

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06161

研究課題名(和文) 弾性と運動による壁面近傍の渦度の成長メカニズムの解明

研究課題名(英文) Vorticity Growth Mechanism in Vicinity of Wall of Elasticity and Motion

研究代表者

瀧脇 正樹 (Fuchiwaki, Masaki)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：60346864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：弾性変形する運動翼壁面近傍の渦度の成長メカニズムを流体構造連成解析による数値シミュレーションとPIV計測のハイブリッド解析により明らかにした。弾性運動翼は、その弾性変形により、壁面の空間勾配が大きくなり、壁面上に強い回転成分をもつ渦が壁面上後縁近傍の広い領域に成長する。壁面の空間勾配の時間変化が線形的に変化する時、壁面近傍の渦度は成長するだけでなく、後縁側へ移流する。その一方、後縁近傍の空間勾配の時間変化がほぼ一定となる時、渦度は成長こそするものの、その後縁側への移流は小さくなる。すなわち、弾性運動壁面の空間勾配が、渦度の成長に寄与する重要なパラメータとなる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弾性運動体まわりの流れ場に関する研究は、近年、大型産業機器だけでなく、小型飛翔体および生体模倣ロボットの観点からも注目されているが、そのマクロな構造や流体力特性に終始しており、微視的視点に立ったメカニズムから追求しようとする着想は知見しない。本研究成果である渦度の成長メカニズムの解明は、マクロな渦構造の起源の解明でもあり、今後、流体工学に関する多種の機器の設計・開発に利用可能となる。また、弾性運動体まわりの流れ場は、変形する壁面上に発達する境界層、渦度の成長、はく離への影響という現実的に抱えられる流体構造連成問題であり、この問題の解決は、今後の流体工学、さらには、「工学」の進歩に繋がる。

研究成果の概要(英文)：The growth Mechanism in the vorticity in a vicinity of the wall of an elastic airfoil is investigated by FSI simulation using ANSYS 17.0/ANSYS CFX 17.0 and PIV measurement. The large spatial gradient region on the wall is formed by the elastic deformation in the elastic airfoil. When the spatial gradient on the wall becomes also large, the vorticity with clockwise rotation becomes wider and thicker. When the time variation of the spatial gradient on the wall changes linearly, the vorticity on the wall grows and moves to the trailing edge. On the other hand, when the time variation of the spatial gradient on the wall becomes constant, the vorticity on the wall grows but it stays on the wall. That is, the spatial gradient on the wall is a key parameter for the growth of the vorticity.

