

水工学シリーズ 09-B-6

河口砂州の地形平衡

東北大学大学院 工学研究科 教授

真野 明

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

河口砂州の地形平衡

Morphological Equilibrium on Sand Spit at River Mouth

真野 明
Akira Mano

1. はじめに

砂浜海岸に開口する河口には、沿岸漂砂が堆積し河口砂州が発達する。この砂州は、河口開口部を狭めるため、河川を流下し海域に抜ける洪水の疎通を阻害し、堰上げ背水による洪水氾濫の危険を増大させる。また、川と海を行き来する船舶にとって、河口は航路としての役割を有しており、航路の狭隘化は流速の増大や、すれ違う船舶の接近を余儀なくし、航行の障害となる。したがって、河川管理者は河口部を適正に維持し管理する必要がある。

河川砂防技術基準¹⁾には、河口処理計画の考え方として、「河川および海の両方の条件を十分考慮し、河口閉塞等に対して洪水を安全に流下させ、高潮による災害を防除するとともに必要に応じて河川の利用を増進させ、河口と海岸の自然のバランスを保った処理方式を決定するものとする」が謳われており、この中で自然のバランスを保った処理方式が重要なキーワードである。また、河口処理工法には、導流堤を中心としていくつかの工法が解説されているが、構造物を設置する場合には河道維持の観点と同時に、構造物設置が周辺へ与える影響を小さくする配慮が必要である。たとえば、導流堤内に沿岸漂砂が回り込んで堆積しないように沖出しをすると、沿岸漂砂が止められ漂砂下手側への土砂供給が遮断される。また、洪水時に川から運ばれる土砂は、導流堤先端付近まで運ばれるので、導流堤が長いと沖に堆積し周辺海岸への土砂供給効果が薄れることにもなる。構造物設置に伴うこのような副作用の定量的な評価については未知な部分も多い。

ここでは原点に立ち返り、川の流れと海の波が出会う場での自然のバランス、すなわち平衡状態とはどのようなものかを理論的に考え、この状態を基本として異なる平衡状態に移行するための河口制御の方法について議論を展開していくことにする。河口には、波浪が沿岸漂砂を持ち込んで堆積させる作用と、一方で河口を通過する河川流や潮汐流が堆積土砂を削って除去する作用の相反作用がある。この2つの作用がバランスしたときが平衡状態であり、地形は定常になる。河口に大きな潟湖を抱える場合には、除去作用の中で潮汐の影響が相対的に大きくなり、一方大河川の河口では河川流の影響が大きくなる。

さらに、河口砂州と類似の地形として、**barrier islands**や海跡湖を形成する砂嘴がある。これらの地形は、自然の防波堤の役割を持ち、背後水域が静穏になるため広く船舶の泊地として利用されてきた。開口部は船舶の航路としての役割を持ち、この維持管理が問題になるなど河口と類似の問題を抱えている。**barrier islands**の開口部は**tidal inlets**と呼ばれ、潮汐が堆積土砂の除去作用を担っている。この開口部の平衡断面について、O'Brien(1931)は**tidal prism**のべき乗に比例する経験式を提案し、Jarrett(1976)はアメリカ西海岸、メキシコ湾、東海岸のデータを詳細に集め比例係数やべき指数の再決定を行った。最近では西ら(2006)が、検討対象国を広げ再解析している。

河口砂州の発達と**barrier islands**の発達は類似の現象であり、河口に対して求めた地形平衡条件の特別な条件として、**tidal prism**を使った経験式と類似の関係式が理論的に導かれる。

2. 事例紹介

ここでは、自然条件下での地形平衡や、沿岸域の開発に伴う地形平衡の変化に関する事例をいくつか紹介する。

2.1 Jawa 島南海岸の河口閉塞

インドネシアの Sumatera 島から Jawa・Flores 島に続く島弧は、インド洋プレートの潜り込みにより形成された地形で、島の南側（インド洋側）には火山列が連なり、活発な土砂生産がある。島弧の北側の海岸は、地形勾配が小さく、泥海岸が広がりマングローブが生息する。島弧の南側の海岸は、地形勾配が急で、崖海岸や砂浜海岸が広がっている。この中でも、Jawa 島南海岸の中央部は海岸平野を抱え、砂浜が約 160km 東西に伸びる最大規模の砂浜海岸である。そこに大小の河川が流入し開口している (Fig.2-1 参照)。ここで、東端に位置する、Serayu 川が最大規模の流域を持ち、他は小さい。

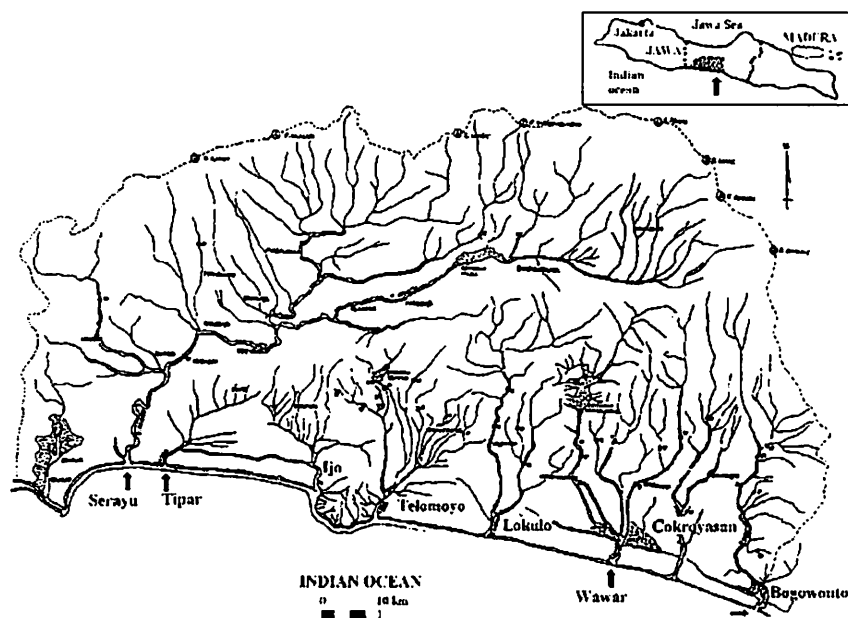


Fig. 2-1 Jawa 島中央南海岸に開口する河川群

Jawa 島は雨期と乾期が明確に分かれており、5 月から 10 月までの乾期には河川流量は大きく減少する。月平均流量で、Serayu 川では 7 月に $8\text{m}^3/\text{s}$ の最小値、Opak 川では 10 月に $2\text{m}^3/\text{s}$ の最小値をとる観測値がある。一方、Jawa 島周辺のインド洋では、5 月から 10 月まで高波浪が続き、砂浜に砂が豊富に存在することもある。活発な沿岸方向の土砂輸送が行われ、砂丘も 3m を越える高いものが形成される。

