

潮位変動に対する河口水位応答から推定される 河口水深の精度

ACCURACY OF AN ESTIMATION METHOD OF WATER DEPTH AT A RIVER MOUTH USING MEASURED WATER LEVEL VARIATION

渡辺 一也¹・田中 仁²

Kazuya WATANABE and Hitoshi TANAKA

¹ 学生員 工修 東北大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

² 正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

Development of sand spit at a river mouth is a concern for river authorities in connection with water level rise during a flood. Due to that reason, it is important to understand river mouth topography change due to river and tidal flows and waves. In order to obtain topography data at a river mouth, however, it is time consuming and expensive in general. If it is possible to estimate river mouth topography from water level data, it will be effective for river mouth maintenance, because water level measurement is much cheaper and easier as compared with ordinary field surveying. In the present study, an estimation method is proposed and applied to virtual data from 1-D model to validate the estimation method. Furthermore, the estimation method is applied to field observation data at the mouth of Natori River.

Key words : river mouth, Natori River, water depth estimation, topographical change, 1-D model

1. はじめに

河口部においては、河川流、波浪、潮汐などの外力の影響を受け地形が変化する。特に、卓越する波浪により河口部が閉塞気味になる河川においては、治水や航路維持にとって大きな障害となることがあることから、河口地形の情報は重要である。そのように河口地形が重要であるにもかかわらず、河口地形を把握するためにそのデータを取得するには多大な資金と時間を要するためにデータが少ないのが現状である。そのため一級河川はもちろん、特に、二級河川においては一般にそれらのデータが乏しいものとなる。

著者らはこれまで宮城県・名取川河口の水位変動パターンが河口地形の影響を受けていることを定性的に示している¹⁾。それにより、水位情報から河口地形情報が明らかに出来ることが示唆されている。河口内水位の実測は地形測量などに比べて比較的安価に実施できるため、水位データから河口地形情報を推定することが可能であれば、今後の河口維持に対してきわめて有効な情報を与えることが出来る。

そこで、本研究では河口内水位データおよび潮位デー

タから河口地形を推定する手法を提案し、その実用性の検討を試みた。まず、あらかじめ河口水深の分かっている仮想水位データを数値計算より求めておき、その水位変動に対しての河口地形の推定を検討し、計算から得られる水深の精度について評価を行った。さらに、同推定法の実河川への適用性を検討した。

2. 一次元モデルから得られる仮想水位データ に対する検討

後述するように、本研究で提案する河口水深推定手法においては、ある時刻の河口内水位と潮位の二つのデータを用いる。そのために、水位データと潮位データを取得する際の有効数字と、そのデータ観測の時間間隔 Δt が推定結果に大きく影響すると考えられる。また、実際の水位データ観測の際には、測定値にさまざまなノイズが含まれているためにその影響も考慮しなければならない。そのために、まず、数値実験から得られる、ノイズが全く無い仮想的な水位データを用いることにより、観測値の有効数字と水位データの観測間隔が推定結果に与える影響について評価を行い、実際の河川への適用の前にこれらについて詳細な検討を行うこととした。

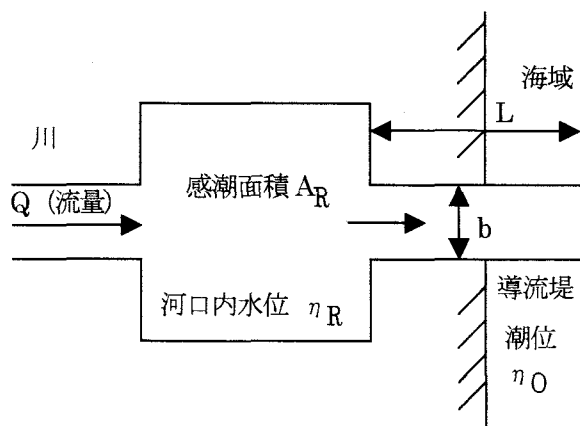


図-1 一次元モデルの説明図

表-1 計算条件

記号	意味	設定値
A_R	感潮面積(m^2)	1,730,000
L	河口水路長(m)	522
B	水路幅(m)	86
h	河口水深(m)	3.1
a_o	潮位振幅(m)	0.74
T	潮汐周期(s)	43,200 or 86,160
K_{en}	入り口損失係数	0.3
K_{ex}	出口損失係数	1.0
n	マンニングの粗度係数	0.035

