

CPSセミナー 2012年11月7日(水) 15:00-16:00

かぐやLRS データに基づく
月表側の火成活動の再解釈

国立天文台水沢

RISE月惑星探査検討室 研究員

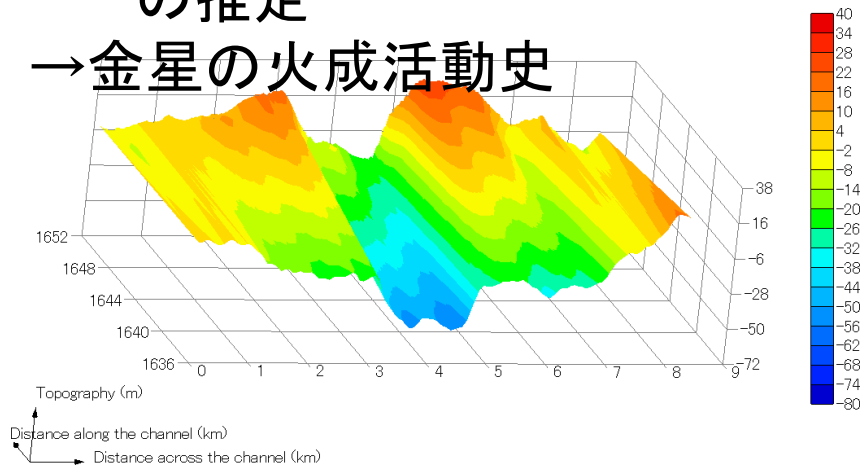
押上 祥子

研究歴 その1

1. ~2006年度(学位取得)
@九州大学

- Magellan SAR画像を用いた金星の地形復元法の開発
- 金星の溶岩チャンネルの地形復元
- 形成プロセス、形成流体の推定

→金星の火成活動史



2. 2007年度-@名古屋大学
、国立天文台水沢

- 「かぐや」月レーダサウンダ(LRS)機器チーム所属
- LRSデータプロダクトの作成、データ解析
- 月の海表層の地下構造推定

→月の火成活動史

本日の話題

研究歴 その2

3. 2010年度-@名古屋
大学、国立天文台水沢

- 地球の岩石・鉱物識別のためのハイパースペクトルデータ解析技術開発

- ナミビア、アメリカ・ネバダ州の鉱物分布



4. 2011年度-@名古屋
大学、国立天文台水沢

- 「はやぶさ2」レーザ高度計(LIDAR)の機器チーム所属
- 機器性能要求検討
 - 小惑星表層のダスト観測に関するモデル計算など

* 富山→福岡→名古屋→奥州

講演内容

1. Introduction

- 「かぐや」搭載月レーダサウンダ(LRS)の機能、性能
- LRS観測エリア・データ
- 過去の月レーダサウンダ観測

2. 地下反射面の分布

- 分布状況
- 分布域の特徴(組成)

3. 地下反射面の同定

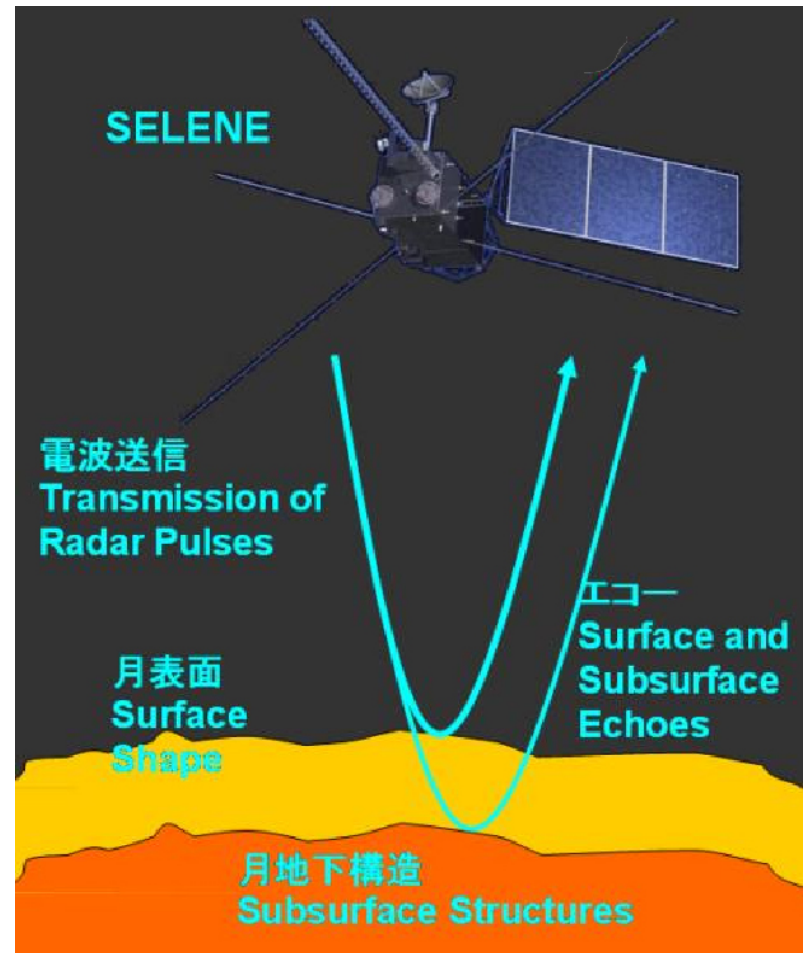
- 晴れの海のクレータ地下構造
- 組成境界 vs 密度境界

4. 月表側の火成活動史

- 既存研究
- 玄武岩溶岩噴出規模の変遷

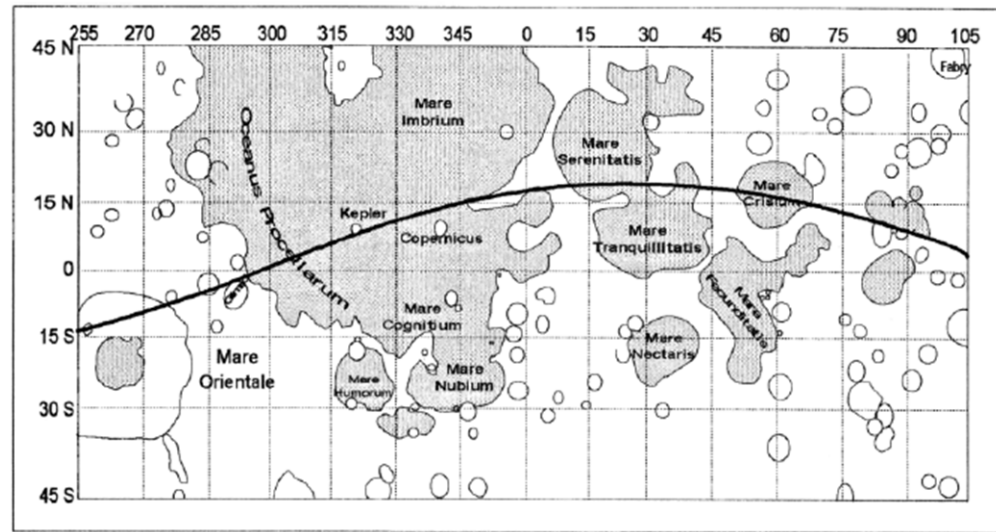
「かぐや」月レーダサウンダ (LRS)

- 中心波長60 mのFMCW (Frequency-Modulation Continuous Wave) レーダシステム
- 誘電率の不連続面からの反射波を検出
- 史上初の高精度な月全球地下構造探査



過去の月レーダサウンダ観測

- Apollo Lunar Sounder Experiment (ALSE)
 - Apollo17号司令船に搭載
 - 実験的なHF帯レーダサウンダ観測
 - 月表層の地質構造探査
 - 赤道付近の限られた領域のみを観測(右図)
 - 当時の技術的制約から、計測精度や空間分解能に課題残る



ALSE vs. LRS

	ALSE	LRS
Frequency [MHz]	5-5.533 (5.267)	4-6 (5)
Band width [MHz]	0.533	2
Range resolution [m]	300	75
Pulse length [μ sec]	240	200
PRF [Hz]	198	20
Data record	Optical	Digital
Data process Azimuth resolution	SAR (optically) $\Delta_{az} \sim 5\lambda$ (300m)	SAR (digitally) $\Delta_{az} \sim 5\lambda$ (300m)

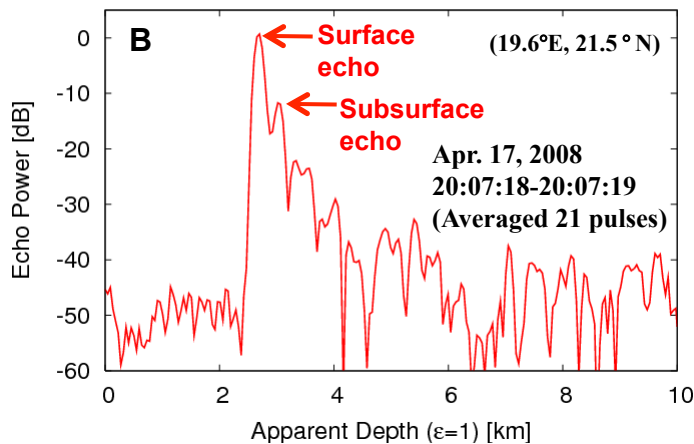
[Phillips et al., 1973]

[Ono and Oya, 2000]

LRSデータ

A-scope (波形データをFT)

