

天気予報と地球温暖化予測の 仕組み

西井和晃

東京大学先端科学技術センター

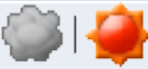
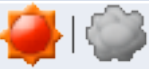
1月10日対象の宮城県東部天気予報

気象庁週間天気予報より

発表日	3日発表	4日発表	5日発表	6日発表	7日発表	8日発表	9日発表
天気	晴時々曇	晴時々曇	晴時々曇	晴時々曇	晴時々曇	晴時々曇	晴時々曇
マーク							
降水確率	20	20	10	10	10	20	10/10/ 10/0
最高(°C)	5	5	5	5	5	6	5
最低(°C)	-1	-2	-1	-1	-1	0	1
信頼度	A	A	A	A	A	-	-

1月7日対象の宮城県東部天気予報

気象庁週間天気予報より

発表日	31日発表	1日発表	2日発表	3日発表	4日発表	5日発表	6日発表
天気	曇一時雨 か雪	曇一時 雨か雪	曇時々 晴	曇時々 晴	晴時々 曇	晴時々 曇	晴時々 曇
マーク							
降水確 率	50	50	30	30	20	20	10~20
最高 (°C)	8	7	4	3	2	2	4
最低 (°C)	2	1	-1	-2	-3	-2	-1
信頼度	C	C	A	A	A	-	-

A：予報の信頼度が高い。 C：信頼度が低い

言葉の定義

- 天気予報
 - 天気を予測し、あらかじめ報じる
 - 天気の定義
 - ある場所の、ある時刻の気象状態。気温・湿度・風・雲量などを総合した状態。（デジタル大辞泉より）
- 地球温暖化予測（＝気候予測）
 - 温暖化に伴う将来の気候変化を予測する
 - 気候の定義
 - ある十分に長い期間における「天気の統計量」
 - 晴れが○回, 雨が×回
 - 平均気温, 平均降水量

よくある間違い

- 今年の冬は寒い. だから温暖化は嘘だ.
 - たった1つの地点の一冬だけでは判断はできない.
 - 温暖化しても, 寒い冬は発生しうる.
 - 1の目が出やすい様に細工したサイコロでも, 6の目がでるときがある.



天気予報の仕組み

気象庁の提供する防災情報の一部

気象庁サイト → 防災情報

気象

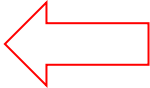
- [気象警報・注意報](#)
- [気象情報](#)
- [台風情報](#)
- [指定河川洪水予報](#)
- [土砂災害警戒情報](#)
- [土砂災害警戒判定メッシュ情報](#)
- [竜巻注意情報](#)
- [レーダー・ナウキャスト\(降水・雷・竜巻\)](#)
- [高解像度降水ナウキャスト](#)
- [解析雨量・降水短時間予報](#)

天気予報など

- [天気予報](#) / [分布予報](#) / [時系列予報](#)
- [天気図](#) [実況](#) / [24時間先](#) / [48時間先](#)
- [週間天気予報](#)
- [異常天候早期警戒情報](#)
- [季節予報](#)

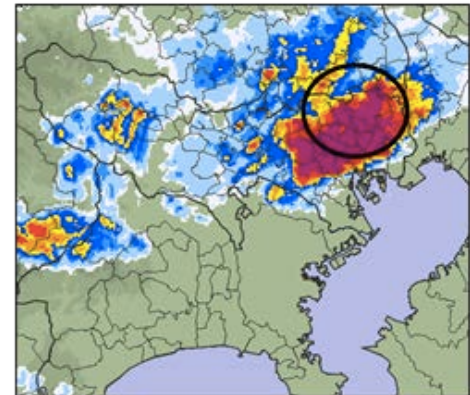
5分先から数ヶ月先の
気象を多くの技術
を用いて予報

多くの技術のうちの2つ

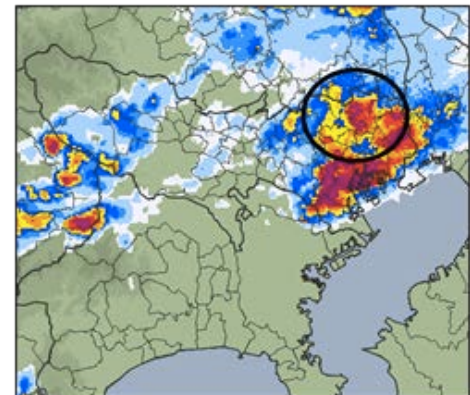
- 数値予報  この講演では主にこれを説明
 - 大気の物理の方程式に基づいて将来の天気を予報
 - 「天気のシミュレーション」
 - 数時間以上先の予報
- ナウキャスト
 - 過去から現在の変化傾向から将来を予測
 - +簡単な雲の予測モデル
 - 5分～数時間程度先までの予報

平成26年6月29日16時00分を初期値
気象庁サイトより

高解像度降水ナウキャスト



20分後予測



解析値

数値予報に必要なもの

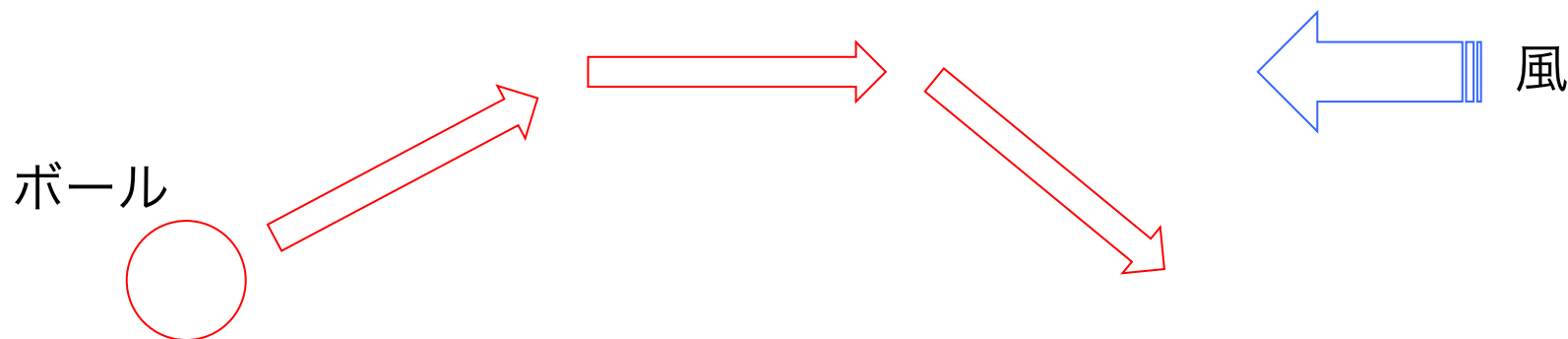
(高性能のコンピューターがあったとして)

