

河口二層流に与える風の影響

横尾 啓介*・吉田 静男**・荒川 範彦***

海水面の水位は気圧、潮汐、そしてとりわけ風の影響を強く受けて著しく変動する。このため河口部の水位は河川の流量だけでは決定せず、感潮域で H-Q 曲線を統計的に得たとしても、それに基づく予測流量には 100% を大幅に越す誤差が含まれる。また、風は時として異常なほど海水位を上昇させ河口域に水害をもたらすこともあり、それが水位に与える影響の把握は急務である。こうした観点から、本研究においては石狩川感潮域の詳細かつ長期にわたる実測結果を基に、海面水位と河川水位に及ぼす風の影響を定量的に明らかにすることを試みた。その結果、風が河道内 2 層流の成層構造に与える影響の実態と、その様な結果に至る力学的機構を明らかにすることができた。

1. はじめに

国内における河口二層流の研究は、1939 年に石狩川において国内初の塩水楔の観測を契機に開始され (福島, 1942)、以来、60 年を経過した。現在では広く知られているこの成層流の問題には数多くの河川や沿岸海洋の研究者が傾注し、得られた成果も少なくない (水理公式集, 1999)。しかし、振り返ってみると準定常流における塩水楔の形状を予測することはできるようになったものの、実河川の河口流は様々な影響を受けて非定常流であることがほとんどであり、従来の研究成果による恩恵はあまり大きいとは言いがたい。このような結果がもたらされた原因は、フィールド観測には多大な費用と時間を要したため、研究の大半が実現現象の把握よりも理論と室内実験に重点を置かざるを得なかったためと思われる。もちろん、河口流の観測が全く無かったわけではないが、何分自然現象を支配するファクターが多過ぎ、その結果から河口流の本質を説明し得る経験則を得ることはきわめて困難であった。

筆者らはこうした状況を打破するため、数年前に石狩川の全感潮域の流れを長期間にわたって把握できる水位観測装置の設置と 3 箇所 の 界面観測所の構築を行った。加えて、毎年渇水期には特定地点の塩分の 24 時間観測、様々な水理条件下のソナーによる塩水楔の河道縦断観測、多地点における表層塩分の連続自記記録、等、徹底した観測を数年に渡り実施してきた。その結果、河口二層流に与える流量、気圧、潮汐、風向、風速のそれぞれの影響が定量的に評価できるようになってきた (吉田ら, 1999, 2004; 横尾ら, 2003)。本論文はこの成果を基に、河口二層流にとりわけ顕著な影響を与える風に注目し、その影響を定量的に評価したものである。

2. 観測方法

本論文において考察の対象とした石狩川下流部の地形を図-1 に示す。石狩川は総延長 268 km で流域面積 14,330 km² を有し感潮区間は約 45 km である。また、年間約 7 割の期間にわたり海水が河口から遡上し、いわゆる、弱混合型の二層流を形成する。しかし、その成層構造は主として気象要因によって複雑化するため、その流れの実態を把握するには、全感潮域にわたる観測網の充実と、気象をはじめとするバックグラウンドデータの長期にわたる収集が欠かせない。実際に、本研究において取り扱う観測項目は極めて多く、上記感潮域の 12 地点におよぶ水位 (KP 44.5, 38.5, 35.0, 30.0, 26.6, 20.0, 15.0, 10.0, 4.5, 3.0, 1.6, 0.1) とこれに影響を与える流量、塩淡水境界面水位 (KP 26.6, 15.0, 4.5)、塩水楔縦断観測、6 地点にわたる水深 1 m における表層塩分 (KP 20.0, 14.0, 11.7, 9.0, 4.5, 3.0)、石狩湾西部に位置する海面水位 (小樽港)、大気圧 (KP 4.5)、風向・風速 (KP 26.6, 15.0, 4.5)、等が含まれている。

