

令和元年6月6日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05543

研究課題名(和文) 第四紀と先カンブリア紀末の氷床変動に伴う海水準変動とマントル粘性率に関する研究

研究課題名(英文) Inference of GIA-based mantle viscosity from the last and Marinoan snowball deglaciations

研究代表者

中田 正夫 (Nakada, Masao)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：50207817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：第四紀と6.35億年前の全球凍結期(マリノアン期)の氷床変動に伴う固体地球変動よりマントルの粘性率構造を推定した。第四紀の海水準変動と次数2-6の重力ポテンシャル係数の時間変化から、深さ670 kmで $\sim 10^{22}$  Pa s、670 km以深で漸次増加し深部マントルで $\sim 10^{23}$  Pa sに達する粘性率構造を求めた。マリノアン期の海水準変動解析から、下部マントル上部で $\sim 5 \times 10^{21}$  Pa s、深部マントルで $\sim 5 \times 10^{22}$  Pa sを求めた。マリノアン期の推定マントル平均温度は現在に比べ $\sim 50$ K高く、マントル平均粘性率は現在に比べほぼ半分と考えられ、本研究の結果と調和的である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球マントルの粘性率構造は、地球内部ダイナミクスの研究において最も重要な要素の一つである。粘性率は強い温度依存性を持ち、地球進化に伴い地球内部温度が減少すると粘性率は時間と共に増加する。つまり、第四紀とマリノアン期の氷床変動・固体地球変動より推定された粘性率構造は、地球熱史研究にも強い制約を与える。岩石学的に推定されたマリノアン期のマントル平均温度は現在に比べほぼ50K高い。このことは、当時の粘性率は現在に比べほぼ半分であることを示唆し、本研究結果と調和的である。つまり、本研究結果はマントルダイナミクス・地球進化の研究に大きな制約を与え、学術的・社会的に重要な意義を持つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We examine the glacial isostatic adjustment (GIA) due to the last deglaciation and the Marinoan ( $\sim 635$  Ma) snowball Earth meltdown to infer the viscosity structure of Earth's mantle. The viscosity structure inferred from the GIA data sets for the last deglaciation, relative sea level (RSL) changes and secular variations in zonal harmonics of Earth's geopotential for degree 2-6, is as follows:  $\sim 10^{22}$  Pa s at 670 km depth, smooth depth variation in the lower mantle viscosity and  $\sim 10^{23}$  Pa s in the deep mantle. The RSL changes due to the Marinoan deglaciation suggest the upper part lower mantle viscosity of  $\sim 5 \times 10^{21}$  Pa s and  $\sim 5 \times 10^{22}$  Pa s in the deep mantle. The average temperature of the mantle at 0.6-0.7 Gyr may be  $\sim 50$  K higher than at present, suggesting that the Neoproterozoic mantle viscosity is approximately half of the present one. This is consistent with the viscosity structures inferred from the GIA-based data sets for the last deglaciation and Marinoan deglaciation.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：海水準変動 マントルレオロジー 氷床変動 snowball Earth 粘性率の時間変化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球マントルの粘性率構造は、地球内部ダイナミクスの研究において最も重要な要素の一つである。マントルの粘性率構造を推定する最も有効な方法の一つは、最終氷期の氷床変動に伴う固体地球の粘弾性変形 (glacial isostatic adjustment, GIA) に起因する観測データ (海水準変動や重力の時間変化など) を解析することである。特に、重力ポテンシャルの次数 2 (波長 ~20000 km) の係数 ( $J_2$ ) の時間変化 ( $dJ_2/dt$ ) は、下部マントルの粘性率に強く依存する。観測値から得られる  $dJ_2/dt$  は、2 万年前から 8 千年前の氷床融解に伴う GIA と、最近 (過去 ~100 年) の山岳氷河、グリーンランドや南極氷床の融解 (以下 recent melting と記す) を原因とする。Recent melting の統一的研究成果は、IPCC2013 報告書 (Report of Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013) に公表された。さらに、Cheng et al. (2013) による  $dJ_2/dt$  は 1976 年以降一定でなく (GIA のみの原因であるなら、GIA の時間スケールを考慮すると一定)、recent melting の影響 (固体地球は弾性レスポンス) を反映し時間変化している。Nakada et al. (2015) は、これらの観測データに基づき GIA に起因する (GIA-induced)  $dJ_2/dt \sim -(6-6.5) \times 10^{-11}/\text{yr}$  を得た。Nakada et al. (2015) の研究以前は、recent melting の影響を正確に評価していない GIA-induced  $dJ_2/dt \sim -3 \times 10^{-11}/\text{yr}$  を用いマントル (主に下部マントル) の粘性率が評価されていた。Nakada et al. (2015) は GIA-induced  $dJ_2/dt \sim -(6-6.5) \times 10^{-11}/\text{yr}$  を用い、マントル 3 層構造モデル (弾性的に振る舞うリソスフェアの厚さ  $H$ 、リソスフェア下部から深さ 670 km の上部マントルの粘性率  $\eta_{\text{um}}$ 、深さ 670 km からコア-マントル境界の下部マントルの粘性率  $\eta_{\text{lm}}$ ) に基づき下部マントルの平均的粘性率を求めた。その値は、それまでに推定されていた値よりかなり高く、少なくとも  $10^{22}$  Pa s 以上で、 $(5-10) \times 10^{22}$  Pa s の可能性が高い。この結果は、本研究課題を遂行する上で非常に重要である。

(2) GIA によるマントル粘性率構造の研究の多くは、上記した 3 層構造モデルを採用している。しかし、Nakada et al. (2015) による GIA-induced  $dJ_2/dt$  を用いることにより、より信頼できる下部マントルの粘性率構造を評価できる可能性がある。つまり、本研究課題開始以前は、下部マントルの平均粘性率は  $10^{22}$  Pa s またはそれ以上であると提案されてきたが (筆者も含め) 地球内部のダイナミクスの研究において最も重要な「深さ 670 km での粘性ジャンプはどうなっているのか? 670 km 以深の粘性率の増加はどうなっているのか?」の問いに答えていない。この問いには 3 層構造モデルを用いた GIA 解析では答えられない。しかし、この問いに GIA の観測データを用いた解析で答えることは大変重要である。

(3) 先カンブリア紀末の 6 億 3500 万年前 (635 Ma) は全地球が氷床に覆われていた (マリノアン氷河時代) と考えられている (Snowball Earth 又は全球凍結)。マリノアン氷床融解に伴う平均的な海面上昇は ~1000 m で最終氷期の氷床融解に伴う上昇量 (~130 m) の 8 倍以上、かつ、この時代の大陸は一つの超大陸ではないが、赤道を中心に分布していた (Liu et al. 2013)。6 億 3500 万年前のマリノアン氷床融解に伴う海水準変動の観測データは非常に少ない。しかし、非常に興味深いのは、最終氷期の氷床融解においては観測されていない特異な海水準変動が、ルイジアナ州立大学の Bao 博士らの中国における詳細な地質調査より報告されている (Zhou et al. 2010)。つまり、当時高緯度に位置していた南中国で海進 海退 海進を報告している。最終氷期の氷床変動に伴う氷床周辺域における海水準変動は、氷床の融解に伴う海進、氷床融解後の海退が観測及び数値シミュレーションにおいて確認されている。しかし、マリノアン氷床融解においては最後のステージに海進が観測されている。この現象はどうして生じているのだろうか。この時代の GIA に起因する海水準変動は低次数の成分に支配されていた可能性がある (海陸分布からの推定)。もう一つの可能性は氷床融解後の時間である。現在は氷床融解後ほぼ 6~8 千年で、氷床融解後の固体地球の粘性緩和に伴う現象 (重力の時間変化や海水準変動) をたかだか 6~8 千年間しか観測していない。しかし、観測されたマリノアン氷床融解後の海水準変動は、固体地球の粘性緩和の全過程 (高粘性の下部マントルの緩和現象) を反映しているはずである。この特異な観測データに基づき下部マントルの平均粘性率を推定 (議論) することができると、地球の熱史の研究に大きな制約を与えることができる。つまり、マリノアン氷河時代は 6 億 3500 万年前であるため、当時の地球の平均的気温は現在に比べ 50~100 K くらい高かった可能性がある。50 K 高いと、マントルの粘性率は現在の粘性率のほぼ半分になる。また、最終氷期に伴う GIA-induced  $dJ_2/dt$  に基づき、信頼性の高い下部マントル平均粘性率  $\sim (5-10) \times 10^{22}$  Pa s が得られている (Nakada et al. 2015)。研究成果で述べるが、マリノアン氷床融解に伴う海水準変動の解析から得られる平均的な下部マントル粘性率は  $\sim 5 \times 10^{22}$  Pa s である。非常にチャレンジングであるが、二つの時期の GIA に伴うマントル粘性率を議論することは、地球内部ダイナミクスの研究に貢献するだけでなく、温度の冷却に伴う固体地球の地球史の研究にも大きな貢献をすることになる。

## 2. 研究の目的

研究開始当初の背景に述べた考察を基に下記の(1)~(5)を主な研究目的とする。

(1) 最終氷期の氷床変動の GIA-induced  $dJ_2/dt$  と海水準変動を 3 層粘性率構造モデルを用い

て解析し粘性率構造を議論する。

(2) 下部マントルを 2 層 (3 層にしたモデルも解析したが結果は 2 層モデルとほぼ同じ) にした 4 層粘性率構造モデルを用い GIA-induced  $dJ_2/dt$  と海水準変動を解析し、深さ 670 km における粘性率 jump と下部マントル内の粘性率増加を議論する。

(3) 上記の 4 層モデルを用い、重力ポテンシャル係数の次数 3~6 ( $J_3\sim J_6$ ) の recent melting の影響を差し引いた GIA に起因する時間変化 ( $dJ_3/dt\sim dJ_6/dt$ ) を解析し、マントル粘性率と南極氷床融解歴史を議論する。

(4) GIA-induced  $dJ_2/dt$  と海水準変動を圧力・温度依存の粘性率モデルを用い解析し、深さ 670 km における粘性率 jump と下部マントル内の粘性率増加を議論する。かつ、実験的に得られていない下部マントルにおける活性化エネルギーや活性化体積の物性定数を推定する。

(5) マリノアン氷床変動に伴う海水準変動をモデル化し、マントルの粘性率構造を議論する。マントルの粘性率構造はマントルの温度分布に依存し、かつ、地球は時間とともに冷却している。つまり、マリノアン氷床変動により推定された粘性率構造と最終氷期の氷床変動による粘性率構造を比較し、マントルの粘性率の時間変化について議論する。

### 3. 研究の方法

(1) 筆者が開発した地球回転変動 (自転軸の移動と自転速度の変動。前者が海水準変動に主に影響する) の効果をも組み込んだ、粘弾性構造モデルによる海水準変動計算プログラムを使用する (Nakada et al., 2015; Nakada et al., 2016)。そのプログラムを用い、 $dJ_2/dt$  と下部マントルの粘性率に敏感な Barbados とオーストラリア北部の Bonaparte Gulf の ~2 万年前の最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum, LGM) の現在の海面を基準にした相対海面変化 (relative sea level change, RSL change) を計算する。計算値の粘性率依存性を評価し、観測値との比較によりマントルの粘性率構造を推定する。RSL change は氷床モデルと粘性モデルに依存するが、観測値の差 (differential RSL change) は主に粘性率に依存すること (Nakada and Lambeck, 1989) を用いて粘性率構造を評価し、その結果と両地点の RSL change を用い両極氷床 (北半球のローレンタイド氷床とヨーロッパ氷床と南極氷床) の融解歴史を議論する。Barbados の LGM での観測された RSL change ( $RSL_{Bar}$ ) は  $-(98\sim 120)$  m で、Bonaparte Gulf ( $RSL_{Bon}$ ) は  $-(120\sim 23)$  m である。Differential RSL ( $\Delta RSL_{Bar,Bon}$ ) は  $(0\sim 25)$  m である。

(2)  $dJ_2/dt$  と RSL change を 4 層粘性率構造モデルに基づき解析する。つまり、下部マントルの深さ 670 km から 1191 km までの粘性率  $\eta_{670,1191}$ 、1191 km から 2891 km (コア・マントル境界) までの粘性率  $\eta_{1191,2891}$  をパラメーターとして解析を行う。本解析では  $dJ_2/dt$  に加え下記の氷床モデルの詳細に依存しない地点の海水準変動のデータを使用する。Barbados と Bonaparte Gulf の differential LGM RSL、氷床域から遠く離れた (far-filed) のオーストラリアの Karumba と Halifax の氷床融解直後 ~6 千年前の Differential RSL、ローレンタイド氷床中心域のハドソン湾内の Richmond Gulf と James Bay の 6 千年前の RSL、氷床末端域から比較的離れた地域 (intermediate field) の Southport と Bermuda の 6 千年前の differential RSL を用いる。これらの観測値と計算値を比較することにより粘性率構造を議論する。観測データは以下の通りである。 $RSL_{Kar}\sim(2.4\pm 0.3)$  m、 $RSL_{Hal}\sim(1.0\pm 0.2)$  m、 $RSL_{Ric}\sim(125\pm 15)$  m、 $RSL_{Jam}\sim(105\pm 15)$  m、 $RSL_{Sou}\sim(-8.0\pm 1.5)$  m、 $RSL_{Ber}\sim(-6.0\pm 2.0)$  m。Differential RSL は  $\Delta RSL_{Kar,Hal}\sim(0.9\sim 1.9)$  m、 $\Delta RSL_{Ber,Sou}\sim(-1.5\sim 5.5)$  m。

(3) GIA-induced  $dJ_2/dt$  は主に下部マントルの粘性率構造に敏感である。観測の精度は  $dJ_2/dt$  に比べ落ちるが (Cheng et al. 2013)、 $J_3\sim J_6$  (ルジャンドル関数の  $n=3\sim 6$  の成分) の時間変化も下部マントルの粘性率に敏感である。さらに、最終氷期の氷床変動の研究で未解決な問題である、過去 ~2 万年間の南極氷床の全融解量 (ESL に関して ~10 m か、20 m 以上か?) や融解歴史に制約を与える可能性がある。使用するモデルは 4 層粘性率構造モデルであるが、マントル粘性率と南極氷床融解史依存性に重きを置き観測値と計算値を比較する。

(4) 粘性率は一般的に温度 ( $T$ )、圧力 ( $P$ )、活性化エネルギー ( $E^*$ 、温度依存性を支配する物性パラメーター)、活性化体積 ( $V^*$ 、圧力依存性を支配する物性パラメーター) の関数である。活性化エネルギーと活性化体積は上部・下部マントルでそれぞれ一定、温度・圧力を深さ ( $z$ ) の関数としてマントルの粘性率を  $\eta(z)=A\exp[(E^*+P(z)V^*)/RT(z)]$  として、上記(2)と(3)で解析した GIA に起因する量を評価し観測値と比較する。温度は、断熱温度分布、プレート冷却モデル、実験的に得られた深さ 670 km の相転移温度を考慮して評価する。上部マントルの  $E^*$  は実験より求められた値を参考に評価する。しかし、 $V^*$  に関

しては上部マントル浅部条件下ではある程度実験による値を参照できるが、下部マントル条件下での実験データは皆無である。本解析では、 $V^*$ は GIA の計算値と観測値の比較により推定する。本研究による  $V^*$ の推定値が、下部マントル条件下での  $V^*$ の実験的研究に貢献することを期待している。

(5) マリノアン氷床変動に関する研究では当時の大陸分布を評価する必要がある。不確定性は否定できないが、主に古地磁気学的情報を基にした Liu et al. (2013)の 635 Ma の大陸分布を用いる。海水準変動を評価するには海の水深分布が必要である。本研究では、現在の平均的な水深分布[Continental shelf(0-150 m)、Continental slope(150-2000 m)、Continental rise (2000-3800 m)、abyssal plane (3800 m で一定)]を仮定する。氷床モデルは Prest (1969)の氷床学的研究を基に作成する。Liu et al.(2013) による古地理は、大陸は赤道の周りに分布しているが、1つの超大陸を形成しているのではなく8つの大陸からなっている。そこで、各々大陸氷床を Prest (1969)の方法で作成する( parabolic 的な形状で、氷床融解量は ESL に換算して 1000 m )。これらの氷床は、100 万年で形成されその状態が1千万年間継続 ( full glacial phase ) したと仮定し、氷床の融解時間 ( $T_d$ ) はパラメーターとする。氷床融解後の海水準変動は  $T_d$  の値のみに依存する。マリノアン氷床変動の海水準変動を計算するプログラムは最終氷期の氷床変動で用いたプログラムを改良することにより作成した。前述したように、マリノアン氷床変動に伴う海水準変動は(最終氷期の氷床変動に伴う海水準変動の専門家にとって)特異な観測データ、海進 海退 海進が観測されている(Zhou et al. 2010)。最終氷期の氷床変動に伴う海進 海退は理解できる。最初の海進は氷床融解、その後の海退は氷床融解後に伴う地殻の隆起に起因している。では、最後のフェイズの海進はどのようなメカニズムで生じているのであろうか? 本問題を解決するために、マントルの粘性率構造、 $T_d$ 、古地理の特徴、大陸棚の水深分布や広さなどをパラメーターとして計算を進める。そして、海水準変動に対する各々パラメーターの依存性を評価し、計算値と観測値を比較してマントルの粘性率構造を推定する。その結果を、(4)の結果と比較検討し粘性率の時間変化を議論する。

#### 4. 研究成果

(1) 観測値から recent melting の効果を差し引いた GIA-induced  $dJ_2/dt \sim -(6-6.5) \times 10^{-11}/yr$  を満たす下部マントルの粘性率 ( $\eta_{lm}$ ) は  $\sim 10^{22}$  と  $(5-10) \times 10^{22}$  Pa s である。一方、Barbados と Bonaparte Gulf の LGM の海面変化より得られる  $\Delta RSL_{Bar,Bon}$  も、下部マントルの粘性率に強く依存し、推定される下部マントルの粘性率は  $2 \times 10^{22}$  Pa s 以上である。つまり、両データから推定される下部マントルの粘性率は  $(5-10) \times 10^{22}$  Pa s である。一方、両地点の LGM の海面変化  $RSL_{Bar}$  と  $RSL_{Bon}$  は、上部マントルの粘性率 ( $\eta_{um}$ ) と両極氷床の融解に伴う平均海面上昇量 ( eustatic sea level change, ESL ) に依存し、 $\eta_{um} \sim (1-3) \times 10^{20}$  Pa s、 $ESL \sim 130$  m が得られる。これらの研究成果は下記の発表論文 に掲載されている。

(2) GIA-induced  $dJ_2/dt$  は、4 層粘性率構造モデルの下部マントル粘性率に関して  $\eta_{lm} > (5-10) \times 10^{21}$  Pa s を与える。一方、GIA-induced  $dJ_2/dt$  と  $\Delta RSL_{Bar,Bon}$  から推定される下部マントルの粘性率は  $\eta_{670,1191} > 3 \times 10^{21}$  Pa s、 $\eta_{1191,2891} \sim (5-10) \times 10^{22}$  Pa s である。これらの結果と  $RSL_{Bar}$  と  $RSL_{Bon}$  から推定される上部マントルの粘性率は  $\eta_{um} \sim (1-4) \times 10^{20}$  Pa s である。オーストラリアの Karumba と Halifax の Differential RSL ( $\Delta RSL_{Kar,Hal}$ ) から得られるマントルの粘性率構造はこれらの解を満足する。氷床中心域のハドソン湾内の Richmond Gulf と James Bay の RSL change は氷床モデルに依存しないと仮定し、マントル粘性率を推定するために多くの研究で使用されてきた。しかし、氷床モデルと粘性率の trade-off のため氷床モデルと独立に粘性率を推定することは難しいことが判明した。氷床末端域から比較的離れた地域 ( intermediate field ) の Southport と Bermuda の RSL は、氷床モデルには強く依存せず、さらに、両地点の differential RSL ( $\Delta RSL_{ber,Sou}$ ) は氷床モデルに依存しない。 $\Delta RSL_{ber,Sou}$  から推定される粘性率構造は、 $\eta_{um} > 6 \times 10^{20}$  Pa s、 $\eta_{670,1191} > 10^{22}$  Pa s、 $\eta_{1191,2891} \sim (5-10) \times 10^{22}$  Pa s である。これらの結果から推定されるマントルの粘性率構造は次のようにまとめられる: (i) 上部マントルは一桁程度の水平方向の不均質が存在し、 $\eta_{um} \sim (1-10) \times 10^{20}$  Pa s、(ii) 深さ 670 km での粘性率は  $10^{22}$  Pa s 以上 ( 有意な粘性率ジャンプの存在 )、深さ  $\sim 1200$  km 以深の深部マントルの粘性率は  $\sim (5-10) \times 10^{22}$  Pa s である。推定された深部マントルの粘性率は、本研究とは異なる GIA のデータを用いた Lau et al. (2016)の結果と調和的である。これらの研究成果は下記の発表論文の に掲載されている。

(3) 観測精度のため ( Cheng et al. 2013 )、現時点では  $J_3 \sim J_6$  の時間変化 ( $dJ_3/dt \sim dJ_6/dt$ ) が下部マントルの粘性率や南極氷床融解史に強い制約を与えることは難しいであろう。しかし、将来的な精度の向上や新たなデータ解析方法の開発により、 $dJ_3/dt \sim dJ_6/dt$  が下部マントルの粘性率や南極氷床融解史に制約を与える可能性はある。実際、recent melting の影響を考慮した GIA-induced  $dJ_3/dt$  と  $dJ_4/dt$  は南極氷床の融解歴史と下部マントルの粘性率レスポンスに非常に敏感であることが判明した。予備的な成果ではあるが、観測デー

夕から得られた GIA-induced  $dJ_2/dt$ ,  $dJ_4/dt$  と  $dJ_6/dt$  と計算値の比較から、南極氷床の融解量  $ESL \sim (20-30) \text{ m}$  を得た。これらの研究成果は下記の発表論文の に掲載されている。

(4) 温度・圧力を深さ( $z$ )の関数としてマンツルの粘性率を $\eta(z)=A\exp[(E^*+P(z)V^*)/RT(z)]$ として、上記(2)と(3)で解析した GIA に起因する量の評価し観測値と比較した。GIA-induced  $dJ_2/dt$ ,  $\Delta RSL_{Bar,Bon}$ ,  $\Delta RSL_{Kar,Hai}$  から推定される粘性率構造は、平均上部マンツルの平均粘性率 $\sim 2 \times 10^{20} \text{ Pa s}$  で深部マンツルの粘性率 $\sim 10^{23} \text{ Pa s}$  である。しかし、深さ 670 km の粘性率に関しては $(1-100) \times 10^{21} \text{ Pa s}$  で一義的に決めることはできない。深さ 670 km の粘性率に制約を与えるために、氷床域に対して intermediate に位置する Southport, Bermuda, Everglades の氷床融解後の過去 6 千年間の RSL を解析した。推定された粘性率構造は上部マンツルの平均粘性率 $\sim (7-9) \times 10^{20} \text{ Pa s}$ 、670 km の粘性率は $\sim 10^{22} \text{ Pa s}$  が推定される。この推定値はこれらの地域の differential RSL を用いても得られる。つまり、本研究から推定される粘性率構造は以下の(i)と(ii)にまとめられる。(i)上部マンツルは $(1-10) \times 10^{20} \text{ Pa s}$  で水平方向の不均質が存在する。(ii)深さ 670 km の粘性率は $\sim 10^{22} \text{ Pa s}$ 、下部マンツル内で粘性率は漸次増加し、深部マンツルで $\sim 10^{23} \text{ Pa s}$  になる。さらに、下部マンツルでの推定される活性化体積は $\sim (2-3) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$  である。この GIA から推定された地球内部の粘性率構造を、seismic tomography により推定される密度異常と重力異常に基づく粘性率構造や、沈み込む海洋プレートの深さ 670~1000km での停滞現象も用いた粘性率構造(マンツル対流に起因した現象に基づく粘性率構造)と比較し議論することは重要である。我々の研究では GIA (代表的時間スケールが  $10^3 \sim 10^4$  年)に伴うマンツル粘性率は、マンツル対流に起因する現象(代表的時間スケールが 100 万年以上)から推定される粘性率と調和的である。つまり、実験や理論の物性研究に基づく、GIA から推定されるマンツルの粘性率は transient rheology であるとの示唆を支持しない。これらの研究成果は下記の発表論文の に掲載されている。

(5) マリノアン氷床変動に伴う海水準変動の研究には、当時高緯度に位置した南中国、および、赤道域に位置した北西カナダとカルフォルニアの堆積学的に推定された氷床融解後の RSL change を利用した。GIA モデリングによると、当時高緯度に存在した南中国の RSL change は、地球回転変動(次数 2 の固体地球の変形のため地球深部の粘性率に強く依存する)に起因することが判明した。その結果、氷床融解後の海退→海進はリソスフェアの厚さや上部マンツルの粘性率の値によらず、深部マンツルの粘性率 $\sim 5 \times 10^{22} \text{ Pa s}$  を支持する。また、当時赤道域に位置した北西カナダやカルフォルニアにおける氷床融解後の海水準変動は地球回転変動には依存せず(赤道位置での RSL change は自転軸の移動の影響を受けない)当時の海陸分布(観測域付近の海洋分布など)に強く依存し、リソスフェアの厚さや上部マンツルの粘性率にも依存するが、深部マンツルの粘性率は南中国の RSL change からの推定値と調和的である。我々の研究は、当時の海水準変動が地理的条件(大陸棚の広さや観測地点付近の海洋の存在など)やマンツルの粘性率の依存性の議論に重点をおいている。今後、我々の研究を基に多くの観測データが得られると、マンツルの粘性率の時間変化を議論できる可能性がある。Ganne and Feng (2017)は、岩石学的研究に基づき当時( $\sim 635 \text{ Ma}$ )のマンツル平均温度は現在より $\sim 50 \text{ K}$  高いと報告している。彼らの結果を用いると、当時のマンツルの平均粘性率は現在に比べほぼ半分となる。マリノアン氷床変動に伴う海水準変動から推定された深部マンツルの粘性率は、(4)で述べた現在の深部マンツルの粘性率の半分であり、この結果は粘性率の時間変化を示唆しているのかもしれない。つまり、地球の進化に伴う固体地球の冷却を反映しているのではと考えている。以上の粘性率の時間変化は非常に preliminary であるが、今後多くのマリノアン氷床変動に伴う海水準変動の観測データが得られることを期待している。これらの成果は国際誌に投稿し positive なレビューを受け現在修正中である。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

Nakada, M., Okuno, J. and Irie, Y., Inference of viscosity jump at 670 km depth and lower-mantle viscosity structure from GIA observations, Geophysical Journal International, 査読あり, 212, 2018, 2206-2225  
doi:10.1093/gji/ggx519

Nakada, M. and Okuno, J., Secular variations in zonal harmonics of Earth's geopotential and their implications for mantle viscosity and Antarctic melting history due to the last deglaciation, Geophysical Journal International, 査読あり, 209, 2017, 1660-1676  
doi:10.1093/gji/ggx116

Nakada, M. and Okuno, J., Inference of mantle viscosity for depth resolutions of GIA observations, Geophysical Journal International, 査読あり, 207, 2016, 719-740  
doi:10.1093/gji/ggw301

Nakada, M., Okuno, J. and Yokoyama, Y., Total meltwater volume since the Last Glacial Maximum and viscosity structure of Earth's mantle inferred from relative sea level changes at Barbados and Bonaparte Gulf and GIA-induced J2-dot, Geophysical Journal International, 査読あり、204, 2016, 1237-1253  
doi:10.1093/gji/ggv520

〔学会発表〕(計3件)

Irie, Y., Nakada, M., Okuno, J. and Bao, H., Sea level change due to Marinoan snowball deglaciation, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018

Nakada, M., Okuno, J., Yokoyama, Y., Irie, Y., Lambeck, K. and Purcell, A., Viscosity structure of Earth's mantle inferred from glacial isostatic adjustment, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018

Irie, Y., Nakada, M., Okuno, J. and Bao, H., Predicting relative sea level changes at the aftermath of Marinoan (635 Ma) Snowball meltdown, American Geophysical Union, Fall Meeting, 2016

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：