

航空機を用いたオホーツク海上の気団変質の研究

—海水形成時期に着目して—

—2006年度山本・正野論文賞受賞記念講演—

猪 上 淳*

1. はじめに

この度、名誉ある山本・正野論文賞を頂き大変ありがとうございます。この賞に恥じぬよう日々の研究に勤しみ、気象学に貢献して参りたいと思います。受賞対象論文 Inoue *et al.* (2005a) は、海水が存在するオホーツク海上で引き起こされる気団変質を航空機観測から調べた研究です。なお、本稿に述べる内容は、北海道大学大学院地球環境科学研究科（当時）に提出した博士論文の中核となったものです。

本研究の対象領域であるオホーツク海は、私たち日本人にとっては地理的には非常に近いものの、意外となじみの薄い海かもしれません。しかし、ここでは毎年冬に日本海と同様の気団変質が起きています。その結果生じる海水がさらに大気—海洋間の熱交換過程を複雑にしています。

一般に、大陸や海水域を起源とする寒気が相対的に暖かい海洋上へ流れ出すとき、大量の熱と水蒸気が海洋から大気へ供給され気団変質が進行します。これまで気団の構造と変質の熱力学的・力学的プロセスの解明は AMTEX (Air-Mass Transformation Experiment) (Ninomiya, 1975 ; Lenschow and Agee, 1976) や GALE (Genesis of Atlantic Lows Experiment) (Dirks *et al.*, 1988 ; Chou and Zimmerman, 1989) などの大規模観測プロジェクトによって行われてきました。この気団変質過程は雲の形成などを通じて大気大循環に影響を与えることも知られています

(Agee *et al.*, 1973 ; Randall *et al.*, 1984)。

日本では冬の日本海上の気団変質が科学的にも社会的にも重要な研究対象です。冬の日本海上では大気—海洋間の温度差が大きく、海面から大量の乱流熱フラックスが供給されることによって大気境界層が発達します。風下では筋状雲に代表される雲システムが形成され、日本に大雪をもたらすことがあります。このようなプロセスは総観規模の熱・水収支解析 (Manabe, 1957, 1958 ; Ninomiya, 1968) や数値モデルによって既に示されています (Asai, 1965 ; Asai and Nakamura, 1978)。気団変質がもっとも著しいとされる大陸沿岸でも最近では航空機観測が行われ (Inoue *et al.*, 2005b)、海洋から大気への熱輸送過程とそれに伴う大気境界層の発達過程が明らかになってきています。

さて、日本の冬をもう少し広域に眺めてみましょう。冬型の気圧配置による寒波が何回か通り過ぎ、1月下旬にもなると毎年ニュースなどで北海道から流水 (海水) の訪れが取りあげられます。海水は今でこそ北海道の重要な観光資源として活用されていますが、一昔前までは道東の漁船の操業など沿岸地域に住む人々の日常生活にも影響が及ぶため不安材料として考えられていました。一方科学的には、オホーツク海の海水の多寡は気候変動の指標として重要であると考えられています。

海水は、日本海での寒気吹き出し時のような活発な大気—海洋間の熱交換を遮蔽する効果があるため、大気境界層の発達に伴う雲形成や海面冷却に伴う海水形成など、高緯度領域の大気—海洋間の熱収支を議論する上で鍵となる存在です。しかし、オホーツク海の海水到来期における大気の観測研究は非常に限られお

