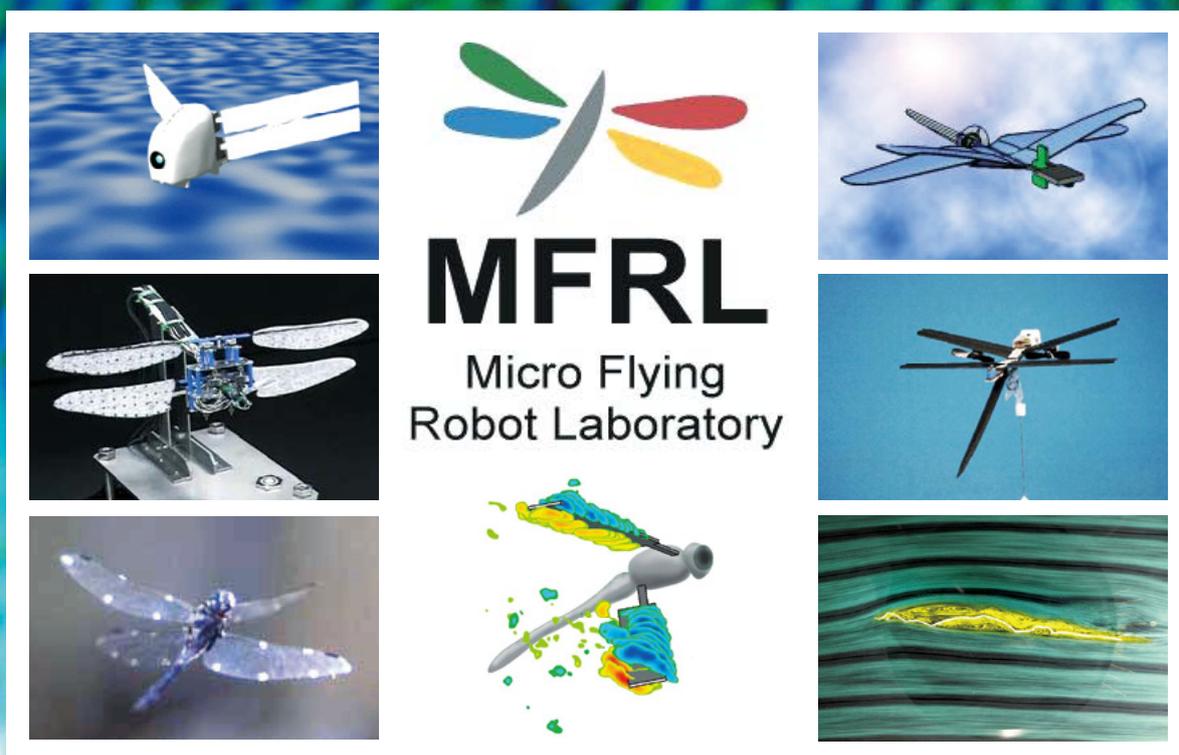


平成17年度－平成21年度私立大学学術高度化推進事業
「文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業」

昆虫型超小型飛翔ロボットの研究開発

研究成果報告書



平成22年5月

学校法人名：文理学園

大 学 名：日本文理大学

研 究 組 織：マイクロ流体技術研究所

研究代表者：磯貝紘二

(日本文理大学工学部 教授)

目 次

研究成果報告書発刊にあたって	1
第1章 研究成果の概要	3
1. 1 研究プロジェクトの目的・意義および計画の概要	3
1. 2 研究組織	4
1. 3 研究施設・設備等	6
1. 4 研究成果の概要	7
1. 4. 1 最初の3年間の「要素技術研究」の成果	8
1) 数値シミュレーション技術	8
イ) トンボおよびトンボ型飛翔ロボットの最適羽ばたき運動に関する研究	8
ロ) 昆虫の飛行メカニズムに関する研究	8
ハ) トンボ型飛翔ロボットの2枚翼の空力干渉効果に関する研究	9
2) 翼や胴体の軽量化技術	9
イ) 2自由度共振型羽ばたき翼に関する研究	9
ロ) 多自由度共振型羽ばたき翼に関する研究	10
ハ) 強制振動型羽ばたき装置に関する研究	10
3) 羽ばたき翼を持つ飛翔ロボットの飛行制御技術	10
イ) トンボの飛行特性に関する研究	10
ロ) 空力データベースを用いた飛行シミュレーションコードの開発	11
4) 可視化技術の開発	11
5) 優れた滑空特性を持つ翼型の開発	12
1. 4. 2 4年目および5年目の「試作機による飛行実証」の成果について	13
1) 「羽ばたき方式飛翔ロボット」の成果	13
2) 「非羽ばたき方式飛翔ロボット」の成果	15
第2章 研究成果の詳細	19
2. 1 トンボの最適羽ばたき運動に関する研究	19
2. 2 昆虫の飛行メカニズムに関する研究	29

2. 3	2自由度共振型羽ばたき翼に関する研究	83
2. 4	多自由度共振型羽ばたき翼に関する研究	99
2. 5	強制振動型羽ばたき装置に関する研究	113
2. 6	トンボの飛行特性に関する研究	125
2. 7	空力データベースを用いた飛行シミュレーションコードの開発	153
2. 8	可視化技術の開発	159
2. 9	優れた滑空特性を持つ翼型の開発	169
2. 10	マイクロ流体技術研究所公開研究発表会講演集	175
第3章	その他の研究成果等	245
3. 1	特許関連の成果	245
1)	特許登録	245
2)	実用新案登録	245
3)	特許出願	245
3. 2	他分野への応用	246
1)	小型風車へのコルゲート翼（凹凸翼）の応用	246
2)	回転ロッドと平板を組み合わせた高揚力低抵抗装置	246
3. 3	新聞、雑誌（一般雑誌）、TV ニュース等で取り上げられた例	246
	発表論文リスト	249
	謝辞	253
	添付資料－1（組織図）	254

研究成果報告書発刊にあたって

文部科学省の「私立大学高度化推進事業」の一つである「ハイテク・リサーチ・センター整備事業」のプロジェクトとして「昆虫型超小型飛翔ロボットの研究開発」を平成17年度より平成21年度まで、5年間にわたり推進して参りました。本プロジェクトの目的は「トンボの様にホバリングから急発進や急旋回など自在な飛行を行う手のひらサイズの超小型飛翔ロボット」を研究開発することにあります。

まず初年度にこのような飛翔ロボットを研究開発するために必要な組織として「マイクロ流体技術研究」を日本文理大学の附置研究所として設立し、このような研究を推進するために不可欠と思われる4つの研究設備、すなわち、「数値シミュレーション設備」、「回流式可視化実験水槽」、「3次元粒子画像流速測定 (PIV) 装置および「3カメラ3次元運動解析装置」を整備致しました。これらの装置を用いて最初の3年間は「要素技術」すなわち「数値シミュレーション技術」、「軽量化技術」、「昆虫の飛翔メカニズムに関する研究」、「昆虫型飛翔ロボットに適した翼型の研究開発」および「昆虫や昆虫型飛翔ロボットの飛行制御技術」の研究を行い、飛翔ロボットの実現に必要と思われる種々の要素技術を開発いたしました。4年目および5年目における試作機による飛行実証フェーズでは、昆虫の中でも特に優れた飛翔特性を示すトンボに着目した2種類の実証機を試作しました。一つは、トンボのように2対の羽ばたき翼を持つ「羽ばたき方式の飛翔ロボット」であり、もう一つは、トンボの優れた滑空特性に着目した固定翼方式（プロペラ駆動）の「非羽ばたき方式の飛翔ロボット」です。前者については、「共振現象」を利用した「共振型羽ばたき翼」を搭載した「ホバリング実証模型」、「飛行制御研究用模型」、「フリーフライト実証模型」等を製作し、ホバリングの実証、羽ばたき運動の自動制御による姿勢制御等に成果をあげることができました。また、後者については、トンボに特有のコルゲート翼（凹凸翼）を採用した試作機が風の影響を受ける屋外の飛行において安定な飛行を示すなどの成果をあげることができました。一方で、このような飛行実証段階における試作機による飛行実験を通して、今後さらに追及すべき研究課題も見えてきています。

本報告書は、本プロジェクトにおける「要素技術研究」および「試作機による技術実証研究」で得られた研究成果の概要とその詳細な内容を記述した論文を掲載しております。本報告書が、まだ克服すべき課題の多い本研究分野における研究者にとって参考になることを願っています。

平成22年5月

研究代表者

磯貝 紘二

第1章 研究成果の概要

第1章 研究成果の概要

1. 1 研究プロジェクトの目的・意義および計画の概要

構想調書に述べた計画について：

本プロジェクトの目的は、トンボのように空中静止（ホバリング）から前進飛行、急旋回まで自在な飛行を行う手のひらサイズの飛翔ロボットを研究開発することである。このロボットの開発により、地震災害時に破壊された建物等内の生存者の探索をはじめ、放射能汚染地域での探査活動等、人が近づけない場所における探査活動を迅速且つ効率よく行うことができる。本プロジェクトでは、最初の3年間で、ロボット設計に不可欠な数値シミュレーション技術（数値シミュレーションコードの開発、回流水槽を用いた翼周りの流れの可視化、流体力の計測を含む）、羽や胴体の軽量化技術の開発、羽ばたき翼を持つ飛翔体の飛行制御技術の開発等を行い、4年目5年目において、これらの研究成果を統合して、トンボ型の超小型飛翔ロボットの試作および飛行試験を行う計画である。

