

水工学シリーズ 10-B-3

沿岸環境を支配する流れと鉛直構造
— データから読みとれること —

九州大学応用力学研究所 地球環境力学部門 教授

松野 健

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2010年8月

沿岸環境を支配する流れと鉛直構造—データから読みとれること

Currents and Vertical Structure Controlling Coastal Environment

—Description with Data—

松 野 健

Takeshi Matsuno

1. はじめに

一般の人が抱く海のイメージは白砂青松の海岸であったり、波が砕ける磯であったり、陸から見た海の景観に依存していると思われる。しかしそこで目にする沿岸の海は、海からの視点で見るとかなり特殊な条件に支配されている。まず岸があること、大半が浅海域であること、陸からの直接的な負荷があること、様々な人為的な圧力がかかっている場合が多いことなど、外的要因が大きいことが特徴である。そして、沿岸域でも特に内湾と呼ばれる半閉鎖的海域では、陸からの負荷の影響が大きく、外洋域に比べて生物生産が高いことと同時に、富栄養化が進みすぎるなど自然のバランスが崩れることも少なくない。先進国では経済が急成長した時期に、人為起源の負荷が沿岸域の環境のバランスを崩し、無秩序な人間の営為が広い範囲の自然環境を大きく変化させることを経験した。その教訓から、沿岸域の研究は飛躍的に進展し、日本でも様々な形で沿岸管理が行われるようになった。環境アセスメントは、不十分とは言えそのひとつの方策である。

一つの例として有明海の問題を考えてみよう。1997年に諫早湾の潮受け堤防が閉め切れ、有明海の環境変化が危惧されていたところに、2000年にノリの色落ち問題が起こって、一気に大きな社会問題となったことはよく知られている。その後様々なセクターがこの問題に取り組み、研究もなされてきた。しかし10年経って、有明海の環境と堤防の閉め切りとの関係は誰もが納得できる形では説明されていない。調査をして、何らかのデータを得、そのデータが意味していそうなことを、そのほかの多くの現象と定性的に結びつけた話に作りあげても、なかなか説得力のある、あるいはシステムを説明するストーリーにはならない。沿岸の海洋環境の全体像をきちんととらえることが如何に難しいかを示している好例といえるのではないかな。

かなり特殊で生物相の豊富な有明海の環境が如何にして維持されていたか、十分な理解があったわけではなかった。東京湾や大阪湾と違って自然環境を変えるだけの巨大な後背地を持っていなかったため、過去の高度成長期を通じて有明海に深刻な環境変化を引き起こさなかった。それゆえ沿岸環境の科学的な理解も社会的にはあまり要求されなかった面もある。潮受け堤防閉め切りの際のアセスメントでも、おそらく有明海全体の自然のシステムを理解した上でのものではなかったために、実際に環境に重大な変化が生じたとき、その原因を明確に説明することができなかったと言える。そして、事後に行われた様々な調査からは既に述べたように明確な答えが未だ得られていない。それは、精力的な調査を通してもお、われわれが海から取得できるデータはかなり限られたものであるということと、膨大なデータから意味のある情報を見いだすのは簡単ではない、ということの両面があると思われる。

これは、沿岸のデータを取ることに、そのデータを取ることを意味すなわち環境理解との間には少なからぬ段差があることを意味している。生のデータには様々な情報が混在しており、そこから物理・化学・生物過程で説明可能な現象を取りだして意味を与えなければならない。すなわちデータから可能な限り正しい情報を読みとることが必要である。ここでは、沿岸海洋で取得されるデータから何をどう読みとるかという視点で、いくつかの事例を紹介したい。

2. 沿岸域で計測される流れ

前述のように沿岸域の中でも半閉鎖的な内湾で富栄養になる場合が多いのは、陸域から流入した栄養塩や有機物の負荷が、海域に長く留まることによる。すなわち沿岸域の環境にはその場の流れの構造が非常に大きな役割を果たしていることは明らかである。環境アセスメントでも、流れを計測するのは最も一般的な手法である。そこで、まず流れの計測と、そこから何がわかるかについて考える。

2. 1 計測値に含まれるもの

沿岸域での流れの観測には、流速計を係留することで固定点での時系列を得るのが一般的である。すなわち、定点の固定層（ADCP：超音波ドップラー流速プロファイラー の場合には鉛直分布）の、通常最低 15 日間程度の時間変化を計測する。15 日間の時系列を取得するのは、そうすることで、潮汐流の主要な成分を分離できるからである。

沿岸域での流れは、海域にもよるが、潮汐流が卓越することが多い。しかし、潮汐の他に、風や河川水起源の浮力によって駆動される部分も少なくない。つまり、潮汐流を分別し、さらにそれ以外の成分については、何に起因する流れであるか、様々な側面から判断することが必要になってくる。潮汐流の分別にはよく知られているように調和分解が用いられる。潮汐はその周期が天文学的に決まった値で与えられ、測定点が決まれば、原則的には、振幅と位相は時間変化しない。しかし、例えば 15 日間のデータから分別できる潮流成分（分潮）は限られているので、より長い周期の成分による変動もそこに含まれてしまうことになり、異なる季節などで測定を繰り返したとき、見かけ上はある分潮の振幅が変化することになる。

潮汐による変動の特徴は、上述のように周期が明確に決まっているという点である。大潮・小潮など見かけ上潮汐の大きさが変動するような現象も、異なった周期変動の組み合わせで起こっていることはよく知られている。ところが、実際の観測では、潮汐周期を持った変動であるにも関わらず、必ずしも振幅や位相が固定されていない現象に遭遇するときがある。顕著な半日周期の変動が、ほんの 2、3 日続いただけで消えてしまったり、大潮・小潮の周期とは別の時期に現れたりする。これは内部潮汐で、それ自体古くから知られた現象ではあるが、間欠的に起こることが一般的で、変動が大きく、実態が捉えにくい。通常の潮汐流の場合には、恒常的に変わらない調和定数として、その場所の潮汐流の大きさが与えられるのに対し、内部潮汐は、イベント的に見られるむしろ例外的な現象としてとらえられることが多い。

少し古いデータになるが、図-1 に示す福島沿岸で観測された内部潮汐の例を図-2 に示す。最も岸よりの測点を除いて、顕著な半日周期の流れが見られる。しかしその流れは、大潮・小潮とはほとんど無関係に振幅が変動している。7 月 27、28 日前後に半日周期の流れが大きくなっているが、潮位変動ではむしろ 1 日周期の変動が卓越している。図-2 は 1-25 時間のバンドパスフィルターを通したデータを示しているが、この時の流れは、上層と下層で明瞭に位相が逆転しており、内部モードの運動であることがわかる。すなわち内部潮汐であるが、その変動が沖から岸に向かって伝播していることもとらえられている（図中破線）。各測定点での時間差から見積もった伝播速度は 0.3 から 0.7m/s 程度

（Matsuno, 1991）で、沖合の方が速くなっている。

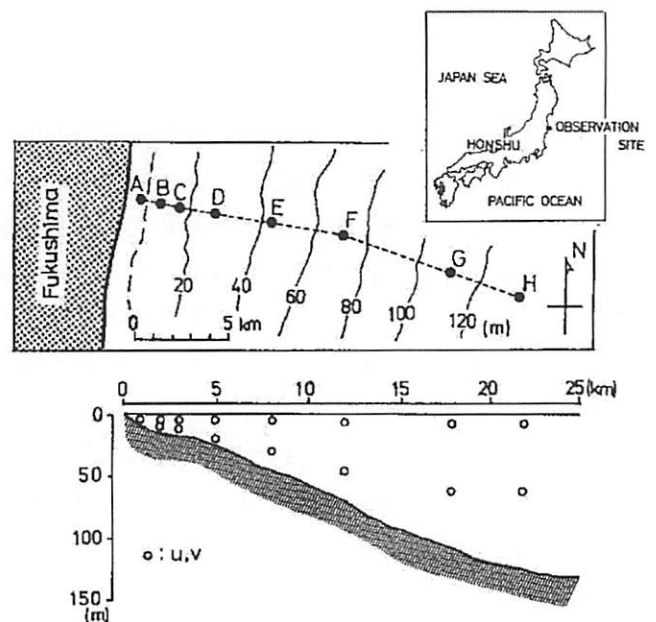


図-1 1985 年に内部潮汐を観測した福島県沿岸の(上)測点と(下)流速の計測層(Matsuno, 1991 より、一部改変)

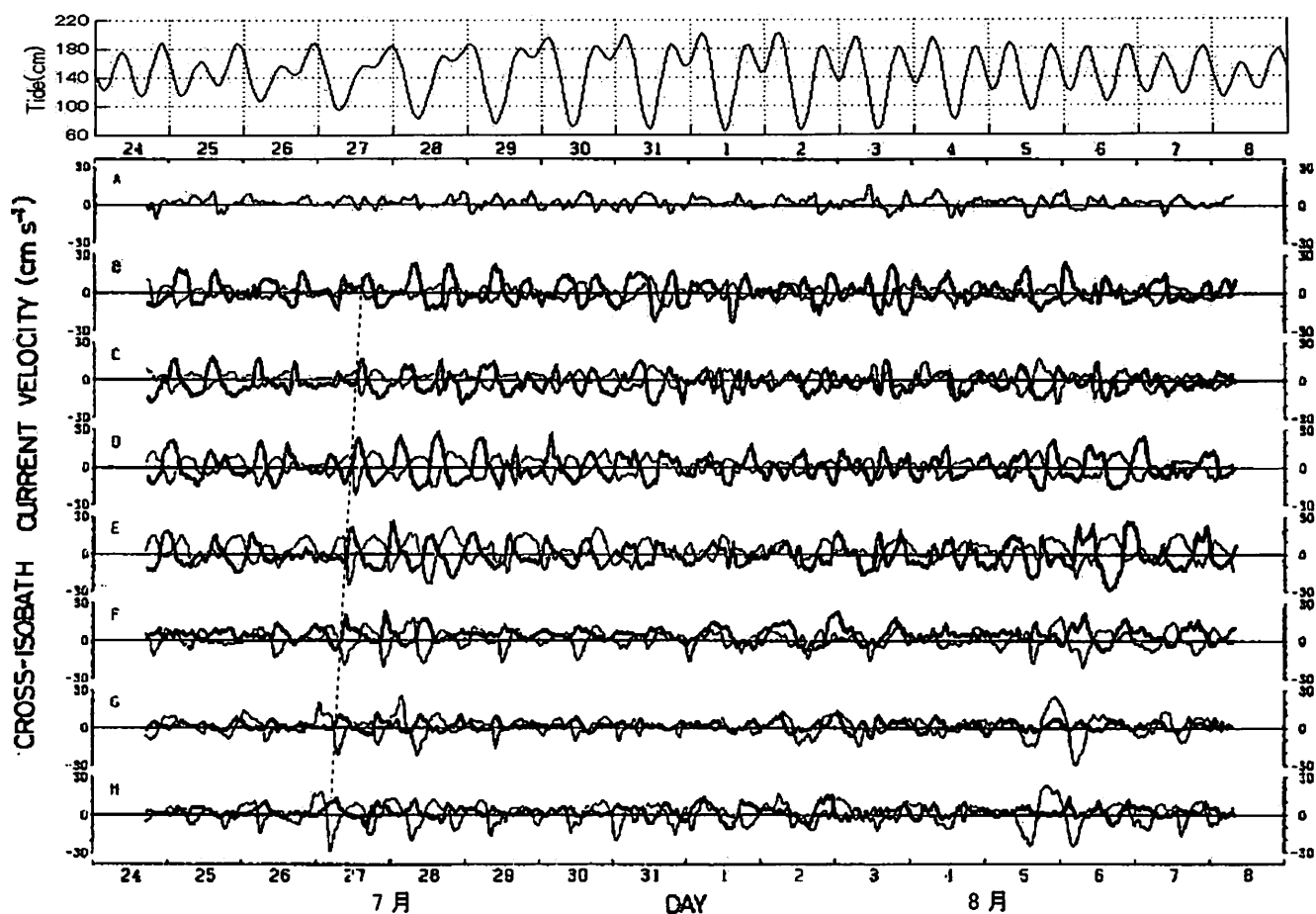


図-2 1985年7-8月に福島沖で観測された内部潮汐。上は小名浜の潮位、以下、図-1に示す測点AからH（上から下へ）における等深線に直交する方向の流れの成分（沖に向う方向が正）。細線および太線はそれぞれ上層および下層の流れを示す。（Matsuno, 1991より一部改変）

