

# 海洋性昆虫ウミアメンボ*Halobates japonicus* Esaki (Hemiptera: Gerridae) の群れの野外における動画解析試験

井川 輝美<sup>a)</sup>・岡部 秀彦<sup>b)</sup>・青木 優和<sup>c)</sup>・渡辺 守<sup>d)</sup>

<sup>a)</sup> 盛岡大学文学部

<sup>b)</sup> 産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門 〒305-8565 茨城県つくば市東1-1 中央第五センター

<sup>c)</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科 〒415-0025 静岡県下田市 5-10-1 筑波大学下田臨海実験センター

<sup>d)</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科 〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

## 緒 言

動物行動学・生態学の研究において、動画による記録と解析はきわめて有用な手段である。実際、人間の視覚、特に動的な視覚とその記憶は観察者の心理的状態や先入観に大きく影響され、しばしば、事実と異なる認識・記録がもたらされる。また、定量性に関しても情況と個人差によるばらつきが大きく、精度を保証すること自体が困難である。そのため、種々の撮影機器を用いた画像計測が実験・調査に導入されている。動物の動きの撮影は16ミリカメラ、スチルカメラ（ストロボ撮影によって）、ビデオカメラ（アナログビデオカメラ、デジタルビデオカメラあるいはデジタルムービーカメラも含めて）等によって試みられてきた。ビデオカメラは、解像度の点で16ミリカメラ、スチルカメラに劣り、記録の精度に限界があった。しかし、近年、解像度の上昇、小型化による携帯性・操作性の向上そして低価格化によりビデオカメラは動物の行動・生態の撮影機器の主流となっている。例えば、室内実験ではビデオカメラによって体長1cm程度のアメンボの水面での滑走メカニズムの解析<sup>1)</sup> や蚊の飛跡の解析<sup>2)</sup>が行われている。

一方、ビデオカメラによる解析が必須であるにもかかわらず、動物の群れの定量的解析は実施例が限られている分野である<sup>3)</sup>。鳥の群翔<sup>4)</sup>、昆虫の群飛<sup>5)~7)</sup>、魚の群泳<sup>8), 9)</sup>のように多くの群れは三次元の広がりをもつ。群れを構成する多数の個体のそれぞれの三次元位置を時々刻々推定することは、様々な理由から困難な問題であ

る。精密な位置座標の獲得を可能とする光学的三次元位置推定方法は基本的には三角法の原理に基づくもので、同時に二方向ないし三方向から群れを撮影して、それぞれのカメラで得られた二次元の位置情報をもとに三次元情報を再構築するものである。上記の報文で提示された群れの三次元位置推定方法の応用例が少ない理由は、群れの広がりや特性、群れの形成される環境が種によって異なるために、撮影機器・撮影方法あるいは三次元位置推定プログラムを状況に合わせて様々に工夫する必要があるためと考えられる。特に、野外での群れの計測では、それぞれの種が群れを形成する環境で三次元位置推定が可能な画質の画像を得るために個別の状況に応じたカメラや撮影条件の設定が必須となるからである（例えば、蚊の群飛の場合、暗闇の中で飛翔する蚊の鮮明な画像をいかにして得るか<sup>3)</sup>、等）。

群れの三次元位置推定のために開発された方法の中で、著者らのうち岡部と井川が開発した基準座標提示器を用いる方法は、撮影現場でカメラの厳密な位置決めを必要とせず、固定したカメラにおいて鮮明な群れの画像と標準座標点の画像が得られれば確率論モデルに基づくコンピュータープログラムによって群れのメンバーの三次元位置が推定できるので、比較的他の生物に応用しやすい<sup>3), 5), 10)</sup>。

著者らは石垣島川平湾に生息する海洋性昆虫ウミアメンボ (*Halobates japonicus* Esaki) の群れの画像計測を試みた。ウミアメンボ (*Halobates*) 属46種はすべて海洋性であり、そ

のうち5種は外洋に生息する唯一の昆虫グループであるという点で極めてユニークな存在である<sup>11)</sup>。しかし、その生態は未だに知られていないことが多い。ウミアメンボ属は様々な形態の群れを形成することが観察されており、群れはウミアメンボ属の生活史の中で重要な役割を果たすと予測される。したがって、群れ行動の定量的把握はその生態の理解に重要である。

ウミアメンボは、海表面で二次元の群れを形成するため、三次元計測より方法的には容易である。しかしながら、光や波や流れの交差する海表面は個々のアメンボの鮮明な画像を得るには極めて困難な環境である。また、撮影機器を流れのある海中に三脚等を設置して撮影を行うという問題も生じる。本稿では、二次元測定に合わせた群れの測定法の原理を述べ、実際の群れの撮影試験・行動の計測について報告する。

