

河口二層流境界面における塩水の拡散

八 鍬 功*・高 橋 将**・大谷守正***

1. 序

筆者らは過去十数年にわたり北海道日本海側の石狩川、天塩川、尻別川、留萌川（図-1 参照）で塩水楔の観測を続けて来た¹⁾。観測の方法は超音波測深機によって流心に沿う塩水楔の縦断形状を記録し、同時に航行中の船から 30 秒～1 分おきに約 300 cc の表面水を連続的に採取し、化学分析によってその塩素量を測定して楔先端から河口までの淡水層における表面塩素量分布を観測した。また塩水楔内の数地点で船を碇置し、塩素量ならびに流速の鉛直分布を測定した。

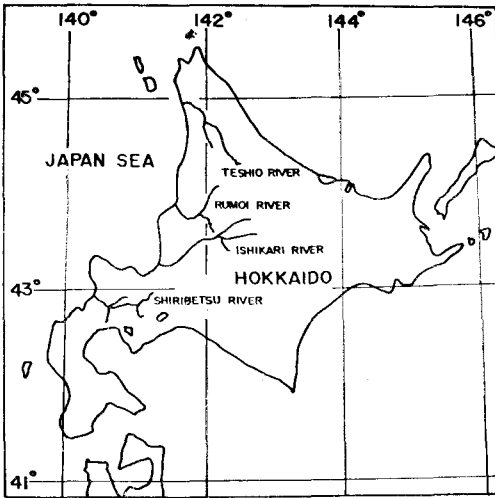


図-1

石狩川、天塩川、尻別川、留萌川はそれぞれ延長 270, 260, 130, 35 km で石狩川、天塩川は大河川、尻別川は中河川、留萌川は小河川の例とみることが出来る。観測の結果によれば、各河川の河口における塩水楔侵入の限界流量はそれぞれ約 550, 350, 150, 5.2 m³/s で、塩淡水境界面の形状は同一の塩水楔においても場所的に変化し、河道が急激に曲折しているところや、川底に大きな凸部のある地点では塩淡水の混合が激しく、境界面は他

の部分にくらべて不明瞭で、淡水層の塩素量は急激に増加していた。

本論文は大きさの異なる石狩川、尻別川、留萌川の河口における表面塩素量分布の実測値から淡水層内の拡散係数を求め、更に塩淡水境界面における連行係数と拡散係数、平均流速、淡水層の厚さなどの諸量との関係をあらわす式を導いて、実測の結果から検討を加えたものである。

2. 淡水層内の拡散係数と連行係数

塩水楔が定常状態にあるものとして淡水層内の塩素量を S 、平均流速を U 、流下方向 (x 方向) の拡散係数を D_x 、鉛直下向 (y 方向で河川表面を $y=0$ とする) の拡散係数を D_y とすれば、淡水層内の塩素量分布は次式から求まる。

$$U \frac{\partial S}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

境界条件として $y=0: \frac{\partial S}{\partial y}=0$, $y=h_0: S=S_0$ (h_0 は淡水層の厚さで、淡水層としては中間層の上端までをとる), $x=0: S=f(y)$ (楔先端を $x=0$ とすれば $f(y)=0$) を用いて式 (1) を解けば

$$S = S_0 - \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n 4 S_0}{(2n+1)\pi} - \frac{2}{h_0} \int_0^{h_0} f(\lambda) \cos \frac{(2n+1)\pi \lambda}{2h_0} d\lambda \right\} \cdot \cos \frac{(2n+1)\pi y}{2h_0} \cdot \exp \left\{ \frac{U}{2D_x} - \sqrt{\left(\frac{U}{2D_x} \right)^2 + \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_y}{4h_0^2 D_x}} \right\} x \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式で $y=0$ とおけば、淡水層の表面塩素量分布を与える次式が求まる²⁾。

$$(S)_{y=0} = S_0 - \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n 4 S_0}{(2n+1)\pi} - \frac{2}{h_0} \int_0^{h_0} f(\lambda) \cos \frac{(2n+1)\pi \lambda}{2h_0} d\lambda \right\} \cdot \exp \left\{ \frac{U}{2D_x} - \sqrt{\left(\frac{U}{2D_x} \right)^2 + \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_y}{4h_0^2 D_x}} \right\} x \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部理学第一研究室
 ** 北海道大学助教授 工学部理学第一研究室
 *** 正会員 北海道大学助手 工学部理学第一研究室

式(3) から拡散係数 D_x , D_y を求めるには, U , h_0 , S_0 の実測値を代入し, $(S)_{y=0}$ の分布が表面塩素量分布実測値と合うように D_x , D_y を定めればよい. 実際には塩淡水境界面の状況によって塩水域を幾つかの区間に分け, 各区間内では諸量が一定とする.

