

広島湾における夏季の河川流量変化の 河川水分散への影響*

湯浅一郎**・上嶋英機**・宝田盛康**・橋本英資**

Effect of river discharge variation in summer on the dispersion of fresh water in Hiroshima Bay

Ichiro YUASA**, Hideki UESHIMA**, Moriyasu TAKARADA**
and Eisuke HASHIMOTO**

Abstract

Observation of salinity distribution in Hiroshima Bay was carried out once a week from June to August 1980, in order to investigate dispersive characteristics of river-discharged fresh water in summer.

The data shows that dispersion of fresh water is dependent on the magnitude of discharge from the Ohta River and the average residence time of the fresh water in the northern portion of the Hiroshima Bay is approximately 2.9 weeks.

1. はじめに

富栄養化, 赤潮発生更には貧酸素水塊の形成などは, 内湾における生物生産や水産業にとって最も憂慮される問題となっている。これらを規定する要素としては, 内湾の物理場(流動, 成層構造, 外海や隣接海域との間の海水交換能力等)と陸から供給される栄養塩・有機物の負荷量及び海域における化学的・生物的過程があげられる。

この中で負荷量は必ずしも毎日一定というわけではない。梅雨期にしばしばみられる出水時には, 負荷量は急増し, その後減少する。負荷量の実体は, そうした間欠的な増減のくり返しとして促えられる。例えば本報でモデル水域とした広島湾の1979年の場合, 6月27日から7月3日の集中豪雨によって, 太田川の河川流量は6月29日に日平均値で $1164\text{m}^3/\text{s}$ を記録し, この一週間の流入量は年間総流入量の実に21%を占めている(湯浅ほか, 1984)。

しかし, 河川出水のみられる初夏から夏にかけて, 河

川水の流出と分散の過程, 更にそれに伴う栄養塩分布の変遷について追跡した研究例は少なく(八木ほか, 1978; 鈴木・湯浅, 1980), 杉本(1983)などによって, このような非定常現象を捉えることの重要性が指摘されてきた。

そこで著者らは, 湾奥に太田川という一級河川を有し, 地形的に閉鎖性の強い広島湾を対象に, 河川増水期における陸水の流出・分散と栄養塩の分布・挙動を調べるため, 現地観測を行った。本稿では, 塩分分布の変動, 湾内淡水保存量の変化などから, 河川流量の変動に対する河川水分散の応答関係について報告する。

2. 方 法

2-1. 観 測

観測は Fig. 1 の44定点において, 1980年6月12日から8月21日まで, おおむね週1回の割合で計10回行った。測定には2隻の高速船を使用し, Fig. 1 の Stn. 1~25, Stn. 26~44 の2コースにわかれて実施した。観測の所要時間は7時間であるが, 河川水の影響をうけ易く, 潮時による変化が比較的大きいと思われる宮島瀬戸以北は午前中の3時間で行い, 残りの水域を午後測定した。測定項目は水温, 塩分及び透明度で, 水温はサーミスター

