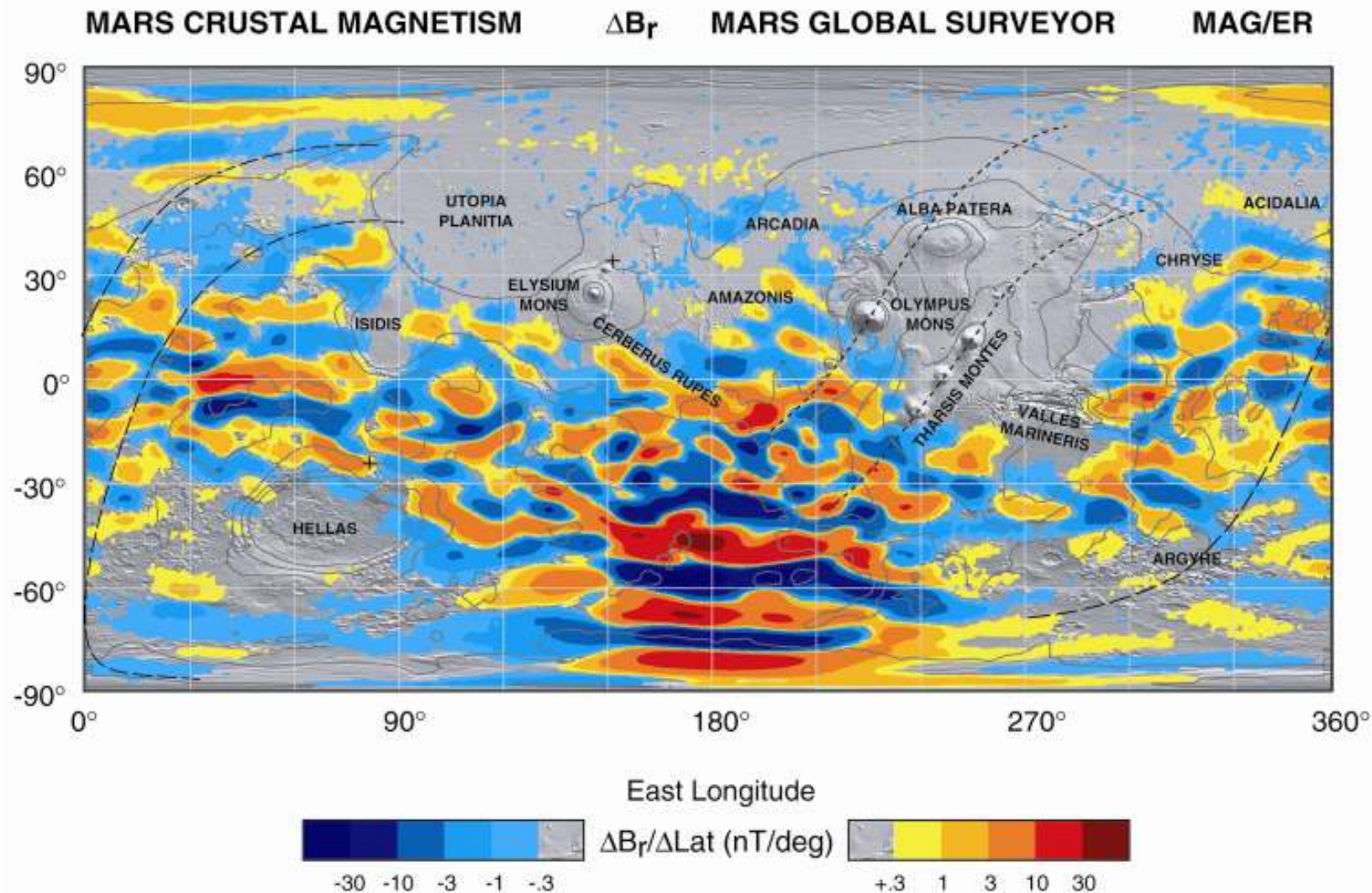
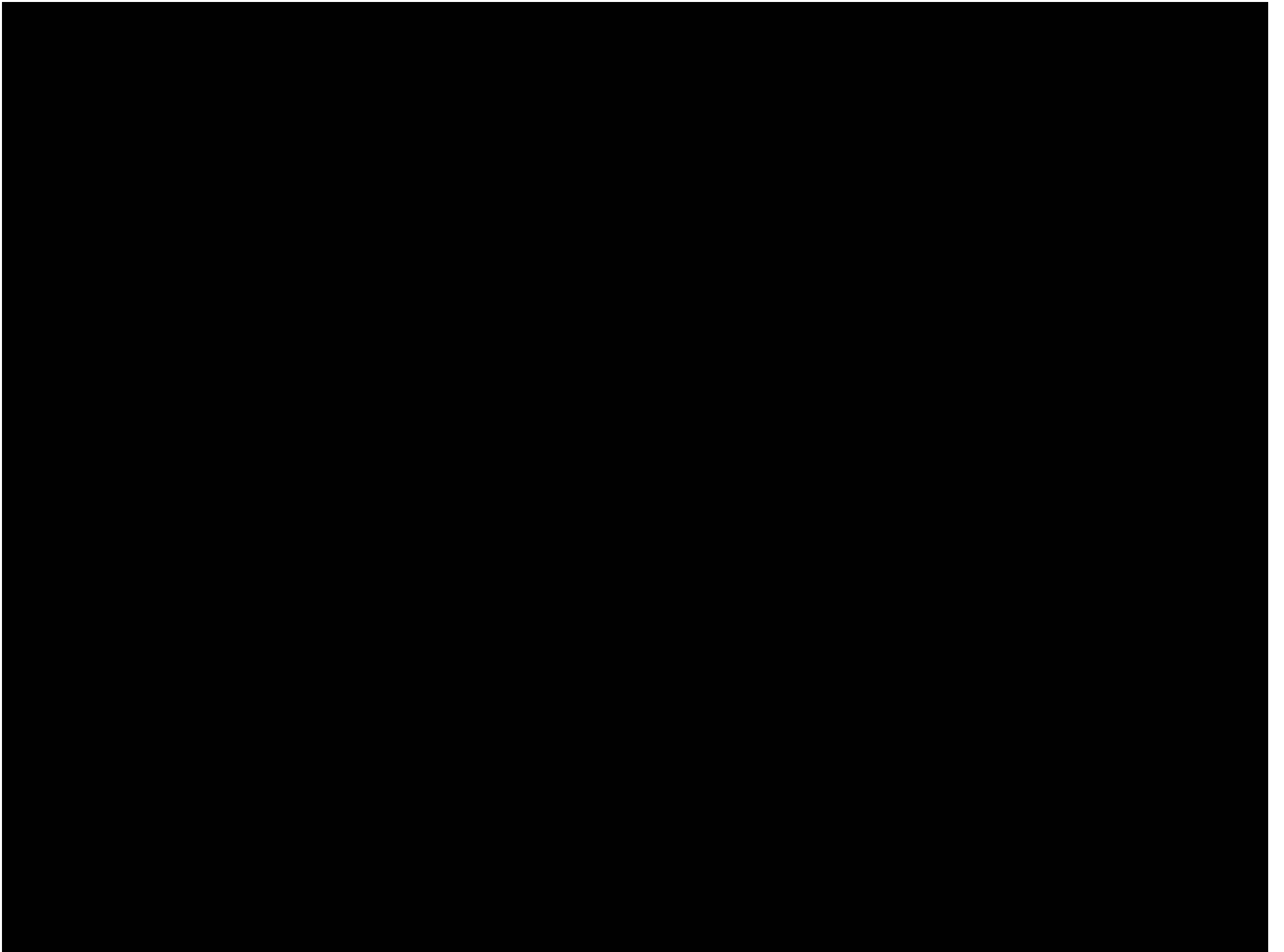


MAG/ER

(Magnetometer / Electron Reflectometer)





