

昆蟲飛行特性與翅翼結構分析探討

投稿類別：生物類

篇名：

昆蟲飛行特性與翅翼結構分析探討

作者：

洪 崑。台北市立成功高中。高二 18 班

指導老師：

魏蜀芬老師

昆蟲飛行特性與翅翼結構分析探討

壹●前言

昆蟲家族裏，不乏許多擅長飛行的昆蟲。像是蜜蜂、蒼蠅以及蜻蜓。

在一次全家露營時，我偶然發現一棵苦楝樹幹上，有一隻高砂熊蟬終齡若蟲正準備羽化，其後更讓我觀察到羽化的高砂熊蟬(圖一)，散發翠綠色光澤的翅脈分佈在燈光下清晰可見，十分美麗。為何看似薄弱的蟬翼，能承受振翅時的強大風壓？又蟬翼上美麗的翅脈分佈，純粹只是美麗的造型還是會為牠的飛行帶來何種影響？在見到這隻高砂熊蟬羽化的過程時，我的內心也萌生了探索昆蟲飛行特性與翅翼結構關聯性的想法。



圖一、高砂熊蟬羽化·攝於花蓮太魯閣
國家公園

本文藉由國內外相關文獻的探討與網路上搜尋而來的資料，分析、整理及歸納出昆蟲飛行特性與翅翼結構的關聯性，以昆蟲飛行原理與其翅翼結構兩大主軸為其大綱，逐步分析、比較與論證。

貳●正文

在生物進化史中，昆蟲是第一個飛上天空的動物。昆蟲的飛行依航程可分為遷徙飛行（遠距離）和巡弋飛行（近距離），昆蟲在遷飛過程中表現出極好的持久性，可以持續數小時飛行；在巡弋飛行的過程中則表現出高度的靈活性。而昆蟲振翅飛行的原理研究則著重於飛行中的動力與氣流場域狀態的分析。

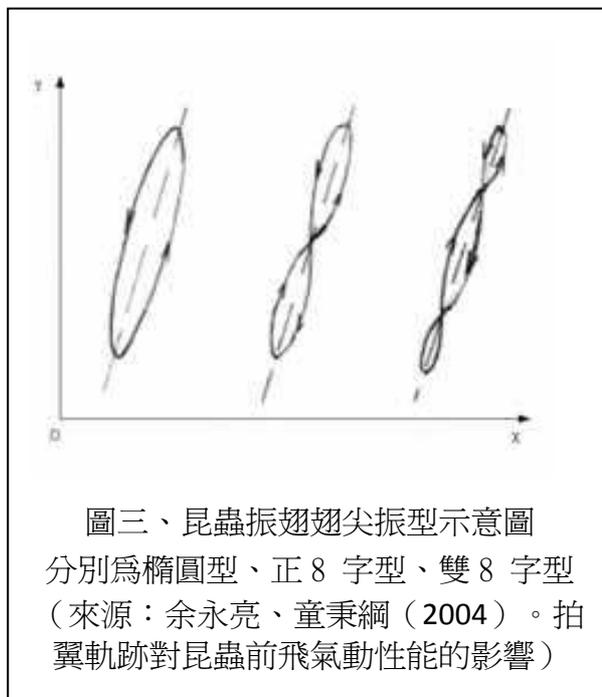
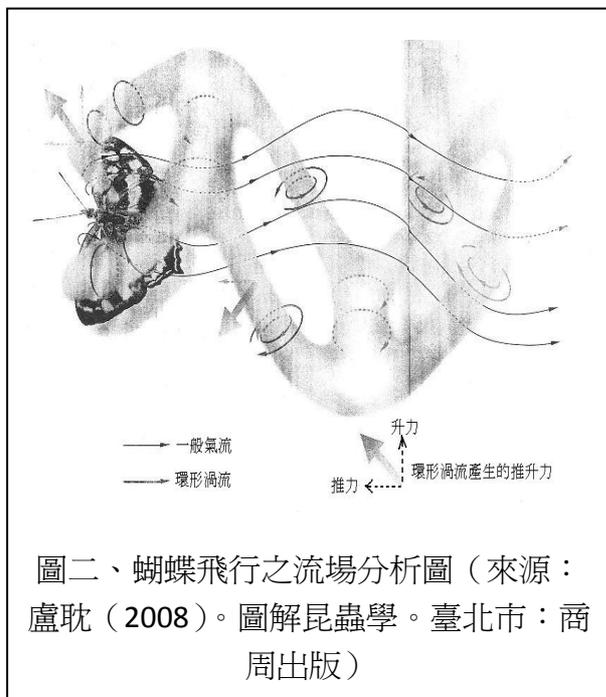
昆蟲的飛行有著許多令人驚奇的特性，像是蜜蜂的振翅頻率可達 80~240Hz，有些文獻記載糠蚊或搖蚊的振翅頻率甚至可以達到 1000Hz，發出刺耳的嗡嗡聲響。另外，昆蟲擁有著許多高超的飛行技巧，舉凡瞬間的垂直上升、翻轉、顛倒飛行或是在空中定點飄浮，甚至還能做到難度更高的瞬間暴衝。而昆蟲的飛行效率，也比起人類的飛行器高明許多。

透過一些文獻與研究的分析可以更加瞭解昆蟲飛行的奧妙：

一、昆蟲飛行原理

昆蟲的飛行模式是藉由不斷的拍動翅膀，造成空氣漩渦的形成，漩渦的內（低壓）外（高壓）氣壓差亦會形成一股向上的升力使其得以向上飛行（如圖二）。為了瞭解昆

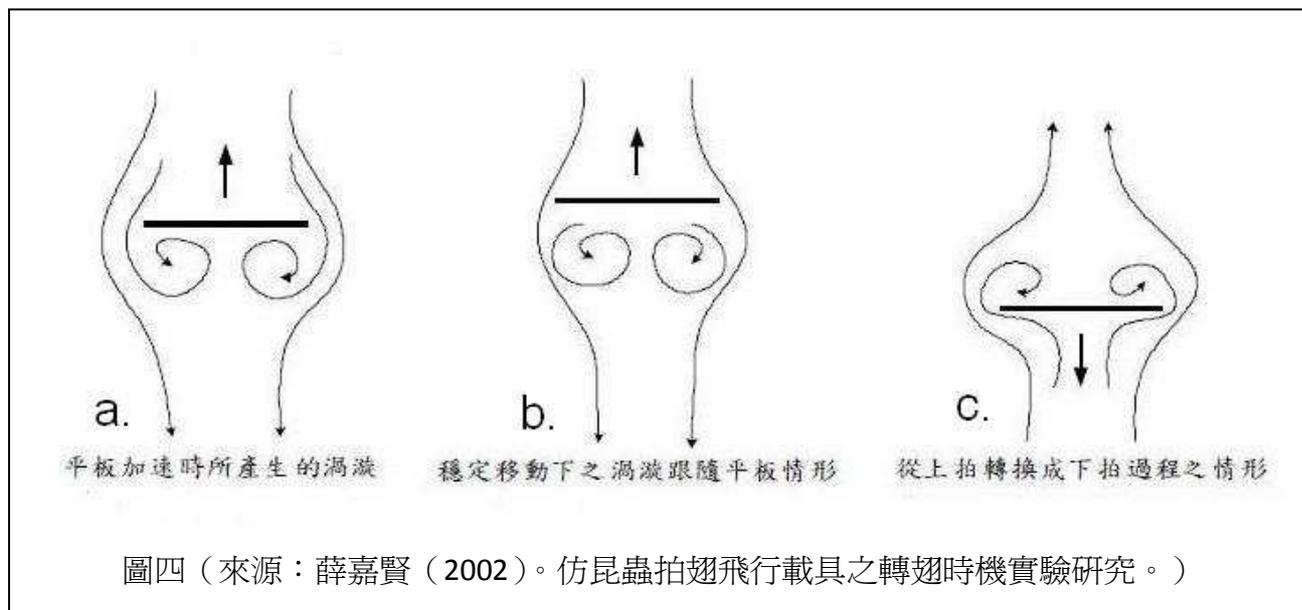
蟲的振翅飛行原理，許多國內外的專家學者都以仿翅為實驗模型，再取得其振翅的氣流場加以分析，若以一般平板模擬翅膀往下加速拍動，透過煙霧效果即可觀察到平板上方會形成兩個明顯的漩渦，強勁的漩渦使得上方形成低壓區，因此為平板帶來往上的力量。如此上下往復的拍動，再藉由周邊空氣流場的變化，巧妙的加以運用與借力，就能使昆蟲輕易的飛升或轉向。



此外，昆蟲的翅膀不僅可上下拍動，亦可向後拍動，拍打時翅膀還能彎曲，由翼尖所形成的往復流線狀似橢圓形、“8”字型、雙“8”字型或更複雜的曲線（如圖三），所以有的學者，即由此特點以8字翼來形容昆蟲的翅膀。而這種8字型的轉動拍翅除能產生前進的推力外，亦能產生額外的舉升力。更有學者將“8”字型拍翼軌跡與橢圓型拍翼軌跡比較，認為正的“8”字型拍翼軌跡可以在增加升力的同時也使得推力不降，是一個比較優的產生高氣動力的方案（余永亮、童秉綱，2004）。可是，另有其他的學者，卻認為在同樣的振翅頻率時，選擇倒“8”字型更容易產生較大的升力，更易於飛行（苗文博、程暮林，2005）。另外，也有一些國外的學者同樣利用模型實驗證實了許多利於飛行的振翅模式，例如：“失速延遲 (dynamic stall)” (Dickinson and Gotz,1993; Ellington et al.,1996)，“轉動升力 (rotation lift)” (Bennett,1970; Dickinson et al.,1999) 還有“尾流擷能 (wake capture)” (Dickinson,1994; Dickinson et al.,1999) 等等。（薛嘉賢，2002）

在 2D 的運動中，當翅膀持續在高攻角向前移動時，翼前緣渦流 (LEV, leading edge vortex) 持續擴大到極限時，就會產生翼後緣渦流，且翼前緣渦流則變成了尾流 (wake)，這個現象我們稱之為失速 (stall)，失速後升力就會跟著下降，然而在失速之前，LEV 的極度激發空氣流場，卻能使翅翼產生非常高的升力而不受失速的直接影響，這個現象我們稱之為延緩失速 (delayed stall)。（歐亦泰，2006）

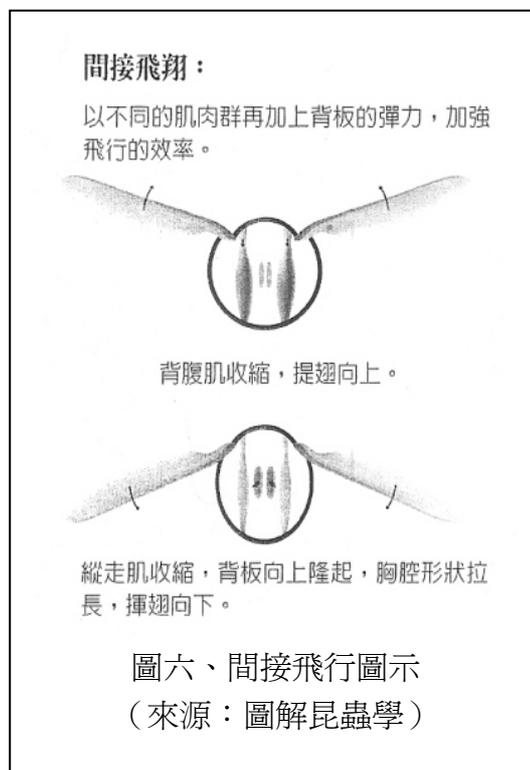
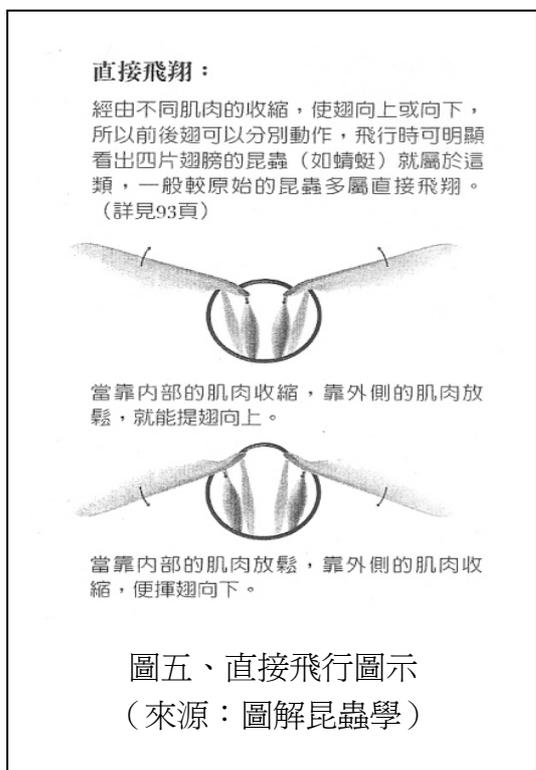
另外，從一般平板模擬翅膀即可以看出，平板從上拍的過程轉換成下拍時（如圖四所示），此時原本跟隨在平板下方的漩渦被下拍的動作擾動，而轉為提供平板向上的力量，此獲取漩渦的能量即所謂的尾流擷能 (wake capture)。（薛嘉賢，2002）



這些複雜的飛行理論，實在無法讓人很直接的明瞭昆蟲飛行奧妙的全貌，若單純的以飛行方式與特性來看，可以概略的歸納如下：

（一）飛行方式

- 1、直接飛行：經由不同肌肉收縮，使翅膀上下擺動，因此前後翅能分別動作，如同蜻蜓等在飛行時能輕易看出有四片翅膀的昆蟲均是直接飛行。一般較古老的昆蟲多屬於此類（如圖五）。



- 2、間接飛翔：以不同肌肉收縮再加上背板的彈力，加大飛行的效率（如圖六）。

（二）飛行特性

昆蟲經過千萬年的漫長演化過程，擁有令人驚歎的飛行技巧。例如家蠅就能在急速飛行過程中急遽減速、懸空停住、以不超過其身長的半徑旋轉等等。昆蟲這種高度飛行的機動性早已引起人們的注意和探索。近幾十年來由於非定常理論（unsteady）完善，實驗和計算技術的不斷發展，加上軍事對微型飛行機械原理的需求，這一方面的研究逐漸有了較大的發展。

1、快速連動

昆蟲的兩對翅膀能夠動作協調一致，進行十分有效的飛行，也可以因為飛行角度的需求或氣流的影響而作多角度的傾斜轉動，甚至前後翅與左右翅可同時作不同角度、頻率與振幅的機動調整。這種靈敏的飛行控制除了需由強大的腹肌與背肌的連動外，與前、後翅之翅根部也有很密切的關聯。

2、長效飛行

昆蟲為了生存和繁衍後代，其遷移飛行能力也是十分驚人的。每年春夏在南方越冬後孵出的粘蟲，可以成群飛越大海，到 1,488 公里外的北方去覓食；小地老虎能飛行 1,328~1,818 公里；稻縱卷葉螟能飛行 700~1,300 公里；褐飛蝨能飛行 20,000 公里；白背飛蝨能飛行 300 多公里；蜜蜂也是健飛的昆蟲，能持續飛行 1,000 公里。蜻蜓和某些天鵝蠶螯也能夠持續飛行數百公里而不著陸。遷移最遠的昆蟲是苧麻赤蛺蝶，從北非到冰島，有 6,436 公里之遙。（嘉義縣自然史教育館，2009）

3、變因組合

昆蟲的飛行速度也是相當可觀的，一般翅型狹長、轉動幅度較大的種類飛行較快。昆蟲的飛行速度主要取決於振翅頻率與攻角的搭配組合，上升力則與頻率、振幅有較密切之關係。而飛行方向與瞬時動作之變化則與連動肌肉與翅翼扭轉有關。蟲體與翅翼的構造搭配不同的振翅變因模式，形成了昆蟲具備優異飛行性能的主要因素。

二、翅膀形式結構與速率

昆蟲與飛行相關的結構主要可分為翅膀、翅根部與連動肌，翅根部上的一對或兩對翅，在腹背肌肉的帶動下上下拍動，同時翅根部的肌肉群控制翅翼圍繞翅軸線（從翅根部向翅尖方向的中央直線）扭轉，從而產生足夠的升力和推力。昆蟲的翅面是膜質，其間又分佈許多粗細不等的管狀翅脈。管狀的翅脈較硬又有一定的彈性，具有支撐和加固翅的作用。

昆蟲的運動感應功能是極其精妙，為了控制飛行的速度、方向及姿態，昆蟲透過改變翅的運動方式來實現，而某些昆蟲能透過改變自身各部分的相對位置來控制飛行，例如像蜻蜓這類昆蟲，由於其腹部較長，能夠彎曲甚至捲曲，因此腹節對飛行控制也有一定作用。

（一）翅的形式

有翅昆蟲一般有兩對翅，但前後翅的發達程度隨不同類群而有很大的不同。在白蟻和蜻蜓等類昆蟲中，前後翅皆發達，而且大小和形狀也大致相似。在蝗蟲和甲蟲中，後翅明顯比不用於飛行的前翅大。在蜂類及蟬類等昆蟲中則前翅比後翅大。

大多數昆蟲的翅為膜質而透明，但演化過程中，翅的型態、發達程度、質地和表面的生成物等發生了種種適應性的變化，大致可分為八種類型（嘉義縣自然史教育館，2009）：

- 1、兩對翅膜翅：膜翅的翅膜質薄且透明，翅脈非常清楚，例如蜂類、蟻類和蜻蜓的前後翅，甲蟲、蝗蟲、椿象等的後翅。
- 2、平衡肢：平衡肢是由翅退化成很小的肢管狀，在飛翔時起平衡身體的作用，例如蚊、蠅等的後翅。有些昆蟲只有一對翅發達，如蚊、蠅、雄性介殼蟲的前翅發達，而後翅退化成平衡肢；撚翅蟲的雄蟲則後翅發達而前翅退化成平衡肢。
- 3、鱗翅：鱗翅的質地為膜質，翅面覆蓋一層帶不同顏色的各種鱗片，有些種類的鱗片特化為發香鱗，可發散化學香味，吸引異性。例如蛾類、蝶類的翅。
- 4、毛翅：毛翅的質地為膜質，翅面各部位生有疏密不同的許多細毛，例如石蠶蛾的翅。

- 5、 鞘翅：鞘翅的翅角質堅硬，翅脈消失，不用於飛行，僅用來保護背部和後翅，後翅仍為膜質，用以飛翔，例如金龜子、金花蟲、天牛等甲蟲的前翅。
- 6、 翅覆：翅覆的翅質加厚堅韌如皮革，半透明仍保留翅脈，不但能飛翔而且兼有保護作用，平時完全蓋在體背側面和後翅上，後翅為傘狀膜質，利於飛行。例如蝗蟲、螻蛄、蟋蟀的前翅。
- 7、 半翅鞘：前翅根部角質化，端部及半鞘翅的根半部為皮革質，端半部為膜質有翅脈，後翅仍為膜質。例如椿象的前翅。
- 8、 纓翅：纓翅的翅膀退化，翅的質地為膜質，翅狹長，邊緣長有很多細長的纓毛，例如薊馬的前後翅。

(二) 翅的結構

昆蟲的翅大多是膜質的，沒有肌肉生成，因此控制翅的運動只能靠翅根部的肌肉和作用於翅面上的氣流動力實現。

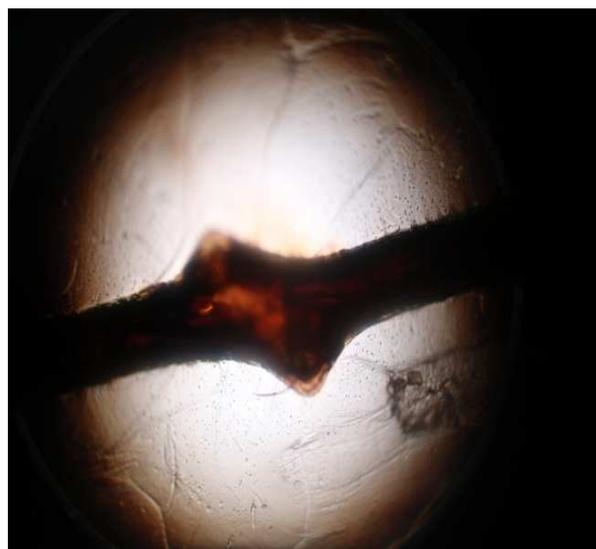
- 1、 翅的生成：昆蟲的翅是由胸部及背皮逐漸演化形成的。生長在中胸的一對叫前翅，生長在後胸的一對叫後翅。昆蟲的翅由肌肉控制運動，可分直接肌（直接飛行）和間接肌（間接飛行）。在鱗翅目、同翅目和膜翅目等許多昆蟲中，前翅和後翅藉由翅根部連接起來，使前後翅在飛行時互相配合，協調動作。
- 2、 翅的外型：昆蟲翅一般成三角形，具有三邊和三角。翅展開時，靠近頭部的一邊稱前緣，靠近尾部的一邊稱內緣或後緣，其餘一邊稱外緣。由這三邊所形成的角，即前緣基部的角稱肩角、前緣和外緣間的角稱頂角或翅頂，外緣和後緣間的角稱臀角。
- 3、 翅膜：翅膜是由兩層極薄的膜質表皮合併而成，同時在夾層中還佈滿許多氣管，有的靠近翅根部的膜上還長有細微的鬃毛，需要以電子顯微鏡才能觀察的出來（如圖七）。
- 4、 翅脈：翅面氣管部分加厚就形成翅脈，對加固翅的強度有很大的作用，很像是兩層薄紙所作成的風箏骨架構造。翅脈有縱向脈和橫向脈、縱橫脈相交空間可形成翅室，翅的 3 個邊緣、翅脈和翅室都是鑑定昆蟲種類的重要依據。

- 5、其他特徵：例如蜻蜓的翅痣有穩定飛行的功用、而蟬在左右前翅的中央縱翅脈上，我發覺有個特徵與其他翅脈有著顯著的不同，那就是多長了一個“脈結”（如圖八），這個“脈結”雖小，但是以肉眼即可明顯的觀察出來，而且它的位置似乎就位於整個翅翼的重（質）心與翅軸線上。比較其他台灣常見的蟬科標本（可禮大蟬、北埔蟬、台灣虎翅蟬、其他熊蟬屬等）發覺亦都有此結構特徵，但是遍查了國內外相關的研究報告或文獻資料，卻找不到與它有關的論述或研究。

在高倍率光學顯微鏡的觀察下，它呈現類似琥珀的透明色澤，纖維化的程度不似連接它的縱脈。我想，這個“脈結”的結構特徵與位置必定在其飛行時，提供某種重要或關鍵性的功能或作用，例如增加整體翅翼之剛性或韌性、迅速有效的扭轉翅面角度改變振翅的方向或角度、舒緩高速振翅時翅面所承受之壓力或翅脈所承受之拉力、提供飛行時翅面穩定平衡的作用等。不過，這些都只是我的推論而已，實際上的功能與作用，有待進一步的探討與研究。



