

【資料】

ゾウムシ類成虫の体長半自動計測法の開発

曲山 幸生*, 古井 聡, 今村 太郎, 宮ノ下 明大

農研機構食品研究部門
〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

Development of a semi-automatic method for measuring the body lengths of adult weevils

Yukio MAGARIYAMA*, Satoshi FURUI, Taro IMAMURA, and Akihiro MIYANOSHITA

Food Research Institute, NARO
2-1-12 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642, Japan

摘 要

昆虫の体サイズは生物種、あるいは集団として、重要な特徴の一つであると考えられている。体長は試料調整の影響を受けにくく、代表的な体サイズの指標である。しかし、従来の手作業による体長測定は手間がかかるために、十分なデータ数を得るために長い時間がかかっていた。そこで、本研究では、画像解析技術を用いて、ゾウムシ類成虫の体長分布を半自動的に測定する方法を開発した。本方法により、体長分布測定の作業時間が短くなったことに加えて、十分に大きなデータ数を容易に収集できるので、非対称性など体長分布の形状について詳細に検討することが可能になった。

Abstract

For an insect species or an insect group, the body size is considered as one of the important characters. Especially, body length is a typical indicator of body size that is little affected by the sample preparation. Measuring the body length of insect by the conventional method, however, takes a lot of effort and time. Accordingly, it is hard to collect enough data to examine the size distribution thoroughly. Here, we developed a semi-automatic method for measuring the body lengths of weevils using techniques of image analysis. This method dramatically shortened the time to measure the distribution of the body lengths of weevils. In addition, we demonstrated that it was easily possible to collect enough data to examine the shape of the distribution in detail, such as asymmetry, by the method.

Key words: ゾウムシ (weevil), 体長 (body length), 測定 (measuring), 画像解析 (image analysis), 半自動 (semi-automatic)

はじめに

昆虫の資源獲得や死亡率等は体サイズ（通常、体長や体重、翅鞘の長さ等を指標として表現される）と関係しているので、現在の昆虫の体サイズは環境適応の結果であると考えられている。したがって、昆虫の体サイズは、長期間の環境適応が遺伝的に固定された結果である生物種に対する特徴としても、短期間の環境変化に応答した生物集団に対する特徴としても注目されている。例えば、キイロショウジョウバエ *Drosophila melanogaster* やタバコスズメガ *Manduca sexta* で得られた知見によると、栄養や温度の変化が臨界重量（幼虫などが発生次の段

階に進むために必要な最小の体重）、成長停止までの時間、成長速度を変え、最終的に成虫の体サイズに影響を与える(Chown and Gaston 2010)。その影響は、体サイズの平均値だけでなく、分布の形にも及ぶ場合もある(Gouws et al. 2011)。

昆虫の体サイズは次のような因子と相関があることが知られている：飢餓、乾燥、低温(Lighton et al. 1994; Arnett and Gotelli 2003; Lehmann et al. 2006; Colinet et al. 2007)、捕食圧(Nylin and Gotthard 1998)、捕食者の構成(Gaston et al. 1997)、食料の粒子サイズ(Holter and Scholtz 2005)、多産性(Honěk 1993; Taylor et al. 1998)、交尾や生殖の成功率(Stone et al. 1995; Taylor et al. 1998)、活動時間、食料採集時間(Stone 1994; Cerdá and

Retana 2000), 種内闘争(Heinrich and Bartholomew 1979), 飛翔能力(Dudley 2000). つまり, 様々な環境要因のうちいずれかが変動すると, 体サイズも変化する可能性がある. 逆に, 体サイズの変化を検知できれば, 何らかの環境変動が生じたと推測できる. また, 体サイズと生殖能力に相関があることから, 害虫の次世代に発生する個体数の予測への利用を目指した研究もある(Rhainds 2015). このような可能性から, 体サイズ分布の情報は, 昆虫の生態解明といった基礎科学だけでなく, 将来害虫の防除にも利用できるようになると考えられる.

詳細な生態解明や精密な害虫防除のためには, 体サイズの平均値だけでなく, 分布の形を考察したり統計解析を実行したりするのに必要な数のサンプルを集めなければならない. 例えば, 分布の形を解析するためにヒストグラムを作成することを考えると, サンプル数は少なくとも 100 以上が望ましい. このように多数の体サイズを計測する場合, 測定法の条件として, 簡便で, 処理時間が短く, 測定誤差が小さいことが求められる.

