甲虫上翅の断面構造とその最適性†

陳 錦 祥* 岩 本 正 治** 倪 慶 清**
倉 鋪 憲*** 齋 藤 憲 司***

Cross Sectional Structure and Its Optimality of the Fore-Wing of Beetles

by

Jinxiang CHEN*, Masaharu IWAMOTO**, Qing-Qing NI**,
Ken KURASHIKI*** and Kenji SAITO***

To obtain the new idea on the improved optimum composite material structures, the fore-wing structures of *Allomyrina dichotoma* and *Prosopocoilus inclinator* have been investigated using scanning electron microscopy. As a result, the structural characteristics of the fore-wing of beetles are made clear and some new knowledge on the optimum light weight composite material structures is obtained. Particularly, the frame structure of the central void is observed in the fore-wing of the beetle, and it consists of the upper lamination, the central void and the lower lamination. The upper lamination and the lower lamination are joined through trabeculae between both of them. The cross section at the edges of the fore-wing is the rectangle and/or the triangle of the central void except the apex. The structure of the fore-wing of beetles possesses both high flexural rigidity and stable secondary moment of inertia and the frame structure of the central void is adopted ingeniously in it. Furthermore, a joint structure between the left and right fore-wings is found.

Key words: Optimum, Composite structure, Beetle, Fore-wing, Microstructure

1 緒 言

軽量化複合構造もしくは薄肉構造の最適設計のヒントを得るために、新しい複合材料の設計手法の開発が必要である。¹⁾ その一つの方法論として、自然界の動・植物の構造を真似る方法 (バイオミメティクス, biomimetics) が注目される。^{2), 3)} これまでに、生物学的観点から昆虫翅構造^{4), 5)} および工学的観点からバイオミメティクス複合材料の力学特性²⁾ についての報告がみられるが、甲虫上翅の3次元構造および力学解析の観点からの研究はほとんどみられない。⁶⁾

本研究では、甲虫としてノコギリクワガタ (*P. inclinator*) とカブトムシ (*A. dichotoma*) の上翅を取り上げ、甲虫上翅の3次元の微視的観点からの構造解析を行い、最適軽量化複合材料構造の開発に対する基礎的知見を得ることを目的とする。甲虫には堅い上翅と柔らかい下翅とがあるが、上翅を対象とする。その理由は、「保護」と若干の「飛行」とを兼ね備え、高強度、軽量化の特徴を有していると思われるからである。また、両甲虫を取り上げたのは、同じ甲虫類ではあるが、その習性と体型が大きく異なる事から比較検討するためである。

2 試料および実験方法

SEM 観察用の試料にはノコギリクワガタとカブトムシの上翅を切断したものを用いる。Fig. 1 に甲虫上翅の座標系と試験片の切断位置を示す。Fig. 1 (a) には上翅各

部の名称を示している。Y 軸は上翅の正中線 (Mesal sutural edge) にある。上翅周辺縁は正中線のほか、前端 (Anterior edge)、側端 (Epipleuron) および後端 (Apex) とし、縁で囲まれている部分を中央部 (Middle part) と呼ぶことにする。また、Fig. 1 (b) 中の番号 X11, Y30 などはそれぞれ上翅の X 軸と Y 軸における切断位置であり、一つの上翅について X 軸方向に左、中、右、Y 軸方向に前、中、後のそれぞれ3箇所での断面様相を観察する。番号の最後桁 0 は左上翅、1 は右上翅を表し、左右上翅は正中線における接触部分を除き、巨視的に正中線に関して対称であるので、左右翅を区別する必要のない場合は番号の最初桁のみを用いる。

(a) Cartesian coordinates and name of the fore-wing. (b) Observation position in X, Y axis.

Fig. 1. Observation position of the fore-wing of beetle.

† 原稿受理 平成 11 年 6 月 7 日 Received June 7, 1999

* 京都工芸繊維大学大学院 〒 606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Graduate Student, Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

** 正 会 員 京都工芸繊維大学工芸科学研究科先端ファイブ科学専攻 〒 606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Division of Advanced Fibro-Science, Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

*** 京都工芸繊維大学機械システム工学科 〒 606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Dept. of Mech. and Sys. Eng., Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

Fig. 2. Cross-sectional shape of the fore-wing of the *P. inclinatus* at X-Z, location Y1.

(a) *P. inclinatus*

(b) *A. dichotoma*

Fig. 3. Representative cross sectional shapes at X-Z, location Y3. M, mesal sutural edge; E, epipleuron.