3. 観測結果と解析

(1) 風向、風速が河川水位に与える影響

まず、河川流量がほぼ一定の条件下で、河口の実測水

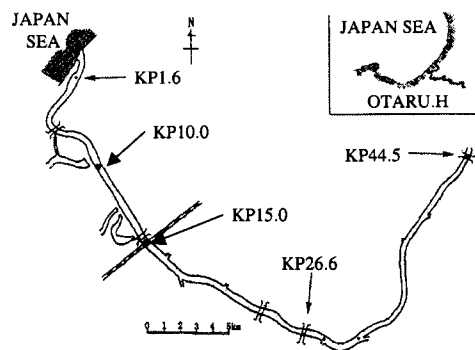


図-1 石狩川下流部地形

* 正会員 (株) 福田水文センター 水工部計画課
** 正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科
*** 北海道開発局石狩川開発建設部計画課

位から小樽港（この地点の平均海面水位は河口と同じ。吹き寄せによって河口水位が上昇してもここでの水位に変化はない）の実測潮位を差し引き、測定値に内包されている気圧と潮汐の影響を除去した。その理由は河口の海面水位と風向・風速の間の関係を得るためである。実際に KP 26.6 および KP 1.6 において様々な風向・風速と水位の関係を調べると図-2 を得る。なお同図には流れに大きな影響を与える特定の風向、すなわち、下流部河道の主流方向に一致する WNW~NW または ESE~SE 方向に属する例のみを掲載してある。同図の実線は両地点における近似曲線で風と水位変動との間の経験則を与える。なお、風速 U と水位 H_{wmax} についてはそれぞれの移動平均値の最大値を対応させた。また、横軸の正負はそれぞれ、風向 WNW~NW および ESE~SE に対応している。図-2 より、正の風向に対しては、 H_{wmax} は風速の 2 乗に比例して上昇することがわかる。たとえば、風速 15 m/s のもとでは KP 1.6 では 0.48 m、KP 26.6 では実に 0.60 m の水位上昇となっている。この上昇量は潮汐、気圧に起因する上昇量よりかなり大きな値となっている。また、負の風向に対しては、NW 風ほど顕著ではないものの、風速 15 m/s のもとでの水位上昇は KP 1.6 では -0.10 m、KP 26.6 では -0.30 m となっている。同様の手法で風と水位の関係を調べ、風速が 3 m/s 以下の無風に近い場合について整理すると図-3 を得る。同図の近似曲線は風の影響もない河川流量 Q と水位 H_m の間の関係を与えている。なお、この段階までに得た 2 つの経験則から感潮域の任意の地点で観測される純粋な水位と流量の関係を得るが、この点に関しては著者らの（横尾ら、2003）論文に述べられていることを付記しておく。

ところで、風が河川水位に影響を与える結果生じる極めて重要な現象が見出された。この現象は特異な様に見えて、実は、渇水期には発生し得る事が分かってきた。以下にその実例を挙げその特性を説明する。

2003 年 6 月から 7 月にかけての流量は、過去に例を見ないほど流量が小さかった。このため塩水遡上距離は既往最長の KP 29.5 に到達したが、その際 5 m/s~9 m/s の ESE~S 風が吹き続き河川の塩分値が極端に上昇した。図-4 は 7 月 5~10 日の期間に KP 3.0~KP 20.0 区間の 6 地点で水深 1 m に設置した表層塩分記録のうちの代表的な 3 地点の記録と、KP 15.0 における風向、風速の測定記録を並べたものである。同図より、表層塩分の極端な増加は、単に塩水楔の遡上距離が著しいために生じるものではなく、ESE~S の河道に沿う強風が継続的に吹き続けることによって生じるものであることが分かる。では如何にしてこのような現象が現れるのであろうか。その詳細は次節で考察するとして、ここでは後に明らかになる力学機構を先取りして上記現象を解説してみ