Fig.2-2 と 2-3 は、乾期における航空写真を示したものである。Opak 川では、東向きの沿岸漂砂によって左岸の河口砂州が伸張して、河口が西に移動し、極狭い河口が残されている。Serayu 川では、同様に左岸の砂州が発達し、河口付近で河道は東に曲げられているが、流量が大きいので河口は広く維持されていることが分かる。河川と波浪の作用の相対的な関係が、河口開口幅を決める重要な要素であることが示唆される。

河口の狭隘化や閉塞は、次の雨期に堰上げ氾濫を引き起こすので、住民は乾期の終わりに人工開削を行い、洪水流が抜けるよう管理している。洪水流の通過が、開削された水路を自然の力で拡幅することを知った生活の知恵によるものである。

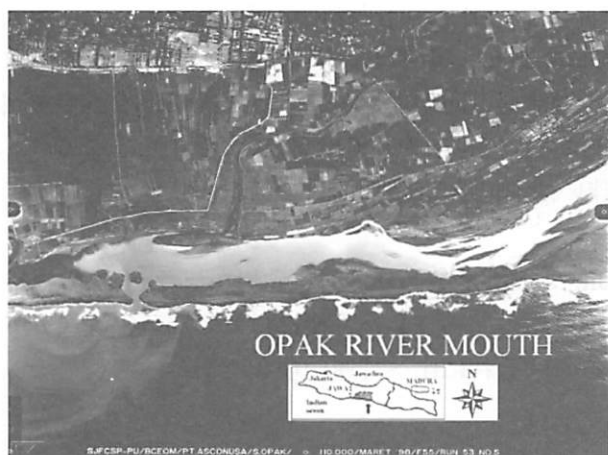


Fig.2-2 乾期には毎年のように閉塞する Opak 川の河口.

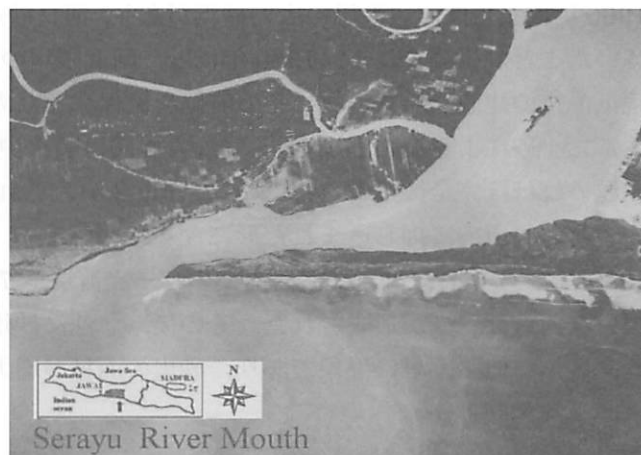


Fig.2-3 乾期でも流量が大きく、河口が維持されている Serayu 川の河口.

2.2 阿武隈川の河口砂州の変遷

阿武隈川は仙台平野のほぼ中央を回流し、仙台湾の中央部に開口する流域面積 $5,390\text{km}^2$ の一級河川である。仙台湾では、北向きの沿岸漂砂が卓越し、南にある福島県の崖海岸から削られ運ばれた土砂と、阿武隈川によって流送された土砂が、主に仙台平野を形成した。Fig.2-4 は、阿武隈川河口砂州の変遷を示したものである。太平洋戦争後まもなく進駐軍によって撮影された 1947 年の航空写真が最も古いものである。

