

金星大気のスーパーローテーション  
Super Rotation of Venusian  
Atmosphere

高木聖子

Takagi Seiko

惑星物理学研究室

2008年1月31日

## 要旨

金星には地球とは大きく異なる現象が数多くある。1960年代に地上からの観測によって発見された金星大気のスーパーローテーションもその1つである。スーパーローテーションとは、金星大気全体が自転と同じ方向に高速回転している現象である。その東西風速は高度約65 km付近で約100 m/sにも達する。金星の自転周期が243(地球)日であることから、この大気の回転が自転に対して非常に高速であることが分かる。発見以来、特異な現象として関心を集め、70年代にスーパーローテーションの生成メカニズムを説明する様々な理論が提唱された。

金星観測が行われる前は、低速回転の金星における大気現象について、極めて単純な予想がされていた。自転速度が非常に遅いので、地面に対する太陽の動きが無視できると考えると、惑星の昼側で大気が加熱されて上昇し、夜側で大気が冷却されて下降する夜昼間対流が卓越すると予想できる。スーパーローテーションの生成メカニズムを説明するにあたり、この夜昼間対流に着目する理論を基に提唱されたのが、moving flameメカニズム(Schubert and Whitehead,1969)・Thompsonのメカニズム(Thompson,1970)である。また、FelsとLindzen(1974)は夜昼間の加熱冷却によって励起される重力波(熱潮汐波)に着目して理論を展開した。さらに、金星のように回転角速度が遅い惑星では、南北方向の大気の運動である子午面循環が発達することが回転水槽実験によって知られている。その子午面循環に着目するメカニズムとして、Gieraschのメカニズム(Gierasch,1975)・松田の研究(1980,1982)が挙げられる。

このように、様々な理論が提唱されているが、スーパーローテーションの生成メカニズムは未だに謎である。

スーパーローテーションの生成メカニズムの解明を目指して、今まで数多くの探査機が打ち上げられた。探査機から得られた観測データは提唱されたスーパーローテーションの生成メカニズムの基となっている。2005年11月に打ち上げられたVenus Express(ESA)は、今まさに金星に関する最新の観測データを提供している。さらに、2010年、日本による金星探査機Planet-C(JAXA)が打ち上げられる予定である。Venus Express(ESA)とPlanet-C(JAXA)はお互い相補的な関係にあり、2つのミッションが連携することで、より大きな成果が期待できる。

## 目次

1	はじめに	2
2	金星観測	5
2.1	地上観測 . . . . .	5
2.2	探査機による観測 . . . . .	6
2.3	観測事実 . . . . .	16
2.4	これからの金星観測 (Planet-C) . . . . .	18
3	スーパーローテーション生成のメカニズム	22
3.1	夜昼間対流に着目するメカニズム . . . . .	22
3.2	重力波 (熱潮汐波) に着目するメカニズム (Fels and Lindzen, 1974) . .	30
3.3	子午面循環に着目するメカニズム . . . . .	31
4	まとめ	42
5	謝辞	43
6	参考文献	44

## 1 はじめに

金星は地球の隣に位置し、赤道半径や質量が地球と似ていることから、2つの惑星は双子の星といわれてきた。しかし、自転周期や大気の性質など、金星は地球とかけ離れた性質を持つこと（表1参照）が観測により明らかにされた。

表1 金星と地球のパラメータ比較。（松田（2000）より抜粋）

	金星	地球
赤道半径 (km)	6052	6378
質量 (地球=1)	0.815	1.00
平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	5.24	5.52
地表面温度 (K)	750	288
地表面気圧 (Pa)	$9.2 \times 10^6$	$1.013 \times 10^5$
自転周期 (地球日)	243	1.00
公転周期 (地球年)	0.615	1.00
太陽からの距離 (AU)	0.723	1.00
大気成分	CO <sub>2</sub> (96 %) ) N <sub>2</sub> (4 %) )	N <sub>2</sub> (78.1 %) ) O <sub>2</sub> (20.9 %) ) Ar (0.9 %) ) H <sub>2</sub> O (不定) CO <sub>2</sub> (0.03 %) )
アルベド	0.78	0.30

表1に示すように、金星の地表面気圧は92 atm、地表面温度は約730 Kもある。このように、金星の地表付近は地球と異なる高温・高圧の過酷な環境である。

大気組成に関しても地球と金星は全く異なっている。金星大気の大部分は二酸化炭素である。地球大気は主に窒素・酸素から成り、二酸化炭素は微量である。

さらに、雲に関しても金星と地球で大きく異なる。地球の雲は水滴から成っており、高度約 15 km 以下の対流圏に散在している。一方金星の雲は濃硫酸の液滴から成っていて、高度約 45 km から 70 km に存在し、金星全体を覆っている。

風の分布に関して、金星の高度 65 km 付近では 100 m/s に達する（雲を移流する）原因不明の高速の風が吹いている。

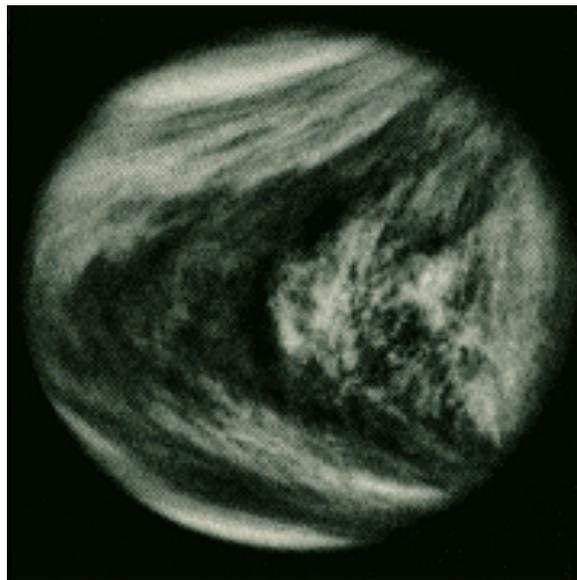


図 1 紫外線によるパイオニア・ヴィーナスの観測で見られる Y 字形のパターン (Beatty et al.1982)

図 1 は探査機パイオニア・ヴィーナス (1978, アメリカ) の観測で得られた。Y 字形を右に横倒しにしたようなパターンが見られる。このパターンは 1960 年代、地上からの紫外線の観測によって発見された。しかもこのパターンが 4 日で同じ場所に戻ってくることが発見された。このパターンが動く原因は、金星の高度 65 km 付近に吹く原因不明の高速の東西風であると考えられている。この原因不明の高速の東西風が吹く現象がスーパーローテーションである。スーパーローテーションとは、金星大気全体が自転を追い越すように回転している現象である。その東西風速は高度と共に増大し、高度 65 km 付近では約 100 m/s に達する。

では、高速の東西風とはどのくらい高速なのだろうか。以下の表は各惑星の風速・自転速度を比較したものである。

表 2 各惑星の風速・自転速度比較

	金星	地球	木星	土星
風速 (m/s)	100	30	100	500
自転速度 (m/s)	1.8	460	13000	9800
風速/自転速度	56	$7.0 \times 10^{-2}$	$8.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-2}$

他の惑星に比べ、金星の風速/自転速度の値が桁違いに大きい。このことから、金星に吹く東西風が自転速度に対して非常に高速であることが分かる。

## 2 金星観測

### 2.1 地上観測

1761年、Lomonosov は、望遠鏡を用いた観測によって金星には大気があると推論した (Lomonosov,1955)。

20世紀に分光器が発明された。金星の雲による太陽光の反射光の観測により、二酸化炭素(気体)や水蒸気が存在が推測された (Adams and Bunham,1932.Bolton et al.1968)。

金星を覆う雲で散乱された太陽光の偏光の観測により、雲の粒子が硫酸であると推測された。また、紫外線観測により、雲に模様が確認され、一様でないことが分かった。また、その模様は約4日間で同じ場所に戻ってくることが分かった (Boyer and Guerin,1966)。

レーダー観測で、惑星の固体部分の回転を確認できた (Shapiro,1968)。その結果、金星は他の惑星とは逆向きに、約243日の周期で自転していることが明らかとなった。

## 2.2 探査機による観測

金星大気について、地上観測から様々なことが明らかにされた。しかし、硫酸の雲や遅い自転など、地球とはかけ離れた性質が見出されたため、金星に探査機を送り、直接観測することでそれまでの結果を確かめる必要があった。探査機による観測はアメリカ・旧ソビエト連邦が大きく貢献している。今までの金星探査計画を以下に述べる。

- ヴェネラ 1～16 号 (旧ソビエト連邦)

ヴェネラとは旧ソビエト連邦が金星に送った探査機のシリーズである。図 2 はヴェネラ 8 号の写真である。

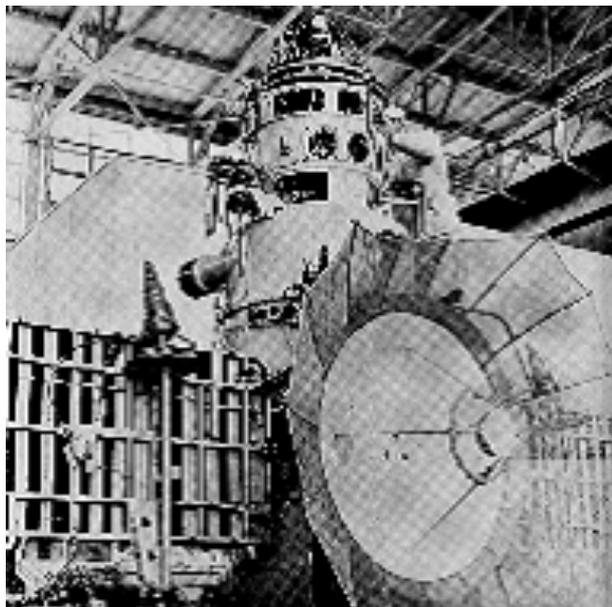


図 2 ヴェネラ 8 号

以下にヴェネラ 1 号から 16 号までの打ち上げ年や到着年などをまとめたものを示す (表 3)。

表 3 ヴェネラシリーズ (Colin (1980) より抜粋)

