

# 雷雲を想定した強制により生じる ガス惑星表層大気循環

地球流体力学研究室

修士課程2年

鈴木 綾馬

# < 目次 >

## 1. はじめに

### 1. ガス惑星表層流の特徴

### 2. 先行研究

### 3. 研究目的

## 2. モデル

## 3. 計算結果

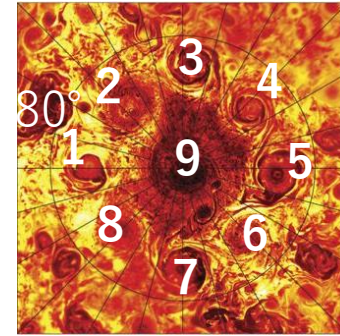
## 4. まとめ

# 1.1 ガス惑星表層流の特徴

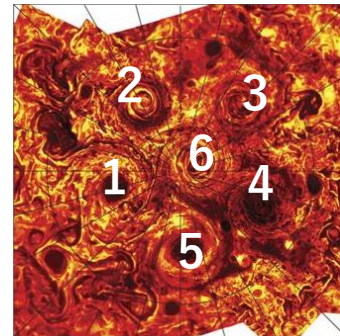
JUNO の観測 (5  $\mu\text{m}$ )

・木星

北極域



南極域

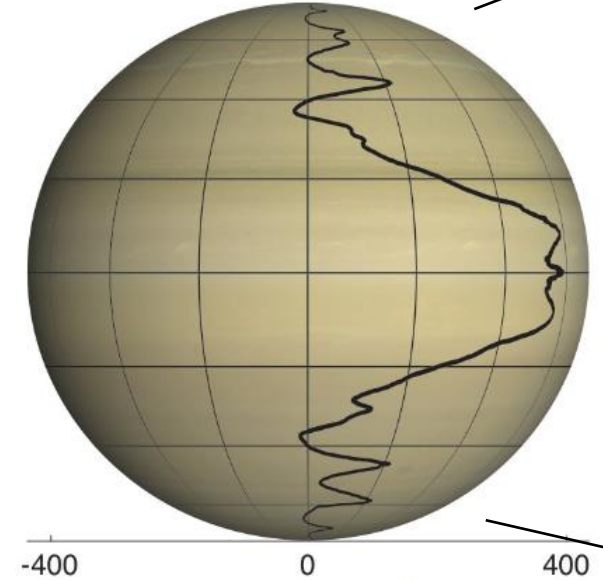


[Adriani et al., 2018](#)  
(上下左右反転したもの)

円周上に並んだ低気圧性渦

・土星

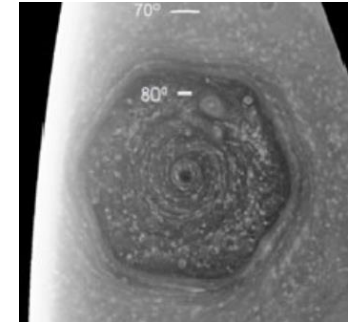
Saturn



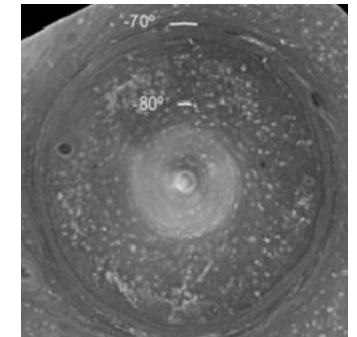
[Antunano et al., 2015](#)

Cassini の観測 (750 nm)

北極域



南極域



[Kaspi et al. 2019](#)

単一の低気圧性渦

## <特徴>

- ・東西風は赤道域で**幅の広い西風**（赤道加速）と 中緯度の**縞状構造**
- ・極域には**低気圧性渦**が存在

# 1.2 先行研究

- 東西風
  - 渦度強制とニュートン冷却を加えた球面 1層浅水系の数値実験で縞状構造と赤道域での西風が形成(Scott and Polvani, 2008).
- 極渦
  - 雷雲を想定した強制項を加えた 1.5層浅水系の数値実験で低気圧性極渦が形成(Brueshaber et al., 2019).
  - Burger 数の値が極域のレジームに最も影響を及ぼす.

Burger 数

$$Bu = \left(\frac{L_{d0}}{a}\right)^2 \quad L_{d0} = \frac{\sqrt{g'h_{eq}}}{2\Omega}$$

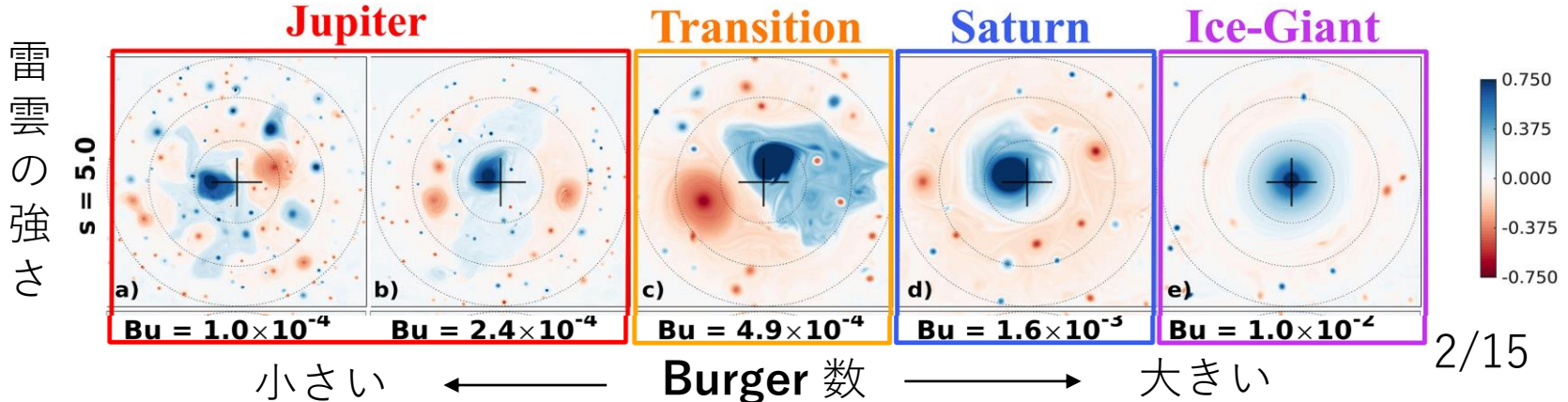
• Brueshaber et al., 2019 の計算領域と実験結果

< 計算領域 >

< 実験結果 >

$\zeta$  : 相対渦度,  $f$  : コリオリパラメータ ( $f_0$  : 極での値)  
 $h$  : 流体層の厚さ ( $\langle \rangle$  は領域平均)

