

2011年秋季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告

1. はじめに

地球温暖化に伴う極域大気の変動の特徴として、北極温暖化増幅 (Arctic Amplification) がある。この言葉には南極域との対比の意味も込められている。この現象を深く知ることは地球全体の気候変化のメカニズムの理解に貢献する。Arctic Amplification の原因として、アイス-アルベド・フィードバックによる効果とともに、地球規模の大気循環に伴う顕熱や潜熱の輸送・収束の効果も検討されている (Alexeev *et al.* 2005 ; Langen and Alexeev 2007)。極域の大気がどのように形成し変動しているのか、今一度、大気中の熱・水・物質の極域への輸送を見直すことは意義深い。

最近、日本を含めた世界中で、北極域の気候変化の解明と将来予測を目指した研究が強力に推進されつつある (文部科学省「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス」(GRENE) 事業の北極気候変動分野 <http://www.nipr.ac.jp/grene/> (2011.12.1閲覧), Roberts *et al.* 2010など)。これから数年に亘って様々な研究成果が発表されると期待される。極域寒冷域研究連絡会は、2011年度秋季気象学会大会第1日目のセッション終了後に「北極温暖化の理解に向けて」と題して、2名の講演者に、最近の北極域の気候変化について議論していただいた。出席者は約40名であった。以下に講演内容を記す。

担当世話人 :

平沢尚彦 (国立極地研究所)

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

2. 「観測から Arctic Amplification を考える」

猪上 淳 (海洋研究開発機構 地球環境変動領域)

近年の観測及び気候モデルの結果から、北極温暖化増幅 (Arctic Amplification) と呼ばれる急激な温暖化が明らかになりつつある。この現象は海水減少に代

表される北極異変、それに伴う中緯度の異常気象、そして北極航路の開拓にも関係し、社会的関心が飛躍的に高まっている。本講演では最近の北極の温暖化増幅に関するレビューと観測研究への適用に関して議論した。

Serreze and Barry (2011) は北極温暖化増幅に関する物理過程を5つに分類している。すなわち、(1) 海水の減少による長波放射収支の変化と乱流フラックスの増加、(2) アイス-アルベドフィードバックに伴う短波放射収支の変化と乱流フラックスの増加、(3) 低気圧等に伴う中緯度からの熱輸送の増加、(4) 雲量や水蒸気の増加に伴う長波放射収支の変化、(5) ブラックカーボンエアロゾルによる短波放射の吸収、である。いずれも独立したプロセスではなく、密接に関係している。明らかな減少傾向を示す海水に関しては、秋から冬にかけて当該海域 (開水面) が顕著な熱源として作用し、対流圏下層の温暖化増幅に著しく寄与していることが示されている (Screen and Simmonds 2010)。その大気海洋間の熱の交換は、秋から冬に発生する北極海上の低気圧によって行われていることが現場観測から実証されており (Inoue and Hori 2011)、年々その傾向 (低気圧の強さや熱放出) が強まっていることも再解析データの解析から示されている (Simmonds and Keay 2009)。その結果、冬の温暖化増幅は、海水の成長を鈍化させ夏に消失しやすい状況を作り出す。

このような冬の温暖化増幅は、北極海で同様ではなく、欧州側のバレンツ海が中心である。これは同海域の海水減少に伴う乱流熱フラックスの増加に加え、北大西洋を北上する低気圧が熱的・力学的に海水域の南下を抑制していることが挙げられる (Serreze *et al.* 2011)。一方、バレンツ海上の高温偏差と対応し、シベリア域で低温偏差が出現することも最近の議論の対象となってきた (Zhang *et al.* 2008 ; Overland 2011)。これは高緯度の変化が中緯度に影響を及ぼす可能性を示唆する。その要因の一つとして、バレンツ海の熱源偏差を強制源とした定常ロスビー波の影響が

考えられている (Honda *et al.* 2009). しかし、これらの解析は季節平均あるいは月平均の場で見ているため、低気圧経路の変化やそれに伴う暖気・寒気移流の詳細な変化は明らかではなく、今後の解析が待たれる (Inoue *et al.* 2012).

