

日本海に面した河川感潮域における冬季高波浪時の wave set-upと入退潮量

Wave Set-up and Tidal Discharge due to Winter Storm Waves in River Mouths Facing the Sea of Japan

篠田栄輝¹・田中 仁²・名倉華子³・梅田 信⁴・佐々木幹夫⁵

Eiki YANATA, Hitoshi TANAKA, Hanako NAKURA, Makoto UMEDA and Mikio SASAKI

It has been already reported by Nguyen et al. (2008) that at the river entrances facing the Sea of Japan, frequent occurrence of water level rise caused by wave set-up can be observed in storm waves during winter. It is hence expected that saline water intrusion is generated into the tidal estuary due to wave set-up, resulting in more frequent and more severe impact to the estuarine environment. In the present study, the additional amount of the sea water discharge caused by wave set-up is estimated from measured water level variation at the Iwaki and Yoneshiro river mouths in the northern part of Japan. Furthermore, theoretical expression is proposed to estimate the additional amount of sea water discharge expressed in terms of the deep water wave height and an empirical coefficient proposed Nguyen et al. (2008).

1. はじめに

一様勾配海浜における wave set-up 高さに関しては、多くの研究者たちが報告を行っており、例えば合田 (1975) によると wave set-up 高さは斜面勾配が1/10の場合には沖波波高の1.5割から2.5割程度であり、1/100の場合には1割から1.7割まで達することが示されている。したがって、冬季に高波浪が高頻度で発生する日本海側では、碎波に伴う wave set-up の発生が太平洋側よりも顕著となる。また、山本 (1978) は実験室規模での検討を通して、河口における wave set-up は河川流量の影響などを受けるため、一様勾配海浜における機構とは異なることを明らかにしている。

一方、現地の河口部における wave set-up 高さに関しても、すでにいくつかの報告がなされている。田中ら (2002) は北海道尻別川を対象とし、尻別川河口部においては碎波による水位上昇が認められ、波高7m程度の波浪による水位上昇は中規模の洪水に匹敵することを確認している。また、Nguyenら (2008) は冬季の高波浪時における秋田県米代川と青森県岩木川に対しての報告を行っており、河口内の wave set-up 高さは米代川において波高の約9%、岩木川において約3%に及んでいることを示している。これらの知見から、冬季の高波浪による

wave set-up が日本海に面した河川の河口感潮域における入退潮量を増加させているものと考えられる。これは、冬季の高波浪が wave set-up により河口感潮域の塩分環境にインパクトを与え、生物環境を支配する要因のひとつであることを示唆している。しかしながら、これまでこのような認識はされておらず、冬季の高波浪による wave set-up に着目した入退潮量の増加メカニズムの十分な解明には至っていないのが現状である。

そこで、本研究では日本海に面する規模の異なる2河

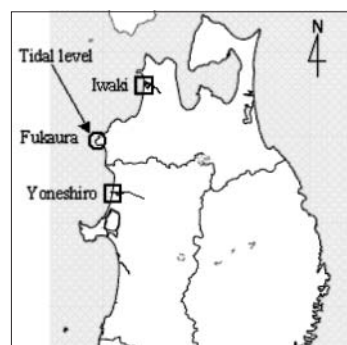


図-1 研究対象河川

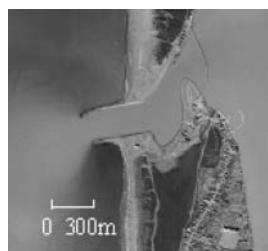


写真-1 岩木川河口部

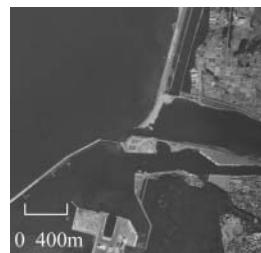


写真-2 米代川河口部

- | | |
|------------|-----------------------|
| 1 学生会員 | 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 |
| 2 フェロー 工博 | 東北大学教授大学院工学研究科土木工学専攻 |
| 3 学生会員 | 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 |
| 4 正会員 博(工) | 東北大学准教授大学院工学研究科土木工学専攻 |
| 5 正会員 工博 | 八戸工業大学教授工学部環境建設工学科 |

