

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」

平成22年6月18日：「研究成果報告会」

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

文部科学省

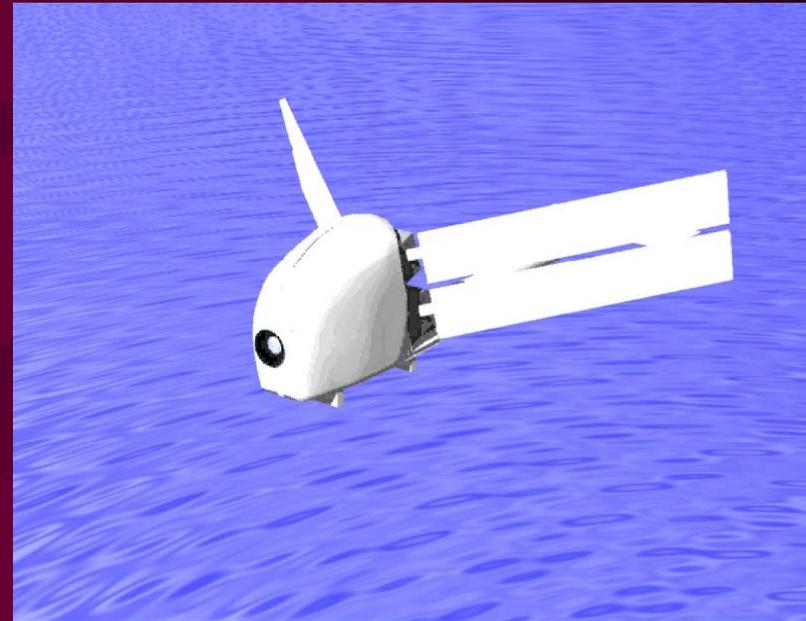
ハイテクリサーチセンター整備事業プロジェクト

## 「昆虫型超小型飛翔ロボットの研究開発」

- 研究期間：平成17年度—平成21年度の5カ年計画
- 研究目的：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。
- 研究計画：平成17年度—平成19年度に要素技術を開発  
平成20年度—21年度に試作・飛行試験を行う

# 本プロジェクトの目的

- 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。



トンボ型飛翔ロボットのイメージ  
(スパン20cm、重量20gf、振動数34Hz)

# 何の役に立つか？

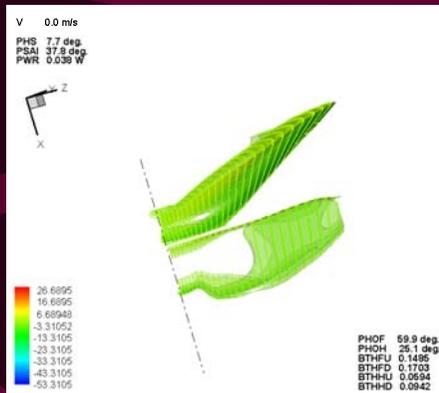
- ホバリング、急旋回、高速飛行などの飛行能力を生かした、各種の探査・監視活動等、多くの用途が期待される。



# どのような技術開発が必要か？

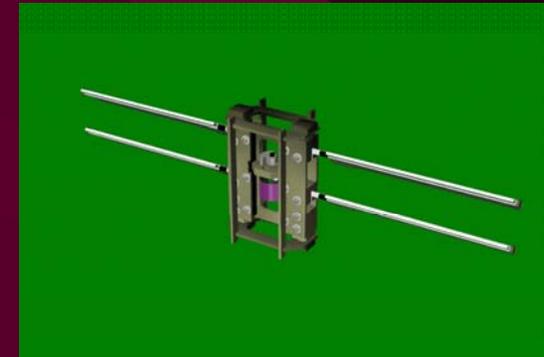
## •数値シミュレーション技術

羽ばたき翼周りの流れのシミュレーション



## •軽量化技術

共振型羽ばたき翼の開発



## •飛行制御技術

(自在な飛行を可能にする)

•トンボ型ロボットに適した新しい翼型の開発

# 整備した研究設備等

- イ) マイクロ流体技術研究所施設
- ロ) 数値シミュレーション設備システム
- ハ) 回流式可視化実験水槽
- ニ) 3次元PIV(粒子画像流速測定法)設備システム
- ホ) 3カメラ3次元運動解析システム

# 数値シミュレーション設備



無停電電源装置

## PC クラスタ (20ノード)

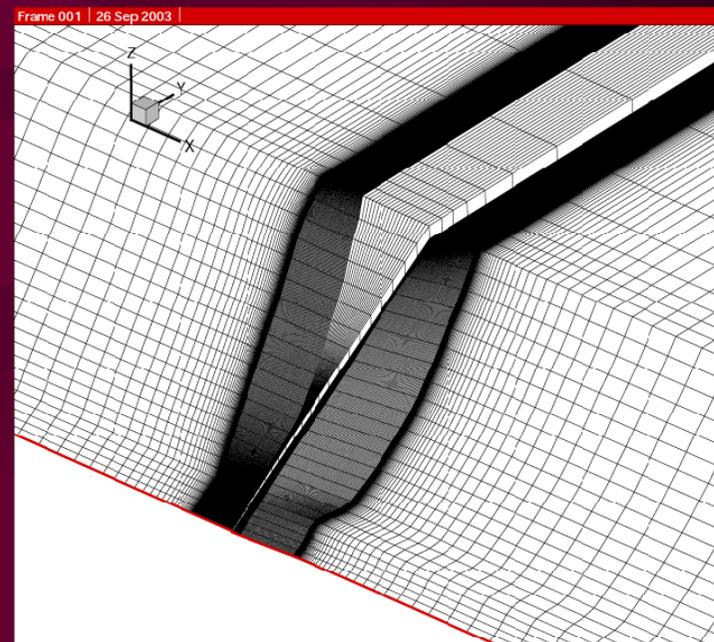
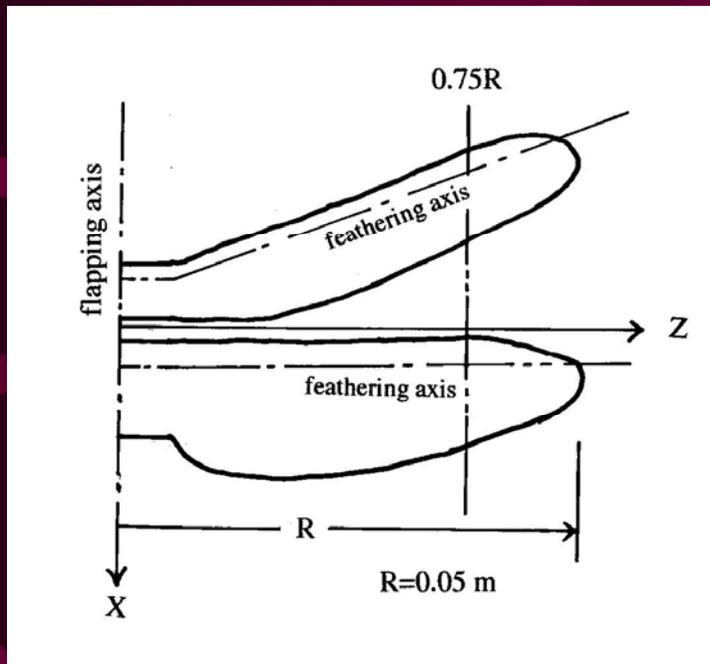
1ノードの性能: トンボの羽まわりの計算、  
強制振動: 1ジョブ当り約10時間

弾性翼: 1ジョブ当り約3日-6日

# 数値シミュレーションコードの開発

## 3次元ナビエ・ストークス・コード

(空力弾性変形効果も取り扱える)

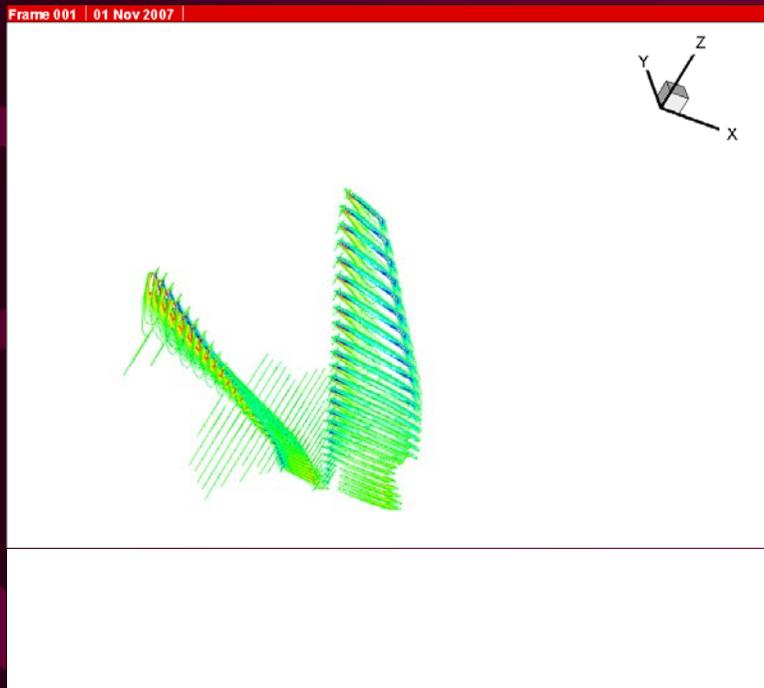


数値シミュレーションコードの役割: 羽ばたき翼による揚力や推進力の予測、必要なパワーの予測、共振型羽ばたき翼の最適設計、空力データベースの構築

# 前進飛行時の羽ばたき運動の比較

数値シミュレーション

(渦の可視化)



シオカラトンボ  
の映像



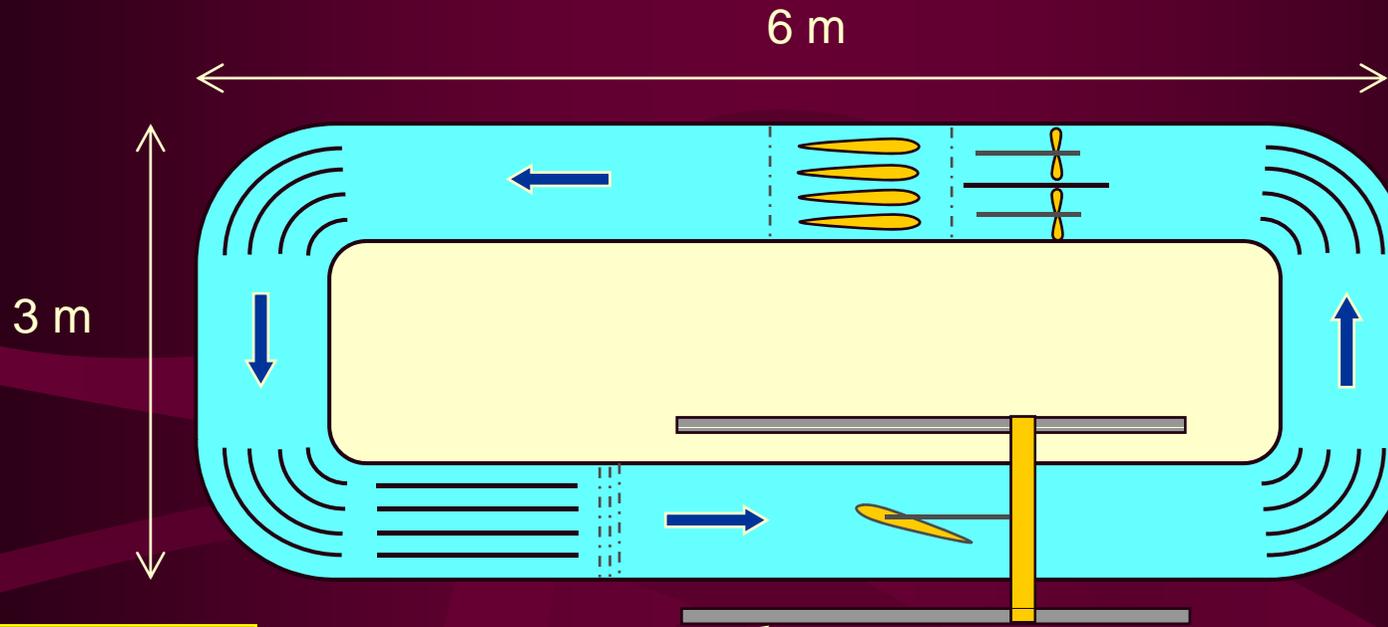
# 回流式可視化実験水槽



## 役割:

1. 昆虫の翅回りの流れの可視化
2. 定常／非定常流体力の計測
3. 数値シミュレーションコードの検証
4. 昆虫の飛行メカニズムの解明
4. 昆虫型飛行ロボットの設計データの取得

# 回流式可視化実験水槽



相似則:

