

感潮域における河川水位決定要因の 定量的評価

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE MOST DECISIVE FACTORS DETERMINING RIVER LEVEL IN AN ESTUARY

横尾 啓介¹・吉田 静男²・西田 修三³・荒川 範彦⁴

Keisuke YOKOO, Shizuo YOSHIDA, Shuzo NISHIDA and Norihiko ARAKAWA

¹正会員 (株) 福田水文センター 水工部 (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

²正会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 大阪大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴北海道開発局 石狩川開発建設部 (〒060-0001 札幌市中央区北2条西19丁目)

Generally, the response of the river water level in an estuary to the river flowrate is far from simple. The main reasons for this are the four competing factors of tide, atmospheric pressure, wind direction and wind speed, whose effects drive the river level to a variety of elevations. The error represented by the average of that dispersed group can at times be over 200%. No matter what statistical analysis is applied, no plausible estimate of the flowrate can be made from the river level. This paper uses data taken in the Ishikari River estuary over the last 5 years to present a quantitative relationship for of the above 4 factors on the level of the Ishikari River. These relationships permit highly precise calculation of the river flowrate, using observed values of the above 4 factors, at any arbitrary location in the estuary.

Key Words : Estuary, river mouth, two-layer flow, river level, tidal river, flowrate, *H-Q curve*

1. はじめに

河川の水位と流量の関係を正しく把握することは、洪水時の流量把握、渇水時の維持流量の監視、農工業や発電などの利水等において重要である。通常、河川流量は水位 (H) と流量 (Q) 間に成立する、いわゆる $H-Q$ 式を用いて推定されるが^{1), 2)}、渇水時の感潮域における流量の把握は上流域における場合に比べて著しく困難である。その理由は、河川流量以外に、潮汐、気圧、風向、風速という4つの要因の影響をうけて、河川水位が様々な値をとるためである^{3), 4), 5)}。本研究では、まず、石狩川感潮域において過去5年間に実施された河口流の観測データから、上記偏差をもたらす4つの要因と水位との定量的な関係を明らかにする。また、得られた定量的な関係と上記4つの要因の実測値から、石狩川下流感潮域の任意の地点と時刻における河川流量が、従来の方法と比較

して格段に高い精度で得られることを示す。

2. 観測方法及び観測結果

本研究において、対象とする石狩川下流部を図-1に示す。石狩川は、延長268kmで流域面積14,330km²を有し、石狩湾南東部に河口を持つ大河川で、その感潮区間は約45kmである。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ため^{6), 7), 8)}、多くの場合、下流部の水理構造は複雑であり、そ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。本研究において取り扱う観測項目には、上記感潮域において、過去5ヶ年に実施した8地点におよぶ水位 (KP44.5, 26.6, 20.0, 15.0, 10.0, 4.5, 3.0, 1.6) とこれに影響を与える流量、塩水遡上、外

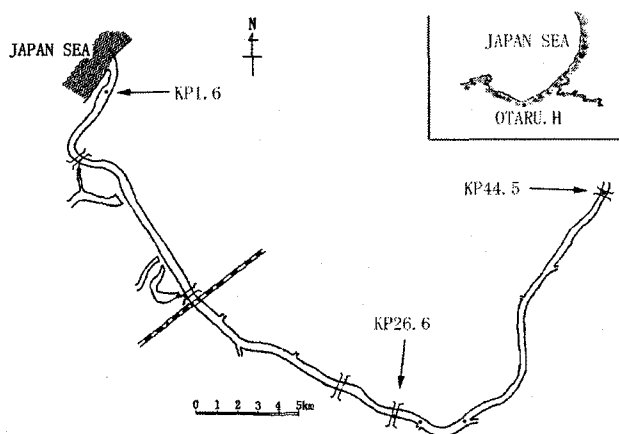


図-1 石狩川下流部地形

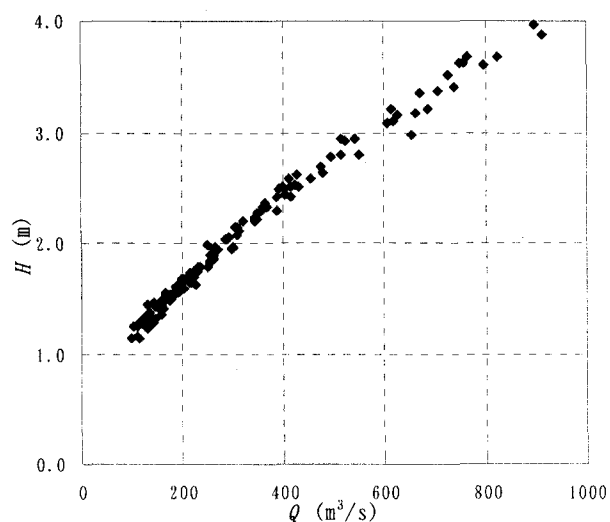


図-2 水位と流量の関係（実測値）（KP44.5）

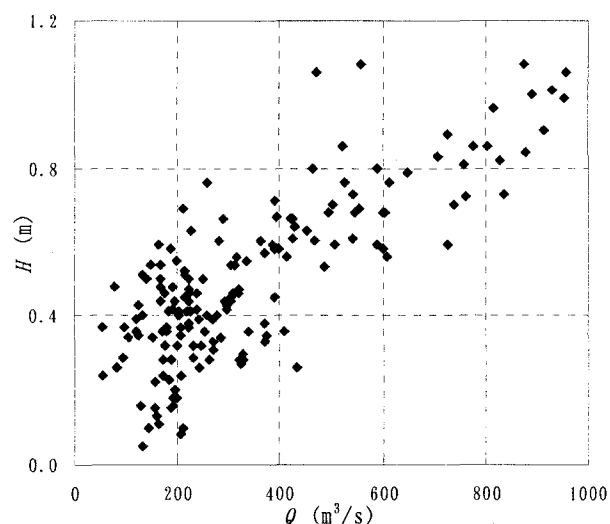


図-3 水位と流量の関係（実測値）（KP26.6）

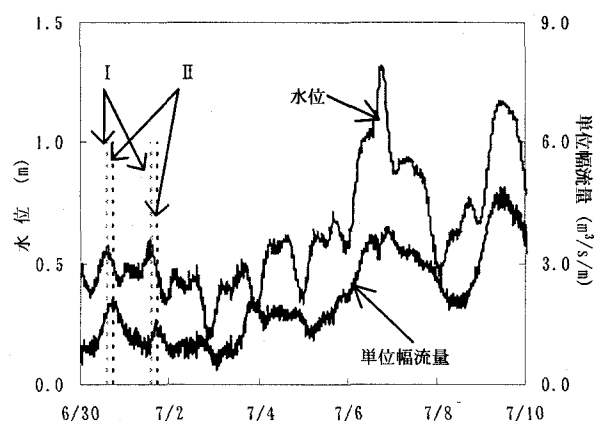


図-4 水位と単位幅流量の関係
（破線Ⅰ、Ⅱはそれぞれ水位と流量のピーク時刻を表す）

海水位（小樽港），気圧（KP4.5），KP26.6，15.0，4.5の風向風速等が含まれている。

図-2は，感潮域の上限近傍であるKP44.5で観測された，洪水時を除く流量が $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 以下についての過去5ヶ年の水位（ H ）と流量（ Q ）の実測値である。同図より，水位と流量は一对一の良好な相関関係を示すことがわかる。同様に，KP26.6における過去5ヶ年の流量観測の実測値から図-3を得る。同図が示すように， H と Q の関係は大きく散乱しており，その度合いは，流量が小さくなるほど増大している。たとえば，平水時に相当する $H=0.40\text{m}$ に注目すると，その流量は $50 < Q < 400\text{m}^3/\text{s}$ となり，散乱の幅が極めて大きいことがわかる。以下，このような散乱の要因について考察を進める。

はじめに，水位の観測記録から見いだせる，明白な特性の指摘を行なう。図-4は，同KP26.6で2001年6月30日から7月10日まで，水位と，流心部に設置した超音波ドップラー流速計ADCP（WH-1200Hz）の結果をもとに，層厚と層平均流速より算出した単位幅流量の時系列変化を示したものである⁹⁾。同図より， $H=0.70\text{m}$ を境にして，低水位側では，2回潮の水位変動に連動して，単位幅流量も増減していることがわかる。しかし，その位相は一致しておらず，約3時間の位相差がある。この理由は，水位に対して流速の位相が $\pi/2$ 遅れることによるものである。一方，水位は 0.70m より高くなると，潮汐の影響を受けず，流量についても位相差なしに増減をしている。しかし，7月6日と9日の水位上昇例を見た場合，6日の方がピーク水位が高いにも関わらず，流量は9日の方が大きくなっている。また，6日の水位ピークはあまりにも急峻であり，潮汐の影響や，河川流量の変化によって生じ得るものではない。この新たな現象に関しては，潮汐や流量を除く気圧や風の要因を想定しなければならない。

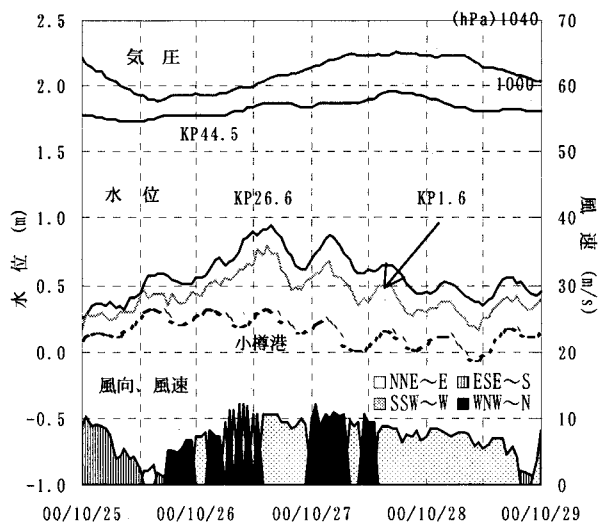


図-5 渇水期の水位観測例(1)

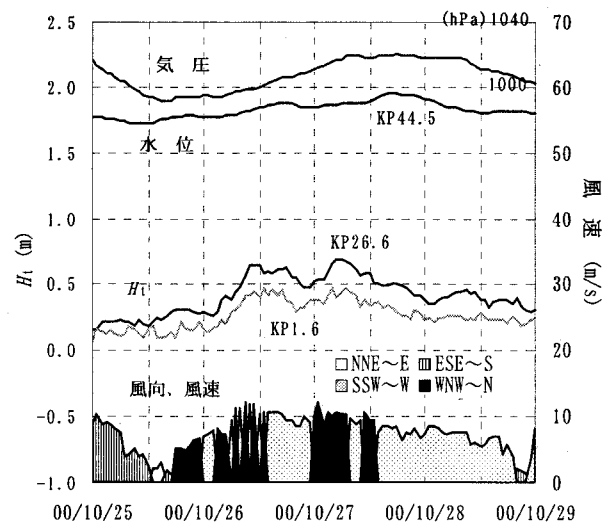


図-7 潮汐、気圧の効果を除去した水位 (Ht)

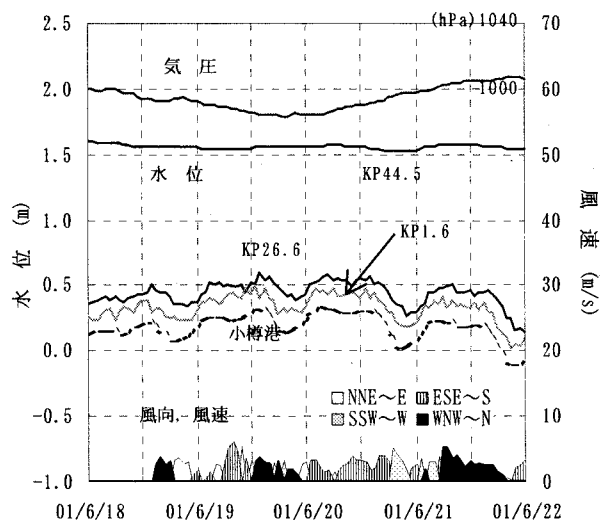


図-6 渇水期の水位観測例(2)

3. 水位決定に寄与する4つの要因の評価

本節では、水位変動の主要因と考えられる上記4つの要因について個々独立に定量的な評価を行なう。

(1) 潮汐と気圧が水位に与える影響の評価

図-5, 6は、上記の要因が含まれる一例として2000年10月25日から29日までと、2001年6月18日から22日までの観測データを示したものである。これらの図には上から順にKP4.5の気圧、下流域KP44.5, 26.6, 1.6の水位および石狩湾の西部にある小樽港の実測潮位、KP4.5の風向風速が示されている。なお、KP26.6とKP1.6の中間値を示すKP20.0, 15.0, 10.0, 4.5, 3.0については、図の判読のし易さを考慮して省略する。

図-5と6において、水位データに着目すると、いずれも上流のKP44.5では、感潮の影響が生じておらず、また、水位変動も小さく、河川流量が定常状態に近いことがわかる。

一方、下流域KP26.6およびKP1.6を見ると、地点によらず潮汐とほぼ同一振幅の水位変動が見られる。すなわち、潮汐による河川水位の上昇量は、少なくともKP26.6より下流では地点によらず潮汐に一致するといえる。このことから、更に、潮汐より周期の長い気圧の変化による海面水位の変動も、同様の変動特性を有しているとみることができる。なお、過去の観測結果から石狩川河口での気圧変動と海水面水位変動との関係を求めると次の定量的関係を得ることが出来る。

$$\Delta h = a \Delta P \quad (1)$$

ここで Δh (cm)は海水面水位変動、 ΔP (hPa)は圧力変動で、 a は約1.4である。このように潮汐と気圧が海水面の水位に与える影響については比較的容易に定量化できる。

ところで、図-5において注目すべき点は、10月26日からはじまる急激な水位上昇である。この現象は図-6では生じていない。なお、それぞれの観測例に関し、期間中最高と最低の水位差を求めると、図-5では、KP26.6において0.69m、図-6のKP26.6では0.46mである。一方、図-5のKP1.6では0.63m、図-6のKP1.6では0.48mとなっている。

次に、このような水位変動をもたらす要因を明らかにする。まず、海面に相対的な水位を得るため、図-5において、下流地点の水位から小樽港の実測水位を差し引き、その値を H_t とおけば図-7を得る。ここで、差し引いた小樽港の実測水位には潮汐の他に、気圧による水面変動も重畳していることに留意

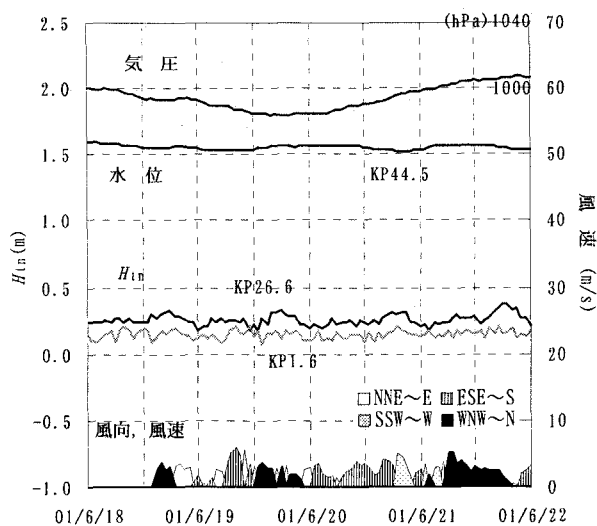


図-8 無風状態における潮汐、気圧の効果を除去した水位 (H_{tn})

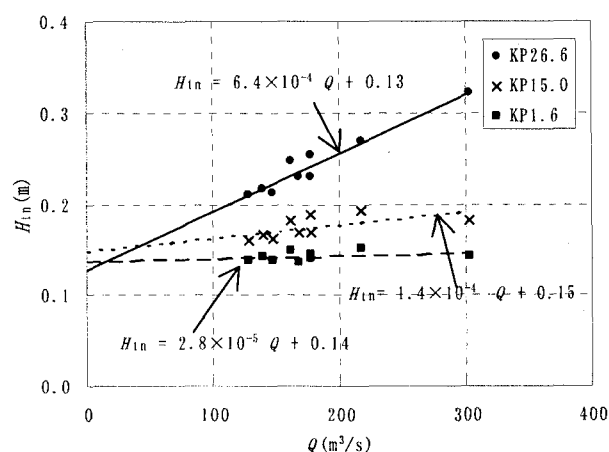


図-9 無風状態における水位 (H_{tn}) 対流量 (Q) の関係

する必要があります。言い換えると H_t は、潮汐、気圧の両成分による水位変動が同時に除去された水位とみることができる。

さて、図-7を見ると、本来河川流量が定常状態に近いのにも関わらず、10月26日以降に急上昇している。実際に、この期間中の H_t の最高値と最低値の差は、KP26.6で0.50m、KP1.6で0.41mとなっている。ここで、風の記録を見ると、同期間にはS E方向の風から、NW方向（海から河道内に向かう方向）に急変し、短時間で12.1m/sの強い風に達していることが読みとれる。従って、この強い風の風下にあたる河口部の水位が、波浪や表面摩擦によって輸送された水塊によって急に上昇し、かつ、表面波となって上流に向かって伝播すること、および、同期間では位置的に風下とはならない小樽港の水位には、風による影響が現れないためこのような著しい水位上昇が出現すると推断できる。しかし、ここまでの解析結果だけでは、風が水位におよぼす定量的な評価はで

きない。この評価のためには次節に述べる流量と水位の関係を明らかにする必要がある。

(2) 流量が水位に与える影響の評価

上述のように、水位は潮汐、気圧、風向、風速に大きく依存する。しかし H_t は、当然ながら河川流量によっても変動する。そこで、風の効果を評価する前に、河川流量の水位に与える効果を評価する。

まず、過去の観測データから図-6のような無風状態下での水位データを抽出し、先述の方法で小樽港実測水位を引き去った結果を H_{tn} とおくと図-8を得る。図中の水位には、潮汐、気圧、そして風の影響が除去されている。同様の関係を、種々の河川流量について調べると図-9を得る。図にはKP26.6、1.6のほか、その中間に位置するKP15.0のデータも示してある。同図から、各地点における任意の流量に対する H_{tn} が求められる。例えばKP26.6では河川流量が200m³/sで H_{tn} が0.26m、300m³/sで H_{tn} が0.32mである。一方、KP1.6では河川流量が300m³/s以下では、 H_{tn} はほぼ一定の0.14mとなる。なお、 Q が0m³/sであるにも関わらず H_{tn} が0mにならないのは実測された小樽港潮位と河口潮位との間に0.13mほどの差異が存在しているためである。また、図中の3地点における H_{tn} から推定出来るように、上流に行くに従って河川流量の増加にともなう H_{tn} の増加率は増大する。この理由は海水が河口から楔状に浸入しており、下流地点では河川水の底部が河床ではなく摩擦抵抗の小さい海水に接するようになるためと考えられる。

(3) 風向、風速が水位に与える影響の評価

これまでの解析により、潮汐、気圧、河川流量についての水位変動の定量的評価が可能となった。そこで、次に風向、風速による水位変動の評価を行う。

潮汐、気圧の効果を除去した H_t から、無風時の H_t である H_{tn} を引き去った結果を H_w とすると、この量は風のみによる水位変動量を表す。もし、無風状態であるならば、 H_w は0mになるはずである。この手法によって得た H_w を図-7と同様の期間で示すと、図-10を得る。図中、KP26.6、1.6の H_w を調べると、無風時には、ほぼ0mを示すのに対し、NW方向の風が卓越してくると、水位が急増する。また、これとは逆に、S Eの風（河道内から海へ向かうの風）が卓越している2001年8月6日から10日までの H_w は図-11のようになる。図中のS Eの風は最大15.1m/sであり、 H_w を見ると先の例とは逆に多少ではあるが減少傾向を示す。

以上で水位に影響を与える各要因が水位におよぼす影響の定量的評価ができた。そこで最後に、これらの結果を用いれば、どの程度正しく流量を推定し得るか検討してみる。

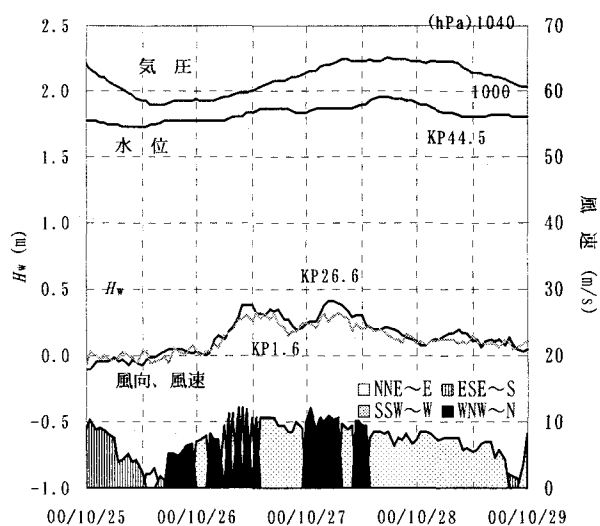


図-10 風による水位の上昇 (風向NW)

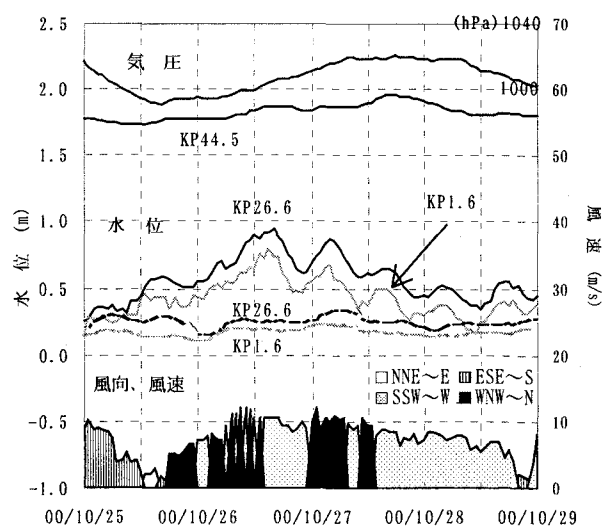


図-13 各観測データと潮汐、気圧、
風の効果を除去した水位の関係(1)

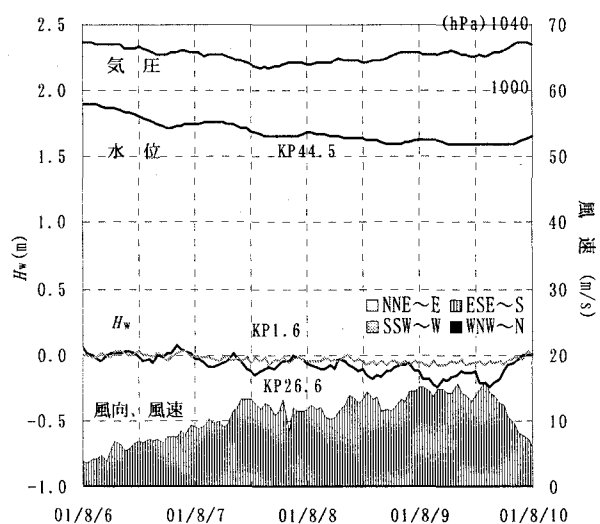


図-11 風による水位の上昇 (風向SE)

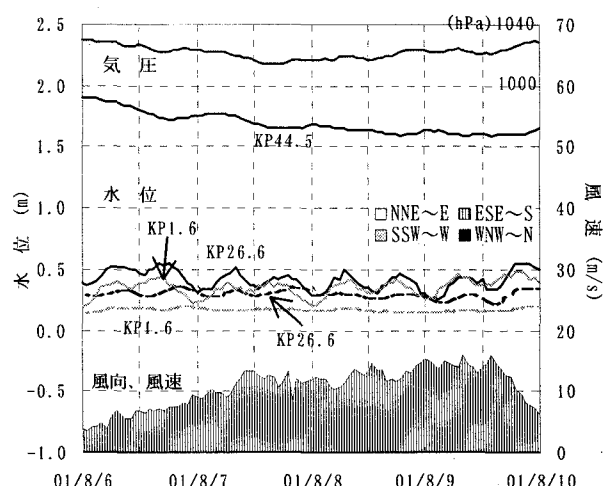


図-14 各観測データと潮汐、気圧、
風の効果を除去した水位の関係(2)

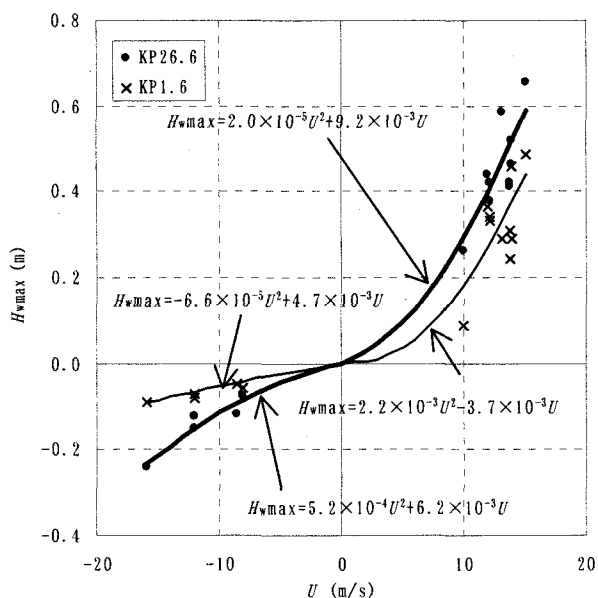


図-12 風向、風速と水位上昇量の関係

まず、風速のピーク値 U とそれに対応する H_w の最大値 H_{wmax} との関係プロットすると、図-12を得る。なお、横軸の正負はそれぞれ風向NW, SEに対応している。

同図より、風向NW (正) に対しては、 H_w は風速の2乗に比例して上昇することがわかるが、具体的には風速15m/s時のKP1.6では0.48m, KP26.6では実に0.65mの水位上昇となっている。この上昇量は前述の潮汐、気圧、流量の上昇量よりも大きな値となっている。また、風向SE (負) に対しては、NWほど顕著ではないものの、風速15.9m/sの時にKP1.6では-0.09m, KP26.6では-0.24mとなっている。

ここで、図-12の結果を用いて、任意の風向、風速に対する水位変動量を推算してみる。

まず、潮汐、気圧、風の効果を除去し、河川流量のみに依存した水位を求めると、図-13, 14を得る。

図中、水位の実測値は実線、各成分を除去した結果は破線で示されている。

得られた水位から、期間平均のKP26.6における流量を求めると、図-13では $218\text{m}^3/\text{s}$ 、図-14では $270\text{m}^3/\text{s}$ であり、これらと感潮域外のKP44.5における流量 $237\text{m}^3/\text{s}$ 、 $220\text{m}^3/\text{s}$ と比べても大きな隔たりはない。

このように本研究において示した評価法によれば、十分な精度で渇水時の石狩川の河川流量を求めることが可能になる。

4. おわりに

本研究においては、水位(H)と流量(Q)の相関が著しく低い河川感潮域において、水位のみを用いて流量を正しく推定するため、上記相関を低下させている潮汐、気圧、風向、風速の4つの因子についての定量的評価が試みられた。その結果、潮汐と気圧については、それらが原因で生じる海面水位の変動分が、ほぼ、そのまま河川水位に加算されていること、風については、無風で流量が定常状態下にあるデータから純粋に河川流量のみによって上昇する水位の経験則を用いることによって、風と河川水位の関係を定量的に評価することもできた。また、得られた当該4因子と水位の定量的関係を用いて、特定の地点における流量を推定したところ、実測流量とほぼ一致する結果を得ることができ、本研究の実用性も確認できた。

謝辞：本研究は一部文部科学省科学研究費補助金（基盤研究B（2）, 課題番号 13450199）を得て実施された。記して感謝する。

参考文献

- 1) 建設省水文研究会著：水文観測（平成8年度版），全日本建設技術協会
- 2) 土木学会水理委員会編：水理公式集（平成11年度版），土木学会
- 3) 宇野木早苗 磯崎一郎：高潮における気圧と風の効果の比較，土木学会海岸工学委員会，海岸工学講演会講演集 pp248-253, 1966
- 4) 田中仁 長林久夫 山内健二：河口感潮域におけるwave set-up高さに関する研究，土木学会海岸工学委員会，海岸工学論文集 pp436-440, 1998
- 5) 吉田静男 西田修三 横尾啓介 中道陽文：石狩川の密度成層構造と地形・気象・海象の関係－Ⅷ，2000
- 6) 吉田静男 横尾啓介 西田修三 荻原清：塩水楔に与える潮汐の影響，土木学会水理委員会 水工学論文集，pp875-880, 1999.
- 7) 日本海洋学会 沿岸海洋研究部会編：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，1985
- 8) 玉井信行：密度流の水理，新体系土木工学，技報堂，1980
- 9) 西田修三 吉田静男：ADCPを用いた河口二層流の観測，土木学会水理委員会 水工学論文集 pp1029-1034, 1997

(2002. 9. 30受付)