* 1990年2月13日受理

** 中国工業技術試験所 Government Industrial Research Institute, Chugoku, Kure City, Hiroshima 737-01, Japan.

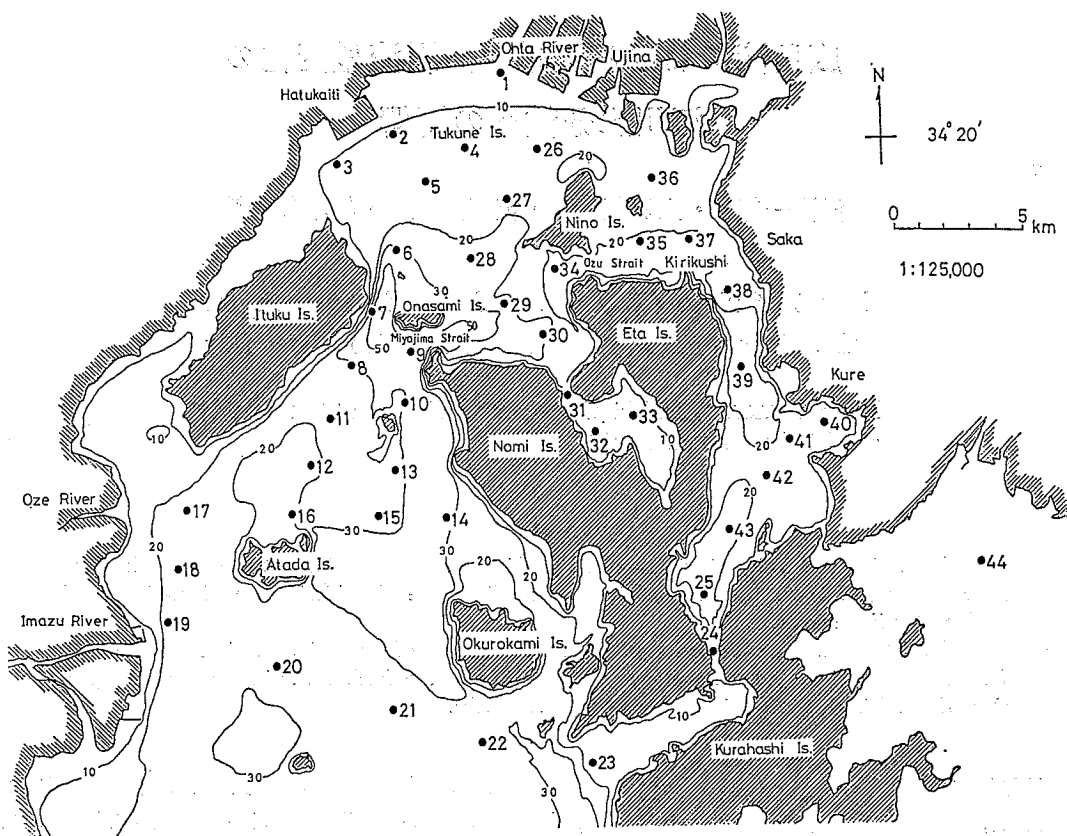


Fig. 1. Observation stations in Hiroshima Bay. Thin line shows the contour of depth in meter.

により現場で、塩分は試水を実験室にもちかえり、サリノメーター (Autorab) で測定した。水温・塩分の測定水深は 0, 2, 5, 10, 底上 1m の 5 層とした。

Fig. 2 に調査期間中の太田川河川流量(日平均値)と測定日を示す。太田川の年平均流量は、30年平均で $78\text{m}^3/\text{s}$ であり、冬場の最も少ない時期で $30\sim 40\text{m}^3/\text{s}$ 程度である(湯浅ほか, 1987)。6月下旬には $30\sim 40\text{m}^3/\text{s}$ で流量は相当少なかったが、7月に入り急増し、特に7月12日には観測期間中で最大の日平均流量 $705\text{m}^3/\text{s}$ を記録した。

2-2. 淡水保存量の推算法

湾内に現存する淡水保存量を求めるために Fig. 3 のように、Fig. 1 の各測定点を代表点とする小さなボックスをとり、各ボックスごとに水深を 4 層 (0~2 m, 2~5 m, 5~10m, 10m~海底面) にわけ、各層別に淡水保存量を求めた。各ボックスの淡水保存量 (F) は、沖合水の塩分濃度 ($S_{\infty}=32$) を基準値として、各ボックスの平均塩分 (S) から次式で算定される。

$$F = (S_{\infty} - S) V / S_{\infty}$$

V は各ボックスの容積である。ここでは地形的要素を考慮して全域を湾北部 (H_N , ボックス 1~18), 湾西部 (H_W , ボックス 19~38), 及び呉湾 (K , ボックス 39~45) の 3 水域に区分し、各水域ごとの保存量について検討した。

3. 観測結果

3-1. 塩分分布の変動

Fig. 4 には表層塩分の水平分布図を 3 例 (No. 3, 5, 7) 示した。6月中でも宮島瀬戸以北の塩分は 30 以下であったが、6月中下旬には、25 以下の領域は太田川河口から 5km 範囲内にせばまっている (No. 3)。

7月10日 (No. 5) には降雨に伴う河川水流出のため観測期間中で最も広く低塩分水が分布し、湾奥及び岩国沖には 10 以下の水が占め、特に太田川河口沖数 km では 2 以下と極度に塩分の低い水がみられた。20 等値線は、呉

広島湾における夏季の河川流量変化の河川水分散への影響

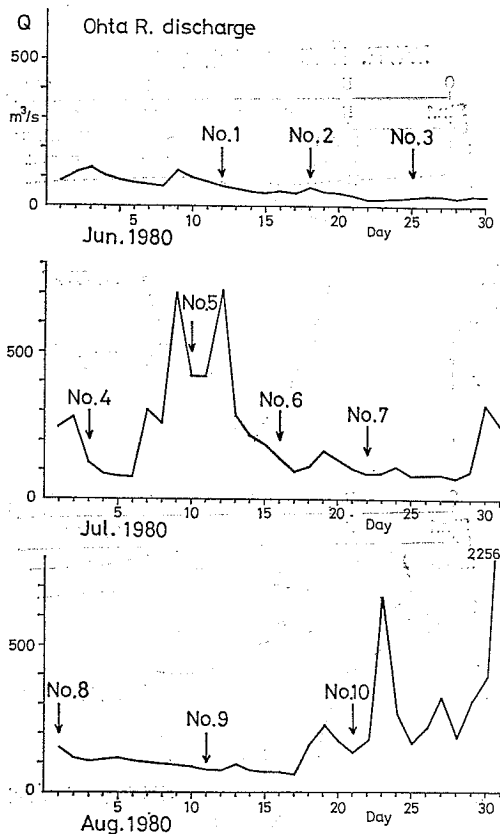


Fig. 2. Discharge of the Ohta River and the dates of observations (No. 1-10).

水道の北端、津久茂瀬戸を通して、能美島北端から南へ走り、河川系水は宮島瀬戸を通して西岸沿いに南へ張りだしており、湾北部から呉湾へ向けての直接的な流出は少ないことが伺える。これは、洪水時には河川系水は宮島瀬戸をこえてから湾の西寄りに分布し、東寄りには高塩分の沖合水が入りこんでいるという上嶋（1986）の指摘と符合している。

以後、流量の減少に伴って塩分は徐々に高くなるが、7月22日（No. 7）にはまだ湾奥の北半分は依然として20以下であった。8月1日には20の等値線は河口から5 km 範囲内にとどまっておき、8月上旬を通してこの状態は続いたが、8月21日には流量の急増により塩分は急激にさがり、湾奥は15以下となった。

次に河川出水時における鉛直方向の塩分の分布状況を見るため、最も低塩分化したNo. 5について太田川河口から阿多田島 Stn. 16 を結んだ縦断面における水温、塩分の鉛直断面図を Fig. 5 に示した。低塩分水は表層2～3 mの非常に薄い層をなして分布し、下層には高塩分水塊が河口付近まで分布し、非常に強い密度成層が形成されている。河川水が大量に流入することによって、水平方向の密度勾配による鉛直循環流が発達し、その結果、下層には高塩分の沖合水が入りこんでいるものと考えられる。

3-2. 河川水拡散範囲の変化

Fig. 4 に例示した塩分分布をもとに河川系水の拡散範

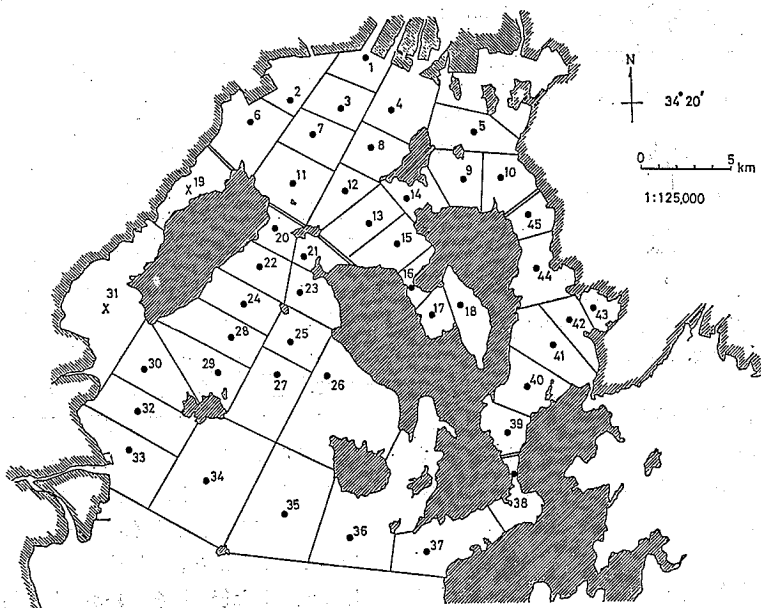


Fig. 3. The area which is represented by each station.