### 画像測定法とカメラキャリブレーション

一般に撮影された画像から物体の空間座標を求めるには、複数台のカメラによる同時撮影をおこなうか、一台のカメラと構造化された照明が必要である。しかしながら今回は測定対象が（想定される最終精度から逆算される許容範囲内で）ほぼ一平面上に拘束されるという特殊な条件により、1台のカメラの普通の1ショットで対象点の空間座標を求めることが可能である。簡単に述べれば、カメラ視野内の1点  $u = '(u, v)$  は透視原点  $O$  と  $u$  を結ぶ（半）直線  $l$  上にその像を与えた実体の点が存在することを意味する。一方、実体の点（ウミアメンボ）は海表面という特定の平面  $S$  に拘束されているため、点の実体空間での位置  $x = '(x, y, z)$  は  $l$  と  $S$  の交点として求められる。実際のアルゴリズムを与える具体的なフォーミュレーションとしては、以下になる。

まず4次元ベクトル空間  $R^4$  を  $'(cx_1, cx_2, cx_3, c) \approx '(x_1, x_2, x_3, 1)$ （ただし  $c \neq 0$ ）、で定義される同値関係  $\approx$  で割った商空間を  $R^3$  に対する同次座標空間と呼び、 $x = '(x, y, z)$  に対して  $(x, y, z, 1)$  を含む同値類をその同次座標  $\hat{x} = [x, y, z, 1] \Leftrightarrow '(x, y, z, 1)$  と記す。記号  $\Leftrightarrow$  は、表示された各成

分の値が等しいことを示すものとする。

また  $4 \times 4$  行列についても、

$$\begin{pmatrix} ca_{11} & ca_{12} & ca_{13} & ca_{14} \\ ca_{21} & ca_{22} & ca_{23} & ca_{24} \\ ca_{31} & ca_{32} & ca_{33} & ca_{34} \\ ca_{41} & ca_{42} & ca_{43} & c \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 1 \end{pmatrix}$$

（ただし  $c \neq 0$ ）、なる同値関係による商環を同次行列環と呼び、普通の  $4 \times 4$  行列  $A = (a_{ij})$ （但し  $a_{44} \neq 0$ ）に対応する同値類をその同次行列  $\hat{A} = [a_{ij}] = [a_{ij}/a_{44}] \Leftrightarrow (a_{ij}/a_{44})$  と記す。

一般に、空間内の座標点  $x = '(x, y, z)$  が撮影されて画面点  $u = '(u, v)$  を与えるとき、 $\hat{u} = '[u, v, 1]$  として

$$\hat{u} = D\hat{P}\hat{x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \tilde{P}\hat{x} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \quad (1)$$

と書くことができる<sup>12)~15)</sup>。さらに、水面は  $z \equiv 0$  平面としてよいので、改めて  $x = '(x, y)$ 、 $\hat{x} = '[x, y, 1]$  として、

$$\hat{u} = \hat{Q}\hat{x} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{24} \\ p_{41} & p_{42} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \quad (2)$$

となる。

撮像された画像から物体の空間座標を求めるには、そのときカメラがどのように置かれどのような角度からどのような倍率で撮像したかを正確に知る必要があり、これは上記の行列の各成分  $q_{ij}$  の値を具体的に確定することに対応する。この情報を求める作業を一般にカメラキャリブレーションと呼ぶ。これにはいくつかの方法があるが、野外で携帯できる撮影システムという条件下では、基準座標提示器（相対的にきちんと座標のわかっているいくつかの空間点を明確に提示する器具）を撮影し、その画像内の各空間点の画面座標から逆算する方法が、最も現実的である。その原理は次のようになる。

水面上の座標が既知の 4 点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$  をカメラで撮像してカメラ座標で  $(u_1, v_1), (u_2, v_2), (u_3, v_3), (u_4, v_4)$  を得たとする。(2) 式を具体的に書き下すと、  
 $u_i = (q_{11}x_i + q_{12}y_i + q_{13})/(q_{31}x_i + q_{32}y_i + 1),$   
 $v_i = (q_{21}x_i + q_{22}y_i + q_{23})/(q_{31}x_i + q_{32}y_i + 1),$   
 $i = 1, \dots, 4$

となり、これを変形すると

$$\begin{aligned} q_{11}x_i + q_{12}y_i + q_{13} - q_{31}x_iu_i - q_{32}yu_iu_i &= u_i, \\ q_{21}x_i + q_{22}y_i + q_{23} - q_{31}x_iv_i - q_{32}yu_iv_i &= v_i, \\ i &= 1, \dots, 4. \end{aligned}$$

すなわち

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_1u_1 & y_1u_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & x_1v_1 & y_1v_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_2u_2 & y_2u_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & x_2v_2 & y_2v_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_3u_3 & y_3u_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & x_3v_3 & y_3v_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_4u_4 & y_4u_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & x_4v_4 & y_4v_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{11} \\ q_{12} \\ q_{13} \\ q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \\ q_{31} \\ q_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{pmatrix}$$

