

# 論文内容要旨 (和文)

平成 22 年度入学 博士後期課程

専攻名 機械システム工学専攻

氏 名 佐藤 裕也



論 文 題 目 渦に沿った高速火炎伝播のメカニズム

例えば自動車のピストン・エンジン、航空機のジェット・エンジン、火力発電所のガスタービン・エンジンなどの輸送機械やエネルギー機械に関連した燃焼現象の大部分は乱流燃焼である。乱流燃焼は非常にたくさんの渦と火炎が複雑に相互作用する現象であり、乱流燃焼場の中で何が起きているのかは、いまだ十分に分かっていない。そこで本研究では、乱流燃焼の理解や予測・制御を目指すための基礎研究として、マクロな乱流燃焼場の中のミクロな渦を1本だけ取り出し、その渦に沿った高速火炎伝播（ボルテックス・バースティング）現象に注目して研究を行った。

渦に沿った高速火炎伝播（ボルテックス・バースティング）とは、燃料と空気の予混合気の中に渦が存在しているとき、その渦の1点に点火すると、火炎が渦に沿って高速伝播する現象である。そのメカニズムの1つとして、「渦に沿った高速火炎伝播は渦糸ソリトンが支配しているのではないか」という篠田ら(1993)のアイデア・仮説に始まる渦糸駆動メカニズムが提案されている。この渦糸駆動メカニズムでは、火炎の熱膨張効果が渦線をねじ曲げ、ラセン状の渦線の孤立波（渦糸ソリトン）を形成すると同時に、その渦糸ソリトンの誘起速度が火炎を前方へ駆動すると説明されている。つまり渦糸ソリトンと火炎がペアになって相互作用しながら高速伝播するイメージである。

そこで第1章の序論では、篠田ら(1993)によって提案された渦糸駆動メカニズムのアイデア・仮説の妥当性を数値シミュレーションによって検証し、渦に沿った高速火炎伝播（ボルテックス・バースティング）のメカニズムを明らかにすることを本研究の目的とすることが述べられた。

第2章では数値シミュレーション方法について説明した。渦糸ソリトンのようなラセン状の渦線を詳細に可視化・解析することは、現在の実験的手法では困難であるため、数値シミュレーションが有効となる。

第3章では数値シミュレーションによって渦に沿った高速火炎伝播を再現し、第4章ではその中に渦糸ソリトンが見出されるかどうかを調査した。温度と渦線の3次元可視化結果から、渦線は火炎先端付近で大きくねじ曲げられ、ラセン状に変形していることが確認された。また1本の渦線に沿った温度と渦線曲率の1次元解析結果から、火炎帯付近に曲率の孤立波が見られ、その曲率の孤立波と火炎帯がペアになって渦線上を伝播していく様子がとらえられた。これらの結果から、火炎先端付近に見られたラセン状の渦線は渦糸ソリトンである可能性があると考えられた。

第5章では温度、温度勾配、発熱速度および渦線曲率の1次元解析によって火炎と渦糸ソリトンの位置関係を詳細に調べた。その結果、火炎と渦糸ソリトンの相対的位置はほぼ正確に一致し、それらが常にペアになって高速伝播していく様子が確認され、火炎と渦糸ソリトンの相互作用が確かに成り立っているように思われた。

第6章ではラセン状の渦線がソリトンと見なしてよいかどうかを検討した。本来、ソリトンは、1)形状や速さなどを変えずに伝播する孤立波の性質、そして2)孤立波どうしの衝突に対して安定な粒子的な性質の2つの物理的性質を持つことが知られている。そこで渦に沿った高速火炎伝播に現れるラセン状

の渦線も、これらの2つの性質を持つかどうかを検証した。まず渦に沿った火炎の定常伝播状態を調べた結果、ラセン状の渦線は形状や速さを変えずに伝播する孤立波の性質を持つことが確認された。しかし渦に沿って2つの火炎を衝突させると、2つのラセン状の渦線はすり抜けずに消滅し、孤立波どうしの衝突に対して安定であるという粒子的な性質は確認できなかった。これらの結果から、渦に沿った高速火炎伝播に現れるラセン状の渦線は、厳密な狭い意味でのソリトンとは呼べないかもしれないが、広い意味でのソリトン（孤立波）とは呼んでもよいのではないかと考えられた。また渦に沿った高速火炎伝播に現れるラセン状の渦線と渦糸ソリトンの理論解の3次元可視化結果を比較すると、非常に類似した形状となっていることが確認された。

第7章では渦に沿った高速火炎伝播が起こっている箇所を特定できる物理量を提案し、その有効性を検討した。その結果、渦度ベクトルのローテーション、クロス・ヘリシティ密度ベクトルなどが渦糸ソリトンによる火炎輸送効果を表わす物理量として利用できる可能性が示された。

