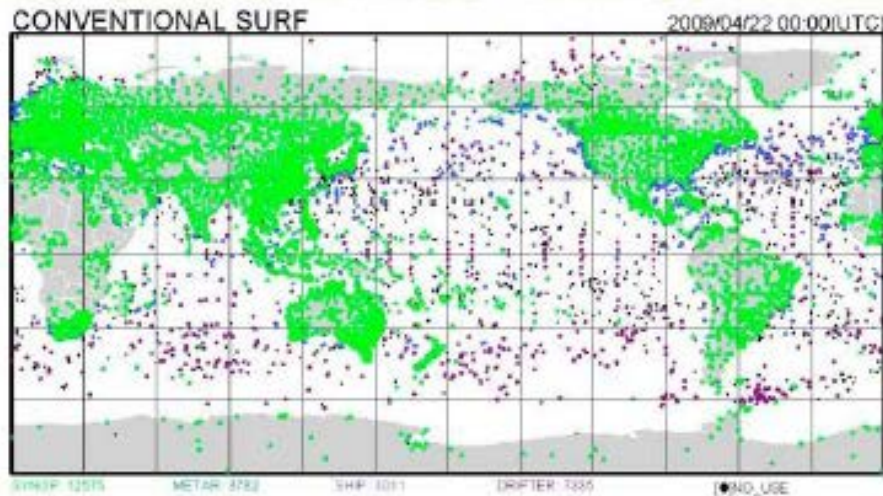
観測気球
(ゾンデ)



世界中で手に入るデータ

- GTSと呼ばれる回線で世界中でデータ共有。

JMA GLOBAL ANALYSIS - DATA COVERAGE MAP (Da00ps): 2009/04/22 00:00(UTC)



(理研 三好建正氏発表資料より)

しかし・・・



ここではほとんど気圧の観測はないはず。

天気予報の作り方

- 観測 + それを基にした解析 → 正確な初期値
- 数値モデル → 正確な物理法則

観測

- 気象衛星、地上観測などで情報を得る

解析(同化)

- 観測をもとに、各地点の状態を推定
(例：気圧配置)

シミュレーション

- 各地点の状態を物理モデルに基づき予測

補正

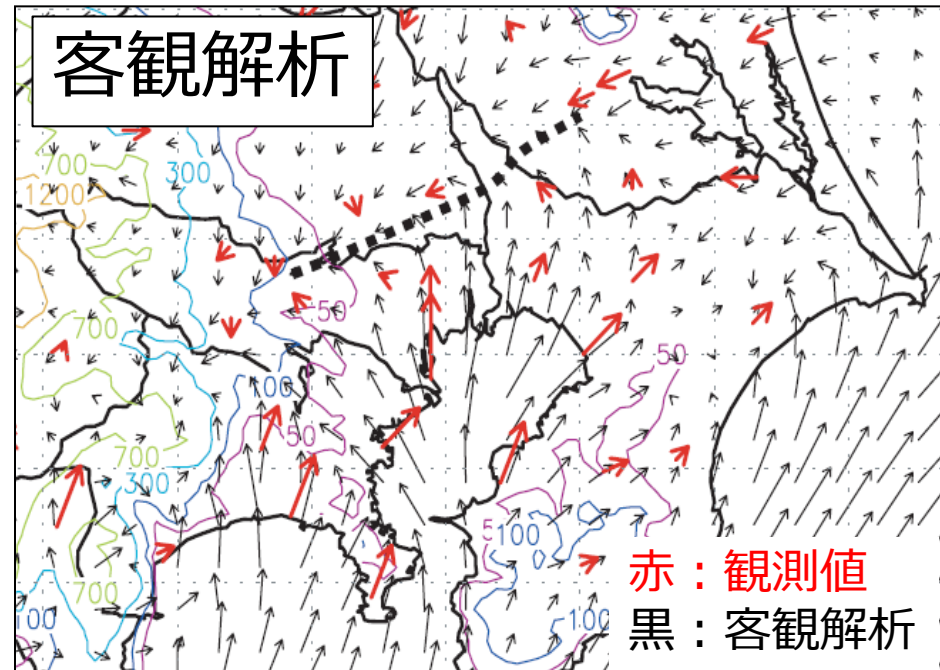
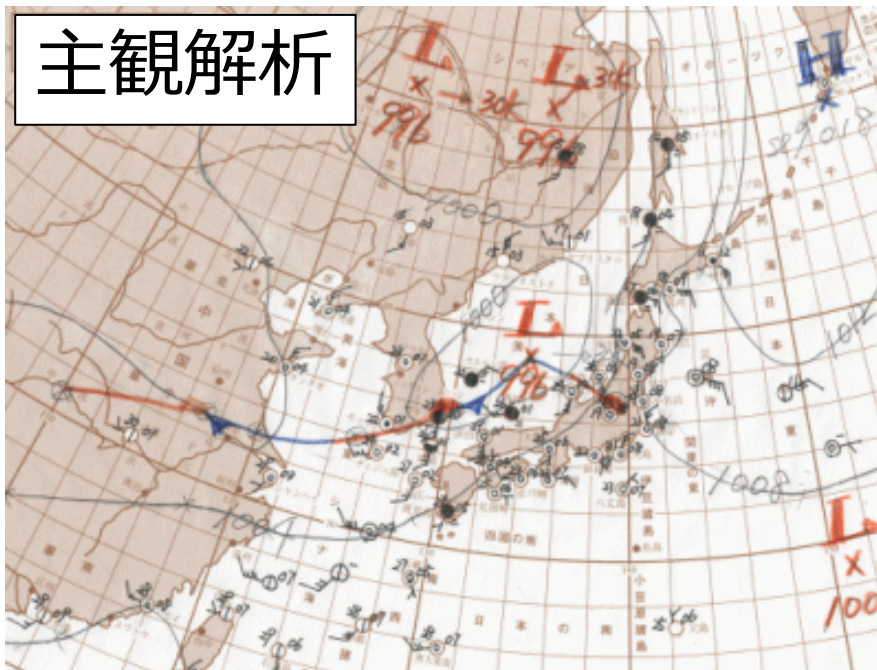
- データベース + 予報官の経験に基づき補正

観測だけでは初期値は作れない

- 数値天気予報を始めるには、全地点での風速・気圧・気温などの情報が必要。
 - しかし、全地点での観測は入手不可能
 - 正確に入力しないと天気予報は外れる
- 客観解析（データ同化）という手段
 - 過去に出した天気予報の結果を観測データで補正する
 - 観測値の情報を周囲にも波及させる

