

感 潮 狭 水 路 の 水 理

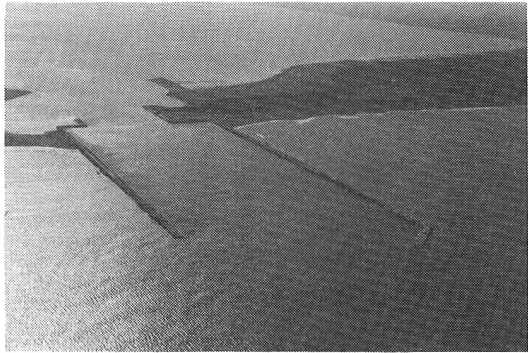
近 藤 倣 郎

1. まえがき

1970年代は北海道のオホーツク海沿岸の漁業に画期的な影響を与えた二つの施設が築設された時代として永くこの地方の住民の脳裡に刻まれるに違いない。それらはまた、それに携さわった技術者達にとってもユニークな経験となった砂浜海岸での人工の感潮狭水路であった。一つは従来閉塞がちな能取湖（表面積 58.5 km^2 ）の湖口を開削して人工水路を作り、湖内に建設した漁港の航路にしたことであり（写真-1）、他の一つは我国最大の鹹水湖であるサロマ湖（表面積 151 km^2 ）で常時開口をしている自然の狭水路のほかに新たに海水交流を目的とした第二湖口水路を設けたことである（写真-2）。

オホーツク海沿岸には大小の海岸湖沼（潟湖）が点在しているが、サロマ湖を除くすべての湖沼は9～10月に漂砂により湖口が閉塞してしまう状況であった。湖口閉塞後は1～3月の流水接岸期を経てやがて春の融雪期を迎えるまで海と湖とは切離なされたまゝである。気温が上昇し出水量が多くなると湖水面が上昇し、やがて砂丘の低い位置から湖水が海に向かって溢れ出て、その水流のエネルギーで自然の狭口が形成され、波が小さい春夏季は開口し続ける……、というのが未開の時代の湖口の一サイクルであった。しかし湖の周辺に多くの人々が居住するようになってからは、5月上旬になると住居、耕地および道路や鉄道が冠水する事態を避けるために“潮切り”と呼ばれる砂丘に小規模な導水路を開設する作業、を行って開口をうながしている。このような自然との永い間の苦闘の体験からして、これらの湖口水路が沿岸漁業の振興のみではなくして、有形・無形の利益をもたらすものとして切望されていたものである。

感潮狭水路のうちで最も美しい平面形を呈するのは、砂州や砂嘴が発達してきた潟湖にできた湖口であろう（写真-3）。我国ではこのような狭水路は北海道のオホーツク海岸と東部太平洋岸を除くと、あまり見当たらないこともあってその水理学的研究はこれ迄活発ではなかった。しかし、欧米ではこの種の狭水路をもつ地形が多



写真・1 能取湖口水路
（昭和53年10月11日撮影・網走開発建設部提供）



写真・2 サロマ湖第二湖口水路
（昭和53年12月6日撮影・網走土木現業所提供）

いこともあって、実証的研究が精力的に広範囲に行われてきており、その成果が最近になって相次いで出版されている。

我国でも近年、閉鎖性内湾や潟湖などの内水域を栽培漁業、港湾あるいは海浜性レジャーなどの目的で利用しようとする傾向がけん著である。そのためには感潮狭水路の水理的特性を十分に検討することが最も基本である。本稿では現段階での、感潮狭水路の水理に関する基礎的な知識と思われるものを取まとめた。



写真・3 ロングアイランド・サウンドの一部
(ニューヨーク・ラガーデア空港付近より、昭和54年3月19日撮影)

2 水底地形

2.1 感潮狭水路の定義と成因

「感潮狭水路」あるいは「感潮狭口」は見なれた用語ではないと思われるが、英語名の Tidal Inlet あるいは Tidal Entrance にあたるものである。専門用語はそれぞれの分野ごとにいくらか解釈の幅が異なることは間々あるので、海岸工学の用語としての “Tidal Inlet” の定義を知る目的で合衆国工兵隊の Coastal Engineering Research Center 刊行の Shore Protection Manual¹⁾ (略称 SPM) の用語集を見ると次のようになっている。Tidal Inlet - (1) A natural inlet maintained by tidal flow, (2) Loosely, any inlet in which the tides ebbs and flows.

Inlet - (1) A short, narrow waterway connecting a bay, lagoon, or similar body of water with a large parent body of water, (2) An arm of the sea (or other body of water), that is long compared to its width, and may extend a considerable distance inland.

上出の定義の(1)すなわち狭義の Tidal Inlet とは、「湾、潟湖などの水域をより大きな母体となる水域とつながり短かく狭い自然な水路のうち、主として潮汐流によって維持されているもの」、ということになる。我国では、Inlet を河口 (River Mouth) と訳していることが多かったが、これは上出の(1)、(2)のいずれの定義からしても適当でない。またしばしば河口と混同されて用いられている “Estuary” とは、やはり SPM の定義に従えば「潮汐の影響が及ぶ河川の領域」であり、これは河口を含めて河川のかかなり上流までの広い水域を指している。

こゝでは感潮狭水路を、上出の狭義の Tidal Inlet と同意味の用語として用いるが、その中に自然のみならず人工的な水路をも含めることにする。感潮狭水路の例としては、図-1 で黒い矢印を付けたようなものがある。

Bruun²⁾ は Inlet をその成因別にわけると、(i) 地質的成因、(ii) 水文的原因、(iii) 沿岸漂砂が原因の三種類があると述べている。このうち (i) は底質が岩盤などで水底地形がほとんど変化しないものであり、(ii) は三角州の発達した河口のようなものがこれにあたる。(iii) は砂浜の漂砂海岸に見出されるもので、潮汐と波浪の作用で底質の移動が激しく、水底の地形は絶え間なく変化しているもので Tidal Inlets はほとんどがこれに属する。Brown³⁾ は合衆国の Tidal Inlets は、波や流れによって自然

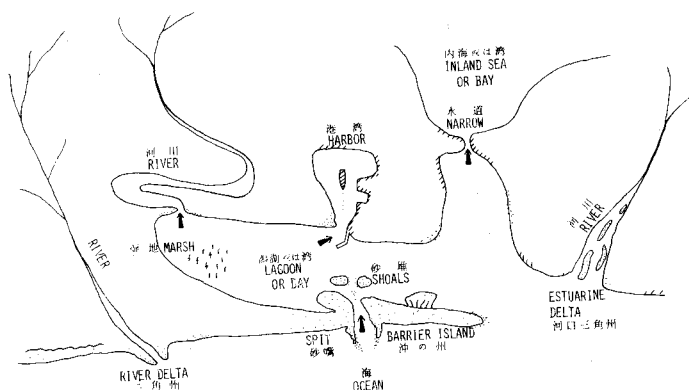


図 - 1 感潮狭水路の例

に形づくられた沖の州 (Barrier) がふたたびそうした外力によって開かれてできたものがほとんどであると指摘した。Caldwell⁴⁾ は Inlet を潮差と潮流の性質から三種類に分類しているが、Tidal Inlet はその中の Class-3 に属するもの、すなわち湾内の潮差が外海の潮差よりも小さいものとみなすことができる。

2.2 潮汐と砂浜海岸の地形

図-2 は大潮の潮差の世界的な分布を示したものであり、また日本沿岸とその近傍の大潮升の値は図-3 のようになっている⁵⁾。Davies は海岸地形を支配している要素として潮差を重視し、潮汐を潮差によって次のように分けて考えた。

- (a) 弱 潮 (Microtidal) 潮差 2 m 以下。
- (b) 中 潮 (Mesotidal) 潮差 2 ~ 4 m。
- (c) 強 潮 (Macrotidal) 潮差 4 m 以上。

この分類からすれば、日本の場合は瀬戸内海と九州西岸を除くといずれも弱潮である。

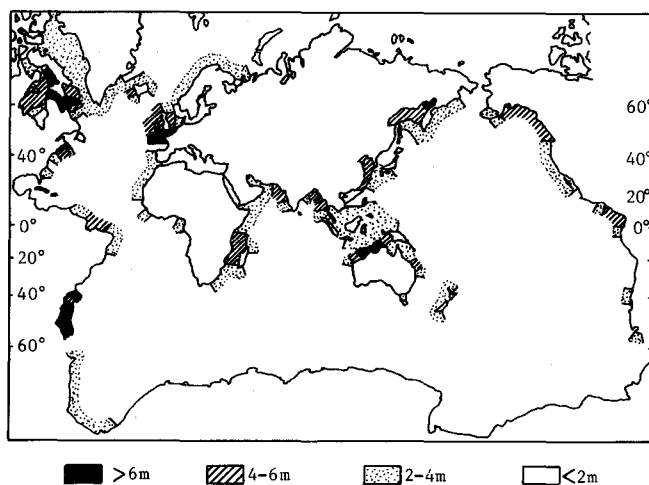


図 - 2 大潮潮差の地理的分布 (Davies⁵⁾ による)

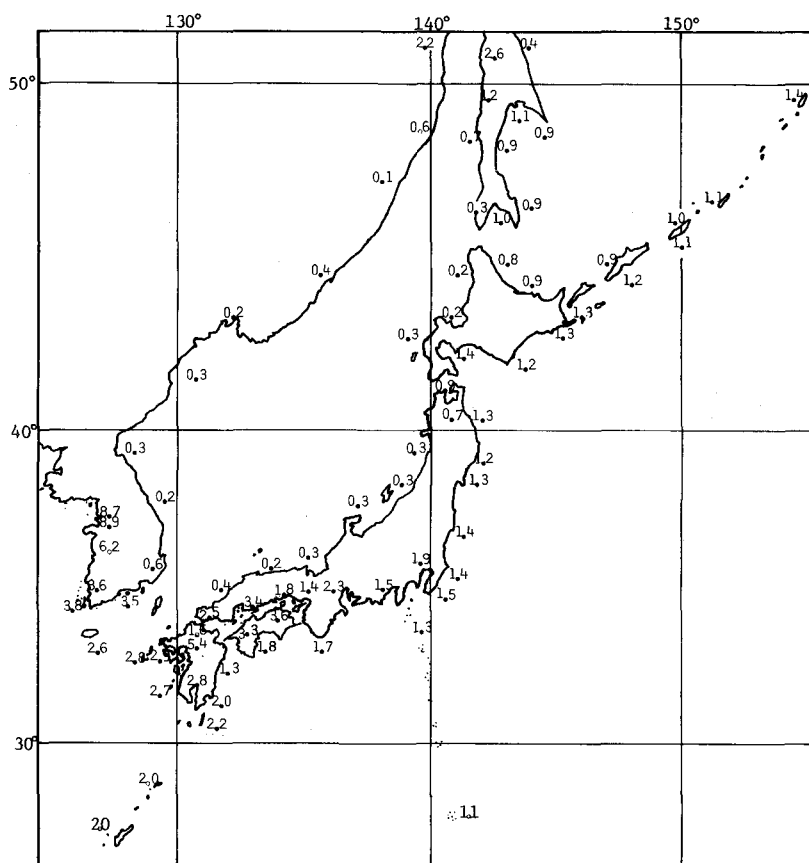


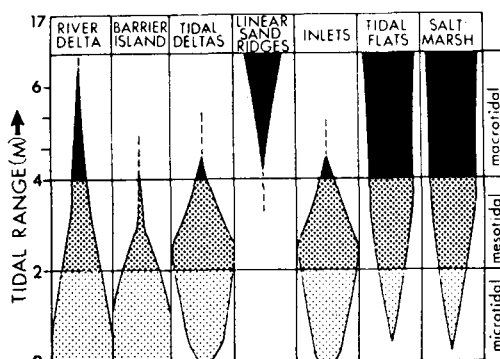
図-3 日本近海沿岸の大潮升(単位 m)⁶⁾

Hays⁷⁾は砂浜海岸の各種の海岸地形の出現頻度と潮差の関係を調べ図-4を得た。これからInletが出現するのは三角州の場合と同様に中潮と弱潮の地帯であり、潮差が4 m以上の強潮地帯ではそれに代ってTidal Flat(潮汐平原)やSalt Marsh(湿地)⁸⁾が圧倒的に多くなる。

2.3 狭口地形の特徴

図-5 はサロマ湖口付近の深淺図の例である。⁹⁾ この湖口は昭和4年に潮切りによって開口して以来今日まで開口を続けているもので、その形状のこれまでの發達の経過については尾崎¹⁰⁾が検討している。砂浜上の大規模な自然感潮狭水路として我国では貴重な例であるこの湖口地形を見ると、以下の特徴が見出される。

- (i) 湖口兩岸の砂州の大きさと形状の違い。
- (ii) 湖口兩岸から海に伸びた三日月状のバー (Crescent Shape Bar)
- (iii) 湖内にある二つの目玉状の砂堆 (Bay



図・4 砂浜海岸の各種地形の潮差ごとの出現割合⁷⁾⁸⁾

Shoals)

(Ⅳ) 湖口の湖側端にある大きな窪み

これらの地形的特性の成因はおよそ次のように考えることができる。(i), (ii)の原因は湖口潮流が沿岸漂砂の移動に対して障害物となっているため¹¹⁾、左右の砂州やバーの規模の違いは、右から左に向う沿岸漂砂量がその反対方向のものより卓越していたことにある。このことは右岸の砂州の湖内に砂嘴が発達していることから裏付けられる。(iii)の砂堆は明らかに湖口付近に堆積した漂砂が入潮流によって湖側に掃流されて堆積したものである。

