

# 論文の内容の要旨

論文題目 ALE 流体構造連成有限要素解析を用いた  
4 駆動自由度羽ばたき飛行ロボットの開発

氏名 濱本 将樹

## 1. 研究の背景と目的

昆虫に代表される羽ばたき飛行はその機動力の高さから、小型ロボットの移動手段として非常に魅力的である。このため、センチメートルサイズの非定常流体挙動の解明という難題に、種々のアプローチが試みられてきた。我が国では東 [1] の風洞実験や河内 [2] の先駆的な昆虫計測の取り組みがなされ、また欧米においては、特に Ellington[3] や Dickinson[4] による動的拡大模型を用いた流体計測によって、非定常流体现象の側面からはかなり解明が進んだ。またロボットという点では、Fearing が主導した Micromechanical Flying Insect プロジェクト [5] により質量 0.1g の 4 駆動自由度羽ばたき飛行ロボットが試作され、回路は外部搭載で浮上力補助しながら、上昇や前進移動を実現している。しかし、より工学的応用範囲の広い、数グラム程度の羽ばたき飛行ロボット実現には、翅の変形が流体挙動にもたらす影響を解明する必要がある。数十 Hz ~ 数百 Hz という高い周波数で往復運動する羽は、慣性由来のトルクを低減するため極端に薄く軽くする必要があり、大きな受動変形の発生は避けられない。これはすなわち空気という流体と羽という構造の連成力学問題であり、特に羽ばたき飛行のような連成の大きい問題については、実験的手法、および従来のシミュレーションでの検討は困難であった。

近年、久田ら [6] は ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 有限要素法に基づく流体構造連成解析 (ALE-FEA) を開発、人工心臓のポンプ内における膜挙動の解析を行い、こういった連成問題の解析が可能であることを示した。本論文の目的は、この ALE-FEA を昆虫の羽ばたき飛行の解析に適用し、その結果に基づき、昆虫の翅の剛性分布戦略を得て、これに基づいた軽量の翅を有する羽ばたき飛行ロボットを設計・試作する道筋を示すところにある。

## 2. ALE-FEA について

久田らの手法に加え、羽ばたき飛行の解析に対応した改良を加えた。昆虫の羽ばたき飛行は、翅の並進運動もさることながら、翅付け根を中心とした数十度におよぶ 3 自由度の回転運動が行われる。このため、流体メッシュは翅に追従して変形する仮想弾性体とし、また、解析空間を十分大きく取った上で、解析空間の回転を許し、過剰なメッシュの歪みに起因する解析精度の低下を回避した。

流体要素には、混合型有限要素法での安定条件、すなわち inf-sup 条件を満たす最も節点数の少ない 5/4c 要素を用い、構造要素には、平板の曲げを想定し厚み方向を縮退させることで解析精度向上と解析の安定化が可能なシェル要素を用いる。

## 3. トンボ (アキアカネ) のホバリングの解析

まず、生体の昆虫の羽ばたき飛行解析技術を確立した。昆虫の羽の3次元形状および剛性分布を有する構造モデルを、実際の昆虫から得られた羽ばたき方で、流体中にて移動させた流体構造連成問題を解く。流体については翅の生み出す流速および圧力分布が、構造については翅変形および節点力が算出される。この節点力から、翅の生み出す浮上力や翅の駆動に要求されるトルクやパワーが算出される。

昆虫の翅形状を3次元スキャナにて取り込み、特徴的な稜線に沿ってメッシュ分割を行った。このメッシュそれぞれに、生体翅断片の荷重変位関係が説明できる等価ヤング率と等価厚みを与え、剛性分布を再現した翅モデルを作成した。また翅全体で質量密度一定を想定し、各シェル要素の厚みより求めた体積で生体翅の質量を除した仮想質量密度を与えた。

