

2004年秋季極域・寒冷域研究連絡会の報告

日本気象学会2004年度秋季大会(福岡)3日目(10月8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(アクロス福岡1F円形ホール)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、「寒冷域の大気循環」及び「両半球の海氷域変動とモデリング」と題しての講演特集であった。最近、客観解析データや衛星データの充実に加え、海氷モデルの開発などで、極域研究の方向も非常に多岐にわたるようになってきた。極域研究の発展には、現地での直接的観測が非常に重要であるとは言うまでもないが、それに加え、データ解析やモデル研究などの間接的手法による研究も重要な貢献をしている。そこで、今回は、数値モデルやデータ解析等による「デスクワーク」を中心に研究を進められている4名の方々に講演をお願いした。前半では、最近話題になった、2002年に南半球で見られた大規模突然昇温に関する研究を紹介して頂き、後半では、観測データ及び再解析データを用いた両極の海氷変動に関する研究、及び海氷モデルを用いた研究についての話題を提供して頂いた。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所)

世話人:

平沢尚彦(国立極地研究所)

中村 尚(東京大学理学部)

浮田甚郎(コロンビア大)

高田久美子(地球環境フロンティア研究センター)

阿部彩子(東京大学気候システム研究センター)

佐藤 薫(東京大学理学部)

本田明治(地球環境フロンティア研究センター)

齋藤冬樹(東京大学気候システム研究センター)

猪上 淳(地球環境観測研究センター)

高谷康太郎(地球環境フロンティア研究センター)

話 題

1. 寒冷域の大気循環

1.1 「2002年南半球大規模突然昇温について」

廣岡俊彦(九州大学理学部)

2002年9月下旬の南半球において、南半球の観測史上初となる大規模突然昇温が発生した(Baldwin *et al.*, 2003)。成層圏突然昇温の規模による分類は1960年代初めから行われており、10 hPa 面かそれ以下の高度面で、緯度60度より極側が高温となり、同時に西風極夜ジェットが東風に変わるものを大規模突然昇温、それ以外のものを小規模突然昇温とするのが一般的である。突然昇温はプラネタリー波が対流圏で非常に強くなり、それが成層圏に伝播することにより引き起こされるため、プラネタリー波活動が強く、平均するとほぼ2年に1回の割合で大規模突然昇温が生じる北半球とは対照的に、プラネタリー波活動が弱い南半球では、大規模突然昇温は起こらないものと考えられていた。

この突然昇温では、9月半ばには同心円状に近かった極渦が9月20日頃に長く引き伸ばされ、9月23日にその中心が2つに分かれ、9月25日には完全に分裂するという、極渦分裂型の特徴を示した。同時に、この時期には最盛期となるはずのオゾンホールも、大規模突然昇温が生じた結果、近年ではまれに見る小規模なものにとどまった。以下では、この大規模突然昇温を発現させたいくつかの要点をまとめる。詳しくは、現在投稿準備中の著者らの論文で議論されるはずである。また、アメリカ気象学会機関誌の特集号(Shepherd *et al.*, 2005)にはさまざまな方面からの研究成果が掲載されているので、合わせて参照されたい。

それまで南半球では大規模突然昇温が生じなかったわけであるが、2002年には一体何が通常と異なっていたのだろうか。今回の突然昇温にともなう極渦の分裂には、東西波数1から3までのプラネタリー波成分すべてが関与したことが明らかとなっている。2002年の南半球冬季は、季節を通してプラネタリー波の活動が活発で、7月頃から何度も小規模突然昇温が生じており、その結果9月半ばには極夜ジェットがかなり弱

まっております。その構造もプラネタリー波を導きやすい構造になっていた。このような極夜ジェットの変化をもたらす効果はプレコンディショニング (Preconditioning) とよばれており、北半球における大規模突然昇温のいくつかの事例でその重要性が指摘されている。今回も、このプレコンディショニングの結果、プラネタリー波が有効に成層圏へと伝播できたのだと考えられる。

