

「地球変動のメカニズム」

平成9年度採択研究代表者

若土 正暁

(北海道大学低温科学研究所 所長・教授)

## 「オホーツク海氷の実態と気候システムにおける役割の解明」

### 1. 研究実施の概要

高緯度海域に広く分布する海氷が、世界の気候に大きな役割を果たしている事はよく知られている。なかでも、オホーツク海は地球上で最も低緯度に位置する海氷域であり、地球温暖化の影響が最も顕著に現れる場所として、近年特に注目されている。また、オホーツク海は北太平洋中層水の起源水域であり、二酸化炭素の吸収域、高生物生産域など物質循環の見地からも重要な海域である。

しかし、オホーツク海はこれまで観測が少なく、何故そのような低緯度で海氷が形成・発達できるのか等、基本的な問題が未解決である。本研究では、ロシアの協力によりロシア船を用いたオホーツク海ほぼ全域の海洋観測を中心に、リモートセンシング、モデリングなどの手段を総動員して、海氷の消長過程、北太平洋中層水の起源水の生成機構、海氷変動とそのインパクト、大気―海洋相互作用などを明らかにし、オホーツク海における海氷の実態と気候システムにおける役割の解明をめざしている。

平成13年度には、これまでと同様ロシア海洋観測船「クロモフ号」を用いた第四回目の航海(平成13年8月17日―9月22日)を実施した。この航海では、特にブツソル海峡での海水交換量を評価するための観測に重点をおいた。過去に実施した、流速計係留観測では必ずしも十分なデータが取得できなかったこともあり、この観測では、時期は限定されているものの、海峡を通しての海水交換量の決定版を評価することに集中した。その結果、潮流の影響も考慮した空間的に高分解能なデータを取得することが出来た。これらのデータについての解析が、現在精力的に進められているが、北太平洋中層水形成におけるオホーツク海の役割を理解する上でも貴重な情報が提供できるものと期待されている。

### 2. 研究実施内容

平成13年度に実施した研究項目とその内容は以下の通りである。

#### (1) ロシア海洋観測船「クロモフ号」による海洋観測

平成13年度に実施した、ブツソル海峡における海水交換量評価に焦点をあてた「クロモフ号」航海による観測結果とデータ解析の速報を1)で述べ、2)以降は、過去の観測航海で得られた観測データの解析に基づいた研究のその後の進展状況について述べる。

## 1) ブッソル海峡における海水交換量の観測

過去3回の「クロモフ号」による観測航海によって、オホーツク海内部の循環像は物理的・化学的・生物学的・地理学的にかなり明らかになったといえる。一方、オホーツク海は気候学的には大気に与える影響と隣接する太平洋循環に与える影響が重要であり、平成13年度に実施した4回目の観測は後者に注目したものである。オホーツク海は、近年、内外の研究者の注目を集める北太平洋中層水(NPIW)の起源として、太平洋循環に赤道域まで及ぶ広い影響を与えていることが明らかになってきている。このオホーツク海と北太平洋の海水交換は、両者を隔てる千島列島に存在する数十の海峡を通じて行われる。これらの海峡のほとんどは深度1000m未満の浅い海峡で、中層に影響を与えると考えられる深い海峡は2つしかない。本航海ではその最大の海峡であるブッソル海峡で集中観測を行った。

実は、ブッソル海峡では1998年から1999年にかけて係留系観測を実施しているが、予想をはるかに越えた強力な潮流の影響で、期待した通りの結果を出すには至らなかった。本航海では、係留系観測のような長時間にわたる観測ではないものの、潮流の影響を考慮した空間的に高分解能な観測を実施した。図1に航路図を、図2にブッソル海峡付近の拡大図を示す。強い潮流下では、地衡流計算は不可能であるので、流速測定には、降下式音響ドップラー流速計(LADCP)を塩分・温度・深度計(CTD)とともに連続投入するという手法を採用した。与えられた航海時間内で最大の時空間分解能を目指すべく、ブッソル海峡内に13点の主観測点をおいた。これらの点は6つのグループに分けられ、各グループでは観測点を往復し、2時間ないし3時間程度の間隔でCTDとLADCPの投下が行われた。日周潮の推定を行うために、各グループでは最短25時間の時系列を得られるようにした。海峡の深い部分(南側)を受け持つグループでは、大潮と小潮のピークに2度ずつ観測できるようにスケジュールを組んだ。実際の航海では天候にも恵まれ、予定した観測を全てこなすことが出来た。

