

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：50102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740322

研究課題名(和文)衛星マルチセンサー観測による海氷厚の推定とその熱塩フラックスデータセットへの応用

研究課題名(英文) Estimation of ice thickness by satellite multi sensors and its application to heat and salt flux dataset

研究代表者

二橋 創平 (NIHASHI, Sohey)

苫小牧工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：50396321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：北極海、南極海、オホーツク海、日本海で、AMSR-Eのデータから日毎の薄氷厚の見積もりを行うアルゴリズムの開発を行った。また得られた薄氷厚データを用いた熱フラックス計算から、海水生産量データセットの作成を行った。さらにオホーツク海では、熱塩フラックスデータセットの作成も行った。熱フラックスは薄氷域の氷厚を考慮して見積もった。塩フラックスは、結氷による塩分排出と、融解に伴う淡水供給を考慮した。海水の移流も考慮した。年平均した熱塩フラックスの空間分布から、海水の移流に伴う淡水と負の熱の輸送が示唆された。以上の本研究課題で作成されたデータセットは、モデルの比較・検証や、境界条件に用いることができる。

研究成果の概要(英文)：Thin ice thickness algorithms for AMSR-E were developed in the Arctic and Antarctic Oceans, Sea of Okhotsk, and Japan Sea. By using the created ice thickness, ice production was estimated based on heat flux calculation. In the Sea of Okhotsk, a heat and salt flux dataset is created. The dataset is based on a heat flux calculation using ice concentration, thickness, and drift speed from satellite observations. The salt flux calculation considers both salt supplied to the ocean from ice production and freshwater supplied when the ice melts. The spatial distribution of the annual fluxes shows a distinct contrast between north and south: significant ocean cooling with salt supply is shown in the northern coastal polynya region, while ocean heating with freshwater supply is shown in the south. This contrast suggests a transport of freshwater and negative heat by ice advection. The dataset created in this study will be useful for the validation and boundary conditions of modeling studies.

研究分野：極域海洋学

キーワード：海氷 熱塩フラックス 海水生産量 海氷厚 沿岸ポリニヤ 南極海 北極海 オホーツク海

1. 研究開始当初の背景

北極海や南極海といった極域の海洋に存在する海水には 1. 熱と塩の再分配と輸送, 2. 大気 - 海洋間の蓋, 3. 高アルベド, という特徴があり、これらの特徴は気候システムのみならず物質循環や生物活動といった地球環境全般に大きな役割を果たしている。例えば、沿岸ポリニヤ(図1, 卓越する沖向きの風や海流によって、海水が沖に運ばれると同時にすぐに結氷することで形成・維持される薄氷域)における盛んな海水生産と、その際に海水から排出される高塩で低温の高密度水の沈み込みは、気候システムの最重要構成要素の一つである海洋の熱塩循環を駆動する。またこの高密度水の沈み込みにより、二酸化炭素等の大気中の物質が海洋深層へと運び込まれている。風や海流によって移流した海水が融解する際、海洋上層を(潜熱を奪うことにより)冷やし、淡水を供給する。この過程は海水による負の熱と淡水の輸送を意味する。また融解に伴う海洋上層の成層の強化が植物プランクトンのブルームを引き起こし、極域海洋を豊かな海にしているとも考えられている。このように海水の結氷・移流・融解は、熱と塩の再分配と輸送を引き起こし、地球環境に対して様々な面から重要な役割を果たしている。他にも海水の融解とそれともなうアルベドフィードバック効果は、海水域を気候変動に対して非常に敏感な海域にたらしめている。現実に北極域で地球温暖化の影響が最も顕著に出ているし、逆に海水域が温暖化を加速させているという考え方もできる。しかしながら、海水域においていつどこでどれだけの大気 - 海洋間の熱フラックスがあり、そしていつどこでどれだけ結氷あるいは融解するかに関しては、まだ定量的な評価は十分にできていない。

