

金星の大循環理論

林 祥介

2003 年 01 月 10 日

目次

1	四日循環	2
2	四日循環に関する理論	3
2.1	昼夜間対流	3
2.1.1	動く炎 (Moving flame) 理論 (Schubert and Whitehead, 1969)	4
2.1.2	昼夜対流そのものの不安定性 (Thompson 1970)	5
2.2	波動加速	6
2.3	子午面循環	7
2.3.1	Gierash (1975) の理論	7
2.3.2	松田 (1980) の理論	8
3	モデル	9
3.1	Chalikov <i>et al.</i> , 1975	9
3.2	Young and Pollack 1977	10
3.3	Rossow 1983	11
4	参考文献	12

Abstract

ここでは、金星大気の四日循環、それに関する理論・数値実験について述べる。内容は不十分であり、ほんのさわりが記されているに過ぎない。特に、1990年代以降の数値計算による理解の進展に関してはまったく触れられていないことに注意しておく¹。

¹高木・松田による球面上での移動加熱による各運動量供給の不可能性に関する議論、伊賀・松田によるスーパーローテーション生成の数値実験による議論、山本・高橋らによる CCSR/NIES モデル (大気大循環モデル) によるスーパーローテーション生成実験、などなど。要リファレンスチェック。

1 四日循環

² 紫外線域で金星を見ると濃淡模様がみられる。これを観察したところ、模様が約四日かけて西向きに金星を一周することが確認された。発見当時、人々は濃淡模様の動きを大気の動きと考えて、大気が四日で金星を一周する速度で循環していると予想した。後の探査船の観測により、四日で金星を一周する風速 (100 m/s) が実際に観測された。この大気の循環のことを四日循環と呼ぶ。

金星の自転周期は 243 地球日であり、赤道上の静止大気が角運動量を保存しながら、高緯度に移動したとしても、100m/s の風速を得ることはできない。100m/s を維持する角運動量がどのように供給されているのか、いくつかの説明がなされた。

²詳細は『金星大気の風の間』(<http://www.gfd-dennou.org/arch/riron/venus/wind/pub/>) を参照されたい。

2 四日循環に関する理論

2.1 昼夜間対流

金星の自転速度は遅く, 昼夜間に温度差が生じ, それによって昼夜間に対流が生じることが考えられる. この昼夜間対流に注目した四日循環の理論の概要を以下に述べる.

Fig.1 のように傾いた対流があるとする. z 軸は鉛直上向きに, x 軸は水平方向にとってある. 流速の x 方向成分 u と z 方向成分 w とに相関があることから, x 方向正の運動量が z 方向に輸送され, 上層では x 正の向きに, 下端では x 負の向きに加速される.

ここで下端の境界に摩擦があるとする, 負の向きの運動量が境界に吸収され, 流体層全層としては正の方向に加速されることになる. 傾いた対流が長時間維持されれば, 一方方向に加速され続けることになり, 大きな水平平均流速を生むことが期待されよう.

この対流渦による運動量の上方輸送は, 上下の風速シアの生成によって生じるであろう乱流による運動量の下向きに輸送 (シアを減じる方向に働く輸送) とがつまりあうまで働き続けるであろうと想像される.

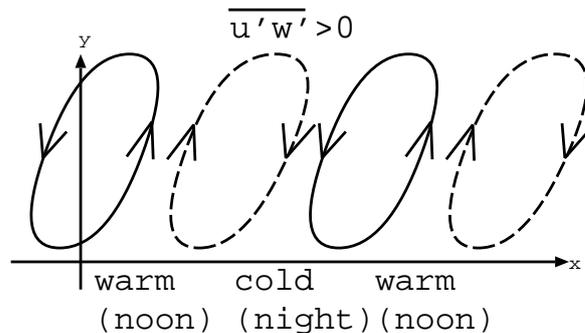


Figure 1: 傾いた対流と運動量輸送

対流がどのようにして傾くのかに関しては次のふたつの考え方が提案されている.

