

海水交換における水平・鉛直循環流の効果

村 上 和 男*

1. はじめに

閉鎖性の内湾域の水質は汚染されていることが多い。これには種々の原因が考えられる。例えば、閉鎖性の海域は波が静穏なので、非常に多くの目的に利用されており、それに伴う汚濁負荷が多いことがあげられる。また、湾口部が狭いために湾内水と外海水との交換が小さいことも、その主な原因の一つと考えられる。

我国の海岸線は、台風による高潮や津波の被害が数多く記録されている。このような災害から守るための湾口防波堤の設置は非常に有効な手段ではあるが、防波堤に囲まれた海域は閉鎖性となるために、外海との交換が悪くなり湾内の水質汚染の原因となることが懸念されている。しかし、このような現象を水理模型実験や数値シミュレーションで検討する場合、必ずしも湾口が狭い方が海水交換が悪くなるという結果は得られず、逆に海水交換が良くなるという研究例も報告されている(中野ら, 1982)。しかし大船渡湾においても報告されているように(岩手県, 1988)、実際の水質は汚染されている場合が多く、またこれが一般的な通念ともなっている。

このように、湾口に設置された構造物の海水交換に及ぼす影響を考慮するに際して、相反する結果がなぜ得られるかといった観点から、何が湾内水の海水交換に寄与し、何が海水交換を抑制するかという閉鎖性水域の海水交換のメカニズムについて検討した。

2. 海水交換のメカニズム

内湾水と外海水との海水交換は湾口を通して行われる。海水交換に関する研究で先駆的なものとしてParkerら(1972)の研究がある。彼らの研究は、湾口から出て行った汚染された水塊が、きれいな水塊とどれだけ交換して戻ってくるかという考え方である。また、他の海水交換に関する概念としては、Bolinら(1973)の平均滞留時間という考え方がある。これは、湾内に流入した水塊が湾外に出ていくに要する時間(滞留時間)の期待値(平均値)を示したものである。

このような海水交換のメカニズムは、基本的には流れによって運ばれたものが乱れによって混合・希釈され、それがまた流れによって運ばれるという機構で説明される。このような物質の輸送機構をFischer(1972)は流れをいくつかの成分に分割し、各々の成分の海水交換に及ぼす寄与を見積もり、水平循環流と鉛直循環流の輸送機構に及ぼす重要性を指摘している。

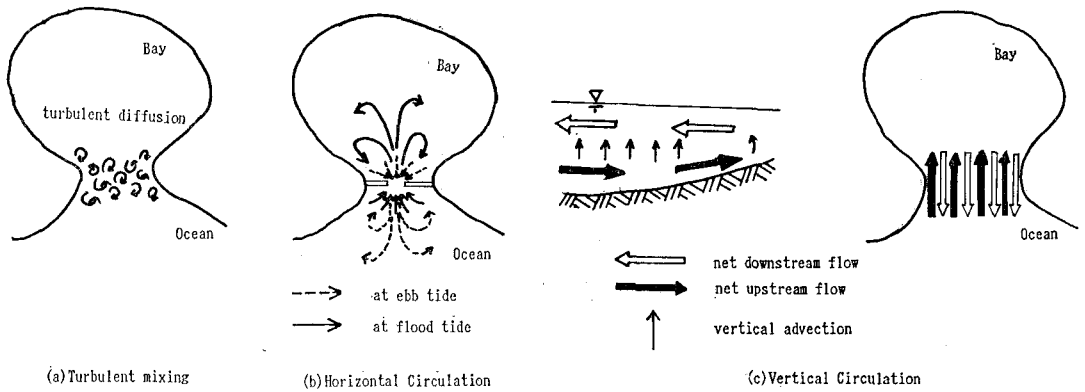
海水交換現象は物質の輸送と混合過程によって行われる。これらの海水交換のメカニズムを模式的に示すと図一1のようになる(Murakami, 1988)。

(a)は乱流拡散による交換で、拡散・混合の基本的なメカニズムの一つである。

(b)は水平循環流による交換で、一般には湾内の恒流による輸送と呼ばれるものである。この水平循環流の生成要因としては、潮汐残差流、吹送流、海流等の影響が考えられる。潮汐残差流は、潮流の非線形性に基づくもので、半島の背後あるいは構造物の背後に形成されるサーキュレーションがその主因であり、地形性要因によるものである。したがって、防波堤等の構造物の海水交換に及ぼす影響を調べる際には防波堤背後に形成される潮汐残差流が最も重要となる。また著者らは、この水平循環流を人為的に発生させて海水交換を促進させるような試みの模型実験(村上ら, 1986)を行っている。

(c)は鉛直循環流による交換である。鉛直循環流は、一般に密度流によるものが最も大きく、上層にある軽い流体が流出し、下層の重い流体が流入するという現象によって生じる。感潮河川における塩水くさびがその典型的な例である。このような現象は、内湾域における夏期の温度躍層、あるいは比較的大きな淡水流入があるような所で生じている。また、風による吹送流も表層では風下に流れ、その補償流としての底層流との間で鉛直循環流が発生する。この鉛直循環流の海水交換に及ぼす影響もかなり大きいものと考えられる。開口部に設置された防波堤の鉛直循環流に与える影響は、鉛直循環流を平面的にみると、その流れが防波堤によって遮られるものと思われる。

* 正会員 工務 運輸省港湾技術研究所海洋水理部



図—1 海水交換のメカニズム (a): 乱流拡散, (b): 水平循環流,
(c): 鉛直循環流 (左: 断面図, 右: 平面図)

3. 水理模型実験による検討

3.1 実験方法と実験条件

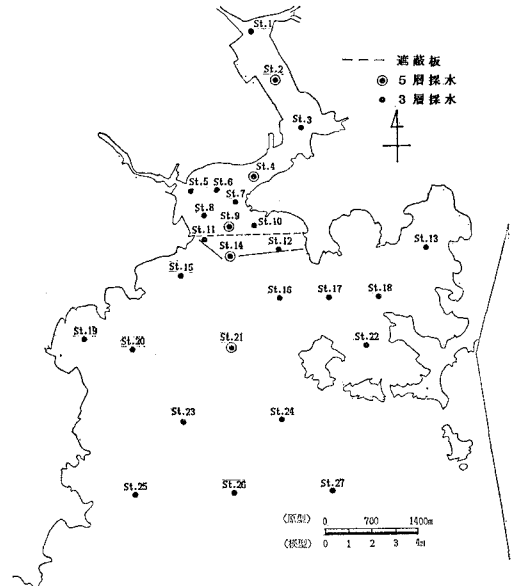
水平循環流と鉛直循環流の海水交換に及ぼす影響について、水理模型実験による検討を行った。実験は須崎湾の水理模型を用いて行った。水理模型の概観図を図—2に示す。水理模型による海水交換実験の手順は、著者らが以前から行っている方法(堀江ら, 1977)と同様である。まず模型内に水道水あるいは久里浜湾の海水を導入して、所定の水位に設定する。そして遮蔽板を所定の位置に設置して、湾内水と外海水とを分離する。遮蔽板の位置は図—2に点線で示す。次に湾内水側に染料(ウラン)を投入して、均一濃度になるまで攪拌する。密度差を考慮する場合は、染料を投入するとともに湾内水の海水の一部を淡水と交換して、湾内水の塩分濃度が外海水の塩分濃度よりも0.5‰小さくなるように設定した。

海水交換の実験は、湾内水の染料及び塩分濃度が均一になるように攪拌後、湾内水が静まった段階で遮蔽板を取り除くと同時に模型内に潮汐を発生させて実験を開始する。実験開始後、湾内及び湾外での採水を行い蛍光光度計による染料濃度の測定を行った。採水点の位置を図—2に示す。なお、図中の白丸は5層からの採水を、また黒丸は3層からの採水を行った事を示す。

表—1に示すのは今回行った4つの実験条件である。ここでは、海水交換現象に及ぼす密度流の影響、及び湾口部に設置された防波堤の影響について考察した。実験潮汐は、須崎港の潮汐の調和定数から大潮期の平均として M_2 と S_2 潮の和(現地スケールで74.6cm, 模型スケールで1.07cm)を振幅として正弦曲線を与えた。

3.2 水理模型実験結果

各実験ケースに対して、まず潮位と潮流の測定を実施した。潮位に関しては、どの実験ケースに対しても振幅及び位相はほとんど同じであった。このことは、湾口防



図—2 須崎湾の水理模型(遮蔽板と採水点の位置)

表—1 実験条件(実験ケース)

実験ケース	密度条件	地形条件
Case-1	密度差無し	防波堤無し
Case-2	密度差無し	防波堤有り
Case-3	密度差有り	防波堤無し
Case-4	密度差有り	防波堤有り

波堤あるいは密度差の存在が潮汐のような周期の長い波動に対しては、その振幅にほとんど影響のないことを示している。すなわち、潮汐の干満によって湾内に入り出す水の容積(交流量)は、防波堤が設置されても変わらないことを示している。

潮流に関しては、湾全体の流況をフロートの流跡により、また湾口部については超音波流速計を用いて測定した。その結果を、密度差を考慮しない場合についての防波堤無しのケースを 図-3 に、防波堤有りのケースを 図-4 に示す。また、防波堤開口部の位置での最大流速の結果を表-2 に示す。湾口部に防波堤を設置することにより、開口部の流速が早くなり、防波堤の背後に循環流が形成される様子がわかる。

図-5 に示すのは、密度差を考慮しない場合の海水交換実験における湾内部の染料の平均濃度の経時変化である。また、図-6 には密度差を考慮した場合の結果を示す。密度差を考慮しない場合においては、防波堤を設置したケースの方が湾内の濃度の減少速度が早く、海水交換率が大きいことを示している。このことは、湾内への潮汐による交流量が防波堤によって変化しないことから判断して、防波堤開口部で増速された流れがその背後に水平循環流を形成し、海水交換を促進させたものと考えられる。これに対して、密度差を考慮した場合には、密度差を考慮しない場合に比べて海水交換率が小さいこと、および防波堤を設置した場合の方が海水交換率が小さいことがわかる。この結果から、密度流によって誘起される鉛直循環流は、海水交換を促進させる働きを持つが、湾口部に設置された防波堤の存在は、この鉛直循環流の効果を抑制する働きを持つことがわかる。

このように湾口部に設置された防波堤の海水交換に及ぼす影響は、防波堤の背後にできた水平循環流により海水交換を促進させるという効果を持つ反面、湾口部の面積を減少させることから、鉛直循環流による海水交換の効果を抑制するという相反する効果を持つことがわかる。

4. 実験結果の考察

湾口部に設置された防波堤の海水交換に及ぼす影響が、密度差を考慮した場合としない場合とでは異なった効果を持つことが実験によって示された。この相反する結果の説明を、図-1 に示した海水交換のメカニズムを使って行うことを試みた。今ここで3. でのべた海水交換の実験結果を、以下のように仮定した。まず、密度差を考慮しない場合で防波堤がない場合を (a) の乱流拡散のみによる交換と仮定し、湾口防波堤がある場合には (a) の他に (b) の水平循環流による交換が重なるものと仮定した。さらに密度流を考慮した場合には、これらに (c) の鉛直循環流による交換が重なるものと仮定した。またここで、(b) の交換は湾口部の断面積には関係なく一定としたが、(a) と (c) の交換は湾口断面積に比例すると仮定した。

以上の仮定より、各々の実験ケースでの交換量は、

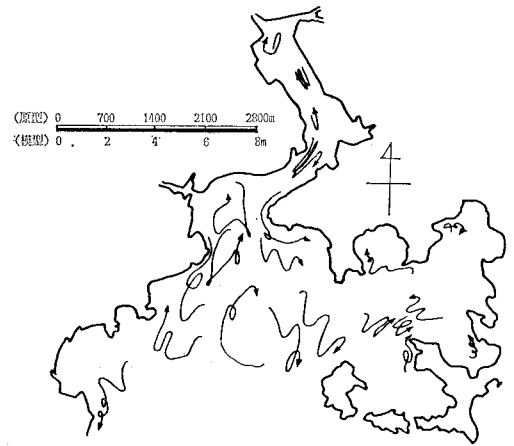


図-3 潮流実験結果(Case-1: 密度差無し, 防波堤無し)

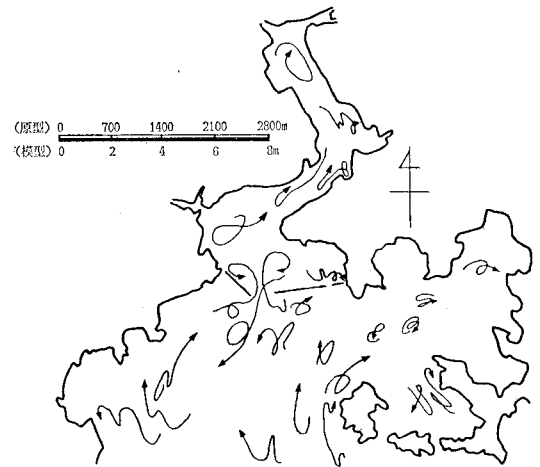


図-4 潮流実験結果(Case-2: 密度差無し, 防波堤有り)

表-2 防波堤開口部の位置での最大流速

実験ケース	密度差	防波堤	上げ潮	下げ潮
Case-1	無し	無し	1.6cm/s	0.8cm/s
Case-2	無し	有り	10.5	8.9
Case-3	有り	無し	2.9	2.8
Case-4	有り	有り	6.0	13.8

$$\text{Case-1: } q_1 = \alpha \cdot Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Case-2: } q_2 = (\alpha \cdot s' / S + \beta) \cdot Q \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Case-3: } q_3 = (\alpha + \gamma) \cdot Q \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Case-4: } q_4 = (\alpha \cdot s' / S + \beta + \gamma \cdot s' / S) \cdot Q \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 α は (a) による交換率、 β は (b) による交換率、 γ は (c) による交換率、 Q は交流量、 s' は防波堤開口部の断面積、 S は防波堤がない場合の湾口部の断面積である ($s'/S \div 0.30$)。いま、図-5, 6 に示される湾内の染料の平均濃度の低減曲線を、Bolin ら (1973)

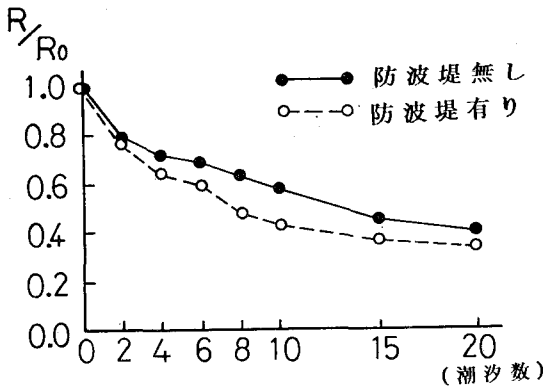


図-5 湾内の染料平均濃度の変化(密度差無し)

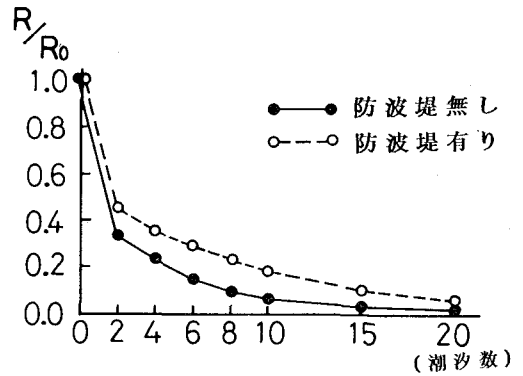


図-6 湾内の染料平均濃度の変化(密度差有り)

表-3 式(6)のA, Bの値及び平均滞留時間

実験ケース	密度差	防波堤	A	B	τ (日)
Case-1	無し	無し	0.143	0.63	15.3
Case-2	無し	有り	0.201	0.57	13.2
Case-3	有り	無し	0.688	0.58	1.3
Case-4	有り	有り	0.432	0.62	2.7

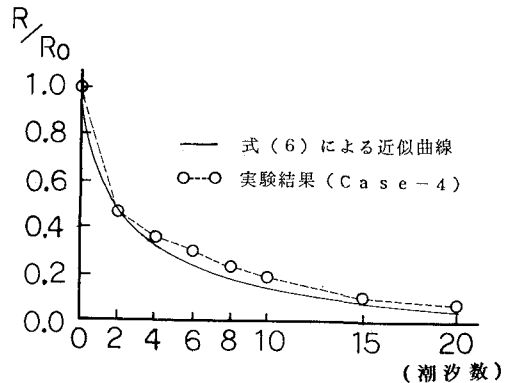


図-7 平均濃度の低減曲線の実験値との比較(Case-4)

の平均滞留時間の概念を用いて表す。平均滞留時間は、

$$\tau_r = \frac{1}{R_0} \int_0^{\infty} t \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] dt = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad \dots\dots (5)$$

で定義される。ここに、 τ_r は平均滞留時間、 R_0 は $t=0$ における湾内の物質質量、 $R(t)$ は時刻 t において湾内に残存している物質質量である。 $r(t)$ は $R(t)/R_0$ で定義される残余関数である。ここで、実験結果から示される残余関数 $r(t)$ を、後で海水交換率と湾内の平均濃度の低減曲線との関連で示すように、

$$r(t) = \exp\{-A \cdot t_d^B\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で近似するものとする。ここに、 t_d は潮汐数、 A 、 B は定数である。その結果を表-3に示す。この結果から1潮汐目での濃度低減率を交換率とした場合に、その交換率を式(1)~(3)に代入すると、 $\alpha=19.9\%$ 、 $\beta=19.8\%$ 、 $\gamma=44.3\%$ が得られる。これらの値を式(4)に代入すると、ケース4の交換率は39.1%という値が得られる。この値は、図-6の低減曲線から得られる交換率43.6%とかなり近い値である。また、 α 、 β 、 γ の値を代入して得られた交換率、および平均的な B の値($=0.60$)を式(6)に代入して求めた湾内の平均濃度の低減曲線とケース4の実験結果との比較を図-7に示す。ほぼ実験結果に近い低減曲線が得られたものと考えられる。

以上の考察から、今回の水理模型実験で得られた結果から非常に大胆な仮定をして、密度流を考慮した場合と考慮しない場合の湾口防波堤の海水交換に及ぼす影響の相反する効果に対する海水交換のメカニズムからの説明が可能となった。なお今回行った実験は、密度分布の設定等に現実とは大きな隔たりがあり、余り定量的なことはいえないが、鉛直循環流が存在する場合の防波堤の海水交換に及ぼす影響としては、定性的には説明できるものと考えられる。

次に、海水交換率と湾内の平均濃度の低減曲線との関連について考察する。いま1潮汐間に湾内の海水の $m_1\%$

のものが外海水と交換するものとし、それが再び湾内に戻ることがないとすると、湾内に残存する物質質量 V は、

$$\frac{V(t_d)}{V_0} = (1-m_1)^{t_d} = r(t_d) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。これは、 $A = -\log(1-m_1)$ で書き直せば、

$$r(t_d) = \exp\{-A \cdot t_d^B\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

と表せる。これは、 $B=1$ に相当する。しかし、表-3の結果からもわかるようにどのケースに対しても $B < 1$ であり、式(8)とは異なっている。これは、一度湾外に出たものが再び湾内に戻るためである。そこで、湾内と湾外の交換率を図-8に示すように仮定する。ここに m_1 は湾内の交換率、 n_1 は湾外にあるもののうち、次の上げ潮時に湾内に戻る割合、 l_1 は湾外の物質のうち、系外(再び湾内には戻らない)に出ていく割合とする、こ

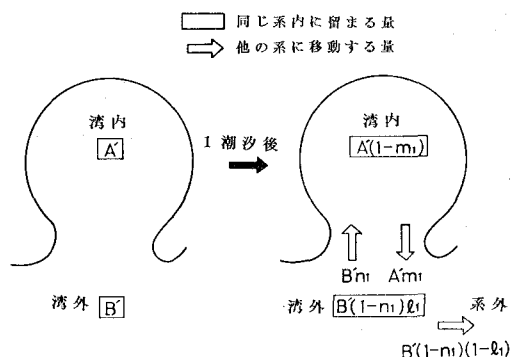


図-8 湾内と湾外のプロック毎の交換率

れは、海流等の湾外の流況が海水交換に及ぼす影響を考慮したものである。この現象は今回の実験では考慮していないが、重要な要因の一つである。これらを式で表すと、

$$\left. \begin{aligned} V_{in} (\text{湾内}) &= A'(1-m_1) + B'n_1 \\ V_{out} (\text{湾外}) &= A'm_1 + B'(1-n_1)l_1 \\ V_{OFF} (\text{系外}) &= B'(1-n_1)(1-l_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

となる。ここにおいて、ある時刻の湾内の物質量を A' 、湾外の物質量を B' 、1 潮汐後の湾内の物質量を V_{in} 、湾外の物質量を V_{out} 、および系外に出て行った物質量を V_{OFF} とする。図-9 に、 l_1 、 m_1 、 n_1 を変化させた場合の湾内濃度の低減曲線の感度解析の結果を示す。湾内濃度の減少に対して、 m_1 、 n_1 の値は初期にその影響が強くなるが、 l_1 の値は時間が経つにつれてその影響が出てくる傾向にある。以上の考察から、閉鎖域の海水交換を論じる際には、内湾域の海水交換率も重要であるが、外海域の流況特性も考慮する必要性を示している。

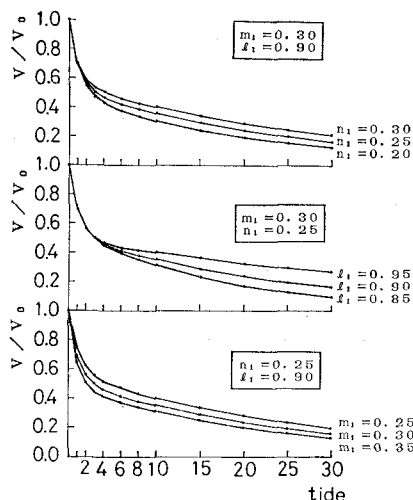
5. ま と め

密度流を考慮した場合としない場合の海水交換の水利模型実験により、以下のことが明らかになった。

(1) 湾口防波堤の海水交換に及ぼす影響は、防波堤の開口部で流れが増速され、それが水平循環流を誘起して海水交換を促進させる働きを持つ反面、鉛直循環流に関しては、湾口断面積の減少により抑制の方向に働く。

(2) 海水交換のメカニズムを3つのタイプに分類し、乱流拡散と鉛直循環流の効果を湾口部の断面積に比例させ、水平循環流は断面積に関係なく一定と仮定すると、図-5、6 の防波堤の海水交換への相反する効果の説明が可能となる。

(3) 湾口防波堤のような構造物が海水交換に及ぼす

図-9 l_1 、 m_1 、 n_1 の湾内濃度への感度解析

影響は、水平循環流と鉛直循環流では相反する効果を持つので、単なる地形条件のみならず対象海域の流れの構造を考慮して判断すべきである。また、湾外の流れも海水交換には影響する。

なお今後の問題としては、今回の実験は実験条件の設定の困難さから、非常に大胆な仮定の下での実験を行っており現実のものを説明しているものとはいえない。また、外洋の流れの影響も無視している。これらの点に関しては、今後数値計算手法を通して検討してゆく所存である。

参 考 文 献

- 岩手県環境公害課 (1988): 大船渡湾をきれいに一大船渡湾の水質を考える—
- 中野拓治・岩上淳一・溝内俊一・入尾野幸雄 (1982): 名瀬湾における潮流実験—防波堤計画の比較検討—, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 629-632.
- 堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄 (1977): 東京湾の海水交換に関する水利模型実験, 港研報告, 第16巻, 3号, pp. 69-99.
- 村上和男・森川雅行・白井正生・佐藤英治 (1986): 強制循環流による海水交換促進の水利模型実験, 港湾技研資料, No. 544, 31 p.
- Bolin, B. and H. Rohde (1973): A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs, Tellus, Vol. 25, No. 1, pp. 58-62.
- Fischer, H. B. (1972): Mass transport mechanisms in stratified estuaries, J. Fluid Mech., Vol. 53, pp. 671-687.
- Murakami, K. (1988): Hydraulic model experiments on water exchange for enclosed inner bay, Int'l Symp. on Scale Modelling, Tokyo, pp. 301-307.
- Parker, D. S., D. P. Norris and A. W. Nelson (1972): Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98, SA2, pp. 305-323.