

金星現象論: 金星の温度場

地球流体電脳倶楽部

1996年7月22日

目次

1	金星大気の温度の観測方法	2
1.1	直接 (in situ) 観測	2
1.2	リモートセンシング	2
2	温度の鉛直構造	3
2.1	表面から高度 65km まで	3
2.2	60km より上	5
3	鉛直温度勾配	9
4	赤道面・子午面構造	11
4.1	赤道面構造	11
4.2	子午面構造	12
5	まとめ	14
6	参考文献	14

Abstract

金星の温度場について

パイオニア・ヴィーナスのデータを用いて, 金星の鉛直温度構造について述べる.

1 金星大気の温度の観測方法

1.1 直接 (in situ) 観測

- 高度 65km より上
空気抵抗から求める. 方法は以下の通り.

加速度 (減速度) を測定することにより ρ がわかり, 静水圧平衡を仮定することにより圧力が求まる. このようにして求めた ρ と p , 質量分析器で得られた分子量を状態方程式に代入すると温度がわかる.

- 高度 65 km より下
探査機に積んだ温度センサーによって気温を観測する.

1.2 リモートセンシング

- マイクロ波 掩蔽
探査船から電波を発する. その電波が金星大気を横切って地球に達するときの電波の変化は金星大気の密度と関係があるので, その関係を用いて密度 ρ を求める. ρ が求まれば, あとの計算は上の空気抵抗による測定と同じ.
- 赤外放射観測
軌道船や地球から金星の赤外放射を測る. 直接観測が一時一点観測になるのに対し, この方法は広い範囲を長期間観測することができる.

2 温度の鉛直構造

金星大気の温度の鉛直構造のデータをもとにその特徴を述べる。データはパイオニア・ヴィーナスの着陸船によるものである。

2.1 表面から高度 65km まで

図 1 はパイオニア・ヴィーナスのデータより得られた、表面から高度 65km までの温度の鉛直構造である。四つの着陸船は昼側に着陸したものふたつ (SOUNDER, DAY), 夜側に降りたものがふたつ (NIGHT, NOTRTH) である。緯度に関しては, SOUNDER が赤道近く, DAY と NIGHT が中緯度, NORTH が高緯度である (図 2)。

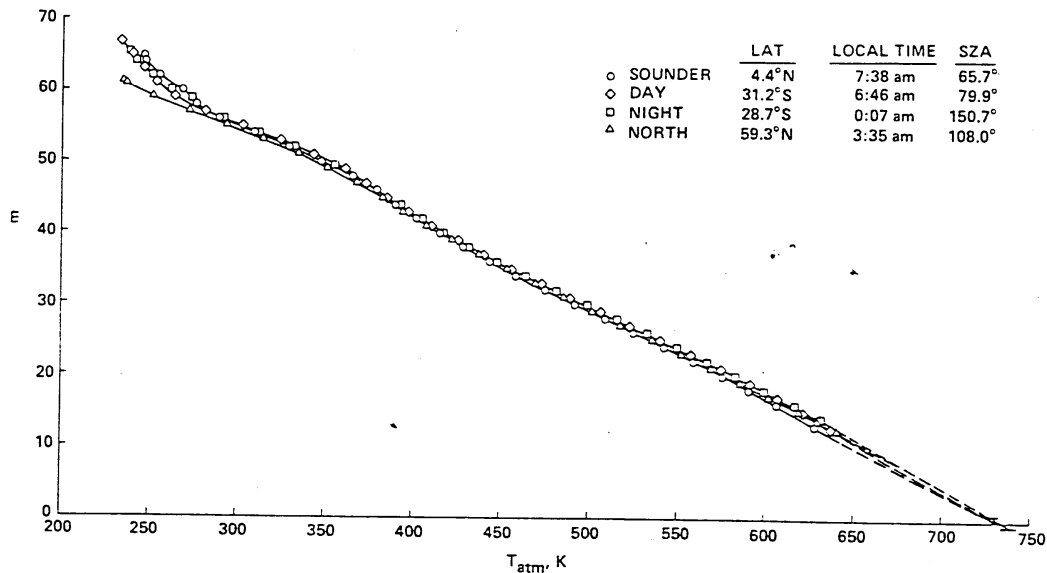


Fig. 3. Temperatures as a function of altitude from the four Pioneer Venus probes (Large or Sounder, Day, Night, and North) widely separated on Venus.