1. 大気の従う物理法則の適切なモデル化
2. 大気の初期状態の把握
3. 大気の接する陸と海の状態の予測
 - それぞれのモデルが必要. または何らかの仮定

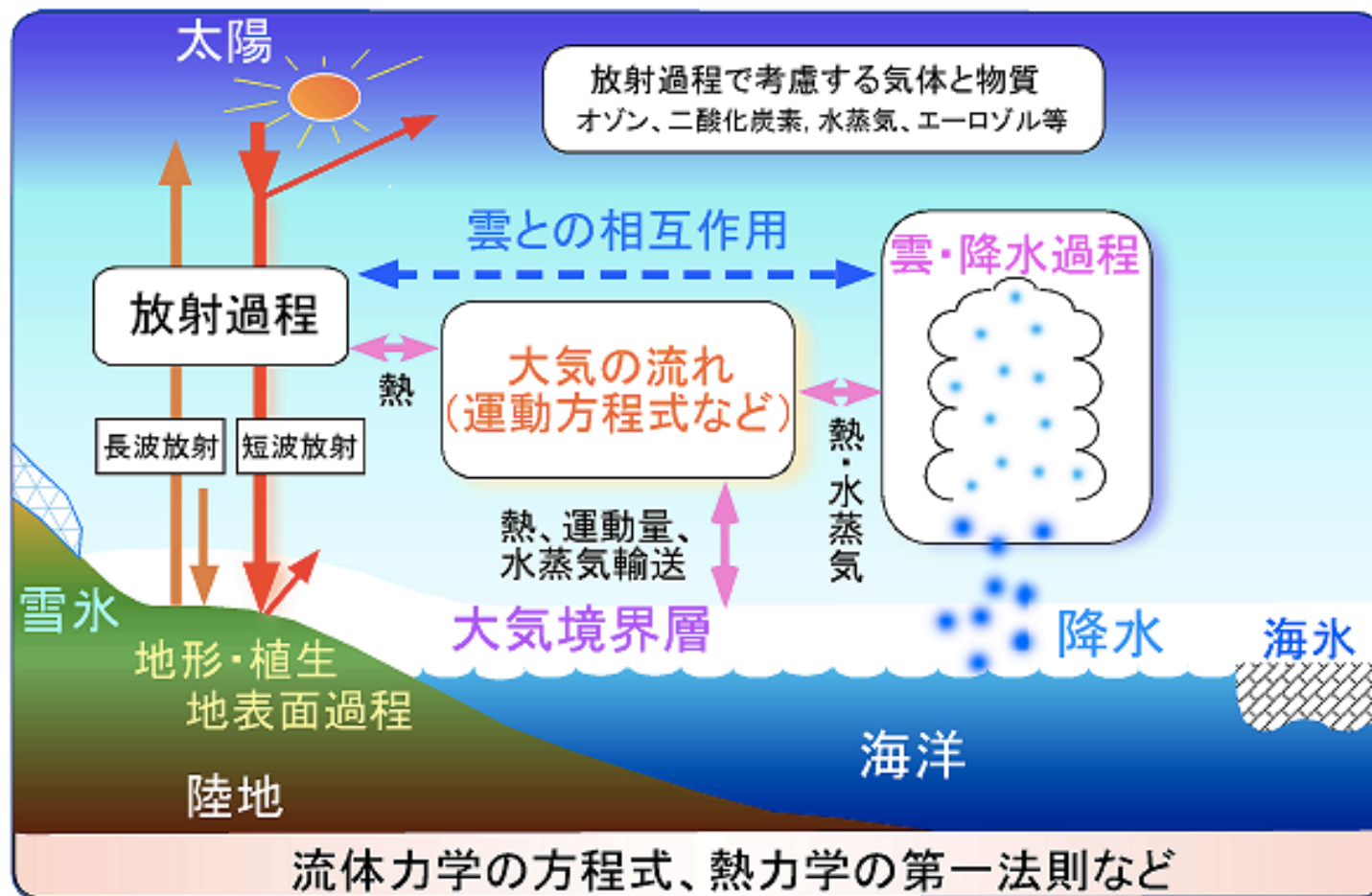
ボール投げのシミュレーションとの類似点

必要なもの

1. ボールの運動のモデル化（運動方程式）
2. ボールの初期状態の把握（初期値）
3. ボールの周りの風の状態の予測
 - 風を予測するためのモデルか、何かを仮定



数値予報モデルで考慮されるもの



気象庁HPより <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>

モデルの種類により考慮のされ方が異なる

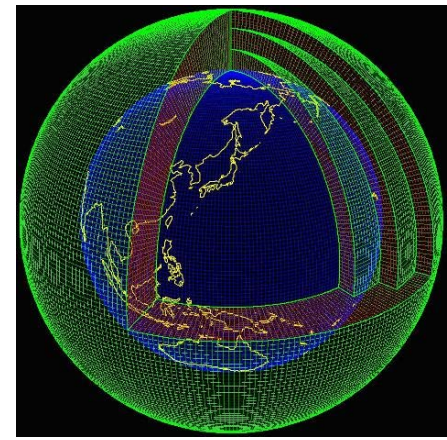
例として大気の流れの計算

- 大気は流体なので，流体の運動方程式に従う
- 一般解はないので，大気を分割してコンピュータ上で近似計算を行う

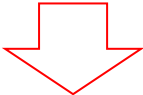
➤ 1 例：微分を差分に置き換える $\frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \sim \frac{\Delta f}{\Delta x}$

- 細かく分割するほど近似精度が良くなる
 - しかし，高性能のコンピュータが必要になる
 - または予報に時間がかかる
- 目的に応じて複数のモデルが利用される

気象庁HPより



気象の空間スケールと予報モデル

- 小さな現象
 - 集中豪雨など
(10~100km)
 - 予報のためには大気をより細かく分割する必要
 - ✓ 特定の領域のみ細かく分割して計算
- 
- 大きな現象
 - 台風や温帯低気圧など
(100km~)
 - 予報のためには広い領域の計算が必要
 - ✓ 地球大気全体を粗く分割

