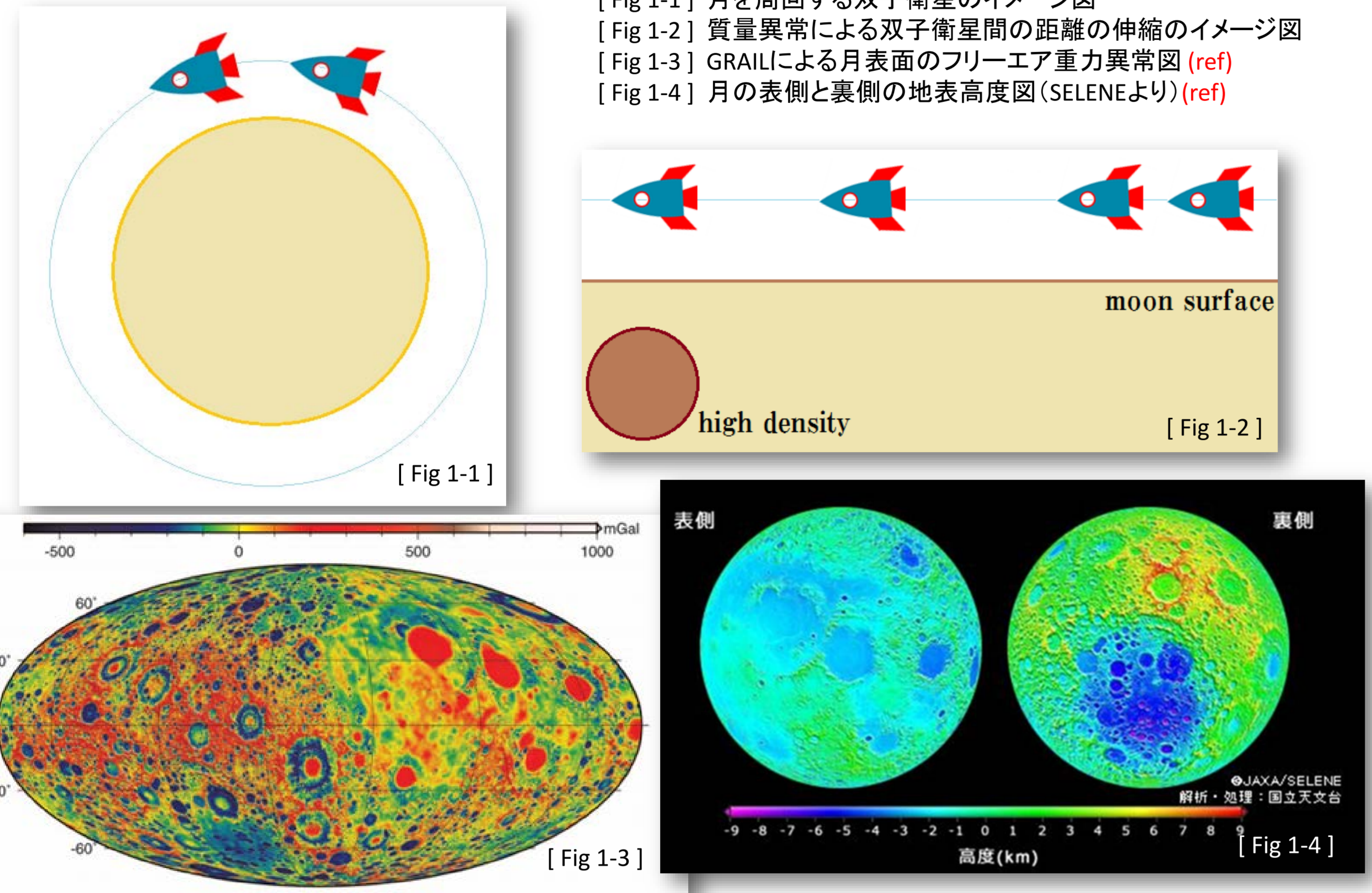


要旨 月の研究は地球型惑星の初期史解読のために有用である。本研究では、GRAIL衛星による高空間分解能月重力場モデルと、LRO/LOLAによる月地形データを比較し、月表面の地形と重力場の間の、相関およびアドミッタンスの、波長依存性を議論した。その結果、月では球関数の次数30次以上でアドミッタンスが急増し、月の地形が形成された当時のリソスフェア厚が約14 kmであることがわかった。月を火星や地球における重力・地形の相関やアドミッタンスと比較し、それらの天体におけるアイソスタシー補償の程度やリソスフェアのたわみ剛性について議論する。