構想調書には無いがその重要性から追加した計画：

(イ) コルゲート（凹凸）翼型およびそれを用いた非羽ばたき方式昆虫型飛翔ロボットの研究

追加研究においては、粘性流れを可視化することで昆虫の翅周りの流れの空力的意味を明確にすることと、可視化実験情報を反映させた昆虫型超小型飛翔体を製作し飛行実験をすることにより、超軽量超小型飛翔体の飛行特性把握を加速し、羽ばたき方式の前段階として屋外飛行の可能な非羽ばたき方式の昆虫型超小型飛翔ロボットを開発することを目的とした。昆虫の、特にトンボの持つ優れた滑空能力の秘密を解明することが羽ばたき方式の超小型飛翔ロボットの開発に結びつく近道と考えたこと、そしてマイクロ流体技術研究所に設置する回流式可視化実験水槽の可視化能力に、未だ解明されていない超小型機の翼の空力特性を解明する足がかりが得られるのではないかという可能性を感じたことが追加研究に取り上げた理由である。研究初年度は、汎用回流式可視化実験水槽の開発に費やされてしまうので、既に保有している小型のパイロット可視化実験水槽による低レイノルズ数流れの概要把握と、超小型飛翔模型の製作と飛行実験によるトンボの各種飛行形態における飛行特性の把握に研究の主目標をおいた。研究2年度は、完成する回流式可視化実験水槽の可視化能力等の特性把握と可視化能力のリファイン、そして初年度に得た知見を反映した形での可視化実験の遂行と、その結果を反映した第一次昆虫型超小型飛翔ロボットの試作ならびに飛行特性の確認に目標をおいた。研究3年度は可視化水槽において非定常実験を行い、空力知見を深めるとともにプロペラ推進の非羽ばたき方式（固定翼様式）の昆虫翼型超小型飛翔ロボットを試作し、飛翔実験に

臨むことを目標とした。研究 4 年度以降は、それまでの研究成果を総括し、改めて研究計画を策定するものとした。

(ロ) トンボの飛行特性に関する研究

本研究の目的は、トンボの自由飛行を初年度末に導入する「3 カメラ 3 次元運動解析システム」を用いて、撮影・解析し、トンボの飛行特性（ホバリング、離着陸、旋回等における機体運動とその時の羽の運動）を定量的に明らかにし、本プロジェクトの目標である「トンボ型飛翔ロボット」の開発、特に、飛行制御方式や制御則の設計に役立てることである。

研究計画としては、1 年目は既存の高速度ビデオカメラ 1 台を用いて、自由飛行を行うトンボの撮影方法を習得する。2 年目は初年度末に導入される「3 カメラ 3 次元運動解析装置」を用いて、自由飛行するトンボの種々の飛行形態を撮影し、その時の機体運動とそれに対応する翼の羽ばたき運動を定量的に解析する。

3 年目以降は、引き続きトンボの種々の飛行形態のデータを取得すると共にそれまでに得られた飛行データを整理し、得られた成果をトンボ型飛翔ロボットの飛行制御の研究に反映させる。

1. 2 研究組織

イ) 参加研究者

本プロジェクトに参加した主な研究者は以下の表に示すとおりである。

研究者名	所属・職名	備考
磯貝紘二	航空電子機械工学専攻・教授	研究代表者
池田多門	航空宇宙工学科・教授	
小幡 章	航空宇宙工学科・教授	
藤本達見	航空宇宙工学科・教授	
河邊博康	航空電子機械工学専攻・教授	
永井弘人	航空宇宙工学科・助教	
伊藤 研	情報メディア学科・教授	
本地弘之	航空電子機械工学専攻・教授	平成 1 8 年 3 月まで
吉永 宗	航空電子機械工学専攻・教授	平成 1 9 年 3 月まで

研究者名	所属・職名	備考
鈴木二郎	航空宇宙工学科・教授	平成20年3月まで
友成義正	航空電子機械工学専攻・教授	平成21年3月まで

ロ) 役割分担

各研究者は次のような役割分担で研究開発を行った。

本プロジェクトを遂行するために、同研究所所長（研究代表者）をトップとして、その下に4つの研究班を設けた（添付資料1参照）。研究代表者（磯貝教授）は、プロジェクト全体の進捗状況の把握、研究方針の策定、プロジェクトの対外説明、年度毎に作成している「研究成果報告書」の取りまとめ等に責任を持つ。一方、各研究班とその役割は以下のとおりである。研究班は、磯貝教授を班長とする「羽ばたき方式飛翔ロボットの研究班」、藤本教授を班長とする「粒子画像流速測定法(以下 PIV)・計算流体力学(以下 CFD)コードを用いた定常／非定常流体力の研究班」、小幡教授を班長とする「非羽ばたき方式飛翔ロボットと低レイノルズ数流れにおける翼特性の研究班」、および河邊准教授を班長とする「トンボの動特性・飛行制御の研究班」である。研究班の名前が示すように磯貝研究班では羽ばたき翼によって、揚力と推力を生成するトンボ型ロボットの研究開発を進める。具体的には、導入した「数値シミュレーション設備」を駆使して、羽ばたき翼まわりの流れを解析し、昆虫型飛翔ロボットのキーテクノロジーの一つである「共振型羽ばたき翼」の研究開発やそれを装着したトンボ型飛翔ロボットの研究開発を進める。一方、小幡研究班ではトンボの優れた滑空特性に着目した（トンボの翼型を模擬した翼を持つ）固定翼を持ち、推力はプロペラを用いた方式の飛翔ロボットの研究開発を進めるとともにその基礎となる「トンボの翼型まわりの低レイノルズ数流れの研究」を、今回独自に開発した「回流式可視化実験水槽」を用いて行う。本可視化実験水槽は、数値解析ではカバーできない、渦列が翼近傍にあって互いに干渉する、低レイノルズ数における準定常流れを簡便に可視化できる世界で唯一の装置である。また、藤本研究班は、今回導入した「3次元PIV装置」および汎用のCFDコードを用いて、トンボの翼型まわりの定常／非定常流れ場あるいは羽ばたき翼まわりの非定常流れ場およびそれに伴う定常／非定常流体力の研究を行い、磯貝研究班が目指す「羽ばたき方式の飛翔ロボット」や小幡研究班が目指す「非羽ばたき方式の飛翔ロボット」の研究開発に寄与する。また、河邊研究班は、実際のトンボの飛翔を、今回導入した「3カメラ3次元運動解析システム」を用いて解析し、トンボの優れた飛翔特性を解明して、磯貝研究班や小幡研究班が目指す昆虫型飛翔ロボットの飛行制御技術の研究開発等に寄与する。添付資料1に示すように、各研究班の下には、池田教授、永井助教、伊藤教授、關非常勤職員、上澤非常勤職員らが配置されそれぞれの研究課題についての研究を遂行する。

さらに、各研究班には本学4年生10数名、大学院修士課程の学生数名が配置され、それ

ぞれの研究課題について、卒業論文および修士論文のための研究を遂行する。この他、支援体制として、本プロジェクトの経理・設備管理を關非常勤職員が行い、本プロジェクトの予算管理および対外管理を本学経理課の荒巻が行っている。また、各研究班の間の連携を密にするために「研究開発会議」を隔週ごとに開催し、研究の進捗状況や研究方針等についての情報交換を行っている（本プロジェクトが始まってから今日まで、80回の会議を実施した）。この他、本プロジェクトの研究内容についてのアドバイスを受けるため小型無人機の研究開発の経験が豊富な、「宇宙航空研究開発機構（JAXA）」の特別研究員である田辺安忠氏に本研究所の「外部協力委員」を委嘱している。

1. 3 研究施設・設備等

本プロジェクトで整備した施設・装置・設備は下記のとおりである。

研究施設

名称： マイクロ流体技術研究所

面積： 190 m²

利用人数： 29 名

研究装置

名称： 回流式可視化実験水槽システム

性能等： 測定部 長さ 1.9 m x 幅 0.75 m x 深さ 0.375 m, 流速 0 - 20 cm/s,
ドローリー速度 0 - 10 cm/s

本プロジェクトにおける役割：

昆虫の翅まわりの流れの可視化、定常／非定常流体力の計測を行い、低レイノルズ数における揚力発生メカニズムの解明、昆虫の飛翔メカニズムの解明、昆虫型飛翔ロボットの設計データの取得、数値シミュレーションコードの検証データの取得を行う。
(世界初の可視化機能を有し、水中での実験データは、相似パラメータであるレイノルズ数と無次元振動数を空中の昆虫あるいは飛翔ロボットの値と合わせることで、水中での実験データを空中の実験データに換算することが出来る。本装置で得られたデータは空中での飛翔に換算すると、ホバリングから飛行速度最大で 8m/s までのデータに対応する。)

利用時間数： 32 時間／週

利用人数： 10 名

情報処理装置

名称： 数値シミュレーション設備システム

性能： 1 ノード (Itanium2 (1.6 GHz) x 2) x 20 台

本プロジェクトにおける役割：

羽ばたき翼周りの流れの数値シミュレーション、昆虫型飛翔ロボットの空力設計、共振型羽ばたき翼の最適設計、昆虫型ロボットの飛行シミュレーション用空力データベースの構築などに使用される。

利用時間： 24 時間／日 (365 日／年)

利用人数： 5 名

研究設備

1) 名称： 3 カメラ 3 次元運動解析システム

性能： 109,500 コマ／秒の高速度ビデオカメラ x 3 台、3 次元運動解析ソフト

本プロジェクトにおける役割：

トンボの自由飛行の運動解析および羽ばたき翼の運動解析、共振型羽ばたき翼の運動解析に使用され、昆虫の飛翔の飛行制御メカニズムや昆虫型飛翔ロボットの飛行制御技術の研究開発に資する。

