

蝶の羽ばたき飛翔の力学と制御について

On Mechanics and Control of Flapping Flight of Butterfly

京都大学・工学研究科 泉田 啓, 横山直人

広島大学・理学研究科 飯間 信

大阪府立大学・生命環境科学研究科 平井規央

Kei Senda^a, Naoto Yokoyama^a, Makoto Iima^b, and Norio Hirai^c

^a Graduate School of Engineering, Kyoto University

^b Graduate school of science, Hiroshima University

^c Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University

1. はじめに

蝶の羽ばたき飛翔は、生成される流場を環境とする、運動知能の一例である。実際、神経系—身体—環境の動的相互作用による運動形態であり、他の運動知能と本質的に同じ問題構造を持っている。ここでは、羽ばたきにより創成される流場に注目して、環境が飛翔を発現するメカニズムの解明を目的とする。

その目的で本研究では、生体の蝶の実験観測に基づいてモデルを構築し、モデルによる飛翔の実現というシステム論的なアプローチを採る。まず、実験装置を構築して観測実験を行い、蝶の運動と空気力を計測している。次に、現実の蝶について、自由飛翔の安定性を解析する等の目的で、3次元数値モデルを構築している。実験で得られた観測データと数値シミュレーション結果を比較して、数値モデルの妥当性や精度を検討している。さらに、構築されたモデルを用いて自由飛翔を実現し、羽ばたきにより創成される渦列流場が飛翔の安定性に貢献していることを示す。また、翅の構造柔軟性に起因する振れが、飛翔の安定化にもたらす効果についても議論する。なお、本稿の詳細については、文献[1]–[10]に述べられている。

2. 蝶の観測実験

図1に示す実験装置を構築し、蝶の運動と空気力を計測した。実験では、胸部を天秤に固定したアサギマダラ蝶を風洞中に置き、一様流中で羽ばたかせる。その際の運動を高速ビデオカメラで3方向から撮影し、同時に蝶に働く空気力を天秤で計測する。撮影されたビデオ映像から身体上の特徴点位置を計測し、関節角といった運動学パラメータに変換する。

得られた羽ばたき一周期分の運動計測と力計測例(揚力方向の力)を図2と図3に示す。ただし、 θ_0 は腹部角、 β はフラッピング角(上下方向)、 η はリードラグ角(前後方向)、 θ はフェザリング角(振れ)を表す。各計測条件において羽ばたき周期が概ね一定であること、翅を打ち下ろす運動は概ねコサイン曲線になり、腹部角は逆位相になることが解る。異なった個体と実験条件で複数のデータを得たが、この特徴は共通する。

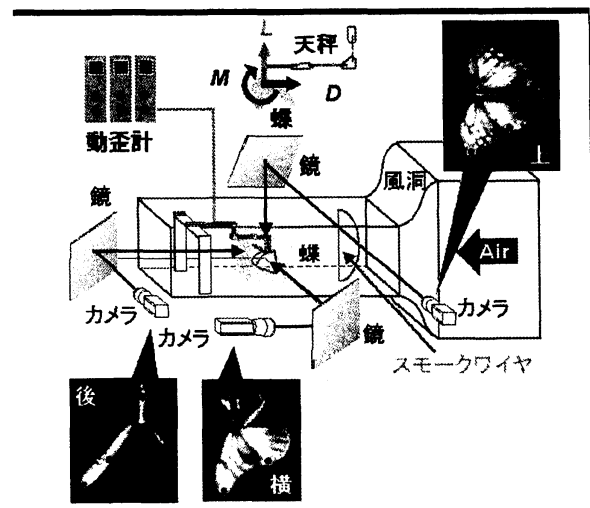


図1：羽ばたき蝶の運動と空気力の計測システム

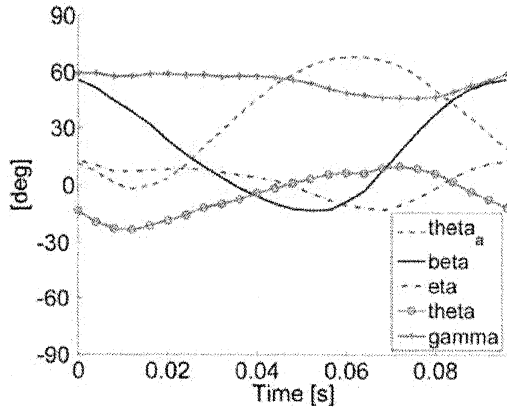


図2：運動の計測例 (主流 1.5m/s, 胸部仰角 30度)

