

川崎港における海水温の連続調査結果-2

Results on Survey of the Seawater Temperature at Port of Kawasaki-2

永山 恵 Megumi NAGAYAMA
 小林 弘明 Hiroaki KOBAYASHI
 二宮 勝幸² Katsuyuki NINOMIYA
 柏木 宣久⁴ Nobuhisa KASHIWAGI

岩渕 美香 Mika IWABUCHI
 牧 秀明¹ Hideaki MAKI
 安藤 晴夫³ Haruo ANDO

要旨

これまで海水温の観測は、様々な研究機関によって行われてきたが、表層だけに限らず深度別に高頻度で長期間観測した例は少ない。そこで、東京湾における海水温変動の実態を調査するために、川崎港東扇島波除堤に水温ロガーを設置し、深度別の海水温変動を10分間隔で約2年間測定したところ、年間を通じた海水の成層構造の発達と崩壊の様子を詳細に把握することができた。さらに、海水温変動に影響を与える要因について解析したところ、気温と海水温変動の間に相関が認められたほか、夏季の底層海水温変動に周期性が見られることが分かった。これらの結果は、環境基準項目として追加が検討されている海域の底層DOの実態を把握する際にも有用な基礎資料となると考えられた。

キーワード： 川崎港、海水温

Key words: Port of Kawasaki, Seawater temperature

1 はじめに

東京湾では赤潮や貧酸素水塊の発生が問題となっており、その機構には夏季に形成される海水の成層構造が深く関係していることがわかっている¹⁾。成層構造は、海域への淡水の流入や表層の水温上昇によって表層一底層間に密度勾配が生じることによって発生するため、海水温の把握は東京湾水質の諸問題を考える上で基本的な事項であるといえる。海水温の観測は、全国の水産試験場や日本海洋データセンター、地方環境研究所等が常時監視を行っているが、底層海水温の連続測定による知見はまだ少ない。そこで、川崎港に水温ロガーを設置し、深度ごとの海水温の連続測定を行い、その結果を用いて川崎港の海水中に起こる詳細な水温変動を解析した。本報告は、2010年度に発表した「川崎港における海水温の連続調査結果」の第2報として、約2年間にわたる調査結果をとりまとめたものである。

2 調査方法

図1に示す川崎港の東扇島波除堤において耐水耐圧式水温ロガーを用いて海水温を測定した。調査は2009年2月から2011年3月までの約2年間行った。また、多項目水質計を用いて塩分、植物プランクトン等色素蛍光強度（以下、「Chl.a」）、溶存酸素（以下、「DO」）についても随時測定を行った。海水温の測定は、2009年2月から2009年12月までは海底固定型、2010年3月から2011年2月までは潮位運動型の測定装置（図2）を用いて行い、水温ロガーを表層から底層（水深約13m）までの間に0.5または1mごとに設置し、測定間隔は10分間とした。現地の様子（写真）を図3に示した。

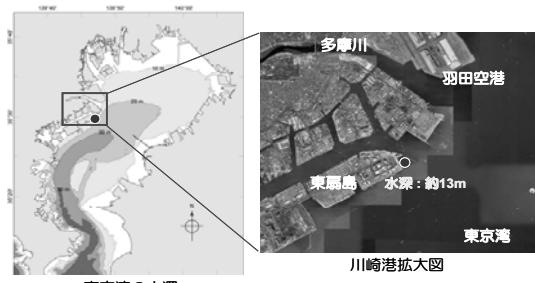


図1 海水温調査地点

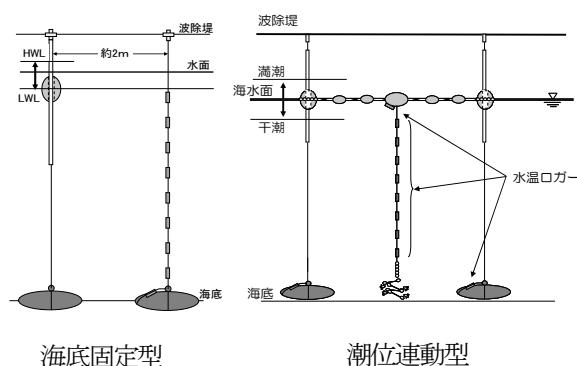


図2 測定装置



図3 現地の様子（写真）

*1 国立環境研究所 *2 横浜市環境科学研究所 *3 東京都環境科学研究所 *4 統計数理研究所

3 結果及び考察

3.1 各層海水温の年間変動

図4に2009年期(2009年2月から2009年12月)及び2010年期(2010年3月から2011年2月)の各層海水温の毎正時データの24時間移動平均値を示した。グラフの縦軸は各層の海水温(℃)、横軸は測定月であり、各層の海水温は表層から底層に向かうにつれて暖色から寒色で示した。また、2009年期と2010年期の結果を比較するため、各グラフの4月1日及び12月1日を破線で示した。図4から、川崎港の深度別海水温について、以下の5つの傾向がみられた。

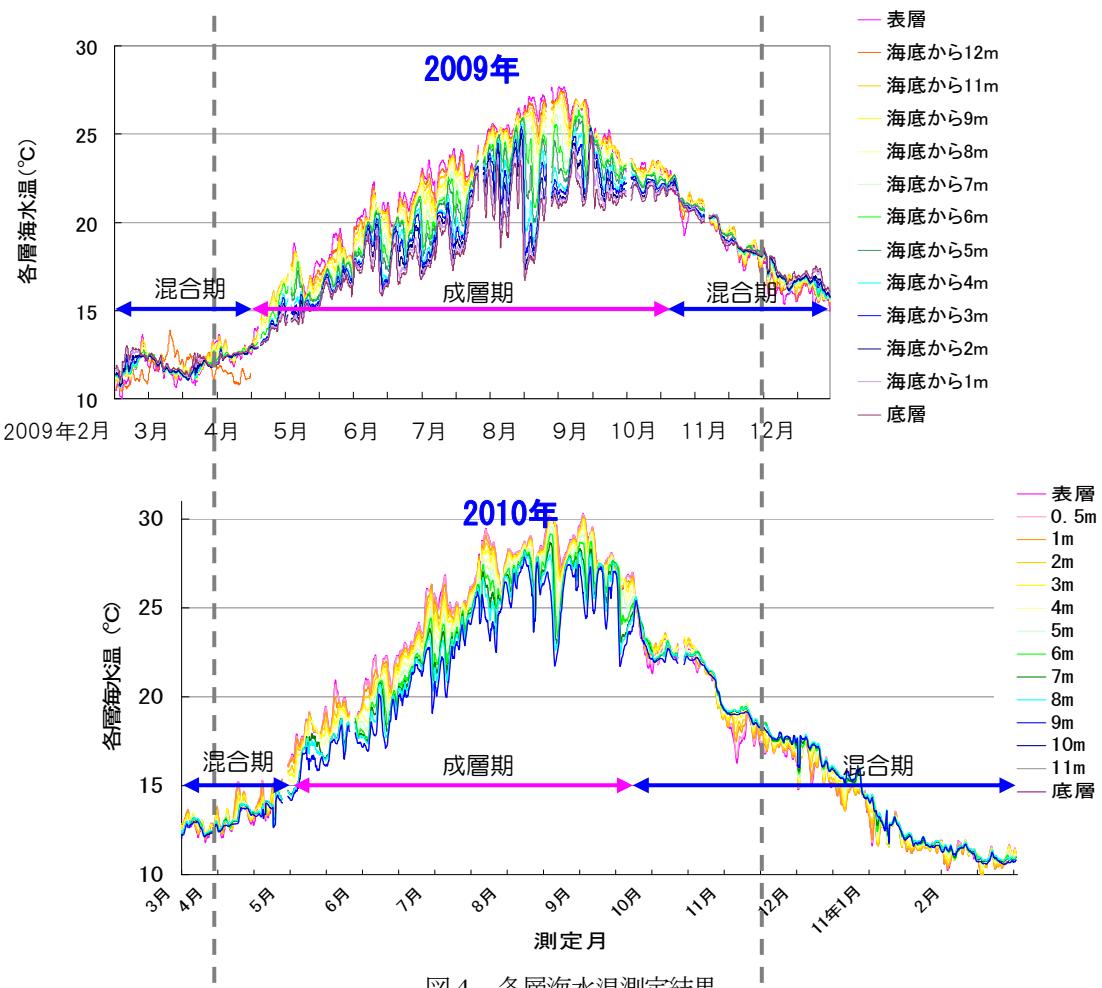
- (1) 各層海水温は4月から5月にかけて水温差を生じはじめ、表層に近づくほど高い値を示しながら成層構造を形成し、この成層構造は8月から9月に最も発達した。その後、10月に成層構造が崩壊し、11月以降は水温差の小さい状態を維持していた。なお、成層構造を形成している時期を「成層期」、形成されていない時期を「混合期」と呼ぶ。
- (2) 夏季の最高海水温は、2009年期では表層で9月上旬に約29℃、2010年度では9月下旬に約31℃であった。
- (3) 2009年期の成層期は4月上旬から10月中旬にかけて

