

赤潮のモニタリングシステムに対する漂流ブイと無線センサネットワークの適用

Development of the Red Tide Monitoring System using Drifting Buoy and Wireless Networks

芝田 浩¹・三宅央朗²・浜崎 淳³・徳田太郎⁴・松山幸彦⁵・岡辺拓巳⁶

Hiroshi SHIBATA, Hiroaki MIYAKE, Atsushi HAMASAKI, Taro TOKUDA
Yukihiko MATSUYAMA and Takumi OKABE

Red tides off the Japanese coast caused serious damages to aquaculture industries in every year. To reduce fisheries damage due to red tide, it is important to inform short-term scale distribution of red tides for fishermen. We developed a system monitoring data of red tides in real-time. Our system can obtain data from a buoy drifted on the sea. The buoy has a GPS and two sensors that measure temperature and brightness, and can connect to the Internet using mobile phone network. This paper describes a construction of our system, and results from observation in Yatsushiro Sea. According to our results, we could obtain measured data from the buoy in the middle of Yatsushiro Sea, and it was found that movement of the buoy mainly driven by tides current, rather than wind.

1. はじめに

瀬戸内海や九州を中心とした沿岸海域において、夏季に発生する赤潮は、毎年甚大な漁業被害に至る原因の一つであり、重要な社会・経済問題として取り上げられている。赤潮とは、植物プランクトンが大増殖することによって海水の色が、赤褐色や茶褐色に変わることをいう。赤潮は、戦後に多くの漁業被害を伴い頻発するようになった。その原因は、温暖化を含めた地球環境の変化や沿岸海域の工業化による工場排水の影響など、様々な要因が複雑に関わりあっている。各種の排水対策を実施することで赤潮の発生件数がやや減少し、赤潮の監視体制も全国に張り巡らされたものの、依然として毎年のように漁業被害を伴っている。統計が開始された1969年以降の被害総額は、550億円を越えている。特に2009年と2010年の2年間だけでも被害額は85億円となっている。養殖場の被害原因は、赤潮と魚病が以前より知られているが、魚病については各種の感染防止対策や動物医薬品やワクチンの開発により現在ではほとんど問題となっていない。しかし、赤潮については未だに漁業被害を積み上げ続けているのが現状である。

一方、世界の食糧事情では、漁業資源に対して爆発的に需要が拡大している。世界の海域で、自然界で持続再生可能となる範囲をはるかに超えた魚介類の乱獲が行わ

れ、環境のバランスが崩れ漁獲量の衰退が著しくなっている。この環境問題および食糧問題に直面している世界において、持続可能な社会づくりを進める上で、海産物の養殖が重要な解決策の一つとなるのは明らかである。養殖業における被害原因である赤潮への対策を施すことは、社会的な意義が大きく、かつ必要不可欠である。

発生した赤潮の状態を時間経過に沿って調査すると、初期は海水面に近い層を浮遊しており、海流や風の影響により移動しながらやがて消滅することが知られている。赤潮被害とは、発生した赤潮が養殖場に流入することにより、養殖魚がエラの障害を引き起こし大量へい死することである。赤潮被害への対策として、人為的な努力によって赤潮の発生そのものを防止することは、現在のところ非常に困難である。そのため、船舶調査や人工衛星画像で、赤潮の分布や移動状況、海水温などのデータをモニタリングし、時々刻々と変化する赤潮を監視することで、赤潮による被害を最小限に抑える方策が取られている。養殖業者での具体的な対策は、赤潮が養殖施設に近づいた場合に施設（生簀）を比較的酸素濃度が高い深い層に沈め、赤潮の通過を待ち、被害を最小限に抑えている（図-1）。しかし、赤潮は、海岸沿いで発生し滞留することもあるれば、海流に乗り沖合に出ることもあるなど挙動が複雑であり、発生場所・時刻の特定が難しく、漁場への流入は昼夜を問わない。赤潮が漁場に流入した場合、早い時は10分以内に養殖魚がへい死するため、素早い対応が求められる。そのため、24時間の赤潮観測体制が望ましいが、労力やコスト的に実施が困難であり、十分に対応できていないのが実状である。これに対し、近年の情報通信技術の発展と通信機器・通信費用の低価格化により、海域での観測方法についての試みがなされ

