

金星上層雲の構造と運動に関する研究
A study of the structure and dynamics
of Venus' upper cloud

北海道大学 理学部 地球科学科 地球物理学
惑星物理学研究室

大石 尊久
Ohishi Takahisa

2005 年 01 月 28 日

要旨

金星大気は地球上の気象とは全く違った現象が多く存在する。その1つに、紫外線観測によって発見されたスーパーローテーションと呼ばれる現象がある。この現象は金星大気の高度約 70 km の風の循環で、金星を 4 日で 1 周している。金星の自転は 243 日であることから考えれば、いかに速い風であるかがわかる。この上層大気循環のメカニズムは様々な議論がされている。これまでにされた議論の中で最も知られている Gierasch (1975) の研究について、そしてその Gierasch の研究の非現実的な仮定を考え直した松田 (1980,1982) の研究をここで紹介する。しかし、その議論が本当に正しいかは判っていないため、メカニズムの解明は未だに未解決のままである。

また、Gierasch の研究の基となった過去の探査機の紹介、そして探査機の観測から判った金星の雲の分布についても紹介する。

最後に、この研究の目的である金星上層大気の地球上からの紫外線観測についてである。特定の波長で紫外線観測することで、金星の上層大気の画像を撮影し、上層大気の運動をとらえようと考えた。地球上からの金星観測の観測システム、これまでの観測結果、画像処理等の紹介、そしてこれからの課題について議論する。

目次

I	はじめに	4
II	金星大気と大気の超回転	6
II.1	超回転の生成機構	6
II.1.1	Gierasch の研究	7
II.1.2	松田の研究	8
II.2	衛星観測の結果	10
II.2.1	過去の金星探査	10
II.2.2	これまでの探査機から判ったこと, これからの課題	16
II.2.3	金星の雲	16
II.2.4	これからの金星探査	20
III	金星大気の観測	21
III.1	観測システム	21
III.1.1	観測に使った使用機材	21
III.1.2	観測方法	22
III.2	観測結果	24
IV	データ解析	26
IV.1	画像解析手法	26
V	議論とまとめ	28
	謝辞	30

参考文献

30

I はじめに

金星は地球の内側を公転する惑星である。そのため、地球からは朝方と夕方しか見ることができず、日本では昔から「明けの明星」、「宵の明星」などという名前で親しまれてきた。しかし、金星は厚い大気に包まれているため、地表面の観測は地球上からはできなかった。だからといって大気の観測は進んでいたかという、そうでもない。地球からは金星大気の上層部分しか見えず、かつ現在のような高性能な望遠鏡がなかったため、探査機が打ち上がるまでは金星についてほとんど知られていなかった。本格的に米ソの探査機が探査するようになったのは 1970 年代あたりからで、未だに金星の気象についてはほとんど解明されていない。

金星は太陽系の第 2 惑星である。大きさは地球と同じくらいで、地球の「兄弟星」とも言われているが、金星の自転運動や環境は地球のそれとは全く異なったものである。まず、自転の方向が地球とは全くの逆方向なのである。言い換えると、赤道傾斜角が約 180° 傾いている。自転周期は 243 地球日、要するに金星が一回転するのを地球では 243 日間待たなくてはならない。そして、金星は地球の内側を公転しているため、惑星に降り注ぐ太陽からのエネルギー、太陽放射量は地球より約 1.9 倍多い。そのため、地球より気温が高いだろうと予想されるのだが、過去の探査機による観測によって地表面温度が 730 K、約 460°C にもなっていることがわかった。太陽放射量やアルベド等から考えた有効放射温度と比べると異常なほどの灼熱の星となっている。その原因は、金星の大気組成にある。金星大気は約 97% が CO_2 であり、その大量の CO_2 が原因で温室効果が起こっている。

金星の大気組成はほとんど CO_2 であるということは上で述べたことだが、この大量な CO_2 は金星大気対流圏の下層部分にほとんどが存在している。では上層の方はどうなっているのだろうか？実は金星にも雲が存在している。しかしその雲は地球のものとは性質が異なり、主成分は H_2SO_4 等の硫黄化合物である。雲は高さ約 45 km から上空に存在し、対流圏のほとんど最上部、約 70 km まで続いている。大気の層が厚いため、そして大気の主成分である CO_2 の分子量が大きいため、地表面での大気圧は約 92 atm にもなる。

金星大気にも地球と同様、風は吹いている。風の分布は高度と共に変化し(図 1 参照)、高度約 70 km あたりでは 100m/s、4 日で金星を 1 周してしまうほどの勢いで吹いている。この速さは地球の偏西風とほとんど同じ速さなのだが、自転周期の長い金星ではとてつもなく速い風である。金星の自転周期 243 地球日から計算すると、赤道での金星の速さは 1.5m/s となり、金星には自転の約 60 倍の速さの風が存在することになる。かつ、この風は緯度に因らずに吹いているため、金星の上層雲は Y 字を横にしたような模様を描いている。この高速度の風の循環は「スーパーローテーション」と呼ばれている。では、どうしてこのような速い風が吹いているのであろうか？実はこの疑問は未だに解決していない。

このように金星の環境は地球のものとはかけ離れている、そして過酷なものであるため、過去に着陸した探査機はそのほとんどが 1 時間と持たずに機能を停止してしまう。そのため、金星の周回軌道上からの様々な波長でのリモートセンシングが必要となってくる。そこで、日本は 2008 年に探査衛星の打ち上げが計画されている。「PLANET-C」という計画で、現在準備が進行している。この観測衛星に乘せる観測機器の一つ、紫外線カメラの

テストを兼ねてこの研究は始まった。

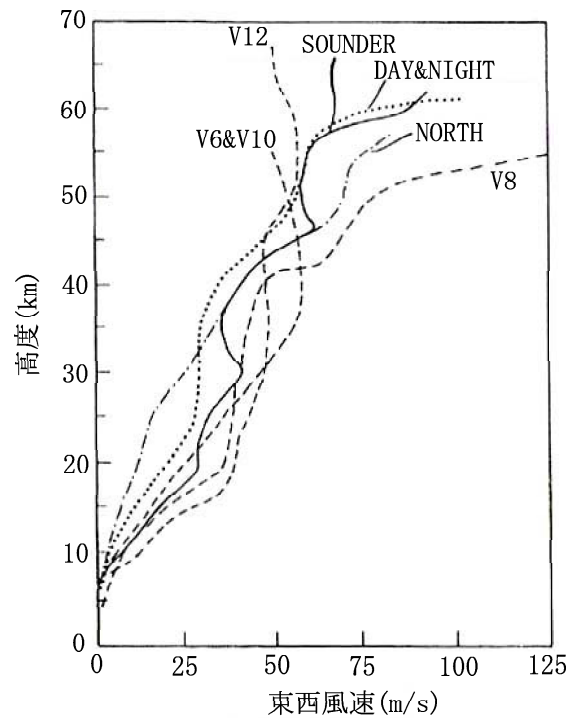


図 1: 探査機により測定された風速の鉛直分布図. (Schubert,1983) V8 は Venera 8 を意味する. Venera 以外の観測は Pioneer-Venus によるもの.

