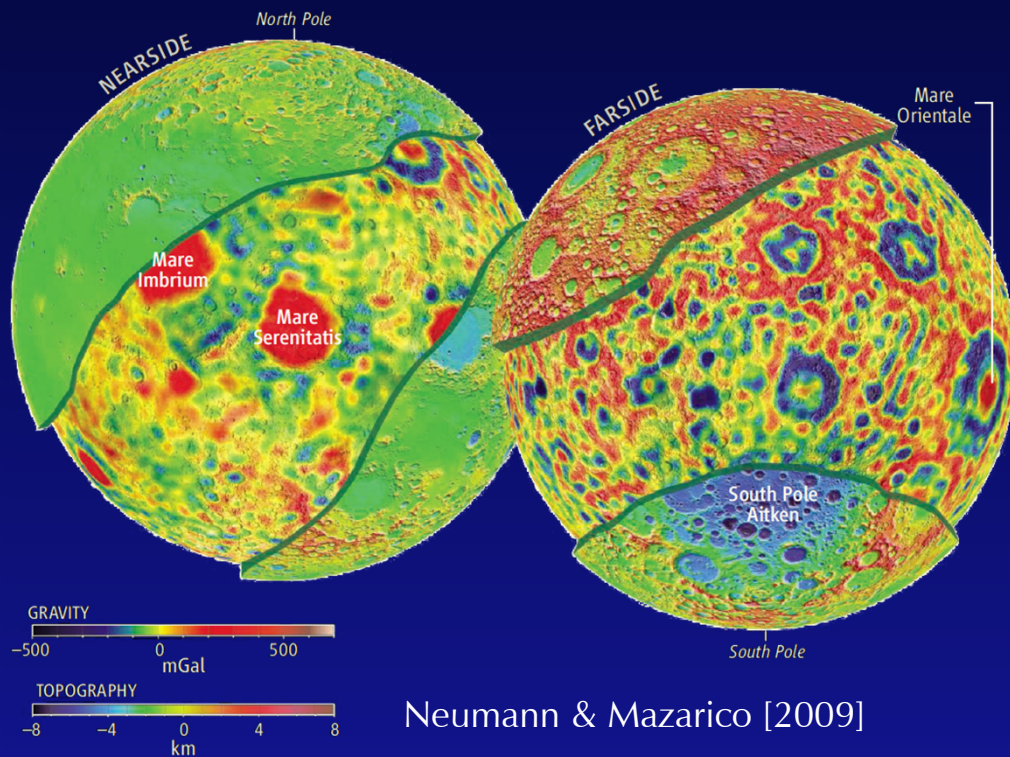


かぐや測地データより示唆された 月の長期変形と熱進化

The long-term deformation of the Moon
inferred from Kaguya geodetic data
and implications for its thermal evolution



Neumann & Mazarico [2009]

鎌田 俊一

東大・理・地惑

博論 目次

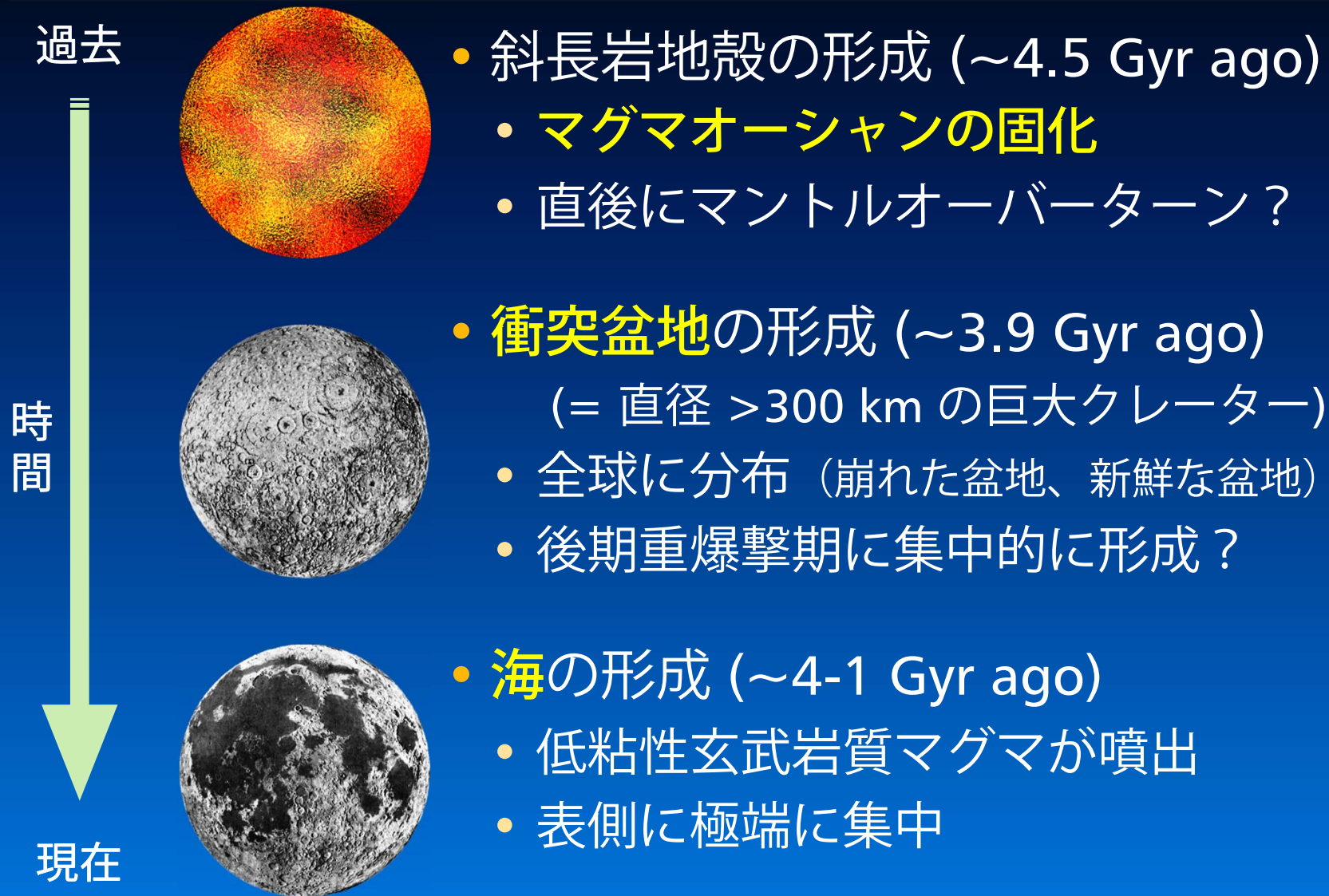
- Ch. 1 研究背景
- Ch. 2 長期粘弾性変形計算手法
 - 計算手法の比較
- Ch. 3 月地殻構造解析 I: 新鮮な衝突盆地
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算
- Ch. 4 月地殻構造解析 II: 崩れた衝突盆地
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算
- Ch. 5 月の「海」の地形から探る大規模変形
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算

月の熱史研究

- 熱構造
 - 主要なプロセスを支配（対流、分化、...）
- 月はほぼ**岩石だけ**で出来ている
 - 風化・浸食がなく太古の地質記録を保持
 - より複雑な固体惑星の初期進化理解の鍵
 - 特にプレートテクトニクスのない固体惑星
- 月に関しては比較的豊富な観測データ
 - ➔ **詳細な実証的研究**



月熱史の概略



熱構造を反映する観測

- 地温勾配計測
 - 表側中緯度2地点のみ
- ガンマ線計測（放射性元素濃度）
 - 表層 <math>< 1 \text{ m}</math>のみ [e.g., Prettyman+, 2006]

測地観測（地形・重力場）

- 全球での観測
 - 「かぐや」の成果
- 地殻～上部マントルまでの内部の密度構造を反映

アポロ15号での地温勾配計測

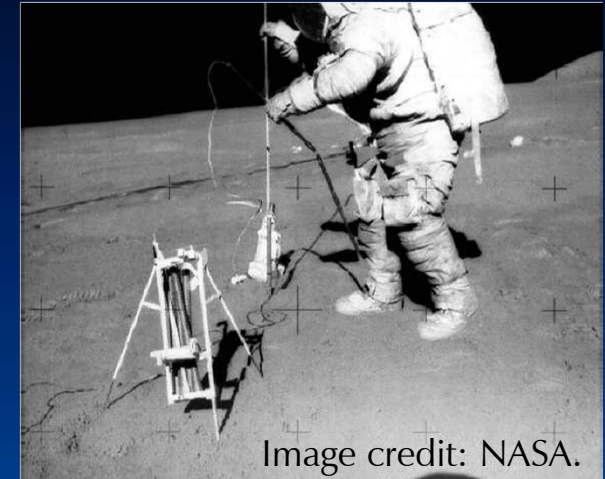


Image credit: NASA.

「かぐや」での全球遠隔
探査イメージ

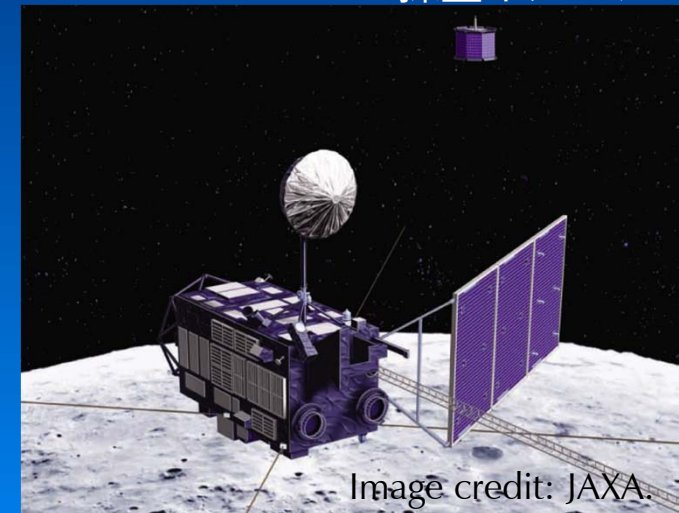
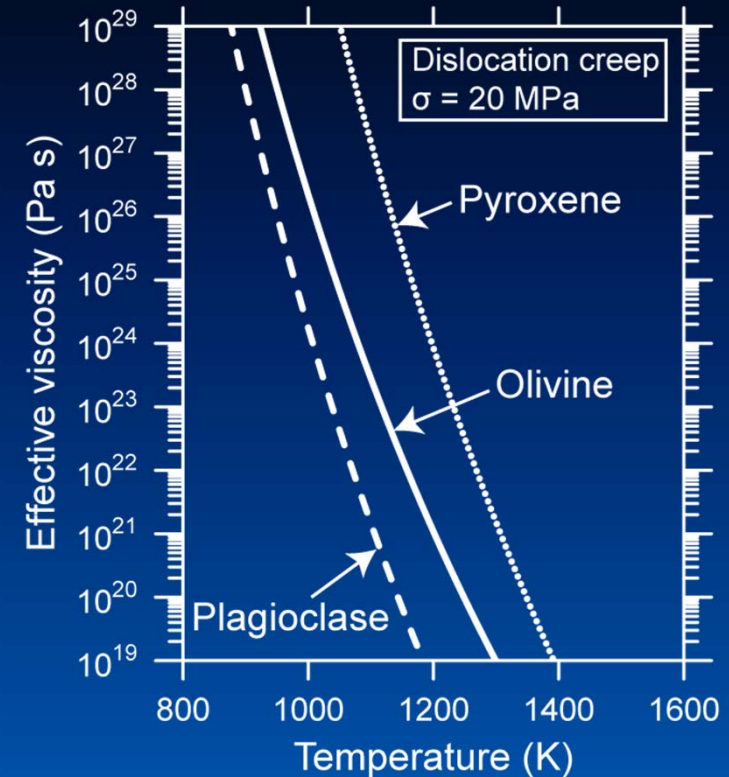


Image credit: JAXA.

