

2014年秋季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告

—極域・寒冷域研究のこれから—

1. はじめに

地球温暖化に伴う北極域の急激な気候変化が近年注目を浴びている。北極海の海氷減少のみならず、2012年7月にはグリーンランド氷床表面の全面融解が発生している (Nghiem *et al.* 2012)。一方南極大陸内部の気候変化は小さいものの、2012/13年の夏季には氷床表面の融解の痕跡が確認されている (平沢ほか 2014)。今回の研究連絡会ではこうした気候変化しつつある南北両極域に関する研究の今後のありかたを考えるきっかけを提供することを目的とした。前半は気象研究所の青木輝夫氏にグリーンランド氷床表面の研究動向について、また猪上 淳氏に海洋開発研究機構や国立極地研究所で立案中の研究計画についてご紹介頂いた。後半は、これからの極域・寒冷域の研究を担う大学院生4名に、ご自身の研究内容を発表して頂いた。本会の出席者は約50名であった。以下に講演内容を記す。

担当世話人：西井和晃*

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

2. グリーンランド氷床表面に関する最近の研究動向

青木輝夫 (気象研究所)

グリーンランド氷床では1990年代後半より急激な融解が進行している。本講演では近年の衛星観測や領域モデルによる質量収支の変化、2012年7月の表面全面融解イベント、雪氷不純物と積雪粒径によるアルベド低下効果、氷床上における表面熱収支観測結果、衛星リモートセンシングによる積雪粒径の年々変動に関する

最近の研究動向と今後の課題について議論した。

重力衛星やレーザー高度計衛星による観測では、1990年代後半からグリーンランド氷床の質量減少率が年々加速している (Shepherd *et al.* 2012)。さらに、氷床コアの記録やAWS、領域気候モデルを使った170年以上の長期にわたる質量収支変動を再構築した研究 (Box 2013) では、表面融解量と涵養量の長期的な増加トレンドの中に、1930年前後及び2000年以降の気温の上昇に伴う顕著な表面融解が再現されている。1990年代後半からは溢流水河から海洋への氷の流出量が表面質量収支量 (涵養量 - 融解水の流出量) を上回り、氷床全体の質量収支が負になっている。この原因は表面融解量の増加 (流出量の増加) と氷山の流失量の増加の両方の効果によるものと考えられている。1990年代後半からのグリーンランド周辺の高温暖傾向の原因としては、NAOが指摘されている (Fettweis *et al.* 2013)。この間、負のNAOが継続し、グリーンランド氷床上の高気圧循環が強まり、この結果、グリーンランド西部とカナダ北極諸島が高温暖化している。Fettweis *et al.* (2013) は、近年の高温暖傾向は長期の温暖化では説明できないと述べている。

2012年7月中旬、グリーンランド氷床全域で表面融解イベントが発生した (Nghiem *et al.* 2012)。この年は繰り返し、グリーンランド氷床上に南から湿った高温の空気が流れ込み、全域で気温上昇と広域での降雨が観測された。我々も北西部氷床上 SIGMA-A サイト (78°03'N, 67°38'W, 海拔1490 m) で現地観測を行っていたが、7月10日からの4日間で推定60-100 mmの降雨を観測した (Aoki *et al.* 2014b)。このときの著しい表面融解の原因は、気温の上昇が主要因ながら、下層雲からの下向き長波放射の増加が、雲による下向き短波放射の減少を凌駕したことが影響した (Niwano *et al.* 2015)。同様の現象は最も標高の高い Summit 基地 (海拔3210 m) での観測からも指摘されている (Bennartz *et al.* 2013)。

