

沿岸海域の海水交換*

武 岡 英 隆**

要旨 沿岸海域での海水交換に関する様々の考え方の中から、応用面を重視した立場で、海水交換の基本的考え方や明らかにされるべき問題を設定する。そして、従来の海水交換に関する研究が、設定された考え方に立てば、どう位置づけられるか、それらにはどのような意義があるのかを検討する。さらに、海水交換を総合的に理解するための今後の課題について考える。

1. まえがき

沿岸海域は、人間の住む陸地に直接面していることに加え、外洋に比べ水深が浅いことや閉鎖的性格を持つことのため緩衝容量が小さく、人間活動の影響を受け易い海域である。我が国では、1970年代において、この沿岸海域の汚染は極度に進行し、深刻な社会問題になるに至った。このため、この頃から沿岸海洋の研究では、環境保全への寄与を念頭に置いたものが大きな比重を占めるようになった。海水交換に関する研究は、このような性格の強いものと言えよう。海水交換の能力は、容量の小さな、従って限られた浄化能力の沿岸の場合から、外洋のより大きな浄化能力の場合へと物質をゆだねるという意味で、言わば物理的な浄化能力と呼べるものだからである。そして現在に至るまで、海水交換に関しては極めて多くの研究の集積がなされてきた。この間の海水交換に関する理解の進歩には著しいものがある。

しかしながら、これらの研究はむしろ多様化こそすれ、体系的にまとまる方向へと向かっては来なかったように思われる。その原因の一つは、海水交換という現象が、本来一つの現象を表わして

いないことにあると思われる。潮流とか吹送流とか言えば、それらは各々が一つの力学を持った現象であるが、海水交換とはそのような物理的実体を表現する言葉ではない。交換を起こすのは、潮流である場合もあれば吹送流や密度流あるいはその他の流れである場合もあり、交換とは、それらの現象の起こす結果である。それ故、対象とする海域によって扱う現象は異なり、また研究成果を応用すべき、現実的な問題の性格も異なる。このような事情に加え、純粋に物理的な問題として交換の機構を明らかにすることを重視する立場や、応用面を重視して、交換能力の評価を問題とする立場等の、問題意識の違いもあって、海水交換の研究は多様化してきたのであろう。

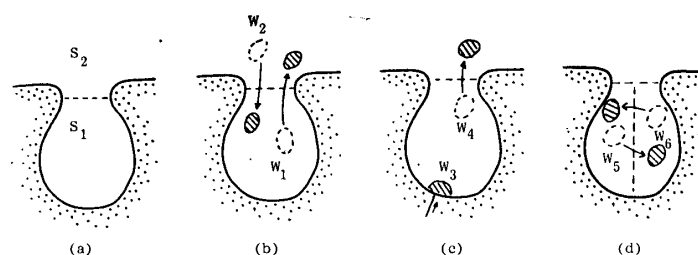
この論文では、このような海水交換に関する研究を体系的に理解するための一つの試みとして、まず海水交換とは何かという基本的な問題に立ち帰り、この考え方を基礎として従来の研究の持つ意味を再検討する。そして、海水交換を総合的に理解するための今後の課題や、研究成果の応用等について考える。

2. 基本的考え方

これまで、「海水交換」という言葉の意味を厳密に定義して用いた例は少い。これはこの言葉の意味するところが、一見自明のように思われるからであろう。実際、密度流とか陸棚波といった言葉とは違い、海水交換という言葉からは、海洋学に無縁の人でさえ、そう的はずれでないイメージを持つことができよう。しかし、それにもかかわらず、あるいはその故にこそ、海水交換という言葉はかなり漠然としており、実際には様々なニュアンスで使われて来た。これらについて、大きく分

* 1983年8月3日受理

** 愛媛大学工学部海洋工学教室



第1図 海水交換の考え方を示すための沿岸域のモデル。S₁は対象海域，S₂は外海。
Wは水を表わし，W₁とW₂，W₃とW₄，W₅とW₆の体積は各々等しい。

けると2とおりの使われ方がある。一つは、海峡や湾口での海域相互の水のやり取りを指す場合であり、今一つはこのような海峡付近にこだわらず、対象とする海域全体での水の入れ換わりを指す場合である。これらのうち、ここでは後者の立場を取る。これは、環境保全等の応用面での問題を考えた場合、中心的課題は、後者のような海水交換にあると考えられるからである。以下に、このような意味での海水交換について、詳しく定義する。

今、第1図(a)のような海域 S₁ を考え、S₁ は破線の境界によって海域 S₂ に接しているとする。ある時刻から、一定時間経過後、S₁ の水の一部 W₁ が S₂ 内に移動し、S₂ 内の水の一部 W₂ が S₁ 内に移動したとする（第1図(b)）。W₁ と W₂ の量が等しければ、両海域の水の量は変わらない。このように、ある海域の水の一部が他の海域の水と等しい量だけ入れ換わったとき、我々は普通、海水が交換したと言う。しかし、このような現象を、そのまま海水交換の定義とするのは少し早計である。もし S₁ に流入する河川があったとし、第1図(c)のように、W₃ の水が河川より流入し、かわりに W₃ と体積の等しい W₄ の水が S₁ から出たとする。この場合も、S₁ の水は入れ換わっているが、(b) の場合と比べ、水を与えた海域から水をもらった訳ではない。別の見方をすれば、(b) の場合境界断面で平均すれば移流はないのに対し、(c) の場合は平均的にも移流は存在する。このため (c) のような水の入れ換わり方を移流によるものとして、交換とは呼ばない場合もある。しかし、ここではこのような場合も含め海水交換と呼ぶことにする。

これらの第1図(b)と(c)の海水交換に関して、本質的なことは、S₁ の水の一部が外へ出たこと、別の言い方をすれば S₁ にもともと存在していた水が減少したことである。このように考えると、海水交換とは、対象海域を満たしている水が、海域外へ出ることによって減少することであると定義される。もちろん、減少した分は別の所からきた新しい水で満たされ、S₁ 内の海水の総量が変わる訳ではない。

このように海水交換を定義すれば、第1図(d)のように、海域内で海水が移動したとしても海水交換とは呼べない。しかしながら、(b) の場合も (d) の場合も、いずれも起こっていることは海水の輸送である。これらの一方を交換と呼ぶのは、その場合の海水の移動が境界を横切るからであるが、この境界は、一般には物理的意味のあるものではない。この境界は、その内部にある水はどこにあっても等価とみなすという線であり、人間の都合によって決められるものである。従って、問題によっては、(d) の破線のように境界が設定され、交換と呼ばれる場合も考えられる。このように考えれば、海水交換とは、応用面から見た海水の輸送の結果の一つの表現であると言うことができる。

さて、それでは海水交換は定量的にはどのように記述されるであろうか。上の定義では、対象とする海水の減少を海水交換であるとした。従って、この減少量、あるいは残量を示すことが交換の量的記述となろう。この海水の減少量は当然時間的に変化するから、海水交換の全容を記述するには、減少量あるいは残量が、時間の関数として

