HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	超伝導重力計で観測された重力季節変化のモデル化
Author(s)	丸藤, 大樹; 名和, 一成; 高橋, 浩晃
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 86, 13-21
Issue Date	2023-03-26
DOI	10.14943/gbhu.86.13
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/88555
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/BY-NC/4.0/
Type	bulletin (article)
File Information	GBHU_86_13-21.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 86, March 2023, pp. 13 − 21
doi : 10. 14943 / gbhu. 86. 13

論説

超伝導重力計で観測された重力季節変化のモデル化

丸藤大樹[1,2]・名和一成[2]・高橋浩晃[3]
[1] 北海道大学大学院理学院
[2] 産業技術総合研究所地質調査総合センター
[3] 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

（2023 年 2 月 24 日受理）

Modeling of seasonal gravity changes observed with a superconducting gravimeter

Taiki MARUFUJI[1,2], Kazunari NAWA[2], Hiroaki TAKAHASHI[3]
[1] Graduate school of Science, Hokkaido University
[2] Geological Survey of Japan, AIST
[3] Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

（Received February 24, 2023）

Continuous gravity observation with iGrav superconducting gravimeter（#17）was carried out at the Teshikaga, eastern Hokkaido, from November 2018 to August 2022. Gravity timeseries with correction of tides, atmospheric pressure change, and polar motion indicated characteristic seasonal gravity changes from winter to spring in each year. Rate of gravity increases in the early spring in 2021 and 2022 were smaller than those in 2019 and 2020. The G-WATER[1D] software（Kazama et al., 2012）was applied to estimate the gravity change associated with underground water mass variation due to precipitation, snow cover and melting. Calculated gravity changes using parameters supposed by Yamaga and Nawa（2020）could not explain the above differences. Optimal parameters associated with infiltration process of snowmelt water and the saturated hydraulic conductivity of the soil were searched by try and error. As a result, gradual snowmelt infiltration process with an approximately one-order larger hydraulic conductivity could well explain the 4-time seasonal gravity change observed in winter to early spring.

BY-NC
この論文はクリエイティブ・コモンズ 表示－非営利 4.0 国際ライセンスの下に提供されています．なお，抄録はクリエイティブコモンズの定めるCC0（パブリック・ドメイン提供）とします．

Ⅰ．は　じ　め　に

重力の時間変化を詳細に捉えることは，地球内部の質量の移動や密度の変化に関する情報を得ることに繋がる．北海道大学や産業技術総合研究所などで構成された研究グループは，道東のカルデラ地域の精密重力観測を通してテクトニックな活動や火山活動のモニタリングを行うため，北海道大学弟子屈観測所で超伝導重力計 iGrav#17 による観測を 2018 年から 2022 年まで行った（名和ほか，2019）．iGrav は，センサー部を液体ヘリウムで極低温に冷却して超伝導状態を作り出し，超伝導物質で出来た試験球を磁気浮上させ，その位置変化から極めて高感度で安定的に重力を連続測定できる．そのため，μGal（$=10^{-8}$ m/s^2）以下の，いわゆるサブマイクロガルレベルまでの微小な重力時間変化の議論が可能である．

重力計によって捉えられる重力変化には，潮汐や気圧変化に対する応答，極運動による影響などのほか，観測点周辺の陸水の移動による成分が含まれている．例えば，神岡鉱山（東ほか，2009）や桜島（風間ほか，2014）で観測された重力季節変化は積雪や降雨などに伴う地下水の移動が原因であると示唆されている．これらの環境影響を重力データから取り除くことができれば，地殻変動や火山活動に伴う重力変化の検出が可能となる．

本研究では，弟子屈観測所の iGrav で観測した 4 年分のデータを解析することで，前半 2 年と後半 2 年で異なる冬から春先に掛けての重力変化を検出することができた．それから，観測された 4 年間の重力季節変化を再現可能な陸水重力変化モデルを構築した．陸水重力変化の計算に必要なパラメータの 1 つである飽和透水係数は，前半 2 年間のデータから山佳・名和（2020）で推定されたものよりも 1 桁大きな値が得られた．