の約6ヶ月間、2010年期の成層期は5月上旬から9月下旬にかけての約5ヶ月間であったことから、2009年期の成層期は2010年期よりも長かった。

- (4) 成層の開始した時期の表層及び底層海水温は2009年期、2010年期共に約13℃、成層の収束した時期の海水温は約22℃であり、ほぼ同程度であった。
- (5) 成層期の表層と底層の海水温の差が最大となった時期及びその水温差は、2009年期は8月下旬(約10℃)、2010年期は9月上旬(約8℃)であった。

これらの結果から、夏季の表層海水温は2010年期の方が高い値を示したが、成層期は2009年期の方が長期化し、また、成層構造もより発達していたことが分かった。

このように年によって成層期の長さ、開始及び収束の時期にずれが生じる原因として、後述する気象等の条件による影響が考えられるが、2009年期と2010年期の測定方式の違い(海底固定型と潮位連動型)による表層と底層以外の層の海水温の測定水深の違いにも起因していると思われる。



3.2 表層及び底層海水温と気温の関係

2010年期の表層及び底層の1時間ごとの海水温と同期間中の日平均気温を図5に示した。縦軸は気温及び表層、底層の海水温、横軸は測定月を示す。各グラフの気温は気象庁横浜地方気象台の観測結果²⁾を、表層及び底層海水温は図4と同じデータを使用した。また、測定期間を混合期と成層期に分類した。

図4及び図5をみると、表層から底層に至る各層の水温は、概ね気温と類似した変動を示した。また、期間ごとにみてみると、成層期の表層海水温と気温はほぼ同様の挙動を示したが、底層海水温は気温や表層海水温よりも短い周期で大きく変動していた。一方、混合期の表層及び底層海水温は、気温の日変動とは連動せず、比較的安定していた。

次に、表層及び底層海水温の変動に与える気温の影響を調べるために、両者の関係を解析した。図6に気温と表層及び底層海水温の相関図を、表1に各相関図から得た気温との相関係数rを示した。図6及び表1から、表層及び底層海水温は全期間を通して気温との相関が高く、その相関係数rは表層で0.917、底層で0.801であった。また、2つに分類した期間の気温との相関係数は、成層期表層>混合期表層>混合期底層>成層期底層の順に高かった。これらの結果から、気温と海水温の関係は、表層ほど相関が高く、底層では特に成層期に気温との相関が低くなることが分かった。その原因として、海水中での成層構造の形成による海水の鉛直循環の低下が考えられる。混合期の海水では鉛直な循環が行われることにより、表層から底層まで比較的均質な海水となるが、成層期には海水の鉛直な循環が行われなくなる。大気により近い表層ほど気温の影響を受けやすいため、気温との相関は成層期の海水温ほど高くなり、次いで混合期表層、混合期底層、成層期底層の順に低くなっていく。成層期の底層は気温の影響を最も受けにくいにもかかわらず、表層以上に大きく変動することから、成層期の底層海水温は表層とは異なる要因により変動していたと推測できる。

3.3 底層海水温の特徴

成層期の底層海水温の変動に影響を与える要因を調べるために、ある時系列波形の周期性等の特徴を解析する手法である自己相関係数r(Δt)を、底層海水温について次式により算出した。

$$r(\Delta t) = E[(X_t - \mu)(X_{t+\Delta t} - \mu)] / \sigma^2$$

E : 期待値、 μ : X_t の平均値、 σ^2 : 分散

なお、自己相関係数の算出は、図7に示す3つの期間のうち5日間の底層海水温について行い、その結果を図8とした。図8の縦軸は自己相関係数、横軸はずらした時間 Δt の大きさを示す。