沿岸海域の海水交換

示されねばならない。即ち、対象とする海域の海水の量を V_0 とし、この海水が時刻 t に、海域内に $V(t)$ 残っているとすると、 $V(t)$ あるいはこれを無次元化した $V(t)/V_0$ を t の関数として示すことが、その海域でどのように海水交換が起るかを定量的に記述することになる。

以上が、ここでの基本的な海水交換の考え方の設定である。しかし、この設定は現実的な問題を考えた場合、若干考え方を絞った面も持っている。例えば、対象海域に流入する河川があり、この河川が汚染物の供給源となっているとしよう。この汚染を考えた場合、海域内の水をすべて等価に扱う訳にはいかない。物質濃度の高い水の交換と低い水の交換は明らかに価値が違うのである。この場合は、物質を荷っている河川起源の水、あるいは物質自身の交換を考える必要がある。この場合も、交換とは対象とする水や物質が海域外へ出ていくことと定義すれば、交換の記述も、全部の水の場合と同様になされる。即ち、最初対象とする水や物質の量を R_0 とし、時刻 t におけるその物質の残量を $R(t)$ とすると、 $R(t)$ または $R(t)/R_0$ で、その物質の交換が記述される。このような問題は、海水交換とは呼びにくい、現実的にはこのような問題こそが重要となる場合が多い。それ故、これらも含めて海水交換の問題として扱うべきであろう。なお、上の $R(t)/R_0$ を $r(t)$ で表わし、これを対象とする物質の残余関数と呼ぶことにする。

3. 海水交換に関するこれまでの研究

前章では、海水交換の基本的考え方を設定したが、このことは、この考え方を基礎とした研究のみを海水交換の研究としようという訳ではない。海水交換の問題が物質輸送の問題であることを考えれば、沿岸海域での海水の運動に関するほとんどすべての研究は海水交換に関係し得るものであり、別の意識による海水交換の研究も、ここで設定した海水交換の研究と深い関わりを持つものである。本章では、これまでの種々の海水交換の研究が、ここで設定した海水交換の研究と、どのよ

うな関わりを持つのか、あるいはそれらにはどのような意義があるのかについて検討する。

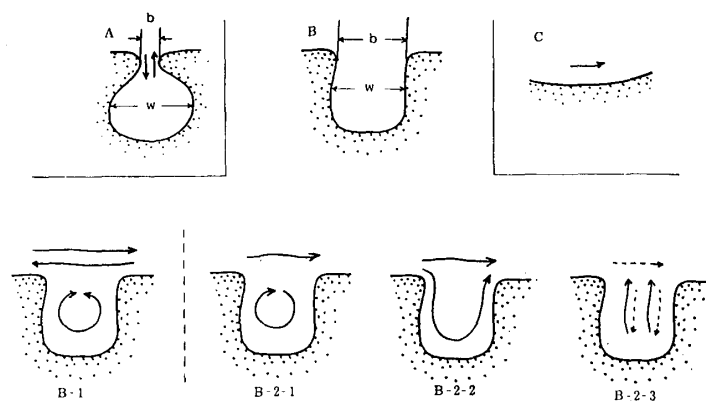
前章では、残余関数を示すことが海水交換を定量的に記述することになると述べたが、このことは海水交換の現象論的な記述に過ぎず、残余関数が得られたからと言って海水交換が総合的に理解できる訳ではない。海水交換を総合的に理解するには、交換の機構の研究や交換能力の定量的評価の研究等の数多くの研究が必要である。以下では、これまでの研究をいくつかの立場に分類する。ただし、ここでは沿岸海域の物理過程の研究のすべてを取り上げる訳にはいかないのは当然で、ある程度直接的に海水交換を意識した研究のみを取り上げることにする。なお、紙数の問題もあって、個々の研究のすべてに詳しく立ち入ることはできないが、以下に示す研究のかなりの部分については、宇野木¹⁾の詳しいレビューがあることを述べておく。

3-1. 海水交換機構の研究

海水交換を起こすのは海水の流動・拡散である。沿岸海域での海水の流れには、潮流、潮汐残差流、密度流、吹送流、地形性渦流等がある。これらは、海水交換に関与する素過程である。そして、これらによる海水の流動が、対象とする水や物質をどのようにして海域外に運ぶかということが、交換の機構である。以下でこの機構の研究を見る訳であるが、その前に以下に挙げる研究の分類の便のため、地形や流動に関して簡単な分類をしておきたい。

まず、対象となる沿岸海域の地形を大雑把に第2図の A, B, C の3タイプに分類する。A は内湾の代表的幅 w に比べ湾口幅 b が小さい場合、B は w と b が同程度、C は b が w に比べ大きい場合で、湾というより開放的沿岸である。

A の場合、ある程度の潮差があれば湾口附近での流れは潮流が卓越する。潮流の場合、湾口を通しての流入は同時には起こらず、流入と流出が周期的にくり返す。もし流入した水のすべてが次の下げ潮で流出するならば交換は起こらない。従って流入した水の一部を湾内に残し、代わりに湾



第2図 地形等による海水交換の分類. b は湾口幅, w は湾の代表的幅.

内の水を流出させる機構,あるいは逆に流出した水の一部を湾外に残す機構が交換の機構である. この機構は,それ自身が重要な研究課題たり得るものである.なぜなら,振動流である潮流は本来は物質輸送機能を持たないからである.

Bの場合は,流系の違いによってさらにいくつかのタイプに分けられる. B-1は湾外に強い潮流が存在する場合で,湾外の潮流の最大流動距離 l が $l \gg b$ の場合である. この場合,湾内には地形性渦流が発生すると考えられる. この渦流は,湾外の潮流の振動に伴い,向きを変えるため,オイラー的に見れば湾内の渦流も潮流と見ることができが,この潮流は湾内の水位変動に関与せず, Aの場合とは区別される. 湾内の渦流は周期的に発生,消滅をくり返し,この複雑な流系により海水交換が行われる. この場合の交換機構もまたそれ自身が研究課題となり得るものである.

B-2は,湾外の潮流が弱く $l \approx b$ または $l \ll b$ の場合で,湾外の流れによりさらに細分される. B-2-1は湾外に強い恒流が存在する場合で, B-1と同様に地形性の渦流が生じる場合である. このような安定した渦流は,水をその内部に trap すると考えられ,渦流自身は交換の効果を持たない. この場合の交換の機構は湾口域での拡散であろう. B-2-2のように,渦流が発生しない場合には,交換は極めて良くなる. この場合は明瞭な流出入が湾口に存在し,流動場の記述で交換機構が記述されよう. B-2-3は湾外が停滞している場合である. この場合,交換を起こす流れとして考え

られるのは,密度流・吹送流等である. この場合は,水平的流動のみでなく,鉛直的循環も交換を起こすことになる. この場合も,流動場を記述することで,交換機構は理解できよう.