…… (3)

となる。 $x_i, y_i, u_i, v_i$  はすべて与えられているので、この線形方程式を解くことにより、容易に  $q_{ij}$  を求めることができる。

実際には、式 (1) の  $\hat{P}$  で各成分が任意の値を取る場合、回転変換・平行移動変換・射影変換・一様なスケーリング変換以外に X 軸方向と Y 軸方向とで異なる比率のスケーリング変換と剪断変形変換が含まれることができる。理想的なカメラによる写像では、後 2 者の変換は含まれないので、これらが含まれないことを要請する 2 個の式を加えることにより、既知の 3 点のカメラ座標のみですべての  $q_{ij}$  を求めることは、原理的には可能のように思われる。しかしながら、現実のカメラでは僅かながら様々な光学収差が存在することと、カメラ画面での座標値は丸め誤差などを含むことから、後 2 者の変換が実際には僅かに含まれている。この情勢下で後 2 者の変換が含まれないことを条件づける式を連立させて解くと、解が存在しなくなったり、逆に複数存在するなどの不都合が生じ、また数值解として求める際、精度的にも不安定が生じ

る。このため 4 点を提示する基準座標提示器を用いて (3) 式を素直に解く方法を採用するのが、妥当と言える。また、多くの画像計測・コンピューターグラフィクスの教科書<sup>13)~15)</sup> では、必要な数の 5 倍程度の基準座標点を取って、得られた冗長な連立方程式の 2 乗ノルム最小解を使うように勧めているが、これは特に考えないで基準座標点群を取るとベクトル幾何学的な相互独立性が乏しくなり情報が十分に得られずかつ解くべき方程式が悪条件になりがちであることによるもので、独立性を考慮して基準座標点群を選んだ場合は、過剰点の必要は無い。

今回は基準座標提示器として正方形の 4 頂点にチェック模様のマーク（写真 1 参照）を置き、その中心を提示座標点とした。正方形の 4 頂点  $(0, 0), (a, 0), (0, a), (a, a)$  を用いた場合に (3) 式左辺の行列が（海表面が射影原点  $O$  を通るような、特殊な場合を除き）正則でありしかも数値解法的にも好条件な行列となるため、(3) 式の解が安定して求められることも確認した。想定される視野の大きさに合わせて、約 30cm 角・3mm 厚のスチロールプレート（写真 1）と、約 60cm 角・5mm 厚の木製のフレームの 2 つを準備した。いずれもマークの位置は海表面から 2~3mm 上にあり、ウミアメンボの背中の海表面からの高さとほぼ同じと考えられる。4 つのマークの内、3 つは黄色に黒、1 つは白に黒のチェックで、後者を原点  $(0, 0)$  として用いる。マークの位置は 0.2% 以下の誤差で、一辺 300.0mm/571.0mm の正方形を成していることを、使用前・使用後に正方形の各辺と対角線の長さを工作用鋼板台上で 1 級検定鋼尺で計測した値から算定して確認した。ただし (3) を解くための実際の計算にはここで測定した値から算定した座標値そのものを用いる。こちらは使用前・使用後で測定精度 (0.1%) 内での差は認められなかった。今回使用したカメラで得られる画像のピクセル解像度は縦横 500~1200 程度であるので、この誤差はほぼ 1 ピクセル程度に相当する。したがって、画面で写された座標提示器のマーク位置を読みとる際の精度とほぼ同じといえる。

## 海洋性昆虫ウミアメンボの群れの野外における動画解析試験（井川輝美・岡部秀彦・青木優和・渡辺 守）

**石垣島川平湾沿岸における動画像計測試験****I. 撮像機材**

- 石垣島川平湾における2005年の調査<sup>16)</sup>から、
- 川平湾のいくつかの地点ではウミアメンボ *H. japonicus* が生態調査に十分な個体数で生息しており、群れを形成すること、b) 同年の調査地でウミアメンボの群れの撮影試験が可能であること、c) 撮影対象となるウミアメンボは明るい灰色をしているが、バックの反射が強い場合には黒い点にも見えること等が判明したので、以下のような撮像機材を準備した。
  - アルミ梁材（三脚の足が写らざるとしても可能な限り真下を撮影するために、2台の三脚に渡して中央にカメラを真下に向けて取り付けられるようにした）。
  - 150cm 以上の高さにできる大型三脚 2 台。
  - 前節に述べた基準座標提示器 2 個（30cm、60cm）。写真 1 に一辺 30cm の基準座標提示器を示す。
  - 白っぽいウミアメンボを見やすくするためバックグラウンドシートとして海底に敷く約 180cm 四方の黒い布（布には 5 × 5 の行列状に約 20cm のロープを縫いつけ、そのロープで長さ 180cm の太いステンレスの鎖 5 本を布に縛り付け、海底に安定して広げて沈めるようにした。布が流されないよう鎖をステンレス製の U 字形のピトンで海底に固定した）。
  - ディジタルカメラ Pentax Optio 750。普通のビデオ対応（解像度 640 × 480 ピクセル、30fps）の動画を撮影するために準備した。
  - ディジタルカメラ Minolta Dimage F300。ハイビジョン720P規格（解像度 1280 × 720 ピクセル、30fps）での動画解析の可能性を評価するために、それをやや上回る解像度 1280 × 960 ピクセルの画像を15fpsで（但し、1秒間15枚の連写しかできない）撮影するために準備した。
  - テレビモニター（ターゲット上方にカメラを設置するので、ファインダーやカメラ背面のモニターを見ることが困難になるので、カメラから背面モニターに常時出力されるビデオ信号と同じ内容の信号を少し離れた場所で見るため。実際には安価な携帯型DVDプレーヤーのビ

デオ入力表示機能を利用した。また、離れた位置から撮影をON/OFFするために、両ディジタルカメラにそれぞれリモコンを準備した）。

全体の座標計測システムは図 1 に示すとおりである。いずれも、旅客機手荷物として運搬でき、野外での携行・組み立てが容易であることを重視して選択・製作した。

**II. 計測試験における確認事項**

緒言に述べたように、生物の画像計測において有意義な結果を得るためにには、フィールドと計測システム両者が撮影に好適な条件を満たしていることが重要である。今回の試験では、以下の疑問点の確認を目標とした。

- 計測フレーム（上に述べたように、2台の三脚の間に梁をかけてその中点からほぼ真下を撮影できるようにしたもの）が、安定に設置できる状況か？また、フレームにどのような改良が必要か？
- 海底に敷く黒い布は、撮影の背景としてウミアメンボを見やすくする効果はあるか？また、これがウミアメンボの行動を変えてしまうことはないか？
- 現場の光条件で好適な撮影ができるか？また露出は今回用意したカメラでは手動固定でできないので、自動露出でも画像解析に適した画像が得られるか？
- ウミアメンボの群れのサイズや位置等はどのようなものであり、どの程度の広さの範囲を撮像する必要があるか？
- 個々のウミアメンボを識別するには、どの程度の解像度が必要か？また海表面のゴミや波と（肉眼あるいは画像解析による自動認識で）弁別できなくなることはないか？
- 普通の動画のコマ数 30fps でウミアメンボ個体の動きを追跡できるか？

