

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	信州大学 工学部
職位または役職	助教
氏名	佐藤 光秀

1. 研究題目

次世代型シリーズハイブリッド自動車に用いるリニア発電エンジンの始動推力低減

2. 研究目的

フリーピストンエンジンリニア発電システム(FPEG)(図 1)は、現行のシリーズハイブリッド自動車よりもエネルギー変換効率の高い次世代の発電エンジンとして注目されている。本研究では、FPEG の始動時における推力低減のために、機械共振を活かしたピストン動作制御法の有効性を実証する。

FPEG のエンジン始動過程では、リニア発電機をリニアモータとして利用し、バッテリーの電力を使用してピストンを駆動する。シリーズハイブリッド自動車はバッテリーの充電状況に応じて、始動と停止を繰り返す。そのため、次代の発電エンジンとしての総合効率を改善するためには、リニア発電機の発電効率向上のみでなく、始動時における推力低減も不可欠である。そこで、燃焼室圧縮時の空気ばね効果とばね反発室のばねを活かした共振を利用することで始動推力の低減を図る。非線形のばね特性でも共振が得られるように図 2 の「定推力型共振制御」について検討する。

本研究では、エンジン実験装置を用いて、「定推力型共振制御」適用時の燃焼開始を実証し、始動推力の低減効果を明らかにすることを目的とする。

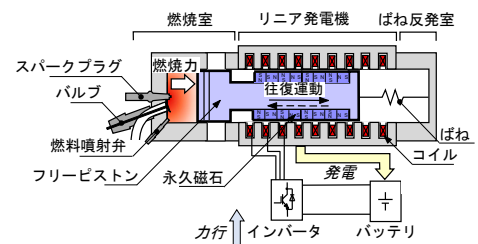


図 1 FPEG の構成

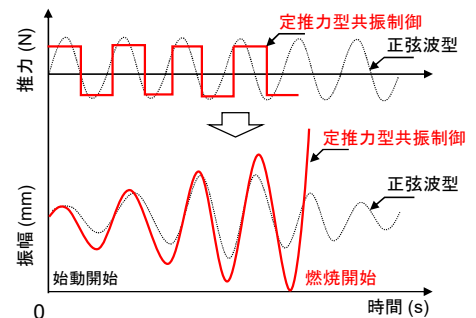


図 2 FPEG の始動法

3. 研究内容及び成果

(1) 機械ばね共振始動実験

図 3 にはエンジン実験装置を示した。実験装置はフリーピストンエンジン、リニア発電機、機械ばねで構成されている。機械ばねの推力は線形性を有し、ばね定数が 276.3N/mm であり、燃焼力との作用で可動子を 40Hz で駆動可能とする。Labview でインバータを制御することで、可動子に作用する推力が制御される。また、エンジンの燃焼室には燃焼圧センサ(CAS-15:シチズンファインデバイス)を取り付けて、エンジンの燃焼状態を確認する。

図 4 には実験結果を示した。図 4(a)のように 280N の作用を加えることで、図 4(b)のようにピストン変位は初期位置から増幅し、182ms の時に上死点に到着した。また、上死点到達時には図 4(c)のようにエンジンの燃焼室の筒内圧力はインパルス状に高くなっており、エンジン燃焼が開始された。また、推力を増加することで、燃焼開始までの振動回数が低下することを確認した。さらに、エンジンと機械ばねのポテンシャルエネルギーを考慮することで適切な推力設定が可能であった。

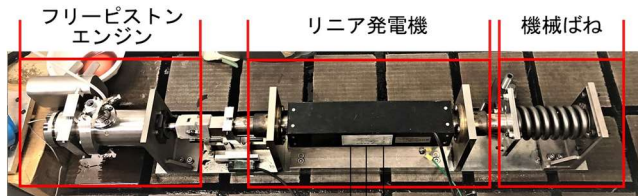
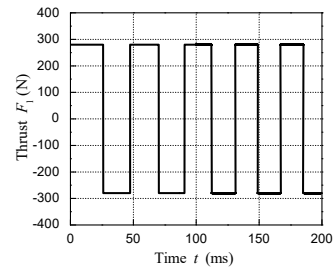
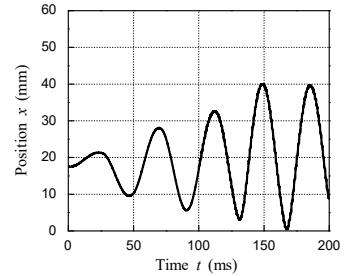


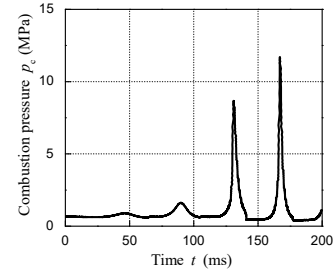
図 3 エンジン実験装置(機械ばね)



(a) 推力



(b) ピストン動作



(c) 燃焼室圧力

図 4 実験結果(機械ばね)