無次元振動数:

$$k = b\omega / V_f$$

レイノルズ数:

$$Re = CV_f / \nu$$

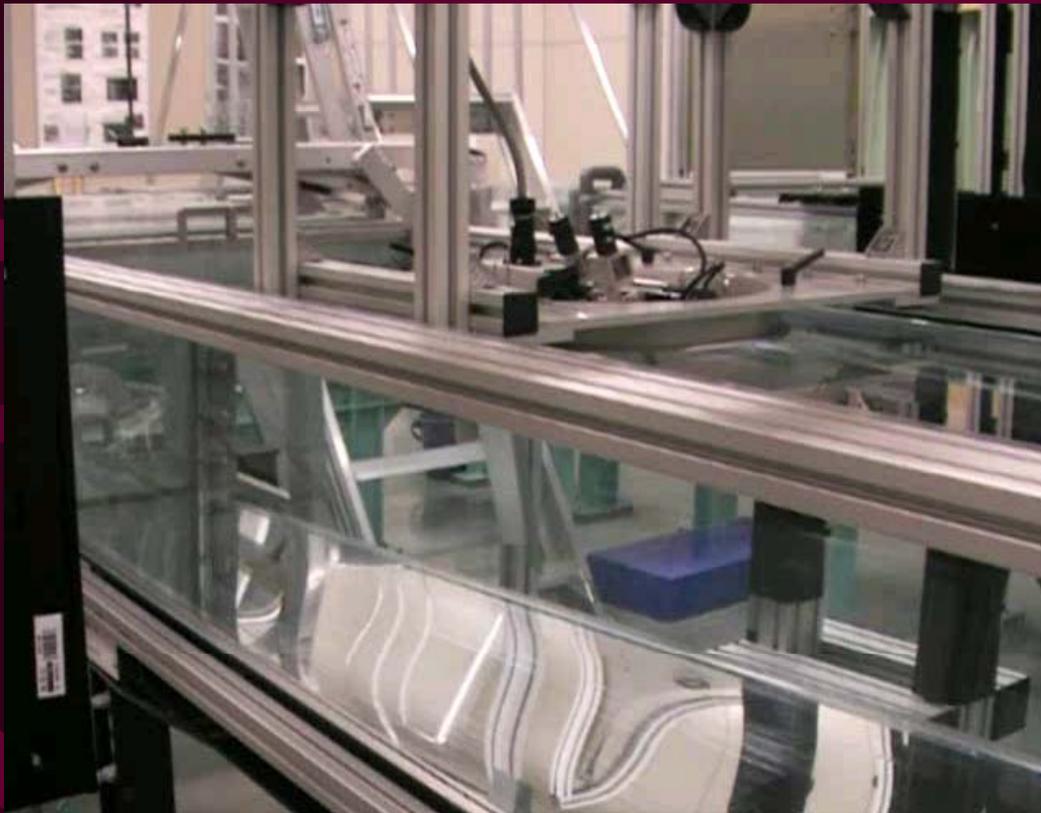
ドーリー

水流 :: 4 - 20 cm/s

ドーリー: 0 - 10 cm/s

空中の昆虫や昆虫型飛翔ロボットに換算して: 0 - 8 m/s

# 非定常流体力計測用振動翼試験装置



トンボ型の2  
枚翼

相似則:

無次元振動数:

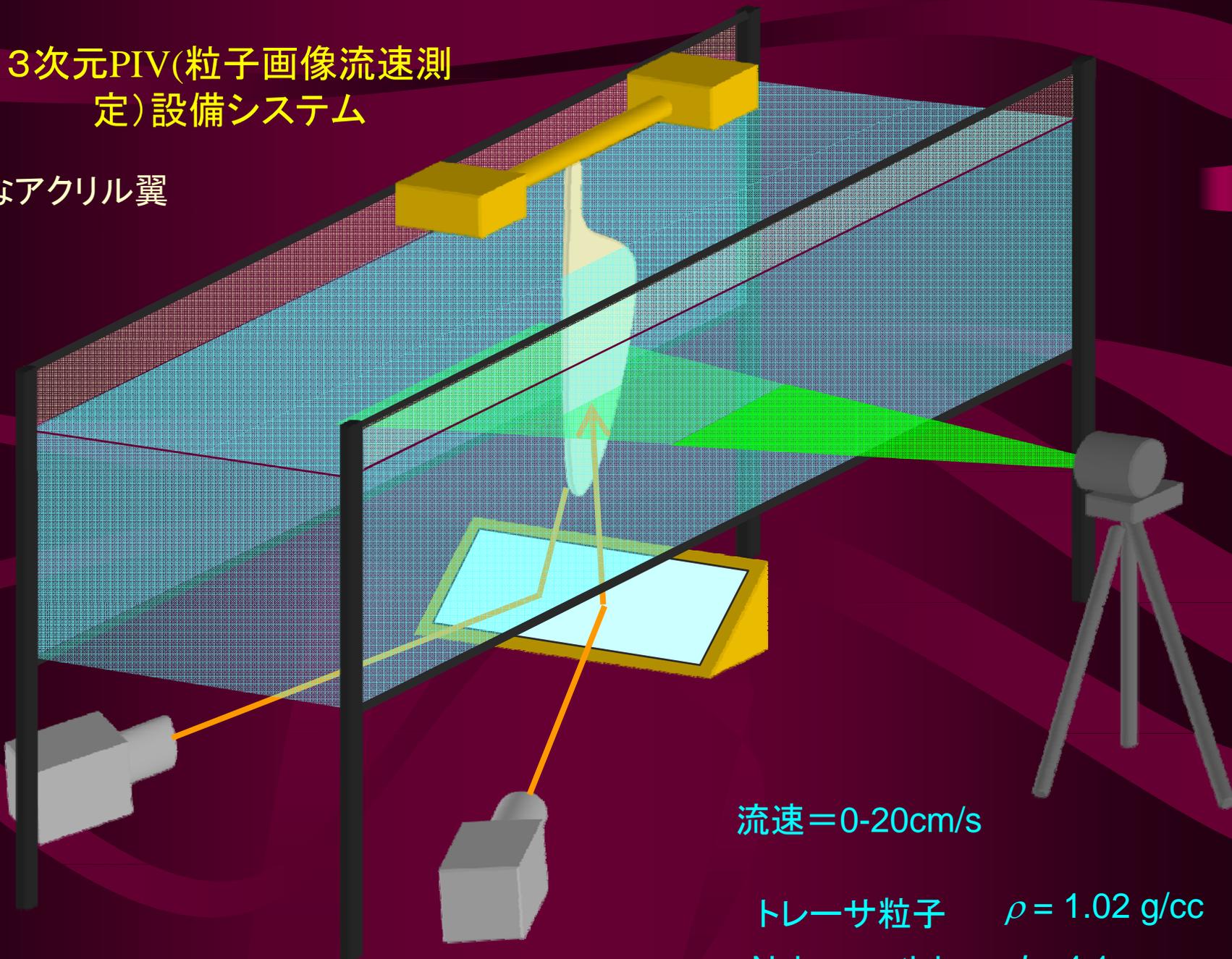
$$k = b\omega / V_f$$

レイノルズ数:

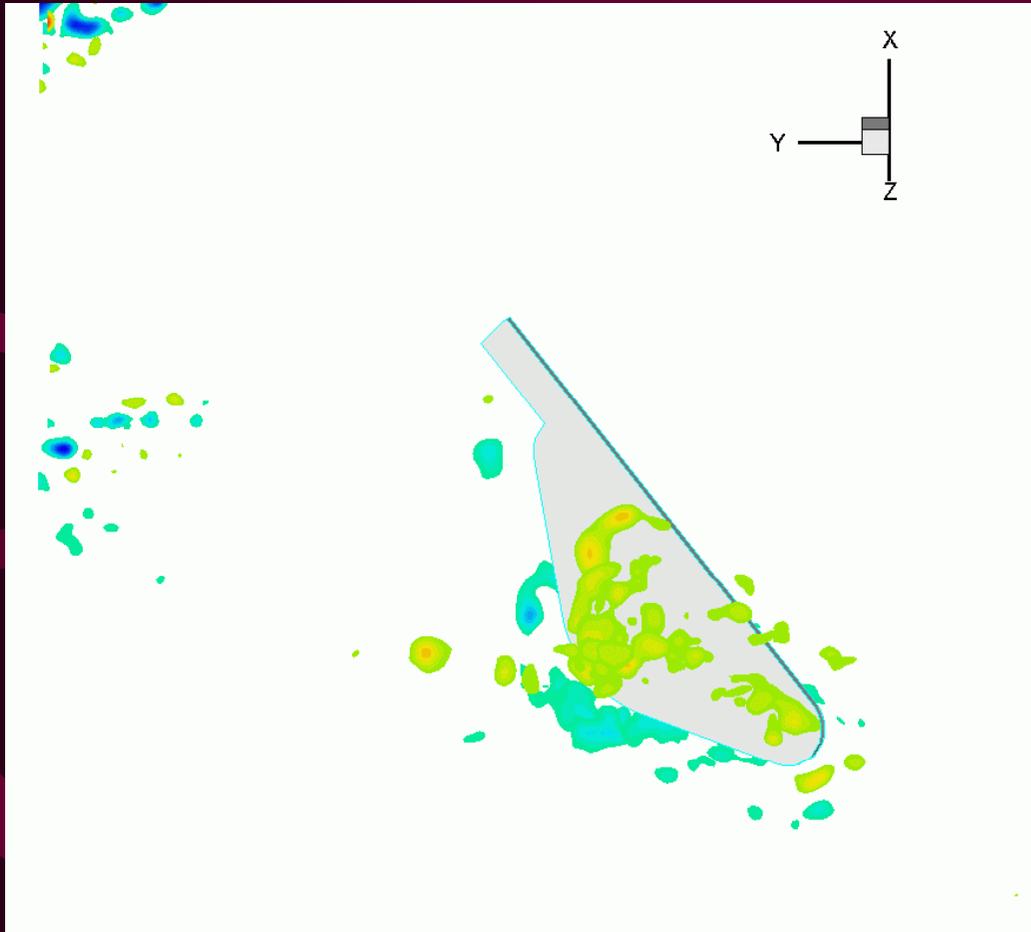
$$Re = CV_f / \nu$$

# 3次元PIV(粒子画像流速測定)設備システム

透明なアクリル翼



前進速度比 = 0.204, ストローク面の傾き角 = 45°



渦度の可視化



空気中の速度に  
換算すると、  
 $V=1.7$  m/s

Trapez-trapez, symmetrical,  $\tau_p=0.2$ ,  $\psi=45\text{deg}$ ,  $J=0.204$

# 実験とCFDとの比較 (流体力)

## ホバリング

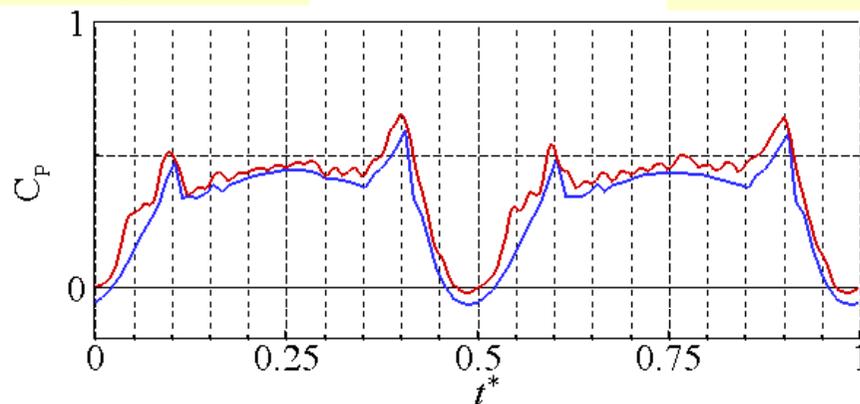
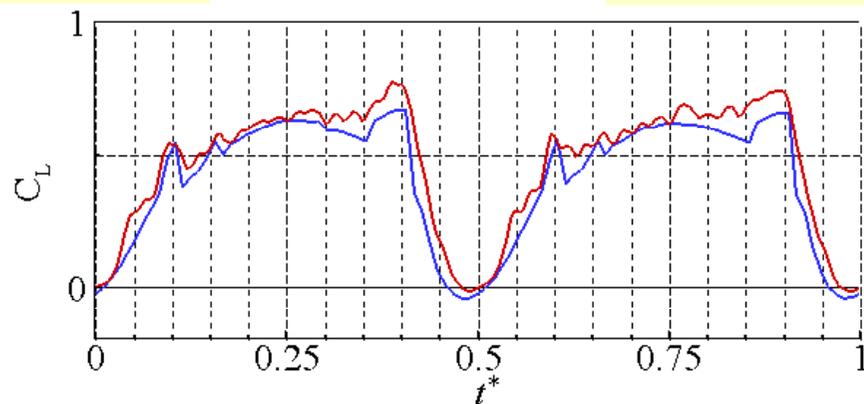
( $\phi_0 = 60$  deg, trapez-trapez type,  $\tau_r = 0.3$ )

揚力係数

— CFD

— Experiment

パワー係数



## 前進飛行

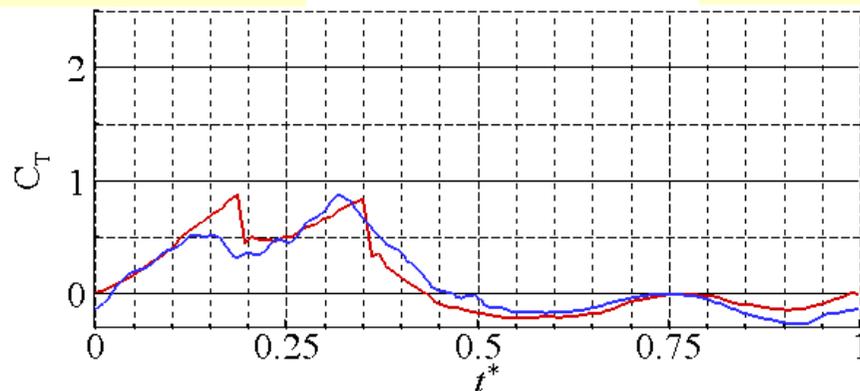
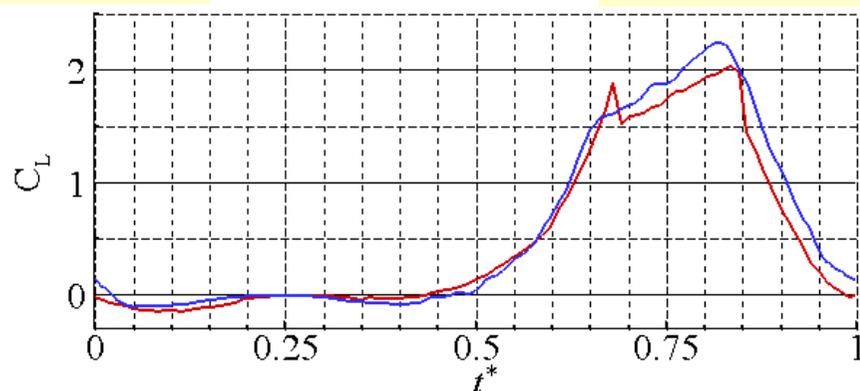
(前進比  $J = 0.24$ , ストローク角  $\psi = 45$  deg, sine-sine type,  $\phi_0 = 45$  deg)

揚力係数

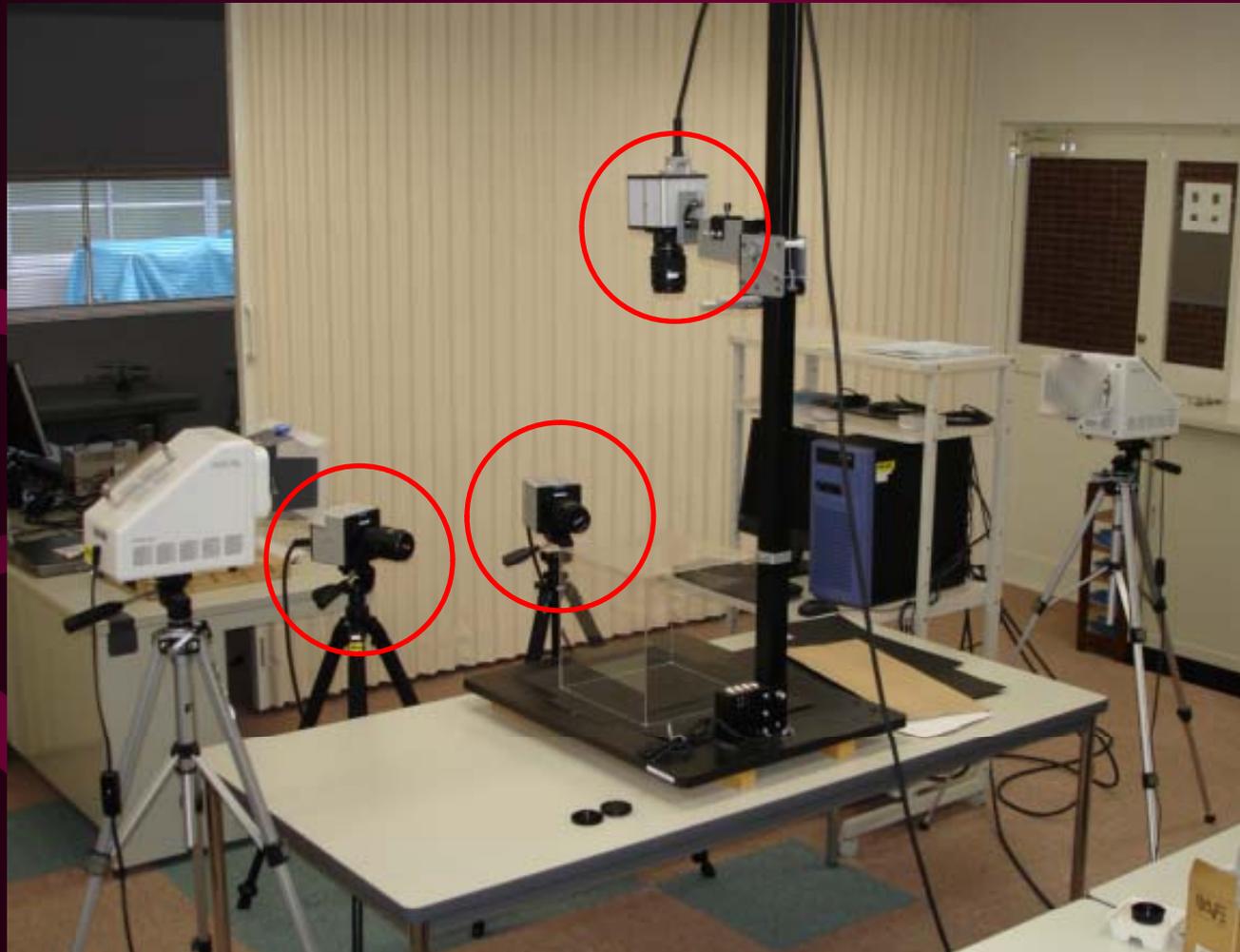
— CFD

— Experiment

推力係数



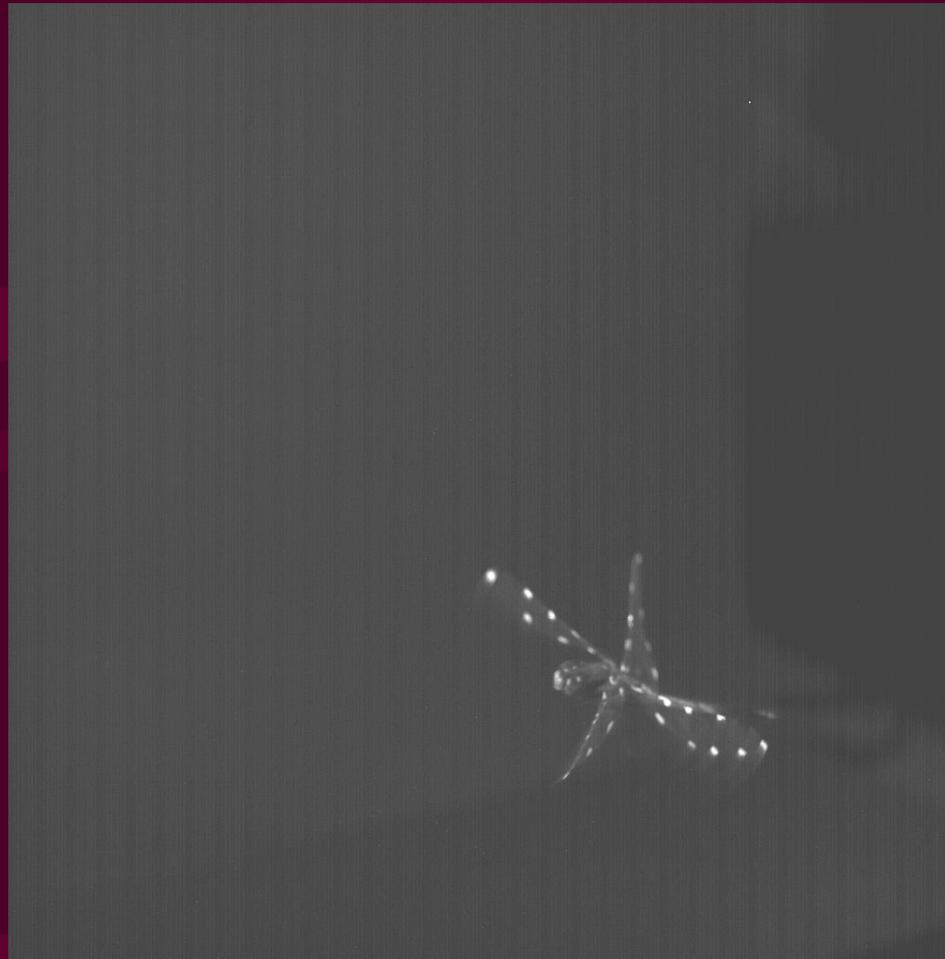
# 3カメラ3次元運動解析システム



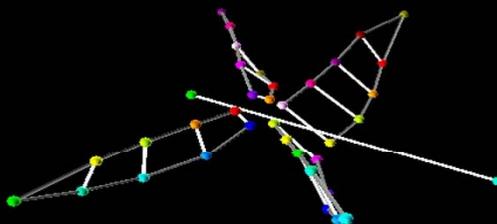
役割:

1. トンボの自由飛行の運動解析
2. 羽ばたき翼の運動解析
3. 共振型羽ばたき翼の運動解析
4. 昆虫の飛行制御メカニズムの解明

# 撮影されたシオカラトンボの映像



# 3次元運動解析結果



# 研究成果の紹介

## A) 要素技術研究の成果

- 数値シミュレーション技術の開発
- 昆虫の飛行メカニズムに関する研究
- トンボ型飛翔ロボットの2枚翼の空力干渉に関する研究
- 共振型羽ばたき翼の開発
- 強制振動型羽ばたき翼に関する研究
- トンボの飛行特性に関する研究
- 空力データベースを用いた飛行シミュレーション技術の開発
- 可視化技術の開発
- 優れた滑空特性を持つ翼型の開発

## B) 「試作機による飛行実証」の成果

### <羽ばたき方式飛翔ロボット>

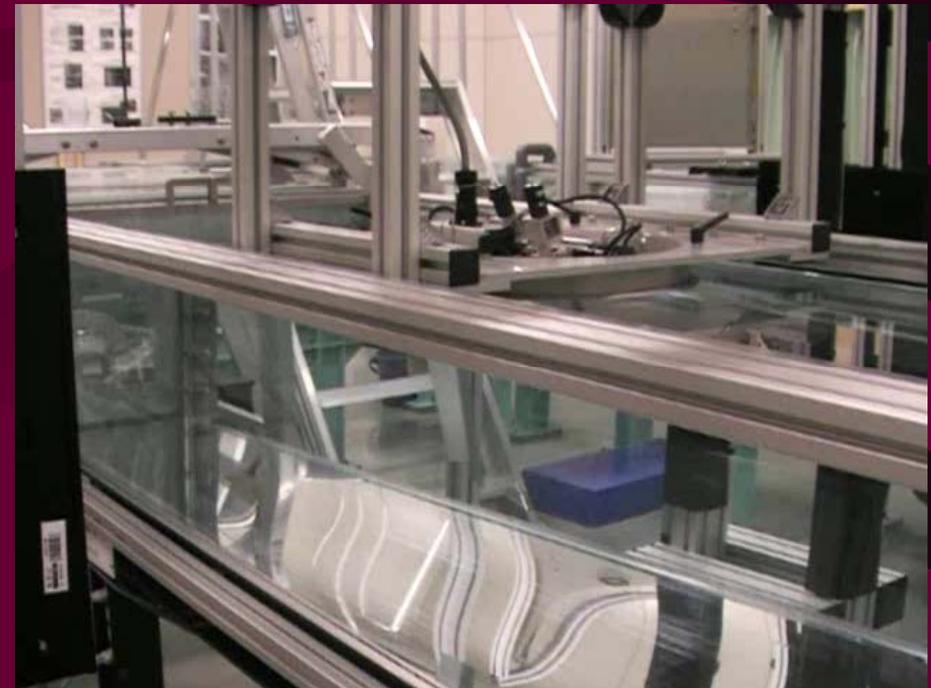
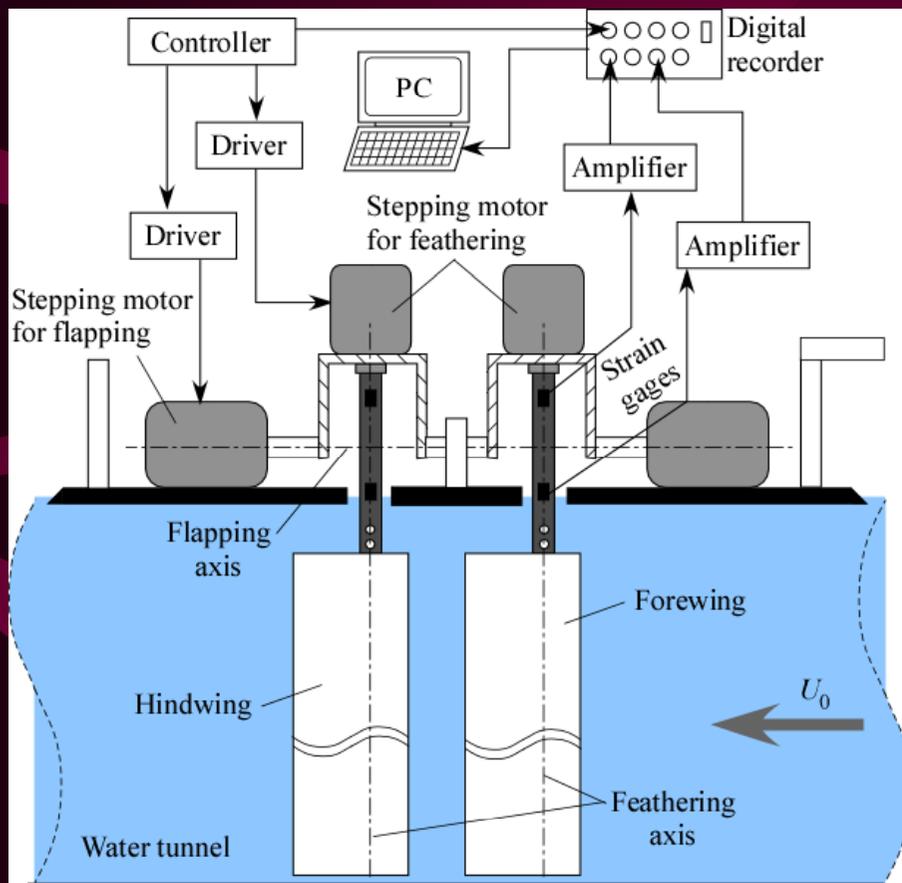
- ホバリング実証模型、姿勢制御研究用模型、フリーフライト実証模型

