

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360080

研究課題名（和文） 弾性翼の運動—流体—構造の連関機構と境界層内渦度成長勾配の解明

研究課題名（英文） the growing process of the vortex structure at the location close to the wall surface and Movement-Fluid-Structure Interaction Mechanism

## 研究代表者

田中 和博（TANAKA KAZUHIRO）

九州工業大学・情報工学研究院・教授

研究者番号：80171742

研究成果の概要（和文）：弾性変形を伴う運動物体壁面近傍の渦構造の発達過程の解明は、運動体に働く流体力に大きな影響を与えることから、学術的および工学的発展に大きく寄与すると考えられる。弾性運動体壁面近傍の渦構造の発達過程について、可視化実験・数値解析を用いて明らかにした。非定常運動を行う弾性翼の非定常推進力は後縁基準の  $St$  数に強く依存すること、弾性運動翼はその弾性変形により前縁から後縁にかけて徐々に渦を成長させ、剛体運動翼とは異なる特性を持つ非常に発達した渦を巻き上げることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：It is very important and interesting to study growing process of vortex structure on the wall surface of a body because the vortex structure affects the wake structure and flow force on the body in a direct fashion. Especially on a moving body with deforming wall surface such as a elastic airfoil, the precise study is needed.

In this project, the growing process of the vortex structure at the location close to the wall surface of the moving elastic airfoil has been studied by flow visualization and PIV measurement as well as numerical studies. As a result, it is verified that dynamic thrust acting on elastic airfoils is much dependent on the Strouhal number based on heaving amplitude and frequency of the trailing edge. Moreover, the heaving elastic airfoils develop the vortex with the characteristics different from heaving rigid airfoils from the leading edge toward the trailing edge by wall deformation

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,000,000円	1,800,000円	7,800,000円
2011年度	4,800,000円	1,440,000円	6,240,000円
2012年度	3,400,000円	1,020,000円	4,420,000円
総計	14,200,000円	4,260,000円	18,460,000円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、流体工学

キーワード：流体計測

## 1. 研究開始当初の背景

近年の物体の小型化に伴い、低レイノルズ数領域における非定常流れが注目されている。そのため、低レイノルズ数領域における非定常運動する物体後流の流れ場についての実験的・数値解析的研究が行われている<sup>(1)</sup>。非定常運動翼は、流れにエネルギーを与えることにより、壁面近傍の渦流れを発達させ、はく離の遅延および逆カルマン渦列の形成などの現象を生じさせる。これらの現象は、物体に働く力に直接影響を及ぼすため、工学分野において非常に重要視されてきた。これまでに、壁面近傍に形成される渦流れには、ことができると考えられる。

## 2. 研究の目的

- (1)弾性運動体壁面近傍の渦の発達過程と弾性変形の関係を定量的に明らかにすることにより、壁面近傍の渦の発達を支配する物理量の特定
- (2)弾性運動体の弾性変形と渦構造の発達の因果関係を詳細に解明することで、運動体壁面近傍の渦構造の発達に関する普遍的な理論の導出

## 3. 研究の方法

### (1)実験方法

本研究の実験で用いた供試翼は図 1(a), (b) および (c) に示すような弾性平板翼と NACA0010 型の剛体翼と弾性翼である。いずれも翼弦基準レイノルズ数は  $Re = 4.0 \times 10^3$  である。弾性平板翼は翼前部を剛体、翼後部を弾性体で作成され、剛体部と弾性部の比率は 1:2 である。

本研究では、PIV 計測により、境界層を含んだ翼近傍の渦流れを定量的に評価することが目的である。そのため、テストセクション内に粒子を満たすだけでは、翼近傍の粒子の空間密度を一定に保つことは困難となる。そのため、図 2 に示すように、供試翼の先端および翼面上に設けられたピンホール(直径  $\phi=1.0[\text{mm}]$ )より、境界層内に直接粒子を注入する。粒子注入穴付弾性翼の形状を図 4 に示す。粒子注入穴付弾性翼は剛体翼と弾性翼から構成され、その比率は 1:1 である。また、 $St=0.64$  の時における翼後縁の変形を確認したところ、翼後縁の最大変位量はヒービング振幅値の 1.46 倍であり、弾性変形は 1 次モードであり、3 次元的に変形しないことを確認した。