表 1: 金星, 地球, 火星のデータ (理科年表 2003 より)

	軌道長半径 (天文単位)	離心率	公転周期 (太陽年)	自転周期 (地球日)	赤道傾斜角 ($^{\circ}$)	赤道半径 (km)	質量 (地球=1)
金星	0.7233	0.0068	0.6152	243.02	177.4	6052	0.8150
地球	1.0000	0.0167	1.0000	0.9973	23.44	6378	1.0000
火星	1.5237	0.0634	1.8809	1.0260	25.19	3397	0.1074
	太陽輻射量 (地球=1)	地表面気圧 (Pa)	平均分子 量	定圧比熱 ($10^3 J/kgK$)	アルベド	有効放射 温度 (K)	Planet
金星	1.91	9.2×10^6	44	1.2	0.78	224	Venus
地球	1.00	1.013×10^6	29	1	0.30	255	Earth
火星	0.43	6×10^2	44	0.8	0.16	216	Mars

II 金星大気と大気の超回転

II.1 超回転の生成機構

生成機構を議論する際に、過去の探査機による観測結果からどのようなことが判っているかが重要となってくるため、まず述べておく。

金星の大気循環には以下のような2種類の循環があるのではないかと考えられる。1つ目に昼夜間対流(図1)と言われるものである。昼夜間対流とは、金星の昼側と夜側の温度差から生じる対流である。昼側で太陽エネルギーによって暖められた空気は上昇し、夜側で冷やされ下降する。そのために生じる対流である。2つ目に子午面循環(図2)である。子午面循環は、赤道域と極域との温度差からできる循環である。この対流も赤道域の暖かい空気が上昇し、極域で冷やされた空気が下降するために起こる。

さて、以上で述べた2種類の循環が存在すると考えられているのだが、実際の観測結果では昼夜間対流は観測されず、子午面循環は存在することが判っている。そのため、子午面循環から超回転、スーパーローテーションの生成機構を議論しようという試みが行われてきた。

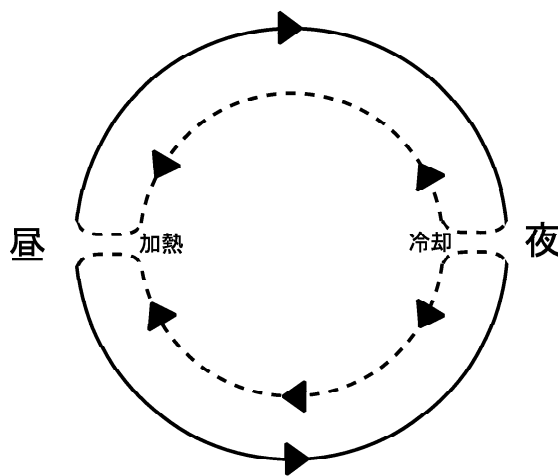


図 2: 昼夜間対流

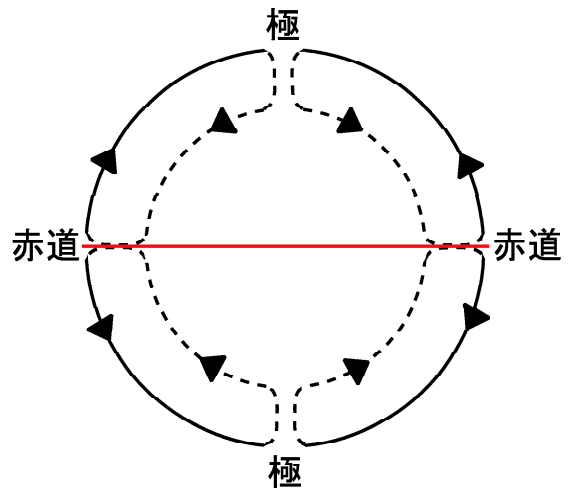


図 3: 子午面循環

II.1.1 Gierasch の研究

Gierasch (1975) は子午面循環によって輸送された角運動量が東西流に影響を与えると考えた。そのために、まず以下に述べるような 3 つの仮定をおいた。

1. 昼夜間の加熱差は無視して、自転軸に対して温度差、大気循環が軸対称性を持っている。
2. 子午面循環は南北加熱差の大きさのみによって決定される。
3. 水平渦粘性を無限大とする。

まず 1 つ目の仮定は、過去の観測において昼夜間対流が観測されていないことによる仮定である。昼夜間での対流がないということは、昼側と夜側における温度差は無視できるとして、東西方向の温度は一樣になっていると考えている。2 つ目の仮定では、子午面循環は単純に、赤道域と極域の温度差によって決まっているとしている。3 つ目の仮定では水平渦粘性を無限大に仮定しているが、現実には無限大になることはあり得ない。しかし、ここでは簡単にするために無限大に仮定している。

以上のような仮定から生成機構を説明していく。まず、初期条件を 0、即ち風速の金星固体部分に対する相対速度が 0 で、固体部分と気体部分が一緒に剛体回転しているものとする。その状態から赤道と極域との温度差によって子午面循環が起きると、赤道の下層にあった大気は上層に輸送され、極へと向かい、極で下降して赤道に戻ろうとする。ここで北半球の上層大気に注目してみよう。北半球の上層大気は子午面循環によって南から北へと移送されようとする。大気と同時に角運動量も北へと輸送される。しかし、水平渦粘性が無限大に働くことによって剛体回転からずれると元の回転に戻そうとする力が働く。そのため角運動量は北へと輸送できなくなり、輸送できない角運動量は代わりに東西方向へと輸送されることになる。そして、東西風の速度が大きくなる(図 3)。また、水平渦粘性によって上層大気の風速は一樣な速さとなり、スーパーローテーションが生成されるのである。角運動量は赤道域で上層へ輸送され、極域で下層へ輸送されるのだが、赤道の方が角運動量は大きいので、全体的に見ると、角運動量は上層へと供給されることになる。大

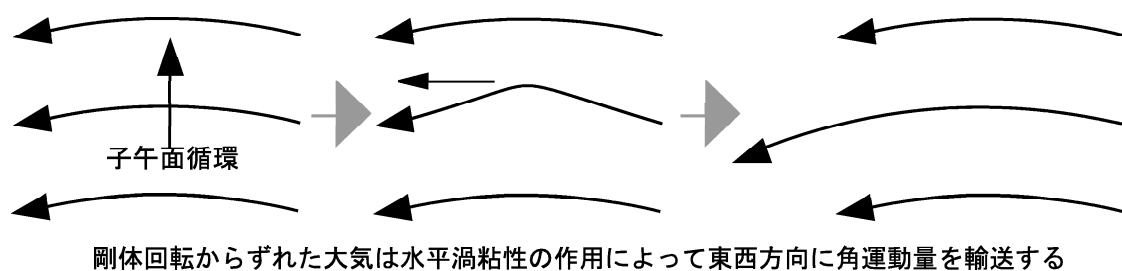


図 4: 水平輸送

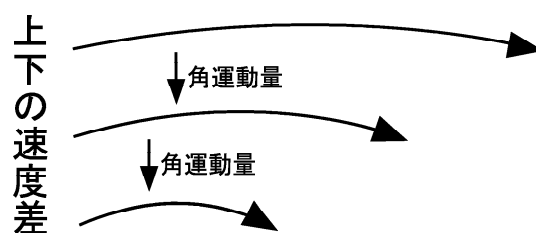


図 5: 鉛直輸送

気上層部へと輸送される角運動量は金星大気の下層部分から来るのだが、この角運動量は金星の固体部分から大気へと供給されている。このままでは東西風は無限大に大きくなってしまふのだが、角運動量の輸送は上方輸送だけではない。鉛直方向の渦粘性により鉛直方向の速度差を打ち消すような仕事働き、角運動量は下方へも輸送される(図 4)。子午面循環による角運動量の上方輸送と、鉛直方向の速度差を打ち消すことによる角運動量の下方輸送が釣り合ったところで角運動量の輸送は平衡状態になり、スーパーローテーションは安定する。この考え方が Gierasch の考えた理論である。