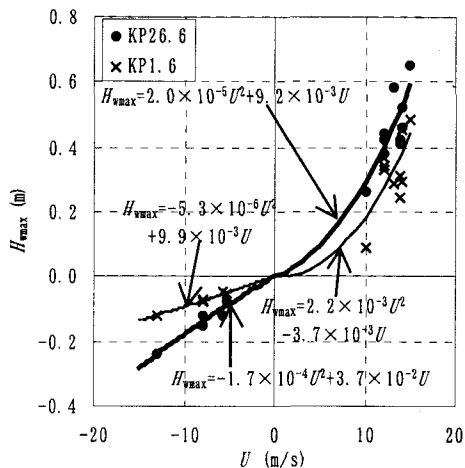


図-2 風向風速と水位上昇量の関係

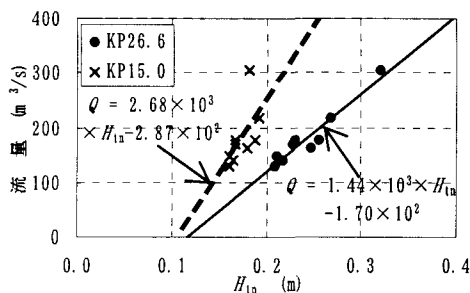


図-3 無風時における水位と流量の関係（潮汐と気圧の影響は除去されている）

る。

まず、河道地形を検討すると図-1 からわかるように KP 30.0 付近から急に ESE 方向に曲がり、それより下流では KP 5.0 付近まではほぼ直線的に伸びている。留意すべきは塩水楔の大半がこの直線河道に存在することである。この河道に ESE~S 風が吹き続ける場合の実測水面形状を調べると図-5 を得る。同図より、風速の増加に従って KP 5.0~KP 30.0 の表面水位が 0.15 m~0.20 m 低下し、局所的に陥没状態になっていることが分かる。この結果は風から受ける表面摩擦応力に基いている。全水深に比較してこの水位降下量は決して大きくなく、上層の流速増加もわずかであるが、それに伴う上層の圧力低下に呼応して上昇する二層界面の上昇量は後述するように著しく大きなものとなる。事実、上記期間には塩水楔先端部が水面下 1 m まで迫っていた。このような状況下での界面はもはや平坦ではなくなり図-6 に示されるような不安定波が発生し上層への塩分拡散が著しく促進される。一方、逆風が吹きつづける場合には、風の摩擦応力によって上層流速が減じ上層内圧力が増加する結果、界面は圧力バランスが達成されるまで降下し続ける。

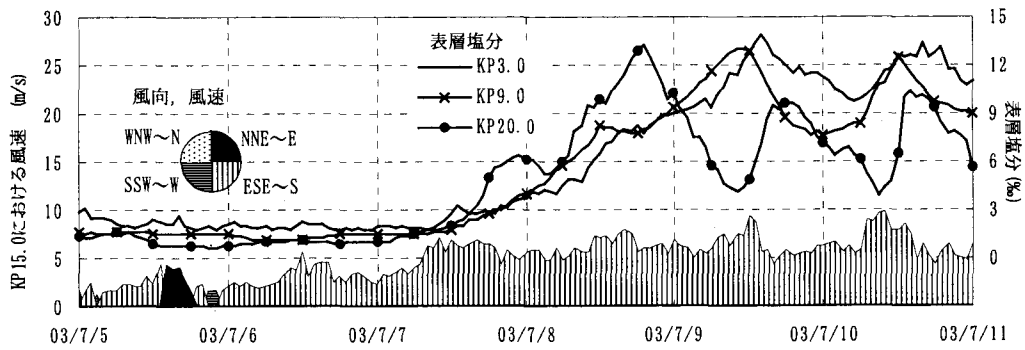


図-4 風と表層塩分の時系列

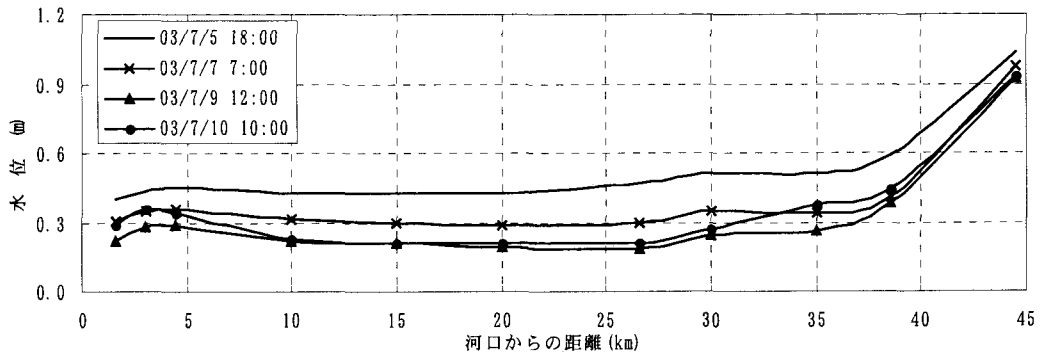


図-5 表面水位の縦断形状

なお、この場合の水位は吹き寄せによる上昇分を差し引いても水表面の降下が目立たない。この理由は河道部でも吹き寄せと同様の水位上昇を生じるためであると考えられる。

風が河口流に与える影響は時として極端な水位上昇をもたらす水害を引き起こすこともある。本節の終わりにその実例を紹介しておく。

北海道の冬季には低気圧が発達し、強風が発生する事が多いが、2003年12月26日に通過した低気圧は短時間の内にSE~SW~Nと変化する強風をもたらす、最大風速は20 m/sを記録した。この際、吹き寄せによる著しい海水面の上昇が発生した。その影響で支川においては河川の増水に寄らない冠水被害が発生した。従来も同様な強風が発生したと思われるが、なぜ今回だけ冠水被害を生じる程海水面が上昇したのか、未だ、原因が分かっていない。この異常な海面上昇はさらに既往の観測例には見られない上流部の水位上昇をもたらした。その水位上昇の伝播状況の記録を図-7に示す。この記録によればKP 44.5の感潮域上流端においてさえ、最大0.7 mの水位上昇があったことが分かる。今後、石狩湾地形も考慮に入れこの現象の発生メカニズムを解明する必要がある。

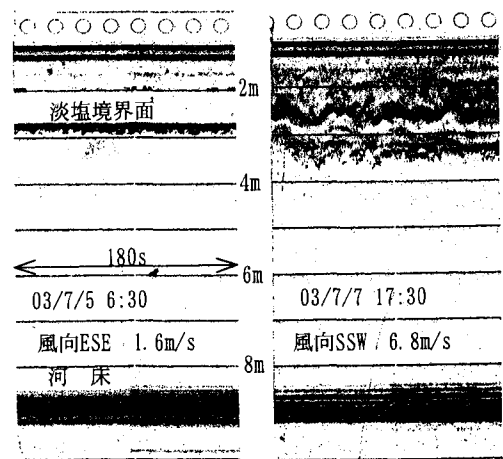


図-6 ソナーによる淡塩境界面観測 (KP 14.5)

(2) 風向、風速が塩水楔に与える影響

図-8は上述の洪水時2003年7月9日のソナーによる縦断観測結果である。図より上流ほど界面が高くなるという力学的に矛盾する結果が見出せる。これが先述の塩水楔先端部が上昇する現象である。この結果はESE~S風が持続的に吹き続けたことに起因している。このよ

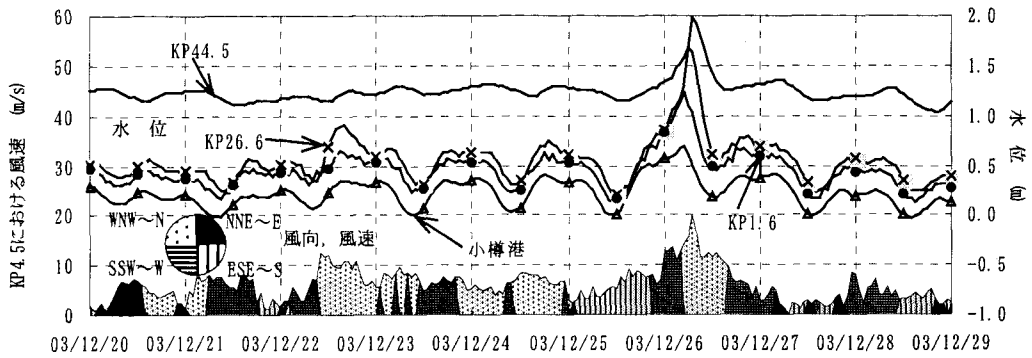


図-7 風と水位の時系列 (異常水位の観測例)

うに風の影響は水表面のみならず界面水位にも著しい影響を与える。

(3) 風向, 風速を考慮した二層流の数値計算

前節までに示した水表面と界面に現れる水位変動現象の力学的機構はすでに(1)節において述べたところであるが, 本節ではその証明となる数値計算結果を示す。紙面の関係で用いた層平均の方程式の説明に関しては筆者らの参考文献(Yoshidaら, 2000)に譲ることにする。計算結果は図-9に示す通りである。計算条件は図-8の結果と比較できるように, 流量は観測結果の $110 \text{ m}^3/\text{s}$ とし風については図-4に示される時間変動の移動平均値を採用した。また, 水表面における風による摩擦応力としては Munk の提案する数値を採用した(石原・本間, 1958)。加えて, 界面抵抗係数については無風時の界面形状を良く説明する値を採用した。なお, 界面抵抗係数は河口二層流を議論する上で一般性を有しており極めて重要なファクターであるから次節で別途述べる事にする。

図-9に示された計算結果によれば無風時の界面形状に比べ明らかに塩水楔が上流側に伸びており, しかも, 先端部が上昇する様子が見て取れ, やはり現実が生じた現象は風の摩擦応力によって生じたものであることが力学的にも立証できる。なお, 紙面の関係で省略したが逆風

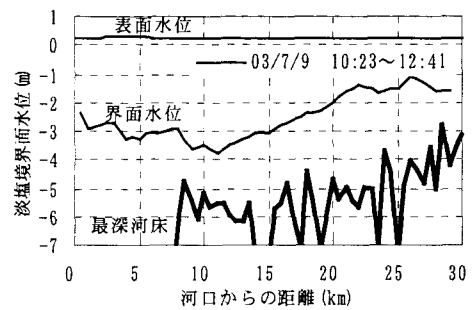


図-8 界面縦断観測結果

時には無風時よりかなり界面が降下した結果となることを付記しておく。

(4) 界面抵抗係数

従来, 界面抵抗係数に関しては容易には予測不可能であることから, 界面形状の実測値から逆算する方法がとられた。その結果, 界面抵抗係数 f_i は以下のものであることが明らかになった。

$$f_i = C\Psi^{-0.5} \dots\dots\dots (1)$$

ここで Ψ は岩崎数, C は係数であるが従来は1以下の様々な数値が提案されている。そこで C が確かに定数であるかどうかを調べるため, 膨大なデータの中から流量

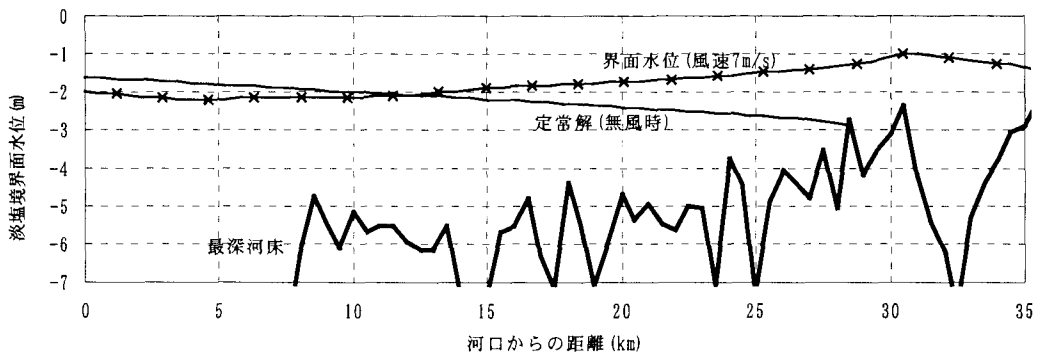


図-9 SSE~SEの風に対する界面形状 (数値計算結果)

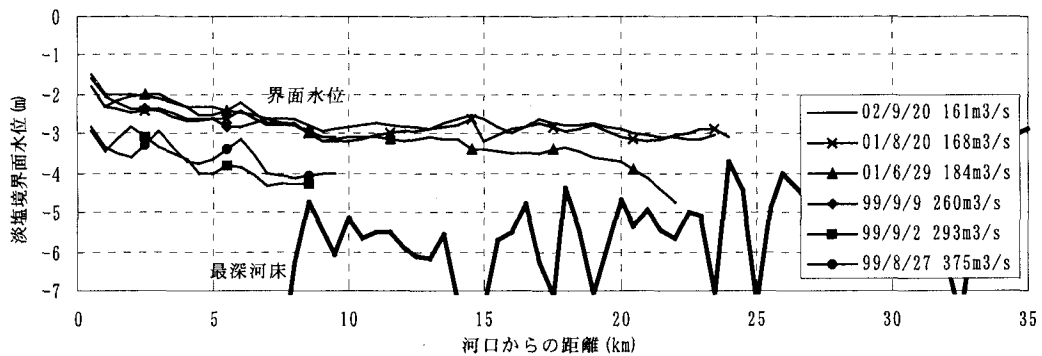


図-10 界面縦断観測結果（無風時）

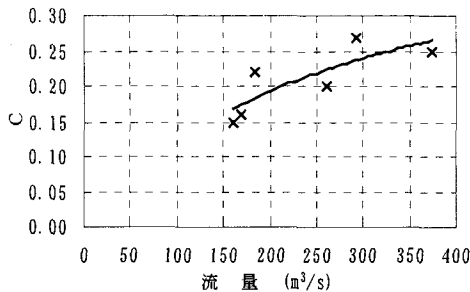


図-11 流量とCの関係

変動のない、しかも無風時の界面形状を抽出してみた。その結果は図-10に示されている。この結果は観測を積み重ねてはじめて得られるものできわめて貴重であると考え。なお、地形的に河口と考えられる地点での密度フルード数はいずれの場合も1を大きく下回った。そこで河口での密度フルード数としては実測値を使用している。

さて、この結果からCを逆算すると図-11を得る。未だデータ数が十分でなく誤差も無視できないが、概略、次の関係を得る。

$$C = 0.0094 Q^{0.352} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、(2)は下記の範囲の河川流量下において成立する。

$$150 \text{ m}^3/\text{s} < 400 \text{ m}^3/\text{s} \dots\dots\dots (3)$$

前節での界面形状予測にはこの(2)の結果が使用されている。

4. おわりに

本研究で得た結論を以下に要約する。

(1) 河口の海面水位を風向と風速の関数として求めることが出来た。

(2) 長い河道部がありそこで上流向きの風が吹く場合には吹き寄せ効果により水位が無風時より上昇する（このとき界面水位は無風時より低下する）。一方、下流向きの風に対しては逆に降下する（このとき界面水位は無風時より上昇する）。

(3) 上記、表面と界面に現れる現象が風による摩擦応力に起因することが力学的に確かめられた。

(4) 流量以外の、水位に影響を与える要因がない界面抵抗係数を求めることが出来た。

謝辞：本研究は一部科学研究費補助金（基盤研究（B）(2)、課題研究13450199）によった。記して感謝する。

参考文献

- 石原藤次郎・本間 仁 (1958): 応用水理学II, 丸善。
- 土木学会編 (1999): 水理公式集, pp. 551-553.
- 福島久雄 (1942): 石狩川河口の観測, 日本海洋学会誌, 第1巻, 第1号, pp. 57-73.
- 横尾啓介・吉田静男・西田修三・荒川範彦 (2003): 感潮域における河川水位決定要因の定量的評価, 水工学論文集, 第47巻, pp. 961-966.
- 吉田静男・横尾啓介・西田修三・荻原 清 (1999): 塩水楔に与える潮汐の影響, 水工学論文集, 第43巻, pp. 875-880.
- 吉田静男・横尾啓介・西田修三 (2004): 石狩川河口二層流の水理-I, 福田水文センター報告書, pp. 207-274.
- Yoshida, S., S. Nishida and K. Yokoo (2000): Flow structures and mixing processes in highly stratified rivers, Proceedings of 5th International Symposium on Stratified Flow, IAHR, pp. 951-956.
- Yoshida, S., K. Yokoo, C. P. Caulfield and P. F. Linden (2003): Quantitative assessment of the most decisive factors determining river level in an estuary, River Basin Management II, WIT Press, pp. 3-12.