1	修(工)	広島商船高等専門学校講師電子制御工学科
2		広島商船高等専門学校産業システム専攻科
3	博(工)	広島商船高等専門学校准教授電子制御工学科
4	博(工)	広島商船高等専門学校准教授商船学科
5	博(農)	西海区水産研究所
6	正会員	豊橋技術科学大学大学院助教工学研究科 建築・都市システム学系

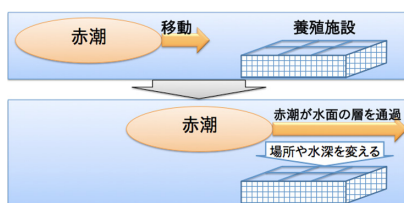


図-1 養殖施設における赤潮被害の抑制

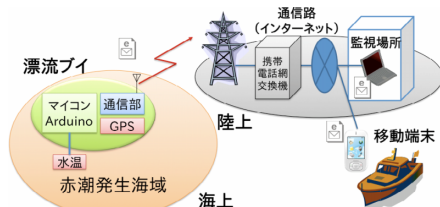


図-2 赤潮モニタリングシステムの概要図

つつある（石井ら，2008；入江ら，2007）。

本研究では、赤潮の状況をモニタリングするシステムを開発することで、養殖業における赤潮による漁業被害低減への適用の検討を目的とする。開発したシステムの概要と観測方法を示すと共に、実海域での観測とその結果から、実際の利用に対して考察した。

2. 観測システムの開発

(1) システム概要

養殖業の赤潮対策の一つとして、被害を細小にするために赤潮をモニタリングし、状況に合わせて養殖設備場所をコントロールしている。本研究では、養殖場近海を監視するための、モニタリングシステムを開発した。赤潮が発生した際にその移動状況をリアルタイムにモニタリングする漂流式の観測ブイを作成し、そのブイには各種センサと観測データを送信する無線通信機器を載せた（図-2）。本システムの使用法としては、赤潮が発生した後、その領域へ漂流ブイを放ち、漂流ブイから送信されるデータに基づき、赤潮の移動経路を観測する。赤潮が現在どの位置に存在し、どのような経路で今後どのくらいの時間で養殖施設へ到達するかを把握する。監視者は、得られたデータを基にして養殖施設をコントロールし、赤潮に対応した被害対策を施す。

(2) 漂流ブイの形状

本システムにおける漂流ブイの形状について述べる。漂流ブイの形状を図-3に示す。漂流ブイを赤潮の発生場所に投下することで、赤潮と共に海上を浮遊して、時々刻々と変化する位置の情報、海水温、照度を観測する。漂流ブイは、センサや通信デバイスを搭載した球状の浮体部分と、表層の赤潮の移動に合わせて追従するための、海水中に位置するドロークで構成される。これらはロー

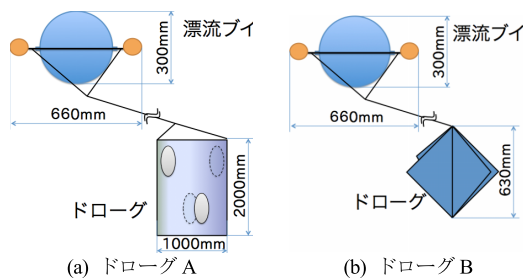


図-3 漂流ブイとドロークの形状

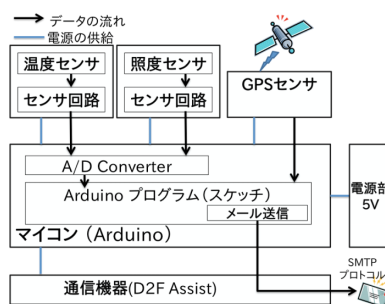


図-4 赤潮モニタリングシステムの概要図

プで連結されており、海流をドロークで捉えることで、漂流ブイが海流にあわせて移動する。このときロープの長さを調整することで、観測したい水深の海流を調査できる。今回は、赤潮の移動に対する追従性を高めるために、開発した2種類の異なった形状のドロークを用いて、実際の海域で実験した。ドロークは、Niilerら（1995）の研究を基に作成した。ドロークAは、円筒形の骨組みにビニールを張り、合計4箇所に穴を配置することで海流を捉え易くしている（図-3(a)）。次に、ドロークBは、ポリカーボネートの板を90°交差させて組み合わせることで海流を捉え易くしている（図-3(b)）。