PIV 計測実験装置は回流水槽、供試翼、加振装置、水冷アルゴンイオンレーザ、平面鏡および高速度カメラより構成され、また、非定常推進力測定装置は、回流水槽、加振装置、より弾性平板の変位の計測結果から求めた関数を与えた。

様々な制御手法が提案されており、近年では、生物がもつ弾性の運動体(蝶や尾ひれ)が注目をされている。飛翔生物および水棲生物は、翅や尾ひれの弾性変形と運動により、自身の周りの渦構造を形成・発達させることで、循環や渦輪を生み出し、飛翔・遊泳していると考えられる。弾性運動体が流れ場に与える“運動”と“変形”は、後流構造およびその起源となる壁面近傍に形成される微細な渦構造の発生と発達に大きな影響を与えると予想できる。そのため、弾性変形に伴う運動物体壁面近傍の渦構造の発達過程の解明は、学術的および工学的発展に大きく寄与する小型六軸力覚センサおよび弾性翼により構成されている。

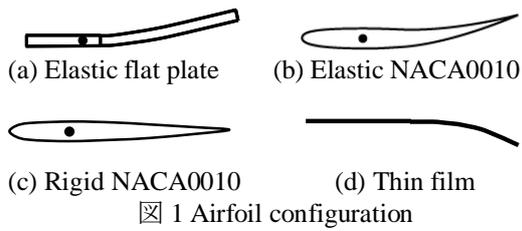
### (2)数値解析

数値解析においては ANSYS11.0 および ANSYS CFX を用い、流体構造連成解析を実現した。流体構造連成解析の流体部の支配方程式は連続の式および Navier-Stokes 方程式であり、その離散化手法には有限要素法を用いる。

解析領域は翼弦長  $c$  を基準に、翼前縁、翼後縁、翼スパン方向奥行および翼面に鉛直方向の長さをそれぞれ  $2c$ ,  $5c$ ,  $c/12$ , および  $3c$  で与える。流出境界に主流  $0.067[\text{m/s}]$  を与え、流出境界を大気解放とした。また、壁面境界は全て対称境界とし、翼面には圧力と変位データを転送する境界面を定義する。その他の解析条件を表 1 に示す。供試翼形状は NACA0010 であり、弾性翼のヤング率およびポアソン比はそれぞれ  $E=0.32[\text{MPa}]$  および  $\nu=0.45$  である。翼前縁から  $c/4$  の位置にヒービング運動を与え、本研究では式(1)および図 4 で示すような翼後縁最大振幅を基準としたストロハル数を定義する。

また、壁面近傍の渦の生成・成長過程においては壁面近傍の渦流れを捉えることと、“弾性変形する壁面上の”渦の成長過程の解明が目的であることから、必ずしも実験をそのまま模擬し、解析モデルも翼形状とする必要はないと考え、良質な格子形成等の多数の利点を持つ図 1(d)に示すような厚みのない平板を対象モデルとした。解析領域は上記と同様とし、全体の領域に対しての総格子数は 80 万格子である。境界条件として主流に  $0.067[\text{m/s}]$  を与え、流出境界を大気解放とした。また、翼面は壁面境界、翼スパン方向を対称境界とした。

前縁から翼中心までは弾性変形しない剛体部と定義し、翼弦中心部から後縁までを弾性変形する弾性部と定義した。厚みのない平板の後部には、実際に弾性平板を使用した実験



$$St = 2bf/V_0 \quad (1)$$

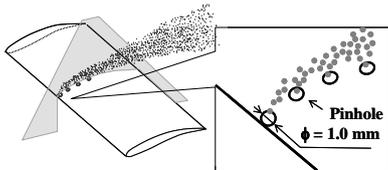


図2 Idea of elastic NACA0010 with some pinholes

表1 Analysis conditions

Re	$4 \times 10^3$	Turbulence	k- $\omega$
St	0.64	y+	< 1
Mesh	Hexa	Cycle	5
Nodes(Fluid)	$2.1 \times 10^5$	Time steps	0.01 [s]
Nodes(Airfoil)	$1.0 \times 10^4$	Cal. Time	10 days

