

特集「金星研究の新展開」

金星の大気大循環モデルについて

山本 勝¹, 高橋 正明²

1. 大気大循環モデル (AGCM)

大気大循環モデル (AGCM) は、大気の力学過程や物理過程 (放射, 雲など) を数値的に解いて、大気大循環を再現するモデルで、地球温暖化などの研究で成果をあげている。近年、地球以外に火星やタイタンの大気にも応用されているが [1,2], 金星の研究における AGCM の利用は進んでいない。92 気圧の CO₂ によって地表が覆われ、その温室効果によって地表温度が 730 K 程度に達するような極限状態の金星大気では、地球の気象学 (特に雲や放射の物理過程) で使われている手法が利用できるか否か検討しなければならない。それに加えて、大気放射が平衡状態に達するのに 1 万日程度かかるので、すべての物理過程を組み込んで平衡状態まで計算することは非常に厳しい。従って、力学以外の物理過程を簡略化した Venus-like AGCM (金星に近い条件の大気大循環モデル) を用いた金星大気大循環の研究がなされている。

2. 金星の大気大循環

金星は、177.4° の赤道傾斜角をもち、243 (地球) 日周期でゆっくりと自転している。ところが、その自転の 60 倍で回転するスーパーローテーション (大気が自転よりも高速で回転) が発見されている [3]。この金星スーパーローテーションの形成・維持は、古くから存在する惑星気象学の未解決問題の一つであるが、今なお確定的な理論は存在していない。

高度 48 km から 70 km の高度域を厚い硫酸エアロゾルの雲が覆っており、その雲により吸収された太陽光の加熱が子午面循環 (東西方向に一周にわたり平均した南北流と鉛直流による循環) の駆動源の一つであると考えられている。また、金星は自転軸の傾きが非常に小さいので (赤道傾斜角が 180° に近いので)、大気大循環の季節変化は無視できる。金星雲層の下では地表から高度とともに徐々に東西流が増大し、高度 40 km あたりで 50 m/s ほどの東西風が吹く。雲層内部でも高度とともに東西流が増大し、雲層上端 (65—70 km) では 100 m/s ほどに達する。この雲層上端のスーパーローテーションは、赤道域から中緯度にわたって存在している。

金星スーパーローテーションの形成・維持機構を説明する理論はいくつか出されており [3], それらは “子午面循環による角運動量鉛直輸送に基づく理論 (Gierasch 説) [4]” と “対流や波動による角運動量鉛直輸送に基づく理論 [5,6]” に大別される。どちらの理論がどの程度寄与しているかを調べるためには、AGCM を用いた客観的な (モデルに与える仮定を可能な限り少なくした) 数値実験が必要とされる。

3. AGCM の金星大気への適用

Young and Pollack が最初に AGCM を用いて高速流を再現したが [7], そのメカニズムについて詳しい解析がなされていない上に、鉛直渦拡散の不適切な扱いが指摘されており [8], 角運動量保存に問題がある。この研究以降、最近まで、自転周期が 243 日で地

¹ 和歌山大学教育学部

² 東京大学気候システム研究センター

表気圧が92気圧の条件で行われたAGCMは成功していなかった。他方、自転周期を金星の値に変更した地球大気AGCMを使用した研究が行われてきた[9]。これらの実験では100 m/sを越える高速流は再現されていないが、結果は“子午面循環による角運動量鉛直輸送に基づく理論”の一つであるGierasch-Rossow-Williams (GRW)シナリオを支持している[9]。このGRWシナリオでは、子午面循環により上層へ汲み上げられた角運動量が、極向きの南北流によって高緯度へ運ばれる。その際、高速流の水平シアで生じる順圧不安定の赤道向き角運動量輸送によって、上層の角運動量が、高緯度域の下降流により下方へ運び去られる前に、赤道方向へ戻される。その結果、上層の赤道域に角運動量が蓄積し、雲層上端で高速流を駆動するというシナリオである。しかしながら、これらのVenus-like AGCMでは十分に発達したスーパーローテーションが再現されていないので、とても決定的なシナリオとは言えない状況であった。

そこで、我々はAGCMを球面3次元力学モデルとして用いて、100 m/sを越える高速流が再現される条件を見つけて、その力学過程を詳しく調べた。第一段階としては、現実の金星大気を追求するのではなく、物理過程を簡略化したVenus-like AGCMを用いて、自転周期が243日で地表気圧が92気圧の大気大循環を調べた。静止状態から出発して、十分に発達したスーパーローテーションを再現し、大気波動の解析からスーパーローテーションの形成・維持のメカニズムを調べた[10,11]。

4. Venus-like AGCMを用いた予備実験

東大気候システム研究センターと国立環境研究所で開発されたCCSR/NIES AGCMを金星の条件に変更し、放射過程を簡略化して、Venus-like AGCMとして使用した。大気の放射伝達の式を解く代わりに、

太陽光による加熱を与え、その加熱によって生じた“金星標準温度からのズレ”を大気放射の時定数(赤外放射で標準温度に戻るのにかかる時間)で緩和させる。また、格子点以下の小さな対流による気温分布の調節過程(対流調節)もモデルに組み込まれている。この予備実験では、地面での加熱は考慮せず、太陽光による大気の加熱率を東西方向に一律に与え、その極大高度が55km付近にあり、下層にも極大値の10分1の大きさをもつ加熱を与えた点が幾分現実と異なる(現実では雲による加熱は、65~70 kmで極大となり、55 kmより上で大きな値をもつ)。これらの放射過程以外では金星と同じ条件で実験した。切断波数10 (T10)で鉛直50層のモデルを用いて、静止状態から出発して、平衡状態に達するまで時間積分した[10]。

この実験では、高度65 km付近で100 m/sを越える帯状平均(東西方向に一周にわたり平均した)東西流が形成された。帯状平均鉛直流は地面から雲層上端に至るまでつながっており、帯状平均南北流は帯状平均東西流の減速域で強められている。角運動量は極域よりも赤道域で大きいので、このような単一セルの子午面循環が支配的な場合、赤道域の上昇流は大きな角運動量を上方へ運び、極域の下降流は小さな角運動量を下方へ運ぶ。従って、角運動量鉛直輸送は正味上向きなので、子午面循環(の鉛直流)は角運動量を上方輸送している。他方、波動による角運動量鉛直輸送は下向きで、下層大気で発生した重力波が鉛直伝播することによって生じる。これらの鉛直伝播する波は、雲層よりも上の領域で帯状平均東西流を減速する。平衡状態として、この減速を生み出すレイノルズ応力が、極向きの帯状平均南北流による転向力とバランスし、強い帯状平均南北流(つまり子午面循環)が存在している。

雲層上端では、波動による赤道向き角運動量輸送が見られる。もし、この赤道向き運動量輸送が無いなら、極向き南北流が角運動量を極域に運び、極域の下降流によって角運動量は下方に運び去られてし

まうので、雲層上端に角運動量が蓄積しない。他方、数値実験では波による赤道向き角運動量輸送が存在するので、この赤道向き角運動量輸送が、子午面循環によって高緯度に運ばれた角運動量を赤道域に戻して、「極域の下降流による角運動量の運び去り」を食い止める。従って、赤道域に戻された角運動量は、雲層上端に蓄積される。また、波による赤道向き角運動量輸送は雲層上端だけでなく下層大気でも見られ、東西流を低緯度域で加速して、高緯度域で減速する。従って、下層大気では、低緯度域の角運動量はより大きくなり、低緯度域の上昇流による角運動量の上方輸送もより大きくなるので、上方に角運動量が効率よく供給される。このように単一セルの子午面循環が支配的な状況では、波動による赤道向き角運動量輸送が、「雲層上端での角運動量の蓄積」と「下層大気での角運動量の上方輸送」の効率をあげることによって、十分に発達したスーパーローテーションが形成・維持される。これらの成果に加え、我々は個々の波動についても解析しており、GRWシナリオで提唱されている順圧不安定波のみならず、高度によって様々な波動が赤道向きに角運動量輸送することも示している[10]。

