

2009年春季極域・寒冷域研究連絡会の報告

日本気象学会2009年度春季大会(つくば)1日目(5月28日)のセッション終了後に、極域・寒冷域研究連絡会が大会C会場(つくば国際会議場 中会議室406)にて行われた。出席者は約40名であった。今回の極域・寒冷域研究連絡会は、「海水を考える—海洋と大気の熱交換—」と題し、海水の拡大期にあたる冬季の海水生成量の時間空間変動について講演を行った。気候における海水の役割は大きく、例えば、海水の存在によって大気海洋間の熱・運動量・物質の輸送が大きく変化する事が知られている。熱交換の抑制は特に大気に影響を及ぼし、また海水生成に伴う塩分排出による高密度水の形成は海洋熱塩循環の駆動源になるなど、いくつかの新しいプロセスを生み出す。さらに、極域での温暖化は冬に顕著に現れるという将来予測を鑑みると、両極での海水生成量の経年変化や海洋への影響に関する知見は気候システムを理解する上で重要である。そこで、今回は、まず初めに大気—海洋系を中心に気候系における海水の役割・位置づけについて、続いて海水生成、高密度水形成、海洋熱塩循環への影響について衛星・観測・モデル研究に基づく最新の知見を3件、最後に海水域の熱フラックスの見積もりについて、計5名の方々に講演をお願いした。以下に、各講演者より寄せられた講演要旨を紹介する。

代 表 :

山崎孝治 (北海道大学地球環境科学研究院)

世話人 :

平沢尚彦 (国立極地研究所)

中村 尚 (東京大学大学院理学系研究科)

浮田甚郎 (新潟大学自然科学系・理学部)

高田久美子 (海洋研究開発機構地球環境変動領域)

阿部彩子 (東京大学気候システム研究センター)

佐藤 薫 (東京大学大学院理学系研究科)

本田明治 (海洋研究開発機構地球環境変動領域)

齋藤冬樹 (海洋研究開発機構地球環境変動領域)

猪上 淳 (海洋研究開発機構地球環境変動領域)
高谷康太郎 (海洋研究開発機構地球環境変動領域)
http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index

話 題 :

「海水を考える—海洋と大気の熱交換—」

1. 「海氷～大気海洋系の白い黒幕～」

本田明治 (海洋研究開発機構地球環境変動領域,
現所属:新潟大学自然科学系)

この数年で、海氷がここまで広く関心を集めることになるとは、思いもよらなかった。多くの予測・予想を上回るスピードで進行する夏季北極海の海水域縮小は、科学的興味のみならず、最近の地球温暖化問題の象徴としてなのか、マスコミにも広く取り上げられ社会的にも反響を呼んだ感がある。しかし南極大陸周辺の海水域に目立った減少傾向は現在のところ確認されておらず、温暖化の影響のみとは一概には言い切れない。いろいろ問題はあるにせよ、元々地味な?存在である海氷に光が当たったことは、これまで地味に?海氷に関わる研究に取り組んできた筆者としては、嬉しくなくもない。

海氷の定義は、海水が凍ったもので、重要な特性は海水生成時に濃縮された高塩分水(ブライン)が海洋中に排出されること、またその一部が形成された純水の薄板の間に残ることである。ブラインはおよそ氷点下20度以上では氷内に液体として存在するので、氷温が高いほど海氷は大きな比熱を持つ。また表面アルベドも増加するため、大気—海洋間の熱交換は著しく抑制されることになる。巨視的にみると海氷は大気海洋間に存在する薄膜に過ぎないが、白い大陸が洋上に広がったとみることもできる。

地球上の雪氷の中でも海水域は(積雪域とともに)その被覆面積の季節変動や年々変動が大きく、それに伴って熱収支も当然変わる。ローカルには勿論、広範囲の大気循環場にも影響を及ぼすことが、数値モデルを用いた研究などによって、例えば冬季のオホーツク海を初めとする季節海水域や夏季～秋季の北極海海水