* Kazuaki NISHII, 東京大学先端科学技術研究センター。

nishii@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

© 2015 日本気象学会

この様に、近年のグリーンランド氷床の急激な融解の主要因は気温の上昇と考えられるが、不確定要素としてブラックカーボン等の光吸収性エアロゾルによる積雪汚染や雪氷微生物の繁殖がもたらす雪氷面アルベドの低下が挙げられる。これらの効果が雪氷の融解にどの程度寄与しているか明らかにするため、日本では「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 (SIGMA)」プロジェクト (科学研究費助成事業 [基盤研究 (S)], 研究代表者: 青木輝夫 [気象研究所], 2011-2015年度) が進んでいる (Aoki *et al.* 2014a)。また、同時に「地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割」(GRENE 北極気候変動研究事業, 研究代表者: 榎本浩之 [国立極地研究所], 2011-2015年度) も進行している。SIGMA は主に内陸氷床と氷河上を研究対象とし、GRENE 事業によるグリーンランド観測は主に氷河末端部を研究対象にしている。それぞれは最初に述べた表面質量収支と溢流水河の流出過程に対応している。

グリーンランド氷床涵養域 (主に積雪域) では、積雪中のブラックカーボンによるアルベド低下効果は最大0.02程度と見積もられ、これに対して気温の上昇に伴って積雪粒径が増加する効果によるアルベド低下量は0.1以上と見積もられている。現在のところ、この粒径増加効果に伴うアルベド低下によって近年の表面融解が増幅されている可能性がある (Box *et al.* 2012)。また、Terra 及び Aqua 衛星 MODIS センサーによる2000年以降の観測から、夏期の表面積雪粒径が増加し、アルベドが低下していることが我々の研究から定量的に明らかになった。一方、消耗域 (主に裸水域) では夏期に氷河表面を覆うクリオコナイトと呼ばれる雪氷微生物を含む不純物によるアルベド低下効果が著しい (Takeuchi *et al.* 2014)。こちらも衛星観測から、その領域の拡大と暗色化 (アルベド低下) が年々進行していることが確認されている (Wientjes *et al.* 2011)。

今後、AWS 観測網の展開と継続、現地観測によるプロセス研究、雪氷表面の放射過程、熱収支過程、積雪変質過程などの物理過程のモデル化、それらの気候モデルや領域メソ気象モデルへの組み込みと数値実験、衛星観測などを組み合わせて、現在の急激な融解の原因とそのフィードバック効果を明らかにする必要がある。

3. 両極における大型観測研究計画の動向

猪上 淳 (国立極地研究所)

南極・北極の観測研究プロジェクトの立案には数年規模の準備期間が必要である。それはアクセスの困難さや観測に関するロジスティクスの問題、予算の問題などがあるからである。現在、国内では南極地域観測第 VIII 期計画、及び GRENE 北極気候変動研究事業が平行して実施されているが、いずれも2015年度が最終年度となっており、次期研究体制の議論が始まっている。一方で、国際的な視点で極域気象研究の動向を把握することは、日本の極域研究の強みを探る上で極めて重要であるとともに、限られた予算・人的資源をどのように配分するのかを考える上でも必要不可欠である。

南極研究においては2014年に ICSU の委員会のひとつである SCAR によって、今後20年以上にわたり重要となるであろう優先研究課題80件が選定された。この作業には多数の研究者による将来を見据えた議論と投票を通じた Horizon Scan という手法が用いられた。選定された計6分野のうち、気象学に関するものは「南極大気と南大洋の影響が世界に及ぼす範囲を明確にする」、「氷床が質量を失う過程、場所、原因を理解する」の2分野である。それを受けた形で、国内の次期南極地域観測計画 (第 IX 期) の策定が始まっており、重点研究観測として (1) 南極大気精密観測に基づく地球気候変動機構の研究、(2) 海洋-海水-氷床システムの相互作用と変動、(3) 80万年を超える深層アイスコア掘削に向けた雪氷観測および沿岸・内陸アイスコアによる数千年の環境復元、が採択された。今後この3課題を中心に2016年度からの日本の南極地域観測研究が始まる。一般研究観測、萌芽研究観測も公募されるので、南極観測に興味のある方は極地研関係者に一度ご相談していただきたい。

