木星の大気構造
天地合同セミナー〜木星

東京大学理学部地球惑星物理学科
竹広真一

1993年 7月 22日

目 次

1 木星の基本的な数字と用語 2
  1.1 天文学的数字 2
  1.2 自転周期について 3
  1.3 模様の名称一覧 3

2 人工衛星時代以前の木星の地上観測 5

3 現代の観測〜ボイジャーのデータより 7
  3.1 帯状流分布 7
  3.2 帯状流のデータと可視画像 (シマシマ) との対応 8
  3.3 水平温度分布 8
  3.4 鉛直温度分布 9
  3.5 放射エネルギー収支 10

4 木星のシマシマのモデル 12
  4.1 回転球面上の強制 2 次元乱流 12
  4.2 回転球殻内の対流 14

5 参考文献 15

1 木星の基本的な数字と用語

1.1 天文学的数字

惑星本体・衛星

物理量	木星	地球の値との比	地球
質量 (10^{24} kg)	1.899×10^3	317.832	5.973
赤道半径 R_e (km)	7.1398×10^4	11.19	6378
極半径 R_p(km)	6.704×10^4	10.55	6357
扁平率 $(R_e - R_p)/R_p$	0.065	19	0.0034
密度 (g cm^{-3})	1.33	0.241	5.52
赤道重力加速度 (表面)(ms^{-2})	23.2	2.37	9.78
衛星の数	16 個以上	16 以上	1

(理科年表 1990 より)

軌道要素[1]・自転軸

物理量	木星	地球
昇交点黄経Ω(°)	100.449	354.865
軌道傾斜角 i(°)	1.303	0.001
軌道長半径 a(10^8 km)	7.783	1.496
離心率 e	0.0485	0.0167
近日点黄経ϖ(°)	14.311	102.904
元期平均近点離角 M_o(°)	91.589	76.273
赤道傾斜角 (°)	3.1	23.44

(理科年表 1990)

時間

物理量	木星	地球の値との比	地球
公転周期	4332.589 日 (11.862 年)	11.862	365.256 日
自転周期[3]	9h55m40.632s (0.414 日)	0.415	0.9973 日
自転角速度 ($\mathrm{rad} \cdot \mathrm{sec}^{-1}$)	1.758×10^{-4}	2.411	7.292×10^{-5}

(理科年表 1990, Moore and Hunt 1983 より)

太陽定数, アルベド

物理量	木星	地球の値との比	地球
太陽定数 (W m $^{-2}$)	50.7	0.037	1370
Albedo(Bond)[4]	0.73	2.43	0.30

(理科年表 1990 より)

1.2 自転周期について

木星の自転周期には伝統的に次の 3 通りある.

- System I
  赤道域南北約 9° の範囲の模様の運動から定める. 周期 9h50m30.003s
- System II
  System I 以外の高緯度の模様の運動から定める. 周期 9h55m40.632s.
- System III
  木星から放出される波長 7.5〜700m の電磁波 (decameter radiation) から定める. 周期 9h55m29.710s. この電磁波放射の周期は木星の磁場・木星内部核の回転周期と考えられている. 現在では System III の周期をもとに木星の経度が定義され, 大気運動などの基準として用いられている.

1.3 模様の名称一覧

木星の縞模様のうち暗いところを縞 (Belt), 明るいところを帯 (Zone) と呼ぶ. 赤道付近に対して高緯度のほうが縞模様が不明瞭になっている.

---

[4] 木星のアルベドは, 他の教科書によると約 0.3 程度である (Moore and Hunt 1983). 理科年表がどのように計算しているのかわからない. 後のセクション '木星の放射エネルギー収支' も参照せよ.