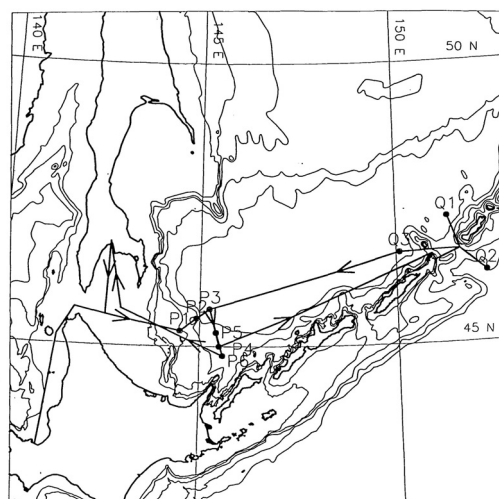


図1 航路図

SCHEME OF CTD STATIONS IN THE BUSSOL STRAIT

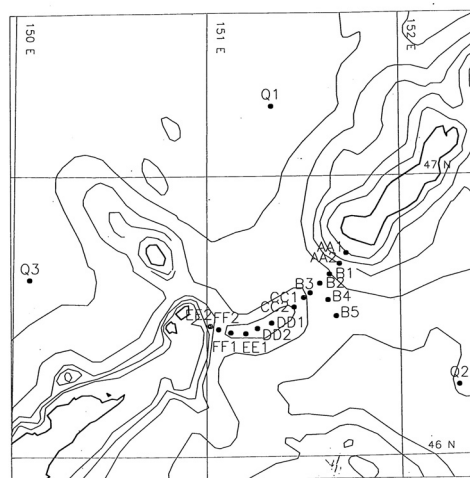


図2 ブッソル海峡でのCTD投入位置

得られたデータは、各深度に日周潮、半日周潮、トレンド成分、定常成分を最少二乗法ではめた。この手法でおおむね70%以上の変動を説明できる。そこから空間的に積分することで海峡における輸送量を求めることができる。日周潮、半日周潮の潮汐による輸送量は1Sv以下で、定常成分による輸送は9Svである。方向はともにオホーツク海から北太平洋に向かう方向であった。この数字は過去のおおざっぱな見積りとも矛盾しない。定常流は、上層では太平洋に向かい、1000m(南西側)或いは1500m(北東側)より深い下層ではオホーツクに向かうという2層流ではあることが分かった。ただ、浅い部分ではより複雑な様相を示していることも明らかになった。

また、特筆すべきは、海峡の南西側の1000mをこえる深度に、1 m/s以上の強い日周潮が観測された。これほどの深さで、これほど大きな潮汐が観測された例は極めてまれである。

## 2) ブッソル海峡での係留観測

これまで NPIW の起源となるオホーツク海水の流出過程とその変動特性の解明を目指してブッソル海峡における係留系データの解析を行ってきた。昨年度は等密度面混合比と流れのデータに基づいて千島海盆の北側の海域に分布するオホーツク海水の流出流量を調べた。本年度は混合比、流れ、オホーツク海水の流出フラックスについて季節変化を調べるとともに北太平洋のスベルドラップ輸送量および下流域にあたる北海道南東岸における観測データと比較した。

### ① 混合比の季節的变化

26. 6~27. 0  $\sigma_\theta$  におけるオホーツク海水の混合比は、すべての測点(南西域;US1、北東域;US2、J1)において1月から4月まで増加する季節変動を示した。尚、US1、US2、およびJ1における上記密度水の存在する平均水深はそれぞれ318m、258m、および304mであった。これらの下層のCTDによる26. 8~27. 2  $\sigma_\theta$  における混合比には顕著な季節変化はみられなかった。

