

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 年度～2010 年度

課題番号：21740339

研究課題名（和文） 急激な海氷面積減少が起こっている北半球の海氷厚の解明

研究課題名（英文） Estimation of sea ice thickness in the northern hemisphere where a rapid sea ice decrease has happened

研究代表者

直木 和弘 (NAOKI KAZUHIRO)

宇宙航空研究開発機構・宇宙利用ミッション本部・地球観測研究センター・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：80463834

研究成果の概要（和文）：北半球の海氷は、急激に減少しており、今後特に薄い海氷域はさらに融解が進行すると予想される。そこでマイクロ波放射計から海氷の厚さを推定するために、観測と海氷の放射過程を計算した。観測の結果から厚さを推定するためには、18GHz 水平偏波が有効であり、海氷上の雪も重要であることが明らかになった。この結果を基に海氷のモデルを改良し比較した結果、厚さの異なる海氷のマイクロ波放射を精度良く推定することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：The sea ice rapidly decreasing in the northern hemisphere. For the future, especially thin sea ice area is expected to melt. Then, the purpose is to estimate the sea ice thickness using passive microwave sensor. The analysis did the observation and the calculation of the radiative process of sea ice. As a result, 18GHz horizontal is effective, and the snow on sea ice is important to estimate the thickness. The models of the sea ice were improved and compared observational data. As a result, the microwave emission of the sea ice with different thickness became possible to estimate of high accuracy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：海氷リモートセンシング

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海氷 厚さ マイクロ波放射 薄氷

## 1. 研究開始当初の背景

地球上で最も温暖化の影響を受けている雪氷圏では、既に積雪や氷河、海氷の融解が始まっており、2007 年 9 月の北極海の海氷面積が 1978 年以降最も減少した。この融解の速度

は気候変動に関する政府間パネルに報告されているように、急激な気候変動は、雪氷圏で顕著に現れることから、雪氷圏における気候変動を時間的・空間的に密に監視することが重要である。

温暖化に伴う雪氷圏の急激な変化は、これまでアメリカ国立雪氷データセンターが中心となって海氷面積や分布の変動を捉えてきた。古くはロシアの潜水艦ソナーによる観測結果のみであったが、マイクロ波放射計を搭載した人工衛星の打ち上げに伴い、海氷観測は極域を中心とした全球レベルへと発展し、現在、地球温暖化の指標とされている海氷面積、海氷分布の広域観測が行われるようになった。この観測から近年の温暖化傾向に伴う海氷面積の減少が指摘された。特に近年、海氷の薄氷化が目立ち、2007年9月の北極海の海氷面積は予想をはるかに超えて減少した。海氷厚の薄い海域では今後急激な融解が起これ、その結果、気候変化のみならず海洋生態系の変化が懸念される。したがって、これからは温暖化の結果としての海氷面積変動ではなく、温暖化の兆候としての海氷厚の変動を長期にわたって監視することが非常に重要である。これまで人工衛星に海氷観測は海氷の面積(割合)や分布の測定が主流であった。これはマイクロ波放射計の空間分解能が10km~20kmと悪く、詳細な測定が困難であったためである。しかし、2002年に打ち上げられた高分解能衛星 ADEOS-II/AMSR によって、海氷の面積(割合)や分布だけでなく、より細かな情報を取り出せるようになった。これまでに衛星搭載型マイクロ波放射計を用いた厚さ推定は、37GHz と 89GHz の輝度温度と熱力学成長モデルから推定した海氷厚の経験式を用いてオホーツク海や南極などの海氷の厚さを推定した報告がある。また、37GHz と 89GHz の輝度温度と観測から得られた厚さの関係から海氷厚の経験式を用いて海氷厚を推定した結果がある。これら研究成果は、海氷生産量などが明らかになり海洋循環などの研究に大きく貢献している。しかし、色々な衛星データや気象データと組み合わせ推定した統計手法を用いた方法であったため、データの欠損が推定結果に大きな影響を及ぼす可能性がある。また、使用している周波数帯が高いため大気・海氷上積雪の影響を考慮していない点において問題点がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、マイクロ波放射計で観測される輝度温度から、海氷及び積雪の放射過程を考慮した手法を用いて海氷厚のリモートセンシングを行うことを目的とした。

(1) これまでに観測報告の少ない 10cm 以下の薄い海氷の詳細な輝度温度特性や、海氷上積雪の影響を観測によって明らかにする。

(2) 海氷の輝度温度を精度よく再現するため

にこれまでに開発してきた海氷輝度温度モデルの改良を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 海氷観測

