

米代川における冬季 wave set-up と塩水遡上に関する研究

Wave Set-Up Height and Salinity Intrusion in Yoneshiro River Mouth in Winter

名倉華子¹・田中 仁²・梅田 信³

Hanako NAKURA, Hitoshi TANAKA and Makoto UMEDA

Water level rise and salinity intrusion in the mouth of the Yoneshiro River in Akita Prefecture, Japan is investigated. Geographical features of the river mouth are greatly dependent on seasonal variation of major physical forcings. Therefore, the characteristic of wave set-up is assumed to be different according to the season, and seasonal variation of wave set-up is quantified. It is found in winter, the water level rise by wave set-up becomes approximately 10% of the deep water wave height, whereas this ratio decreases rapidly in summer due to flushing of sediment around the river mouth caused by frequent occurrence of floods. In spite of such water level rise due to wave set-up in winter, salinity intrusion was not observed in the river because of the closure of the river entrance caused by severe storms.

1. はじめに

河口域は、淡水と海水との混合により複雑な環境を有し、これにより独特の生態系が発達している。また、河川水は、利水の面からも豊富な水資源として我々の生活に恩恵を与えており、重要な役割を果たしている。しかしながら、近年注目を集めている地球温暖化を始めとする異常気象は、海面上昇や沿岸災害だけでなく、波高の増加や濁水も引き起こすと予測されており、このような変化に伴い、河道への塩水侵入長が変化する事による塩害の発生が危惧されている。よって、塩水遡上現象について精度良く予測することは、河道計画の際の対策工法の適切な選択や、河口感潮域における生態系へのインパクトを予測する際に役立てるためにも急務となっている。

塩水侵入形態は地形条件や、河川流量、及び、潮汐といった様々な諸元に影響を受けるため、個々の河川に独自の特徴を有している。例えば潮汐について言えば、太平洋側の河川では、平均的な潮位差が1~2m程度であり、日本海側における0.2~0.4mと比較して非常に大きい。ため、潮汐や日潮不等の影響を大きく受け塩水侵入長が変化をする。一方、日本海側河川の河口部では、塩水侵入距離も短い。しかし、冬季の日本海側河川では大陸より吹く強風がもたらす高波浪により、wave set-up量が卓越し、時には洪水時のせき上げ水位に匹敵する水位上昇をもたらすことがある (Nguyenら, 2007, 2008; 築田ら, 2009)。また、日本海側に面する河川の地形的な特徴として、河口閉塞が挙げられる。すなわち、冬季の高波浪に起因する堆砂作用により河口が閉塞し、その後、春季や夏季の出水によりフラッシュされ、閉塞傾向が解消さ

れるという季節的な変動を繰り返している。これらは日本海側特有の性質であり塩水侵入現象にも大きな影響を与えていると推測される。

そこで、本研究では、日本海側に位置する米代川を対象として、まず、wave set-up 高さに関する検討を行い、定式化を行った。特に、季節に依存した wave set-up 発現特性について定量的な評価を行った。次に、現地観測と解析をおこなうことにより、現況の塩水侵入現象について把握した。また、地形条件を夏季と冬季、潮汐条件を日本海側と太平洋側を想定して与えた解析をおこない、比較をすることにより、冬季日本海側河川の塩水侵入現象について明らかにした。また、将来的な水需要の増大による河川流量の減少を仮想的に想定した解析を行うことにより予測をおこなった。

2. 研究対象

研究対象の米代川はその源を青森、岩手、秋田の3県境に位置する中岳に発し、岩手県を南流後、向きを西に変え、秋田県に入り北流し、大館市南部を貫流し、能代市において日本海に注ぐ、流域面積4,100km²、幹川流路延長136kmの一級河川である。河口地形の概要を図-1に示した。米代川河口部の地形は、冬季の季節風による高波浪に起因した砂州の発達、並びに、冬季に発達した砂州が、春季の融雪出水や夏季の洪水流により消失するという季節的な変化を有する (島谷ら, 1996)。なお、河口左岸には能代港防波堤が存在している。このため、右岸側からの沿岸漂砂が卓越し、これにより右岸側砂州の発達が顕著である。

3. Wave set-up 高さの定式化

(1) 使用データ

冬季日本海側に面した河川で卓越する水理量として、

1 正会員 修(工) 東京電力株式会社 信濃川総合制御所
2 フェロー 工博 東北大学教授 工学研究科土木工学専攻
3 正会員 博(工) 東北大学准教授 工学研究科土木工学専攻

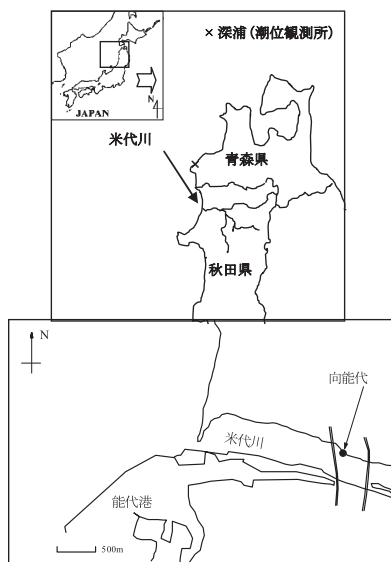


図-1 米代川河口の概要

砕波による水位上昇量であり波高の関数として表される wave set-up による水位上昇量が挙げられる。wave set-up による水位上昇量 $\Delta\eta$ は有義波 H_0 を用いて表現することができる (Nguyen ら, 2007, 2008)。

$$\Delta\eta = aH_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

吹き寄せと、吸い上げによる水位上昇量は、潮位観測所と河口水位観測所の両地点において等しいと仮定する。また、米代川河口部における水位変動に河川流量が影響を及ぼさない流量を $500\text{m}^3/\text{s}$ とし (Nakura ら, 2009), $500\text{m}^3/\text{s}$ 以下のデータを抽出することにより、河口水位 η_R と潮位 η_T から wave set-up 量を得る。

$$\Delta\eta = \eta_R - \eta_T \quad \dots\dots\dots(2)$$

式 (1) と式 (2) を用いて係数 a を求めることにより、wave set-up 量 $\Delta\eta$ を定式化する。

米代川における河口水位変動特性を解析するにあたり、2003年11月から2005年2月までの2年間のデータを用いた (図-2)。河口水位 η_R は、河口より2kmに位置する向能代観測所における実測値を用いる。実測潮位 η_T と沖波波高 H_0 には、米代川河口から最も近くに位置する青森県深浦港におけるデータを用いる。河川流量 Q は、米代川河口より約30km上流に位置する二ツ井観測所におけるデータを用いて解析をおこなった。

(2) 結果および考察

図-2には2004年における河口水位、潮位、水位上昇量、河川流量、沖波波高を示した。2004年1～2月の期間Aでは、水位上昇が波高の11%程度となっており、また、良い相関関係を示した。また、5～6月 (期間B) は水位上昇量、波高共に小さい値をとり、相関は見られなかった。また、11～12月 (期間C) においても1～2月と同様に、良い相関関係にあった。2002年～2005年において1～2月、5～6月、11～12月で同様の計算を行い、水位上昇量と波高の関係を求めた。5～6月では全ての年で相関が見られなかった。1～2月、11～12月では良い相関が得られたため、2003年11月～2005年2月において係数 a を算出した (図-3)。2005年1月～2月を除くすべての月で、11月～翌年の2月にかけて係数 a が増加している。以上より、11月～翌年の2月にかけて水深が浅くなり、閉塞傾向が強まっていると予想される (Nguyen ら, 2007)。2005年1月～2月にかけて、この傾向が見られなかった原因としては、地形の閉塞傾向が強まり、河口水位がほとんど海部の影響を受けなかったことが考えられる。また、各月の係数 a で2004年11月～2005年2月が前年の係数 a より小さい。つまり、2004年11月～2005年2月の各月が前年の各月と比較して、河口部の閉塞が解消していることが分かる。