火星の内部構造

千秋博紀

千葉工業大学惑星探査研究センター

火星の起源と進化を知りたい

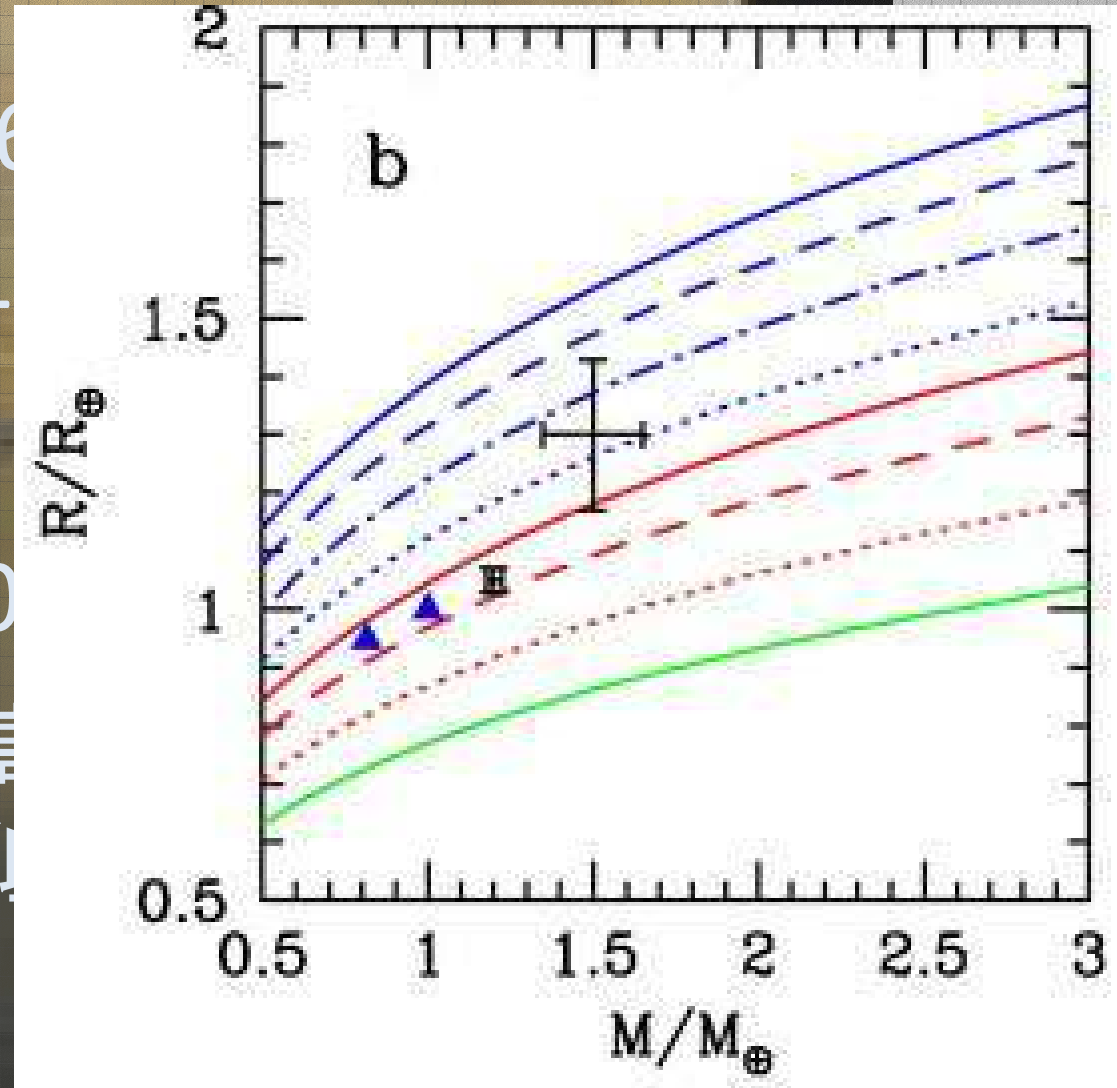
- 火星は何でできているのか
 - 地球と同様？小天体や隕石と同様？
 - 太陽系全体でどのように位置づけられるのか
- 火星はどのような構造をしているのか
 - 核を持っているか？そのサイズは？
 - 磁場はあったのか？
 - マントルには構造があるか
 - 火星の地形とどのような関係があるのか
 - 火星隕石は火星全体を代表しているのか

