

土星現象論：土星大気の放射エネルギー収支

地球流体電脳倶楽部

1996 年 7 月 22 日

目次

1	全球放射収支	1
1.1	放射フラックスの波長依存性	1
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	5

要旨

土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 は土星への入射太陽放射, 反射太陽放射ならびに土星より射出される赤外放射の波長依存性である。

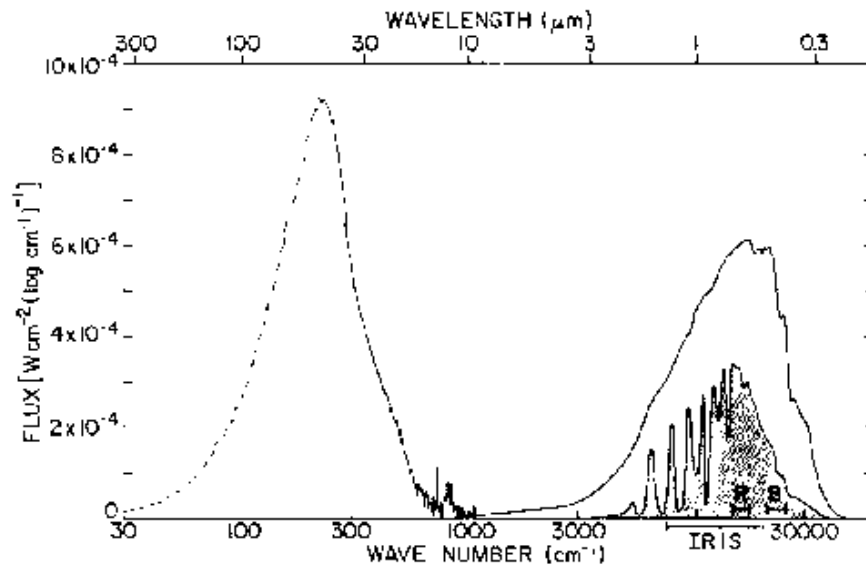


図 1. 土星の太陽放射, 赤外放射. $200 \sim 950 \text{ cm}^{-1}$ での曲線は 8 枚の写真から得られた土星からの赤外放射である. 200 cm^{-1} 以下の部分はモデル計算の結果による. 3000 cm^{-1} 以上の波長帯の上側の曲線は土星への入射太陽放射である. 下側の曲線は反射太陽放射であり, アルベドの値 0.34 で規格化されている. 反射太陽放射の詳細な構造は地球からの地上観測による (Hanel *et al.* 1983).

1.2 放射エネルギー収支基本量

表 1 は土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 1.78 である. このことをもって, 「土星が内部熱源を持つ」と巷で語られる.

SUMMARY OF ENERGY BALANCE TERMS AND ERRORS			
Quantity	Value	Uncertainty	Contributing error (%)
$P = .5\Sigma(1 - A_{\text{sid}})(1 - e_1) - e_2 + e_3$			
S : Solar constant at Saturn (10^{-7} W cm $^{-2}$)	1.506	0.008	0.4
Σ : Seasonal average Saturn cross section (10^{23} cm 2)	1.043	—	—
A_{sid} : Bond albedo	0.342	0.030	3.8
e_1 : Seasonal ring shadow effect	0.0911	10%	0.8
e_2 : Seasonal ring scattering (10^{17} W)	0.0681	20%	1.2
e_3 : Seasonal ring emission (10^{17} W)	0.1064	20%	1.9
P : Total absorbed power (10^{17} W)	1.114	0.030	4.5
Emitted thermal flux (10^{-4} W cm $^{-2}$)	4.614	0.075	1.6
Emitted thermal power (10^{22} W)	1.977	0.032	1.6
Effective temperature (°K)	94.98	0.39	—
Internally generated heat (10^{17} W)	0.863	0.060	6.9
Internally generated flux (10^{-4} W cm $^{-2}$)	2.01	0.14	6.9
Energy balance	1.78	0.09	4.8

表 1. 土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.* 1983)

放射エネルギー収支に関する木星と土星の比較をしたのが表 2 である.

**COMPARISON OF ENERGY BALANCE PARAMETERS
FOR JUPITER AND SATURN**

Quantity	Jupiter	Saturn
Geometric albedo	0.274 ± 0.013	0.242 ± 0.012
Phase integral	1.25 ± 0.1	1.42 ± 0.1
Bond albedo	0.343 ± 0.032	0.342 ± 0.030
Total absorbed power (10^{17} W)	5.014 ± 0.248	1.114 ± 0.050
Total emitted power (10^{17} W)	8.365 ± 0.084	1.977 ± 0.032
Effective temperature (°K)	124.4 ± 0.3	95.0 ± 0.4
Energy balance	1.67 ± 0.09	1.78 ± 0.09
Internal energy source (10^{17} W)	3.35 ± 0.26	0.863 ± 0.060
Internal energy flux (10^{-4} W cm $^{-2}$)	5.44 ± 0.43	2.01 ± 0.14
Internal power/mass (10^{-13} W g $^{-1}$)	1.76 ± 0.14	1.52 ± 0.11
Luminosity: $\log(L/L_{\text{Sun}})$	-9.062 ± 0.034	-9.651 ± 0.030

表 2. 木星と土星の放射エネルギー収支の比較 (Hanel *et al.* 1983)

練習問題: 内部熱源の熱輸送量から土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 , 土星の全質量を M , 温度を T , 土星の放出する熱を F とするとき, 土星が冷える特性時間 t_R は

$$t_R = \frac{c_p M T}{F} = \frac{1.34 \times 10^4 \times 5.684 \times 10^{26} \times 78.43}{1.977 \times 10^{17}} = 3.02 \times 10^{15} (\text{sec}) = 9.5763571 \times 10^7 (\text{yr})$$

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ろう. 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

$$\begin{aligned} Q &= \frac{3GM^2}{5R^2} \frac{dR}{dt}, \\ \text{ゆえに } \frac{dR}{dt} &= \frac{5QR^2}{3GM^2} = \frac{5 \times 0.863 \times 10^{17} \times (6.0 \times 10^7)^2}{3 \times 6.67 \times 10^{-11} \times (5.684 \times 10^{26})^2} \\ &= 0.240 \times 10^{-10} \text{m sec}^{-1} \\ &= 7.57 \times 10^{-4} \text{m yr}^{-1} \\ &= 0.757 \text{mm yr}^{-1} \end{aligned}$$

2 放射フラックスの緯度分布

まだ見つけていない

3 参考文献

Hanel, R. A., Conrath, B. J., Kunde, V. G., Pirraglia, J. A., 1983 : Albedo, internal heat flux, and energy balance of Saturn. *Icarus*, **53**, 262-285

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. 原作版は竹広真一による「土星現象論」(90/07/23) であり, 林祥介・豊田英司によって地球流体電脳倶楽部版「木星現象論」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.