

高・低気圧の発達に関する理論的研究

地球および惑星大気科学研究室

北野 太郎

はじめに

地球の中高緯度では水平スケールが数千kmの広がりを持ち、かつ2~3日で変化する大気現象が支配的である。これらは高気圧・低気圧によってもたらされることが知られている。高気圧の発生・発達について流体力学的に解明した初期の研究はCharney(1947)やEady(1949)によって行われた。ここではEady(1949)の研究について紹介する。高気圧を波動と見なして、その波動がどのような状況で発達するのか、また発達したときにどのような構造を持つのか、ということに特に注目する。

系の設定

現実大気の中緯度では、風は鉛直シアを持ち(図1の状況)、水平方向に温度勾配を持っている。Eady's Model (Eady, 1949) ではそのような設定を採用している。その他の状況設定は以下のように簡略化した場を考えている。

- ・ f 平面(球面効果は無視、直交座標)で考える。
- ・ 非圧縮・非粘性流体である。

場は「平均場」と「ゆらぎ場」に分けて考える。
高気圧・低気圧は、平均場からの「ゆらぎ」として捉える。

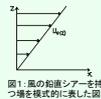


図1: 風の鉛直シアを持つ場を模式的に表した図

支配方程式系と定式化

☆ 回転系上の流体力学の基礎方程式に対して、準地衡風近似(気圧傾度力とコリオリ力が釣り合うとする近似)と静水圧近似(重力と鉛直方向の気圧傾度力がほぼ釣り合うとする近似)を行った結果得られる準地衡流のポテンシャル渦度方程式を支配方程式とする。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right) q = 0 \quad (1) \quad q = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_0}{S} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) : \text{ポテンシャル渦度}$$

ここで、(1)式は無次元化している。これは中緯度の数千kmで数日程度で変動する大気現象をよく記述する方程式として知られている。

φ : ゆらぎの流線関数 u (= - ∂φ / ∂y) : ゆらぎの東西方向の速度 ρ₀ : 大気密度
 U₀ : 東西方向の平均流 v (= ∂φ / ∂x) : ゆらぎの南北方向の速度 S : 大気の安定度
 θ (= ∂φ / ∂z) : ゆらぎの温度

☆ 境界条件は以下のように考える。

- ◇ x は周期境界条件 ◇ z = 0, z = 1 (地表面と上部境界面)
- ◇ y = -1, y = 1 (南北の境界) ・ w = 0 w : 鉛直方向の速度
- ・ v = 0

境界における摩擦の影響はないものとする

☆ ゆらぎは以下のように設定する。

$$\phi = \sum R_0 \Phi e^{ik(x-ct)} \quad c = c_r + i c_i$$

これを(1)式に代入して整理すると、cについての固有値問題として定式化できる。それを解くことで、成長率が分かる。

成長率が最大となる波数

固有値問題を解くことにより、波数の関数としての成長率は以下のように与えられる。

$$kc_i = \frac{k}{\mu} \left[\left(\coth \frac{\mu}{2} - \frac{\mu}{2} \right) \left(\frac{\mu}{2} - \tanh \frac{\mu}{2} \right) \right]^{1/2} \quad \mu^2 = \left(k^2 + \frac{\pi^2}{4} \right) S \quad k: \text{波数}$$

成長率を波数の関数として表すと、図2のようになる。

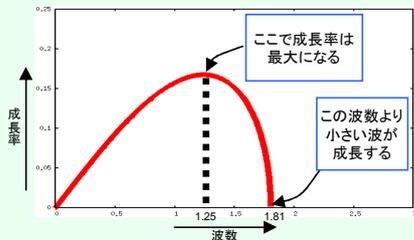


図2: ゆらぎの成長率を波数の関数として表したグラフ

このグラフの値をもとに有次元化すると、水平スケールは約5,000kmのときに最も発達する。
このスケールは現実の高気圧のそれとおおよそ対応している。

- 有次元化に用いた値
- L (長さスケール) = 10⁶ m
- U (速度スケール) = 10 m/s
- T (時間スケール) = 10⁵ s

ゆらぎが発達するときの場の状況 (温度場, 圧力場)

ゆらぎ(=高気圧)が最も発達する場合のゆらぎ場の構造について議論する。まず、気圧場・温度場の東西-鉛直断面を図3に示す。ここで静的安定度はS = 1とする。また時刻はt = 0で考えた。

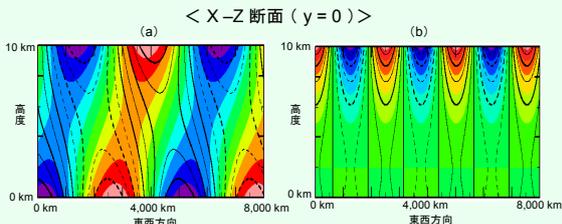


図3: y = 0における東西-鉛直断面の気圧場と温度場。等値線が気圧場を示し、実線は高気圧部を、点線が低気圧部を表している。色の分布は温度場を示し、暖色系が高気圧、寒色系が低気圧を表している。(a)はk = 1.6でゆらぎが最も成長する場合、(b)はk = 2.5でゆらぎが成長しない場合である。

図3からわかるように、高気圧が発達する場合、気圧の峰と気圧の谷は上空へ行くとともに西向きに傾いている。また、温度場は逆に上空へ行くとともに東向きに傾いているが、ゆらぎが成長しない場合は、気圧場・温度場とも鉛直方向には傾いていない。

次に、気圧場・温度場の水平断面を図3に示す。

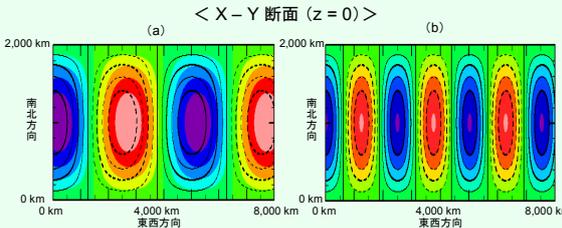


図4: z = 0における水平断面の気圧場と温度場。等値線が気圧場を示し、実線は高気圧部を、点線が低気圧部を表している。色の分布は温度場を示し、暖色系が高気圧、寒色系が低気圧を表している。(a)はk = 1.6でゆらぎが最も成長する場合、(b)はk = 2.5でゆらぎが成長しない場合である。

地上での気圧場と温度場の関係について考えてみる。ここでは低気圧に着目すると、図4からわかるように、低気圧が発達する場合は、気圧場と温度場の位相がずれているため、気圧の谷の東側に高温域が存在し、西側に低温域が存在する。また地衡風の関係から、気圧の谷の東側では北向きの風が吹き、西側では南向きの風が吹いている。つまり、低気圧が発達するとき、低気圧の東側では南から高温の空気塊が移流され、西側では北から低温の空気塊が移流される。南北の温度差を解消するように熱の流れが起こっている。ゆらぎが発達しない場合、気圧場と温度場の位相は同じである。

この構造は現実の高気圧が発達する場合とほぼ対応している。

まとめ

・高気圧の発生・発達について流体力学的に解明したEady(1949)の研究について紹介した。現実大気に相当するパラメータのもとではEady's Modelによると水平スケールが約3,000kmより大きいときに高気圧が発達し、水平スケールが約5,000kmのときに成長率が最大となる。これらは実際の気圧の状況とよく対応するものである。

・高気圧が発達する場合の鉛直方向・水平方向の位相構造は、南北方向の温度差を解消するようになっている。

参考文献

- ・Eady, E. T. 1949: Long waves and cyclone waves. Tellus 1, 33-52
- ・木村竜治, 1998: 地球流体力学入門, 東京堂出版, 247pp.
- ・Pedlosky, J., 1987: Geophysical Fluid Dynamics, Springer-Verlag, 703pp.
- ・高数出, 2000: 気象研究ノート第198号「温帯低気圧の力学」, 日本気象学会, 154pp.