

# フィリピン・ボリナオのサンゴ礁隣接型高密度養殖海域における 水質環境特性の観測と解析

Field Observations and Analyses of Water Quality Characteristics in a Dense Aquaculture Area  
Adjacent to a Coral Reef in Bolinao, Philippines

芦川浩太<sup>1</sup>・灘岡和夫<sup>2</sup>・Eugene C. Herrera<sup>3</sup>・山本高大<sup>3</sup>・Cesar L. Villanoy<sup>4</sup>・Erlinda E. Salamante<sup>5</sup>

Kota ASHIKAWA, Kazuo NADAOKA, Eugene C. HERRERA, Takahiro YAMAMOTO,  
Cesar L. VILLANOY and Erlinda E. SALAMANTE

Bolinao is located along the north western coast of Luzon Island in the Philippines. Uncontrolled aquaculture has contributed to deterioration of water quality, indicated by massive milk fish kills and destruction of ecosystem of the Bolinao reef complex. The field observations were conducted around Santiago Island, Bolinao in order to evaluate the impacts of excessive milkfish culture on the coastal environment. High feeding input from fish cages or pens have contributed to nutrient enrichment and phytoplankton blooms not only in the aquaculture area but also right close to the reef area. It is known that dissolved oxygen should be more than 5 mg/l for milkfish growth. However, dissolved oxygen in the aquaculture area was less than this critical level from the surface to the bottom water especially during spring tide.

## 1. はじめに

フィリピン・ルソン島北西部に位置するボリナオ・サンティアゴ島(北緯: 16° 24' 00", 東経: 119° 56' 00")は、図-1に示すように島の北側が典型的な裾礁域となっており、サンゴや海草をはじめとする生物多様性に富んだ自然環境がある。一方、島の南西側の海峡部では、ミルクフィッシュの養殖が盛んに行われている。このミルクフィッシュの養殖は1970年代から始まり、現在ではボリナオの主要な産業となるまで成長した。

しかしながら近年、Vercellesら(2000)によると、(1)養殖場の急増、(2)エサの過剰供給、など養殖に起因する環境負荷が増大し、深刻な水質低下を引き起こしている。その結果、養殖場においてミルクフィッシュの大量死が頻発化しており、さらに水質低下の影響が上記のサンゴ礁域にまで及んでいることが懸念されている。

これを受けて現在、地元自治体およびフィリピン大学が中心となり、水質改善策が検討されている。本研究では、現地観測によって水質改善策を講じる上で必要不可欠となる同海域の水質環境特性を明らかにし、過剰な養殖がサンティアゴ島沿岸域の生態系に与える影響やミルク

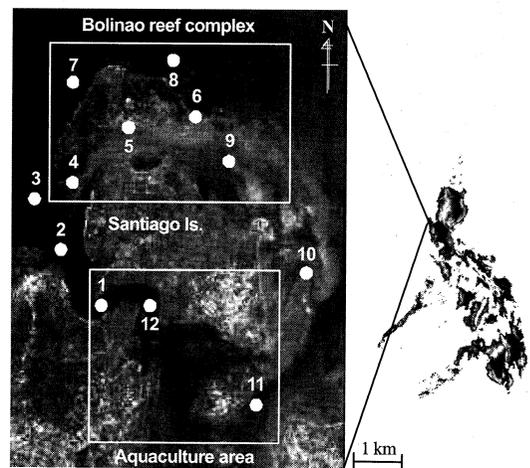


図-1 ボリナオの位置と観測地点

クフィッシュ大量死の原因構造を解明することを試みた。

## 2. 現地観測

### (1) 現地観測概要

2007年11月14日から12月2日までの期間に、ボリナオ・サンティアゴ島沿岸域を対象として現地観測を行った。図-1に示すように養殖エリア内に3点 (Sta.1, 11, 12)、リーフ内に4点 (Sta.4, 5, 6, 9)、リーフ外に5点 (Sta.2, 3, 7, 8, 10) の計12地点の観測点を島の周辺に設け、流速、波高、塩分、クロロフィル-a、濁度、溶存酸素、水温、PHの計測を行った。