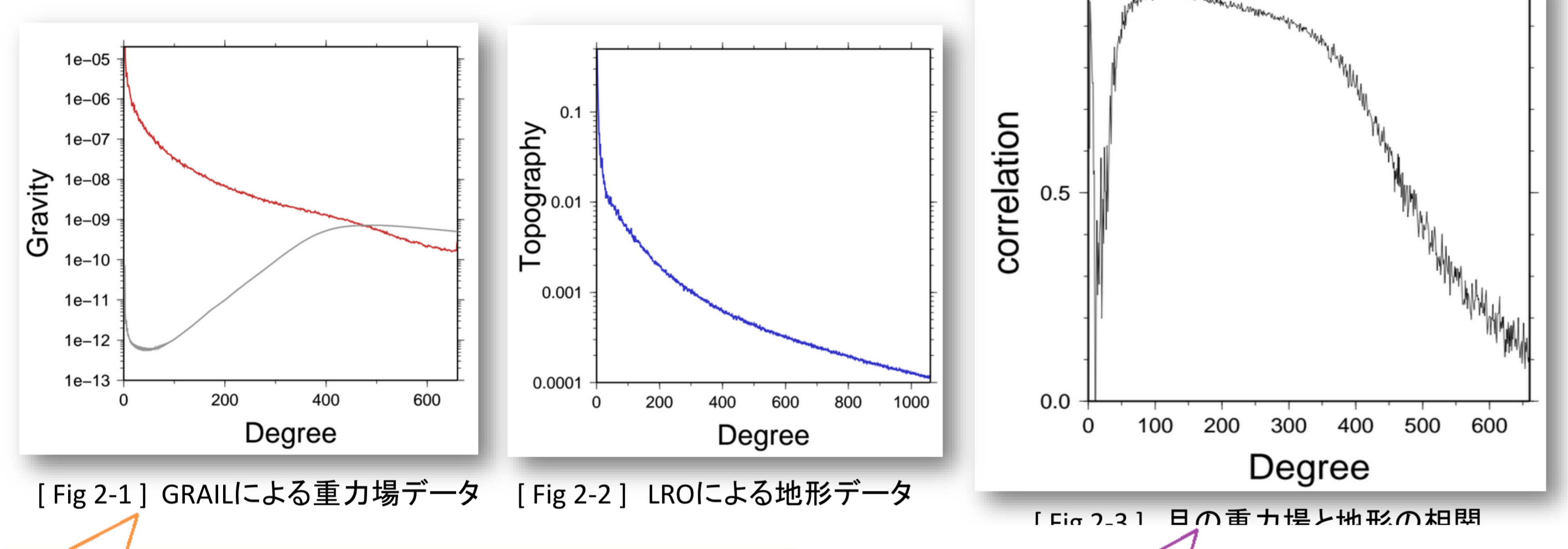
1. 衛星による重力場と地形の測定

月の重力場のデータは、共通軌道(極軌道)を描く2つの探査機を月の周回軌道に投入し、その間の距離を測ることで推定することができる。そのために開発されたのがGRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) と呼ばれる双子衛星である。また、本研究に使用する月の地形データは、レーザ高度計を搭載した月探査機Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) から得た。



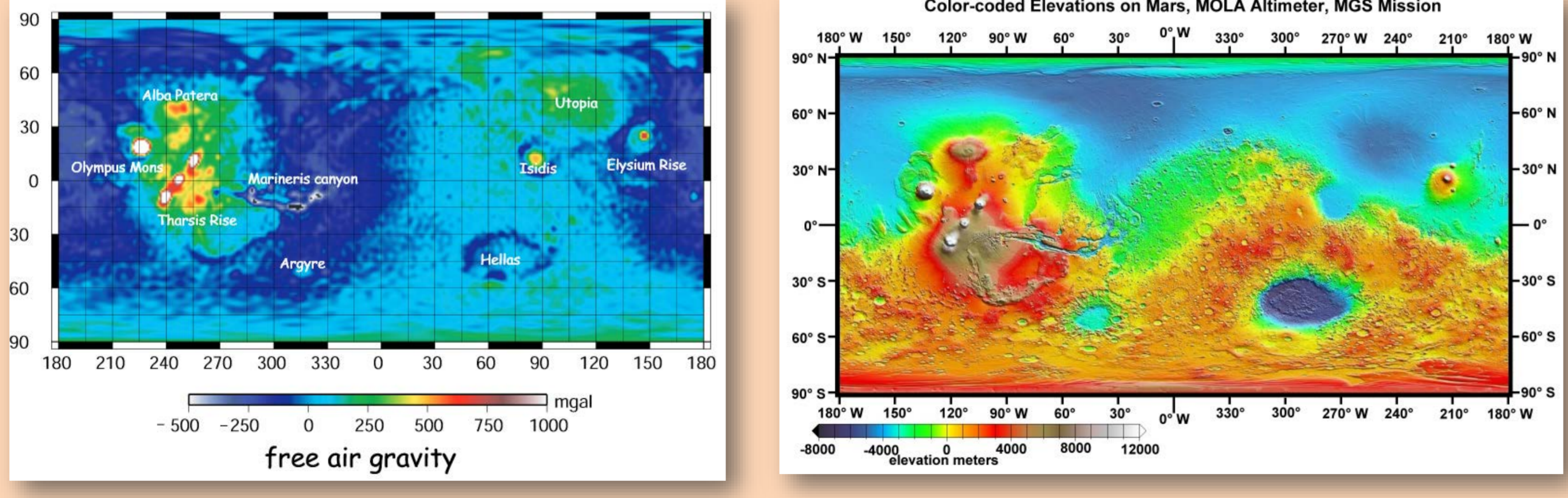
2. 相関 Correlation

GRAILやLROによって得られた重力場 (Fig. 2-1) と地形 (Fig. 2-2) をそれぞれ球関数展開し、それらの間の相関係数 (correlation coefficient) (Fig. 2-3) を次数毎に比較し、波長依存性に注目する。このグラフから、低次 (長波長) で相関が低いことが分かる。これは、月内部の流動性によってアイソスタシー補償が成り立っているため両者の相関が失われていることを示す。また、100~400にかけては、相関は1に近く、短波長の地形はリソスフェアの剛性で支えられているためアイソスタシーが成り立っていないことを意味する。さらに高次になると、本来の地形と重力の相関は高いはずだが、重力の推定誤差が大きくなるため、相関は低下する。



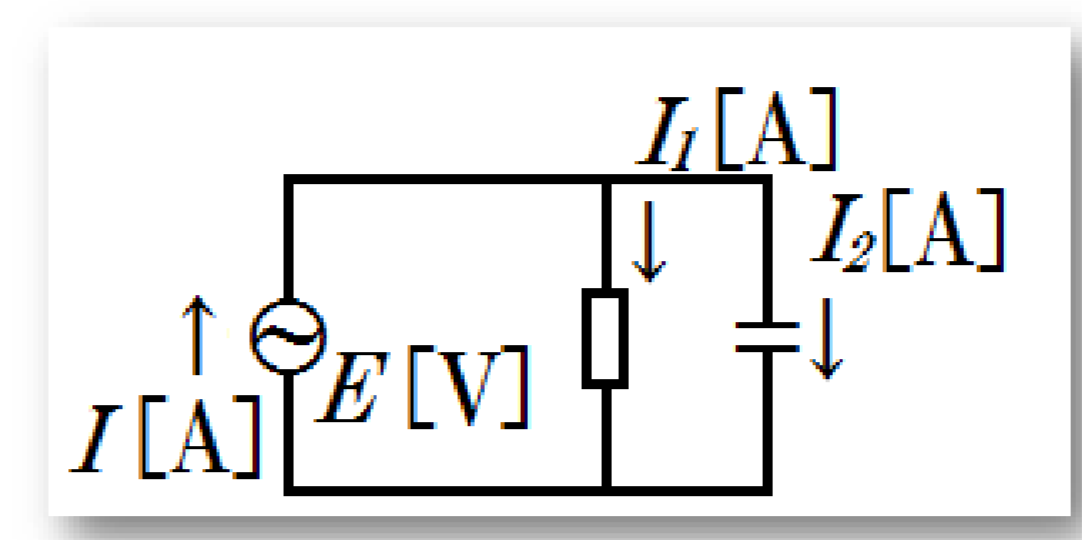
[Fig 2-1] の赤線はGRAILで推定された重力場データの大きさを次数の関数としてみたもの、灰色線はそれらの実測値との誤差を示す。450次付近まで信号強度が誤差を上回っている。
 10次付近で相関が負になるのは、地形と重力が負の相関を持つmasconの間隔が10次の球関数の波長と一致することを反映する。

ここで、地球型惑星である火星 (地球と月の中間的なサイズ) における重力場と地形の相関について、それらのデータをNASAのPDS (Planetary Data System) から、NASAの火星探査機MGS (Mars Global Surveyor) に搭載されたUSO (重力異常測定探査機) とMOLA (地形測定探査機) のデータをダウンロードして調べた。火星の重力モデルの最大次数は、90次と月に比べては少ない。[Fig 2-8] は火星における両者の相関係数を表す。これより、火星の地形と重力の相関は、月と同様に低次数 (長波長) で相関が低く、長波長地形におけるアイソスタシー補償を反映している。次数が上がるに従って相関は高くなり、30次以上では安定して高相関を示すが、重力の計測誤差が大きくなる50次以上で相関が低下する。



3. アドミッタンス Admittance

そもそもアイソスタシーとは、惑星などの天体の深部にある高密度の岩石が流体のように振る舞うことによって、地表の質量荷重または欠損が浮力によって支えられる現象のことをいう。そして、その流動する部分の上には、剛性の高い弾性体として振る舞う部分 (リソスフェア) があり、その厚さによってモホ面が凹凸し、重力異常が信号として現れる。このリソスフェア厚を議論するために「アドミッタンス」という物理量を用いる。



「アドミッタンス」は、元々電気工学用語で、交流回路における電流と電圧の比であり、電流の流れやすさを表す物理量である。電流の流れにくさを意味する「インピーダンス (impedance)」とは逆数の関係にある。

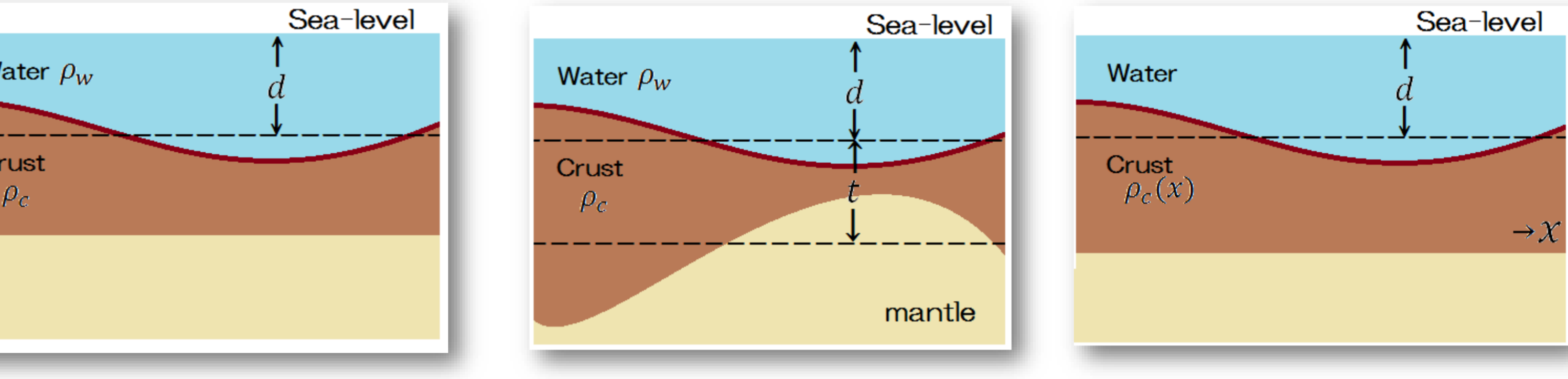
[Fig 3-1] で示した回路全体におけるアドミッタンス (単位は「ジーメンス [S]」) を Z [S]、インピーダンスを R [Ω]、交流電圧の起電力を E [V]、交流電圧に流れる電流を I [A] とすると、以下の式が成り立つ。

$$Z = R^{-1} = \frac{1}{R}$$

すなわち、電気工学におけるアドミッタンスとは、「回路全体にける電圧に対して、回路全体に電流がどれだけ流れるか」を示す物理量である。それに対して、地球物理学で重力と地形の関係を示すアドミッタンスとは、「地形の凹凸の影響によって、どれだけ重力異常が観測されるか」を示す物理量である。

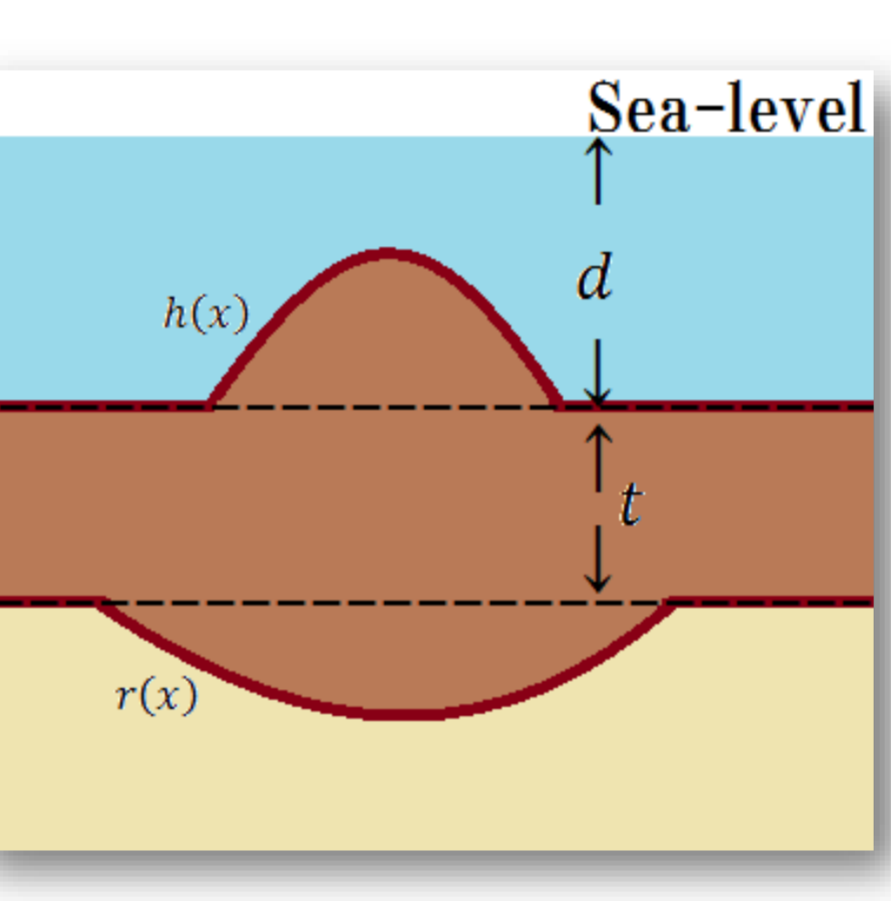
$$Z = \frac{\text{どれだけ重力異常が観測されるか}}{\text{地形の凹凸の影響によって...}} \text{ 単位 (mgal/km)}$$

[Fig 3-2] は、地形の凹凸に伴うモホの凹凸が無い「Uncompensated model」、すなわちアイソスタシー非補償のモデルを示す。アイソスタシーが成り立つ場合の古典的モデルとして、低密度の地殻が山の高い場所ほど深くまで「根」を持っているエアリーモデル (Airy model) [Fig 3-3] や、モホ面の深さは一定だが、標高に応じて地殻密度が変化するプラットモデル (Pratt model) [Fig 3-4] がある。現在では、両者の中間的な弾性プレートモデル (Elastic Plate model) [Fig 3-5] が現実に近いと考えられている。図は地球を想定しており、海水が描かれているが、月では海水が存在しないため ρ_w はゼロである。



$$Z = 2\pi G(\rho_c - \rho_w)e^{-kd}$$

$$Z = 2\pi G(\rho_c - \rho_w)e^{-kd}(1 - e^{-kt})$$



Elastic Plate modelは、地表の凹凸によるモホ面の「根」がマン틀との密度差による浮力のほかにリソスフェアの曲げ弾性によっても支えられているというmodelである。このモデルの基に計算されるアドミッタンスは、以下の式のように表される。

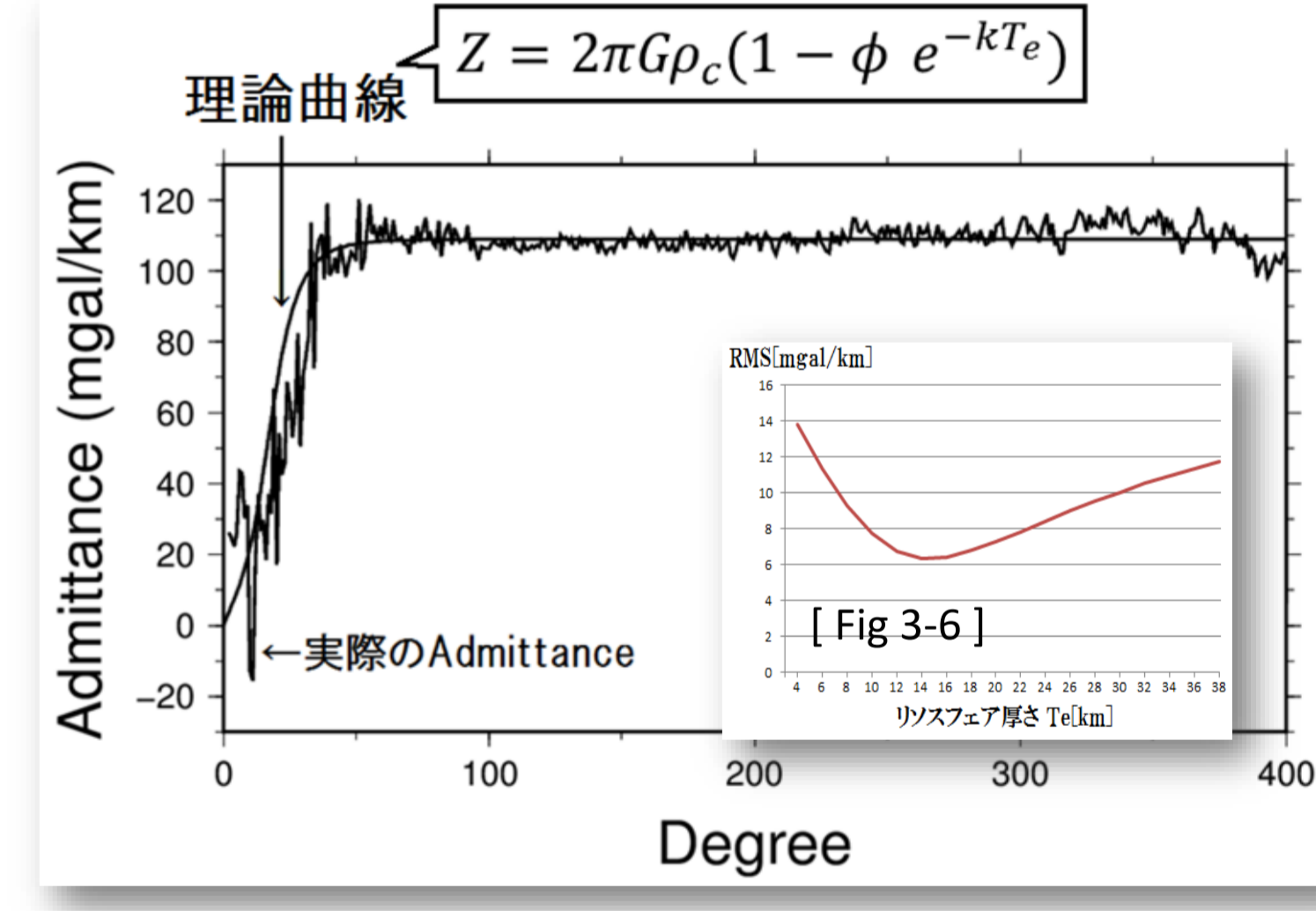
$$Z = 2\pi G(\rho_c - \rho_w)e^{-kd}(1 - \phi e^{-kt})$$

ここで、 ϕ は内部物質の曲げ剛性 (屈曲) の影響を鑑みるために必要な係数である (エアリー型のアイソスタシーが、弾性によって波長に依存して減衰する分を示す係数)。

