

明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について

京都大学教授 理学博士 速 水 頌 一 郎

同 助 手 福 尾 義 昭

同 大学院学生 依 田 大 介

ま え が き

瀬戸内海と外海との海水交流は速吸瀬戸、下関海峡、明石瀬戸、鳴門海峡、紀淡海峡などの狭水道を通じて行われる。この海水交流は瀬戸内海の海洋学的性質を特性づけるものであつて、瀬戸内海を対象とする海岸工学の諸問題にとつて重要な意味をもっている。従来の研究(日高1937)によると瀬戸内海の恒常流は極めて微弱であり、海水の流動は専ら潮流や吹送流によるものである。恒常流を検出するには潮流の効果を除去するために長期に亘る潮流観測が必要であるが、このような資料はいまだ少なく、これを以て瀬戸内海の恒常流を論じうるまでに至っていない。僅かな資料が示すところによると恒常流の存在は甚だあいまいである。したがつて海水の交流は主として潮流によるものと推定されるが、その過程についてはまだよく判っていない。潮流による海水混合の問題は既に本講演会において市栄博士が詳しく解説されたように、近年頗る注目されだした研究分野である(市栄 1954, 1955)。

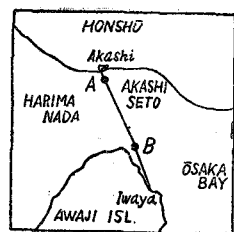
海岸に建設された火力発電所は多く海水を冷却用水に使用しているが、昇温したその排水はどのような速さで海中に拡がってゆくか、大阪湾などでは糞尿が多量に投棄されているが、それはどの程度まで外洋に流出するものであるか、また潮流による海水密度の変化は船舶の浮力を変化させるが、吃水制限のある浅い港では船舶の積載量にどの程度の変化を与えるであろうか。このような問題はいろいろあるが、いずれも潮流による海水混合に関連する問題である。

この研究は潮流によつて播磨灘と大阪湾の海水が明石海峡を通じて如何に交流しているかをしらべたものであつて、潮流による海水混合の問題に一つの資料を提供するであろう。

1. 観 測

潮流による海水の交流、混合の様子は潮流の資料だけでは判らない。それには交流する海水そのものをしらべなければならない。明石海峡では都合よく明石港と岩屋港との間に航送船が運航しているので、これに便乗して採水した。図-1に航送船の航路を示した。採水には金属採水バケットを使用し、表面下約50cmの表層水を採取した。採水は図-1の航路AB間において航行中ほぼ等間隔に10回行い、毎回180ccの水を採つてこれを混合し、全部で1升瓶に満水するようにした。したがつて1航行について1升瓶1本の採水ができることになる。この水を以て航行の中央時刻における海峡横断線上の平均表層水を代表させた。1航行に要する時間は約20分である。採水は航送船の運行する回数だけ行うように努めたが、航送船は昼間のみ運行しているので夜間の資料は得られなかつた。しかし昼間の資料だけからでもある程度解析を行うことができた。観測は1955年8月2日～16日の15日間毎日休みなく行つた。観測の期間は好天に恵まれ、雨は1度も降らなかつた。

図-1



2. 採水資料の処理方法

海水の交流を研究の主眼としたために、試水の水質測定はこれに必要な程度に止めることにして、塩素量と密度とを測定した。塩素量の測定は日本海洋学会発行の海洋観測指針に従い、ウランニ澱粉指示薬を使用するFajansの方法によつた。測定精度は $\pm 0.01\%$ であつた。塩素量はClで表わす。密度の測定には筆者速水が数年まえに考案試作した密度計を使用した。測定精度は $\pm 2 \times 10^{-6} \text{gr/cm}^3$ である。密度計の詳細は別の機会にのべるが(速水1954)、それは全潜比重計の原理に基いて、測定を迅速、正確、かつ容易に行えるようにしたものであつて、装置全体は電気冷凍機によつて温度は 0°C 附近に保つた恒温槽に納められている。測定は零点法により、蒸溜水を標準にとつて、試水による浮力の変動をエリンパー線の振り角によつて測る。また試水の温度は装置に附随したベックマン温度計によつて 0.01°C まで測れる。測得した 0°C における密度から 4°C を標準温度にとつた 0°C における比重 ρ'_0 を計算した。比重の精度は密度の精度と同程度である。次に $\sigma'_0 = (\rho'_0 - 1) \times 1000$ で定義される σ'_0 の値を計算した。また測定した塩素量からKnudsen表によつて σ'_0 に対応する σ_0 を計算した。 σ_0 と σ'_0 とは一般に一致しない。差 $(\sigma_0 - \sigma'_0)$ を過剰比重

とよぶことにし、これを $\Delta\sigma_0$ で表わす。

Knudsen 表は海水中の塩類の相対組成比が全海洋を通じて常に一定であると仮定して作成されたものである。しかし現実の海洋では含有塩類の組成比は場所によつて、また時によつて多少変動しており、特に河川の流入がある沿岸とか、大都市、工業地帯の排水によつて汚染された海域などではその差が著しい。したがつて過剰比重 $\Delta\sigma_0$ は Knudsen が準拠した標準海洋と現実の海洋における塩類組成の相違を表わすものと考えられ、海水の水質を表示する好適の指標とみられる。

海水の交流を取扱う場合には交流に関与する海水の特性を捉えなければならない。海水はそれが保有する保存量間の関係によつて特性づけられ、この関係を利用して水型の解析が行われる。保存量としては各種のものがあげられるが、水温 (T)、塩分 (S) を利用する $T-S$ 相関図はその代表的のものである。しかしわれわれの場合には表面水を15日間に亘つて採水したのであるから、気象の影響を受ける水温を保存量として採用するのは面白い。それで水温の代りに過剰比重を用いることにした。過剰比重は海水に含まれている塩類の質を表わし、塩素量はその量を表わすから、両者の相関はよく水型の特性を表示するものと予想されたが結果は予期以上に好成績であつた。この方法では現場作業は採水だけでこと足りる。水型の分析にかかる方法を使用したのはこの研究が最初であらう。

以上は採水資料に基くこの研究の根本資料であるが、このほか明石海峡の潮流、神戸港、明石港の潮位などを重要な参考資料に供した。

3. 測定結果

この研究に対する根本資料はすべて図化して次に示す。図—2は明石海峡における塩素量、過剰比重の時間的变化、明石海峡中央部の潮流（水路部推算）、神戸港及び明石港の潮候曲線を表わし、図—3は明石海峡における毎日の $\Delta\sigma_0-Cl$ 相関図を、図—4は明石海峡における15日間の $\Delta\sigma_0-Cl$ 総合相関図を表わしている。

4. 測定結果に基く考察

図—2をみると塩素量、過剰比重の潮汐変化は明白であつて、海水の交流が潮流によつて支配されていることを示している。図—4の $\Delta\sigma_0-Cl$ 総合相関図をみると、この図で実線は図—3に示した毎日の相関線

