

感潮狭水路水深がラグーン内水位応答および流入塩分に及ぼす影響

Influence of Tidal Inlet Depth on Water Level Response and Salinity Intrusion in A Lagoon

渡辺一也¹・田中 仁²・金山 進³・Purwanto Bektı Santoso⁴

Kazuya WATANABE, Hitoshi TANAKA, Susumu KANAYAMA and Purwanto Bektı Santoso

Nagatsura-ura Lagoon in Miyagi is a semi-enclosed water area that has been used for aquaculture of oyster for these forty years. Recently, however, death of oysters has frequently occurred due to anoxic water near the bottom, and is a big concern among stakeholders. Nagatsura-ura Lagoon and Oppa Bay are connected by shallow tidal inlet, and its water depth may greatly affect hydrodynamics and water environment in the lagoon. In this study, time variation of water level in the lagoon in response to tide is investigated through spectral analysis to quantify the role of water depth in the hydrodynamic process. Furthermore, the relationship between channel water depth and salinity concentration intruding into the lagoon is examined through 3-D numerical simulation.

1. はじめに

閉鎖性水域では汚濁物質が滞留しやすいため、一度水質が汚濁されるとその改善は容易ではない。本研究対象である宮城県石巻市に位置する長面浦では、静穏であり栄養塩が豊富という特徴をもつため、カキの養殖が盛んに行われている。しかし、近年の生産規模の拡大に伴って、水質環境が悪化し貧酸素水塊の発生とともに酸欠によるカキの斃死が底層において見られるようになった。そのため、浦内の水質改善策の検討がなされている。水質浄化の効果は浦内の海水の流入量に大きく依存しており、閉鎖性水域における海水交換は内部水位と潮位との関係が大きく寄与している (信岡ら, 2005)。また、水域内の流動はその土地固有の地形、環境条件によって大きく異なるため、それぞれの特性を理解することが重要である (福岡ら, 2002)。

長面浦は閉鎖性の強い水域でもあるため外海との海水交換には、外海と長面浦をつなぐ狭水路によるところが非常に大きい。近年ではこの狭水路が砂の堆積により浅くなってきており、そのため、湾内の水質が悪化していることが指摘されている。しかし、諸々の制約から水路内の測量は少なく、それを裏付けるデータは得られていない。しかしながら、湾内の水位観測は長年行われており、データが蓄積されている。長面浦内の水位は狭水路の水深の影響を受けた応答特性となっており、水位データから水深の情報を逆算できると推察される。また、

Purwantoら (2007) により、流入水の貫入高さが浦内の海水交換に影響を与えることが確認されており、長面浦の水質環境について論じるには、狭水路を通して流入してくる塩分についても検討する必要がある。

そこで、本研究では感潮域における水位変動スペクトル特性と狭窄部の水深について検討を行った。また、上述のような理由から、水質悪化の一因とされる海水交換量の減少について、狭水路水深の違いによる流入塩分についても検討を行った。

2. 研究対象領域

長面浦は宮城県北東部の北上川河口に位置し、周囲は約8km、浦面積は1.4km²である。そして追波湾と長さ1.7km、最大水深約2mの狭水路でつながっている汽水域である (図-1)。

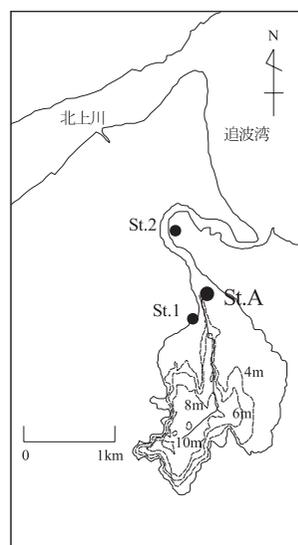


図-1 長面浦の概要と測点位置

1	正会員	博(工)	高松工業高等専門学校助教建設環境工学科
2	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
3	正会員	博(工)	(株)五洋建設
4		Ph.D.	Department of Civil Engineering, Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia

長面浦には数本の沢を通じて淡水の流入はあるが、狭水路を通じて潮汐による入退潮が浦内の流動を大きく支配している。カキの養殖は浦奥部で行われており、10m以上の水深を有する。また近年、狭水路と追波湾の接続部の形状が大きく変わり、入口部分の幅が大きく広がった。また、長面海岸では砂が大量に流失し、この4年間で高さ2mに渡り侵食されたことが確認されている。長面浦の狭水路においても砂が堆積し、水深がそれによって浅くなり、船の航行が困難になった。それに伴い海水交換量も変化していることが考えられる。ただし、狭水路の地形データが存在しないため、潮位に対する浦内水位応答特性から、狭水路水深に関する検討を行うこととした。2002年11月から2005年12月にかけて、浦内水位として図-1におけるSt.1、狭水路水位としてSt.2に水位計を定点設置し、水位の変動を測定した。

3. データセット

今回の検討に使用したデータについて、以下に示す。

(1) 水位データ

本研究では、長面浦内部、狭水路の2ヶ所に水位計を定点設置し、水位の変動を計測した。観測点は、図-1に示したSt.1において浦内水位 (η_1) を、St.2において狭水路水位 (η_2) を計測した。観測には、ICカード式水圧式水位測定装置KADEC21-MIZU-C (コーナーシステム社製) を用い、5分間隔で測定を行った。観測は2002年10月から開始され、現在も行っている。さらに、それをT.P.に換算してデータを使用した。潮位データについては、鮎川港にて観測されている潮位データを5分間隔に補間することで代用した。鮎川港と長面浦は直線距離で約30km離れている。

(2) 地形測量データ

今回対象とした長面浦では、2004年7月に国土交通省によって長面浦内及び狭水路部の横断測量が行われている。横断面測量は狭水路内の26の地点において行われた。

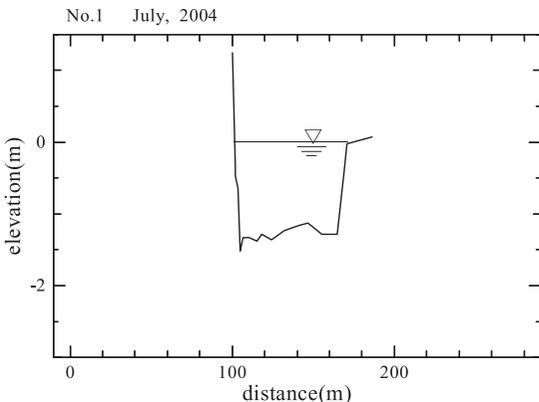


図-2 No.1の断面データ

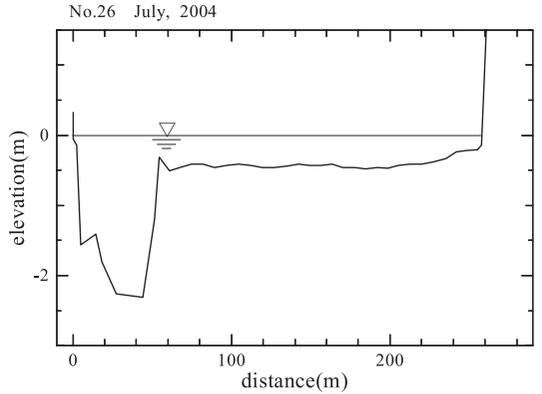


図-3 No.26の断面データ

図-2と図-3に今回取得した断面測量データの特徴的な例を示す。図に示されるように、狭水路内においてもその形は一様ではなく断面形状は大きく変化しており、図-3に代表されるような断面においては、水深が0.5m以下の場所においては流れがほとんど起こらず、海水交換への寄与は少ないと考えられる。

4. 解析方法

長面浦内での水位変化と潮位変化の応答性を検討するために、tidal inletの流れを表す基礎式を用いた(渡辺ら, 2005)のモデルを用いた。以下にその式を示す。

$$\eta_o - \eta_R = \left(K_{en} + K_{ex} + \frac{2gn^2L}{R^{4/3}} \right) \frac{|U|U}{2g} \dots\dots\dots (1)$$

$$U = \frac{A_R}{A_C} \frac{d\eta_R}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 η_o : 潮位、 η_R : 長面浦内水位、 K_{en} : 入口損失係数、 K_{ex} : 出口損失係数、 n : マニングの粗度係数、 L : 狭水路長、 R : 径深、 U : 流速、 A_R : 感潮域面積、 A_C : 狭水路断面積、 g : 重力加速度である。