大規模地形の長期粘弾性変形

- 変形度合いは地殻・マントルの粘性に依存
- 粘性 η は温度 T に強く依存
 - $\eta \propto \exp(1/T)$

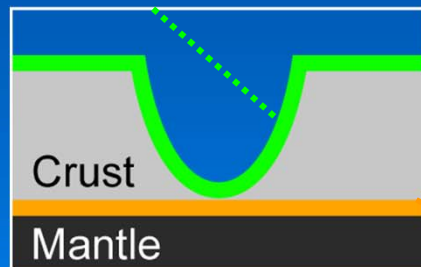


Pyroxene: Mackwell [1991]
 Olivine: Korenaga & Karato [2008]
 Plagioclase: Rybacki & Dresen [2000]

表面：レーザー測距

モホ面：表面地形+重力場から推定

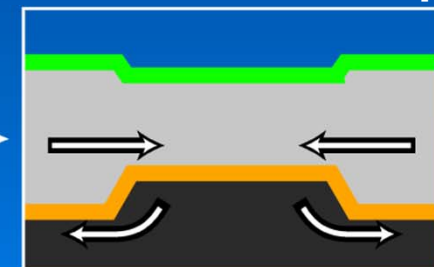
Based on Bratt+ [1985]



隕石衝突による盆地形成



アイソスタシーの回復



地殻下部の水平流動

先行研究とその課題

- 得られた結果 [e.g., Solomon+, 1982]
 - 崩れた衝突盆地構造は地殻下部での激しい粘性水平流動
 - 形成期のモホ面温度 $> 1300 \text{ K}$ [Mohit & Phillips, 2006]
 - 表側の新鮮な衝突盆地（マスコン）の構造
 - 形成時のマンタルの粘性 $> 6 \times 10^{26} \text{ Pa s}$ [Arkani-Hamed, 1998]
- 課題
 - 重力場データの空間解像度が低い
 - 裏側での重力場観測がなされていないため
 - 表側の大きな衝突盆地のみ解析されてきた
 - 非常にシンプルなモデル計算のみ
 - 熱進化を組み込んだ億年スケールの粘弾性計算例なし

先行研究とその課題

- 得られた結果 [e.g., Solomon+, 1982]

- 崩れた

- 形成

- 表側の

- 形成

月全球の衝突盆地に関して
形成期の温度構造を定量的に推定

平流動

[e.g., Solomon+, 1998]

- 課題

- 重力場データ

かぐや測地データ

- 裏側での

[e.g., Namiki+, 2009]

ないため

- 表側のデータ

衛星運用・データ1次解析

れてきた

- 非常にシンプルな

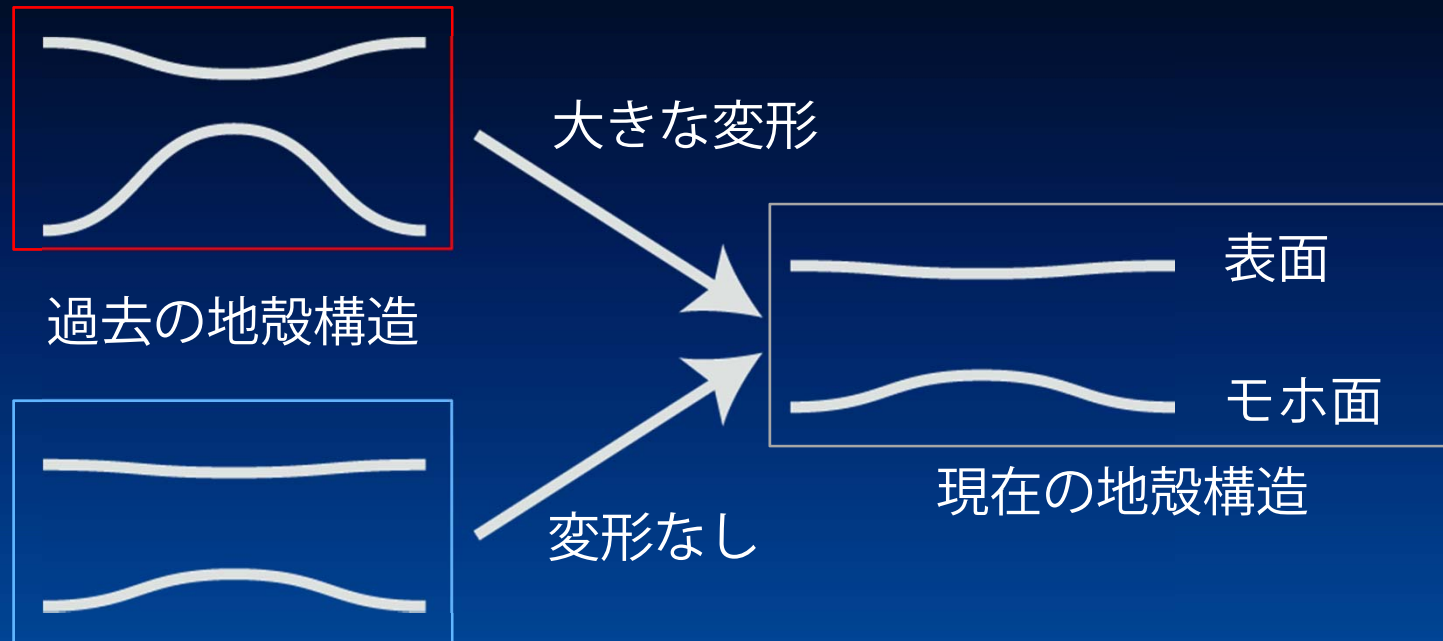
新たな粘弾性計算手法

- 熱進化を組み込

[鎌田修論 ; Kamata+, 2012]

計算例なし

初期地殻構造の不定性



- 異なる初期地殻構造→異なる熱構造
- 初期地殻構造を仮定**しない**
 - 得られる情報は限られる
- 初期地殻構造を仮定**する**
 - モデル依存性が大きい

博論 目次

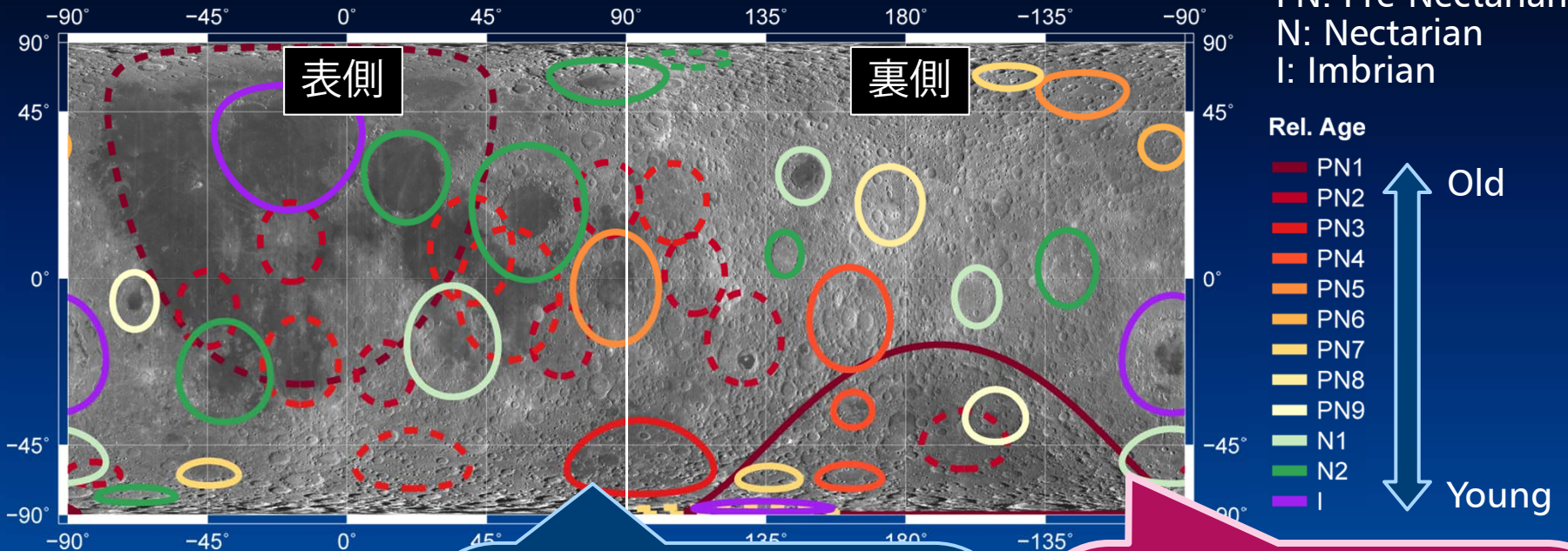
- Ch. 1 研究背景
- Ch. 2 長期粘弾性変形計算手法
 - 計算手法の比較
- Ch. 3 月地殻構造解析 I: 新鮮な衝突盆地
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算 (初期構造仮定なし)
- Ch. 4
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算
- Ch. 5 月の「海」の地形から探る大規模変形
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算

Submitted to *JGR Planets*

(with S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, T. Morota, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, H. Araki, K. Matsumoto, and E. Tajika)

かぐや測地データによる地殻構造推定

盆地データ: e.g., Wilhelms [1987]. 背景: LROC/WAC (NASA/GSFS/Arizona State Univ.)

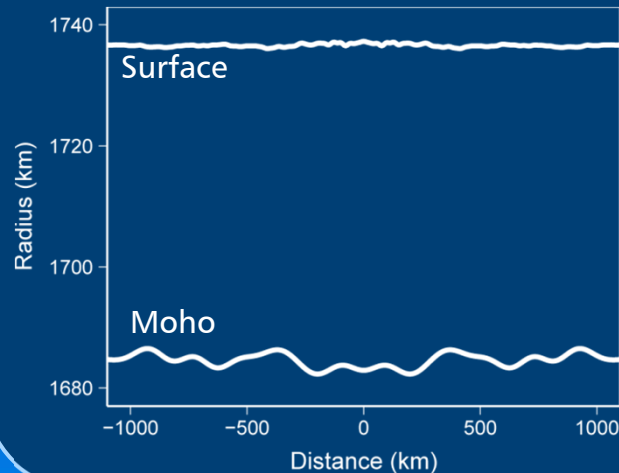


— Definite
- - Possible/Probable

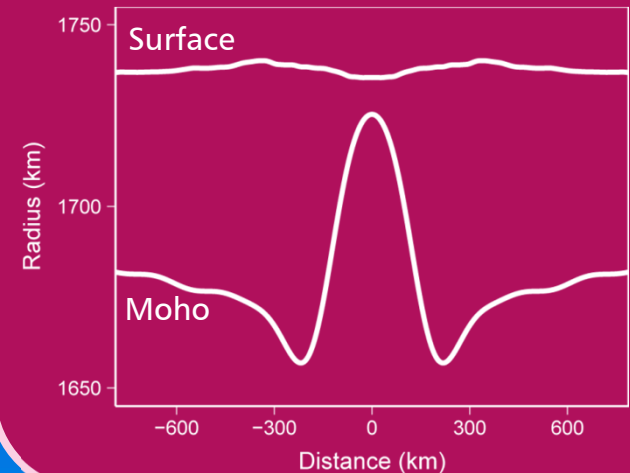
【地殻厚算出条件】

高度データ: STM-359_grid-03
重力場データ: SGM150j
地殻密度: 2820 kg/m³
マントル密度: 3320 kg/m³
最小振幅型フィルタ
(半値次数46)
展開次数: 70 (波長~150 km)
最小地殻厚: 0 km