(1) 仮想データ作成のための基礎式

河口水位情報から河口地形情報をより定量的に取り出す方法について検討するための水位データを作成する目的で、一次元モデルによる数値計算を実施した。基礎式は tidal inlet の流れを表現する一次元モデルである²⁾。河口域・海域のモデル化の概念を図-1に示す。ただし、本研究においては河川流量 Q を考慮しない³⁾。この時、基礎式は、式(1)の運動の式、式(2)の連続の式からなる。

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

$$U = \frac{A_R}{A_c} \frac{d\eta_R}{dt} \quad (2)$$

ここで、 η_o ：沖側潮位、 η_R ：河口内水位、 R ：径深、 U ：河口部流速である。その他の記号については、その定義を図-1、表-1に示した。

今回用いた仮想水位データを得るために入力した条件を表-1に示す。これらのデータは名取川河口における実際の条件をもとに設定したものである。ここで、河

口の断面形状は矩形であると仮定した。計算に際しては Runge-Kutter 法を用い、潮位を正弦波近似して入力した。潮位の周期としては半日周潮および一日周潮の二つを対象とした。

(2) 河口水深の推定法

(1)において説明した方法により、潮位、河口内水位の時間変化が計算で与えられている。断面推定のプロセスにおいては、この水位データを所与のものとして、水深 h のみを未知数として、式(1)、式(2)から繰り返し計算によりこれを逆算する。水位は時々刻々の値として与えられ、また、式(2)右辺の水位の時間変化率を中央差分で求めることとすれば、各時間毎に河口水深推定値を得ることが出来る。

式(1)で入り口・出口の損失係数を無視すれば、マンニングの平均流速式に他ならない。河口感潮区間においては式(2)により水位変動から感潮狭水路での流速が得られるので、これにより水深の計算が可能となる。

推定計算では、異なるデータ時間間隔 (60 秒, 5 分, 1 時間) と、異なる有効数字 (丸めなし, mm, cm) について、それぞれ3ケースずつ計算を行った。

(3) 観測データの有効数字に関する検討結果

まず、潮位、河口内水位データの有効数字が河口水深推定結果に及ぼす影響を検討する。計測時間間隔5分での結果を図-2、図-3に示す。図-2が潮位の半日周潮の計算結果であり、図-3は一日周潮の計算結果を示している。それぞれの上段に示されているのが今回使用した仮想水位データである。

図-2より、有効数字を丸めたものでその誤差が大きくなっていることが確認できる。特に cm のオーダーで有効数字を丸めたものではその差が大きくなっている。しかし、有効数字が mm のオーダーのものは、多少誤差は認められるものの、真値 ($h=3.1m$) に対して良好な結果を示している。潮汐周期による比較では、周期が長いものが短いものに対して推定結果が悪くなっている。周期が長いものでは、特に有効数字を cm で丸めたものでは真値に対しての誤差が大きくなってしまっている。mm 単位で有効数字を丸めたものであっても周期が半日周潮のもの比べて再現できておらず、周期が長いものではどのケースでも計算結果が悪くなっている。図-2の最上段に見られるように、このケースでは潮位と河口内水位にわずかながらも差が見られる。式(1)から明らかなようにこの差をもとに水深の推定が行われる。そのため、 η_o と η_R がほぼ等しい位相での推定誤差が大きい。