探査機	打ち上げ年	到着年
ヴェネラ 1 号	1961.2.21	×
ヴェネラ 2 号	1965.11.12	×
ヴェネラ 3 号	1965.11.16	1966.3.1
ヴェネラ 4 号	1967.6.12	1967.10.19
ヴェネラ 5 号	1969.1.5	1969.5.16
ヴェネラ 6 号	1969.1.6	1969.5.17
ヴェネラ 7 号	1972.3.26	1972.7.22
ヴェネラ 8 号	1972.3.26	1972.7.22
ヴェネラ 9 号	1975.6.8	1975.10.22
ヴェネラ 10 号	1975.6.14	1975.10.25
ヴェネラ 11 号	1978.9.9	1978.12.25
ヴェネラ 12 号	1978.9.14	1978.12.21
ヴェネラ 13 号	1981.10.31	1982.3.1
ヴェネラ 14 号	1981.11.4	1982.3.5
ヴェネラ 15 号	1983.6.2	1983.10 ~ 1984.6
ヴェネラ 16 号	1983.6.7	1983.10 ~ 1984.6

表 3 中の到着年の欄にある × とは到着しなかったことを表す。観測に成功したのはヴェネラ 4 号 (1969) からである。(ヴェネラ 1 ~ 3 号は大気圏に突入する際に故障した) この探査機によって初めて金星大気に観測機 (プローブ) が降ろされた。この観測機は高度 25 km 付近で故障するまで大気成分・気温・気圧などを計測した。

金星表面に着陸できたのはヴェネラ 7 号 (1972) が初めてである。この探査機は現在知られている高温・高圧の金星表面を観測した。

次のヴェネラ 8 号 (1972) は大気を降下中に風速の分布を直接測定した (図 12)。また、地表面で岩石調査や太陽光の地表面到達量を観測した。

ヴェネラ 9・10 号 (1975) は着陸船と軌道周回船に分かれて探査した。着陸船が地表面に軟着陸し、観測データを軌道周回船から地球へ送信するしくみである。軌道船は初めて地表面のモノクロ写真を撮影した。

ヴェネラ 11・12号(1978)は軟着陸し、雷が起源と思われる電波をとらえた。  
ヴェネラ 13号(1981)は地表面のカラー写真を(図3)、14号はモノクロ写真を  
撮影した(図4)。また、地表の岩石が玄武岩質であることを明らかにした。  
ヴェネラ 15・16号は金星には着陸せず、金星を周回する軌道周回船である。周  
回軌道からレーダーで地表面を観測した。



図3 ヴェネラ 13号が撮影した金星表面のカラー写真(NASA)

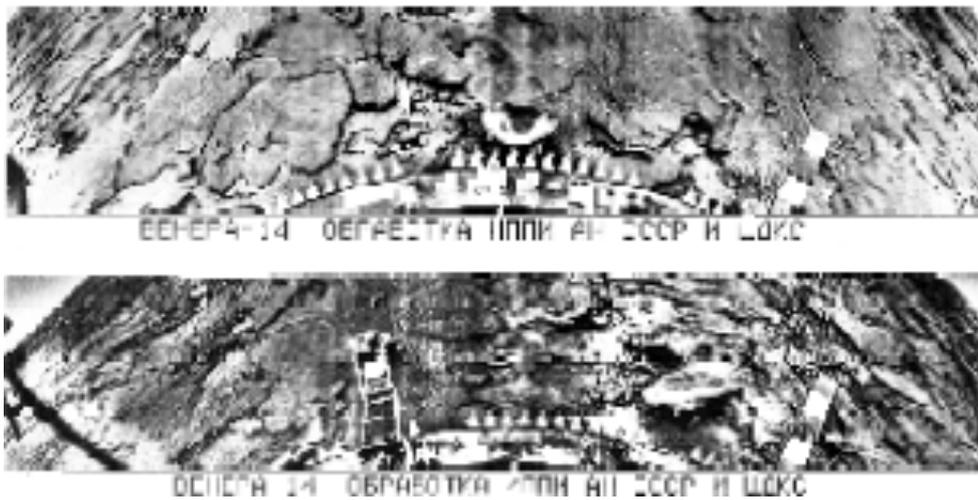


図4 ヴェネラ 14号が撮影した金星表面のモノクロ写真(NASA)

- マリナー 1・2・5・10 号 (アメリカ)

マリナーはアメリカにより打ち上げられ、対象となる星へ接近した後、遠ざかっていく (フライバイ) 探査機である。図 5 はマリナー 2 号の想像図である。



図 5 マリナー 2 号の想像図

以下にマリナーシリーズの打ち上げ年と到着年をまとめたものを示す (表 4)。

表 4 マリナーシリーズ (Colin (1980) より抜粋)

探査機	打ち上げ年	到着年
マリナー 1 号	1962.7.22	×
マリナー 2 号	1962.8.26	1962.12.14
マリナー 5 号	1967.6.14	1967.10.19
マリナー 10 号	1973.11.3	1974.2.5

表 4 中の到着年の欄にある × とは到着しなかったことを表す。マリナー 1 号は完全に失敗だった。ちなみに、表 4 にはないが、マリナー 3・4 号は火星のフライバイを目的としていた。3 号は失敗に終わったが、4 号は初の火星フライバイを成功させた。また、マリナー 6~9 号は火星探査機である。

マリナー 2 号 (1962) は世界で初めて成功した惑星探査ミッションである。金星まで約 3 万 5000 km まで接近し、金星から放射されるマイクロ波を観測して金星が現在知られているような高温・高圧の環境であること、自転速度が遅いことなどを明らかにした。

マリナー 5 号 (1967) は約 4100 km まで接近し、金星大気の主成分が二酸化炭素であることを確認した。

マリナー 10 号 (1973) は約 5700 km まで接近し、紫外線画像の連続撮影により、スーパーローテーションを確認した。また、10 号では惑星の重力を利用した軌道修正やテレビ画像の電送が行われた。

- パイオニア・ヴィーナス (アメリカ)

パイオニア・ヴィーナスはアメリカにより打ち上げられた探査機で、ヴェネラやマリナーのようにシリーズではなく単独の計画で、軌道船と着陸船から成る大型ミッションである。図 6 は金星に突入するプローブの想像図である。

以下にパイオニア・ヴィーナスを構成する軌道船と着陸船の打ち上げ年と到着年をまとめたものを示す (表 5)。

表 5 パイオニア・ヴィーナス (Colin (1980) より抜粋)

探査機	打ち上げ年	到着年
軌道船	1978.5.20	1978.12.4
着陸船	1978.8.8	1978.12.9

1 回目に打ち上げられた軌道船には、12 の観測装置が積まれていた。レーダーを用いた地表面の地形の調査などを行った。2 回目に打ち上げられた着陸船は、大型観測機 1 つ、小型観測機 3 つ、それらを運ぶ運搬船から成る。降下しながら下層大気の温度や組成、風速などを調べた。



図 6 金星大気に突入する観測機の想像図 (NASA)

- ベガ (旧ソビエト連邦)

ベガ 1・2 号は金星とハレー彗星の探査を目的として、旧ソビエト連邦によって打ち上げられた探査機である。

以下に 2 機の探査機の打ち上げ年と到着年をまとめたものを示す (表 6)。

表 6 ベガ

探査機	打ち上げ年	到着年
ベガ 1 号	1984.12.15	1985.6.11
ベガ 2 号	1984.12.21	1985.6.15

この探査機はハレー彗星に向かう途中に金星にバルーン (図 7) と着陸機を大気中に降ろした。バルーンは鉛直風速・気温・気圧・雷などを調べ、着陸機は金星の大気組成などを調べた。



図 7 探査機によって降ろされたバルーン

- マゼラン（アメリカ）

アメリカによるミッション（1989）。スペースシャトルで打ち上げられた初の惑星探査機（図 8）。金星を周回しながらレーダーで地形を調べ、金星表面の約 99 % を網羅した地形図を作った。



図 8 マゼランの想像図

- ガリレオ (アメリカ)

ガリレオ (1989 年) はアメリカによって打ち上げられた木星探査機である (図 9)。金星でフライバイした際に紫外・赤外領域の波長で金星の雲を撮像した。

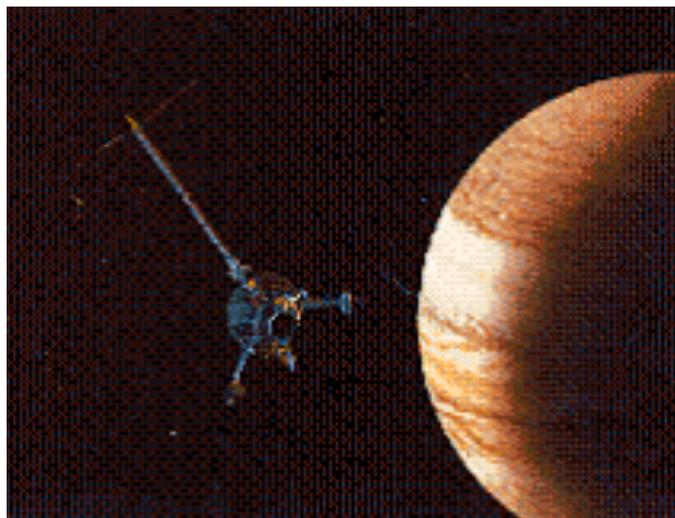


図 9 ガリレオの想像図

- Venus Express (ESA)

