

ポケットビーチの河口安定性に関する実験

EXPERIMENTS ON THE INSTABILITY OF A RIVER MOUTH IN A POCKET BEACH

泉 典洋¹・H. P. V. Vithana²・田中 仁³

¹正会員 Ph.D. 東北大学大学院工学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

²M.Eng. University of Twente, Netherland

³正会員 工博 東北大学大学院工学研究科

It is commonly observed that, in pocket beaches, river mouths are located at either end of beaches adjacent to one of the headlands. Izumi *et. al.*¹⁾ presented a linear stability theory to explain the instability of river mouths in pocket beaches. The theory shows that river mouths cannot stay stably in the central region of beaches but can stay only within regions near either end of beaches when the capability of longshore sediment transport is not sufficient compared with the load of river sediment supply. In this study, a series of experiments are performed to study the instability of river mouths with the use of a simplified physical model. It is found that river mouths are always unstable at the center of beaches even without the shielding effect of headlands on the wave energy; thus, the shielding effect is not essential for the instability. Contrary to the theoretical results, river mouths are unstable at the beach center even if sediment supply is not sufficiently large.

Key Words : pocket beach, river mouth, instability, laboratory experiment

1. はじめに

ビーチの両端を岩場などのヘッドランドで囲まれたビーチをポケットビーチと呼ぶ。ポケットビーチには河川が流入しているのが普通であるが、ほとんどの場合、河口はビーチのどちらかの端のヘッドランドに隣接して位置していることが知られている。泉ら¹⁾は、この現象が河口から供給される土砂と波浪によって生じる沿岸漂砂の相互作用によって生じる不安定現象であるとの観点から、one-line theory を用いた線形安定解析を行い、波浪の沿岸漂砂輸送能力に比べて河口からの供給土砂が大きい場合、河口はビーチの中央に安定的に存在できないことを理論的に示した。本研究は泉ら¹⁾の理論を検証するとともにポケットビーチにおける河口の安定性について実験的に明らかにしようとするものである。

2. 実験

(1) 実験概要

ポケットビーチのモデルとして 12 m × 12 m の造波水槽内に、図-1 のような実験装置をベニア板を用いて作成した。水槽内の幅 2 m 長さ 10.34 m の領域をベニア板で囲み、長手方向の一端（図中左側）にポケット

ビーチの模型を配置し、反対側の一端（図中右側）を開放にして波を入射させている。

実際のポケットビーチでは両端にヘッドランドが存在するのが普通であり、河口の安定性に対しヘッドランドによる波浪の遮蔽効果が大きな影響をおよぼしているとも考えられる。しかし本研究では、その効果が現象に対して本質的なものではないとの考えから、ポケットビーチの模型として二つの側壁でビーチを挟んだ非常に単純化された模型を用いている。この模型では、ヘッドランドが有する沿岸漂砂を止める働きのみが再現されていることになる。

また実際のポケットビーチでは円弧状の形状を有する場合が多いが、理論的考察の章で述べるように、碎波角が十分小さい場合、ビーチの幾何形状が円弧状であっても直線状であっても one-line theory の範囲内では第一近似的に同一の方程式系で記述することができる。したがってこの模型を用いれば、ヘッドランドによる波浪の遮蔽効果を除いて、実際のポケットビーチを良好に再現することができるものと期待できる。