(2) 空気ばね共振始動実験

機械ばねの長期的信頼性を考慮し、エンジンの対向部分を空気ばねで構成される方式も提案されている。しかし、空気ばねの推力特性は非線形性を有するため、機械ばねよりも共振が発生しにくい。そこで、空気ばねを用いた図 5 の実験装置を構築し、定推力始動法の有効性を確認した。空気ばねはコガネイ製のダイナシリンダを利用して、ばねの反発力を高めるために 2 個並列としている。空気ばねの反発力は圧力センサを使用して測定し、非線形性の特性を有することをあらかじめ確認した。

図 6 には実験結果を示した。280N の定推力作用を与えることでピストン変位は初期位置から増幅し、354ms の時に上死点に到着した(図 6(a))。また、エンジンの燃焼室の筒内圧力(図 6(b))は、上死点に達した瞬間にインパルス状に高くなっており、エンジン燃焼が開始可能であることを確認した。

以上より、線形・非線形いずれの特性を有するばねでも、定推力始動法を適用することで、エンジンの燃焼開始が可能であることを確認した。

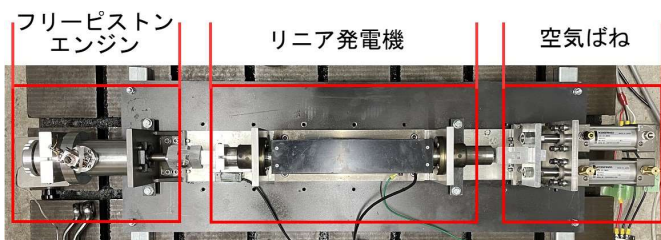
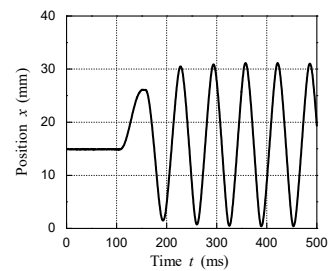
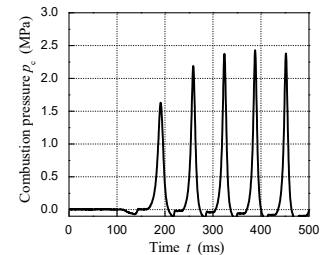


図 5 エンジン実験装置(空気ばね)



(a) ピストン動作



(b) 燃焼室圧力

図 6 実験結果(空気ばね)

4. 今後の研究の見通し

(1) デュアルエンジン型における発電効率の改善

ばねを利用せずに 2 基のエンジンでリニア発電機を挟み込む構造のデュアルエンジン型は、エンジンの熱損失やばね損失の改善が可能となるため、総合的な効率向上に期待される。シングルエンジン型と同様にデュアルエンジン型でもピストン動作の可変性を活かして、発電効率の改善効果を明らかにしたい。

(2) 4 ストローク化のためのインバータ制御

地球環境を考慮して水素エンジンの開発が進められており、FPEG に適用することも検討されている。水素エンジンの熱効率改善にも 4 ストローク化が有効であるが、FPEG の構造を考慮すると、4 ストローク化にはリニアモータを利用してピストンを駆動する必要がある。そこで、ピストンの運動を工夫することで、リニアモータ駆動時の消費電力を低減する検討を進めたい。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文（査読付）

- [1] Mitsuhide Sato, Takumi Goto, Jianping Zheng, Shoma Irie: “Resonant Combustion Start Considering Potential Energy of Free-piston Engine Generator”, *Energies*, Vol. 13, No. 2, Art. No. 5754, pp. 1-17, 2020.
- [2] Mitsuhide Sato, Shoma Irie, Jianping Zheng, Tsutomu Mizuno, Fumiya Nishimura, Kaname Naganuma: “Generator design considering mover action to improve energy conversion efficiency in a free-piston engine generator”, *Electronics*, Vol. 10, No. 17, Art. No. 2142, pp. 1-14, 2021

国際会議（査読付）

- [3] Jianping Zheng, Kaname Naganuma, Masami Nirei, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno: “Improvement of Thermal Efficiency via High-Frequency Driving of Mover in Free-Piston Engine Linear Generator”, *Proc. ICEMS2020 (International conference on Electronic Magnetics Systems)*, LS8C-1, pp. 1643-1648, 2020.
- [4] Shoma Irie, Jianping Zheng, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno, Fumiya Nishimura, Kaname Naganuma: “Loss-Reduction Effect with the Variation in the Mover Motion in a Dual-Sided Free-Piston Engine Generator System”, *Proc. LDIA2021 (The 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Application)*, 95, pp. 562-567, 2021.

国内学会（査読なし）

- [5] 入江 渉馬, 佐藤 光秀 他: 「リニア発電エンジンのエネルギー変換効率最大化のための可動子動作を考慮したシステム構築法」, 第 33 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD33), SEAD33-42, 2021.
- [6] 入江 渉馬, 佐藤 光秀 他: 「デュアル型リニア発電エンジンにおける可動子動作履歴の変化に伴う損失低減効果」, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-21-031, pp.1-6, 2021.