Venus Express は ESA による金星探査機である。2005 年 11 月 9 日に打ち上げられ、2006 年 4 月 11 日に金星に到着した。2003 年に打ち上げられた火星探査機 Mars Express (ESA) の設計をもとにすることで、開発期間の短縮を図ったため、搭載観測機器 (図 10・表 7) も Mars Express (ESA) と共通のものが多い。

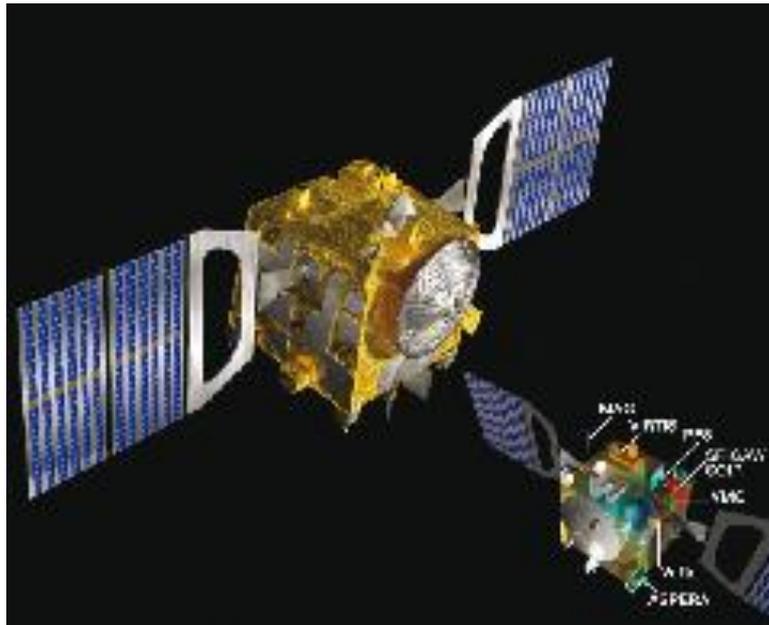


図 10 Venus Express の想像図 (Nature,2007)

表 7 Venus Express の搭載機器とその役割 (Venus Express (ESA) の HP より)

搭載機器	役割
PFS (高波長分解能赤外フーリエ分光計)	大気垂直探査
VIRTIS (可視-赤外分光撮像装置)	大気・地表の地図作製
SPICAV (直下視/掩蔽観測用紫外-赤外分光計)	大気分光分析
VNC (紫外/可視カメラ)	紫外・可視画像
ASPERA-4 (プラズマ/高速中性粒子分析器)	プラズマ分析
MAG (磁力計)	磁場
VeRa (電波科学観測)	大気の無線探査

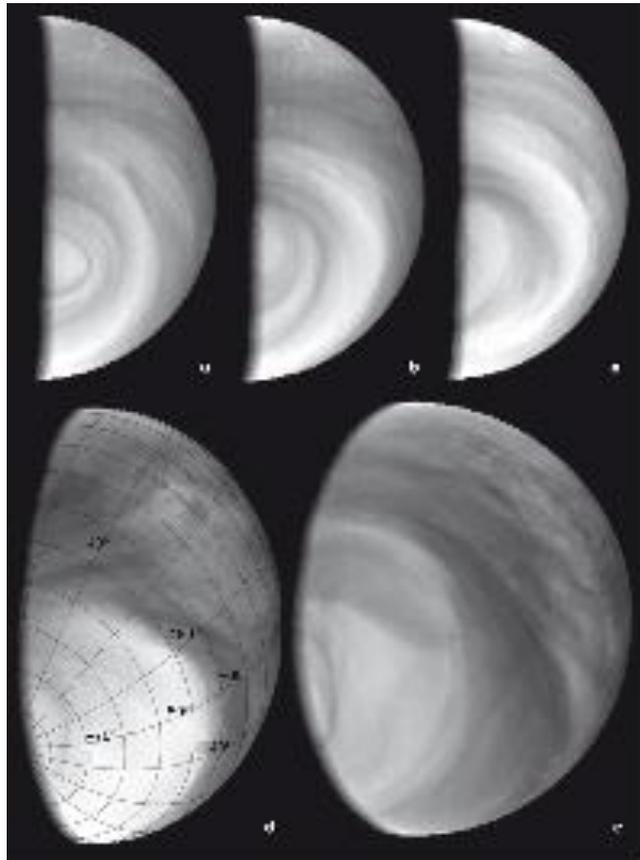


図 11 金星南極域における雲の変動 (Nature,2007)

金星大気の全球調査のため、2006年4月11日、Venus Express は金星の楕円極軌道に入り、搭載機器の1つ VMC (Venus Monitoring Camera) は金星の南極域における雲の動きをとらえた (図 11)。

### 2.3 観測事実

ヴェネラ 7 号 (1970. 旧ソビエト連邦) 以来、様々な探査衛星が大気突入し、様々な場所で風を実測した。その結果を図 12 に示す。

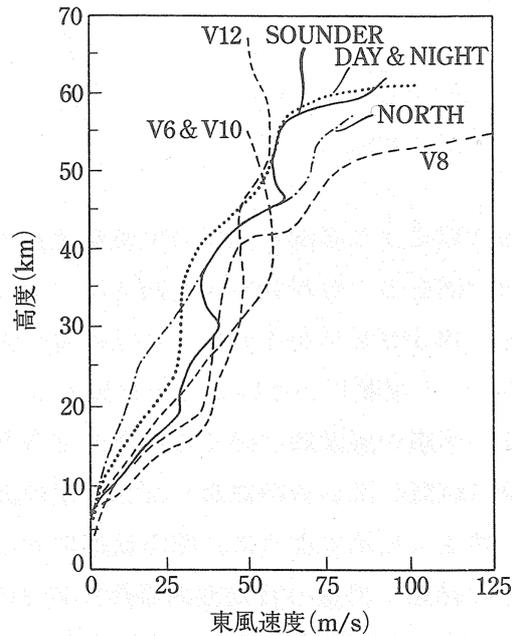


図 12 探査衛星により測定された風速の鉛直分布 (Schubert, 1983). V8 はヴェネラ 8 号を意味する. ヴェネラ以外はパイオニア・ヴィーナスによる観測.

図 12 より、東風速度は上層にいくに従い徐々に大きくなり、地表面付近では数 m/s の弱い風しか吹いていないが、65 km 付近では約 100 m/s の風が吹いていることが分かる。

図 13 は東西風に働く遠心力と南北の気圧傾度力が釣り合っているという遠心力バランスを仮定して求められた東西風速の子午面分布である。

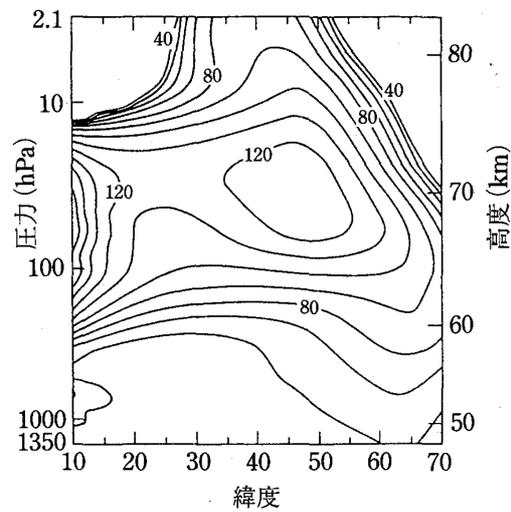


図 13 温度分布から遠心力バランスを仮定して求めた東西風速の子午面内分布 (Walterschheid et al., 1985). 曲線にかかっている数字は東西風速 (m/s) を表す.