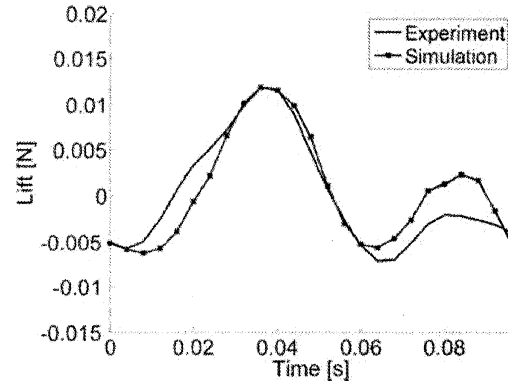


図3：空気力計測例 (主流 1.5m/s, 胸部仰角 30度)

3. 3次元数値モデル

3.1 モデル概要

蝶の機構の単純なモデル化として、剛体多体系として定式化する。ただし、蝶の翅が流体力によって変形する様子が実験的に観察されているので、より精密には、柔軟体としてモデル化し、流体力による構造の変形を考慮するべきかもしれない。

蝶モデルは、本体である胸部、胴部、左翅、右翅から成る4リンク剛体多体系としてモデル化する。前後翅を一枚パネルとしてモデル化し、モデルも運動も左右対称とする。胸部と翅の関節には回転3自由度、胸部と胴部の間には回転1自由度を配置する。この関節角は前節で運動学パラメータとして述べたものである。これらに蝶の胸部の x, z 位置と姿勢 x, z, θ_t を加えた $\theta = [x \ z \ \theta_t \ \theta_a \ \beta \ \eta \ \theta]^T$ が蝶の運動を表す一般化座標になる。

この系のラグランジュ運動方程式を導くと

$$M\ddot{\theta} + M\dot{\theta} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta}^T M \dot{\theta}) + \frac{\partial V}{\partial \theta} = \tau \quad (1)$$

ここで、 M は慣性行列、 V は重力ポテンシャル、 τ は θ に対する一般化力である。また、 $\tau = \tau_d + \tau_{control}$ であり、 τ_d は空気力、 $\tau_{control}$ は関節に加える制御力である。

羽ばたきによって得られる空気力を、翅周りの空気の付加質量による慣性力、および、流速の関数となる空気力 τ_d の和として考える。ここで付加質量とは、翅と共に加減速運動をするとモデル化される流体の質量である。付加質量は、式(1)の左辺に既に組み込まれているものとする。

蝶の翅は小アスペクト比の平板翼なので、空力特性に対する翼端渦の効果が大きい。さらに翅を羽ばたくことにより、非常に強い翼端渦が発生する。この翼端渦は、後縁から放出される自由渦と複合して複雑な構造を成し、空力特性に大きく影響すると思われる。そこで、文献[11]に基づくパネル法を用いて、蝶の羽ばたき飛翔の流体力学をモデル化し、 τ_d を算出する。

3.2 モデルの検証

得られたモデルに図2の運動をさせたときの空気力を図3に実験結果とともに示す。数値シミュレーションによる計算結果は実験結果と良く一致する。また、蝶を一樣流中で羽ばたかせ、スモーク・ワイヤを用いて可視化した実験画像と対応する数値計算結果を図4に示す。実験結果から、羽ばたきによって後流中に放出される自由渦により、複雑な流れ場が形成されることがわかる。数値シミュレーションでも、その様子を捉えていることがわかる。

蝶のように $Re \sim 10^3$ 程度の低いレイノルズ数では、粘性の影響を考慮する必要があるかもしれない。しかし、計算と実験で評価したところ、粘性抵抗は最大抗力の0.5%程度であった。また、流

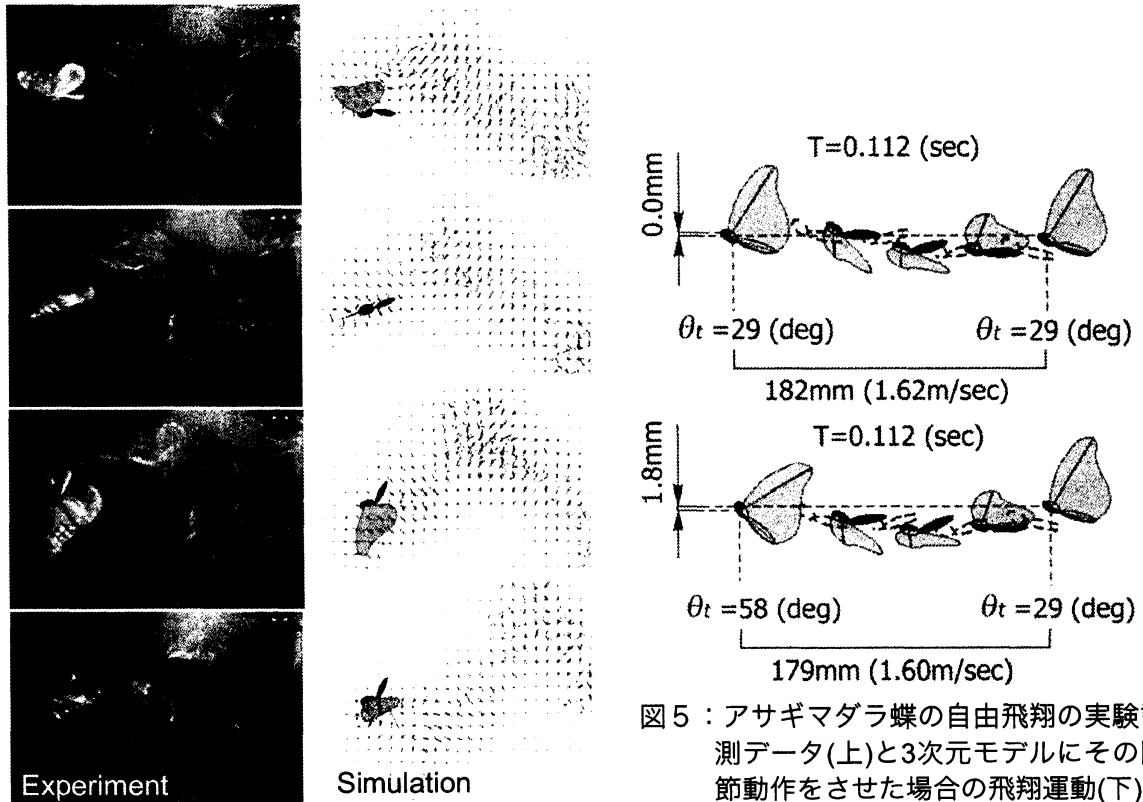


図5：アサギマダラ蝶の自由飛翔の実験計測データ(上)と3次元モデルにその関節動作をさせた場合の飛翔運動(下)

図4：アサギマダラ蝶の羽ばたきの可視化実験(左)と3次元モデルによる計算結果(右)

れ場の自由渦パターンも捉えられている。結果的に粘性を無視しても大きな影響が出ておらず、ポテンシャル理論によるモデル化が実際と良く一致すると期待できる。

図1の実験装置を用いてアサギマダラ蝶の自由飛翔の運動を計測した。周期的な羽ばたき飛翔一周期分の計測結果を図5(上)に示す。また、この関節動作で自由飛翔させたときのモデルの飛翔運動を同図(下)に示すが、概ね実験計測の自由飛翔を再現している。羽ばたき一周期後の胸部角に多少の差異が観られるが、これまで構築してきた何れのモデルでも同条件で自由飛翔を再現できなかったことを考慮すると、このモデルの精度は高いと考えられる。

4. 3次元数値モデルによる自由飛翔の制御

4.1 流れ場をもたらす効果

A. 周期軌道の探索

周期的な羽ばたき飛翔を「羽ばたき周期 T 秒後の状態量 θ_f および $\dot{\theta}_f$ の内、 x 以外の全てが初期値 θ_0 および $\dot{\theta}_0$ と一致する」ものと定義する。次に、蝶モデルを周期的羽ばたき飛翔させるよう軌道および初期状態を探索する。

後流に放出される自由渦の効果を比較して調べるために、自由渦を取り除き定常的な後流を仮定したモデルも構築した。

軌道を探索したところ、何れのモデルでもほとんど定常な飛翔の軌道を探索できた。得られた飛翔を図6に示す。得られた羽ばたき動作は、胸部を固定した図2の実験と似ている。しかし、この羽ばたきを繰り返すと徐々に周期的な飛行から離れ、不安定化する。自由渦ありでは10回以上羽ばたき、自由渦なしでは二三次の羽ばたきの後に墜落する。