領域モデル

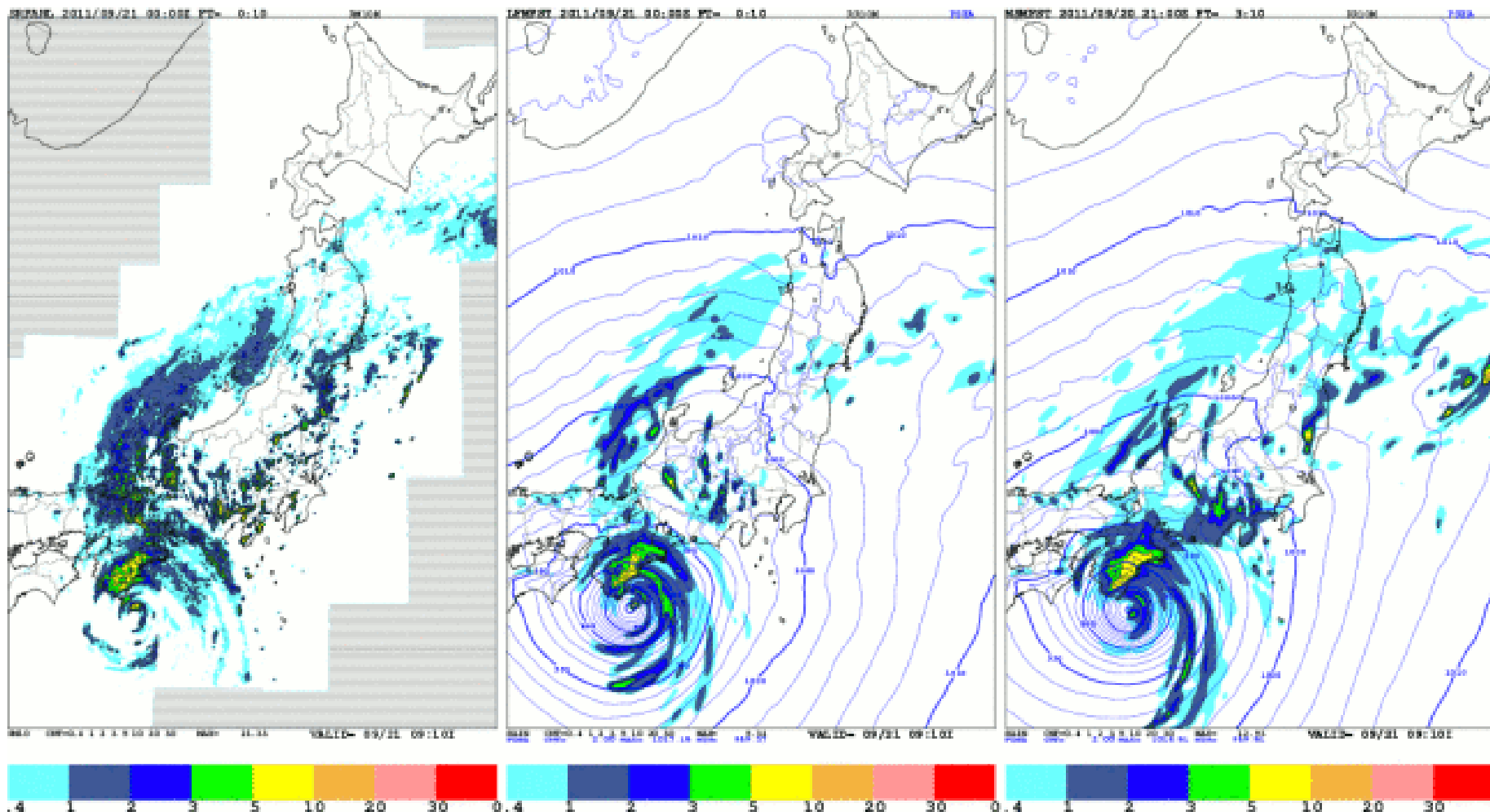
全球モデル

領域モデルの雨

観測

2km モデル

5km モデル



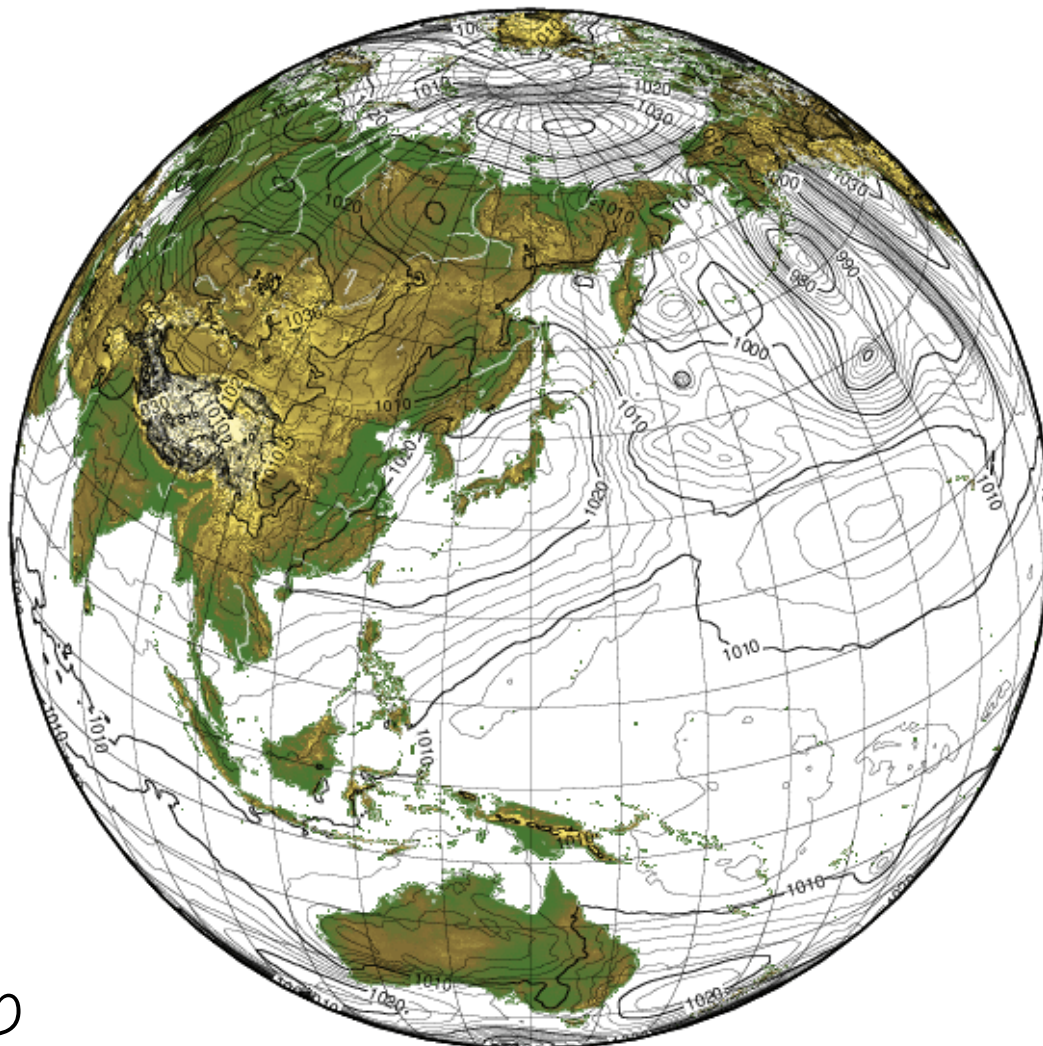
2011年9月21日 台風15号

気象庁サイトより

全球モデルの雨

GSM-TL959L60 2014.01.23.12UTC FT=000

(Valid Time: 01.23.12UTC)