図8から、①混合期A及び③混合期Bにおいては、 Δ

$t=0$ 以外では自己相関係数が高い値を示さなかった。一方、②成層期においては、 $\Delta t=0$ のほか、▲で示した $\Delta t=25$ 及び $\Delta t=50$ など25時間ごとに自己相関係数が高まる傾向にあった。これらの結果から、成層期の底層海水温は25時間周期で変動する特徴をもつことが示唆された。

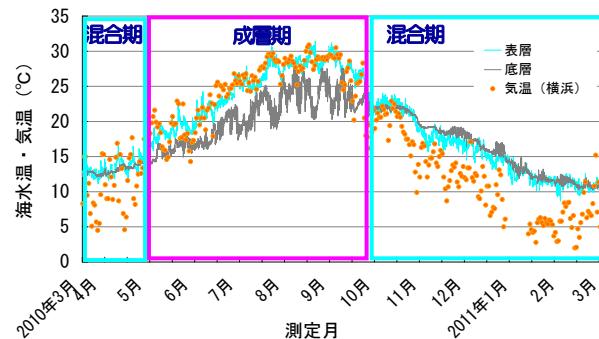


図5 気温及び表層、底層海水温

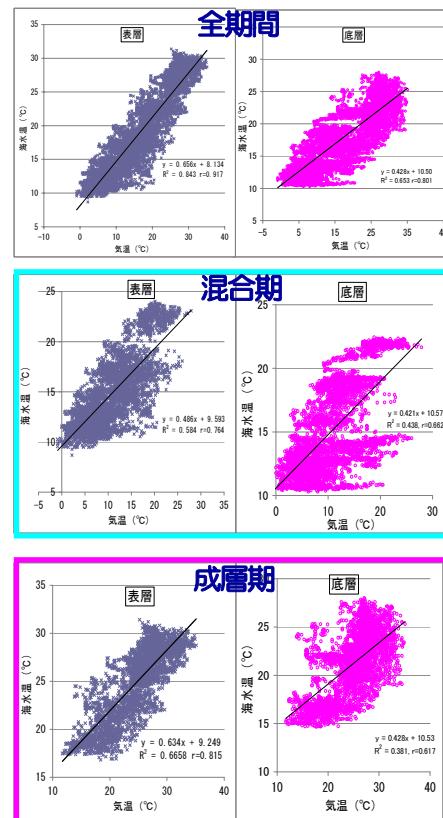


図6 気温と表層及び底層海水温の相関図

表1 気温と海水温の相関係数r

	全期間	混合期	成層期
表層	0.917	0.764	0.815
底層	0.801	0.662	0.617

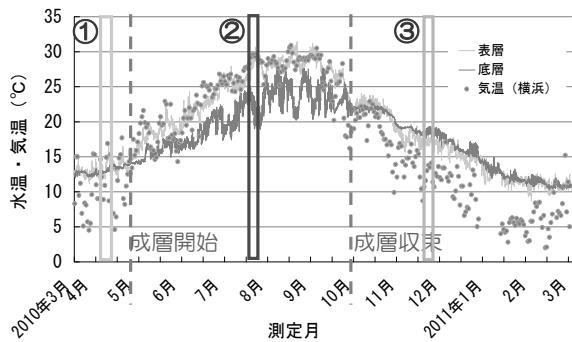


図7 自己相関係数を算出した期間

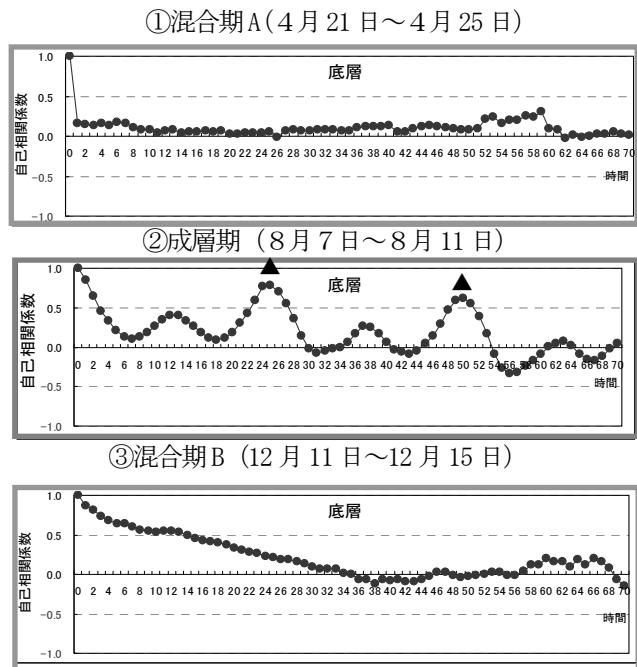


図8 各時期の底層海水温の自己相関係数

3.4 底層海水温の変動要因

成層期の底層海水温が25時間周期で変動していた可能性が示唆されたが、一般に、25時間周期で変動する気象現象として潮位が挙げられる。そこで、成層期のうちまとまった降雨や強風のみられなかった3日間（8月9日～8月11日）の底層海水温及び潮位を図9に示し、両者の変動を比較した。図9の左の縦軸は海水温(℃)、右の縦軸は潮位(cm)、横軸は測定日を示す。図9から、両者の変動の周期に類似性がうかがえるため、底層海水温を3時間遅らせてプロットした。その結果、3時間遅らせてプロットした底層海水温は潮位と連動して変動する傾

向が見られた。このことから、潮位が上昇または低下した3時間後に、底層海水温が上昇または低下する可能性が示唆された。