北極に関しては、南極ほど予算的裏付けがあるわけではなく、ポスト GRENE プロジェクトがどのようなものになるのか不透明である。しかしながら、国際的動向では、WMO-WWRP のもとに PPP が設置されており、数時間から季節スケールの予測可能性研究の推進を極域大気研究のコミュニティーに働きかけている。特に2017-2019年に設定されている YOPP は核となる活動で、2018-2019年にはドイツ砕氷船 Polarstern 号を1年間北極海で漂流させる野外観測が予定されている (MOSAic)。領域モデルによる海水上の境界層や雲の再現性、すなわちパラメタリゼーション

に関する素過程、北極低気圧に代表されるような総観規模擾乱の解明、北極温暖化と大陸寒冷化に代表される高緯度-中緯度の相互作用など、マルチスケールの研究課題が設定されている。日本が YOPP/MOSAiC にどのように貢献するかは早急に議論が必要ではあるが、現在進めている ARCROSE は日本が推進している観測研究とデータ同化研究を統合した予測可能性研究である。YOPP/MOSAiC の先駆けとなるもので、PPP では非常に注目されている。北極海航路上の気象・海水予測の精度向上や、近年頻繁に観測されている大陸上の厳冬イベント等、極域の観測データ及び数値シミュレーションの融合によって、その理解の進展が期待される。

4. 東シベリアタイガ-ツンドラ境界域におけるメタン放出フラックスの観測

新宮原 諒 (北海道大学大学院環境科学院)
自然環境の湿地は対流圏 CH₄ の最大の放出源であり、全球 CH₄ 放出量の年々変動を駆動する主因とされている (Ciais *et al.* 2013)。北極圏においては CH₄ の基質となる多量の有機炭素が土壤に蓄積されており、湿地の CH₄ 放出量が北極圏の顕著な温暖化に対してどのように応答するのか注目されている。CH₄ 放出フラックスを支配する環境因子 (水位、地温、植生など) がこれまで明らかにされているが (Olefeldt *et al.* 2013)、これらの環境因子とメタン放出量の定量的な関係は地域によって異なる可能性がある (Turetsky *et al.* 2014)。北極圏の地域間で永久凍土の発達度や植生が異なる中、北東シベリアのインディギルカ川下流域は発達した連続的永久凍土帯に位置し、タイガとツンドラの境界域が分布している。CH₄ 放出フラックスの年々変動と環境因子の関係、およびその基底となる CH₄ の生成・酸化・輸送過程を解明することを目的とし、我々はこの地域のチョクログ村 (70.62°N, 147.90°E) 周辺において、チャンバー法によりフラックスを観測した (2009-2013年)。

CH₄ の放出はカラマツの生育するマウンドにおいて検出限界以下であり、放出が活発であったミズゴケやスゲの湿地に注目することとした。CH₄ 放出フラックスは明らかな日変動が見られず、7月中旬以降に安定したため、7月中旬から8月上旬にかけてのフラックスの平均値をもって2009年から2013年の比較を行った。2011年は突出した降水量を伴う湿潤年となり (Jones and Harris 2013)、メタン放出フラックスは

2009、2010年から2011年に増大した。2011年以降は2013年まで湿地の水位が低下したものの、活発な CH₄ の放出が継続した。そのうえ同地温に対する CH₄ の放出フラックスは2011年よりも2012、2013年に大きかった。また土壤間隙水中の溶存 CH₄ についても、2011年より2012、2013年の方が高濃度であった。このような放出フラックスの増大は、CH₄ 酸化過程の抑制や CH₄ 生成過程の促進によって説明される。2012年に溶存 CH₄ の δD 値が低かったことも、酸化による CH₄ の消失が不活発であったことを支持した。以上から土壤の還元過程は年を跨いでゆっくり進行したことが示唆され、その結果2011年の湿潤イベントが2012、2013年の CH₄ 放出を促進した可能性がある。

5. 温位座標に基づく寒気質量の長期変化

菅野湧貴 (東北大学大学院理学研究科)