予報モデルの種類（気象庁HPより）

予報モデルの種類	モデルを用いて発表する予報	予報領域と水平解像度	予報期間	実行回数
局地モデル	防災気象情報、飛行場予報	日本周辺 2km	9時間	毎時
メソモデル	防災気象情報、航空気象予報	日本周辺 5km	39時間	1日8回
全球モデル	分布予報、時系列予報、府県天気予報、台風予報、週間天気予報	地球全体 20km	11日間	1日4回
台風アンサンブル予報モデル	台風予報	地球全体 40km	5.5日間	1日4回
週間アンサンブル予報モデル	週間天気予報	地球全体 40km	11日間	1日2回
1か月アンサンブル予報モデル	異常天候早期警戒情報、1か月予報	地球全体 55km	1か月	週2回
3か月・暖寒候期アンサンブル予報モデル	3か月予報、暖寒候期予報	地球全体 180km	7か月	月1回

天気予報の作成手順

1. 世界中の天気の状態の観測
2. 観測データの収集と品質チェック
3. 数値シミュレーションのための初期値作成
4. 数値予報モデルによるシミュレーション
5. 結果を実際の天気「翻訳」
6. 以上を参考にして予報官・気象予報士が天気予報を作成
7. 予測を配信

天気観測

- 気温, 気圧, 風, 水蒸気, 海面水温などを観測

百葉箱



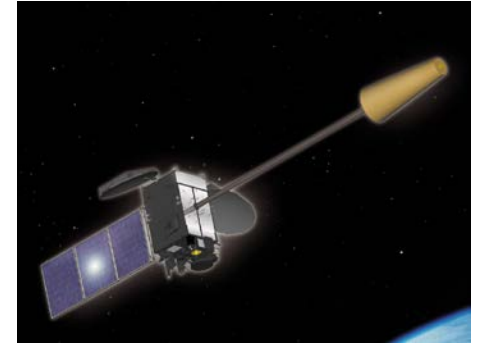
ラジオゾンデ



船舶観測



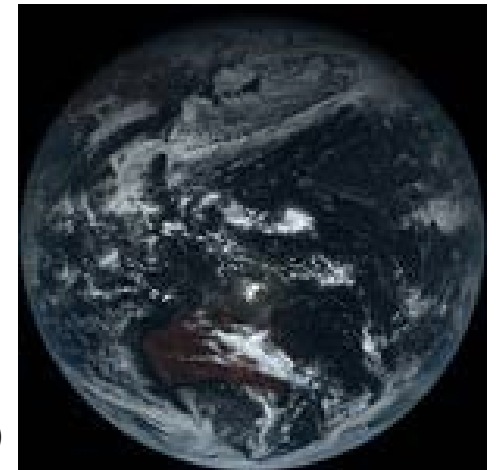
衛星観測



ウィンドプロファイラ



ひまわり 8 号初画像
H26 12/18 11:40(JST)

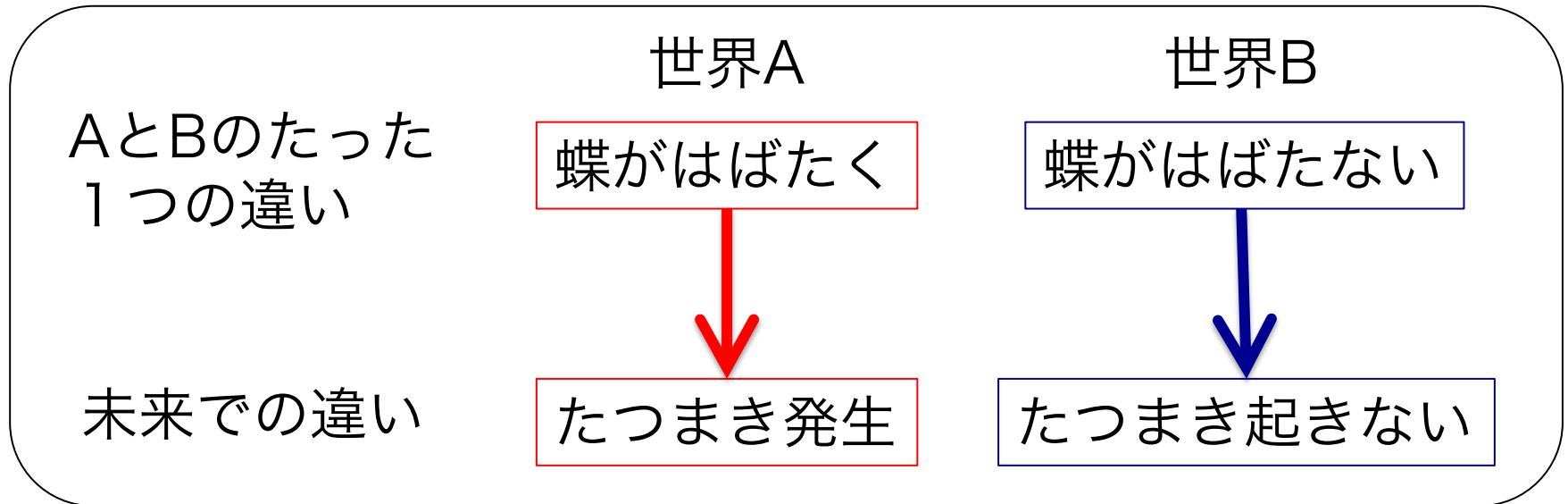


初期値の作成

- 数値予報を始めるには、地球上のすべての地点での気象を知る必要.
- しかし、観測の無い地点での気象を推定する必要.
 - 無い地点の方が圧倒的に多い.
- この方法は非常に難しいので詳しい説明は割愛
- 良いモデルの作成と同じくらい、良い初期値を作成することが重要.
 - 高品質の観測データが、あればあるほど良い

バタフライ効果

- ローレンツの講演タイトル (1972)
ブラジルで1匹の蝶がはばたくとテキサスで大たつまきがおこるか
- より正確にいえば,



ということがありうるか？

バタフライ効果の定義と簡単な実験

- バタフライ効果の定義

「最初の僅かな違いが後で大きな違いになること」

→ 鋭敏な初期値依存性

- 簡単な実験

- 紙や葉っぱを空中から落とす.
- 2回落としたとき, 連続して同じ場所に落とすことができるか?
- 手を離すときのちょっとした違いが, 落ちる場所に大きな影響を与える.

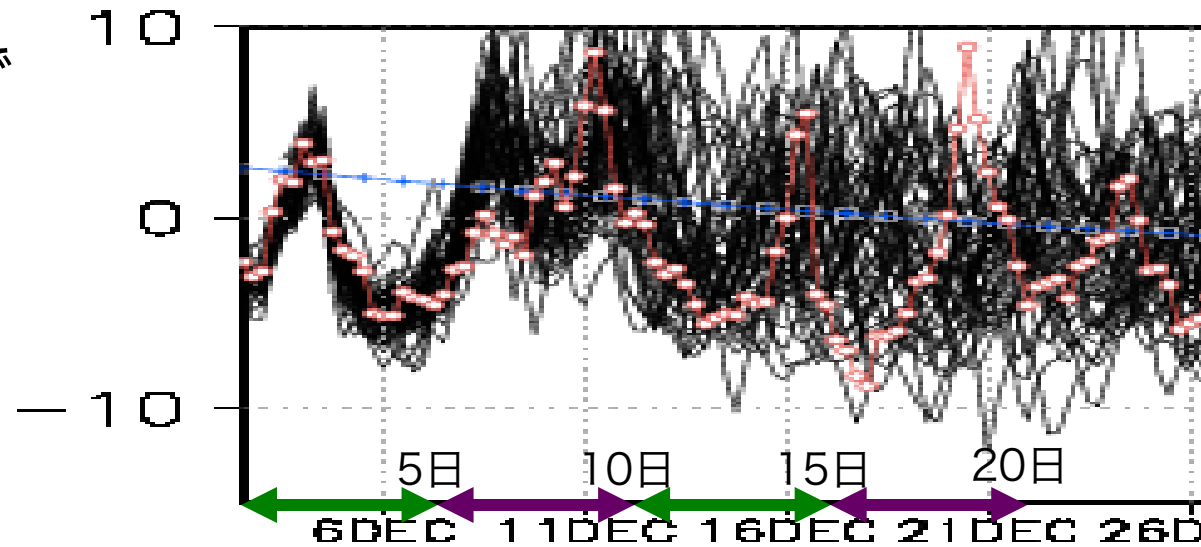
アンサンブル予報

- 大気の流れは時と場所によって、バタフライ効果の大きさが変化する
- もし数値予報の開始時に大気の流れが、バタフライ効果の大きな状態だったら、予報は困難
- この効果を見積もるため、わざと初期値を微妙に変え何度も数値予報をくりかえす。
 - 「アンサンブル予報」
 - 現在は週間天気予報以上で用いられている。
 - 「信頼度A,B,C」

気温のアンサンブル予報

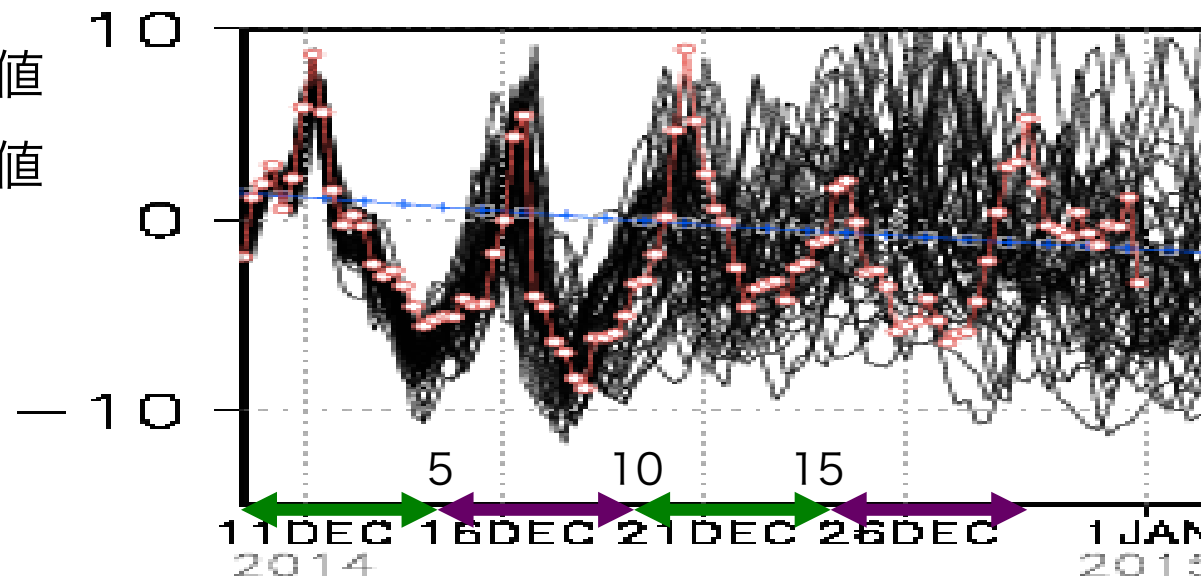
関東上空約1500mでの
気温の予測

黒：予報50個
赤：正解
青：気候値



上：2014年12月2日初期値

下：2014年12月9日初期値



天気予報の限界

- 観測は完全ではないので、初期値には誤差が含まれる.
- たとえモデルが完全でも、1週間以上の数値予報は、バタフライ効果によって現実から次第に離れていく.



1週間より先の**天気**予報が発表されない理由

季節予報

- 1週間より先の予測は「**気候**予測」
 - 気象庁では季節予報と呼ばれている.
 - ある期間の「天気の統計量」を確率的に予測する
 - 平均気温が主
- 現在の気象庁の季節予報の種類
 - 1ヶ月予報, 3ヶ月予報, 暖候期予報, 寒候期予報

