

# 2007 年度 科学技術共同研究センター 研究プロジェクト実績報告書

課 題	翼を有するホバリングロボットに関する基礎研究
研究組織	渋谷 恒司（理工学部・准教授）研究代表者 塩見 洋一（理工学部・准教授） 辻上 哲也（理工学部・准教授）

## 1 . 研究発表

- ( 1 ) 渋谷恒司，長谷川慧，米田竜，塩見洋一，辻上哲也，羽ばたきホバリングロボットを目指して～浮上に必要な羽ばたき周波数と電力～，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'07(ROBOMECH'07)，2A2-B04，(2007.5)
- ( 2 ) 渋谷恒司，森大輔，塩見洋一，辻上哲也，ホバリング可能な羽ばたきロボットを目指して 翼形状がロボットの動作に与える影響 ，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08(ROBOMECH'08)，(2008.6)（発表予定）

## 2 . 2007 年度の研究計画

本研究の最終的な到達目標は，羽ばたきによるホバリング（空中静止）可能な飛行ロボットの開発である．羽ばたきによる飛行は，飛行機に代表される固定翼の飛行に比べ飛行コースの急激な変更が可能であり，小回りが効くと考えられる．これに加えて，ホバリングする能力が備わることができれば，例えば災害現場での空中撮影も可能になるなど，より高い有用性が期待できる．しかしながら，現在までにこのようなロボットは開発されていない．そこで本研究では，まずこのホバリングに着目し，ホバリング可能な羽ばたき飛行ロボットの開発を最終的な目標とした．2007 年度は，以下の 3 つの研究テーマについて研究を進めた

### ( 1 ) 羽ばたきロボットの製作と振動計測

本研究でこれまでにに行った羽ばたきロボットの実験では，羽ばたき時の振動を，運動を拘束することによって抑制してきた．しかし実際には拘束がない状態でホバリングすることが求められるため，この振動を取り除くことが必要不可欠である．この振動は翼の形状等に影響されると考えられる．そこで，新たにオオハチドリの大きさの羽ばたきロボットを製作し，羽ばたき時のロボットの振動を計測し，翼形状と振動との関係を考察した．

### ( 2 ) 推進力測定方法の確立

ホバリングの実現には，空中静止するための羽ばたきによる推進力の把握が重要になる．そこで本研究では，翼の発生させる推進力の測定を目的とし，3 軸ロードセルを用いた計測システムを構築した．そして，昨年度提案した，はりの固有振動を考慮した簡易的な推進力の測定結果と，3 軸ロードセルを用いた推進力測定結果を比較し，推進力測定方法の確立を目指した．

### ( 3 ) 翼周りの流れの可視化

ホバリングを行うロボットを製作するうえで，翼周りの流れの様子を把握することは，きわめて重要である．そこで，昨年度の鳥型に引き続き，トンボ型の羽ばたき飛行機における翼周りの流れの解析を，PIV(粒子画像流速測定法:Particle Image Velocimetry)を用いて行った．

### 3. 研究実績の概要（研究経過と成果）

#### 3.1 羽ばたきロボットの製作と振動計測

##### (1) 機体の製作

本研究では、ハチドリの中でも大型のオオハチドリのサイズでロボットを製作することを目指している。オオハチドリの全長と体重はそれぞれ約 200~220mm, 18~20g 程度と言われており、これを目標にロボットを設計した。図1に製作したロボットの写真を示す。動力は1.5WのD.C.モータとし、翼はクランク機構により羽ばたかせることとした。また、電力は外部の電源から供給する。構造部材にはアクリルを用いた。以上の結果、翼と尾翼をつけない状態で、質量は約 12.8g, 全長は約 48.6mm となった。質量に関しては翼と尾翼をつけた状態でも約 20g 程度とほぼ目標を達成できた。

翼については、カーボン素材で骨組みを作り、それにポリエチレンを貼り付けた。カーボン素材による骨組みに関しては、図2に示すような5種類を製作した。なお、翼幅と翼長は全て 220mm および 35mm である。

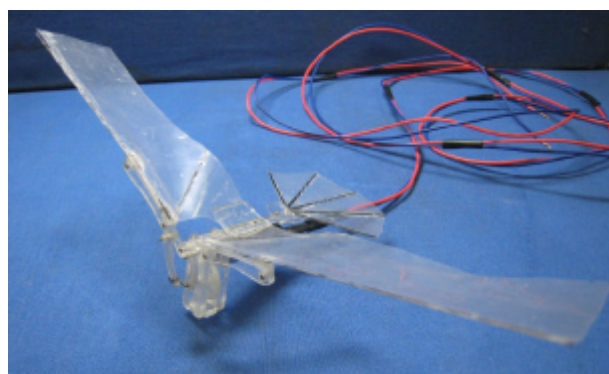


図1 製作したロボット

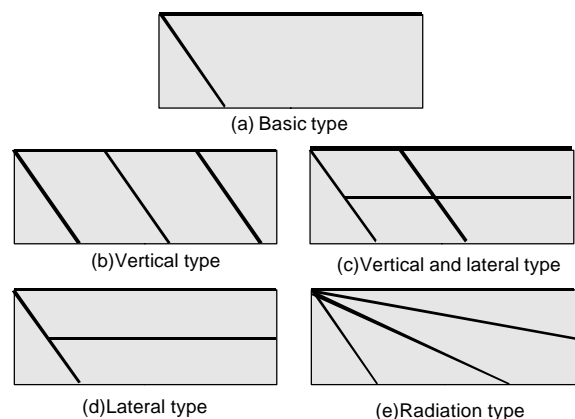


図2 羽の骨組み

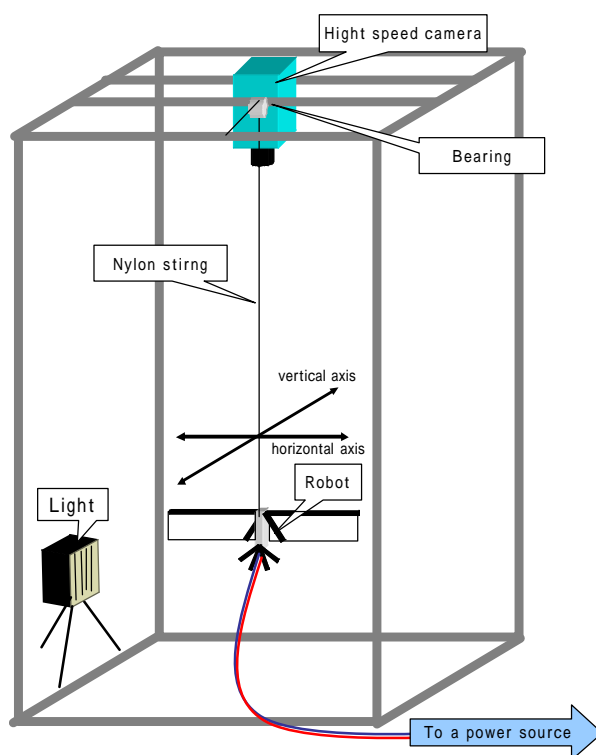


図3 計測システム

##### (2) 実験および考察

図4に計測装置の概略図を示す。製作したロボットに翼および尾翼を取り付けた。そしてナイロン糸でつり下げ、上から高速度カメラで 500fps のスピードで撮影した。撮影された画像から羽ばたき周波数を算出したところ、約 7Hz であった。また、羽ばたき角度は羽のしなりも考慮に入れて約 90deg であった。実際のハチドリの羽ばたき周波数と羽ばたき角度は、約 20Hz と 120deg 程度であるとされているので、それよりは小さい値である。

次に、ロボットの一点(図1に示す機体の中央先端部分)の軌跡を追跡することにより、ロボットの振動を調べた。本実験では、尾翼をつけた状態で行った。ロボットの縦方向および横方向の変位量を調べ平均化し、図2(a)の基本型に対する割合を計算したものを表1および表2に示す。表1の縦方向の値は、ロボットを若干斜めに傾けていたことより、推進力に影響を及ぼしていると予想され、また横方向の値は機体の安定性に関するものと

考えられる。これらの表より，(b)の縦型と(e)の放射型が縦方向の値が大きく，かつ横方向の値が小さいことがわかった。これから，翼の骨組みによって，機体の安定性や推進力のある程度向上させることが可能であると言える。