域の大気循環場への影響などについて、明らかになってきている。気候変動に果たす役割も大きいと考えられているが、定量的な評価についてはまだ議論の余地があると言える。

海水生成時に海洋中に排出されるブラインは、当然のことながら海洋表層を高塩分化する。詳細は続く研究報告に譲るが、海水の生成域はかなり局所的であることがわかってきている。主に定常的な寒気が吹き出す沿岸陸棚域であることが多く、海水が生成されては沖に流され、開いた海面でまた海水が生成され…というプロセスが繰り返される、このような海域は一般に「沿岸ポリニア」と呼ばれているが、事実上の「海水生産工場」である。つまり海洋表層の高塩分化は沿岸ポリニアで顕著であり、局所的に高密度水が形成されていることになる。元々成層の弱い極域寒冷域の海洋では表層の高密度化をきっかけに鉛直対流を生じ易い条件にある。これまでも南極大陸周辺で形成される南極底層水、オホーツク海北西部で形成される北太平洋中層水には沿岸ポリニアでの海水生成が重要な役割を果たしていることが確認されている。

高緯度海洋は、世界の海洋循環（深層循環）の駆動源とも言え、海水（生成）はその一端を担っているのだ。海水生成量をより定量的に見積もることは、長期の気候変動を考える上でも極めて重要であることは明白である。また今後予想される地球規模の温暖化に伴って全球での海水生成量がどのように変化していくのか、今後注意深く監視していく必要がある。

海洋循環のエンジンとも言える海水生成のプロセス、生成量の見積もりについて、観測・データ解析・数値実験のさまざまなアプローチによる具体的な取り組みは、続く報告を是非ご覧頂きたい。最後に、この報告のタイトルでは、海水を大気海洋系の「黒幕」呼ばわりしてしまったが、ここで撤回させていただきます、今後は大気海洋系の「名脇役」と呼びたい。

2. 「衛星データによる北極・南極での海水生産量・熱塩フラックスのマッピング」

田村岳史（北海道大学低温科学研究所）

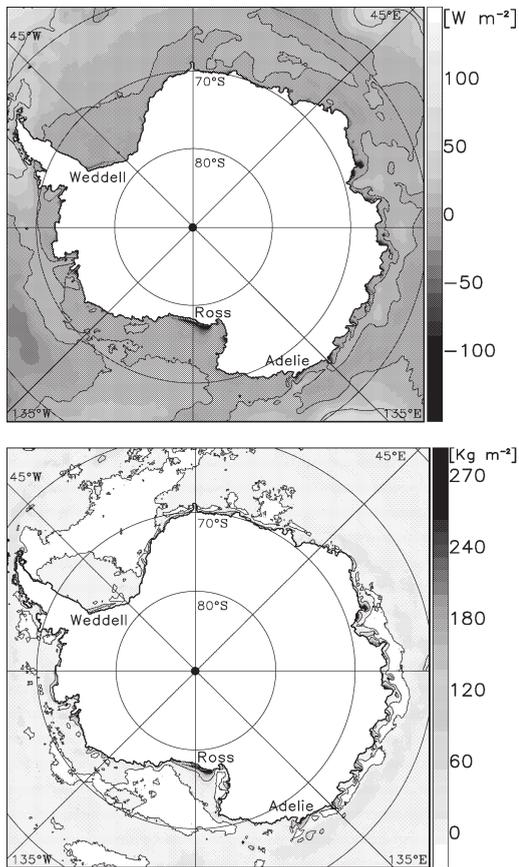
海洋の大規模な深層循環は、高密度水が沈み込み、それが徐々に湧き上がってくるという密度（熱塩）循環である。高密度水が生成されるのが極域・海水域の海であり、海水生成の際に吐き出される高塩分水（ブライン）が高密度水の生成源になっている。世界で最も重く、深層循環の最も重要な駆動源である南極底層

水の形成に対して、南極沿岸ポリニアにおける多量の海水生産が重要な役割を果たしていると考えられている。南極沿岸ポリニアは主に風や海流によって海水が運び去られることが原因で出現し維持される薄氷域である。冬季において、沿岸ポリニアに限らず薄氷域での大気に対する熱損失は他の一般の海水域と比べて1～2オーダー大きく、海水が活発に生産されている。

この海水生成およびその移動・融解は、南大洋の熱塩フラックスを決める重要な因子であるが、現場観測が難しい海域であるため、変動はもとよりその平均的な量・分布さえも今までよくわかっていなかった。これは海洋大循環モデルにおいても、海水域での適切な熱塩フラックス境界条件・検証データがないことに相当する。実際に従来ほとんどのモデルでは、南極海域での表層からの高密度水の潜り込みは、本来あるべき沿岸ポリニアからではなく深い外洋域で生じており、正しく熱塩循環が表現されているとは言えない。また、海水の大きな変動は、高密度水の生成量を変え、さらには海洋深層循環を変えうる潜在力を持っている。