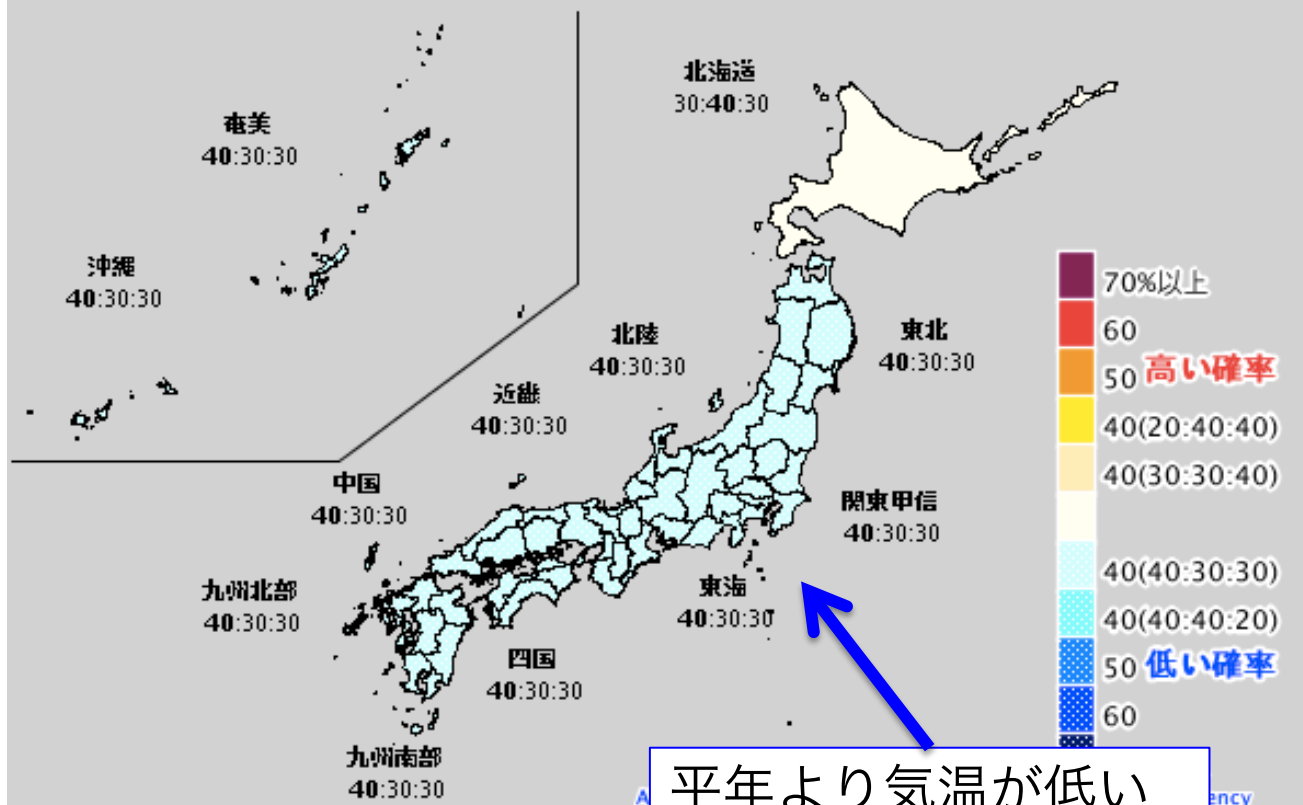
1/8発表の1/24~2/6平均気温予測

平均気温

1月24日~2月6日

「高い」または「低い」確率が40%以上の地域
地域名の下の数値は、左から、低い：平年並：高いの各確率（%）

気象庁 1ヶ月予報



平年より気温が低い
確率がちょっと高い

予報モデルの中での海

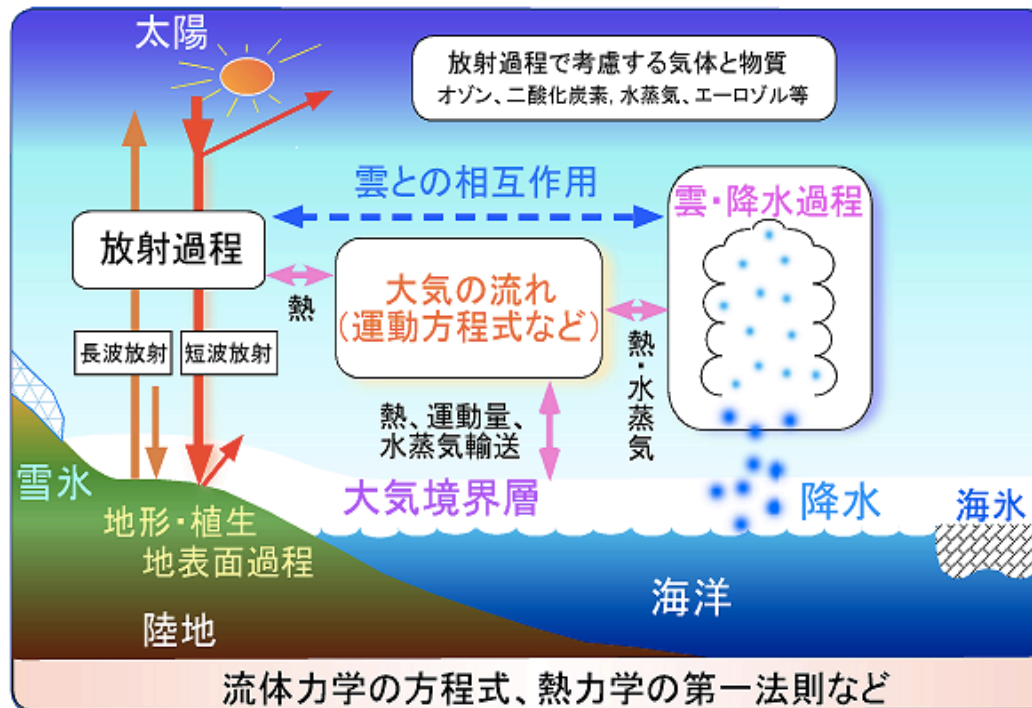
- 予報モデルでは、大気と接する海面の水温も考慮する必要
- もちろん海の状態は時々刻々と変化するが…
- 1ヶ月予報とそれより短い予報
 - 現時点での、水温の平年値からのずれが、そのまま持続すると仮定
- 3ヶ月予報以上
 - 海洋の流れや水温をきちんと考えたモデル（海洋モデル）を使用

海洋はゆっくりとしか変化しないので、短い期間の予報では、コンピューター的能力を海洋モデルに使うよりも、大気モデルに多く使う方が有利なはず。

温暖化予測のしくみ

温暖化予測と天気予報

- 温暖化予測モデルは天気予報用と基本的に同じ
 - 気候は天気の積み重ね
- 大気以外の部分がよりきちんと考慮される傾向
 - 大気以外の部分も温暖化によって変化するため



温暖化予測用モデルのいろいろ

単純なモデルから複雑なモデルまで存在

単純なモデル

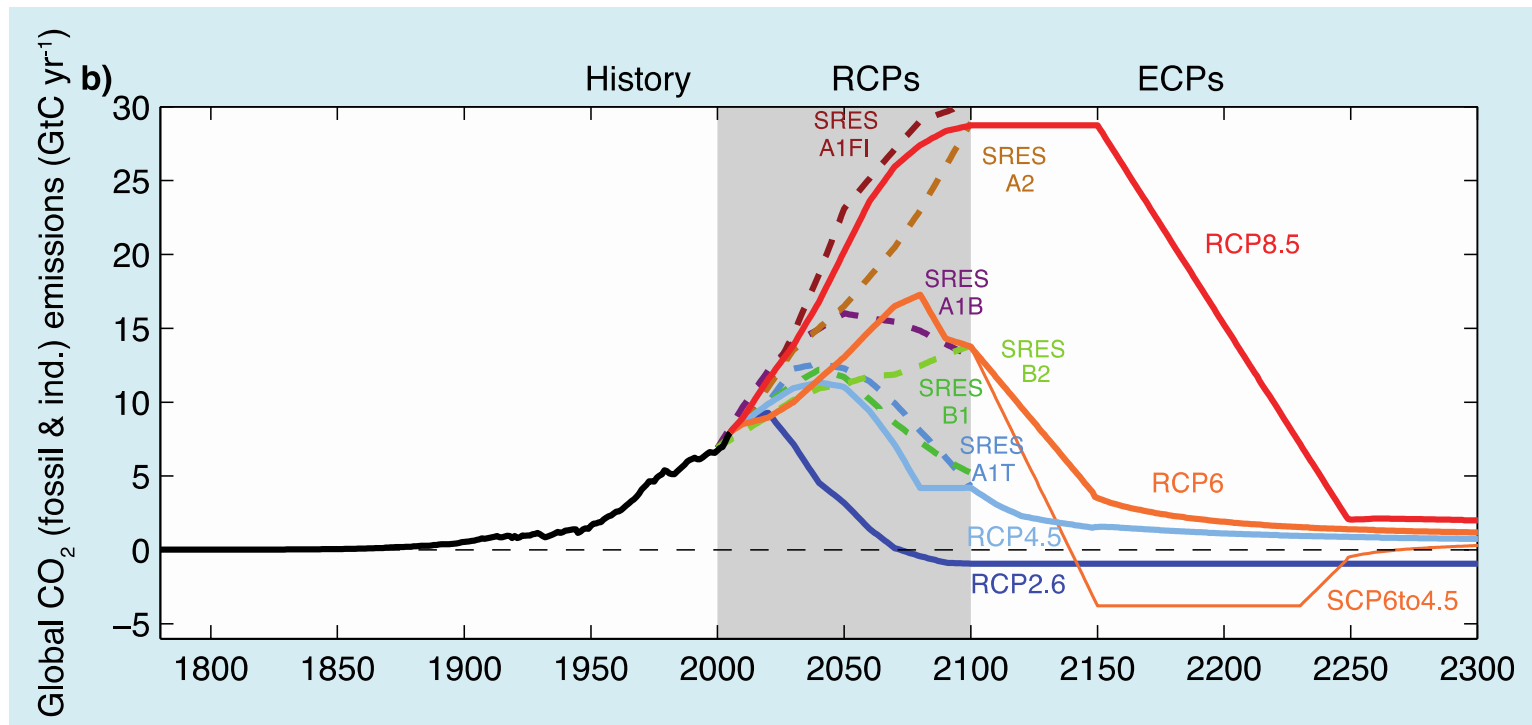
- 温暖化の本質を取り出す.
- 高いコンピューター能力が必要とされない
- 長期間, なんども条件を変えて計算できる.

