

土星現象論: 土星の内部構造

地球流体電腦俱楽部

1996 年 7 月 22 日

目 次

1 土星の内部構造の推定法	2
1.1 モデルの制約条件	2
1.2 モデルの構成	4
2 モデルの計算結果 ~ 密度と圧力の関係	5
3 モデルの計算結果 ~ 密度分布	6
4 参考 : 水素の相転移曲線	7
5 参考文献	7

要旨

Hubbard and Marley, 1989 の土星内部構造モデルを紹介する。

ここでは Hubbard and Marley, 1989 の土星内部構造モデルを紹介する。

1 土星の内部構造の推定法

1.1 モデルの制約条件

土星の内部構造を定めるための制約条件とその値を記す。

- 惑星半径 a
- 重力ポテンシャルの球面調和関数展開した各成分 J_2, J_4 ¹

¹惑星外部の重力ポテンシャル $U(r)$ は惑星中心を原点とする球座標系で

$$U(r) = \frac{GM}{r} \left[1 - \sum_{l=1}^{\infty} J_{2l} \left(\frac{a}{r} \right)^{2l} P_{2l}(\cos \theta) \right]$$

- 無次元化した回転角速度 $q \equiv \frac{\omega^2 a^3}{GM}$ ただし ω は惑星の回転角速度, G は万有引力定数, M は惑星質量である².

と表される. ここで r は中心からの距離, θ は余緯度, P_{2l} はルジャンドル多項式を表す.

²惑星全質量の値についてはシリーズ‘土星に関する基本的数字’を参照せよ.

PRIMARY CONSTRAINTS ON STRUCTURE OF JUPITER PLANETS					
Planet	a (km)	$J_2 \times 10^6$	$J_4 \times 10^6$	$J_6 \times 10^6$	$q \times 10^6$
Jupiter	$71,492 \pm 4$	$14,697 \pm 1$	-584 ± 5	31 ± 20	$89,180 \pm 15$
Saturn	$60,268 \pm 4$	$16,331 \pm 18$	-914 ± 61	108 ± 50	$154,766 \pm 31$
Uranus	$25,559 \pm 4$	$3,516 \pm 3$	-31.9 ± 0.5	0^a	$29,513 \pm 48$
Neptune	$24,992 \pm 30$	$4,000 \pm 300$	0^a	0^a	$28,960 \pm 450$

^a Assumed.

表 1. 内部構造推定に用いる制約条件

1.2 モデルの構成

土星内部を核とその外側に分ける.

核より外側では, 領域を 3 つに分ける ($0 < p < p_1, p_1 < p < p_2, p_2 < p$) 全領域へリウムと水素の一定混合物であり, エントロピーを一定とする.

$0 < p < p_1$: 水素分子とヘリウムの混合, 状態方程式がわかっている.

$p_2 < p$: 金属水素とヘリウムの混合, 状態方程式がわかっている.

$p_1 < p < p_2$ の間の密度-圧力関係と核の質量を未知数として上記制約条件を用いてインバージョンを行う.

2 モデルの計算結果～密度と圧力の関係

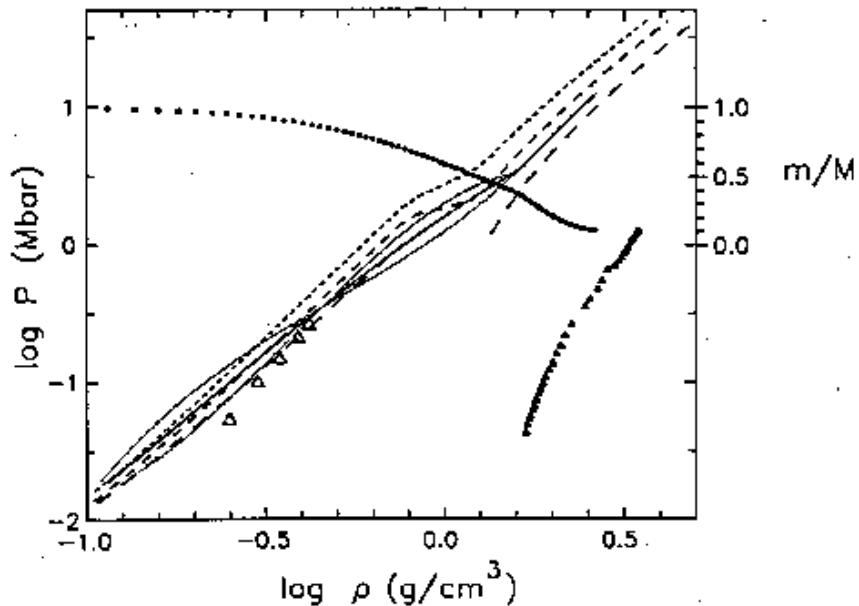


図1. 土星内部の圧力-密度分布(太実線). 内側の領域($\log \rho > 0.20$)ではヘリウム-水素質量比 $Y = 0.4$, 外側の領域($\log \rho < -1.0$)では $Y = 0.06$ の断熱線に従う. 2本の細い実線は J_4 を誤差の値だけ増減させたときの結果である. 破線はヘリウム-水素質量比 $Y = 0.06$ (上側), $Y = 0.27$ (中側), $Y = 0.50$ (下側)での断熱線である. 点線はそのレベルの下側にある質量である. 対数の底は以下全て 10 である. 大きい三角形は純粋な H_2 の室温における実験結果, 小さい三角形は純粋な H_2O の室温における実験結果を表す.

