

# 温帯低気圧の成因と作用

\* 暗黙の想定: 北半球中緯度

© 2025 stratoverse

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (CC BY-NC-ND 4.0).

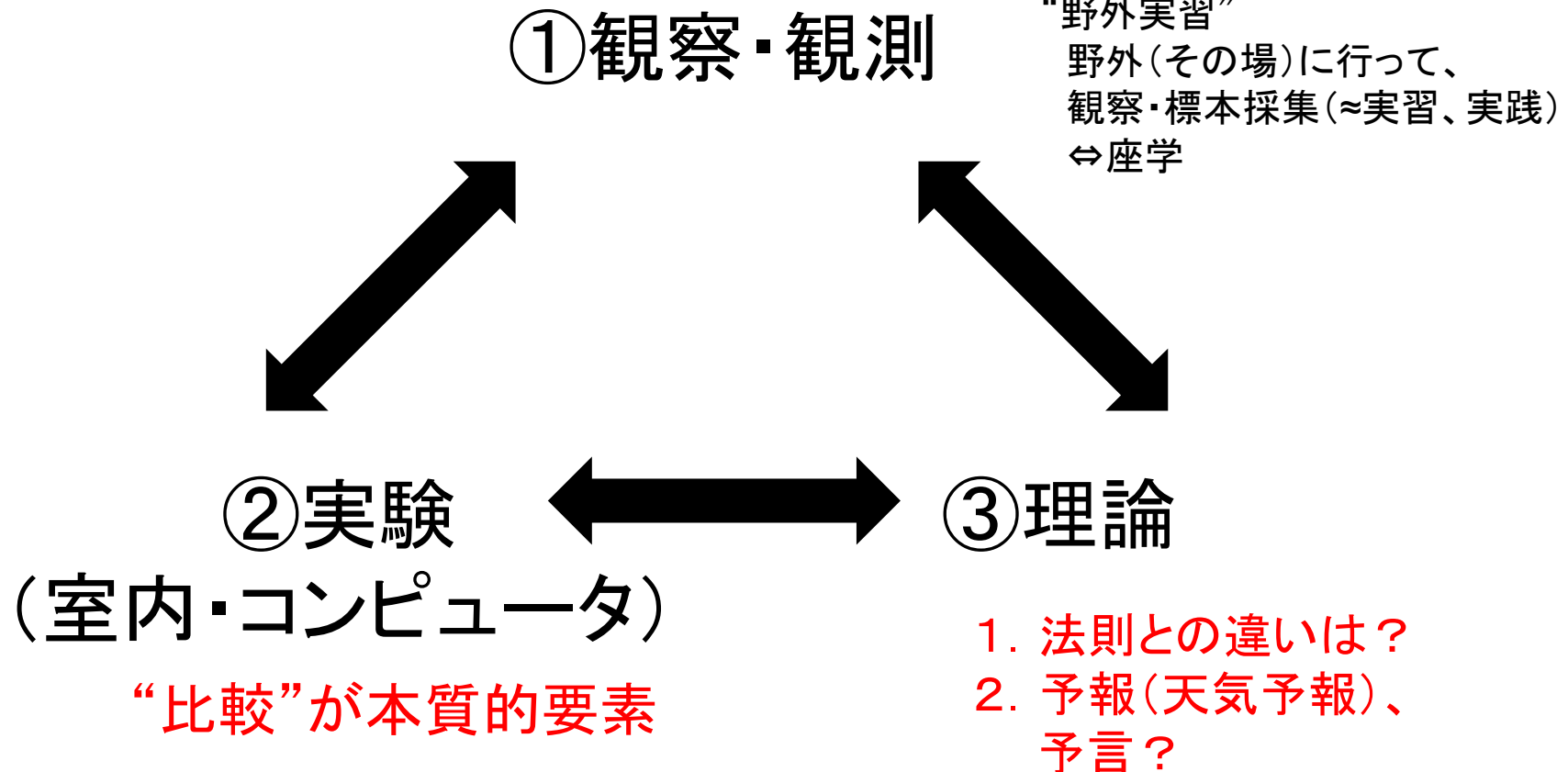
# 自然科学研究の基本スタイルは3つある：

## ①観察・観測、②実験、③理論の3つである

### 自然科学研究の基本スタイル

### 再掲

\* 何かを研究する際には、  
まず観測・観察が第一歩



# 例えば、温帯低気圧の関連では、 3方法による歴史的な成果として下のものがある

---

自然科学研究の3方法の例: 温帯低気圧

再掲

## ①観察・観測

ブランドス(1820)は、  
1783年3月の低気圧通過時に各地で観測されたデータを集めて、  
世界で初めて“天気図”を描き、温帯低気圧の広がりなどに気付いた。  
([http://www.jma.go.jp/jma/kids/faq/a5\\_41.html](http://www.jma.go.jp/jma/kids/faq/a5_41.html))

## ②実験

フルツ(1950)とハイド(1953)らは、回転水槽実験で、  
偏西風波動を示した。(乙部他 2016)

## ③理論

チャーニー(1947)とイーディー(1949)は、  
温帯低気圧の成因として、傾圧不安定理論を示した。  
中緯度の西風は、ある程度強くなると自然に蛇行する。(小倉 2001)

温度風：北への温度減少が大きいほど、上に西風が強くなる  
南北気温差  $\propto$  上に向かって西風が強くなる  $\propto$  上空の西風

---

北半球中緯度で

再掲

$$\Delta p = - (p g \Delta z) / (R T)$$
$$\doteq - (p_{s0} g \Delta z) / (R T)$$

著作権に配慮し、  
非表示

温帯低気圧と、上空の偏西風蛇行

# 今見ているのは、上空の偏西風蛇行：その多くは、 地表では温帯低気圧・移動性高気圧を伴う

---

## 温帯低気圧の立体構造

著作権に配慮し、  
非表示

地上低気圧の西で、  
寒気移流→上空トラフを強化  
上空トラフの東で  
暖気移流→地上低気圧を強化

参考：青木(2008)、Holton(2004)