**III. ウミアメンボの群れの撮影手順**

撮影手順は、おおむね以下のようであった。

- 調査地点にできるだけ近接した場所まで自動車で移動し、後は徒步で各機材・採集用具などを運搬する。

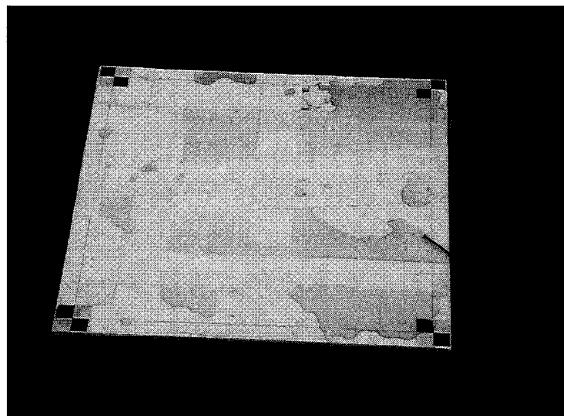


写真1：一辺30cmの基準座標提示器。

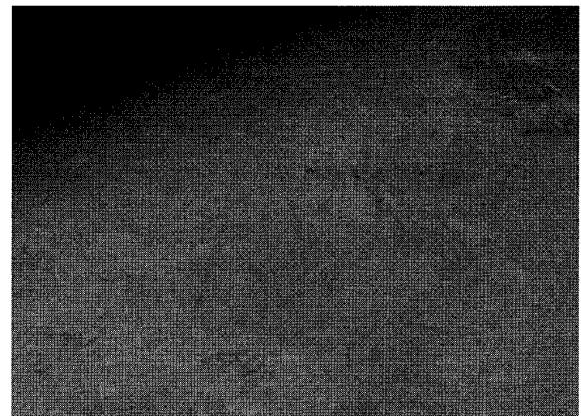


写真2：Optio 750の30fpsムービーで捉えた  
ウミアメンボの群れの全体像。

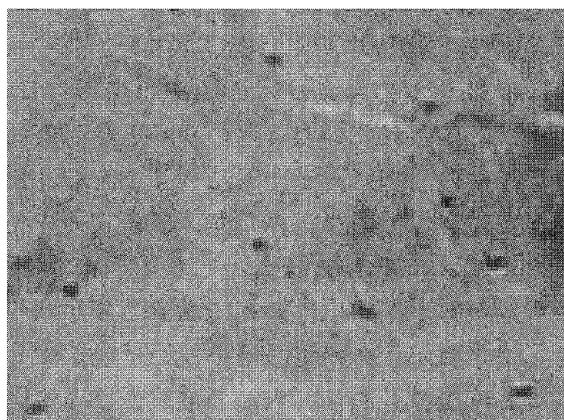


写真3：ほぼ写真2と同じ視野での Dimage F300  
による連写の部分拡大。

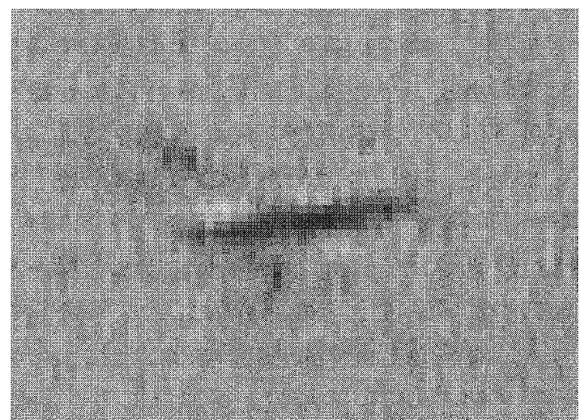


写真4：Dimage F300で狭い視野で撮影した場合  
(画像を部分拡大。画面には1個体が写っている)。

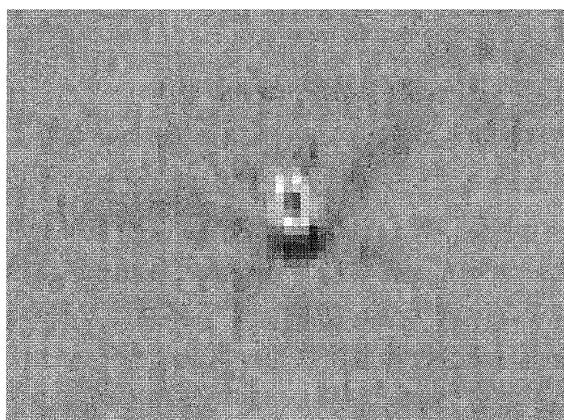


写真5：写真4と同じコマの別の部分の拡大  
(画面には1個体が写っている)。



写真6：一定の空間を占有し遊泳しているように見  
える個体(右の白い点)。左の黒く見える個体を追  
い回すような行動がムービーに記録された。

## 海洋性昆虫ウミアメンボの群れの野外における動画解析試験（井川輝美・岡部秀彦・青木優和・渡辺 守）

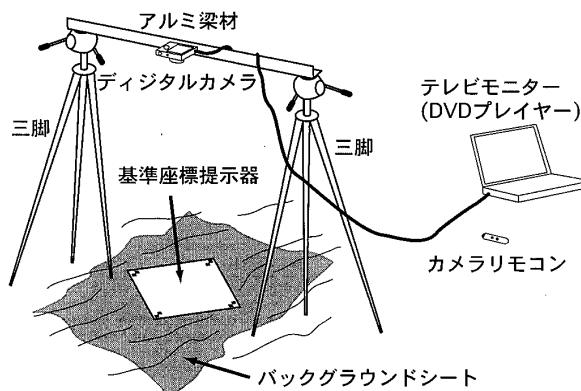


図1：座標計測システムの模式図

- 2) 撮影システムを組み立て、ウミアメンボが群れを形成している撮影ポイントを決定する。
- 3) ズームを目分量で適切な位置にセット・ロックし、三脚を両端に付けた梁の真ん中を持って撮影ポイントの真上にできるだけ体を離しながらセットし、各三脚の足を調整して安定に置く。但し、足場の関係からこのような置き方ができない場合もあり、その際は三脚に直接カメラを取り付けて、足下から少し離れた場所を斜めに撮影することとなった。このような場合でも、基準座標提示器を撮像することによってウミアメンボの位置の推定が可能である。しかし、実視野が著しく歪んだ四辺形になり、測定精度が場所により変わったり含まれる正方形領域が小さくなってしまい、解析が煩雑になる等の問題が生じるので、このような撮影条件は可能な限り避けることとする。
- 4) 計測装置の設定作業でウミアメンボの群れは散っていくが、設定終了後、速やかに群れは再形成される。モニターと肉眼とでウミアメンボの群れを確認して、リモコンで撮影を開始する。上述した三脚に直接カメラを取り付けて斜めに撮影する場合は、ウミアメンボの群れを乱さずに直接カメラのモニターで確認し、カメラのシャッターボタンで撮影を開始できる。
- 5) 数分 (Pentax Optio 750の場合) ないし数連写 (Minolta Dimage F300の場合) 撮影したら、最後に、視野サイズに応じた基準座標提示器 (写真1) を視野中央に浮かべて (実際には不規則な流れがあるので、人手でそっと支持する必要があった)、数秒／数コマ撮ってから撮影