(2) 実験方法

図-1 中左側の水槽の奥に、ビーチ部の模型として中央粒径 0.2 mm のほぼ一様な砂を敷きつめ、中央部に河道模型としてアクリル板で作った固定水路を設置し

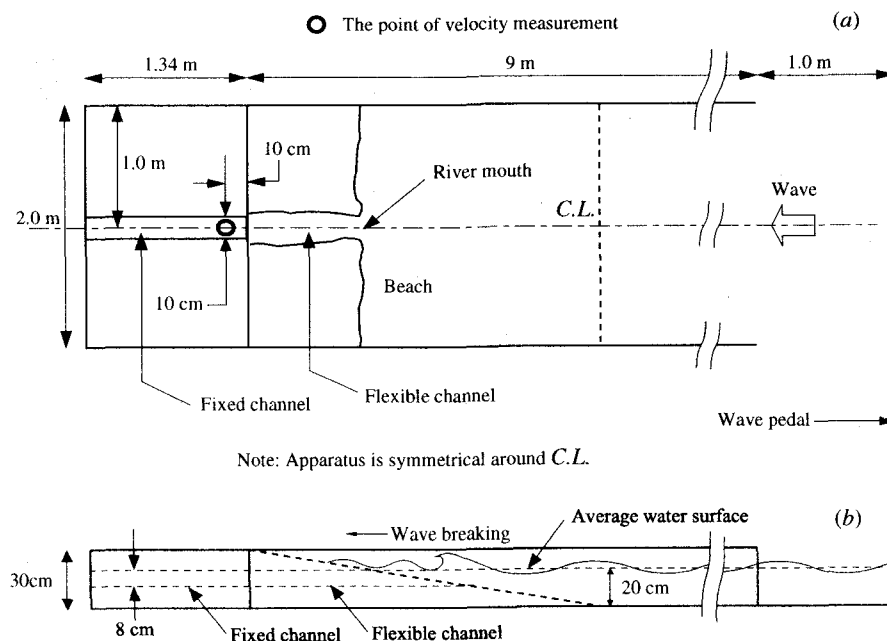


図-1 実験装置. (a) 平面図, (b) 側面図.

表-1 実験条件および結果.

Run No.	河口流速 (cm/s)	給砂量 (g/min)	$\kappa \times 10^4$ (m^2/s)	D (cm)	P (cm)	H (cm)	γ	河口の移動状況
B2	42.6	180	1.8	6	10	2.8	0.90	16 時間後に若干左岸側にシフト
B3	30.0	45	1.8	6	10	3.1	4.0	12 時間後に左岸側へシフト
B4	26.7	15	1.8	6	10	3.0	12	6 時間後に右岸側へシフト
B5	29.8	90	1.8	6	10	3.0	2.0	8 時間後に左岸側へシフト
B6	35.5	120	1.8	6	10	2.5	1.2	18 時間後に若干左岸側にシフト
B7	32.0	30	1.8	6	10	3.9	7.6	16 時間後に左岸側へシフト
B8	25.8	0	1.8	6	10	3.3	∞	6 時間後に左岸側へシフト
B9	34.0	60	1.8	6	10	3.3	3.2	28 時間後に左岸側へシフト
B10	27.5	10	1.8	6	10	3.5	6.8	5 時間後に左岸側へシフト

た. また河道部は上流の 1.34 m の部分だけが固定であり, それより下流の部分は河口の移動が生じ得るように砂を成型して作った移動床水路となっている. 河道模型には $1 \text{ l/sec} \pm 20 \%$ の流量の水を流しながら固定水路部から給砂を行った. また図中の右側の造波板を用いて周期 1.0 sec, 波高 4.0 cm の波を発生させ, 左側のビーチ部に当てている.

実験模型のスケールは実際のビーチに比べて非常に小さいため, 漂砂限界や掃流限界などの影響によって波浪や河川流の条件は大きな制約を受ける. そのため実験では波の波高, 周期, 河川流量を一定としながら供給土砂量を変化させて 9 ケースの実験を行った.

実験は直線状ビーチから開始した. 図中左側の河道部から一定量の水と土砂を供給しながら右側から波を当てると, 河川上流から供給された土砂は河口周辺だ

けでなく, 波浪による沿岸漂砂として汀線方向に輸送される. これによって河口周辺にはカズブ状の河口デルタが形成される. 河口位置が安定的に維持されるような場合, 一定量の供給土砂によって河口ビーチの汀線は形状を維持しながら一定速度で沖側に前進する. もし河口位置が安定的に維持されないような場合, ビーチの前進に伴って河口は右か左に移動することになる. この河口の移動状況を記録するために, 2~4 時間おきに流れと波を停止し, ビーチ形状を測定した. ビーチ形状の測定は, 造波水槽内から水を抜き, 水深 2 cm おきに写真撮影することによって等高線を抽出した.