Cのような例は,これまで海水交換の問題の対象として認識された例は少いが,特定の境界を設定するならば,海水交換の問題は存在し得る. しかし,この場合も流動場の記述によって一般に交換機構は理解できよう. なお,この問題は外洋に面した開放型の沿岸部での問題でもあるが,そこでの物理素過程は現在盛んに研究されている段階であり,ここではこの問題については触れないことにする.

以上は,沿岸海域の地形とそこでの交換に関する素過程の粗い分類である. 以下では,これまでの交換機構の研究を簡単に紹介する.

これまでしばしば行われてきた交換機構の研究の一つに,湾口断面での輸送様式を調べる研究がある. このような研究の手法は, FISCHER²⁾, DYER³⁾ らに始まり,我が国でも多くの研究が行われてきた⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾. これらの研究の基本的考え方は次のようである.

湾口断面の点において,断面に直交する流速成分を,恒流 $\bar{u}$, 潮流 U , および乱れ u' の3つに分解し,着目する物質の濃度 c についても同様に分解する. すなわち,

$$u = \bar{u} + U + u', \quad c = \bar{c} + C + c' \quad (1)$$

である. ここに $-$ は時間平均である. これら3成

沿岸海域の海水交換

分のみでなく、潮流より長周期の変動成分も加えた分解を行うこともある。上の成分を、さらに断面平均とそれからの偏差にわけ、添字 A を断面平均、 $*$ をそれからの偏差とすれば、

$$\bar{u} = \bar{u}_A + \bar{u}_*, \quad U = U_A + U_*, \quad u' = u'_A + u'_* \\ \bar{c} = \bar{c}_A + \bar{c}_*, \quad C = C_A + C_*, \quad c' = c'_A + c'_* \quad (2)$$

である。いま断面を通過する物質の時間的・空間的平均の輸送量を Φ とすると

$$\Phi = \bar{u}_A \bar{c}_A + (\bar{u}_* \bar{c}_*)_A \\ + \overline{U_A C_A} + \overline{(U_* C_*)_A} + \overline{(u'_* c'_*)_A} \quad (3)$$

であることが示される。このように輸送量は5項から成っており、第1項は断面平均流による移流項、第2項は恒流のシアによる交換項、第3項は断面平均潮流による交換項、第4項は潮流のシアによる交換項、第5項は乱れによる交換項である。断面全体にわたる連続観測により、これらの輸送項の大きさを調べる研究が、東京湾⁴⁾、三河湾⁶⁾、浜名湖⁷⁾、瀬戸内海の一部⁵⁾ 等で行われている。ただし、輸送項の分解の仕方は研究により若干異なる。

このような研究は、この論文での海水交換の考え方から言えば、物質の交換の問題を扱ったものと言うことができる。また、前章で述べたように、ここでの交換の考え方に従えば、(3)式の右辺第1項も、移流による交換項と呼ぶことができる。

このような手法による研究は、先の分類の特定のタイプを扱ったものでなく、種々の素過程の重なり合った交換機構を、各々の素過程に分離するものである。このような研究により、各輸送項の大きさを比較することから各々の湾の輸送特性に関する多くの情報が得られる。しかしながら注意すべきことは、これらの研究は交換の機構に関するものではあるが、直接機構を明らかにするものではないことである。例えば、 $\overline{U_A C_A}$ が卓越する湾があったとしよう。 U_A と C_A の変動の振幅がいかに大きくてもこれらの変動の位相差が 90° であれば $\overline{U_A C_A}$ は0になる。従ってこの項が卓越するのに必要なのは適当な位相差であり、そのような位相差を生じさせるのが交換の機構と呼べるも

のである。断面でのオイラー的観測のみからは、普通位相差を生じさせる機構を知ることはできず、内部の流動に関する情報が不可欠である。

第2図のAのようなタイプでの交換機構の研究には、今里・淡路⁸⁾、AWAJI et al.⁹⁾ などの数値実験による研究がある。彼等は、多数のマーカー粒子の動きを追跡した結果に基づき、海峡部周辺海域では潮流のシアと位相差が大きく、ストークス・ドリフトにより粒子は1周期後も出発点に戻らず、交換が起こることを示した。

水平地形としてはAのタイプであるが、湾口部にシルを持つ場合の交換機構は、松田¹⁰⁾により浜名湖を、またMAZDA¹¹⁾により川平湾を対象として行われている。これらの研究によれば、上げ潮で流入した外海水は内海水より密度が大きいため、その一部はシルのレベルより深く進入し、下げ潮時にも流出しない。すなわち、上げ潮で流入した水の一部を内海に残すという交換の機構が密度の効果によるものであるということが明らかにされた。これらの例では、交換機構に密度流を含むことから、AとB-2-3との複合的なタイプと考えることもできる。

B-1のようなタイプの湾での交換機構の研究には、武岡・樋口¹²⁾の水理模型実験による研究がある。彼等は、湾外の潮流の影響により湾内に生成・消滅をくり返す地形性渦流により交換が起こることを示し、主として湾外の潮流の転流時に交換が起こるとしている。さらに彼等は、観測により、瀬戸内海の松山港ではこのような機構による交換が起こっていることを示した。

以上のような研究が、湾内外の交換の機構に関するものであるが、湾内にいくつかの定常的な環流が存在している場合、これらの間の交換機構が問題となる。OONISHI & KUNISHI¹³⁾は、隣接する環流に振動流が加わることによって環流間の水の交換が起こることを示した。この環流が海峡をはさんで隣接しているとすれば、Aのようなタイプで海峡の両側に環流が存在するような場合の、潮流と環流の複合効果による交換機構となる。

以上のような交換機構の研究は、数は多くない

が、先の地形や流動の分類の中で、機構として問題になるような例に関しての研究である。それ故、種々の素過程がどのように交換を起こすかについては、あらかじめ理解されて来たと言えよう。これらは、必ずしも対象とする海域の全部の水に関する交換機構ではないが、そのような機構の一部となるものである。海域全体にわたる交換機構は、地形や流動が先の分類の程度に単純な場合、種々の素過程による交換機構がそのまま全体を支配する機構になることもあるが、一般には複雑な地形に種々の流動が加わっている場合も多い。このような場合には、種々の交換機構や輸送機構を集積した総合的な交換機構の理解が必要である。

3-2. 輸送・交換能力の評価の研究

3-2-1. 湾口、海峡を通しての交換率の研究

海水交換の機構の解明はさておいて、観測や資料解析、実験等により交換の能力を評価しようとする研究は、機構の研究より数多く行われてきた。これは、海水交換の研究の持つ応用研究としての性格の表れでもあろう。これらの中でも数多く行われてきたのは、海峡や湾口での交換能力を評価しようとしたものである。これらの研究では、交換能力を潮汐交換率(以下単に交換率とする)を用いて評価するのが普通である。交換率とは、大雑把に言えば、1 潮汐周期での海水の交換量と、潮汐周期の海水の交流量の比であると考えられるが、交換量の決め方の概念的な難しさもあって、交換率と呼ばれるものは数多く存在する。ここでは、これらに関する研究の代表的なもののみを取り上げることにする。

まず挙げられるのは、PARKER et al.¹⁴⁾、柏井¹⁵⁾、川村ら¹⁶⁾の研究である。彼らは、湾口あるいは海峡の断面での指標物質の濃度と流れの1 潮汐周期間の観測等から求められる。上げ潮の平均濃度、下げ潮の平均濃度、湾内外の代表的濃度等を用いて、交換率を求める方法を提案しているが、交換率の考え方と定義式は各々若干異なる。PARKER et al. は、Golden Gate で、川村らは豊予海峡で交換率を求めている。これらの研究がオイラー的観測に基づくのに対し、中田・平野¹⁷⁾

は、潮流板を追跡するラグランジュ的手法から、燧灘と安芸灘を結ぶ瀬戸水域で交換率を求めている。これらのうち、先に述べた例の交換率の定義や相互の関係、中田・平野の交換率等については、宇野木¹⁾に詳しい。また、武岡・柴木¹⁸⁾は上げ潮、下げ潮で観測された濃度を時間的にも空間的にも平均化せず、海水の流動の直接のトレーサーとして用いることを提案し、柴木ら¹⁹⁾は、来島海峡での観測からこの方法によって交換率を求めている。

以上の研究は、現地観測に基づいて交換率を評価するものであるが、今里・淡路⁸⁾は数値実験によって、明石海峡と鳴門海峡での交換率を求めている。

これらの交換率は、海峡部での物理過程の一つの定量的表現であるが、この論文で設定した海水交換に関しては何を明らかにするものであろうか。このような交換の研究は、1 潮汐間での交換を扱ったものであるから、湾内の全部の水の残余関数 $r_T(t)$ に関しては、 t を潮汐周期を単位とした時の $r_T(1)$ を決める情報を与えるものである。もし、 $r_T(t)$ が、

$$r_T(t) = e^{-pt} \quad (4)$$

あるいは、

$$r_T(t) = 1 - qt \quad (5)$$

等であることがわかっているとしよう。(4) は湾内が完全に混合している場合で、(5) は各潮汐毎に交換されて出ていく湾内水が、すべて最初 ($t=0$) に湾内にあった水である場合である。このような場合、 $r_T(1)$ の値が決まれば、(4)、(5) のパラメータ p 、 q が決まり、残余関数が得られることになる。しかし、このような例は特殊な例であるし、(4)、(5) 式は湾内の流動、拡散に関する情報を含んでいることに注意しなければならない。つまり、一般的には湾口での交換率のみから残余関数を知ることはできないのである。

しかしながら、交換率の研究は、単に $r_T(1)$ を与えることが出来るというだけではない。交換率は、例えば

沿岸海域の海水交換

$$D = \frac{1}{2} \alpha \bar{u} l \quad (6)$$

(D は拡散係数あるいは分散係数, α は交換率, $\bar{u}$ は潮流の平均流速, l は潮流の最大流動距離)という形で分散係数化される場合もある¹⁶⁾ように, 物質輸送能力の一つの定量的評価である. この評価は局所的な評価ではあるが, 次節に述べる内部領域での物質輸送能力の評価の結果と併せることにより, 物質輸送に関する実験のできる数値モデルに必要な情報を与えるものである. このような数値モデルによる実験は, 残余関数を求めるには有力な手法である.

3-2-2. 内部領域での輸送能力の評価の研究

前節での, 湾口部での輸送能力の評価の研究とは異り, 内部領域での輸送能力を評価する研究は必ずしも海水交換の研究としての意識からなされとは限らないが, これらも海水交換の能力の評価には, 交換率の場合と同様な意義を持つ. 従って, ここではいくつか代表的なものを取り上げてみたい.

まず挙げられるのは, 著名な速水・宇野木²⁰⁾の研究である. 彼らは, 瀬戸内海を1次元的な水路として扱い, 塩分分布を再現するのに最適な1次元の分散係数の値として $10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ という値を得た. この値は, 内海全体が分散係数は一様として得られたものである. 大西²¹⁾は, この方法を発展させ, 2次元的に分割した各領域毎に異なる分散係数を求めるため, 最適化手法を導入し, これを東部瀬戸内海に適用して分散係数をこまかく求めている. また, 柴木・武岡²²⁾は, 瀬戸内海の灘や湾の各々を1つのボックスと見なし, 塩分の収支の関係から, 瀬戸内海の主要な海峡部での交換量や交換率を求めている. これらの交換率は, 瀬戸内海全体の海水交換を考えた場合, 内部での輸送機能の評価となるものである. また, 宇野木・岸野²³⁾は, 東京湾, 三河湾, 伊勢湾を各々いくつかのボックスに区切り, 塩分の収支の関係式を直接解いて, 分散係数等を求めている.

以上は, 物質の分散の能力を評価する研究であるが, 移流としての輸送能力の評価もまたこれら

と同等の意義を持つものであることは言うまでもない. しかし, このような研究には, 余りに多くの研究が含まれると思われるので, ここでは省略する.

3-2-3. 海水交換能力の評価の研究

前2節で挙げた, 交換率や分散係数の評価は, 局所的な輸送能力の評価である. これに対し, 海域全体の持つ交換能力の評価を試みた研究もいくつか存在する. これらを示す前に, 海域全体の交換能力は何によって定量的に表現されるかについて考えておきたい.

物質の輸送能力は, 普通流速や拡散係数あるいは分散係数で定量的に表現される. これらは, 1つの海域全体を考えた場合, 場所的に値が異なるのが普通である. これらを, 1つの数字で表現することは, 流速や分散係数の各々が海域内で一様であった場合にさえ, 容易なことではない. 例えば, 第3図の(a), (b), (c)の水路および(d)の湾を考えてみる. 水路および湾の長さは同じで, 1次元的に扱えるものとする. u は水路の軸方向の流速, D は軸方向の分散係数で, 各々一様とする. これらのうち, (a)と(b)の水路内の水は, いずれが交換が速いであろうか. この間には, 流速とか分散係数の値を用いて, すぐに答えるという訳にはいきそうもない. また, (c)の水路と(d)の湾の水は, どちらが速く交換するだろうか. 両者では分散係数が同じであるにもかかわらず, (c)の方が直観的には速く交換するように思われる. この両者の違いは, 水路左端の境界条件の違いといえる. このような問題を考えると, 流速や分散係数だけでは海域全体の交換能力は表現され得ないことがわかる.

それでは, 海域全体の交換能力は何で表現されるだろうか. 既に述べたように, 海水交換は, 残余関数によって表現される. そこでこの残余関数を特性づける量を用いることが一つの方法であろう. そこで, 問題とされる水や物質の残余関数を $r(t)$ として, 次のような $r(t)$ の積分を考えてみる.

