

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540402

研究課題名（和文）時間変化する重力でみる学際的地球科学

研究課題名（英文）Interdisciplinary earth science from time-variable gravity

研究代表者

日置 幸介 (HEKI KOSUKE)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：30280564

研究成果の概要（和文）：

2010年2月のチリ地震に伴う重力変化を GRACE 衛星データから検出した(Heki & Matsuo, 2010 GRL)。これはスマトラ地震に続き世界二例目である。また地球温暖化に伴うアジア高山域（特にヒマラヤ山脈）の年間 40Gt に及ぶ山岳氷河の縮小を GRACE 衛星データから定量的に求めた(Matsuo & Heki, 2010 EPSL)。しばしば GRACE データに現れる重力変化の加減速の原因が降水量の直線変化であることを突き止めた(Ogawa et al., 2011 GJI)。

研究成果の概要（英文）：

Coseismic gravity changes associated with the 2010 Chile Earthquake have been detected with GRACE satellites (Heki & Matsuo, 2010 GRL). We also detected ice loss amounting up to 40 Gt/yr in the Asian High Mountains including the Himalayan glaciers (Matsuo & Heki, 2010 EPSL). We also revealed that quadratic signals in time-variable gravity are due mainly to linear changes in precipitation (Ogawa et al., 2011 GJI).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

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：衛星重力計測 チリ地震 陸水変動 地球温暖化 氷河縮小

1. 研究開始当初の背景

初めての「重力変化を測るための衛星」である GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)が 2002 年に打ち上げられた。地球を周回する人工衛星は地球重力場の不均一によって加速減速を繰り返す。GRACE は双子衛星間の距離を精密に計ることによって地球全体の重力場を短期間に計測し終え

る画期的なシステムである。得られた重力場を時間順にならべれば、「重力時間変化」という新たな目で地球を眺めることができる。GRACE 衛星は当初の予想を超える目覚ましい成果を地球科学の諸分野で挙げていた。本研究テーマは GRACE 衛星のデータ解析を通じ、地震学、陸水学、気候学、雪氷学、地球環境科学等の多分野を横断する「時間変化する重

力でみる学際的地球科学」を目指して提案された。

2007年までのGRACEの目覚ましい成果として、(1)熱帯域で降雨の季節変化に伴う陸水変動、(2)地球温暖化にともなう山岳氷河の縮小、(3)グリーンランド氷床の質量変化から推測された2004年春を境とする温暖化の加速、(4)地震時の断層運動に伴う重力変化、(5)後氷期回復に伴うマンツルの流動と地殻の上昇、等の現象を初めて衛星から重力の時間変化として捉えたことである。

2007年の1年間にもGRACEは地震学にインパクトを与えた。2004年12月のスマトラ・アンダマン地震に伴う重力変化（ジオイド高変化）の解析の際に、地震時に急激に減少した重力が地震後ゆっくりと回復していることが発見された。地震時重力変化は主に地殻と上部マンツルの体積歪の変化によるものであるが、Ogawa & Heki (2007)は地震後変動を断層下端付近の超臨界水の拡散によるものと考えて、論文発表した。この論文はAGU Journal Highlightに選ばれただけでなく、「地震の傷を癒す水」という題名でNew Scientist誌を始め、Discovery Channel News等のウェブ媒体の科学ニュースで複数取り上げられた。地震後のゆっくりした重力変動の検出は世界初であるが、我々から数ヶ月遅れて米国や欧州のグループが我々の結果を追認する論文を発表した。

2. 研究の目的

当面の目的として、(1)地震に関連した重力変化、(2)気候変化に伴う重力変化、の二つに絞って、衛星重力計測による研究を行った。

2004年12月のスマトラ・アンダマン地震後の大規模な余効すべりや、下部地殻やマンツルの粘性流動による重力変化が数年以内に顕著になることが予想された。既に報告した水の拡散による重力変化は地震後一年以内の短い時定数のものであるが、本研究ではより長期にわたる重力変動をGRACEで観測し、上部マンツルの粘性や余効すべりにGPSと異なる拘束を与えることを目指した。

ENSO（エルニーニョ南方振動）に代表される気候の擾乱は、全球規模で降雨の異常をもたらす（日本列島の暖冬少雪等）。降雨異常は土壌水分や雪氷質量の変化として陸域重力に変化をもたらすであろう。2006年以降は、El NiñoとLa Niñaが交互に生じており、本研究期

間内にそれらをもたらす重力変化をGRACEで全球的に解明することを目指した。また、地球温暖化によるグリーンランド氷床や山岳氷河の質量永年減少はすでに検出されているが、本研究では中低緯度地域では最大規模の山岳氷河であるアジア高山域の氷河に注目して質量の変化を研究しようと考えた。

3. 研究の方法

GRACE データは、米国テキサス大学(UTCSR)とドイツの地球科学研究所(GFZ)で処理されたLevel-1 データ（衛星間距離変化データ）や、一ヶ月毎の重力場を球面調和展開した係数(Stokes係数)からなるLevel-2 データが、データセンターから研究者に公開されている。本研究は主にLevel-2 データを用いて行った。Stokes係数から高次の誤差を押さえつつ最適な空間解像度を持つ重力分布図を得る手法、および荷重ラプ数を用いて重力を地球表面の質量分布に換算する手法はほぼ確立しておりデータ処理法には研究要素は多くないので、本研究は既存の手法に従った。

GRACEを用いた研究で最も重要なのは、公開データを解釈して論文を発表するまでの速度である。月毎の重力モデルは数ヶ月遅れて公開される。GRACEに限らず最先端技術による公開データを利用した研究は「時間との勝負」である。本研究でもハードウェアの購入は最小限で、主に情報収集と研究発表のための旅費および論文出版経費に研究費を支出するような研究計画をたてた。

4. 研究成果

2002年に打ち上げられたGRACE重力衛星によって、様々な地域や時間スケールの重力変化が捉えられている。本研究では2008-2010という時間窓で、重力の時間変化という切り口による新たな地球物理学的現象の解明を目指して研究を進めた。

(1)二次の成分を持った重力の経年変化
陸地において、GRACEが観測する重力変化は主に陸水（土壌中の水分、地下水、積雪、河川や湖沼の水等の総称）の貯水量を反映している。貯水量は雪や雨などの降水量や蒸発散等のフラックスの積分値であり、もし長期的な一次変化成分があれば、GRACEの重力変化には二次の変化成分が現れるはずである。本研究では、GRACEによる重力の時間

変化時系列を季節変化と二次関数でモデル化し、重力変化の加速・減速についてその大きさや地理的分布を議論した。さらに陸水モデルや降水量データからも同様の二次的な変化分を比較した結果、GRACE で得られた加速・減速の変化は、降水量の直線的な時間変化を反映している可能性が高いことを示した。本研究は大学院生である小川涼子の博士論文の一部となっただけでなく、Ogawa et al. (2011)として GJI 誌に掲載されている。また、エルニーニョ・南方振動に伴う降雨異常を GRACE によって陸水貯留量をもたらす重力変化として検出した。これは卒論学生である森下遊の卒業研究を発展させたものであり、Morishita & Heki (2008)として EPSL 誌に掲載された。ここで挙げた成果は下記で図を含めて公開している。

http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Ogawa_etal_GJI2010.pdf

http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/MorishitaHeki_EPSL.pdf

(2) シベリア永久凍土帯における重力の季節的・経年的な変化

地球温暖化に伴って、様々な地域の陸氷は融解し海面上昇に影響を与えている。GRACE データによる経年的な重力変化を見てみると、永久凍土で覆われている東シベリアでは、年間約 30.7 Gt という顕著な貯水量の増加が見られる。これは温暖化に伴うパタゴニアの氷河の融解量に匹敵し、海面上昇を和らげる作用を持つ。永久凍土域では凍土の不透水性のため冬の地下水の涵養がなく、また余剰水が氷として冬越しできるため、その陸水変動は、温帯とは異なる季節変化を示し、さらに貯水量の経年変化は大きい。本研究では GRACE データと降水量や河川流量データといった地上観測データを比較することで、永久凍土における季節的および経年的な水収支を議論した。その結果、降水量の増加が貯水量増加の直接的原因であるが、許容貯水量自体が増大している可能性が示唆された。本内容は小川涼子の博士論文の一部となり、また AGU 等の国際学会で発表され、月刊地球に和文論文として掲載された。論文は下記で見ることができる。

http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Ogawa_Chikyu2010.pdf

(3) 2010 年チリ地震に伴う重力変化

2010 年 2 月 27 日にチリ中部で発生した Mw8.8 の大地震に関して、GRACE による衛星重力データを用いて、地震時の重力変化を検出した。本研究は博士課程の大学院生である松尾功二との共同で行われた。その成果は米国の地球物理学速報誌 GRL に掲載された (Heki & Matsuo, 2010)。地震に伴う重力変化を衛星で観測したのは、2004 年 12 月のスマトラ・アンダマン地震に続いて世界で二例目である。重力変化は最大で 5μ ガル程度であり、既存の地震時重力変化計算プログラムには海洋地域では地殻と海水の密度差を考慮する必要があることが明らかにされた。なおスマトラ・アンダマン地震で初めて発見された地震後変動は、チリ地震ではあっても極めて小さいことが明らかになりつつある。

南米大陸では、GRACE による季節的および経年的な重力変化は、そのかなりの部分が陸水モデルで説明可能であることがわかった。同時に、そのモデルに含まれない雪氷や湖水の質量変動が GRACE のデータには有意に含まれることが明らかになった。地震時重力変化を推定する際に、陸水変動によるノイズをどのように除去すべきかに関して、アメリカ合衆国ネバダ大学リノ校で開催された国際シンポジウムにおいて招待講演を行った。論文は下記のリンクで閲覧可能である。
http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/HekiMatsuo_GRL2010.pdf

(4) アジア高山域における氷河の縮小

チベット高原を取り囲むように連なるアジア高山域は、中低緯度で最も多くの陸氷を山岳氷河として貯蔵しており、南極と北極に次ぐ「第三の極」として知られる。現在この地域では、地球温暖化に伴う氷河の融解が進行していると推測される。大学院生の松尾功二と共に、山岳氷河の大規模な融解が重力場を変動させることに注目し、重力観測衛星 GRACE が捉えた重力変化の解析から、アジア高山域における山岳氷河の融解量を世界に先駆けて導いた。本研究の成果は、欧州の専門誌 EPSL にて発表された (Matsuo & Heki, 2010) だけでなく、2010 年 2 月 6 日付の毎日新聞全国版で報道された。また 2010 年夏のアジアオセアニア地球科学協会 (AOGS) の学術総会 (インド・ハイデラバード) で松尾功二が招待講演を行った。論文は下記で見ること

とができる。

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Matsu>
oHeki_EPSL.pdf
また新聞記事は
<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/news/2010>
0206_mainichi.jpg
にある。

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 8 件)

- 1 Ogawa, R., B.F. Chao, and K. Heki, Acceleration signal in GRACE time-variable gravity in relation to interannual hydrological changes, *Geophys. J. Int.*, 184, 673-679, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04843.x, 2011. (査読有)
- 2 Heki, K. and K. Matsuo, Coseismic gravity changes of the 2010 earthquake in Central Chile from satellite gravimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24306, doi:10.1029/2010GL045335, 2010. (査読有)
- 3 日置幸介, 松尾功二、重力衛星でみるアジア高山域の山岳氷河の融解、月刊地球、32, 219-223, 2010. (査読無)
- 4 松尾功二、日置幸介、陸水荷重による季節的地殻変動、月刊地球、32, 229-233, 2010. (査読無)
- 5 小川涼子、B.F. Chao, 日置幸介、シベリア永久凍土帯の重力経年変化、月刊地球、32, 234-238, 2010. (査読無)
- 6 Matsuo, K. and K. Heki, Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290, 30-36, doi:10.1016/j.epsl.2009.11.053, 2010. (査読有)
- 7 Morishita, Y. and K. Heki, Characteristic precipitation patterns of El Niño/La Niña in time-variable gravity fields by GRACE, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 272, 677-682, 2008. (査読有)
- 8 日置幸介、重力で見る変化する地球、リテラポプリ、No.34, pp.26-27, 北海道大学広報誌、2008. (査読無)

[学会発表] (計 34 件)

- 1 Heki, K. and K. Matsuo, Coseismic gravity changes of the 2010 earthquake in Central Chile from satellite gravimetry, AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 13-17, 2010.
- 2 Matsuo, K. and K. Heki, Precipitation anomaly patterns associated with Arctic Oscillation as seen from GRACE gravimetry, AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 13-17, 2010.
- 3 松尾功二、日置幸介、重力衛星 GRACE で見る北極振動に関連した降雨/降雪量異常、日本測地学会 2010 年秋季講演会、京都大学

防災研究所、京都、Nov.8-10, 2010.

- 4 日置幸介、松尾功二、GRACE で見た 2010 年チリ地震の重力変化、日本測地学会 2010 年秋季講演会、京都大学防災研究所、京都、Nov.8-10, 2010.
- 5 日置幸介、松尾功二、2010 年チリ地震はジオイドを変形させたか、日本地震学会 2010 年秋季講演会、広島国際会議場、広島、Oct.27-29, 2010.
- 6 松尾功二、日置幸介、2010 年チリ地震後の重力変化は陸水変動と分離できるか、日本地震学会 2010 年秋季講演会、広島国際会議場、広島、Oct.27-29, 2010.
- 7 Heki, K. and K. Matsuo, Coseismic and postseismic gravity changes by the 2010 Chile earthquake: separating hydrological and tectonic signals in GRACE data, IGCP 565 Workshop 3: Separating Hydrological and Tectonic Signals in Geodetic Observations, Reno, Nevada, Oct. 11-13, 2010.
- 8 日置幸介、松尾功二、小林裕太、2010 年チリ地震に伴う重力変化: GRACE による観測結果、東京大学地震研究所特定共同研究(B)「精密重力観測のための陸水補正法の開発と適用」、東京大学宇宙線研究所、神岡、Sep.29-30, 2010.
- 9 松尾功二、日置幸介、GRACE が捉える北極振動/北大西洋振動に関連した重力異常について、東京大学地震研究所特定共同研究(B)「精密重力観測のための陸水補正法の開発と適用」、東京大学宇宙線研究所、神岡、Sep.29-30, 2010.
- 10 Matsuo, K. and K. Heki, Glacial melting in Asian high mountain ranges derived by GRACE gravimetry, Asia Oceania Geosciences Society 7th annual meeting, Hyderabad, India, Jul.5-9, 2010 (invited).
- 11 日置幸介、GRACE で日本列島の積雪は見えるか?、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、幕張メッセ、千葉、May 23-28, 2010.
- 12 松尾功二、日置幸介、陸水荷重による年周地殻変動について、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、幕張メッセ、千葉、May 23-28, 2010.
- 13 Heki, K., Can GPS see winter snows in Japan?, EGU Meeting 2010, UN City, Vienna, Austria, May.3-7, 2010.
- 14 日置幸介、積雪荷重と年周地殻変動: GRACE で日本の雪が見えるか?、地殻変動研究集会、東京大学地震研究所、東京、Mar.10, 2010.
- 15 Ogawa, R., B. F. Chao, K. Heki, Seasonal and inter-annual gravity changes in the Siberian permafrost region from GRACE, AGU Fall Meeting 2009, Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA, Dec. 14-18, 2009.

- 16 日置幸介、山岳氷河の融解：GRACE による観測のレビュー、地震研究所共同利用研究集会、「重力観測・理論、その応用—陸上・海底から衛星観測まで—」、東京、Dec. 3-4, 2009.
- 17 松尾功二、日置幸介、年周地殻変動再訪：GPS と GRACE の比較、地震研究所共同利用研究集会、「重力観測・理論、その応用—陸上・海底から衛星観測まで—」、東京、Dec. 3-4, 2009.
- 18 小川涼子、B. F. Chao, 日置幸介、シベリア永久凍土帯の重力経年変化、地震研究所共同利用研究集会、「重力観測・理論、その応用—陸上・海底から衛星観測まで—」、東京、Dec. 3-4, 2009.
- 19 松尾功二、日置幸介、GPS と GRACE で捉えた陸水起源による地表の荷重変形、日本測地学会 2009 年秋季講演会、産業技術総合研究所、茨城、Nov.4-6, 2009.
- 20 小川涼子、日置幸介、B.F. Chao, シベリア永久凍土帯における季節的・経年的な重力変化、日本測地学会 2009 年秋季講演会、産業技術総合研究所、茨城、Nov.4-6, 2009.
- 21 Heki, K. and K. Matsuo, Ice loss versus uplift: Current mass balance in Asian high mountains from satellite gravimetry, Int. Assoc. Geod. General Meeting, Buenos Aires, Argentine, Aug.31-Sep.4, 2009.
- 22 Matsuo, K. and K. Heki, Uplift and glacial melting in Asian high mountains from GPS and GRACE, Asia Oceania Geosciences Society 6th annual meeting, Singapore, Aug.11-15, 2009.
- 23 日置幸介、松尾功二、重力衛星 GRACE でみたアジアの山岳氷河の融解、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、幕張メッセ、千葉、May 16-21, 2009.
- 24 松尾功二、日置幸介、GPS と GRACE でみたチベット高原の隆起と重力変化、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、幕張メッセ、千葉、May 16-21, 2009.
- 25 小川涼子、B. F. Chao, 日置幸介、GRACE でみる重力二次変化に反映された降水量パターン的一次変化、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、幕張メッセ、千葉、May 16-21, 2009.
- 26 Ogawa, R., B. F. Chao, and K. Heki, Inter-annual precipitation change as quadratic signals in the GRACE time-variable gravity, EGU General Assembly, Vienna, Austria, Apr. 19-24, 2009.
- 27 Heki, K. and K. Matsuo, Ice melting versus tectonic uplift: Current mass balance in Tibet as seen by GRACE, AGU Fall Meeting 2008, Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA, Dec. 15-19, 2008.
- 29 Ogawa, R., B. F. Chao, and K. Heki, Acceleration of terrestrial water storage changes from GRACE data, AGU Fall Meeting 2008, Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA, Dec. 15-19, 2008.
- 30 Heki, K. and K. Matsuo, Uplift, ice melting and gravity decrease in Tibet, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Nov. 25-27, 2008.
- 31 小川涼子、日置幸介、吉田清人、測地的にみた地球温暖化のシグナル、日本測地学会平成 20 年度秋季大会、函館市、函館市民会館、Oct.22-24, 2008.
- 32 日置幸介、松尾功二、チベット高原の隆起、山岳氷河の融解、重力変化、日本測地学会平成 20 年度秋季大会、函館市、函館市民会館、Oct.22-24, 2008.
- 33 Heki, K. and Y. Morishita, El Niño and La Niña signals in the GRACE time-variable gravity data, Western Pacific Geophys. Meeting, Cairns, Australia, Jul.29-Aug.1, 2008.
- 34 Ogawa, R., B.F. Chao, and K. Heki, Global water budget from atmosphere, land and ocean using GRACE data and GCM output, Western Pacific Geophys. Meeting, Cairns, Australia, Jul.29-Aug.1, 2008.
- 35 小川涼子、Benjamin F. Chao, 日置幸介、GRACE でみる全地球的な大気、陸水、海洋間の季節的および経年的な水収支について、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、幕張メッセ、千葉、May 25-30, 2008.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki>

(論文別刷りおよび本プロジェクトに関する新聞雑誌の報道がまとめられている)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日置 幸介 (HEKI KOSUKE)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：30280564

(2) 研究分担者

古屋 正人 (FURUYA MASATO)

北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：60313045

(3) 連携研究者

無し