* 海洋研究開発機構地球環境観測研究センター。

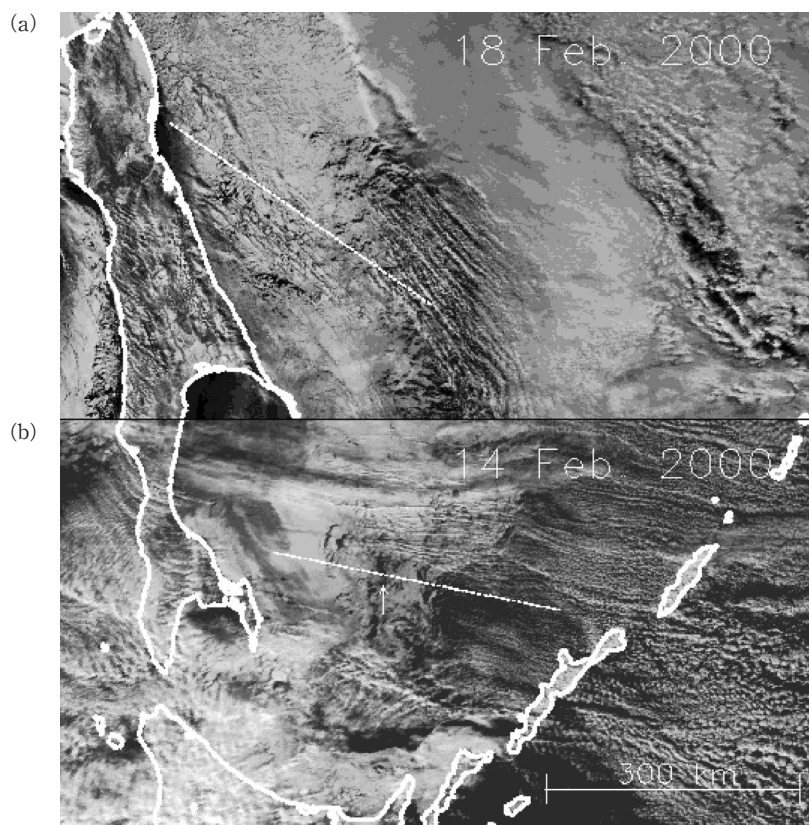
—2007年1月9日受領—

—2007年2月14日受理—

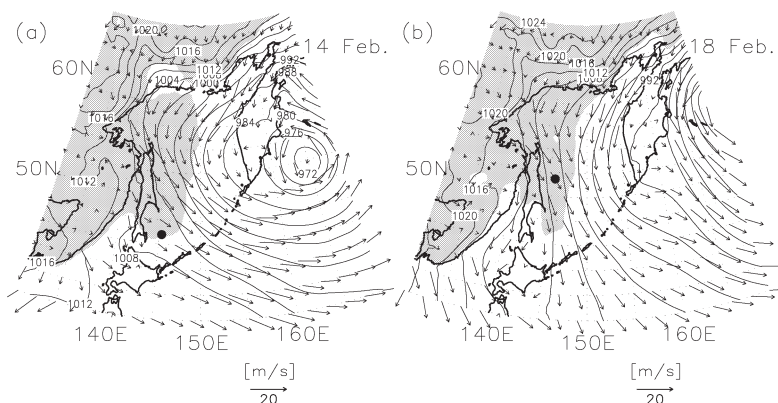
り、船舶を利用した熱収支研究 (Toyota and Wakatsuchi, 2001) や GPS ゾンデを用いた領域スケールの解析 (Iwamoto *et al.*, 2001; Inoue *et al.*, 2001, 2003) が挙げられる程度です。海水域での気団変質を調べるためには、乱流熱フラックスの直接観測とそれに対応する海面に占める海水面の割合 (以下、海水密接度) が必要不可欠です。そのためには短時間で広範囲を調査できる航空機観測が必要でした。そのような観測で得られたデータを解析し議論することが受賞対象論文の主題です。

2. ロシア機を用いた航空機観測

オホーツク海の海水は場所によって海水密接度も厚さも異なります。これまで日本の領海内で行われてきた観測だけでは、オホーツク海の海水域を代表した研究とは必ずしも言えません。オホーツク海のほとんどはロシア領海内ですので観測は政治的に困難ですが、短時間で広範囲の観測が可能な航空機が理想的です。幸いにも、戦略的創造研究推進事業「オホーツク海水の実態と気候システムにおける役割の解明」(代表: 北海道大学低温科学研究所 若土教授) によるプロジェクトによって、ロシアとの共同による航空機観測を2000年2月に初めて実施することができました。



第1図 観測時の海水と雲の NOAA/AVHRR 可視画像。(a) 2000年2月18日のサハリン沖の観測、(b) 2月14日のサハリン南端での観測、矢印は10 km 程度の海面を示す。点線は観測経路を示す。

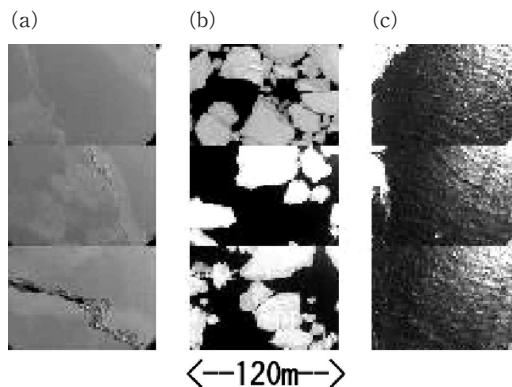


第2図 (a) 2月14日と (b) 2月18日の ECMWF 再解析データ (ERA-40) による航空機観測時の気象状況。等値線は海面気圧、矢印は風向・風速、陰影は -12°C 以下の領域を示す。黒丸はおおよその観測領域の中心を示す。