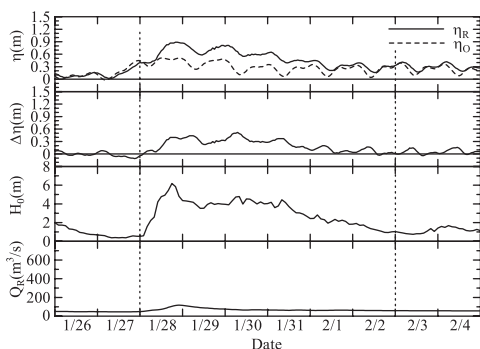


図-2 岩木川河口水位・潮位・水位上昇量・波高・河川流量

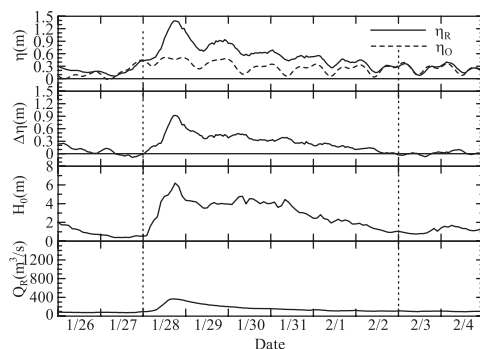


図-3 米代川河口水位・潮位・水位上昇量・波高・河川流量

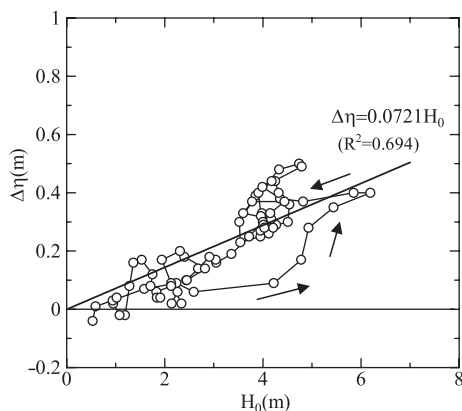


図-4 岩木川における河口水位上昇量と波高の関係

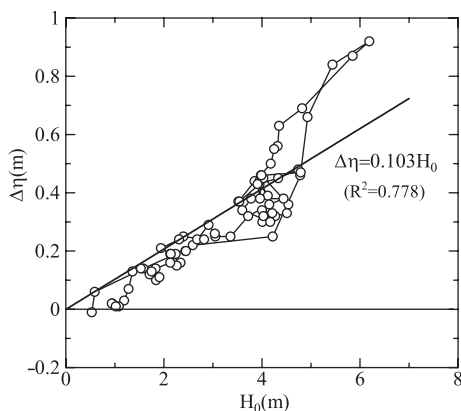


図-5 米代川における河口水位上昇量と波高の関係

川の河口部において、wave set-up高さを評価した。さらにその結果を踏まえ、潮汐による入退潮量に加えて wave set-up がもたらす感潮域内への流量を定量的に評価することを目的とした。

2. 研究対象

本研究の対象領域は、日本海に面する青森県岩木川と秋田県米代川である(図-1)。岩木川は、十三湖を経由して日本海に注ぐ、流域面積2,540km²、幹川流路延長102kmを有する一級河川である。面積18.06km²を有する十三湖は感潮域であり、水戸口と呼ばれる十三湖湖口には二本の導流堤が建設されている(写真-1)。一方、米代川は、流域面積4,100km²、幹川流路延長136kmを有する一級河川であり、河口部に砂州が発達しやすいなどの傾向を示す(写真-2)。