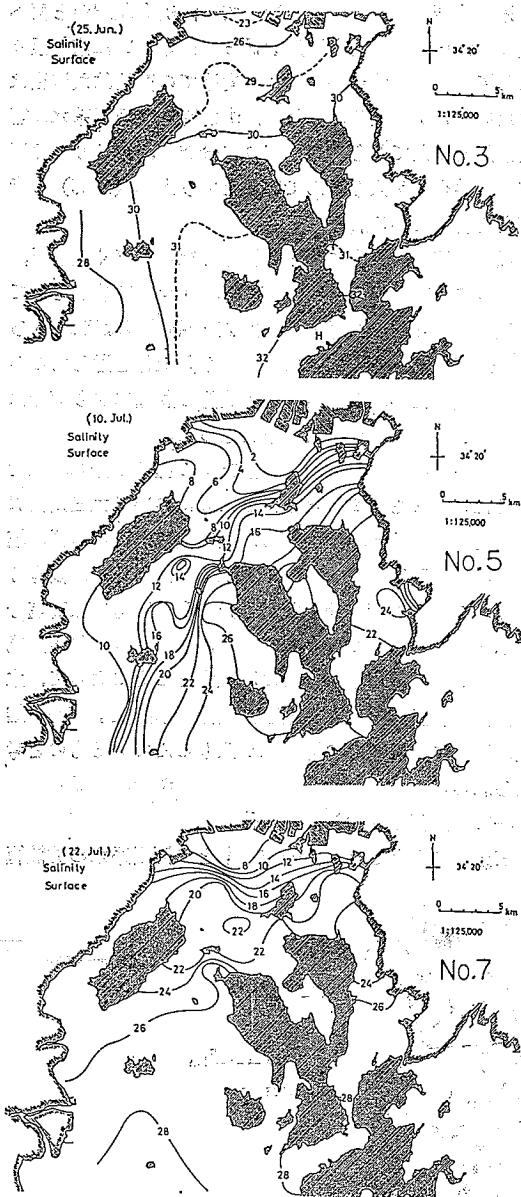


Fig. 4. Distributions of surface salinity from 12 June to 21 Aug. 1980.

図が経時的にどう変化するかをみたのが Fig. 6 a), b) である。図にはそれぞれ観測日ごとの表層における 20 a), 25 b) の等塩分線を示した。これによって河川流量の変動に対応して低塩分水塊が大きくゆらんでいる様子がよくわかる。

6月中は、25の等値線が宮島瀬戸以北にあり、6月25日には20以下の海域はない。7月3日には、25の線は宮

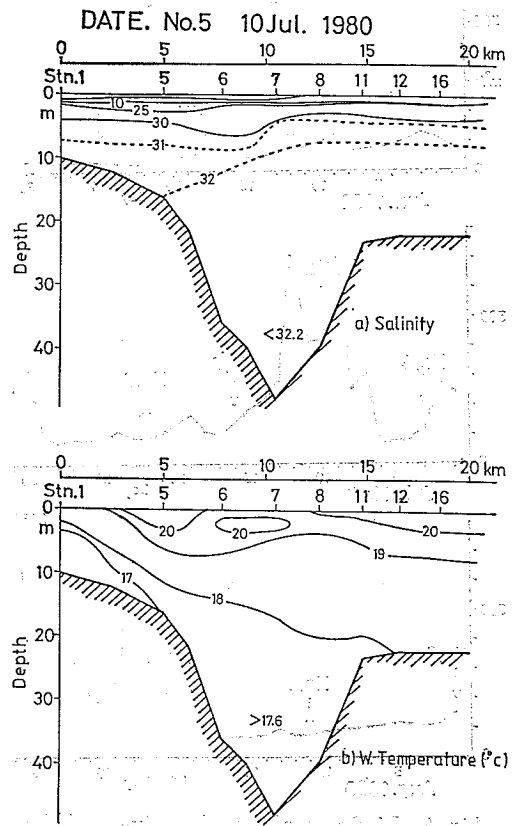


Fig. 5. Vertical sections of a) salinity, b) temperature in Hiroshima Bay on July 1980.

島瀬戸、大那沙美島、似島を結ぶ線まで南下し、更に10日には20の線でも、Fig. 4 でみたように宮島瀬戸から阿多田島方向へ南北に走り、低塩分水が極めて広範囲に分布している。呉水道側では、20の線が切串と坂を結ぶ線まで張りだし、更に20~25の海水が呉湾全域をおおい、呉湾としては相当低塩分となっている。

その後、河川流量が峠をこした7月16日には、20以下の水塊は宮島瀬戸辺りまで分布しているにすぎず、河川系水の分布範囲はかなり縮小している。以後は8月下旬まで、塩分20、25以下の水域は湾奥の一部に限られる状況が続いた。8月21日には塩分20以下の水域が宮島瀬戸と能美島北西端辺りまで張りだしている。

以上より、河川系水の拡散範囲は、河川流量の変動に敏感に反応し、低塩分水塊の分布は数日単位で変動していることがわかる。低塩分水は、河口から宮島瀬戸へ向けて流出した後、阿多田島から岩国沖の間を南下しており、似島、坂を通して呉湾へ向う流出は少ない。即ち呉

広島湾における夏季の河川流量変化の河川水分散への影響

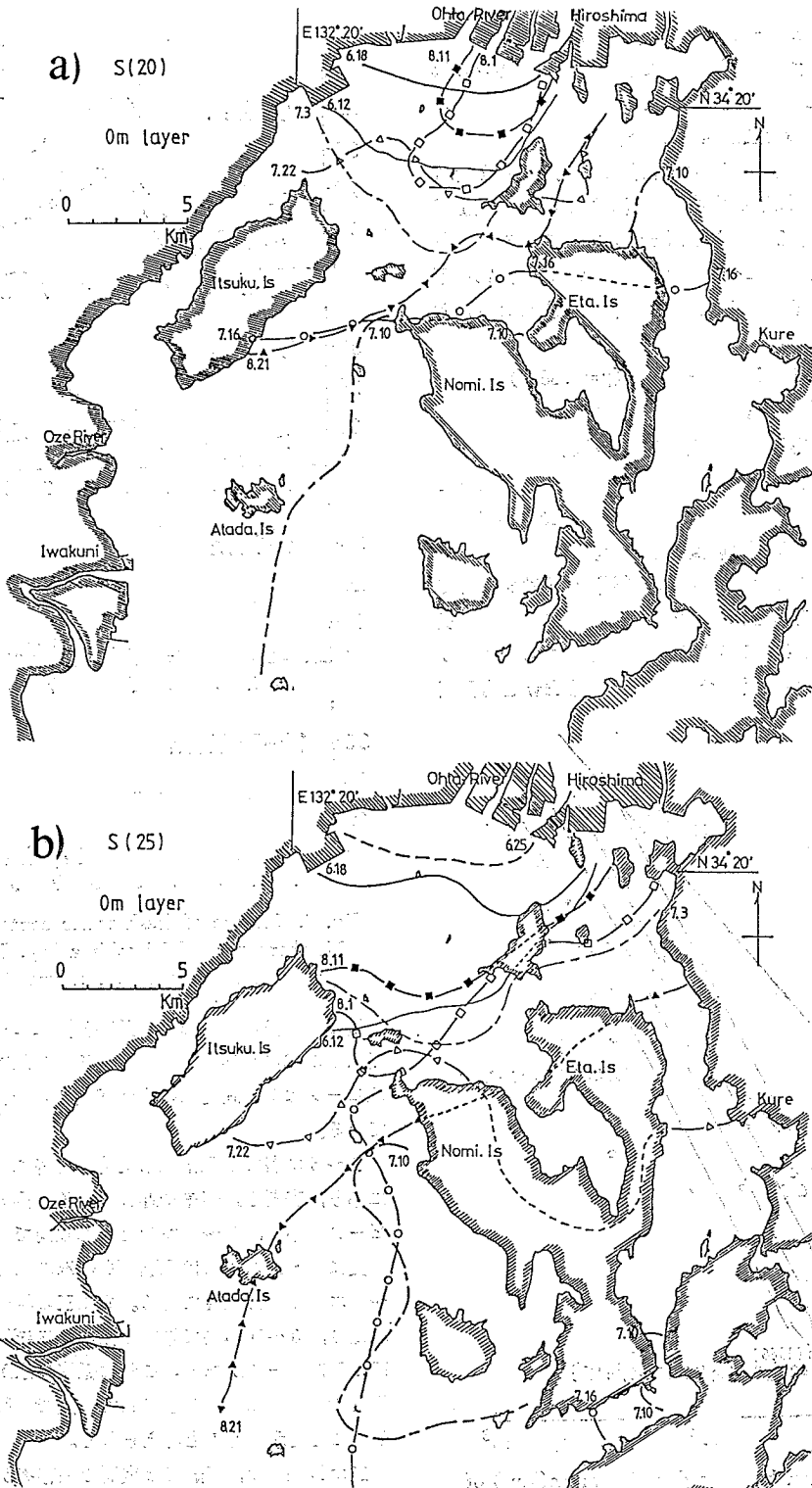


Fig. 6. Variation of salinity contour in the surface water. a) 20 b) 25.

水道の低塩分水は、一旦宮島瀬戸へ向けて流出した湾奥起源のものが、大須瀬戸を通じて切串に達し、徐々に呉側へと流入したものと推察される。

3-3. 河川流量と拡散範囲の相関

低塩分水塊の拡散範囲と河川流量の相関関係を Fig. 7 に示す。塩分 20 以下の水塊の面積でみると河川流量 Q に対応して面積 A はかなりばらついており、特に 8 月 1 日の面積は相対的にやや少ない。これに対し、25 以下の水塊面積でみると、 A と Q との間に下記のような回帰直線が得られる。

$$\log A = 1.135 \log Q - 0.480 \quad (r = 0.8896)$$

ここで r は相関係数である。

3-4. 淡水保存量の推移と平均滞留時間

次に湾内に現存する淡水保存量を 2-2 の方法によって求め、河川流量の変動に対応した淡水保存量の推移を検討し、あわせて平均滞留時間を求めた。

Fig. 8 は層別にみた淡水保存率 (%) の推移を示している。ここで保存率とは、対象とする水域についての淡水保存量 (F) と水域の容積 (V) の比率である。表層 0 ~ 2 m 層の保存率は、湾北部 H_N 、湾西部 H_W とともに河川