図 13 より、高度約 70 km の緯度 15 度及び 45 度付近を中心に 120 m/s の風速が存在していることから、高速東西風が特定の緯度の現象ではないことが分かる。

## 2.4 これからの金星観測 (Planet-C)

Planet-C は日本による金星探査計画である。打ち上げは 2010 年の予定である。このミッションは、金星大気の力学の解明、特にスーパーローテーションを解明することを目的としている。

Planet-C にはカメラが 5 台 (IR1, IR2, UVI, LIR, LAC (図 15, 表 8 参照)) 搭載される。それぞれのカメラが高度の異なる対象を同時に見ることによって、大気全体の姿をとらえる。

IR1 カメラ (1  $\mu\text{m}$  カメラ) は、低高度の雲や地表付近の水蒸気を 1  $\mu\text{m}$  前後の赤外線で見測する。地表面から発せられる赤外線をとらえ、地面を構成する物質を調べたり、活火山から噴出する溶岩を探す。

IR2 カメラ (2  $\mu\text{m}$  カメラ) は、低高度の雲や、場所による雲粒の大きさの違い、一酸化炭素ガス (二酸化炭素から分解) などを観測する。さらに、黄道光 (惑星間空間内に分布する塵が太陽光を散乱することによってできる) も観測する。

UVI (紫外イメージャ) は、雲頂付近に存在する二酸化硫黄や未知の雲成分を観測し、それらの関係を明らかにする。

LIR (中間赤外カメラ) は、波長 10  $\mu\text{m}$  の赤外線で見測する雲頂から放出される熱、雲頂の温度を計測する。

LAC (雷・大気カメラ) は、雷放電に伴う発光を超高速撮影でとらえる。また、大気光 (高層大気中の酸素が放つ) 放射も観測する。

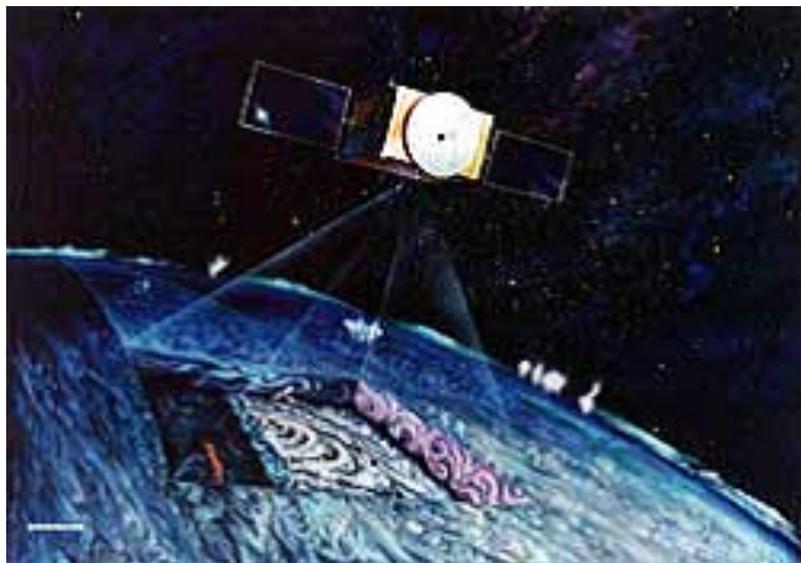


図 14 Planet-C のイメージ画像

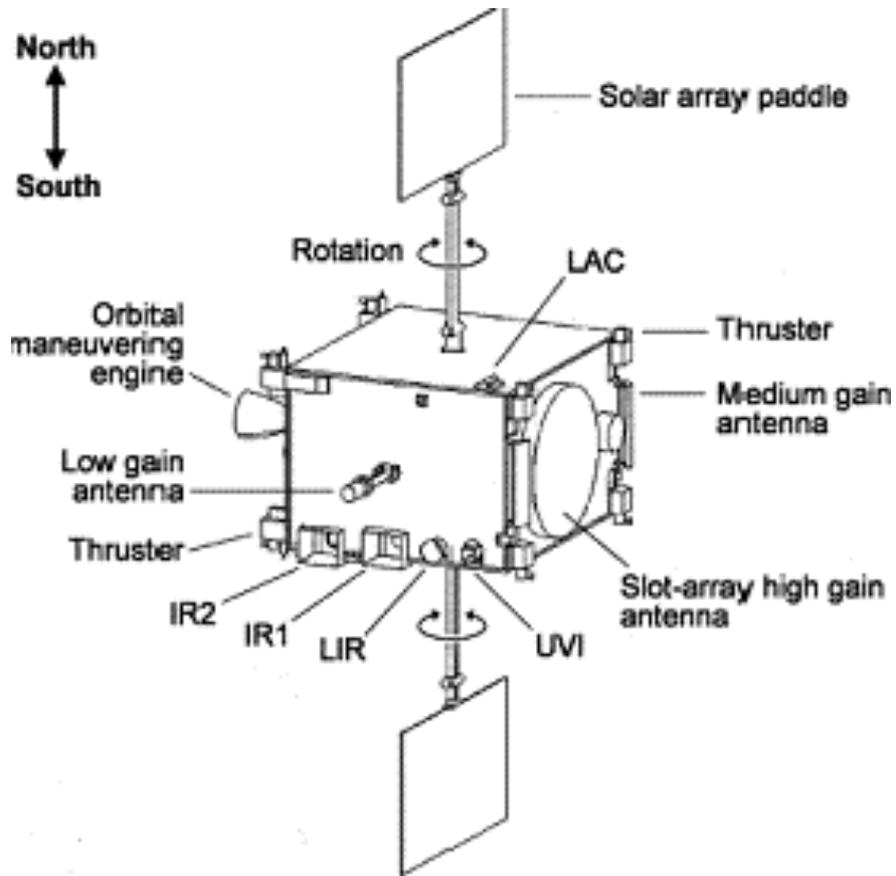


図 15 探査機の概観 (Nakamura,2007)

表 8 Planet-C に搭載される 5 台のカメラの観測波長と観測対象 (Nakamura,2007)

カメラ	波長選択フィルター	観測対象
IR1	1.01 $\mu\text{m}$ ( night )	地表面, 雲
	0.97 $\mu\text{m}$ ( night )	水蒸気
	0.90 $\mu\text{m}$ ( night )	地表面, 雲
	0.90 $\mu\text{m}$ ( day )	雲
IR2	1.735 $\mu\text{m}$ ( night )	雲, 粒径分布
	2.26 $\mu\text{m}$ ( night )	
	2.32 $\mu\text{m}$ ( night )	一酸化炭素
	2.02 $\mu\text{m}$ ( day )	雲頂高度
	1.65 $\mu\text{m}$ ( cruise )	黄道光
UVI	283 nm ( day )	二酸化炭素
	365 nm ( day )	未知吸収物質
LIR	10 $\mu\text{m}$ ( day/night )	雲頂温度
LAC	777.4 nm ( night )	雷放電発光
	552.5 nm ( night )	酸素分子大気光
	557.7 nm ( night )	酸素原子大気光
	630.0 nm ( night )	酸素原子大気光

### 3 スーパーローテーション生成のメカニズム

#### 3.1 夜昼間対流に着目するメカニズム

金星の自転速度 ( $1.8 \text{ m/s}$ ) は非常に遅い。そこで、地面に対する太陽の動きが無視できると考えると、図 16 のように昼側で大気が加熱されて上昇し、夜側で大気が冷却されて下降する夜昼間対流が予想できる。

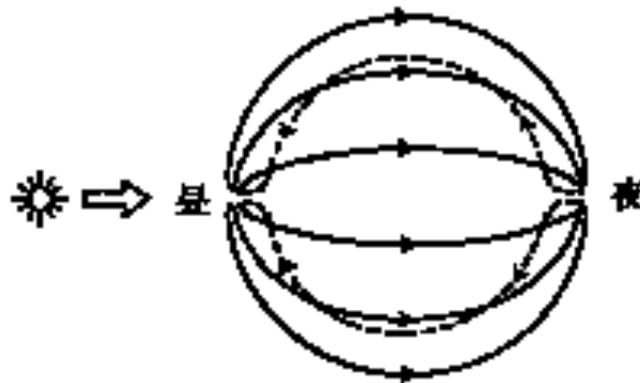


図 16 夜昼間対流の模式図

夜昼間対流は太陽直下点とその対蹠点を結ぶ直線に対して軸対称である。このとき、温度が最大、または最低の位置を結んだ等温線はどのようになっているかを考える。太陽によって加熱された熱が熱伝導によって輸送されるとすると、赤道上の鉛直 2 次元面における等温線は図 17 のようになる。

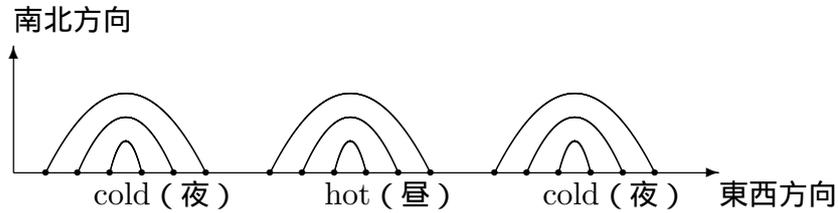


図 17 直立した等温線. 横軸は東西方向, 縦軸は南北方向.

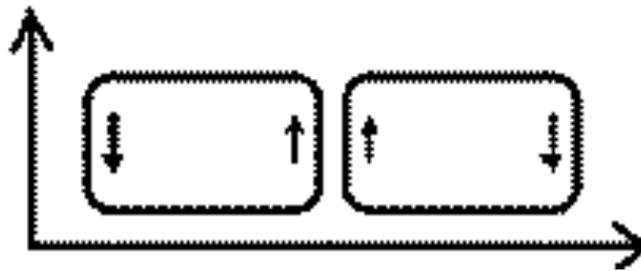


図 18 赤道上の鉛直 2 次元面における直立した対流セル. 横軸は東西方向, 縦軸は鉛直方向.

次に対流セルについて考える。粘性の高い流体層の下面を一様に加熱すると、加熱された流体は浮力により上昇するため、流体内部に半定常的な細胞状の様子が形成される。この様子を対流セルという。太陽の動きが無視できる場合、対流セルは図 18 のようになる。

つまり、対流が軸対称な場合（図 16）その対流セルは軸が直立している（図 18）。

この対流セルの軸が傾く要因を考え、その軸の傾きから東西流を生成しようという考えが夜昼間対流理論である。以下にこの理論に基づいたメカニズムを紹介する。

### 3.1.1 moving flame メカニズム (Schubert and Whitehead,1969)

Schubert と Whitehead (1969) は対流セルの軸が傾く原因を太陽の動きであると考えた。

図 17 で太陽が右から左へ移動したとする。熱源が移動するので等温線は図 19 のように右に傾く。

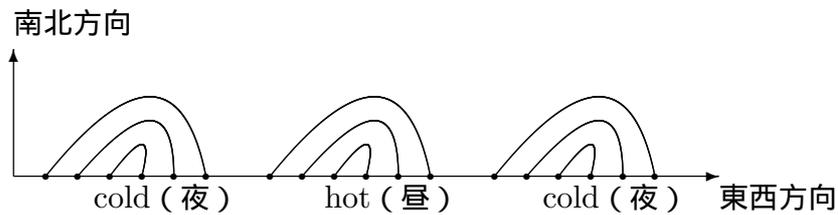


図 19 傾いた等温線. 横軸は東西方向, 縦軸は南北方向.