河口水位は、岩木川では十三湖内に位置する十三観測所の実測値を用い、米代川では向能代観測所の実測値を用いた。潮位と波高は、これらの観測所から最も近い青森県深浦港での実測潮位、有義波高をそれぞれ用いた。また河川流量は、岩木川では五所川原観測所のデータを用い、米代川では二ツ井観測所のデータを用いた。デー

タはすべて2003年のものを使用し、河口水位と実測潮位の差として表される水位上昇を洪水起源と波浪起源のものに分類した。その結果、洪水の影響を大きく受けておらず、主として波浪の影響を受けていると考えられる水位上昇を wave set-up によるものと判断し、特に高波浪が観測された2003年1月28日から2月2日までの6日間を研究対象期間として選定した。

なお、岩木川において波浪が小さい時期にも河口水位と潮位の間に一定の差が認められたため、波浪が小さい時期には両者が等しい値を示すものとして補正を行っている。

3. 実測データによる wave set-up 高さの定量評価

図-2は上段から順に、岩木川での河口水位 η_R と深浦港での実測潮位 η_0 、水位上昇量(両者の差、 $\Delta\eta = \eta_R - \eta_0$)、深浦港での波高 H_0 、河川流量 Q_R の変化を示している。1月28日において、水位上昇量の変化が波高の変化ほど急激ではなく、またピークも小さいことが分かる。一方、1月29日以降においては、波高の変化と水位上昇量の変化がほぼ同ような波形を示していることが分かる。また河川流量は常に小さいことから、この期間における水位

上昇が洪水の影響によるものではなく、波浪の影響によるものであることが確認できる。図-3は同様に、米代川における河口水位と深浦港での実測潮位、水位上昇量、深浦港での波高、河川流量の変化を示している。1月28日における水位上昇量が岩木川よりも大きく、水位上昇量と波高の波形がほぼ一致していることが分かる。

図-4は1時間毎の実測データから、岩木川における河口水位上昇量と波高の関係を調べたものである。図中の矢印は時間の経緯を表しており、反時計回りにループが描かれている。これは、岩木川が十三湖の存在により大きな感潮面積を有しているため、急激な波高の増減に対して河口水位がすぐには応答できず、位相にずれをもつことを示している。しかしながら、全体的にはほぼ線形関係が認められ、結果として波高の7.2%が水位上昇量に相当している。一方、図-5に示した米代川における河口水位上昇量と波高の関係にはループが確認できず、波浪の発生から水位上昇までに要する時間がほとんど存在しないことが分かる。その結果、岩木川より強い線形関係となり、波高の10.3%が水位上昇量に相当している。なお、線形関係式より上方にプロットされているデータは、河川流量による影響をやや受け、水位上昇したものと考えられる。

以上より、二河川における wave set-up 高さは次式のように評価されることが確認された。

$$\Delta\eta = a \cdot H_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

これらの結果は、河口水深が大きな河川では河口前面において碎波が生じにくいことから、wave set-up の発生特性も個々の河川地形状況により大きく異なるという多くの報告事例（Hanslowら、1992；田中ら、1998；成田ら、2002）と矛盾しないものである。

4. 数値シミュレーションによる入退潮量の算定

上記の wave set-up 高さの定量評価を踏まえ、以下ではこれがもたらす入退潮量を、数値シミュレーションを用いて算定することとする。

(1) 河口感潮域の水理モデル

河口水位を再現するモデルとして、Keulegan (1967) により示された tidal inlet の水理モデルを使用した (図-6)。基礎式は、式 (2) の運動の式、式 (3) の連続の式で示される。