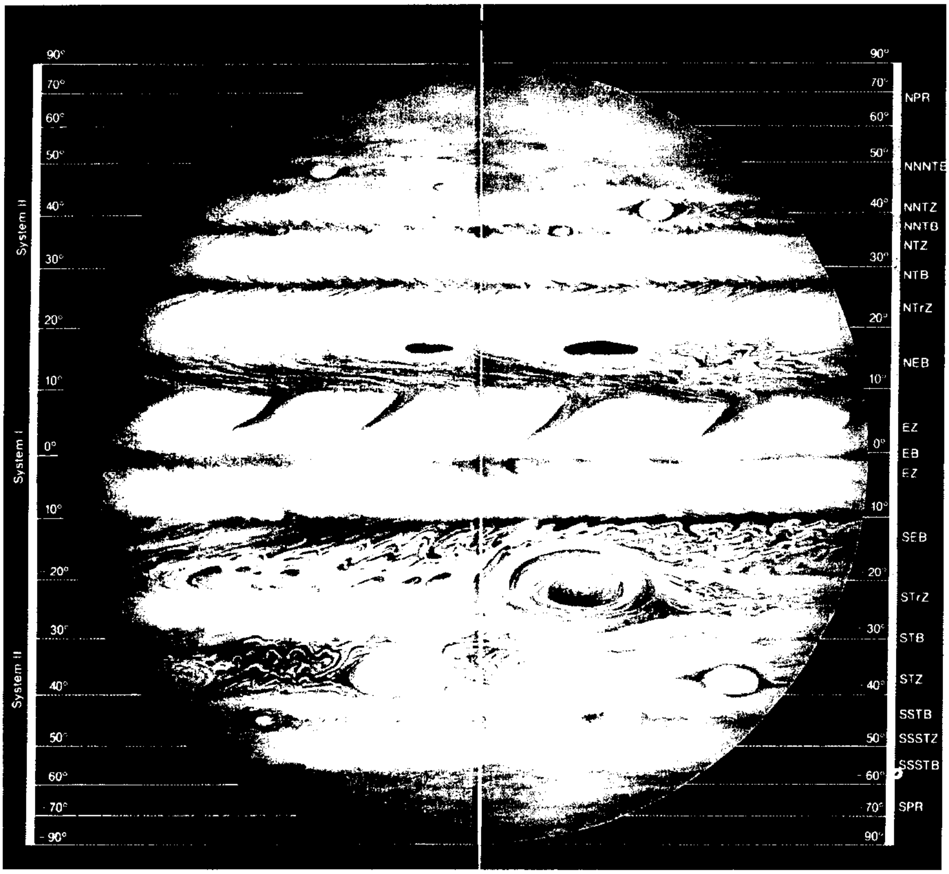

90°
70°
60°
50°
40°
30°
20°
10°
0°
10°
20°
30°
40°
50°
60°
70°
-90°
System II
System I
System II
NPR
NNNT
NNTZ
NNTB
NTZ
NTB
NTrZ
NEB
EZ
EB
EZ
SEB
STrZ
STB
STZ
SSTB
SSSTZ
SSSTB
SPR
90°
70°
60°
50°
40°
30°
20°
10°
0°
10°
20°
30°
40°
50°
-60°
70°
90°

図 1. 木星の地図 (Moore and Hunt 1983)

略記号	名称	位置	略記号	名称	位置
NPR	北極圏	90°N～55°N	SEB	南赤道縞	7°S～21°S
NNNTB	北北北温帯縞	45°N	STrZ	南熱帯	21°S～26°S
NNTZ	北北温帯	41°N	GRS	大赤班	22°S
NNTB	北北温帯縞	37°N	STB	南温帯縞	26°S～34°S
NTZ	北温帯	33°N	STZ	南温帯	38°S
NTB	北温帯縞	31°N～24°N	SSTB	南南温帯縞	44°S
NTrZ	北熱帯	24°N～20°N	SSSTZ	南南南温帯	50°S
NEB	北赤道縞	20°N～7°N	SSSTB	南南南温帯縞	56°S
EqZ	赤道帯	7°N～7°S	SPR	南極圏	58°S～90°S
EB	赤道紐	0.4°S			

表 1. 木星の模様の名称 (Moore and Hunt 1983)

2　人工衛星時代以前の木星の地上観測

人工衛星が飛ぶ以前の地上からの木星の観測は主にその模様へ注目が集まった.

- 大赤斑
  古い記録では Hooke(1664) に大赤斑の存在が記されている. 以来, 300 年以上に渡って存在し続けている.
- その他の擾乱 (斑点)
- 風速分布
  雲の模様 (斑点) の動きから緯度毎の風速分布を求めることが行なわれた. 図 2,3 参照.

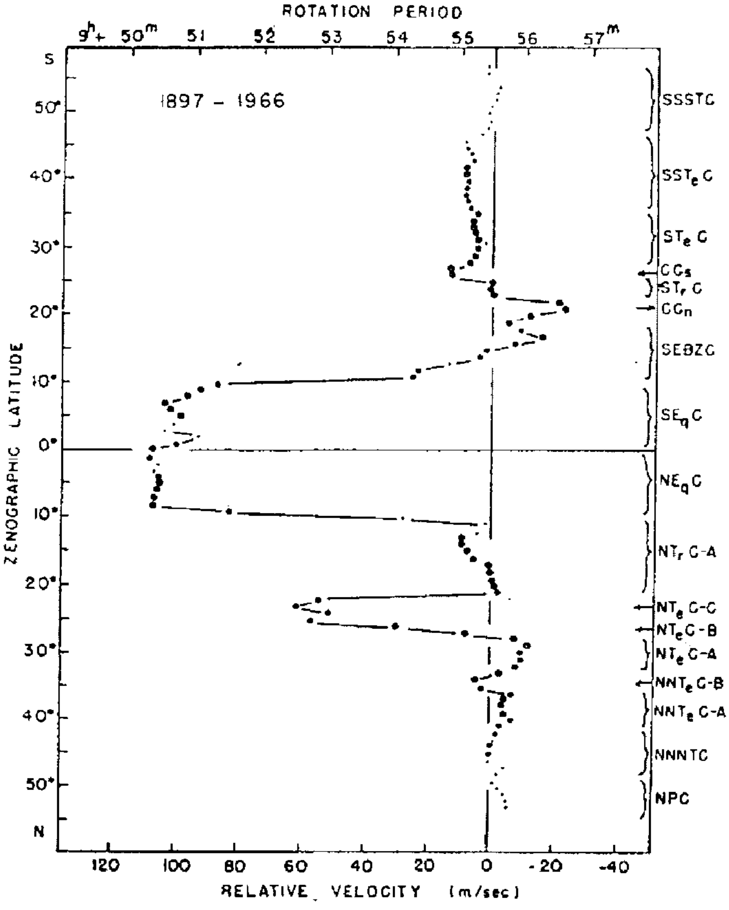
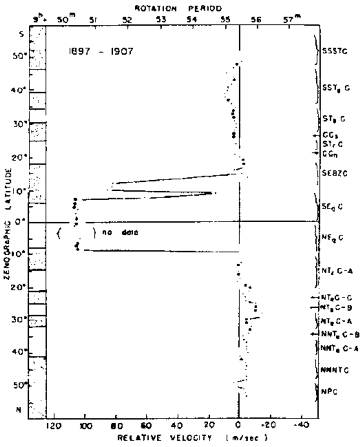


図 2. 地上からの観測による木星の帯状流分布 (Chapman,1969). 1897 年から 1966 年までのデータを用いている. 風速は赤道以外の平均が 0 になるように選んである.