海水には大気 - 海洋間の断熱材としての働きがあるが、その断熱効果は氷の厚さが薄くなるに従って急激に小さくなる。従って海水の厚さは、薄い場合は大気 - 海洋間の熱フラックスの見積りに対して重要になる。一方、厚い場合は海水の総量を知る上で重要になり、例えば温暖化の海水への影響を調べる場合、氷厚は不可欠な情報になる。しかしながら、海水の広がり(面積)に関しては衛星観測(SMMR, SSM/I, SSMIS, AMSR-E)によって30年間以上のデータの蓄積があるが、厚さに関しては、長らく現場でドリルにより海水に直接穴を開けて測定するか、砕氷船が砕く氷を目視で見積もるしかなく、データは限られていた。近年になり、音響測器(Ice Profiling Sonar)や電磁誘導式氷厚計(EM: Electromagnetic Induction Instrument)による、現場での氷厚の推定が行われるようになってきている。半球規模の氷厚推定のためには衛星観測が不可欠であり、特にこの10年間に様々な取り組みが行われてきている。例えば、マイクロ波散乱計データ(QuikSCAT

等)を用いた北極海の多年氷域(夏でも氷が融けきらず残る厚い海水域)の検出(Kwok, 2004)や、マイクロ波放射計データ(SSM/I, AMSR-E)を用いた薄氷厚推定(Martin et al, 2004; Tamura et al., 2007)等である。2000年代中盤以降は、レーザーならびにレーダー高度計(ICESat, CryoSat-2)データを用いた氷厚推定(Kwok et al., 2006; Kurtz et al., 2009)が行われるようになり、氷厚分布ならびにその変動を知るための重要な情報になりつつある。

マイクロ波放射計は、約5cmの精度で20cm程度未満の氷厚を推定できる。この方法では実際には氷厚を見ているわけではなく、誘電率を介して海水表面の塩分を見ている(Hwang et al., 2007)。海水は厚くなるにしたがって脱塩するので、海水表面の塩分と薄氷厚には負の相関関係があり(Kovacs, 1996)、この関係を用いて氷厚を推定している。従って海水がある程度厚い場合は、すでにかなり脱塩してしまっており、さらに塩分の情報を隠す積雪で覆われているので、マイクロ波放射計による氷厚推定は適していない。一方レーザー高度計による氷厚推定では、海面から海水表面(積雪を含む)までの高さ(surface elevation)を10cm程度の精度で計測し、そこから海水の密度等、幾つかの仮定のもと氷厚の推定を行っている。従って海面からの高さがほとんど無い薄氷の場合は、この方法による氷厚推定は適していない。このように、それぞれの衛星センサーによる氷厚推定には得手不得手があるのが研究開始当初の現状であった

2. 研究の目的

本研究課題では、複数のセンサーによる衛星観測データを組み合わせることで互いの欠点を補い、薄い海水から厚い海水までのより精度の高い氷厚の推定を南北両半球で行うことを第一の目的とした。本研究で作成する新たな氷厚データを用いることにより、大気 - 海洋間の熱フラックス計算や海水融解量の見積もりをより高い信頼性を伴って行うことができるようになる。南北両半球で海水域の熱塩フラックスデータセット(いつどこでどれだけ大気 - 海洋間に熱のやりとりがあり、それに伴う海水形成(塩分排出)量ならびに融解(淡水供給)量を示すデータセット)の作成を行うことを第二の目的とした。

3. 研究の方法

複数のセンサーによる衛星観測データを組み合わせ相互に補完することによって、薄い海水から厚い海水までのより精度の高い氷厚データセットの作成を南北両半球で行う。具体的には、薄い海水にはマイクロ波放射計(SMMR, SSM/I, SSMIS, AMSR-E)のデータを、厚いものに対してはレーザー高度計(ICESat)のデータを用いる。現場観測による

氷厚データとの比較をおこない、作成された氷厚データセットを検証する。氷厚データセットを用いて、主に熱収支計算から熱塩フラックスデータセットの作成を行う。

4. 研究成果

(1) オホーツク海で、AMSR-E による輝度温度データを用いて薄氷厚を推定するアルゴリズムの開発を行った。従来のアルゴリズムでは、海水密接度の低い氷縁域で氷厚を過小評価する（氷縁域が薄氷域として誤検出される）ことがあった。この誤検出は、氷縁域における海水生産量の過大評価につながり、海水域における熱塩フラックスデータセットの作成のために必要不可欠な改善点であった。新しいアルゴリズムでは、海水密接度の情報を取り入れることにより、この過小評価を改善することができるようになった。北海道沿岸での巡視船宗谷による現場観測データとの比較から、氷縁域であっても薄氷が卓越する場合は、改良型のアルゴリズムは正しく薄氷域と検出できることが確認できた。

(2) オホーツク海における AMSR-E 薄氷厚アルゴリズムをもとに、SSM/I 用のアルゴリズムの開発も行った。この SSM/I 薄氷厚を用いて、海水生産量の長期変動を調べた。さらにこのデータセットを用いた多変量解析をもとに、気象パラメータのみから 30 年間以上の海水生産量の変化を再現し、海水生産量が 34 年間で約 11.4%減少していることを示している。この理由として、風上のシベリアでの温暖化が示唆されている。また海水生産量の変動が、Okhotsk Intermediate Water (OSIW) の変動とよく対応していることも示した。

(3) 北極のチュクチ海で、AMSR-E による輝度温度データから薄氷厚を推定するアルゴリズムの開発を行った。AMSR-E の空間分解は約 6.5 km であり、従来の研究で用いられていた SSM/I よりも空間分解能が倍良いので、空間スケールの小さい沿岸ポリニヤをより良く解像することができるようになった。さらにこの研究では、大気（水蒸気）の影響を軽減でき、海洋の部分をより良く検出できるといった新たな改良を加えた。

(4) 南極海で、AMSR-E による輝度温度データを用いて、薄氷厚推定ならびに定着氷検出アルゴリズムの開発を行った。これにより、約 6km の空間分解能で日毎の薄氷厚と月毎の定着氷の分布を明らかにできるようになった。この空間分解能は、従来の研究で用いられたマイクロ波放射計 SSM/I によるデータの倍である。南極海の沿岸ポリニヤ（薄氷域）や定着氷の空間スケールは約 100km 程度なので、AMSR-E の空間分解能の良さは、沿岸ポリニヤや定着氷のメカニズムを調べる際、大きなアドバンテージになる。実際に AMSR-E による薄氷厚データと SSM/I によるものとの比

較を行ったところ、AMSR-E データは SSM/I データでは解像できなかったような、岸に近いのより海水生産量が大きい薄氷域を検出することができた。AMSR-E よりずっと空間分解能が良い SAR（合成開口レーダー）による衛星観測データとの比較を様々な沿岸ポリニヤ行きで行ったところ、開発した AMSR-E アルゴリズムが沿岸ポリニヤ域と定着氷域をよく検出できていることが確認できた。

(5) 日本海北部でも、上記のアルゴリズムの開発での成果を取り入れて、AMSR-E データから薄氷厚を推定するアルゴリズムの開発を行った。日本海北部のタートル海峡は幅が 200 km 程度と狭く、空間解像度の良い AMSR-E データの使用はとても有利である。実際、作成されたデータから、日本海北部でも寒極であるシベリアからの寒気の吹き出しにより沿岸ポリニヤが形成され、オホーツク海のサハリン沿岸ポリニヤと同程度の海水生産量があることが見積もられた。