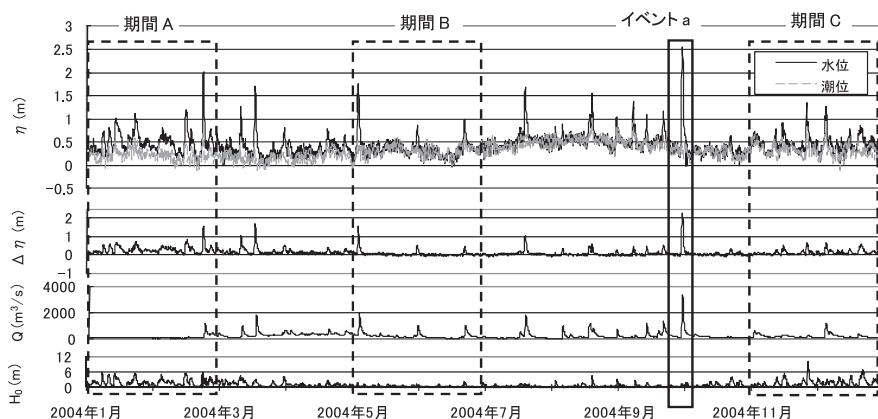


図-2 米代川河口水位、深浦潮位、河川流量、沖波波高の変化 (2004年)

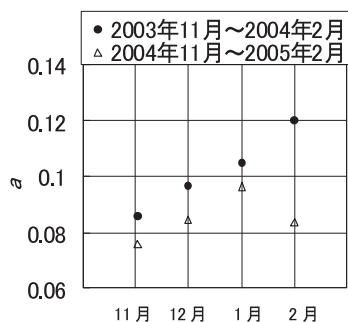
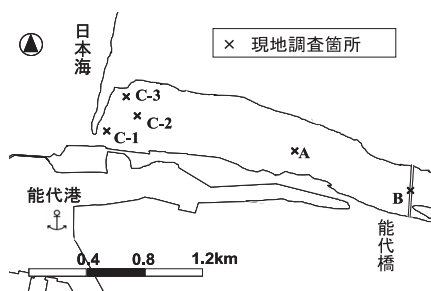
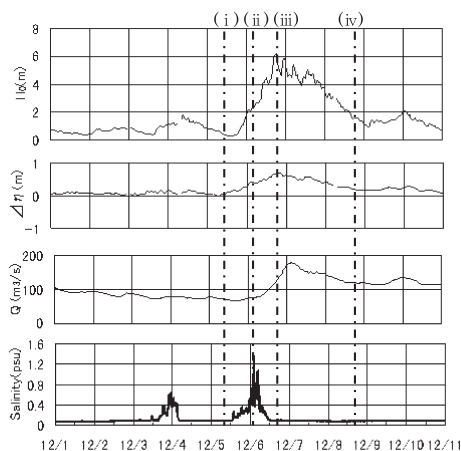
図-3 係数 a の変化

図-4 現地調査箇所

図-5 観測時水理諸元, 塩分濃度分布
(2009年12月1日~12月11日)

これは、イベント a の台風21号の際、二ツ井での警戒水位を超える流量 ($3370\text{m}^3/\text{s}$) の洪水が発生しており、この洪水流で河口部の砂州がフラッシュされたと考えられる。また、2005年の11~12月においても前年度より a が減少しているが、これは、2005年8月に発生した大規模洪水のため、砂州が回復しなかったためと考えられる。以上より、冬季の米代川における wave set-up 量は、波高 H_0 の約1割程度となることが分かった。

4. 塩水遡上に関する現地調査

(1) 現地観測の概要

河川の塩水遡上は河川流量の影響を大きく受けるため、夏季の渇水時になると、塩水遡上距離が伸びることが知られており、米代川において過去におこった塩害の被害もまた、夏季の異常渇水時に発生したものである。一方、前節において検討を行った wave set-up 量も塩水侵入長に大きな影響を与える可能性がある。また、冬季と夏季で河口地形が大きく異なることを前述した。このような季節的な違いは、日本海に面する河川に特有の特徴である。そこで、冬季と夏季における水理量、地形条件の違いが塩水遡上形態、遡上距離にどのような変化をもたらすのかを把握することを目的に現地調査をおこなった。