研究分野：流体工学

キーワード：非定常流れ はく離 翼 非定常運動 渦

1. 研究開始当初の背景

弾性変形と運動により作り出される流れ場は、流体構造連成問題として位置付けられ、渦流れ、はく離に関する基礎流れから、流体機械の振動・騒音抑制、バイオメテックス分野に至るまで、近年、注目されている流れ場である。また、最近では、小型飛翔体 (Micro-Air-Vehicles) の開発競争が盛んになり、羽ばたき型は、環境に調和し、単純な機構で、小型化が容易とされているものの、未だ実用化には足踏み状態にある。その大きな理由は、翅の変形に伴う複雑な渦流れ機構が明らかにされていないことにある。これらの解明の軸となる生物の羽ばたき機構解明も国内外で盛んに行われているが、申請者はこの研究熱を先導し、世界で初めて無尾翼・羽ばたき飛翔ロボットの開発に成功した。その一方で、もう一方の軸となる剛体・弾性運動翼まわりの流れ場に関する研究も盛んに行われているが、多数のパラメータにも関わらず、各条件下での結論付けが多く、パラメータの精査はなされておらず、その巨視的 (マクロ) な渦構造と流体力特性の関連付けに留まっている。申請者は、この方面でも運動翼まわりの流れ場に関する研究熱を先導してきた。これまでに、蝶の飛翔、羽ばたき飛翔ロボット、運動翼まわりの流れ場については、安定飛翔する羽ばたき飛翔ロボットの翅の曲げ剛性と羽ばたき周波数の組合せ領域が存在すること、羽ばたき飛翔ロボットと蝶の翅上には同等の渦輪が形成されることを明らかにし、また、自由飛翔する蝶の後流に L 字状に形成される渦輪群とその渦輪内部の増速流を定量的に明らかにした。さらには、蝶の翅上の渦輪の動的挙動の非定常揚力への寄与だけでなく、運動量理論によるその非定常揚力の推定手法を構築した。その一方で、弾性運動翼まわりの渦流れについては、剛体・弾性運動翼のマクロな後流構造解明とその翼後縁振幅を基準とした  $St$  数への帰納化を導き、弾性運動翼後縁から後流へと放出される (巻き上がる) 高渦度の渦を定量的に捉えるだけでなく、弾性運動翼の後流構造と非定常流体力の単位曲げ剛性あたりの  $St$  数の 2 乗への帰納化も示した。さらには、弾性運動体から巻き上がるマクロな後流構造と非定常流体力特性は、無次元曲げ剛性  $K(E,I)$  と  $St$  数に帰納できることを明らかにし、このことは、飛翔ロボットの翅の曲げ剛性 ( $K(E,I)$ ) と羽ばたき周波数 ( $St$ ) も説明できる。しかしながら、弾性変形と運動が作り出すマクロな後流構造は無次元パラメータにより整理できたが、その構造をなすまでの渦の成長メカニズムが不明であった。そのため、次のステップとして、弾性体の変形とそのダイナミックな運動による境界層を含む壁面近傍の渦度の成長に注目し、微視的視点に立ち、弾性運動翼壁面近傍に生成される連続的渦度の動的挙動は、後部駆動翼壁面近傍に生成される離散的渦度と大きく異なること、さらには、剛体翼壁面近傍には、この連続的渦度が生成されないことを明らかにした。また、弾性翼壁面近傍に生成された渦度は、回転成分を強化しながら成長し、高渦度の渦を放出すると推論でき、一方、弾性翼のように翼後部のみがピッチング運動する後部駆動翼 (剛体) 壁面近傍で生成された渦度は、離散的であり、成長が弱いために消失し、上/下死点で渦を急激に放出すると推論できる。すなわち、弾性翼と後部駆動翼では、壁面近傍で成長する渦度の成長勾配が異なると予想できる。そのため、変形と運動が渦度の成長勾配にどのように寄与し、高渦度の渦として放出されるのか、また、これらが前縁はく離渦にどのようにフィードバックしているかを明らかにすることでその成長メカニズムを明らかにできると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、弾性変形する運動体のダイナミックな運動により、境界層を含む壁面近傍の渦度の成長は、壁面の移動速度、または、その速度勾配に寄与している推論を証明し、渦度の成長に寄与するパラメータを見出すことを目的とする。また、弾性運動翼壁面近傍では、渦度が回転成分を強化しながら連続的に成長し、高渦度の渦として放出されるまでの成長メカニズム、渦の減衰率に注目した後流へ放出された渦の特性、さらには、これらの前縁はく離渦の動的挙動へのフィードバック効果も明らかにする。これらのことを基盤とし、弾性・運動・渦・流体力特性に対する流れ場の基礎メカニズムを明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 二次元弾性運動翼壁面近傍の渦度の成長に寄与するパラメータとそのメカニズムを明らかにするために、流体構造連成解析による数値シミュレーションとPIV解析のハイブリッド解析より、壁面近傍の渦度の時間発展と壁面の移動速度、その速度勾配との関連付けによる渦度の成長に寄与するパラメータを精査する。特に、剛体翼、後部駆動翼との比較による弾性翼の渦度の成長を比較し、弾性運動翼壁面近傍の渦度の成長に寄与するパラメータとその成長メカニズムにアプローチする。
- (2) 二次元弾性運動翼壁面近傍を成長し、後流へと放出された渦の特性についても明らかにする。特に、弾性翼壁面上を成長し、後流へ放出された渦の減衰率の定量的評価を渦の特性と関連付け、その渦の特性を明らかにする。

## 4. 研究成果

- (1) 弾性翼は、弾性変形することにより、壁面近傍の広範囲に強い渦度をもつ渦を成長させることが可能となる。特に、ヒービング運動の上死点から下死点に動く時に、下向きの弾性変形が大きくなるため、翼背面の壁面近傍には、剛体翼に比べて、時計方向回転の強い渦が広範囲に成長する。
- (2) 弾性翼の壁面近傍に成長する渦は、その第二不変量が大いことから、弾性変形により成長する壁面近傍の渦の渦度は、回転成分が支配的であることが明らかになった。このことから、壁面近傍において成長した渦は、最終的に、翼後縁から後流へと巻き上げられ、放出され、強い渦度を持つ渦として後流構造を決定できる。そのため、弾性翼後流に形成される後流構造（渦列）は、剛体翼に比べ、高い渦度をもつ渦列であることが明らかとなった。
- (3) 弾性翼壁面近傍には、回転成分が支配的な渦度が後部壁面に存在するために、壁面近傍には、境界層が生成される。特に、弾性翼が上死点から下死点に動き、その後部の弾性変形が非常に大きくなる際には、境界層に運動量を与えているかのような速度分布になることが明らかになった。