体サイズを表す代表的な指標である体長を測定する場合, 従来は, ミクロメーター付き実体顕微鏡を用いて精密に測定するか, 方眼紙の上に昆虫の個体を線に合わせて配置し, 拡大鏡を使って肉眼で簡易的に測定するか, 撮影した写真を拡大印刷して測定している. これらの方法では, 昆虫をピンセット等により 1 個体ずつスライドガラス, または方眼紙の上に正確に配置し, 測定値を 1 個体ずつ記録するという手間がかかる. また, サンプル数の増加により測定時間が長くなるという問題に加えて, 細かく単調な作業を人が繰り返さなければならないことから, 疲労によって効率の低下と測定誤差の増大が懸念される. さらに, 人が介在することによって発生する測定誤差も考えられる.

昆虫の生態理解という基礎科学的興味に加え, 人類の経済活動への影響も考慮すると, 害虫の体長分布の情報を収集する意味は大きい. 代表的な食品害虫であるコクゾウムシ類は穀類を貯蔵する倉庫でよく見られるが, その体長は餌となる穀類や温度, 湿度等の生育環境によって変化すると考えられている. しかし, 成虫は湾曲した長い口吻を持ったゾウムシ類特有の形状のため, 体長を再現性よく測定すること自体が難しい. そこで, 体サイズの指標として体長の代わりに, 翅鞘の長さ (Campbell 2002) や体重 (Oliveira et al. 2007) を測定した例がある. し

かし, 前者の場合翅鞘を取り外す手間がかかり, 後者の場合昆虫の乾燥の程度によって体重が変動しやすいという欠点がある.

本研究の目的は, サンプル数が増えても, 正確性を保ったまま, 手間が大きく増えない, ゾウムシ類成虫の体長の測定方法を提案することである. 本研究では, 写真の撮影方法, 自動化に適した体長の定義, 画像解析技術を用いた体長測定アルゴリズムを検討した結果をまとめた半自動測定方法を開発し, その方法を評価した.

材料および方法

1. 昆虫

著者の研究室で飼育維持しているコクゾウムシ類の 3 種の昆虫, コクゾウムシ *Sitophilus zeamais*, コクゾウムシ *Sitophilus oryzae*, グラナリアコクゾウムシ *Sitophilus granarius* の成虫を使った. 撮影に用いるために, 冷凍庫 (-30°C) で 5 日以上冷却し殺虫してから, 結露がなくなるまで室温で自然乾燥させた.

2. 写真撮影

点灯したトレース台 (トライトック トレビュア A4-400) の上に, 1 mm 方眼紙 (コクヨ ホ-19N) を置き, 昆虫が重ならないようにほぼ 10 cm 四方の範囲に配置した. コンパクトデジタルカメラ (RICOH WG-40W) を三脚 (HAKUBA HD-301VD) に下向きに設置し, 自動撮影モードでリモコンシャッター (RICOH O-RC1) を用いて垂直に真上から撮影した.

3. 画像解析プログラム開発環境

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), 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, 本方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 (NIH, 2016). 生物学においては標準的な画像解析ツールで, 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 (三浦・塚田, 2016)。

4. 手作業による体長測定

本研究では、手作業によるコクゾウムシの体長を口吻の先端から腹部の末端までの長さとして定義した。コクゾウムシの口吻は大きく湾曲しているため、撮影方向 (腹面、側面、背面) によって、体長の測定結果が異なる。そこで、ルーペの下でコクゾウムシを体長方向に合わせて側面から撮影できるように方眼紙の上に置き、目視により体長を測定し、その数値を解析用の Excel の表に記録した。作業による測定結果のばらつきを考慮しなくてもよいように、この作業は著者の一人が実施した。

結果および考察

1. 開発した半自動測定方法を使った測定手順

多数のゾウムシの体長を迅速に正確に測定できることを目指して、本研究では、ImageJ による画像解析過程と Excel による数値解析過程とに分離した、ゾウムシ類成虫の体長の半自動測定方法を開発した (図 1)。システム開発の際、サンプルとして用いた

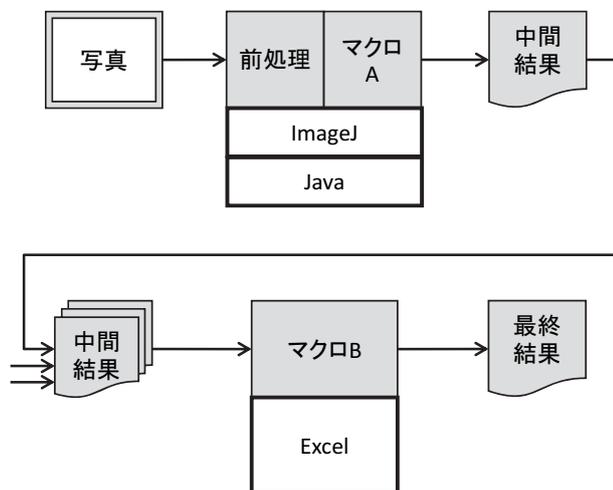


図 1 半自動測定方法のフローチャート

ImageJ 上で、コクゾウムシの画像を前処理 (スケール合わせ) し、マクロ A 処理を行う。出力された中間結果ファイルをまとめ、Excel 上でマクロ B 処理を実行すると体長の統計データ等が記載された最終結果ファイルが出力される。

のはコクゾウムシである。開発した体長測定方法を使った測定手順を以下に記す。

まず、元データとなるゾウムシの写真撮影する。写真には、①場所によってスケールが変わらないこ

と、②背景と像の境界が明確であること、という二つの特性が求められる。①の特性を持たせるためには、真上から撮影しなければならない、カメラを三脚に垂直下向きに固定することが必要である。本研究では太い線で描画した 1 cm 方眼紙をトレース台に置き、カメラのモニターで確認しながら、カメラの向きを合わせた。②の特性のために、手ぶれがないようにリモコンシャッターを利用した。また、コントラストを高くするために、点灯したトレース台によって下から透過照明した市販の方眼紙の上に、ゾウムシを重ねるがないように置いた。さらに、部屋の照明を消すことにより上からの余計な落射照明もなくした。必要な他の特性として高解像度も挙げられるが、本研究で使用したコンパクトデジタルカメラ (RICOH WG-40W) でも 4608×3456 画素 (本研究では 1 mm あたり約 30 画素で撮影) で記録することができ、測定分解能上の問題はなかった。

次に、ImageJ を立ち上げ、解析したい写真を開いた後、前処理として、長さの単位を画素 (pixel) から物理長 (mm; 実際の長さ) に変換する。この操作は、直線ツールを使って背景の方眼紙に合わせて特定の物理長 (例えば、100 mm) の直線を描き、スケール設定メニュー (Analyze > Set Scale) を使って実行する。このとき、以下の解析で同じ単位を使用するので、全画像に適用するために、Global をチェックしておく。

前処理終了後、一連の画像処理 (8 ビットグレースケール→二値化→粒子解析; 図 2) をまとめたマクロ (Length.ijm; 表 1) を実行する。このマクロを実行すると、Area (面積), XM (重心の X 座標), YM (重心の Y 座標), Major (当てはめた楕円の長径, 図 5a の l_o), Minor (当てはめた楕円の短径), Angle (当てはめた楕円の長径の傾き), Feret (フェレ径: 外接長方形

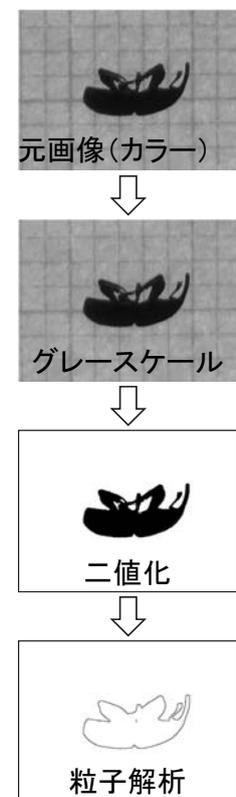


図 2 ImageJ で実行する画像処理の流れ

表1 マクロAソースリスト

```

//
//      コクゾウムシの体長計測
//
macro "Length-all" {
//初期設定
    directory = "C:\¥¥¥\Image\¥¥¥\workspace¥¥¥";
    id0 = getImagelD();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step0.jpg");
//8-bitグレースケール
    run("Duplicate...", " ");
    run("8-bit");
    id1 = getImagelD();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step1.jpg");
//二値化
    run("Duplicate...", " ");
    setAutoThreshold("Minimum");
    setOption("BlackBackground", false);
    run("Convert to Mask");
    id2 = getImagelD();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step2.jpg");
//計測
    run("Duplicate...", " ");
    selectImage(id2);
    run("Set Measurements...", "area center fit feret's redirect=None decimal=2");
    run("Analyze Particles...", "size=1.5-10 show=Outlines display clear");
    id3 = getImagelD();
    saveAs("Jpeg", directory + "Step3.jpg");
    selectWindow("Results");
    saveAs("Results", directory + "Results1.txt");
//結果表示
//.....省略.....
}

```

の長辺, 図5aの l_f), FeretX (フェレ径の中心のX座標), FeretY (フェレ径の中心のY座標), FeretAngle (フェレ径の傾き), MinFeret (外接長方形の短辺) の情報を記載した中間結果ファイル ("Results1.txt"; タブ区切りテキストファイル形式; 図3) が出力される。

