

報 文

フェロモントラップに捕獲されたコクゾウムシのImageJを用いた半自動計数法の開発

曲山 幸生*, 今村 太郎, 古井 聡, 宮ノ下 明大

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門
〒305-8642 茨城県つくば市観音台2-1-12

Development of a semi-automatic method for counting maize weevils, *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Dryophthoridae), captured in pheromone traps

Yukio Magariyama*, Taro Imamura, and Satoshi Furui, and Akihiro Miyanoshita

Food Research Institute, National Agriculture and Food Research Organization, 2-1-12
Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642

Abstract

We developed a semi-automatic method for counting maize weevils captured in pheromone traps using techniques of image analysis. In the method, the area of particles corresponding to insects was calculated by “Analyze Particles” in “ImageJ” and then the number was estimated based on the area. To succeed in counting, a suitable trap for this method needs to be chosen. This method can also apply to many stored insect pests. If an application program based on this method will be developed and implemented in smartphones and tablet computers, improvements in integrated pest management is expected.

Key words: *Sitophilus zeamais* (コクゾウムシ), pheromone trap (フェロモントラップ), image analysis (画像解析), ImageJ, semi-automatic counting (半自動係数)

貯穀害虫は、食糧の損失、殺虫剤の残留、薬剤抵抗性昆虫の発生、食品への混入といった問題で、私たちが悩ませている¹⁾。しかし、最近になって物理的、化学的、生物的な様々な方法を総合的に組み合わせて貯穀害虫を管理する方法論、総合的病害虫管理 (IPM;

Integrated Pest Management) が発展してきた¹⁾。IPMにより過度な農薬やエネルギーの使用を避け、環境負荷を低減させることができるとされている¹⁾。

IPMを成功させるためには正確な害虫の発生状況を把握する必要があり、トラップやサンプリングによる

* 連絡先 (Corresponding author), maga@affrc.go.jp

監視が最初のステップである^{2), 3)}。管理対象としている場所における害虫の詳細な発生状況の調査は、複数のトラップを空間的に適切に配置し、それらのトラップに捕獲された害虫の個体数を適切な時間間隔で計数したデータが求められる。

通常、トラップに捕獲された害虫の計数は手作業によって行われているが、自動的に個体数を計数するツールがあると便利である。特に、一つのトラップに多数の個体が捕獲されている場合、手作業と自動計数では効率に大きな差が生じると考えられる。

収穫前の農作物の害虫に対して、自動計数の研究がいくつか報告されている。アブラナ科植物を食害するコナガ (*Plutella xylostella*) を、人工合成性フェロモン剤を使った水盤式トラップで捕獲し、それを自動計数するシステムが開発されている⁴⁾。このトラップには他の昆虫等が混入するので、画像処理が必要だが、明るさの影響を除去するために、画像の色をRGB (赤Red, 緑Green, 青Blueの輝度で表す方法) からHIS (色相Hue, 彩度Saturation, 輝度Intensityで表す方法) に変換⁵⁾し、色相画像を用いてコナガを識別している。この自動計数システムの正答率は約91%であったと報告されている。また、果菜類の害虫であるハモグリバエ類の自動計数の研究もある⁶⁾。この研究では、黄色粘着プレートに捕獲されたハモグリバエ類をインターネットカメラによって撮影し、テンプレートマッチングという画像処理方法によって計数する。この方法のユニークな点は、ハエが微小であるため、1個体ずつ判別するのではなく、マッチングの得点の合計を捕獲数としていることで、結果は必ずしも整数にならないことである。解像度が十分に得られない画像には有効な方法だと考えられる。

収穫後の害虫に対しても、トラップを使った発生状況の監視が行われている。例えば、コクゾウムシは日本では玄米貯蔵庫や精米所に分布する主要な貯穀害虫として知られ、倉庫では粘着トラップでモニタリングが行われている⁷⁾。しかし、トラップに捕獲された個体数の自動計数法に関する報告はない。

