

昆虫の複眼構造の計測と3次元モデル化

伊藤 大翔[†] 盧 承鐸[‡] 柿本 正憲[‡]

東京工科大学[†] 東京工科大学／プロメテック CG リサーチ[‡]

1. はじめに

昆虫の身体構造を研究することは、複眼構造を模倣した人工的複眼撮影システムの開発などに繋がる。また、近年では昆虫の視覚推定の研究もあり、視覚の画像化や視野と生態の関係性の考察が行われている。

本研究では、昆虫の複眼と個眼構造の3次元モデル化を目標とする。本稿では、昆虫の中でも眼部の比較的大きいカマキリの眼を走査型電子顕微鏡及びX線CT装置で撮影し、その構造を観察し分析することで、個眼の3次元モデル化に必要な知見を得ることを目的としている。昆虫の個眼の精密な3次元モデル化ができれば、一つの個眼がどの範囲の外光を取り入れているかが明らかになる。また、昆虫の視野をより正確に再現できることも期待される。

2. 昆虫の複眼

複眼は昆虫や甲殻類などの節足動物の視覚器官である。この複眼は、多数の微小な眼である個眼の集合で構成されている。

複眼は周囲200°以上を見ることができる広い視野を持つ。この特徴は複眼を構成する個眼が数多く存在することで成り立つ。個眼は一つにつき原則一つの視神経を持つため、個眼一つから得られる情報は一画素と等しいといえる。このような個眼が放射状に向かい密に集まった楕円球状の複眼を構成することで、昆虫は広い視野を得ている。

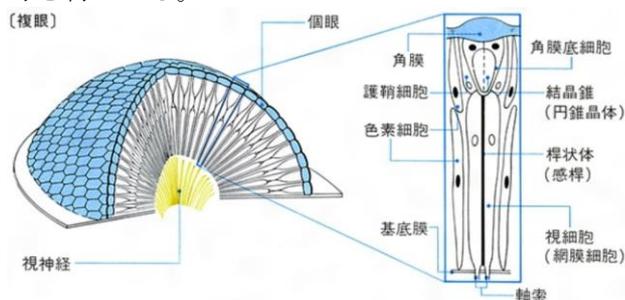


図1. 複眼と個眼の構造[1]

Measurement and 3D modeling of compound eye structure in an insect.

[†]Taisho Ito, [‡]Seung-Tak Noh, [‡]Masnori Kakimoto

[†]Tokyo University of Technology

[‡]Tokyo University of Technology / Prometech CG Research

3. 関連研究

清水は、複眼の光学系を明らかにするために角膜や円錐晶体などの屈折光学系の屈折率分布を干渉顕微鏡を用いて測定した[2]。また、角膜と円錐晶体による屈折光学系について光線追跡を行い、角膜から入った平行光線は円錐体内で一点に集光し、再度ほぼ平行光線となって出射されることがわかった。

野村は、マイクロX線CTを用いて甲虫の3Dデータ計測と走査型電子顕微鏡によるナノスーツ法を用いたシロアリの観察を行った[3]。この二つの方法は昆虫を非破壊で観察することを可能としている。

本研究のように個眼の表面形状を精密に3次元再構築した研究は筆者らが調査した限りでは存在しなかった。

4. 複眼構造の計測実験と3次元再構成

4.1. 試料

本稿で研究対象とした昆虫は、オオカマキリとオキナワハラビロカマキリである。電子顕微鏡とX線CTで撮影するため、オオカマキリの個体を二つ用意した。電子顕微鏡での撮影は生体に近い状態で行えたが、X線CTで撮影する個体は10日前に死亡したため、撮影したところ個眼の形状が変形してしまったことが判明した。時期により、オオカマキリを捕獲することができなかったため、オキナワハラビロカマキリを購入した。そのため、X線CTでの撮影はオオカマキリとオキナワハラビロカマキリの複眼を用いて行った。

4.2. 走査型電子顕微鏡とX線CTによる撮影

複眼と個眼の3次元モデルから正確な視野を推定するためには、個眼レンズの実物に近いモデル形状が必要となる。そのため、走査型電子顕微鏡(SEM)とナノフォーカスX線CTを用いた計測データを得ることで正確な3次元モデルが製作できるのでないかと考えた。

SEMによる撮影は、カマキリの表面の個眼形状を知るために行った。撮影はナノスーツ法を用いて行った。ナノフォーカスX線CTによる撮影は、株式会社JMCに委託し、GE社Phoenix

Nanotom M という CT 撮影装置を用いてオオカマキリの乾燥した頭部を撮影した。図 2 はオオカマキリの SEM による複眼の撮影結果（左）と、同種別個体の X 線 CT 撮影による 3 次元再構成像（右）の画像である。これらの画像はほぼ同じ角度からの表示結果を提示している。上の画像が 25 倍の撮影結果であり、下の画像が 100 倍の撮影結果である。X 線 CT 撮影による 3 次元再構成像からは個眼レンズ形状の凹凸が激しく形状がわかりにくくなってしまっている。これは撮影する 10 日前に死亡したため、乾燥による変形が原因だと考えられる。