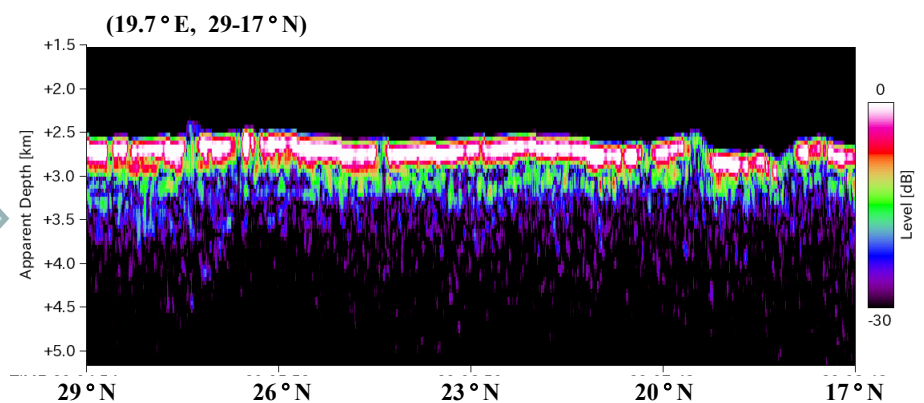
- 未公開



B-scan

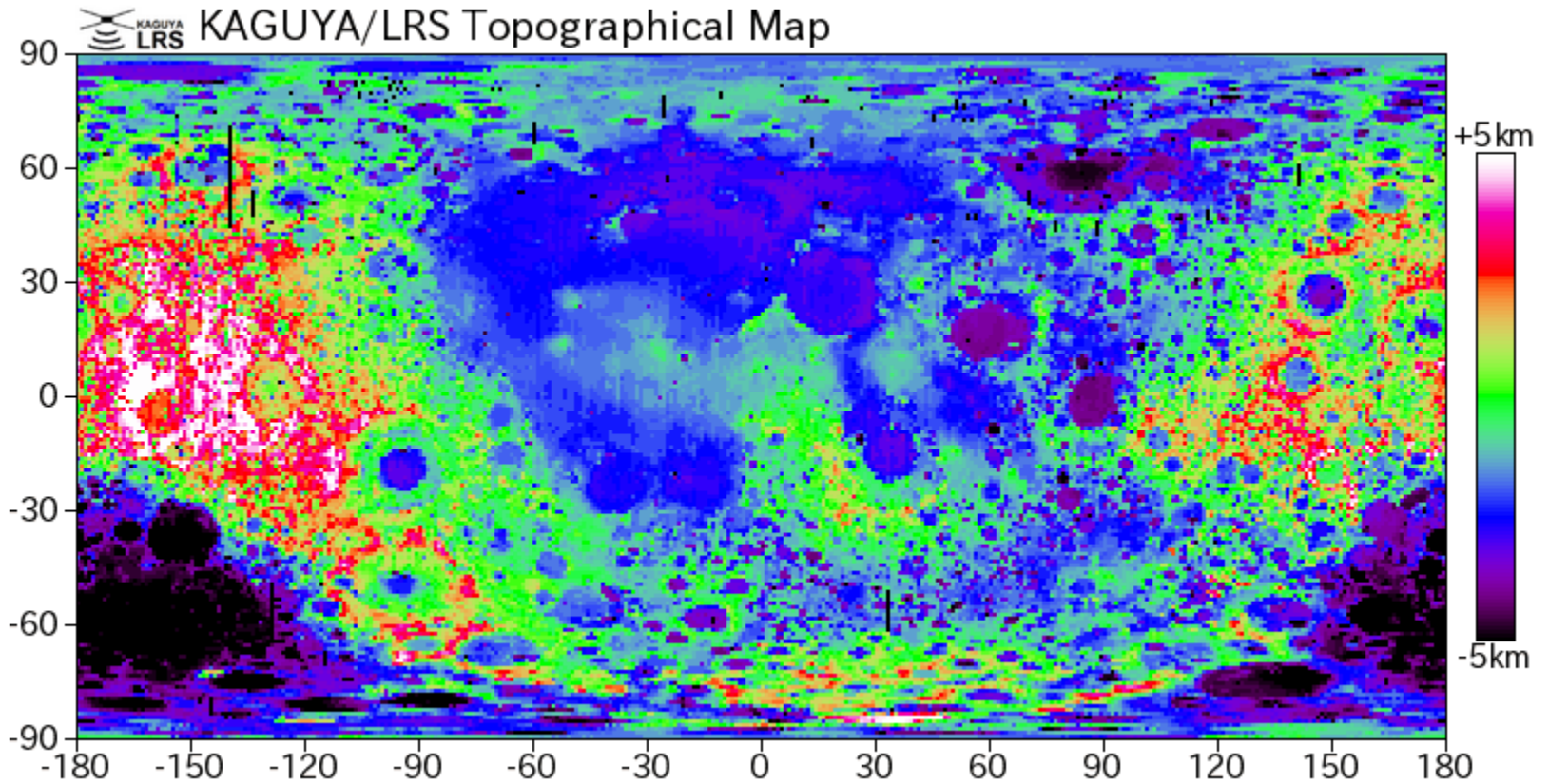
- 公開@かぐや(SELENE)データアーカイブ

<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/>



$$(Actual\ depth) = (Apparent\ depth) / \sqrt{\epsilon}$$

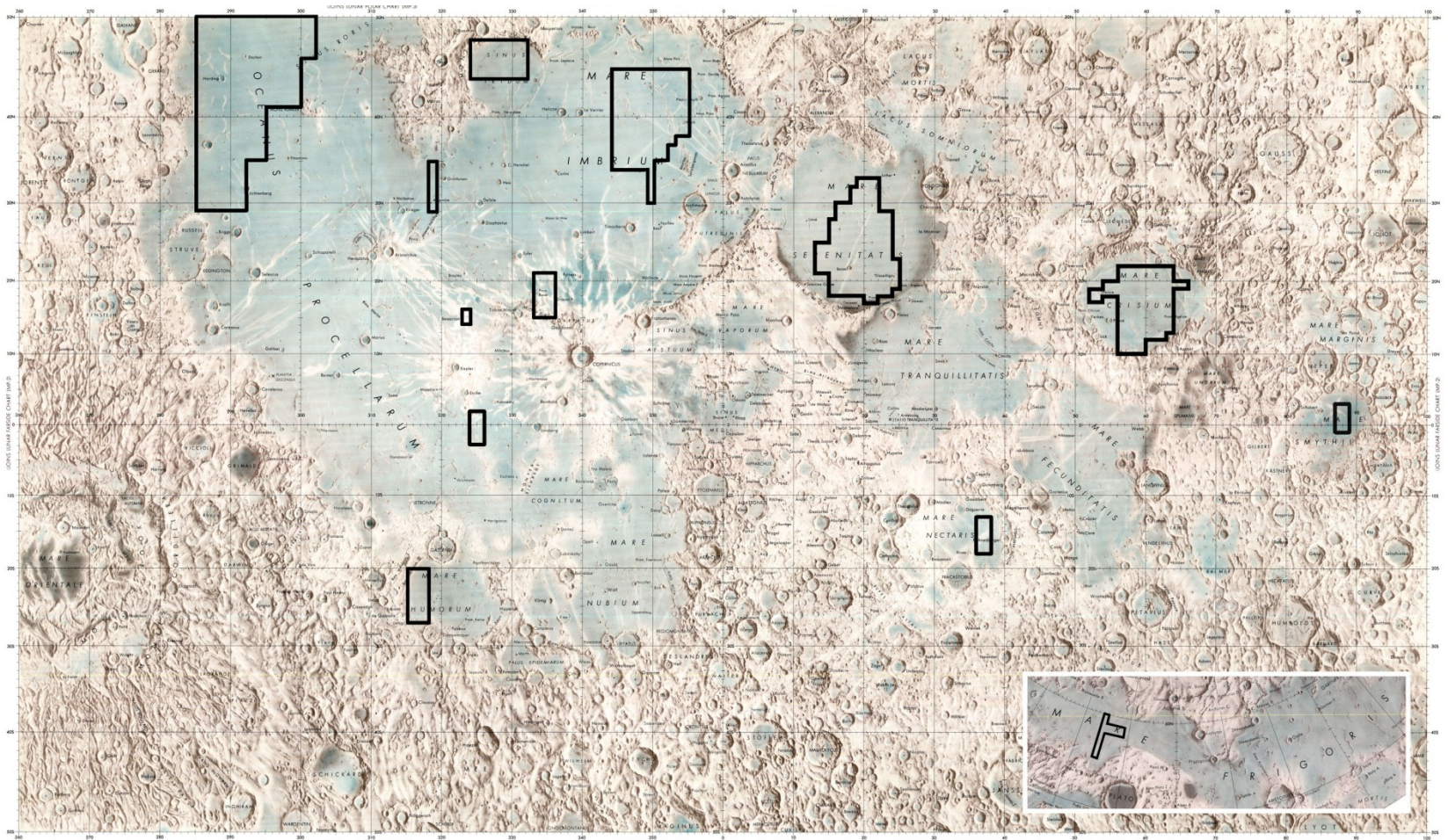
LRS観測エリア



SDR-W&SDR-Aモード

[東北大 熊本篤志氏 提供]

地下反射面分布



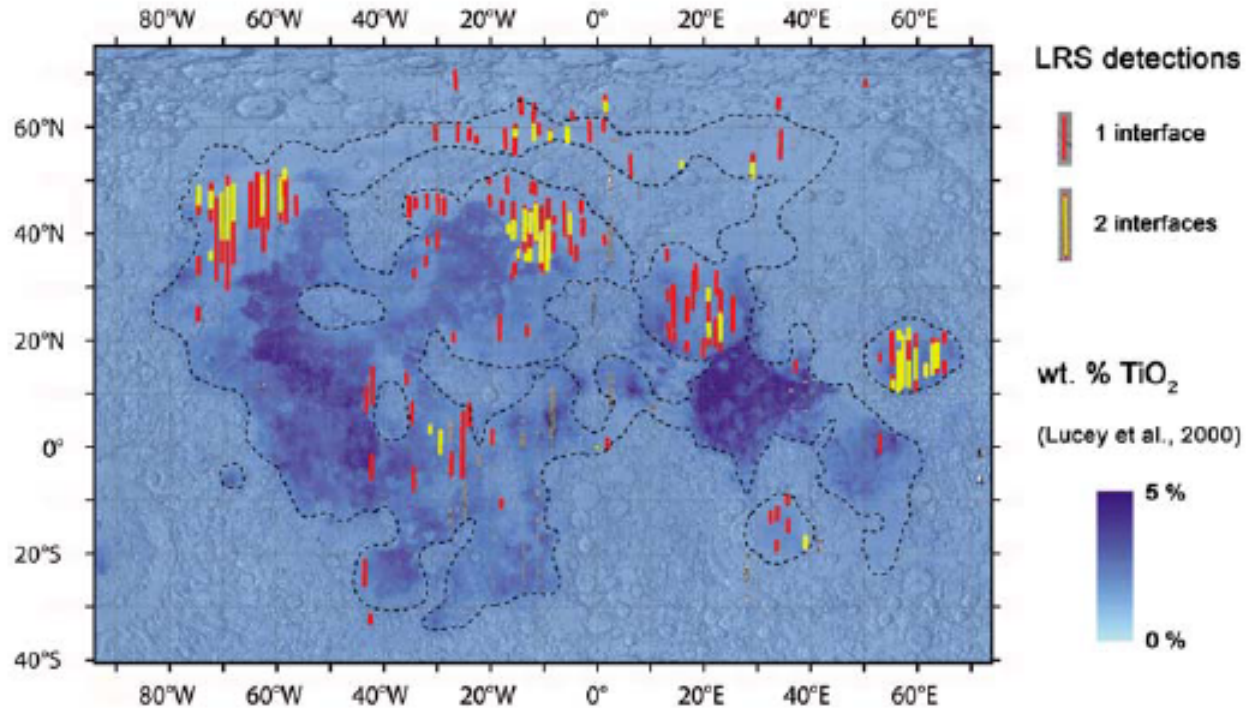
[modified from Oshigami et al., 2009]

地下反射面深度

Region	Maximum apparent depth [km]	Estimated mare thickness [km] (Williams and Zuber, 1998)	Estimated mare thickness [km] (De Hon, 1979)	Estimated mare thickness [km] (Solomon and Head, 1980)
Mare Humorum	0.7	3.6 km	2.3 km	2.7 km
Mare Imbrium	1.6	5.2 km	2.3 km	9.2 km
Oceanus Procellarum	1.2	N/A	0.8 km	N/A
Mare Serenitatis	0.7	4.3 km	>1.5 km	8.5 km
Mare Crisium	0.7	2.9 km	>1.5 km	7.4 km
Mare Nectaris	1.2	0.8 km	>1.5 km	4.5 km
Mare Smythii	0.7	1.3 km	0.5 km	4.5 km
Mare Frigoris	0.6	N/A	N/A	N/A

地下反射面分布域の特徴

- 地下反射面分布とFeO、TiO₂含有量分布に負の相関



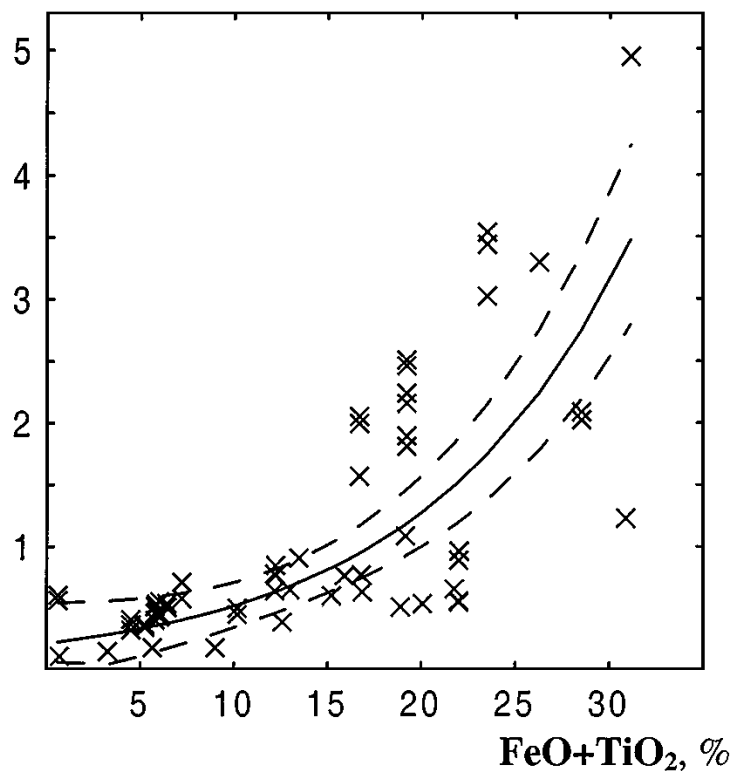
玄武岩中のilmenite (FeTiO₃)～電磁波の吸収体
⇒地下反射面が検出されにくい？

[Pommerol et al., 2010]

レーダの減衰

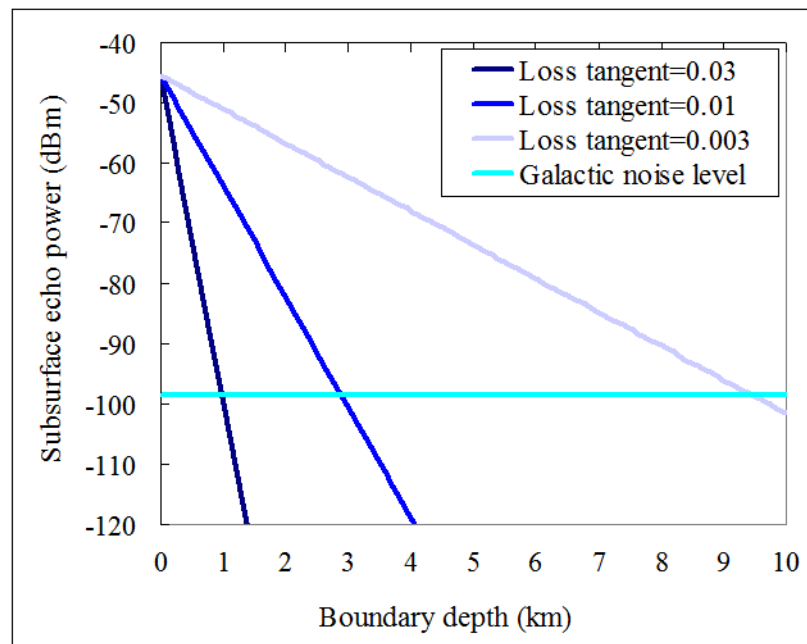
Apolloサンプルの $\tan\delta$ (誘電正接) vs. $\text{FeO}+\text{TiO}_2$

$\tan\Delta \cdot 10^{-2}$



[Shkuratov and Bondarenko, 2001]

レーダ方程式に基づくモデル計算結果



一層目の誘電率: 4

二層目の誘電率: 8

[Ono and Oya, 2000]

まとめ: 地下反射面の分布

- 分布状況

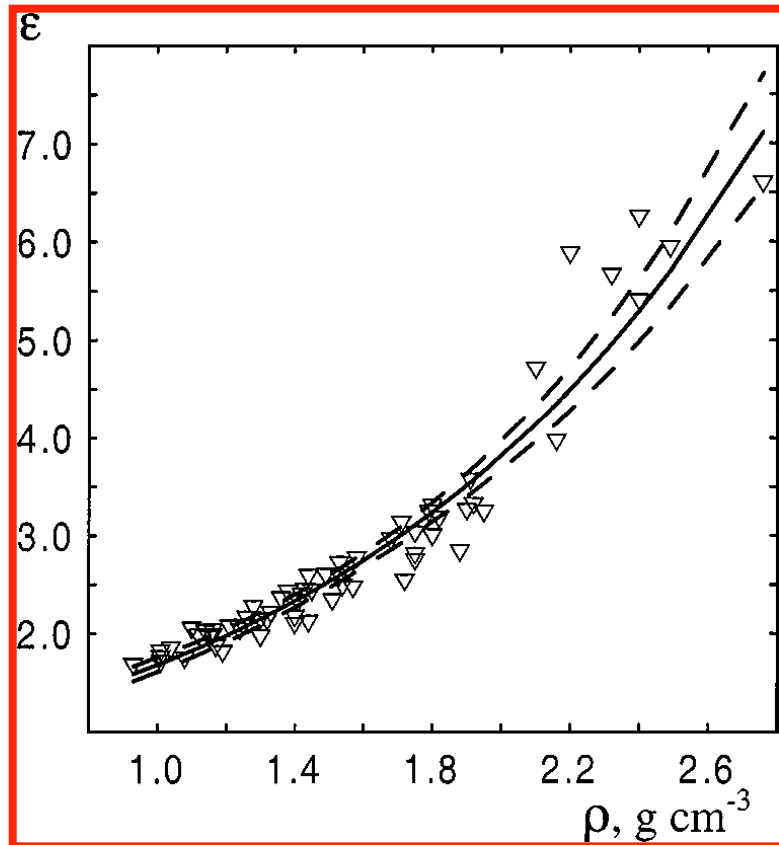
- 水平方向に連続的
- 深さ < 数百m ~ LRSの探査限界
- 表側の海の約9% ($0.6 \times 10^6 \text{ km}^2$)