利用時間： 10 日／月

利用人数： 4 名

2) 名称： 3 次元 PIV 設備システム

性能： ダブルパルス YAG レーザー1 台、PIV カメラ 2 台、解析装置 1 台より構成

機能： 3 次元物体周りの 3 次元流れ場（速度ベクトル、渦度等）の計測

本プロジェクトにおける役割：

昆虫の翼（羽ばたき翼・固定翼）周りの 3 次元流れ場の定量的計測、昆虫型飛翔ロボットの羽ばたき翼・固定翼周りの 3 次元流れ場の定量的計測に使用され、昆虫や昆虫型飛翔ロボットの揚力や推力の生成メカニズムの解明と数値シミュレーションコードの検証を行う。

利用時間： 10 日／月

利用人数： 5 名

1. 4 研究成果の概要

1. 1 節で述べたように、本プロジェクトの目標である優れた飛翔能力を持つトンボ型の飛翔ロボットの開発のため、最初の 3 年間でその基盤となる 4 つの「要素技術」、すなわち、「数値シミュレーション技術」、「翼や胴体の軽量化技術」、「羽ばたき翼を持つ飛翔ロボットの飛行制御技術」、「優れた滑空特性を持つ翼型の開発」を進めた。4 年目および 5 年目は、これらの「要素技術」を統合した「飛翔ロボット」を設計・製作し、飛行試験による技術実証を進めた。以下、これらの項目について、得られた研究成果の概要に

ついて述べる。

1. 4. 1 最初の3年間の「要素技術研究」の成果

1) 数値シミュレーション技術

多くのパラメータに支配される羽ばたき方式飛翔体の開発は、羽ばたきによって生じる空気力を予測するための信頼できる数値シミュレーション技術の開発が必須となる。流体の粘性効果を含めた3次元ナビエ・ストークス方程式に基づく数値シミュレーションコードを開発した《雑誌論文1》。本コードは、任意の翼平面形を持つ1枚あるいはトンボのような2枚の羽ばたき翼周りの非定常流れ場のシミュレーションが可能で、非定常流体力、必要パワー等の予測が可能である。また、本コードの信頼性・精度は、回流水槽における半載羽ばたき翼模型による流体力の計測結果と極めてよく一致することが確認されている。さらに、本コードは翼の空力弾性変形(空気力による翼の弾性変形)の効果も考慮することができるので、次項で述べる「共振型羽ばたき翼」の最適設計あるいは本学が開発を目指しているトンボ型ロボットの空力設計において威力を発揮している。具体的には、本数値シミュレーションコードを用いて以下のような成果が得られた。

イ) トンボおよびトンボ型飛翔ロボットの最適羽ばたき運動に関する研究

空気中で羽ばたき運動を行って自重を支えるための揚力や抵抗に打ち勝つための推進力を生成するためには、エネルギーの消費を伴う。本研究では、エネルギー消費が最小になる羽ばたき運動を数値シミュレーションと最適化計算手法を組み合わせることによって決定した。さらに、ホバリング時よりも飛行速度が3m/s - 4m/s付近での消費エネルギーが最も小さくなる(ホバリング時の約1/3)ことや予想される最大の飛行速度が8m/s程度になることなど、従来知られていなかった新しい知見を得た。

(詳細は2. 1節参照)

ロ) 昆虫の飛行メカニズムに関する研究

本研究は、昆虫のホバリングや前進飛行時における羽ばたき翼によって生成される非定常空力特性について、相似模型による水槽実験および3次元ナビエ・ストークス・コードによる数値シミュレーションを用いて、詳細な検討を行ったものである。研究対象とした昆虫はマルハナバチである。まず、回流式可視化実験水槽において、前進飛行時の空力特性を支配する重要なパラメータである前進速度比(advance ratio)およびストローク面

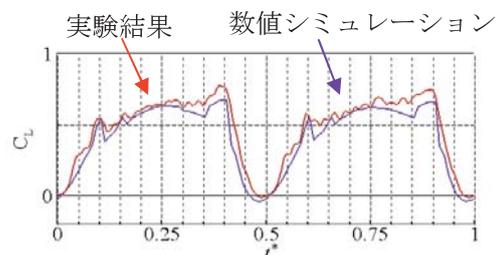


図1 1サイクル間の揚力変動の実験値と数値シミュレーションの比較



図2 翼まわりに生成された渦度の比較
数値シミュレーション PIVによる測定

傾斜角の種々の値について、非定常流体力の計測と 3 次元 PIV（粒子画像速度計測）装置を用いた流れの可視化実験を行って数値シミュレーション結果と比較し、両者が良く一致することを示した(図 1、図 2 参照)。この研究により、昆虫の種々の羽ばたき運動による非定常空気力の生成メカニズムの詳細が解明されると共に、開発した数値シミュレーションコードの信頼性と精度が確認された。（詳細は 2. 2 節参照）

ハ) トンボ型飛翔ロボットの 2 枚翼の干渉効果に関する研究

本プロジェクトが目指すトンボ型ロボットは、前後 2 対 4 枚の羽ばたき翼を持つ。前後 2 対の羽ばたき翼は空気力学的な干渉を起こし、前翼と後翼の羽ばたき運動の位相差によって生成される空気力や消費エネルギーが異なってくる。本研究では、本プロジェクトで製作した半載羽ばたき翼装置(図 3)を用いた、水槽実験によって前後翼間の干渉効果を明らかにした。具体的には、揚力は前後翼が同じ位相差で羽ばたいている場合に最大値を示すこと、一方、効率（単位揚力当たりのエネルギー）は位相差が 45 度の場合に最小値を示すことなどが明らかになった。（水槽実験の結果は、相似則によって空中の値に換算することができる。）（詳細は 2. 2 節参照）

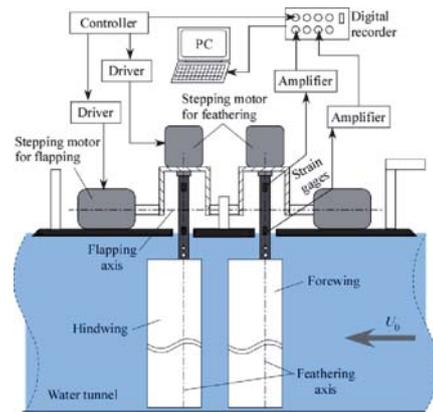


図 3 半載羽ばたき翼装置

2) 翼や胴体の軽量化技術

飛翔ロボット開発のキーテクノロジーの一つは、軽量で大きな推力（または揚力）を少ないエネルギー消費で生成できる羽ばたき翼を開発することである。このような羽ばたき翼の候補として、本プロジェクトでは「共振型羽ばたき翼」の開発に力を入れてきた。共振型羽ばたき翼の特徴は、弾性翼あるいは弾性的に支持された翼の固有振動数に近い振動数で翼を加振することにより「共振現象」を起こさせ、小さなトルクで大きな羽ばたき運動を実現し、少ない消費エネルギーで大きな推力（または揚力）を生成するものである。このような翼を実現するためには、翼の弾性特性や質量特性を最適設計などの手法を用いて決定しなければならない。以下に述べるように、1) で開発した空力弾性変形（空気力による弾性変形）も取り扱える数値シミュレーションコードが不可欠である。

イ) 2 自由度共振型羽ばたき翼に関する研究

薄い素材で出来た剛体の翼を、羽ばたき運動の基本であるフラッピング運動のバネとフェザリング運動のバネで支えた共振型羽ばたき翼のバネ特性と翼の質量特性を数値シミュレーションによって決定し、さらに、それを搭載したトンボ型飛翔ロボットの飛行

制御の重要技術である羽ばたき運動のコントロールを、適切な減衰力を与えて行う新しい手法を提案した。さらに、数値シミュレーションコードと最適設計手法を組み合わせた最適設計コードを開発し、トンボ型飛翔ロボットに必要な揚力と推力を実現するような、バネと翼質量分布を決定する新しい手法を提案した。

(詳細は2. 3節参照)

ロ) 多自由度共振型羽ばたき翼に関する研究

イ) で述べた「2自由度共振型羽ばたき翼」の実験による実証模型を設計・製作し実験を進める過程で「多自由度共振型羽ばたき翼」が開発された。この翼は、1本のカーボンロッドと EPP(Expanded Polypropylene)の薄板より構成される簡単な構造ながら、1枚の翼で約 0.10 N の推力(羽ばたき振動数 52 Hz)を出すことが図4に示す推力計測装置を用いた実験により確認された。このことは、この翼を4枚装着したトンボ型飛翔ロボットは 52 Hz の羽ばたき運動によって 0.40 N (約 41 gf)の機体をホバリングさせる能力のあることを意味している。図5に示すように、この実験結果は1)で述べた空力弾性効果を考慮した数値シミュレーションコードによる計算結果ともよく一致することが確認されている。この共振型羽ばたき翼の開発により、4年目及び5年目に計画しているトンボ型飛翔ロボットの飛行実証への道が開けたことになる。

(詳細は2. 4節参照)