3 モデルの計算結果～密度分布

図2が計算された土星内部の密度分布である。比較のため他の外惑星の結果ものせてある。

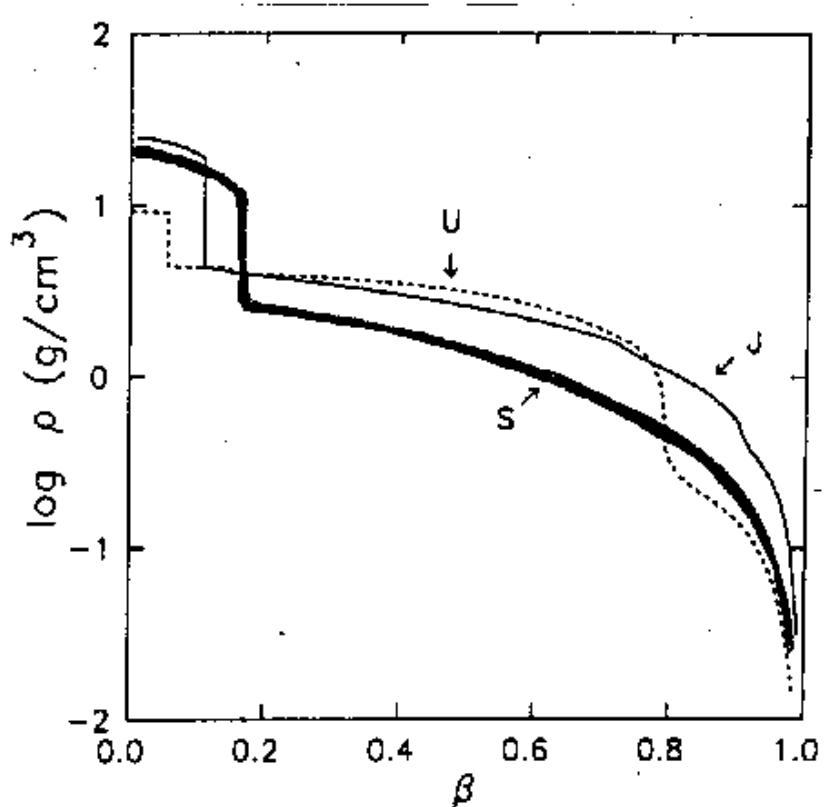


図2. 土星の内部の密度分布。横軸 β は中心からの相対的な距離を表す。J,S,U はそれぞれ木星、土星、天王星の内部密度分布である。

4 参考：水素の相転移曲線

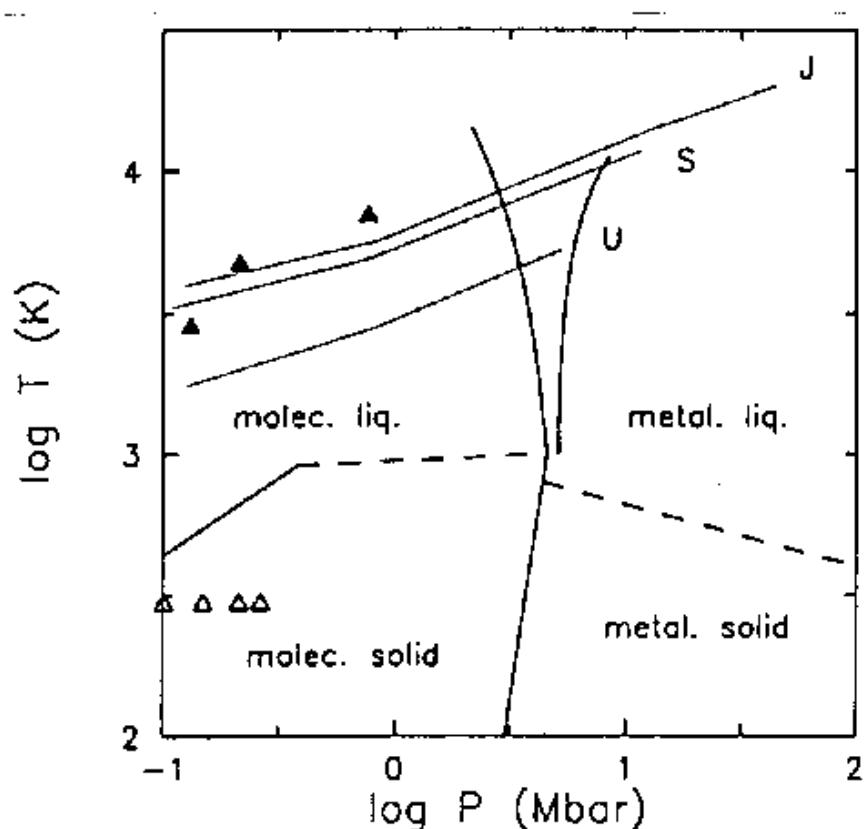


図3. 水素の相転移曲線. J,S,U はそれぞれ木星, 土星, 天王星内部での断熱線である. 点線ははっきりしない相境界線を表す. 金属-分子水素間の相境界は2通り示してある¹. また黒い三角形は衝撃により高圧にしたときの実験結果, 白い三角形は純粋な H_2 の室温における実験結果を表す.

5 参考文献

Hubbard,W.B.,Horedt,G.P.,1983 : Computation of Jupiter interior models from gravitational inversion theory. *Icarus*, **54**, 456-465

Hubbard,W.B.,Marley,M.S.,1989 : Optimized Jupiter, Saturn, and Uranus interior Models. *Icarus*, **78**, 102-118

¹金属-分子水素間は1次の相転移ではない.

Hubbard,W.B.,Stevenson,D.J.,1984 : Interior structure of Saturn. *in Saturn*, 47-87

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「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力学部版「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。