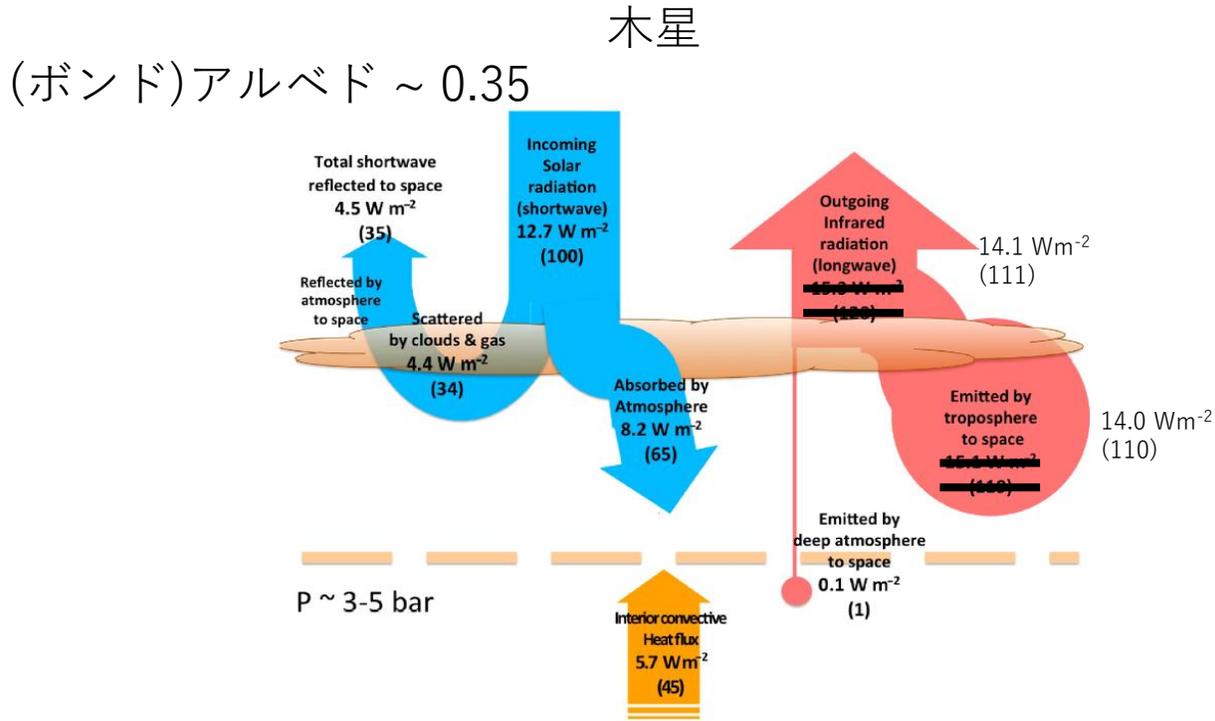


木星の放射収支観測結果 概観

Li et al., Less absorbed solar energy and more internal heat for Jupiter, Nature Communications, 9, 3709, 2018.

高橋芳幸（神戸大）

木星（と地球）の放射収支



木星は太陽からもらった熱の 1.7 倍の熱を出している。

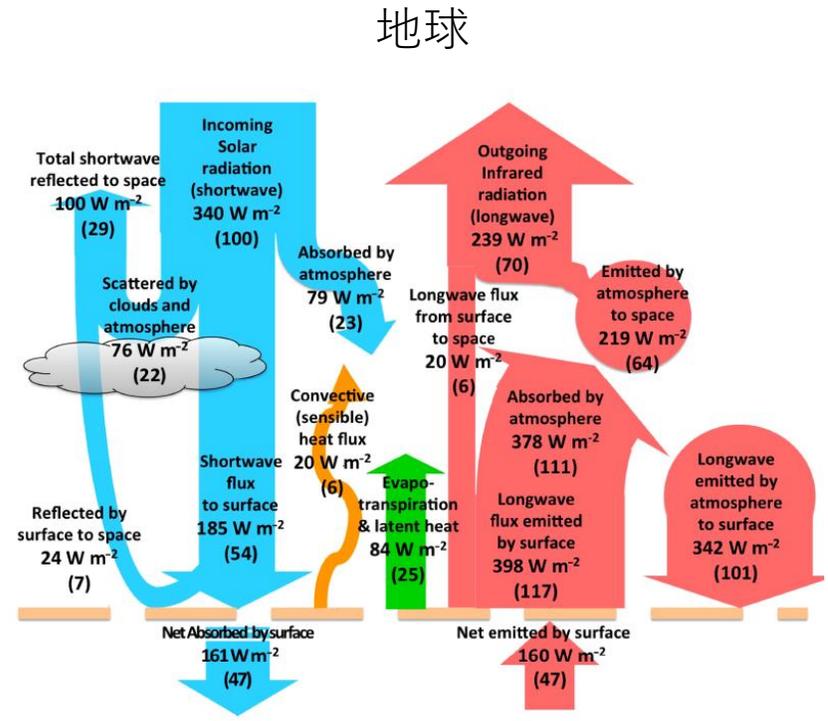


Figure 1. Schematic flow of energy within the Earth's climate system, as determined from a combination of satellite measurements (ERBE, CERES) (Harrison *et al.*, 1990; Wielicki *et al.*, 1996) and model reanalyses (Trenberth *et al.*, 2009; Kim and Ramanathan, 2012; Stephens *et al.*, 2012; Wild *et al.*, 2013). Solar radiative fluxes are shown on the left (in blue online) and infrared fluxes on the right (salmon pink online); convective and latent heat fluxes are in the centre (in orange and green online). The horizontal dashed line represents the planetary surface. Figures quoted here were based on those obtained by Wild *et al.* (2013) and adapted for the IPCC AR5 report (IPCC, 2013).