しかしながら、プレコンディショニングの効果があるとせよ、比較的短い波長の東西波数3成分が冬季成層圏の強い西風中を上方伝播するのは難しく、ここではさらに特別な条件が加わったものと考えられる。2002年9月の南半球では、対流圏界面付近では総観規模擾乱が例年になく活発で、対流圏界面から下部成層圏にかけての領域の西風が顕著に減速されており、プラネタリー波の伝播に有利であった。この領域は、いわばプラネタリー波にとって成層圏への入り口に当たり、同様の特徴が北半球における大規模突然昇温の事例でも見られる。このことも大規模突然昇温の生起にとって重要な要素と思われる。

次に、プレコンディショニングの形成にとって重要な、7月以降小規模突然昇温が繰り返し生じた要因について考えてみる。さかのぼって極夜ジェットの状況を見てみると、9月半ばほどではないにしろ、すでに7月くらいからプラネタリー波の伝播に好都合な構造が見られ、7月以降、プラネタリー波の間歇的な伝播が生じていた。また、南半球冬季成層圏でしばしば観測される東西波数2の東進波が期間を通して顕著に見られ、東西波数1成分の寄与と合わさって、小規模突然昇温の10日から2週間くらいの周期での発現をもたらしたと思われる。一方、その前の5、6月の極夜ジェットには同様の特徴は見られなかったが、対流圏でのプラネタリー波は例年以上に活発であった。このように、5～9月にかけての持続したプラネタリー波の活動性が、極夜ジェットと相互作用しながら次第にプラネタリー波の伝播に好都合な条件を作り上げ、さらに活発な総観規模擾乱の寄与が加わって、9月下旬の大規模突然昇温を導いたものと考えられる。

以上のように、少なくとも、9月下旬の南半球成層圏は、プラネタリー波の伝播に大変好都合であった。そして、大規模突然昇温を最終的にもたらしたのは、9月下旬に出現したプラネタリー波の、特に極渦の分裂に直接関与する東西波数2および3成分である。これについては、9月下旬の南半球対流圏では顕著なブ

ロッキング現象が生じ、それが波源となったという報告がある (例えば、Nishii and Nakamura, 2004)。このように見てくると、単独では大規模突然昇温には至らなかったいくつかの要因が重なり合って、ようやく大規模突然昇温が発現したような印象を受ける。特に、プラネタリー波、総観規模擾乱、ブロッキングと、大小さまざまなスケールの波動すべてが活動的であったことが重要と考えられる。今後は、どうして2002年にそのような高い波動の活動性が生じたのかを、色々な方面の研究を通して明らかにしなければならない。

2. 両半球の海水域変動とモデリング

2.1 「北半球海水域変動と大気循環場の関連についての最近の見聞」

本田明治 (地球環境フロンティア研究センター) 気候システムにおいて雪氷圏は主に熱力学過程や放射過程にかかわる主要な変動要素のひとつとして認識されており、中でも海氷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の大きさから、気候変動に果たす役割も大きいと考えられる。海水は文字通り海洋上に存在するので、最近まで広域の変動特性は分からなかった。1970年代のマイクロ波放射計搭載衛星による定常的な観測の開始に伴いグローバルな海水域分布が把握されるようになってからおよそ四半世紀、蓄積された海水データによって長期変動やグローバルな気候変動との関連なども議論されるようになってきた。

海水の定義は海水が凍ったもので、海上に浮かぶ氷山などの淡水氷は海水ではない。ひとつの特徴は海水生成時に排出される塩の一部が濃縮された高塩分水 (ブライン) として純水の薄板の間に残ることである。ブラインは時間とともに徐々に脱落していくが、およそ -20°C 以上では氷内に液体として存在するので、生成後しばらくは水温が高いほど海水は大きな比熱を持つことになる。巨視的にみると海水は大気海洋間に存在する薄膜に過ぎないが、このような熱特性もあり大気-海洋間の熱交換を著しく抑制することになる。また運動量の交換も抑えられ、表面アルベドも増加する。海水はしばしば積雪にも覆われるため、白い大陸が洋上に広がったとみることもできる。

北極海では通年でほぼ海水が存在するため、多年氷域と呼ばれることもある。一方、周辺のおホーツク海、ベーリング海、ラブラドル海、バレンツ海は季節海水域と呼ばれ暖候季に海水は主に融解によって消失する。北半球全体ではまとまったデータのあるここ25年

では特に冬季を中心に海水域面積はいずれの季節も減少傾向にあり、近年の温暖化との関連が議論されており、今後も監視が必要である。ちなみに「海水面積」は海水密接度を考慮した実際に海水に覆われた面積であり、「海水域面積」は海水密接度がある閾値以上ならその格子は海水が存在する海域として面積を計算する。広域の海水変動を調べるときは後者を一般によく用いる。

続いて寒候季の北半球海水域面積の変動に着目すると、北極海はほぼ完全に海水に覆われるため、周辺の季節海水域の変動が議論の対象となる。我々にとって最も身近な季節海水域はオホーツク海で、最盛期には北海道の沿岸まで到達する。北半球の最もな海水域としては最南端である。海水が接岸する沿岸としては世界で最も人口密度が高いであろう。そのような訳で冬の流水観光も近年は盛んであるが、年による海水勢力の変動は大きく、近年では1989年のように北海道沿岸に全く接岸しなかったこともある。1993年のように5月の連休まで居座ることもある。オホーツク海全体の海水域も大きな年々変動をしており、それは他の季節海水域も同様である。最近の研究では、先に示した4つの季節海水域の年々変動はてんでばらばらではなく、相互に関連して変動していることが分かってきた。最も顕著なのはユーラシア大陸側（オホーツク、バレンツ）と北米大陸側（ベーリング、ラブラドル）の海水域変動間のシーソー関係で、これは冬季大気循環場の主要な変動のひとつである北大西洋振動と密接に関連していると考えられる。また4海域が同位相になるような変動も抽出され、これはエルニーニョ現象との関連が指摘されている。またこれら季節海水域では複数年に渡って海水域偏差が持続する海域もあり、また相互の海域でも1～2年のラグを持って有意に海水域偏差が関係している場合もある。十年規模変動との関連は不明であるが、現在も研究は進められている。

最後に海水域変動が大気場に及ぼす影響について紹介する。先に示した熱的な特性から、海水に覆われることによる低温化でローカルな高気圧の発生が期待される。オホーツク海でもいくつかの事例解析で示されている。最近の数値モデルを用いた研究では、各海水域変動は広範囲の大気循環場に影響を及ぼし得ることも分かってきた。例えば、オホーツク海の海水域変動は対流圏全体に停滞性ロスビー波を励起しアリューシャン低気圧への影響のみならず、北米上空の循環場にも影響を及ぼす。また北太平洋セクターでは、ア

リューシャン低気圧の強化→オホーツク海の海水増加→アリューシャン低気圧の強化、という正のフィードバックをもたらす一方、最近の複数の研究によると、北大西洋セクターでは海水域変動と大気循環場の間には負のフィードバックが働く傾向にあるらしい。これらの結果の解釈には十分な議論が必要で、多くの研究者が取り組んでいる。海水域変動と大気循環場の因果関係の謎はまだまだ多く本格的な研究は今始まったばかりである、と言えるのかもしれない。

2.2 「南極海水域の変動について衛星リモートセンシングデータから分かること」

木村詞明（北海道大学低温科学研究所）

2.2.1 背景

海水は大気と海洋間の熱交換を遮断し、その生成融解に伴い熱や塩を放出するなどの特徴を持つことから、気候システムの中で重要な役割を果たしていると考えられている。海水の分布は変動が大きく、その様子や大気場との関係などについては比較的よく研究されてきた。しかし変動のメカニズム、すなわち、どこで生成され、どのように移流・成長し、どこで融解することによって海水域が変動しているかについてはよく分かっていない。海水の変動が大気や海洋に与える影響の大きさを知るためにも、そのメカニズムを解明することは重要な課題である。これまで海水域の変動メカニズムに関する研究があまり進展しなかった大きな理由のひとつに、利用できる広範囲な海水データが海水密接度のみに限られていたことが挙げられる。そこで、マイクロ波放射計 SSM/I による観測データから、海水密接度に加えて毎日の海水漂流速度のデータセットを作成し、それらを用いて南極海の海水域の変動メカニズムを知るための解析を行った。

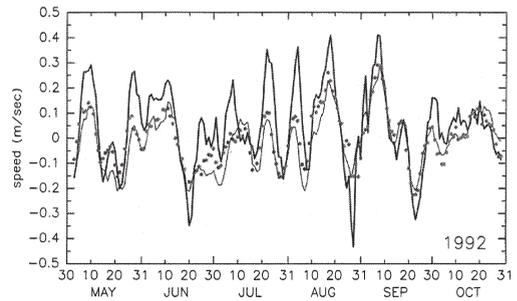
2.2.2 海水の動きの特徴

まず、作成した海水漂流速度データセットを用いて、海水の動き自体に注目した解析を行った。南極海の平均の海水漂流速度場は沿岸に沿った西向き動きと低緯度側での東向きの周極的な動き、ウェッデル海とロス海での北に向かう動きで特徴づけられる。日々の海水の動きと風速とを比較すると、両者の間には最大で相関係数が0.9に達する強い相関があった。また、風速に対する海水漂流速度の比率は海域によって異なり、陸地から離れるほど大きくなる傾向が見られた。さらに、海水の動きから風速変化に応答する成分を差し引くことにより、表層海流の推定を行った。得られた海

流場には東南極の沿岸流が顕著に見られ、それは海底地形に沿って蛇行していた。また、平均の海水漂流速度場は主に平均の風速場によって決定されていることも分かった。

2.2.3 海水域の日々の変化は何によって起こるか
海水域の広がり（氷縁の位置）は、海水が移流するという力学的過程と海水の生成/融解という熱力学的過程の双方によって変化している。海水域の変化を理解するためには、変化がどちらの過程によるものかを知る必要がある。第1図は西経135度の経度線上での氷縁位置の移動速度、氷縁での海水漂流速度、地衡風速のそれぞれの南北成分の時間変化を示したものである。おおまかには、三者の時間変化の傾向はよく似ている。同様の比較を南極海全体で行った結果、全ての海域で、風速と海水漂流速度の間には相関係数0.7~0.9の高い相関が見られた。また、風速と氷縁位置の移動速度、海水漂流速度と氷縁位置の移動速度との間の相関係数はどちらも0.5~0.8であった。これらの相関の強さは海域によって異なり、西南極で高く、東南極で低い傾向が見られた。また、第1図にも見られるように、海水域の拡大時には海水漂流速度よりも氷縁の移動速度の方が速くなる傾向がある。つまり、その差は氷縁での海水生成（熱力学的過程）によって海水域が拡大していることになる。そこで、全ての海域で氷縁の移動速度と氷縁での海水漂流速度との詳細な比較を行った。その結果、海水域の拡大期（3~8月）の沖向き風時には氷縁位置は海水の動きの2~4倍の速さで沖向きに移動し、その他の場合には氷縁は海水漂流速度とほぼ同じ速さで移動することなどが分かった。得られた結果から、日々の海水域（氷縁位置）の変化の速さは第1表のような過程の寄与により決まっていることが明らかになった。海水域の拡大期の沖向き風時には、海水の沖向き移流のみならず氷縁での海水生成により海水域が急速に拡大する。この結果は、拡大期であっても氷縁での海水生成がほとんど起こらない北半球の季節海水域での結果とは異なるものである。さらに、得られた結果に基づき、沖向き風時の海水生成量は海水漂流速度に比例すると仮定して、海水漂流速度のみを用いて各海域での海水域の変化を予測した。その結果は実際の変化とよく一致し、海水域の拡大する速さや短周期の変化だけでなく、それらの海域や年による違いも再現できた。

2.2.4 海水面積の季節変化は何によって起こるか
南極海を経度線によっていくつかの海域に分け、そ



第1図 西経135度線上の氷縁位置の移動速度（太線）、海水漂流速度（点）、地衡風速（細線：2%の大ききで表示）の南北成分の時間変化の例(1992年)。正の値が北向き（沖向き）の速さを示す。海水漂流速度は地衡風速の2%と非常によく一致する。また氷縁位置の移動速度は値が正の時（沖向きに拡大するとき）に海水漂流速度よりも速い傾向がある。