無次元ポテンシャル相対渦度 :  $Q_e^* = \left[ \frac{\zeta + f}{h} - \frac{f}{\langle h \rangle} \right] \cdot \frac{\langle h \rangle}{f_0} \quad t = 20000 \text{ [day]}$



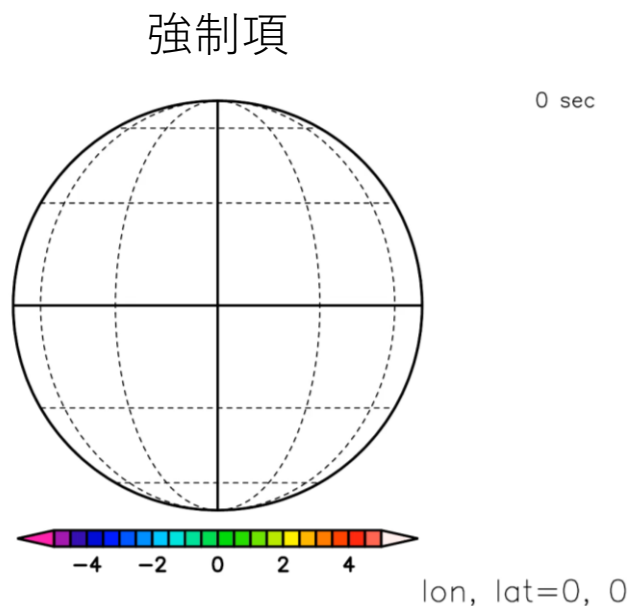
## 1.2 先行研究 (Brueshaber et al., 2019)

### ・木星の雷雲

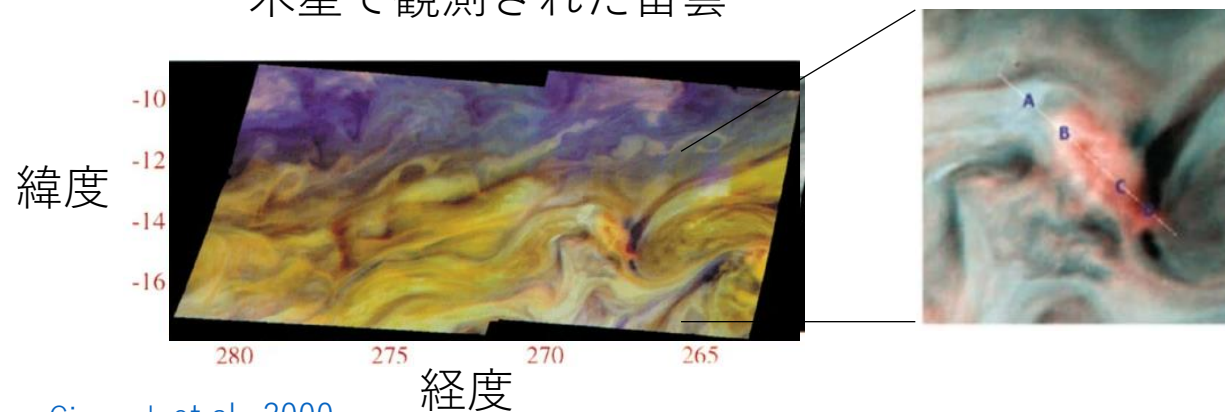
- ・木星，土星では局所な雷雲が観測されている．
- ・局所的な雷雲によって，その付近の大気の流れに影響を与える．

### ・雷雲を想定した強制項

- ・全球のランダムな位置に局所的な質量強制．
- ・時間と空間方向にガウス関数で与える．

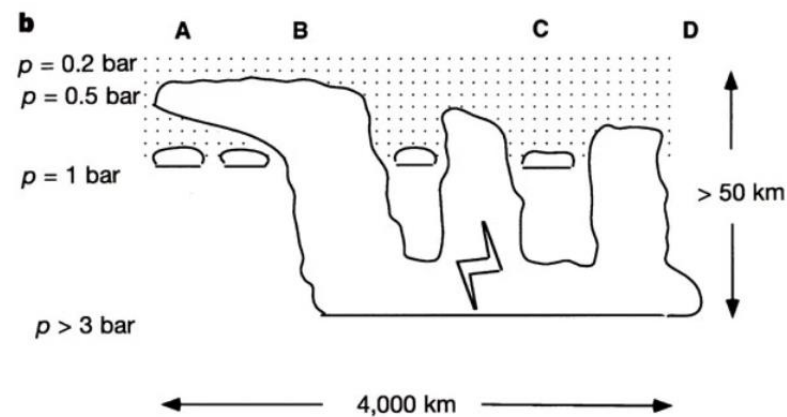


木星で観測された雷雲



[Gierasch et al., 2000](#)