B. 安定性の解析

羽ばたき軌道の初期条件に摂動を加えた結果を図7に示す。図7(上)は自由渦ありのモデル、図7(下)は自由渦なしのモデルの結果である。何れも不安定であるが、自由渦なしのモデルに比べ、パネル法の不安定性の程度は小さい。各モデルで得られる周期解で1周期毎の離散ダイナミクスを構成する。それらの最も不安定な極の大きさは、それぞれ 8.6, 17.0 となり、上の結果を定量的に支持する。

後者に比べ前者の方が安定であることから、前者で考慮される後流の自由渦が、蝶の飛翔の安定化に本質的な役割を担うことがわかる。

C. 陰的控制

用いた制御系により、蝶は同じ関節運動を繰り返し、胸部運動や流れ場は毎回の羽ばたきで変動する。そのため、翅にはたらく空気力も変動し、この変動は蝶の飛翔運動制御の意味では外乱として作用する。なお、飛翔運動とは胸部運動と関節運動を併せた蝶全体の運動を指す。制御系は、この外乱による関節運動の誤差を抑制する動作をもつが、フィードバックにより胸部運動の誤差を抑制する動作は持たない。しかし、先の安定性解析により、後流の自由渦を伴う流れ場により、安定化効果が生じている。このことは、「身体」が翅で「流れ場」と空気力をやりとりする際、後流の自由渦が存在することで、ある種のフィードバック安定化効果をもたらす相互作用を生じていると考えられる。これは、流れ場が持つ力学的特性を介してこの系にもたらされたフィードバック安定化効果であり、陰的控制と捉えることができる。

4.2 翅の振れがもたらす効果

A. 翅の構造柔軟性による捻れのモデル化

図4のように、生体の蝶では構造柔軟性による翅の変形に起因して、ねじれが生じる。先のシミュレーションでは、目標動作の軌道に誤差なく追従するように蝶の羽ばたき動作が制御されていたが、生体の蝶の翅には様々な予想外の外乱が作用して翅はねじれるので目標軌道通りには動かない。先のシミュレーションの蝶モデルの翅には、この受動的な翅のねじれは導入されていない。そこで、蝶のモデルに対して受動的なねじれを考慮し、羽ばたき飛翔にどのような影響を与えるかを調べる。

蝶のモデルに翅の構造柔軟性によるねじれを取り入れるために、生体の蝶の翅のねじり剛性値を測定した。蝶の翅の付け根を水平に固定した状態で、翅にねじりのモーメント荷重をかける。

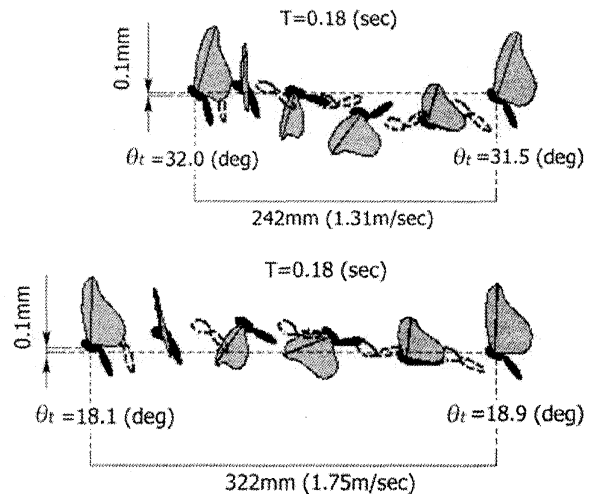


図6：ほとんど周期的な羽ばたき飛翔：自由渦あり(上)と自由渦なしのモデル(下)

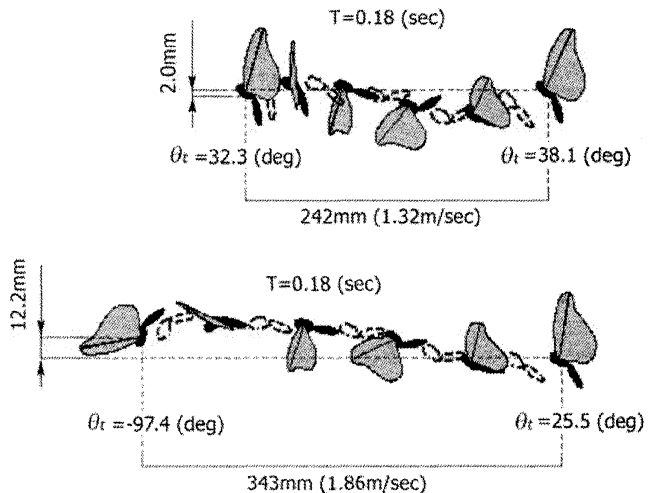


図7：初期摂動に対する羽ばたき飛翔の安定性：自由渦あり(上)と自由渦なしのモデル(下)