しかし、二宮ら³⁾は、東京湾西岸の底層は、夏季に海水温が低く、塩分が高くなる傾向が見られ、その原因として東京湾外から流入する低温高塩分の外洋水の流入が考えられると述べている。また、中島ら⁴⁾も、夏季の底層海水が低温高塩分になる現象について、潮位の上昇と関係があると述べている。今回の結果はこれらと矛盾していることから、底層海水温と潮位の関係についてはさらに詳細に検討する必要があると考えられる。

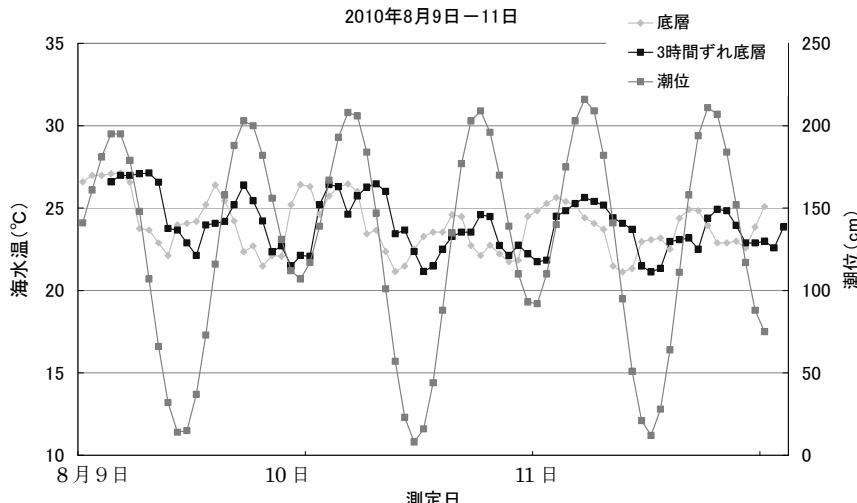


図9 3日間の海水温と潮位の変動

3.5 多項目水質計による水質測定結果

図10に示した①～⑥の6回にわたり、当該調査地点において多項目水質計を用いて水深ごとの水温(℃)、塩分(psu)、DO(mg/L)及びChl.a(μg/L)を測定し、結果を図11に示した。各グラフの縦軸は水深(m)を、横軸は各水質項目の濃度等を表している。

3.5.1 水温

図11の④では、水深4m及び水深9mを境に、⑤では水深4mを境に水温が低下する傾向がみられた。この④及び⑤は成層構造の最も発達する夏季に当たり、水温ロガーによる連続測定結果に見られた、表層と底層海水温の差が大きくなる傾向と同様であった。

3.5.2 塩分

図11の①から⑥では、いずれも表層付近の塩分濃度は25～27psu、底層(水深約12～13m)の塩分濃度は約31psuであった。このうち、①及び⑥では水深1m付近で塩分濃度が急激に上昇する傾向が見られたが、②から⑤では水深が深くなるにつれて濃度勾配を形成しながら徐々に塩分濃度が上昇していた。特に、③、④、⑤では、水深2～5m付近まで表層と同程度に低塩分であった。これらの結果から、混合期は、低塩分層が表層付近のみ存在しているが、成層期に入ると徐々に拡大し、成層構造が発達するほど厚くなると考えられた。

