

# 水質改善のための潮流制御工に関する研究 (2)

中村 充\*・萩野 静也\*\*・海藤 齊\*\*\*

## 1. はじめに

海域の水質汚濁は年を追って急速に進行し、その被害範囲、規模は拡大しつつある。そのような現状でいくつかの水質改善工法が研究、提案されている。筆者らも内湾水と外海水との海水交換を促進し、内湾水の水質改善を図る工法をいくつか提案してきた。ここでは、湾口が2つ以上あり潮汐によって同時に流出入がありながら往復潮流で卓越流向がない場合、あるいは湾口が1つで往復潮流の場合には 図-1, 2 に示すような方法で恒流成分を助長し、海水交換を促進する工法について報告する。

図-1 は導流堤による潮流制御で一方向に流れやすく、逆方向には流れにくいように導流堤を配置するもので、流速が速い場合に効果的である。導流堤による水質改善効果は順逆流の流量係数の差によって評価できる。昨年は交角  $\theta=60^\circ$  の漸近線をもつ双曲線形状の導流堤について検討した。本年は交角  $0, 30, 90^\circ$  の双曲線導流堤の流量係数について実験を行い、それより最適形状を見出した。またこの潮流制御工を明石海峡に施工した場合の瀬戸内海の恒流成分、交換量、浄化速度の変化を昨年の簡易計算に引き続き、今回は数理モデルで検討した。

きわめて緩流速の場合には浮子につるした可動扉を用いて 図-2 のように漲潮時一方は閉じ、他方は開くよう

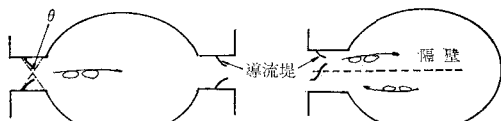


図-1 双曲線導流堤による潮流制御

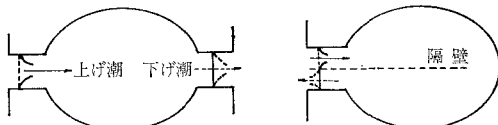


図-2 可動扉による潮流制御

に配置した潮流制御工が考えられる。この場合、問題となるのは緩流速下における可動扉の作動力および船舶航行等を考えた欠口部の流量係数で、これらについて検討した。

## 2. 導流堤による潮流制御

### (1) 理論<sup>1)</sup>

流速の速い場に 図-3 に示すような双曲線形の導流堤を配置する。流れが往復流である時、図-3 中の実線、点線に示すように、流れの通過し易さ、すなわち流量係数が順流、逆流によって異なる。この形状特性を利用することによって往復流を一方向流に変換することができ

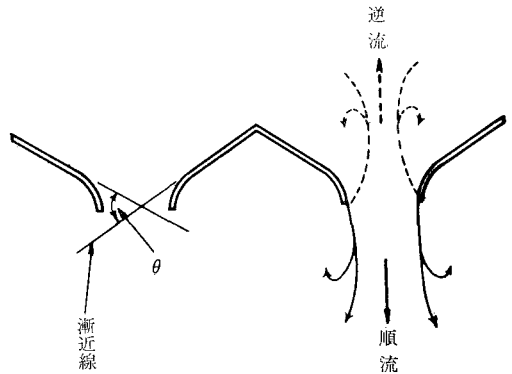


図-3 双曲線導流堤平面図

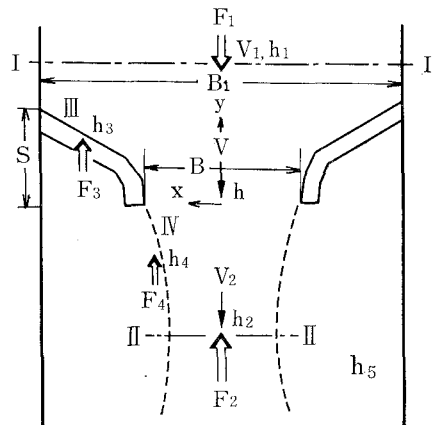


図-4 導流堤形状および記号

\* 正会員 農博 農林省農業土木試験場水産土木部  
 \*\* 農林省農業土木試験場水産土木部  
 \*\*\* 元東海大学海洋土木

る。ここで図の上から下に流れる流れを順流とし、反対の場合を逆流と呼ぶことにする。

図-4 に示す導流堤配置において速度係数  $C_v$  は縮流部における現実の流速  $v_2$  と完全流体における理論流速との比とし、次のように定義される。

$$C_v = \frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + 2g(h_1 - h_2)}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $h_1, v_1$ : 上部流の水深, 流速,  $h_2, v_2$ : 縮流部の水深, 流速である。

また、縮流係数  $C_a$  は最大流速の発生断面の通水断面積  $A_2$  と開口部に関する断面積  $A$  との比で定義される。

$$C_a = \frac{A_2}{A} = \frac{A_1}{B\left(h + \frac{v^2}{2g}\right)} = \frac{A_2}{B\left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $B$ : 開口部幅,  $h, v$ : 開口部の水深, 流速である。

よって開口部を通過する現実の流量  $q$  は

$$q = C_a C_v A \sqrt{v_1^2 + 2g(h_1 - h_2)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C = C_a C_v \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $C$ : 流量係数である。

導流堤形状は式(5)のような交角  $\theta$  の漸近線を持つ双曲線とする。

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} &= 1 \\ a &= \frac{B}{2}, \quad b = \frac{B}{2} \tan \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また導流堤の平均流方向の長さ  $s$  は次のようになる。

$$s = b \sqrt{\frac{B_1^2}{4a^2} - 1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

縮流係数  $C_a$  を式(5)の導流堤形状の各種の  $\theta$  について昨年発表した理論の実証を行う。前回の結果式を再記すれば次のようである。

a) 順流の場合

順流の場合の縮流係数  $C_a$  は次式となる。

$$C_a = \frac{B_1 h_1}{B h_2} \left\{ \frac{F g}{w h_1 B_1 v_1^2} + 1 \right\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$\begin{aligned} F &= F_1 - F_2 - 2F_3 - 2F_4 \\ &= \frac{w h_1^2}{2} B_1 - \frac{w h_2^2}{2} B - \frac{w a h^2}{b} \left[ \sqrt{s^2 + b^2} - b \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{s} \left( \frac{h_1}{h} - 1 \right) \left\{ s \sqrt{s^2 + b^2} - b^2 \ln \frac{s + \sqrt{s^2 + b^2}}{b} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3s^2} \left( \frac{h_1}{h} - 1 \right) \left\{ (s^2 - 2b^2) \sqrt{s^2 + b^2} + 2b^3 \right\} \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

b) 逆流の場合

逆流の場合にも同様に考えると縮流係数  $C_a$  は次のようになる。

$$C_a = \frac{B_1 h_1}{B h_2 \left\{ \frac{g B (h_1^2 - h_2^2)}{2 h_1 B_1 v_1^2} + 1 \right\}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(2) 実験装置と実験方法

使用した平面水槽は昨年と同様に長さ 11.5m, 幅 4.8m, 深さ 0.5m である。導流堤模型は木製ブロックを交角 0, 30, 90° の双曲線型形状 (図-3 参照) に配置したものである。実験流量は 15.0~52.9l/sec, 導流堤上流側の水深, 流速はそれぞれ 8.24~15.01cm, 2.4~10.4cm/sec である。実験方法, 測定項目は昨年と同様で, 水位はポイントゲージを用い, 導流堤上流側, 下流側, 開口部を, 流速は CM-1 型流速計を用い開口部, 縮流部で測定した。縮流部幅は染料により滞流部を着色し, 可視化することによって目視にて測定した。その他縮流部幅測定の補助手段として手製の簡易流向指示計を用いた。

(3) 実験結果とその考察<sup>1)</sup>

流れの状態は昨年と同様に上流側では Potential 流に近い状態で流れ, 導流堤先端に近づくにしたがって急速に加速流となり, 開口部を通過した後は噴流となって開口部通水断面の実幅より小さい幅に縮流する。この部分では主流と滞流域との境界に渦が生じる。縮流係数は可視的に順流と逆流とで差が認められた。そこで縮流係数の実験値を式(2)を用いて計算し, 理論値を式(7), (9)を用い実験条件のもとで計算し, 実験値を比較したのが図-5 である。この図より順, 逆流で縮流係数は明確に2つのグループにわかれる。また理論値は実験値とよく一致することも再確認できた。本実験では速度係数  $C_v$  はほぼ1であるので図-5は流量係数の比較と考えてよい。これより順逆流における流量係数は1~0.4程度で, その差は交角90°の場合が一番大きく約0.4であった。すなわち90°の場合, 逆流時の通水断面は順流時のほぼ

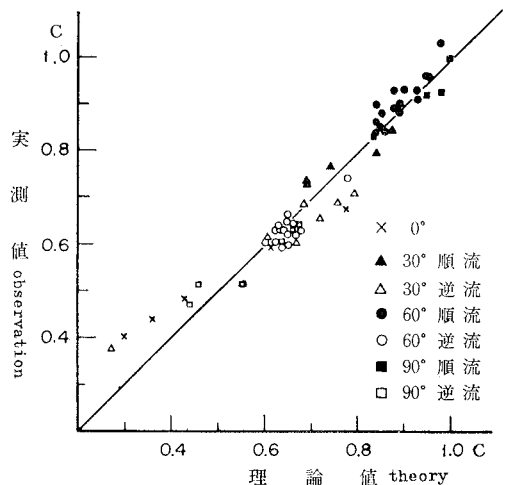


図-5 流量係数

半分となり、順逆流の流量比率は約 2 : 1 にすることができる。

(4) 瀬戸内海浄化への応用

最も効果的な導流堤配置として交角 90° の双曲型導流堤潮流制御工を明石海峡に設けた場合の瀬戸内海の恒流成分、交換量の変化、富栄養化の指標として海水中に溶解しているチッ素を用い、その濃度の時間的変化を数理モデル、簡易計算によって検討する。

a) 数理モデル

瀬戸内海に通じる明石、鳴門、豊予、下関の 4 海峡のうち、支配的大きさをもつのは豊予、明石海峡である。また瀬戸内海全域の海水交換を大局的に把握するという観点から格子間隔 20 km の単一内海一次元モデルを作製した。地形条件は図-6 に示す<sup>2)</sup>。基礎方程式は次式を用いた。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \left( \frac{\gamma^2 |U|}{H} + 2 \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \right) M - gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} \dots \dots \dots (10)$$

$$S \frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial MW}{\partial x} \dots \dots \dots (11)$$

$$H = h + \zeta \dots \dots \dots (12)$$

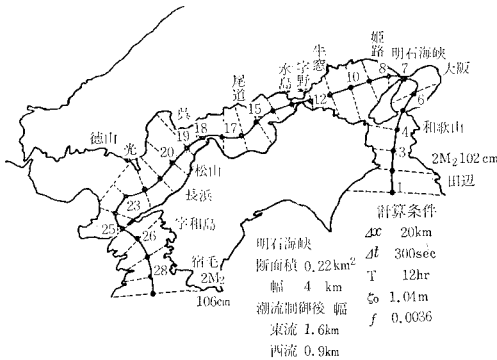


図-6 瀬戸内海 の 地形条件

ここに、 $M$ :  $x$  方向の単位幅当りの平均流量、 $U$ :  $x$  方向の断面平均流速、 $H$ : 時刻  $t$  における水深、 $h$ : 平均水深、 $\zeta$ : 平均水面からの水位、 $\gamma^2$ : 海底摩擦係数、 $S$ : 水面積、 $W$ : 断面幅

外海潮汐は和歌山県田辺、高知県宿毛で与えた<sup>3)</sup>。兩地点の  $M_2$  分潮の振幅、遅角はほぼ同じである。またこのモデルでは潮流制御工設置前後の瀬戸内海各水域での恒流成分、交換量の比較に重点をおいた。それで境界条件としての外海潮汐は振幅、位相とも同じとし、周期 12 時間の正弦曲線と与えた。その振幅は 0.52 m である。 $\gamma^2$  は内海各水域の潮差が現地と一致するよう定めた。この値は 0.0036 であった。潮流制御工を設ける明石海峡の幅は現況で 4 km、潮流制御後は東流に対し 1.6 km、西流に対し 0.9 km とした。

b) 計算結果および海水交換特性

瀬戸内海の潮位差の計算結果を図-7 に、海水交換特性を表-1 に示す。図-7 で黒丸は  $M_2$  分潮の振幅から求めた平均潮位差観測値<sup>3),4)</sup>で、白丸は現況の計算値で、大阪湾と宇和島付近を除いて観測値と計算値はほぼ一致している。現況の潮位差は釜灘付近で最大で約 2 m、明石海峡で最小で約 30 cm となっている。これより瀬戸内

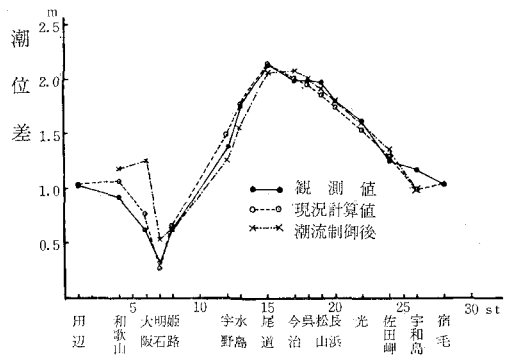


図-7 瀬戸内海 の 潮位差

表-1 瀬戸内海 の 海水交換特性

	数 理 シ ミ ュ レ ー シ ョ ン		昨 年 度 の 値		
	現 況	潮 流 制 御 後	現 況	潮 流 制 御 後	
水 面 積 $A$	$1.57 \times 10^{10} \text{ m}^2$	$1.57 \times 10^{10} \text{ m}^2$	$1.56 \times 10^{10} \text{ m}^2$	$1.56 \times 10^{10} \text{ m}^2$	
水 容 積 $V$	$4.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$	$4.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$	$4.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$	$4.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$	
平 均 潮 差	1.5 m	1.36 m	1.6 m		
年 間 交 流 量	$1.71 \times 10^{13} \text{ m}^3/\text{年}$	$1.56 \times 10^{13} \text{ m}^3/\text{年}$	$1.8 \times 10^{13} \text{ m}^3/\text{年}$		
年 間 交 換 量	$7.95 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$	$3.44 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{年}$	$7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$	$6.7 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{年}$	
交 換 率	0.47%	2.21%	0.4%		
明 石 海 峡	東 流 流 量	$3.16 \times 10^9 \text{ m}^3/12\text{hr}$	$1.95 \times 10^9 \text{ m}^3/12\text{hr}$		
	西 流 流 量	$3.05 \times 10^9 \text{ m}^3/12\text{hr}$	$1.47 \times 10^9 \text{ m}^3/12\text{hr}$		
	最 大 流 速	0.91 m/sec	2.02 m/sec	3.0 m/sec	
	通 水 断 面 積	$2.4 \times 10^5 \text{ m}^2$	$1.0 \times 10^5 \text{ m}^2$	$2 \times 10^5 \text{ m}^2$	$1.0 \times 10^5 \text{ m}^2$

注: \* 平均流量

海の断面平均流量は現況を再現していると考えてよいであろう。次に数値シミュレーションによって瀬戸内海の海水交換特性を検討してみる。まず年間交換量は現況で  $1.7 \times 10^{13} \text{ m}^3/\text{年}$ 、潮流制御後は  $1.56 \times 10^{13} \text{ m}^3/\text{年}$  で現況の約9割となる。年間交換量は現況で  $7.95 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$ 、潮流制御後で  $3.44 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{年}$  となり、この値は現況の約4.5倍である。また現況の交換量は宇野木<sup>2)</sup>が塩分拡散から求めた交換量  $7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$  とほぼ一致した。明石海峡における潮流制御後の流速は現況の約2倍となる。この値は実測値などに比べ少し小さめであるが、比率として考えれば実用上の重要な情報である。また潮流制御後の年間交換量は水理シミュレーションと昨年報告した値とでかなり異なる。これらの点は今後検討すべき問題点である。

c) 負荷の現状<sup>5),6)</sup>

47年度におけるリン、チッ素の瀬戸内海に対する全負荷量は環境庁の調査資料によればリン 15 ton/日、チッ素 270 ton/日である。一方瀬戸内海関係府県における下水道処理場における全チッ素量に対する無機チッ素量の処理前後の比はそれぞれ0.42, 0.38である。また都市下水中の蒸発残留物 500 ppm 中溶解性有機物は 64 ppm, 非溶解性有機物は 143 ppm となる。したがって、これらの値を用い溶解性チッ素比率を求めると図-8のようになる。さて瀬戸内海への負荷チッ素が図-8の比率で溶解性と非溶解性に分解するとすれば約60%が溶解し、47年度には 162 ton/日 の溶解性チッ素負荷があると見積ることができる。

d) チッ素濃度の変化

長期にわたる往復潮流成分によって内海域のチッ素は完全混合していると考えることができよう。この濃度の海水が潮流制御工による恒流成分によって外海水と交換

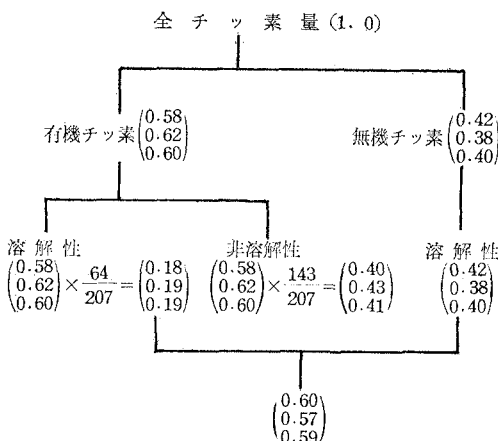


図-8 下水中の溶出チッ素比率

ここに( )内の数字は全チッ素量に対する比率を示し、上段は処理前の下水、中段は処理後の下水、下段は平均値である。

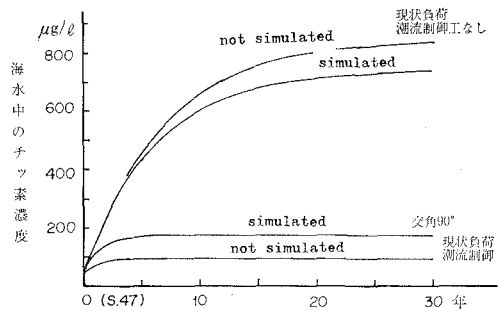


図-9 瀬戸内海のチッ素濃度変化予測

すると考える。この時、チッ素濃度  $C$  の時間変化は次式で与えられる<sup>5),6)</sup>。

$$C = \left( \frac{N}{q} + C_0 \right) - \left( \frac{N}{q} + C_0 - C_a \right) \exp\left(-\frac{q}{V}t\right) \quad (13)$$

ここに、 $N$ : 負荷量,  $C_a$ : 内海の初期濃度,  $C_0$ : 外海濃度,  $q$ : 海水交換量,  $V$ : 水容積,  $t$ : 時間

$N=162 \text{ t/日}$ ,  $C_a=49 \text{ µg/l}$ ,  $C_0=2.8 \text{ µg/l}$  とし、表-1の年間交換量、水容積を用いてチッ素濃度の時間的変化を計算すると図-9のようになる。この結果より瀬戸内海の汚染は溶解性チッ素に限っても現状のままでも10年後には昭和47年の濃度の約12~13倍、20年後には約14~16倍となり、進行過程にある。しかし交角90°の導流堤を設置した場合、瀬戸内海の汚染は現状の負荷に対して4年後に平衡状態に達し、その濃度は潮流制御しない場合の約1/8~1/4、現状の約2~3倍に押えることができる。

3. 可動扉による潮流制御

(1) 実験装置とその方法

実験は長さ 30 m, 幅 1.2 m, 深さ 0.5 m の流水水槽のほぼ中央部で行った。可動扉の作動力の実験は水路一端にヒンジで固定された、大きさ横 45 cm, 縦 35 cm, 横 70 cm, 縦 30 cm の2種類の片開き平板を用いて行った。測定は平板に作用する力と、その力につり合う開放角度および流速で、流速計はホートランジスター小型流速計を用いた。作用する力は分銅を用いて測定した。

欠口部の流量係数は水路の上下部に種々の開き高さ  $a$  をもつ固定平板の上下流水深、および開口部の流速を測定することによって求めた。

(2) 実験結果とその考察

緩流速下の平板に作用する力の評価は抗力係数  $C_D$  で行った。その結果を図-10に示す。この図で横軸はレイノルズ数で  $Re = vb \cos \theta / \nu$  で表わす(ここに、 $v$ : 平板上流側の断面平均流速,  $b$ : 可動平板の幅,  $\theta$ : 平板開放角度,  $\nu$ : 動粘性係数)。これより  $b$  と平板の高さ  $h$  の比  $b/h=1.29$  の場合は開放角度が大きくなると  $C_D$  は多少ばらつくがほぼ4である。一方  $b/h=2.33$  の場

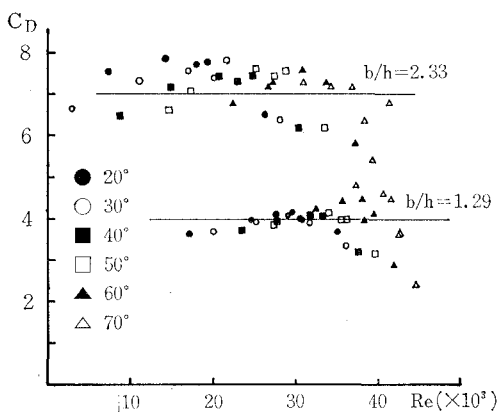


図-10 抗力係数  $C_D$

合は  $C_D=7$  程度であった。これらの  $C_D$  の値は従来の値より大きい。これは水路断面に対する平板の断面積の比が大きいためと考えられる。

次に欠口部の流量係数について検討してみる。流量係数は次式によって求めた。

$$C = \frac{Q}{a' \sqrt{2g\Delta h + v_1^2}} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $C$ : 流量係数、 $Q$ : 流量、 $a'$ : 通水断面積、 $v_1$ : 平板上流速、 $\Delta h$ : 平板の上下流水位差

その結果を図-11 に示す。これより平板の上下部開き高  $a$  と水深  $A$  との比  $a/A$  が大きくなると流量係数は大きくなり、実験では 0.7~1.0 の範囲であった。

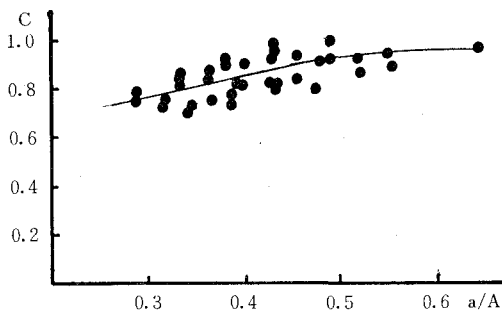


図-11 可動扉の流量係数

4. 結 言

本論文では内湾水と外海水との海水交換を促進し、内湾水の水質改善を図る工法として導流堤による潮流制御工および緩流速用の可動扉式潮流制御工を提案し、その

設計計算法を検討した。その結果導流堤潮流制御工の場合交角  $90^\circ$  が一番効果的で、流量係数の差が 0.4 程度であることがわかった。すなわち本工法で潮流制御を行った場合、順逆流の流量比率は約 2 : 1 にすることがわかった。さらにこの潮流制御工を明石海峡に施工した場合の瀬戸内海の交換量、恒流成分の変化を全体モデルとして検討する必要がある、今回は一次元数理モデルで検討した。また溶解性チッ素を指標として瀬戸内海のチッ素濃度の時間的変化を調べた。その結果現状のチッ素負荷でも内海の汚染は進行過程にあり、20年後には昭和47年の濃度の14~16倍となる。潮流制御後の交換量は現況の5~10倍に増加し、内海の汚染は現状の負荷に対して4年後には平衡状態に達し、潮流制御のない場合の1/8~1/4に押えることがわかった。そしてこの工法は海域の浄化を図るのに有効な手段であることが再認識された。

しかし海域における水質はその海域への負荷と拡散希釈のみでなく沈殿、生物化学的遷移によって定まる。それらの要因には未知の部分が多過ぎることである。今後はそれらの問題を一つ一つ解決し総合的な水質予測が必要である。

さらに緩流速用の潮流制御工として可動扉式の制御工を提案し、その設計に必要な作動力と欠口部の流量係数について検討した。しかし可動扉の作動力に関しては、実用化ということを考えてもっと大きいレイノルズ数についても実験する必要がある。この点は早い機会に解決したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・乃万俊文・萩野静也・吉沢 裕・浅沼譲二: 導流堤による潮流制御について, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 2) 速水頌一郎・宇野木早苗: 瀬戸内海における海水交流と物質の拡散, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970.
- 3) 中野猿人: 潮汐学, 古今書院, 1940.
- 4) 杉本隆成・樋口明生: 瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究(1)序報, 京都大学防災研究所年報第14号B, 1971.
- 5) 中村 充・乃万俊文・萩野静也・富田和夫: 瀬戸内海の水質予測と導流堤による水質改善工, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 6) 中村 充・萩野静也・乃万俊文: 導流堤による潮流制御工と瀬戸内海の水質改善, 海と空, 第50巻2~3合併号, 1975.