II.1.2 松田の研究

先に解説したギーラシの研究では不自然な仮定、「水平渦粘性を無限大とする」を置いてスーパーローテーションを解き明かしているため、松田(1980,1982)は、この仮定を取り除いて解き明かそうとした。またそれだけでなく、2つ目の仮定にあった「子午面循環は南北加熱差の大きさのみによって決定される」というものも考え直し、金星大気に働く様々なモーメントの釣り合いを考慮して、子午面循環の強さを決定させようとした。

まず、ギーラシの考え方と同じように水平渦粘性によって子午面循環の角運動量が東西風に影響すると考えた。そして、子午面循環の強さが東西風の強さを決めると考えたのだが、ここで水平渦粘性を有限の値としたため、子午面循環がある一定の値を超えると子午面循環の移流効果が水平渦粘性の作用による東西方向へ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、角運動量の移動は相対的に見て南北の移動をしていることになってしまう。このようなことになると金星大気の運動は剛体回転からずれてしまふ、実際の運動を実現できなくなってしまう。では子午面循環が小さければいいかという、そうでもない。子午面循環が小さいということは下層から上層へと輸送される角運動量が小さくなり、結果、東西風も小さくなってしまふ。よって、子午面循環が適当な強さになることによってスーパーローテーションは実現される。

では、子午面循環の強さは何によって決まるのであろうか。ギーラシの研究では南北の温度差のみによって決定していたが、子午面循環には他にも以下のようなモーメントが働いている。

- 摩擦力のモーメント
- 遠心力の高度差によるモーメント (図 6)
- コリオリ力の高度差によるモーメント

以上の 3 つのモーメントに南北温度差のモーメント (図 5) を加えた 4 つのモーメントの釣り合いから強度を求めた. これら 4 つのモーメントは

$$\begin{aligned} (\text{南北温度差のモーメント}) &= (\text{摩擦力のモーメント}) \\ &+ (\text{遠心力の高度差によるモーメント}) \\ &+ (\text{コリオリ力の高度差によるモーメント}) \end{aligned}$$

といった釣り合いがとれる. しかし, 金星では下層大気の風速と上層大気の風速の差が大きいため (第 1 章, 図 1 参照), 遠心力の高度差によるモーメントが卓越していることになり,

$$(\text{南北温度差のモーメント}) = (\text{遠心力の高度差によるモーメント})$$

と見なすことができる. これらのモーメントが釣り合うことによって強度を決定することができる. こうして子午面循環の強さが決定でき, スーパーローテーションの大きさも決定できると考えた.

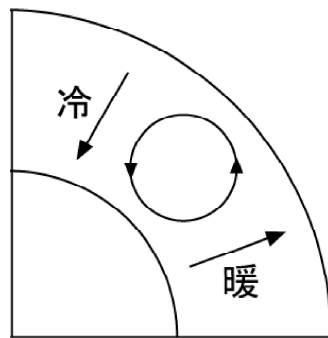


図 6: 南北温度差のモーメント

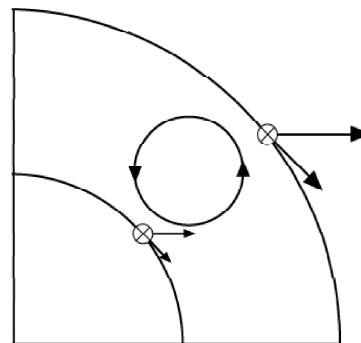


図 7: 遠心力の高度差によるモーメント

II.2 衛星観測の結果

II.2.1 過去の金星探査

過去, Mariner, Venera, Pioneer-Venus など様々な探査機が金星の探査をしている。それらは金星探査を目的に発射された探査機, もしくは他の惑星や彗星に向けて飛んでいく際の Flyby¹ の最中に観測をしたものがある。観測内容も様々で, 着陸するタイプや周回軌道上から紫外線や赤外線画像を撮ったり, レーダーで探査したりした。以下に示すものはアメリカ, 旧ソ連によって打ち上げられた探査機である。

1. Venera シリーズ

Venera は旧ソ連によって全 16 機打ち上げられた探査機である。最初の頃に打ち上げられた Venera 1~3 は大気圏に突入する段階で燃え尽きた。そして, Venera 4 でついに燃え尽きる前に大気を測定することに成功し, 金星大気の主成分が CO_2 であること確認した。Venera 5, Venera 6 も大気に突入したが約 50 分で燃え尽きてしまった。

金星地表面に到達できたのは Venera 7 からである。Venera 7 は地表面で 23 分間探査機能が活動し, 現在知られている高温高压の金星表面を観測した初めての探査機である。次の Venera 8 では無傷で軟着陸し, 1 時間生き残った。その間に岩石調査・太陽光の地表面到達量を観測。大気突入から地表面到達までに風速の分布を観測した(第 1 章, 図 1)。

Venera 9, Venera 10 は着陸船(Lander)と軌道周回船(Orbiter)とに別れて調査した。着陸船が金星表面に軟着陸し, 観測データを軌道周回船から地球へ送信する仕組みだった。そして, 金星表面の写真を初めて撮影した探査機である。2機は3日差で 2200km 離れて着陸し, 地表面風速・雲の分布・大気成分等を観測した。

Venera 11, Venera 12 は軟着陸をし, 大気下層に水蒸気の痕跡や雷雨らしいものの発見など新しい現象を発見したが, Venera 12 は地表面の写真の撮影に失敗した。

Venera 13 はカラー写真を撮影し, Venera 14 は白黒で撮影をした(図 8, 図 9)。2機は4日差で 950km 離れた場所に着陸。共に1時間前後活動した。

Venera シリーズ最後となった Venera 15, Venera 16 は金星地表面には着陸せず, 金星の周回軌道からレーダーで地表面地形を観測した。8ヶ月の観測期間で約 25 % の領域を観測した。

¹フライバイ。惑星の引力を利用して探査機を加速する方法

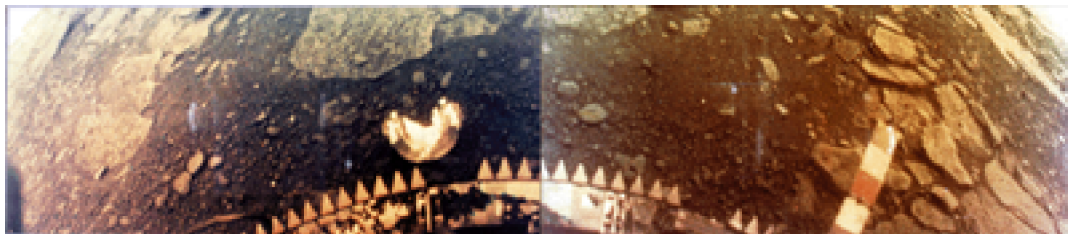


図 8: Venera 13 が撮影した地表面のカラー画像 (NASA)

