

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630072

研究課題名(和文)究極効率エンジンの燃焼原理研究

研究課題名(英文)Fundamental research of a new compression-combustion engine of ultimate thermal efficiency

研究代表者

内藤 健(Naitoh, Ken)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30323174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：多重衝突パルス噴流圧縮に基づく新燃焼方式エンジンについて、サイクル理論とシミュレーション検討、及び、航空機と自動車用の2つの試作エンジンによる燃焼実験を行い、以下の2つの結果が得られ、新燃焼方式の有効性を示すことができた。

(1)理論とシミュレーションでは、ガソリン自己着火で50%レベルを超える熱効率の見通しを得た。(2)自動車用小型試作エンジンの燃焼実験では比較的低騒音でガソリン自己着火することが示され、かつ、従来型エンジンと同等か、それ以上の熱効率の可能性を得た。航空用の燃焼実験では、安定な燃焼を実現する方策を見出した。

研究成果の概要(英文)：Thermo-fluid dynamic theory, three-dimensional computations, and combustion experiments of new engines based on supermulti-jets colliding with pulse show the two following results. (1)Theory and computations: Supermulti-jets colliding with pulse bring auto-ignition of gasoline and high thermal efficiencies over 50%. This is because the supermulti-jets colliding has an effect of encasing the burned gas of high temperature around the chamber center, which results in very less hot gas on the chamber walls. (2)Combustion experiments: combination of point compression due to jets injected intake nozzles and piston compression having relatively low compression ratio actually indicated auto-ignition of gasoline and thermal efficiency potential comparable to that of traditional gasoline engines. Thus, the above results indicate the efficiency of the new compression-combustion principle based on the supermulti-jets colliding with pulse for various purposes.

研究分野：熱流体科学

キーワード：熱機関 熱効率 熱流体力学 燃焼実験 シミュレーション サイクル理論

1. 研究開始当初の背景

従来型小型レシプロ・ジェット・ラムスクラム・パルス detonation エンジン単体の熱効率は未だに 50% を超えず、小型エンジンでは 35%~10% 程度である。半分以上のエネルギーを捨てているので、逆に言えば、熱効率が 2 倍以上にすることが可能で、それが「安価に」環境エネルギー問題を解決し、航空宇宙産業をも発展させるというのが、本申請代表者の研究の起点である。オットー・ブレイトンサイクル論に立ち戻ると、断熱・高圧縮比化という二大因子のクリアで 60% 以上の熱効率は可能である。

小型エンジン壁面での冷却損失は投入エネルギーの 30% 程度もあるので、以前から断熱化が試みられ、最近では燃料を狭領域噴射して燃焼室側壁付着を低減しようとしているが、あまり大きな効果がないことが知られている。申請代表者らが行ってきた数値解析結果をみると、乱流拡散速度の 2~5 倍程度もある「膨張流」が既燃焼ガスを側壁に運ぶためだとわかった。そこで、エンジン側壁から中心部に向けて、複数の吸気噴流群を噴出させて「膨張流」を抑え込むという着想を得た。

(図1) ロータリーバルブやピストンバルブの開閉によって燃焼室内を負圧にし、複数の噴流を急速衝突させて、エンジン中心部微小領域に騒音や既燃焼ガスを閉じ込めると同時に、超高圧縮の微小領域を生成して一点自己着火燃焼させることを繰り返すのである。

燃焼室中央部に向けられた多重衝突パルス噴流(図1:日本では権利化済)は、既燃焼ガスをエンジン側壁に到達させないため、冷却損失の大幅低減が可能で(図2)、かつ、騒音をも封鎖しながら微小な高圧縮領域を形成して超高圧縮比化可能である。ディーゼルやパルス detonation 等は「超多点」の同時着火のために急激な熱発生で振動が大きい、新方式は燃焼室中央部「一点」の自己着火であるため、振動低減も見込まれる。

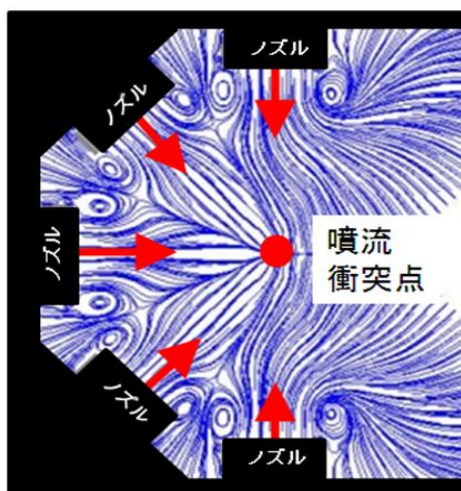


図1 多重衝突噴流圧縮コンセプト

圧縮するほど、騒音振動を抑える可能性は従来エンジンにはない。しかも、噴流群はエ

ンジン側壁に既燃焼の高温ガスを到達させない効果もあり、大小あらゆるサイズのエンジンで冷却系をなくす可能性もある。

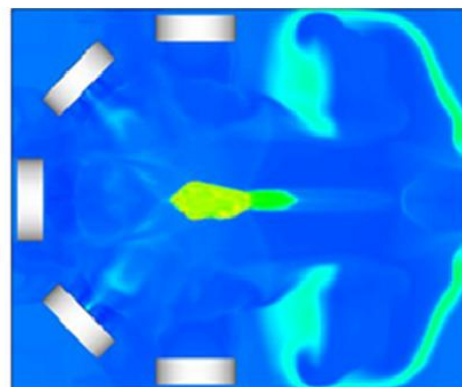


図2 複数サイクル後温度分布(数値解析)

その更なる根拠を以下に2つ述べる。

(1) ピストン圧縮と併用した地上走行用では、低速度でも効果的に作用する構成も考案しており、超希薄燃焼・ガソリン自己着火実現を促進するポテンシャルも持っている。

(2) 負圧状態と噴流衝突による高圧力域生成状態を繰り返す、この新たな圧縮方式は、従来型の往復動ピストン、ラム圧利用の圧縮方式との併用も可能で、しかも、航空機用超音速エンジンを考えると、多重噴流の吸気管群(インテーク)配置は、今後増加する Busemann タイプ改良型に近い形状となっていて相性が良いからである。

各家庭や事業所で、新規ピストンをも含めた本エンジンを搭載した自動車が発電すれば、大型発電所を減らし送電ロス削減も可能となり、さらに、始動から極超音速までの大気中航行も可能である。よって、航空機・自動車・発電で用いれば、CO2 排出問題を安価に解決する新機軸となりうる。さらに言えば、自己着火なので、燃料希薄条件で負荷・回転数を変えても安定着火可能で、燃料を選ばない。また、この高圧縮で“パルス状プラズマ”が生成できれば、Magnetohydrodynamics(MHD)で発電でき、しかも、低エミッション化の可能性もある等、効果は多様で卓越している。

なお、噴流群をパルス状に衝突させることによって、高圧縮が「安定に可能」なことは、シミュレーションと非燃焼の衝撃波管実験で本研究を実施する前に確認してきた。

2. 研究の目的

複数のパルス噴流を燃焼室中央部で衝突させ、そこに微小な高圧縮領域を生成すると同時に、騒音と既燃焼高温ガスをその中央部に封鎖させる新燃焼方式のエンジン実験を行い、「小型でも単体熱効率が 60%」のポテンシャルを確認することが、本研究の主たる目的である。

詳細目標は以下の4つである。(1) ガソ

リンなどを用いた燃焼実験と数値解析・理論解析によって、熱効率と燃焼安定度を含む燃焼性能・振動騒音レベル・エミッション低減可能性の三点の基本性能評価を行う。(2) エンジン内壁に既燃焼高温ガスが壁面に接触しない理由を明らかにする。(3) また、燃焼形態(火炎伝播かデトネーション)を判定する。(4) 以上から更に、航空機・自動車・定置発電利用を可能とする要件や条件を明らかにする。

3. 研究の方法

熱流体力学理論、3次元非定常の数値シミュレーション、燃焼実験の3つの方法で研究を行った。

なお、従来エンジンは小型であるほど、壁面冷却損失増大・低熱効率なので、本k年休の燃焼実験では、あえて小型エンジン(燃焼室直径40mm)で実施する。そのために試作したエンジンは、ピストンを持たないもの(航空用:図3上)とダブルピストン(自動車・発電用:図3下)の2つである。

燃焼実験の主な計測系は、壁面上圧力・排気温度センサーとともに、排気空燃比(A/F)センサー、黄炎有無確認のためのビデオカメラである。なお、本申請実験の主要条件範囲は、 $0 < \text{吸気マッハ数} < 2$ 、 $500\text{rpm} < \text{ロータリーバルブ回転数} < 10000\text{rpm}$ 、 $\text{ピストンクランク回転数} < 5000\text{rpm}$ 、 $10 < \text{空燃比}(A/F) < 200$ 、8~24本のパルス噴流群とした。