Australe (PN3)

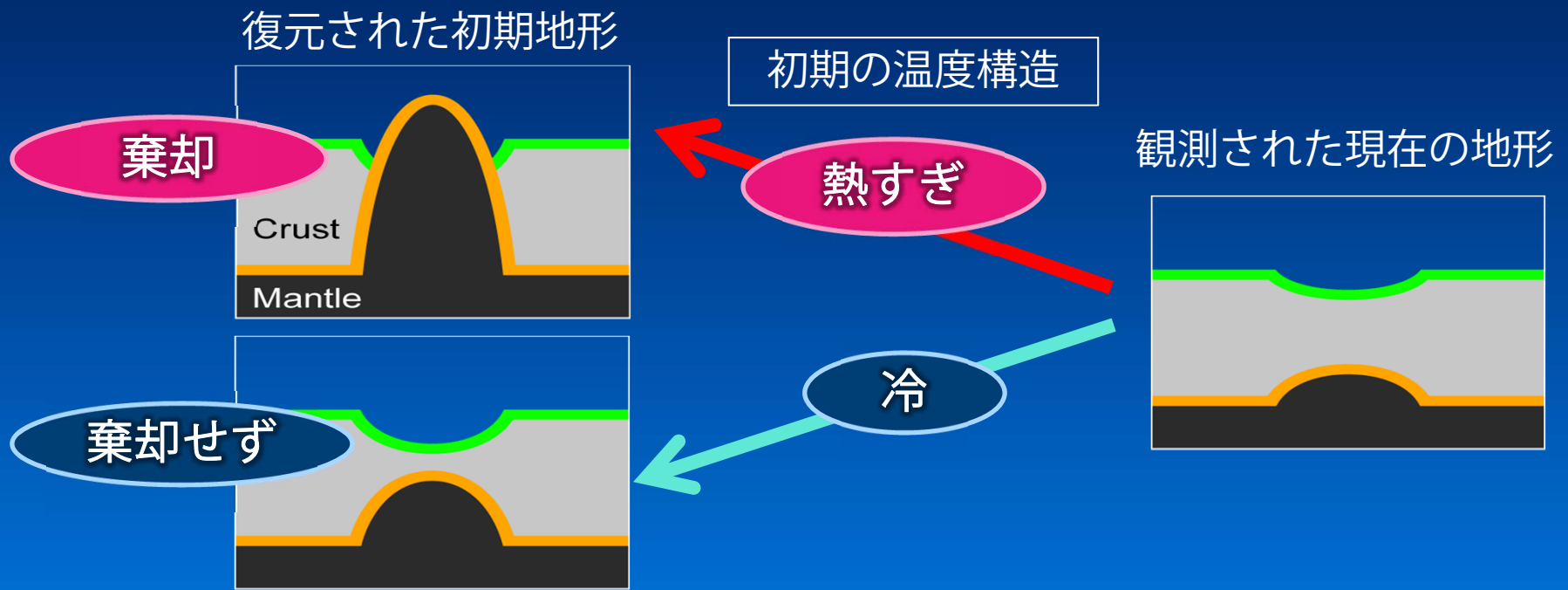


Mendel-Rydberg (N1)



研究目的・アプローチ

目的：月全球の衝突盆地に関し、その形成期における最も熱い条件を制約



熱進化モデル

- 熱伝導 + 長寿命放射壊変熱

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho \sum_x Q_x^0 e^{-\lambda_x t}$$

T : 温度
 ρ : 密度
 C_p : 比熱
 k : 熱伝導率
 x : 同位体核種
 λ : 崩壊定数
 Q^0 : 初期発熱率

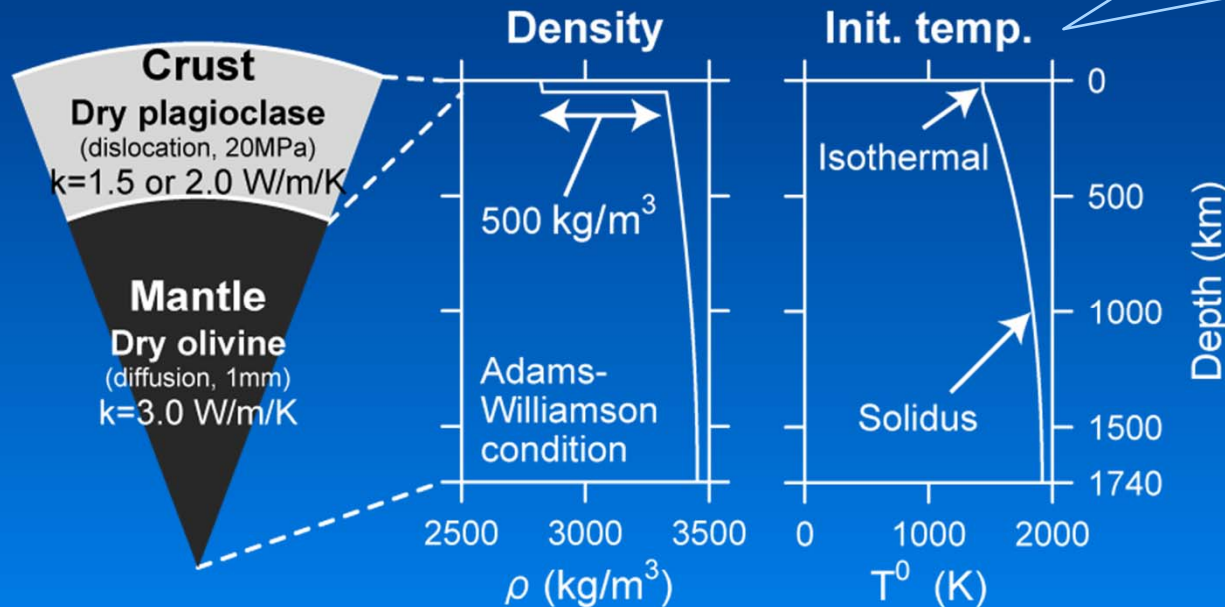
- 地殻に関するパラメータ

- 厚さ: 30 - 90 km

現在の値

- Th: 0.1 - 5.0 ppm

45億年前にマグマオーシャン固化



U, K の濃度: Th との線形関係
 マントル中の Th: 25 ppb
 比熱: $1.2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 表面温度: 250 K

[e.g., Rybachi & Dresen, 2000; Korenaga & Karato, 2008; Keihm and Langseth, 1977; Shearer+, 2006; Kobayashi+, 2010; Korotev, 1998; Warren, 2005; Langseth+, 1976]

球面調和展開による粘弾性変形計算

- Maxwell 粘弾性球の静的変形 [e.g., Peltier, 1974]

$$\frac{d\sigma_{ji}}{dt} + \frac{\mu}{\eta} \left(\sigma_{ji} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ji} \right) = \lambda \frac{de_{kk}}{dt} \delta_{ji} + 2\mu \frac{de_{ji}}{dt}$$

$$\rho \partial_i \phi + \partial_j \sigma_{ji} = 0$$

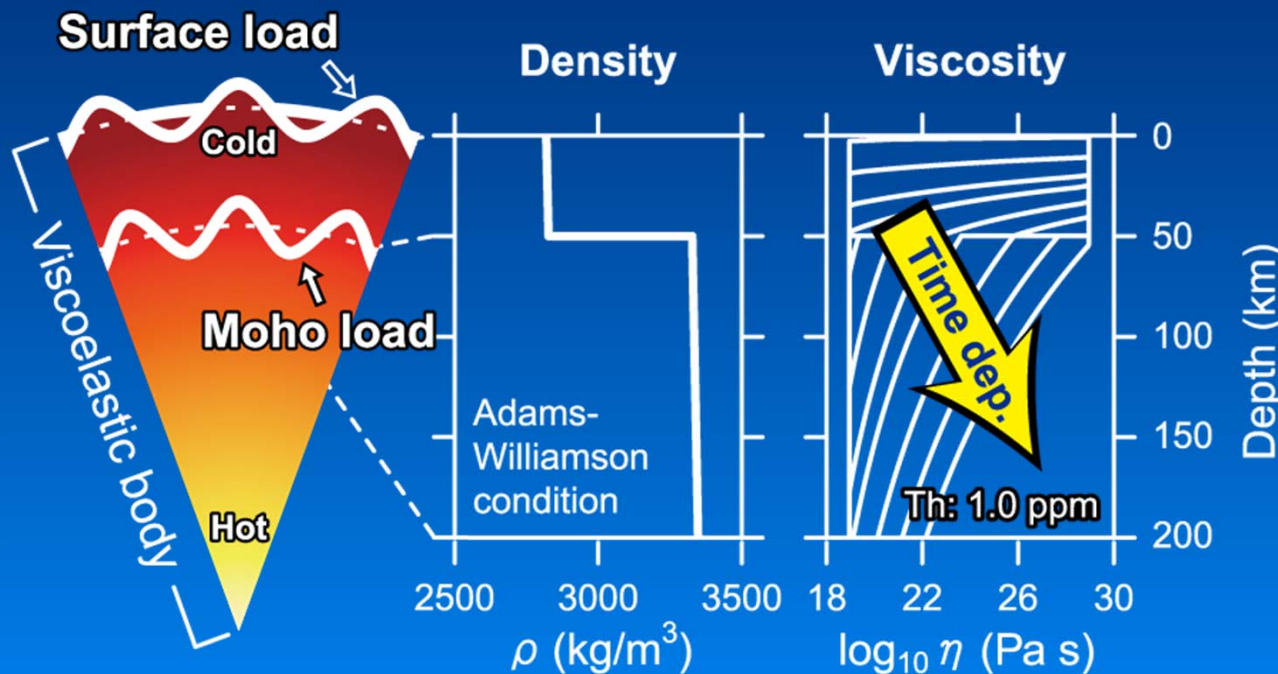
$$\partial_j \partial_j \phi = -4\pi G \rho$$

σ : 応力 ; e : ひずみ
 ϕ : 重力ポテンシャル
 ρ : 密度 ; η : 粘性
 λ, μ : 弾性率

従来の方法1 :
 ラプラス変換法
 問題 : 定常構造のみ

従来の方法2 :
 前方差分 (1次差分)
 問題 : 計算コスト大

本研究 : 時間微分を
 2次精度で近似
 [Kamata+, 2012]



弾性率 (GPa)

層	体積	横
地殻	80	40
マントル	125	65

[e.g., Hanyk+, 1995; Plag and Jüttner, 1995; Nakamura, 1983]

球面調和展開による粘弾性変形計算

- Maxwell 粘弾性球の静的変形 [e.g., Peltier, 1974]

$$\frac{d\sigma_{ji}}{dt} + \frac{\mu}{\eta} \left(\sigma_{ji} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ji} \right) = \lambda \frac{de_{kk}}{dt} \delta_{ji} + 2\mu \frac{de_{ji}}{dt}$$

$$\rho \partial_i \phi + \partial_j \sigma_{ji} = 0$$

$$\partial_j \partial_j \phi = -4\pi G \rho$$

σ : 応力 ; e : ひずみ
 ϕ : 重力ポテンシャル
 ρ : 密度 ; η : 粘性
 λ, μ : 弾性率

従来の方法1 :
 ラプラス変換法
 問題 : 定常構造のみ

従来の方法2 :
 前方差分 (1次差分)
 問題 : 計算コスト大

本研究 : 時間微分を
 2次精度で近似
 [Kamata+, 2012]