断面の模式図



正の強制は高気圧性の渦度を形成  
負の強制は低気圧性の渦度を形成

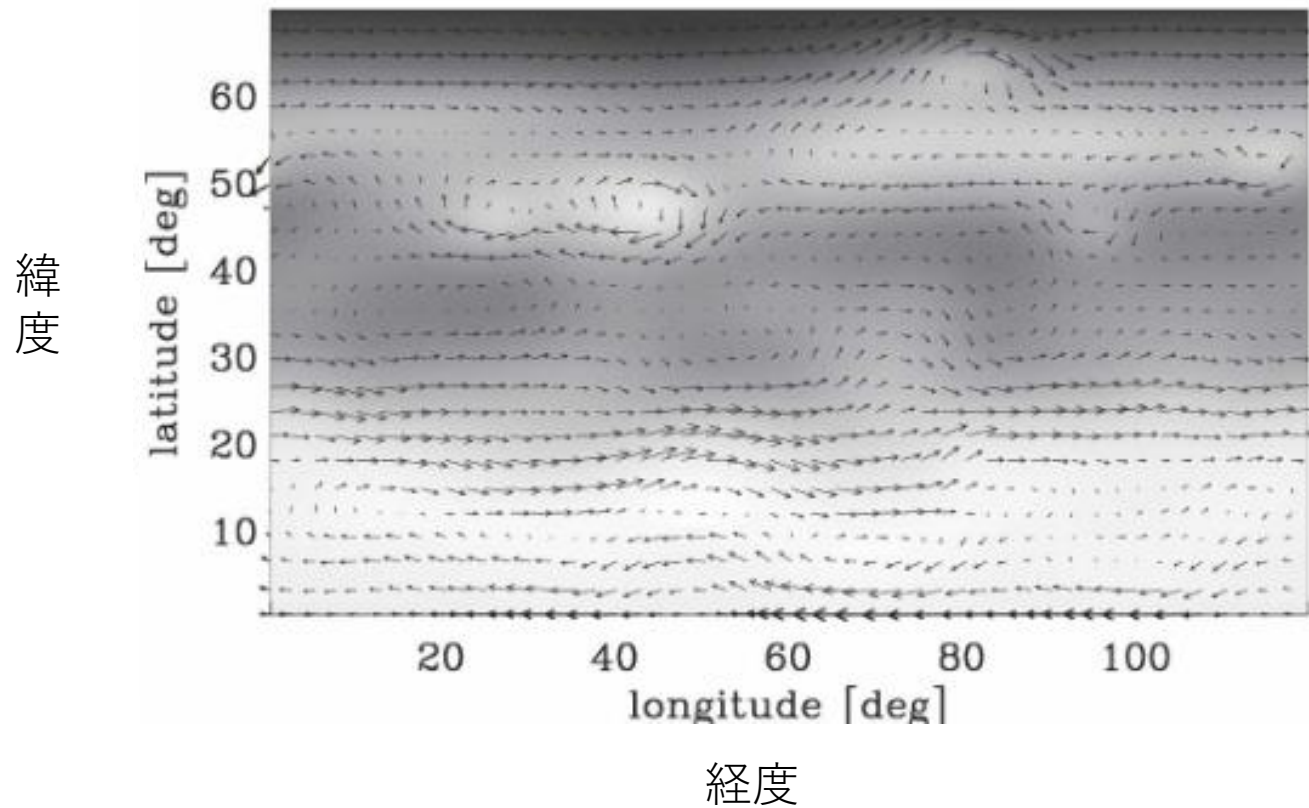


## 1.2 先行研究 (Showman, 2007)

- Brueshaber et al., と同様の雷雲を想定した強制項で、緯度 0 – 70 度、経度 0 – 120 度の領域を計算した Showman, 2007 では変形半径が大きい場合に東西風の**縞状構造**がみられた。しかし、赤道では**東風**になる。

正の強制のみを加えた計算

ジオポテンシャル :  $g'h$     **2200日**



## 1.3 研究目的

### < 先行研究に対する問題点 >

- ・ Brueshaber et al., 2019 , Showman 2007 とともに領域計算である.

### < 研究目的 >

- ・ 雷雲を想定した強制の全球計算は行われていない.  
そのため全球計算を行い, 以下の 2つを確認する.
  1. 極渦ができるかどうか.  
(その特徴やパラメータ依存性を Brueshaber et al., 2019 と比較する)
  2. 東西風の縞状構造が出来るかどうか.  
(Showman, 2007 と比較する)

## 2. モデル

### ・ 1.5層浅水系

- ・ 密度の異なる 2つの流体層を考える。
  - ・ 下層は静止
  - ・ 水平流速や圧力変化は深さに依らない

< 支配方程式 > (Showman, 2007)

運動量の式 
$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -f\hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{v} - g'\nabla h - \mathbf{D}_v$$

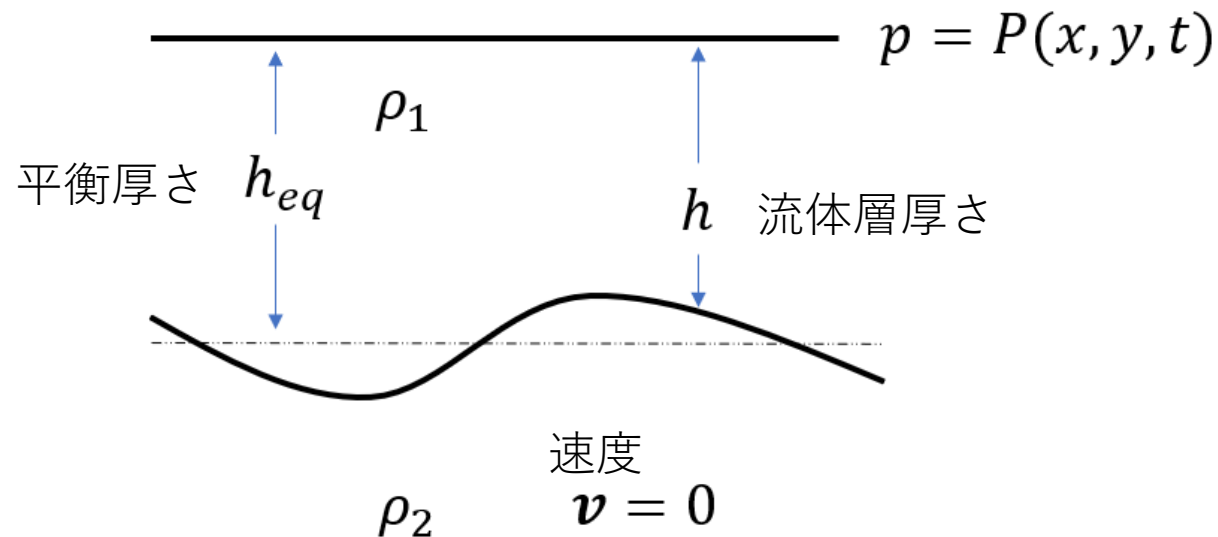
連続の式 
$$\frac{Dg'h}{Dt} + g'h(\nabla \cdot \mathbf{v}) = \underbrace{\Sigma S_{storm}}_{\text{雷雲強制}} + \underbrace{S_{rad}}_{\text{放射緩和項}} - g'D_h$$

### ・ 強制項

$$S_{storm} = s \cdot \exp \left[ -\frac{R^2}{R_{storm}^2} - \frac{(t - t_0)^2}{\tau_{storm}^2} \right]$$

$$S_{mass} = -\langle \Sigma S_{storm} \rangle,$$

$$S_{rad} = -\frac{\langle g'h \rangle - g'h_{eq}}{\tau_{mass}} - \frac{g'h - \langle g'h \rangle}{\tau_{APE}}$$



$v$ : 速度  
 $h$ : 流体層の厚さ  
 $f$ : コリオリパラメータ  
 $g' = g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}$ : 有効重力加速度

$s$ : 振幅  
 $R$ : 中心からの距離  
 $R_{storm}$ : 半径 =  $2.1^\circ$   
 $t$ : 発生してからの時間  
 $t_0$ : 最大値になる時間  
 $\tau_{storm}$ : 緩和時間 =  $10^5$   
 $\tau_{interval}$ : 1つの雷雲が次にできるまでの間隔  
 $h_{eq}$ : 平衡厚さ  
 $\langle g'h \rangle$ : 領域平均したジオポテンシャル  
 $\tau_{mass}$ : 緩和時間 =  $10^6$  [s]  
 $\tau_{APE}$ : 緩和時間 =  $\infty$  [a]



## 2. モデル

### <境界条件>

緯度，経度方向に周期境界

### <積分スキーム>

- ・スペクトル法

時間積分：4次のルンゲ・クッタ法

散逸項　：クランク・ニコルソン法

### ・パラメータの共通設定

- ・切断波数：T170 (Showman, 2007 の低解像度計算と同程度)
- ・時間刻み幅：10 [s]
- ・積分時間：3000 日を目標 (本発表では 約 1000 日の計算結果を示す)
- ・惑星半径，自転角速度は木星の値を使用

- ・本発表では流体層の平衡の厚さを変化させ，  
Burger 数 が異なる 3つの ケースの途中計算を示す.

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Burger 数} \\ Bu = \left(\frac{L_{d0}}{a}\right)^2 \quad L_{d0} = \frac{\sqrt{g'h_{eq}}}{2\Omega} \end{array}}$$

### 3. 計算結果

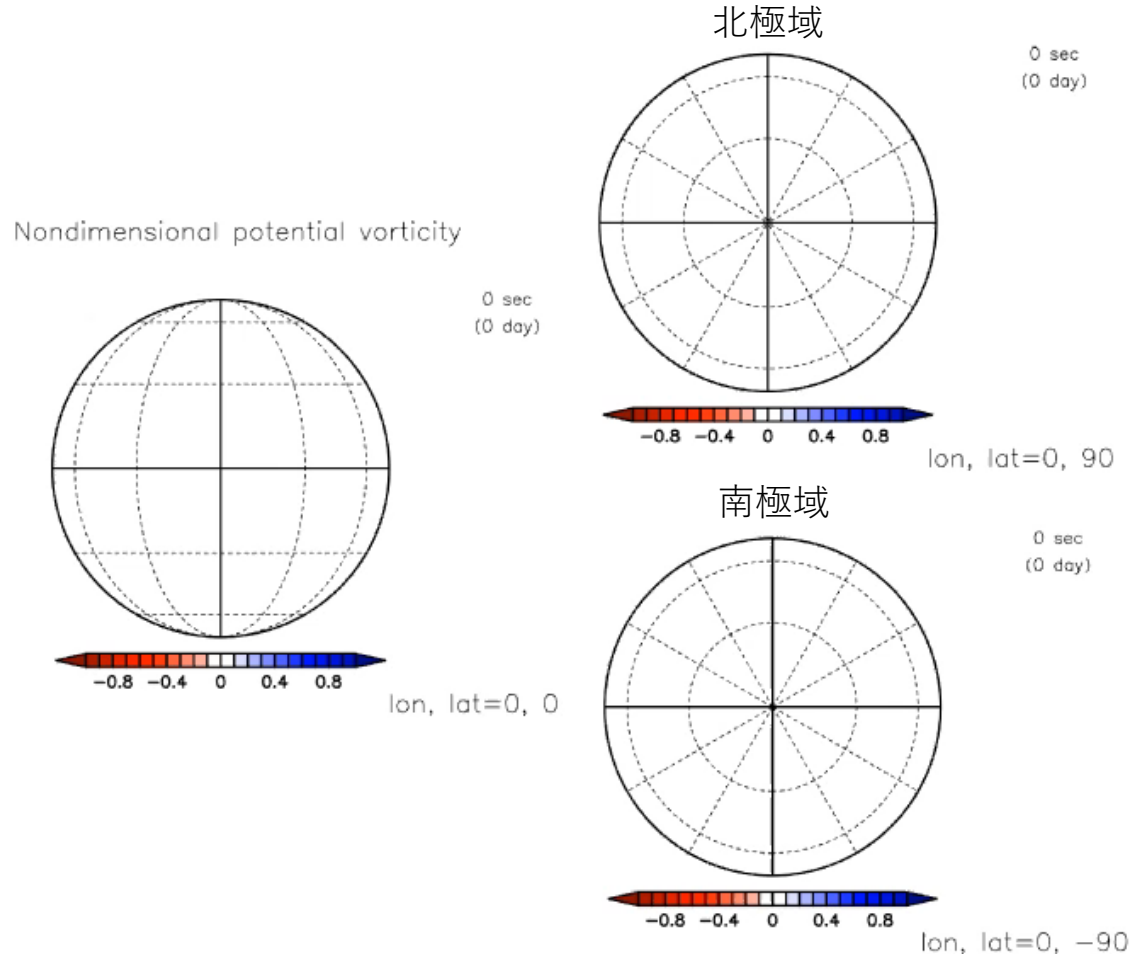
ケース1.  $Bu = 2.95 \times 10^{-4}$  (Brueshaber の木星的レジームの範囲)