### <非羽ばたき方式飛翔ロボット>

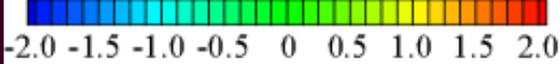
- トンボ型飛翔ロボット、回転ロッド方式小型飛翔ロボット

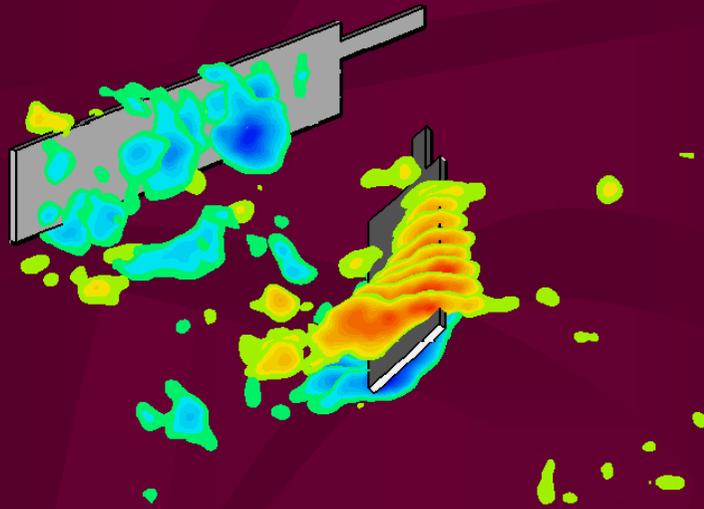
# トンボ型飛翔ロボットの2枚翼の空力干渉に関する研究

## タンデム翼の羽ばたき装置

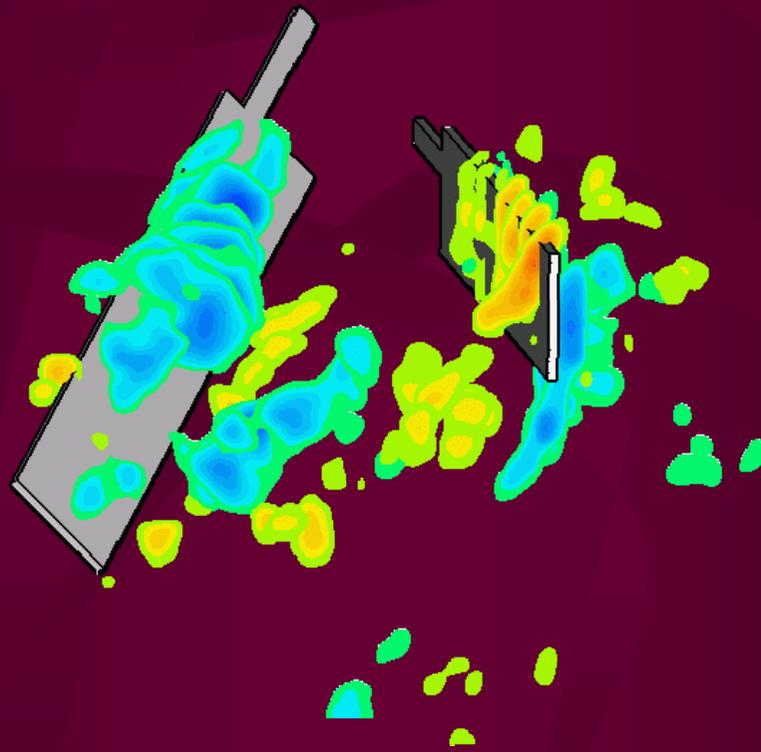
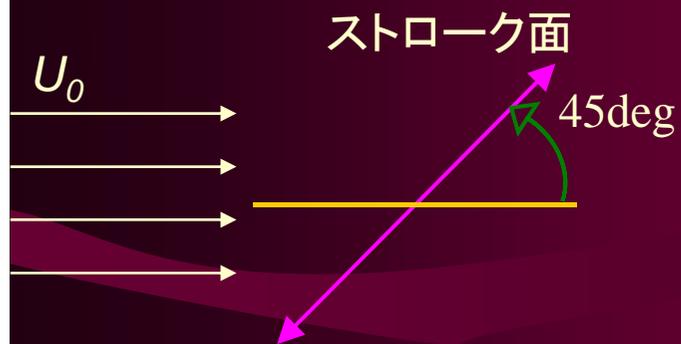


# PIV計測結果－3次元の渦の様子－ ホバリング（位相差 $\psi=90^\circ$ ）

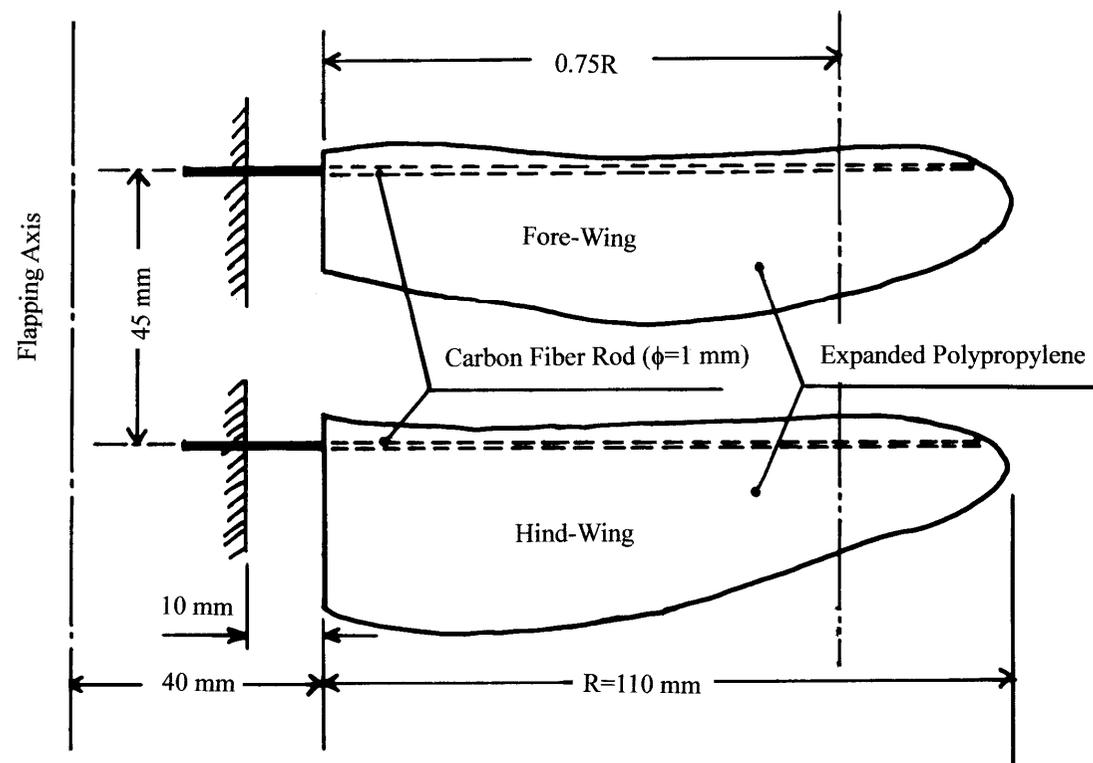
渦度  -2.0 -1.5 -1.0 -0.5 0 0.5 1.0 1.5 2.0



# PIV計測結果－3次元の渦の様子－ 前進飛行（位相差 $\psi=90^\circ$ ）



# 昆虫型飛翔ロボットに適した 共振型羽ばたき翼の開発



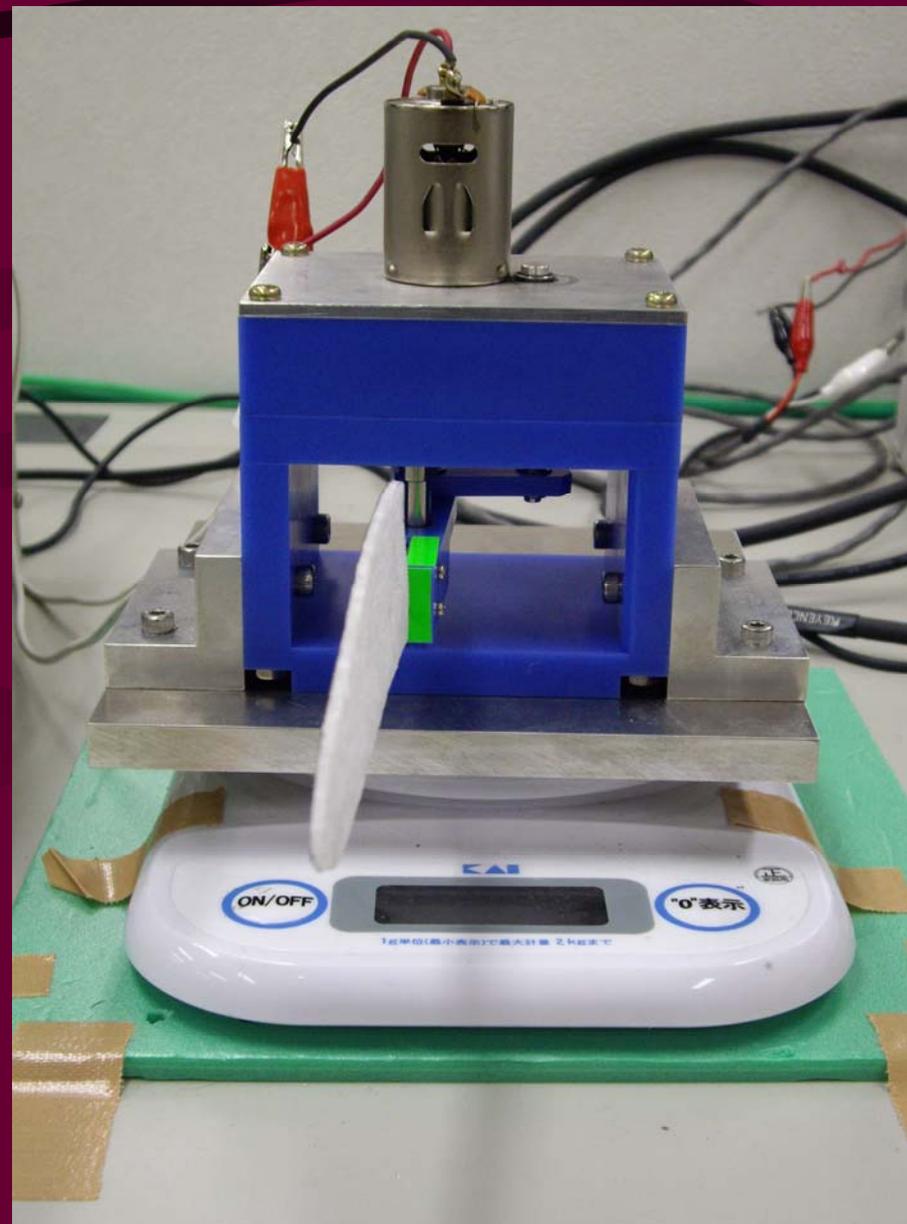
t=1.5mm for Fore-Wing

t=3mm for Hind-Wing

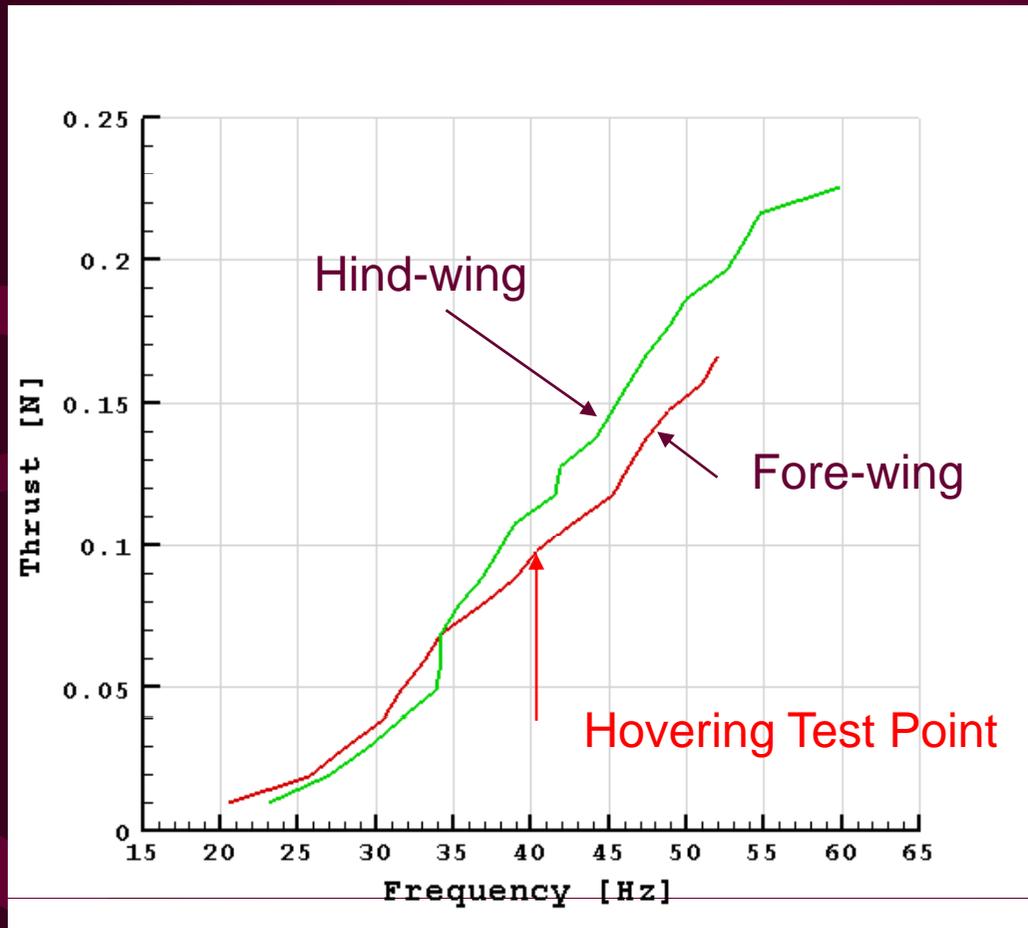
効率: 10 W/N

# ホバリング条件での揚力の計測

推力測定映像.avi



# 揚力の実験値



固有振動数:

