

木星現象論：木星大気の放射エネルギー収支

地球流体電腦俱楽部

1996年5月24日

目次

1 全球放射収支	2
1.1 放射フラックスの波長依存性	2
1.2 放射エネルギー収支基本量	3
2 放射フラックスの緯度分布	5
3 参考文献	7

要旨

木星表層大気の放射熱収支を概観する。

1 全球放射収支

1.1 放射フラックスの波長依存性

図1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。

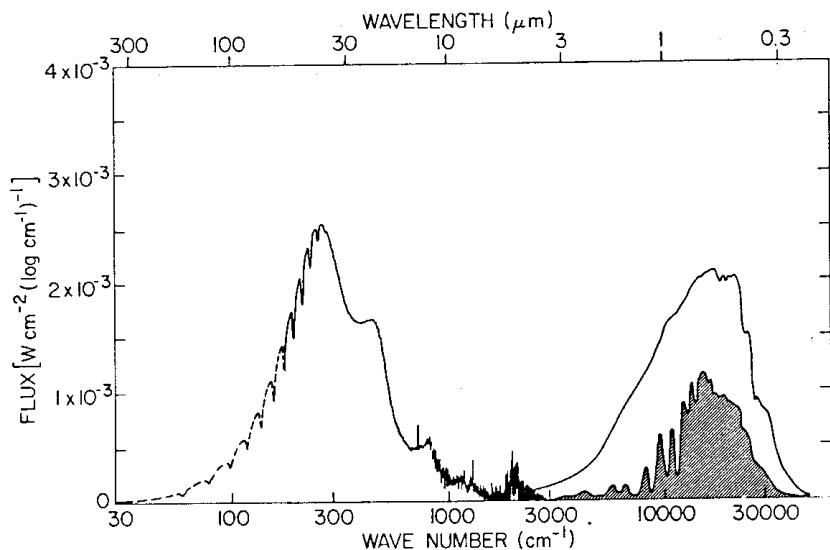


図1. 木星の太陽放射、赤外放射。 $200 \sim 2300\text{cm}^{-1}$ の曲線はボイジャーの撮影した5枚の写真から得られた木星からの赤外放射である。 230cm^{-1} 以下の部分はモデル計算の結果による。 3000cm^{-1} 以上の波長帯での上側の曲線は木星への入射太陽放射である。下側の曲線は反射太陽放射であり、入射太陽放射とアルベドの値0.343から計算した。反射太陽放射の詳細な構造は地球からの地上観測による(Hanel et al, 1981)。

1.2 放射エネルギー収支基本量

表 1 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	$5.076 \pm 0.025 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-2}$	± 0.5
Reflected solar energy	$1.741 \pm 0.163 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-2}$	± 9.4
Absorbed solar energy	$3.335 \pm 0.165 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-2}$	± 4.9
Total solar energy absorbed by Jovian disk (cross section = $1.5035 \times 10^{20} \text{ cm}^2$)	$5.014 \pm 0.248 \times 10^{17} \text{ W}$	± 4.9
Thermal emission	$1.359 \pm 0.014 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-2}$	± 1.0
Total thermal energy emitted by Jovian ellipsoid (surface area = $6.1551 \times 10^{20} \text{ cm}^2$)	$8.365 \pm 0.084 \times 10^{17} \text{ W}$	± 1.0
Total internal heat source	$3.351 \pm 0.262 \times 10^{17} \text{ W}$	± 7.8
Internal heat flux	$5.444 \pm 0.425 \times 10^{-4} \text{ W cm}^{-2}$	± 7.8
Energy balance, total emitted/absorbed solar energy	1.668 ± 0.085	± 5.1

表 1. 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).

練習問題：内部熱源の熱輸送量から木星が冷えるまでの特性時間を求めよ。また、この内部熱源に見合うだけのエネルギーをポテンシャルエネルギーから解放するにはどの程度のスピードで収縮する必要があるか。

解答例

単位質量あたりの定圧比熱を c_p 、木星の全質量を M 、温度を T 、内部熱源からの木星全体の熱の発生を Q とするとき、木星が冷える特性時間 t_R は

$$t_R = \frac{c_p M T}{Q} = \frac{1.28 \times 10^4 \times 1.899 \times 10^{27} \times 111.8}{8.365 \times 10^{17}} = 3.25 \times 10^{15} (\text{sec}) = 1.03 \times 10^8 (\text{yr}).$$

半径 R の球体の持つ全ポテンシャルエネルギーを計算する。球の中心からの距離が r のところの単位質量あたりのポテンシャルエネルギー $\phi(r)$ は $-\frac{GM(r)}{r}$ である。ただし $M(r)$ は半径 r の球の内側にある質量である。簡単のため等密度 $\rho = \text{const.}$ とする。全ポテンシャルエネルギー Φ は

$$\begin{aligned}\Phi &= \int_0^R 4\pi dr \rho \phi(r) \\ &= - \int_0^R dr \rho \frac{G}{r} \int_0^r 4\pi dr' \rho r'^2 \\ &= - \frac{G(4\pi)^2 \rho^2}{3} \int_0^R dr r^4 \\ &= - \frac{G(4\pi)^2 \rho^2 R^5}{15} \\ &= - \frac{3GM^2}{5R}.\end{aligned}$$

この表式を用いて収縮の程度を見積もう。全ポテンシャルエネルギーの時間微分が土星内部の熱の発生 Q に等しいとして

$$\begin{aligned}Q &= \frac{3GM^2}{5R^2} \frac{dR}{dt}, \\ \text{ゆえに } \frac{dR}{dt} &= \frac{5QR^2}{3GM^2} = \frac{5 \times 3.351 \times 10^{17} \times (7.1398 \times 10^7)^2}{3 \times 6.67 \times 10^{-11} \times (1.899 \times 10^{27})^2} \\ &= 1.184 \times 10^{-11} \text{m sec}^{-1} \\ &= 3.733 \times 10^{-4} \text{m yr}^{-1} \\ &= 0.373 \text{mm yr}^{-1}\end{aligned}$$