- 分布域の特徴

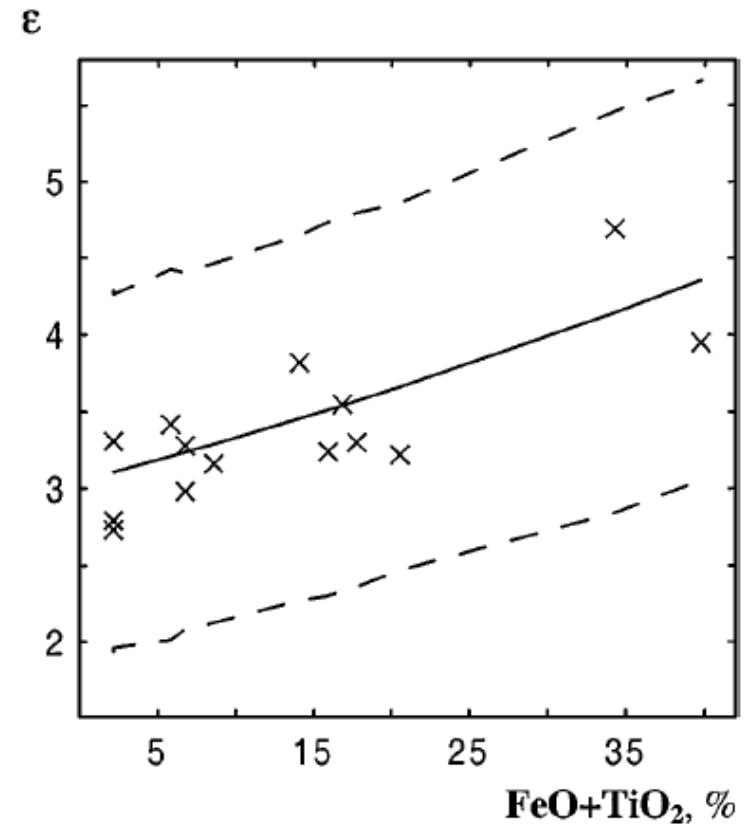
- 月面の TiO_2 , FeO量と負の相関
- 玄武岩中のIlmeniteによるレーダの減衰が影響か

アポロサンプルの誘電率

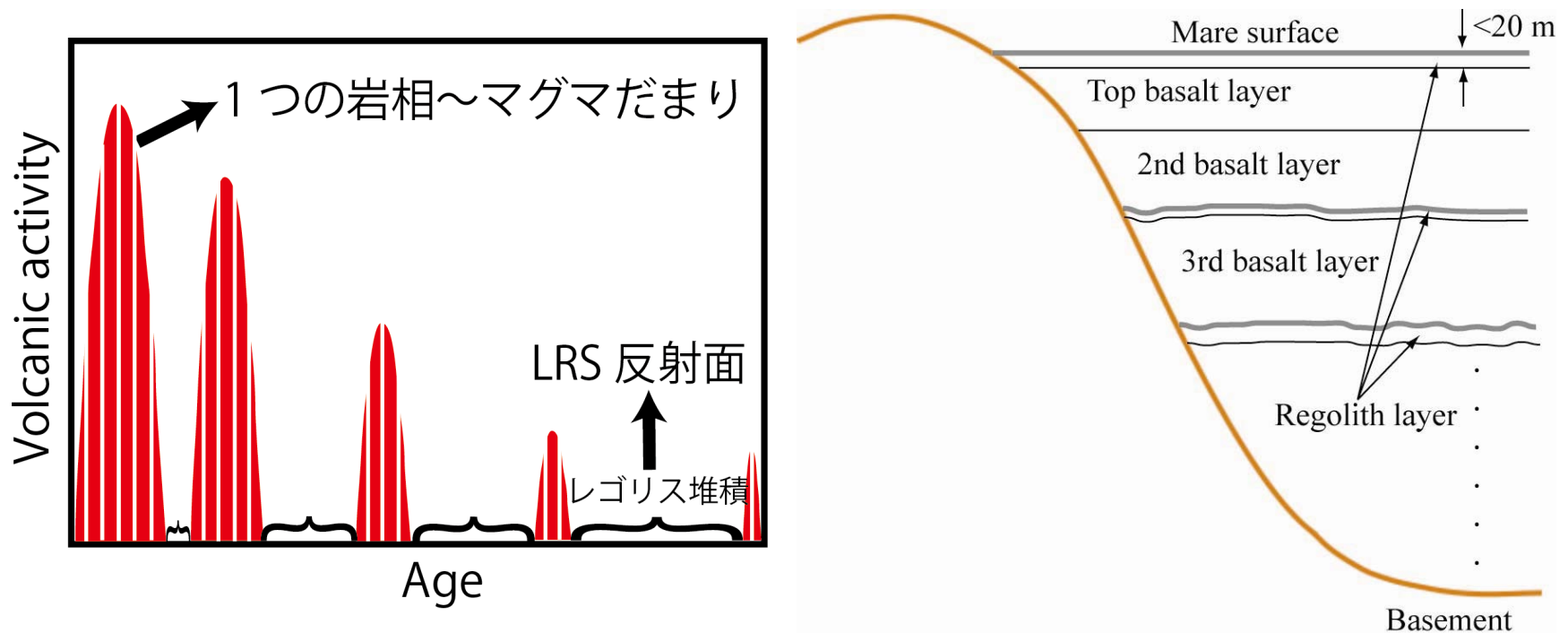
誘電率 vs 密度



誘電率 vs FeO+TiO₂含有量

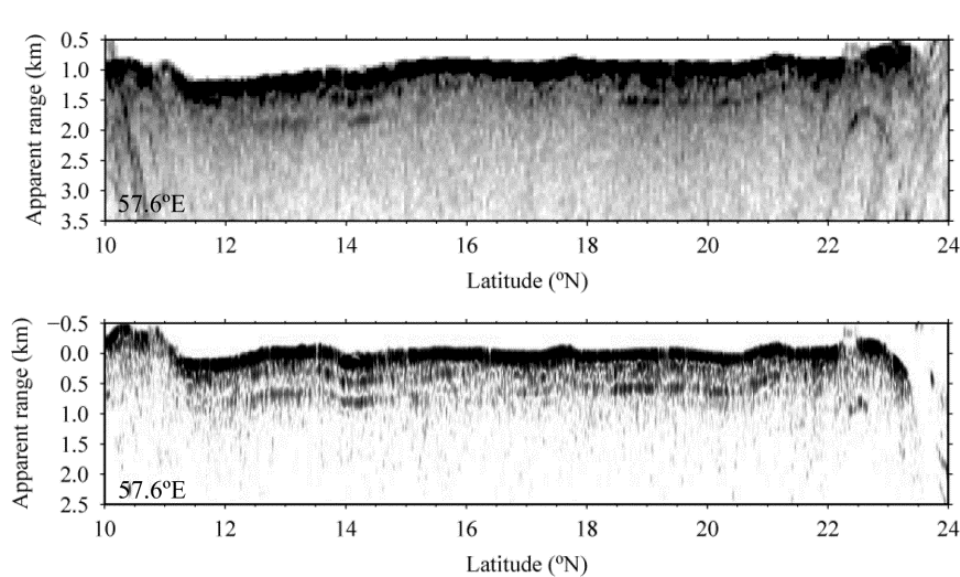


埋没レゴリスモデル



- 「かぐや」LRSデータ、光学データを用いた**反射面の同定**

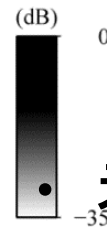
SAR処理LRSデータ



(上図)SAR処理前、(下図)SAR処理後の
危機の海付近のLRSデータ

- Synthetic Aperture Radar (SAR)処理

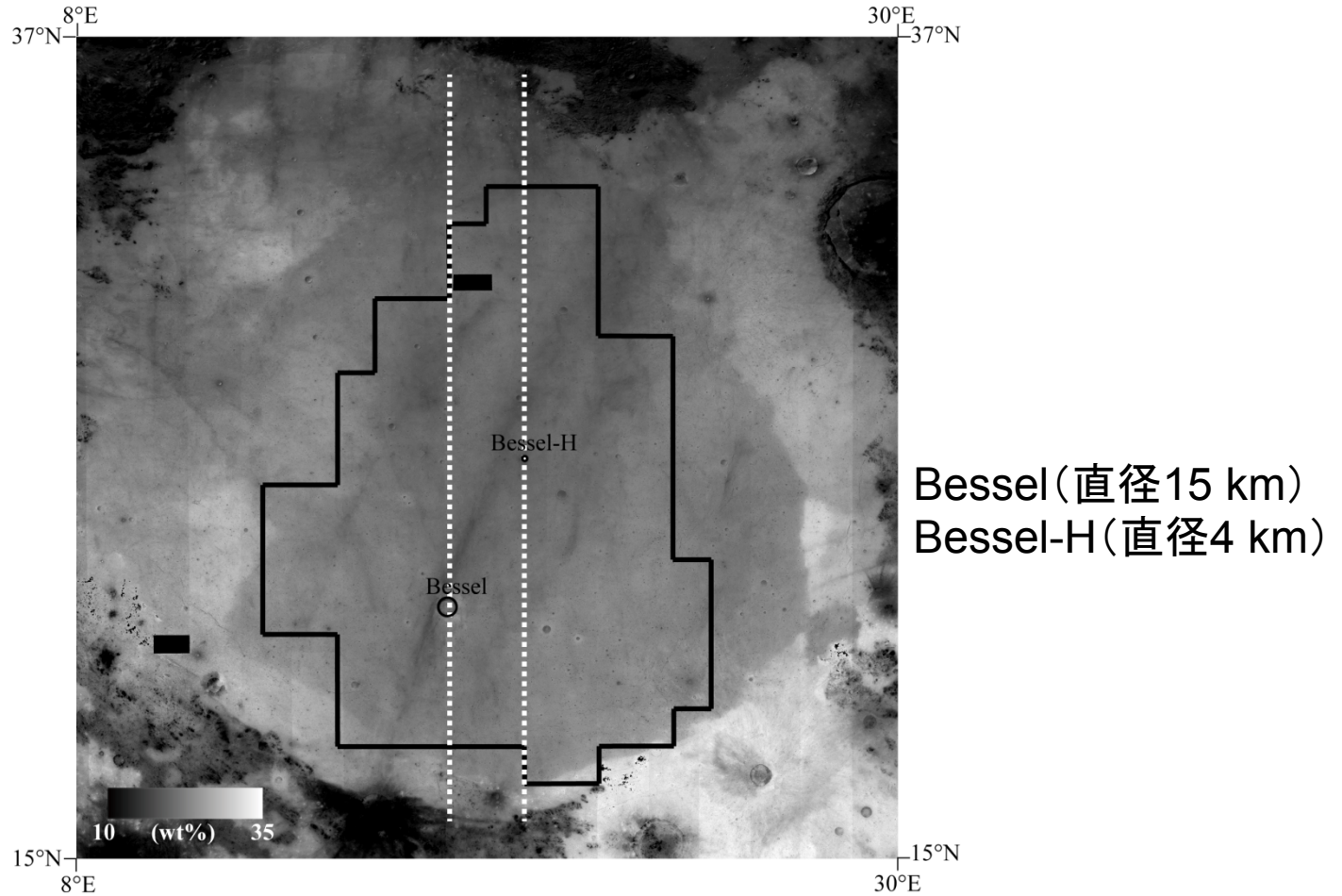
- 地下エコーが明瞭化
- 月面(クレータ)由来の双曲線状エコー(clutter)の除去