そこで、本研究では、コクゾウムシを例に、トラップに捕獲された貯穀害虫をデジタルカメラで撮影し、PCを用いた画像解析によって半自動的に個体数を計数する方法を開発した。さらに、手作業による計数結果と比較し、開発した方法の性能を評価した。

実験方法

1. 対象害虫

対象とした害虫は、コクゾウムシ *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Dryophythininae) とノコギリヒラタムシ *Oryzaephilus surinamensis* (Coleoptera: Silvanidae) である。コクゾウムシは玄米貯蔵庫に生息し、本研究でトラップに捕獲されたものを対象とした。ノコギリヒラタムシは著者らの研究室で継続的に飼育しているものを使用した。

2. トラップ機材

コクゾウムシの実験に使用したトラップ機材は、床置き型コクゾウムシ用フェロモントラップ (富士フレーバー, トリオス (コクゾウ)) で、プラスチック製ケースの底面に紙製の粘着紙 (9 cm × 6.5 cm) を装着する構造になっている。誘引剤の主成分は雌雄が誘引される本種の集合フェロモン (5-hydroxy-4-methyl-3-heptanone)⁸⁾ である。屋内環境でのトラップの有効範囲は半径約 5 m である。

ノコギリヒラタムシの実験に使用したトラップ機材のケースはコクゾウムシ用と同じで、誘引剤だけが異なる (富士フレーバー, トリオス (ノコギリヒラタムシ))。誘引剤は2種類で、集合フェロモン類縁体と食物誘引物質である。

3. 害虫の捕獲

コクゾウムシの捕獲に関しては、2016年5月19日から6月14日にかけて、茨城県南部の玄米貯蔵の低温倉庫下屋の本庫扉の両側床面に、コクゾウムシ用トラップをそれぞれ1個ずつ設置し、回収した。

ノコギリヒラタムシの捕獲に関しては、幅、奥行き、高さがそれぞれ約30cmのプラスチック製密封容器に、床面中央にノコギリヒラタムシ用トラップを1個設置した。密封容器のふたには、害虫が出入りできないように網で覆った空気穴が付いている。密封容器にノコギリヒラタムシを100個体放ち、3日間放置後、回収した。

4. 写真撮影

粘着紙に捕獲されたコクゾウムシを、室内で、コンパクトデジタルカメラ (RICOH CX3) を使って、照明の反射が映り込まないように注意して、三脚用いずに本体のシャッターボタンを手動で押して撮影した。

5. 開発環境

プログラミング言語 (Java 1.8.0_91 (32_bit)), 画像処理アプリケーション (ImageJ 1.51a)ⁱⁱ⁾, 表計算アプリケーション (Microsoft Excel 2016 (32_bit)) をインストールしたPC (HP Pavillion Elite HPE-390jp, Intel Core i7 CPU 930 2.80GHz, 24.0 GB, Windows 10 Pro 64bit) で, 半自動計数法の開発をおこなった. ImageJは, NIHがMacintosh用に開発した画像処理アプリケーションNIH Imageを, Java上, つまりWindowsやLinux等の様々なOS上で動作するように改良したフリーの画像処理アプリケーションである. 生物学においては標準的なツールで, 細胞数を数えたり, 粒子径を求めたり, 電気泳動パターンを解析したりといった, 様々な場面で利用されている⁹⁾.

6. 計数法の比較

本研究で開発した半自動計数法を, 計数結果の値と処理時間の2項目について, 7名 (男4名, 女3名)

の試験者が実際に作業をして, 手作業による計数法と比較した.

手作業による計数法の評価では, 二つの評価用の画像 (図1) をそれぞれA4サイズで印刷し, それを手作業で計数した. 計数の際, ペンでチェックするなど用紙への記入は, 自由に行ってよいことにした. 計数時間は数え初めから終わりまでとし, ストップウォッチ (SEIKO, TIME KEEPER ViB) を使用して測定した.