火星の密度

- 半径: 3396km
- 質量: 6.42×10^{23} kg
- 密度: 3930 kg/m^3
 - 岩石より高密度
 - 金属より低密度

火星の密度

- 半径: 3396 km
- 質量: 6.4 × 10²³ kg
- 密度: 3930 kg/m³
 - 岩石より高い
 - 金属より低い



©NASA/NSF

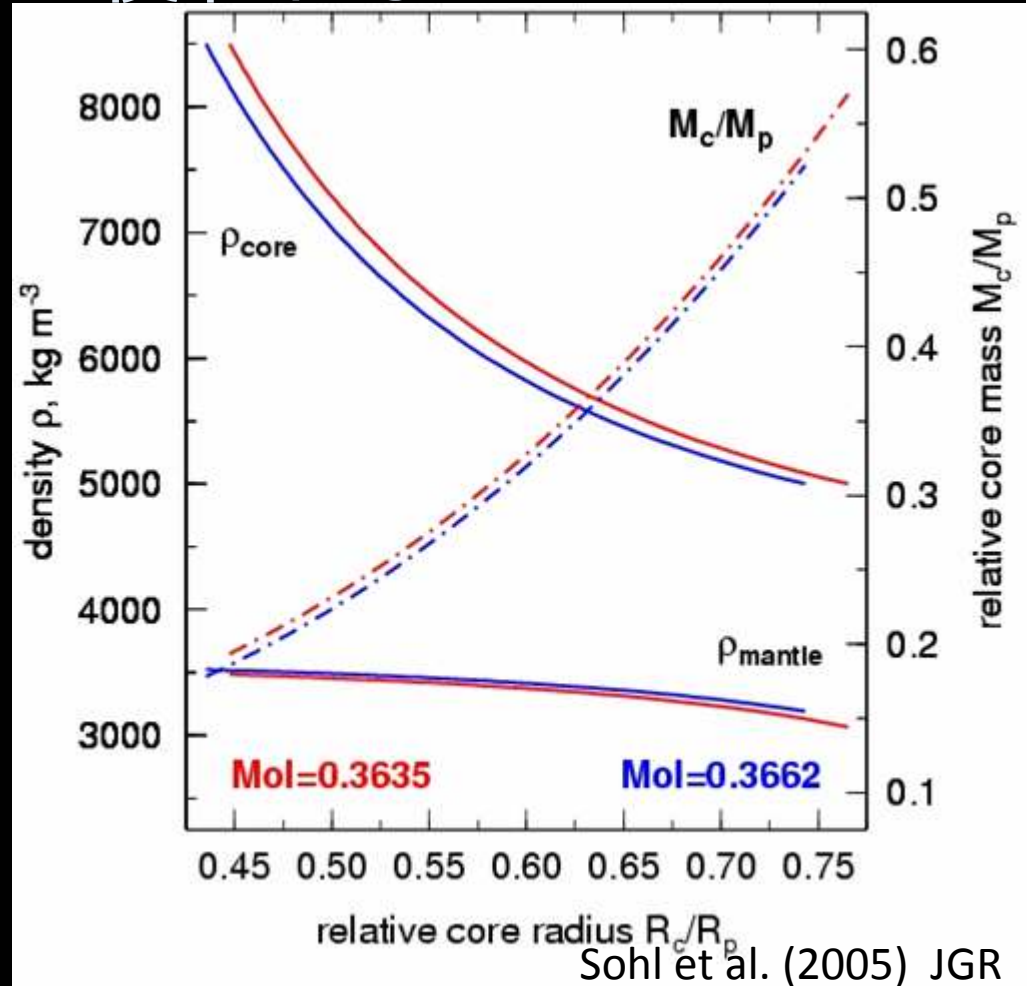
Seager et al. (2007) ApJ

慣性能率

- 内部構造の指標として使われる

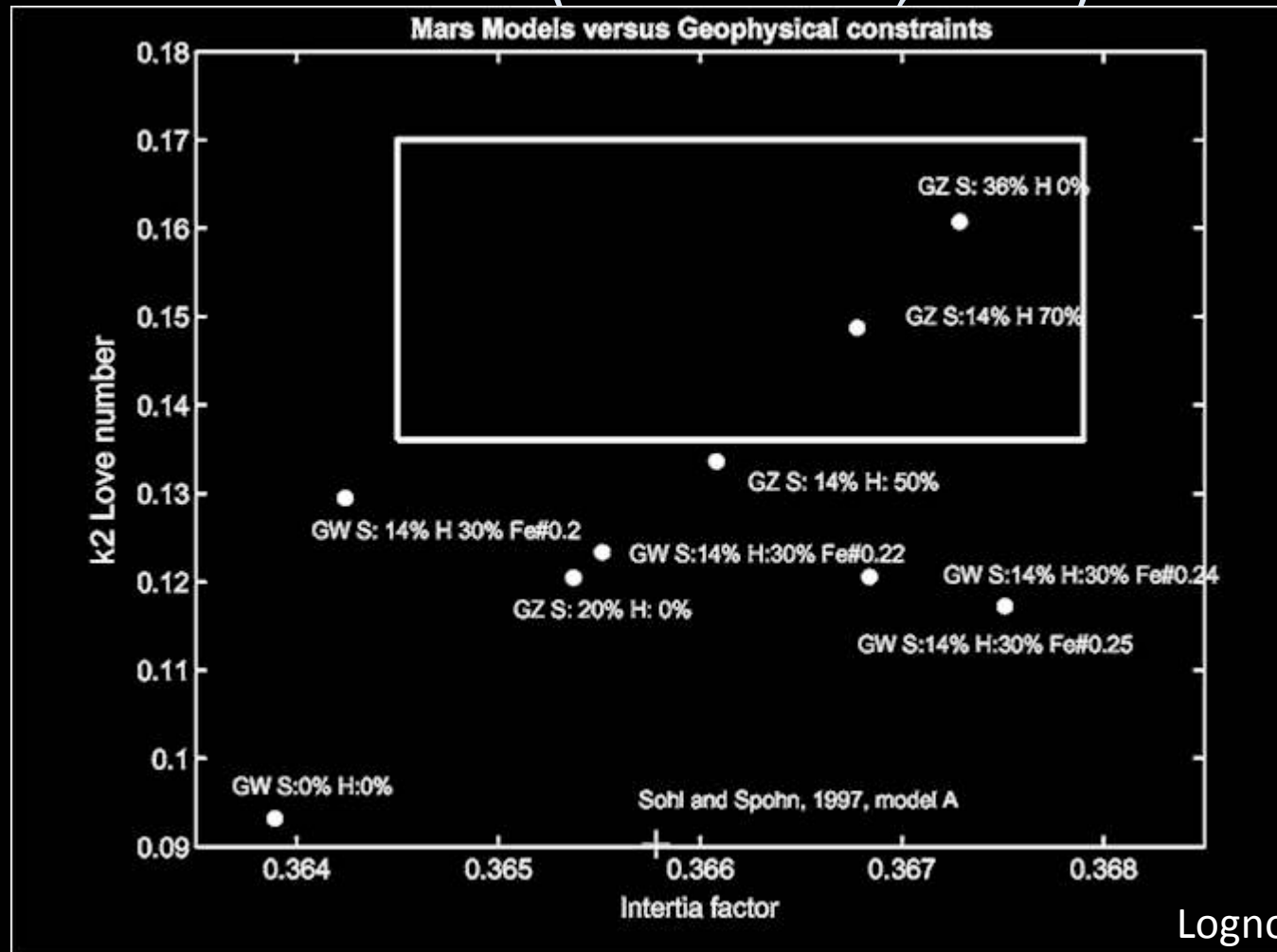
$$C = \frac{8}{3} \pi \int_0^R \rho r^4 dr$$

- 歳差運動の観測から求められる
 - 火星上の固定点の位置測定
- 0.3662 ± 0.0017
(Folkner et al., 1997)



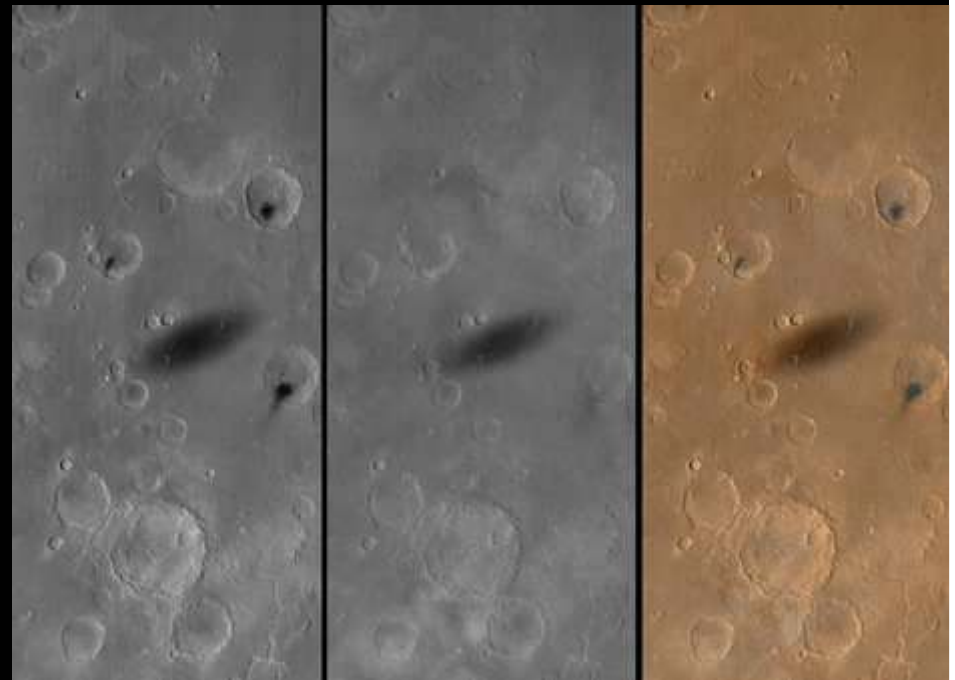
k2 Love 数と Q 値の関係

- $k_2 = 0.153 \pm 0.017$ (Yoder et al., 2003)



k2 Love 数と Q 値の関係

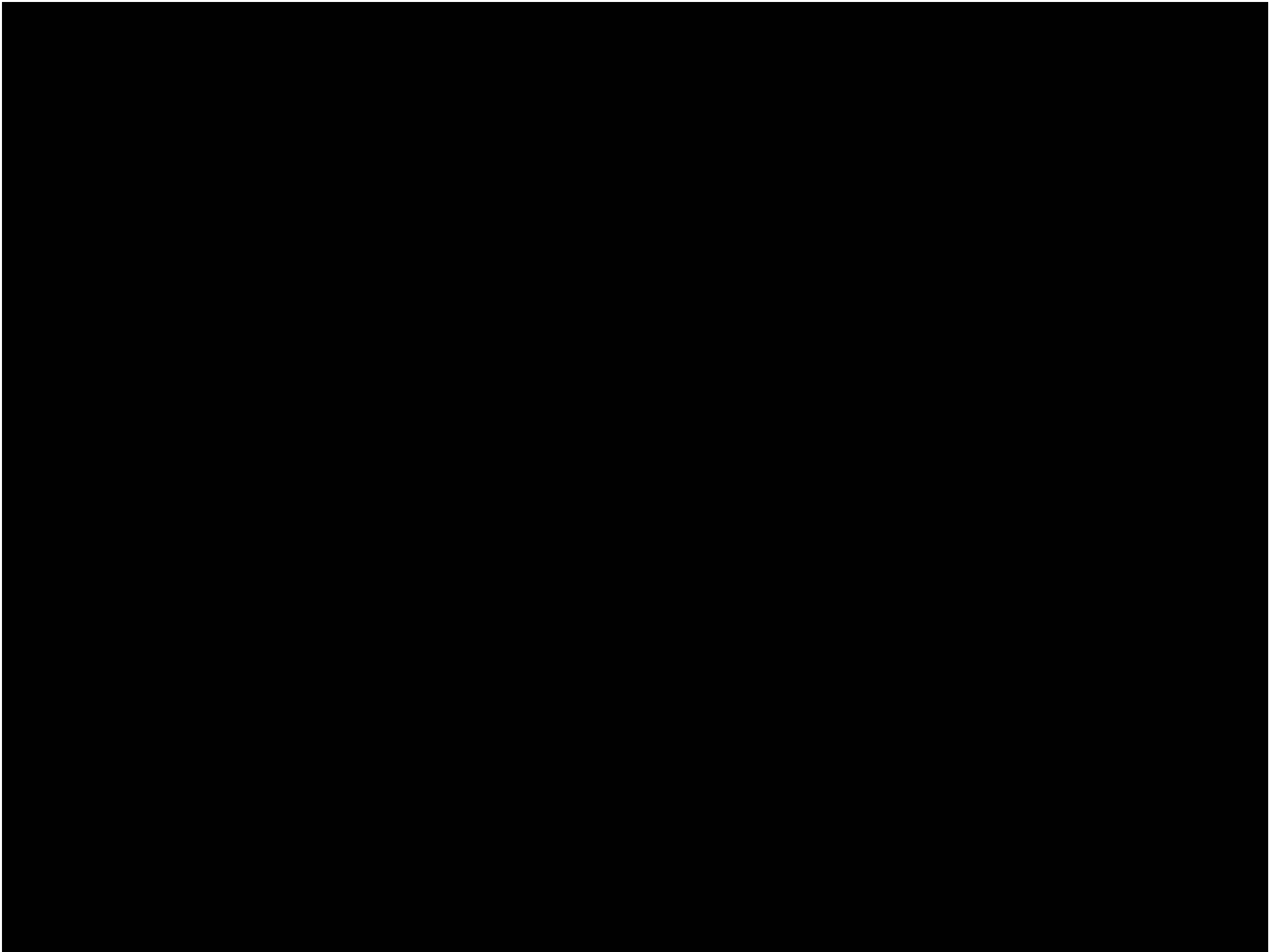
- 火星との潮汐によるフォボスの軌道進化から火星のQ値を求める事ができる
- Q値は小さい
→ 液体核の存在



