

新長崎漁港における成層と流況に関する現地観測

小橋 乃子* ・ 安達 貴浩** ・ 甲斐 一洋***
西ノ首英之**** ・ 中村 武弘***** ・ 多田 彰秀*****
矢野真一郎***** ・ 藤田 和夫***** ・ 小松 利光*****

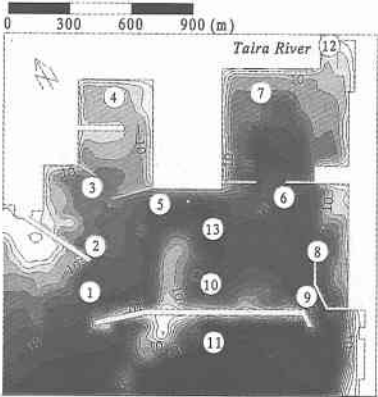
1. 緒 言

代表的な小規模海域であるマリーナや漁港は全国各地に数多く存在し、人々の生活に密接に関係した水環境を提供している。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いるため、水質改善に対する要望は予想以上に根強いものとなっている。このように小規模海域では水質問題に対して草の根的な社会ニーズが存在しており、しかも、比較的取り扱いやすい小規模海域で流動や水質の状況を調べ、水質改善を考えていくことは、比較的広い海域における水質問題の打開策への足掛かりになると考えられた。そこで本研究では平成 12 年度より長崎市の新長崎漁港を対象とした現地観測を行っている。

新長崎漁港は平成元年に開港した東洋最大規模の漁港であるが、港口には堅固な防波堤が築かれており、漁港規模に比べて港口幅が狭い閉鎖性海域となっている。しかも、ここ数年赤潮の発生が相次いでいることや、出荷調整用の蓄用筏が増設されたことなどから、将来的な水質悪化が懸念されている。このため、本研究では同海域の物質輸送構造を把握することを目的として、成層ならびに港口の流動構造について検討を行った。

2. 新長崎漁港ならびに現地観測の概要

新長崎漁港は長崎県西彼杵半島の西南部に位置し、幅約 1.6 km、奥行き約 1.2 km のスケールをもつ大規模漁港である。2 箇所の港口は長大な防波堤の存在によりそれぞれ約 100 m、300 m と狭くなっており、閉鎖度の大きい海域である（図－1）。港内の平均水深は約 12 m であ



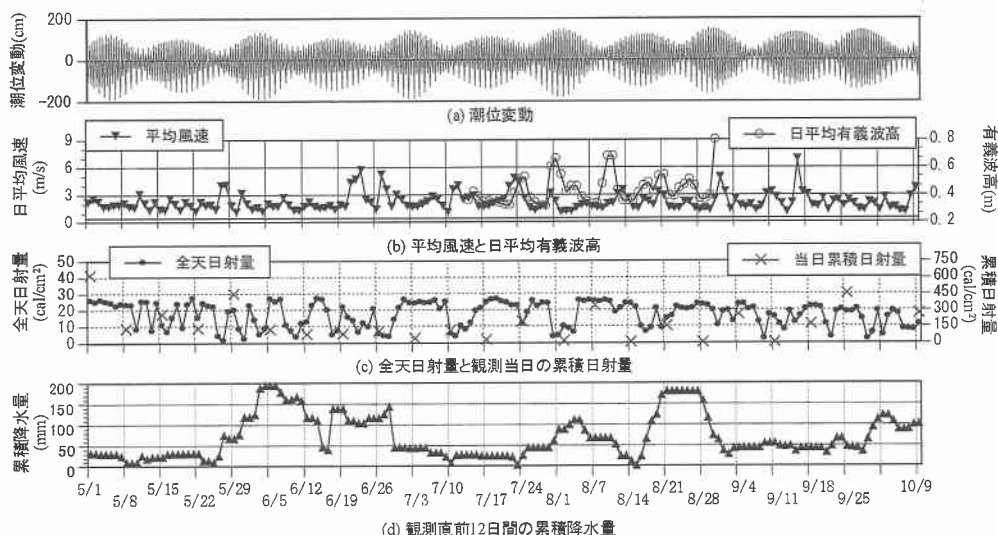
（○は観測点を、他の数字は海底から基準面までの高さ（m）を表す）

図－1 新長崎漁港における水質・流況調査測点

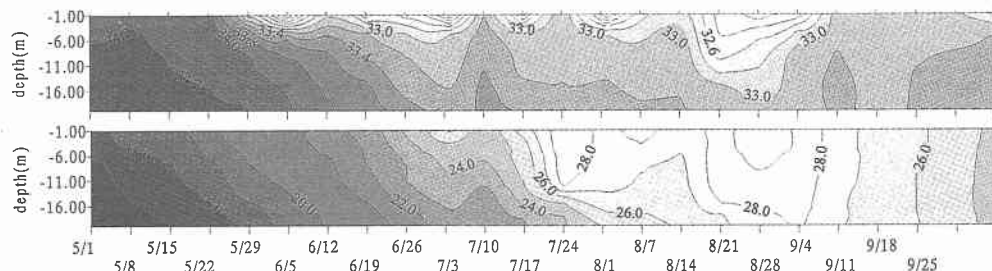
り、港内のほぼ中央部に張り出した水深 10 m の泊地に沿って約 17～18 m の水深部分が存在している。更に、東側港口には捨石が高さ 5 m のマウンド状に集積されている等、複雑な海底地形が見られる。また、港奥部東側には二級河川の多以良川が、港奥部西側には宅地等からの生活雑排水の排水口があり、いずれも港内への淡水や汚濁負荷の供給源となっている。

このような特徴をもつ新長崎漁港の成層状況を把握するため、2000 年 5 月から 10 月中旬までの約 6 ヶ月間にわたり、毎週 1 回満潮時に多成分水質計（アレック電子社製、ADR-1000）を用いた観測を行った。測定ポイントは図－1 に示す港内外の計 12 点（測点①を除く）であり、水深 1 m 毎に水温、塩分濃度等のデータを採取した。また、夏季の流況調査として、港内外の海水交換を考える上で最も重要と思われる、東西 2 箇所の港口（測点①および測点⑨）の海底にそれぞれ ADCP を 1 台ずつ固定し（RD 社製、ワークホース、1200 kHz ならびに 600 kHz）、50 cm 層厚毎に 1 分または 2 分間の平均流速（以下、測定流速）を 10 分間隔で約 45 日間（7/13～9/2）にわたって測定した。また、港内外の波浪条件や潮位変動を調べるため、港口①と港外⑪の海底に波浪観測計（アイオーテック社製、WH-202）を設置した。なお、港内の測点⑩（上・下層）と測点⑬（下層）に電磁流速計（アレック

* 学生会員	工修	九州大学大学院工学府日本学術振興会 特別研究員
** 正 会 員	工博	九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門 沿岸域環境学講座
*** 正 会 員	工修	国土交通省 北陸地方整備局 技官
****	水博	長崎大学教授 水産学部漁業管理学講座
***** 正 会 員	工博	長崎大学教授 環境科学部
***** 正 会 員	工博	長崎大学助教授 工学部社会開発工学科
***** 正 会 員	工博	長崎大学講師 工学部社会開発工学科
***** 正 会 員		九州大学大学院技官 工学研究院
***** フェロー	工博	九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 沿岸域環境学講座



図一 潮汐, 平均風速, 全日射量, 累積降水量の経時変化



図一 3 a) 測点⑩における：上図, 塩分濃度の季節変化, b) : 下図, 水温の経時変化

ク電子社製, ACM-8)を設置し, 港内の流況についても観測を行った。

3. 新長崎漁港における成層の形成特性

3.1 成層の季節変化について

まず, 夏季の水質・流動構造に大きな影響を与えると考えられる, 港内の成層状況について検討を行った。調査は港内全域の測点②～⑩, ⑫, ⑬において実施されたが, 淡水流入の影響を強く受ける港奥を除いて, 塩分・水温の鉛直分布の季節変化は全測点で概ね一致していた。そのため, 水深の深い測点⑩を代表点として結果の考察を行った。

水温および塩分濃度によって形成される海域の成層状態は, 熱収支や淡水流入によってもたらされる浮力のインプットと, 風や波浪・潮汐による混合効果のバランスによって規定されている。そこで, これらの効果を全日射量, 淡水流入量, 風速(もしくは波高), 潮汐の4項目を用いて評価した。成層の観測結果や長崎海洋気象台による気象データ, 潮汐に関しては, 観測日(もしくは

観測時刻)のデータを代表値とし, 累積効果が大きいと思われる日射に関しては観測日の日の出から観測時刻までの累積量を代表値とした。また, 淡水流入量に関しては正確なデータが得られなかったため, 気象台データの降水量を用いることとし, 測点⑩の上層の塩分濃度の減少と比較的相関が強かった観測日直前12日間の累積降水量を代表値とした(相関係数 ≈ 0.6)。なお, 成層調査は週一回, 満潮時に実施されたことから, その結果を解釈する際に観測時刻がそれぞれ異なっていることに注意を払う必要があった。潮汐, 日平均風速(日平均有義波高), 全日射量(当日累積日射量), 直前12日間累積降水量の時系列データならびに測点⑩における水温, 塩分の鉛直分布の季節変化をそれぞれ図一2, 3に示す。

図一3(a)に示す塩分濃度の季節変化を見ると, 6月から塩分濃度が全水深にわたって急激に低下し, 7月以降は低濃度の状態で推移していることが分かる。また, 7月以降の表層付近では直前12日間の累積降水量の変化に応じて(図一2(c)), 顕著な塩淡水成層が断続的に形成されていることも確認できる。

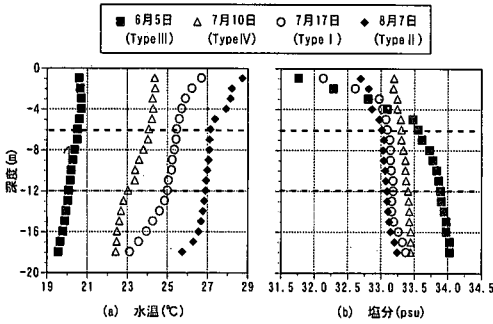


図-4 成層期における水温と塩分の鉛直分布

次に水温の季節変動を見ると、観測の始まった5月から水温は全水深にわたって単調に上昇し、強い安定成層は7、8月の成層期の海底近傍においてのみ確認できる。一方、9月の循環期に入ると水温成層は速やかに消失し、水温は水深方向にほぼ様な分布となってくる。

3.2 夏季の成層とその生成要因について

夏季の代表的な成層状態として6/5、7/17、8/7、8/14の水温と塩分濃度の鉛直分布を示す(図-4(a), (b))。図-4あるいは図-3からも見て取れるように、新長崎漁港の成層状況は深度約-1~-6 mの上層、約-12~-18 mの下層、およびその間の中層といった3層で大きくその性質を変化させている。そこで、各層における成層の形成状況を定量的に把握するために、以下のような物理量を導入し、それぞれを塩分、水温の成層度を表す指標として用いた。

$$R_{\text{salt}} = \left\langle \frac{\partial S}{\partial z} \right\rangle, \quad R_{\text{temp}} = \left\langle \frac{\partial T}{\partial z} \right\rangle$$

ここで、 S 、 T はそれぞれ観測結果から得られた塩分濃度(psu)、水温(°C)、 z は鉛直上向きを正とする空間座標である。また、 $\langle \rangle$ は各層毎の平均値を意味する。

塩分、水温いずれも鉛直方向の勾配が大きい上層について R_{salt} と R_{temp} の相関を調べた結果を図-5に示す。なお、9月になると水温成層が全く見られない循環期へと移行したため、ここでは5月から8月までの結果のみを用いている。図-5の結果から判断すると、塩分濃度勾配と水温の勾配の間には一貫した傾向はなく、幾つかのタイプに分割できることが分かる。そこで、閾値として $R_{\text{salt}} = -0.1$ 、 $R_{\text{temp}} = 0.1$ を選定し、夏季の成層状況を簡単に以下のような4タイプに分類した。

Type I ($R_{\text{salt}} < -0.1, 0.1 < R_{\text{temp}}$):