複雑なモデル

- 気候システム（陸, 海, 空）を, 可能な限りコンピュータ上で再現する.
- 高いコンピューター能力が必要
- あまり長い期間を何度も計算できない.

IPCC報告書で使用されたCO₂排出量

- 温暖化予測では，モデル中のCO₂を増加させる
- どうCO₂が増加するかは人間の将来の行動に依存
- 複数のシナリオを準備し様々な可能性を検討する



各地の平均気温と降水量変化の予測

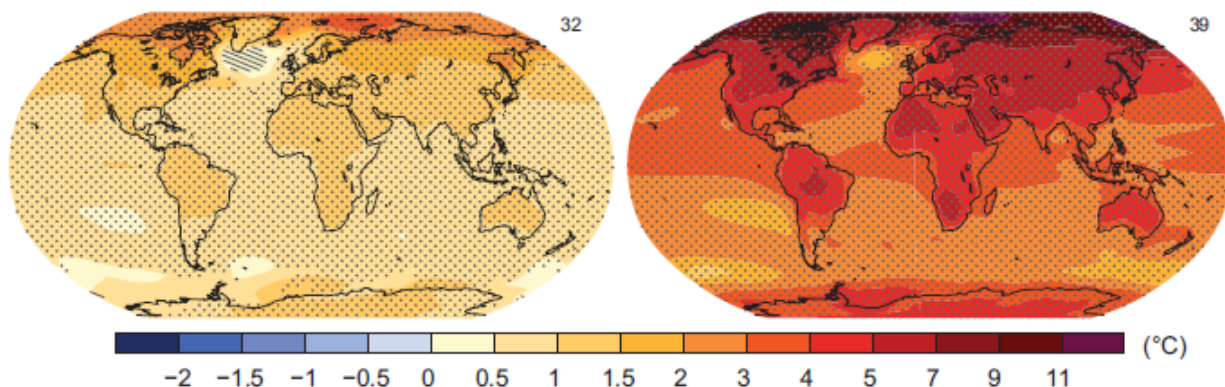
世界各国の「複雑なモデル」による予測の集合

CO2排出 少ない将来

CO2排出 多い将来

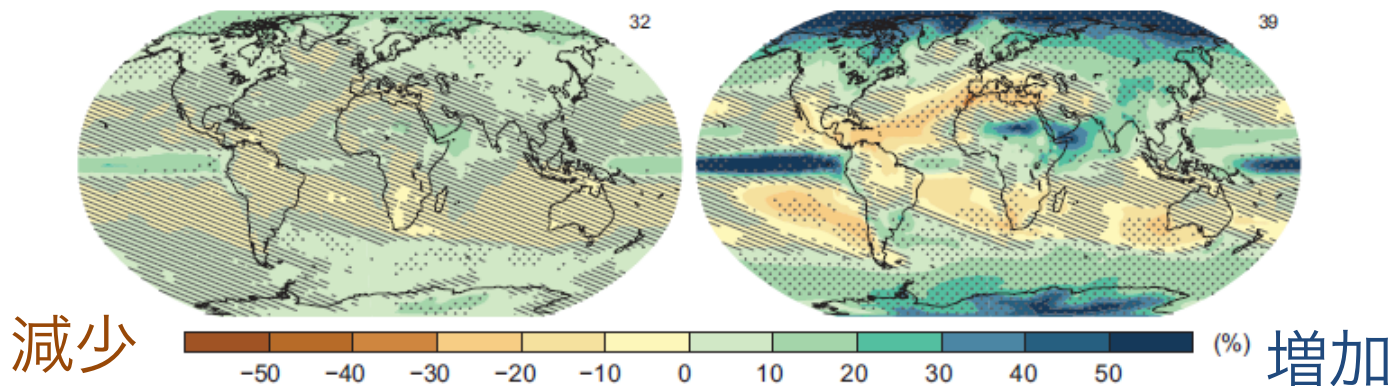
(a) Change in average surface temperature (1986-2005 to 2081-2100)

平均
気温



(b) Change in average precipitation (1986-2005 to 2081-2100)

