

尻別川河口部における wave set-up 高さの 定量的評価に関する研究

田 中 仁*・李 炫錫**・古 路 一 哉***

本研究では顕著な wave set-up が見られた一級河川・尻別川を対象として、河口部の斜め写真から読み取った詳細な地形情報と河口水位観測データを用いて、河口部における wave set-up 高さの定量的評価を行った。その結果、尻別川においては wave set-up による水位上昇量は中規模の洪水によるそれに匹敵するものであることが分かった。また、一次元解析手法により、wave set-up 高さを波浪諸元の関数として定式化した。この方法により得られた式は、別途行われた室内水理実験と比較的近い傾向を示すものであった。

1. はじめに

河口出発水位は河道計画においてきわめて重要な水理量である。通常は、潮汐および高潮を対象にある生起確率の水位を定めることが多い。この中には一部 wave set-up の効果も含まれているものと考えられるが、より直接的な形で考慮されていない。wave set-up 高さは沖波波高の 2 割程度に達することが知られており、波浪条件によっては 1 m 前後にも及ぶ。その大きさは潮汐・高潮による水位上昇に比肩するものであるにもかかわらず、ほとんど調査がなされていない。このような背景から、山本 (1978) は実験的検討を行っている。また、著者の一人は 3 つの河川における実測値をもとに、波高と水位上昇量との関係などについて検討を行っている (田中ら, 1998)。この研究によれば、河川に応じて wave set-up による水位上昇が顕著に見られる河川とそうでない河川とが見られた。また、Hanslow and Nielsen (1992) の研究によれば、二つの導流堤を有するオーストラリア・Brunswick 川においては、近隣の海浜において顕著な wave set-up が観測されるにもかかわらず、同河口内ではそれがほとんど見られないとの報告がある。このように、河口部の wave set-up の発生の有無について、統一的な知見を得るには至っていない。よって、さらに多くの河川を対象とした検討を行い、より多くの事例のもとに定量的評価を進める必要がある。

そこで、本研究では一級河川・尻別川を対象として河口水位上昇に関する研究を実施した。まず、河口水位観測データに顕著な wave set-up が見られる事例を抽出した。また、実測水位から河口での wave set-up 高さを定量的に評価する手法を提案し、さらに、波浪諸元と wave set-up との関連を考察した。wave set-up の有無、大小は河口地形と密接に結びついていると考えられるが、このような検討を行うに足る地形データが一般には十分でない。本研究で対象とした尻別川では近隣の山頂からの 1

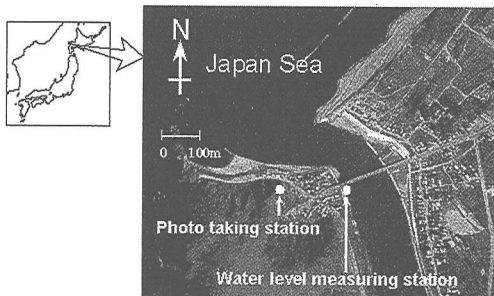
週間毎の斜め写真が 21 年間にわたり蓄積されており、詳細な地形情報が得られている点に特徴がある (田中・李, 2002)。

2. 研究対象河口

研究対象は、北海道西部で日本海に注ぐ尻別川であり、流域面積 1,640 km²、幹川流路延長 126 km の一級河川である。その河口地形の概要を写真—1 に示す。1991 年から 1998 年まで取得された 1 時間間隔の河口水位と潮位の差をとることにより、河口水位の上昇量を求めた。ここで、河口水位とは写真—1 の水位観測点での値であり、また、潮位としては瀬棚港における観測値を用いた。さらに、河川流量 (河口より 14 km 地点の名駒観測所)・波浪データ (瀬棚港沖 3.6 km 地点) を入手し、水位上昇を洪水起源・波浪起源のものに分類した。また、河口近くの山頂から 1 週間毎に 21 年間にわたり撮影された斜め写真をもとに河口砂州の長さ・河口幅を求め、後述の一次元解析に使用した。