3.5.3 DO

図11の①から⑤では表層から底層に向かうにしたがってDOが低下したが、⑥では表層から底層までのDOは約10mg/Lとほぼ均一であった。特に、④及び⑤では水深3mと水深8～9m付近で急激にDOが低下する傾向が見ら

れ、底層付近のDOは約2～3mg/Lであった。これらの結果から、水深13m程度の本調査地点においても、成層構造が最も発達する夏季の底層にはDOが3mg/L以下となる貧酸素水塊が形成され、その厚さは海底から2～3m程度であったと考えられた。

3.5.4 Chl.a

図11より、①、②、③及び⑤ではChl.aは水深4～6m付近で最大値を示し、その濃度は10～20μg/Lであった。また、④では表層付近のChl.aは他の時期と比較して非常に高く、最大で約50μg/Lであった。これらの結果から、成層構造の発達する夏季の中でも初期にあたる7月に、表層付近では赤潮(Chl.a濃度50μg/L以上)が発生し、その層の厚さは4m程度であったと考えられた。一方、⑥ではChl.aは平均して5μg/Lと比較的低いが、水深6～8mでは急激に上昇していたが、赤潮の発生時期とは異なることから、原因についてはさらに検討する必要がある。

3.5.5 考察

3-5-1から3-5-4の結果から、混合期には、水温の他、塩分、DO、Chl.a等の水質項目は表層から底層にかけてほぼ均一な値を示し、底層まで海水の循環が行われていたと考えられた。一方、成層期に入ると、その初期にChl.aが上昇し成層構造の最も発達する夏季にピークを迎え、その頃から底層には貧酸素水塊が形成されると考えられた。これらの傾向は、一般的に知られている赤潮の発生時期(春季～夏季)や貧酸素水塊の発生時期(夏季～秋季)と非常によく一致していた。