冬半球の高緯度地域に蓄積された寒気質量は、冬半球の気候や循環場を支配する重要な要素の1つである。従来行われている気圧座標での寒気の解析には、熱力学的な表現が煩雑である、風速場の単純な時間平均では暖気移流と寒気移流を分離することが出来ない、などの問題点が挙げられる。温位座標を用いると、寒気の量やその流れの定量的な解析が可能となる (Iwasaki *et al.* 2014)。特定温位面以下の大気で定義される寒気質量は、断熱過程で保存され、その生成・消滅にはそれぞれ、非断熱冷却・加熱のみが寄与する。

まず、著者らは温位280K 面以下の寒気質量について、南北半球の比較を行った。冬季北半球には、冬季南半球の約1.4倍の寒気が存在する。2ボックスモデルに基づく解析から、その理由を寒気の生成域での滞留時間が長いことで説明した (Kanno *et al.* 2015)。

さらに、本講演では温位280K 面以下の寒気質量の南北両半球冬季の長期トレンドについて、5つの再解析データ (JRA-55, JRA-25, ERA-interim, CFSR, NCEP-NCAR) を用いた結果を発表した。

1980年から2012年までの、冬季北半球 (12月から2月の3ヶ月平均) と冬季南半球 (6月から8月の3ヶ月平均) を対象に、経年変化の線形トレンドの計算を行った。その結果、冬季北半球の総寒気質量は、5つの再解析データに共通する統計的に有意な減少傾向が見られた。その大きさは33年平均値 (約 2.1×10^{17} kg) に対して10年でおおよそ $-1.6 \sim -0.8\%$ 程度であった。トレンドの分布を地理的に見ると、バレンツ

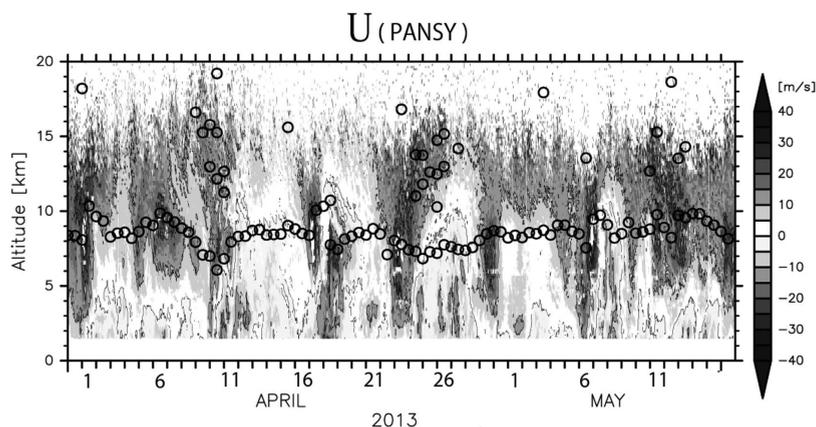
海、カラ海、北大西洋、北米大陸の北部、東アジアで寒気質量の減少傾向が、中央シベリアの内陸部とベーリング海で寒気質量の増加傾向が5つの再解析データに共通して見られた。中央シベリアの内陸部の寒気質量の増加傾向は、バレンツ海、カラ海での近年の急激な海氷の減少が影響していると考えられる（例えば、Mori *et al.* 2014）。地理的な寒気質量のトレンドの分布は、地上気温のトレンドの分布とも一致していた。これらの結果から、冬季北半球の寒気質量のトレンドは再解析データに共通する、信頼性の高いものであると言える。

反対に、冬季南半球の寒気質量のトレンドは再解析データ間で大きなばらつきが見られた。JRA-25には統計的に有意な増加傾向が見られ、JRA-55、NCEP-NCARには統計的に有意な減少傾向が見られた。特に、解析期間前半の1980年代、1990年代の総寒気質量の値に再解析データ間で大きな差が見られ、それがトレンドのばらつきの大きさの原因と考えられる。以上のことから冬季南半球の寒気質量の変化は不確実性が大きい。