水平解像度を2倍に上げた実験(切断波数21, T21)でも、十分に発達したスーパーローテーションが再現される[11]。この結果も、T10同様に、“子午面循環による角運動量鉛直輸送に基づく理論”を支持する。この場合、3~5日周期の赤道波が見られる。この赤道波は、実際の金星大気でも観測されていて、波のエネルギーが赤道で捕捉され、赤道域で大きな振幅をもつ。これらの赤道波は、角運動量を上方輸送するので、スーパーローテーションを強化するのに寄与する。

5. より現実的なAGCMに向けて

4章の予備実験では、加熱率の分布が東西方向に一樣で、加熱の極大高度が低いなどの非現実な点も

あるが、自転周期が243日で地表気圧が92気圧の条件であっても、100 m/sを越えるスーパーローテーションが形成されることを示した。次のステップとして、1金星日(117日)で金星を1周する3次元加熱で、その極大高度が雲層上端になるように改良した分布で実験している。その結果の一例を以下に示す。

図1aに太陽直下の加熱率の鉛直分布を示し、図1bに帯状平均東西流の緯度-高度分布を示す。雲頂付近に130 m/sに達する高速流が形成される。子午面循環の極向き南北流は、70 kmより上の高度域で5 m/sを越える極向きの流れをもつ(図2a)。また、子午面循環の鉛直流は、地面から雲層上端を越える領域までつながっている(図2b)。

図3aで示すように、子午面循環による角運動量鉛直輸送fluxは、赤道域で正、高緯度で負となる。緯度方向に積分したfluxは正なので、子午面循環は角運動量を正味上向きに輸送している。他方、図3bでは、波動による角運動量の鉛直輸送fluxが赤道域を除いた大部分の領域で負の値を示しており、全体として、波は角運動量を下方に輸送している。図3aとbが示すように、子午面循環が角運動量を上層へ運び、鉛直伝播する波が角運動量を下方に戻している。

波動による角運動量水平輸送は、4章の予備実験同様に、赤道向きである。しかし、帯状平均した加熱の場合と異なり、ゆっくり金星を一周する太陽光加熱の影響で、位相速度が遅い波動の役割が重要になっている。太陽光加熱が強い高度域では、その加熱によって強制される波動が角運動量を赤道向きに輸送し、加熱が弱い下層では、位相速度が0~50 m/sの値をもつ惑星スケールの波が角運動量を赤道向きに輸送する。下層の低緯度域では、順圧不安定や傾圧不安定と呼ばれる力学的不安定の必要条件を満足する領域が常に存在するので、下層の赤道向き角運動量輸送は、これらの不安定によって引き起こされる可能性が高い。帯状平均東西流は平衡状態を中心に時々刻々と変動しており、それに伴い、