(Ⅳ)の窪みと類似のものは海峡や水道の付近にも見出されることがある¹²⁾。この成因はNayak¹³⁾の移動床実験を参照すると、退潮流の際の流

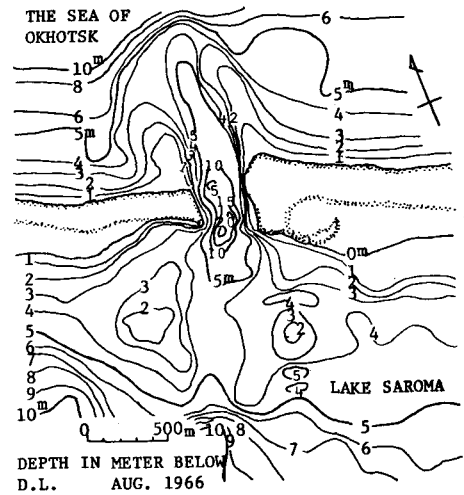


図 - 5 サロマ湖口付近深浅図⁹⁾

れの縮流効果にとまなう局所的な流速の急増によると考えられる。

水路底の河床形状は、断面平均流速が0から最大2 (m/s)位までの範囲で潮汐の半周期間に変動するので、Ripple - Dunes - Transition - Flat Bed のように変化する。また潮流の強い海峡などの砂堆の付近には大規模な海底砂州 (サンドウェーブ) が発達していることが知られている¹⁴⁾。

感潮狭口の狭窄部での水面幅と平均水深の関係はMehta¹⁵⁾が合衆国のデータについて調べており、図-6は導流堤のない狭口の場合であって、実線は平均的な関係である。同図にはサロマ湖口と能取湖の旧湖口のデータをプロットしてある。これを見るとオホーツク海沿岸のこれらの湖口の場合は、若干水深が大ききようである。破線は導流堤がある場合の合衆国のデータの平均的な関係である。これより水深が5m以深の大きな狭口では導流堤の有無は影響がないが、水深が小さくなると導流堤の無い場合の水面幅が大きくなることが認められる。

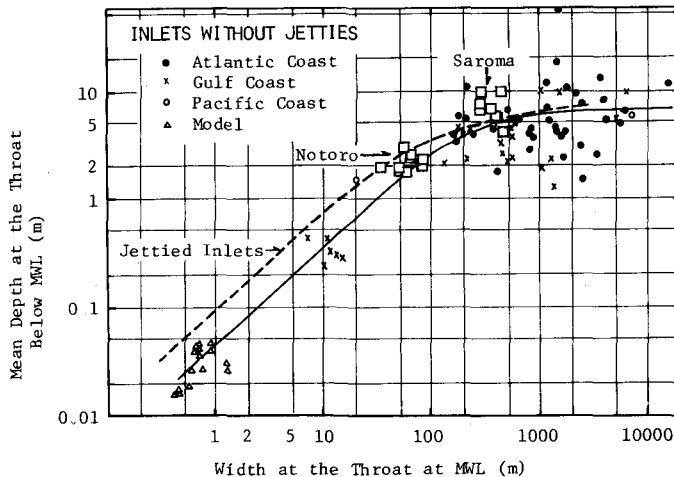


図 - 6 狭水路の狭窄部における水面幅と水深の関係¹⁵⁾

3 狭水路潮流ほか

感潮狭水路の支配的な外力である海の潮汐によって生ずる水路の潮流について計算する方法は、二次元的な数値解析を行うのが汎用性があるが、水路部分のみに注目すると一次元の解析でも十分精しい解が得られる。

3.1 水路潮流流速と内水域潮位の解

図-7のように、表面積 S の内水域が長さ ℓ 、水深 h の水平底の一樣断面水路で海と接続している場合を扱う。 x 座標を海側の端を

原点とし、内水域の方向を正にとる。水路の断面平均流速を u 、静水面から鉛直上向きに測った水位を η とすれば、連続と運動の方程式は下式のように表わされる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u A) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g n^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

こゝで、 A ：流水断面積、 g ：重力加速度、 R ：径深、 n ：Manning 式の粗度係数。

また境界条件の一つは水路の海側端における水位が、次式で表わされる外海の潮位に等しいとするものである。

$$\eta_{x=0} = a_s \cos \sigma t \quad \dots\dots\dots (3)$$

こゝで、 a_s ：外海潮位の振幅、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 T ：外海潮汐の周期である。もう一つの境界条件としては、内水域の水位 η_b はいたるところ等しいと仮定して得られる次式である。

$$A u_{x=\ell} = S \left(\frac{d \eta_b}{d t} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

河川流が内水域に流入しているときには左辺にその流量 Q_f を加える。

長方形断面水路の場合には(1)と(2)の方程式を線形化し(3),(4)の境界条件のもとで u と η の解が求めている^{16), 17)}。しかしその解は複雑であり、加えて非線形抵抗を対象とすると、解は陰関数として表現されるので不便である。そこで通常、水路の長さ ℓ は潮波の波長に比べると極端に短いことに着目して、水路内の水面勾配は一樣であると仮定する。そうすれば u は時間 t のみの関数となり(4)式が(1)式に代って連続の式になる。また水路の流出入の損失を摩擦損失とともに考慮する。

水面勾配は

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \left[\eta_b - (\eta_s - f_c \frac{u |u|}{2g}) \right] / \ell \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $f_c = 1 + f_e$ 、 f_e ：流入の損失係数。

また運動の方程式は次のように書き改められる。

$$\frac{d u}{d t} + g \frac{(\eta_b - \eta_s)}{\ell} + \left[\frac{f_c}{2\ell} + \frac{g n^2}{R^{4/3}} \right] \cdot |u| u = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。 f_c は 1.5 とするのが妥当である。解析的解を得るには(6)式を線形化して

$$\frac{d u}{d t} + \frac{g (\eta_b - \eta_s)}{\ell} + k u = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

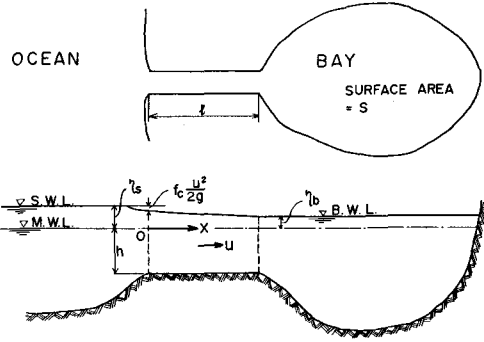


図-7 感潮狭水路の略図

とおく。こゝで k は線形化係数であり、次式で与えられる。

$$k = \frac{8g n_r^2 U}{3\pi R^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

こゝで U は水路流速の時間的的最大値であり、 n_r は等価粗度といわれ、次式で与えられる。

$$n_r = n \left[1 + \frac{f_c R^{4/3}}{2g\ell n^2} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(7)式と、(4)式において $U_{x=\ell} = u$ とした連続の式から η_b に関する常微分方程式は次のように得られる。

$$\frac{d^2 \eta_b}{dt^2} + k \frac{d \eta_b}{dt} + \alpha \eta_b - \alpha \eta_s = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ただし, } \alpha = \frac{A g}{\ell S} \quad \dots\dots\dots (11)$$

η_b と u の解は結局、次のようになる。

$$\eta_b = a_b \cos (\sigma t - r) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$u = -U \sin (\sigma t - r) \quad \dots\dots\dots (13)$$

こゝで、

$$\frac{a_b}{a_s} = \frac{(\alpha / \sigma^2)}{\sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^4 + 4 \left(\frac{\beta p}{\sigma^2} \right)^2} \right]}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$r = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{2} \left\{ - \left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^4 + 4 \left(\frac{\beta p}{\sigma^2} \right)^2} \right\}}}{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)} \right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$p U = \sqrt{\frac{1}{2} \left[- \left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^4 + 4 \left(\frac{\beta p}{\sigma^2} \right)^2} \right]} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{ただし, } \beta = \frac{a_s g \sigma}{\ell} \quad \dots\dots\dots (17), \quad p = \frac{8 g n_r^2}{3 \pi \sigma R^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

以上が近藤の解であり¹⁸⁾、この他に中村ら¹⁹⁾の解もある。また欧米の研究者の解については Mehta¹⁵⁾が精しくまとめている。実際の潮汐は日潮不等があるので、単調な潮を対象としたこのような理論はそのまゝ適用はできず、外潮を調和分解して各分潮毎に解を求めて重ね合わせる方法が用いられる。¹⁸⁾
 図-8 は能取湖旧湖口水路において観測された水位と流量のデータについて計算値を示したものである。外海潮差に比べて水深が 1.1m と極めて浅く潮波の減衰が著るしい例であるが、計算値は良く観測値を表現している。

3.2 タイダルプリズム P

潮汐の半周期間に狭水路を出入りする総水量は Tidal Prism と呼ばれ、後述のように安定流積と密接な関係があることから重要なパラメータとして考えられている。また海水交流の面からしても大切な量である。 P は定義から以下のように計算される。

$$\begin{aligned}
 P &= - \int_{t'}^{t'+T/2} Q dt = - \int_{t'}^{t'+T/2} u A dt = U A \int_{t'}^{t'+T/2} \sin(\sigma t - \gamma) dt \\
 &= Q_{\max} \int_{t'}^{t'+T/2} \sin(\sigma t - \gamma) dt = \frac{Q_{\max} T}{\pi} = 2 a_b S \quad \dots\dots\dots (19)
 \end{aligned}$$

たゞし、 $Q_{\max} = AU$ 、 $t' = \gamma/\sigma$ である。

(19式の右辺の最後の式は、内水式の水位が一樣に上下するとの前提で得られる。

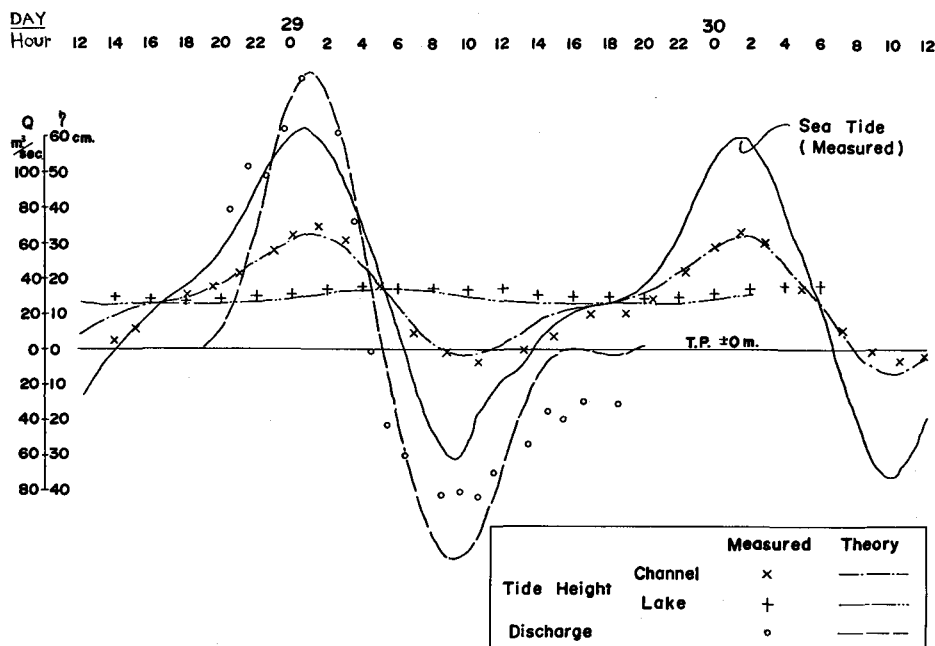


図 - 8 能取湖口の潮位と水路潮流流量 (昭和 41 年 8 月)

3.3 最大流速水深 h_0

感潮狭水路の流速は、海と内水域の水位差によって主に支配されている。このため水路の流積が大きいと潮波の伝播が速やかで水位差が小さくなり、また流積が小さ過ぎると摩擦損失が大となり、流速は減少する。したがってある流積（一樣断面水路であればある水深）のところで流速が最大になることが推測できる。このことは既に 1940 年に Escoffier が Brown の式に基づいて検討している。²⁰⁾ 小規模な水理実験によって得られた U および a_b に及ぼす水路水深 h の効果は図 - 9 に示されている。²¹⁾ 最大流速 $U_{\max}$ は $(\partial U / \partial h) = 0$ の条件を用いて次のように得られている。

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{n_r}{n} \right)^2 \cdot \frac{\alpha (\alpha / \sigma^2 - 1)}{\sigma^2 p^2} \cdot \frac{\left(\frac{\partial A}{\partial h} / A \right)}{\left(\frac{\partial R}{\partial h} / R \right)}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

最大流速水深 h_0 あるいは流積は (20) 式の $U_{\max}$ と (16) 式の U とを等しいとおいた式から求められる。一般の断面の場合は試算が必要である。図-10 は $n = n_r$ の場合に h_0 を直接求めるグラフである。通常はこの図で h_0 の近似値を求め、その前後の水深について U を計算すれば $U_{\max}$ ならびに h_0 が得られる¹⁸⁾。

以上、単一内水域が一本の水路で外海と結ばれている場合を扱ったものであるが、複数の水路の場合の解も得られている^{18), 19)}。また河川などの流入や流出が内水域で起る場合の解法についての研究も行われている^{22), 23)}。

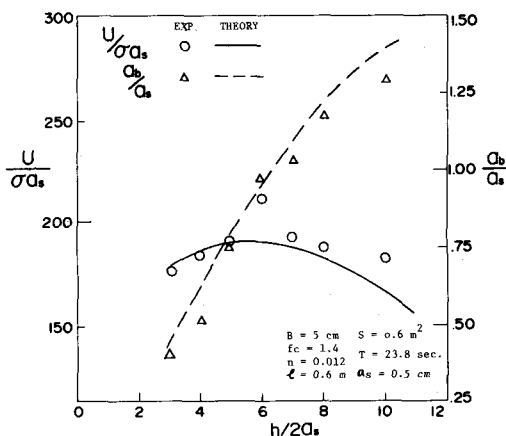


図-9 水深変化にともなう U と a_s の変化 (実験)