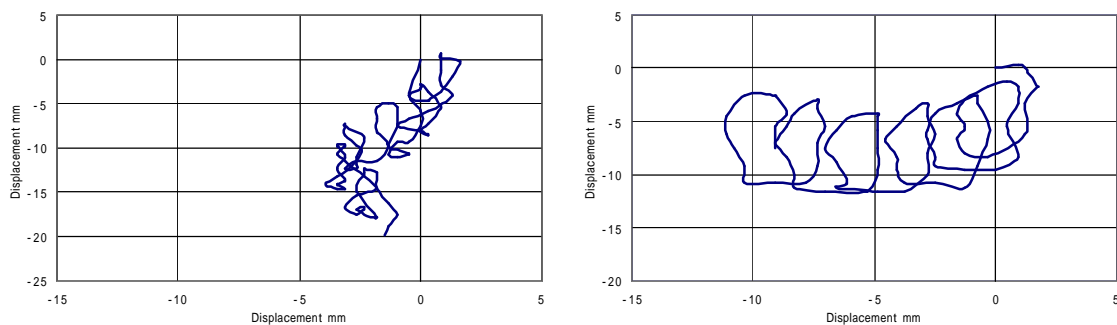
表1 縦方向の変位

Wing Type	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Average amplitude mm	7.99	11.10	7.85	7.14	11.10
Ratio to type (a) wing %	/	139	98	89	139

表2 横方向の変位

Wing Type	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Average amplitude mm	3.67	2.70	3.20	4.04	2.82
Ratio to type (a) wing %	/	74	87	110	77

次に尾翼の有無による軌跡の違いを調べた。図4に軌跡を示す。これは，図2(c)の翼での結果である。このように尾翼の有無によって，軌跡が大きく異なることがわかった。尾翼がある方はある一定方向に動こうとしているが，尾翼がない方は，動きが複雑である。このことから，うまく尾翼を設計すれば，機体の安定性に貢献できるのではないかと考えられる。



(a)尾翼無し (b)尾翼有り

図4 尾翼の有無による軌跡の違い

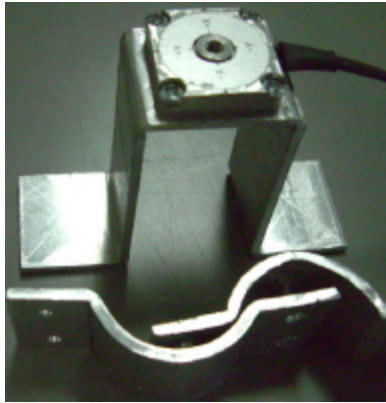
### 3.2 推進力測定方法の確立

簡便に推進力の大きさを測定するには，ばねやはりが利用されることが多い。しかし，羽ばたきによる推進力は変動しており，推進力以外の力も作用していると考えられるため，ばねやはりをを用いた単純な測定では正確な推進力の値を求めることが困難である。そこで昨年度は，片持ちばりをを用いたひずみ測定から，FFT解析，はり理論，振動理論等を駆使して，推進力を推定する方法を考案した。一方，ロードセルを用いて直接的に力を測定することも可能である。しかしながら，羽ばたきによる推進力測定は羽ばたきによる振動の影響が大きく表れるため，この影響を最小限にする必要がある。また，ロードセルへの取り付け位置と翼から発生する推進力の位置は必ずしも一致しておらず，ロードセルからの距離に応じてモーメントが影響すると考えられる。そこで，ロードセルからの距離によるモーメントの影響を確認した。図5(a)のような3軸ロードセルに，(b)のようにロボットを固定し，実験を行った。その結果を図6に示す。この結果から，水平方向および軸方向に大きく影響することがわかる。この結果より，推定推進力を求める補正式を導出すると，?

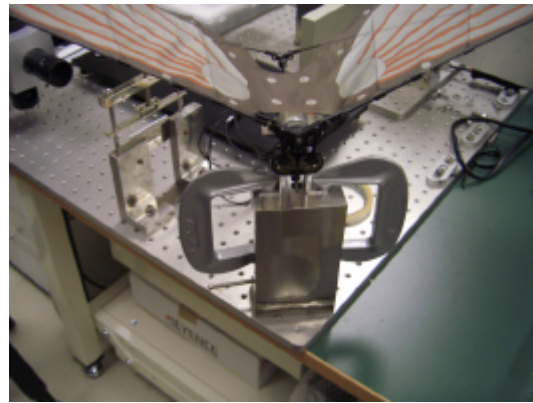
$$\text{推定推進力} = \text{測定値} / (0.01448 \times ? + 1)$$

