

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420126

研究課題名(和文) Re数, St数, 曲げ剛性により決定できる弾性翼・薄膜まわりの渦流れの解明

研究課題名(英文) Study on Vortex Flow around Elastic Airfoil and Thin Film Determined by Reynolds number, Strouhal number and Bending Stiffness

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・准教授

研究者番号：60346864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：断面が一様でない弾性翼の曲げ剛性は、重心位置の厚みおよびスパン長さを考慮することで、形状および厚みに関わらず一意に決定され、曲げの特性および流体における壁面の移動境界の条件を決める重要なパラメータになる。ヒービング運動する弾性翼の非定常流体力特性は $St^2/K$ に強く依存し、臨界レイノルズ数以下の領域では、その効果は非常に小さい。弾性薄膜の前縁から巻き上がるLEVと端から巻き上がるTVが強く干渉し、渦輪を形成する。渦輪は、主流に対して傾いて後流へと発達することで、薄膜の後流遠方でさえも、増速流が生じ、弾性薄膜には、ピッチング一周期あたりのほとんどで大きな推進力が働く。

研究成果の概要(英文)：The bending stiffness of an elastic airfoil with a non-uniform cross-section is uniquely determined by the thickness at the position of the center of gravity and the span length, independent of the shape or thickness of the airfoil. It is an important parameter that determines the bending characteristics and the moving boundary conditions at the wall surfaces in the fluid. The characteristic of dynamic forces acting on a heaving elastic airfoil depends on the ratio  $St^2/K$ . In the regime below the critical Reynolds number, the impact of this parameter is extremely small. For a thin film, the LEVs produced from the leading edge and the TVs produced by the trailing edge interfere strongly and form a vortex ring. An accelerating flow arises even far into the wake of the thin film, because the vortex rings evolve towards the wake at an incline with respect to the main flow, and a substantial propulsive force is induced over almost the entire pitching cycle for an elastic thin film.

研究分野：流体力学

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

近年、世界各地で自然災害が頻発し、被災者の発見・救助は困難を極めるだけでなく、人間の侵入が困難な大事故も引き起こす。また、欧米では、不審者の監視技術システムの開発が盛んに行われ、安全・安心の社会の実現のための小型飛翔体 (Micro-Air-Vehicles (MAVs)) の開発が盛んに行われてきたが、足踏み状態にある。その多くは、ローター型であるが、複雑な構造、操作性が悪く、環境に調和した監視技術システムへは不向きである。一方、羽ばたき型は安定性・操作性に優れているものの、尾翼が必須とされ、昆虫の飛翔には程遠いのが現状である。その大きな理由は、昆虫の翅の運動機構のみならず、低  $Re$  数領域における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。これらの解明の一方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、パラメータの洗練はなされておらず、弾性が流れ場に与える影響も明らかにされていない。申請者は、この方面でも非定常運動翼まわりの流れ場に関する研究熱を先導し、蝶の飛翔、飛翔ロボット、運動翼まわりの流れ場について以下のことを明らかにしてきた。(1) 蝶の翅脈の配置と弾性の関連付けと、翅の運動の幾何学的解析、(2) 自律飛翔する無尾翼・羽ばたき飛翔ロボットの開発、(3) 羽ばたき飛翔ロボットの最重要パラメータの抽出、(4) 蝶と羽ばたき飛翔ロボットの翅上に形成される同等の渦輪とその動的挙動、(5) 剛体運動翼の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、(6) 弾性運動翼後縁から巻き上がる渦の成長を支配する翼後縁加速度の効果。これらの結果より、蝶の種類に依らず、また、安定飛翔する羽ばたき飛翔ロボットの翅上には同等の渦輪が形成されることから、 $Re$  数、 $St$  数 (運動)、 $K(E,I)$  (曲げ剛性) の組み合わせにより、翅まわりの流れ場とその流体力特性は同等となることが推論できる。すなわち、弾性とその運動により作り出される複雑な渦流れは、 $Re$  数、 $St$  数 (運動)、 $K(E,I)$  により決定できる領域があり、その領域内で、 $Re$ 、 $St$ 、 $K(E,I)$  のバランスにより、渦流れは分類されることが予想できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、弾性運動翼から発達する渦流れと非定常流体力特性に関わるパラメータの定式化と  $Re=10^3$  における弾性薄膜まわりの複雑な渦流れが、 $St$  数と  $K(E,I)$  により決定できる領域の証明、それらのバランスによる渦流れの分類と弾性の効果を解明し、さらに

は、乱流域近傍 ( $Re=10^4-10^5$ ) での  $St$  数と  $K(E,I)$  により決定できた渦流れのダイナミクスの解明を目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) ピッチング/ヒーピング運動する二次元弾性運動翼の後流構造と非定常流体力特性を PIV 計測実験と非定常流体力測定実験により明らかにし、これらに寄与するパラメータを洗練し、渦流れと非定常流体力特性を  $Re$  数、 $St$  数、曲げ剛性により定式化する。定式化が困難な領域については、定式から逸脱するパラメータの理由と弾性の効果を解明する。
- (2) 続いて、蝶と同等の  $Re$  数領域において、ピッチング/ヒーピング運動する三次元弾性薄膜まわりの渦流れが  $St$  数、曲げ剛性により決定できる領域を証明し、その渦流れを分類することで、弾性が流れ場に与える効果を解明する。特に、渦流れの挙動、非定常流体力特性、羽ばたき飛翔ロボットの飛翔性能の関連付けより、 $St$  数と  $K(E,I)$  による渦流れを分類し、弾性が渦流れと非定常流体力に与える効果を解明する。
- (3) 最終的に、 $Re=10^3$  で得られた  $St$ 、 $K(E,I)$  の領域が乱流域近傍 ( $Re=10^4-10^5$ ) で、どのように変化し、その渦流れの構造・挙動がどのように変化するかを明らかにし、 $Re$ 、 $St$ 、 $K(E,I)$  による定式化を試みることで、流体、運動、剛性に関する運動・変形・渦・流体力の現象のメカニズムを解明する。

## 4. 研究成果

- (1) ヒーピング運動する二次元弾性運動翼の後流構造と非定常流体力特性に寄与するパラメータを洗練し、渦流れと非定常流体力特性を  $Re$  数、 $St$  数、曲げ剛性 ( $E, I$ ) により定式化することを目指した。特に、渦流れ構造と非定常流体力特性 (揚力、推進力) の  $Re$  数、 $St$  数、( $E, I$ ) による定式化、さらには、定式から逸脱するパラメータの理由を明確にし、弾性の効果を明らかにすることを目的とし、以下の知見を得た。

断面が一様でない弾性翼の曲げ剛性は、重心位置の厚みおよびスパン長さを考慮することで、形状および厚みに関わらず一意に決定され、曲げの特性および流体における壁面の移動境界の条件を決める重要なパラメータになることがわかった。

ヒーピング運動する弾性翼の曲げの流体力への効果を明らかにするために、単位曲げ剛性あたりの流体力を考え、それが  $Sr^2$  および  $K$  に関係することを明らかにし、新たに  $Sr^2/K$  を定義することで、その流体力特性が  $Sr^2/K$  に依存し、臨界レイノルズ数以下の領域では、その効果は非常に小さいことを明らかにした。

低  $Sr^2/K$  では、弾性運動翼の弾性変形

が非常に小さくなるため、翼の形状および厚みにより、それらに働く推進力は異なる。弾性変形が小さい場合、翼面近傍における速度勾配 $\partial v/\partial x$ が、翼面の空間勾配に強く影響されるためである。その一方で、弾性変形が十分に大きい高 $St^2/K$ では、弾性運動翼に働く非定常推進力は、 $St^2/K$ に強く依存し、翼の形状およびヤング率の影響は小さい。弾性変形により、翼形状に依らず、翼面の空間勾配および翼面近傍の速度勾配 $\partial v/\partial x$ が大きくなるためである。

- (2) ヒーピング運動する三次元弾性薄膜まわりの渦流れ構造とその非定常流体力特性に注目し、弾性変形がこれらに与える効果、さらには、その渦流れ構造の生成メカニズムを明らかにすることを目的とし、以下の知見を得た。

三次元弾性薄膜から巻き上がる前縁はく離渦(LEV)は翼端渦(TV)と干渉し、弾性薄膜まわりに渦輪を生成する。薄膜弦方向の弾性変形により、薄膜の端に沿って巻き上がるTVは主流に対して大きく傾くために、後流の渦輪は傾いて発達する。さらには、薄膜スパン方向の弾性変形により、LEVのTVへの干渉による巻きつきが強くなるために、渦輪の循環は強くなる。すなわち、大きな推進力が働く渦構造を形成するためには、薄膜弦方向およびスパン方向の大きな弾性変形が重要である。

また、三次元弾性薄膜まわりに生成される渦輪の生成メカニズムとして、弾性薄膜の端から巻き上がるTVには、裏面のLEVが巻きつくように干渉することがわかった。弾性薄膜は薄膜弦方向の弾性変形によりTVが主流に対して傾き、スパン方向の弾性変形によってLEVとTVの干渉が強くなる。そのため、弾性薄膜が形成する渦輪は主流に対して大きく傾き、LEVとTVが巻きついた渦構造が明確になる。その結果、薄膜弦方向およびスパン方向に大きく弾性変形する薄膜では、その後流で大きな傾きおよび循環を持った渦輪を形成する。そのため、薄膜後流の速度分布は大きな増速流が発生する。剛体薄膜まわりにも同様の渦輪が形成されるものの、LEVとTVの巻きつきが弱いために、渦輪は主流に対して傾くことなく後流に発達し、その結果、増速流も小さく、剛体薄膜が生み出す非定常推進力も小さい。すなわち、弾性薄膜は弦方向の弾性変形により大きな推進力を生み出し、さらには、スパン方向の弾性変形により、その推進力をさらに大きくすることが可能となる。

- (3) ヒーピング運動する三次元弾性薄膜まわりの渦流れ構造とその非定常流体力特性に注目し、弾性変形がこれらに与える効果、さらには、その渦流れ構造の生成メカニズムを明らかにすることを目的とし、以下の知見を得た。

ヒーピング運動する弾性薄膜は弦方

向の弾性変形が大きい場合に推進力を生み出し、さらには、そのスパン方向の弾性変形が大きくなることで、さらに大きな推進力を生み出すことが可能となる。その理由は、弦方向の弾性変形が主流方向へ流れを誘起する渦を形成し、さらには、スパン方向の弾性変形により、その渦がさらに強化されるためである。

ピッチング/ヒーピング運動する弾性翼・薄膜まわりの巻き上がる渦の特性を明らかにするために、はく離領域において非定常運動する渦の成長・発達過程について調べた。その結果、運動による弾性変形により、弾性翼・薄膜の相対迎え角が減少することで、剛体翼に比べ、前縁はく離渦の成長が遅れる。また、相対迎え角が剛体翼に比べて小さくなる $1.0 < \alpha/T < 1.5$ において、弾性翼に働く非定常揚力の変化率は剛体翼と異なることから、弾性翼の相対迎え角が、前縁はく離渦の挙動および非定常流体力に強く影響するパラメータであることがわかった。

弾性変形により、弾性翼の壁面の空間勾配が変化することで、その速度勾配も変化するために、弾性翼面上には回転成分の強い渦度が形成され、弾性変形部で生成された渦度は、剛体部である前縁近傍の速度勾配にも強く影響を及ぼし、前縁はく離渦の成長にも影響していることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) 淵脇正樹, 田中和博, 自由飛翔する蝶の後流の三次元渦構造, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833, 2016, DOI: 10.1299/transjsme.15-00425, 査読有
- (2) Masaki Fuchiwaki, Taichi Kuroki, Kazuhiro Tanaka and Takahide Tabata, Dynamic Behavior of the Vortex Ring Formed on a Butterfly Wing, Experiments in Fluids, Vol. 54, 2013, pp.1450-1461, 査読有

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Characteristics of Dynamic Forces acting on Elastic Heaving Airfoil in a Separation Region, Proc. of the 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2015 (DVD-ROM), 2015年12月16-18日, タイ・ホアヒン, 査読有
- (2) Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Wake Structures of Heaving Elastic Airfoils covered with walls, Proc. of the 26th International Symposium on Transport Phenomena, 2015 (DVD-ROM), 2015年9月27日-10月1日, オーストリア・ウィーン, 査読有
- (3) Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Vortex Rings formed behind a Free-Flight