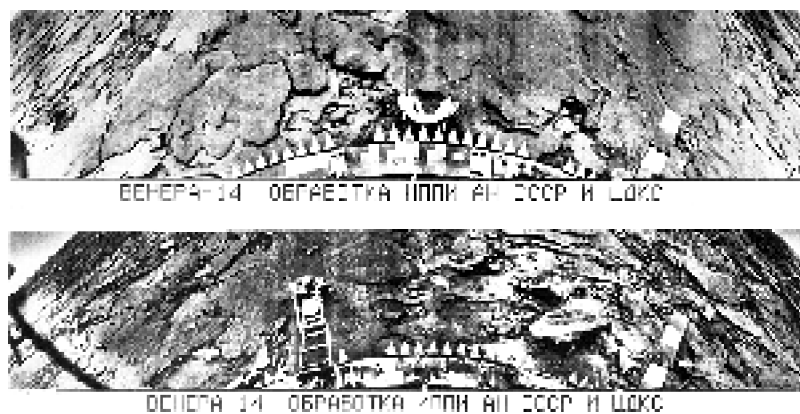


図 9: Venera 14 が撮影した地表面の画像 (NASA)

2. Mariner シリーズ

アメリカによる水星探査機の Flyby の際に観測された。Mariner 2, Mariner 5, Mariner 10 の3機が金星で Flyby をして、観測をしていった。ちなみに Mariner 6 ~ 9 は火星探査機であった。

Mariner 5 は金星大気が CO_2 であることを確認し、Mariner 10 は TV カメラ、磁力計、紫外線分光器を使用して、電離層と上層大気の観測を行った。紫外線画像の連続撮影により、金星のスーパーローテーションを見出した。

3. Pioneer-Venus シリーズ

アメリカによる金星探査機。Pioneer-Venus 1 は 1978 年から 14 年間に渡り、金星周回軌道上にて様々な観測を行った。Orbiter のみの Pioneer-Venus 1 に対し、Pioneer-Venus 2 は軌道周回船 (Orbiter) と 4 つの観測機 (Probe) を積んでいた。観測機は大気組成・粒子の大きさや形・太陽風・雲粒子・赤外放射・温度・圧力・風速度を調べる大型 Probe 1 機と、放射エネルギー・雲粒子・温度・圧力・風速度を調べる小型 Probe 3 機である。

4. VEGA シリーズ

旧ソ連の最後の金星探査。ハレー彗星の観測のために金星で Flyby したときに気球と着陸船を切り離した。観測内容は大気の調査。

5. Magellan

アメリカによるミッション。金星を周回してレーダー撮像をした。発射はスペースシャトルでされ、地球の周回軌道から金星に向けて飛んでいった。金星周回軌道上で 4 年間にわたって約 3000 周し、全地表面積の 99% をカバーした (図 11)。その観測結果から、金星にはプレートテクトニクスがなく、平均地表年齢は 5 億年、そして重力場と地表地形の関連が高いことなどが判った。

6. Galileo

アメリカの木星に向かうミッション。金星で Flyby した際に紫外線、赤外線領域の波長で撮像。



図 10: Pioneer-Venus が撮影した紫外線画像 (NASA)



図 11: Magellan によるレーダー観測で作られた金星の地表イメージ (NASA)

表 2: 金星探査の歴史

打ち上げ年	探査機	備考
1962	Mariner 2	Flyby, 水星へ
1965	Venera 3	大気圏に突入, 燃え尽きた
1967	Venera 4	大気圏に突入, 主成分が CO ₂ であることを確認
1967	Mariner 5	Flyby
1969	Venera 5	大気圏に突入
1969	Venera 6	大気圏に突入
1970	Venera 7	軟着陸
1972	Venera 8	軟着陸
1973	Mariner 10	Flyby
1975	Venera 9	Orbiter と Lander
1975	Venera 10	Orbiter と Lander
1978	Pioneer-Venus 1	Orbiter
1978	Pioneer-Venus 2	Orbiter と 4つの Probe
1978	Venera 11	昼面に軟着陸
1978	Venera 12	昼面に軟着陸
1981	Venera 13	軟着陸
1981	Venera 14	軟着陸
1983	Venera 15	レーダーで地表面地形を観測
1983	Venera 16	レーダーで地表面地形を観測
1984	VEGA 1	バルーン投下, ハレー彗星へ
1984	VEGA 2	バルーン投下, ハレー彗星へ
1989	Magellan	レーダーで地表面地形を観測
1989	Galileo	Flyby, 木星へ
1994	Cassini	Flyby, 土星へ

II.2.2 これまでの探査機から判ったこと、これからの課題

今までの探査機によって、金星の基本的な性質とも言うべきことは大抵のことは判ってきている。まず、大気の組成、温度分布、風速分布といった大気の特徴のデータはある程度そろった。そして、リモートセンシングにより金星の地表面地形も判ってきた。しかし、金星地表面の高温高圧環境のために、地表面から下の調査が難しい。また、金星の気象についてを解き明かすにはまだまだ情報が足りない。かつ、金星の大気上層部には自転の60倍もの速さで回転するスーパーローテーションが存在し、生成原理が未だに判明しない現象も存在している。

よって、金星の探査はまだやらなくてはならないことばかりなのである。しかし、地表面での長期観測は難しいため、まずは金星周回軌道上からの観測が主になるようである。そのことに関しては後の項目で話す。

II.2.3 金星の雲

探査機が金星大気中を降下する際に判ったことの中に、金星の雲の分布がある。探査の結果によると、金星大気の大部分はエアロゾルによって占められている。分布範囲は主に高度30~90 kmに渡る60kmもの高さである。このエアロゾルでできた金星の雲は均一に分布しているわけではない。光学濃度や粒子の性質が高度で区切られた特定の領域ごとに異なっている。

Venera-9 と Venera-10 が降下する際の測定結果から、最も濃度が集中している主雲は70~48 kmの範囲であることが判った。そして、この主雲は3つの層(Layer I, Layer II, Layer III)に分類することができる。また、これらの層の間には性質がはっきりしない転換層(Layer I', Layer II')も存在する(表1 参照)。そして、この主雲の上下にはもやが存在する範囲がある。下方のもやの下はほぼ完全にCO₂によって構成された大気である。しかし、この範囲にも時折極わずかなエアロゾルが存在する薄い層やもやが発生するだろうが、ここで言う雲の下のもやとは違った現象である。

表 3: 金星を覆う雲の構造 (Venera-9, 10 の測定より)

領域	高度範囲Z,km	温度範囲 T,K	圧力範囲 P,atm
雲上のもや (Above-cloud haze)	90-68	172-238	3.6×10^{-4} - 3.1×10^{-2}
上部層 ▪ (Layer I)	68-58	235-276	0.06-0.31
転換層 ▪ '(Layer I')	58-57	276-281	0.31-0.36
中間層 ▪ (Layer II)	57-52	281-330	0.36-0.76
転換層 ▪ '(Layer II')	52-51	330-340	0.76-0.92
下部層 ▪ (Layer III)	51-48	340-365	0.92-1.3
雲下のもや (Subcloud haze)	48-32	365-475	1.3-7.6

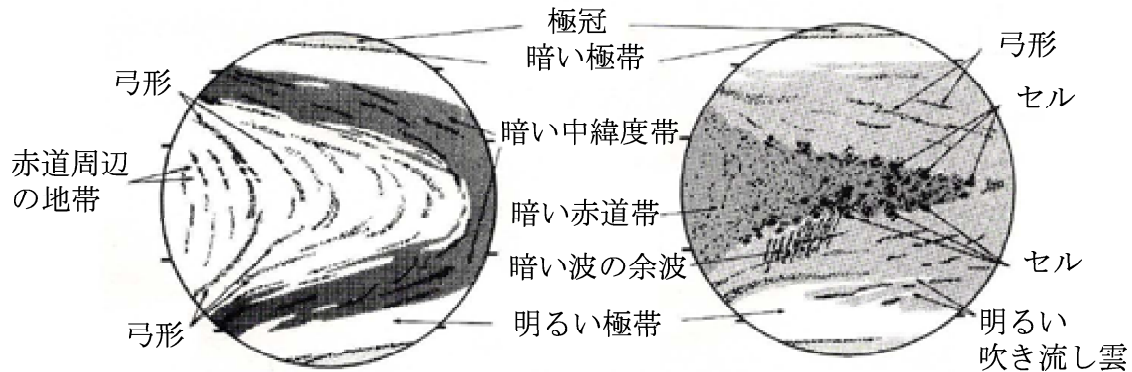


図 12: 金星に見られる雲の種類 (Rossow et al.,1980)