平均
降水量

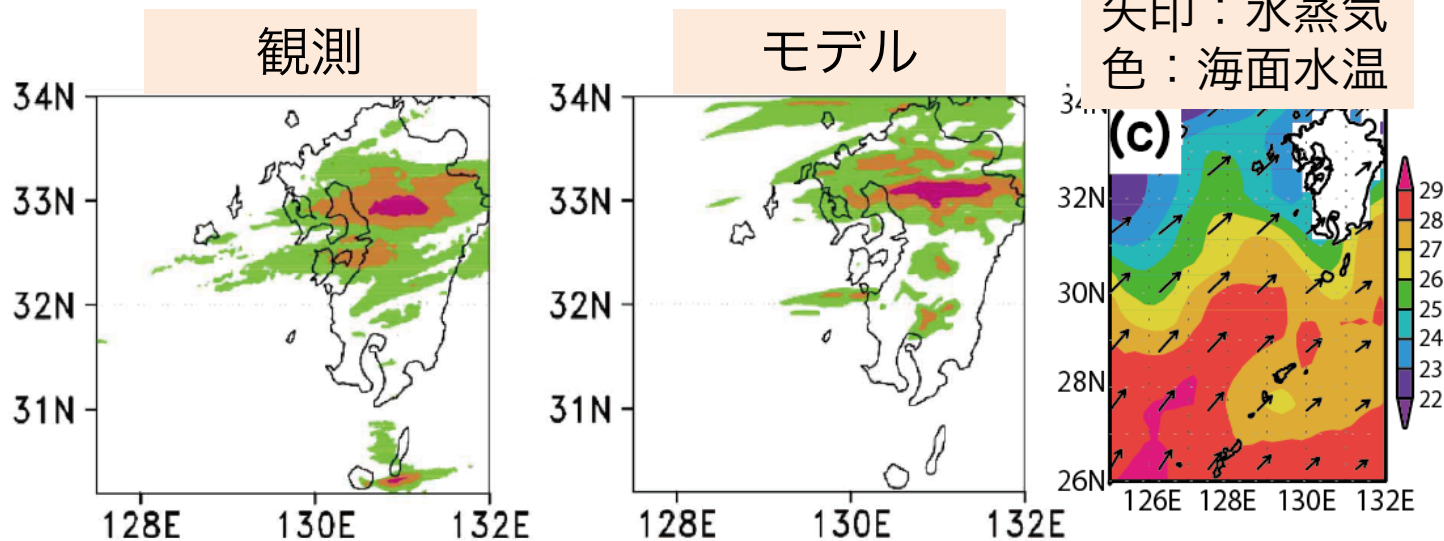


集中豪雨の将来変化

- 地球気候全体を予測するモデルは、コンピューター能力の限界のため大気を細かく分割できない。
- 集中豪雨のような小さな現象の予測は苦手
- でも、温暖化したときの集中豪雨の変化を予測したい！

平成24年7月九州北部豪雨

- 九州各地で洪水や土砂崩れ
 - 30名以上の死者・行方不明者
 - 東シナ海からの湿った暖かい空気が流れ込んだため
 - 領域モデルでシミュレーション可能



もし同じような気象条件が、温暖化が進んだ今世紀末に起きたらどうなるか？

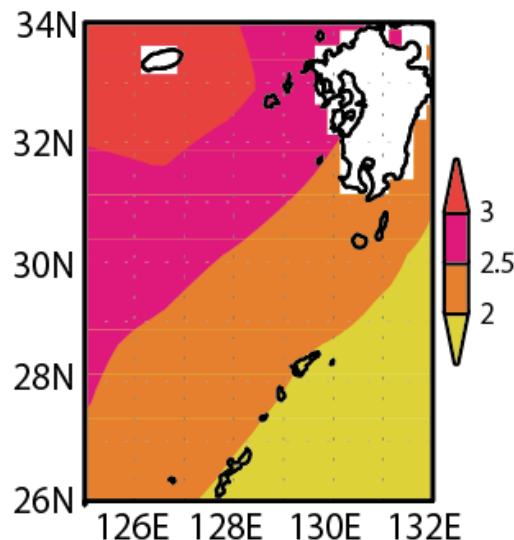
領域モデルによる豪雨の将来予測

集中豪雨の発生した気象条件

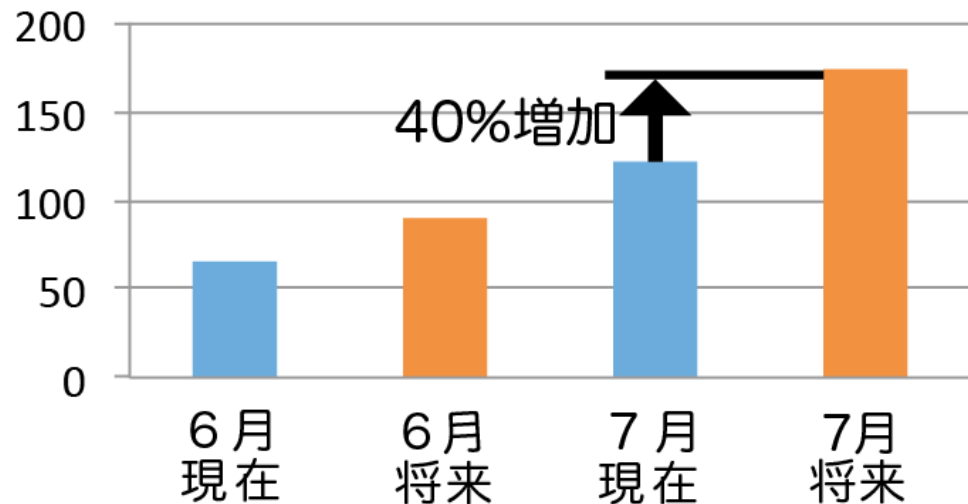


全球気候モデルで予測した
海面水温や気温の上昇分

海面水温上昇



mm/4日 九州平均4日間降水量

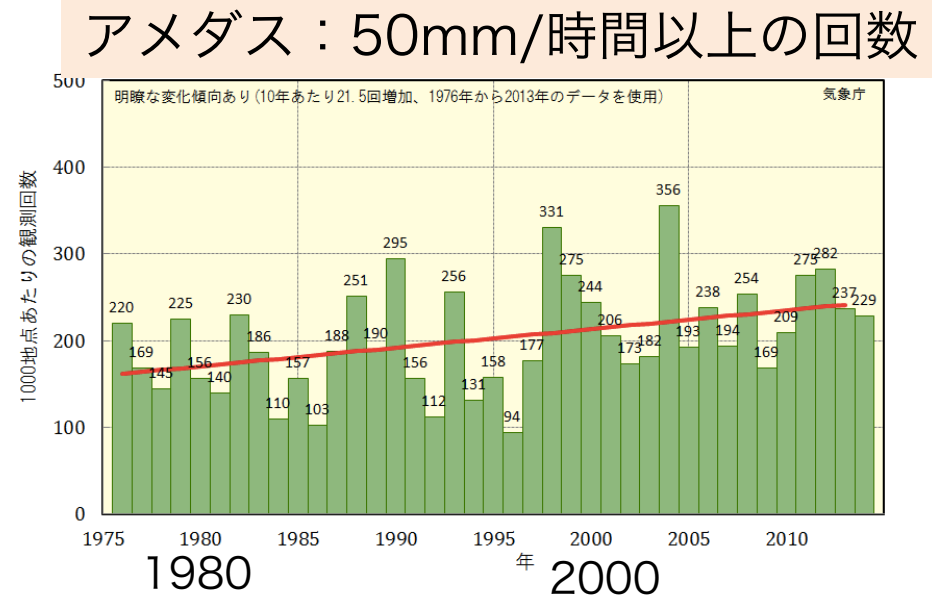


温暖化と降水量

- 気温があがると、大気中に存在できる水蒸気量が増える。（飽和水蒸気量の増加）
- 海面水温が上昇すると、蒸発が盛んになる
 - 大気への水蒸気の供給量が増える。
- 大気中の水蒸気量増加のため、降水量が増加

- 実際に、「強い雨」の観測回数は増加傾向

気象庁サイトより



まとめ

- 天気予報と温暖化予測の精度は
 - コンピューターの計算能力
 - 気象観測データの質と量に大きく依存