2010年2月と2011年2月に海氷及び海氷上積雪の輝度温度特性を観測するために北海道サロマ湖において海氷観測を実施した。サロマ湖は塩水湖であり、海水の塩分濃度や海氷の塩分濃度及び海氷の構造は、外洋に存在する海氷と同様である。薄い海氷の輝度温度特性の観測は、サロマ湖上において既に成長している海氷を切り出し人工的に開放水面を作成し実験プールを作成した。その後、海氷の成長に伴う海氷の輝度温度を測定した。海氷のマイクロ波観測は、三菱電機特機システム株式会社製のマイクロ波・ミリ波放射計(MMRS2)の18GHzと36GHzを用い、両周波数帯共に水平偏波の輝度温度を連続観測し、約30分毎に垂直偏波の輝度温度を観測した。観測入射角は、AMSRと同じ55度とした。観測終了後、海氷サンプルを取得し塩分濃度の測定を行った。

海氷上積雪の輝度温度観測は、同じくサロマ湖上2地点で行い、各地点において18GHz、36GHz 両偏波の輝度温度を観測した。輝度温度測定後、積雪断面観測および海氷観測を行った。積雪断面観測では、粒径・密度・温度・雪質の観測を行った。

### (2) 海氷の輝度温度の推定

海氷の放射率の推定は、これまでの観測結果から得られた海氷表面塩分濃度と厚さの関係を用い、厚さ(1-30cm)から塩分濃度を求めた。海氷の放射率は、海氷表面、積雪、大気の間境界層において熱平衡状態であるとした。海氷と大気および積雪の境界ではマイクロ波の透過はなく吸収されたエネルギーは全て放射されるとした。また、積雪と大気の間境界では、積雪を乾雪とし吸収はない状態とした。本研究では、4.(1)に示す海氷の観測結果から18GHzにおいても海氷上積雪がマイクロ波放射に対し影響があることが観測されたため、海氷上積雪を考慮したモデルに改良した。海氷の放射率は、積雪がない場合、密度 $0.1\text{g/cm}^3$ の積雪がある場合、密度 $0.3\text{g/cm}^3$ の積雪がある場合、密度 $0.5\text{g/cm}^3$ の積雪がある場合に対して計算した。入射角は、比較のために使用する航空機搭載型マイクロ波放射計(PSR)と同じ55度とし、海氷表面温度は、 $-3\sim-8^\circ\text{C}$ に対し計算した。計算結果は、2003年2月に実施した航空機と砕氷船同期観測によって取得されたPSRの観測輝度温度のうち、現場観測

から得られた密接度 100%領域の厚さ 2.5、5.8、11.1、18.5、27.2cm の輝度温度と同期観測日に観測した温度から放射率を推定し比較した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 海氷観測

図 1(A) は、観測開始時刻から観測終了時刻までの両偏波の水平偏波の輝度温度の観測結果を示している。また図 1(B) は、同じく観測開始時刻から観測終了までの両偏波の垂直偏波の輝度温度の観測結果を示している。図中の数値は、各観測時刻において、実験プールにおける成長中の海氷に穴を開け測定した海氷の厚さを示している。

観測は、4 時 13 分に開放水面の垂直偏波の輝度温度を観測し、4 時 18 分に開放水面の水平偏波の輝度温度を観測し、その後輝度温度観測を継続した。18GHz の開放水面の輝度温度は、水平偏波が、94.4K、垂直偏波が、178.4K であった。また、36GHz の開放水面の輝度温度は、水平偏波が、121.8K、垂直偏波が、207.4K であった。その後、輝度温度は両周波数、両偏波ともに時間経過と共に上昇し観測終了時には、18GHz の水平偏波の輝度温度が 164.3K、垂直偏波の輝度温度が 239.9K、36GHz の水平偏波の輝度温度が 211.5K、垂直偏波の輝度温度が 260.5K であった。海氷の厚さは、5 時 53 分には 5mm、6 時 29 分には 10mm となり観測終了時の 6 時 56 分には 12mm となった。また、観測終了時の 12mm の海氷サンプルの塩分濃度は 25ppt であった。放射率に対し重要な、表面温度は、開放水面時には  $-1.9^{\circ}\text{C}$ 、4 時 55 分には  $-2.3^{\circ}\text{C}$ 、5 時 53 分も  $-2.3^{\circ}\text{C}$ 、6 時 27 分には  $-4.2^{\circ}\text{C}$ 、6 時 53 分には  $-3.2^{\circ}\text{C}$  であった。観測時の気温は、観測期間中は常に  $-10^{\circ}\text{C}$  より低く、4 時 55 分が  $-13.2^{\circ}\text{C}$ 、5 時 27 分が  $-11.9^{\circ}\text{C}$ 、5 時 53 分が  $-12.5^{\circ}\text{C}$ 、6 時 27 分が  $-11.5^{\circ}\text{C}$ 、6 時 53 分が  $-12.1^{\circ}\text{C}$  であった。大気からの海氷表面への下向き放射は、入射角 55 度の時、18GHz 水平偏波が 12.8K、垂直偏波が 15.4、36GHz 水平偏波が 31.6K、垂直偏波が 35.0K であった。