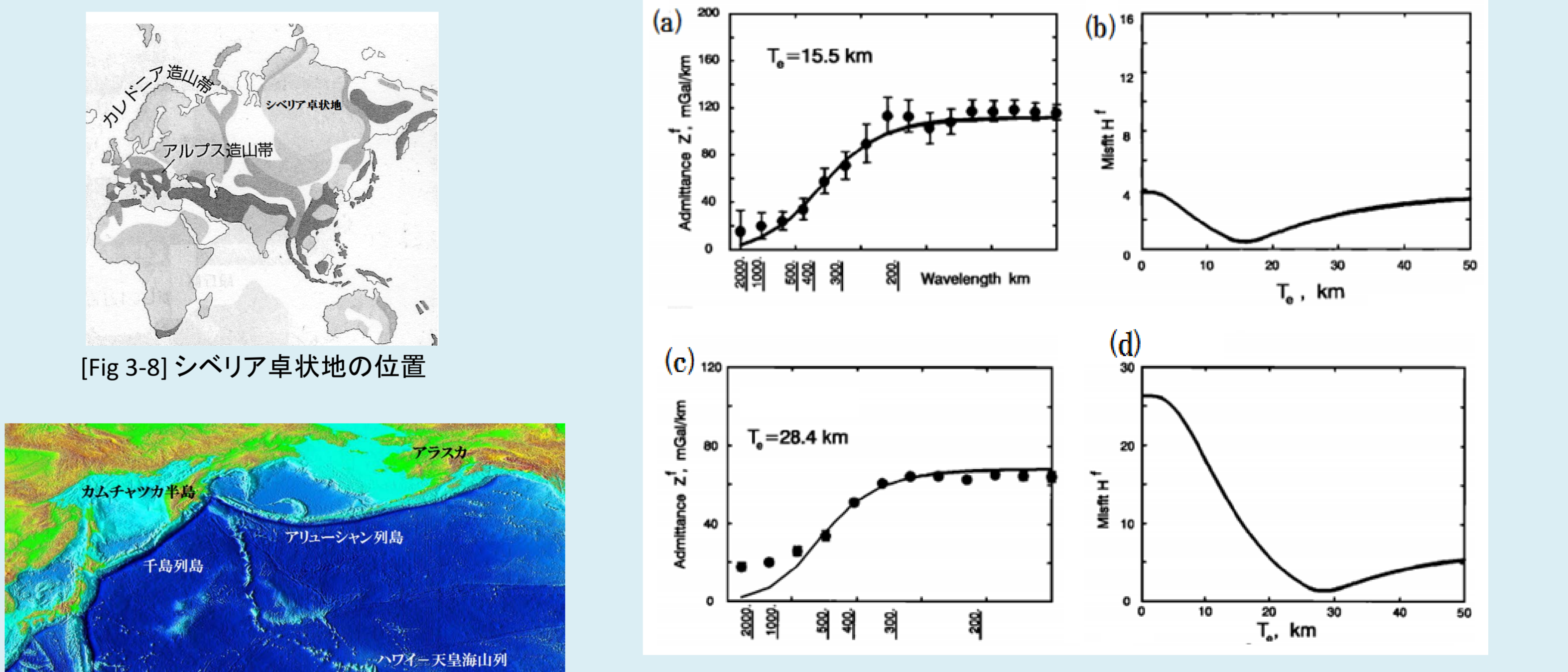
$$\phi = \left[\frac{Dk^4}{(\rho_m - \rho_c)g} + 1 \right]^{-1}, \quad D = \frac{-ET_e^3}{12(1 - \nu^2)}$$

上式中の D は剛性梁の曲げにくさを示す「曲げ剛性」、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 k は波数、 T_e は剛体として振る舞う部分の厚さ (リソスフェア厚) である。

月表面のアドミッタンスの理論値 Z の式にある物理量の内、不確定な物理量はリソスフェア厚さを表す T_e である。つまり実際にGRAILの重力場データとLROの地形データから得られるアドミッタンスの観測値と理論値とを比較するためには、 T_e を変えて観測されたアドミッタンスに合う値を推定しなければならない。[Fig 3-6] は T_e の値を4[km]から38[km]まで2[km]ごとに変えて、その時のアドミッタンスの観測値と理論値の差のRMS (二乗平均平方根) の変化をグラフに描いたものである。この結果から、 $T_e = 14$ [km]の場合にRMSが最小になるので、アドミッタンスの観測値と理論値が概ね一致する T_e は約14[km]であることが分かる。RMSから得られた $T_e = 14$ [km] をアドミッタンスの理論値 Z に代入したものの (灰色の曲線) と、実際に測定された観測値 (折れ線) を次数ごとにプロットすると、[Fig 3-7] のようになる。