(Read, 2016 に加筆)

(ボンド) アルベド

$$A = \frac{P_{\text{reflect}}}{P_{\text{incident}}} = \frac{2}{S/D^2} \sum_{\lambda_i} \sum_{\phi_j} I_{\lambda_i}(\phi_j) \sin \phi_j \Delta \phi \Delta \lambda = \sum_{\lambda_i} \frac{I_{\lambda_i}(0)}{S/D^2} \left(2 \sum_{\phi_j} \frac{I_{\lambda_i}(\phi_j)}{I_{\lambda_i}(0)} \sin \phi_j \Delta \phi \right) \Delta \lambda$$
$$= \sum_{\lambda_i} A_0(\lambda_i) q(\lambda_i) \Delta \lambda = \sum_{\lambda_i} A_m(\lambda_i) \Delta \lambda$$

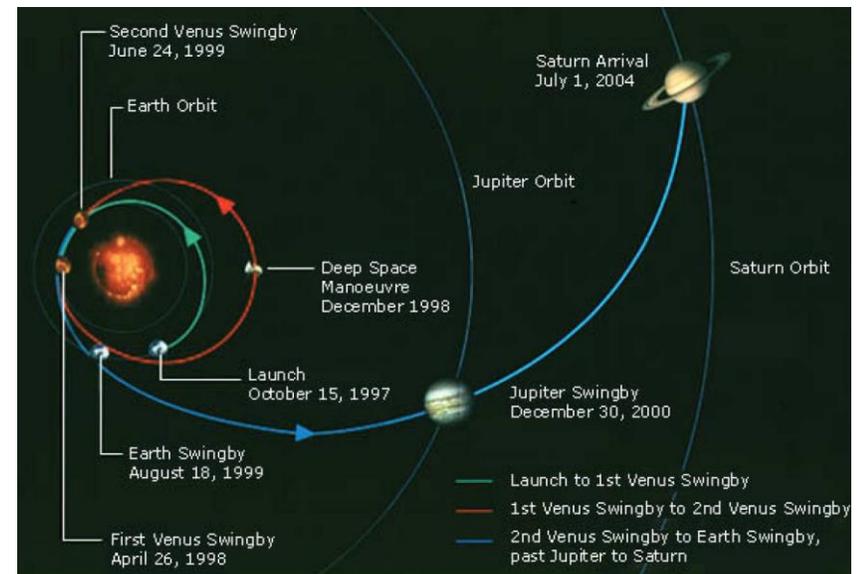
$$P_{\text{reflect}} = 2\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi} I_{\lambda}(\phi) \sin \phi \, d\phi \, d\lambda = 2\pi \sum_{\lambda_i} \sum_{\phi_j} I_{\lambda_i}(\phi_j) \sin \phi_j \Delta \phi \Delta \lambda$$

$$P_{\text{incident}} = \pi S/D^2$$

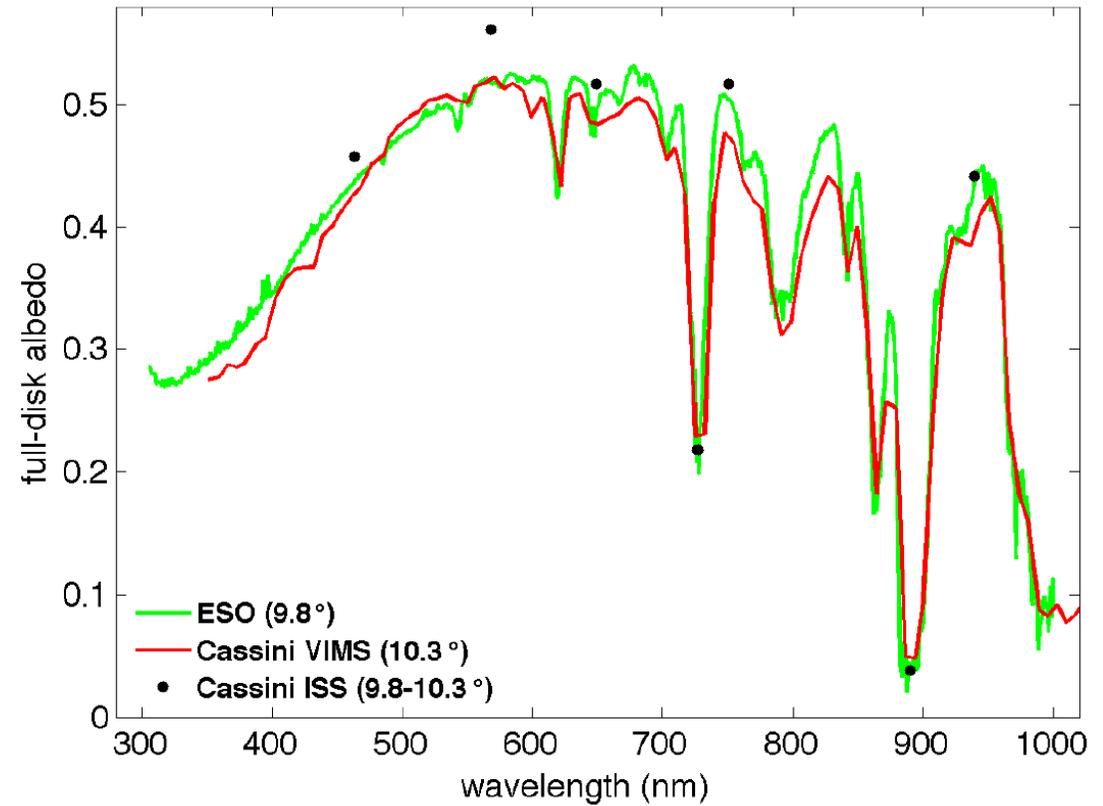
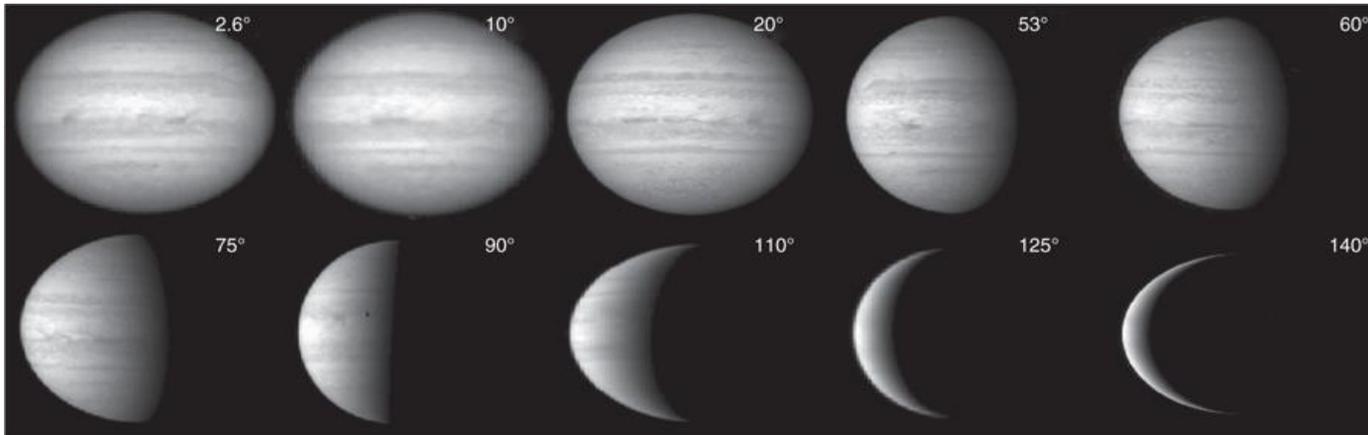
- πS は太陽定数, D は太陽-木星間距離
- ϕ は位相角 (太陽と対象物を結ぶ線と, 対象物と観測者を結ぶ線のなす角)
- I_{λ_i} は観測された反射・散乱太陽光