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (6)$$

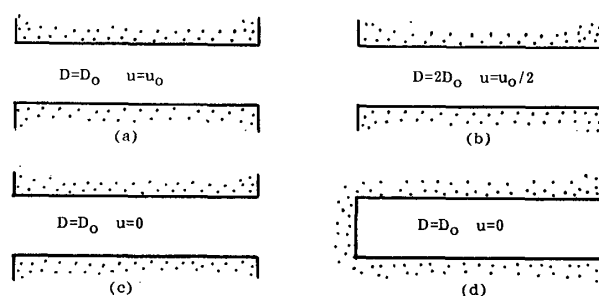
この τ_r は、時間の次元を持ち、対象とする物質の平均滞留時間と呼ばれる²⁴⁾²⁵⁾。この平均滞留時間は、対象とする物質の1つ1つが海域外へ出るまでに要する時間の平均値であるから、海域全体の輸送能力の定量的表現として用いてよいであろう。なお、既に述べたように、1つの海域に対して海水交換の問題はいくつも存在し得る。従ってそれぞれの問題に対して残余関数は存在し、また平均滞留時間も存在する。これらは、各々がその問題にとっての輸送能力の定量的評価である。

さて、以下にこれまでの研究例を挙げてみよう。大谷²⁶⁾は、むつ湾内における河川起源の水の量を河川水の流入量で割ったものを、滞留時間と呼び、湾内水の更新の尺度とした。後に述べるように、この時間は、新しく流入した河川水の平均滞留時間であり、特定の問題に関する交換能力の評価になっている訳である。河川が、しばしば沿岸域での物質の供給源であることを考えれば、この方法は極めて簡明で有効な方法であると言えよう。

越智ら²⁷⁾は、有明海に流入する河川の流量の変動に対する、有明海に存在する河川起源の水の量の変動の応答関係から、河川より流入してくる水の平均滞留時間ばかりでなく、河川起源の水全体の平均滞留時間も求めている。この方法によれば、単に平均滞留時間のみでなく、各々の水の残余関数も求めることができる。

以上の2つの研究は、河川起源の水に関する滞留時間を求めたものである。現地の観測資料を用いた研究では、トレーサの関係で、普通このような研究に限られるが、実験によれば任意の水を追跡することができ、種々の平均滞留時間を求めることができる。

武岡²⁸⁾²⁹⁾、TAKEOKA³⁰⁾は、樋口ら³¹⁾³²⁾の瀬戸内海の5万分の1の水理模型による実験結果等を用いて、瀬戸内海の全部の水の残余関数の他、河川より流入してくる水、河川起源の水全部、外海より流入してくる水、外海起源の水全部、の各々に関する残余関数を求め、各々の平均滞留時間を求めた。この方法では、模型で再現できる塩分分



第3図 一次元の水路と湾のモデル。 D は分散係数、 u は流速。

布を原型と比較することにより、交換の現象の相似性を検証し、実験結果を修正している。

一方、藤原³³⁾は、速水・宇野木²⁰⁾による瀬戸内海の1次元の分散係数 $10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ を用いて、数値実験によって、瀬戸内海全域の水の残余関数、平均滞留時間等を求めている。

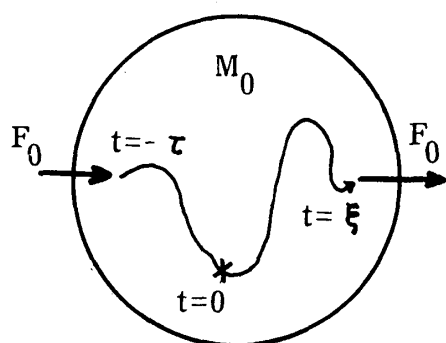
以上の研究は、特定の海域を対象としたものであるが、武岡²⁴⁾、TAKEOKA²⁵⁾は、第3図のような、流速と分散係数の各々一様な水路および湾において、移流分散方程式を解析的に解き、種々の平均滞留時間を求めている。この結果を用いれば、1次元扱いの可能な水路や湾で、流速および分散係数がほぼ一様であればそれらの値を平均滞留時間に変換することができ、平均滞留時間の粗い見積りに便利である。なお、この結果によれば、第3図の(d)の湾の水全体の平均滞留時間は(c)の水路のその4倍である²⁵⁾。(a)、(b)の平均滞留時間のいずれが大きいかは、 u_0 、 D_0 および水路の長さに依存しており、一概には決められないが、これらの値を与えれば判定が可能である。

3-3. 海水交換の概念等に関する研究

以上に述べてきたような研究と異り、海水交換の考えや表現等に関する基礎的研究もある。武岡²⁴⁾、TAKEOKA²⁵⁾は、自然界一般での物質輸送の問題に用いられる、年令や滞留時間等の概念を整理するとともに、沿岸海域でのこれらの概念の適用性について論じた。ここに示される諸概念は、交換の問題の理解に有効であるばかりでなく、今後の課題を考える際にも重要であるので、以下に簡単に紹介する。

いま、物質の入れ換わりが定常的に起こってい

沿岸海域の海水交換



第4図 年令, 滞留時間の概念図. 曲線は, 対象領域内のある物質の動きを示し, ×印は $t=0$ におけるその物質の位置を示す. $t=-t$ は, その物質が領域に入った時刻, $t=\xi$ は, その物質が領域を出る時刻.

る自然界の空間領域を考え, 領域内の対象物質の総量を M_0 とし, 物質の流入および流出量を F_0 とする (第4図). この領域内のある物質粒子を考え, その粒子が領域に入ってから経過した時間 τ をその物質の年令と呼び, 将来領域から出るまでに要する時間 ξ をその物質の滞留時間と呼ぶ. 時刻 $t=0$ にこの領域を考えているとすれば, その物質が入って来た時刻は $-\tau$ で, 出て行く時刻は ξ である. また, $\tau+\xi$ は, その物質が入ってから出ていくまでの時間で, 通過時間と呼ばれる.

領域内のすべての物質は, それぞれの年令と滞留時間を持っており, 全物質に関する年令の頻度分布を表わす関数 $\phi(\tau)$ と, 滞留時間の頻度分布を表わす関数 $\phi^*(\xi)$ が定義される. これらは時間の逆数の次元を持ち

$$\int_0^\infty \phi(\tau) d\tau = 1, \quad \int_0^\infty \phi^*(\xi) d\xi = 1$$

である. これらから, 全物質の平均年令 τ_a と平均滞留時間 τ_r' が次のように定義される.

$$\tau_a = \int_0^\infty \tau \phi(\tau) d\tau \quad (7)$$

$$\tau_r' = \int_0^\infty \xi \phi^*(\xi) d\xi \quad (8)$$

滞留時間分布関数 $\phi^*(\xi)$ が既知であれば, ある時刻に領域に存在している物質がその後どのように減っていくかがわかるから, $\phi^*(\xi)$ は, 全物質に

関する残余関数 r_M に変換することができる. この残余関数から, (6) によって求められる平均滞留時間は (8) の平均滞留時間と等しいことが示される. さらに, 定常状態では一般に ϕ と ϕ^* は同形の関数となることが示され, 全物質の平均年令と平均滞留時間は等しいことが示される.

