

論文内容要旨 (和文)

平成31年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 李 鹿 博 華



論文題目 Passive control of three-dimensional wake flow
behind a surface-mounted low-aspect-ratio cylinder

(平板上に置かれた低アスペクト比円柱の三次元後流の受動制御)

平板上に置かれた有限長円柱まわりの後流は先端面と、円柱と平板との接合点の流れによって複雑な三次元流れを引き起こし、無限長円柱の後流と異なり、そのアスペクト比が後流構造に大きく影響する。円柱まわりの三次元流れの研究は水中探査機、航空機、新幹線のパンタグラフの支柱、自動車、建造物、冷却塔、煙突、防波堤などの多くの工学的応用の面において重要な意味がある。有限長円柱は、その後流が引き起こす圧力変動が流体後流の渦構造の振動の原因となる。また、空力設計および最適化における有限長円柱の流れのダイナミクスを理解することも重要である。

これまで、有限長円柱まわりの三次元流れ構造はよく研究されており、主に円柱側面から発生するカルマン渦、馬蹄渦、円柱と壁の接合部付近で形成されるベース渦、先端から生じる先端渦から構成されることがわかっている。一方、低アスペクト比円柱まわりの後流構造は先端渦、ベース渦、馬蹄渦により構成され、カルマン渦は発生しない。アスペクト比が非常に低い円柱の場合には、先端面からはく離する流れは地面に当たる前に側面からはく離した渦と相互作用するため、アーチ渦が形成することがわかった。ベース渦は、先端渦とは反対の方向であり、壁から離れるアップウォッシュを引き起こした。低アスペクト比の場合、ダウンウォッシュの流れは後流全体に影響する。しかし、低アスペクト比円柱の渦誘起抵抗や振動抑制に関する基礎的研究はほとんど文献で見られない。これまで、吸い込み、吹き出し、分離板、表面を粗くする素子のような境界層受動制御技術は無限長円柱においてよく研究されているが、低アスペクト比円柱の後方と先端面のはく離領域を制御する研究についてほとんど行われていない。

本研究は平板上に置かれた低アスペクト比円柱後方のはく離領域と先端面の渦を制御することを目的とし、以下の三つの受動制御法を新たに提案した。(1) 先端面と側背面を貫通する傾斜穴を設ける方法 (RIH)。円柱後方に吸込み、先端面に吹き出しを発生させる。(2) 円柱前方と後方面を貫通する水平穴を設ける方法 (HH)。水平穴から後方に吹き出しを発生させる。(3) 側前面と先端面を貫通する傾斜穴を設ける方法 (FIH)。先端面に吹き出しを発生させる。本研究で使用了実験モデルは直径と高さとも70 mm (アスペクト比1) のアクリル製の円柱である。穴の直径と位置による制御効果の違いを検討するため、三種類の穴の直径と位置の高さをそれぞれ変化させた。本研究では回流水槽において、平板上に置かれた円柱のまわり流れの速度分布をレイノルズ数7000~14000の範囲で二次元PIVと三次元高解像度Tomo-PIVを用いて計測した。そして、通常円柱と各種の穴付き円柱の後流に関する平均流線、平均速度成分、平均渦度、レイノルズ応力、乱流運動エネルギー、Q値、スペクトル、瞬時の流れ構造を解析した。さらに、三次元ウェーブレット変換と三次元POD解析により各スケールの三次元渦構造を解明した。

以上の研究内容は本論文において十四章から構成される。

第一章では、本研究の背景、流れ制御、ウェーブレット変換、従来の研究から本研究へのアプローチや研究目的について述べている。

第二章では、多次元ウェーブレット変換の基礎理論について紹介している。

第三章では、流体力学における三次元POD解析の応用について記述している。

第四章では、本研究の実験モデルや二次元PIVの実験装置、実験方法について述べている。

第五章では、本研究の三次元高解像度Tomo-PIV計測における実験装置と実験方法について述べている。

第六章では、ナビエ・ストークス方程式の分析より本研究の三次元流れ構造はレイノルズ数、アスペクト比、穴の種類、穴の直径比によって相似することを示している。二次元PIV計測結果より、通常円柱、RIH円柱、HH円柱、FIH円柱の後流構造は本実験の範囲内においてレイノルズ数によって変化しないことが示された。また、各円柱モデルにおいて直径10mmの穴の円柱は後流構造の制御に最適であることがわかった。