雲の上方のもや

雲の上方のもやは高度約 70~90 km に存在している。雲の上のもやは、地球上からの可視スペクトル観測では主雲の上部境界ともやの間には安定な印象を与えるが、Pioneer-Venus 探査機の観測からエアロゾルの濃度は空間的及び時間的に変化していることが判明した。

まず、このもやの分布であるが、常に高度 70 km~ であるわけではない。下境界は 65~70 km の間で変動している。そして、夜側ではこの境界ははっきりと定義できるのだが、日中には発散してしまう。かつ、下境界は高緯度に行くに従って高度が低くなり、均一でもなくなる。どれだけ高度が下がるかという点、高緯度の極地の渦の中においては赤道よりも 5-7 km も低くなる。

次に、もやの形なのだが、これは紫外線で見えた模様の形とほとんど一致する。よって、探査機の紫外線カメラで撮られた画像から形は判断できる。金星の紫外線画像の模様で有名なのは全体的に見たときに Y の字を横に寝かしたように見える模様である。この模様は 4-5 日ごとに現れている。しかし時々、この模様は数周期間に渡って全く現れないことがある。

もっと細かい形を見てみると、帯状のもの、螺旋状のもの、流れるような形のもの、蜂の巣状のものが存在している。これらの形状は空間分解能が良くなければ判断できないため、探査機の紫外線画像から明らかとなった。そして、これらの形状が存在する範囲として、3つの範囲に分類できる。1つ目に、緯度が 45-50° よりも極側の領域である。この領域では極冠が相当な明るさを見せている。しかし、明るいからと言って温度が高いわけではない。かつ、極冠は常に明るいわけではなく、時には暗くなることもある。2つ目に、緯度が 20~45-50° の中緯度の領域である。この領域は常に極域よりも暗く、アーチ形の波が存在している。このアーチ形に波は赤道域の太陽直下に向かって集中している。そして3つ目に帯状の赤道域である。

さて、紫外線画像で金星雲の上の模様が見えるということは、その領域に紫外線吸収物質が存在することを示している。経験的なデータに基づいて、3200 Å より短いスペクトルでの最初の吸収物質は SO₂ である。その上、3200 Å 以上の範囲で少なくとももう一つ

の吸収物質の存在を考慮しなくてはならない。それはまだはっきりとはしていないが、非晶質硫黄のとても細かい粒子であると考えられている。

主雲の雲棚

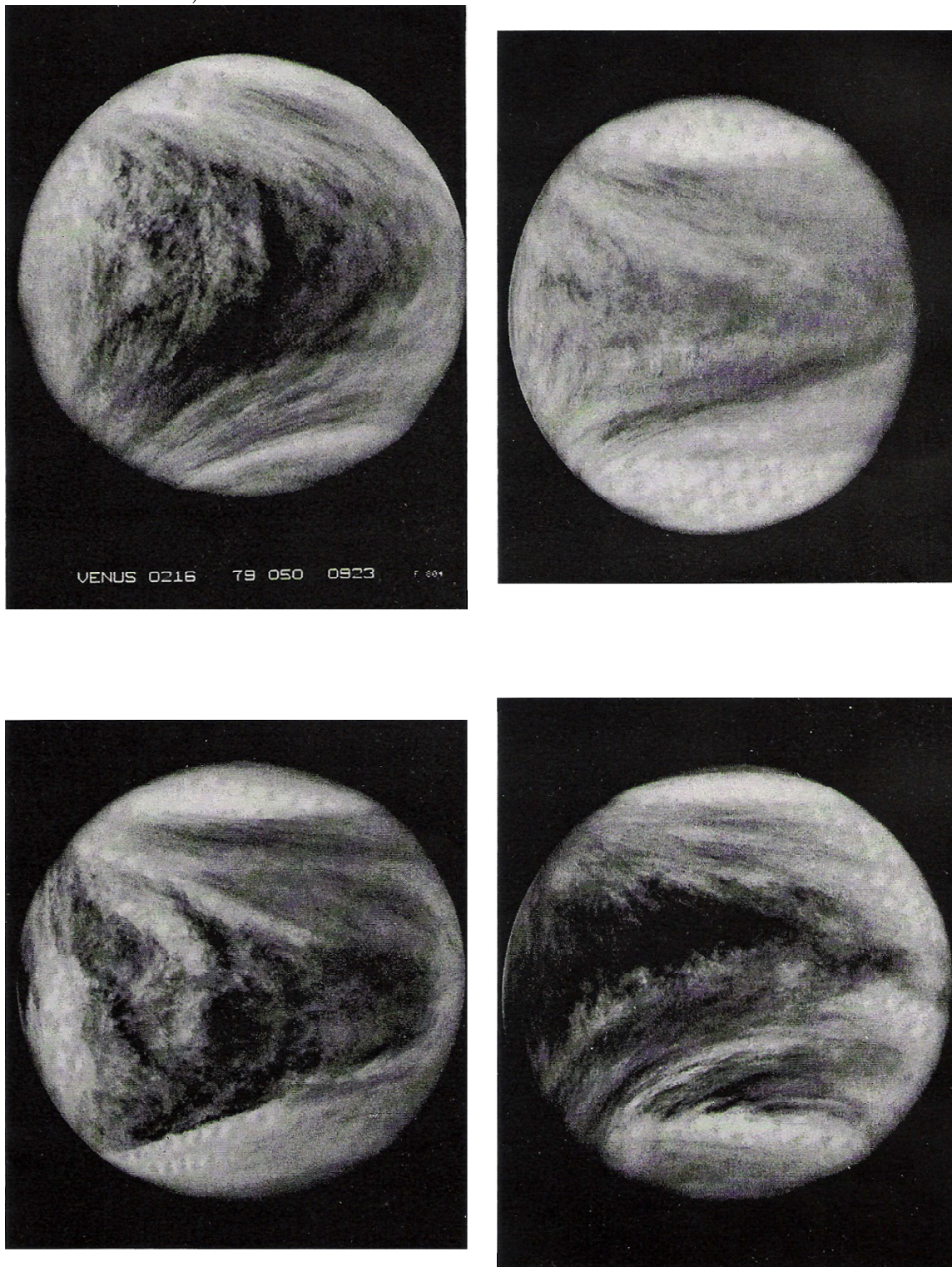
先に記述したように主雲は3つの層と各層の間の転換層に分類される。これは Venera の観測によって求められた分布だが、Pioneer-Venus の観測でもよく似た仕組みが観測されている。過去の探査の結果によると、Layer III の下の境界は高度 47-49 km の範囲で場所によって異なっていることが判っている。そして、極の渦の範囲内では 40 km の高度でも観測されている。