輝度温度は、放射率を用いると物理温度との積として現わすことができる。そこで、観測された開放水面の輝度温度と海水温度の  $-1.9^{\circ}\text{C}$  を用いて、放射率を求めた。水平偏波の 18GHz の放射率は、0.348、36GHz は 0.449、垂直偏波の 18GHz の放射率は 0.657、36GHz は、0.764 となった。北半球や南半球においてこれまでに航空機等で観測された海氷域における開放水面の各放射率は、水平偏波の 18GHz の放射率は、 $0.332 \pm 0.018$ 、36GHz は  $0.392 \pm 0.015$ 、垂直偏波の 18GHz の放射率は

$0.570 \pm 0.033$ 、36GHz は  $0.662 \pm 0.029$  と報告されている。18GHz の水平偏波の放射率は、これまでの観測結果とほぼ同じとなった。また、36GHz の水平偏波も差が小さかった。しかし 18GHz の垂直偏波の差は約 0.08、36GHz の垂直偏波の差は約 0.10 であった。36GHz は、大気からの下向き放射が 18GHz と比較したときに大きくそのため海氷表面での反射によって今回の結果が高くなっていると考えられる。

図 1(B) に示すように、垂直偏波の輝度温度は両偏波共に開放水面から観測から急激に上昇している。このことから、水平偏波は表面状態の変化に強く影響を受けると考えられる。また、今回の観測時の海水温度は  $-1.9^{\circ}\text{C}$  であったために既に結氷温度となっており、人工的に開放水面を作成したが、海氷を取り除いている瞬間から海氷が生成されているために放射率が高くなったと考えられる。今回観測した海氷厚さは 12mm までであったが、観測終了時刻付近になると、この厚さ領域においても垂直偏波の輝度温度の変化量は小さくなり一定の輝度温度になりつつある。特に 36GHz において顕著であることが分かった。本観測によって、現場観測が困難である非常に薄い海氷の厚さと輝度温度の関係を観測することができ貴重なデータを取得できた。また、非常に薄い領域においても海氷の厚さ推定には 18GHz 水平偏波が有効であるということが分かった。

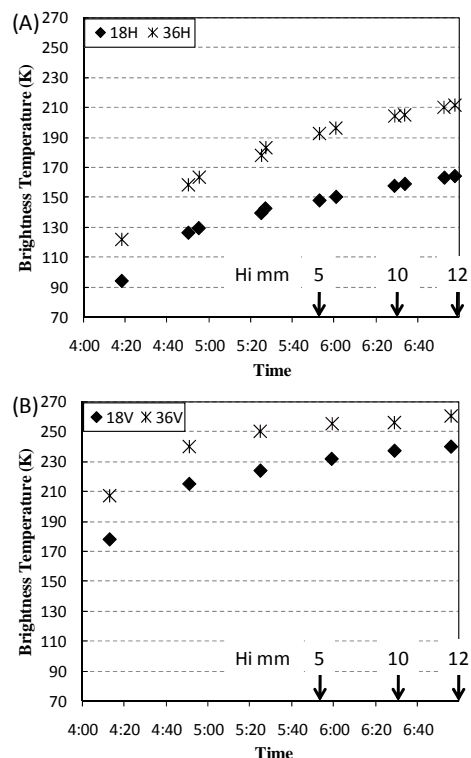


図 1 薄い海氷の輝度温度観測結果 (A) 水平偏波 (B) 垂直偏波

海氷及び海氷上積雪の観測輝度温度を図 2 に示す。観測を実施した 2 地点を #S1、#S2 としている。また、図中 H、V はそれぞれ水平偏波、垂直偏波である。図に示すように観測輝度温度は、海氷上に積雪がある方が大きくなっていることが分かった。また、#S1 は積雪深の増加に伴い輝度温度が上昇した。#S2 は、積雪深の増加に伴い減少した。この要因を調べるために、#S1 では上部 2cm、#S2 では上部 4cm の積雪を取り除き、輝度温度を再び測定した。その結果、#S1 では、輝度温度が減少し、#S2 では増加した。これは、#S1 においては、雪による吸収・放射が卓越していると考えられる。一方 #S2 では雪による散乱が卓越していると考えられる。このことから、#S1 は高い含水率の湿雪であり、#S2 は乾雪である可能性が高い。一般的に乾雪は、ほとんどマイクロ波を吸収せず散乱のみを考慮する。しかし、#S2 において、海氷上に積雪が存在しない状態より海氷上に積雪が存在する状態の方が輝度温度が高くなった。そのため、18GHz 帯においても海氷上積雪を考慮する必要があることが明らかになった。