3 実験結果および考察

3・1 上翅の微細構造

ここでは X-Z および Y-Z 断面における代表的切断位置 (Fig. 1 (b)) での上翅の断面微細構造⁷⁾を考察する。

3・1・1 X-Z 断面の様相 Fig. 2 はノコギリクワガタムシの X-Z 断面 (切断位置 Y1) の全体様相を示す。左右両端 (正中線と側端) は中空の擬似三角形で、中央部は厚さがほぼ等しい中空層であることが分かる。

両端の断面形状は切断位置によって大きく異なる。Fig. 3 に代表的な端面形状を示す。各種の断面形状が存在しており、かつ正中線端と側端においても差異が見られる (Fig. 3 (a))。これらの差異は、カブトムシについても言える (Fig. 3 (b))。Fig. 4 にノコギリクワガタムシの X-Z 断面における上翅中央部の断面様相の例を示す。甲虫上翅は一般の昆虫胴体の皮膚と同様な構成要素を有していると言われているが、上翅の中央部において上層、下層とほぼ均一な空隙層が存在し、上下層間には Fig. 4 に示すような柱 (Trabecula) で強化されている特徴を有していることが分かった。

ここで、中央部の断面構造を記述するため、Fig. 5 に断面の模式図を示す。断面形状のパラメータとして上下層と空隙層の厚さ L_u , L_d と L_v および空隙率 F_v を用いる。空隙率 F_v は空隙層の厚さ L_v と同位置の上翅の厚さ T の比で定義する。

$$F_v = \frac{L_v}{T} \times 100\% \quad (1)$$

Fig. 4. Cross section in middle part of the fore-wing of the *P. inclinatus* at X-Z, location Y1.

Fig. 5. Schematic of cross section of the fore-wing.

Fig. 6 にノコギリクワガタムシの X-Z 断面における上下層と空隙層の厚さの変化を示す。厚さの値は Y1 ~ Y3 の平均値で表している。ここで X 軸は断面の正中線端と側端をそれぞれ 0 と 1 に正規化し、両端の最大空隙層まで測定する。図より X-Z 断面における各層の厚さは“凹”字形を有し、中央部では上下層および空隙層の厚さはどこの点においてもほぼ一様である。しかし、両端では厚さの変化が激しく、特に空隙層の厚さは中央部と比べ、6 倍以上も増大している。Table I にはノコギリクワガタムシおよびカブトムシに対して断面各部位の厚さの平均値を示す。カブトムシについて性別による差異も示している。この表から分かるようにノコギリクワガタムシとカブトムシの上翅断面における各層の厚さは大きく異なっている。中央部の空隙層の厚さはノコギリクワガタムシには約 40 μ m (空隙率約 30%) に対し、カブトムシには約 100 μ m (空隙率メス約 45%, オス約 60%) であり、カブトムシのほうが約 2.5 倍も大きい。しかし、カブトムシの下層の厚さは逆にノコギリクワガタムシより 20 μ m 以下と小さい。

以上に示したように甲虫上翅 X-Z 断面の詳しい構造は甲虫の種類、性別、切断位置によってかなり異なる。しかし、中央部には薄くて広い空隙層が存在し、両端の空隙層の厚さは中央部のそれより何倍も大きいことが共通している。

次に正中線における左右上翅の差込構造を考察する。Fig. 7 にノコギリクワガタムシ左右上翅の正中線付近の X-Z 断面形状を示す。左右上翅は相互に差込み合う断面形状を有している。非常に簡単な形を取っているが、生

Fig. 6. Average thickness of Y1 ~ Y3 for the fore-wing of male *P. inclinator*.

Table I. Cross section size of the fore-wing of the *P. inclinator* and *A. dichotoma* at X-Z.

Object		<i>P. inclinator</i> ♂	<i>A. dichotoma</i> ♀	<i>A. dichotoma</i> ♂
Mesal sutural edge	T (μ m)	488	504	332
	Lv (μ m)	257	333	270
Middle of the fore-wing at X-Z cross section	Lu (μ m)	69	86	45
	Lv (μ m)	41	101	101
	Fv (%)	28	45	59
	Ld (μ m)	37	19	12
Epipleuron	Lv (μ m)	348	318	489
	T (μ m)	669	576	704

All data are average of X-Z, location Y1, Y2 and Y3.

♂, male; ♀, female.

きているものに対して左右上翅の差込部を外すにはかなりの力が要すると思われる。また、この部分は水が漏れないような構造となっており、良い開閉式のジョイント構造である。

3・1・2 Y-Z 断面の様相 Fig. 8 にノコギリクワガタムシの上翅の X1, X2 と X3 の切断位置における Y-Z 断面の全体模式図と前後端の局部断面様相を示す。前端は上翅の根元で大きな空隙域を有している中空断面であるが、後端は上翅の翼先なので、空隙層は一番薄くなっている。前端の空隙層の厚さは約 250 μ m であり、これに比べ、中央部の空隙層の厚さは約 40 μ m でほぼ均一である。各切断位置においても空隙層の変化の様子が類似してい

Fig. 7. Cross section of the mesal sutural edge of the *P. inclinator* at X-Z, location Y2 or Y3.

Fig. 8. Cross section of the fore-wing of beetle at Y-Z.

る。しかし、断面全体の形状は、特に根元部分は切断位置によって大きく異なる。これは Fig. 9 に示す X1 の切断位置における上下層と空隙層の厚さの値からもその変化の一端が見られる。ここで Y 軸は断面の後端と前端をそれぞれ 0 と 1 に正規化している。これらの特徴は、カブトムシに対しても同様に言える。

以上の X-Z および Y-Z 断面様相の微細構造から後端(翼先)を除き、上翅の縁の断面形状は擬似中空三角形または擬似中空長方形であることがわかる。また中央部には薄くて広い空隙層を有している。したがって、上翅全体は中空のフレーム構造となる。甲虫上翅のこの構造特徴はトンボ、セミおよび他の昆虫など⁸⁾と異なり、甲虫特有のものと考えられる。

3・2 上翅断面構造の最適性

甲虫上翅は生物体であり、飛ぶ機能を要するとともに、身体保護の役を果たしている。また、甲虫上翅は自然界に存在する生態系のもので長年の進化により最適性を有しているものと思われる。甲虫は上翅を振って飛ぶため、飛ぶ過程中的上翅の振る舞いが極めて複雑である。しかし、上翅は根元に支持点しかないため、飛ぶ過程でこの支持点に対して曲げおよびねじり変形特性は、上翅にとって重要である。曲げ、ねじり変形には曲げ剛性(EI)とねじり剛性(EJ)が基本パラメータとなる。ここで、 E はヤング率、 I と J はそれぞれ断面二次モーメントと極断面二次モーメントである。そこで、これらの断面二次モーメントを用い、上翅縁の断面形状の最適性について検討する。

3・2・1 断面二次モーメント 昆虫上翅の飛行状態および翅力学モデルについていくつかの提案^{9), 10)}がされているが、ここでは上翅の曲げ変形について根元の支持点に対して上翅は片持ち梁として簡単にモデル化することで議論を簡略化する。前述のように甲虫上翅の縁は中空断面で、位置により断面の形も変化しているが、根元の支持点に対し、曲げ変形特性は正中線と側端の断面形状に大きく影響される。そこで、これらの中空断面における、図心に関する断面二次モーメントを計算してみる。断面二次モーメントは中空断面の形状と面積に依存するので、計算にはこれらの条件を揃えて比較を行う。

上翅縁の中空断面形状は前述のとおりノコギリクワガタムシは主に擬似三角形であり、カブトムシは擬似長方形または擬似三角形である。また、上翅の部位によって中空断面形状と肉厚が変化している。Fig. 10 にその中空断面の模式図を示す。ここでは、観察された上翅の各

縁断面を中空の正三角形(A1)、二等辺三角形(A2, A3, A4)、正方形(B1)、長方形(B2, B3)または直角三角形(B4)で模式化する。これらの中空断面の幾何学寸法の決定には、簡便的に Fig. 11 に示す中空断面モデルを用いる。Fig. 11 (b) と (c) は正三角形中空断面と長方形中空断面である。まず、正三角形中空断面の肉厚 t と長さ B の比 $m (= t/B \times 100\%)$ をパラメータとする。 m の実測値はノコギリクワガタムシとメスカブトムシにおいて 15% ~ 20% であるため(オスカブトムシでは約 5%)、モデルには $m = 15\%$ を用いる。また、断面面積を一定とし、肉厚が求められる。他の中空三角形および中空長方形については断面面積と肉厚を中空正三角形の値と同様とすることにより各中空断面の幾何学寸法が決められる。以上諸条件下で各断面二次モーメントを計算し、同一面積の実円断面(Fig. 11 (a))の断面二次モーメントとの比(無次元パラメータ I_x で記す)で表し、比較検討する。上翅の各部位における無次元断面モーメント I_x の値は Fig. 10 に示している。Fig. 10 からノコギリクワガタムシとカブトムシ上翅の Y3 位置における I_x の値は正中線では 2 以上、側端では 3.5 以上となるが、Y1 と Y2 においては正中線と側端とも 1.5 以下になる。上翅の根元近くでは高い断面二次モーメントを有していることがわかる。

3・2・2 極断面二次モーメント ねじり変形における極断面二次モーメントは中空断面の形状および肉厚のみならず、回転軸にも依存している。ここで、中空断面の形状と肉厚は断面二次モーメントの計算条件と同様にするが、回転軸の位置について甲虫の飛ぶ状態を考え、Fig. 12 に示すように上翅根元からの延長線上にあるとする。

回転軸の位置は Fig. 13 の“O”点に示すような各中空断面の肉厚の中心線の角点 A または辺中央点 C からの回転軸 O までの距離を実円(Fig. 13 (a))または(c))半径 r の n 倍の形式である“ nr ”で表している。したがって

Fig. 10. Side shapes and I_x values.

- A1 : an equilateral triangle.
- A2 : a vertical isosceles triangle at an angle of 45°.
- A3 : a upside down isosceles triangle at an angle of 45°.
- A4 : an isosceles triangle at an angle of 45°.
- B1 : a square.
- B2 : a rectangle with $L : W = 1 : 1.5$ (see Fig. 11).
- B3 : a rectangle with $L : W = 3 : 1$ (see Fig. 11).
- B4 : a right triangle with the side ratio of 3 : 4 : 5.

Fig. 9. Thickness of the fore-wing for male *P. inclinatorius* at Y-Z, location X1.

(a) Circle (b) Triangle (c) Rectangle
Fig. 11. Central void models for computation of the moment of area.

Fig. 12. Rotation axis of fore-wing in *P. inclinatus*.

て、回転軸の位置はパラメータ n で一意に決められる。実測の n 値は甲虫の性別に問わずノコギリクワガタムシは約 10 (Y3) ~ 20 (Y1), カブトムシは約 15 (Y3) ~ 35 (Y1) である。異なる n 値による極断面二次モーメントと実円のそれとの比 (無次元化, J で記す) の計算結果を Table II に示す。比較のため円環の結果および図心を通る回転軸の結果をも示す。但し、肉厚と断面面積は中空正三角形と同様としている。Table II から各種中空断面の図心に関する無次元極断面二次モーメントは Wainwright ら¹¹⁾ の結果と同様であり、円環が一番大きい。しかし、Fig. 13 に示すような角点 A ($n=0$) から回転軸の距離 nr までの任意回転軸に対し、無次元極断面二次モーメントは円環が一番小さく、中空長方形および三角形は大きい値となることが分かる。また、辺の中央の C 点から回転軸 O 点に対する場合、各断面形状における J の変化は小さいが、縦長い中空三角形と横長い中空長方形について J はそれぞれ最小と最大となる。

正三角形断面形状の極断面二次モーメントについて前述の形状パラメータ $m (=t/B)$ と回転軸位置パラメータ n を用いて求めるとつぎの関係が得られる。

$$J = \frac{\frac{\pi}{9m} + 2\left(\frac{1}{3}\sqrt{\frac{\pi}{m}} + n\right)^2}{1 + 2(n+1)^2} \quad (2)$$

Fig. 14 には上式における J と m , n の関数曲線を示す。極断面二次モーメント J は m の小さい領域において、 n が大きいほど激しく変化しているが、 m の大きい領域では、 n の変化に対して落ち着いている傾向となる。ノコギリクワガタムシとカブトムシの上翅側端の m は約 5% ~ 20%, n は約 10 ~ 35 である。この領域では、 m , n の変化に対して極断面二次モーメントの変化が少ないこと

(a0) Circle (a1) Triangle (a2) Rectangle
(c0) Circle (c1) Triangle (c2) Rectangle
Fig. 13. Central void models for computation of the second moment of area.

Table II. The second moment inertia of area with different cross-sectional shapes.

Shapes	Centroid	n (m=15%)				
		5	10	15	25	35
A1	2.48	1.58	1.28	1.18	1.11	1.08
A2	2.72	1.53	1.26	1.17	1.10	1.07
A3	3.26	1.06	1.02	1.01	1.00	1.00
C1	2.48	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98
C2	2.72	1.09	1.04	1.03	1.02	1.01
C3	2.72	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99
C4	3.26	1.12	1.06	1.04	1.02	1.02

Fig. 14. Relation of second moment of area to the parameters m and n .

