

閉鎖度の高い小規模海域における成層期の海水交換機構

小橋 乃子* ・ 安達 貴浩** ・ 清水 崇*** ・ 西ノ首英之****
中村 武弘***** ・ 多田 彰秀***** ・ 矢野真一郎***** ・ 藤田 和夫*****
神山 泰***** ・ 小松 利光*****

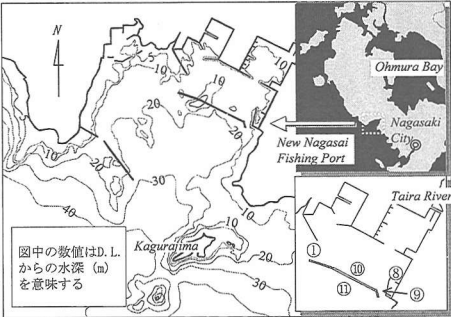
本研究では小規模海域における現地観測の重要性を指摘し、長崎県新長崎漁港での現地観測を実施した。これまでの研究成果から、同海域の夏季の残差流構造は主に港内外の密度差によって説明できるということが明らかにされているため、本論文では特に港内外の密度分布に違いが生じる要因に着目して検討を行った。その結果、新長崎漁港の成層構造は風の影響を強く受けており、流動構造と密度場が互いに影響を及ぼしながら非定常な変化を示していることが分かった。また、数日周期の一方に卓越する南風によって引き起こされる残差流構造が夏季の海水交換に大きな役割を果たしていることが示唆された。

1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国には、生活に密着した数多くの小規模海域が存在している。このような海域の1つである漁港の総数は2001年の時点で2,931を数え、総延長3万4千kmの海岸線に対して平均的に見ると12kmに1つの割合で漁港が存在していることになる。この他にも多くのマリーナや渡船場等が身近な親水空間として再開発されており、人々と小規模海域との係わり合いは日常的なものとなっている。一方、このような海域は静穏度を確保するために閉鎖度が高くなっており、更に我々の生活空間に近いことも相まって水質問題を抱えていることが少なくない。特に海面養殖業を営む漁港等では水質汚濁が死活問題として認識されており、透過性防波堤を設置する等といった種々の試みがなされている。

以上のような状況を踏まえると、小規模海域の海水交換機構を把握することは、現在あるいは将来において、適切な水環境保全策を講じるためにも非常に重要と言える。しかしながら、東京湾や大阪湾等のような比較的スケールの大きい水域の調査は精力的に行われてきたのに対し、小規模海域の水質や流況に着目した現地観測はほとんど行われていないのが実状である。

このような背景の下、本研究では長崎県の新長崎漁港を対象海域として2000年5月から約2年間に渡る現地観測を実施し、閉鎖度の高い小規模港湾特有の海水交換機構について検討を行っている。これまでの研究により、同海域の夏季の残差流構造は主に港内外の密度差によ



度の高い海域となっている（図-1）。港奥部東側から二級河川の多以良川が流入しているが、供給される淡水流量は多い時でも約 $1.6\text{ m}^3/\text{s}$ であり（滞留時間は135日）、新長崎漁港は比較的淡水の影響が小さい海域と考えられる。以上のような特徴をもつ新長崎漁港の成層ならびに流況を把握するため、2000年から2002年にかけて表-1に示すような調査を実施した。

3. 港内外の成層構造の相違とその形成要因

3.1 新長崎漁港の夏季の成層構造

通常、比較的近接した海域であれば、成層構造や水質は自ずと似通った傾向を示すものと考えられる。しかしながら、新長崎漁港の内外は長大な防波堤によって隔てられており、近接海域であっても水平方向に不均一な構造をとり易いと言える。そこで、ここでは港内外の成層構造の違いに着目した検討を行った。なお、港内であれば成層状況にそれ程大きな違いが見られなかったため、比較的水深の大きい測点⑩（満潮時の平均水深約19m）を港内の代表点とした（図-1）。港外にある測点⑪の水深は平均で約20m、満潮時で約22mである。