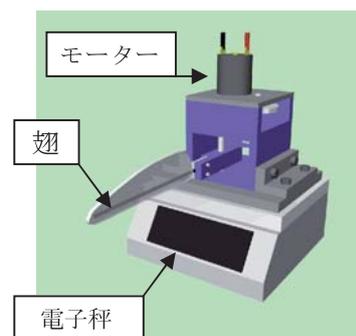


図4 揚力計測装置

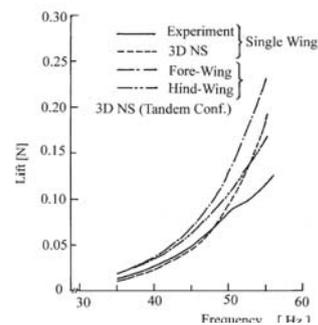


図5 揚力の実験値と数値シミュレーション結果の比較

ハ) 強制振動型羽ばたき装置の研究

翼を一定の振幅で強制的に加振する所謂「強制振動型羽ばたき翼」に関する研究では、EPPの薄板に細いチューブを接着してその中に直径 0.7 mm の形状記憶合金製の棒を通した新しいタイプの翼を開発した。この翼は、フラッピング振動振幅 40 度で、約 40 gf の推力を生成することが確認されたので、本翼を2枚装着したホバリング実証模型(スパン 20 cm, 重量約 40 gf)を製作した。本実証模型は、電力を供給するための電池も搭載しているために、無線操縦によりホバリング実証試験が可能である。試験の結果、30 Hz 程度の羽ばたき振動数で自重を支えることが可能であることを実証した。また、尾翼の追加による操縦の可能性を確認した。(詳細は2. 5節参照)

3) 羽ばたき翼を持つ飛翔ロボットの飛行制御技術

イ) トンボの飛行特性に関する研究

本プロジェクトで導入した「3カメラ3次元運動解析装置」を用いて、自由飛行するシオカラトンボの種々の飛行形態を撮影し、その時の機体運動とそれに対応する翼の羽ばたき運動を定量的に解析した。撮影に成功した運動は、次の4ケースである。Case 1: 緩やかに上昇しながら左へ横滑りを行うケース、Case 2: 上昇しながら右ロールを開始するケース、Case 3: ホバリング飛行を行うケース、Case 4: 風速1 m/sの左横風を左旋回

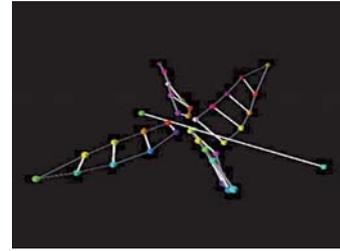


図6 トンボの翼運動解析例

しながら横切るケース。(Case 1, 2, 3は 無風状態での飛行である。) このようにトンボの自由飛行における種々のマニューバ時の機体運動とそれに対応する羽ばたき運動を計測し、定量的な飛行データ(図6)を取得した例は他に無い。本研究で得られた成果は、トンボの飛行特性の研究やトンボ型飛翔ロボットの飛行制御の研究に有用な知見を提供する。(詳細は2. 6節参照)

ロ) 空力データベースを用いた飛行シミュレーションコードの開発

1) で開発した数値シミュレーションコードを用いて、トンボ型飛翔ロボットの任意の羽ばたき運動に対する空気力・モーメントを実時間で計算するためのデータベースを作成し、トンボ型ロボットのホバリングから前進飛行のシミュレーションを行うための飛行シミュレーションプログラムを開発した。このシミュレーションコードは、4年目に開発したトンボ型飛翔ロボットの制御研究用模型の設計に用いられた。また、5年目に製作予定の自由飛行模型について遷移飛行シミュレーションを行ったところ、姿勢を安定に保ちながら、出発地から3Km先にある目標地点まで飛行し、目標地点上空50mにホバリング状態で静止飛行(ホバリング)を続けることができることや、4枚の共振型羽ばたき翼のうち前翼2枚を2個の独立したモータで駆動し、後翼2枚は1個のモータで同位相、同振動数で駆動する方式が、4枚の羽を4個のモータで駆動する方式より安定性に優れていることなどを明らかにした。

(詳細は2. 7節参照)

4) 可視化技術の開発

レイノルズ数が低くなると、粘性の影響が強くなることは知られていたが、定常流において翼前縁に渦が出来ると、それがどのような挙動を示すかは明確に知られていなかった。数値解析法ではカバーできない複雑な干渉流であるため数値シミュレーション手法が適用できず、実験によるにしても空気中では揚力発生対象が小さすぎ、水中では特に流線を可視化する方法が開発されていなかった。マイクロ流体技術研究所が開発した可視化式実験水槽は、特殊な工夫によって、低レイノルズ数2次元流れにおけるフロントライン、流線、翼近傍の渦を簡便に可視化できるものである。各種実験の結果、次項に示すトンボに

代表されるコルゲート翼の揚力発生メカニズムを明らかにできただけでなく、低レイノルズ数流れが予想外の大きな工学応用例に結びつく可能性を有する深さと広さをもつことを発見した。

(詳細は2. 8節参照)

5) 優れた滑空特性を持つ翼型の開発

平成18年3月に整備された大型回流式実験水槽を用いて、トンボに特有の凹凸翼型について、その低レイノルズ数における特性を、可視化実験によって詳細に調べ、翼上面に形成される準死水域に生成される渦列によって、はく離が抑制され全体として、揚抗比の優れた翼状の流れが形成されることなどを明らかにした。また、この成果を応用した設計ルールを明らかにし、NBUシリーズと呼ばれる翼型を開発した。また、凹凸翼が備える前縁突起が飛行安定向上にも大きく寄与することを明らかにし、それを応用した「昆虫型飛行ロボット」に適した軽量かつ、十分な強度と剛性を持つ翼を開発し、それを装着した赤外線誘導方式の超小型軽量(3.5g)の「第1次昆虫型飛行ロボット」(固定翼、プロペラ推進)を試作し、アウトドアを含む飛行試験により、その耐突風性能等優れた飛行特性を確認した。

凹凸翼周りの流れの例を図7に示す。翼面上で渦を巻いている部分を着色したものであるが、その部分が見事な翼型を形成していることが分かる。渦が移動しつつあるので平均的なものではあるが、空気キャタピラー翼ということも出来るであろう。この時の迎え角は5度で、レイノルズ数は弦長基準で約7,000である(露出時間1秒)。この他、トンボは、自分の翅周りに意識的に渦列を作り、それを後縁まで続かせることによって境界層内のエネルギーがなくなることを防ぐと共に、渦によって流れを曲げたり、やり過ぎたりして空気キャタピラー翼を形成し巧みに翼機能を果していることなどが明らかになった。このように、昆虫の翅周りの局所渦だけでなく、渦と翅周りの流れの関係を全体的に明らかにしたのは本研究が最初と考えられる。これらの研究成果を基にして、図8に示すような昆虫型の翼断面をもったプロペラ推進式の超小型・超軽量の昆虫翼型リモコン機を試作し、それが外乱に極めて強い、従来我々が手にし得なかった飛行特性を与えることを明らかにした。この機体は全幅17cm、重さ3.5gなので、絵葉書相当の大きさで重さである。本研究成果は、将来羽ばたき方式飛行ロボットに統合化される予定である。(詳細は2. 9節参照)

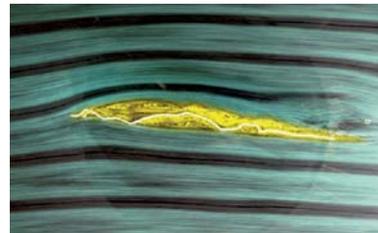


図7 凹凸翼周りの流れの可視

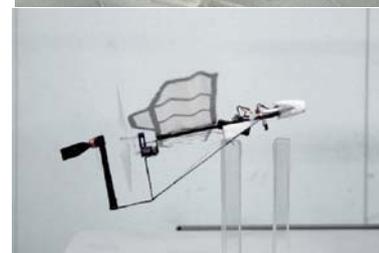
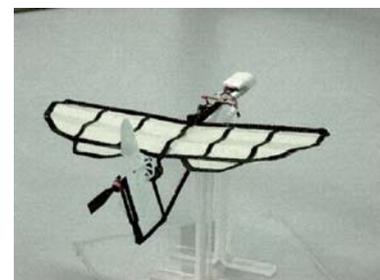


図8 凹凸翼を用いた飛行ロボット

1. 4. 2 4年目および5年目の「試作機による飛行実証」の成果について

1. 1節で述べたように、4年目及び5年目は3年間の「要素技術」の研究・開発の成果を踏まえて、昆虫型飛行ロボットの試作・飛行試験と位置付けられている。以下に、「羽ばたき方式飛行ロボット」と「非羽ばたき方式飛行ロボット」に分けて、それぞれの研究成果について述べる。

1) 「羽ばたき方式飛行ロボット」の成果

まず、4年目には要素技術研究で開発した「共振型羽ばたき翼」(翼平面形は矩形)をさらに発展させたトンボと同じ翼平面形状を持つ「共振型羽ばたき翼」を開発した。この翼は、図9に示すように構造的には前者と同じであるが、翼平面形をトンボ型にすることにより揚力生成の効率が前者に比べ50%以上改善された。図10に実験で得られた翼一枚当たりの推力(ホバリングでは揚力)の羽ばたき振動数に対する値を示す。この結果は、羽ばたき振動数40 Hz のとき、この翅4枚を装着したトンボ型ロボットは約40gfの自重をホバリング状態で持ち上げることが出来ることを意味する。このことを実証するために図11に示す重量約40gfのホバリング実証模型を作成した。この模型はまだ姿勢を安定に保つための姿勢制御を行っていないので、図12に示すテストベッドに固定されている。このテストベッドは、飛行体部分が羽ばたきによって40gf以上の揚力を生成すれば、飛行体部分が上昇運動を行うように設計されている。平成20年6月に行った試験で、約40 Hzの羽ばたきによって上昇運動することが始めて確認された(<http://www.nbu.ac.jp/~mfri/>参照)。本模型は、電力は外部から供給され、姿勢制御も行っていないが、トンボ型飛行ロボットとしては、世界で初めてのホバリング成功例と言える。次の課題は、姿勢制御を行った自由飛行である。本プ

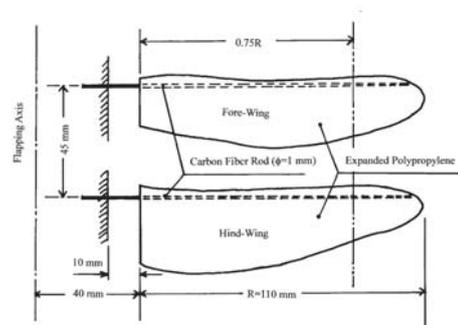


図9 共振型羽ばたき翼

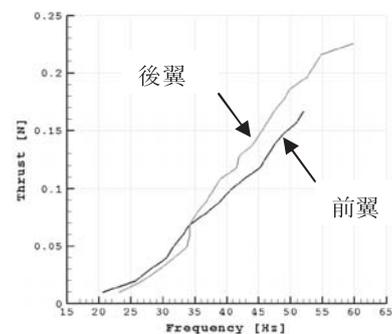


図10 推力の振動数に対する変化



図11 ホバリング実証模型



図12 ホバリングテストベッド

プロジェクトで採用した姿勢制御方式は、図 10 に示された推力と振動数の関係からヒントを得たもので、4 枚の翅それぞれを 4 個の独立したモータで加振して、それぞれのモータの振動数を変えることによって、姿勢制御に必要な空気を生成する方式を採用することとした。この方式に従って、姿勢制御の基本であるピッチングとローリングの運動の制御を研究するための模型の設計・製作を行った。設計に当たっては、前述の「空力データベースを用いた飛行シミュレーションコード」が重要な役割を果たした。図 13 に「姿勢制御研究用模型」を示す。この模型は、ピッチングとローリング運動の振動数制御の研究のために製作されたもので、この機体の重心は支持棒でジンバル固定され、重心周りのピッチング運動とローリング運動が自由に出来るようになっている。4 枚の翅を駆動するモータの振動数は、外部に置かれた計測機からの指令によって、フィードバック・コントロール(PID 制御)が行われる。機体の姿勢制御を行うためには機体の姿勢を検出するためのセンサーが必要であるが、現在、異なる 2 つの方式による機体姿勢の検出を試みている。

1 つは、機体の外部に置かれた超音波センサーにより、外部から機体の姿勢を検出する方式であり、2 つ目は機体に搭載されたセンサーにより姿勢を検出するものである。2 つ目の方式が本来トンボ型ロボットに採用されるべき技術であるが、センサーの精度や羽ばたき運動による振動の影響を受けるなどの問題点を含むため、まず、そのような問題の無い 1 つ目の方式により、振動数制御方式によって姿勢が安定に保てることを確認することが重要と考えたためにこの方式を採用した。まず前者の超音波センサーを用いた方式については、平成 21 年 10 月に行った試験により、4 枚の翅の振動数を別々に制御することによりピッチとロールの姿勢を安定に保つことが出来ることが確認された (<http://www.nbu.ac.jp/~mfri/>参照)。一方、2 つ目の方式については、搭載している加速度センサーが羽ばたきによる振動の影響により、正しい姿勢の検出が困難であることが判明したので、その防振対策を進めた結果、センサー本体を α GEL(アルファージェル)と呼ばれる防振材で包むことにより羽ばたき振動によるノイズをほぼ除去することに成功し、加速度センサーを用いた姿勢制御が可能であることを確認した。以上のような姿勢制御研究用模型に

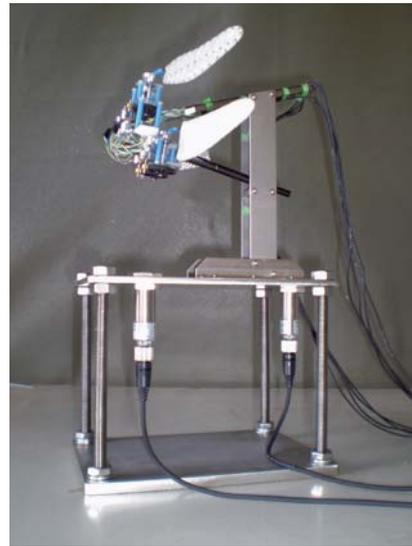


図 13 姿勢制御研究用模型

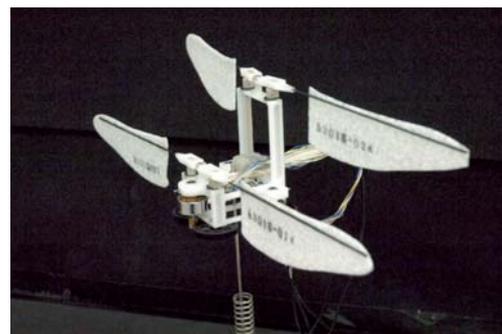


図 14 フリーフライト実証模型

よる実証試験結果および「空力データベースを用いた飛行シミュレーションコード」を用いた検討結果を反映した「(3モーター方式による)フリーフライト実証模型」(図14)を平成22年2月に製作した。本フリーフライト模型は「姿勢制御研究用模型」と同様に4枚の共振型羽ばたき翼および3個の駆動用モーターと姿勢角を検出するための加速度センサーを搭載している。機体の総重量は49 gfで、モーターの振動数を制御するため制御装置(スピードコントローラーおよび演算装置)は前述の「姿勢制御研究用模型」と同様に機体外部に設置され、制御信号等は電力と共に有線で外部より供給される。本機体の重心を釣り糸で吊って姿勢制御の試験を実施した結果、まだ、自重を上回る揚力は出ないが、80%程度の出力で機体の姿勢を安定に保持できることが確認された(<http://www.nbu.ac.jp/~mfri/>参照)。今後、自重を上回るフルパワーでの試験を進める計画である。

2) 「非羽ばたき方式飛翔ロボット」の成果

平成19年度末に図15に示すようなトンボ型飛翔ロボットの原型機を完成し、平成20年度は屋外における飛行試験を行って、基礎データの蓄積と空力的・飛行力学的リファインを行った。なお、本機の操縦方式は、プロペラの差動回転による左右方向変化と、同時回転増減による速度変化からなる2CH方式である。

飛行試験の結果、トンボ型飛翔ロボットは従来の固定翼にはない多くの優れた飛行特性を示すことが明らかになった。具体的には、以下の3点である。1) コルゲート翼の効果によって無風時の安定度が通常翼型機に比較して格段に優れている*。2) 後翼が失速しない。3) 横風に対しても傾くことなく横に滑る飛び方ができ、地表付近での横風バンクによる高度ロスを抑制できる(*2.9節を参照されたい)。



図15 トンボ型飛翔ロボット
原型機

このうち、後翼の非失速特性は次のように説明される。

迎え角が大きくなっても、前翼で流れが迎え角を減少させる方向に変えられ、その流れがプロペラによって加速され後翼の剥離を防ぐので、後翼のプロペラ後流に洗われる部分は失速をすることがない。従って下方からの風で前翼が失速しても、機体の高度ロスを生ずる前に後翼による頭下げモーメントが利いて迎え角の小さい正常の飛行姿勢を瞬時に回復し制御性を失うことがない。これは通常形態の飛翔体ではみることの出来ない極めて特徴的で優れた性質である。

屋外を比較的低速で飛ぶ小型飛翔ロボットは風により大きく迎え角が変わるので、失速しない機体が第一に望まれるが、トンボ型はこの条件を満たすことが出来たことになる。

飛行実験を重ねるうち、地表付近を飛ぶ小型飛翔ロボットにとって失速の次に怖いのが、不時バンク等による急な高度落ちであることが明らかとなった。風環境中での低空飛行を

実現するためには横風バンク対策が必須であった。トンボ型飛翔ロボットが採った横風対策は次のようなものである。

通常、航空機は横・方向の安定を保つために機体に上反角効果を持たせるが、超低速機においては主翼に上反角を与えると強い横風に対しては大きなバンクをし、結果的に上方への揚力が急減し、急激に高度を落としてしまうという副作用が生ずる。

そこでトンボ型飛翔ロボットにおいては、テールブームを下方に傾ける対策を試みた。テールブームに下反角効果を持たせ、かつ横風に対して横力を発生させることでダッチロール減衰を与えると共に、横風に対しても大きなバンクをすることなく横に滑るだけで安定な飛行を継続することを狙ったものである。結果は概ね予想通り良好であった。テールブームの下折れ角は15～20度が適切であった。標準型を図16に示す。参考までに標準型は全幅25cm、質量約20gである。

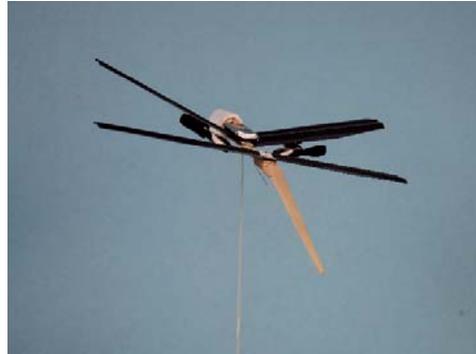


図16 トンボ型飛翔ロボット標準型（2CH制御）

以上、本研究によってトンボ型飛翔ロボットは、翼型の凹凸による安定性獲得にプラスして、後翼が失速しない特性と、横風に対して大きなバンクをしないで横と方向の安定性を保てるという極めて優れた飛行特性を持つことが略立証できたものと考えられる。この形態は従来不可能とされてきた超小型超軽量機の屋外飛行に関する解の一つであると考えられる。

原始トンボは胸の筋力が弱く満足な羽ばたきは出来なかったものと考えられているので、トンボの4翅という特殊な形態は羽ばたき用と言うよりも滑空用であった可能性がある。

なお、トンボ型飛翔ロボットは自機の飛行速度に近い風速下でも飛行可能である。原型機無風時の飛行速度は毎秒約6mであるが、毎秒4～6mの風の吹く屋外での飛行が可能であった。風に乗ってからのUターンも可能であり、風に逆らう時にでも飛行安定性を失わず、空中静止することも出来ることが確認された。ただし、原型機は速度と方向変化のみの2CH制御故、姿勢が変えられないので長時間空中静止を維持することは出来なかった。より意図的な飛行を求めて姿勢制御を含めた3CH化の実現が望まれた。

なお、飛行実験途中、トンボ型はテールブームを45度以上下方に折ると左右舵が利かなくなる程の直進安定性を示すことも明らかとなったが、飛行モードだけからはその理由を明らかにすることは出来なかった。本件は飛行力学上極めて興味深いものであるが、横と方向の特性を計測する天秤の製作には時間が必要なので、今後の研究課題として残すこととした。

なお、平成20年度においても飛行実験に平行して関連する可視化水槽実験を行い、低レイノルズ数の流れに直角におかれた回転ロッドが揚力だけでなく推力を発生するという、従来知られていなかった新しい現象を発見した。回転ロッドに平板を沿わせることで、迎

え角 30 度でも失速しないだけでなく、抵抗の極めて少ない飛行が可能であることも発見した（図 1 7）。

トンボ型飛翔体の前翅前縁にロッドを付けた試験飛行では、最高速毎秒 8m を達成し、トリムを変えることで超低速飛行も可能であることが確認された。

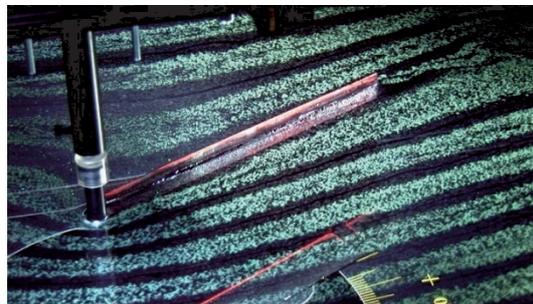


図 1 7 回転ロッドの整流効果

平成 21 年度は、これらの成果・背景の下に、2CH 機体の飛行実験を繰り返すことによる飛翔ロボット特性の把握を進めると共に、姿勢制御機能を追加した機体の 3CH 化と回転ロッド

を飛翔ロボットの翼に備えた、従来存在していなかった全く新しい概念の超小型の飛行領域拡大飛翔ロボットの実現に向けて挑戦することとした。

2CH 機については大阪府立大学に風洞実験を依頼し、プロペラなしの状態での全機揚抗比が約 6.5 という優れた値を持つことを明らかにした。この値は迎え角 4 度～8 度の範囲で殆ど変化しないという特徴を持っている。

機体の 3CH 化については、どのような姿勢制御方式を採るかから検討を開始した。前述のように、トンボ型は姿勢安定性に優れ、多少の縦揺れモーメントを尾翼で与えてもびくともしないであろうことが明らかになっていたので、トンボ型の形態に矛盾を与えず、かつ十分な制御力を発生させるため、主翼直後のテールブームの前方上部に小さなファンを置くこととした（図 1 8）。大きな昇降舵をつけると全体としての形態が変わり、トンボ型形態の優れた飛行力学的特性が犠牲になる可能性に配慮したためでもあった。

狙いは成功し、ファンを用いた姿勢制御は概ね意図通り機能した。ファンプロペラ断面はキャンバーを持つため、本機の様には正逆回転でテールを上下させる時には片方のみ効きが良くなるという問題が考えられたが、操縦に支障が出ることはなく、コントロールパワーも十分であり、急降下や引き起しならびに大迎え角飛行が可能となった。水平飛行で迎え角 55 度でも水平飛行を継続すると言う、従来考えられないような性能も発揮した（図 1 9）。

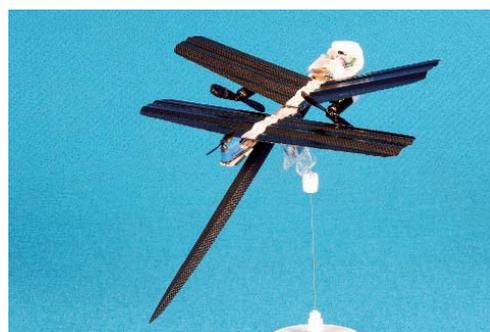


図 1 8 3CH 制御飛翔ロボット

本機は飛行中に迎え角を変えることが出来るため低速での飛行が可能となり、特に旋回時にそのメリットが顕著に表れて、旋回半径は 2CH 機の半分になった。

制御も容易になって、体育館内の 1m 角のベースまたは物体に着地あるいは当てる事が可能である。

当然ながら後翼は失速することがなく、通常の翼型をもった機体に比して格段に優れた

安定性を示す上、鳥が水中の魚を狙う時のような急降下も、宙返りに近い飛行も出来る。

本機のような毎秒 6m 以上の速度で飛翔し、スパンも 25cm という小型の機体になると応答速度が速くなり、それらを操縦する技術は大型サイズのものに比して格段の難しさを増すのであるが、低速飛行も可能なので超小型飛翔体の自在なコントロールと言う意味で画期的なものが開発出来たと考えられる。本 3CH 機によって、人が近寄れない場所にいる生物の観察を手軽に行う等の作業を効率良く行うことが容易となった。

以上、トンボ型飛翔ロボットは世界中で推し進められている MAV (マイクロ・エア・ビークル) の、低速化と小型化の前に立ちはだかっていた壁を乗り越えた画期的形態と見え、本プロジェクト発足当時には計画に盛り込まれていなかった非羽ばたき方式飛翔ロボットのもたらした大きな研究開発成果と考えられる。

一方、回転ロッドを装備した飛翔ロボットについては、翼形状としては平板の方が好ましいことが分かったので、トンボ型の応用を断念しゼロから機体設計を見直して再製作することとした。

機体構造がトンボ型とは全く異なって薄い平板翼の精度と強度確保に難題があり、開発には時間を要したが、平成 21 年の末に体育館内での初飛行に成功した。安定性等で見るべきものがあり、現在もそのリファインを継続中である(図 20)。

本機における回転ロッドは直径 3mm のストロー製で、平板主翼の前縁に装着されている。技術的には、揚力を発生しつつ、回転数を 5 万 rpm (飛行速度の 3 倍以上の周速が達成されて初めて機能することが水槽実験で明らかとされている) 以上にすることが難しかった。組立治具を作り上げるためにも時間を要している。

ロッドの翼への取り付けについては、両端支持、片持ち支持等各種の方法をトライしたが片持ち方式で約 5 万 rpm が達成できたので、現在はその方式を採用している。

平成 21 年度末においては、回転ロッド型飛翔ロボットはトンボ型飛翔ロボットほど完成された形態を得るに至っていないが、仮に 3CH 化に成功するとトンボ型に比して遥かに高い速度(試作機では毎秒 8m を達成)と超低速飛行が可能になることになり、これも超小型飛翔ロボットの新しい形態として研究を継続する価値があるものと考えている。現時点では最低速度の目標を毎秒 3m に置いている。これが実現すると、微風中でも空中停止が簡単に出来るようになるので、従来は考えられなかったような観測用途に応用が可能であると考えている。



図 19 迎え角 55 度飛行



図 20 回転ロッド式小型飛翔
ロボット

第3章 その他の研究成果等

3. 1 特許関連の成果

1) 特許登録

- イ) 特許第3879771号
発明の名称：羽ばたき飛行機
発明の内容：昆虫型飛翔ロボットに適した2自由度共振型羽ばたき装置に関する特許
特許権者： 学校法人日本文理学園
発明者： 磯貝紘二
出願番号： 特願2006-063595
出願年月日：平成18年3月9日
登録日： 平成18年11月17日

2) 実用新案登録

- イ) 出願番号： 実願2008-006269
実用新案登録権者：学校法人日本文理学園
出願年月日：平成19年9月3日
登録年月日：平成21年1月21日
考案の名称：低レイノルズ数用翼型
考案者： 小幡 章

3) 特許出願

- イ) 出願番号： 特願2006-289239
出願日： 平成18年9月27日
発明の名称：羽ばたき飛行機
発明の内容：加振装置として振動モータを用いた2自由度共振型羽ばたき装置に関する特許
発明者： 磯貝紘二、上澤裕一
特許出願人：学校法人日本文理学園
- ロ) 出願番号： 特願2007-117710
出願日： 平成19年3月30日
発明の名称：羽ばたき飛行機
発明の内容：弾性棒材と弾性板材を組み合わせた共振型羽ばたき翼に関する特許
発明者： 磯貝紘二、佐藤寛幸
特許出願人：学校法人日本文理学園

- ハ) 出願番号： 特願 2007-259214
出願日： 平成 19 年 9 月 3 日
発明の名称：振動翼推進装置
発明の内容：羽ばたきによる振動揚力変動をゼロにする羽ばたき運動に関する特許
発明者： 友成義正
特許出願人：学校法人文理学園
- ニ) 出願番号： 特願 2008-277356
出願年月日：平成 20 年 9 月 30 日
発明の名称：回転円柱による飛行特性向上案
発明者： 小幡 章
特許出願人：学校法人文理学園

3. 2 他分野への応用

1) 小型風車へのコルゲート翼(凹凸翼)の応用

本プロジェクトで開発したコルゲート翼型を小型風車へ応用し、強風下でも性能の劣化しない小型風車を開発した。

2) 回転ロッドと平板を組合せた高揚力低抵抗装置

低レイノルズ数において回転ロッドは揚力だけでなく推力も発生する。これを平板と組合せると、画期的な超小型機用高揚力低抵抗装置となることを発見した。

3. 3 新聞、雑誌（一般雑誌）、TV ニュース等で取り上げられた例

<<新聞報道>>

1. 2006 年 3 月 28 日、日刊工業新聞に「マイクロ流体技術研究所」のプロジェクト「昆虫型超小型飛翔ロボットの研究開発」および附属設備を紹介する記事が掲載された。
2. 平成 18 年 4 月 6 日付け、朝日新聞大分版に本学「マイクロ流体技術研究所」のプロジェクト「昆虫型超小型飛翔ロボットの研究開発」の紹介記事が掲載された。
3. 平成 18 年 4 月 25 日付、大學新聞の中部・西日本版に本学「マイクロ流体技術研究所」のプロジェクト「昆虫型超小型飛翔ロボットの研究開発」の紹介記事が掲載された。
4. 平成 19 年 9 月 1 日付け、大分合同新聞（「子ども大分合同新聞」欄）にトンボ型ロ

ボットとして、本プロジェクトを紹介する記事が掲載された。

5. 大分合同新聞、2008年9月の科学欄に、「開発進むトンボロボット」という見出しで、磯貝の進めている「羽ばたき型」、小幡の進めている「非羽ばたき型」の研究開発状況が二週にわたりそれぞれ紹介された。羽ばたき方式は今年度試作に入ること、非羽ばたき方式は試作済みであることも紹介された。
6. 毎日新聞、2008年11月、九州版に「トンボ型ロボット開発へ」「日本文理大学飛行研究をリード」という見出しで、回流式可視化実験装置で発見されたトンボのぎざぎざ翼の秘密とそれを応用した小幡の進めている「非羽ばたき型」の飛翔ロボットが紹介された。また磯貝の進めている「羽ばたき型」の共振型ロボットとともに、来年完成する予定であることが紹介された。
7. 日刊工業新聞、2009年4月17日号の科学技術欄に、「トンボ型飛行ロボット」「回転体取り付け高速化」「日本文理大学 年度内カメラ搭載」という見出しで、小幡の進めている非羽ばたき方式のトンボ型飛行ロボットが完成したことが紹介された。
8. 日本経済新聞、2009年5月10日号の科学欄（「ナゾ謎かがく」欄）「マルハナバチはなぜ飛べる？」にて、マイクロ研の永井弘人および磯貝紘二のコメントが掲載された。
9. 日本経済新聞の九州産業欄 2009年8月26日（水）「トンボ型空撮ロボット、日本文理大開発へ、災害現場で活躍期待」というタイトルでマイクロ研のプロジェクトが紹介された。

<<テレビ・ラジオ出演>>

1. 平成18年9月 NHKの教育テレビ番組「科学大好き土曜塾」に出演し、凹凸翼の秘められた可能性を示す実験と凹凸翼に出来る渦の可視化状況等をデモし大きな反響を得た。
2. 「トンボロボットに夢をのせて」、大分朝日放送、2008年2月8日放映。
3. 「UFO vs 世界の科学者100人」、日本テレビ、2007年10月4日放映。
4. 平成20年7月 OBSラジオ「ごごらくワイド」
「ごごらく雑学辞典」のコーナーで、河邊が「鳥はなぜV字編隊飛行をするのか？」とマイクロ研の研究紹介を生放送で行った。
5. 平成20年11月4日、NHKハイビジョン「アインシュタインの眼」で小幡が開発を進めている非羽ばたき型飛翔ロボットの飛行の様子が紹介された。

<<一般雑誌・報告書>>

1. 前記テレビ番組で放映された内容が東北経産局経済産業局に注目され、同局の推し進める「ネイチャーテクノロジー」の体系的な研究計画構築に関連して、ネイチャーテク

ノロジーの専門家として、平成 19 年 2 月に意見を聴取された。ネイチャーテクノロジーは国としての取り組みが遅れているとされている領域で、今後経済産業省による積極的な研究推進が期待される。関連ヒアリング報告書（「ネイチャーテクノロジーに係わる産業公害防止技術・事業可能性調査」報告書、平成 19 年 3 月）by 旭リサーチセンター 丁野昌純 研究員「極小レイノルズ数の世界における渦の空力的、飛行力学的貢献に関する研究 日本文理大学 工学部 航空宇宙工学科教授 小幡 章」

2. 日本航空宇宙学会誌、第 56 巻第 652 号（2008 年 5 月号）に「日本文理大学における羽ばたき飛行機の取り組み」という題名（著者：磯貝紘二）で、「トンボ型飛翔ロボットに関する研究」が紹介された。
3. 日本航空宇宙学会西部支部の機関紙「西部支部ニュース No. 17」（2008 年 12 月発行）の研究室紹介の中で「日本文理大学マイクロ流体技術研究所」の概要（著者：磯貝紘二）が紹介された。
4. 日本機会学会流体工学部門ニューズレター流れ 2009 年 4 月号—特集テーマ：流体工学により解明される自然界、そこから生まれる新技術—において「トンボ型飛翔ロボットの研究開発」（著者：磯貝紘二）という題名でマイクロ研のトンボ型ロボットの開発状況が紹介された。
http://www.jsme-fed.org/newsletters/2009_4/no1.html
5. 東京理科大学の科学教養誌「理大科学フォーラム」2009 年 8 月号の「科学教養講座」で、「トンボ型飛翔ロボットの開発に向けて」という題名にてマイクロ研の羽ばたき方式の飛翔ロボットの開発状況が紹介された（著者：磯貝紘二）。

発表論文リスト

<<雑誌論文>>

(注) 左欄外の (※) はレフェリー付論文

- ※ 1. Yamamoto, M., and Isogai, K., “Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Forces for a Mechanical Dragonfly Model,” AIAA Journal, Vol. 43, No. 12, December 2005, pp. 2475-2480.
- ※ 2. Isogai, K. and Harino, Y., “Optimum Aeroelastic Design of a Flapping Wing,” Journal of Aircraft, Vol. 44, No. 6, Nov.-Dec. 2007, pp. 2040-2048.
- 3. 河邊博康 “協調行動に基づいた編隊飛行制御について,” 日本文理大学紀要 第 34 巻, 第 1 号, 2006, pp. 22 - 32.
- 4. 小幡 章, 関 幸, 篠原章太郎, “マイクロ流体技術研究所の回流式可視化実験水槽について,” 日本文理大学紀要 第 35 巻 2 号, 2007 年 10 月, pp. 150 - 157.
- 5. 河邊博康, 永井 海, “トンボの飛行解析と胸部構造について,” 日本文理大学紀要 第 35 巻 2 号, 2007 年 9 月, pp. 79 - 88.
- 6. 磯貝紘二, 上澤裕一, 佐藤寛幸, “昆虫型飛翔ロボットに適した 2 自由度共振型羽ばたき翼に関する研究,” 日本文理大学紀要 第 35 巻 2 号, 2007 年 9 月予定, pp. 72 - 78.
- ※ 7. 永井弘人, 伊東匠, 三浦慶太, 早瀬敏幸, 磯貝紘二, “ホバリング飛行における 3 次元羽ばたき翼の非定常空気力の測定(第 1 報, レイノルズ数, 無次元振動数, 翼平面形状の影響),” 日本機械学会誌論文集(B 編), 73 巻, 736 号, 2007, pp. 2450-2458.
- ※ 8. 永井弘人, 伊東匠, 三浦慶太, 早瀬敏幸, 磯貝紘二, “ホバリング飛行における 3 次元羽ばたき翼の非定常空気力の測定(第 2 報, 台形波形と正弦波形羽ばたき運動の比較),” 日本機械学会誌論文集(B 編), 74 巻, 739 号, 2008, pp. 536-544.
- ※ 9. Kamisawa, Y. and Isogai, K., “Optimum Flapping Wing Motions of Dragonfly,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 51, No. 172, Aug. 2008, pp. 114-123, 2008.
- ※ 10. Nagai, H. Isogai, K. and Hayase, T., “Measurement of Unsteady Aerodynamic Forces of 3D Flapping Wing in Hovering to Forward Flight,” 26th International Congress of The Aeronautical Sciences, CD-ROM, Sep. 2008.
- ※ 11. Nagai, H., Isogai, K., Fujimoto, T., Hayase, T., “Experimental and Numerical Study of Forward Flight Aerodynamics of Insect Flapping Wing,” AIAA Journal, Vol. 47, No. 3, March 2009, pp. 730-742.
- ※ 12. Obata, A. and Shinohara, S., “Flow Visualization Study of the Aerodynamics of Modeled Dragonfly Wings,” AIAA Journal, Vol. 47, No. 12, Dec. 2009, pp. 3043 - 3047.
- ※ 13. Isogai, K., Kamisawa, Y. and Sato, H., “Resonance Type Flapping Wing for a Micro Air Vehicle,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 52, No.

178, Feb. 2010, pp. 199 – 205.

- ※ 14. Isogai, K., Kamisawa, Y. and Sato, H., “Optimum Aeroelastic Design of a Resonance Type Flapping Wing for Micro Air Vehicles,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 52, No. 178, Feb. 2010, pp. 238 - 245.
15. 池田多門, “波型翼の曲げねじり振動特性,” 日本文理大学紀要, 第 35 卷, 第 1 号, 2008 年 3 月, pp. 61–66.
16. 池田多門, 江崎明彦, “新機構による強制振動型羽ばたき機構の性能向上,” 日本文理大学紀要, 第 37 卷, 第 2 号, 2009 年 10 月, pp. 25 - 29.
17. 河邊博康, 三浦申也, 伊東寿朗, “トンボのマニューバに関する研究,” 日本文理大学紀要, 第37巻, 第2号, 2009年10月, pp. 30 - 37.

