

4. グリーンランド氷床における近年の急激な雪氷質量損失 —現地観測と数値モデルによるメカニズム理解の試み—

庭野 匡 思*

1. はじめに

地球上で二番目に大きな氷床であるグリーンランド氷床 (Greenland Ice Sheet ; GrIS) では、1990年代以降、海洋へ流出する融解水や氷体の量が増加して雪氷質量損失が加速度的に進行しており (e.g., Rignot *et al.* 2008 ; van den Broeke *et al.* 2009), 全球規模の海水準変動に重要な影響を与えていると考えられている。2012年7月12日前後には、氷床上の90%以上の領域において表面融解が引き起こされる (衛星観測による推定結果) という記録的なイベント (Nghiem *et al.* 2012) が発生して耳目を驚かせたことも記憶に新しい。本稿では、GrISにおける近年の急激な雪氷質量損失のメカニズムを大気-雪氷相互作用の観点から理解する試み (特に現地観測と数値モデリング) の最新動向について紹介する。

2. 雪氷質量の変化とは?

氷床上の雪氷質量 (以下, “質量” と略す) の変化 (Mass Balance; MB) は、大気-雪氷相互作用の帰結である表面質量収支 (Surface Mass Balance ; SMB = Precipitation - runoff - sublimation - evaporation) と氷床流動による氷体の海洋への流出 (Discharge ; D) のバランスによって決まる (MB = SMB - D)。IPCC AR5 (The Intergovernmental Panel on Climate Change's Fifth Assessment Report) が発表された時点では、SMBの減少率の絶対値とDの増加率がほぼ同等であると考えられていたが、近年ではその状況が一変して、SMBの減少率

の絶対値がDの増加率を大きく凌駕し始めていることが指摘されている (Enderlin *et al.* 2014 ; Andersen *et al.* 2015 ; van den Broeke *et al.* 2016)。そのため、現在は、SMBに関わる物理量の実態把握の重要性が未だかつてなく高まっている状況にあると言える。以下では、そのSMBに焦点を当てて議論を進める。

3. SMBに関わる物理量の現地観測

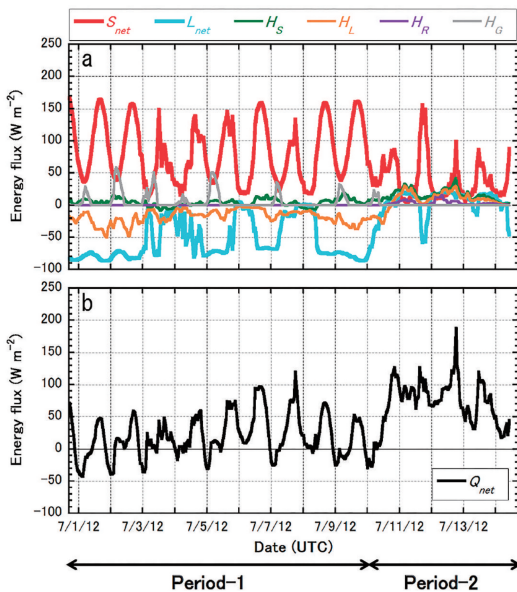
GrISにおけるSMBと関連する地上気象要素の直接測定は、自動気象観測装置 (Automated Weather Station ; AWS) や雪尺 (積雪の深さを読み取ることを目的にして雪面から差し込まれた細い棒) (日本雪氷学会 2014) によってなされてきた。Steffen and Box (2001) は、18個のAWSから構成されるGreenland Climate Network (GC-Net) を主に氷床内陸において構築した。Ahlstrøm *et al.* (2008) は、Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet (PROMICE) と呼ばれるAWS群を沿岸域に設置し、一部のサイトでは雪尺測定も並行して実施している。最近では、Aoki *et al.* (2014) が、そのアクセスの悪さから気象・雪氷に関わる実態把握が十分になされていなかったGrIS北西部に2つのAWSを設置した。それらはSIGMA (Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic)-A、及びSIGMA-Bと呼ばれ、2012年の夏から現在にかけて高品質な観測データを取得し続けている。

現地観測データが貴重な測定事実を伝えた例を紹介する。前述の2012年7月12日前後の記録的な表面融解イベントにおいては、氷床内陸部の高所に位置するSummit Station (標高3216 m) においても表面融解が検知された。これは、Summit Stationに設置され

* 気象庁気象研究所。
mniwano@mri-jma.go.jp
© 2019 日本気象学会

たAWSの測定結果に基づく。なお、同地点で過去に実施されたアイスコア掘削の結果を参照すると、顕著な融解がSummit Stationで引き起こされたのは実に1889年以来とのことである (Nghiem *et al.* 2012)。ちょうど同じ頃 (6月下旬～7月中旬)、SIGMA-A サイト (標高1490 m) では、我々日本の観測隊が気象・雪氷現地集中観測を実施中であった (Aoki *et al.* 2014)。現地では、6月末から7月9日にかけて (Period-1とする) 基本的に晴れ基調の良い天気であったが、7月10日から14日にかけて (Period-2とする) は暖気を伴う下層雲が断続的に流入して時に激しい雨も観測された。表面融解に起因する積雪深の急激な低下も7月10日以降観測された (Niwno *et al.* 2015)。第1図に、AWSで取得された気象データと積雪変質モデルSMAP (Snow Metamorphism and Albedo Process) (Niwno *et al.* 2012, 2014) を組

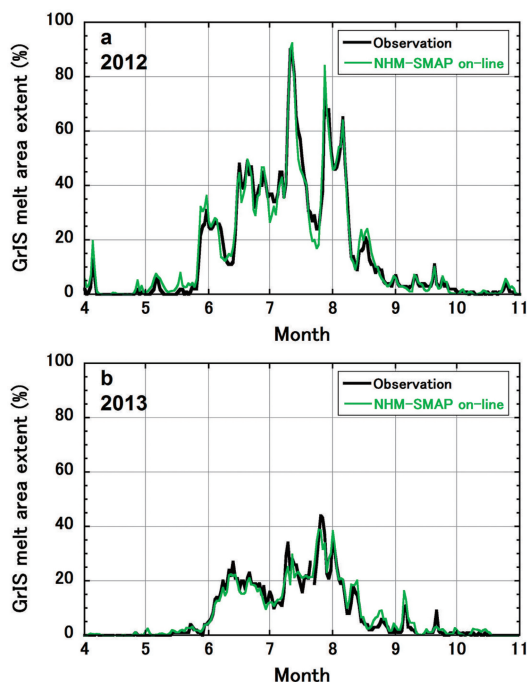
み合わせて計算された集中観測期間中の雪面熱収支の時間変化 (Niwno *et al.* 2015) を示す。Nghiem *et al.* (2012) が報告した7月12日前後の記録的な表面融解イベント期間中 (Period-2) には、短波放射収支がPeriod-1と比べて明らかに減少したものの、対照的に長波放射収支が大きく増加して、結果的に正味の雪面熱収支 Q_{net} は継続的に正の値を維持している。このことから、暖かな下層雲の流入に伴う下向き長波放射の増加が下向き短波放射の減少を凌駕し、その結果、SIGMA-A サイトで観測された表面融解・積雪深減少に対して大きな影響を与えたことが明らかにされた。従来、近年のGrISにおける融解量の増加は、夏期の北大西洋振動の強化によるGrIS上空での高気圧性循環の強化と、それに伴う雲量の減少によって説明されることが多かった (Box *et al.* 2012) が、Niwno *et al.* (2015) が示した結果は暖気を伴う下層雲がGrISの表面融解を加速させる可能性を示すものである。しかし、近年のGrISにおける雪氷表面融解とその帰結としてのSMB減少に対する雲の影響は依然として不明な点が多く (van den Broeke *et al.* 2016)、更なる研究が必要である。



第1図 2012年6月30日から7月14日にかけてのSIGMA-Aサイトにおける雪面熱収支 (1時間値)。(a) 短波放射収支 (S_{net})、長波放射収支 (L_{net})、顕熱 (H_s)、潜熱 (H_l)、降水による供給熱 (H_R)、雪中伝導熱 (H_G) を示す。フラックスの符号は雪面に向かう向きを正とする。(b) 正味の雪面熱収支 (Q_{net}) の時間変化。 Q_{net} が正の場合には雪面は加熱されるが、負の場合は雪面冷却が引き起こされる。Niwno *et al.* (2015) より。© European Geosciences Union

4. 数値モデルによるSMB推定

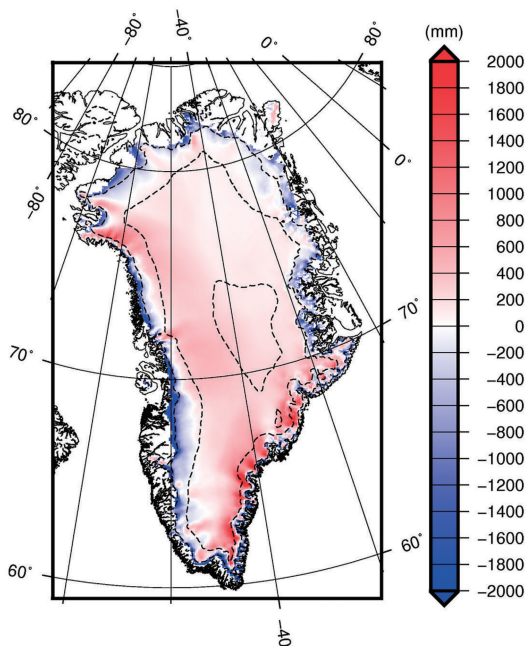
前節で現地観測の重要性を概観したが、AWSや雪尺観測はあくまでもポイント観測であり、広大なGrISに存在する様々な気候帯を十分にカバーしているとは言い難いのが実情である。また、低温条件の過酷な観測環境下では測器のトラブルが付き物であり、高品質な観測を途切れなく継続することは多大な困難を伴う。そこで、SMBに関わる物理量の面的かつ時間的に詳細な情報を提供するために、気候モデルの活用が図られてきた。現在、GrISにおける大気・雪氷物理状態の再現性は、依然として全球気候モデルよりも領域気候モデルに分があると考えられており (Yoshimori and Abe-Ouchi 2012)、ベルギーのMAR (Fettweis 2007) やオランダのRACMO2 (Noël *et al.* 2015) といった領域気候モデルが信頼性の高いモデルとして認識され頻繁に使用されている。しかし、Vernon *et al.* (2013) が報告した通り、MARやRACMO2を含む既存の領域気候モデルによるSMBの推定結果の間には大きなバラつきが存在している。このため、GrISにおけるSMB推定結果の定量的妥当性に関しては統一的な見解を得るには至っていない。



第2図 (a) 2012年と (b) 2013年のGrIS 日別表面融解域の観測とモデルの比較結果。観測データはMote (2014) から与えた。Niwano *et al.* (2018) より。
© European Geosciences Union

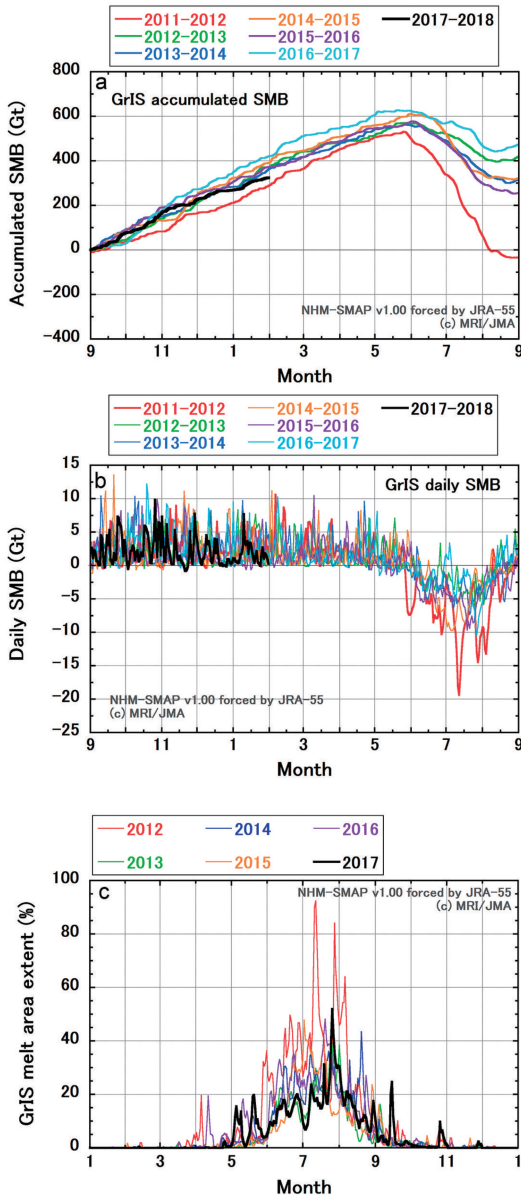
そこで我々は、GrIS SMB 推定の不確定性低減に貢献するために、水平解像度 5 km の NHM-SMAP と呼ぶ日本発の新たな領域気候モデル (Niwano *et al.* 2018) を開発することとした。大気部分は気象庁非静力学モデル JMA-NHM (Saito *et al.* 2006; Hashimoto *et al.* 2017) によって計算され、雪氷物理状態の時間変化は積雪変質モデル SMAP (Niwano *et al.* 2012, 2014) によって計算される。現バージョンの NHM-SMAP では、大気モデルの側面境界条件として気象庁の最新の再解析データ JRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015) を与えている。NHM-SMAP が持つ (他の極域向け領域気候モデルにない) 主な利点は、非静力学大気モデルを用いることによってより現実的な雲が表現出来るようになることと、詳細な積雪変質モデル SMAP を用いることによって積雪アルベドと雪氷内部融解水移動計算が精緻化されている点である。

以下では、NHM-SMAP 最新版の計算精度の一端を紹介する。第2図は、2012年と2013年のGrIS表面



第3図 NHM-SMAP によって計算された2011年9月から2012年8月にかけてのGrIS年積算SMB。点線は、標高1000, 2000, 及び3000 mの等高線を示す。

融解域の変化の様子について、衛星観測から得られた結果 (Mote 2014) と NHM-SMAP 計算結果を比較して示す。得られた決定係数は0.97 (2012年) 及び0.94 (2013年) と、モデルは観測された特徴を非常に良い精度で再現していた。特筆すべき点は、NHM-SMAP が前述の2012年7月12日前後の記録的な表面融解イベントを良く再現していることである (第2図a)。また、相対的に寒冷であった2013年についても観測結果で見られる変化傾向にモデルは良く追隨している (第2図b)。この結果は、NHM-SMAP の計算結果をGrISにおける近年の急激な気候変動のメカニズム理解の研究に供することが出来る可能性を示唆する。一方で、モデルの改善すべき課題も明らかになっている。第3図に、NHM-SMAP によって計算された2011年9月から2012年8月にかけて (1質量収支年) のGrIS年積算SMBを示す。南東部で涵養量が多い点や南西部から北部にかけての沿岸域で消費量が多くなっているといった定性的な特徴については多くの先行研究で得られている知見に合致する。しかし、特に南部沿岸域において観測されている急激な表面質量の減少についてはモデルは十分に再現出来ていないことが



第4図 NHM-SMAPによって計算されたGrISにおける (a) 2011年から現在にかけての9月を起点とする年積算SMB, (b) 2011年から現在にかけての日積算SMB, 及び (c) 2012年から現在にかけての日別表面融解域。

確認されている (SMB については, モデルが特に南部沿岸域において過大評価傾向) (Niwano *et al.* 2018). この主要因は, クリオコナイトに代表される雪氷微生物 (Takeuchi *et al.* 2014) の活動をモデルの中で考

慮することが出来ておらず, 結果として, GrIS 南部で近年広がりを見せている所謂暗色域を再現することが出来ていないことにあると考えられる. 今後は, SMAP に組み込まれている積雪アルベド物理モデル (Aoki *et al.* 2011) において雪氷微生物の影響を陽に評価することを可能にするなど更なるモデル高度化に取り組むと同時に, モデルの精度評価結果をより多角的な観点から積み重ねてモデルの信頼性向上に努める必要がある.

本節の最後では, NHM-SMAP を GrIS における (SMB の変化を含む) 気候変動モニタリングに活用する可能性について議論する. 第4図に, 既に可能となっている NHM-SMAP 準リアルタイム計算によって推定された2011年から現在にかけての質量収支年毎の年積算・日積算 SMB の結果と, 2012年から現在にかけての日別表面融解域の変化を示す. 図によると, 2016-2017質量収支年は2011年以降で最も涵養量が多いと推定されており (第4図 a), それは特に2016年10月と2017年7月の例年のない涵養量の多さに起因していた (第4図 b). 2016年10月の涵養量の多さについては, 北大西洋上を北進してきたハリケーン Nicole の動きに大きく影響を受けていた. また, 涵養量が多い (つまり, 表面付近の雪氷が融解をほとんど経験していない) ことに関連して, 2017年における GrIS 表面融解域の広がりは近年でも特に少ない状況にあった可能性が示されている (第4図 c). 一方で, 2017-2018質量収支年は, 涵養量が2011-2012質量収支年以来の少なさとなっている可能性が示唆されている. 2011-2012質量収支年の夏は, 前述の通り記録的な表面融解イベントとその帰結としての急激な質量損失が引き起こされており, これから夏にかけての GrIS の気候変動には大いに注目していく必要があると考えられる. 将来的には, 2012年の記録的な表面融解イベントなどに相当する顕著なイベントの発生を NHM-SMAP 準リアルタイム計算結果から抜かりなく検知することに努め, イベントを認め次第すぐに次の行動 (機動的な観測実施やモデル計算結果の解析) に移ることを可能とする体制を構築したい.

5. おわりに

GrIS における近年の急激な雪氷質量損失メカニズム理解の試みは依然として道半ばである. 新しいタイプの観測手法の創出や更なるモデル高度化に絶え間なく取り組み続けることが必要不可欠である. 更に, そ

ここで得られた知見を、気候変動の将来予測を行う地球システムモデルなどに随時フィードバックしていくことも今後の重要な課題と言えよう。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP16H01772, JP15H01733, JP17K12817), 宇宙航空研究開発機構共同研究, 環境省地球環境保全試験研究費, 北海道大学低温科学研究所共同研究, 及び文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム (領域テーマC) の助成を受けた。

参 考 文 献

- Ahlström, A. P., P. Gravesen, S. B. Andersen, D. van As, M. Citterio, R. S. Fausto, S. Nielsen, H. F. Jepsen, S. S. Kristensen, E. L. Christensen, L. Stenseng, R. Forsberg, S. Hanson and D. Petersen, 2008: A new programme for monitoring the mass loss of the Greenland ice sheet. *Geol. Surv. Den. Greenl. Bull.*, **15**, 61–64.
- Andersen, M. L., L. Stenseng, H. Skourup, W. Colgan, S. A. Khan, S. S. Kristensen, S. B. Andersen, J. E. Box, A. P. Ahlström, X. Fettweis and R. Forsberg, 2015: Basin-scale partitioning of Greenland ice sheet mass balance components (2007–2011). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **409**, 89–95.
- Aoki, T., K. Kuchiki, M. Niwano, Y. Kodama, M. Hosaka and T. Tanaka, 2011: Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, **116**, D11114, doi: 10.1029/2010JD015507.
- Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi and H. Motoyama, 2014: Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) Project in Greenland in 2011–2013. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 3–20.
- Box, J. E., X. Fettweis, J. C. Stroeve, M. Tedesco, D. K. Hall and K. Steffen, 2012: Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers. *Cryosphere*, **6**, 821–839.
- Enderlin, E. M., I. M. Howat, S. Jeong, M.-J. Noh, J. H. van Angelen and M. R. van den Broeke, 2014: An improved mass budget for the Greenland ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 866–872.
- Fettweis, X., 2007: Reconstruction of the 1979–2006 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate model MAR. *Cryosphere*, **1**, 21–40.
- Hashimoto, A., M. Niwano, T. Aoki, S. Tsutaki, S. Sugiyama, T. Yamasaki, Y. Iizuka and S. Matoba, 2017: Numerical weather prediction system based on JMA-NHM for field observation campaigns on the Greenland ice sheet. *Low Temp. Sci.*, **75**, 91–104.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Mote, T. L., 2014: MEASURES Greenland Surface Melt Daily 25 km EASE-Grid 2.0, Version 1. Boulder, Colorado, USA., NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, doi: 10.5067/MEASURES/CRYOSPHERE/nsidc-0533.001.
- Nghiem, S. V., D. K. Hall, T. L. Mote, M. Tedesco, M. R. Albert, K. Keegan, C. A. Shuman, N. E. DiGirolamo and G. Neumann, 2012: The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20502, doi:10.1029/2012GL053611.
- 日本雪氷学会, 2014: 新版雪氷事典. 日本雪氷学会, 307 pp.
- Niwano, M., T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka and Y. Kodama, 2012: Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.*, **117**, F03008, doi:10.1029/2011JF002239.
- Niwano, M., T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka, Y. Kodama, S. Yamaguchi, H. Motoyoshi and Y. Iwata, 2014: Evaluation of updated physical snowpack model SMAP. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 65–78.
- Niwano, M., T. Aoki, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Kuchiki and H. Motoyama, 2015: Numerical simulation of extreme snowmelt observed at the SIGMA-A site, northwest Greenland, during summer 2012. *Cryosphere*, **9**, 971–988.
- Niwano, M., T. Aoki, A. Hashimoto, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Fujita, A. Tsushima, Y. Iizuka, R. Shimada and M. Hori, 2018: NHM-SMAP: spatially and temporally high-resolution nonhydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet. *Cryosphere*, **12**, 635–655.
- Noël, B., W. J. van de Berg, E. van Meijgaard, P. Kuipers Munneke, R. S. W. van de Wal and M. R. van den Broeke, 2015: Evaluation of the updated regional climate model RACMO2.3: summer snowfall impact

- on the Greenland Ice Sheet. *Cryosphere*, **9**, 1831-1844.
- Rignot, E., J. E. Box, E. Burgess and E. Hanna, 2008: Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20502, doi:10.1029/2008GL035417.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and K. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
- Steffen, K. and J. E. Box, 2001: Surface climatology of the Greenland ice sheet: Greenland Climate Network 1995-1999. *J. Geophys. Res.*, **106**, 33951-33964.
- Takeuchi, N., N. Nagatsuka, J. Uetake and R. Shimada, 2014: Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 85-94.
- van den Broeke, M. R., J. Bamber, J. Ettema, E. Rignot, E. J. O. Schrama, W. J. van de Berg, E. van Meijgaard, I. Velicogna and B. Wouters, 2009: Partitioning recent Greenland mass loss. *Science*, **326**, 984-986.
- van den Broeke, M. R., E. M. Enderlin, I. M. Howat, P. Kuipers Munneke, B. P. Y. Noël, W. J. van de Berg, E. van Meijgaard and B. Wouters, 2016: On the recent contribution of the Greenland ice sheet to sea level change. *Cryosphere*, **10**, 1933-1946.
- Vernon, C. L., J. L. Bamber, J. E. Box, M. R. van den Broeke, X. Fettweis, E. Hanna and P. Huybrechts, 2013: Surface mass balance model intercomparison for the Greenland ice sheet. *Cryosphere*, **7**, 599-614.
- Yoshimori, M. and A. Abe-Ouchi, 2012: Sources of spread in multimodel projections of the Greenland ice sheet surface mass balance. *J. Climate*, **25**, 1157-1175.
-