

河口砂州周辺の海水侵食

Seawater erosion around the sandbarriers at river mouths

井藤 由親*・真野 明**

Yoshichika Ito and Akira Mano

There is a flood terrace formed by the flood in 1986 off the Abukuma River mouth. On the terrace, a channel develops year by year, which has an important effect on the sandbarrier development by refracting waves. The cause of the channel development is estimated to be runoffs of the river but the buoyancy effect of seawater is against the erosion. As the first step to study the channel formation, we have searched the condition that the fresh water erode the seawater around the sandbarrier, expecting the effect of wake from the barrier. We get $Ri \leq 0.5$ for the erosion from the hydraulic experiments. Then we apply the result to the Abukuma River mouth.

Keywords : Richardson number, the eddy of the wake, the effect of the buoyancy, 2-layer flow

1. はじめに

阿武隈川河口では河口テラス地形による波の屈折が砂州の成長や変形に大きな影響を及ぼしていることがわかって¹⁾。この中で特に河口開口部から沖に向かって発達する河口テラス上の溝地形が波の屈折に大きな影響を与えている。この溝は出水時の河川水の侵食作用により発達するものと考えられるが、密度流効果と砂州による後流渦効果の両方の効果があり複雑な現象なので水理実験により流れの様子を調べ、実験的に渦の挙動と水理条件の関係を求めた。また、得られた水理条件を現地に適用して、溝発達の機構を考察した。

2. 実験の概要

(1) 実験装置の概要

実験装置は図-1のように、整水タンク、開水路、貯水タンク、調節バルブ、揚水ポンプ、ポンプホース、3つの堰から成り、水を循環させている。この間、なるべく塩水が淡水に混合しないようにするため、塩水上層が流されてほぼ定常になるまでの排水は貯水タンクに流さず、排水するものとした。

図-2に寸法を示した。整水タンクは、合板を用いた手製のものにペンキを塗り、隙間をシリコンシーラントで埋め、水が漏れないようにしている。又、ポンプアップした循環水を整流するために、直径1cm程度の穴を多数開けた整流板を1枚、整流タンク全断面に設置してある。開水路は矩形断面（縦16cm、横30cm）をもつ、厚さ1cmの透明アクリル板で製作した。また開水路の両側に可動式の堰を設け、塩水層の高さを変えられるよう工夫をしてある。開水路内に配置したバブルも、同じアクリル板を用いており、左右対称にした。また、揚水ポンプの容量が大きいため越流堰を設け、排水させてある。