雷雲の振幅:  $s = 0.1$

雷雲のインターバル:  $\tau_{interval} = 5 \times 10^4$  [s]

無次元ポテンシャル相対渦度:  $Q_e^* = \left[ \frac{\zeta + f}{h} - \frac{f}{\langle h \rangle} \right] \cdot \frac{\langle h \rangle}{f_0}$

$\zeta$ : 相対渦度,  $f$ : コリオリパラメータ ( $f_0$ : 極での値)  
 $h$ : 流体層の厚さ ( $\langle \rangle$  は領域平均)



- 低気圧性極渦が形成する.  
これは, Brueshaber et al., 2019 の  
結果と矛盾しない.

### 3. 計算結果

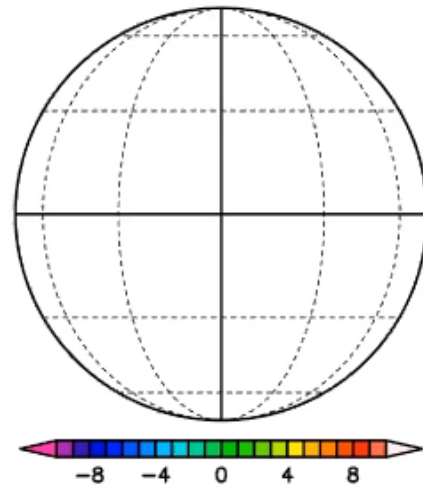
ケース1.  $Bu = 2.95 \times 10^{-4}$  (Brueshaber の木星的レジームの範囲)

雷雲の振幅： $s = 0.1$

雷雲のインターバル： $\tau_{interval} = 5 \times 10^4$  [s]

東西風速

Velocity-lon

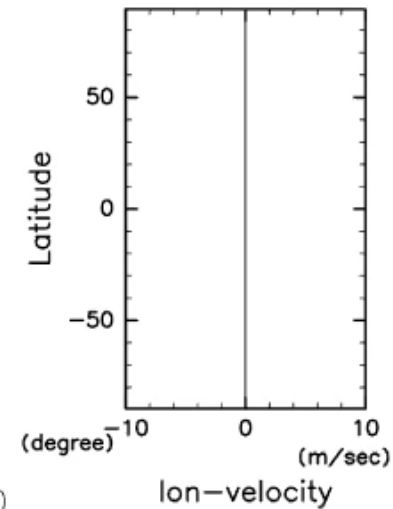


lon, lat=0, 0

東西平均した東西風速

lon-velocity

0 sec  
(0 day)



t=0 sec  
(mean) lon:0..359.297

- ・ 縞状構造が形成し，赤道では東風。  
この結果は Showman, 2007 で得られた結果と矛盾しない

### 3. 計算結果

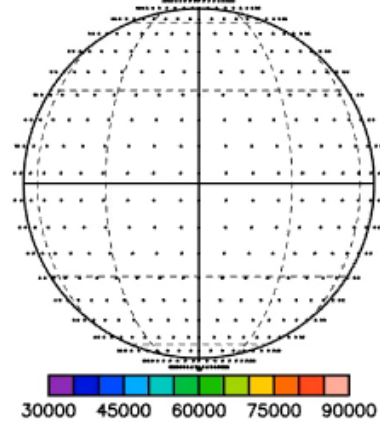
ケース1.  $Bu = 2.95 \times 10^{-4}$  (Brueshaber の木星的レジームの範囲)

雷雲の振幅 :  $s = 0.1$

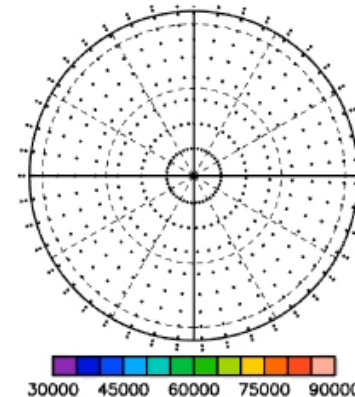
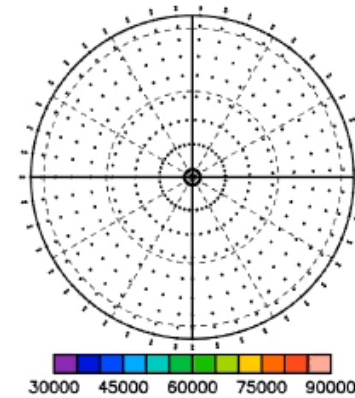
雷雲のインターバル :  $\tau_{interval} = 5 \times 10^4$  [s]

ジオポテンシャル :  $g'h$

Geopotential(lon-velocity,lat-velocity)



