

解説

蝶の飛翔制御法解明への実験的アプローチ

Experimental Approach to Flapping-of-Wings Flight of Butterfly

泉田 啓* *金沢大学 大学院 自然科学研究科

Kei Senda* *Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

1. はじめに

蝶の飛翔の様子を思い出していただきたい。蝶は予測できないような揺れ方でヒラヒラと飛翔する。だからといって墜落することもなく、望みの花にとまり蜜を吸える。このことは、飛翔は安定であり制御されていることを意味する。また、本稿で主に登場する蝶は、アサギマダラで、前翅長が40~60 [mm]、質量はわずか0.2~0.4 [g]であるが、台湾と日本の間1,000 [km]以上も飛行する[1][2]。この間、体内にあるわずかなエネルギーで、非常に高効率に飛行する。

このような羽ばたき飛翔のために「どのような動作」「いかなる制御」をしているかなど、疑問はつきない。本稿では、蝶という生命の理解へのアプローチを、筆者らの研究[3][4]を中心に紹介する。ここでは観測実験を基にして数学モデルも用いるが、その結果として何が理解できるか、このアプローチで十分かどうか、最後に改めて検討したい。

なお、飯間[5][6]は、数理モデルを基にして何が起こりえるかを研究しており、本稿とコントラストを成すであろう。また、羽ばたき全般に関して文献[7][8]を参考文献として挙げておく。

2. 実験による観測方法

図1に示す実験システムを構築し、実際の蝶を用いた風洞実験により、蝶の動作と空気力を計測した[3][4]。光学計測系により動作の様子を計測し、力計測系により蝶に働く力を得る、同時計測システムである。計測の際には、蝶の胸部上面を接着剤で天秤（力トルク・センサ）の先端に貼り付け、蝶を固定する。天秤に付けられた蝶を定常な一樣流を生じる風洞に入れ、高速度カメラで撮影し、映像から動作を計測する。同時に、天秤により蝶にかかる力を計測し、蝶を固定した点での3分力（揚力 L 、抵抗力 D 、ピッチング・モーメント M ）を計算する。また、図2のように、煙を用いて流れを可視化することもできる。

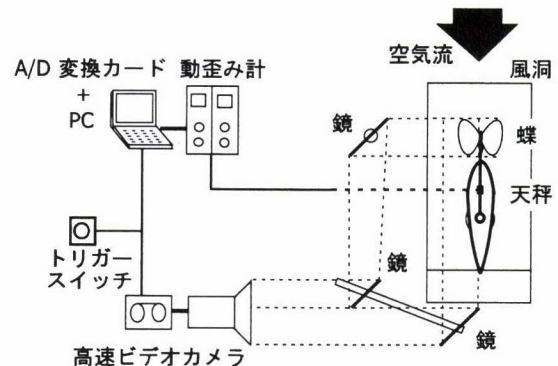


図1 観察と計測のための実験装置

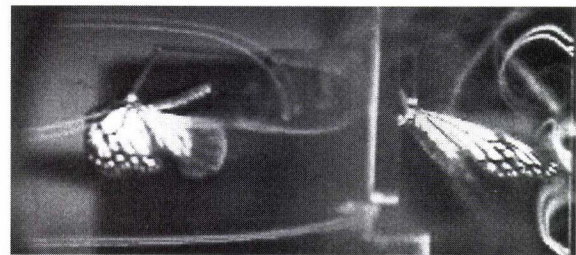


図2 可視化された流れ

3. 機構と動作

3.1 羽ばたき機構の概要

昆虫の翅や胸部の構造に、洗練された近代の航空機と同様、軽量かつ高剛性なセミ・モノコック構造が発見されている[9][10]。また、羽化の際に翅の構造を作る様子は、将来の宇宙建造物の建築方法として注目されるインフレータブル構造と同じである[11][12]。このように、蝶の構造も興味深い。以下では主に羽ばたきの機構について説明する。