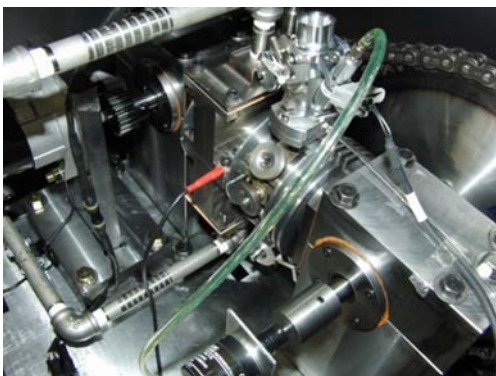
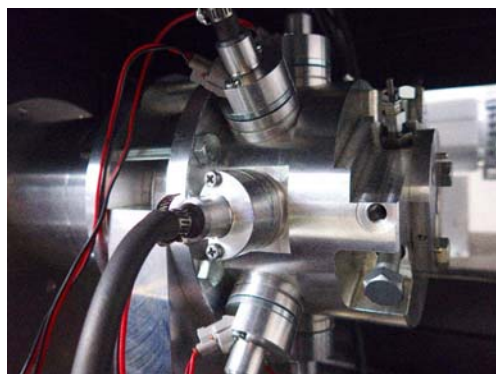


図3 試作エンジン
(上:航空用、下:自動車・発電用)

さらに数値流体力学計算によって燃焼安定度や既燃焼ガス壁面到達状況を3次元

に確認することで、燃焼メカニズムを明らかにする。

4. 研究成果

まず、3つの方法論ごとに記す。

(1) 理論:圧縮性流体力学で考えると、対向二本の噴流の一次元的な面圧縮で最大7:1程度の圧縮比が可能であり、多数噴流による一点圧縮では数十から数百程度の圧縮比が可能である。なお、従来のピストンエンジンでは、空燃比が小さくなるほど、つまり、理論混合比に近づいて比熱比が小さくなるほど、圧力比が上昇せず、理論熱効率(図示)の最大限界値が60%程度と言われてきたが、本エンジンの圧縮燃焼原理では、比熱比が小さくなくても、得られる圧力比が下がらないことが見出された。この理論的研究によって、最大到達熱効率が70%程度である可能性が見出された。

(2) シミュレーション:自動車を含む定置用途では、過給器を併用した場合、ある程度のエンジン回転数範囲・ある程度の範囲の負荷条件で、図示熱効率60%レベルが可能であるという見通しをえた。これによって、最大出力運転時の燃料投入量も、従来エンジンに比べて大幅低減できる見通しも得られた。また、過給機なしでも、高熱効率、かつ、従来エンジンの最大出力を達成させるためのエンジン諸元・構成・条件案も見出した。航空宇宙用途では、従来型エンジンと同等かそれ以上にすることができる可能性を見出した。

(3) 燃焼実験:まず、交流モータを付加して、アイドルから5000rpmまでの回転数域での定常燃焼実験を可能とし、構造強度について問題ないことをモータリング試験で確認した。自動車用では2つの成果を得た。ひとつめは、30cc程度の吸気量の超小型エンジンでも、その始動時に、グローやスパーク等の強制的な点火システムを一切用いずに、安定な始動できる可能性を見出したことである。ふたつめは、排気温度と筒内圧力等のデータからみて、従来のレシプロエンジンと同等かそれ以上の熱効率を得られる見通しを得た点である。また、航空用途のプロトタイプでは、燃焼に起因すると考えられる高強度の発光を得た。

次に、当初計画の4つの目標・項目について、達成度を記す。

(1) 熱効率・振動騒音レベルなどの基本的評価:熱効率については、シミュレーションでは100cc以下の小型エンジンでも目標熱効率(60%)レベルを達成できる見通しをえた。また、原理燃焼試験では、従来型ガソリンエンジンと同等かそれ以上の熱効率を得られる見通しを得た。また、この新たな圧縮燃焼原理では、燃焼室中央部だけが高圧力になっており、相対的にシリンダー側壁やピストンリング付近の平均圧力は低いので、ピストンリングの数や摩擦力を低減可能であり、正味

