

阿賀野川における塩水遡上の実態

福岡 捷二* ・ 市村 清** ・ 加藤 信夫***
高橋 晃****, 藤田 光一****, 加賀谷 均****

1. ま え が き

阿賀野川下流部では、潟水時に海水が河道内深く侵入し、取水上の問題が生じている。河道内への塩水遡上問題は、取水量の増大に伴う河川流量の減少、河口開口幅の増大、潮位が異常に高くなる場合および河道の浚渫や河床低下などによって生じ、潟水時に問題が表面化する。ここでは阿賀野川下流部における潟水年を中心とした塩分観測資料より、塩水遡上現象を水理諸量、河口および河道地形との関連で調べ、塩水遡上の実態を明らかにすることを目的として検討を行った。

このような実際河川の塩水くさびの遡上については、石狩川河口^{1),2)}をはじめ、天塩川³⁾、九頭竜川⁴⁾等で実際資料に基づき研究が行われている。

しかし、河川毎に河道の特性が異なると同様に、そこでの塩水遡上現象も異なるため、より多くの河川で外力や河道条件の変化に対応した塩水遡上現象を把握し、塩水遡上の一般的な特性を明らかにしていくことが重要である。このことは、今後調査を遂行する上でも、対策等を検討する上でも参考になると考えられる。

2. 塩水遡上観測資料の概要

新潟県に位置する阿賀野川下流部では、低水時に弱混合状態の塩水くさびが形成される。図-1の平面図に示すように、下流部河道の低水路幅は、17.0 km 付近で約 400 m、それより下流は河口まで漸拡し、河口で約 800 m となっている。河床勾配は約 1/2,000 であり、17.0 km 付近で勾配が急変する。

この下流部には約 10 箇所の取水施設があり、潟水時には塩水くさびによって水質が悪化し、時には取水難に見舞われることもある。

塩水くさびの観測は、このような潟水年を中心として

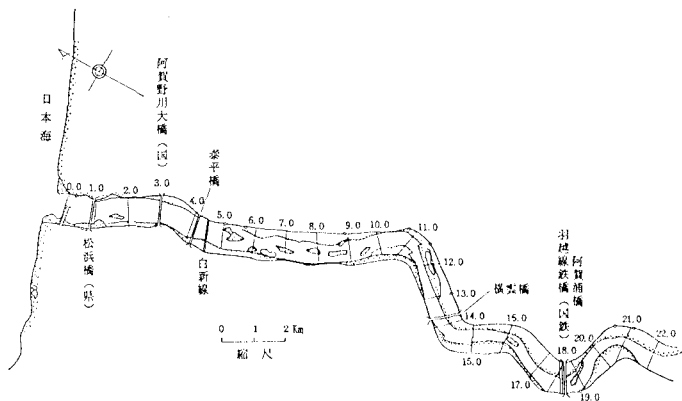


図-1 阿賀野川下流部平面図

昭和 40 年代から現在まで数多く実施されている。観測は水理諸量とともに、主として河道内の塩分濃度の縦断分布を測定したもの、および塩水くさび先端付近の濃度分布と先端位置を測定したものである。今回の検討では昭和 48 年、昭和 51 年～55 年、昭和 59 年および 60 年の夏季に観測された 8 年間のデータを用いている。

3. 塩水遡上と水理量・河口形状の関係

河道内への塩水侵入を支配する要素としては、一般に潮汐変動、平均海水面高、河川流量、河口および河道地形（縦断形、横断形、平面形）、海水および河川水の密度、気象要素（風向、風速、気圧など）、波浪、沿岸潮流および人工要素（取排水、船舶航行）などがある。ここでは塩水遡上が主として潮汐の時間変動、平均海水面高、河川流量の水理諸量および河口と河道地形によって支配されるものとする。

(1) 潮位変動

阿賀野川河口（新潟西港）における潮位変動は、図-2 の一例に示すように、大潮時で約 30～35 cm、小潮時で約 10～20 cm であり、大潮時には平均潮位が高く、小潮時には低い。日本海側の潮位は、日潮不等が著しく、一回潮となることもある。また、平均海水面は 3 月～4 月に最低、8 月に最高となり、その差は約 40 cm であって、平均海水面の昇降量が潮汐による昇降量に匹敵

* 正会員 工博 建設省土木研究所 河川部河川研究室長

** 北陸地方建設局 湯沢砂防工事事務所長

*** 北陸地方建設局 阿賀野川工事事務所

**** 正会員 建設省土木研究所 河川部河川研究室

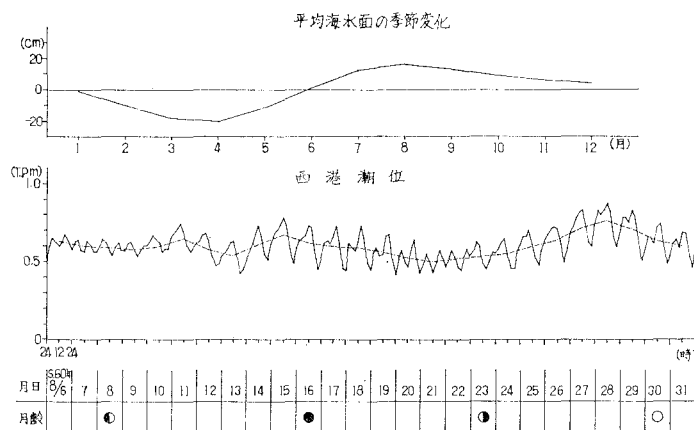


図-2 新潟西港の平均海面の季節変化と潮位変動

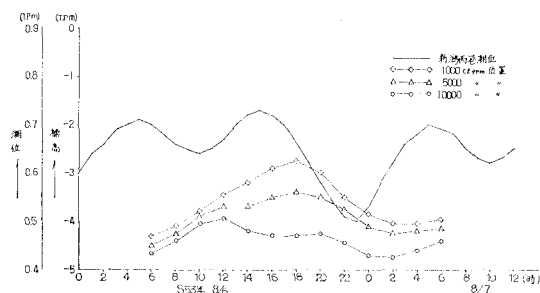


図-3 10.4 km 地点等濃度面の変化と潮位の関係

するため、夏の最低潮高が春の最高潮高とほぼ同じ高さとなる場合もある。このため阿賀野川河口では、渇水時でかつ平均海面が高くなる夏季の大潮時には、塩水が河道内奥深く遡上し、塩害による取水難の問題が発生するようになる。

このような潮位変動と塩水くさびの挙動の関係を知らするために、潮位変動とそれに対する河道内 10.4 km 地点で観測された淡塩水境界面付近の等塩素イオン濃度線の高さの変動を示したのが図-3である。この観測時の流量は $140 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、流量の時間変化は小さい。これによると潮位変動に対する塩水くさびの応答は、約3時間～4時間の遅れが生じている。しかし、4節で後述するように塩水くさびの遡上距離は、くさび先端付近の最深河床地形の影響を受けるため、潮位変動に対する遡上距離の変化は、たかだか 400 m～500 m と相対的に小さい。また、河川流量が大きく、塩水遡上距離が短い場合は、潮位変動の影響は小さいため、遡上距離の変化はさらに小さくなる。

(2) 流 量

塩水くさびの遡上距離は河川流量によって大きく影響を受ける。各年度の調査資料より、観測日の日平均流量と塩水遡上距離の関係を河口潮位をパラメータとして示したものが図-4である。流量が減少するにつれて、塩

水くさびの遡上距離は増大する傾向となるが、各年度における潮位や河口断面形、河床地形等の違いによって遡上距離は異なっている。全体をみて目立つことは、昭和 53 年度の流量は他の年度の同じ規模の流量の場合に比して、遡上距離が大ききことである。これはこの年の6月27日の大洪水 ($Q=7870 \text{ m}^3/\text{s}$) による河口砂州開口河積の拡大、河床地形の変化が大きな要因となっている。昭和 53 年以外の観測資料を調べると、塩水くさびの遡上距離が 8.0 km 以上となっているのは、いずれも平均海面が高くなる大潮時で渇水流量 ($Q \leq 100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下)

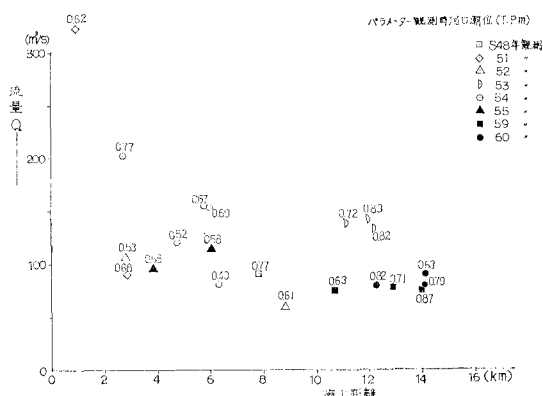


図-4 日平均流量と塩水遡上距離の関係

が2日間以上継続する場合であることがわかる。

(3) 河 口 地 形

河道内への塩水遡上は、河口砂州すなわち河口地形の影響を大きく受けると考えられる。そこで観測時の河口断面形と遡上距離の関係を以下に検討した。

阿賀野川河口部は両岸より突出した砂州が存在し、時期により河口の様相が異なる。図-5は河口砂州による最狭部断面形を示す。最狭部断面は各観測年度によってかなり変化するが、いずれも 0 km 断面で現われている。したがって、河口断面として最狭断面の現われる 0 km 断面を用いた。

各年度の濃度分布観測資料より、上下層濃度の変曲点

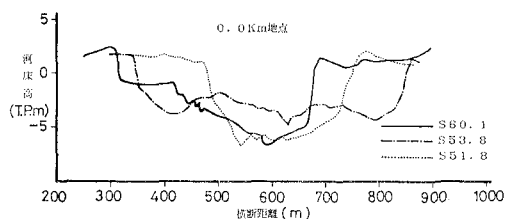


図-5 河口断面形状の変化

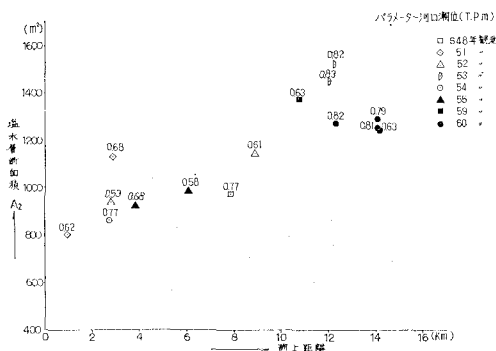


図-6 塩水遡上距離と塩水層断面面積の関係

を淡水境界面とし、塩水層断面面積 A_2 と塩水くさびの遡上距離の関係を示したのが図-6である。これより塩水層断面面積が大ききときは、遡上距離も大ききことが明らかとなる。また、遡上距離が 6.0 km 以上では、全断面面積に対して塩水層断面面積の占める割合は、いずれも 75%~80% を占める。これより遡上距離が大ききときには、塩水層断面面積が大きき、したがって河口断面面積も大きくなる。とくに 10 km 以上の遡上距離となっている昭和 53 年 8 月、昭和 59 年および 60 年 8 月は河口断面面積が大きく、また湧水流量が長期間継続しており、このようなときには河道内深く塩水が遡上することになる。

以上の結果より、河口砂州の存在が塩水くさびの遡上距離に密接に関係しており、河口砂州は塩水侵入を軽減し、湧水時の水質維持に大きく貢献していることがわかる。

4. 塩水遡上距離の大局的把握手法

塩水遡上距離を予測する際には、一般に塩水層・淡水層それぞれについて運動方程式を立て、これらを連立させて積分することにより界面形状を求める手法が用いられてきた。河川における湧水時の取水問題に対処するうえで必要なことは、遡上距離と大よその界面形状が求まることである。したがって、実測データから現象を支配する各因子と遡上距離との関係を明らかにし、容易に測定が行える数個の因子から遡上距離を説明する式が得られれば、これも有力な予測手法となる。こうしたマクロな観点からの現象理解に基づく手法は、最初に述べたミクロな情報を積上げる手法にくらべて大局を把握する上で容易であることからその実用性は大きく、こうした観点からの予測手法の開発要請が現場技術者から高まっている。従来の手法がかなり厳密な力学的考察に基づいてはいるが、計算にあたって用いられる種々の係数に含まれる誤差や計算の前提となっている仮定と実際の違いによって、得られる遡上距離が必ずしも精度良いものにはならない場合がある。一方、マクロな観点に基づく手

法は、概括的ではあるが、計算では取りきれない各河道固有の複雑な特性をも考慮できる可能性を持っている。こうした考え方に基づく手法の最も簡単な例が図-6に示した $A_2 \sim L$ 関係である。すなわち、河口での塩水層断面面積 A_2 は河口部形状と流量という遡上距離に係わりの深い因子と密接な関係を持っており、この値が遡上距離 L と高い相関を持つことは、 $A_2 \sim L$ 関係が物理的意味を持つことを示している。このことから、図-5 が阿賀野川における遡上距離を推定する手法の 1 つと判断できる。ただし、この種の手法を用いるにあたっては、単に遡上距離と相関の高い因子から機械的に予測式を作るだけでなく、得られた結果が物理的に解釈して妥当かどうか、結果の一般性に問題がないかどうかを充分吟味しなければならない。またこの手法のもう 1 つの欠点は、予測式作成にあたってある程度の数の質の高い実測データが必要になる。

これらの問題に対処するためには、従来より行われてきた密度流現象についての力学的考察の成果と実測データの物理的解釈の上に立って、着目すべき因子とそれらが遡上距離に与える影響を把握し、これをもとに遡上距離予測の枠組みや最も効率良い現地観測方法をあらかじめ提示しておくことが重要である。

塩水遡上を支配する基本因子は、①流量、②河口の地形、③河道の平均的な地形特性、④河道の局所的な地形特性と考えられる。潮位変動も因子の 1 つではあるが、前述のように弱混合の塩水くさびではその遡上距離にはそれ程重要な因子とはなり得ない^{*}。したがって湧水期における最大遡上距離に関係する代表的な 1 つの潮位を検討対象にしておけば良いと考えられる。これら 4 つの因子は、次のように遡上距離に影響を及ぼしていると考えられる。河口においては、河口部の地形と流量によって、その場所の淡水層の厚さ、したがって内部フルード数が規定される。河口より上流の河道で塩水層の厚さが比較的大きい区間では、界面が河床の局所的な凹凸の影響を受けることなく、平均的な河床地形の下での淡水層と塩水層の力のバランスから界面勾配が定まる。この勾配を決定するのは、河川流量と河床の平均的な地形である。さらに上流のくさびの先端付近では、塩水層の厚さが小さくなるために、河床の局所的な凹凸が界面形状に大きな影響を及ぼすようになる。上にあげた (1) 河口での内部フルード数、(2) 河道部での代表的な界面勾配、(3) くさび先端での界面形状が明らかとなれば、遡上距離を求めることができる。以上より、(1)、(2)、(3) に及ぼす基本因子の影響を定量的に把握することができ

^{*} この記述は、潮位差の大きい太平洋側の河川でも成立する。一般に潮位差が大ききときには、塩水侵入現象が緩混合または強混合型となり、弱混合の塩水くさびの形態をとらない。塩水くさびは潮位差の小さいときに起こる。

ば、基本因子から遡上距離を予測するための標準的な考え方を提示することが可能となる。そこで以下に、上記の (1), (2), (3) と基本因子との関係について、阿賀野川での実測データを用いて考察を加えることにする。

(1) 河口での内部フルード数と基本因子の関係

定常流の塩水くさびの形状を求める場合に、通常は河口において内部フルード数 $F_{r1}=1$ の条件が与えられる。この内部フルード数が 1 になる地点は河口の最狭部を少し出たところとなることが多い。阿賀野川河口 (0 km 地点) の代表的な断面形を図-5 に示すが、観測年度によってかなり異なっていることがわかる。他の観測も含め、流量と河口部の断面積から計算した内部フルード数を表-1 に示す。河口地形や流量の大きさによって、内部フルード数の変化も大きい。これより渇水流量時 ($Q \div 100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下) では $F_{r1}=0.4$ 付近をとることが多く、この断面で境界条件を与える場合、内部フルード数の与え方に留意する必要がある。

表-1 河口部での水理諸量

年 月 日 (昭和)	48.8.2	51.8.26	51.10.3	52.8.3	52.8.24	53.8.4	53.8.4	54.9.8	59.8.14	60.8.12	60.8.26	60.8.28	60.8.29
観測時刻	15:00	14:43	10:17	15:33	9:18	13:00	16:00	15:00	15:00	14:34	10:50	16:27	11:40
流 量 Q (m^3/s)	91.6	322.8	89.9	60.0	106.3	133.7	143.6	202.3	72.6	90.7	79.7	79.3	80.8
潮位 H_0 (T.P. m)	0.77	0.62	0.68	0.61	0.53	0.82	0.83	0.77	0.63	0.63	0.82	0.82	0.81
上層水深 h_1 (m)	0.72	2.62	1.43	1.04	1.75	0.80	0.98	1.77	0.81	1.20	1.25	1.22	1.41
内部フルード数 F_{r1}	0.90	0.62	0.40	0.47	0.39	0.81	0.67	0.64	0.60	0.48	0.34	0.37	0.32

(2) 河道部での代表的界面勾配と基本因子の関係

くさび先端付近を除く河道内の界面勾配は、阿賀野川においてはほぼ一定であり、多くの場合河口から直線的な界面形状を呈している。特に淡水流量が小さく遡上距離が大きい場合においてこの傾向が顕著となる。このことから、この区間の界面形状の特性は代表的界面勾配という 1 つの特性量で表現でき、河口部での界面高または淡水流量が得られれば河道内の界面高をおおよそ決定できると考えられる。ところで、この区間の界面形状は、塩水層厚が大きいため河床の局所的な凹凸の影響を受けず、淡・塩水層についての運動方程式を平均的な河床勾配の下で適用することにより記述できると考えられる。今、対象としているような流量の小さい場合においては、運動方程式中の淡水層の速度水頭は無視できるものとする。この仮定を用い、また塩水層の流速を 0 とすると、界面勾配について次式が得られる。

$$\text{界面勾配 } I_t = \frac{1}{2} f_t \cdot F_{r1}^2 \left(\frac{h_1}{h_2} + 1 \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで f_t : 内部抵抗係数, F_{r1} : 淡水層の内部フルード数, h_1 : 淡水層厚, h_2 : 塩水層厚, である。内部抵抗係数がクーリガン数の -0.5 乗に比例するとすれば, (1) 式は次のように変形できる。

$$I_t = a \sqrt{u_1} \cdot \frac{D}{h_1(D-h_1)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, u_1 : 淡水層の流速, D : 全水深, a : 流体の性質と密度差から決まる定数, である。以上より界面勾配は、河床形状を表わす特性量である川幅, 全水深, 流量, 淡水層厚によって決定されることがわかる。したがって、上式を第一近似式として、この式に示された界面勾配と各因子との基本的な関係をもとにして、実測値から界面勾配と各因子との関係を定量的に調べれば、代表的界面勾配を予測する簡易式が得られる。

(3) くさび先端での界面形状と基本因子の関係

河道内への塩水遡上には、流量や河口の地形のほかに河道形状、とくに塩水くさび先端付近の局所的な地形特性である最深河床高が大きな影響を与える。図-7 は阿賀野川の平均河床高と最深河床高の縦断形の一例を示す。

一般に塩水くさびの先端部は、みお筋の最深河床部を

遡上する。最深河床高縦断の途中に高い場所がある場合、そこで塩水遡上は妨げられ、流量がさらに減少すると、そこを乗り越えて一気に次の河床高の低い所を遡上する。

図-7 に示すようにその上下流に比して、最深河床高の若干高い 6.0 km~8.0 km 付近の河床が低下すると上流の河床高が高い地点の 9.0 km あるいは 11.0 km 付近まで塩水が遡上することになる。実際 56 年以降、この付近の河床が低下し塩水くさびの遡上は大きくなっている。したがって、塩水遡上を防止するためには、このような比較的河床高の高い場所を維持するような配慮が

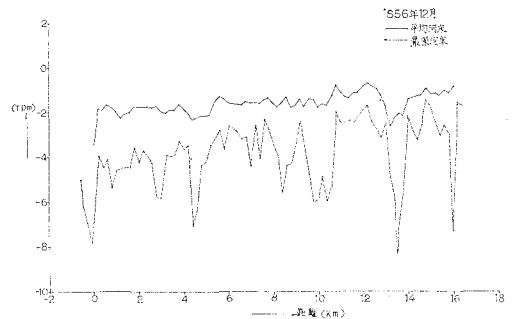


図-7 平均および最深河床高縦断図

必要である。

5. ま と め

阿賀野川下流部における塩分観測資料を用い、塩水遡上と水理諸量・河口および河道地形との関連について検討した。明らかとなった主要な事項は次のようである。

- (1) 阿賀野川では平均海面が高くなる大潮時で潟水流量 ($Q \div 100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下) が 2 日以上継続すると河道内深く (侵入長 8 km 以上) 塩水が侵入する。
- (2) 阿賀野川では潮位変動に対し、河道 10 km 地点付近の界面変動の遅れ時間は約 3 ~ 4 時間である。しかし、最深河床地形の影響等もあり、潮位変動に対する遡上距離の変化は相対的に小さい。
- (3) 河口砂州地形と塩水遡上距離の関係を調べた結果、河口での最狭部の河積、および塩水が占めている断面積が大きいほど塩水遡上距離も大きいことが示された。
- (4) 塩水遡上を支配する基本因子として、流量、河口形状、河道の平均的な形状、河道の局所的な形状を取り上げ、これらの因子が、河口での淡水の内部フ

ールド数、代表的界面勾配、くさび先端での界面形状に及ぼす影響を明らかにすれば、基本因子より塩水遡上距離や界面形状を大局的に把握できることを示した。

- (5) 河口における淡水層の内部フルード数は河口形状や流量によって大きく異なるが、潟水流量時では 0.4 程度となり、1 よりかなり小さい値を示すこと、塩水くさび先端付近の界面形状は、局所的な地形特性である最深河床の縦断変化の影響を受け、部分的にでも最深河床の高い場所があると、それが塩水の遡上を妨げる役割を果たすことが示された。

参 考 文 献

- 1) 福島久雄・柏村正和・八鍬 功・高橋 将: 石狩川河口の研究, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 137~146, 1964.
- 2) 福島久雄・八鍬 功・高橋 将: 石狩川河口における二, 三の問題, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 431~435, 1971.
- 3) 八鍬 功・高橋 将・大谷守正: 天塩川河口における塩水の侵入, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 377~381, 1974.
- 4) 中村 宏・稲村敏夫: 神通川河口の塩水くさびについて, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp. 295~301, 1966.