また、一次元解析から得られた水位上昇量と比較する目的で、別途室内実験も実施した。

なお、尻別川河口においては 1999 年に右岸河口導流堤が完成している (北海道開発局小樽開発建設部, 2000) が、ここでは河口処理前の水位データに関する解析を実施した。導流堤完成後には、本研究で得られた水位上昇と異なる特性を示すように変化していることが確認されている (田中・李・古路, 2002)。



写真—1 尻別川河口地形

* 正 会 員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

** 学生会員 工修 東北大学大学院博士後期課程 工学研究科土木工学専攻

*** 正 会 員 国土交通省北海道開発局小樽開発建設部課長補佐

3. 現地資料の解析結果と考察

3.1 河口内水位上昇特性

図一(a)は1996年12月に観測された典型的な wave set-up の例を示したものである。ここで、水位 η の図中に示したもののうち、添え字 R, T はそれぞれ河口内水位、潮位を表している。波高 H_0 の変化に連動して、水位上昇量 ($\eta_R - \eta_T$) がほぼ同じ波形で増減していることが分かる。一方、この間の河川流量 Q は一定であり、したがって、この水位変動は洪水によるものではないと結論づけられる。1991年2月に観測された図一(b)においても同様な変動が見られる。

図二(a), (b) はそれぞれ1995年および1996年を対象として、一日毎の最大水位上昇量と、その時刻の河川流量、波高の関係をプロットしたものである。いずれの図においても、水位差が大きい値を有する黒丸は右下あるいは左上に位置している。図中の黒丸に付した数字は水位上昇高さを表しており、波高7m程度の波浪により流量900 m³/sの洪水に匹敵する水位上昇が見られることが分かる。このように、wave set-up による水位上昇量は中規模の洪水によるそれに匹敵するものである。

図一3は、同時刻の河口水位と潮位の差と、沖波波高と

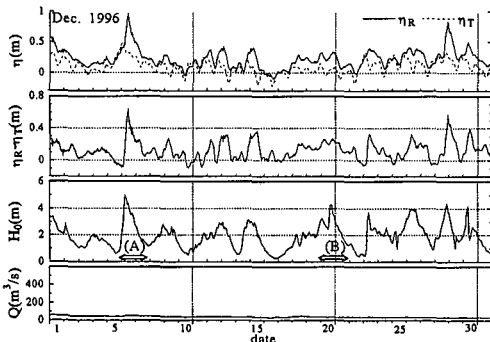
の関係を一時間毎に示したものである。図一3(a)は図一1(a)の期間(A)に対応している。この時、反時計回りループが特徴的であり、これ以外の事例でも多く観察された。これは、期間(A)の様な急激な波高の増加に対して河口水位がすぐには応答せず、位相のずれを持つことを示す。同河口は冬期に狭窄し(写真一2参照)、また、河床掘削・河道拡幅により $1.92 \times 10^6 \text{ m}^2$ という大きな感潮面積を有し、このために、海水の流入による水位上昇に時間の遅れが生じる。

一方、図一3(b) (図一1(a)の期間(B)に対応)ではほぼ線形関係にある。この様に緩慢な波高変化では、準定常的な水位応答が見られる。ただし、この様なケースは本研究で対象とした期間においてまれであった。

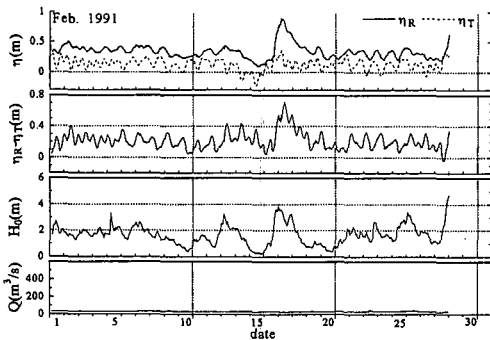
3.2 一次元解析を用いた水位上昇量の定式化

前節に示したように、河口内水位の潮汐変動に対する応答は位相の遅れを伴うものである。このため、同時刻の河口内水位と潮位の差がそのまま wave set-up 高になる訳ではない。そこで、ここでは以下に示す一次元解析を用いてその評価を試みた。