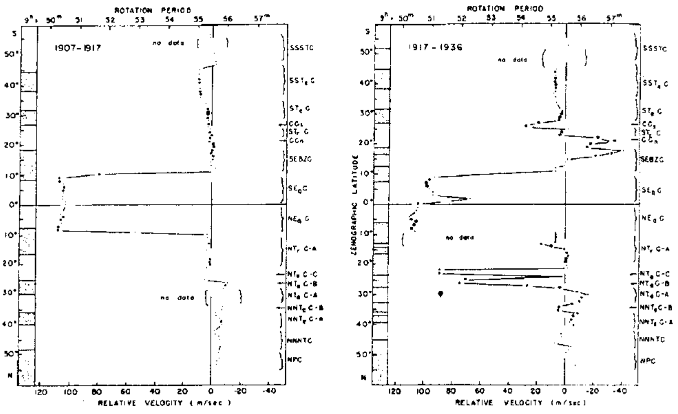


Fig. 2b. Same as Fig. 2a except for 1907–1917.

Fig. 2c. Same as Fig. 2a except for 1917–1936.

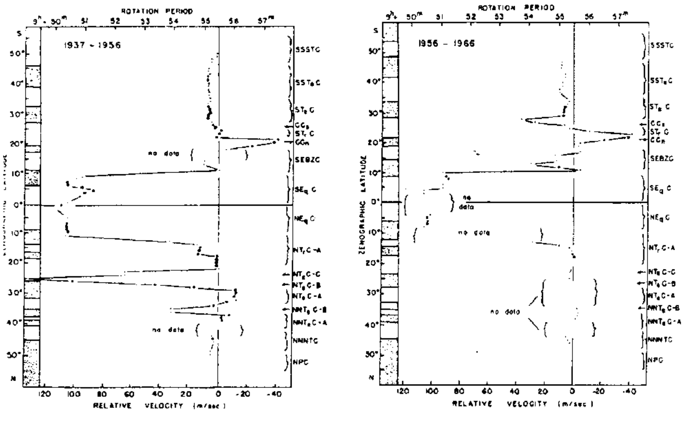
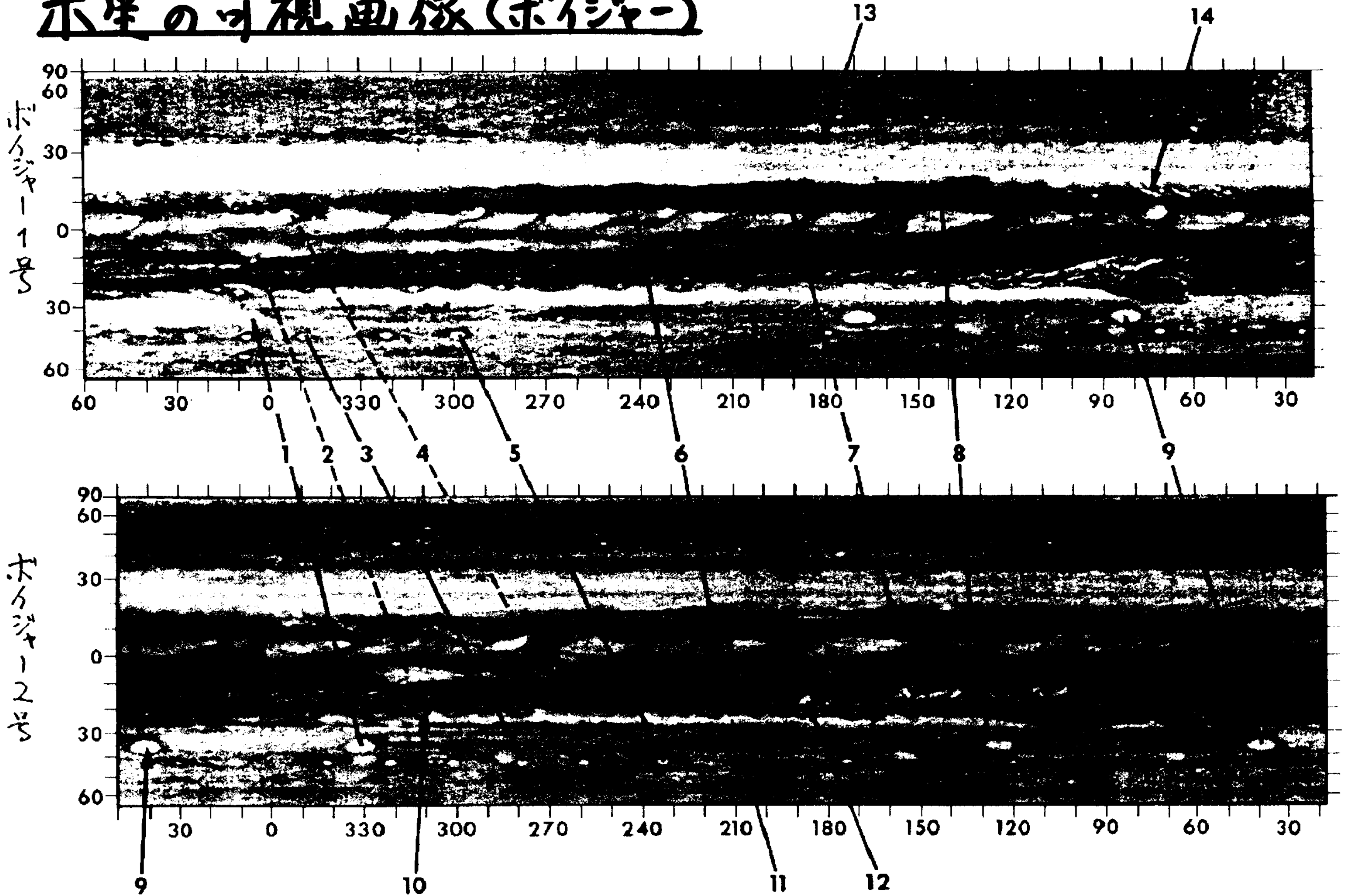


Fig. 2d. Same as Fig. 2a except for 1937–1956.

Fig. 2e. Same as Fig. 2a except for 1956–1966.

図 3. 観測年代別の木星の帯状流分布 (Chapman,1969).

木星の可視画像（ボイジャー）


ボイジャー1号
ボイジャー2号
90
60
30
0
30
60
60
30
0
330
300
270
240
210
180
150
120
90
60
30
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14

3 現代の観測〜ボイジャーのデータより

3.1 帯状流分布

ボイジャー画像の雲の動きから得られた東西風の緯度分布. 赤道で自転より速く回っている (赤道加速, Superrotation) こと, 風速の向きが入れ替わるバンド構造が見られることが特徴的である. このような定性的な特徴は, 昔の地上からの観測 (図 1) の結果と比較して良く一致しており, 十数年に渡って安定であることを示唆している. バンド構造に伴う東西風の速度差は 100 m/s に達する.

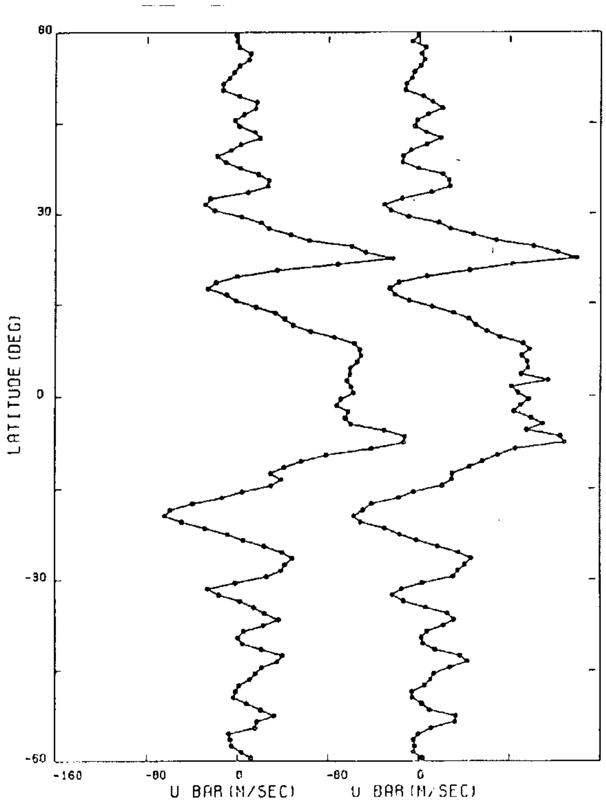


図 4. ボイジャー画像の雲の動きから得られた東西風の緯度分布. 左側のグラフは 1979 年 2 月末 (ボイジャー 1 号), 右側のグラフは 1979 年 7 月初め (ボイジャー 2 号) の画像による. (Ingersoll *et al.* 1981)

3.2 帯状流のデータと可視画像 (シマシマ) との対応

図 5 はボイジャー画像の雲の動きを追って得られた平均風速およびそれに関係する諸量を可視画像と重ねて描いたものである.

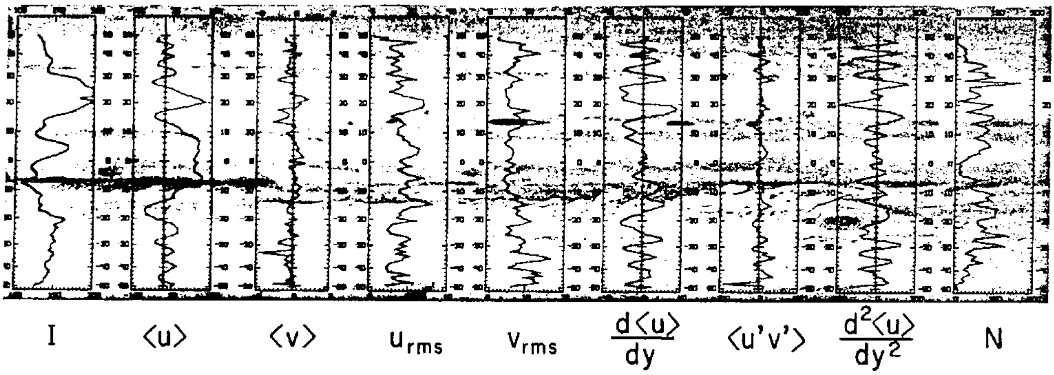


図 5. ボイジャー画像の雲の動きから得られた平均風速分布. I は相対的な輝度分布, N はベクトル (データ) の数である. (Limaye *et al.* 1982)

3.3 水平温度分布

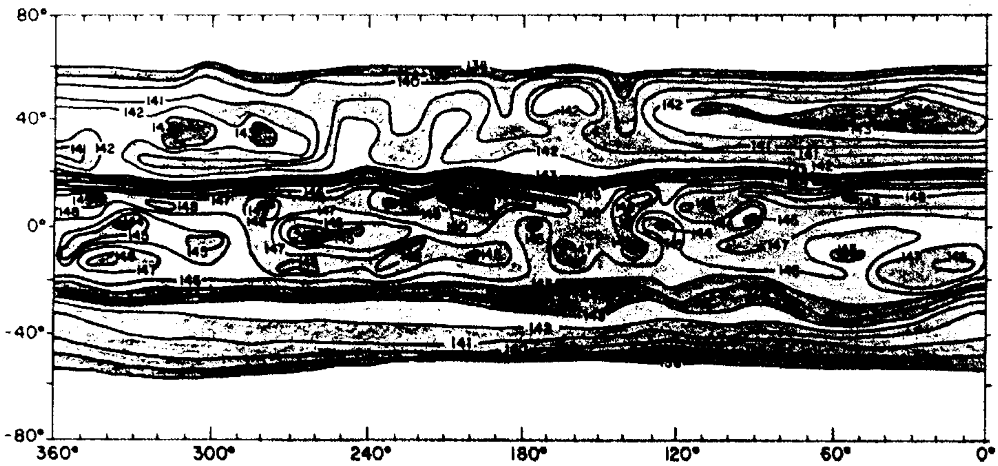


図 6. ボイジャー 2 号の赤外放射観測から得られた波数 $226\mathrm{cm}^{-1}$ の^2 輝度温度の水平分布. 高度約 800 mb の温度を表していると考えられる. (Hanel *et al.* 1979)