2 放射フラックスの緯度分布

図2はボイジャー1号によって観測された木星の射出する赤外放射ならびに反射太陽放射の緯度分布である。観測視角、太陽反射角を考慮して修正したものが図3である。

‘Internal’はいわゆる内部熱源とは異なり、大気による南北エネルギー輸送の効果を合わせた結果のものである。

赤外放射は全球均一、吸収する太陽放射は高緯度ほど小さい。したがって(?)、大気は南北方向にエネルギーを輸送している¹

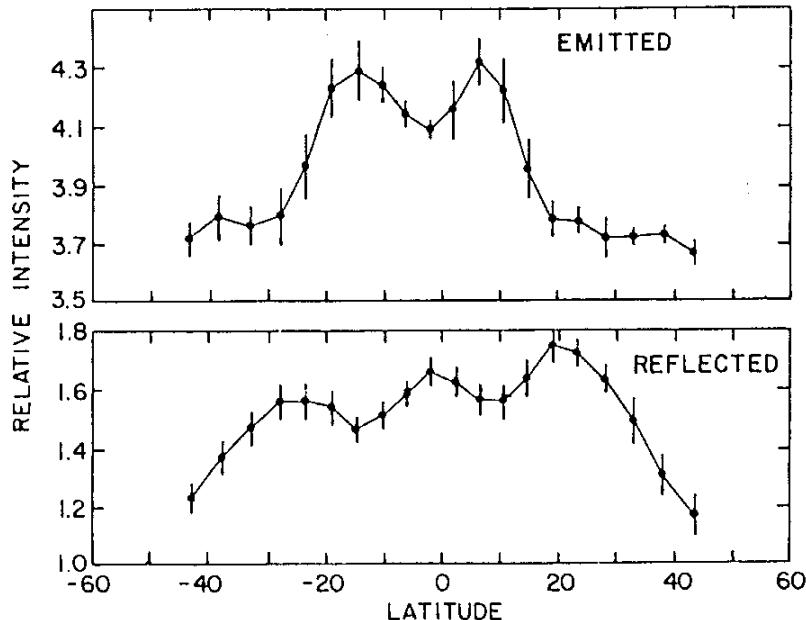


図2. ボイジャー1号による赤外放射、反射太陽放射の相対強度の緯度分布。赤道面上側 2° より観測した。太陽の位置は赤道上側 0.5° である。赤外放射は波数 $200 \sim 2300\text{cm}^{-1}$ の平均であり、 $1.23 \times 10^{-4}\text{W cm}^{-2}\text{st}^{-1}$ でスケーリングしてある。反射太陽放射は波長 $0.3 \sim 2.0\mu\text{m}$ の平均であり、 $10.14 \times 10^{-4}\text{W cm}^{-2}\text{st}^{-1}$ でスケーリングしてある。観測視角、反射角の影響は考慮していない(Pirraglia 1984)。

¹この裏には、木星内部の熱源による熱フラックスが均一である、という偏見がある？

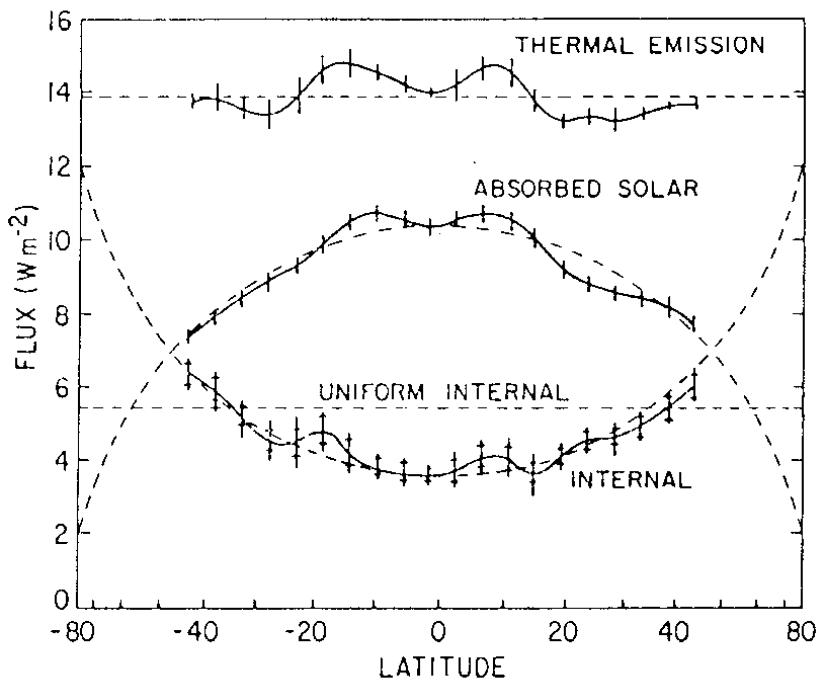


図3. 木星大気の緯度別放射収支. 図2について観測角, 反射角の効果を考慮して修正した. ‘Internal’は‘Thermal’と‘Absorbed’の差である (Pirraglia 1984).

3 参考文献

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

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

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、流体力論セミナーでのセミナーノートがもとになっている。原作版は竹広真一による「木星現象論」(90/05/01) であり、林祥介によって地球流体力学部「木星現象論」として書き直された (96/06/23)。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。