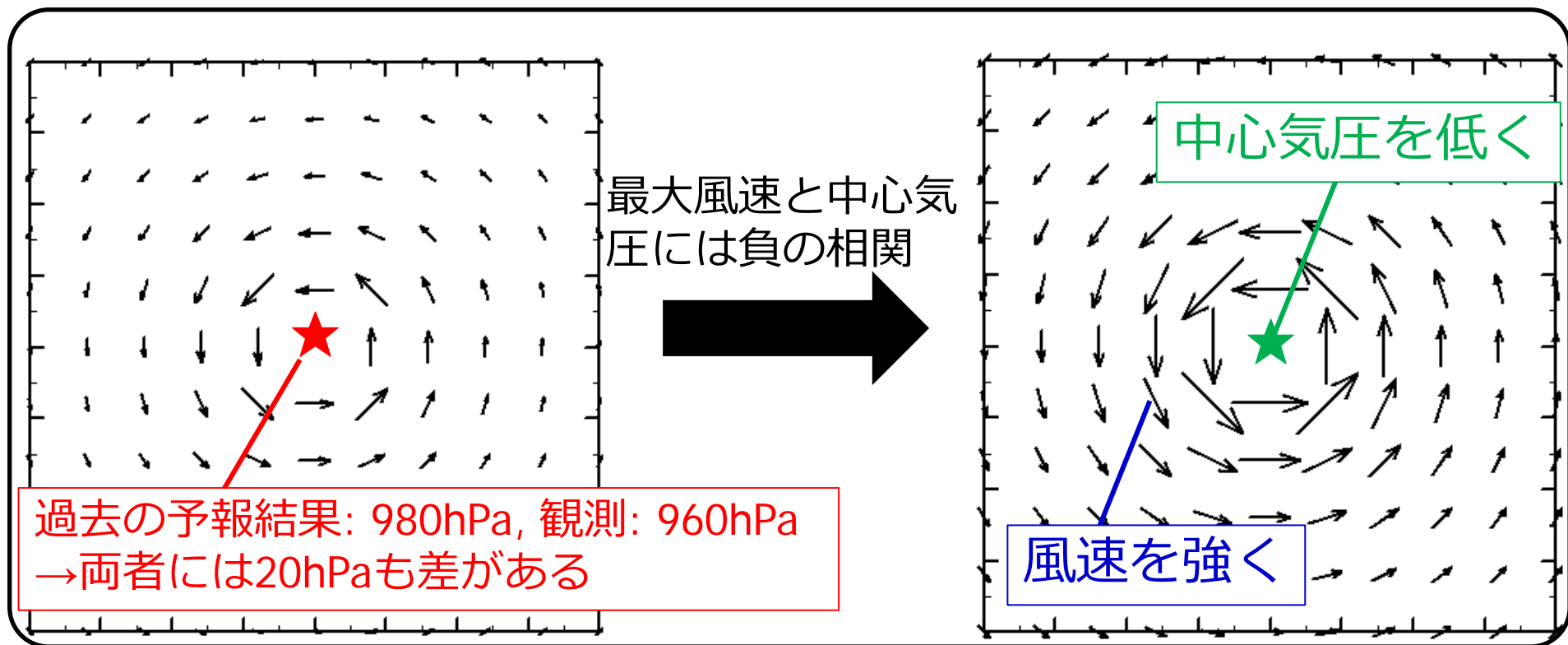
解析

- 解析：観測がない地点も含め、尤もらしい値を推定
 - 主観解析：観測をもとに人の手で天気図を書く
 - 客観解析：観測と過去の予報から数値計算で作る
- 現在の天気予報は客観解析(データ同化)で風速や気温などを推定し、それを数値シミュレーションの初期値として与える。



解析はなぜ重要か？台風を例にして

- 中心気圧の観測値が得られたら、過去の予報結果を観測値に近づければいいんじゃないの？
→中心気圧だけを修正するのはもったいない。
- 中心気圧が低いとき、風速は大きい。
→共分散を使って風速も同時に直す。

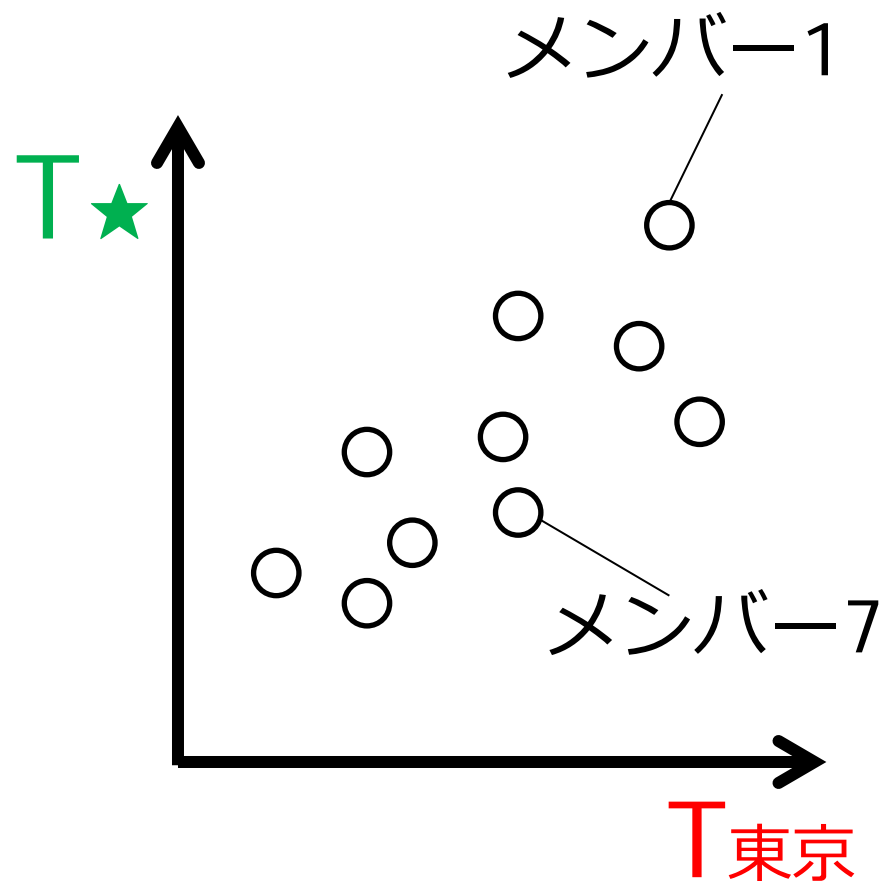


言うは易く、行うは難し：共分散の計算

- 予報変数の数を n 個とすると、予報変数の共分散の組み合わせは n^2 個だけある。
- 予報変数の共分散を直接計算するのは無理なので、近似計算を行うアルゴリズムを利用。
 - 4次元変分法(4DVar)
 - アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)
 - ハイブリッド(Hybrid EnKF-4DVar)
- 4DVarとEnKFにはいずれも一長一短がある。
→気象庁は現在、主に4DVarを利用。やがて、ハイブリッド法に移行する予定。