さて、各層での粒子サイズの分布を見てみよう。Venera-9 と Venera-10 の観測結果から Layer I では有効半径 $1 \mu\text{m}$ の単一粒子、Layer II では有効半径 $0.3 \mu\text{m}$ と $2-3 \mu\text{m}$ の少なくとも2種類の粒子、そして Layer III では有効半径 $1-1.5 \mu\text{m}$ の単一粒子から構成されていることが判っている。Layer II での2種類の粒子はそれぞれ mode1(有効半径 $0.3 \mu\text{m}$)、mode2(有効半径 $2-3 \mu\text{m}$) と呼ばれ、mode2 は mode1 を核にして成長することで形成されると思われる。

雲の下方のもや

下方のもやは 48~32km に存在している。もやは雲の下境界から直ちに発生している。かつ、極めて希薄なもやである。もやの下境界の位置は時間的、空間的に変化していることが Venera の観測から判っている。光散乱の性質や分光測光結果より、有効半径が約 $1.5 \mu\text{m}$ の微小粒子で形成されているだろうと推測されている。

図 13: Pioneer-Venus 探査機の撮影した紫外線画像. 様々な模様が観測された. (the planet VENUS より引用)



II.2.4 これからの金星探査

これからの金星探査は今のところ 2 機が打ち上げられる予定である。いずれも金星の周回軌道上からの観測で、複数の波長の赤外線カメラ、紫外線カメラが搭載される予定である。

1. Venus Express

ヨーロッパ宇宙機関が 2005 年 11 月に打ち上げる予定の探査機。金星周回軌道上からのリモートセンシングで、主に大気組成の観測・電離大気の調査を目的としている。

2. Planet-C

日本による金星探査計画。2008 年打ち上げ予定で 2009 年から観測に入る。主な観測目的は金星大気の状態の解明。



図 14: Venus Express イメージ画像 (ESA)



図 15: Planet-C イメージ画像 (JAXA)

III 金星大気の観測

III.1 観測システム

III.1.1 観測に使った使用機材

- 25cm 反射望遠鏡 (名寄市立木原天文台 所有)
 - 口径 : 250mm
 - 焦点距離 : 1500mm
 - F 値 : F6
 - ヨシカワ光器製
 - 架台 : ペンタックスMS-5 赤道儀

- 冷却 CCD カメラ²
 - ビットラン BJ-42L (モノクロ)
 - CCD チップ : Kodak KAI-4020M
 - ピクセル数 : 2024 × 2024
 - ピクセルサイズ : 7.4 μ m × 7.4 μ m
 - CCD サイズ : 15.1mm × 15.1mm

- 紫外線フィルター
 - 透過波長 : 380nm³

- PC
 - SHARP PC-MC1-3CC
 - CPU : Athlon(tm) XP-M 1800+
 - メモリ : 256 MB
 - USB ポートからカメラに接続

²CCD チップを冷却することにより, 熱で生じるノイズを削減することのできるカメラ. 空冷, 水冷等冷やし方には様々な方法があるが, ここでは空冷を使用した.

³SO₂ の紫外線吸収帯の 1 つである 365 nm に近く, 入手し易いフィルタとしてこの波長のフィルタを使用.

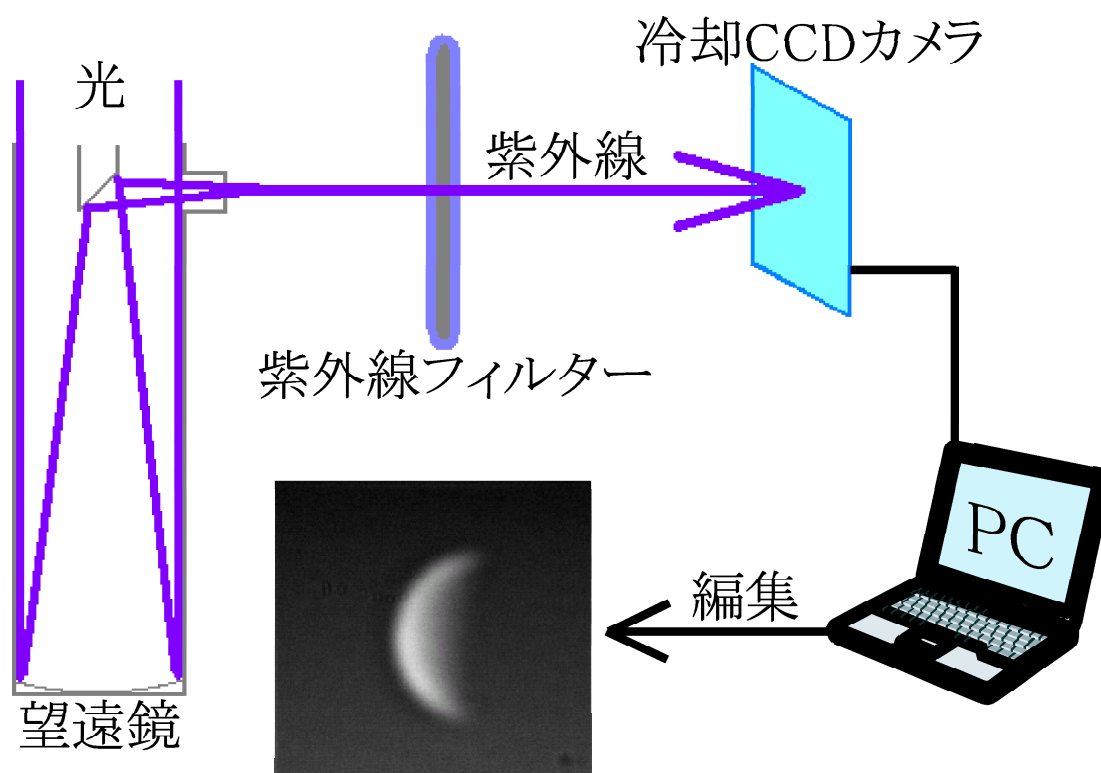


図 16: 観測方法

III.1.2 観測方法

まずは観測システムのセッティングである。紫外線領域の観測が目的であるため、紫外線フィルターを使用する。そして、金星を拡大して撮影するため、望遠鏡を使用する。望遠鏡のレンズにおける紫外線の吸収を考慮し、使用する望遠鏡はレンズに光をできるだけ通さない反射望遠鏡を使用する。望遠鏡によって収束された光は紫外線フィルターを通すことで紫外線のみ波長の光となる。その光を冷却 CCD カメラで撮影すればよい。しかし、冷却 CCD カメラは可視光を撮影するために設計されているものが多いため、紫外線領域を撮影できるものを使用しなくてはならない。冷却 CCD カメラによって撮影された画像は通信ケーブルを使い、計算機に保存される。このとき、冷却 CCD カメラに付属の冷却 CCD カメラコントロールソフトを使用して、カメラの露出時間、イメージ調整等を行う。そして、自動撮影システムを使い、30~50 枚撮影するように設定する。

冷却 CCD カメラの冷却には簡単に冷却できる空冷を使用した。空冷では外気温より約 20℃冷やすことが可能である。

さて、セッティングができれば観測に入るわけだが、金星は夜中に見ることができない。なので、観測時間は主に日中となる。観測時間はシーイング⁴や大気透明度を考え、金星の高度が 30° 以上である時間をねらう。

⁴望遠鏡で見た星の像の見え具合。大気の屈折率のムラから生じている。

まず、金星を望遠鏡に導入しなくてはならないのだが、昼間の空から金星を探すのは難しい。そこで、金星の位置情報を調べてから金星を見つけることになる。金星はほぼ年中-4等級以上であるため、肉眼でも発見できる。発見した金星を望遠鏡に導入する。