計算結果の例

- 熱進化

$t = 400 \text{ Myr}$ (盆地形成期)

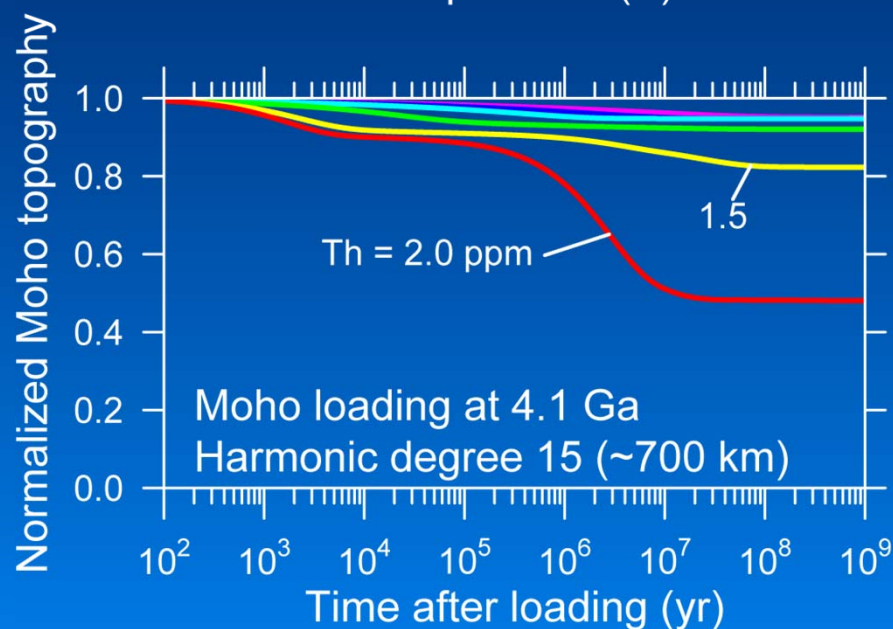
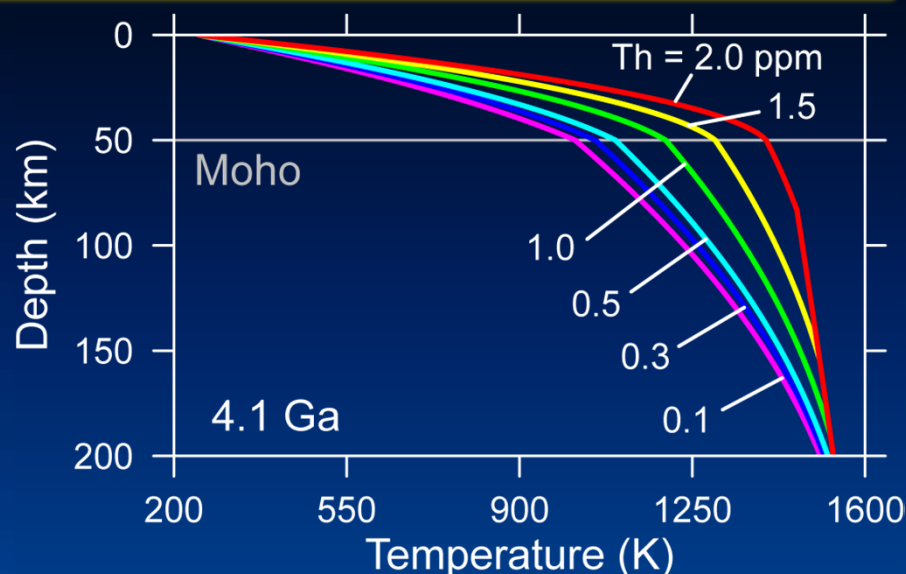
- モホ面の温度...地殻中の熱源元素量に強く依存

- 粘弾性変形

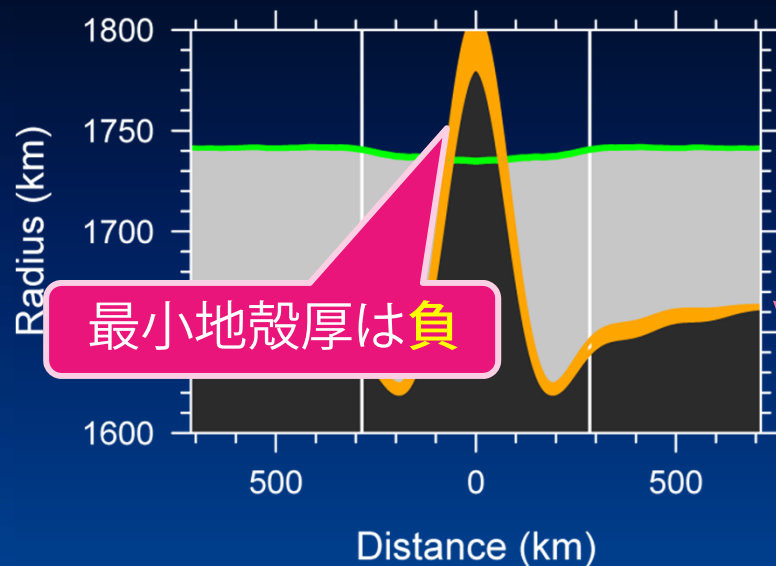
マントルアップリフトの高さが減少する様子

- 温度構造に強く依存

地殻厚: 50 km
地殻熱伝導率: 1.5 W/m/K



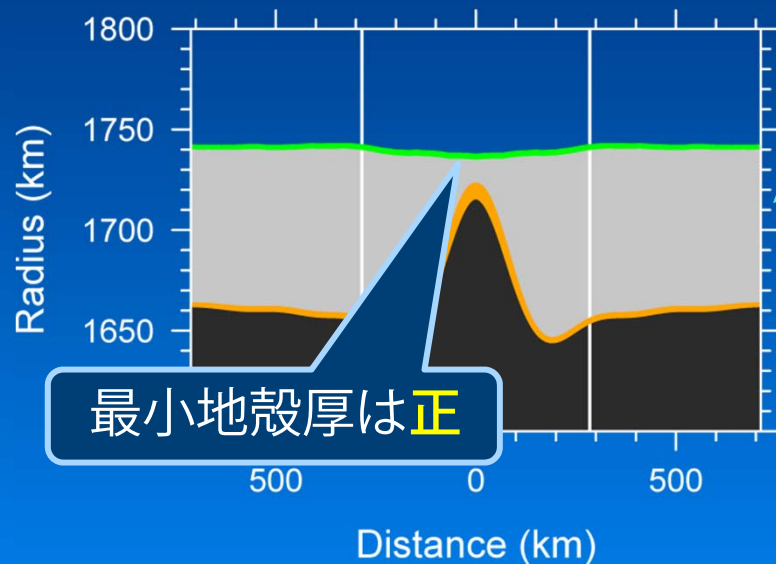
初期地形の復元 (Hertzsprung)



Th = 0.5 ppm
 $k_{\text{crust}} = 1.5 \text{ W/m/K}$
 $t_{\text{form}} = 3.9 \text{ Gyr ago}$

→ 棄却

復元
(初期値)



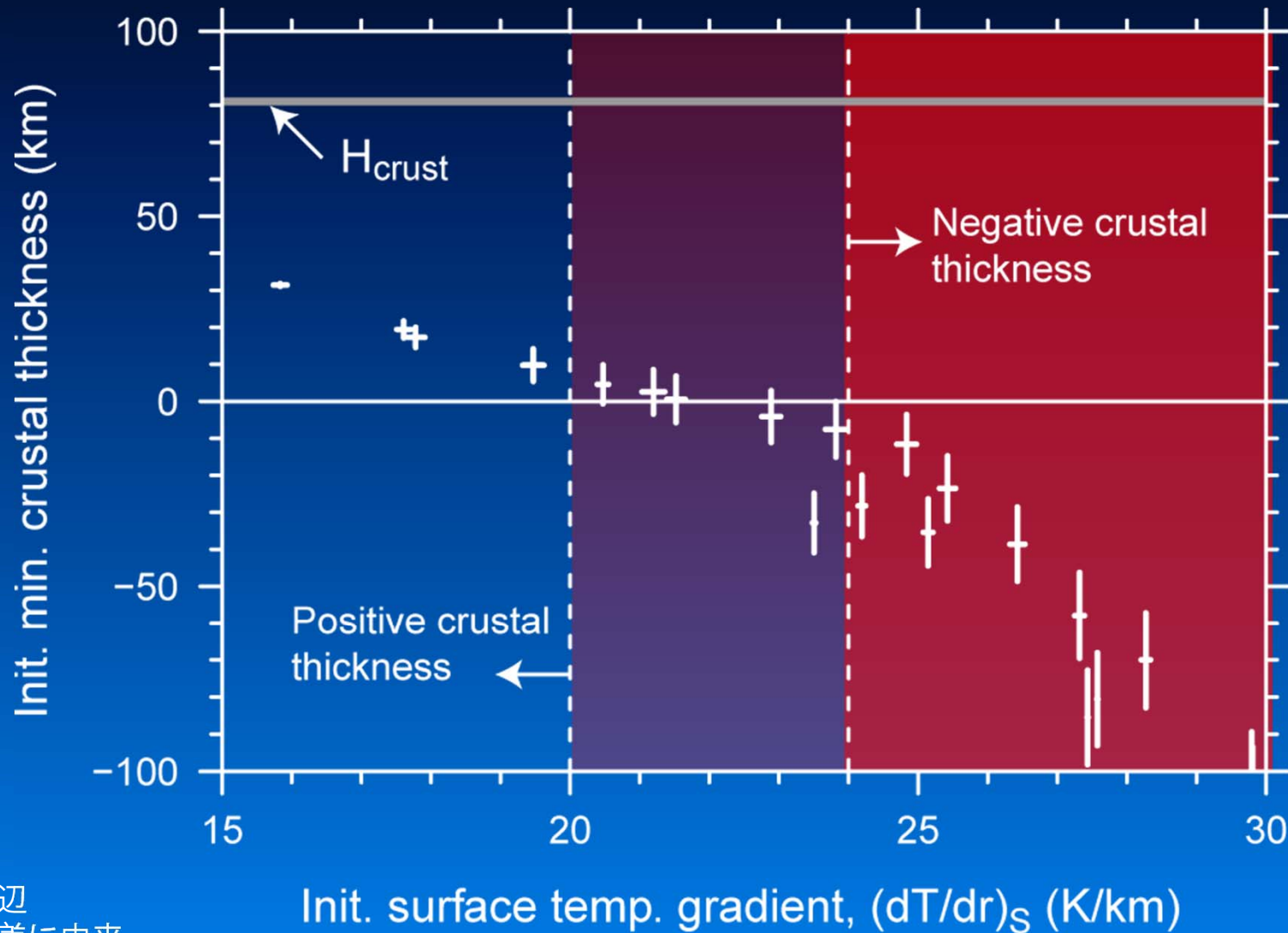
Th = 0.3 ppm
 $k_{\text{crust}} = 2.0 \text{ W/m/K}$
 $t_{\text{form}} = 3.7 \text{ Gyr ago}$

→ 棄却せず



初期表面温度勾配の制約

- Hertzprung: $< 20\text{-}24 \text{ K/km}$ (モホ面温度 $1250\text{-}1350 \text{ K}$)