# 地上の低気圧の多くは、上空の気圧の谷または切離低気圧(偏西風の、南への蛇行)に対応する

2012/04/03日00Z(09JST): SLP (Pa) and Z500 (m)

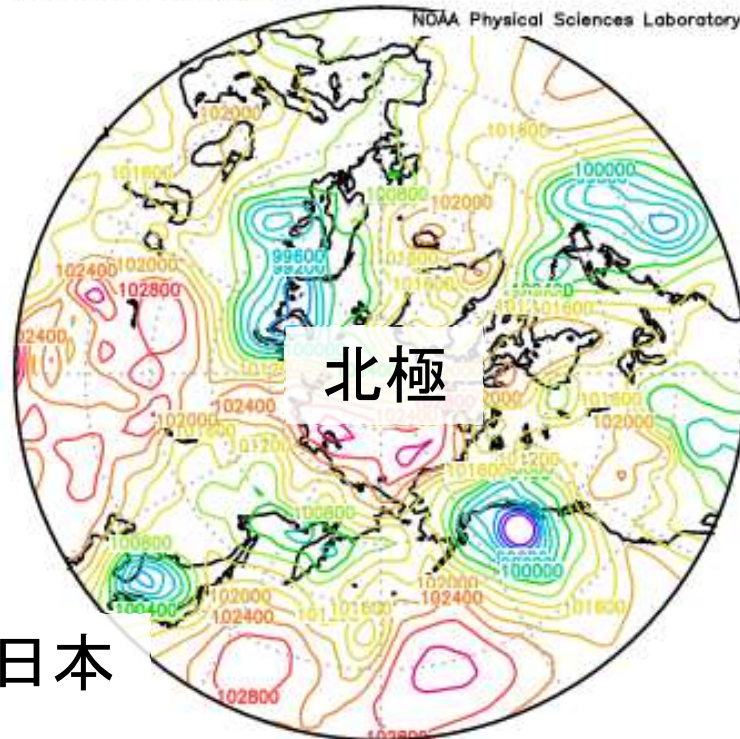
参考: NCEP/NCAR再解析データ

地表の低気圧:

上空の気圧の谷などによく一致

Individual Obs slp Pascals

NOAA Physical Sciences Laboratory



日本

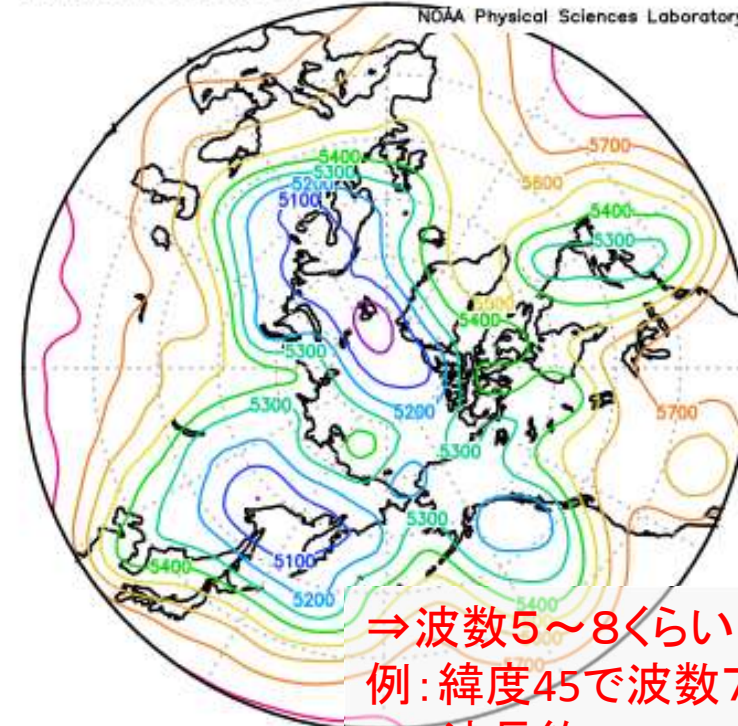
気圧の谷:

偏西風波動の一部

ジェット気流が、南に蛇行している部分

Individual Obs hgt m

NOAA Physical Sciences Laboratory



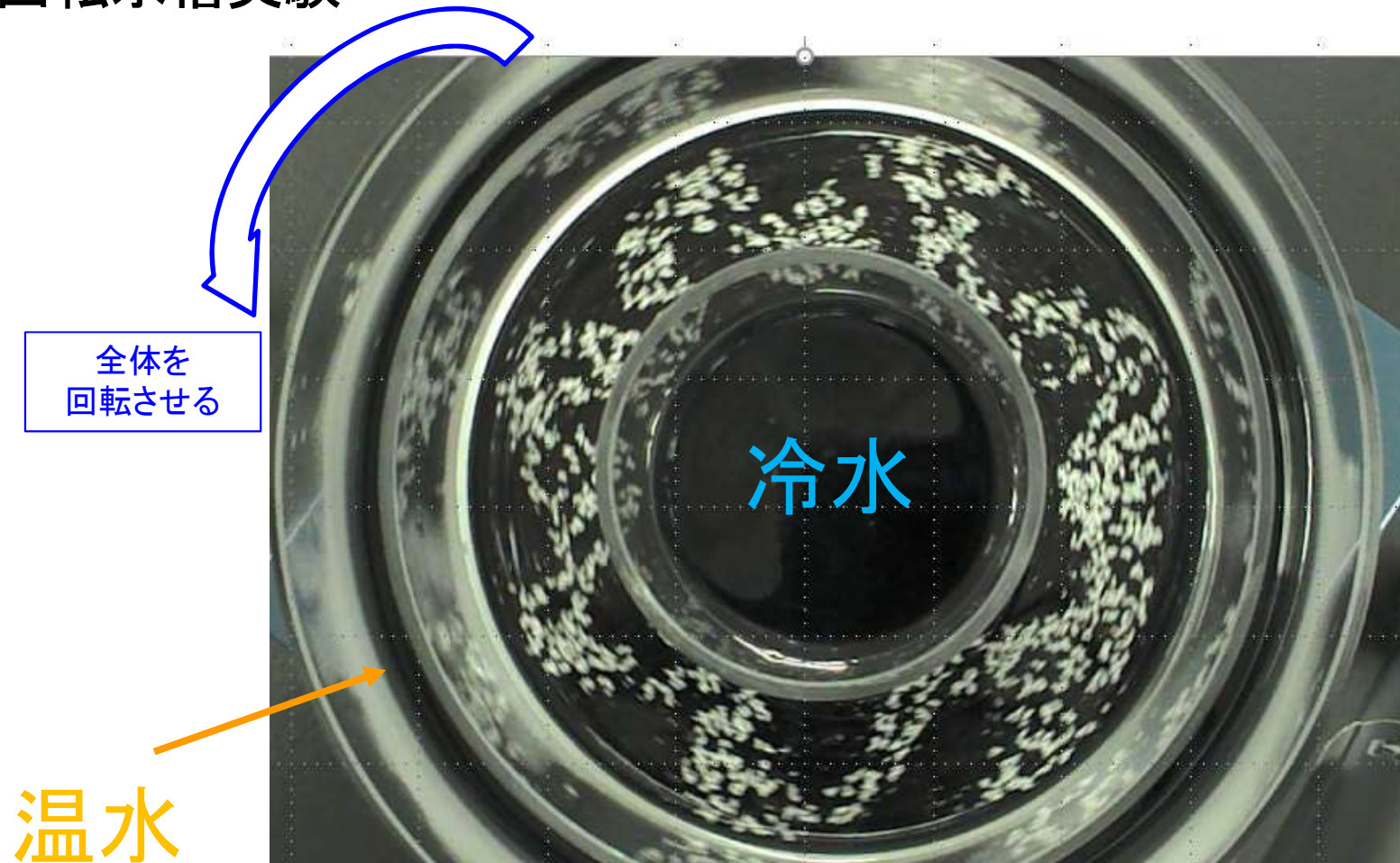
⇒波数5~8くらい  
例: 緯度45で波数7とすると、  
波長約4000 km

# 回轉水槽実験



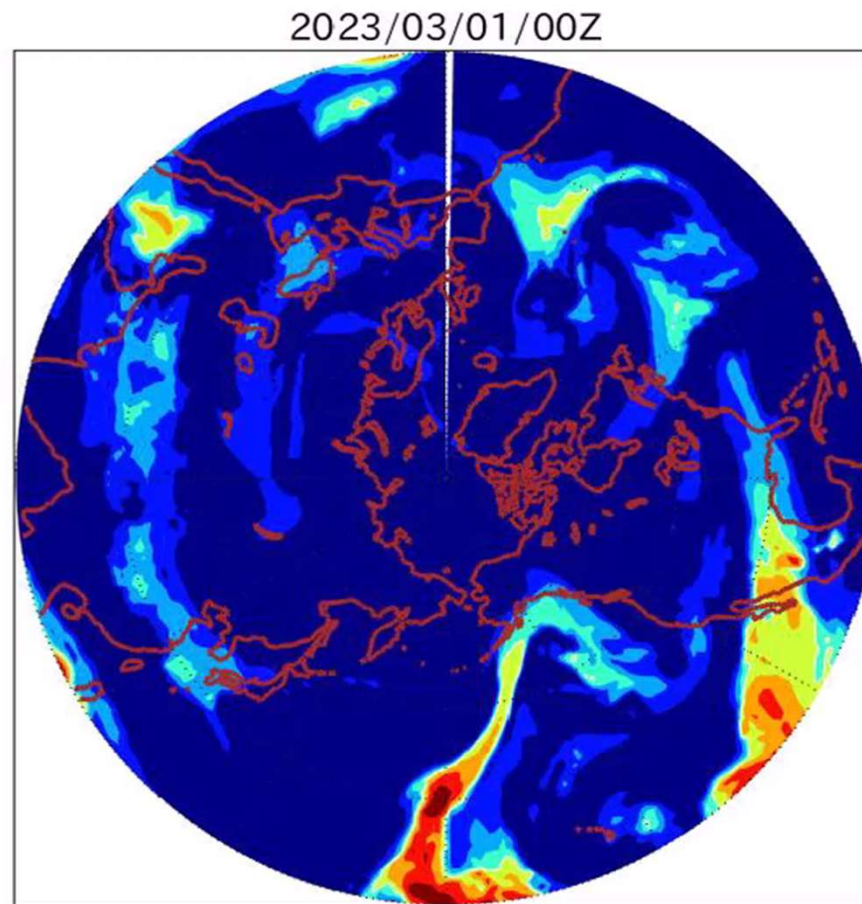
# “温帯低気圧(偏西風蛇行)”は、 回転水槽実験で再現できる

## 回転水槽実験



では、現実の偏西風の吹き方は.....  
上空約5 kmでの水蒸気量の“墨流し”風の動画

---



ERA5  
Specific Humidity  
500 hPa  
MAM2023

# 傾圧不安定の回転水槽実験は、回転速度・温度差 によって、様々な流れのパターンを示す

---

## 回転水槽実験結果例

著作権に配慮し、  
非表示

(赤く見えるところは高温)

参考 : [http://dennou-k.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/library/gfd\\_exp/exp\\_j/exp/bc/](http://dennou-k.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/library/gfd_exp/exp_j/exp/bc/)