図 1. 金星大気温度の鉛直構造。データは大気中を降下中に温度センサーによって測られた温度 (Seiff, 1983)。

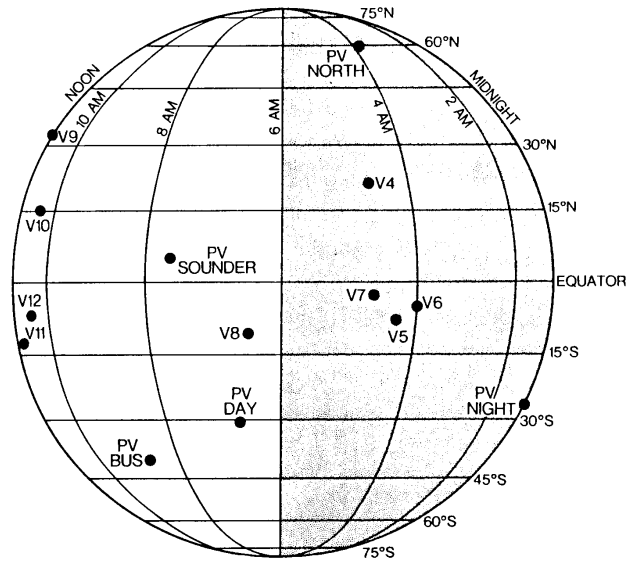


図 2. 探査船の着陸位置. 経度は, 太陽が南中している子午線を 12 a.m. として, 西向きに 24 時間で一周するようにとってある. 'PV' がパイオニア・ヴィーナスを表す (Shubert, 1983).

図 3 は 赤道近くの SOUNDER 着陸船の温度記録と他の着陸船の温度記録との差を見たものである.

- 表面から 50 km くらいまででは, 緯度・昼夜が違ってても, 気温の差は高々 10 K 程度である¹.

¹地球では, 北半球の冬に南北温度差が大きくなり, 赤道と北極の温度差は 40 K くらいになる.

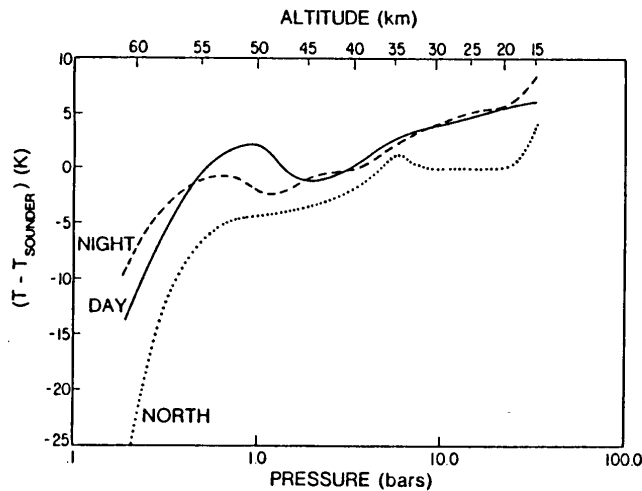


Fig. 11. Probe thermal contrasts as functions of pressure. The approximate altitude scale is for the sounder probe.

図 3. 着陸船 SOUNDER の気温データと着陸船の気温データの差の高度分布. 高度 50km 以上で各探査船のデータの差が大きくなるのがわかる (Schubert et al., 1980).

2.2 60km より上

図 4 はパイオニア・ヴィーナス 着陸船の空気抵抗測定の結果から得られた高度 60 km 以上の温度である. 高度 100 km より上と下で, 鉛直温度分布の傾向が異なる. 図 5 は図 1 と図 4 をつなげたものである.

