

地形性大気重力波の発生と伝播に関する研究

A study on generation and propagation of topographically-forced atmospheric gravity waves

研究代表者 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻助手 佐藤 薫
Research Associate, Department of Geophysics, Kaoru SATO
Faculty of Science, Kyoto University

A fully compressible, non-hydrostatic, two-dimensional numerical model is used to study topographically-forced gravity waves. This model includes the mesosphere and keeps sufficient vertical resolution to characterize the breaking and generation mechanisms of gravity waves in the stratosphere. The mean flow is initialized by a climatology from CIRA86 at 40N in February. A bell-shaped mountain with 30-km half-width and 1.5 km height is located at the bottom.

The primary wave forced by the bottom mountain propagates into the stratosphere, its amplitude increasing with height, and breaks in the lower stratosphere. After the wave breaking, significant wave activity is simulated in the stratosphere. These secondary waves are identified as gravity waves whose horizontal and vertical wavelengths are 3–8 km and 3–20 km, respectively. The phase velocities are -1.5 to +4 m/s. Amplitudes of the vertical velocities of the gravity waves are 0.1–0.2 m/s at the altitude of about 20 km. Several generation mechanisms for the secondary gravity waves are considered. The results suggest that the winter lower stratosphere is a wave duct for small-scale gravity waves.

1. 研究目的

位相速度ゼロの地形性大気重力波は、上方伝播する過程で、砕波や吸収を通して運動量を平均場へ移すことで、大気大循環に大きな影響を与えると考えられている。そのため、地形性重力波について理論的研究 (例えば Smith, 1979) のほか、総合的な野外観測 (例えば Bougeault et al., 1993) や定点での大型大気レーダ観測 (例えば Sato, 1994) により、その様々な特性が調べられてきた。しかしながら、非線形領域に於ける理論解析や様々な大気・地形条件下での観測は困難が伴うため、山岳波の振る舞いを大気下層から上空まで一貫して種々な条件下で調べることは十分にされていない。

この研究では数値モデルによるシミュレーションにより、地形性重力波の発生から中層大気への

鉛直伝播、および大規模場への影響までを明らかにすることを目的とする。

2. 研究経過

この研究の特色は、現実的な重力波の背景場を考慮に入れることである。水平風、温度の鉛直構造として、緯度 40N における CIRA86 の 2 月の気候値を与え、特に地形性重力波の砕波と砕波に伴う現象について詳しく調べた。数値モデルは、Satomura (1989) の圧縮性流体方程式を用いる非静水圧 2 次元大気モデルを改良・拡張し、上部中間圏まで領域内に取り込めるようにしたものを用いた。モデルで使用した運動方程式、エネルギー

保存則、質量保存則は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + c_p(\Theta + \theta) \frac{\partial \pi}{\partial x} = Diff_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} + c_p(\Theta + \theta) \frac{\partial \pi}{\partial z} - g \frac{\theta}{\Theta} = Diff_z, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial(\Theta + \theta)}{\partial x} + w \frac{\partial(\Theta + \theta)}{\partial z} = Diff_\theta, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + u \frac{\partial(\Pi + \pi)}{\partial x} + w \frac{\partial(\Pi + \pi)}{\partial z} + \frac{R_d(\Pi + \pi)}{c_v} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{R_d(\Pi + \pi)}{c_v(\Theta + \theta)} \frac{d(\Theta + \theta)}{dt}. \quad (4)$$

ここで、

$$\Pi + \pi = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R_d/c_p} \quad (5)$$

$$\frac{d\Pi}{dz} = -\frac{g}{c_p\Theta} \quad (6)$$

であり、 $Diff$ はそれぞれの渦粘性・渦拡散項を示す。渦拡散係数の計算には1次のクロージャー(Lilly, 1962)を用いた。

今回の研究には、水平512km、鉛直97kmの領域を、水平格子間隔500m、鉛直格子間隔25-100m(50km以上で100-500m)の格子で覆って計算した。領域中央の下面には半値幅30km、高さ1.5kmのベル型の山を置き、地形に沿うよう自動生成した曲線座標系に方程式(1)-(4)を座標変換して使用している。

3. 研究成果

下面境界の山岳で励起された重力波は、上方伝播するにつれ、大気密度減少に対応して温度、風速振幅が増大した。そして、下部成層圏において砕波が起こった。第1図に積分開始から10時間後(地形性重力波の波束がモデル上端まで到達して3時間後)の鉛直速度と温位の分布を示す。高度20km辺りの砕波域から上下に短波長の波が発生・伝播している。成層圏界面付近はScorerパラメータが小さく、地形性重力波の鉛直波長が長くなること、砕波によって振幅が落ちたことにより、砕波は起きていない。

第2図はカットオフ水平波長10kmのhighpass filterをかけた運動量束の砕波付近の拡大分布図である。砕波域のすぐ下流部(S)から波が発生し、上向き(U)及び下向き(D)に伝播していく様子が見られる。そして、それぞれの波は、40km付近、10km付近で反射しており、下部成層圏がこれらの波の導波管の役割をしていることがわかる。

発生した波の波長と位相は、上向伝播波(U)が $(\lambda_x, \lambda_z) = (5.4\text{km}, 7.9\text{km})$ 、 $C_x = 2.0\text{ m/s}$ であり、下向伝播波(D)が $(\lambda_x, \lambda_z) = (7.9\text{km}, 25.3\text{km})$ 、 $C_x = 2.0\text{ m/s}$ である。これらの波長と位相速度は重力波の分散関係を満足している。また、運動量束の符号も重力波として予想されるものと一致している。したがって、これらの波は地形性重力波の砕波下流部で発生した重力波と同定できる。発生メカニズムとしては、対流不安定、モード不安定などが考えられる。

Sato and Hirota (1988)では大型大気レーダー観測により下部成層圏に小さな位相速度をもった短波長の重力波が存在していることを示した。また、Sato (1990)では同じレーダーによりしばしば観測される鉛直流擾乱が、250km上流にある山脈に関連して発生した重力波であると結論している。これらの観測事実は、本研究の数値モデルでシミュレートされた2次重力波が現実大気中にも存在していることを示唆している。

砕波している地形性重力波に比べて、2次的に発生した重力波に伴う運動量フラックスは小さい。しかし、ゼロでない水平位相速度を持っているため、山岳の存在しない場所にも伝播可能であり、また、位相速度ゼロの重力波の臨界層も通過可能であるので、中層大気循環に影響をもたらす可能性がある。

4. 今後の課題と発展

位相速度ゼロの重力波は背景風を減速するようのみ働くが、位相速度がゼロでない重力波は背景風を加速することもある。このような位相速度がゼロでない重力波は、赤道成層圏での準2年周期振動や、夏季に現れる中緯度成層圏東風ジェット

の維持などの中層大気大循環に対し、重要な役割を果たすのではと考えられるようになってきた。ここで着目した地形効果は、重力波の発生メカニズムとして最も重要なものであり、本研究の意義は大きいと思われる。今後さらに、背景風の時間変化を取り入れ、地形効果により発生する重力波の位相速度の分布がどのように変化するか調べる必要がある。また、位相速度がゼロでない重力波の発生メカニズムとして、対流や地衡風調節なども考えられている。高分解能大気大循環モデル等を用いて、このような地形効果以外のメカニズムについても調べていく予定である。

