

2024年2月5日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

火炎と爆轟（ばくごう）を理論的につなぐことに成功 安定した超音速燃焼器の実用化に期待

【発表のポイント】

- 着火と火炎が同じ構造を持つことを明らかにした理論から、燃焼理論を拡張し、「自着火反応波」を定義しました。
- 「自着火反応波」により、亜音速のデフラグレーション（火炎）^(注1) から超音速のデトネーション（爆轟：ばくごう）^(注2) に至る反応波の伝播を理論的に統一しました。
- 実機サイズの超音速燃焼でも火炎が定常にできることが示され、実用化に向けて大きく前進。

【概要】

近年、二酸化炭素の排出量を削減することを目的に、自動車エンジンなど燃焼器のさらなる高効率化が求められています。燃焼器の高効率化は古くから進められていますが、さらなる高効率化には従来避けられていた消炎条件近傍や爆発する条件近傍などの極限的な条件を採用するか、新たな燃焼形態を探索することが必要です。

燃焼は化学反応が可燃性気体の中を伝播する現象であり、その反応によって生じた波は音速未満の亜音速領域で火炎、超音速領域で爆轟として自己伝播することがわかっています。しかし、伝播速度が音速に近くなるとどのような条件で火炎から爆轟に遷移するかは解明されていませんでした。

東北大学流体科学研究所の森井雄飛助教らの研究グループは、同研究グループが独自に導いた着火と火炎の等価性に関する理論を適用することで、反応波を「自着火反応波」として拡張し、火炎と爆轟を理論的につなぐことに成功しました。これにより、自動車エンジンの高効率化の阻害要因であるノッキングの発生条件や、安全工学として重要な爆轟遷移条件を明確にできるようにしました。

革新的な燃焼器の実現に向けて爆轟の適用が期待されていますが、爆轟の持つ非定常性が実機開発を困難にしています。しかし予混合気^(注3)を爆轟速度よ

りも高速に流入させることで、「自着火反応波」が理論的に安定して存在する可能性が分かりました。数値計算を実施し、衝撃波構造を持たない安定した「自着火反応波」が形成されることを確認しました。この結果、実機サイズの超音速燃焼でも火炎が定常にできることが示され、衝撃波が発生しない燃焼器の実用化に向けて大きく前進しました。

本研究は 2024 年 1 月 18 日、体分野の専門誌 Physics of Fluids 誌に掲載され、その高い汎用性から、Editor's picks（編集者推薦論文）に選出されました。

【詳細な説明】

研究の背景

近年、二酸化炭素の排出量を削減することを目的に、燃焼器のさらなる高効率化が求められています。燃焼器の高効率化は古くから進められているため、さらなる高効率化には、従来避けられていた条件、つまり、消炎条件近傍や爆発する条件近傍などの極限的な条件を採用するか、新たな燃焼形態を探索することが必要です。

従来の研究開発において、着火と火炎は別の現象として扱われていたため、極限条件における現象理解は難しく、長年の研究にも関わらず理解が進んでいませんでした。本研究グループは 2023 年 8 月 29 日にプレスリリースした研究で着火と火炎の等価性を理論的に証明することに成功し、極限状態の非線形性を緩和させることに成功しています。この知見をもとに燃焼形態をきちんと整理することで、極限条件における燃焼形態を正確に分類することが可能になると考えました。さらに、このように理論的に燃焼形態を整理することで、今までに燃焼器に対して適用されていない新しい燃焼形態も探索できると考えました。

※2023 年 8 月 29 日プレスリリース

熱効率向上の弊害、ノッキングの謎に迫る理論構築に成功 —着火と火炎の等価性理論を構築、定量予測が可能に！？—

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2023/08/press20230829-02-knock.html>

今回の取り組み

研究グループは、2023 年 8 月 29 日にプレスリリースした研究で得られた着火と火炎の等価性から、着火を特徴付ける可燃予混合気が着火に至る時間で定義される着火遅れ時間と、火炎を特徴付ける可燃性予混合気中を伝播する速度である層流燃焼速度に注目しました。従来、着火遅れ時間と層流燃焼速度に関係はないとされてきましたが、研究グループの取り組みにより、着火と火炎が同じ構造を持つことを、さらに、爆轟速度よりも流入速度が速い条件に、安定解が存在することが分かりました。この超音速条件における「自着火反応波」

を数値計算を用いて調べたところ、衝撃波構造を持たず、安定した燃焼形態として存在することが分かりました（図2）。

今後の展開

本研究により、様々な燃焼形態を一つの図に整理して議論することが可能となりました。この情報は、燃焼条件を決定する上で、良い指標を与えることができます。また、新しい燃焼形態として、超音速条件下においても非常に安定した「自着火反応波」が存在することを明らかにしました。つまり、超音速燃焼器において、爆轟速度が最大の燃焼速度と考えられてきましたが、着火を応用することでさらに高速に燃焼させることが可能であることが分かります。また、爆轟を実機に応用する際に問題となってきた非定常性も「自着火反応波」は克服できます。このように、着火を上手に適用することで、今まで避けられていた燃えにくい燃料の適用も可能となり、革新的な燃焼器開発につながると考えています。