(3) 実験結果

各ケースの実験条件と結果を表-1 にまとめた. 表中の κ および D , P , H は後の理論考察に出てくるパラ

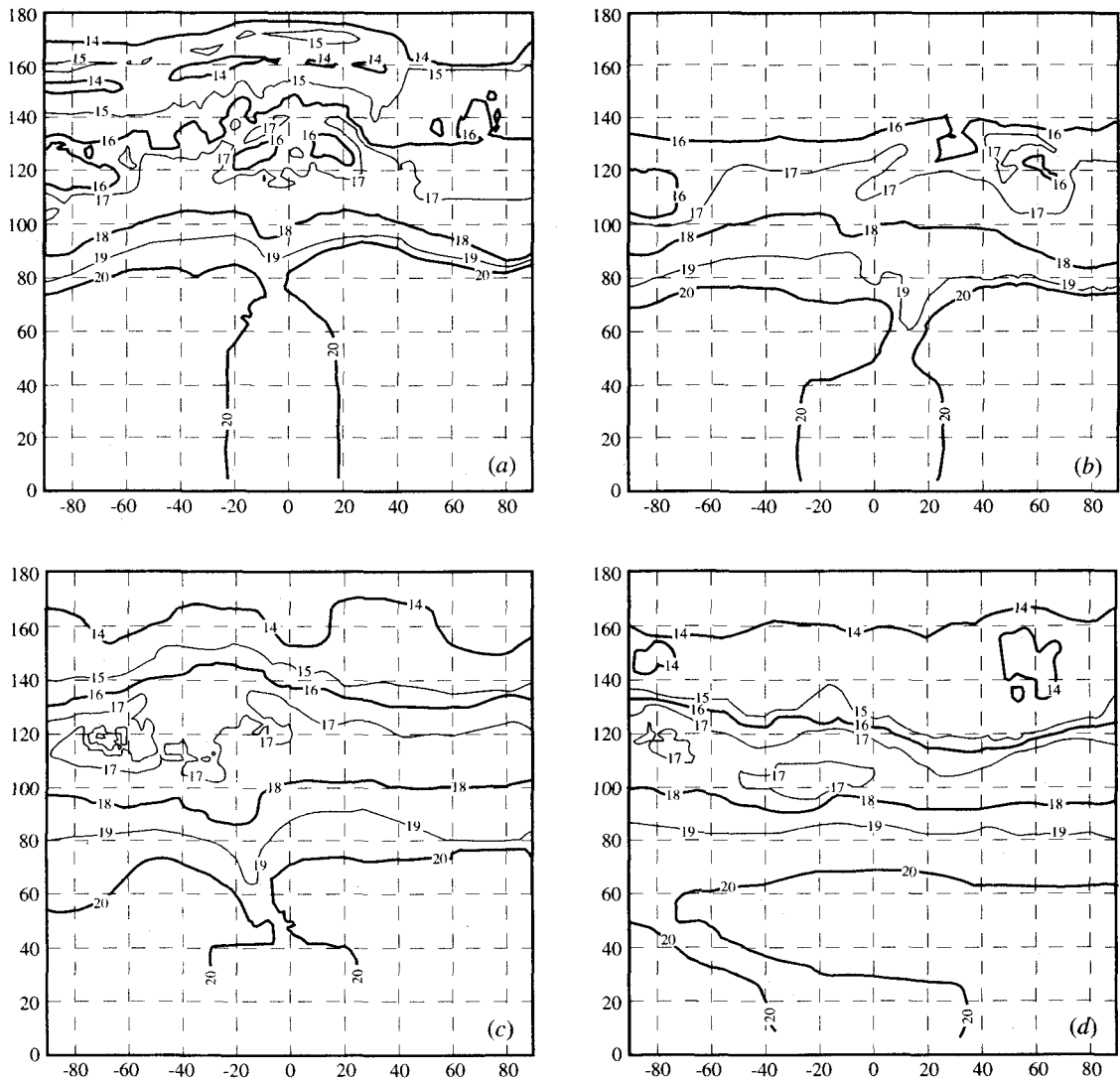


図-2 Run B7における等高線の時間変化。河川流は図中下端中央から上方向を、波は図中上端から下方向を向いている。図中の縦軸および横軸はそれぞれ岸沖方向およびそれと垂直方向の距離 (cm) を、等高線上の数値は水槽底部からの高さ (cm) を示している。(a) 2 時間後、(b) 6 時間後、(c) 12 時間後、(d) 16 時間後。

メータであり、それぞれ沿岸漂砂能および汀線付近における堆積厚さ、河口砂州の幅、厚さに対応しており、これらの値は実測値を基に算出された。

結果を先に述べると、B2 および B6 を除いていずれのケースでも河口は不安定であり、最終的にはビーチのどちらかの端に寄ってしまうことがわかった。この結果は、ポケットビーチ端部における河口の偏在現象に対してヘッドランドによる波浪の遮蔽効果は必ずしも本質的な役割を演じてはいないことを示している。