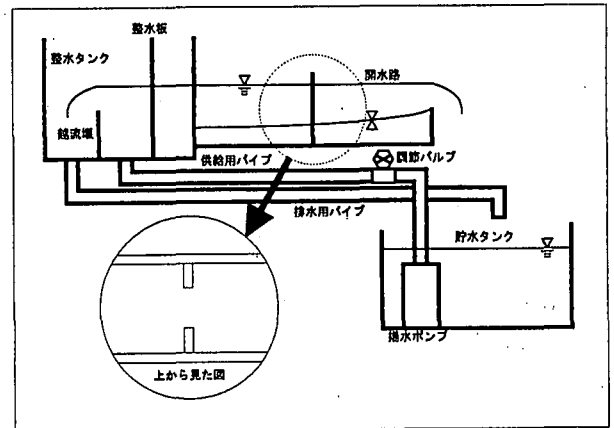


図-1 実験装置概要図

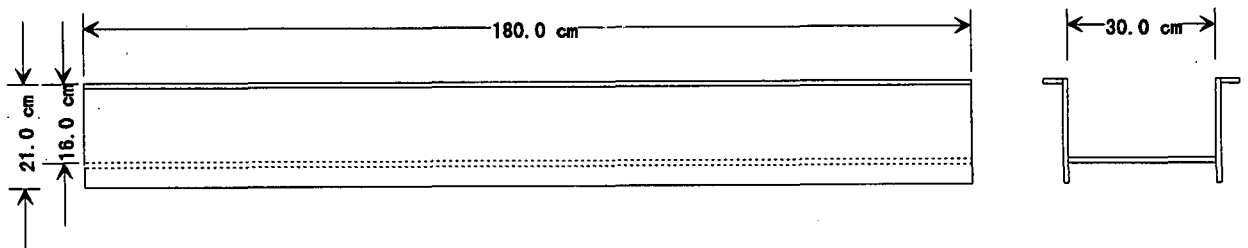


図-2 実験装置寸法図

* 学生会員 北海道大学大学院 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 東北大学大学院

(2) 実験条件

調節バルブにより、流量 Q を調節し、バップル間隔 B ($=5\text{cm}, 10\text{cm}, 15\text{cm}$), 塩水の密度 ρ_2 ($=1.003\text{g/cm}^3, 1.005\text{g/cm}^3, 1.007\text{g/cm}^3, 1.009\text{g/cm}^3$) を変えて実験を行った。流速の測定はトレーサーを用いて測定した。デジタルビデオカメラで撮影して取り込んだ画像からトレーサーの座標をVMG (ビデオメジャリングゲージ) を用いて求め、トレーサーの移動距離を測り、移動時間を考慮し、流速を求める。

(3) 可視化の手法

バップルによってできる後流渦が底に達するかどうかを調べるため、上層の淡水にウラニンで着色し、可視化した。水路の底に鏡を設置して、水路側方と底から流れの様子を同時に観測できるようにした。水路全体を暗幕で覆い、ブラックライトでバップル周辺を照らしてウラニンを発光させた。側方よりデジタルビデオカメラで撮影し、解析に用いた。

3. 2層の界面形状について

右の図-3は砂州模型の周辺の界面の様子を3次元プロットしたものである。X軸は水路下流端を原点に上流に向かってとっており、 $X=90\text{cm}$ の所に砂州模型が設置されている。Y軸は側壁から横断方向にとった距離で $0 \leq X \leq 7.5\text{cm}$ の所の高いピークは砂州模型である。砂州の上流側では塩水層の水深は小さいが、砂州部分で水深の勾配が大きくなり、下流側では厚い塩水層の上に淡水層が乗りあげ、淡水の流動は底面に達しない状態であることがわかる。

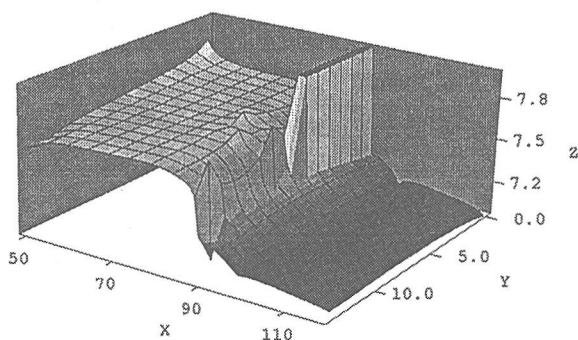


図-3 界面形状図

(図-3の条件は、 $\Delta\rho=0.03(\text{g/cm}^3)$,

淡水層の流速 $U=3.98(\text{cm/sec})$, $Re=907$, $Ri=4.79$)

4. 後流渦の挙動について

実験は淡水の流量、バップルの間隔を変えた3パターン8ケースずつ24種類の条件と、淡水の流量、塩水の密度を変えた4パターン8ケースずつ32種類の条件の全部で48ケースを行った。(淡水層の流速は、バップルの最狭部の値を用いた。)

(1) 後流渦の底への到達

下に淡水で起こった後流渦が底まで到達した例(写真-1)と底まで到達してない例(写真-2)を示す。この2枚の写真はそれぞれ上部分が水路側面から直接得られた像で、下部分が水路の下に置いた鏡から反射した像である。写真-1では、側面から見て淡水が塩水層を侵食して底に達しているのがわかる。また、底からの像をみると、流れの中心軸に対してほぼ対称に後流渦が発達しており、後流渦の3次元的な挙動がわかる。この状態のときに淡水による後流渦が底に到達しているものと判定した。