我々のこれまでの研究は、衛星マイクロ波放射計のデータを用いて薄氷域の水厚を検出して（Tamura *et al.* 2007）熱収支計算を行い、熱損失は主に海水生成に使われるとの仮定の下で海水生産量を見積もっている（Tamura *et al.* 2008）。本研究は、この熱収支計算によって得られる熱フラックスと海水生産量から得られる塩分フラックスのデータセットを作成する。これによって、今までよくわかっていなかった海水域での熱塩フラックス条件が気候モデルに対して提供されることになり、モデルによる気候変動の予測に対しても大きな貢献となると考えられる。また本研究によって、南極底層水と海水生成・融解との変動の関連性についても明らかにすることができる。

第1図は、ERA-40データを用いて1992-2001年の期間で計算した、南大洋における年平均の熱塩フラックスの空間分布を示している。熱（塩）フラックスの分布は、海水生産量の高い沿岸ポリニア域において負（正）、沖において正（負）という強いコントラストを持っている。このことは、岸で生成された海水が沖に運ばれて融解することによる、岸から沖への淡水や負の熱の輸送という、これまで定性的に考えられてきた事を定量的に示している。また、塩分フラックスの分布図からは、南極沿岸域において東方で作られた海水（高塩分水）が沿岸流に乗って西方に運ばれ、ウェッ



第1図 ERA-40を用いて計算した、(上)年平均熱フラックスと、(下)年積算塩フラックスの空間分布(1992~2001年の平均)。

デル海・ロス海において沖に運ばれている(底層水が作られている)様子が伺われる。

この熱塩フラックスデータセットによって、海洋大循環モデルに対して海水域での熱塩フラックス条件を与えることができ、海水モデルを入れなくても海水生成による中深層循環を再現する事が可能になる。海水結合モデルに対しては、海水や熱・塩がどこでどれだけ生成されているかに対する検証データとして使用できる。また、大気モデルに対しては、これまで考慮されてこなかった沿岸ポリニヤでの大気に対する熱フラックスの極大を取り入れるための熱フラックス条件を与えることができる。

3. 「海洋観測から見た北極海アラスカ沖での海水・高密度水形成」

伊東素代(海洋研究開発機構地球環境変動領域)

北極海アラスカ沖の大陸棚では、冬季に卓越するポーフォート高気圧の沖向き風によって、北極海で最大級の沿岸ポリニヤ(バローポリニヤ)が形成される。厚い海水は、大気-海洋間の熱のやり取りを遮断するため、海水成長は遅くなる。一方、沿岸ポリニヤは、できた海水が沖に吹き寄せられて、大気と海洋が直接し、厳冬期でも海水形成が非常に活発に起こる、言わば「海水の生産工場」である。海水成長時には、高塩分のプラインが排出される。バローポリニヤは、太平洋からベーリング海峡を通して流入する海水の流路上にあるため、冬にこの海域を通過する太平洋冬季水は、プラインを含んで重くなり、北極海の中層に広がる。この冬季水層は、下層の大西洋水の膨大な熱が、表層に影響し、海水融解を促進するのを防ぐバリアーの役割を果たしている。冬季水の性質は、ベーリング海峡よりも南での海水変質と、ポリニヤの出現頻度および海水形成によって、大きく左右されると考えられてきたが、観測が少なく、詳しいことは分かっていた。そこで、係留系観測(海中に測器を係留して水温、塩分、流速等を観測すること)、船舶観測などの海洋データ、人工衛星、客観解析気象データによる熱収支計算を用いて、海水/高密度水の形成量の経年変動とその原因を調べた研究成果を発表した。

2000~2006年のポリニヤ周辺の係留系観測から、6冬のうち、2000/2001年と2001/2002年の2冬に、冬季水の高密度化が顕著だったことが分かった。しかし、その原因は異なり、2000/2001年冬はポリニヤでの大量の海水形成、2001/2002年冬はベーリング海峡より南での海水の高密度化であることが分かった。それ以外の4冬(2002/2003, 2003/2004, 2004/2005, 2005/2006年冬)は、2003/2004年冬以外は、ポリニヤの出現頻度が低く、高密度な冬季水も観測されなかった。一方、2003/2004年冬は、厳冬期にポリニヤ出現頻度が高く、従来なら高密度水が形成されるはずである。しかし、高密度水はほとんど観測されなかった。この年は、ポリニヤ直下の海水温が、結氷温度より0.5~1.0°C高く、ポリニヤが開いても、活発な海水形成は起こらなかったことが予想される。近年、夏季の海水減少でより多くの日射が海洋に入ることになったこと、夏季に太平洋から流入する暖水の温度が上昇していることが原因で、北極海の海洋表層の貯熱量は増