(6) 南極海で薄氷厚データを用いた熱フラックス計算から海水生産量を見積った。さらに南極海全域で沿岸ポリニヤ（薄氷域）ならびに海水生産量と定着氷域のマッピングを作成した。その結果、南極海の主要な沿岸ポリニヤの多くが定着氷の西側に形成されることが示され、両者が密接にリンクしていることが示唆された。気象データとの比較から以下の結果が得られた。定着氷ならびに陸地で定義される境界に対して発散方向の地衡風成分がポリニヤ形成の主要な要因である。定着氷が西向きの沿岸流に伴う海水の移流を妨げる効果もポリニヤ形成の重要な要因である。定着氷の急激な変化が、ポリニヤにおける海水生産量の劇的な変化を引き起こす。このことは、定着氷の変化が南極底層水の変動の主要な要因の一つであることを示唆する。以上の結果から、気候モデルで南極底層水の形成や変動を的確に再現するためには、定着氷を考慮する必要があることが示唆された。示されたマッピングは、定着氷の境界条件を提供するものでもある。



図 1 南極海における海水生産量と定着氷のマッピング

(7) 世界で一番重い海水は南極海で作られ、南極底層水として沈み込み、全世界の海洋深層に拡がっていくことで、海洋の大循環が駆動される。南極底層水の生成域として今まで3ヶ所が知られていたが、今回新たにケープダンレー沖でも南極底層水が生成されていることを、AMSR-Eによる薄氷厚データを用いた熱フラックス計算から見積もられた海水生産量や、係留系観測、バイオロギングによる観測から、突き止めた。この海域では、多量に海水が生産され、その際に低温・高塩の重い水が多量に排出されることにより、底層水生成域となっていることも明らかにした。この底層水生成域の発見は、今までの海洋深層循環像を一部描き換えるものである。

(8) オホーツク海において、熱塩フラックスデータセットの作成を行った。熱フラックスは、大気-海洋間の熱交換が特に大きい、薄氷域の氷厚を考慮して見積もった。塩フラックスは、結氷による塩分排出と、融解に伴う淡水供給を考慮した。海水の移流も考慮した。薄氷厚と海水の移流速度は、人工衛星Aquaに搭載されるAMSR-Eにより推定されたものを用いた。年平均した熱塩フラックスの空間分布は、オホーツク海の北と南で明瞭なコントラストを示した。北側の沿岸ポリニヤ域では、膨大な海洋の冷却と塩の供給が示された。南側では、海洋への加熱と淡水供給が示された。これは、海水の移流に伴う淡水と負の熱の輸送を示唆している。この研究で作成されたデータセットは、モデルの比較・検証や、境界条件に用いることができる。

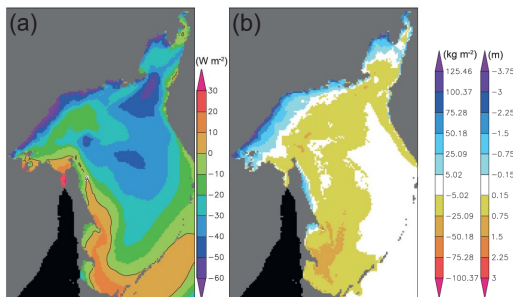


図2 オホーツク海における年平均の(a)熱フラックスと(b)塩フラックス

(9) AMSR-Eからは、厚さ約20 cm以下の薄氷厚しか推定できないので、人工衛星ICESatによるデータを用いて、より厚い氷厚の推定をオホーツク海で行った。ICESatはレーザー高度計であり、海面から海水表面(積雪を含む)までの高さ(surface elevation)を10 cm程度の精度で計測することができる。このsurface elevationから海水の密度等、幾つかの現場観測に基づいた仮定のもと氷厚の推定を行った。ICESatから推定された氷厚と、オホーツク海の南部で砕氷船に搭載された、電磁誘導式氷厚計(EM: Electromagnetic Induction Instrument)により現場観測され

た氷厚との比較から、両者はある程度対応することが示された。また、前述の熱塩フラックスデータセットによる海水生産量と、ICESat氷厚を用いた海水量とが対応することも示された。これらの結果は、比較的氷厚の薄い1年氷域であるオホーツク海でも、ICESatによる氷厚推定がある程度可能であることを示唆するものである。

<引用文献>

Hwang, B. J., J. K. Ehn, D. G. Barber, R. Galley, and T. C. Grenfel, 2007: Investigations of newly formed sea ice in the Cape Bathurst polynya: 2. Microwave emission. *J. Geophys. Res.*, 112, C05003, doi:10.1029/2006JC003703.

Kovacs, A., 1996: Sea ice-Part I: Bulk salinity versus ice floe thickness. *CRREL Monogr.* 96-7, U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, 16 pp.

Kurtz, N. T., T. Markus, D. J. Cavalieri, L. C. Sparling, W. B. Krabill, A. J. Gasiewski, and J. G. Sonntag, 2009: Estimation of sea ice thickness distributions through the combination of snow depth and satellite laser altimetry data, *J. Geophys. Res.* 114, C10007, doi:10.1029/2009JC0052.

Kwok, R., 2004: Annual cycles of multiyear sea ice coverage of the Arctic Ocean: 1999-2003, *J. Geophys. Res.*, 109, C11004, doi:10.1029/2003JC002238.

Kwok, R., G. F. Cunningham, H. J. Zwally, and D. Yi, 2006: ICESat over Arctic sea ice: Interpretation of altimetric and reflectivity profiles, *J. Geophys. Res.*, 111, C06006, doi:10.1029/2005JC003175.

Martin, S., R. Drucker, R. Kwok, and B. Holt, 2004: Estimation of the thin ice thickness and heat flux for the Chukchi Sea Alaskan coast polynya from Special Sensor Microwave/Imager data, 1990-2001, *J. Geophys. Res.*, 109, C10012, doi:10.1029/2004JC002428.

Tamura, T., K. I. Ohshima, T. Markus, D. J. Cavalieri, S. Nishashi, and N. Hirasawa, 2007: Estimation of thin ice thickness and detection of fast ice

from SSM/I data in the Antarctic Ocean, J. Atmos. Oceanic Technol., 24, 1757-1772.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Nihashi, S. and K. I. Ohshima, 2015: Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: relationship and variability, Journal of Climate 28 3650-3670.

Kashiwase, H., K. I. Ohshima, S. Nihashi, 2014: Long-term variation in sea ice production and its relation to intermediate water in the Okhotsk Sea, Progress in Oceanography 126 21-32.

Iwamoto, K., K. I. Ohshima, T. Tamura, and S. Nihashi, 2013: Estimation of thin ice thickness from AMSR-E data in the Chukchi Sea, International Journal of Remote Sensing 34(2) 468-489.

Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. Herraiz-Borreguero, I. Field, M. Hindell, S. Aoki and M. Wakatsuchi, 2013, Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya, Nature Geoscience 6.

Nihashi S., K. I. Ohshima, and N. Kimura, 2012, Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea-ice production and melting in the Sea of Okhotsk, Journal of Climate 25 2261-2278.

[学会発表](計24件)

Nihashi, S. and K. I. Ohshima, Strong linkage between Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice revealed from their combined circumpolar mapping, the AOGS 11th Annual Meeting (AOGS2014), Sapporo, Japan, 1 August, 2014.

Nihashi, S. and K. I. Ohshima, Estimation of sea-ice production in Antarctic coastal polynyas using AMSR-E data, the AOGS 11th Annual Meeting (AOGS2014), Sapporo, Japan, 28 July, 2014.

Nihashi, S. and K. I. Ohshima, Sea-ice production in Antarctic coastal polynyas estimated using AMSR-E data., Japan Geoscience Union Meeting 2014, Yokohama, Japan, 29 April, 2014.

Nihashi, S. and K. I. Ohshima, Mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice from AMSR-E., IGS International Symposium on Sea Ice in a changing environment, Hobart, Australia, 10 March, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二橋 創平 (NIHASHI, Sohey)

苫小牧工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号 : 50396321