$$f_{1f}=39\text{Hz}$$

$$f_{1h}=47\text{Hz}$$

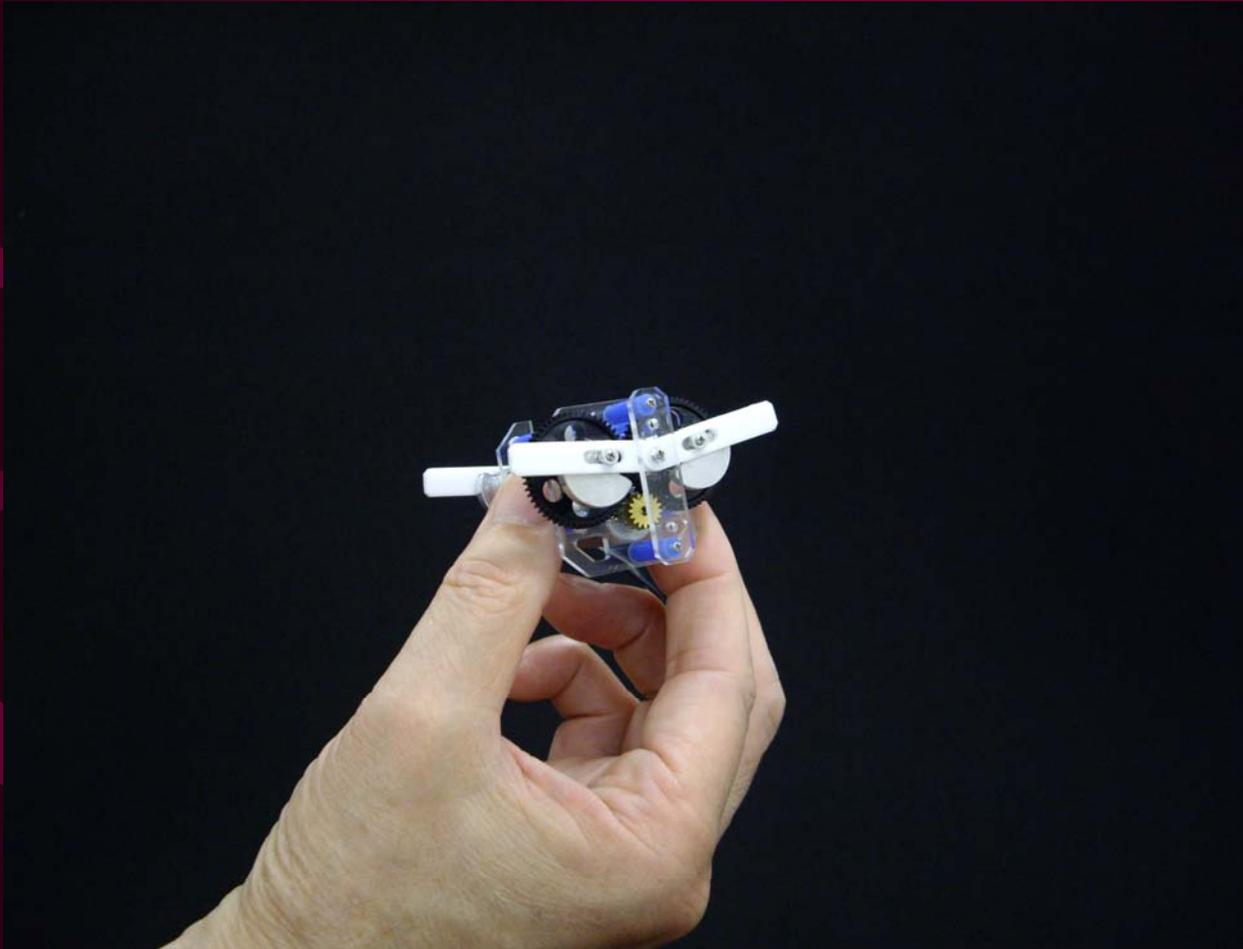
Lift for four wings:

40gf for 40Hz

(Power mass ratio:100W/kg)

cf: dragonfly of 50W/kg)

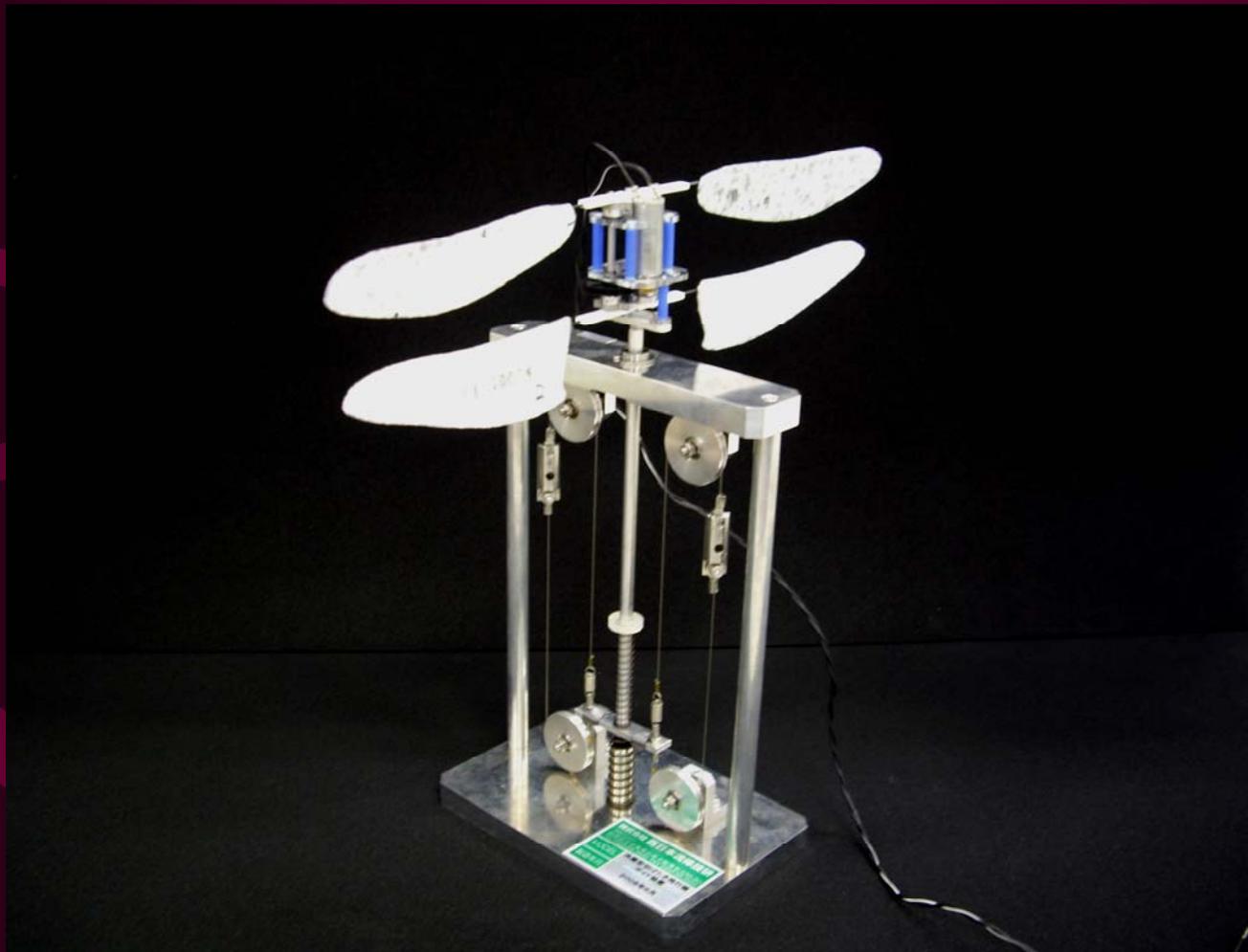
# 飛翔体



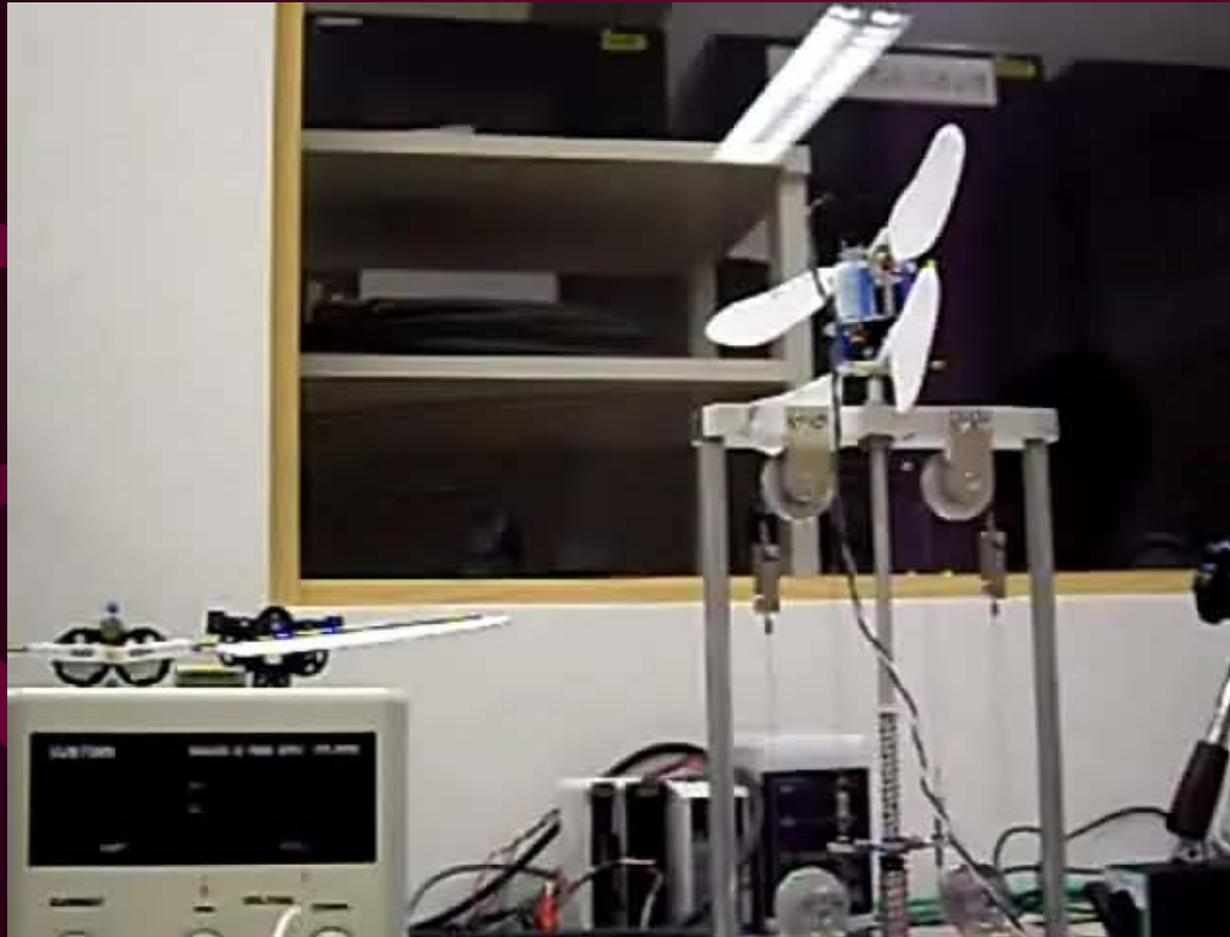
Mass of the  
body : 35 g

Flapping  
amplitude of the  
arms: 10 deg.

# ホバリング実証試験装置



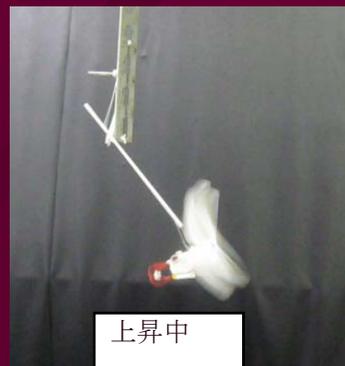
# ホバリング実証試験装置による実証試験



Weight of flying  
body : 0.392N  
(40gf)

Frequency: 40 Hz

# 強制振動型羽ばたき翼に関する研究



重量: 40 gf

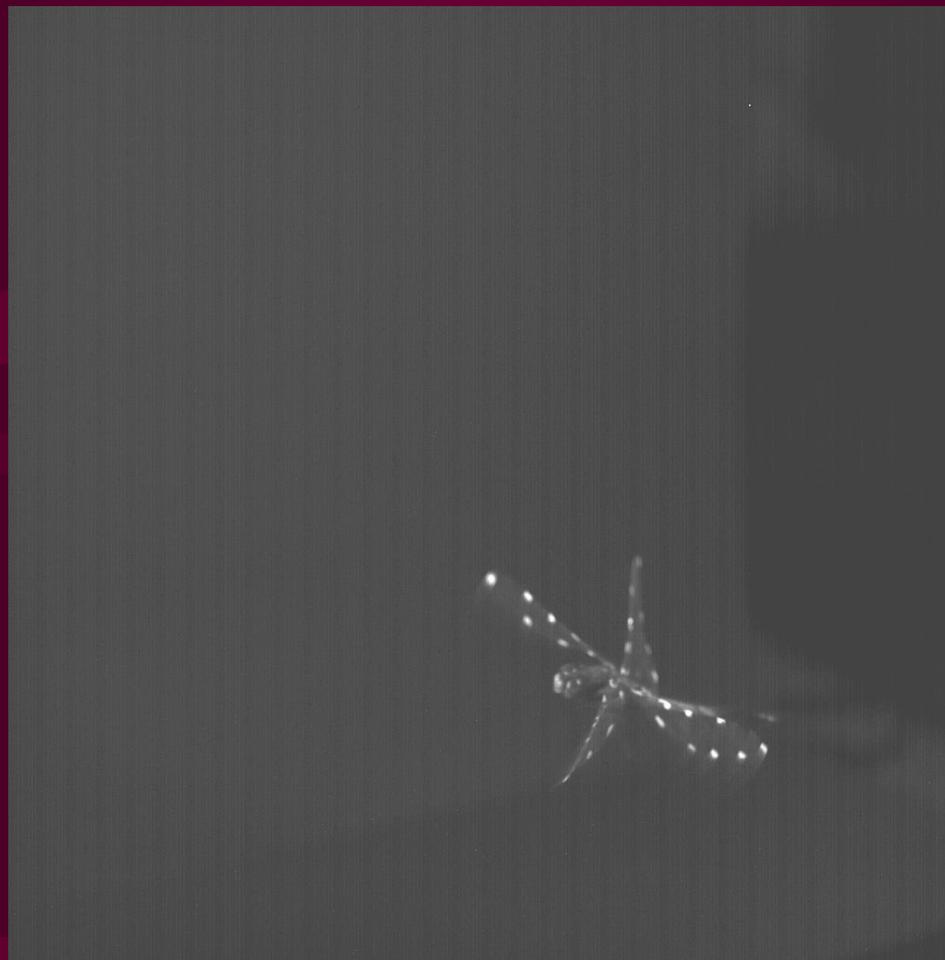
羽ばたき振動数: 30 Hz

フラッピング振動振幅: 40 deg

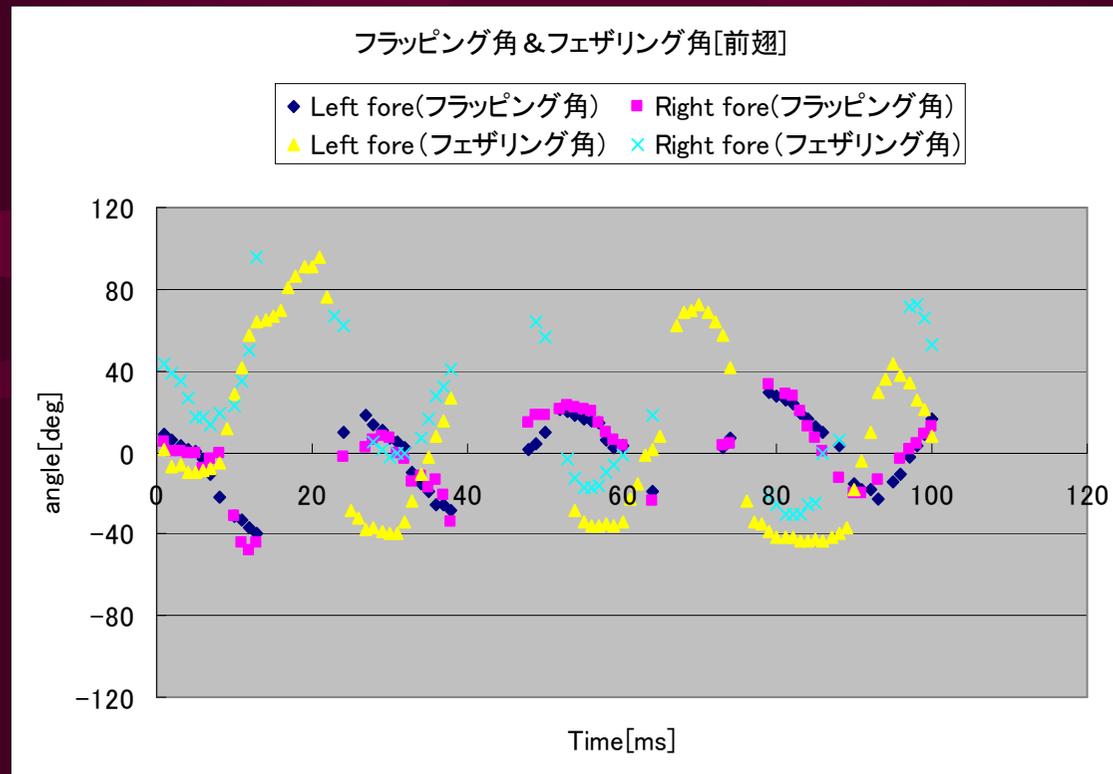
# トンボの動特性・飛行制御に関する研究

- 3カメラ3次元運動解析システムを用いて、トンボの種々の飛行形態での自由飛行を撮影し、そのときの機体運動と翼の羽ばたき運動を解析して、種々のマヌーバー時の翼運動と機体の運動の関係を明らかにし、飛翔ロボットの飛行制御の研究に役立てる。

# 撮影されたシオカラトンボの映像

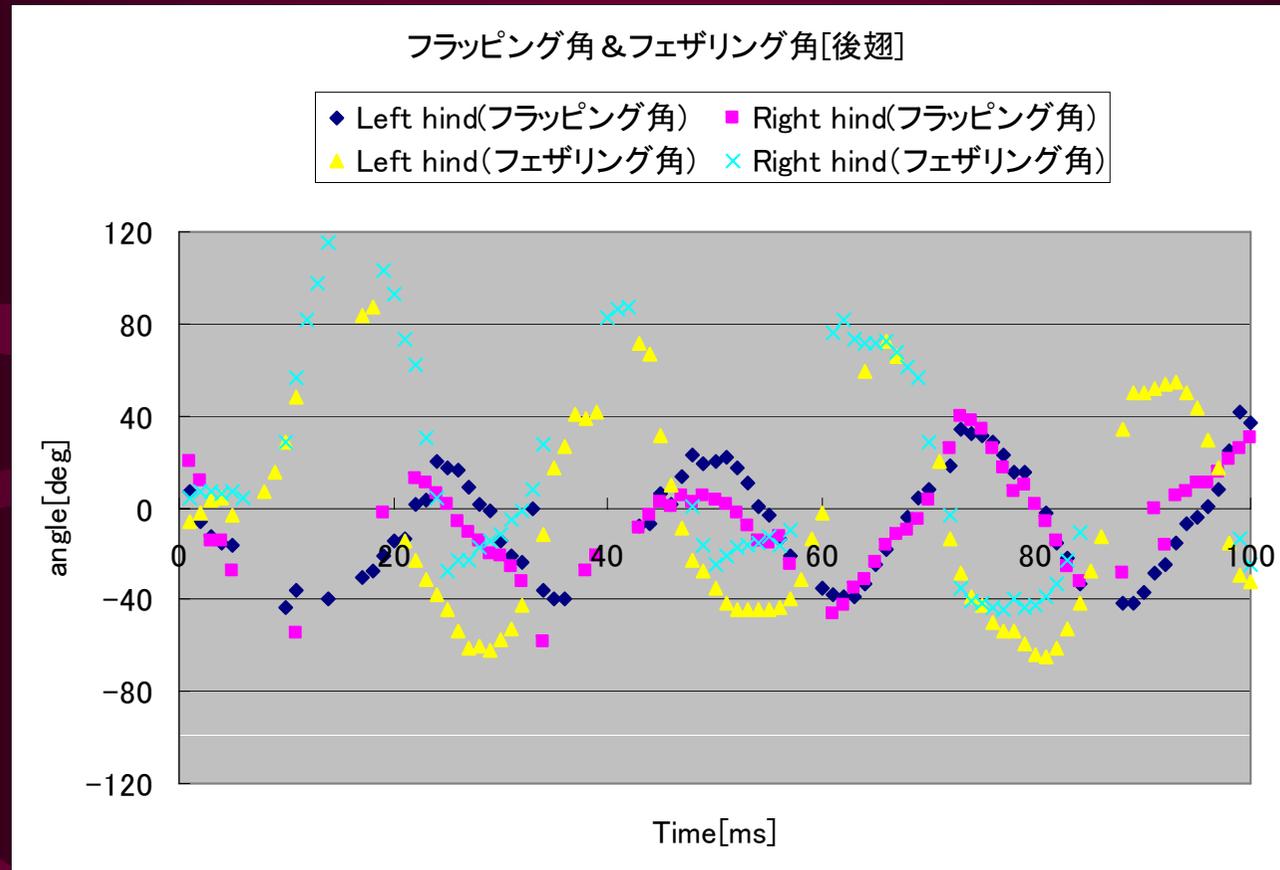


# シオカラトンボの右旋回



前翼の羽ばたき運動

# シオカラトンボの右旋回



後翼の羽ばたき運動

## 解析からわかったこと

- 例えば、シオカラトンボが右に方向転換する場合、右の翅を打ち下ろすときにフェザリング角が正となり翅の前縁が上向きとなって、揚力が後方に傾き抗力成分が増加し、同時に、左の翅を打ち下ろすときはフェザリング角が負となり翅の前縁が下向きとなって、推力成分が増加し、トンボが右にヨーイング運動を起こすこと等がわかりました。

# これまでに明らかにになったこと

シオカラトンボやギンヤンマのフリーフライトの解析により

- 定常水平飛行
- ホバリング飛行
- 方向転換
- 横風飛行

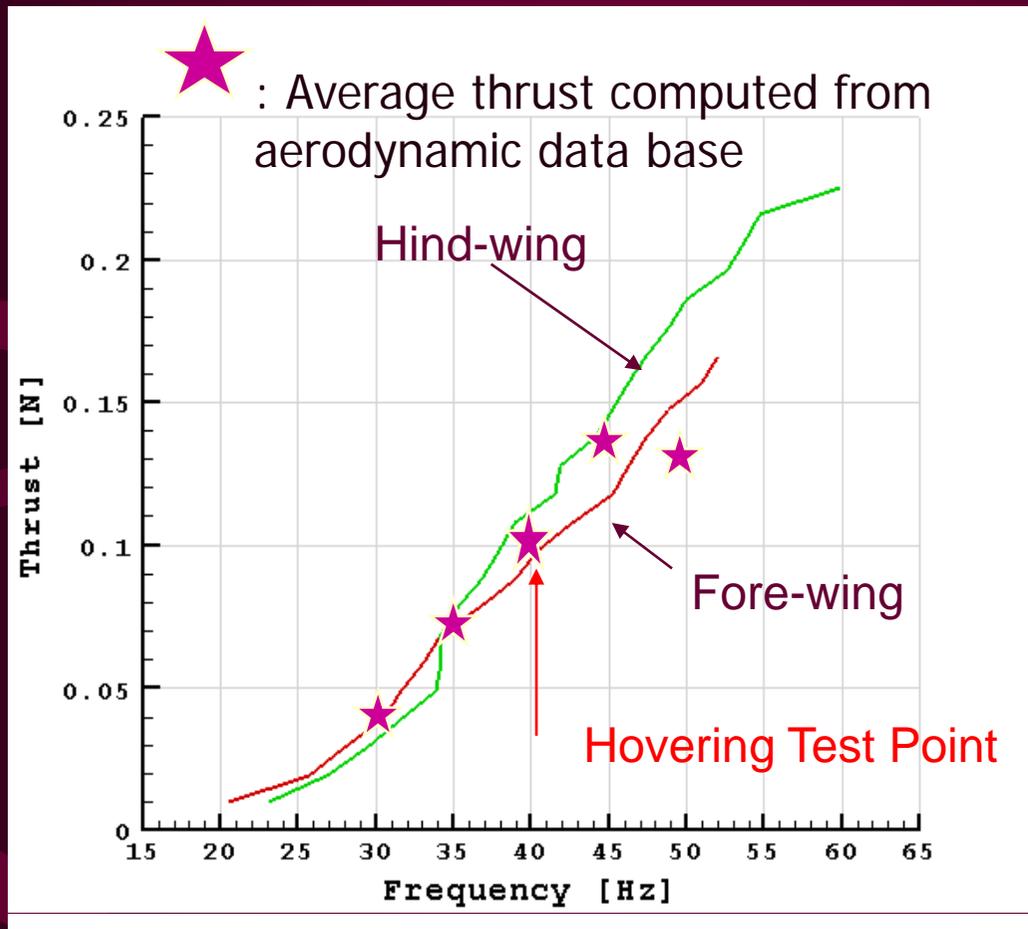
について、トンボの羽の巧みな制御方法が明らかにになった。

# 羽ばたき翼を持つMAVの飛行制御に関する研究

ホバリングから前進飛行まで、自在な飛行を行うためには:

- 自重を支えるための揚力と抵抗(前進飛行の場合)に打ち勝つための推力のみならず、高度制御、姿勢安定、各種のマニューバーに必要な制御力を羽ばたき運動のみによって生成しなければならない。

# 振動数制御方式の提案



4枚の翼のそれぞれの振動数を独立に変えることによって、姿勢制御に必要な制御力を生成できることを示唆している。

共振型羽ばたき翼の推力特性

# 振動数制御方式の提案

## A) 空力データベースを用いた飛行制御シミュレーション

- a. 空力弾性効果を考慮した3次元ナビエ・ストークスコードによる空力データベースの構築
- b. 実時間飛行シミュレーション

## B) 姿勢制御研究用モデルによる実証試験

- a. 実機製作上の問題点の抽出
- b. 振動数制御方式の実証

# 計算する空気力

(羽ばたきによる時間平均空気力)

## 右前翼

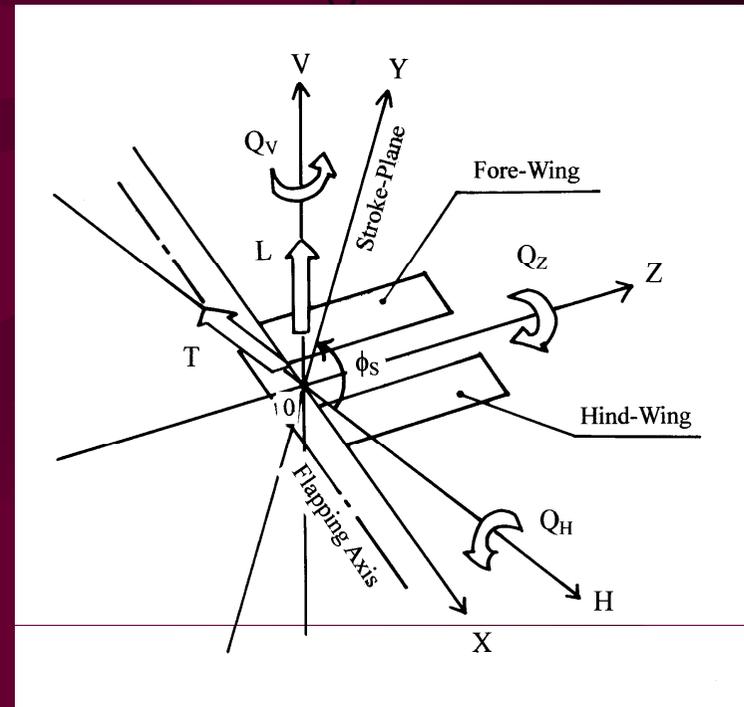
$$L_f, T_f, Q_{Hf}, Q_{Vf}, Q_{Zf}$$

## 右後翼

$$L_h, T_h, Q_{Hh}, Q_{Vh}, Q_{Zh}$$

翼運動を支配するパラメータ:

飛行速度、羽ばたき面角、前後左右の翼のそれぞれの振動数



# 遷移飛行のシミュレーション

(高度、水平位置、ピッチ、ロールの制御)