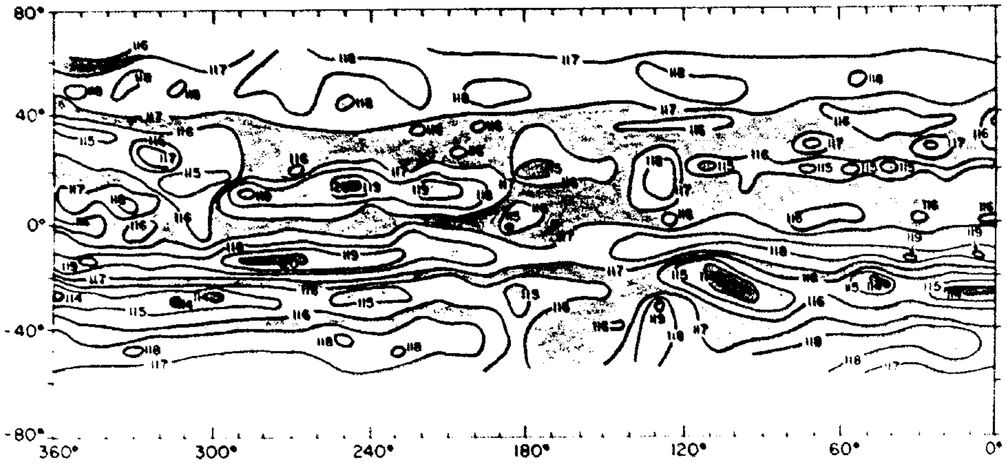


図 7. ボイジャー 2 号の赤外放射観測から得られた波数 602cm^{-1} の輝度温度分布. 高度約 150 mb の温度を表していると考えられる. (Hanel *et al.* 1979)

3.4 鉛直温度分布

図 8 はボイジャー探査機の観測結果から得られた温度の鉛直分布である. 100mb あたりを対流圏界面, 100mb より下を対流圏, 上を成層圏とよぶ. 対流圏の温度分布は, ほぼ断熱温度減率にしたがう.

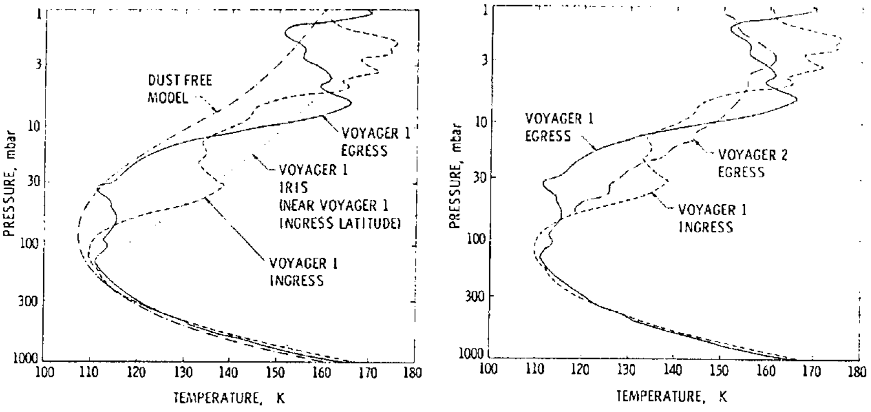


図8. ボイジャー探査機の観測による温度の鉛直分布. 図中 IRIS は赤外放射観測, INGRESS, EGRESS は Occultation から得られた温度分布を表す (Lindal *et al.* 1981) .

3.5 放射エネルギー収支

図 9 は木星への入射太陽放射, 反射太陽放射ならびに木星より射出される赤外放射の波長依存性である.

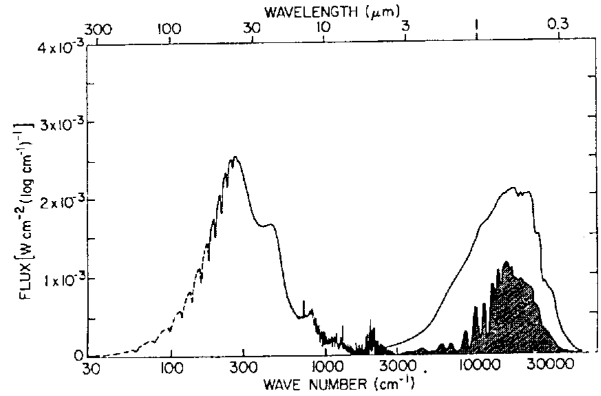


図 9. 木星の太陽放射, 赤外放射. 200〜2300cm^{-1}の曲線はボイジャーの撮影した 5 枚の写真から得られた木星からの赤外放射である. 230cm^{-1}以下の部分はモデル計算の結果による. 3000cm^{-1}以上の波長帯での上側の曲線は木星への入射太陽放射である. 下側の曲線は反射太陽放射であり, 入射太陽放射とアルベドの値 0.343 から計算した. 反射太陽放射の詳細な構造は地球からの地上観測による (Hanel et al, 1981).

表 2 は木星の放射エネルギー収支に関する基本的な数字である. 射出する赤外放射エネルギーと吸収する太陽放射エネルギーの比 (Energy Balance) が 1.668 である. このことをもって, 「木星が内部熱源を持つ」と巷で語られる.

