

# 論文要旨

## 論文題目

有明海奥部海域における密度躍層の発達が生底質の物理化学的環境ならびに底生生物群集に及ぼす影響

氏名 折田 亮

## はじめに

沿岸閉鎖性海域において、陸域からの栄養塩負荷量が増加すると、海域の富栄養化が進行し、大規模な植物プランクトンの増殖（ブルーム）が発生する。大規模な植物プランクトンのブルームの発生に伴い生産された有機物が沈降し、海底に堆積することで、底質中の易分解性有機物の含量が増加する現象（organic enrichment）が進行する。易分解性有機物の増加に伴い好気性細菌による酸素消費量が増加するため、底層水が貧酸素化し、底質が極度に嫌気化する環境変化が生じる。底生生物群集は、貧酸素水の発生および底質の嫌気化による生理的ストレスが増加するに従い、底生魚類や甲殻類、棘皮動物などを含む多様な大型生物で構成される群集構造から、小型でオポチュニストと呼ばれる環境変動に対する適応能力の高い生物のみが卓越する単純な群集構造へと変化する。

上述のような海域への栄養塩負荷量の増加に端を発する一連の海洋生態系の変化が、世界同時多発的に発生していることが報告されている。本研究の調査地である有明海奥部海域においても、1990年代後半より大規模な赤潮が頻発するようになり、2001年以降は毎年夏季に広範囲におよぶ海域で貧酸素水が発生することが報じられてきた。しかしながら、この海域では、海域への栄養塩負荷量の増加が過去50年間にわたって認められない。有明海奥部海域において、富栄養化海域のように植物プランクトンのブルームの頻発化・大規模化および貧酸素水が発生していることを説明するためには、新たな赤潮および貧酸素水の発生メカニズムを提示する必要がある。

有明海奥部海域における大規模な赤潮の発生メカニズムとして、梅雨や秋雨の降雨で大量の河川水が湾奥部へ流入し、塩分躍層が発達した時に、その表層が一時的に富栄養化した状態となることで、大規模な赤潮が発生することが指摘されている。また、同海域の底層で発生する貧酸素水も、梅雨期に形成される塩分躍層に梅雨明け後の夏季に発達する水温躍層が重なり、強い密度躍層が形成された時に、その躍層より底層側で溶存酸素濃度（DO）が著しく低下し、

貧酸素水が発生している。したがって、大規模な赤潮および貧酸素水の発生には、いずれも密度躍層の発達が強くと関与しており、以前よりも密度躍層が長期的または広域的に発達するような海洋環境へと変化してきたことが示唆される。

海水の鉛直混合力は、潮流速の変化に強く依存するため、有明海奥部海域において密度躍層がより発達するような海洋環境の変化は、同海域における潮流速の減少を強く示唆している。しかしながら、有明海奥部海域における潮流速の過去の観測結果は非常に少なく、実際にどのように潮流速が変化したかを検証することは困難である。水中における懸濁粒子の沈降・堆積ならびに再懸濁は、ストークスの法則に従うことから、潮流の減少は底質表層の泥分の増加として反映される可能性がある。したがって、有明海奥部海域において、密度躍層がより発達するようになる海洋環境の長期変化は、底質の粒度組成の空間分布や底質の質的变化に応答する底生生物群集の空間分布パターンの長期変化として捉えられる可能性が指摘される。

## 本研究の目的

本研究では、有明海奥部海域における密度躍層の形成に焦点をあて、密度躍層が発達することで生じる底質の物理化学的環境ならびに底生生物群集の変化を明らかにするために、以下の項目を実施した。

1. 2012年3月～2015年4月に、水質および底質環境の調査ならびに底生生物群集の定量調査を実施した。これらの調査結果をもとに、季節的な密度躍層の発達と貧酸素水発生の関係、ならびにこれらの現象に対する底生生物群集の応答を明らかにする。
2. 2013年の4月および8月に、底生生物群集および環境要因の分布調査を実施した。これらの調査結果をもとに、海水の鉛直混合期および密度躍層が発達した成層期における底生生物群集の空間分布を制御している要因（環境要因および空間構造の特性）を明らかにする。
3. 2011年～2014年の密度躍層が発達した成層期および鉛直混合期に、底質の粒度組成の分布調査を実施するとともに、2014年には、それぞれの時期にセディメント・トラップを用いて懸濁粒子の沈降流束を測定する調査を実施した。これらの調査結果をもとに、成層期および鉛直混合期における底質の粒度組成の分布の特徴ならびに懸濁粒子の沈降特性を明らかにする。
4. 底質の粒度組成の分布に関する過去の調査例との比較を通して、過去25年間の海底環境の変化を明らかにし、上述の結果の特徴をまとめて、その変化から推察される密度躍層の発生海域の変遷と底生生物群集の分布への影響を考察する。