次に境界面における連行係数と諸量との関係について考察する. 大坪・福島³⁾によれば, 連行係数を K , 淡水層の厚さを h , 地点 $x=0$ および x における淡水層, 塩水層の平均塩素量を S_{10} , S_{20} および S_1 , S_2 とすれば, これら諸量の間には次の関係式が成り立つ.

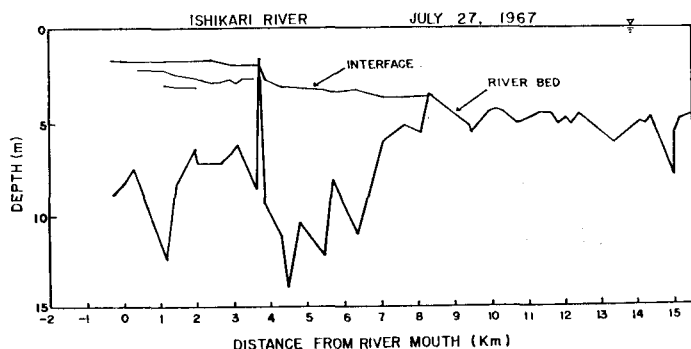
$$\frac{S_2 - S_1}{S_{20} - S_{10}} = \exp \left[- \int_0^x \frac{K}{h} dx \right] \dots\dots\dots (4)$$

一区間については S_2 , K , $h (=h_0)$ が一定とすれば, 上式から

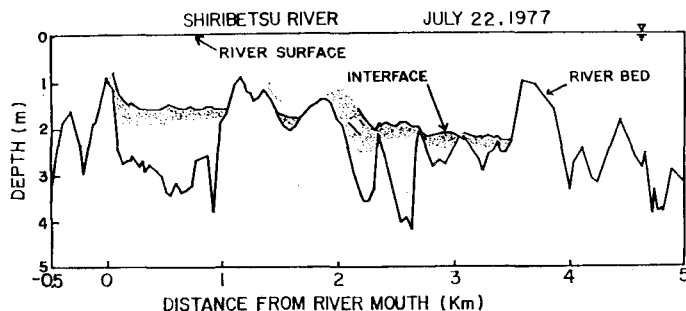
$$S_1 = S_2 - (S_2 - S_{10}) e^{-(K/h_0)x}$$

ただし S_2 は中間層も含めた塩水層の平均塩素量で実測値を用いる. 式(2) から $S_1 = \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} S dy$ を求め, 上式に代入して両辺を比較することにより

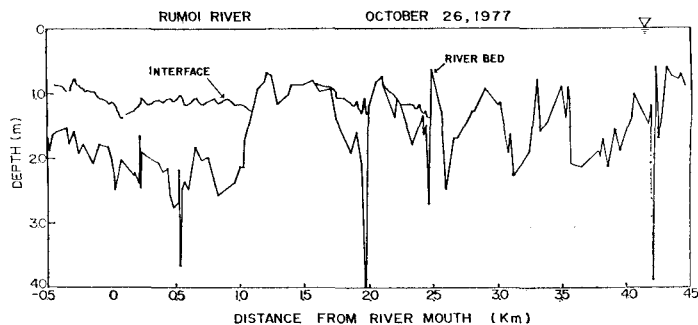
$$K = \frac{S_0}{S_2 - S_{10}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{4}{(2n+1)^2 \pi^2} - \frac{(-1)^{n/2}}{h_0 S_0 (2n+1) \pi} \int_0^{h_0} f(\lambda) \cos \frac{(2n+1)\pi \lambda}{2h_0} d\lambda \right\} \times \left\{ \sqrt{\left(\frac{h_0 U}{D_x} \right)^2 + \frac{D_y}{D_x} (2n+1)^2 \pi^2} - \frac{h_0 U}{D_x} \right\} \dots (5)$$



(a) 石狩川河口 (1967. 7. 27)