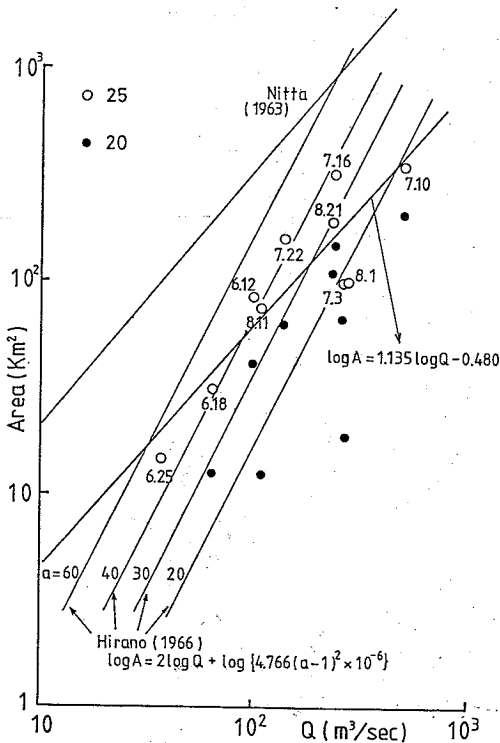


Fig. 7. Relation between diffusion areas (km²) of the river water and the river discharge (m³/s).

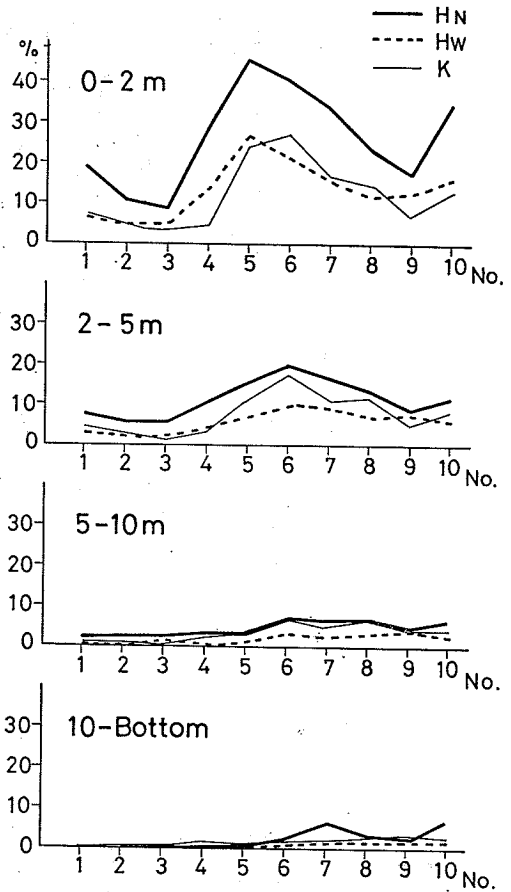


Fig. 8. Change of fresh water content (%). H_N : Northern part of Hiroshima Bay. H_W : Western part of Hiroshima Bay. K : Kure Bay.

流量の最も多い No. 5 (7 月 10 日) にピークに達し、河川水の増減に敏感に対応している。これに対し呉湾 K ではピークは 1 週間遅れの No. 6 (7 月 16 日) にあらわれている。

2 ~ 5 m 層では H_N , H_W とともに保存率のピークは No. 6 にあり、表層と比べやや遅れている。呉湾 K も No. 6 にピークがあり、0 ~ 2 m 層と同じ傾向である。

更に 5 ~ 10 m 層では H_N , K はほぼ同じ保存率で、2 ~ 5 m 層の半分程度である。また K の場合、 H_N , H_W と異なり、0 ~ 10 m 層で増加の傾向はほぼ同様で、共に No. 6 にピークがある。これは低塩分水が表層から 10 m 層まで鉛直的によく混合された状態で、呉水道側に流入したことを示すものと考えられる。

