

## 野見湾での初夏の流況と水質変動及び赤潮発生を捉える現地観測

山 本 潤\*・佐 伯 信 哉\*\*

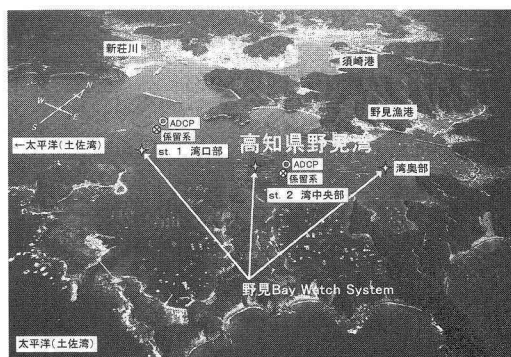
高知県の野見湾において、夏期と秋期の水質・流況観測に引き続き、初夏に観測を実施した。夏期には成層化し大規模な内部潮汐が生じ、秋期には湾内水が停滞する“水止まり”現象が起きる。初夏は成層化がまだ不十分であり、内部潮汐に伴う流れも弱い状態であった。この結果から、内部潮汐は7月に明確となり8月に最大となって9月に終わるということが判明した。この時期に、クロロフィルが夜間に中層で増大し翌日に表層で増大傾向を示し、かつ、降雨後の晴天という条件で赤潮の発生を予測した。概ね予測通り赤潮が発生し、湾奥から湾の北岸を経由して湾外に流出する様子の撮影に成功した。

## 1. 序 論

養殖の盛んな閉鎖性内湾である高知県の野見湾では、夏期には内部潮汐によって表面潮汐の数倍の海水交換があるが、秋期になると内部潮汐が起きなくなり、「水止まり」と呼ばれる現象によって海水交換が不足し水質が悪化する事態が発生する。山本ら (2002, 2003) は 2001 年夏期と 2002 年秋期に観測を行い、そのメカニズムの解明を試みた。本研究では、内部潮汐の季節変化を更に詳しく評価するため、内部潮汐が顕著になる直前の初夏の流況と水質を把握する現地観測を行った。また、初夏に発生し養殖魚に多大な影響を及ぼす渦鞭毛藻やラフィド藻 (緑色鞭毛藻) 類による赤潮を対象に、赤潮発生の前兆とそれに伴う水質変動も把握したので、それらの結果を報告する。

## 2. 現地観測の方法

写真-1 に示す野見湾の湾口部や湾中央部に、前報(山本ら 2002, 2003)と同様の手法で、水温計、塩分計、DOメータ(ワイパー式、蛍光光度式)、水中照度計、クロロフィル計を適宜配置した係留系を設置し、2003年5月26



写真—1 野見湾の全景と観測機器の配置

\* 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所

正会員 (株) 荒谷建設コンサルタント

[元(独法)水産総合研究センター水産工学研究所研修生]

日から7月7日までの約40日間、10分間隔で連続観測を行った。湾口部及び湾中央部には超音波ドップラー流速計(ADCP)を設置し、流速分布を層厚1mで同様に計測した。同時に垂下水質計による水質の鉛直分布の観測と採水による水質分析を行った。また、赤潮発生日の9:00, 12:00, 15:00に航空写真撮影を行い、赤潮の平面分布を把握した。台風4号来襲時に湾口部の係留系を避難させたが、ADCPや湾内の係留系は観測を継続し、データを取得した。

### 3. 現地観測の結果と考察

### (1) 成層化に至る状況

図—1は (a) 初夏, (b) 夏, (c) 秋の表層, 中層, 底層の水温の経時変化を比較したものである。夏には表層と底層で約 10°C 程度の水温差が生じ, 中層以下で内部潮汐に伴う大きな変動が見られた。秋では全層でほぼ同じ水温となり, 内部潮汐に伴う変動は無く, 表層のみ僅かに日変動を示しながら冬に向かい全層で徐々に水温が低下した。初夏の水温の状況としては, 秋とは逆の傾向があるのは当然であるが, 秋期に全層で水温が同じとなり水温が低下したものが, 春になって水温が上昇する過程において, 徐々に表層と底層の水温差が生じ始め弱い躍層が形成されるが, すぐに元の等密度に戻る状態を数回