- 未公開データ

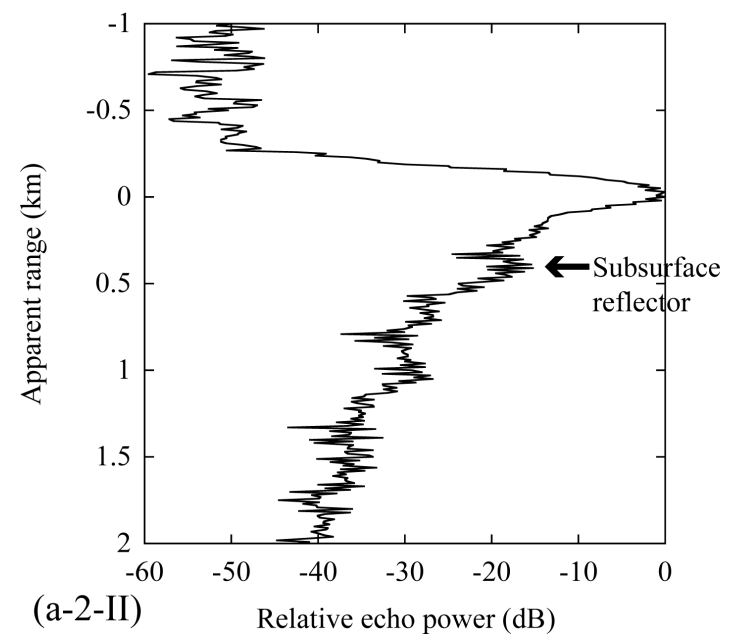
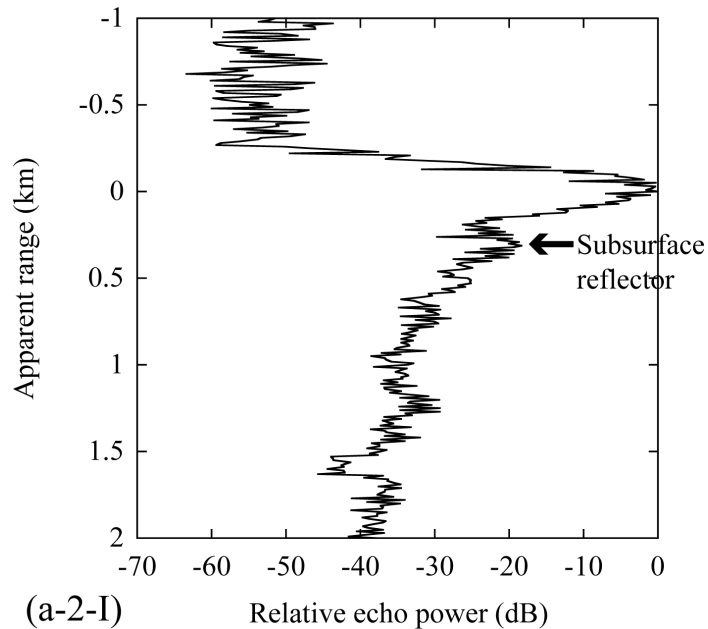
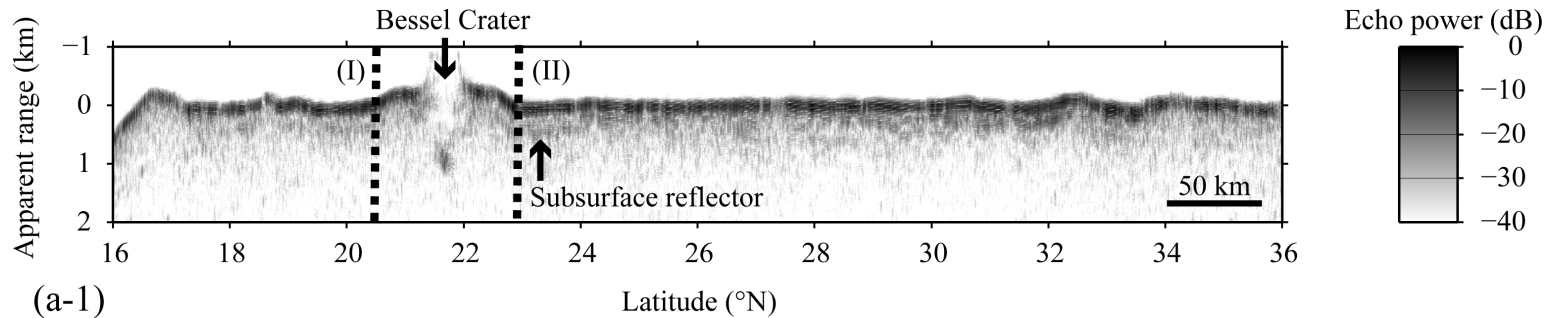
- SAR処理データを用いた地下表層構造解析

晴れの海表層の地下構造

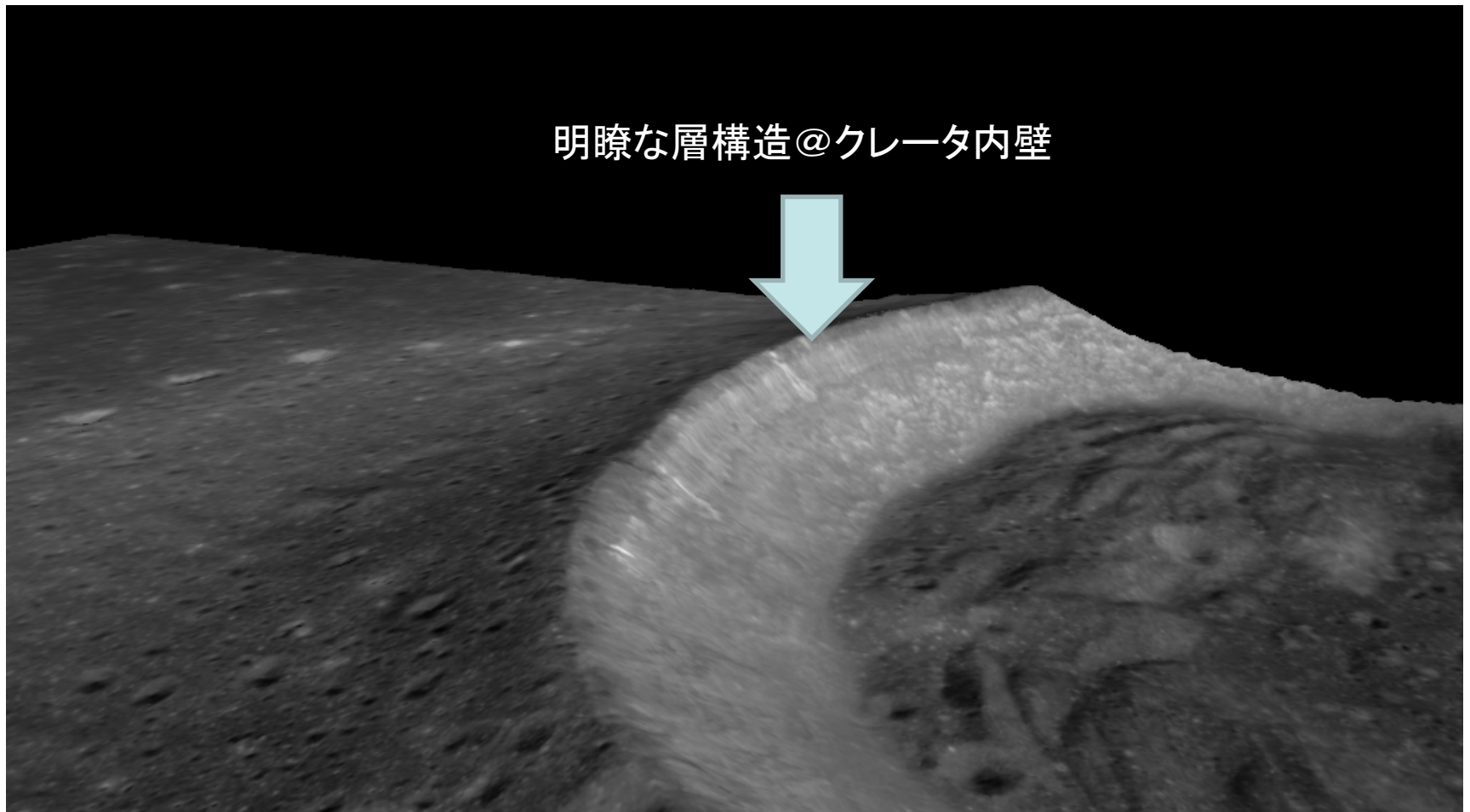


晴れの海の地下反射面分布とFeO+TiO₂含有量 [Oshigami et al., 2012]

Bessel Crater付近のLRSデータ

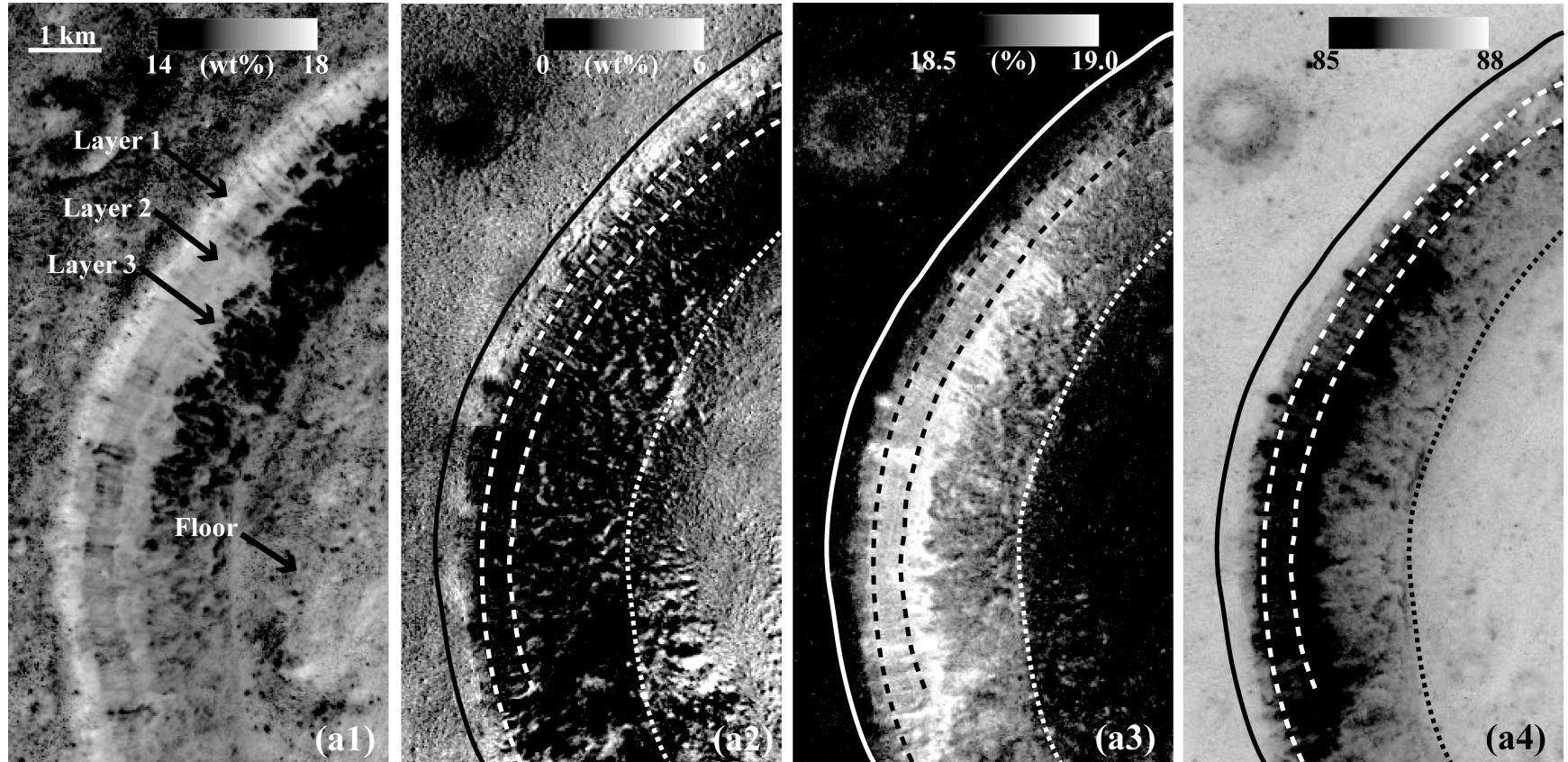


Bessel クレータ付近のTCデータ



「かぐや」地形カメラ(TC)データに基づくBesselクレータ(直径~15 km)付近の3D画像

Bessel Crater付近のMIデータ



FeO含有量
FeO)