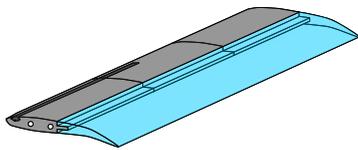


図3 Configuration of elastic NACA0010 with some pinholes

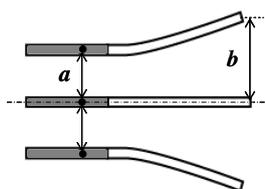


図4 Elastic deformation of elastic airfoils

#### 4. 研究成果

(1) ヒービング運動する弾性翼後流の等渦度線図

図1の(b)および(c)に示す供試翼を用いて、 $St=0.64$ でヒービング運動を行う弾性翼および剛体翼まわりの等渦度線図をそれぞれ図5および図6に示す。また、PIV解析結果および数値解析結果をそれぞれ(a)および(b)に示す。いずれもヒービング運動が運動中心の位置における瞬時値を示す。

いずれの数値解析結果もPIV解析結果とよ

く一致しており、特に、流体構造連成解析も実現しているといえる。また、弾性翼後縁から巻き上がる渦(図6(b))は剛体翼(図5(b))に比べて大きく成長し、その中心付近の渦度も大きい。そのため、翼後流に吐き出され、発達する渦も剛体翼に比べて大きいことがわかる。さらには、剛体翼後方の推進力発生渦列は、弾性翼と比べて密に形成されていることがわかる。弾性翼では、ヒービング運動とその弾性変形により翼面上で成長した渦が常に、ヒービング運動の上死点および下死点において翼後縁から離れるために渦間隔が大きくなる。

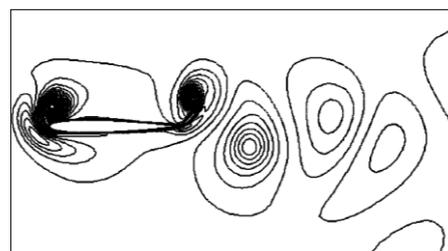
(2) ヒービング運動する弾性翼に働く非定常推進力

ヒービング運動翼に働く非定常推進力のヒービング運動一周あたりを平均した値を図7に示す。横軸および縦軸はそれぞれSt数と推進力係数の平均値を示す。■、●および▲はそれぞれ剛体翼、弾性平板翼および弾性翼の結果を示す。St数とは非定常運動する物体周りの流れ場を示す無次元数である。

いずれの翼においても、St数の増加により非定常推進力は増加する傾向にある。さらに、剛体翼、弾性平板翼および弾性翼に働く非定常推進力は、弾性変形量および翼形状に依らず、St数に強く依存することがわかる。

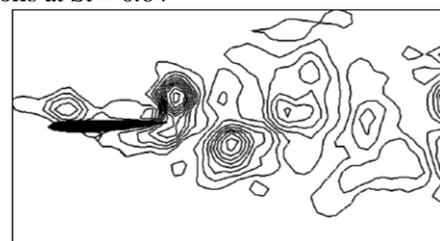


(a) PIV measurement result

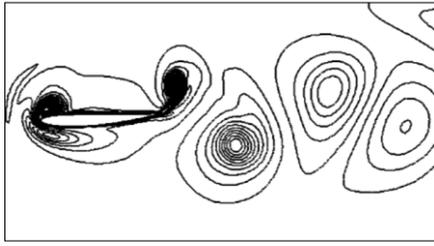


(b) Numerical simulation result

図5 Vorticity contours behind heaving rigid airfoils at  $St = 0.64$



(a) PIV measurement result



(b) Numerical simulation result

図 6 Vorticity contours behind heaving elastic airfoils at  $St = 0.64$

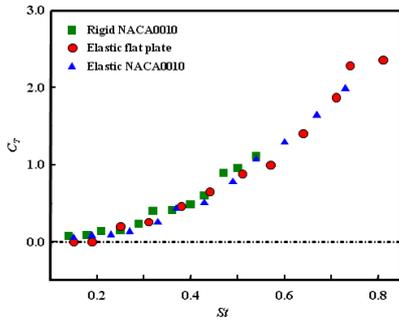


図 7 Dynamic thrust averaged for one cycle acting on heaving airfoils

### (3) 弾性変形による渦の成長勾配

弾性変形の空間的な変化が渦の発達に与える影響を明らかにするために、渦度の空間変化について注目した。本研究では渦度の空間変化を定量的に評価するために式(2)に示す渦度輸送方程式の第二項と第三項を用いた。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