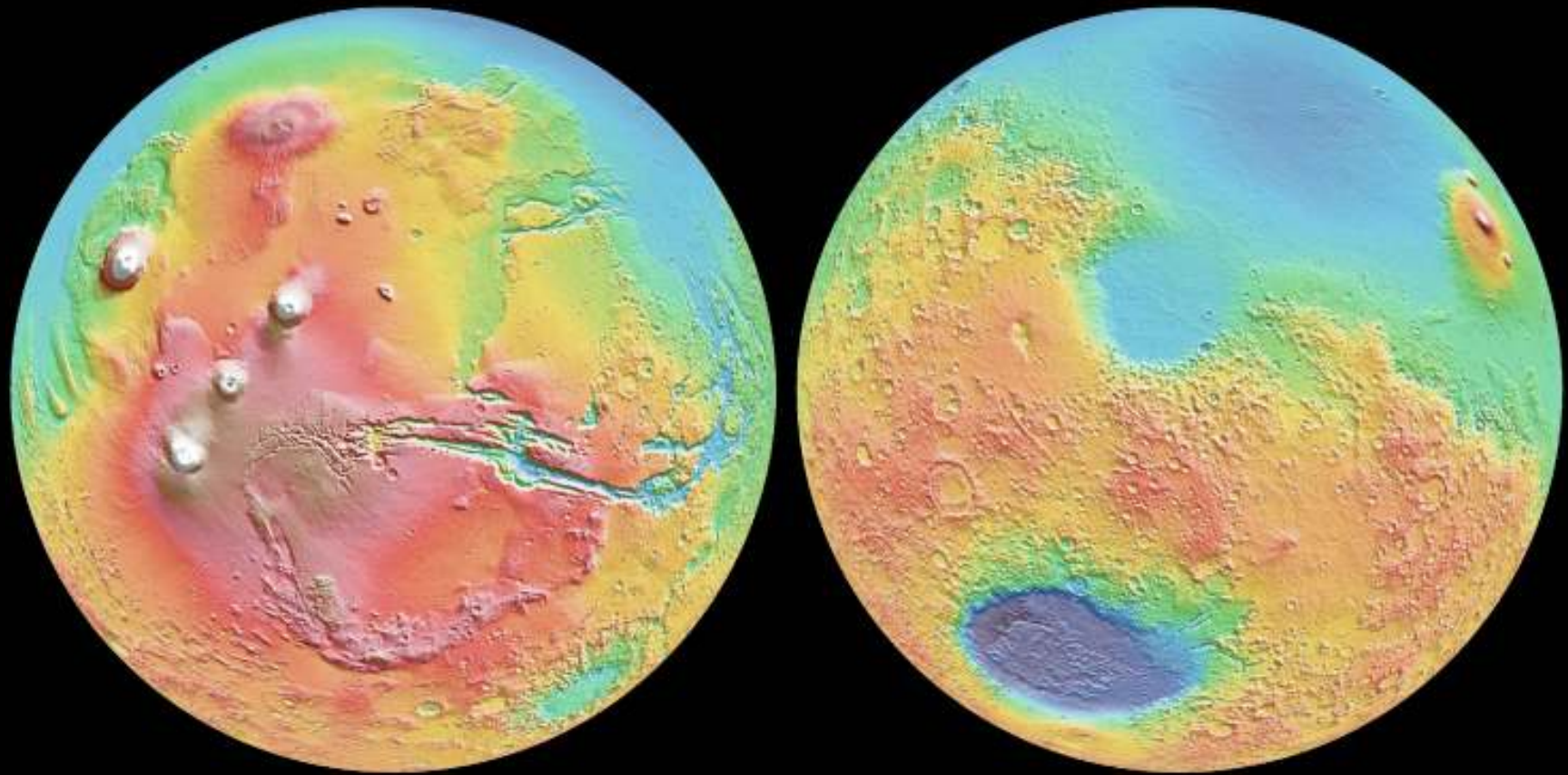
Shadow of Phobos on the surface of Mars

これまでの探査で分かった 火星内部の情報

- **密度** ← 半径 + 質量
 - 火星は岩石と金属の混合物
- **慣性能率**
 - 中心部に高密度の構造を持つ
- **Love 数と Q 値**
 - 火星の核には硫黄以外にも軽元素を含む
 - 火星の(外?内?)核は融けている



地形から何を読み取れるか



Altitude [km]

Image Credit: NASA/JPL

南北非対称の起源

- 外因説

- 天体衝突

- (Wilhelms and Squyres, 1984; Frey and Schultz, 1988; Marinova et al., 2008; Nimmo et al., 2008; Andrews-Hanna et al., 2008)

- ⇔ 地殻厚は南北で連続的に変化している

- (Zuber et al., 2000; Zhong and Zuber, 2001; Zuber 2001)

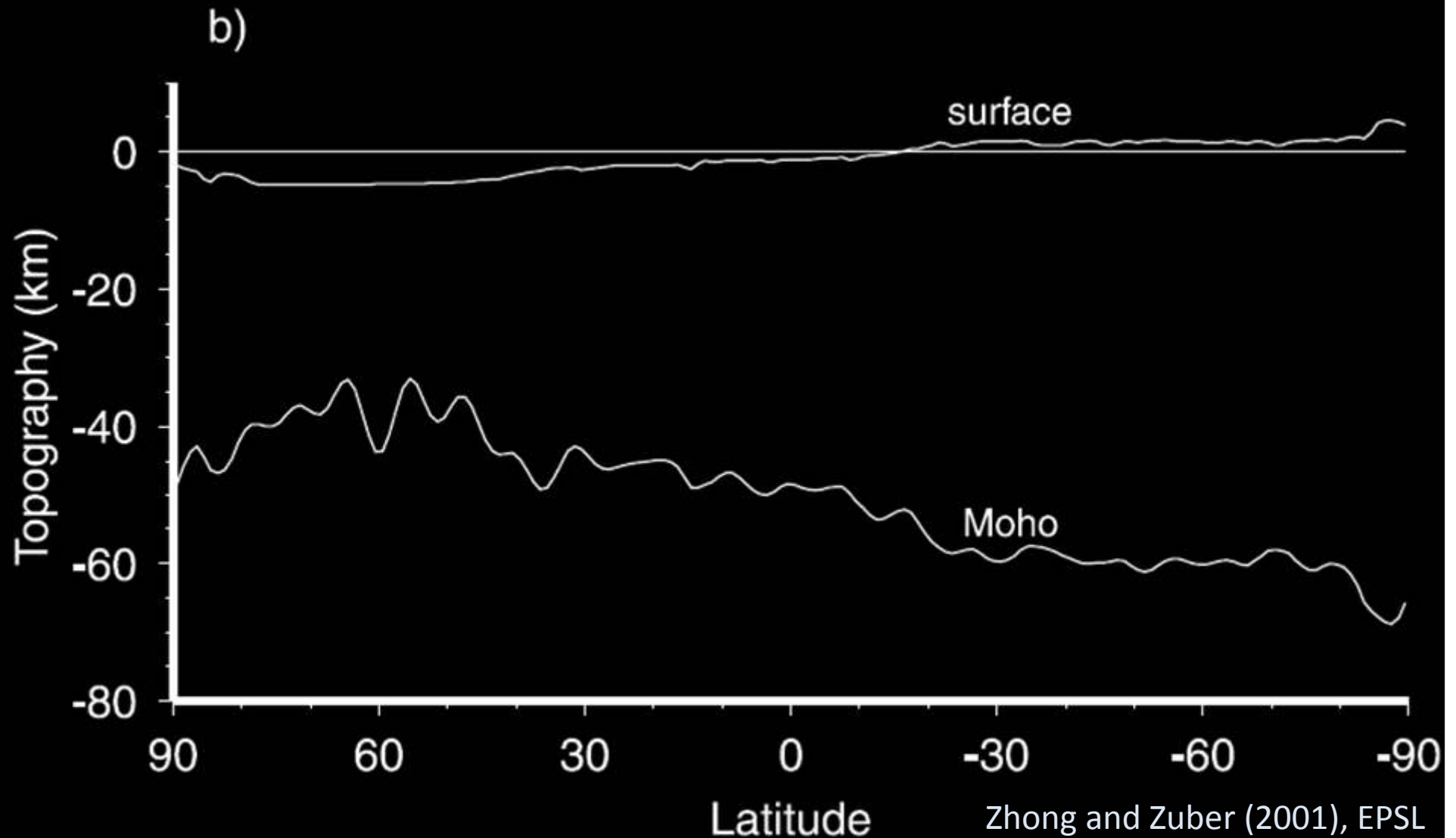
- ⇔ 地殻形成は火星史初期 (pre-Noachian)

- (Solomon et al., 2005; Nimmo and Tanaka, 2005;)

- ⇔ 北半球地下に埋もれたクレーター

- (Frey et al., 1999, 2000; Frey 2006)

地殻厚の南北変化



南北非対称の起源

- 外因説
 - 天体衝突
- 内因説
 - プレートテクトニクス
(Sleep, 1994; Lenardic et al., 2004)
 - マグマオーシャンのオーバーターン
(Elkins-Tanton et al., 2003)
 - 長波長のマントル対流
(Wise et al., 1979; McGill and Dimitriou, 1990;
Zhong and Zuber, 2001; Roberts and Zhong, 2006;
Keller and Tackley, 2009; Zhong, 2009)

南北非対称の起源

- 外因説
 - 天体衝突
- 内因説
 - プレートテクトニクス
(Sleep, 1994; Lenardic et al., 2004)
 - マグマオーシャンのオーバーターン
(Elkins-Tanton et al., 2003)
 - **長波長のマントル対流**
(Wise et al., 1979; McGill and Dimitriou, 1990;
Zhong and Zuber, 2001; Roberts and Zhong, 2006;
Keller and Tackley, 2009; Zhong, 2009))

長波長のマントル対流

- Zhong and Zuber (2001) EPSL
 - 粘性率モデルによっては長波長のマントル対流が生じる
- Roberts and Zhong (2006) JGR
 - 粘性率モデルの検証
 - 粘性率ジャンプが25以上あれば長波長構造
- Keller and Tackley (2009) Icarus
 - 輝石 (MgSiO_3) の相転移で粘性率がジャンプする
- Zhong (2009) Nat. Geoscience
 - タルシス高地の起源も長波長構造で説明可能

Zhong and Zuber (2001) EPSL

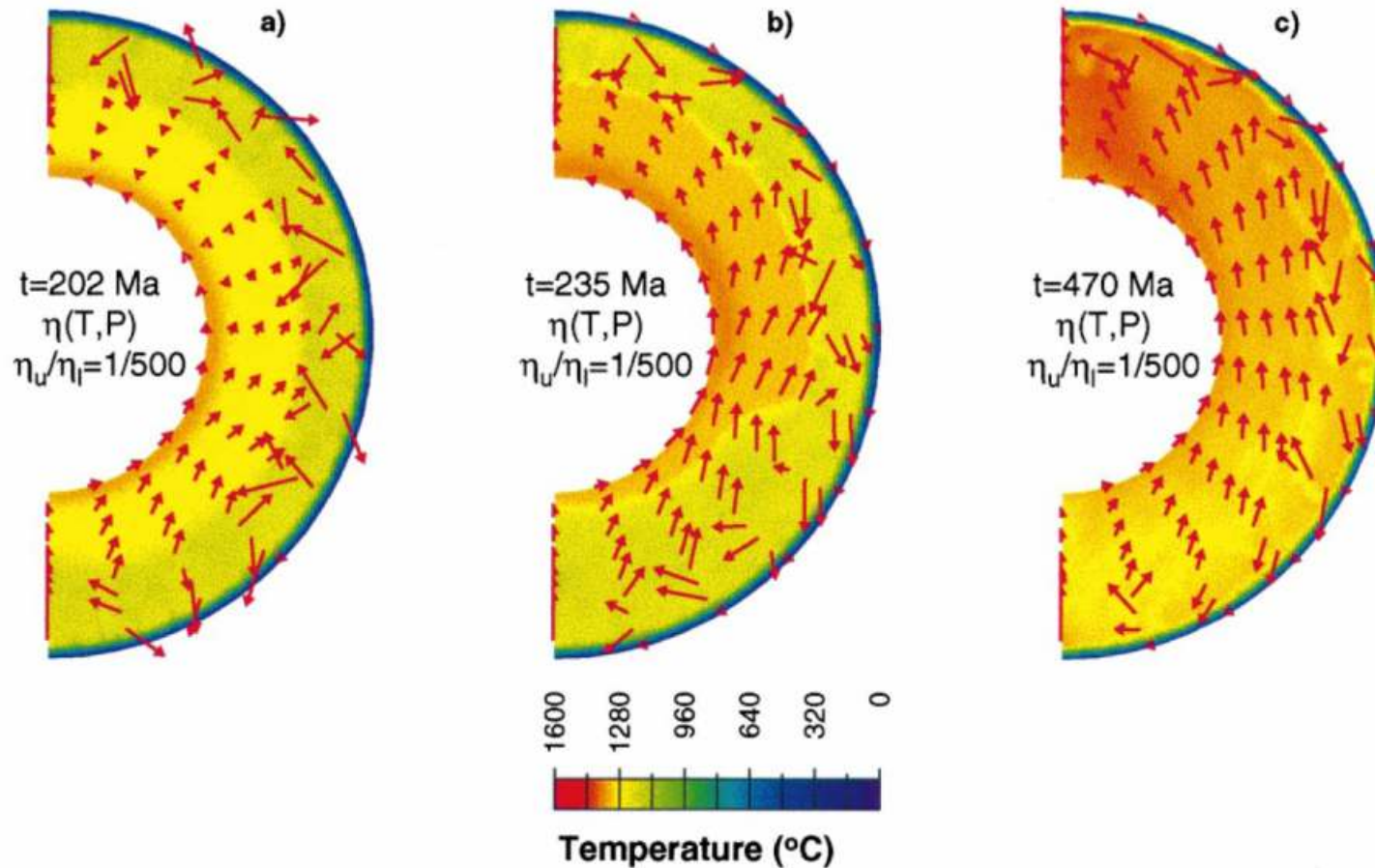
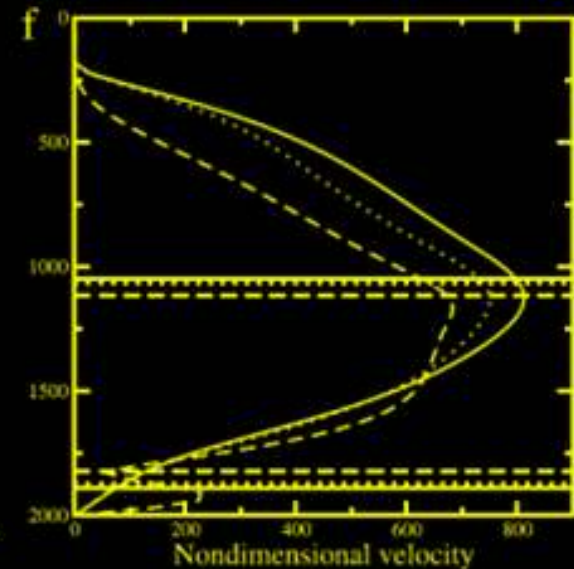
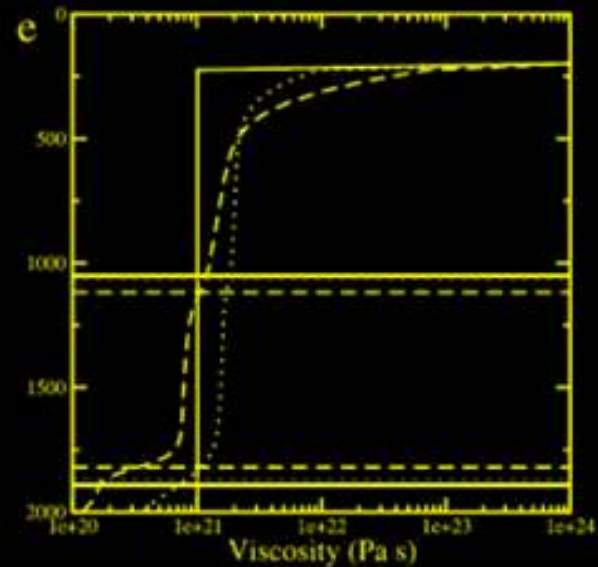
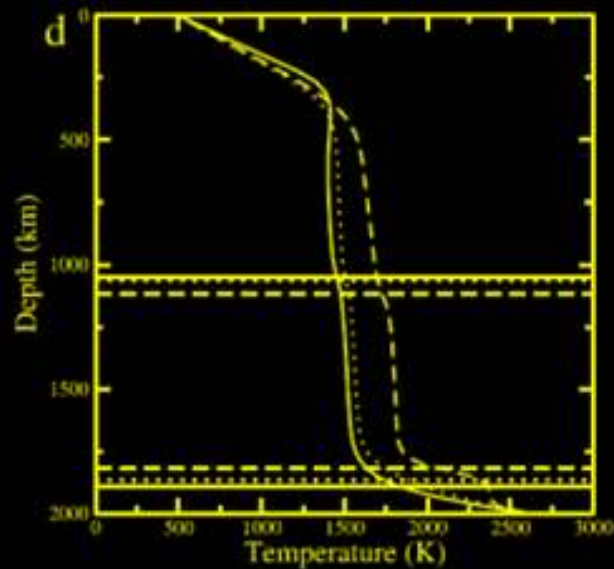
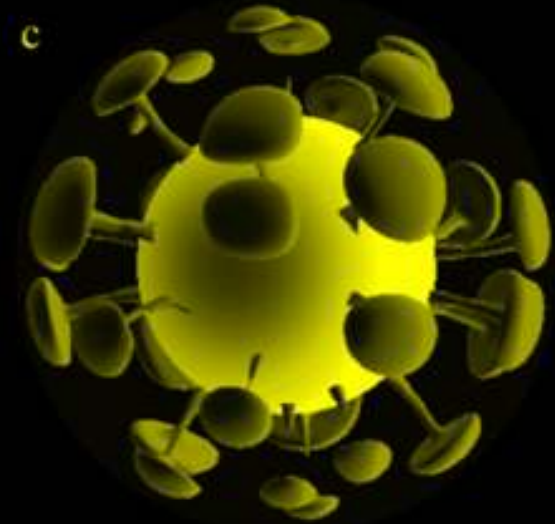
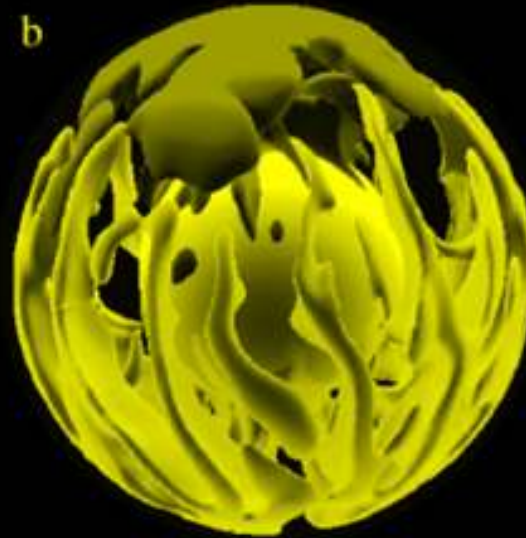
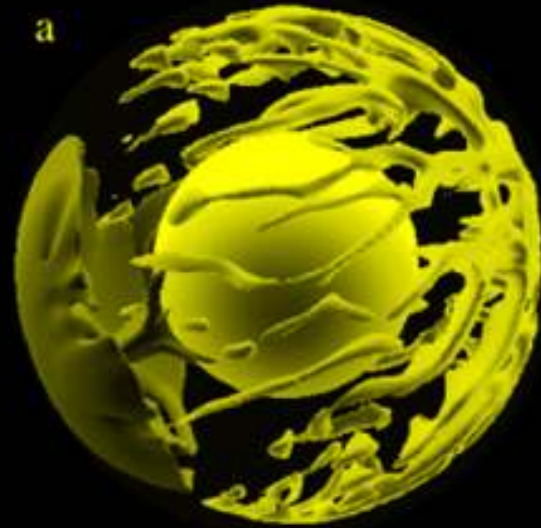