第1表 日々の海水域（氷縁位置）の変化の速さの、時期及び風向きによる過程の違い。

	沖向き風時	岸向き風時
海水域の拡大期 (3-8月)	海水移流+海水生成	海水移流
海水域の後退期 (9-12月)	海水移流	海水移流

それぞれの海域での海水面積の季節変化が何によって起こっているかについて解析を行った。まず、密度度と漂流速度を用いて海水域内部での海水生成面積を計算した。その結果、海水生成は沿岸域で集中的に起こっていることや、ウェッデル海沿岸域での海水生成は少なく、ロス海やインド洋側の沿岸域での生成量が多いことなどが明らかになった。

次に、それぞれの海域で、毎月の海水面積の変化量、海水域内部での海水生成面積（-消滅面積）、隣接する海域からの流入面積の見積もりを行った。これらの量と、残差として得られる氷縁での生成・融解面積とのバランスから、各海域での海水面積の季節変化の過程を知ることができる。例としてウェッデル海の結果を第2図に示す。結果として、ほとんどの海域で海水域は氷縁での海水生成と沿岸域での海水生成の同程度の寄与によって拡大していること、融解期には氷縁で急速な海水融解があることなどが明らかになった。氷縁での海水生成が起こる期間は海域によって異なり、例えばウェッデル海では海水域が拡大する期間を通じて

氷縁でも海水生成があるのに対し、ロス海では海水域の拡大期の後半は氷縁では海水融解が起こっていた。また、インド洋側の海域の一部では年間を通じて氷縁では海水が融解していることも分かった。

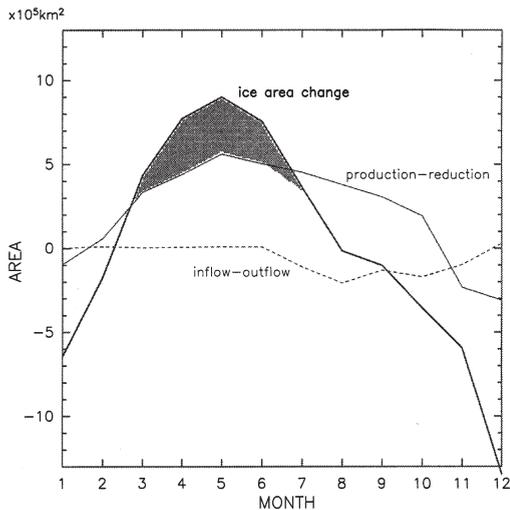
2.2.5 今後の課題

現在までの解析により、海水域の変動メカニズムについてその全体像が明らかになってきた。今後、マイクロ波放射計 AMSR-E などのより高解像度の観測データを用いることにより、さらに詳細な海水域変動の実態が明らかにできるであろう。しかし、以上のような解析は海水の面積という二次元量を議論しているに過ぎない。衛星リモートセンシングデータから海水の厚さ分布を知ることは困難であるが、何らかの手法を用いて海水の厚さも含めた三次元量の変動メカニズムを解明していく必要がある。

2.3 「南極海水分布に海水力学過程が及ぼす影響について」

小倉知夫 (国立環境研究所)

現在及び過去の海水分布を維持するメカニズムを理



第2図 ウェッデル海域(西経0度-60度)での各月の海水面積の変化量(太線), 海水域内部での生成面積(細線), 隣接する海域からの流入面積(点線). 濃影部と薄影部はそれぞれ氷縁での生成面積と融解面積を示す. 海水域は3~7月にかけて拡大し, その間は氷縁でも海水生成が起こっている. また, 12月に急速な面積減少が見られ, それは主に氷縁での海水融解によるものである.

解する上で, 海水モデリングは一つの有力な手段と期待される. 海水の分布は大気, 海洋との様々な相互作用の結果として決定されるため, 海水モデルは大気GCM, 海洋GCMと結合して用いることが最も望ましい. 東大気候システム研究センター(CCSR), 国立環境研究所(NIES), 地球環境フロンティア研究センター(FRCGC)では2002年より共同で大気海水海洋結合大循環モデル(OAGCM)の開発を進めており, 本講演ではこの結合モデルの海水部分の概要について紹介した.