t=0 sec



t=0 sec

### 3. 計算結果

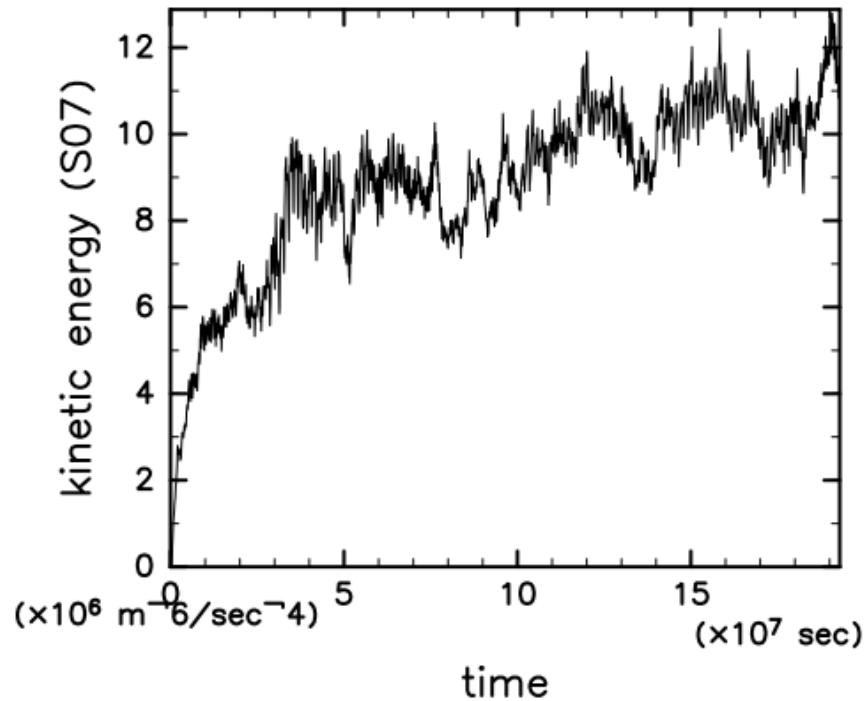
ケース1.  $Bu = 2.95 \times 10^{-4}$  (Brueshaber の木星的レジームの範囲)

雷雲の振幅:  $s = 0.1$

雷雲のインターバル:  $\tau_{interval} = 5 \times 10^4$  [s]

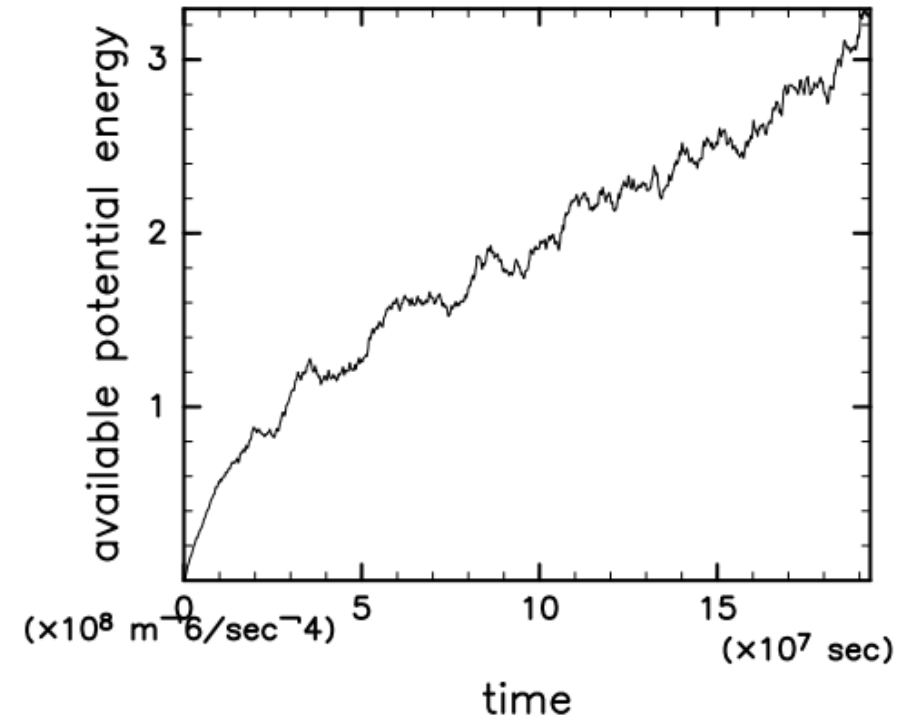
$$KE = \frac{1}{2} \int g' h (u^2 + v^2) dA$$

kinetic energy (S07)



$$APE = \frac{1}{2} \int (g' h)^2 - \langle gh \rangle^2 dA$$

available potential energy



- ・ エネルギーは増加し続けている.
- ・  $\tau_{APE}$  の値が有限であれば, これらのエネルギーの変化は徐々に緩やかになってくはず.

### 3. 計算結果

ケース2.  $Bu = 1.48 \times 10^{-3}$  (Brueshaber の土星的レジームの範囲)

ケース3.  $Bu = 4.43 \times 10^{-3}$  (Brueshaber の巨大氷惑星的レジームの範囲)

雷雲の振幅:  $s = 0.333$

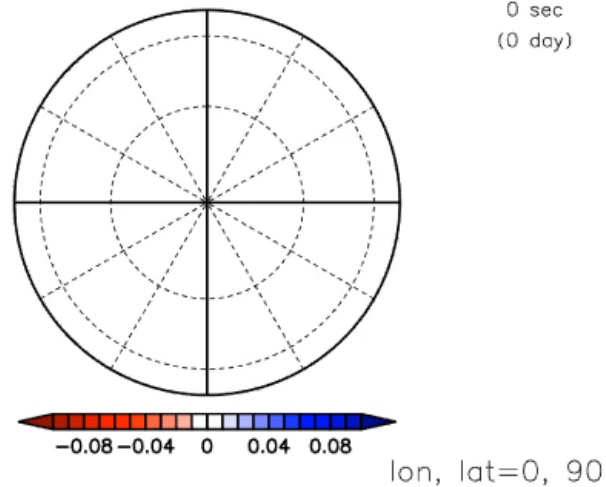
雷雲のインターバル:  $\tau_{interval} = 10^5$  [s]

無次元ポテンシャル相対渦度:  $Q_e^* = \left[ \frac{\zeta + f}{h} - \frac{f}{\langle h \rangle} \right] \cdot \frac{\langle h \rangle}{f_0}$