対流圏下層の温暖化増幅は海水の減少である程度説明できるが、それよりも上層の温暖化は別なプロセスが作用していそうである。海水の減少が顕著になる前の2001年までの再解析データを用いた解析でも、季節を通じて対流圏中層の温暖化は全球トレンドよりも強く、これは中緯度からの熱輸送が原因であるとされている (Graversen *et al.* 2008). 実際、2001年までの低気圧活動は春から秋にかけて増加傾向で (Sorteberg and Walsh 2008), 特にシベリア大陸から北上してくる1000hPa以下に発達する低気圧が顕著である (Sepp and Jaagus 2011). こうした低気圧活動は降水/降雪を通じて陸面にも顕著な影響をもたらす。東シベリアの地中の温度は2005年頃から上昇傾向、かつ土壌水分も増加傾向である (Iijima *et al.* 2010). 陸上の降水の増加に伴って永久凍土が融解し活動層が深まっていること、そして降雪の早期化に伴って積雪が大気と陸面の断熱材として作用していることが主要因である。雪が多い年は直前の夏に北極海の海水が少ない関係があることが知られ (Ghatak *et al.* 2010), 北極圏の低気圧活動の変化の影響は広範囲に及んでいる。

以上見てきた通り、北極温暖化増幅の解明には大気・海洋/海水・陸面の相互作用と、熱・水輸送の担い手である総観規模スケールの低気圧活動の役割に着目した研究が必要となる。その包括的な理解には、細分化された従来型の研究を総花的に集めたプロジェクトではなく、研究者間の連携はもとより、研究者の専門分野に執着しない柔軟な発想力が求められる。GRENE事業の北極気候変動分野のプロジェクトでは、観測・モデル・衛星・研究基盤・人材育成、などにおいて多分野から構成される研究者が集結している。この利点を活かすためには、世界の研究動向の把握と日本の北極研究の強みを理解できていることが大前提である。強いリーダーシップの下、若手・中堅研究者の大胆な登用によって、この事業は革新的成果を挙げることが期待されよう。数年後には学会の中高緯度のセッションが盛り上がることを楽しみにしている。

3. 「極域への水・熱・物質輸送」

山崎孝治 (北大・地球環境科学研究院)

最初に北極域と南極域の降水量の季節変化が異なることを極域への水蒸気輸送から考察した研究 (Oshima and Yamazaki 2006) を紹介した。正味降水量 (降水量 - 蒸発量) は北極域では暖候期に多いが南極域では寒候期に多い。極域への対流圏下層の水蒸気フラックスを考えることによりこれを説明する。ある緯度円で積分した極向き水蒸気フラックスは、可降水量の時間変化を除けば (南極では無視でき、北極では正味降水量がフラックスに1カ月遅れる)、緯度円より高緯度における正味降水量に比例する。従って、極向き水蒸気フラックスの季節変化を説明できればよい。極向き水蒸気フラックスは南北の水蒸気勾配と南北風の変動 (標準偏差) の積で近似できると考えた。南北及び各月・各年のデータをすべて使って一般的な両極域に適用できる回帰式をつくった。水蒸気勾配はほぼ水蒸気量に比例するので気温の高い暖候期に大きい (気温効果)。一方、南北風変動は低気圧活動の活発な寒候期に大きい (擾乱効果)。この積がどうなるかは、各効果の季節変化の振幅の相対的大きさ (季節変化振幅を平均で割ったもの) によることが簡単な算術からわかる。北極域では気温効果の相対振幅が擾乱効果の相対振幅より大きいので、暖候期に正味降水量が大きい。南極域では逆になるので、寒候期に大きい。温暖化したときにどうなるかは、気温効果と擾乱効果がどうなるかを考えるとよいのではないかと。

次に、Arctic Amplification について議論した。近年の北極域の急速な温暖化に海水減少がどのくらい寄与しているかの論争は興味深い。Graversen *et al.* (2008) は ERA40 を用いて近年の北極の温暖化の鉛直構造を調べ、対流圏全層で温暖化していることを示し、北緯60度での極向きエネルギー輸送の増加が北極温暖化の要因として重要とした。彼らは、北緯60度での極向きエネルギー輸送のみを説明変数として高緯度域の気温の回帰式を精度よく作れることを示した。一方、Screen and Simmonds (2010) は、ERA-Interim を用いて (1989-2009年、ERA40 は2001年まで)、同じく近年の北極の温暖化の鉛直構造を調べ、主に対流圏下層で温暖化が顕著であることを示し、海水減少が北極温暖化の主因であるとした。彼らは、海水面積のみを説明変数として高緯度域の気温の回帰式を精度よく作れることを示した。数値実験から2007年の海水減少の効果を調べた Kumar *et al.* (2010) に