を終了する。

#### IV. 撮影試験の実施

撮影は2006年11月1日から3日にかけて、川平湾東岸において各日干潮ピーク前後の約4時間に行われた。撮影場所は海食崖の下でその頭上・背後に樹木や草本の茂る岩混ざりの砂浜(2005年の調査における調査区 NA-1<sup>16)</sup>)であった。11月2日のみ、マングローブの散在する砂浜に幅1mほど水路状に干満の海水が出入りする場所(2005年の調査区 MA-1<sup>16)</sup>から30mほど離れた地点で、MA-2とする)でも撮影試験を行った。

以下に撮影の概略を述べる。

##### 1) 11月1日 (撮影場所: 調査区 NA-1)

ウミアメンボの群れは水深の深い場所(1m以上)に形成されていた。黒いシートを海底に広げ、二台の三脚で支えた梁にカメラを取り付け直下方視野で撮影を試みたが、ほの暗い光条件でウミアメンボも黒い点として見えるので、白い背景の方が撮影には適当であることが判明した。また風がきわめて強く、撮影機材が吹き倒される可能性もあり、水面の波紋がウミアメンボを見分けにくくするなどの問題があった。一方、強い潮流が風とは反対の方向に流れていたが、ウミアメンボは風・潮流いずれにも逆らって地面に対して一定の位置で群れを維持しており、木の影などを標識としている可能性<sup>5)</sup>が改めて確認された。

##### 2) 11月2日 (撮影場所: 調査区 NA-1)

前日使用した黒いシートに白いビニールクロスをステープラーで取り付けたバックグラウンドシートを作製し、これを水底に沈め撮影を行った。ウミアメンボの群れの形成される位置は前日より水深の深い方向へ若干移動しており、海面から十分な高さに撮影システムをセットするのが困難であったが、視野と解像度の適合性を調べるための、2種のカメラによるいくつかの撮影条件(撮影距離・ズーム比の違い)でのテスト撮影を行うことができた(写真2, 3)。

##### 3) 11月2日 (撮影場所: 調査区 MA-2)

調査区 NA-1における撮影の後、調査区 MA-

2で撮影試験を行った。一定の空間を占有し遊泳しているように見える個体の行動が観察されたので、これを撮影した。MA-2はどちらかと言えば日向であり、逆に少し黒い背景の方が好都合のようであったが、水深が極めて浅く(5~15cm)シートを敷けなかった。しかしながら、海底の砂泥を足でかき回すと、酸化されて灰黄色を呈する表面の下の黒色の嫌気性泥土が舞い上がって海底に広がり一様な灰褐色のバックグラウンドを提供してくれるため、この方法で灰色をバックとした撮影を行った(写真4~6)。

#### 4) 11月3日(撮影場所:調査区NA-1)

前日に比べウミアメンボの密度は低かったがそれでも群れは存在していた。群れの位置が前日よりさらに水深の深い(1m以上)場所に移動していたため、三脚を両端に付けた梁による撮影は海面との距離が近すぎて不可能であった。このため、三脚に直接カメラを取り付けて斜めに撮影する方法に切り替えて、撮影を行った。バックグラウンドシートは敷くべき場所の水深が深すぎて使用できなかった。斜め方向での撮影では海表面の反射が邪魔になる可能性があるため、偏光フィルターの効果を試験した。

### 結果および考察

#### I. 計測試験による確認・検討事項

ウミアメンボの群れを撮影する環境および撮影装置・撮影方法について以下の知見と検討事項を得た。

1) 撮影環境として、NA-1は水深が深い場所(1m以上)が多く、固定した撮影の足場を確保しにくい。また、湾内の小島と岸の狭間に位置しているため潮流も風も強く、撮影上種々の不都合があった。MA-2は逆に水深が浅すぎて、海底にシートを敷くのが困難である。しかしながらウミアメンボの生息場所は限られており、撮影システムの改良と撮影方法(特にカメラを保持する方法)の改良で対応するのが現実的な対策となろう。また前節Ⅲで述べたカメラを直接三脚に取り付ける撮影法は、実視野の形状の問題はあるにせよ、撮影ポイントの制約が減り即応性に長じており撮影チャンスをより多く得

ることができるため、今後はこの撮影法も最初から考慮する方が良いであろう。

2) 調査区NA-1は海食崖の下で岸近くに木が茂っている場所で、撮影時にやや日陰になっていたためかウミアメンボは黒い点のように写り、準備した黒い背景では明らかにコントラストが付きにくかった。このため、急遽白いビニールクロスを海底用シートの反対側にステープラーで留め、白黒両面で使えるように準備した。翌日白バックで撮影を試みたが、写真2, 3に示すように、かなり深い場所であったためシートよりも海面の日光の反射がコントラストを出すのに役に立っているように見える。ただ、海面が明るく見えること自体に海底の白が寄与しているとも考えられる。

調査区MA-2は日向であり海底も明るい色をしていたため、黒い背景が必要だと思われたが、水深が浅すぎシートを敷けなかった。海底の砂泥をかき回すと下層の黒色泥土が舞い上がって沈み暗色のバックグラウンドとなるので、この方法で撮影を試みた(写真4~6)。撮影画像を見ると、意図に反してこのバックはウミアメンボより明るく、白色バックの役割をしていた。また、ウミアメンボの体色にはバラツキがあり、(特に胸部が)白く見えるもの(写真5の個体と写真6の右の個体)と、同じ光条件下で常に黒く見えるもの(写真4の個体と写真6の左の個体)があることがはっきりとした。

いずれの撮影においても、均一な背景を提供しコントラストを良くするためにとった処置(背景となる海底に白いシートを敷く・海底をかき回す)は有効であった。また、これらの処置はウミアメンボの行動に大きな影響は与えず、処置後まもなくほぼ同じ場所で同じ規模の群れが再現した。

3) 光条件については、比較的暗い場所(調査区NA-1)と比較的明るい場所(調査区MA-2)いずれでも、自動露出による撮影で特に問題は無かった。また、斜め方向の撮影で海面に波が多い時には、偏光フィルターで海面反射を低減させるのが有効であることも判明した。ただし今回は3日とも曇りないし雨であり、晴天下で

## 海洋性昆虫ウミアメンボの群れの野外における動画解析試験（井川輝美・岡部秀彦・青木優和・渡辺 守）

の撮影試験は出来なかった。

4) 群れのサイズは季節、環境条件、群れの構成メンバー等によって異なると思われるが、今回の調査で撮影した群れは直径 15cm～35cm 程度であり、地面に対してほぼ一定の位置を保っていた。群れの周辺に、流されたり他個体との近接で飛び退いたりして群れから飛び出した個体の存在するゾーンがあるが、このゾーン自体に明確な外部境界があるかは不明である。群れを視野の中央に確実にとらえることができるなら、ある程度このゾーンを含んだ 50～70cm 角の視野があれば、群れ内部の個体の運動と群れからの出入りを観察できると思われる（写真 2）。

5) 今回撮影・捕獲したウミアメンボの体長は約 4～6mm であり、撮影画像の 1 ピクセルが 1mm 角であれば、細長い点として（雌成虫は幼虫や雄成虫と比較してかなり丸いが）確認可能である（写真 2, 3）。1 ピクセル = 0.3mm 角の解像度であれば、大きい個体の場合は脚がある程度確認できるので（写真 4, 5）、ゴミ等と弁別可能である。ただし、1 ピクセル = 1mm 角の解像度でも、人間が動きを見ればウミアメンボであることは判別できる。齢・性に関しては、判別基準が生殖器なので、この程度の解像度では全く区別できない。ただし、大きさによって若齢幼虫（1～3 齢）は推定できるかもしれない。

1 ピクセル = 1mm 角とすれば、普通のビデオ対応の 640×480 ピクセル画像は 64×48cm の視野範囲に対応するので、上記4) の検討から、1 つの群れとその周辺を何とか撮影できる。さらにハイビジョン 720p 規格 1280×720 ピクセルの画像であれば、ある程度解像力ないし視野範囲の余裕をもって撮影が可能になると考えられる。

6) 15fps の Dimage F300 の連続写真では、コマ間の個体移動距離が群れ内での相互の間隔に匹敵ないしそれを上回るため、個々の追跡は全く不可能であった。30fps の Optio750 の映像をスロー再生しても、しばしば個体の追跡は不可能になるが、数秒ほどは追跡できることも多く、

ある程度軌跡データとして使えるものが得られそうである。但し、人間の肉眼での追跡は、無意識のうちに動画像の様々な特徴を認識して利用しているが、自動認識はこういった面では人間に及びもつかないことを考えると、自動認識による追跡はかなり困難である。60fps であれば自動認識でもある程度追跡できる可能性はあるように思われた。

## II. ウミアメンボの行動

現地での肉眼による観察と群れの画像をパソコン上で様々な再生速度・拡大率で観察することから、ウミアメンボの行動に関する次の知見・課題が得られた。

1) 調査区 NA-1 では、ウミアメンボが高密度の群れを形成しているのが観察・撮影された。各個体は群れ内で激しく動いており、平均秒 2 回程度で互いに至近距離になってお互いに飛び退いているように見える。それに比較すると、群れ外への出入りの頻度はかなり小さい。群れ内の個体の分布パターンはランダム以上に一様であるように思われる。このような分布パターンの成因は、ウミアメンボは周囲の環境で目立った存在（たとえば、日光のスポットや特定の形状をした物体等）を標識として群れを構成するが、群れ内ではある距離以内の近接は避ける行動を取ることに由来すると推定される。ウミアメンボの群れは水表面の流れにかかわらず地面に対する絶対座標でほぼ一定の位置を保って継続しており、ウミアメンボが樹木の影などを標識としている可能性が高い<sup>5)</sup>。

