

浦の内湾湾口部における水温・塩分の変動と物質輸送特性

宗 景 志 浩*・木 村 晴 保**

1. はじめに

浦の内湾は土佐湾湾奥部に位置し、細長く複雑な地形を呈した陥没性内湾である(図-1)。深浦～大崎より湾口側は水深は4～6mと浅く、Sillを形成しており、湾幅も300～500mと狭い。そのため潮汐に伴う流況は、流速は速かつ乱れが強い。一方、光松から目ノ莖にかけて湾中央部の水深は18～20mと深く、潮流も微弱で海水交換が悪い。浦の内湾には常時流入するほどの河川はなく、豪雨時を除いて淡水供給量は少ない(木村ら, 1986; 宗景ら, 1988)。しかし、豪雨時には仁淀川(湾口部東方4km)から流出する淡水によって湾口部の水質は大きな影響を受ける。

湾口部の浅瀬にはアサリが高密度で棲息しており、湾中央部はハマチの養殖場として広く利用されている。しかし湾中央部では水質悪化が著しく、夏季には赤潮や貧酸素水塊が頻発し、ときには養魚のみならず天然魚介類にも被害の及ぶこともある。そのため、浦の内湾の環境悪化の実態とその機構の解明、並びに環境保全対策が重要な課題となっている。

ここでは、浦の内湾の水理特性を解明する目的で、湾口部で水温、塩分および潮位のほぼ一年にわたる連続観測を行い、それらの変動特性や物質輸送特性を解析し、

湾口部での海水交換率(潮汐交換率)と拡散係数の推算を行った。

2. 方 法

(1) 湾口部における物質輸送の推算法

湾口部で海水が十分混合されていて断面で一様で、潮汐による拡散が支配的と考えられる場合は、単位面積、単位時間に湾口部を通して湾内へ運ばれる物質量 $\bar{q}_e$ は次式で表わされる(例えば、日本水産資源保護協会, 1980)。

$$\bar{q}_e = \overline{u' C'} = Kx \frac{dc}{dx} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに u' は潮汐による往復流の流速で流入を正、 c' は湾口での物質の平均濃度からの偏差、 dc/dx は湾口部での湾内から湾外へ向けての物質濃度勾配、 Kx は乱流拡散係数である。往復流速 u' および Δt 時間の海水流入量 q_t は湾内での潮位 η と湾内水面積 S とで表わすと、

$$u' = \frac{S}{A_x} \frac{d\eta}{dt}, \quad q_t = S \int_0^{\Delta t} \left(\frac{d\eta}{dt} \right) dt$$

となる。ここに A_x は湾口部の断面積、 t は時間である。そこで式(1)は、

$$\bar{q}_e = \frac{S}{A_x \Delta t} \int_0^{\Delta t} \left(c' \frac{d\eta}{dt} \right) dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、湾口断面内での水塊が均質である場合は、 $\bar{q}_e$ は湾口部断面1点での物質濃度と潮位の連続観測から推算できる(木村ら, 1986)。

(2) 拡散係数と潮汐交換率

湾口部での連続観測値の干潮および満潮時の濃度を C_L 、 C_H とし湾口付近での平均流速を l とすると、濃度勾配は $dc/dx = (C_H - C_L)/2l$ となる。そこで、拡散係数 Kx は

次式となる。

$$Kx = \bar{q}_e / (dc/dx) = 2l \bar{q}_e / (C_H - C_L) \quad \dots\dots\dots (3)$$

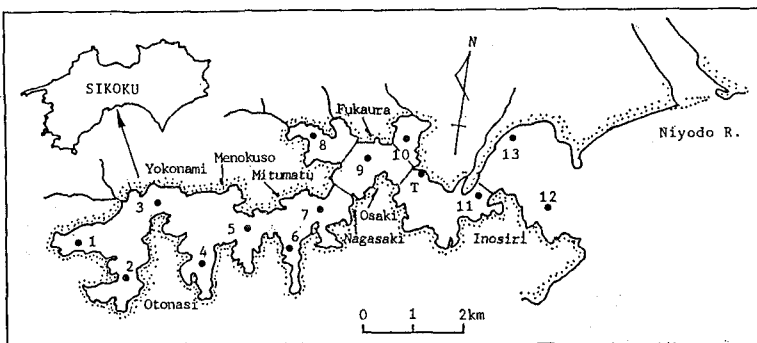


図-1 浦の内湾の地形と観測点

* 正会員 農博 高知大学助教授農学部栽培漁業学科

** 正会員 農博 高知大学教授農学部栽培漁業学科

また、 Δt 時間に潮汐によって流入した海水量 q_t に対し湾内に流入した正味の湾外水量の比を潮汐交換率 r とすると、 r は次式となる。

$$r = S \int_0^{\Delta t} \left(c' \frac{d\eta}{dt} \right) dt / (C_o - C_I) q_t \dots\dots (4)$$

ここに、 C_I 、 C_o は湾内外の物質濃度である。連続観測による干潮および満潮時の値 (C_L 、 C_H) を湾内外の濃度とし、その濃度差 ($C_H - C_L$) を ($C_o - C_I$) と等しいと見なすと、拡散係数 K_x と潮汐交換率 r には次の関係がある。

$$K_x = 2lrq_t / \Delta t A_x \dots\dots (5)$$

従って、湾口付近での倍流程 $2l$ と断面積 A_x を与えると、拡散係数 K_x は潮汐交換率 r から容易に導かれる。

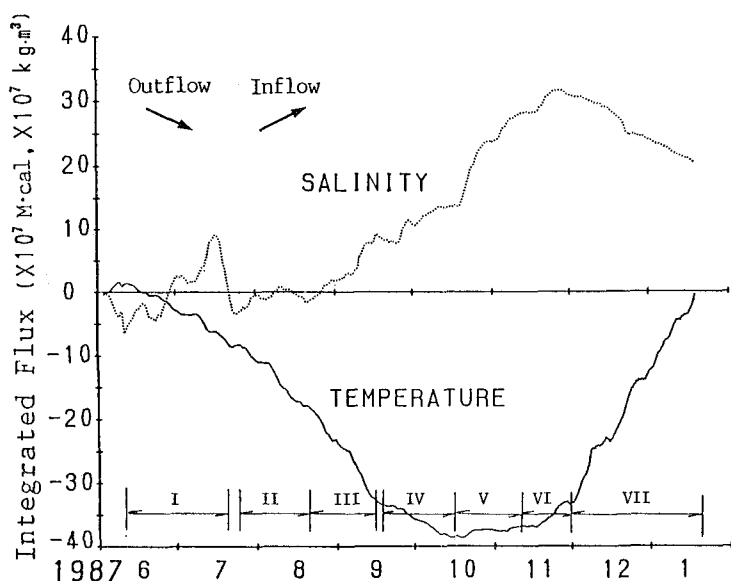


図-3 水温および塩分の積算輸送量

(3) 観測内容

図-1 に示す湾口部 St. 11 の海面下 4m (底上 1m) で水温および電気伝導度を計測した。また、ST. T では、水圧式潮位計を用いて湾内潮位を観測した。水温および電気伝導度は10分間隔、潮位は5分間隔でデジタル記録した。観測は、1987年6月から1988年5月まで行った。また、これと並行して St. 1~13 では水温、塩分、溶存酸素 (DO) などの定期観測を2~4週間間隔で行った。

3. 観測結果

(1) 湾口部における水温、塩分の変動特性

図-2 には連続観測から得られた水温および塩分の記録 (実線) の一部を潮位変化 (ドット) と重ねて表示した。また、図-3 には水温、塩分および潮位の連続観測値から推算した熱と塩分の湾内への輸送量の積算値を季節変化で示した。物質輸送量はこれらの変化量で表わされる。積算輸送量の変化を考慮しながら水温、塩分の変動の型を分類すると、次の4つのタイプが見られる。

Type-(A) : このタイプの変動は、水温、塩分とも上げ潮時に低下し、下げ潮時に上昇するもので、豪雨時に仁淀川から流出する淡水により低塩分・低水温となった湾外水が上げ潮とともに侵入してくる場合に生じる。このタイプは、周年を通して5~6回しか見られない。また、継続期間は、通常1~2日程度で、図に示すように5日も続く場合は稀である。しかし輸送量から見ると、この短い期間に塩分が大量に湾外へ持ち出されている。一方、河川水と海水の水温には塩分ほどの差はないから熱量の輸送に大きな変動は生じない。

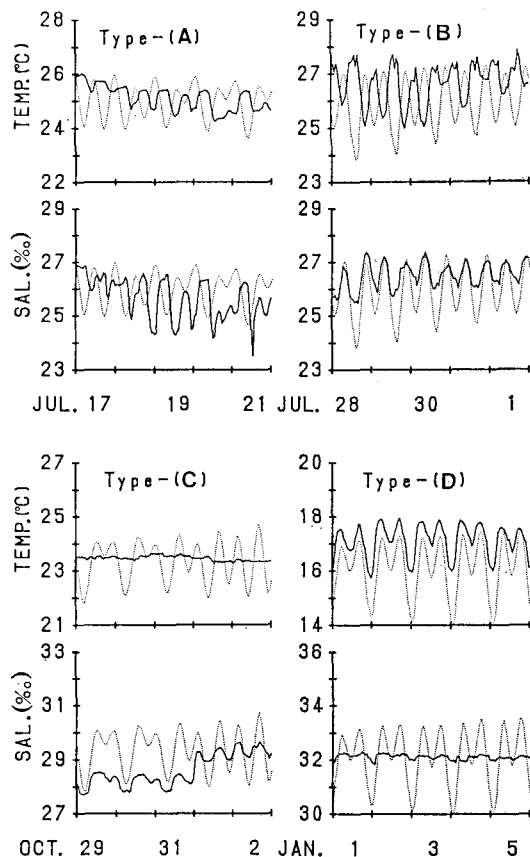


図-2 水温、塩分の変動タイプ

Type-(B) : 夏季, 海洋は水温, 塩分とも成層が著しいが, 湾内水と湾外水の接する沿岸域では, いずれも強い水平勾配を伴っている. すなわち水温は湾内が高く, 塩分は豪雨時を除いて湾外が高い. そのため, 上げ潮時に水温は低下し, 塩分は逆に上昇する. 夏季にはこのタイプの変動が長く続き, 潮汐による水温, 塩分の輸送も比較的活発に行なわれる.

Type-(C) : 9月になると湾内水温が徐々に低下し始め, 9月下旬から11月にかけて湾内外の水温はほぼ一樣になり, かなり長期にわたって水温変動は見られない.

そのため熱の輸送はほとんどない. 一方, 塩分は, タイプ(B)と同じように上げ潮時に上昇し下げ潮時に低下するもので, 塩分輸送量も大きい. しかし, 降水量の減少にともなって湾内外の塩分差が小さくなっていくため, 変動は徐々に弱まる. そして, 日潮不等が大きい時には半日周期の塩分変動はほとんど見られなくなる.

Type-(D) : このタイプは冬季の鉛直混合期に見られる変動で, 水温は, 上げ潮時に上昇し下げ潮時に低下する. これは, 冬季の冷却によって湾内水温が著しく低下するの比べ, 湾外水温がそれほど低下しないことによ

る. そして, タイプ(B)とは逆に湾外から湾内へ熱が大量に持ち込まれる. 一方, 湾内外の塩分差が減少するため, 塩分変動はほとんど見られなくなる. しかし, 塩分輸送量では, むしろ湾内から湾外へ持ち出されている. この塩分の輸送は11月中旬から春3月まで安定して持続していた.

(2) 湾内外の水温とその差

図-4 には St. 11 における連続観測から求めた満潮(鎖線)および干潮時(実線)の水温を, 図-6(a) にはその差($T_H - T_L$)を示した. さらに図-4 には, 定期観測で得た St. 12 (点線) および St. 9 (実線) の平均水温をプロットした. St. 9 での水温は湾内全域での平均水温にはほぼ等しかった.

干潮および満潮時の水温は, 9月下旬から11月中旬まではほぼ等しく, 水温の水平的な一様化が窺われるが, 6月から9月中旬の期間および12月以後の冷却期には水平的な分布(水温差)が見られる. また, 干潮時の水温には12月頃から短周期の激しい変動が見られる. これは水平的な水温差が大きいため大潮時の日潮不等に起因するものと考えられる.

干潮時の水温(実線)と St. 9 の平均水温を比較すると, これらはほぼ一致している. さらに, 平均潮差 1m による St. 9 以奥の海水増加量は St. 9, St. 10, St. 11 を支配領域(図-1の実線で区分した領域)とする体積の海水量にほ

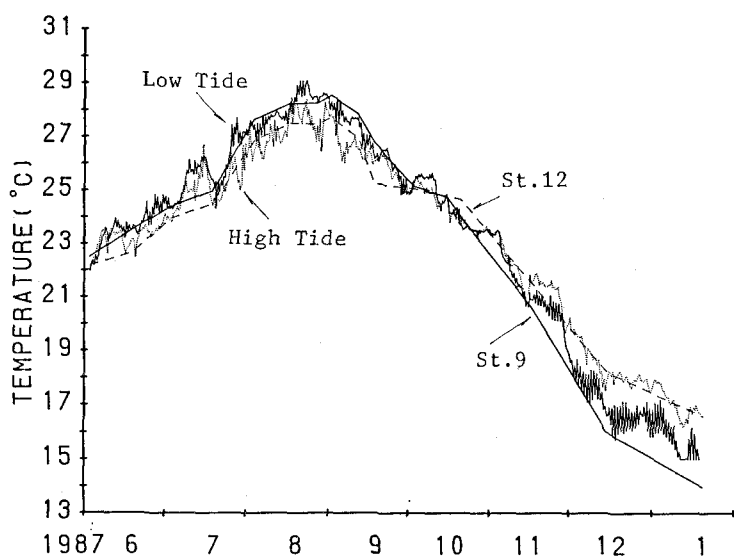


図-4 満潮および干潮時の水温

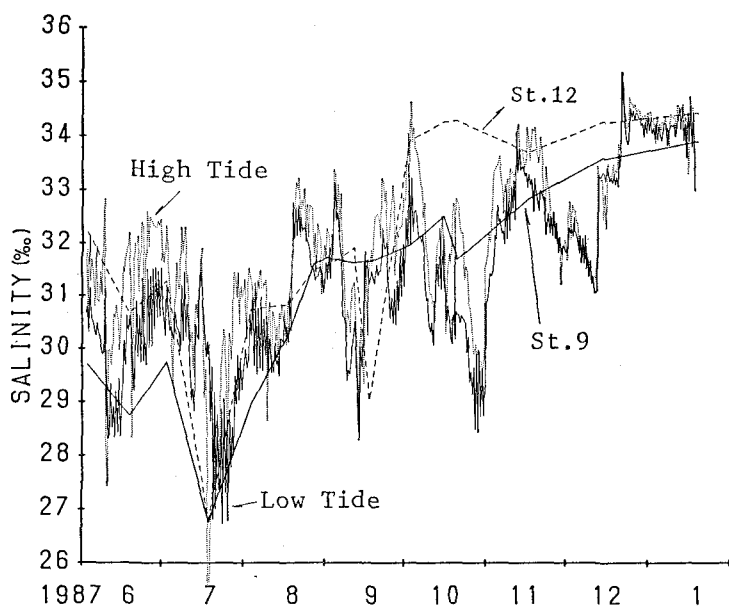


図-5 満潮および干潮時の塩分

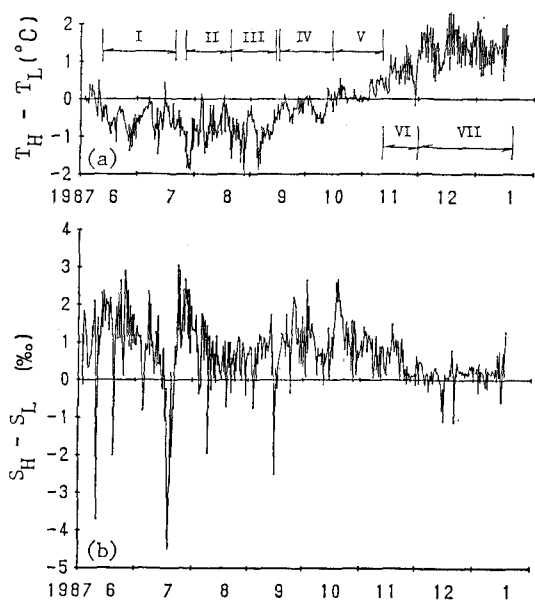


図-6 湾内外の水温差 (a) および塩分差 (b)

ほ等しい。これより、St. 9 は St. 11 から見てほぼ流程距離にあると言える。一方、満潮時の水温（ドット）と St. 12 の平均水温も、周年にわたって比較的良好一致する。従って、St. 12 も St. 9 と同じく St. 11 から見てほぼ流程距離にあると言える。これらの関係は上森ら（1965）のフロート観測による流程とも類似していた。それゆえ、連続観測から求めた満潮時および干潮時の値は、いずれも湾口（St. 11）から流程距離だけ離れた点での平均水温に等しい。そこで、これらを湾外および湾内水温と見なす。その差の季節変化（図-6（a））は比較的安定で、6月から10月中旬までは湾外の水温が湾内よりやや低く、9月下旬から11月中旬まではほぼ等しい。また、それ以後は逆に湾内水温が湾外より低いと言える。

(3) 湾内外の塩分とその差

図-5 には連続観測から求めた満潮および干潮時の塩分を、図-6(b) にはその差 ($S_H - S_L$) の季節変化を示した。

塩分は7月中旬の豪雨時に最も低下し、冬季1月頃に最も上昇する。水温に比較し、塩分は短周期の変動が非常に激しい。図-6(b) によれば、通常は湾外塩分（満潮時の塩分）が湾内（干潮時の塩分）より高いが、例えば6月中旬、7月中旬、9月中旬、10月下旬、12月初旬は湾外の方が低くなっている。いずれも、湾口部近く（東方4 km）の仁淀川から流出する淡水の影響を強く受けた結果である。降雨による塩分低下は僅か2～3日で4～5‰に及ぶ。しかし、その後の回復もすみやかで、降雨期には10日間程度、8月以後になると2～4日程度で降雨直前の濃度に回復してしまう。

4. 推算結果

(1) 潮汐による物質輸送量の季節変化

図-4 および 図-6（a）によれば、6月から10月中旬までは湾内水温が湾外より高く、それ以後は逆に湾外が高い。図-3 に示す熱の積算輸送量の季節変化を見ると、前者の期間は熱は湾外へ運ばれ、後者の期間は湾外から湾内へ運ばれる。水温は年変動に比較して短期的な変動が小さいため、熱の輸送は長期にわたって単調な変動傾向を示す。

一方、塩分の積算輸送量は6月から7月までは降雨の影響で流入を繰り返すが、9月初めから11月末までは安定した流入が続き、湾内は高塩分となる。図-6(b) に示す湾内外の塩分差が負値、すなわち湾外が低塩分となる6月10、21日、7月6、20日、8月20日、9月10日、12月15日頃には塩分の積算輸送量に流出成分が認められる。とくに降雨量の多かった7月20日頃は、塩分と潮位との位相差や湾内外での塩分差が大きく、持ち出される塩分量も多い。また、12月以後は蒸発の影響も加わって湾内がさらに高塩分化し、塩分は再び湾外へ輸送される。

表-1 水温から求めた潮汐交換率 r と拡散係数 K_x

期間(Δt) (hour)	日 付	$S \int_0^{\Delta t} (C \cdot \frac{d\eta}{dt}) dt$ $\times 10^6 M \cdot cal$	qt $\times 10^6 m^3$	$T_H - T_L$ $^{\circ}C$	r	K_x $\times 10^6 cm^2/s$
I (960)	6月10日～7月20日	-100	800	-0.6	0.21	2.57
II (624)	7月25日～8月20日	-100	520	-0.7	0.28	3.39
III (624)	8月20日～9月15日	-150	520	-0.9	0.32	3.96
IV (672)	9月17日～10月15日	-60	360	-0.5	0.33	2.65
V (624)	10月15日～11月10日	14	520	0.15	0.18	2.22
VI (456)	11月11日～11月30日	38	380	0.7	0.14	1.76
VII (1176)	12月1日～1月19日	315	1000	1.5	0.21	2.65

St. 11 付近の断面積: $A_x = 747.5 m^2$
湾口部での倍流程距離: $2\ell = 4000 m$

(2) 拡散係数と潮汐交換率

熱の積算輸送量(図-4)の変化の傾向が一樣(輸送量が一定)で、湾内外の水温差(図-6(a))に余り大きな変化のない期間ごとに拡散係数および潮汐交換率を求め、結果を表-1 および 図-7 に示した。湾口断面積は 747.5 m^2 、倍流程を 4000 m (St. 12~St. 9)とした。

拡散係数は $2 \sim 4 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度となった。6~7月の降雨期は若干小さく、8月中旬から10月にかけてやや大きいようである。一層ボックスモデルから求めた湾口部での水平拡散係数は $1.3 \sim 5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ (高知県水産試験場, 1987) で、これらはほぼ等しい。また、倍流程距離 $L=4000 \text{ m}$ を使って見積った海洋での水平拡散係数 ($K=0.01 \text{ L}^{1/3}=2.9 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) よりかなり大きく、湾口部は潮汐による拡散がきわめて活発であると考えられる。

潮汐交換率 r は降雨期の6~7月の期間で0.2と小さく、8~10月の成層期に0.33と大きく、鉛直混合期の11月~1月には0.1~0.2程度に再び低下した。定期観測による湾内外の塩分濃度を用いて、一層モデル(図-7の●印)(高知県水産試験場, 1988)や二層モデル(宗景ら, 1988)から推算した潮汐交換率に比較すると、ここで求めた値はやや大きい。しかし、季節変化の傾向はよく一致しており、成層期の潮汐交換率は鉛直混合期に比較してかなり良いと言える。

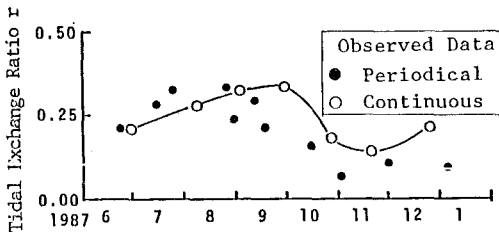


図-7 潮汐交換率

5. 結 論

浦の内湾湾口部で水温、塩分および潮位のほぼ一年にわたる連続観測を行い、それらの変動特性や物質輸送特

性を解析し、以下の結果を得た。

(1) 連続観測による水温と塩分の変動には、湾内外の濃度差によって、潮位と①位相差のある、②位相差のない、③変動しない場合が見られる。これらの組み合わせで年間には4タイプがある。豪雨期には塩分変動が潮位と逆位相、つまり低塩分水が湾外から湾内に流入する場合も見られる。

(2) 潮汐による熱輸送量の季節変化は安定しており、熱量は夏季湾外へ持ち出され、冬季湾内へ持ち込まれる。一方、塩分の輸送は降雨による短期的な変動が大きい。9月~11月には安定して流入し、12月以降は蒸発に伴う湾内水の高塩分化によって流出する。

(3) 豪雨時を除いて、湾口部(St. 11)での連続観測による満潮時の水温、塩分は定期観測による湾外 St. 12 (C_0) の、干潮時のそれは湾内 St. 9 の平均値にほぼ一致していた。また、St. 12 と St. 9 の距離はほぼ倍流程 $2l$ であり、St. 9 の平均濃度は湾内全域の体積平均濃度 (C_l) に近かった。これらの条件から、拡散係数、潮汐交換率を推算した。

(4) 湾口部は、豪雨時を除いて潮汐(拡散)による物質輸送が主体で拡散係数は $2 \sim 4 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であった。

(5) 潮汐交換率は6~7月の期間で0.21、8~10月の期間で0.33とやや大きく、11~1月は0.1~0.20程度であった。

参 考 文 献

- 上森千秋 (1965): 昭和39年度浦の内湾総合開発調査報告書, pp. 39-114.
- 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳 (1986): 塩分・水温を指標としたボックスモデルによる浦の内湾のDO負荷量の推算, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 621-625.
- 高知県水産試験場 (1987): 昭和61年度赤潮対策技術開発試験報告書, 105 p.
- 高知県水産試験場 (1988): 昭和62年度赤潮対策技術開発試験報告書, 146 p.
- 日本水産資源保護協会編 (1980): 水質汚濁調査指針, 恒星社厚生閣, pp. 64-132.
- 宗景志浩・木村晴保 (1988): 二層ボックスモデルによる浦の内湾の海水交換とDO負荷量について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 827-831.