### ② オホーツク海水流出フラックスの変動特性とスベルドラップ輸送量との対応

26. 6~27. 0  $\sigma_\theta$  におけるオホーツク海水の混合比と流れの流出入成分の連続データを用いてオホーツク海水と太平洋海水の流出フラックスをそれぞれ計算した。US1 では、全期間において両フラックスが太平洋への流出を示しており、とりわけオホーツク海水の太平洋への流出フラックスは、1999年3~5月と1999年10月~2000年1月に顕著に増加した。一方、US2 と J1 における両フラックスの長期変動には、1998年のオホーツク海水の場合を除き、太平洋からの流入の方が卓越しており、顕著な季節変化はみられなかった。また、NCEP の再解析データを用いて北太平洋の両岸の間で北緯46. 7度を横切るスベルドラップ輸送量を見積もり、唯一季節的变化がみられた US1 におけるオホーツク海水の太平洋への流出フラックスと比較したところ、1999年2~4月を除いて非常に良い対応を示した。

### ③ 北海道南東沖におけるオホーツク海水輸送量との対応

1998年9月~1999年7月に北海道南東沿岸域で観測された T-S 関係は、26. 6~26. 8  $\sigma_\theta$  において1999年4月が極小となり、到達時間差1ヶ月前のブッソル海峡における係留観測結果と一致した。この低温低塩分は、引き続き1999年5月および7月も観測され、この密度

層でブツル海峡の T-S 関係とそれぞれ一致するか近い値となった。さらに、北海道南東岸から南南西に伸びる定線観測結果から、オホーツク海水のフラックスの分布と輸送流量を計算した。大きなフラックスは大陸斜面の海底付近に分布し、輸送流量は、1998年9月、1999年1月、3月、および4月において、それぞれ0.3、0.05、0.5、1.1 Sv となり、4月に最も高くなった。これらのことは、ブツル海峡の US1 におけるオホーツク海水の混合比が、1999年4月に極大となったことと、オホーツク海水の太平洋への流出フラックスが1999年3～5月において増加したことから矛盾しない。これは、亜寒帯循環の強化によって、千島海盆より北部にある低温水がブツル海峡から流出する可能性のあることを示唆している。

### 3) 東樺太海流の空間構造および季節変化

今まで「まぼろしの海流」と呼ばれていた、東樺太海流の長期流速計係留系による観測を実施し、その存在と季節変動を初めて明らかにすることができた。係留観測は、サハリン東岸沖において、1998年から2年間にわたって実施した。サハリン東岸沖の北緯49.5度、北緯53度およびサハリン北端(北緯約55度)の3つの海域において、それぞれ等深線をほぼ垂直に横切る線に沿い、陸棚から陸棚斜面にかけて、計10カ所に係留系を設置した。設置点の深度は、約100m—1700m、観測期間は、1998年6月—1999年9月と1999年9月—2000年6月の2つの期間であった。測流には ADCP(RDI)と流速計(ユニオン)を用いた。測器の設置深度は約200m、450m、800mとし、浅い地点では海底付近とした。CTD観測によると、この海域では、NIPW 起源水と思われる高密度水は、200m—450m付近に存在する。

サハリン東岸沖の全ての係留点、全ての深度において、等深線に沿って南下する流れが卓越し、その強さは季節によって顕著に変化(冬最大、夏最小)していた。典型的な3つの係留点として、北緯53度線上における陸棚斜面上のM3点、陸棚上のM1点、サハリン北端の陸棚斜面上のM7点において観測された月平均流速の時系列を図3に示す。ここで、実線と破線のスティックはそれぞれ20m付近と200mないしM1 では海底付近(約80m)における流速を表す。いずれの点でも1—2月に最大となる様な季節変動をする南下流が見られる。同じ傾向は他の係留点でも見られた。これに対し、深さによる流速の変化に着目すると、M3点では図に示した2つの深度で顕著な流速の違いは見られないが、陸棚上のM1点では10月—11月に海面付近に集中して強くなるような南下流が見られる。同じ傾向は陸棚上の全ての係留点で見られ、また、その鉛直シアはアムール川起源の低塩分水の層に伴っていた。