2) 11月 2 日の調査区 MA-1 での撮影では、形狀から雌成虫と推定される一匹のウミアメンボが 25cm×40cm 程度の範囲をおおむね 8 の字型に遊泳していた。この場所の水表面の流れはきわめて緩やかであったとはいえ、観測・撮影を継続した約 5 分間の間に少なくとも数 m 流れていた。それにもかかわらずこのウミアメンボはかなり正確に一定の絶対位置の遊泳範囲を維持し、他の個体がその位置空間に近づき、個体間距離が近接すると互いに反発する行動を示した。近づいた個体（延べ 5 匹）はすべてその場

から去っていった。したがって、一見するところの雌成虫の一連の行動は一定の空間を占有し、他のウミアメンボから防衛する行動のように思われた。しかし、調査区 MA-1 で頻繁に観察された至近距離での個体同士の回避行動である可能性も否定できない。ウミアメンボにおいて個体が一定空間を占有する行動が普通に見られるのかどうか、そして、その生物学的意義については今後の研究課題である。

### 謝 辞

川平湾でのウミアメンボ調査に際して貴重なご協力をいただいた高木拓之氏に心から感謝申し上げる。川平湾での調査に参加した院生・学生諸氏（筑波大学大学院・阪本真吾、筑波大学・岩崎洋樹、入江萩子、盛岡大学・佐々木幹雄）には、ウミアメンボの撮影作業に多大なご協力を頂いた。ここに御礼申し上げる。

### 引 用 文 献

- 1) Hu, D., L. Chan, J. W. M. Bush (2003) The hydrodynamics of water strider locomotion. *Nature* (London) 424 : 663-666.
- 2) Dekker, T., M. Geier and R.T. Carde (2005) Carbon dioxide instantly sensitizes female yellow fever mosquitoes to human skin odours. *J. Exp. Biol.* 208 : 2963-2972.
- 3) Ikawa, T. and H. Okabe (1997) Three-dimensional measurement of swarming mosquitoes— A probabilistic model, measuring systems and example results. Parrish, J.K. and W. M. Hamner (eds.) In "Animal Groups In Three Dimensions" pp. 90-104. Cambridge Univ. Press, Cambridge U.K.
- 4) Major, P. F. and L. M. Dill (1978) The three-dimensional structure of airborne bird flocks. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 4 : 111-122.
- 5) Ikawa, T., H. Okabe, K. Urabe, T. Mori and T. Ikeshoji (1994) A method for reconstructing the three-dimensional positions of swarming mosquitoes. *J. Insect Behavior* 7 : 237-248.
- 6) Shinn, E. A. and G. E. Long (1986) Technique for 3-D analysis of *Cheumatopsyche pettiti* (Trichoptera: Hydropsychidae) swarms. *Env. Ent.* 15 : 355-359.
- 7) Okubo, A., D. J. Bray and H. C. Chang (1981) Use of shadows for studying the three-dimensional structure of insect swarms. *Ann. Ent. Soc. Am.* 74 : 48-50.
- 8) Pitcher, T. J. (1975) A periscopic method for determining the three-dimensional positions of fish in schools. *J. Fish. Res. Can.* 32 : 1533-1538.
- 9) Cullen, J. M., E. Shaw and H. A. Baldwin (1965) Methods for measuring the three-dimensional structure of fish schools. *Anim. Behav.* 13 : 5534-543.
- 10) 岡部秀彦・井川輝美・赤見仁・相坂登 (1992) ベイズ推定法マッチングによる立体視とその応用. 繊維高分子材料研究所報告 169 : 105-115.
- 11) Andersen, N. M. and L. Cheng (2004) The marine insect *Halobates* (Heteroptera: Gerridae): Biology, adaptations, distribution, and phylogeny. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 42:119-180.
- 12) Roberts, L. G. (1965) Homogeneous Matrix Representation and Manipulation of N-Dimensional Constructs. Documents MS1405, Lincoln Laboratory, M.I.T., Cambridge, Massachusetts.
- 13) Rogers, D. F. and J. A. Adams (1976) Mathematical Elements for Computer Graphics. McGraw-Hill, Inc. New York.
- 14) 谷口慶治 (編) (1996) 画像処理工学－基礎編. 共立出版、東京.
- 15) 佐藤 淳 (1999) コンピュータビジョン－視覚の幾何学. コロナ社、東京.
- 16) 井川輝美・諏佐晃一・渡辺守 (2006) 海洋性昆虫ウミアメンボ *Halobates japonicus* Esaki (Hemiptera : Gerridae) の群れと繁殖器官に関する予備的研究. 盛岡大学紀要, 23 : 103-108