夏季と冬季における東京湾のクロロフィルa分布の形成パターンの分類

比嘉 紘士¹・鯉渕 幸生²・小林 拓³・虎谷 充浩⁴・作野 裕司⁵

¹正会員 横浜国立大学大学院 日本学術振興会特別研究員 (PD) 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:higa-h@ynu.ac.jp

²正会員 東京大学大学院准教授 新領域創生科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail:koi@k.u-tokyo.ac.jp

³非会員 山梨大学大学院准教授 生命環境学部環境学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail:kobachu@yamanashi.ac.jp

⁴非会員 東海大学教授 工学部 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1)

E-mail:tora@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

⁵正会員 広島大学大学院准教授 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:sakuno@hiroshima-u.ac.jp

東京湾における赤潮の空間的挙動に関するメカニズムを解明し分布の形成パターンを分類するため、衛星リモートセンシングを用いてクロロフィルa (Chl-a) 分布の形成要因の解明を試みた。対象は2010年、2011年の夏季と冬季とし、Chl-a、有色溶存有機物、デトリタスの光吸収係数、水温の分布を明らかにした上で多面的視点から考察を行った。夏季のChl-a分布は、南よりの風の連吹と伴に荒川・隅田川河口付近から北岸沿い、東岸沿いにかけて拡大し、湾奥部全体を覆うように分布を形成していたことが示された。冬季は、Chl-aが上昇するまでに長期間の安定的な日射が重要であり、エクマン輸送により水塊が輸送された西岸側から濃度が上昇していた。さらに日射が継続した場合には、水深が浅く混合層が小さかった陸域側から湾内を囲い込むようにChl-aが上昇していた可能性が示された。

Key Words : Chlorophyll-a, Red tide, CDOM, Detritus, Tokyo Bay

1. はじめに

閉鎖性水域である東京湾では、長年に渡り赤潮が恒常的に発生している。赤潮に伴い発生する大量の有機物は、海底に沈降し分解される過程で酸素を消費し、生物被害を引き起こす貧酸素・無酸素水塊形成の1つの要因となるため重大な環境問題として認識されている。さらに、近年では、冬季の珪藻類赤潮が溶存無機態窒素を消費することによってノリの色落ちを引き起こすため、ノリ養殖に甚大な被害をもたらしている(石井ら, 2008)¹⁾。そのため、赤潮の予測や解消策を検討するための基礎的な研究として、これまで赤潮の発生や消長要因に関する考察が行われており、徐々に多くのメカニズムが解明されつつある(佐々木ら, 1999²⁾ ; 鯉渕ら, 2001³⁾)。

しかしながら、従来の研究ではポイント的な現地観測に基づいたものが多く、赤潮の空間的な挙動に関する知見は乏しい。また植物プランクトンの拡がりについて議論するためには生態系モデルを用いた数値シミュレーション

が有効と考えられるが、植物プランクトンの濃度を定量的に計算し大小関係を含めて高精度に計算することは現段階において非常に困難であり、未だ多くの課題が残されている。このような赤潮の空間的挙動のメカニズムに関する知見の不足は、赤潮の発生し易い箇所の特定やその原因の解明、さらには赤潮の発生予測、被害の軽減策の提案の遅れにも繋がっている。

そこで比嘉ら, (2015)⁴⁾は、東京湾のような富栄養化水域を対象として、空間的観測に優れた人工衛星リモートセンシングのためのクロロフィルa (Chlorophyll-a : Chl-a)、有色溶存有機物の光吸収係数 (Color dissolved organic matter : a_{CDOM})、デトリタスの光吸収係数 (a_d) の推定手法を開発し、またAqua/Terra衛星に搭載されているMODISの水温推定の精度検証を行った。これによって、これら4つのパラメーターを同時に推定し、様々な観点からその空間的な拡がりモニタリングすることが可能となった。そこで本研究では、富栄養化水域における衛星リモートセンシングの技術を用いてChl-a, a_{CDOM}, 水温, a_dの空間

的挙動を考察することにより、夏季と冬季におけるChl-a分布の形成要因を明らかにすることを目的とした。さらに、明らかにした形成要因に基づきChl-a分布の形成パターンを分類した。