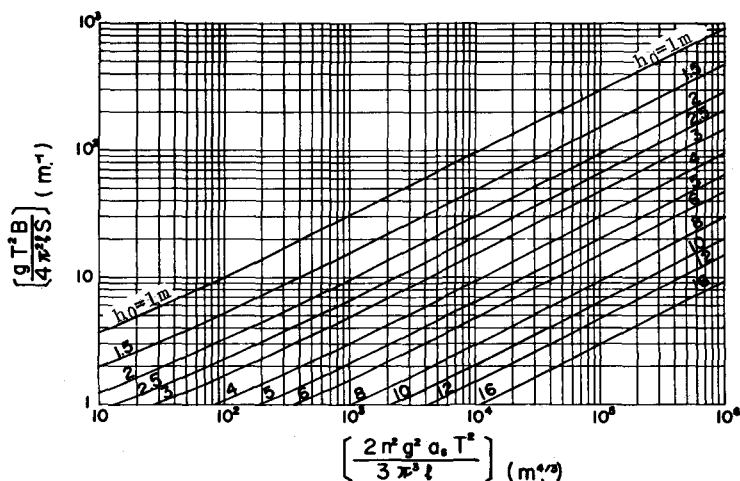


図-10 感潮狭水路の最大流速水深 h_0 を求める図
(広長方形断面水路で $n = n_r$ のとき)

4 土砂の輸送

4.1 感潮狭水路周辺の底質移動特性

狭口付近の土砂の輸送パターンを、Bruun¹⁵⁾ は波のエネルギーの強弱および導流堤の有無を考慮して以下のように考察している。図-11 は波が強い場合であり、自然の狭口(a) の前方では波の屈折効果により海からのあらゆる方向の波が集中するので底質の攪乱が激しく、この土砂が狭口の入潮流で湾に運ばれ易い。入ってきた土砂のうちの相当な量は湾内の砂堆に堆積する。湾内では波は小さいので浮遊砂濃度は小さく、結局海に戻される土砂量は海から湾にきた量よりも少ない。このようにして湾内砂堆は次第に大きくなる。導流堤があると、海側では沿岸漂砂の一部の移動が阻止されるので、

入潮流で湾に運ばれる土砂量は少なくなる。また退潮流は導流堤によってより沖合まで強い流速をもつことになるので、土砂も自然狭口に比べてより沖合に運ぶことができる。

波が弱い場合は海から波によって徐々に堆積した土砂が退潮流によって一挙に海側に掃き出されるという経過をたどるので、湾内砂堆は大きくない。

4.2 退潮流による流砂量

上述のように入潮流による流砂量は波浪や漂砂の影響で、同一流速の退潮流時よりも相当に大きいことが予想され、その推定は容易ではない。こゝでは退潮流を対象にする。非定常流であっても潮流のように緩やかな変化をする流れによって運搬される流砂量は、同一流速の定常流の流砂量と大きな違いは無いはずである。このことはプラスチック材料を底質として用いた狭口水路のモデルについての実験でもほぼ確認できている²⁴⁾。実際の応用を考えると数多くある河川の流砂量推定式のうちのどれを使うかが問題である。こゝでは実測値との検証で良い結果が得られている²⁵⁾Engelund - Hansen の式を用いて潮流による狭口の流砂量を求める方法を示す。同式は

$$q_s = 0.005 V^2 \left[\frac{d_{50}}{S_w g} \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{\tau_0}{S_w \rho g d_{50}} \right] \dots\dots\dots (21)$$

で表現されるものであり、こゝで q_s : 水路の単位幅当りの流砂量 ($m^3/sec \cdot m$) , d_{50} : 中央粒径, ρ : 水の密度, S_w : 底質の水中比重 = $(\rho_s - \rho) / \rho$, ρ_s : 砂の密度, τ_0 : 水底に作用する剪断応力, V : 断面平均流速. τ_0 を Manning の平均流速式を用いてあらわすと, (21) 式は次式となる。

$$q_s = \frac{0.55 n^3 V^5}{g^{1/2} S_w^2 d_{50} R^{1/2}} \dots\dots\dots (22)$$

潮流による各瞬間の流砂量を上式の V に代って (13) 式による u の絶対値を代入することで推定できるとする。そうすると潮汐の1周期間に水路の片方に流れる単位幅当りの流砂量は、下式となる。

$$\begin{aligned} q_s \cdot T/2 &= \int_{t'}^{t' + T/2} q_s dt = C_q U^5 \int_{t'}^{t' + T/2} \sin^5 (\sigma t - r) dt \\ &= (1.07 C_q U^5 T) / 2 \pi, \quad (m^3/m) \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

中蘭ら²⁶⁾は同様な流砂量計算を各種の河川流砂量式について行えるような図表を作成している。狭水路の底質の d_{50} は河口の場合と同様に周辺の海浜よりは大きいことが、能取潮口について知られている²⁷⁾。

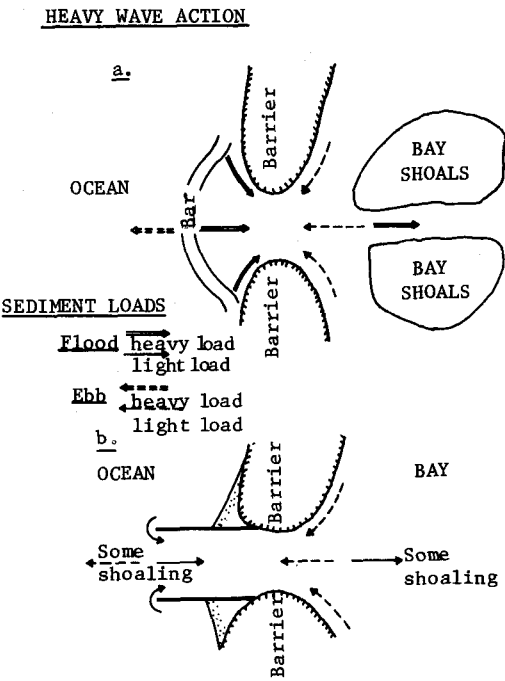


図 - 11 狭水路付近の底質移動の概略 (Bruun¹⁵⁾)

4.3 狭口付近の土砂収支

感潮狭水路の付近には、上出の狭口潮流による流砂量とそれに直角方向の沿岸漂砂があり、その一部が堆積しあるいは不足分をおぎなうために侵食がおこるなどで、複雑な地形の変化がある。これを正しく行うには漂砂や海浜流と潮流の相互作用が明らかにされなくてはならない。その方面の知識はあまり知られていない現段階では大まかな土砂の収支を把えることに留まる。こゝでは Bruun¹¹⁾ の案を修正したもの²⁸⁾を示す。

図-12 は沿岸漂砂が左から右に向っている場合を示している。こゝで Q_L : 沿岸漂砂量 (狭口の両側海岸で等しい値をもつ), a : 狭口の左岸側に堆積する土砂量, b と h はそれぞれ左, 右側から水路に入ってくる土砂量, c , e はそれぞれ入潮流, 退潮流によって運ばれる土砂量,

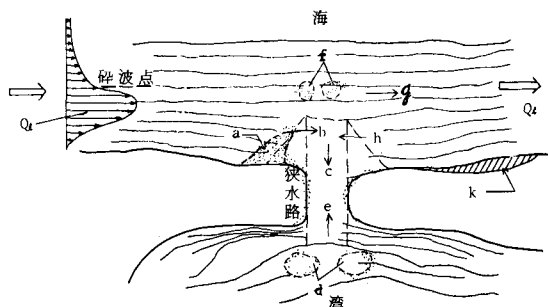


図-12 狭口周辺の土砂収支説明図

d : 水路内および湾内砂堆に堆積する土砂量, f : 沖側に堆積する土砂量, g : 水路の沖合を左から右にバイパスする土砂量, k : 右岸側の侵食土量。これらの諸量の間には次式が成立する。

$$Q_L = a + d + f + g \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$Q_L = g + k \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$b + c + h = d + e \quad \dots\dots\dots (26)$$

これは Q_L がわかっているとしても, $a, b, c, d, e, f, g, h, k$ の9個の量の間の3個の式の関係であるから, 6個の量を推定しておいて残りの3個の量が求まることになる。 Q_L は年間当たりで与えられるのが通例であるから, 土砂収支も年間について行うことになるが, Q_L は左右両方向の向きに現われるから, 両方向について計算しなければならない。²⁹⁾

5. 狭水路の安定性

砂浜海岸にあって安定な狭口 (Stable or Equilibrium Inlets) と呼ばれるものは, 狭口の流積が大きな変動をしていない狭水路を指すと考えられる。変動の程度を知る物指しとしては, 例えば1年間の間に10%以内とかを基準としても良いであろう。安定な水路が存在するということは, 漂砂による埋没作用と潮流による洗掘作用がおおよそ同じ程度であり, 時化による一時的な埋没現象が起ったとしてもそれが潮流による掃流力によって比較的短かい間に復元できるような一種の平衡特性をもっていることを意味する。対象とする狭水路の安定な流積はいくらなのかを知ることは, 海岸・港湾技術者にとって最大の関心事であったし, 今後もそうであろう。このため多くの技術者達がこの安定流積の研究を続けてきている。こゝではその研究手法の別に紹介する。

5.1 $A_e = CP^n$ として求める方法

安定狭口の流積 A_e がタイダルプリズム P との間に密接な関係があることは経験的に知られていたが, 1931年に M. P. O'Brien³⁰⁾ が合衆国の感潮狭口について一つの式を提案して以来, 主としてカリフォルニア大学でこの手法による研究がなされた。³¹⁾ 表-1はそれを取りまとめたものである。共通点としてあげられることは, n は自然狭口では1.0だが, 導流堤があると1.0より小さいことである。

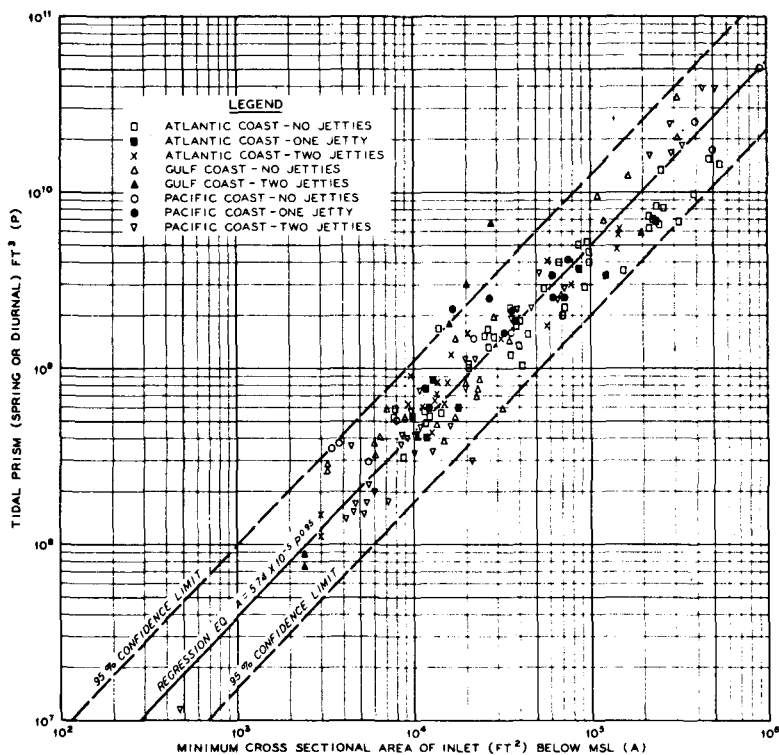


図 - 13 タイダルプリズムと流積の関係
(合衆国, Jarrett³²⁾)

Jarrett³²⁾ の場合は合衆国の狭口についてこれ迄のすべてのデータと最新のデータを網羅し回帰分析を行って、三つの沿岸（太平洋岸、大西洋岸およびメキシコ湾岸）の影響、また導流堤の有無の効果をj知る目的で行ったものである（図 - 13）。その結果、自然狭口の場合と導流堤が片側一基のみの場合の狭口については、同じP値に対して常に大西洋岸の狭口の方が太平洋岸のものよりも大きな A_e を有していることがわかった。重村³³⁾ は我国の湾の湾口の形状特性について回帰分析を行って研究しているが、表 - 1の値は A_e とPの関係を四つの沿岸（日本海岸、太平洋岸、九州西岸、瀬戸内海）別に求めた結果である³⁴⁾。

表 - 1 $A_e = CP^n$ の各種の式

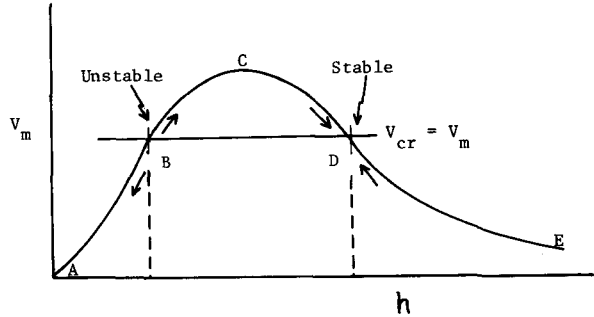
提案者（発表年）	長さの単位	C	n	導流堤の数	海 域
O' Brien (1931)	ft	4.69×10^4	0.85	0, I, II	合 衆 国・全 域
" (1969)	ft	2.0×10^5	1.0	0	" "
Nayak (1971)	ft	4.17×10^4	0.85	0, I, II	" "
" (1971)	ft	1.89×10^5	1.0	0	" "
Johnson* (1973)	ft	2.0×10^4	0.9	0, I, II	合衆国・太平洋岸
" (1973)	ft	1.82×10^5	1.0	0	" "
Jarrett (1976)	ft	5.74×10^5	0.95	0, I, II	合 衆 国・全 域
" (1976)	ft	1.04×10^5	1.03	0, I	" "
重 村 (1978)	km	3.014	0.861	0	日 本・太平洋岸
" (1978)	km	11.51	0.813	0	" ・日本海岸
" (1978)	km	0.961	0.768	0	" ・瀬戸内海
" (1978)	km	1.482	0.844	0	" ・九州西岸

* Johnson の場合のPは平均潮（他は大潮平均）によって求めている。

同一 P に対して A_e は上出の順に大きい。ただし重村のデータには地質的成因の底質が岩盤の狭口もかなり含まれているので、漂砂の影響をこのデータから議論することは適当でない。