Fig. 4. Thermal structure and flow field for Case 4 at different times 202 Ma (a), 235 Ma (b), and 470 Ma (c) of Case 4 with a depth- and temperature-dependent rheology.

Roberts and Zhong (2006) JGR



Keller and Tackley (2009) Icarus

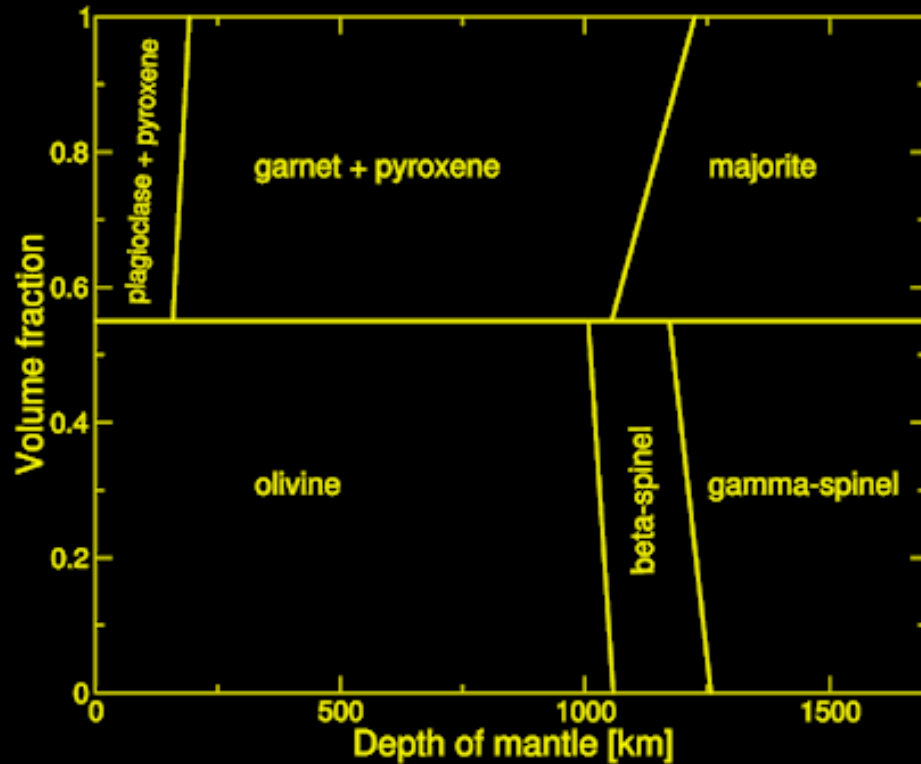


Fig. 2. Simplified mineral phase assemblage used for all model runs performed for this study. The mantle chemistry is generally treated as a two-phase system of olivine and garnet-pyroxene. Corresponding phase transition parameters are to be found in Table 2.

