

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289053

研究課題名(和文) 小型エネルギー変換機器の高効率・環境性能両立実現のための動的設計法の研究

研究課題名(英文) Research on dynamic design method for achieving both high efficiency and environmental performance of small energy conversion equipment

研究代表者

金子 成彦 (Kaneko, Shigehiko)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：70143378

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：バイオ燃料の活用やエコモビリティの実現に向けては、小型エネルギー変換機器の高効率化と環境性能の両立は必須条件である。本研究では、天然ガス、バイオガス、石炭ガス等を燃料とする小型発電用ガスタービン、バイオガスと液体燃料の両方を燃料とするデュアルフューエル自動車用レシプロエンジン、ジェット燃料やバイオ燃料を燃料とする小型ターボジェットエンジンを対象に、高効率化と環境性能の両立実現の障壁となっている 燃焼振動対策、計算負荷の軽いリアルタイム制御アルゴリズム、ノズルから放出される騒音低減デバイス開発について、化学反応を絡めた新しい視点から各機関に内在する動的問題の解決策を提案した。

研究成果の概要(英文)：Toward utilization of biofuel and realization of eco-mobility, compatibility of the high efficiency of small energy conversion equipment and environmental performance is an essential condition. The problems to be solved in this study are a gas turbine for small power generation operated by natural gas, biogas, coal gas, etc. as fuel, a reciprocating engine for dual fuel automobiles using both biogas and liquid fuel as fuel, jet fuel and biofuel for small turbojet engines to be used as fuel.

In each problem, barriers for achieving both high efficiency and environmental performance embedded are measures against combustion vibration, real-time control algorithm with light calculation load, development of noise reduction device released from a nozzle. We proposed a solution to such dynamic problems inherent in corresponding energy converting devices from a new viewpoint involving chemical reactions.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：エネルギー効率化 環境調和型 制御工学 モデル化 騒音低減 振動現象 燃焼 化学反応

1. 研究開始当初の背景

小型エネルギー変換機器の高効率化と環境性能の両立は必須条件であるが、天然ガス、バイオガス、石炭ガス等を燃料とする小型発電用ガスタービン、バイオガスと液体燃料の両方を燃料とするデュアルフューエル自動車用レシプロエンジン、ジェット燃料やバイオ燃料を燃料とする小型ターボジェットエンジンには、高効率化と環境性能の両立実現の障壁となっている。燃焼振動対策、計算負荷の軽いリアルタイム制御アルゴリズム、ノズルから放出される騒音低減デバイスが求められていた。これらに共通するものは、化学反応を絡めた新しい視点からの動的問題の解決策の提案であった。

2. 研究の目的

上記の課題に共通するものは、燃焼であり、化学反応の影響を考慮する必要があるため、新しい視点からの動的問題を解決するための手法が必要である。本研究の目的は、振動や騒音問題に燃焼が絡む際の手法の提案である。

3. 研究の方法

の燃焼振動については、水素混焼の場合、都市ガス専焼とは異なる振動モードが発現することが実験で観測された。実験に用いている燃焼器の上流側を閉端、下流側を開端の一次元配管として考えた場合、固有振動数は350 Hz という値が算出され、これは都市ガス専焼の結果と一致する。しかしながら、水素混焼の場合には、200 Hz および 400 Hz 付近の振動が観測された。これは、燃焼器よりも上流の配管までを考慮しなければ得ることのできない周波数である。燃焼器の上流側には、保炎のために複雑な流路を有するスワラが設置されており、燃焼面のような急峻な温度変化面の影響を受けて、流路の抵抗が増加していることが考えられる。つまり、上流を閉端として考えた場合にはこれらの発振振動数は得られず、水素混焼の場合には、その燃焼特性が音響的境界条件に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

そこで、本研究では燃焼振動実験から得られた発振周波数の変化について、水素混焼が音響境界条件に与える変化に着目した音響解析を行った。ここでは、音響境界条件として音響インピーダンスを計測し、CFD 解析より求めた温度情報より補正を行う。音響インピーダンスは、一般的にはある媒質を音波が伝搬する際の伝わりやすさを表す指標であるが、

本研究では、燃焼器におけるインジェクタや保炎のためのスワラなど複雑な構造物における流路の抵抗を音響インピーダンスによって表現することを試みた。

次に、については、バイオマスガスのような低カロリーガスをレシプロエンジンで用いるための HCCI エンジンやデュアルフューエルエンジンの燃焼条件設定のための着火遅れ時間の検討を行った。また、デュアルフューエルエンジンの軽油の消費量低減を実現するための自動運転制御システムを構築した。

この中に採用される制御アルゴリズムには計算負荷の低いモデルが必要である。本研究では、精力的にモデル開発に取り組み、リアルタイム制御を実現させることに成功した。さらに、制御目的に計算負荷の軽いエンジン排気中に含まれる NO_x 予測モデルを提案した。

最後に、については、空力騒音低減と推力損失低減が同時に実現できる装置の開発、CFD によるジェットノズル周辺流れ解析、線形安定論理論と渦放出挙動解析により、ジェット騒音低減用ミキシングデバイスの設計指針を得ることができた。

4. 研究成果

については、化学反応方程式の解法を組み込んだ圧縮性流体コードを燃焼が絡む流れの問題に組み込み、高速計算を可能にした。硬直性の高い化学反応方程式に対して、堅牢かつ高速な陽的な時間積分法を提案した。また、小型ガスタービン燃焼器で発生する燃焼振動については、バイオマスガスに含まれるメタン中の水素の含有量によって、配管系を含む燃焼器全体系で発生する燃焼振動の発生振動数と振動モードが変化することを初めて実験的に明らかにするとともに、音響インピーダンスの変化に起因するとの理論を提案した。図1は、提案した理論に基づいて計算された発生振動を当量の関数として整理したもので、図2は実験結果である。3種類の振動数の存在を説明することができている。

については、天然ガスと軽油を燃料とするデュアルフューエルエンジンにおいて、低負荷領域での未燃炭化水素と熱効率の改善、および、高負荷領域での更なる熱効率の向上を目指して、二段噴射の有効性を実験的に調査し、噴射の方針の検討を行った。比較的負荷の低い運転条件では、軽油の噴射を二段とし、一段目の噴射時期を遅い時期に設定することで、天然ガスの燃焼効率が増加することが確認され、未燃炭化水素の大幅な低減の可

能

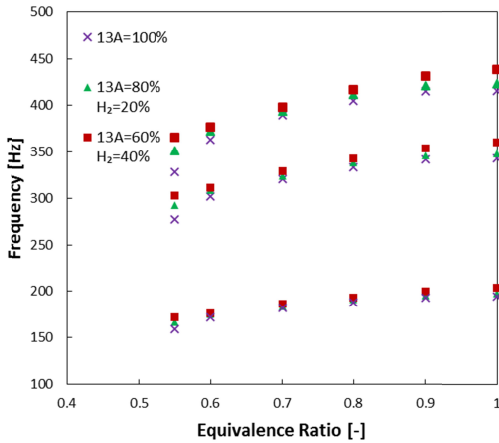


図1 計算結果

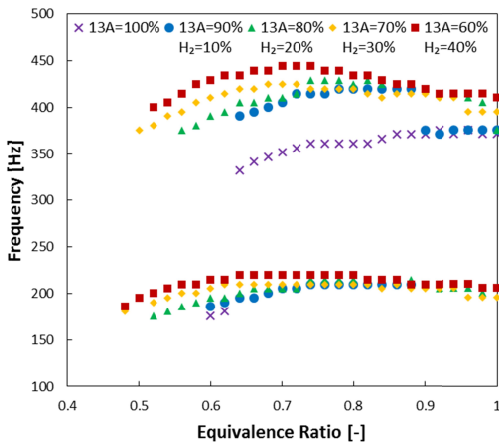


図2 実験結果

性が示された。また、二段目の噴射時期を進角させれば、燃焼重心が進角側へ推移するため、熱効率を高くすることが可能であることがわかった。一方、負荷が高い領域では、軽油の二段噴射によって更なる高熱効率化が見込まれるものの、NOx の排出が増加してしまうことが明らかとなった。二段噴射の噴射間隔を適切に選択し、噴射時期を遅角させることで、熱効率を高く保ったまま NOx の排出を抑えることのできる可能性が示唆された。

