

海水交流に関する研究

中 村 充*・萩 野 静 也**

1. ま え が き

漁場の水質改善対策、漁場行使および生産力などを見積るためには、その湾の海水交流特性を把握する必要がある。ここでは二つの水域が狭くされた水路で結ばれたいわゆる閉鎖性の湾の海水交流について述べる。これを計算する解析法は湾内への河川流入などのない場合についてすでに中村ら¹⁾によって近似解が求められている。著者らは湾内への河川流入のある場合を含めて計算する方法を提案する。ここでは閉鎖性湾の運動方程式、連続方程式より無次元方程式を導き、さらにその解を数値解として求め実用計算図表を作った。

また湾口が開いており、共振系の内湾の場合は長方形等深水域の副振系として解析し、その計算法も示した。

さらに利根川下流の河道内の流況解析にそれらの計算方法を応用した。

2. 閉鎖性の湾

図-1のように内水面積 S の湾が交流口通水断面積 A

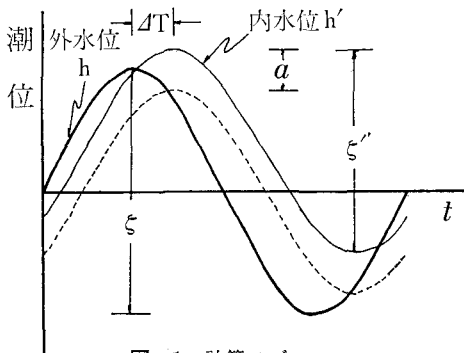
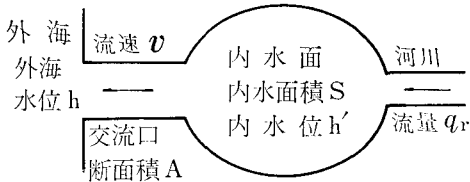


図-1 計算モデル

で外海と接しており、この内湾に流量 q_r の河川が流入するモデルを考える。この計算のための仮定は

- ① 内水面を水平または単節のセイシュとする。
- ② 内湾への流入水のエネルギーは内水位および熱損として消費され反射を生じない（非共振系の仮定）。
- ③ 外海水位変動は正弦曲線とする。

この時、内水面と外海との流出入流量 q は次式によって表わされる。

$$q = \pm CA\sqrt{2g|h-h'|} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q : 流出入流量、 C : 交流口の流量係数、 h, h' : 外海、内湾の水位、 g : 重力加速度、 A : 基準通水断面積

流量係数 C は実用上は摩擦、流入、流出の損失水頭を考慮して次式によって表わされる。

$$C = \left[f_e \left(\frac{A}{A_e} \right)^2 + f_o \left(\frac{A}{A_o} \right)^2 + \sum \frac{2gn^2 l}{R^{4/3}} \left(\frac{A}{A_l} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 f_e, f_o : 流入、流出損失係数でほぼ 0.4, 1.0 ととられる。 A_e, A_o, A_l : 流入点、流出点、区間 l の通水断面積、 l : 区間長、 R : 径深、 n : Manning の粗度係数
内湾への流出入流量の連続方程式は式 (3) で与えられる。

$$S \frac{dh'}{dt} = q + q_r \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 S : 有効内湾水面積で式 (4) により与えられる。
 q_r : 河川流量

$$S = \bar{S} \left(1 - \frac{\pi t_l}{T} \right) \left\{ \dots\dots\dots (4) \right. \\ t_l = l' / \sqrt{gd'} \left. \right\}$$

ここに、 $\bar{S}$: 平均内湾水面積、 T : 潮汐周期、 l' : 湾口から湾奥までの距離、 d' : 湾内の平均水深

外海潮汐は単振動とし式 (5) で与えられる。

$$h = \frac{\xi}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ξ : 外海潮位差

式 (1), (5) を式 (3) に代入し

$$S \cdot \frac{dh'}{dt} = CA\sqrt{2g \left| \frac{\xi}{2} \sin \frac{2\pi}{T} t - h' \right|} + q_r \quad \dots\dots (6)$$

* 正会員 農博 農林省農業土木試験場水産土木第3研究室長
** 農林省農業土木試験場水産土木第3研究室

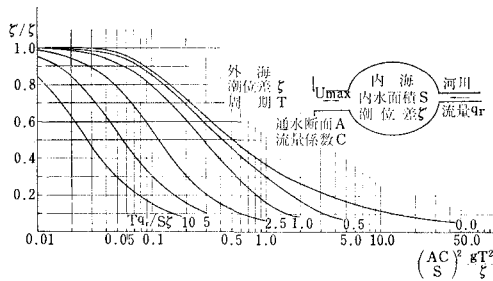


図-2 湾内外の潮位差比

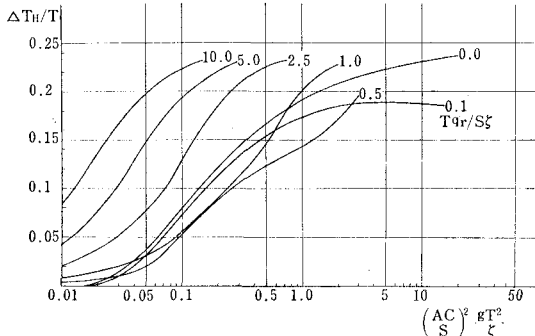


図-3 満潮時の湾内外の位相差

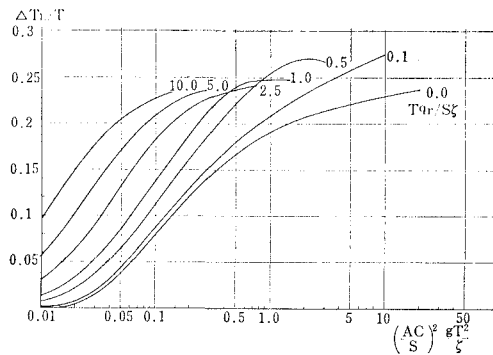


図-4 干潮時の湾内外の位相差

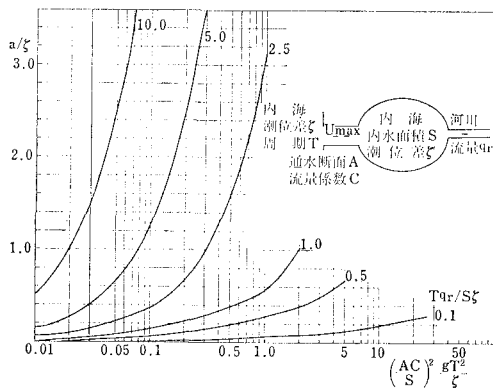


図-5 湾内の平均水面上昇量

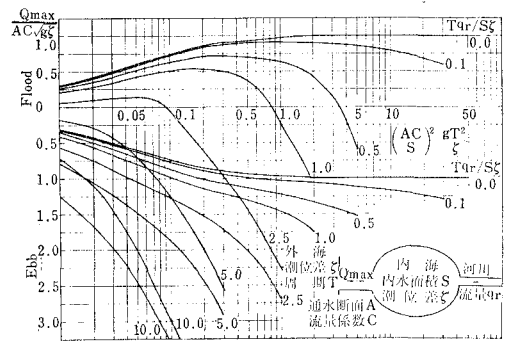


図-6 湾口部の最大断面平均流量

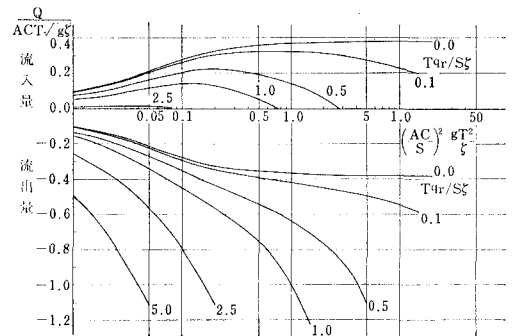


図-7 一潮当りの海水交流量

さらに、 $t_0 = t/T$, $h_0 = h'/\zeta$ なる無次元量 t_0 , h_0 を用いて式 (6) を整理すると次式が得られる。

$$\frac{dh_0}{dt_0} = \left[\left(\frac{AC}{S} \right)^2 \frac{gT^2}{\zeta} |\sin 2\pi t_0 - 2h_0| \right]^{1/2} + \frac{qrT}{S\zeta} \quad (7)$$

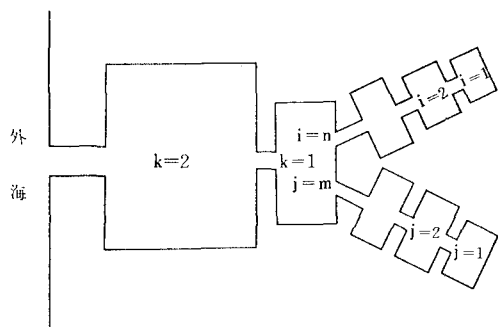
式 (7) を Runge-Kutta 法により数値計算し、湾内潮位差 ζ' 、内外水位変化の時差 ΔT 、流入河川水による内水面の平均水面上昇量 a 、流出入の最大流量 Q_{max} 、一潮あたりの流出入海水交流量 Q などが求められる。その結果を図-2~図-7 に示す。すなわち外海の潮汐条件 (ζ, T)、交流口の特性 (A, C)、内湾の条件 (S, qr) が既知であれば図-2~図-7 により容易に湾内の潮汐、海水交流量などが求められる。特に河川流量 qr が 0 の場合には中村ら¹⁾の近似解法と一致する。

一般に図-8 のようにいくつかの水域に区分されて外海につながっているときは、それぞれの系列、例えば i の系列で $\zeta_{i=2}$ を仮定し、図-2 から $\zeta_{i=1}$ を求める。そして $i=3$ における潮汐振動 $\zeta_{i=3}$ に対する $S_{i=1}$, $S_{i=2}$ を流量の連続条件から

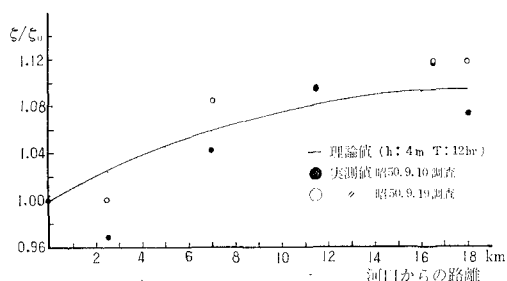
$$\left. \begin{aligned} S'_{i=2} &= S_2 + S_1 \zeta_1 / \zeta_2 \\ S'_i &= S_i + S'_{i-1} \zeta_{i-1} / \zeta_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

として換算内水面積を求め $i=2$ の水域に当初の仮定値 $\zeta_{i=2}$ が起こるような $\zeta_{i=3}$ を試算的に求める。以下順次同様に換算内水面積 S'_i を使い、 ζ_i を生ずるような ζ_{i+1} を求め外海まで計算する。同様に j 系列についても求め

注：図-2~7 の横軸は $\left(\frac{S}{AC} \right)^2 \frac{\zeta}{gT^2}$ です。御訂正下さい。



る。 i 系列と j 系列が $k=1$ で合流する場合には $k=1$ の振幅 $\zeta_{k=1}$ を与えて、この水域に $\zeta_{k=1}$ になるような $\zeta_{k=2}$ を図-2 より求める。この時用いる換算内水面積は式 (9) とする。



図—10 利根川・霞ヶ浦水系

て今後霞ヶ浦等の用水取水量の増大に伴ない、常陸川水門は完全に閉鎖されることが多くなる。ここでは常陸川水門の開閉によって利根川下流河道内の流況がどのように変化するかを検討した。その流況解析に前述の計算方法を応用した。

(1) 霞ヶ浦が感潮している場合（常陸川水門が全開の場合）

常陸川水門が全開していて霞ヶ浦が感潮している場合の河道内の水位変化を 図-11 に示す。これより外海潮汐振動が湖内に伝わっていく過程でそのエネルギーは主として河道内で消費されることがわかる。そこでこの場合の解析は前述閉鎖湾の解析手法を応用する。いま利根川下流水系を 図-12 のようなモデルで考える。ここで未知なのは西浦、北浦への淡水流入量、各河道内の有効通水断面積である。そこでこれらの現地定数を知るために現地調査を行った。調査は昭和 50 年 11 月 5 日～6 日までの 26 時間で、①、①、②、④、⑤ における潮位観測、①～① 間、①～② 間における流速、利根河口堰における放流量である。計算の手順は以下のとおりである。

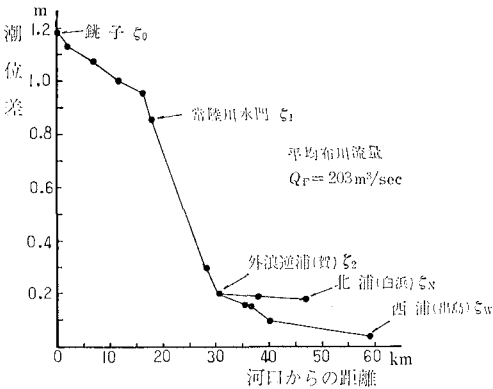


図-11 河道内の水位変動（常陸川水門開放）
昭和 50 年 11 月 5 日～6 日調査

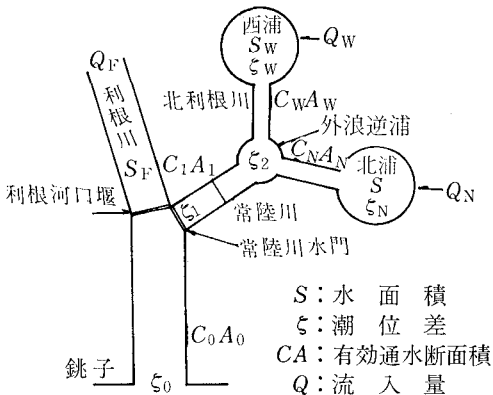


図-12 霞ヶ浦・利根川モデル

① 西浦、北浦の有効水面積

西浦、北浦の有効水面積は式 (4) を用いて求めた。そ

の結果は 表-1 の通りである。

表-1 有効水面積

	$S \text{ (m}^2\text{)}$	$l' \text{ (m)}$	$d' \text{ (m)}$	$S \text{ (m}^2\text{)}$
西 浦	1.71×10^8	28 000	4.89	$S_W = 1.33 \times 10^8$
北 浦	0.34	24 000	5.13	$S_N = 0.28$

なおこの値はそれぞれ湖口、湖奥における潮位実測記録によるものと一致する。

② 西浦、北浦への潮汐流以外の流入量 Q_W, Q_N

観測当日に常陸川水門を開放し、その前日まで閉門して淡水貯溜を行っていた。したがって自然状態での感潮流でないで、閉門時の水位上昇を、 Q_W, Q_N による上昇におきかえて現象を解析する。 Q_W, Q_N は 図-5 を用いて求めた。その結果を 表-2 に示す。

表-2 基底流量

	$\zeta_2 \text{ (m)}$	$a \text{ (m)}$	$S \text{ (m}^2\text{)}$	$AC \text{ (m}^2\text{)}$	$T \text{ (hr)}$	Q_W, Q_N
西 浦	0.2	0.1	1.33×10^8	243	16	$278 \text{ m}^3/\text{s}$
北 浦	0.2	0.15	0.28	321	16	$96 \text{ m}^3/\text{s}$

ここに、 ζ_2 は賀の観測値、 a は西浦においては出島と賀の、北浦では白浜と賀の平均水位差、 AC は各区間の水道断面から式 (2) で計算した値である。

③ ①～② 間の有効通水断面積

観測当日の ①～② 間での水位変動の伝達からその区間の抵抗特性 (C) を求め、有効通水断面積 $C_{NW}A_{NW}$ を観測値から定める。この時 ② の等価水面積 S_2 は水量の連続条件を満足するように次式で定める。

$$S_2 = \frac{1}{\zeta_2} [S_W \zeta_W + S_N \zeta_N] + S_{2R} \\ = 0.64 \times 10^8 \text{ m}^2$$

ここに、 S_{2R} は ①～② 区間の河道水面積

いま $\zeta_1 = 0.84 \text{ m}$, $\zeta_2 = 0.2 \text{ m}$, $T = 16 \times 3 600 \text{ sec}$, $Q = Q_W + Q_N = 374 \text{ m}^3/\text{sec}$, $S = S_2 = 0.64 \times 10^8 \text{ m}^2$ とし、 図-2 を用いて有効通水断面積を計算すると次のようになる。

$$C_{NW}A_{NW} = 261 \text{ m}^2$$

④ ①～① 間の有効通水断面積

いま $\zeta_1 = 0.84 \text{ m}$, $\zeta_0 = 1.19 \text{ m}$, $Q = Q_F + Q_W + Q_N = 577 \text{ m}^3/\text{s}$

$$S = \frac{1}{\zeta_1} [S_2 \zeta_2 + S_F/2] = 0.246 \times 10^8 \text{ m}^2$$

ここに、 S_F は河口堰～布川（感潮区間）間の河道面積を用いて前項 ③ と同様に計算すると次のようになる。

$$C_0A_0 = 378 \text{ m}^2$$

前述の方法で現地定数が決定されたので次に外海潮位が大潮、中潮、小潮の場合で、利根河口堰放流量 (Q_F) が $30 \text{ m}^3/\text{sec}$, $200 \text{ m}^3/\text{sec}$ の場合の利根下流河道内の流況を計算する。計算の手順は以下のようである。

④ ζ_2 を仮定し、前述の方法で求めた現地定数を図—2に適用して ζ_N , ζ_W を求める。

⑤ $S_2 = (S_W \zeta_W + S_N \zeta_N) / \zeta_2 + S_{2R}$ として 図—2 より ζ_2 が生じるような ζ_1 を求める。

⑥ $S_1 = S_2 \zeta_2 / \zeta_1 + S_F / 2 + S_{1R}$ (ここに S_{1R} は ①~④区間の河道面積) の S_1 を用いて ζ_1 が生じるような ζ_0 を 図—2 から求める。河口堰のある場合は利根本川の感潮面積 $S_F = 0$ とする。

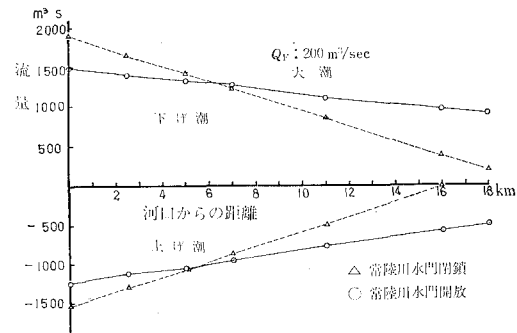
⑦ ④~⑥ の計算を図化する。

⑧ ④ で求めた図より外海潮位が大潮、中潮、小潮の場合の各水域の ζ を読みとる。これを 表—3 に示す。

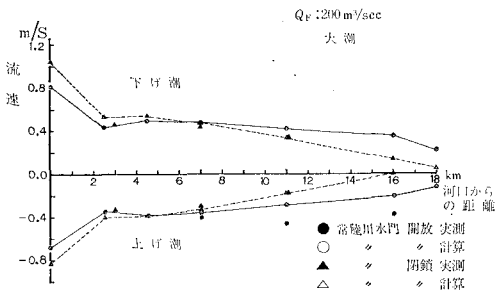
表—3 各水域の潮位差 ($Q_F = 200 \text{ m}^3/\text{sec}$)

St	大 潮	中 潮	小 潮
銚 子 ζ_0	1.50 m	1.00 m	0.65 m
常陸水門 ζ_1	0.78	0.56	0.36
賀 ζ_2	0.20	0.16	0.13
白 浜 ζ_N	0.19	0.16	0.13
出 島 ζ_W	0.05	0.04	0.14

⑨ 表—3 の各値を 図—6 に適用して、上げ潮、下げ潮時の最大流量を求める。その結果を 図—13 に示す。河道内中間点の値は河口よりその点までの貯留量修正で



図—13 河道内の最大流量



図—14 河道内の最大断面平均流速

内そうした。

⑩ ④ で求めた値を各河道通水断面で割って最大断面平均流速を求める。その結果を 図—14 に示す。

(2) 霞ヶ浦が感潮しない場合 (常陸川水門が閉鎖している場合)

河道内の水位変動の実測値は 図—9 に示すように河道内で共振現象により増幅している。したがってこの場合の振動現象は式 (11) を用いて解析する。

まず最初に河口堰からの放流による流況と潮汐振動の現象について、そのオーダーを比較する。

潮汐現象: $\zeta_0 = 1.5 \text{ m}$, $T/2 = 6 \text{ hr}$ として

$$\frac{\zeta_0}{T/2} = \frac{1.5}{6 \times 3600} = 0.7 \times 10^{-4} \equiv O(-4)$$

放流時水位変化: 放流量変化率を $200 \text{ m}^3/\text{s/hr}$ とする。いま $n = 0.025$, $l' = 18 \text{ km}$, $d' = 4 \text{ m}$, $B = 820 \text{ m}$ とし水位変化 Δh を式 (11) で計算する。

$$\frac{\Delta h}{3600} = 1.3 \times 10^{-6} \equiv O(-6)$$

両現象の変化率の比は $O(-4)/O(-6) = O(-2)$ となり潮汐変動のオーダは 2 桁、すなわち 100 倍速い。よって放流操作を $200 \text{ m}^3/\text{s/hr}$ 以下で行う場合には放流操作の非定常性は無視することができるので以下の解析は式 (11), (12), (13) を用いて計算する。

式 (12) を用いて求めた x 断面における流量を 図—13 に、式 (13) を用いて求めた平均流速を 図—14 に示す。

あ と が き

本報告では閉鎖性湾の場合は湾内に河川流入のある場合を含めてその流況を計算する方法を提案し、その実用計算図表を作った。また共振系内湾についての流況計算法も示した。そしてこれらの近似理論式を利根川下流の河道内の流況解析に応用した。その結果これらの近似理論式で計算した諸量は観測値とよく一致した。従来感潮河川、湾における流況解析は水理模型、数理模型による実験によって検討されるのが一般的であったがここでは近似理論解析でも充分実用上は問題はないということを示唆したものである。しかしこの方法にもおのずと適用限界があり、今後はこの点を検討したいと考える。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 海水交流の一解析法, 第 12 回海工講演集, pp. 128~132, 1965.
- 2) 土木学会編: 水理公式集, p. 563, 1968.
- 3) 中村 充・萩野静也: 霞ヶ浦開発事業が利根川下流漁業に及ぼす影響調査委員会報告書, 日本水産資源保護協会, pp. 1~34, 1976.