(2) 長期間定点塩分観測

2009年11月17日から12月24日まで図-4のA点において河床より0.5mの地点で塩分計を設置し、長期間定点観測をおこなった。観測期間の各水理諸元と塩分の観測結果を図-5に示す。実施した定点観測では、観測期間の塩分濃度の最大値が1.8psu程度であり、海水の塩分濃度と比較すると、非常に低い濃度であった。しかし、波高の増加とともに塩水が確認されるため、冬季の高波浪による水位上昇に起因した塩水侵入と考えられる。

(3) 多地点塩分観測

2008年10月18日に河口から2.0km上流にある能代橋(図-4)の橋から横断方向に20m間隔で計11箇所において塩分計の鉛直分布を観測した。また、2009年12月25日には河口から50から300mまでの区間で観測を行った。10月18日の観測時の水理諸元を図-6に示す。実測時の潮汐は大潮であり、河口より約30.0kmに位置する流量観測所二ツ井における流量は $50\text{m}^3/\text{s}$ 程度となっており、渇水流量 (約 $45\text{m}^3/\text{s}$) に近い流況であった。能代橋直下の滞筋部に位置するB点での観測結果を図-6に示す。水深2m程度で塩分躍層を確認することができる。また、塩分が観測された全ての地点で水面から2m程度のところに塩分躍層が形成されていた。12月25日には図-4に示した河口より50mから300mまでの3地点において塩分の鉛直分布を観測した。ただし、C-1からC-3のどの点においても塩分は認められなかった。

5. 数値シミュレーション

(1) 数値モデルの概要

流況解析モデルには、梅田・池上 (2007) による鉛直二次元モデルを用いた。運動方程式の近似はブシネスク近似を用いた。また、渦粘性係数の計算には $k-\epsilon$ モデルを用いている。

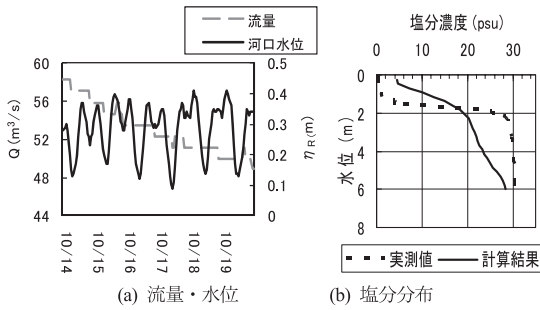


図-6 観測結果

(2) 解析条件

計算領域は河口から海側に5km, 上流に向かって10km地点までとした。水平格子間隔 $\Delta x=200\text{m}$, 鉛直格子間隔 $\Delta y=0.1\text{m}$ とし, 時間刻み $\Delta t=1\text{s}$ を用いた。全計算ケースを表-1に示す。Case 1-1は観測時に塩水侵入が見られた2008年10月18日を含む10月12日～10月22日, Case 1-2は, 2009年12月6日を含む12月1日～12月14日までとし, 河口から約30kmに位置する二ツ井観測所における実測値を上流端流量とした。また, 海域での流入量は向能代の河口水位の変動, 地形条件, 上流端流量を用いて連続式により求めた。Case 2のそれぞれの上流端流量は現況の平均流量程度の $120\text{m}^3/\text{s}$, 将来的な渇水を想定した $40\text{m}^3/\text{s}$ を表-1のように一定に与えた。また, 下流端水位として, 日本海側を想定した潮汐条件 (A) (式 (3)) と, 太平洋側の潮位を想定した潮位条件 (B) (式 (4)) を用いた。

$$\eta = 0.3 + 0.2 \times \sin(2\pi t / T) \quad (\text{m}) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$\eta = 0.3 + 1.0 \times \sin(2\pi t / T) \quad (\text{m}) \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここに, t : 時間, T : 潮汐周期である。また, 地形デー

タは平成19年12月21日に測量されたものであり, 閉塞傾向が強い地形となっている。一方, 夏季には砂州がフラッシュされ, 顕著な河口閉塞は存在しないと考えられる。そこで, 河口から0.2km地点の横断地形を挿入して夏地形とした。なお, 計算助走期間として3日間の計算を行った。また, 最初の干潮時刻を0時とした。