図—2

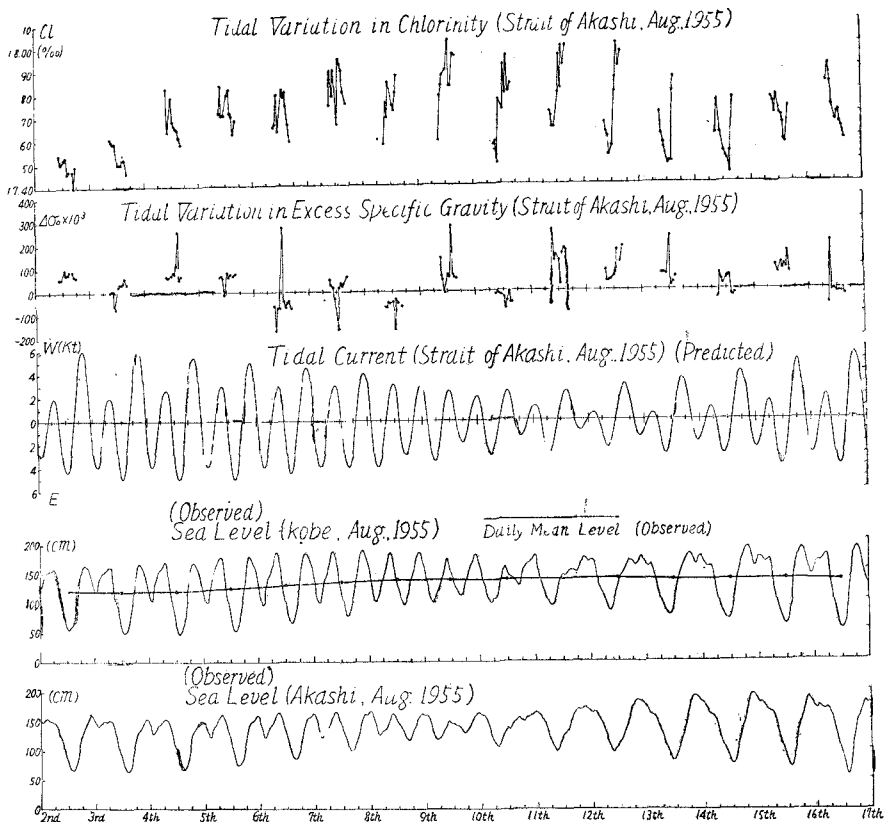
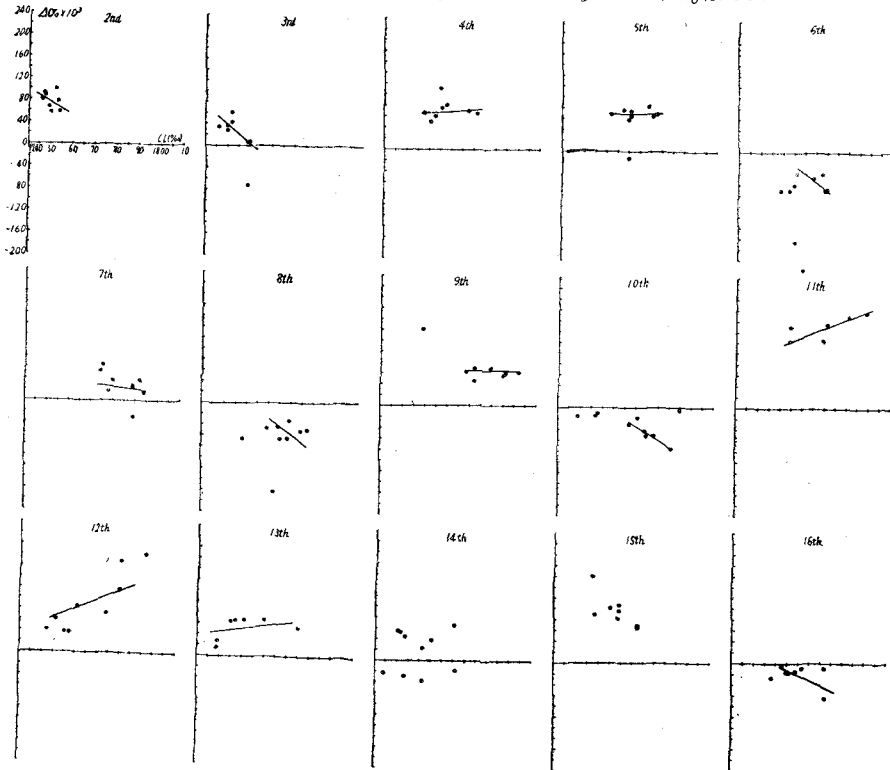


図-3

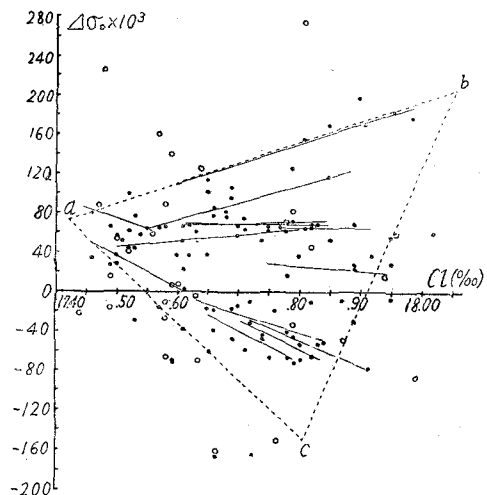
 $\Delta\sigma$ -Cl Correlation Diagram (Strait of Akashi, Aug. 1955)


(回歸線)を表わしているが、これらの直線は1点に向つて収斂している。この収斂する点aは播磨灘の海水を表している。また直線はこれと反対方向に発散しているが、これらの直線を包むと一つの三角形が得られ、測定点は概ねこの三角形の内部に含まれる。点は三角形の外部にも散乱しているが、これらの多くは転流時に近いものである。図の白圏は転流時附近の値を表わしている。これは極めて注意に値する現象である。日高博士がかつて調査された大阪湾及び紀伊水道における塩素量、過剰比重の分布(日高1938)を参照すると三角形の他の二つの頂点のうちbは大阪湾北部の沿岸水を、cは紀淡海峡より流入する紀伊水道北部の海水を表わすものと思われる。明石海峡の東部に現われる大阪湾の水はb c 2点を結ぶ線上にあり、bの水とcの水との混合水を表わしているが、その混合状態は断えず変化している。

8月2日前後、大阪湾の平均潮位が低く、かつまた大潮でもある時期には測定点は概ねaの附近に限定されているが、8月10日前後、大阪湾の平均潮位が高く、かつまた小潮の時期においては相關線はaの附近からb c線に向つて長く走つている。これから推定すると播磨灘と大阪湾の海水は明石海峡を通じて専ら潮流によつて互に混合しているが、15日間を通じてみると播磨灘の水がより多く大阪湾に流入しているようである。

b点によつて代表される大阪湾北部の海水は Knudsen の標準海水に比べて塩素量の割合が非常に多い。そして過剰比重の値は日高博士がしらべた時よりも更に大きくなつている。これは工場排水、糞尿投棄などに起因するものであろう。

図-4



5. 海水の潮汐混合機構

5.1 うえにのべたように海水の交流は潮流と密接な関係をもっている。H.Stommel は潮流を要素とする大規模の水平乱流を考え、これに混合距離の概念を適用して潮流による水平混合が拡散現象として取扱えることを論じた。(Stommel 1951). しかし乱流の機構は明かでなく、実証的な論拠にも欠けているようである。われわれの観測結果はこの問題への一つの基礎資料となるであろう。図-3, 4にみるように、点($\Delta\sigma_0, Cl$)は概ね1直線上にあるが、転流時の近傍において点が散乱する傾向にあることは極めて注意すべき現象である。これから推定すれば、気体論においてガス分子が相互に衝突するまでは確定論的経路を辿るが、衝突によつて不確定性が現われ、その巨視的性質が確率で規定されると考えるように、潮流もその速度が大きい間は確定論的に行動するが、転流時の前後には流れが乱れて不確定性が現われ、潮汐混合の巨視的性質は確率で規定されることができると考えることができるであろう。これは気体における自由経路に相当するものとして潮流によつて一方向に流れる距離(l で表わす)を混合距離とみなしうることを示唆する。したがって混合係数(拡散係数) A は

$$A = \alpha l \cdot u, \quad l = u \cdot T \quad \dots\dots\dots (1)$$

によつて与えられる。ここに α は混合の度合を表わす係数, u は潮流の平均流速, T は潮流の半周期を表わす。

いま思考模型として塩素量 Cl_1, Cl_0 なる二つの水塊が最初($t \leq 0$) ひとつの鉛直境界面($x=0$, 東方を正にとる)で互に接触しており、それが突然、潮流によつて x 軸の方向に混合する場合を考えると t 時間(>0)後の塩素量の分布は

$$Cl = \frac{Cl_1 + Cl_0}{2} + \frac{Cl_1 - Cl_0}{2} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{At}} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。われわれが観測した時間は平均において $t=T$ に相当する。(2)式は次のように無次元化できる。

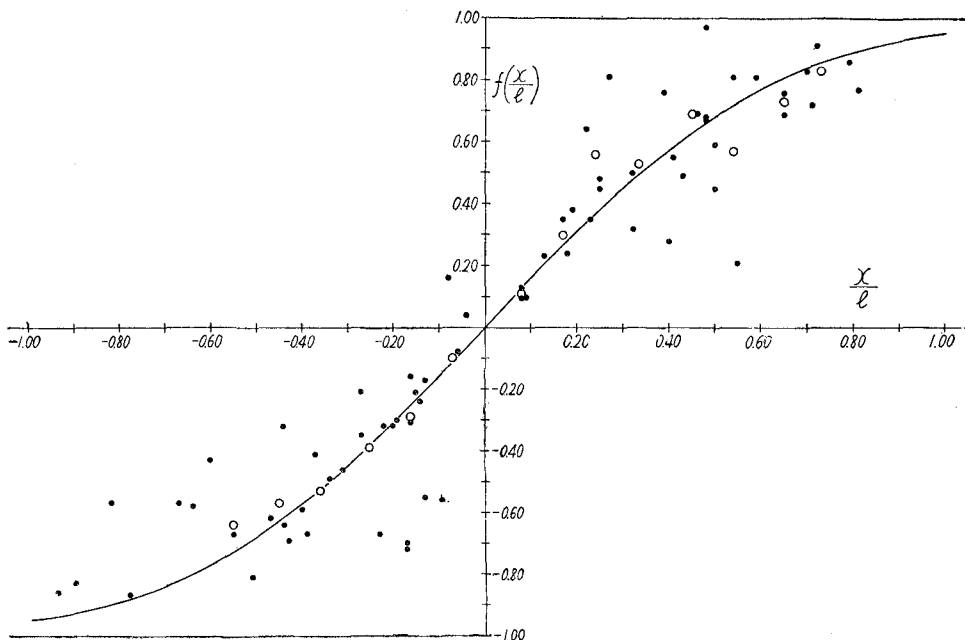
$$\frac{2Cl - Cl_1 - Cl_0}{Cl_1 - Cl_0} = \operatorname{Erf} \left(\frac{x/l}{2\sqrt{At/l}} \right) \quad \dots\dots\dots (3).$$

以下(3)式の左辺を $f(x/l)$ で表わすことにする。観測された塩素量は時間的変化であるが混合距離の概念を用いると次の変換式によつて空間分布に変換できる。

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t u_0 \sin \pi \left(\frac{t-t_0}{T} \right) dt \quad \dots\dots\dots (4),$$

ここに x は地点 x_0 で t なる時刻に観測された海水が, t の直前の転流時刻 t_0 に存在した位置を表わし, u_0 は潮流の最大流速を表わす。5.2 明石海峡の資料にこの思考模型を適用してみる。 Cl_0 を図-4のa点

図-5



にとり、 Cl_1 を同図の $b c$ 線と毎日の相関線との交点にとる。 l, u_0 は図-2 の潮流資料から求める。次に x であるが、(4) 式からは x の相対値 $(x-x_0)$ が得られるだけである。 x の絶対値を知るには原点の位置が判らなければならない。それは (3) 式の誤差函数が 0 となる位置によつて与えられる。この位置は平均潮位によつて動揺しているから、これを正確に決定することは困難である。しかしある転流時から次の転流時に至る間の観測値に最も適合する誤差函数を描き、内挿または外挿によつてその値が 0 となる点を求めると、この期間における原点の位置が近似的に求まる。この方法をすべての観測期間に適用して x の値を求める。かくして (3) 式の左辺 $f(x/l)$ を x/l に対してプロットすると図-5 が得られる。点は当然のことながら相当に散乱しているが、白圏はその平均値を表わす。平均値は x/l の間隔 0.1 ごとに求めた。図の曲線は平均値に適合するように計算した誤差函数であるが、白圏はほぼこの曲線にしたがつており、多数の平均において (3) 式が成立することを示している。この図で $x/l=1$ に対して $Erf=0.95$ となるから、誤差函数表によつて

$$\frac{l}{2\sqrt{At}}=1.4, \text{したがつて } \sqrt{At}=\frac{l}{2.8} \dots\dots\dots (5)$$

この場合 $t=T$ であるから

$$A=\frac{1}{7.8}lu \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式は (1) 式と同形である。(1), (6) 式から

$$\alpha=0.12 \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、平均して潮流の半周期ごとに約 10% の海水が混合する。

以上の推論は表面水の資料に基いたものであるが、明石海峡の潮流は傾斜流とみなされ、流速は海面から海底までほぼ一様と考えられるから、明石海峡の全海水に対して同様の結論が下せるであろう。潮汐混合は波浪や吹送流による混合と異なつて、その効果が海底にまで及ぶ点において特に重要である。

謝 辭

この研究は神戸市明石海峡調査会並びに日本ユネスコ国内委員会海洋資源開発調査委員会の援助をうけて行つたものである。ここに多大の援助を給つた関係当局各位に深謝の意を表明したい。

参 考 文 献

- 1) 日高孝次：瀬戸内海の東向流について。海と空，Vol.17, 1937.
- 2) 日高孝次，安井善一：ナンゼン全潜比重計による海水密度の測定。海と空，Vol. 18, 1938.
- 3) Stommel, H. and Arons, A.B.: A Mixing Length Theory of Tidal Flusing. T.A.G.U., Vol.32, 1951.
- 4) Hayami, S.: Water Mass Analysis Applied to River Outflows. Pub. n°37 de l'Assoc. Int. d'Hydrologie (Assem. Gén. de Rome, Tome II), 1954.
- 5) 市榮譽：タイダル・フラッシュについて。海岸工学研究発表会論文集，1954.
- 6) 同：Estuary の水理について。海岸工学講演会講演集，1955.
- 7) Hayami, S., Fu Kuo, Y. and Yoda, D.: On the Tidal Mixing of Sea Water through Narrow Channels. Rec. Oceanograph. Works in Japan, Vol.3, No.1, 1956.