代表的なケースとして B7 を取り上げ、図-2a-d にそれぞれ 2, 6, 12, 16 時間後におけるコンターを示した。2 時間後のコンター (a) を見ると、河口は未だビーチ中央に存在しており、土砂は河口を中心にしてカスプ状に堆積している様子がうかがわれる。図-3 の写真を見てもわかるように河口より若干上流の部分は川幅が 40 cm 以上に大きくなっている。この部分は河口が自由に

移動できるように河道側岸部の自由な侵食を許している。そのため実験直後に急速に河道の拡幅が進むが、河道幅が大きくなっても、実際に水と土砂が流れている河口幅自体は、河川と波浪による土砂輸送の相互作用によって 5~10 cm 程度に維持されている。

6 時間後のコンター (b) を見ると河口は若干右岸側にシフトしている様子がわかる。ところが 12 時間後 (c) には河口は左岸側にシフトをはじめている。この後、河口は左岸側にシフトを続け、16 時間後 (d) には完全に左岸側の側壁までシフトしてしまっている。このあとも引き続いて実験を行ったが、河口は 2 度と中央部に戻ることはなかった。

前述のように B2 および B6 では、河口のシフトはわずかであり、河口位置は他のケースに比べて安定であった。これらは土砂供給量を非常に大きくしたケースであり、土砂供給量が多いと河道の勾配が大きくなり、河

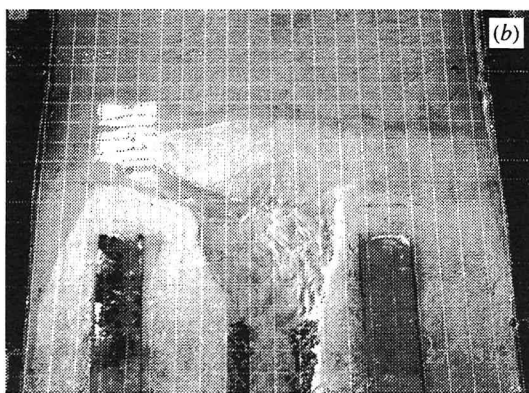
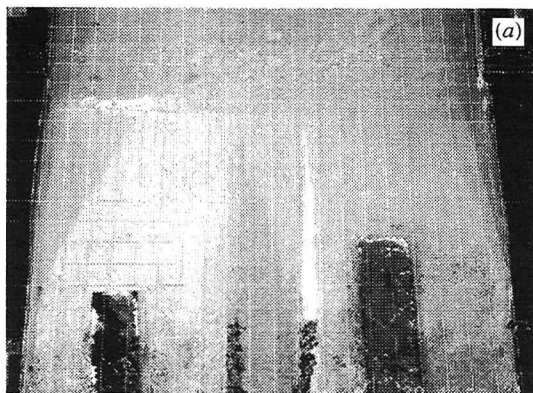


図-3 実験状況. Run B7. (a) 実験開始前, (b) 実験開始 16 時間後.

口部での流速が非常に大きくなる. 表-1 から B2 および B6 のケースの平均流速はそれぞれ 42.6 cm/s および 35.5 cm/s と他のケースに比べて大きくなっているのがわかる. 表には平均流速として固定水路部の流速を示したが, 移動床である河口部ではさらに勾配が大きくなり, 浅く早い流れとなっているのが観察された. このように大きな流速が河口部で生じると河口砂州がフラッシュされるようになり, 河口の移動は生じにくくなるものと考えられる.

いずれも河口位置は不安定であったが, 河口の供給土砂量がゼロの B8 で河口位置のシフトが 6 時間で生じたのに対し, 供給土砂量 90 g/min および 60 g/min の B5 および B9 ではそれぞれ 8 時間および 28 時間であるなど, 土砂供給量と河口の不安定性については顕著な相関関係は見られない. むしろ砂で河口部を成型する際に生じる初期不整の影響が大きいように思われた.

また表-1 を見ると河口は B4 のケースを除いていずれも左岸側にシフトしていることがわかる. これについては実験装置の欠陥などあらゆる観点から調査したが, 河口部成型時のわずかな初期不整以外に実験に非対称性が導入される可能性は小さいことが結論された. あるいはコリオリ力などの微小な力によって水槽内に微弱な循環が生じている可能性も否定できない. この原因の解明については今後の課題である.

3. 理論的考察

(1) 定式化

実験の状況は次のように定式化できる. 図-4 に示すように, 河口を有するビーチが二つの側壁に挟まれているような状況を考える. もし碎波角 (波向線と汀線に直角方向とのなす角) が十分小さければ, 汀線の時間変化は次式で表されることが知られている²⁾.

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial \tilde{t}} = \kappa \frac{\partial^2 \tilde{y}}{\partial \tilde{x}^2}, \quad \kappa = \frac{K(EC_n)_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda_v)D} \quad (1a, b)$$

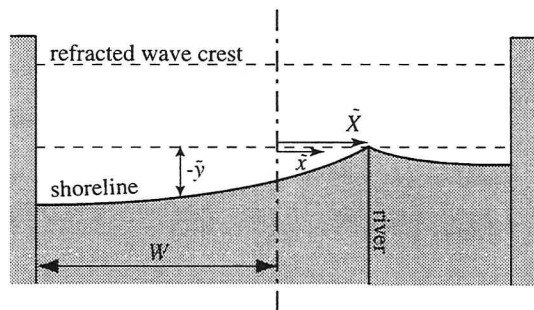


図-4 単純化されたポケットビーチの概念図.

ここで $\tilde{y}$ は汀線の岸沖方向座標 (沖側が正), $\tilde{t}$ は時間, $\tilde{x}$ は沿岸方向の座標 (原点はビーチ中央), K は経験的に決定される無次元定数, $(EC_n)_b$ は波浪エネルギー, ρ_s および ρ はそれぞれ砂および水の密度, g は重力加速度, λ_v は砂の空隙率, D は汀線付近における堆積厚さである.

ビーチ両端では沿岸漂砂はヘッドランドによってブロックされている. したがって漂砂量はゼロとなる.

$$\kappa D \frac{\partial \tilde{y}}{\partial \tilde{x}} = 0 \quad \text{at} \quad \tilde{x} = \pm W \quad (2)$$

ここで W および $-W$ はビーチの右および左端の $\tilde{x}$ 座標である.

河口では汀線は連続である. したがって次の関係が成り立つ.

$$\tilde{y}^R = \tilde{y}^L \quad \text{at} \quad \tilde{x} = \tilde{X} \quad (3)$$

ここで $\tilde{X}$ は河口の位置の $\tilde{x}$ 座標であり, 添え字 L および R はそれぞれ河口の左および右の部分の変数を表す.

河口の移動は主として河口からの供給土砂量と沿岸漂砂量のバランスによって決定される. Tanaka, Kabutoyama and Shuto³⁾ のモデルを本研究で考えている座標系で表すと次式が得られる.

$$PH \frac{d\tilde{X}}{d\tilde{t}} = fQ_f + Q^L(\tilde{X}), \quad (4)$$

$$-PH \frac{d\tilde{X}}{d\tilde{t}} = (1 - f)Q_f - Q^R(\tilde{X}). \quad (5)$$

ここで $Q^L(\tilde{X})$ および $Q^R(\tilde{X})$ はそれぞれ河口から沿岸方向右および左方向への漂砂量を表しており、河口からは一定量の土砂量 Q_f が供給されていると仮定する。この土砂は左右のビーチへ振り分けられる。この振り分け比率（左と右の土砂量の割合）を f と $1-f$ としている。また H は河口において堆積と侵食の発生する厚さを表すパラメータであり、河口付近の水深とほぼ同程度の値である。パラメータ P は、 $Pd\tilde{X}$ が堆積の発生する領域の面積に相当するような長さのスケールを持ったパラメータである。河口の移動が主として河口砂州の影響で発生するとすれば、 P は砂州の流下方向長さスケール（砂州幅）となる。

(2) 座標変換と無次元化

まず最初に形状を維持したまま一定速度 $\tilde{c}$ で前進するような準定常な汀線形状を考える。その場合次のような座標変換を導入するのが便利である。

$$\tilde{y}^* = \tilde{y} - \tilde{c}\tilde{t}, \quad \tilde{t}^* = \tilde{t} \quad (6a, b)$$

式 (1a) は次のように書き直される。

$$\frac{\partial \tilde{y}^*}{\partial \tilde{t}^*} = \kappa \frac{\partial^2 \tilde{y}^*}{\partial \tilde{x}^2} - \tilde{c} \quad (7)$$

次のような正規化を導入する。

$$\tilde{x} = Wx, \quad \tilde{y}^* = Ly, \quad \tilde{t}^* = Tt. \quad (8a, b, c)$$