については、ジェット騒音低減デバイスとして音響入力によるミキシングデバイスを提案し、模型試験によってその騒音低減効果を検証した。ジェットの低周波加振では SPL とシュリーレン画像、そして過去の研究から低周波音によるジェットの不安定性の増大と

それによるジェット構造の変化が起きていることが示唆された。高周波音によるジェットの音響加振を行った結果、低周波騒音が低減し、シェブロンやノッチと同様な効果を生むことが分かった。以上のように、ジェット構造を維持したまま縦渦に起因する微小擾乱をジェットせん断層に与えるためには高周波でジェットを音響加振する必要があることを確認した。

図3に音源発生器として提案したハルトマンジェネレーター (HG) の概略を示す。

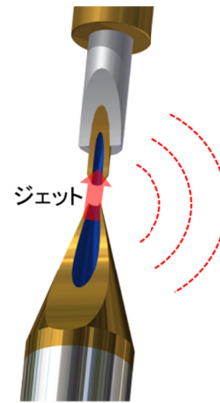


図3 HGの構造

図4には、HGを取り付けた時のジェット騒音低減効果を示す。1000Hzという特定周波数では、騒音レベルが上昇するものの、広周波数領域ではマイクロジェットと比較して低減効果が大きいことが分かる。

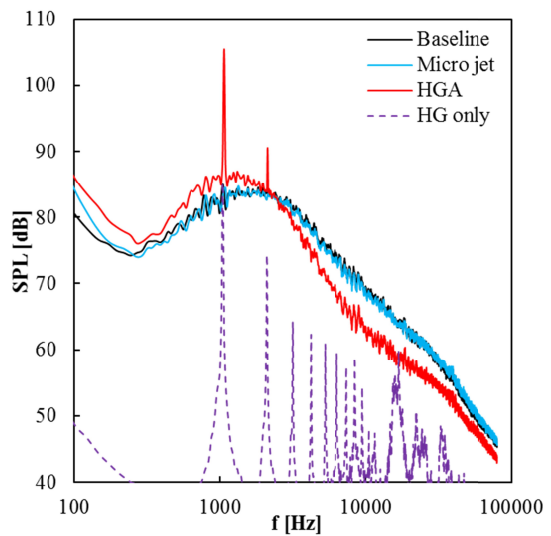


図4 Mj=0.9, f=1100Hz, St=0.09, $\theta=20$ deg., Q=90NL/min(2%), 圧力振幅最大

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

上道茜, 金築一平, 金子成彦, 音響的境界条件を考慮した燃焼振動発振周波数の検討, 日本機械学会論文集, 84 巻 (2018) 861 号 p. 17-00514, 査読有

DOI:

<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-0>

[0514](https://doi.org/10.1299/transjsme.17-0)

林 卓哉, 山崎由大, 金子成彦, 疋田孝幸, 水野沙織, 藤井拓磨, 離散化モデルを用いた HCCI エンジンの制御シミュレーション, 日本機械学会論文集, 84 巻 (2018) 860 号 p. 17-00325, 査読有

DOI:

<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-0>

[0325](https://doi.org/10.1299/transjsme.17-0)

酒向優太朗, 山崎由大, 上道茜, 金子成彦, 天然ガス利用デュアルフェューエルエンジンにおける軽油多段噴射の燃焼特性, 日本機械学会論文集, 84 巻 (2018) 859 号 p. 17-00381, 査読有

DOI:

<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-0>

[0381](https://doi.org/10.1299/transjsme.17-0)

[学会発表] (計 18 件)

Akane Uemichi, Shigehiko Kaneko et. al., Combustion Oscillation Characteristics of Hydrigen-rich Fuel, 4th Symposium of FSSIC (国際会議), 2017 年 8 月 21 日, 日本大学 (東京都千代田区) Yudai Yamasaki, Akane Uemichi et. al., NOx Prediction Model for Diesel Engine Control, COMODIA2017 (国際会議), 2017 年 7 月 25 日, 岡山コンベンションセンター (岡山県岡山市)

Akane Uemichi, Shigehiko Kaneko et. al., Combustion Oscillation in Gas Turbine Combustor for Fuel Mixture of Hydrigen and Natural Gas, ASME-PVP2017 (国際会議), 2017 年 7 月 16 日, ハワイ (アメリカ)