羽ばたき方は以下のように計測した。生体の翅根元に3点の微小マーカーを打ち、ハーフミラーを用いた正面像/上面像同時撮影システムにより高速度撮影を行い、これにより得られたマーカーの移動を翅モデル根元の運動に幾何的に変換することで翅根元の強制変位を得た。

図に解析に用いたメッシュを示す。翅は4節点MITCシェル要素、周囲流体は5/4c要素であり、圧力安定化手法としてSUPG法を用いている。流体の要素数は6317、流速節点数は7530、圧力節点数1317、構造まで含めた総自由度数は24351である。なお、ホバリングに近い左右対称羽ばたきであることを前提に、対象条件を導入したハーフモデルを用いている。

解析の結果、図2に示される流れが得られ、また節点力から浮上力が求まった。翅1枚あたりの浮上力は自重のほぼ1/2、水平力は浮上力の1/4以下と、2枚翅でのホバリングとほぼ矛盾しない結果となった。また leading edge vortex[3] や wake capture 現象[4] による動的空力現象が観察された。

#### 4. 翅剛性分布設計戦略の模索

続いて、羽ばたき方は一定で、翅のヤング率のみを変化させた解析から、翅の剛性分布設計戦略を模索した。13種(125~2880MPa)のヤング率の翅の中で浮上効率が最良であった354MPaの翅では、図4に示されるように、翅対角線上に走る浅い溝構造が、膜面に加わる流体力を主に保持していることが分かった。

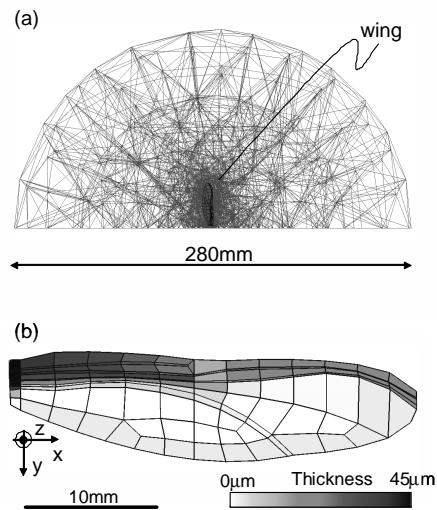


図1: 生体の飛行解析に用いた (a) 流体および (b) 構造のメッシュ

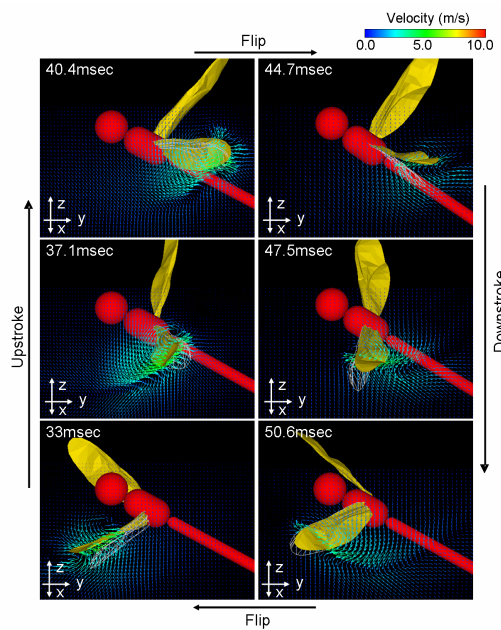


図2: 2枚翅トンボの微速飛行時の翅周囲流れ

以上の知見より、羽ばたき用に特化された翅構造を図4に示されるように提案した。コルゲーションおよびこの対角上の溝構造に質量を優先的に配分して厚みを持たせることで強度を保持し、他の部分はこれに保持され流体力を受けるだけの薄い膜で構成され、周囲を縁取りした構成である。