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

$$A_R \frac{d\eta_R}{dt} = UA_C + Q_R \quad \dots\dots\dots (3)$$

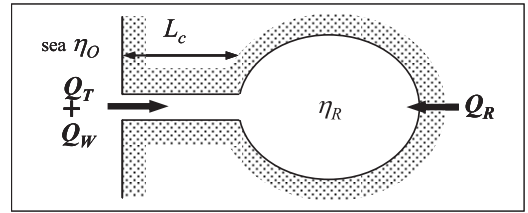


図-6 tidal inletの水理モデル

ここに、 K_{en} ：入り口損失係数、 K_{ex} ：出口損失係数、 n ：Manningの粗度係数、 L_c ：河口部狭水路路長、 R ：径深、 U ：河口部流速（沖側から河口内部への方向を正とする）、 A_R ：感潮面積、 A_C ：河口面積、 B ：水路幅、 h ：河口水深である。ここでは、河口断面形状を矩形であると仮定した。さらに、式 (2)、式 (3) から式 (4) を得る。

$$\eta_o - \eta_R = \frac{1}{2g} \frac{A_R^2}{A_C^2} (K_{en} + K_{ex} + \frac{2gn^2 L_c}{R^{4/3}}) \left| \frac{d\eta_R}{dt} - \frac{Q_R}{A_R} \right| \left(\frac{d\eta_R}{dt} - \frac{Q_R}{A_R} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) の河口水位を含む諸量以外がすべて既知であれば、これを解くことによって河口内水位 η_R が得られる。

ここで、式 (3) の UA_C は沖側からの河口内に侵入する流量を表すが、これは式 (5) に示すように潮汐による流量 Q_T と wave set-up による流量 Q_W の和と考えられる。

$$A_R \frac{d\eta_R}{dt} = Q_T + Q_W + Q_R \quad \dots\dots\dots (5)$$

そこで、沖側潮位の条件設定を変えることにより、潮汐による流量 Q_T と wave set-up による流量 Q_W をそれぞれ算定し、河川流量 Q_R との比較を行った。

(2) 入退潮量の算定法

まず波浪条件を考慮したとき、沖側潮位は実測潮位 η_{Omeas} に wave set-up 高さ (式 (1)) を加算する。

$$\eta_o = \eta_{Omeas} + aH_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) を式 (4) に代入することにより河口内水位を計算し、さらに計算した河口内水位を式 (5) に代入することにより潮汐流量と wave set-up による流量の和

表-1 両河川における計算パラメーター

記号	物理量	岩木川	米代川
A_R	感潮面積	$1.81 \times 10^7 \text{ (m}^2\text{)}$	$3.56 \times 10^6 \text{ (m}^2\text{)}$
L_c	河口部狭水路路長	620 (m)	200 (m)
B	水路幅	187 (m)	200 (m)
h	河口水深	3.35(m)	2.70 (m)
K_{en}	入り口損失係数	0.3	0.3
K_{ex}	出口損失係数	1.0	1.0
n	Manningの粗度係数	0.035	0.030