半自動計数法の評価では, 最初にPCに評価用の画像 (図1) を保存しておいた. 使用したPCは半自動計数法を開発した環境と同じで, 開発したマクロを利用して計数作業を, 手作業計数と同様に7名の試験者がそれぞれ実行した. 計数時間はImageJを立ち上げてからExcelで結果が表示されるまでとし, ストップウォッチ (SEIKO, TIME KEEPER ViB) を使用して測定した.

実験結果

1. トラップによるコクゾウムシの捕獲

回収したトラップに捕獲されたコクゾウムシを図1に示す. 二つのトラップを比較すると, 明らかに捕獲された個体数に差があった. 捕獲数の少ない場合 (図1a) と, 多い場合 (図1b) の両方とも, 本計数法の評価に用いた.

2. 解析アルゴリズムの開発

解析対象の画像において, 背景 (使用したトラップの粘着紙は白色) に比較して像の色 (コクゾウムシの体色は茶褐色から黒色) は濃いので, 簡単な二値化 (輝度の違いによって領域を分けること) によってコクゾウムシ部分を抽出できると考えられた (図2a). しかし, トラップに捕獲された個体の密度が高くなると互いに接触し, 複数個体が1粒子として認識されてしまう場合が出てくる. したがって, そのような粒子が何個体から構成されているのかを決定する何らかの方策が必要になる. 本研究では, 個体どうしが上下に重なり合っている部分は無視できるほど小さいと仮定し, 抽出されたコクゾウムシ画像の面積から個体数を推定する方法を採用し, ImageJとExcelを用いて自動計数プログラムを開発した.

簡単なサンプル画像 (図2a, 評価用のサンプル画像図1bの一部) を用いて, 具体的な操作手順を以下に説明する.

- (1) 元画像の読み込み (図2a)
- (2) 8-bitグレイ画像への変換 (図2b)

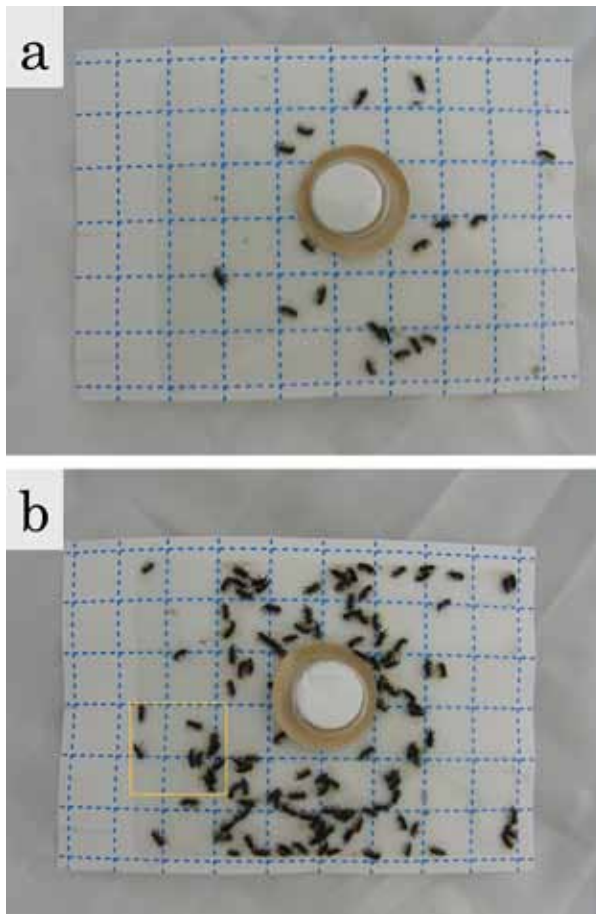


図1 トラップに捕獲されたコクゾウムシの画像

(a) 捕獲数の少ない例, (b) 捕獲数の多い例. 四角は, 図2aの位置を示す.