フェレ径を l_f , フェレ径の傾きを θ_f , 当てはめた楕円の長径の傾きを θ_e とすると, 本研究ではゾウムシの体長 l_A を次のように定義した。

$$l_A = l_f \cos(\theta_f - \theta_e)$$

つまり, フェレ径の, 当てはめた楕円の長径成分を, 本研究における体長とした。このように定義した理由は次節で述べる。この計算と統計処理は, 中間結果ファイルのデータの読み込みを含め, Excel上でマクロ(表2)によって実行する。図4はマクロを実行した結果得られたワークシートの例で, 入力した中間結果ファイルリスト, 統計データ(サンプル

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		Area	XM	YM	Major	Minor	Angle	Feret	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret
2	1	4.41	99.88	11.08	3.35	1.67	1.2	3.84	98.16	11.07	168.35	1.99
3	2	3.99	96.54	14.74	3.27	1.55	104.91	3.9	96.11	13.05	114.02	1.82
4	3	3.99	85.44	14.78	3.32	1.53	161.53	3.94	83.83	14.17	149.91	1.93
5	4	3.83	74.26	16.99	3.19	1.53	24.21	3.88	72.76	17.77	36.07	1.91
6	5	3.62	116.68	17.37	3.19	1.44	123.21	3.94	115.04	15.72	129.01	1.99
7	6	3.39	80.09	19.79	3.23	1.34	153.27	3.98	78.1	18.55	148.94	1.78
8	7	4.19	84.01	20.15	3.41	1.56	15.3	4.04	82.36	20.76	8.83	1.97
9	8	4.27	90.04	21.29	3.51	1.55	55.46	4.33	89.06	22.81	46.45	2.04
10	9	4.26	103.7	21.61	3.48	1.56	3.12	4.01	101.99	21.53	169.99	1.85