2. 観測結果の概要

本研究では、比嘉ら、(2015)⁴⁾が開発したChl-a, a_{DOM} , a_t 推定モデルを人工衛星Aqua/MODISの衛星画像に適用し、また水温の衛星画像を使用することでそれぞれの空間分布を推定した。報告によると、Chl-a推定に関しては濃度が20.0~50.0 $\mu\text{g/l}$ 以上のときの中濃度から高濃度にかけては約30%以内の誤差率で推定可能である。また、通常、衛星リモートセンシングによる濃度の情報は、鉛直方向の光が届く範囲での濃度の積分値の情報になるが、東京湾湾奥では透明度が低い場合が多く、衛星画像が示すChl-aは概ね海面直上の濃度を表すことが多い。提案されている手法は、表層1mのChl-aの現地観測結果を衛星画像によるChl-aの推定値に同期しているため、主に表層1mの情報を表す。 a_{DOM} , a_t に関しては、衛星画像からの推定値と実測値による精度検証は不十分な部分があるものの、 a_{DOM} の推定値と塩分の実測値は負の相関関係があり、また a_t の推定値も実測値との間に正の相関関係が認められている。さらに、水温推定は夏季北岸沿いにおいてたびたび過大評価される問題点が指摘されているが、その部分を除いた場合誤差率は5%以下と高精度に推定可能であった。

これらの空間分布の変動要因を考察するため、図-1に示す地点において国土交通省関東整備局により連続モニタリングされているChl-a、水温、塩分の時系列結果を使用した。また、風向、風速は千葉港口第一号灯標の結果を使用し、降雨量、全天日射量は気象庁が提供している東京管区気象台の結果を使用した。さらに、流量は、湾内のChl-a, a_{DOM} , a_t 、水温の空間的な変動には河川水流入の影響が大きく寄与すると考え、東京湾の主要河川の1つである江戸川を対象とし二瓶ら、(2008)⁵⁾を参考にH-Q曲線を作成し算出した。

図-1 観測地点及び連続モニタリングポイント

3. Chl-a分布の形成要因及び分布パターンの分類

(1) 2010年夏季におけるChl-a分布の変動

図-2に2010年5月20日~8月31日までの風速ベクトル、全天日射量、全天日射量の4日移動平均、降雨、江戸川流量、浦安沖、千葉波浪観測塔、千葉港口第一号灯標の表層Chl-a、川崎人工島の塩分の時系列結果を示す。東京湾では、通常Chl-aの濃度が高濃度になる場合でも100 $\mu\text{g/l}$ 以上になることはほとんどないが、図-2中のChl-aは200 $\mu\text{g/l}$ 以上になっていた期間が2回確認できる。これはセンサー面の生物付着や劣化等が考えられるが、全地点において増減の傾向は概ね一致していたことから、傾向としては捉えることができていたと仮定し使用した。2010年の夏季の特徴として、主に南南東の風が卓越しており、また6月の梅雨の時期を含め降雨の日が多く、6月から8月の初旬までに流量が増加していた期間が6回確認された。

a) 2010年6月3日：期間A

図-3に2010年6月3日に取得されたAqua/MODISの衛星画像に各推定モデルを適用したChl-a, a_{DOM} , a_t 、水温の空間分布を示す。図-3のChl-aに着目すると、荒川、隅田川河口付近においてChl-aが高濃度になっており、西岸沿いから湾口側にかけて広がっていたことが確認できる。このとき、水温と a_{DOM} が上昇していた部分が、Chl-aの濃度が上昇していた部分と一致していたことから、河口付近を起源とした水塊が湾内へ広がっていたと考えられる。また、図-3の6月3日の衛星画像が取得された日付近の流量の結果に着目すると、5月24日~29日の5日間において最大流量320 m^3/s の河川水の流入が確認でき、さらに衛星画像が取得された6月3日まで弱風化しており、北風が吹いていた期間も確認できる。このときの湾内流動は、通常夏季で卓越する南風の影響が弱まり、河川水の影響によってエスチュアリー循環が強まったことで河口付近の水塊が湾口側へ広がっていたと推測される。また、5月28日から確認できる北風も分布形成に影響していた可能性も考えられる。そのため、6月3日の分布は、弱風化及び河川水流入パターンとして分類した。 a_t に着目すると川崎沖において上昇しており、これは初期に流入してきた河口起源の水塊に含まれる濃度の高いChl-aが徐々に分解され、デトリタス化していたものの、まだある程度の生物量は維持されていたと考えられる。

b) 2010年6月12日：期間B

図-4に2010年6月12日のChl-a, a_{DOM} , a_t 、水温の空間分布を示す。衛星画像から、荒川、隅田川河口域から北岸に沿ってChl-aと a_{DOM} が上昇しており、これらの分布と水温が高かった部分が概ね一致していた。図-3の6月12日付近である期間Bに着目すると、北岸付近に位置する浦安沖、千葉波浪観測塔のChl-aは上昇していたものの、比較的湾奥中央に位置する千葉港口第一号灯標では上昇

図-2 2010年5月20日～8月31日の風速ベクトル, 全日射量, 降雨, 流量, Chl-a, 塩分の時系列

図-3 2010年6月3日のChl-a, aCDOM, 水温, a_t の空間分布

図-4 2010年6月12日のChl-a, aCDOM, 水温, a_t の空間分布

しておらず, Chl-a 分布の結果と一致する. これは, 図-2の時系列結果から約 10m/s の南風が約 2 日間連吹していたことによって河口から北岸沿いに高濃度の Chl-a, aCDOM, 高水温の水塊が吹き寄せられていたことが原因と考えられる. そのため河川水流入が少ないときにおいて南風が卓越していたときの 1 つのパターンとして分類した. また, a_t の分布は Chl-a の濃度が高かった湾奥部において低くなっていたことから, 植物プランクトンが増殖し始め

図-5 2010年7月28日のChl-a, aCDOM, 水温, a_t の空間分布

てもなかったと考えられる. これを裏付けるように, 期間 B 中の Chl-a の時系列からも Chl-a は南風への変化と夏季の強い日射が引き金となり上昇して間もなかったことが分かる.

c) 2010年7月10日, 17日, 28日, 8月6日, 7日: 期間C

2010年7月10日～8月7日は, 降雨のため流量の上昇が4回見られた. 期間Cにおいて衛星画像が取得されたのは7月10日, 17日, 28日, 8月6日, 7日であった. これらの画像取得日はどちらも強い南南東の風が連吹していたことに加え, 流量が大きく増加していた点において条件が概ね類似していた. このような条件下で期間Cの Chl-a, aCDOM, 水温の分布も類似しており, 河口付近から西岸にかけて分布していた形状であった. この期間の代表として7月28日の Chl-a, aCDOM, a_t , 水温の空間分布を図-5に示す. この結果から, 南南東の風が連吹し, 河川水の流入が同時に起きた場合, Chl-a は風の影響により西岸から北岸部にかけて吹き寄せられ, その補償流として湾口から湾奥部側に向かって外洋水流入が促進されていたことが示唆される分布となっていた.

(2) 2011年夏季におけるChl-a分布の変動

2011年の夏季は7月, 8月において北よりの風が発生していた特徴があった. このように 2010年の夏季とは異なった気象条件であったことから, 2011年の Chl-a の空間的変動及び発生要因について検討する. 図-6に2011年7月1日～8月31日までの風速ベクトル, 全日射量, 全日射量の4日移動平均, 降雨, 江戸川流量, 浦安沖の Chl-a, 塩分の時系列結果を示す.

a) 2011年7月1日～10日: 期間A

図-6に示す2011年7月1日～10日の期間Aは, 降雨がほとんどなく流量が低下し全日射量が強まっていた期間であった. この期間中における浦安沖の塩分の低下は, 河川水の影響であった可能性があるものの, 低下の程度からセンサーの生物付着, センサー点検と関連していた可能性もあることから注意し解釈する必要がある. このと

き、Chl-aについては上昇しており日射の影響により植物プランクトンが増殖していたものと考えられる。しかし、7月11日を境に塩分の上昇と伴にChl-aが減少していたことが確認でき、その直後に取得された図-7に示す7月15日のChl-aと水温の衛星画像に着目すると、比較的低温化した水塊が湾口から湾奥へ分布し、その部分においてChl-aが低濃度になっていた。これは7月11日付近から外洋水が湾内へ浸入していた可能性が考えられる。その後、塩分は再度低下しており、Chl-aは夏季の南風連吹パターンの通り、徐々に湾内へ広がっていたことが確認できた。

(3) 2010年、2011年の夏季の赤潮発生に関するまとめ

2011年の夏季は2010年の夏季と比較して赤潮の発生頻度が低くなっていた原因として、1つは植物プランクトンの濃度の上昇が著しい7月において外洋水が湾奥付近まで流入し湾奥部の濃度の上昇が抑えられていたことが挙げられる。また、2011年7月20日から8月後半にかけての約1ヶ月の間に高頻度に北よりの風が確認されており、その影響で植物プランクトンが拡散され低濃度になっていたことも原因の1つと考えられる。さらに、2010年夏季は北よりの風の発生頻度が著しく低く、梅雨の時期においても強い南風が卓越していたため、沿岸水が湾奥部に滞留しChl-aが減少しにくい状態になっていたと考えられる。

(4) 2010年、2011年冬季におけるChl-a分布の変動

図-8に2010年12月1日～2011年2月28日の風速ベクトル、全天日射量、全天日射量の4日移動平均、降雨、江戸川流量、浦安沖のChl-a、千葉波浪観測塔の塩分の時系列結果を示す。この期間の特徴として12月4日と20日に南風の発生と伴に2回の流量の増加が確認でき、それ以降は安定的に北風の連吹と晴れの日が継続していた。2回目の流量増加後は塩分が全層にて低下し、その後、2011年2月23日まで大きな変動は見られなかった。また、1月10日付近から浦安沖のChl-aが $50\mu\text{g/l}$ 近くまで上昇しており、冬季の赤潮が観測された。

a) 2011年1月19日：期間A

図-9に示す赤潮が発生していた期間中である1月19日のChl-a, acDOM , 水温, a_t の空間分布に着目すると、荒川、隅田川河口付近の西岸沿いにおいてChl-aが $50\mu\text{g/l}$ 以上に上昇していた箇所が確認できる。このとき、水温は東岸沿いにおいて上昇しており、同様に acDOM , a_t の増加も見られる。これは、底層において有機物分解の際に生成され高濃度になっていたCDOMとデトリタス及び比較的高水温の水塊が、エクマン輸送により東岸沿いから湧昇していた可能性が考えられる。

b) 2011年1月31日：期間B

図-10の1月31日のChl-aを見ると、26日と比較して西岸沿い、北岸沿いに加え東岸沿いでも上昇しており、湾奥を

囲い込むように上昇していた。このときの東岸沿いのChl-a増加の遅れは、東岸沿いが湧昇域であったことが原因となり、西岸沿いと比較して日射の影響を受けるタイミングに時間差があった可能性が考えられる。このような場合においても陸域側からChl-aは上昇しており、この分布形成の要因については次節にて鉛直構造から検討する。

(5) 夏季と冬季における赤潮発生時の鉛直構造

夏季と冬季においてChl-aが上昇していた期間である2010年8月10日と2011年1月6日のChl-a、水温、光量子量の鉛直プロファイル調べた。地点は、図-1に示す河口付近であるStn.1と湾奥中央Stn.8の2地点を対象とした。図-11の2010年8月10日のStn.1に着目すると、水深が浅く混合層も小さくなっており、約1.2m付近において水温躍層が存在していた。また、夏季の高い日射の影響で有光層が大きくなっており、その影響により表層から約2.0m近くにおいてChl-aが $50\sim 70\mu\text{g/l}$ まで上昇していた。さらに比較的水深が大きい湾奥中央のStn.8では、水温躍層の位置が約8.5m付近に位置しStn.1よりも混合層が大きくなっており、その影響によって混合層中のChl-aと水温はStn.1よりも低下していた。このとき、Chl-aの鉛直分布は、照度の鉛直分布と概ね対応しており、混合層と有光層の大きさがChl-aの増加に影響を与えていたことが分かる。このように成層期である夏季においては、比較的水深の浅いところで躍層の位置が低下していた上、夏季の強い日射によってChl-aが短時間で急激に増加していたと考えられる。

