

河口砂州を有する主な河川の最狭開口部平衡条件

佐藤 智昭*・Totok Suprijo**・真野 明***

Suprijo (2003) は, 波浪, 河川流, 潮流流の作用を考慮して, 砂州を有する河口開口部の地形平衡条件を理論的に導いた。本研究では, 我が国の砂州を有する主な一級河川の河口を対象にして観測資料を収集し, この平衡条件の妥当性を検討した。また, 各河口において外力に関する無次元パラメータを計算し比較することにより, 河口の維持に対し河川流と潮流流が行う寄与の相対的な大きさを明らかにした。さらに, 外力の低変動期において, 外力の変化に要する時間と地形が平衡に達するまでの応答時間を求めて比較し, 河口開口部の地形が外力にほぼ即応して平衡状態を取ることが示された。

1. はじめに

砂浜海岸に開口する河口に沿岸漂砂が堆積して砂州が発達することにより, 開口部は狭まる。特に冬期は河川流量が低下するので, 砂州は成長しやすい。このとき, 水路断面積が小さくなることで最狭部において河川流と潮流流の速度が上昇し, せん断力の増加により排砂能が増え, 堆砂と排砂が釣り合う平衡状態となる。このような開口部の狭窄化は洪水の疎通や航行に障害を与えるため, 河川管理上重要な問題であり, この平衡条件を知ることが不可欠である。

既往の研究では, 青田・首藤 (1980) が河川流と沿岸漂砂の影響を考えて河口部の土砂収支に関する微分方程式を提案し, Tanaka (1996) はその平衡解を得ている。また, Kraus (1998) は潮流流と沿岸漂砂を考え潟湖入口での近似平衡解を得ている。Suprijo (2003) は青田らの土砂収支式に潮汐の効果を加え, 河川流, 潮流流, 波浪の 3 つの外力が存在するときの平衡条件を求め, これにより河口と潟湖入口の平衡条件を統一した。本研究では河口砂州を有するわが国主な 1 級河川のデータを収集解析して, Suprijo の平衡条件の適合性を検討したものである。

2. 開口部平衡条件

図-1 に示すように, 砂浜に開口した河口に沿岸漂砂の一部が堆積し, 河川流と潮流流による排砂が行われる時, 河口開口部の土砂収支に関する無次元微分方程式は, Suprijo (2003) により次のように求められている。

$$B^{*4} \frac{dB^{*}}{dt^{**}} = |\phi_R^{1/5} + \phi_T^{1/5} \cos \omega^{**} t^{**}|^5 - B^{*4} \quad \dots (1)$$

ここで, B^{*} は無次元開口幅であり $B^{*} = B/h$ と表され, B と h は河口幅と河口水深, t^{**} は無次元時間で, 式(2)のように表される。

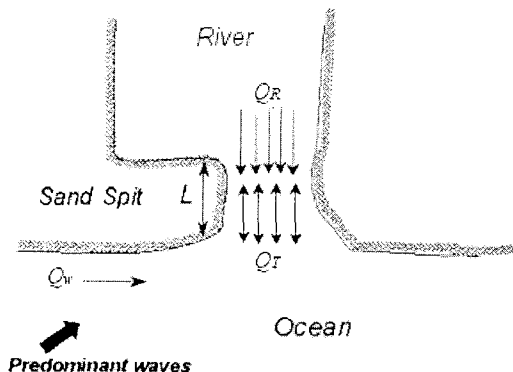


図-1 河口地形モデル

$$t^{**} = \frac{e_w I_i t}{L(1-\lambda)(\rho_s - \rho_w)gh^2} \quad \dots (2)$$

また, 無次元角速度 ω^{**} は $\omega^{**} = \omega t / t^{**}$ と表され, ω は角速度 $\omega = 2\pi/T$, T は潮汐の周期, e_w は土砂の捕捉効率, I_i は沿岸漂砂量 Q_w を重量換算したもので $I_i = (1-\lambda)(\rho_s - \rho_w)gQ_w$ と表される。 t は時間, L は砂州の幅, h は堆積土砂の空隙率, g , ρ_s , ρ_w はそれぞれ重力加速度, 土砂及び海水の密度である。