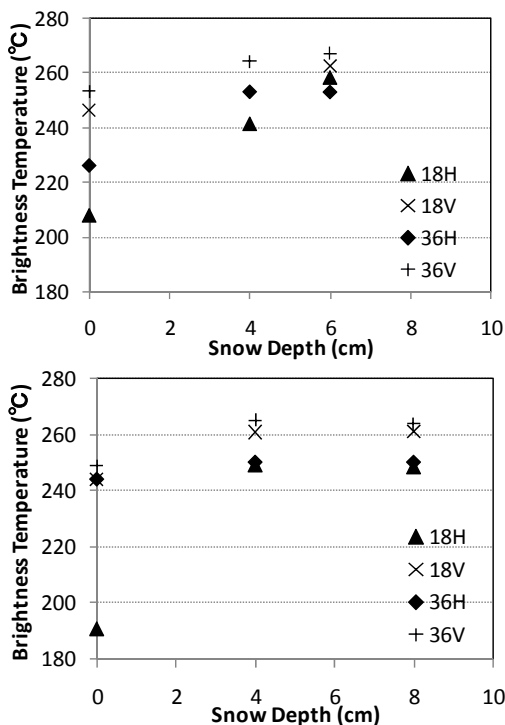


図 2 海氷と積雪の輝度温度観測結果 上図が#S1、下図が#S2 を示している。

## (2) 海氷の輝度温度の推定

図 3 は、18GHz 水平偏波の放射率の計算結果と PSR による観測結果の比較を示している。図 1(a) は積雪のない海氷表面からの放射率、図 1(b)~(d) は、海氷上積雪表面からの放射率を示している。全ての推定値の最大値は、

海氷表面温度が $-8^{\circ}\text{C}$ の時の計算結果であり、最小値は、海氷表面温度 $-3^{\circ}\text{C}$ の結果である。比較地点における海氷表面状態をカメラ画像で確認した結果、11.5cm 以下では裸氷であり、それ以上では海氷上に積雪が存在していた。

図 1(a) に示している積雪のない状態の海氷の放射率は、10cm 以下で推定値と観測値が良く一致した。この領域は、先に述べたように積雪がなく、海氷が薄いため塩分濃度が高いため、積雪がない状態の計算結果と良い一致を示した。また、2.5cm における観測値に最も近い放射率となったのは、 $-4^{\circ}\text{C}$ の海氷表面温度の場合であった。一方、6.8cm では、 $-6^{\circ}\text{C}$ の表面温度の場合であった。この温度の違いは薄い海氷ほど海水温度の影響を受けやすいため、薄い海氷ほど高い表面温度での計算結果と最もよく一致したと考えられる。11.5cm 領域の観測値は、密度  $0.1\text{g}/\text{cm}^3$  の推定値と最も良い一致を示した。表面状態をカメラ画像から確認したところこの領域の表面には数箇所積雪の存在していない領域があった。このことから、海氷上に積雪が多くは存在しない可能性が高い。さらに、厚さが 11cm と比較敵薄いことからこの領域には密度の低い積雪が存在していたと考えられる。そのため積雪密度  $0.1\text{g}/\text{cm}^3$  の推定値と最も良い一致を示したと考えられる。18.5cm と 27.2cm の領域は、密度  $0.3\text{g}/\text{cm}^3$  の結果と良い一致を示した。海氷が厚い領域では、積雪が存在可能であり、また降雪後時間が経過していると考えられる。そのため積雪の密度が高い状態で存在していると推測される。そのため、積雪密度の高い計算結果と良い一致を示したと考えられる。

これらのことから、結氷期における薄い海氷と積雪を考慮することで海氷の輝度温度を精度よく推定することが可能となり、同時に 18GHz 水平偏波の輝度温度から海氷の厚さを推定する基礎となる結果が得られた。