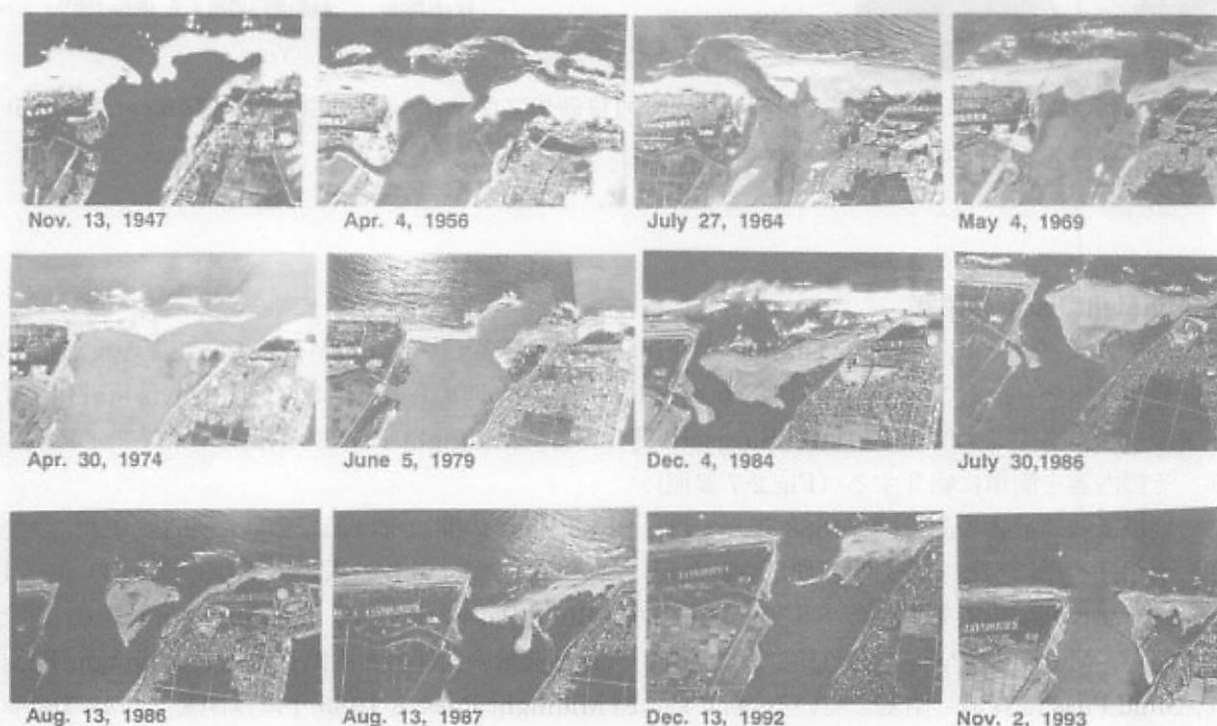


Fig.2-4 阿武隈川河口砂州の変遷. 進駐軍, 国土地理院, 建設省撮影. 写真の上が北. (Mano et al. 1994)

1960年代までは周辺海岸に広い砂浜があり、河口砂州は沖に張り出し、沿岸漂砂が河口を越えて北に運ばれていたことが推測される。1960年には、阿武隈川の旧河口であり、現河口の南に位置する潟湖「鳥の海」に荒浜漁港の建設が始まった。その航路を確保するために、導流堤（防砂堤）が建設されたが、導流堤を回り込んだ土砂による航路埋没を防ぐため、堤防は順次沖に伸ばされて長さ約600m（先端水深10m）に達し、沿岸漂砂はほぼ完全に遮断されている（Fig.2-5）。これに伴い、北側の阿武隈川河口の河口砂州はやせ細ってきており、河道内に押し込まれた形になっている。

1986年8月5日には、下流岩沼でのピーク流量が7600m³/sの洪水があり、河口砂州がフラッシュされ、大規模な河口テラスが形成された。その後、急速に砂州が伸び始め、約14ヶ月後には元の開口幅に戻っている。砂州の伸張は早い現象であり、砂州の面積が増大するのはそれに比べて遅い現象である。



Fig.2-5 荒浜漁港の導流堤と阿武隈川河口（2008年国土交通省撮影）

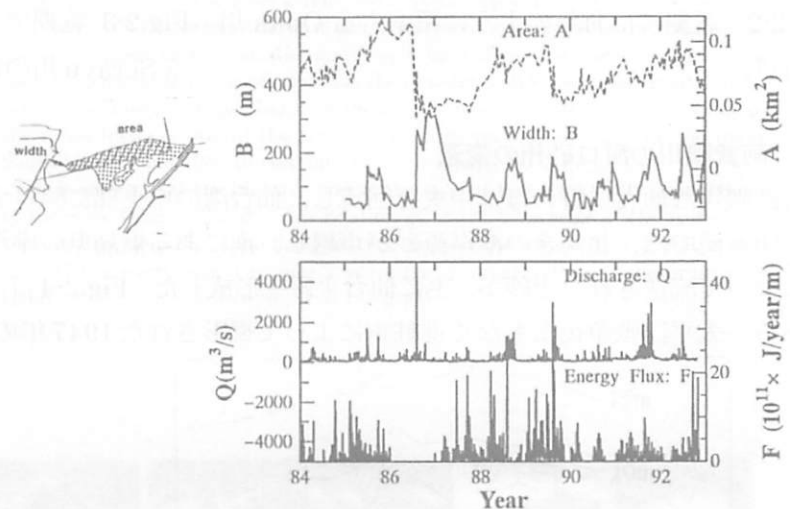


Fig.2-6 河口砂州フラッシュ後の回復過程(Mano et al. 1995)

2.3 Midnight Pass の閉塞

米国、フロリダ州には、barrier islands が発達した海岸が多く、これらが天然の防波堤の役割を果たし、背後は静穏な水域となることから、泊地や航路としての利用が進められてきている。Davis et al.(1987)は、その中の一つ、メキシコ湾岸の Little Sarasota 湾にある、Midnight Pass の消長について詳しく分析しており、その内容を簡単に紹介する（Fig.2-7 参照）。

この地域に残る最古の測量図（1888年）では、Blind Pass の開口部は沿岸漂砂に押されて北に大きく移動し、水路は海岸に沿って長く引き伸ばされた形になっているが、潮汐の入退によりその後30年以上維持されていた。1921年に発生したハリケーンにより、Blind Pass の近くで、barrier island が切れ新たにできた水路が、Midnight Pass である。これにより、入退潮流量の大部分を水路長の短い Midnight Pass に奪われ、Blind Pass は衰退し閉塞している。新しい水路 Midnight Pass も1983年には閉塞したが、Davis et al. は、その原因として人為的な影響を挙げている。Little Sarasota 湾は牡蠣の養殖が盛んであり、そのために作られた盛土が湾内の潮汐流の循環パターンを変化させたこと。また、航路確保のために水路を掘削し、その土砂を周辺に廃土したことが、水の循環を変え、また感潮面積を縮小させたとしている。

この湾には、南北端の水路と、Midnight Pass の合計3つの水路があり、潮汐流量の配分により水路を維

持していたが、流量配分の減った水路では、土砂堆積が進み、それによってさらに入退潮量が減るというフィードバック効果で、完全閉塞に移行していったものと考えられる。



Fig.2-7 Little Sarasota 湾と Blind Pass 跡, Midnight Pass 跡. Google Earth より引用. 画像の上が北東.



Fig.2-8 Little Sarasota 湾全域. Google Earth より引用. 画像の上が北東.

2.4 Frisian Islands における tidal inlets の縮小

北海南岸のオランダからデンマークにかけて、Frisian Islands (オランダ語で Waddeneilanden) と呼ばれる barrier islands が並んでいる(Fig.2-9 参照). この内部は、Wadden Sea と呼ばれ、細砂から粘土の細粒土砂が堆積する浅い泥の海で、潮差が 1.4m から 4.1m と大きく、meso-tidal deposits に分類される干潟である(Eisma, 1993).