用いられた航空機はロシア中央高層気象台 (CAO: Central Aerological Observatory) の ILY-SHIN-18 です。観測は、ロシア人研究者と技術者により、サハリンのユジノサハリンスクを出発点として行われました。飛行条件は有視界飛行とし、飛行可能な気象条件としてはサハリンの東海上に北西の季節風が卓越し、かつ筋状雲が存在している場合です (第1図, 第2図)。毎日、天気予報を基に1日先の観測を行うかどうかを日本側 (北海道大学低温科学研究所藤吉教授) が決定し、サハリンで待機しているロシア側に観測の有無と飛行経路・方法を通知しました。

観測は3回行われましたが、本研究ではそのうち2つの事例 (2月14日と18日) を解析しています。この観測の特徴は乱流成分を直接観測できるだけではなく (Strunin, 1997)、海水をモニターするための可視/赤外線カメラを航空機の底面から下向きに設置したことです。第3図のように得られた画像からは、沿岸に近い領域と氷縁域では海水の状態 (海水密接度や氷盤サイズ) が著しく異なることが分かります。海水と大気の乱流成分を観測する飛行は季節風と平行に高度200 mで行いました。さらに気団変質の様子を捉えられるよう気象観測を高度350 m と800 m でも行い、その風上と風下では気温・水蒸気などの鉛直分布も取得しました。

大陸からの寒気がどれほど変質したかは風上と風下の気温や水蒸気量の変化を比較することで分かります。第4図は各観測日における気温と水蒸気の鉛直分布です。風上の逆転層の高度が400~500 m なのに対して風下では1000 m 前後まで高くなっていること、



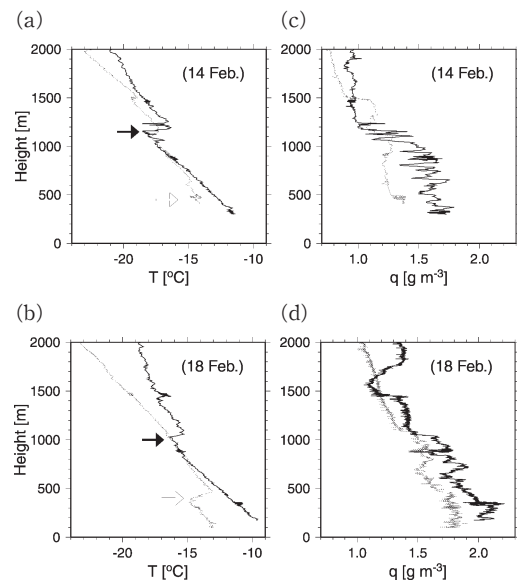
第3図 観測で得られた海水の画像の例 (2月14日)。沿岸域 (a) から氷縁域 (c) へ海水密接度が減少する。

混合層内の気温や水蒸気量が著しく増加していることなどから、海面からの熱・水蒸気の供給 (乱流熱フラックス) が季節風と平行な観測経路上のどこかで存在していたことになります。この気団変質過程を調べるためには、詳細な海水データとそれと対応させる乱流熱フラックスのデータが必要となります。

3. 海水密接度の見積もり

後述の乱流熱フラックスと海水密接度との関係を詳細に調べるためには高空間分解の海水密接度データが必要です。この研究では1秒毎の海水画像を用いて解析することにしました。航空機は毎秒約100 m で飛行しますので、海水データは約100 m の空間分解能ということになります。