2.1.1 動く炎 (Moving flame) 理論 (Schubert and Whitehead, 1969)

太陽による加熱が下端境界だけで起こり、他の高度には放射や伝導で伝わるものとする。その過程に有限時間を要するならば、太陽の移動に対して下層の加熱と上層の加熱に位相差を生じ、対応して対流が傾くことが想像される (Fig.5).

この考え方によれば、太陽の移動する方向(金星では東向き)とは逆向き(西向き)に流れが生じることになり、これは観測結果にあう。

しかし、放射の観測によれば加熱は雲層、つまり最大風速の観測される高度で起こっており、対流の傾き方が下端加熱の時の逆になり、下層で西向きとなってしまう、実測される風速鉛直分布と矛盾する。

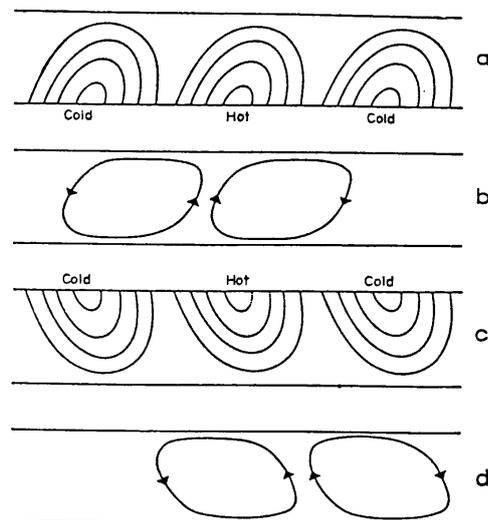


Figure 2: 熱源の移動による対流の傾き. a, b では熱源が下端にあり, c, d では上端にある. 熱源は右から左に移動しているものとする. a, c は等温線, b, d は流れの図.

2.1.2 昼夜対流そのものの不安定性 (Thompson 1970)

Fig.1 よりわかる通り, x 正方向へ傾く対流では上方へ x 正方向の運動量を生じる. すると対流はより傾く. つまり, 傾く対流はそれ自体自励的などところを持つので, 何かきっかけさえがあれば, 対流は傾くという考え方である.

2.2 波動加速

内部重力波,あるいは,加熱の日変化に起因する波動(潮セキ波)による加速が考えられている (Fells and Linzen 1974).

2.3 子午面循環

東西風を形成維持するための角運動量供給に子午面循環が関わっているという考え方があ。以下この考え方を述べる。

2.3.1 Gierash (1975) の理論

極と赤道の加熱差から、赤道域で上昇、極域で下降という子午面循環が生じる。

大気が等角速度運動(剛体運動)しているものとしよう。子午面循環が形成されると、赤道域の大きな角運動量が上層に輸送され、極域の小さな角運動量が下層に輸送される。角運動量は上層で増加、下層で減少することになる。

固体表面での摩擦によって、下層大気の角運動量減少は押えられ、結果として、固体から大気に自転方向の角運動量が輸送される。

このようにして上層では角運動量が増加し続け、

$$\begin{aligned} & \text{(子午面循環による角運動量上方輸送量)} \\ & = \text{(鉛直渦粘性による角運動量下方輸送量)} \end{aligned} \quad (1)$$

になるまで続く。

(1) を大雑把に評価し、東西流の代表的風速 U について次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} U & \propto \frac{\text{自転角運動量のくみあげ } (a\Omega W)}{\text{鉛直渦拡散速度 } (\nu/H)} \\ & \propto \frac{\text{鉛直渦拡散緩和時間 } T_\nu}{\text{自転周期 } T_\Omega} \frac{a}{H} W \end{aligned} \quad (2)$$

ここで a は惑星の半径、 Ω は自転角速度、 W は鉛直速度、 H は大気の厚さ、 ν は鉛直渦拡散係数である。

(2) より U の大きさを見積もるときに自転周期 T_Ω と比べられるのは、子午面循環の一周する時間 T_M ではなく鉛直渦拡散緩和時間 T_ν である。つまり、子午面循環の影響のあるときに、必ずしも子午面循環の速度の早い必要はないということである。

2.3.2 松田 (1980) の理論

南北の加熱差によるモーメントは他のどのモーメントとつりあうかを調べることにより、惑星の循環形態を分類した (Matsuda 1980; 解説は松田・松野 1980 等).