現地観測は、自記式センサーを用いた定点連続観測と

1	東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻 修士課程
2 フェロー 工博	東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻
3	東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻 博士課程
4	フィリピン大学海洋科学研究所 教授
5	フィリピン大学海洋科学研究所 研究員

採水や多項目水質計による水質調査に分けられる。自記式センサーによる連続観測は、電磁流速計（アレック電子㈱, COMPACT-EM), ADCP (RD社, Workhorse 600kHz, 1200kHz), 圧力式波高計（アレック電子㈱, COMPACT-WH), 塩分計（アレック電子㈱, COMPACT-CT), クロロフィル・濁度計（アレック電子㈱, COMPACT-CLW), 溶存酸素計（アレック電子㈱, COMPACT-DOW), 小型水温計（Onset Computer Corp., HOBO Water Temp Pro）を係留ブイまたは海底に固定して行った。各観測地点における自記式センサーによる観測内容を表-1に示す。

水質調査では、各観測地点における栄養塩濃度・クロロフィル-a 濃度測定のための採水を行うとともに、多項目水質計（アレック電子㈱, AAQ1183）により水温、塩分、濁度、Chl.a, DO, PHの鉛直分布の計測を7回行った（大潮、中潮、小潮を含む）。水質調査はSta.1とSta.7以外のすべての観測地点で行った。採水の方法については、Sta.2,8,11,12において表層から50cm、中層、底層から50cmの海水を採水し、それ以外の観測地点では、水深が5m以下であるため表層水のみ採水した。採水したサンプルは帰港後、直ちにフィルタリング等の処理をしたのち冷凍保存し、後日分析を行った。分析項目は、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン、ケイ酸態ケイ素、クロロフィル-aである。

(2) 現地観測結果および考察

表-1 各地点の観測内容

地点	水深(m)	観測内容
S1	12.0	流速・波高・水温
S2	16.0	採水・AAQ
S3	30.0	流速・塩分
S4	2.5	流速・波高・Chl-a・濁度・塩分 採水・AAQ
S5	2.5	流速・波高・Chl-a・濁度・塩分 水温・採水・AAQ
S6	14.0	流速・波高・Chl-a・濁度・塩分 水温・採水・AAQ
S7	9.5	流速・波高・水温
S8	8.5	採水・AAQ
S9	1.0	採水・AAQ
S10	5.0	流速・波高・Chl-a・濁度・塩分 水温・採水・AAQ
S11	9.0	流速・波高・Chl-a・濁度・塩分 水温・採水・AAQ
S12	11.5	Chl-a・濁度・塩分・溶存酸素 水温・採水・AAQ

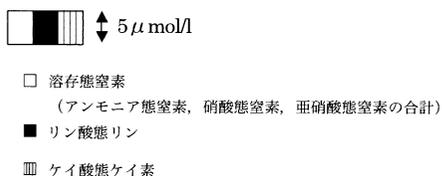
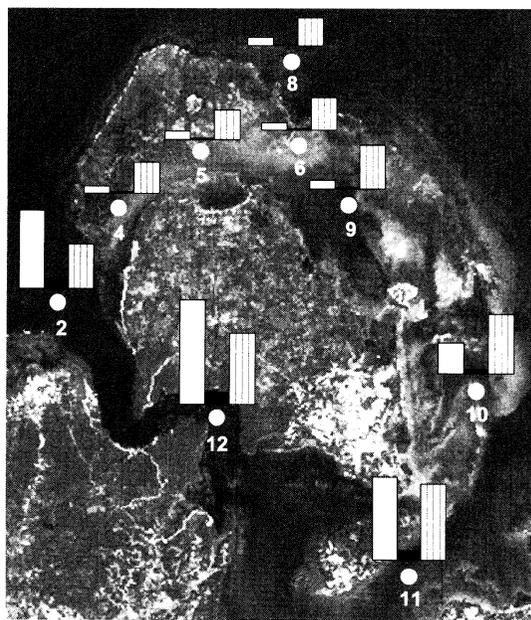


図-2 栄養塩濃度分布 (7回平均)

表-2 クロロフィル-a 濃度分布 (7回平均)

Sta.	2	4	5	8	9	10	11	12
Chl-a	9.42	0.40	0.40	0.37	0.71	3.29	7.13	16.33

単位: μg/l

a) 栄養塩濃度・クロロフィル-a 濃度の分布

図-2は、各観測地点における7回行った採水による表層の栄養塩濃度の分析結果の平均値である。養殖場周辺のSta.11, 12において、2地点の栄養塩濃度平均値は、溶存態窒素（アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の合計）で13.94 μmol/l, リン酸態リンで1.63 μmol/l, ケイ酸態ケイ素で10.99 μmol/l であり、エサの過剰供給によると思われる高い栄養塩濃度が確認された。

一方、リーフ内のSta.4, 5, 6, 9の栄養塩濃度は、4地点の平均値で、溶存態窒素（アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の合計）は1.07 μmol/l, リン酸態リンは0.17 μmol/l, ケイ酸態ケイ素は5.06 μmol/l であり、現状では比較的貧栄養な状態を保っている。しかし、裾礁域近傍のSta.2とSta.10まで高栄養塩濃度の海水が広がっており、特にSta.2では、溶存態窒素（アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の合計）が11.59 μmol/l, リン酸態リンが1.42 μmol/l, ケイ酸態ケイ素が

6.62  $\mu\text{mol/l}$  となっており、養殖エリア内と同等の栄養塩レベルであった。このことから、過剰な養殖が、リーフ内において、特に養殖場に近い場所の栄養塩濃度を増加させる可能性があることが示唆される。

また表-2は、各観測地点における7回行った採水による表層のクロロフィル-a濃度の分析結果の平均値である。養殖場周辺の Sta.11, 12および Sta.2でクロロフィル-aの濃度が極端に高くなっていることから、富栄養化によって植物プランクトンが大量に発生していることが分かる。

#### b) 養殖エリア内の海水流動特性

図-3は養殖エリアの南東側チャンネル(Sta.11)および南西側チャンネル (Sta.1) における残差流 (25時間平均流) ベクトルを表したものである。なお、Sta.1については ADCP のデータを鉛直平均した残差流ベクトルである。南東側チャンネルでは外洋から養殖エリア内に流れが向かい、南西側チャンネルでは養殖エリア内から外洋に向かって流れていることが分かる。南西側チャンネル近くの Sta.2における養殖場周辺と同レベルの栄養塩・クロロフィル-a濃度は、このような流動特性に起因している。

また、南西側チャンネルの狭く曲がった地形や密集する養殖生け簀が、南西側チャンネルの海水交換率を低下させていると考えられる。

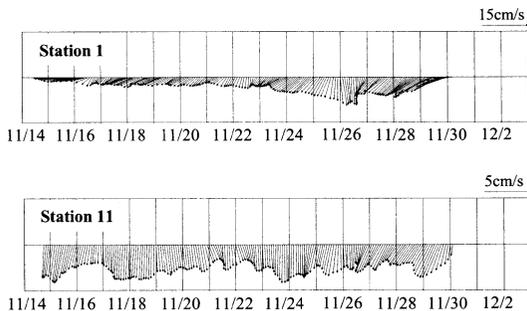


図-3 残差流(25時間平均流)ベクトル

#### c) 流動の変化に伴う栄養塩・クロロフィル-a濃度の時系列変化

図-4, 図-5は、それぞれ養殖エリア内の Sta.1における時系列水位変動および流速変動を示している。また図-6は、Sta.12における表層のクロロフィル-a濃度の時系列変動を示している。これから、流速が低下する小潮期(11/20-11/22)において、表層のクロロフィル-a濃度が大幅に増加していることが分かる。この理由として、小潮期の流速の低下により、(1)海水の鉛直混合が減少し、成層が強化され植物プランクトンが表層に留まり易くなること、(2)養殖エリア内の海水交換率が低下し、植物プランクトンが養殖エリア内に留まり易くなること、が考えられる。

図-7は Sta.12における表層、中層、底層、Sta.4にお

る表層の栄養塩濃度時系列変化である。表層でクロロフィル-aが大幅に増加した小潮期において、表層から底層にかけて栄養塩濃度が減少しており、特に表層で大幅に栄養塩が減少していることが分かる。これは、小潮期に大量に発生した植物プランクトンによって、表層の栄養塩が消費されたためであると考えられる。

