

建設省 土木研究所 正員 ○ 須賀 堯三

建設省 工木研究所 正員 高橋 晃

1. はじめに

塩水が河口から河道内へ遡上する問題を取り扱おう。現実の河川において、塩水がくさび状に侵入する場合に遡上距離が大きくなるようである。この場合、従来の塩水くさび理論では、河川における実態を説明しきれないことが⁽¹⁾南により指摘されている。南は下層から上層への塩分の混入を考慮すべきであるとして解析を試みたが、なお未解決の問題も残されている。そのなかで、特に塩分の混入速度 E を一定と仮定したことは、河川の実態とかけはなれている。著者らはすでに E が内部フルード数 Fr_1 のほぼ4.5乗に比例して増大し、混入塩分が Fr_1 の増大とともに急増することを報告している。また、⁽³⁾末石らは弱混合から強混合への変化の過程における E の重要性に示唆を与えている。

ここでは、複断面水路の定常流の場合について、一定塩分濃度の下層から、上層への塩水混入があり、上層では縦断的に塩分濃度変化のある状態をとりあげて考察する。このような塩水遡上の状態は潮位変動の小さい地方でみられる。モデル解析の結果は最上川河口の例で検証された。また、この解析例は緩混合の場合の解析や河口出発条件の検討になんらかの示唆を与えることになるであろう。

2. 河口から遡上する塩水くさびモデルの問題点と適用範囲

このモデルでは次の各項目の仮定を行っており、妥当性と適用範囲の検討が必要である。

- 下層における塩分濃度を一定とし、塩分は下層から上層へ混入するものとし、その逆は無視する。
- 上層に混入した塩分は短い区間において完全に混合する。
- 混入速度 E , $E/u_1 = 6 \times 10^{-3} Fr_1^{10/3}$ ^{(4),(2)} (1)
- 境界面の抵抗係数 $f_i = 1.29 \Psi^{-2/3}$ ⁽³⁾ ($\Psi = Re \cdot Fr_1^2$, $Re = u_1 h_1 / \nu$, $Fr_1 = u_1 / \sqrt{g h_1}$) (2)

この他にも問題となる仮定はあるが、それらについては逐次ふれることとする。図-1は下層塩分濃度の縦断変化を示す例である。緩混合の河川であっても、弱混合の状態が存在すればその時点をとりにあげている。これより見ると、適用河川は日本海側ばかりでなく、もう少しひろげてもよさそうに思える。ただし、塩水くさびの上流端付近では、不定流効果、河床形状の影響および履歴現象などによって、この仮定の条件は成立しない。ところが、先端付近での混入量はわずかであるからモデルに重要な障害は与えていない。bについては別途取扱わなければならないが、ここではその影響を無視する。(1)式および(2)式については、大型水路の実験結果に基づく

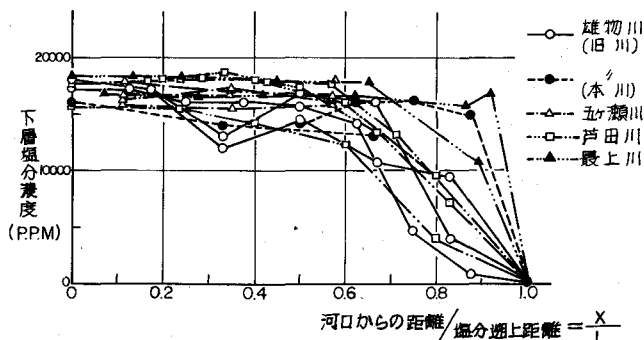


図-1 下層塩分濃度の縦断変化

圖 - 3 橫断面

河口付近は単断面と仮定できる場合も多いが、高水敷が存在する下流河道も少なくないので、図-3のような複断面河道を考える。上下層のそれぞれにおいて平均水理量にて表示できるとすると、基礎式

$$\frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} + \frac{u_1}{g} \frac{du_1}{dx} + i_{f1} - i_0 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d(1-\varepsilon)h_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} + \frac{u_2}{g} \frac{du_2}{dx} + i_{f2} - i_0 = 0 \quad (4)$$

$$u_1 B_1 \frac{dh_1}{dx} + h_1 B_1 \frac{du_1}{dx} + u_1 h_1 \frac{dB_1}{dx} = E B_2 \quad (5)$$