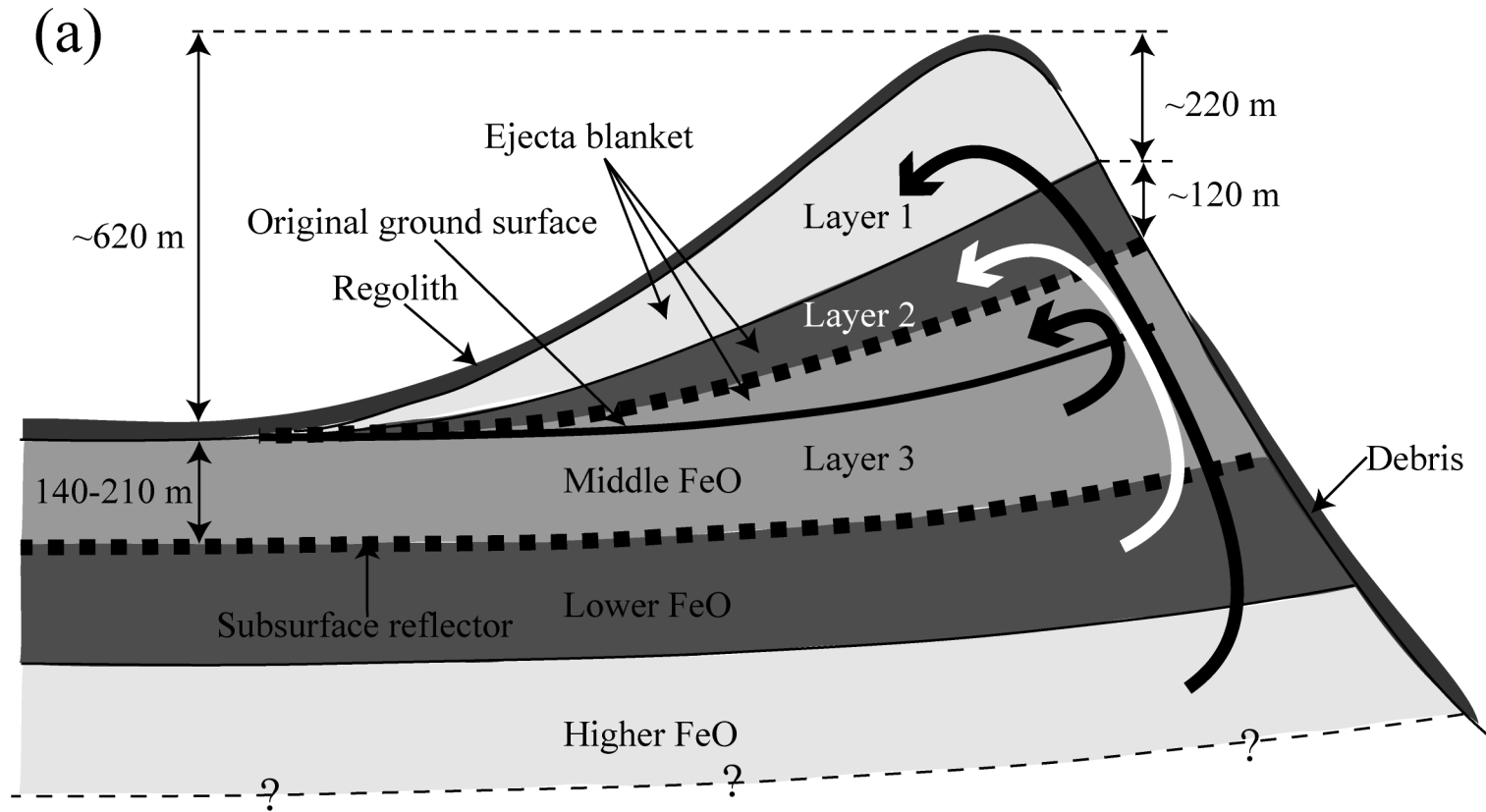
TiO₂含有量

Cpx含有量

風化度(Is/

Besselクレータ(直径~15 km)付近の「かぐや」マルチバンドイメージャ(MI)画像

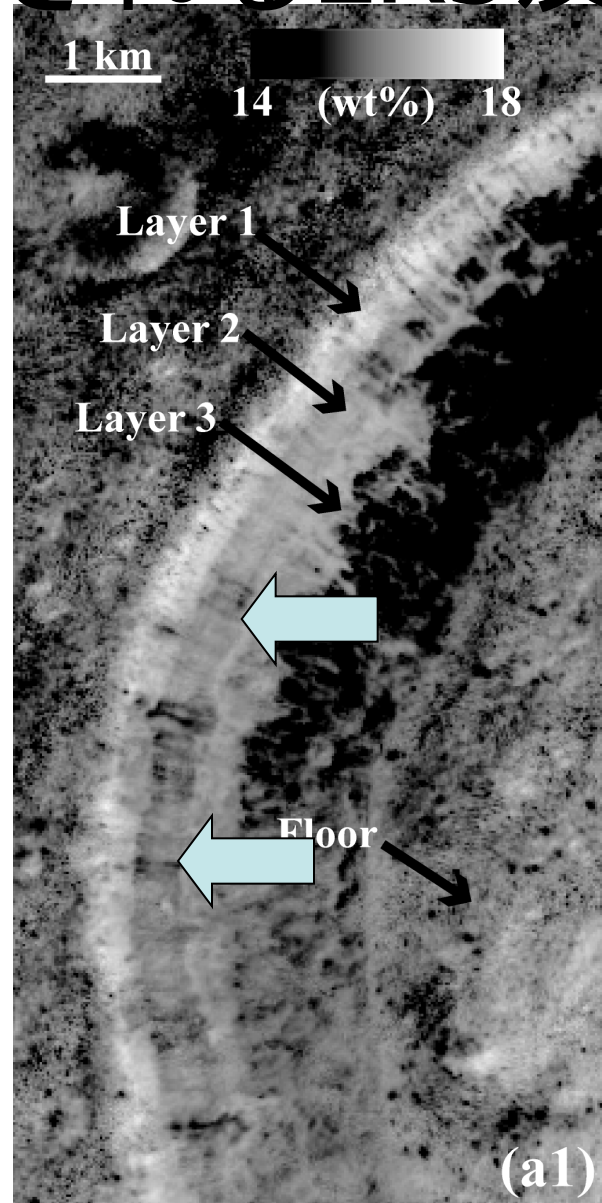
推定されるBessel Crater断面



Melosh [1989]によるクレータ形成モデル(overturn)を仮定

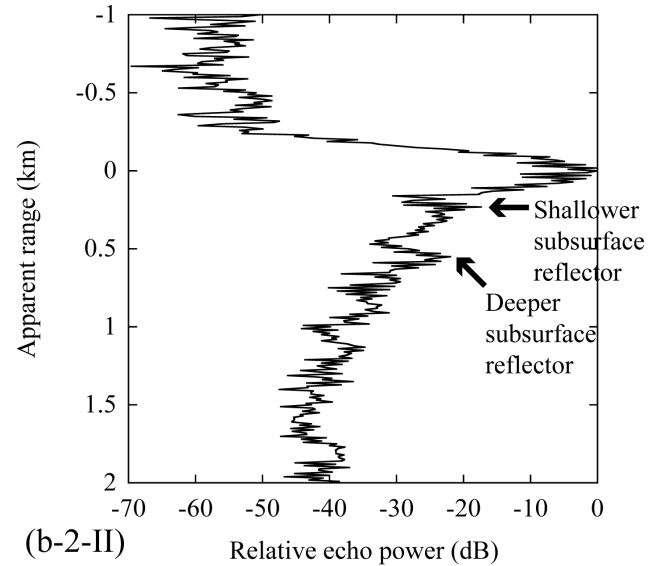
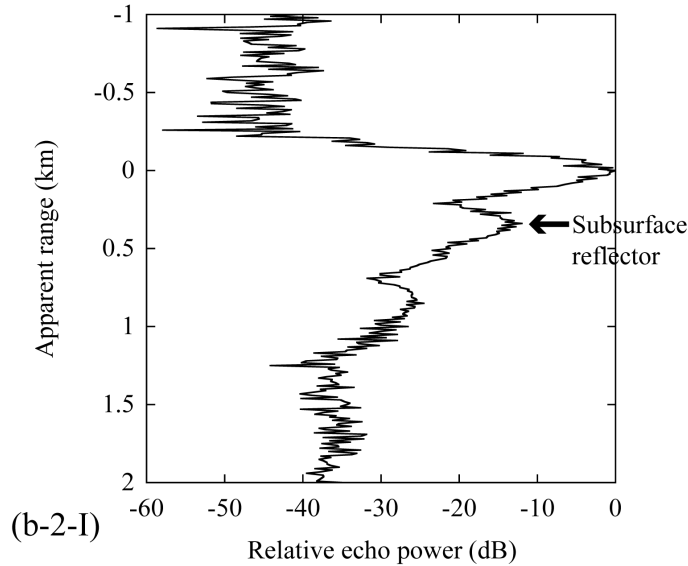
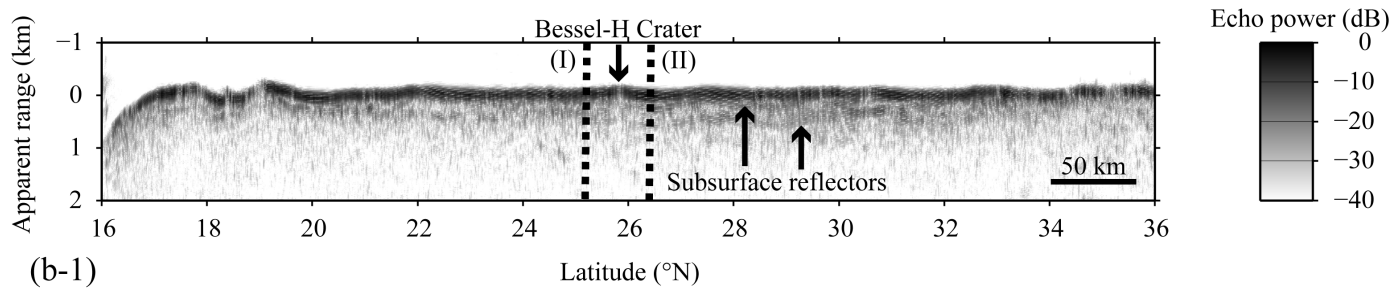
[Oshigami et al., 2012]

推定されるLRS反射面

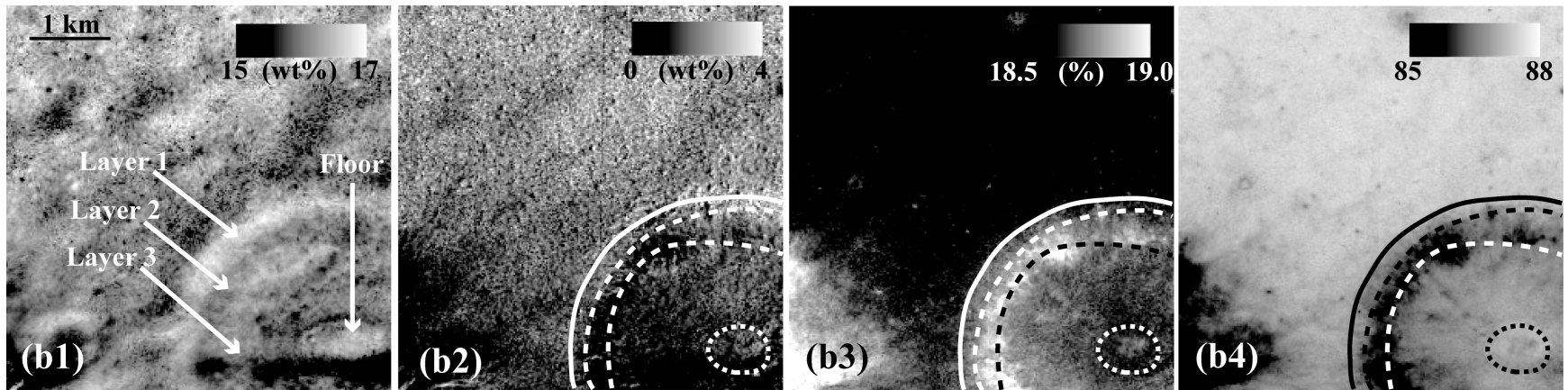


FeO含有量マップ
[Oshigami et al., 2012]

Bessel-H Crater付近のLRSデータ



Bessel-H Crater付近の MIデータ



FeO含有量
(wt%)

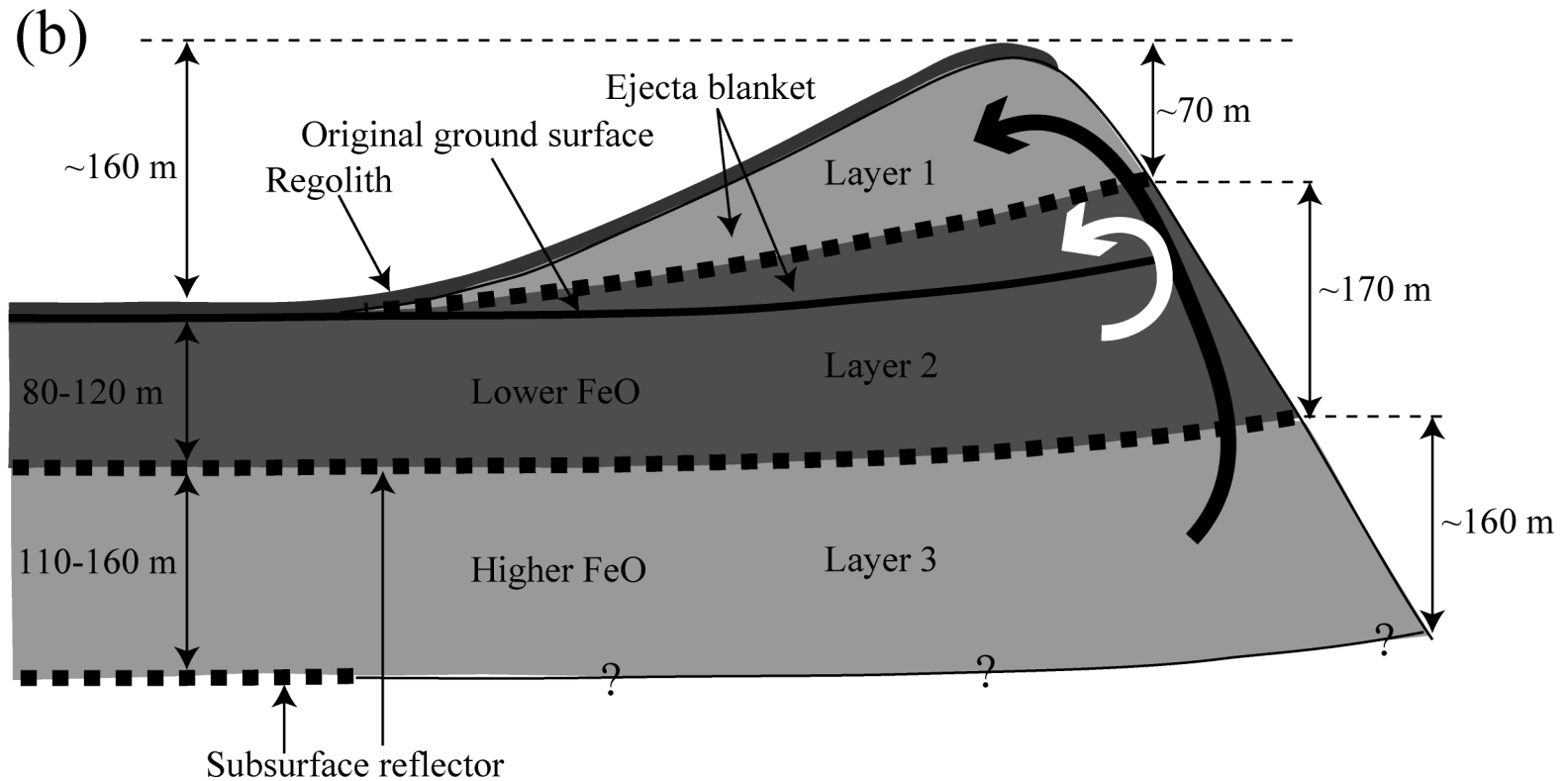
TiO₂含有量
(wt%)

Cpx含有量
(%)

風化度(Is/
FeO)