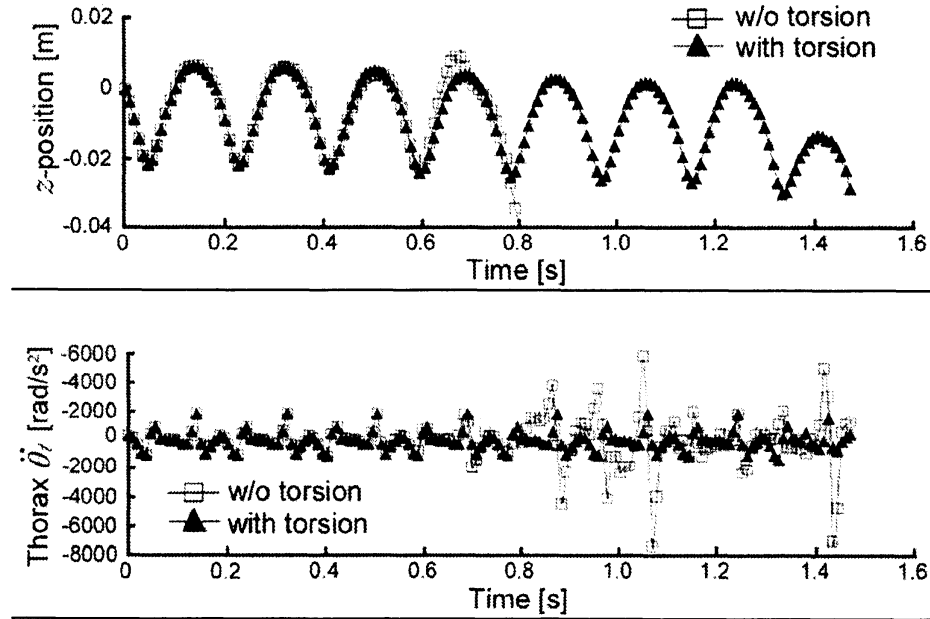


図8：翅のねじれの有無による羽ばたき飛行の変化。飛行高度(上)と胸部角加速度(下)

カメラでその時の様子を撮影し翅の回転角を計測することで、剛性値を得た。生体の蝶について複数の平均として得られた翅のねじれ剛性値は、概ね 8.0×10^{-4} Nm/rad であった。

翅の構造柔軟性による捻れを、1自由度減衰振動系でモデル化する。翅は平板のままとし、飛行軌道探索に用いた軌道追従制御の一部を変更して根元の関節が受動的にねじれることを表現するために、PD制御を適用している。また、翅のねじり振動の減衰は、翅の振動の様子から減衰比が0.7と推定した。

B. 翅の捻れが羽ばたき飛行に及ぼす影響

数値シミュレーションにより、翅のねじれを考慮することにより飛行安定性がどのように変化するか解析する。前節の飛行軌道探索によって得られた羽ばたき運動、および、翅のねじれをモデル化した場合の羽ばたき運動の軌道を図8(上)と(下)に示す。翅のねじれを考慮することによって、飛行が4周期延びている。このとき、墜落時に観られる胸部核の加速度 $\ddot{\theta}_t$ の振動が、翅のねじれを考慮することにより抑えられていること分かる。これは、墜落の原因の一つと考えられる胸部角のピッチングの振動の発散を翅の構造柔軟性が減衰したためであると考えられる。この結果、胸部角の不安定化が遅れ、飛行可能な期間が増加している。

また、飛行軌道探索によって得られた異なる羽ばたき軌道においても、翅の受動的なねじれを考慮したところ、4つの羽ばたき軌道のうち3つでその効果が確認された。以上より、構造柔軟性による受動的な翅のねじれは蝶の飛行安定性に安定化効果をもたらすと考えられる。