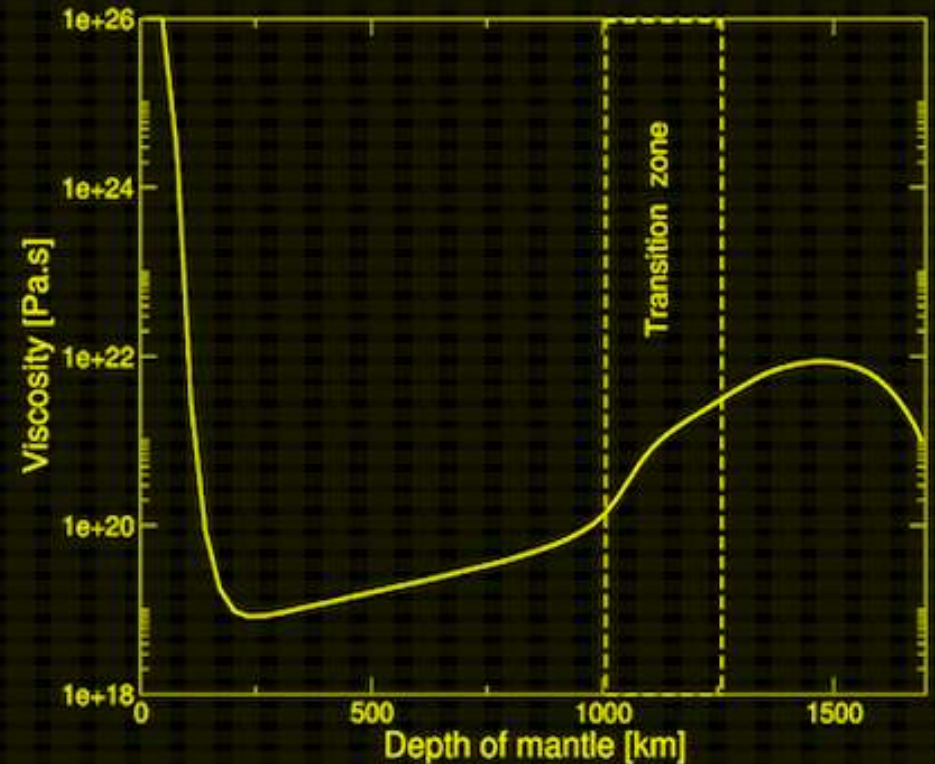
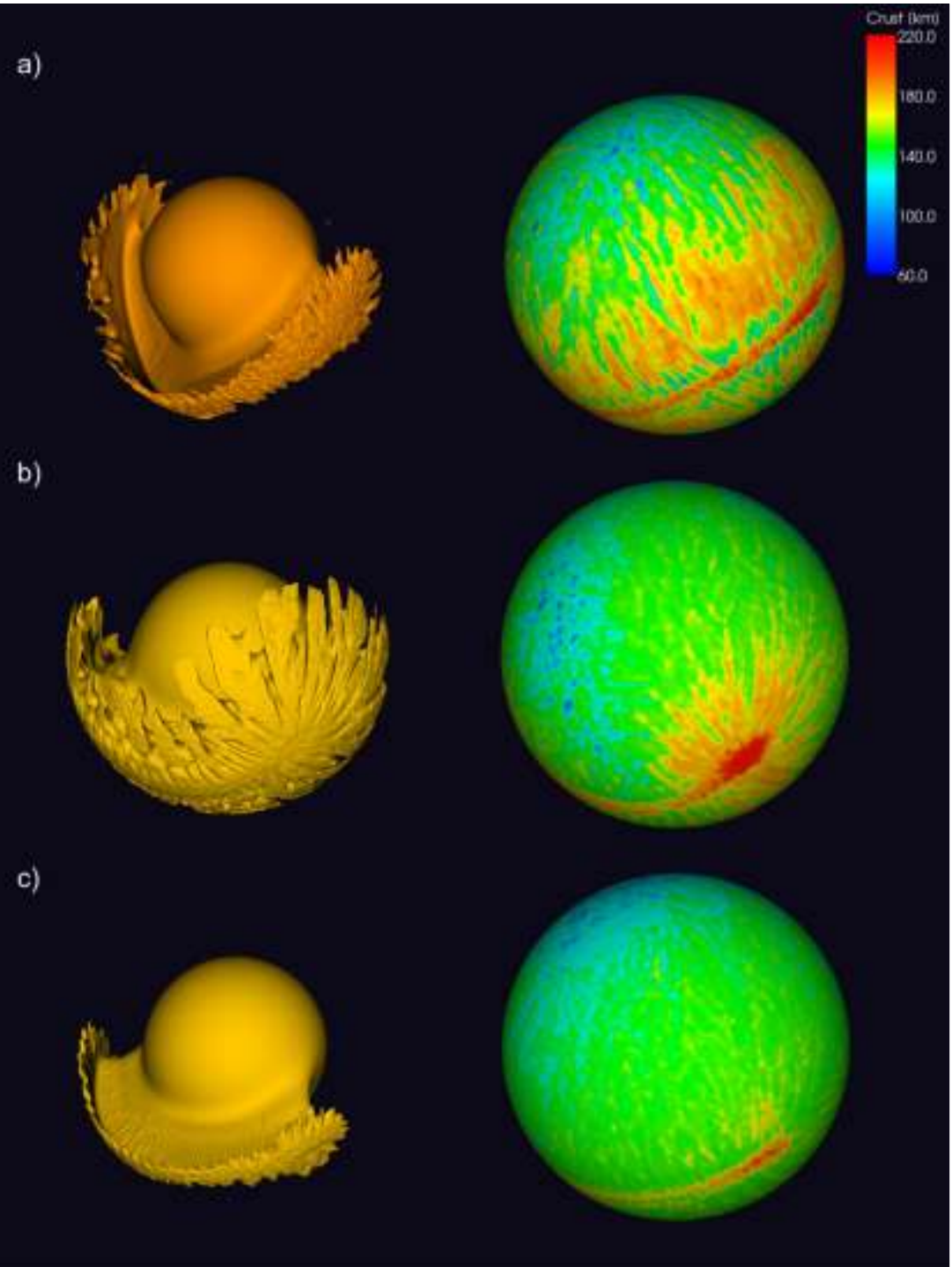


Fig. 3. Reference viscosity profile of all runs. Dashed box marks the martian transition zone in the lower mantle, where occurring phase transitions cause a viscosity increase.

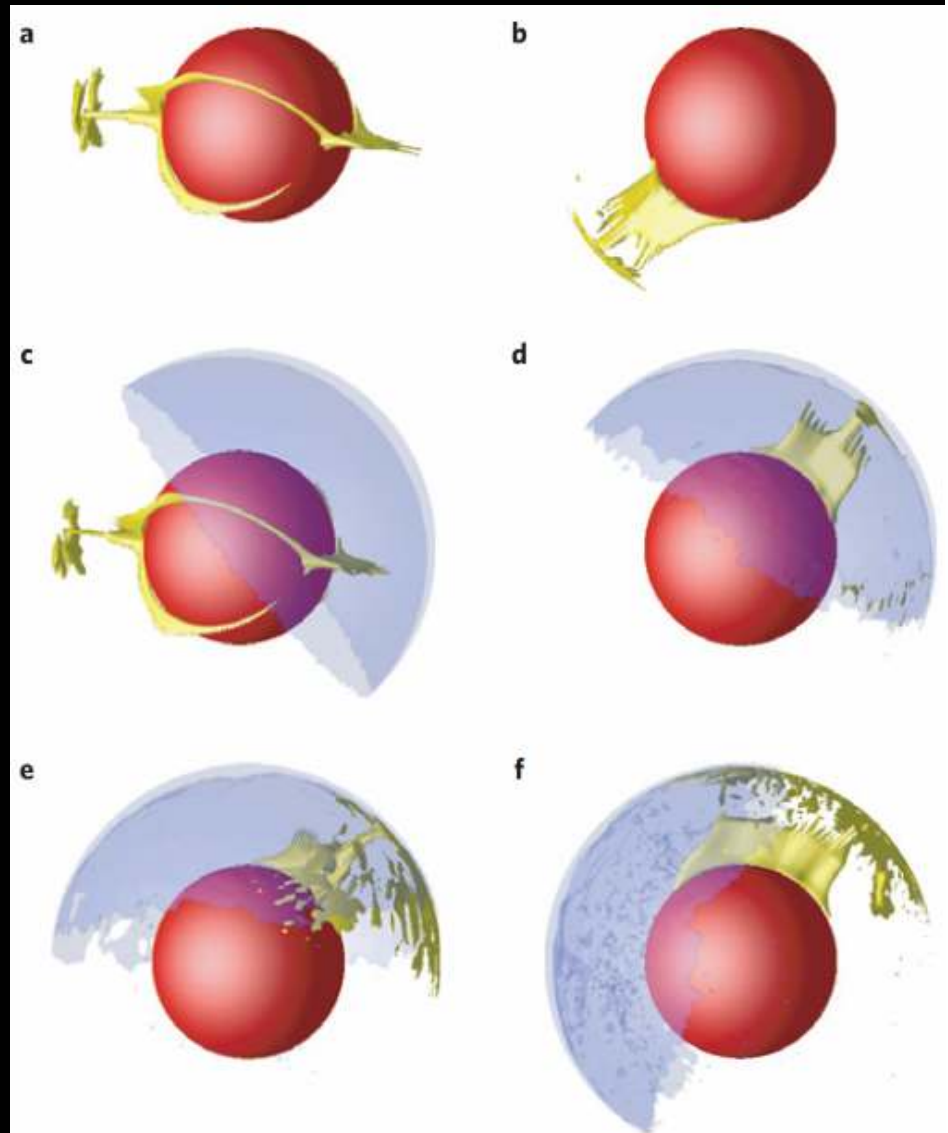
Keller and Tackley (2009) Icarus

Fig. 6. The model state after 1 Gyr for different Ra . Presented are the model runs (a) *REF_MELT* as isosurface at $T = 1550$ K to the left and corresponding crustal thickness map to the right, (b) *MID_RA* (isosurface at $T = 1500$ K), and (c) *HIGH_RA* (isosurface at $T = 1500$ K). The correlation between mantle flow and crustal patterns is clearly visible. Although large-scale upwellings produce the largest amount of crust, a significant component of crustal production also takes place in regions of small-scale sublithospheric convection driven by sheet- and drop-like downwellings.



