

感潮狭口の最大流速水深と最小流積

近 藤 俣 郎*

1. ま え が き

ここで扱う感潮狭口は、海と入江、潟湖、河口などの内水域をつなぐ狭い水路で、その水路の流量が海の潮位変動により主に支配されているもの限定される。

砂質海浜の感潮狭口では、水路流による掃流作用と海からの漂砂による堆積作用が共存し、流積は絶えまなく変化している。しかし、長い年月安定して開口している感潮狭口の最小の流積は、ある平衡的な値を中心にして変動の範囲が小さいとみなされる。そのような平衡最小流積 A_e は、内水域の面積 S 、水路の形状・寸法、潮汐、波浪、底質などの複雑な関数であると推定される。

O'Brien¹⁾、Per Bruun ら²⁾、吉高³⁾ は A_e がタイダルプリズム P (狭口を潮汐の 1/2 周期間に流出もしくは流入する全水量) にほぼ比例することを示している。Johnson⁴⁾ は USA の太平洋沿岸の狭口について、 A_e と P の関係をくわしく調査し、狭口の安定、閉塞におよぼす来襲波のエネルギー量の影響を見出している。

一方、筆者⁵⁾ は狭口水路潮流ならびに内水域潮位を求める簡略解を得て、それをもとにして長方形断面水路について流速が最大になる水深、すなわち最大流速水深 h_0 を直接計算する方法を示した。そして、安定な狭口水路では h_0 よりも大きい水深を保持していることを示唆した。

ここでは、この h_0 を長方形だけではない、一般の断面形について求める解を示す。そしてその状態での最小流積とタイダルプリズムとの関係を調べ、それと実際の狭口のデータとをあわせて検討して、安定な水路の条件を考察するものである。

2. 水路流速 u と内水域潮位 η_b の解

前報⁵⁾ において得た解は次の通りである。図-1 に示すような狭口について、海の潮位が次式で与えられるとき

$$\eta_s = a_s \cos \sigma t \quad \dots\dots\dots (1)$$

水路の潮流流速並びに内水域の水位は次のようになる。

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

$$\eta_b = a_b \cos(\sigma t - \gamma) \quad \dots\dots\dots (3)$$

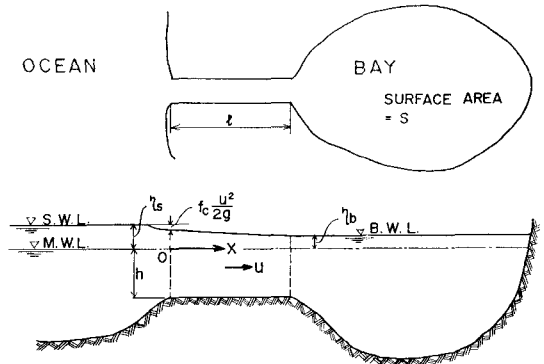


図-1 感潮狭口水路の略図

ここで U, a_b はそれぞれ水路流速と内水域潮位の振幅(時間的的最大値)であり、 γ は位相角(ラジアン)である。それらは、

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

$$a_b = a_s \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^4 + 4\left(\frac{\beta p}{\sigma^2}\right)^2} \right]} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\sqrt{-\frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^4 + 4\left(\frac{\beta p}{\sigma^2}\right)^2} \right\}} \right. \\ \left. \left/ \left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right) \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで

$$\alpha = (Ag/lS), \quad \beta = (a_s g \sigma / l)$$

$$p = (8 g n^2 / 3 \pi \sigma R^{4/3}), \quad \sigma = (2\pi / T)$$

$$n_r = n \sqrt{1 + (f_0 R^{4/3} / 2 g n^2 l)}$$

そして、 A, l, R, n はそれぞれ水路の流積、長さ、径深、マンニングの粗度係数であり、また f_0 は水路への流出入による損失係数で n_r は等価粗度係数である。 T と a_s は海の潮位の周期と振幅である。 g は重力加速度。

式(4)に従って、水路水深 h のみを変化させて U を計算すると、ある水深で U は最大となる。図-2 は長方形断面水路の狭口に関する、小規模な長周期波実験の一例である。同図の実線ならびに破線はそれぞれ上出の式による U と a_b/a_s の計算値である。

* 正会員 室蘭工業大学助教授 土木工学科

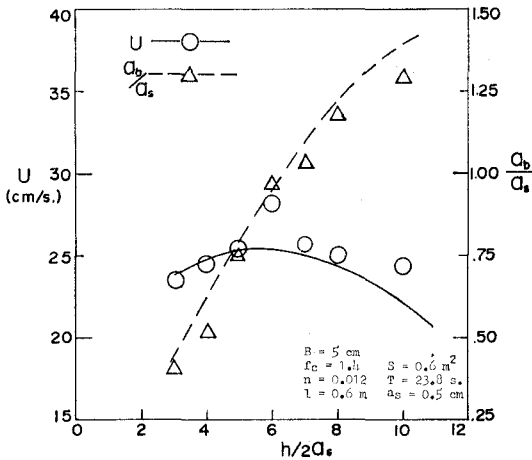


図-2 水路水深による U と a_b の変化

3. 最大流速 $U_{\max}$ と最大流速水深 h_0

図-2 のような U の最大値とそれを与える h_0 を直接的に、しかも一般の種々の断面形について求められるのが望ましい。式(4)を多項式に直し、 h で微分した後 $\partial U / \partial h = 0$ とおくと⁵⁾、 $U_{\max}$ は p, α が h の関数であることを考慮し下のように得られる。

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{(\alpha/\sigma^2 - 1) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial h} \right)}{\sigma^2 p \left(\frac{\partial p}{\partial h} \right)}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$= \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{n_r}{n} \right)^2 \frac{\alpha(\alpha/\sigma^2 - 1)}{\sigma^2 p^2} \cdot \left(\frac{\partial A / A}{\partial h / R} \right)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また h_0 あるいはその場合の流積は式(4)と(8)を等しいとおいた下式を満足する値として求められる。

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)^4 + 4 \left(\frac{\beta p}{\sigma^2} \right)^2} \\ & = \frac{3}{2} \left(\frac{n_r}{n} \right)^2 \frac{\alpha \left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1 \right)}{\sigma^2} \cdot \left(\frac{\partial A / A}{\partial h / R} \right) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

上式は h_0 に関する限り陰関数であるから、試算法で求めなくてはならない。そこで次のようなパラメーターを導入し、計算の便宜をはかる。

$$W = \left[\left(\frac{\partial A}{\partial h} / A \right) / \left(\frac{\partial R}{\partial h} / R \right) \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$X = (\alpha/\sigma^2) = (gA/\sigma^2 l S) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$Y = (n_r/n)^2 = 1 + (f_c R^{4/3} / 2 g n^2 l) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Z = (\beta p / \sigma^2) = Z^* Y \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$Z^* = (2 n^2 g a_s T^2 / 3 \pi^2 R l^{4/3}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

これらのパラメーターを用いて式(9)を書き改め、 Z について整理すると、

$$Z = \frac{(X-1)}{2} \sqrt{\frac{9}{4} X^2 Y^2 W^2 + 3X(X-1)YW} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(13)では Z は Y と Z^* の関数であり、式(15)では Z は X と YW の関数で、 $h=h_0$ ときには両式による Z は一致しなければならない。図-3 は Z を縦軸にとり、図の左半分が式(13)を、右半分が式(15)の関係を図示したもので、 X, Y と W を与えて h_0 を試算的に求めるのに便利である。