この理論によれば,

- 金星の自転速度は, 四日循環を生じるにはそれほど遅いとはいえない.
- 大気が厚く, 雲層での加熱が強いことが, 大きな速度を持つ東西流を生む.

といったことがわかるそうである.

3 モデル

金星大気の大循環を扱ったモデルのうち、古典的なものを三つあげる。

3.1 Chalikov *et al.*, 1975

当時得られていた金星のデータ (表面気温) を大気大循環モデルに入れたもの。鉛直方向のレベル数は 2 から 10 までである。太陽放射が 80% 表面に達する場合 (Model 1) と、最上層ですべて吸収される場合 (Model 2) とを扱っている。昼夜間対流が現れている。

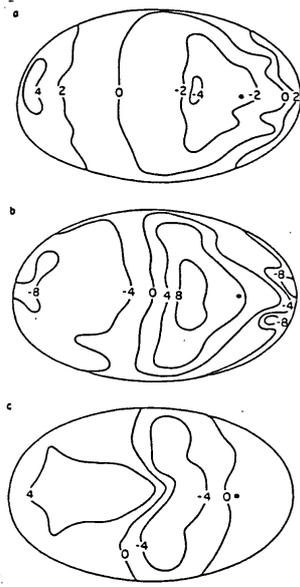


FIG. 19. Zonal velocity component (m/sec) by the 140th day of experiment for three-level Model II: (a, b, and c) levels 1, 2, and 3.

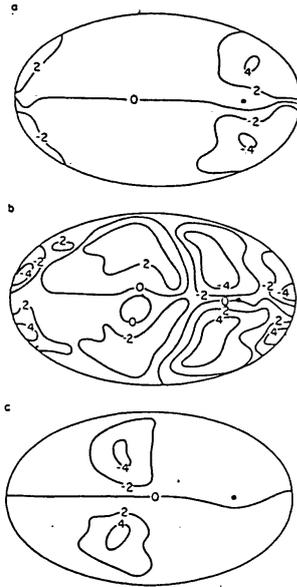


FIG. 20. Meridional velocity component (m/sec) by the 140th day of experiment for three-level Model II: (a, b, and c) levels 1, 2, and 3.

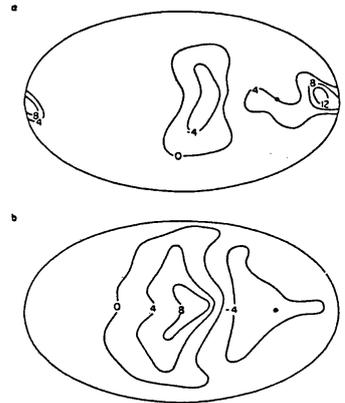


FIG. 21. Vertical velocity analog ζ (10^{-7}sec^{-1}) by the 140th day of experiment for three-level Model II: (a) $\zeta_{1.5}$, (b) $\zeta_{2.5}$.

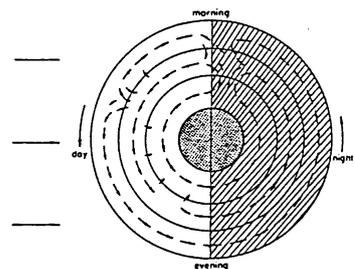


FIG. 22. Qualitative scheme of atmospheric circulation in equatorial section from the numerical experiment for a three-level Model II.

Figure 3: Chalikov *et al.* (1975) の結果 (3 層モデル)。楕円の図は上下が極で全球を表している。左から、東西風、南北風で上から第 1 層, 2 層, 3 層 (第 1 層は最下層)。右上は鉛直流, 右下は赤道面断面図の模式図。

3.2 Young and Pollack 1977

水平方向総波数 4 以下の有限切断スペクトルモデル. 鉛直方向は 64 km までの 16 層モデル. 紫外線観測でみられた Y 字型模様や帯状流も再現されている.

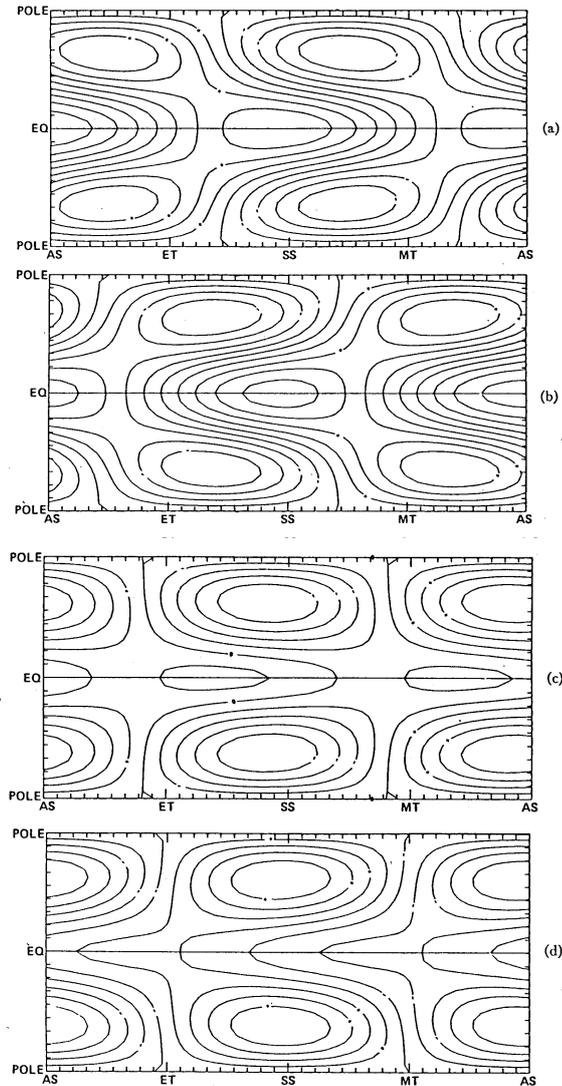


Fig. 27. Wavenumber $m=1$ vertical velocity and potential temperature patterns for solution II, $z=56$ km: (a) vertical velocity pattern, $t=t_0$; contour intervals are $|u_r|_{\max}/5$, $|u_r|_{\max}=0.83$ cm s $^{-1}$; (b) as in (a) but $t=t_0+5$ days, $|u_r|_{\max}=0.57$ cm s $^{-1}$; (c) potential temperature, $t=t_0$; contour intervals are $|\theta'|_{\max}/5$, $|\theta'|_{\max}=3.6$ K; (d) as in (c) but at $t=t_0+5$ days, $|\theta'|_{\max}=3.9$ K.

Figure 4: Pollack and Young の結果. 波数 1 のものを抜き出したもの. a 鉛直流, b a の五日後 c 温位, d c の 5 日後. a, b, c, d とも高度 56km (Young and Pollack 1977, Fig.27 より).

3.3 Rossow 1983

スペクトルモデル. 水平方向のグリッドの取り方は Pollack and Young (1977) のものよりよい. 鉛直9層モデル. 四日循環は現れなかった.

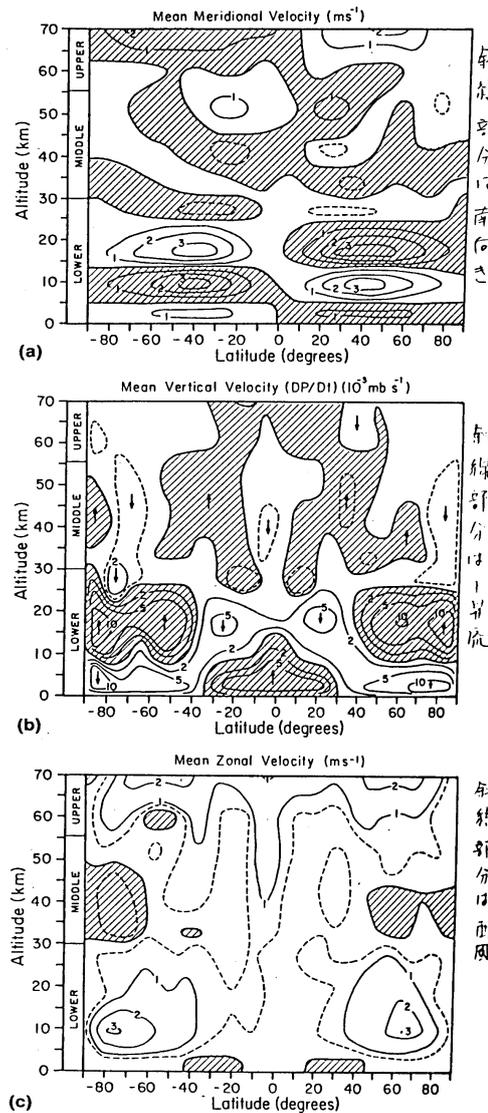


FIG. 5. Zonal mean wind components as a function of altitude and latitude for three altitude regimes: (a) meridional wind (positive is northward), (b) vertical wind (positive is downward), and (c) zonal wind (positive is in direction of planetary rotation). Dashed contour represents half the value of the smallest solid contour value.

Figure 5: Rossow の結果. 風の東西平均の各成分: (a) 南北流 (斜線部南向き), (b) 上昇流 (斜線部は上昇流), (c) 東西流 (斜線部は西風). 東西流の最大値は 10 m/s (図中の数値では 3) しかない. (Rossow 1983, Fig.5 より)

4 参考文献

- Chalikov, D. V., Monin, A. S., Safray, A. S., Turikov, V. G., Zilitinkevich, S. S., 1975: Numerical simulation of the general circulation of the Cytherean lower atmosphere. *Icarus*, **26**, 178–208.
- Fells, S. B., and Lindzen, R. S., 1974: The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows. *Geophys. Fluid Dyn.*, **6**, 149–191.
- Gierasch, P. J., 1975: Meridional circulation and the maintenance of the venus atmospheric rotation. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1038–1044.
- Matsuda, Y., 1980: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Met. Soc. Japan*, **58**, 443–470.
- 松田佳久, 松野太郎, 1980: 金星大気の四日循環. *科学*, **50**, 285–293.
- Moroz, V. I., 1981: The atmosphere of venus. *Space Sci. Rev.*, **29**, 3–127.
- Rossow, W. B., 1983: A general circulation model of a Venus-like atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 273–302.
- Schubert, G., and Whitehead, J. A., 1969: Moving flame experiment with liquid mercury; Possible implication for the venus atmosphere. *Science*, **163**, 71–72.
- Thompson, R., 1970: Venus's general circulation is a merry-go-round. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1107–1116.
- Young R. E., and Pollack, J. B., 1977: A three-dimensional model of dynamical processes in the venus atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1315–1351.

謝辞

本稿は 1989 年から 1993 年に東京大学地球惑星物理学科で行われていた、流体理論セミナーでのセミナーノートがもとになっているものである。原作版は野村竜一による「金星現象論」(1990-05-04) であり、高木征弘によって修正 (1996-07-22)、林祥介 (2003-01-10) によって WEB 掲載用に整理された。

セミナー参加者および校正とデバッグに協力してくれたすべての方々に感謝するものである。

本資源は、地球流体電脳倶楽部のインターネット上での学術知識の集積と活用の実験の一環として

<http://www.gfd-dennou.org/arch/riron/venus/atmcomp/pub>

において公開されているものである。©林祥介 (Y.-Y. Hayashi) 2003. 本資源は、著作者ならびに図版等の著作権者の諸権利に抵触しない限りにおいて自由に利用していただいて構わない。なお、利用する際には今一度自ら内容を確認することを願います (無保証無責任原則)。

本資源に含まれる元資源提供者 (図等の版元等を含む) からは、直接的な形での WEB 上での著作権または使用許諾を得ていない場合があるが、勝手ながら、「未来の教育」のための実験という学術目的であることをご理解いただけるものと信じ、学術標準の引用手順を守ることで諸手続きを略させていただきます。本資源の利用者には、この点を理解の上、注意して扱っていただけるようお願いする。万一、不都合のある場合には

riron@gfd-dennou.org

まで連絡していただければ幸いです。