一方、図-3最上段においては二つの水位の見分けがつかないほど類似した変動を示している。このために、一日周潮のケースでは水位波形から水深を予測する精度

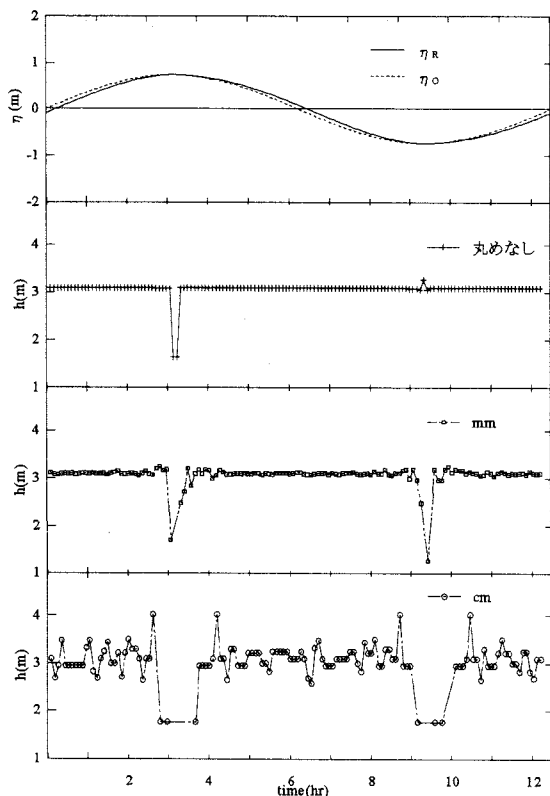


図-2 有効数字に関する検討（半日周潮）

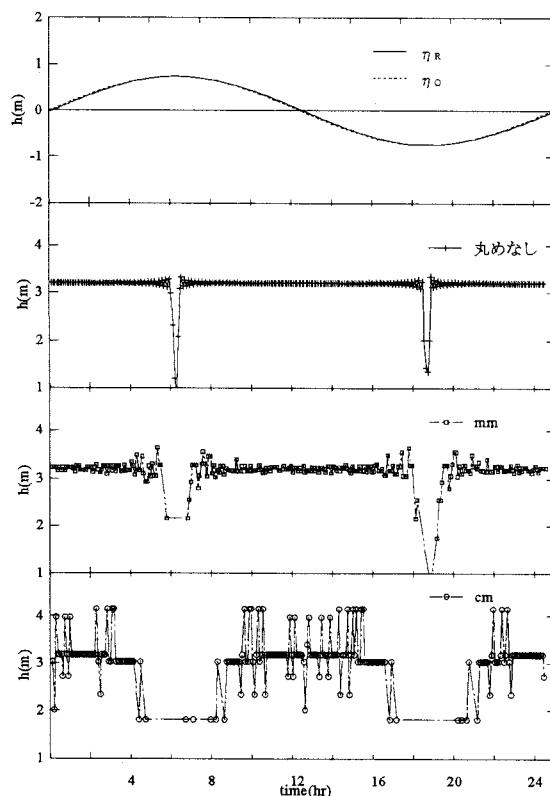


図-3 有効数字に関する検討（一日周潮）

が低い。O'Brien and Dean⁴⁾ が示したように、潮汐の周期が短いほど潮位・河口内水位の間の位相差が大きく、後者の低減も顕著となる。このことから、より短い周期の潮汐において推定の精度がより高いことが理解される。

(4) データ時間間隔に関する検討

次に、データ時間間隔を変えた際の、河口地形推定結果への影響を検討する。水位データ時間間隔を変化させた時の河口水深の推定結果を図-4、5に示す。ここで示した計算結果の有効数字はmmとし、時間間隔を60秒、5分、1時間と変えて計算している。また使用した仮想水位データは有効数字に対する検討の時と同じものを使用し、図-4、5それぞれの上段に示した。時間間隔についての検討についても有効数字の検討のときと同じく、半日周潮と一日周潮の2種類の潮汐に対して計算を行っている。

