

学位論文題名

Laboratory studies on supercooling
and rapid underwater-ice production processes
in winter coastal polynyas.

(厳冬期の沿岸ポリニア域における過冷却および
水中氷の急速生産過程に関する実験的研究)

学位論文内容の要旨

厳冬期の極域海洋において表面を覆う海水は海水に対して‘上蓋’の働きをするため、大気-海洋間の熱や水蒸気などの交換を抑制する。海水域内には氷に覆い尽くされず、水面が顔を出した開水面領域が随所に見られる。このほっかり開いた‘窓’のような存在である開水面をポリニアといい、エネルギー・物質交換が活発な場であると考えられている。全海水域の1割以上の面積を占めるポリニアは極域のみならず地球規模の気候変動過程に多大な影響を及ぼすことが指摘されているが、その物理的素過程については未解決の問題が多い。本研究では大陸や島の風下側に形成される「沿岸ポリニア」を対象としており、厳しい寒気にさらされた開水面における海水生産過程の解明を目的とする。第31次日本南極地域観測において昭和基地沖に形成される沿岸ポリニアの水温分布を通年にわたって測定した。その結果、表面の対流混合層が深さ約400mまで発達し、その水温値がほぼ結氷温度(-1.9~-1.8°C)に維持されている事実を捕らえた。また強風時には新成海水が風下の氷盤に吹き寄せられ、蓄積している様子も観測した。この現場観測の結果に基づいて、沿岸ポリニア域を想定した低温室内実験を行った。結氷温度にある海水が強冷風にさらされながら海水生産する状況を実験水槽内に再現し、一連の実験結果を用いて、風で維持された開水面における海水生産過程について考察した。

室温を-10°C以下に制御した低温室内に透明アクリル製の大型水槽を設置した。中に満たしたNaCl溶液を攪拌しながら水全体を一様に冷却していき、その塩分で決まる

結氷温度に達した時点で攪拌を止め、水面上で送風を開始した。氷晶(frazil ice)と呼ばれる微細な氷結晶が発生しては風下に輸送され、水槽の風下側に次々と蓄積していくことにより、開水面が維持された。室温、風速、塩分を変えた様々な条件下で実験を行い、風下の氷蓄積量、水槽内の温度・塩分の変化などを測定した。その結果、強風かつ高塩分の場合には水中における氷晶の大量生産が盛んになり、厚い蓄積層が形成された。そしてこの時は広い開水面が長時間維持された。水槽風下の氷蓄積量の時間変化から算出した氷生産速度は低温、強風、高塩分であるほど大きく、また時間とともに開水面の大きさが減少するにも関わらず、次第に増大した。氷生産速度の最大値は板状海水が急速成長する場合の3~5倍に達した。一方、低塩分の時は短時間の内に水槽表面が多くの氷晶で覆われる傾向が強く、水中氷の生産は少ない。氷の急速生産に大きく寄与する水中氷の発生について調べるために、水槽内の温度及び塩分を測定した結果、氷生産しながらも過冷却状態が長時間維持されていることを確かめた。塩分25%以上の塩水の場合は全層で過冷却状態が形成・進行したが、塩分が小さい場合は全層にわたる大きな過冷却は認められず、表層付近のみの冷却が顕著であった。この現象を解釈するために結氷温度近傍の海水の物理的性質について検討した。海水の密度を与える状態方程式を用いて、過冷却状態と結氷温度にあるそれぞれの水の密度を比較して、その塩分特性を調べた。真水や塩分25%未満の低塩分水とは異なり、塩分25%以上の海水は過冷却すると結氷温度にある水より密度が増す。さらに同一の過冷却度でも塩分増大とともに密度増大量が増すことがわかった。つまり海水では塩分が高いほど過冷却した時、密度に関する不安定度が増し、寒気が下層へ効果的に侵入し得る性質を持つといえる。水面が寒気にさらされても風の弱い穏やかな条件の下では、表面に形成された過冷却水は下層に沈降する前に結氷し、表面が氷で覆われた後は過冷却状態の進行の度合いが小さいことも実験で示された。強風が過冷却水の一部を風下へ、かつ密度不安定により下層へ輸送し、周囲の水と混合しながら水を効率良く冷却する。そして過冷却水の沈降を補う形で、相対的に低密度の結氷温度の水が水面に輸送され、寒気に熱が奪われると、新たに過冷却水が形成される。この繰り返しにより過冷却が進行していく。また沈降した過冷却水から氷生産が起こる水中氷晶の発生も開水面の維持を促進し、激しい放熱を持続させる。本実験で用いたNaCl溶液は天然海水と類似した物理的性質を持っており、急速かつ大量な海水生産、特に水中氷の生産過程において海水の特性が重要な役割を果たしていると解釈できる。