図3 中間結果ファイル例

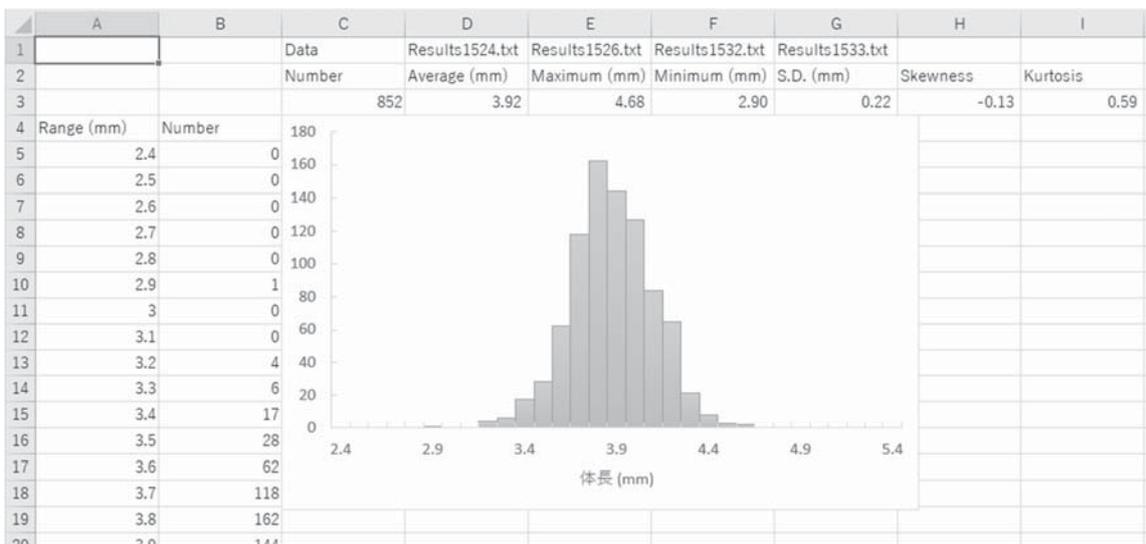


図4 最終結果ファイル例

表2 マクロBソースリスト

```

' 体長計測結果の解析
'
Sub LengthA()
'
  Dim file As Variant
  Dim f As Variant
  Dim sFile As String
  Dim sh0 As Excel.Worksheet
  Dim sh1 As Excel.Worksheet
  Dim des As Excel.Range
  Dim iRow, iColumn As Integer
  Dim length, pi, l, a0, a1 As Double
'
'データの入力
  ChDir ActiveWorkbook.Path
  file = Application.GetOpenFilename("TAB区切りファイル (*.txt), *.txt", MultiSelect:=True)
  If IsArray(file) Then
    Set sh1 = ActiveWorkbook.Worksheets("Results")
    sh1.UsedRange.Delete
    Set des = sh1.Cells(1, 1)
    For Each f In file
      Workbooks.Open FileName:=f, Format:=1
      sFile = Right(f, Len(f) - InStrRev(f, "*"))
      Set sh0 = Workbooks(sFile).Worksheets(1)
      sh0.UsedRange.Copy Destination:=des
      des.Value = sFile
      Set des = sh1.Cells(sh1.UsedRange.Rows.Count + 1, 1)
      Workbooks(sFile).Close
    Next f
  Else
    Beep
    MsgBox "ファイルが選択されませんでした。"
    Exit Sub
  End If
'
'LengthAの計算
  Set sh0 = ActiveWorkbook.Worksheets("Results")
  Set sh1 = ActiveWorkbook.Worksheets("Summary")
  sh0.Activate
  Range("M1").Value = "LengthA"
  pi = Application.WorksheetFunction.pi()
  iRow = 2
  Do Until iRow > sh0.UsedRange.Rows.Count
    If IsNumeric(Cells(iRow, 1).Value) Then
      l = Cells(iRow, 8).Value
      a0 = Cells(iRow, 7).Value
      a1 = Cells(iRow, 11).Value
      Cells(iRow, 13).Value = Abs(l * Cos(pi / 180 * (a0 - a1)))
    End If
    iRow = iRow + 1
  Loop
'
'度数分布表
  sh1.Activate
  Rows(1).Clear
  Range("C1").Value = "Data"
  length = Round(Range("D3").Value, 1) - 1.5
  For iRow = 5 To sh1.UsedRange.Rows.Count
    Cells(iRow, 1).Value = length
    Cells(iRow, 2).Value = 0
    length = length + 0.1
  Next iRow
  iRow = 1
  iColumn = 4
  Do Until iRow > sh0.UsedRange.Rows.Count
    If IsNumeric(sh0.Cells(iRow, 1).Value) Then
      length = sh0.Cells(iRow, 13).Value
      Cells(fRow(length), 2).Value = Cells(fRow(length), 2).Value + 1
    Else
      Cells(1, iColumn).Value = sh0.Cells(iRow, 1).Value
      iColumn = iColumn + 1
    End If
    iRow = iRow + 1
  Loop
  Set sh0 = Nothing
  Set sh1 = Nothing
  MsgBox "終了"
'
End Sub
'
' 区間
'
Function fRow(ByVal length As Double) As Integer
'
  fRow = Int((length - (Round(Range("D3").Value, 1) - 1.5)) / 0.1 + 5)
'
End Function

```

数, 平均値, 最大値, 最小値, 標準偏差, 歪度, 尖度), 度数分布表, ヒストグラムが作成されている。

2. 体長の決定

手作業による体長測定の場合, 実体顕微鏡を使用しない比較的簡便な方法を用いても, 方眼紙の上にゾウムシを1頭ずつ決まった姿勢で正確に配置する作業があり, 手間がかかり時間を要する。画像解析手法を採用しても, この作業が残るのでは省力化や時間短縮の効果があまり期待できない。したがって, 本研究で開発した体長測定法では, ゾウムシの個体どうしが接触しなければよいという条件だけにした。本研究で使用したゾウムシは3種のコクゾウムシ類(コクゾウムシ, ココクゾウムシ, グラナリアコクゾウムシ)だが, この条件では, 各個体の姿勢は, 背を下にした仰向け(測定者の視点では, 腹面), 背を横に向けた横向き(同, 側面), 背を上にした腹ばい(同, 背面)とランダムな向きになってしまう。そこで, 姿勢の影響を受けにくい体長の定義を,

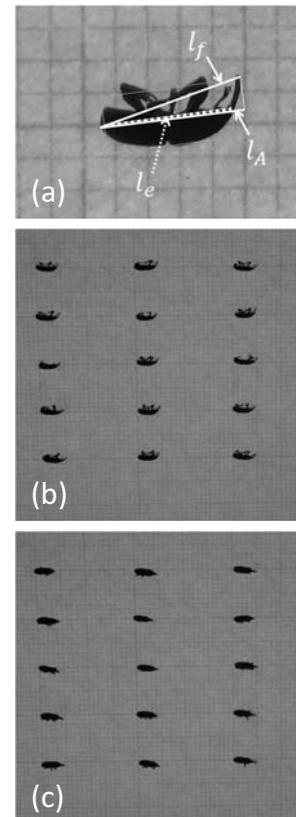


図5 コクゾウムシの体長の指標

(a) 体長の指標の候補となった3つの線分。 l_e は当てはめた楕円の長径, l_f はフェレ径, $l_A = l_f \cos \theta$ はフェレ径の楕円長径成分である。(b) 15頭のグラナリアコクゾウムシを側面から撮影した画像。(c) bと同じ15頭を同じ場所に置いて腹面から撮影した画像。