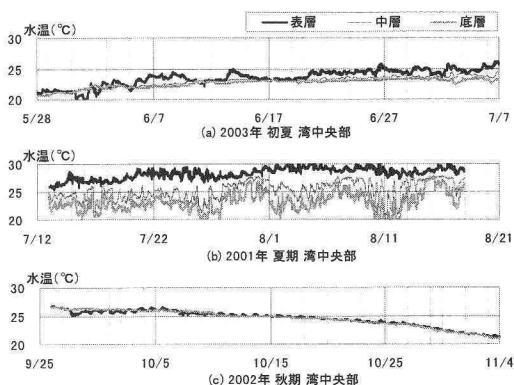


図-1 季節毎の水溫の経時変化

繰り返す、やがて夏の強固な成層状態となった。初夏は、冬の低温状態から夏の内部潮汐が起きる成層期に至る遷移段階であり、6月後半以降は混合状態に戻ることなく夏期の成層状態となった。

## (2) 内部潮汐の発生状況

図-2に季節毎の流速を示す。図-2(c)の夏期では、内部潮汐に伴う流れが顕著であり、底層で湾内方向の流れがある時は、表層では湾外方向へ、底層で湾外方向の流れがある時は、表層では湾内方向へそれぞれ逆向きの流れが生じており、二層流を形成している。また、それらは概ね半日程度の周期で交互に繰り返しており、潮位変動とは連動していない。(f)より流速は $\pm 200 \sim 300$  mm/s程度であった。一方、(d)の秋期では(g)のとおり流速が $\pm 50$  mm/s程度以内に小さくなり、湾内水が停滞する「水止まり」と呼ばれる現象が生じている。(b)(e)の初夏では台風6号が来襲した6月19日午後を除き、両者の中間の様相を呈し、僅かではあるが内部潮汐に伴う弱い二層流が見られる。成層化の状況及び内部潮汐の発生状況から、内部潮汐は7月に明確となり始め、

8月に最大となって9月に終わることが確認された。

## 3. 台風4号来襲時の状況

図-3は台風4号来襲時の状況をまとめたものである。(a)では5月31日の台風通過に伴い海面気圧が極小値を示し、(b)湾口部、(c)湾中央部ともに上層では湾内方向、下層では湾外方向の極めて強い流れが観測され、(d)湾口部では、主に表層から400 mm/sの流速で流入し、底層で300 mm/sの流速で流出している。湾中央部でも同様の傾向を示している。いずれも4~6時間程継続した。図-2(b)(e)での6月19日午後の台風6号来襲時にも同様の傾向が見られる。さらに、(f)に見られる5月30~31日の激しい降雨により、(g)で5月31日に表層付近の塩分濃度が約20 psu近くまで低下し、元の塩分濃度に回復するまで数日間を要した。