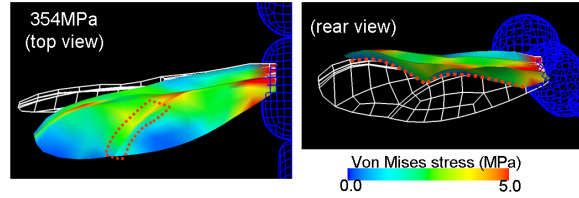


図 3: 翅溝構造への応力集中

#### 5. 羽ばたき飛行ロボットの設計解析

上記羽構造を反映した特徴を有する、チタンフレームとアラミドフィルムからなる、翅長 70mm、翼弦長 16mm の翅を、図5に示すように設計し、水平面内ストローク運動と前縁を回転中心とする能動的捻り運動の2自由度羽ばたき運動による浮上能力およびその要求スペックを ALE-FEA により算出することを試みた。

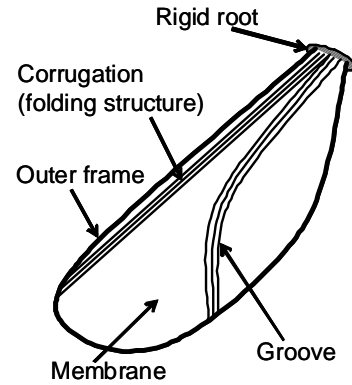


図 4: 羽ばたきに適した翅構造

翅部の駆動には、Fearing らが提案した2自由度運動変換機構を、ダイレクトドライブ超音波モータを適用した形にモディファイした図6に示される機構を想定した。羽ばたきストロークと能動的捻りをそれぞれ  $-45$  度、 $-30$  度、羽ばたき周波数 25Hz となる駆動条件をロータ根元要素の強制変位として与え、運動変換機構は非連成として ALE-FEA 解析を行った。

ロータ部の駆動におけるトルク - 角速度関係は図7のごとくなり、ここから、約 0.1W の機械的出力の超音波モータによって質量 2g の2枚翅羽ばたき飛行ロボットが自立浮上可能であることを定量的に示した。

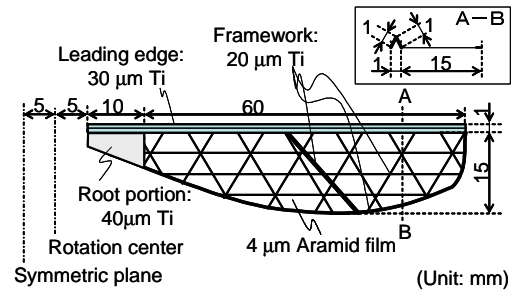


図 5: 設計された翅

#### 6. 浮上力補助下における浮上および移動の実証実験

上記シミュレーションによって検討されたモデルを具現化し、図8に示す4駆動自由度羽ばたき飛行ロボットを試作した。

駆動には、in-house の定在波型超音波モータ (機械的出力 12mW) を4つ用いた。Tethered にて得られた浮上力はモータパワーの小ささを反映して、0.108gf 程度と低い値であったが、浮上力補助機構に搭載された状態で、超音波モータの駆動変更のみで、上方および前後方向への移動を実証することが出来た。

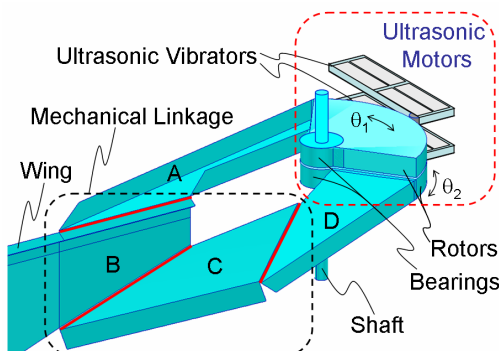


図 6: 羽ばたき飛行ロボットの機構

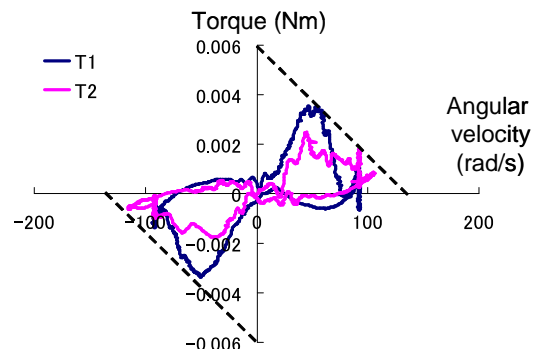


図 7: 駆動トルク - 角速度関係図

また、4つのモータの回転角を高速撮影にて取得し、これを強制変位として羽ばたき飛行ロボットモデルに与えた ALE-FEA によって、図9に示されるごとく、上記3方向への移動がほぼ妥当に算出され、ALE-FEA による設計の妥当性が裏付けられた。

## 7. 結言

以上により、流体・構造連成解析を活用して、特に、2g といったミッドレンジの羽ばたき飛行ロボットには欠かせない軽量化された羽を、昆虫のデザイン戦略に倣い受動変形を許すことで設計、具現する手法が筋道立てられた。定量的な設計ツールが確立され、自立浮上へ向けての課題が定量的に示されたことで、今後の羽ばたき飛行ロボットの開発が大幅に効率化されると考えられる。

## 参考文献

- [1] A. Azuma *The biokinetics of flying and swimming*, Springer-Verlag, 1992
- [2] 大貫 武，河内啓二，”昆虫に学ぶマイクロメカニクス，“*応用物理*，Vol.64, No.8, pp.822-825, 1995
- [3] C. P. Ellington, A. L. R. Thomas, C. van den Berg and A. P. Willmott, ”Leading-edge vortices in insect flight,“ *Nature*, Vol. 384, pp. 626–630, 1996.
- [4] M. B. James and M. H. Dickinson, ”Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings.,“ *Nature*, Vol. 412, pp. 729–733, 2001.
- [5] J. Yan, S.A. Avadhanula, J. Birch, M.H. Dickinson, M. Sitti, T. Su, and R.S. Fearing, ”Wing transmission for a micromechanical flying insect,“ *Journal of Micromechatronics*, vol. 1, no. 3, pp. 221-238, 2002.
- [6] Z. Qun and T. Hisada, ”Analysis of fluid-structure interaction problems with structural buckling and large domain changes by ALE finite element method.,“ *Comput. methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 190, pp. 6341–6357, 2001.

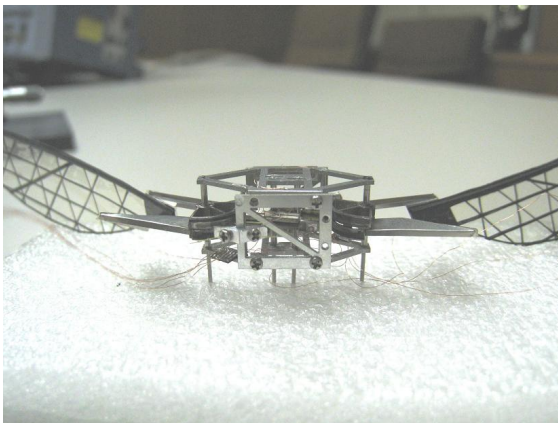


図8: 試作した自律浮上実証機

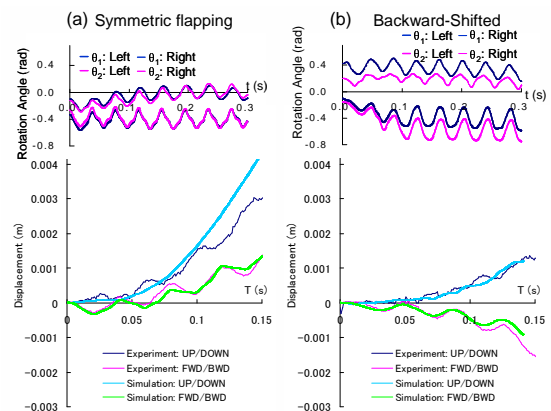


図9: (a) 対称羽ばたきと (b) 後退羽ばたきにおける実験と解析の比較