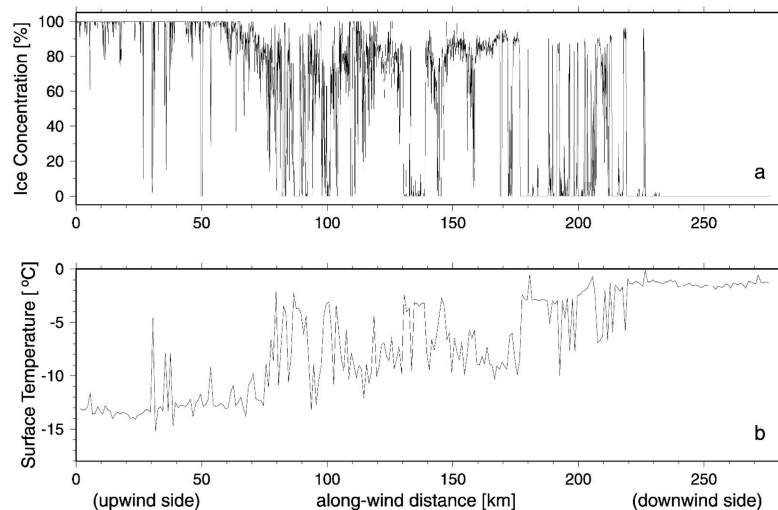
海水と海の識別は基本的には白と黒の色分けで済むため、画像処理において二値化すれば海水密接度は計算できます。ところが、第3図で示したとおり、海水はカメラの自動露出補正の効果によってコントラストが変化し、さらに白黒の面積比は太陽や海水の凹凸によっても変化します。従って、海水と海を区別するための閾値は各画像について決定しなければならず、これは人間の目による判断がもっとも正確です。そこで



第4図 (a) 2月14日と (b) 2月18日における風上 (灰色) と風下 (黒色) の気温の鉛直分布。 (c) 2月14日と (d) 2月18日における水蒸気の鉛直分布。矢印は逆転層高度を示す。

各観測日で得られた画像約3000枚(300 km 分)を1枚ずつ丹念に処理して海水密接度を求める方法を採用しました。

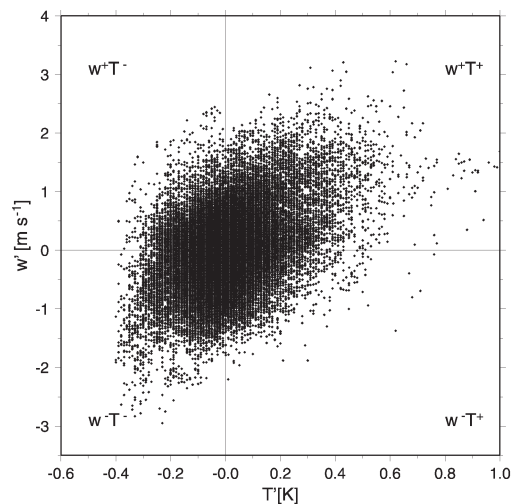
第5図はそうして得られた2月14日の海水データの解析結果です。海水密接度は衛星画像(第1図)と比較して全体的な傾向は一致しますが(沿岸域の多水域や第1図矢印で示された10 km 程度の海面など)、より細かな変動が存在します。この解析結果は表面温度の空間分布とも整合的(海水が多い場所は低い温度、少ない場所は高い温度)であることから、乱流熱フラックスとの比較に有効な信頼性のあるデータセットであることが分かります。



第5図 2月14日の(a)画像解析から得られた海水密接度(%)と(b)赤外線カメラで得られた表面温度(°C)の水平分布。横軸(along-wind distance)は沿岸からの沖向きの距離。

4. 乱流熱フラックスの見積もり

第4図で見たように気温や水蒸気の鉛直分布の変化から観測経路上で海面からの熱・水蒸気の供給があることは分かります。一般に海面付近で加熱され軽くなった空気は上昇し、それを補うために上空から重い空気が降りてきますが、このような場合、気温と鉛直流の乱流成分には正の相関関係が存在することは良く知られています。第6図は2月14日の観測事例(20 Hzで観測された気温と鉛直流の乱流成分)ですが、暖かい気塊($T' > 0$)は上昇($w' > 0$)、冷たい気塊($T' < 0$)は下降($w' < 0$)する傾向があることが分かります。これは乱れによって上空へ顕熱(水蒸気 q' の場合は潜熱)が運ばれていることを意味します。寒気吹き出し時には、このような乱流熱フラックスが収束することによって気温や水蒸気の増加がもたらされることが知られています。ところが、今回観測された最下層の乱流成分は高度200 mで得られたものであることから、この観測結果は必ずしも海面で加熱された浮力成分(サーマル成分)を反映しているとは限りません。通常の渦相関法による温度フラックス($\overline{w'T'_0}$)の計算では不均一な表面状態、すなわち海水の隙間に存在する開水面(以下、リード)にト