間接筋を用いる昆虫の羽ばたき機構は、おおむね図3のようになっている[8]。翅は外骨格からの進化したもので、レバー状の機構で胸部と繋がっている。翅リンクの端は、胸部の背板とヒンジ結合され、端点近くにある支点でも胸部の側板とヒンジ結合されている。胸部の背板が下から上に持ち上がると、テコの原理で翅が上から下に振り下ろされる。猫背なアーチ形状の背板には背縦走筋という筋肉が付

原稿受付 2004年10月12日

キーワード: Flapping-of-wings Flight, Butterfly, Experimental Approach

*〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20

*Kanazawa-shi, Ishikawa

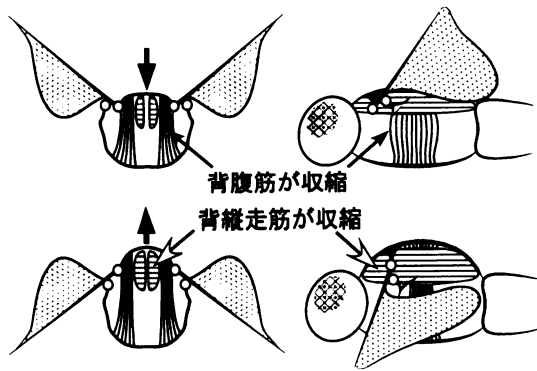


図3 蝶の翅を駆動する機構 (左:胸部横断面, 右:胸部縦断面)

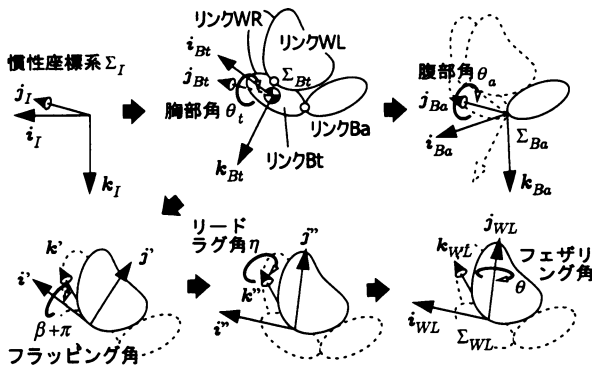


図4 蝶の剛体多体系モデルと回転自由度

着しており、曲率を増すように収縮しようとしている。背側と腹側の骨格間には、背腹筋と呼ばれる筋肉があり、これが収縮すると背板が引き下げられ、弛緩すると背縦走筋の収縮力により持ち上げられる。このように、羽ばたき機構は、おおむね1自由度振動系と見なすことができ、蝶は背腹筋を周期的に収縮させることにより、機構を振動させて羽ばたいている。実験による観測では、蝶の羽ばたき振動数は個体ごとにほぼ一定である。これは、機構の固有振動数で共振させると、効率よく羽ばたきことができるためである[7]。その他の筋肉により翅を多少動かすことができるが、基本的な動作にわずかに付け加えられる程度である。

3.2 機構の運動学と動力学モデル

蝶の機構の最も単純なモデル化として、ロボットの一般的なモデルと同様、剛体多体系として定式化する。ただし、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べきかもしれない。

蝶モデルは図4で示すように、本体を胸部 Bt (t : thorax) とし、そこに胴部リンク Ba (a : abdomen), 左翅リンク WL , 右翅リンク WR の三つのリンクが組み合わさった4リンク剛体多体系としてモデル化する。ここで、前後翅を1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。

この系のラグランジュ運動方程式を導くと

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

ここで、一般化座標は $\theta = [x \ z \ \theta_t \ \theta_a \ \beta \ \eta \ \theta]^T$ である。図4に示すように、 x, z, θ_t は胸部の位置と姿勢、 θ_a は腹部角度、 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。 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 は次節で述べる空気力、 $\tau_{control}$ は関節に加える制御力である。

3.3 動作の計測

アサギマダラを用いて、主流の流速1[m/s]、胸部の位置と姿勢が $x = z = 0$ [m]、 $\theta_t = 31^\circ$ で観測実験を行った。図5(a)は、得られた θ の成分で、1周期約0.16[s]間の羽ばたき動作を示す。この観測例では、蝶が周期的な羽ばたきを行う間、同様の動作が繰り返された。