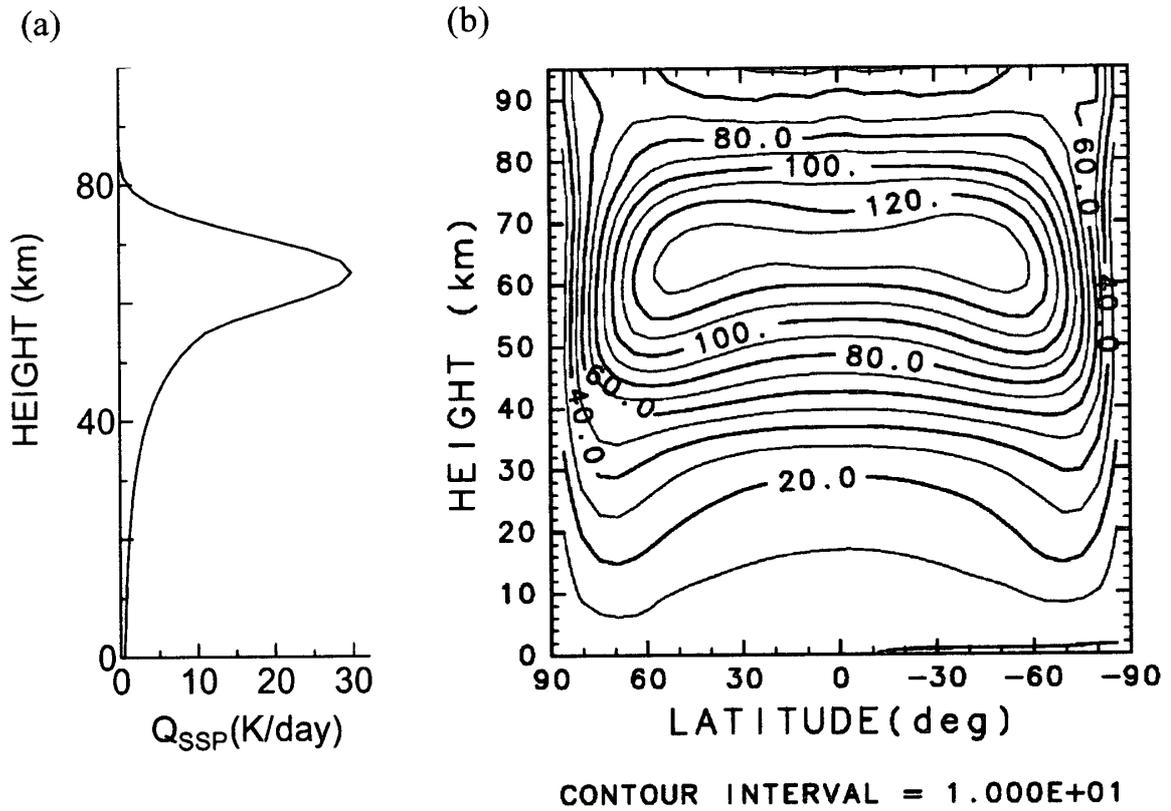


図1 (a) 数値実験で用いた太陽直下での太陽光加熱率 (K/day) の鉛直分布. (b) 帯状平均された東西流 (m/s) の緯度-高度分布

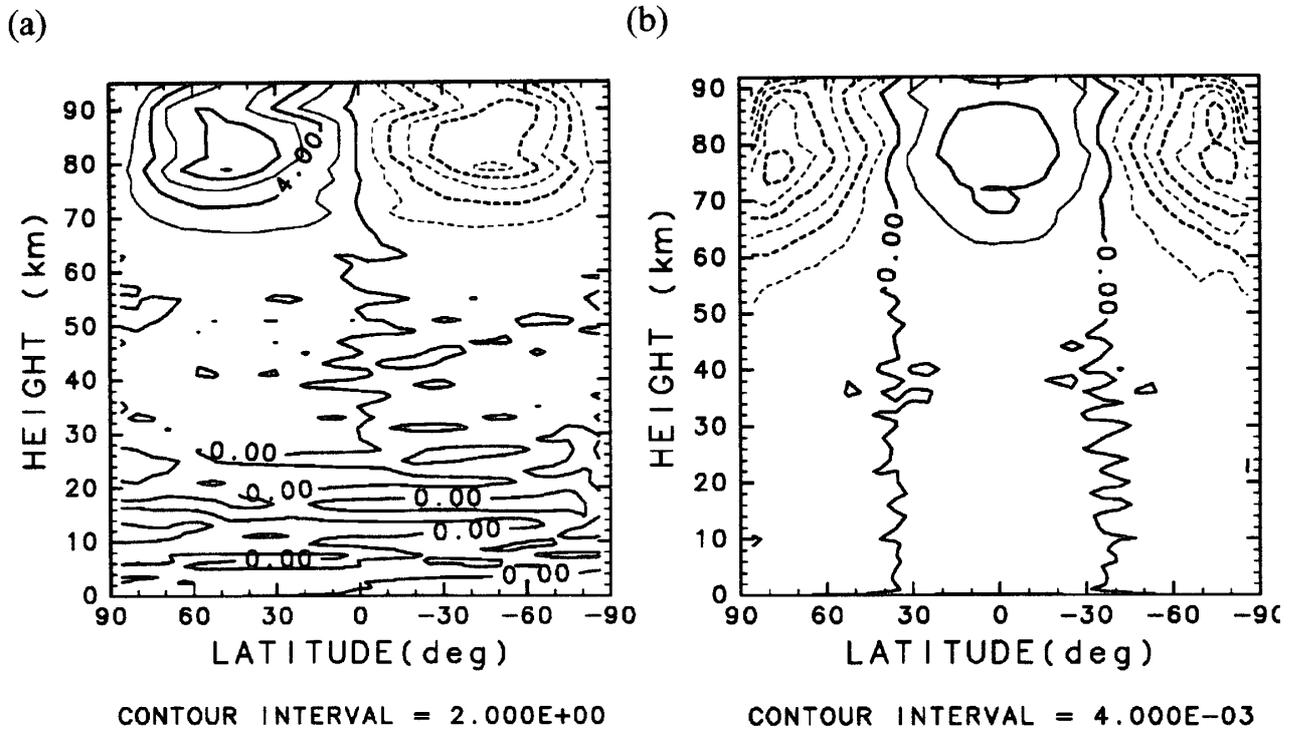


図2 帯状平均された(a)南北流 (m/s)と(b)鉛直流 (m/s) の緯度-高度分布

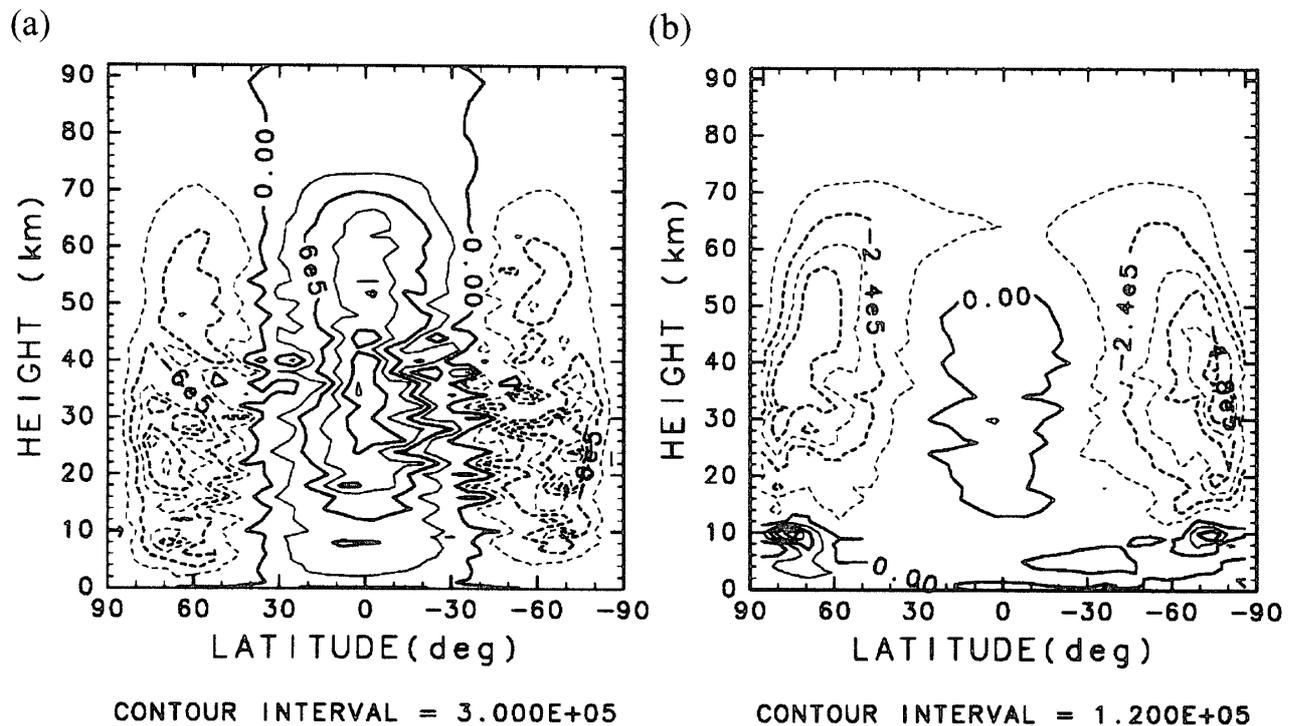


図3 (a) 子午面循環と(b) 波動による角運動量鉛直輸送 flux (kg/s^2) の緯度-高度分布

下層大気のみならず雲層内でも力学的に不安定な状態が時折現れる。このような局所的で一時的な力学的不安定が角運動量輸送過程に及ぼす影響について、今後研究しなければならないと思っている。

上で議論したように、スーパーローテーションが再現されている状況下では、「子午面循環による角運動量の上方輸送」や「上層での角運動量の蓄積」の効率が良くなる様に、波動が赤道向きに運動量を輸送している。鉛直伝播する波動は、全体的には、上層に汲み上げられた角運動量を下層に戻す役割を果たしている。また、高速流より速い位相速度の赤道波は、スーパーローテーションをより強化する役割を果たしている。本稿では波動の解析については詳しく述べなかったが([10,11]を参照)、観測や数値実験の詳細な波動の解析は、波動の同定や発生機構を調べる上で非常に重要であることを付け加えておく。

金星大気において、AGCMの中で再現された形成・維持メカニズムが本当か否かについて議論するためには、大気大循環(特に子午面循環や大気波動)の気象観測は非常に重要である。特に、雲層の子午

面循環が地面まで達する単一セル型なのか? いくつかのセルが積み重なった多重セル型なのか? が解明されなければならない。もし多重セル型の子午面循環なら、子午面循環による角運動量の上方輸送メカニズムを再検討しなくてはならない。また、角運動量を輸送する波動の正体も、観測によって突きとめなくてはならない。

将来的には、高温高圧下における放射過程を精密に組み込んだり、化学輸送モデルと結合させたりすることによって、金星AGCMは、観測できない領域の大気大循環の描像を推定する有効な手段になり得ることを強調しておきたい。こうして、観測と理論と数値実験の三者が相補し合い、スーパーローテーションに代表される金星特有の気象現象の理解が深まっていくことが期待される。

謝辞

本稿の研究は、東京大学気候システム研究センターの共同研究の成果である。数値実験は、東京大学

情報基盤センター, 東北大学情報シナジーセンター, 大阪大学サイバーメディアセンターの大型計算機でおこない, 図の作成には, 地球流体電脳ライブラリーを用いた. また, 査読の過程では, 編集委員と匿名で査読していただいた方に感謝します.

参考文献

- [1] Lewis, S. R. et al., 1999: *J. Geophys. Res.* **104**, 24117.
- [2] Hourdin, F. et al., 1995: *Icarus* **117**, 358.
- [3] 松田佳久, 2000: 「惑星気象学」, 東京大学出版会.
- [4] Gierasch, P. J., 1975: *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1038.
- [5] Schubert, G. and Whitehead, J. A., 1969: *Science*, **163**, 71.
- [6] Fels, S. B. and Lindzen, R. S., 1974: *Geophys. Fluid Dynamics*, **6**, 149.
- [7] Young, R. E. and Pollack, J. B., 1977: *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1315.
- [8] Rossow, W. B. et al., 1980: *J. Atmos. Sci.*, **37**, 250.
- [9] Del Genio, A. D. et al., 1993: *Icarus*, **101**, 1.
- [10] Yamamoto, M. and Takahashi, M., 2003: *J. Atmos. Sci.*, **60**, 561.
- [11] Yamamoto, M. and Takahashi, M., 2003: *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL016924.