

学 位 論 文 題 名

Detection of Antarctic coastal polynyas from
passive microwave data and estimation of
sea ice production there

（マイクロ波データによる南極沿岸ポリニヤの検出と
そこでの海水生産量の見積もり）

学位論文内容の要旨

南極沿岸ポリニヤは主に風や海流によって海水が運ばれることが原因で出現し維持され、冬季におけるここでの熱損失は非常に大きい。また、水深が浅く水温が結氷点に近い大陸棚域に形成されるため、海洋下層からの熱の供給を無視できる。そのため、ここでは冬季を中心に海水が活発に生産されている。この沿岸ポリニヤにおける海水生産は南極の海水総生産に対してのみならず、ブライン排出による塩分生産によって、南極底層水形成に対しても重要な役割を果たしていると考えられている。しかしながら、現場観測が極めて難しい海域であるため、海水生産・塩分排出に関して、定量的には明らかになっていない。衛星データを用いて沿岸ポリニヤを検出し、表面熱収支を計算する事によって海水生産量を求める方法が、現時点では最も有効である。厳しい寒さのため、南極沿岸ポリニヤの開水面はすぐに結氷し、そのほとんどは薄氷で覆われている。表面熱収支は氷厚に大きく依存するため、ポリニヤの領域とその薄氷厚をより正確に見積もることが重要である。また、沿岸ポリニヤは空間的・時間的に大きく変動するので、その大きさ及びそこでの大気・海洋・海水間熱交換を一日単位で測る必要がある。マイクロ波データならば、雲や夜の影響を受けずに全南大洋をカバーするデータを一日単位で取得することができる。そこで、マイクロ波データの中でも空間解像度が 12.5km と細かい、Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) 85GHz 輝度温度データを主に使用して薄氷厚アルゴリズムを作成することにした。このデータを使うことによって、南極海沿岸に多く存在する大きさ 15~20km 程度の沿岸ポリニヤを検出することができる。アルゴリズム作成にあたって、比較・検証データが必要である。南極沿岸ポリニヤでの氷厚に関する現場観測データは限られており、その中で数十 km の空間解像度を持つ SSM/I のグリッドスケールを代表できるデータを得るのは難しい。空間解像度数 km の Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) データによる表面温度からは氷厚を原理的に導出でき、SSM/I のグリッドスケールでの比較・検証が可能となる。この氷厚導出は AVHRR データから見積もられた海水表面温度と客観解析データを用いた熱収支計算に基づいていて、北半球の季節海氷域で現場観測データと比べて確かめられている。この方法を南極沿岸ポリニヤに適用し、2003 年に行われたオーストラリア主催の国際海氷観測に参加して取得した現場観測データと比較して、この方法の南極海における有効性を確かめることにした。以上のことから、下記の三つの研究を行うことにした。(1) AVHRR データから計算される氷厚の確からしさを南極沿岸ポリニヤでの現場

観測データを用いて検証する。(2) AVHRR データから得られる氷厚を比較・検証データとして用いることによって、SSM/I データから南極沿岸ポリニヤの薄氷厚を見積もるアルゴリズムを作成する。(3) SSM/I のアルゴリズムと客観解析データを用いて熱収支計算を行うことによって、海氷生産量を見積もり、その空間分布と年変動を明らかにする。この研究の意義は、全南極海に適用できるアルゴリズムを用いて海氷生産を見積もることによって、南極海における海氷生成域や生産量の年変動を明らかにできることである。

(1) AVHRR 氷厚推定

AVHRR データから得られる海氷表面温度を用いて熱収支計算をすることによって氷厚を求める方法を、南極ウィルクスランド沖のヴィンセンネス湾ポリニヤに適用し、氷厚の現場観測データと比較することによってこの方法の有効性を示した。2003 年 9~10 月に行われたオーストラリア主催の国際海氷観測に参加して現場観測データを取得した。船首に設置した放射温度計（海氷表面温度を観測）と船が観測していた気象データを用いて熱収支計算から求めた氷厚（現場データのみを用いて導出した氷厚）と、舷側に設置したビデオで観測した氷厚を比較データとして用いた。ポリニヤ域において、AVHRR データと ECMWF データを用いて熱収支計算から求められる氷厚は、現場観測データから得られる氷厚とよく一致した（Bias: 0.5cm, STD: 2cm）。AVHRR データから得られる氷厚は、マイクロ波データから氷厚を見積もる際の比較・検証データとして使用できることが南極海においても示唆された。