Cassini

- Li et al. (2018) がデータを使用した観測装置
 - Imaging Science Subsystem (ISS) (266-938 nm, 2000-01)
 - Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) (350-4000 nm, 2000-01)
- 観測期間
 - Jupiter-flyby 期間 (2000-2001)

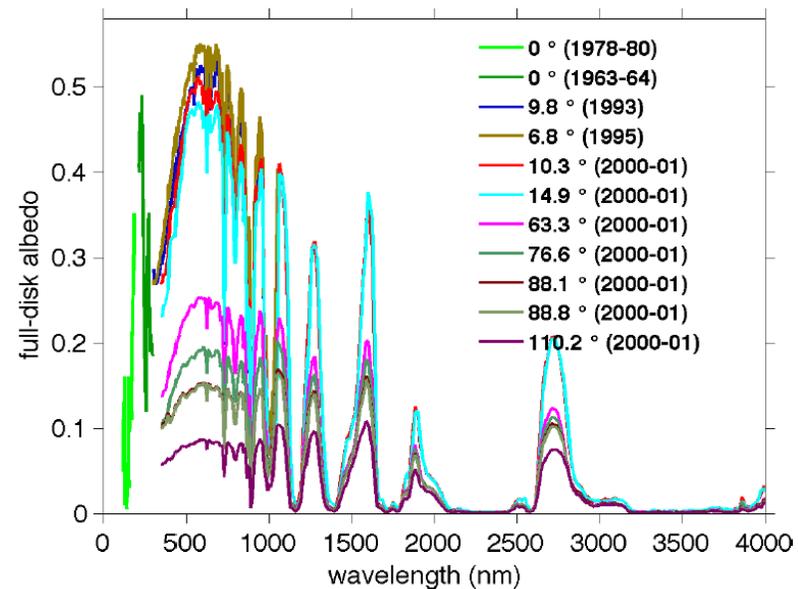


観測画像・スペクトル例

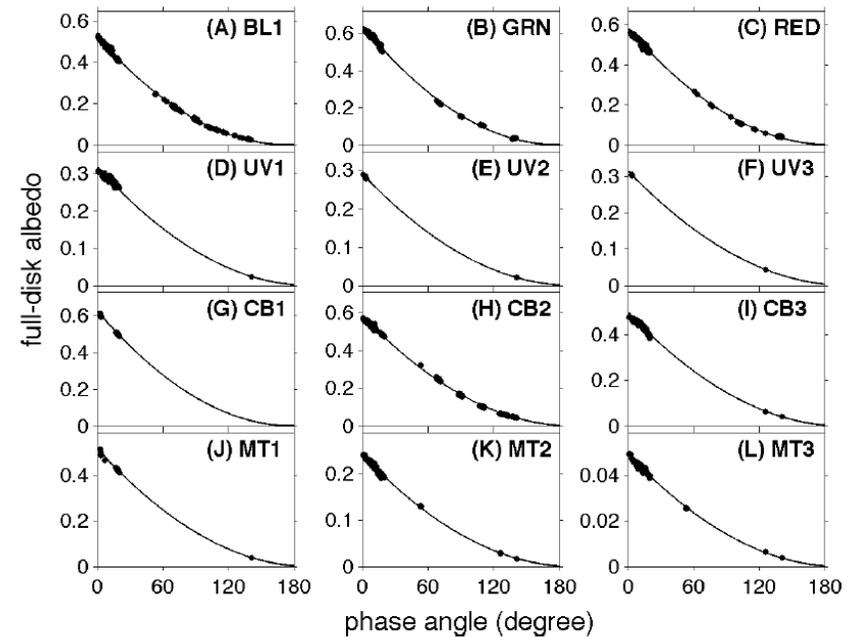


Supplementary Figure 7. Comparison of Jupiter's full-disk albedo among the European Southern Observatory (ESO), the Cassini/ISS, and the Cassini/CIRS at phase angles from 9.8° and 10.3°.

観測結果の例



VIMS 観測スペクトル (と Cassini 以前の観測スペクトル)