図-4、5 から、どのケースに対する検討においても、潮位と河口内の水位差が0となる地点においては、河口水深の推定結果の誤差が大きくなっている。これは本研究で使用したモデルが水位差から河口地形を推定するために、水位差が無いところでは計算が出来ないということを示している。しかし、この仮想水位データのように水位差が小さいものであっても、データ間隔が5分のも

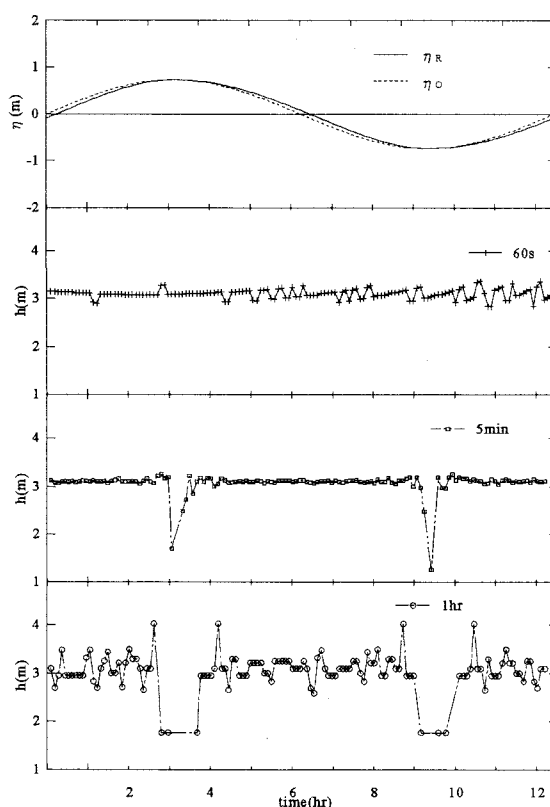


図-4 データ時間間隔に関する検討（半日周潮）

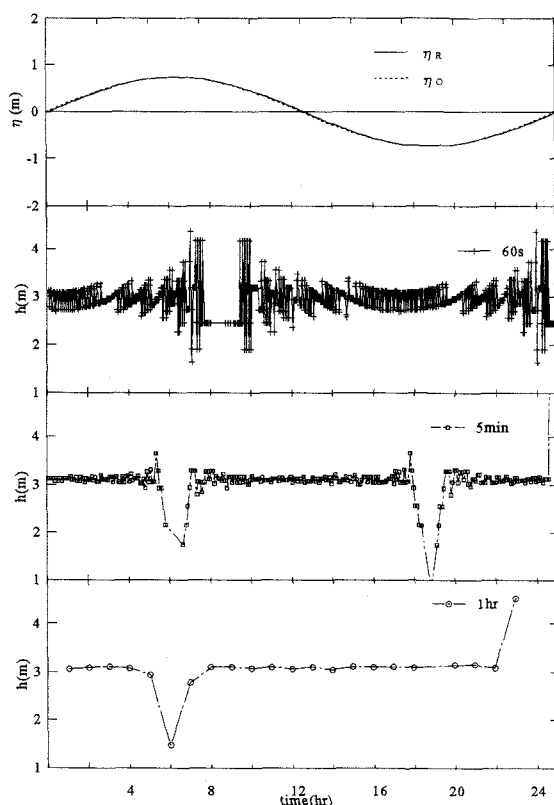


図-5 データ間隔に関する検討（一日周潮）

のではほぼ良好に再現が出来ている。しかし、時間間隔が長いものではその差が大きくなっている。丸めなしのものは水位差が0となる付近で誤差が大きいもののそれ以外では真値の再現ができています。

以上の結果から、実測データを取得する際の時間間隔が河口水深の推定結果に大きな影響を与えることが確認された。

(5) 有効数字とデータ間隔の組み合わせに対する誤差評価

各ケースにおいて計算された河口水深の平均値 h_{mean} と二乗平均誤差 $RMSE$ を使用して考察を行う。それぞれのケースについて計算した結果を表-2、表-3 に示す。表中の h_{mean} は各時間毎に推定された河口水深の平均値を示している。 $RMSE$ の定義は以下である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_{(cal)i} - h_{(real)})^2}{N}} \quad (3)$$

ここで、添え字の cal , $real$ はそれぞれ計算値、真値を

表している。また、 N はデータ総数を表している。表-2、表-3 を見ると有効数字が mm のものと丸めがないものでは、周期が 12.5 時間および 25 時間のものでも比較的真値に近い値を再現できている。しかし、有効数字が cm のものになるとその影響を受け、誤差が大きくなる。また、データの時間間隔に注目すると、有効数字が mm のものと丸めなしのものではより真値に近い値が得られている。有効数字が cm になると、どのケースにおいても真値からの誤差が大きくなり推定値のばらつきが大きくなっていることが分かる。周期に関して比較すると、半日周潮のもので良好な再現が出来ている。これは、上述のように、周期のケースでは潮位に対する河口内水位の応答が緩慢であり、両者の水位差がでないことによる。

表-2 推定河口水深の平均値と $RMSE$ （半日周潮）

Δt	有効数字	丸めなし	mm	cm
	$h_{mean}(m)$			
60s	$h_{mean}(m)$	3.11	3.11	3.53
	$RMSE(m)$	0.54	0.58	1.06
5min	$h_{mean}(m)$	3.06	3.10	3.04
	$RMSE(m)$	0.18	0.40	0.39
60min	$h_{mean}(m)$	3.17	3.17	2.90
	$RMSE(m)$	0.43	0.42	0.31

表-3 推定河口水深の平均値と $RMSE$ （一日周潮）

Δt	有効数字	丸めなし	mm	cm
	$h_{mean}(m)$			
60s	$h_{mean}(m)$	2.95	3.01	3.80
	$RMSE(m)$	0.25	0.36	0.91
5min	$h_{mean}(m)$	3.06	3.07	3.01
	$RMSE(m)$	0.26	0.33	0.54
60min	$h_{mean}(m)$	3.03	3.07	2.89
	$RMSE(m)$	0.23	0.47	0.44

3. 名取川における河口水深の推定

先に示されたように、仮想水位データを用いた河口地形推定の検討においては、データの時間間隔および有効数字に影響を受けるものの、河口地形（河口水深）の推定に関してかなり良好な結果を得た。しかし、実際に計測される水位データにはノイズが含まれており仮想水位データのように良好な推定ができるとは限らない。そこ

で、次に名取川河口への実測データを用いた河口水深の推定を行い、実河川において河口水深の推定が可能であるのかを検討する。

(1) 名取川の概要

図-6 に研究の調査対象である名取川の河口付近の地形概要を示す。名取川は宮城県のほぼ中央に位置し、水源を宮城・山形県境に発し、広瀬川等の中小支川と合流して名取市関上において太平洋に注ぐ一級河川である。流域面積は 938.9km²、幹川流路延長は 55.0km となっている。

図-6 に示すとおり、名取川は河口部に 2 本の導流堤を有しており、北へ向かって湾曲している。このために、導流堤内断面の右岸寄りにはらせん流による深掘れが見られる。河口北部には井土浦、南部には広浦が広がっており、過去に河口開口位置が大きく変動していたことを物語っている。

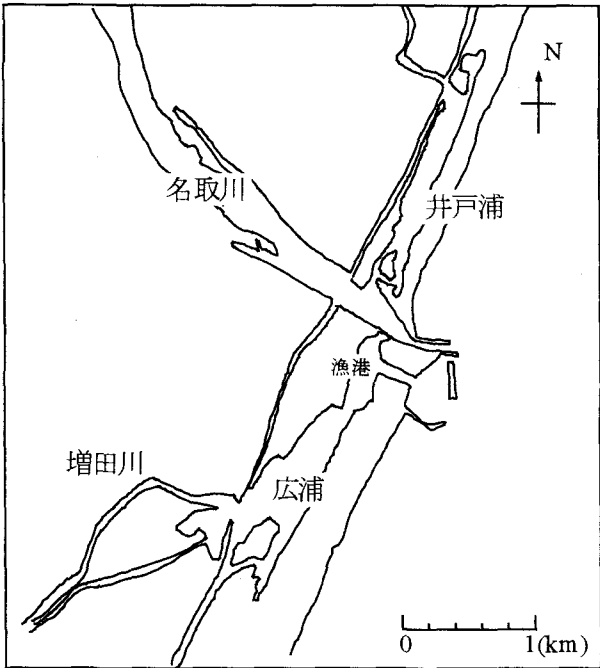


図-6 名取川河口概要

(2) 使用する実測データ

名取川河口においては詳細な水位観測が行われている¹⁾。その際に得られた水位データの観測期間は表-4 に示されるとおりである。水位データの観測時間間隔は 1 分であり、独自に開発された水位計を用いることにより、mm 単位までの測定を行っている。データ取得方法および観測方法の詳細については既発表の論文^{1), 5)}を参照されたい。

名取川河口では年に 1 回程度の地形測量が国土交通省により行われている。そこで、本研究では表-4 のうちで水位データと河口地形データの揃っている No.1 の期間を対象として河口水深の推定を試みることとする。使用した水位データの時間変動を図-7 に示す。

表-4 水位観測期間

観測 No.	観測期間
No.1	2002 年 1 月 14 日 13 : 00 ~ 1 月 18 日 10 : 08
No.2	2002 年 1 月 31 日 13 : 00 ~ 2 月 08 日 10 : 05
No.3	2002 年 2 月 15 日 10 : 00 ~ 3 月 01 日 10 : 08

(3) 河口水深の推定結果

名取河口において測定された河口内および潮位データを用いて河口水深の推定を行う。ここでは、図-7 に示されたデータの中で半日周期的な特徴の強い 14 日 13 時から 15 日 1 時までの変動を取り出し、仮想データを用いた時と同様の手法で河口地形の推定を行った。計算結果を図-8 に示す。

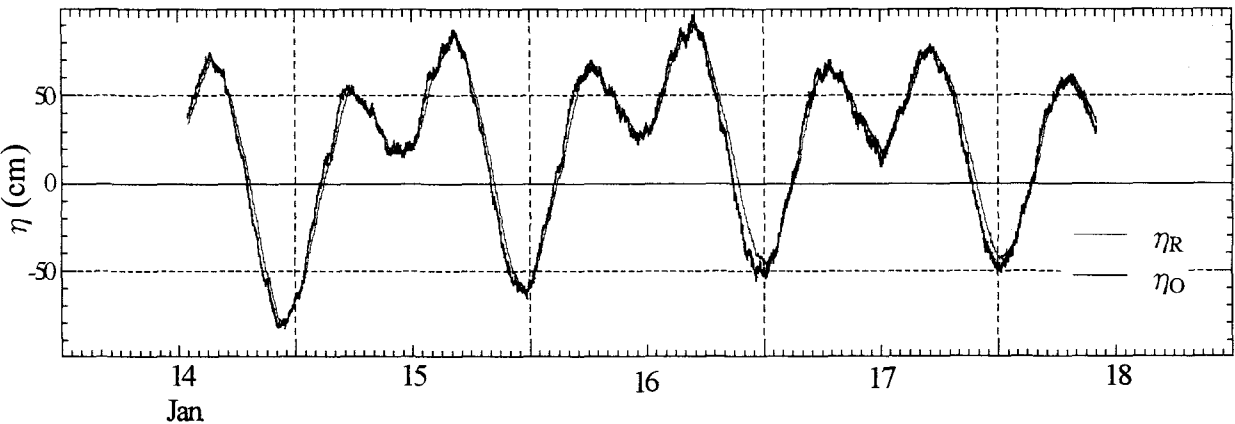


図-7 観測水位

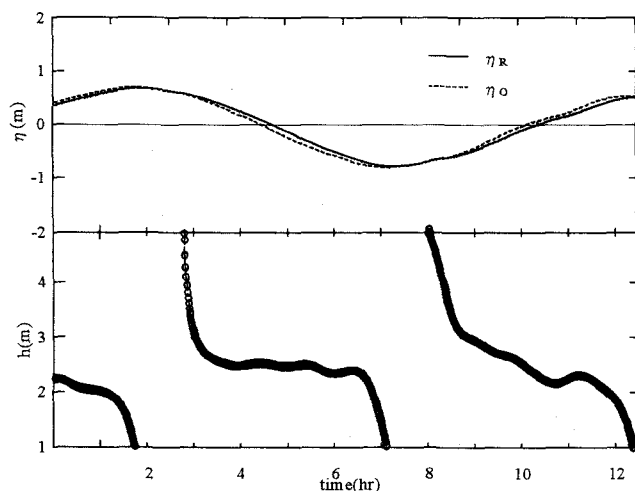


図-8 名取川河口における実測値を使用した
河口水深推定結果

図-7に見られるように、名取川河口で観測された水位データにはノイズが含まれており、特に潮位データにそれが著しい。この実測データをそのまま用いて河口水深の計算を行ったところ、推定された水深は振動してしまった。そこで、測定された水位データにスムージングをかけてノイズを取り除いた。図-8上段の水位波形はこのようにして得られた平滑化したものを示している。

図-8下段は推定結果を示す。先の仮想データによる計算と同様に、水位差が小さい時刻の計算結果は不自然な値を示している。ただし、それ以外の時間で有意な水面差が認められる時間においてはほぼ一定値に近い結果が得られている。一方、地形測量から得られた結果は3.1mである。特に、導流堤区間において測定されたデータは400mの区間で5つのデータが存在するがその中でも最も浅い水深は2.77mであり、この結果は図-8に示した推定値の平均値2.53mと比較的近いものとなっている。

前述のように、本研究で用いた推定法の精度は沖側と河口の水位差の勾配に依存している。すなわち、水位差が微少な場合は推定精度が悪くなる。そのため、用いる水位データの精度が重要となってくる。今回、名取川のケースにはmm単位で1分間隔での水位観測が適当であるという結論を得た。他の河川においても同様な検討により、最適なデータ取得の精度・時間間隔について検討を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では名取川河口において一次元モデルを用いることによって、仮想河口水位データおよび潮位データから河口地形データを推定する方法を検討した。その結果、本研究で用いた一次元モデルを用いることにより、水位データおよび潮位データから河口地形情報（河口水深）を求めることが可能であることが分かった。また、実河川に対して、実測データを使用したところ最も浅い河口水深を表現できており、今後の河川計画等に対して有効であると考えられる。今後は、他の実河川に対して検討し、水位情報から河口地形情報を有効的に取り出す手法を確立していくことが必要である。

謝辞：本研究で使用した現地データの取得に当たり協力を頂いた東北大学大学院工学研究科山路弘人技官、実測に際して様々な便宜を図って頂いた国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所に深く感謝いたします。最後に、本研究に対して日本学術振興会科学研究費の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 渡辺一也・山路弘人・田中 仁：名取川河口水位変動の詳細計測，河川技術論文集，No.8，pp.401-406，2002.
- 2) Keulegan, G.H.: *Tidal Flow in Entrances*, U.S. Army Corps of Engineers, Committee on Tidal Hydraulics, Tech. Bull. No.14, 1967.
- 3) 渡辺一也・田中 仁・槻山敏昭：名取川における河口処理と地形変化，海岸工学論文集，第49巻，pp.1361-1365，2002.
- 4) O'Brien, M.P. and Dean, R.G.: *Hydraulics and sedimentary stability of coastal inlets*, *Proceedings of 13th International Conference on Coastal Engineering*, pp.761-780, 1972.
- 5) 山路弘人・渡辺一也・田中 仁：汎用品を用いたメモリ式水位計の試作と応用，土木学会東北支部技術研究発表会概要集，pp.260-261，2002.

(2003. 4. 11受付)