C. 翅の捻れによる reflex

この安定化効果は、翅の構造柔軟性という身体の力学的特性により系にもたらされた、ある種のフィードバック安定化効果である。preflex [12]の一種であるとともに、陰的制御と捉えることができる。

5. 蝶の解剖学的観測

アサギマダラの飛行に関わる筋肉を明らかにし、可能な能動的動作を知るために、冷凍保存した標本を用いてマイクロCT装置 Comscantecno ScanXmate-A080Sを用いて撮影した。撮影条件は、解像度 $18 \mu\text{m}$ 、管電圧 70 kV、管電流 $90 \mu\text{A}$ である。ソフトウェア Analyze を用いて、撮影された画像をコンピュータ上で3D画像に合成した。図9は合成された画像で、翅はほぼ水平な状態

である。

得られた画像を用いて、オオカバマダラとギフチョウの筋肉と胸部外骨格の構造[13,14]を参考に各部の同定をおこなった。その結果、主な間接飛翔筋である背縦走筋、背腹筋など比較的大型の筋肉が同定され、構造や付着点が明らかになった。また、直接筋についても比較的大型のものは同定可能であった。

この筋骨格系の調査の結果、前節でモデルに適用した蝶の羽ばたき運動を、生態の蝶が生成することは、それ程無理のない仮定であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、羽ばたきにより創成される流場に注目して、飛翔を発現するメカニズムを議論した。まず、実験装置を構築して観測実験を行い、蝶の運動と空気力を計測している。次に、3次元数値モデルを構築し、実験で得られた観測データと数値シミュレーション結果を比較して、数値モデルの妥当性や精度を示した。さらに、構築されたモデルを用いて自由飛翔を実現し、羽ばたきにより創成される渦列流場が、飛翔の安定性に貢献していることを示した。また、翅の構造柔軟性に起因する捩れにより、安定化効果がもたらされることを示した。

また、生体の蝶の実験観測による生物学的な解析を行い、蝶が可能な運動についても検討した。

謝辞

蝶の XCT 画像の撮影に協力頂いた慶応大学の荻原直道博士に感謝します。

本研究の一部は、科学研究費補助金に関連してなされたことを付記する。

参考文献

- [1] K. Senda, T. Tanaka, M. Sawamoto, Measurement and numerical simulation of a flapping butterfly, in: Proceedings of International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Kyoto, 2003, pp. 1-7, WeP-II-1.
- [2] K. Senda, M. Sawamoto, T. Shibahara, T. Tanaka, Study on flapping-of-wings flight of butterfly with experimental measurement, in: Proceedings of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference,