5.2 狭口潮流流速による方法

Escoffier (1940) は上述した A と U の関係から以下のように狭水路の安定を考察した²⁰⁾。図-14^{*}はその説明図であり、横軸に水深 h を縦軸に U に相当する V_m をとってその関係を示したものである。また V_{cr} とは水路流速がそれより大きいと水路底が洗掘され、小さいと堆積するような流速である。図の矢印でわかるように、 AB 区間では $V_{cr} > V_m$ であるから水深は減少し水路は閉塞傾向をたどる。 BC 、 CD 区間では水深は増大し水路は侵食傾向になる。しかしさらに水深が大きくなって DE 区間になると再び堆積傾向に戻る。このことから V_m と V_{cr} の二つの線の交点のうち水深の大きい D 点の水深 h_D 付近に水深があると、水深が一時的に変化したとしてもすぐに D 点に戻ることが期待できる。この方法は V_{cr} を決めることがポイントであるがEscoffierはその点までは述べていない。(19)式から U に関して次式が得られるから、



図・14 感潮狭水路の安定に関する説明図
(Escoffier による²⁰⁾)

$$U = \frac{\pi}{T} \left(\frac{P}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (27)$$

こゝで自然狭口を対象にすれば表-1の $P/A = 1/C$ の値を上式に代入することで、半日周潮では、 $U \approx 1.1$ (m/s)を得る。 V_{cr} をこのような値として設定できたとしても、 D 点の代りに誤まって B 点を採用することの無いようにしなければならない。その為にも最大流速水深を求めておくことが必要である。

宇田居⁹⁾はさらに精しく検討を加え、 U と流砂量 q_s を水深 h の関数で示すとともに、侵入漂砂量のモデル化も行って、漂砂量と掃流砂量が等しくなる点の水深をもって安定水深と考えた。

近藤は P/A の値は最大流速水深の場合に最大となり、その値は長方形断面水路では下式となることを導いた²¹⁾。

$$\left(\frac{P}{A} \right)_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} \cdot \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{n_r}{n} \right)^2 - 1}}{\sqrt{f_c \left(\frac{n}{n_r} \right) \cdot \left\{ \frac{3}{4} \left(\frac{n_r}{n} \right)^2 + 1 \right\}^{1/4}}} \right] \cdot (\sqrt{a_s g} \cdot T) \quad \dots\dots (28)$$

これは $(P/A)_{\max}$ が水路形状に関するパラメータ[]と外潮に関するパラメータ $(\sqrt{a_s g} \cdot T)$ に比例することを意味している。そこで合衆国と我国の狭口のデータを P/A と $\sqrt{a_s g} \cdot T$ の関係でプロットしたのが図-15である。そして上式の[]を定数と仮定して、安定と不安定の限界における定数を図上で決定すると、図の直線のようになり、この直線の式は下ようになる。

$$\frac{P}{A} \leq 0.22 \sqrt{a_s g} \cdot T \text{ (m/sec)} \quad \dots\dots\dots (29)$$

* Escoffier の原論文では h の代りに x となっているが、これはほぼ h に比例する量と推定される。

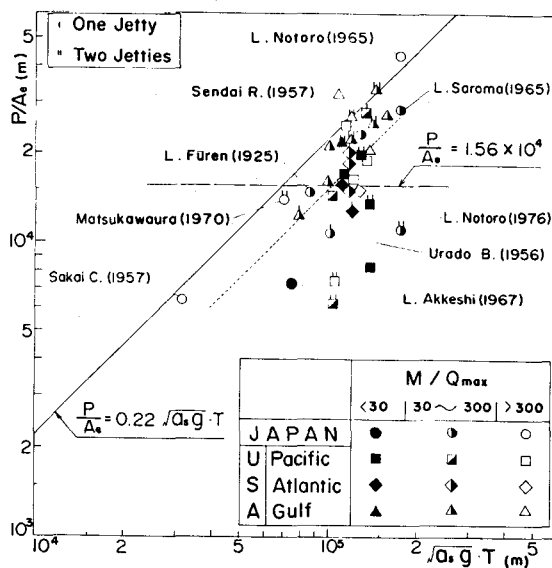


図-15 P/A_e に及ぼす外潮と沿岸漂砂量の効果

こゝで a_s は日平均潮差の $1/2$, T は潮汐の卓越周期をとる。これに単調和潮の場合には (27) 式を適用すると,

$$U \leq 2.16 \sqrt{a_s} \quad , \quad (\text{m/sec}) \quad \dots\dots\dots (30)$$

が安定条件式として得られる。

5.3 沿岸漂砂量 M との関連で求める方法

安定を論ずる際に漂砂量を抜きにできないことは当然である。5.1の方法では統計的、平均的な結果であるから漂砂量の効果は明確に現われてこない。図-15のデータは全沿岸漂砂量 M ($\text{m}^3/\text{年}$) と $Q_{\max}$ (m^3/sec) との比をパラメータとしてかゝげてあるので、それを見るとすべてのデータに関する限界値は (29) 式で与えられるが、 $(M/Q_{\max}) < 30$ の場合ならば同図の点線から,

$$\frac{P}{A_e} \leq 0.15 \sqrt{a_s g} \cdot T, \quad (\text{m}), \quad U \leq 1.47 \sqrt{a_s} \quad , \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots (31)$$

となる。すなわち沿岸漂砂量が少ないほど、 A_e は大きくなるという常識的な結果が得られる。

Bruun はアメリカとヨーロッパの狭口について調査したところ大潮時の U は

$$U = 1 \pm \alpha \quad , \quad (\text{m/s}), \quad \alpha = 0.1 \sim 0.2 \quad \dots\dots\dots (32)$$

であって、きわめて狭い範囲にあることを示した。このことから M と P との比で、感潮狭口の安定性をおよそ表-2 のように判定している。^{11), 15)}

5.4 波浪のエネルギーとの関係

Johnson (1972) は合衆国の太平洋岸の感潮狭口について、開口、閉塞の状況を調べ³⁵⁾、沿岸漂砂量よりも来襲波浪のエネルギー量によって支配されているとして、北カリフォルニア沿岸の感潮狭口について次の条件を導びいている³⁶⁾。こゝで P_w : 単位幅を通過する波のエネルギー量 ($\text{ft.lbs}/\text{ft. year}$), S_H : 満潮時の内水域の表面積 (ft^2) 。

表 - 2 P/M による狭口の安定性

$\frac{P^*}{M}$	$\frac{M}{Q_{\max}}$	安定度の判定	沿岸漂砂の移動状況など
> 150	< 100	きわめて安定	狭口潮流で運ばれる。
$100 \sim 150$	$100 \sim 150$	かなり安定	海側の Bar ができる。
$50 \sim 100$	$150 \sim 300$	—	海側の Bar と湾側の Shoal はかなり大きい。
$20 \sim 50$	$300 \sim 750$	かなり不安定	Bar を経由して運ばれる。
< 20	> 750	きわめて不安定	—