オランダでは、1953 年に起こった大規模な水害を防止するために、Lauwers Sea と Wadden Sea を切り離す長さ 13km のダムが建設された(Fig.2-10 参照). Kreeke (2004) は、このダム建設の影響を解析している. 最寄の水路 Zoutkermperlaag の感潮域が、ダム建設により約 30% 減少したと見積もり、この減少に伴う水路の新たな平衡断面が約 30% 減少したと評価している. O'Brien (1931), Jarrett (1976), 西(2004)らによる、感潮面積と tidal inlets の経験的な関係は、いずれも両者がほぼ比例的な関係にあることを示しており、Kreeke の解析結果も同様な関係にあると結論することができよう.



Fig.2-9 Frisian islands. Google Earth より引用. 画像の上が北

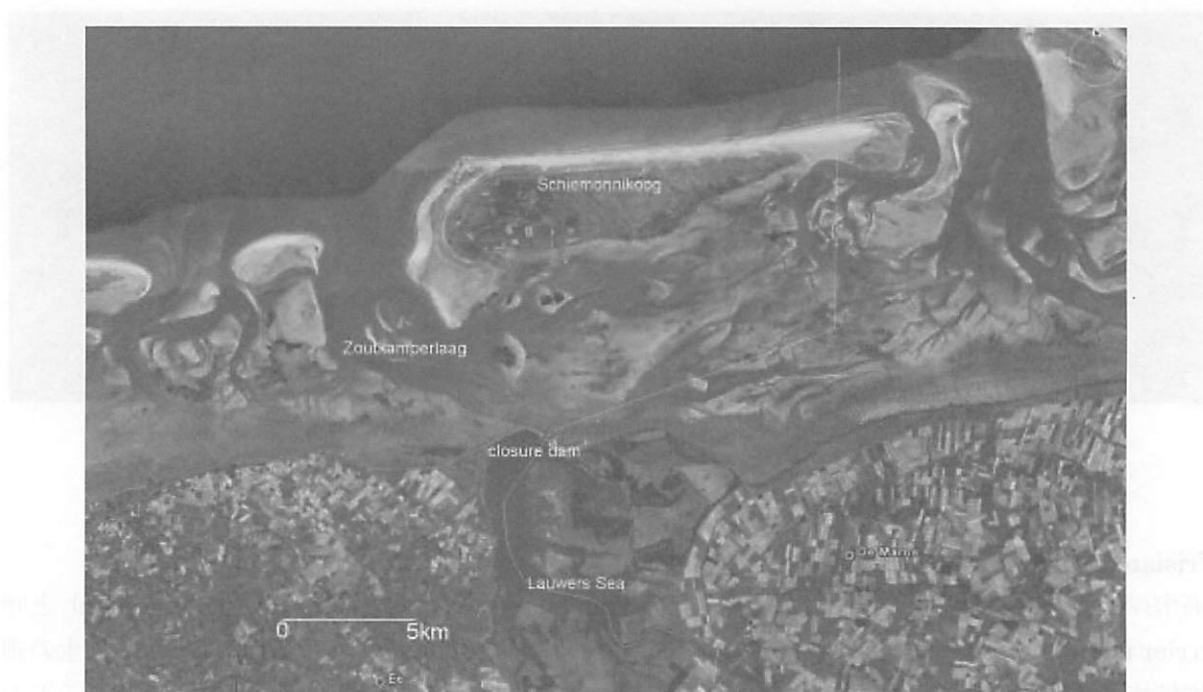


Fig.2-10 Lauwers Sea の締め切りダムと Zoutkamperlaag(水路)

3. 地形平衡条件

3.1 河口開口部の発展方程式

砂州が発達した河口開口部の平衡断面を求めるために、Fig.3-1 に示すような河口モデルを考える (Suprijo and Mano, 2005) .これは、青田・首藤(1980)が提案した沿岸漂砂と河川流を考えたモデルを拡張したもので、潮汐の入退を加えてあり、これにより tidal inlets への応用が可能になっている。なお、2.3 で紹介したような、複数の開口部をもつ地形は、ここでは簡単のため考えない。

河口開口部での土砂収支の連続式は、

$$(1 \cdot \lambda)Lh \frac{dB}{dt} = q_{RT} B \cdot e_w (1 \cdot \lambda)Q_w \quad (3.1)$$

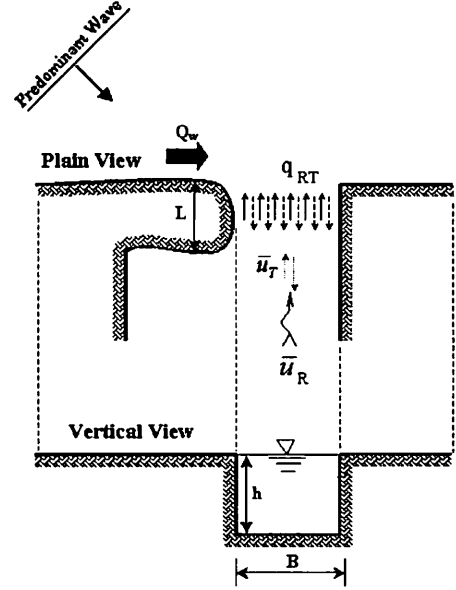


Fig.3-1 河口モデルの概念図

ここで、 B 、 t 、 λ は各々開口幅、時間、空隙率であり、土砂持込効率 e_w は、沿岸漂砂フラックス Q_w の中で河口に持ち込まれる割合を示し $0 \leq e_w \leq 1$ である。河口砂州を導流堤や離岸堤などで制御する場合の効果やバイパス効果を調べるためには、この土砂持込効率を変化させればよい。

上式の q_{RT} は開口部の流れによって運び去られる単位幅あたりの土砂フラックスを表しており、ここではBrown and Kalinske (1950)の関係式を用いることとした

$$q_{RT} = 10 \left(\frac{u_*^2}{sgd} \right)^2 |u_*| d \quad (3.2)$$

ここで、 u_* は開口部の流れによって生じる底面摩擦速度、 $s = \rho_s / \rho_w \cdot 1$ は水中における土砂の相対比重、 ρ_s 、 ρ_w は土砂と水の密度、 g は重力の加速度、 d は土砂の代表粒径である。式(3.1)の項の中に空隙率が入る項とそうでない項があるのは、慣例的に河川工学では土粒子だけの輸送フラックスを、海岸工学では空隙を含んだ体積輸送フラックスを扱うことによる。摩擦速度は摩擦係数 f を用いると断面平均流速 $\bar{u}$ と次式で関係付けられる

$$u_* = \sqrt{\frac{f}{8}} \bar{u}, \quad (3.3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \bar{u}_R + \bar{u}_T \\ &= (Q_R + \hat{Q}_T \cos \omega t) / Bh \end{aligned} \quad (3.4)$$

であり、 Q_R 、 $\hat{Q}_T$ は各々河川流量、潮汐流量振幅、 ω は潮汐角周波数、 h は開口部水深である。開口部が短く潮汐振動の減衰が無いと仮定すると連続式から、感潮面積 A_T と潮汐振幅 a を使って次式が得られる。

$$\hat{Q}_T = A_T \omega a, \quad (3.5)$$

沿岸漂砂量の評価には、Komar and Inman (1970)の経験式を用いることとした

$$I_i = KP_i = (1 - \lambda)(\rho_s - \rho_w)gQ_w, \quad (3.6)$$

ここで、 I_i は沿岸漂砂量を水中重量で換算したフラックス、 P_i は砕波点におけるエネルギーフラックスの沿岸方向成分、 K は沿岸漂砂量係数である。

摩擦係数は、Manningの粗度係数 n を使って表現し、

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}} \quad (3.7)$$

最終的に Manning-Strickler の経験式より粒径と結びつける、

$$n = 0.0131d^{1/6} \quad (3.8)$$

ここで、 R は径深である。粗度係数 n は $m^{-1/3}s^{-1}$ の次元を有している。Strickler の経験式はさらに複雑で、粒径には mm の単位を用いなければならない。以下の式の誘導では、汎用性を持たせるために無次元化を行うが、Strickler の経験式を陽に組み込むと次元の関係が難しくなるので、ここでは n を評価するときに使うに留める。

(3.2)から(3.7)を(3.1)に代入すると、次式が得られる。

$$(1 - \lambda)Lh\frac{dB}{dt} = \frac{10n^5g^{1/2}}{s^2B^4h^{35/6}d}\left|Q_R + \hat{Q}_T \cos \omega t\right|^5 \cdot e_w \left(\frac{I_i}{(\rho_s - \rho_w)g}\right) \quad (3.9)$$

上式を一般化するために無次元化する。

$$B^{*4} \frac{dB^*}{dt^*} = C_R \frac{1}{L^* d^*} \left|Q_R^* + \hat{Q}_T^* \cos \omega^* t^*\right|^5 \cdot C_w \frac{I_i^*}{L^*} B^{*4}. \quad (3.10)$$

ここで、肩付きのアスタリスクは無次元量をあらわし、以下で定義される

$$B^* = \frac{B}{h}, \quad L^* = \frac{L}{h}, \quad d^* = \frac{d}{h}, \quad \omega^* = \omega T, \quad t^* = \frac{t}{T}, \quad (3.11)$$

$$C_w = \frac{e_w}{(1 - \lambda)}, \quad C_R = \frac{10}{s^2(1 - \lambda)} \left(\frac{ng^{1/2}}{h^{1/6}}\right)^5, \quad Q_R^* = \sqrt[5]{\frac{T}{g^2 h^{13}}} Q_R, \quad (3.12)$$

$$I_i^* = \frac{TI_i}{(\rho_s - \rho_w)gh^3}, \quad \hat{Q}_T^* = \sqrt[5]{\frac{T}{g^2 h^{13}}} A_T a \omega, \quad (3.13)$$

ここで、 T は潮汐の周期である。

さらに、簡素化すると、河口開口幅の時間発展を記述する微分方程式が次式のように表現されることが分かる

$$B^{*4} \frac{dB^*}{dt^*} = \left| \phi_R^{1/5} + \phi_T^{1/5} \cos \omega^* t^* \right|^5 \cdot B^{*4} \quad (3.14)$$

ここで、

$$\phi_R = \frac{C_R Q_R^{*5}}{C_w I_i^* d^*}, \quad \phi_T = \frac{C_R Q_T^{*5}}{C_w I_i^* d^*}, \quad t^{**} = \frac{t^* C_w I_i^*}{L^*} = \frac{t^*}{T^*} \quad (3.15)$$

式(3.14)より、無次元開口幅 B^* の挙動は、2つの無次元パラメータ、 ϕ_R と ϕ_T によって決まることが分かる。これらのパラメータは、それぞれ河川流や潮汐流による土砂除去作用と波浪による土砂堆積作用の比を表している。新たなスケリングに用いた無次元時間 $T^* = L^*/C_w I_t^*$ は、砂州を単位距離伸ばすのに必要な時間を表している。

3.2 地形平衡条件

沿岸漂砂の堆積作用と開口部の流れによる土砂除去作用が釣り合った状態が平衡状態で、このとき砂州の伸張は止まり、地形は定常状態となる。しかし、式(3.14)を見て分かったとおり、潮汐の影響を考えた場合には外力が絶えず変化しているので、厳密な意味での定常状態はない。そこでここでは、少し条件を緩和して、潮汐一周平均してみたときに、地形が変化しない状態を定常状態と呼び、それを実現する条件を平衡条件と呼ぶことにする。

$$0 = \frac{1}{T^{**}} \int_0^{T^{**}} B^{*4} \frac{dB^*}{dt^{**}} dt^{**} = \frac{1}{T^{**}} \int_0^{T^{**}} \left(\left| \phi_R^{1/5} + \phi_T^{1/5} \cos \omega^{**} t^{**} \right|^5 - B^{*4} \right) dt^{**} \quad (3.16)$$

ここで、 $T^{**} = 2\pi / \omega^{**}$ であり、上式を満足する開口幅を平衡開口幅 B_c^* とすると、

$$B_c^{*4} \equiv \frac{1}{T^{**}} \int_0^{T^{**}} B^{*4} dt^{**} = \frac{1}{T^{**}} \int_0^{T^{**}} \left(\left| \phi_R^{1/5} + \phi_T^{1/5} \cos \omega^{**} t^{**} \right|^5 \right) dt^{**} \quad (3.17)$$

上の平均化操作は、佐藤により解析的に解かれており、以下のようなになる。

(1) 河川流が潮汐流より大きい場合 ($\gamma_1 = \phi_T / \phi_R \leq 1$)

$$B_c^* = \sqrt[4]{\left(\frac{15}{8} \gamma_1^4 + 5 \gamma_1^2 + 1 \right)} \phi_R \quad (3.18)$$

この特別な場合として、潮汐流が無い場合 ($\phi_T = 0$) は

$$B_c^* = \sqrt[4]{\phi_R} \quad (3.19)$$

式(3.19)と同様の式は、Tanaka (1997)によって求められているが、そこでは初期開口幅を無次元化するための長さの代表量としており、無次元量の意味合いが異なったものとなる。

(2) 潮汐流が河川流より大きい場合 ($\gamma_2 = \phi_R / \phi_T \leq 1$)

$$B_c^* = \sqrt[4]{\frac{2}{\pi} \left\{ \arccos(\cdot \gamma_2) \cdot \frac{\pi}{2} \left(\gamma_2^5 + 5 \gamma_2^3 + \frac{15}{8} \gamma_2 \right) + \sqrt{1 - \gamma_2^2} \left(\frac{137}{60} \gamma_2^4 + \frac{104}{15} \gamma_2^2 + \frac{8}{15} \right) \right\}} \phi_T \quad (3.20)$$

この特別な場合として、河川流が無い場合 ($\phi_R = 0$) は

$$B_c^* = \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \frac{16}{15} \phi_T} @ 0.76 \sqrt[4]{\phi_T} \quad (3.21)$$

なお、潮汐流と河川流が等しい場合 ($\phi_R = \phi_T$) は、式 (3.18) と(3.20)は一致することが確かめられる。

これらの関係を Fig.3-2 に示す。両軸とも対数軸であり、潮汐の影響がない、式(3.19)は図中傾き 1/4 の直線で表される。 $\phi_R / \phi_T \ll 1$ では、河川流の影響(ϕ_R の依存性)は無く、 ϕ_T が大きくなるほど開口幅は大きくなる。

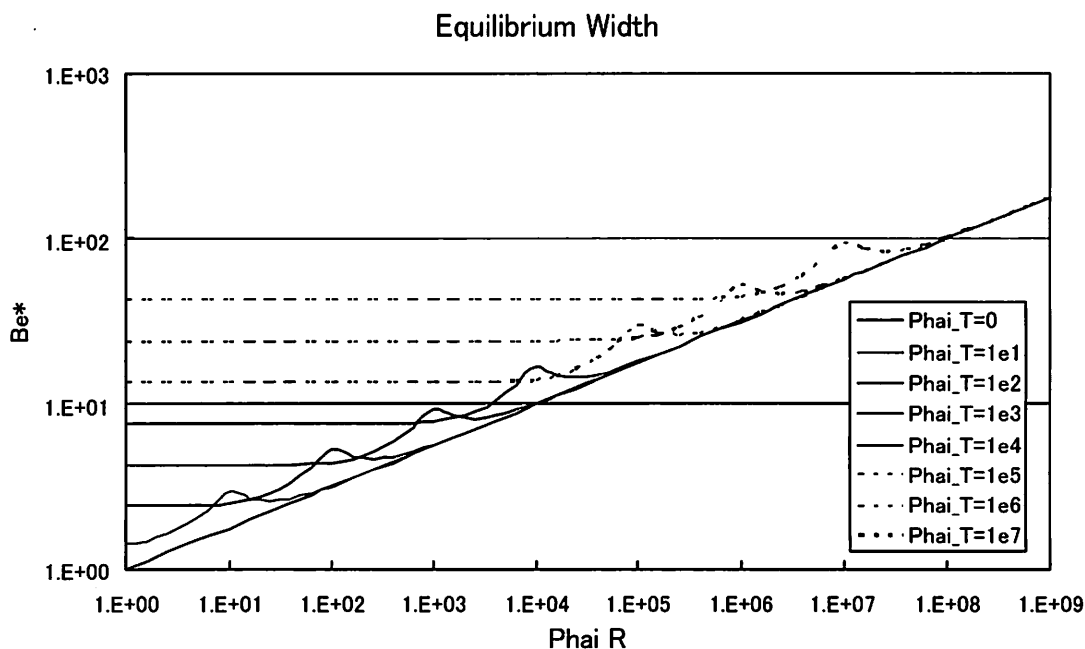


Fig.3-2 無次元外力パラメータ ϕ_R , ϕ_T と無次元河口開口幅 B_e^* の関係

3.3 地形平衡条件の検証

前節で誘導した、地形平衡条件を現地データを収集して検証した (Suprijo et al. 2005, 佐藤ら, 2006)。インドネシアおよび日本の砂浜に開口する河口で、できるだけ海岸構造物のない河川を選んだ。航空写真、横断測量、底質、乾期の河川固有流量、潮汐、波浪などのデータを収集した。特にインドネシアでは、波浪の観測がほとんど行われていないために、ECMWF(欧州中期気象予報センター)の全球予測値の当該地点を5年分入手して推定した。また、沿岸漂砂量係数は、真野ら (1996) の $K = 0.03$ を準用した。