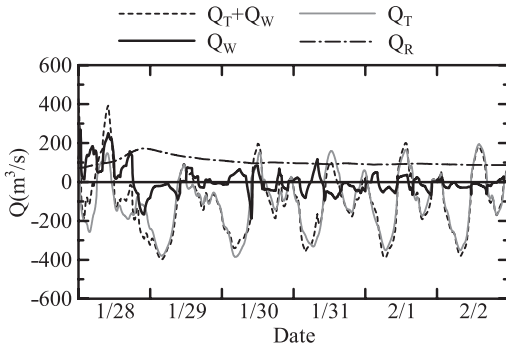


図-7 岩木川における入退潮量の算定結果

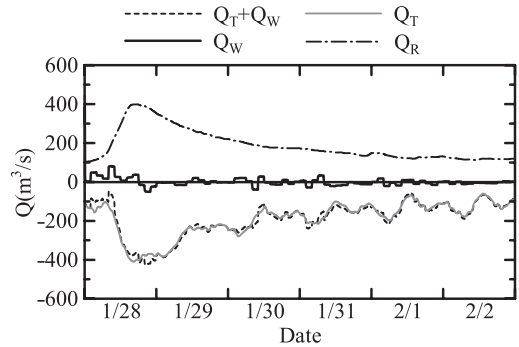


図-8 米代川における入退潮量の算定結果

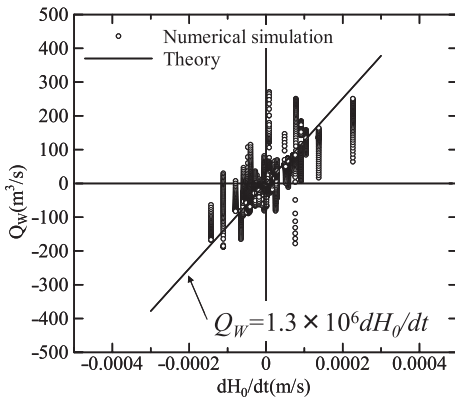


図-9 岩木川における wave set-up による流量と波高変化率

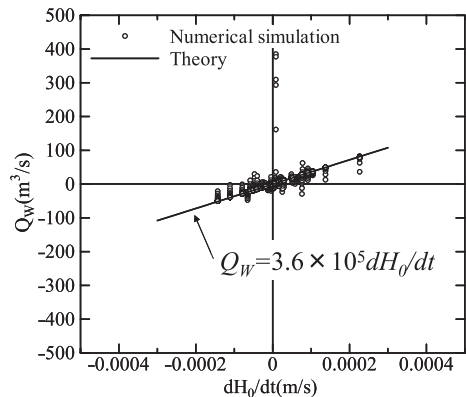


図-10 米代川における wave set-up による流量と波高変化率

($=Q_T + Q_W$) を得た。

一方、波浪条件を無視したとき、実測潮位をそのまま沖側潮位とし、式 (7) のように表した。

$$\eta_0 = \eta_{0meas} \quad \dots\dots\dots (7)$$

同様に、式 (4)、式 (5) を用いて潮汐流量を得た。

以上より、潮汐流量と wave set-up による流量の和から潮汐流量を差し引くことによって、wave set-up による流量を得た。

(3) 入退潮量の算定結果

表-1に、算定の際に使用したパラメーターを示す。図-7は、岩木川における各流量の算定結果である。波高の増加が顕著であった1月28日における wave set-up による流量が、潮汐流量、河川流量を上回るほどの大きさを有することが分かる。一方、図-8に示した米代川における算定結果から、米代川では、wave set-up による流量が潮汐流量と河川流量に比べ、この期間を通して常に小さいことが分かる。したがって、感潮域に流入する河川流量がそのまま、河口を通じて沖側へ流出していると言える。

(4) 理論的考察

このような2河川での相違を説明するため、wave set-

upによる流量について理論的考察を行った。まず、上述した河口感潮域の水理モデルにおいて、沖側潮位 η_0 と河口内水位 η_R に位相のずれがなく等しいものと仮定する。このとき、波浪条件を考慮し、wave set-upの効果を考えれば式 (6) から式 (5) は以下ようになる。

$$A_R \frac{d(\eta_{0meas} + aH_0)}{dt} = Q_T + Q_W + Q_R \quad \dots\dots\dots (8)$$

一方、波浪条件を無視し、wave set-upが仮想的に存在しないものとすれば、同様に式 (7) から式 (5) は以下のようになる。

$$A_R \frac{d\eta_{0meas}}{dt} = Q_T + Q_R \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上、式 (8) と式 (9) の差をとることによって式 (10) が得られる。

$$Q_W = a \cdot A_R \frac{dH_0}{dt} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、係数 a は河口水深の特性を反映し、水深が浅いほど大きな値となる。一方、 A_R は河床勾配、河川幅など感潮域の河川特性を反映し、この両者と波高の時間変化率が wave set-up による流量を支配していることが分かる。

表-2 他河川への適用結果

対象河川	A_R (m ²)	a	$a \cdot A_R$ (m ²)
七北田川	7.98×10^5	0.109	8.68×10^4
北上川	7.71×10^6	0.038	2.91×10^5
長面浦	1.40×10^6	0.123	1.72×10^5
岩木川	1.81×10^7	0.072	1.30×10^6
米代川	3.56×10^6	0.103	3.68×10^5

図-9、図-10は、算定された wave set-up による流量と波高の時間変化率の関係と、式 (10) で表される理論解の比較を行ったものである。算定値と理論解は両河川ともに良い一致を示しており、両河川における wave set-up による流量の相違は主に感潮面積の大小によるものであることが理解できる。

(5) 他河川との比較

上述した理論式を河口水深、感潮面積の異なる複数の河川にも適用し、wave set-up による流量の大小を比較した。比較対象としては、太平洋側に面する宮城県北上川河口、長面浦、七北田川河口を選定した。北上川は宮城県津山町登米市付近で新北上川と旧北上川に分派している。新北上川は石巻市で追波湾に注ぎ、旧北上川は石巻港に注ぐ、幹川流路延長249km、流域面積10,150km²を有する一級河川である。長面浦は、北上川河口近くの宮城県北東部に位置し、周囲8km、面積1.41km²の海跡湖であり、長さ1.7km、最大水深2mの狭水路により追波湾につながっている。七北田川は宮城県仙台市を流れる幹川流路延長45km、流域面積229km²を有する二級河川である。

表-2に、これら3つの対象領域と岩木川河口、米代川河口における理論式の適用結果を示す。なお、感潮面積と wave set-up 高さは、既存の研究（渡辺ら、2007；Nguyenら、2007）において本研究と同様に式 (1) を用いて確認されている値を使用した。

表-2より、 $a \cdot A_R$ の値は河川によって大きく異なり、特に十三湖を河口部に有する岩木川では、七北田川の約15倍もの大きさを持つことが分かる。

5. おわりに

本研究では、日本海に面する二河川を対象に、冬季の高波浪時における wave set-up 高さを入退潮量について検討を行った。その結果得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) wave set-up による水位上昇量は、岩木川では波高の7.2%、米代川では10.3%に相当する。
- (2) 入退潮量についての理論的考察により、wave set-up による流量が感潮面積、wave set-up 高さ、および波高の時間変化率の関数で表されることを示した。
- (3) 算定した wave set-up による流量は、岩木川では潮汐流量を上回るほど大きいものであったが、米代川では潮汐流量に比べて小さかった。この相違は主に感潮面積の大小によるものである。

謝辞：本研究を行うに当たり、国土交通省東北地方整備局青森河川国道事務所、同能代河川国道事務所から貴重な現地資料の提供を受けた。本研究の一部は河川生態学術研究・岩木川研究グループにおける活動の一環として行われた成果である。さらに、日本学術振興会科学研究費（基礎研究 (B)、No. 21360230）,ならびに日本大学学術フロンティア（代表：長林久夫教授）の補助を受けている。ここに記して、関係機関に対し深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- Nguyen Xuan Tinh・田中 仁・長林久夫（2007）：2006年秋冬季低気圧来襲時に観測された河口感潮域 wave set-up 高さ、海岸工学論文集、第54巻、pp.321-325。
- Nguyen Xuan Tinh・田中 仁・梅田 信・佐々木幹夫（2008）：日本海に面した河口感潮域における冬季の wave set-up 高さ、海岸工学論文集、第55巻、pp.366-370。
- 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・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・古路一哉（2002）：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、海岸工学論文集、第49巻、pp. 371-375。
- 成田 舞・石川忠晴・高橋 淳（2002）：青森県高瀬川の河口部変動特性について、海岸工学論文集、第49巻、pp.526-530。
- 山本晃一（1978）：河口処理論〔I〕－主に河口砂州を持つ河川の場合－、土木研究所資料、第1394号、pp.223。
- 渡辺一也・田中 仁（2007）：河口水位データに内包された河口地形情報の抽出手法とその評価、海岸工学論文集、第54巻、pp.366-370。
- 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。
- Keulegan, G. H.(1967): Tidal Flow in Entrances, U. S. Army Corps of Engineers, Committee on Tidal Hydraulics, Technical Bulletin, No.14, 102p.