アンサンブルで共分散を推定する

- 初期条件を少しずつ変えて複数の予報を実施。
 - 統計を取って、共分散を近似的に計算。
 - 東京**での観測を使って★**地点**の値を推定



天気図（客観解析）の正しい捉え方

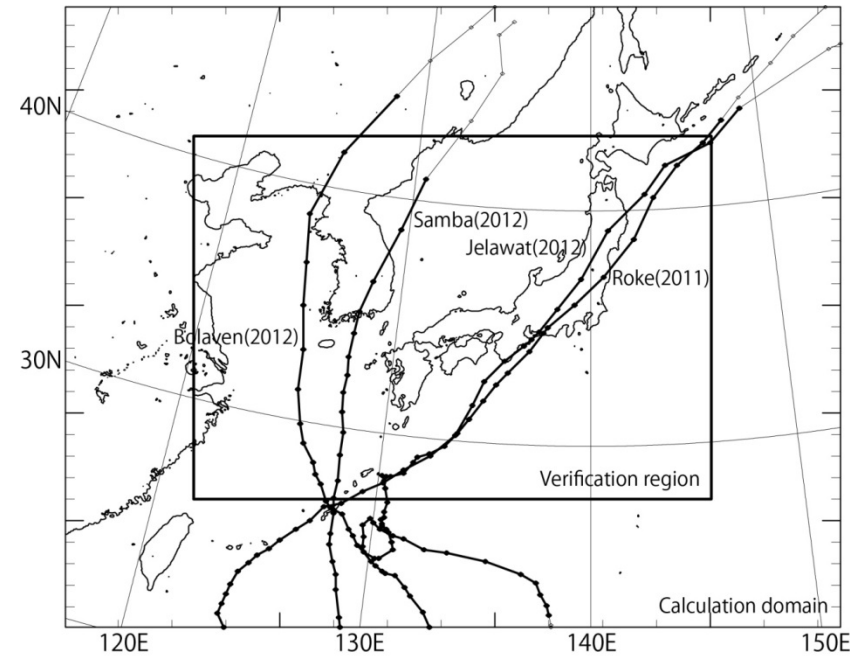
日本付近は
観測が多いので
正確な値に近い

データ同化によって頑
張って推定しているが、
観測が少ない分怪しい

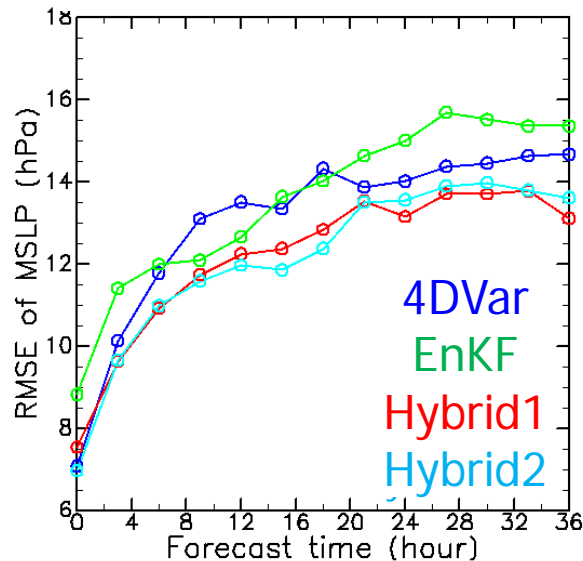


データ同化手法と 台風予報誤差

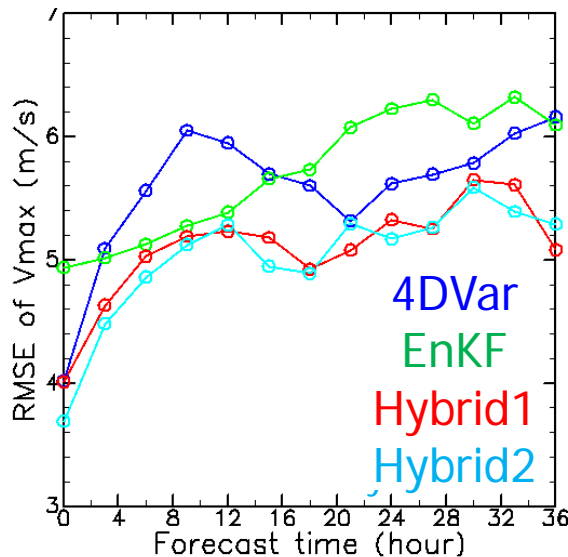
- 日本付近を通過した強い台風で同化&予報実験
- Hybrid法を用いると強度も進路も予報誤差が小さい



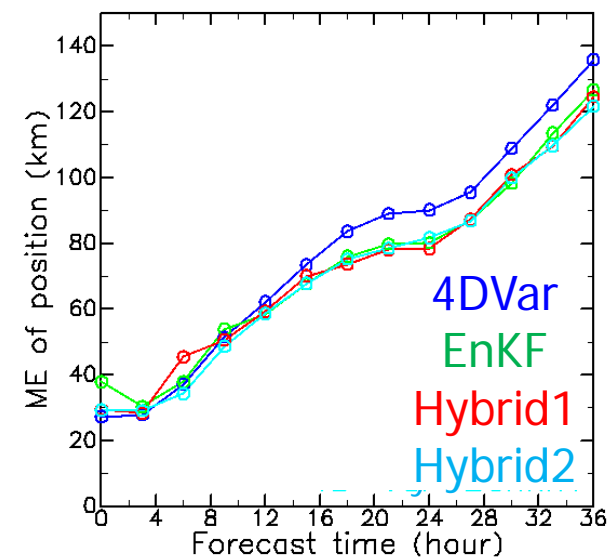
中心気圧の予報誤差



最大風速の予報誤差



進路の予報誤差



(Ito et al. 2016)

天気予報の作り方

- 観測 + それを基にした解析 → 正確な初期値
- 数値モデル → 正確な物理法則

観測

- 気象衛星、地上観測などで情報を得る

解析(同化)

- 観測をもとに、各地点の状態を推定
(例：気圧配置)