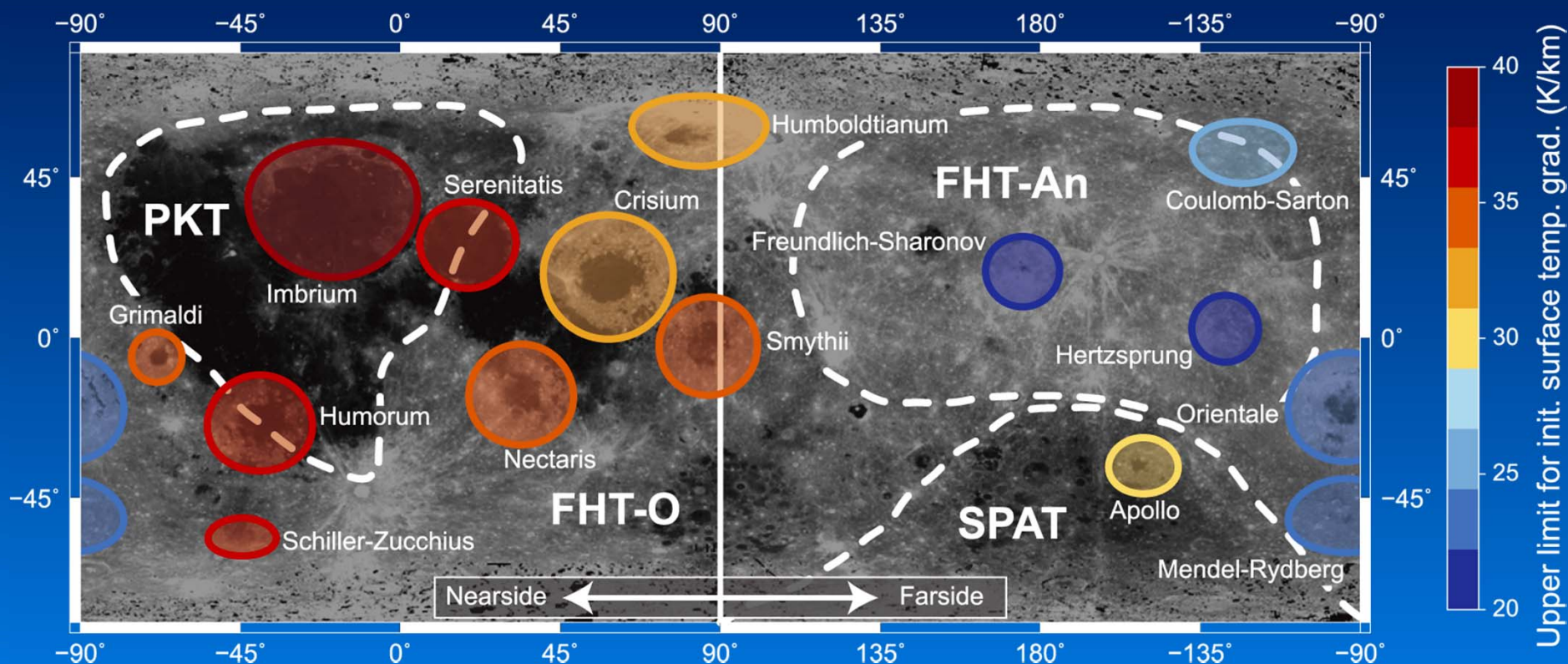


エラーは周辺
地殻厚の誤差に由来

温度勾配上限に明確な地域差

- PKT (表側中緯度) : $< \sim 40$ K/km
- **FHT-An (裏側北部)** : $< \sim 20$ K/km
- 地殻下部での熱源元素量に制約

PKT: Procerallum KREEP Terrane
SPAT: South Pole-Aitken Terrane
FHT: Feldspathic Highlands Terrane
-An: Central anorthositic region
-O: Outer region



背景：かぐやMI 750nm 反射率マップ [Ohtake+, 2009]

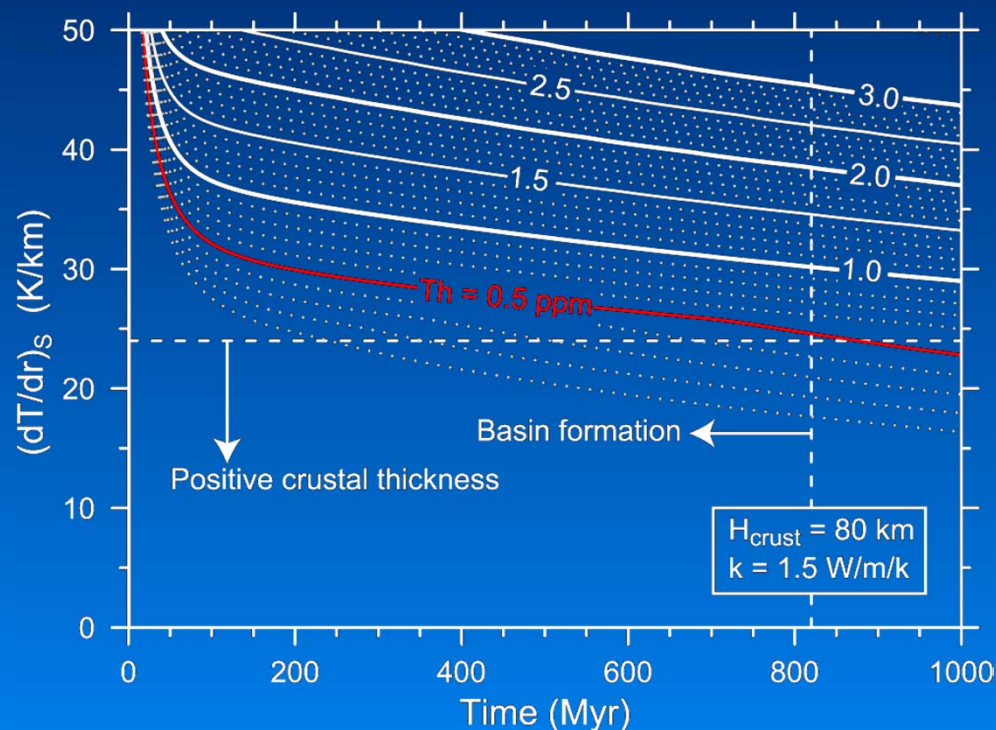
Wilhelms [1987], Jolliff+ [2000]

議論：熱源元素の地下分布

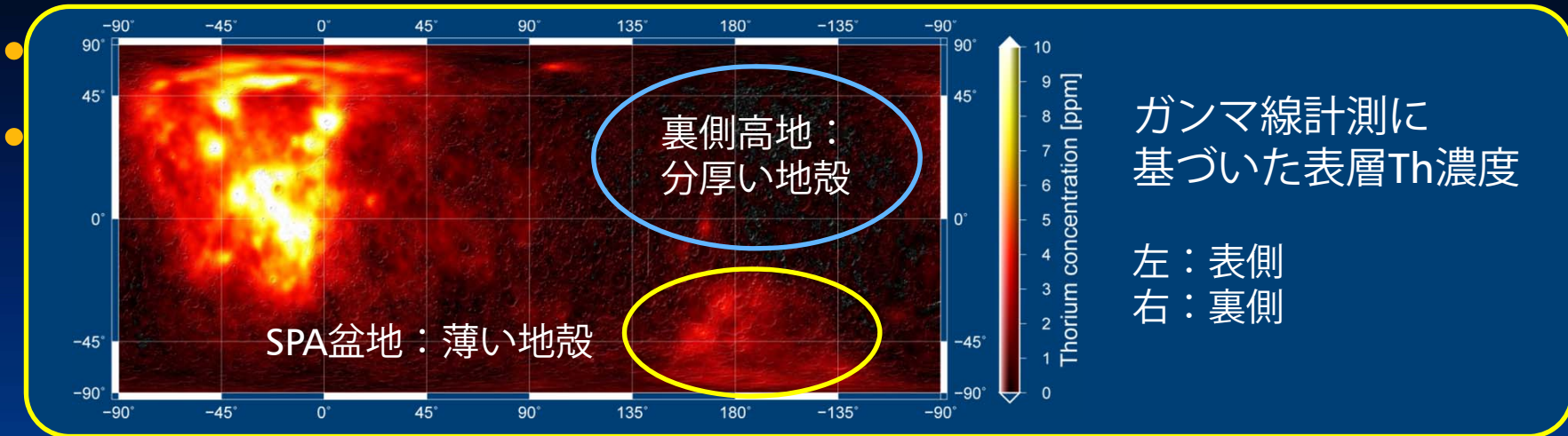
- ガンマ線分光では計測不可
- 裏側高地
 - 条件1：典型的な地殻厚 80 km [e.g., Ishihara+ 2009]
 - 条件2：衝突盆地形成は 3.7 Ga よりも前 [e.g., Stöffler+2006]
 - 条件3：衝突盆地形成期に <24 K/km