河口内水位を計算する基礎式として、tidal inlet の解析に良く使われる一次元式を用いる(例えば、Mehta and Özsoy, 1978; 田中, 1995)。

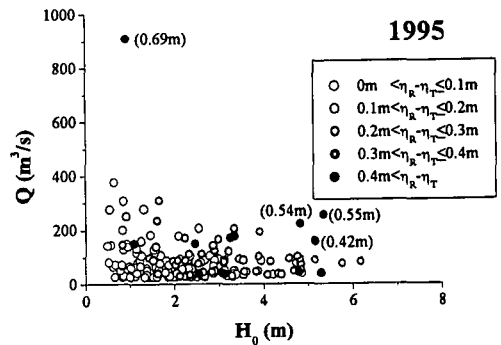


(a) 1996年12月

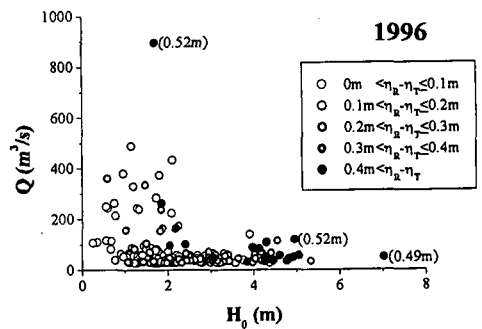


(b) 1991年2月

図一 河口部の水位、潮位、波高、流量の変化

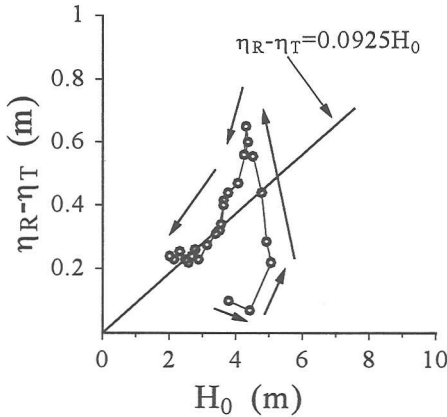


(a) 1995年

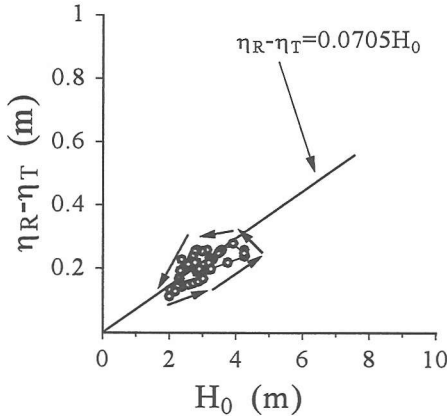


(b) 1996年

図二 水位上昇量と流量、波高との関係



(a) 1996年12月6日4時～12月7日5時



(b) 1996年12月19日17時～12月21日11時

図-3 水位上昇量と波高との関係

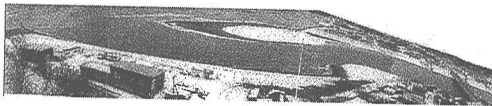


写真-2 冬季の尻別川河口 (1996年12月10日)

