

人工感潮狭口水路の設計法について

近 藤 俣 郎*

1. ま え が き

ここでいう感潮狭口とは、海と内水域をつなぐ、内水域に比べて極めて幅の狭い水路であって、そこを通過する流量は主として両水面の潮位差によって惹き起されているものを指すことにする。砂浜海岸に開口している感潮狭口は、海からくる漂砂による埋没作用と、狭口水路の底地形による掃流作用の均衡のもとで形成され、狭口水路の海底地形は絶え間なく変化している。

一方、水路や内水域をいろいろな目的に利用するため、自然の狭口に人間が手を加えてその形状や流積を安定させようとしたり、あるいは全く新しい水路を建設する事例が最近になって多いようである。そうした人工的な水路は、その利用目的と自然条件に対応して適切な計画設計がなされないならば、当初の目的に十分応えられないだけではなくして、その後の改良や維持に費用が嵩んで無駄の多いものとなるおそれがある。

感潮狭口の設計法に関連する研究として、宇田居¹⁾は出水排除を主目的とした湖口処理工について考察しており、また Bruun^{2),3)}は壱望潮時の水路の最大流速を0.8~1.2 (m/sec) とすることを骨子とした設計法を提案している。これらの研究は、いずれも漂砂との関係において水路の安定性を検討している点でその価値は高い。

本論文では、狭口水路の利用形態の多様化に対応して、広い見地から設計法について考察し、その中の主要な項目について最近の知見に基づいた検討あるいは計算方法を示すものである。

2. 設 計 順 序

人工的な感潮狭口水路の水理的な設計は、以下のような内容と順序で行なわれるものと考える。

- (i) 水路の利用目的あるいは利用計画の設定
- (ii) 外力（外海潮汐、波浪、沿岸漂砂量など）ならびに内水域に関する水理的諸量の調査、決定
- (iii) 水路の位置と形状の選定
- (iv) 水路の断面寸法の仮定
- (v) 水路潮流流速、流量、内水面の潮位およびタイダルプリズムなどの計算

- (vi) 水路流積の安定性の検討
- (vii) 退潮流による流砂量の推定
- (viii) 水路周辺の土砂収支の検討
- (ix) 内水域および水路の海側端付近の堆砂の位置・形状ならびにその処理対策の検討
- (x) 水路の断面形状・寸法の決定

以上の項目の総てについて論及することは本論文集の紙数からして無理であり、また特に取上げるまでもないと思われる項目もある。したがって、ここでは (i), (iii), (v), (vi), (vii), (viii) の6項目に関連して考察するに留める。

3. 利用目的による感潮狭口水路の分類と所要条件

人工的な感潮狭口水路をその利用目的から分類するならば、およそ次の4種類となる。

- (1) 流域の出水排除などの治水上の目的のもの
- (2) 内水域と外海との水の交流を良くする目的のもの
- (3) 水路を航路として利用する目的のもの
- (4) 上記の(1)(2)(3)のうちの2つ以上を目的とするもの

以上の利用目的によって水路の具備すべき条件が異なってくる。(1)では河口導流堤とほぼ同じ機能が要請され、出水があるときには速やかに排水できることが望ましい。それには閉塞を起させない範囲でなるべく水路断面積を広く採ることになり、流速は比較的小さくなる。(2)のような海水交流を活発にするための水路を設けるケースが、沿岸での栽培漁場開発の目的で多くなっている⁴⁾。この場合は、流量やタイダルプリズムを大きくすることと共に、拡散効果をあげるためには流速そのものも大きいことが必要である。ここで交流の効率は外海潮差が小さく水深が大きい水域ほど悪いことに注意すべきである。なお、潮流流速を制御する目的で、作れいや湾内導流堤の施工がなされることもあると思われるが、漂砂海岸の狭口では、水路の内水域端にできる砂堆 (Bay Shoal) の位置や形状を規定することになるので、その処理対策について考慮を払う必要がある。(3)のように内水域の一部もしくは全部が港湾として利用される場合に

* 正会員 工博 室蘭工業大学教授 土木工学科

は、狭口水路は航路としての役割を果すことになる。その場合は、(a) 利用船舶に対して所要の幅員と水深をもつこと、(b) 水路流速が許容値（通常3ノット程度）以下、などが要請される。(a)と(b)の両方を満足させるには比較的大きな水深をとることになる。流積が大きくなると、流速が減少し退潮流による掃流力がなくなつて、いわゆる非洗掘水路(Non-Scour Channel)となる。けれども水路内への漂砂の侵入は必ずあるから、水深と幅員を保持するには、維持浚渫が必要となる。その場合は、導流堤の建設費に維持浚渫費などを加えた工事費を最小とするような、最適な導流堤延長を追求することが考えられる。