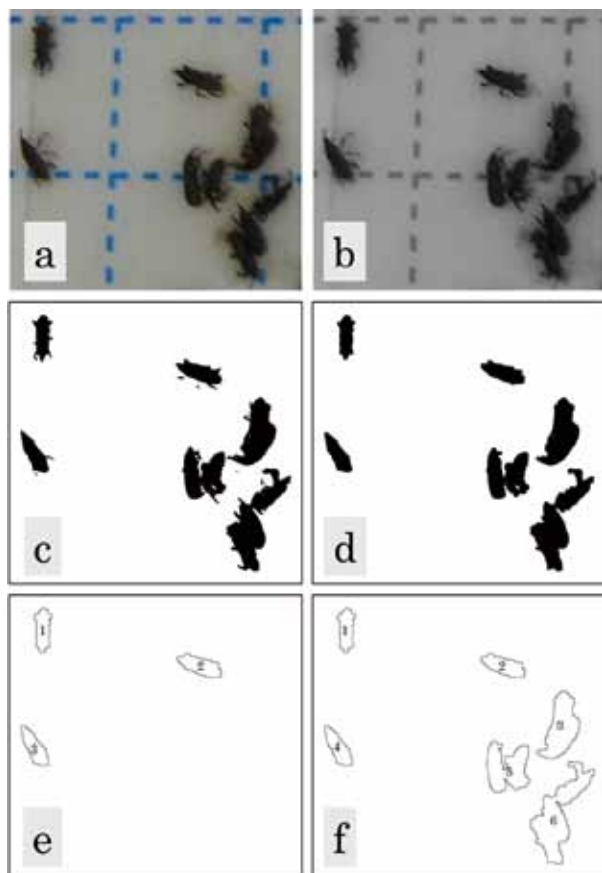


図2 画像解析の各過程の画像

(a) 元画像 (図1bの一部), (b) 8-bitグレー画像, (c) 二値化画像, (d) ノイズ除去後の画像, (e) 孤立個体のアウトライン, (f) 全個体のアウトライン.

(3) 二値化 (図2c)

閾値はImageJのsetAutoThreshold (“Minimum”) (二峰性分布を仮定し, 最小点を閾値とする方法) で自動的に決定した. 結果は白い背景と黒い物体 (コクゾウムシ) に分けられた画像になる.

(4) ノイズ除去 (図2d)

コクゾウムシに接触している微小なごみ (飛来物等) を除去するために, ImageJのErode (浸食: 黒い物体の境界部からピクセルを除外する処理) を3回実行後, Dilate (拡張: 黒い物体の境界部にピクセルを追加する処理) を3回実行した.

(5) 孤立個体の抽出 (図2e)

新たな条件で撮影した画像を解析する場合, 適当な孤立した個体を選択し, ImageJのAnalyze Particles (粒子解析) を実行し, 1個体分の面積を求めておく. この面積を基に, コクゾウムシの大きさの粒子を抽出するために, 抽出する面積の範囲を決定した. 今回の撮影条件では1500~3500ピクセルとした.

表1 個体数の判定結果

孤立個体 (図2e)		全個体 (図2f)		
粒子番号	面積	粒子番号	面積	判定個体数
1	2245	1	2245	1
2	2586	2	2586	1
3	2292	3	6376	3
		4	2292	1
		5	6193	3
平均	2374	6	9602	4

粒子番号は図2e, 図2fに記載されたものに対応している. 判定個体数は, 各粒子の面積を孤立個体の平均面積で割って整数に丸めた値である. 面積はピクセル単位.

改めて, 画像全体に対して, ImageJのAnalyze Particles (粒子解析) を実行し, コクゾウムシ1個体分と推定される粒子だけを抽出した. 記録する結果は, 面積と重心位置とした. 後の工程で, この結果は1個体分の面積の平均値を求めるために使った.

(6) 全個体の抽出 (図2f)

ImageJのAnalyze Particlesを実行し, 1個体分の面積以上の粒子 (この場合は面積1500ピクセル以上) をすべて抽出した. 記録する結果は, 面積と重心位置とした.

(7) 計数結果 (表1)

操作5で得られた孤立個体 (粒子数3) の平均面積 (2374ピクセル) を, コクゾウムシ1個体の平均面積と仮定した. 操作6で抽出した粒子 (粒子数6) それぞれに対して, 平均面積で割った値 (四捨五入した整数値) を, 個体数と判定した. 例えば, 粒子番号3は複数の個体が接触して1粒子として抽出されているが, 半自動計数法ではコクゾウムシ3個体が凝集した粒子であると判定された. 結果として, サンプル画像に含まれるコクゾウムシの総個体数は13と判定された.

ImageJ上で行う操作のうち2から6をImageJマクロで記述し, 自動実行できるようにした. 表2はマクロソースコードである. 同様に, Excel上で行う操作7をExcelマクロで記述し (表3), 自動的に実行できるようにした. これにより, 少ない操作で計数作業を実行できるようになった. ただし, 撮影条件 (カメラ, 撮影距離, 倍率等) を変更した場合, 操作5で必要な孤立個体の面積の範囲を修正する必要がある.

3. 半自動計数法の評価

本研究で開発した半自動計数法を評価するために, 実際に現場に設置したトラップに捕獲されたコクゾウ

表2 コクゾウムシ計数のための ImageJ マクロのソースコード

```

//
//      トラップに捕獲されたコクゾウムシの計数
//
//
//      全工程（無停止）
//
macro "Count-all" {
// 初期設定
    directory = "C:¥ImageJ¥workspace¥";
    id0 = getImageID();
//8-bit グレースケール
    run("Duplicate...", " ");
    run("8-bit");
    id1 = getImageID();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step1.jpg");
// 二値化
    run("Duplicate...", " ");
    setAutoThreshold("Minimum");
    setOption("BlackBackground", false);
    run("Convert to Mask");
    id2 = getImageID();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step2.jpg");
// ノイズ除去
    run("Duplicate...", " ");
    run("Erode"); run("Erode"); run("Erode");
    run("Dilate"); run("Dilate"); run("Dilate");
    id3 = getImageID();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step3.jpg");
// 単独個体の抽出
    run("Set Measurements...", "area center redirect=None decimal=3");
    run("Analyze Particles...", "size=1500-3500 show=Outlines display exclude clear");
    id4 = getImageID();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step4.jpg");
    selectWindow("Results");
    saveAs("Results", directory + "Results1.txt");
// 全個体の抽出
    run("Duplicate...", " ");
    selectImage(id3);
    run("Set Measurements...", "area center redirect=None decimal=3");
    run("Analyze Particles...", "size=1500-Infinity show=Outlines display clear");
    id5 = getImageID();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step5.jpg");
    selectWindow("Results");
    saveAs("Results", directory + "Results2.txt");
}

