

河口閉塞が塩水遡上におよぼす影響

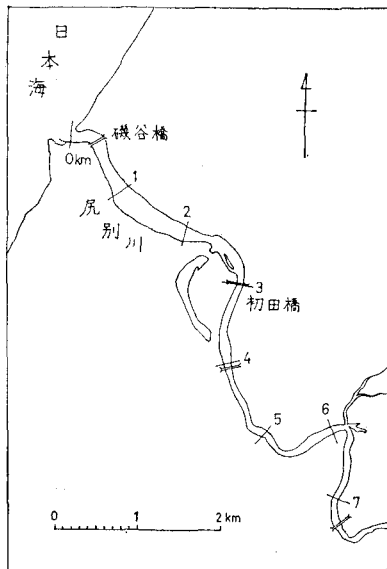
八 鍬 功*・高 橋 将**・大谷守正***

1. 序

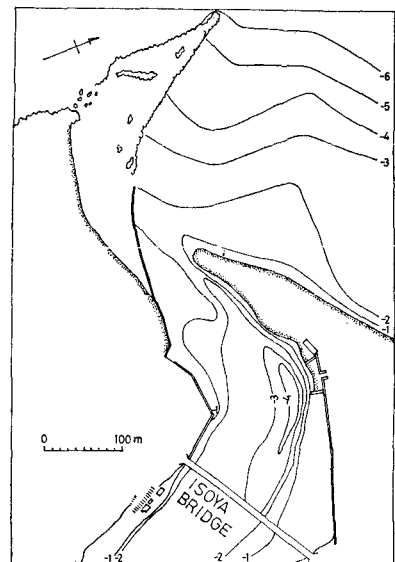
日本海のように潮差の小さい海にそそぐ河川では、塩水楔は弱混合型をなし、塩水の遡上は主に河川流量によって左右されることはよく知られている。このような河口における塩水の遡上に関してはこれまでも多くの理論的考察、実河川での観測、模型実験がなされ、河口条件や塩水遡上距離の算定法等について多くの成果がえられている。しかしこれまでの理論的考察や模型実験は河口付近の河川の断面形を一樣としたものが多く、河口閉塞による河口の狭さくの影響を考慮したものはない。実際の河川では冬季漂砂によって河口が閉塞する場合が多く、河口が閉塞すれば河口における抵抗が大きくなるので、塩水侵入の限界流量や塩水遡上距離に影響を与えることが予想される。これは一様な断面形を仮定した計算や模型実験では取り扱うことが出来ない現象である。

筆者らは昭和52年以来北海道西部の尻別川河口(図一

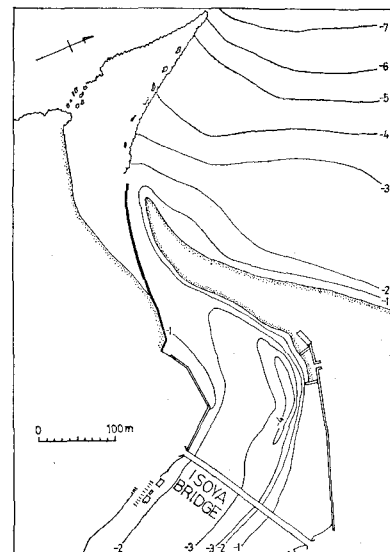
1) で塩水遡上に関する観測を続けている^{1),2)}。尻別川は漁岳に源を発し羊蹄山北麓を西進して日本海にそそぐ流



図一1 尻別川河口付近



(a) 昭和52年11月



(b) 昭和53年3月

図一2 尻別川河口付近深浅図(北海道開発局)

* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部

** 北海道大学助教授 工学部

*** 正会員 北海道大学助手 工学部

路延長 129 km, 年平均流量 78 m³/s の河川で, 河口が北西の方向に開いているため, 冬季には季節風による波浪をまともに受け, 河口漂砂によって河口が閉塞する。しかし左岸側には岩礁が多くまた導流堤が構築されており, 河流が導流堤に沿って流出するので完全閉塞には到らない。夏季には河口における川巾 110 m 平均水深 2.5 m 程度であるが, 10 月末から 11 月にかけて右岸側から砂州が発達し, 4 月半ば頃からはじまる融雪出水の時期まで河口狭さくの傾向が継続する。図-2 は昭和 52 年 11 月, 53 年 3 月に北海道開発局が行なった河口付近深淺測量の結果であるが, 11 月には河口狭さく部の川巾 62.5 m, 水深(最深部) 1.75 m, 3 月には川巾 24.3 m, 水深 1.5 m であった。

次に尻別川における観測の結果をもとにして, 河口閉塞が行なわれた場合の塩水侵入の条件等について考察する。

2. 閉塞河口における塩水の侵入

図-3 のような川巾, 水深ともに河口付近で狭さくする矩形断面の水路における 2 層流の方程式は, 上層流, 下層流の混合を無視し, 定常状態を考えれば次のようにもとめられる。

上層流, 下層流の水深をそれぞれ h_1, h_2 , 平均流速: u_1, u_2 , 断面積: A_1, A_2 , 密度: ρ_1, ρ_2 , 流量: Q_1, Q_2 とし, 流下方向に x 軸をとって川巾: $B(x)$, 全水深: $H(x)$ とすれば, 2 層流の基礎方程式から次式をうる³⁾。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} + \frac{Q_1^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A_1^2} \right) + i_1 - i_b &= 0 \\ (1-\varepsilon) \frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} + \frac{Q_2^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A_2^2} \right) + i_2 - i_b &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし $\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}$, i_b : 河床勾配

で, 2 層境界面, 河床の剪断力を τ_i, τ_b とすれば

$$i_1 = \frac{\tau_i}{g\rho_1 h_1}, \quad i_2 = \frac{\tau_b - \tau_i}{g\rho_2 h_2}$$

また 2 層間抵抗係数を f_i とすれば

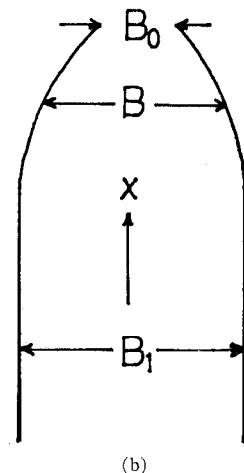
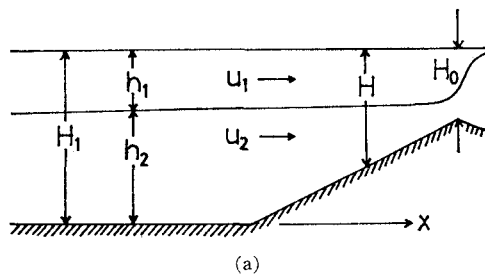


図-3 閉塞した河口のモデル

$$\tau_i = \rho \frac{f_i}{2} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2|, \quad \rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

によって与えられる。

(1) 式から

$$\left. \begin{aligned} \frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} - \frac{Q_1^2}{gA_1^2} \left(\frac{1}{h_1} \frac{dh_1}{dx} + \frac{1}{B} \frac{dB}{dx} \right) \\ + i_1 - i_b &= 0 \\ (1-\varepsilon) \frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} - \frac{Q_2^2}{gA_2^2} \left(\frac{1}{h_2} \frac{dh_2}{dx} + \frac{1}{B} \frac{dB}{dx} \right) \\ + i_2 - i_b &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となり, (2) 式から $dh_1/dx, dh_2/dx$ をもとめることが出来る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dh_1}{dx} &= \frac{\varepsilon \frac{1}{B} \frac{dB}{dx} (h_1 F_1^2 - h_2 F_2^2 - \varepsilon h_1 F_1^2 F_2^2) + (i_1 - i_b) \varepsilon F_2^2 - (i_1 - i_2)}{\varepsilon (1 - F_1^2 - F_2^2 + \varepsilon F_1^2 F_2^2)} \\ \frac{dh_2}{dx} &= \frac{\varepsilon \frac{1}{B} \frac{dB}{dx} (h_2 F_2^2 - h_1 F_1^2) + \varepsilon^2 \frac{1}{B} \frac{dB}{dx} (h_1 F_1^2 - h_2 F_1^2 F_2^2) + \varepsilon \{ F_1^2 (i_2 - i_b) - (i_1 - i_b) \} + (i_1 - i_2)}{\varepsilon (1 - F_1^2 - F_2^2 + \varepsilon F_1^2 F_2^2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$F_1^2 = \frac{u_1^2}{\varepsilon g h_1}, \quad F_2^2 = \frac{u_2^2}{\varepsilon g h_2}.$$

定常状態として塩水の遡上が静止している場合を考えれば $u_2 = 0$ とする。また $\varepsilon^2 \approx 0$ とおけば (3) 式から

$$\left. \begin{aligned} \frac{dh_1}{dx} &= \frac{\varepsilon F_1^2 h_1 \frac{1}{B} \frac{dB}{dx} - (i_1 - i_2)}{\varepsilon(1 - F_1^2)} \\ \frac{dh_2}{dx} &= \frac{-\varepsilon F_1^2 h_1 \frac{1}{B} \frac{dB}{dx} + (i_1 - i_2) + \varepsilon F_1^2 (i_2 - i_b) - \varepsilon(i_1 - i_b)}{\varepsilon(1 - F_1^2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

(4) 式から河口条件として $F_1^2=1$ をうる。また (4) の第一式により定常状態における塩淡水境界面の形状をもとめることが出来る。

図-4 は尻別川河口から 320 m 上流にある磯谷橋付近の塩素量鉛直分布観測結果の一部である。昭和 52 年 7 月 23 日, 53 年 7 月 24 日以外の観測日には塩水の河口内侵入はみとめられなかった。とくに 52 年 11 月 4 日には河川流量 22.0 m³/s で 7 月 23 日の 28.0 m³/s より少ないにもかかわらず, 前者には塩水侵入がなく, 後者には深度 1.6 m まで塩水が侵入していた。11 月 4 日には河口砂州の発達によって河口がかなり閉塞していたので, 上述の現象は河口の狭さくが原因とおもわれる。いま河口条件 $F_1^2=1$ において淡水層の厚さ h_1 が河口の平均水深 H_0 と同じになるときの流量すなわち限界流量 Q_0 は

$$Q_0 = \sqrt{gH_0^3} \cdot B_0 \quad B_0: \text{河口における川巾}$$

で与えられる。従って 11 月 4 日当時の状況からみてもっともおもわれる値として河口平均水深 $H_0=1.0$ m, 河口巾 $B_0=50$ m とすれば上式から $Q_0=22.1$ m³/s となり当時流量 22 m³/s で塩水侵入のなかったことがよく説

明される。しかし夏季には $B_0=110$ m, $H_0=2.5$ m, $\varepsilon=0.02$ とすれば $Q_0=193$ m³/s となり, 河川流量が 193 m³/s 以下となれば塩水が河口内に侵入する。事実 52 年 7 月 23 日, 53 年 7 月 24 日にはそれぞれ流量 28 m³/s, 39 m³/s で塩水楔は河口から 3.5 km, 1.2 km まで遡上していた。

図-3 のモデルのように一様水路 (川巾 B_1 , 水深 H_1) の河口付近のみ川巾および水深が変化した場合 (河口における川巾 B_0 , 水深 H_0), 河口における限界流量 $Q_0 = \sqrt{gH_0^3} \cdot B_0$, 一様水路部分における限界流量 $Q_1 = \sqrt{gH_1^3} \cdot B_1$ で, $Q_1 > Q_0$ となる。すなわち河川流量が Q_1 以上となれば塩水楔は河口外に押し出されるが, 一たん押し出された楔は流量が Q_0 以下にならなければ再び河口内に侵入することが出来ない。従って Q_0 と Q_1 の間の河川流量では, それが Q_1 より大きい流量の後ならば水路内に塩水が存在せず, また Q_0 より流量が減少して河口内に楔が侵入した後ならば塩水が水路内に残留することになる。

3. 塩淡水境界面への影響

次に河口閉塞が塩淡水境界面の深度におよぼす影響について考察する。(4) の第一式を差分化し, 図-2 の河口付近深浅測量図から川巾 B , 水深 H (ここでは断面内最大水深をとった), をもとめて河口から上流 1 km までの境界面深度を流量の異なる場合を想定して計算した。差分の 1 ステップは 25 m とし, 計算法は中村ら⁵⁾が神通川の塩水楔形状計算に用いた方法によった。なお抵抗係数 f_i としては金子の式 $f_i=0.2(R_0 F_1^2)^{-1/2}$ を用いた。計算は (a) 完全開口, (b) 昭和 52 年 11 月 (図-2 (a)), (c) 昭和 53 年 3 月 (図-2 (b)) の 3 つの場合について行なったが, (a) は磯谷橋上流側の川底地形の平坦な部分がそのまま河口まで連続したと仮定した場合で, この場合の川巾 142.5 m, 水深 3.0 m は前節の B_1 , H_1 とみなしうるものである。なお限界流量計算値はそれぞれ (a) 327 m³/s, (b) 64.1 m³/s, (c) 19.7 m³/s である。

図-5 は計算結果を示したもので, 同流量について比較すれば, 河口閉塞の度合によってとくに河口付近で塩淡水境界面の深度に大きな差が生ずることがわかる。(a) の完全開口の場合と (b) を比較すれば, 同流量について (b) の淡水層厚さは (a) の 1.5~2.0 倍となっている。

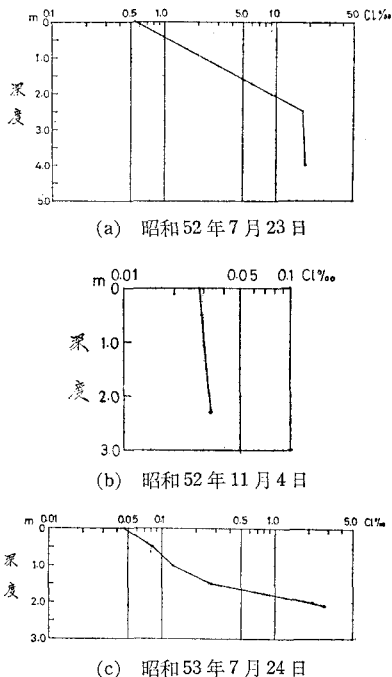
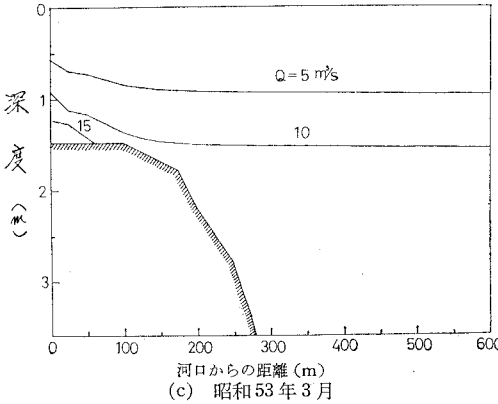
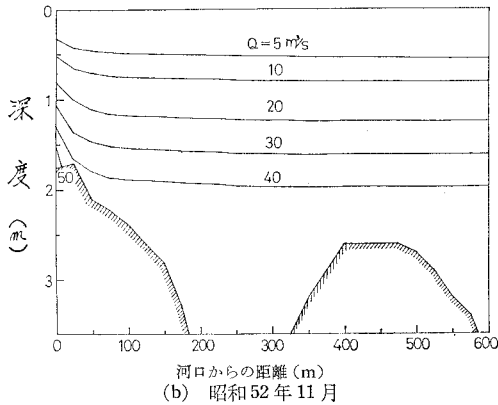
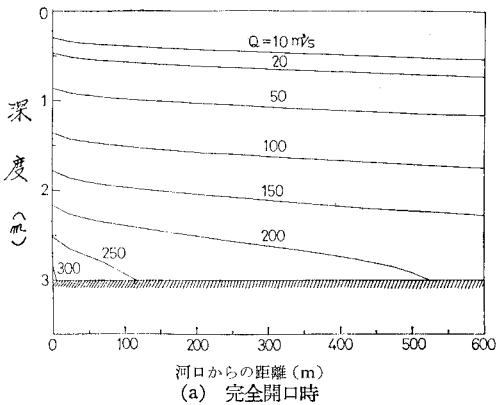


図-4 塩素量鉛直分布 (磯谷橋)

表一 塩淡水境界面深度計算値 (流量 10 m³/s)

河口からの距離 (m)	内部フルード数			平均流速 (m/s)			境界面深度 (m)		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
0	1.000	1.000	1.000	0.240	0.315	0.432	0.29	0.51	0.95
100	0.654	0.309	0.366	0.181	0.118	0.191	0.39	0.75	1.36
200	0.562	0.243	0.122	0.163	0.095	0.066	0.43	0.77	1.52
300	0.503	0.176	0.086	0.152	0.070	0.047	0.46	0.79	1.53
400	0.461	0.179	0.064	0.143	0.071	0.035	0.49	0.80	1.54
500	0.428	0.204	0.069	0.136	0.081	0.038	0.52	0.81	1.55
600	0.401	0.233	0.076	0.130	0.093	0.042	0.54	0.82	1.55
700	0.378	0.224	0.088	0.125	0.090	0.048	0.56	0.83	1.56
800	0.359	0.216	0.086	0.121	0.088	0.047	0.58	0.84	1.56
900	0.342	0.184	0.079	0.117	0.075	0.044	0.60	0.86	1.57
1000	0.328	0.144	0.071	0.114	0.060	0.039	0.62	0.87	1.58



図一五 河口付近の塩淡水境界面形状

表一は計算結果の一例として、流量 10 m³/s を想定したときの内部フルード数、淡水層平均流速、境界面深度の (a), (b), (c) 3 つの場合における計算値を示したものであるが、表から (c) における淡水層厚さは (b) の約 1.8 倍となっている。

4. 結 語

河口における塩水の侵入は、河川流量の増減とともに、河口閉塞の度合によっても左右されることを尻別川河口における塩水楔観測の結果から示し、また河口の狭さくが塩淡水境界面の深度に大きな影響をおよぼすことを計算例によって明らかにした。今後更に観測を継続し、河口閉塞と塩水楔消長の関係を究明したい。

尻別川河口の観測に際し、絶大なる御援助、御協力をいただいた北海道開発局小樽開発建設部はじめ関係各位に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Yakuwa, I., S. Takahashi and M. Ohtani: Behaviors of the salt wedge and the salinity distribution at estuaries, 16th Conf. Coastal. Eng., 1978.
- 2) 八鉄 功・大谷守正: 尻別川河口の閉塞と塩水域の季節変動, 尻別川環境調査報告書, 北海道開発局, pp. 37~48, 1979.
- 3) たとえば岩崎敏夫: 密度流の諸問題, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. 16~1~37, 1966.
- 4) Otubo, K. and H. Fukushima: Density currents in a river mouth with a small tidal range, Proc. 8th Cong. IAHR Vol. 4C, pp. 1~25, 1959.
- 5) 中村 宏・稲松敏夫: 神通川河口の塩水くさびについて, 第13回海講講演集, pp. 295~301, 1966.