よれば、影響は北緯60度以北の対流圏下層に限られるが、海水減少で観測された気温偏差をほぼ説明できる。個人的印象としては、海水減少が北極域の温暖化増幅の第1の原因ではあるが、それだけではないらしい。

そもそも、北極の海水減少が20世紀末から加速したのはなぜかという問題がある。これは人為的温暖化に自然変動が重なったためと思われる。自然変動の候補として大西洋数十年変動 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO: 例えば, Vellinga and Wu 2004) が考えられる。1990年代から AMO が正 (北大西洋の海面水温が暖かく、熱塩循環が強い位相) になっている。20世紀前半の北極の温暖化 (Bengtsson *et al.* 2004) にも符合する。その他にも様々な要因が考えられ、今後、解明が進んでゆくと思われる。

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。

略語一覧

ERA40: ECMWF (ヨーロッパ中期予報センター) の40年再解析データ

ERA-Interim: ECMWF の新しい再解析データ

参考文献

- Alexeev, V. A., P. L. Langen and J. R. Bates, 2005: Polar amplification of surface warming on an aquaplanet in “ghost forcing” experiments without sea ice feedbacks. *Clim. Dyn.*, **24**, 655-666.
- Bengtsson, L., V. A. Semenov and O. M. Johannessen, 2004: The early twentieth-century warming in the Arctic - A possible mechanism. *J. Climate*, **17**, 4045-4057.
- Ghatak, D., A. Frei, G. Gong, J. Stroeve and D. Robinson, 2010: On the emergence of an Arctic amplification signal in terrestrial Arctic snow extent. *J. Geophys. Res.*, **115**, D24105, doi:10.1029/2010JD014007.
- Graversen, R. G., T. Mauritsen, M. Tjernström, E. Källén and G. Svensson, 2008: Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature*, **451**, 53-57.
- 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.
- Iijima, Y., A. N. Fedorov, H. Park, K. Suzuki, H. Yabuki, T., C. Maximov and T. Ohata, 2010: Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River basin, Russia. *Permafr. Periglac. Process.*, **21**, 30-41.
- Inoue, J. and M. E. Hori, 2011: Arctic cyclogenesis at the marginal ice zone: A contributory mechanism for the temperature amplification? *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L12502, doi:10.1029/2011GL047696.
- 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* (submitted).
- Kumar, A., J. Perlwitz, J. Eischeid, X. Quan, T. Xu, T. Zhang, M. Hoerling, B. Jha and W. Wang, 2010: Contribution of sea ice loss to Arctic amplification. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L21701, doi:10.1029/2010GL045022.
- Langen, P. L. and V. A. Alexeev, 2007: Polar amplification as a preferred response in an idealized aquaplanet GCM. *Clim. Dyn.*, **29**, 305-317.
- Oshima, K. and K. Yamazaki, 2006: Difference in seasonal variation of net precipitation between the Arctic and Antarctic regions. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18501, doi:10.1029/2006GL027389.
- Overland, J. E., 2011: Potential Arctic change through climate amplification processes. *Oceanography*, **24**, 176-185.
- Roberts, A. *et al.*, 2010: A Science Plan for Regional Arctic System Modeling. IARC, Univ. Alaska Fairbanks. http://www.iarc.uaf.edu/jp/research/highlights/2010/arctic_system_modeling (2011.12.1閲覧)
- Screen, J. A. and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**, 1334-1337.
- Sepp, M. and J. Jaagus, 2011: Changes in the activity and tracks of Arctic cyclones. *Clim. Change*, **105**, 577-595.
- Serreze, M. C. and R. G. Barry, 2011: Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global Planet. Change*, **77**, 85-96.
- Serreze, M. C., A. P. Barrett and J. J. Cassano, 2011: Circulation and surface controls on the lower tropospheric air temperature field of the Arctic. *J. Geophys. Res.*, **116**, D07104, doi:10.1029/2010JD015127.
- Simmonds, I. and K. Keay, 2009: Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979-2008. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19715, doi:10.1029/2009GL039810.

- Sorteberg, A. and J. E. Walsh, 2008: Seasonal cyclone variability at 70°N and its impact on moisture transport into the Arctic. *Tellus*, **60A**, 570-586.
- Vellinga, M. and P. Wu, 2004: Low-latitude freshwater influence on centennial variability of the Atlantic thermohaline circulation. *J. Climate*, **17**, 4498-4511.
- Zhang, X., A. Sorteberg, J. Zhang, R. Gerdes and J. C. Comiso, 2008: Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22701, doi:10.1029/2008GL035607.
-