導入したら紫外線フィルター・CCDカメラをセットし、ピントを合わせる。ピントはPC内での画面に写った映像で判断する。

あとはPC内での作業となる。冷却CCDカメラのコントロールソフトを使用して気象条件や透明度等を考慮し、0.5~1.0秒程に露出時間を設定する(細かい調整は撮ってみてからである)。2×2ビニング⁵で30~50枚連続撮影する。連続撮影する際にはPCのスペックで撮影間隔が左右されてしまうため、PCはできるだけマシンパワーが大きいものを使った。

⁵2×2ビニング：近傍4ピクセルのピクセル値を加えて1つのピクセルとして画像を形成すること。面積は1/4になるが、感度は良くなる。

III.2 観測結果

- 1 回目 (図 17)

- 日時：2004 年 8 月 8 日
- 天候：晴れのち曇り
- 観測開始時間：8 時
- 観測回数：7 回
- 観測終了時間：13 時
- 備考：観測終了は曇ったため

観測の結果は、金星の形、濃淡は撮れたのだが、模様ははっきりしなかった。

- 2 回目 (図 18, 図 19)

- 日時：2004 年 11 月 18 日
- 天候：晴れ時々曇り
- 観測開始時間：5 時
- 観測回数：17 回
- 観測終了時間：12 時 20 分
- 備考：ピントをずらして観測してみる。

金星の視直径が小さいため、写る像も小さくなってしまう。かつ、天候も安定していなかったため、はっきりした画像は撮影できなかった。

- 3 回目 (図 20)

- 日時：2004 年 11 月 19 日
- 天候：曇り時々晴れ
- 観測開始時間：10 時
- 観測回数：5 回
- 観測終了時間：10 時 40 分
- 備考：

晴れ間から何とか撮影撮影できた。2 回目と同様に天候が安定しなく、視直径も小さかったため、はっきり写らなかった。

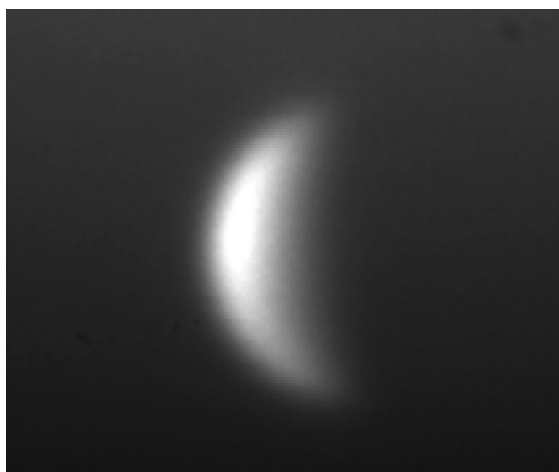


図 17: 2004/08/08 08:45 ~ 08:47

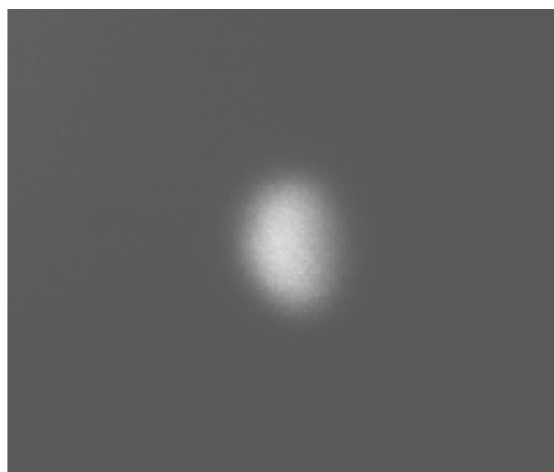


図 18: 2004/11/18 10:11 ~ 10:13

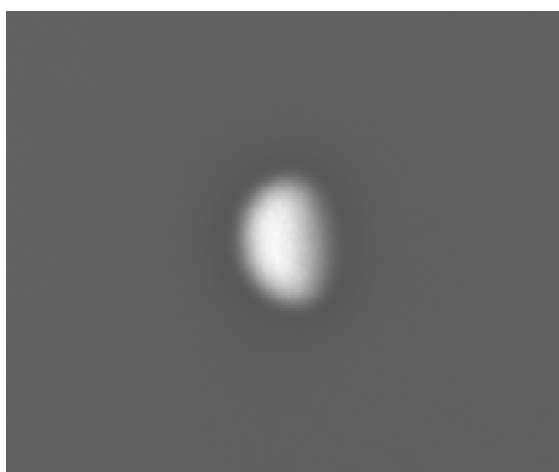


図 19: 2004/11/18 12:17 ~ 12:18



図 20: 2004/11/19 10:26 ~ 10:38

IV データ解析

IV.1 画像解析手法

これから書く画像処理は、撮影された画像では雲の模様がはっきりしないため、目で判断できるレベルまで白色濃度を増大させる目的でされた処理である。

今回の画像処理では、コンポジット⁶、階調レベルの調整、コントラストの調整を行った。順序は

1. StellaImage⁷により Fits⁸形式で保存されたデータを開き、データの選出をする。使えないデータとして
 - 曇ったためによる金星の写っていない画像
 - 風や地面の揺れによるブレ等が挙げられる。
2. 10枚程度の画像⁹をコンポジットする。コンポジットには加算平均¹⁰を使う。コンポジット時のズレに注意する。
3. バックグラウンドを取り除き、階調レベル、コントラストを模様の見易いレベルに調整する。

と、とりあえず見易い画像にすることはできるのだが、今のところ模様の有無を調べるのには目で見て判断するしかない。この作業を確実にを行うには計算機の力を使いたいが、それはこれからの課題となる。

⁶合成

⁷Copyright ©AstroArts Inc.

