

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560310

研究課題名(和文) リニア発電エンジンの研究開発

研究課題名(英文) Research of Internal Combustion Engine with Linear Generator

研究代表者

大道 武生 (OOMICHI, Takeo)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：20340292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：クランク機構を有しないリニア発電エンジンのメカニズムを提言するとともに、高効率運転が可能な運動サイクルが実現できることを、主として、コンピュータシミュレーションによって確認した。すなわち、燃焼行程では、発電損失を最小とする速度で、かつ、内部エネルギーを使い切るまでストロークを延長する。圧縮行程では、ピストンが上死点で停止す位置でモータを止め、その後は慣性力のみで圧縮を行う。また、吸・排気工程では、背圧を充分さげるようにゆっくり運転を行うことで、高効率化が実現できる見通しを得た。なお、燃焼・排気工程と圧縮・吸気行程のストロークは同じにする必要がないため、制御則の制限が少ないのも特徴である。

研究成果の概要(英文)：The concept of the Internal Combustion Engine with Linear Generator(ICELG) which has no crank mechanisms was proposed and the engine can be operated with high efficiency in computer simulation. Two methods are useful in combustion stroke. One is to operate under minimized regeneration current fluctuation. The other makes long stroke minimizing internal energy of the cylinder. The Linear motor as compression stroke is stopped at the position from which the engine piston can move to top dead center without linear motor drive. The motor as two strokes of intake and exhaust are driven slowly against tiny back pressure. As these piston controls saves energy of generated electric energy in combustion stroke, ICELG has high efficiency. Here, strokes of combustion and exhaust do not need same strokes of intake and compression. It makes control method simple or easy. This shows advantage of ICELG compared with conventional engines as energy saving.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：メカトロニクス エンジン

1. 研究開始当初の背景

地球環境保全は国策として取り上げられている重要な研究分野である。その一環として、太陽光発電、風力発電等、化石燃料からの脱却の視点からの取り組みが進展している。しかし、本質的に、発電コストが高いという大きな課題がある。クランク機構を有する内燃機関（以下、従来エンジン）は、長年の使用実績があり、世界中の過酷な環境で使用されている。特に、安価、堅牢という優れた特長を有する。一方で、これ以上の省エネルギー化については、クランク機構の持つ本質問題を解決しなければ、大きな進歩が得られない状況にあった。

2. 研究の目的

上記の状況を打開するために、以下の目的で研究を実施した。

(1) リニア発電エンジンの提案

燃焼工程における発電エネルギーを貯蔵し、その他の工程のピストンの外部駆動運動のエネルギーとして活用することを発想した。すなわち、完全フリーピストン方式の内燃機関（ICELG: Internal Combustion engine with Liner Generator）の機構と制御方法を提案した。

(2) ICELG の実現性検証

ICELG は、世界的にも研究の実績が少ない。したがって、各工程における最適ピストン速度の設計、エンジン効率と発電・モータ効率の整合、蓄・放電システムの開発等の具体例を示し、その実現性を明確にする必要がある。

3. 研究の方法

(1) シミュレータ構築

ICELG は他に参考とする例がないため、従来エンジンの性能を参考にシミュレータを構築し、コンピュータ上で性能比較を行う [1]。

(2) 試設計

ICELG を試設計し、シミュレータと比較することで、最大効率を有するシステムパラメータの同定と効率評価を行い、より効率の高い ICELG を抽出する。

(3) シミュレータ妥当性評価

上記、試設計を模擬した模擬試験装置を製作し、シミュレータ計算の妥当性を評価する。これらをループ的に回すことで、提案する ICELG の最適化をはかる。

4. 研究成果

(1) リニア発電エンジンの提案

図1に示すように、ICELG はピストン、シリンダ、バルブからなる簡素なエンジン機構部と急速充放電対応のキャパシターとその制御を行う充放電回路部から構成される。

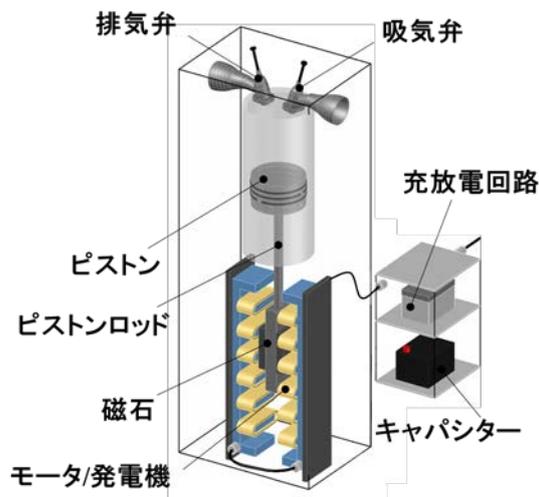


図1 ICELG の概念

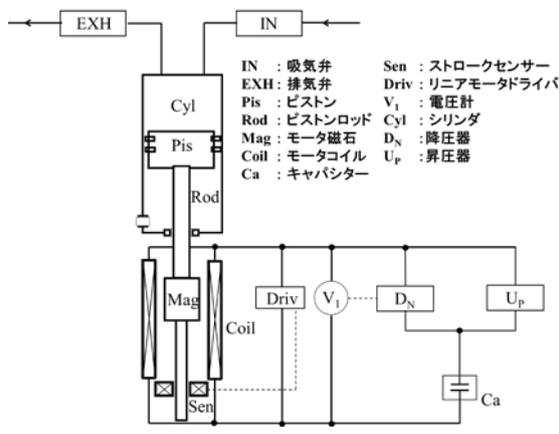


図2 ICELG の電気系統

2つの機能は、リニア発電（燃焼行程）・モータ（その他の行程）によって電氣的に結合される（図2）. したがって、各行程は、機械的な結合をもたず、各々の工程での効率を最大化する様に独立した制御を行うことができる. 充放電には、高速大容量キャパシタを用いることで、充放電損失を低減させている.

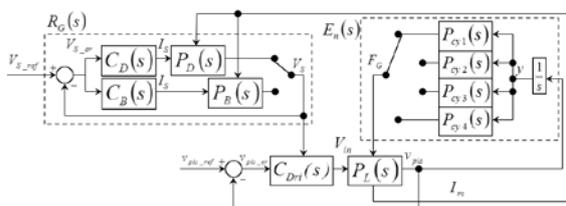
(2) シミュレータ開発

シミュレータは、ICELG を機能ごとに計算が可能のように、図3のようにモデル化する. 主たる構成要素は以下である.

①モータ・ピストン：モータコイルと抵抗からなる電気要素とモータ可動子とピストン部の運動機構から構成される.

②シリンダ要素：シリンダ内のガスの状態をポリトロープ変化であらわすモデルで模擬する. この要素は、燃焼、排気、吸気、圧縮の4工程で、ガス挙動が異なるので各行程に応じて、切り替えて利用する.

③充放電要素：充放電要素は、リニアモータの回生回路で模擬する. すなわち、モータ駆動電圧が定格電圧を上回った時、降圧回路が作動、下回ったとき昇圧回路が作動するようになっている.



$E_n(s)$: エンジン	$P_L(s)$: リニアモータモデル
$R_C(s)$: 充放電回路	F_G : ピストン力
$C_B(s)$: 昇圧制御器	I_S : 昇降圧電流
$C_D(s)$: 降圧制御器	I_m : モータ電流
$C_{Dr1}(s)$: リニアモータドライバ	V_S : 駆動電圧
$P_B(s)$: 昇圧器	$V_{S,er}$: 駆動電圧偏差
$P_D(s)$: 降圧器	$V_{S,ref}$: 駆動電圧目標値
$P_{C1}(s)$: 燃焼ガスモデル	V_{in} : モータ駆動電圧
$P_{C2}(s)$: 排気ガスモデル	v_{pis} : ピストン速度
$P_{C3}(s)$: 吸気ガスモデル	$v_{pis,ref}$: ピストン速度目標値
$P_{C4}(s)$: 圧縮ガスモデル	y : ピストン位置

図3 シミュレータの基本モデル

(3) 最適運転の探索

開発したシミュレータを用いていくつかの運転パターンを調べた結果、以下の有用な運転パターンを得た.

①燃焼行程

燃焼行程では、燃焼によって発生したエネルギーを発電用としていかに使い切るかが重要である. そこで、下死点のシリンダ内圧を大気圧まで膨張させることを考えた. また、発電機に流れる電流による損失は、その2乗に比例して増えるので、電流損失を最小化するピストン駆動を考慮した. そして、簡易な解としてピストン速度を直線的に下げるように制御することによって、良好な結果を得た. さらに、種々の速度指令関数を組み合わせることで、より高効率な解が存在することと思われる.

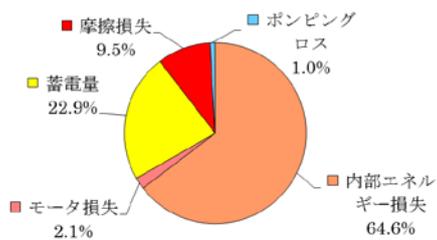
②排気工程

提案の行程では、燃焼行程終了時のシリンダ圧力は大気圧に等しい. よって、シリンダ運動によって背圧が立たないようにゆっくりと排気を行うことで、排気損失を減らすことができる.

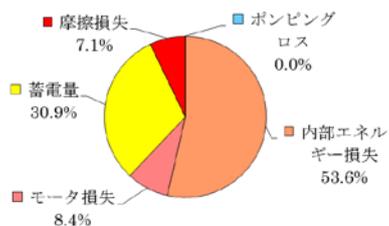
③吸気行程：吸気行程では、排気工程の逆のシリンダ動作を実施する. ただし、ストロークは燃焼、排気工程と同じとする必要はなく、圧縮行程での圧縮比を考慮したストロークとすることができる.

④圧縮行程

モータの圧縮エネルギーは、シリンダ内ガスの内部エネルギーとピストンの運動エネルギーとなる. ここで、内部エネルギーは燃焼行程の初期エネルギーとなるので、燃焼行程で回収可能である. また、ピストンの運動エネルギーは、ガス圧縮動力として再利用する. すなわち、上死点でピストン速度がゼロになるタイミングでモータをフリーにしてピストンの慣性力のみで圧縮を行い、モータの電流損失をゼロにする. この方法によって大幅なエネルギー損失を低減できたことができた（図4）[2].



(a) 従来エンジン



(b) ICELG 最適運転例

図4 エンジン効率の計算例

(4) 模擬試験装置

模擬試験装置は、ピストン運動をボールネジで模擬したもので、エンジン模擬シリンダに燃焼エネルギーと同等の高圧ガスを充填して燃焼行程を模擬する。試作の結果、他行程では、シミュレータの妥当性をおおむね確認できた。燃焼行程では、ボールねじの可逆特性のために精度良いデータを得るに至らなかった。また、リニアモータ直動方式を試行したが、摩擦損が大きく高精度なデータは得られなかった。しかし、定性的にはシミュレータとの一致をみることができ、シミュレータ評価の有用性を知ることができた。

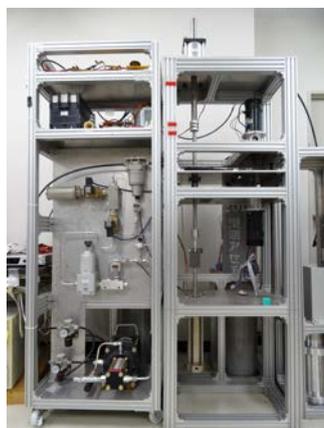


図5 模擬試験装置

(5) 他への波及

ICELG の概念は突き詰めれば、理想的熱サイクルを実現することであり、スターリングサイクルへの展開をはかる足掛かりとなった[3].

(6) 結論

ICELG は、運転制御を適正化することによって、従来エンジンを超える効率を得ることができることを示した。また、リニアモータの摩擦軽減等、現状の市販機器の改良点を明確にした。これらを考慮することによって、ICELG の実用化への道筋を明らかにした。

なお、ICELG は可変ストロークエンジンとしても活用可能であり、可変容量（小出力〜大出力エンジン）としても活用できる。また、燃料組成変化時のリアルタイム適合等多くの利用方法があり、従来不可能視されていた領域にも適用範囲を広げる新しいエンジンといえる。

<引用文献>

- ① Hiroki Ishikawa, Yuta Takeda, Satoshi Ashizawa, and Takeo Oomichi: Efficiency improvement of the electric generating engine system based on internal combustion engine, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 24, No. 3 pp487-497, 2012/6
- ② 石川 広基, 武田 佑太, 石原 丈裕, 鈴木 翔 (名城大), 芦澤 怜史, 大道 武生; クランク運動に依存しない発電エンジンシステムの開発(その4), 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2012) 予稿集, CDR 2E1-3, 2012.12.19
- ③ 大脇 知也, 平子 大輔, 大道 武生; リニアスターリングエンジンの研究開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 2014.05.26

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 1 件)

①Hiroki Ishikawa, Yuta Takeda, Satoshi Ashizawa, and Takeo Oomichi: Efficiency improvement of the electric generating engine system based on internal combustion engine, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.3 pp487-497, 2012/6 (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

①平子大輔, 大脇智也, 大道武生, 芦澤怜史; リニアスターリングエンジンの研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2014.05.18 (京都)

②鳥居 蔵人, 石原 丈裕, 大道 武生; ICELG のエネルギーシミュレータ, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2014.05.26 (富山)

③平子 大輔, 大脇 知也, 大道 武生; リニアスターリングエンジンのエネルギーシミュレータの検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 2014.05.26 (富山)

④石川 広基, 武田 佑太, 石原 丈裕, 鈴木 翔, 芦澤 怜史, 大道 武生; クランク運動に依存しない発電エンジンシステムの開発(その4), 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2012) 予稿集, CDR 2E1-3, 2012.12.19 (京都)

⑤石川広基, 武田佑太, 石原丈裕, 鈴木翔, 芦澤怜史, 大道武生; クランクに依存しない発電エンジンシステムの開発—高効率運転方法—, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2A2-I05(CD-R), 2012.05.29 (浜松)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: リニアスターリングエンジン発電装置及びそれを利用した発電方法

発明者: 大道 武生, 芦澤 怜史

権利者: 学校法人名城大学

種類: F02G 1/053

番号: 特願 2014-106920

出願年月日: 平成26年5月23日

取得年月日:

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ:

<http://mechatronics.meijo-u.ac.jp/labs/rrr002/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大道武生 (OOMICHI, Takeo)
名城大学 理工学部 教授

研究者番号: 20340292

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

小島晋爾 (KOJIMA, Shinji)
名城大学 理工学部 教授

研究者番号: 70394434