$$u_2 B_2 \frac{dh_2}{dx} + h_2 B_2 \frac{du_2}{dx} + u_2 h_2 \frac{dB_2}{dx} = -E B_2 \quad (6)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{d\rho_1}{dx} \quad (7), \quad \therefore \quad \frac{d(1-\varepsilon)h_1}{dx} = (1-\varepsilon) \frac{dh_1}{dx} + \frac{h_1}{\rho_2} \frac{d\rho_1}{dx} \quad (8)$$
$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{1}{\phi_{|x|}} \left[\left(1 - \frac{u_2^2}{gh_2} \right) (i_0 - i_{f1}) - (i_0 - i_{f2}) + \left(\frac{u_1}{gh_1} \frac{u_2^2}{gh_2} \frac{B_2}{B_1} - \frac{u_1}{gh_1} \frac{B_2}{B_1} - \frac{u_2}{gh_2} \right) E + \frac{h_1}{\rho_2} \frac{d\rho_1}{dx} \right. \\ \left. + \frac{u_1^2}{gh_1} \frac{h_1}{B_1} \frac{dB_1}{dx} - \frac{u_2^2}{gh_2} \frac{h_2}{B_2} \frac{dB_2}{dx} - \frac{u_1^2}{gh_1} \frac{u_2^2}{gh_2} \frac{h_1}{B_1} \frac{dB_1}{dx} \right] \quad (9)$$
$$\phi'(x) = \frac{u_1^2}{gh_1} - \frac{u_2^2}{gh_2} - \frac{u_1^2}{gh_1} - \frac{u_2^2}{gh_2} + \epsilon \quad (10)$$
$$\frac{d h_1}{d x} = \frac{1}{\phi(x)} \left[- (i_{f_1} - i_{f_2}) + \frac{h_1}{\rho_2} \frac{d \rho_1}{d x} - \left(\frac{u_1}{g h_1} \frac{B_2}{B_1} + \frac{u_2}{g h_2} \right) E + \frac{u_1^2}{g h_1} \frac{h_1}{B_1} \frac{d B_1}{d x} \right] \quad (11)$$

$$\Phi_{(x)} = \epsilon - \frac{u_1^2}{g h_1} = \epsilon (1 - Fr_1^2) \quad (12)$$

—216—

面が水平となる。(9)式あるいは(11)式は、従来の式に加えて、塩水の混入量、混入塩分による上層の密度変化、および水路幅の変化を考慮していることになる。ここではx軸を図-2に示すように、上層流の上流から下流に向けて正としているので、混入量の増大はせん断力の増大と共にくさびの勾配を大きくし、逆に上層密度および川幅の増加率によってくさびの勾配は小さく、極端なケースとしては逆勾配の生じることをも示唆している。川幅が縮小するところで境界面が上昇することは、一見逆のようにも思われがちであるが、このことは実験によっても確かめてみた(詳細は省略)。

さて、(11)式および(12)式に基づいて実際の計算を行なうためには、 $d\rho_1/dx$ および i_f について少し考察しておかなければならない。そこで、上流からの純水流量 Q_0 、x 地点までの塩水混入量を Q_x とすれば、

$$C_1 = \frac{Q_x C_2}{Q_0 + Q_x} \quad (13) \quad Q_x = \int_0^x B_2 E \, dx \quad (14)$$

などの関係が認められる。(13)式では上層にて完全に混合されると仮定した。(13)式および(14)式より、

$$B_2 E = \frac{dQ_x}{dx} = \frac{C_2}{(C_2 - C_1)^2} Q_0 \frac{dC_1}{dx} \quad (15)$$

となる。したがって、(15)式および C_1 と ρ_1 の関係式(水理公式集)を用いることによって、(11)式右辺第2項は

$$\frac{h_1}{\rho_2} \frac{d\rho_1}{dx} = 1.47 \{ 1 - A_t - (0.138 - 2.94 \times 10^{-3} C_1) B_t \} \frac{\rho_0}{\rho_2} \frac{(C_2 - C_1)^2}{C_2} \frac{h_1 B_2 E}{Q_0} \quad (16)$$

ここに、 ρ_0 = 密度の次元を有する単位量

$$A_t = t(4.7867 - 0.098185t + 0.001083t^2) \times 10^{-3} \quad (17)$$

$$B_t = t(18.030 - 0.8164t + 0.01667t^2) \times 10^{-6} \quad (18)$$

となる。つぎに、損失の勾配 i_f については

$$i_{f1} = \frac{\tau_1}{\rho_1 g h_1}, \quad i_{f2} = \frac{\tau_0 - \tau_1}{\rho_2 g h_2}, \quad \tau_1 = f_1 \frac{\rho_1}{2} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2|, \quad \tau_0 = f_0 \rho_2 u_2 |u_2|$$

などの関係があるので、下層塩水層内の流速 u_2 が微小な場合には、(11)式の右辺第1項は

$$i_{f1} - i_{f2} = f_1 \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \frac{u_1^2}{2g} \quad (19)$$

である。ただし、以上は河川を幅の広い長方形断面水路とし、高水数の摩擦や側岸の影響を無視したものである。実際は地盤沈下などにより高水数が水没している河川があり、また塩水くさびの上流では河床摩擦が無視できない場合もある、中村・阿部⁽⁶⁾は河床摩擦を考慮し、次式を提案している。すなわち、(11)式において f_1 の代りに K_1 を用いることとし、 K_1 は

$$K_1 = \left[f_1 h_1 + \left(f_1 \frac{B_2}{B_1} + \frac{2gn^2}{h_1^{1/3}} \frac{B_1 - B_2}{B_1} \right) h_2 \right] / (h_1 + h_2) \quad (20)$$

と表わされる。ただし、(20)式は断面の上・下層にてそれぞれ平均流速を用いている。実際は境界面の摩擦が異なれば流速も異なる。この場合には、(5)式の連続条件も同時に書き改めなければならない。この問題は、今回の論点では本質の問題ではないので、式の記述は省略しておく。

混合を考慮した場合のくさびの遡上計算は、河川の上流から下流に向ってx軸を考えた場合、(11)式を基に、(14)式および(19)式または(20)式を用いて逐次計算を行なえばよい。

4. 最上川河口部における塩水くさび

日本海側などの潮位差の小さい緩流河川では、かなり明瞭な塩水くさびの出現がみられる。図-4および図-5はS.44年およびS.46年における実測例である。淡塩境界面は推定によるものである。図中の計算値は、試算の結果、塩水の混入量や川幅変化の影響が小さいと思われたので、通常計算法により(1)式の右辺第一項のみを考慮して計算したものである。河口(CS.1)にて限界水深 h_{1c}

$$h_{1c} = 3 \sqrt{\frac{Q_1^2}{\epsilon g B_1^2}}, \quad \left(\frac{u_1}{\sqrt{\epsilon g h_1}} = 1 \right) \quad (1)$$

が出現し、 $\rho_2 = 1.024$ (18000ppm, $\epsilon = 0.0234$) とした。また、河床摩擦の影響は(2)式により考慮し、 $n = 0.030$ とした。河口水位は平均潮位T.P.060, 横断形はS.42年測量のものを用いた。水位や河床形状が塩水くさび観測時のものではないため、実測と計算の結果には若干の差はある。しかし、以上のような事情を考慮すると、くさびの長さや形状はほぼ一致しているとみなすこともできよう。そこで、この計算結果に基づき、(1)式を用いて塩水の混入量を計算してみた。混入速度は F_{ri} によりかなり異なるが、 $10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ のオーダーである。ところが、境界面の面積が大きいと混入量は相当大きくなり、図-6に示すように、河口地点では淡水流量のほぼ5%くらいにもなる。下層から上層に混入した塩水は、最上川の場合上層中において、ただちに完全に混合されることはない。その状況は図-4および図-5に示されている。

しかし、比較のため上層の平均塩分濃度を求めて計算値と照合すると図-7のようである。塩分濃度の鉛直線上の測定間隔が1mであるうえ、淡塩境界面付近とそのやや上層とでは塩分濃度にかんがりの差があるため、上層の平均塩分濃度を求めることに疑問がないわけではないが、ここでは、下層から上層への混入量に注目しているの、平均値化して比較検討を行なうこともやむをえぬことと思われる。境界面は濃度分布の変曲点と仮定して、概略値を求めたものが図-7に示されている。 $Q_0 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合、かなり大きな値が上流にまでわたっているが、測定間隔が長いので、境界面の位置の

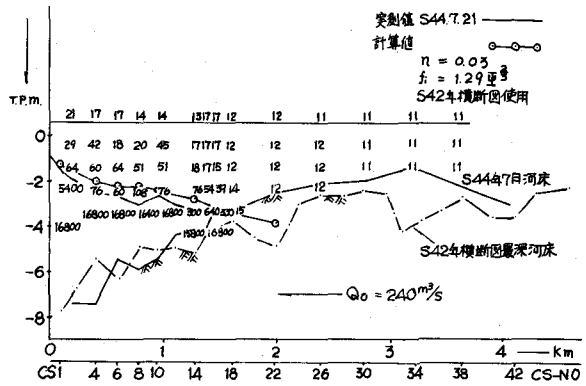


図-4 塩水くさび 最上川 S.44.7.21. $Q = 240 \text{ m}^3/\text{s}$

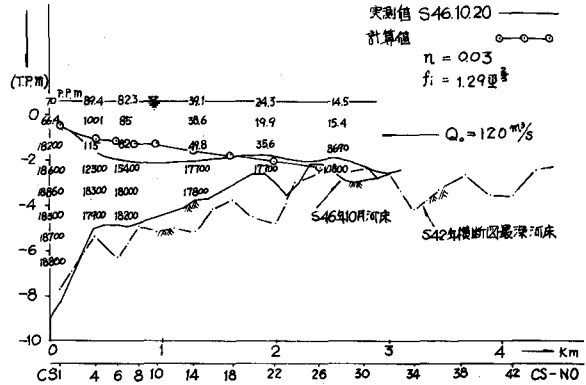


図-5 塩水くさび 最上川 S.46.10.20 $Q_0 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

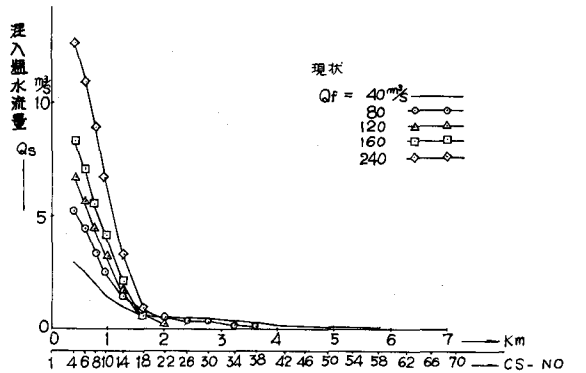


図-6 混入塩水流量 (最上川・現状河道)

とり方により極端に大きくなったもので、実際はもう少し小さい値をとるはずである。

$Q_0 = 240 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合が、 $Q_0 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合より小さいのは遡上距離が短いためであって、曲線の勾配は淡水流量の大きい方が急になる。この比較の結果は、(11)式の全項を考慮したものではないので厳密さを欠くうみはあるが、オーダー的には合致しているとみなすことができ、(11)式の妥当性をみることができよう。

つぎに、最上川下流部では河道断面を拡大する計画を検討中であるが、その場合には、試算の結果、上層への塩水混入量が増大し、その影響を無視できないことがわかった。したがって、この場合には(11)式の全項を考慮することにした。また、河床摩擦は考慮しなくてもよいので、(10)式の代りに(9)式にて計算を行なった。

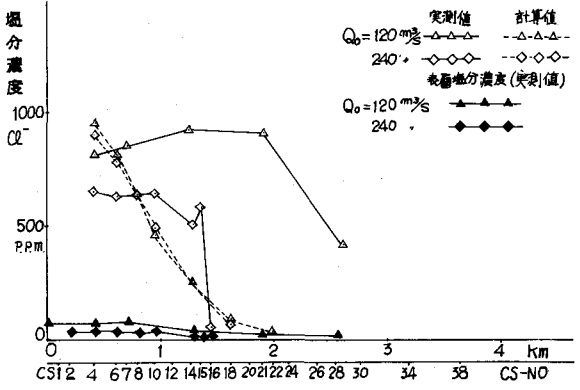


図-7 上層の平均塩分濃度(最上川, 現状河道)

断面No	追加距離 m	断面積		最大水深		川幅	
		現状	計画	現状	計画	現状	計画
CS 1	926	1260	2625	-7.75	-7.75	215	465
4	410.7	1320	2220	-5.40	-5.40	460	469
6	610.5	1254	2290	-6.30	-6.30	512	512
8	788.2	1070		-4.95	-4.95	357	
10	953.3	1022	2185	-5.15	-5.15	417	491
14	1276.7	859	2210	-5.20	-5.20	375	525
18	1621.9	805	2005	-3.75	-4.00	387	446
26	2384.0	753	1500	-2.60	-3.75	411	411
34	3220.2	620	1380	-4.20	-4.20	346	348
42	4111.0	650	1090	-3.60	-3.60	353	354
50	4868.7	594	940	-2.15	-2.95	290	290
54	5314.7	710	860	-3.70	-3.70	224	251
62	6292.2	420	732	-3.70	-3.70	294	311
70	7158.6	221	450	-2.70	-2.70	154	247

5. 混合を考慮する場合の塩水くさびの特性

表-1 最上川河口部横断の諸元

最上川のところで取りあげた計画河道の諸元は表-1のようであるが、試算の結果、(11)式で dB_1/dx の項の影響はわずかであるので、焦点を合わせるため、この項を省略して $B_1 = 360 \text{ m}$ (一定)と仮定して計算した結果を次に示す。図-8は $Q_0 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ および $Q_0 = 240 \text{ m}^3/\text{s}$ のそれぞれの場合について条件をかえて4種類の計算を実施し、(11)式の各項の比較をした結果を示す。また、内部フルード数、塩水混入流量 $Q_s = \int B_2 E dx$ 、および上層塩

分濃度の変化の様子をそれぞれ図-9~図-11に示す。曲線①と②は混合を無視した場合で川幅変化と河床摩擦を考慮するときとしないときとを比較したものである。河口で $Fri = 1$ としているが、くさび形状はほぼ同様の傾向を示し、くさびの上流端付近で多少の差が生じ

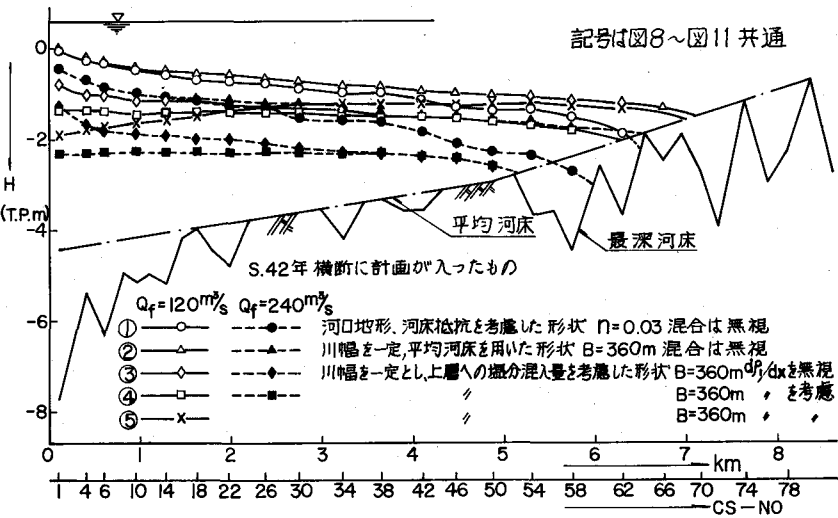


図-8 最上川塩水くさび形状図(計画断面)

ている。曲線③と④は混合を考慮した場合であるが、③では $d\rho_1/dx$ の項を無視している。河口付近、すなわちくさびの上流端付近において、上層の塩分濃度が大きくなると、これまで重視されていなかった $d\rho_1/dx$ の項が大きな影響をもってくるのがわかる。表-2は曲線④の場合について各項のオーダーを示したものである。これによると、Eの項の影響は小さいが、 $d\rho_1/dx$ の項の影響は河口付近において上層濃度が大きくなると急激に大きくなり、摩擦項と匹敵するほどになり、 dh_1/dx の値は負であったものが、正に転ずるに至った。別の計算で、CS58地点で境界面の高さを④より50cm上げた場合⑤には、CS50付近で曲線のピークが生じ、それより海側では境界面がさがる結果が得られた。もとより、上層の塩分濃度分布などの影響もあり、実際上には疑問も残るが、かなり微妙な特性を有することは確かであろう。(その他の特性については省略)。

6. おわりに

この解析を通じ、弱混合から緩混合、そして強混合へと移行する機構の解明に手がかりを得た。実験水路で緩混合状態が得られないといわれてきたが、くさびの長さが短い場合には当然のことである。また、河口でくさびが短い場合はジャンプするが、混合がすすんでいる場合にはジャンプは見られない。平常時航測写真の示すところでもある。各層における拡散を考慮した解析、および河口条件に関する考察の結果は別の機会に報告する予定である。

[参考文献] (1) 南：水講 S.48, (2) 須賀・高橋：年講 S.47, (3) 末石・住友・山田：年講 S.48, (4) 須賀・高橋：土

木研究所資料 834号 S.48, (5) 須賀・高橋：年講 S.46, (6) 中村・阿部：電研所報 66074, S.42,

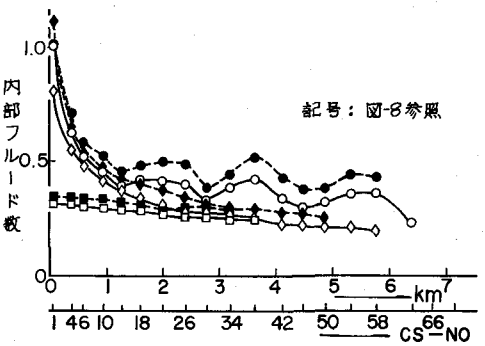


図-9 $Fr_1 \sim x$, 最上川計画断面

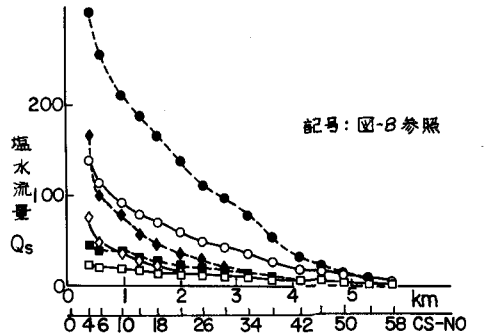


図-10 塩水混入流量 (最上川計画断面)

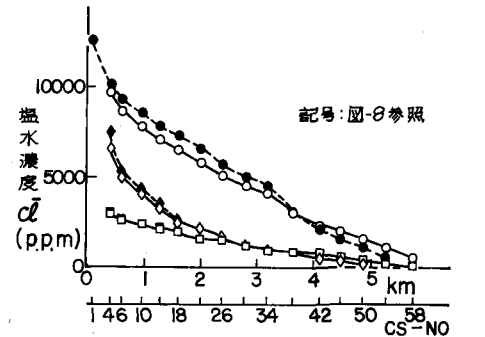


図-11 上層平均塩分濃度 (最上川計画断面)

CS-NO	ΔX_m	h_1	Q_1	C_1	ρ_1	ϵ	$f_1 - u_1^2$	Fr_1	E	$\phi(x)$	$if_1 - u_{f2}$	$h_1 \frac{d\rho_1}{dx}$	$\frac{u_1}{gh}$	$E \frac{u_1}{gh}$
	m	m	m^3/s	ppm			$\times 10^{-4}$		$\times 10^{-6} m/s$		$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-6}$
50	386.5	2.20	121.316	195	1.0	0.0234	20.59	0.2157	5.530	0.02231	2.934	0.8876	7.106	0.039
42	458.1	2.13	122.933	429	1.0	0.0234	18.80	0.2294	7.104	0.02217	2.633	1.050	7.679	0.055
34	447.6	2.07	125.363	770	1.0	0.0234	17.07	0.2441	9.176	0.02201	2.409	1.268	8.291	0.076
26	394.5	2.03	128.277	1161	1.00025	0.0232	15.58	0.2583	11.55	0.02165	2.261	1.495	8.822	0.102
18	345.2	2.00	131.669	1595	1.00089	0.0226	14.10	0.2748	14.80	0.02089	2.136	1.792	9.332	0.138
14	323.4	1.99	133.508	1821	1.0012	0.0223	13.50	0.2827	16.57	0.02052	2.086	1.940	9.558	0.158
10	342.8	1.99	135.437	2052	1.0015	0.0220	12.96	0.2887	18.05	0.02017	2.060	2.055	9.696	0.175
6	199.8	1.99	137.665	2310	1.0019	0.0216	12.42	0.2961	19.96	0.01971	2.040	2.202	9.855	0.197
4	318.1	1.99	139.101	2472	1.00208	0.0214	12.08	0.3006	21.19	0.01947	2.025	2.288	9.958	0.211
1		1.99	141.528	2738	1.00247	0.0210		0.3088						

表-2 最上川塩水くさび計算数値表 (曲線④のケース, $Q_0=120 m^3/s$ (a)式の各項の比較)