- 60km から 100km

図 5 では, 金星表面から 高度 60km くらいまでほぼ一定の割合で温度が減少しているが, 60km 付近から温度変化が小さくなっている. また, この高度領域ではグラフが波打っているようにも見える¹.

- 100 km より上

図 4 または図 5 より, 高度 100km 以上で顕著な傾向は昼夜差である. その差は上に行くほど大きい. しかし 地球の熱圏に比べると, 温度が低い(図 6).

¹地球の偏見によれば, これは内部重力波ということになる (?)

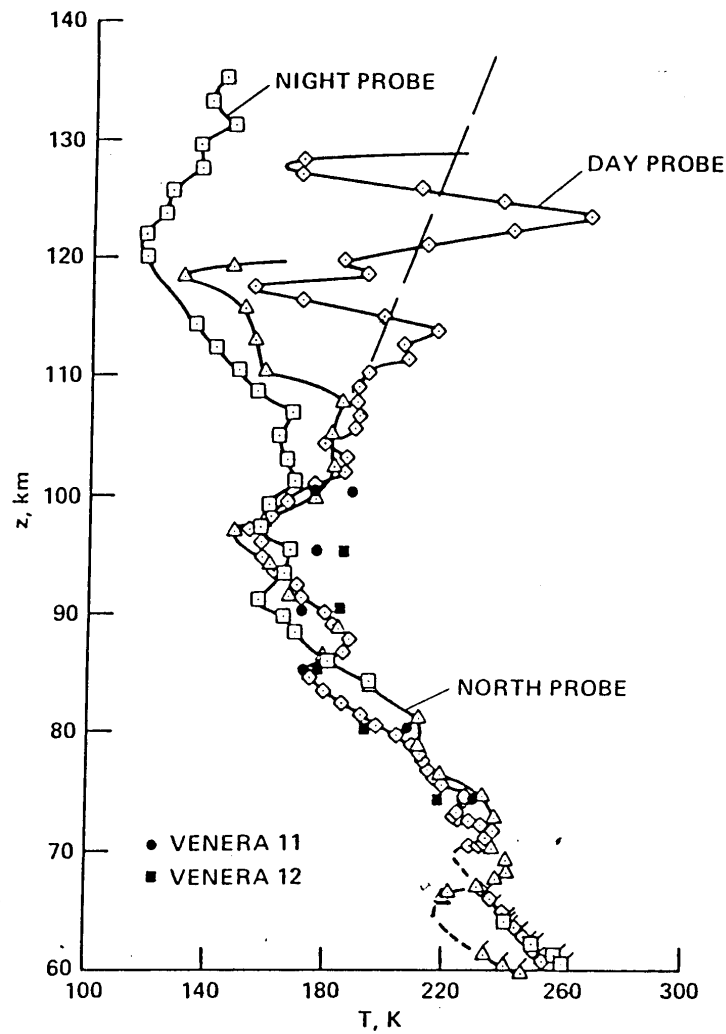


Fig. 16. Temperatures above the clouds derived from measurements of deceleration during entry of the three Pioneer small probes and Veneras 11 and 12. Flagged symbols show temperatures directly sensed during descent.

図 4. 空気抵抗観測から求められた高度 60km 以上の温度. データはパイオニア・ヴィーナスの三つの探査船とヴェネラ 11,12 号の一部である (Seiff, 1983).

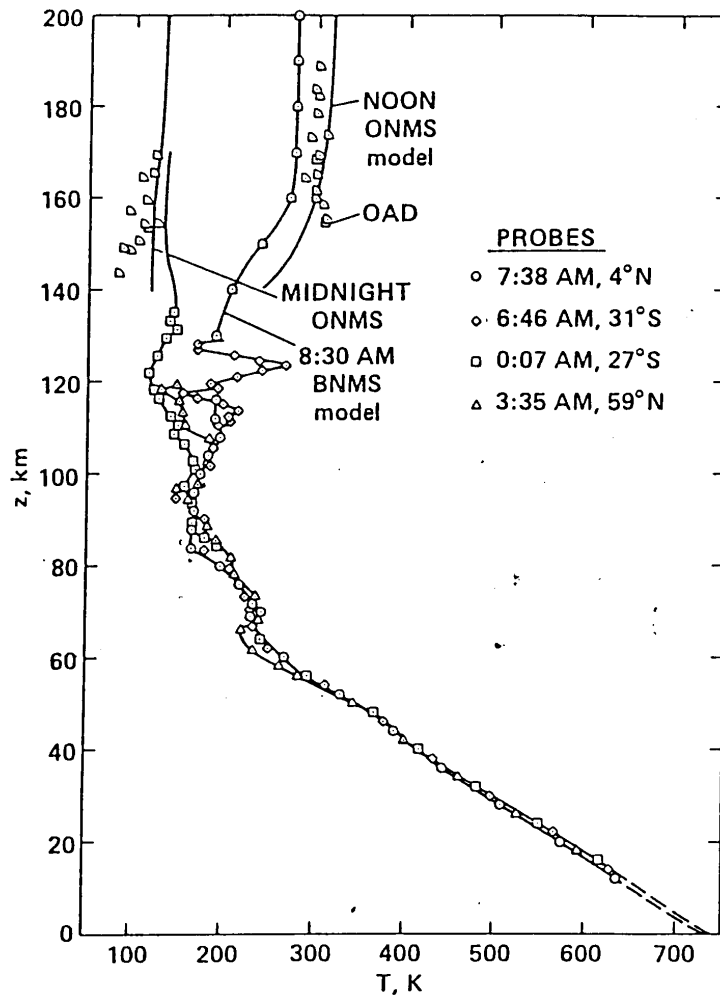


Fig. 24. Temperature profiles of the Venus atmosphere from the surface to 200 km, as indicated by four Pioneer Venus experiments. The different character of the temperature variation with altitude in the three altitude regimes is evident: (1) below the cloud tops; (2) from 60 to 100 km; (3) above 100 km.

図 5. 金星表面から 高度 200km までの温度.ONMS は PV orbiter neutral mass spectrometer, BNMS は PV bus neutral mass spectrometer, OAD は Orbiter atmospheric drag experiment を表す (Seiff, 1983).

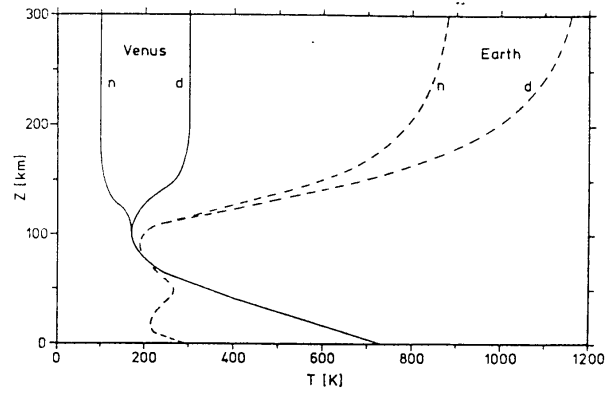


Fig. 21. Comparison of the vertical thermal structures of the atmospheres of Venus and earth.

図 6. 地球と金星の鉛直温度構造. 熱圏 (100km より上) の温度は地球の方が高い (Schubert et al., 1980).

3 鉛直温度勾配

図7は $S = dT/dz - \Gamma$ の鉛直分布を示したものである。ただし、

$$\Gamma = -\alpha T \frac{g}{C_p}$$

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$$

であり、 $-\Gamma$ は断熱減率と呼ばれる。ここで S の符号について述べる。値 S が正の高度では、空気塊は断熱減率で温度を下げながら上昇した結果、上った先の同じ高さの周りの空気より冷たく重いので、空気塊は下に戻ろうとする。 $S > 0$ の高度の成層状態は安定である。 $S = 0$ の高度は上昇した空気塊と周りの空気が同じ温度になるので、空気塊は上にも下にも力を受けない。 $S = 0$ の高度の成層状態は中立である。 $S < 0$ の高度は上昇した空気塊が周りの空気より暖かく軽いので、空気塊は上に力を受ける。 $S < 0$ の高度の成層状態は不安定である。このような成層状態の安定性と、対流運動の関係について次のような解釈が存在する。不安定な成層状態では、一度上下方向に動き始めた空気は浮力により加速して対流運動を生じ、加速は摩擦力と浮力が釣りあうまで行われる。対流が起こると大気は上下方向にかき混ぜられ、温度の鉛直分布は断熱減率となり、各高度の成層状態は中立となる。したがって、温度の鉛直分布を見たとき、成層状態が中立な高度では対流が存在する可能性がある。このような解釈に基づいて図7を見てみる。

- 成層状態が安定な領域が 40km 付近と 60km より上にある。
- 成層状態が中立な領域が 20km と 55km 付近にある。この領域では対流の起こっている可能性がある。

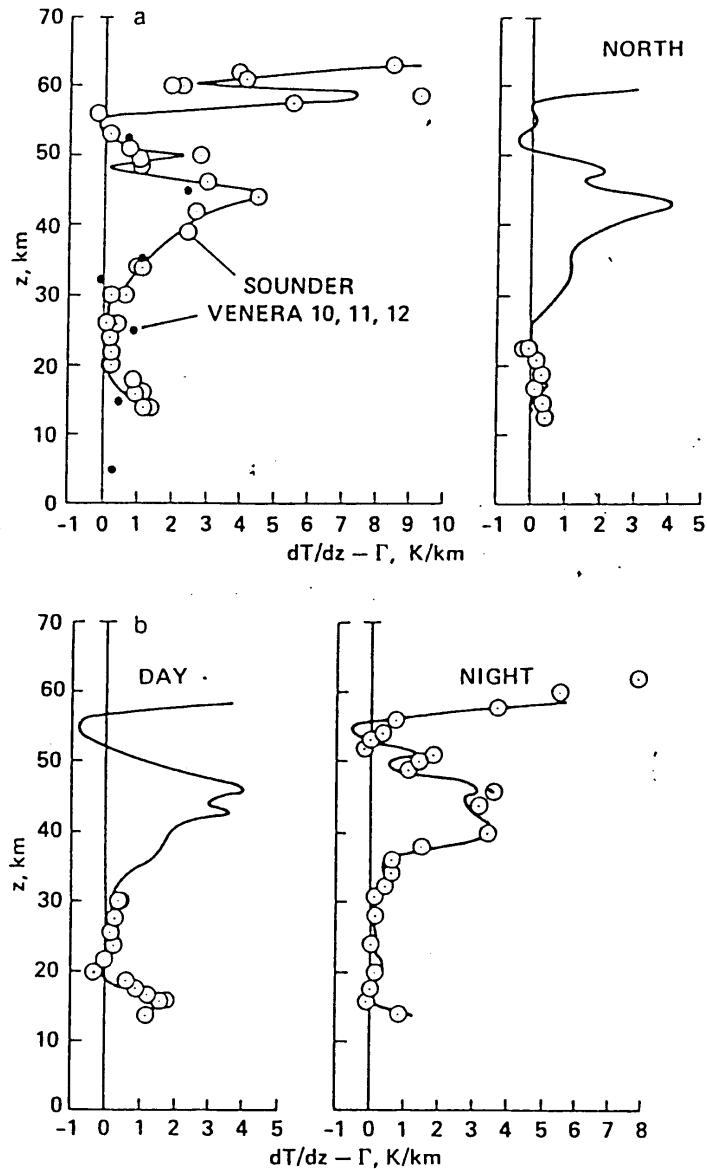


Fig. 13. Stability of the Venus atmosphere as a function of altitude determined from Pioneer Venus probe data at four widely separated locations: Large (Sounder) probe; North probe; Day probe; Night probe. Venera 10, 11, and 12 data from Table II show substantial agreement with the Large probe data in the graph at the top left.

図 7. $dT/dz - \Gamma$. $dT/dz - \Gamma > 0$ は安定, $= 0$ は中立な成層状態の高度を表す. ただし $-\Gamma$ は断熱減率. 対流が起こっているとすれば, $dT/dz - \Gamma = 0$ の高度である (Seiff, 1983).