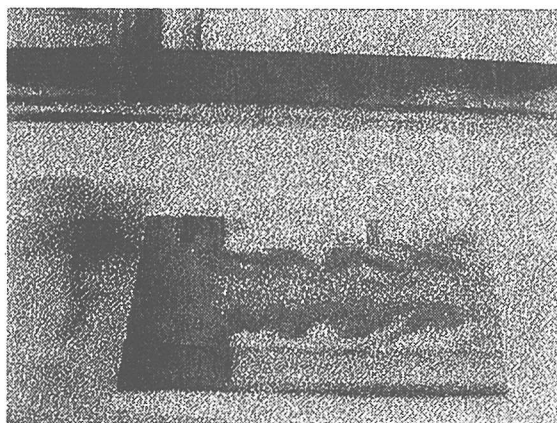


写真-1 ケース4

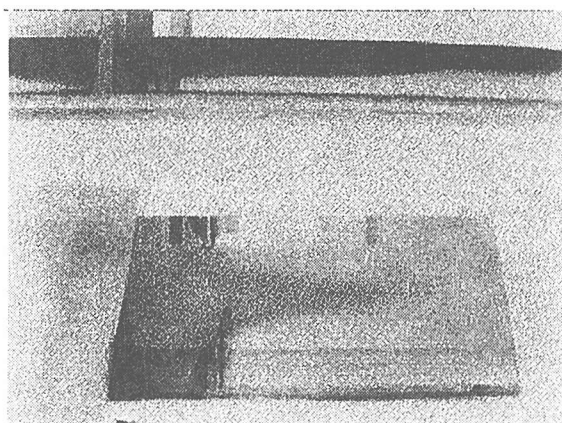


写真-2 ケース1

(2) バッフル間隔を変化させた場合

表-1~3には、淡水層の密度を1.000g/cm³、塩水層の密度を1.003g/cm³として、バッフル間隔を種々変えた実験ケースの結果を示す。表-1がバッフル間隔15cm、表-2が10cm、表-3が5cmの場合であり、各表とも流量を8段階に変えて実験してある。

いずれのバッフル間隔でも、流速が大きい方が後流渦が底に達することがわかった。また、淡水の流量が等しければ、バッフル間隔が狭くなるほどバッフル間を流れる流動層の流速が速くなることはわかる。つまり、一定流量で比較した場合、バッフル間隔が狭いほど後流渦が底に達することが確認できた。表の最下欄の×は底への到達が認められないもの、△はデジタルビデオカメラにおいて不明瞭であったもの、○は底への到達が認められたものを示す。

(3) 塩水の密度を変化させた場合

塩水の密度を変化させた場合を表-4~6に示す。バッフル間隔はいずれも15cmであり、淡水層密度はρ₁=1.000g/cm³である。表-4は、塩水層の密度1.005g/cm³、表-5は、1.007g/cm³、表-6は、1.009g/cm³の場合を表す。

バッフル間隔を変えたときと同様に、流速が大きい方が後流渦が底に達することがわかった。また塩水の密度が淡水の密度に近いほど後流渦が底に達することが確認できた。

(4) 考察

淡水による塩水の侵食には、4(2)節、4(3)節から流速が関係してくることは明らかで、また4(3)節の結果から淡水層と塩水層の密度差も考慮する必要がある。つまり、浮力も関係する。よって、浮力と慣性力（ここでは、せん断力）の比で表されるリチャードソン数Riが、後流渦が底に達するどうかを区別する重要なパラメータになる。ここでRiは次式のように定義した。

$$Ri = -g(\frac{\partial \rho}{\partial z})/\rho(\frac{\partial U}{\partial z})^2$$

いま、 $-\partial \rho/\partial z \approx \Delta \rho/h_1$ 、 $\partial U/\partial z \approx U_1/h_1$ と近似すると
$$Ri = \epsilon g h_1 / U_1^2$$

h₁:淡水層の厚さ、U₁:淡水層の流速、ε = Δρ/ρ₂、Δρ₂:淡水層と塩水層の密度差、ρ₂:塩水層の密度、g:重力加速度で表される。

この流れを記述する無次元数としてはこの他に、レイノルズ数Reと上下層の水深比h₁/h₂が挙げられる。Reは次式で定義した。

$$Re = U_1 h_1 / \nu$$

後流渦が底に達するかどうかをRiとReによって調べたのが図-4である。横軸がReで縦軸がRiである。また、後流渦が底に達した実験ケースは、白抜き記号でプロットしてある。これを見ると、全実験範囲でRi ≤ 0.5の場合に後流渦が海水を侵食し底に達することがわかり、Reには関係しないことがわかる。バッフルより下流側では淡水と塩水の界面に連行渦が発生しているが、Ri ≥ 0.5では、後流渦はこの連行渦と一緒にU字型の渦となって流下しているものと考えられる。水深比h₁/h₂については本実験範囲内では影響は小さいと考えられる。

