

# 閉鎖性湾の海水交流に関する研究

——島根県中海・宍道湖水系について——

上北 征男\*・大竹 臣哉\*\*・中村 充\*・押谷 美由紀\*\*\*

## 1. はしがき

島根県中海やサロマ湖のように外海と内湾とが水道部でつながり、外海との海水交流がその水道部を通じて行われ、エネルギー損失が主として水道部で生じている湾を閉鎖性湾と定義する。このような閉鎖性湾の海水交流については、著者の 1 人である中村 (1991) によって、その理論解が与えられている。この理論に地形条件、潮汐条件を与えれば、容易に海水交流量を求めることが出来る。また、中海と宍道湖のように連結した湾の場合についても、等価水面積の概念を導入し、二つの湾を一つの湾の水面積、いわゆる等価水面積に置き換えることによって海水交流量を求める方法を示している。この場合、中村は、連続条件式に二つの湾の水域間に生じる水位の位相差を考慮していないため、精度に問題が残っていた。

本研究では、このたび、島根県中海における本庄干拓に関連して中国四国農政局が実施した調査の結果 (1999) により、先ず単一湾の場合の既存理論について検証し、続いて、中村らの理論の連結した湾への適用を考慮し、より精度の高い海水交流量の推算のために、位相差を考慮した理論を導き、水理模型実験による検証および現地シミュレーション結果 (中国四国農政局, 1999) と比較した。

## 2. 閉鎖性湾の海水交流

### 2.1 海水交流理論 (中村ら, 1965; 中村, 1991)

内湾面積  $S$ 、水道部の通水断面積  $A$ 、流量係数  $C$  である湾の条件式は  $h$ 、 $h_0$  を水道の内外水位として

$$\text{運動方程式 } q = Av = CA\sqrt{2g|h_0 - h|} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{連続方程式 } q = S\frac{dh}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

である。ここに  $v$ : 水道部流速,  $q$ : 流量である。外海水位  $h_0$  を与えて内水面水位  $h$  を (1), (2) 式を満足する解として求める。外海水位を (3) 式で与える時,  $h$  の解の形を (4) 式で与え, (4) 式中の内水位干満差と

振動の位相遅れ時間  $\Delta T$  を (1), (2) 式を満足させるように解く

$$h_0 = \frac{\zeta_0}{2} \sin \frac{2\pi}{T} t \dots\dots\dots (3)$$

$$h = \frac{\zeta}{2} \sin \frac{2\pi}{T} (t - \Delta T) \dots\dots\dots (4)$$

ここに,  $\zeta_0$ : 外海干満差,  $T$ : 振動の周期である。

(1), (2) 式で

$$h_0 = h \text{ で } q = 0 \therefore \frac{dh}{dt} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$Q = \int_{-\zeta/2}^{\zeta/2} S dh = \int_{t_0}^{t_0 + \zeta/2} q dt \dots\dots\dots (6)$$

(5), (6) 式を連立に解いて

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta T}{T} &= \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \frac{\zeta}{\zeta_0} \\ \frac{\zeta}{\zeta_0} &= \sqrt{\frac{\sqrt{1+4K}-1}{2K}} \\ K &= \left(\frac{2}{\beta}\right)^4 \left(\frac{S}{CA}\right)^4 \left(\frac{\zeta_0}{gT^2}\right)^2 \\ \beta &= \Gamma\left(\frac{3}{4}\right)\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) / \Gamma\left(\frac{4}{5}\right) / \pi = 0.76 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

として,  $\Delta T$ ,  $\zeta$  が求まる。そして水道部の流速  $v$ , 平均流速  $\bar{v}$ , 流量  $q$ , 交流量  $Q$  は,

$$\left. \begin{aligned} \bar{v} &= 2S\zeta / (AT) \\ v &= \frac{\bar{v}}{\beta} \sin^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2\pi}{T} t + \delta \right) \\ \delta &= \sin^{-1} (\zeta / \zeta_0) \\ q &= Av \\ Q &= S\zeta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。