→ 地殻での平均Th濃度
 $< \sim 0.5$ ppm

- 裏側高地は地殻深部までThに枯渇
- マグマオーシャンの固化の水平不均質

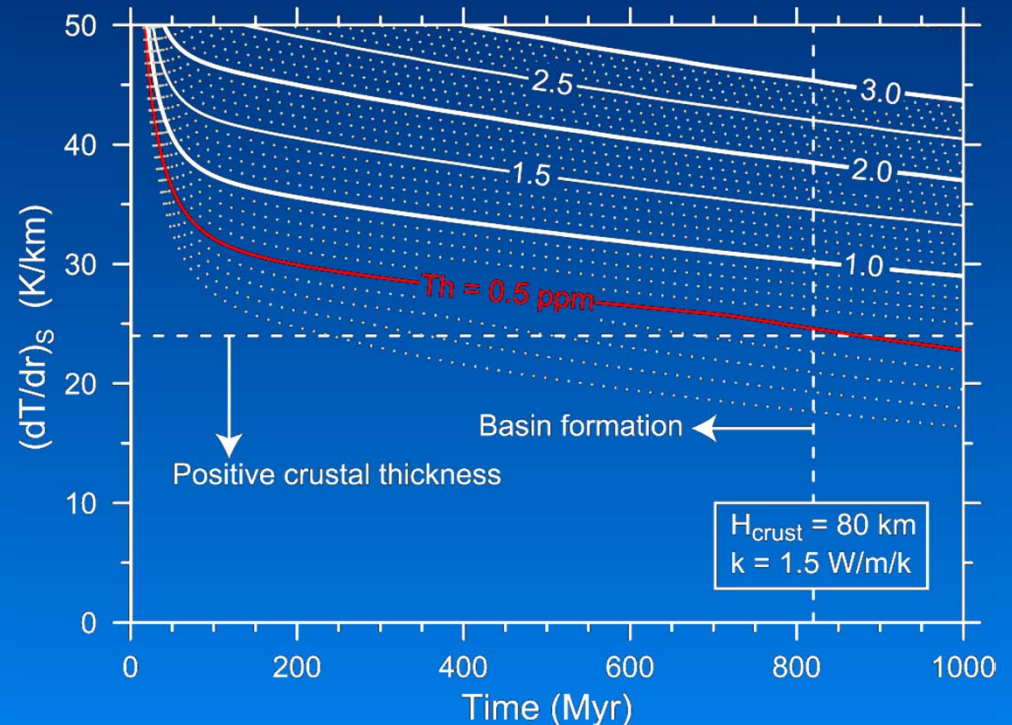


議論：熱源元素の地下分布



→ 地殻での平均Th濃度
< ~0.5 ppm

- 裏側高地は地殻深部までThに枯渇
- マグマオーシャンの固化の水平不均質

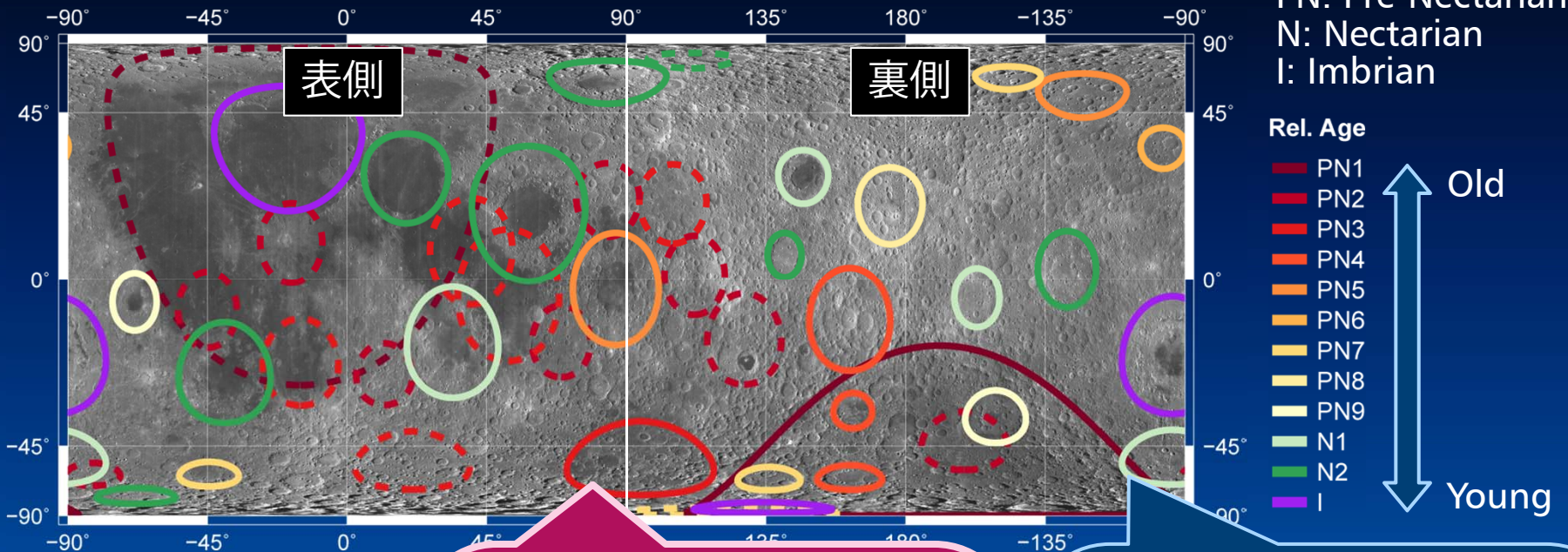


博論 目次

- Ch. 1 研究背景
- Ch. 2 長期粘弾性変形計算手法
 - 計算手法の比較
- Ch. 3 月地殻構造解析 I: 新鮮な衝突盆地
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算
- Ch. 4 月地殻構造解析 II: 崩れた衝突盆地
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算 (初期構造仮定あり)
- Ch. 5 月の「海」の地形から探る大規模変形
 - かぐやデータ解析 + 粘弾性変形計算

かぐや測地データによる地殻構造推定

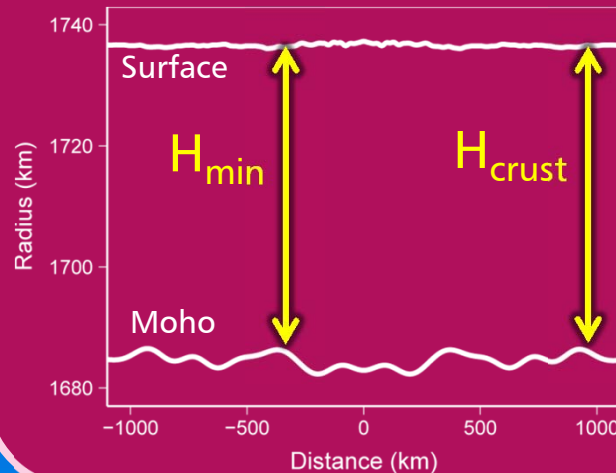
盆地データ: e.g., Wilhelms [1987]. 背景: LROC/WAC (NASA/GSFS/Arizona State Univ.)



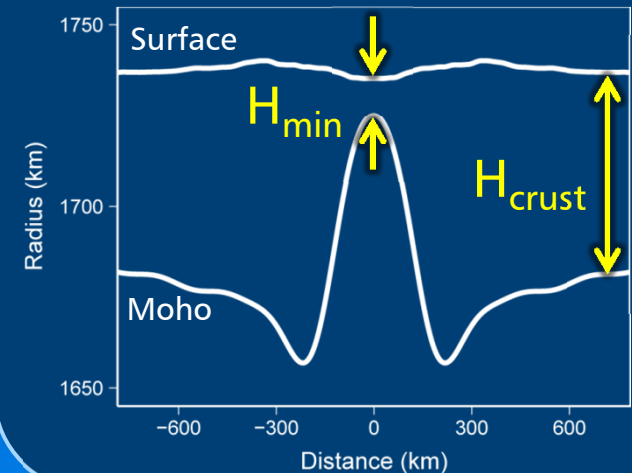
【地殻厚算出条件】

高度データ: STM-359_grid-03
重力場データ: SGM150j
地殻密度: 2820 kg/m³
マントル密度: 3320 kg/m³
最小振幅型フィルタ
(半値次数46)
展開次数: 70 (波長~150 km)
最小地殻厚: 0 km

Australe (PN3)

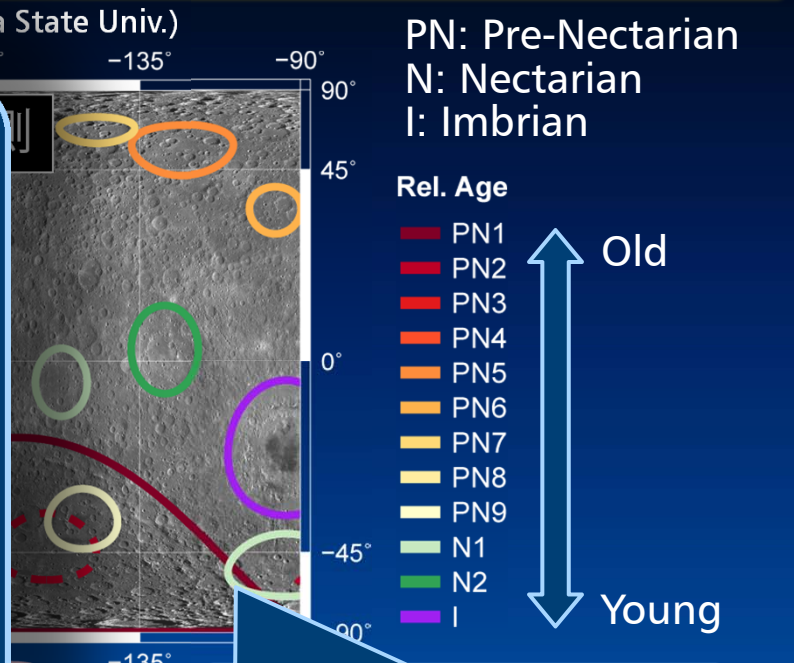
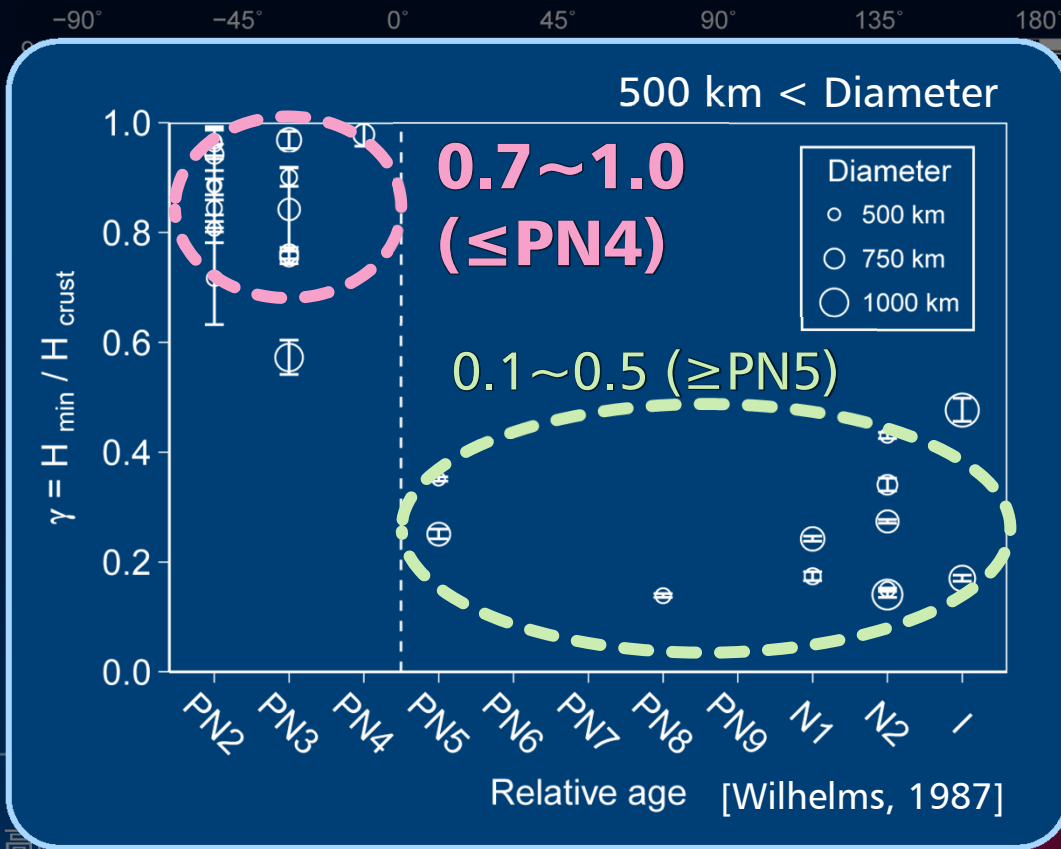


Mendel-Rydberg (N1)

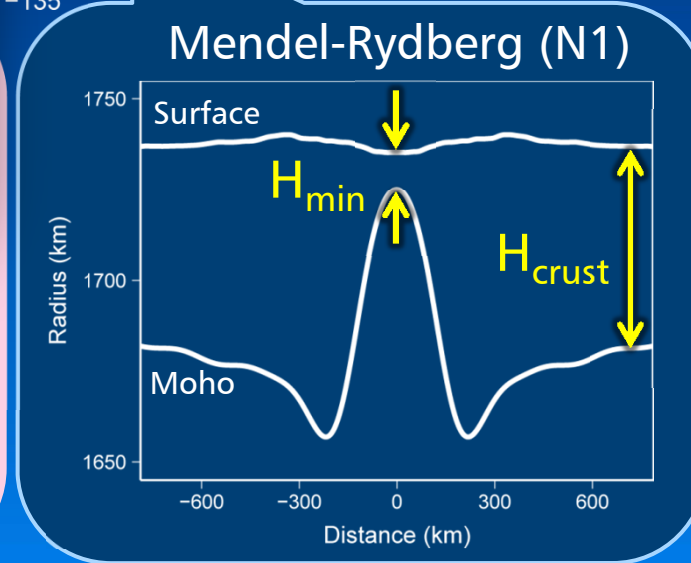
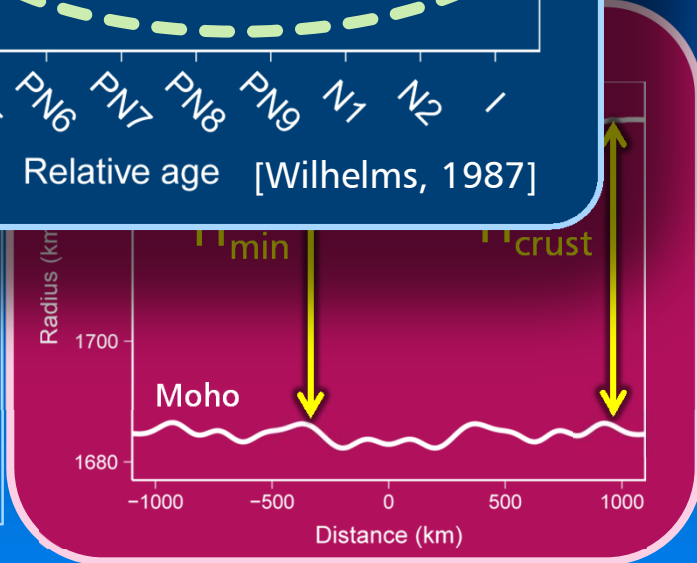


かぐや測地データによる地殻構造推定

盆地データ: e.g., Wilhelms [1987]. 背景: LROC/WAC (NASA/GSFS/Arizona State Univ.)