第6図 2月14日の最下層の観測で得られた温度(T')と鉛直流(w')の乱流成分の散布図。

ラップされた熱フラックスの抽出が困難です。そこで本研究では、暖かい上昇流の成分、すなわちサーマルの成分($\overline{w^+T'_0}$)や冷たい下降流の成分($\overline{w^-T'_0}$)を分離する手法を用いました。通常、渦相関法で算出される温度フラックスは第6図で示される4成分の和の時間平均で表されますが、ここでは先に各成分を求

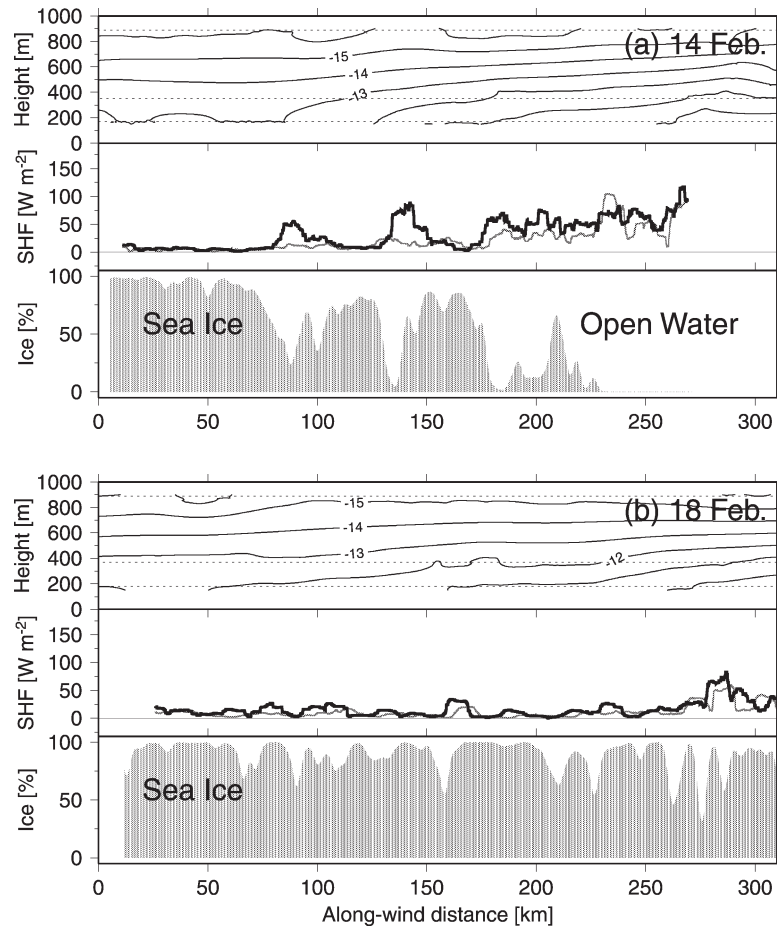
め、それらを個別に抽出しました。この手法は海水の無い東シナ海やメキシコ湾流上の気団変質の研究にも使われています (Mahrt and Paumier 1984; Chou and Zimmerman 1989)。本研究では10 kmの移動平均で各成分を連続的に抽出しました。これでようやく詳細な海水データと比較できる乱流熱フラックスデータの準備ができたことになります。

5. 海水域の気団変質の実態

第7図に各観測日における気温の断面図、顕熱フラックス、海水密度度の水平分布を示します。第4図で見た風上から風下への気温の増加は海水域上で生じているのが分かります。これは海水域に多数存在するリードからの熱供給が考えられます。例えば2月14日で海水密度度が50%以下になっている風上側の領域に着目すると、そこでは顕熱フラックスのサーマル成分が周りよりも著しく大きく

50 Wm^{-2} 以上になっていることが分かります (第7図黒線)。一方、冷たい下降流の成分 (第7図灰色線) は風上ではリードの水平分布に対応していませんが、風下では大きくなっています。これは混合層の発達によって鉛直の熱交換が効率よく行われている証拠です。また、良く見ますとサーマル成分の極大はリードの風下数 km に位置していることも分かります。これは一般風による移流の効果と考えられます。

一方、海水密度度が高い2月18日の事例では、サーマル成分はせいぜい30 Wm^{-2} ですが、同様の箇所が多数あります。またサーマル成分の風下側へのずれは一般風が強かったため14日の事例よりも傾いているな



第7図 (a) 2月14日と (b) 2月18日における気温の鉛直断面図、最下層の観測で得られた顕熱フラックス (Wm^{-2}) (黒線：暖かい上昇流成分、灰色：冷たい下降流成分)、海水密度度 (%) の水平分布。気温は3高度のデータを用いて補間している。海水密度度は顕熱フラックスの空間平均と同様に10 kmの移動平均を施している。