OAGCMの中で海水は海面放射収支や大気海洋間の乱流輸送へ影響を及ぼすほか, 氷の生成・融解に伴う塩分・淡水の放出を介して海洋塩分濃度を変える役割を担う. 海水分布はグリッド平均の厚さと密度として表現され, 質量保存則と密度に関する経験則を元に予報される. その際, 融解や凍結, 海水移流の効果はそれぞれエネルギー, 運動量の保存則に基づいて考慮される. また海水内部応力は, 海水を粘性, 塑性を備えた連続体と見なすことで表現される. なお, 計算機コストを抑えるために海水内部の熱力学過程やサブグリッドスケールの海水厚分布の表現は簡略化されており, 大気T42, 海洋海水 $1.4^\circ \times (0.5-1.0)^\circ$ の解像度で1か月に数百年の積分が可能である.

上記の結合GCMを用いることで, 海水分布の維持, 変動メカニズムを理解する手掛かりを得ることが可能と考える. その一例として, 低解像度版モデル(大気T21, 海洋海水 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$)を用いた数値実験結果を次に紹介したい(Ogura *et al.*, 2004).

海水力学過程(風, 海流, 海水同士の接触によって支配される海水の移動)が海水分布に及ぼす影響の重要性は夏季南大洋を中心に観測や数値実験で指摘されてきた. しかし, 海水力学過程が海水分布を制御する上で, 海水分布と大気・海洋循環の相互作用が果たす役割については未だ議論の余地が多く残されている. その一因として, これまでの数値実験では大気・海洋循環や放射過程等が簡略化されていたことが挙げられる. そこで本研究では結合GCMを用いることで大気海洋相互作用の表現をより詳細に行い, 海水力学過程が南大洋の海水分布を制御する可能性について冬季を含め検討を加えた. 具体的には, 海水の移動を考慮した数値実験'Control'と考慮しない実験'No-Drift'でそれぞれ積分を行い, 得られた海水面積を南大洋で相互に比較した. その結果, No-Driftでは冬季に数十年規模の海水面積変動が見られるがControlでは同様な

変動は見られず海水面積が比較的安定して維持される様子が確認できた。No-Driftの海水面積変動は冬季ウェッデル海で海洋コンベクションによる上向き海洋熱輸送が間欠的に活発化することに伴って見られる。一方Controlでは海水の生成、移流、融解により低緯度へ向けて淡水が輸送され、海洋の鉛直成層が海水縁辺部で強化されることで海洋コンベクションが抑制される。本研究で得られた結果は、海水力学過程に伴う淡水輸送が海洋コンベクションの強度に影響を及ぼし南大洋の海水分布を安定化する働きを示唆するものである。但し、その働きの重要性については観測に基づき今後検証を進める必要がある。海水移流に伴う淡水輸送量の見積もりを含め、定量的議論を深めてゆきたい。

お詫びおよび謝辞

編集作業が遅れ、研究会報告が大幅に遅れてしまったことを、ここに心からお詫びいたします。また、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

- Baldwin, M., T. Hirooka, A. O'Neill, S. Yoden, A. J. Charlton, Y. Hio, W. A. Lahoz and A. Mori, 2003 : Major stratospheric warming in the Southern Hemisphere in 2002 : Dynamical aspects of the ozone hole split, SPARC News Letter, **20**, 24-26.
- Nishii, K. and H. Nakamura, 2004 : Tropospheric influence on the diminished Antarctic ozone hole in September 2002, Geophys. Res. Lett., **31**, doi : 10.1029/2004GL019532.
- Ogura, T., A. Abe-Ouchi and H. Hasumi, 2004 : Effects of sea ice dynamics on the Antarctic sea ice distribution in a coupled ocean atmosphere model, J. Geophys. Res., **109**, C04025, doi : 10.1029/2003JC002022.
- Shepherd, T., R. A. Plumb and S. C. Wofsy, 2005 : The Antarctic stratospheric sudden warming and split ozone hole of 2002, J. Atmos. Sci., **62**, 565-900.