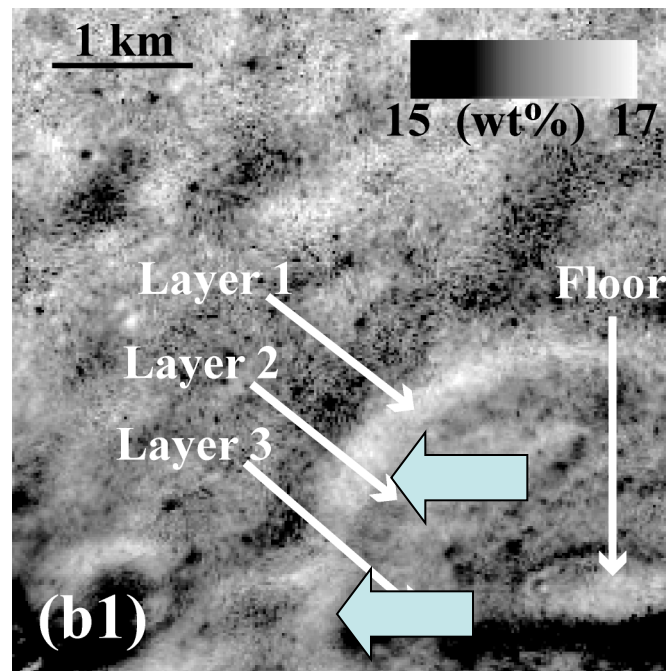
[Oshigami et al., 2012]

推定されるBessel-H Crater断面



Melosh (1989)によるクレータ形成モデルを仮定 (overturn有) [Oshigami et al., 2012]

推定されるLRS反射面



FeO含有量マップ
[Oshigami et al., 2012]

観測された反射強度と モデル計算との比較

- LRSで検出されている
反射強度 > -20 dB

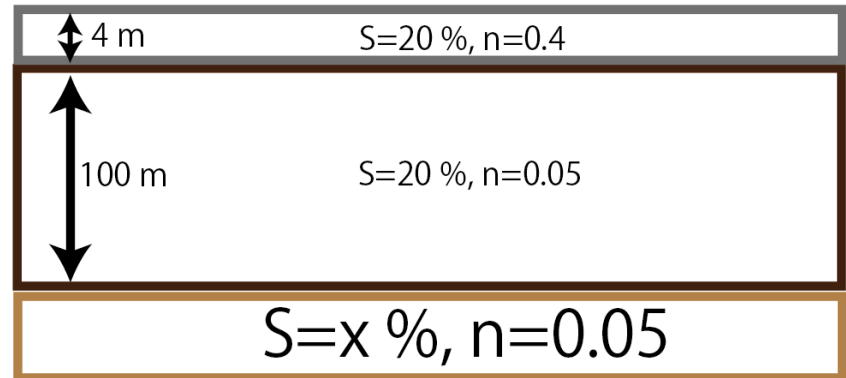
$$\tan \delta(S) = 8.8 \times 10^{-4} \times e^{10.5(1-n)} (0.0165S + 2.616) + 0.085S$$

$$\epsilon_{lr}(S) = 0.74 \times e^{10.85(1-n)} (0.0165S + 2.616)$$

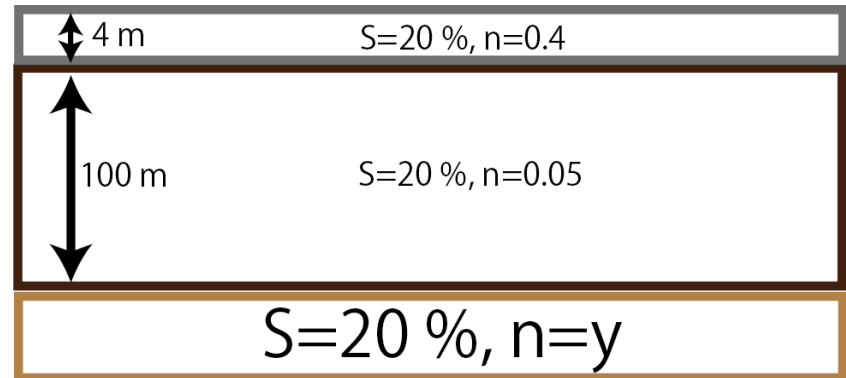
[Shkuratov and Bondarenko, 2001]

- 反射強度 > -20 dBとなる
 S (FeO+TiO₂量)、
 n (空隙率) は？
 1. $S < 1\%$ \rightarrow 非現実的
 2. $n < 0.15$

(1) 第三層 = 玄武岩



(2) 第三層 = レゴリス (Regolith)



まとめ: 地下反射面の正体

- LRS、MI、TCデータの比較
 - LRS反射面～組成差のある玄武岩相境界と一致
- 観測された反射強度とモデル計算との比較
 - LRS反射面～組成境界×、密度境界○

⇒ LRS反射面

～火成活動の休息期間に堆積したレゴリス層

既存研究

- 重力異常(右図a) [e.g., Solomon and Head, 1980]
- クレータのリム高と直径の関係(右図b) [e.g., DeHon and Waskom, 1976]

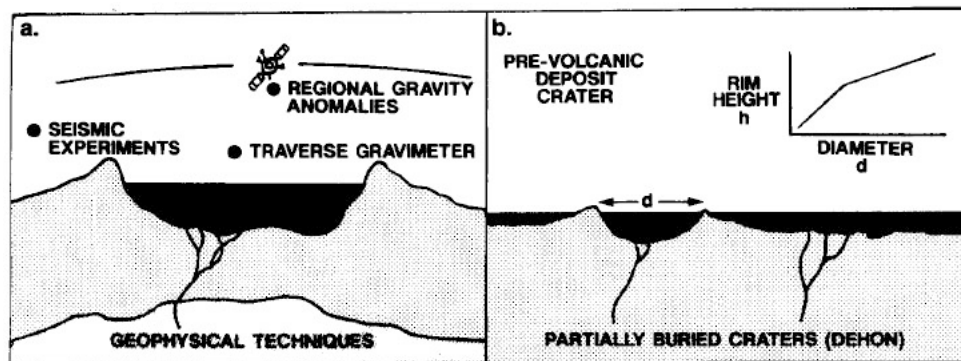
など

⇒海の玄武岩の総体積

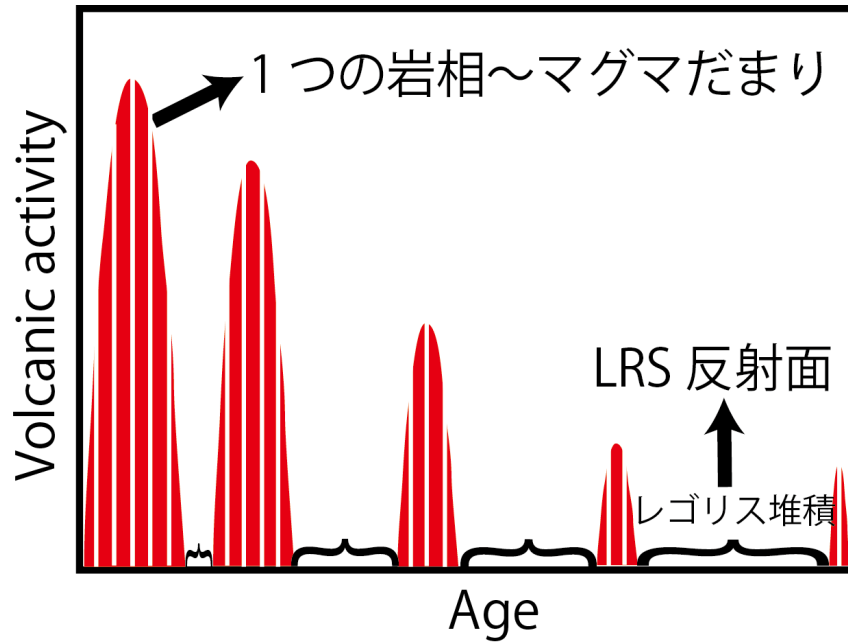
- クレータ年代学にもとづく表面年代



- 平均的な玄武岩噴出率 [Hartmann et al., 1981]