ϕ_R と ϕ_T は以下のように表される。

$$\phi_R = \frac{10n^5 g^{3/2} Q_R^5 (\rho_s - \rho_w)}{s^2 h^{59/6} e_w I_i d} \quad \dots (3)$$

$$\phi_T = \frac{10n^5 g^{3/2} Q_T^5 (\rho_s - \rho_w)}{s^2 h^{59/6} e_w I_i d} \quad \dots (4)$$

ここで, Q_R は河川流量, Q_T は入退潮流の流量振幅である。 n はマンニングの粗度係数で, $n = 0.0131 d^{1/6}$, s は $s = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$, d は砂の粒径で, 底質の中央粒径 d_{50} を用いる。 ϕ_R は河川流により河口から運び去られる土砂フラックスと沿岸漂砂の中の河口に堆積する土砂フラックスの比を含み, ϕ_T は潮汐により河口から運び去られる土砂フラックスと沿岸漂砂の中の河口に堆積する土砂フラックスの比を含む無次元数とする。この 2 つの数を比較することで, 河川流と潮流流の卓越度を知ることができる。その結果は後に示す。

ここで, 堆砂と排砂が釣り合う条件が平衡条件であり,

* 学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻
** 工博 パンドン工科大学講師 地球科学鉱物工学部
*** 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

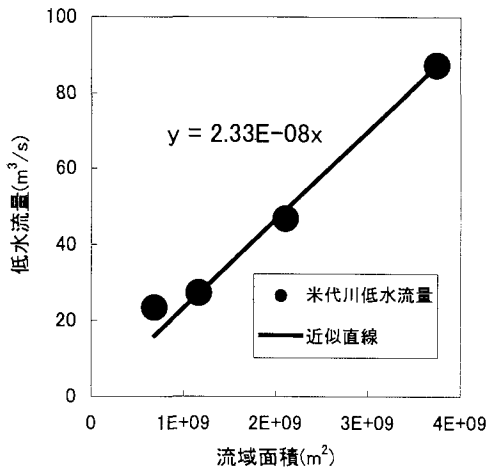


図-3 米代川低水流量

表-1 低水流量と流域面積の関係

	評価年	河川	k (m/s)	相関係数
阿賀野川	1993	阿賀野川	$3.19\text{E}-08$	0.99
米代川	2000	米代川	$2.33\text{E}-08$	0.99
阿武隈川	2000	阿武隈川	$1.50\text{E}-08$	0.99
安倍川	2000	狩野川, 安倍川, 菊川	$2.66\text{E}-08$	0.82
天神川	1973	天神川	$4.09\text{E}-08$	1.00
仁淀川	2000	渡川, 仁淀川, 物部川	$1.68\text{E}-08$	0.94

面積を A_r , 潮汐の振幅を a , 潮汐の角周波数を $\omega = 2\pi/T$, とすると, 河口を入退する潮汐流量の振幅 Q_T は次式で表される.

$$Q_T = A_r a \omega \dots\dots\dots (9)$$

ここで平均感潮面積 A_r は, TP±0 の平面が水際線と河床で囲まれる河口内面積と考えることができ, 河道縦断面から TP±0 の河床を感潮域上流端とし, 河口平面図や航空写真を参照して求めた.

(3) 沿岸漂砂量

Kommer・Inman (1970) の沿岸漂砂量式を用いて沿岸漂砂量を算出する.

$$Q_w = \frac{KP}{(1-\lambda)(\rho_s - \rho_w)g} \dots\dots\dots (10)$$

ここで, K は沿岸漂砂量係数, P は砕波点における波浪エネルギーフラックスの沿岸方向成分である. 評価期間は, 地形測量が行われた日から1ヶ月前までの期間とし, この間の河口近くの観測点における有義波高, 有義波周期, 波向きの日平均値を基本データとし, 真野ら (1996) の方法を用いて, 評価期間内の P の平均値を求め計算に用いた. また, 沿岸漂砂量係数は同じく真野ら (1996) が名取川河口の長期データを使って評価した K

$= 0.03$ を用いた. 堆砂の空隙率 λ は 0.6 として用いた. 捕捉効率 e_w は, 阿武隈川河口における砂州体積の発達率と沿岸漂砂量の比から求められた 0.67 を用いる (Suprijo, 2003).