熱効率と図示熱効率の差も小さくなることもわかった。燃焼騒音については現在までに行った燃焼試験から、目立った燃焼騒音は計測されていない。

(2) エンジン内壁に既燃焼高温ガスが接触しない理由や条件の解明：燃焼室側壁・ヘッド・ピストン表面を含む全ての壁に、燃焼後の高温ガスを接触させないようにできることがわかり、その理由が幾何学的なものであることが解明された。

(3) 燃焼形態（火炎伝播かデトネーション）：シミュレーションと燃焼実験で、燃焼初期はデトネーションで、後半は火炎伝播になっているであろうと推定される結果を得た。デトネーションの時間の長さは衝突噴流圧縮の強さによって制御可能と考えられる。

(4) 航空機・自動車・定置発電利用を可能とする要件や条件の検討：

・自動車・発電用では、通常レベルの過給機を併用すれば熱効率 60%レベルが可能という見通しをシミュレーションから得た。過給機なしでも、ある程度の運転条件範囲で高熱効率、かつ、要求最大出力を確保できる案がシミュレーションから得られた。ガソリンを用いた小型 (30cc 程度) の試作エンジンの燃焼実験では、8 本の噴流衝突圧縮に機械圧縮比 8 程度を付加した状態で、ほぼ安定な自己着火を確認し、しかも、100°C を超える排気温度とかなりの燃焼圧力が得られ、従来エンジンと同等レベルの熱効率と騒音振動レベルを示唆するデータを得た。

・航空用途では、シミュレーションで $M > 0.5$ レベル以上では燃焼が可能で、従来型ジェットエンジンと同等レベルの推力が確認され、 $M > 3$ の極超音速域では、従来型のラムスクラムエンジンと同等かそれ以上の推力が実現できる見通しを得た。実験では、音速飛行レベルの吸気量での燃焼実験が実施できるようになり、高発光強度の燃焼写真が得られ始めたところである。

以上の研究によって、自動車・発電・航空用途での成立要件（負圧・過給の程度、マッハ数範囲、噴流本数等）をある程度、明確にし、論文などで公開した。

なお、水素を燃料とした研究は、まず、シミュレーションで開始した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

(1) Ken Naitoh, Kouichi Ishida, Shouhei Nonaka, Tomoaki Kubota, Yoshitaka Sagara, Taro Tamura, Taiki Hashimoto, Yoshiyuki Nojima, Masato Tanaka, Kan Yamagishi, Takuma Okamoto, Kentaro Kojima, Kenya Hasegawa, Takuya Nakai, Daiki Ikoma, Yoshiaki Tanaka. Fugine: the supermultijet-convergence engine working

from startup to hypersonic scram mode and attaining simultaneously light-weight, high-efficiency, and low noise. AIAA paper 2014-3960, pp. 1-26 2014. DOI: 10.2514/6.2014-3960 (査読あり)

(2) Ken Naitoh, Kentaro Kojima, Takuma Okamoto, Kan Yamagishi, Taro Tamura, Kouichi Ishida, and Shouhei Nonaka. Physical theory of the single-point auto-ignition engine based on supermulti-jets colliding with pulse: leading to thermal efficiency over 60% at various engine speeds and loads of automobiles. SAE paper 2014-01-2640, pp. 1-16, 2014. doi:10.4271/2014-01-2640 (査読あり)

(3) Ken Naitoh, Kan Yamagishi, Shouhei Nonaka, Takuma Okamoto, and Yoshiaki Tanaka. Unsteady three-dimensional computational experiments of the single-point auto-ignition engine based on semispherical supermulti-jets colliding with pulse for automobiles. SAE paper 2014-01-2641, pp. 1-16, 2014. doi:10.4271/2014-01-2641 (査読あり)

(4) Ken Naitoh, Kenya Hasegawa, Tomoaki Kubota, Taiki Hashimoto, Yoshiyuki Nojima, Masato Tanaka, Kentaro Kojima. Development of Fugine based on supermulti-jets colliding with pulse: leading to stable plug-less start and improvement of HCCI with satisfactory strength of structure. SAE paper 2014-01-2639, pp. 1-8, 2014. doi:10.4271/2014-01-2639 (査読あり)

(5) Ken Naitoh, Daiki Ikoma, Hiroki Sagara, Taro Tamura, Taiki Hashimoto, Yoshiyuki Nojima, Masato Tanaka, Kentaro Kojima, Kenya Hasegawa, Takuya Nakai, Shouhei Nonaka, and Tomoaki Kubota. Two small prototype engines developed based on pulsed supermultijets colliding: having a potential of thermal efficiency over 60% with satisfactory strength of structure. SAE paper 2014-32-0099, pp. 1-10, 2014. doi:10.4271/2014-32-0099. (査読あり)

(6) Ken Naitoh, Takuma Okamoto, Tomoaki Kubota, Kan Yamagishi, Yoshiyuki Nojima, and Taro Tamura. Design guidelines of the single-point auto-ignition engine based on supermulti-jets colliding for high thermal efficiency and low noise: obtained by computational experiments for a small strongly asymmetric double-piston engine. SAE paper 2014-32-0100, pp. 1-16, 2014. doi:10.4271/2014-32-0100 (査読あり)

(7) Ken Naitoh, Mikiya Marui, and Kouichi Ishida, Yoshitaka Sagara, Taro Tamura, Dai Shimizu, Shouhei Nonaka, Tomoaki Kubota, Taiki Hashimoto, Yoshiyuki Nojima, Masato

Tanaka. Simultaneous attainment of light-weight, high efficiency, and low noise: by supermultijets-twister engine working from startup to hypersonic scram mode. AIAA paper 2013-3011. Pp.1-12. (2013). DOI: 10.2514/6.2013-3011 (査読あり)

〔学会発表〕(計 7 件)

(1)内藤健他. 多重衝突パルス噴流による高効率プロトタイプエンジンの開発(第一報). 自動車技術会春季大会講演会, 自動車技術会. パシフィコ横浜. (2013. 5. 22-24).

(2)橋本大器, 内藤健他. 多重衝突パルス噴流を有するダブルピストンエンジンの研究. 自動車技術会秋季大会講演会. 自動車技術会. 名古屋 (2013. 10. 23-25)

(3)田村太郎, 内藤健他. 多重パルス噴流圧縮を用いたエンジンの基礎燃焼試験に関する研究. 24 回内燃機関シンポジウム. 自動車技術会 & 日本機械学会. 神戸大学 (2013. 11. 26-28)

(4)田中聖人, 内藤健他. 多重パルス噴流圧縮に基づく強非対称ダブルピストンエンジン研究. 24 回内燃機関シンポジウム. 自動車技術会 & 日本機械学会. 神戸大学 (2013. 11. 26-28)

(5)内藤健他. 多重衝突パルス噴流による高効率プロトタイプエンジンの開発(第二報). 自動車技術会春季大会講演会. 自動車技術会. パシフィコ横浜. (2014. 5. 21-23)

(6)中井琢也, 内藤健他. 多重衝突パルス噴流圧縮機構エンジンの基礎燃焼試験に関する研究. 第 46 回流体力学講演会. 日本流体力学会, 弘前文化センター. (2014. 7. 3-4).

(7)内藤健, 究極系研究: 複雑系研究からの脱皮と飛躍, CMM Colloquium, Meiji University, 2014. 10. 10. (招待講演)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

(1)早稲田大学ホームページ. 究極効率エンジンを生む新圧縮原理を発見. (2013) (http://www.waseda.jp/jp/news13/130709_engine.html)

(2)日本経済新聞 (エンジンの熱効率、新理論で 60%に) (2013)

http://www.nikkei.com/article/DGXNASGG08020_Y3A700C1TJM000/

(3)次代に豊かな新世界をもたらす「究極のエンジン」(2013)

http://www.yomiuri.co.jp/adv/wol-rikou/research/141107_01.html

(4)AIF2013 パネル 4 世界が羨む日本の未来テクノロジー. (2013)

<https://www.youtube.com/watch?v=xBnihjfZf18>

(5)日経 Automotive:熱効率 60%を目指すエンジン(2014)

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/MAG/20140121/328815/?rt=nocnt>

6. 研究組織

(1)研究代表者

内藤 健 (NAITOH Ken)

早稲田大学 理工学術院 教授

研究者番号: 30323174

(3)連携研究者

相良 慎一 (SAGARA Shinichi)

九州工業大学 工学 (系) 研究科 准教授

研究者番号: 50235199

佐藤 茂 (SATO Shigeru)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙

輸送ミッション本部 主幹研究員

研究者番号: 10358559