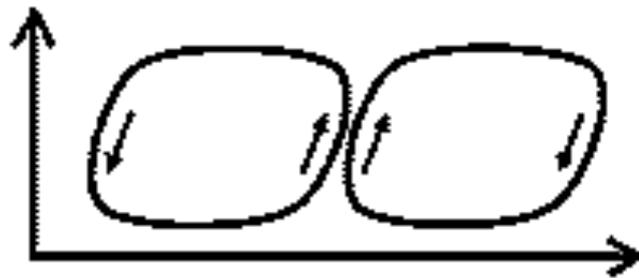


図 20 赤道上の鉛直 2 次元面における傾いた対流セル. 横軸は東西方向, 縦軸は鉛直方向.

温度が最大(最小)の位置で空気の密度は最小(最大)になり、正(負)の浮力が働く。よって、傾いた等温線に沿って上昇流と下降流が生じ、対流の上昇域と下降域も傾くことになる。このとき対流セルは図 20 のようになる。

ここで、 $u$  を東西方向、 $w$  を鉛直方向の速度成分とする。図 18 のように、直立した対流では、 $w$  が最大(上昇域)、最小(下降域)のところでは  $u = 0$ 、 $u$  が最大、最小のところでは  $w = 0$  なので、 $u$  と  $w$  は相関を持たない。よって、 $uw = 0$  で  $[uw] = 0$  である ( $[ ]$  は領域全体での平均)。

一方、図 20 のような傾いた対流では上昇域で  $u > 0$ ,  $w > 0$ 、下降域で  $u < 0$ ,  $w < 0$  となり、両方とも  $uw > 0$  で  $[uw] > 0$  である。ここで  $uw$  とは東西方向の速度(密度を掛けると運動量)の鉛直方向への輸送量である。つまり、 $[uw] > 0$  ということは東西方向の正の速度(運動量)が上方に輸送されたということである。ゆえに、上層では正の方向(太陽の動きと逆方向)に流体が動こうとし、下層では正の方向の運動量が上層へ輸送されたので、負の方向(太陽の動きと同方向)に流体が動こうとする。この過程で全運動量は保存される。しかし、下層では地面との摩擦により、負の方向の運動量が減少する。したがって、上層の正の方向(太陽の動きと逆方向)の運動量が勝ることになる。このようにして作られた流れで金星大気のスーパーローテーションを説明する考えが moving

flame メカニズムである。

moving flame メカニズムは実際に動くのだろうか。Schubert と Whitehead (1969) は水銀 (流体) と炎 (熱源) を用いた室内実験によって、炎の動きと逆向きで、その速さの数倍の速さを持つ流体の流れをつくることに成功した。

水銀ではなく水を用いた実験は、Fultz (1959) や Stern (1959) によって行われていて、動く炎の速さの 0.1 % ~ 1.0 % の速さの平均流ができた。

水を用いた実験では、移動熱源は熱源の動く方向とは逆方向の角運動量を流体に与えることが分かったが、流体は熱源よりも桁違いに小さい速さでしか回転しなかった。moving flame メカニズムによってスーパーローテーションが生成されるとすると、流体は熱源より速くなくてはならない。移動熱源は自身の速さより速い平均流を生成できるのだろうか。

水銀を用いて実験をした結果、水銀の回転速度 (4 mm/s) が熱源の回転速度 (1 mm/s) の 4 倍になり、熱源よりも速い平均流を得ることができた。

では、なぜ水銀で実験が成功したのだろうか。実験で得られた平均流の高速回転は、水銀の粘性の効果に比べて熱伝導の効果が大きいのということの結果である。

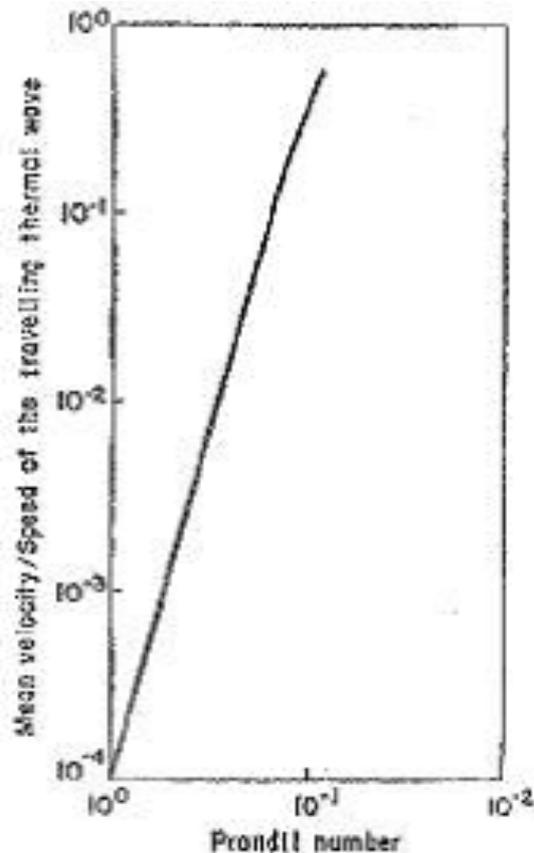


図 21 プラントル数に対する流体速度/熱源速度. 横軸はプラントル数, 縦軸は移動熱源に対する平均流速度.

図 21 から分かるように、移動熱源に対する平均流速度はプラントル数（粘性係数/熱伝導係数）が小さくなるにつれて大きくなる。つまり、moving flame メカニズムでスーパーローテーションを説明するならば、プラントル数は小さい方がよい。実際、20 度における水のプラントル数は 6.75 であるが、水銀のプラントル数は 0.44 と非常に小さい。この差が水を用いた実験では移動熱源の 0.1 ~ 1.0 % の速さの平均流しか生成されなかったのに対し、水銀を用いると移動熱源の 4 倍もの速さの平均流が生成されたことにつながったと考えられる。

moving flame メカニズムが適当な条件下では働くことが分かったが、実際に金星大気に適用できるのだろうか。金星大気のプラントル数を考える場合、粘性係数を渦粘性係数に、熱伝導係数を渦熱伝導係数に置き換える必要があるが、プラントル数が小さい理由は特にない。

このメカニズムに対して、もう一つ疑問点が挙げられる。それは東西流の流れの方向で

ある。このメカニズムでは太陽の加熱効果が地表に集中していることを前提としているが、金星のように厚い雲で覆われている場合、どのくらいの太陽光が地表に到達するのだろうか。

そもそも金星はアルベドが 78 % (表 1 参照) と非常に大きいため、金星が吸収する太陽光の量は地球よりも小さい。ヴェネラ 8 号 (1972, 旧ソビエト連邦) はその吸収量の十数 % が厚い金星大気を通して地表に到達していることを最初に観測した。

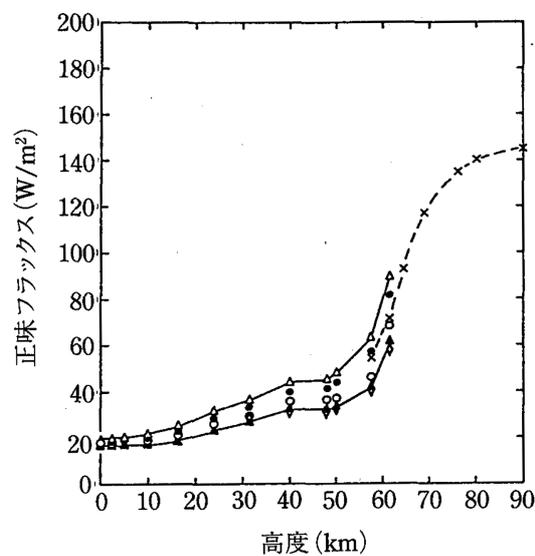


図 22 全球平均した太陽光の全正味フラックスの鉛直分布 (Tomasko et al., 1980)

図 22 は金星における太陽光の全正味フラックスの鉛直分布 (全球平均) である。図 22 から、金星が吸収する太陽光の半分程度が 64 km 以上の上層の雲で吸収されることが分かる。つまり、金星では moving flame メカニズムの前提とは逆に、雲層上部に太陽光の加熱効果が集中していることになる。この場合には、流体層が上から熱せられるので、対流セルの傾きが図 20 とは逆になり、生成される東西流の方向は太陽の動きと同方向で現実と矛盾してしまう。

### 3.1.2 Thompson のメカニズム (Thompson,1970)

Thompson のメカニズム (1970) は、夜昼間対流の対流セルの傾きから東西流を生成しようという点で、moving flame メカニズム (Schubert and Whitehead,1969) と同じである。しかし、このメカニズムでは対流セルの軸が傾く原因を太陽の遅い動きではなく対流セルの不安定性にあるとしている。

