

## 船舶搭載型マイクロ波放射計を用いた南極昭和基地沖の海氷厚観測

館山一孝, 榎本浩之 (北見工業大学), 下田春人, 宇都正太郎 (海上技術安全研究所),  
牛尾収輝 (国立極地研究所)

## 1. はじめに

多年氷域や季節海氷域の海氷厚の変動を調査することは、地球の気候変動を監視する上で重要である。これまで多くの科学者によって人工衛星による海氷面積の経年変動が報告されているが (Zwally et al., 1983; Cavalieri et al., 1984; Comiso et al., 1984), 海氷厚については報告が少ない。人工衛星による海氷厚の測定は可視画像アルベド, 赤外放射計の表面温度 (Drucker et al., 2003), マイクロ波レーダ (Kwok and Cunningham, 2002; Nakamura et al., 2006), 高度計 (Peacock and Laxon, 2004) などから推定する試みが行われてきたが, 地上検証データが少ないため実用化に至っていない。著者らは海氷厚増加に伴う内部温度勾配の変化と低塩分化を検知できる多周波マイクロ波放射計に着目し, オホーツク海における砕氷船の目視氷厚観測データからマイクロ波放射計 SSM/I 用のアルゴリズムを開発した (Tateyama et al., 2002)。このアルゴリズムは検証データとして使用した目視氷厚の測定手法が厚い変形氷の測定に不向きであるという限界から, 氷厚を過小評価する傾向にあるという欠点があった。そこで本研究は変形氷の氷厚を正確に測定できる非破壊式の電磁誘導式氷厚計に着目し, 新開発の船舶搭載型マイクロ波放射計とともに新たな氷厚推定アルゴリズムの開発を行った。

## 2. 観測海域と観測方法

観測は 48 次日本南極地域観測隊の夏期観測の際に, 図 1 に示す南緯 66 度から 69 度の昭和基地にかけて, 東経 38 度から 40 度の間の流氷帯と定着氷帯で実施した。往路は 2006 年 12 月 16 日から 23 日にかけての融解前の初夏, 復路は 2007 年 2 月 10 日から 14 日にかけての融解が進んだ晩秋に観測した。

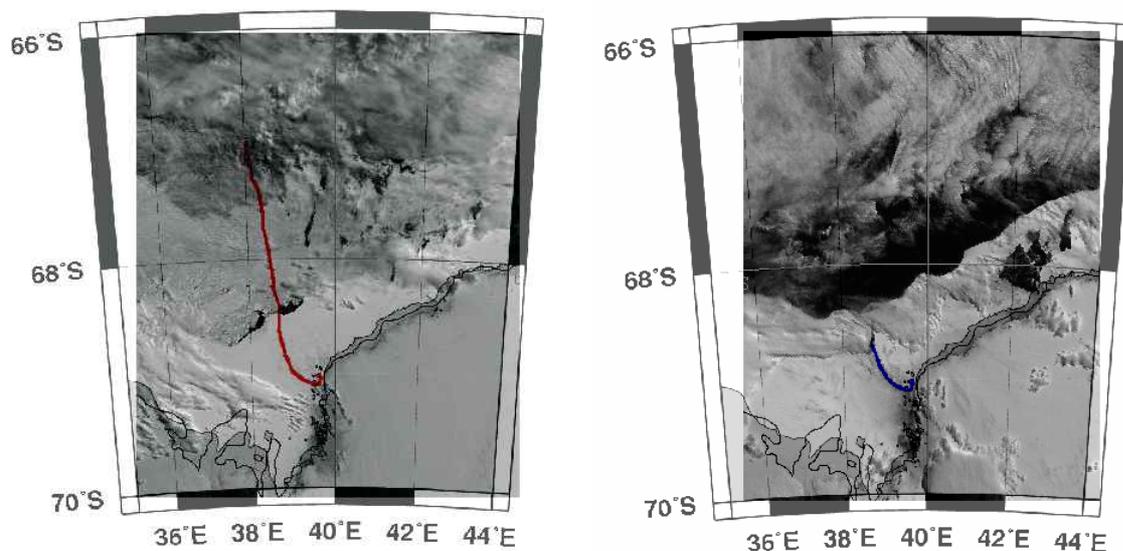


図 1 観測. 左に往路 (2006 年 12 月) の航跡を赤, 右に復路 (2007 年 2 月) の航跡を青で示す。

電磁誘導式氷厚計 (Electro-Magnetic induction device, EM) で氷厚, マイクロ波放射計 (Microwave/Miliwave Radiometer System, MMRS) で 36GHz の垂直・水平偏波の輝度温度, MMRS に内蔵している赤外放射温度計で表面温度をそれぞれ 1 秒間隔で測定した. これらの測器は砕氷船しらせの右舷に設置し, 砕氷前の海水を測定した.