無次元平衡開口幅の実測値と予測値の比較を Fig.3-3 に示す。プロットに使った数値を Table.3-1 に示す。安倍川のように少し実測値と予測値の差

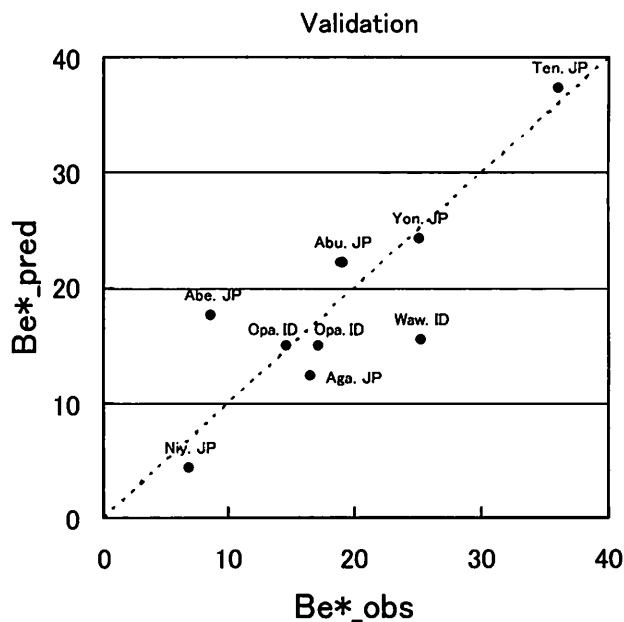


Fig.3-3 地形平衡条件の検証

が大きい地点もあるが、全体的に予測値は実測値を良く再現しているということが言えよう。

Table. 3-1 各河川の河口特性

川の名前	国名	記号	Phai_R	Phai_T	Be*_obs	Be*_pred
米代川	日本	Yon. JP	1.44E+05	4.02E+03	25.1	24.3
阿武隈川	日本	Abu. JP	4.00E+04	2.36E+04	19.0	22.1
阿賀野川	日本	Aga. JP	1.73E+04	1.43E+01	16.5	12.4
安倍川	日本	Abe. JP	4.83E+04	8.78E+02	8.7	17.6
天神川	日本	Ten. JP	2.11E+06	1.64E+01	36.1	37.4
仁淀川	日本	Niy. JP	1.69E+00	1.17E+03	6.9	4.4
Opak R.	インドネシア	Opa. ID	1.48E+03	1.50E+05	17.2	15.0
Opak R.	インドネシア	Opa. ID	1.00E+03	1.50E+05	14.7	15.0
Wawar R.	インドネシア	Waw. ID	1.32E+03	1.70E+05	25.3	15.4

3.4 tidal inlets への応用

3.2 では、河口が潮汐のみによって維持されている場合の平衡条件、(3.21)を導いた。これは、物理現象としては、tidal inlets に起こっているものと類似したものであるとすることができる。一方で、tidal inlets の地形平衡に関しては、開口部の断面積 A_c を tidal prism P_T のべき乗に比例する形に表現する経験式が、O'Brien (1931)によって提案された。その後 Jarrett (1976)や西ら(2006)が係数やべき指数の同定を詳細化し、適用地域を広げるなど、この経験式を発展させてきた。いずれの適用例をみても、tidal prism のべき乗は、開口部の断面積をよく説明しており、この経験則は次元の問題を別にすれば成功しているといっていよい。ここでは、2つの平衡条件の関係を調べてみることにする。

式(3.21)を有次元形に戻すと、

$$\frac{B_e}{h} = \sqrt[4]{\frac{1}{\pi}} \frac{16 C_R (A_T \omega a)^5 (\rho_s - \rho_w)}{15 C_w g h^9 I_i d} \quad (3.22)$$

いま、開口部の断面積や tidal prism は次式で表される

$$A_c = B_e h \quad (3.23)$$

$$P_T = 2aA_T \quad (3.24)$$

これらを使って、(3.22)を書き換えると、

$$A_c = C_T P_T^{5/4} \quad (3.25)$$

ここで、

$$C_T = \sqrt[4]{\frac{(\rho_s - \rho_w) C_R \omega^5}{30\pi C_w g h I_i d}} \quad (3.26)$$

となり、O'Brien らの経験則に近い形が、(3.21)から導かれることがわかる。

式(3.25),(3.26)の検証のために、CIRP (Coastal Inlet Research Program of the United State Army) のホームページから、米国西海岸、メキシコ湾岸、東海岸の tidal inlets の実測データを取得した。Fig.3-4 に

水路断面積と tidal prism の関係をプロットした。図中太い破線は、CIRP から得た係数 C_T の平均値に対する、式(3.25)の直線を、細い破線は同じく C_T の最小値と最大値に対する直線を示したものである。平均値に対する直線はデータ群の中心を通っており、最大値と最小値に対するものは、それぞれほぼデータの最大と最小を示す直線となっている。このことから、理論的に導出した平衡条件(3.25)およびその元となった(3.21)は、tidal inlets の現地データおよび O'Brien らの経験則とも整合しているといえよう。図中には、Jarrett の回帰式も示してあるが、傾きは若干ずれている。現地のデータが、導流堤のある場合を含んでいるので、細かい差異についてはさらに詳細な検討が必要である。

