



Tokyo Tech

令和2年4月21日

報道機関各位

東京工業大学

超希薄燃焼と水噴射でガソリンエンジン熱効率 52%を達成

—温度成層化によるノッキング抑制と冷却損失低減効果—

【要点】

- 空気過剰率を上げた超希薄燃焼ガソリンエンジンに筒内水噴射を適用。
- ピストン上に低温水蒸気層を形成し、ノッキングと冷却損失を効果的に低減。
- 乗用車用ガソリンエンジンとして世界最高水準の図示熱効率 52.6%を達成。

【概要】

東京工業大学 工学院 システム制御系の小酒英範教授、長澤剛助教、佐藤進准教授らは、慶應義塾大学の飯田訓正名誉教授、横森剛准教授らとともに、**空気過剰率**（用語 1）を 2 程度まで上げた超希薄燃焼ガソリンエンジンに**筒内水噴射**（用語 2）を適用し、これまで 40%程度だった乗用車用エンジンの正味熱効率を 51.5%、**図示熱効率**（用語 3）を 52.6%に向上させることに成功した。

高い熱効率が期待される超希薄燃焼ガソリンエンジンだが、さらなる熱効率向上を目指すには高負荷領域における**ノッキング**（用語 4）抑制と**冷却損失**（用語 5）低減が欠かせない。同グループは燃焼室内のピストン表面近くに水を噴射して低温水蒸気層を形成することにより、超希薄燃焼においても燃焼を悪化させることなくノッキング抑制と冷却損失低減を実現することを目指した。

各種の条件を最適化し、最終的には**圧縮比**（用語 6）を 17 まで上げることで乗用車用ガソリンエンジンとしては世界最高水準の熱効率を達成した。これらに加え、水噴霧の可視化と**熱流束**（用語 7）の計測により当初の狙い通りピストン表面近くに低温水蒸気層が形成されていることを示唆する結果を得た。

本研究成果は、英国機械学会の国際学術誌「*International Journal of Engine Research*」オンライン版に 4 月 6 日付で掲載された。

●研究の背景

超希薄燃焼ガソリンエンジンでは低温燃焼による冷却損失の低下に伴って熱効率の大幅な向上が期待されるものの [参考文献 1]、さらなる熱効率向上を目指す上では高負荷領域におけるノッキング抑制と冷却損失低減が欠かせない。ガソリンエンジンの効果的なノッキング抑制・冷却損失低減手法として、水噴射が以前より研究されている。これは水の蒸発によって筒内ガス温度を低下させ、ノッキングと冷却損失の低減を図るものであり、主に理論空燃比（用語 8）を対象として行われてきた。本研究では水噴射を超希薄燃焼に適用することで、熱効率のさらなる向上を図った。

●本研究のアプローチ

従来の理論空燃比におけるガソリンエンジン水噴射の多くは水を吸気ポートより噴射する形式であり [参考文献 2]、この場合、空気・燃料の混合気は比較的均一に冷却される。しかし混合気への水の均一添加によって燃焼速度は大きく低下するため、超希薄燃焼においては燃焼不安定性の増加が懸念される。

そこで本研究では図 1 に示すように、水を筒内に直接噴射し、点火プラグ近傍を避けてピストン表面付近に水蒸気を集中的に分布させる「層状水蒸気遮熱」を提案した。これにより超希薄燃焼でも燃焼を悪化させることなく水の冷却効果が得られ、またピストン近くの未燃領域で多く発生するノッキングとピストン表面から外部への大きな冷却損失を効果的に低減できると期待される。

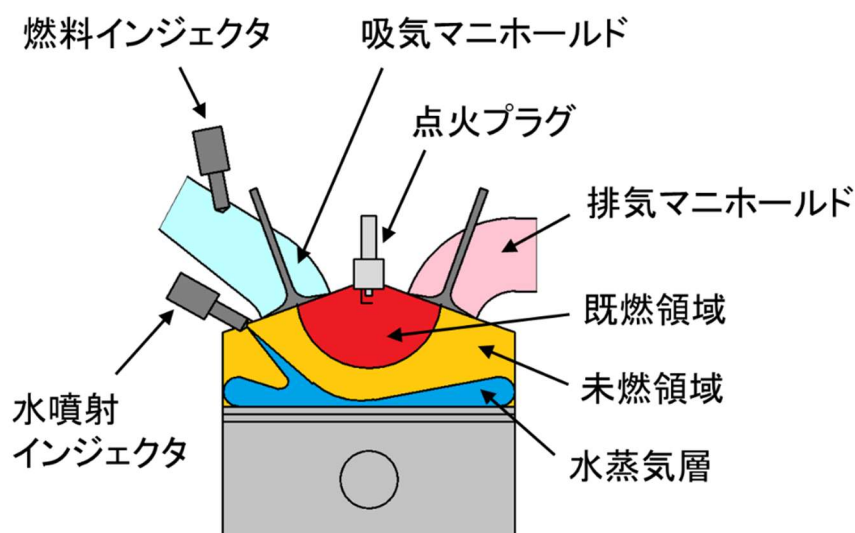


図 1 本研究におけるガソリンエンジン筒内水噴射の概略図

●研究成果

本研究では筒内水分布が熱効率向上の大きな鍵を握るため、石英ガラス製の可視化エンジンを用いて水噴射時期が水噴霧分布に与える影響を調査した。その結果、図 2 に示すように上死点（用語 9）前 150°に水噴射した場合、水は時計回りの流れに乗って吸気側からピストン表面近くに輸送され、層状に分布する様子が確認された。