* 半日周潮としての値，日周潮ならこの値の $1/2$ 。

$P_W / S_H < 1160$ 常時開口

$P_W / S_H > 10000$ 閉塞

$P_W / S_H = 3000 \sim 8000$ 閉塞することもある。

以上，種々の要素を検討した結果から，安定な流積を支配しているのは P の他に外海潮汐 (T, a_s) 沿岸漂砂量，入射波のエネルギーなどがある。一般に流積の大きい狭口では潮汐の効果が強くあらわれ，日周潮よりも半日周潮が，また外海潮差が小さいほど，同一タイダルプリズムに対する安定流積は大きくなる。沿岸漂砂量や波浪のエネルギー量は，流積が小さくて流量が多くない狭口についての安定を支配する要素である。

6. む す び

この他に水理設計法^{28, 29)}や人工狭水路の計画，施工後の経過^{37), 38)}などについてもふれるべきかと思われるがこゝでは割愛した。本文がこの分野に興味を抱く技術者諸氏にいささかでもお役に立つことを希う次第である。

終りに，日頃，資料の収集などでお世話になっている網走開発建設部ならびに網走土木現業所の各位にお礼を申上げる。またカリフォルニア大学バークレー校の Johnson 名誉教授から文献についてご協力頂いたことに感謝する。データの整理と図面作製には室蘭工大河海工学研究室の浅間良則技官と高橋幹夫院生が協力したことを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) U S. Army Coastal Engineering Center : Shore Protection Manual (2nd Ed), vol. III, 1975.
- (2) Bruun, Per and F. Gerritsen: Stability of coastal inlets, Jr. of Wateways and Harbr Div, Proc. of ASCE, Vol. 84, WW3, Paper 1644, 1958.
- (3) Brown, E. I.: Inlets on sandy coasts, Proc, ASCE, Vol. LIV, pp. 505-553, 1928.
- (4) Caldwell, J.: Tidal currents at inlets in the United States, Proc, ASCE, Vol. 81, Separate 716, 1955.
- (5) Davies : Geographical Variation in Coastal Development, Longman, 203 p., 1977.
- (6) 潮汐表：昭和45年度，第1巻，海上保安庁，1972.
- (7) Hays, O. H.: Morphology of sand accumulation in estuaries, Estuarine Research (Ed. L. E. Cronin), Vol. II, pp. 3-22, 1974.
- (8) Davis, R. A. (Ed.): Coastal Sedimentary Environments, Springer - Verlag, 420 p., 1978.
- (9) 宇田居吾一：湖口処理に関する一考察，土木試験所報告，46号，北海道開発局土木試験所，pp. 1~20, 1968.

- (10) 尾崎 晃：サロマ湖の湖口水路形成に関する考察，北大工学部研究報告，68号，pp.155～171，1973.
- (11) Bruun, Per: Tidal Inlets and Littoral Drift, University Book Company, Oslo, 220 p. 1967.
- (12) 松本輝寿・川上俊雄・入江功・伊村勇隆：狭水道開口部の底質移動について，第25回 海岸工学講演会論文集，pp. 255～259，1978.
- (13) Nayak, I.V.: Tidal prism-area relationship in a model inlet, Technical Rept. HEL24-1, Univ. of California, Berkeley, 1971.
- (14) 田中則男・小笹博昭・柴山煒彦：備讃瀬戸におけるサンドウェーブの特性について，第20回海岸工学論文集，pp.365～370，1973.
- (15) Bruun, Per with co-authors A.J. Mehta and I.G. Jonsson: Stability of Tidal Inlet, Elsevier, 510 P., 1978.
- (16) 樋口明生：境水道の水位変化に関する模型実験について(2)，第8回海岸工学講演会講演集，pp.119～125，1961.
- (17) 近藤俊郎：湖口水路における潮汐の線形解，土木学会北海道支部研究発表会論文集，昭和43年度，pp. 147～153，1969.
- (18) 近藤俊郎：感潮狭口水路の流速，内水域潮位および最大流速水深の一解法，土木学会論文報告集，第206号，pp.49～57，1972.
- (19) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄：海水交流の一解析法，第12回海岸工学講演会講演集，pp.128～132，1965.
- (20) O'Brien, M.P.: A critical review of the E.I. Brown analysis of inlets on sandy coasts, Technical Rept., HEL-24-10, University of California, Berkeley, p.115, 1971.
- (21) 近藤俊郎：感潮狭口の最大流速水深と最小流積，第21回海岸工学講演会論文集，pp.367～371，1974.
- (22) van de Kreeke, J.: Water level fluctuations and flows in tidal inlets, Jr. of Waterways and Harbor Div., ASCE, Vol.93, No. WW4, pp.97～106，1967.
- (23) 境 隆雄・近藤俊郎・寺島拓郎：感潮湖沼の水面変動と流れ，第24回土木学会年次学術講演会講演集(第2部)，pp.55～58，1969.
- (24) 近藤俊郎・小林和彦・中田敬人・高田保彦：感潮狭口の底質移動に関する実験，土木学会北海道支部論文報告集，昭和50年度 pp.299～301，1976.
- (25) American Society of Civil Engineers: Sedimentation Engineering, Manual No 54, 745 p., 1975.
- (26) 中園清治・下村嘉平衡・福岡隆志：潮流による掃流砂量の推定について，第22回 海岸工学講演会論文集，pp.307～311，1975.
- (27) 近藤俊郎・佐藤功・田中義一：能取湖の湖口閉塞調査，土木試験所報告，第46号，北海道開発局土木試験所，pp.45～59，1968.
- (28) 近藤俊郎：入口感潮狭口水路の設計方法について，第24回海岸工学講演会論文集，pp.529～533，1977.
- (29) 近藤俊郎：感潮狭口水路の水理設計，海と港，No.2，北海道港湾・海岸研究会，pp.53～58，1979.
- (30) O'Brien, M.P.: Estuary tidal prisms related to entrance area, Civil Engineering, Vol.1, No.8, pp.738～739.
- (31) O'Brien, M.P.: Equilibrium flow areas of tidal inlets on Sandy Coast, Proc. of 10th Conf. on Coastal Engineering, ASCE, pp.676～686，1967.
- (32) Jarrett, J.T.: Tidal prism - inlets area relationship, GITI Rept.3, 1975.
- (33) Shigemura, T: Characteristics of tidal inlets on the Pacific coast of Japan, Proc. of 15th Coastal Eng. Conf. ASCE, pp.1666～1679，1976.
- (34) 重村利幸：我国の湾の湾口狭窄部特性，第33回土木学会年次学術講演会講演概要集(第2部)，pp.830～831，1978.

- (35) Johnson, J.W. : Characteristics and behavior of Pacific coast tidal inlets, Jr. of Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Div, WW 3, ASCE, pp.325~339, 1973.
- (36) Johnson, J.W. : Closure conditions of Northern California lagoons, Shore & Beach, Vol. 44, No 2, pp.20 - 23, 1976.
- (37) 梅沢一之 : 能取漁港湖口地区建設について, 海と港, No 2, 北海道港湾・海岸研究会, pp.59~68, 1979.
- (38) 林 和男 : 佐呂間湖浅海漁場開発工事について, 海と港, No 2, 北海道港湾・海岸研究会 pp.69~80, 1979.