第七章では、二次元PIV計測における通常円柱とRIH円柱の後流構造の比較について分析し、RIH50円柱の後方のはく離領域は、通常円柱よりも明らかに小さくなることがわかった。RIH35とRIH20円柱は先端面の渦を有効的に減少させた。また、渦度、レイノルズ数、TKEは穴の吸込みによって明らかに抑制され、抗力が減少したことが示された。

第八章では、二次元PIV計測における通常円柱とHH円柱の後流構造の比較について分析を行った。水平穴からの噴流は、渦の形成、円柱後方のはく離域、渦度、レイノルズ数、TKEを抑制し、抗力を減少させた。なお、HH35のはく離域の減少がより明らかであった。

第九章では、二次元PIV計測における通常円柱とFIH円柱の後流構造の比較について解析した。円柱穴の吹出し流により先端面の渦は小さくなるが、後方のはく離領域が大きくなった。その結果、FIH円柱の抗力が増大したことが確認できた。また、本研究で提案している受動制御法は次のように応用できる。RIHとHH円柱は抗力軽減によって熱流体機械の高効率化に適用でき、FIH円柱は波や津波エネルギーを減少させるために防波堤に応用可能である。

第十章では、三次元Tomo-PIV計測、三次元ウェーブレット変換と三次元POD解析により通常円柱の三次元後流構造の分析を行った。円柱の後流においては、アップウォッシュとダウンウォッシュにより発生した3次元W形アーチ渦構造が新たに発見された。アーチ渦構造の頭部形状は、円柱のアスペクト比によるものであることがわかった。さらに、W型アーチ渦は時間平均の中スケールで見られ、M型アーチ渦は大スケールで現れたことが示された。

第十一章では、三次元Tomo-PIV計測におけるRIH円柱の三次元後流構造の分析を行った。RIH円柱のW型アーチ渦の肩での渦度は、通常円柱の渦度よりも小さいことがわかった。W型アーチ渦は穴の影響により、通常円柱の渦よりもゆっくりと崩壊したことが確認できた。

第十二章では、三次元Tomo-PIV計測におけるHH円柱の三次元後流構造の比較について解析した。水平穴からの吹出し流の影響により、W型アーチ渦の傾きが通常円柱よりも大きくなり、W型アーチ渦は弱くなった。HH円柱の大スケール渦構造は通常円柱よりも小さくなり、穴の高さが高くなるにつれて明らかになった。

第十三章では、三次元Tomo-PIV計測におけるFIH円柱の三次元後流構造について分析した。傾斜穴からの吹出し流の影響により大きなダウンウォッシュが発生したため、Wアーチ渦が通常円柱よりも大きくなり、穴の高さとともに減少した。W型アーチ渦と渦のペアはFIH円柱後流の中スケール構造ではっきり見られたことが示された。

最後に第十四章では、本研究で得られた主要な知見をまとめて、本論文の総括とした。

論文内容要旨 (英文)

平成31年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 李 鹿 博 華



論 文 題 目 Passive control of three-dimensional wake flow
behind a surface-mounted low-aspect-ratio cylinder

It is a well-known fact that the flows around a wall-mounted finite length cylinder (WMFLC) exhibit strongly three-dimensional complex structures, especially for a low-aspect-ratio cylinder. Many important engineering applications meet frequently this simple geometry, such as high-speed rail pantographs, aircraft landing gear, control surfaces on aircraft and underwater vehicles, buildings, cooling towers, chimney stacks, automobile, offshore (breakwater) structures and so on. WMFLC wakes are also often a source of unwanted flow-induced noise. It is also important to understand the flow dynamics of WMFLC in aerodynamic design and optimisation.

So far the 3D-dimensional vortical structures of a low-aspect-ratio cylinder wake, which are mainly consist of arch vortex, base vortices, horse shoe vortices and tip-vortices, have been clarified. The vortex shedding from the surface of free end interacts with the vortices occurring from the cylinder side before it reaches to the ground, and the arch-type vortex is formed in the near wake. The base vortices are the opposite direction to the tip vortices and cause an upwash flow departing from the wall. The downwash flow influences the whole wake at the case of the lower aspect ratio. However, few researches on controlling the wake vortices of a short cylinder is found, which becomes a high spot of the present study.

To control and reduce the rear separation region of short WMFLC and the vortex on the free-end surface, the present study proposed three passive control methods: (1) a rear inclined hole passing from the free-end surface to the side of the rear surface (RIH); (2) a horizontal hole passing from the front side surface to the rear surface (HH); (3) a front inclined hole passing from the front side surface to the free end surface (FIH). Then the controlling and non-controlling wake structures of the low-aspect-ratio WMFLC were measured by 2DPIV and 3D high-resolution tomographic PIV in the range of Reynolds number 7000 – 14000 in a circulation water tunnel. The mean streamlines, mean velocity components, mean vorticity, Reynolds shear stresses, turbulent kinetic energy, the Q criterion, the instantaneous flow structures and spectral analysis were examined and compared between the controlling and non-controlling cylinders. Furthermore, 3D orthogonal wavelet multiresolution technique and 3D POD analysis are used to analyze high-resolution Tomo-PIV data. The 3D multi-scale

flow structures and energetic coherent structures around the control and non-control low-aspect-ratio WMFLCs are extracted.

The above research contents consist of fourteen chapters to be written in this paper.

Chapter 1 states the research background of WMFLC wake, flow control and wavelet transform, and proposes the purpose of this paper.

Chapter 2 introduces the basic theory of multi-dimensional orthogonal wavelet transform.

Chapter 3 reviews the application of 3D Proper Orthogonal Decomposition (POD) on fluid mechanics.

Chapter 4 describes the experimental controlling and non-controlling WMFLC models, 2DPIV measurement setup and experimental conditions.

Chapter 5 states the experimental apparatus, methods, and conditions in 3D tomographic PIV measurement.

Chapter 6 provides that 3D flow structures behind a controlling WMFLC are characterized by Reynolds number, aspect ratio, hole diameter ratio, and hole type and position based on the governing equations of WMFLC wake. 2DPIV experiment indicates that the flow structures of standard, RIH, HH and FIH cylinders do not vary with the Reynolds number in the range of this experiment, and the optimal hole diameter of RIH, HH and FIH cylinders is $d = 10 \text{ mm}$ ($d/D = 0.14$) for controlling the WMFLC wake structures.

Chapter 7 discusses the 2DPIV experimental results of RIH cylinder wakes. It is found that the rear recirculation zone of RIH cylinder with $h = 0.71D$ becomes evident smaller than that of the standard cylinder. The RIH cylinders with $h = 0.29D$ and $0.5D$ effectively reduce the separation region of the free end surface. The concentration of vorticity, the Reynolds shear stresses and the turbulent kinetic energy are evidently suppressed by the suction flow of the RIH, which results in the reduction of the drag force the cylinder.

Chapter 8 states the 2DPIV experimental results of HH cylinder wakes. The issuing flow from a horizontal hole leads to suppress the vortex formation and to reduce the rear separation region, the vorticity concentration, Reynolds shear stresses and TKE, which is related to the decrease of drag. Here the reduction of separation zone for the HH with $h/D = 0.5$ is more evident.

Chapter 9 describes the 2DPIV experimental results of FIH cylinder wakes. It is revealed that the FIH cylinders increase the rear separation region and result in the increase of drag although it reduces the size of separation region on the free end surface. The proposed passive control methods in this study may be used to the following practical applications: the RIH and HH cylinders may be adopted as a purpose for increasing thermofluid system efficiency by the drag reduction, while the FIH cylinder may be applied to control the offshore (breakwater) structures for reducing wave and Tsunami energies.

Chapter 10 discusses that 3D multi-scale flow structures behind a WMFLC based on tomographic PIV, 3D orthogonal wavelet transform and POD. It is first found a 3D W-type arch vortex behind the short cylinder, which is originated by the interaction between upwash and downwash flows. The head shape of arch vortex structure depends on the aspect ratio of the cylinder. Furthermore, the W-type head shape arch vortex was extracted in the time-mean intermediate-scale structure, and an M shape arch vortex was found in the time-mean large-scale structure.

Chapter 11 describes the Tomographic PIV results of 3D flow structures behind a wall-mounted RIH cylinder. It is found that the vorticity of RIH cylinders at the “shoulders” of the 3D W-type arch vortex is smaller than that of the standard cylinder. Several parts of 3D W-type arch vortex vortices break down more slowly than that of standard cylinder due to the effect of the hole.

Chapter 12 describes the Tomographic PIV results of 3D flow structures behind a wall-mounted HH cylinder. It is observed that the inclination of the 3D W-type arch vortex is larger than that of the standard cylinder, and the W-type arch structures of HH cylinders become weaker. The 3D large-scale streamwise vortices of the HH cylinders are smaller than that of the standard cylinder, and becomes more evident as increasing the hole height.

Chapter 13 discusses the Tomographic PIV results of 3D flow structures behind a wall-mounted FIH cylinder. It is revealed that the width of 3D W-type arch vortex becomes larger than that of the standard cylinder, and decreases with the hole height since the effect of the blowing flow from the hole causes large downwash. The W-type head shape arch structures and a pair of vortices are clearly observed in the intermediate-scale structures of FIH cylinder wake.

Chapter 14 summarizes the conclusions of this study.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 3 年 2 月 8 日

理 工 学 研 究 科 長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 赤松 正人

副査 峯田 貴

副査 幕田 寿典



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論 文 申 請 者	専攻名 機械システム工学専攻 氏名 李鹿 博華		
論 文 題 目	Passive control of three-dimensional wake flow behind a surface-mounted low-aspect-ratio cylinder (平板上に置かれた低アスペクト比円柱の三次元後流の受動制御)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和 3 年 1 月 20 日 ~ 2 月 2 日
論文公聴会	令和 3 年 2 月 2 日	場 所	工学部 6 号館 315 教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和 3 年 2 月 2 日
学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)			
<p>平板上に置かれた低アスペクト比円柱まわりの後流は、先端面および円柱と平板との接合点の流れによって、複雑な三次元流れを引き起こす。この円柱後方に発生する流れの流動制御は、航空機、新幹線、建造物、防波堤、熱交換器、自動車などの多くの工学的応用において重要である。</p> <p>本論文では円柱後方のはく離領域と先端面の渦を制御することを目的とし、穴付き円柱の三つの受動制御法を新たに提案している。この提案に対して、三次元高解像度 Tomographic-PIV 計測を用いて円柱まわりの複雑な三次元流れを計測し、三次元ウェーブレット変換と POD 法により各スケールの三次元渦構造とエネルギー分布について検討している。</p> <p>本論文は五部（十四章）から構成されており、各部の概要は次の通りである。</p> <p>第一部は、研究の背景、研究目的、基礎流体方程式、ウェーブレット変換および POD 法の基礎理論について紹介し、実験モデル、二次元 PIV 計測および三次元高解像度 Tomographic-PIV 計測の実験装置と実験方法について述べている。第二部は、二次元 PIV 計測により通常円柱と穴付き円柱の後流構造について計測と解析が行われている。結果として、通常円柱後流に比べ、後ろ穴の吸込み流と水平穴の吹出し流により円柱後方のはく離領域が減少するため、抗力低減が可能となることが明らかにされている。さらに、前穴の吹出し流により先端面の渦を制御することはできるが、後方のはく離領域は増大されることを見出している。第三部は、三次元高解像度 Tomographic-PIV 計測における各種円柱の三次元後流構造について計測と解析が行われている。結果として、三次元 W 形アーチ渦構造を新たに発見し、穴付き円柱により、この W 型アーチ渦構造や縦渦などを制御できることを明らかにしている。第四部は、三次元ウェーブレット多重解像度解析と POD 解析を三次元高解像度 Tomographic-PIV 計測データの分析に応用し、各スケールの三次元後流の渦構造とエネルギー分布について検討している。結果として、W 型アーチ渦と先端渦は、時間平均の中スケール構造で抽出され、瞬時のアーチ渦と縦渦は大スケール構造であることが明らかにされている。第五部は、本論文の総括、得られた知見と工学への応用について述べられている。</p> <p>本研究成果の一部は、筆頭著者として、6 報のジャーナル論文（このうち Q1 ジャーナル 3 編 (2021, 2020, 2019), そして Q2 ジャーナル 1 編 (2018)を含む）として公表しており、学位の審査基準を満たしている。また、日本学術振興会特別研究員（DC1）にも採択されている。</p> <p>以上より、本論文の内容は新規性・独自性があり、自ら研究を計画・遂行するための専門的知識を基に研究背景・目的が正しく述べられている。学位論文の構成は適切で、体裁も整っており、記述が論理的で、設定した研究テーマに沿った明確な結論が述べられている。これらの成果は、工学上の貢献度が十分にあると認められ、学位論文としての水準を満たしており、合格と判定した。なお、本論文は研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ない。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>最終試験は、学位論文を中心とし、当該分野の内容に関連する事項について口頭により実施された。その結果、専門知識、スキル、考察能力などは十分あり、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断された。</p> <p>以上より、最終試験を合格と判定した。</p>			