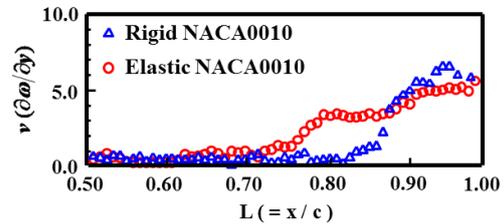
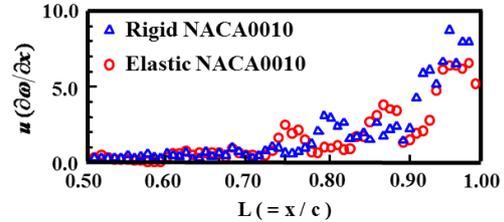
渦度の空間変化を示す渦度輸送方程式の第二項と第三項に、PIV 計測で得られた速度および渦度を代入し、渦度の  $x$  方向および  $y$  方向それぞれの空間変化を定量的に評価した。ヒービング運動翼壁面近傍に形成される渦度の  $x$  方向および  $y$  方向の空間変化を図 8 にそれぞれ示す。(a)、(b)および(c)はそれぞれ  $T = 0.75$ 、 $0.83$  および  $0.90$  の結果を示す。横軸および縦軸はそれぞれ運動翼の翼弦中心部から翼後縁までの位置および渦度の各方向に対する空間変化を示す。

図 8(a)より、弾性変形が生じない時には、剛体翼と弾性翼の渦度の空間変化は  $x$  方向および  $y$  方向共に変化はない。

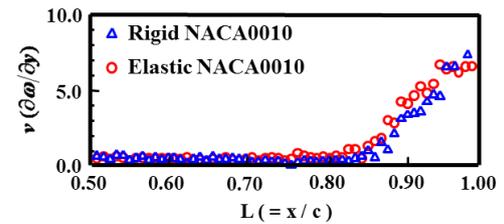
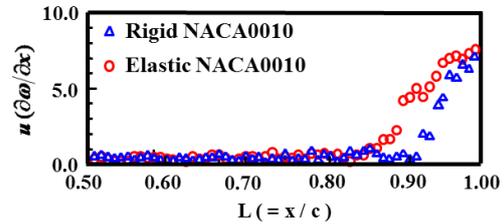
一方、図 8(b)および(c)より、弾性翼の翼後部において弾性変形が生じる場合、 $y$  方向の空間変化は剛体翼と弾性翼で変わらないものの、弾性翼の壁面近傍に形成される渦度の  $x$  方向の空間変化は、剛体翼に比べ、大きくなるのがわかる。さらに、最も弾性変形が大きくなる  $T=0.90$  の際の弾性翼の渦度の  $x$  方向の空間変化は、翼弦中心部 ( $L = 0.50$ ) に近い位置 ( $L = 0.70$ ) で大きく変化することがわ

かる。これは、 $L = 0.70$  付近で弾性変形が生じるためである。また、剛体翼と弾性翼の壁面近傍に形成される渦度の  $y$  方向の空間変化は、全ての位相に対して同様の傾向を示すことから、渦度の  $y$  方向の変化においては、ヒービング運動自体の影響が支配的になるためだと考える。

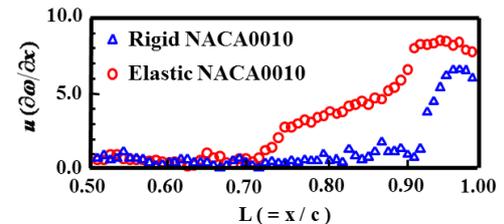
弾性翼は、弾性変形により斜め方向に流れを誘起し、剛体翼にはない渦度の  $x$  方向の空



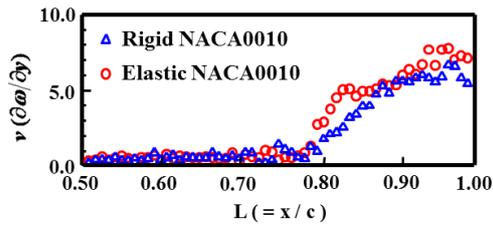
(a)  $T = 0.75$



(b)  $T = 0.83$



(c)  $T = 0.90$



(c)  $T = 0.90$

図 8 The spatial change of vorticity in vicinity a wall of heaving NACA0010 for x-direction

間変化を生じさせる。そのため、弾性翼壁面近傍に形成される渦度は、剛体翼壁面近傍に形成される渦度よりも大きくなることを確認できる。

#### (4) 壁面近傍に形成される渦の生成とその成長機構

##### ① 壁面近傍に形成される渦の生成

空間解像度・時間解像度の観点から、実験解析のみでは壁面近傍の渦の成長を捉えることは困難である。したがって、数値解析を用いて壁面近傍に形成される渦の生成を判別した。

壁面近傍の渦の生成を判別するために数値解析における計算格子の壁面第二格子のデータを用いた。これは壁面第一格子では、渦度の算出において補正項がかかることを懸念されたためであり、壁面第二格子の方がより高精度で渦の生成の判別を行えると判断したためである。壁面上の第二格子において、式(3)で示す渦度の定義式の各項の効果をそれぞれ示すことで渦の生成の判別を行った。

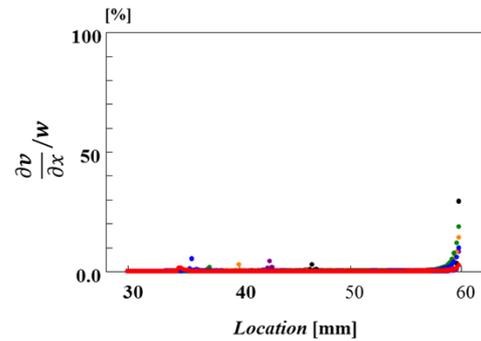
$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

渦度の定義式の第一項、第二項のみが存在している場合は渦度としては値があるが、実際には渦はせん断変形しているために渦とは認識することができない。したがって、回転しているかどうかの判別には渦度の式の第一項と第二項のバランスが重要となる。この渦度の定義式中の第一項と第二項のバランスを表す物理量として、渦度第一項を渦度で除した値  $(\partial v / \partial x) / \omega$  を用いることとした。渦度第一項を渦度で除した値が 50% 付近であれば、各々の項の影響を含んでいることになるため、回転している渦が存在することを示し、渦度第一項を渦度で除した値が非常に小さい場合および非常に大きい場合は、それぞれ第二項および第一項の影響が非常に大きいことを示すため、渦要素はせん断変形していることを示す。

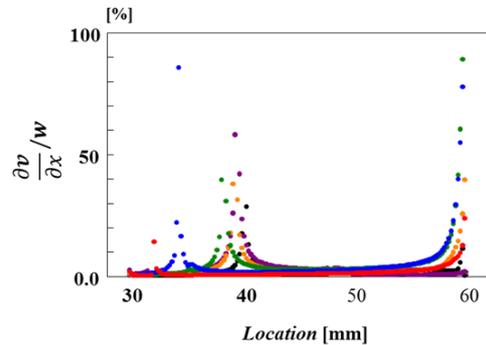
図 9(a) および (b) にそれぞれ剛体翼および弾性翼の壁面近傍の翼弦方向における渦度第一項を渦度で除した値の結果を示す。黒、紫、橙、緑、青および赤はそれぞれ  $T=0.50, 0.60,$

0.70, 0.80, 0.90 および 1.00 の結果を示す。

図 9(a) より、剛体の平板上では、後縁以外での翼弦位置において渦度第一項を渦度で除した値がほとんど 0 であることがわかる。すなわち、剛体平板上では渦度は広く存在するものの、その渦度はせん断の渦が強く、回転している渦は存在しないことがわかる。一方、図 9(b) より弾性の壁面上では、後縁以外での翼弦位置において渦度第一項を渦度で除した値が大きくなっていることが確認できる。すなわち、弾性平板の壁面近傍においては、回転成分を持つ渦が瞬間的に形成されていることがわかる。