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \eta_R}{dt^2} + \left\{ \left(\frac{K_{en} + K_{ex}}{2L_c} + \frac{g\eta^2}{R_c^{4/3}} \right) \frac{A_R}{A_c} \left| \frac{d\eta_R}{dt} - \frac{Q}{A_R} \right| \right. \\ \left. - \frac{B}{A_c} \frac{d\eta_R}{dt} \right\} \left(\frac{d\eta_R}{dt} - \frac{Q}{A_R} \right) \\ + \frac{gA_c}{L_c A_R} \{ \eta_R - (\eta_T + \Delta\eta) \} = 0 \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta\eta$: wave set-up 高さ、 L_c, R_c, A_c, B : 海と河川を結ぶ水路の長さ、径深、断面積、河口幅、 g : 重力加速度、 t : 時間、 K_{en}, K_{ex} : 入口、出口の損失係数、 n : マニングの粗度係数、 A_R : 感潮面積である。

各種損失係数は、 $K_{en}=0.5$ 、 $K_{ex}=1.0$ とし、マニングの粗度係数は 0.026 とした。尻別川の感潮面積は前述のとおりである。河口幅 B 、と海と河川を結ぶ水路の長さ

L_c は、表-1 に示す 4 つのケースとほぼ同時刻に撮影された斜め写真から読み取った値を平均して、それぞれ 27 m と 98 m とした。断面積 A_c 、径深 R_c の評価にあたっては、河口断面を放物型と仮定し、田中 (1995) の評価法を用いた。また、式 (1) の計算にはルンゲ・クッター法を用いた。

ここで、海浜における wave set-up 高さに関する過去の研究例 (例えば、合田, 1975) を参考に、次式の関係を仮定する。

$$\frac{\Delta\eta}{H_0} = \alpha \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^\beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、海浜における wave set-up に関する既往の研究を参考に α, β の変域を想定し、その間を一樣な刻みで α, β を変化させ、そのすべての組み合わせに対して式 (1) から河口水位 η_R を計算する。次に、これにより得られる河口内水位の計算値 η_{Rcal} と実測水位 η_{Rmeas} とを比較した誤差 $Error$ を次式により計算して、これを最小化する α, β を得る。

$$Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\eta_{Rmeas} - \eta_{Rcal}| \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 N : 計算期間における水位データ総数である。

表-1 計算ケースと計算結果

Case	期 間	計算結果	
		α	β
Case 1	91年2月12日 ～91年2月19日 (8日間)	0.0080	-0.80
Case 2	91年12月8日 ～91年12月11日 (4日間)	0.0040	-0.96
Case 3	93年3月17日 ～93年3月20日 (4日間)	0.0060	-0.84
Case 4	96年12月18日 ～96年12月21日 (4日間)	0.022	-0.36

以上の計算を、表-1 に示す 4 つのケースに適用した。ここで、Case 4 は、図-3(b) に示した時間帯を含んでいる。

図-4 は α, β を変化させた時に得られる誤差のコンターを表した例である。最小の誤差は 6.4 cm 程度となり、図に示す丸印の位置で α, β の最適値が得られていることが分かる。

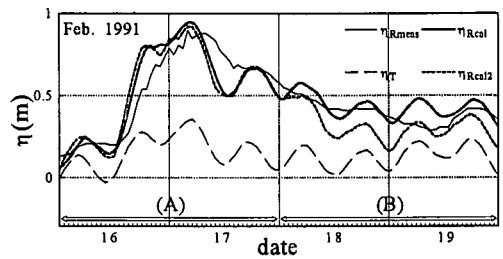
表-1 にすべてのケースについて得られた係数値を示す。また、図-5 に上記の計算により得られた式 (2) の線を示した。各ケースで得られる係数には幾分差違があるが、図-5 に見られるように実質的にはその差は小さいと言える。なお、図中の点は実験値であり、これについては後述する。