式 (1)、(2) より、 U を消去し、浦内水位を計算することができる。そして、水位と潮位についてそれぞれ月ごとにスペクトル解析を行った。

5. 解析結果および考察

(1) 実測水位データ

長面浦の水位データについて、代表的なものとして、2005年7月6日と7日の水位と潮位の实測データを図-4に示す。狭水路水位 η_2 は、潮位と比較して約3時間位相が遅れていることがわかる。干潮時においては浦内水位、狭水路水位ともに潮位ほど低下しない。他の水位データにおいても同様の傾向が確認された。

(2) 数値計算結果

実測値と、狭水路水深 h を0.7mと2.5mに仮定した時の、

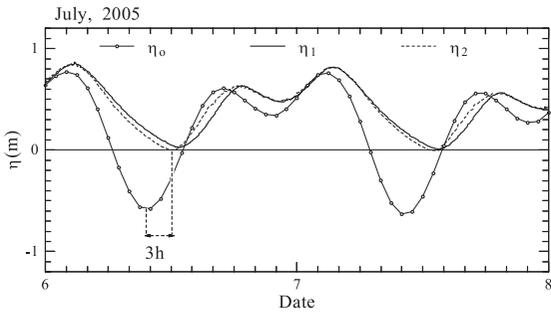


図-4 水位・潮位データの比較

浦内水位のスペクトル S を計算した結果を図-5に示す。実際には、3ケースでの検討を行っている。 h の値を大きくすることで、周期 $T=10$ 時間以下の短周期成分が卓越しなくなり、12時間の周期が大きく卓越することが分かった。図-6は、 $h=0.7\text{m}$ 、 2.5m と仮定した時に計算された浦内水位と実測水位の3ケースにおいて、実測潮位とのコヒーレンスを計算したものである。 $h=0.7\text{m}$ と 2.5m を比較すると、 $h=0.7\text{m}$ のときに実測値により近い値をとっている。また、 $h=2.5\text{m}$ のときには、特に、10時間以上の長周期成分において、コヒーレンスの値が1に漸近するが、これは潮位との相関が非常に強いことを示している。