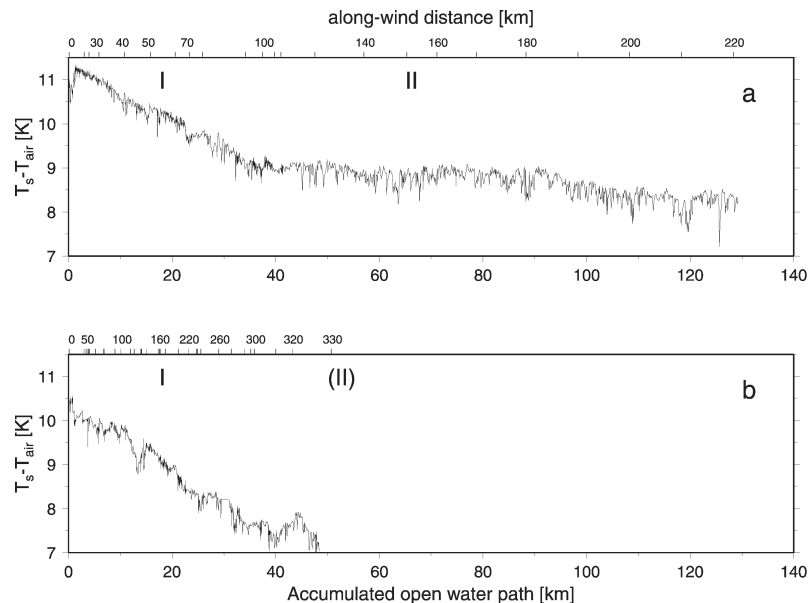
ど、細かい構造まで分かります。風下の冷たい下降流の成分は海水域であるにも関わらずサーマル成分と同等の大きさになっていることから、海水域でも混合層が発達していることが明らかです。

ここでいよいよ海水域の気団変質の実態にせまります。観測された乱流熱フラックスは高度200 mでの値ですが、サーマル成分はリード起源であることから、気温や乱流熱フラックスの水平方向の変化はリードの累積幅に依存している可能性があります。そこで、画像解析から得られた海水密度度からリードの幅を求め、気温や乱流熱フラックスの水平変化を調べました。

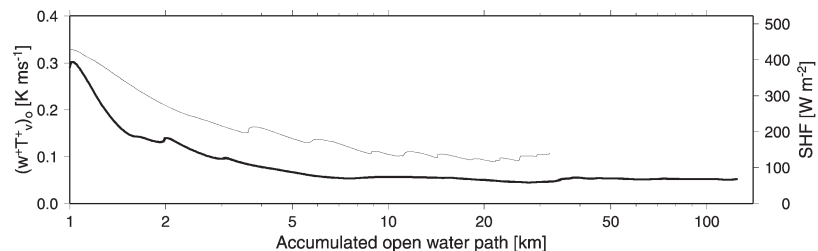
第8図は気塊が接したリードの累積幅と大気—海洋間の温度差の関係を示した図です（海水温は結氷点 -1.8°C に固定）。上の横軸は沿岸からの実際の距離を示し、下の横軸はそこまでリードがどれほど存在したかを示しています。風上は海水密度が高いためリードとしての領域は一見すると少ないですが、海水域内のリードの累積幅は30 km程度と意外にも長く、無視できないほどの海面が存在していることが分かります。従って、海水域でもリードを通じて大気へ熱が供給されることになります。どの程度加熱されたかは大気と海洋の温度差の水平変化に反映されます。リードの累積幅において風上約40 kmまでは大気が著しく加熱されていますが（領域Ⅰ）、それよりも風下ではあまり変化がありません（領域Ⅱ）。実はこれらの領域は第7図で示した風上のサーマルによる加熱と風下の効率的な熱交換と対応する傾向にあります。領域Ⅱでもサーマルが卓越する箇所がありますが、実際の温度変化に重要なのは熱

フラックスの収束・発散であるため、領域Ⅱは領域Ⅰよりも熱フラックスの収束が小さい領域と考えられます。これまでの気団変質の研究では、風下の混合層の発達やそれに伴う雲システムの形成が注目されてきましたが、今回の観測では気団変質過程の初期から発達期までを捉えていると考えられます。

