

成層圏突然昇温についての考察

佐伯 拓郎

神戸大学 理学部 地球惑星科学科 地球および惑星大気科学研究室

<研究の目的>

•大気力学の基礎理論の一端として、「波と平均風の相互作用」という観点から、プラネタリー波と帯状平均風が及ぼし合う影響を理解する。

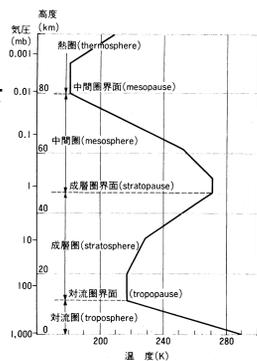
<研究の内容>

•Matsuno (1971) において示された成層圏突然昇温のモデルの支配方程式を導出し、解の挙動について考察することを通し、この現象のメカニズムを理解する。

1. 成層圏について

•対流圏と中間圏との間にある大気圏であり、極地方では下限が 6 ~ 8 km, 上限が約 50 km である。
•**高度とともに気温が上昇**するという特徴があるため、上下運動に対して安定な領域であり、**熱対流は起こらない**。

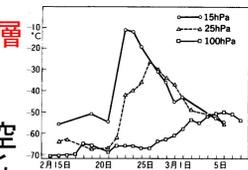
右図: 米国標準大気の高高度分布 (松野・島崎, 1981)



2. 成層圏突然昇温とは

•日々の気温変化が緩やかな成層圏で、**気温が突然上昇**する現象である。
•**上層ほど早く温度上昇がはじまり、次第に弱まりながら下層に移動していく**という特徴がある。

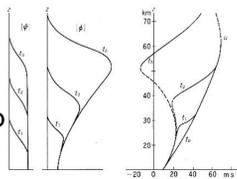
右図: 成層圏突然昇温が発見されたときの、ベルリン上空 15 hPa, 25 hPa, 100 hPa における気温の時間変化 (小倉, 1999)



3. メカニズム

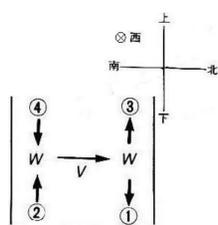
•Matsuno (1971) では、対流圏から上方に伝播する大振幅のプラネタリー波と成層圏における平均風(風向・風速の帯状平均(緯度円一周にわたる平均))との相互作用という枠組みで成層圏突然昇温のメカニズムが説明される。
•プラネタリー波とは、偏西風の波動のひとつであり、大気加熱や地形の起伏などがその成因である。**平均風が東風のときにはほとんど上方に伝播できない**という特徴がある。

•成層圏突然昇温の発生メカニズムは以下の通りである。



説明図 1 (松野・島崎, 1981)

左から順に $|\psi|$, $|\phi|$, 平均西風 \bar{u} の t_1, t_2, t_3 における様子を表す。



説明図 2 (Matsuno and Nakamura, 1979 を改変)

- 対流圏でプラネタリー波が増幅する。
- 波はほぼ**エネルギー密度を保存しながら上方へ伝播**するため、プラネタリー波の増幅後 t_1, t_2, t_3 の時間の後には右上図に示すように波動のエネルギー密度振幅 $|\psi|$ と振幅 $|\phi|$ は順次上層へと延びていく。
- $|\psi|$ はほぼ一定に保たれるが $|\phi|$ は**高度が上昇して密度が減少するのにしたがって増大**していき、波の非線形性が強くなる。
- 波の非線形効果によって波の先端で西向きの平均風加速が起こる(**西風が減速する**)。
- もともと吹いている平均風と南北の気圧傾度は地衡風のバランスしており、波の作用によって西向きに平均風加速を受けると平均風に働くコリオリ力が極向きの気圧傾度力より小さくなるため、**極向きの流れが生じる**。
- 右下図に示すように、極向きの流れ v を生じると流れの連続性のために高緯度側では**上下両方に発散するような鉛直流 w** が生じる。
- 高緯度側の下層(右下図の①)で、高度の低下とともに気圧が上昇するため**断熱圧縮による温度上昇**が起こる。
- 平均風加速が継続し、時間とともに上層から下層に向かって順々に西風が東風になる。
- 西風から東風に転じる高度より上では、プラネタリー波は急激に減衰し、また大気密度が高いとプラネタリー波は増幅しにくいため、**温度上昇は弱まりながら下層に移動**する。

4. 基礎方程式

ここでは、Matsuno (1971) のモデルのメカニズムのうち、対流圏から大振幅のプラネタリー波が上方に伝播する過程についての基礎方程式について説明する。
•基礎方程式は、渦位の帯状平均からのずれに関する、以下の方程式である。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{\omega} \frac{\partial}{\partial \lambda}\right) \mathcal{L}_p(\phi) + \frac{\partial \bar{q}}{\partial \theta} v = 0$$

| | | | |
|-----------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|
| t | 時間 | ϕ | 等圧面の高度の帯状平均からのずれ |
| λ | 経度 | $\bar{\omega}$ | 角速度の帯状平均 |
| θ | 緯度 | \bar{q} | 渦位の帯状平均 |
| a | 地球の半径 | \mathcal{L}_p | ϕ から地衡風の関係を用いて渦位を生成する演算子 |
| v | θ 方向の速度の帯状平均からのずれ | | |