シミュレーション

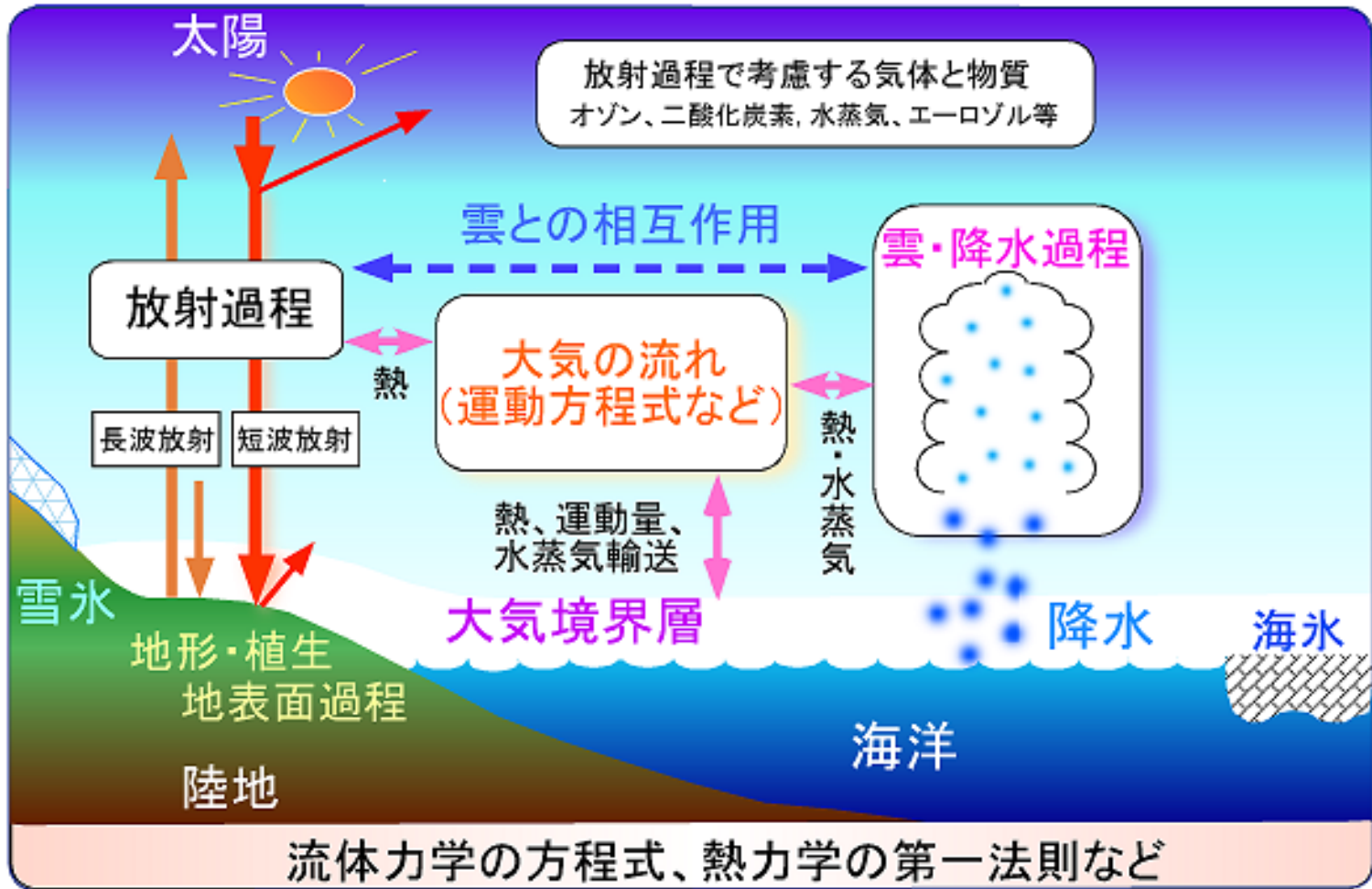
- 各地点の状態を物理モデルに基づき予測

補正

- データベース + 予報官の経験に基づき補正

シミュレーションに使う物理法則

- 物理法則をコンピュータで計算できるようにしたもの



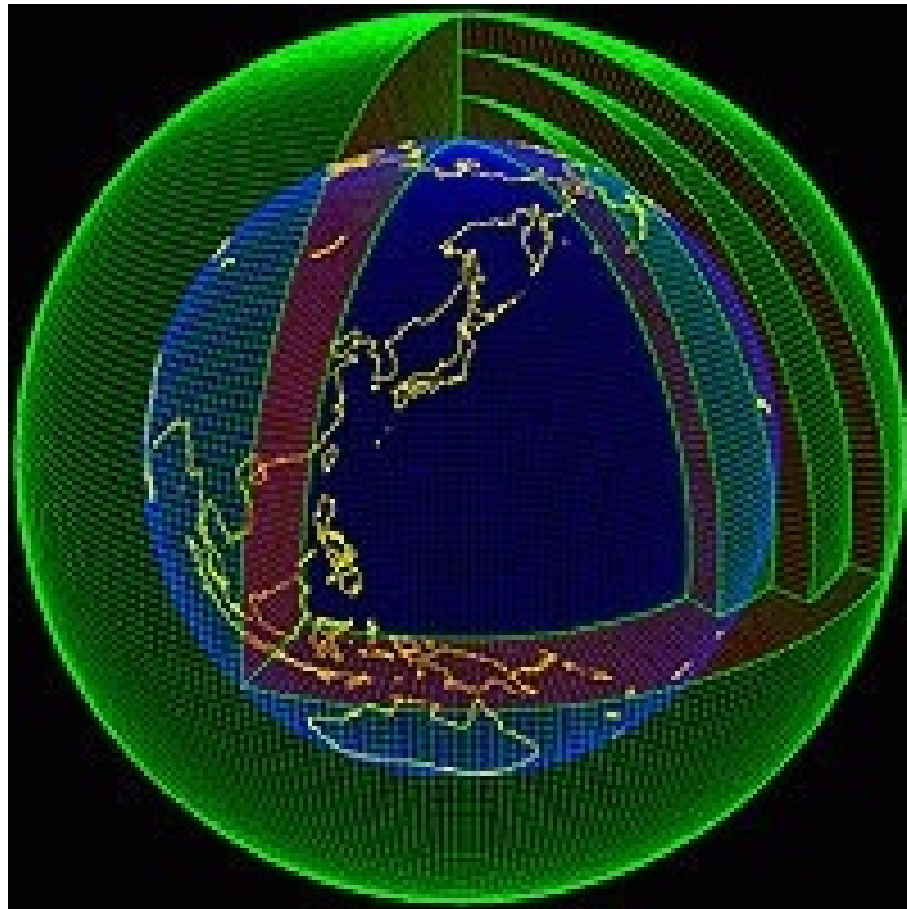
(気象庁HP「数値予報とは」)

世界中の空気の地域ごとに分割

⇒各地点で基礎方程式を計算

⇒高校数学のように手計算で解けない

⇒コンピュータに計算を頑張ってもらおう！



(気象庁HP)

天気予報の作り方

- 観測 + それを基にした解析 → 正確な初期値
- 数値モデル → 正確な物理法則

観測

- 気象衛星、地上観測などで情報を得る

解析(同化)

- 観測をもとに、各地点の状態を推定
(例：気圧配置)

シミュレーション

- 各地点の状態を物理モデルに基づき予測

補正

- データベース + 予報官の経験に基づき補正

シミュレーション結果を補正 & 確認

- シミュレーション結果は不完全なので、現実の天気との対応を考慮し、ニューラルネットワークなどにより補正する（**ガイダンス**の作成）。
- 予報官はその他の情報を踏まえて、最終的に発表。

数値予報結果

850hPa: 高度、風、湿度...
925hPa: 高度、風、湿度...
950hPa: 高度、風、湿度...
地上: 気圧、降水量、風...

翻訳

ガイダンス

晴れ後雨
最低気温14°C
最高気温21°C



(気象庁数値予報研修テキスト第45巻)

(筆保・伊藤・山口「台風の本体」)

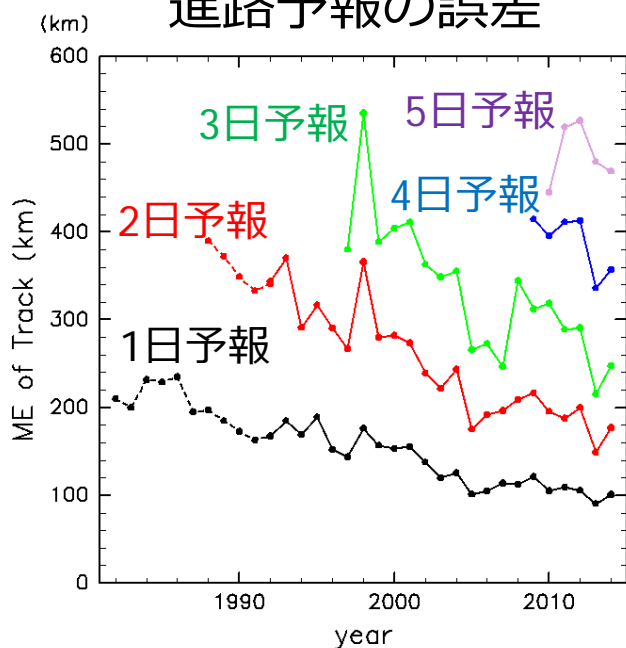
**さらに天気予報を
良くするために：**

物理モデルの問題・初期値の問題

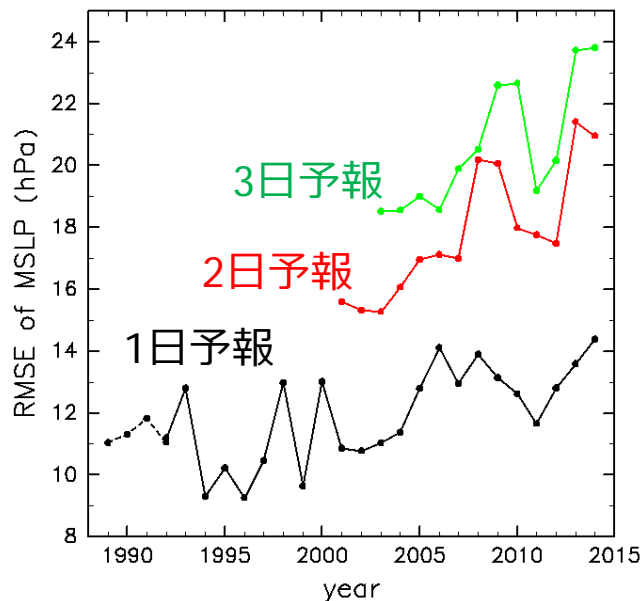
気象庁による台風の予報について

- 気象庁はシステムの改良を続けているほか、各国の結果も参考にして予報を発表するようになった。
- 進路予報：ずっと改善が続いている。現時点で気象庁が発表する予報は世界最高精度と言ってよい。
- 強度予報：なかなか改善が進まない。