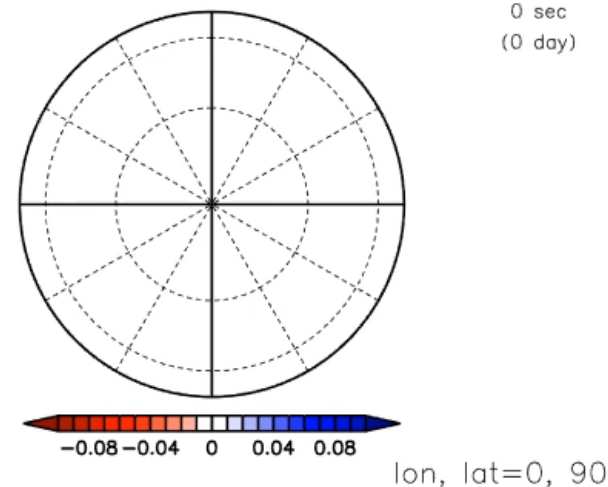
ケース2                      ケース3

$\zeta$ : 相対渦度,  $f$ : コリオリパラメータ ( $f_0$ : 極での値)  
 $h$ : 流体層の厚さ ( $\langle \rangle$  は領域平均)

$Bu = 1.48 \times 10^{-3}$   
北極域



$Bu = 4.43 \times 10^{-3}$   
北極域



- どちらの場合も低気圧性極渦が形成する。  
今回は考えている層の平衡厚さを変更し, Burger 数を変えているが  
Brueshaber et al., では平衡厚さを固定し, 自転角速度を変え, Burger 数を変更している。  
Burger 数に対する依存性を調べるためにはそのような実験を行う必要がある。



### 3. 計算結果

ケース2.  $Bu = 1.48 \times 10^{-3}$  (Brueshaber の土星的レジームの範囲)

ケース3.  $Bu = 4.43 \times 10^{-3}$  (Brueshaber の巨大氷惑星的レジームの範囲)

雷雲の振幅:  $s = 0.333$

雷雲のインターバル:  $\tau_{interval} = 10^5$  [s]

東西風速 (左)

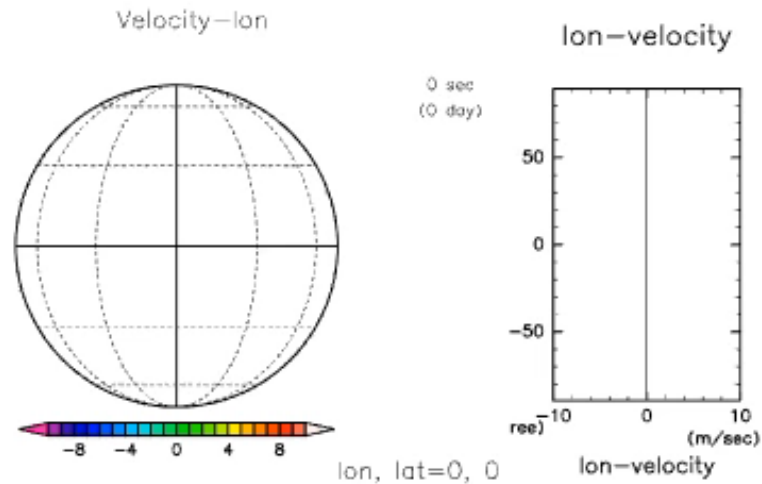
東西平均した東西風速 (右)