ここで

$$L = \frac{Q_f W}{2\kappa D}, \quad T = \frac{W^2}{\kappa}, \quad \tilde{c} = \frac{Q_f}{2WD} \quad (9a, b, c)$$

上式を用いて式 (7) および (2), (3), (4), (5) はそれぞれ次のように正規化される。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - 1 \quad (10)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad \text{at} \quad x = \pm 1 \quad (11)$$

$$y^R = y^L \quad \text{at} \quad x = X \quad (12)$$

$$\gamma \frac{dX}{dt} = 2f - \left. \frac{\partial y^L}{\partial x} \right|_{x=X} \quad (13)$$

$$-\gamma \frac{dX}{dt} = 2(1-f) + \left. \frac{\partial y^R}{\partial x} \right|_{x=X} \quad (14)$$

ここで

$$\gamma = \frac{PH}{LD} = \frac{2\kappa PH}{Q_f W} \quad (15)$$

上式は文献 1 中の式 (20)–(24) において r を y , θ を x , ϕ を X に置き換えたものとなっている。したがって実験で用いた単純化されたポケットビーチについても、one-line theory の範囲では円弧状のビーチと全く同一の方程式系で記述できることがわかる。また現象を支配す

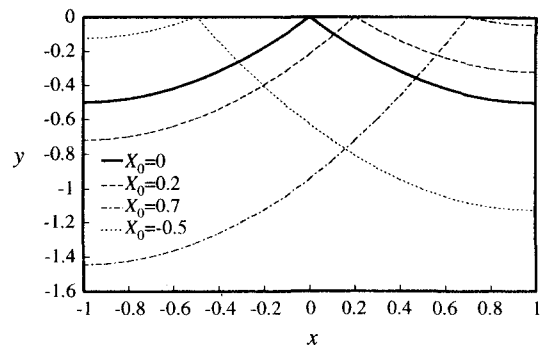


図-5 準定常解。 X_0 は河口の位置を示している。

るパラメータは相対的河川供給土砂量に対する相対的漂砂輸送能力の比 γ であり¹⁾、この値は波浪による漂砂輸送能力に対して河川からの供給土砂量が大きいき小くなる。

(3) 基本解

ここではまず準定常解を求める。準定常解は式 (10) において時間微分項を落とした次式から求められる。

$$\frac{d^2 y_0}{dx^2} = 1 \quad (16)$$

ここで添字 0 は準定常解を表している。上式を境界条件 (11) および (12) の下に積分して次の解が得られる。

$$y_0^R = \frac{1}{2}x^2 - x - \left(\frac{1}{2}X_0^2 - X_0\right), \quad x \geq X_0 \quad (17)$$

$$y_0^L = \frac{1}{2}x^2 + x - \left(\frac{1}{2}X_0^2 + X_0\right), \quad x < X_0 \quad (18)$$

図-5 に準定常解を示す。

(4) 線形安定解析

文献 1 と同様の線形安定解析を行う。これは前節で求めた準定常解における河口位置 X_0 および汀線形状 y_0 に対して微小な摂動を与えて、その後摂動が成長するのか減衰するのかを調べるものである。次のような摂動展開を導入する。

$$X = X_0 + \epsilon e^{\Omega t}, \quad y = y_0 + \epsilon y_1 e^{\Omega t} \quad (19a, b)$$

ここで X_0 は準定常状態（基本状態）における河口の位置、 ϵ は摂動の振幅を表し、線形安定解析では微小であると仮定される。また Ω は摂動の増幅率を表し、この値が正であるとき準定常状態は摂動に対して不安定、負であるとき安定であることが結論できる。

解析結果は文献 1 の図-10 とほぼ同様に図-6 のようになる。現象はビーチ中央に対して対称であるので、図では右半分 ($0 \leq X_0 \leq 1$) だけを示した。図中 $X_0 = 0$ および $X_0 = 1$ はそれぞれビーチ中央および両端に対応する。この図はパラメータ γ の値と河口の位置 X_0 に