以上は全物質に関する議論であるが, 入ってくる物質あるいは出ていく物質等, 特定の物質についても平均年令や平均滞留時間を考えることができる. まず流入物質を考えると, 年令はすべて0であり議論する意味はなく, 滞留時間のみ意味がある. 流入物質についての滞留時間の分布関数を $\varphi^*(\xi)$ とすると, 流入物質の平均滞留時間 τ_s は

$$\tau_s = \int_0^\infty \xi \varphi^*(\xi) d\xi \quad (9)$$

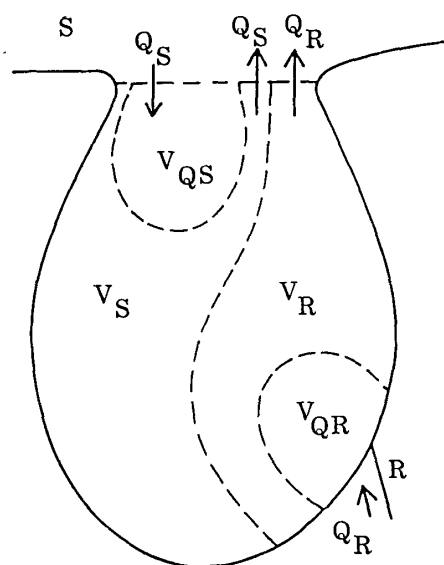
で定義される. 流出物質に関しては逆に年令が問題となり, その年令分布関数を $\varphi(\tau)$ とすると, 平均年令 τ_i は

$$\tau_i = \int_0^\infty \tau \varphi(\tau) d\tau \quad (10)$$

となる. 定常状態では φ と φ^* は同形の関数であり, 従って τ_s と τ_i は等しいことが示される. これらはまた, 平均通過時間とも呼ばれる. また, φ と φ^* は, 流入物質に関する残余関数 r_F から変換することが可能である. さらに, r_M は r_F に, ϕ は φ に変換することができることが示されており, 例えば r_M がわかれば, r_F , ϕ , ϕ^* , φ , φ^* , τ_a , τ_r' , τ_i , τ_s などがすべて求められる.

このような平均滞留時間や平均年令等の他, M_0/F_0 で与えられる量も時間の次元を持ち, 置換時間あるいは平均滞留時間と呼ばれて, 物質輸送特性を表わす量として広く用いられてきた. この時間は, 上の定義の中では流入物質の平均滞留時間, 即ち平均通過時間に等しいことが示されている. 従って, 置換時間を全物質の交換の時間スケールとすることは正しくない.

さて, それでは沿岸海域ではどのような平均年令や平均通過時間が考えられるであろうか. 既に



第5図 沿岸域での水の区分.

明らかなように、滞留時間に関する議論は、年令に関する議論に変換可能であるので、ここでは滞留時間についてのみを考える。沿岸海域での水の起源は、主に外海と河川である。従って、外海起源の水の集合と河川起源の水の集合の2つを考えることができる。もちろん、起源となる外海や河川が複数の場合もあり、それらによって水の集合を区別することもできるが、ここでは簡単のために各々は1つであるとする。このように、水を起源によって区別すると、各々の水の集合に関して、上のような議論を展開することができる。

今、第5図のような沿岸海域を考えてみよう。 R は流入河川で、 Q_R は河川水の流量、 S は外海で、 Q_S は外海水の流入量である。また、 V_R は河川起源の水で、 V_{QR} はそのうち単位時間に新しく流入した水、 V_S は外海起源の水で、 V_{QS} はそのうち単位時間に新しく流入した水である。これら、 V_R 、 V_{QR} 、 V_S 、 V_{QS} に関して各々の残余関数 r_R 、 r_{QR} 、 r_S 、 r_{QS} を考えることができ、さらに各々の平均滞留時間 τ_R 、 τ_{QR} 、 τ_S 、 τ_{QS} を考えることができる。また、 V_R と V_S の和、すなわちこの海域の全部の水 V_T を1つの水の集合と見なすこともできる。この V_T に関して、残余関数 r_T 、平均滞留時間 τ_T を考えることができる。

さて、ここでこの論文で述べてきたことのいく

つかを振り返ってみよう。第2章で設定した、基本的な海水交換の問題における残余関数は、 r_T にあたるものである。大谷²⁶⁾の滞留時間は、むつ湾での τ_{QR} であり、越智ら²⁷⁾の求めたのは、有明海での、 τ_{QR} 、 τ_R および r_{QR} 、 r_R である。また武岡²⁹⁾、藤原³³⁾の求めたのは、瀬戸内海の r_T および τ_T である。さらに、TAKEOKA³⁾は、瀬戸内海に関する、上の5つの残余関数と5つの平均滞留時間を示している。

なお、ここで考えたのは沿岸海域での基本的な問題であって、海水交換の問題はもっと一般的には種々のものがあることは言うまでもない。

4. 今後の課題

4-1. 総合化の問題

以上述べた海水交換に関する研究の多くは、局所的な輸送機構や輸送能力に関する研究であり、残余関数や平均滞留時間を明らかにするには、これらの成果の総合化が必要である。このような目的には数値実験が適している。

物質輸送に関する数値実験には、流動・分散場を与えることが必要であり、従って、流動・分散や、交換率に関する多くの研究の集積が必要である。これらの研究の集積により、物質輸送を再現できる数値モデルが作成されれば、種々の海水交換の問題に関する残余関数や平均滞留時間を求めることができる。さらに、これらの結果と輸送機構との関連の吟味によって、海水交換が総合的に理解されよう。

このことを、瀬戸内海を例にして具体的に考えてみよう。藤原³³⁾の一次元モデルによる数値実験は、速水、宇野木²⁰⁾による輸送能力の研究結果を応用したものであり、上に述べたような、残余関数を求める方法の一つの例である。この実験では、瀬戸内海全域で一様な分散係数の値 $10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ が与えられているが、この値を生み出す機構が理解されれば、瀬戸内海全域の海水交換に関する一つの総合的理解がなされたと言えよう。ただし、これは極めて粗い理解である。より詳しい理解のためには、海峡部における交換率の研究や、灘や

沿岸海域の海水交換

湾内部での分散係数の研究等の成果を用いた場所的に異った分散係数を持つモデルでの実験が必要である。このようなモデルで、例えば海峡部での分散係数の値を変えて実験をしてみれば、残余関数や平均滞留時間と海峡部での分散係数、さらには交換率との関連が吟味できよう。また、灘や湾内部での分散係数と、残余関数等の関連が明らかになれば、さらに、そのような分散係数を生み出す物理的機構と海水交換の関連が明らかになるであろう。