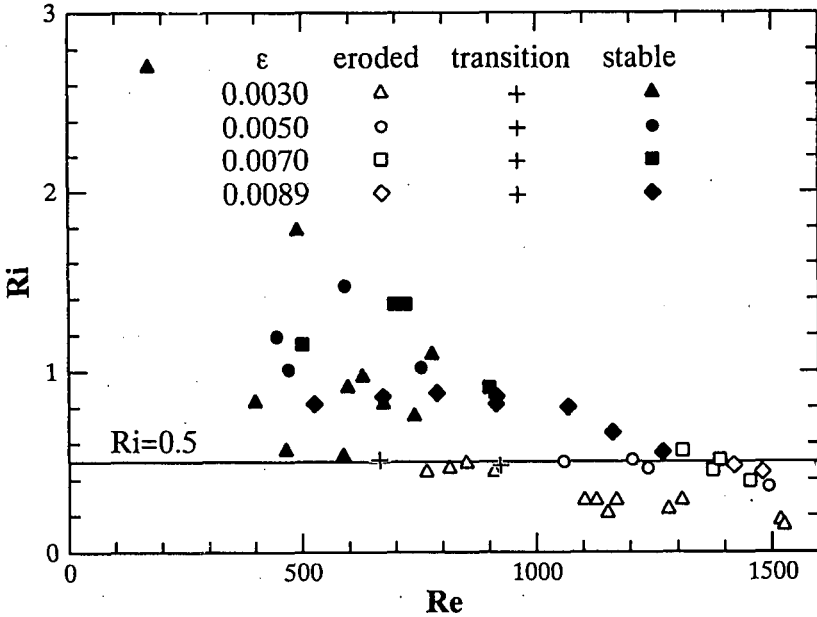


図-4 ReとRiと後流渦の侵食との関係

表-1 Riと後流渦の底への影響(B=15cm, $\rho_2=1.003\text{g/cm}^3$)

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8
淡水層の流速(cm/sec)	2.16	3.01	2.91	4.06	4.17	4.08	5.62	5.37
淡水層の厚さ(cm)	2.84	3.37	2.79	2.73	2.86	2.63	3.00	2.79
Re	490	778	628	850	923	814	1308	1127
Ri	1.78	1.09	0.97	0.49	0.48	0.46	0.28	0.28
後流渦の底への影響	×	×	×	○	△	○	○	○

表-2 Riと後流渦の底への影響(B=10cm, $\rho_2=1.003\text{g/cm}^3$)

ケース	9	10	11	12	13	14	15	16
淡水層の流速(cm/sec)	1.35	2.92	3.15	3.36	4.30	5.31	5.95	7.03
淡水層の厚さ(cm)	1.68	2.64	2.76	2.89	2.77	2.72	2.82	2.83
Re	173	596	673	739	909	1102	1280	1518
Ri	2.70	0.91	0.82	0.75	0.44	0.28	0.23	0.17
後流渦の底への影響	×	×	×	×	○	○	○	○

表-3 Riと後流渦の底への影響(B=5cm, $\rho_2=1.003\text{g/cm}^3$)

ケース	17	18	19	20	21	22	23	24
淡水層の流速(cm/sec)	2.65	3.16	3.48	3.39	4.05	5.44	5.93	7.53
淡水層の厚さ(cm)	1.98	1.90	2.20	1.98	2.46	2.82	2.53	2.64
Re	520	594	758	665	986	1519	1485	1968
Ri	0.83	0.56	0.53	0.51	0.44	0.28	0.21	0.14
後流渦の底への影響	×	×	×	△	○	○	○	○

表-4 Riと後流渦の底への影響(B=15cm, $\rho_2=1.005\text{g/cm}^3$)

ケース	25	26	27	28	29	30	31	32
淡水層の流速(cm/sec)	2.94	2.88	3.61	3.09	5.28	5.10	5.53	6.38
淡水層の厚さ(cm)	2.60	2.02	2.72	1.98	2.94	2.66	2.88	3.00
Re	590	446	755	471	1204	1058	1236	1493
Ri	1.47	1.19	1.02	1.01	0.51	0.50	0.46	0.36
後流渦の底への影響	×	×	×	×	○	○	○	○

表-5 Riと後流渦の底への影響(B=15cm, $\rho_2=1.007\text{g/cm}^3$)

ケース	33	34	35	36	37	38	39	40
淡水層の流速(cm/sec)	3.58	3.63	3.41	4.47	5.96	6.26	6.49	6.95
淡水層の厚さ(cm)	2.58	2.65	1.96	2.67	2.90	2.96	2.79	2.77
Re	697	722	501	900	1311	1390	1374	1453
Ri	1.37	1.37	1.15	0.91	0.56	0.51	0.45	0.39
後流渦の底への影響	×	×	×	×	○	○	○	○

表-6 Riと後流渦の底への影響 ($B=15\text{cm}, \rho_2=1.009\text{g/cm}^3$)

ケース	41	42	43	44	45	46	47	48
淡水層の流速 (cm/sec)	4.64	4.91	4.99	5.22	5.71	6.38	6.93	7.25
淡水層の厚さ (cm)	2.16	2.37	2.33	2.49	2.48	2.57	2.64	2.63
Re	788	915	914	1068	1163	1269	1419	1479
Ri	0.88	0.86	0.82	0.80	0.66	0.55	0.48	0.44
後流渦の底への影響	×	×	×	×	×	×	○	○

5. 阿武隈川河口への適用

阿武隈川河口 (1992 年) の鳥瞰図を図-5に示す。阿武隈川では1986年の洪水でできた大規模な洪水テラスが河口の沖に広がっている。波の卓越方向が東南東なので漂砂の卓越方向は北向きとなり、右岸砂州が発達する。すなわち、左岸寄りに主水路が存在しているが、その沖のテラス上に溝形地形が発達していることがわかる。

次に阿武隈川河口での出水時のRiを考察する。1985～1994年までの主な出水時のデータ²⁾を用いた。また、1984年から1994年の阿武隈川河口の深淺図を合わせて検討した。

河口での断面形状は河口最狭部の幅とその地点の最高水深を用い、三角形断面で近似した。

Riは4(4)節と同様に定義した。ここで、阿武隈川河口のデータは次のように処理した。まず、海水の密度は標準値である 1.03g/cm^3 を用いた。そして淡水層の水深 h_1 については、出水時は阿武隈川河口において砂州地点までは淡水層と考え、河口最狭部における最大水深を用いた。流速はピーク出水流量を上で求められた断面積で除して求めた。ここで出水による流水断面の拡大は考えていない。

阿武隈川河口における出水時の海底侵食とRiの関係を図-6に示す。阿武隈川河口テラス上で溝が侵食傾向であるときは $Ri \leq 0.5$ がわかった。また、1993年以降は河口が広く開いた状態を保っているため、出水時にもRiがあまり小さくならず、この期間では、 $Ri \geq 0.5$ となり溝の発達が鈍っていることと対応している。

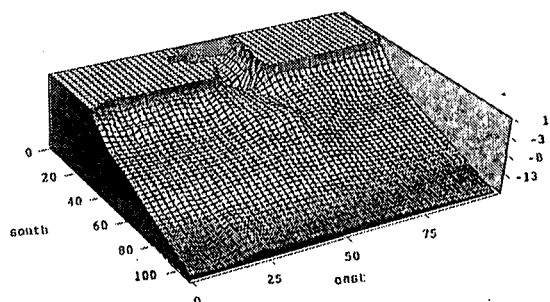


図-5 阿武隈川河口鳥瞰図

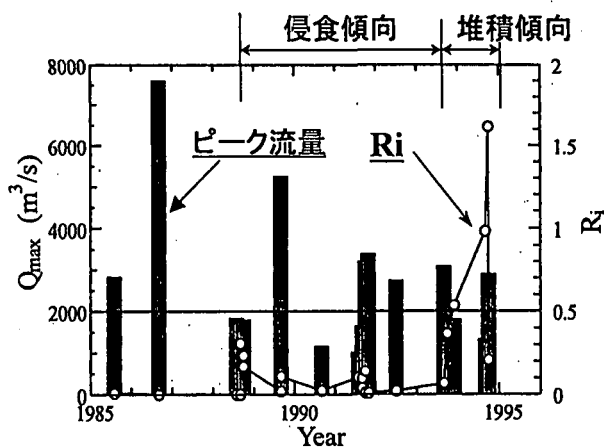


図-6 阿武隈川河口でのRi

6. おわりに

2層の界面形状より、バップルを過ぎると淡水は塩水の上に乗りがあがることがわかった。しかし、この状態でも $Ri \leq 0.5$ で後流による渦が塩水を侵食し、底にまで達することが確認できた。また、実際の阿武隈川においては、テラスの溝地形が発達している期間で $Ri \leq 0.5$ がわかり、また侵食が鈍っている期間では $Ri \geq 0.5$ がわかった。よって、阿武隈川河口テラス上の溝形地形の発達は、出水時に淡水が海水を侵食して底に影響を与えて生じたものと考えることができる。

参考文献

- 1) 真野明・林吉近・沢本正樹：阿武隈川河口テラスと砂州の干渉作用，海岸工学論文集，第42巻，pp.591-595，1995。
- 2) 建設省東北地方建設局・宮城県土木部：仙台湾沿岸技術検討委員会報告書，161p，1994。