フラッピング角 β はコサイン状の曲線となり、腹部角度 θ_a はおおむね β と逆位相になる。この観測例では、 β の最大値が 90° 、最小値が -80° と大振幅で、最初に上で重なり合った左右翅が振り下ろされた後、おおむね打ち合わされる。羽ばたき振幅が変化する場合、 β の最小値のみ変化し、最大値はほとんど変わらない。また、自由に飛翔している場合に比べ、腹部を不自然に大きく振っている。個体や条件により β と θ_a の振幅が変化しても、同様のきれいなコサイン曲線を保つ。リードラグ角 η は β の2倍の振動数成分を持つ。フェザリング角 θ の変化は小さく、流体力によって受動的に変化しているようである。なお、Fryら[13]は、同様にハエの翅の動作を観測している。

様々な条件で、計測された動作を図6に示す。比較しやすいよう周期と振幅を正規化してある。 β は同じコサイン曲線を描くが、 η は多様で、制御されているようである。

4. 流体力学

蝶の飛翔には、流れの様子を特徴づけるレイノルズ数が小さい、羽ばたき周波数が小さい[7]等の特徴がある。また、固定した翼を持つ航空機(固定翼機)が定常に飛行している場合と比べると、蝶では羽ばたき動作のため、翅に対する流れが時々刻々と変化する。この非定常な流れを考慮しなければならないという、最大の特徴を中心に説明する。

4.1 基本的な流体力の計算モデル

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 の和と考える。ここで付加質量とは、物体が流体中を動くときに、物体ととも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)の左辺にすでに組み込まれているものとし、以下では τ_d の算出法を議論する。

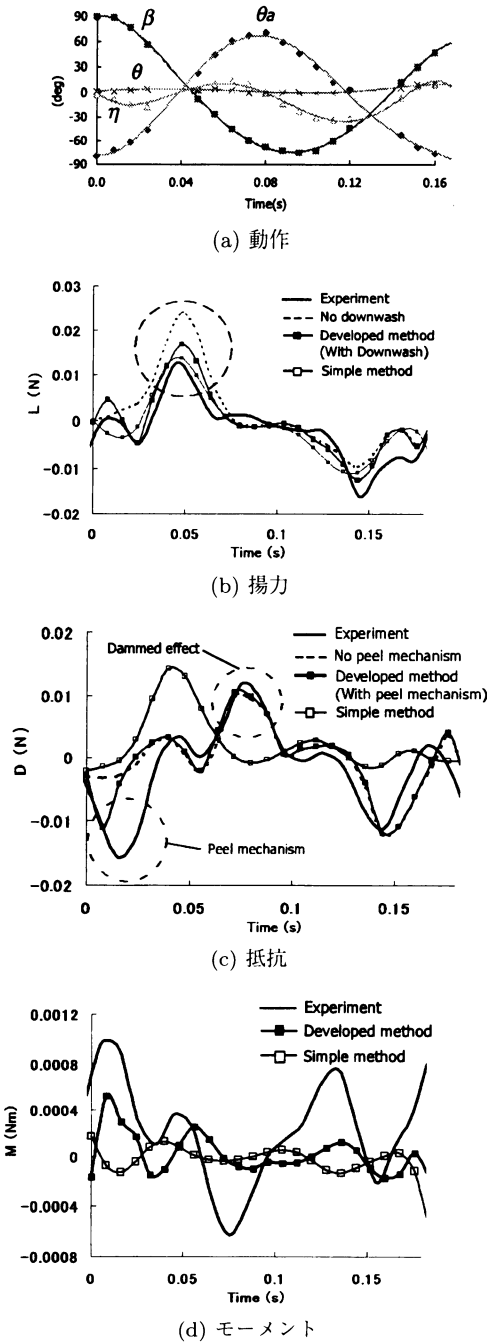


図5 実験による計測とシミュレーション結果

本稿では、比較的簡単な単純法と渦法に基づく計算法 [3] [4] を考える。その中では、翼端渦の影響は一部考慮されるが、その他の渦の影響を陽には考慮しない。より複雑な計算法により、それらの影響を考慮することができる [14] [15]。

単純法 [16] を以下に要約する。定常流の中に置かれた翼に加わる空気力は、一般に次のようにモデル化される。

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L S, \quad D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S = \frac{C_D}{C_L} L \quad (2)$$

ただし、 V は翼に対する流れの相対速さ、 D は V 方向の

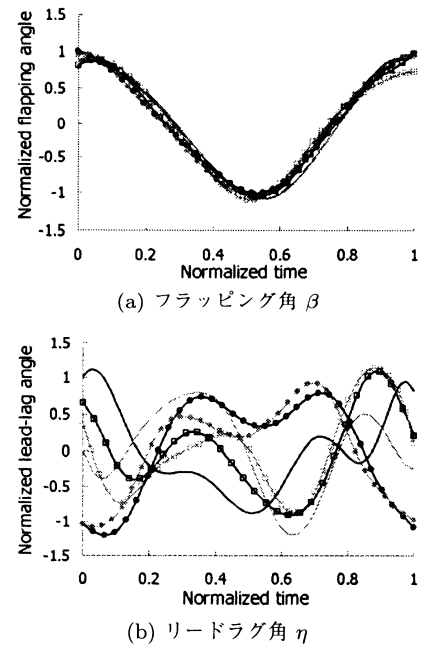


図6 様々な実験条件に対する正規化された蝶の動作

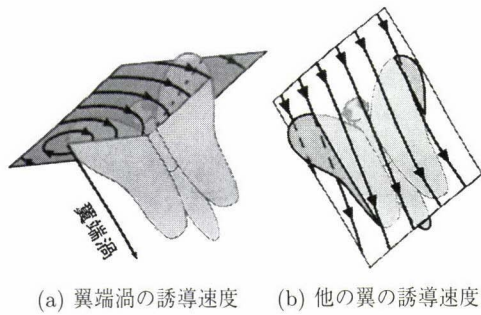
力すなわち抵抗力、 L は D に垂直な力すなわち揚力である。また、 C_L と C_D はおのこの揚力係数と抵抗係数、 S は翼の代表面積である。羽ばたき動作により蝶の翅は速度を持つため、翅に対する流入速度は時間と翅上の位置の関数となる。この速度を式 (2) に用いる方法が、単純法である。文字通り簡単であるが、計算の複雑な他の計算方法と同等の計算精度を有すると期待された [16]。ただし、式 (2) より、蝶に作用する抵抗力はおおむね揚力に比例することになる。

第二の空気力の計算方法は、集中渦法または単に渦法 [17] と呼ばれる手法である。渦法では、分割された翼の各要素に束縛渦を配置し、後縁付近の評価点で Kutta の条件を満足するように渦の強さ (循環) を決定し、空気力を計算する。

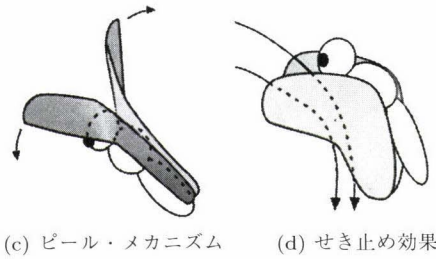
4.2 羽ばたき固有の流れのモデル

後に示す実験の結果、図 7 の四つの効果を考慮すべきであることが分かった。これらのうち、せき止め効果以外は翅周りの循環を計算しなければならず、単純法に取り込むことはできないので、渦法に基づく計算に付け加える。

図 7 (a) のように翼端からは翼端渦が生じるため、吹き下ろしと呼ばれる速度成分を誘起する。図 7 (b) のように翅の周りに誘起される流場に他方の翅が位置すると、その誘導速度を考慮する必要がある。翅の振り下ろし開始時には、図 7 (c) のように翅の前縁のほうから引き剥がされるように変形する様子が観察された。このような変形は、ピールメカニズムと呼ばれ、推力を生じる。図 7 (d) のように左右の翅を打ち合わせる際、翅間の空気の流れをせき止め、主に抵抗力を生じる。なお、ハエの羽ばたき固有の流れについては、Dickinson ら [18] が実験と数値計算で解析している。



(a) 翼端渦の誘導速度 (b) 他の翼の誘導速度



(c) ピール・メカニズム (d) せき止め効果

図7 羽ばたき固有の流れ

4.3 実験計測による流体モデルの検証

先の観測例で、同時に得られた揚力 L 、抵抗 D 、モーメント M を図5(b)~(d)に示す。周期的な羽ばたき動作の間、これらの流体力もおおむね周期的になる。

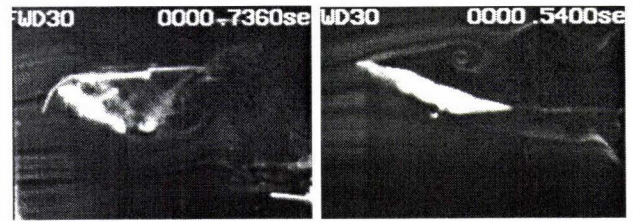
次に、実験と同様に胸部を固定した数学モデルに、計測された動作をさせることにより、空気力 τ_d を算出し、図5(b)~(d)に併せて示す。流体力の計算方法として、単純法と提案手法を示すが、比較のために提案手法から羽ばたき固有の流れの効果を一部考慮しない場合の結果も示す。単純法では誘導速度が考慮されないため、同じ効果が得られるように迎角を小さく調整して計算した。

図5(c)を見ると、単純法の抵抗と実験結果とに大きな違いが見られる。結果は示さないが、蝶固有の流体力学を考慮しない渦法のみに基づく計算法でも同様である。この流体力の食い違いは、特に丸で印した左右の翅が接近する部分で顕著である。これらの数学モデルでは、接近する左右の翅による流れを考慮していないためと考えられる。

渦法に蝶固有の流体力学を考慮した提案手法では、そのような大きな食い違いはない。揚力 L のグラフでは、翼端渦の効果を考慮しない場合、抵抗 D のグラフでは引きはがしの効果を考慮しない場合の結果も示してある。このように、羽ばたき固有の流れの効果を考慮することにより、実験に近いモデルが得られる。また、提案手法は単純法に比べ、かなり実験に一致するモデルになった。ただし、蝶の固定点回りのモーメントについては、提案モデルでも実験結果に対して有意な食い違いが認められる。他の実験データを用いても同様であり、さらなる検討が望まれる。

4.4 可視化された流れの観察

スモークワイヤ法で可視化された翅周りの流れの様子を



(a) 羽ばたき（振下し）時の流れ (b) 固定した翅まわりの流れ

図8 羽ばたき時と固定した翅まわりの流れの可視化

図8に示す。図8(a)は、図5の $t = 0.04$ [s] 付近で、翅を振り下ろす間に流れが翅に沿って通過する様子を示している。図8(b)は、同じ翅を同等の迎え角で一様流中に設置した場合を示している。翅の上面を通過する流れは、前縁で剥離して失速状態になるが、図8(a)のように翅を振り下ろす間は剥離することなく翅の上面に沿って流れている。このように、羽ばたき時の空気の非定常流れは、定常時と大きく異なる。類似の報告が Birch ら [19] によって示されている。これらの観察が、翼に沿って流体が流れ去ることを仮定した単純法や渦法などの計算方法を適用する根拠となっている。図2は、翅の先端の流れを横と後方から観察したものである。強い翼端渦の存在が分かる。なお、オックスフォード大学 [20] でも飛翔の可視化実験を行っており、美しいビデオ映像を見ることができる。