実機エンジン試験においても、圧縮行程前半（上死点前 150°～120°）に水噴射することで燃焼安定性を保ちつつノック・冷却損失低減効果が得られ、熱効率が上昇することが確認できた。

また図 3 には、ピストン表面およびエンジンヘッドの熱流束計測から得られた水噴射による平均気体温度低下率と壁面熱流束低下率の関係を示したものである。これより同一の平均気体温度の低下に対して、ピストン側の熱流束低減割合はヘッド側より大きいことから、ピストン表面近くに水蒸気層が形成されて低温となる温度成層化（用語 10）が起きていることが示唆された。

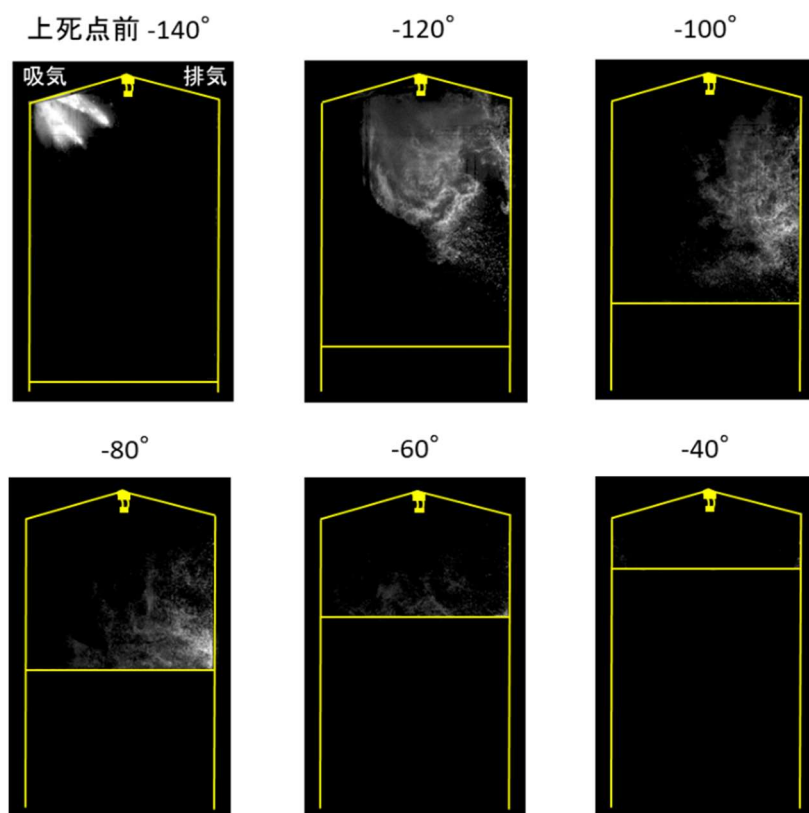


図 2 上死点前 150° に水噴射した際の筒内水噴霧の可視化結果

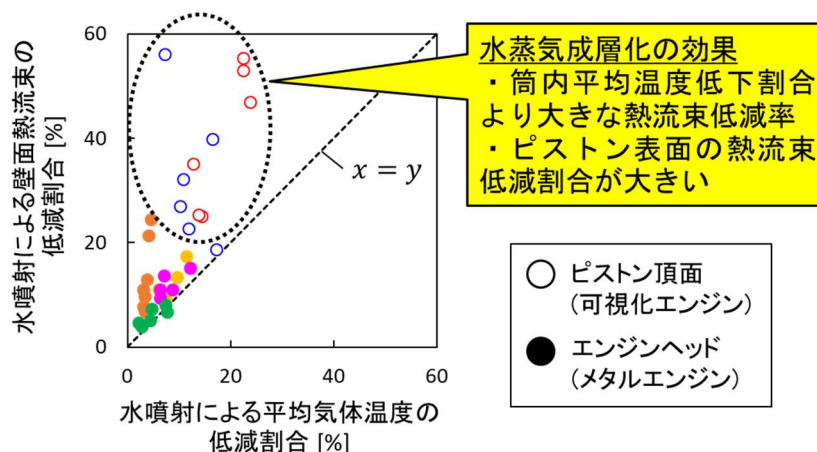


図3 水噴射による平均気体温度低下率と壁面熱流束低下率の関係

以上の結果をもとに 0.5 L (リットル) クラスの単気筒エンジンで、さらに水噴射条件および運転条件の最適化を行うことで熱効率の向上を図った。その結果を熱バランスの形で示したものが図4である。

