

準定常河口流出流と内部ジャンプ渦

須賀 堯 三*・高 橋 晃**

1. はじめに

準定常河口流出流においては、通常河口前面に内部ジャンプ渦が形成される。この内部ジャンプ渦は連行や混合の現象、および流れ方に深い係わりを有しているが、現象はレイノルズ数の影響を受けるため、実験室の水路における現象に関する研究のみによっては十分な考察を行うことができない。そこで最上川河口部における現地観測結果に基づいて、準定常状態の河口流出流の実態を明らかにすることを目的として検討を行った。

本論文において対象とした現象は、河口外での水理諸量の縦断特性、流量と川幅および地形条件が内部ジャンプや拡がり幅などの現象に与える影響、および内部抵抗係数と連行量などである。

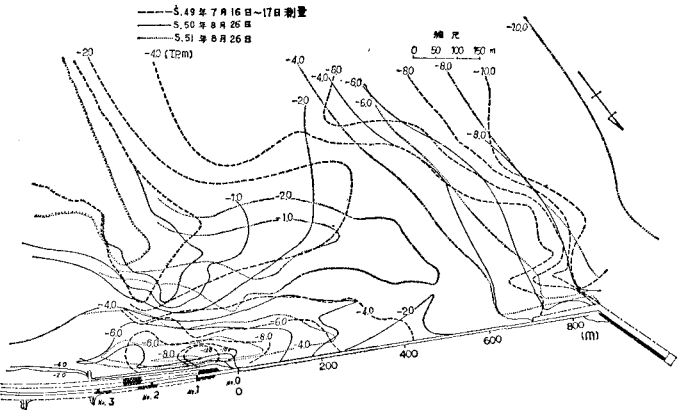
2. 実測の概要

日本海側の山形県に位置する最上川河口部では、弱混合状態の塩水くさびが存在し、低水時にはほぼ定常的な河口流出流が得られる。最上川河口においては、表一に示す3回の現地観測を行った。観測の主な項目は、流速と濃度の分布、拡がり幅や流線、および地形、水位、流量、波などである。

河口部は、右岸側に酒田港の左防波堤が導流堤の機能を有するかたちとして存在する。観測時の河口砂州汀線、および深浅測量結果が図一であり、砂州部の最狭川幅は昭和49年観測時で約180m、昭和50年観測時が約170m、昭和51年観測時が約250mである。河口部地形は、河口砂州先端部の右岸側導流堤沿いに局所的な深掘れ部が存在し、その下流導流堤中央部付近で浅くなっている。さらに導流堤先端付近は深くなり、等深線が海岸線にほぼ平行に連なっている。このうち昭和51年観測時は、とくに砂州先端付近の海側延長線上に

表一 観測時の水理量諸元

実 測 日	流 量 (m^3/s)	潮 位 (T.P. m)	風 速 (m)	波 高 $H_{1/3}$ (m)	備 考
S.49.7.17	490+京田川?	0.48	—	—	流量減水時(7日前にピーク 1800 m^3/s)
" 7.18	355+京田川?	0.46	—	—	
S.50.8.27	61+京田川 19	0.45	1.3~3.5	0.07~0.11	流量減水時(3日前にピーク 240 m^3/s)
" 8.28	55+京田川 19	0.46	1.7~3.7	0.35~0.37	
S.51.8.25	290+京田川 28	0.55	1.0~3.3	0.57~0.60	流量減水時(9日前にピーク 1700 m^3/s)
" 8.26	250+京田川 28	0.50	2.3~3.8	0.26~0.48	



図一 最上川河口深浅図

かなり沖まで浅くなっており、この浅い部分で碎波している状態であった。これまでの洪水前後の調査では、右岸導流堤末端から700m間付近で大きな変化が見られ、洪水によってはき出された土砂の堆積、波による変化が大きく、それより左岸側では大きな変化は見られないが、碎波点の違いによる沿岸砂州の移動があることが観測されている。

3. 河口流出と内部ジャンプ渦

定常流では河口において、内部フルード数が1となり、その位置を起点として内部ジャンプ渦が発生する。この内部ジャンプ渦は、境界面から間欠的に巻き波が発生し、それが急激に渦に成長して流下する現象であり、そのエネルギーは混合に費され、やがて消滅する。内部ジャンプ渦の領域は、巻き渦の発生から消滅までの全体の範囲をさすものとし、その区間では急成長地点での流速の一

* 正会員 工博 建設省土木研究所 河川部河川研究室長
** 正会員 建設省土木研究所 河川部河川研究室研究員

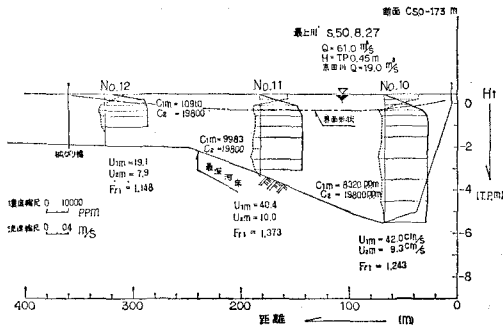


図-5 濃度、流速分布の横断変化

位置が上昇する傾向が強い。またこの場合、河口最狭地点から 100 m 下流間の左岸先端部で、石狩川⁴⁾で得られている結果と同様、流速が早くなっている。河口流出流の拡がり幅も石狩川⁵⁾と同様、指数関数的な拡がりを示すが、海水による浮力効果がきいて、大局的には折線となり、上流側の領域は短い。それより下流では流路の拡がり方が小さくなり、沖合も含めた拡がり方は双曲線に近い傾向を示す⁶⁾。この指数関数的な拡がりの領域、逆流の縦断的な変化、および分布形より判断すると内部ジャンプ渦の長さは約 400 m 程度となる。実際河川では、水深に比してローラー状の間欠渦が小さいので、主流からのエネルギー補給と混合によって失なうエネルギーとの差が小さく、全体として内部ジャンプ渦の長さが大きくなるものと考えられる。ただし、水深に比して流路幅の程度が小さい場合には、内部ジャンプ渦の長さは短くなるものと考えられる。

いっぽう、昭和 51 年の実測資料は、流量がある程度大きく、かつ地形の影響をあまり受けない場合で、内部フルード数が沖合に向って増加する傾向を示す。内部ジャンプ後の変化も顕著でないが、表面流速の横断方向で一様性、および濃度、流速分布等より判断すると内部ジャンプ渦の長さは約 1000 m 程度と考えられる。なお、これら 3 ケースの河口流出流の拡がり幅に関しては、河水が海水上を拡がるため、海底地形の影響は内部ジャンプ渦などの特性に対するのと比して、この場合は少ないと言える。

4. 内部抵抗係数と連行量

河口流出流の濃度分布、流速分布および内部境界面形状の縦断変化と拡がり幅から、内部ジャンプ後の内部抵抗係数および連行係数の特性を検討した。流心に沿う水理諸量の縦断変化は、測定の不規則値を平均化して用いた。連行係数を柏村⁷⁾と同様、 $E = |h_1/e \cdot de/dx|$ によって求め、その結果を他の水理諸量とともに縦断的に示したのが図-6~8である。昭和 49 年の観測値は、内部ジャンプ後の混合状態が通常のものとは異なった変化を示す

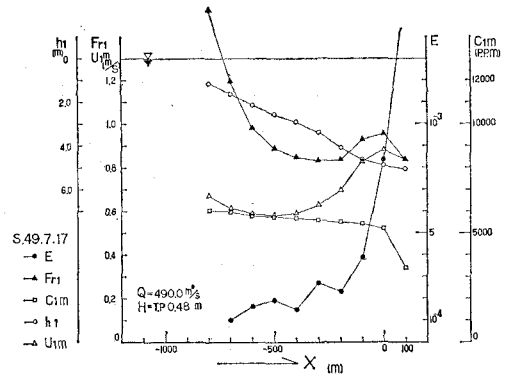


図-6 水理諸量縦断変化図(最上川)

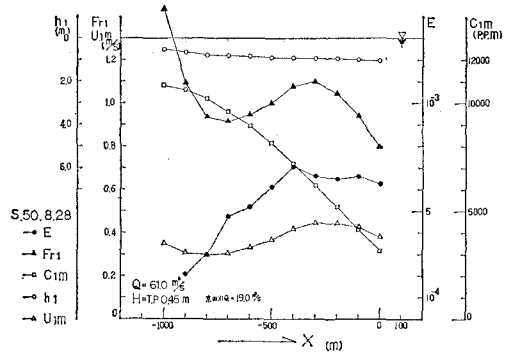


図-7 水理諸量縦断変化図(最上川)

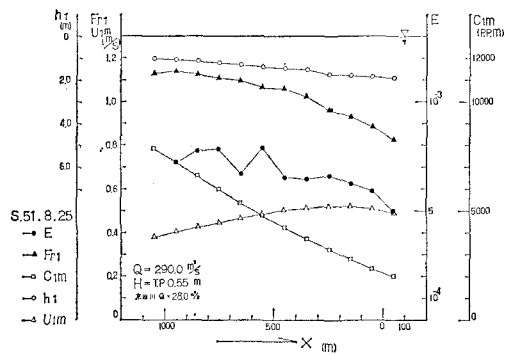
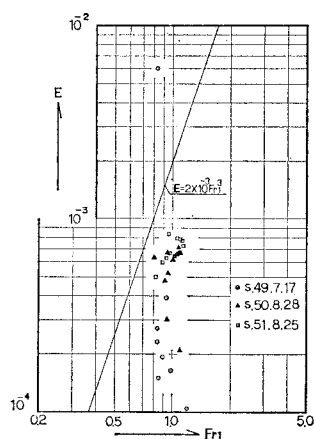


図-8 水理諸量縦断変化図(最上川)

が、内部ジャンプによる上層濃度の急増に伴い、その縦断変化に対応して連行係数も変化する。また沖合では内部フルード数の増加にもかかわらず、減少する傾向となっている。なお著者らの提案している $E = 2.0 \times 10^{-3} \cdot Fr_1^3$ の実用式⁸⁾は、 $Fr_1 > 1$ の範囲でも、内部ジャンプ渦が生じていない場合のものである。実測によると、内部ジャンプ渦の発生する河口外では、図-9のように、実用式より小さく、約 1/3 以下となることが多い。

この原因は、内部ジャンプ後の濃度分布および流速分布の相違によるものと思われる。すなわち、内部ジャンプ渦の領域では、表面流速が大きく、三角形分布に近づく

図-9 $E \sim Fr_1$ の関係

き、界面付近の流速は小さい。また、濃度勾配は緩やかとなるが、流速の勾配も小さいので、界面付近の局所リチャードソン数は層平均リチャード数が減少しても、あまり小さくならないためと考えられる。この場合、内部ジャンプ渦の中に含まれるローラ状渦のスケール、強度、減衰に伴う拡散、および間欠性に関する考察が必要であり、減少量も含めて厳密には今後の問題として残される。

内部抵抗係数 f_i の逆算は、柏村⁹⁾が指摘したように、拡がり幅がその値を大きく左右し、逆算精度に問題が残る。また、一次元性の問題もある。昭和 51 年観測資料で、連行量および内部境界面位置が実測値となるような、内部抵抗係数は 2×10^{-3} 付近であった。通常の内部抵抗係数は、クーリガン数の増大とともに減少する。内部フルード数が大きい領域では、連行による付加摩擦力を考慮する必要がある、その項の寄与が支配的となる。著者らはこの場合の抵抗係数の実用式として、 $f_i = 0.35 \times \Psi^{-0.5} + 2E$ を提案¹⁰⁾している。連行による付加摩擦力を考慮せず、従来の式により混合を考慮した塩水くさび形状計算では、安定した計算ができないが、付加摩擦力を考慮することにより、満足すべき結果が得られている。内部ジャンプ渦の領域の連行係数は、図-9 のように実用式の約 1/3 以下であるので、実用式から得られる f_i は相当過大なものとなる。しかし連行係数の逆算値を付加摩擦力として考慮すると、ほぼ妥当な値となることが判明した。なお、クーリガン数がさらに増大する場合には、柏村¹¹⁾の指摘したように、 $f_i \approx 2E$ となることは明らかである。

5. まとめ

この論文では、準定常状態の最上川河口部における流出現象の実測結果を基に、内部ジャンプ渦を中心に現象の実態について考察を行った。その特徴は次の 3 点であると言える。すなわち、(a) 柏村らの石狩川における実

測結果と対比し、多くの点において同一傾向であることがわかり、現象の一般性を示し得たこと。(b) 地形と流量が異なることによって、流出流が異なる場合があること。および (c) 内部ジャンプ渦を中心に議論し、現象の知見を深めることができたことである。

この検討によって明らかとなった主要な事項は次のようである。

- (1) 内部ジャンプ渦の形状は、実験水路の場合に比して、レイノルズ数が異なるので、界面の縦断勾配が小さく、したがって、渦の厚さは大きくならない。また、ローラ状の間欠渦が小さいので主流からのエネルギー補給と混合によって失なうエネルギーとの差は小さく、流路幅が小さくない場合には、全体として内部ジャンプ渦の長さが大きくなる。最上川の場合には 400~1 000 m 程度と考えられる。
- (2) 河口沖合に浅い水域が存在すると内部ジャンプ渦は変化することがある。すなわち、内部ジャンプ後の水深に小さい所があると、下層における逆流量が制限され、通常の内部ジャンプ渦と異なった混合状態を示す。このような場合には、浅瀬下流において再び内部ジャンプが発生することがある。
- (3) 流量が少ない場合、海水による浮力効果が卓越し、横断特性は変化する傾向が強くなり、一次元性が崩れる。
- (4) 河口流出流の拡がり幅は、海床地形の変化には鈍感であり、内部ジャンプ渦の形態が若干異なっても、その影響をあまり受けない。なお、流量が小さい場合には拡がり方が若干異なることとなる。
- (5) 連行係数 E は、内部ジャンプ渦以外の区間に適用する著者の提案による実用式よりは小さく、最上川の場合には約 1/3 以下となった。連行係数が減少する理由は、濃度分布および流速分布の相違にあり、局所リチャードソン数がある値より小さくならないことを見出したが、減少量も含めて厳密には今後の問題点として残される。この場合、内部ジャンプ渦の中に含まれるローラ状渦のスケール、強度、減衰に伴う拡散、および間欠性に関する考察が必要である。
- (6) 内部ジャンプ渦の領域において、内部抵抗係数は、クーリガン数の項の寄与は小さく、連行による付加摩擦力項の寄与が支配的である。連行係数の実測値を用いることにより、以前著者が提案した内部抵抗係数の実用式 $f_i = 0.35 \Psi^{-0.5} + 2E$ の適用性が確認された。

参考文献

- 1) 須賀幾三・高橋 晃: 弱混合河川における内部抵抗係数, 土木学会第 30 回年次講演会 II 部, pp. 470~471, 1975.

- 2) 須賀堯三: 河川における塩水くさびと内部渦の特性, 第 23 回水理講演会論文集, pp. 369~374, 1979.
 - 3) 須賀堯三: 河道特性によって生じる二・三の特異な海水遡上現象, 土木学会第 34 回年次講演会 II 部, pp. 255~256, 1979.
 - 4) 柏村正和・梶井 浩: 河口の内部フルード数の持つ意味とその分布, 第 26 回海講論文集, pp. 563~566, 1979.
 - 5) 柏村正和・吉田静男: 河口を出る淡水の流れ, 第 13 回海講講演集, pp. 268~271, 1966.
 - 6) 須賀堯三・高橋 晃: 河口流出流に関する実測に基づく考察, 第 24 回海講論文集, pp. 539~543, 1977.
 - 7) 柏村正和: 河口密度流における連行と二層間抵抗, 土木学会第 29 回年次講演会 II 部, pp. 429~430, 1974.
 - 8) 須賀堯三・高橋 晃: 淡塩二層流の連行係数, 土木学会第 31 回年次講演会 II 部, pp. 383~384, 1976.
 - 9) 前出 7).
 - 10) 須賀堯三・高橋 晃: 内部抵抗係数に関する再考, 第 26 回海講論文集, pp. 572~576, 1979.
 - 10) 前出 7).
-