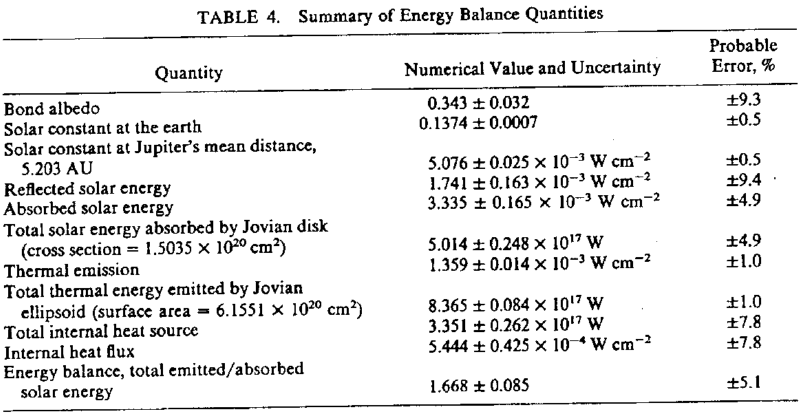


TABLE 4. Summary of Energy Balance Quantities

Quantity	Numerical Value and Uncertainty	Probable Error, %
Bond albedo	0.343 ± 0.032	±9.3
Solar constant at the earth	0.1374 ± 0.0007	±0.5
Solar constant at Jupiter's mean distance, 5.203 AU	$5.076 \pm 0.025 \times 10^{-3}$ W cm^{-2}	±0.5
Reflected solar energy	$1.741 \pm 0.163 \times 10^{-3}$ W cm^{-2}	±9.4
Absorbed solar energy	$3.335 \pm 0.165 \times 10^{-3}$ W cm^{-2}	±4.9
Total solar energy absorbed by Jovian disk (cross section = 1.5035×10^{20} cm^2)	$5.014 \pm 0.248 \times 10^{17}$ W	±4.9
Thermal emission	$1.359 \pm 0.014 \times 10^{-3}$ W cm^{-2}	±1.0
Total thermal energy emitted by Jovian ellipsoid (surface area = 6.1551×10^{20} cm^2)	$8.365 \pm 0.084 \times 10^{17}$ W	±1.0
Total internal heat source	$3.351 \pm 0.262 \times 10^{17}$ W	±7.8
Internal heat flux	$5.444 \pm 0.425 \times 10^{-4}$ W cm^{-2}	±7.8
Energy balance, total emitted/absorbed solar energy	1.668 ± 0.085	±5.1

表 2. 木星大気の放射エネルギー収支に関する基本的な数字 (Hanel *et al.* 1981).

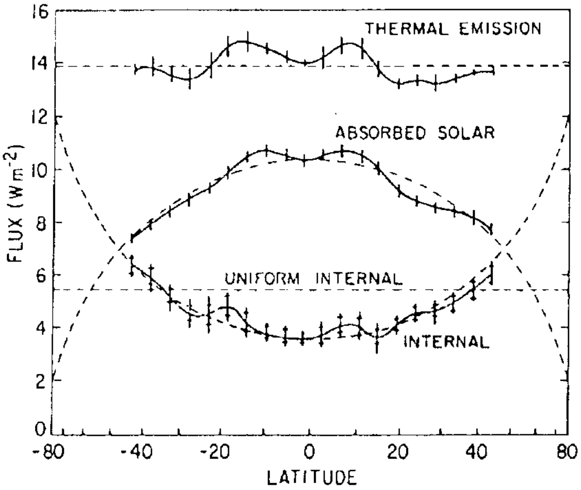


図 10. 木星大気の緯度別放射収支. 'Internal' は 'Thermal' と 'Absorbed' の差であり, いわゆる内部熱源とは異なり大気による南北熱輸送の効果を合わせたものである. (Pirraglia 1984).

4　木星のシマシマのモデル

4.1　回転球面上の強制 2 次元乱流

- Williams(1978) の数値計算
  球面上のバロトロピック渦度方程式を用いて時間積分を行った. 地球あるいは木星のパラメターのもとでさまざまな強制分布・散逸率を与えて計算している.[1]

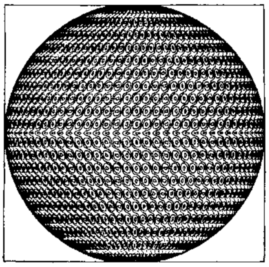


図 10. 球面バロトロピックモデルで用いられた 73.6 日目の強制項の分布 (Williams 1978).

---

[1] 野沢 (1993) の計算によると, Williams(1978) の計算は定常状態に落ち着いておらず, より幅の広いバンド構造が見られるようになる.