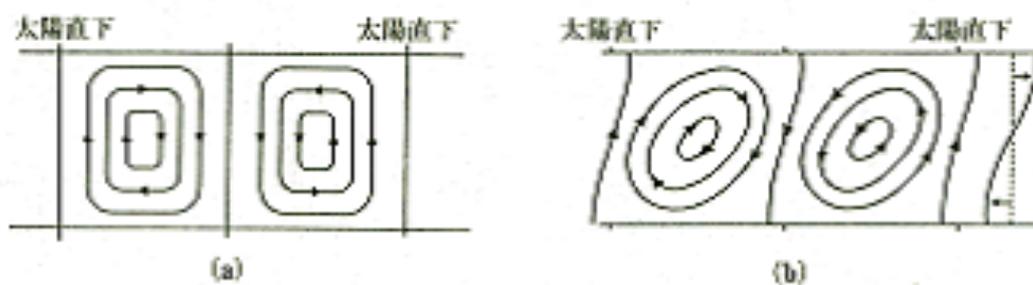


図 23 (a) 直立した対流 (b) 鉛直シアーをもった平均流によって傾いた対流 (Thompson,1970)

図 23 (a) のように直立した対流を基本場とする。そこに擾乱として図 23 (b) の右側にあるような平均東西流が加わったとすると、この平均流による移流により対流が傾く (図 23 (b))。その結果、moving flame メカニズム (Schubert and Whitehead,1969) と同様に東西方向と鉛直方向の速度に相関が生じ、正の方向の運動量が鉛直輸送され、対流がさらに傾く。

Thompson (1970) はこのメカニズムが働くかを数値実験により調べた。図 24 は Thompson (1970) の数値実験による夜昼間対流の安定性を表したものである。

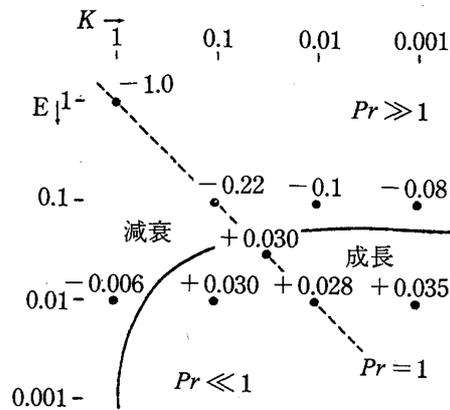


図 24 Thompson の数値実験による夜昼間対流の安定性 (Thompson,1970) . 横軸は熱伝導係数 (K) , 縦軸は粘性係数 (E) . Pr はプラントル数  $Pr=E/K$  .

図 24 から粘性係数  $E$  が大きければ夜昼間対流は安定で、粘性係数  $E$  が小さければ夜昼間対流は不安定であることが分かる。moving flame メカニズム (Schubert and Whitehead,1969) では、スーパーローテーションが生成される条件をプラントル数が小さいこととしていたが、Thompson のメカニズム (1970) では粘性係数  $E$  が小さいことが条件である。

### 3.2 重力波（熱潮汐波）に着目するメカニズム（Fels and Lindzen, 1974）

熱潮汐波とは、太陽光加熱によって励起される重力波のことである。Fels と Lindzen (1974) は熱潮汐波に着目してスーパーローテーションの生成メカニズムを説明した。

金星の雲層は太陽光によって加熱されるので、熱潮汐波が励起される。(図 25) この熱潮汐波は地面に対して太陽の動く速さと同じ位相速度をもち、位相速度を同方向の運動量が伴っている。雲層で励起された熱潮汐波は上下に伝播し、運動量を大気を与え、太陽の動きと同方向の平均東西流をつくる。大気中の全運動量は保存されるので、加熱層から太陽の動きと同方向の運動量が運び去られた結果、加熱層では太陽の動きと逆方向の流れができる。Fels と Lindzen (1974) はこの流れでスーパーローテーションが生成されると考えた。

このメカニズムには問題点が挙げられる。それは雲層上下の平均東西流である。雲層で励起された熱潮汐波は上下に伝播し、上層でも下層でも太陽の動きと同方向の平均東西流が生じると考えられる。しかし、このような太陽の動きと同方向、すなわちスーパーローテーションと逆方向の流れは雲の上層でも下層でも観測されていない。

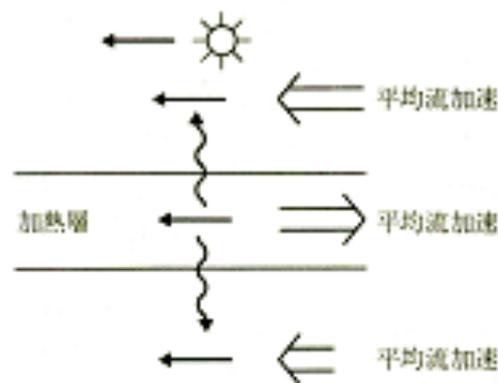


図 25 重力波の鉛直伝播による平均東西流生成の模式図（松田,2000）

### 3.3 子午面循環に着目するメカニズム

大気大循環の形成において、極・赤道間の温度差と自転の力学的効果が重要な要素である。回転水槽実験はこの2つの要素を取り出し、大循環がそれにどのように依存するかを調べたものである。

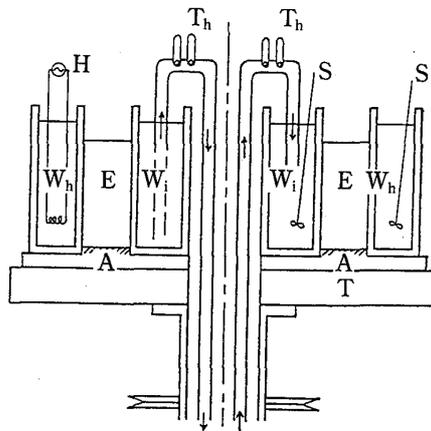


図 26 回転水槽実験装置 (守田,1980)

図 26 は回転水槽実験装置である。外側に温水、内側に冷水が入っていて、外側の温水は低緯度の大気 (高温)、内側の冷水は高緯度の大気 (低温) に対応している。装置を回転させたとき (回転は惑星の自転に対応している)、装置内の水の動きが大気の大循環ということになる。

まず実験装置が回転していないとき（回転角速度  $\Omega = 0$ ）を考える。

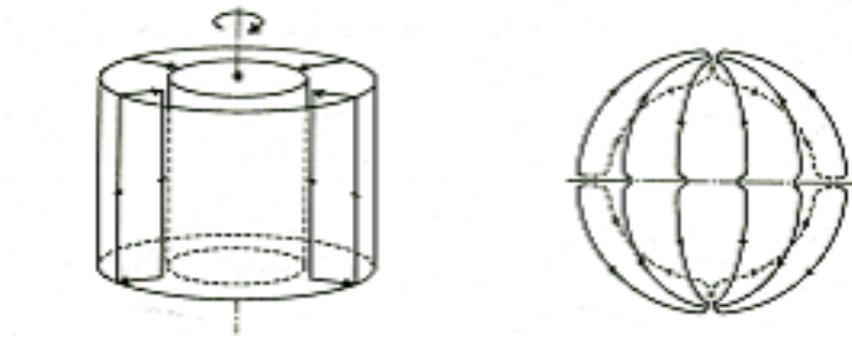


図 27  $\Omega = 0$  の場合の流れの様相（左）と子午面循環（右）（松田,2000）

外側の流体は温度が高く密度が小さいので浮力が働き上昇する。内側の流体は温度が低く密度が大きいため負の浮力が働き下降する（左）。この流体の運動は惑星に置き換えると子午面循環に相当する（右）。

次に回転しているとき（ $\Omega \neq 0$ ）を考える。

この場合は流体素片の動径方向の運動に対してコリオリ力が働き、接線方向にも運動する。外側から内側に向かう上層では時計回り（西風）、下層では反時計回り（東風）に運動する。つまり、回転角速度  $\Omega = 0$  ならば子午面循環が発達し、 $\Omega \neq 0$  ならば東西風が発達する。

ここで惑星の自転速度について考える。表9は太陽系惑星の自転速度と自転周期の比較である。

表9 太陽系惑星の自転速度・自転周期の比較

	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
自転速度 (m/s)	1.8	460	240	13000	9800	2800	2300
自転周期 (日)	243	0.99	1.02	0.41	0.44	0.72	0.67

表9が示すように、金星は他の惑星に比べ自転速度が非常に小さい。そこで回転角速度を $\Omega = 0$ と考える。回転水槽実験によると、 $\Omega = 0$ では子午面循環が発達するはずだが、実際の金星では東西風が卓越している。この東西風は子午面循環によって引き起こされたものだという考えが子午面循環に着目する理論である。

### 3.3.1 Gierasch のメカニズム (1975)

Gierasch (1975) は、子午面循環による角運動量輸送が東西風の生成に関係すると考えた。Gierasch (1975) が考案したメカニズムでは簡単のために以下のような仮定がおかれている。

1. 大気循環は自転軸に対して軸対称 (夜昼間の温度差を無視)
2. 子午面循環は東西風の大きさと無関係に南北加熱差の大きさのみによって決定される
3. 水平粘性は無量大