ケース2

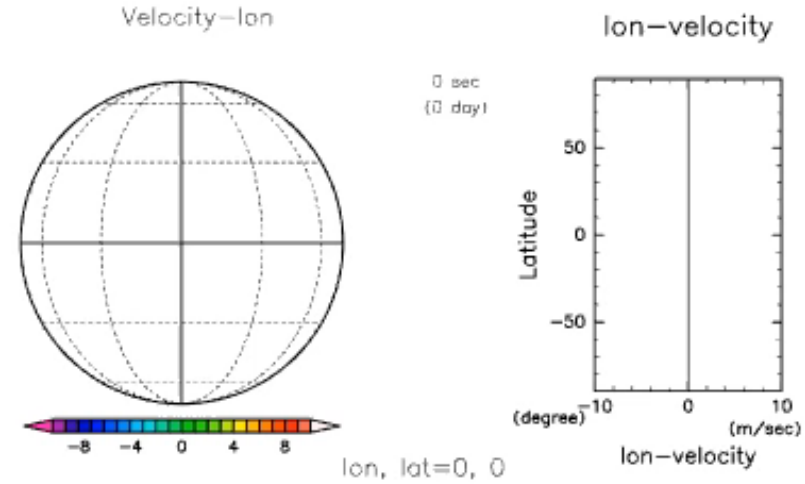
ケース3

$Bu = 1.48 \times 10^{-3}$

$Bu = 4.43 \times 10^{-3}$



t=0 sec  
(mean) lon:0..359.297

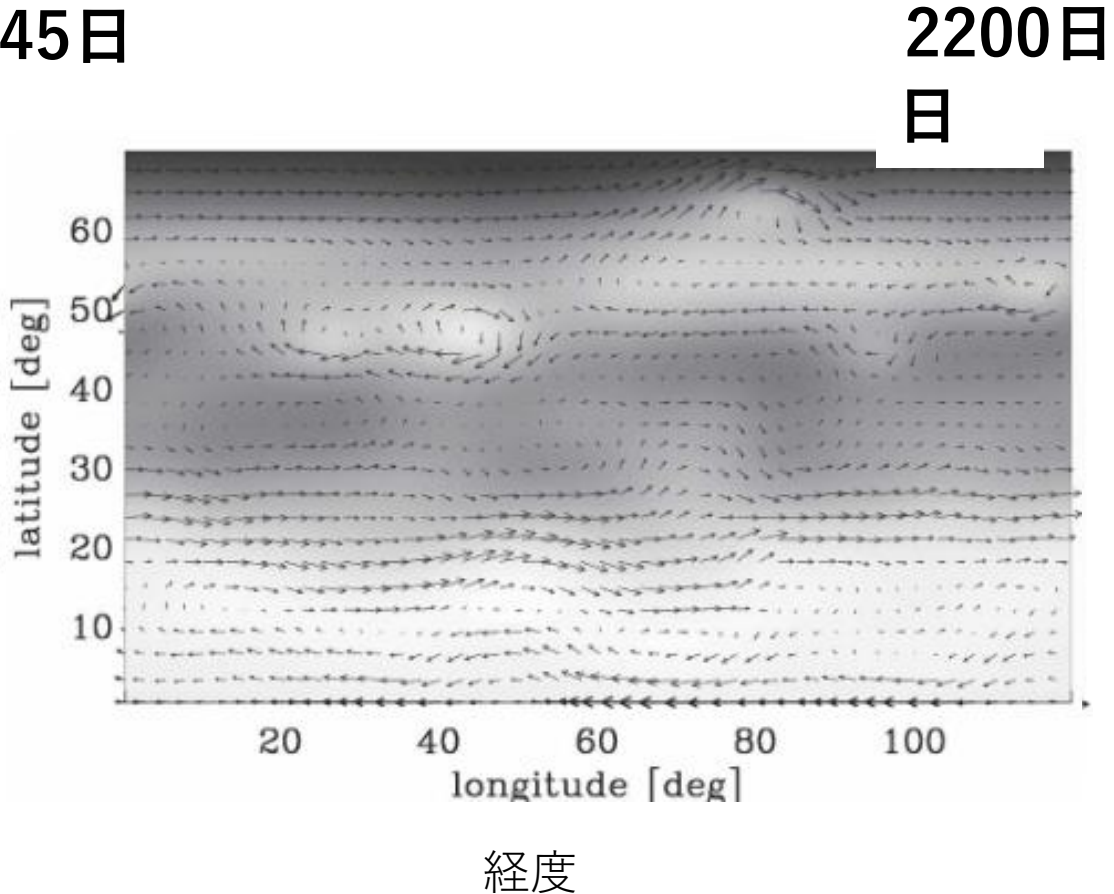
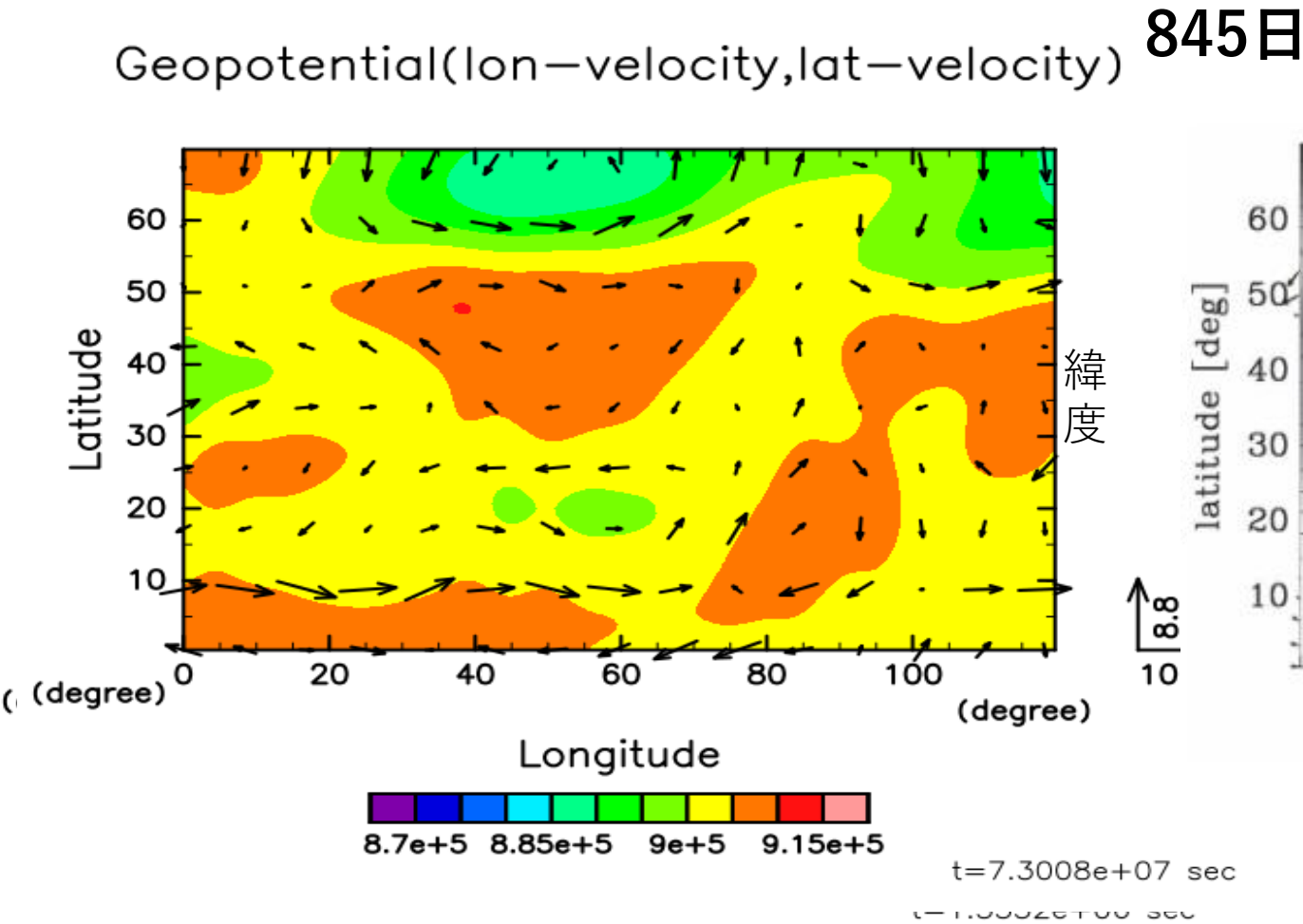


t=0 sec  
(mean) lon:0..359.297

- ・ 縞状構造が形成していそうだが、赤道での風向きはまだわからない。さらなる数値積分が必要である。

### 3. 計算結果

ケース3. ジオポテンシャル



## 4. まとめ

- ・ 雷雲を想定した強制項を加えた数値計算した
- ・ 縞状構造と低気圧性極渦が形成することを確認したが、  
その詳細な特徴についてはさらなる数値積分とパラメータ実験が必要
- ・ 今後の展望
  - ・ 影響のありそうなパラメータを変更し、依存性を調べる.

### < 影響のありそうなパラメータ >

1. Burger 数
2. 雷雲の符号
3. 雷雲の緩和時間
4. 雷雲の分布