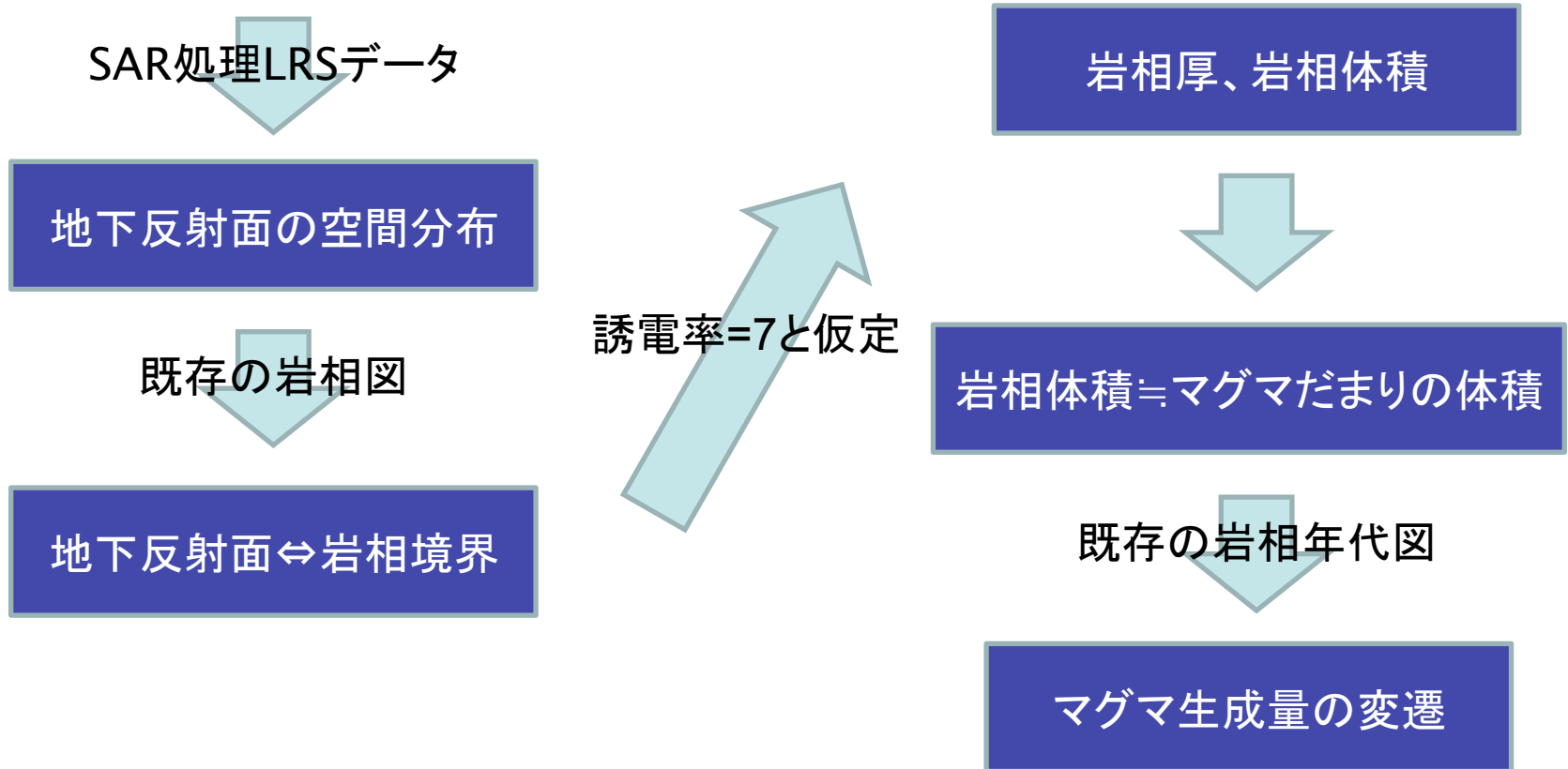


本研究で明らかにしたいこと

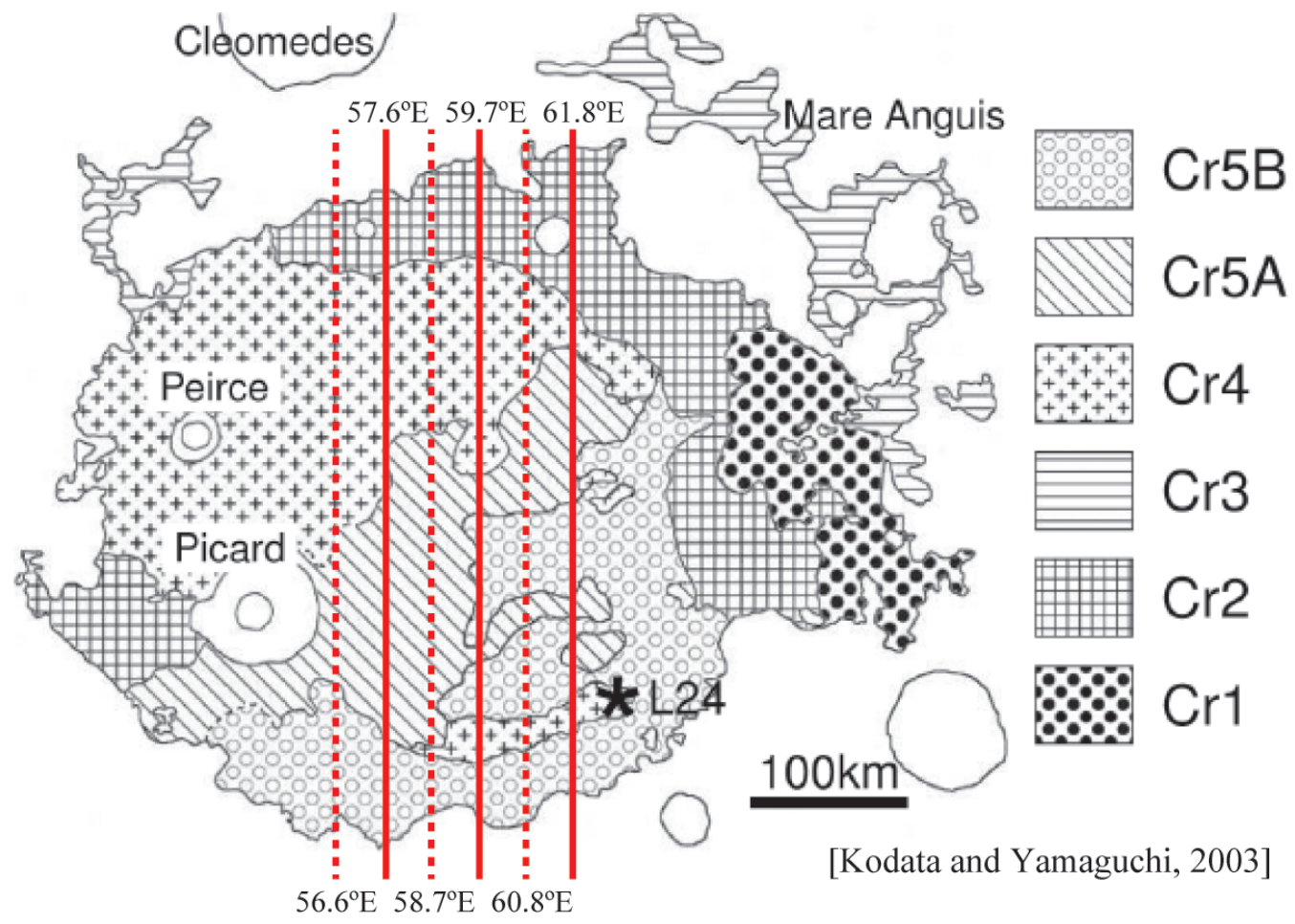


- 個々の玄武岩相体積
→ マグマだまりの規模を示唆
→ 火成活動度の変遷

火成活動史の推定方法

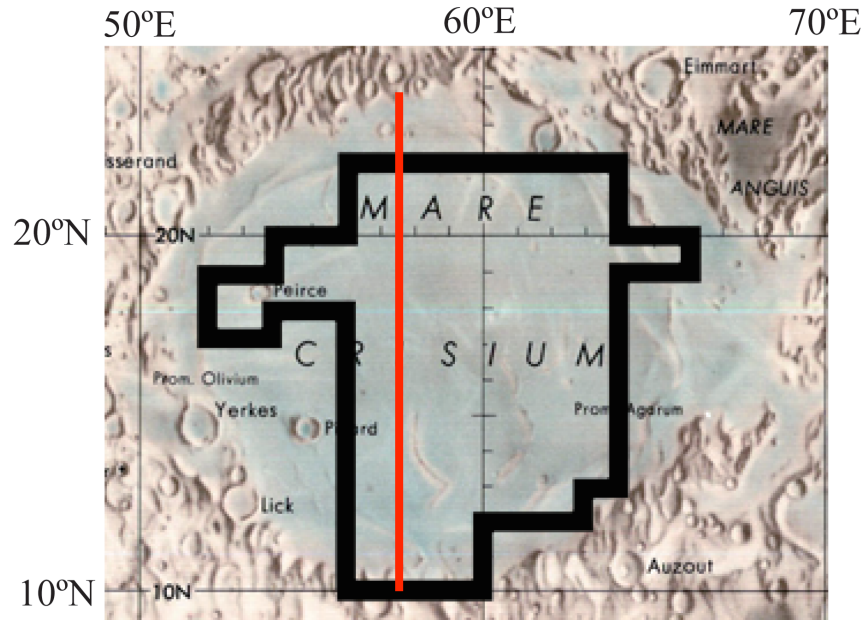


危機の海(Mare Crisium)の例

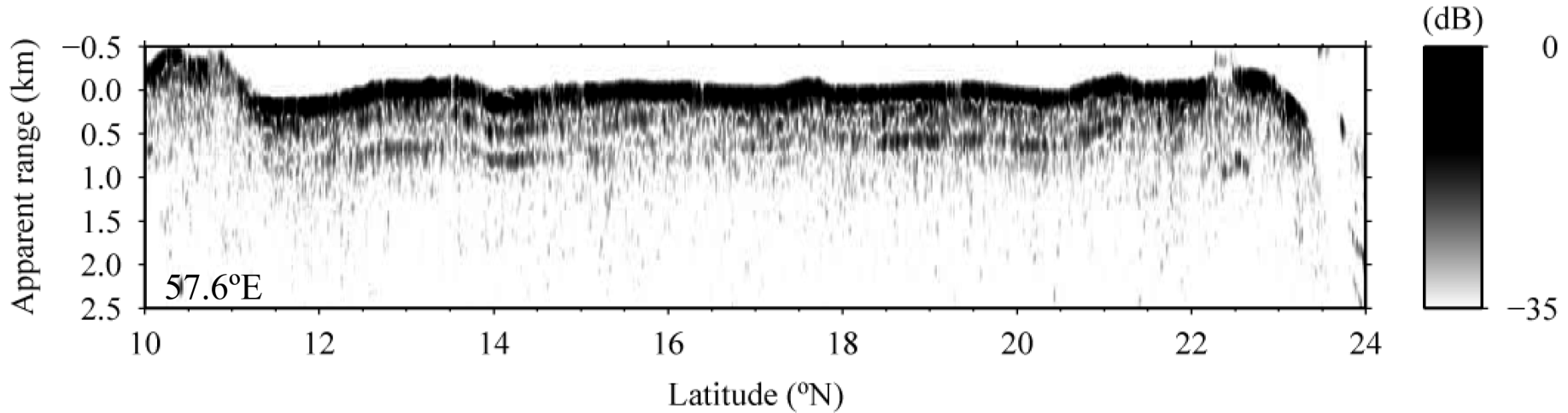


A lithofacies map of Mare Crisium [Kodama and Yamaguchi, 2003]

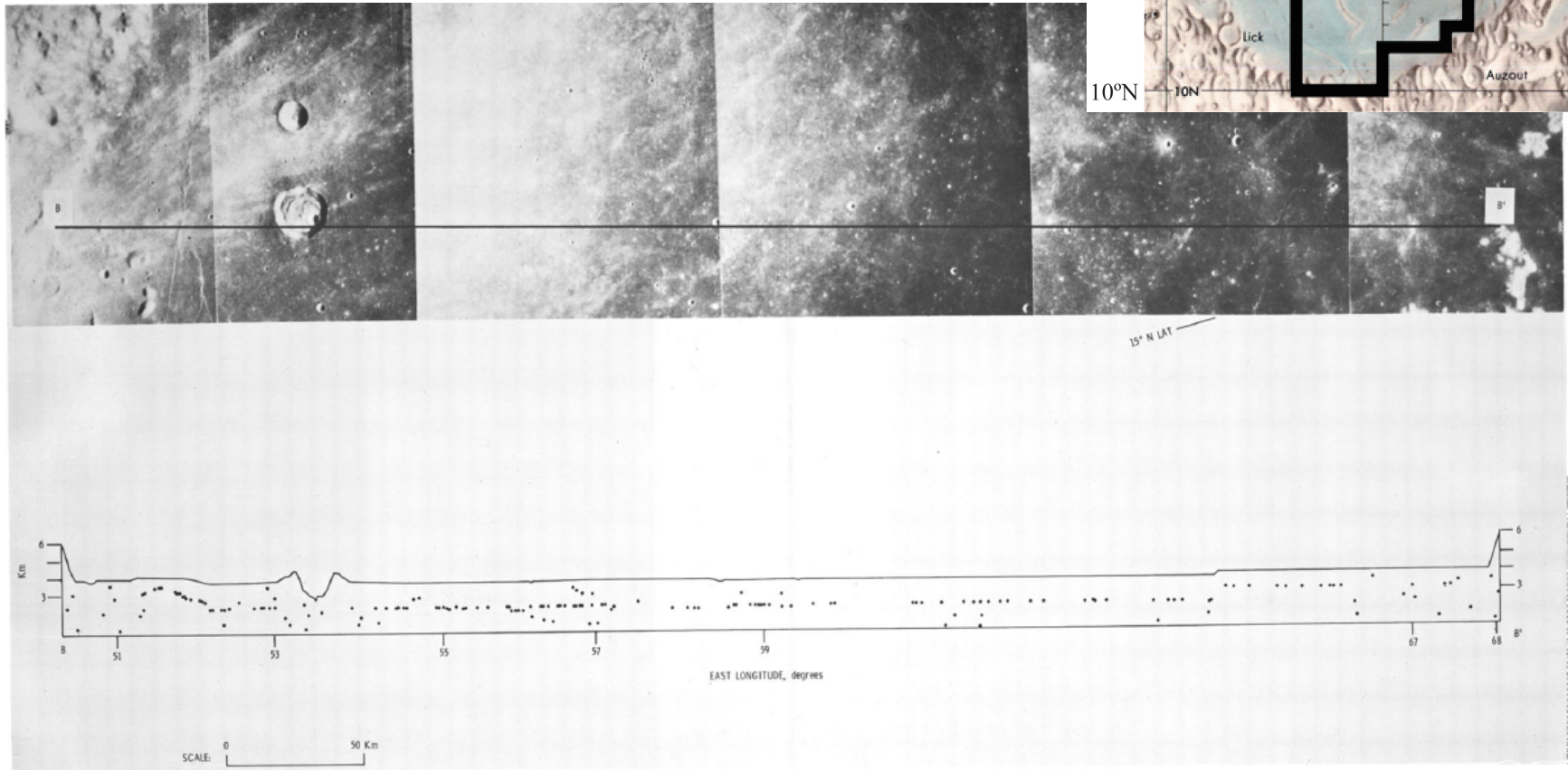
地下反射面分布



- 海のほぼ全域で複数枚の地下反射面
- 見かけ深さ < 700 m
⇒ 実際の深さ < 300 m

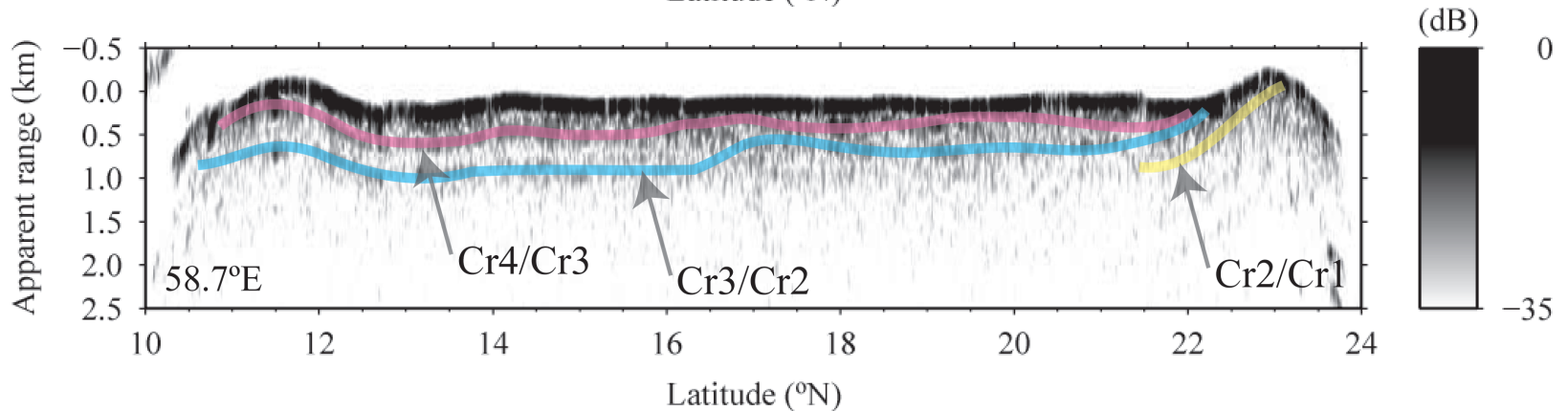
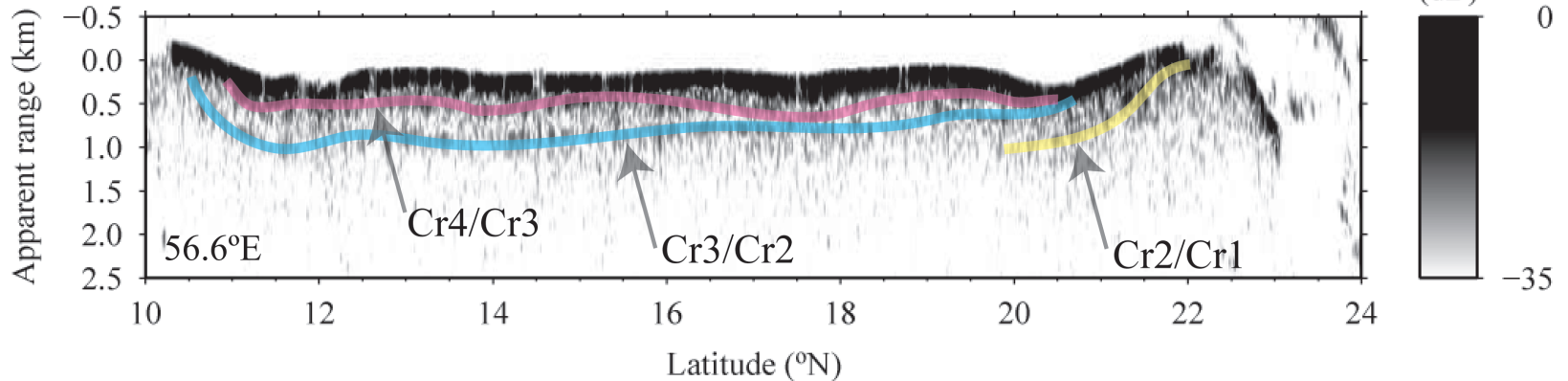
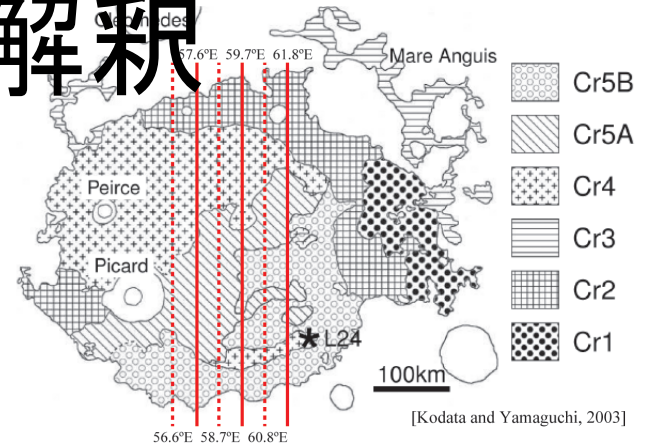