4. 水路の位置と形状特性

閉塞と開口を繰返しているような不安定な狭口の位置や形状は、そのつど変化するが、長い年月安定して開口している自然の狭口では地形・地質条件と外力条件に対応して、水流に関する水理的抵抗が最も小さい位置に開口している(写真-1参照)。しかし、現在安定している狭口も恒久的に安定であるとは限らず、沿岸漂砂に対する障壁としての作用によって形成される砂州の発達や、水路潮流による掃流作用で形成される砂堆の拡大によって、水理的抵抗が大きくなって次第に不安定な水路に変わってゆく。図-1に示すサロマ湖の湖口水路地形は、昭和4年に開口してから37年後のものであるが、この地形は幅の狭い砂州に僅かな人力で開口してから徐々に形成されたものである⁵⁾。しかし、わが国で第3位の表面積のサロマ湖をオホーツク海につなぐこの水路にしても、今後、恒久的に人工を加えないで安定して存在できるとは、砂州や砂堆の発達状況からして保証し難い。こうしたことからして、人工的水路の位置選定に当っては、水理的抵抗が小さく、永続性が期待できる地点を選ぶことは無論であるが、その後の維持の難易も考慮に入れる必要がある。次に水路の平面形状は、地形によってはかなり彎曲していることがあるが、そのような水路では外縁部分が深くなる傾向があるから(図-2参照)、新設の水路ではそのような線形は採用しない方がよい。

感潮狭口水路の水底地形の目立った特徴としてあげられるものに、図-1, 2に見出される水路の内水域側にある窪みである。この窪みの成因としては、(a) 入潮流が

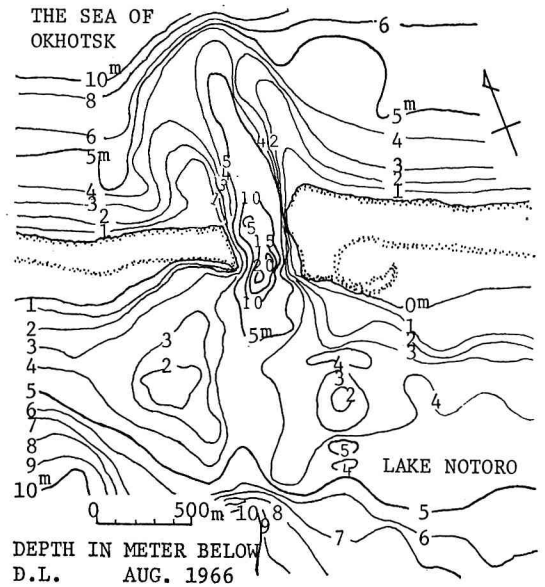


図-1 サロマ湖口付近深浅図¹⁾

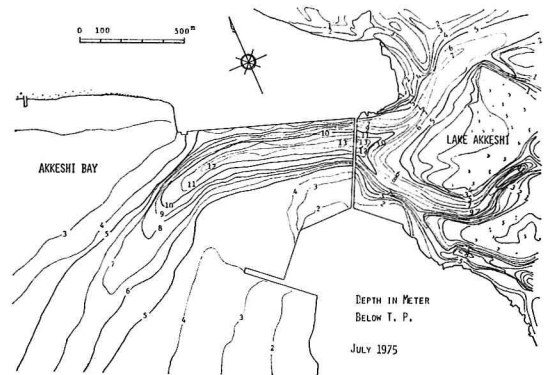


図-2 厚岸湖口水路付近深浅図

内水域に排出するときのエネルギー勾配の急増、(b) 退潮流時の水路に入るときに縮流効果、などが考えられるが、窪みの形状からすれば(b)の方の影響が強いと判断される。海側端にこのような窪みができないのは、漂砂と波浪による埋戻し作用があることによると思われる。これより、水路を海に向かって次第に狭くした“八の字”型もしくはベルマウス型にすれば、岸側の窪みの発達を小さくし、しかも海側端付近の流速を大きくすること



写真-1 北海道十勝海岸の自然感潮狭口(昭和49年8月21日、B & G財団撮影)

で、埋没防止に有効だと考えられる。

5. 潮流の流速、潮位およびタイダルプリズム

水底地形が複雑で流路が彎曲している狭口水路について、潮流々速や内水域の潮位の分布を精しく知るには数値解法によらざるを得ないが、平均の流速や潮位を求めるには1次元の理論的解法で十分良い結果が得られる。日潮不等が著しい場合でも、外海潮汐を調和分解して各成分潮について流速や潮位を計算し、それらを重ね合わせることでかなりよく推定できる^{6),7)}。タイダルプリズム P は、単調和潮として次式で概算される。

$$P \left(= - \int_t^{t+T/2} Q dt = - \int_t^{t+T/2} u A dt \right) = 2a_b S \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで T は潮汐の周期、 A は水路の流積、 a_b と S は内水域における平均潮差と表面積である。 u は水路の潮流流速で、外海潮位を cosine 波とすると、

$$u = -U \sin(\sigma t - \gamma) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表現される。ただし u は海から内水域方向に向うものを正としている。 U は潮流のピーク流速で、 γ は外潮に対する位相を表わし、 $\sigma = 2\pi/T$ である。

感潮狭口のピーク流速 U は、 A もしくは水路水深 h だけが変化すると、そのある値のところで最大値をとることがわかっている^{8),9)}。図-3 は能取湖口水路について、長方形と放物線形の両断面形について、その水深と流速 U の関係を近似解¹⁰⁾で計算した例である。同図から知れるように、最大流速水深（もしくは流積）の存在は明瞭である。 A を等しくする長方形と放物線形断面とを比較すると前者（すなわち人工的と思われる水路断面）の方が、浅い水深で最大流速をとる。海水交流や治水上の目的の水路では、この最大流速水深が設計水深の目安になるであろう。

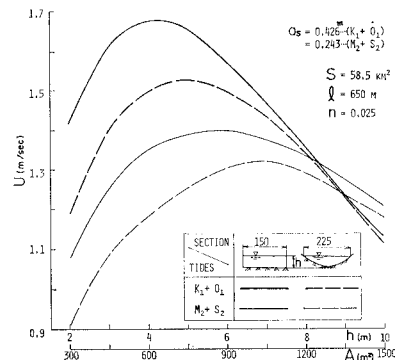


図-3 能取湖口水路のピーク流速の水深による変化

6. 水路の安定性の検討

計画された水路が、外力特に漂砂による閉塞作用に対

して安定か否かを調べておくことは最も大切なことである。前述のように漂砂海岸では全く手を加えずに安定が恒久的に保たれる狭口水路は望むべくも無いから、変化がゆるやかに進行している水路が平衡状態もしくは安定であるものとみなして良いと思われる。平衡状態にある狭口の最小流積 A_0 と P との関係については、1931年に発表された M. P. O'Brien の最初の論文を嚆矢として多くの研究者が検討しており、その後 A_0 に及ぼす沿岸漂砂量^{11),12)} や入射波エネルギー量¹³⁾ の影響も調べられている。筆者はさらに P/A_0 に及ぼす外海潮汐の諸元の効果について調べて、平衡状態にある実在の狭口水路について次の条件式を導びいた¹⁴⁾。ただし a_s は外海潮差である。

$$P/A_0 \leq 0.22 \sqrt{a_s g} T, \quad (m) \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式によって、単調和潮では下式が得られる。

$$U \leq 2.16 \sqrt{a_s}, \quad (m/sec.) \quad \dots\dots\dots (4)$$

狭口の安定性に対する沿岸漂砂量 M ($m^3/年$) の効果を示す変数として、Bruun らは P/M と M/Q_{max} ($Q_{max} = AU$) の2種類を使い分けている。ただし、このうちの P/M は潮汐の卓越周期の差異が表われない点で問題があり、 M/Q_{max} の方が一般的でよいと思われる。そこで(3)式の基礎となったデータおよびその後得られたデータについて M/Q_{max} の大きさに応じて3クラスに分類し、表現してみたのが図-4である。 M はアメリカの狭口についてはかなり資料があったが^{15),16)}、日本の場合は資料がほとんどなく、筆者の推測によった。この図によれば、 P/A_0 に対する影響は、個々のデータで違いはあるが、全体的に M/Q_{max} が小さいほど、 P/A_0 を小さくする。換言すれば M が小さいほど流積が大きくなる。なお、同図では、導流堤の数の効果がけ

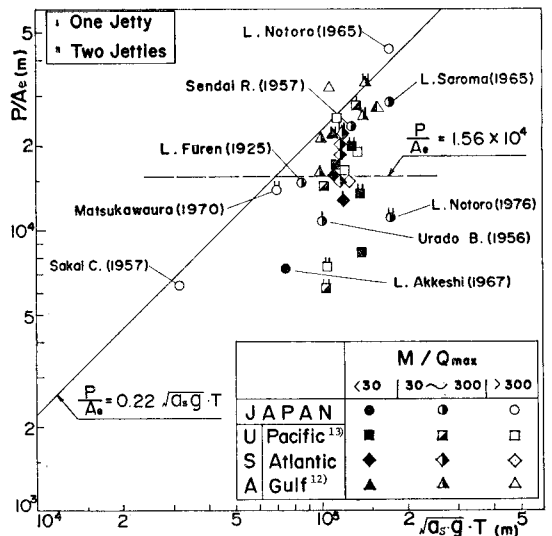


図-4 タイダルプリズム/平衡流積の関係

ん著になっているとはいえないが、沿岸漂砂を阻止する作用をするから、この結果は導流堤の長さや建設後の経過年数によってその機能はかなり異なることを表している。 $M/Q_{\max}$ と導流堤設置が P/A_e に与える効果を端的に示すのが、図—4 中の右端の能取湖とサロマ湖の湖口水路についての3個のデータである。1965年の両湖口の $M/Q_{\max}$ の違いは、 M は大差ないので $Q_{\max}$ の大きさの違いである。1976年の能取湖のデータは長い導流堤状の防波堤を湖口両岸に設け、水路の一部については片側を矢板護岸とする新水路が開通してから2年半経過した時点でのデータである。この場合の P/A_e の急激な低下は、沿岸漂砂量の侵入がきわめて少なくなったことによるものである。以上のことから、沿岸漂砂をある程度阻止できれば、 P の小さい狭口であっても、かなりの期間安定であることが可能だが、長い年月を経てその阻止能力が低下すると、次第に不安定となることが知れる。

7. 退潮流による流砂量の推定

入潮流による流砂量は漂砂や海浜流の影響で、同一流速の退潮流時のものよりも相当に大きくなることが予想され、その推定は困難なので、ここでは退潮流のものを対象とする。非定常流であっても潮流のように緩慢な変化をする流れによる流砂量は、同一流速の定常流の流砂量と大きな差があるとは考え難い。実際、筆者らは、軽量プラスチックを移動床材料として使用した小規模な実験の範囲ではあるが、狭口潮流のピーク流速付近の流砂量は、定常流の流砂量公式でほぼ推定できることを確認した¹⁷⁾。ASCE 刊行の「SEDIMENTATION ENGINEERING (1974)」によれば、河川流砂量の推定のための数多くの公式のうちで、実測値との検証によって Colby の方法と下記の Engelund-Hansen の式がすぐれているとされている。

$$q_s = 0.05 V^2 \left[\frac{d_{50}}{Sg} \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{\tau_0}{S \rho g d_{50}} \right]^{3/2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで q_s は水路の単位幅当りの流砂量 ($\text{m}^3/\text{sec}\cdot\text{m}$)、 d_{50} は中央粒径、 ρ と σ はそれぞれ水および砂の密度、 S は底質の水中比重 $= (\sigma - \rho)/\rho$ 、 τ_0 は水底に作用する剪断応力、 V は断面平均流速、 τ_0 を Manning の平均流速式を用いて表現すれば、粗度係数を n として (5) 式は次式となる。

$$q_s = \frac{0.55 n^3 V^5}{g^{1/2} S^2 d_{50} R^{1/2}} \dots\dots\dots (6)$$

潮流による各瞬間の流砂量は上式の V に代って (2) 式の u を代入することで推定される。潮汐の1周期間に水路の片一方に流れる単位幅当りの流砂量は、下式となる。

$$q_{s,T/2} = \int_{\tau}^{\tau+T/2} q_s dt = C_q U^5 \int_{\tau}^{\tau+T/2} \sin^5(\sigma t - \gamma) dt$$

$$= 1.07 C_q U^5 T / 2\pi, \quad (\text{m}^3/\text{m}) \dots\dots\dots (7)$$

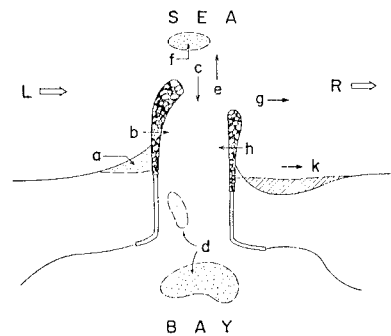
ここで、

$$C_q = 0.05 n^3 / g^{1/2} S^2 d_{50} R^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

8. 感潮狭口の土砂収支

漂砂海岸の狭口水路周辺における土砂収支は、沿岸漂砂と潮流による交番掃流作用によって運搬される土砂、さらにその一部が堆積するなどが基本となる。ここでは Brunn の収支案¹⁸⁾ を簡略化したものを示す。