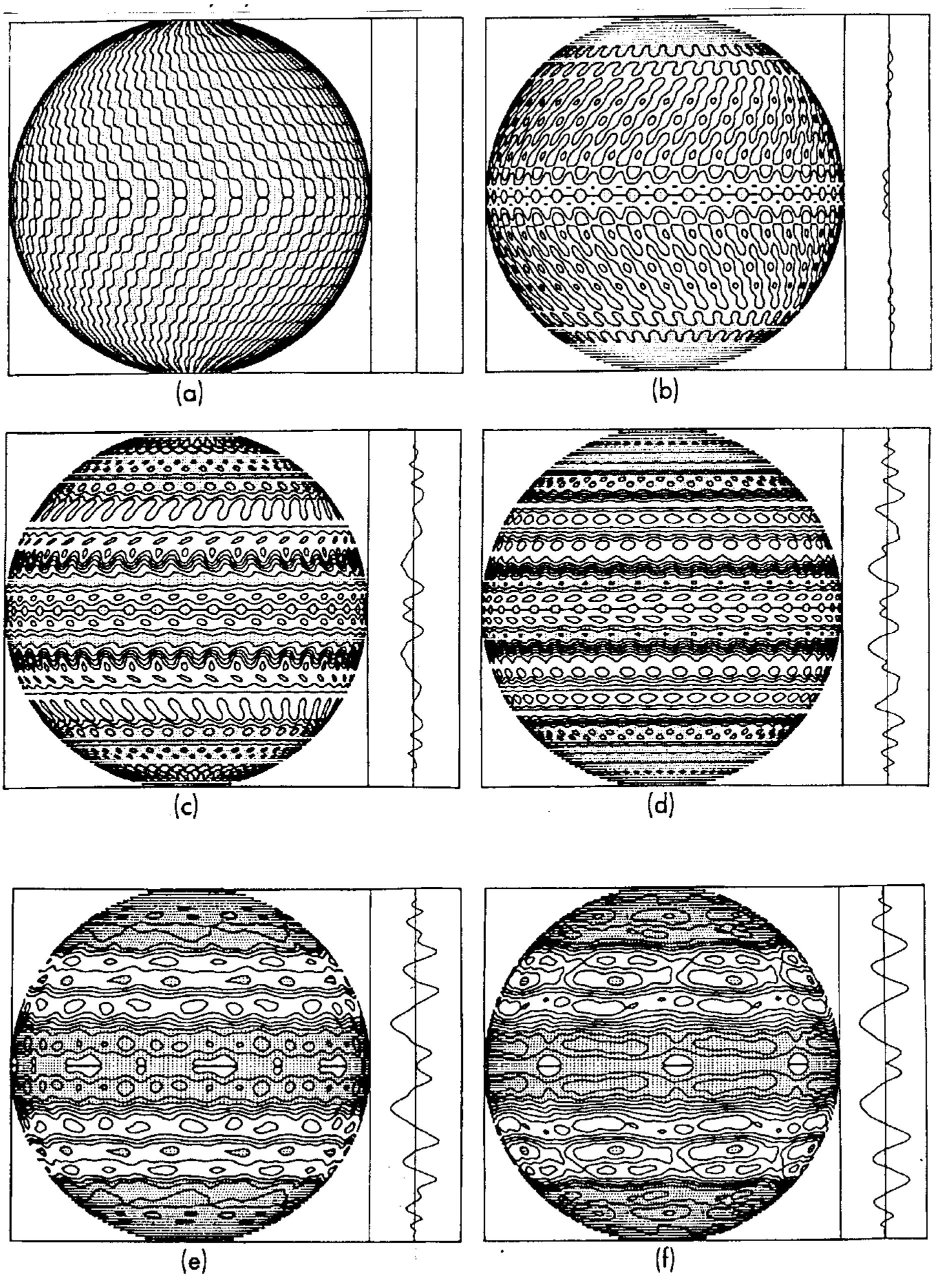
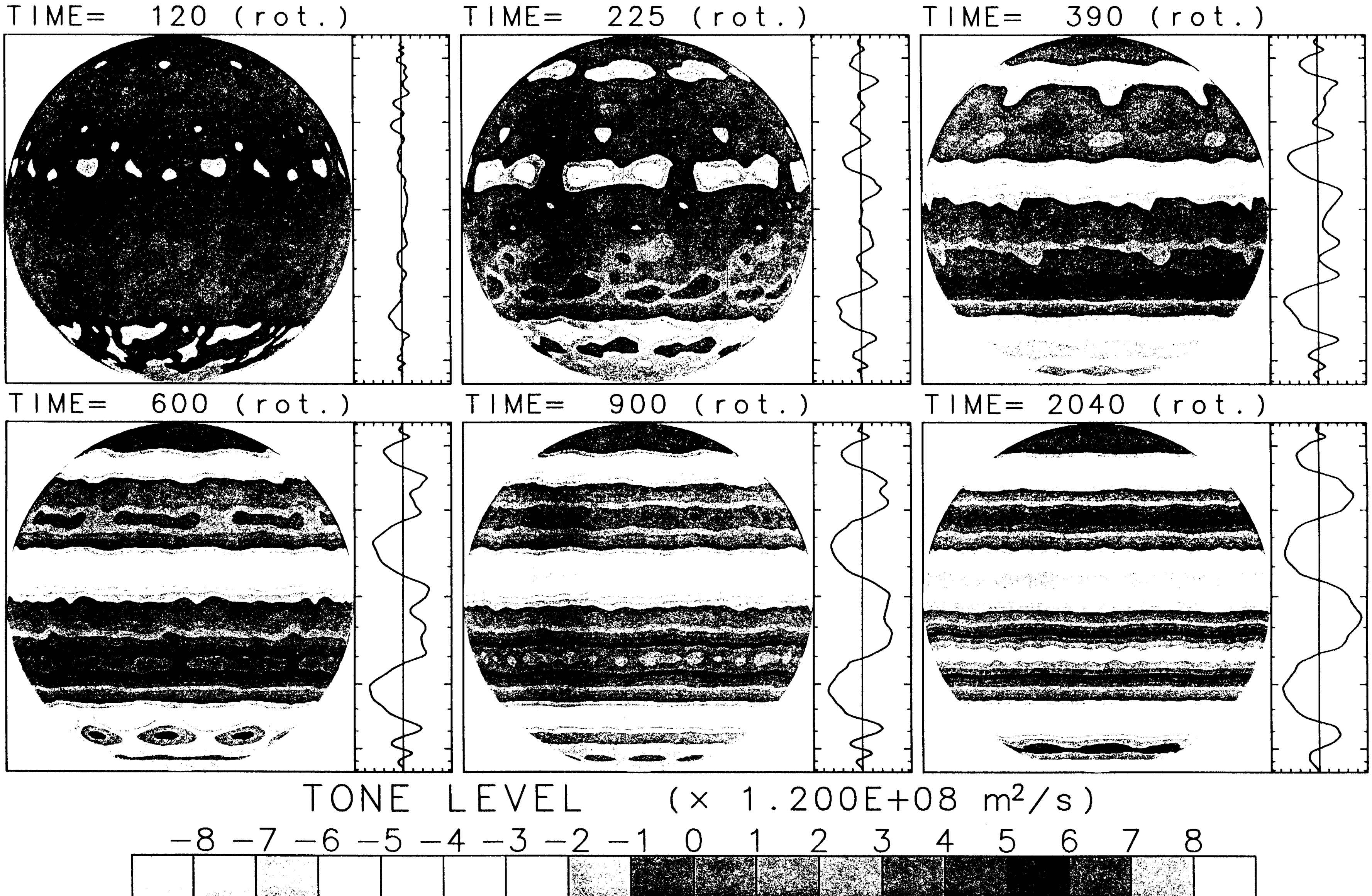