(1) 最初、大気は惑星の固体部分とともに剛体回転しているとする。

図 28 は大気が剛体回転しているときの、回転に伴う東西風速と角運動量の緯度分布である。

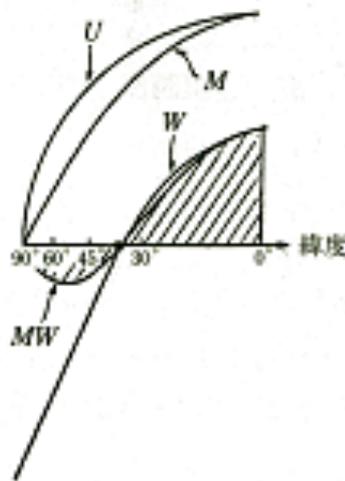


図 28 角運動量の緯度分布と子午面循環による角運動量の鉛直輸送 (松田,1987)

ただし、 $U$  は東西風速、 $M$  は角運動量、 $W$  は子午面循環の鉛直速度、 $MW$  は子午面循環による角運動量の上向きフラックスである。腕の長さが長いので、低緯度では角運動量  $M$  は大きい。また、子午面循環の鉛直速度  $W$  は低緯度で上向き、高緯度で下向きである。それらの積  $MW$  (角運動量の上向きフラックス) は低緯度で正、高緯度で負であ

り、MW の低緯度での絶対値は高緯度より大きい。よって、MW を全球で積分すると正になるので、大気が惑星とともに剛体回転をしているとすると、角運動量は上方に輸送されることがわかる。

(2) 次に子午面循環の水平移流効果を考える。

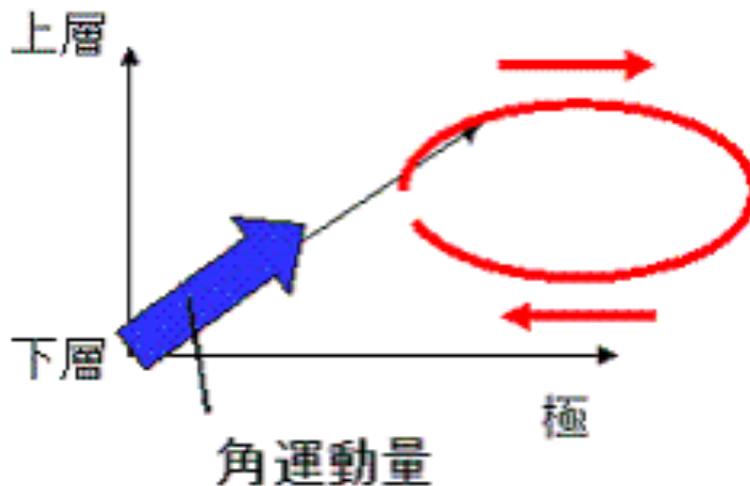


図 29 角運動量に対する子午面循環の水平移流効果の模式図

図 29 は角運動量に対する子午面循環の水平移流効果の模式図である。矢印の長さは大きさを表す。低緯度の大きな角運動量は子午面循環によってその大きさを変えずに高緯度へ水平に移流され、高緯度では下層へ、下層では低緯度へ移流される。このときの風速を考える。

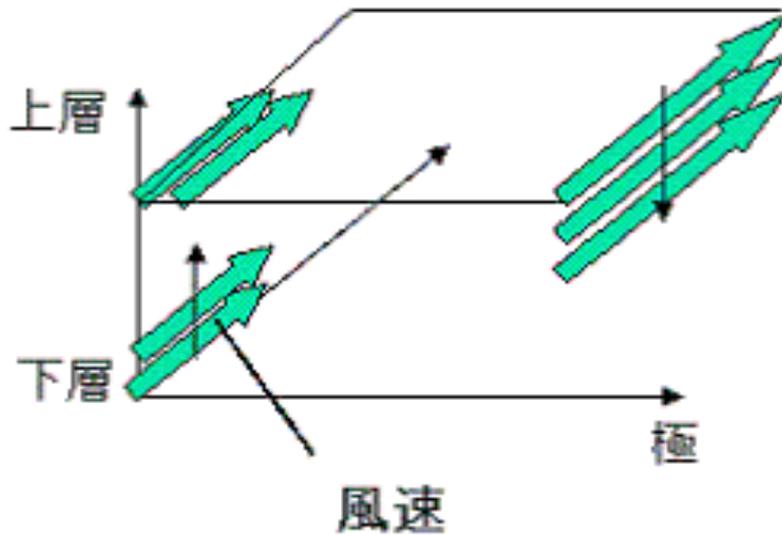


図 30 角運動量が水平に移流されたときの風速の模式図

図 30 は角運動量が子午面循環によって移流されたときの風速の模式図である。図 29 と同様に矢印の長さは大きさを表す。角運動量は保存されるので、低緯度下層の風速はその上層でも大きさは変わらない。角運動量が高緯度へ輸送されると、腕の長さが短くなるので、角運動量保存により風速は大きくなる。そしてその下層に角運動量が輸送されても風速は変わらないので、赤道付近（低緯度）ではスーパーローテーションは起こらないことになる。しかしスーパーローテーションは図 13 からわかるように全球にわたって起きている現象なので、低緯度でも起こらなければならない。

(3) そこで粘性を考える。

まず水平粘性を考える。水平粘性は図の高緯度上層の高速東西風を低緯度へ輸送するので、水平粘性があれば低緯度でもスーパーローテーションが起こる(図 31 参照)。

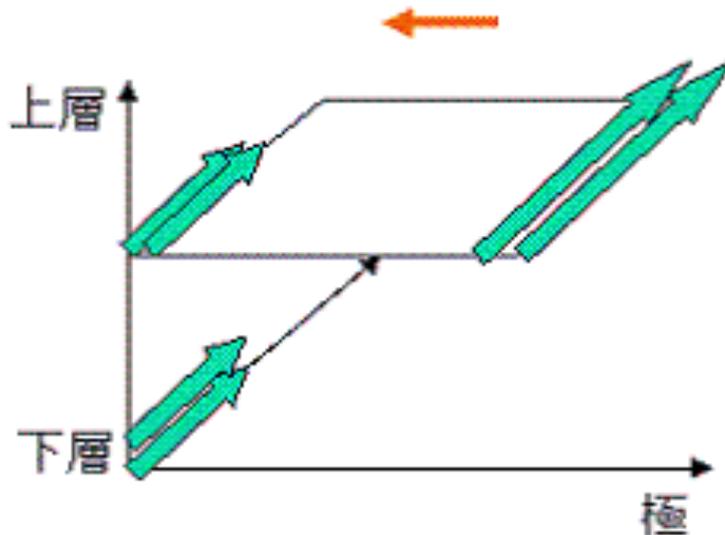


図 31 風速に対する水平粘性の輸送効果の模式図

水平粘性を無限大とすると、大気は各高度で剛体回転する。この場合は(1)の考察より、角運動量の上方輸送が常に起こる。角運動量を得た上層大気は高速度の剛体回転を始め、角運動量を失った下層大気は固体部分よりも遅い回転をするようになる。

次に鉛直粘性を考える。水平粘性によって固体部分よりも遅い回転をするようになった下層大気は鉛直粘性によって固体部分と同じ速さで回転するように作用を受ける。このとき固体部分は下層大気に角運動量を提供する。さらに子午面循環が作用するので角運動量は上層に蓄積していき、上層の東西風速が増大し、低緯度でもスーパーローテーションが起こる。

こうして実際の通りスーパーローテーションが低緯度でも高緯度でも生成されそうであるが、図 32 のように鉛直粘性が鉛直方向の速度差をならすように上層の高速東西風がもつ角運動量を下層へ輸送することを考えなければならない。

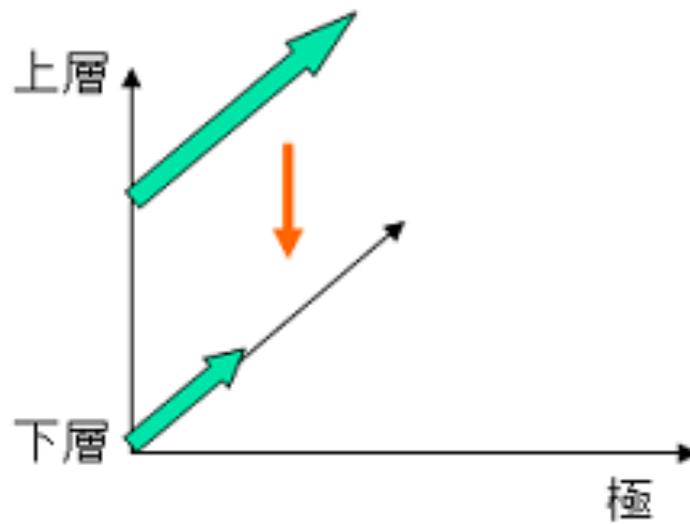


図 32 鉛直粘性による風速の移流

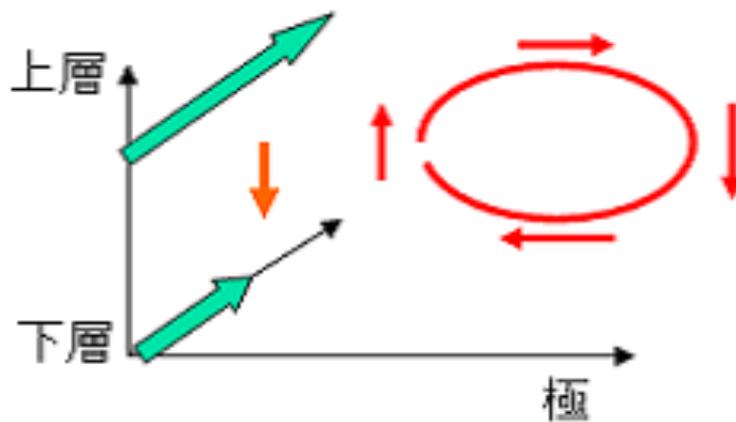


図 33 鉛直粘性による下方輸送と子午面循環による上方輸送（風速）

鉛直粘性によって角運動量の鉛直分布が一様化されてしまう前に、子午面循環によって角運動量の上方輸送が起こらなければスーパーローテーションは生成しない（図 33 参照）。よって鉛直粘性による角運動量の下方輸送にかかる時間を鉛直粘性の緩和時間とするとスーパーローテーションが実現される条件は、

$$\text{鉛直粘性の緩和時間 } \tau_V > \text{子午面循環の周期 } \tau_M$$

である。

### 3.3.2 松田の研究 (1980,1982)

先に述べた Gierasch (1975) のメカニズムは仮定が多いという問題点が挙げられる。松田 (1980,1982) は Gierasch (1975) のメカニズムでの水平粘性は無有限大という仮定を取り除いてスーパーローテーションを解き明かそうとした。また、「子午面循環は東西風の大きさと無関係に南北加熱差の大きさのみによって決定される」という仮定も考え直し、金星大気に働く様々なモーメントのバランスを考え、子午面循環の強さを決定させようとした。

まず、水平粘性は無有限大ではなく有限であるとする。松田 (1980,1982) も Gierasch (1975) と同様、子午面循環による角運動量輸送が東西風生成に影響すると考えた。子午面循環の強さがある一定の値より小さければ、下層から上層へ輸送される角運動量は小さくなり、その結果東西風も小さくなる。この場合は、Gierasch (1975) のメカニズムでのスーパーローテーションが実現する条件、

$$\tau_V > \tau_M$$

を満たせばよい。また、子午面循環の強さがある一定の値より大きくなると、子午面循環による角運動量の水平移流効果が、水平粘性による角運動量の輸送効果よりも大きくなってしまふことが起こる。すると、上層では角運動量が高緯度へ輸送され、下層では高緯度の小さな角運動量が低緯度へ輸送される。結局、剛体回転 (水平粘性が無有限大) の場合より、上層の高緯度で角運動量が大きく、下層の低緯度で角運動量が小さくなる。つまり、子午面循環の鉛直方向の流れによって上層に流入する角運動量が減り、さらに流出する角運動量が増えるので、子午面循環の上方輸送の効率が悪くなる。子午面循環の強さが非常に大きい場合は、水平粘性の効果は相対的に無視できるので、このメカニズムは成り立たない。以上より、松田 (1980,1982) は子午面循環が適当な強さをもつとき、スーパーローテーションが実現されると考えた。適当な強さとは、子午面循環による角運動量の移流効果が水平粘性による角運動量の輸送効果よりも小さい、ということである。よって、水平粘性の緩和時間を  $\tau_H$  とすると、

$$\text{水平粘性の緩和時間 } \tau_H < \text{子午面循環の周期 } \tau_M$$

という条件が必要である。2つの条件をまとめると、スーパーローテーションが実現されるための条件は、

$$\tau_H < \tau_M < \tau_V$$

である。

では、子午面循環の強さは何によって決定されるのだろうか。Gierasch (1975)によれば子午面循環の強さは南北加熱差の大きさのみによって決定されるが、子午面内には他にも以下のようなモーメントが働いている。

- 子午面循環に働く摩擦力のモーメント
- コリオリ力の高度差によるモーメント
- 遠心力の高度差によるモーメント (図 35)

ここで遠心力とは、鉛直シアを持った東西風に働く遠心力である。上層の東西風の方が大きいので、遠心力も大きくなっている。そして、子午面循環は南北加熱差によって励起される。合計4つのモーメントの釣り合いから、子午面循環の強さを決定することができる。これら4つのモーメントは、

$$\begin{aligned} (\text{南北加熱差によるモーメント (図 34)}) = & (\text{子午面循環に働く摩擦力のモーメント}) \\ & + (\text{コリオリ力の高度差によるモーメント}) \\ & + (\text{遠心力の高度差によるモーメント}) \end{aligned}$$

という釣り合いがとれる。ここで図 12 より、金星では下層大気の東西風速と上層大気の東西風速の差が大きく、遠心力の高度差によるモーメントが卓越していると考えられるので、上のモーメントの釣り合いの式は、

$$(\text{南北加熱差によるモーメント}) = (\text{遠心力の高度差によるモーメント})$$

とかくことができる。これらのモーメントが釣り合うことで、子午面循環の強さを決定することができる。

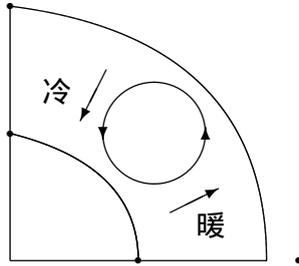


図 34 南北温度差のモーメント

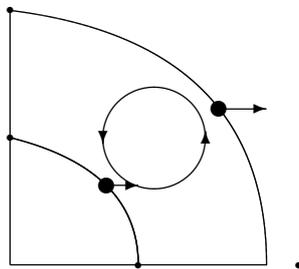


図 35 遠心力の高度差によるモーメント

## 4 まとめ

金星には、地球とは全く異なる現象が数多く存在する。その不思議な現象の解明のために、1960年代から地上及び探査機からの観測が行われてきたが、未だ解決されていない現象がある。金星大気のスーパーローテーションもその1つである。

スーパーローテーションとは、金星大気全体が自転を追い越すように東西回転している現象である。その東西風速は高度と共に増大し、高度 65 km 付近では 100 m/s に達する。1970年代からスーパーローテーションの生成メカニズムを説明する様々な理論が提唱され議論されてきたが、正解は分からず、スーパーローテーションの生成メカニズムは未だに謎である。

スーパーローテーションの生成メカニズムの解明を最終目標の1つにかかげる金星探査機 Planet-C (JAXA) が 2010年に打ち上げられ、2年以上にわたって金星の周回軌道から金星大気の観測を行う。また、付加的な目標として大気だけでなく、地表探査や黄道光観測も行う。

Planet-C (JAXA) に搭載される 5 台のカメラが、高度の異なる対象をそれぞれ同時に見ることによって、金星大気全体の様相をとらえることを試みる。連続的な撮像観測は金星大気力学について今までにないデータを与えてくれるだろう。

2005年11月9日に打ち上げられた Venus Express (ESA) から多くのデータが得られ、Nature (2007) で公開された。Venus Express (ESA) の目標は、大気力学や大気構造など様々なテーマに分類することができるが、大気化学の観点から金星大気を調査することは、特徴の1つといえるだろう。Planet-C (JAXA) が気象力学に重点を置いていることから考えると、Venus Express (ESA) と Planet-C (JAXA) はそれぞれ別の視点から異なるアプローチで金星大気を調査していて、お互いを補うことでより大きな成果が得られると期待できる。

## 5 謝辞

この論文を作成するにあたり、たくさんの方々にお世話になりました。

渡部重十 教授には、研究の方向性を示唆して頂きました。また、本来学生は参加できないような Planet-C の話し合いの場に参加させて頂くという大変貴重な経験もさせて頂きました。

大石尊久さんには、本論文に使用した図の画像処理をして頂きました。また、夜遅くまで本論文の添削をして頂き、内容の解釈について丁寧に教えて頂きました。

南部慎吾さんには、本論文を書き始めたばかりの段階から締め切り直前まで、何回も添削して頂き、様々な助言を頂きました。

そのほかにも、惑星物理学研究室及び地球流体力学研究室の皆様には、常日頃から助言を頂いたり、分からないことを丁寧に教えて頂きました。

この場を借りて厚く御礼申し上げます。

## 6 参考文献

Colin,L.,1983: Basic fact about Venus,*Venus*,University of Arizona Press10-26

Gierasch,P.J.,1975: Meridional Circulation and the Maintenance of the Venus Atmospheric Rotation.*J.Atmos.Sci*,32,1038-1044

Markiewicz,W.J.,Titov,D.V.,Limaye,S.S.,Keller,H.U.,Ignatiev,N.,Jaumann,R., Thomas,N.,Michalik,H.,Moissl,R.,Russo,P.,2007: Morphology and dynamics of the upper cloud layer of Venus.*Nature*,450,629-632

松田佳久,2000: 「惑星気象学」, 東京大学出版会

Matsuda,Y.,1980: Dynamics of the Four-Day Circulation in the Venus Atmosphere. *J.Meteor.Soc.Japan*,58,443-470

Matsuda,Y.,1982: A Further of Dynamics of the Four-Day Circulation in the Venus Atmosphere.*J.Meteor.Soc.Japan*,60,245-254

Nakamura,M.,Imamura,T.,Ueno,M.,Iwagami,N.,Sato,T.,Watanabe,S.,Taguchi,M., Takahashi,Y.,Suzuki,M.,Abe,T.,Hashimoto,G.,Sakanoi,T.,Okano,S.,Kasaba,Y., Yoshida,J.,Yamada,M.,Ishii,N.,Yamada,T.,Uemizu,K.,Fukuhara,T.,Oyama,K., 2007: Planet-C: Venus Climate Orbiter mission of Japan. *Planet.Space Sci*,55,1831-1842

Shubert,G.,Whitehead.J.A.,1967:Moving Flame Experiment with Liquid Mercury : Possible implications 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.,Schubert,G.,1973: Dynamical Aspects of the Venus 4-Day Circulation  
*Planet.Space Sci*,21,1563-1580

<http://www.stp.isas.jaxa.jp/venus/>

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=64>