- (4) 弾性運動翼に働く非定常揚力は、ヒービング運動の上死点からさらに大きくなる。これは、翼前縁から巻き上がった前縁はく離渦の成長の遅れに寄与していることが定量的可視化 (PIV) 計測からも明らかになった。
- (5) 壁面の空間勾配の時間変化とその渦度の成長について考察した結果、壁面の空間勾配の時間変化が線形的に変化する時、すなわち、弾性変形が後縁に進むにつれて大きくなる時、壁面近傍の渦度は成長するだけでなく、その渦度は、後縁側へ移流する。その一方、後縁近傍の空間勾配の時間変化がほぼ一定となる時、すなわち、弾性変形は大きくても後縁近傍がほぼ同じ割合で変形している時には、渦度は成長こそするものの、その後縁側への移流は小さくなる。これらのことから、壁面が瞬間的に変化する際に、壁面近傍に生成された渦度は、時間とともに成長していることがわかった。
- (6) 第二普遍量を比較した結果、弾性変形が後縁に進むにつれて大きくなる時には、その渦度は大きくなるだけでなく、回転成分が主となることも明らかになった。このことより、壁面近傍に生成され、成長する渦度は、定量的にも発達していると言える。
- (7) 弾性運動翼壁面の空間勾配は、渦度の成長に強く寄与していると考えられ、壁面の空間勾配が大きいと、その壁面上の渦度は大きく成長する。特に、その渦度が定量的に大きくなるだけでなく、その移動 (移流) に寄与していると考えられる。

#### 参考文献

- (1) P.Rojratsirikul, et al., “Unsteady fluid-structure interactions of membrane airfoil at low Reynolds numbers”, *Exp Fluids*(2009), pp. 859-872.
- (2) L.Tregidgo et al. , “Unsteady fluid-structure interactions of a pitching membrane wing”, *Aerospace Science and Technology* 28 (2013), pp. 79-90.
- (3) M.Amin Nikbakht et al. , “An investigation on the flow behavior in the airfoil of a flapping wing”, *International Journal of Engineering Works*, Vol. 5, Issue 9 (2018), pp. 138-146
- (4) 淵脇正樹 他 “非定常動翼後流の渦流れと非定常推進力”, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 72, No. 728 (2007), pp. 922- 929.
- (5) Tomoki Kurinami et al. , “Vortex flow developed in the vicinity of a wall of an elastic heaving airfoils and its wake structure”, *Journal of Fluid Science and Technology*, vol 6, No 4 (2011), pp. 562-574

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 刀根千玖沙, 淵脇正樹
2. 発表標題 弾性運動翼壁面上の渦度の成長過程
3. 学会等名 日本機械学会第97 期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 刀根千玖沙, 淵脇 正樹
2. 発表標題 運動翼の弾性変形が作り出す渦度とその成長
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Fuchiwaki
2. 発表標題 Dynamic Behavior of Leading Edge vortex and Vorticity on Suction Surface of a Heaving Elastic Airfoil
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Critical flow dynamics involving moving/deformable structures with design applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki. Fuchiwaki, Aphaiwong Junchangpood
2. 発表標題 Growth of Vortcity in a Vicinity of Wall of an Elastic Moving Airfoil
3. 学会等名 The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 重信樹, 瀧脇正樹
2. 発表標題 弾性運動翼壁面上の渦度の成長
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 刀根千玖沙, 瀧脇正樹
2. 発表標題 弾性運動翼壁面上を発達する渦度
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大井貴登, 瀧脇正樹
2. 発表標題 渦法による運動翼まわりの流れ解析
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Fuchiwaki, Aphaiwong Junchangpood
2. 発表標題 Dynamic Behavior of Vortices Rolled up from a Heaving Elastic Airfoil by a FSI simulation
3. 学会等名 The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池田拓士, 瀧脇正樹
2. 発表標題 弾性運動翼の弾性変形部壁面近傍の渦度の成長
3. 学会等名 2017年可視化情報全国講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池田拓士, 瀧脇正樹
2. 発表標題 はく離領域にてヒービング運動する弾性翼後縁の弾性変形とその非定常揚力
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 重信樹, 瀧脇正樹
2. 発表標題 ヒービング運動翼の前縁はく離渦とその背面を成長する渦度
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考