# 二層流体が、異なる密度と水平シアーを持つときに、 ケルビンヘルムホルツ(KH)不安定が生じる

---

## KH不安定

著作権に配慮し、  
非表示

以下の写真は、  
KH不安定により生じた雲の写真である

---

KH不安定

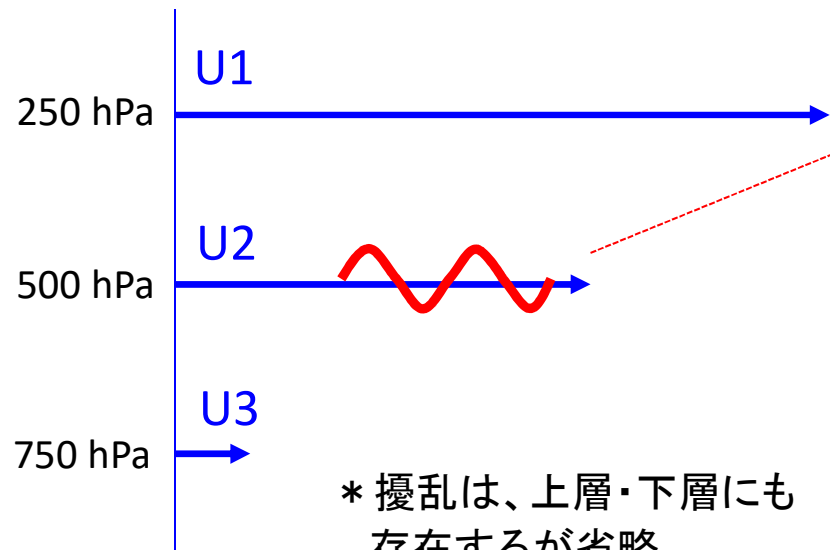
著作権に配慮し、  
非表示

# 傾圧不安定理論

- “傾圧(けいあつ)”とは、水平面上で気温の差がある、つまり上下方向に風の変化があることを指す。  
北半球では、普通、北が低温で南が高温、上空に西風が強い  
⇔ 順圧(じゅんあつ) 水平面で気温が一樣
- 複雑な数式導出・変形などの一部を省略し、全体をかいつまんで紹介する。  
⇒ [結論] 南北気温差、すなわち上空の西風、が限度を超えて強くなると、不安定解(時間的に急激に増幅する解)が存在する  
\* 現実的な自転角速度を仮定

# 傾圧不安定理論では、 西風中に置かれた擾乱の性質を検討する

北半球中緯度で  
東西一様な偏西風Uが吹いている  
普通上空ほど強い



\* 擾乱は、上層・下層にも  
存在するが省略

微小擾乱

(の地衡風流線関数 $\doteq$ 気圧)

$$\varphi = \text{Re}[A \exp\{i k(x-ct)\}]$$

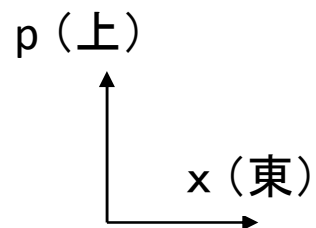
$$\doteq L \sin\{k(x-ct) + \alpha\} \text{ とおく}$$

A 振幅(複素数あり)

k 東西波数(実数、正)

c 位相速度(複素数あり)

Re 実部をとる操作



$U_T = (U1 - U3)/2$   
後で重要になる  
他に、  
緯度・成層安定度など

\* オイラーの公式

$$\exp(i\theta) = \cos\theta + i \sin\theta$$

擾乱は、渦度方程式・熱力学方程式の制約を受ける  
先ほどの擾乱 $\varphi$ の式を代入すると、 $c$ の2次方程式となる

---

◎渦度方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla_h^2 \varphi + \mathbf{v}_g \cdot \nabla_h (\nabla_h^2 \varphi) + \beta \frac{\partial \varphi}{\partial x} = f_0 \frac{\partial \omega}{\partial p}$$

◎熱力学の第一法則

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial p} \right) = -\mathbf{v}_g \cdot \nabla_h \left( \frac{\partial \varphi}{\partial p} \right) - \frac{S_0}{f_0} \omega$$

⇒擾乱 $\varphi$ の式を代入すると、 $c$ の2次方程式を得る  
 $c$ は、複素数解の場合がある

$$(c - U_m)^2 k^2 (k^2 + 2x^2 \mu^2) + 2(c - U_m)x\beta(k^2 + x^2 \mu^2) + \{x^2 \beta^2 + U_T^2 k^2 (2x^2 \mu^2 - k^2)\} = 0$$

$x$ : 自転角速度を現実の何倍にするか



cが複素数の場合、擾乱は時間的に増幅する不安定解である

$$c = c_r \pm i c_i \quad (c_i > 0)$$

---

$$\begin{aligned} & \text{Re}[ A \exp\{ i k (x - ct) \} ] \\ &= \text{Re}[ A \exp\{ i k (x - (c_r \pm i c_i) t) \} ] \\ &= \text{Re}[ A \exp\{ i k x - i k c_r t \pm k c_i t \} ] \\ &= \text{Re}[ A \exp(\pm k c_i t) \exp\{ i k (x - c_r t) \} ] \\ &= \exp(\pm k c_i t) \text{Re}[ A \exp\{ i k (x - c_r t) \} ] \end{aligned}$$