(a) Rigid plate



(b) Elastic plate

図 9 Generation of vortex in the vicinity of a wall

##### ② 壁面近傍の渦の成長過程の変化

図 10 に翼弦方向に対する渦度の時間変化について示す。横軸および縦軸はそれぞれ翼弦位置と渦度の値を示している。青および黒は剛体翼および弾性翼の結果を示す。

結果より、剛体翼と弾性翼では渦度の形成位置が大きく異なることがわかった。さらに、弾性翼の壁面上の渦度は剛体翼よりも大きくなる。

図 11 に無次元化されたヒービング運動周期に対する渦度の時間成長について示す。横軸および縦軸は無次元運動周期と渦度の値を示す。

結果より、剛体翼の渦は急激に渦を成長させていることが確認でき、弾性翼の渦はゆる

くりと大きく渦度が成長していることも確認できる。また、その成長勾配は一定であることも確認できる。すなわち、剛体翼は後縁付近で生まれた渦を急激に成長させ後縁から巻きあげ、弾性翼は壁面の前縁側から渦を形成し、ゆっくりと大きく成長させ、十分に発達した渦を後縁から巻きあげることがわかる。

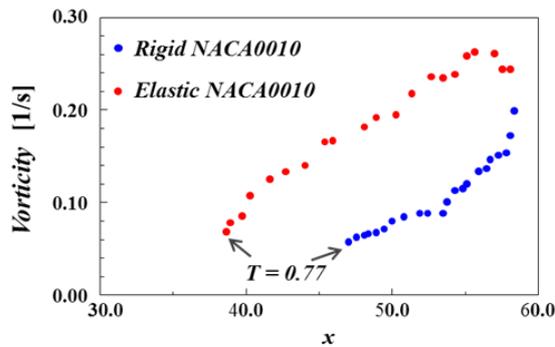


図 10 Growth of vorticity in the vicinity of a wall against the chordwise direction

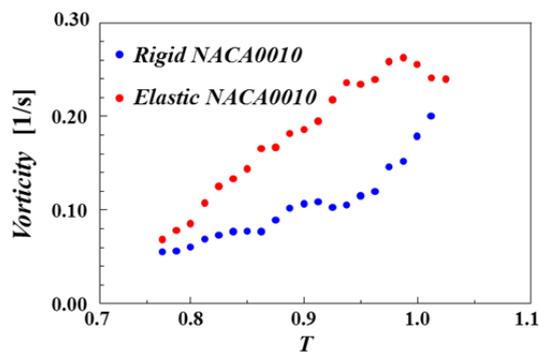


図 11 Growth of vorticity in the vicinity of a wall against the non dimensionalized

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 永田哲志、瀧脇正樹、田中和博  
Dynamics of Vortices shed from and Elastic Heaving Thin Film by Fluid Structure Interaction Simulation、Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering、査読有、65 巻、2013、299-309、DOI :10.1007/s00348-012-1450-x

[学会発表] (計 36 件)

- ① 栗波智樹、瀧脇正樹、田中和博  
The Vortex Growth on a Wall of Elastic

Airfoils and Effect of Relative Angle of Attack、Proc. of Int. Conference on Intelligent Unmanned Systems-2012、2012 年 10 月 22 日～10 月 24 日、Singapore

- ② 永田哲志、瀧脇正樹、田中和博  
Vortex Flow Structures determined by Stiffness of an Elastic Moving Thin Film、Proc. of Int. Conference on Intelligent Unmanned Systems-2012、2012 年 10 月 22 日～10 月 24 日、Singapore

- ③ 瀧脇正樹、栗波智樹、田中和博、田畑隆英  
Detailed Wake Structure around Moving Elastic Airfoils and Their Characteristics of Dynamic Thrust、Proceedings of ASME 2012 Fluids Engineering Summer Meeting 2012 年 7 月 8 日～7 月 12 日、Perto Rico USA

- ④ 永田哲志、瀧脇正樹、田中和博  
Vortex Structure around Moving Elastic Bodies by Fluid Structure Interaction Simulation、Proc. of Int. Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition、2012 年 7 月 3 日～7 月 6 日、Germany

- ⑤ 永田哲志、瀧脇正樹、田中和博  
Vorticity Components of Vortices rolled up from an Elastic Moving Thin Film、Eighth International Conference on Flow Dynamics 2011 年 11 月 9 日～11 月 11 日、仙台

- ⑥ 栗波智樹、瀧脇正樹、田中和博  
The Variation of the Growth Process of Vortex in the Vicinity of a Wall by Elastic Deformation、Eighth International Conference on Flow Dynamics、2011 年 11 月 9 日～11 月 11 日、仙台