また、養殖エリア内で栄養塩濃度が大幅に減少する小潮期に、リーフ内の Sta.4においても栄養塩濃度が減少していることが分かる。これは、養殖エリア内の栄養塩濃度が減少したことで、リーフ内への栄養塩供給が減ったためであると考えられる。

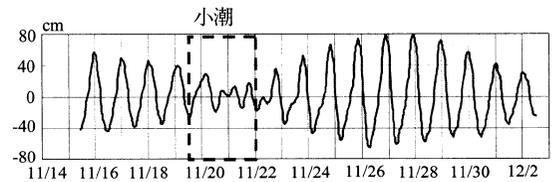


図-4 水位変動 (Sta.1)

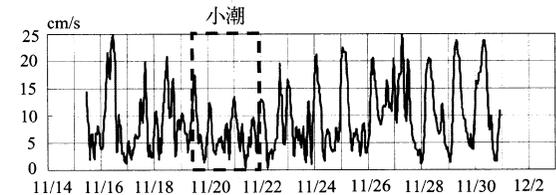


図-5 流速時系列変動 (Sta.1)

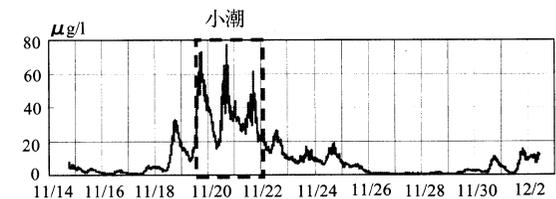


図-6 クロロフィル-a時系列変動 (Sta.12)

#### d) ミルクフィッシュ大量死をもたらす貧酸素水動態

図-8は、観測地点ごとに7回行った溶存酸素量鉛直分布測定結果の平均値である。リーフ内 (Sta.5と Sta.6) においては、主に据礁内の海藻とサンゴでの光合成によるものと考えられる酸素生産のため、比較的高い溶存酸素濃度となっている。一方、養殖エリア内 (Sta.11と Sta.12) においては、先述した植物プランクトンの大量発生に伴い、それらの死骸の分解過程で、酸素が消費されるため、溶存酸素濃度が低くなっている。ミルクフィッシュの養殖に適した酸素量は5mg/l以上であるが、計測を行った7回の平均値がその値を下回っていることから、過剰な養殖が当海域の環境容量を大きく超えて拡大していることが分かる。また、据礁域近傍の Sta.2においても、養殖エリアからの海水の流入により、表層から中層

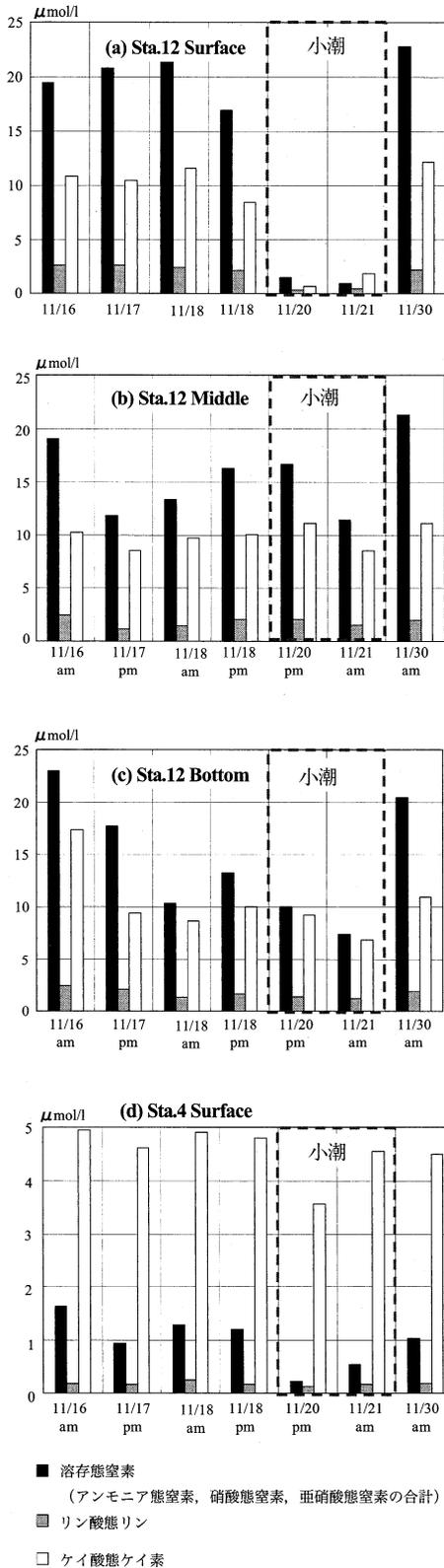


図-7 栄養塩濃度の時系列変動 (Sta. 12, Sta. 4)

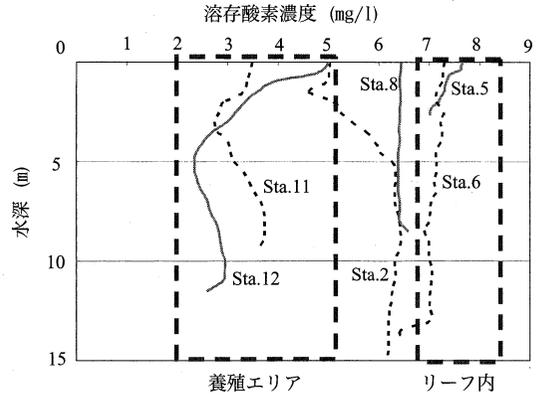


図-8 観測地点ごとの溶存酸素量鉛直分布 (7回平均)

にかけて貧酸素となっている。しかし、底層では外洋から海水の流入があるため、外洋 (Sta.8) と同レベルの溶存酸素量となっている。

図-9は養殖エリアの Sta.12における底層での溶存酸素量の時系列変動を示したものである。これから、11月19日から21日の小潮期 (図-3) にかけて溶存酸素量が大幅に減少していることが分かる。同時期にクロロフィル-a濃度が急激に増加している (図-6) ことから、特にこの時期に植物プランクトンの死骸の分解量が増加し、底層で酸素が大量に消費されたものと考えられる。さらに、先述ように、小潮期には成層が強化されるため、表層からの酸素供給が減少することも原因である。

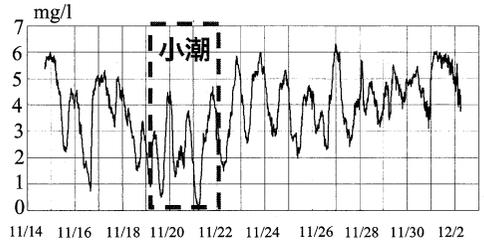


図-9 底層の溶存酸素量時系列変動 (Sta. 12)

図-10は、同地点における小潮時 (11/20上げ潮) と大潮時 (11/20上げ潮) の溶存酸素鉛直分布を比較している。これより、大潮時では底層のみならず表層においても貧酸素になっていることが分かる。これは大潮時では、表層における植物プランクトンの発生量が減少し、酸素生産が大幅に減少するとともに底層の貧酸素水塊との鉛直混合が増加するためと考えられる。Azanza ら (2005, 2006) によると、過去にミルクフィッシュの大量死が起きた時の溶存酸素量は  $2.1\text{mg/l}$  であったと報告されているが、大潮時には全水深にわたってそのレベルに近くなっているため、今回のデータから判断すると、小潮期よりも大潮期の方が、ミルクフィッシュが死亡する可能性が

高くなるものと考えられる。

一般的に底層では、植物プランクトンの死骸の分解によって酸素が消費されるため、底層ほど溶存酸素量が低くなる。しかし、図-10に示されているように、Sta.12では中層で最も溶存酸素量が低くなり、底層にかけて増加する傾向にある。特に、小潮期に中層から底層にわたる溶存酸素の増加量が大きくなるのが分かる。この原因として、外洋からの酸素を多く含んだ海水が底層に流れ込むことが考えられる。図-11に示されている Sta.1 における残差流 (25時間平均流) の東西方向の鉛直分布を見ると、小潮期のあたり (11/20-11/23) において底層の流向が東向きになっていることから、特に小潮期においてチャンネルの西側から外洋水が、底層に流れ込んでいく可能性がある。

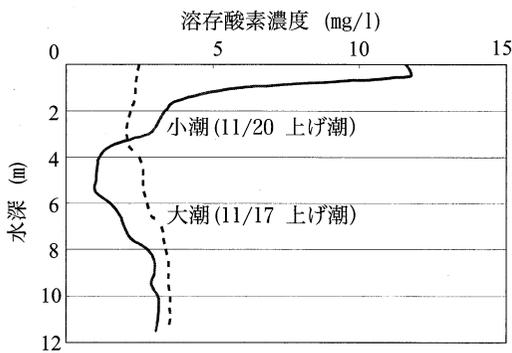


図-10 溶存酸素量鉛直分布 (Sta.12)

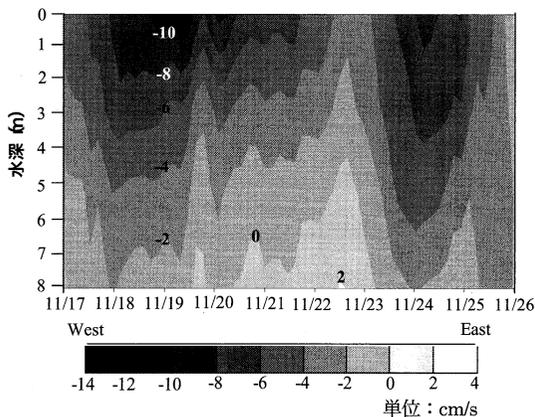


図-11 残差流(25時間平均流)の東西方向の鉛直分布

### 3. 結論

本研究では、フィリピン・ボリナオのサンティアゴ島沿岸域を対象に約3週間にわたり観測を行い、過剰な養殖がサンティアゴ島沿岸域の生態系に与える影響やミルクフィッシュ大量死の原因構造を解明するために、同海域の水環境特性を明らかにすることを試みた。その結果、以下のことが示された。

- 1) 養殖エリアでは過剰なエサの供給により栄養塩濃度が高く、植物プランクトンが大量発生している。主に南西側のチャンネルを通して養殖エリアから高栄養塩濃度の海水が外洋に流出し、さらにはリーフ内に流れ込む可能性がある。
- 2) 植物プランクトンの大量発生に伴い、その死骸の分解によって養殖エリア内で貧酸素化が起こっている。特に大潮時には、養殖海域において底層のみならず表層にまで貧酸素状態になり、ミルクフィッシュの大量死の危険性が高くなる。

**謝辞:** 現地観測を行うに当たりご助力を頂いたフィリピン大学ボリナオ臨海実験所の方々、栄養塩およびクロロフィル-aの分析機器をお貸し頂いた東京海洋大学の石丸隆教授、神田稷太准教授に対して謝意を表します。なお、本研究は、科研費基盤研究(A)海外学術調査(代表者: 灘岡和夫, 課題番号: 18254003), 日本学術振興会拠点大学交流プロジェクト(環境工学), APN 助成金(代表者: 灘岡和夫, プロジェクト番号: APN2006-08NMY)を得て行ったものであることを付記する。

### 参考文献

- Azanza, R. V., Y. Fukuyo, L. G. Yap, H. Takayama (2005): *Prorocentrum minimum* bloom an its possible link to a massive fish kill in Bolinao, Pangasinan, Northern Philippines, *Harmful Algae* 4, pp. 519-524.
- Azanza, R. V., I. Baula, Y. Fukuyo (2006): Seasonal changes in phytoplankton composition in an extensive fish culture area in Bolinao, Pangasinan, Northern Philippines, *Coastal Marine Science* 30 (1), pp. 85-87.
- Verceles, F. L., L. T. McManus, P. M. Alino (2000): Participatory Monitoring and Feedback System: An Important Entry Towards Sustainable Aquaculture in Bolinao, Northern Philippines, *Science Diliman* (July-December 2000) 12:2, pp. 78-87.