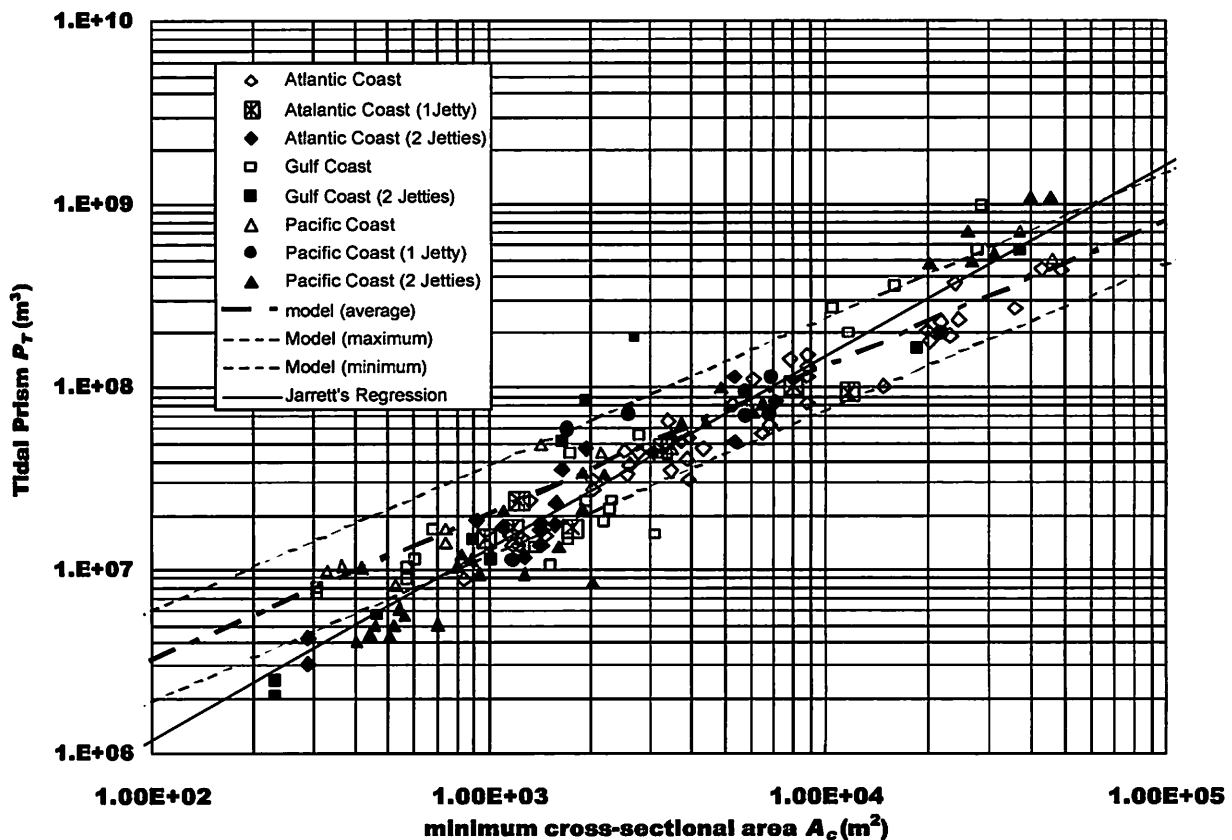


Fig.3-4 米国西海岸，メキシコ湾岸，東海岸における tidal inlets の開口断面積と tidal prism の関係。

4. おわりに

簡単なモデルと土砂収支の視点から、河口開口部の地形平衡条件を解析的に導出し、日本、インドネシアの現地データで検証した。また、この地形平衡条件は tidal prism を使った tidal inlets の経験式を特別な場合として含んでおり、米国における各海岸の現地データで検証した。

河口平衡開口幅は、二つの無次元パラメータ ϕ_R と ϕ_T によって決定されることが示された。河口開口幅を別の大きさに制御する問題を考える場合には、それに対応した平衡状態の ϕ_R と ϕ_T を実現すれば、安定に河口を維持できるものと考えられる。そのためには、河川流量、河口感潮域、沿岸漂砂などの制御による方法があり、最適なものを選べば良い。

今回のモデルでは考えなかった、複数の開口部をもつ問題、開口部のエネルギー損失が無視できない問題など、現実の問題では多種多様な変化があり、それに対応してモデルを高度化していくことも重要である。

参考文献：

- 1) Brown, C.B.: Engineering Hydraulics, edited by H. Rouse, John Wiley & Sons, Ind., New York, N. Y., 1950.
- 2) Davis, R. A. Jr., Hine, A. C. and Bland, M. J.: Midnight Pass, Florida: Instability due to man-related activities in Little Sarasota Bay, In: Kraus, N.C.(Ed.), Coastal Sediments, ASCE, pp.2062-2077, 1987.
- 3) Eisma, D.: Intertidal Deposits - River Mouths, Tidal Flats, and Coastal Lagoons, CRC Press, p.525, 1997.
- 4) Jarrett, J.T.: Tidal prism-inlet area relationship, GITI Report 3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1976.
- 5) Kreeke, J.: Equilibrium and cross-sectional stability of tidal inlets: application to the Frisian Inlet before and after basin reduction, Coastal Engineering, vol.51, Issue 5-6, pp.337-350, 2004.
- 6) Komar, P.D. and Inman, D.L.: Long-shore sand transport on beaches, Journal of Geophysical Research, 30, pp. 5914 -5927, 1970.
- 7) Mano, A., Sawamoto, M., and Nagao, M.: Response characteristics of river mouth topography in wide time scale range, Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp.3126-3138, 1995.
- 8) O'Brien, M.P.: Estuary and tidal prisms related to entrance area, Civil Engineering, 1(8), pp.738-739, 1931.
- 9) Suprijo, T. and Mano A.: Dimensionless parameters to describe topographical equilibrium of coastal inlets, Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp.2531-2543, 2005.
- 10) Tanaka, H.: Complete closure of the Nanakita River mouth in 1994, Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp.4545-4556, 1997.
- 11) 青田茂雄・首藤伸夫：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.203-208，1980.
- 12) 国土交通省河川局監修，社団法人日本河川協会編：国土交通省河川砂防技術基準，同解説，計画編，山海堂，p.230，2005.
- 13) 佐藤智昭・Totok Suprijo・真野 明：河口砂州を有する主な河川の最狭開口部平衡条件，海岸工学論文集，第51巻，pp.526-530，2004.
- 14) 佐藤智明：砂州内浸透流を考慮した河口地形平衡条件の導出と国内主要河川への適用，東北大学大学院工学研究科修士学位論文，2006.
- 15) 西隆一郎・Nicholas C. Kraus・川森晃：インレットの形状特性に関する基礎的研究，海洋開発論文集，第22巻，pp.927-932，2006.
- 16) 真野 明，ムハマド・ハサヌディン，沢本正樹：沿岸漂砂量公式に用いる年平均波，海洋開発論文集，12，pp.55-59，1996.