

電磁誘導式氷厚計を用いた海氷厚の測定

白澤邦男・高塚徹・石川正雄・河村俊行（北大低温研）・
館山一孝（北見工大）・宇都正太郎（海上技術安全研究所）

はじめに

海氷の厚さを知ることは、気候変動が海氷域へ及ぼす影響を見積もる上で重要な情報である。海氷厚の測定には、ドリルで海氷に穴を開けその掘削孔よりメジャーで測るなどの直接測定する方法、リモートセンシングなどの間接的に測定する方法がある。前者は氷厚の広域分布を測定するには多大な時間・労力を必要とする。一方、後者は広域観測には向いているが、海氷のような淡水氷、ブライン、気泡から構成された複雑な内部構造の物質では、まだその測定方法が確立していない。本研究は、リモートセンシングによる海氷厚の測定方法の一つである電磁誘導式氷厚計（Electromagnetic Induction Instrument; EM）を用いた広域海氷厚の測定、問題点、測定結果の一部について報告する。問題点の技術的解決策や船舶への実装観測については、別途報告する（高塚他、2008）。

測定方法

EMは海氷（ $\sigma_i < 80 \text{ mS/m}$ ）と海水（ $\sigma_w = 2300\text{--}2500 \text{ mS/m}$ ）の大きな電気伝導度の違いを利用し、測定器から海水までの距離 Z_E （図1）を測定できる（Kovacs *et al.*, 1987）。本研究で使用したEMはGeonics社製EM-31/ICEで、図1に示すように1対の送信コイル（ T_x ）と受信コイル（ R_x ）を持ち、両者の間隔は3.66 mとなっている。送信コイルから周波数9.8 kHzで1次磁場を変化させると、海水と海氷の境界面で起電力が誘導される。この電流が発生する2次磁場の強さを受信コイルで感知し、見かけの電気伝導度（Apparent conductivity; σ_a ）として記録する。 σ_a の値が大きいと氷は薄く、小さいと厚いという測定原理である。この σ_a から、図1に示すような1-D multi-layer modelと測定器と雪面までの距離（ Z_L ）を用いて、積雪（ Z_S ）と海氷（ Z_I ）の合計の厚さ（ $Z_S + Z_I$ ）が計算できる（Haas *et al.*, 1997; Haas, 1998）。

EM観測の測定誤差として、(1) 変形氷の空隙中の海水の存在、(2) 高塩分積雪層の存在、(3) 融解水の存在、(4) 浅い水深の影響などが挙げられる。(1)については沿岸流氷域や外洋などで、(2)については特に多雪域で、(3)については融解期に、(4)については沿岸定着氷域やサロマ湖などの湖や湾岸域などで、特に影響を考慮する必要がある。

チュクチ海（図2）、ボフォート海、東南極海、オホーツク海、クレイユ海峡（サハリン北東海域；図3）、サロマ湖などの様々な海氷域や季節におけるEMによる氷厚測定から、空隙中に海水が存在する変形氷、高塩分積雪・スラッシュ層、融解水、船舶搭載によるEMの高さの変化（footprintの増加；図4）、などの影響を考慮した標準化1-D multi-layer modelの開発を行った（Tateyama *et al.*, 2006）。この標準化モデルから計算された氷厚に対する誤差は、（前出の全海域、季節の）全データの平均では7%以下、海域別では、北極海で2.2%、南極海で7.0%、オホーツク海で6.5%、サロマ湖で4.4%であった。

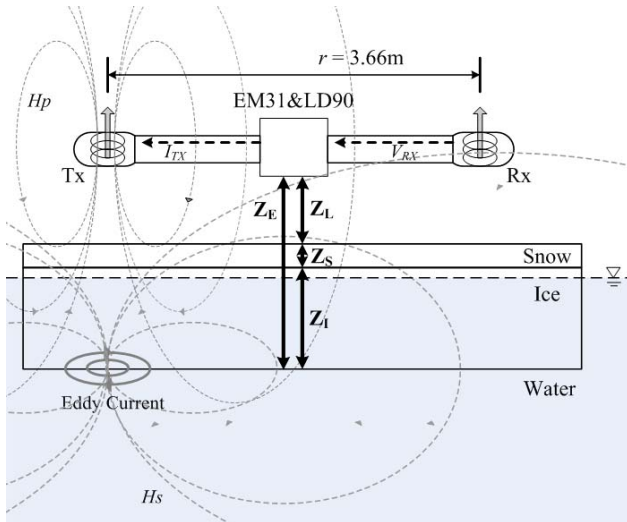


図1 測定原理



図2 チュクチ海の GEM (Ground-based EM) による観測



図3 クレイユ海峡 (サハリン北東海域) における観測 (スノーモービルで EM を搭載したソリを牽引)



図4 チュクチ海における砕氷船「雪龍」に搭載した SEM (Ship-borne EM) による観測

測定結果

チュクチ海海氷上で測定された GEM (Ground-based EM) と drill hole の氷厚は平坦氷 (level ice) ではよく一致した (図 5)。氷丘域では、drill hole と EM の値で差が見られたが、これは EM の footprint により生じたと思われる。ここで、level ice なのか deformed ice (変形氷; 凹凸や盛り上がり激しい所や氷丘など) なのかは、ある点の前後の勾配を基準にして決めた (Tin & Jeffries, 2003; Shirasawa *et al.*, 2008)。図 6 にチュクチ海の 2002, 2003, 2004 年の level ice の海氷厚の PDF (Probability Density Function; 確率密度関数) を示す。2002 年と 2004 年はチュクチ海南部の 5 月下旬から 6 月上旬の融解期の初め、2003 年はチュクチ海北部の 8 月下旬から 9 月上旬の融解期の終わり頃の海氷であった。1.5–1.6 m と 1.8–1.9 m あたりに PDF のピークが見られた。チュクチ海北部で 2003 年 8 月下旬から 9 月上旬に砕氷船「雪龍」(中国極地研究所所有) に、またチュクチ海南部で 2004 年 5 月下旬から 6 月上旬に米国沿岸警備隊所有砕氷艦「Healy」に搭載した SEM (Ship-borne EM) による海氷厚の PDF を図 7 に示す。2003 年では 0.1 m と 1.1 m に、2004 年では 0.7 m にピークが見られたが、level ice の大部分は層状に重なり合った rafted ice を形成していた。

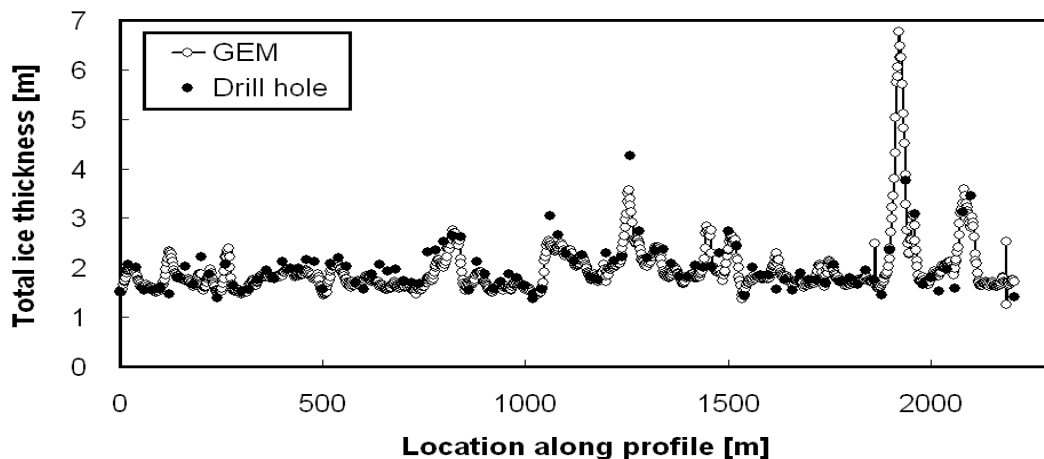


図 5 チュクチ海海氷上における GEM と drill hole による海氷厚の測定

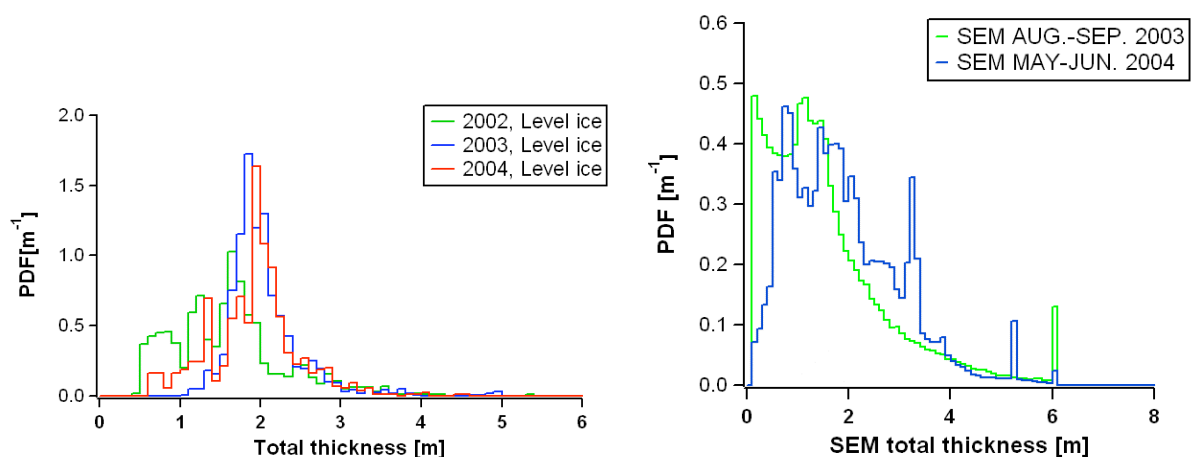


図 6 チュクチ海の 2002, 2003, 2004 年の level ice (平坦氷) の海氷厚の PDF

図 7 チュクチ海の 2003 年「雪龍」、2004 年「Healy」に搭載した SEM の海氷厚の PDF

参考文献

- Haas, C., Gerland, S., Eicken, H., Miller, H., 1997. Comparison of sea-ice thickness measurements under summer and winter conditions in the Arctic using a small electromagnetic induction device. *Geophysics* 62, 749-757.
- Haas, C., 1998. Evaluation of ship-based electromagnetic-inductive thickness measurements of summer sea-ice in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica. *Cold Regions Science and Technology* 27, 1-16.
- Kovacs, A., Valleau, N.C., Holladay, J.C., 1987. Airborne electromagnetic sounding sea-ice thickness and subice bathymetry. *Cold Regions Science and Technology* 14, 289-311.
- Shirasawa, K., Eicken, H., Tateyama, K., Takatsuka, T., Kawamura, T., 2007. Sea-ice thickness variability in the Chukchi Sea, spring and summer 2002-2004. Submitted to *Deep-Sea Research Part II*.
- 高塚徹・石川正雄・白澤邦男, 2008. 電磁誘導式氷厚計(EM-31)の船舶への実装方法. *低温科学研究所技術報告*. 2008年2月.
- Tateyama, K., Shirasawa, K., Uto, S., Kawamura, T., Toyota T., Enomoto, H., 2006. Standardization of electromagnetic-induction measurements of sea-ice thickness in polar and subpolar seas. *Annals of Glaciology* 44, 240-246.
- Tin, T., Jeffries, M.O., 2003. Morphology of deformed first-year sea ice features in the Southern Ocean. *Cold Regions Science and Technology* 36, 141-163.