

2023年8月29日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

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！？ —

【発表のポイント】

- これまで別々に扱われてきた「着火」と「火炎」が等価であることを示す理論の構築に世界で初めて成功しました。
- ガソリンを含む実用燃料には、火炎として存在できない特別な条件が存在することを証明しました。
- この条件（温度・圧力）を越えるとエンジン内では自着火（ノッキング）が発生することを明らかにしました。
- ノッキング予測は世界的にも非常に困難と考えられてきましたが、この理論により予測が可能になると考えられます。

【概要】

ノッキング現象は自動車用ガソリンエンジンの熱効率向上の阻害因子です。この現象は流体现象と化学反応の複雑な相互作用に関わるため、エンジンが実用され百年を越えた現在も、完全な理解は得ら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と大学院博士後期課程の角田陽氏、インド工科大学ルールキー校のAjit Kumar Dubey（アジット・クマー・デュベイ）助教、東北大学流体科学研究所の丸田薫教授らの研究チームは、世界で初めてノッキング実験データと定量的に一致した直接数値計算結果を分析することで、極限下では燃焼化学反応が起こる火炎が、「火炎」として存在できなくなる特別な条件が存在することを突き止めました。このとき起こる現象を「火炎からの激しい遷移現象」(Explosive transition of deflagration)と名付けました。この結果から、着火と火炎の等価理論を構築、ノッキングとこの条件の関係を明らかにすることに成功しました。世界的な研究の潮流では予測は原理的に不可能とみられていたノッキングの発生を、近く予測することが可能になるとみられます。

本研究成果は、2023年8月7日付で流体物理学の専門誌 Physics of Fluids に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

ノッキングは、自動車エンジンの熱効率向上を妨げる現象として、長年の研究の対象となっています。しかし、ノッキングの詳細な発生メカニズムは、流体力学や化学反応の複雑な相互作用のため、完全には解明されていませんでした。当研究グループでは世界で初めて実験データと定量的に一致した直接数値計算の結果を詳細に分析することで、ノッキングの発生要因の解明を試みました。

今回の取り組み

本研究では、当グループが成功した直接数値計算の結果が、ノッキング実験データと定量的に一致したことに基づき、ノッキングの発生メカニズムを詳細に分析しました。その結果、極限的な条件においては、燃焼化学反応波である火炎が、火炎として存在できなくなり、激しい全体的な着火に遷移せざるを得なくなる「臨界条件」が存在することを突き止めました。

そこから、ノッキングと強い関連を持つ着火と火炎に関係があるのではないかと考え、時空間変換を施し、温度と燃料質量分率を規格化することで、熱の移動と物質の移動の速さの比を表すルイス数が 1 の時、つまり熱の移動と物質の移動が同じ時に、着火と火炎が等価であることを理論的に導くことに成功しました。着火と火炎は燃焼における最も基本的な現象ですが、別々に研究が進められ、それらが等価であることは全く知られていませんでした。

さらに、ルイス数が 1 より小さい場合には常に火炎構造が存在すること、ルイス数が 1 より大きい場合には火炎構造が存在できなくなる臨界条件が存在することが分かりました（図 1）。ガソリン燃料の主成分の一つである n-ヘプタンはルイス数が 1 より大きいので、本理論からは火炎構造が存在しない臨界条件が存在するはずです。

つまり、未燃混合気の温度がこの臨界条件を超えると、火炎は伝播することができなくなり、全体的な激しい着火に遷移しなければなりません。こうした自着火をノッキングと呼ぶため、この閾値温度とノッキングには強い相関があります（図 2）。今回の研究成果により、エンジンでのノッキング発生を精度高く、かつ比較的簡易に予測することが可能になると考えられます。

今後の展開

本研究の結果から、ノッキング実験におけるノッキングの発生の予測手法を開発できました。今後は実際のエンジンへと展開し、精度を確認する予定です。また着火と火炎伝播という、燃焼における最も基本となる現象が相互に等価であることが示されたため、着火や火炎伝播単体の研究では説明がつかないさまざまな現象に対して、今までとは異なる視点で現象を見るのが可能にな