圖七 高砂熊蟬翅脈根部鬚毛
（來源：學校生物實驗室利用光學顯微鏡觀察）



圖八 高砂熊蟬翅脈脈結
（來源：學校生物實驗室利用光學顯微鏡觀察）

由於昆蟲的翅不具備較好的流線型，且利用滑翔飛行的時間較短。爲了浮於空中必須通過不斷的振翅獲得升力，然而簡單的上下撲動顯然是不可能產生有效的升力，翅在撲動過程中必須扭轉，因此，昆蟲的翅並非完全是剛性的，往往具有一定的柔性和彈性。在振動過程中受力的作用於翅面上的力和翅根部肌肉的共同作用使翅面呈現螺旋狀。不過，由於研究手段的限制，目前我們對於翅在飛行中的變形對昆蟲獲得升力、控制飛行是否提供不可忽

視的作用還不得而知，近幾年的研究，不論試驗還是計算都假定昆蟲的翅是剛性不可變形的。

翅的剛性主要是翅脈提供有如骨架的功能，縱向翅脈主要提供支撐與抗拉作用，縱脈與橫脈所圍成的封閉方框中的膜提供加固與抗壓的作用。某些昆蟲翅上存在一些微結構，這些微結構能提供翅在飛行中變形為適當的形狀以獲得更大的升力或控制飛行方向。例如在蜻蜓的翅上存在一個三角區，可以將作用於翅間附近的力透過“槓桿效應”作用於翅的端部，使翅的端部向下彎曲，整個翅的剖面形成有如機翼狀。

(三) 頻率與速度

表一、昆蟲的飛行頻率與速度-A 資料

| Insect | Beats/second | Flight speed km/hour |
|-------------|--------------|----------------------|
| Dragonfly | 20-28 | 25 |
| Beetles | 46-90 | 5 |
| Butterflies | 9-12 | 9 |
| Hawk moth | 70-85 | 18 |
| Mosquito | 300-550 | 32 |
| Horsefly | 100 | 22 |
| Honey bee | 200 | 22 |
| Wasp | 110 | 9 |

(來源：98 年嘉義縣自然史教育館「自然探索」教師研習活動研習手冊)

表一所引用有關昆蟲的振翅頻率與飛行速度。昆蟲的振翅頻率的測定，如同飛行速度與飛行時間一般，因為受到本體與環境等各種因數的影響，故不容易測定也較難有一精準的數值，在這方面的資料並不多，而且有些出入還不小。一九三四年法國 A.Magnan 寫了一本書“Le vol des Insectes(昆蟲的飛翔)”，有些這方面的資料亦常被人引用如下：

表二、昆蟲的飛行頻率與速度-B 資料

| 種類 | 振翅頻率 | 時速(km/h) |
|------|------|-----------|
| 舉尾蟲 | 28 | 1.8 |
| 豆娘 | 16 | 5.4 |
| 家蠅 | 190 | 7.2 |
| 紋白蝶 | 12 | 9.0 |
| 吹粉金龜 | 46 | 10.8 |
| 熊蜂 | 130 | 10.8 |
| 虻 | 120 | 12.6 |

昆蟲飛行特性與翅翼結構分析探討

| | | |
|------|-----|------|
| 牛虻 | 96 | 14.4 |
| 天蛾一種 | 85 | 18.0 |
| 胡蜂 | 100 | 21.6 |
| 蜜蜂 | 250 | 21.6 |
| 蜻蜓 | 38 | 25.2 |

(來源：A.Magnan (1934)。Le vol des Insectes(昆蟲的飛翔)。)