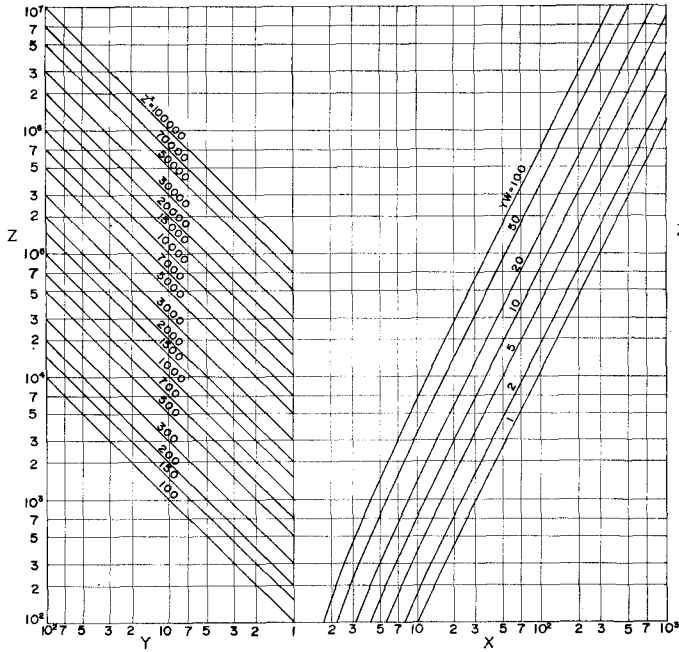
X, Y, W は R と A の関数であり、 A および R は断面形によって h と関係づけられている。一般的な長方形、台形、放物線形の三種類の断面形についての W を A, R などとともに h で表わしたものを表-1 にかかげてある。

h_0 をこれらの断面について図表を使って求める手順は以下の通りである。

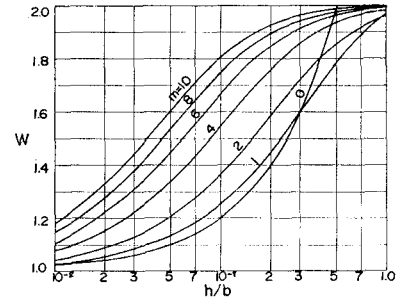
1) 長方形と台形: 台形断面の R, A および W は h , 水底幅員 b および斜面勾配 m の関数であり、長方形断面はそのうちの $m=0$ の場合である。 b と m が与えられているから、 h を仮定し h/b を計算する。この h/b と m から、図-4 の第3, 4象限の図から R/h と A/bh が得られる。この R/h と $Y^* (= f_c h^{4/3} / 2 g n^2 l)$ から Y を同図の第2象限で、また A/bh と $X^* (= g b h^2 / \sigma^2 l S)$ から第1象限で X を求める。一方、 W は図-5 で得られる。そして図-3 により Y と Z^* からと、 X と YW から求めた Z が等しくなればその h は h_0 である。等しくなければ同じ手順を h を変えて繰り返すことで収れんさせる。

表-1 各種断面の A, R および W

	Rectangular	Trapezoidal	Parabolic
A	bh	$h(b + mh)$	$\frac{1}{3} p^{1/2} h^{3/2}$
R	$\frac{bh}{b + 2h}$	$\frac{h(b + mh)}{b + m\sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{2}{3} h \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{a} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{h}{a} \right)^4 + \dots \right]^{-1}$
$\frac{\partial A}{\partial h}$	b	$b + 2mh$	$2q^{1/2} h^{1/2}$
$\frac{\partial R}{\partial h}$	$\frac{b^2}{(b + 2h)^2}$	$\frac{b(b + 2mh) + 2mh^2 \sqrt{1 + m^2}}{(b + m\sqrt{1 + m^2})^2}$	$\frac{2}{3} \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{a} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{h}{a} \right)^4 + \dots \right]^{-2}$
$W = \left(\frac{\partial A / A}{\partial R / R} \right)$	$1 + \frac{2h}{b}$	$\frac{(1 + 2m \frac{h}{b}) (1 + \frac{h}{b} \sqrt{1 + m^2})}{1 + 2m \frac{h}{b} + 2m \left(\frac{h}{b} \right)^2 \sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{2}{3} \left[\frac{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{a} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{h}{a} \right)^4 + \dots}{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{a} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{h}{a} \right)^4 + \dots} \right]$