Supplementary Figure 10. Fitting the phase function of Jupiter's albedo recorded by the Cassini ISS 12 filters. Equation 6 in Methods is used to fit the observations with the least-squares method.

様々な波長, 位相角における ISS での観測例

備考

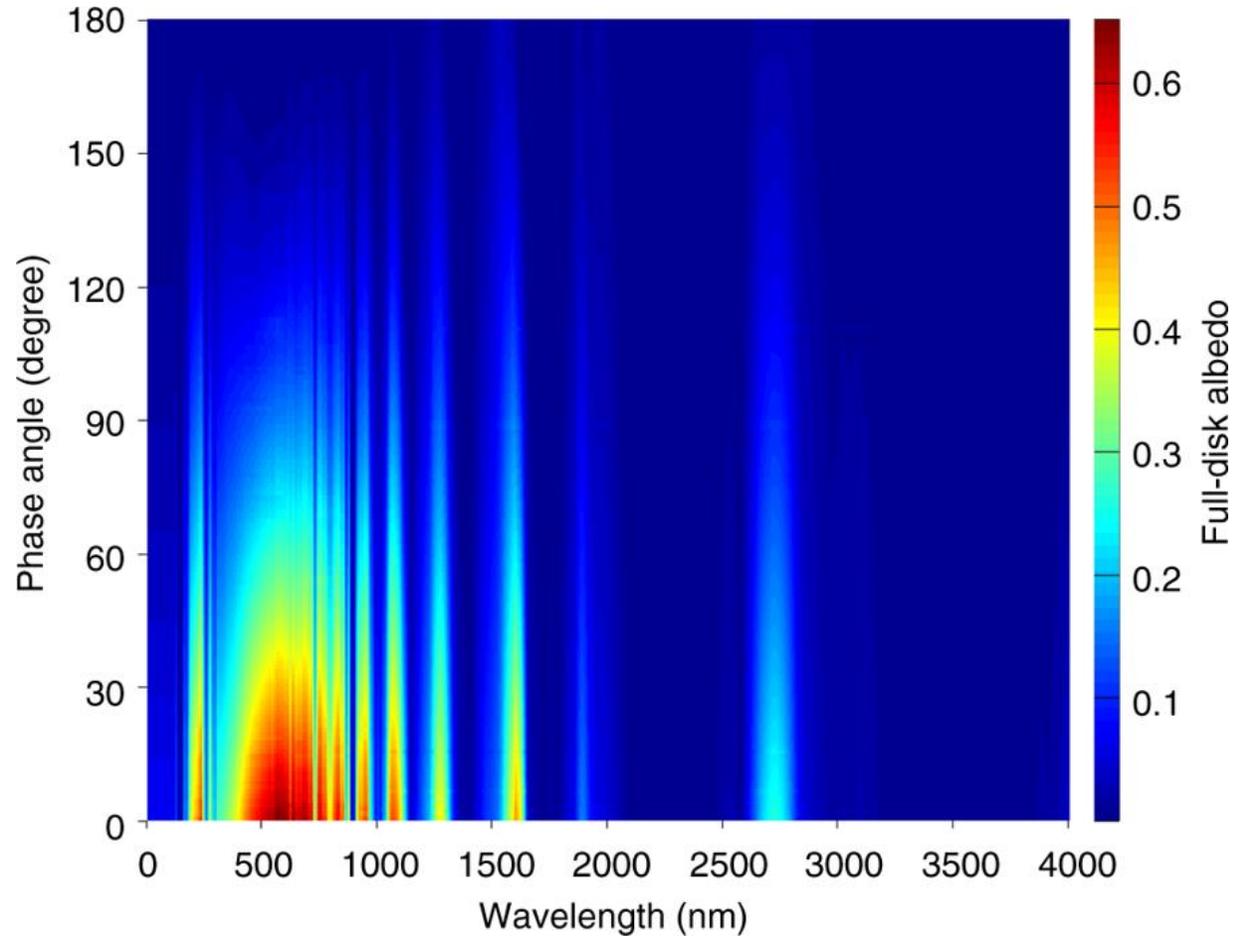
- 地上観測
 - 位相角 12° 以下のみ観測可能 (Tomasko et al., 1978).
- Pioneer 10 の Imaging Photopolarimeter による観測 (Tomasko et al., 1978)
 - チャンネル
 - “red”: $0.595\text{-}0.720\ \mu\text{m}$
 - “blue” $0.390\text{-}0.500\ \mu\text{m}$
 - 観測位相角: $12^\circ, 23^\circ, 34^\circ, 109^\circ, 120^\circ, 127^\circ, 150^\circ$

解析に使用した Cassini 以外の観測器

- 木星紫外スペクトル
 - International Ultraviolet Explorer (IUE) (125-195 nm, 1978-80)
 - Aerobee rocket (210-300 nm, 1963-1964)
 - European Southern Observatory (ESO) (300-1000 nm, 1993, 1995)
- 太陽スペクトル
 - Solar EUV Experiment (SEE) (0-120nm, 2002)
 - Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) (120-420 nm, 2000-01)
 - Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) (420-2410 nm, 2003)
 - American Society for Testing and Materials (ASTM) (2410-4000 nm, climatology)

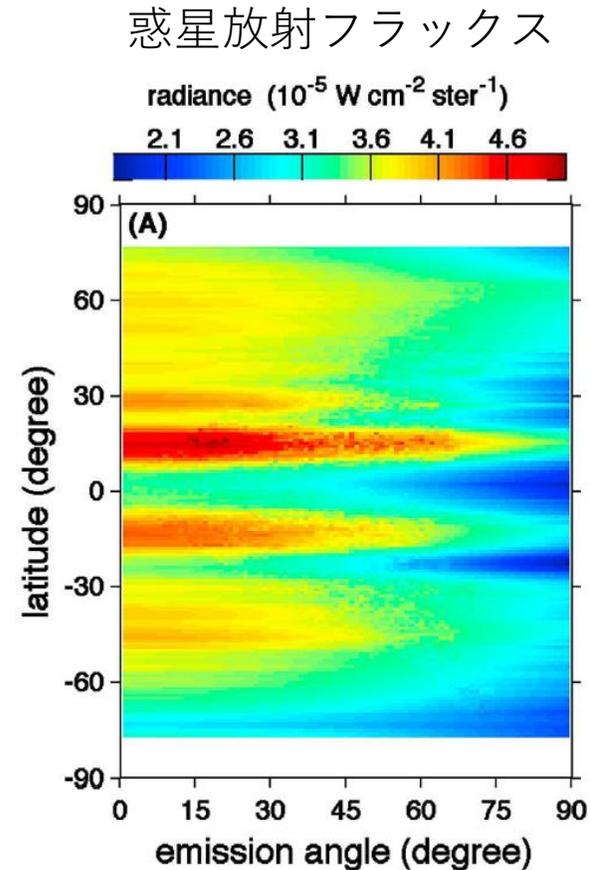
Cassini 観測によるアルベドの 波長-位相角分布

- 色々処理すると… (ボンド)
アルベドは 0.503 ± 0.012
 - 過去の観測では 0.343 ± 0.032
(Pioneer, Voyager).



惑星放射フラックス と内部からの熱フラックス

- Cassini 観測による木星の惑星放射フラックス
 - $\sim 14.098 \text{ W m}^{-2}$ (Li et al., 2012)
 - 観測器
 - Composite Infrared Spectrometer (CIS)
 - Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS)
- (ボンド)アルベド 0.503 ± 0.012 , 太陽定数 53.48 Wm^{-2} を考慮すると, 内部熱源フラックスは, $7.485 \pm 0.163 \text{ Wm}^{-2}$.



木星のエネルギー収支 改訂

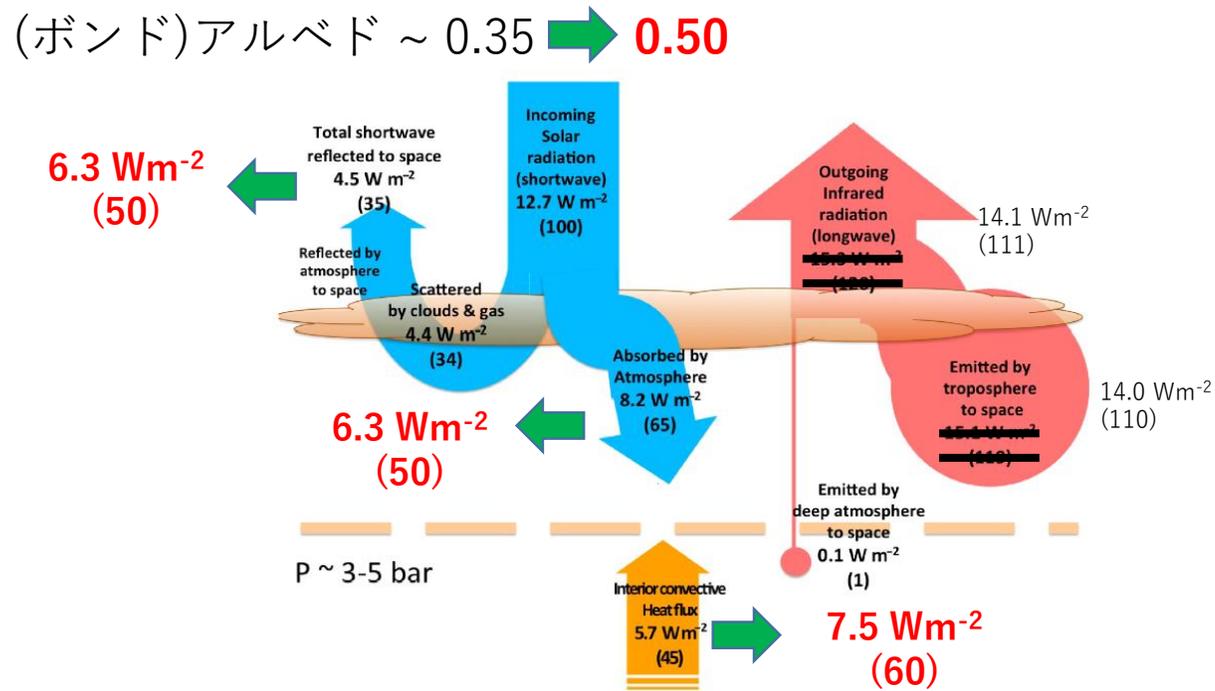


Figure 9. Schematic flow of energy within Jupiter's irradiated troposphere and stratosphere, as determined from a combination of *Voyager* and *Cassini* measurements (Li *et al.*, 2012) and NEMESIS model calculations (Irwin *et al.*, 2008, see text). Solar radiative fluxes are shown on the left (in blue online) and infrared fluxes on the right (salmon pink online); upwelling interior convective fluxes are in the centre (in orange online). The horizontal dashed line represents the approximate boundary in the atmosphere below which solar insolation does not penetrate.

木星は太陽からもらった熱の 1.7 倍の熱を出している。

(Read, 2016 に加筆)

↓
2.3 倍

(別の論文と合わせたので、収支の数字は合ってません)

議論 1: 木星の進化

- 内部からの熱フラックスがこれまでの認識と異なる ($5.7 \Rightarrow 7.5$ Wm^{-2} ; 1.3 倍) ことは, 木星進化の理解の再検討が必要…らしい.

議論 1: 木星の進化

- Graboske et al. (1975)
 - 木星の進化を調べた初期の研究
 - 太陽組成
 - 放射対流平衡（断熱的温度構造 + 放射平衡温度分布）
 - 太陽放射加熱

(より新しい論文まで手が回りませんでした.)

議論 1: 木星の進化

- Graboske et al. (1975)

- 木星の進化を調べた初期の研究

- 太陽組成
- 放射対流平衡 (断熱的温度構造 + 放射平衡温度分布)
- 太陽放射加熱

光度=内部熱源熱フラックス

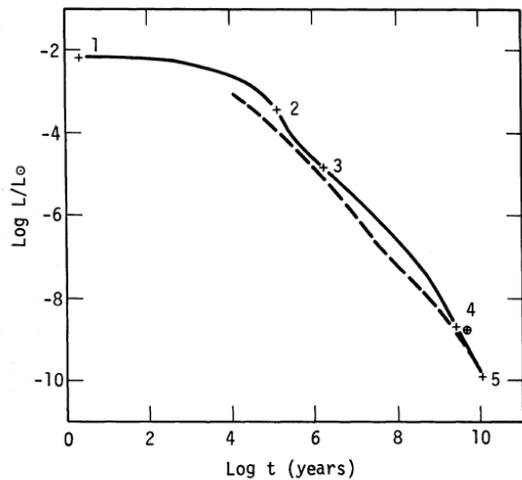


FIG. 3.—Time dependence of luminosity for the S1 standard sequence, with epochs 1 to 5, the Jovian luminosity and the hydrogen sequence shown as in Fig. 2.

半径

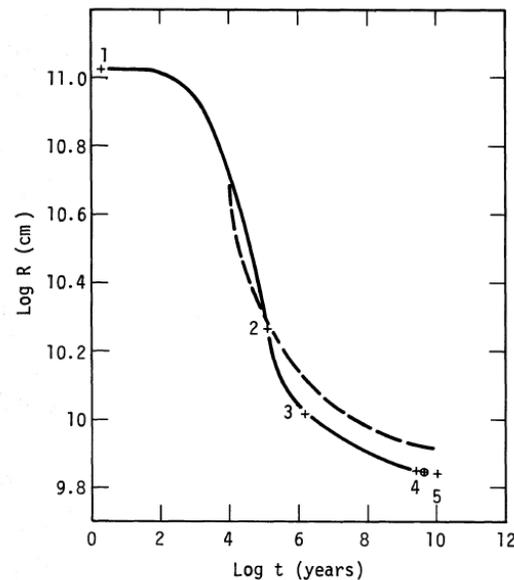


FIG. 2.—Time dependence of radius for the S1 standard sequence, with epochs 1-5 (+) and Jupiter (⊕) indicated. The broken line (---) gives the radius of the hydrogen sequence.

光度=内部熱源熱フラックス

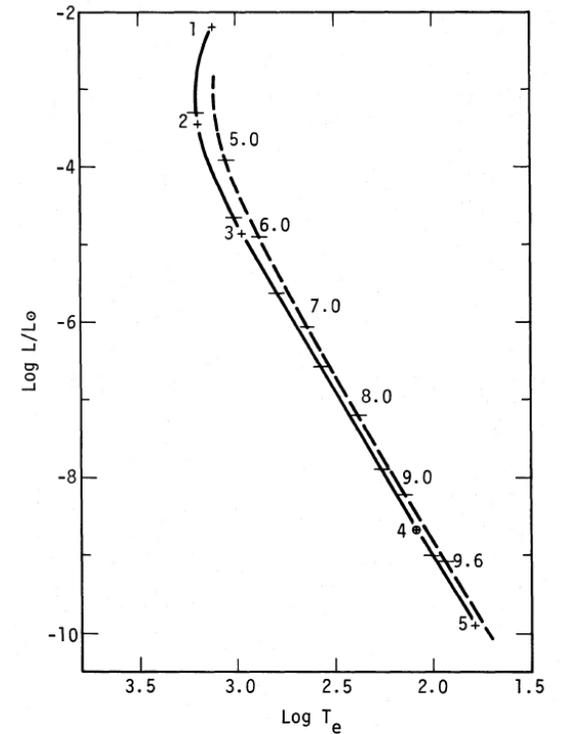


FIG. 1.—The theoretical ($\log L, \log T_e$)-track for the S1 standard sequence (—) with $T_{\odot} = 102$ K. The value of $\log t$ in years is indicated by the horizontal bars, while model epochs 1-5 are shown (+), as is the observational value for Jupiter (⊕). The corresponding hydrogen sequence is given by the broken line (---).

