

# 数值天气予報

天気予報は、こんな感じで、  
よく見ますよね...

---

2020/05/26(Tue)の時点での予報例

今日の天気は...

1週間の天気は...

著作権に配慮し、  
非表示

# 天気予報に関して、 皆さんの考えを書いておきましょう

---

- Q1 天気予報は、よく当たると思えますか、あるいはよく外れると思えますか。
- Q2 もし天気予報が外れたとしたら、原因は何だと思えますか。
- Q3 “1ヶ月後の運動会の日”の天気予報(例:晴れ時々曇り)は、可能と思えますか。
- Q4 TVの天気予報コーナーのお天気キャスターの表情・言動などに、その時の予報への自信の有無(強弱)を感じたことはありますか。

# 世の中のいくつかの“予報”（未来について言及）を、 検討・比較してみましよう

---

プロ野球の順位予想は、よく当たるのでしょうか？？？

著作権に配慮し、  
非表示

最終順位

広  
や  
巨  
D  
中  
阪

著作権に配慮し、  
非表示

(2017年)8月22日に皆既日食が起こります。アメリカの一部で皆既食を、北米大陸全域や南米大陸北部などで部分食を見ることができます。今回、日本では日食を見ることは、できません。

次回皆既日食が起こるのは2019年7月3日、南太平洋や南米大陸の一部。

日本で次に皆既食を見ることができるのは、2035年9月2日。関東北部から能登半島にかけての地域で皆既食を、日本全国で部分食を見ることができます。

(<https://www.nao.ac.jp/astro/sky/2017/08-topics04.html>)

# それらの予報の、いくつかの性質を 比較してみましょう

何の 予報？	自明でない、 重要な点に言及 しているか？	客観的な言い方か？ 答えが分かるか？	継続的に、 検証・改善 されているか？	自明な予報より、 高いスキルを 持つか？
“毎朝の 占い”	？	？ “ラッキーカラーはブルー”	？	？
プロ野球の 順位予想	○	○	？	？
天気予報	○	○	○	○
天文現象 の予報	○	○	---	---

世の中にはいろいろな予報の中で、  
天気予報等だけ？がまっとうなPDCAサイクルの対象のよう  
徹底的・定期的な検証＋改善の対象、まだ改善の必要性・余地がある

# H28年台風10号は、日本の南で複雑な動きをした後、 観測史上初めて東北地方太平洋側に上陸した

---

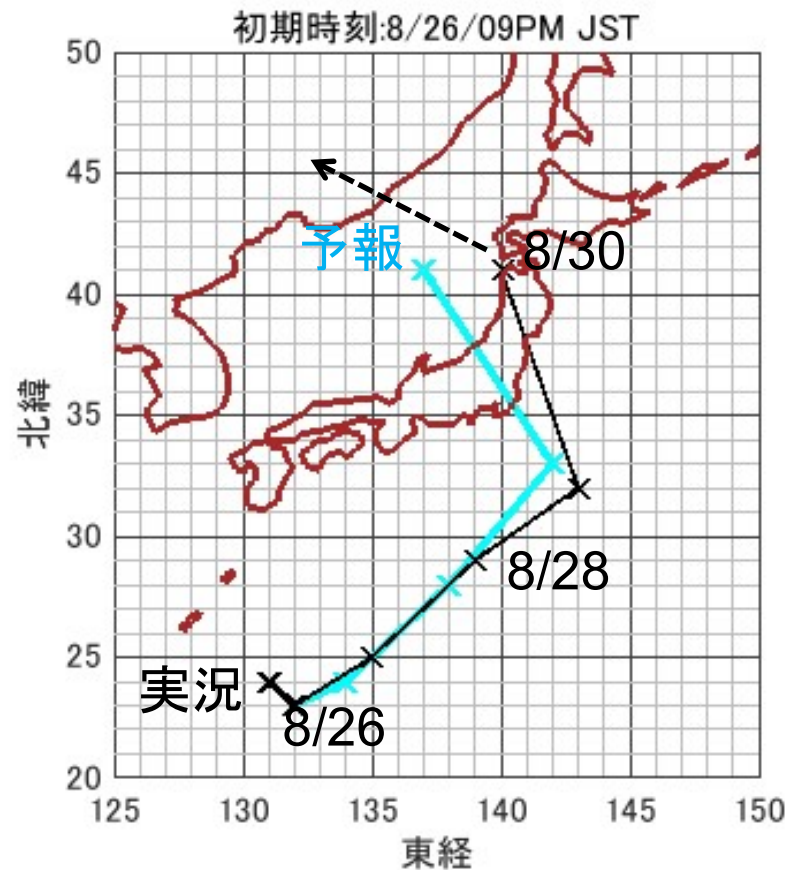
## 平成28年台風10号

著作権に配慮し、  
非表示

参考：<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/typhoon/1-4.html>  
[http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route\\_map/index.html](http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/index.html)、  
[http://www.kahoku.co.jp/tohokunews/201608/20160831\\_13020.html](http://www.kahoku.co.jp/tohokunews/201608/20160831_13020.html)

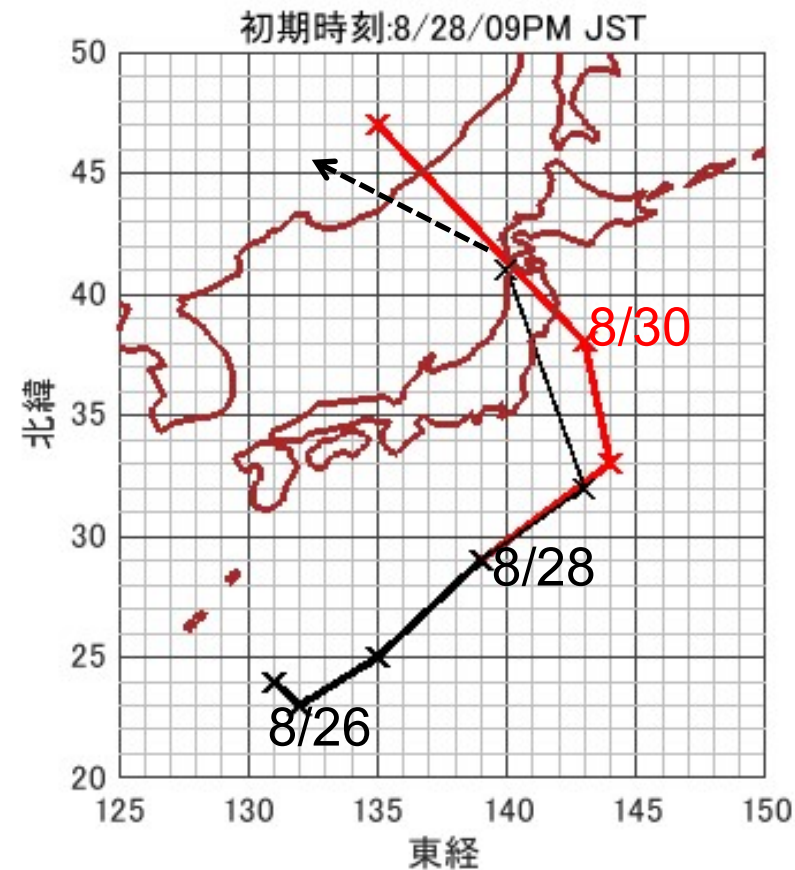
# 予報は、約4日前には、この台風が、 太平洋から東北～北関東に上陸することを示す

## 2016年の台風10号の予報の例



約4日前から予報された進路でも、  
東北・北関東への上陸を示す

気象庁GSMデータから低気圧中心を抽出



予報された進路は、実況と大体同じだが、  
進み具合が遅すぎた



# 観測史上初の台風経路を大体予報できたことは、 天気予報の方法について、重要な点を含意します...

2016年台風10号予報の含意

観測史上初(未経験)の、台風経路をある程度予報できた

⇒

天気予報の主な部分は、**経験**ではない

⇒

天気予報の主な部分は、**原理(物理)**である

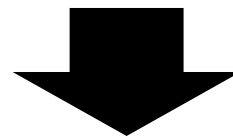
\* 国語辞典的には、“**経験**”の反意語は、“**思弁(しべん)**”

経験ではなく、純粋な思考によって真理に到達しようとする事

経験的天気予報の例:

**観天望気**

**統計、ディープラーニング**



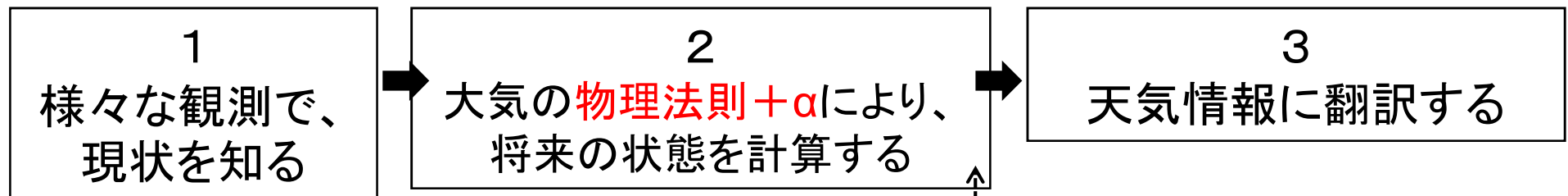
**現代の天気予報の中心は、物理+計算に基づいた数値予報**

# 天気予報は、大別すれば、 3つの手順で行われていると言えます

では、天気予報が  
外れたとしたら、  
その原因は？

## 天気予報の3手順

参考: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>



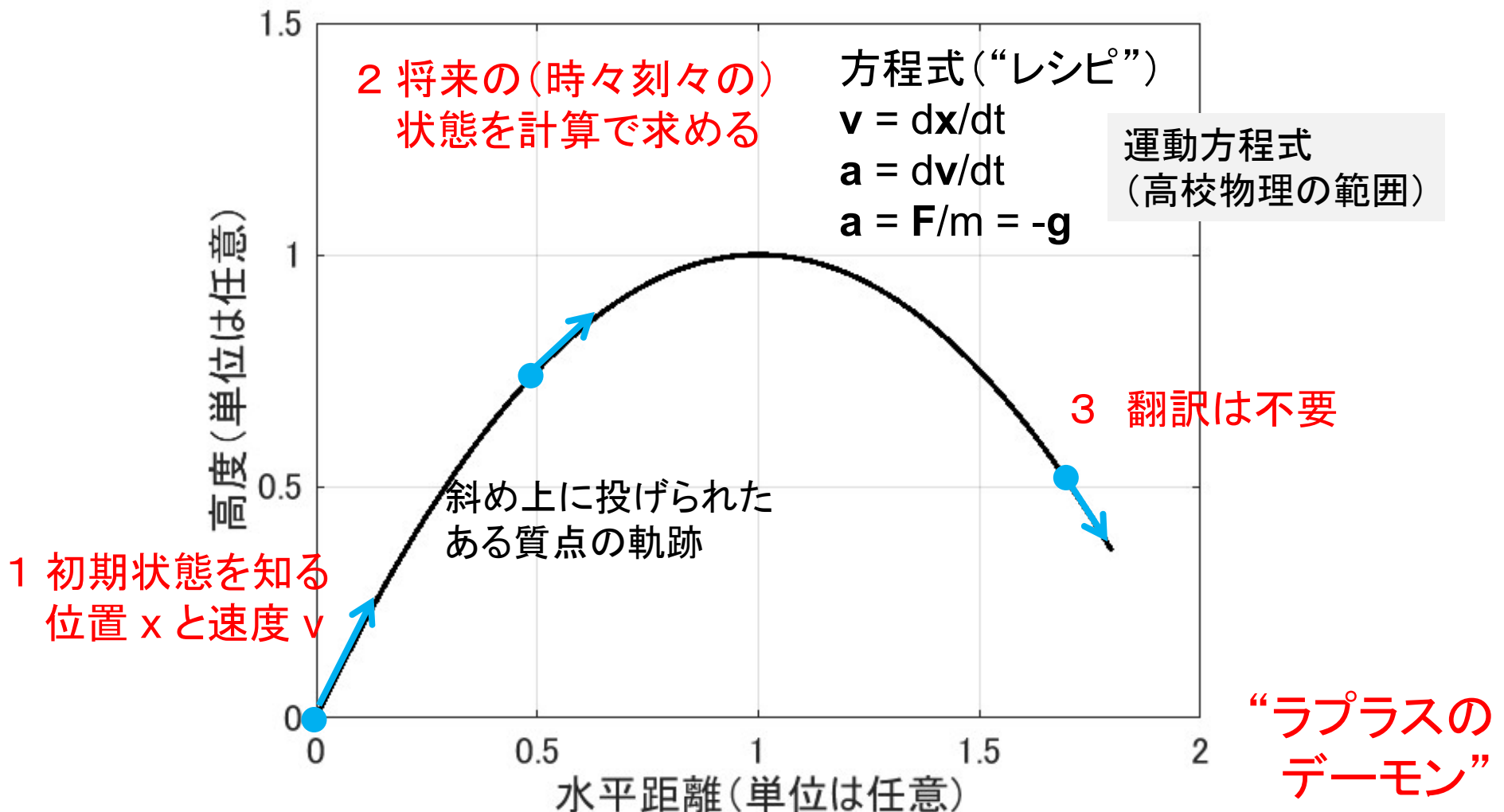
著作権に配慮し、  
非表示

物理の分野での根本となる法則\*  
(それ以上たどれない)

いわゆる天気予報  
+その他に、  
レーダー・警報など

# 高校物理の、質点の放物運動を求める手順は、 天気予報の手順の“プロトタイプ”と言えます

## 質点の放物運動



天気予報は、地球大気全体を覆うように多数の風船を並べ、  
時々刻々、それらの位置・状態を追跡することに対応する

---

著作権に配慮し、  
非表示

■各風船が持つデータ

位置・速度

気温

気圧

湿度(水蒸気量)

雲

など

■無数の風船

お互いのデータが必要

⇒膨大な計算になり

スパコンを必要とする

# “風船”の状態を計算する主な“レシピ”には、 以下のようなものがあります

“レシピ”: 大気状態を支配する物理法則

## ■位置

速度(風)で変化

**\* 位置と速度の関係**

## ■速度(風)

重力・周囲の気圧分布・自転の影響・地表摩擦などで変化

**\* 運動方程式**

## ■気温

上下運動・日射などによる加熱・水蒸気凝結などで変化

**\* 熱力学の方程式、放射の伝達**

## ■水蒸気・雲・雨:

水蒸気が凝結すれば雲になり、その分、水蒸気量は減少  
雲粒がたくさん集まると、雨粒になります

**\* 水蒸気の輸送、雲や雨の生成**

(斜体: 周囲の情報が必要な部分、赤い文字は物理の法則)

**\* 上記以外に、経験依存の部分がある**

著作権に配慮し、  
非表示

参考:

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

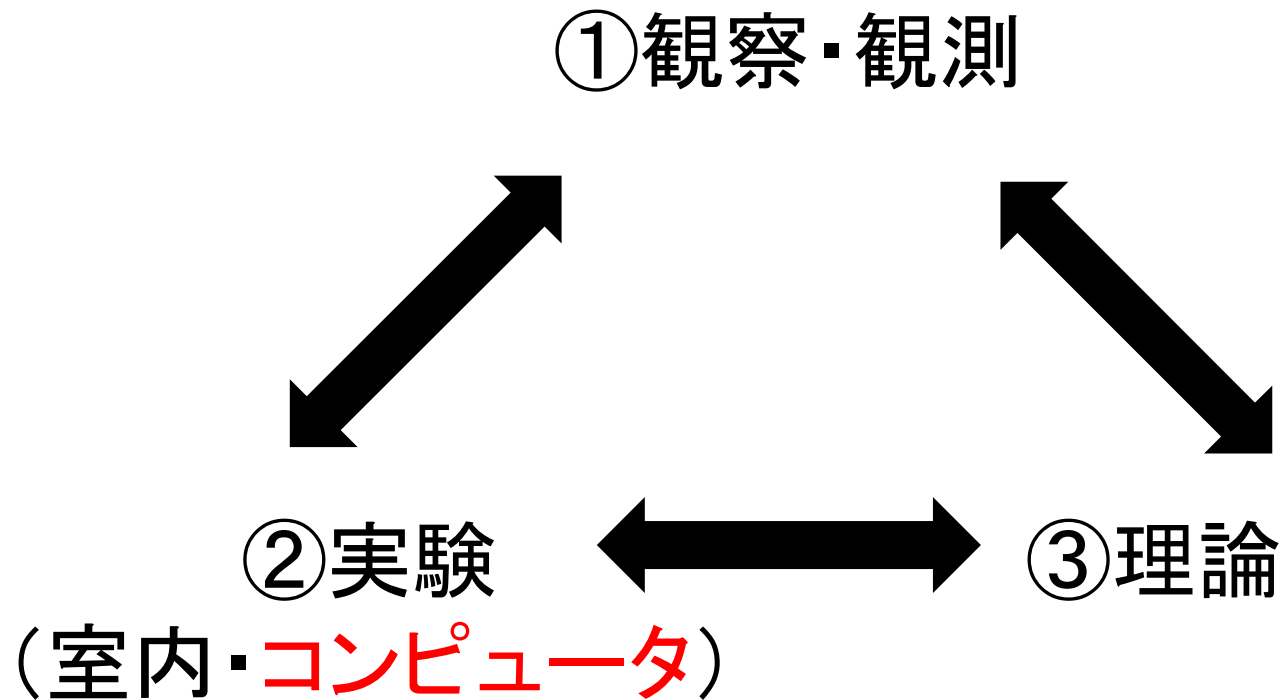
参考: 松山・増田(2021)

自然科学研究の基本スタイルは3つある:

①観察・観測、②実験、③理論の3つである 再掲

---

自然科学研究の基本スタイル



⇒ つまり、天気予報とは、  
観測＋理論・数値シミュレーションの  
組み合わせ

天気予報は、多数の風船を並べ、時々刻々、  
それらの位置・状態を追跡することに対応する.....

---

### ■“板ばさみ”の発生

◇大気をより細かく表現したい →計算量は増える

◇計算機資源は有限で、一定時間で計算・処理する必要

⇒両者を満たす、有限分解能で対応する

### ■経験則の必要性

分解能以下(各風船中)の過程は、

直接には表現できない

例:対流発生、雲粒・雨粒の生成

⇒それらの効果を表す経験則が必要になる

\* 実際は、風船を追跡するのではなく、

大気を格子状に区切り、各格子点での状態変化に着目する

著作権に配慮し、  
非表示

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>

# 現代に通じる天気予報は、1950～60年頃にまで 遡れます(アイデアは、1920年頃)

---

## 天気予報の大まかな歴史

1900年頃 大気の支配方程式の導出

1922年 “リチャードソンの夢”

1937年 米国で、高層観測開始

1939年 ロスビー波の発見

1946年 電子計算機の登場

1947年 温帯低気圧の理論

1950年 数値予報に初成功(米国)

1955年 米国で数値予報を開始

1959年 日本で数値予報を開始  
(当初は、ごく素朴なもの)

以降、継続して改善

## 世界初の“天気予報”(1920年頃)

- ・先見的アイデア  
大人数が、担当の風船を計算するイメージ
- ・6時間予報を1ヶ月以上かけて一人で手計算
- ・非現実的な気圧変化を予測  
(用いた方程式が不適切だった)

著作権に配慮し、  
非表示

参考:

[http://www.jma.go.jp/jma/press/1612/15a/20161215\\_symposium.html](http://www.jma.go.jp/jma/press/1612/15a/20161215_symposium.html)

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-2.html>



# 気象庁などは、様々な予報の検証・改善を継続的に実施しています

---

著作権に配慮し、  
非表示

# 世界各国気象機関の天気予報は、基本的考えを共有していますが、違う予報結果を出すこともあります

---

2017年(平成29年)

著作権に配慮し、  
非表示

予報は、台風が東日本へ進む・西日本へ進む・沖縄方面へ進む・東の海へ離れる結果にばらつく。

今回は太平洋高気圧の大きさ・位置が通常とはかなり異なるようで、それが世界各機関による予報が分かれる原因。台風は太平洋高気圧の周りを沿うように進むため。

⇒

計算機資源(解像度等)の違い、  
経験依存の部分の影響、等

⇒

現実の気象をよく理解する  
その仕組みなどを数値予報に取り込む

予報の改善＝モデル(分解能、経験則、等)改善＋初期値改善

初期値改善＝観測データの質・量の改善＋作成方法の改善

---

GPS水蒸気量が予報を改善した例

再  
掲

著作権に配慮し、  
非表示

GPSによる水蒸気量は2009年10月から数値天気予報にも利用。  
天気予報の精度向上に貢献。

参考：<https://www.mri-jma.go.jp/Research/explanation/gps.html>@2023/04/11

予報の改善＝モデル(分解能、経験則、等)改善＋初期値改善  
初期値改善＝観測データの質・量の改善＋作成方法の改善

---

## ■数値予報の初期値作成 ―データ同化―

様々な観測データ(地上観測、人工衛星観測、等)と、  
より以前から実施されたシミュレーション結果を組み合わせ、  
最適な初期値を作成

<https://www.jma.go.jp/jma/press/0502/16a>

平成17年2月のプレスリリース

著作権に配慮し、  
非表示

## ■再解析データ

この工程を、最新モデル(固定バージョン)で長期間分やり直す  
⇒過去数十年分の全球気象データ

例：気象庁55年長期再解析 ([https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index\\_ja.html](https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_ja.html))

参考：松山・増田(2021)。データ同化の簡単な例が12.1節にある。

# カオスとアンサンブル予報

# “ラプラスのデーモン”：現在・過去の情報（支配方程式と初期状態）から未来全てが分かるという決定論的世界観

---

## ■ラプラスによる主張

もしもある瞬間における全ての物質の力学的状態と力を知ることができ、かつもしもそれらのデータを解析できるだけの能力の知性が存在するとすれば、この知性にとっては、不確実なことは何もうなくなり、その目には未来も（過去同様に）全て見えているであろう。

著作権に配慮し、  
非表示

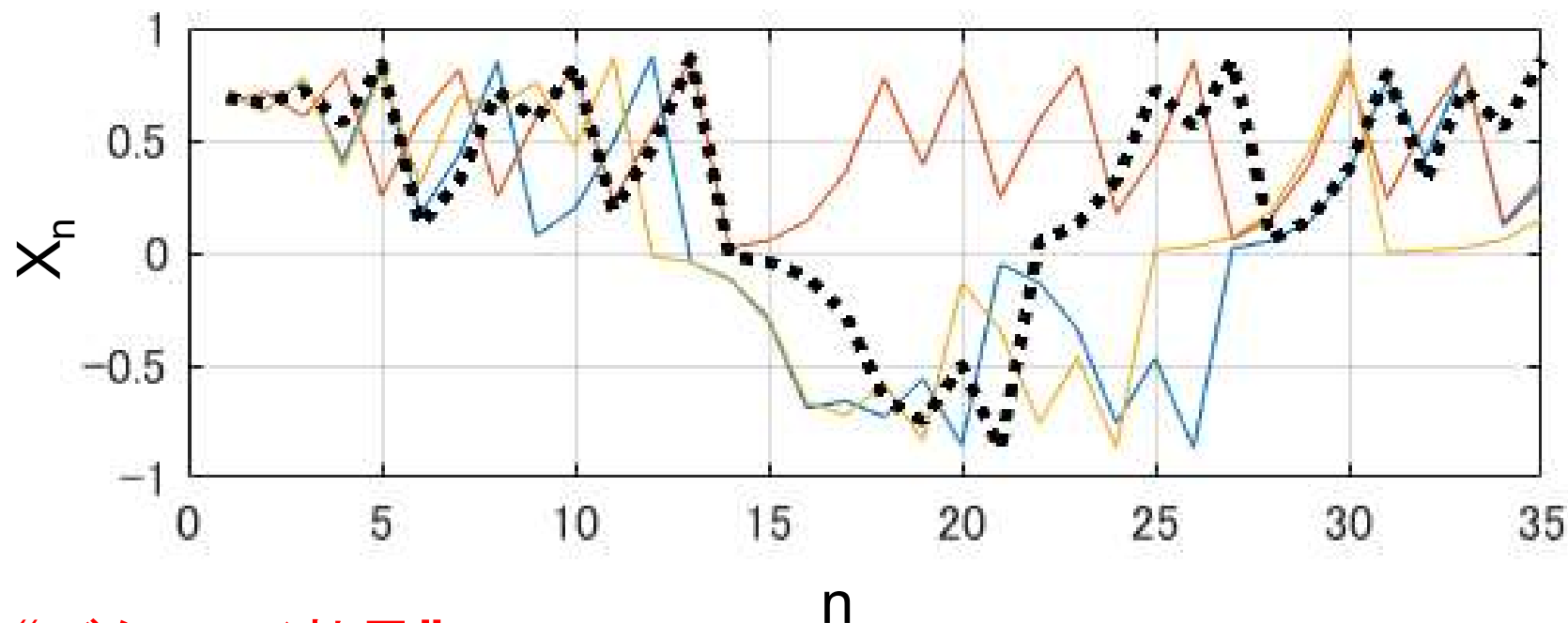
現実には、  
初期状態に観測誤差  
があり、  
長い予報は原理的に  
不可能。  
⇒カオスと  
アンサンブル予報

仮に支配方程式・翻訳が完全だとしても、系の“カオス的性質”により初期誤差がいずれ増大し、予報は不可能になる

## 数列カオス体験の例

\* 通常天気予報は、せいぜい2週間まで

$$X_{n+1} = (7/8) \times (3 X_n - 4 X_n^3)$$



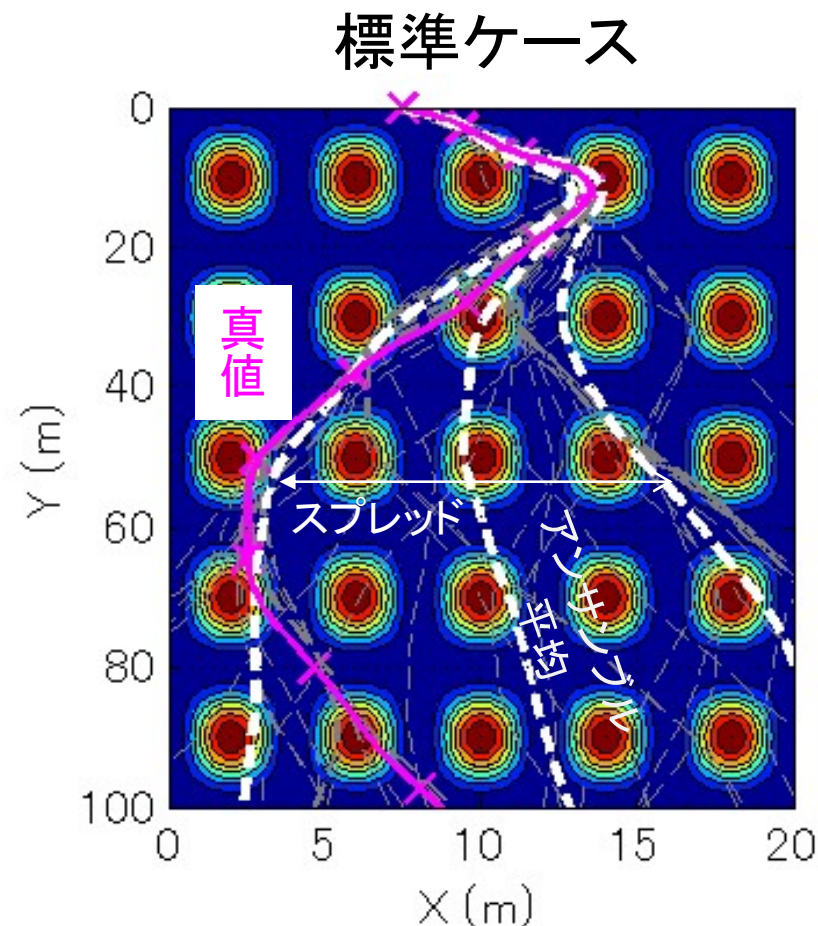
“バタフライ効果”