(3) 結果および考察

Case 1-1における塩分観測場所での塩分の鉛直分布を図-6 (b) に示す。計算結果よりも実測値では, 塩分の躍層がはっきりと見られる。Case 1-2における結果を図-7に示す。ここで, 図中の (i)～(iv) は図-5中の時刻と対応している。(a) は下流端水位として天文潮位を用いた結果 (wave set-upの影響無し) であり, (b) は河口水位を用いた結果 (wave set-upによる影響を含む) である。(c) は, 両者の差であり, wave set-upによる塩水侵入量の変化を示している。この結果により, 波高が小さい (i) では, (a), (b) でほとんど塩水侵入量に変化がないことがわかる。一方, (ii) から (iii) にかけての波高の急激な増加と共に, (b) では塩水侵入量が増加しており, wave set-upが冬季の塩水侵入に影響を及ぼしているといえる。図-8に示したCase 2-1とCase 2-2を比較すると, 河口の閉塞傾向を除去した地形条件を用いたCase 2-2で,

表-1 解析条件

	上流端流量	下流端水位	地形条件
Case 1-1	実測値	河口水位	冬地形
Case 1-2	実測値	河口水位または天文潮位	冬地形
Case 2-1	$120\text{m}^3/\text{s}$	潮位条件 (A)	冬地形
Case 2-2	$120\text{m}^3/\text{s}$	潮位条件 (A)	夏地形
Case 2-3	$120\text{m}^3/\text{s}$	潮位条件 (B)	夏地形
Case 2-4	$40\text{m}^3/\text{s}$	潮位条件 (A)	夏地形
Case 2-5	$40\text{m}^3/\text{s}$	潮位条件 (B)	夏地形

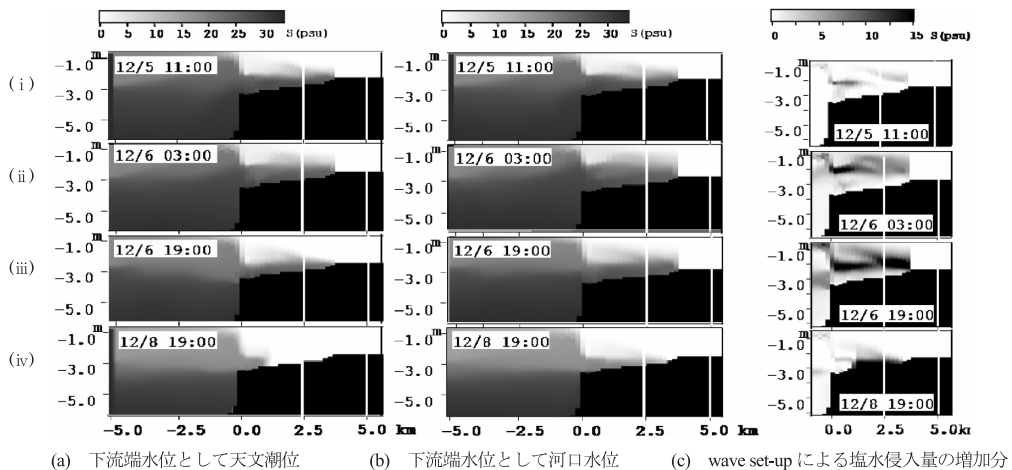


図-7 塩分の分布 (Case 1-2)

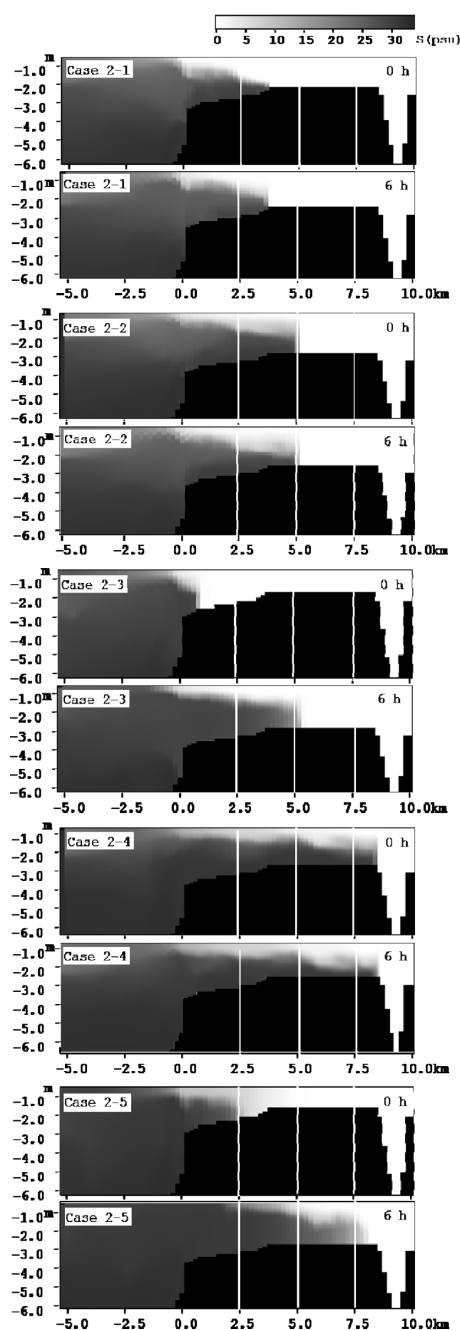


図-8 塩分分布 (Case 2)

塩水侵入長が1.5倍程度に伸延している。また、潮汐の条件として潮位差0.4mの日本海側河川の潮汐を想定して解析をおこなったところ、塩分の鉛直分布に幾分の差異はあるものの、塩水侵入長は大きく変化しないという結果となった。この結果より、日本海側の河川では、潮位差が小さいため、潮汐が塩水侵入長に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、太平洋側の潮汐を想定したCase

2-3では、干潮の0時に河口より0.8km付近まで後退した塩水が満潮の6時には5.6km付近まで侵入している様子が伺える。また、将来的な渇水を想定したCase 2-4では8.6km付近まで塩水が侵入してきている。しかし、潮汐変動の影響をほとんど受けないことが分かる。Case 2-5では、満潮時に塩水が上流まで遡上するが、河川流量が小さいため、Case 2-3の干潮時ほどは潮が押し戻されることはない。

6. おわりに

米代川では、冬季の暴浪のため波高が増大する。碎波による水位上昇量である、wave set-up量は波高の関数として表わされるため、河口での水位上昇量も卓越する。しかし、同時期の河口付近の地形は、冬季には500m程度ある川幅が50m程度となるほど閉塞する。そのため、河口部では、河川流量を流下させるために流速が速くなり、海域からの塩水の侵入が難しい条件となる。冬季の米代川で顕著な塩水侵入が見られなかったのはこのような機構によるものと考えられる。また、日本海側河川の潮汐は非常に小さく、太平洋側の河川のように潮汐による塩水侵入長の進退は発生しない。よって、夏季の河川流量が小さい条件下においては一度侵入した塩水楔が、河川流量が多くなるイベントが発生するまで、貧酸素水塊を形成しながら停滞している可能性がある。このような現象は生態系へインパクトとして重要な課題である。

謝辞：国土交通省東北地方整備局能代河川国道事務所から貴重な現地データの提供を受けた。また、日本学術振興会科学研究費（基盤研究（B）、No.21360230）の補助を受けた。ここに記して、深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 梅田 信・池上 迅 (2007)：ダム貯水池の水温成層に関する鉛直2次元数値解析，水工学論文集，第51巻，pp.1349-1354.
- 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.
- 島谷任克・笹本 誠・笠井太志・大場孝司・布施泰治・堺茂樹 (1997)：米代川の河口変動特性，海岸工学論文集，第44巻，pp.571-575.
- 築田栄輝・田中 仁・名倉華子・梅田 信・佐々木幹夫 (2009)：日本海に面した河口感潮域における冬季高波浪時のwave set-upと入退潮量，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. B2-65, No.1, pp.391-395.
- Nakura, H., Nguyen, X.T., Tanaka, H. and Umeda, M. (2009): Seasonal characteristics of wave setup height in the Yoneshiro River mouth, Japan, Proc. 3rd Int. Conf. Estuaries and Coasts, pp.257-264.