◎ $\exp(+k c_i t)$ の部分が時間的増幅を示す

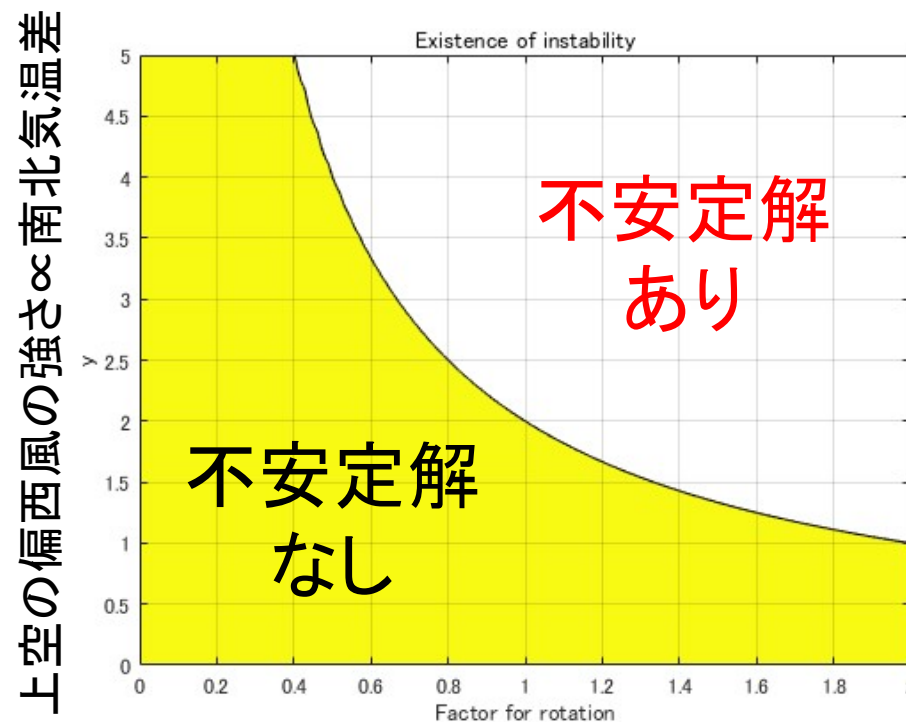
⇒傾圧不安定解という

わずかなゆらぎから、摩擦・粘性に抗して擾乱が現実に出現

◎発達率( $k c_i$ )は、 $k$ (東西波数)と場のパラメータに依存する  
最大発達率を持つ東西波数  $k$  の擾乱が現実に出現する

# 簡単な理論モデルは、不安定解の存在が 自転角速度・南北気温差に依存することを示す

理論モデル(Holton 2004) +  $\alpha$ による予測



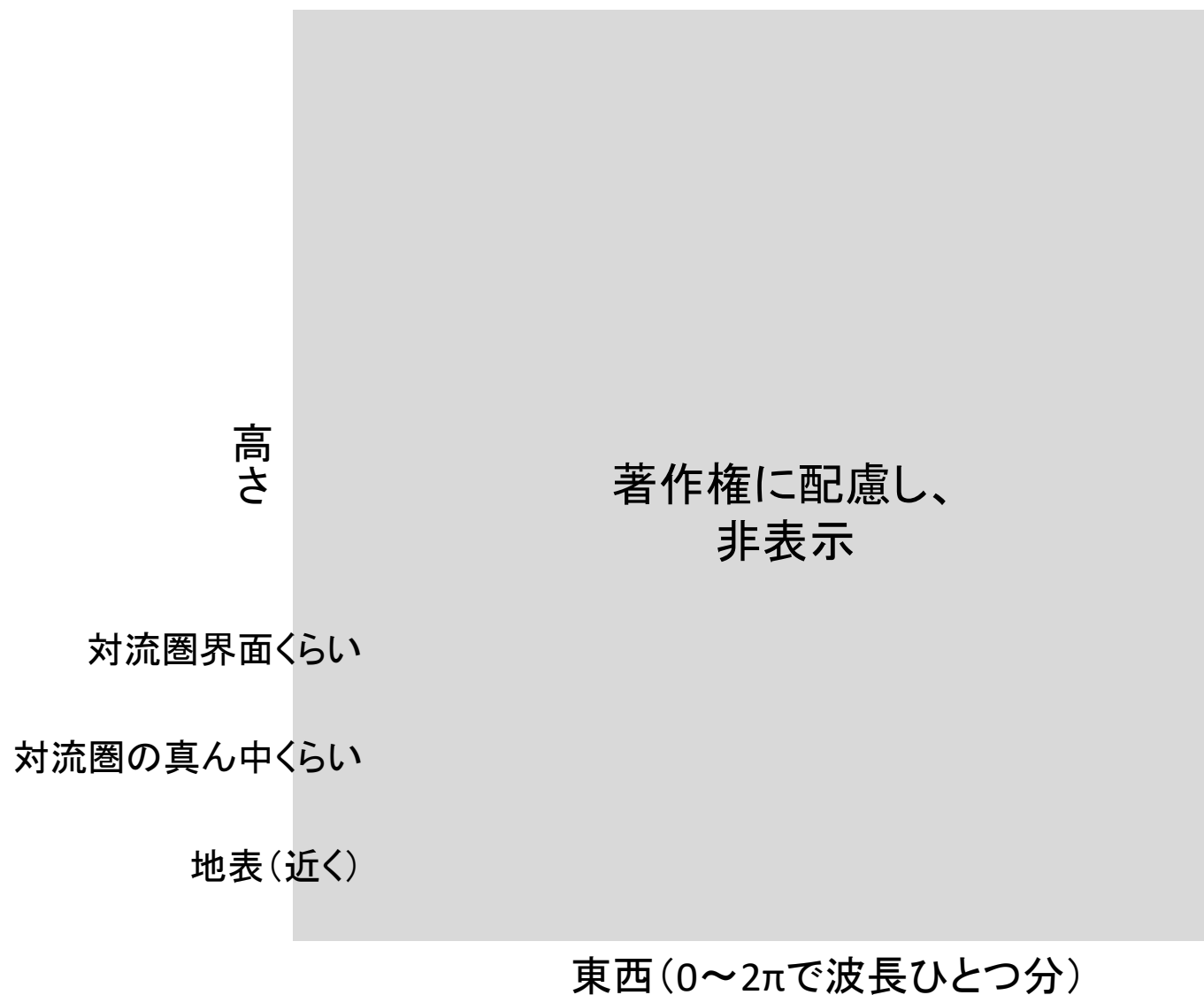
不安定解の場合に、  
最大発達するスケール  
を書き入りたい

自転角速度を現在の何倍にするか

$y=1$ が、 $U_T \doteq 8 \text{ m/s}$ に対応

# 簡単な理論モデルによる、不安定解の立体構造は、 現実のそれをよく再現する

---



# この簡単“傾圧不安定”モデルは、 現実の温帯低気圧・偏西風波動の理解の基盤となる

---

## ■現実の温帯低気圧・偏西風波動≡このモデル中の不安定解

太陽放射(＋地球の丸さ)