図—3 最大流速水深の推定用図表

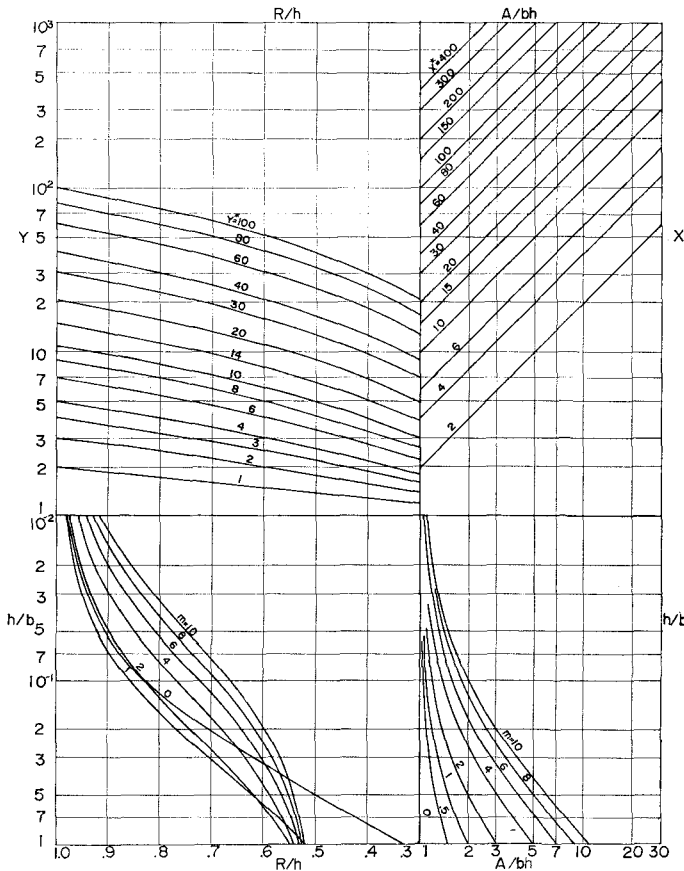
図—5 台形断面の W

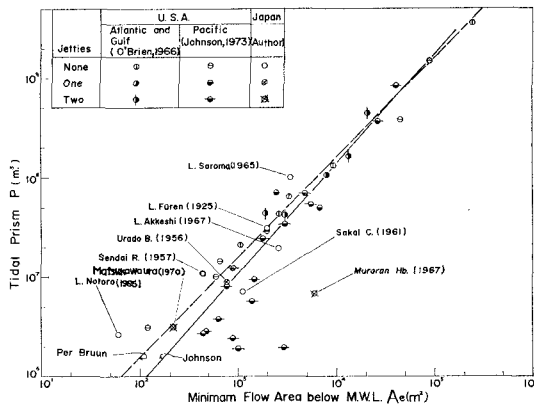
2) 放物線形: 放物線形断面の A , R および W は h と q の関数として表—1 のように与えられる。 R/h を計算した後に Y は図—4 の第2象限で求められる。 X は A を計算して式 (11) から求めるか、または A/h^2 を計算して同図の第1象限において A/bh を A/h^2 に読み替えて求めることができる。その後は1) と同様に図—3を用いて h_0 を得る。

4. 最小流積とタイダルプリズム

1. で述べたように感潮狭口における平衡状態の最小流積 A_e は、タイダルプリズム P との関係でこれまで調べられている^{1)~4)}。ここでは、これまで海岸工学講演集などで発表されたデータに、その他の資料から計算した北海道の狭口のデータを加えて図—6 に示した。同図には USA の狭口についての O'Brien ならびに Johnson のデータもメートル単位に換算してかかげてある。 P はほとんどの場合、日平均潮について $2a_bS$ として求めたものである。

USA のデータに関しては、Johnson のものは同様に日平均潮についてであるが、O'Brien のものは朔望平均潮についてのデータである。日本のデータは導流堤が無いケースがほとんどであるが、 P と A_e の関係はおおよそ USA のものと同様な傾向を示していることが認められる。図—6 をみると、二導流堤をもつ狭口の A_e は、その他のケースより比較的大きいようであるが、来襲波のエネルギーの影響も大きいことがわかっている⁴⁾。一方、オホーツク海のサロマ湖と能取湖の A_e が P の割合に小さいことが現われている。この原因としては、こ

図—4 台形断面の X と Y の計算図表

図-6 感潮狭口の A_e と P の関係

の沿岸は日周潮成分がきわめて強いこと⁶⁾に関係がありそうである。加えて能取湖の場合のデータは夏期の比較的稳定していた時期のものであるが、同湖口は例年 9~10 月に閉塞していた。そのデータ測定の約 50 日後に閉塞をしている。

ここで 3. で得た最大流速水深のときの P/A の関係を調べることにする。最初に U あるいはピーク流量 $Q(=UA)$ と P との関係は、潮汐を余弦波として 2. で示した水路流速から次式のように求まる。

$$P = AU \int_0^{T/2} \sin \sigma t \, dt = \frac{AUT}{\pi} = \frac{QT}{\pi} \quad (16)$$

すなわち

$$P/A = (UT/\pi) = \frac{2\sqrt{2}\beta}{\sigma^3} \times \frac{1}{\sqrt{(\alpha/\sigma^2 - 1)^2 + \sqrt{(\alpha/\sigma^2 - 1)^4 + 4(\beta p/\sigma^2)^2}}} \quad (17)$$

したがって水深変化にともなう P/A の最大値は

$$(P/A)_{\max} = \frac{TU_{\max}}{\pi} = \frac{2}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{n_r}{n}\right)^2 \cdot \frac{\alpha(\alpha/\sigma^2 - 1)W}{\sigma^2 p^2} \quad (18)$$

である。すなわち P/A は水深が最大流速水深に等しいときに、最大値をとるのである。水深が h_0 より大きくなるあるいは小さくなるのと同時に P/A は減少するのである。ここで広長方形断面について、しかも $\alpha/\sigma^2 \gg 1$ のときについて式 (18) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{P}{A}\right)_{\max} &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{\ln n_r}} \cdot \frac{h_0^{2/3} T}{[3/4(n_r/n)^2 + 1]^{1/4}} \quad (19) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} \cdot \left[\frac{\sqrt{(n_r/n)^2 - 1}}{\sqrt{f_{cn} n_r [3/4(n_r/n)^2 + 1]^{1/4}}} \right] \cdot (\sqrt{a_s g} \cdot T) \quad (20) \end{aligned}$$

式 (20) の右辺の [] は水路の形状・寸法に関するものであり、() は外潮に関する項であるといえる。それらが $(P/A)_{\max}$ を支配する要素であることが知れる。

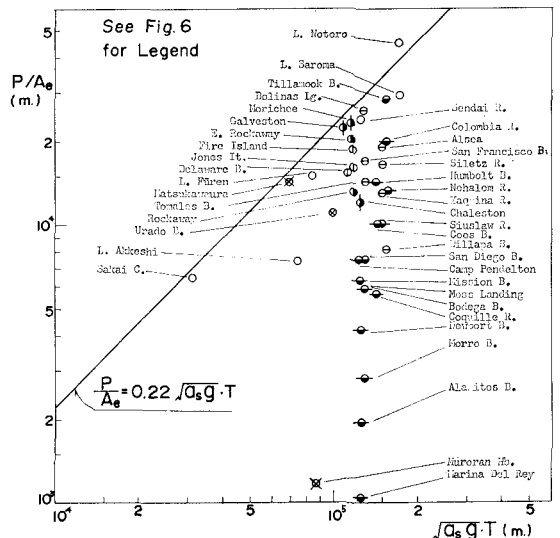
以上は P/A の最大値を、潮位にともなう水路流速だけから求めたものである。実際の安定な狭口水路では、漂砂による水路断面の一時的な減少状態から復元できるように、その水深は最大流速水深よりも大きくなっていると理解される。その場合の P/A_e は式 (18)~(20) よりも当然小さくなっている。そうした要因も考慮すると P/A_e は一般的に表現するなら、次式のようになる。

$$P/A_e = K(\sqrt{a_s g} \cdot T) \quad (21)$$

図-6 のデータについて、 P/A と $\sqrt{a_s g} \cdot T$ の関係をプロットしたものが 図-7 である。 a_s は狭口の海側出口における日平均潮差の 1/2 とし、潮汐表など^{7), 8)} から推定した。 T はサロマ、能取の両湖とメキシコ湾岸の Galveston のみについて日潮周期 (24 h 50 m) をとり、その他の場合は 1/2 日周期を使用している。

図-7 において、USA のデータは $\sqrt{a_s g} \cdot T$ の値が狭い範囲に限られているのに対して、日本のデータはかなり広範囲に分布していることが特徴的である。二導流堤の場合を除くと、おおむね式 (21) の関係があてはまる分布をしている。同図において、 P/A_e の小さいデータは、二導流堤をもつ南カリフォルニア沿岸の狭口がほとんどである。

この原因として Johnson⁹⁾ は、来襲波エネルギーが小さいこと、導流堤が長いこと、浚渫による履歴効果などをあげている。特に小さい P/A_e 値を示している Marina Del Rey の場合は港口前面に長い離岸堤がある。また室蘭港の場合も幅 300 m の -12 m 航路をはさむ防波堤間隙間の、深掘れしているところの流積を使用している

図-7 感潮狭口の P/A_e と $\sqrt{a_s g} \cdot T$ の関係

特殊な例である。式 (21) 中の K の値は式 (20) であらわれているような水路自体に関する要素のみならず、来襲波エネルギーもしくは波高にも支配されていることは図-7からも推察される。 P/A_0 は年平均波高が大きいところほど大きい傾向が認められる。しかし、その効果が水路形状などとの関連でどのように K の中に入ってくるかは不明である。平衡流積という概念からすれば、落潮流を対象にしてそれに沿岸流や波浪が加わるときの流速を最大にする水深は、潮汐のみによる流れの場合の h_0 よりも大きくなることに関連している、とも考えられる。そのことを確かめるにはさらにくわしいデータが必要とされる。

この段階では図-7 のデータから、不安定に向っている能取湖のデータを除いた上限の線を式 (21) に従って引いて平衡状態における P/A_0 の一つの条件式として次式が得られる。

$$(P/A_0) \leq 0.22 \sqrt{ga_s} \cdot T \quad \dots\dots\dots (22)$$

外海潮汐を単調和潮と仮定して、式 (16) から上式は次の式に書き改められる。

$$U \leq 0.22 \pi \sqrt{ga_s} = 2.16 \sqrt{a_s}, \text{ (m/sec)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式 (22)、式 (23) は安定な状態下にある狭口水路にあてはまる関係であるが、その場合の水深は h_0 よりも大きいことは当然である。

5. む す び

感潮狭口の最大流速水深を一般的な断面について求める解を示し、その場合に流積とタイダルプリズムの比、

P/A が最大となることを示した。その関係式を用いて、現存の内外の狭口に関するデータを整理し、安定な狭口の一つの条件式として式 (22)、(23) を得た。安定な感潮狭口の最小流積は、その水深が最大流速水深よりも大きく、しかもその日平均潮に関する水路潮流の振幅が式 (23) を満たすものである。

本研究には室蘭工大河海工学研究室の藤間 聡講師、葛西勝栄助手、加納隆一技官、谷野賢治大学院生ならびに48年度卒業生の首藤悦男 ((株)間組) と日野利則 (岩手県庁) の両君が協力していることを記し、感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) O'Brien, M.P.: Proc. 10th Conf. Coastal Eng., Vol. I, 1966.
- 2) Bruun, Per and F. Gerritsen: Proc. ASCE, Vol. 84, WW3, 1958.
- 3) 吉高益男: 水工学夏期研修会講義集, A, 1968.
- 4) Johnson, J.W.: Proc. ASCE, Vol. 99, WW 3, 1973.
- 5) 近藤俊郎: 土木学会論文報告集, 第206号, 1972.
- 6) 近藤・宇田居・鴻上・佐藤: 18回海岸工学論文集, 1971.
- 7) 潮汐表: 昭和45年度, 第1巻, 海上保安庁, 1970.
- 8) Wiegel, R.L.: Oceanographical Eng., Prentice-Hall, 1964.