塩淡水成層、温度成層が両方とも存在する場合

Type II ($-0.1 < R_{\text{salt}}, 0.1 < R_{\text{temp}}$):

温度成層のみが存在する場合

Type III ($R_{\text{salt}} < -0.1, R_{\text{temp}} < 0.1$):

塩淡水成層のみが存在する場合

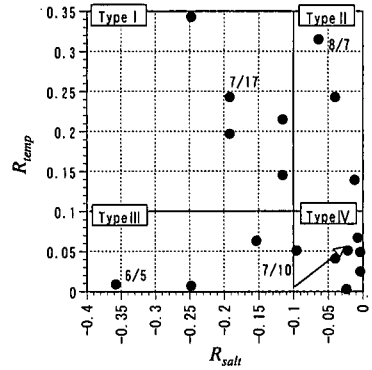


図-5 上層の塩分濃度勾配と水温勾配の関係

Type IV ($-0.1 < R_{\text{salt}}, 0.1 < R_{\text{temp}}$):

塩淡水成層、温度成層のいずれも存在しない場合
上記の指標を用いると、図-4に示す成層はそれぞれ7/17 (Type I)、8/7 (Type II)、6/5 (Type III)、7/10 (Type IV) にタイプ分けされる。これらのタイプの大きな出現状況を調べるために、観測時刻前後の干満差、当日の平均風速、当日累積日射量、直前12日間の累積降水量、観測時刻の河川水と測点⑩の水表面近傍の水温差を各タイプ毎に平均し、更に夏季の全観測データの平均値で規格化して比較を行った(図-6)。

まず Type II と Type III に着目すると、淡水供給が少なく日射が多い日には水温成層のみが発達しやすく (Type II)、反対に日射が少なく淡水供給が大きい日には、塩淡水成層のみが発達しやすい (Type III) という傾向がはっきり見て取れる。Type II では河川水温が極めて高くなっているため、この熱量の付加が水温成層の発達を促進していることも考えられるが、淡水流入量自体が少ないためトータルとしての寄与はさほど大きくないと言える。次に塩淡水成層、水温成層が共存する Type I につ

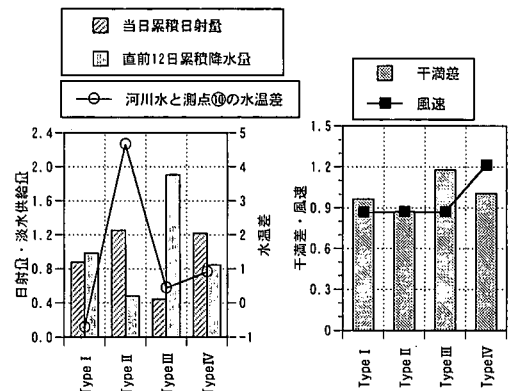


図-6 成層形成要因と上層の成層 Type の関係
(但し、図中の値はいずれも夏季の平均値で規格化されている)

いて見ると、日射量、淡水流入量ともにある程度あるが、いずれも Type II, IIIよりは少なく、成層はあまり発達しないものと推察できる。しかしながら、図-5中の Type IのRの分布を見ると、塩分に比べて水温成層の発達の程度が大きいことから、Type Iのように淡水供給と日射が同時に存在すると、塩淡成層によって表層の混合が抑制され、少ない日射量でも水温成層が発達しやすくなると言える。一方、成層の形成が見られない Type IVを見ると、他の Type に比べて風速が大きく、表層の混合力が卓越していたことが分かる。また、干満差に対する傾向性はほとんど見られないことから、表層の混合には潮汐よりも風の影響（吹送流、波浪による混合）が支配的であると言える。

4. 港口部における残差流の鉛直構造とその生成メカニズム

次に、流況調査結果について検討を行う。ADCP による測定は東西2箇所の港口において実施されたが、ここでは港内への入退潮量の大部分が通過すると考えられる西側港口（測点①）に着目し、測定流速の25時間移動平均値を、残差流と見なして検討を行った。なお、測点①で観測された流速は港口部の幾何形状の影響により東西方向成分が卓越しており、残差流についても同様の傾向が見られた。そのため、これ以降は流速の東西方向成分のみを対象として検討を進める。

残差流の東方向成分と多良川の河口より約1 km 上流地点での当日の河川流量ならびに約2 km 上流にある鳴見ダムでの当日降水量を図-7に示す。残差流の鉛直分布の経時変化から、本海域の港口における残差流には、1) 上層から流出、下層から流入（代表例：8/1）、2) 上・下層から流出、中層から流入（代表例：7/24）、3) 上層から流入、下層から流出（代表例：8/21）といった3タイプの鉛直分布が存在しており、日によって残差流のパ

ターンが大きく異なっていることが分かる。次に、成層調査を実施している上記の代表日に対して、港内外の水温・塩分の鉛直分布と成層調査時刻（各満潮時）の残差流（東方向成分）の関係を調べた。また、密度流の駆動力として港内外のバロクリニック圧の水平勾配をとり、その鉛直分布を算定した。港内外の代表点を測点⑩、⑪とした場合のそれぞれの結果を図-8(a)～(d)に示す。

まず7/24における水平方向の圧力勾配の鉛直分布から、深度-12～-13 m 付近で大きく勾配が変化しており、-15 m 以深において港外よりも港内の方が圧力が高くなっていることが分かる。この時の塩分、水温の鉛直分布を見ると、塩分はほぼ一様であるが、港内の下層に冷たい水塊が存在することによって圧力勾配の逆転が生じている。また、藤原ら（2000）が指摘するように水平方向の密度が一致する-13 m 付近で中層貫入が生じ、大きな残差流成分が生じている。なお、中層貫入については他の海域においても多数観測されており（例えば、中村ら、1999）、港内外の熱容量の差に起因した密度流現象であることが指摘されている。7/24の中層貫入も港内下層の冷たい水塊によって引き起こされていることから、これらと同様のメカニズムで生じたものと考えられる。

次に8/1を見ると、港外側の圧力が全水深にわたって大きくなっており、表層からの流出、底層からの流入といった典型的なエスチャリー循環が観察できる。

一方、8/21には、他の観測日よりも全体的に塩分濃度が低く、また港内側の塩分が全水深にわたって港外よりも高くなっている。このため、バロクリニック圧も全水深にわたって港内側で高くなっており、結果的に上層で湾内へ流入、下層より湾外流出といった、8/1とは全く逆方向の残差流が形成されている。鳴見ダムにおける降水量（図-7）を見ると、8/21には比較的大きな降水量により出水量が大きくなっており、上記の塩分の挙動は、このような一時的な出水によって引き起こされたものと考

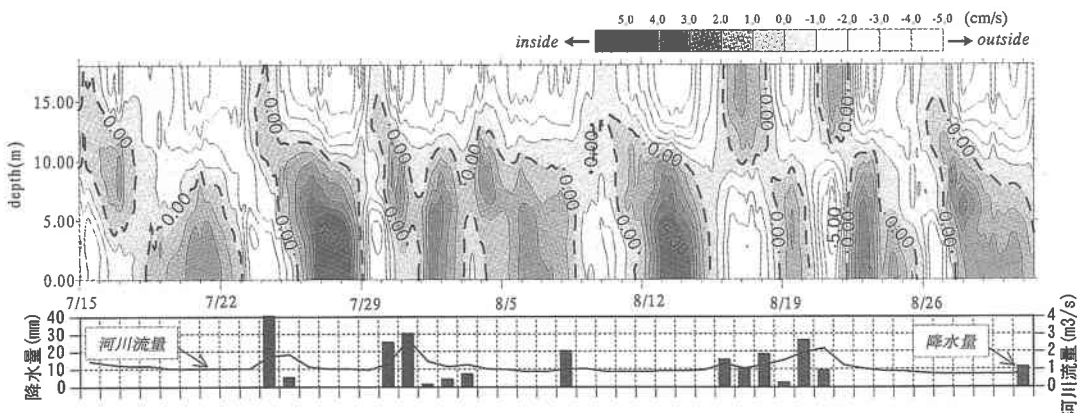


図-7 港口（測点①）における残差流の東方向成分の経時変化と出水状況

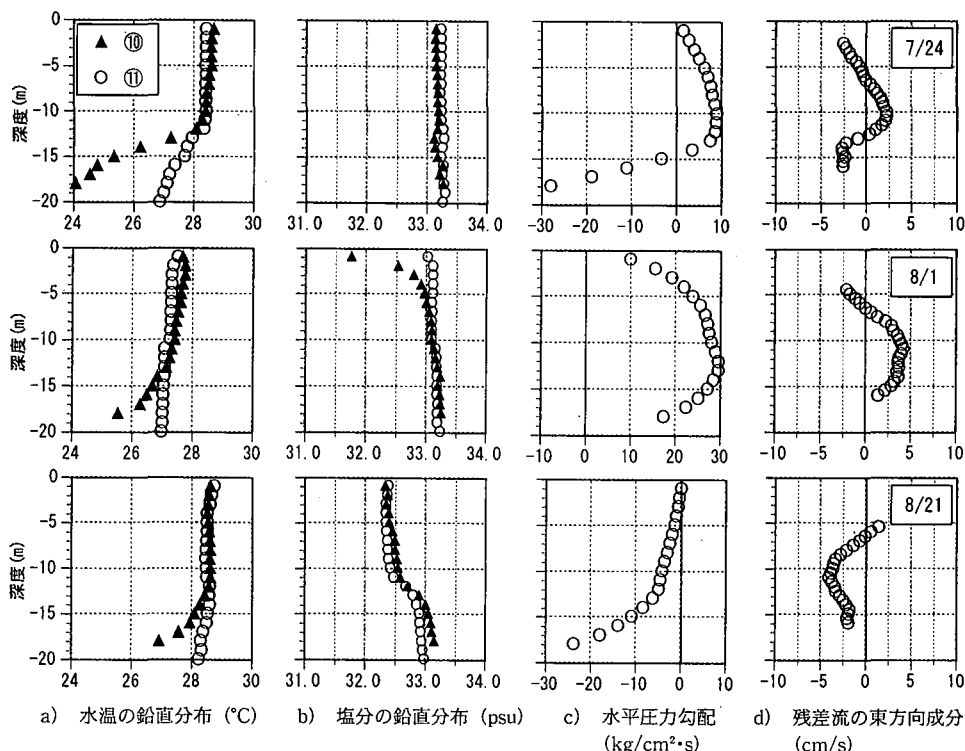


図-8 水平密度勾配と残差流

えられる。すなわち、多以良川から放出された淡水の多くが河口に近い東側の港口から流出したことによって、港内よりも港外において淡水の影響が速やかに現れ、しかも、港外の方が港内よりも鉛直混合力が大きいため、結果的にバロクリニック圧も全水深にわたって港内側で高くなっていたのではないかと推測される。成層に関する観測データが限られているため、このような推測の妥当性を現時点で明らかにすることはできないが、図-7において、多量の雨が降っている時に顕著な底層流出が発生しているケースが多いという事実からも、やはり底層流出は河川水の大きな出水によってもたらされた一時的な現象である可能性が高いと言える。また、以上のような観点から改めて図-7を見ると、典型的な重力循環流のパターンは比較的流量の安定した状態において出現しやすいことが確認できる。

5. 結 論

本研究により新長崎漁港における成層および流況特性について以下のような知見が得られた。

(1) 成層状況を塩分ならびに水温の鉛直勾配で分類した結果、表層の成層は淡水流入量と日射量、風速の大小関係では説明できる。

(2) 新長崎漁港の港口の残差流分布は主に3種類に分類することができ、いずれの分布においても港内外のパロクリニック圧の差によってよく説明できる。また、新長崎漁港のように閉鎖性の強い海域では、港内・外の混合力の相違や現象の非定常性に起因した複雑な密度流現象生じていることが明らかになった。

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)、(株)アクア・ティッペンならびに長崎大学水産学部学生、齋藤 新氏、辰野 和加奈氏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

- 中村武弘・福本 正・多田彰秀 (1999): 大村湾湾口近傍における潮流現象の現地観測と数値解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1046-1050.
- 藤原建紀・佐々倉諭・高橋鉄哉・山田佳昭 (2000): 東京湾における外洋水の浸入深度の算定法とその季節変化, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 431-435.