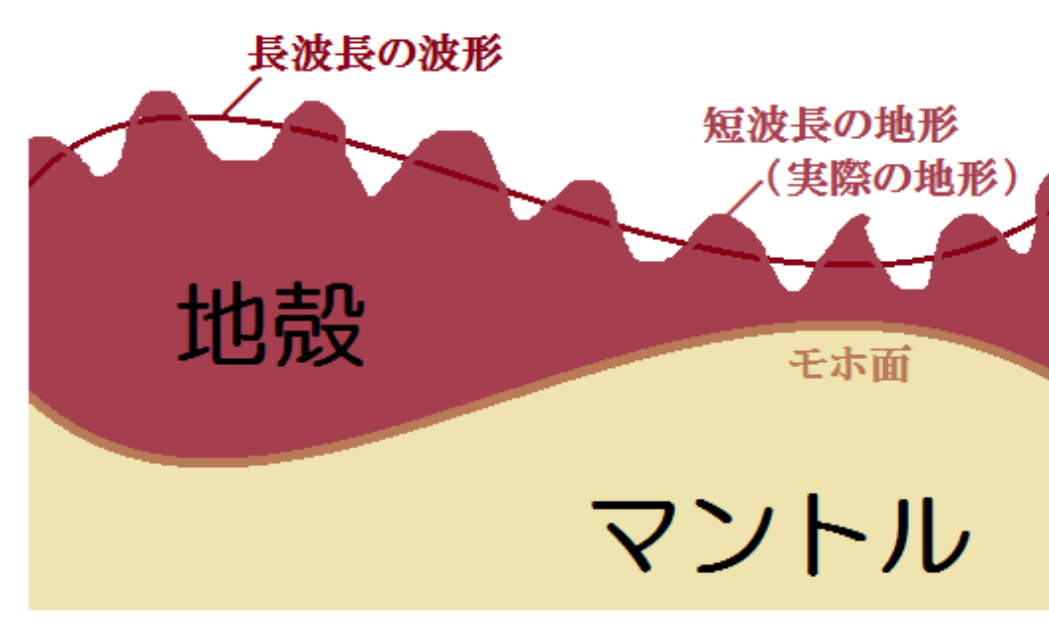
ここで、地球の一部地域のアドミッタンスやリソスフェア厚 T_e の様子を、Watts著「Isostasy and Flexure of the Lithosphere」中にまとめられた過去の文献値を紹介して月と比較する。本研究では、地球上に長い間居座っている安定陸塊のシベリア卓状地 [Fig 3-8] と、火山活動が現在も盛んなハワイ-天皇海山列 [Fig 3-9] のアドミッタンスとリソスフェア厚を例に挙げる。



シベリア卓状地は古い安定陸塊で、アイソスタシー補償の達成度合が高く、フリーエア重力異常も小さいため T_e も小さく推定される。一方、ハワイ-天皇海山列が存在する太平洋プレートは冷たく厚いため、 T_e もより大きく計算されるのだろう。

4. まとめ・今後の展望

相関やアドミッタンスから、月表面のフリーエア重力異常は、波長の長い地形には依存せず、主に短波長の地形がもたらしていることが分かる。それは長波長の地形はモホ面の凹凸によってアイソスタシーが成り立ち易いため、重力異常の大部分が解消されるためであろう [Fig 4]。今後は、月と火星、ならびに地球の T_e を系統的に比較し、天体のサイズや地形形成年代によってアイソスタシー補償の度合いやリソスフェア厚がどう依存するかを研究する予定である。



参考文献

- ・地球内部物理学 講義ノート 日置幸介 (http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Phys_inter.pdf)
- ・ <http://observatorioaia.com.ar/web/los-fenomenos-lunares-transitorios/>
- ・ <http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2007/1112.shtml>
- ・ <http://sr.jaxa.jp/report/2012/project03.html>
- ・松尾功二 (2008): Mars Global Surveyor による火星の測地学的研究、北海道大学理学部地球科学科卒業論文
- ・青山千晶 (2000): 局地的なアドミッタンスを用いた月内部構造の推定、九州大学理学部地球惑星科学専攻、修士論文
- ・橋本実奈 (2012): 「月惑星の重力場におけるカウラ則とカウラ定数のスケールリング則」北海道大学理学部地球科学科卒業論文
- ・ニューステージ地学図表 浜島書店
- ・McKenzie and Fairhead (1997): Estimates of the effective elastic thickness of the continental lithosphere from Bouguer and free air gravity anomalies
- ・Watt 著: 「Isostasy and Flexure of the Lithosphere」
- ・Zuber, M. et al. (2013), Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission, Science: Vol. 339 no. 6120 pp. 668-671, DOI: 10.1126/science.1231507