実はサーマル成分とリードの累積幅にも同様の関係が存在するのが確かめられ（第9図）、風上ほど海面が冷却されやすいということも分かりました。これは



第8図 (a) 2月14日と (b) 2月18日の観測におけるリードの累積幅 (Accumulated open water path) と大気—海洋間の温度差 ($T_s - T_{\text{air}}$) の関係。図中上の横軸 (along-wind distance) は沿岸からの実際の距離を示す。領域Ⅰはサーマル成分が卓越する領域、領域Ⅱは混合層が発達している領域を示す。



第9図 リードの累積幅 (Accumulated open water path) とリード起源のサーマル成分 ($w + T_v$)。(温度フラックス) との関係。黒線は2月14日、灰色線は2月18日を示す。右軸は顕熱フラックス (SHF) への換算値を示す。

風上のリードほど海面冷却の影響が強く、海水が生成されやすいことを意味しています。沿岸域に形成される数十 km スケールの開水面（ポリニア）は、確かに海水生産の著しい領域ですが（Kimura and Wakatsuchi, 2004）、海水域に存在する無数のリードでの海面冷却も海水生成に重要であることが、海水域の気団変質の観測結果から明らかになりました。第1図のように海水域でも筋状雲が形成されているのは、無数のリードでの気団変質が可視化された結果とも言えるで

しょう。

6. まとめと今後の展望

本研究では海水に覆われたオホーツク海の気団変質過程を航空機観測によって調べました。詳細な海水データと乱流熱フラックスデータを用いた結果、海水域内に存在するリード上では海水上に比べて著しく大きな乱流熱フラックスが供給されていることが確認されました（海水密度と乱流熱フラックスの負相関係）。このとき沿岸域に近い風上では混合層は未発達で暖かい上昇流（サーマル）の寄与が大きいのにに対し、氷縁域に近い風下側では混合層の発達に伴って上昇流・下降流の両者からの寄与が拮抗することが明らかとなりました（気団変質過程の初期から発達期の実態把握）。さらに、気団変質初期では大気—海洋間の温度差がリードの累積幅にほぼ比例して減少することを示しました（リードからの熱供給の累積効果）。

リード上で気団変質が活発であるということは、海面冷却による海水生成が卓越するとも言えます。しかしながら、リードのスケールは衛星データでは解像が困難です。今後、このような効果をいかに数値モデルに組み込むか（パラメタリゼーション）が、大気—海水—海洋間の熱交換過程を精度良く見積もる鍵となります。これはオホーツク海に限ったことではなく、年々減少を続けている北極海の海水変動を解明するためにも重要なことです。

観測による現象の理解と数値モデルによる応用研究は1人の研究者で成し得ることは困難です。しかし、研究手法や研究分野の垣根を越えた研究者交流が進めば新たな展開を期待できます。若手研究者が中心となって多角的に研究を推進する時代が近い将来訪れるのだらうと確信しています。

謝 辞

本研究は戦略的創造研究推進事業「オホーツク海水の実態と気候システムにおける役割の解明」の中で行われた航空機観測です。この観測を計画・実施して下さった北海道大学低温科学研究所の藤吉康志教授には、修士課程から博士課程まで雲科学とその境界領域を懇切丁寧にご指導して下さいました。プロジェクトリーダーの同研究所若土正曉教授にはロシアで行った初めての航空機観測データを解析するチャンスを与えて下さいました。また、同研究所の川島正行助手、大島慶一郎助教授、豊田威信助手には大気・海洋・海水

の様々な面から貴重なご助言を頂きました。また竹内謙介教授（水産大学校）、立花義裕助教授（東海大学）、本田明治研究員（海洋研究開発機構）、岩本勉之研究員（防災科学研究所）には、航空機観測の2年前から始めたゾンデ観測に参加する機会を頂き、その後も幅広い見地からオホーツク海研究について議論させて頂きました。私が日本学術振興会特別研究員として米国コロラド大学に滞在中には、Judith A. Curry 教授に海水が存在する海全般を研究するために必要な様々なプロセスの重要性についてご指導して頂きました。

また、私の地球科学研究の出発点となった弘前大学理学部（当時）では、児玉安正助教授に気象学を、力石國男教授には海洋学を教えて頂きました。オホーツク海という気象も海洋も重要な研究領域に踏み込むことができたのは、お二方のお陰であることは言うまでもありません。また、北海道大学大学院地球環境科学研究科（当時）に進学後は、充実した教官方のお陰でさらに極域研究への基礎とその気候学的重要性を学びました。ここに記した皆様並びに対象論文に関わる研究にてご支援頂いたその他多くの皆様に心から感謝申し上げます。

参 考 文 献

- Agee, E. M., T. S. Chen and K. E. Dowell, 1973 : A review of mesoscale cellular convection, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **54**, 1004-1012.
- Asai, T., 1965 : A numerical study of the air-mass transformation over the Japan Sea in winter, *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 1-15.
- Asai, T. and K. Nakamura, 1978 : A numerical experiment of airmass transformation processes over warm sea. Part I : Development of convectively mixed layer, *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 424-434.
- Chou, S.-H. and J. Zimmerman, 1989 : Bivariate conditional sampling of buoyancy flux during an intense cold-air outbreak, *Bound.-Layer Meteor.*, **46**, 93-112.
- Dirks, R. A., J. P. Kuettner and J. A. Moore, 1988 : Genesis of Atlantic Lows Experiment (GALE) : An overview, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **69**, 148-160.
- Inoue, J., M. Honda and M. Kawashima, 2001 : Air mass transformation processes over the southwestern region of the ice-covered Sea of Okhotsk during cold air outbreaks, *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 657-670.
- Inoue, J., J. Ono, Y. Tachibana, M. Honda, K. Iwamoto, Y. Fujiyoshi and K. Takeuchi, 2003 : Characteristics

- of heat transfer over the ice-covered Sea of Okhotsk during cold air outbreaks, *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 1057–1067.
- Inoue, J., M. Kawashima, Y. Fujiyoshi and M. Wakatsuchi, 2005a : Aircraft observations of air-mass modification over the Sea of Okhotsk during sea-ice growth, *Bound.-Layer Meteor.*, **117**, 111–129.
- Inoue, J., M. Kawashima, Y. Fujiyoshi and M. Yoshizaki, 2005b : Aircraft observations of air-mass modification upstream of the Sea of Japan during cold-air outbreaks, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 189–200.
- Iwamoto, K., K. Domon, M. Honda, Y. Tachibana and K. Takeuchi, 2001 : Estimation of surface heat flux based on rawinsonde observation in the southern part of the Sea of Okhotsk under ice-covered condition, *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 687–694.
- Kimura, N. and M. Wakatsuchi, 2004 : Increase and decrease of sea ice area in the Sea of Okhotsk : Ice production in coastal polynyas and dynamical thickening in convergence zones, *J. Geophys. Res.*, **106**, 31319–31331.
- Lenschow, D. H. and E. M. Agee, 1976 : Preliminary results from the air mass transformation experiment (AMTEX), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **57**, 1346–1355.
- Mahrt, L. and J. Paumier, 1984 : Heat transport in the atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3061–3075.
- Manabe, S., 1957 : On the modification of air-mass over the Japan Sea when the outburst of cold air predominates, *J. Meteor. Soc. Japan*, **35**, 311–326.
- Manabe, S., 1958 : On the estimation of energy exchange between the Japan Sea and the atmosphere during winter based upon the energy budget of both the atmosphere and the sea, *J. Meteor. Soc. Japan*, **36**, 123–134.
- Ninomiya, K., 1968 : Heat and water budget over the Japan Sea and the Japan Islands in winter season —with special emphasis on the relation among the supply from sea surface, the convective transfer and the heavy snowfall—, *J. Meteor. Soc. Japan*, **46**, 343–372.
- Ninomiya, K., 1975 : Large-scale heat and moisture budgets during the air-mass transformation over the East China Sea during AMTEX'74, *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 285–303.
- Randall, D. A., J. A. Coakley, Jr., C. W. Fairall, R. A. Kropfi and D. H. Lenschow, 1984 : Outlook for research on subtropical marine stratiform cloud, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **65**, 1290–1301.
- Strunin, M. A, 1997 : Meteorological potential for contamination of Arctic troposphere : Aircraft measuring system for atmospheric turbulence and methods for calculation its characteristics : Archive and database of atmospheric turbulence, *Atmos. Res.*, **44**, 17–35.
- Toyota, T. and M. Wakatsuchi, 2001 : Characteristics of the surface heat budget during the ice-growth season in the southern Sea of Okhotsk, *Ann. Glaciol.*, **33**, 230–236.

Aircraft Observations of Air-mass Modification over the Sea of Okhotsk during Sea-ice Growth

Jun INOUE*

* *Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, 237-0061, Yokosuka, Japan.*

(Received 9 January 2007 ; Accepted 14 February 2007)
