

北上川融雪出水による 追波湾の低塩分化について

ON THE SALINITY DECREASE IN OPPA BAY
CAUSED BY A SNOW-MELT FRESHET FROM KITAKAMI RIVER

石川忠晴¹・工藤健太郎²・坂井洋平³・入江光輝⁴・李炫錫⁴・田中總太郎⁵
Tadaharu ISHIKAWA, Kentaro KUDO, Yohei SAKAI, Mitsuteru IRIE Hyunseok LEE
and Sotarou TANAKA

¹フェロー 工博 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

²学生会員 修(工) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

³東京工業大学 大学院総合理工学研究科

⁴正会員 博(工) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番地)

⁵正会員 工博 (財)リモート・センシング技術センター
(〒106-0032 東京都港区六本木1丁目9-9)

Behavior of low salinity water caused by a freshet from Kitakami River to Oppa bay was studied by field measurements and satellite image analysis. In the field measurements, data of salinity and turbidity in the surface mixed layer were collected along many lines continuously by towing a measurement devices unit. The results show a high correlation between the salinity decrement and the turbidity increment transported by the freshet. In the satellite image analysis, Band-2 of Landsat-7 data was firstly normalized by adjusting the values at some reference points so that images of different times could be compared with one another. Then, a regression analysis was made for the normalized data vs turbidity data. Finally, three satellite images were converted to maps of salinity distribution in the bay via turbidity mapping. The series of salinity maps show the behavior of freshet clearly and reasonably.

Key Words : low saline water, LANDSAT-7, remote sensing, field measurement, ground truth

1. はじめに

本研究で対象とする追波湾(図-1参照)は,三陸海岸の南部に位置する面積30km²あまりの三角形の湾であり,ワカメ,カキ,ホタテ等の養殖が盛んに行われている。追波湾奥には,旧北上川から分派する半人工河道の新北上川が流入する。新北上川は,放水路の役割を担っているため,追波湾には自然状態より大きな洪水が流入し,低塩分状態が比較的長く継続することがある。特にワカメは塩分13psu以下の状態に長く曝されていると成長が阻害されることから¹⁾,低塩分水塊の挙動を把握することが重要となる。

そこで本研究では,広域性・即時性に優れたりリモートセンシング技術を利用し^{2),3)},現地観測結果との相関分析から,低塩分水塊の挙動の面的把握を試みた。すなわ

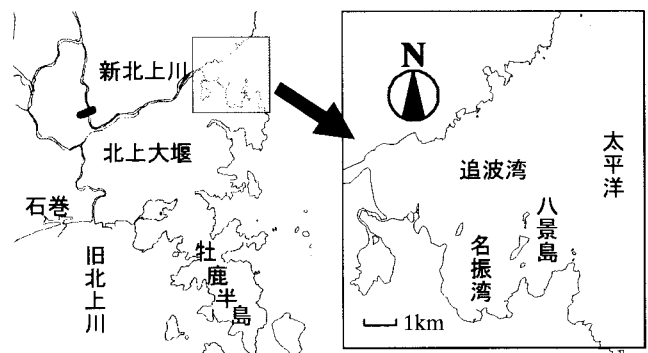
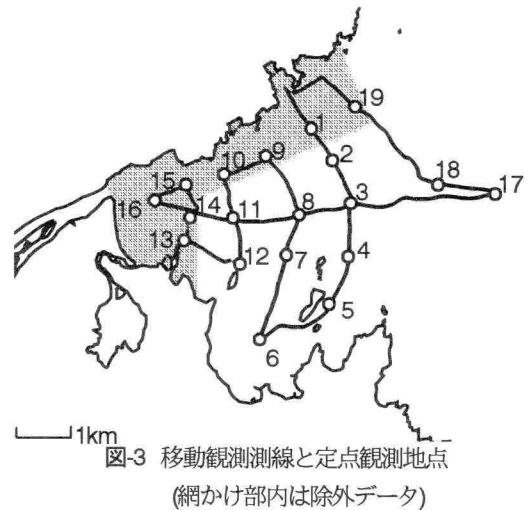
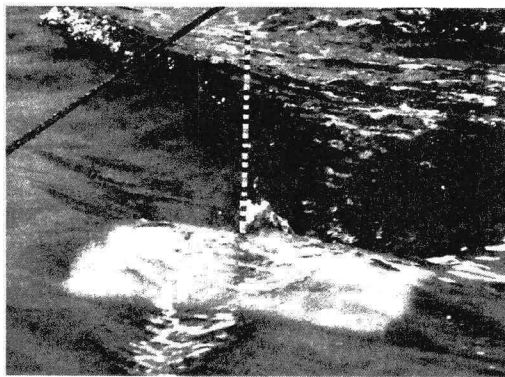
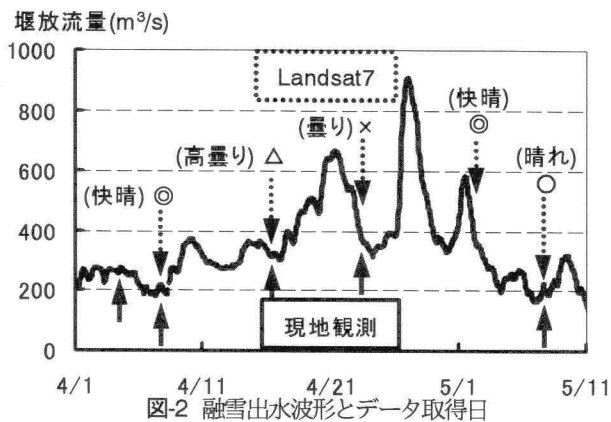


図-1 追波湾の位置と平面形状

ち平成15年の融雪出水時に,ランドサット衛星飛来時に数度にわたり湾内で現地観測を行い,衛星画像解析と観測濁度の相関,および水質計測における濁度と塩分の相関関係を調べた上で,追波湾内での低塩分水塊の分布と挙動を推定した。



PDK) により塩分・水温の鉛直分布を計測した。

なお、曳航計測で用いた濁度計は、ホルマジンでキャリブレーションされており、出力はFTUで表示されている。また定点計測で用いた濁度計はカオリンでキャリブレーションされており、出力はppmで表示されている。一般にホルマジン検定のほうが小さい値となるが、両者の関係に対して明確な一価関係は保証されていない。そこで本研究では、後者のデータについては濁度鉛直分布の定性的考察に使用することとし、定量的解析においては後者を用いないこととした。

2. 河川流出水の観測

(1) 観測方法

平成15年の融雪出水流量波形を図-2に示す。図中にランドサットの飛来日と現地観測実施日を記入してある。ランドサット7号は16日周期で同一地点に飛来するが、追波湾は二つのシーンに含まれるので、約8日周期で画像が得られている。ただし、4月23日(×)は曇りのため画像を購入しなかった。また4月16日(Δ)は高曇りであったため、湾の一部でしか有効なデータは得られなかった。

現地観測は4月4、7、16、23日および5月9日の計5回実施した。このうち4月4日は観測態勢のテストでありランドサットとは同期していない。また5月2日のランドサット飛来日には諸般の事情により観測を行えなかった。

現地観測では、メモリー式濁度計(アレック電子製、Compact-CKU)とメモリー式塩分計(アレック電子製、ACT-HR)を本研究室で開発した曳航装置⁴⁾に取り付け、図-3に示す予め定めた側線上を一定速度で曳航し、表層水質(塩分、濁度、水温)を連続的に計測した。なお、目盛りを付したポールを曳航装置に取り付け潜行深度を調べたところ、40cmから50cmの間で安定していた(写真-1参照)。船の位置はGPS(MAGELLAN社製、GPS315)により別途記録した。また、図中に○で示す地点で船を停止し、多目的水質計(アレック電子製、ACL1182-

(2) 観測結果

4月23日の定点観測で得られた塩分・水温・濁度の鉛直分布を図-4に示す。図-4(a)において東西方向の(湾軸方向)表層水質変化を見ると、河口に最も近いst.16では、表層はほとんど淡水(塩分=0psu)で、濁度は15ppmとなっている。湾口においても表層塩分は20psuまで低下し、湾全域で表層が低塩分化していることがわかる。表層の水質値は河口から湾口に向けて徐々に変化し(st.16→st.14→st.11→st.08→st.03→st.17)、海水の連行が生じていると推定される。低塩分層の厚さは2~3mで、湾奥からの距離とともに減少している。

また、濁度の変化に着目すると、ほとんどの図において、濁度鉛直分布と欠損塩分が相似形であることがわかる。これは、新北上川からの淡水によって輸送される懸濁物質のうち沈降しにくい微細な成分が海水により希釈された結果と考えられる。ただし、河口に近いst.16に限って4m以深の塩水層でも高い値を示している。これは、河川から放出された濁質のうち、沈降性の高い粗粒成分がこの付近で沈降しているためと推定される。

一方、図-4(b)において南北方向の表層水質変化を見ると(st.01→st.02→st.08→st.07→st.06)、低塩分層の厚さが南側(特に名振湾内)で厚くなっていることがわかる。また、追波湾の南側に位置する八景島の東側測点st.05では、西側のst.07とst.06に比べて塩分の低下が少ない。これは八景島が河川水の流出の妨げとなり、

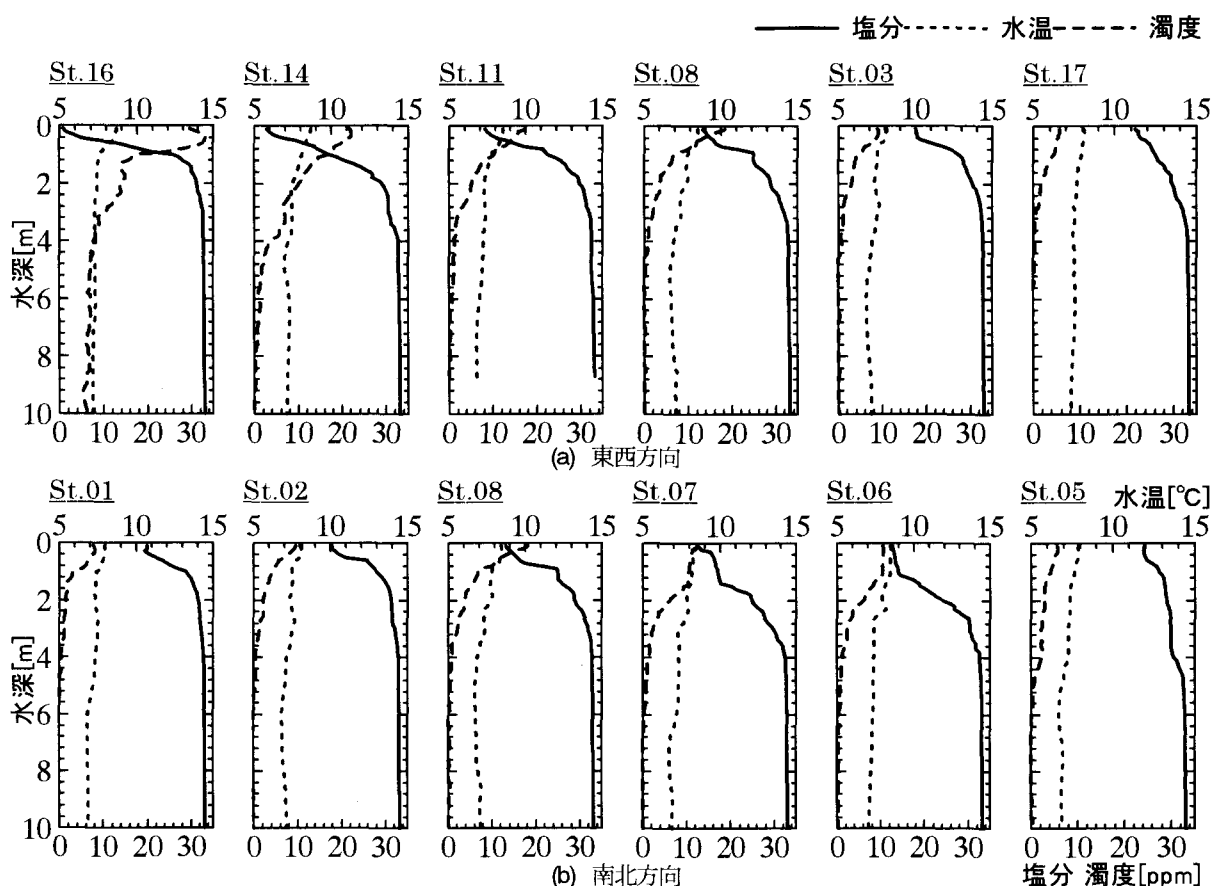


図-4 4月23日観測融雪出水時の水質鉛直分布

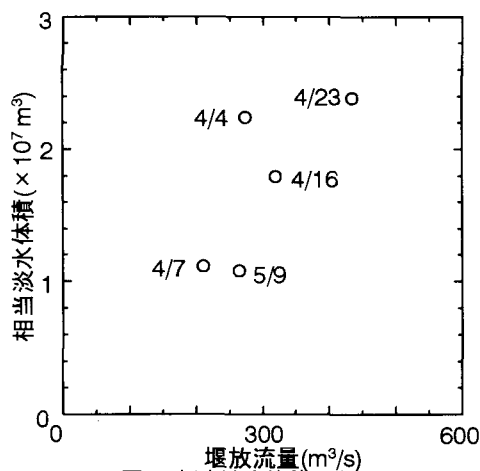


図-5 相当淡水体積の変化

追波湾南側の低塩分水を名振湾に滞留させるためと考えられる。

図-4のデータより、以下のようにして淡水の湾内滞留時間を概算した。まず次式により湾内の塩分低下量を淡水体積に換算して求める。

$$V_f = \int (S_0 - S) dV \quad (1)$$

ここに、 S_0 は純海水の塩分で、ここでは図-4に示した鉛直分布の下層の塩分から33psuとした。 S は湾内の塩分、 $\int dV$ は体積積分、 V_f は相当淡水体積である。具体的には各測点の塩分鉛直分布から $(S_0 - S)$ の鉛直積分値を求め、これを全地点で平均した後に湾の平面積を乗じて V_f の値を求めた。その結果、 V_f は約24,000,000 m^3 となった。こ

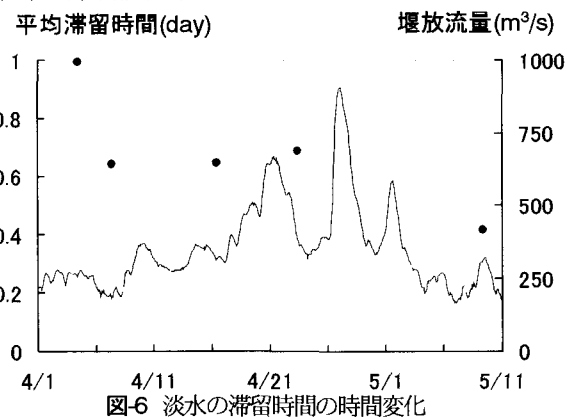


図-6 淡水の滞留時間の時間変化

の値をこの日の平均流量440 m^3/s で除すと、淡水の平均滞留時間は約0.7日となった。同様の解析を他の現地観測結果に施し、堰放流量との関係を調べたところ図-5のようになった。相当淡水体積を各現地観測日における平均流量で除すと、淡水の湾内滞留時間となる。この値を図-6に●で示す。これからわかるように、淡水滞留時間は約0.6日で安定している。ただし、混合層の塩分欠損量は、図-4からわかるように、平均的には海水塩分の1/2~1/3程度であるから、「汽水としての滞留時間」は1.2~1.8日程度となる。すなわち、図-2に示したランドサットとの同期観測の間隔(8日または16日)に比べて十分短い。

表層連続計測で得られた塩分と濁度の相関関係を観測日ごとに調べた。その結果、河口に近い水域と北岸に接

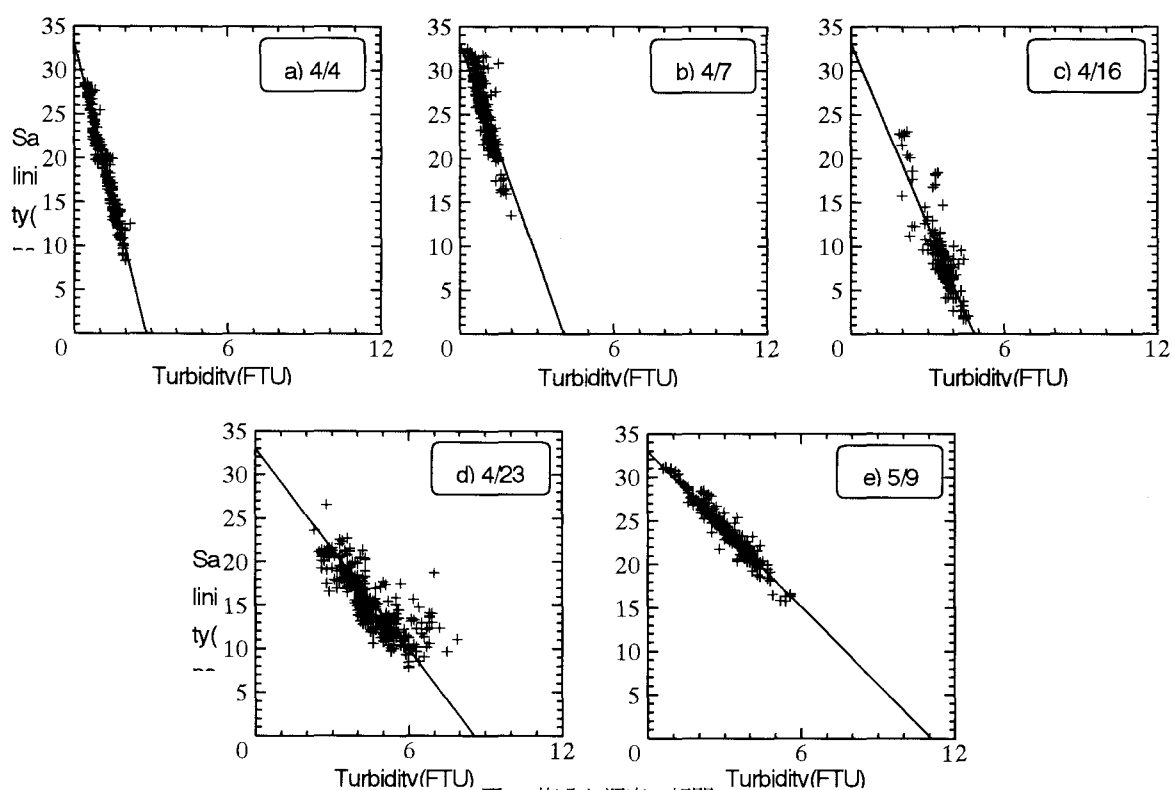


図-7 塩分と濁度の相関

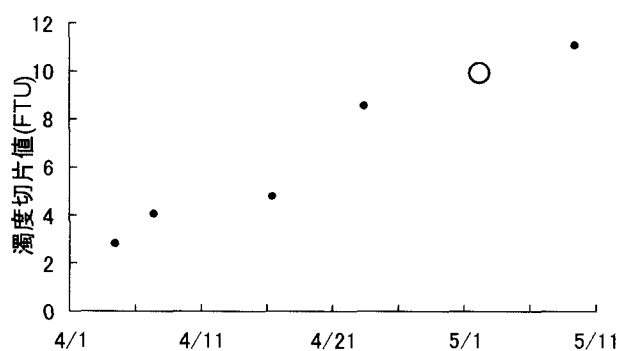


図-8 濁度切片値の時間変化

した水域（図-3のハッチをした部分）のデータを除くと常に高い相関が見出された。ハッチをした領域は沈降性の高い粗い濁質が供給されて、塩分と濁度の相関関係が悪くなっているものと考えられる。また本研究で問題としている養殖水域のほとんどは、ハッチをしていない部分に相当する。そこで、図-3のハッチ部分のデータを除いて、濁度と塩分の相関を観測日ごとに求めると図-7を得る。観測日ごとの相関は非常に高く、概ね直線関係となっている。また縦軸の切片はどの図でも約33psuとなっていることから、沈降性の低い微細粒子を含んだ濁水が海水によって単純に希釈された結果と考えてよいと思われる。そこで、塩分がゼロとなる濁度値（図の水平軸の切片値）の時間変化をプロットすると図-8の●点を得る。この値は、河川水が含む沈降性の低い微細粒子濃度に相当すると考えられる。ただし、本研究では河川水の水質分析を行っていないので、あくまで推測である。

さて、図-8よりその関係は時間的に徐々にシフトして

いる。このような変化は、融雪出水の水質が時間的に変化しているために生じていると考えられる。式(1)で検討したように、低塩分水塊の滞留時間は2,3日程度であり、ランドサットが飛来する時間間隔より十分短い。そこで、図-8のデータを補完することにより、現地観測を行わなかったランドサット飛来日である5月2日についても、○点のように濁度切片値を推定した。この値を用いて図-7と同様に濁度と塩分の直線関係を想定して以後の解析を行った。

3. 衛星画像による塩分分布の推定

(1) 衛星画像データの前処理と輝度補正

用いた衛星データはLANDSAT-7/ETM+である。ここでは、図-2に示したように、4月7、16日と5月2、9日のデータを用いる。

まず、各日のデータから追波湾周辺を切り出し、幾何補正の後に各ピクセル（解像度約30m）に対して3×3ウィンドウでメディアンフィルターをかけてノイズ除去した。濁度と相関の高いと考えられるバンド2の値（放射輝度を離散化した256階調の値、以下CCT値という）を用いて以下の検討を実施した。

さて、元のCCT値には大気状態や方位角の差異の影響が含まれている。そこで、濁水と同系統の色調である地上固定点と、河川水の影響を受けないと考えられる沖合の地点を選択し、CCT値の比較を行い基準化することとした。図-9は、縦軸に5月9日のCCT値、横軸に4月7日・4月23日・5月2日のCCT値を取って相関を取ったものであ

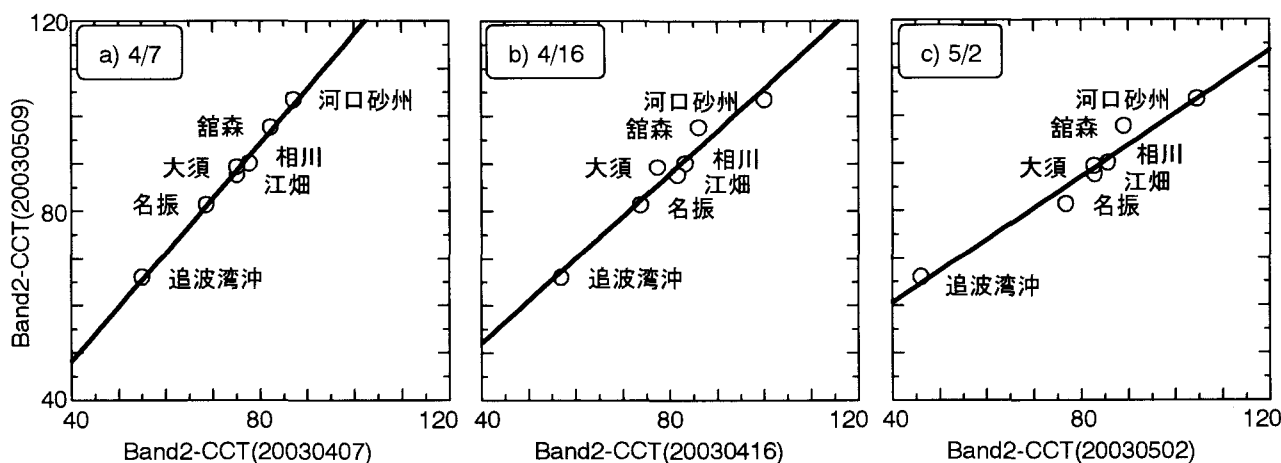


図-9 5月9日のシーンを基準としたCCT値の相関

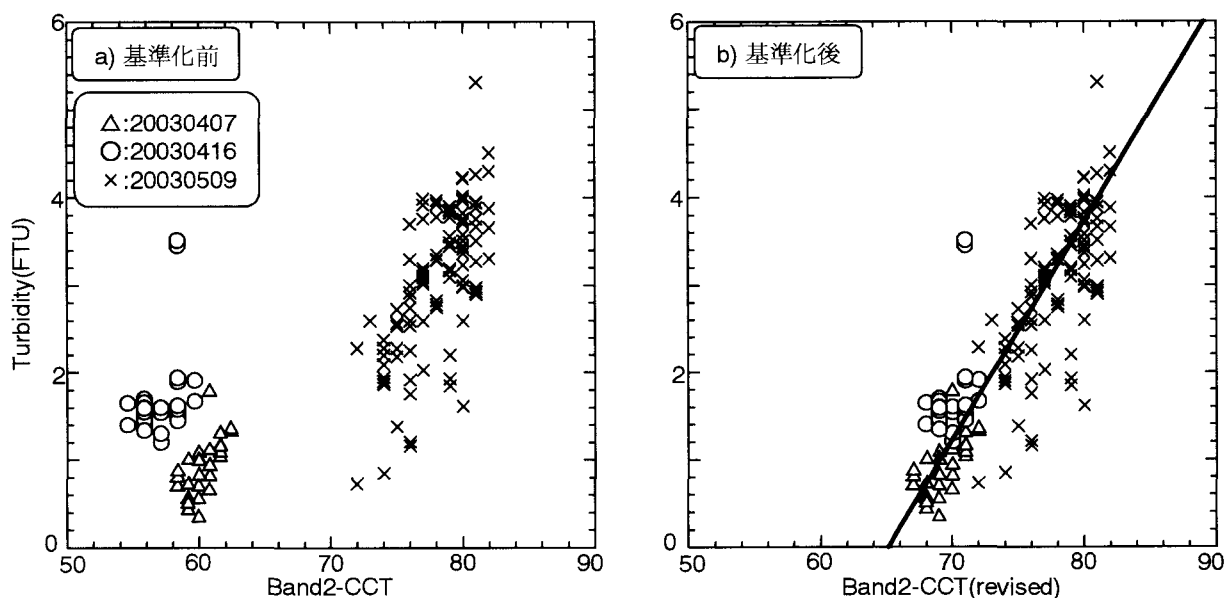


図-10 CCT値と表層濁度の相関

る。どの図においても多地点のデータがほぼ一直線上に並び、直線回帰の相関係数は0.97程度と極めて高い。そこで以下では、この直線関係を用いて5月9日のCCT値で基準化した値を用いた。

(2) 基準化されたCCT値と現地観測濁度の相関

4シーンのうち、現地観測で表層濁度が計測されているものについて、ランドサット画像のピクセル位置と濁度計測位置を対照し相関図を描いた。ただし、4月16日は高曇りであったので、可視域画像を参照して雲のない領域のデータを抽出している。また、図-3でハッチを施した領域のデータは省いている。図-10(a)は前述の基準化を行わない場合の結果で、観測日ごとにバラバラの分布を示している。一方図-10(b)は基準化されたCCT値と現地観測濁度との関係である。基準化されたCCT値は、観測日が異なっても概ね一つの直線上にあることがわかる。なお、河川水の影響をほとんど受けていないと考えられる湾口よりはるか沖の部分について基準化されたCCT値の頻度分布を調べたところ、最低値は概ね65であ

り、図-10(b)の回帰線で濁度ゼロになるCCT値に一致している。この直線関係は次式で表される。

$$Tu = -13.7 + 0.218 \cdot Cn \quad (2)$$

ここに、 Tu は表層濁度、 Cn は基準化されたCCT値である。

(3) 表層塩分空間分布

そこで、次のようにして、ランドサット画像から表層塩分の空間分布を求めることができる。まず、図-9から求められる回帰式(次式)を用いて各シーンにおけるCCT値を5月9日に基準化する。

$$4月7日 : Cn = 2.13 + 1.15 \cdot CCT \quad (3-1)$$

$$4月16日 : Cn = 31.4 + 0.735 \cdot CCT \quad (3-2)$$

$$5月2日 : Cn = 34.2 + 0.662 \cdot CCT \quad (3-3)$$

$$5月9日 : Cn = CCT \quad (3-4)$$

次に式(2)により基準化されたCCT値から表層濁度を求めた後、図-7から求められる各観測日の濁度と塩分の相関式から塩分を求める。

$$4月7日 : Sa = 33.0 - 8.14 \cdot Tu \quad (4-1)$$

$$5月2日 : Sa = 33.0 - 3.30 \cdot Tu \quad (4-2)$$

$$5月9日: Sa = 33.0 - 2.98 \cdot Tu \quad (4-3)$$

ここに、 Sa は表層塩分である。5月2日は現地観測を行っていないが、図-8で推定した濁度切片を用いて係数を求めている。また、曇りおよび高曇りであった4月23日と16日は計算していない。以上のようにして求めた表層塩分分布を図-11に示す。ただし、図-3でハッチを施した湾奥部および岸沿いの領域の値は必ずしも正確でない。また、図-11(c)中に示すように5月9日は雲および雲の影に当たる部分がある。

河口から排出された低塩分水塊は、湾のほぼ中央を沖に向かって直進しながら希釈されている。また湾口に達すると急激に希釈されるが、わずかに低塩分の状態を保ち太平洋岸沿いを南下している。また八景島が流れの障害となり、低塩分水塊が名振湾に流入する傾向のあることが明確にされている。湾の北側は相関式の適用外の領域が多いので明確なことは言えないが、三陸沖を南下している津軽海流が追波湾北岸沿いに流入し、北上川からの低塩分水塊の流下を妨げている可能性がある。養殖漁業の盛んな湾中央部および名振湾の塩分は20psu程度であり、今回の融雪出水の流量規模では、水産生物に大きな影響を与えることはないと思われる。

4. おわりに

本研究の結果、湾内表層濁度を媒介として、衛星画像から低塩分水塊の挙動を把握できる可能性が示された。ただし濁度と塩分の関係は時間的に変化するもので、湾内表層水質（濁度と塩分）のモニタリングを行うためのステーションを設置し、船を用いた観測が実施できない場合でも衛星画像解析を可能にする必要があると思われる。

今回の融雪出水は流量規模が $200\text{m}^3/\text{s}$ で比較的小規模であったため、水産養殖に大きな被害を生じるような低塩分状態は出現していない。今後、台風等による大きな出水に対しても、ここで開発した手法を用いて、観測事例を増やしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 宮城県編：宮城県の伝統的漁具漁法Ⅷ 養殖編（わかめ・こんぶ），宮城県，pp.103
- 2) 大串浩一郎，馬場里美，荒木宏之，Thian Yew GAN：衛星画像と現地観測に基づく有明海湾奥部の水質評価，水工学論文集，第47巻，pp.1261-1266，2003.
- 3) 工藤健太郎，高坂香那，田中總太郎，石川忠晴：北上川融雪出水の追波湾における挙動について，海岸工学論文集，第49巻，pp.361-365，2002.
- 4) 入江光輝，石川忠晴：浮体型曳航器の試作とテスト，水工学論文集第48巻（投稿中）

(2003.9.30受付)

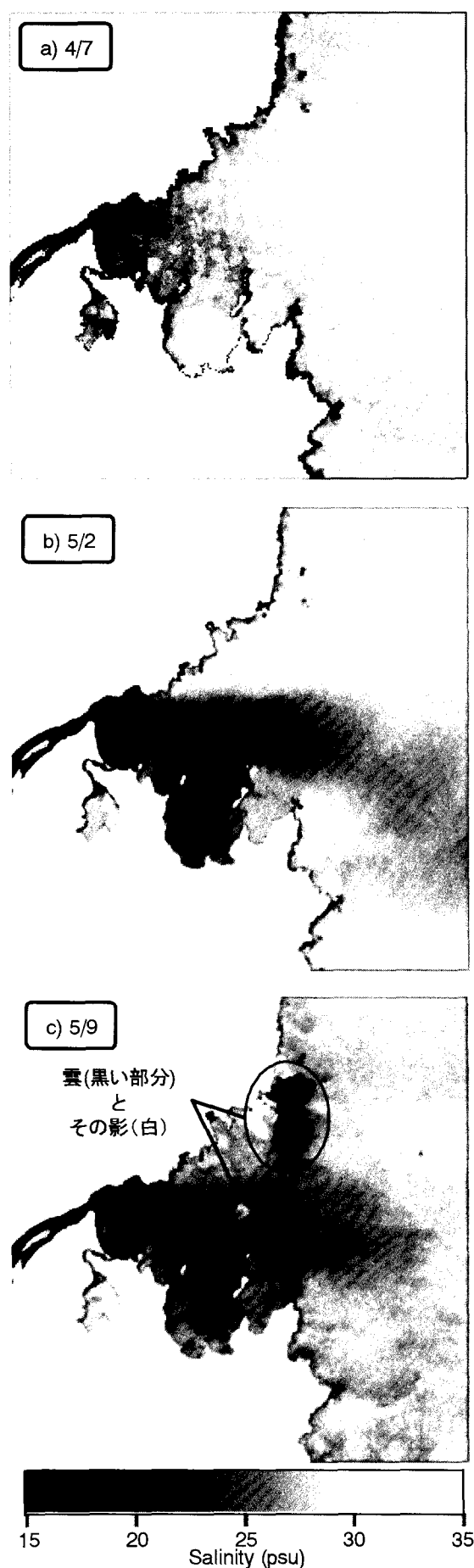


図-11 衛星画像から推定された表層塩分分布