り、革新的な燃焼研究、ひいては革新的な燃焼技術へつなぐと期待しています。

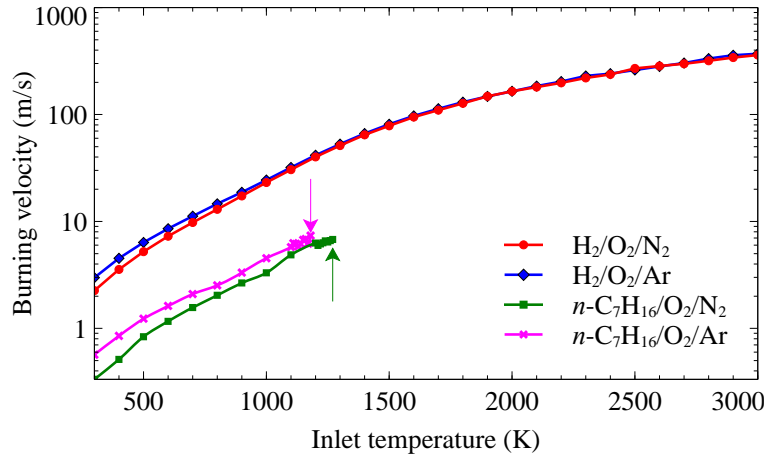


図 1. 流入温度(Inlet temperature)と燃焼速度(Burning velocity)の関係。ルイス数が1より低い燃料 (H₂) は常に火炎が存在するが、ルイス数が1より高い燃焼 (n-C₇H₁₆) には臨界条件 (閾値温度) が存在し、それ以上の温度では火炎構造が存在しない。

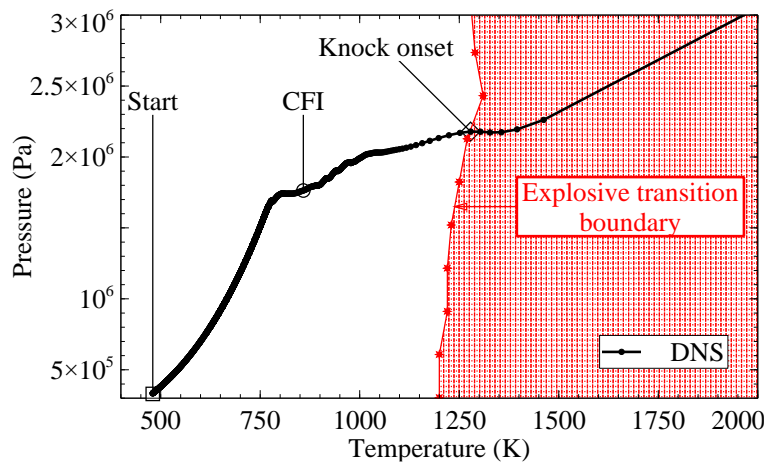


図 2. 直接数値計算で得られた未燃ガス部の温度(Temperature)と圧力(Pressure)の時間履歴と Explosive transition が発生する境界を示した図。未燃ガス部の時間履歴が Explosive transition 境界を跨いだ直後にノッキングが発生している。

【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. ノッキング：ガソリンエンジンで発生する異常燃焼。ピストンや、点火プラグから伝播した火炎による圧縮のため、未燃状態の混合気が自己着火する現象。エンジンの破壊を招くこともある。

【論文情報】

タイトル：Analysis of knock onset based on two-dimensional direct numerical simulation and theory of explosive transition of deflagration

著者：Youhi Morii*, Akira Tsunoda, Ajit Kumar Dubey, 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：10.1063/5.0160236

URL: <https://doi.org/10.1063/5.0160236>

【問い合わせ先】

（研究・応用に関すること）

東北大学流体科学研究所

助教 森井雄飛 教授 丸田薫

TEL:022-217-5296

E-mail: morii@edyn.ifs.tohoku.ac.jp

E-mail: maruta@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

E-mail: ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp