

2013年春季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告

—両極の氷床変動に関連する最近の研究・最近の日本の寒冬に関する討論—

1. はじめに

温暖化の下、広大な東南極氷床の地上気温からは明瞭な長期トレンドは検出されていない。それでも東南極の沿岸域の氷床の厚みが減少していることは広く観測されている。氷床厚減少の要因の一つに、氷床縁部からの氷山の離脱による氷床流動の加速がある。氷山の離脱は海水準を上げる典型的なプロセスであるが、南極底層水の生産量を変えることによって海洋大循環にも影響する可能性が示唆されている。一方、北極では、温暖化増幅と協調したグリーンランド氷床の融解が早くから関心を集めてきた。前年(2012年)の夏に日本の観測隊がグリーンランドに入った日に氷床上を流れる川が撮影され反響を呼んだ。グリーンランド氷床の衛星画像には、その日本の観測隊が活動した西側斜面に色のついた領域が広がっている。そこではアルベドが下がり融解が加速されている可能性がある。研究会の前半には、両極の氷床の変動に関連した新しい観点の研究について講演をいただいた。

北極海の海水面積は、前年の夏に最小記録を更新した。暖くなる北極に対して、日本では寒冬の頻度が近年多くなっているのではないかという言葉に耳にするようになった。2012/13年の冬季も寒冬となった。エルニーニョの終息によって、気象庁の長期予報は覆った。研究会の後半では、初めに2012/13年の冬の総観規模大気循環場の特徴を整理し、その後に参加者からのコメントをいただきながら最近の日本の冬に関する討論会を行った。参加者からの話題として、三重大学生物資源学研究所の安藤雄太氏に「2012/13年の寒冬とAO・WPパターン・日本周辺の海面水温との関係」(安藤ほか 2013)、海洋研究開発機構の飯島慈裕氏に「2012/13年ユーラシア大陸冬季の寒気形成と

その日本への流出過程」(飯島ほか 2013) についての講演をいただいた。ここでの議論を発端として、2013年度気象学会秋季大会において、スペシャルセッション「近年における日本の冬の気象：気候変動、遠隔応答の枠組みからの理解」が企画された。

本会の出席者は約60名であった。以下に講演内容を記す。

担当世話人：平沢尚彦*

http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index

2. 南極氷床末端部の変動が海洋・海水に与える影響

田村岳史(国立極地研究所)

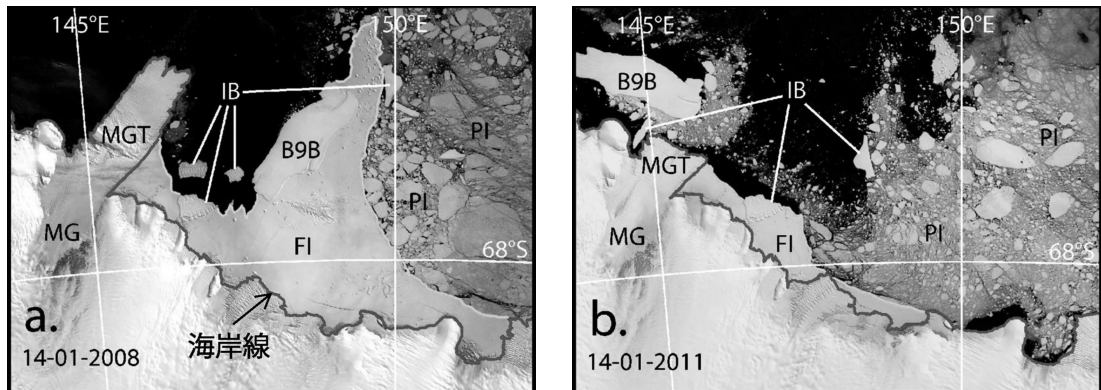
南極底層水という地球で最も重い水の沈みこみは、地球規模の海洋大循環の駆動源であり、全球気候システムの肝である。東南極メルツ氷河(東経145度付近)周辺には、メルツポリニヤと呼ばれる海水生成域が存在し、この氷河の存在によって活発な海水生産(→塩分排出→重い水の生成に繋がる)が起これ、この海水生産によってアデリーランド底層水(南極底層水の一つ)が生成されている。2010年2月にこのメルツ氷河(正確には氷河が海に突き出している氷舌と呼ばれるもの)が大規模に崩壊するイベントが起これ(第1図)、数値モデルの研究(Kusahara *et al.* 2011)から、ここでの海水生産量が大きく減少する可能性が示唆されていた。我々は衛星リモートセンシングという観測手法によって、海水生産量をダイレクトに求め、この海域での海水生産量の減少を定量的に明らかにした(Tamura *et al.* 2012)。また、研究観測船による現地での直接的な海洋物理観測によって、この海域での高密度水の生成量の減少、植物プランクトンの増殖とCO₂吸収量の増加を定量的に明らかにした(Shadwick *et al.* 2013)。

最初に、東南極メルツ氷河周辺の海水生産量を、衛

* Naohiko HIRASAWA, 国立極地研究所.

hira.n@nipr.ac.jp

© 2014 日本気象学会



第1図 メルツ氷河周辺の衛星画像 (a: 2008年1月14日, b: 2011年1月14日)。MGTがメルツ氷舌, B9Bが1992年からこの海域で座礁していた巨大氷山, FIが定着氷域, PIが海水域, IBが氷山, MGがメルツ氷河。2010年2月に、これまで座礁していた巨大氷山 (B9B) が移動してメルツ氷舌に衝突し、折れたメルツ氷舌は速やかに他の海域に移動し、B9Bは同海域内に留まった。

星データを用いて詳細に調査した。具体的には、衛星赤外データから正確な沿岸線（氷河・氷床・氷山・定着氷と海洋・海水域との境界線）を求める手法 (Fraser *et al.* 2009, 2010, 2012) と、衛星マイクロ波データから海水生産量を求める手法 (Tamura *et al.* 2007, 2008, 2011) とを組み合わせ、2000～2011年の12年間の海水生産量を算出した。次に、メルツ氷河周辺の海洋観測を詳細に行った。具体的には、2011・12年1月に研究観測船が同海域に行き、表層から底層に渡る採水等の直接的な観測を行い、物理・化学・生物学的解析に必要な各現場観測データを取得した。氷河が崩壊した2010年以前に取得されていた過去の観測データと比較して、同海域の水質の変化を解析した。

衛星データの解析結果から、メルツ氷河崩壊後の海水生産量は以前のそれと比べて14～20%減少していた事が明らかになった。さらに、この崩壊後の2010年と2011年は、海水が生産されやすい気候条件（低温・強風）であるにもかかわらず、海水生産量が減少していた。今後はさらに海水生産量が減少する可能性が極めて高い。この海水生産量の減少は、メルツ氷河の崩壊によって海水生成域が根本的に変化した事によって引き起こされている。海洋現場観測データの解析結果からは、メルツ氷河崩壊後の表層塩分は 1 gkg^{-1} ほど低塩化しており、この低塩化傾向は底層まで渡っており、この海域で生成される南極底層水が低塩化していた事が明らかになった。これは上記の衛星リモートセンシングの研究結果で明らかになった低塩化にも対応

する。この低塩化の傾向は過去の低塩化の傾向に比べて5倍程度と急激なものである。この海域で生成される南極底層水の低塩化傾向は、メルツ氷河が崩壊前のレベルまで復活すると予測される50年後まで続くものと予想される。これは今後50年に渡って、この海域で生成される南極底層水が低塩化し続ける事を意味する。

また、メルツ氷河崩壊と周辺の定着氷の流出による古い氷の融解により、鉄の流出が起こったと考えられ、プランクトンの爆発的な増殖であるブルームが起きるなど植物プランクトンの活動が盛んになり、それによって CO_2 の海洋吸収量が崩壊前のそれと比べて約2倍に増えた事が明らかになった。この氷河の崩壊は自然現象であるが、崩壊の引き金となる氷河・氷床の底面融解は海水温の上昇によるものである。南極周辺での温暖化は、今後もこのような現象が引き続き起こりうるという事を意味する。氷河崩壊は海洋循環や CO_2 を含む物質循環及び生物生産に顕著な変化を引き起こす現象であり、全球規模の海洋大循環や気候システム、物質循環を予測する上で、今後もこの南極沿岸域の監視と分析を続けていく事が大変重要である。

3. グリーンランド氷床の暗色化と雪氷微生物

竹内 望 (千葉大学大学院理学研究科)

グリーンランド氷床は、近年、特に1990年代以降、著しく質量が減少している (Rignot *et al.* 2008)。考えられているその原因は大きく二つあり、一つは海に流れ出るカービング氷河の末端後退、そしてもう一つ

が表面融解量の増加である。このうち表面融解量の増加の原因は、単に温暖化による気温上昇だけではなく、氷床表面のアルベドの低下が指摘されるようになった (e.g., Tedesco *et al.* 2011)。実際にグリーンランド氷床の過去数十年の可視域の衛星画像を比較すると、場所によって裸氷域がかつてより黒くなっていることがわかる。この部分は暗色域 (dark region) と呼ばれ、融解への影響から最近になって注目されるようになった (e.g., Wientjes and Oerlemans 2010)。雪氷表面のアルベドを決める要因は、主に近赤外線域に影響する積雪粒子の粒径と、主に可視光線域に影響する不純物濃度がある (e.g., Aoki *et al.* 2011)。積雪粒子の粒径が大きくなる、また不純物濃度が増加すると、雪氷面アルベドは低下する。ただし暗色域が現れるのは、グリーンランド氷床の中でも積雪のない下流側辺縁部の裸氷域であることから、氷床暗色化の主な原因は不純物の増加であると考えられる。

雪氷面のアルベドを低下させる不純物には、主に大気から供給される風成ダスト、または黒色炭素粒子が知られている (e.g., Aoki *et al.* 2011)。風成ダストは、大陸の砂漠などの乾燥域から巻き上げられたダスト粒子が、大気循環によって広く拡散し氷河上に沈着したものである。黒色炭素粒子は、人為的な化石燃料の燃焼等によって大気中に放出された炭素粒子が、やはり大気循環によって広く拡散し氷河上に沈着したものである。一方、雪氷表面にはこの二つ以外の不純物も存在する。それは、雪氷表面上で繁殖する雪氷微生物由来の有機物である。この雪氷生物由来の不純物については、今までほとんど注目されることがなかったが、実際には山岳氷河を中心に大量の有機物が堆積していることがわかってきている (e.g., Takeuchi *et al.* 2001)。

この雪氷微生物は、寒冷環境に適応した特殊な生物で世界各地の氷河や積雪の表面に生息していることが明らかになっている。中でも緑藻やシアノバクテリアといった光合成を行う独立栄養性の生物が雪氷面で有機物を生産し、その有機物に依存した従属性のバクテリア、カワゲラやユスリカなどの昆虫類、コオリミミズやクマムシなども雪氷上で生息している。このような生物やその遺体を含む、有機質な氷河表面の堆積物をクリオコナイトと呼んでいる。今までの調査によって、この生物由来の不純物であるクリオコナイトの量は、氷河によって大きく異なることがわかってきた。その量はアジアの山岳氷河では多く、極域の氷河では

少ない (Takeuchi and Li 2008)。この量の違いは、微生物による有機物の生産量や微生物の種類の違いによると考えられる。とくに光合成微生物では、アジアの山岳氷河では糸状のシアノバクテリアが多く存在するのに対し、極域の氷河では緑藻が優先している。従って、グリーンランド氷床の消耗域の暗色化の原因がこのクリオコナイト量の増加であるならば、氷床表面の微生物の生産量や種類が近年の環境変動の影響を受けて変化したのではないかと考えることができる。

グリーンランド氷床の不純物による融解促進のプロセスの理解のため、2012年の夏期にグリーンランド氷床の北西部および南西部の調査を行った。この調査は、科研費基盤研究S「北極域における積雪汚染及び雪氷微生物が急激な温暖化に及ぼす影響評価に関する研究」(研究代表者：青木輝夫、気象研究所)の一部として行われたものである。北西部の調査域であるカナック氷河では、実際に裸氷域および積雪域に大量の不純物が含まれていることが確認できた。その不純物の顕微鏡観察の結果、緑藻や糸状のシアノバクテリアが含まれており、この不純物は単なる風成ダストや黒色炭素粒子ではなく、雪氷微生物由来の有機物を含むクリオコナイトであることが確かめられた。さらに、特に不純物が多い氷河の中流部には、糸状のシアノバクテリアが多く分布しており、このシアノバクテリアの繁殖が暗色化に強く関わっていることが示唆された。また、氷床南西部の裸氷域表面では、比較的白く見える表面でもクリオコナイトホールと呼ばれる円柱状の水たまりが多数存在し、クリオコナイトがその穴の底に堆積していることが明らかになった。気象条件によって決まるクリオコナイトホールの発達や崩壊も、裸氷表面のクリオコナイト量に影響する可能性が示唆された。以上の調査結果から、雪氷生物由来の有機物が確かに表面の暗色化に強く関与していることが明らかになった。地球温暖化による気温上昇は、融解期間の長期化、クリオコナイトホールの崩壊の原因となり、それがさらに雪氷微生物群集の変化を引き起こしている可能性がある。このことは、氷床の変動過程の理解には、氷河上の生物地球化学的物質循環の定量的評価を行い、氷河や氷床を生物群集を含む生態系としてとらえることが重要であることを示している。今後、科研費プロジェクトにおいて、モデルを使いながらこのような氷床上の生物過程が融解に及ぼす影響の定量的な評価を行っていく計画である。

4. 2012/13年の冬の北半球大気循環の特徴

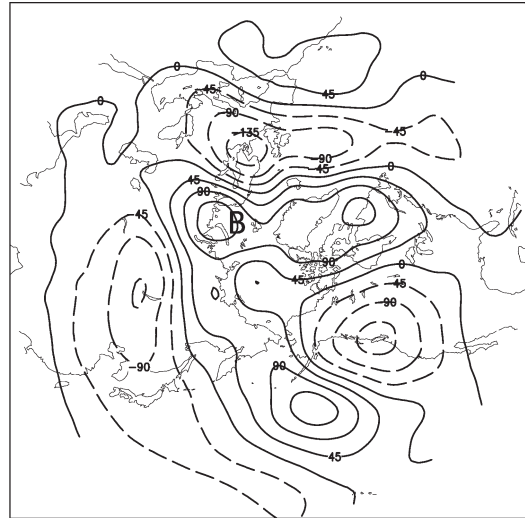
高谷康太郎（海洋研究開発機構，
現所属：京都産業大学）

2012/2013年の北半球冬季（2012年12月から2013年2月）の気候の特徴について、特に極東付近に注目しながら簡単な解説を行った。2012/2013年の日本付近の冬季地上気温は、1月終わり頃から2月はじめにかけて全国的に異常に暖くなる時期があったものの、その時期を除けば概ね平年を下回る時期が長く続き、北・東日本では2年連続、西日本では3年連続の寒冬となった。また、北日本では積雪も多く記録的な大雪となった地点もあった。この10年程度は、1990年代と比べて寒冬豪雪となる冬が増えてきている印象がある。

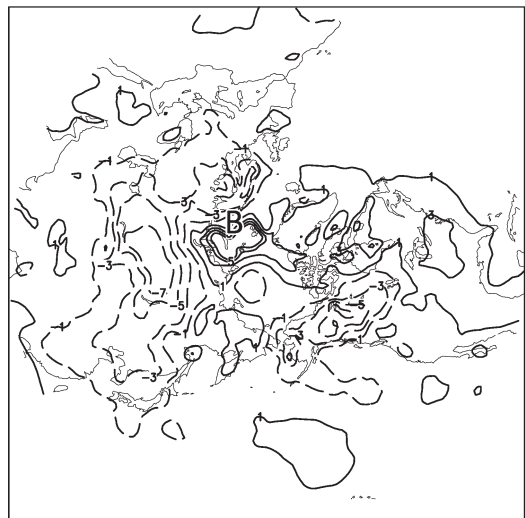
講演においては、この12月から2月にかけての各月の月平均大気循環場の特徴について説明したが、本稿では特に12月について注目したい。第2図は2012年12月の対流圏上層250 hPaにおける高度場偏差を、第3図は同時期の1000 hPaにおける気温偏差場を示している。この時期の地上の気温偏差場をみると、シベリア付近を中心としてユーラシア大陸上に強い寒気偏差が見られ、それが東西に大きく広がっている。日本付近もその寒気偏差に覆われており、寒冬傾向だった事が裏付けられる。一方、北極海上では、比較的狭い領域とはいえ強い暖気偏差が見られている地点もある。

対流圏上層の高度場偏差には、ユーラシア大陸上に特徴的な波型のパターンが見られる。特に、波型のパターンに伴う高気圧性偏差がバレンツ海（第2図及び第3図にBで位置を表示）のすぐ直上に観測出来る事から、北極海水の減少との関係が注目されている。よく知られているように、バレンツ海などの北極海域においては、21世紀に入って海水の減少が顕著となっている。それとともに、第2図に示されたようなバレンツ海上の高気圧性偏差も近年しばしば見られるものである。対流圏上層にこのような高気圧性偏差が卓越するときには、海面気圧場には（気象庁の前田修平氏の表現をお借りすれば）「北部ユーラシア高気圧」とでも呼べるような大きな高気圧が出現し、冬季東アジアモンスーンにも影響を及ぼす。このような近年の状況もあり、バレンツ海の海水の減少が冬季東アジアモンスーンに与える影響についての研究が近年、注目を集めている。このテーマについては日本の研究者により精力的な研究がなされており、例えば Honda *et al.* (2009) や Inoue *et al.* (2012) は、ともに、海水

の減少が極東に寒冬をもたらすような大気循環変動を引き起こすと指摘した。ただし、両者では力学的なメカニズムが違うことには注意が必要である。すわなち、Honda *et al.* (2009) では、海水減少に伴う対流



第2図 2012年12月における250 hPa面での高度場偏差。等値線が高度場偏差で45 m 毎、破線が負値。平年値は1979～2012年の気候値とした。用いたデータはJRA-JCDAS再解析データ。バレンツ海的位置をBで示す。



第3図 第2図と同様、ただし1000 hPa面での気温偏差。等値線は±1, ±3, ±5, ±7 (K)。

圏下層の熱的条件の変化が Rossby 波束を励起する事により冬季東アジアモンスーンを強化すると考えたのに対し、Inoue *et al.* (2012) では対流圏下層の傾圧帯の変化による低気圧経路の変化が大気循環変動を引き起こすとしている。2012年12月の例も含め、バレンツ海の海氷の変動が大気変動を引き起こすとするばどのようなメカニズムによるのか、両者の説に対し更なる精緻な検証を行い、理解を深めていく必要がある。なお、両者のメカニズムは必ずしも相反するとは限らず、互いに相補的な役割を果たしている可能性がある事を指摘したい。

なお、第2図をよく見てみると、ユーラシア大陸上の波型の偏差パターンは、ヨーロッパ方面や北大西洋上から引き続き波束パターンのようにも見える。実際、wave-activity flux による解析によると、Rossby 波束がヨーロッパ/北大西洋方面から伝播しているようである(図省略)。その事から、第2図に示されたユーラシア大陸上の波型のパターンは、Takaya and Nakamura (2013) で指摘された EU-like pattern の成分を強く含むだろうと、講演者は推察している(なお、EU-like pattern も、Honda *et al.* や Inoue *et al.* の説と競合的な関係にある訳ではない)。

なお、極東の冬季気候の変動を考察するときによく言及されるのが、熱帯海水温や北極振動である。この時期の熱帯海水温の状況はラニーニャ的な様相を示していた。その意味では、よく言われる説(ラニーニャなら寒冬傾向)と矛盾しないが、2012年12月の状況は必ずしも強いラニーニャとは言えず、ラニーニャだけで説明するのは少し無理があるようである。また、北極振動に関しては、確かに指数の極性はこの時期、負になっているのだが、第2図に見られるような対流圏上層の高度場偏差パターンを北極振動に伴うものと考えていいのだろうかかと講演者は考えている。

寒冬/暖冬などの実際に観測される現象を単一の原因で説明しようとするのは、余程の状況でない限り難しいのではなかろうかというのが講演者の個人的な考えである(し、多数の研究者に取ってもこれは当然の事であろうと思う)。大気循環場は強非線形系なので、原因結果を切り分ける作業には困難が伴うが、複合的な要因をなるべく解きほぐして理解を深める研究がこれからは求められているのではないかと考えている。

謝 辞

講演を快く引き受けてくださった諸氏に感謝申し上げます。

また、会場の準備をいただいた大会実行委員会の皆様に感謝いたします。報告書のとりまとめが遅れましたことをお詫びいたします。

略語一覧

EU pattern: ユーラシア大陸上に形成される地理的に固定された総観規模波動 (Eurasian pattern)

JCDAS: 気象庁の気候データ同化システム (JMA (Japan Meteorological Agency) Climate Data Assimilation System)

JRA: 日本の再解析気候データ (Japanese ReAnalysis)

参 考 文 献

- 安藤雄太, 小木雅世, 立花義裕, 2013: 2012/13年の寒冬と AO・WP パターン・日本周辺の海面水温との関係. 日本気象学会2013年度春季大会予稿集, A413, 341.
- 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.
- Fraser, A. D., R. A. Massom and K. J. Michael, 2009: A method for compositing polar MODIS satellite images to remove cloud cover for landfast sea-ice detection. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **47**, 3272-3282.
- Fraser, A. D., R. A. Massom and K. J. Michael, 2010: Generation of high-resolution East Antarctic landfast sea-ice maps from cloud-free MODIS satellite composite imagery. *Remote Sens. Environ.*, **114**, 2888-2896.
- Fraser, A. D., R. A. Massom, K. J. Michael, B. K. Galton-Fenzi and J. L. Lieser, 2012: East Antarctic landfast sea-ice distribution and variability, 2000-08. *J. Climate*, **25**, 1137-1156.
- Honda, M., J. Inoue and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707, doi: 10.1029/2008GL037079.
- 飯島慈裕, 猪上 淳, 堀 正岳, 2013: 2012/13年ユーラシア大陸冬季の寒気形成とその日本への流出過程. 日本気象学会2013年度春季大会予稿集, P220, 235.
- Inoue, J., M. E. Hori and K. Takaya, 2012: The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly. *J. Climate*, **25**, 2561-2568.
- Kusahara, K., H. Hasumi and G. D. Williams, 2011:

- Impact of the Mertz Glacier Tongue calving on dense water formation and export. *Nat. Commun.*, **2**, doi:10.1038/ncomms1156.
- 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.
- Shadwick, E. H., S. R. Rintoul, B. Tilbrook, G. D. Williams, N. Young, A. D. Fraser, H. Marchant, J. Smith and T. Tamura, 2013: Glacier tongue calving reduced dense water formation and enhanced carbon uptake. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 904-909.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2013: Interannual variability of the East Asian winter monsoon and related modulations of the planetary waves. *J. Climate*, **26**, 9445-9461.
- Takeuchi, N. and Z. Li, 2008: Characteristics of surface dust on Ürümqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **40**, 744-750.
- Takeuchi, N., S. Kohshima and K. Seko, 2001: Structure, formation, and darkening process of albedo reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: A granular algal mat growing on the glacier. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **33**, 115-122.
- Tamura, T. *et al.*, 2007: Estimation of thin ice thickness and detection of fast ice from SSM/I data in the Antarctic Ocean. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **24**, 1757-1772.
- Tamura, T., K. I. Ohshima and S. Nihashi, 2008: Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L07606, doi:10.1029/2007GL032903.
- Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nihashi and H. Hasumi, 2011: Estimation of surface heat/salt fluxes associated with sea ice growth/melt in the Southern Ocean. *SOLA*, **7**, 17-20.
- Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser and K. I. Ohshima, 2012: Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving. *Nat. Commun.*, **3**, 826, doi:10.1038/ncomms1820.
- Tedesco, M., X. Fettweis, M. R. van den Broeke, R. S. W. van de Wal, C. J. P. P. Smeets, W. J. van de Berg, M. C. Serreze and J. E. Box, 2011: The role of albedo and accumulation in the 2010 melting record in Greenland. *Environ. Res. Lett.*, **6**, 014005, doi:10.1088/1748-9326/6/1/014005.
- Wientjes, I. G. M. and J. Oerlemans, 2010: An explanation for the dark region in the western melt zone of the Greenland ice sheet. *Cryosphere*, **4**, 261-268.