- Butterfly and Their Dynamic Behaviors, Proc. of the International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2015 (DVD-ROM), ISBN 978-3-319-30602-5, 2015年6月15-19日, スウェーデン・ストックホルム, 査読有
- (4) Aiko Shimada, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Growth of vortex rolled up from moving thin airfoil and their angular momentum, Proc. of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering 2015, AJK2015-15271, 2015 (DVD-ROM), 2015年7月26-31日, 韓国・ソウル, 査読有
- (5) Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Interaction of Vortices Rolled Up from a Moving Elastic Thin Film with Low Aspect Ratio, Proc. of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering 2015, AJK2015-12284, 2015 (DVD-ROM), 2015年7月26-31日, 韓国・ソウル, 査読有
- (6) Aiko Shimada, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Momentum thickness of heaving rigid and elastic thin airfoil, Proc. of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, ID O-32, 2014(DVD-ROM) 2014年11月17-20日, 愛知県名古屋市, 査読有
- (7) Taichi Kuroki, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Dynamic Behaviors of Vortex Rings Rolled up from Moving Body and Their Dynamic Forces, Proc. of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, ID O-20, 2014(DVD-ROM), 2014年11月17-20日, 愛知県名古屋市, 査読有
- (8) Masaki Fuchiwaki, Taichi Kuroki and Kazuhiro Tanaka, Growth of Vortex Structure around a Butterfly Wing in the Free Flight, Proc. of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, ID O-18, 2014(DVD-ROM) 2014年11月17-20日, 愛知県名古屋市, 査読有
- (9) Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Characteristics of Dynamic Thrust Acting on Elastic Heaving Airfoils by Strouhal Number and Bending Stiffness, Proc. of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014 (DVD-ROM) 2014年11月5-7日, タイ・クラビ, 査読有
- (10) Masaki Fuchiwaki, Taichi Kuroki, Kazuhiro Tanaka and Takahide Tabata, Three-dimensional Vortex Structure around a Free Flight Butterfly, Proc. of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting and 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, FEDSM 2014-21303, 2014 (DVD-ROM), 2014年8月3-7日, アメリカ・シカゴ, 査読有
- (11) Masaki Fuchiwaki, Tetsushi Nagata and Kazuhiro Tanaka, Dynamic Forces acting on Elastic Heaving Airfoils based on the Bending Stiffness Considerations, Proc. of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting and 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, FEDSM 2014-21302, 2014 (DVD-ROM), 2014年8月3-7日, アメリカ・シカゴ, 査読有
- (12) Masaki Fuchiwaki, Takuya Kawahara and Kazuhiro Tanaka, Vortex Pairs Formed behind a Butterfly in Free Flight, The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Proc. of the 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering, pp. 143, 2013 (DVD-ROM), 2013年10月16-18日, タイ・パタヤ, 査読有
- (13) Taichi Kuroki, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Dynamic Lift Produced by Vortex Ring over a Butterfly Wing, Proc. of the 4<sup>th</sup> International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, ID ICJWSF2013-1148, (DVD-ROM), 2013, 2013年9月17-21日, 愛知県名古屋市, 査読有
- (14) Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, The Growth of Vortices in the Vicinity of a Wall of Elastic Moving Airfoils, Proc. of the ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, ID FEDSM 2013-16362, 2013 (DVD-ROM), 2013年7月7-11日, アメリカ・ネバダ・Incline Village, 査読有
- (15) Taichi Kuroki, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Characteristics of Dynamic Force Generated by a Flapping Butterfly, Proc. of the ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, ID FEDSM 2013-16363, 2013 (DVD-ROM), 2013年7月7-11日, アメリカ・ネバダ・Incline Village, 査読有
- 〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.vortex.mse.kyutech.ac.jp>
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
淵脇 正樹 (FUCHIWAKI Masaki)  
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授  
研究者番号：60346864
- (2)研究分担者  
田中 和博 (Kazuhiro Tanaka)  
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授  
研究者番号：80171742