図—5 は沿岸漂砂が左から右に向っている場合の土砂量収支を图示したものである。ここで、 L, R はそれぞれ左岸の方向から入ってくる、右岸方向に去る沿岸漂砂量。 a は左側導流堤の左に堆積する土砂量。 b, h はそれぞれ左側導流堤、右側導流堤を透過あるいは乗り越えて水路に入ってくる土砂量。 c, e はそれぞれ入潮流、退潮流によって運搬される土砂量。 d は水路内および内水域砂堆に堆積する土砂量。 f は沖合に堆積する土砂量。 g は水路の沖合を左から右へバイパスする土砂量。 k は右岸側の侵食土量。これらの間には次式が成立する。



図—5 感潮狭口の土砂収支の説明略図

$$L = R = Q_t \dots\dots\dots (9)$$

$$L = a + d + f + g \dots\dots\dots (10)$$

$$R = g + k \dots\dots\dots (11)$$

$$c' (= a + c + h) = d + e \dots\dots\dots (12)$$

沿岸漂砂量 Q_t が知れているとして、 a, c', d, e, f, g, k の7個の量の間の関係式である。それに対しての方程式は (10), (11), (12) の3個であるから、4個の量は推定しておく必要がある。新水路を計画する際には、 a, c', k, e を推定しておいて、 f, g, d を求める場合が多いと思われる。また実在の狭口については、 a, f, d を調べることができれば、 e を推定することで、 c' と k を求めることができる。

計算に際しては、上記の計算を海岸の左右両方向に行う必要がある。図—1 のサロマ湖口水路について昭和40年から約10年間の年平均値として、 $d=50,000$,

$f=30,000$ (m^3) が得られ、また (7) 式を用いて $e=1,100,000$ (m^3) と推算される。なお、西岸は $130,000$ 減少し、東岸は $50,000$ (m^3) 堆積しているので、この湖口付近では東から西に向う沿岸漂砂が卓越していると認められる。

9. む す び

漂砂海岸の感潮狭口水路は、複雑な外力系のもとで変形する存在であるから、利用目的・計画を明確にした上で、それに適した形状・断面寸法等を見出すような設計を行なうことが肝要である。設計上もっとも必要とするのは、沿岸漂砂量であって、これを推定できれば水路周辺の海浜変形の予測も可能になる。このような目的のためにも、多くの刊行物の中に分散しているであろうと思われる日本沿岸の各海岸・港湾における沿岸漂砂量の推定データをとりまとめたものが切望される。

本論文中で使用した資料等に関しては、多くの方々からのご支援を頂いていることを記し、ここに厚くお礼を申し上げます。本論文を草する直接の動機づけとなったのは、筆者の前論文(文献9))に対する Per Bruun 博士の熱心な討議と、能取湖口水路に関しての北海道開発局網走港湾建設事務所長得永道彦氏との対話であった。ここに記して、両氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Bruun, Per. and F. Gerritsen: Stability of Coastal inlets, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 123 p., 1960.
- 3) Bruun, Per., F. Gerritsen and N. P. Bhakta: Evaluation of overall entrance stability of tidal entrances, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., pp. 1566~1587, 1974.
- 4) 中村 充: 沿岸漁場の開発と防災; 水工学に関する夏期研修会講義集 B (第10回), 1974.
- 5) 尾崎 晃: サロマ湖の湖口水路形成に関する考察, 北工学部研究報告, 68号, pp. 155~171, 1973.
- 6) 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, 206号, pp. 49~57, 1972.
- 7) 近藤俊郎・宇田居吾一・鴻上雄三・佐藤 功: オホーツク海沿岸湖口の閉塞について, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 343~347, 1971.
- 8) 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.
- 9) Kondo, H.: Depth of Maximum Velocity and minimum flow area of tidal entrances, Coastal Engineering in Japan, Vol. 18, pp. 167~183, 1975.
- 10) 前出 6)
- 11) 前出 2)
- 12) Bruun, Per.: Tidal inlets and littoral drift, University Book Company, Oslo, 220 p., 1967.
- 13) Johnson, J. W.: Characteristics and behavior of Pacific Coast tidal inlets, Jr. of Waterways, Harbors, and Coastal Eng. Div., ASCE, pp. 325~339, 1973.
- 14) 前出 8)
- 15) U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual (2nd Ed.), Vol. I, 1975.
- 16) 前出 12)
- 17) 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, pp. 299~302, 1976.
- 18) 前出 12)