上記4色は、初期値だけがわずかに違う。  
たとえば、黒を現実、それ以外を予報とみなす。

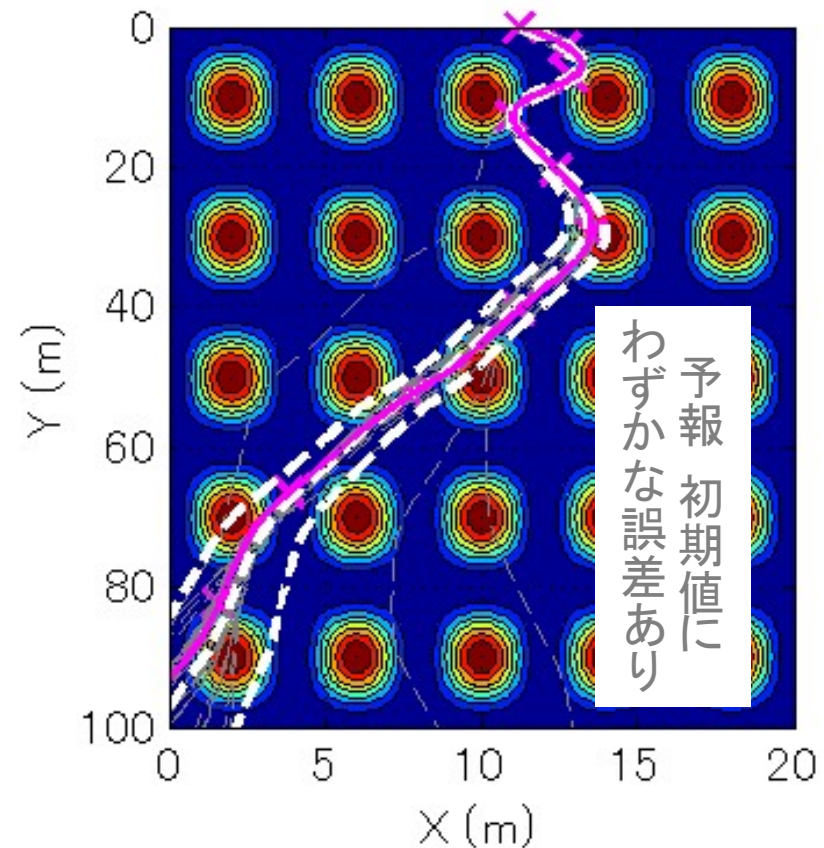
参考：小倉(1999)

# 凸凹のある斜面を滑り落ちる質点運動についても、 予報しやすい場合と予報しにくい場合がある

質点運動に対するアンサンブル予報(イメージ)



より長期の予報が  
可能なケース



参考: 白点線は、50メンバーアンサンブル予報の平均±1標準偏差



# 気象庁は、大気のカオス的性質に対抗するため、 アンサンブル予報を実施している

---

大気の観測は、完全でない

測器の誤差、時空間的な隙間

⇒予報を始める際の初期状態に、  
誤差が必ずある

⇒初期誤差は、時間とともに拡大  
“大気のカオス的性質”

“バタフライ効果”