(2) SSM/I 薄氷厚アルゴリズム

南極海において SSM/I データを用いて、定着氷を検出した上で海氷の薄氷厚を見積もるアルゴリズムを作成した。AVHRR データから得られる氷厚を比較・検証データとして用いることによって、SSM/I の 85・37GHz 輝度温度の極性比 (PR-85・PR-37) から 0.2m 以薄の氷厚を検出し、その厚さを見積もる式を提出した。このアルゴリズムは沿岸域に限らず氷縁も含めて全南極海に適用でき、空間解像度 12.5km で一日二回のデータを提供するものである。このアルゴリズムが薄氷と厚氷を正しく区別している精度は約 95% である。SSM/I アルゴリズムと AVHRR データから得られる氷厚の差の STD は約 5cm と小さくないが、地域差・季節差によるバイアスはほとんどなく、地域や季節に関係なく適用できる。沿岸ポリニヤは強い沖向きの風によって生成されるが、沖向き風速との対応もよい。この結果は本研究の薄氷域検出の確からしさを支持するものである。よってこのアルゴリズムを全南極海に適用して、熱フラックス・海氷生産量を求め、その地域差や年変動について程度議論することが可能と考えられる。

(3) 海氷生産量推定

SSM/I アルゴリズムを使って得られた沿岸ポリニヤにおける氷厚のデータと、ECMWF 高分解能再解析データ（気温・風速・海面気圧・露点温度）、ISCCP データ（全雲量）、OISST データ（海面温度）を用いて熱収支計算を行った。解析期間は 1992~2001 年で、全南極海域で解析を行った。海氷域内のグリッドにおいて海洋から大気に奪われた熱は全て海氷生産に使われるものとして海氷生産量を見積もった。海洋下層からの熱の供給はないものとしている。南極沿岸ポリニヤでの海氷生産は高く、特に東南極沿岸で海氷生産の高い領域が半島などの突起の西側（南極沿岸流の下流側）に存在する。ロス海沿岸では南極海で最も高い海氷生産が示され、これはロス海で高塩の南極底層水が生産されている事実に対応している。一方、ウェッデル海沿岸は、南極底層水の主要形成域であるにもかかわらず、海氷生産が比較的低い。また、東南極沿岸のブリッツ湾の西側にあるケーブダーンレーポリニヤにおいて、ロス海に次いで二番目に高い海氷生産が示された。それぞれの南極沿岸ポリニヤにおける海氷生産量の年変動を見ると、ロス海沿岸ポリニヤでの年変動が南極海で最も大きく、そこでの海氷生産は 1990 年代中盤から 2000-2001 年にか

けて大きく減少している。この結果は、現場の海洋観測から得られた近年のロス海底層水の塩分減少に対応している。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 大 島 慶一郎

副 査 教 授 若 土 正 暁

副 査 教 授 江 淵 直 人

副 査 教 授 池 田 元 美

副 査 教 授 榎 本 浩 之 (北見工業大学土木開発

工学科)

副 査 教 授 西 尾 文 彦 (千葉大学環境リモート

センシング研究センター)

学 位 論 文 題 名

Detection of Antarctic coastal polynyas from passive microwave data and estimation of sea ice production there

(マイクロ波データによる南極沿岸ポリニヤの検出と
そこでの海水生産量の見積もり)

南極海は世界で最も重い水が作られる海域で、ここで沈み込んだ南極底層水は全世界の海の底層に拡がり、大規模な海洋深層循環を駆動している。この重い水を作っているのが南極沿岸ポリニヤである。ポリニヤとは、海洋がある程度厚い海水で覆われているはずの時期に、海水が部分的に開水面または薄氷域になる領域のことである。南極沿岸ポリニヤは主に風や海流によって海水が運ばれることが原因で出現し維持され、冬季におけるここでの熱損失は非常に大きい。また、水深が浅く水温が結氷点に近い大陸棚域に形成されるため、海洋下層からの熱の供給は小さいと考えられる。そのため、ここでは冬季を中心に海水が活発に生産されている。この沿岸ポリニヤでの高い海水生産によるブライン (高塩分水) 排出が、南極底層水のもととなる高密度水の生成のもととなっている。しかしながら、南極沿岸ポリニヤは現場観測が極めて難しい海域であるため、そこでの海水生産がどの程度であり、またどの海域で大きいのかといったことや、生産量の年々変動はどのようなものか、といった定量的なことはほとんど明らかになっていない。申請者の研究は、衛星データを用いて沿岸ポリニヤを検出し、表面熱収支を計算することによって海水生産量を求めることを試みたもので、南極海における海水生成域や生産量の年変動を明らかにすることをめざしたものである。

厳しい寒さのため、南極沿岸ポリニヤの開水面はすぐに結氷し、そのほとんどは薄氷で覆われている。表面熱収支は海水厚に大きく依存するため、海水生産を求めるにはポリニヤの領域とその薄氷厚をより正確に見積もることが重要である。また、沿岸ポリニヤは空間的・時間的に大きく変動するので、その大きさ及びそこでの大気・海洋・海水間熱交換を一日単位

で測る必要がある。マイクロ波データならば、雲や夜の影響を受けずに全南大洋をカバーするデータを一日単位で取得することができる。

申請者は、まず、AVHRR データから得られる海氷表面温度を用いて熱収支計算をすることによって氷厚を求める方法を、南極ウィルクスランド沖のヴィンセンネス湾ポリニヤに適用し、氷厚の現場観測データと比較することによってこの方法の有効性を示した。この研究は、オーストラリアの砕氷船による国際海氷観測に実際に参加して自ら取得した現場観測データに基づいている。この研究から、AVHRR データから得られる氷厚は、マイクロ波データから氷厚を見積もる際の比較・検証データとして使用できることが南極海においても示されたことになる。

次に、申請者は、南極海においてマイクロ波の SSM/I データを用いて、定着氷を検出した上で海氷の薄氷厚を見積もるアルゴリズムを開発した。具体的には、AVHRR データから得られる氷厚を比較・検証データとして用いることによって、SSM/I の 85・37GHz 輝度温度の極性比 (PR-85・PR-37) から 0.2m 以下の氷厚を検出し、その厚さを見積もる式を提出した。SSM/I アルゴリズムと AVHRR データから得られる氷厚の差の STD は約 5cm と小さいが、地域差・季節差によるバイアスはほとんどなく、このアルゴリズムは地域や季節に関係なく適用できるものである。

さらに、申請者は、SSM/I アルゴリズムを使って得られた沿岸ポリニヤにおける氷厚のデータと、ECMWF 再解析データ等の気象データを用いて海氷生産量の見積もりを行った。解析期間は 1992～2005 年で、全南極海域を対象に、海氷域内のグリッドにおいて海洋から大気に奪われた熱は全て海氷生産に使われるものとして海氷生産量を見積もっている。その結果、南極沿岸ポリニヤでの海氷生産は高く、特に東南極沿岸で海氷生産の高い領域が半島などの突起の西側（南極沿岸流の下流側）に示された。ロス海沿岸では南極海で最も高い海氷生産が示され、これはロス海で高塩の南極底層水が生産されている事実に対応している。一方、ウェッデル海沿岸は、南極底層水の主要形成域であるにもかかわらず、海氷生産が比較的低いという結果となった。注目される点は、東南極沿岸のブリッツ湾の西側にあるケープダーンレーポリニヤにおいて、ロス海に次いで二番目に高い海氷生産が示されたことである。これはここで南極底層水が作られている可能性を示唆しており、過去の海洋観測結果とも対応している。それぞれの南極沿岸ポリニヤにおける海氷生産量の年変動を見ると、ロス海沿岸ポリニヤでの年変動が南極海で最も大きく、そこでの海氷生産は 1990 年代から 2000 年代にかけて大きな減少が示された。この結果は、現場の海洋観測から得られた近年のロス海底層水の塩分減少を説明している可能性がある。

申請者の研究は、南極海において初めて海氷生産量分布やその経年変動を示した研究であり、南極域の海氷・海洋研究だけでなく、衛星リモートセンシングによる海氷研究にも大きく貢献するものと判断される。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、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、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。