⁸Flexible Image Transport System, NASAによって開発された。

⁹金星上層大気は高速で移動しているため、できるだけ狭い時間で選ぶ。

¹⁰明るさを数値化した値を足し合わせて平均を出す。

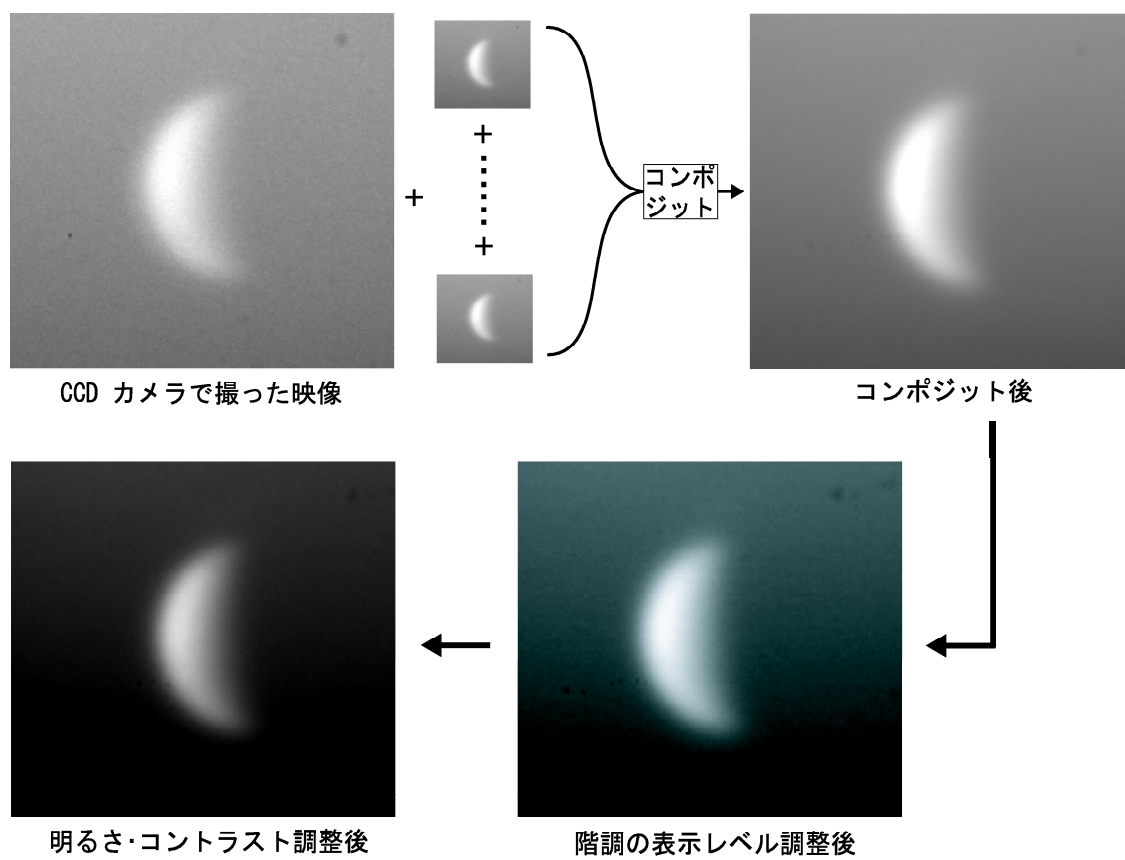


図 21: 画像処理過程と画像

V 議論とまとめ

金星のスーパーローテーションのメカニズムについて考えた Gierasch (1975) の研究では、子午面循環による運動量の輸送という観点から解き明かしている。現在の観測データからその理論が正しいかどうかは判らない。その理論が正しいか、もしくは原理はもっと別なものであるかは、これからの観測によって明らかになるであろう。

今後の観測で現在準備が進行しているのが、Venus Express (ヨーロッパ宇宙機関) と Planet-C (JAXA) である。共に金星の周回軌道上からの観測となる。これら 2 つの探査機によって多くの金星大気の手がかりが得られるであろう。しかし、探査機のみならず、地球上からも金星の観測は可能である。ならば地球上からも観測はできるはずである。

ところが、地球上からの観測には様々なものが障害となり、観測は難しくなる。最も障害となるのはオゾン層である。オゾン層は地球上の生物にとってなくてはならないものであるが、惑星の紫外線観測にとっては大きな障害となる。しかしすべての紫外線がオゾン層で吸収されるのではなく、オゾン層で吸収されきらなかった紫外線は地表面まで到達している。この紫外線を観測すればよい。この微量な紫外線を観測するためには、望遠鏡による集光、そして感度の良い観測機器を使用しなくてはならない。

機器は揃った次に問題になるのが、天候である。観測条件(シーイング、大気透明度)が悪くなければ、感光能率が悪い・像が歪む・ぼけてしまう等が起こり、しっかりしたデータが取れない。空気が薄くなる山の上で観測するのがベストなのだが、ハワイのマウナケア山のような天文台が近くにない。ならば平地で条件が良い場所からならできないだろうか？



そこで、北海道名寄市での観測が始まった。名寄市は周囲に大都市がないため空気の透明度がよく、晴れる確率が高く、かつ天文台があるためである。そこで観測を始めたのだが、一朝一夕には良いデータが取れなかった。まず、1回目の観測では大気の状態は数日間の中では良い方であったのだが、夏は気温が高いため大気が揺らぎ易い季節だったため、模様まではっきりと撮像するまでには至らなかった。2回目、3回目は季節は良かったのだが、天候、そして金星の視直径がすでに最大時の1/4位になってしまっていたこともあってうまく撮影できなかった。よって、金星の紫外線

写真は金星の視直径が大きく、かつ季節は夏は避けるべきであろうことが判明した。ただし視直径が大きい時期は輝面率が小さくなり、模様は写せなくなるので、適当な時期(輝面率が30%以上ある時)を選ばなくてはならない。

撮影された画像の全体を見ると、所々にごみが写っている(図 22)。おそらくレンズやフィルターに付いた埃なのであろうが、その埃と金星の画像が重なってしまったらそのデータは使えなくなってしまう。さらに、画像に大量のノイズが入ってしまうことがある。このノイズの原因は、冷却 CCD カメラに太陽光が当たることによって冷却機能がしっかり働いていなかったことによるものであるということは観測中に判明し、直接太陽光が当

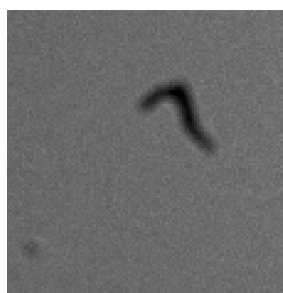


図 22: 画像に写った埃

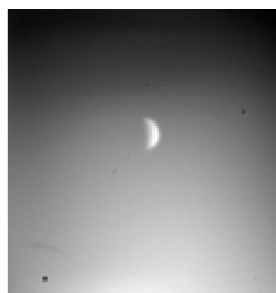


図 23: 主鏡に入った光

たらないようにしていたのだが、反射光も考慮すべきであると思われる。主鏡に太陽光が入ってしまうことも大問題である(図 23)。今までの観測では太陽光が当たらないように監視していたが、次の接近時までには冷却 CCD カメラの周りを遮光するなどの機材の見直しもしておくべきであろう。

今までは、観測で得たデータを天文用のソフトを使って手動で編集していた。しかし、画像の明暗のレベルを調整し、目で判断していたため、細かな大気の変動を調べるにはこの方法では限界がある。そのためにはバックグラウンドを引いて周囲との光の強度の変化量をデータとして出せば、変化の様子がはっきりわかるであろうと考えている。これは今後の課題である。

とりあえず、金星の観測時期は太陽離角に左右される¹¹ため、次の観測時期は今年の夏以降となる。それまでに観測システムの向上、編集方法の確立をしておきたいところである。

¹¹直接太陽光を覗かないようにするため。

謝辞

本論文を作成するにあたり，多くの方のお世話になりました。

まず，渡部 重十 教授には大変お世話になりました。教授には様々な指導，助言をしていただきました。そして，名寄市立木原天文台の 佐野 康男 様には機材の使い方，惑星観測の方法等様々なことを教えていただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

また，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きました。合わせてお礼申し上げます。

参考文献

- Gierasch, P.J., 1975: Meridional circulation and maintenance of the Venus atmospheric rotation, *J. Atmos. Sci.*, 32, 1038-1044
- 国立天文台, 2002: 「理科年表 平成 15 年」, 丸善株式会社, 942pp.
- 天文年鑑編集委員会, 2003: 「天文年鑑 2004 年版」, 誠文堂新光社, 335pp.
- 福島 英雄, 1996: 「天文アマチュアのための冷却 CCD 入門」, 誠文堂新光社, 192pp.
- 松田 佳久, 2000: 「惑星気象学」, 東京大学出版会, 204pp.
- 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 study of dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 245-254
- Mikhail Ya. Marov and David H. Grinspoon, 1998: *The Planet Venus*, Yale University Press, 464pp.
- Rossow, W.B., A.D. Del Genio, S.S. Limaye, L.D. Travis, and P.H. Stone, 1980: Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images, *J. Geophys. Res.*, 85, 8107-8128