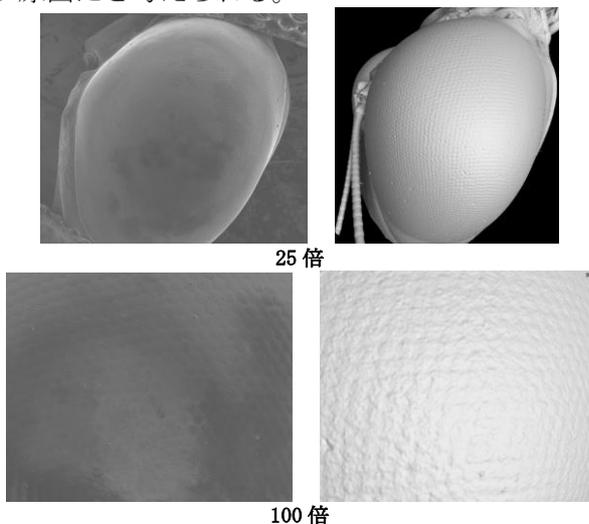


図 2. SEM の撮影結果（左）とナノ CT 撮像結果からの等値面点群生成結果（右）

5. 3次元モデルを用いた視野推定

5.1. 個眼表面形状の推定

撮影結果と 3 次元モデルを用いて、個眼一つの視野がどのようになっているかを推定する。

SEM の撮影結果から、カマキリの個眼レンズ形状は正六角形状になっていることがわかる。このことから、個眼表面は球面の一部であると想定できる。また、個眼の視野は正六角錐状になると仮定できる。

X 線 CT 撮影による 3 次元再構成像からは、個眼レンズ形状がわかりやすい場所を拡大し、計測したところ、各個眼の直径が 60~70 μm であることがわかった。この計測はボクセルサイズを 1 μm にし、最大解像度で撮影した結果に対して等値面生成処理により複眼表面に分布する点群を求めたうえで行った（図 2 右下）。

これらのことから、一個眼表面の等値面の点群データが約 3000 個あるということになる。そのため、点群データを一番フィッティングできている球体を探すために、最小二乗法により球面フィッティングを行い、個眼レンズ形状を推

定する。

5.2. 個眼の視野推定

推定した個眼レンズの表面形状を用いて、一つの個眼に入る外光の範囲を推定する。図 3 は清水が蛾の角膜と円錐晶体をモデル化した屈折光学系について光線追跡を行った結果の模式図である。この図では、集光する角度は 21° が限界だと説明している。また、個眼の裏面は平面となるレンズ系が想定されている。

本研究では、この模式図の考えに基づいたうえで、個眼レンズの表面形状が測定できれば、外光を取り込むより正確な範囲がわかり、正六角錐の視野が推定できると考える。フィッティングにより求めた表面の個眼レンズモデルの曲率から個眼一つの視野を正確に推定することができる。

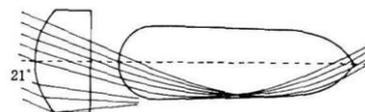


図 3. 個眼視野の模式図（文献[2]より引用）

6. おわりに

本研究では、昆虫の視野の再現を目的としてカマキリの複眼構造と個眼レンズを 3 次元モデル化した。SEM による撮影では、ナノスーツ法を用いることで複眼を変形させずに撮影できた。ナノフォーカス X 線 CT 撮影による 3 次元再構成像では、複眼全体で見ると、形状は実物に近いモデル化ができていた。ただし、個眼レンズ形状は生体に近い状態で撮影できなかったため、凹凸が激しく本来の形状の推定は困難であった。しかしながら、個眼レンズ表面点群のフィッティングにより球面形状として 3 次元モデル化することで、個眼一つの視野を推定できる見通しが立った。

今後は、個眼レンズ形状のモデル化の精度を上げ、より実物に近づけることで精度の高い個眼視野推定を行う。さらに、その個眼視野から複眼全体の視野推定を行い、昆虫が外界をどう認識しているかの知見を高めていく。

7. 参考文献

- [1] コトバンク, “複眼,” <https://kotobank.jp/word/%E8%A4%87%E7%9C%BC-123925> (2023. 1. 13 アクセス) .
- [2] 清水嘉重郎, “視覚のメカニズム—複眼の光学系—” 応用物理, 49(4), 321-329, 1980.
- [3] 野村周平, “昆虫学の最近の進歩と今後の展開 体系学・形態学,” 昆蟲 (ニューシリーズ), 21(1), 14-26, 2018.