測点⑩、⑪における水温と塩分の鉛直分布のイソプレスを図-2に示す。データは2000年5月1日～8月28日に得られたものであり、1週間に1回満潮時に観測されている。この結果から、1)大半の期間において、港内では上層に塩分・水温のシャープな成層が形成されている、2)比較的風の強い日（例えば7月10日や24日）には表層の成層は一様化するが、港内の下層では急激な水温成層が生じる、3)比較的降水量の少ない7月中旬以降では、港内下層および港外の中下層における塩分

表-2 港内外の塩分・水温の層別平均値

	港内代表点（側点⑩）			港外代表点（側点⑪）		
	上層	中層	下層	上層	中層	下層
平均塩分濃度（PSU）	33.18	33.45	33.58	33.36	33.46	33.58
平均水温 $^{\circ}\text{C}$	23.70	23.12	22.31	23.68	23.21	22.67

2000年5月1日～8月28日の満潮時に観測されたデータ（全18回）より算出。なお、上層は6m以浅、中層は6m～13m、下層は13m以深と定義する。

はほぼ一様である、ということが分かった。また、水温、塩分の層別平均値を観測期間について平均した値から（表-2）、1)上層塩分は港内外で異なる値を示すが（港内：低、港外：高）、下層塩分は港内外でほぼ一致している、2)上層水温は港内の方が高いが、下層水温は港外よりも港内の方が低い、という結果が得られる。

以上をまとめると、「夏季の新長崎漁港では港外よりも港内の方が成層しやすく、また高温・低塩分の水塊と低温・高塩分の単純な混合だけでは成層場の挙動を説明できない」と言える。また、港内外いずれにおいても下層の塩淡成層は比較的一様であることから、「下層における成層構造の相違は、主に水温成層によって決定されている」ことが分かる。実際、上層（-4m地点）と下層（-15m地点）それぞれについて港内外の塩分差、水温差、密度差の経時変化を調べてみると、上層では塩分差と水温差の増減のパターンが概ね一致しており、結果的に密度差ともほぼ同様の変動パターンを示していた（図-3）。一方、下層における密度差は水温差の変化パターンのみと類似した変動を見せており、この結果からも下層では水温成層が支配的であると確認できる。