特定温位面以下の寒気質量は、気温の変化などに比べて変化要因の物理的な解釈が明快であるという利点がある。今後はそうした利点を生かして詳細な解析を進めていく予定である。

6. 昭和基地で観測された多重圏界面のメカニズム

澁谷亮輔（東京大学大学院理学系研究科）
極域においては、WMOの定義による対流圏界面



第1図 2013年3月31日から5月16日の期間におけるPANSYレーダーによって観測された東西風の時間高度断面図。○印はラジオゾンデによって観測されたWMOの定義による対流圏界面の位置を表す。

が多重に見られることが多い。南極昭和基地(69.0°S, 39.6°E)におけるPANSYレーダー(Sato *et al.* 2014)のデータは、このような小さな鉛直構造を持つ多重圏界面構造とその力学機構の研究に有効である。昭和基地では2013年4月及び5月において複数回多重圏界面構造が観測されていた(第1図)。このとき、第一圏界面付近での東西風の絶対値の増大及び第一圏界面高度の下降が同時に観測されていることがわかった。ERA-Interim再解析データを用いたErtelの渦位の解析は、多重圏界面構造の出現前後に昭和基地付近をtropopause foldingが通過した可能性を示唆していた。このように多重圏界面構造が観測されたとき背景場の特徴がよく似ていることから、これらは同じ力学機構を持つことが期待される。本研究では特にきれいな特徴を示していた2013年4月8日から11日にかけて観測された多重圏界面の事例について、その力学を詳しく調べることにした。

次に、これらの現象の空間構造や力学機構を調べるために、重力波パラメタリゼーションを含まないNICAM(Satoh *et al.* 2008)を用いて数値シミュレーションを行った。昭和基地における時間高度断面を調べてみると、多重圏界面構造と第一圏界面の下降がよく再現されていることがわかった。また昭和基地付近で発達する顕著なtropopause foldingが現れていた。よって、観測された第一圏界面の下降は、このtropopause foldingが発達しつつ昭和基地の上を通過したことによると考えられる。さらに、NICAMで再現された慣性重力波のパラメータは、PANSYレーダーデータを用いたホドグラフ解析による推定とよく一致していた。

次に、NICAMデータを用いて昭和基地付近で観測された慣性重力波の発生源を調べた。まず、4月7日1600 UTCの15°E付近において、顕著な正のPV偏差の前面において南極大陸の斜面を滑り降りる20 ms^{-1} を超える強風が生じていた。これと同時に、定在的な位相構造を持つ波束が15°E付近の大陸沿岸上空に存在していた。この波

東は急峻な地形の効果によって励起された重力波であると考えられる。

また、4月8日0600 UTCの15°E付近において、大陸沿岸から離れた60°S付近にも振幅の大きな波束がみられた。重力波の発生メカニズムの1つとして、バランスからずれた強いジェット付近における自発的調節過程による重力波放射が考えられる。そこで、この可能性を調べるために、流れのバランスからのずれを記述する局所ロスビー数と非線形バランス方程式の残差項 ΔNBE (Zhang *et al.* 2001) を計算した。ジェット周辺でのこれらの値は共に大きく、ジェットがバランスから大きくずれていることがわかった。この結果は、海上にみられた波束が、流れの自発的調節過程によって放射された慣性重力波である可能性が高いことを示唆する。

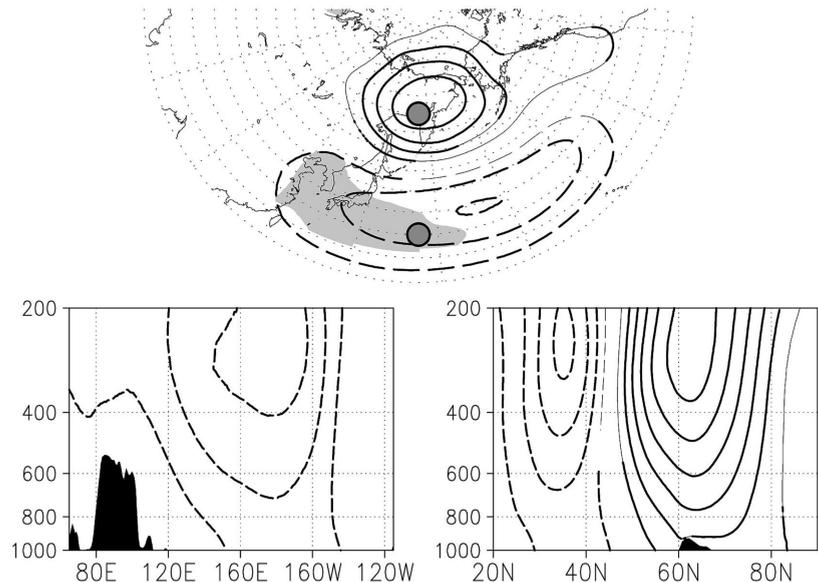
これらの慣性重力波の伝播についても詳しく解析した。15°E付近の海上でみられた慣性重力波の波束は、高PV偏差と共に東方向に伝播しており、4月9日0000 UTC～4月10日0000 UTCに高度10 kmよりも上で昭和基地に到達していた。故に、この期間に昭和基地で観測された重力波は、自発的調節過程によって発生した慣性重力波を含むものと考えられる。一方、15°E付近において発生した地形性慣性重力波の波束は、南向きの波数ベクトルを持っており、これに直交する東方向へとほぼ海岸に沿って伝播していた。これは、Sato *et al.* (2012) によって議論された地形性重力波の移流メカニズムで説明できる。高度15～18 kmにおいて、この波束は、4月9日0200 UTC～1600 UTCに昭和基地上空へ到達しており、この地形性重力波も昭和基地で観測されていたことを示唆する。

本研究で明らかになった多重圏界面のメカニズムは、Randel *et al.* (2007) などが指摘したメカニズムと大きく異なる。本研究の

メカニズムはAñel *et al.* (2008) が明らかにした極域における多重圏界面構造の観測頻度の強い季節依存性を説明することが出来ると考えられる。冬季極域の静的安定度は他の緯度帯と比べて特に弱い (Gettleman *et al.* 2011)。また、重力波にともなう温度揺らぎは静的安定度の揺らぎとしても観測される。したがって、冬季極域の下部成層圏のように、背景の静的安定度が十分弱いとき、重力波に伴う温度揺らぎは熱的圏界面と定義できるような安定度の極小を作ることが出来ると考えられる。故に、慣性重力波による多重圏界面構造は、冬季極域において特によく観測される可能性がある。

7. 冬季東アジアに寒波をもたらす西太平洋パターンの維持メカニズム

田中 翔 (東京大学先端科学技術研究センター)
昭和38年豪雪や平成18年豪雪などの寒冬に、しばしば西太平洋上の対流圏中上層に高度場偏差の南北双極子構造が観測される。この循環パターンは、Wallace and Gutzler (1981: 以下WG81) によってWPパターンと名付けられている。WPパターンの形成・維



第2図 (上) 500 hPa 高度偏差の合成図。実線が正、破線が負を表す。 t 検定で90%以上有意な領域を濃い線で示している。等値線間隔は20 m。陰は850 hPa 気温偏差が -0.8K 以下の領域、点はWG81のWPパターン定義点を表す。(左下) 南の作用中心緯度(30°N)、(右下) 作用中心経度(155.25°E)における鉛直断面図(縦軸: 気圧(hPa))。実線・破線は高度偏差。陰影は山岳などの地形を示す。

持メカニズムに関する先行研究は、順圧エネルギー変換量だけでは維持に不十分であること (Nakamura *et al.* 1987), 及び移動性擾乱による過度強制の重要性を指摘している (Lau 1988; Lau and Nath 1991). 従来海洋上の停滞性擾乱は等価順圧構造を持つと考えられてきたが、幾つかの長周期変動の維持に関して傾圧構造に伴う傾圧エネルギー変換の重要性が近年指摘されている。このため WP パターンについても鉛直構造の詳細な解析とその維持過程への寄与を評価することが必要である。本研究は、WP パターンの3次元構造とエネルギー収支に着目し、その維持過程メカニズムを明らかにすることを目的とする。

ERA-interim 再解析データを用いた (Dee *et al.* 2011). 解析期間は、1979/80 - 2010/11年冬季 (12月~2月) である。典型的な正位相の WP パターンシグナル抽出のため、WG81で定義した WP index が1標準偏差をこえる14ヶ月の月平均偏差場に基づく合成図を作成した (第2図)。

合成偏差図によると、WP パターンは高さと共に南西へ傾く傾圧構造をもつことが確認でき、傾圧エネルギー変換の WP パターン維持への寄与を示唆している (第2図下)。エネルギー収支解析に基づき、気候平均場と WP パターンに伴う偏差場間の運動エネルギー変換量である順圧エネルギー変換、有効位置エネルギー変換量である傾圧エネルギー変換 (CP) を合成偏差場から評価した。また非断熱加熱偏差によるエネルギー生成量、移動性擾乱からの順圧、傾圧フィードバック強制も評価した。以上5つの寄与を定量的に評価するため、北半球対流圏内の WP パターンに伴う偏差場の持つ運動エネルギーと有効位置エネルギーの和を、同空間内の各変換・生成量で1日にどれほど賄えるかの割合 (変換効率) を求めた。CP の変換効率が最も高く (0.22 day^{-1}), WP パターンの維持に最も効率良く寄与することが明らかになった。WP パターンの南側負偏差の西側で、亜熱帯ジェットに伴う気候平均南北温度傾度に沿う北風偏差による寒気移流が寒気偏差を強めること、及び WP パターンの節のやや北で、気候平均惑星波トラフに伴う東西温度傾度に沿う東風偏差による暖気移流が暖気偏差を強めることが、大きな CP をもたらしていると解釈できる。以上の結果は、WP パターンは冬季極東域の地理的特徴である東西海陸熱コントラストと太平洋亜熱帯ジェットの分布を反映し、維持されていることを示唆している。

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。

略語一覧

ARCROSE : Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment
 AWS : Automatic Weather Station 自動気象観測装置
 CFSR : Climate Forecast System Reanalysis
 CP : Conversion of available Potential energy 平均場から擾乱への有効位置エネルギー変換
 ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
 ERA : ECMWF Re-Analysis
 GRENE : グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス
 ICSU : the International Council for Science 国際科学会議
 JRA-25 : Japanese 25-year Reanalysis
 JRA-55 : Japanese 55-year Reanalysis
 MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
 MOSAiC : Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate
 NAO : North Atlantic Oscillation 北大西洋振動
 NCAR : National Center for Atmospheric Research
 NCEP : National Centers for Environmental Prediction
 NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model
 PANSY : Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar
 PPP : Polar Prediction Project
 SCAR : Scientific Committee on Antarctic Research 南極研究科学委員会
 SIGMA : Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic
 WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
 WP : 西太平洋
 WWRP : World Weather Research Programme
 YOPP : Year Of Polar Prediction

参 考 文 献

Añel, J. A., J. C. Antuña, L. de la Torre, J. M. Castanheira and L. Gimeno, 2008: Climatological features of global multiple tropopause events. *J. Geophys. Res.*, 113, D00B08, doi:10.1029/2007JD009697.
 Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi and H.