## 結果のまとめ

1. 有明海奥部海域においては、降雨に伴い大量の淡水が湾の最奥部に位置する河川から供給されることで密度躍層が形成され、特に梅雨後の7月～9月に湾奥部側の海域を中心に密度躍層が発達していた。海底直上の水温が23.0℃以上かつ海底直上水と表面水間の密度差が5.5 ( $\sigma_t$ ) 以上の水質条件時には、海底直上において貧酸素水が観測された。底生生物群集は、有機物含量の高い泥底においては、周年にわたって生物量および種多様性が低い状態が継続していた。一方、有機物含量の低い砂底では、底生生物群集の生物量および種数が夏季に減少し、秋季～春季に回復する明瞭な季節変化が認められた。同底質環境においては、貧酸素水発生時に底質の嫌気化が認められなかったことから、他の場所で発生した貧酸素水の移流の影響を受けて、底生生物群集が衰退していると考えられる。また、台風が7月～8月に有明海に接近すると、強風・波浪により海水が鉛直的に攪拌され、酸素消費の進んだ底層水のDOが一時的に回復することで、砂底においては、底生生物群集の回復が早まり、翌春季には生物量および種多様性の豊かな底生生物群集が形成されることが示された。
2. 空間構造変数 (MEM) を用いた解析により、底生生物群集の空間分布を説明する主要な環境要因が、海水の鉛直混合期には底質表層の泥分および海底直上の塩分、成層期には底質表層の泥分、AVSならびにChl-*a*含量であることが明らかになった。鉛直混合期には、底生生物群集の空間分布は、それぞれ湾央部の泥分が低い環境、湾奥部の泥分が高い環境、諫早湾の泥分が高く塩分の低い環境に対応し、これら3つのサブエリア間で異なっていた。一方、成層期には、鉛直混合期に認められた湾奥部および諫早湾の2つのサブエリア内で、AVSおよびChl-*a* 含量の高い底質環境が発生し、底生生物群集の空間分布に違いが生じた。この湾奥部および諫早湾のサブエリア内で発生した底質環境の変化は、それぞれ密度躍層の発達および調整池由来の排水に起因していることが考えられ、本解析により、夏季に生じる環境攪乱が底生生物群集の空間分布に及ぼす影響が評価された。
3. 底質表層の泥分について、砂底の広がる湾央部に面する湾奥部の泥底では、鉛直混合期に泥分が低下する傾向が見出された。また、同海域周辺における懸濁粒子の沈降流束は、鉛直混合期に著しく高い値を示し (153.2 ~ 203.7 g m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)、沈降粒子の有機物含量が低かったことから、底質の再懸濁量が著しいことが示された。同時期には、湾奥部へ向かう底層流が卓越することが知られており、砂底の広がる湾央部に面する湾奥部の泥底では、再懸濁した微細粒子がより湾奥部へ輸送されるのに対して、砂底の広がる湾央部からの微細粒子の供給量が限られるため泥分が低下したと考えられる。一方、成層期には、沈降粒子の有機物含量の期間平均値が鉛直混合期の約2.4倍に達し、0.8 ~ 1.2 g m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>のTOCの沈降流束が記録された。また、8月～9月には、沈降粒子のTOC/Chl-*a*が32 ~ 88を記録したことから、おもに植物プランクトン由来の易分解性有機物で構成された粒子が沈降していると考えられる。同海域では、

近年、底質のorganic enrichmentが進行していることが報告されており、この底質のorganic enrichmentの進行には、密度躍層発達時の沈降粒子による寄与が大きいことが示された。

4. 底質表層の泥分の分布について、1989年、2000年、2005年に実施された過去の研究例ならびに2011年～2014年に実施した本研究結果の比較より、過去25年間に有明海奥部海域の湾奥部東側において砂泥底～泥底の分布が拡大してきたことが明らかになった。1990年代前半に湾奥部東側に砂底が分布していたことは、粒径の小さい懸濁粒子が海底に堆積しない、または一旦堆積しても再懸濁するような速い潮流速が、当時この海域に存在していたことを示している。このような潮流条件下では、流入してきた栄養塩の豊富な河川水は、速い潮流によって鉛直混合し、海水で希釈されるため、植物プランクトンの増殖が抑制されていたと考えられる。また、鉛直混合により底層へも酸素が供給されることから貧酸素水の発生も抑制され、夏季でも生物量および種多様性の豊富な底生生物群集が形成されていたと考えられる。

一方、2011年～2014年の調査結果で、湾奥部東側海域に砂泥底～泥底が分布していたことは、1990年代以前に比べて、湾奥部の東側海域では、季節的に形成される密度躍層が発達しやすい環境へと変化してきたことを示している。このような条件下では、流入してきた栄養塩の豊富な河川水が直ちに希釈されず、発達した密度躍層の表層に留まり富栄養層を形成する。その層では、大規模な植物プランクトンのブルームが発生して、易分解性の有機物が海底へ沈降する。この一連の現象が毎年季節的に繰り返されることで底質のorganic enrichmentが進行し、有機物含量の高い底質環境が湾奥部の広い範囲に分布するようになったと考えられる。この海域では、水温上昇および密度躍層発達の水質条件が重なると、海底直上で貧酸素水が発生し、堆積物の嫌気状態が長期化することで、生物量や種多様性の乏しい底生生物群集が周年にわたり継続するようになったと考えられる。また、有明海のように強い潮汐流の発生する海域では、密度躍層の底層側で発生した貧酸素水が潮汐流によって移流することにより、周辺の貧酸素水が発生しない砂底においても、底生生物群集が季節的に衰退する生態系へと変遷してきたことが示された。

本研究により、季節的に密度躍層が発達することが、海底環境および底生生物群集に対して、過去の研究例で記載されてきたことよりも複雑なプロセスを介して影響し、非調和的な底質環境および底生生物群集の衰退を招いていることが明らかになった。さらに、日本の典型的な沿岸閉鎖性海域の1つである有明海奥部海域において、1990年代後半以降、栄養塩負荷量の増加に伴わないで赤潮が頻発し、夏季に貧酸素水が発生するようになった原因として、密度躍層の発達が強く関与していることが示され、これまで沿岸閉鎖性海域において報じられてきた海域への栄養塩負荷量の増加に起因して生じる一連の海洋生態系の変化が、密度躍層が発達することによっても生じる可能性が示された。