⇒誤差の拡大を把握するため

アンサンブル(集団)予報を実施

わずかに異なる多数の初期値から  
予報を行い、統計情報を活用

著作権に配慮し、  
非表示

台風進路のアンサンブル予報の例。  
2018年8月4日9時を初期値とした  
台風第13号の5日予報。

# \* 天気予報(週間予報)には、 予報の信頼度の情報が付加されている

---

2019/05/10(金)の時点での予報例

著作権に配慮し、  
非表示

- 1 遠い将来は、予報しにくい
- 2 予報しやすい状況と予報しにくい状況がある
- 3 全ての予報は、信頼度(自信の程度)を付随するはず

参考: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>

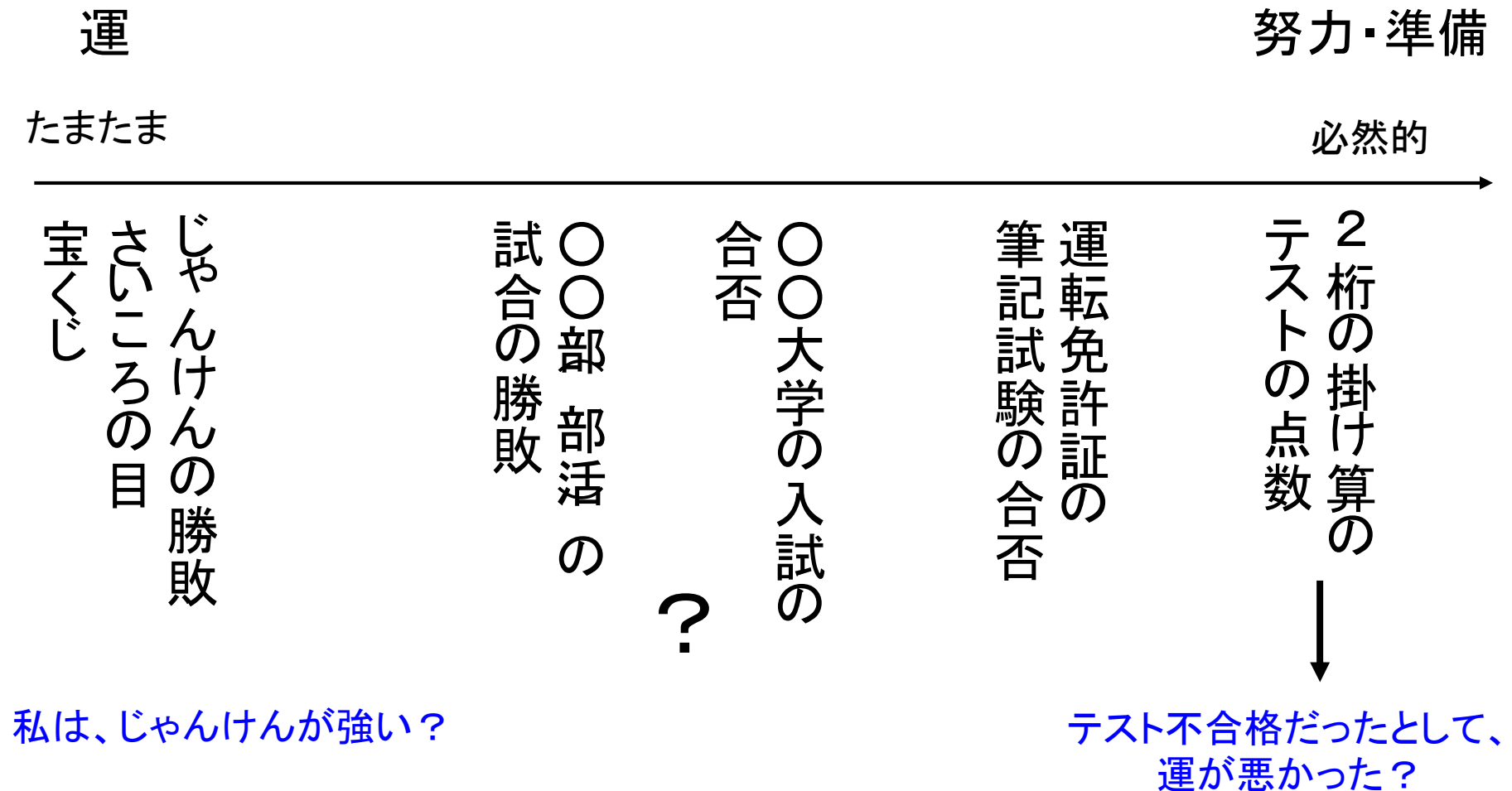
同じ5日先の天気予報でも、状況によって、  
自信がある場合と、自信がない場合がある

---

著作権に配慮し、  
非表示

多くの物事には、signal-to-noise ratio (SN比) の要素があります：  
そうなるはずでしょう vs. たまたまでしょう（両者の見極めが重要）

---



＊ より短い時間の予報を知りたいときには、  
レーダー画像などが有効です

---

寒冷前線付近の例（平成26年9月5日09時）

著作権に配慮し、  
非表示

北～西日本に線状のエコー。  
一部はかなり発達し、積乱雲を含意。  
落雷や竜巻などの突風、急な大雨に注意。

# 天気予報や実際の気象のデータは、様々な利活用されています

## 天気予報の利活用

### 気象・天気予報データの 利活用先

- ・日常生活
- ・防災
- ・ビジネス・産業
- ・農業
- ・漁業

...

今後、さらなる利活用が期待されています

著作権に配慮し、  
非表示

“数値天気予報”は気象学特有の日進月歩の分野・技術＋特有の見方  
⇒スマートユーザーになる＋応援する＋検証・開発の側に回る

## まとめ

### ■数値天気予報 ―現代の天気予報の中心―

1. 観測・初期値化
2. 気象の物理に基づいた大気モデル
3. 大規模な計算・翻訳(要:スパコン)

「こういう状況では、  
大気はこうのように  
変化するはずだ」  
という私達(最新の気象学)  
の物理的認識の結晶  
⇔経験・データ駆動  
例:観天望気  
AI(deep learning)

### ■小歴史

約100年前:“リチャードソンの夢”(アイデア)

約 65年前:現代的天気予報の開始

### ■精度の向上

予報を繰り返し検証、システムを継続的に改善

### ■カオスとアンサンブル予報

予報の確からしさ(自信の程度)を予報する

\* SN比: そうなるはずでしょ vs. たまたまでしょ

### ■様々な予報とその利活用

対象の時空間規模により様々な予報を実施、利活用を推進

### ■推奨図書:シミュレートジアース(河宮)、数値予報(岩崎)、など