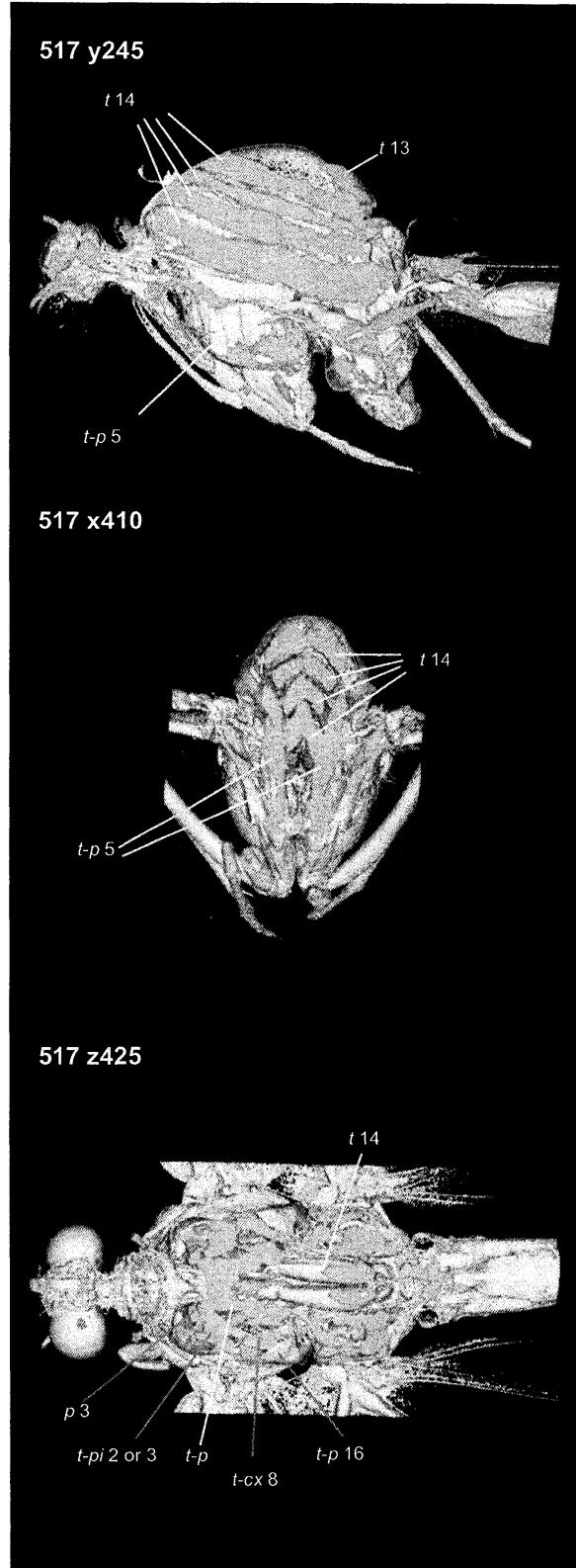


図9：アサギマダラ蝶のマイクロCTによる撮影画像から合成された3D画像

- AIAA, Reston, Virginia, 2004, pp. 1–14. AIAA Paper 2004-5368.
- [3] K. Senda, M. Sawamoto, T. Tanaka, T. Shibahara, Analysis on control of flapping-of-wings flight of butterfly, in: Proceedings of 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Ilmenau, Germany, 2005, pp. 1–12.
 - [4] K. Senda, M. Sawamoto, T. Shibahara, M. Kitamura, T. Tanaka, Study on flapping-of-wings flight of butterfly with numerical and experimental analysis, in: Proceedings of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, AIAA, Reston, Virginia, 2006, pp. 1–16. AIAA Paper 2006-6150.
 - [5] K. Senda, M. Sawamoto, M. Kitamura, T. Tanaka, Stabilization of flapping-of-wing flight of butterfly, considering wakes, in: N. Kato, S. Kamimura (Eds.), Bio-Mechanisms of Swimming and Flying, Springer, Tokyo, 2007, pp. 193–204.
 - [6] K. Senda, M. Sawamoto, M. Kitamura, T. Obara, Towards realization of stable flapping-of-wings flight of butterfly, in: Proceedings of 4th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Cleveland, Ohio, USA, 2008, pp. 62–63.
 - [7] K. Senda, M. Sawamoto, M. Kitamura, T. Obara, Effects of flexibly torsional wings in flapping-of-wings flight of butterfly, in: Proceedings of World Automation Congress 2008, Waikoloa, Hawaii, USA, 2008, pp. 1–6. ISIAAC-338.
 - [8] K. Senda, T. Obara, M. Kitamura, T. Nishikata, On flight mechanics of flapping butterfly, in: Workshop on Future Trends of Mobiligence: in IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009, pp. 17–22.
 - [9] K. Senda, T. Obara, M. Kitamura, T. Nishikata, N. Hirai, M. Iima, N. Yokoyama, Modeling and emergence of flapping flight of butterfly based on experimental measurements, Robotics and Autonomous Systems, Vol.60, Issue 5, 2012, pp. 670–678.
 - [10] K. Senda, T. Obara, M. Kitamura, N. Yokoyama, N. Hirai, M. Iima, Effects of structural flexibility of wings in flapping flight of butterfly, Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 7, No. 2, 2012, 025002, 15pp.
 - [11] J. Katz, A. Plotkin, Low-Speed Aerodynamics, second ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
 - [12] I. E. Brown, G. E. Loeb, A reductionist approach to creating and using neuromuscular models, in: Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement, J. M. Winters and P. E. Crago (eds.), Springer, New York, 2000.
 - [13] P. R. Ehrlich, S. E. Davidson, The internal anatomy of the monarch butterfly, *Danaus plexippus* L. (Lepidoptera: Nymphalidae), Microentomology, Vol. 24, No. 3, 1961, pp.87–133.
 - [14] J. Emoto, Morphology of the thoracic skeltal structure and musculature of *Luehdorfia japonica* L. (Lepidoptera: Papilionidae), Bulletin of Nanzan University (Academia), Natural Science & Physical Education, 1, 1983, pp. 17–33.