

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400455

研究課題名(和文) 氷床変動を考慮したマントルダイナミクスとテクトニック運動に関する研究

研究課題名(英文) Research on mantle dynamics and tectonic crustal movement for glacial isostatic adjustment

研究代表者

中田 正夫 (NAKADA, MASAO)

九州大学・理学(系)研究科(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)：氷床変動に伴う固体地球の変動シミュレーション，最近の地球温暖化に伴う海水準変動に関する種々のデータ，人工衛星観測による地球回転変動のデータ，過去12万年間の日本列島における海水準変動のデータに基づき，マントルダイナミクスと日本列島の過去12万年間のテクトニック変動を議論した。その結果，(i)下部マントルの平均的粘性率は $(5-10) \times 10^{22}$ Pa s，(ii)過去100年間に観測されている極移動はマントル対流の寄与が2/3以上，(iii)日本列島の1000年に1回発生する巨大地震の長期予測には過去12万年間の海水準変動に基づく地殻変動の解析が重要であることを得た。

研究成果の概要(英文)：We have examined mantle dynamics and tectonic crustal movements along the Japanese coastlines by considering the Earth's deformation for glacial isostatic adjustment (GIA) due to the last deglaciation, sea level observations due to the recent global warming, Earth's rotational variations and sea level observations at the Japanese Islands during the past 125 kyr. The main results for mantle dynamics are as follows: (i) GIA-induced d^2 -dot (rate of change of degree-two harmonics of geopotential) is $-(6.0-6.5) \times 10^{-11}$ /yr, (ii) lower mantle viscosity inferred from the GIA-induced J_2 -dot and sea level changes at ~ 21 kyr BP is $(5-10) \times 10^{22}$ Pa s and (iii) the observed polar wander may be significantly attributed to convection motions in the mantle. As for the Japanese tectonic crustal movements, we obtained that the rates on a timescale of ~ 50 yr are not representative of the tectonic crustal movements for timescales longer than ~ 6 kyr in most sites along the Japanese coastlines.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：マントルレオロジー 地球温暖化 氷床変動 テクトニック運動 地球回転変動 マントルダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

本研究の主な研究テーマは、(i)「過去 100 年の地球温暖化に伴う山岳氷河や大陸氷床の融解の定量的評価」(ii)「マントル対流を考慮した氷床変動に伴う固体地球の変動 (Glacial Isostatic Adjustment; GIA) を評価し、マントル対流の時間変化やマントルの粘性率構造の評価」(iii)「日本列島の氷河・氷床変動に伴う海水準変動を 10 万年、数千年、100 年スケールで評価」である。

(1) (i)に関する研究開始当初の背景：1990 年以降人工衛星観測による氷河・氷床のマスバランスが研究され、それに伴う海面上昇の議論も進んでいる。1990 年以前(pre-satellite era)の海面上昇(ここでは 20 世紀の海面上昇と記す)については、俟潮儀のデータにより 1-3 mm/年であることが指摘されている。しかし、その原因である氷河・氷床の融解と、海水の温度上昇にともなう海水膨張の寄与は未解決である(IPCC2007 の報告書)。俟潮儀データのほとんどは 1900 年以降のデータであり、20 世紀の海面上昇が正確に議論できるデータは 2 観測点のみである。しかし、2005 年以降、高精度の有孔虫を用いた地質学的手法による過去 200 年の情報を含む海水準変動のデータが公表されている。さらに、気象研究所の石井正好氏による 1945 年以降の海水膨張による海面変化(1°グリッド)の計算値と、IPCC2007 の氷河・氷床の 20 世紀の融解の情報を用いると、20 世紀の山岳氷河や大陸氷床の融解をかなりユニークに推定することが可能と判断し本研究課題を申請した。

(2) (ii)に関する研究開始当初の背景：現在、地震トモグラフィーの手法により、マントル対流に関係した地球内部の密度異常は推定できるが、マントル対流の時間変化を評価することは難しい。しかし、過去 2 万年間の氷床変動と最近の温暖化による地球回転変動を正確に見積もることにより、マントル対流に起因する地球回転変動(極移動)を評価できるはずである。つまり、マントル対流の時間変化を推定することで可能であり、かつ、これらの結果を総合的に解釈することにより、マントル対流の理解に最も重要なファクターであるマントルの粘性率構造を評価できるはずである。これらを考慮して本研究課題を申請した。

(3) (iii)に関する研究開始当初の背景：2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震において、1000 年スケールの巨大地震の長期予測には、100 年スケール、数千年、10 万年スケールの海洋プレートの沈み込みに伴う地殻変動の定量的な評価が非常に重要であると考へた。海洋プレートの沈み込み以外でこれらの時間スケールの変動に関係する主な要因は、最近の氷河・氷床の融解と海

水膨張、過去 100 万年間の氷床の融解・成長サイクルに伴う海水準変動である。100 年スケールの海面上昇に関しては前述したので割愛する。GIA に伴う海水準変動から推定される日本の多くの地点での 6 千年前の相対海面レベルは、粘性率構造にもよるが、0-6 m である。GIA は過去 100 年スケールの海水準変動にも影響する。また、テクトニックに安定な地域での最終間氷期(ほぼ 12 万年前の間氷期)の相対海面レベルは、3-8 m であることが報告されている。氷床変動に伴うこれらの時期の相対海面レベルは、固体地球の粘弾性レスポンスを考慮して定量的に評価できる。100 年スケールの変動は俟潮儀のデータで得られる。6 千年前と 12 万年前の相対海面レベルは、地形・地質学的手法を用いて日本の多くの地点で得られている。12 万年前の観測された相対海面レベルが数十 m の場合、明らかにテクトニックな影響がほとんどである。しかし、20m 程度又はそれ以下であれば、GIA の効果は重要である。つまり、3 つの時期の観測データから GIA 及び最近の温暖化に伴う海水準変動を差し引き、3 つの時間スケールのテクトニック変動の定量的な評価を日本全土で行い、その関係を議論し、巨大地震の長期予測に貢献することができるかと判断し本研究課題を申請した。

2. 研究の目的

本申請で研究対象としている地球回轉變動、海水準変動の主な原因の一つはマントル対流である。しかし、これらの観測には、第四紀と最近の地球温暖化に伴う地球表面の質量再分配も強く関係している。そのため、地球内部のダイナミクスやテクトニクスを定量的に理解するためには、各々要因に対応する成分を分離することが必要である。各々成分を分離するために、マントル対流を考慮した氷床変動に伴う種々の固体地球の変動シミュレーションを行い、以下の項目の研究を遂行する。(i)過去~100 年の地球温暖化に伴う山岳氷河や大陸氷床の融解の定量的評価、(ii)マントル対流を考慮した GIA 変動を評価し、マントル対流の時間変化やマントルの粘性率構造の評価、(iii)日本列島の氷河・氷床変動に伴う海水準変動を 10 万年、数千年、100 年スケールで評価し、各々時間スケールのテクトニックな地殻変動を推定し巨大地震の長期予測に貢献する。これら研究をもとに、マントルのダイナミクスやテクトニクスの研究に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

[i] 課題(i)に関する研究方法：20 世紀(pre-satellite era)の海水面の変動速度は、(a)テクトニックな地殻変動、(b)GIA、(c)20 世

紀の氷河・氷床融解，(d) 20 世紀の地球温暖化に伴う海水膨張による。(a)は，日本等の非連続的な地殻変動がない地域では，過去 200 年間はその変動速度は一定と仮定して良いだろう。(b)は地球内部の粘性率構造によるが，過去 200 年程度は一定としても問題ない。(c)は 100 年程度なので，固体地球のレスポンスは弾性的としても問題ない。(d)は 1945 年以降ではあるが， 1° グリッドの計算値が私用できる。また，過去 200 年以上の情報を含む海水準変動のデータをみると，明らかに ~ 1900 年を境に上昇速度が加速している(13 地点のデータ)。これらを考慮すると，1900 年以降の変動速度から 1900 年以前の値を引くことにより，マンツルの粘性率やテクトニックな地殻変動によらない，(c)と(d)の値(和)を評価できる。この値から，(d)の寄与を差し引くことにより，(c)の寄与のみを評価できる。(c)の寄与は，IPCC2007 報告書の氷河・氷床のマスマランスの値をもとに，GIA の海水準変動を求めるプログラム(弾性レスポンス)により評価できる。つまり，観測データに基づく(c)の値とモデル計算値を比較することにより，かなりユニークに 20 世紀の氷河・氷床融解が推定できる。

[ii] 課題(ii)に関する研究方法：この研究課題に関しては研究を進める過程で当初の方法と異なる方法を採用した。理由は IPCC2013(2013 Report of Intergovernmental Panel on Climate Change)報告書の出版と，Cheng et al. (2013)が 2010 年までの重力ポテンシャル(J_2)の時間変化($J_2\text{-dot}$)を公表したことによる。Chen 等の観測に基づく $J_2\text{-dot}$ の値は $-3.5 \times 10^{-11}/\text{yr}$ (1976-1990 年)， $-0.3 \times 10^{-11}/\text{yr}$ (2000 年以降)である(1990 から 2000 は漸次的に変化している)。 $J_2\text{-dot}$ にはマンツル対流の寄与は少なく(本研究で確認)，観測された値は GIA と最近の氷河・氷床の融解を原因とする。IPCC2013 においては，温暖化に伴う氷河・氷床の融解が IPCC2007 に比べより詳細に記述され，1990 年以前と 2000 年以降で明らかに異なることが指摘されている。そこで，1990 以前と 2000 以降の氷河・氷床の融解に伴う $J_2\text{-dot}$ を評価し，その差が Chen 等の観測における差と一致すると，より正確に氷河・氷床融解による $J_2\text{-dot}$ への寄与が評価されることになる。つまり，マンツルの粘性率構造に依存する，GIA による $J_2\text{-dot}$ もより正確に評価できることを意味する。そこでまず，GIA による $J_2\text{-dot}$ からマンツルの粘性率構造を求める。次に，その粘性率構造による極移動(マンツル対流に依存)を求め観測値を比較することにより，マンツル内部の質量移動の時間変化(実際は慣性テンソル I_{13} と I_{23} の時間変化が評価できる)も推定可能である。このような方法で課題(ii)の研究を進めた。

[iii] 課題(iii)に関する研究方法：この研究に

関しては，申請者がこれまで開発してきた GIA に関するプログラム，及び研究(i)と(ii)の結果を用いることにより実施可能である。つまり，GIA 及び 20 世紀の温暖化に伴う 100 年スケールの海面上昇(下降)，GIA に伴う ~ 6 千年前 ~ 12 万年前の海面の高さを，主に，リソスフェアの厚さ及び上部マンツルの粘性率構造(日本列島域の GIA 海水準変動は下部マンツルの粘性率構造に依存しない)の関数として評価できる。さらに，氷床域から十分離れた地域(far-field)の海水準変動は，海岸線の形状に非常に敏感である(Nakada, 1986; Nakada & Lambeck, 1987)。6 千年前の海面の高さの GIA による計算値は 0 \sim 5 m である(モデルにもよるが，例えば，東京では ~ 5 m，銚子では ~ 0 m)。この性質は 12 万年前の GIA による海面の高さにも適用でき，計算値は 0 \sim 10 m の地域性をもつ。これらの性質は，観測データにおいて，GIA 成分が主か，テクトニック成分が主かを判断する重要な指標である。

観測データは以下の通りである。100 年スケールのデータは 俵潮儀のデータ(Permanent Service of Mean Sea Level, PSMSL)と 20 世紀の地球温暖化による寄与(氷河・氷床の融解と海水膨張)を用い，テクトニックと GIA の値を評価できる。 ~ 6 千年前の相対海面高に関しては，Nakada et al. (1991)において収集したデータとその後出版されたデータを用いる。仙台周辺域でのデータも収集している。 ~ 12 万年前の海面の高さに関しては，小池・町田(2001)による「日本の海成段丘アトラス」が利用できる。例えば，仙台湾では ~ 0 m，その北部の牡鹿半島から大船渡にかけては 18 \sim 29 m となっている。 ~ 12 万年前の GIA による計算値は地域により 0 \sim 10 m になる。仮に，両地域の計算値が 10 m ならば，過去 12 万年間のテクトニックな影響はそれぞれ ~ 10 m と 8 \sim 19 m となり，明らかに GIA の寄与は長期地殻変動の評価に重要である。これらの計算値と観測データを比較し，100 年スケールのテクトニック変動は，6 千年，12 万年前まで外挿可能か，また，6 千年前の変動は 12 万年前まで外挿可能か等を議論し，巨大地震の長期予測に貢献する。

4. 研究成果

(1) 俵潮儀，地質学的手法，海水膨張と最近の氷河・氷床の融解から推定される 20 世紀の海面上昇
最近の山岳氷河や両極の氷床の融解を，PSMSL 俵潮儀のデータ，高精度の有孔虫を用いた地質学的手法による過去 200 年の情報を含む海水準変動のデータ，IPCC2007 の報告書による氷河及び氷床融解の評価，1945 年以降の海水膨張による海面変化(1° グリッド)の計算値，上記の情報を考慮した数値シミュレーションにより評価した。この種の研究において，海水膨張の効果と地質学的手法

によるデータを取り入れたのは、この研究が初めてである。これらの結果によると、1990年以前の氷河・氷床の融解による平均海面上昇はほぼ1.0mm/年で、IPCC2007 レポートの結果と調和的であることが判明した。これらの成果は Nakada et al. (2013)として国際誌に公表した。

(2) GIA を原因とする地球回轉變動に関する理論的研究

マンテル対流の時間変化の評価の基礎になる氷床変動に伴う地球回轉變動に関して、地球最深部の粘性率構造の効果や地球回轉變動を記載する方程式 (Liouville Equation) の新たな物理的解釈に関する研究を行った。この研究は研究課題(ii)の基礎になり、研究成果を Nakada & Okuno(2013)として国際誌に公表した。

(3) 第四紀と 20 世紀の海水準変動から推定される日本列島の地殻変動-1000 年に 1 回発生する巨大地震の長期予測に向けて-

日本列島の氷河・氷床変動に伴う海水準変動を 10 万年、数千年、100 年スケールで評価し、各々時間スケールのテクトニックな地殻変動を推定した。俣潮儀のデータと 2013 年度に公表した計算値(Nakada et al. 2013)による日本列島の地殻変動は、ほとんどの地域において沈降である。しかし、過去 6 千年間の海面変動と 12 万 5 千年前の海成段丘から推定される海水準の観測値と計算値による地殻変動は、両時間スケールで調和的であり、ほとんどの地域で隆起を示す。つまり、これらの時間スケールの地殻変動は、100 年スケールでの地殻変動と逆センスで、巨大地震の長期予測において非常に大切である。これらの研究成果は、Okuno et al. (2014)として国際誌に公表した。

(4) 氷床変動と最近の氷河・氷床融解に伴う地球回轉變動とマンテルの粘性率構造・マンテル対流に伴う質量移動の時間変化
重力場変動から推定される過去数十年の地球自転速度変動(J_2 -dot)と、IPCC2013 報告による最近の氷床融解データにより、GIA 成分のみの J_2 -dot : $-(6.0-6.5) \times 10^{-11}$ /年を求めた。かつ、この値に基づく下部マンテルの粘性率とし、 10^{22} Pa s と $(5-10) \times 10^{22}$ Pa s の 2 つの解を得た。この研究以前の全ての研究では、最近の氷河・氷床融解成分を考慮しない J_2 -dot の値 : -3×10^{-11} /年を用いて下部マンテルの値が評価されている。

マンテル対流に伴う質量移動の時間変化に関しては以下の通りである。過去~100 年間の観測データから推定された極移動は、大きさは $\sim 1^\circ/\text{Myr}$ で、ハドソン湾の方向である (McCarthy and Luzum, 1996)。この極移動は主に氷床変動に原因すると仮定され、下部マンテルの粘性率が議論されてきた。しかし、本研究で推定された粘性率の場合、GIA の貢

献は 1/3 以下で、マンテル対流の寄与が 2/3 以上である。つまり、慣性テンソルの時間変化をもとに、マンテル内部の質量移動の時間変化が推定できる。これらの研究成果は Nakada et al. (2015)として国際誌に公表した。

(5) GIA に基づく J_2 -dot と最終氷期における海水準変動から推定されるマンテルの粘性率構造

最終氷期における海面低下量は、過去 2 万年間の大陸氷床の融解量の評価のみならず、下部マンテルの粘性率評価に重要な観測量である。現在最も信頼できる最終氷期の海面低下量は、バルバドスとオーストラリアのボナパート湾で得られている。これらの地点の海水準変動の観測量と J_2 -dot の両方を考慮して粘性率の評価を行った。これらの結果 J_2 -dot で求めた 2 つの解のうち、 $(5-10) \times 10^{22}$ Pa s が両方の観測量を説明することを明らかにし、Nakada et al. (2016)として国際誌に公表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Nakada, M., Okuno, J., Ishii, M., Twentieth century sea-level rise inferred from tide gauge, geologically derived and thermosteric sea level changes, Quaternary Science Reviews, 75, 2013, 114-131, 査読有

Nakada, M., Okuno, J., GIA-related rotational variations for the Earth with low-viscosity D" layer, Geophysical Journal International, 195, 2013, 725-739, 査読有

Okuno, J., Nakada, M., Ishi, M., Miura, H., Vertical tectonic crustal movements along the Japanese coastlines inferred from late Quaternary and recent relative sea-level changes, Quaternary Science Reviews, 91, 2014, 42-61, 査読有

Nakada, M., Okuno, J., Lambeck, K., Purcell, T., Viscosity structure of Earth's mantle inferred from rotational variations due to GIA process and recent melting events, Geophysical Journal International, 202, 2015, 976-992, 査読有

Nakada, M., Okuno, J., 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 dJ_2/dt , 204, 2016,
1237-1253, 査読有

〔学会発表〕(計 2 件)

Nakada, M., Viscosity structure of the Earth Mantle inferred from the glacial isostatic adjustment and Earth's rotational variations, SEDI Pre-Symposium 2013, 2013 年 9 月 28 日, 葉山 (湘南国際村センター)

Okuno, J., Nakada, M., Ishii, M., Miura, H., Vertical tectonic crustal movements along the Japanese coastlines inferred from late Quaternary and recent relative sea level changes, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 5 月 1 日, 横浜

6 . 研究組織

(1) 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