

学 位 論 文 題 名

Melting processes of the Antarctic sea ice :
Importance of heat input through open water

（南極海における海水融解過程：開水面から入る熱の重要性）

学位論文内容の要旨

海水の融解過程に関する研究は、主に北極海の多年氷域とその氷縁域で行われ、そこではある程度理解されている。多年氷域では、海水は主に表面から融解し、基本的には大気と海水表面間の熱収支で決まることが幾つかの研究から示されている。一方季節氷域、特に典型的な季節氷域である南極海は、発散場であるため開水面の割合が大きいという特徴がある。開水面は、通常積雪の存在する海水表面に比べ、アルベドが非常に小さい。そのため定性的には、まず短波放射が開水面から海洋上層に吸収され、その熱により海水が側面と底面から融解する過程が重要であると考えられている。つまり南極海の海水融解過程を考える場合、海水と海洋を結合させて考えることが本質的になる。しかしながら、このような結合系としての理解は、数値実験に基づいたものはあるものの、データ解析に基づいた定量的な議論は殆んどなされていない。

南極海における海水融解過程を定量的に理解するため、本研究ではまず熱収支解析を行った。各熱フラックスの計算には、経験式ならびにバルク式と ECMWF 客観解析データを用いた。氷域全体の 10 年間分の気候値から、海水の融解が最も盛んな 12 月の大気からの net heat input は海水表面で $\sim 0 \text{ W/m}^2$ 、海洋表面で $\sim +150 \text{ W/m}^2$ であった。砕氷艦しらせによる現場観測の気象データを用いて計算を行っても同様な結果になった。従って南極海の海水融解期は、開水面では大気から正の大きな熱フラックス（主に日射による）があるのに対し、海水表面では熱のやり取りが非常に小さいことが確かめられた。

もし大気から開水面を通して海洋上層へ入る熱によってのみ海水が融解するなら、[海水融解率] $\propto$ [開水面から海洋上層へ入る熱] (= [海洋表面での net heat input] $\times$ [開水面の割合]) という単純な比例関係が成り立つはずである。このような関係が見られるかを人工衛星 (DMSP SSM/I) による海水データと熱収支解析を用いて調べた。南極海の氷域全域における 10 年間分の気候値から、開水面を通して海洋上層へ入る熱は、海水の面積減少に必要な融解潜熱と同等であった。各年、各海域で調べたところ、海水融解率の変動は開水

面から海洋上層へ入る熱の変動によく対応していた。詳しく見ると、海氷の融解が11月頃から始まり12月にピークを迎えるという大局的な変動は、大気場の熱的外力（海洋表面での net heat input）が決定しているが、より短期間の変動や年々変動は、開水面の割合が支配要因になっていた。

海氷-海洋結合系の視点から南極海の海氷融解過程を調べるため、1999年1月の夏季南極ロス海で、米国砕氷船 R/V Nathaniel B. Palmer の in-take system により観測された海洋上層の水温、塩分データと、ビデオカメラにより観測された海氷密接度データを用いて解析を行った。その結果、海氷野内部ではある空間スケール(20-30km)平均で見ると、海氷密接度は水温と負の相関、塩分と正の相関関係になった。この関係は、昭和基地沖での結果 (Ohshima et al, 1998) と良く一致し、開水面から入る熱によってのみ海氷が融解すると簡略化した海氷-海洋結合モデルからも説明された。人工衛星に搭載されたマイクロ波放射計による海氷密接度データとオーストラリアの砕氷船 R/V Aurora Australis ならびに砕氷艦しらせにより観測された9年間分の海洋上層のデータを用いて同様な解析を行ったところ、海洋上層のデータが得られた南極海のほぼ半分の海域でロス海と同様な関係が見られた。

前述の熱収支解析から、大気からの net heat input が最大になるのは12月であり、海氷の有無により、海洋上層に入る熱はオーダーが1~2異なることが示される。加えて12月は海氷分布の年々変動が最も大きい月でもあるので、この時期に大気から開水面を通して海洋上層中に入る熱は、年により大きく異なることになる。もしこの熱のアノマリーが海に記憶されるなら、次の結氷期にも影響を及ぼす可能性がある。20年間分の人工衛星 (Nimbus-7 SMMR ならびに DMSP SSM/I) による海氷密接度データを用いて12月の海氷密接度アノマリーと次の結氷期(4月)のものと比較したところ、両者の空間分布はよく一致した。その相関係数は、ほぼ南極海全域で正であり、特に強い相関を示す海域があった。この結果は、融解期における海氷の多少が、海洋上層へ入る熱の多寡を生み、それが海に記憶されて海氷が一度消滅した後、結氷期の海氷分布に反映されることを示唆している。

以上の結果から、南極海では大気から開水面を通して海洋上層へ入る熱(主に短波放射)が海氷融解の主な熱源であり、この開水面から入る熱は海氷の後退と前進の変動を説明し得る最も重要な要因であることが示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 若 土 正 暁

副 査 教 授 池 田 元 美

副 査 助教授 大 島 慶一郎

副 査 教 授 山 内 恭 (国立極地研究所)

学 位 論 文 題 名

Melting processes of the Antarctic sea ice : Importance of heat input through open water

(南極海における海水融解過程：開水面から入る熱の重要性)

海水の融解過程に関する研究は、主に北極海の多年氷域とその氷縁域で行われ、そこではある程度理解されている。多年氷域では、海水は主に表面から融解し、基本的には大気と海水表面間の熱収支で決まることがいくつかの研究から示されている。一方季節海水域、特に典型的な季節海水域である南極海は、発散場であるため開水面の割合が大きいという特徴がある。開水面は、通常積雪の存在する海水表面に比べ、アルベドが非常に小さい。そのため定性的には、まず短波放射が開水面から海洋上層に吸収され、その熱により海水が側面と底面から融解する過程が重要であると考えられている。つまり南極海の海水融解過程を考える場合、海水と海洋を結合させて考えることが本質的になる。しかしながら、このような結合系としての理解は、数値実験に基づいたものはあるものの、データ解析に基づいた定量的な議論はほとんどなされていなかった。

まず本研究では、南極海における海水融解過程を定量的に理解するため、熱収支解析を行った。その結果、海水の融解が最も盛んな12月の大気からの正味の熱のインプットは海水表面で $\sim 0 \text{ W/m}^2$ 、海洋表面で $\sim +150 \text{ W/m}^2$ と見積られ、南極海の海水融解期では、開水面では大気から正の大きな熱フラックス（主に日射による）があるのに対し、海水表面では熱のやり取りが非常に小さいことが確かめられた。もし大気から開水面を通して海洋上層へ入る熱によってのみ海水が融解するなら、[海水融解率]と[開水面から海洋上層へ入る熱]の間には比例関係が成り立つはずである。本研究では、このような関係がおおむね成り立つことを人工衛

星 (DMSP SSM/I) による海水データと熱収支解析から明らかにした。南極海の海水域全域における気候値から、開水面を通して海洋上層へ入る熱は、海水の面積減少に必要な融解潜熱と同等であり、また海域や年による海水融解の違いや変動特性も、開水面から海洋上層へ入る熱の変動によってよく説明できることが示される。

さらに申請者は 1999 年 1—2 月の夏季南極ロス海での米国砕氷船 R/V Nathaniel B. Palmer による観測に日本人としてはただ 1 人参加し、海水融解過程に関わる観測を行った。その結果、海洋上層の水温、塩分と海水密接度の間にはある空間スケール (20-30km) 平均で見ると特徴的な関係があることを見出した。この関係は、開水面から入る熱によってのみ海水が融解するとした簡略化した海水-海洋結合モデルから説明されることを示した。さらに、人工衛星による海水密接度データとオーストラリア及び日本の砕氷船による海洋上層のデータからも同様な結果が導き出されることを示し、この特徴的な関係は南極海一般のものであることを提示した。

前述の熱収支解析から、大気からの正味の熱のインプットが最大になるのは 12 月であり、海水の有無により、海洋上層に入る熱はオーダーが 1~2 異なることが示される。加えて 12 月は海水分布の年々変動が最も大きい月でもあるので、この時期に大気から開水面を通して海洋上層中に入る熱は、年により大きく異なることになる。もしこの熱のアノマリーが海に記憶されるなら、次の結氷期にも影響を及ぼす可能性がある。本研究では、20 年間分の人工衛星による海水密接度データを用いて 12 月の海水密接度アノマリーと次の結氷期 (4 月) のものと比較し、両者の空間分布が非常によく一致することを示した。この結果は、融解期における海水の多少が、海洋上層へ入る熱の多寡を生み、それが海に記憶されて海水が一度消滅した後、結氷期の海水分布に反映されることを示唆している。

以上、申請者の研究は、南極海では大気から開水面を通して海洋上層へ入る熱 (主に短波放射) が海水融解の主な熱源であることを、はじめてデータから定量性をもって明らかにしたものである。さらに、本研究は開水面から入る熱が海水の後退と前進の年々変動を説明し得る最も重要な要因であることも示唆している。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士 (地球環境科学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。