図-6 は表-1 の Case 1 と Case 4 のについて河口水位の計算値 η_{Rcal} と実測値を比較したものである。図中に

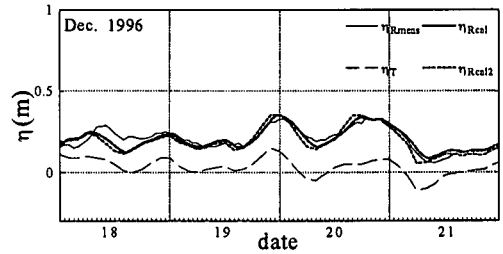
は潮位変動も併せて示した。さらに、図-3に示した単純な線型回帰式による水位上昇分を wave set-up として潮位に足し合わせて求めた水位 η_{Rcal2} も示した。図-6(a)の期間 (A) は wave set-up による水位上昇が顕著である。この間、最大で波高 4 m 程度の波浪により 60 cm 程度の水位上昇が見られる。この期間、二つの計算値に大きな差は見られない。一方、図-6(a)の期間 (B) では水位上昇量が減少する時期であり、単純な線形回帰では過小評価になっている。これに対して、一次元解析による計算値は、潮位変動による凹凸が実測値に比べ顕著ではあるものの、全体的により良好な計算値を与えている。

3.3 水理実験との比較

以上に示した現地での観測結果を再現するために、水理実験を行った。実験は図-7に示す二次元造波水路で行われた。水路は全長 16 m、幅 0.8 m、高さ 0.6 m である。下流端に造波機を取り付けた。右端は河口部を模擬した地形となっており、この間に 1/20 勾配の斜面を設置した。河口部は 20 cm の一定幅の水路となっており、河口部には導流堤を設けることにより、流路横断方向に一



(a) Case 1



(b) Case 4

図-6 計算と実測の河口水位比較

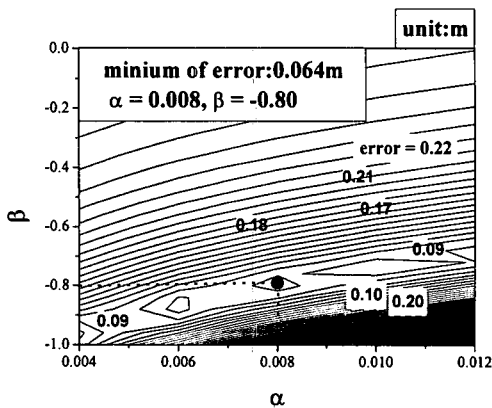


図-4 誤差のコンター図 (Case 1)

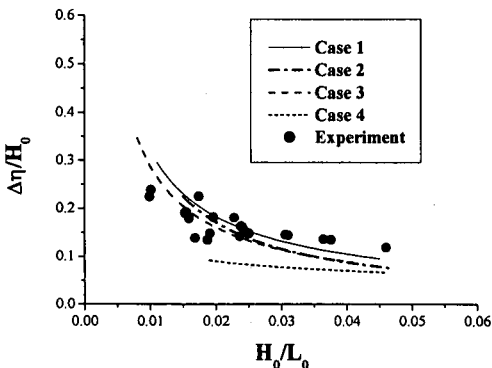


図-5 wave set-up 高さ と 波形勾配 と の 関係

様な水位を保つようにした。

平均水面の測定にはマンメータを用い、河道内では図-7に示す場所で測定を行い、さらにそれ以外の数点でも測定した。また、波高については沖側の入射条件を図-7の測点で測定し、さらに波高計を台車に取り付けて岸側に移動させ、岸沖方向の波高分布を調べた。

なお、本実験では河川流量をゼロとした実験のみを行っている。静水状態から造波を開始すると、河口内への流れが発生し、ある時間を経過した後は水位が安定し、定常状態にいたる。本研究ではこのような定常状態での wave set-up 高さに関する検討を行っている。

実験は、波高、周期、河口水深などを変化させて合計 22 ケースの条件下で行った。これらは冬期の尻別川河口に襲撃する最大波を想定し、そのほぼ 1/100 のスケールの条件とした。

図-8は、Case 1 ($H_0=8.4$ cm, $H_0/L_0=0.024$, h_r (河口水深)=3.6 cm)における岸沖方向の波高分布、平均水位分布を水路縦断形状とともに示したものである。

平均水位については、Bowen et al. (1968)の実験結果と同様に、碎波前の wave set-down と碎波後の wave set-up を認めることが出来る。また河道内では波高がほぼ一定であり、これに伴い平均水位も一定値を保っていることが分かる。河口部の存在しない一様勾配海浜においては、汀線位置まで set-up 高さが増加するが、河口部においては set-up 高さが河口内で頭打ちとなり、一般に河口内での set-up 高さは一様勾配海浜でのそれに比べて低いことが理解される。

図-5の点は、実験データについて無次元 wave set-up

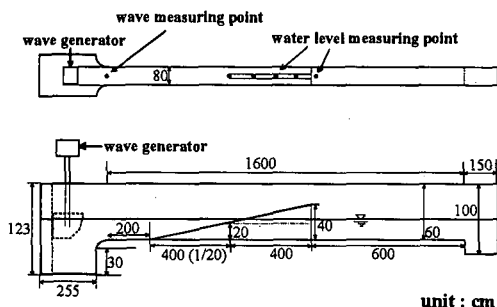


図-7 実験装置

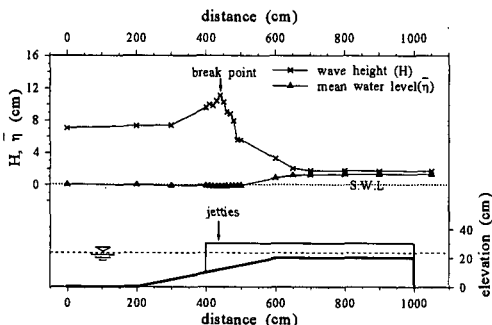


図-8 波高と平均水位の岸沖分布

高さと波形勾配 H_0/L_0 との関係を見たものである。図より、河口内の wave set-up 高さは波形勾配への依存性を示していることが分かる。この結果は、前述した一次元解析の結果を支持するものである。

4. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 尻別川河口において波による水位上昇が認められた。研究対象期間において見られた最大の水位上昇量

は中規模の洪水時のそれに匹敵するものである。

(2) 一次元解析を用いた河口部での wave set-up 高さの定量的評価手法により、無次元 wave set-up 高さを波形勾配の関数として定式化することが出来た。

(3) 現地資料に一次元モデルを当てはめることにより得られた wave set-up 高さに関する式は、水理実験の結果と良い一致を示した。

謝辞：本研究は土木学会水理委員会・河川懇談会による共同研究として実施されたものである。ここに記して、関係各位に深く謝意を表する。

参考文献

- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106.
- 田中 仁 (1995): 七北田川において観測された中小河川特有の河口現象, 土木学会論文集, 第 509 号/II-30, pp. 169-181.
- 田中 仁・長林久夫・山内健二 (1998): 河口感潮域における wave set-up 高さに関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 436-440.
- 田中 仁・李 炫錫 (2002): 尻別川河口における砂州と水位の変動特性, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 965-970.
- 田中 仁・李 炫錫・古路一哉 (2002): 尻別川河口導流堤建設による砂州地形・河口水位変動特性の変化, 海洋開発論文集, 第 18 巻, pp. 461-466.
- 北海道開発局小樽開発建設部 (2000): 平成 12 年度尻別川河口域の水理特性に関する研究, 234 p.
- 山本晃一 (1978): 河口処理論 (I) 一主に河口砂州を持つ河川の場合一, 土木研究所資料, 第 1394 号, 223 pp.
- Bowen, A. J., Inman, D. L., and Simmons, V. P. (1968): Wave 'set-down' and set-up, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 73 pp. 2569-2577.
- Hanslow, D. J. and Nielsen, P. (1992): Wave setup on beaches and in river entrances, *Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering*, pp. 240-252.
- Mehta, A. J. and Özsoy, E. (1978): Inlet Hydraulics, in *Stability of Tidal Inlets—Theory and Engineering* (Bruun, P. ed.), Elsevier, pp. 83-161.