•渦位とは、回転している空気塊などを、体積を変化させずに回転軸方向に伸縮させたときに保存される物理量である。

•各項の意味は以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{L}_p(\phi): \text{渦位の局所的変化} \quad \bar{\omega} \frac{\partial}{\partial \lambda} \mathcal{L}_p(\phi): \text{東西方向からの渦位の移流}$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \theta} v: \text{南北方向からの渦位の移流}$$

•等圧面の高度の帯状平均からのずれ ϕ は、いまプラネタリー波の鉛直方向の振幅を表すため、この方程式に基づいて ϕ の時間発展を求めることは、上方に伝播するプラネタリー波の振幅を求めることと等しい。

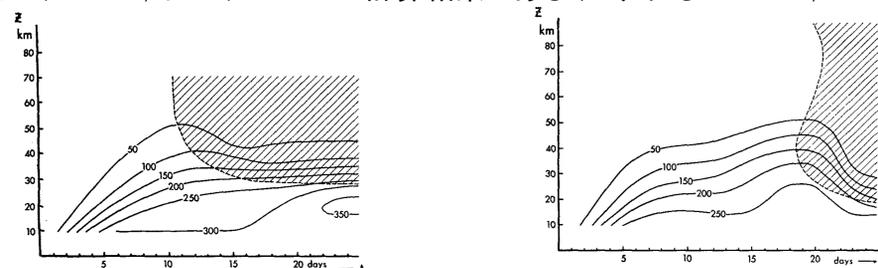
5. Matsuno (1971) の計算結果についての考察

ここでは、Matsuno (1971) において、2通りのケースのもとで上の方程式に基づき時間積分を行うことによって得られたプラネタリー波の伝播の様子について考察する。

•Matsuno (1971) における計算条件は以下の通りである。

- 初期条件: (ケース 1) 波動なし, 平均西風一定 = 33 m/sec (ケース 2) 波動なし, 現実の冬の典型的な平均風分布。
- 境界条件: (下端) 実際の観測結果を模した波動を強制として与える。(上端) 波動なし。(南北端) 波動なし。
- 形状: (ケース 1) 北緯 90 度と 30 度に壁をもち 45 度を基準とする β 面。(ケース 2) 赤道に壁をもつ球面。
- 強制として与える波動の波数: (ケース 1) 1 (ケース 2) 2

•ここで β 面とは、コリオリパラメータを緯度の線形関数で近似した面である。
•計算結果として、時間と高度の関数で表した、北緯 60 度でのプラネタリー波の振幅を以下に示す。影付きの領域は平均東風を表す。
•左がケース 1, 右がケース 2 の計算結果である (いずれも Matsuno, 1971)。



•同一時刻・高度で比較すると、ケース 1 ではケース 2 よりも**プラネタリー波の振幅が概ね大きい**。この傾向は 5 ~ 10 日目ごろ、特に上層で顕著である。

- これは、波数が小さい、すなわち**波長が長いプラネタリー波の方が上層まで効率よく伝播する**(これは先行研究である Matsuno, 1970 で示されている)ということを示唆していると思われる。
- ケース 2 の方がケース 1 よりも振幅の変化の様子が複雑である。
•ケース 2 の方がより現実に近い複雑な設定をしているためと思われる。

まとめ

- Matsuno (1971) において提唱された成層圏突然昇温のモデルのメカニズムを一部解明した。
•プラネタリー波によって平均風が変化する過程については、支配方程式が導出できておらず、完全には解明できていない。これについては、今後の課題である
- Matsuno (1971) で得られた計算結果について考察した。

参考文献

• Dickinson, R., 1967: A note on geostrophic scale analysis of planetary waves, *Tellus*, **20**, 548-550.
 • Matsuno, T., 1970: Vertical Propagation of Stationary Planetary Waves in the Winter Northern Hemisphere, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 871-883.
 • Matsuno, T., 1971: A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1479-1494.
 • Matsuno, T., Nakamura, K., 1979: The Eulerian-and Lagrangian-Mean Meridional Circulations in the Stratosphere at the Time of a Sudden Warming, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 640-654.
 • 松野太郎, 島崎達夫, 1981: 大気科学講座3 - 成層圏と中間圏の大気, 東京大学出版会, 279pp.
 • 小倉義光, 1999: 一般気象学[第2版], 東京大学出版会, 308pp.
 • 小倉義光, 1978: 気象力学通論, 東京大学出版会, 249pp.
 • 小倉義光, 2000: 総観気象学入門, 東京大学出版会, 289pp.
 • Pedlosky, J., 1987: Geophysical Fluid Dynamics [second edition], Springer, 710pp.
 • 佐海弘和, 2003: 成層圏突然昇温の予測可能性, 北海道大学大学院修士論文。
 • 辻野智紀, 2010: 鉛直一次元モデルを用いた赤道準二年周期振動の再現実験, 神戸大学卒業論文。