また, 海氷密接度は EM に内蔵しているレーザー高度計で開放水面を測定したときに高さが負の値になるのを利用して判断している. 1 秒間隔で開放水面の有無を判定し, 60 秒平均での海氷密接度を求めた.

### 3. 結果

図 2 に往路と復路の EM 氷厚, マイクロ波輝度温度, 表面温度の測定結果を示す. なお, これらのデータは全て密接度 100 % のデータのみ抽出したものである. 往路は流氷帯 (67.4°S~68.4°S) で氷厚 0.7~1.5 m, 定着氷帯 (68.4°S~69.1°S) で氷厚 1.5~2.1 m, 復路は定着氷帯 (68.7°S~69.1°S) で氷厚 1.0~1.7 m であった. 36 GHz の輝度温度は垂直・水平偏波ともに流氷帯では氷厚に伴う上昇傾向, 定着氷帯では逆に氷厚に伴う下降傾向が見られた. 表面温度は流氷帯・定着氷帯の区別無く氷厚に伴う下降傾向を示した.

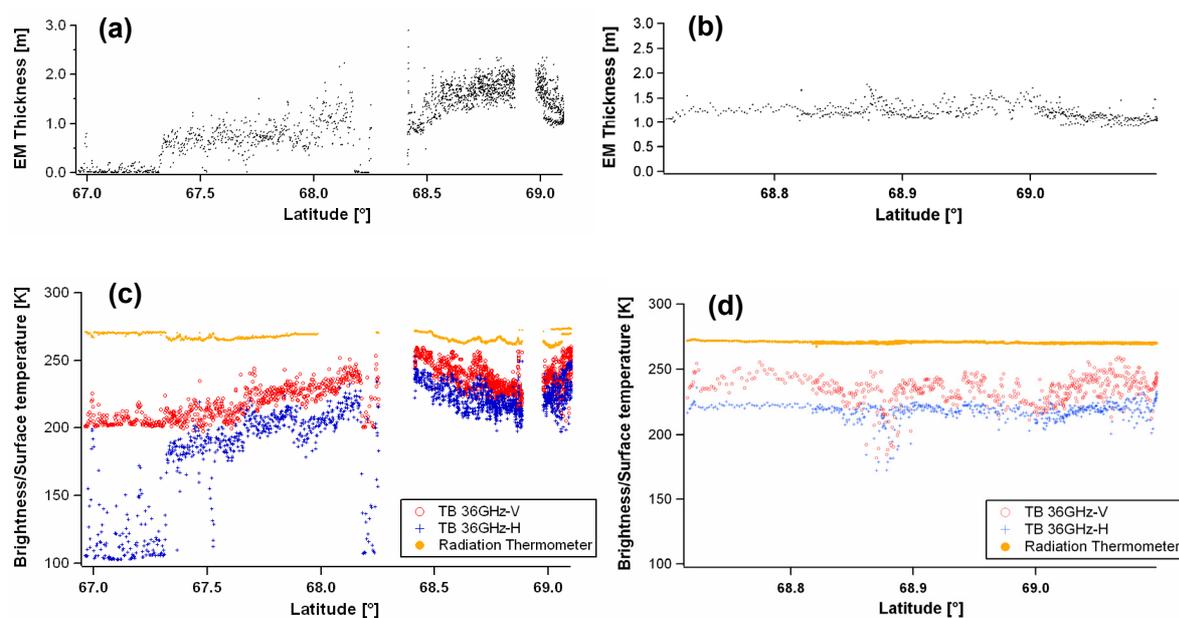


図 2 EM 氷厚とマイクロ波放射計 (赤 : 36 GHz 垂直偏波の輝度温度, 青 : 36 GHz 水平偏波の輝度温度)・赤外放射計 (橙 : 表面温度) の観測結果. EM 氷厚 (a) 往路, (b) 復路. マイクロ波放射計, 赤外放射計 (c) 往路, (d) 復路.

図 3(a) に往路と復路の EM 氷厚と 36 GHz の垂直・水平偏波の輝度温度の関係を示す. なおこの図も全て密接度 100 % のデータのみ使用している. この図から, 36 GHz の水平偏波では輝度温度と EM 氷厚の相関が見られる, 特に 1.2 m 以下の薄い氷と高い正の相関が見られる. 氷厚が 1.2 m を超えると変化が鈍くなり, 弱いながらも負の相関が見られる. 36 GHz の垂直偏波では水平偏波よりも 1.2 m 以下の薄い氷と高い相関は見られず, 1.2 m 以上の厚い氷では水平偏波よりも負の相関が高い. 以上をまとめると 36 GHz の水平偏波の輝度温度は 1.2 m 以下の薄い氷の氷厚測定に適しているが, 1.2 m 以上の厚い氷では 36 GHz の垂直・水平偏波ともに氷厚推定が困難であるこ

とがわかった。

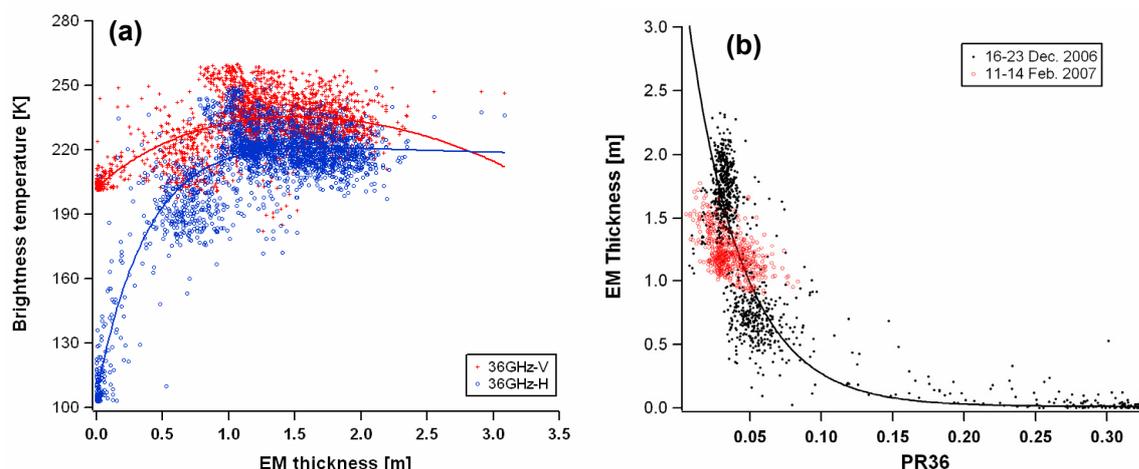


図3 (a) EM 氷厚とマイクロ波輝度温度の関係. 2本の曲線はそれぞれの偏波の近似曲線, (b) EM 氷厚と PR36 の関係. 黒点が融解前の往路, 赤点が融解末期の復路のデータ. 実線は式(2)の PR36 を用いた氷厚推定式.

36 GHz の垂直・水平偏波はそれぞれ単周波では氷厚推定が難しい. しかし, 両者を効果的に組み合わせることで氷厚推定能力を向上させることは可能である. NASA team 薄氷アルゴリズム (Cavalieri, 1994) の PR (Polarization Ratio) が季節海氷域の氷厚推定に有効, GR (Gardiation Ratio) は多年氷域に有効であることが知られている (Tateyama et al., 2002). PR は式(1)で示すように単周波の偏波間の差であり, GR は2つの周波数間の差である. 本研究は単周波センサのため, PR のみ適用可能である.

$$PR36 = [TB36V - TB36H] / [TB36V + TB36H] \quad (1)$$

ここで PR36, TB36V と TB36H はそれぞれ 36GHz の PR, 36GHz の垂直・水平偏波の輝度温度を意味する.

式(1)で求めた PR36 と EM 氷厚の結果を図 3(b)に示す. 黒点が融解前の往路, 赤点が融解末期の復路のデータを意味している. 融解前の PR36 は EM 氷厚との相関が高く, R=0.86 であった. 融解末期は表面の融解水がマイクロ波の吸収をしているため PR36 が低い値を示し, 実際よりも氷厚を厚く評価する傾向が見られた. PR36 と EM 氷厚の関係から, PR36 から推定する氷厚 H (PR36 氷厚) を次のように定義した.

$$H = 0.01 + 3.00 \cdot \exp\left(-\frac{PR36 - 0.0076}{0.038}\right) \quad (2)$$

EM 氷厚と PR36 氷厚の比較を図 4(a)と(b)に示す. 2.0 m 以下の氷では EM 氷厚と良い相関が見られるものの, EM 氷厚 1.2 m~1.5 m の間に融解末期の顕著な過大評価が見られ, 全体として PR36 氷厚の RMS エラーは 0.35 m であった. 図 4(b)の EM 氷厚と PR36 氷厚のヒストグラムから, 第1モードは両者ともに 0.1 m, 第二モードはそれぞれ 0.8 m と 1.0 m, 平均氷厚はそれぞれ 1.15 m と 1.25 m であった. この結果から, マイクロ波放射計から測定した PR36 氷厚は EM の実測氷厚

と近い値を示し、マイクロ波放射計から氷厚を推定することが可能であることが示唆された。今後の課題として多周波マイクロ波放射計を用いて GR による厚い海氷の氷厚推定の取り組みが必要と思われる。

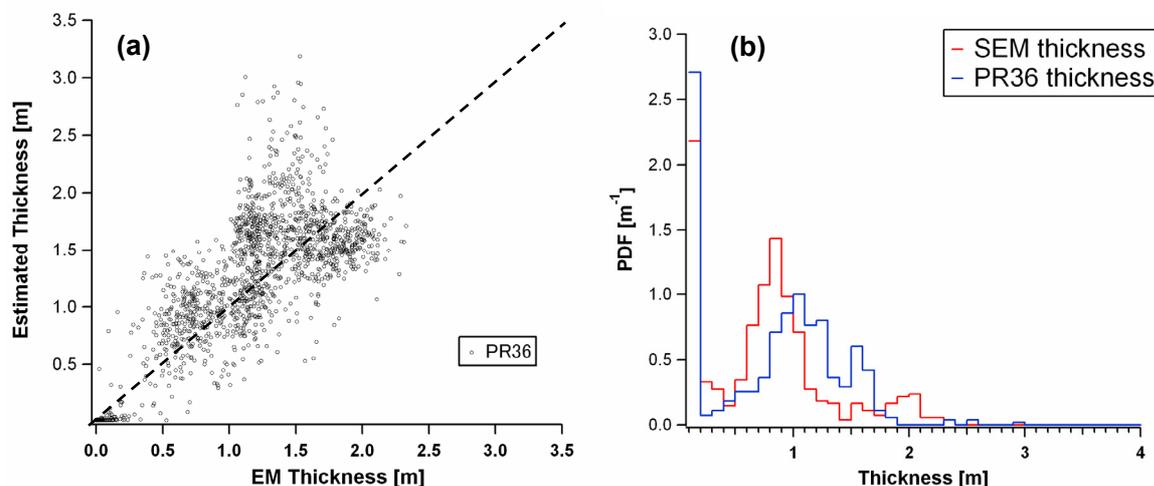


図4 (a) EM 氷厚と式(2)から PR36 で推定した氷厚. 破線は EM 氷厚と PR36 氷厚が 1 対 1 のラインを示す, (b) EM 氷厚と式(2)から PR36 で推定した氷厚のヒストグラム. Bin サイズは 0.1 m.

参考文献

Cavalieri, D. J., P. Gloersen, and W. J. Campbell, Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR, *J. Geophys. Res.*, 89(D4), 5355–5369, 1984.

Cavalieri, D. J., A microwave technique for mapping thin ice. *J. Geophys. Res.*, 99(C6), 12,561–12,572, 1994.

Comiso, J. C., Ackley, S. F. and Gordon, A. L., Antarctic sea ice microwave signatures and their correlation with in-situ ice observations, *J. Geophys. Res.*, 89(C1), 662–672, 1984.

Drucker, R., Martin, S., and Moritz, R., Observations of ice thickness and frazil ice in the St. Lawrence Island Polynya from satellite imagery, upward looking sonar, and salinity/temperature moorings, *J. Geophys Res.*, 108(C5), 3149, doi:10.1029/2001JC001213, 2003.

Kwok, R. and Cunningham G. F., Seasonal ice are and volume production of the Arctic Ocean: November 1996 through April 1997, *J. Geophys. Res.*, 107(C10), 8083, doi:10.1029/2000JC000469, 2002.

Nakamura, K., Wakabayashi, H., Uto, S., Naoki, K., Nishio, F., and Uratsuka S., Sea-ice thickness retrieval in the Sea of Okhotsk using dual-polarization SAR data, *Annals of Glaciology*, 44, 261-268, 2006.

Peacock, N. R. and Laxon, S. W., Sea surface height determination in the Arctic Ocean from ERS altimetry, *J. Geophys Res.*, 109, C07001, doi:10.1029/2001JC001026, 2004.

Tateyama, K., Enomoto, H., Toyota, T. and Uto, S., Sea ice thickness estimated from passive microwave radiometers, *Polar Meteorology and Glaciology*, 16, 2002.

Zwally, H. J., Comiso, J. C., Parkinson, C. L., Campbell, W. J., Carsey, F. D., and Gloersen, P., Antarctic sea ice, 1973–1976: satellite passive-microwave observations, U.S. National Aeronautics and Space Administration. Special paper, NASA SP-459, 155–159, 1983.