大している。冬季の海洋混合層は、大陸棚では海底(50~100 m)近くまで達するが、沖合い(海盆域)では表層塩分が低密度成層が発達しているため、30 m程度に抑えられ、夏季に蓄えられた熱は亜表層に残る。2003/2004年冬は、この暖水が、海盆から陸棚のポリニヤ域へ継続的に供給されたため、ポリニヤが開いても海水形成は起こらなかったことが予想される。1990年代までは、冬季の北極海の表層~亜表層は、結氷温度になっているのが常識で、これは今までには無かった状況である。今後も北極海の海水の減少が続けば、海洋表層の温暖化は、更に進むだろう。その影響は、海洋表層のみに留まらず、海水/高密度水形成の減少を通じて、海洋中層にまで達する可能性がある。

4. 「海洋データ同化システムを用いた北太平洋底層昇温と南極沿岸域海面フラックス変動に関する研究」

増田周平(海洋研究開発機構地球環境変動領域)

近年の観測研究によって海洋の全球貯熱量が過去数十年の時間スケールで増加していることが指摘されている(e.g. Levitus *et al.* 2005)。貯熱量の増加は、大気と海洋の熱配分の変化の結果であると考えられ、長期的気候変動に関わる問題として注目されている。

最近の高精度海洋観測は太平洋の水深4000 m以深でも十年程度の時間スケールで有意な水温上昇がおこっていたことを審らかにし、この現象が全球的な熱配分の変化を考える上で重要な役割を果たす可能性を指摘している(e.g., Fukasawa *et al.* 2004; Kawano *et al.* 2006)。海洋研究開発機構(JAMSTEC)では観測で捉えられた深層の水温変化傾向を力学的整合性を保ったまま再現できるような四次元変分法全層同化システムを開発し、そのシステムの根幹をなす随伴方程式(アジョイント)モデルを用いて北太平洋底層での水温上昇の起源・力学過程についての考察を行った。

四次元変分法で用いられるアジョイントモデルを時間を遡って積分することにより特定の変動現象に対する影響要因や起源を調べることができる(e.g. Fukumori *et al.* 2004; Masuda *et al.* 2006)。ここではターゲットとする海域(北太平洋北緯47度, 東経160度, 5200 m深)の水温に対して評価関数を作成し、アジョイントモデルを使って制御変数(モデル初期値・境界条件)に対する評価関数の勾配を求めること

で、ターゲット海域での水温の変化に対する制御変数の影響度(感度)を調べた。

40年間の感度解析実験を行った結果、制御変数のひとつである海面熱フラックスに対する感度が南極大陸アデリー海岸沖において顕著な値を示した。これは海面熱フラックスの増加に伴い南極縁辺海で形成される深層水の量を減少させることが北太平洋の底層で発見された水温上昇の主な起源であるということモデル力学の観点から示唆した結果である。この結果は過去のモデル研究結果(e.g., Nakano and Sugihara 2002)と矛盾せず、南極大陸で採取されたアイスコアを用いた解析結果(e.g., Curran *et al.* 2002)や過去の衛星観測結果なども整合的である。このことは南極海面における環境変動と北太平洋の底層水温上昇現象の間に数十年スケールの力学リンクが存在することを示しており、今後、全球的な熱配分の時間変化を理解する上で海洋・衛星観測などにより南極海域変動を継続的にモニタリングすることが重要であることを示唆している。

5. 「コメント：海水域の広域の熱フラックスの定量的見積もりについて」

川合義美(海洋研究開発機構地球環境変動領域)

南大洋における海面冷却、海水形成は海洋の中層・深層水形成に重要な役割を果たす。特に太平洋の深層循環にはアデリー沖の海面冷却が大きな影響を与える可能性がある(Nakano and Sugihara 2002)。増田氏の講演で紹介されたように、ここ20年ほどの間に観測で確認された太平洋の底層水昇温(Kawano *et al.* 2006など)の原因を感度実験で探った結果、40-50年前にアデリー沖の海面冷却が弱まっていたことが原因である可能性が示唆された。

この感度実験の結果を裏付けるためには実際の観測データから海面熱フラックスの変動を確認する必要がある。しかし衛星観測のない40-50年前はもちろん、衛星観測の充実した現在においても海水の存在する海域における海面熱フラックスを正確に見積もることは非常に難しい。その大きな理由として、海水の存在する海域では衛星による海上風観測が不可能であり、また海面水温(SST)、海水面温度、及び海水厚の衛星観測も容易ではなく、精度にまだ問題があることが挙げられる。現在、衛星データを活用した全球海面熱・運動量フラックスデータセットがいくつかの機関で作成されているが(Curry *et al.* 2004)、少しでも海水

のある海域は始めから対象外となっている。また大気再解析データセット内の海面フラックスもモデル中の海水の扱いが非常に大雑把であるため議論に耐えるものではない。

海氷域の海面熱フラックスを推定するために、田村氏の紹介された方法は大変有効であると思われる。田村氏の手法による推定値を今後更に良くするためには

- ・衛星データから SST を推定する手法の改善
(例えば Rayner *et al.* 2003 ; Vincent *et al.* 2008 など参照)

- ・衛星導出海氷厚の更なる精度向上
- ・大気再解析におけるモデル中の海水の扱いの改善、海氷結合モデルの発展

などが必要と考えられる。推定された海面熱フラックス値はやはり何らかの方法で精度検証する必要があるが、これについては特効薬はなく、今後の課題となるであろう。関係する研究者同士の更なる協力が望まれる。

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。

参 考 文 献

- Curran, M. A. J., T. D. Van Ommen, V. I. Morgan, K. L. Phillips and A. S. Palmer, 2003 : Ice core evidence for Antarctic Sea ice decline since the 1950s. *Science*, **302**, 1203-1206.
- Curry, J. A., A. Bentamy, M. A. Bourassa, D. Bourras, E. F. Bradley, M. Brunke, S. Castro, S. H. Chou, C. A. Clayson, W. J. Emery, L. Eymard, C. W. Fairall, M. Kubota, B. Lin, W. Perrie, R. A. Reeder, I. A. Renfrew, W. B. Rossow, J. Schulz, S. R. Smith, P. J. Webster, G. A. Wick and X. Zeng, 2004 : Seaflux. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 409-423.
- Fukasawa, M., H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, H. Uchida and A. Nishina, 2004 : Bottom water warming in the North Pacific Ocean. *Nature*, **427**, 825-827.
- Fukumori, I., T. Lee, B. Cheng and D. Menemenlis, 2004 : The origin, pathway, and destination of Nino-3 water estimated by a simulated passive tracer and its adjoint. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 582-604.
- Kawano, T., M. Fukasawa, S. Kouketsu, H. Uchida, T. Doi, I. Kaneko, M. Aoyama and W. Schneider, 2006 : Bottom water warming along the pathway of lower circumpolar deep water in the Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23613, doi : 10.1029/2006GL027933.
- Levitus, S., J. Antonov and T. Boyer, 2005 : Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02604, doi : 10.1029/2004GL021592.
- Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, T. Toyoda, Y. Ishikawa and K. Horiuchi, 2006 : Interannual variability of temperature inversions in the subarctic North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24610, doi : 10.1029/2006GL027865.
- Nakano, H. and N. Sugimoto, 2002 : Importance of the eastern Indian Ocean for the abyssal Pacific. *J. Geophys. Res.*, **107**, 3219, doi : 10.1029/2001JC001065.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent and A. Kaplan, 2003 : Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4407, doi : 10.1029/2002JD002670.
- Tamura, T., K. I. Ohshima, T. Markus, D. J. Cavalieri, S. Nishashi and N. Hirasawa, 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. Nishashi, 2008 : Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L07606, doi : 10.1029/2007GL032903.
- Vincent, R. F., R. F. Marsden, P. J. Minnett, K. A. M. Creber and J. R. Buckley, 2008 : Arctic waters and marginal ice zones : A composite Arctic sea surface temperature algorithm using satellite thermal data. *J. Geophys. Res.*, **113**, C04021, doi : 10.1029/2007JC004353.