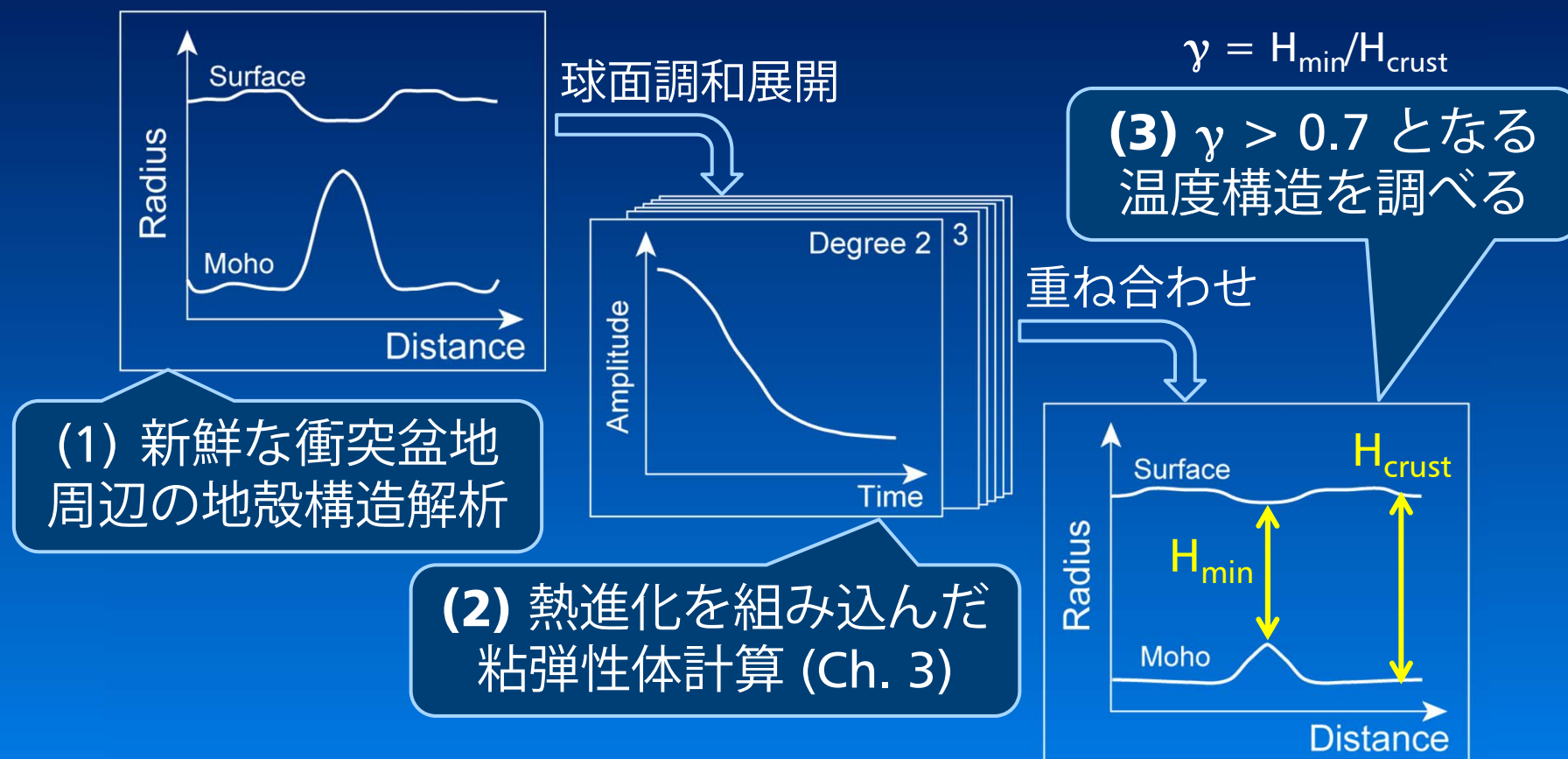


重力場データ: SGM150j
地殻密度: 2820 kg/m³
マントル密度: 3320 kg/m³
最小振幅型フィルタ
(半値次数46)
展開次数: 70 (波長~150 km)
最小地殻厚: 0 km



研究目的・手順

目的：Pre-Nectarian 4 以前とされる、緩和した衝突盆地の地殻構造を説明する温度構造を推定



計算結果の例

- 熱進化

$t = 400 \text{ Myr}$ (盆地形成期)

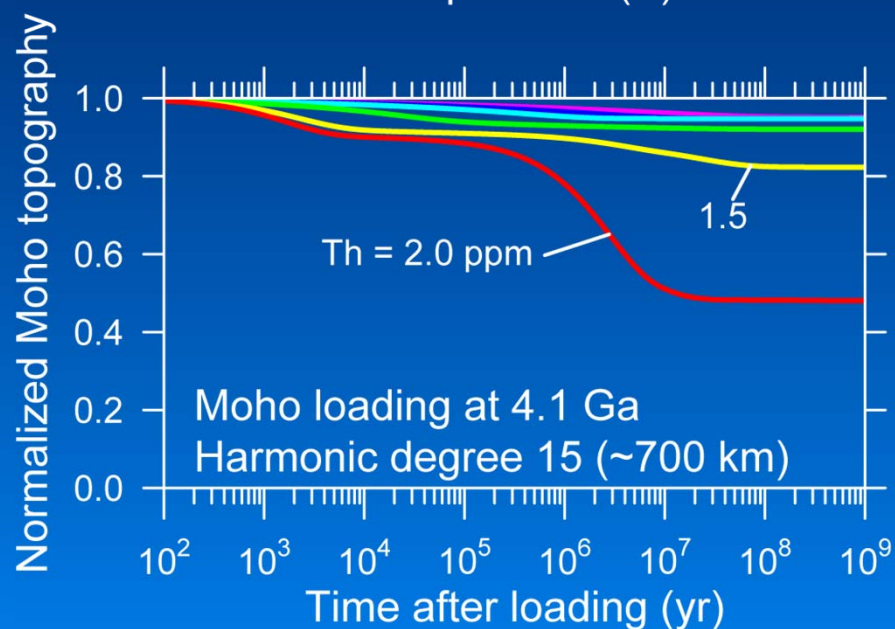
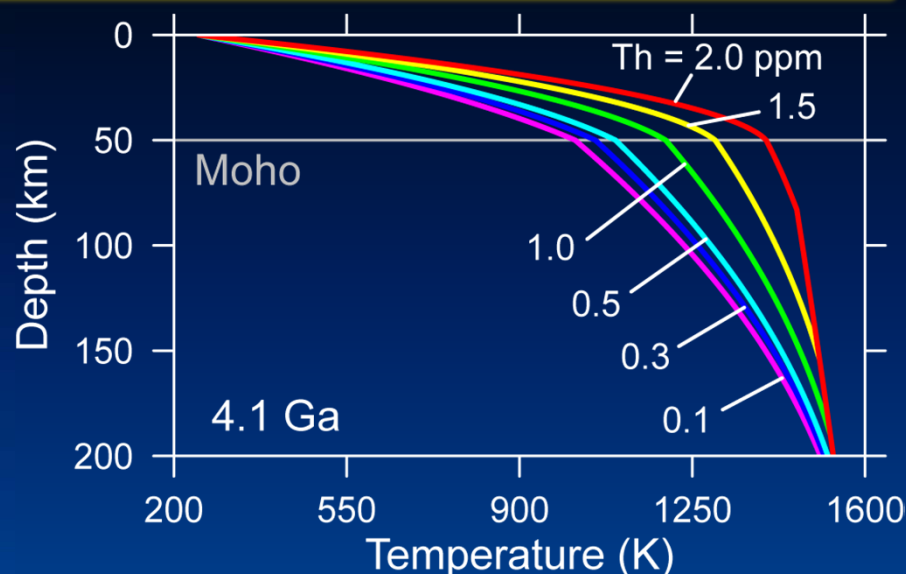
- モホ面の温度...地殻中の熱源元素量に強く依存

- 粘弾性変形

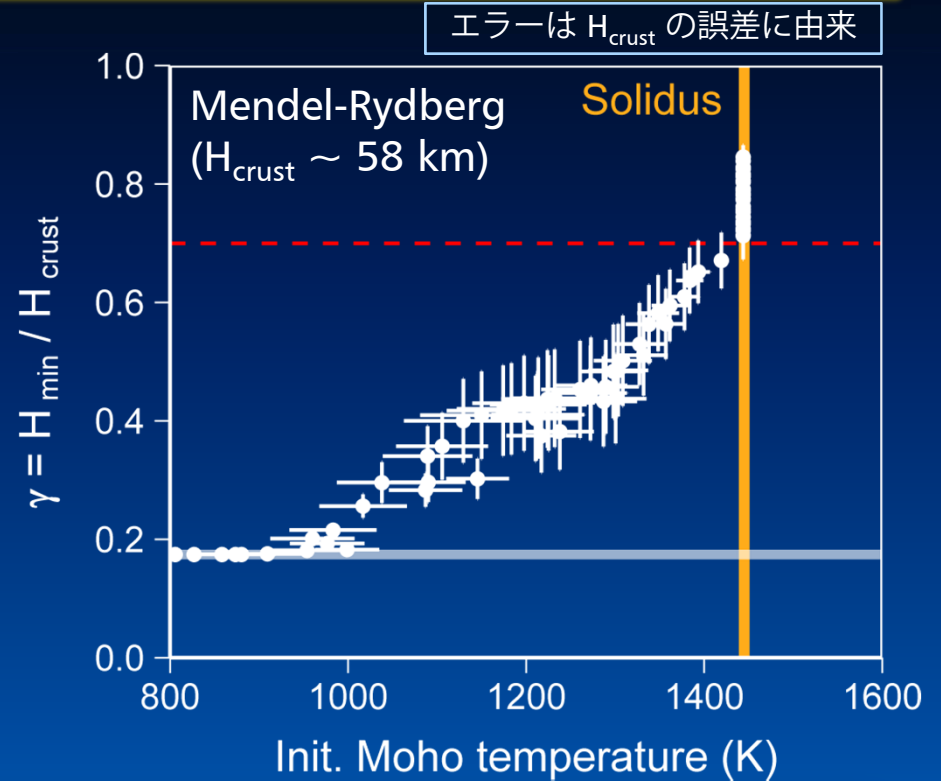
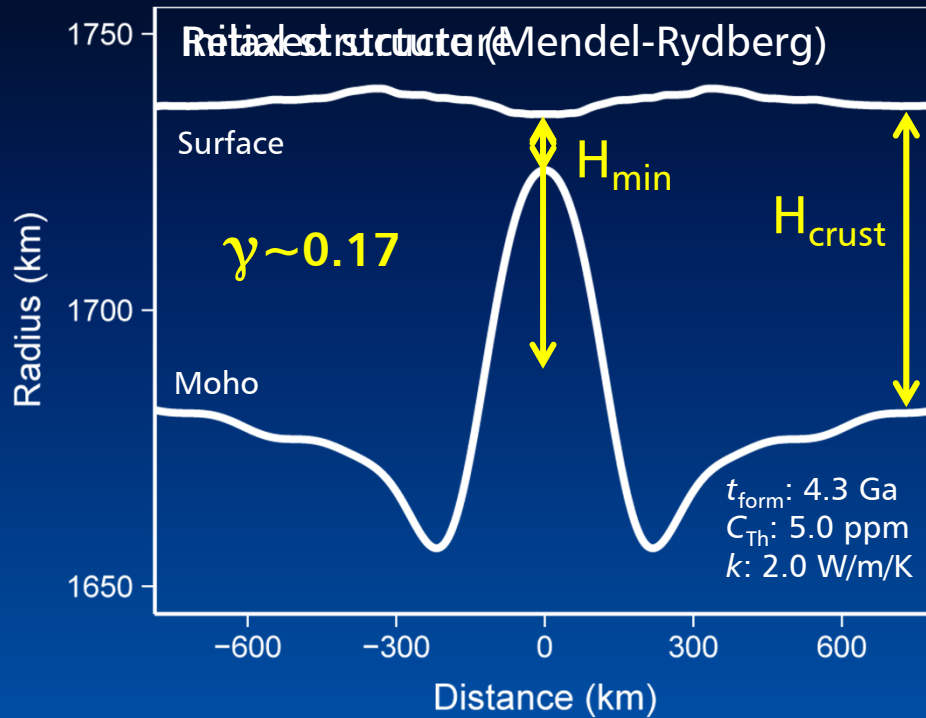
マントルアップリフトの高さが減少する様子

