

# 博士学位論文審査要旨

2017年2月17日

論文題目：風洞用ムービングベルト上に設置された物体周りの空力特性とその流体制御に関する研究

学位申請者：井上 達哉

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 平田 勝哉

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 千田 二郎

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 稲岡 恭二

要 旨：

社会の進展とともに、地面近くを移動する物体の空力特性を精度高く計測する事は、重要性を増している。そこで本論文では、地面付近を移動する物体の空力特性を正確に把握すること、さらに、その物体に加わる空気力を低減させるための流体制御手法を提案することを目的としている。つまり、地面付近を移動する物体に加わる空気力を精度高く計測するため、風洞用ムービングベルトを新たに開発している。この装置により風洞内で物体を固定した状態で移動地面を再現し、物体が地表面付近で走行する際の流れの精密測定を可能にしている。本論文では、この装置を用いて、“平板”および“陸上走者”に加わる空気力の高精度計測を実施している。次に、流体制御手法の一つとしてFFJN（リップフロップ・ジェット・ノズル）に関する研究を行っている。本論文では、3種類のFFJNを用いて、形状効果と発振周波数の関係および安定発振領域の特定などの発振特性、ならびに、その発振メカニズムを明らかにしている。

本論文は、全7章で構成されている。第1章は、本論文の序論であり、本論文の研究背景、研究目的、構成を述べている。第2章では、高精度のムービングベルト装置の開発と基本特性、平板を用いた風洞試験に関する基礎研究を論じている。第3章では、開発したムービングベルト装置を用いた風洞試験により、陸上走者が受ける抗力を明らかにしている。第4章では、連結管を有する従来型のFFJNの発振特性を明らかにしている。第5章では、従来型のFFJNの連結管端部の一方のみを閉じたFFJNを用いた研究を実施し発信機構を明らかにしている。第6章では、単純形状を有するFFJNを新たに提案し、その発振特性と発信機構を論じている。第7章は、本論文のまとめであり、ムービングベルトを用いた風洞試験（平板および陸上走者）とその流体制御に関する研究の結論と今後の課題について述べている。

以上、本論文は流れの制御に関する先駆的かつ実用的な研究であり、これらの成果はこの分野の発展に多大なる貢献をなすものである。よって、本論文は博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2017年2月17日

論文題目：風洞用ムービングベルト上に設置された物体周りの空力特性とその流体制御に関する研究

学位申請者：井上 達哉

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 平田 勝哉

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 千田 二郎

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 稲岡 恭二

### 要 旨：

本論文提出者は、2007年3月に、同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を修了した。2013年4月に、同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集 B 編, Vol. 73, No. 725, ならびに、日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, No. 783, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 816, *Journal of Fluid Science & Technology*, Vol. 2, No. 2, , *Journal of Fluid Science & Technology*, Vol. 6, No. 4, 同志社大学ハリス理化学研究報告, Vol. 56, No. 3, 同志社大学ハリス理化学研究報告, Vol. 57, No. 2 (2 編), *Cogent Engineering*, Vol. 3, Issue 1, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, Vol. 4, No. 4 に掲載され、十分な評価を受けている。

2017年1月14日午後3時半より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。更に公聴会終了後、審査委員により論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することが出来た。なお、提出者は、英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力ならびに語学力は充分であることが確認できた。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 風洞用ムービングベルト上に設置された物体周りの空力特性とその流体制御に関する研究

氏名： 井上 達哉

## 要旨：

本論文の目的は、地面付近を移動する物体の空力特性を正確に把握すること、さらに、物体に加わる空気力を低減させるための流体（境界層）制御手法を提案することである。地面付近を移動する物体に加わる空気力を再現するため、風洞内には、ムービングベルトを設置した。ここで、ムービングベルトとは、ローラーに巻き付けたベルトを回転させ、物体が移動する状況を実現させる装置である。つまり、ムービングベルトを用いれば、物体と地面間の相対速度が零ではなくなり、風洞試験において、地面付近を移動する物体に生じる風速分布を再現する事が可能となる。風洞模型は、“平板”と“陸上走者”の二種類を用いて、風洞試験を行った。最初に、簡易形状の平板を用い、ムービングベルトが物体へ及ぼす影響を調べた。解析手法としては、後流の発振周波数の測定、乱れ度の測定、動画や画像の撮影・解析、PIVによる可視化である。次に、実環境で地面付近を移動する物体として、陸上走者を用いた。陸上走者に関する試験では、先導走者、随伴走者の2体の模型を用いて、最適なフォーメーション（随伴走者の抗力が最も低減される位置）を特定した。さらに、流体制御手法の一つである、FFJN（フリップフロップ・ジェット・ノズル）を、地面付近を移動する物体の境界層制御へ応用する事を念頭に置き、研究を行った。FFJNに関する研究では、形状変化と周波数の関係、安定発振領域の特定、発振メカニズムの解明を行った。

本論文は、第1章から第7章の7章で構成される。第1章は、本論文の序論であり、本論文の研究背景、研究目的、構成を述べた。第2章から第7章は、以下の内容を記載している。

第2章では、開発した高精度のムービングベルト装置の基本特性、および平板を用いた風洞試験に関する基礎研究を概説した。ムービングベルトに関する試験では、(1) ハイスピードカメラを用いたムービングベルト速度の測定、(2) レーザー変位計を用いたムービングベルト振動の計測、(3) 熱線流速計を用いたムービングベルト面上の流速分布および乱れ強さ分布の計測、(4) スモークワイヤー法によるムービングベルト面上流れの可視化を行った。その結果、ベルト振動は、2mm未満であり、熱線流速計を2mm程度まで近づけられる事等が分かった。平板を用いた風洞試験（移動地面：ムービングベルト使用）では、平板を地面に近づけると、平板周りの流れ場が大きく変化する臨界高さのある事が分かった。具体的には、平板高さ $h$ 、平板弦長 $c$ とすると、 $h/c=0.2$ で、その周波数は微増することがわかった。この現象は、固定地面（ムービングベルト：不使用）では生じなかった。そこで、 $h/c=0.2$ 付近の流れ場をハイスピードカメラと連続光レーザーを用いて可視化した。すると、移動地面（ムービングベルト：使用）では、地面が移動するため、地面付近の流速が加速され、平板後流に周期的な渦構造が確認出来たが、固定地面では、平板は境界層内に存在し、流速は低く、平板後流に周期的な渦構造を確認することが出来なかった。まとめると、本章では、熱線流速計を用いた流速計測、連続光レーザーを用いた可視化試験により、移動地面、固定地面における平板周りの流れ場の違いを明らかにした。また、風洞試験におけるムービングベルトの必要性を示した。

第3章では、開発したムービングベルト装置を用いて、陸上走者が受ける抗力に関する風洞試験について概説した。陸上走者モデルは、最大二つ（先導走者と随伴走者）用いた。つまり、単独走行時の走者の抗力、および、様々な隊列での二者走行時に随伴走者が受ける抗力について明らかにした。風洞地面は、固定地面及び移動地面を用いた。従来の風洞試験との差異を検討するため、単独走者の場合は、固定地面を用いた場合と移動地面を用いた場合での抗力の増加率を調べた。その結果、増加率（移動地面法を用いた際の単独走者の抗力／固定地面法を用いた際の単独走者の抗力）は、約1.15倍となる事がわかった。これは、移動地面を用いたことによる、地面付近の流速の増加が要因と考えられる。次に、二者走行時に、随伴走者が受ける抗力を調べた。具体的には、随伴走者の設置位置を変化させ、先導走者が存在することによる空気抵抗低減率を調べた。その結果、先導走者の後方に空気抵抗を大幅に低減させる領域（随伴走者の抗力が、先導走者が無い場合と比較して75%低減する領域）のあることを確認した。また、その低減率は、最大で90%になることもわかった。さらに、その低減領域は、固定地面と移動地面で比較した場合、移動地面で、大幅に減少する事がわかった。

第4章では、FFJN (Conventional-type) を用いた研究を概説した。FFJN (Conventional-type) とは、FFJN の両端部を連結管で接続した、従来（1960年代）から研究されている一般的な形状を持つFFJNである。FFJN (Conventional-type) は、従来から研究されているものの、形状パラメータが噴流の発振周波数へ及ぼす影響については、未だ不明瞭な点が残る。そこで、第4章では、FFJN (Conventional-type) の形状パラメータである、連結管長さ  $L$ 、連結管直径  $d$  等が、噴流の発振周波数へ及ぼす影響について明らかにした。その結果、連結管長さ  $L$  が減少するほど、連結管直径  $d$  が増加するほど、 $St$ （無次元発振周波数）は増加する事が分かった。また、本結果を元に、噴流の発振周波数を予測する為の経験公式を求めた。次に、形状パラメータ以外で、噴流の発振周波数を決定づける物理量の検討をした。つまり、高压部から低压部に連結管を通して流れ込む諸量（運動量  $J_M$ 、運動エネルギー  $J_K$ 、質量  $J_P$ ）の時間積分値に着目し、各積分値と噴流の切り換え機構の関係を議論した。その結果、質量流れ（あるいは圧力仕事）を考える事が最も合理的であることが分かった。そして、圧力仕事の時間積分値  $J_P$  の無次元値  $J_P^*$  がある値  $(J_P^*)_{UNV}$  に達すると、噴流は切り換わる事を示した。

第5章では、FFJN (Conventional-type) の片側を閉じたFFJN (Single-port-conventional-type) を用いた研究を概説した。第4章の結果から、未だ解明されていない課題として、噴流付着側の連結管からの流入流れ、もしくは、噴流非付着側の連結管への流出流れのどちらが、噴流の発振へより支配的な影響を及ぼすのか等の疑問が残った。そこで、第5章では、噴流の発振現象を別の観点から調べるため、一方の連結管部分を閉じ、片側のみの連結管からの流量を制御するFFJN (Single-port-conventional-type) を用いた実験を行う。なお、事前の予備実験から、噴流付着側の連結管からの流入流れが、より噴流の発振機構へ強い影響を及ぼしている事を確認した。その為、本章では、連結管からの流入流れに関する物理量のみに着目し、実験を行った。その結果、FFJN (Single-port-conventional-type) においても、 $J_P^*$  が重要なパラメータである事を示した。この事実は、FFJN (Conventional-type) の周波数には、 $J_P^*$  が支配的な影響を及ぼす事を補強する。更に、FFJN (Conventional-type) の切り換え機構を考える時、噴流が付着していない側の諸条件は、噴流の切り換えにはそれほど大きな影響を与えておらず、主に噴流付着側の条件のみによって、発振機構を議論出来る可能性がある事も分かった。

第6章では、FFJN (Simple-type) を用いた研究を概説した。FFJN (Simple-type) とは、第4章や第5章で扱った様なFFJN (Conventional-type) に存在していた連結管を除き、ノズル出口後方に障害物を設置した、従来よりも簡易な形状をしたモデルの事をいう。このタイプのFFJN

(Simple-type) は、FFJN (Conventional-type) と比較して、形状が簡易なため、より故障の心配が少なく、その応用性・汎用性は広いと考えられる。そこで、作動流体に、水と空気を用いて、形状パラメータ変化と安定発振領域を詳細に調べた。さらに、発振現象を低  $Re$  でも調べ、発振の低  $Re$  限界および安定発振領域についても明らかにした。その結果、噴流の安定発振のための  $Re$  下限界は、 $B/b=15$ 、 $c/b=2.5$ 、 $d/b=8$  で得られ、90 程度であった。次に、FFJN (Simple-type) の小型化を想定し、側壁長さを極端に短くした形状で、噴流の発振現象を調べた。その結果、側壁が十分に短い形状でも噴流は発振することがわかった。この現象は、噴流発振装置の小型化に有効であり、特許を取得した。これらの結果は、今後、FFJN (Simple-type) を実用化する上で、重要な基礎研究となる。

第 7 章は、本論文のまとめであり、“ムービングベルトを用いた風洞試験（平板、陸上走者）とその流体制御に関する研究”の結論と今後の課題について述べた。本論文では、目的である“地面付近を移動する物体の空力特性を正確に把握すること、さらに、物体に加わる空気力を低減させるための流体（境界層）制御手法を提案すること”を達成できた。今後は、本研究成果を元とした、実社会での応用が予想される。