画像解析によって得られるパラメータ,あるいはその組合せの中から選び出すことにした。候補は,当てはめた楕円の長径 l_e , フェレ径 l_f , フェレ径の l_e 方向の成分 $l_A = l_f \cos \theta$ である(図5a)。ただし, θ は楕円の長径とフェレ径のなす角である。

グラナリアコクゾウムシ15頭を側面から撮影できるようにして方眼紙の上に並べ(図5b),前節で述べたImageJを用いた方法と手作業により,上記の3つの体長候補を測定した。次に同じ15頭を腹面から撮影して(図5c)測定した。その測定結果を表5にまとめた。背面の測定をしなかった理由は,無作為にコクゾウムシをばらまいた場合脚が邪魔をして背面の画像がほとんどないことと,背面と腹面の二値化画像がほとんど同じであることである。

測定によって得られた3つの体長候補の値を比較すると,側面と腹面の測定結果の差が最も小さかったのは,フェレ径の l_e 方向の成分 l_A であった(表3)。差の平均値が小さいだけなら,差が正の値と負の値に均等にばらついている可能性もある。しかし, l_A は差の2乗の平均値も小さく,この結果は絶対値も小さかったことを示している。興味深いのは, l_A は手作業による測定値よりもよい結果になっ

たことである。手作業の測定値は l_A と l_f の中間の値になっており,定義の観点からもそのようになっていると考えられる。

以上の検討結果から,本研究ではゾウムシの体長として,フェレ径の楕円長径成分 l_A を採用することにした。

3. 開発した方法の評価

本研究で開発した体長測定法を評価するために,コクゾウムシ100頭の同じサンプルを用いて,手作業による従来法と,迅速性(作業時間)と測定結果のばらつき(標準偏差)について,実際に作業を行い比較した。手作業による従来法の作業時間は,コクゾウムシサンプル,ルーペ,方眼紙,PCの準備を整えておき,最初のコクゾウムシを取り出してから解析が終了するまでとした。本研究で開発した体長測定法の作業時間は,コクゾウムシサンプル,撮影機材一式,PCの準備を整えておき,コクゾウムシサンプルを取り出してから解析が終了するまでとした。

作業時間は,本方法が手作業の約1/5と圧倒的に短かった(表4)。手作業による従来法ではコクゾウムシを側面から撮影できるように方眼紙の線に

表3 姿勢の影響

体長指標	横向き (mm)	仰向け (mm)	差 (mm)	差 ² (mm ²)
l_e	4.13±0.18	4.32±0.17	-0.19±0.13	0.05±0.06
l_f	4.84±0.21	4.70±0.24	0.14±0.14	0.04±0.05
l_A	4.76±0.23	4.70±0.24	0.06±0.12	0.02±0.02
手作業	4.8±0.2	4.7±0.2	0.08±0.11	0.02±0.02

15頭のグラナリアコクゾウムシを二つの方向(側面と腹面)から撮影した画像をもとに,3つの体長の候補(楕円長径 l_e , フェレ径 l_f , フェレ径の楕円長径成分 l_A)を測定した結果である。それぞれ,15頭の平均値±標準偏差を記載している。差と差²は,同じ個体の側面と腹面の差と差²を求めてから,平均値と標準偏差を計算した。

表4 手作業と開発した方法の比較

測定方法	作業時間	平均±標準偏差 (mm)	歪度/尖度
手作業	57分59秒	3.99±0.18	-1.60/6.30
開発した方法	11分8秒	3.83±0.15	0.04/-0.31

同じコクゾウムシ100頭に対して,測定に要した作業時間と測定結果(平均±標準偏差,歪度,尖度)をまとめた。試行は一人の作業による1回である。

合わせて配置する作業に時間がかかった。本方法ではコクゾウムシどうしが接触しないようにすればよいだけである。サンプル数が増えれば、この差はもっと大きくなると考えられる。

測定結果のばらつき（標準偏差）は、測定誤差と関係していると考えられるが、手作業（0.18）と本方法（0.15）との間の差はほとんど見られなかった（表4）。しかし、正規分布からのずれの指標である歪度（分布の左右非対称性を示す）と尖度（分布のピークの鋭さを示す）の値を比較すると、どちらも手作業（-1.60/6.30）よりも本方法（0.04/-0.31）で得られた結果のほうが0に近かった。つまり、手作業よりも本方法で得られた結果のほうが、正規分布に近い形状であった。コクゾウムシサンプルの体長が正規分布に従っていたと仮定すると、手作業よりも本方法のほうが真の値に近い測定ができた可能性がある。