- 温度構造に強く依存

地殻厚: 50 km
地殻熱伝導率: 1.5 W/m/K



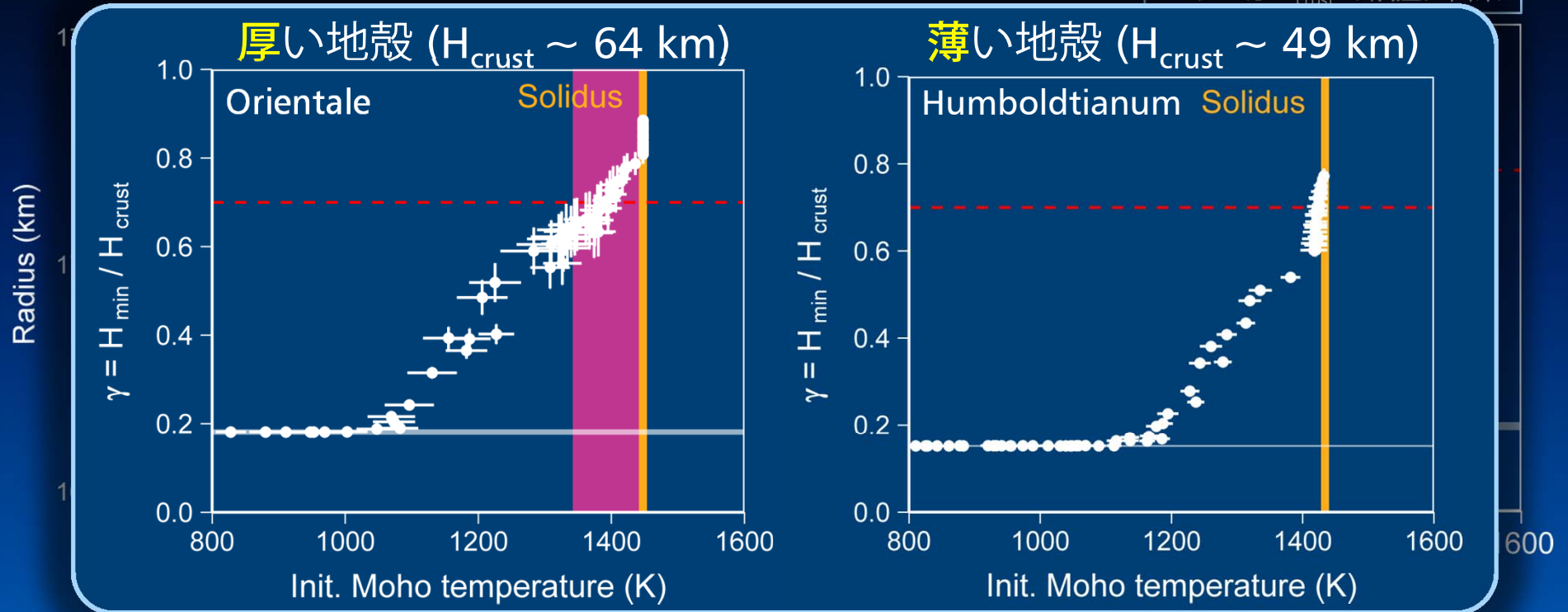
粘性緩和後の地形



地殻厚	$\gamma > 0.7$ に必要な盆地形成期のモホ面温度
< 60 km	\geq ソリダス
> 60 km	< ソリダス

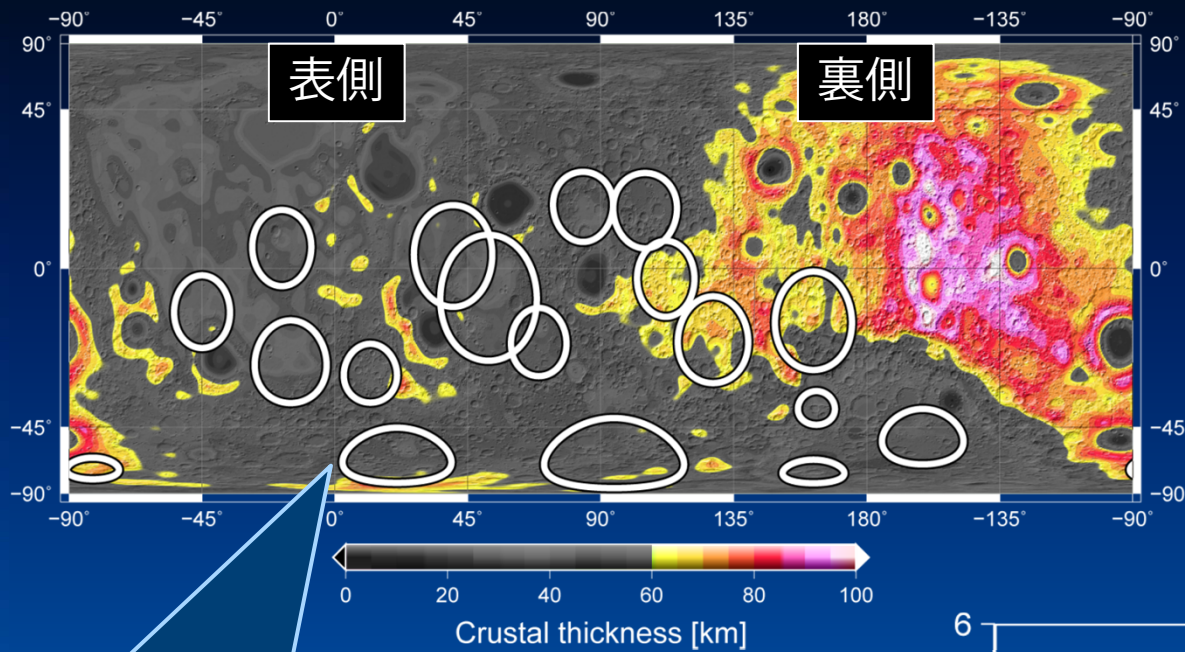
粘性緩和後の地形

エラーは H_{crust} の誤差に由来



地殻厚	$\gamma > 0.7$ に必要な盆地形成期のモホ面温度
< 60 km	\geq ソリダス
> 60 km	< ソリダス

月地殻の大部分は厚さ < 60 km

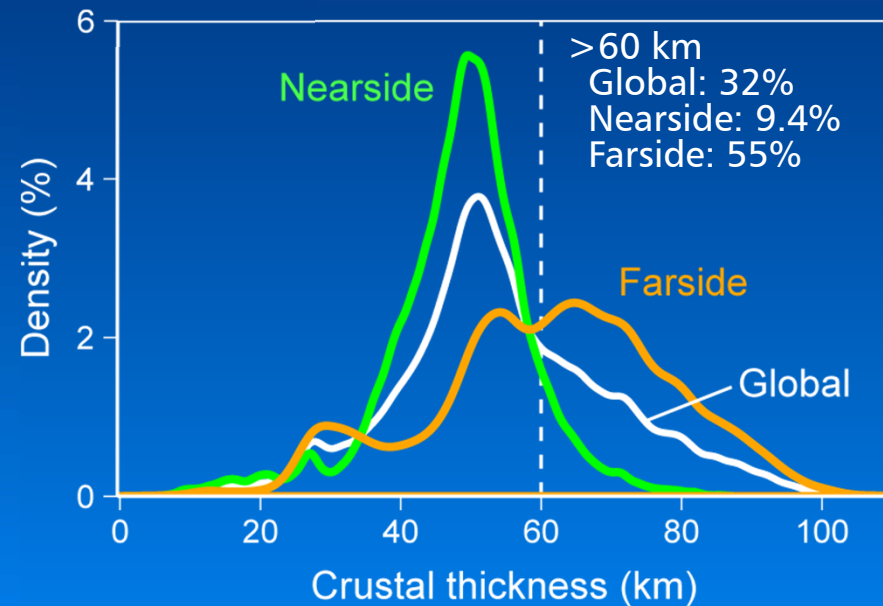


【地殻厚算出条件】

高度データ：STM-359_grid-03
重力場データ：SGM150j
地殻密度：2820 kg/m³
マントル密度：3320 kg/m³
最小振幅型フィルタ
(半値次数46)
展開次数：70 (波長~150 km)
最小地殻厚：0 km

PN2-PN4 に形成した盆地
盆地データ：e.g., Wilhelms [1987]

固体地殻水平流動では
衝突盆地の地殻構造を
十分に緩和できない



議論

- 先行研究の主張：固体で十分に緩和 [e.g., Solomon+, 1982; Mohit & Phillips, 2006]
 - 計算モデルの簡略化 + 大きな計算誤差 (Ch. 2)
- 平らな地殻構造を作る要因
 - そもそも掘削量が極めて少なかった
 - PN4 以前の衝突は浅い角度のみ？ → 棄却
 - Pyroxene-rich な下部地殻、潮汐加熱、… → 棄却
- **モホ面温度 > ソリダス**
 - 莫大な放射壊変熱 → PKT (表側低～中緯度) のみ (Ch. 3) [e.g., Wiczorek & Phillips, 2000]
 - **崩れた盆地はマグマオーシャン固化前に形成**
 - **PN4/PN5境界はマグマオーシャン固化のタイミング**

PN4以前の衝突盆地
全球に分布、平坦
PN5以降の衝突盆地
全球に分布、大きな起伏

まとめ



- その他の章

- **Ch.2** : 長い時間スケール ($>10^8$ yr) の変形を考えるときには、モード分解法は使えない場合あり
- **Ch.5** : 海の地形はセレノイドに対して $\sim 0.1^\circ$ 傾斜、低次の内部荷重 (Ilmenite-rich layer?) による変形の可能性
 - マントルオーバーターンしきっていない?