Zhong (2009) Nat. Geophys.

Figure 2 j Three-dimensional thermal structure from numerical models. a–f, Snapshots of the thermal structure for Model 1 at non-dimensional times $t=2.5 \times 10^{-4}$ (a) and 3.9×10^{-3} (b) and for Model 2 at $t=2.6 \times 10^{-5}$ (c), 5.0×10^{-4} (d), 8.6×10^{-4} (e) and 2.05×10^{-3} (f). The red sphere, yellow isosurfaces and transparent, light-blue isosurfaces (only in d–f) represent the core, positive temperature anomalies and melt residue, respectively. The values for isosurfaces of thermal and melt residue structures are 0.07 and 0:1, respectively. Model 1 is identical to case V3 in Roberts and Zhong15, which describes model formulation and parameters (see also Supplementary Information, Table S1).



Zhong (2009) Nat. Geophys.

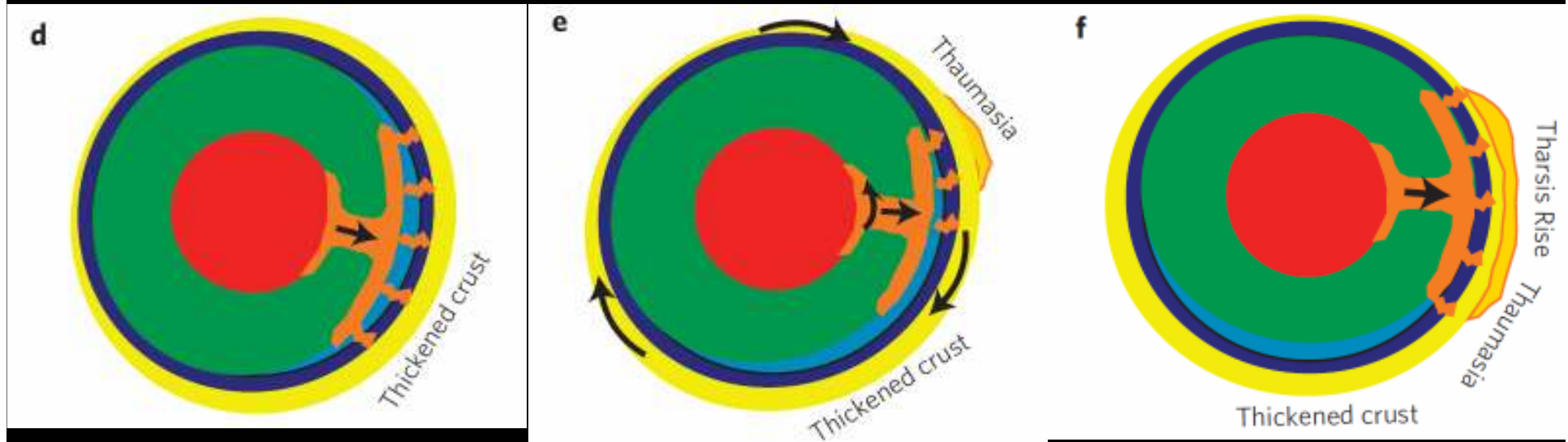
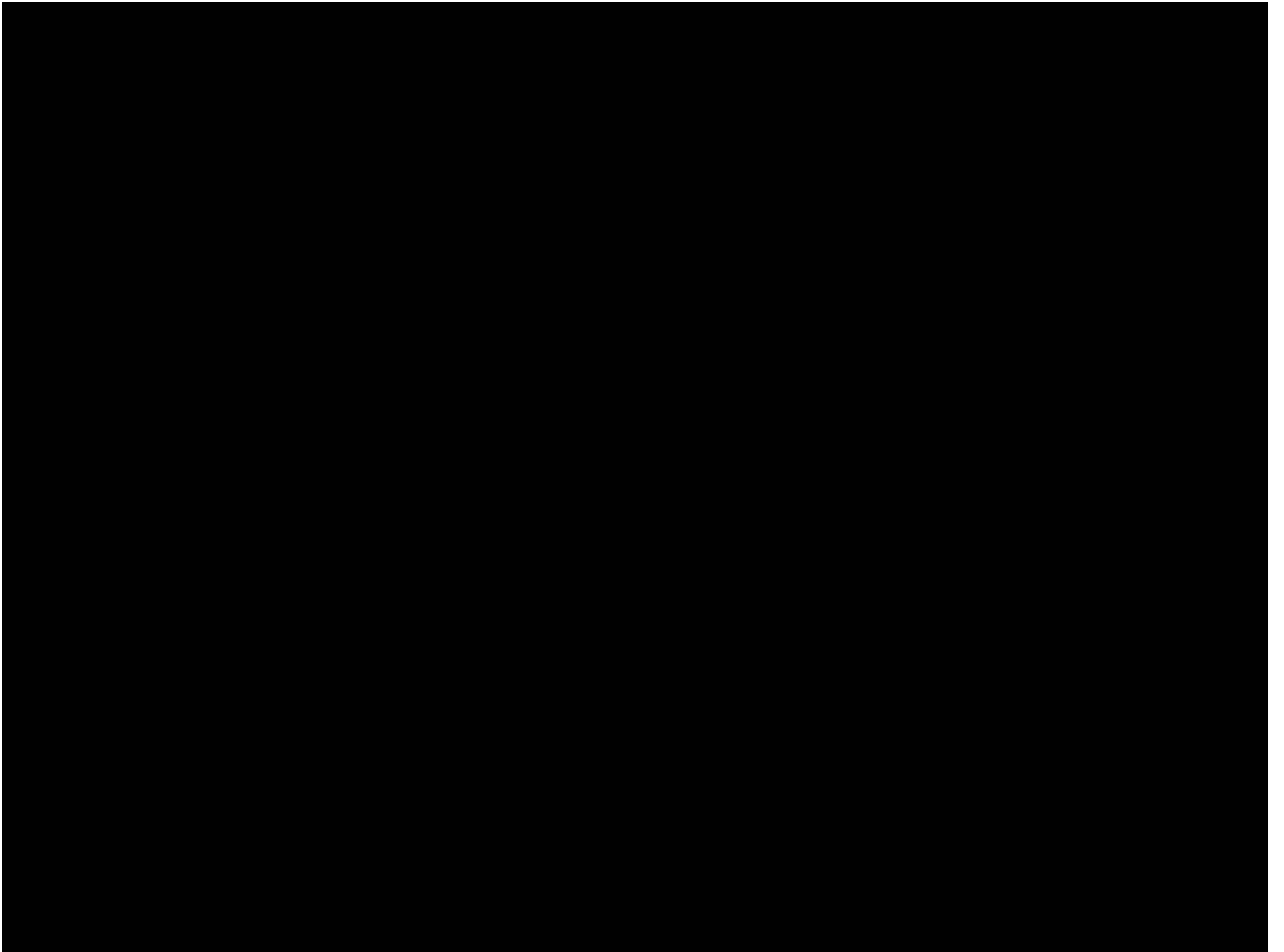


Figure 4 j Heat flux and a unified model. a, Surface heat flux. b, Non-dimensional temperature 160 km above the CMB. c, CMB heat flux for Model 2 at $t= 2.5 \times 10^{-3}$. d–f, Schematic descriptions of a unified model for the formation of the crustal dichotomy and Tharsis. The dashed line in a–c represents the melt residue cap with the star marking its centre. a and c use the same scale. The average CMB and surface heat fluxes are 52 and 72 mWm^{-2} with an internal heating rate of $\sim 82\%$. In d–f, the red, green, dark blue and yellow regions represent the core, mantle, lithospheric mantle and crust, respectively, and the light-blue region represents the melt residue.



これまでの探査で分かった 火星内部の情報

- **密度** ← 半径 + 質量
 - 火星は岩石と金属の混合物
- **慣性能率**
 - 中心部に高密度の構造を持つ
- **Love 数と Q 値**
 - 火星の核には硫黄以外にも軽元素を含む
 - 火星の(外?内?)核は融けている

次に進むために必要な情報は

- コアのサイズ, 組成
 - ←地震波, 歳差
- 岩石圏の組成
 - ←サンプルリターン
- 対流パターン, またはプルームの分布
 - ←地震波のネットワーク観測
- 粘性率分布
 - ←自由振動観測

まとめ

- **内部構造**や**内部組成**は天体の起源と進化を考える上で必須の**基礎情報**
- しかし我々はコアのサイズすら知らない
- マントルの組成も確定していない
- 火星の起源や進化を解明するためには、**内部構造**や**内部組成を知るための探査が必要**
地震, 歳差, 章動など...