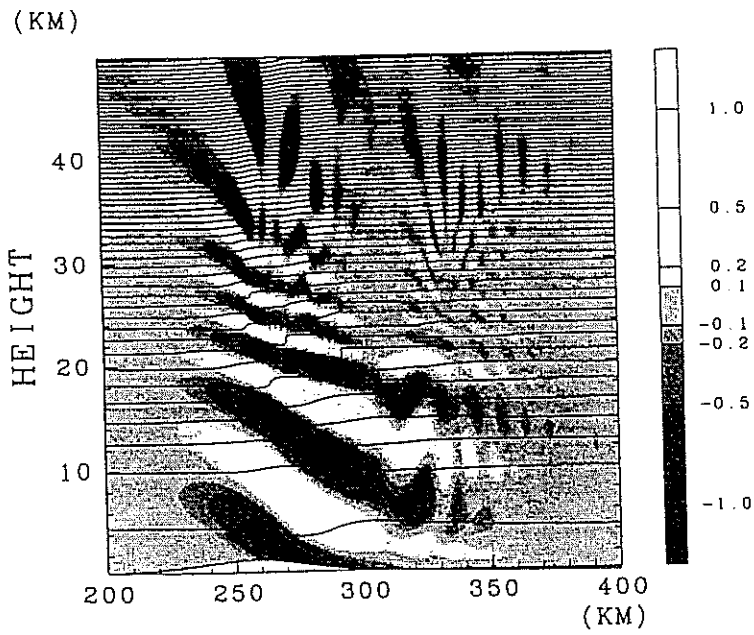
参考文献

- Bougeault, P., 他, 1993: The atmospheric momentum budget over a major mountain range: First results of the PYREX field program, *Annales Geophysicae*, **11**, 395-418.
- Lilly, D.K., 1962: On the numerical simulation of buoyant convection, *Tellus*, **14**, 148-172.
- Sato, K.: Vertical wind disturbances in the troposphere and lower stratosphere observed by the MU radar. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2803-2817, 1990.
- Sato, K., and Hirota, 1988: A small-scale internal gravity waves in the lower stratosphere revealed by the MU radar multi-beam observation. *J. Met. Soc. Japan*, **66**, 987-999, 1988.
- Sato, K., 1994: A statistical study of the structure, saturation and sources of inertio-gravity waves in the lower stratosphere observed with the MU radar. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **56**, 755-774.
- Satomura, T., 1989: Compressible flow simulations on numerically generated grids. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 473-482.

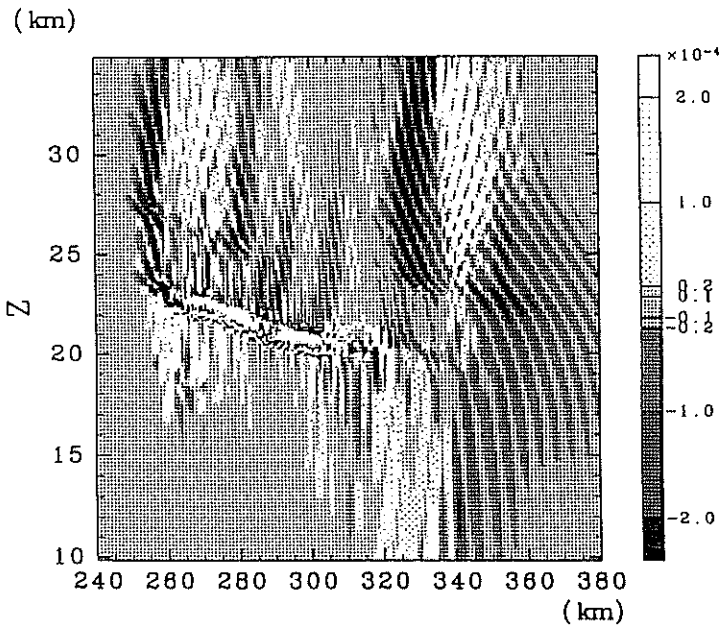
Smith, R. B., 1979: The influence of mountains on the atmosphere, *Adv. Geophys.* **21**, 87-230.

4. 発表論文リスト

- T. Satomura and K. Sato, 1997: Secondary generation of gravity waves associated with the breaking of mountain waves. Submitted to *J. Atmos. Sci.*



第1図: 積分開始から10時間後の鉛直速度と温位の分布.



第2図: 積分開始から10時間後の2次重力波に伴う運動量束.