図 11. 球面バロトロピックモデルで表現される木星の ‘しましま’. (a)4.6 (b)23.0 (c)46.0 (d)73.3 (e)161 (f)294.4 日目の流線関数と帯状平均流 $\bar{u}$. 帯状平均流のスケールは $100\mathrm{ms}^{-1}$ (Williams 1978).


TIME= 120 (rot.)
TIME= 225 (rot.)
TIME= 390 (rot.)
TIME= 600 (rot.)
TIME= 900 (rot.)
TIME= 2040 (rot.)
TONE LEVEL (× 1.200E+08 m²/s)
−8 −7 −6 −5 −4 −3 −2 −1 0 1 2 3 4 5 6 7 8

4.2　回転球殻内の対流

‘しましま’ のパターンが南北対称になることが説明できる. 極で ‘しましま’ が不明瞭になる理由を内部固体核の存在で説明する.

- Busse(1983) の弱非線形論

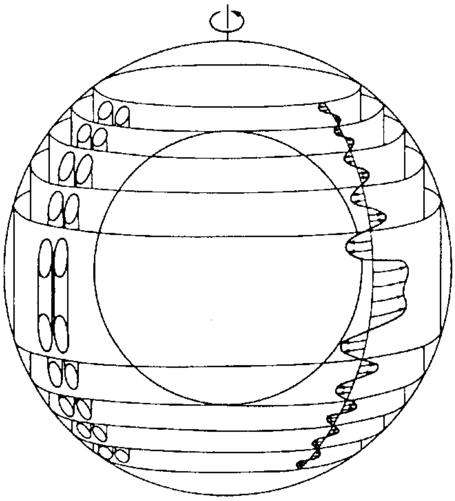


図 12. 回転球殻対流モデルで予想される木星大気大循環の模式図 (Busse 1983).

5　参考文献

国立天文台, 1990 : 理科年表, 丸善, 1032pp.

野沢 徹, 1993 : 回転球面上の強制 2 次元乱流の研究. 京都大学理学部地球物理学教室修士論文 (part I), 42pp.

Busse,F.H., 1983 : A model of mean zonal flows in the major planets. *Geophys. & Astrophys. Fluid Dyn.*, **23**, 153-74

Chapman,C.R., 1969 : Jupiter's zonal winds : variation with latitude. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 986-990

Hanel,R., Conrath,B., Flasar,M., Herath,L., Kunde,V., Lowman,P., Maguire,W., Pearl,J., Pirraglia,J., Samuelson,R., Gauter,D., Gierasch,P., Horn,L., Kumar,S., Ponnamperuma,C., 1979 : Infrared observations of the Jovian system from Voyager 2. *Science*, **206**, 952-956

Hanel,R.A.,Conrath,B.J.,Hearth,L.W.,Kunde,V.G., Pirraglia,J.A.,1981 : Albedo, internal heat, and energy balance of Jupiter : preliminary results of the Voyager infrared investigation. *J. Geophys. Res.*, **86**, 8705-8712

Ingersoll,A.P., Beebe,R.F., Mitchell,J.L., Garneau,G.W., Yagi,G.M., Muller,J.-P., 1981 : Interaction of eddies and mean zonal flow on Jupiter as inferred from Voyager 1 and 2 images. *J. Geophys. Res.*, **86**, 8733-43

Limaye,S.S., Revercomb,H.E., Sromovsky,L.A., Krauss,R.J., Santek,D.A., Suomi,V.E., Collins,S.A., Avis,C.C., 1982 : Jovian winds from Voyager 2. I. Zonal mean circulation. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1413-32

Lindal, G.F., Wood, G.E., Levy, G.S., Anderson, J.D., Sweetnam, D.N., Hotz, H.B., Buckles, B.J., Holmes, D.P., Doms, P.E., Eshleman, V.R., Tyler, G.L., Croft, T.A., 1979 : The atmosphere of Jupiter : an analysis of the Voyager radio occultation measurements. *J. Geophys. Res.*, **86**, 8721-7

Moore,P.,Hunt.G.,1983 : Atlas of the solar system. Rand McNally & Company, 464pp. 清水幹夫訳 : 図説我らの太陽系

Pirraglia, J.A., 1984 : Meridional energy balance of Jupiter. *Icarus*, **59**, 169-76

Smith,B.A., Soderblom,L.A., Beebe,R., Boyce,J., Briggs,G., Carr,M., Collins,S., Cook,A.F. Danielson,G.E., Davies,M.E., Hunt,G.E., Ingersoll,A., Johnson,T.V., Masursky,H., McCauley,J., Morrison,D., Owen,T., Sagan,C., Shoemaker,E.M., Strom,R., Suomi,V.E. 1979 : The Galilean satellites and Jupiter : Voyager II imaging science results. *Science*, **206**, 927-950

Williams,G.P., 1978 : Planetary circulations. I. Barotropic representation of Jovian and terrestrial turbulence. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1399-426