4 赤道面・子午面構造

4.1 赤道面構造

図 8 は赤道面に表した平均温度構造である. データはパイオニア・ヴィーナスの軌道船による. 横軸の 0 が太陽が南中位置にある経度である.

- 昼夜の差は高度が高いところに現れている.

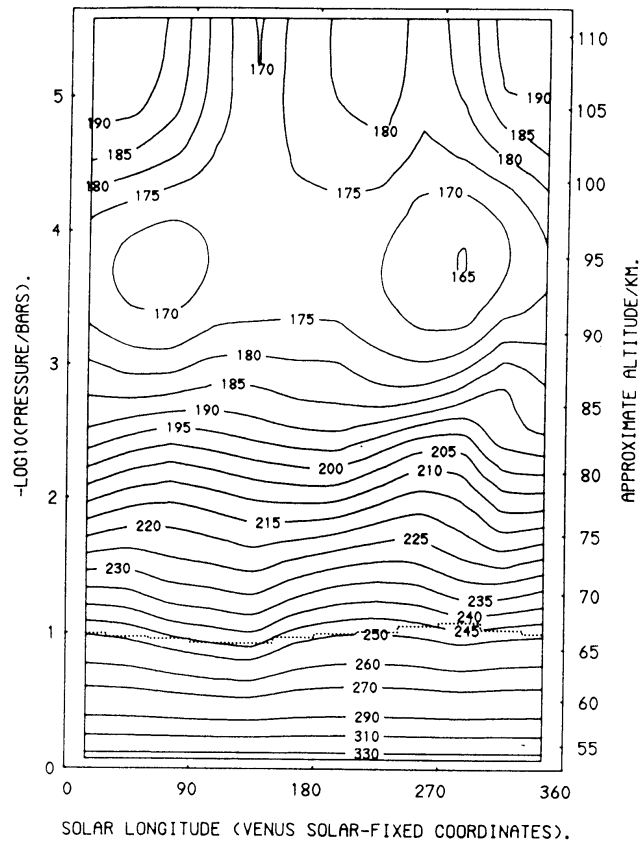


Fig. 4. Equatorial cross section of the mean thermal structure in solar-fixed coordinates, from Pioneer Venus data. 0° longitude is local noon (Schofield and Taylor 1982b).

図 8. 金星の平均温度断面図 (赤道面). 横軸経度, 縦軸高度. 横軸の 0 が太陽が南中位置にある経度である (Taylor et al., 1983).

4.2 子午面構造

図9は子午面に表した平均温度構造である. データはパイオニア・ヴィーナスの軌道船による.

- 高緯度で等温面が大きく傾いている.

参考までに地球の子午面断面図をのせておく (図10).

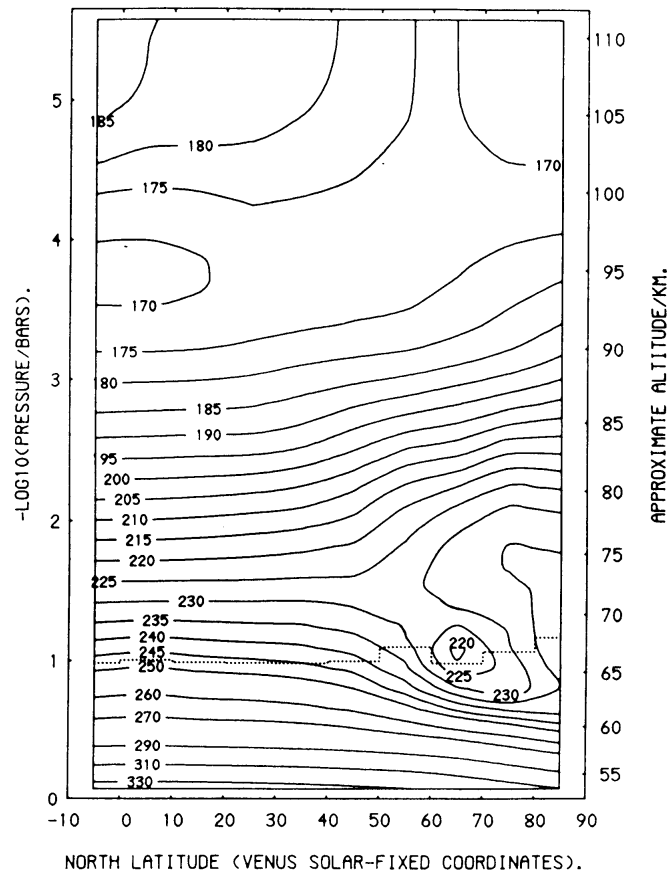


Fig. 7. Meridional cross section of the mean thermal structure in solar-fixed coordinates, from Pioneer Venus data (Schofield et al. 1982).

図9. 金星の平均温度断面図(子午面). 横軸緯度, 縦軸高度 (Taylor et al., 1983).

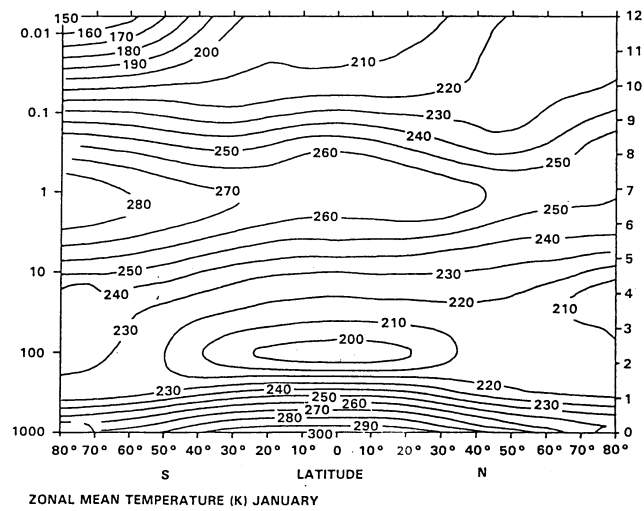


図 10. 地球の帯状平均温度構造 (1 月) (Barnett and Corney, 1985).

5 まとめ

以上あげた金星の温度構造の特徴について, 主なものを並べてみる.

- 表面から高度 50km までは, 気温は昼夜・緯度によらないといわれている.
- 高度 100 km より上では, 昼夜差が卓越している.
- 安定性はどの探査器のデータも共通して, 25km 及び 55km 付近に中立領域がある.
- 極域では等温面は水平でない.

6 参考文献

Barnett, J. J. and M. Corney, 1985: Middle atmosphere reference model driven from satellite data. *Handbook for MAP*, **16**, 47-85.

岸保勘三郎, 田中正之, 時岡達志, 1982: 大気科学講座.4

Morotz, V. I., 1981: The atmosphere of venus. *Space Sci.Rev.*, **29**, 3-127.

Schubert, G., et al., 1980: Structure and circulation of the venus atmosphere. *J.Geophys.Res.*, **85**, 8007-8025.

Schubert, G., 1983: General circulation and the dynamical state of the Venus atmosphere. "VENUS", The university of Arizona presss, 684-685.

Seiff, A., D. B. Kirk, R. E. Young, R. C. Blanchard, J. T. Findlay, G. M. Kelly, S. C. Sommer, 1980: Measurements of thermal structure and thermal contrasts in the atmosphere of venus and related dynamical observations: results from the four pioneer venus probes. *J.Geophys.Res.*, **85**, 7903-7933.

Seiff, A., 1983: Thermal structure of the atmosphere of venus. "VENUS", The university of Arizona presss, 215-279.

Taylor F. W., D. M. Hunten, 1983 The thermal balance of the middle and upper atmosphere of venus. "VENUS", The university of Arizona presss, 650-680.

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. 原作版は野村竜一による「金星現象論」(90/05/04) であり, 高木征弘によって地球流体電脳倶楽部版「金星現象

論」として書き直された (96/07/22). 構成とデバッグに協力してくれたセミナー参加者のすべてにも感謝しなければならない.