ALSEの結果

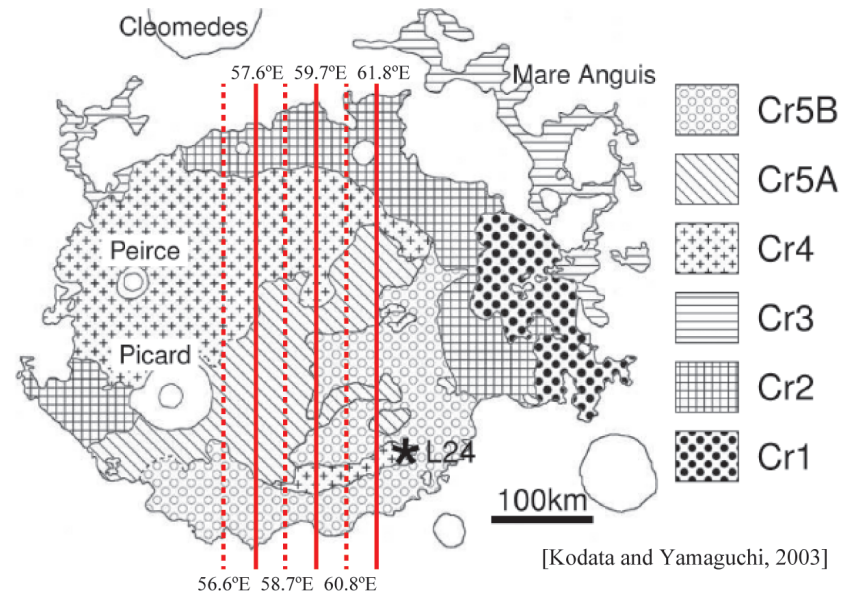
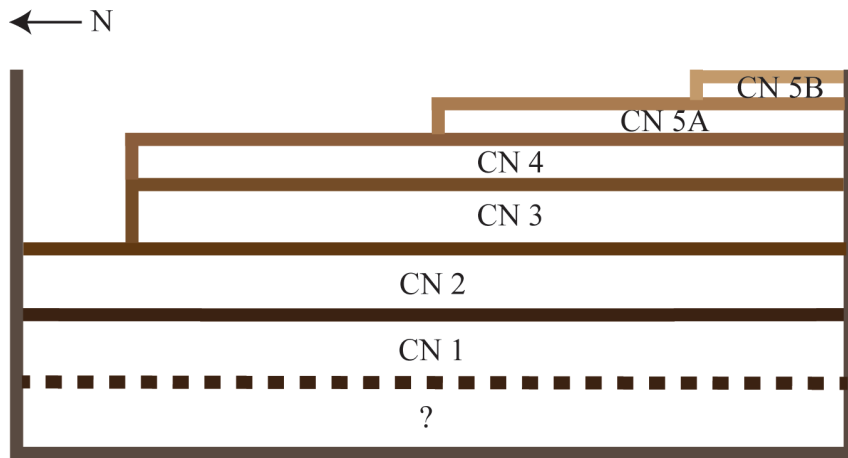


“mean apparent depth of **1.4 km**” [Peeples et al., 1978]

地下反射面の解釈



推定される地下構造



Schematic model of estimated cross section of Mare Crisium along about 57°E.

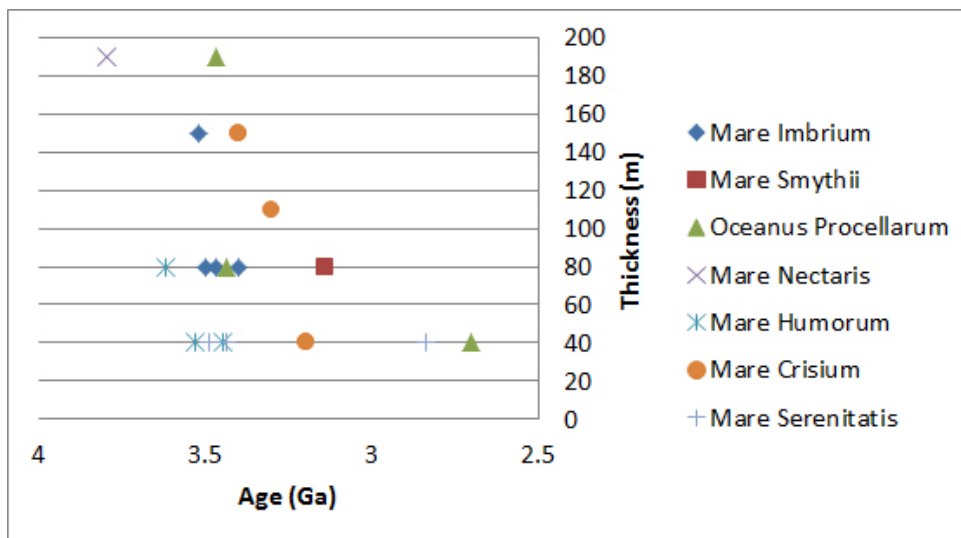
[Kodata and Yamaguchi, 2003]

表の海の岩相厚

- 最大値 $\sim 200 \text{ m} @ \varepsilon = 7$

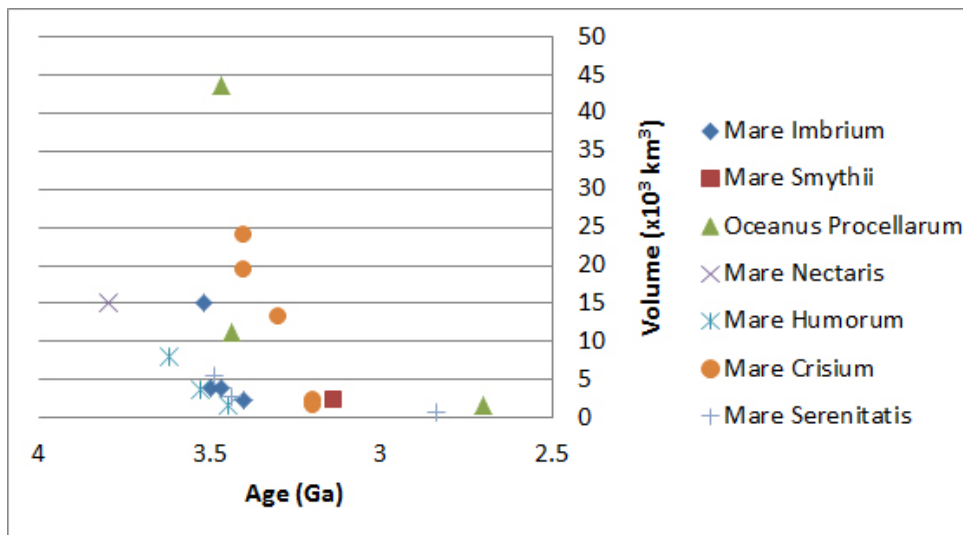
- 最小値 $\sim 40 \text{ m} @ \varepsilon = 7$
→ LRSのレンジ分解能に依存

- 各海の内部で年代と強い正の相関

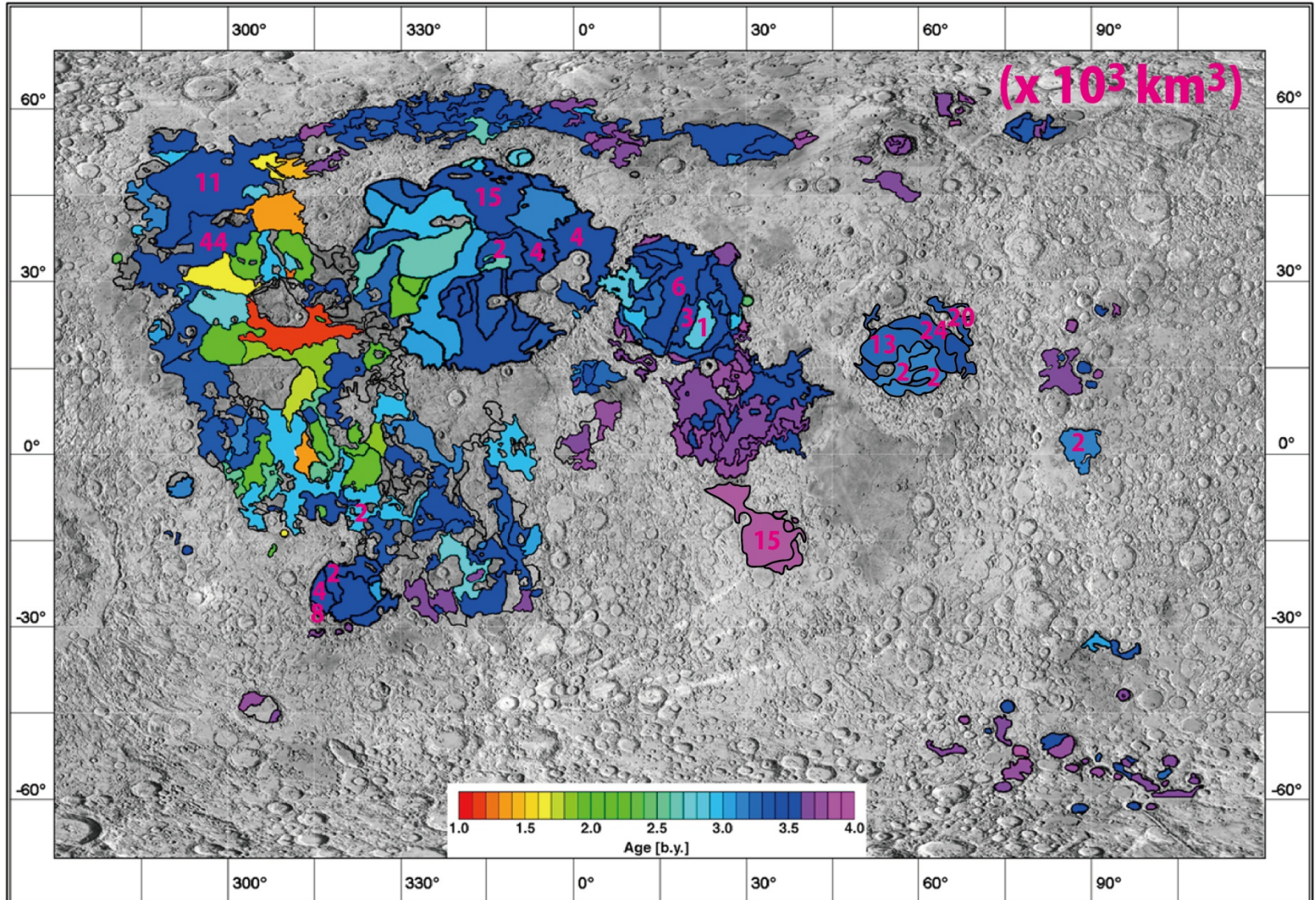


表の海の岩相体積

- 最大値～ $45 \times 10^3 \text{ km}^3$
- 最小値～ $1 \times 10^3 \text{ km}^3$
→LRSのレンジ分解能に依存
- 各海の内部で年代と強い正の相関
- マグマだまりの規模の差～年代<地域



表の海の岩相体積分布



[after Kodama and Yamaguchi, 2003; Hiesinger et al., 2010]

考察

- 推定される玄武岩相厚 (<200 m)
 - Apollo 11, 12, 15号着陸地点の一枚一枚の玄武岩溶岩流の厚さ<10 m [Brett, 1975] →LROカメラデータ
 - (一つの岩相形成に対応する)一連の火成活動において、**噴出イベントが最大で数十回**発生
- 推定される玄武岩相体積 (1,000–5,000 km³)
 - 月のsinuous rilles(溶岩チャンネル)形成に対する熱浸食モデルの数値計算から導かれる流出量と一致 [Hulme, 1973].
 - 地球の始生代(25–40億年前)におけるコマチアイト流出量(1,000–10,000 km³)に匹敵[Williams et al., 2001].

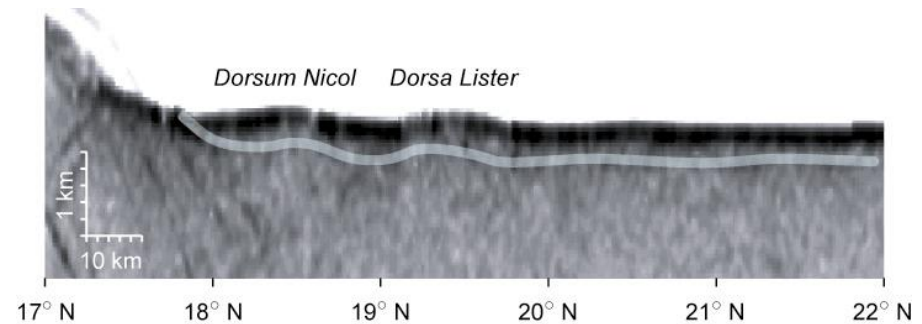
まとめ：月表側の火成活動史

- 推定手法
 - 既存の岩相年代図との比較により月表側の海の岩相境界を同定し、各岩相の体積を推定
- 岩相厚・岩相体積
 - <200 m
 - <4,500 km³
 - 個々の海において、年代とともに明らかに減少
- 本研究で同定した岩相の年代範囲(2.7–3.8 Ga)において、月表側の玄武岩質マグマだまりは**同時期の地球(始生代)のコマチアイト質マグマだまりに匹敵する規模**をもっていた可能性

今後の課題

- 岩相厚、岩相体積（マグマだまりの規模）と、海のテクトニクスとの関連性
- 海のリッジ形成要因
 - 晴れの海南部のリッジ地下反射面～リッジと平行
 - 水平方向の圧縮力
 - global cooling [Freed et al., 2001]に起因する地殻収縮によるリッジ形成
 - 35.5億年前(S11の形成)以後の主なテクトニクス駆動要因はglobal cooling

[Ono et al., 2009]



晴れの海のLRSデータ [Ono et al., 2009 Fig.3改]



リッジ地下断面模式図 (上)mascon loadingモデル、(下)地殻収縮モデル