さらに塩水からの氷生産と同時に起こる特徴的な現象として、ブラインによる塩排出がある。ブラインは元の塩水より高密度であるため水中で対流を引き起こしながら、周囲の水と混合して、水を徐々に高塩分化させていく。沿岸ポリニアが海洋に与える効果を評価するためにも、急速な氷晶生産に伴う塩排出過程を調べるのが不可欠である。そこで実験水槽内の水を一定時間間隔で採取し、測定した塩分の変化量から塩フラックスを見積もった。塩フラックスは板状海水が急速成長する場合のそれより1桁大きい値を示した。氷生産速度の比較では数倍の差であったことを併せて考えると、水と塩の分離の割合に関しても板状海水とは異なることが予測された。ブライン排出の様子をシャドウグラフ法という光学的可視化法を用いて観察した。これは平行光線を通した水槽内に生じた密度差が光の屈折率の違いを生み出す‘かげろう’の原理を応用して、高塩分ブラインを可視化するものである。風下の氷晶蓄積層の縁で多くのブライン流下が鮮明に捕えられた。また浮上しつつある水中氷晶から高塩分ブラインが分離・沈降する様子も観察され、水と塩の効果的な分離の可能性が示された。塩水から氷晶が生産された時、その氷晶を構成する水に溶け込んでいた塩を氷晶表面に付着させることなく、また氷晶同士の間に取り込むことなく、周囲の水にどの程度分離・排出するかを測定値から見積もった。その結果、氷晶生産に伴う塩排出率は約9割にも達し、板状海水成長の場合の約2倍も効率良く塩を排出していることがわかった。板状海水の場合、急速成長すると排出ブラインを機械的に氷の結晶間に閉じ込めてしまう傾向が強まるため、塩の排出率は成長速度の増大と共に減少する。これに対して氷晶の場合は急速生産しても大部分の塩を周囲に排出している。開水面が存在する限り継続可能な氷晶の急速生産に伴い大量の塩がブラインの姿で排出されるため、同一の冷却期間でも定着氷が厚さを増す場合より表層の高塩分化への寄与が大きい。さらにこの高塩分化が過冷却水の密度不安定化を促進する可能性も考えられる。

このような開水面における海水の急速生産過程の駆動には、水を吹き流すほどの強い風が海上で吹いていることを必要条件とし、海水が25%以上の塩を含んでいることが過冷却や水中氷晶生産を引き起こすために本質的に重要である。そして氷晶生産時のブライン排出による表層海水の高塩分化は、厳冬期に現れた沿岸ポリニアが極域海洋に与える大きな影響のひとつとなることが考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 若 土 正 暁
副 査 教 授 金 成 誠 一
副 査 教 授 竹 内 謙 介
副 査 助 教 授 日 比 谷 紀 之

学 位 論 文 題 名

Laboratory studies on supercooling
and rapid underwater-ice production processes
in winter coastal polynyas.