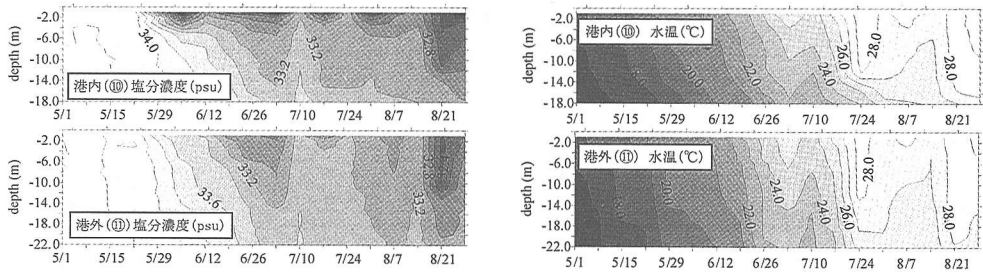


図-2 港内外における塩淡成層と水温成層（2000年）

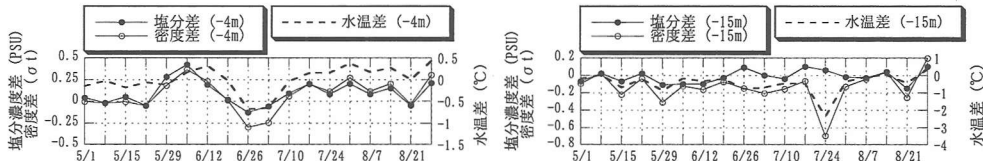
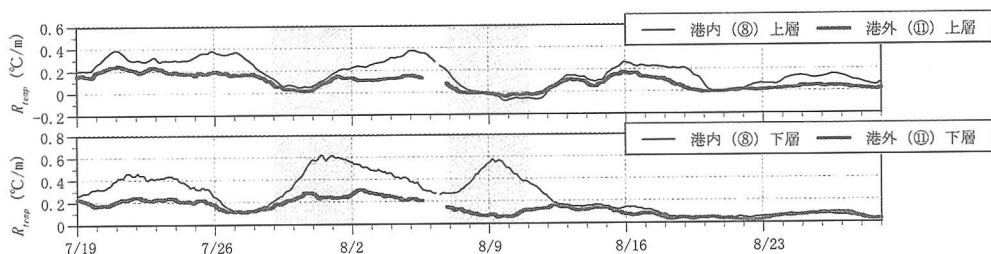
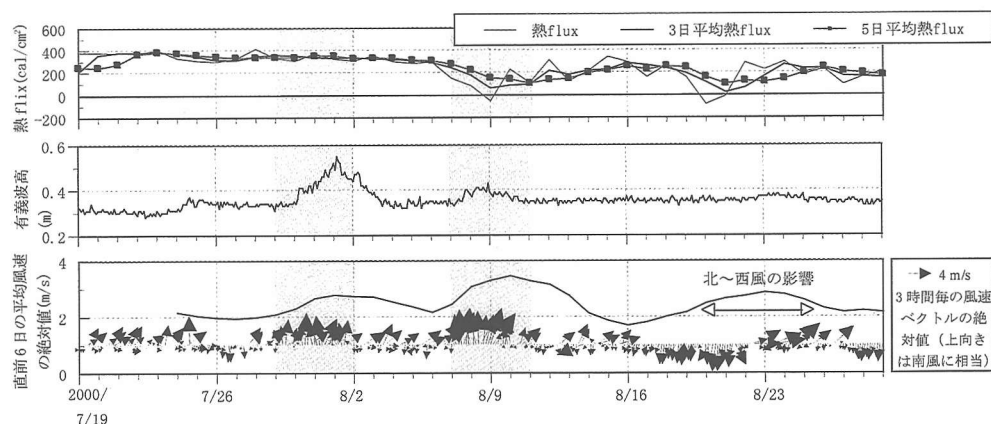


図-3 港内外の塩分濃度差、水温差ならびに密度差の経時変化（2000年）
（塩分差と密度差に関しては港外の値から港内の値を引いており、水温差に関してはその逆とした）

(a) 港内外における水温の鉛直勾配 R_{temp} (上図：上層，下図：下層)

(b) 観測時の気象条件 (上から、各熱フラックス、港口①における有義波高、6日平均風速と風速ベクトル)

図-4 下層の水温勾配と気象条件の関係 (2001年連続観測結果)

次に、港内外の混合能力の相違に最も影響を及ぼすと考えられる波浪について調べてみると、2000年夏季の港口(測点①)と港外(測点⑪)の有義波高ならびに周期は、それぞれ港内で0.44 m, 3.81 s, 港外で0.68 m, 4.92 sであった。このように、非常に近接した海域においても防波堤の存在によって静穏度は大きく異なっており、港内外の鉛直混合能も大きく異なっていると言える。

3.2 水温成層の形成メカニズム

次に、港内外の下層の成層構造を規定する水温の鉛直分布について検討を行う。2001年7月中旬から8月末までの約40日間にわたって、港内測点⑧と港外測点⑪に水温計をそれぞれ10個ずつ係留し、水温の連続観測を行った(表-1)。水温成層の程度を定量的に評価するために、観測結果を上層(6 m以浅)、中層(6 m~13 m)、下層(13 m以深)の3層に区分し、各層毎に平均的な水温の鉛直勾配を算出した(以下、 R_{temp} (°C/m))。なお、潮汐運動に伴う水温計の昇降の影響をできるだけ排除し長期的なトレンドを見るために、ここでは25時間移動平均の水温を用いて検討を行った。上層ならびに下層における R_{temp} の経時変化を、漁港の北側で得られた気象データ、港口①で観測された波浪データと併せて図-4に示す。上層の R_{temp} の経時変化を見ると、ほぼ全期間にわたって港内よりも港外の値が小さく、港内外で混合力に相違があ