- ⑦ ジェンタンポード・アパ イソ、瀧脇正樹、田中和博、Vortex Structure around Ideal Elastic Deformation of Flapping Wing Due to Some Ribs、Eighth International Conference on Flow Dynamics、2011 年 11 月 9 日～11 月 11 日、仙台

- ⑧ 永田哲志、瀧脇正樹、田中和博  
Vortex Structure rolled up from Elastic Thin Film by Fluid Structure Interaction Simulation、ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011、2011 年 7 月 24 日～7 月 29 日、浜松

- ⑨ 栗波智樹、瀧脇正樹、田中和博  
The Growth of Vorticity in the vicinity of a Wall of an Elastic Moving Airfoil and

- Their Developing Processes,  
ASME-JSME-KSME Joint Fluids  
Engineering Conference 2011、2011年7  
月24日～7月29日、浜松
- ⑩ ジェンタンポード・アバイン、瀧脇正樹、田中  
和博、Wake structure around moving  
elastic airfoils with projections and  
their characteristics of dynamic forces  
by fluid structure interaction  
simulation、ASME-JSME-KSME Joint  
Fluids Engineering Conference 2011、  
2011年7月24日～7月29日、浜松
- ⑪ 瀧脇正樹、井村忠継、田中和博  
Dynamic Behaviors of Butterfly Wing  
and Their Application to Small Flapping  
Robot  
International Conference on Intelligent  
Unmanned Systems ISIUS2010、2010年  
11月3日～11月5日、Bali, Indonesia
- ⑫ 栗波智樹、瀧脇正樹、田中和博  
Vortex Flow Developed in the Vicinity of  
a Wall of an Elastic Heaving Airfoil and  
its Dynamic Behavior、International  
Conference on Intelligent Unmanned  
Systems ISIUS2010  
2010年11月3日～11月5日、Bali,  
Indonesia
- ⑬ 永田哲志、瀧脇正樹、田中和博  
Fluid Structure Interaction  
Simulation of Flow Field around  
Elastic Moving Airfoils  
International Conference on  
Intelligent Unmanned Systems  
ISIUS2010  
2010年11月3日～11月5日、Bali,  
Indonesia
- ⑭ 瀧脇正樹、黒木太一、田中和博、田畑隆  
英、Dynamic behavior of vortex ring  
formed on a butterfly wing and its  
structure、International Conference on  
Jets, Wakes and Separated Flows,  
ICJWSF-2010、2010年9月27日～9月  
30日、Cincinnati, Ohio USA
- ⑮ 栗波智樹、瀧脇正樹、田中和博  
Vortex Flow Developed in the Vicinity of  
a Wall of an Elastic Moving Airfoil and  
Its Wake Structure、International  
Conference on Jets, Wakes and Separated  
Flows, ICJWSF-2010、2010年9月27  
日～9月30日、Cincinnati, Ohio USA
- ⑯ 永田哲志、瀧脇正樹、田中和博  
Study on Vortex Flow Structure and  
Dynamic Forces on an Elastic Heaving  
Airfoil by Fluid-Structure Interaction  
Simulation、International Conference on  
Jets, Wakes and Separated Flows,  
ICJWSF-2010、2010年9月27日～9月

- 30日、Cincinnati, Ohio USA
- ⑰ 瀧脇正樹、黒木太一、永田哲志、田中和  
博、田畑隆英  
Vortex Structure around Moving Elastic  
Airfoils and Their Characteristics of  
Dynamic Forces、Proceedings of ASME  
2010 3rd Joint US-European Fluids  
Engineering Summer Meeting and 8th  
International Conference on  
Nanochannels, Microchannels, and  
Minichannels, EDSM2010-ICNMM2010  
2010年8月1日～8月5日、Montreal,  
Canada
- ⑱ 瀧脇正樹、黒木太一、田中和博、田畑隆  
英  
Dynamic behavior of vortices on a  
flapping butterfly wing、International  
Symposium on Flow Visualization,  
ISFV14、2010年6月21日～6月24日、  
Daegu, Korea

[その他]  
ホームページ等  
<http://tanakafutiwaki-lab.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 和博 (TANAKA KAZUHIRO)  
九州工業大学・情報工学研究院・教授

研究者番号：80171742

### (2) 研究分担者

瀧脇 正樹 (FUCHIWAKI MASAKI)  
九州工業大学・情報工学研究院・准教授

研究者番号：60346864