⇒南北気温差、すなわち上空の偏西風、を強化

⇒限度を超えると、擾乱(不安定解)が発達

\*モデルは、現実的な東西スケール・空間構造を再現

## ■本モデルの限界と、発展

### ◎南北構造と水蒸気を除外

本質的(ミニマムな)要因でない.....

### ◎その後の発展(ライフサイクル)は対象外

微小擾乱の初期増幅を示すだけ

### ◎前駆条件、上層とのカップリングの問題、など

⇒より高度な、非線型モデルによるシミュレーション

発展  
ストームトラック  
Eadyの成長率の導出  
様々なモデルの比較  
包括的理解

# 3次元大気モデルシミュレーションは、 現実の温帯低気圧の特徴をよく再現する

---

南北温度傾度を持つ中緯度大気が、時間変化する様子@地表  
等値線: 温度、 矢印: 風向・風速、 H・L: 高低気圧

著作権に配慮し、  
非表示

寒冷前線、温暖前線、暖域  
Nモデルに似ている

暖気核の隔離  
後屈温暖前線

現実の温帯低気圧の発達はもっと速い場合がある  
⇒前駆条件、上層とのカップリングの問題

参考: 小倉(1994)

低気圧の東で、暖気が北向きに移動  
西で、寒気が南向きに移動

# 別の低気圧について、水蒸気無のシミュレーション では、現実とは違う場所で低気圧が発生した

---

観測された、低気圧中心の軌跡・強度  
日時は、Z表記

シミュレーションの結果  
初期値: 02/18/00Z

著作権に配慮し、  
非表示

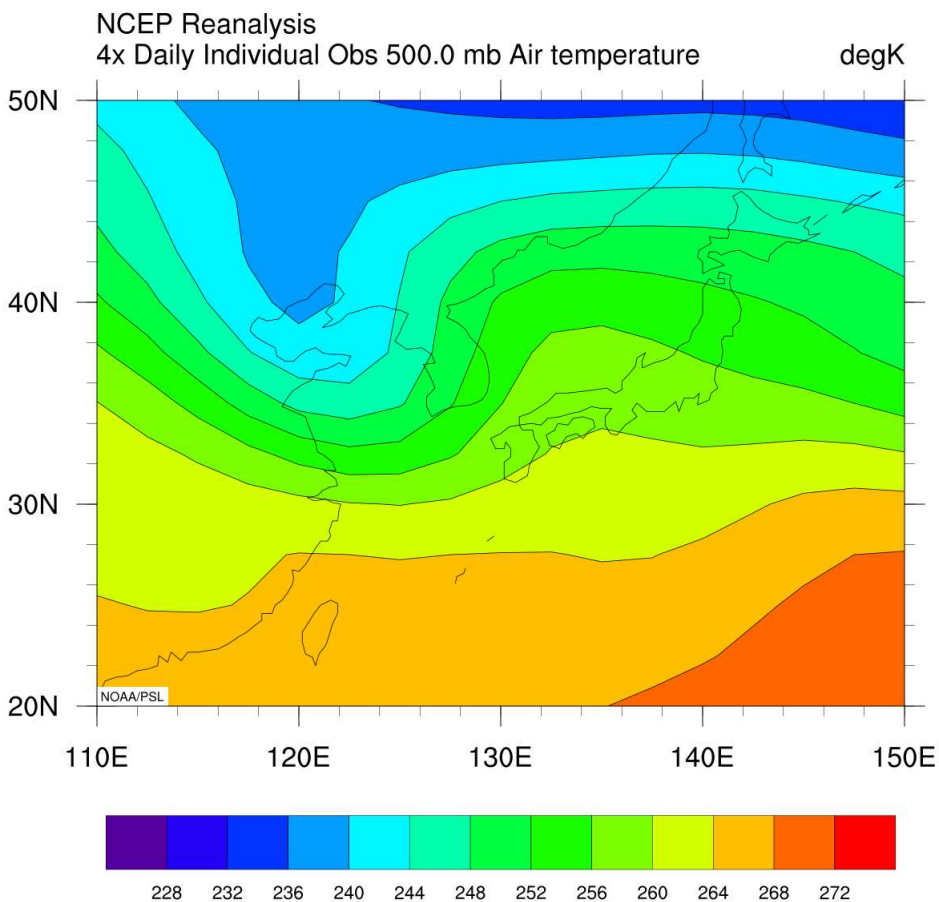
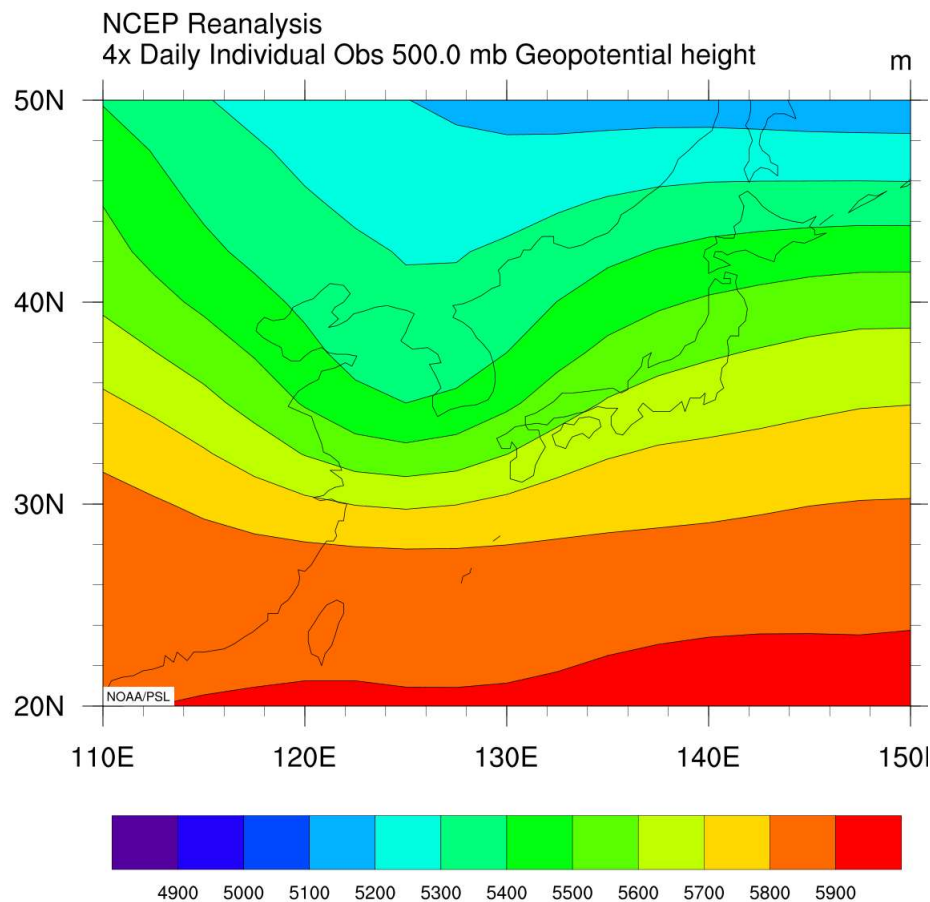
参考: 小倉(2015)、2000年2月の事例。より詳細な紹介あり。