ることが伺える。また、卓越した南風が連吹する8月1日や11日付近では、 R_{temp} の値が小さくなっており、港内外ともに上層では水温成層が消失している。しかしながら、同期間の港内下層では逆に R_{temp} の値が大きくなっており、南風の作用によって上層では水温成層が消失し、下層では水温成層が発達するといった相反する傾向が見て取れる(図-4(a), 着色部分参照)。

なお、8月25日以前の約6日間では北風が連吹し、比較的大きな風速が生じているが、南風の時のような成層構造の変化は見られない。このことから、風向きも成層構造を決定する重要な要因であることが伺える。一方、海面での熱フラックスの移動平均期間を種々変化させ、下層における R_{temp} との相関を調べたが、両者の間には直接的な関係は見られなかった(図-4(b))。

次に、南風の時に見られた特徴的な水温成層の挙動を把握するために、7月29日から8月2日までの、港内外における日平均的な水温分布の経時変化を調べた(図-5)。この期間における日平均的な海面熱フラックスの値は常に鉛直下向きであったため、港内外いずれにおいても全層にわたって水温上昇が見られる。しかしながら、港内の表層と海底近傍の水温がそれぞれ1.3°C, 1.5°Cしか上昇しないのに対し、表層から8 m地点の水温上昇は2.1°Cと大きな変化を示していた。南風によ

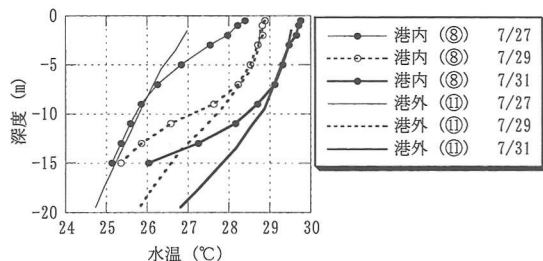


図-5 卓越した南風による港内外の水温分布の変化

で中層付近まで鉛直混合の影響が及ぶと、それまで成層していた上層の水温が完全に一樣化し中層にも上層の高温水の影響が伝わるため、8 m 地点の水温上昇が大きくなったものと考えられる。ところが、そのような大きな南風によっても全水深にわたって成層を一樣化する程の混合は生じないため、海底近傍の水温上昇は比較的小さく、結果的に下層の水温勾配が大きくなったものと推察される。一方、元々鉛直混合力が大きく、比較的一様な水温分布であった港外では港内ほどの変化が生じていないことが分かる。つまり、強い南風が連吹すると港内外ともに上・中層では水温が一樣化し、港内外でほぼ同じ値を示すようになるが、港内下層ではそれ程水温が上昇しないため、結果的に下層では港内外の水温差が拡大するようになる。

強い南風の影響を受けた 2000 年 7 月 24 日では、港内の下層水温が港外よりも約 3°C も低くなっていた。このような大きな水温差は港内外の流動にも影響を及ぼすものと推察される。このため、港口①の下層流速を調べると、約 3 日間にわたって常に流出傾向を示していた(平均 2.0 cm/s 程度、図-6)。この時の残差流の鉛直分布はバロクリニック圧の水平勾配によって説明できることから、この残差流は密度流と見なすことができる。なお、幅方向に一樣の残差流を仮定して概算すると、この期間に漁港内の約 3 割の水塊が下層から流出したことになる。この時は特に強い水温成層が形成された期間であるが、他にも風によって形成された水温成層に駆動される残差流が夏季に 3~4 回観測されていることから、このような流動が小規模海域の海水交換や水質環境形成に及ぼ

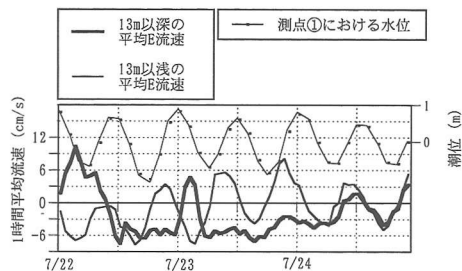


図-6 南風が卓越する時の下層平均流速の経時変化 (2000 年 7 月 24 日)

す影響は非常に大きいものと考えられる。

4. 夏季の残差流構造

夏季の流動特性を把握し、港内外の海水交換メカニズムを調べるため、海底設置型の ADCP 調査により得られたデータを用いて検討を行った(表-1)。港口①で得られたデータを見ると、時々刻々の下層流速は通常は潮汐に追従して入退を繰返しているが(図示省略)、残差流(25 時間移動平均値)を見ると、上層流出・下層流入といった、いわゆるエスチャリー循環流が形成されていることが多い(図-7)。しかし、7 月 28 日~8 月 2 日のように比較的強い南風が吹き続けると、港口の下層の残差流は流出傾向を示すようになり、風の種類と下層残差流のパターンとの間には密接な関係があると思われる。

そこで、風速・風向のデータを基に、観測期間を 1) 南風が卓越する日、2) 北風が卓越する日、3) 海陸風が卓越する日といった 3 つのタイプに分類し、これらのタイプと下層残差流の関係を調べた(下層は 13 m 以深と定義した)。図-8 (a) は風のタイプが 1) と 2) に相当する日の下層残差流速と風速の関係をプロットしたものであるが、南風が一日中吹き続けると下層では流出方向の残差流が、逆に北風が一日中吹き続けると流入方向の残差流が下層に生じるという関係が明瞭に示されている。一方、風向が一日以下の短いタイム・スケールで変動するタイプ 3) に相当する日では、風に対し潮汐条件、淡水流入、日射の変化やそれまでの履歴の影響が相対的に大きくなるため、風速と残差流の間には図-8 (a) 程の

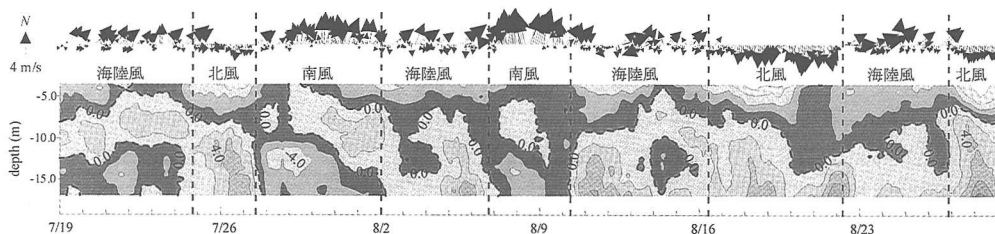


図-7 風と残差流の経時変化 (2001 年)

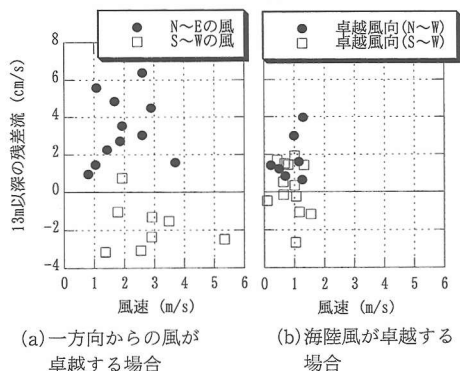


図-8 風速と下層残差流速の関係 (2001 年)

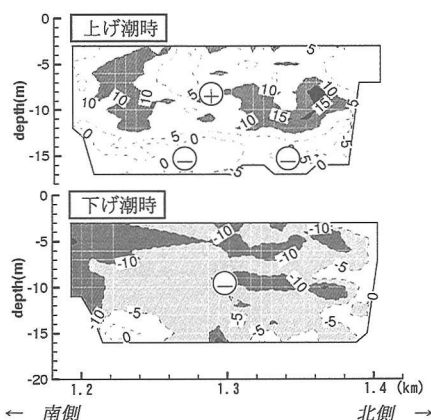


図-9 西側港口断面における夏季の流動構造

明瞭な関係が見出せない。しかしながら、やはり南風が卓越すると下層流出、北風の場合には下層流入といった残差流が出現することが多いようである。

ところで、2001 年 8 月 8 日 (大潮時) には測点①を含む西側港口において、ADCP を用いた曳航調査を実施した (図-9)。調査日は数日前から南風が卓越していたため (図-4)、上げ潮、下げ潮に拘らず底層付近では常に流出傾向が見られる。また、夏季の流動構造は水平方向には比較的一様であるため、図-6 および 7 で得られた結果はほぼ全幅にわたって現れる現象と推察できる。なお、冬季の曳航調査結果では鉛直方向というよりもむしろ水平方向のシアが大きく、流れは成層よりもむしろ地形の影響を強く受けていた (清水ら, 2002)。

5. おわりに

新長崎漁港の海水交換のメカニズムを明らかにするために、本研究では港内外における成層構造と風の関係、風と残差流の関係について検討を行った。この結果、南風が連吹すると、①風波の発達 (鉛直混合の強化)、②風成流の形成 (鉛直循環流の形成)、③防波堤の存在による港内外の混合力の非均一性の拡大、④港内外における成層状況の差異の増加、⑤④によって駆動される密度流の形成、といった複雑な過程を経て海水交換が行われていることが示唆された。港口で観測された残差流が密度流であるか風成流であるかを特定するのは容易ではないが、風に対する残差流の応答性が良いのに対し、風の吹き始めの段階では必ずしも港内外の傾圧差のみで流動を説明できないことから、南風の吹きはじめにはまず風成流が卓越するものと考えられる。このような風成流が長期間形成されると、防波堤の存在により場の不均一性が生じやすい港内外では、風波による混合効果の違いもあって、密度場の相違が拡大し、結果的に密度流が顕在化してくるのではないかと考えられる。同海域では南風による底層流出が生じた後、風が止んでもすぐには底層

流入とはならず、中層貫入 (表層、底層流出) の流動が形成されるといった現象が数多く観測されているが、これは南風が数日連吹した後の残差流が風よりもむしろ港内下層の高密度水塊によって駆動されていることを示唆するものであり、上記の推察を支持する結果と見なすことができる。

本研究により以下のような知見が得られた。

- (1) 港内外の成層特性、特に水温成層の形成メカニズムが明らかとなった。
- (2) 新長崎漁港の成層構造ならびに流動構造は風の影響を強く受け、互いに影響を及ぼしながら非定常な変化を示していることが分かった。
- (3) 卓越した南風は、強い底層流出流を形成することがあり、夏季の海水交換や水質環境に少なからず影響を及ぼしていることが示唆された。

謝辞：本研究で行った現地観測は中小企業総合事業団による「課題対応新技術研究開発事業」の一環として行われた。また、本現地観測を遂行するにあたり、長崎県臨海開発局、新三重漁業協同組合、長崎県総合水産試験場、(社)長崎県水産開発協会、五洋建設(株)、須田建設工業(株)、(有)フィールド環境リサーチ、東栄商興(株)、中部大学工学部・武田誠講師ならびに長崎大学水産学部、環境科学部、工学部の学生諸氏にから多大なご協力得た。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 小橋乃子・安達貴浩・甲斐一洋・西ノ首英之ら (2001): 新長崎漁港における成層と流況に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1041-1045.
- 清水 崇・小橋乃子・神山 泰・安達貴浩ら (2002): ADCP を用いた新長崎漁港の流動解析, 平成 13 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. B 78-79.