10 m 以深では、 H_N では表層の保存率がピークに達してから約 2 週間後の No. 7 にピークが出現している。

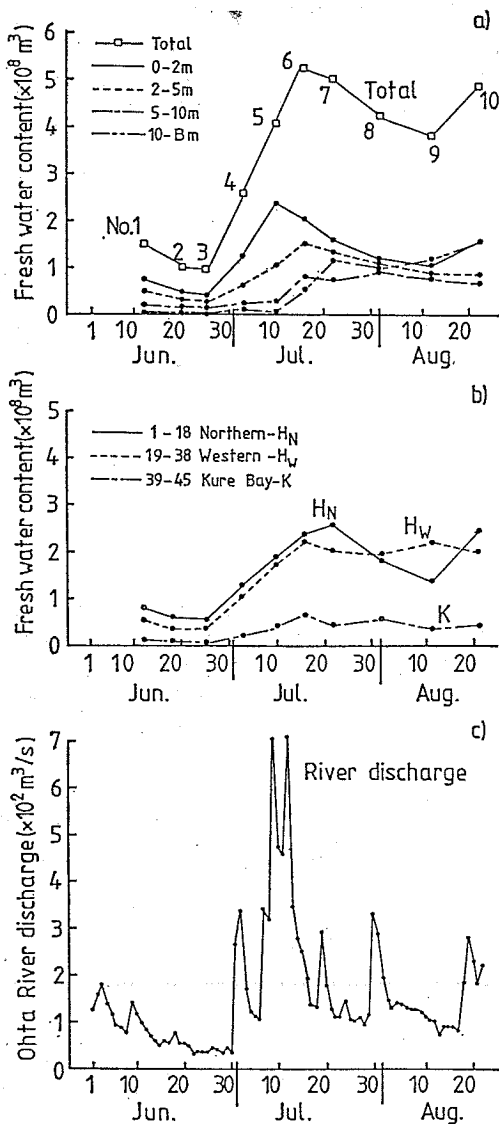


Fig. 9. Fresh water content [a) by depths, b) by districts], and c) Ohta River discharge.

Fig. 9は、a) 全域の全淡水保存量と層別保存量、b) 水域ごとの全層保存量、及びc) 河川流量の変化を示したものである。a) から各層ごとの淡水保存量は、0～2m層は河川流量の最大となったNo. 5にピークがあるが、中層ではNo. 6、下層でNo. 7にピークが現われ、各々位相のずれがみられる。

一方、水域別には、HNではNo. 7に保存量がピークに達するのに対し、HW、KではNo. 6にピークらしきものがみられるもののその後あまり減少せず、顕著な極

大にはなっていない (Fig. 9. b)。これらを合計した全域・全層の保存量はNo. 6で最大となる。しかし最大を示した後の減少は緩慢で、3週間たっても依然として保存量はピーク時の75%を示し、河川流量の減少に対する応答はゆるやかである。

これは、夏季には顕著な成層構造があるため、表層では河川流量の増減に対し、1～2週間で応答するのに対し、下層水と混合した淡水はかなりの間、当該海域に滞留することを示唆している。

また淡水保存量、河川流量の各々について10回の測定値から平均値を求め、その比率から観測対象水域における河川水の平均滞留日数を求めると、20.6日となる。

4. 考 察

夏季の広島湾における河川流量の変動に対する環境変化について集中的な観測を行った。表層の淡水保存量は、河川流量の変動に敏感に反応し、数日単位で応答している。太田川の河川流量と拡散範囲が直線関係にあることを示した Fig. 7 はそれを物語っている。Fig. 7 のような形で、同一河川について流量変化に対する拡散面積の相関をとった例は、これまで見かけないが、その回帰直線の傾きが、多くの河川での異った時期の観測データから求めた新田 (1963) の関係式の勾配と一致していることは興味深い。これより河川系水の拡散面積は河川流量によって一義的に決まっていることが示唆される。

Fig. 7 で両者の回帰式で縦座標にずれがあるのは、新田 (1963) では河川系水の境界の希釈倍率を60、塩分で約31.5としているのに対し、著者らは塩分25として拡散回積を求めているためである。

HIRANO (1966) は、河川水の拡散が「下層からの海水の取り込み (entrainment) に伴う海水との混合」によって起るものとして、河川水拡散範囲の定式化を試み、次式を提案している。

$$A \leq 27(a-1)^2 \rho Q^2 / 8\pi a g h^3 \quad (3)$$

ここで A は拡散範囲 (km²)、 Q は河川流量 (m³/sec) であり、 A が流量 Q の2乗に比例することになる。その他、 a は河川系水の先端における希釈倍率、 ρ は海水の密度、 α は海水と淡水の密度差、 h は淡水と海水の混合水の層厚である。

この式で $\rho=1$ 、 $g=9.8\text{m/sec}^2$ 、そして $\alpha=23 \times 10^{-3}$ 、 $h=1\text{m}$ とすると次式がえられる。

$$\log Aa = 2 \log Q + \log \{4.776(a-1)^2 \times 10^{-6}\} \quad (4)$$

Aa は、希釈倍率が a の時の拡散範囲であり、上記の式で a をパラメーターとして $a=60, 40, 30, 20$ について Fig. 7 に示した。図からすぐわかるように新田 (1963) や筆者らの実測値に基く回帰式の勾配が 1.1~1.2 なのに対し、(4)式では傾きが 2 と大きい。

筆者らの $S=25$ の回帰直線と比べると、 $a=20\sim40$ の場合に、拡散範囲はほぼ一致している。しかし $S=25$ は希釈倍率にすると a は約 5 であるから、流量が $10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ を越えない範囲では、(4)式の方が拡散面積をかなり小さく評価していることになる。この原因は、HIRANO (1966) も指摘するように層厚 h の決め方にあると考えられる。(3)式から A は h^3 に逆比例しており、例えば $h=0.5 \text{ m}$ とすれば A は一挙に 8 倍になる。 h は河口付近を離れると、かなり薄くなり、Fig. 7 での実測値とのずれは、 h として 1 m と仮定するのが相当過大評価になっていることを示唆している。

中底層の淡水保存量は、表層に比べやや遅れて極大を示した。これは表層を拡散した河川系水が鉛直混合により次第に中底層へ輸送されていくことを示唆している。本報では連続観測を同時に行っていないため、中底層に影響が現われるまでのタイムラグを正確に捉えることはできなかった。

上嶋 (1980) は、1979年7月、津久根島 (Fig. 1 の Stn. 4) で水深 1, 2, 4, 8m 層の水温、塩分の連続観測を行ったところ、表層で出水に伴う塩分低下が起ったのち、8m 層では18日後に約 2 の急激な塩分低下が起ったとしている。これは表層へ供給された河川系水が2週間強で中底層に輸送されたことを示唆しており、著者らの観測において、淡水保存量が表層のピークから2週間後の観測において中底層で極大となることと符合している。

一方、広島湾 (H_N+H_W+K) における河川水の滞留日数についての著者らの推定値 20.6 日は、木村 (1975) が広島県水産試験場の浅海定線調査の塩分分布にもとづいて推定した $21\sim28$ 日とほぼ同じオーダーである。この値は、夏場の広島湾における平均的な交換状況を示すものとみられる。柳 (1988) は、大阪府水産試験場の塩分データをもとに大阪湾での淡水の平均滞留日数を 1.5 ケ

月と評価している。大阪湾は広島湾北部と比べ面積で 7 倍、水容積で 11 倍であることを考えあわせれば、広島湾北部の方が大阪湾全体より相対的に交換状況は悪いことが推察される。

5. おわりに

太田川の流入する広島湾を対象に河川水の流量変動に対応して、湾内の淡水保存量の応答関係を示した。降水による河川水流出の増加に伴い、湾内の表層塩分は急激に低下するが、その回復及び下層への鉛直的な混合過程を追跡した。しかし流量の減少に対する淡水保存量の減少は、緩慢におこっており、これは鉛直混合によって下層水に混じりこんだ淡水の湾外への流出が遅いためと推定された。更に観測期間中の広島湾北半分(呉湾も含め)における平均的な河川水の滞留日数は 21 日となった。

文 献

- HIRANO, T. (1966) On the dilution area of effluent in the sea. Special contributions, Geophysical Institute, Kyoto University, **6**, 107-112.
- 木村知博 (1975) 広島湾海域に流入する淡水の移流について. 水産増殖, **22**(3), 110-119.
- 新田忠雄 (1963) 海洋域における工場廃水の希釈と拡散について. 用水と廃水, 5-6.
- 杉本隆成 (1983) 物理の面からの沿岸海洋研究. 沿岸海洋研究ノート, **20**, 109-117.
- 鈴木輝明・湯浅泰昌 (1980) 三河湾における窒素・リン現存量の把握. 1980年日本海洋学会春季大会講演要旨集, 199-200.
- 上嶋英機 (1980) 広島湾内の河川水の流出分散. JAFSA RS REPORT 801008, 81-101.
- 上嶋英機 (1986) 瀬戸内海の物質輸送と海水交換に関する研究. 中国工業技術試験所研究報告, **1**, 1~179.
- 八木明彦・西条八束・仁木義郎 (1978) 三河湾における栄養塩と植物プランクトンの動態. 愛知県環境部, 富栄養防止技術研究会報告, 63-77.
- 柳 哲雄・高橋 暁 (1988) 大阪湾の淡水応答特性. 海と空, **64**(2), 1-8.
- 湯浅一郎・上嶋英機・宝田盛康・橋本英資 (1984) 広島湾・呉湾における水質変動特性. 中国工業技術試験所報告, **22**, 47-66.
- 湯浅一郎・上嶋英機・宝田盛康・橋本英資 (1987) 太田川感潮域の水質変動. 中国工業技術試験所報告, **29**, 1-14.