- Motoyama, 2014a: 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.
- Aoki, T., S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, M. Niwano, K. Kuchiki, K. Adachi, J. Uetake, H. Motoyama and M. Hori, 2014b: Light-absorbing snow impurity concentrations measured on Northwest Greenland ice sheet in 2011 and 2012. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 21–31.
- Bennartz, R., M. D. Shupe, D. D. Turner, V. P. Walden, K. Steffen, C. J. Cox, M. S. Kulie, N. B. Miller and C. Pettersen, 2013: July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds. *Nature*, **496**, 83–86.
- Box, J. E., 2013: Greenland ice sheet mass balance reconstruction. Part II: Surface mass balance (1840–2010). *J. Climate*, **26**, 6974–6989.
- 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.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R. B. Myneni, S. Piao and P. Thornton, 2013: Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, 465–570.
- Dee, D. P. *et al.*, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553–597.
- Fettweis, X., E. Hanna, C. Lang, A. Belleflamme, M. Erpicum and H. Gallée, 2013: Brief communication “Important role of the mid-tropospheric atmospheric circulation in the recent surface melt increase over the Greenland ice sheet”. *Cryosphere*, **7**, 241–248.
- Gottelman, A., P. Hoor, L. L. Pan, W. J. Randel, M. I. Hegglin and T. Birner, 2011: The extratropical upper troposphere and lower stratosphere. *Rev. Geophys.*, **49**, RG3003, doi:10.1029/2011RG000355.
- 平沢尚彦, 本山秀明, 堀 雅裕, 2014: 2012/13年夏に起こった南極氷床表面の融解現象. 日本気象学会2014年度春季大会講演予稿集, C206.
- Iwasaki, T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie and K. Takaya, 2014: Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the Northern Hemispheric winter. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2230–2243.
- Jones, P. D. and I. Harris (University of East Anglia Climatic Research Unit), 2013: CRU TS3.21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.21 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901– Dec. 2012). NCAS British Atmospheric Data Centre, 24th September 2013.
- Kanno, Y., T. Shoji and T. Iwasaki, 2015: Comparison study of polar cold air mass between Northern and Southern Hemispheric winters based on a zonal-mean two-box model. *Atmos. Sci. Lett.*, **16**, 70–76.
- Lau, N. C., 1988: Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2718–2743.
- Lau, N. C. and M. J. Nath, 1991: Variability of the baroclinic and barotropic transient eddy forcing associated with monthly changes in the midlatitude storm tracks. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2589–2613.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geosci.*, **7**, 869–873.
- Nakamura, H., M. Tanaka and J. M. Wallace, 1987: Horizontal structure and energetics of Northern Hemisphere wintertime teleconnection patterns. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 3377–3391.
- 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.
- Niwano, M., T. Aoki, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Kuchiki and H. Motoyama, 2015: Numerical simulation of extreme snow melt observed at the SIGMA-A site, northwest Greenland, during summer 2012. *Cryosphere Discuss.*, **9**, 495–539.
- Olefeldt, D., M. R. Turetsky, P. M. Crill and A. D. McGuire, 2013: Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones. *Glob. Change Biol.*, **19**, 589–603.
- Randel, W. J., D. J. Seidel and L. L. Pan, 2007: Observational characteristics of double tropopauses. *J. Geophys. Res.*, **112**, D07309, doi:10.1029/2006JD007904.
- Sato, K., S. Tateno, S. Watanabe and Y. Kawatani, 2012: Gravity wave characteristics in the Southern Hemisphere revealed by a high-resolution middle-atmosphere general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1378–1396.
- Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, M. Kohma, H. Yamagi-

- shi and T. Yamanouchi, 2014: Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **118**, Part A, 2-15.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.
- Shepherd, A. *et al.*, 2012: A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, **338**, 1183-1189.
- 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.
- Turetsky, M. R. *et al.* 2014: A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Glob. Change Biol.*, **20**, 2183-2197.
- Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wes. Rev.*, **109**, 784-812.
- Wientjes, I. G. M., R. S. W. Van de Wal, G. J. Reichert, A. Sluijs and J. Oerlemans, 2011: Dust from the dark region in the western ablation zone of the Greenland ice sheet. *Cryosphere*, **5**, 589-601.
- Zhang, F., S. E. Koch, C. A. Davis and M. L. Kaplan, 2001: Wavelet analysis and the governing dynamics of a large-amplitude mesoscale gravity-wave event along the East Coast of the United States. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 2209-2245.
-