

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05621

研究課題名(和文) 日本海の測地学的、海洋物理学的、および地震学的研究

研究課題名(英文) Geodetic, physical oceanographic, and seismological study of the Japan Sea

研究代表者

日置 幸介 (Heki, Kosuke)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：30280564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：特定の海域について、衛星重力計測(GRACE衛星)、海面高度計(JASON衛星等)、アルゴフロート(海水温度や塩分濃度のプロファイル)のデータを組み合わせ、海面高度や海水質量(海底圧力)の永年変化や季節変化が海水の熱膨張によるものか、あるいは海水質量の実際の変化によるものかを判別する手法を確立した。またそれらの結果を、当該海域に面した地域におけるGNSS地上局の変位からその海域の質量変化を推定することによって検証した。それらの手法を日本海やオーストラリア北部のカーペンタリア湾などの海域に応用し、有意な振幅をもつ海水質量の季節変化がそれらの海域で生じることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本海の海面高が20cmを超える季節変化を見せることは験潮儀等のデータから知られていた。本研究では重力衛星による海水質量計測、衛星海面高度計による海面高計測、その場観測による海水の熱膨張の推定、の三者を組み合わせその原因を探り、日本海の海面高の季節変化はその大部分が熱膨張によるものであることを示した。しかし衛星重力データはわずかながらも有意な海水質量の季節変化を示し、それに起因する海底圧力変化が日本海東縁で発生する逆断層地震が初夏に集中する原因である可能性を示した。同様の手法をオーストラリア北部カーペンタリア湾に応用し、大きな海面高季節変化が季節風の吹き寄せによるものであることを解明した。

研究成果の概要(英文)：I developed a technique to combine various sensors for a particular sea, such as the satellite gravimetry (GRACE satellites), ocean altimetry (e.g. JASON satellites), and Argo Float for in-situ measurements of the sea water temperature and salinity profiles. Combination of these data enables us to discern if the observed sea level change comes from thermal expansion or real ocean mass changes (ocean bottom pressure changes). These results were verified by comparing with seasonal or secular crustal movements measured by global navigation satellite system (GNSS) receivers deployed near the coast of the studied oceanic area. I applied the method to the Sea of Japan and the Gulf of Carpentaria, northern Australian coast, and found significant seasonal oceanic mass changes in these oceanic areas.

研究分野：固体地球物理学・測地学

キーワード：日本海 GRACE 衛星海面高度計 GNSS 季節変化 日本海東縁地震 海底圧力変化 アルゴフロート

1. 研究開始当初の背景

2002年に打ち上げられた GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 衛星は、地球重力場の多様な変化から陸水の動態や地球温暖化に伴う氷河・氷床の縮小など、主に陸域で顕著な成果を上げてきた。打ち上げ 14 年を迎え、従来信号が弱くて議論が困難だった海域の重力変化がようやく見えてきた。本研究の発端は、海域における重力の季節変化としては世界最大級の変化を、日本海で見出したことにある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、海峡での流量季節変化に起因する日本海海水質量の季節変化が、海底圧力の季節変化もたらし、それが日本海東縁のプレート境界で発生する大地震の季節変化に及ぼす影響を明らかにすることである。

3. 研究の方法

研究に必要なデータは(1)衛星重力観測データ(GRACE データ)、(2)地殻変動データ(GNSS 測位データ)、(3)海洋物理数値モデル、(4)地震データ、の 4 種類であるが、それぞれ公開データを利用する。それらを過去に開発した一次処理のプログラムで解析し、新たにいくつかのプログラムを開発することによってそれらの相互関係(たとえば海水荷重による地殻変動の計算、海水荷重が地震断層に及ぼす応力擾乱の計算等)を解明する

4. 研究成果

(1) GNSS による成果

日本海の海水質量の季節変化に伴って生じる地殻上下変動を東北日本で調べた。日本海沿岸部の地殻変動は日本海の海水質量の増減を反映するのに対して、内陸は積雪荷重の影響を反映する。Peak-to-peak の振幅は前者で約 1 cm、後者では約 2 cm に達し、また波形が後者では冬季に短期間生じる荷重によって鋭い沈降のピークを見せるのに対して、前者では一年を通じたゆるやかな変化が特徴的である。

冬季の負のピークの鋭さという感覚的な波形の違いを定量的に表すために、季節的な地殻上下変化の値が正の値を示す時期の占める割合を用いて、その分類を試みた。冬季の負のピークが鋭い内陸型ではこの値が大きくなり、逆に海洋型ではおよそ 50%となる。この結果は一概に東北日本の季節的な地殻上下変動と言っても実際は種類の異なる二種類の荷重(積雪と海水)による変動が混在していることを示唆している。

(2) GRACE による成果

GNSS の結果と比較するために、GRACE でも東北日本内陸と日本海における重力の季節変化を別々に求めて波形を比較した。重力の変化は CSR の Level-2 data、RL06 のストークス係数を用い、GSM モデルに GAD モデルの足し戻し(add back)を行った。注目すべき点として、GNSS と同様に内陸部では冬のピークが鋭く、一方日本海では冬のピークはゆるやかである。なお GNSS 局の鉛直位置と異なり、冬のピークが正の値を示すのは荷重が増える(重力が増えると)上下位置は負を示す(沈降する)からである。GNSS で見られた二種類の荷重の存在が重力からも支持されることがわかった。

(3) GRACE, 海面高度計, アルゴフロートの三種類データで見た日本海の質量変化

GRACE データを検証するために、衛星搭載海面高度計のデータとアルゴフロートによる海水温のプロファイルのデータを併用し、Sea level budget の考え方を取り入れて三者の整合性を確認した。例えば高度計で見た海水の体積の変化は、GRACE 衛星でみた海水質量の変化による分と、アルゴフロートでみる海水の熱膨張の分の合計になっているはずである。日本海の海面高の季節変化について Sea level budget が閉じるか否かを、高度計とアルゴフロートのデータを利用して調べた。

衛星海面高度計データはフランスの AVISO から取得、また英国の Hadley Centre からダウンロードしたアルゴフロートの海水温度プロファイルから熱膨張による海面高の季節変化を求めた。衛星海面高度計による海面高変化から、アルゴフロートで得られた熱膨張分を差し引いた変化が衛星重力計測(GRACE)で観測された変化に一致するか(Sea level budget が閉じるか)を議論する。図 1 にそれら三種類のセンサーによる海面高変化を共通のグラフで比較する。これらのデータが代表しているのは日本海のほぼ中心である。GRACE のみ 2011 年の前半に負のジャンプがあるのは 2011 年東北沖地震に伴う重力減少(Matsuo and Heki, 2011)であり、それは固体地球内部の質量移動に伴うものであるため、他の二つのセンサーには現れない。季節変化の振幅は海面高度計とアルゴフロートが大きく位相も良く揃っている。一方 GRACE のデータは小さな振幅を示しており夏季に最小を示すような季節変化を見せている。

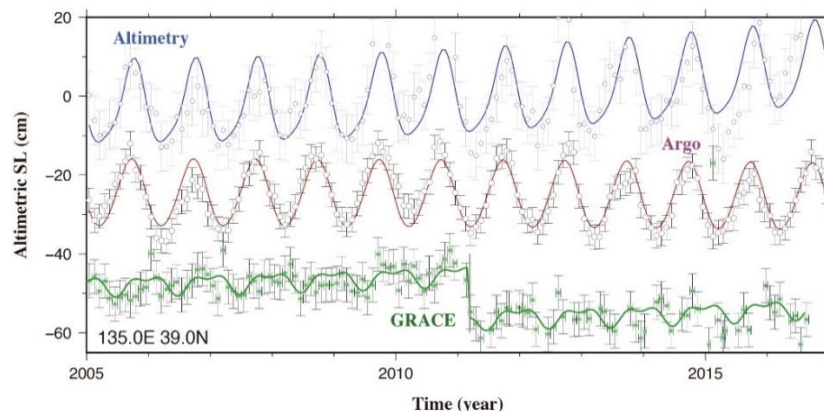


図 1. 日本海中央の点における海面高度の変化を、体積から見る海面高度計（上）、熱膨張分を見るアルゴフロート（中）、質量を見る GRACE（下）の三者で比較したものの。