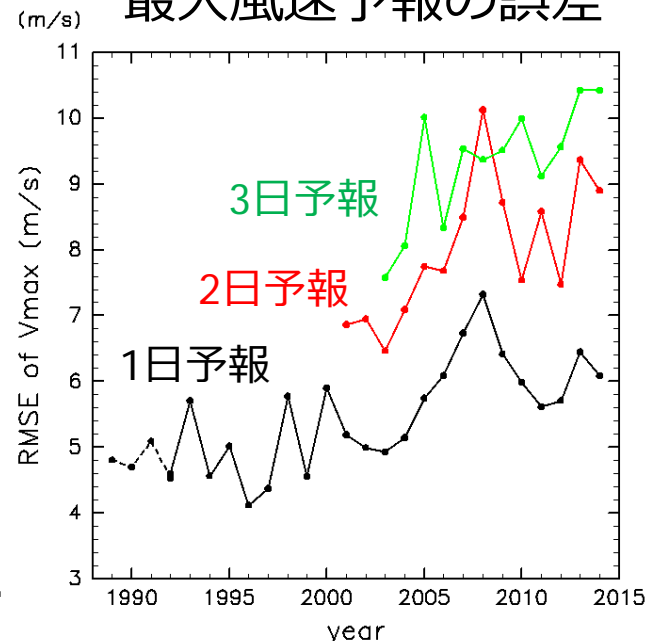
進路予報の誤差



中心気圧予報の誤差



最大風速予報の誤差

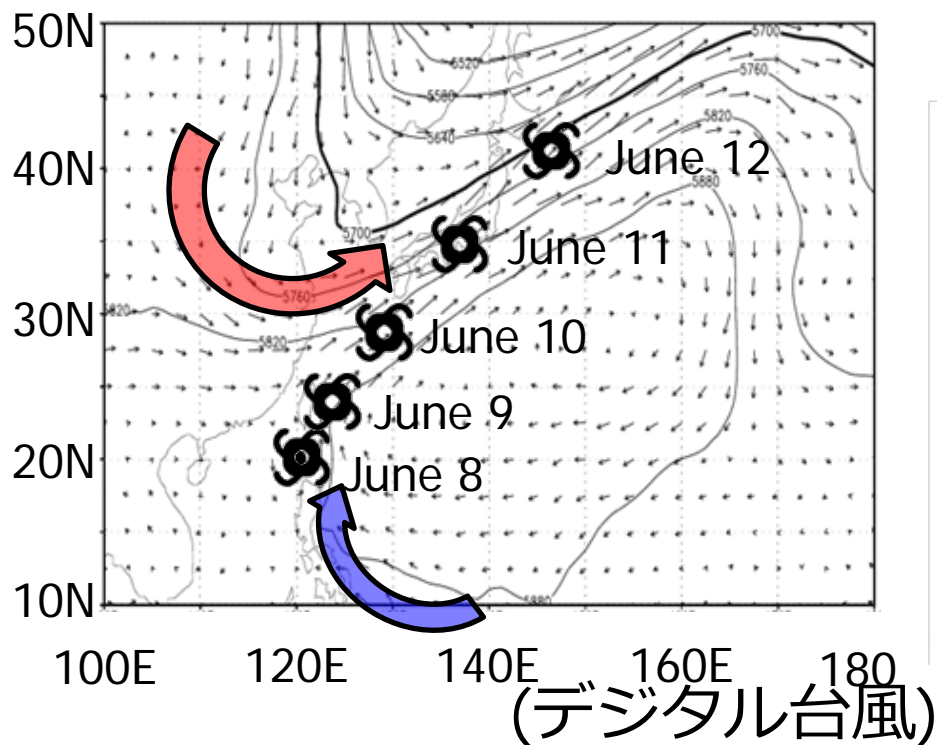


(伊藤, 2016)

台風の強度予報はなぜ難しい？

➤ 進路

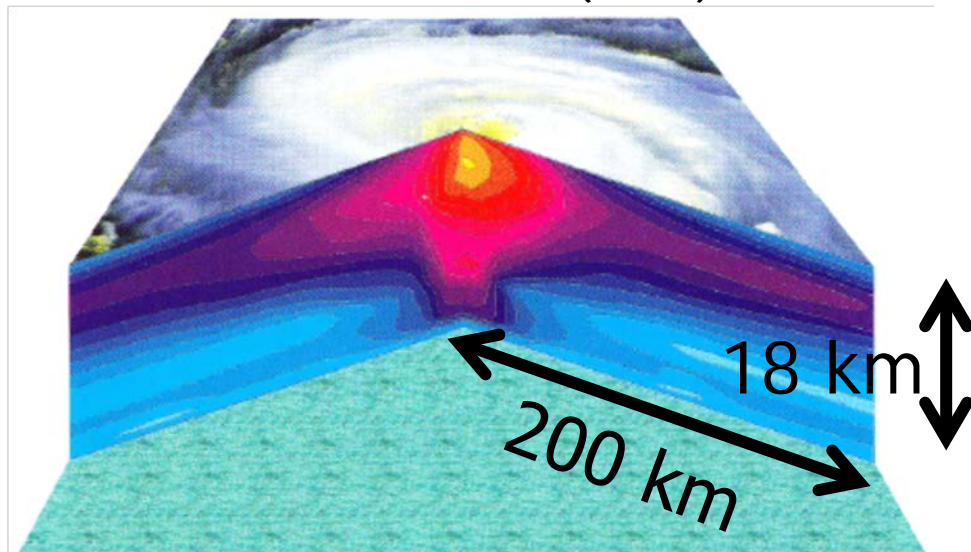
→ 数百～千km離れた地点の流れでおよそ決まる



➤ 台風の強さ(強度)

→ 中心付近のエネルギーバランスを正確に解く必要

気温の変化量:
Hurricane Fran (1999)



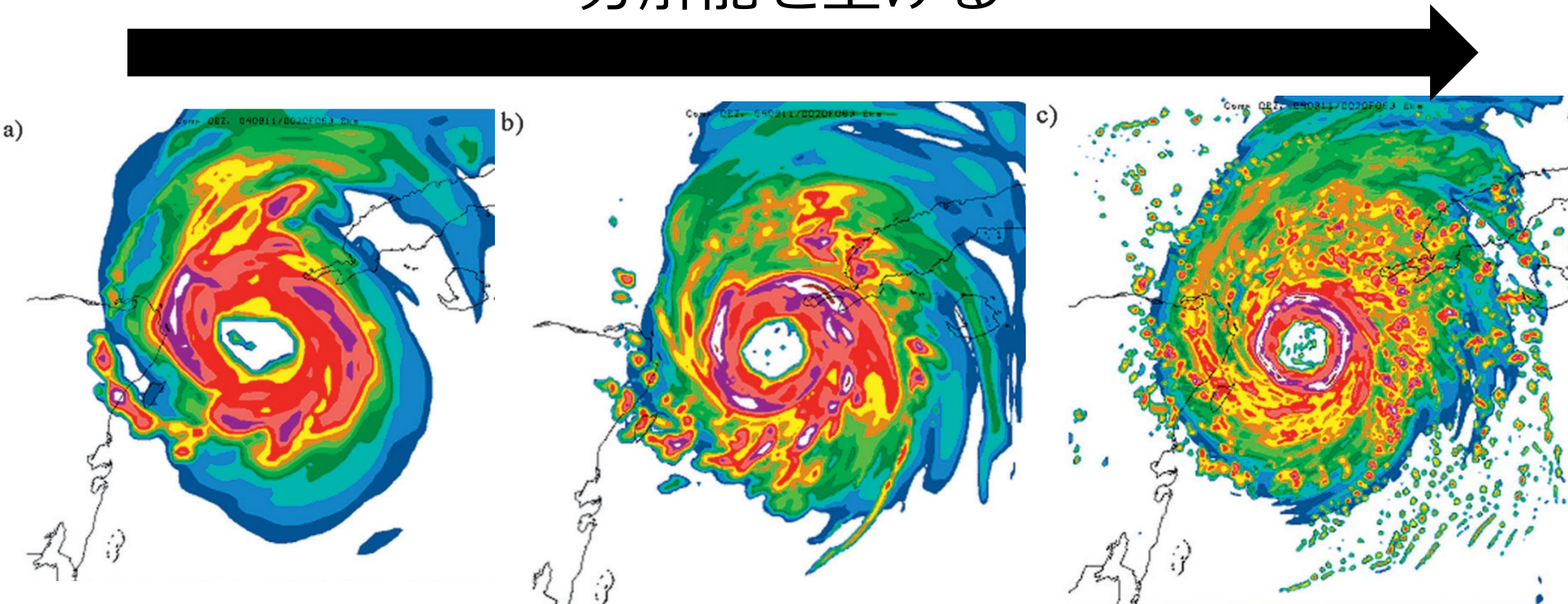
(Emanuel, 2004)

・ 台風強度を再現するためには、高解像度で計算する必要がある

台風強度を再現するには

- 計算する領域を非常に細かく分割しないと、台風の心臓部である中心付近は再現できない
→大規模な数値計算が必要になる。

分解能を上げる



(Gentry and Lackmann, 2010)