Ⅱ．データ解析

超伝導重力計 iGrav（#17）は弟子屈観測所（東経 144.3992 度，北緯 43.4855 度，標高 201m）に設置されており，観測開始の 2018 年 11 月 13 日から観測終了の 2022 年 8 月 24 日までの約 4 年間の全データを解析した．解析に使用したデータは，北大地殻変動データベース（山口ほか，2010）に登録されており，絶対重力計との並行観測から推定したスケールファクター，－1998 μGal/V（名和ほか，2020）を掛けて，重力値に変換済みである．

以下に，重力季節変化検出までの重力補正手順を示す．短周期潮汐成分は北大地殻変動データベースに実装されている BAYTAP-G（Tamura *et al.*, 1991）を使用し補正した．気圧応答成分は，iGrav#17 付属の気圧計データと，短周期潮汐成分除去後の残差重力との相関から推定した応答係数 －0.33 μGal/hPa（山佳・名和，2020）を用いて計算し補正した（Fig. 1b）．長周期潮汐成分（Fig. 1c）と極運動効果（Fig. 1d）の補正には理論計算プログラムである GOTIC2（Matsumoto *et al.*, 2001）と Tsoft（Van Camp and Vauterin，2005）を使用した．極運動効果の計算では，IERS が公開している地球回転パラメータ（https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.

html，2023 年 2 月 24 日閲覧）を使用した．

観測期間中に 2 回の大きなステップ変化があるが，これらは期間中に発生した有感地震のタイミングで生じていた．1 回目は 2019 年 11 月 28 日の釧路沖での地震（M4.7），2 回目は 2020 年 5 月 30 日の十勝沖での地震（M5.6）の発生後にそれぞれ生じている．山佳・名和（2020）で，地震による重力変化はないと仮定して推定された 123 μGal と－140 μGal を用いてこれらのステップ変化を補正した．

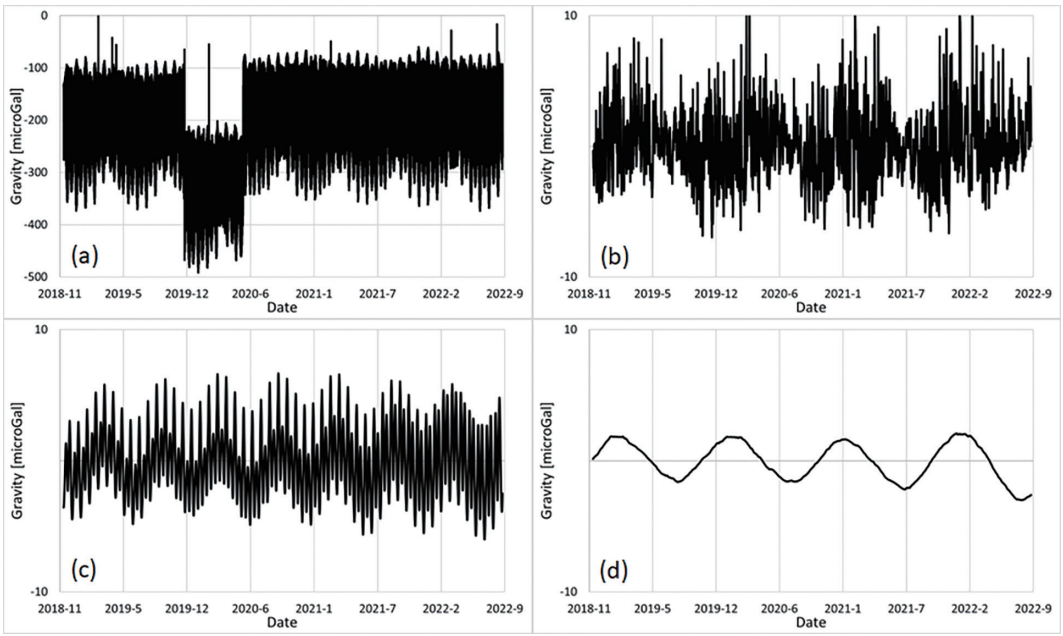

Fig. 1. Observed gravity and theoretical correction components in the period from November 2018 to August 2022. (a) Observed gravity. (b) Atmospheric pressure response. (c) Long period tides. (d) Polar motion effect.

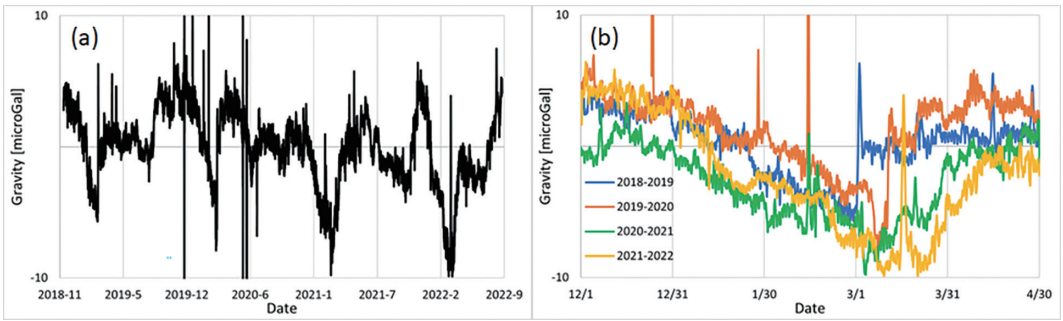

Fig. 2. Corrected gravity timeseries in 2018–2022. (a) Residual gravity timeseries with correction of tides, atmospheric pressure response and polar motion effect. (b) Gravity timeseries from December 1 to April 30 for each year.

潮汐，気圧変化，極運動の影響及び有感地震による大きなステップ変化の補正を行った後の残差重力をFig. 2aに示す．観測期間の前半2年は概ね±5 μGalの変動をしており，後半2年はより大きな±8 μGalの変動をしている．特徴的なのは，冬季4シーズンに共通して，積雪期間に緩やかに重力は減少し，春先に掛けて回復する季節変化が見られることである（Fig. 2b）．この様な季節変化は山佳・名和（2020）での2年長データの解析でも見えていた．積雪期の重力減少率は4シーズン共に1日当たり約0.08 μGalであった．しかし，山佳・名和（2020）で示された前半2シーズンの春先の重力増加は1日当たり1.4～1.5 μGalで数日間での回復であったのに対して，後半2シーズンでは1日当たり約0.25 μGalと増加率が小さく，回復までに3週間程度要していた．

Ⅲ．重力季節変化のモデル化

本研究では山佳・名和（2020）と同様に，前節までに得られた重力変化は，陸水による影響が支配的であると考え，以下で述べるような数値モデル作成を試みた．陸水重力変化の計算にはG-WATER[1D]（Kazama *et al.*, 2012）をカスタマイズして使用した．G-WATER[1D]は，陸水が地下の不飽和層を浸透する過程をシミュレートし，地下水の分布を空間積分することで重力変化を計算する．山佳・名和（2020）では，残差重力と周辺の積雪深データを比較し，重力が緩やかに減少している時期と積雪量が増加している時期が対応していることから，冬季期間は積雪底面から土壌への水の浸透が停止していると仮定した．本研究でも，各年の12月上旬から土壌への水の浸透が停止すると仮定した．浸透停止期間をそれぞれの年度でTable. 1のように設定した．

G-WATER[1D]には土壌への浸透停止・再開を操作する機能は備わっていないため，入力となる降水量データを操作して，浸透停止・再開を模擬した．まず，浸透停止期間中の降水量を0 mmに置き換えた．浸透再開後，置き換える前の降水量を一定期間（Table.1），一定の割合で土壌へ浸透させた（Fig. 3b）．積雪期間と融雪期間は気象庁アメダス弟子屈観測点（東経144.47度，北緯43.51度）で実際に観測された日別の最高気温を参考にして設定している．浸透しなかった降水は，観測所の屋根の上に融雪開始まで累積することになる．累積した降水（積雪水）が重力計を上向きに引っ張る効果を計算するため，山佳・名和（2020）が求めた比例定数－0.033 μGal/mmを使用した(Fig. 3c)．入力データとして気象庁アメダス弟子屈観測点の降水量データ(Fig. 3a)を一部編集して使用した．北大弟子屈観測所ではOnset社製の気象観測装置を用いて雨量を測定しているが，雨量センサーにはヒーターが付属しておらず積雪期の降水量を正確に記録できていないため，本研究では使用しなかった．

G-WATER[1D]の計算で必要な土壌パラメータは，飽和透水係数K_0[m/s]と最大土壌水分量θ_{max}[m^3/m^3]と最小土壌水分量θ_{min}[m^3/m^3]である．そのうち，最大土壌水分量θ_{max}と最小土壌水分量θ_{min}は現地の土壌水分計の観測値を参考にθ_{max}＝0.7，θ_{min}＝0.1　として計算を行った．それから，観測された重力季節変化を再現できるような飽和透水係数K_0を試行錯誤的に求めた．

Table 1. The periods of snow accumulating and melting used in this study.

Season	Accumulating	Melting (Yamaga and Nawa, 2020)	Melting (This study)
2018-2019	2018/12/1 ～ 2019/2/27	2019/2/28	2019/2/28 ～ 3/2
2019-2020	2019/12/4 ～ 2020/3/7	2020/3/8	2020/3/8 ～ 3/10
2020-2021	2020/12/12 ～ 2021/3/8	2021/3/9	2021/3/9 ～ 3/31
2021-2022	2021/12/17 ～ 2022/3/8	2022/3/9	2022/3/9 ～ 3/31

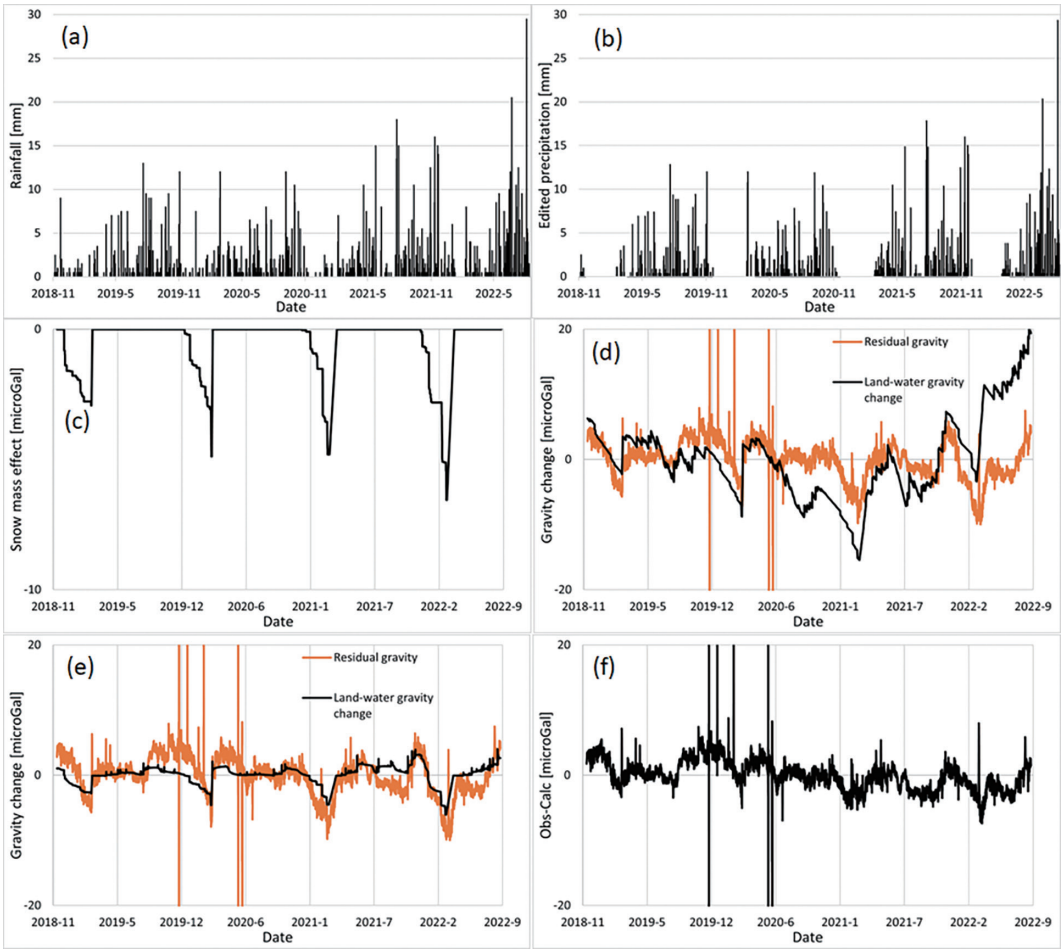

Fig. 3. Calculation of gravity change due to land-water. (a) Original hourly precipitation data at Teshikaga AMeDAS station of Japan Meteorological Agency. (b) Edited precipitation data. (c) Snow mass effect. (d) Comparison of observed and calculated gravity values. Orange and black lines are observed and calculated land-water gravity changes with $K_0=5.0\times10^{-8}$ m/s, respectively. (e) Same as Fig. 3 but with $K_0=5.0\times10^{-6}$ m/s. (f) Residual of observed minus calculated land-water gravity change.

飽和透水係数 K_0 を変化させたときの陸水重力変化の違いを Fig. 3d，e に示す．飽和透水係数 $K_0=5.0\times10^{-8}$ m/s では，後半 2 年の観測値と理論値とのずれが大きくなった．一方，飽和透水係数を $K_0=5.0\times10^{-6}$ m/s に設定すると，後半 2 年も観測値とのずれは小さくなった（Fig. 3f）．この係数を用いることで，前半 2 年と後半 2 年で傾向が異なっていた春先の重力変化も再現することができた．

Ⅳ．考　察

観測期間の前半と後半で春先の重力増加速度が異なった原因

観測が行われた 4 年間の冬の積雪水量（降水量）と，融雪期間が始まってから 1 週間の最高気温の平均値を Table. 2 に示す．1 年目（2018 年冬～ 2019 年春）は，最高気温は高くなかったが積雪水量も多くなかったため，短い期間で急速に積雪内部の構造が変わり，積雪底面から土壌への水の浸透が進んだと考えられる．2 年目（2019 年冬～ 2020 年春）は，積雪水量は多かったが気温がほかの年と比べて高かったため，1 年目と同様に積雪内部の構造の変化と土壌への水の浸透が急速に進んだと考えられる．3，4 年目は，積雪水量は多かったが融雪期の気温が高くなかったため，積雪内部の構造は緩やかに変化し，積雪底面からの水の浸透が相対的に緩やかに進んだと考えられる．積雪内部の構造の変化が急速に進むほど，土壌への水の浸透量が急激に増え春先の重力増加速度も大きくなるのであろう．このように，融雪期の重力値は，冬の積雪の状況と融雪期の気象条件に影響を受けているため，毎年変化するこれらのパラメータをモデルに組み込んで補正を行うことが必要である．

今回得られた飽和透水係数の妥当性

山佳・名和（2020）では飽和透水係数を $K_0=5.0\times10^{-8}$ m/s と設定することで，観測期間の重力変化をよく説明した．また，春先の急激な重力増加については，積雪が一気に融け，その水が土壌へ浸透すると仮定（Fig. 4a，b）することで再現した．しかし，山佳・名和（2020）と同じ方法で陸水重力変化を計算すると，後半 2 年分の重力変化を再現することはできなかった（Fig. 4c，d）．本研究では飽和透水係数 $K_0=5.0\times10^{-6}$ m/s を使用することで後半 2 年分の重力変化も概ね再現することができた．現地で観測された雨量が前半と後半の 2 年で大きく異なっていたため，前半 2 年のデータのみを使用した解析とは飽和透水係数の推定結果が異なったと考えられる．弟子屈，川湯，阿寒湖畔の気象庁アメダス観測点で得られた 2018 年から 2022 年までの年間降水量（Table. 3）を見ると，前半より多量の降水が後半で記録されていることが分かる．前半 2 年のように降水量が少ないときは透水係数が小さい土壌でも問題なく土壌への地下水の浸透は進むが，後半 2 年のように降水量が多くなると地下水の浸透が追い付かずに滞留して，結果として観測値よりも大きな重力変化が計算されたのだろう．また，弟子屈の雨量ではなく川湯の雨量を使用して陸水重力変化の計算を行った結果，4 年間の重力変化を説明するためには飽和透水係数 $K_0=1.0\times10^{-6}$ m/s が適当であった．周辺の雨量データを使用した場合でも，推定した飽和

Table 2. Total amount of snow water and the weekly average of daily highest temperature at the beginning of the snowmelt period in each winter.

Seanson	Accumulating	Accumulating water volume [mm]	Average of maximum temperature [℃]
2018-2019	2018/12/1 ～ 2019/2/27	77	2.6
2019-2020	2019/12/4 ～ 2020/3/7	128.5	6.2
2020-2021	2020/12/12 ～ 2021/3/8	126.5	3.88
2021-2022	2021/12/17 ～ 2022/3/8	172.5	3.157

Table 3. Annual total precipitation at Kawayu, Teshikaga, Akan

Year	Kawayu[mm]	Teshikaga[mm]	Akan[mm]
2018	1092.5	1058.5	1219
2019	847.5	908.5	931.5
2020	649.5	812	866.5
2021	1148.5	1329	1407.5
2022	1067.5	1342.5	1270.5

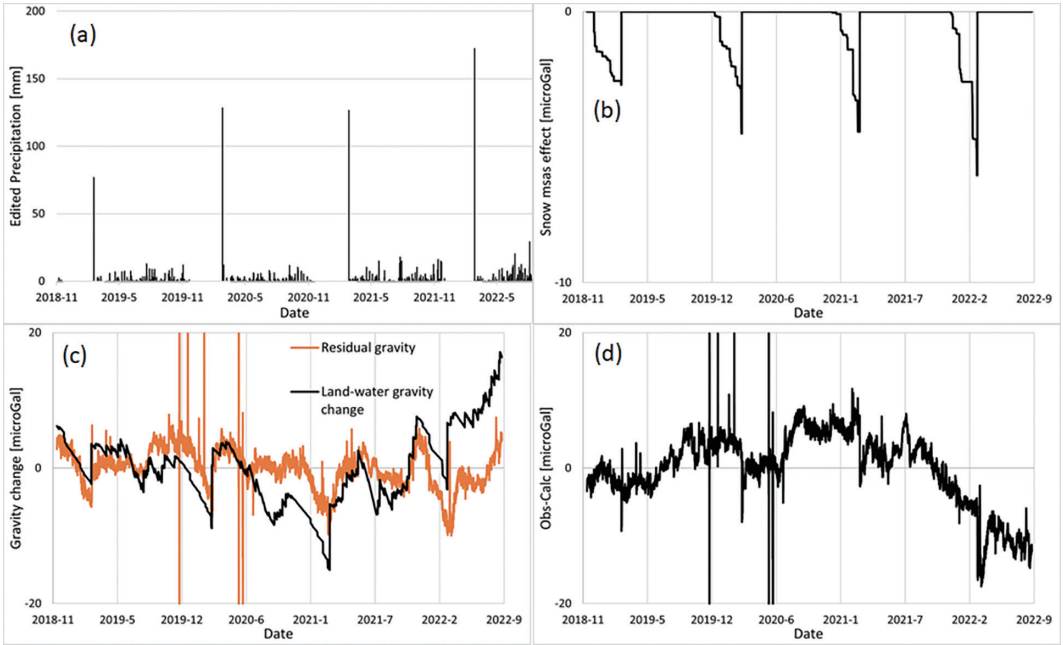

Fig. 4. Calculation of gravity change due to land-water with parameters in Yamaga and Nawa (2020). (a) Edited precipitation data. (b) Snow mass effect. (c) Comparison of observed and calculated values. Orange and black lines are observed and calculated land-water gravity changes with $K_0=5.0\times10^{-8}$ m/s, respectively. (d) Residual of observed minus calculated land-water gravity change.

透水係数のオーダーは一致した．弟子屈と川湯の雨量を使用して得られた飽和透水係数 K_0＝1.0～5.0×10^{-6} m/s は，シルトや砂層に相当する値である（杉田・田中，2009）．

飽和透水係数の推定値が山佳・名和（2020）より大きく求められた原因として，観測期間中の実際の地下水位の変化が影響していた可能性も挙げられる．山佳・名和（2020）及び本研究では，G-WATER［1D］を用いた地下水浸透による重力変化の計算の際，地下水位は常に一定であると仮定していた．重力観測点近傍で地下水位に関する調査を実施していなかったが，周辺地域の地下水位観測データや，それらを用いた水理モデルなどから近傍の地下水位を推定できれば，より実態に近い陸水重力変化の計算が可能となるだろう．

V．ま　と　め

2018 年 11 月から 2022 年 8 月まで行われていた超伝導重力計 iGrav（#17）のデータから潮汐，気圧変化，極運動による影響を補正した結果得られた重力季節変化を，陸水重力変化の計算によって再現することを試みた．山佳・名和（2020）では，積雪が融雪開始後瞬時に浸透するという仮定をしていた．しかし，その仮定と小さな飽和透水係数 K_0＝5.0×10^{-8} m/s を用いた陸水重力変化の計算では，後半 2 年の重力変化を再現することはできなかった．本研究で提案した，積雪水が一定の割合で土壌に浸透するモデルと飽和透水係数 K_0＝5.0×10^{-6} m/s を用いた陸水重力変化の計算では，後半 2 年分も含めて観測された重力変化を再現することができた．超伝導重力計の重力データを用いた高精度の議論を行うためには，積雪や融雪を含めた陸水の影響を年毎に検討する必要があることが示された．今後，観測期間中行われた絶対重力測定値（今西・西山，2020）を用いた超伝導重力計のドリフト補正や観測期間中生じたスパイク状のノイズの同定作業などを通して，定量的に飽和透水係数の妥当性を評価することが課題である．より厳密に陸水重力変化を計算して補正することで，道東カルデラ地域における火山活動やテクトニックな活動の検討が可能になると考えられる．

謝辞　本研究は JSPS 科研費 JP20K04093 の助成を受けています．また，気象庁が提供している過去の気象データ（https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php，2023 年 2 月 24 日閲覧）をダウンロードし使用しました．

文　　献

東敏博・福田洋一・田村良明・佐藤忠弘・竹本修三・早河秀章・由井智志・大橋正健・内山隆，2009．神岡鉱山における繰り返し絶対重力測定と重力季節変化，測地学会誌，55，87-93．

今西祐一・西山竜一，2020．弟子屈における絶対重力測定（2019 年および 2020 年），東京大学地震研究所彙報，95，9-13．

Kazama，T.，Y. Tamura，K. Asari，S. Manabe and S. Okubo，2012．Gravity changes associated with variations in local land-water distributions：Observations and hydrological modeling at Isawa Fan，northern Japan，Earth

Planets Space，64，309-331.

風間卓仁・山本圭吾・福田洋一・井口正人，2014．相対重力データに対する陸水擾乱補正の重要性： 桜島火山を例に，測地学会誌，60，73-89.

Matsumoto，K.，T. Sato，T. Takanezawa，and M. Ooe，2001．GOTIC2：A program for computation of oceanic tidal loading effect，測地学会誌，47，243-248.

名和一成・池田博・岡田和見・高橋浩晃・岡大輔，2019．iGrav 型超伝導重力計（#17）の道東カルデラ火山地域への移設：苫小牧から札幌・南新川を経て弟子屈へ，北海道大学地球物理学研究報告，82，19-24.

名和一成・今西祐一・西山竜一・高橋浩晃・大園真子・岡田和見・山口照寛・本田亮，2020．絶対重力計との比較による超伝導重力計のスケールファクターの推定：2019 年 9 月北海度大学弟子屈観測所において，北海道大学地球物理研究報告，83，97-101.

杉田倫明・田中正（編）・筑波大学水文科学研究室，2009．水文科学 Hydrologic Science，共立出版株式会社.

Tamura，Y.，T. Sato，M. Ooe，and M. Ishiguro，1991．A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion，Geophys. J. Int.，104，507-516.

Van Camp，M. and P，Vauterin，2005．Tsoft：graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides，Computers & Geosciences，31（5），631-640.

山佳典史・名和一成，2020．2 年間の超伝導重力計観測データから推定される道東・弟子屈の季節的・経年的重力変化，測地学会誌，66，16-22.

山口照寛・笠原稔・高橋浩晃・岡山宗夫・高田真秀・一柳昌義，2010．地殻変動データベースシステムの開発，測地学会誌，56，47-57.