<<学会発表>>

国際学会

(イ)招待講演

1. Isogai, K., and Kamisawa, Y., “Towards Development of a Dragonfly Robot,” Proceedings of the Sixth International Symposium on Advanced Fluid Information –JAXA-IFS Joint Symposium- , 26-27th Oct. 2006, JAXA Aerospace Research Center, Tokyo, Japan, pp. 17-20.
2. Isogai, K., Kamisawa, Y., and Sato, H., “Optimum Aeroelastic Design of Flapping wing for Micro Air Vehicles,” Lectures and Workshop International –Recent Advances in Multidisciplinary Technology and Modeling–“ 23-25 May 2007, University of Tokyo, Japan, 28 pages.
3. Isogai, K., Sato, H., and Kamisawa, Y., “Development of a Resonance Type Flapping wing for Micro Air Vehicles,” The Fourth International Conference on Flow Dynamics,” Sep. 26-28, 2007, Sendai International Center, Sendai, Japan, 1 page.

(ロ)一般講演

1. Kamisawa, Y., and Isogai, K., “Study on Optimum Flapping Wing Motions of Dragonfly,” Proceedings of The Third International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, ISABMEC 2006, [CD-ROM], July 3-7, 2006, Okinawa, Japan, Paper P09, 2006.
2. Isogai, K., and Harino, Y., “Optimum Aeroelastic Design of a Flapping Wing,” Proceedings of The Third International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, ISABMEC 2006, [CD-ROM], July 3-7, 2006, Okinawa, Japan, Paper S-13, 2006.
3. Isogai, K., and Kamisawa, Y., and Sato, H., “Resonance Type Flapping wing for a Micro Air Vehicle,” AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 20-27 Aug. 2007, Hilton Head, South Carolina, AIAA 2007-6499, 17pages.
4. Isogai, K., Kamisawa, Y., and Sato, H., “Optimum Aeroelastic Design of a Resonance Type Flapping Wing for Micaro Air Vehicles,” APCOM’07 (Third Asian-Pacific Congress on

Computational Mechanics), Kyoto, Dec. 2-7, 2007, 10 pages.

5. Isogai, K., Kamisawa, Y. and Sato, H., “Optimum Aeroelastic Design of a Resonance Type Flapping Wing for Micro Air Vehicles”, 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, CD-ROM, Sep. 2008.
6. Nagai, H., Isogai, K. and Fujimoto, T., “Experimental Study of Wing-Wake Interactions of Insect Flapping Wing,” Proceedings of KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, Nov. 2008, pp. 133-140.
7. Isogai, K., Maesato, K., Kamisawa, Y. and Sato, H., “Development of a Resonance Type Flapping Wing for a Dragonfly-Type Micro Aerial Vehicle,” Proceedings of KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, Nov. 2008, pp. 312-317.
8. Isogai, K. and Kawabe, H., “Transition Flight Simulation of Flapping Wing Micro Aerial Vehicle Using Aerodynamic Database,” 4th International Symposium of Aero Aqua Bio-Mechanisms, ISABMEC 2009, Aug. 29th – Sep. 2nd 2009, Shanghai, China.
9. Nagai, H., Nishi, A., Fujimoto, T., Isogai, K., “Study on Flow Interaction Mechanism of Fore- and Hind-wings of Dragonfly,” 4th International Symposium of Aero Aqua Bio-Mechanisms, ISABMEC 2009, Aug. 29th – Sep. 2nd 2009, Shanghai, China.
10. Isogai, K. and Nagai, H., “Experimental and Numerical Study of Resonance Type Flapping Wings for Micro Air Vehicles,” APISAT2009, Nov. 4 – 6, 2009, pp. 32 - 39.

国内講演会

(イ) 招待講演

1. 磯貝紘二, “トンボ型飛翔ロボットの開発に向けて,” 第 23 回エアロ・アクアバイオメカニズム研究会講演会資料集, 2009 年 3 月, pp.5-8.

(ロ) 一般講演

1. 上澤裕一, 磯貝紘二, “CFD を用いたトンボの飛翔の最適羽ばたき運動に関する研究,” 第 37 回流体力学講演会講演集, 2005 年 9 月, pp. 229-231.
2. 稲吉翔大, 河邊博康, “航空機の編隊飛行制御について,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集, 2005, pp. 69 – 72.
3. 上澤裕一, 磯貝紘二, “トンボ型飛翔ロボットの最適羽ばたき運動に関する研究,” 第 38 回流体力学講演会講演集, 2006 年 9 月 28 日-9 月 29 日, pp. 273-276.
4. 磯貝紘二, 上澤裕一, “共振型羽ばたき翼の提案と数値シミュレーションによる検証,” 第 38 回流体力学講演会講演集, 2006 年 9 月 28 日-9 月 29 日, pp. 277-280.
5. 磯貝紘二, 佐藤寛幸, 上澤裕一, “昆虫型飛翔ロボットに適した共振型羽ばたき翼に関する研究,” 日本航空宇宙学会第 38 期年会講演会講演集, 2007 年 4 月, pp. 58-61.
6. 磯貝紘二, 上澤裕一, 佐藤寛幸, “共振型羽ばたき翼の CFD を用いた最適設計,” 第 39 回流体力学/航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム 2007 講演集, 2007

- 年 6 月, pp. 63-66.
7. 田川優智, 永井弘人, 磯貝紘二, “共振型羽ばたき翼の振動特性に関する研究,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2007) 講演集, 2007 年 11 月, 121-124.
 8. 三浦申也, 河邊博康, “トンボの飛行解析について,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2007) 講演集, 2007 年 11 月, pp. 117-119.
 9. 河邊博康, “飛行力学と制御から見た生物の飛行について,” 第 257 回流体科学セミナー, 東京大学航空宇宙工学科主催, 2007 年 10 月 6 日.
 10. 磯貝紘二, 河邊博康, “昆虫型飛翔ロボットの飛行シミュレーション用空力データベースの作成とその活用,” 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008 講演集, 2008 年 6 月, pp.113-116.
 11. 永井弘人, 磯貝紘二, 藤本達見, “昆虫の羽ばたき翼の空力生成メカニズムに関する研究,” 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008 講演集, 2008 年 6 月, pp.117-118.
 12. 西 晃広, 藤本達見, 磯貝紘二, 永井弘人, “トンボ型羽ばたき翼の前後翼干渉効果に関する研究,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2008)講演集, 2008 年 11 月, pp.193-196.
 13. 伊東寿朗, 河邊博康, “トンボのマニューバに関する研究”, 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2008) 講演集, 2008 年 11 月、pp.197-220.
 14. 西 晃広, 永井弘人, 平井知早, 藤本達見, 磯貝紘二, 河邊博康, “トンボの前後羽ばたき翼干渉効果に関する実験的研究,” 日本航空宇宙学会北部支部講演会 2009 年ならびに第 10 回再使用型宇宙推進系シンポジウム講演論文集, 2009 年 3 月, pp.23-28.
 15. 保久村永人, 池田多門, “高振動数羽ばたき飛翔ロボットの空中停止飛行の可能性検討,” 第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会講演集, 2009 年 11 月、pp. 57 - 60.
 16. 播村充紀, 磯貝紘二, 永井弘人, “共振型羽ばたき翼における前後翼干渉効果に関する研究,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集, 2009 年 12 月, pp. 255-258.
 17. 山路 諒, 永井弘人, 磯貝紘二, 藤本達見, “ホバリングおよび前進飛行時のトンボ型前後 2 枚羽ばたき翼における空力干渉効果,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集, 2009 年 12 月, pp. 259-262.
 18. 有田圭秀, 河邊博康, “トンボの飛翔と羽ばたき運動の関係について,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集, 2009 年 12 月, pp. 251-254.
 19. 播村充紀, 磯貝紘二, 永井弘人, “共振型羽ばたき翼における前後翼空力干渉効果に関する研究,” 第 24 回エアロ・アクアバイオメカニズム研究会資料集, 2010 年 3 月, pp. 21-22.

謝 辞

本プロジェクトを遂行するにあたり、助成いただいた文部科学省および学外協力委員として貴重なご助言をいただいた独立行政法人宇宙航空研究開発機構の田辺安忠博士に心より感謝申し上げます。また、東北大学大学院からは、博士後期課程の学生をそれぞれ平成19年度に1名、同21年度に1名をマイクロ流体技術研究所の「特別共同利用研究員」として受け入れ、研究指導を行い貴重な成果をあげることが出来ました。受け入れに際しご協力をいただいた東北大学大学院の関係各位に感謝申し上げます。また、平成20年度には当時九州工業大学の博士研究員であった永井弘人博士（現在、本学の助教）に学外協力委員をお願いし多大な研究成果をあげることが出来ました。同氏の受け入れに際しお世話になった九州工業大学の関係各位に対し感謝申し上げます。また、大分大学医学部看護学科の島田達生教授にはトンボの解剖および顕微鏡撮影に際しお世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。また、本プロジェクトを遂行するために不可欠の各種の実験設備・装置の導入に際しご協力いただいた、(株)西日本流体技研、日本カノマックス(株)、ナラサキ産業(株)、有限会社山生アーキテクトおよび九州計測器(株)に感謝申し上げます。とりわけ、本プロジェクトにおいて重要な役割を果たした各種の飛行実証模型の設計・製作は(株)西日本流体技研の高い技術力に負うところが大きく、ここに記して同社関係各位に感謝申し上げます。また、本プロジェクトに対して多大なご支援とご協力をいただいた学校法人文理学園および日本文理大学関係各位に対して感謝申し上げます。

