

感潮海跡湖としての長面浦の流動特性について

Purwanto Bekti Santoso*・金里 学**・金山 進***
田中 仁****・高崎みつる*****・山路弘人*****

宮城県北東部に位置する長面浦においてはカキの養殖が盛んであるが、近年生産規模の拡大とともに、酸欠による斃死が見られる。そこで、本研究では現地観測を行い、水理的な観点から海水交換のメカニズムを検討した。まず、これまでの調査から、海域から流入し中層に貫入する流れにより浦内の酸素回復が確認されている。そこで、中層貫入流れの基本特性を検討した。また、貫入高さは流入水の密度に大きく依存することから、流入塩分を支配する外力に関する検討を行い、北上川の流量およびこの地域の風が主な支配要因であることを明らかにした。また、この定式化による得られた塩分推定値を用い、数値計算により中層貫入現象の再現を行った。

1. はじめに

新北上川河口に近接する長面浦は感潮狭水路によって追波湾と連絡された汽水の海跡湖であり、静穏な水域を利用したカキの養殖が盛んであるが、近年になって中・底層を中心に貧酸素化の進行が見られるようになった。浦内の水質改善方策を検討するためには、貧酸素化の機構、特に中・底層での流動停滞などの水理特性を十分に把握する必要がある。こういった背景の下、著者らは2002年から調査に着手し、その機構解明を進めつつある(高崎・田中, 2004; 岡島ら, 2004; Tanaka et al., 2004)。これまでに、(1) 海谷状に深くなった浦奥部を中心に発達する塩分躍層が中・底層水の流動停滞の主因であり、(2) この状況下での潮流変動は狭水路から浦内へ流入する外海水が自らと同程度の密度の層に流れ込む中層貫入現象として捉えられること、(3) 流入水の密度は北上川の流量と追波湾における気・海象によって幅広く変化することなどが判明している。

本研究においては、これらの現象を定量的に把握することに主眼を置くが、長面浦の海水交換を①新北上川河口、追波湾から感潮狭水路にかけての海象による浦内流入水の塩分濃度の形成、②流入水の浦内での密度流としての挙動という2つの素過程に分けて検討した。

2. 長面浦の概要

調査対象である長面浦の概要を図-1に示す。長面浦は宮城県石巻市の北上川河口近くに位置する海跡湖であ

り、追波湾と狭水路でむすばれた汽水域である。長面浦の周囲は約8 km、浦面積は1.41 km²である。最大水深は約10 m であるのに対して、狭水路の長さは約1.7 km、最大水深は約2 m と、水深の浅い入り口をもつ閉鎖性の強い水域である。また浦内には海水交換を促進するための渚筋がある。長面浦には数本の沢を通じて淡水の流入があるがその流量は微量で、浦内の流動特性は潮汐による狭水路からの入退潮により大きく支配されている(高崎・田中, 2004)。カキの養殖が行われている浦奥部では7 m から10 m の水深を有するが、5 m 以深では夏期に溶存酸素の不足によるカキの斃死が確認されている。

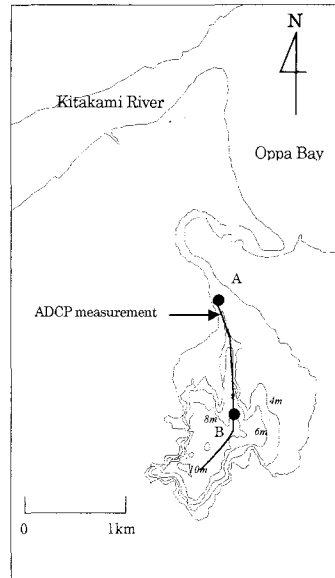


図-1 長面浦の概要

浦内底層では夏期に顕著な貧酸素状態になる。そこで、観測は2003年7月21日から8月15日まで行なった。観測期間の大潮時(7月28日, 29日)には浦内の流動特性を把握するために ADCP (超音波ドップラー流速計, RDI社製) を図-1 に示す渚筋上で測定した。さらに、浦内

* 学生員 M.Eng. 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
** 学生員 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
*** 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
**** フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
***** 正会員 工博 石巻専修大学教授 理工学部生物生産工学科
***** 正会員 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻

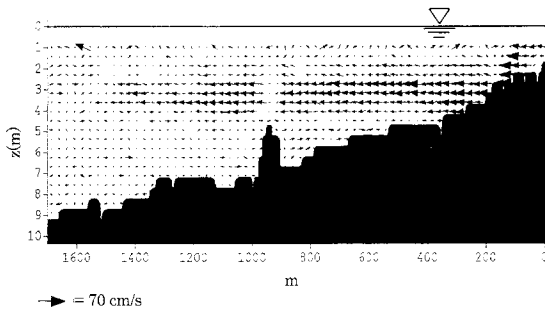


図-2 ADCPより観測された中層貫入

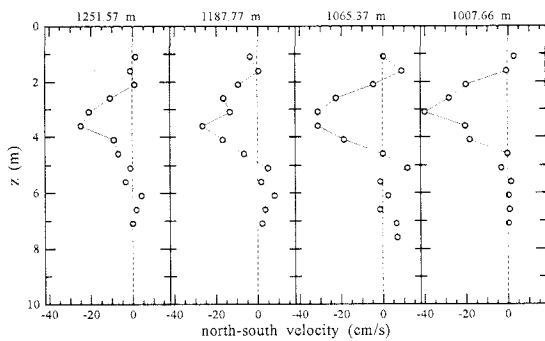


図-3 中層貫入流速の鉛直分布

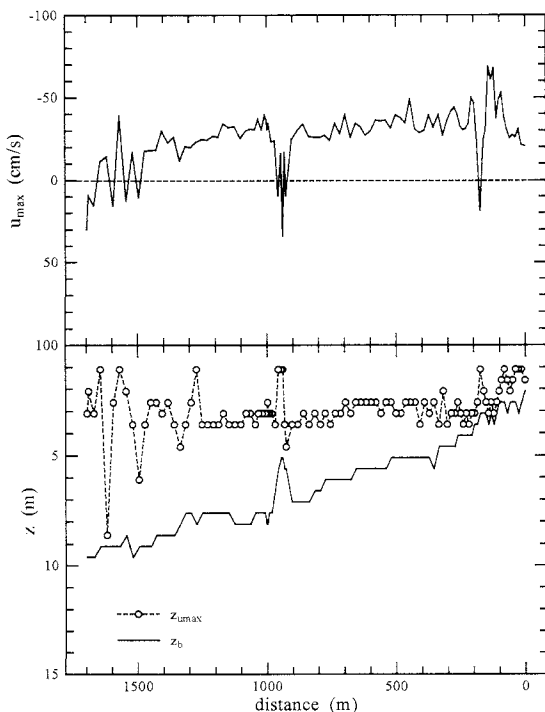


図-4 中層貫入流れの最大流速とその発現高さ

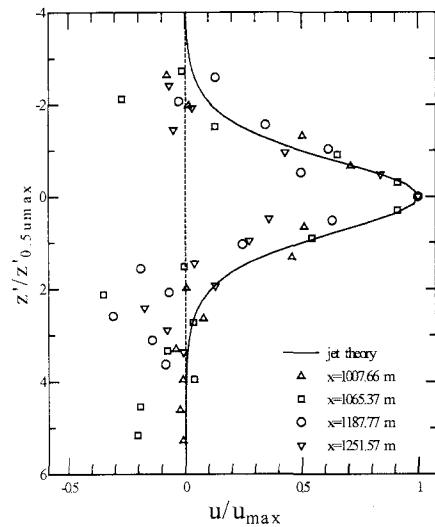


図-5 中層貫入流れの相似性

口部 (St. A) には水温・塩分を、浦内部 (St. B) に水温・塩分・溶存酸素を測定した。

3. 調査結果

(1) 浦内への流入特性

図-2 は、7月28日の上げ潮時に ADCP によって測定した流速分布を示したものである (岡島ら, 2004)。横軸は浦入口の St. A を 0 m とした時の測定距離を表している。なお, St. B は 1100 m 付近となる。ADCP では海面および海底近傍 1 m 程度の流速を測ることはできない。図-2 より, 入口部で底層に沿って流入し, 深さ 4 m 付近に浦奥部まで流速を保ちながら貫入している様子がわかる。図-3 は実際の流速値をもとに速度分布を描いたものであり, いずれの断面においても貫入特有の噴流に類似した速度分布を有していることが分かる。各断面での最大流速およびその発現高さを示した結果が図-4 である。速度はほぼ一様に低減し, また, その貫入高さは比較的安定しており, 表層から 3 m ほどの高さである。速度分布の相似性を検討するために, 各断面での最大流速 $u_{\max}$ を代表速度とし, また, $u_{\max}$ が現れる高さから $0.5u_{\max}$ の速度が現れる高さ $z'_{0.5u_{\max}}$ までの距離 $z'_{0.5u_{\max}}$ を代表長さにとりて無次元表示した。その結果を図-5 に示す。図中で実線は噴流理論から得られる次式,

$$\frac{u}{u_{\max}} = 1 - \tanh^2 \eta \quad (1)$$

を表している。ここで, $\eta = z'/z'_{0.5u_{\max}}$, $z' : u_{\max}$ が現れる高さを原点として, 上向きに正を取る鉛直座標である。実測の速度分布はこの曲線に比較的類似した振る舞いを

見せている。

(2) ANN による流入塩分の評価

人間の脳の中には多数の神経細胞（ニューロン）が存在し、各ニューロンは神経線維（シナプス）でつながれている。各ニューロンは多数の他のニューロンから信号を受け取り、他のニューロンへ受け渡すことによって、様々な情報処理を行っている。この働きをコンピュータ上で再現したのが、ニューラルネットワーク（Artificial Neural Network：ANN）である。ニューラルネットワークの大きな特徴は、与えられた入出力データに基づいて必要な機能を自己形成でき、さらに学習によって定式化の困難な非線形の関数を近似できることである。塩分変動などの因果関係が不明瞭な自然現象を対象とする場合、入出力の関係は非線形で表す方が適切である（太田・木村，1998）。

本研究では、塩分値の予測を目的とするため階層型ニューラルネットワークを使用した。階層型ネットワークの構造は、入力層・中間層・出力層の3層からなり、情報は入力層から中間層、出力層と一方向に伝達される。各ニューロン（ユニット）は一つ前の層全てのユニットからシナプス（結合路）を通り、情報信号の入力を受ける。結合路を通る際、ある重み（結合加重）を情報信号に乗じて加算され、さらにユニットの持つ閾値が差し引かれて入力される。そしてユニットで応答関数に応じた出力値を出力する。この応答関数はシグモイド関数を用いる。シグモイド関数は微分可能な連続関数であり、式（2）、（3）に示す。

$$f(T_j) = \frac{1}{1 + \exp(-T_j)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T_j = \sum_{i=1}^n (X_i W_{ji} - \theta_j) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 X_i は入力層ユニット*i*からの入力値、 W_{ji} は入力層ユニット*i*と中間層ユニット*j*の結合加重、 θ_j はユニット*j*の閾値である。

3層以上の階層型ニューラルネットワークでは、「誤差逆伝搬法（Back propagation 法）」によって自己学習を行う。自己学習とは、入力データと期待する出力値（教師データ）をセットで与え、ネットワークからの出力値と教師データとの誤差に従って、ネットワークの結合加重と閾値を変化させ、誤差を最小にしていこうとすることである。

入力データとして北上川流量、風速、潮位差を用い、浦内に流入する外海水の塩分の評価を行う。始めに2003年夏期の塩分と北上川流量、風速、潮位差を教師データとして学習を行い、ネットワークを構築した。上げ潮塩分は集中実測の St. A 水深 2 m の上げ潮時ものを、北上川流量は河口から上流 1.4 km に位置する北上大堰のもの

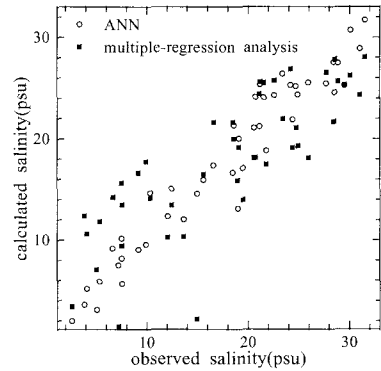


図-6 実測塩分値と計算塩分値の相関関係

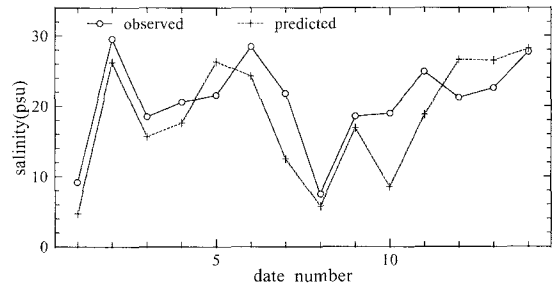


図-7 実測値と予測値(2003年7月28日～8月3日)

のを、風速は北上川河口部のものを西風を正、東風を負とし、東西成分に分解して用いた。

ANN の有用性を調べるために、同期間（2003年 7 月 21 日～8 月 15 日）、同データを用いて、ANN での学習結果と重回帰分析の計算結果を比較した。図-6 に ANN と重回帰分析の計算値と実測値の相関関係を示す。重回帰分析でもある程度外力との関係があると言えるが、ANN のほうがより相関が高く、明瞭に関係を示すことができています。

図-7 に計算した予測結果と実測塩分濃度を示す。学習期間は ADCP 流況観測前後の 7 月 21 日から 7 月 27 日、8 月 4 日から 8 月 15 日とし、7 月 28 日から 8 月 3 日のシミュレーションを行った。横軸は観測期間を通しての上げ潮の回数を表している。相関は 0.815 であり、流量・風速の増減に対する塩分の変動を良好に表していると言える。データナンバー 10 では予測値が急激に下がっているが、このとき一時的に東風が強かったため、その影響を ANN が強く表しすぎ、低塩分を予測したのだと考えられる。今後データの抽出の仕方を再検討し、当該時刻の数時間前のデータを総合して考慮していかなければならない。

また北上川流量を測定する北上大堰が河口部から約 1.4 km 上流にあるため、北上大堰で記録された放流水

が長面浦に到達するまでに時間差が起こる。そこで入力データの流量を2時間前のものを用いたところ、二乗平均平方誤差が0.977 psu 小さくなり、精度を上げることができた。

4. 数値計算

(1) 計算手法

感潮狭水路から長面浦への流入水の塩分の評価には、これが新北上川河口から追波湾にかけての気・海象に影響される複雑な機構に基づくものであることから、帰納的な手法である ANN を採用したが、力学モデルによる取り扱いが比較的容易と考えられる浦内での流入水の挙動については3次元密度流シミュレーションの適用を検討した。ここで採用したモデルは、静水圧近似およびブシネスク近似に基づくものであり、空間に固定された層分割により鉛直方向の離散化を行うレベルモデルである。

(2) 計算条件

浦内での中層貫入が ADCP による曳航観測で明確に

捕らえられた2003年7月28日14:00~18:00の大潮の上げ潮の時間帯を検討対象とした。

長面浦の入り口から約400 m 海側の感潮狭水路上に沖側境界を設け、実測潮位を入力した。感潮狭水路内の塩分の実測値は得られていないが、浦の入り口に近い St. A において上げ潮時に測定された最大値がこの期間における気・海象条件を反映した感潮狭水路の塩分であると考え、計算期間中は感潮狭水路内の塩分をこの値に固定した。この値は実測によれば29.5 psu であり、前出の ANN によれば26.2 psu である。今回は、新北上川の流出状況や隣接海域の気・海象による感潮狭水路の塩分の決定とこれが長面浦に流入した後に示す挙動について、前者を帰納的な手法である ANN によって、後者を力学モデルである密度流シミュレーションによって評価することを試みているが、これを一貫した予測評価手法として捕らえた場合、ANN によって算定された流入水塩分を浦内流動シミュレーションの境界条件として用いた場合の再現性を検証する必要がある。こういった観点から、沖側境界における塩分については、実測値に基づく29.5

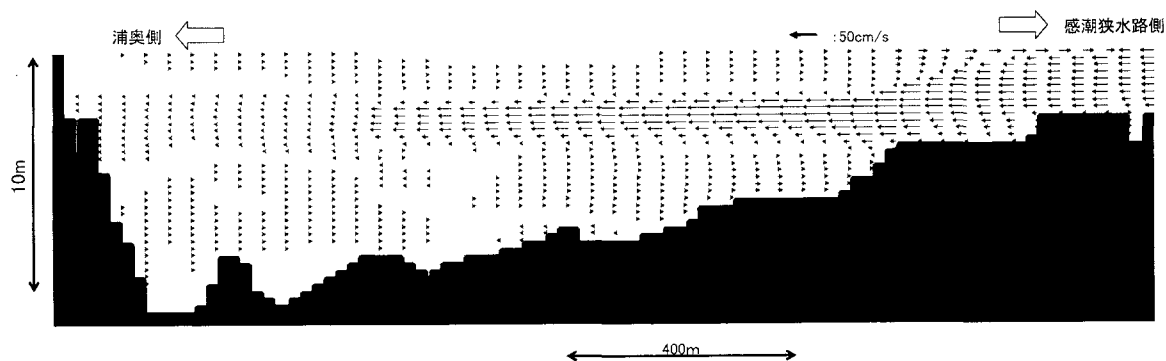


図-8 上げ潮最強時における計算流速

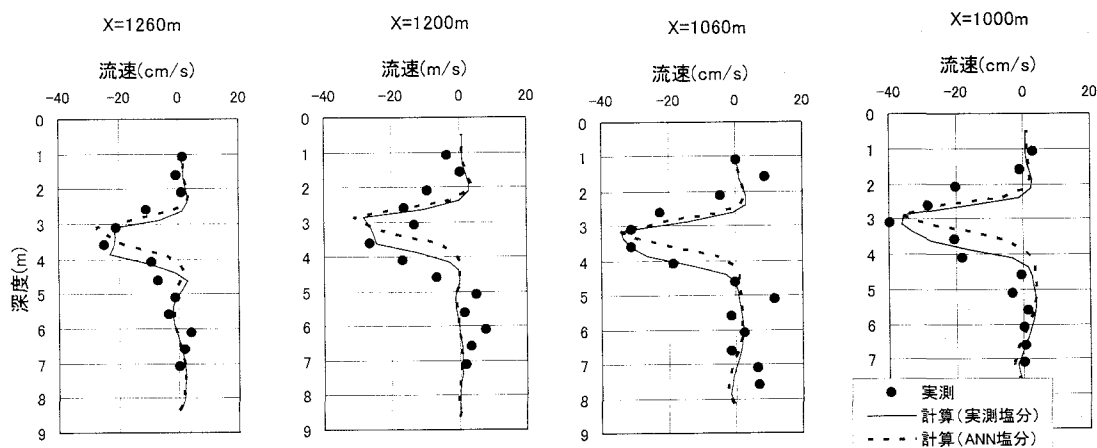


図-9 上げ潮最強時における流速の再現性

psu を採用した場合と ANN による 26.2 psu を採用した場合をともに対象とした。

浦内の水温および塩分の初期値は浦中央部の St. B における実測値を与えた。感潮狭水路内の水温は実測値に基づき 20℃ に固定した。また、今回は水表面を通した熱フラックスによる水温変化および吹送流は考慮していない。

水平方向の計算格子 Δx , Δz はともに 20 m とした。鉛直分割については、静水面 -0.5 m 以浅を表層第 1 層とし、それ以深は 0.25 m 間隔で層を設定した。浦内の最大水深は平均潮位を加えると 11 m 程度であることから 40 層のレベルモデルとなる。計算時間間隔 Δt は 3 s とした。

(3) 計算結果

図-8 は上げ潮による流速がほぼ最強となる 7 月 28 日 17:00 における流速場を ADCP 計測ラインに沿った縦断面図で表示したものである。これは実測による感潮狭水路の塩分を与えたケースであるが、流入水が 3 ~ 4 m の深度に中層貫入している様子が認められる。

図-9 は曳航式の ADCP によって測定された流速と計算流速を比較したものである。ADCP による測定結果を黒丸、実測の塩分を入力した計算結果を実線、ANN によって算定した塩分による計算結果を破線で示す。ANN による塩分を用いたものは中層貫入の深度が若干小さめに現れている感があるが、両者とも浦内での特徴的な流況を定量的にも妥当な範囲で表現している。

5. おわりに

宮城県北東部に位置する長面浦を対象に、水理的な観点から海水交換のメカニズムを検討した。以下に本研究の成果を示す。

- (1) これまでの調査から、海域から流入し中層に貫入する流れにより浦内の酸素回復が確認されている。そこで、中層貫入流れの基本特性を検討した。
- (2) また、貫入高さは流入水の密度に大きく依存することから、流入塩分を支配する外力に関する検討を行い、北上川の流量およびこの地域の風が主な支配要因であることを明らかにした。
- (3) ニューラルネットワークを用いて定式化された流入塩分推定値を用い、数値計算により中層貫入現象の再現を行った。

謝辞：本研究を行うに際し、貴重な現地データを提供頂いた国土交通省東北地方整備局北上下流河川事務所に深謝する。また、本研究の現地調査を実施するに当たり、(株)ヤマニシ・菅野孝一郎氏、アレック電子(株)三木聖彦氏、東北大学環境水理学研究室の諸兄、石巻専修大学・高崎研究室卒研究生ならびに河北町漁業協同組合の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 太田隆夫・木村 晃(1998)：ニューラルネットワークを用いた有義波高の予測について，海岸工学論文集，第45巻，pp. 226-230.
- 岡島直也・田中 仁・金里 学・高崎みつる・山路弘人(2004)：長面浦における溶存酸素の変動機構，海岸工学論文集，第51巻，pp. 936-940.
- 高崎みつる・田中 仁(2004)：南三陸長面浦における溶存酸素濃度の変動に関する現地調査，水工学論文集，第48巻，pp. 1411-1416.
- Tanaka, H., M. Takasaki, H.S. Lee and H. Yamaji, (2004) : Field observation of salinity intrusion into Nagatsura-ura Lagoon, Proceedings of the 4th Congress of Environmental Hydraulics and the 14th Congress of APD-IAHR, pp. 737-743.