### 2.2 直列した湾への適用

図-1 に示すように複数の湾が直列につながっている場合の外海振動による湾の海水交流の計算法については、著者の 1 人中村 (1991) によって (9) 式に示すように、奥側の湾の水面積を等価水面積 ( $Se$ ) として手前の湾の面積に加算する方法が行われ、逐次計算して計算するとしている。

$$Se_n = S_n + Se_{(n-1)} \left( \frac{\zeta_{n-1}}{\zeta_n} \right) \dots\dots\dots (9)$$

\* 正会員 農博 福井県立大学教授 生物資源学部海洋生物資源学科  
\*\* 正会員 農博 福井県立大学助教授 生物資源学部海洋生物資源学科  
\*\*\* 財団法人漁港漁村建設技術研究所

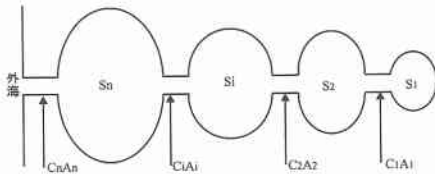


図-1 複数の直列につながった湾

ここに、 $\xi$  は水位変動の振幅の2倍である。

この方法では、水道部を通して各湾への流入に位相の遅れが考慮されていない。

そこで、各湾への振動伝達の位相遅れを考慮した理論の展開を図り、以下に示した。

#### a) 直列した湾の理論

図-2に示す2個の内湾の場合について考える。このとき、外海、 $S_2$ 、 $S_1$ の水位  $h_0$ 、 $h_2$ 、 $h_1$ の変動は図-3のようになる。 $S_2$ の振動振幅  $\xi_2/2$  が判れば単一湾の計算で  $S_1$  海域への交流量が求まる。 $S_2$ の振幅  $\xi_2/2$  を外海  $\xi_0$  より計算する場合には、 $S_2$  湾に  $S_2(dh_2/dt)$  だけ流入すると同時に  $S_1$  湾に  $S_1(dh_1/dt)$  だけ流れる。この2つの量が  $C_2A_2$  水道を通ることになる。したがって  $C_2A_2$  水道を半周期 ( $T/2$ ) に通過する全流量  $Q_2$  は、

$$Q_2 = \int_{-T/4}^{T/4} S_2 \frac{dh_2}{dt} dt + \int_{-T/4}^{T/4} S_1 \frac{dh_1}{dt} dt \dots\dots\dots (10)$$

いま (3) 式の、 $h_0$ 、 $\xi_0$  を  $h_2$ 、 $\xi_2$ 、(4) 式の  $h_1$ 、 $\xi_1$  として (10) 式に代入し、(7) 式の第1式の関係を用いれば

$$Q_2 = \int_{-T/4}^{T/4} \left\{ S_2 \frac{\pi \xi_2}{T} \cos \frac{2\pi t}{T} + S_1 \frac{\pi \xi_1}{T} \cos \frac{2\pi (t - \Delta T)}{T} \right\} dt$$

$$= S_2 \xi_2 + S_1 \xi_1 \cos \frac{2\pi \Delta T}{T} = S_2 \xi_2 + S_1 \frac{\xi_1^2}{\xi_2} \dots\dots (11)$$

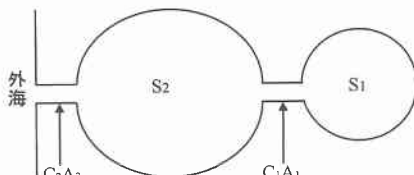


図-2 直列につながった2つの湾

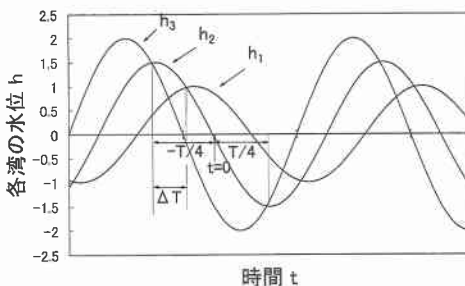


図-3 外海および各湾の水位変動

この流量  $Q_2$  が等価水面積  $Se_2$  に水位変化を乗じた値  $Se_2 \xi_2$  に等しいとして、

$$Se_2 = S_2 + S_1 \left( \frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^2$$

一般化して

$$Se_n = S_n + Se_{(n-1)} \left( \frac{\xi_n}{\xi_{n-1}} \right)^2 \dots\dots\dots (12)$$

$$Se_1 = S_1, \quad n > 3$$

となる。(9) 式に示す従来の等価水面積に比し振幅比が2乗となる。(12) 式を既存の等価水面積にかわり検証する。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 海水交流理論の検証

##### a) 現地実験施設

中海・宍道湖水系および中海干拓本庄工区の略図を図-4に示す。本庄工区は汐止め口として西部承水路堤の約200mの開閉部を除き囲繞堤防が完成し、現状はその開口部を通して中海と交流している極閉鎖的な内湾である。この工区を水産利用に切り換えるとした場合にどのような利用ができるか、中国四国農政局で検討が行われ、これに参画し本理論を検証する機会を得た。

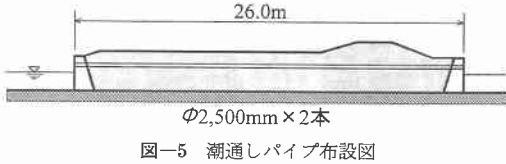
現状では水質が悪く試験栽培も不可能であるので、境水道に近い北部承水路堤にパイプを布設して境水道の水との海水交流を図ることとされた。図-4に示す位置に図-5に示す通水パイプ(直径2.5m、長さ26m)2本を水平並列に設置された。

##### b) 現地実験施設における理論計算

パイプ布設前の本庄工区内への外海潮波の伝達は境水



図-4 中海・宍道湖水系および中海干拓本庄工区



道, 中浦水道, 中海, 西部承水路を経て工区内に伝わり, かつ中海からは穴道湖へも伝達する. このような水系における有効通水断面積  $CA$  ( $C$ は流量係数) は各水道毎の有効通水断面積  $C_i A_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) を用いて

$$\left. \begin{aligned} \text{直列水道} \quad CA &= [\sum 1 / (C_i A_i)^2]^{-1/2} \\ \text{並列水道} \quad CA &= \sum (C_i A_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

として求められる(中村ら, 1965). しかし, 今回のような複雑な水道の場合には対象水域の内外の同時潮位観測値があればよく, (7)式における  $\zeta/\zeta_0$  あるいは  $\Delta T/T$  を実測すれば  $CA$  が逆算できる. このことはパイプ布設位置に流量特性  $CA$  である仮想水道で外海に直接つながって内水面振動  $\zeta$  が生じていると考える. この仮想水道にパイプの有効通水断面積  $C_p A_p$  が加わるとして, パイプ布設後の有効通水断面積  $C_n A_n$  を用いて(7)式より  $\zeta_n/\zeta_0$ ,  $\Delta T_n/T$  を求め(8)式よりパイプ布設後の流量を計算することができる. 本地区に適用する諸元は実測より

$$\begin{aligned} \zeta &= 0.18 \text{ m}, \quad \zeta_0 = 0.31 \text{ m} \\ S &= 1354 \text{ ha} \quad (\text{工区内水面静振修正}) \\ T &= 44700 \text{ sec}, \quad g = 9.8 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

これらを(7)式の第2式, 第3式に代入して, 有効通水断面積

$$CA = 91 \text{ m}^2$$

布設パイプの通水断面積  $A_p = 9.1 \text{ m}^2$ , 流量係数(流入, 流出, 摩擦損失による)  $C_p = 0.80$  であり

$$C_n A_n = CA + C_p A_p = 98.3 \text{ m}^2$$

が得られる. 水道特性  $C_n A_n$  を用い(7)式より, 任意の外海振動  $\zeta_0$  を与えて  $\zeta$  が求まり(8)式より流量を計算する.

c) 現地実験施設による流量観測と計算値の比較

現地観測は, パイプ布設直後の平成10年4月25日および平成10年7月3日より8月3日までの32日間行なった. 流速は予めパイプ内の流速分布を測定し, 平均流速に等しい代表点として, 6割水深に相当する水深1 m位置に電磁流速計(東邦電探社製/TX-105 X型)を設置し連続観測を行った. 一例として, 平成10年4月25日8時~17時に行われた観測値と比較する. 計算値に用いる観測日の外海潮差  $\zeta_0 = 0.21 \text{ m}$  であり, 計算値は, (7), (8)式より

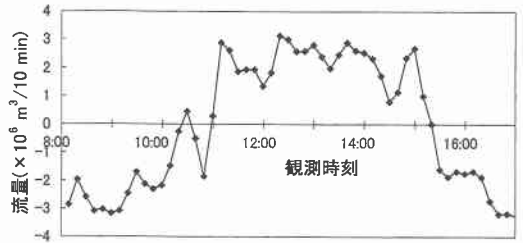


図-6 現地流量観測値 (平成10年4月25日)

$$\begin{aligned} K &= \left(\frac{2}{0.76}\right)^4 \left(\frac{1.354 \times 10^7}{98.3}\right)^4 \left(\frac{0.21}{9.8 \times 4.47^2 \times 10^8}\right)^2 \\ &= 1.99 \\ \zeta &= 0.149 \text{ m} \\ Q &= 2020000 \text{ m}^3/T/2 \\ Q_p &= \frac{C_p A_p}{C_n A_n} Q = 150000 \text{ m}^3/T/2 = 300000 \text{ m}^3/\text{day} \end{aligned}$$

となる. 一方そのときの現地でのパイプ内流速観測値で得られた流入流出量を図-6に示す. この値を用いて8:00から17:00まで9時間の交流量は, 往復流における, 流入量  $55.3 \times 10^3 \text{ m}^3$  を得, 1日当りの海水交流量は  $55.3 \times 10^3 / 9 \times 24 \times 2$  本分 =  $295,000 \text{ m}^3/\text{day}$  となり, 計算値によく一致する.

3.2 直列した湾への適用理論の検証

a) 水理模型実験

実験は, 図-7に示す福井県立大学所有の潮汐装置付平面水槽に3つの直列した湾模型を設置して行った. 湾模型の平面および水道部の諸元を図-7及び表-1, 表-2に示す. 実験に用いた潮汐の緒元は, 周期  $T$  に  $T = 750 \text{ sec}$ , 外海の潮汐波高  $\zeta_0$  を  $4.37 \text{ cm} \sim 4.75 \text{ cm}$  に変化させた. 模型の湾外および各湾の水位変動および各水道部の流速変動は, 水位についてはサーボ式水位計を用い, 流速測定にはペラ式微流速計及び電磁式流速計を用いて測定した. 測定値はデジタルレコーダーで数値化し, フロッピーディスクに収録した.

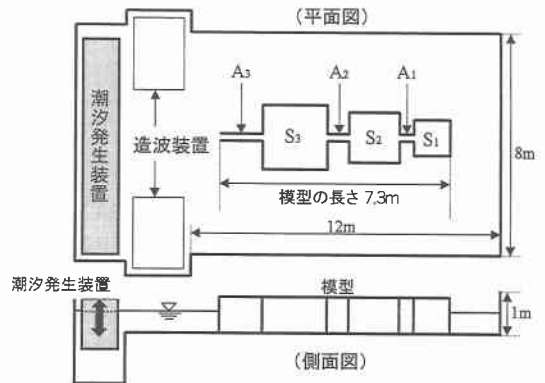


図-7 水理模型模式図挿入

表—1 模型湾の水面積及び水道部長さ

	水面積 (cm <sup>2</sup> )		水道部長さ (cm)
S1	18409.5	A1	50.4
S2	27605.7	A2	90.5
S3	35704	A3	140.2

表—2 模型各水道部の平均流水断面積

A3	A2	A1
16.0~36.8	8.0~14.0	1.3~7.0

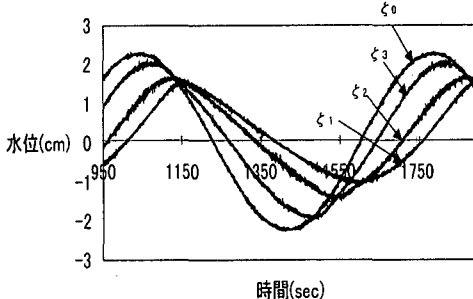
## b) 水理実験結果

水位変動の実測記録を図—8に示す。図から各湾への流入・流出水の位相に遅れが確認された。そこで各湾の面積( $S_3, S_2, S_1$ )と潮位変動の記録から得られた振幅( $\xi_3, \xi_2, \xi_1$ )を用い、(9)式により従来の等価水面積および(12)式による振動伝達に位相遅れを考慮した等価水面積 $Se_2, Se_3$ を求め、この値を(8)式の第5式に代入して、水道 $A_2$ 部を流出入する水量 $q_2=Se_2 \cdot \xi_2$ および水道 $A_3$ 部を流出入する水量 $q_3=Se_3 \cdot \xi_3$ を求める。

模型実験における各水道部の実測の流入出流量は、水道部 $A_2$ および $A_3$ で流速を測定し、流水断面積を乗じて断面を流れる流量とし、 $-T/4$ から $T/4$ までの間を積分して直列した湾の模型水道部からの湾への流入出水量の実測値とした。

図—9は、(9)式および(12)式による等価水面積を用いて計算した各湾への流入出量を縦軸にとり、模型の各水道部での流入出流量の実測値を横軸にとり、計算値と実測値を比較した図である。図中の×印は、等価水面積に(9)式から求めた値を用いて求めた流入出量の計算値であり、■印は(12)式から求めた計算値である。

図から水道部を通して湾内への流入出流量の計算値は、(9)式による値に比して、位相差を考慮した(12)式による値の方がよく実測値と一致していることが判かる。



図—8 模型各湾での水位変動観測例

## 3.3 本庄工区堤防開削時の理論計算とコンピュータシミュレーションの比較

本庄工区を海面として水産利用を図るには海水交流を促進し貧酸素水塊の発生を防止することが必要であり、図—4に示す森山堤防および大海崎堤防を開削した場合の流量について検討する。工種条件を表—3に示す。③の条件は堤防開削後既設の中浦水門を上げ潮時閉鎖、下げ潮時開放の操作をすることによる本庄工区、中海の潮汐差流を増大させ海水交換を促進させる場合の検討である。

## a) 本庄工区堤防開削時の海水交流の理論計算

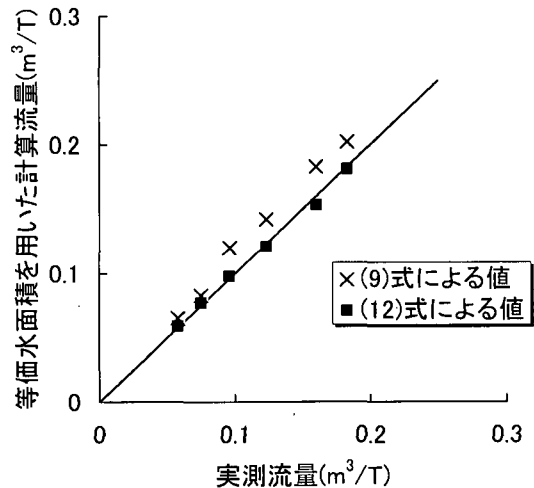
水系モデルを図—1に示す。(7),(8),(12)式を表3の条件で計算する。各水道の流量係数 $C_i$ はそれぞれ流入、流出、摩擦、橋脚、分岐、合流その他の損失水頭の合計から求めることができる。しかし、現状で各湾の同時水位観測記録 $\xi_i$ があれば、 $\xi_{n-2}/\xi_{n-1}$ から(7)式で $C_i A_i$ を逆算できる。計算に用いた諸元は表—4の通りである。

計算の手順を以下に示す。

① 図—4の実測値を用い(12)式より宍道湖、中海の等

表—3 工種条件

工種条件	工種対象	工事範囲
① 開削	森山堤防	100×(-6) m
	大海崎堤防	100×(-4) m
② 開削	森山堤防	200×(-6) m
	大海崎堤防	200×(-4) m
③ 開削 水門操作	森山堤防	200×(-6) m
	大海崎堤防 中浦水門	200×(-4) m 上げ潮時閉鎖 /下げ潮時開放



図—9 実測流量と計算流量の比較

表-4 潮汐・内水面積・潮汐周期

外海干満差	$\zeta_0=0.268$ (m)
中海干満差	$\zeta_n=0.24$ (m)
宍道湖干満差	$\zeta_s=0.0375$ (m)
中海水面積	$S_n=8.00 \times 10^7$ (m <sup>2</sup> )
宍道湖水面積	$S_s=8.03 \times 10^7$ (m <sup>2</sup> )
本庄工区水面積	$S_h=1.69 \times 10^7$ (m <sup>2</sup> )
潮汐周期	$T=12$ hr = 43200 (sec)

表-5 理論式による流量

(単位は $\times 10^6$  m<sup>3</sup>/6 hr)

工種条件	中浦水道	森山水道	大海崎水道
①	19.0	7.5	3.5
②	17.1	10.0	5.9
③	0/7.6	14.7/4.5	11.4/2.6

表-6 数値シミュレーションによる流量

(単位は $\times 10^6$  m<sup>3</sup>/6 hr)

工種条件	中浦水道	森山水道	大海崎水道
①	19.2	7.2	1.6
②	16.8	10.0	4.0
③	0/7.8	18.0/4.7	14/3.2

価水面積  $Se$  を求める。

- ② 現況における境水道+中浦水道の有効通水断面積を(13)式で求め、摩擦損失係数を逆算し、境水道、中浦水道の有効通水断面積を求める。
- ③ 森山口、大海崎口は流出入損失と摩擦損失より有効通水断面積を求める。
- ④ 各水道の組み合わせによる有効通水断面積  $CA$  を(13)式より求める。
- ⑤ ④で求めた  $CA$ 、①で求めた  $Se$ 、を用い外海の各種振動条件 ( $\zeta_0$ ,  $T$ ) を与えた場合の計算を(7)式および(8)式で行う。

以上の計算による各場合の各水道の流量は表5の通りである。

b) 数値シミュレーションとの検証

前項と同じ工種条件で、農林水産省中国四国農政局で宍道湖、中海水系のコンピューター数値シミュレーションが行われた。メッシュ区分は1 km で本庄工区周辺は333 m とされた。鉛直方向には8層に分割したレベルモデルである。このシミュレーションプログラムは密度流として流況、塩分、水質の予測を行うものである。

この数値シミュレーションによる海水交流の計算結果を表-6に示す。また表-5に示す本理論による計算値

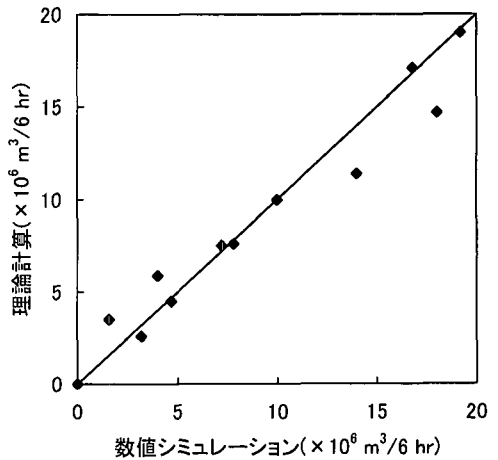


図-10 流量  $Q$  の比較

と、表-6に示す数値シミュレーション値との比較を図-9に示す。大海崎および森山水道の工種③、大海崎工種①、②で多少の相違が見られるが、計算値とシミュレーション値はほとんど一致している。

4. あとがき

本報告における理論計算法は既に沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針で実用化しているものであるが、今回現地実験が行われその精度を確認した。直列につながる湾についてより精度の高い計算法を提案し、水理実験で検証し、現地数値シミュレーション結果<sup>4)</sup>と比較した。この方法は湾、水道の深浅地形と外海潮差が与えられれば簡単に計算が可能であり、内外潮位の同時実測記録があれば計算精度は更に十分なものとなる。今回の適用ではパイプ布設の流況予測では計算に用いられたプログラムでは規模が小さすぎて適用不可能であったため本理論を用いたものであり全体計算ではシミュレーションの演算ケースの設定のため、シミュレーション計算に先立って本理論による検討を行ったものである。最後に、各種資料の提供に御便宜を頂いた中国四国農政局の関係各位に謝意を表す。

参考文献

中国四国農政局 (1999): 本庄工区水産調査の結果について, 本庄工区水産調査専門委員会資料.  
 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄 (1965): 海水交流の一解析法, 第12回海岸工学講演会論文集, pp.130-131.  
 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄 (1966): 海水交流に関する研究, 農土試報告第4号 pp.1-11.  
 中村 充 (1991): 水産土木学, 工業時事通信社, pp.313-343.