衛星搭載赤外放射計を用いたサロマ湖の結氷状況の推定

内田圭一, 舘山一孝, 榎本浩之(北見工業大学) 白澤邦男, 河村俊行(北大低温科学研究所),

1. はじめに

サロマ湖は面積が 152km²とわが国で 3 番目 に大きい湖で, カキやホタテの養殖が盛んであ る. この豊かな水産資源を育んでいる周辺環境 の中で, 冬期にサロマ湖が結氷することが重要 な役割を担っている. 通常, サロマ湖は冬期に 全面結氷するが, 近年は全面結氷しない, ある いは全面結氷しても氷厚が薄く期間が短いこ とが漁業関係者から報告されている.

サロマ湖の結氷状況を定量的に把握するため,衛星リモートセンシングの活用が期待されている.国内における衛星データを用いた湖の結氷状況の調査は,野中ら[2003, 2004]が湖の中心のある一点から完全に雪氷がなくなる日

(解氷日)を衛星データから推定し,湖全体の 結氷期間の経年変化を調査した例があるが,湖 全体の結氷状況を定量的に調査した例はない. 本研究は,サロマ湖のような比較的広域な湖全 面の結氷状況の経年変化を調べるために,通常 外洋で用いられている衛星リモートセンシン グの手法に着目し,将来的にサロマ湖結氷調査 の自動処理が可能か検証した.

2. 使用したデータ

北見工業大学地域共同センターでは、1996 年3月から現在に至るまで気象衛星 NOAA(米 国海洋大気庁:National Oceanic and Atmospheric Administration の気象衛星)に搭載されている可 視近赤外放射計 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)で測定された表面アル ベド (ch1,ch2),近赤外放射輝度温度(ch3),赤 外放射輝度温度(ch4,ch5),のデータを受信し蓄 積している.本研究では NOAA12 号,14 号, 16 号の受信データを用いてサロマ湖の結氷状 況の調査を行った.本研究で使用した赤外画像 は,AVHRR と AQUA 衛星 MODIS の可視チャ ンネルから,現地時間 12 時~16 時の範囲で晴 天日を判断し抽出したものである.解析期間は 1997 年から 2005 年の1月から4月まで,およ そ10日間隔で解析した.

検証用データとして,①1998年~2003年に おけるサロマ湖栄浦沖の湖氷上(図1参照)で 連続観測した「表面温度データ」(放射温度計 で実測.北大低温研より提供),②AVHRR と MODISの「可視画像から判断した結氷面積」 を用いた.



図1: サロマ湖全体図と氷上観測地点

3. 解析方法

大気の窓である AVHRR の *ch4,ch5* の輝度温 度を利用して,式(1)より大気補正済みの海表 面温度(*SST*: Sea Surface Temperature, [NESDIS, 1998]),式(2)より雪氷面温度(*IST*: Ice Surface Temperature, [Key *et al.*, 1997])を求めた.

$$SST=a_{\circ} \cdot ch4 + b_{\circ} \cdot (ch4-ch5) + c_{\circ} \cdot [(ch4-ch5) \cdot (\sec \theta - 1)] + d_{\circ}$$
(1)

$$IST=a_1+b_1\cdot ch4+c_1\cdot (ch4-ch5)$$

+ $d_1\cdot [(ch4-ch5)\cdot (\sec \theta -1)]$ (2)

ここで,

θ:衛星天頂角

ch4.ch5:輝度温

a₀~d₀: NOAA の号数や昼・夜で異なる係数 a₁~d₁: NOAA の号数や ch4 の輝度温度で異な

る係数

これらの 2 つの推定式を用いて定量的にサ ロマ湖の結氷面積を求めた.

4. 解析結果

4-1. 実測データの比較

はじめに式(1),(2)より,推定された表面温 度と氷上に設置した放射温度計のデータを比 較した(図2参照).図2ではSSTとISTそれ ぞれを NOAA の号数別に示している.図2(a)



図 2 式(1), (2)より, 推定された表面温度(SST, IST)と氷上に設置した放射温度計データ の比較. (a)補正前, (b)補正後.

を見ると,氷上の放射温度計に比べて SST で は温度が高めに, IST では温度が低めに推定さ れていることがわかった.これらのずれには系 統性が見られ,SST,IST にそれぞれ-6℃, +4.7℃のオフセットを与えて補正すると,放射 温度計との相関係数が,SST:0.403,IST:0.437 となり,良い一致が見られるようになった(図 2(b)参照).通常 SST は未結氷の海表面温度, IST は雪氷面温度に用いられるが,両者共に結 氷・未結氷に関わらず放射温度計と相関が見ら れることがわかった.SST と IST の推定式の違 いは係数だけなので,結果として似たような値 を示したが,SST よりも IST の方が放射温度計 との相関が高く,結氷面積の推定に適している ことがわかった.

また, IST に比べて SST では推定値のばらつ きが大きいことから, なぜ差が生じるのかを調 べた.その結果,図3に示すように SST では NOAA の号数によって IST の系統的に差が生 じることがわかり, NOAA12号と16号のデー タを用いてサロマ湖の観測に用いる場合, NESDIS で提供している係数 d₀の値を補正す る必要があることがわかった.これらの結果か ら, サロマ湖の結氷状況の調査には IST を用い ることが適していることが示唆された.



図 3 NOAA の号数別に示した IST と SST の比較.

4.2 1997 年~2005 年の結氷状況

サロマ湖の湖水(塩分約 32‰)の結氷温度 -1.8 度を閾値として,補正後の SST と IST より 求めた結氷面積の精度について議論する.

図 4 は(a)サロマ湖近傍の常呂地点のアメダ ス・気温データより算出した積算寒度,(b)衛 星可視画像より判読した結氷面積,(c)補正 SST で求めた結氷面積,(d)補正 IST で求めた結氷 面積をそれぞれ示している.(b)可視画像から 判読した結氷面積は,閾値を用いた定量的な判 別ではなく,主観的な要素が強く様々な欠点 がある. 例えば, 結氷初期における薄氷の有無 の判別が困難であり, 薄い霧がかかると判断が 難しい. しかし, 表面に積雪がある十分に厚い 氷の判別は容易であり, 結氷最盛期及び融解期 の判別には有利な点がある. この可視画像によ って求めた結氷面積の時系列と(a)積算寒度を 比較すると, 全面結氷していない 2002 年と 2004 年は積算寒度が 400℃・日に達しておらず, 全面結氷期間が長かった 1998, 2000, 2001, 2003 年は積算寒度が 600℃・日を超えていたと いう共通点が見られ, 可視画像から推定した結



図4 1997年1月2005年4月までの推定したサロマ湖結氷状況. 斜線部分はデータの欠測を示す. (a)サロマ湖近傍の常呂地点のアメダス・気温データより算出した積算寒度,(b)衛星可視画 像より判読した結氷面積,(c)補正 SST で求めた結氷面積,(d)補正 IST で求めた結氷面積

氷面積は信頼できることが確認できた.以下, この可視画像による結氷面積を信頼できる検 証データとして議論する.

図 4(b)より,過去9年間の年平均結氷面積は 66.9(%/年)で、最大は2003年の85.7(%/年)、最 小は 2004 年の 44.1(%/年)であった. 図 4(c)は 補正 SST から推定した結氷面積と可視画像か ら推定した結氷面積を比べたもので,結氷初期 である1月では SST の方が結氷面積を多く見 積もり、3月中旬~4月では少なく見積もる傾 向が見られた. 図 4(d)は補正 IST から推定した 結氷面積と図 4(c)同様可視画像から推定した 結氷面積を比べたもので, SST よりも差は小さ くなっているが, IST においても可視画像に比 べて結氷初期に多く,融解期に少なく見積もつ ている傾向が見られた.以上の結果から,4-1 節で述べたように、IST の方が SST よりもばら つきが小さく、結氷状況の推定に適しているこ とがわかった.

前述したように、可視画像で全面結氷してい ると判断されている時の推定結氷面積は比較 的精度が高いといえる.しかし、結氷初期では 薄い氷の判別が難しいため, 可視画像の結氷面 積は実際よりも少なく見積もっている可能性 があり, SSTや IST の推定結果が正しい可能性 がある.一方,融解期では表面の融解水や融解 した積雪の存在のため、表面温度が-1.8℃より も高くなってしまい, SST や IST では氷がある にも関わらず未結氷と判断し過少評価してし まう問題があることがわかった.地上付近の薄 い霧の存在は高分解能の可視画像でも存在を 確認することが難しい.この薄い霧が未結氷湖 面に発生すると表面温度が低くなり, SST と IST で推定した結氷面積が過大評価になる問 題点も見られた.

5. まとめ

1. 氷上に設置した放射温度計の観測との比較

から、AVHRR の赤外チャンネルから SST, IST を推定した結果, IST の方が放射温度計 と高い相関が見られた.今後の課題として, 放射温度計の信頼性について検討するとと もに,放射温度計を多点で観測し, IST との 比較検討をさらに進める.

2. 可視画像から判別した結氷面積とSST, IST から推定した結氷面積は、結氷最盛期の2 月~3月上旬では良い一致が見られ、結氷初 期の1月ではSST, ISTが多く見積もり、融 解期の3月中旬~4月で少なく見積もる傾向 があった。今後の課題として、エラーの原因 と考えられる結氷初期の霧の影響、融解期の 融解水の影響等を考慮して改良を加え、IST による結氷/未結氷の推定精度の精度向上を 図り、将来の自動判別化に目指したい。

謝辞

本研究で使用したサロマ湖栄浦沖放射温度 実測データは北大低温科学研究所より,衛星画 像は MODIS より提供して頂きました.ここに 深く感謝の意を表します.

参考文献

- 野中崇志,2003:衛星リモートセンシングによ る水温トレンドを利用したユーラシア大陸 の湖の解氷日推定. 東京工業大学,学位論 文
- 野中崇志・松永恒雄・梅干野晃:衛星データに よるバイカル湖内の解氷日分布とハンカ湖 の解氷日の経年変化.日本雪氷学会誌 Vol.66, No.5 581-590
- NESDIS, 2003: NOAA polar orbit date users guide November 1998 revision.
- Key, J., Collins J., Fowler, C., and Stone, R., 1997.High-latitude surface temperature estimates from thermal satellite date. Remote Sens.Environ., 61, pp. 302-309