一方、2011年1月6日の冬季の赤潮時における鉛直プロ

図-6 2011年7月1日～8月31日の風速ベクトル、全天日射量、降雨、流量、Chl-a、塩分の時系列

図-7 2011年7月15日、16日のChl-a、水温の空間分布

ファイルに着目すると、躍層の位置がStn.1で約4m、Stn.8で約14mに位置し鉛直混合が盛んに行われており、それに伴いChl-aは混合層内で鉛直一様に増加していた。この日の全天日射量は $10.6\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ と冬季としては一般的な値だったものの、夏季と比較する著しく低い。ただし、冬季においても夏季同様に水深が浅いStn.1において混合層が小さくなっており、Stn.1のChl-a、水温はStn.8と比較して上昇していた。このように冬季は夏季と比較して混合層の上昇や有光層の低下により赤潮の発生には時間を要し、また、水深が浅いところから混合が進みChl-aが徐々に増加していたことが分かる。このような鉛直的なChl-aの増加に関する有光層と混合層との関係はスベルドラップの臨界点理論により説明される。このことから冬季の植物プランクトンは、佐々木ら、(2001)⁶⁾の報告の通り、長時間の日射の継続が重要であり、また、分布の形成としては混合層の厚さの影響から水深が浅く水温が高くなっていた箇所から増加していた可能性が考えられる。また、Chl-aの濃度の増減に関しては、図-8の赤潮発生期間における浦安沖のChl-aに着目すると、北よりの風が強まると減少し、弱まると上昇しており、風と概ね対応していたことが分かる。さらに、鉛直一様にChl-aが増加していることから、一度Chl-aが上昇した後は簡単には低濃度に転化せず、高い濃度を保ったまま増減していた。

4. Chl-a分布パターンの分類

2010年、2011年にわたる夏季、冬季におけるChl-a分布の形成パターンについて図-12に概念図を示した。夏季においては、河川水流入パターン、河川水流入と南南東の連吹パターン、南風系の連吹パターンの3つに分類した。

図-12(a)の河川水流入パターンは、夏季の弱風時に降雨の影響により河川水の流入が上昇した場合、比較的濃度が高い河口起源のChl-aが河川水の流入に伴って湾口付近まで広がっていた。河口付近において植物プランクトンが高濃度になりやすい原因としては、河口フロント前面部において植物プランクトンの生産力が高かったことや、河口付近において水が滞留しやすくなっていた可能性が挙げられる(岡田・中山, 2002)⁷⁾。図-12(b)の河川水流入と南南東風の連吹パターンでは、南南東の風により河口から西岸にかけて沿岸水が吹き寄せられ、河川水流入に伴い沿岸水が川崎沖付近に向かって広がっていたと考えられる。図-12(c)の南風系連吹パターンは、夏季において最も高頻度で発生しており、南風が継続的に吹き続けることで湾奥の西岸、北岸、東岸の陸域側に沿って、Chl-aが上昇しながら徐々に吹き寄せられていた。冬季においては日射の継続と北風連吹パターン、長期間の日射の継続と北風連吹パターンの2つに分類され、図-12(d)の日射の継続と北風の連吹パターンでは、エクマン輸送に

図-8 2010年12月1日～2011年2月28日の風速ベクトル、全天日射量、降雨、流量、Chl-a、塩分の時系列

図-9 2011年1月19日のChl-a, aCDOM, 水温, a_t の空間分布

図-10 2011年1月31日のChl-a, aCDOM, 水温, a_t の空間分布

よって北岸と東岸が湧昇域となり、同時に沿岸水は西方向へ輸送される。このとき、日射が継続することにより、西岸の水塊が輸送された箇所からChl-aが上昇していた。図-12(e)の長期間の日射の継続と北風連吹パターンでは、湧昇が起きて長期間日射が継続したことで湧昇域だった箇所と西岸沿いから湾奥陸域を囲い込むようにChl-aが上昇していた。この東岸沿いにおけるChl-aは、西岸沿いの水塊より後に日射の影響を受けることから、遅れて上昇することが示唆された。図-12(f)の外洋水流入パターンは、

図-11 2010年8月10日と2011年1月6日のChl-a, 水温, 光量子量の鉛直プロファイル

図-12 夏季と冬季におけるChl-a分布の分類

夏季と冬季における発生が確認でき、南風による沿岸水の吹き寄せや黒潮の蛇行の影響により湾奥まで波及する場合がありますと考えられる。

5. 結論

本研究では、衛星リモートセンシングを用いて東京湾のChl-a, a_{CDOM} , 水温, a_t の分布を明らかにした上で、2010年、2011年の夏季と冬季におけるChl-aの空間的な変動特性を明らかにし、分布形成パターンの分類を行った。

夏季ではChl-aの分布形成要因として、河川水流入、南風の連吹時間の変化が分布形成に重要な役割を果たし、Chl-a分布の形状は南風連吹と伴に荒川、隅田川河口付近

から北岸沿い、東岸沿いにかけて徐々に拡大し、最終的に湾内全体を覆うように上昇していた。

冬季のChl-aは、長期間の安定的な継続した日射が重要であり、水深が浅く混合層が小さい陸域側から徐々に上昇していた。また、冬季の赤潮は、鉛直的に一様にChl-aが上昇するため、一度発生すると減少しにくくなる可能性が示唆された。Chl-aの濃度の増減は、主に北風の強弱に対応していたことが分かった。

謝辞：現地観測を実施するにあたり、千葉県の水質調査船「きよすみ」の船員の方々及び千葉県環境研究センターの飯村晃氏に大変お世話になった。ここに記して感謝の意を表する。また、本研究はJSPS科研費 24-4765の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 石井光廣, 長谷川健一, 松山幸彦: 東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因: 栄養塩の長期変動および最近の珪藻赤潮発生, 水産海洋研究, 72.1, pp.22-29, 2008.
- 2) 佐々木淳, 磯部雅彦, 今井誠: 東京湾における赤潮の消長要因に関する考察, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1021-1025, 1999.
- 3) 鯉淵幸生, 五明美智男, 佐々木淳, 磯部雅彦: 現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生機構, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1071-1075, 2000.
- 4) 比嘉紘士, 鯉淵幸生, 小林拓, 虎谷充浩, 作野裕司: 東京湾における海色リモートセンシングを用いた水環境モニタリング手法の提案, 海岸工学論文集, 第62巻, 印刷中.
- 5) 二瓶泰雄, 高村智之, 渡邊敬之: 東京湾主要流入河川における流量モニタリングの現状と課題, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1221-1225, 2007.
- 6) 佐々木淳, 渡邊亮太, 磯部雅彦, 五明美智男: 自動昇降式観測システムを用いた冬季の東京湾湾奥における基礎生産の推定, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1091-1095, 2001.
- 7) 岡田知也, 中山恵介: 荒川河口域におけるChl-aの鉛直分布, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1021-1025, 2002.

(2015.3.18 受付)

CLASSIFICATION OF FORMATION PATTERNS FOR CHLOROPHYLL-A DISTRIBUTION IN TOKYO BAY DURING SUMMER AND WINTER

Hiroto HIGA, Yukio KOIBUCHI, Hiroshi KOBAYASHI,
Mitsuhiro TORATANI and Yuji SAKUNO

Chl-a distributions, estimated using the techniques of satellite remote sensing, were determined spatial behavior of red tides and were classified the formation factors of their distributions. The variation of Chl-a distributions were discussed through expressing distributions of Chl-a, absorption coefficients of color dissolved organic matter and detritus and temperature during summer and winter of 2010 and 2011. As a result, the Chl-a distribution in the summer spread from the estuarine area of Arakawa and Sumida rivers to the northern and eastern parts of the inner bay and then covered the entire inner bay due to the effect of continuous south wind and gradual increase of Chl-a. In the winter, stable long term solar radiation was important for the increase of Chl-a and Chl-a increased starting from the western part, where water mass from eastern part was transported by Ekman transport. Furthermore, if stable solar radiation continued, Chl-a increased from the land side of the inner bay where mixing layer is small because the water depth is shallow.