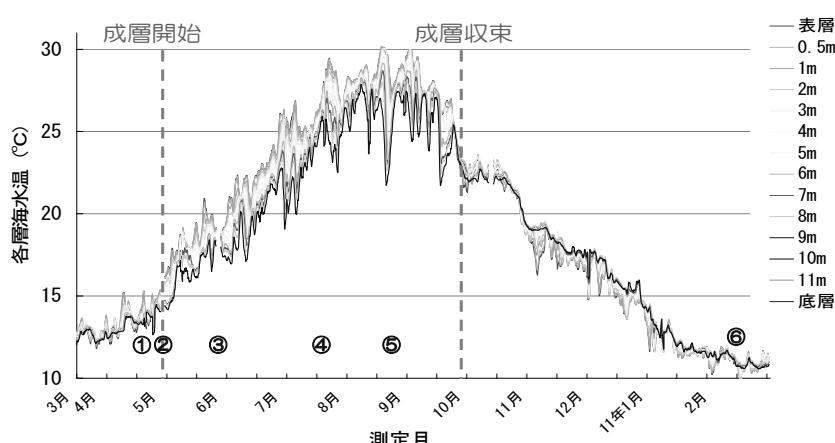


図10 多項目水質計による測定日

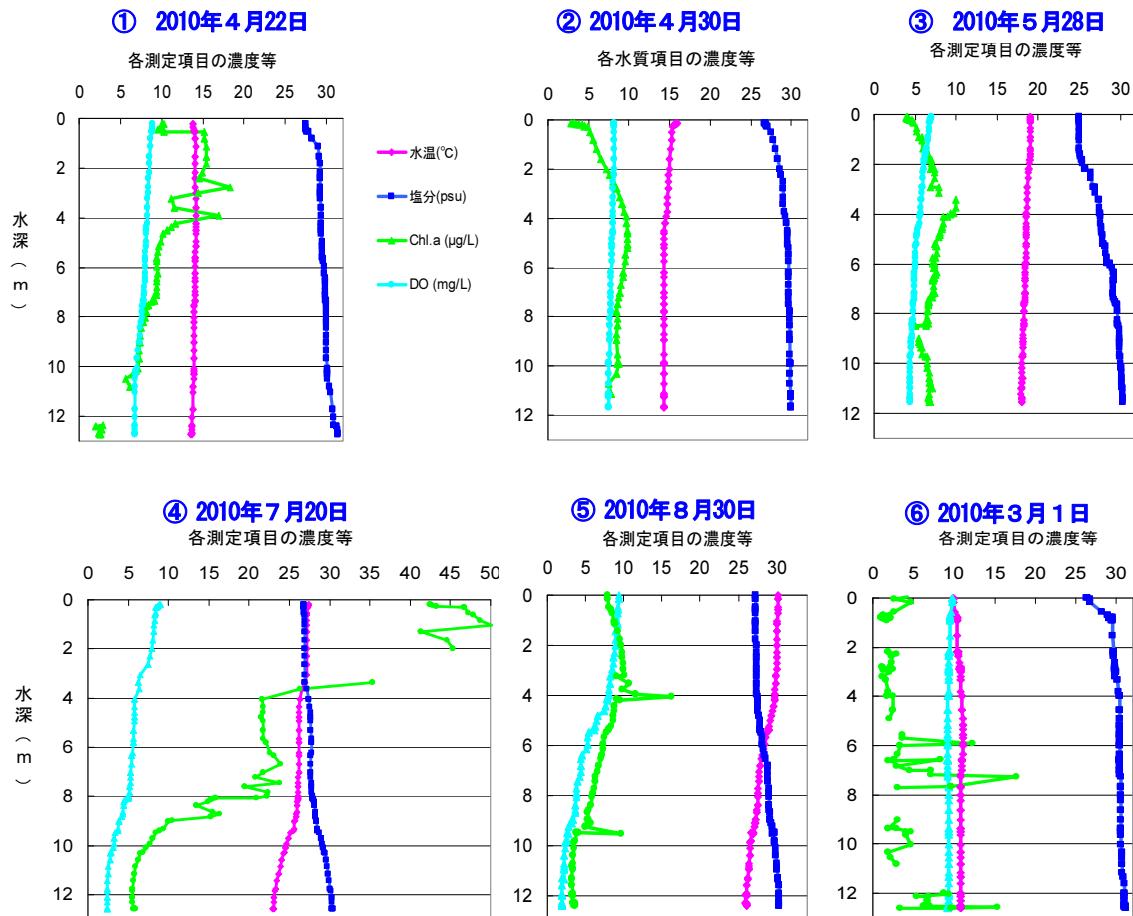


図11 多項目水質計による水質測定結果

4 まとめ

川崎港では、春季から秋季にかけて水温や塩分濃度等水質の異なる成層構造を形成し、夏季に最も発達した。また、この成層構造の形成と、植物プランクトン等の指標となる Chl. a 濃度の上昇や貧酸素水塊の存在を示す底層での DO の低下など、東京湾の水質に関する諸問題との関連性がみられた。

さらに、川崎港の海水温は、表層に近いほど気温の影響を強く受けて変動し、成層構造の状態によって気温から受ける影響の度合いが変化した。また、成層期の底層海水温は25時間周期で変動していたが、その要因についてはさらに詳細に解析する必要がある。

これまで、東京湾の底層における海水温変動は詳細に把握されてこなかったが、深度別に水温の連続観測を行ったことで、夏季の成層構造の存在等、川崎港における水質の実態を詳細に把握することができた。これらの調査結果は、間もなく環境基準項目として追加されるであろう底層DOの常時監視等において有用な基礎資料になると考えられる。

謝辞

本研究は、平成20年度から平成22年度にかけて3カ年で実施された地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究(C型)「地球温暖化がもたらす日本沿岸域の水質変化とその適応策に関する研究」の一環として行われましたが、調査および結果の解析にあたってお世話になりました共同研究者の皆様に深謝します。

文献

- 1) 環境省:中央環境審議会水環境部会 総量削減専門委員会(第2回) 資料3、(2009)
- 2) 気象庁:
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 3) 二宮勝幸、水尾寛巳、柏木宣久、安藤晴夫、小倉久子、飯村晃、岡敬一、吉田謙一、飯島恵:温暖化と東京湾の水環境—水温と水質との関係ー、横浜市環境科学研究所報 第33号、58~67 (2009)
- 4) 中島剛、鈴木弘之、堀江岳人、古川恵太:現地観測による東京湾北西部における貧酸素水塊の回復過程に関する考察、土木学会論文集B2(海岸工学)、66、No.1、1041~1045(2010)