議論 1: 木星の進化

光度=内部熱源熱フラックス

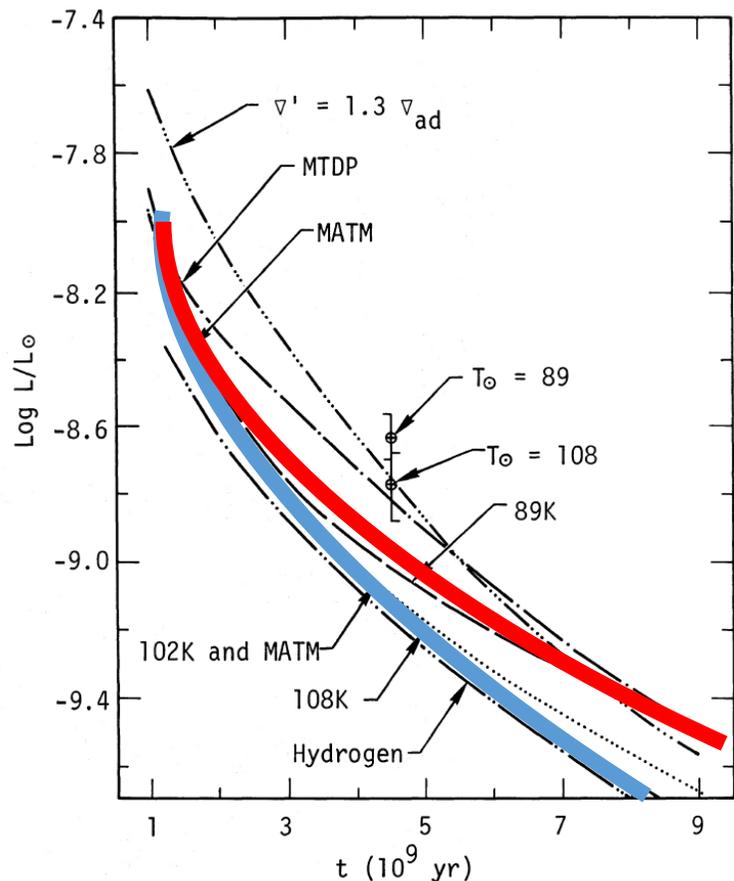


FIG. 10.—Variation of luminosity with time for various sequences. The 89 K, 108 K, and MATM sequences lie very close to the S1 standard sequence. The two values of L_J correspond to $T_{\odot} = 89$ K and 108 K.

- (Graboske et al. (1975) の標準的なモデルでは, 形成後 45 億年において現実の木星の光度を再現しない.)
- 計算された光度の太陽放射加熱率へ依存性に基づくと, Cassini 観測による内部熱源フラックスの更新の進化の時間スケールへの影響は ~5% ?

T_{\odot}	F
89 K	3.6 Wm ⁻²
108 K	7.7 Wm ⁻²

議論 2: 他の惑星の放射収支

- 他の惑星も考え直した方が/測りなおした方が良い.
 - 天王星は内部熱源がないと考えられているが本当か?

	木星	土星	天王星	海王星
惑星放射 /太陽放射吸収	1.7 ⇒ 2.3	1.8	~1	2.6

(West, 2007)

議論 3: 対流活動

- 内部熱源 $5.7 \text{ Wm}^{-2} \Rightarrow 7.5 \text{ Wm}^{-2}$ に対応して対流活動の理解にも影響?
 - 安直には, これまでに考えていたよりも対流は活発?

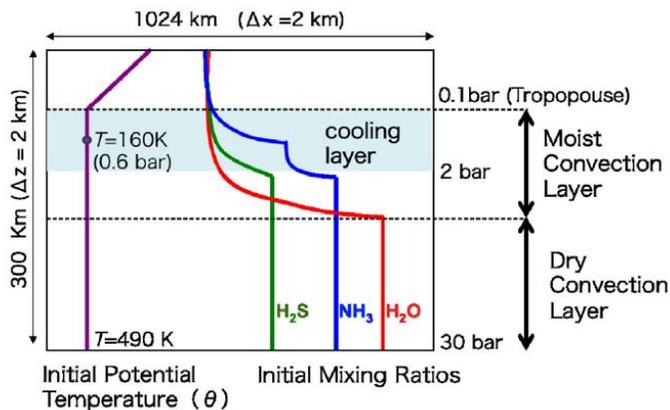


Fig. 1. Schematic view of experimental settings.