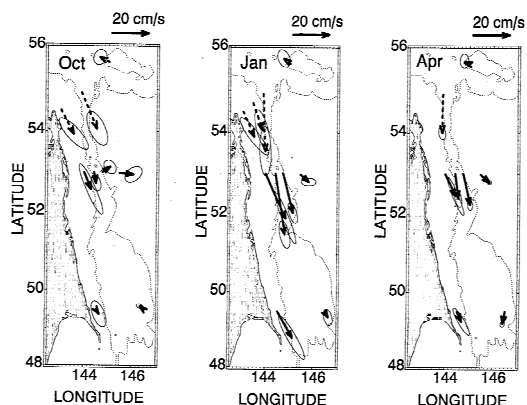


図3 3つの係留点における海亀の月平均流速

一方、サハリン北端のM7点では20mよりも200mに強い南下流が見られる。この南下流は海底付近で最も強く、その様に海底付近に捕捉された流れは、陸棚高密度水と存在する時期、場所がよく一致していた。この様にサハリン東岸沖には広範囲にわたって南下する流れの他に、陸棚、海底斜面上にそれぞれ固有の水塊に伴う2つの南下流のコアが存在する。

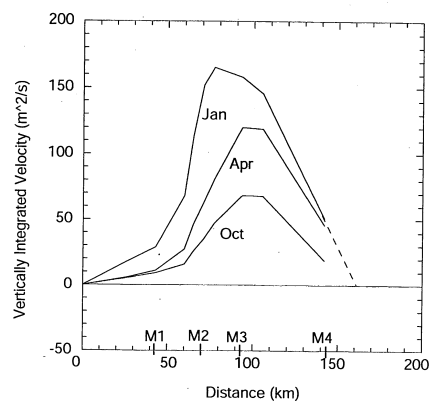


図4に北緯53度の観測線を横切る月平均流量の時系列を示す。流量は2月に最大値12.3Svをとり、1998年7月から翌年6月まで1年間の平均流量は6.6Svであった。

図4 北緯53度の観測線を横切る月平均流量

ECMWFの風データから計算されるSverdrup流量は年平均で3.5Svであり、季節変化の振幅と共に観測された流量と同じオーダーであった。海面付近に集中した流れの見られる陸棚上と海底に捕捉された流れが見られた陸棚斜面上の200m以深の年平均流量は、それぞれ0.36Sv, 0.76Svであり、流量の大きさとしては全体に占める割合は小さい。

#### 4) PALACE フロートによる観測

オホーツク海の中層循環、及び海洋の上・中層の季節変動等を明らかにする目的で、中層フロートによる観測をワシントン大学と共同して行っている。2000年6月の4基(浮遊深度500m、10日ごと浮上)に引き続き、2001年8・9月には7基(浮遊深度750m、5日ごと浮上)の計11基をロシア船クロモフ号にて投入した。中層フロートの観測から、東樺太海流は、中層においても0.1m/s程度の流速を持って存在すること、千島海盆内では中層においても時計回りのメソスケール渦が確認されること、表層と同様に北緯48度付近で東向流が見られること、千島列島沿いに北上流が存在すること、など多くのことが明らかにされつつある。

また、中層フロートによって、オホーツク海では初めて、結氷に至るまでの混合層の季節進行が観測された。夏に表層は暖められ、秋以降は冷却と混合で下層から高塩分水がエントレインされながら混合層が深まっていき、ついには結氷に至る、という混合層の季節進行がよく捉えられた。観測された混合層の貯熱量の変化は、ECMWF、GISSTなどから求めた海面熱フラックスとよく対応していた。2000年は、結氷開始が例年よりかなり早く、その後20年ぶりにオホーツク海全面がほぼ海氷に覆われた年となった。気候値の海面熱フラックスに比べると、2000年の10・11月の冷却は例年より非常に厳しく、それが海洋混合層の熱を多く奪い、この年の結氷を多いに早めたことまでも示唆される。

#### 5) 物質循環

2001年度には、2000年度にクロモフ号の航海で採取した水柱中の溶存・懸濁有機物試料、および時系列セジメントトラップ試料の分析を進めた。その結果、以下のことが明らかとなった。