4-2. 研究成果の応用

前節で述べたような作業により、残余関数や滞留時間が得られるとともに、各々の輸送機構が、これらとの関連において把握されれば、対象とする海域での海水交換の研究は一応完結することになる。しかしながら、海水交換の研究が、そもそも環境問題への寄与を意識してきたことを考えれば、研究成果がそういった問題にどのように応用されるかを考えることも重要な課題である。ここでは、そのような応用の方法の例としていくつか考えられることを挙げてみたい。

我々は、海水の交換が悪い海は汚れ易いと普通考える。この汚れ易さとは、どのような量で表現できるであろうか。それは、海水交換能力の定量的評価と直接結びつくものであろうか。そこで次のような問題を考えてみる。第6図の(a)のように、ある海域に対し、単位体積当りに対して均一な量の物質が連続的に負荷されているとする。このとき、この海域内には、定常状態においてどれだけの量の物質が蓄積されるだろうか。この海域内の水は、海域に入ってから連続的に物質負荷を

受け続ける。それ故、各々の水は、その水の年令に等しい時間供給を受け続け、その間に与えられた物質を蓄えていることになる。従って、全部の水は、その平均年令に相当する時間分の負荷量を蓄積する。すなわち、蓄えられる全物質量を M_0 、単位時間の物質負荷量を F_0 、全海水の平均年令を τ_T とすれば、

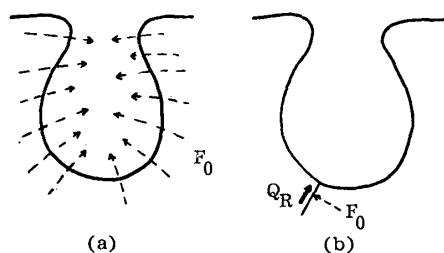
$$M_0 = F_0 \tau_T \quad (11)$$

であり、 τ_T と M_0 は比例する。この意味で、全海水の平均年令 τ_T を、その海域の平均的な汚れ易さの尺度と考えることができる。一方、この平均年令は、既に述べたように、全海水の平均滞留時間に等しい。この平均滞留時間は、その定義から考えれば明らかのように、海域全体で均一な汚れからの回復力の尺度として用いることができる。この場合、この回復力は、上のような、均一な負荷による汚れからの回復力ではなく、均一な汚れからの回復力であることに注意しなければならない。均一な負荷の場合、汚染濃度が均一になるとは限らないのである。

次に、このような平均的な問題でなく、もう少し現実的な問題で考えてみよう。今、第6図(b)のように、海域に流入する河川があるとし、この河川から物質が連続的に供給されているとしよう。この場合は、海域内の河川起源の水が、その年令とは無関係に、最初に供給された物質を蓄えていることになる。今、河川水の流量を Q_R 、河川起源の水の総量を V_R 、物質の供給量を F_0 とすると、河川水の単位体積当りの物質量は F_0/Q_R であるから、物質の総量 M_0 は

$$M_0 = F_0 V_R / Q_R = F_0 \tau_{QR} \quad (12)$$

である。ここに、 τ_{QR} は先に述べたように、流入してくる河川水の平均滞留時間であり、平均通過時間でもある。すなわち、このような問題では、平均通過時間が汚れ易さの尺度となるのである。一方、この河川による定常的な汚れからの回復力としては、河川起源の水の平均滞留時間 τ_R を用いるべきである。



第6図 沿岸域への物質負荷の思考モデル。

(a) は全域への均一な連続的負荷で、

(b) は河川よりの連続的負荷。

以上は、海水交換能力の定量的表現としての平均滞留時間等の応用の例を考えたものである。これに対し、残余関数は、交換に関するより多くの情報を含んでおり、より広範な応用性を持つものである。例えば、第6図(b)の問題で、河川より供給される物質が非保存性の物質であったとしよう。この非保存性物質の減衰が $f(\tau)$ で表わされるとし、河川起源の水の年令分布関数を $\phi_R(\tau)$ とする。河川水の年令は、その河川水の荷っている物質の年令と等しいと考えられるから、 $\phi_R(\tau)$ は、物質が保存物質であったとしたときの物質の年令分布関数と同じである。保存物質としたときの物質の総量を M_0 とすると、年令が τ の物質量は $M_0\phi_R(\tau)$ であるから、非保存物質の場合は、この量が $M_0\phi_R(\tau)f(\tau)$ に減少する。従って非保存性物質の総量 M_0' は、

$$M_0' = M_0 \int_0^{\infty} \phi_R(\tau) f(\tau) d\tau \quad (13)$$

で与えられる。この $\phi_R(\tau)$ は、河川より流入する水の残余関数 r_{QR} から

$$\phi_R(\tau) = r_{QR}(\tau) / \tau_{QR} \quad (14)$$

によって、あるいは河川起源の水の残余関数 r_R から、

$$\phi_R(\tau) = -dr_R(\tau)/d\tau \quad (15)$$

によって、変換することができる²⁸⁾。

さらに、残余関数は、物質供給量の変動がある場合の海域の物質存在量の変動の記述に用いることができる。これには、システム工学の考え方を導入する。再び、第6図の(b)の河川よりの供給を考えてみよう。河川より供給される物質量が時間の関数 $q(t)$ で表わされるとし、海域内の物質の存在量を $m(t)$ とすると、 $m(t)$ のうち η 時間前に流入した物質の寄与分は、 $q(t-\eta)r_{QR}(\eta)$ となる。従って、 $m(t)$ はたたみ込み積分

$$m(t) = \int_0^{\infty} q(t-\eta) r_{QR}(\eta) d\eta \quad (16)$$

で与えられる。先に述べた越智ら²⁷⁾の研究は、物

質として河川水自身を考え、 $q(t)$ と $m(t)$ の変動から、 r_{QR} を求めたものである。

なお、システム工学では、残余関数は、単位入力に対する系の応答を表わす関数であり、重み関数、あるいはインパルス応答などと呼ばれる。この重み関数、従って残余関数のフーリエ変換は、入出力間の周波数応答関数である。例えば、上の例での、 r_{QR} のフーリエ変換

$$H(\omega) = \int_0^{\infty} r_{QR}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (17)$$

を考えてみよう。角周波数 ω の変動に関し、出力 $m(t)$ の振幅と入力 $q(t)$ の振幅の比は $H(\omega)$ の絶対値で表わされ、入力に対する出力の位相遅れは $H(\omega)$ の偏角で表わされる。このように、残余関数は、物質供給量の変動に対する海域の応答特性を知る上でも有効である。

以上は、海水交換の研究成果の応用として一般的に考えられることをいくつか示したものである。さらに、問題によっては、別の応用の方法もあろうし、残余関数や滞留時間以外の別の情報が提起されなければならない場合もあろう。こういった応用面の問題は、物理の分野だけでなく、化学、生物学といった他の分野との共同研究によって今後詳しく検討されるべき学際的な問題である。