含蓄(作用)  
極向きエネルギー輸送

# 2012年04月03日09時JST@500 hPa

## 等圧面高度(気圧の高低と一致)

## 気温



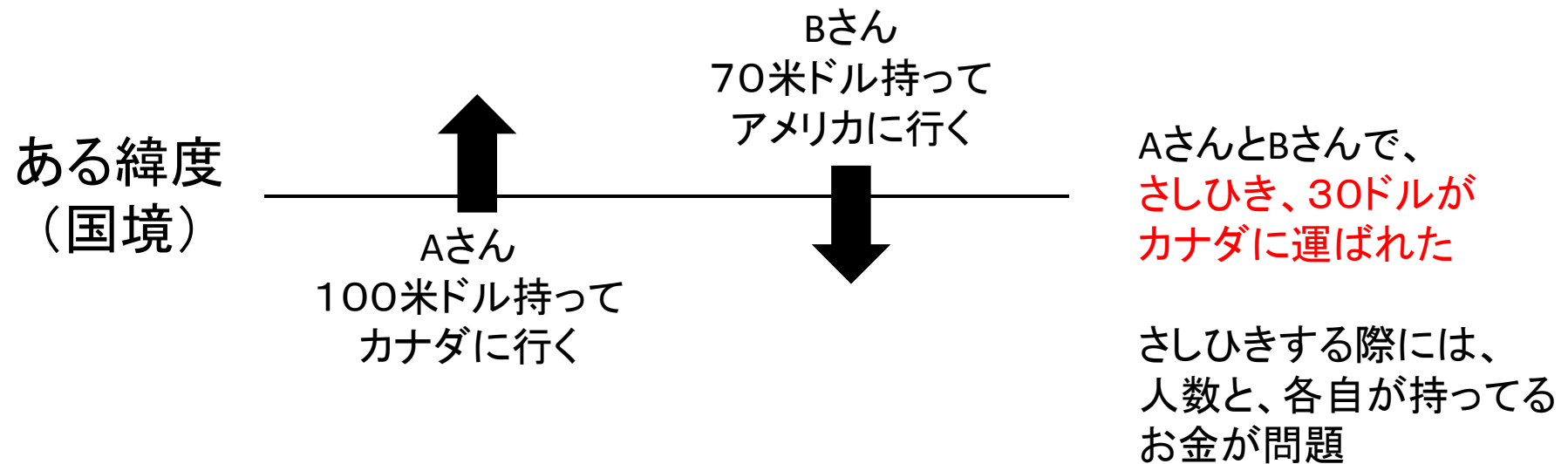
風は、地衡風で近似できる  
各緯度の最低気温の経度を、左図にマークする

⇒北風と低温が対応することが分かる  
⇒北向き熱輸送を示す



低温の水が南向きに、高温の水が北向きに移動する。  
さしひき、北向きに熱エネルギーを輸送する

---



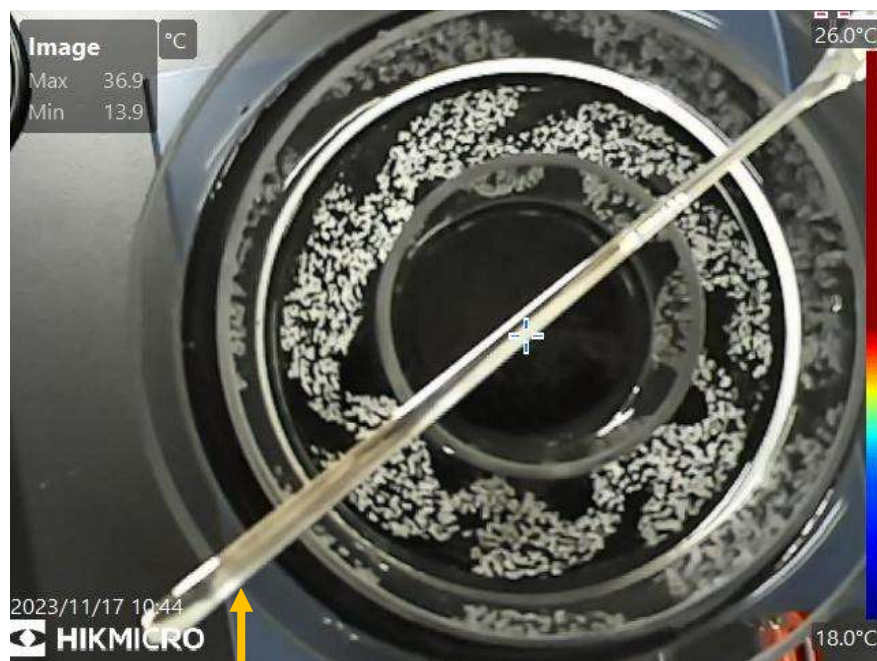
流れの蛇行(傾圧不安定波動)の成因と作用

- ①南北水温差の不安定性から出現する
- ②北に熱エネルギーを運んで、その水温差を解消しようとする

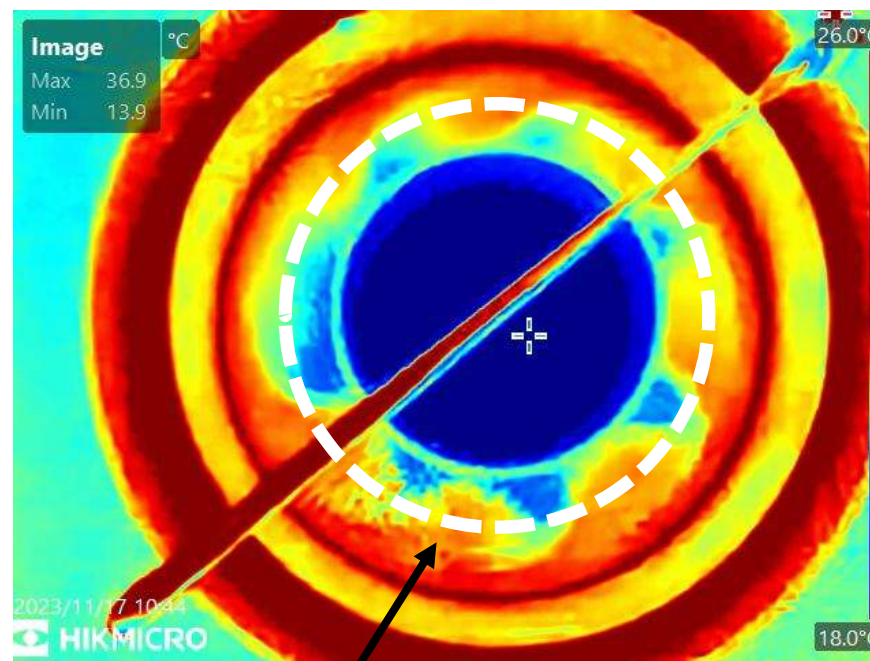
\* ②は波動発達期の特徴であり、成熟期以降はそうでない

# 流れの蛇行と水温分布の関係は？

赤外線カメラの画像  
左と同一タイミング



目印として置いたマドラー



一定の緯度を示す補助線

# 熱収支の過不足にも関わらず、長年ほぼ定常状態であることは、大気・海洋による熱輸送を含意する

## 放射収支の緯度分布

それでも地球は、長年でほぼ定常

熱が過剰

熱が不足

極向きに熱を輸送して、  
左図の過不足を解消

著作権に配慮し、  
非表示

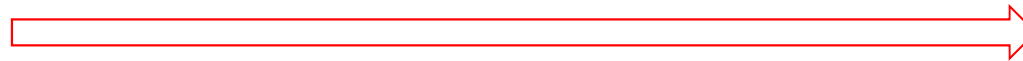
大気も極向きに熱を輸送  