となる。この式によって補正したロードセルによる最大推進力と昨年度のはりによる最大

推定推進力との比較結果を図7に示す．この結果から，はりによる測定結果とよく一致する結果が得られることがわかる．以上より，測定値をモーメントの影響を補正することにより，より精度の良い推進力が測定でき，また，片持ちばりによる簡便な推進力推定手法の妥当性が確認できた．



(a) 3 軸ロードセル



(b) 3 軸ロードセルへの固定方法

図5 3 軸ロードセルを用いた推進力の測定状況

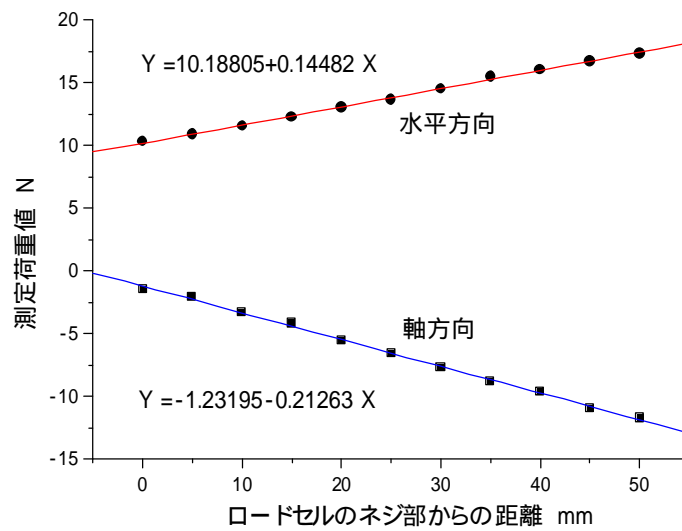


図6 三軸ロードセルのモーメントが測定値に及ぼす影響

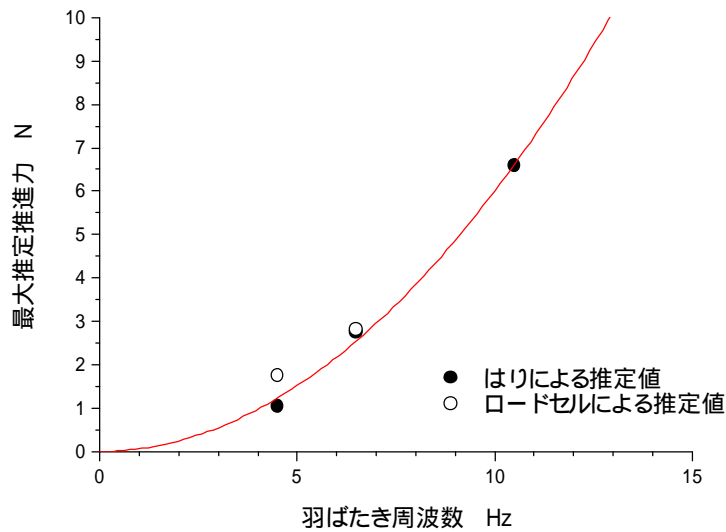


図7 はりによる推進力の推定値とロードセルによる推定値の比較

### 3.3 翼周りの流れの可視化

本研究では、PIV（粒子画像流速測定法:Particle Image Velocimetry）を用いて実際に羽ばたきを行うトンボ型ロボット（商品名：メカトンボ）の翼周りの流れの解析を行った。

実験では、トンボ型ロボットの翼周りについて、煙発生装置であるポータースモークを用いて流れを可視化し、高速ビデオカメラで得られた画像からPIVで流れの解析を行い、速度分布を定量的に求めた。なお、高速ビデオカメラを用いたことにより、微小時間間隔での流れ場の時間変化も取得できた。

図8～10はトンボ型ロボットの翼に対して垂直にレーザーシート光を照射したときに、トンボ型ロボットの中心から翼先端方向に90mmの位置における可視化画像と解析結果のベクトル図である（図8は上下の翼が閉じた状態、図9は上下の翼が開く途中の状態、図10は最も開いた状態）。これらの結果より、上下の翼が閉じきったときに、その間にあった空気が押し出されて翼の後方に対称な2つの渦を形成すること、また、翼を上下に開いていく際には、前方から水平方向に空気が引き込まれていくことが分かった。さらに、他の断面位置の結果より、翼の外側へ向かうにつれて、発生する対称渦が大きくなることが分かった。

図11～13はトンボ型ロボットのストローク幅の中心で水平にレーザーシート光を照射したときに可視化された断面を真上から撮影・解析をしたものである（図11は上下の翼が閉じた状態、図12は上下の翼が開く途中の状態、図13は最も開いた状態）。翼が閉じた際に翼の後方に2.8～3.6m/sの速度を有する対称渦が発生し、それが時間の経過とともに後方に移動することが分かった。

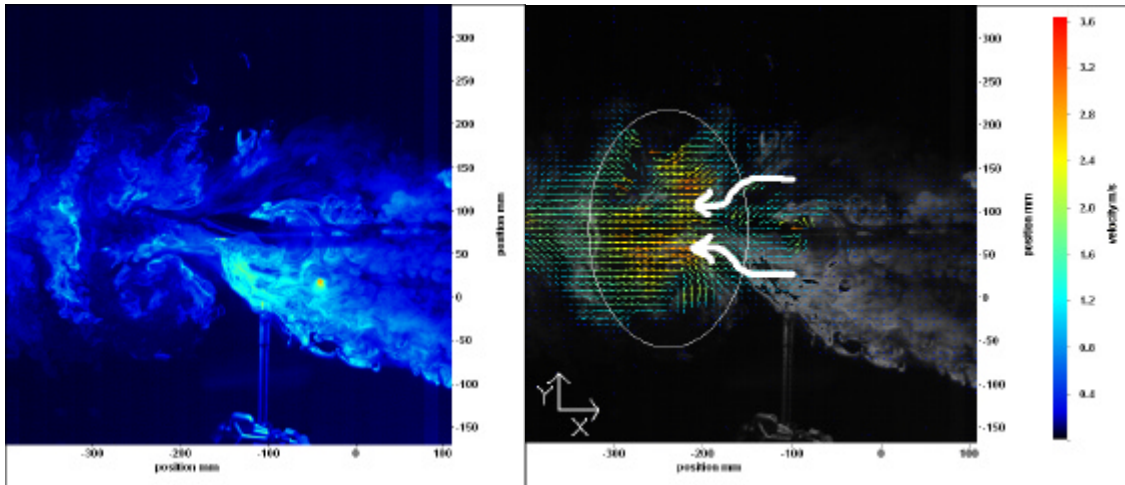


図 8 翼が閉じたときの可視化画像とベクトル図

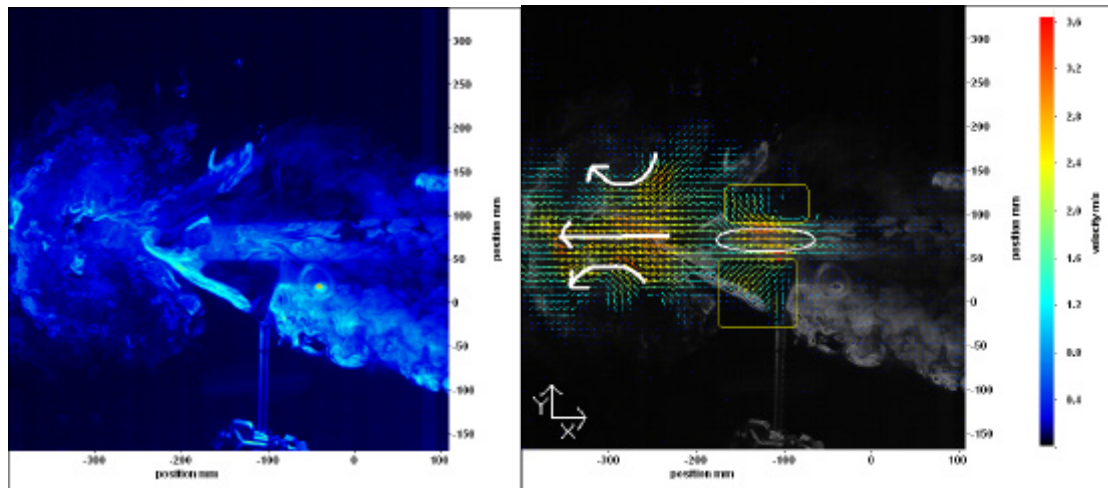


図 9 翼が開く途中での可視化画像とベクトル図

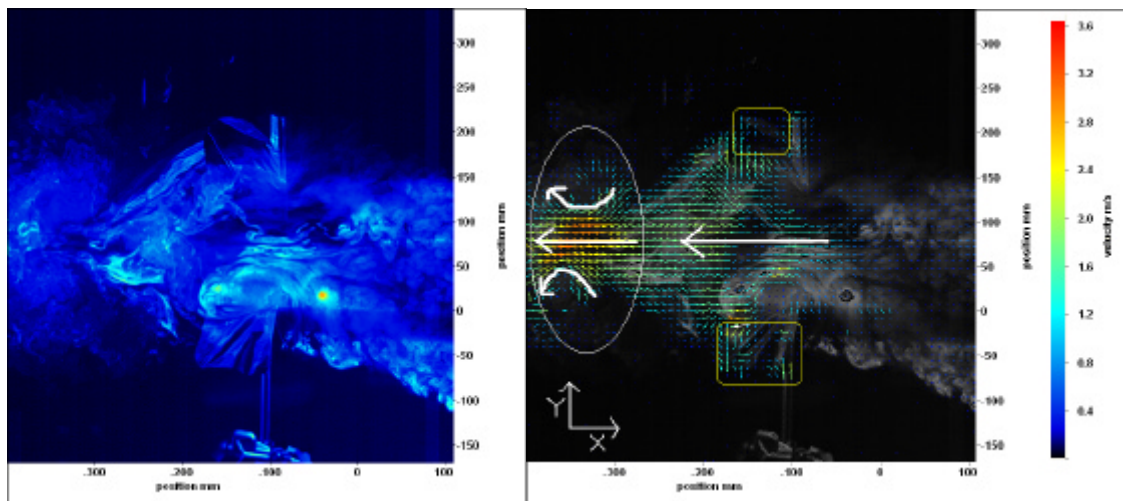


図 10 翼が最も開いたときの可視化画像とベクトル図

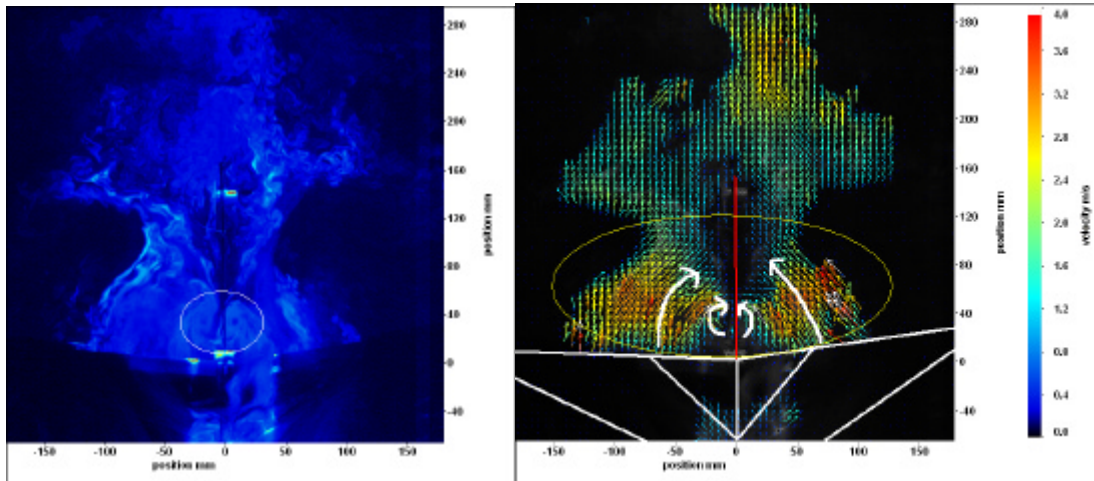


図 1.1 翼が閉じたときの上から見た可視化画像とベクトル図

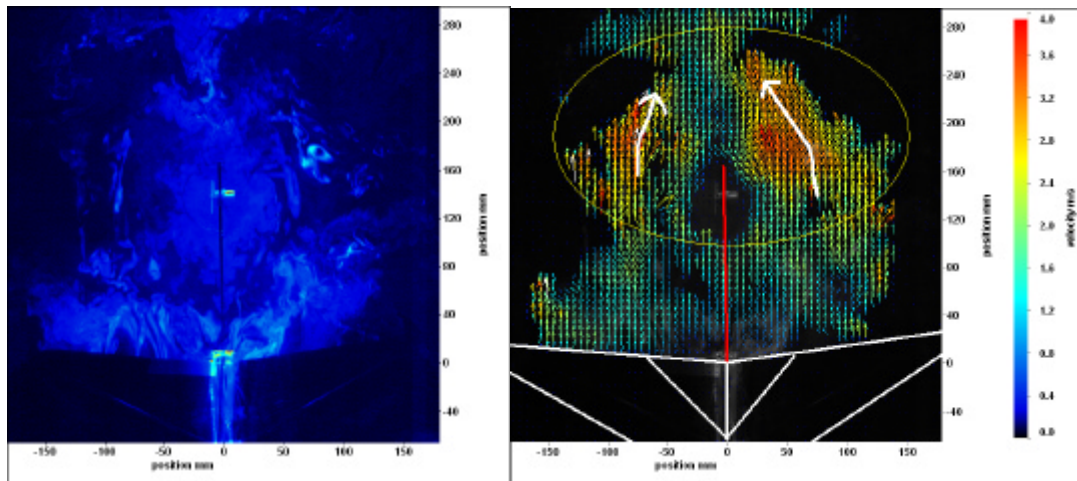


図 1.2 翼が開く途中での上から見た可視化画像とベクトル図

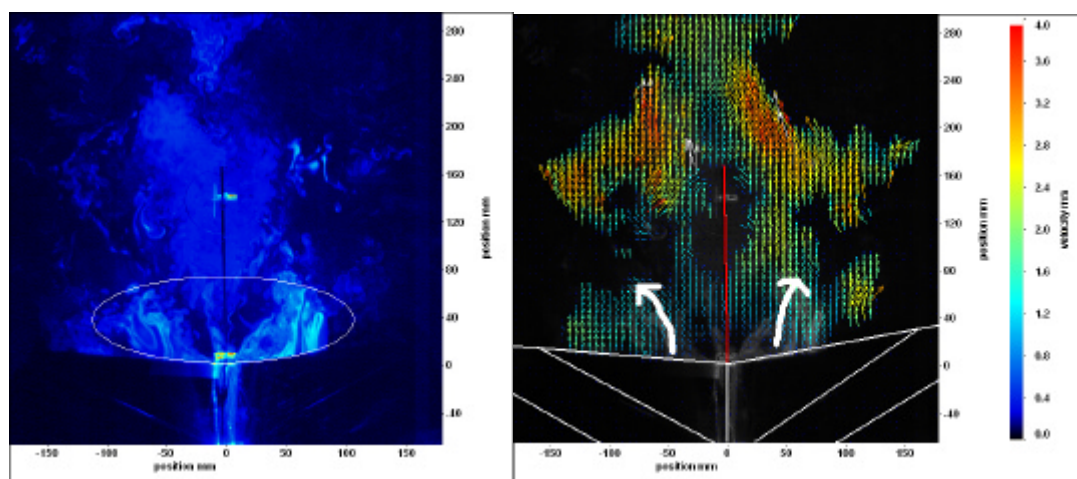


図 1.3 翼が最も開いたときの上から見た可視化画像とベクトル図

### 3.4 まとめ

本プロジェクトではこれまでの2年間で、鳥型ホバリングロボットの開発を目指して、ロボット、流体、計測に関するそれぞれの要素研究を行ってきた。今後は、例えば流体解

析と推進力測定の同期をとり両者の関係を考察する，振動抑制を考慮した機体の推進力と流体解析を行うなど，これらの研究成果を統合し，更に研究を進めていきたいと考えている．

#### 4．本研究課題のキーワード

( 1 ) ホバリング ( 2 ) 羽ばたき ( 3 ) 振動分析 ( 4 ) 流れ解析  
( 5 ) 推進力測定 ( 6 ) ロードセル ( 7 ) 高速度カメラ ( 8 ) PIV