機体の目標値の設定

$y_{target}, x_{target}, \theta_{target}, \phi_{target}, V_{target}$

$t=0 - t_{max}$

①揚力、推力、ピッチングモーメント、ローリングモーメントの目標値設定:

$$L_{target} = k_1(y_{target} - y(t)) + M_B g - k_{1g} dy/dt + k_{v1} D_{Bv}$$

$$T_{target} = k_2(x_{target} - x(t)) + k_{v2} D_B - k_{2g} dx/dt$$

$$T_{target} = k_{2v}(V_{target} - V(t)) + k_{v2} D_B - k_{2g} dx/dt$$

..... 遷移・巡航・ホバリング

$$Q_{Z'}_{target} = k_3(\theta_{target} - \theta(t)) - k_{3g} d\theta/dt$$

$$Q_{H'}_{target} = k_3(\phi_{target} - \phi(t)) - k_{3g} d\phi/dt$$

②  $L_{target}, T_{target}, Q_{Z'}_{target}, Q_{H'}_{target}$  を実現する前後左右の翼の羽ばたき振動数を最適設計アルゴリズムおよび空力データベースを用いて決定する。

③ 空力データベースを用いて決定された  $L, T, Q_{Z'}, Q_{H'}$  を用いて、機体の運動方程式を解く、すなわち、

$$M_B \ddot{y} = L - M_B g - D_{BV}$$

$$M_B \ddot{x} = T - D_B$$

$$I_{Z'} \ddot{\theta} = Q_{Z'} - Ll_{cg} \sin \theta - Tl_{cg} \cos \theta$$

$$I_{H'} \ddot{\phi} = Q_{H'} - Ll_{cg} \sin \phi$$

$y(t), x(t), \theta(t), \phi(t)$

$t=t_{max}$

stop

## B) 姿勢制御研究用模型による実証試験

- 共振型羽ばたき翼4枚を搭載
- 重心はジンバルで支持
- ピッチとロールの自由度を持つ
- 4モータ制御方式
- PID 制御

姿勢センサー:

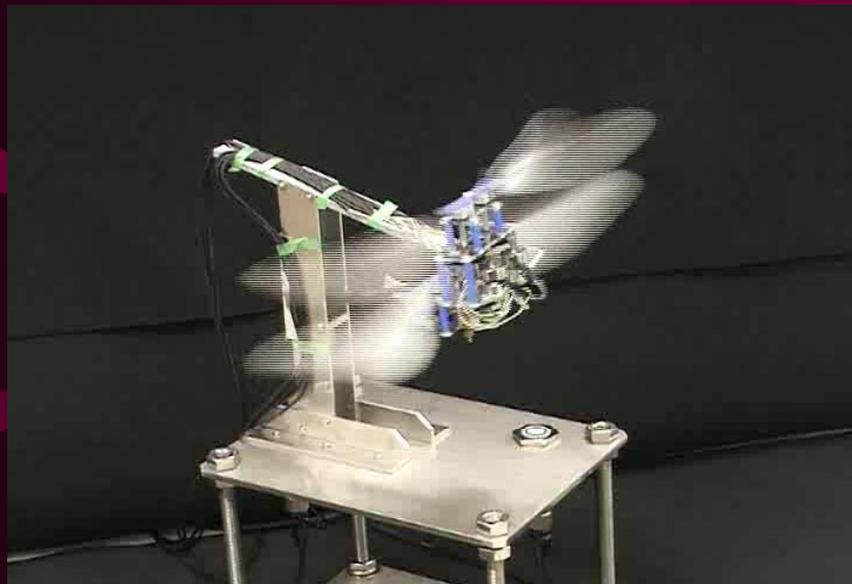
1. 機体搭載の加速度センサー
2. 機体外設置の超音波センサー



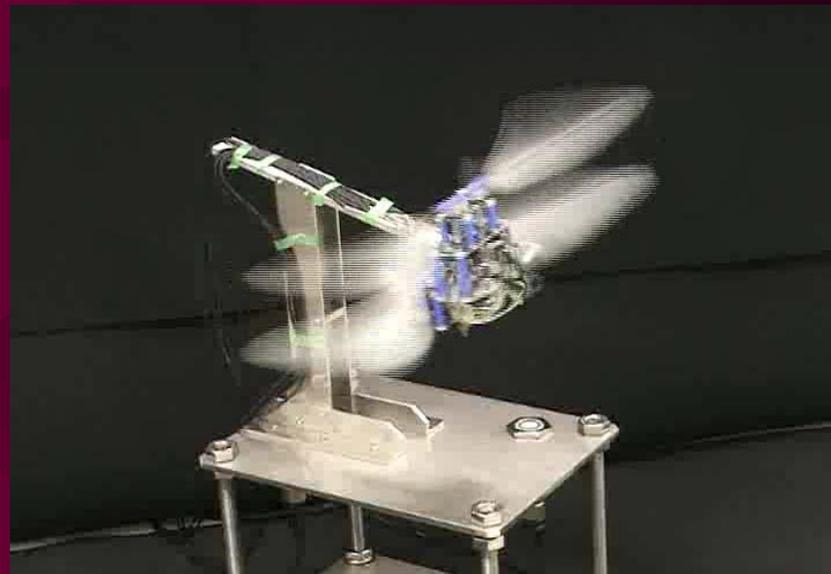
# 姿勢制御研究用模型



# 姿勢制御の実証映像



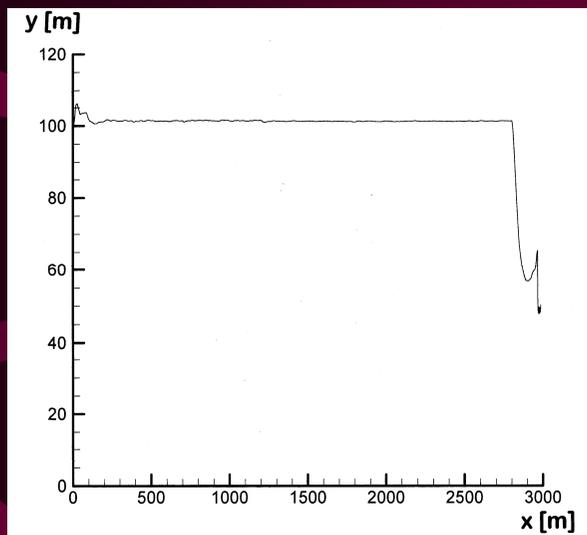
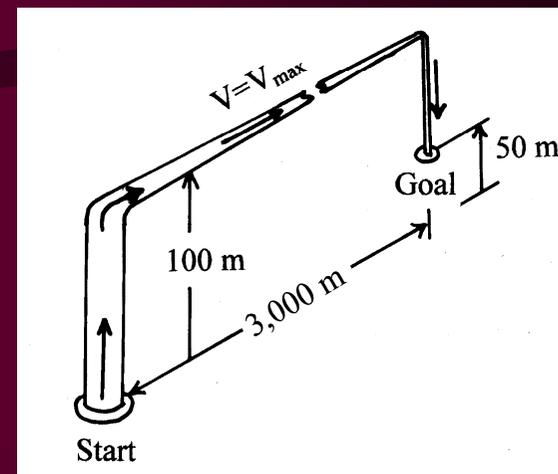
制御を行った場合



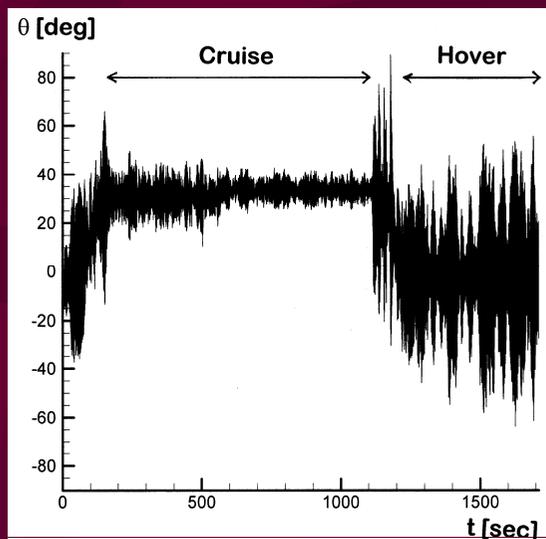
制御をしない場合

# 姿勢制御研究用模型に対する 飛行シミュレーション結果

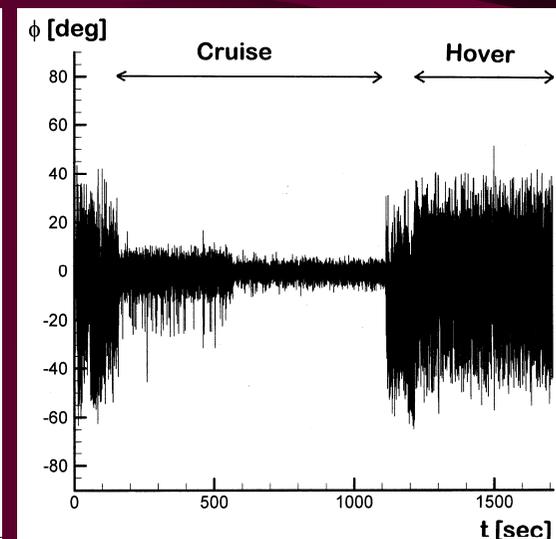
機体質量: 49 g



重心の軌跡



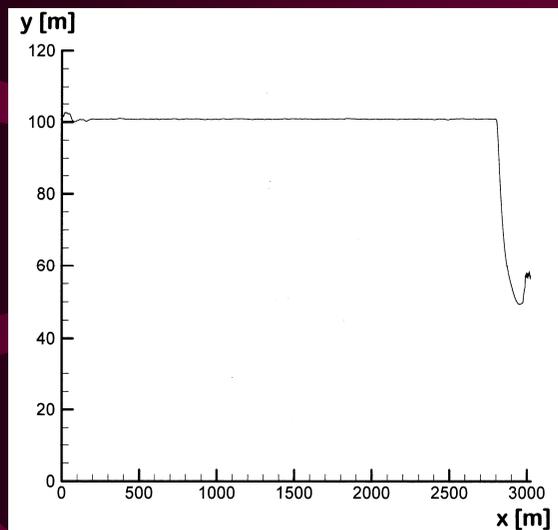
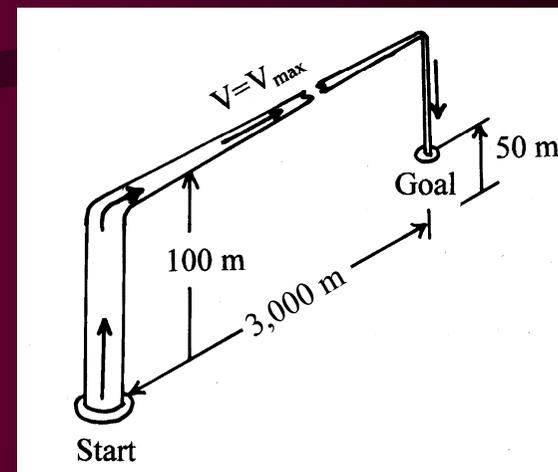
ピッチ角の応答