① 陸棚高密度水の流出に伴う有機物の大陸棚から外洋への輸出過程

オホーツク海サハリン北東沖の中層に見出された低温層の中には、同密度の外洋水と比べて、高濃度の溶存・懸濁有機炭素が含まれており、北西部大陸棚の底層に形成される高密度陸棚水(DSW)の流出に伴って、大量の有機炭素が、外洋の中層に直接運び込まれていることが明らかとなった。また、懸濁粒子有機炭素の炭素同位体比の測定から、外洋中層に運び込まれる有機炭素の起源が、実際に大陸棚上で生産された有機物であることが証明された。オホーツク海における大陸棚から外洋への有機炭素の輸送効率は、他の大陸棚域と比べて著しく高く、海氷ブラインによって形成される高密度水の流出という季節海氷域特有のメカニズムが、沿岸-外洋系の物質循環過程に大きな影響を及ぼしていることが初めて明らかとなった。これらのメカニズムに関しては、濁度測定データを中心にして、GRL に投稿し、受理された。

② アムール川からの大量の陸起源溶存有機物の流入

オホーツク海北西部の表層に広がるアムール川起源の低塩分水の中には、外洋表層水の何倍にもなる著しく高濃度の溶存有機物が含まれていることが分かった。これら陸上起源の溶存有機物は、様々な微量金属と錯体を形成するなどして、その輸送と海洋生物への利用促進に貢献し、オホーツク海北西部の高い生物生産性に関与していると考えられる。今後、オホーツク海と周辺陸域の関係を研究していく上で、陸起源溶存有機物の動態の解明が、1つの鍵になることが示唆された。

③ 粒子の沈降・堆積過程での有機化合物の選択的分解とその古海洋学的意味

サハリン沖の沈降粒子に含まれる脂質バイオマーカー分子の組成・炭素同位体比の、空間(鉛直・水平)的および時間的变化を測定した。その結果、円石藻のマーカーであるアルケノンのフラックスは秋に高く、珪藻マーカーであるステロール化合物の1種は春に多くなるなど、顕著な季節変化が見られ、古海洋解析の前提となるバイオマーカーと表層生物生産の関係が確認された。陸上高等植物のマーカーと言われている長鎖n-アルカンの組成・同位体比分布は、上層・下層の沈降粒子、更に表層堆積物の間で顕著な違いを示し、1)長鎖 n-アルカンは、陸上高等植物だけではなく、海洋の植物プランクトンによっても作られているらしいこと、しかし、2)粒子の沈降・堆積過程で、植物プランクトン起源の n-アルカンは急速に分解し、最終的に堆積物中に残されるのは、陸上高等植物起源のものだけであることなどが、示唆された。陸起源・海起源物質が共に大量に供給されるサハリン沖で得られたこれらの試料について、今後、化合物毎の  $^{14}\text{C}$  濃度測定などで、それらの起源を更に明確にすることにより、有機物の沈降・堆積過程における化合物の選択的分解という物質循環の基本的事項や、陸起源バイオマーカーの古環境指標としての正確な意味が、体系的に明らかにできるものと思われる。

6) 古海洋

2001 年度には、脂質バイオマーカーの分析を更に進めると共に、2000 年度までに測定された様々な無機・有機化学的、微化石学的、鉱物・堆積学的データを元に、解析を進め、秋に札

幌で開かれた第7回国際古海洋学会議(ICP-7)にて、8件の発表を行った。融氷期の陸起源物質の供給量増大イベントについて、脂質バイオマーカー・同位体比を用いた考察を進め、GRLに投稿し、受理された。その他の論文についても、現在、審査・改訂中、もしくは投稿準備中である。

#### (2) 砕氷船「そうや」による南西部海氷域での現場観測

1996年より海上保安庁水路部との共同で実施している、砕氷型パトロール船「そうや」によるオホーツク海南西部海氷域の海洋、海氷、気象観測を、13年度(2002年2月)も同様に実施した。このような、海氷域における現場観測を毎冬継続して実施している例は、世界的にみても極めて稀である。今までに得られた結果の一部は、既にいくつかのジャーナルに公表されているが、今後ともこの現場観測を継続し、オホーツク海南西部海氷域の実態を明らかにしたいと考えている。