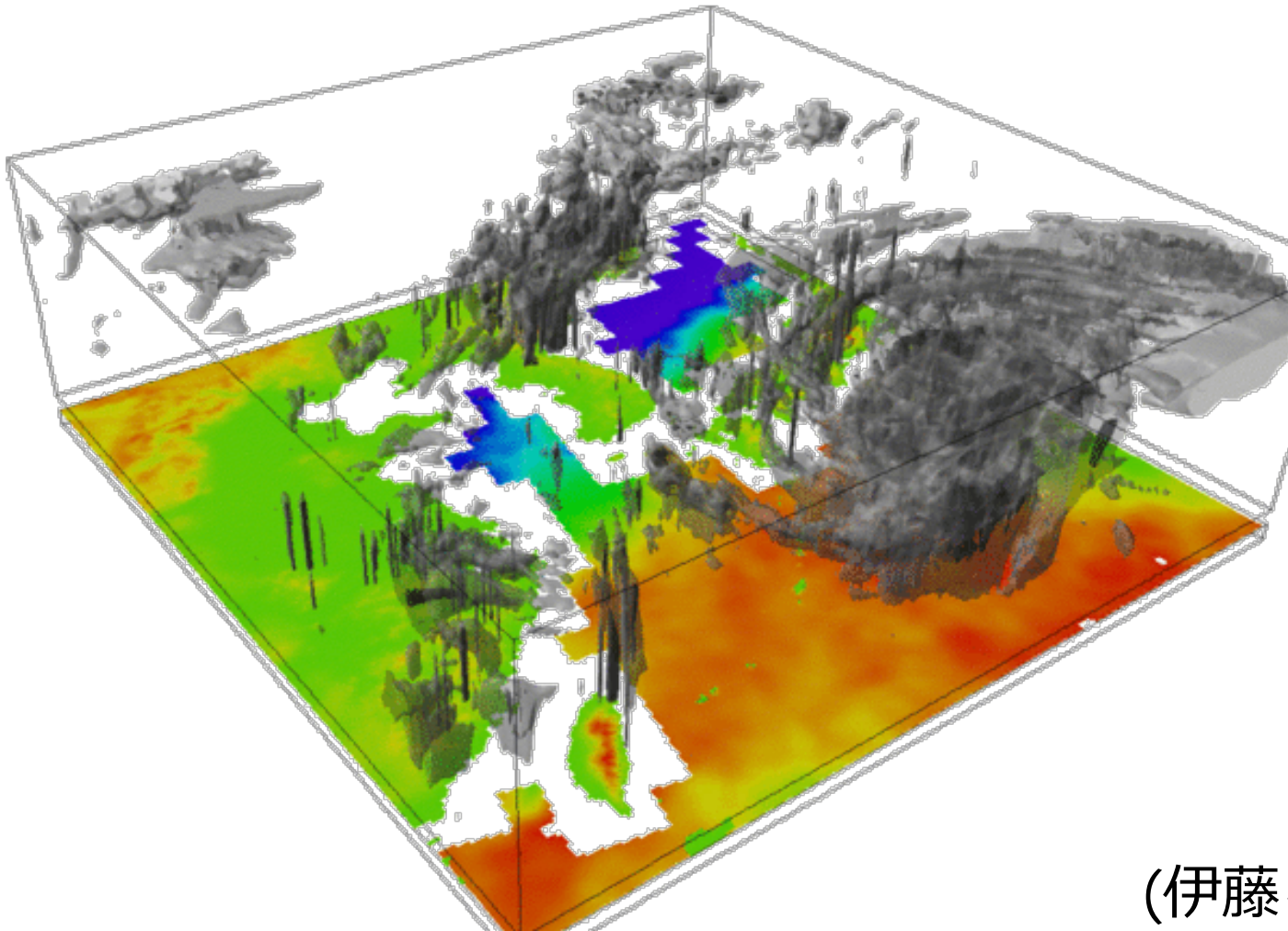
スーパーコンピュータ「京」

- 2011に世界で一番速いマシンとなった
(現在でも世界で5番目に速いマシン)
- **SPIRE 分野3** 2011-2015年度
防災・減災に資する地球変動予測
→ **FLAGSHIP 2020** 2014-2018年度 (予定)
観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化



伊藤研：「京」を使った予測

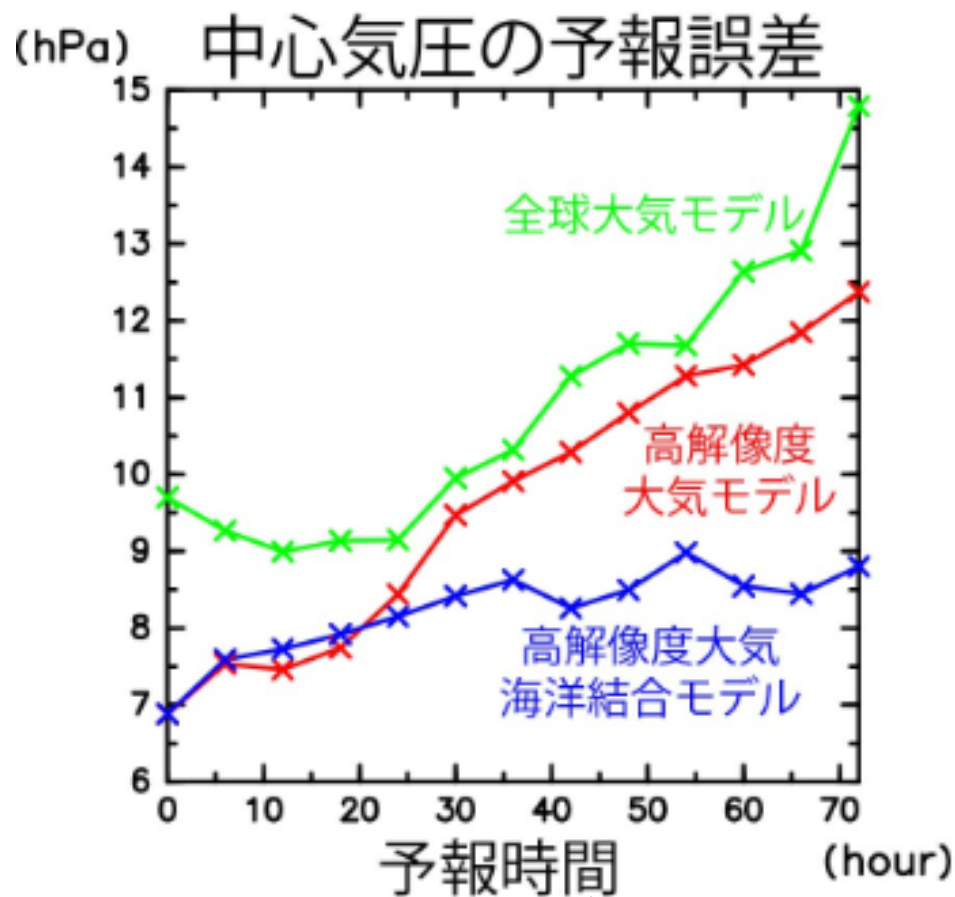
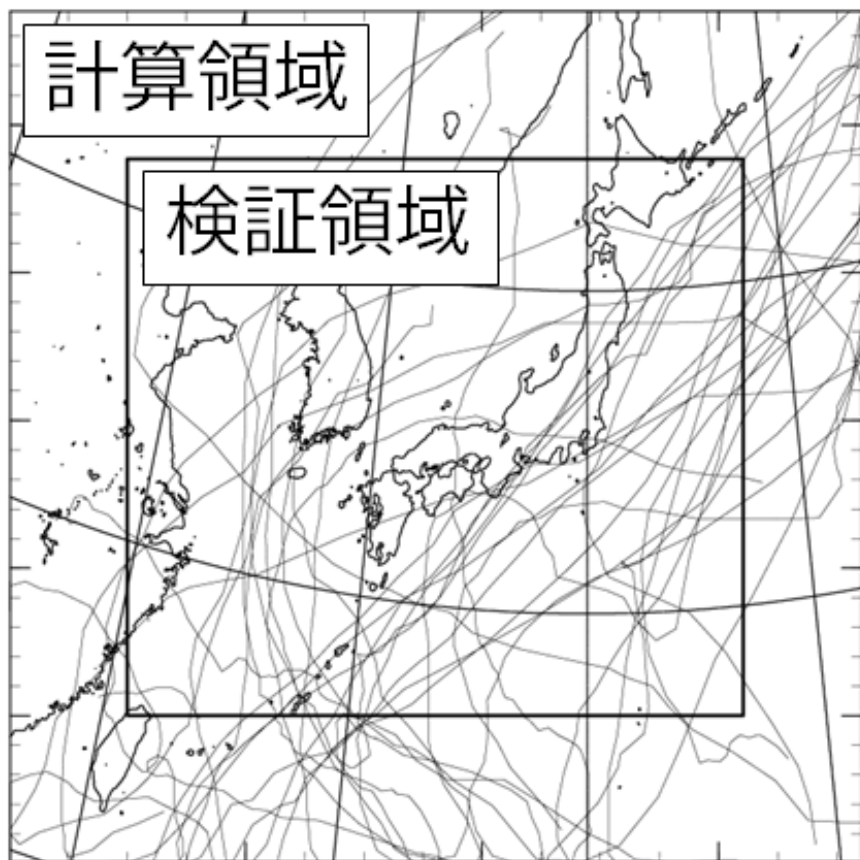
- 気象庁は現在、大気だけを計算しているが、台風にとっては海洋も大事。
- 大気・海洋の同時計算⇒正確な台風強度予報



(伊藤ら, 2015)

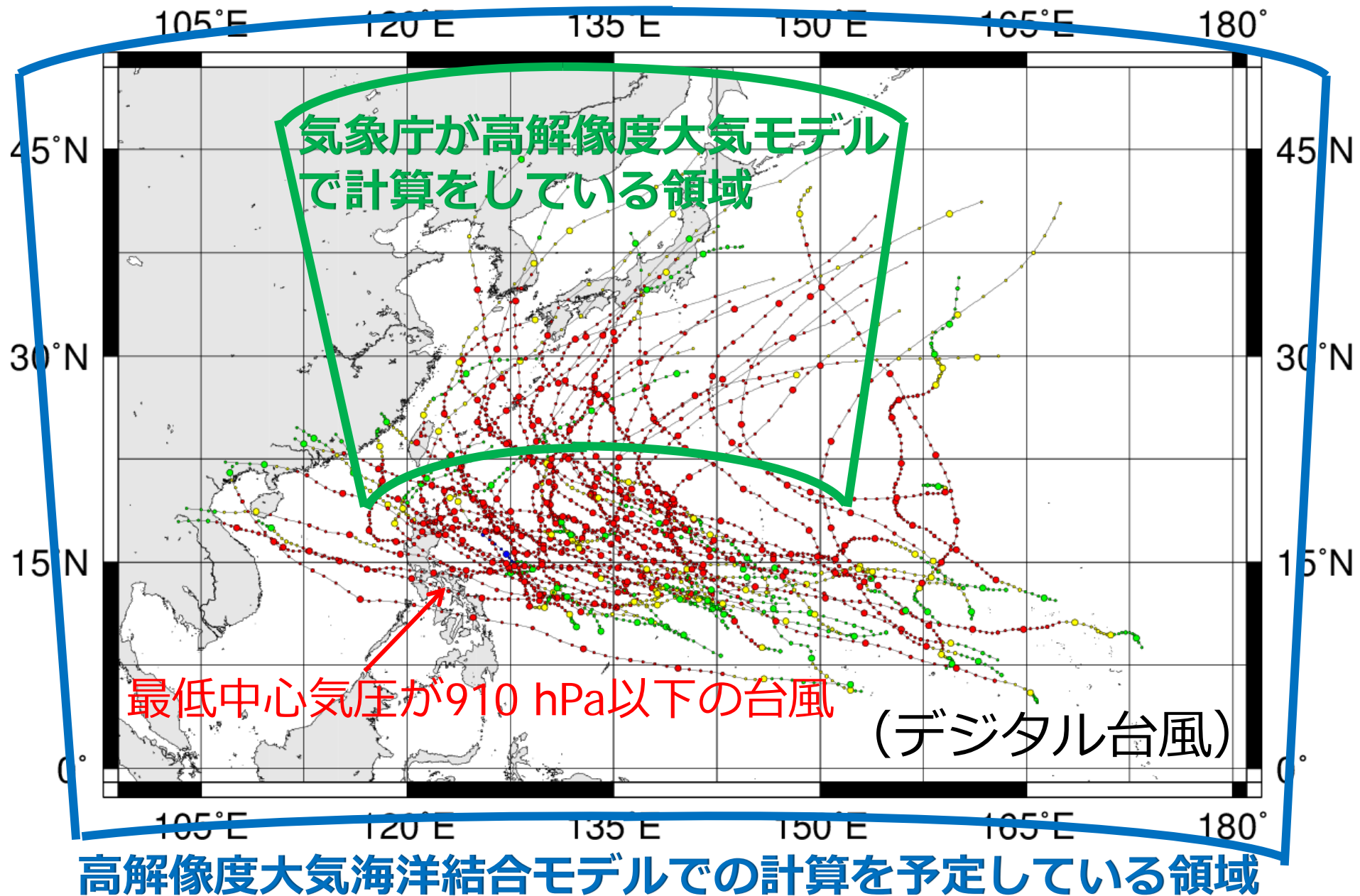
台風強度予測の大幅な精度向上に成功！

- 性能を検証するため、281回の予測実験を行った。
- 気象庁の大気モデルを用いた予報よりも、中心気圧や最大風速の予測誤差が約20-40%低下。



(伊藤ら, 2015)

将来計画：北西太平洋台風予測システム



機動的観測：初期誤差を減らすために

台風の予報に悪影響を与える地域を割り出し、
航空機などで観測データを取りに行く

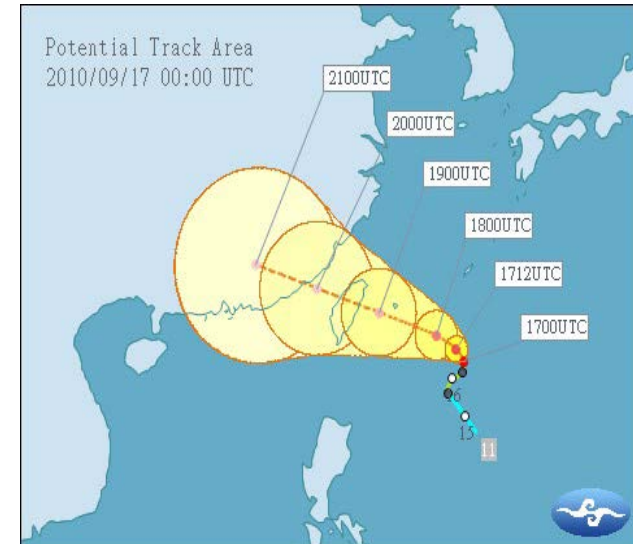
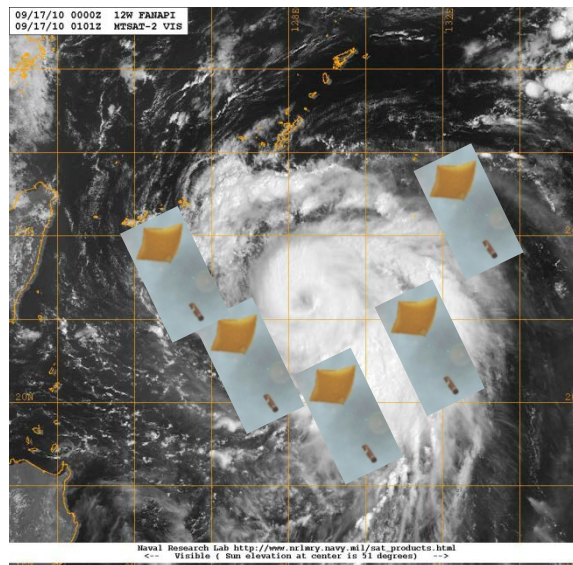
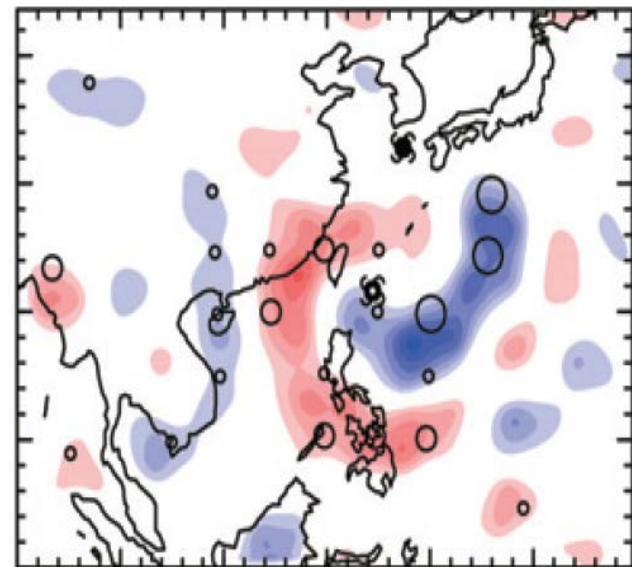
感度解析