4. 開発した方法を使った測定例

本方法を使って、著者の研究室で維持しているコクゾウムシ属の3種（コクゾウムシ、ココクゾウムシ、グラナリアコクゾウムシ）の体長分布を測定した（表5、図6）。サンプル数はそれぞれ、852、601、641で、平均値は3.96 mm、3.47 mm、4.81 mmであった。つまり、グラナリアコクゾウムシ、コクゾウムシ、ココクゾウムシの順に大きい。これだけのサンプル数があれば、分布の形が明確なので、様々な仮定を設けた統計的な検定を実施する必要はない。さらに、図6を見ればわかるように、ランダムに3種の中で体長の平均値が最大のグラナリアコクゾウムシと最小のコクゾウムシの中から適当に個体を選んだ時、わずかな確率だが、グラナリアコクゾウムシのほうが小さい場合もある。分布の重なり程度まで詳細に検討することができる。

図6の体長分布をよく見ると、左側の裾のほうで右側よりも広がっているように見える。表5に

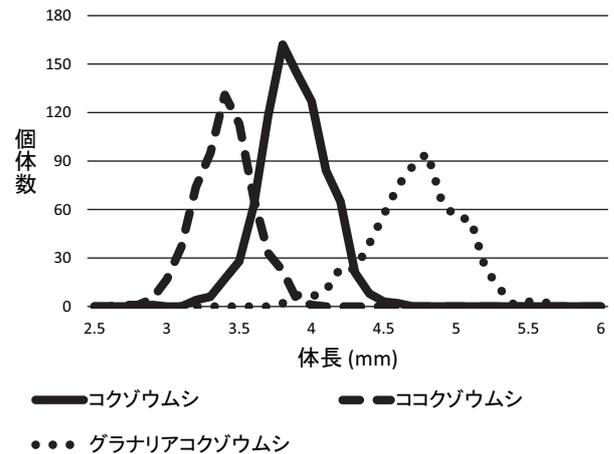


図6 コクゾウムシ属3種の体長分布

本研究で開発した体長測定法を用いて測定した結果をヒストグラムで表示した。

記されているように、分布の左右非対称性を示す歪度も負の値になっている。これはコクゾウムシの体長を決定する要因のうちひとつ（あるいは複数）にも分布があり、小さい体長の個体の割合を上昇させるような分布を持っていることを示唆している。例えば、飼料とした玄米粒の大きさの分布が非対称で、小さいサイズの割合が多いのかもしれない。このように微妙な分布の歪みを考察できるのも、十分に大きなサンプル数の測定を手軽に実施できるからである。

5. 想定される応用分野

本論文の最初に述べたように、昆虫の体サイズはその生態や環境との関係を研究するために重要な指標で、研究者としては調べておきたい情報の一つである。食品害虫の分野では、穀物等の餌の種類、穀粒サイズ、温度、湿度、その他の環境条件、天敵の有無といった因子と、体サイズとの関係を知っておきたい。本研究で開発した体長測定法は、特別な装置やソフトウェアを必要とせず、マクロのソースコードも公開しているので、研究者であれば簡単に利用

表5 コクゾウムシ属3種の体長分布

昆虫名	サンプル数	平均±標準偏差 (mm)	歪度/尖度
コクゾウムシ	852	3.96±0.22	-0.13/0.59
ココクゾウムシ	601	3.47±0.20	-0.07/0.12
グラナリアコクゾウムシ	641	4.81±0.30	-0.24/0.20

本研究で開発した体長測定法を用いて測定した結果の統計量をまとめた。

することができると思う。

病害虫の状態を迅速に把握することは、IPM (Integrated Pest Management; 総合的病害虫管理) の第一歩で最重要課題である。現状の害虫防除の現場では、主にトラップによって得られる情報を基に、害虫の発生状況 (発生している個体数が多いか少ないか) を調べている。今後の害虫の増減の傾向をこの情報だけから予測するのは難しく、様々な状況を基に熟練者が推測しているという状況である。一方、害虫の体長分布の情報は、最初に述べたように次世代の発生予測に使えるかもしれない。つまり、トラップによる情報に、質的にまったく異なる情報が追加されるということであり、IPM の飛躍的な向上が期待できる。現場のニーズに対応したこのような研究は、応用を見据えて、いずれ現場で実施しなければならない。本方法はスマートフォンやタブレット PC のようなモバイル端末に搭載されているデバイスで実現できる。本方法のモバイル端末向けアプリの開発は、屋外 (つまり、IPM 現場) で利用できる迅速で正確な体長分布の測定ツールを提供し、IPM の発展に貢献するという点で重要である。

引用文献

- 1) Arnett, A. E. and Gotelli, N. J. (2003) Bergmann's rule in larval ant lions: testing the starvation resistance hypothesis. *Ecol. Entomol.* 28: 645–650.
- 2) Campbell, J. F. (2002) Influence of seed size on exploitation by the rice weevil, *Sitophilus oryzae*. *J. Insect Behav.* 15: 429–445.
- 3) Cerdá, X. and Retana, J. (2000) Alternative strategies by thermophilic ants to cope with extreme heat: individual versus colony level traits. *Oikos*, 89: 155–163.
- 4) Chown, S. T. and Gaston, K. J. (2010) Body size variation in insects: a macroecological perspective. *Biol. Rev.* 85: 139–169.
- 5) Colinet, H., Vernon, P. and Hance, T. (2007) Does thermal-related plasticity in size and fat reserves influence supercooling abilities and cold-tolerance in *Aphidius colemani* (Hymenoptera: Aphidiinae) mummies? *J. Therm. Biol.* 32: 374–382.
- 6) Dudley, R. (2000) The evolutionary physiology of animal flight: paleobiological and present perspectives. *Annu. Rev. Physiol.* 62: 135–155.
- 7) Gaston, K. J., Chown, S. L. and Styles, C. V. (1997) Changing size and changing enemies: the case of the mopane worm. *Acta Oecol.* 18: 21–26.
- 8) Gouws, E. J., Gaston, K. J. and Chown, S. L. (2011) Intraspecific Body Size Frequency Distributions of Insects. *PLoS ONE* 6(3): e16606.
- 9) Heinrich, B. and Bartholomew, G. A. (1979) Roles of endothermy and size in inter- and intraspecific competition for elephant dung in an African dung beetle, *Scarabaeus laevistriatus*. *Physiol. Zool.* 52: 484–496.
- 10) Holter, P. and Scholtz, C. H. (2005) Are ball-rolling (Scarabaeini, Gymnopleurini, Sisyphini) and tunnelling scarabaeine dung beetles equally choosy about the size of ingested dung particles? *Ecol. Entomol.* 32: 559–566.
- 11) Honěk, A. (1993) Intraspecific variations in body size and fecundity in insects: a general relationship. *Oikos* 66: 483–492.
- 12) Lehmann, T., Dalton, R., Kim, E. H., Dahl, E., Diabate, A., Dabire, R. and Dujardin, J. P. (2006) Genetic contribution to variation in larval development time, adult size, and longevity of starved adults of *Anopheles gambiae*. *Infect. Genet. Evol.* 6: 410–416.
- 13) Lighton, J. R. B., Quinlan, M. C. and Feener, D. H. (1994) Is bigger better? Water balance in the polymorphic desert harvester ant *Messor pergandei*. *Physiol. Entomol.* 19: 325–334.
- 14) 三浦耕太・塚田祐基 (2016) ImageJ ではじめる生物画像解析. 296 pp. 学研メディカル秀潤社, 東京.
- 15) NIH (2016) ImageJ. <https://imagej.nih.gov/ij/> (Accessed 22 February 2017)
- 16) Nylin, S. and Gotthard, K. (1998) Plasticity in life-history traits. *Annu. Rev. Entomol.* 43: 63–83.
- 17) Oliveira, E. E., Guedes, R. N. C., Totoia, M. R. and De Marco, P. (2007) Competition between insecticide-susceptible and -resistant populations of the maize weevil, *Sitophilus*

- zeamais*. *Chemos.* 69: 17–24.
- 18) Rhainds, M. (2015) Wing wear and body size measurements of adult spruce budworms captured at light traps: inference on seasonal patterns related to reproduction. *Appl. Entomol. Zool.* 50: 477–485.
- 19) Stone, G. N. (1994) Activity patterns of females of the solitary bee *Anthophora plumipes* in relation to temperature, nectar supplies and body size. *Ecol. Entomol.* 19: 177–189.
- 20) Stone, G. N., Loder, P. M. J. and Blackburn, T.M. (1995) Foraging and courtship behaviour in males of the solitary bee *Anthophora plumipes* (Hymenoptera: Anthophoridae): thermal physiology and the roles of body size. *Ecol. Entomol.* 20: 169–183.
- 21) Taylor, B. W., Anderson, C. R. and Peckarsky, B. L. (1998) Effects of size at metamorphosis on stonefly fecundity, longevity, and reproductive success. *Oecologia* 114: 494–502.