5. あとがき

以上、この論文では比較的応用面を重視した立場で海水交換の基本的考え方と問題意識を設定し、これまでの諸研究の意義やそれらの関連、さらには今後の課題について検討した。ここで設定された海水交換の考え方は、あくまで一つの考え方に過ぎず、ここではこの考え方の是非を議論するつもりはない。基礎的研究としての海水交換の研究を重視するのもまた一つの立場であり、そのような立場での海水交換の研究の体系化も、今後必要なことであろう。

なお、ここでは海水交換の問題を、海水のみでなく、水以外の物質の交換の問題も含めて論じた

沿岸海域の海水交換

が、ここでの物質はすべて水に溶け、水と一緒にふるまうと仮定していることを注意しておきたい。それ故、先に述べた汚れ易さの尺度なども、あくまで海水がどれだけ物質を蓄えられるかに関する尺度である。しかしながら、実際に海に供給される物質は水溶性のものとは限らず、粒子として懸濁し、あるいは底に堆積するものもあり、また水溶性のものでも底質に吸着される場合もある。このように、底質への物質の蓄積を考えた場合、蓄積可能な量は飛躍的に大きくなり得るであろうし、またその海域が汚染からの回復するには、海水自身の回復よりはるかに長い時間を要するであろう。事実、例えば瀬戸内海では、瀬戸内海環境保全特別措置法の施行などもあって、最近では水はかなりきれいになってきたという声もあるが、底質の汚染はいまだ回復していないと言われる。このように考えれば、海の問題として海水交換の研究は一つのステップに過ぎず、今後底質との関連を含めた物質交換の問題へと発展する必要がある。

最後に、本論文をまとめるにあたり貴重な助言を頂いた、愛媛大学工学部助教授柳哲雄氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 宇野木早苗 (1980): 海水交換とその素過程について. 沿岸海洋研究ノート, **17**(2), 89-98.
- 2) FISCHER, H.B. (1972): Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries. *J. Fluid Mech.*, **53**, 671-678.
- 3) DYER, K.R. (1974): The salt balance in stratified estuaries. *Estuarine Coast. Mar. Sci.*, **2**, 273-281.
- 4) 上嶋英機, 藤原建紀, 早川典生 (1975): 感潮河川における物質輸送の機構について (第1報). 第22回海岸工学講演会論文集, 239-247.
- 5) 上嶋英機, 早川典生 (1982): 瀬戸内海の物質拡散・分散特性. 沿岸海洋研究ノート, **20**(1), 1-11.
- 6) 佐々木克之, 松村皐月, 松川康夫, 鈴木輝明 (1980): 三河湾の夏季の海水交換と窒素の循環. 沿岸海洋研究ノート, **17**(2), 99-107.
- 7) 松田義弘 (1982): 浜名湖の海水交換 (I). 塩分輸送形態と地理的環境. 東海大学紀要海洋学部, **15**, 1-16.
- 8) 今里哲久, 淡路敏之 (1982): 明石・鳴門海峡を通しての海水交換の数値実験. 沿岸海洋研究ノート, **20**(1), 19-32.
- 9) AWAJI, T., N. IMASATO and H. KUNISHI (1980): Tidal exchange through a strait: A numerical experiment using a simple model basin. *J. Physical Oceanogr.*, **10**(10), 1499-1508.
- 10) 松田義弘 (1982): TIDAL TRAPPING による湾内外水の交換機構の一例. 日本海洋学会春季大会要旨集, 119-120.
- 11) MAZDA, Y. (1983): Water exchange in Kabira Cove, Ishigaki Island—A tidal trapping process in a vertical two-dimensional field—. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **39**(2), 63-72.
- 12) 武岡英隆, 樋口明生 (1982): 地形性渦流による小港湾の海水交換. 沿岸海洋研究ノート, **19**(2), 175-182.
- 13) OONISHI, Y. and H. KUNISHI (1979): Water exchange between adjacent vortices under an additional oscillatory flow. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **35**(3-4), 136-140.
- 14) PARKER, D.S., D.P. NORRIS and A.W. NELSON (1972): Tidal exchange at Golden Gate. *Proc. ASCE*, **98**, SA2, 305-323.
- 15) 柏井 誠 (1977): 潮汐による海水交換について, その1, 海水交換の概念と海水交換率. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 96-97.
- 16) 川村雅彦, 清水浩輔, 小山治行, 中嶋秀夫, 前川力 (1975): 豊後水道の海況と拡散係数. 海と空, **50**, 43-58.
- 17) 中田英昭, 平野敏行 (1976): 瀬戸水域における海水の交流・交換について. 水産海洋研究会報, **29**, 7-14.
- 18) 武岡英隆, 柴木秀之 (1982): 海水交換率の新たな算定法. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 102-103.
- 19) 柴木秀之, 武岡英隆, 樋口明生 (1982): 来島海峡を通じての海水交換. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 117-118.
- 20) 速水頌一郎, 宇野木早苗 (1970): 瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散. 第17回海岸工学講演会論文集, 385-393.
- 21) 大西行雄 (1981): 最適化手法による東部瀬戸内海の分散係数の推定. 海と空, **56**(4), 181-194.
- 22) 柴木秀之, 武岡英隆 (1983): 瀬戸内海の主要海峡における塩分輸送と海水交換. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 98-99.
- 23) 宇野木早苗, 岸野元彰 (1977): 大局的に見た内湾の海水交流. 第24回海岸工学講演会論文集, 486-490.
- 24) 武岡英隆 (1981): 海水交換と物質輸送の概念について. 愛媛大学工学部紀要, **9**(4), 287-298.
- 25) TAKEOKA, H. (1984): Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research* (in press).
- 26) 大谷清隆 (1977): むつ湾の湾内水の更新. 沿岸海

武 岡 英 隆

- 洋研究ノート, **14**(1), 1-9.
- 27) 越智浩二, 武岡英隆, 井上尚文, 宮地邦明 (1981): 有明海における海水交換について, 河川水の滞留時間. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 99-100.
- 28) 武岡英隆 (1982): 瀬戸内海の水は何年で換わるか, 海水・河川水の滞留時間. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 100-101.
- 29) 武岡英隆 (1983): 瀬戸内海の水は何年で換わるか (続). 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 96-97.
- 30) TAKEOKA, H. (1984): Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea. *Continental Shelf Research* (in press).
- 31) 樋口明生, 武岡英隆, 北川吉男 (1976): 瀬戸内海における海水交換の実験的研究 (Ⅱ). 京都大学防災研究所年報, **19**(B-2), 411-421.
- 32) 樋口明生, 武岡英隆, 黒田芳史, 北川吉男 (1979): 瀬戸内海における海水交換の実験的研究 (Ⅲ). 京都大学防災研究所年報, **22**(B-2), 625-630.
- 33) 藤原建紀 (1983): 瀬戸内海水と外洋水との海水交換. 海と空, **59**(1), 7-17.