航空機観測

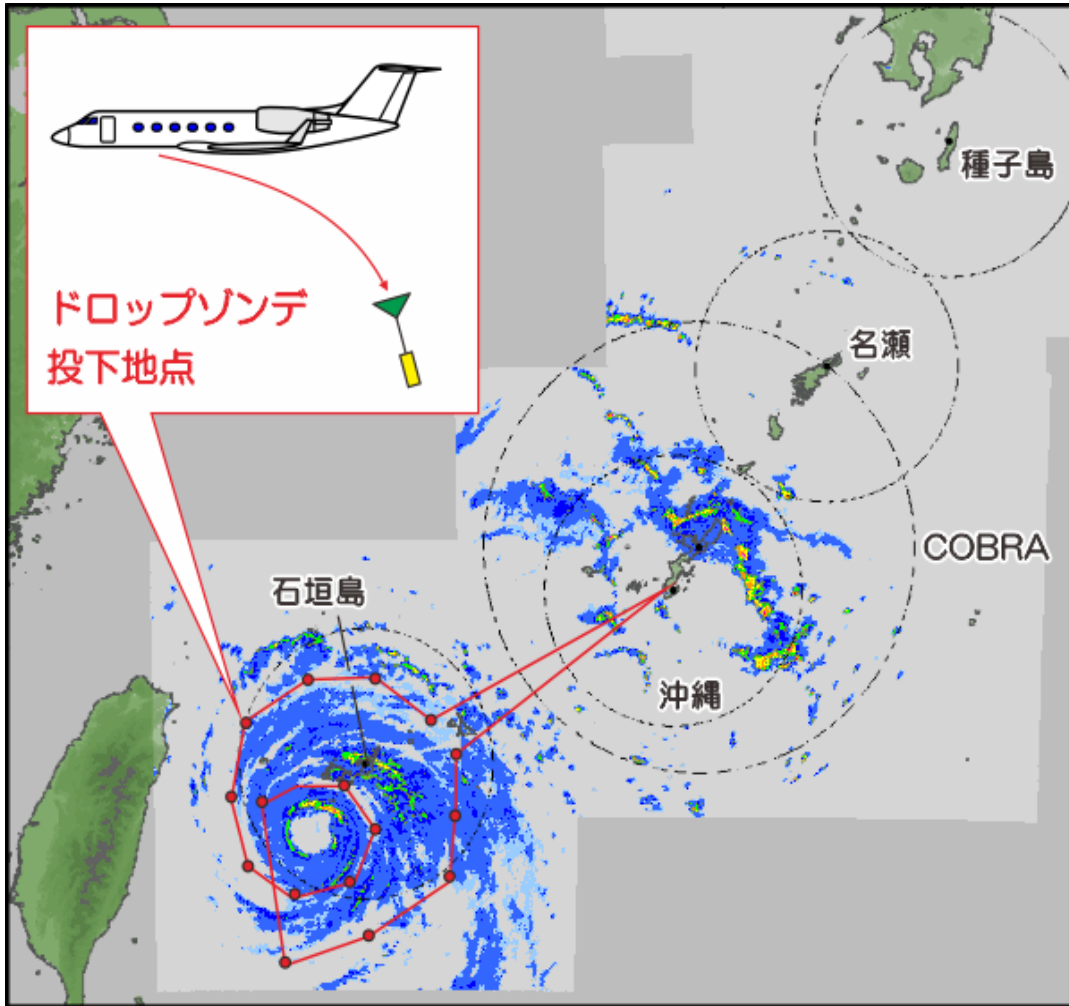


予報精度
向上



(Ito and Wu, 2013)

沖縄における航空機観測計画 (2017-2020年度)



雲・エアロゾル地上観測

名大 降雨レーダ



名大雲レーダ



雲粒子ゾンデ

ドローンによる観測



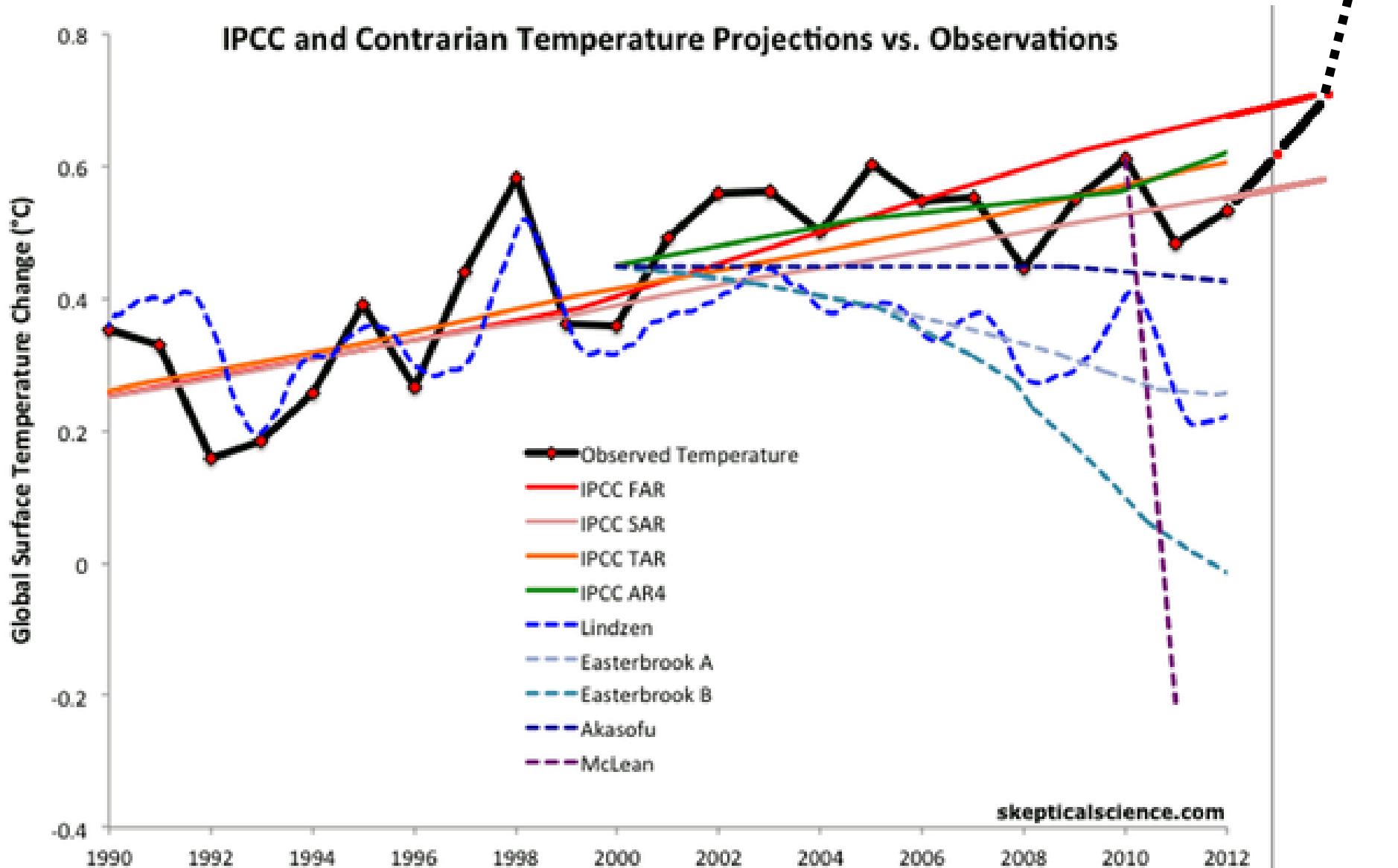
科学研究費基盤S「豪雨と暴風をもたらす台風の力学的・熱力学的・雲物理学の構造の量的解析」
研究代表者：坪木和久（名古屋大学）名古屋大学、琉球大学、気象庁気象研究所による共同研究

なぜ、長時間の予報は難しい？

→誤差は時間とともに成長する

- 天気予報では、
1分後の予報結果を使って2分後を予報、
2分後の予報結果を使って3分後を予報と
進んでいくので、不確かさが増していく。
- では、ずっと先の予報はどうか？
→地球温暖化の予測なんかできないのでは？
→これは、また、別の問題。
- 事象によっては1か月先の予報も可能。

地球温暖化の予測



全体のまとめ

- 現在の天気予報は数値物理モデルをベースにして予測を行っている。
- 天気予報を正確に当てるためには
 - 観測を客観解析に取り込み、正確に初期状態を推定する
 - 物理モデルを可能な限り完全にしていく
- 伊藤研の目指す新時代の天気予報の姿
 - スーパーコンピュータを活用した高解像度大気海洋結合システム
 - 航空機を用いた機動的観測や増え続ける衛星データによる予測精度の改善

以上です。ご清聴ありがとうございました。



(ある日の雲：伊藤の琉球大学の研究室から撮影)