(3) 漂流ブイのシステム構成

球状の漂流ブイの内部には、データを観測するためのセンサおよび、無線ネットワーク網を利用したデータの送信部を格納している。漂流ブイのシステムの概要を図-4に示す。漂流ブイの位置情報を計測するためのGPS、海水温を計測するための温度センサ、光の強さを計測するための照度センサ、全体を制御するマイコン、取得したデータを送信するための通信機器、および電源を載せた。各センサから得られたデータはマイコン（Arduino）にて処理され、通信機器を使用し、携帯電話の通信網を経由して、電子メールで送信される。

観測されたデータは、監視場所のコンピュータやモバイル機器で確認できる。監視者は、得られたデータを基にして養殖施設をコントロールすることで、赤潮に対応した被害対策を施す。漂流ブイは、養殖業への適用性と船舶航路への影響を考慮し、安価で小型に開発した。



図-5 本システムを使用した現地観測場所 (八代海)

(4) 各種センサ

ここでは、ブイに使用したセンサについて述べる。

- GPSセンサモジュール：GPSセンサは、衛星からの信号を受信し、現在の場所の情報を特定する。今回使用したEM-406aの測定精度は、5 mである。
- 温度センサモジュール：温度の測定は、サーミスタ (103AT-1) を使用した。測定範囲を60℃から-10℃までとし、非線形の特性があるため多項式近似によりデータを処理する。
- 照度センサモジュール：照度の測定には、フォトトランジスタ (NJL7502L) を使用した。本フォトトランジスタは、光が当たり照度が上昇するのに伴い電流が流れる特性を持っている。照度センサは、ブイの下側と上側に2つのセンサを搭載し、その差分から簡易的に海水の濁り具合を検知する方法を考えているが、今回は下側の光センサのみを実装した。

3. 観測方法と対象海域

例年赤潮が発生している実際の海域にて、実際に本システムを動作させることで各種観測を行った。本年度は、対象としている海域で赤潮の発生がなかったため、本システムの動作に関する各種実験を実施した。観測場所は水俣市沖の八代海 (図-5) にて、2回実施した。1回目 (2012年9月27日、28日) では、漂流ブイの動作・機能の確認およびロープ長による漂流速度違いを確認した。ドローグAを使用し、漂流ブイと連結するロープ長を2mと5mの場合について実験した。2回目 (2012年10月24日、25日) では、2mのロープと2種類のドローグを使用し、3つのパターンにおける漂流速度および漂流方向の違いを調べた。3つのパターンとは、ドローグBを直列に2つ連結、ドローグBを1つ、ドローグAを1つの場合である。観測は下記のa) からd) の手順にて行った。これをロープ長とドローグを変えて実施した。

- 船で対象海域まで移動し、漂流ブイを海上に放つ。
- 海上を浮遊している漂流ブイからのデータを取得する。
- 一定時間漂流した後、人手により漂流ブイを回収する。

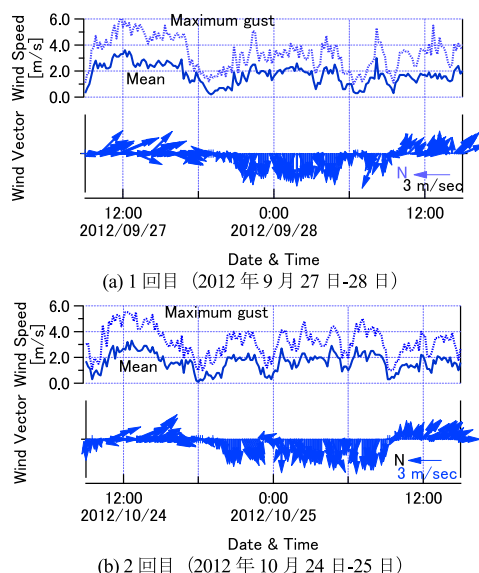


図-6 現地観測近傍の風向風速 (熊本県・水俣)

4. 観測結果及び考察

(1) 観測時における気象条件

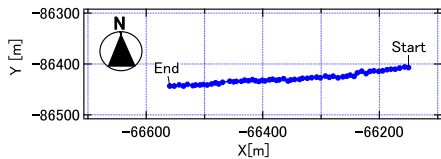
現地における観測時の気象条件として、観測場所の近傍として、熊本県水俣 (気象庁発表) の風向・風速を図-6に示す。観測した日時は、1回目を2012年9月27日の13時から17時までと2012年9月28日の7時から10時まで、2回目を、2012年10月24日の13時から17時までと2012年10月25日の7時から10時までである。

(2) 確認結果

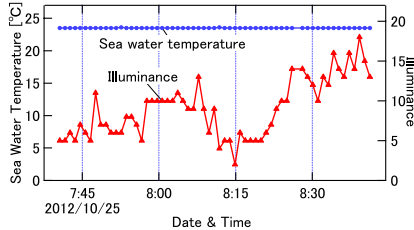
実際に動作させた結果、漂流ブイの位置情報と温度および照度の観測データを得ることができ、正常に機能することを確認できた。漂流ブイから得られた緯度経度のデータから、平面直角座標系 (2系) へ変換したデータを図-7 (a) に示す。漂流ブイを投入した位置から、西の方向に移動していることがわかる。また、同時刻の海水温および照度のグラフを図-7 (b) に示す。照度については簡易的な値の変化のみであり、正確な校正が完了していない。

(3) 漂流ブイとドローグを連結するロープ長の違いによる漂流速度の比較

漂流ブイとドローグAを連結するロープ長が2mの場合と5mの場合における、各緯度経度のデータを平面直角座標系 (2系) へ変換したデータを図-8に、このときの移動速度を図-9に示す。2012年9月27日に実施したロープ長2mの場合では、投入位置から北西方向へ移動しており、2012年9月28日に実施したロープ長5mの場合では、投入位置から北東方向へ移動している。各ロープ長における平均移動速度を表-1に示す。2mと5mを比較すると、2mの方が移動速度の平均値が速い結果となった。



(a) 漂流ブイの位置データ (平面直角座標系・2系)



(b) 海水温および照度

図-7 観測結果 (2012年10月25日)

漂流ブイは海流の各層の状況を示しているものと考えられる。赤潮は表層付近を浮遊することが多く、それに合わせたロープ長を状況に応じて選択する必要がある。調査した日時における水俣の風向風速と比較すると、2012年9月27日の同時刻には北寄りの風、2012年9月28日の同時刻には東から北西寄りの風へ変化していた。漂流ブイの移動方向は、風による影響よりも、海流が強く影響したものと考えられる。

(4) ドローグの違いによる漂流速度の比較

1回目 (2012年9月27日、28日) の観測ではドローグAのみを使用し、2回目 (2012年10月24日、25日) ではドローグAとドローグBの2種類を使用し3パターン (ドローグBを2つ直列に連結、ドローグBを1つ、ドローグAを1つ) について観測実験を行った。各緯度経度のデータを平面直角座標系 (2系) へ変換したデータを図-10に、このときの移動速度を図-11に示す。2012年10月24日では、ブイが投入位置から北方向へ移動しており、2012年10月25日には、ブイが投入位置から西方向へ移動している。各パターンにおける平均移動速度を表-2に示す。ドローグA×1個、ドローグB×2個、ドローグB×1個の順に平均移動速度が速くなる傾向にあった。これは、ドローグの大きさや形状による海流からの抗力による影響の差が関連しているためと考える。しかし、その違いはそれほど大きくなく、移動の軌跡を比較しても大きな違いは見られなかった。さらにその形状を検討し、実際の利用に対してより利便性が高いドローグを採用する。調査した日時における気象庁による水俣の風向風速を確認すると、2012年10月24日の同時刻には北寄りの風、2012年10月25日の同時刻には東から西寄りの風へ変化していた。前回と同様に、漂流ブイの移動方向は、風による影響よりも、海流が強く影響し移動したものと考えられる。

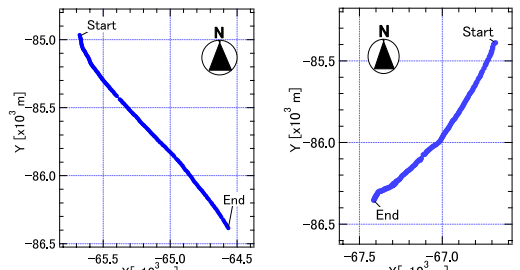
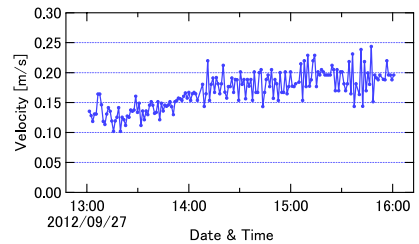
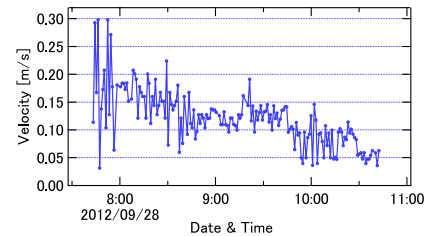
(a) ロープ長 2m
(2012年9月27日)(b) ロープ長 5m
(2012年9月28日)

図-8 1回目の観測における漂流ブイの移動軌跡



(a) ロープ長 2m (2012年9月27日)



(b) ロープ長 5m (2012年9月28日)

図-9 ロープ長の違いによる移動速度の比較

表-1 漂流ブイの平均移動速度 (ロープ長による比較)

ロープ長	平均移動速度	日付
2 m	0.169 m/s	2012年9月27日
5 m	0.121 m/s	2012年9月28日

5. 実利用へ向けたシステムの改善

(1) 漂流ブイへ搭載するセンサ

今回搭載したセンサは、GPS、温度センサ、照度センサを載せた。照度センサについては、上側と下側の2つの照度センサの値の差分を取ることで簡易的に赤潮濃度を推定できるように改善が必要である。これにより、赤潮の濃度推定とともに、漂流ブイが赤潮から外れてしまった際の目安とすることが考えられる。

(2) 漂流ブイとドローグの形状について

漂流ブイとドローグの形状については、今回の実験結果と作成する際の容易さおよび移動や設置の利便性によりドローグBがよいと考える。しかし、実際の赤潮の移動に合わせて、漂流ブイが追従するかは未確認である。

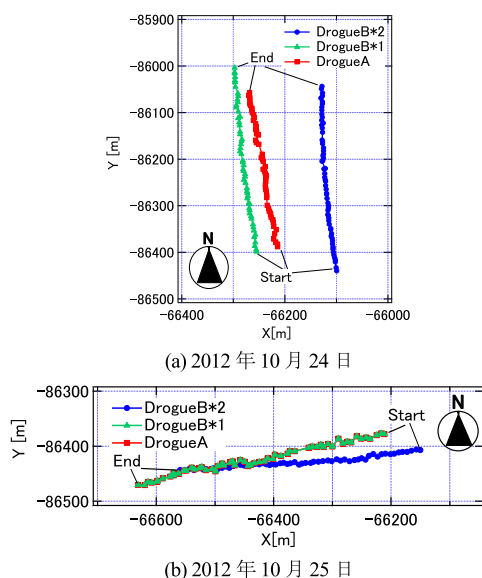


図-10 2回目の観測における漂流ブイの移動軌跡

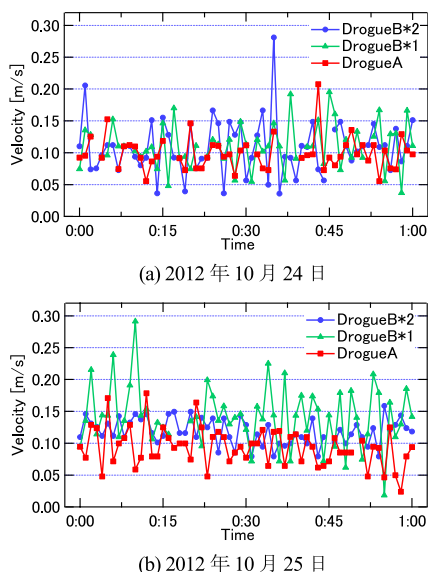


図-11 ドローグの違いによる移動速度の比較

表-2 漂流ブイの平均移動速度 (ドローグの違いによる比較)

パターン	2012年10月24日	2012年10月25日
ドローグB×2	0.108 m/s	0.118 m/s
ドローグB×1	0.111 m/s	0.142 m/s
ドローグA	0.099 m/s	0.094 m/s

め、海流の流向流速との関係を明らかにする必要がある。

また、現在のシステムでは、漂流ブイのシステム格納部分について、防水性を高めるためボルトで締め上げており、開閉するために手間がかかる。利便性を高めるため、開閉機構を再検討する必要がある。

(3) 赤潮に対する追従可能性の検討

八代海の赤潮移動については、粒子追跡実験 (Aoki ら, (2012)) の結果より、表層における水平の物理的な輸送によって再現できることが示されている。実際の赤潮に高い確率で追従するためには、表層近くの水塊をターゲットにし、漂流ブイを複数の場所へ多数投入することで、赤潮へ追従する確率を高めることが出来る。その際には、漂流ブイの作成費用と工数を低減し量産化する必要がある。さらに、ZigBeeやBluetooth等の近距離の無線センサネットワークを応用することで、多数の漂流ブイに対する観測結果の送信を1つの携帯電話の通信機器へ集約することができ、通信費用を抑えることができる。

また、赤潮の自立的な鉛直方向移動については今後の課題であるが、多数の漂流ブイと無線センサネットワークにより、対応することできると考える。

6. 結論

本研究では、養殖業における赤潮に対する漁業被害を低減するために、赤潮の状況をモニタリングするシステムを開発した。2012年夏期に例年赤潮が発生する八代海の海域において、本システムを使用した観測を実施し、視覚的に漂流ブイの移動を表すことができた。さらに、現地での観測により、漂流ブイにおけるドローグと連結するロープ長の違いおよび、ドローグの違いによる移動状況の観測・比較をすることができた。また、観測場所の海水温と照度を観測できることを確認した。

今後は、本システムの観測値と赤潮発生時の流動の状況および海流の流向流速を比較することで、本システムの動作を検証する。さらに、養殖業者において実際に利用されるシステムにするための改善を目指したい。

謝辞：本研究は、環境省の環境研究総合推進費 (RFF-1201) により実施された。現地観測にあたって東町漁業協同組合のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 石井大輔 (2008) : GPS機能付き携帯電話を用いた漂流ブイ観測システムの開発, 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, 9, pp.119-137.
- 入江博樹・三田長久・上久保祐志・斉藤郁雄 (2007) : GPS搭載漂流ブイを用いた八代海の潮流観測システムと数値解析, 信学報, SANE, 106 (471), pp.69-74.
- Aoki K., Onitsuka G., Shimizu M., Kuroda H., Matsuyama Y., Kimoto K., Matsuo H., Kitadai Y., Sakurada K., Nishi H., Tahara Y. (2012) : Factors controlling the spatio-temporal distribution of the 2009 *Chrotonella antiqua* bloom in the Yatsushiro Sea, Japan, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 114(1) 148-155.
- Niiler, P., Sybrandy, A., Bi, K., Poulain, P. and Bitterman, D (1995) : Measurements of the water-following capability of holey-sock and TRISTAR drifters, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 42, issue 11-12, pp. 1951-1955.