(厳冬期の沿岸ポリニア域における過冷却および
水中氷の急速生産過程に関する実験的研究)

南北両極域の海は勿論のこと、オホーツク海やベーリング海などの比較的低緯度の海域でも冬になると、海が海氷で広く覆われる。海が海氷で覆われてしまうと、膨大な熱容量をもつ海洋から大気への熱放出が大幅に制限されるだけでなく、海氷自身のアルベドが高いこともあって、まわりの大気が冷却され、さらなる海氷域の拡大を促すことになる。この自己拡大促進効果、即ち正のフィードバック効果は海氷がもつ大きな特性の1つである。一方、海氷生成にともなうブライン排出は、南極底層水という世界最大密度水を形成し、世界の海洋深層大循環を介して世界の気候に大きく関わっていく。このように大きな物理的特性をもつ海氷は、地球の温暖化などの気候変化に対する高感度のセンサーになり得るのではないかと考えられている。従って、今後推進すべき極域海洋学上の研究課題は、大きく変動する海氷域の実態を正しく把握することは勿論のこと、その変動の原因や、変動にともなって生じる大気-海洋相互作用の物理素過程を定量的に明らかにすることである。

本研究は、近年急速に進歩した衛星観測によってその存在が明らかになった、海氷域内部に無数に分布する開水面、即ちポリニヤの形成およびその維持機構を低温室内水槽実験によって明らかにしたものである。申請者は、第31次日本南極地域観測隊のメンバーとして南極昭和基地に1年間越冬し、沿岸ポリニヤ域における海氷生成と海洋混合層の水温変動の観測を行なっ

た。その結果、冬季に大量の海氷生産をともないつつ対流混合層の厚さが深まり最大400mにまで達し、その間水温は全層結氷温度を保ちながら、開水面が冬の間中維持されていたという興味ある現象を初めて観測することに成功した。そこで申請者は、この南極での現場観測の結果に基づいて、厳冬期沿岸ポリニヤ域を想定した低温室内実験を行なった。

申請者は、フラジルアイスの生産量を風速、室温、海水塩分などの関数として測定し、水中で生じる対流現象については、シュリーレン法を用いて光学的に観察した。実験結果の中で特に注目したのは、大気にさらされる開水面域が時間とともに減少していくにもかかわらず、フラジルアイスの生産量は次第に増大していくという事実である。申請者は、そのフラジルアイス生産過程に介在する支配要因が、沿岸ポリニヤの形成・維持に本質的な役割を果たしていると考え、水温変動を注意深く観測した結果、水中において、フラジルアイス生成をともないながらも「過冷却」状態が継続的に維持されていることを見出した。密度的には、純水における過冷却が安定なのに対して、海水の場合は、過冷却した水はむしろ不安定になる。この過冷却水の密度不安定を考慮に入れると、沿岸ポリニヤ域における急速海氷生産過程は次のように説明される。つまり、大気冷却によって表面に形成した過冷却水が、風による強制攪拌だけでなく、密度不安定の効果も加わって、水中を沈降していき、代りに結氷温度の水が下の層から表面にやってくる。この結氷温度の水は、前と同様に大気冷却によって過冷却され、その水は密度不安定のために沈降し、水中でフラジルアスを生成することによって過冷却を解消する。この一連の過程が淀みなく続けば、水面を冷たい大気にさらし続けたままで、水中ではフラジルアスの急速生産とその結果としてのブライン（高塩分水）の大量排出が起こることになる。

本研究の最もオリジナルな成果は、従来から指摘されていた強風による吹き流し効果だけでは説明できない沿岸ポリニヤ域における急速海氷生産過程を、南極で実際に行なった観測の結果から想定した低温室内実験によって、「過冷却水」の生成とそれの沈降による水中氷生成がその支配的要因と指摘した点である。また、海水によるこの過冷却不安定は高塩分ほどその度合いが大きくなるので、高塩分水の場合ほど海氷生産量は増大する、という今までの常識と逆の結果が本研究によって得られたが、これも大きな成果の1つである。

本研究で得られた以上の成果は、いずれも極域海洋学に新しい知見を提供した点で高く評価できるものである。このことから、審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認定した。