最後の第8章は結論であり、本研究で得られた結果は、篠田ら(1993)によって提案された「渦に沿った高速火炎伝播は渦糸ソリトンが支配しているのではないか」という渦糸駆動メカニズムのアイデア・仮説の妥当性を示す証拠となり、渦に沿った高速火炎伝播（ボルテックス・バースティング）のメカニズム解明に向けて大きな前進があったと言える。将来、ミクロな渦を扱った本研究の成果をさらに進展させて、マクロな乱流燃焼や旋回流燃焼などの理解や予測・制御を実現するために役立てられることが期待される。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 26年 2月 6日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 李鹿輝

副査 中西 為雄

副査 篠田 昌久

副査

副査

副査



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

1. 論文申請者

専攻名 機械システム工学専攻

氏名 佐藤 裕也

2. 論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記する。)

渦に沿った高速火炎伝播のメカニズム

3. 審査年月日

論文審査 平成 26年 1月 28日 ~ 平成 26年 2月 4日

論文公聴会 平成 26年 2月 4日

場所 工学部百周年記念会館セミナールーム

最終試験 平成 26年 2月 4日

4. 学位論文の審査及び最終試験の結果 (「合格」・「不合格」で記入する。)

(1) 学位論文審査 合格

(2) 最終試験 合格

5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200字程度)

別紙のとおり

6. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

## 別紙

専攻名	機械システム工学専攻	氏名	佐藤 裕也
学位論文の審査結果の要旨			
<p>佐藤裕也君の学位論文は、燃焼学分野における渦に沿った高速火炎伝播現象のメカニズムを数値シミュレーションによって明らかにすることを目的としている。渦に沿った高速火炎伝播は、各種エンジン内の乱流燃焼場や旋回流燃焼場の基礎過程として注目されているが、そのメカニズムはまだ十分に理解されていない。そこで渦糸ソリトンの誘起速度が火炎を駆動しているのではないかと渦糸駆動メカニズムの立場から、メカニズム解明を試みている。本論文は全8章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。</p> <p>第1章では、本研究の背景として、渦に沿った高速火炎伝播と乱流燃焼場の関係、これまでの研究の歴史などが述べられ、本研究の目的が述べられている。</p> <p>第2章では、本研究で用いる非定常3次元数値シミュレーションの方法が述べられている。</p> <p>第3章では、直線渦と渦輪に点火した場合に対して、温度の3次元可視化、火炎伝播速度の1次元解析などを行い、渦に沿った高速火炎伝播が数値シミュレーションによって確かに再現できていることが確認されている。</p> <p>第4章では、代表的な直線渦の場合に対して、温度と渦線の3次元可視化、温度と渦線曲率の1次元解析、温度と渦線振率の1次元解析などが試みられている。その結果、火炎先端付近にラセン状の渦線をとらえることに成功し、それが渦線曲率の孤立波（渦糸ソリトン）である可能性を示している。渦に沿った高速火炎伝播における渦糸ソリトンの発見は、世界初の成果である。</p> <p>第5章では、第4章で扱った温度に加え、温度勾配や発熱速度も用いて、火炎と渦糸ソリトンの位置関係が詳しく調べられている。</p> <p>第6章では、第4章で見出されたラセン状の渦線が確かにソリトンとしての性質を持っているかどうかを検討されている。その結果、孤立波の性質は見られるが、今回の問題設定では粒子的な性質は確認できないことが述べられ、厳密な狭い意味でのソリトンとは呼べないかもしれないが、広い意味でのソリトン（孤立波）とは呼んでもよいのではないかと結論付けられている。</p> <p>第7章では、乱流燃焼場中で渦に沿った高速火炎伝播が起こっている箇所を特定するための物理量がいくつか提案されている。</p> <p>第8章では、本論文の総括として、各章で得られた結論がまとめられている。</p> <p>また本論文の内容の一部は、佐藤裕也君が第1著者となっているものに限れば、学術論文2報によって公表されており、そのうち1報は掲載済み、1報は掲載決定済みである。さらに佐藤裕也君が共著者となっているものも含めると、その他に学術論文1報、国際会議発表2件などによっても公表されており、学位の審査基準を十分に満たしている。</p> <p>以上の内容を総合的に判断した結果、本論文は燃焼学分野における学術的価値が非常に高く、博士（工学）の学位論文としての水準を十分に満たしているため、学位論文審査を合格と判定した。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>公聴会における学位論文を中心とした40分の口頭発表、ならびに30分の質疑応答を最終試験とした。その結果、学位論文の内容およびその関連分野についての理解度は十分であり、博士（工学）として必要とされる専門知識および研究能力を十分に備えているものと判断された。以上により、最終試験を合格と判定した。</p>			