が分かる。

3・2・3 断面二次モーメントと極断面二次モーメントの相互関係 ここでは以上の諸図表から曲げとねじり変形に対する上翅前端から後端への縁断面形状の変化を断面二次モーメントと極断面二次モーメントの相互関係から検討する。

上翅の切断位置 Y3 において、縁の断面形状は Z 軸方向と X 軸方向のサイズ比は切断位置 Y2 より大きく、肉厚も大きいので、大きい断面二次モーメント I_x を有している (正中線では 2 以上、側端では 3.5 以上, Fig. 10 参照)。しかし、このような断面形状では極断面二次モーメントは小さくなる (Table II 例 C1, C3)。一方、前述のように Y3 位置の n 値は Y2, Y1 よりかなり小さく、Table II における J は n の減少に対し、A1 と A2 の場合

以外には変化が少なく, 均一な極断面二次モーメントとなる. すなわち, 切断位置 Y3 (上翅の根元付近) では大きな I_x を有しているが, J の値は切断位置によらずほぼ一定であることがわかる. ちなみに Y3 位置における上翅の厚さは Y2, Y1 のそれより大きいので, 上翅の根元の断面構造は曲げ変形に対して合理的なものと言える.

上翅の Y2 位置の断面形状は縦横比と m 値が Y3 位置のそれらに比べ, 小さくなり, 断面二次モーメントもだいぶ小さくなる (Fig. 10 参照). 一方, 小さい縦横比の縁断面形状は大きな J を得られる (Table II, C2 の J は C3 より大きい). Y2 位置では小さい縦横比によって回転軸の位置 n の増大による J の減少を補っているものと考えられる.

このように甲虫上翅左右両端をはじめ, 甲虫上翅の全体構造は大きい極断面二次モーメント J を持ちながら, 前端になるほど断面二次モーメントが大きくなる構造を有している. 甲虫の飛ぶ状態において上翅の根元に近いほど受ける力は大きくなるので, 最適化の結果であると思われる. また, 上翅の両端と前端の空隙層の厚さは中央部に比べ, 約 3 倍以上も大きいので, 広くて薄い中央部を有しても全体として高強度と軽量化のフレーム構造となる.

4 結 言

本研究では甲虫上翅を解析し, その微細構造の最適性について検討した結果, 次の知見を得た.

(1) 甲虫上翅は左右両端と前端の擬似中空長方形または中空三角形の断面形状および中央部の中空層から構成される中空フレーム構造である. 中央部の上下層間に小柱で繋がっていることがわかった. また, 上翅の部位によって断面形状が変化し, 均一な極断面二次モーメントを有すると同時に, 上翅の根元に近いほど曲げ剛性が大きくなっている.

(2) 甲虫の左右上翅は自由に開閉できるジョイント構

造になっていることを明らかにした.

(3) 微視的には空隙厚さ, 断面形状と配置位置等の変化により甲虫構造の最適性が見受けられ, 最適軽量化複合材料構造の開発に有益な基礎知見が得られた.

本研究の遂行に当たりご助言をいただいた京都工芸繊維大学の遠藤泰久教授と同大学大学院ベンチャー・ラボラトリーの李軍博士, 試料を提供された一田昌利助教授に深謝いたします.

参 考 文 献

- 1) 日本複合材料学会編, “複合材料ハンドブック (IV編設計)” (1989) 日刊工業.
- 2) 例えば, 谷本敏夫, 陳 慶輝, 田口美穂子, 日本繊維機械学会研究発表論文集講演要旨集, 第 51 回年次大会, 78 (1998).
- 3) 黒川智弘, 日本複合材料学会誌, **25**, 122 (1999).
- 4) B. Zelazny and A. C. Neville, *Insect Physiol*, **18**, 2095 (1972).
- 5) P. J. Gullan, P. S. Cranston and K. Hansen McInnes, “The Insects: An Outline of Entomology” (1995) Chapman and hall Tokyo.
- 6) 陳 錦祥, 岩本正治, 倪 慶清, 倉鋪 憲, 齋藤憲司, 日本材料学会第 28 回 FRP シンポジウム講演会論文集, p.269 (1999).
- 7) 齋藤憲司, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 217 (1994).
- 8) 例えば, Smita Bamerjee, *Int. J. Insect Morphol. & Embryol.*, **17**, 313 (1988).
- 9) 下山 勲, 機械の研究, **48**, 7 (1996).
- 10) 石本早霧, 橋本 巨, 日本学術会議第 45 回応用力学連合講演会, 143 (1996).
- 11) S. A. Wainwright, W. D. Biggs, J. D. Currey and J. M. Gosline, “Mechanical Design in Organisms” (1982) Princeton University Press.