數年前英國 Life 曾出版 Nature Library Series，其中談論昆蟲的書中（著者為 Peter Farb）也有昆蟲飛行速度的測定表如下：

表三、昆蟲的飛行速度-C 資料

| | |
|----|----------|
| 家蠅 | 8.0 km/h |
| 蝶 | 19.2 |
| 胡蜂 | 20.8 |
| 蜜蜂 | 20.8 |
| 虻 | 40.0 |
| 天蛾 | 40.0 |
| 蜻蜓 | 40.0 |

(來源：Peter Farb。Nature Library Series)

由這些統計表也可看出振翅頻率與速度之間似乎沒有絕對的關係，統計顯示的結果也不一而足，但也可看出這個問題具有相當的複雜性。參考其他文獻資料可以得知昆蟲的飛行速度與上升力與其攻角及拍翅振幅亦有很大的關聯性，所以若要仔細比較牠們的飛行性能，至少應該把頻率、振幅、攻角以及風阻的這些變數都同時考慮才比較能接近昆蟲飛行特性的探索。

參●結論

昆蟲飛行技巧的優越遠超過人類發明的飛行器，其神秘的飛行特性，至今仍是許多科學家與昆蟲學家致力研究的方向。

綜合相關資料研究與探討，可歸納為以下幾項觀點：

- 一、某些昆蟲具有極高的振翅頻率，其翅肌與翅根部應較其他昆蟲來的發達。
- 二、要仔細比較昆蟲的飛行性能，至少應該把頻率、振幅、攻角以及風阻的這些變數都同時考慮才比較能接近昆蟲飛行特性的探索。

- 三、昆蟲可在短時間做出急速升降、翻轉等高難度的飛行動作，顯示其自主與感覺神經系統之發達。
- 四、爲了控制飛行的速度和方向及飛行姿態，昆蟲可以改變翅的運動方式及外型來實現。
- 五、昆蟲翅翼並沒有肌肉及神經，因此無法控制其彎曲，只能藉著與翅根部連接的肌肉促使其拍動並巧妙運用流場特性，進而振翅飛向高空或急速盤轉。
- 六、昆蟲翅脈的分佈呈現一種特殊的結構佈局，這種必須抵禦風壓及高頻率揮動使用的平面骨架，有其完美的應力與應變的分工。
- 七、遍尋多方資料，並未發現有關蟬類翅翼“脈結”之論述，或許能在未來對此一問題更進一步研究。

再者，昆蟲翅脈結構大都有著特定的佈局，若是能針對昆蟲翅脈結構做一研究分析與深入探討，並將其應用於微型飛行器亦或是其餘振翅飛行器之翅翼仿製，或許會讓人類的飛行技術，再次向前跨出一大步。

肆●引註資料

- 余永亮、童秉綱（2004）。**拍翼軌跡對昆蟲前飛氣動性能的影響**。中國科學院。
- 歐亦泰（2006）。**振翅翼翅膀結構對升力之影響**。國立成功大學航空太空工程研究所：碩士論文。
- 薛嘉賢（2002）。**仿昆蟲拍翅飛行載具之轉翅時機實驗研究**。國立臺灣大學應用力學研究所：碩士論文。
- 苗文博、程暮林（2005）。**昆蟲振翅三維情形數值分析**。北京大學力學與工程科學系。
- 王少甫（2005）。**振翅翼之空氣動力分析**。國立成功大學航空太空工程研究所：碩士論文。
- 盧耽（2008）。**圖解昆蟲學**。臺北市：商周出版社。
- 陳振祥（2007）。**台灣賞蟬圖鑑**。臺北市：天下文化出版社。
- 嘉義縣自然史教育館（2009）。**「自然探索」教師研習活動研習手冊**。嘉義縣：嘉義縣自然史教育館。
- 國立台灣大學昆蟲學系暨研究所官網首頁>>現有師資>>朱耀沂教授>>痴蟲庵先生文集>>飛翔比賽。2012/09/30。取自網址：
<http://www.entomol.ntu.edu.tw/chinese/teacher/chuyi/articind06.htm>