このような内部潮汐はその間欠性に特徴があり、例えば、測点Gで得られた時系列では8月5、6日に1波分だけ顕著な半日周期の変動が観測されている。また、伝播速度と周期から波長も見積もることができるが、この場合には伝播速度を0.5m/sとすると、波長は22km程度になる。内部潮汐が起こる場所は海底地形に大きく依存しているとはいえ、そのときの成層構造にも関連するので、発生源が決まっているわけではない。すなわち、ある固定点で観測していた場合を考えると、様々な場所で起こった内部潮汐が、様々な伝播時間の後に観測されるということになる。したがって、通常の潮汐と違って、その位相が決まっているわけではない。周期現象である一方で、イベント的な性質を持っているという特徴がある。

図-2に示したケースは、特に半日周期の変動に関して、通常の潮汐流よりも内部潮汐が卓越した場合である。1日以上周期成分を抜くことによって顕著な内部潮汐が抽出された。ところが、半日周期についても通常の潮汐（外部潮汐）が卓越する場合には、周期から内部潮汐と外部潮汐を分離することはできない。例えば、有明海のように外部潮汐が非常に大きい海域では、内部潮汐自体があまり注目されない。外部潮汐が大きいことによって鉛直混合が盛んになり、強混合のエスチュアリとして内部モードの運動が抑制されているという理解が通常なされている。しかしそのような類型的な議論は必ずしも現象を正しく理解することには結びつかない。大潮時には潮位差が5m以上にもなる有明海奥部でも鉛直的に充分には混合されない場合も少なくない。成層構造については後に述べるとして、潮汐流についていくつかの例を紹介する。

諫早湾の湾口付近、有明海から見れば湾央から湾奥にあたる付近（図-3のStn.B）で計測された流速分布の例を図-4に示す。海底設置されたADCPによる観測結果で、外部潮汐の潮流の主軸方向（潮流楕円にすると長軸方向、概ね等深線に沿った方向）とそれに直交する方向（同じく短軸方向）の成分を示す。長軸

方向の流れは、明瞭な上げ潮・下げ潮を示しており、鉛直方向にも概ね様な流れになっていることがわかる。すなわち外部潮汐が卓越している。ただ、流れが強い時間帯では特に底層からある程度の厚さで流れが弱くなっている傾向が見られる。これは、海底境界層の影響が表れたものと考えられる。一方、短軸方向（これは諫早湾に向かう方向でもある）の成分には上層と下層で逆転した流れが見られる。干潮時に表層で諫早湾に向かい、下層で外に出る流れになっている。満潮時にはその反対の流れになっており、明瞭な半日周期の変動が見られる。流速は長軸方向に比較して小さいが、明瞭な内部モードの運動を示している。流速は小さいとはいえ、最大 0.2m/s 程度の値が見られ、沿岸の流れとして決して小さい流れではない。図-4 に示すように同時に観測された水温・塩分構造の時間変化から、大潮時においても成層構造（低塩の上層では低温になっていて、密度的には一部打ち消しあって、成層は強くはない）があることがわかる。この成層構造によって、特に短軸方向に明瞭な内部潮汐が起こっていたと考えられる。長軸方向の流れと異なり、最干時に流れが強くなっているのが特徴的であるが、1点のみの測定であるため位相についての議論は難しい。

（後で述べるように、この内部モードの流れは、内部潮汐というより、湾口部に移流された低塩分水による密度流的な流れという解釈も可能）

次に内部モードの変動のみを取りだした例を紹介する。2009年7月28日から8月6日までの9日間のデータである（図-5）。内部モードの変動を抽出するには、一般的には鉛直平均流を求めてそれを差し引けばよいと考えられるが、水深の浅い海域では、前に述べたように海底境界層の影響が無視できない。境界層内のデータも含めた平均値からの偏差を求めると、内部モードの運動がない場合でも、見かけ上の内部構造が現れてしまう。海底境界層の分布をあらかじめ仮定し、それを用いて平均流を抜く方法も考えられるが、海底境界層の厚さは成層構造にも依存し、適切に仮定することは簡単ではない。ここでは、海底境界層と思われる

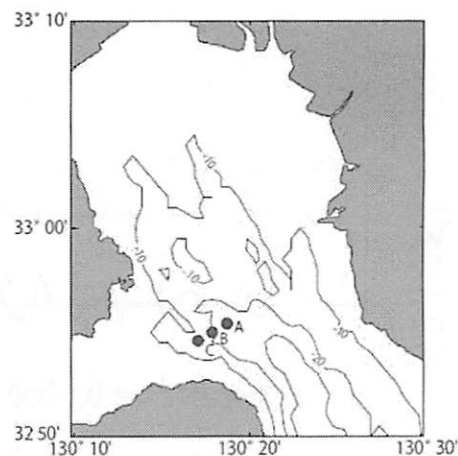


図-3 諫早湾口部の観測点

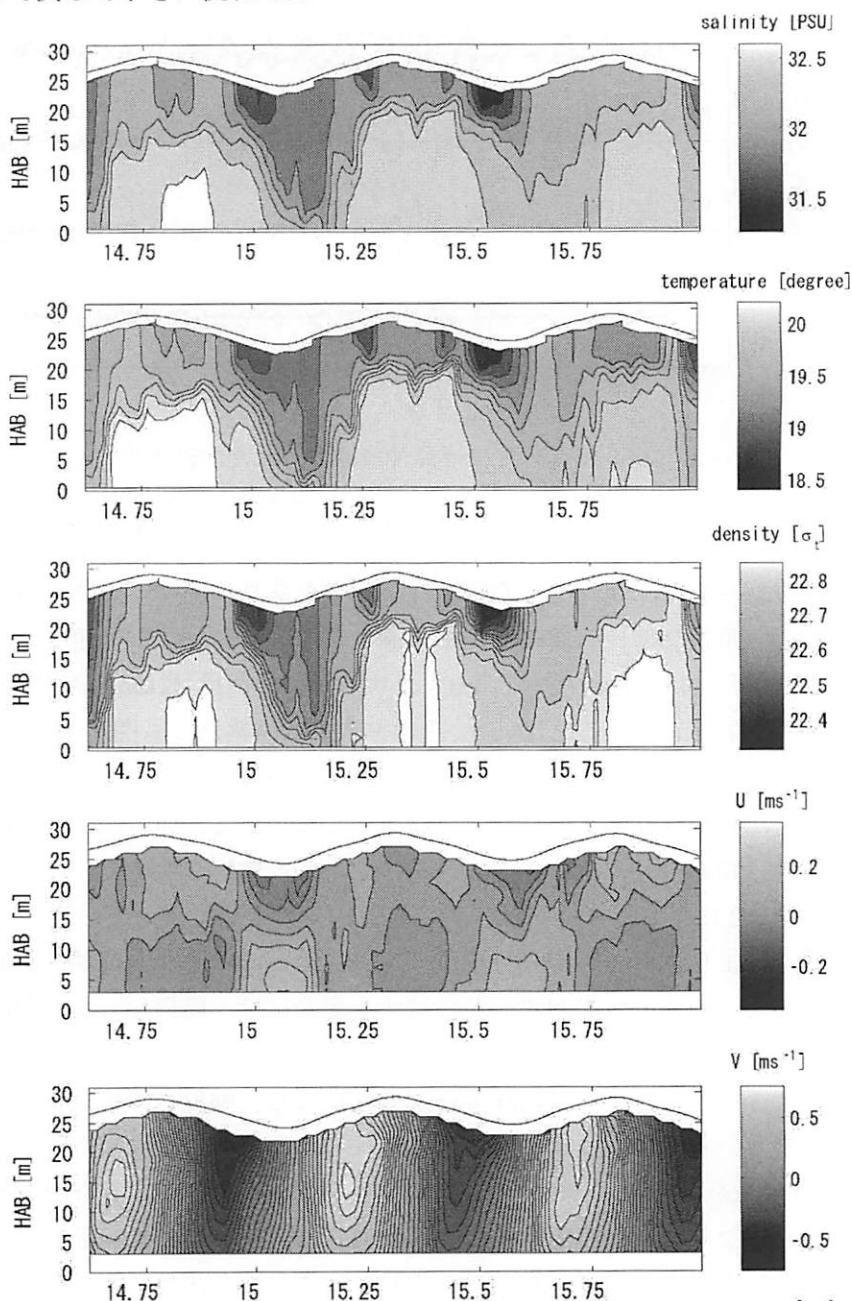


図-4 2009年11月に諫早湾口部付近で観測された水温・塩分・密度・流速の短軸・長軸成分の時間変化。縦軸は海底からの高さ（以下の図でHABは同様）

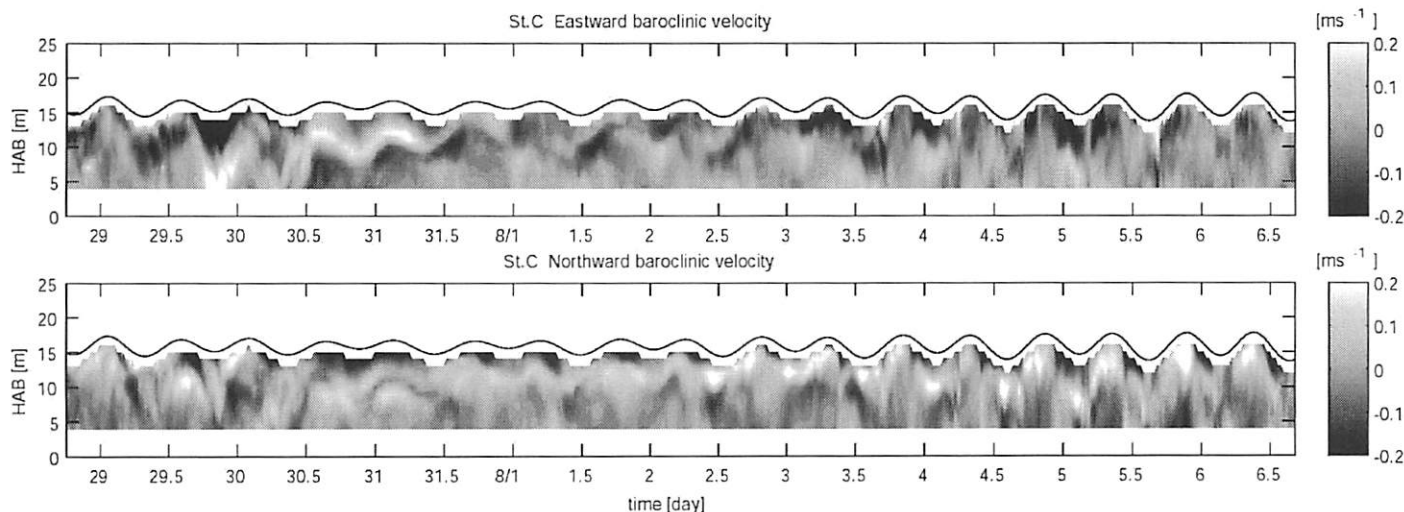


図-5 2009 年 7-8 月に諫早湾口付近の Stn.C で観測された内部モードの流れに時間変化。(上) 東向き成分、(下) 北向き成分。

厚さをあらかじめ除外して平均流と偏差を求めた結果を示している。

内部領域で明瞭な鉛直分布を持った流れが、短軸方向に近い東向き成分だけではなく長軸方向に近い北向き成分にもはっきり現れている。その流れの特徴は前半から後半にかけて大きく変化していることがわかる。半日周期の変動については内部潮汐と考えられるので、各層で半日周期の潮流楕円を描くと、その長軸の方向は日によって変化していることがわかる(図-6)。具体的には、Stn.C では 2 日目あたりには南東-北西方向に長軸を持つ楕円であったのに対し、4-5 日目には南北方向、7 日目付近では北東-南西方向のほぼ直線に近い運動になっている。すなわち、内部潮汐はいつも決まった形態で起こっているのではなく、その時々で成層構造に対応して増幅されやすい場所と方向で生じている可能性が考えられる。しかしその実態については、まだ明らかになっていない。

さて、図-5 に示した時系列では、半日周期の他にももう少し長い時間スケールの変動も見られる。例えば、7 月 30 日から 8 月 2 日にかけて、表層近くで南向き、下層ないし中層で北向きの流れが数日継続しているように見える。このとき、特に強い風は吹いていなかったこと(図-7)、後に示すように表層には

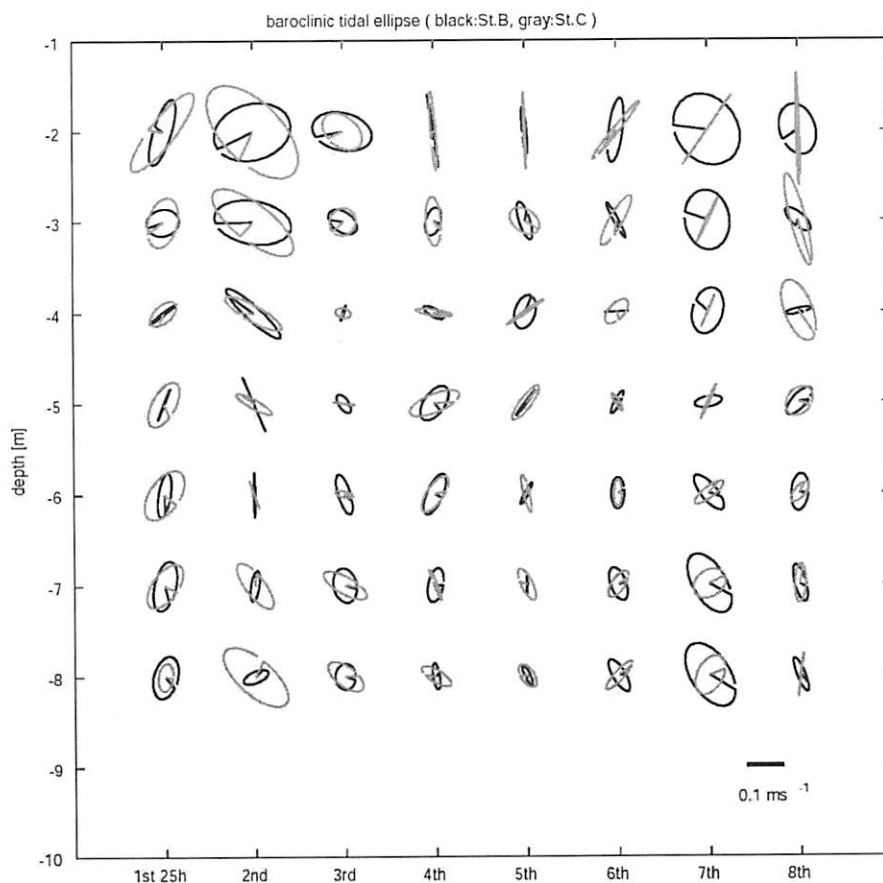


図-6 Stn.B (黒) および Stn.C (灰色) で観測された流速データから、内部モードの運動を抽出し、水深 1m 毎のデータから 25 時間毎に半日周潮について調和分解し、潮流楕円を描いたもの。

高温・低塩の低密度水が分布し、顕著な成層が形成されていたことを考慮すると、密度流によるものと推察される。表層で湾奥から（有明海の）湾口に向かう明瞭なエスチュアリ循環を示すものと理解できるが、通常のエスチュアリ循環と異なるのは、湾口から湾奥に戻る流れが、下層ではなく中層で卓越している点である。数日にわたって中層で北向き成分が明瞭に見られ、この複雑な構造には局所的な鉛直混合過程が関係している可能

性が考えられるが、具体的に説明できるデータは得られていない。この観測時の直前の7月24日から26日には九州地方で被害が出るような大雨が降っており（図-7）、この影響で大量の河川水が流入し、表層が低塩分水で覆われていたことが推察される。実際に7月28日から29日にかけて諫早湾口で観測された塩分分布からは表層5m以浅に15(psu)以下の非常に低塩分の水が見られた（後述する図-17参照）。この低塩分すなわち低密度の水が数日以上で時間スケールで顕著な湾口に向かう流れを形成したものと考えられる。

時間スケールのみから流れの生成要因を特定することは困難であるが、このケースでは、同じ内部モードの運動でも、半日周期の変動については潮汐起源、数日の変動については河川水流出の密度流によるものと分別することができる。さらに強い風が吹く場合には吹送流の影響が当然想定されるので、観測値から流れの生成要因を分別することはより困難になる。風や潮汐は流れを駆動するだけでなく、鉛直混合にも寄与することにも注目する必要があるが、鉛直混合過程については後で述べる。

2. 2 計測値の代表性

上で述べたように、沿岸で計測されるデータには様々な要因による現象が含まれている。それを可能な限り分別し、原因と結果を説明することで、海域の環境に影響する海洋構造の変動過程を理解することができる。前節では、流速の鉛直構造を測定するためにADCPを用いた結果を示した。20m程度の水深で、鉛直的には1m毎の流速値を計測しており、海域の流れの鉛直構造を知る上では十分な解像度である。しかし、1点のみの計測では、ここでの計測値がどの程度の範囲の流れ場を代表しているのか明白ではない。内部潮汐は海底地形の凹凸に起因して発生し、伝播の過程において海底地形で反射することで強化されたり干渉したりすることを考慮すると、現象の水平スケールはあまり大きくないことが想定される。図-5に示した流

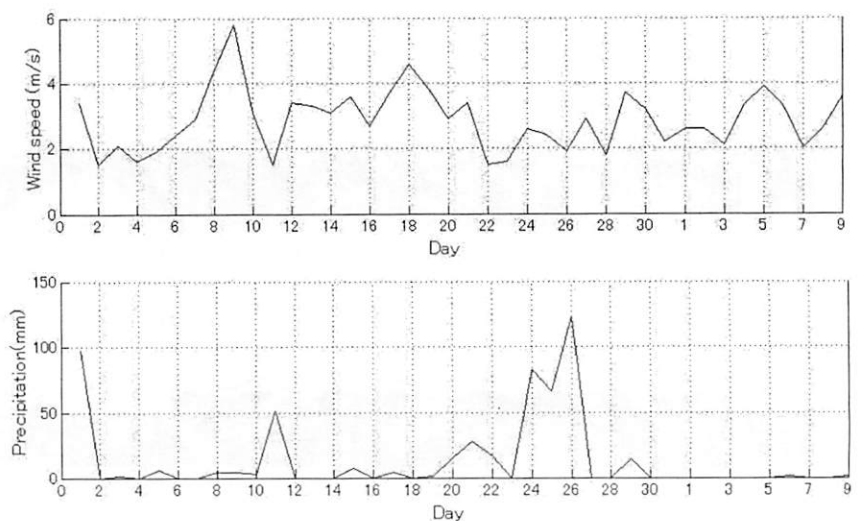


図-7 2007年7月1日から8月9日までの久留米における（上）日平均風速と（下）降水量。

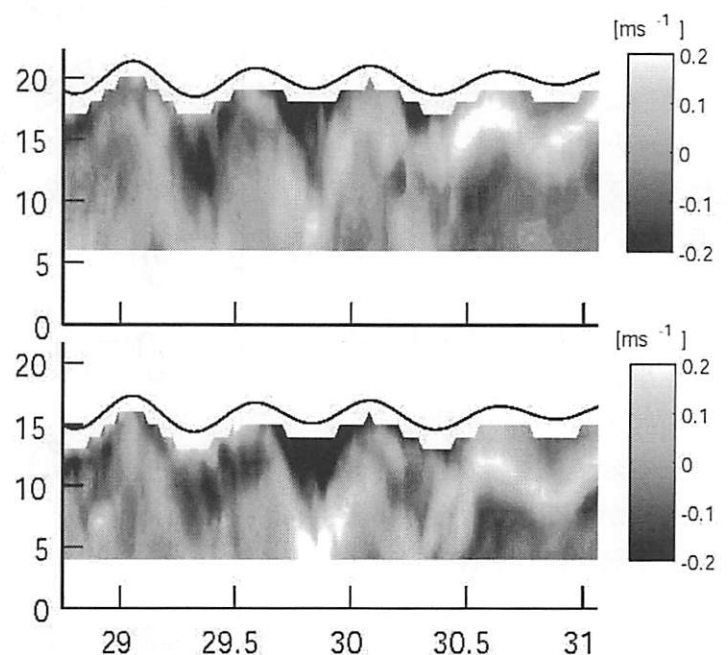


図-8 （上）Stn.B および（下）Stn.C における内部モードの流れの東向き成分の時間変化。縦軸は海底からの高さ、横軸は2009年7月の日。

速分布の計測時には、およそ 1.5km 離れた点(Stn.B)で同時に同様の計測を行っている。それぞれの点での計測結果から、内部モードの流れの東向き成分について一部を取りだしたものを図-8 に示す。半日周期で変動する内部モードの流れの全体的な様子は概ね類似しているが、29 日の後半の流れは Stn.C でより顕著なものになっている。これは、内部潮汐のエネルギーが浅い方の海底地形によって集中した結果と考えることもできる。図-6 に示した 25 時間毎の潮流楕円でも 2 日目(29-30 日に対応)の下層では Stn.B に比較して、Stn.C で大きな楕円になっている。

このように、1.5km 程度の隔たりでも現象によっては、大きく異なった様相を呈するものもあり、見ようとする現象の空間スケールを考慮した解釈が重要である。

外部潮汐の場合、その波長は長く、長波と考えられるので伝播速度は速い。したがって水位は短時間に広い範囲に伝播すると考えてよい。水深 20m としても約 12 分で 10km 伝播する。言い換えると、地形によって変形はあるとしても、1 点で計測した場合の水平代表性は高いと言える。ところが、流速は水位変動に対応した線形的な流ればかりではない。地形の複雑なところでは、その場に応じた流れ場が生じ、これは流れによって情報が伝達される。一般に流れは上述の長波の伝播速度に比較して遙かに小さく、したがって、1 点での計測値の空間代表性は小さい。例えば数値モデルで水位変動は比較的観測値と合わせやすいのに対し、流速場は精度よく再現することが難しいことにも関係する。すなわち、モデル自体の精度ばかりでなく、観測値の空間代表性についても考慮する必要がある。

例えば、諫早潮受け堤防の影響を評価する際、事前に計測されたデータと、事後にほぼ同じ点で観測されたデータを比較することで、その影響を判断しようとする場合がある。流れに関しては、平均流や潮流楕円で比較される。限られた資料を用いて影響を評価しようとする際、それはもっともらしい比較ではあるが、計測の時空間的代表性の問題がつかまとう。同季節同期間の計測であったとしても上述のように先行する期間に降った雨の量や卓越した風向でも流れの様子は異なってくる。条件を揃えることは簡単ではない。時間的に何を代表しているかという点である。一方、潮受け堤防の建設のような場合、地形が変わっているということは、流れのパターンが変わっている可能性がある。流れの構造が相似的に変化している保障はどこにもない。例えば、流量は変わらなくても流軸の中心が少しずれるようなとき、その流れの分布がわからないままに同じ 1 点で測定した結果のみから流量の変化を推定することの妥当性には、注意する必要がある。

3. 鉛直構造の変化の時間スケール

海域の鉛直構造の中で、基本となるのが密度場である。海水の密度は水温と塩分および圧力で決まる。圧力は水平的にはほぼ一様であるので、密度の決定要因としてはあまり重要でない。外洋では水温が第 1 義的に密度場を決定すると考えても大きな間違いにはならないが、沿岸域では塩分の影響が大きい。特に河川水の影響の大きい内湾域では、塩分の寄与の方が大きいことが多い。

沿岸環境に大きな影響を及ぼす貧酸素水塊の形成や、富栄養化など生物化学過程も成層構造に大きく依存している。ここでは、沿岸域で成層構造がどのように変化しているか、実際のデータに基づいて見ていきたい。

3. 1 季節変動

一般的には、成層構造の変化の代表的なものは季節変動である。春から夏に、海面に入る熱輸送が正になることによって表層に浮力が与えられ、水温成層が発達する。一方、秋から冬には海面から奪われる熱の方が大きくなることで、負の浮力が与えられ、密度的不安定によって成層構造が崩れる。沿岸域でも海面を通した熱収支の季節変化による成層構造の季節変動は一般的であり、基本場としては、夏季には顕著な成層構造が見られるのに対して、冬季には鉛直方向にほぼ一様あるいは弱い成層になっていることが多い。夏季にはまた降水量も多く、河川水の影響による低塩分水が成層構造をさらに強化する場合も多い。高温水と低塩分水は共に低密度化に寄与するためである。

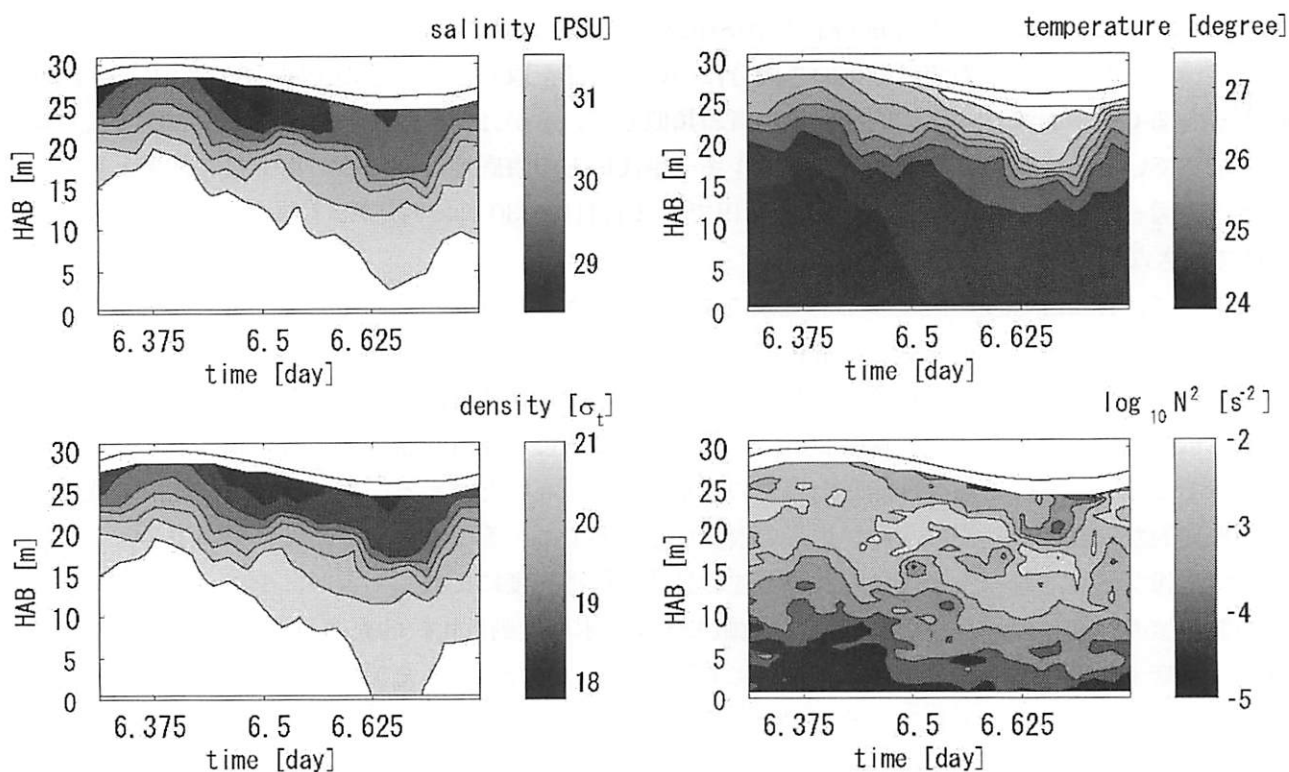


図-9 2009年8月6日に諫早湾口部付近で観測された成層構造（左上）塩分、（右上）水温、（左下）密度、（右下）浮力振動数の時間変化。

有明海で観測された夏季と冬季の典型的な成層構造の例を図-9、10に示す。夏季の例は2009年8月6日に諫早湾沖の定点（図-3のStn.A）において30分間隔で約10時間繰り返し観測した結果である。水位の変動は潮汐によるものであり、満潮時の少し前から再び上げ潮になった時間帯までの計測である。干潮時における表層の水温は27℃台、満潮時には下層で24℃程度になっている。また、塩分は表層で28台、下層では31.5程度になっている。海面下10m付近に見られる顕著な躍層は厚さ10m程度、密度差は 2kg/m^3 以上となっており、成層の強さを表す浮力周波数(N)は $10^{-1.6}$ 前後と大きな値に

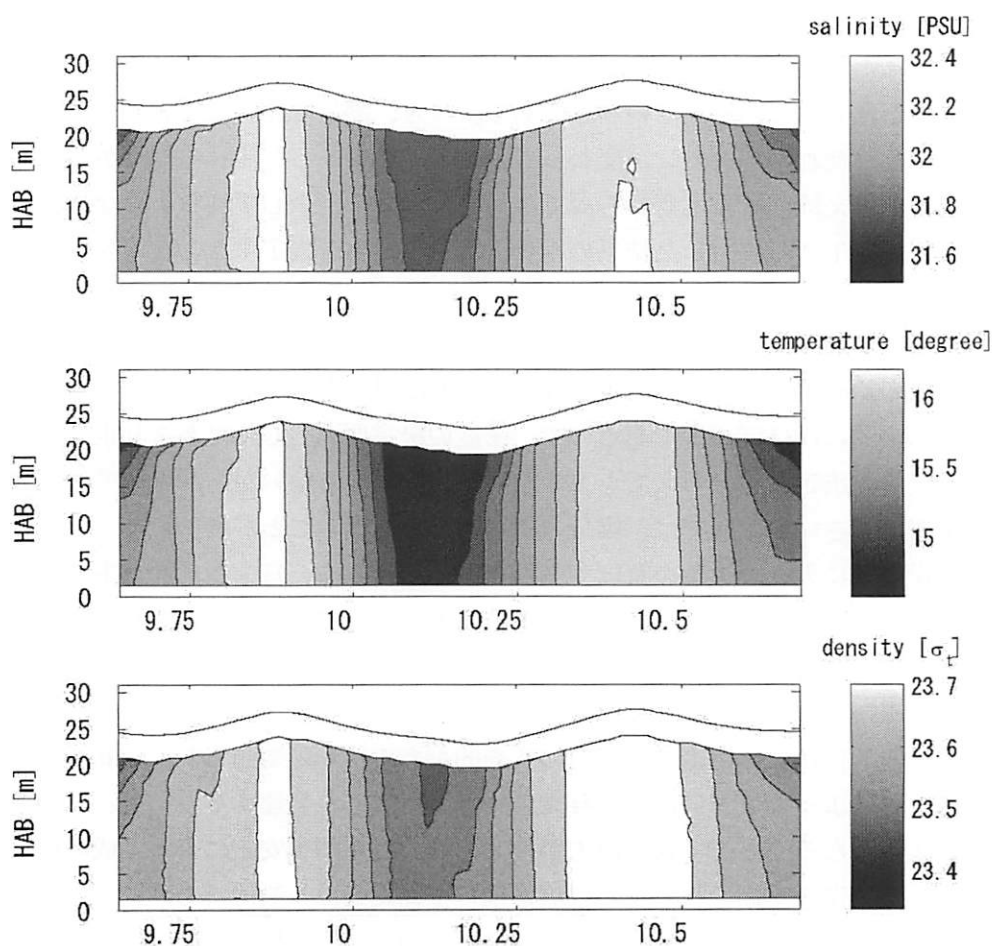


図-10 2007年12月9-10日に諫早湾口部付近で観測された成層構造。上から塩分、水温、密度。

なっている。そのときは大潮の時期に対応していたにもかかわらず強い成層が見られる。下げ潮に伴って表層付近で水温が高くなっているのは、日射による熱輸送の影響も考えられるが、より湾奥寄りで暖められた高温水が移流してきた効果の方が大きいと思われる。このように定点における計測では移流の影響を考慮する必要があるが、その効果を正しく評価することは一般には難しい。

冬季の例として図-10に示したものは、2007年12月9-10日に図-9より若干諫早湾よりの定点(Stn.B付近)で計測した結果である。夏季と異なり、鉛直方向にはほぼ様な構造になっていることがわかる。時間的には満潮時に高温・高塩分、干潮時に低温・低塩分であり、湾奥の水が低温・低塩分であったことがわかる。密度的には満潮時に若干高くなっており湾奥の水の方が少し軽かったことがわかる。しかし、その軽い水が上層に乗ることはなく鉛直ほぼ一様になっているのは、鉛直混合が盛んなためである。

この2ケースの相違は典型的なものであり、季節による相違を示すわかりやすい例であるが、有明海のように淡水の影響を強く受ける海域では、このような例に沿わない場合も出てくる。図-11は2月に観測した例の方が6月の観測例より成層が強かった場合である。2003年2月の観測例では、上層と下層との塩分の差が1.5(psu)以上あり、密度差も1 (kg/m^3) 程度になっているのに対し、同年6月の観測例では、特に満潮時には全層ほぼ一様になっており、干潮時でも塩分差は0.5、密度差も0.5 (kg/m^3) 程度になっている。これは例外的なケースであるが、単発的な観測からその季節を代表する結果が得られるとは限らないという例でもある。

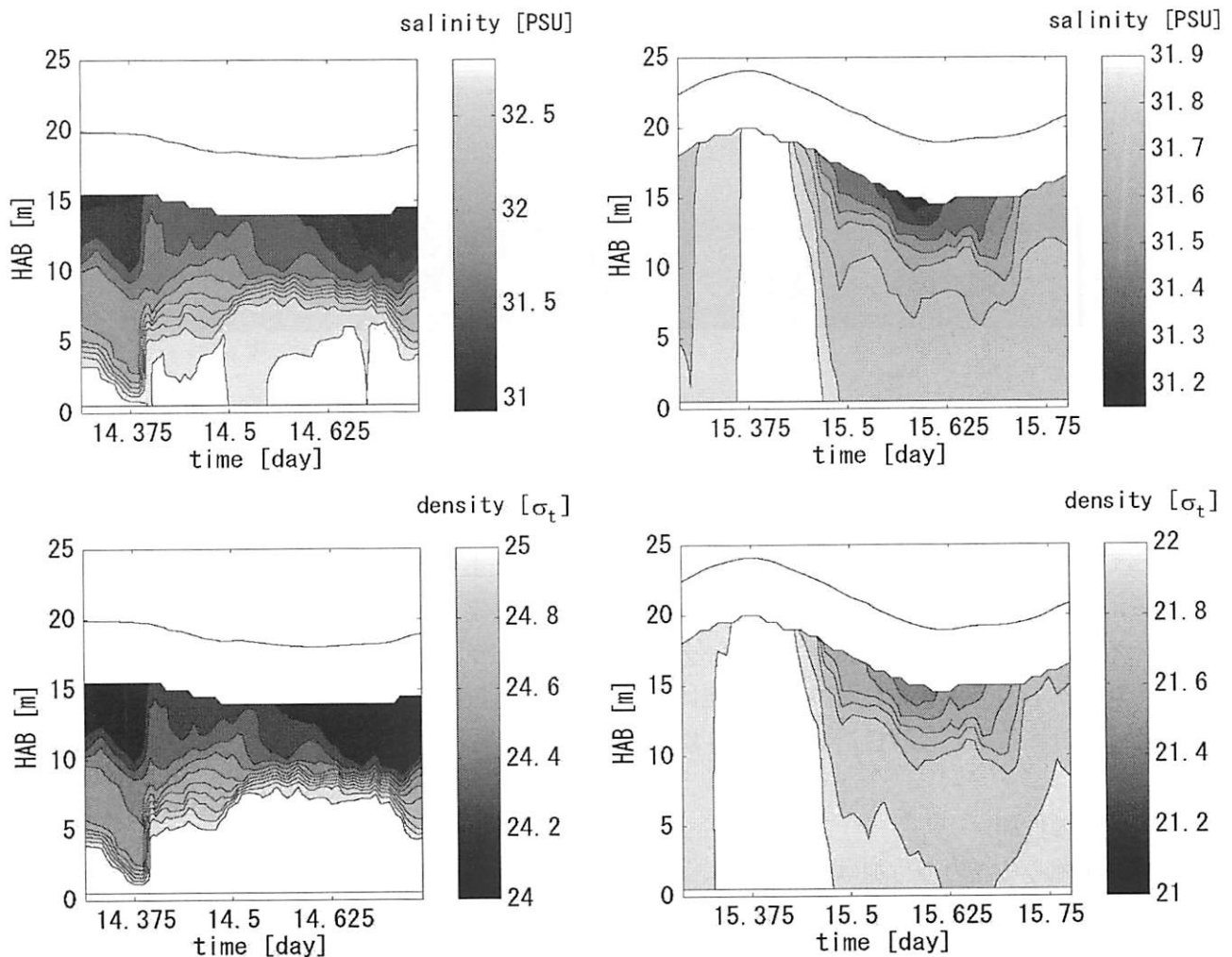


図-11 (左) 2003年2月14日と(右) 2003年6月15日に諫早湾口部付近で観測された成層構造。(上) 塩分、(下) 密度。

3. 2 1日から数日の変動

成層構造の変化は次章で述べるように、浮力の付加と鉛直混合によって決まる。上述の季節変動は主として海面を通した熱収支の季節変動に依存するものである。しかし、上でも述べたように実際にはその時々条件によって、より短い時間スケールで成層構造は変動している。例えば2009年7月のように、大雨の後、イベント的に河川からの大出水があった場合には、沿岸域の塩分は大きく低下し、成層は強化される。これは湾のスケールにもよるが、数日以上の時間スケールを持った変動である。また、大潮・小潮の流速の違いによる鉛直混合の強さによる成層構造の変動も一般的である。こちらは約2週間の周期を持つことになる。このように、成層構造の変動は季節変動の他に1日程度から数日以上の時間スケールを持つ。

昼夜の熱収支の相違による成層構造の変化に関わる観測例を紹介する。上述のように定点における時間変化には水平移流の影響も大きく、時間変化の部分を抽出することが難しい場合が多い。そこで、漂流ブイを追跡しながらCTD観測を行った例を示す(図-12)。図は、4時から18時まで2時間毎の観測に基づく。日によって変化の大きさは異なるが、両日とも正午ころから表層の水温が上昇していることがわかる。漂流ブイに搭載した水温計からは、同様に正午頃に昇温が始まり、夕方からは水温は降下していたことがわかる(図は省略)。

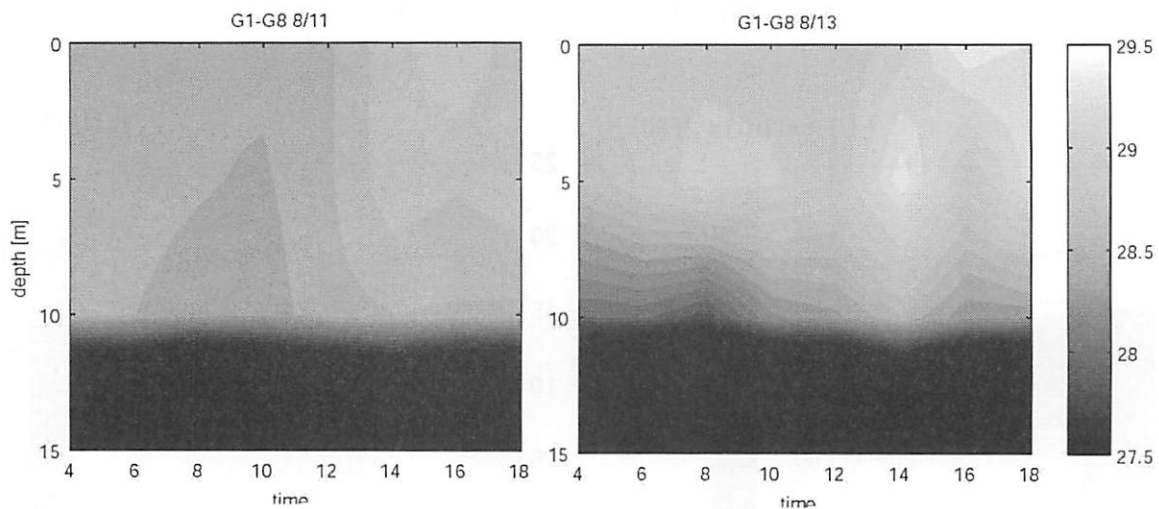


図-12 2008年8月(左)11日と(右)13日に東シナ海陸棚域で漂流ブイを追跡しながら観測された表層混合層内の水温の日変化。正午過ぎから水温が高くなっているのがわかる。

4. 成層構造を決めるもの

既に述べてきたように、成層構造は、浮力が付加されることにより強化される方向に変化し、鉛直混合の発達によって弱くなる。定性的にはわかりやすい説明であるが、定量的には非常に難しい。近年鉛直混合の強さに関する計測は普及してきており、数値モデルでも様々なパラメタリゼーションが用いられ、重要性が認識されてきているが、まだ十分な説明が可能になったと言える段階には達していない。ここでは、鉛直混合に関わる乱流計測結果と成層構造との関わりについて紹介する。

4. 1 浮力の付加

成層構造を強める浮力の付加は、上述のように主として海面からの熱輸送と河川からの淡水輸送によるものである。海面を通した熱収支は太陽の短波放射と正味の長波放射、そして顕熱と潜熱による輸送を考えれば見積もることができる。ただ、その熱がどの層に分配されるかについては表層混合層など鉛直混合の評価をする必要があるため簡単ではない。また、河川水の流入量は河川管理の情報からかなり正確に把握できると思われるが、海域に流入した後の混合については熱の場合と同様である。しかし、沿岸域の観測から熱輸送や河川起源の浮力の寄与を定量的に評価するのが難しい理由は、それよりも観測値には水平移流が大き

く影響しているためである。1例として既に図-9に示したように、1固定点での観測から、表層からの熱輸送の効果と移流の効果とを分別することは難しい。移流の評価には、海域の多数の点で、水温・塩分の分布と流れのデータが得られていることが必要となる。しかし一般には観測値から移流の寄与を評価することは困難なので、その代わりに満潮時と干潮時に2回観測を行い、両者の相違から、潮時の間に海洋構造がどの程度変化するかを考慮するような計画が組まれることはある。

筑後川からの河川水の流入が、有明海奥部の海洋構造にどの程度の時空間スケールで影響しているかを評価することは、有明海の海洋構造に対する河川起源水の寄与を考える上で大変重要である。山口(2007)は有明海奥部の表層塩分と、筑後川からの淡水流入量との関係を調べ、筑後川河口域に近い有明海奥部では、河川流量の極大から2日程度で表層低塩分との相関が高くなり、さらに奥部の西寄りでは4、5日程度で相関が高くなることを示した。更に諫早湾内の点でも7から8日ほどの時間差で有意な相関があることを示している。このことは、河川水からの浮力の付加が諫早湾を含む有明海奥部から中央部における成層構造に、イベントとしても影響していることを示している。河川流量が諫早湾内の表層塩分と最も相関の高かった時間差について、両者の関係を示したものが図-13である。両者には明瞭な負の相関が見られる。一方、この関係は、同じ河川流量であっても、諫早湾内の表層塩分にはかなりのばらつきがあることも示しており、流入した河川水の拡がり経路や混合過程には大きな変動があることも示唆するものである。

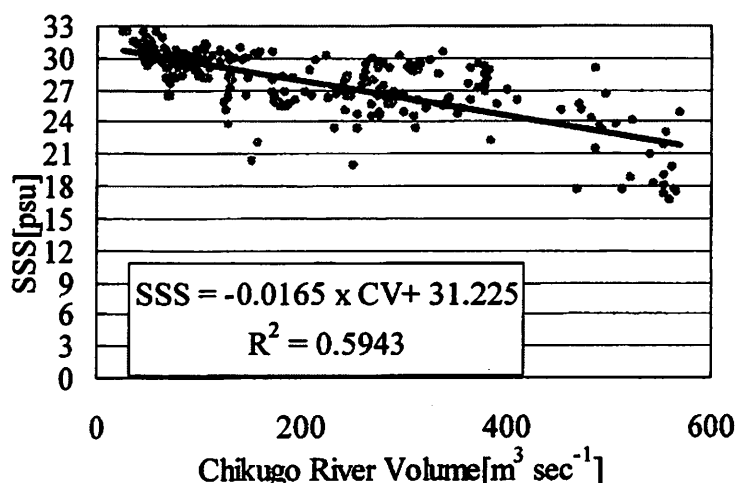


図-13 筑後川の流量と諫早湾内の表層塩分との関係。筑後川の流量については2週間の移動平均をかけ、8日間の時間差を考慮した関係を示している（山口,2007より）

4. 2 乱流混合

さて、成層構造には、浮力の付加と共に、鉛直混合が深く関わっている。鉛直拡散とも言われるが、通常沿岸海域では分子拡散と比較して乱流拡散が卓越しており、様々な要因によって生じられる乱流混合が成層構造の変化に大きな役割を果たしている。ここでは、主として流れの微細構造の計測に基づいた乱流混合の実測例を紹介しながら、鉛直混合と成層構造の関係について述べる。

まず、表層混合層に関する例を示す。場所は福岡市沖の対馬海峡で、2006年10月に長崎大学の練習船長崎丸によって行った観測に基づいたものである。このときは、水平移流による変化を考慮しなくてよいように、海面下5mに抵抗体を持つ漂流ブイを追跡しながら、微細構造プロファイラーによる観測を繰り返し実施した。アレック電子製の微細構造プロファイラーTurboMAPによる乱流計測は通常海面から自由降下させてデータを取得するが、その場合には、計測器が安定な降下速度になる数mから10mでは信頼できるデータを取得することができない。このケースでは表層混合層の変化過程を調べることを目的としたため、計測器を一旦海面下40m付近まで沈め、そこで錘から切り離して自由浮上させることで、海面直下まで信頼性の高いデータが取得できる方法を採用した。ただ実際には、表面直下ではおそらく波の影響によって測定器の動揺が大きくなり、海面下2mではデータの信頼性が低くなったため、以下の解析では極表層を除いている。

微細構造プロファイラーTurboMAPにはシアープローブと呼ばれる流れのシアースセンサーの他に、高感度の水温計、通常の水温・塩分計、圧力計、加速度計、蛍光光度・濁度計が搭載されており、512Kzでそれぞ

れのデータをサンプルしている。自由浮上速度はおよそ 0.5–0.6m/s なので、サンプリングの解像度はおよそ 1mm である。流れのシアの時系列、例えば 2 秒間で 1024 個、すなわち約 1m のデータからスペクトルを求め、そのシアの波数スペクトルを次式のように積分することで乱流エネルギー散逸率 ε を計算する。

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \int_{k1}^{k2} \psi(k) dk$$

ここで、 k は波数、 ψ はシアの波数スペクトル $k1$ 、 $k2$ の積分区間は乱流エネルギーの卓越する波数区間であるが、ここでは測定器の大きさ（約 1m）からコルモゴロフスケール（1cm 程度）くらいに相当する。また ν は動粘性係数である。

1m ないし 2m のサブデータセット毎に ε を計算することによってその鉛直分布を求めることができる。

上述の観測の中から 10 月 18 日の 12:00 から 21:00 までの期間を取りだしたものを図-14 に示す。表層混合層に注目するため、20m 以浅のデータを示している。図で影の濃いところが ε の大きいところであり、乱流混合が盛んであることを示している。

混合の強いところは 15:00 前後ま

で表層 5m 付近までに限られていたものが、その後急激に深くなり、18:00 頃には 10m を越えている。それに対応して等温線も深くなり、強い流れの層も深くなっている。これは、15:00 頃から急に強くなった風に対応したものと考えられる。表層混合層内は元々密度勾配が小さく、風から表層に入った運動エネルギーの一部が乱流エネルギーに移行し、それが表面近くの熱を下の層に伝える役目を果たしていることを示すものである。表面での風応力と流れの鉛直構造から、生成される乱流エネルギーを見積もることができ、やはり 15:00 以降に大きな乱流エネルギー生成項が急激に深くまで達するようになっていた（図省略）。これらのことから、表面で付加された運動エネルギーが、乱流過程によって表層下に運ばれていることがわかる。これは表面で付加された浮力についても同様であるが、浮力が下層に運ばれる際にはポテンシャルエネルギーに変わる部分があり、その定量的評価については決定版はないのが現状である。

乱流混合と成層構造の関係については難しい部分も少なくないが、沿岸域の環境を支配する成層構造の挙動を定量的に評価するためには、その関係は避けて通れない問題である。次に、海底での摩擦に起因する鉛直混合について、成層構造との関連で検討する。

再び有明海に戻る。最初に述べたように、有明海の環境異変は潮汐流が弱まったために起こったのではないかというストーリーがしばしば語られる。潮汐流が弱まり、鉛直混合が弱まって、成層構造が強くなった、という論理であるが、それが現実を説明しているかどうかは別として、潮汐流が弱まることで鉛直混合が弱まるという関係は、海底摩擦にともなう流れのシアが乱流を生み出し、それが鉛直混合を引き起こすという過程を想定している。ここでは、前に述べた諫早湾口部付近での観測時に行った、海底摩擦に伴う乱流エ

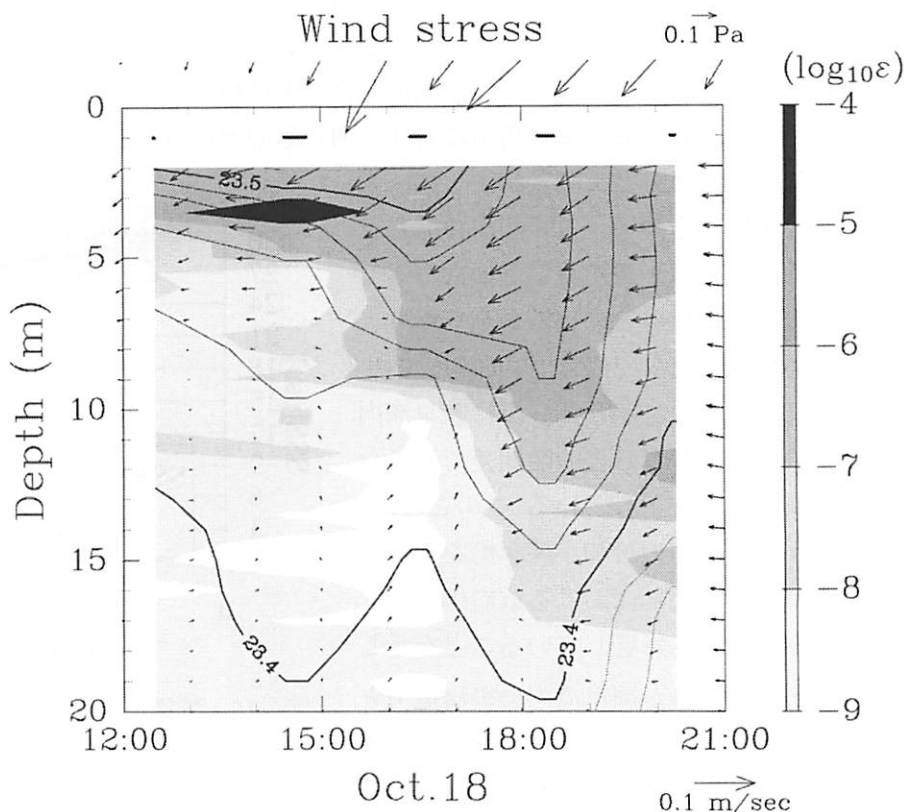


図-14 2006年10月18日に対馬海峡で観測された乱流エネルギー散逸率 ε （濃淡）と表層係留 ADCP による流速ベクトル（矢印）およびそのときの水温（等値線）の鉛直分布。上に風速のベクトルを示す。（遠藤ほか、2010 による）

エネルギー散逸率を計測したいいくつかの例を紹介する。

2007年12月9日の夕方から30分間隔で24時間繰り返し行った TurboMAP による観測および調査船に搭載された ADCP による流速測定に基づいた、密度構造、半日周潮流の長軸方向の流速、および ε の鉛直分布の時間変化を図-15に示す。密度の時間変化から明らかなように、成層構造はほとんど見られない。密度構造の変化は図-10で示した図と同じである。また、流速分布からも海底近くの境界層を除けば、鉛直的に概ね一様であり、上げ潮で北西方向、下げ潮で南東方向の潮汐による往復流が明瞭に現れている。前にも述べたように、この流れによって、上げ潮時には高密度、下げ潮時には低密度の鉛直的にはほぼ一様な水が、運ばれていることがわかる。さて、ここでのテーマは乱流混合であるが、その指標となる ε の分布は非常に特徴的である。流れが強くなっている上げ潮・下げ潮時に対応して1/4日周期の変動が明瞭に見られる。特に海底から中層でその変動は顕著であるが、その極大値は表層近くまで達していることが特徴である。海底付近では潮汐流の強い時間帯では 10^{-6} ($\text{W/kg}=\text{m}^2/\text{s}^3$) 以上の値を示し、上層に行くにしたがって小さくなっているが、海底付近での大きな ε の影響は海面直下まで及んでいることがわかる。流れが弱まると海底近くでも 10^{-8} (W/kg) 程度になり、 ε の時間変動は非常に大きい。 ε の値は鉛直混合の強さの指標となるが、一般的に用いられる鉛直拡散係数 K_z に変換すると鉛直混合の強さのイメージはよりわかりやすいかもしれない。

K_z の値は海底付近で、 10^{-1} (m^2/s) 以上になっており、一般的な鉛直拡散係数の値と比較すると非常に大きな値である。鉛直拡散係数は、以下の式に示すように、乱流エネルギー生成率、同散逸率 (ε) および浮力フラックス (J_b : ポテンシャルエネルギーに変換

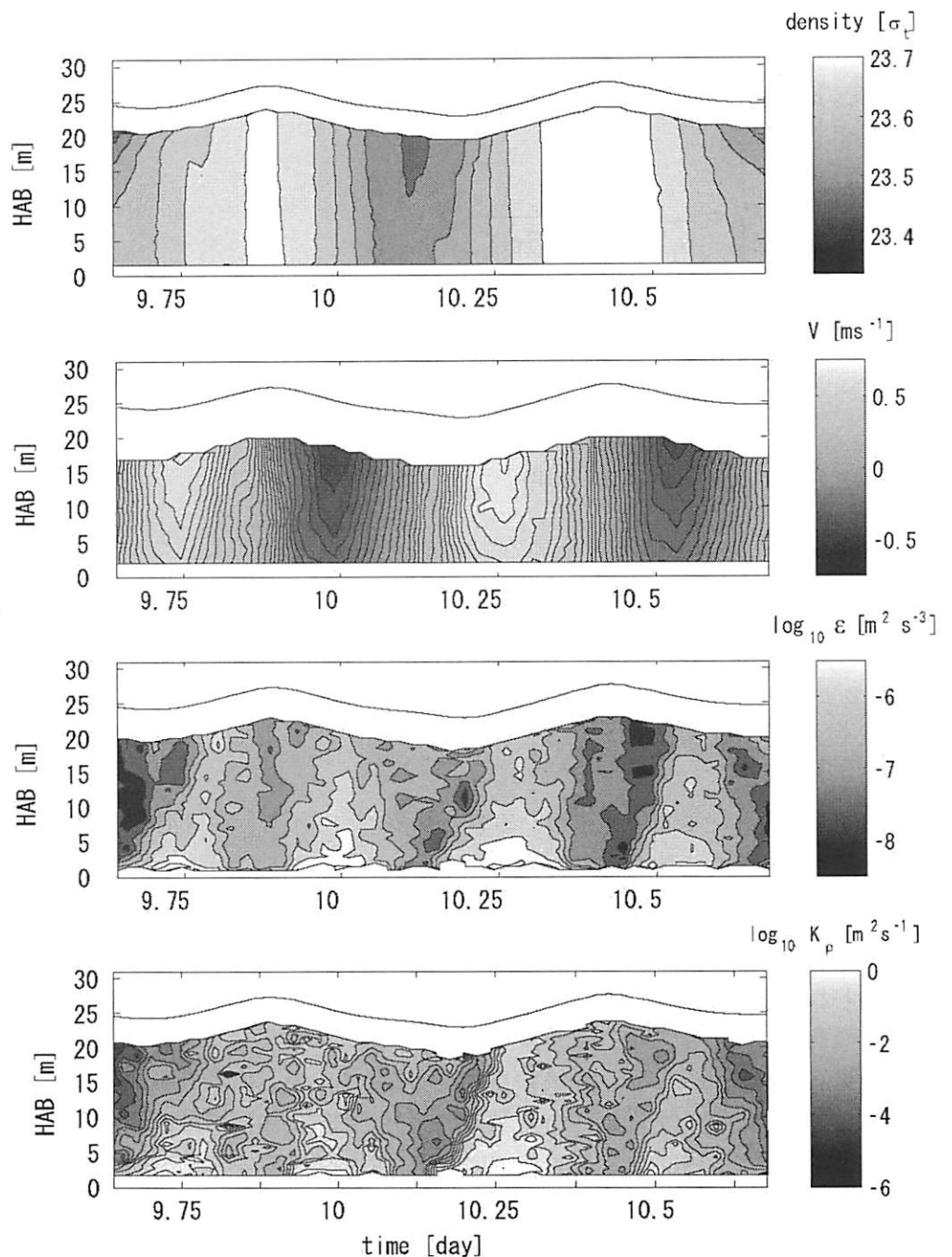


図-15 2007年12月9-10日に諫早湾口部の Stn.B 付近で観測された（上から）密度、流速の長軸成分、乱流エネルギー散逸率 ε および鉛直拡散係数 (K_z) の鉛直分布の時間変化。各図の上の曲線は海面を表す。

される部分) がバランスしているという仮定にしたがって見積もっている。

$$\overline{u_1' u_3'} \left(\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_3} \right) = J_b - \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 u_1 、 u_3 は水平方向、鉛直方向の流速、' はアノマリ、バーは平均を示す。また、 x_3 による微分は鉛直方向の微分を示す。鉛直拡散による密度フラックスは鉛直拡散係数を用いて、以下のように表すことができる。

$$\overline{u_3' \rho'} = -K_\rho \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x_3} \quad (2)$$

ここで、 ρ は海水の密度を表す。 K_ρ は K_z と概ね同じであるが、厳密には等密度面を横切る拡散に対する係数を表す。さらに

$$R_f = \frac{J_b}{\overline{u_1' u_3'} (\partial u_1 / \partial x_3)} \quad (3)$$

とおく。 R_f はフラックスリチャードソン数と呼ばれ、乱流エネルギー生成率に対する浮力フラックスの割合であり、通常測定することは困難である。(2) 式は

$$J_b = -K_\rho N^2$$

と書くことができ、それを R_f を用いて書き換えると、

$$K_\rho = \frac{R_f \varepsilon}{(1 - R_f) N^2} = \gamma \frac{\varepsilon}{N^2} \quad (4)$$

となる。上述のように一般的に R_f の値を与えることは困難であるが、Osborn(1980)は $R_f \leq 0.15$ として、 $\gamma < 0.2$ より

$$K_\rho < 0.2 \frac{\varepsilon}{N^2} \quad (5)$$

を与えており、 γ として0.2を用いることも多い。しかし、海底混合層内など成層構造が弱い場合にはより小さな値になるという議論もなされている。上述の図-15に示した値も、 γ として0.2を用いたものであり、値としては不確定なものを含んでいることに注意する必要がある。以下 K_ρ と K_z は同じように扱う。

次に、成層構造が見られたケースについて示す。観測は2009年11月14から15日に同じく諫早湾口付近で行われた観測結果である。図-16に密度、流速、 ε 、 K_z の鉛直分布を示す。測定点の位置は図-15に示した観測時に比べて若干異なっており、水深が少し深くなっている。密度の分布から明らかなように成層構造が見られる。しかし、秋の終わりということもあり、密度成層はそれほど強くはない。流速も長軸方向を見る限りは概ね鉛直方向に一樣であるが、上げ潮時に中層で最大値を取る分布も見られ、内部モードの運動を示唆する部分もある。 ε が特に下層で半日周期の変動を示し、海底付近では大きな値を示すことは、図-15のケースと同様である。ところが、上げ潮・下げ潮に対応して海底付近で大きな値を示した ε の半日周期の変動は、海底上15m付近より上層ではあまり明瞭ではなくなっている。この海底上15m前後という深さは密度構造から明らかなように、成層が発達している層である。すなわち、海底摩擦による流れのシアーによって作られた乱流が、成層構造のあるところまで伝わってその後減衰していることを示唆している。乱流混合は成層構造を崩壊させると同時に、成層構造によって乱流も減衰することがわかる。図-15に示した密度一様の例では、海底起源の乱流が表層近くまで達していたことと対照的である。鉛直拡散係数も ε の分

布を反映して、大きな値は海底上 15m 以深で見られる。特に成層構造のある深さでは K_z は小さな値をとることがわかる。

このように潮汐流による海底摩擦は鉛直混合を助長するが、成層構造があると、それによって乱流は大きく影響を受ける。流れが弱まることで、成層構造が強まるという議論は、定性的には正しく、長い時間の平均を考えれば、量的にもその傾向は現れると思われるが、例えばある年のイベント的な現象を説明するには定量的な議論が必要であり、少なくとも有明海を対象海域として考えたとき、成層構造と鉛直混合の関係については、まだ十分な説明ができるだけの知見は得られていない。

鉛直混合を引き起こす要因は、表面の風と海底摩擦だけではない。海洋内部においても鉛直混合の起源となる現象がある。その代表的なものが第 2 章で述べた内部潮汐である。有明海のような外部潮汐の発達する海域でも、明瞭な内部潮汐が頻繁に起こっている

ことは既に述べたが、それに起因する鉛直シアによってどの程度の鉛直混合が起こっているかについての情報は限られている。諫早湾口部付近で繰り返し実施してきた観測の中から、内部モードの運動に伴って発達したと思われる鉛直混合の例を図-17 に示す。この観測時には、第 2 章でも述べたように、直前に顕著な降雨があり、表層は著しい低塩分水に覆われていた。図に示すように表層近くの密度成層は、今までに述べた例に比較して極端に強く、浮力振動数も 10^{-1} (時間スケールにすると 1 分程度) に近い非常に大きな値になっている。その密度成層に対応して、流れのシアも大きくなる場合が見られ、図中破線で囲ったところでは、顕著なシアが認められる。そして、この強いシアに対応して ε の極大が認められる。海底直上の ε に比較すると値は大きくないが、明瞭に極大値を示しており、乱れが内部で生じていることを示している。この鉛直シアが内部潮汐によるものであるかどうかはあまり明瞭ではないが、強い成層構造に関連し内部モードの運動に伴ったものであることは明らかである。この ε の極大値付近で計算した K_z は 10^{-4} より大きくなっており、一般的にバックグラウンドの値として考えられているよりは大きな値になる。このような成

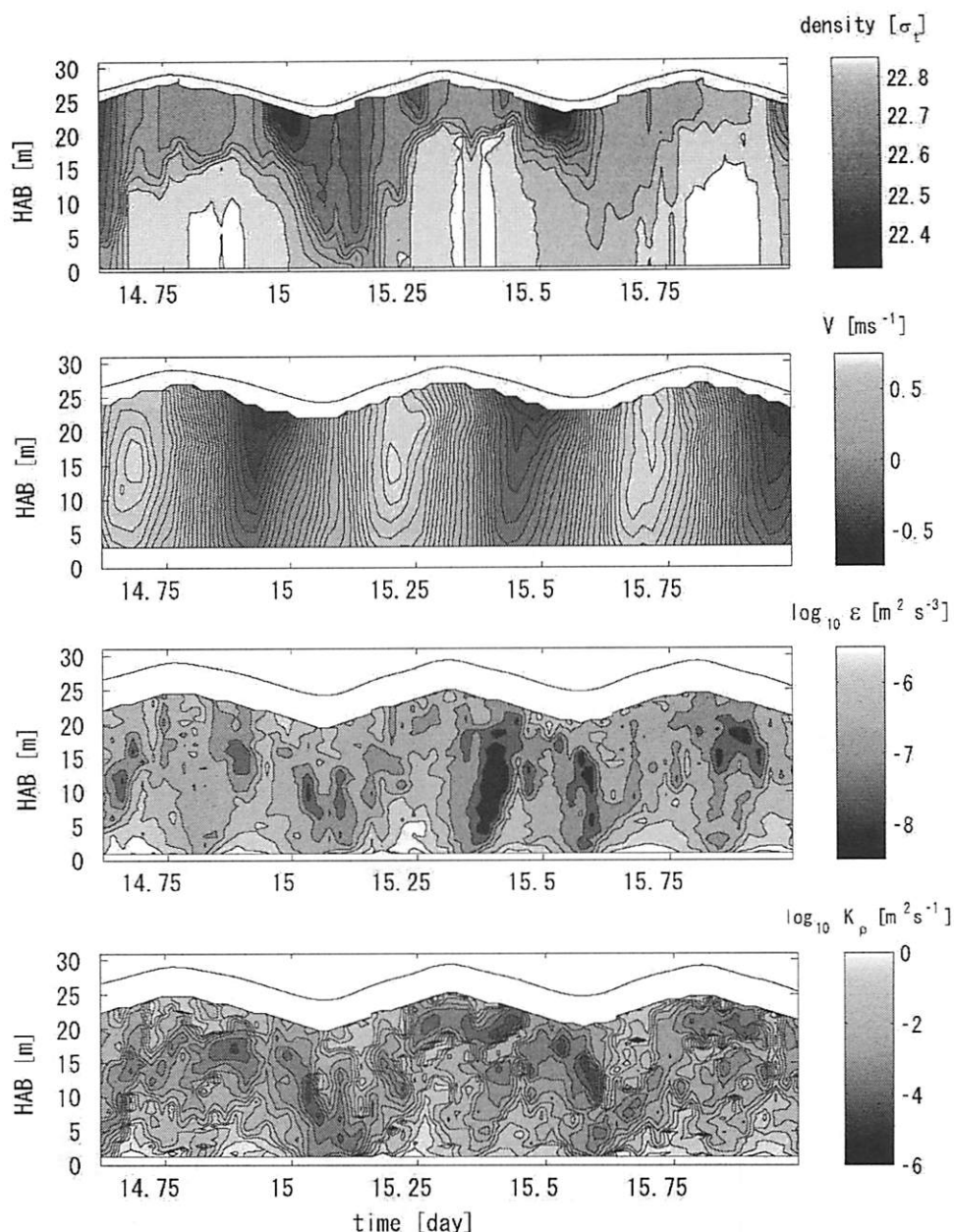


図-16 2009 年 11 月 14-15 日に諫早湾口部の Stn.B 付近で観測された (上から) 密度、流速の長軸成分、乱流エネルギー散逸率 ε および鉛直拡散係数 (K_z) の鉛直分布の時間変化。各図の上の曲線は海面を表す。

層構造に伴った内部モードのシアによる鉛直混合も頻繁に起こっており、図-17の例は特殊なケースではない。このような内部で生じた乱流混合も成層構造を変化させる役割を果たしていると推測される。有明海でもしばしば観測される水温や塩分のステップ構造はこうした内部で発達した混合によって作られている可能性もある。

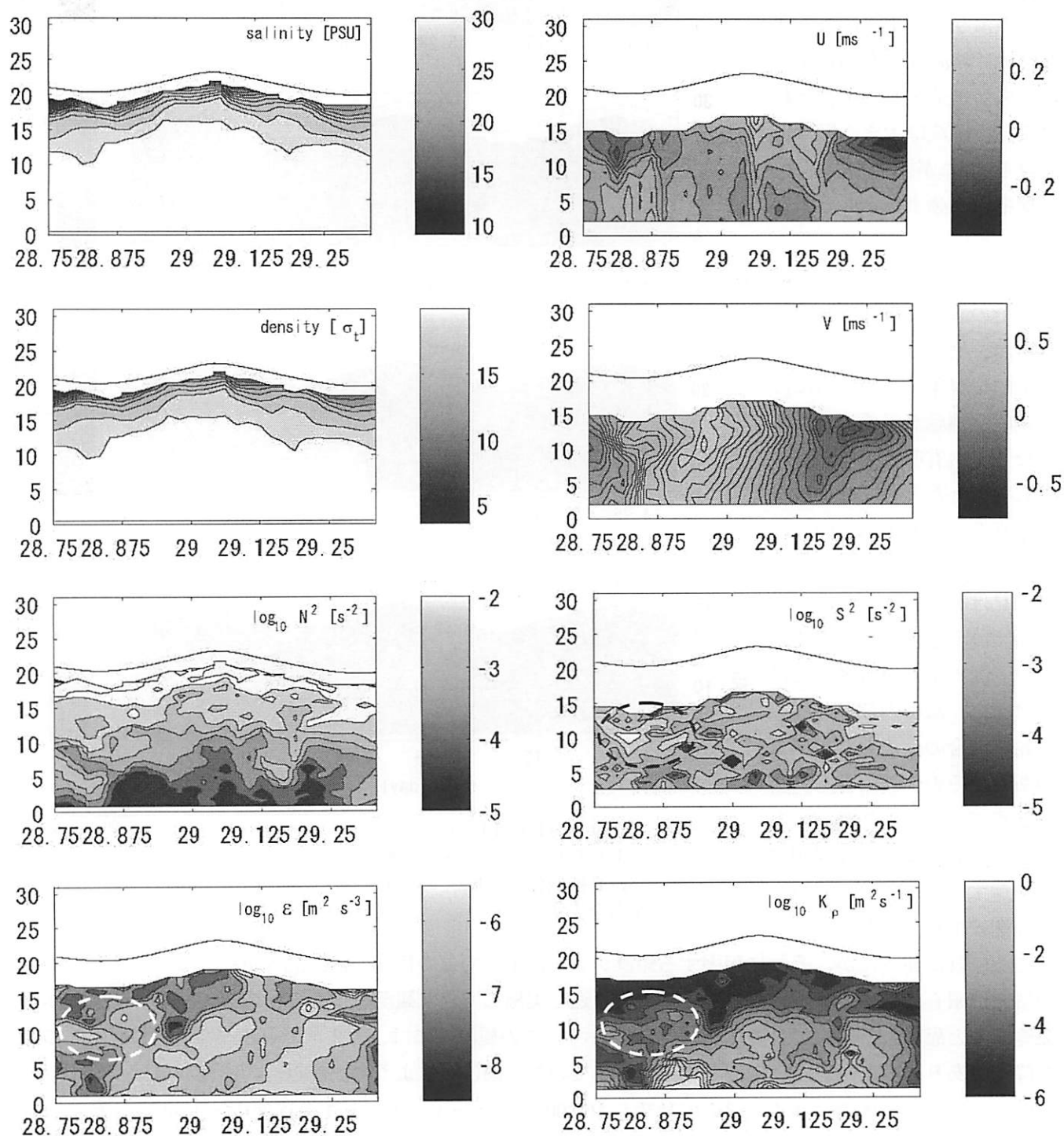


図-17 2009年7月28-29日に諫早湾口部のStn.Aで観測された(左列上から)塩分、密度、浮力振動数、 ϵ 、(右列上から)流速の短軸成分、長軸成分、シアの2乗、 K_z の鉛直分布の時間変化。各図の上の曲線は海面を表す。シアの2乗、 ϵ 、 K_z の図の破線の楕円は内部モードによる乱流混合が起きているところを示す。

5. 成層構造に依存する環境

以上述べてきたように、流れと成層構造は密接に相互作用しながら変動している。そしてそれらは沿岸域の環境にも深く関わっている。成層が発達することによって、上下層の物質交換が抑制され、表層の酸素が下層に運ばれにくくなることで、下層に貧酸素水が形成されることがある。特に沿岸域では堆積物などに新鮮な有機物が多いことから、その分解によって消費される酸素の量も多く、貧酸素になりやすい。有明海のように大きな潮位差があり潮汐混合が盛んな海域でも近年貧酸素水塊の形成が大きな問題になっている。貧酸素水塊の形成については、成層構造の発達によって表層からの酸素供給が抑制される度合いが大きくなっているのではないかと推測がなされている。

諫早湾でも潮受け堤防閉め切り以降、貧酸素水が頻繁に発生することが報告されている。山口(2007)は諫早湾において精力的な観測を実施して、成層構造と貧酸素水塊の形成との関係を調べている。2005年には7月21日から9月12日までの間に2日ないし5日間隔で計16回の観測を行っている。その中から代表的な水温・塩分・密度構造と溶存酸素の鉛直分布を図-18に示す。8月8日のケースでは、高温・低塩分水が表層に拡がり、強い密度成層が形成されていた。そして表層では溶存酸素は10mg/lを超え、過飽和状態になっていたのに対し、底層では2mg/l以下の貧酸素水が形成されている。一方、8月21日には塩分に若干成層が見られる程度で、密度成層は弱く、このときには貧酸素水塊は形成されていない。8月8日に見られた溶存酸素の顕著な成層構造は表層に分布する低塩分水に深く関係していることが強く示唆される。また、密度成層の形成過程に関しては、表層における低塩分水の流入の他に、低温・高塩分水の下層への流入の寄与が大きいと思われるケースも見られる。8月28日の例がそれに相当する。この期間に諫早湾内の定点で実施された連続観測からは、底層の溶存酸素濃度が半日周期で大きく変動していることを示すデータが得られている。これは、図-18に示す底層の貧酸素水塊が潮汐に伴って斜面に沿って往復しているためと推察されている(山口, 2007)。表層の低塩分水についてもその起源はひとつおりでない。諫早湾奥の河川の影響は当然受けると共に、図-13に示したように降水量が多い場合には、筑後川の影響による低塩分化も考慮する必要がある。後者の場合には湾口側がより低塩分になるはずである。実際に諫早湾口部における2009年11月の

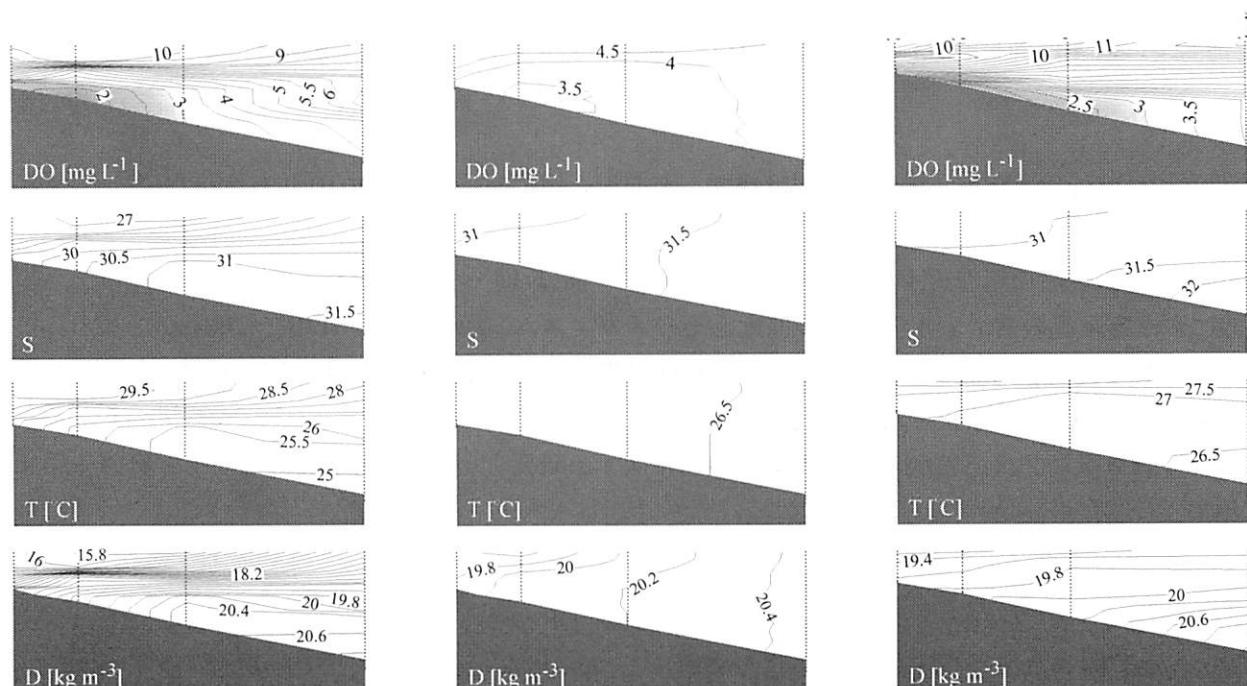


図-18 2005年8月(左)8日、(中)21日、(右)28日において、諫早湾の湾軸方向の断面における、上から溶存酸素濃度、塩分、水温、密度の鉛直分布。(山口, 2007より抜粋)

観測（第2章参照）で示したように、干潮時に有明海奥部から移流された低塩分水に湾口部が覆われるときに、表層で諫早湾に向かう流れが形成され（図-4）、同時に下層では諫早湾から流出するような、いわゆるエスチュアリ循環とは逆の流れになる場合も考えられる。

様々な要因によって諫早湾内が成層化し、成層が強くなることによって海底近くでは貧酸素化が進行するというプロセスになる。上でも述べたように、定量的説明は簡単ではないが、成層化は流れの強さに依存している。少なくとも諫早湾内では潮受け堤防の建設以降、流れが大幅に弱まったことは間違いのない事実であり、それに伴って、成層化が顕著になり、貧酸素になる頻度が高まったことは明らかであろう。一方、貧酸素水塊の形成は底層での酸素消費速度にも依存する。図-18にも示されているような、表層で見られる極端な酸素過飽和は赤潮状態であったことを示唆するものであり、その後大量の有機物が沈降することで、底層での酸素消費が活発になって、貧酸素化がさらに進行することが考えられる。すなわち、貧酸素化と成層構造の関係は物理的な説明だけでは不十分であり、生物化学過程を考慮する必要がある。

さらに、諫早湾の外、有明海奥部の西寄りの海域でも貧酸素水の発生する頻度が増えているという報告があり（例えば、堤ほか, 2007）、やはり成層構造との関連が議論されている。しかし、有明海奥部での流れ場をはじめとする物理環境については、近年の変遷過程などデータに基づいた定量的な共通認識は得られていない。さらに、赤潮と貧酸素水との関係のように、生物化学過程による正のフィードバックがかかるようなプロセス、沈降・懸濁粒子の挙動など沿岸環境に重要な役割を果たしている諸過程についても十分理解されているとは言えない。情報は充分でないとはいえ、潮受け堤防閉め切り以降、様々な機関によって膨大なデータが取得されているので、それらから実際の海洋で本当に起こっていることを正しく読みとる作業を進める必要がある。

謝辞

諫早湾口部での観測結果とその解析は、九州大学大学院総合理工学府博士課程の堤英輔氏の研究に基づいたものであり、作図も同氏によるものである。また、九州大学応用力学研究所遠藤貴洋氏、同総合理工学府山口創一氏には図の提供を受けた。諫早湾口部の観測の多くは長崎大学練習船鶴洋丸によって行われた。対馬海峡での観測は同長崎丸によって行われた。協力いただいた方々に深く感謝する。

引用文献

遠藤貴洋・松野健・吉川裕・吉村浩・森井康宏、海面混合層の発達過程、2010年日本海洋学会春季大会講演要旨集、259.

堤 裕昭・堤 彩・高松篤志・木村千寿子・永田紗矢香・佃 政則・小森田智大・高橋 徹・門谷 茂、有明海奥部における夏季の貧酸素水発生域の拡大とそのメカニズム、海の研究、16(3)、183-202、2007.

Matsuno, T., Propagation of Semi-Diurnal Internal Tides Observed off Fukushima, along the East Coast of Japan. J.Oceanogr.Soc. Japan, 47, 138-151, 1991.

山口創一、諫早湾における貧酸素水塊の形成機構に関する研究、九州大学大学院総合理工学府博士論文、73p、2007.