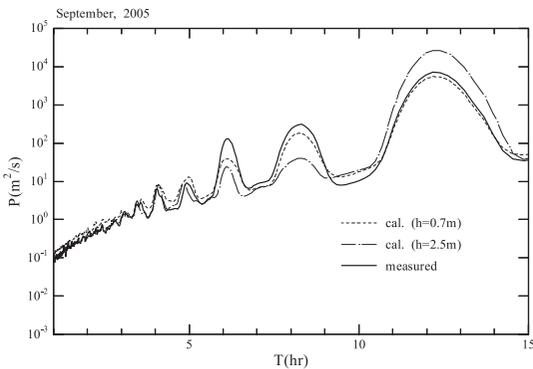


図-5 浦内水位計算のスペクトル分布

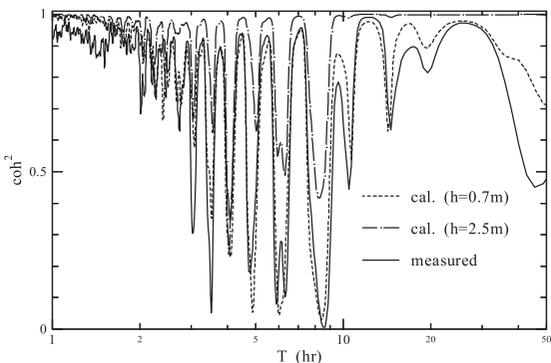


図-6 浦内水位と潮位とのコヒーレンス

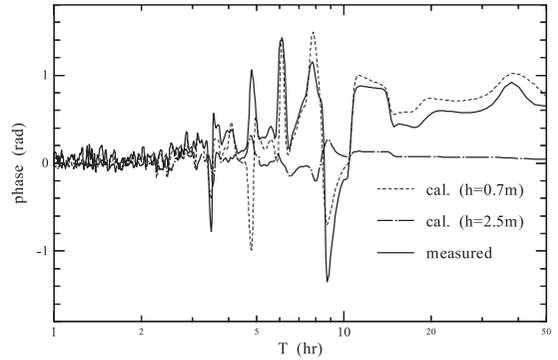


図-7 浦内水位と潮位とのフェイズ

潮位は短周期成分においてほとんど卓越することがなく、長周期成分において強く卓越する。浦内水位は長周期成分においては潮位ほど卓越はせず、短周期成分で潮位より強い卓越が見られる。浦内水位と潮位のコヒーレンスは、短周期域において低い値をとっている。このことから浦内スペクトルの短周期成分は、狭水路内部の影響からきていることがわかる。これは数値計算結果からも見ることができ、特に水深が1m以下の時に短周期成分が卓越する。

図-7は実測水位、 $h=0.7\text{m}$ 、 2.5m で計算した浦内水位と、実測潮位とのフェイズを計算したものである。 $h=0.7\text{m}$ のときは実測値に近い値をとっている。これは実測潮位との位相遅れが、実測水位と良く一致していることを示している。また、 2.5m のときは長周期域において0に近い値をとっている。これは潮位との位相遅れがほとんどないことを示している。

6. 狭水路水深の変化による流入塩分の変化

次に、狭水路の水深を様々に変化させた場合に、流入してくる塩分がどのように変化するかについて数値計算を用いて検討した。

(1) 数値計算モデル

数値計算には佐藤ら (1993) のモデルを基本として、密度勾配の影響を考慮して傾圧項を加えて使用した。さらに計算には、Galperin et al. (1988) の乱流クロージャーモデルを使用した。

計算条件としては、水平方向の計算格子 Δx 、 Δy はともに50m、鉛直方向には40層に分割した。第1, 2層は0.675m、0.15mとし、さらに、0.25m、1.0m、9.0m、10mとして、それ以降は5mごとに層を分割した。この時に狭水路の水深のみを1mから4.5mまで0.5m間隔で変化させることにより、水深の違いによる塩分流入の違いについて検討した。

(2) 水位変動特性

計算を行った期間においては、いくつか特徴的な水位

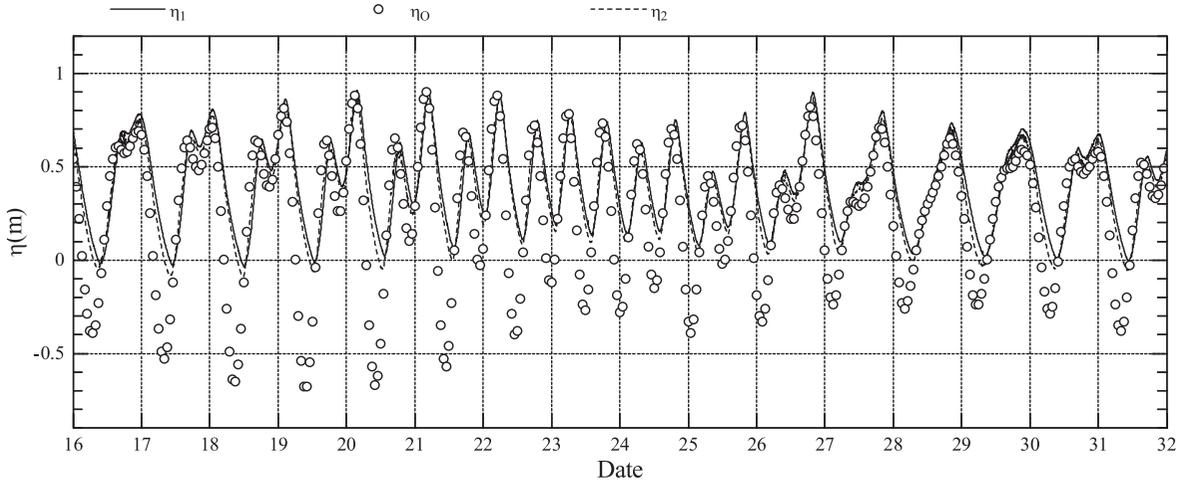


図-8 長面浦の水位変動特性

変動特性が確認された。そこで、実測された長面浦内の水位変動 (η_1 , η_2)、ならびに鮎川港での潮位 (η_0) を図-8に示す。図より、浦内の水位は基本的に潮位に呼応しているが、低潮時に水位が潮位ほどは低下しないことが分かる。これは、海水交換の観点から見ると、潮位変動から見積もられるほどの流入流量が無いことを意味している。

なお、今回の期間では観測されていないが、長面浦における過去の観測では潮位に比べて30cm程の水位上昇が確認されており、これは、波浪による wave set-up に起因するものと考えられている (田中ら, 2003)。

(3) 数値計算結果

上記のような特徴をもつ長面浦の塩分の流入について、数値シミュレーションを用いて計算した結果を図-9に示す。図-9は、狭水路水深を変化させた場合のSt.Aにおける塩分変化を示している。

図-9上段には、鮎川港の潮位と狭水路水深を変化させた時の浦内水位を示した。下段には塩分を示した。ここ

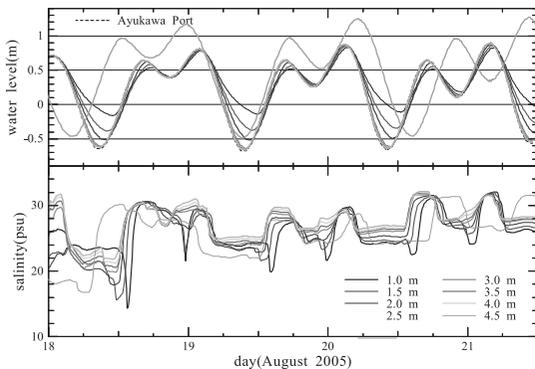


図-9 狭水路水深を変化させた場合のSt.Aにおける塩分変化

で、塩分を見ると水深が大きく潮位と浦内水位の応答が一致している時(水位差が小さい時)には、狭水路内でも高濃度の塩分が流入してきていることが分かる。しかし、浦内の水深が小さく両者の差が大きく生じているような場合においては塩分の濃度が低く、狭水路の水深により流入塩分が支配されていることが分かる。

図-10, 11, 12には水深を変化させた場合(水深1m, 2.5m, 4.5m)の流速と塩分濃度の変化について縦断面を

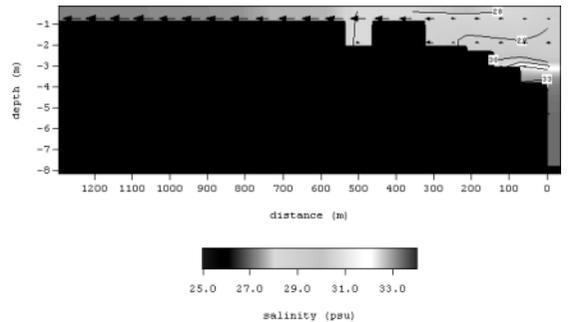


図-10 狭水路における流速と塩分の分布 (水深1m)

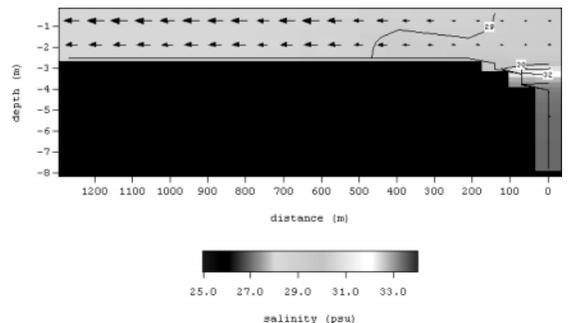


図-11 狭水路における流速と塩分の分布 (水深2.5m)

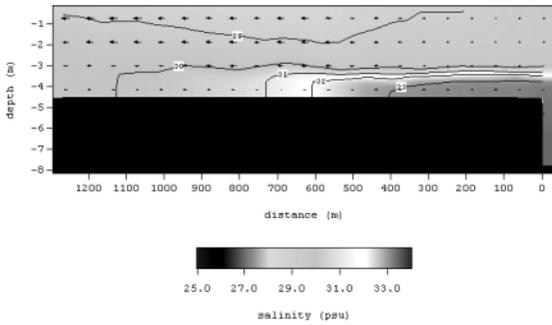


図-12 狭水路における流速と塩分の分布 (水深4.5m)

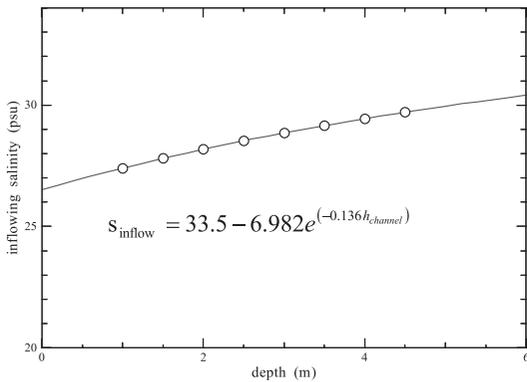


図-13 流入塩分と水深の関係

示した。狭水路の入り口付近では、塩分躍層が形成されるが、狭水路に沿って流入していくに連れて乱流の影響により、塩分の鉛直分布は一様になっていく。また、水深違いによる塩分の流入の違いに注目すると、水深の大きなケースである図-12から塩分濃度が大きくなっていることが確認できる。

次に、狭水路水深と流入塩分について見ると図-13の様な関係があることが分かる。図-13は2005年8月19日の12時から18時までの上げ潮時において、水深を変化させた場合の流入塩分の変化を示している。ここで、両者の関係をみると指数関数で表現することができることが分かる。 $S_{inflow}=C-A \cdot \exp(B \cdot h_{channel})$ を図-13に適用すると、式(3)が得られる。

$$S_{inflow} = 33.5 - 6.982e^{(-0.136h_{channel})} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 S_{inflow} : 流入塩分、 $h_{channel}$: 狭水路水深である。塩分の計算値は、式(3)にとっても良い一致を示している。

7. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 長面浦感潮域水位データに対してスペクトル解析を試みたところ、狭水路における底面摩擦効果によりスペクトル成分の短周期成分が発生することが明らかとなった。
- (2) tidal inletの基礎式から計算される水位変動のスペクトル解析と実測値の比較から、狭水路水深を定量的に評価することができた。
- (3) 今回の手法は他の河口部にも適用でき、河口の維持管理にも応用が可能である。
- (4) 狭水路の水深により、長面浦に流入する塩分が変化することが数値計算より明らかとなった。このことから、狭水路への砂の堆積による水深の減少が、湾内の水質悪化の一因となったことが明らかとなった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省東北地方整備局北上下流河川事務所より貴重なデータを頂いた。また、本研究の現地調査を実施するに当たり、東北大学環境水理学研究室の諸兄、石巻専修大学・高崎研究室卒業生ならびに河北町漁業協同組合の協力を得た。ここに記して深く謝意を表する。

参考文献

佐藤勝弘・松岡道男・小林一光 (1993) : 効率的な3次元潮流計算法とその適用性について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 221-225.

田中 仁・高崎みつる・山路弘人・李 炫錫 (2003) : 長面浦における水理特性の現地観測, 東北地域自然災害科学, 第39巻, pp. 165-170.

信岡尚道・三村信男・根本隆夫・布目彰一・齊川義則・大竹佑馬 (2003) : 汽水湖への塩分侵入の過程と条件, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 401-405.

福岡捷二・松下智美・三浦 心・黒川岳司・船橋昇治・中村幹雄 (2002) : 連結系汽水湖における塩分変化特性, 水工学論文集, 第46巻, pp. 899-904.

渡辺一也・朝山順一・田中 仁・山路弘人 (2005) : 水位データにより推定される名取川河口水深の季節変動について, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 336-340.

Galperin, B., Kantha, L. H., Hassid, S., and Rosati, A. (1988) : A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows, *J. Atmos. Sci.*, 45, 1988, pp. 55-62.

Purwanto Bektı Santoso・田中 仁・金山 進・高崎みつる・山路弘人 (2007) : 南三陸長面浦における海水交換機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1016-1020.