

2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	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損失最小化

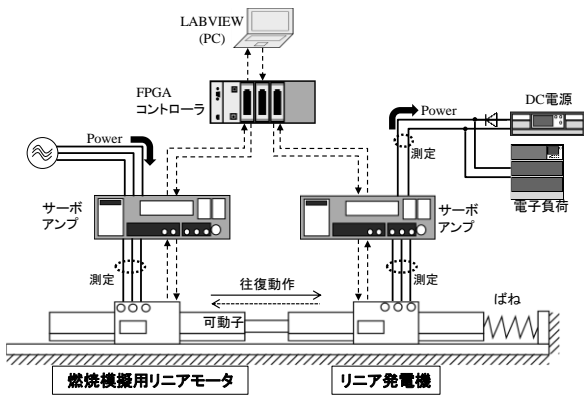
2. 研究目的

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、フリーピストンエンジンリニア発電システム(以下、FPEG)が期待されている。FPEGは機械損失や熱損失の低減に期待が高いものの、発電効率は低下しやすい。それは、シリーズハイブリッド車では、燃焼エネルギーがバランスウェイトにより平準化されて回転形発電機の駆動力となるのに対し、FPEGではダイレクトにリニア発電機に作用するためである。また、回転形発電機では同一方向にほぼ一定速回転のまま発電を続けることが可能であるが、リニア発電機は往復運動しながら発電するため、速度ゼロ点が存在することにも起因する。これらの特徴により、低効率の低速動作時間や高出力時間が増え、リニア発電機の損失は増加しやすい。即ち、次代の発電エンジンとしての期待に応え得るFPEGの実現には、これらの問題を解消し、リニア発電機の発電効率改善が不可欠である。これまでに申請者は、発電制動力の作用について、低速域で抑制する(低速抑制)とともに、高速域で上限値を設定する(上限設定)を利用して、銅損を削減する制御手法を提案した。また、シリーズハイブリッド車のバランスウェイトのように、リニア発電機の可動子(即ち、ピストン)を動作させることで、発電機出力が平準化され、発電効率が3%程度改善されることをシミュレーションで確認した。そこで、本申請では、発電機仕様を考慮して、損失最小化制御を利用した場合の発電効率の改善効果を実証し、次代の発電エンジンとしての実現性を明らかにすることを目的とする。

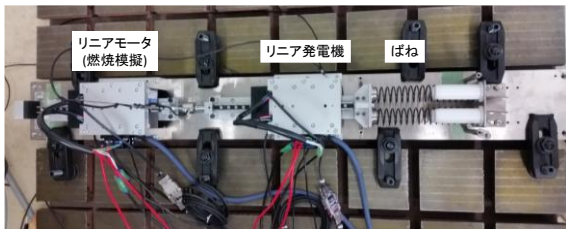
3. 研究内容及び成果

FPEG の性能を把握するため、小出力で動作を模擬する図 1 の実験装置を構築した。2 つのリニアサーボモータで構成され、それぞれ燃焼力の模擬と発電の模擬を行う。

実験結果を図 2 に示した。図中(a)はピストン動作履歴である。制動力係数の減少に伴い、ピストン動作ストロークが 23.7, 25.5, 27.1, 27.9 mm と増加することを確認した。このときの各動作をそれぞれ Case1~4 とする。同図中(b)は燃焼力とピストン動作履歴の状態図である。エンジンのオットーサイクルに類似した燃焼力が模擬され、Case1~4 のいずれも図示仕事(即ち、発電機入力)は同一であった。同図中(c)は出力電力である。正側が力行、負側が発電を示しており、発電のみで動作継続可能である。また、膨張行程の最大出力が Case1 よりも Case4 で小さくなっている。図 3 はエネルギー収支である。同図中(a)は膨張行程と圧縮行程の発電量を示している。掃気後のストローク増加に伴い、膨張行程での発電量が抑制され、圧縮行程の発電量が増加している。これは、ストロークの増加に伴い、ばねの弾性エネルギーとして蓄える量が増加し、圧縮行程に発電量を分散させたことに起因していると判断される。また、同図中(b)はエネルギー収支を示したものであり、i)は銅損、ii)は出力、iii)は残存損(摩擦損、鉄損など)である。掃気後のストローク増加に伴い、銅損が削減され、出力は最大化した。以上から、提案した手法は発電電力を平準化し、発電効率の改善に有効であると判断された。

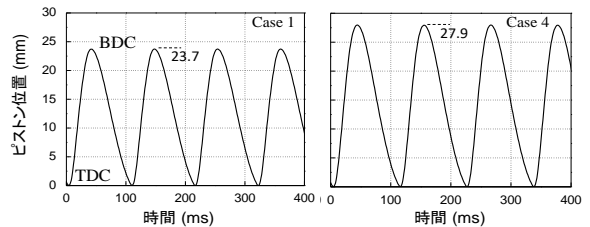


(a) 全体構成

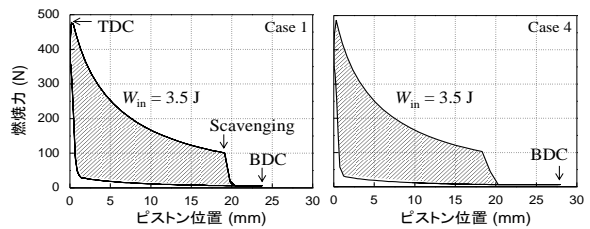


(b) 可動部の構成

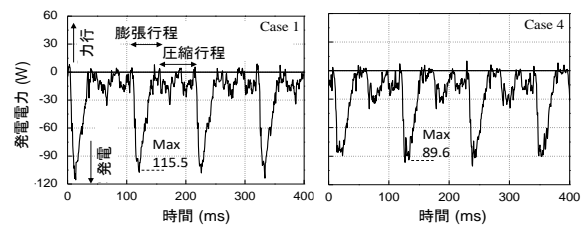
図 1 実験装置



(a) ピストン動作

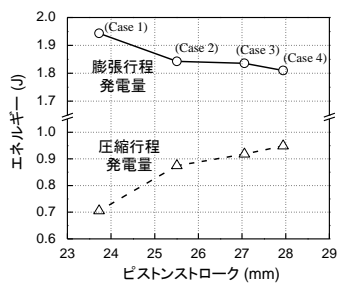


(b) 燃焼力

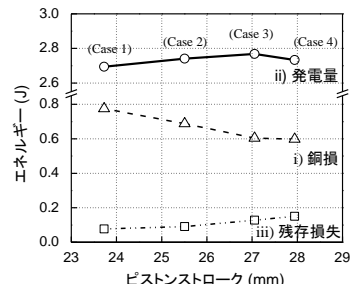


(c) 発電電力

図 2 実験結果



(a) 各ストロークの出力



(b) 出力と損失

図 3 エネルギー収支

4. 今後の研究の見通し

(1) 燃焼を考慮した損失最小化制御の有効性

本申請ではリニアモータで燃焼を模擬した発電実験装置を用いて、損失最小化制御の上限設定の効果を確認した。さらなる発電効率改善には、制動力の低速抑制に伴う発電量の抑制も必要とする。その場合には、低速で可動子が動作する燃焼前に慣性力のみを使用する。即ち、損失最小化制御は可動子(即ち、ピストン)の動作を変化させることになるが、その場合の燃焼状態への影響については確認されていない。そこで、損失最小化制御が燃焼に与える影響を明らかにし、連続的な燃焼が可能であることを実証したい。

(2) デュアルエンジン型における発電効率の改善

2基のエンジンでリニア発電機を挟み込んだデュアルエンジン型は、熱発生分散化、ばね損失の改善などが期待されるため、総合的な効率の改善が期待されている。そこで、本申請で明らかにしたシングルエンジン型の損失最小化制御をデュアルエンジン型に応用した可動子動作制御方法を明らかにしたい。

(3) エンジン始動のためのリニアモータ制御

本システムは、エンジンの始動時には、リニア発電機をリニアモータとして駆動力を作用することで、燃焼を開始させるように可動子を動作させる必要がある。そこで、モータの電力消費を最小限とするようなエンジン始動方法を検討し、損失最小化制御と組み合わせた動作制御方法を明らかにしたい。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

<学術論文(査読有)>

- [1] 佐藤 光秀, 楡井 雅巳, 山中 雄一朗, 鈴木 樹, 後藤 拓海, ト 穎剛, 水野 勉:「フリーピストンエンジンリニア発電システムにおける出力分散を利用した銅損低減効果」, 電気学会 D 論文誌, Vol. 139, No. 1, pp. 69-75, 2019

<国際会議論文>

- [2] M. Sato, M. Nirei, Y. Yamanaka, T. Suzuki, T. Goto, Y. Bu, and T. Mizuno: “Top Dead Center Position Control while Maintaining Regeneration in a Free-piston Engine Linear Generator System”, Proceedings of the ICPT 2018 (The 8th International Conference on Positioning Technology), 1062, pp.1-6, 2018
- [3] T. Suzuki, K. Naganuma, M. Nirei, M. Sato, Y. Yamanaka, T. Goto, Y. Bu, and T. Mizuno: “Examination of a Free-piston Engine Linear Generator System with Opposite-side Combustion”, Proceedings of the 12th LDIA2019 (International Symposium on Linear Drives for Industry Applications) Tu-1-A, pp.1-6, 2019

<国内学会論文>

- [4] 佐藤 光秀, 楡井 雅巳, 山中 雄一朗, 鈴木 樹, 後藤 拓海, ト 穎剛, 水野 勉:「フリーピストンエンジンリニア発電システムにおける回生状態を維持した上死点位置制御」, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-19-017, pp. 1-6, 2019
- [5] 鈴木 樹, 長沼 要, 楡井 雅巳, 佐藤 光秀, 山中 雄一朗, 後藤 拓海, ト 穎剛, 水野 勉:「フリーピストンエンジンリニア発電システムにおける対向燃焼化の検討」, 電気学会産業応用部門リニアドライブ研究会, LD-19-016, pp.1-6, 2019