Akane Uemichi, Shigehiko Kaneko et. al., Combustion instability under hydrigen rich condition, 36th Int. Sym. Combustion (国際会議), 2016 年 7 月 31 日, ソウル (韓国)

Akane Uemichi, Shigehiko Kaneko et. al., Development of a prediction method for Combustion oscillation, 11st Int. Conf. on FIV and Noise (国際会議), 2016 年 7 月 3 日, ハーグ (オランダ)

Akane Uemichi, Shigehiko Kaneko, et. al., Proposal of Crterion for Combustion Oscillation Considering Fuel Flexibility, IGTC 2015(国際会議), 2015 年 11 月 15 日, 虎の門ヒルズ (東京都港区)

池村亮祐, 山崎由大他 2 名, バイオマス由来ガスの圧縮自己着火燃焼におけるオゾン添加時の化学反応メカニズム, 日本機械学会 2015 年次大会, 2015 年 9 月 14 日, 北海道大学 (北海道札幌市)

Hirofumi Terashima and Yuu Daimon, Generation of unstable combustion in a non-premixed GCH4/GOX rocket injector, AIAA Propulsion and Energy 2016 (国際会議), 2015 年 7 月 25 日, ソルトレークシティ (アメリカ)

Shigehiko Kaneko, Akane Uemichi et al., Characteristics of combustion oscillation observed in a micro gas turbine combustor fueled by biomass gas, 3rd Symposium of FSSIC (国際会議), 2015 年 7 月 5 日, パース (オーストラリア)

池村亮祐, 山崎由大他 1 名, バイオマス由来ガスを利用したエンジンへのオゾン添加の影響, 第 20 回動力エネルギーシンポジウム, 2015 年 6 月 19 日, 東北大学 (宮城県仙台市)

Akane Uemichi, Shigehiko Kaneko, et. al., Proposal of an Evaluate Formula for Combustion Oscillation Considered an Effect of Laminar Flame Speed, The 4th Korea-Japan Dynamics Symposium (国際会議), 2015 年 5 月 21 日, 釜山市 (韓国)

沢田恭兵, 金子成彦他 4 名, ジェット騒音能動制御のためのミキシングデバイス, 日本航空宇宙学会第55回航空原動機・宇宙推進講演会, JSASS-2015-0037, 2015 年 3 月 9 日, 富山国際会議場 (富山県富山市) 森井雄飛, 寺島洋史他 3 名, 反応性流体解析における化学反応方程式の堅牢・高速な時間積分法, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014 年 12 月 9 日, タワーホール舟堀 (東京都江戸川区)

沢田恭平，金子成彦他 4 名，音響入力によるジェット騒音低減の試み，第 34 回流体力騒音シンポジウム，2014 年 12 月 5 日，東京大学工学部（東京都文京区）

宮内健太，山崎由大他 2 名，デュアルフェューエルエンジンにおけるバイオマス熱分解ガスの燃焼特性，第 52 回燃焼シンポジウム，2014 年 12 月 3 日，岡山コンベンションセンター（岡山県岡山市）

福本将太，金子成彦他 5 名，模型エンジンを利用したマイクロジェットデバイスの騒音低減性能評価に関する研究，第 42 回日本ガスタービン学会定期講演会，2014 年 10 月 22 日，熊本市国際交流会館（熊本県熊本市）

寺島洋史他 2 名，大規模詳細反応機構の適用を可能とする高効率反応性流体解析手法の提案，第 46 回流体力学講演会，2014 年 7 月 4 日，弘前文化センター（青森県弘前市）

宮内健太，山崎由大他 2 名，バイオマス熱分解ガスを利用した Dual Fuel エンジン，第 19 回動力エネルギー技術シンポジウム，2014 年 6 月 26 日，アオッサ（福井県福井市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子 成彦 (KANeko, Shigehiko)

東京大学・工学系研究科・教授

研究者番号：70143378

(2) 研究分担者

山崎 由大(YAMASAKI, Yudai)

東京大学・工学系研究科・准教授

研究者番号：60376514

寺島 洋史(石原 洋史)(TERASIMA, Hiroshi)

北海道大学・工学系研究科・准教授

研究者番号：20415235