

Investigation of Ganymede's interior structure through tidal deformation measurements by JUICE/GALA

S. Kamata¹, J. Kimura², K. Matsumoto³, and K. Kuramoto⁴

¹ Creative Research Institution, Hokkaido University,
Kita-21 Nishi-10, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 001-0021, Japan

² Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1-IE-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

³ RISE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan,
2-12 Hoshigaoka-cho, Mizusawa-ku, Oshu, Iwate, 023-0861, Japan

⁴ Dept. CosmoSciences, Hokkaido University,
Kita-10 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0810, Japan

ABSTRACT

Tidal deformation of an icy satellite provides crucial information for its subsurface structure. In this study, we investigate the parameter dependence of the tidal response of Ganymede adopting a depth-dependent viscosity profile assuming a conductive ice shell. Our results indicate that the presence/absence of a subsurface ocean changes not only the range of the amplitude and phase lag but is also the major control on tidal deformation. If Ganymede does not possess a subsurface ocean, the major control is the viscosity of high-pressure ice; the upper ice layer plays only a minor role. On the other hand, if Ganymede possesses a subsurface ocean, the major controls are the rigidity and the thickness of the ice shell; the upper ice layer plays a major role. Our results also indicate that tidal response is almost independent of the subsurface ocean thickness; in addition to altimetric data, other types of observational data are necessary to estimate the subsurface ocean thickness.

1. はじめに

欧州宇宙機関を中心として、木星氷衛星系探査計画 *Jupiter Icy Moons Explorer*, 通称 *JUICE* ミッションの準備が進んでいる。本計画は、無人探査機を 2030 年代に氷衛星ガニメデの周回軌道に投入し、複数の装置を用いて様々な観測を行う総合探査ミッションであるが、その中でも *Ganymede Laser Altimeter* (*GALA*) は *JUICE* で行うサイエンスの根幹となるデータをもたらす観測機器である [Steinbrügge et al., 2015]。 *GALA* はレーザー測距によりガニメデ全球の形状を決定するのに用いられるが、その形状は木星からの潮汐力によって時間変化すると考えられる。それは、ガニメデの公転軌道が真円ではなく楕円であり、木星との距離が時間変化し、潮汐力が周期的に変化するためである。軌道要素が決まると潮汐力は決まるが、それに対する衛星の変形量は衛星の内部構造に依存する [e.g., Moore & Schubert, 2003]。したがって、 *GALA* データからガニメデの潮汐変形量を抽出することで、ガニメデ内部構造に関する情報を得ることが出来ると考えられる。

GALA で得られる予定のガニメデ潮汐変形データから、その内部構造をどれほど正確に決めることができるのかを知るためには、幅広いパラメータ空間を網羅しつつ、現実的な内部構造モデルを用いた理論的・数値的研究を通して、潮汐変形量がどのパラメータに最も強く依存するのかを調べる必要がある。既にガニメデ潮汐変形量と内部構造の対応を調べたモデル研究が複数存在するが [e.g., Moore & Schubert, 2003; A et al., 2014], いずれも、非常に限られた条件でしか計算していないか、あるいは内部の粘性率構造を単純化しすぎているという課題がある。室内実験の結果から氷の粘性率は温度に非常に敏感であり、ガニメデ氷地殻の粘性率は表面と下端で数十桁も変化すると考えられるにも関わらず、先行研究では一様な氷地殻粘性率が仮定されており、これは極めて非現実的である。

本研究の目的は、氷地殻の温度依存性を考慮した内部構造モデルを用いて、幅広いパラメータ空間におけるガニメデ潮汐変形量を計算し、ガニメデの潮汐変形が内部構造のどのパラメータに最も強く依存するのかを調べることである。

2. モデル

本研究ではガニメデは半径 2631.2 km の球で、1次元球対称の非圧縮内部構造を持つと仮定した。外側から氷地殻、内部海、高圧氷、岩石マントル、金属核の

5層，または内部海なしの4層モデルを用いた．氷地殻の粘性率以外のパラメータ（密度，弾性率，粘性率）は各層内で一様とし，固定したモデルパラメータについては Table 1 にまとめた．内部海の厚さ H_o は氷地殻の厚さ D_{sh} の関数で与え，中心が深さ 145 km となるようにした．すなわち，

$$H_o = 2 \times (145 - D_{sh}) \quad (\text{km}) \quad (1)$$

で与えた．岩石マンタルの厚さは 1020 km，金属核の半径は 700 km とし，また高圧氷の密度はガニメデの平均密度が 1942 kg/m^3 となるように設定した．予備計算により，金属核が固体・液体いずれの場合においても潮汐変形量はほとんど変わらないことが示されたので，本研究では固体の場合の計算結果を基に議論する．氷地殻の粘性率は純水氷の流動則[Goldsby & Kohlstedt, 2001]を温度構造に適用することで与え，その温度構造は，表面温度 100 K，下端温度 273 K の境界条件の下で定常発熱なしの熱伝導方程式を解くことで与えた．フリーパラメータは氷地殻の厚さ，氷地殻下端での粘性率，氷の剛性率（低圧層と高圧層で同じ値），高圧氷の粘性率，である．

パラメータ	値	単位
氷地殻の密度	1000	kg/m^3
内部海の密度	1000	kg/m^3
岩石マンタルの密度	3500	kg/m^3
金属核の密度	8000	kg/m^3
内部海の剛性率	0	GPa
岩石マンタルの剛性率	100	GPa
金属核の剛性率	100	GPa
内部海の粘性率	0	Pa s
岩石マンタルの粘性率	10^{20}	Pa s
金属核の粘性率	10^{20}	Pa s

Table 1 : Model parameters adopted in this study.

球対称な内部構造を持つ天体の潮汐変形の計算には，球面調和関数展開を用いたスペクトル法が有効である．本研究では，同手法の中でも弾性体の変形計算にしばしば用いられてきた y-method [Takeuchi & Saito, 1972]を粘弾性体に応用した計算コード[Kamata et al., 2015]を用い，球面調和次数が 2 で軌道角振動数が

1.016×10^{-5} rad/s の場合の潮汐ラブ数 h_2 を求めた。ラブ数は複素数であり、その絶対値は潮汐変形の振幅、偏角は位相のずれを与える。

3. 結果と議論

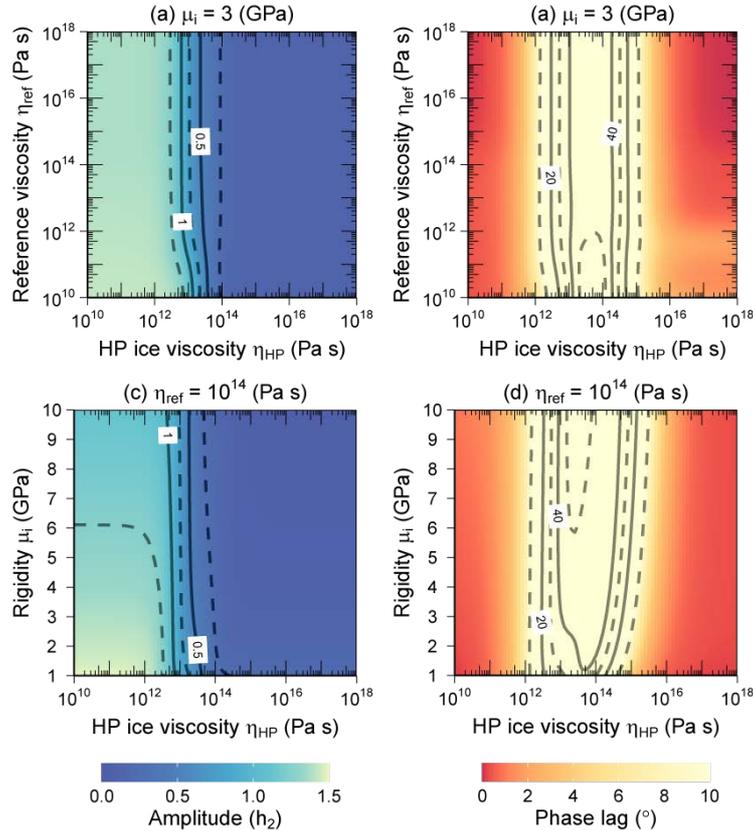


Fig. 1: Amplitude (left) and phase lag (right) of tidal deformation assuming no subsurface ocean. Calculation conditions are shown (μ_i , η_{ref} , and η_{HP} are the rigidity of ice, the viscosity at the base of the icy crust, and the viscosity of high-pressure (HP) ice layer, respectively).

まず、内部海がない場合の計算結果を Fig. 1 に示す。高圧氷の粘性率が $< 10^{13}$ Pa s の場合、潮汐変形の振幅は大きく ($h_2 \sim 1.4$)、位相遅延はほぼゼロである。これは、ガニメデが潮汐力に対して液体として振る舞っていることを示す。他方、高圧氷の粘性率が $> 10^{16}$ Pa s の場合、潮汐変形の振幅は小さいが ($h_2 \sim 0.05$)、位相遅延はこの場合もほぼゼロである。これは、ガニメデが潮汐力に対して弾性体として振る舞っていることを示す。高圧氷の粘性率が $\sim 10^{14}$ Pa s の場合におい

ては、位相遅延が非常に大きくなる ($\sim 50^\circ$) が、これはガニメデが粘弾性体として振る舞っていることを示している。他のフリーパラメータを大きく変化させても、振幅や位相遅延にこれほど大きな変化は見られない。したがって、内部海がない場合にガニメデの潮汐変形を決定づけるのは高圧氷の粘性率であることが分かった。

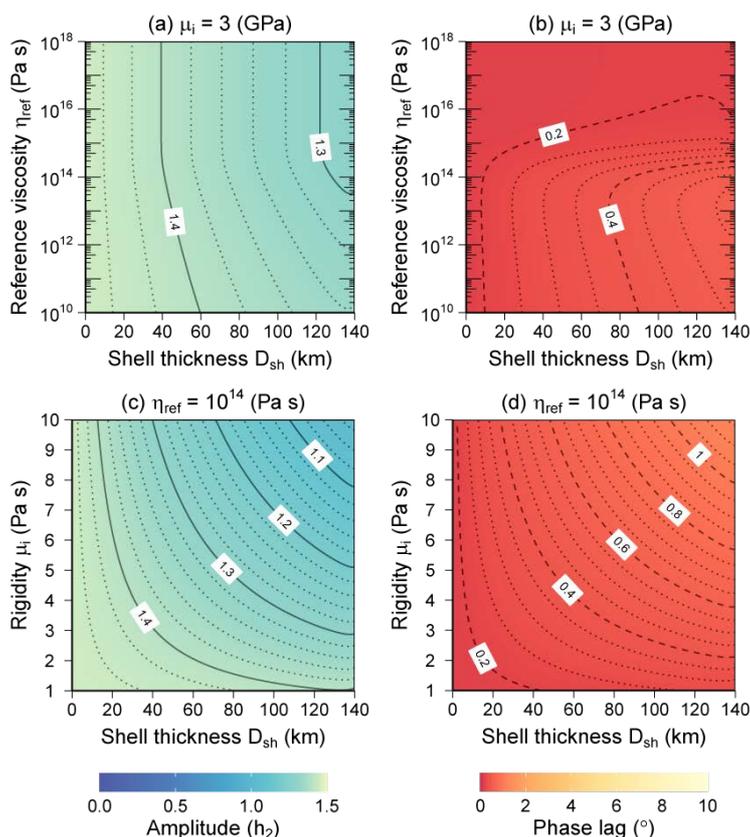


Fig. 2: Amplitude (left) and phase lag (right) of tidal deformation assuming a subsurface ocean. $\eta_{HP} = 10^{14}$ Pa s is adopted. Other calculation conditions are shown.

次に、内部海がある場合の計算結果を Fig. 2 に示す。この場合、高圧氷層は氷地殻とデカップルしているために、前者の粘性率を大きく変えても潮汐変形には影響はないので、それ以外のパラメータを変化させた結果を示す。潮汐変形に大きな影響を与えているのは、氷の剛性率と氷地殻の厚さであることが分かる。また、内部海なしの場合と比較して、振幅や遅延のパラメータ依存性が小さいことが分かる。より具体的には、内部海がある場合、剛性率や氷地殻厚、氷地殻下端の粘性率を大きく変化させても、潮汐変形の振幅は常に大きく ($h_2 > 1$)、位

相遅延は小さい ($<2^\circ$)。これは、氷地殻が硬く厚くても、内部海があるためガニメデ全体がかなり変形しやすいことを示している。

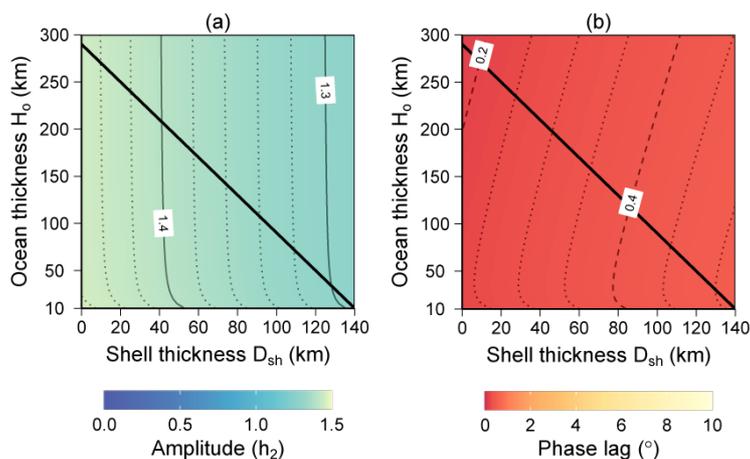


Fig. 3: Amplitude (left) and phase lag (right) of tidal deformation assuming a subsurface ocean. $\mu_i = 3$ GPa, $\eta_{\text{ref}} = \eta_{\text{HP}} = 10^{14}$ Pa s are adopted.

前節で述べたように、上記の計算結果は氷地殻の厚さと内部海の厚さの間に線形の関係 ((1)式) を仮定した場合のものである。したがって、内部海がある場合の潮汐変形量を決定する主要素がどちらの厚さであるのか、それとも両者であるのか、上記の計算だけでは分からない。そこで、氷地殻の厚さと内部海の厚さをフリーパラメータとし、それ以外のパラメータを固定した場合の計算を行った。Fig. 3に示すように、潮汐変形の振幅も位相遅延のいずれも氷地殻の厚さに依存している一方で、内部海の厚さにはほとんど依存しないことが分かった。このことは、GALAによる潮汐変形計測からは、ガニメデの氷地殻の厚さを推定できる一方、内部海の厚さを推定することは困難であることを示している。内部海の厚さを知るためには、磁場計測など他の観測とのコラボレーションが重要であろう。

4. 結論

JUICE/GALAでの将来ガニメデ潮汐変形計測を見据えて、潮汐変形量と内部構造の関係を調べた。潮汐変形量は、内部海がない場合には高圧氷の粘性率に最も強く依存する一方で、内部海がある場合には氷地殻の厚さと氷の剛性率に最も強く依存することが分かった。また、内部海の厚さは、潮汐応答にほとんど影

響しないことが分かった。これらの結果は、JUICE/GALAでの計測結果を解釈する上で重要な知見となるであろう。

参考文献

- A, Wahr, & Zhong (2014), The effects of laterally varying icy shell structure on the tidal response of Ganymede and Europa, *J. Geophys. Res. Planets*, **119**, 659-678.
- Goldsby, & Kohlstedt (2001), Superplastic deformation of ice: Experimental observations, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **106**, 11017-11030.
- Kamata, Matsuyama, & Nimmo (2015), Tidal resonance in icy satellites with subsurface oceans, *J. Geophys. Res. Planets*, **120**, 1528-1542.
- Moore & Schubert (2003), The tidal response of Ganymede and Callisto with and without liquid water oceans, *Icarus*, **166**, 223-226.
- Steinbrügge, Stark, Hussmann, Sohl, & Oberst (2015), Measuring tidal deformations by laser altimetry. A performance model for the Ganymede Laser Altimeter, *Planet. Space Sci.*, **117**, 184-191.
- Takeuchi & Saito (1972), Seismic surface waves, *Methods Comput. Phys.*, **11**, 217-295.