

氏名（本籍）	羽二生 稔大（北海道）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	工博甲第227号
学位授与の日付	平成28年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学資源学研究科・生産・建設工学専攻
学位論文題名	The Role of Vortex Ring on Propulsion (推進における渦輪の役割)
論文審査委員	(主査) 教授 中村雅英 (副査) 教授 田子 真 (副査) 教授 三島 望 (副査) 教授 足立高弘 (副査) 学外審査委員 長谷川裕晃

論文内容の要旨

昆虫や鳥の飛翔メカニズムについては、これまで準定常解析を用いた説明がなされてきた。しかしながら、飛翔時の羽の詳細な動作が明らかになると、準定常解析では揚力は生物自身の自重に達しないことが示された。これにより、特に低レイノルズ数領域における生物の飛翔においては、非定常流体力の重要性が指摘されている。この非定常現象では定常時の力の2倍以上もの力が生じることが知られている。こうした非定常流体力の生成には渦の挙動が大きく関係している。飛翔生物は羽を振動させることで渦を生成している。この渦が運動量を生成し、運動量の時間的な変化が非定常流体力となる。昆虫の飛翔時の流れ場に関しては二次元的な計測から前縁剥離渦の存在が明らかになっている。この前縁剥離渦により翼面上に低圧部が形成され、揚力が増加すると言われている。また近年、数値解析や計測技術の進歩により、三次元的な渦の構造が明らかになってきている。羽の羽ばたきによって渦輪を生成し、その渦輪による下向きの運動量の反作用によって飛翔していると考えられる。しかしながら、三次元的な渦(渦輪)の構造や挙動と非定常流体力の関係が十分明らかになったとは言えない。

本研究の目的は、非定常流体力生成メカニズムを渦の三次元構造および挙動から実験的に明らかにすることである。その結果をもとに渦輪の持つ運動量から非定常流体力を算出することを目標とする。その対象として、水泳の推進時に見られる非定常現象に着目した。例えば、クロール泳法におけるS字プル動作は、推進の大部分が手の掻きで得られて

いることを考慮すると、明らかに非定常流体力を活用していることになる。特に、実際の泳者を被験者とした実験結果では、泳者は後方に渦を放出し、手の周りの循環を強め、非定常揚力を活用していることがわかってきている。この現象を、泳者の手のひらを円盤翼に見立て、風洞試験で調べた。S字プルでは、動作中に前縁と後縁が入れ替わるという、昆虫や鳥の羽ばたきでは見られない特徴を有する。こうしたユニークな運動での渦輪の生成と放出を、三次元的に明らかにすることを試みた。また、大きな推進力を得ることが可能なモノフィンについて、力と渦構造の関連を物体後方の流れ場も含め評価する。推進力が大きい場合、渦流れはより下流位置まで顕著に現れる。それにより、渦輪のモデルに対する位置が推進力の生成に与える影響を調べることができる。さらに泳者の場合、扱う無次元振動数とレイノルズ数が生物の飛翔とは大きく異なり、これまでの類似の研究の成果を当てはめることはできない。こうした水泳特有の動作に着目し、非定常現象について調べた。本論文は、第1章から第8章で構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景や目的について述べる。

第2章では、実験方法や装置について述べる。本研究において、三次元的な渦構造を計測するにあたり、実際の泳者では自由に動作のパラメータを変化させることが困難である。そこで、試験模型を機械制御することで、自由にパラメータを変化させ実験を行った。流れ場の計測にはステレオPIV計測を用い、模型後流の複数断面について実施することで、三次元的な渦構造を構築した。また、実際に模型に働いている流体力はロードセルを用いて計測を行った。

第3章では、非定常流体力生成と渦構造の関係を基本的な非定常運動で理解するために、三次元翼に急激な迎角変化(Wagner問題)を与え、流れ場と流体力を計測し比較を行った。急激迎角変化では非定常現象を単純な形で観察することができる。また、円盤翼とデルタ翼を用いて形状の違いによる影響についても調べた。その結果、前縁渦の成長により揚力の大きな増加が見られた。さらに、円盤翼では翼端渦が形成されることで、デルタ翼の場合よりも長く翼停止後も非定常揚力が持続した。つまり、翼近傍の渦の三次元構造とその強さは非定常流体力の変動に関係していることが確認できた。

第4章では、渦の生成について翼動作が与える影響について調べるために、迎角 90° 中心で2種類のピッチング振動(前縁と後縁が入れ替わる運動)を円盤翼に与えた。一つは正弦波で、もう一つの動作は振動数を同じになるように一周期中の角速度に変化を与えた。動作に速度差を与えることで、翼背面の近くにより強い渦の生成が観察された。この強い渦の生成によって、大きな非定常流体力が生じた。

第5章では、翼の三次元構造の違いが渦の構造や挙動に与える影響について調べた。試験翼は円盤翼と矩形翼を用いた。円盤翼では円形の、矩形翼では矩形の渦輪が後流に生成される様子が確認された。円形の渦輪の方が渦は長く後流に存在し、非定常流体力は円盤翼の場合の方が大きくなる。つまり、渦輪の早い崩壊は流体力の減少を招くことが予想される。

第 6 章では渦輪の持つ運動量から推進力の算出するにあたり、モノフィン後流の流れ場と推進力について説明する。迎角 90° 中心でのピッチング振動時の渦輪は複雑であるため、渦輪の構造が比較的単純なモノフィンについて渦輪の構造と推進力を計測した。

第 7 章では第 6 章で説明した渦輪について循環と面積の変化から推進力を算出した。その結果、モノフィンの推進においてはフィンに付随した渦輪について運動量の変化を算出することで、実測した推進力と値、変動ともにある程度の一致が見られた。第 8 章では本研究で得られた結果についてまとめた。

論文審査結果の要旨

昆虫の飛翔や魚の推進メカニズムの解明のために多くの努力が行われてきた。低レイノルズ数領域における生物の飛翔、推進では、非定常流体力を利用していることが指摘されている。非定常流体力は渦が生成する運動量の変化であるため、非定常流体力の生成には渦の構造や挙動と密接に関係している。近年、数値解析や計測技術の進歩により、三次元的な渦の構造が明らかになってきている。また、計測した渦の三次元構造から非定常流体力を算出する試みはなされているが、時間変化する力の算出は成功していない。

水泳推進においても、非定常流体力を利用していることが分かっている。しかし、水泳の推進では、扱う無次元振動数とレイノルズ数が生物の飛翔とは大きく異なり、これまでの類似の研究の成果を当てはめることはできず、流れ場の三次元構造は明らかになっていない。

本論文は、こうした水泳特有の動作に着目し、非定常流体力の生成における渦輪の役割を実験的に明らかにすることを目的とした。そのために、渦輪の持つ運動量から非定常流体力を算出することを目標とした。

第 1 章の序論では、これまでの生物の飛翔、推進における非定常現象の解明にむけた研究について紹介している。特に、渦輪から推進力を求める試みの現状と問題を示し、本論文の目的について述べている。第 2 章では、実験方法や装置について述べている。第 3 章では、三次元翼に急激な迎角変化を与え、三次元的な渦の構造と非定常揚力の変動を比較することで、翼背面における前縁渦の成長が非定常揚力の増加に寄与していることを確認した。また、三次元流れ場において、強い翼端渦の形成は、急激な翼の失速を抑制することを示した。第 4 章では、水泳のクロール泳法の S 字プル動作で代表される前縁と後縁が入れ替わるピッチング振動において、翼動作の違いが流体力と流れ場の与える影響について議論している。振動に速度差を与えると、翼の近傍において強い渦度を持つ渦が形成される際に大きな流体力が形成され、翼近傍の渦の成長が非定常流体力の生成に大きく寄与していることを明らかにした。第 5 章では、円盤翼と矩形翼を用いて、翼の三次元構造の違いが渦の構造や挙動に与える影響について調べ、円盤翼後流に形成される円形の渦輪は、矩形翼後流に形成される矩形の渦輪よりも長く後流に存在することを明らかにした。渦が

長く後流に存在することで、流体力の平均値が大きくなる可能性が示された。第6章では渦輪の持つ運動量から推進力を算出するにあたり、より大きい力が生じ、後流まで渦輪が存在するモノフィンについて流れ場と推進力について説明している。第4章で得られた結果と同様に、速度変化を与えることで生成される渦の強さと推進力が増加することを示した。第7章では第6章で説明した渦輪について循環と面積の変化から推進力を算出している。その際、どこに存在する渦輪が推進力に寄与するか調べ、フィンの動作によってフィン面上で成長している渦の運動量から求めた推進力が、実測した推進力と値、変動ともにある程度の一致することを示した。第8章では、本論文で得られた結果についてまとめている。

以上より、本論文では、昆虫の飛翔とは異なる無次元振動数、レイノルズ数の領域における渦の三次元構造を実験的に明らかにし、渦輪から推進力を算出した。こうした成果は、非定常流体力の生成メカニズムの解明に向けて大きな進展があったと言える。このように、本論文は、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認められる。

最終試験では、博士論文の内容について口頭発表および質疑応答を行った。口頭発表では以下の内容について説明がなされた。昆虫の飛翔には非定常効果が重要であり、これまで非定常流体力と渦の関係解明のために多くの研究が行われてきた。また、非定常流体力の利用は水泳の推進においても考えることができる。しかし、水泳の推進において渦の三次元構造や渦が実際にどのように推進力の生成に寄与しているかはわかっていない。そこで水泳特有の動作に着目し、非定常流体力と渦構造の関係を明らかにするために、翼形状や振動動作の違いが流体力や渦構造に与える影響を調べ、最終的に実験的に調べた渦輪の運動量から推進力を試みた。その結果、翼面上で翼の動作によって成長する渦の運動量から求めた推進力が最も計測した値と一致し、主流方向に運動量を持った渦を生成する際に、推進力が生成されることを示した。口頭発表の内容を受けて質疑がなされ、データを示し根拠を説明したうえで、適切に回答がなされた。以上より、学位論文の内容およびその関連分野に関する知識は十分であり、大学院博士課程修了者として、博士(工学)の学位を授与するに十分であると判断した。