5. 羽ばたき飛翔

5.1 羽ばたき動作の探索

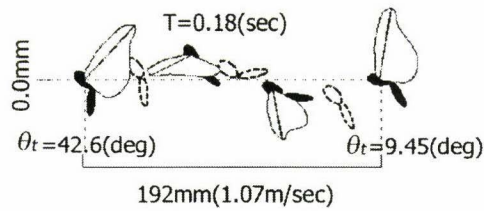
数学モデルの蝶に、実験計測された動作をさせても飛翔できなかった。実験時に胸部を固定された蝶の動作が、自由飛翔時と異なるためと考えられる。そこで、数学モデルを羽ばたき飛翔させるための動作を以下のように探索する。

まず、周期的な羽ばたき飛翔を「ある周期 T が存在し、すべて時刻 t に対して、状態量 θ および $\dot{\theta}$ のうち x 以外のすべてが時刻 t と $t+T$ で一致するもの」と定義する。次に、関節角の周期的な軌道をフーリエ級数と同様に級数展開し、級数のパラメータおよび系の初期状態を学習パラメータとする。そして、数学モデルの飛翔軌道が、周期的な羽ばたき飛翔になるように、学習パラメータを探索する。

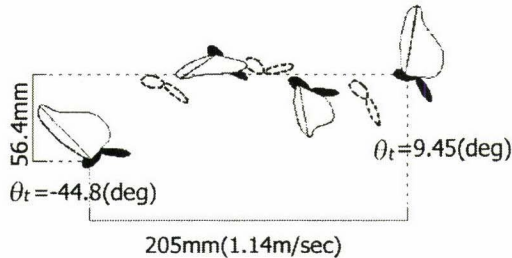
両モデルで、おおむね周期的な羽ばたき飛翔軌道を探索できた。提案モデルにより得られた飛翔を図9(a)に示す。探索された動作は、自由に羽ばたき飛翔する蝶の観察に近く、実験観測例のように腹部を大きく振ることはない。

5.2 羽ばたき飛翔の安定性

周期的な羽ばたき飛翔が得られても、実際に飛翔できるとは限らない。例えば、図9(a)の羽ばたき軌道の初期条件にわずかな摂動を加えると、図9(b)のようになる。このように、わずかな変化に対して軌道が大きく変化するので、探索された羽ばたき飛翔は不安定である。このことは、



(a) おおむね周期的な羽ばたき飛翔



(b) 初期条件のわずかな摂動による不安定化

図9 提案モデルを用いて探索された羽ばたき飛翔

単純法と提案手法のいずれのモデルでも同様である。

本稿で考えた、左右対称面上の飛行の安定性を飛行力学では縦安定性と呼ぶ。実用的な固定翼機は、ほとんどすべて縦安定であり、制御を行わなくても定常飛行状態に収束する。上で得られた結果は、周期的な羽ばたき飛翔が縦安定ではないことを示している。この縦の不安定性が実際の蝶でも存在することは、いまだ確認されておらず、検証の必要がある。

6. おわりに

まとめとして、本稿のアプローチを再検討する。正確な数学モデルのために、実験による観測が重要なことは議論を待たない。しかし、用いることができたのは、蝶を固定した実験の観測であり、自由な羽ばたき飛翔とは異なる条件であった。そのため、数学モデルを検証された領域外に外挿している。考慮されない因子が現実の世界で重要な場合、この外挿結果が正しいとは限らない。これを補完するためにロボティクスの力を借りたい。現実の世界で動くロボットを作って必要な計測に供することは有用であろう。

片や、蝶の飛翔を理解するために、数学モデルで飛翔を再構成しようとした。これは、Analysis by Synthesisと呼ばれる手法であるが、再構成できても、蝶の内部が同じ原理で動いているとは限らない。このことは、ロボットを用いても同じであろう。蝶をより理解するためには、蝶の言葉話を話す生物学者に、通訳を頼むしかないかもしれない。

謝辞 紹介した研究の実施に当たり、情報や蝶をご提供いただくなど、大阪府立大学の石井実教授、平井規央博士ならびに石川県「ふれあい昆虫館」の協力を得た。実験や数値計算は、元大阪府立大学大学院生の田中剛君、金沢大学の沢本雅和君、芝原孝徳君、松村直人君とともに実施

した。また、金沢大学重点化経費および文部科学省の科学研究費補助に関連して成された。記して、御礼申し上げる。

参考文献

- [1] 福田: '長距離移動をする蝶, アサギマダラの話', チョウとガ, pp.25-39, 徳島県立博物館, 1998.
- [2] 平井: '海を渡るアサギマダラの航法と飛翔高度', 昆虫と自然, vol.38, no.8, pp.6-9, 2003.
- [3] 泉田, 田中, 沢本: '蝶の羽ばたきの実験的計測と飛行の安定性について', 自律分散システム・シンポジウム, pp.73-78, 2004.
- [4] K. Senda, M. Sawamoto, T. Shibahara and T. Tanaka: "Study on Flapping-of-Wings Flight of Butterfly with Experimental Measurement," AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, AIAA-2004-5368, pp.1-14, 2004.
- [5] 飯間: "昆虫飛翔の物理", 物性研究, vol.77, no.3, pp.447-507, 2001.
- [6] 飯間: "昆虫のはばたき飛翔機構の解明への数理的アプローチ", 日本ロボット学会誌, vol.23, no.1, pp.36-40, 2005.
- [7] 東: 生物の動きの事典, 朝倉書店, 1997.
- [8] A.K. Brodsky: The Evolution of Insect Flight. Oxford University Press, 1994 (邦訳: アンドレイ K. プロドスキー: 昆虫飛翔のメカニズムと進化, 築地書館, 1997.).
- [9] R.J. Wootton: "The Mechanical Design of Insect Wings," Scientific American, November, 1991 (邦訳: R.J. ウォートン: "昆虫の翅のメカニカル・デザイン", 日経サイエンス, 1991年1月号, pp.82-90.).
- [10] W. Nachtigall: Insects in Flight. Allen and Unwin, 1974.
- [11] 福田, 高橋: 蝶の生態と観察, 築地書館, 1985.
- [12] H.M. Jenkins (ed.): Gossamer Spacecraft. AIAA, 2001.
- [13] S.N. Fry, R. Sayaman and M.H. Dickinson: "The Aerodynamics of Free-Flight Maneuvers in Drosophila," Science, vol.300, pp.495-498, 2003.
- [14] 砂田, 劉: "生物の翼に働く空気力の計算法", 計算工学, vol.3, no.1, pp.16-21, 1985.
- [15] H. Liu and K. Kawachi: 'Leading-Edge Vortices of Flapping and Rotary Wings at Low Reynolds Number,' Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications. T.J. Mueller (ed.), pp.275-285, AIAA, 2001.
- [16] K. Sunada, et al.: "Performance of a Butterfly in Take-off Flight," J. of Experimental Biology, vol.183, pp.249-277, 1993.
- [17] J. Katz and A. Plotkin: Low-Speed Aerodynamics. Cambridge University Press, 2nd ed., 2001.
- [18] M.H. Dickinson, F.-O. Lehmann and S.P. Sane: "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight," Science, vol.284, pp.1954-1960, 1999.
- [19] J.M. Birch and M.H. Dickinson: "Spanwise Flow and the Attachment of the Leading-edge Vortex on Insect Wings," Nature, vol.412, pp.729-733, 2001.
- [20] A.B.R.G. Flight Group, Department of Zoology, University of Oxford. <http://users.ox.ac.uk/~abrg/flight.html>



泉田 啓 (Kei Senda)

1963年8月17日生。1988年大阪府立大学大学院博士前期課程(航空工学専攻)修了。同年4月同大学工学部助手, 1994年同助教授, 2002年4月金沢大学大学院自然科学研究科助教授となり現在に至る。1996~1997年ミシガン州立大学客員教授, 2000~2003年宇宙科学研究所客員助教授などを兼任。1992年AIAA GNC最優秀発表論文賞, 1994年システム制御情報学会賞論文賞, 2002年とやま賞(学術研究部門)など受賞。宇宙システムの力学と制御, ロボットの知能化と強化学習, 動物の運動知能などの研究に従事。博士(工学)。AIAAなどの会員。(日本ロボット学会正会員)