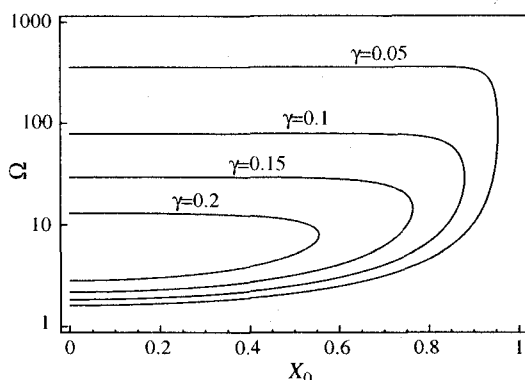


図-6 摂動の増幅率 Ω の X_0 および γ に対する依存性

応じた擾乱の増幅率 Ω の正の解（ Ω の負の解は常に存在する．また Ω はある範囲の値をとるのではなく離散値となる．文献 1 参照）を示しており，例えば $\gamma = 0.2$ のとき， $X_0 = 0.4$ の位置における Ω は曲線 $\gamma = 0.2$ と直線 $X_0 = 0.4$ との交点における $\Omega = 4$ および 11 として求められる．図によれば γ が約 0.24 より小さいとき Ω は $X_0 = 0$ の周辺において二つの正の解を有するが，このときビーチ中央付近では河口は安定的に存在できないことになる．しかも γ が減少するにつれて安定な（正の Ω が存在しない）領域は両端近傍に限定されることになる．また γ が約 0.24 より大きくなると正の Ω は存在しない．これは γ の大きい領域で河口は安定となることを意味している．

以上より理論結果は γ が小さくなるにしたがって河口は不安定になると要約できる．前述したように γ は河川からの供給土砂量に対するビーチの沿岸漂砂輸送能力を表している．したがって上記の結果は，河川供給土砂量に比してビーチの沿岸漂砂輸送能力が十分でないとき，河口位置の微小な変化に対して河口左右岸の運搬能力に生じたアンバランスが増幅され，河口位置は不安定となることを意味していると考えられる．

(5) 実験結果との比較

理論によると γ が約 0.24 より大きいとき，河口はビーチ全体で安定である．ところが実験では γ が 0.90 から ∞ と非常に大きい範囲にあったにも関わらず，河口は中央付近で不安定であることがわかった．また γ が比較的小さい 0.90 および 1.2 のケースで，むしろ河口は若干安定的な挙動を示す．

まず前者に対する理由としては，河口の不安定性が線形の範囲内では十分に説明できない可能性が考えられる．河口付近は次々に通過するデューンのせいで大きな擾乱を受けつづけることになる．したがって線形安定解析で考慮しているような無限小振幅の擾乱ではなく，有限振幅の擾乱を考慮する必要がある．これに

ついては今後の課題である．

また後者に対する理由としては，前述したように供給土砂量を増加させたとき河口部での流速が非常に大きくなることが挙げられる．河口噴流が河口砂州をフラッシュする効果が卓越するようになると河口を安定化させる．本理論ではそのような効果は全く考慮されていないため，このような現象を説明できないと考えられる．

4. 結論

河口位置の安定性を明らかにするための実験を行い，次のことが明らかとなった．

- 非常に単純化された模型を用いた実験によって，ポケットビーチ中央部において河口は安定的に存在できず，時間とともにビーチの端に寄ってしまう現象が再現できた．このことによりヘッドランドによる波浪の遮蔽効果が存在しなくても河口は不安定であることが示された．
- 実験で用いた単純な直線状のポケットビーチと，実際の形状に近い円弧状のポケットビーチでは，ほぼ同一の方程式系を用いて表されることが明らかになった．
- 実験によれば，理論と異なり γ の値に関わらず全般的に，河口はポケットビーチ中央部において不安定となることが明らかになった．これは線形安定解析の範囲では説明できない有限振幅擾乱の影響であると考えられる．
- 実験によれば河川供給土砂が大きいとき河口は若干安定化し，理論とは異なる結果となることが明らかとなった．これは，供給土砂が大きくなると河口での流速が大きくなり理論で考慮されていない河口付近の流れによる砂州のフラッシュ効果が卓越するためと考えられる．

謝辞： 本研究は第一著者の AIT 在任中に，JICA および日本政府の援助による AIT のプロジェクト (Education and Research Project for Sustainable Development in Greater Mekong Sub-Region) の一環として行われた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 泉 典洋, H. P. V. Vithana: ポケットビーチの河口位置に関する不安定性理論, 応用力学論文集 Vol. 4, 2001.
- 2) Komar, P. D.: *Beach processes and sedimentation*, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- 3) Tanaka, H., Kabutoyama, H. and Shuto, N.: Numerical model for predicting seasonal migration of a river mouth. *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions II*, 345-352, 1995.

(2001. 10. 1 受付)