5. 平衡条件の比較

Suprijo (2003) が求めた, 無次元平衡河口幅 B_e^* と無次元パラメータ ϕ_R の関係を図-4 に示す. 図中には潮汐流に関する無次元量 ϕ_T の値を種々変えて対応する曲線がプロットしてあるが, 一番下の曲線が $\phi_T = 0$ に対応する曲線で, 潮汐流がない場合の理論解 (6) に対応している. ここで, 各曲線共に ϕ_R が小さくなるほど無次元河口幅 B_e^* は一定の値となっている. これが $\phi_R = 0$ に対応するグラフで, 河川流がない場合の理論解 (7) に対応している. また, ϕ_R が大きくなるほど, また ϕ_T が大きくなるほど式 (5) に示されているように無次元幅は大きくなる. ことも曲線より読み取れる.

図中には, 前節までの方法で得られた6つの河口の実測値を平衡状態のもと仮定してプロットしてある. なお, 平衡性に関する検討は次節で行う. 図-5 には, 無次元河口幅の理論値と実測値をそれぞれ縦軸と横軸にとって, 適合性をより明確に調べられるようにしてある. 図-5 において, 安倍川は理論値が実測値より過大になっているがそれ以外の河川においては, 両者は近く, 理論は平衡条件をよく表現しているといえよう. また, 表-2 は各無次元パラメータの諸元を示す. ϕ_R と ϕ_T の2つのパラメータを比較すると, 米代川, 阿賀野川, 安倍川, 天神川の4河川では, 河口維持に河川流が卓越していて, 仁淀川では潮汐流が卓越していることがわかる. また, 阿武隈川では河川流と潮汐流が同程度に寄与している.

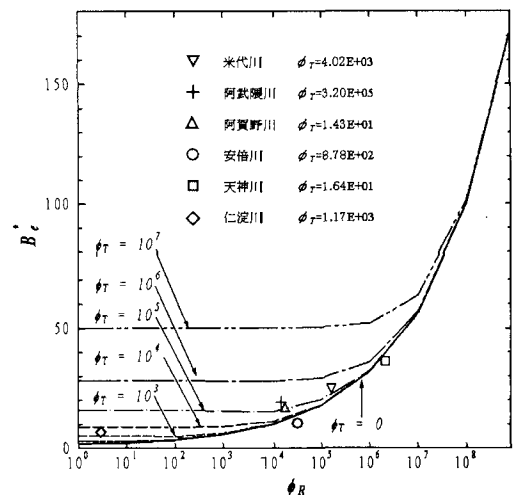


図-4 無次元パラメータの実測値と平衡式の比較

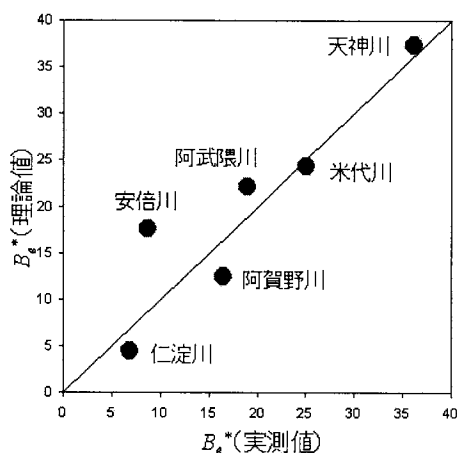
図-5 無次元河口幅 B_e^* の実測値と理論値の比較

表-2 各河口無次元パラメータ

	B_e^* (実測値)	B_e^* (理論値)	ϕ_R	ϕ_T
米代川	25.1	24.3	1.44E+05	4.02E+03
阿武隈川	19.0	22.1	4.00E+04	2.36E+04
阿賀野川	16.5	12.4	1.73E+04	1.43E+01
安倍川	8.65	17.6	4.83E+04	8.78E+02
天神川	36.1	37.4	2.11E+06	1.64E+01
仁淀川	6.87	4.4	1.69E+00	1.17E+03

6. 平衡性に関する検討

現地では、河川流、潮汐流、波浪の外力いずれも時間的に変化している。ここで、外力低変動期における外力変化に要する時間スケール T_E と、開口部が新しい外力の状態に対応し平衡状態に達するまでの応答時間 T_I を比較して、 $T_I \ll T_E$ であれば、外力の変化に追従した形で平衡地形が移っていくと言える。図-6 はこれを模式的に示したもので、 T_E として1ヶ月をとり、初期の ϕ_{R1} から1ヵ月後、 ϕ_{R2} に外力が変化することを考えている。 ϕ_{R1} と ϕ_{R2} に対応した平衡開口幅をそれぞれ B_{e1}^* 、 B_{e2}^* としたときに、 ϕ_{R1} から ϕ_{R2} へのステップ応答を考え、応答時間 T_I が早い場合と遅い場合を示している。応答時間 T_I は、微分方程式(1)を数値的に解くことで求められる。