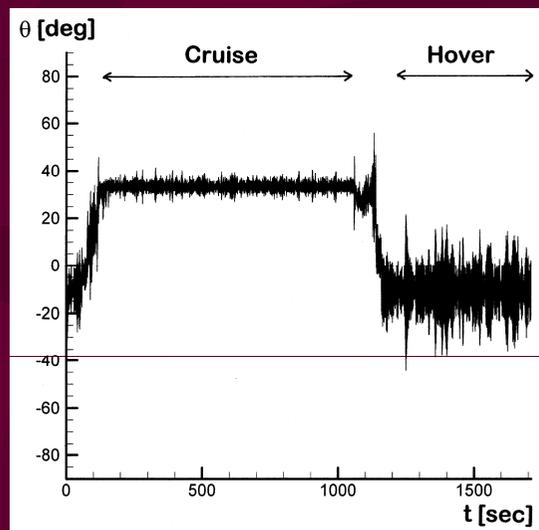
ロール角の応答

# 姿勢制御研究用模型に対する 飛行シミュレーション結果

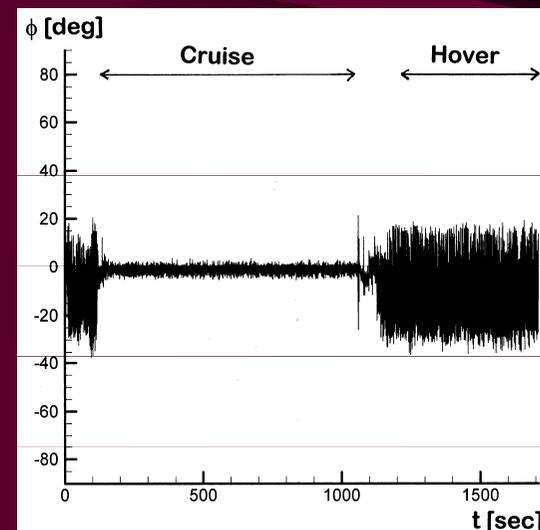
機体質量: 49 g



重心の軌跡



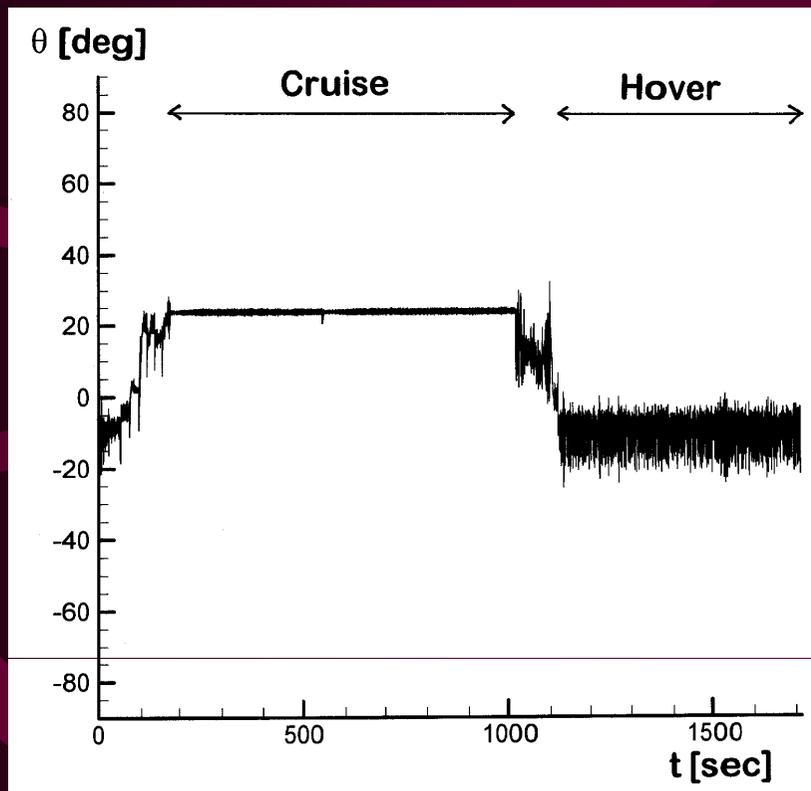
ピッチ角の応答



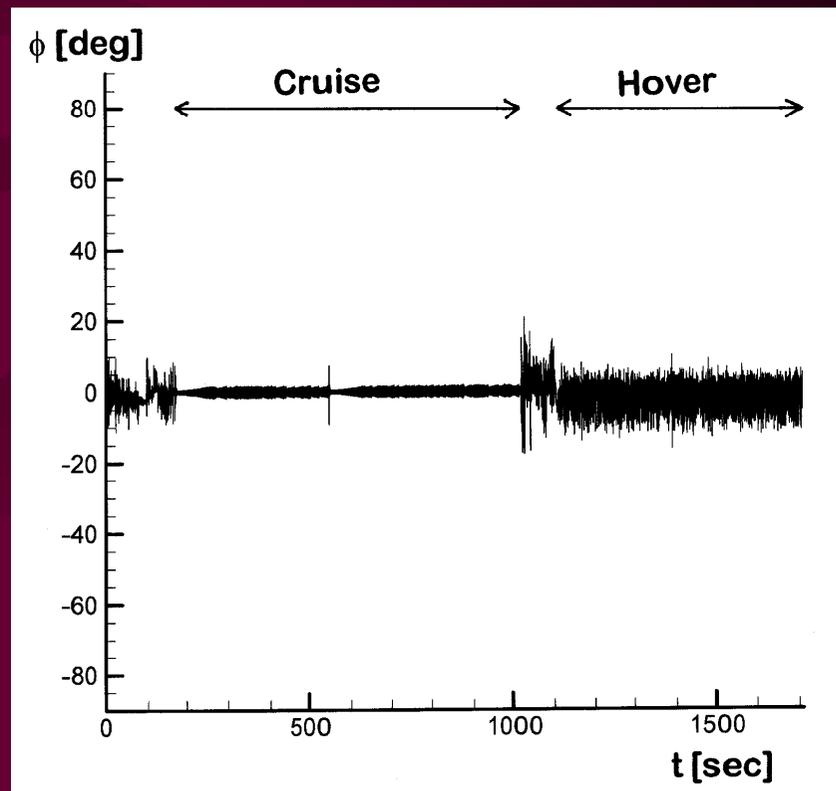
ロール角の応答

前後翼間の水平距離とロール方向の慣性モーメントを2倍にしたモデル

# フリーフライトモデルの飛行シミュレーション結果 (3モーター方式を採用した)

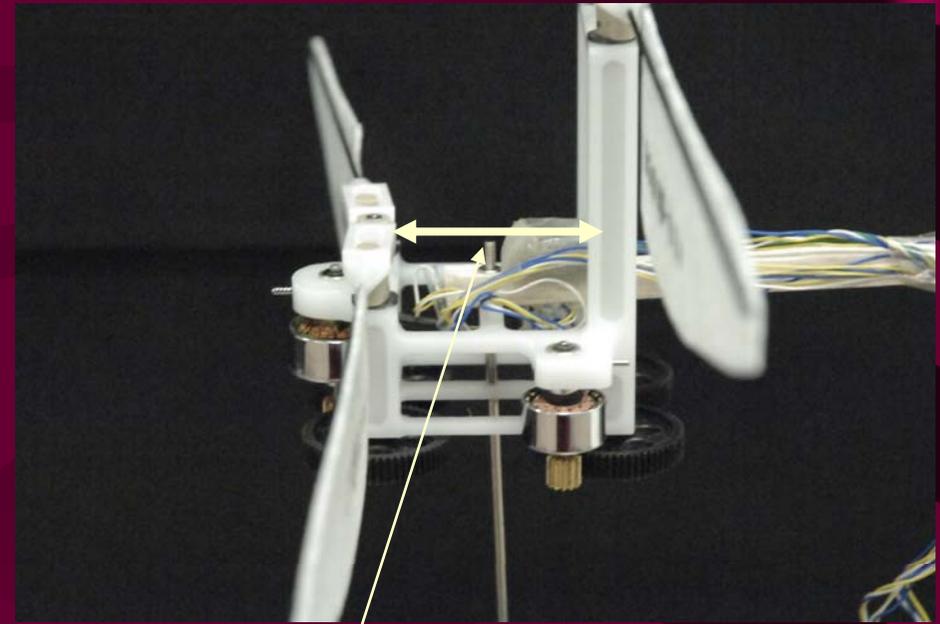
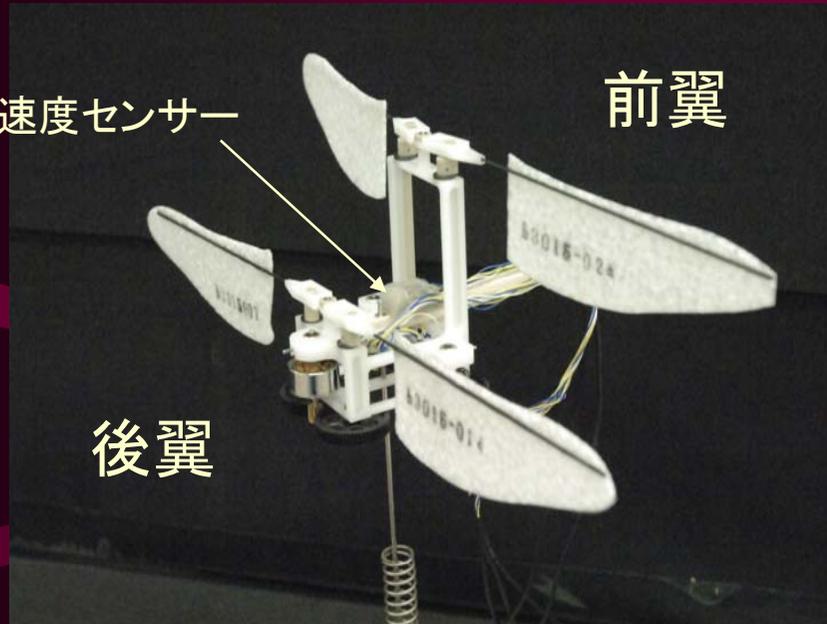


ピッチ角の応答



ロール角の応答

# フリーフライトモデルの概要

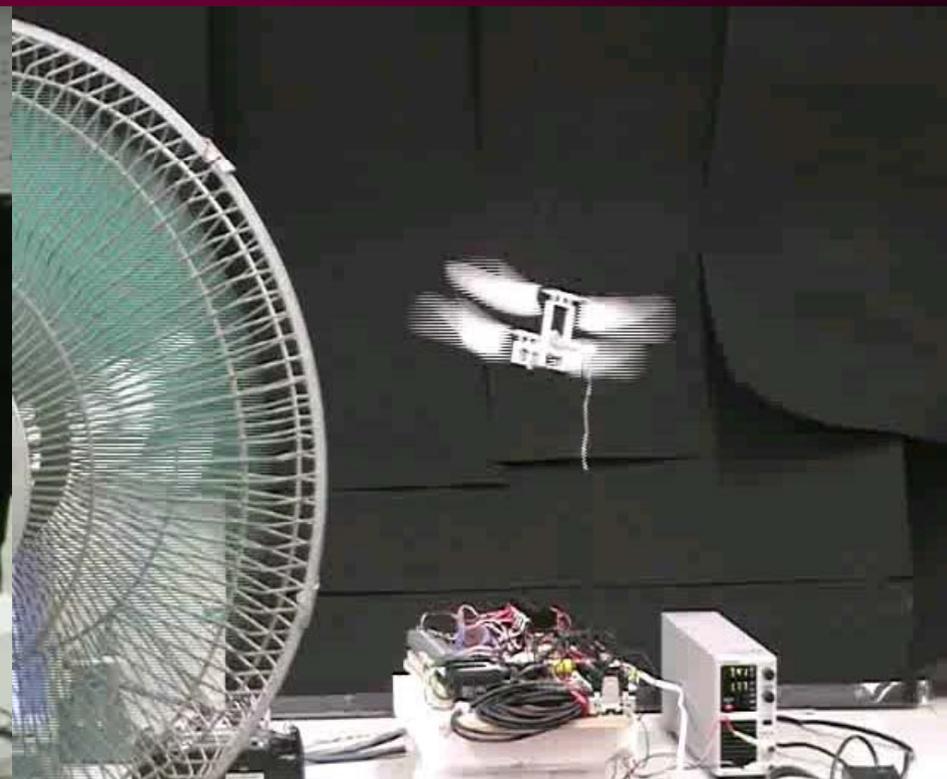


- 3モータ方式を採用し、前翼と後翼との距離を広げた。
- 重量49gと軽量化に成功。
- 加速度センサーを採用しており、防振にも成功している。

# フリーフライトモデルによる実証試験



マニュアルによる羽ばたき



PID制御による羽ばたき

# 特許および論文等

特許:

登録:1件、出願:4件

実用新案

登録:1件

論文:

学術誌論文:17件(査読付:10件)

国際学会論文:13件、国内学会講演集:20件

# 羽ばたき方式飛翔ロボットの今後の展望

## A) 学術研究

- 昆虫の飛行メカニズムに関する研究
  1. 翼平面形の効果、2. 翼断面形状の効果、3. 羽ばたきモードの効果
- 昆虫の飛行制御に関する研究

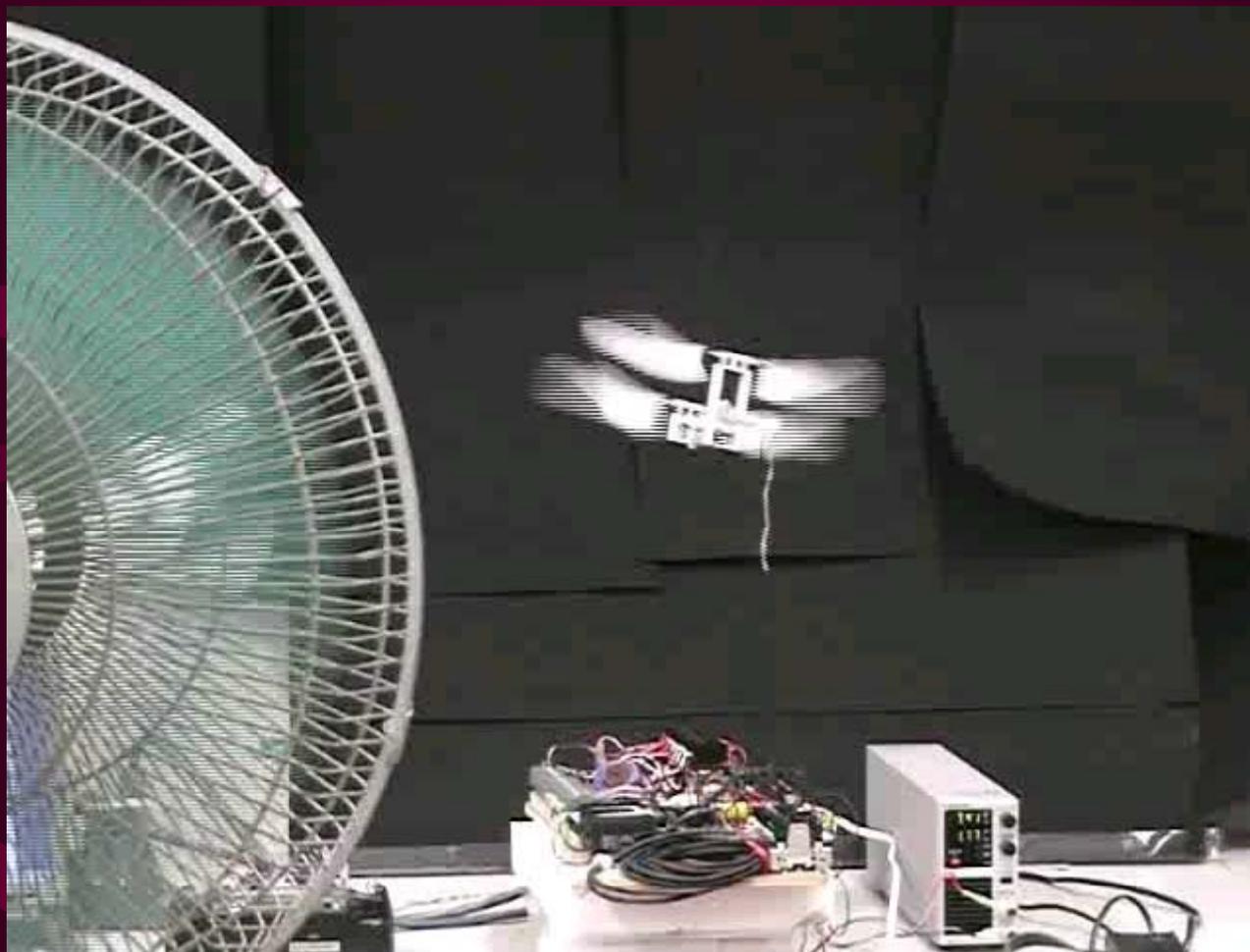
↑  
飛行制御の観点から重要

## B) トンボ型飛翔ロボットの開発

- フリーフライトモデルによる試験の続行
- フリーフライトモデルの改造・フリーフライの実証
- 搭載機器（センサー、コントローラー、バッテリー）の軽量化

(西日本流体技研、ゼノクロス(株)との共同開発を進める)

ご清聴ありがとうございました



本プロジェクトにおける学生の  
貢献も非常に大きかった。