#### (3) 航空機を用いたオホーツク海氷上の大気境界層観測

観測は、2000年2月9日、14日、18日の計3回、それぞれサハリンの南部、中部、北部の三ヶ所で、いずれも三層(100m、500m、800m)の高度で行われた。このような総合的な航空機観測がオホーツク海上で実施されたのは初めてであり、季節海氷域上での気団変質過程を理解する上で非常に貴重なデータを取得することができた。まだ、解析中の段階であるが、現在までに明らかになったことは以下の通りである。ビデオ観測から得られた高分解能の海氷密接度と乱流熱フラックスの関係から、海洋から大気への熱フラックスは、リードと海氷とでは、前者の方が100倍大きいことが分かった。寒気吹流し時の海氷域(沿岸から氷縁まで300km)における気温と水温(結氷温度)の差を、リード幅の積算値の関数で調べたところ、風下方向35kmまでは直線的に減少することが分かった。ところが、35kmを越えた氷縁域にくると、ある臨界幅以上の大きなリードの存在によって、対流活動が盛んになり、大気境界層が厚くなり、結果的に雲の発生をもたらすことになる。このような現象をともなう氷縁域では、従って、温度差はほとんど変化が無くほぼ一定であった。この結果から、ポリニアやリードでの新生氷の形成とそれにとまなう海氷域の発達を理解する上で、この風上側に無数に存在する細長いリードすべての幅の積算値は重要なパラメータになることが示唆された。

#### (4) 北海道湧別沖の海氷漂流・氷厚係留観測

2001年の冬季に、過去2年間と同じように、北海道沿岸域湧別沖6マイルの地点で得られたIce Profiling Sonar (IPS) のデータの解析を行った。この年は、オホーツク海全体における最大海氷面積が1979年以来の最大であったことから推測されるように、1月上旬から係留観測点において海氷が観測されていたが、氷厚については、過去2年間に見られたような極端に大きいice keelはあまり見られなかった。この理由としては、海氷の密接度が高かったために、rafting や ridging のような変形プロセスが起こりにくかったことが考えられる。2001年を含めたこれまでの3年間の氷厚データの特徴は、各年について大きく異なっている。このことは、北海道沿岸域に存在する海氷は、海氷面積のみならず、氷厚についても、大きな年々変動があることを示唆しており、海氷量の見積もりに対しての氷厚の重要性をも示している。

#### (5) リモートセンシングによる海氷研究

まず何よりも成果は、SSM/I マイクロ波データを用いて、かなり高精度での「海氷の漂流速度」の導出に成功したことである。これを北半球全体の海氷域に適用し、海氷の漂流ベクトル場を求め、それと地衡風との関係などから、各海域における海氷の変動機構を定量的に明らかにした。例えば、バレンツ海、ベーリング海、オホーツク海の家氷域の発達は、風による海氷の移流でほぼ説明できるが、ラブラドル海やグリーンランド海の家氷域は、海流場にかかなり影響され、風速の変動に依存しないことが明らかとなった。これら海域による変動機構の違いは、最大の家氷域面積の年々変動にも反映することが分かった。

### 3. 研究実施体制

若土 正曉 北大低温研 教授 総括

### 4. 研究成果の発表

#### (1) 論文発表

- Kimura, N. and M. Wakatsuchi, Mechanisms for the variation of sea-ice extent in the Northern Hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 106(C12), 31319-31332, 2001.
- Aramaki, T., S. Watanabe, T. Kuji and M. Wakatsuchi, The Okhotsk-Pacific seawater exchange in the viewpoint of vertical profiles of radiocarbon around the Bussol' Strait, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3971-3974, 2001.
- Baba, K. and M. Wakatsuchi, Eastward propagation of the intraseasonal variability of sea ice concentration and the atmospheric field in the marginal ice zone in the Antarctic, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3669-3672, 2001.
- Ohshima K. I., G. Mizuta, M. Itoh, Y. Fukamachi, T. Watanabe, Y. Nabae, K. Suehiro, and M. Wakatsuchi, 2001, Winter oceanographic conditions in the southwestern part of the Okhotsk Sea and their relation to sea ice, *J. Oceanogr.*, 57, 451-460, 2001.
- Toyota, T. and M. Wakatsuchi, Characteristics of the surface heat budget during the ice growth season in the southern Sea of Okhotsk, *Ann. Glaciol.*, 33, 230-236, 2001.