阿賀野川の1993年2月と3月の外力を示すと表-3 のようになり、応答時間は $T_I = 17.8$ day となった。よって、 $T_I/T_E = 0.59$ と T_I が非常に小さく、その時々の外力に対応した平衡状態で河口が変化していることがわかる。他の河口についても、同様の状態にあることが確かめられている。ここで、 T_E は、Suprijo (2003) がインドネシアの河口について解析したものにならない1ヶ月とし

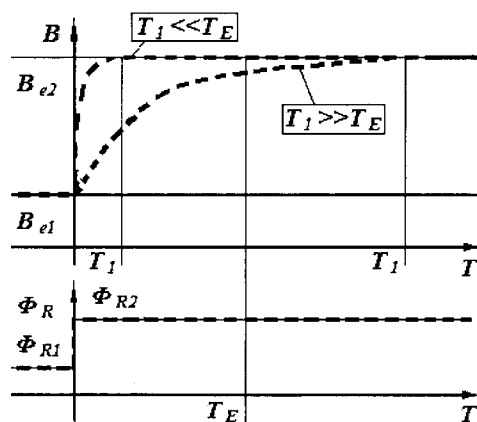


図-6 ステップ応答 (Suprijo, 2003)

表-3 阿賀野川の地形応答

	Q_R (m ³ /s)	ϕ_R	B_e^*	T_I (day)
1993.2.21	416	7.73E+04	16.7	17.8
1993.3.21	448	1.13E+05	18.3	

た。月平均流量は流量年表から簡便に得ることができる。

7. 結 論

実測値を用いて計算された無次元河口幅 B_e^* は平衡式を用いて理論的に表された値とほぼ等しい値を示し、さらに、無次元パラメータ ϕ_R と ϕ_T を比較することで、各河口における河川流と潮汐流の河口地形維持に対する寄与の割合がわかった。また、外力の低変動期において、外力の変化に要する時間スケール T_E と、それに対応して地形が平衡状態に達するまでの応答時間 T_I を比較することで、応答時間が外力の変動時間スケールより十分短く、外力変化にほぼ即応して外力に対応する地形平衡状態をとることが示された。

謝辞：本研究を進めるにあたり、貴重な助言を頂きました東北大学大学院工学研究科 田中仁教授に感謝致します。また、数多くの貴重なデータを提供して頂きました国土交通省の各河川国道事務所、河川工事事務所、北海道開発庁建設部河川課に謝意を表します。

参 考 文 献

- 青田茂雄・首藤伸夫 (1980): 河口断面積変化過程の数値モデル, 第24回水理講演会論文集, pp. 203-208.
- 宇多高明・高橋 晃・松田英明 (1994): 河口地形特性と河口処理の全国実態, 土木研究所資料, 第3281号, 122 p.
- 運輸省港湾局監修 (1999-2001): (財)沿岸開発技術研究センター: 全国港湾海洋波浪観測資料 (NOWPHAS).

- 気象庁 (1976-2003): 潮位表.
- 建設省河川局 (1976-2003): 流量年表.
- 真野 明・沢本正樹 (1996): 沿岸漂砂量硬式に用いる年平均波, 海洋開発論文集, 第12号, pp. 55-59.
- Komar, P.D. and D. L. Inman (1970): Longshore sand transport on beaches, *Journal of Geophysical Research* 30, pp. 5914-5927.
- Kraus, N.C. (1998): Inlet cross-sectional area calculated by process-based model, *Proceedings of 26th Coastal Engineering Conference 3*, ASCE, pp. 3265-3278.
- Tanaka, H. (1996): Complete closure of the Nanakita River mouth in 1994, *Proceedings of 25th Coastal Engineering Conference 2*, ASCE, pp. 4545-4556.
- Suprijo, T (2003): Topographical equilibrium of coastal inlets, 東北大学博士学位論文, 102 p.
-