

測地学および海洋学的手法を利用した南大洋における海水位・質量変動の把握

青木茂¹、青山雄一、土井浩一郎、野木義史、渋谷和雄²

¹北海道大学低温科学研究所

²国立極地研究所

Detecting sea level and mass variability in the Southern Ocean using geodetic and oceanographic methods

Shigeru Aoki¹, Yuichi Aoyama, Koichiro Doi, Yoshifumi Nogi and Kazuo Shibuya²

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

²National Institute of Polar Research

Sea level and mass variabilities in Antarctica have global impact and central problem in Earth science. Geodetic and oceanographic methods, such as GPS and bottom pressure gauge (BPG), are useful in detecting these signals. Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) has contributed much to this area, with its long-term observations of BPG tide gauge, invention of GPS tide gauge, and implementation of deep-ocean bottom BPG. Here we review the progress, present state, and achievement with these methods and studies. Further development of the stable platform will merit the measurement of sea level and understanding of long-term changes of sea level and mass budget in the Southern Ocean.

数十年スケールや数百年スケールの海水位変動の実態を明らかにすることは現在の地球科学における最重要課題の一つである。中でも極域は、氷床と海洋間の水の移動や、その移動の結果として生じる地殻の応答により、地球規模で海水位変化のドライビングフォースとなっている。また、海面高度計以前の験潮所潮位計により観測される水位は地面に対する海面の相対的変化を測定しているため、地殻変動の正確な理解なくしては絶対的な海水位変動の把握が困難であるという現実的な要請もある。南極域は、このような水質量収支の移動やそれに伴う地殻隆起の舞台として本質的に重要な地域であり、ここでの長期にわたる海水位や質量分布の精密な観測が望まれる。

昭和基地では、圧力計を用いた水位観測が1960年代から行なわれており、データの蓄積としてはFaraday/Vernadskyに次ぐ長さを誇るが、初期の観測には測器センサーのドリフトの問題やその設置地点・設置形態などに様々な問題点があった。また冬季海氷に閉ざされる条件から、独立した比較観測による十分な精度評価が困難であった。1990年代後半からのGPSの本格運用により、こうした状況に進展がもたらされた。GPSを利用した海氷上からの水位変化の観測は、圧力計により得られる結果のCalibration/Validationとして有用性を実証した。二周波干渉測位により数分周期から季節周期にいたる海面変動が互いに十分な精度で観測できることが示された(Aoki et al., 2000; 2001; 2002; 2004)。また単独測位でも潮汐成分の決定が可能であることが明らかになった(King and Aoki, 2003)。時間変化以外にも、海面高度の空間的な分布の把握にも適用できる(Doi et al., 2002)。このようにGPSによる高度観測の原理的な有効性は十分に確かめられたが、近年ではGPSを搭載するプラットフォームの開発が進み、実用面でも前進している。GPSブイによる開水面での連続観測にも成功している。ただし、昭和基地近傍西ノ浦のように夏期と冬期で海氷状況が著しく変化する環境下では、一年を超える時間規模でミリ精度の安定した観測をするのは現在でも難しい。今後は、長期的な水位変動の把握を目指し、圧力計観測と組み合わせて、いかにして安定的なプラットフォームによる絶対測位に移行できるかが、次なる飛躍に向けた大きな鍵を握る。

昭和基地での水位観測が南極海の水位変動研究に果たした貢献は大きい。潮汐研究はJAREのごく初期から実施されていたが、Odamaki et al.(1991)は季節的な水位変動の特性を明らかにした。Ohshima et al. (1996)は、数日から十数日程度の時間スケールで、卓越風や流れとの対応関係を明らかにした。その後、季節内スケールでは、昭和基地沿岸を含む南極沿岸の水位はどこでもほぼ同時に応答し、その応答は環状モードの変化と対応していること(Aoki, 2002; Kusahara and Ohshima, 2009)、また南極周囲の海盆では環状モードと関連した海盆モードが卓越することも分かった(Iijima et al., 2009)。一方、西の浦における観測にみられるより長期スケールの変動として、 -4.5mm/yr や約 -12mm/yr といった顕著な低下傾向が報告されている(Odamaki et al., 1991; Michida et al., 2004)。しかしながら、この評価の誤差も含めて、その原因はよく分かっていない。従来の地殻隆起量の評価としては幾つかの氷床モデルに基づき $0.5\text{-}2\text{mm/yr}$ という見積もりがあり(James and Ivins, 1998)、1990年代後半から2000年代にかけてのGPS観測で得られている鉛直変位の値は 0.1mm/yr 程度と極めて小さい。SAMの増加傾向で説明できる部分は、Aoki(2002)の季節内スケールでの関係が中長期スケールに適用できるとして見積もるとワンオーダー小さい。長期的な海水位変動傾向の把握と理解という重要な課題は、未だに大きな問題として残されている。

海水位変動と密接に関連する質量変化を捉えるために、衛星重力計が有効な手段として実用化された。これに呼応して JARE でも昭和基地沖の外洋域(4500m 深)に海底圧力計が設置され、2004 年の 12 月から観測が継続されている。Hayakawa et al.(2012)は季節スケールから季節内スケールの圧力変動を見出し、GRACE による重力変化との整合性や順圧数値実験の結果との一致が得られており、海底圧力計観測の有効性を実証した。しかしながら、ここでも圧力計の中長期応答特性のため、長期的な変動を捉えるのは現在のところ容易ではない。なお、南極海の底層では 1990 年代以降全般的に、底層水水温の上昇と層厚の縮小が観測されている(Purkey and Johnson, 2012)。JARE で継続している海底圧力計のプラットフォームには高精度の水温計(Seabird SBE-37)も取り付けられており、これにも 6 年間で 0.02°C 程度の水温上昇傾向が捉えられている。この現象の原因はまだ明らかではないが、氷床質量変動との関連性を考えるうえでは、こうした付随的なアプローチによる多面的な理解も有効であろうと考えられる。

近年の南極氷床融解の加速に関する報告もあり、海水位・質量変化観測の重要性は増大している。海洋の塩分分布にも氷床変動の影響と考えられる特徴が見られ始めている。こうした中、GPS や海底圧力計による観測手法のさらなる発展が寄与できる余地は大きい。現在では精密 GPS 観測は氷河上の観測でも不可欠な手段となり、JARE53 ではラングホブデ氷河の上でも観測がなされたが、棚氷上に多点展開してデータ伝送ができれば、海洋と氷河の相互作用の理解に資する上、接地線を導出するうえでも有用である。またさまざまな場所での潮汐観測により潮汐モデルの改良につながる。多点展開にはより容易で堅固な設置手法とデータ伝送手段の開発が望ましい。海底圧力計も同様に設置やデータ回収手続きの簡略化や観測機材そのものの回収を不要にできれば、観測網の多点展開はかなり現実的になる。これらは数値実験結果の検証を通じて、数値モデルの改良に貢献する。いずれにしても、中長期的な変動把握へ向けたプラットフォーム全体としての精度・安定度の向上への取り組みが、これらの手法のさらなる可能性をひきだすものと考えられる。

References

- Aoki, S.: Coherent sealevel response to the Antarctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.29 (12), 10.1029/2002GL015733, 2002.
- Aoki, S., T. Ozawa, K. Doi, and K. Shibuya: GPS observation of the sea level variation in Lutzow-Holm Bay, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27(15), 2285-2288, 2000.
- Aoki, S., T. Ozawa, K. Shibuya, and A. Masuyama: Ocean tide observed with differential GPS technique in Lutzow-Holm Bay, Antarctica. *J. Geod. Soc. Japan*, Vol. 47,(1), 181-186, 2001.
- Aoki, S., K. Shibuya, A. Masuyama, T. Ozawa, and K. Doi: Evaluation of seasonal sea level variation at Syowa Station, Antarctica, using GPS observations, *Journal of Oceanography*, Vol.58, 519-523, 2002.
- Aoki, S., K. Shibuya, and K. Doi: Combined utilization of GPS and bottom pressure gauge in landfast ice region around Antarctica. *Proceedings of OCEANS'04/TECHNO-OCEAN'04*, 1644-1648, IEEE Catalog Number 04CH37600C/ ISBN:0-7803-8670-1, 2004.
- Doi, K., N. Seo, S. Aoki, and Kazuo Shibuya: Sea surface height determination by GPS in sea ice region of Lutzow-Holm Bay, Antarctica. *Polar Geosci.*, 15, 104-111, 2002.
- Hayakawa, H., K. Shibuya, Y. Aoyama, Y. Nogi, and K. Doi, Ocean bottom pressure variability in the Antarctic Divergence Zone off Lutzow-Holm Bay, East Antarctica, *Deep-Sea Research I*, 60, 22-31, 2012.
- James, T.S., and E.R. Ivins (1998): Predictions of Antarctic crustal motions driven by present-day ice sheet evolution and by isostatic memory of the Last Glacial Maximum. *J. Geophys. Res.*, 103, 4993-5017.
- King, M., and S. Aoki: Tidal observations on floating ice using a single GPS receiver. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 30 (3), 10.1029/2002GL016182, 2003.
- Michida, Y., A. Tateoka, H. Kinoshita, M. Namiki and M. Odamaki, Long-term and seasonal changes of the mean sea level at Syowa Station, Antarctica, from 1981-2000, *Polar Meteorol. Glaciol.*, 18, 19-29, 2004.
- Odamaki, M., Y. Michida, I. Noguchi, Y. Iwanaga, S. Ikeda, and K. Iwamoto, Mean sea-level observed at Syowa Station, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, 5, 20-28, 1991.
- Ohshima, K.I., T. Takizawa, S. Ushio, and T. Kawamura: Seasonal variations of the Antarctic coastal ocean in the vicinity of Lutzow-Holm Bay. *J. Geophys. Res.*, 101, 20,617-20,628, 1996.
- Purkey, S., and G. Johnson, Global contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s. *J. Climate*. doi:10.1175/JCLI-D-11-00612.1, in press.