```

表3 コクゾウムシ計数のための Excel マクロのソースコード

```

'
' 個体数の見積もり
'
Sub CountEstimation()
'
'   Dim sPath As String
'   Dim sh0 As Excel.Worksheet
'   Dim sh1 As Excel.Worksheet
'   Dim i, n As Integer
'   Dim s As Double
'
' データの入力
    sPath = ActiveWorkbook.Path
    Workbooks.Open Filename:=sPath & "¥Results1.txt", Format:=1
    Set sh0 = Workbooks("Results1.txt").Worksheets("Results1")
    Set sh1 = Workbooks("Count.xlsm").Worksheets("Alone")
    sh1.UsedRange.Delete
    sh0.UsedRange.Copy Destination:=sh1.Range("A1")
    Workbooks("Results1.txt").Close
    Workbooks.Open Filename:=sPath & "¥Results2.txt", Format:=1
    Set sh0 = Workbooks("Results2.txt").Worksheets("Results2")
    Set sh1 = Workbooks("Count.xlsm").Worksheets("All")
    sh1.UsedRange.Delete
    sh0.UsedRange.Copy Destination:=sh1.Range("A1")
    Set sh0 = Nothing
    Set sh1 = Nothing
    Workbooks("Results2.txt").Close
'
' 個体数の見積もり
    Worksheets("Estimate").Activate
    ActiveSheet.UsedRange.Delete
    Range("A1").Value = "Average"
    Range("E1").Value = "Total"
    Range("A3").Value = "Alone"
    Range("B3").Value = "Area"
    Range("D3").Value = "All"
    Range("E3").Value = "Area"
    Range("F3").Value = "Estimate"
    s = 0
    For i = 2 To Worksheets("Alone").UsedRange.Rows.Count
        Cells(i + 2, 1).Value = Worksheets("Alone").Cells(i, 1).Value
        Cells(i + 2, 2).Value = Worksheets("Alone").Cells(i, 2).Value
        s = s + Cells(i + 2, 2).Value
    Next i
    s = s / (Worksheets("Alone").UsedRange.Rows.Count - 1)
    Range("B1").Value = s
    n = 0
    For i = 2 To Worksheets("All").UsedRange.Rows.Count
        Cells(i + 2, 4).Value = Worksheets("All").Cells(i, 1).Value
        Cells(i + 2, 5).Value = Worksheets("All").Cells(i, 2).Value
        Cells(i + 2, 6).Value = Round(Cells(i + 2, 5).Value / s)
        n = n + Cells(i + 2, 6).Value
    Next i
    Range("F1").Value = n
'
End Sub

```

表4 手作業計数と半自動計数法の比較

方法	捕獲数少 (図1a)		捕獲数多 (図1b)	
	計数結果 (個体)	処理時間 (秒)	計数結果 (個体)	処理時間 (秒)
手作業計数	17.8±0.9	17.8±10.5	117.1±6.1	92.6±44.6
半自動計数法	19.0±0.0	46.6±8.7	137.0±0.0	48.3±9.1

実際に7人の試験者が作業した結果を示す (平均値±標準偏差)。

ムシを、7名の異なる試験者が計数した。捕獲数が少ない例 (図1a) と多い例 (図1b) を用いて評価した結果を表4に示す。

今回の例では、半自動計数法による計数結果のほうが手作業計数よりも多かった (捕獲数少で7%, 捕獲数多で17%)。捕獲数少では危険率1%で、捕獲数多では危険率5%で、統計的に有意な差があるという結果が得られた。半自動計数法では誰がやっても同じ結果が得られたのに対して、手作業による方法では試験者によるばらつきが見られた (捕獲数少でも多でも5%)。これは従来手法である手作業計数の結果が常に正しいとは限らないことを示している。

計数のための処理時間については、捕獲数少では手作業による計数のほうが半自動計数法よりも短い (17.8秒と46.6秒, 危険率1%で有意な差がある) が、捕獲数多では長くなった (92.6秒と48.3秒, 危険率5%で有意な差がある)。半自動計数法では捕獲された個体数にそれほど影響されない (統計的に差がない) のに対して、手作業による方法では個体数が多くなると急激に処理時間が長くなった (危険率1%で有意な差がある)。処理時間のばらつきは、手作業による方法のほうが半自動計数法よりもばらつきが大きかった (捕獲数少では59%と19%, 捕獲数多では48%と19%)。手作業による方法よりも半自動計数法のほうが、トラップに捕獲された個体数や作業者によって、処理時間の差が小さかった。

考 察

本研究で開発した半自動計数法は手作業による方法よりも、トラップに捕獲された個体数や作業者の影響を受けにくいということがわかった。手作業による計数の場合疲労による誤差の増大も懸念されるが、半自動計数法にはその影響もないと考えられる。効率的に安定して計数できるメリットは大きい。

しかし、今回の例では、半自動計数法による計数結果は手作業による従来法よりも10%から20%程度多め

に計数された (表4)。これがどの程度深刻であるかが問題である。まったく同じ場所、時間に複数のトラップが設置されていたとしても、捕獲の過程は確率的なので、捕獲数は同じになるとは限らない。トラップに捕獲される個体数を、放射線計測の計数¹⁰⁾と同様に考えると、判定値19と137に対して統計誤差 (\sqrt{n}) はそれぞれ約4.4 (23%) と11.7 (9%) になる。つまり、半自動計数法と手作業による方法で得られる結果のずれと、サンプリングによる統計誤差は同程度である。さらに、害虫の発生状況の監視など、実際に使われる場面を想定すると、10%から20%の誤差はそれほど大きな問題にはならないことが多いと思われる。以上のことを考慮すると、従来法とこの程度のずれがあるデメリットよりも、半自動計数法を使用することによって得られるメリットを優先させたい場面が十分にあると考えられる。

本研究では、画像処理 (粒子解析) の過程で、接触している個体をあえて粒子分離せずに、1粒子として取り扱う方法を採用した。しかし、ImageJには、領域を分ける手法のひとつであるWatershed法¹¹⁾も標準搭載されている。これを利用して個体数を計数する方法を構築することも考えられた。ところが、Watershed法は、抽出した画像が極端に凸凹していないことを前提としている。実際にこの方法を適用した結果が図3で、1個体内で分割されているものや、接触している複数の個体が分離されていないものがあり、このままでは



図3 Watershed法による粒子分離の結果
図2cの画像をWatershed法で処理した。

正確な計数ができなかった。適当な処理を加えることによって改善できる可能性はあるが、面積を基礎にした計数法を上回る性能を実現するのは困難だと考えている。

本研究で開発した半自動計数法を適用するためには、使用するトラップの特性に注意を払う必要がある。つまり、半自動計数法の成功には、次の特性が有利に働いたと考えている。

- ①フェロモントラップなので、対象昆虫（コクゾウムシ）が高確率で捕獲され、他の種類の混入が少ない。
- ②トラップの入口が狭いので、壁掛け用トラップに比較してごみ（対象昆虫以外の飛来物）が入りにくい。
- ③粘着紙が平面なので、歪みの小さい写真を撮影できる。
- ④粘着紙の色が薄いので、対象昆虫と背景のコントラストが大きい。
- ⑤粘着面の周縁にまともって捕獲されてしまう壁掛け式トラップに比べると、本研究で使用したトラップでは対象昆虫が上方の網にのぼってから粘着紙に落ちるので、捕獲された昆虫の分布の偏りや昆虫どうしの重なりが少ない。

本研究で使用したトラップが備えているこれらの特性は、半自動計数法による計数が効率よく実行できる写真を撮影する条件となっている。したがって、半自動計数法を適用する場合は、本研究で使用したトラップ（富士フレーバー、トリオス）か、それに類似したトラップの利用が望ましい。

ここではコクゾウムシを対象とした計数方法について述べてきたが、本研究で開発した半自動計数法はコクゾウムシに限定されないと考えている。実際、試験環境で捕獲したノコギリヒラタムシを計数してみたところ、半自動計数法によって、1個体の面積を修正した以外に変更を加えることなく、半自動計数に成功している。コクゾウムシもノコギリヒラタムシも体長約3mmで大きさにあまり違いはないが、コクゾウムシは体に厚みがあるのに対して、ノコギリヒラタムシは平たい形状である。そのため、トラップに捕獲されたコクゾウムシは横向きのものが多いが、ノコギリヒラタムシはほとんど腹這いになっていた（図4）。つまり、脚などの突起物が本体の片側に大きく出ているのか、両側に小さく出ているのかという、輪郭の形状に違いが生じていた。それにもかかわらず、計数結果には影響を及ぼさなかったため、他の甲虫、例えば、



図4 トラップに捕獲されたノコギリヒラタムシの画像

コクヌストモドキ (*Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenerionidae)) やコナナガシクイムシ (*Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae)) 等も、ほとんど修正を加えることなく、計数が可能だと考えられる。

本研究で開発した半自動計数法を基にしたアプリケーションを、スマートフォンやタブレットで動作させることも可能だと考えられる。このような環境を実現できれば、食品貯蔵倉庫や加工工場のような多数のトラップが設置されている場所で、時間をかけずに計数し記録することが容易になる。その作業自体は害虫に関する専門知識を持たない者でも実施できるので、専門家は別の作業をする時間を増やすことができる。つまり、緒言で述べた計数作業自体の効率化にとどまらず、食品害虫の防除のための総合的な戦略策定と実行 (IPM) に取り組む余裕が生まれると期待できる。

要約

フェロモントラップに捕獲されたコクゾウムシに対して、画像解析技術を応用した半自動計数法を開発した。ImageJの粒子解析により抽出された粒子の面積を求め、それぞれの粒子に含まれる個体数をその面積から推定するという方法を採用した。計数を成功させるためには、半自動計数法に適したトラップを使用することが重要だと考えられる。この半自動計数法はコクゾウムシだけでなく他の貯穀害虫にも適用可能であ

る。また、この半自動計数法を基にしたアプリケーションを開発し、スマートフォンやタブレットに搭載すれば、総合的病害虫管理の向上が期待できる。

引用文献

- 1) Phillips, T.W. and Throne, J.E., Biorational Approaches to Managing Stored-Product Insects. *Annu. Rev. Entomol.* 55, 375-397 (2010).
- 2) 大岡高行, IPMの推進・定着に向けた今後の取組みについて, *植物防疫*, 61, 686-690 (2007).
- 3) Trematerra, P., Aspects Related Decision Support Tools and Integrated Pest Management in Food Chains, *Food Control*. 34, 733-742 (2013).
- 4) 下田直樹, 片岡崇, 岡本博史, 寺脇正樹, 端俊一, 画像処理を用いた害虫の自動計数システム, *農業機械学会誌*, 68, 59-64 (2006).
- 5) 「新編画像解析ハンドブック」, 高木幹雄, 下田陽久編, (東京大学出版会, 東京), (2004).
- 6) 中野昭雄, 藤原伸幸, 寺田賢治, 画像処理による微小害虫の自動カウント, *植物防疫*, 65, 43-46 (2011).
- 7) 松坂守, 石向稔, 坂本新一郎, 宮ノ下明大, 今村太郎, 中北宏, 玄米貯蔵倉庫における貯穀害虫の季節的変動について, *家屋害虫*, 31, 27-36 (2009).
- 8) Phillips, J.K., Walgenbach, C.A., Klein, J.A., Burkholder, W.E., Schmuff, N.R., and Fales, H.M., (*R*,S**)-5-hydroxy-4-methyl-3-heptanone male-produced aggregation pheromone of *Sitophilus oryzae* (L.) and *S. zeamais* Motsch, *J. Chem. Ecol.* 11, 1263-1274 (1985).
- 9) 「ImageJで始める生物画像解析」, 三浦耕太, 塚田祐基著, (学研メディカル秀潤社, 東京), (2016).
- 10) 「放射線計測ハンドブック(第4版)」, Knoll, G.F. 著, (オーム社, 東京), (2013).
- 11) Roerdink, J.B.T.M. and Meijster, A., The Watershed Transform: Definitions, Algorithms and Parallelization Strategies. *Fundam. Inform.*, 41, 187-228 (2001).

引用URL

- i) http://www.maff.go.jp/j/syouan/syokubo/gaicyu/g_ipm/ (2016.7.26)
- ii) <https://imagej.nih.gov/ij/> (2016.7.26)