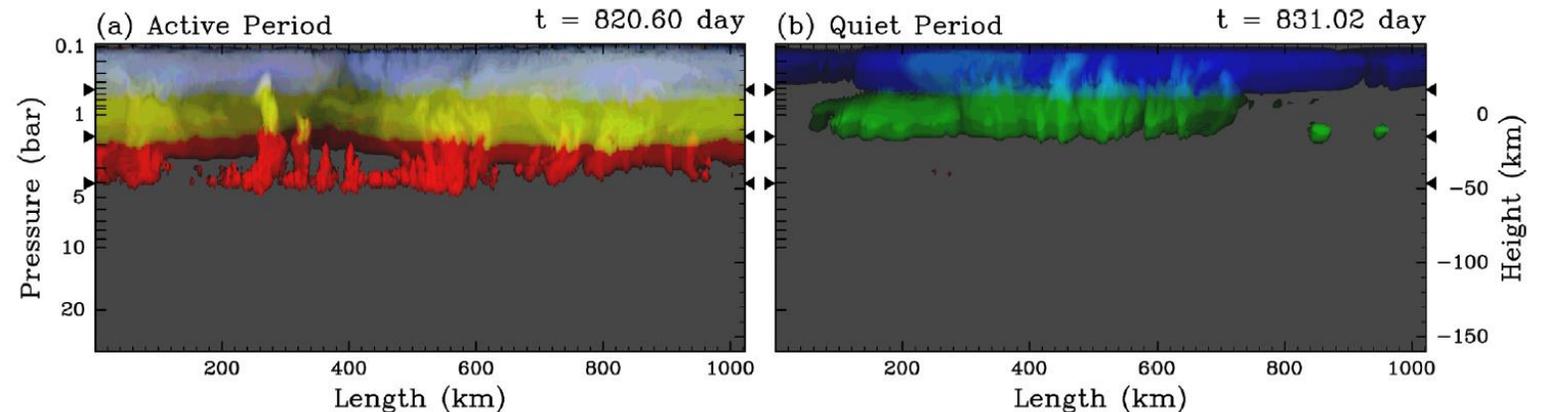
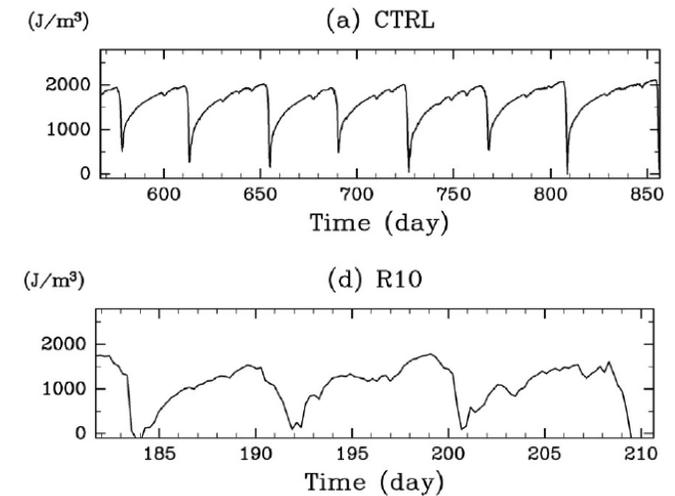
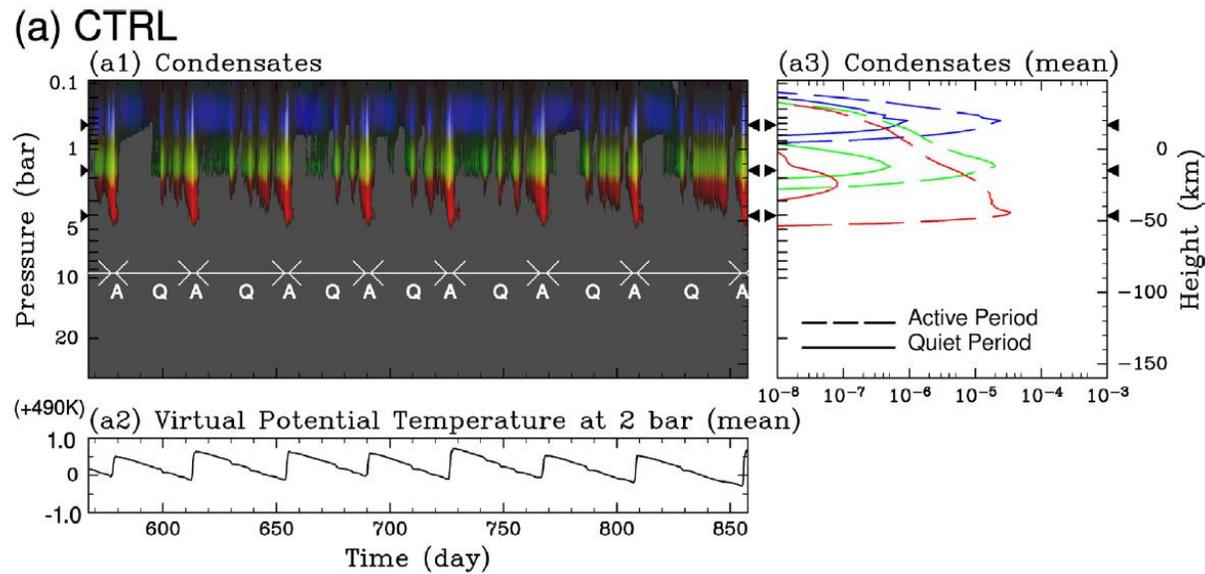


Fig. 8. Snapshots of mixing ratios of condensates obtained in C100 during (a) an active period at $t = 820.60 \text{ day}$ and (b) a quiet period at $t = 831.02 \text{ day}$. Multiple composition condensates are represented in the same manner as in Fig. 3. Black triangles on the left and the right edges of each panel indicate the NH_3 , NH_4SH , and H_2O LCLs from top to bottom.

議論 3: 対流活動



「対流不安定の指標」の時間変化
上図: Control
下図: *冷却率*を10倍にした実験

まとめ

- Cassini の Jupiter fly-by 期間中の観測結果を用いて, 木星のアルベドを求め, それを用いて内部熱源フラックスを再計算した.

	Li et al. (2018)	過去の研究
アルベド	0.50	0.35
内部熱源熱フラックス	7.5 Wm ⁻²	5.7 Wm ⁻²

- この結果は, 木星進化や木星大気中の対流活動の理解に影響があるかもしれない.
- また, 他のガス惑星のアルベドと熱フラックスの評価も修正が必要かもしれない.