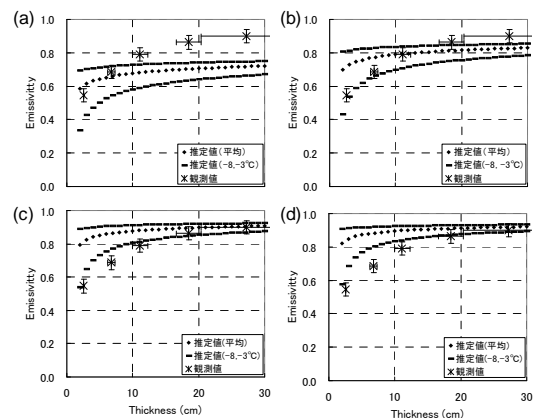


図 3 18GHz 水平偏波放射率の観測値と推定値の比較。(a) 積雪がない場合 (b) 密度

0.1g/cmの積雪(c)密度0.3g/cmの積雪(d)密度0.5g/cmの積雪の場合に対する表面からの放射率。各図とも推定値の最大値は-8℃、最小値は-3℃の推定結果である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

① Shinsuke Kojima, Kazuki Nakamura, Kazuhiro Naoki, Hiroyuki Enomoto, Thermal Properties of Snow on Sea Ice Changed by Formation of Wet Snow and Flooded Snow, International Journal of Offshore and Polar Engineering, vol.21, no.2, 97-102, 2011. 査読有

〔学会発表〕(計11件)

① K. Tateyama, H. Shibata, H. Enomoto, M. Hori, K. Naoki, Estimation of The Annual minimum Sea Ice Extent in The Arctic Ocean Using IJIS Dataset, Program for the Second International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 8 December, 2010

② 直木和弘, 堀雅裕, 蔭山邦幸, 今岡啓治, 五十嵐保, 海氷域における船上観測データと衛星データとの比較, 日本リモートセンシング学会第49回学術講演会, 鹿児島県鹿児島市, 2010年11月10日

③ 直木和弘, 谷川朋範, 浮田甚郎, 吉川真由子, 西尾文彦, 結氷期におけるオホーツク海の海氷及び積雪のマイクロ波特性, 2010年度雪氷研究大会, 宮城県仙台市, 2010年9月28日

④ 吉川真由子, 直木和弘, 長康平, 西尾文彦, サロマ湖氷上積雪のマイクロ波放射特性, 2010年度雪氷研究大会, 宮城県仙台市, 2010年9月28日

⑤ 大沼友貴彦, 吉川真由子, 直木和弘, 西尾文彦, 熱量式簡易含水率計による積雪の含水率測定, 2009年度雪氷研究大会, 宮城県仙台市, 2010年9月27日

⑥ K. Naoki, J. Ukita, F. Nishio, K. Nakamura, M. nakayama, Comparison between brightness temperature and reflectivity to thickness of Sea-ice, ISPRS Technical Commission VIII Symposium, Kyoto, Japan, 9 August, 2010

⑦ M. Yoshikawa, K. Naoki, F. Nishio, Brightness temperature characteristic of snow on sea ice, International Symposium on Sea Ice in The Physical and Biogeochemical System, International Glaciological Society, Tromsø Norway, 3 June, 2010

⑧ K. Naoki, J. Ukita, F. Nishio,

Variability of thin sea-ice region from AMSR-E in the Sea of Okhotsk, International Symposium on Sea Ice in The Physical and Biogeochemical System, International Glaciological Society, Tromsø Norway, 31 May, 2010

⑨ K. Naoki, J. Ukita, F. Nishio, Detection of thin sea-ice region from brightness temperature of 18GHz, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 千葉県千葉市, 2010年5月28日

⑩ 直木和弘, 浮田甚郎, 中山雅茂, 吉川真由子, 西尾文彦, 薄い海氷域におけるマイクロ波輝度温度と衛星データの比較, 2009年度雪氷研究大会, 北海道札幌市, 2009年9月30日

⑪ 吉川真由子, 直木和弘, 館山一孝, 榎本浩之, 西尾文彦: 海氷上積雪におけるマイクロ波放射特性に関する研究, 2009年度雪氷研究大会, 北海道札幌市, 2009年9月30日

〔その他〕

釧路市こども遊学館主催の市民向け冬休みイベント「雪と氷を楽しもう」における「実験教室・氷の不思議」を担当し海氷に関する説明や実験を担当した, 北海道釧路市, 2011年1月9日

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

直木 和弘 (NAOKI KAZUHIRO)

宇宙航空研究開発機構・宇宙利用ミッション本部・地球観測研究センター・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号: 80463834

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし