内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係*

宇野木 早苗†

Relation between the Transport of Gravitational Circulation and the River Discharge in Bays

Sanae Unoki‡

Abstract

Based on the two layer box model for Bays of Tokyo and Mikawa the transport of gravitational circulation was estimated and compared with the river discharge in winter and summer. The transport of the circulation exceeds the river discharge remarkably, but the ratio of the former to the latter is smaller in summer than in winter. It suggests that the gravitational circulation is likely to be suppressed in summer, because of its strong density stratification. The amount itself of the transport, however, is larger in summer than in winter in Tokyo Bay, and comparable in the both seasons in Mikawa Bay. It is attributed to the abundance of the river discharge in summer. Moreover, the residence time of river water is shorter in summer than in winter in the respective bays. Therefore, we can conclude that the sea water in the lower layer of bay is not so stagnant as believed intuitively but circulates actively even in the warm season.

1. はじめに

ここで問題にする鉛直循環流は、河川水の流入に伴って内湾に生じる上層流出・下層流入の流れで、密度流に属して重力循環ともいわれる (Fig. 1). これはほぼ定常的に存在して、よく知られているように湾水の形成、物質の収支、海水交換などに本質的に重要な役割を果たしている。それゆえ鉛直循環流に関しては多くの研究があり、その基本的な性格はほぼ明らかにされている。

一方、最近では都市用水、農業用水、工業用水などの水需要に応えるため、河川から大量の取水が行なわれて海域へ流入する河川流量が減少し、海域の環境が悪化する例が見られる。例えば三河湾は汚濁負荷が東京湾の 1/10 の程度に過ぎないのに、特に東部の渥美湾が顕著であるが、東京湾と並んでわが国で最も水質汚濁が著しい内湾である。その原因として、もともと河川流量があまり多くないのに、豊川用水などによる多量の取水が行なわれたことが、一つの大きな理由に上げられている (西條ら, 1997)。さらに現在進行中の豊川総合用水事業によって、新たな取水もなされることになって、その影響が憂慮されてい

Fig. 1. Gravitational circulation in a bay due to the inflow of river water.

る。取水された水が利用後そのまま湾に帰る場合は少ないのである。

上記の問題は、河川水の影響が強い他の内湾沿岸においても、多かれ少なかれ起こり得ることである。だが河川流量の減少が海域の環境に及ぼす影響についての実証的研究は少なく、われわれの理解は乏しい。そこで最初に、河川流量の何倍程度の鉛直循環流量が、内湾に発生しているかを量的に明確にすることは、学問的興味と共に、上記の問題を考える基礎としても重要と思われる。

* 1997年11月14日受領; 1998年6月4日受理

† 〒424-0912 清水市殿沢 2-12-24

‡ 2-12-24, Tonosawa, Shimizu-shi, Shizuoka-ken, 424-0912 Japan

この問題に関係する文献はわが国においては、著者が知り得た範囲内では、湾内外水の交換量を求めたものは多いが、さらに進めてこの鉛直循環流量と河川流量の量的関係に注目して、これを実際に求めたものは見出だされなかった。ただ論文中的数値から推定できるものがあるので、これについては6節で考察する。一方、アメリカ東岸の James estuary に対する Pritchard の解析によれば、鉛直循環流量は河川流量の19倍で、河川流量と合わせて20倍の海水が estuary の外海に流出するとの結果が得られている (Dyer, 1973)。ただしこの比率は海域の成層状態に関係するので、季節的な変化を知ることが重要である。

このためこの小論の第一の目的として、わが国の代表的汚濁内湾である東京湾と三河湾を対象に、観測データに基づいて夏と冬の鉛直循環流量と河川流量の関係を具体的に把握し、比較することを考える。なおこの問題は今後数値計算でも検討されねばならないが、これには種々の仮定を用いねばならないので、計算結果の信頼性を確認する上にも、このような解析は必要であろう。

次に、内湾の暖候期には成層が強くて、水質汚濁が顕著である。したがって例えば「有機汚濁が進行した湾内部では、海水の成層に伴う海底水の停滞により底層水の貧酸素化が進行し、ところによっては無酸素状態になっている海域もある」との記述に代表されるように、この時期の内湾の底層では弱い鉛直混合と共に、海水の流れも停滞していると考えている人が少なくないように思われる。

だが過去に発表されている湾水の平均滞留時間や分散係数に関する資料解析、水理実験結果、および流れの観測結果などを考慮して、著者は上記の考えに疑問を抱き、前に次のことを述べた (宇野木, 1993)。すなわち、「外海に通じ河川流量の多い内湾では、特別の地形でなければ、なお検討を要するものの、暖候期の海水交換が他の季節に比べて、一般に考えられているほど劣っていないといえよう。内湾は閉じた湖と大きく異なっている」と。そこで冬と夏の鉛直循環流の大きさを具体的に求めて比較し、この考えの妥当性を実証することを、この小論の第二の目的とする。

対象海域としては上記のように東京湾と三河湾を選び、長期間の海洋観測資料の統計結果を基に、2層のボックスモデルを用いて解析を行う。季節としては冬と夏を考える。このとき海洋の特性を考慮して、1, 2, 3月を冬、7, 8, 9月を夏とする。なお3ヵ月にまとめたのは、季節全体として理解したいことと、後で示すことであるが、平均滞留時間が1ヵ月を越えることが多いからである。

Fig. 2. Box model.

2. 解析の方法

躍層の存在を考慮して、Fig. 2 に示すように2層に成層した内湾を考え、上層の平均塩分を S_1 、下層のそれを S_2 とする。湾外の海域も同様に2層に分け、上層と下層の平均塩分をそれぞれ S_3 と S_4 で表す。そして湾奥から流量 R の河川水が流入している場合を考える。

湾内では躍層を通して上層と下層で海水の交換が行われている。これは移流と拡散によるものであるが、両者の効果を含めて単位時間の海水交換量を輸送係数 Q_{12} と Q_{21} で表す。輸送係数は交換量を2方向に分けたもので、前者は上層から下層へ、後者は下層から上層へ輸送される量である。湾口断面においても、湾内と外海との間に移流と拡散によって海水交換が行われているが、ここでは移流の効果のみを考え、拡散の効果を考えないことにする。これは1つには、この境界面での拡散を考えると未知数に対して方程式の数が少なくて一義的な解が得られないこと、2つには5節に述べるように、拡散項は移流項に比べ桁小さいとみなされるからである。湾口断面の下層で湾外から湾内に単位時間に流入する量を Q 、上層で湾外に流出する量を Q' とする。

このとき定常状態において、湾内上層のボックスにおける海水と塩分の保存式はそれぞれ (1) と (2) で与えられる。

$$R + Q_{21} = Q' + Q_{12} \quad (1)$$

$$S_2 Q_{21} = S_1 (Q_{12} + Q') \quad (2)$$

一方、下層のボックスにおける保存式は下記の両式になる。

$$Q + Q_{12} = Q_{21} \quad (3)$$

$$S_1 Q_{12} + S_4 Q = S_2 Q_{21} \quad (4)$$

ここで(1)と(3)より(5)が、(2)と(4)より(6)が得られる.

$$Q' = Q + R \quad (5)$$

$$S_1 Q' = S_4 Q \quad (6)$$

(5)と(6)より Q' を消去すると、次式が求まる.

$$Q = RS_1/(S_4 - S_1) \quad (7)$$

この Q が、われわれが注目する下層流入・上層流出の鉛直循環流量を表す. ここで次式のように鉛直循環流量と河川流量の比 λ を考える.

$$\lambda = Q/R = S_1/(S_4 - S_1) \quad (8)$$

また上記の諸式を組み合わせると次の関係が求まる.

$$Q' = RS_4/(S_4 - S_1) \quad (9)$$

$$Q_{21} = RS_1/(S_2 - S_1) \quad (10)$$

$$Q_{12} = Q_{21} - Q \quad (11)$$

次に平均滞留時間を考える. これは対象物質により異なるが、ここでは内容が明確な流入した河川水の湾内における平均滞留時間 τ_f を取り上げる. 武岡(1984)によれば、これは定常場合には河川水の平均通過時間に等しく、湾内に貯留されている淡水量 Q_f を流入河川の流量 R で除して求められる.

$$\tau_f = Q_f/R \quad (12)$$

海水の塩分を S 、外海水の塩分を S_* としたとき、この海水に含まれる淡水の割合は $(S_* - S)/S_*$ である. ここでは外海の塩分として $S_* = S_4$ を考え、湾内の上下のボックスのそれぞれに含まれる淡水量を計算する. Q_f は両者を加えて求まるので、(12)から河川水の平均滞留時間が定まる. ちなみに平均滞留時間は初期物質量が $1/e (= 0.37)$ になる時間で、 $1/10$ になるには τ_f の2.3倍、 $1/100$ になるには τ_f の4.6倍の時間を要する.

3. 東京湾における解析結果

東京湾の地形と水深分布をFig. 3に示す. 湾のボックスとしては浦賀水道より北の狭義の東京湾を考える. 湾外のボックスには図に示した範囲を考える. 両者の境界は太い破線で示してある. 上層と下層のボックスの境界面は、躍層が現われや

Fig. 3. Topography of Tokyo Bay and the area of inner and outer boxes. The depth is shown in meter.

すい深さとして水深5mを考える. このとき湾内上層の容積は 4.7km^3 になる. 湾内の平均水深は17m程度であるが、湾外では急に深くなり水深は数百mにも達する. しかし浅い湾内との海水交換を考えているので、下層のボックスの深さは湾の内外とも最深40mに限ることにした. このとき湾内下層の容積は 11.3km^3 である.

次に神奈川水試と千葉水試の1961-1970の10年間における観測結果を用いて、冬と夏の各ボックスにおける平均塩分の値を求める. 河川流量としては、1960-1974年の平均として各月の値が求まっているので(宇野木・岸野, 1977), これを利用する. 各塩分と河川流量の値はTable 1に載せてある. 河川流量は夏は冬の3倍以上であるが、年による河川流量の変動は大きい.

解析結果もTable 1に示してある. これから鉛直循環流量 Q と河川流量 R の比 λ は、冬は13.2, 夏は5.6になって、同じ河川流量に対して、夏の方が鉛直循環流が発達しにくいことがわか

Table 1. Basic data and the result of estimation in Tokyo Bay, for the case of a boundary surface at 5m depth.

season	winter	summer
S_1	32.03	28.63
S_2	32.81	32.73
S_3	34.39	32.70
S_4	34.45	33.78
$R \text{ m}^3/\text{s}$	124	396
Q	1641	2201
Q'	1765	2597
Q_{12}	3451	564
Q_{21}	5092	2765
$\lambda = Q/R$	13.2	5.6
$\tau_f \text{ month}$	2.7	1.0

る。これは冬に比べて夏は成層が強いので、循環が抑制されるためである。

しかしながら鉛直循環流量の値そのものは、冬は $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ であるのに、夏は $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ にも達し、夏が冬より多くなっている。これは河川流量が夏に著しく多いためである。これに対応して河川水の湾内における平均滞留時間も、冬は 2.7 ヶ月、夏は 1.0 ヶ月であって、夏の方が短くなっている。

4. 三河湾における解析結果

Fig. 4 に三河湾の地形と水深分布を、およびボックスモデルに用いた湾内と湾外の範囲を示す。上層の厚さは東京湾と同じく 5m とする。下層は海底までを考える。湾ボックスの容積は上層が 2.4 km^3 、下層が 3.0 km^3 である。河川流量には三河湾に注ぐ 1 級河川の豊川、矢作川、矢作古川の 1950 年から 1970 年までの平均流量を考える。Table 2 に示すように、夏の平均流量は $137 \text{ m}^3/\text{s}$ で冬の $60 \text{ m}^3/\text{s}$ の約 2.3 倍になっている。各ボックスの平均塩分は、愛知水試が得た 1961-1972 の 12 年間のデータを中心に、既に著者らによって統計処理してあるので (宇野木ら, 1975), これに基づいて求められた。結果は Table 2 に載せてある。

これらの統計値を基に (8) から λ を計算すると、Table 2 に示す結果を得る。鉛直循環流量は河川流量に比べて冬は 21.1 倍、夏は 8.5 倍になっていて、やはり冬の方が鉛直循環流が発達しやすいことが分かる。ただし東京湾と比較すると、 λ の値は冬も夏も三河湾が大きく、三河湾の方が河川水の流入に対して鉛

Fig. 4. Topography of Mikawa Bay and the area of inner and outer boxes. The depth is shown in meter.

Table 2. Basic data and the result of estimation in Mikawa Bay, for the case of a boundary surface at 5m depth.

season	winter	summer
S_1	31.69	28.66
S_2	32.17	31.04
S_3	32.97	28.78
S_4	33.19	32.02
$R \text{ m}^3/\text{s}$	60	137
Q	1268	1169
Q'	1328	1306
Q_{12}	2694	481
Q_{21}	3961	1650
$\lambda = Q/R$	21.1	8.5
$\tau_f \text{ month}$	1.3	1.0

直循環流が生じやすいといえる。

一方、鉛直循環流量 Q の値に注目すると、東京湾の場合と逆に冬が夏よりもやや大きい、その差はわずかで両季節とも $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ の前後の大きさになっている。河川水の湾内における平均滞留時間 τ_f は、夏は 1.0 ヶ月で冬の 1.3 ヶ月より少し短く、海水交換が夏に活発であることが分かる。

Table 3. Basic data and the result of estimation in Tokyo Bay, for the case of a boundary surface at 10m depth.

season	winter	summer
S_1	32.17	29.58
S_2	32.88	32.97
S_3	34.40	32.89
S_4	34.46	33.88
$R \text{ m}^3/\text{s}$	124	396
Q	1742	2724
Q'	1866	3120
Q_{12}	3876	731
Q_{21}	5618	3455
$\lambda = Q/R$	14.0	6.9

5. モデルに関する考察

ここでは極めて単純化した2層のボックスモデルを用いて解析を行った。そこで、このモデルが含む若干の問題点について、少し考えてみる。用いたボックスモデルはFig 2に示されているが、湾口断面における物質輸送には移流 Q' と Q の効果のみが考慮されて、水平拡散の効果は無視されている。そこで移流と拡散の輸送効果を比較してみる。

東京湾と三河湾の冬と夏の湾口付近における塩分の水平勾配 $\partial S/\partial x$ は、大きくみても $3 \times 10^{-4} \text{psu/m}$ の程度である。湾口の上層の断面積 A_1 は三河湾の方が広くて、 $5 \times 10^4 \text{m}^2$ の程度になる。一方水平拡散係数 K_z の値は、大きめに $10^2 \text{m}^2/\text{s}$ ($10^6 \text{cm}^2/\text{s}$)を考えればよいであろう(例えば松川, 1989)。したがって湾口の上層断面の拡散による塩分輸送は、たかだか $A_1 K_z \partial S/\partial x = 1.5 \times 10^3 \text{psu} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の程度と見積もられる。

一方上層の移流量 Q' は、Table 1と2で低い値をとると $1300 \text{m}^3/\text{s}$ になり、上層塩分 S_1 の最も低い値は28.7である。ゆえに上層の移流による塩分輸送は少なめに見積もっても $Q'S_1 = 3.7 \times 10^4 \text{psu} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ になり、上記の拡散による輸送量より1桁大きい。下層においても同様である。したがって湾口断面において、拡散項を無視して移流項のみを考えたのは近似的に許されるであろう。

次に問題になるのは、上層と下層の境界面の深さである。これまで5mを仮定したが、躍層の深さも時空間的に変化するので、どの深さが適当であるかは明らかでない。そこで試みに境界面の深さを10mとして、東京湾について前と全く同様な解析を行った。その結果をTable 3に示す。これをTable 1と比

較すると、 λ , Q , Q' の値は5m層の場合よりやや大きい、その違いは思いの外小さい。それゆえ境界面の深さの選定がcriticalに結果を変えるほどではなく、境界面を5mにおいて得た結果を用いて議論することも、そう間違った結論を導くことはないと思われる。

さらにわれわれはこのようにして求めた鉛直循環流を、河川水流入に起因する密度流とみなしているが、これが妥当かどうかを考える。これに関連して松川(1989)は三河湾において、各種の流動の塩分分散に対する寄与を拡散係数の形で比較した。それによると密度流の効果が最も大きく、続いて吹送流、潮流、短周期の変動の順にほぼ1オーダーずつ小さくなっている。これによれば密度流が鉛直循環流の主体とみなされる。

しかし例えば東京湾では、冬の北寄りの季節風は上層流出・下層流入の鉛直循環流を強め、夏の南寄りの季節風はこの循環流を弱めている。それにもかかわらず鉛直循環流量は夏が冬より著しく大きいので(Table 1)、河川流に起因する鉛直循環流の効果が卓越することが示唆される。風が強いときには、たしかに内湾で吹送流が発達するが、風は河川流よりも定常性に劣るので、長い期間でみれば密度流が湾軸方向の鉛直循環流の主体であるとの考えは、ほぼ認められるであろう。

さてTable 1, 2に示したように、鉛直循環流量と河川流量の比 λ は、東京湾と三河湾で共に冬が夏より大きくなっていた。いま冬と夏の値にそれぞれ添字 w と s を付して区別すれば、 λ_w/λ_s の値は東京湾では2.4、三河湾では2.5になってほぼ同じ値になる。(8)式によればこの比は次式で与えられる。

$$\lambda_w/\lambda_s = (S_{4s}/S_{1s} - 1)/(S_{4w}/S_{1w} - 1) \quad (13)$$

通常の内湾の塩分分布では $S_{1w} > S_{1s}$ であり、外海における S_{4w} と S_{4s} の値はあまり変わらないので、 $(S_{4s}/S_{1s}) > (S_{4w}/S_{1w}) > 1$ の関係が期待される。したがって計算結果のように、 λ_w が λ_s より大きい値を取るようになる。この理由は既に述べたように、夏は冬よりも成層が強いため、鉛直循環が抑制されるためである。また λ_w/λ_s の値が東京湾と三河湾でほとんど同じになることは、(13)式右辺の塩分間の関係が両湾で似ていることを意味している。

なおこのモデルでは、湾の横断方向には流れは一樣と考えている。しかし湾奥に河川水が流入する内湾では、地球自転の影響で、河川水を多く含む海水が湾口に向かって右岸側に偏して外海へ流出し、鉛直循環に加えて上層に水平循環が認められることもある。長島(私信)によれば、付録で紹介するように、水平循環を考えないで得たこれまでの λ の値は、最大値を与えるもので、水平循環が大きくなると λ の値は減少する(Table 5参照、後出)。ただ湾口断面では、一般に鉛直循環が水平循環より

卓越しているのに、水平循環の存在のために、これまでの結果が大幅に変わることはないと思われる。

6. 従来の知見との比較

わが国の内湾において、観測資料にボックスモデルを適用して、鉛直循環流量が河川流量の何倍程度であるかを具体的に見積もった研究は見出だされないようである。しかしこれらの論文の中で、鉛直循環流量と河川流量の値が明記してあれば、両者の比 λ を推定することができる。大阪湾において、ただしこれは湾全体ではなく湾の奥部を対象にしているが、このような論文が2編見出される。

1つは、湯浅ら(1993)が9月の観測結果に基づいて解析したもので、前述の記号を用いると $Q=4520\text{m}^3/\text{s}$, $R=120\text{m}^3/\text{s}$ であるので、 $\lambda=37.7$ になる。もう1つは藤原ら(1994)が8月の観測を基に解析したもので、 $Q=3300\text{m}^3/\text{s}$, $R=130\text{m}^3/\text{s}$ となっていて、 $\lambda=25.4$ が求まる。いまは湾全体を対象にしていなくて単純に比較はできないが、Table 1と2の λ と比較すると、この結果は大阪湾では鉛直循環流が発達しやすいことを示しているのかも知れない。

ここで湾水の滞留時間について、従来の結果と比較する。前に宇野木・岸野(1977)は、1層モデルを用いて東京湾における各月の平均滞留時間を求めた。ただしこれは湾の容積を、湾口断面を通して外に向かう輸送係数で割ったもので、河川水の平均滞留時間と内容は異なる。このときの平均滞留時間は、それぞれ3か月の平均として冬は2.7か月、夏は1.1か月であって、Table 1に示した τ_f の値とほとんど同じである。基礎のモデルも定義も異なるにもかかわらず、同じ数値になり興味深い。

一方、日本水産資源保護協会(1987)の報告書では、東京湾水の平均滞留時間として夏が1か月、冬が0.5か月になっている。Table 1と比較すると値は小さく、また冬が夏より滞留時間が短く、逆の関係にある。上の数値は後で述べる Matsukawa and Sasaki (1990)の解析結果に基づいているが、そこでは鉛直循環流が大きく、また冬が夏より強くなっていて、平均滞留時間はこれを反映している。

しかしながら暖候期が寒候期より海水交換が速いことは、Table 2で示す三河湾の結果と一致し、またこの傾向は柳(1986)による明石海峡と紀淡海峡を通しての大阪湾の海水交換においても認められる。さらに中田ら(1985)の三河湾の数値実験や、上島(1986)の広島湾における成層水理実験でも同様な結果になっている。したがって東京湾における今回の結果が、誤りであるとは考えにくい。

なお三河湾において、宇野木ら(1975)は以前に1層モデル

Table 4. Average of residual current velocities at observation stations located in the northern/southern regions and the whole area of Tokyo Bay. The stations are shown in the middle of Fig.5, and the data are based on Unoki *et al.* (1980).

(unit: cm/s)

area	upper layer		lower layer	
	winter	summer	winter	summer
north	5.2	4.2	3.0	2.8
south	5.4	4.7	6.0	5.0
whole	5.3	4.5	4.8	4.3

に基づき、平均滞留時間を求めている。それによると冬は0.5か月、夏は0.3か月になって、今回のTable 2に示す値に比べ、かなり小さい値である。前回は河川流量に1級河川以外の小河川も含めて求めたが、その際の流量推定が必ずしも適切でなく、流量を過大に評価している可能性が強い。そのためこのような違いを生じたものと判断される。

次に、鉛直循環流の流速の点から調べる。松川(1989)は三河湾の大部を占める渥美湾において、流速と塩分の連続記録と塩分分布のデータを基に解析を行い、成層期に推定される2層流すなわち密度流の大きさは、2cm/s内外であるという結果を得た。Table 2に示す三河湾の夏の鉛直循環流量は約 $1200\text{m}^3/\text{s}$ である。三河湾の上層に注目すると、層厚は5m、平均幅は12km程度であるので、上の流量を断面積で割れば、平均流速はたまたま2.0cm/sになって松川の得た値に一致する。対象海域に多少の差異があるが、本報で得た結果はある程度妥当であることが示唆される。

東京湾では、Fig. 5の中央図に示す東京湾内部の多数地点で、夏季と冬季にそれぞれ1か月または半月にわたる連続測流により、期間平均の恒流が求まっている(宇野木ら, 1980)。いま東京湾を北半分と南半分に分けて、また上層(海面下3m)と下層(海底上5m)別に、所属する各測点の恒流速のスカラ平均を計算すると、Table 4の数値を得る。なお表には全測点に対する数値も載せてある。

さてTable 1に示す東京湾の鉛直循環流量を、上層のボックスの平均的横断面積(5m × 20km)で割れば、平均流速として冬は1.6cm/s、夏は2.2cm/sになっている。これらは観測で得られたTable 4の数値の、1/3~1/2の大きさである。しかし湾内では地形やコリオリの力の影響で、密度流、吹送流、潮汐残

Fig. 5. Frequency distribution of the residual current velocity observed in the inner region of Tokyo Bay during a winter (Jan.-Feb., 1979) and a summer (July-Aug., 1979). Observations were made on the layer 3m below the sea surface and 5m above the sea bottom at each station indicated in the middle map. The original data are based on Unoki *et al.* (1980).

差流などは環流を形成しやすく、恒流の流向は各測点で異なり、逆向きのものもある。したがって、ここで問題にしている湾軸方向の流速成分が、実測恒流の絶対値を単に平均した値よりも、この程度小さいことは当然あり得ることで、この結果はむしろ今回の解析で求めた数値が、それ程おかしくないことを示すと考えられる。

一方、前に触れた Matsukawa and Sasaki (1990) は、月ごとの解析を行っている。彼らは狭義の東京湾を北部と南部の2つの海域に分けた。鉛直循環流の大きさは、平均して北部境界では冬(1-3月)は3.9cm/s、夏(7-9月)は1.6cm/sであり、南部境界(湾口)では冬は10.9cm/s、夏は7.6cm/sである。上記のわれわれの解析結果と比べると、北部は値が近く、南部は著しく大きい。ただし南部の値は湾口狭窄部の流速であるので、もともと流れは大きい場所である。彼らの結果では夏に比べて、冬の方が鉛直循環流が強く、したがって前述のように海水交換も冬が速いことが注目される。われわれの結果と逆になる理由は明らかでないが、彼らは冬季の北寄りの季節風の効果で、鉛直循環流が強まっていると考えている。

以上の考察によると本報告の解析結果は、過去の成果と一致

しないところもあるが、多くは矛盾していないので、全体としてはほぼ妥当であると考えられる。

7. 閉鎖的といえない成層期の内湾の底層

「はじめに」に触れたように、成層した内湾の底層は、水の動きは鈍くて停滞していると考える人が、一般に多いように見受けられる。本報告の解析結果によっても、鉛直循環流量と河川流量の比を表す λ の値は、東京湾、三河湾両湾とも夏の方が冬よりも小さかった。すなわち成層の強さが異なるため、同一の河川流量に対しては、たしかに鉛直循環流は夏は冬より発達しにくいといえる。

しかし湾の下層を湾奥に向かう鉛直循環流の流量 Q は、河川流量の多さを反映して、東京湾においては夏の方が冬よりもかなり多く、また三河湾においても夏は冬と同程度の流量になっている。さらに河川水の湾内における平均滞留時間は、東京湾と三河湾のいずれにおいても、夏の方が冬より短くなっている。同様に大阪湾その他の内湾においても、暖候期が寒候期よりも海水交換が速い傾向にあることを既に述べた。

いま東京湾における冬と夏の恒流の測定結果に基づいて、湾内の多数点における表層と底層の恒流の頻度分布と平均流速を示した Fig. 5 によれば、右下の夏の底層の流れは、右上の夏の表層の流れや、左下の冬の底層の流れに比べても、特別小さいという程ではない。なお北部と南部に分けた Table 4 で見ると、湾北部の底層の流れは、表層や湾南部に比べれば弱い。しかし冬と夏では大きさはほとんど同じになっている。

以上のことから成層期の底層の水平的な流れは、寒候期の底層の流れとあまり変わらず、一般に直感的に想像されているほどには、停滞していないといえよう。湾奥から多量の河川水が流入し、外海に口を開いている内湾では、閉じた湖とは性格が異なっており、成層期にも鉛直循環が発達しやすいのである。また夏には、潮流は冬とほとんど変わらずに流れ、かつ時に吹く強めの風は、鉛直循環を発達させる。

それにもかかわらず暖候期に内湾の水質汚濁が激しいのは、1 つには躍層面を通しての鉛直混合が制限を受けるためである。すなわち Table 1, 2 から理解できるように、上下層の交換量を表す Q_{21} と Q_{12} の値は、その差が鉛直循環流量になるのであるが、東京湾と三河湾は共に、夏は冬に比べて著しく小さくなっている。2 つには成層期には富栄養化に関する諸過程が、冬に比べて著しく活発で速いためである。なお、地形的に内部が窪んでいたり、湾口が非常に狭かったり、河川が湾口付近に偏在しているときなどには、内湾は当然閉鎖性が強くならざるを得ないであろう。

ここで少し付言すると、密度流としての鉛直循環流の形成に関して、流入した軽い河川水が湾口に向けて海面を流れるとき、下層との間にシア（速度勾配）が生じて下層水を連行するので、鉛直循環流が発生するという説明がよくなされている。だがこれでは河川流量の数倍から 20 倍以上にもなるような強い鉛直循環流の発生は理解しにくい。

実際は湾に河川水が流入すると、重い海水が位置する湾口部と軽い海水が存在する湾奥部との間に密度の、したがって圧力の水平勾配ができて力学的に不安定になる。これを解消するため重い外海水は下層を通過して湾奥に、軽い湾奥水は上層を通過して湾口に向かう流れを生じる。このとき位置エネルギーが運動エネルギーに転換されるので、大きな流速が得られる。その際上下層の間に連行作用が働き、これらの過程が継続して行われるので、強い鉛直循環流が形成されるのである。

なお本報告で得た鉛直循環流量と河川流量の関係が妥当であるかどうかを、限られた仮定の上に導かれた理論によって定量的に説明することはむずかしく、数値モデルによる詳しい解析が今後必要と思われる。

ここで、この研究から理解できるように、河川水の取水は取

水量の何倍、何 10 倍にも拡大されて内湾の鉛直循環流を弱め、ひいては海洋環境の悪化をもたらしやすいことに、注意を喚起したい。河川における取水は十分に慎重であらねばならない。著者が前に述べたように、これからは川と海を一体とした発想と管理が大切であり、海に関係する人は川に目を向け、川に関係する人は海のことを考慮する必要がある（宇野木、1996）。

8. むすび

東京湾と三河湾における長期間の塩分と河川流量の資料を 2 層モデルを用いて解析し、内湾の環境形成に基本的に重要な上層流出・下層流入の鉛直循環流について、その流量と河川流量との関係を調べた結果を得た。モデルの取り方や資料によって、数値的には変動はあり得るも、結論の大筋は変わらないと思われる。

1. 鉛直循環流の流量は河川流量に対して、東京湾では冬は 13 倍、夏は 6 倍程度であり、三河湾では冬は 21 倍、夏は 9 倍程度であった。
2. したがって同じ河川流量では、冬よりも夏の方が鉛直循環流が発達しにくいといえる。これは夏は成層が強いためである。なお東京湾では風の効果も考えられる。河川流量に対する鉛直循環流の増幅率の冬と夏の比は、両湾とも 2.4 の程度でほぼ同じであった。
3. しかし鉛直循環流の流量そのものは、河川流量の大きさを反映して、東京湾の方が三河湾より多い。流量は、東京湾では夏が $2200\text{m}^3/\text{s}$ 、冬が $1600\text{m}^3/\text{s}$ の程度で、夏が多い。三河湾では夏、冬ともに $1200\text{m}^3/\text{s}$ の程度である。
4. 湾内における河川水の平均滞留時間は、東京湾は 1.0~1.7 ヶ月、三河湾では 1.0~1.3 ヶ月の程度であり、両湾とも夏が冬より短い。
5. ただし湾口断面を通過する水平循環が存在するときには、河川流量に対する鉛直循環流量の増幅率は減少する傾向にある。
6. 鉛直循環流量や河川水の平均滞留時間および流れの観測結果によれば、河川水の流入の多い内湾は、特別な地形条件でなければ成層期においても、鉛直混合は抑制されるものの、下層の水は停滞しているとはいえない。
7. 河川水の取水は、取水量の数倍あるいは 20 倍以上もの鉛直循環流の減少をもたらす、海域の環境を悪化させる可能性があるため、十分注意すべきことが指摘できる。

最後に、論文をまとめる上に有益な助言を頂いた長島秀樹博士と論文査読者に厚くお礼申し上げる。また、この小論の基礎データの海洋資料や河川流量資料を、長期間にわたり蓄積してこられた千葉水試、神奈川水試、愛知水試、および建設省の担当者の方々のご努力に深く敬意を表する。

References

- Dyer, K.R.(1973): Estuaries: A Physical Introduction, John Wiley & Sons, London, p.9.
- 藤原建紀・沢田好史・中辻啓二・倉本茂樹(1994): 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性—内湾奥部にみられる高気圧性渦—, 沿岸海洋研究ノート, **31**, 227-238.
- 松川康夫(1989): 内湾域における物質輸送機構と窒素、リンの収支と循環に関する研究, 中央水研研究報告, **1**, 1-74.
- Matsukawa, Y. and K. Sasaki (1990): Nitrogen budget in Tokyo Bay with special reference to the low sedimentation to supply ratio, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, **46**, 44-54.
- 中田喜三郎・石川公敏・松川康夫(1985): 内湾の流動場の数値実験, 沿岸海洋研究ノート, **22**, 96-108.
- 日本水産資源保護協会(1987): 東京湾における漁場環境容量, 73pp.
- 西條八束監修・三河湾研究会編(1997): 三河湾, 八千代出版, 312pp.
- 武岡英隆(1984): 沿岸海域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, **21**, 169-182.
- 上嶋英機(1986): 瀬戸内海の物質輸送と海水交換特性に関する研究, 京都大学学位論文, p. 173.
- 宇野木早苗(1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, p. 544.
- 宇野木早苗(1996): 海から川を考える, 海の研究, **5**, 327-332.
- 宇野木早苗・岸野元彰(1977): 東京湾の平均的海況と海水交流, Tech. Rep., 1, 理化学研究所海洋物理研究室, 89pp.
- 宇野木早苗・岸野元彰・岡見登(1975): 伊勢湾の平均的海況, 恒流および海水交流, 伊勢湾における汚濁物質の循環機構に関する調査, 産業公害防止協会, 1-88.
- 宇野木早苗・岡崎守良・長島秀樹(1980): 東京湾の循環流と海況, Tech. Rep. 4, 理化学研究所海洋物理研究室, 262pp.
- 湯浅一郎・上嶋英機・橋本英資・山崎宗広(1993): 大阪湾奥部の循環流とリンの循環, 沿岸海洋研究ノート, **31**, 93-107.
- 柳哲雄(1986): 大阪湾の海水交換率の季節変動, 沿岸海洋研究ノート, **24**, 72-77.

付録 湾口断面を通る水平循環流の影響

本文5節の末尾に記したように、鉛直循環流に加えて、上層に水平循環流の成分が存在する場合を考える。最も簡単なモデルとして、Fig. 6のボックスモデルを用いる。このとき上層には、外海との間に流出量 Q_{out} と流入量 Q_{in} の海水のやりとりがあるとする。Fig. 2のモデルで考えた上層の流出量は、 $Q' = Q_{out} - Q_{in}$ として与えられる。ここで Q_{out} は S_1 の塩分をもって流出

Fig. 6. Revised box model including a horizontal circulation in the upper layer.

Table 5. Values of $\lambda (=Q/R)$ for different values of $\mu (=Q_{in}/Q_{out})$.

μ	Tokyo Bay		Mikawa Bay	
	winter	summer	winter	summer
0.0	13.2	5.6	21.1	8.5
0.1	11.8	5.0	19.2	8.5
0.2	10.4	4.5	17.2	8.4
0.3	9.0	3.9	15.2	8.4
0.4	7.6	3.3	13.1	8.3
0.5	6.2	2.7	10.9	8.2

し、 Q_{in} は S_3 の塩分をもって流入すると仮定する。しかるとき連続条件は次式で与えられる。

$$R + Q_{21} + Q_{in} = Q_{out} + Q_{12}$$

$$S_2 Q_{21} + S_3 Q_{in} = S_1 (Q_{out} + Q_{12})$$

$$Q + Q_{12} = Q_{21}$$

$$S_1 Q_{12} + S_4 Q = S_2 Q_{21}$$

5 個の未知流量 (Q , Q_{12} , Q_{21} , Q_{out} , Q_{in}) に対して 4 個の式しか存在しないから、一義的な解は得られない。そこで上層の流入量と流出量の比、 $\mu = Q_{in}/Q_{out}$ を考えると、上記 4 式から

本文と同様にして下記の関係式を得る。なお $\mu=0$ のとき、 λ は本文の (8) 式に一致する。

$$\lambda = Q/R = Y/(S_4 - Y)$$

ここで

$$Y = (S_1 - \mu S_3)/(1 - \mu)$$

試みに μ の値を種々変えた場合の λ の値を、Table 5 に示す。これは上層の厚さが 5m の場合である。 λ は $\mu=0$ の場合、すなわち水平循環がない場合に最大で、 μ が大きくなるほど小さくなっている。

なお Fig. 6 のボックスモデルは、実は上層の外海との境界付近に、水平拡散が働く場合にも適用できる。この水平拡散の効果が、水平移流の効果よりも 1 桁小さいことは、既に 5 節に述べてある。