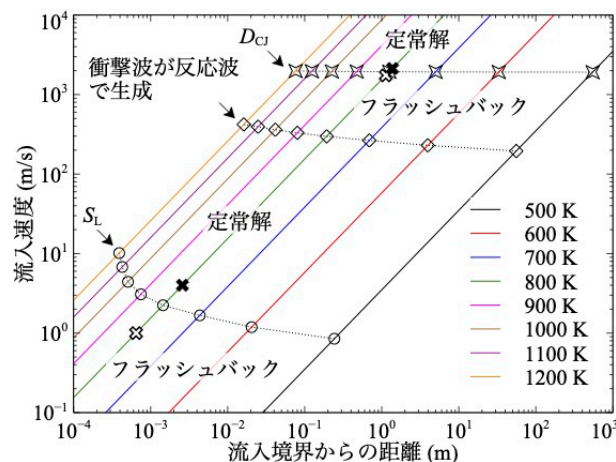


図1. メタン・空気予混合気に対して、圧力 101325.0 Pa、入口温度を 500 から 1200 K まで変化させた場合の「自着火反応波」が温度に依存した直線で示されます。従来から知られている燃焼形態だけではなく、それぞれの条件における安定性についても、この図から議論できます。図中の丸印は流入速度と燃焼波の速度が同じ条件を、星印は流入速度が爆轟速度と同じ条件を、菱印は「自着火反応波」内で速度が音速を超えて衝撃波が生成する条件を示しています。

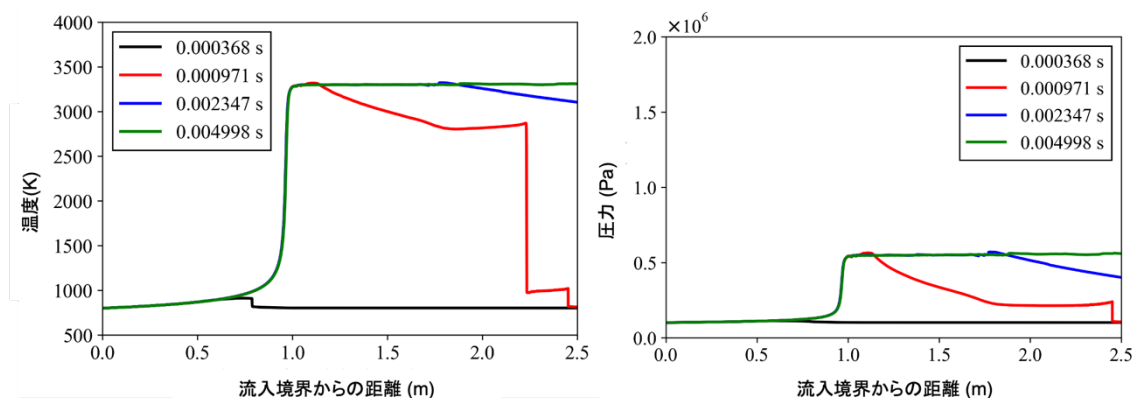


図 2. 図 1 から、予混合気を爆轟速度よりも高速に流入することで生成される「自着火反応波」は安定した構造を持つと予測されます。数値計算によってこの条件を再現すると、「自着火反応波」は衝撃波構造を持たない状態で安定に定在することが、数値計算によって確かめられました。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 JP19KK0097 の助成を受けたものです。

【用語説明】

- 注1. デフラグレーション（火炎）：衝撃波を伴わない燃焼。伝播速度は数十センチメートルから数メートル程度であり、圧力上昇は無視できるほど小さい。
- 注2. デトネーション（爆轟：ばくごう）：衝撃波の圧縮により高温になった可燃性気体が化学反応を起こし、そのエネルギーが燃焼前方の衝撃波を支えることで超音速で伝播する燃焼波。伝播速度が毎秒数千メートルと非常に高速であり、背後の圧力は非常に高い。
- 注3. 予混合気：燃焼させる可燃性気体と酸化剤をあらかじめ混合した気体。

【論文情報】

タイトル：General concept for autoignitive reaction wave covering from subsonic to supersonic regimes

著者：Youhi Morii*, Kaoru Maruta

*責任著者：東北大学 流体科学研究所 助教 森井雄飛

掲載誌：Physics of Fluids

DOI：https://doi.org/10.1063/5.0176262

URL：https://pubs.aip.org/aip/pof/article/36/1/016139/3023005/General-concept-for-autoignitive-reaction-wave?searchresult=1

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学 流体科学研究所

助教 森井雄飛

TEL: 022-217-5296

Email: morii@edyn.ifs.tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学流体科学研究所

広報戦略室

TEL: 022-217-5873

Email: ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp