

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2005～2008

課題番号：17340132

研究課題名（和文） 地球回転変動と気候変動・地質作用の相互作用に関する研究

研究課題名（英文） Rotation of the Earth, climate change and geologic events

研究代表者

中田 正夫 (NAKADA MASAO)

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：50207817

研究成果の概要：第四紀氷床変動がコア・マンテル結合を通して気候変動やダイナモ作用に影響を与えること、大陸移動やマンテル対流が過去数億年のスケールで有為な極移動を引き起こすこと、第四紀の極移動を正確に評価するにはマンテル対流の効果を考慮する必要があること、最近の地球回転変動に電磁的カップリングが効果的であることを数値的に確かめ、かつ、秋吉石灰岩層群とジェスモンド石灰岩から推定される堆積作用・海水準変動に関する研究を遂行した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	4,700,000	0	4,700,000
2006年度	2,800,000	0	2,800,000
2007年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
総計	13,500,000	1,800,000	15,300,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地球回転変動、極移動、マンテル対流、氷床変動、気候変動、マンテルレオロジー、堆積作用、第四紀の氷床変動と地球回転変動・最近の海面上昇

## 1. 研究開始当初の背景

第四紀の氷床変動に伴う地球回転変動の研究が精力的に行われ、地球内部のマンテルの粘性率や氷床の融解歴史等が議論されていた。しかし、第四紀の地球回転変動にはマンテル対流に伴う地球内部の質量再分配や、内核・外核と外核・マンテル境界における摩擦が関係しているはずである。つまり、マンテル対流に伴う地球回転変動及びそれに伴う全地球的な海水準変動、マンテル対流を考慮した第四紀氷床変動に伴う地球回転変動、

第四紀の氷床変動と内核・外核と外核・マンテル境界における摩擦を考慮した地球回転変動のモデリングはほとんど行われていなかった。しかし、観測された地球回転変動（極移動と地球の1日の長さの変化）や海水準変動は、これらの要因が複雑に関係していると考えられる。つまり、これらをモデル化して統一的なモデリングに組み込み、定量的な議論を行うことは、非常に重要であると申請者（研究代表者）は考え、本申請課題を申請した。

本研究における長周期の気候変動や海水

準変動の評価において、世界的にも貴重なフィールドである秋吉石灰岩層が重要な位置をしめる。しかし、秋吉石灰岩層群の上部石炭系において、ゴンドワナ氷室気候極大期の寒冷化と海水準低下による短周期の離水が明らかにされていたにすぎなかった (Sano et al., 2004)。また、大洋域の海山頂部での堆積作用の変化が海山斜面相の堆積作用に影響を及ぼすかどうかはまったく理解されていなかった。その一方で、真の全球的環境復元研究には大洋域からの情報が欠落しているとの指摘が行われていた。これらの背景を考慮し、秋吉石灰岩層群とジェスモンド石灰岩における詳細なフィールドワークとそれに基づく記載・解釈は重要であると考えられる。

## 2. 研究の目的

種々の地学現象はプレート運動やマンテル対流に基づき説明されているが、これらの現象に伴う地球全体の慣性モーメントの変化を原因とする現象はあまり研究されていない。プレート運動はアイソスタシーを保ちながら進行するので、全地球レベルでの慣性モーメントの変化は小さく極移動量は小さいと一般的に考えられている。マンテル内部での急激な変動は、有意な慣性モーメントの変化を誘起し、極移動が生じる可能性がある。これらの地球回転変動の結果、気候変動や海水準変動が生じ、堆積作用にも大きな影響を与える可能性がある。さらに、第四紀の氷床変動に伴う地球回転変動は精力的に行われているが、重要な要因であるマンテル対流の影響は考慮されていない。本研究では、①これらの一連の変動を定量的にモデリングし、地球内部のレオロジーや気候変動・地学現象の評価に貢献すること、②地質学的過去の長時間スケール海水準変動および気候変動を、フィールドワークベースの層序学・堆積学・古生物学的手法など地質学的手法によって記述し、得られた海水準・気候変動と全球変動の比較を行うこと、を研究目的とする。

## 3. 研究の方法

地球回転変動は、地球表層の質量再分配（第四紀の氷床変動や大陸移動）やマンテル対流に関係した地球内部の質量再分配、及びそれらに対応した固体地球の粘弾性レスポンスに起因する。また、内核や外核の地球回転変動に対する影響は、内核・外核と外核・マンテル境界における摩擦（電磁カップリン

グ、粘性カップリング、地形カップリング、重力カップリング）が考えられている。つまり、本研究課題を定量的にモデル化するには、これらの要因を考慮した地球回転変動及び全地球的な海水準変動を評価するプログラムを開発する必要がある。本研究では、マンテルと内核を粘弾性体、外核を粘性率がゼロの *inviscid fluid* とし、内核・外核と外核・マンテル境界にそれらの差分回転に比例する電磁気的カップリングを組み込んだプログラムを開発し、本研究課題を遂行した。

気候変動や海水準変動の評価においては、秋吉石灰岩層群とジェスモンド石灰岩のフィールドワークによる岩相層序の把握、鏡下観察に基づく岩相・化石相・続成相の解析、フズリナおよびコノドントを用いた年代決定などの研究手法を用いた。さらに、現世～第三紀の海山・陸棚炭酸塩堆積作用をアナログとしてデータの解釈を行った。

## 4. 研究成果

(1) 第四紀氷床変動とコア・マンテル結合及び気候変動やダイナモ作用

第四紀の表層荷重の再分配はマンテル・外核・内核の差分回転を引き起こし種々の興味深い地学現象と関係していると考えられている。例えば、氷床変動と地球磁場変動の関係などが考えられるが、どのようにリンクしているかはこの現象に伴う差分回転を定量的に見積もる必要がある。本研究においては、この現象を定量的に評価することを目的としている。具体的には、マンテルを粘弾性体、外核を *inviscid*、内核を有限の粘性率を持った粘弾性体としたモデルによる種々のラブ数を評価するプログラムを開発し、CMBとICB境界においては電磁結合を考慮して、地球全体、外核、内核の回転変動を評価している。電磁結合においては、ICB域でのポロイダル磁場の強度が重要であることが確かめられ、かつあるパラメータ範囲（粘性率やICB域でのポロイダル磁場の強度）では外核の西方移動や内核のスーパーローテーションが本モデルで説明できることを明らかにした。本研究の主な結果は以下である (Nakada, 2006)。

①内核と外核の差分回転は、内核の粘性率には依存せずに、下部マンテルの粘性率と CMB と ICB 境界の電磁結合に敏感である。CMB と ICB 境界に電磁結合が働かない場合は、内核と外核のマンテルに対する差分回転は、それぞれ  $\sim 2^\circ$  /年と  $\sim 1^\circ$  /年となる。外核に関する計算値は、西方移動から推定されている外核の差分回転に比べ非常に大きな値である。

②表面のポロイダル磁場を下方接続して求めた電磁結合を用いると、有為な内核・外核の差分回転は得られない。ただし、急激な氷床の融解（実際に観測されていて、～200年で～25mの海面上昇）においては、応答が弾性的になり有為な差分回転が得られる。

③これらを総合的に評価すると、第四紀の氷床変動は十分に外核のダイナモ作用に影響を与える可能性がある。つまり、気候変動は磁場変動に影響を与える可能性が示唆される。

#### (2) 大陸移動と極移動・海水準変動

大陸移動がどの程度極移動を引き起こすかのモデルを構築し、大陸移動と極移動の関係を議論した(Nakada, 2007)。大陸移動に伴う慣性モーメントの変化は、アイソスタシーが成立しているため粘性緩和が生じず、非常に有効に極移動に影響を与えることが判明した。これらの結果は下部マントルやリソスフェアの粘性率に依存するが、古地磁気学から得られている過去4千万年間の極移動は、その間のオーストラリア大陸の北上で説明でき、かつ過去2億年間の極移動も大陸移動によりかなり良く説明できることが明らかにした。これらは、地球科学における基本的な問題であり未だ解決されていない「極移動の原因は何か」に大きな貢献をしたと考えられる。本論文のレビューにおいて、“大陸移動は極移動の原因になり得ない”との論文の著者からも私の主張に賛同するコメントをもらっている。しかし、研究成果にはマントル対流の影響は考慮されてなく、マントル対流の影響を考慮した研究成果については、下記項目(4)に述べる。

以上の結果は、大陸移動に伴う極移動はグローバルな海水準変動に大きな影響を与えることを示唆している。大陸移動・極移動を考慮したグローバルな海水準変動のモデル化を行い、プログラムも完成し、現在論文をまとめている段階で、大陸移動-極移動-海水準変動のモデル化は本研究課題の採択期間内において完成した。海水準変動と堆積作用に関しては定量的なモデリングを行い、予備的な研究であるが、北西九州の50-20Maの観測データを基に議論を行った(Yamada and Nakada, 2006)。

#### (3) 第四紀の氷床変動と地球回転変動・最近の海面上昇

20世紀の全地球的な海面上昇の速度と原因を、地球回転変動と過去140-200年の海面変化の情報をもつ検潮儀のデータ

を用いて評価した。これらの解析の結果、平均的な海面上昇速度（ユースタティックな海面上昇速度）は1.3 mm/年以上で、南極とグリーンランド氷床の融解がそれぞれ～0.5 mm/年程度寄与していることが示唆される。しかし、本研究では海水膨張と山岳氷河の影響を独立に評価することはできず今後の課題である(Nakada and Inoue, 2005; Nakada 2007)。

#### (4) 大陸移動・マントル対流を考慮した極移動

マントル対流と大陸移動に伴う慣性モーメントの変化を考慮した極移動のプログラムを完成させ、数値計算による研究を進めた。その結果、大陸の集積・発散(Wilsonサイクル)の影響が極移動に大きな影響を及ぼす可能性があることが判明した。つまり、集積過程においては大陸移動に伴う慣性モーメントの変化が極移動に大きな影響を及ぼし、発散過程においてはマントル対流に伴う変化が重要であることが数値計算により推定された。この結果はNakada(2008)に掲載された。さらに、3次元球殻マントル対流シミュレーションに基づき、マントル対流の下降流や上昇流に伴う慣性モーメントの変化を時間の関数として求め、マントル対流と極移動の関係の研究を現在進めている。

#### (5) マントル対流を考慮した第四紀氷床変動に伴う極移動

これまでの第四紀氷床変動に伴う極移動の研究は多くの研究者により行われているが、マントル対流の影響は考慮されていない(e.g. Nakada, 2002)。しかし、マントル対流は最近の極移動に重要であるとの指摘は、マントル対流の研究から指摘されている。マントル対流を考慮した第四紀氷床変動に伴う極移動の研究を遂行するため、極移動を記述するLiouville equationの一般形を世界で初めて導きだし、その方程式により観測されている現在の極移動を議論した。その結果、第四紀氷床変動に伴う極移動の評価において、マントル対流の影響による静水圧平衡からの余剰な赤道方向の地球の膨らみ(excess flattening)が重要であることを定量的に示した。この結果は現在国際誌に投稿中(revised versionを投稿中)である。

#### (6) 電磁的カップリングを考慮した最近の地球回転変動の研究

外核最上部でのコア表面流の1~2年程度の変動は、外核・マントル境界での電磁気的カ

ップリングを通して地球の 1~2 年程度の LOD(length of day)や自転軸の運動に影響を与えることが考えられている。これまでの研究においては、これらの現象は別々にモデル化されていたが、本研究においては地球回転変動として同一モデルで定式化して研究を進めた。現在、これらのモデリング及び結果を国際誌に投稿中 (revised version を投稿中) である。今後もこの研究を押し進め、固体地球物理学の古典的であるが大問題である、Chandler wobble の励起やコア表面流が Chandler wobble に与える影響等の研究を押し進める予定である。

#### (7) 秋吉石灰岩層群とジェスモンド石灰岩から推定される堆積作用・海水準変動

わが国の代表的な浅海成石灰岩である山口県秋吉石灰岩層群 (下部石炭系~中部ペルム系)、およびカナダ、ブリティッシュコロンビア州カシェクリーク帯のジェスモンド石灰岩 (下部三畳系) を研究対象とした。これらの 2 例は付加体に組み込まれた海山型石灰岩体である。成果は以下のように要約できる。そのほかに西九州天草地域の古第三系、赤崎層の古土壌を対象にした研究に着手した。

##### ①秋吉石灰岩層群

自身の研究で得られた新しいデータと先行研究結果のレビューから、秋吉石灰岩層群全体の岩相、化石相、堆積相、続成相などの堆積記録をまとめた。これに基づいて同石灰岩の全堆積期間 (石炭紀古世中期~ペルム紀中世後期: 約 330 Ma~260 Ma) における長時間スケール海水準・気候変動の概要を解釈することができた。これによると、大局的には秋吉石灰岩層群は堆積開始から年代にしたがって高海水準安定・温暖気候期、海水準低下・寒冷気候期、海水準上昇・温暖化気候を経験してきた。特に、石炭紀後半~ペルム紀初期にかけては短周期海水準変動による頻繁な離水・再沈水が見出された。この時期の海水準変動はおよそ 1 Ma 前後の周期をもっていることが明らかになり、北米・西ヨーロッパなどに広く分布するサイクロセム堆積物に比較することができると考えた。つまり、秋吉石灰岩層群全体としては古生代後期のゴンドワナ氷床の盛衰による温室期と氷室期の両方を記録しており、大洋域の海山上での堆積作用が全球的な環境変動を十分に記録していることが明らかになった (Sano, 2006)。

さらに、秋吉石灰岩層群を堆積させた海山の下部斜面を覆って堆積していた海綿チャ

ートに含まれる碎屑性石灰岩が高海水準安定・温暖気候期に多く見られることを明らかにした。これをバハマバンクなどで知られている高海水準期の炭酸塩堆積物の流出・再堆積作用に比較した (Nakashima & Sano, 2007)。

##### ②ジェスモンド石灰岩

カナダ、カシェクリーク帯の下部三畳系ジェスモンド石灰岩の岩相、化石相、堆積相、地球化学的性質 (炭素・酸素安定同位対比、主要元素の定量、磁化率など) を記述した。その結果、同石灰岩が堆積した三畳紀古世後期 (スミシアン後期~スパシアン初期) のパンサラッサ海大洋域では海洋の無酸素状態は解消していたものの、なお生物相は貧弱であったことが明らかになった。また、ジェスモンド石灰岩の岩相変化は緩やかな海水準上昇を記録していると考えられる。この海水準上昇はスパシアン初期に知られている第 3 オーダーの海進・海退サイクルに比較されることが明らかになった。本研究の成果は、北米コルディレラの付加体では最初の下部三畳系石灰岩の詳細検討事例である。

#### 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 10 件)

- ① Nakada, M., Long-term true polar wander of the Earth including the effects of convective processes in the mantle and continental drift, *Geophysical Journal International*, 175, 1235-1244, 2008, 査読有
- ② 佐野弘好, 上野勝美, 大国谷彰人, 海山被覆性浅海石灰岩から解読された石炭・ペルム紀の気候・海水準変動, *石灰石*, 353号, 46-64, 2008, 査読有
- ③ Nakada, M., True polar wander associated with continental drift on a hypothetical Earth, *Earth, Planets and Space*, 59, 513-522, 2007, 査読有
- ④ Nakada, M., Quaternary glacial cycles, Earth's rotation and twentieth-century global sea level rise, *第四紀研究 (The Quaternary Research)*, 46, 257-264, 2007, 査読有
- ⑤ Nakashima, K., Sano, H., Palaeoenvironmental implication of resedimented limestones shed from Mississippian - Permian mid-oceanic

- atoll-type buildup into slope-to-basin facies, Akiyoshi, Japan, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 247, 329-356, 2007, 査読有
- ⑥ Yamada, Y., Nakada, M., Stratigraphic architecture of sedimentary basin induced by mantle diapiric upwelling and eustatic event, Tectonophysics, 415, 103-121, 2006, 査読有
- ⑦ Nakada, M., Axial and equatorial rotations of the Earth's cores associated with the Quaternary ice age, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 154, 113-147, 2006, 査読有
- ⑧ Sano, H., Impact of long-term climate change and sea-level fluctuation on Mississippian to Permian mid-oceanic atoll sedimentation (Akiyoshi Limestone Group, Japan), Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 236, 169-189, 2006, 査読有
- ⑨ Nakada, M. and Inoue, H., Rates and causes of recent global sea-level rise inferred from tide gauge data, Quaternary Science Reviews, 24, 1217-1222, 2005, 査読有
- ⑩ Yanagawa, T.K.B., Nakada, M. and Yuen, D.A., 2005. The influence of lattice thermal conductivity on thermal convection with strongly temperature-dependent viscosity, Earth, Planets and Space, 57, 15-28, 2005, 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① 中田正夫, Long-term true polar wander of the Earth including the effects of mantle convective processes and continental drift, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月28日、千葉(幕張メッセ)
- ② Sano, H., Impact of long-term climate change and sea-level fluctuation on mid-oceanic atoll sedimentation: Akiyoshi Limestone Group, Japan, North Asian Symposium 2006 Climate Change and Carbon Cycle, 2006年11月8日、北九州(小倉)
- ③ 中田正夫, Quaternary glacial cycles, Earth's rotation and twentieth-century global sea level rise, 日本第四紀学会(創立50周年記念大会 招待講演)、2006年8月4日、東京(首都大学東京)

- ④ 中田正夫, Northward drift of Australia and true polar wander in Cenozoic time, 地球惑星科学連合学会, I143-014, 2006年5月17日、千葉(幕張メッセ)
- ⑤ 佐野弘好, 尾上哲治, Orchard, M.J., プリティッシュコロンビア州南部、カシエクリーク・コンプレックスの下部三疊系浅海成炭酸塩堆積物(予報)、日本地質学会、2006年9月18日、高知(高知大学)
- ⑥ 佐野弘好, 中島浩一, 秋吉帯石炭・ペルム系チャート中の碎屑性石灰岩が記録する海水準・気候変動、日本地質学会、2005年9月20日、京都(京都大学)
- ⑦ 中島浩一, 佐野弘好, 秋吉帯石炭系海綿骨針チャート中の碎屑性石灰岩、日本地質学会、2005年9月20日、京都(京都大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中田 正夫 (NAKADA MASAO)

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号: 50207817

### (2) 研究分担者

佐野 弘好 (SANO HIROYOSHI)

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号: 80136423