圧縮比 15、空気過剰率 1.9 にて水噴射を行うことにより、ノッキングと燃焼変動を抑えた状態でgross図示熱効率（機械損失やポンプ損失を含まない効率）が 48.7 から 50.2%まで上昇した。ここで、さらに圧縮比を 17 まで増加させたところ、ノッキングと燃焼変動を十分低く抑えたうえで排気損失、未燃損失、冷却損失が低減されることにより、gross図示熱効率は最大 52.6%まで上昇した。

これは 0.5 L クラスのガソリンエンジンとしては世界最高水準の熱効率であり、次世代の超高熱効率ガソリンエンジンの 1 つの可能性を示したといえる。今後は水蒸気分布と熱流束の同時計測などによって熱効率向上の機構解明を進めるとともに、水噴射インジェクタの形状や設置位置を含めた最適化を行うことにより、さらなる熱効率の向上につながると期待される。

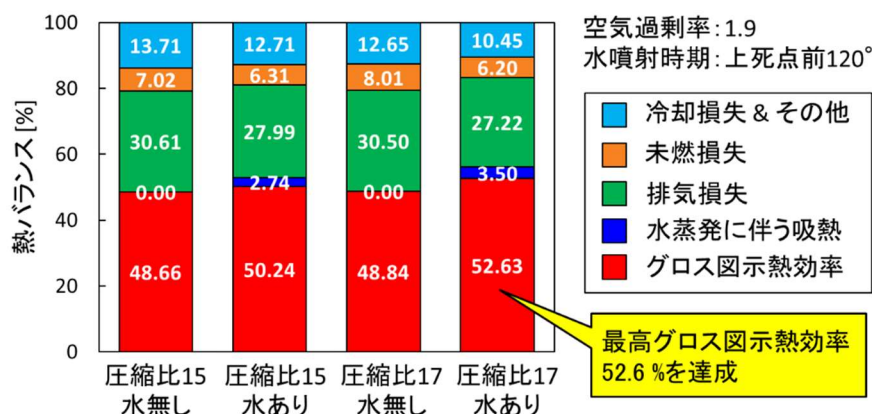


図4 高圧縮比+超希薄燃焼+水噴射による熱効率の向上と各種損失の内訳

【付記】

本研究は総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」（管理法人：JST）、および自動車用内燃機関技術研究組合の委託事業の成果である。

【参考文献】

- (1) Jung, D. et al., *SAE Technical Paper* 2017-01-0677 (2017)
- (2) Bellis, V. D. et al., *SAE Int. J. Engines* 10(2), 550-561 (2017)

【用語説明】

- (1) **空気過剰率**：実際に供給された空気の質量を、燃料を燃やし切るために理論上必要な最小空気質量で除した値。1 の場合が理論空燃比であり、1 より大きい場合は希薄燃焼となる。
- (2) **筒内水噴射**：水をエンジンシリンダ内に直接噴射する技術。
- (3) **図示（ずし）熱効率**：燃焼室圧力履歴から計算される燃焼ガスがシリンダ内でピストン上面にする仕事（図示仕事）を、投入熱量で除した値。実際に熱機関から得られる有効仕事は図示仕事から機械摩擦損失やポンプ損失を差し引いた値となる。
- (4) **ノッキング**：ガソリンエンジンにおいて、通常は点火プラグを中心に火炎が燃え広がるのに対し、燃焼ガスによってピストンやシリンダ壁面に押し付けられた未燃ガスが高温・高圧となって自己着火する現象。強い衝撃波を伴い、場合によってはエンジンが破損することもある。
- (5) **冷却損失**：燃焼室内において仕事には変換されず、壁面を通して外部へ熱として捨てられる損失。
- (6) **圧縮比**：内燃機関において圧縮前の燃焼室体積を圧縮後の体積で除した値。圧縮比が高いほど理論的には熱効率は向上するが、同時にノッキングも発生しやすくなる。
- (7) **熱流束**：単位時間に単位面積を通過する熱量。
- (8) **理論空燃比**：空気と燃料が過不足なく燃焼する時の空気と燃料の質量比。通常のガソリンエンジンでは空気 14.7 に燃料 1 の割合となる。
- (9) **上死点**：ピストンの往復運動において、ピストンが最上端となる点。
- (10) **温度成層化**：領域内において温度が低い冷却材が片側に、温度が高い冷却材がもう片側に、層状に分かれて分布する状態。

【論文情報】

掲載誌 : *International Journal of Engine Research*

論文タイトル : Thermal efficiency improvement of super-lean burn spark ignition engine by stratified water insulation on piston top surface

著者 : Tsuyoshi Nagasawa, Yuichi Okura, Ryota Yamada, Susumu Sato, Hidenori Kosaka, Takeshi Yokomori, Norimasa Iida

DOI : 10.1177/1468087420908164

【問い合わせ先】

東京工業大学 工学院 システム制御系 教授

小酒 英範

Email: kosaka.h.aa@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2170

FAX: 03-5734-2170

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報・社会連携課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975

FAX: 03-5734-3661