また、(e)のとおり5月31日の台風4号来襲時の水温分布の特徴として、台風の接近時即ち上陸の1~2日前

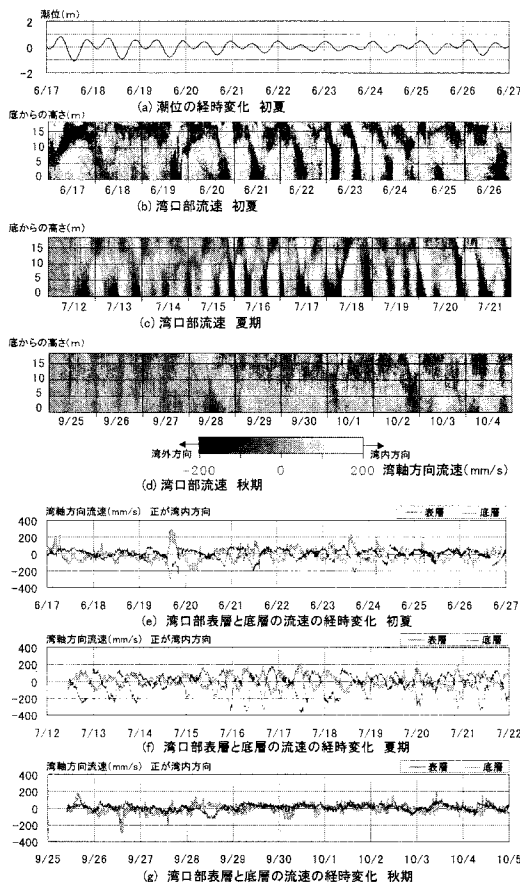


図-2 季節毎の流速 (湾口部) の経時変化

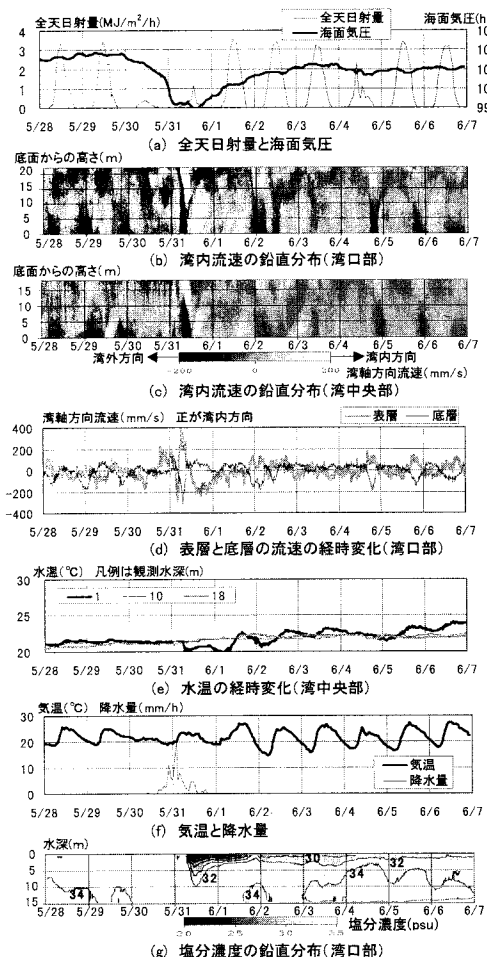


図-3 台風4号来襲時の状況

には、徐々に表層と底層の水温差が形成されつつあった状態が一変し、表層は塩分濃度の低下に伴い一時的に水温分布の逆転が生じるものの、中層と底層で水温が一定となった。台風接近に伴う外海の擾乱が野見湾の混合をもたらしたと言える。6月19日の台風6号来襲時にも同様の傾向が見られた。台風通過後は天候の回復と共に再び表層と底層で水温差が生じ始める。

#### 4. 赤潮発生に関する観測結果と考察

##### (1) 赤潮発生の予測方法

野見湾において初夏に発生する主な赤潮プランクトンは、ギムノデニウム・ミキモトイ、アレキサンドリウム・カテネラ、コクロディニウム・ポリクリコイデス、プロセントラム・デンタータム（以上渦鞭毛藻）、ヘテロシグマ・アカシオ、シャトネラ・マリナ（以上ラフィド藻）等がある。いずれも鞭毛を有し顕著な鉛直運動を行う（福代ら, 1990；本城・松山, 2000）ことで知られている。それらの増殖には対数増殖型と急速増殖型があり、ヘテロシグマ・アカシオで1.35回/日の増殖速度を有する報告や室内培養でその数倍以上との報告事例（岡市, 1997）がある。このことは、これらの種の赤潮が突然発生するのではなく、増殖を繰り返し徐々に増加する等の何らかの前兆が現れることを意味している。