このデータを用いて海面高度計からアルゴフロートを差し引いたものを GRACE と比較したのが図 2 である。まず長期的な変化に注目すると、破線の四角で囲んだ領域におけるゆっくりした上昇はいずれの時系列でも明瞭に現れている。一方 2012 年以降は、前者は引き続き上昇を見せているが GRACE ではそれほど明瞭ではない。GRACE が運用を停止する前の数年間は衛星の故障が多発してデータの質が以前に比べて良くないことも原因の一つかも知れない。

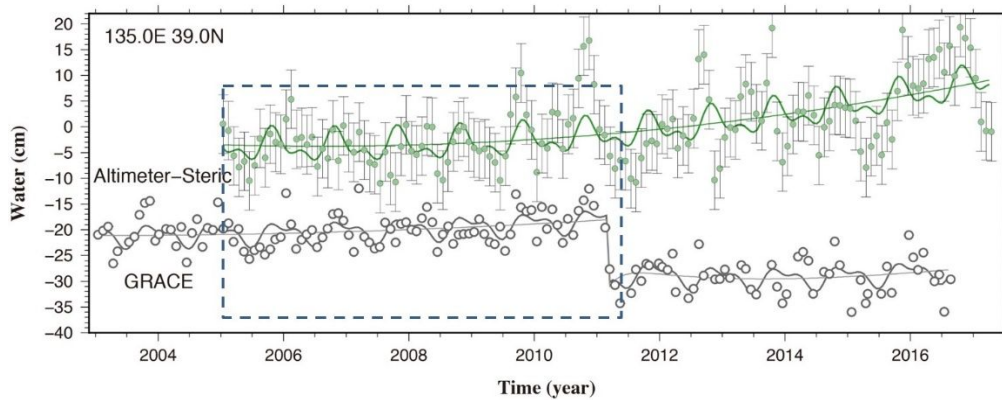


図2. 図1のデータを用いて、海面高度計から熱膨張分を差し引いたもの（上）を GRACE（下）でみた海水質量と比較したもの。Sea level budget が閉じると両者は一致する。

次に季節変化に注目して海面高度計からアルゴフロートを差し引いたもの（図では Altimeter-Steric と書いてある）と重力(GRACE)を図3に比較する。日本海の中央からやや東北日本寄りの海域の点を代表している。これらは全期間の平均的な季節変化を月ごとの値として求め、二年間の変化として表現したものである。両者ともばらつきが大きいけど最小値が夏に来ること、および peak-to-peak の振幅が 10 cm 弱であることなどの特徴は一致している。

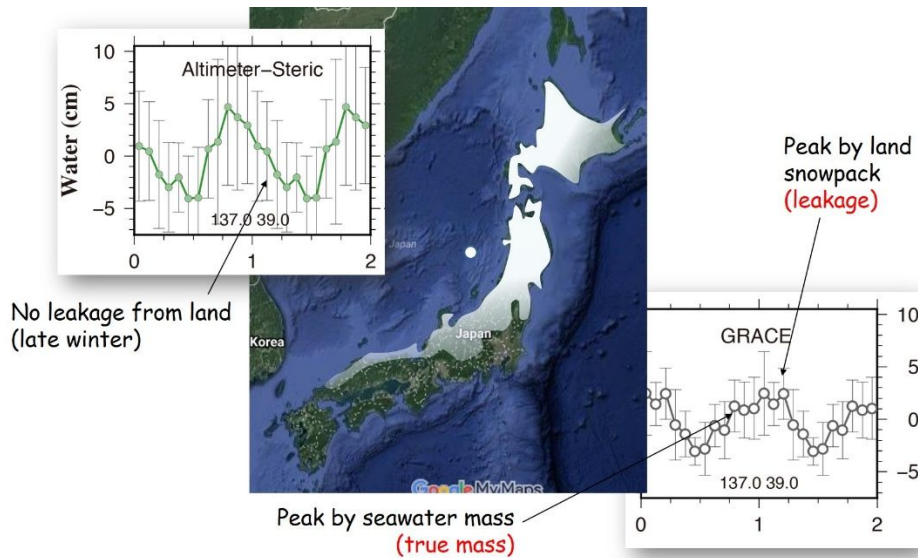


図3. 日本海の東部における、季節変化に関する Sea level budget。海面高度計から熱膨張を差し引いた左上のものと GRACE で求めた右下のものはある程度一致する。

最後に東北日本に近い日本海の点（図3の白い丸）での海面高度計からアルゴフロートを引いた季節変化と GRACE で見た季節変化の微妙な差について議論する。GRACE では三月頃まで重力は比較的高い値を保持した後に四月以降急激に減少して 5-7 月に最小値を示す。

一方海面高度計からアルゴフロートを引いた季節変化では秋の最大から夏の最小まで単調減少しており、GRACE で見られるような春先の高い値が見られない。これは同じ点を代表する値でも GRACE のデータは空間分解能が悪いため、東北日本陸地の積雪の質量の分が海洋の質量変化に漏れこんでいることを示している。GRACE は衛星高度程度の空間分解能しか持たない(300 km 程度)のに対して、衛星海面高度計もアルゴフロートもその海域のピンポイントのデータが取得できるため GRACE のような陸域の信号の漏れこみは無いのである。

(4) 日本海東縁で発生する地震の季節性の起源

最後に、明瞭な季節性を見せる日本海東縁で発生する地震と、季節性を見せない日本海溝および千島海溝で発生する地震について、これまでに得られた知見をベースにその原因を考察してみる。図 4 は日本海東縁で発生する地震の発生月の分布を、図 3 で示した日本海東部における海水質量の季節変化と比較したものである。海水の質量変化なので本来は GRACE のデータを示すべきであるが、ここでは東北日本陸地の積雪の信号の漏れこみが無い海面高度計データをアルゴフロートの熱膨張データで補正したものを示す。地震発生が集中する 5-7 月が海水質量の最小時期に一致することがわかる。日本海と太平洋を比較するにあたって重要な相違点は、半日周期の海洋潮汐 (M2 分潮) の振幅である。閉鎖的な海域である日本海はこの潮汐成分の振幅が太平洋に比べて極端に小さく peak-to-peak で約 10 cm 程度しかないことが知られている (図左上の飛鳥験潮場の約一ヶ月の潮位変化参照)。つまりこの海域では海水荷重の周期変化の振幅は、季節変化の方が潮汐よりやや大きいか同程度なのである。これが日本海東縁の地震が強い季節性を見せる原因ではないだろうか。

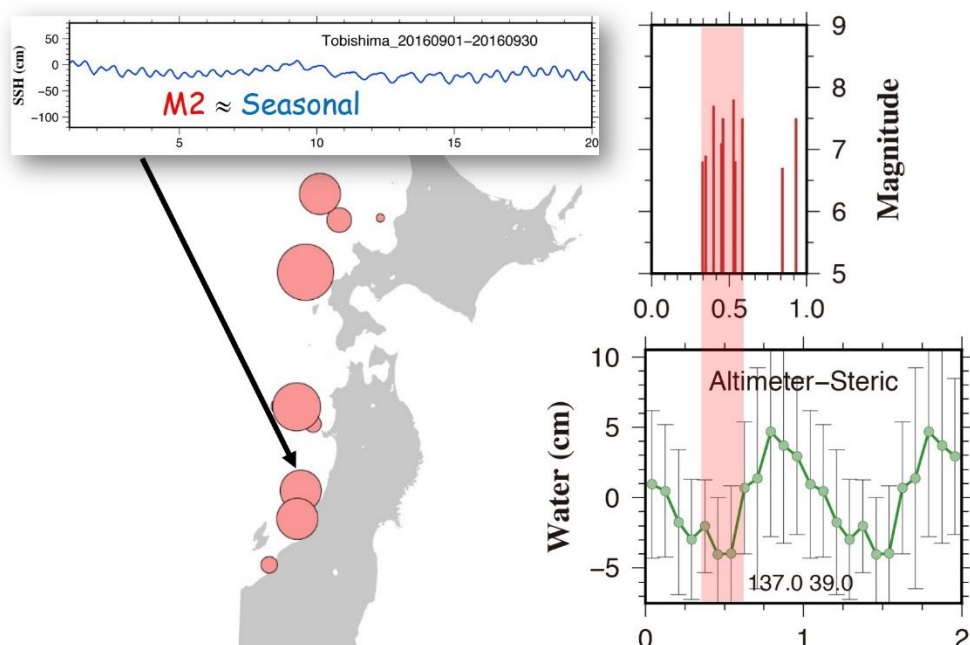


図 4. 日本海東縁における地震発生の季節性を日本海東部の海水質量変化の季節変化と比較したものである。地震が集中する 5-7 月は海水質量が最小となる季節に一致する。日本海は太平洋と異なり M2 分潮の振幅が季節変化と同じ程度かやや小さい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yi, S., C. Song, Q. Wang, K. Heki, and W. Sun	4. 巻 53
2. 論文標題 The potential of GRACE gravimetry to detect the heavy rainfall-induced impoundment of a small reservoir in the upper Yellow River	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 6562-6578
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2017WR020793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yi, S., K. Heki, and Q. Qian	4. 巻 44
2. 論文標題 Acceleration in the global sea level rise: 2005-2016	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 11905-11913
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2017GL076129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yi, S., C. Song, K. Heki, S. Kong, Q. Wang, and L. Chang	4. 巻 -
2. 論文標題 Substantial meltwater contribution to the Brahmaputra revealed by satellite gravimetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Cryosphere Discuss	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/tc-2019-211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yi, S. and K. Heki	4. 巻 221
2. 論文標題 Heterogeneous oceanic mass distribution in GRACE observations and its leakage effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 603-616
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggaa022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kosuke Heki
2. 発表標題 Seasonal crustal deformation in NE Japan and sea level budget of the Japan Sea
3. 学会等名 American Geophysical Union, 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日置幸介
2. 発表標題 日本海のSea Level Budget: GRACEとArgoと海面高度計
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doto, S. and K. Heki
2. 発表標題 Water mass variation in the Japan Sea from satellite gravimetry: Comparison with seasonal movements of GNSS stations
3. 学会等名 Japan Geoscience Union, 2017 Meeting (joint with American Geophysical Union) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doto, S. and K. Heki
2. 発表標題 Seasonal water mass variation in the Japan Sea from satellite gravimetry: Comparison with GNSS and seasonality in earthquake occurrences
3. 学会等名 IAG- IASPEI 2017 Joint Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日置幸介、道藤俊
2. 発表標題 東北日本の季節的地殻変動再訪：日本海の海水荷重と積雪荷重の変動
3. 学会等名 日本測地学会秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日置幸介
2. 発表標題 潮位と地殻変動：宇宙技術で何が変わったか
3. 学会等名 2017年度地殻変動研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳井雄太、日置幸介
2. 発表標題 衛星海面高度計記録に見る海面上昇：ARGO Float観測による熱膨張成分の推定とENSOによる短期的乱れ
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳井雄太、日置幸介
2. 発表標題 GMSLの上昇モデルからの短期的擾乱と、ENSOなどの各種気候変動との関係
3. 学会等名 日本測地学会秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳井雄太、日置幸介
2. 発表標題 オーストラリア北側の海洋での海水準変動について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tokui, Y. and K. Heki
2. 発表標題 Sea level in northern Australian coast
3. 学会等名 IUGG 27th General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳井雄太、日置幸介
2. 発表標題 オーストラリア北側海域の海面高度および海水質量の変化
3. 学会等名 日本測地学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Heki, K. and S. Yi
2. 発表標題 Seasonal crustal deformation in NE Japan and sea level budget of the Japan Sea
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 鳥海光弘他多数(研究代表者の日置幸介を含む)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 248
3. 書名 図説 地球科学の事典 第5-6章 地球重力場と時間変化	

1. 著者名 河野宣之、日置幸介	4. 発行年 2017年
2. 出版社 東海大学出版部	5. 総ページ数 124
3. 書名 動く地球の測りかた	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	易 爽 (Yi Shuang)		本研究開始時から2018年10月までJSPS外国人特別研究員として研究代表者と共同研究
研究協力者	徳井 雄太 (Tokui Yuta)		2018年4月から2020年3月まで北海道大学大学院修士課程在学(研究代表者が指導教員)