温帯低気圧は、輸送を担うひとつ

# 中緯度では、言わば、日射と偏西風波動が、 偏西風をめぐって“綱引き”をしている

---

緯度変化する日射の作用

持続的



気温差が小さい  
偏西風が弱く、蛇行的

南北気温差  
偏西風(ジェット気流)

気温差が大きい  
偏西風が強く、直進的

“自己破滅的”



気温差・偏西風が強くなると、偏西風蛇行・温帯低気圧が発生  
(場が不安定になり不安定解が出現、南北気温がエネルギー源)  
蛇行は極向きにエネルギーを輸送、気温差・偏西風を弱める(解消)

間欠的

気象とは無関係ですが、  
この描像と本質的に同じようなものが  
身の回りにあります(普通、庭にあります)。  
それは何でしょうか。

# まとめ

---

## ■現実の温帯低気圧・偏西風波動の特徴

空間構造： 上空の偏西風波動と対応（発達期には気圧の谷が西に傾く）

東西スケール：波数5～8くらい

地理的な分布：西風の強いところで活発

## ■回転水槽実験

一定以上の自転角速度と南北温度差を与えると、流れが蛇行

## ■傾圧不安定理論

南北気温差 $\propto$ 西風シア（ $\asymp$ 上空の西風）が強いと、

不安定解（時間的に増幅する解）が存在 （現実的な自転角速度の元で）

⇒現実の温帯低気圧・偏西風波動に対応

⇒上記の、現実の特徴を再現

特に、

暖気上昇・寒気下降 ⇒位置エネルギーを運動エネルギーに変換

南北熱輸送 ⇒与えられた不安定な気温分布を解消

## ■発展

非線型シミュレーション、水蒸気の効果、前駆条件・上層とのカップリング、等