また、降雨による塩分低下は、河川水による陸域の栄養塩類の供給を意味するが、塩分の低下自体が刺激となって植物プランクトンの増殖が促進されるとの報告（岡市, 1997）もある。いずれにしても、当地域では降雨後の晴天が続けば赤潮の危険性があると言われており、通常の天気予報で概ねの見当がつく。撮影にあたっては、撮影当日の天候が良好であることの他に、航空機の手配の都合上、数日前に撮影準備を申し込んでおき、撮影日の前日に撮影実施の最終確認を行う必要があった。

そこで、赤潮発生時に合わせて航空写真撮影を行うため、当地域に整備された水質モニタリングシステム（野見 Bay Watch System）が地元ケーブルテレビやインターネット上に配信するデータ（上野ら, 2002）を注視し、中層のクロロフィルが夜間に増大し、翌日の日中に表層で増大する傾向が見られ始める状況において、降雨後に晴天が継続すれば赤潮発生の条件を満たし、赤潮が発生すると予想した。図-4の野見 Bay Watch Systemのデータを注意深く観察すると、(c) 湾奥部において6月21日にその傾向が見られ、中層において、夜間にクロロフィルのピークが生じ、翌日の日中に表層のクロロフィルが上昇し、渦鞭毛藻やラフィド藻等による鉛直運動が示唆され、この直後に撮影準備を申し込んだ。なお、この時点で図-4の翌日以降のデータ及び図-5(c)の全データは未知である。表-1に天気予報の代わりに地上

観測日表の天候を示した。6月22～24日の降雨後に晴天が継続するとの予報から、6月26日以降の数日間が赤潮発生日の可能性が高まった。夜間にクロロフィルのピークが再び見られ始めた6月27, 28日に、撮影当日の天候も考慮し、29日の撮影実施を決定した。撮影は赤潮着色域の時間変化を比較できるように、9時, 12時, 15時の3回行った。

##### (2) 赤潮発生の状況

写真-2～5は平成15年6月29日赤潮発生時の状況の航空写真である。赤潮域がわかりやすくなるように色調を補正した。

午前9時頃には写真-2のとおり湾奥部(写真-2中央

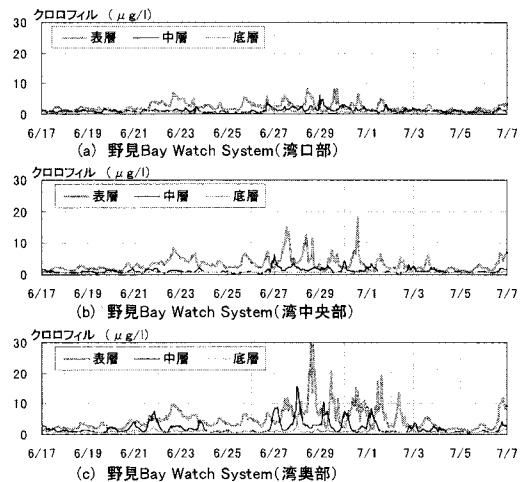
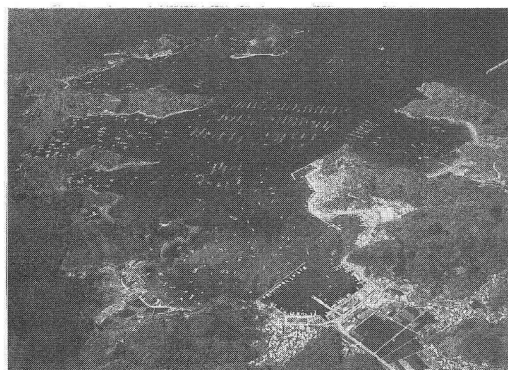


図-4 野見 Bay Watch Systemのクロロフィル値

表-1 赤潮発生時の天候（高知地方気象台日表）

|       | 3:00 | 9:00 | 15:00 | 21:00 |
|-------|------|------|-------|-------|
| 6月18日 | 雨    | 雨    | 雨     | 曇     |
| 6月19日 | 曇    | 曇    | 雨     | 曇     |
| 6月20日 | 晴    | 晴    | 晴     | 晴     |
| 6月21日 | 晴    | 薄曇   | 曇     | 曇     |
| 6月22日 | 曇    | 雨    | 雨     | 曇     |
| 6月23日 | 曇    | 曇    | 雨     | 雨     |
| 6月24日 | 曇    | 雨    | 曇     | 雨     |
| 6月24日 | 雨    | 薄曇   | 薄曇    | 晴     |
| 6月26日 | 晴    | 快晴   | 薄曇    | 晴     |
| 6月27日 | 晴    | 曇    | 曇     | 曇     |
| 6月28日 | 曇    | 曇    | 雨     | 曇     |
| 6月29日 | 晴    | 薄曇   | 薄曇    | 薄曇    |
| 6月30日 | 薄曇   | 曇    | 雨     | 雨     |
| 7月1日  | 雨    | 雨    | 雨     | 曇     |



写真—2 野見湾全体の航空写真 6月29日9:00



写真—5 湾奥部の航空写真 6月29日15:00

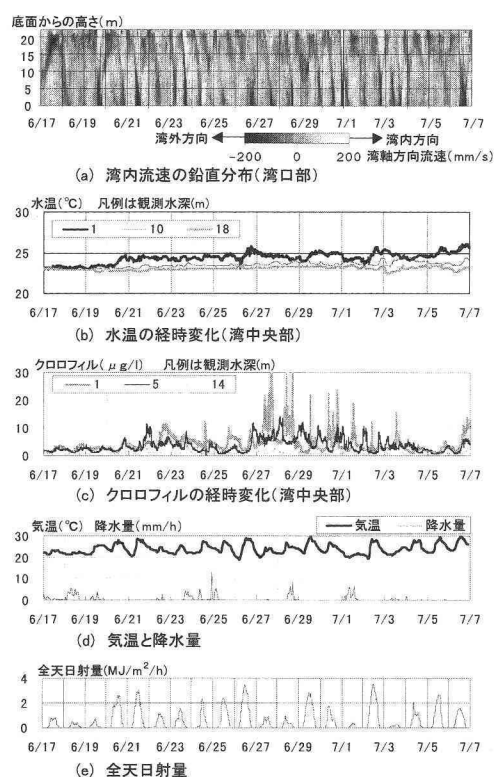


写真—3 野見湾全体の航空写真 6月29日15:00



写真—4 北側枝湾付近の航空写真 6月29日15:00

下側)のみが着色域であったが、午後3時には写真—3のとおり着色域が北側枝湾(写真—3右手前側)を經由し湾外に広がっていることがわかる。着色部を拡大した写真—4, 5から、発生域は湾奥部と思われ、湾内の流れにより北部沿岸から湾外へ流出していることが明白である。この時発生した赤潮は高知水試らの調査で、ラフィド藻(緑色鞭毛藻)ヘテロシグマ・アカシオであり、最高細胞数が113,000 cells/mlであった(高知水試ら, 2003)と報



図—5 赤潮発生時の状況

告されている。

図—5は観測期間のうち赤潮が発生する前後のデータを並べたものである。観測開始後20日間程度は湾内のクロロフィルは低迷していたが、6月後半から上昇傾向に転じ、この時に図—5(d), (e)のとおり6月22~24日の降雨後に晴天という条件が見られ、(c)の6月27日頃よりクロロフィルが大幅に増大した。

図—5(c)を各層毎に見ると、植物プランクトンの鉛直運動が示唆される。例えば、図中の水深5mのデータを

指す細実線は6月21日夜にピークを示し、その後、表層のデータを指す太線が日中にピークを示している。同様の現象は6月27日～7月3日まで毎日見られる。水深9mのクロロフィルも5m層と同様の傾向を示しており、夜間に水深5～9m付近で一度植物プランクトンの増殖が起きるか、その水深帯に集積し、その後、日中に表層付近で急激な増殖を引き起こす鞭毛を有する赤潮プランクトン特有の鉛直運動が認められた。ただし、赤潮着色域はパッチ状またはスジ状に分布することもあるため、クロロフィル計の周りをそのパッチ部分が通過しただけで値が急変する場合もあり、その解釈には注意を要する。

以上より、内部潮汐がまだ弱く海水交換が不十分な時期において、水温が上昇し生産性が高まり、モニタリングシステムで夜間に中層でクロロフィルが増大し、翌日中に表層で上昇する傾向が見られ、かつ、降雨後の晴天という条件を満たせば、概ね予測どおりに赤潮が発生することを確認できた。

## 5. おわりに

本研究では、初夏の水質・流況のデータを取得し、夏期の内部潮汐及び秋期の“水止まり”現象との比較を行ってきた。また、初夏の赤潮発生の前兆及び発生時の状況のデータを取得した。本研究の主要な結論は以下の通りである。

- ・初夏の水温鉛直分布について、観測開始当初は秋期と同様に鉛直方向に水温差は見られず低温であったものが、徐々に夏の成層状態へと遷移した。その過程において、成層化しつつあったものが再び元に戻る状態を数回繰り返し、やがて夏期の強固な成層状態に近づいた。
- ・流速鉛直分布についても、成層化し内部潮汐が顕著である夏期と、躍層が破壊され湾内水が停滞する“水止まり”が見られる秋期の状態の中間的な傾向が見られた。
- ・内部潮汐は7月にその存在が明確となり始め、8月に最大となり、9月に終わることが確認された。
- ・台風来襲時には、表層から40 cm/s程度の流速で流入

し、中・底層から流出する状態が継続し、形成されつつあった成層構造が崩れ混合状態となった。

・赤潮発生について、夜間に水深5～9m付近でクロロフィルの増大が生じ、その翌日の日中に表層で増大するという鞭毛を有するプランクトン特有の鉛直運動を示す傾向が見られ、この時に降雨後に晴天が継続するという条件があれば、予想通り赤潮が発生した。これらのことから、気象予測と水質モニタリングシステムの監視により、赤潮の発生予測の可能性が示唆された。

**謝辞：**本調査・研究は、数値計算等の基礎部分が運営費交付金「閉鎖性水域における流動・水質変動機構の定量的評価手法の開発」、現地観測等の現場応用的部分が水産基盤整備調査費委託「漁港水域における水質・底質改善技術の開発」により行われた。

本調査を進めるにあたり、須崎市水産課、高知県水産試験場、高知県中央漁業指導所、高知県漁港課、野見漁業協同組合、大谷漁業協同組合の方々には多大なる協力を頂いた。紙面にて心よりお礼申し上げる。

## 参考文献

- 上野成三・永田良助・山崎英活・中山哲蔵 (2002): 赤潮・貧酸素をリアルタイムに観測する野見湾漁場環境情報システム (nomi BAY WATCH STSTEM) の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1531-1535.
- 岡市友利 (1997): 赤潮の科学 (第二版), 恒星社厚生閣, pp. 255-264.
- 高知県水産試験場・高知県中央漁業指導所 (2003): 6月27日に行った野見湾プランクトン検鏡結果について, 平成15年6月27日付け須崎市水産課宛事務連絡.
- 福代康夫・高野秀昭・千原光雄・松岡敷充 (1990): 日本の赤潮生物—写真と解説—, 内田老鶴圃, pp. 346-347.
- 本城凡夫・松山幸彦 (2000): 赤潮植物プランクトン, 月刊海洋, 号外 No. 21, 総特集海洋植物プランクトン II, pp. 76-84.
- 山本 潤・中山哲蔵・時吉 学・宮地健司 (2002): 野見湾における夏期の流況と水質変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1086-1090.
- 山本 潤・時吉 学・佐伯信哉・上野成三 (2003): 閉鎖性内湾における秋期の水止まり現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 941-945.