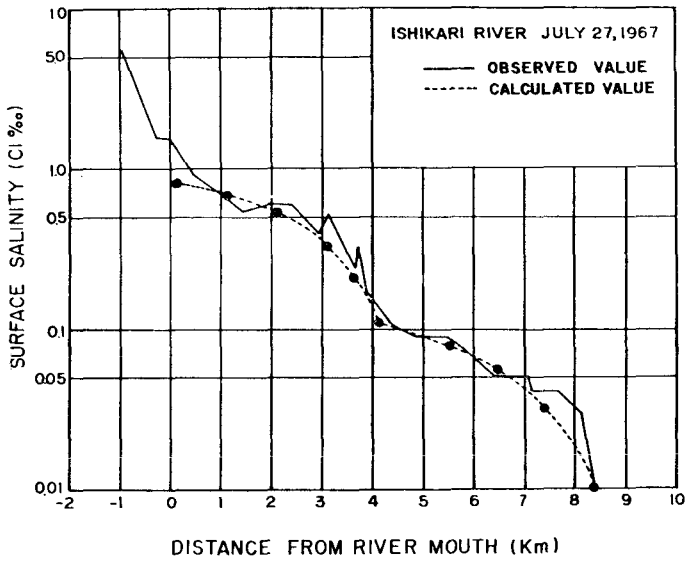


(b) 尻別川河口 (1977. 7. 23)

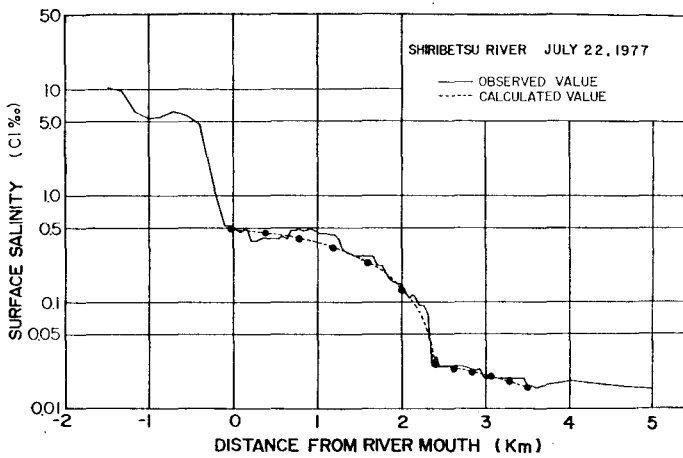


(c) 留萌川河口 (1977. 10. 26)

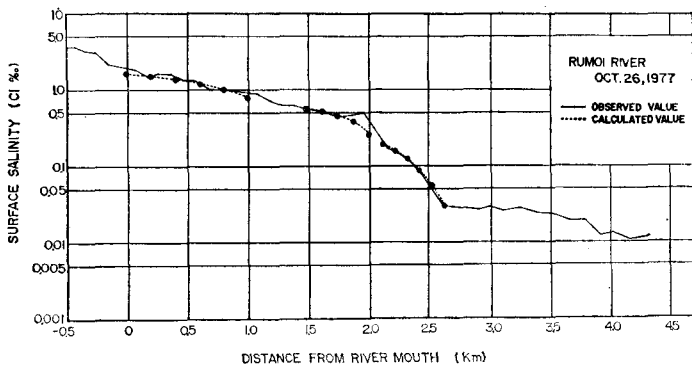
図-2 塩水楔縦断形状



(a) 石狩川河口 (1967. 7. 27)



(b) 尻別川河口 (1977. 7. 23)



(c) 留萌川河口 (1977. 10. 26)

図-3 表面塩素量縦断分布

をうる。ただし

$$S_{10} = \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} f(y) dy.$$

とくに楔先端を原点とした場合は $f(y)=0$ であるから

$$K = \frac{S_0}{S_2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)^2 \pi^2} \times \left\{ \sqrt{\left(\frac{h_0 U}{D_x} \right)^2 + \frac{D_y (2n+1)^2 \pi^2}{D_x}} - \frac{h_0 U}{D_x} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となり、連行係数 K は S_0/S_2 に比例し、かつ D_y/D_x が大きい程、また $h_0 U/D_x$ が小さい程大きい値となる。

3. 観測結果の考察

図-2 は石狩川 (1967.7.27)、尻別川 (1977.7.23)、留萌川 (1977.10.26) における塩水楔縦断形状の超音波記録を図化したもので、図-3 は同時に観測した表面塩素量縦断分布である。石狩川では河口から 3.7 km の地点にある川底の突起によって塩淡水の混合が激しくなり、下流側では表面塩素量が急激に増加している。尻別川の場合は 2 km 付近から下流側の川底の凸部の影響によって境界面が乱れ、2.4 km 付近で表面塩素量が急増している。また留萌川では川底地形の状況により、塩水

表-1

河川名	流量 (m ³ /s)	区間	河口からの距離 (km)	U (cm/s)	h_0 (cm)	S_0 (Cl ‰)	S_2 (Cl ‰)	$f(y)$ $a+by+cy^2$	D_x (C.G.S.)	D_y (C.G.S.)
石狩川 (1967. 7. 27)	260	I	楔先端 8.4~3.7	41.3	250	0.32	16.49	0	3.0×10^8	13
		II	3.7~0	76.5	100	1.12	15.47	$\begin{pmatrix} 0.319 \\ -4.61 \times 10^{-3} \\ 1.26 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$	4.0×10^8	21
尻別川 (1977. 7. 23)	27~29	I	楔先端 3.5~2.4	15.0	150	0.074	15.99	0	5.0×10^7	2.3
		II	2.4~0	12.0	100	0.62	17.53	$\begin{pmatrix} 0.121 \\ -3.31 \times 10^{-3} \\ 8.30 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$	5.0×10^7	12
留萌川 (1977. 10. 26)	1.7	I	楔先端 2.5~2.1	6.3	100	0.46	4.25	0	1.4×10^5	0.3
		II	2.0~1.6	4.5	100	0.85	7.03	$\begin{pmatrix} 0.248 \\ 4.04 \times 10^{-3} \\ 1.96 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$	4.1×10^5	0.4
		III	1.0~0	4.2	100	2.02	12.80	$\begin{pmatrix} 0.770 \\ -8.95 \times 10^{-3} \\ 2.14 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$	4.1×10^5	0.5

* 上から a, b, c

表-2

河川名	区間	K	
		計算値	実測値
石狩川 (1967. 7. 27)	I	0.22×10^{-4}	0.82×10^{-5}
	II	0.15×10^{-4}	0.21×10^{-4}
尻別川 (1977. 7. 23)	I	0.55×10^{-5}	0.44×10^{-5}
	II	0.18×10^{-4}	0.17×10^{-4}
留萌川 (1977. 10. 26)	I	0.76×10^{-3}	0.14×10^{-3}
	II	0.56×10^{-4}	0.65×10^{-4}
	III	0.12×10^{-3}	0.59×10^{-4}

拡散現象は河口~1.0 km, 1.6 km~2.0 km, 2.1 km~2.5 km の 3 地区に分けて考察される。

上述の境界面ならびに表面塩素量分布の状況から、表-1 に示すように、楔先端から河口までを石狩川、尻別川では 2 区間、留萌川では 3 区間に分けて、各区間の U , h_0 , S_0 , $f(y)$ を与え、式 (3) により表面塩素量分布が実測値と一致するように各区間の D_x , D_y を決めれば、表-1 の結果がえられる。図-3 の黒丸は D_x , D_y として表-1 の値をとった場合の計算値である。

各河川の各地区における U , h_0 , S_0 , D_x , D_y の諸量

を用い、楔先端を含む区間では式 (6) から、また楔先端を含まない区間については $f(y)$ を加えて式 (5) から、各区間の連行係数 K の平均値を求めれば、表-2 に示すようになる。表には塩水楔内の数地点で測定した塩素量鉛直分布から式 (4) によって求めた K の値 (実測値) をも示した。式 (5), (6) を用いて計算した K の値 (計算値) と実測値とは、区間距離が大きいにもかかわらず order 的に一致し、同じ傾向を示している。とくに留萌川河口において K の値が大きいのは、他の河口にくらべて S_0/S_2 が大きくて不安定であることと、 D_y/D_x が大きいことによるものとおもわれる。

4. 結 語

実際の河口では河道の曲折、川底の凹凸など、理想的な河口では考えられない原因によって地域的に塩淡水混合が激化し、淡水層の塩素量が增大していることがよくみうけられる。

筆者らは塩淡水境界面の状況によって塩水遡上域を区分し、各区間における表面塩素量分布の計算値を実測値と合わせることによって、淡水層拡散係数 D_x , D_y を求

め更に各区間の境界面連行係数 K をあらわす式を導いて、無次元量 D_y/D_x が大きい程、また $h_0 U/D_x$ が小さい程 K の値が大きくなることを示した。

石狩川、尻別川、留萌川の観測に際し、絶大なる御援助、御協力をいただいた関係各位に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) Fukushima, H., I. Yakuwa and S. Takahashi:

Salinity diffusion at the interface of stratified flow in an estuary, Proc. 13th Cong. IAHR, Vol. 3, pp. 191-197, 1969.

2) Yakuwa, I. and M. Ohtani: Longitudinal distribution of surface salinity in an estuary, Bull. Faculty of Engi. Hokkaido Univ., No. 54, pp. 135-141, 1969.

3) Otsubo, 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.