

平成21年 6月 23日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19860071  
 研究課題名（和文）自動車エンジン用電磁駆動バルブのためのリニアモータと制御系に関する研究  
 研究課題名（英文）Study on Control System and Linear Motor for Electromagnetic Engine Valve  
 研究代表者  
 打田 正樹（UCHIDA MASAKI）  
 福井工業大学・工学部・講師  
 研究者番号：80454437

## 研究成果の概要：

自動車エンジン用電磁駆動バルブ(ElectroMagnetic engine Valve：以下 EMV と略記) のバルブ駆動用のリニアモータの設計・試作を行い、その推力特性を測定することでその性能を明らかにした。その結果からさらに性能を改善した新型リニアモータ構造を提案することができた。

従来の EMV 用のバルブ位置決め制御系の性能を改善する新たな制御系を提案することができた。さらに、EMV に対するエンジン環境下の外乱を明らかにし、バルブ位置決め制御系の外乱に対する性能を明らかにした。

以上のことによって EMV 実用化に関する多くの知見を得ることができた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,340,000	0	1,340,000
2008年度	1,320,000	396,000	1,716,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,660,000	396,000	3,056,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電気機器工学

キーワード：リニアモータ，エンジン，制御，スライディングモード制御

## 1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化が問題となっている。その問題を解決するためには自動車の燃費を改善し、二酸化炭素排出量を削減することが必要不可欠である。現在ハイブリット自動車などが普及しつつあるが、ガソリンエンジン自体の燃費は頭打ちの状態である。そこで燃費を大幅に改善することができる技術の一つとして、自動車エンジン用電磁駆動バルブ

(ElectroMagnetic engine Valve：以下 EMV と略記)がある。EMV は、従来のカムに換えて電磁アクチュエータによって吸排気バルブを駆動するものである。従来申請者は、EMV の駆動源にリニアモータを用いることを提案し、EMV 実現のために、バルブ駆動用のリニアモータとバルブ位置決め制御系に関する研究を行ってきた。リニアモータを用いることで、従来の EMV より自由な開閉軌跡

でバルブを駆動することができる。よって、より性能の高い EMV を実現できる可能性がある。これまでの研究成果として、EMV 用途に利用できる可能性のあるリニアモータとバルブ位置決め制御系を提案し、リニアモータを用いた EMV の実現可能性を見出すことができた。本研究では、EMV 実用化の点から、提案した永久磁石可動型リニアモータとバルブ位置決め制御系の性能を検証する。

## 2. 研究の目的

研究の目的は、提案した永久磁石可動型リニアモータとバルブ位置決め制御系の性能を検証することである。具体的には以下のことを目的とする。

- (1) 提案した永久磁石可動型リニアモータの試作を行い、その特性を測定することで性能を実験的に明らかにする。
- (2) エンジン環境下における外乱を明らかにする。
- (3) エンジンに搭載して EMV の性能を検証する前段階として、バルブ位置決め制御系のエンジン環境下における耐外乱性能を明らかにする。

さらに、以上の事柄を明らかにする過程で得られる知見を通して、EMV 用のリニアモータとバルブ位置決め制御系の高性能化を行う。

## 3. 研究の方法

### (1). リニアモータに関する研究

- ① リニアモータの試作を行うにあたり、有限要素法による磁場解析を用いて、再設計および詳細設計を行う。
- ② 永久磁石可動型リニアモータの試作を行い、その特性を測定することで性能を検証する。

### (2). エンジン環境下の外乱の測定

- ① エンジンの外乱として、エンジンヘッドの温度変化、振動を測定する。温度センサおよび3軸加速度センサをエンジンヘッドに取り付け、それぞれの測定を行う。その振動を再現する加振器を作成する。

### (3). バルブ開閉制御系に関する研究

- ① EMV を加振器に搭載し、バルブ位置決め制御系を用いた実験を行う。

## 4. 研究成果

### (1). リニアモータに関する研究

リニアモータに関する研究成果を以下に示す。

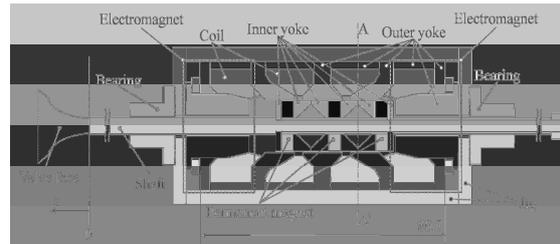


Fig.1 Structure of redesigned linear motor.

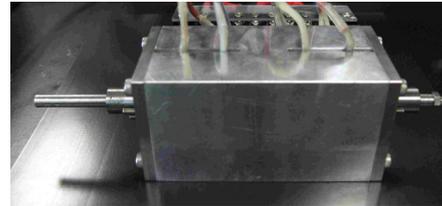


Fig.2 Exterior of prototype linear motor.

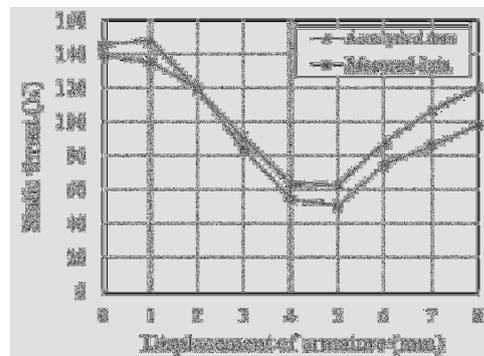


Fig.3 Static thrust characteristics (Analytical and measured data).

- ① 提案した永久磁石可動型リニアモータの構造を再設計することで、その性能を改善することができた。
- ② 再設計を行った永久磁石可動型リニアモータを試作し、その性能を実験的に明らかにすることができた。
- ③ 上記の永久磁石可動型リニアモータより高性能なリニアモータを提案することができた。

具体的な成果を以下に述べる。

### ① リニアモータの再設計

提案した永久磁石可動型リニアモータ[1]の構造について考察を行うことで、さらに高性能化できる可能性があることがわかった。そこで提案した永久磁石可動型リニアモータの再設計を行った。ここで再設計後の永久磁石可動型リニアモータの構造を Fig.1 に示す。特にコイルスペース形状とティース形状について重点的に再設計を行った。その結果、推力定数/可動子質量(N/A・kg)を約 7%改善することができた。推力定数/可動子質量とは、本研究で用いている設計指針であり、この値が高いほど高い応答性能が望める。

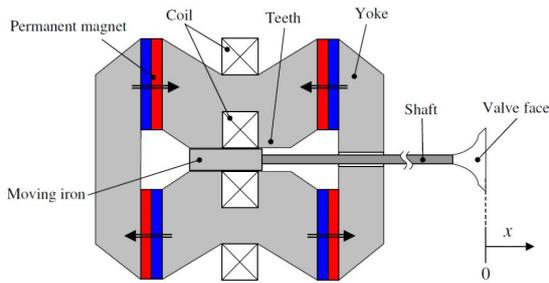


Fig.4 Structure of new type linear motor for EMV.

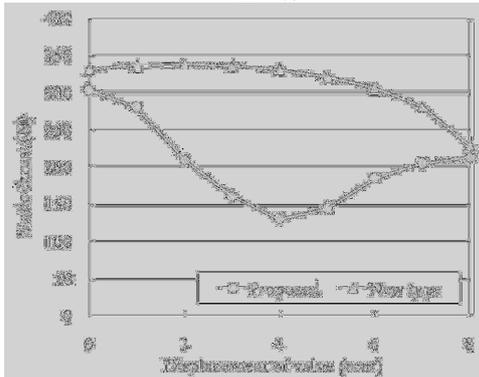


Fig.5 Static thrust characteristics of new type and moving magnet type linear motors (analytical data).

① 試作リニアモータの性能の検証

再設計したリニアモータの試作を行った。ここで、その外観を Fig.2 に示す。また、試作リニアモータの静推力特性を Fig.3 に示す。ただし、Fig.1 に示す位置に可動子がある場合を可動子位置の原点とし、バルブが開こうとする方向に励磁(10A)した。Fig.3 より、ほぼ設計どおりの性能を発揮していることがわかる。

一方、試作リニアモータの動特性を測定するために、試作リニアモータ専用の駆動回路を製作した。その駆動回路を用いて試作リニアモータにステップ状の電圧を印加した結果、従来のリニアモータ[2]より、高速な応答を実現していることが確認できた。

② 新型リニアモータの提案

制御性の点から、リニアモータの推力特性はできるだけ平坦な方がよい。そこで、試作リニアモータの推力特性を改善する新たなリニアモータを提案した。ここで、その新型リニアモータの構造を Fig.4 に示す。この新型リニアモータは可動子鉄片型であり、固定子に永久磁石を用いている。その静推力特性(解析値)を再設計後の永久磁石可動型リニアモータのものと合わせて Fig.5 に示す。ただし、アンペアターンはどちらも同じ値(8000Aターン)としている。Fig.5 より、永久磁石可動型リニアモータより平坦な推力特性を実

Table1 Maximum value of measured data of acceleration.

Cases	Max. Acceleration (G)		
	X axis	Y axis	Z axis
Case1	4.4	0.8	0.5
Case2	5.6	3.1	1.6
Case3	5.6	3.5	1.2

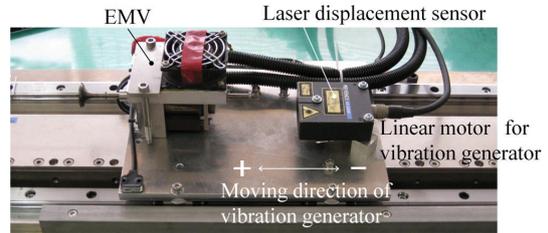


Fig.6 Exterior of vibration generator and EMV.

現していると同時に、ストローク全体で高推力化できていることがわかる。また、永久磁石可動型リニアモータと比べ、可動子質量/推力定数は約 1.3 倍、ストローク平均推力は約 1.5 倍にすることができた。

以上のリニアモータに関する研究内容について、現在雑誌論文を執筆し投稿中である。また、高性能化を実現した新型リニアモータは、モータ体格と推力の点で高性能であり、その構造は従来にないものである。よってこの新型リニアモータに関する学会発表を行う予定である。また、それに伴い特許の出願を行った。

今後、新型リニアモータの試作を行い、その性能を実験的に検証する予定である。

(2). エンジン環境下の外乱の測定

エンジンの外乱を測定することで、その外乱を明らかにすることができた。具体的な成果を以下に述べる。

温度センサを用いて、エンジンヘッドの温度を測定した。その結果、約 90℃であることがわかった。リニアモータに用いている永久磁石のキュリー温度は約 180℃であり、永久磁石が不可逆減磁しないことがわかった。

3 軸加速度センサを用いてエンジンヘッドの振動を測定した。測定対象は、一般的なガソリンエンジン車(総排気量約 2500cc, 4 気筒, 横置き)である。ここで加速度の最大値の絶対値を Table1 に示す。ただし、Case1 はアイドルリング中(エンジン回転数約 600rpm)、Case2 は停車中(エンジン回転数 600~5000rpm)、Case3 は走行中(エンジン回転数 600~5000rpm)をそれぞれ示す。また、X 軸は車体の上下方向、Y 軸は車体の前後方向、Z 軸は車体の左右方向である。Table1 より、振

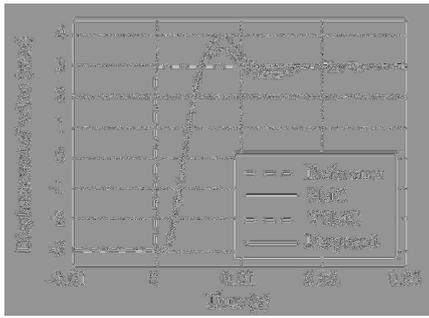


Fig.7 Time responses of displacement of valve using proposed controller, VSMC and SMC.

動の最大値は X 軸方向において 5.4G であり、測定対象のエンジンは上下方向に大きく振動していることがわかる。

一方、EMV はストローク方向に外乱の影響を大きく受ける。加速度の測定結果とエンジンのバルブ傾斜角を考慮すると、EMV のストローク方向にかかる振動の最大値は約 6.5G となる。この加速度で EMV を加振することができる加振器を作成する。ここで、その加振器の外観を Fig.6 に示す。ただし、振動の最大加速度で加振できる加振器を作成するものとし、加速度サーボは行わない。また、加振する方向は Fig.6 に示す向きとし、同図左方向を正方向とする。

### (3). バルブ位置決め制御系に関する研究

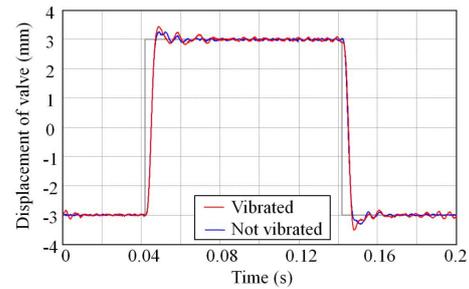
バルブ位置決め制御系に関する研究の成果を以下に示す。

- ① 従来の制御手法の問題点を解決した新たな制御手法を提案することができた。
- ② 制御系の振動に対する耐外乱性能を明らかにすることができた。

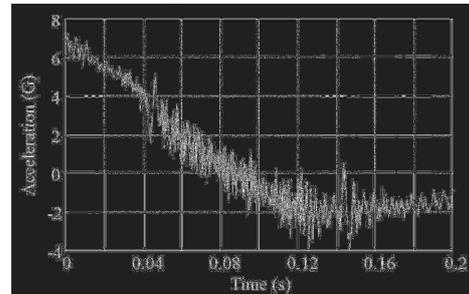
具体的な成果を以下に述べる。

#### ① 新たな制御系の提案

従来、バルブ位置決め制御系には可変切換超平面をもつスライディングモードサーボ制御(Variable Sliding Mode servo Control : 以下 VSMC と略記)[3]を用いていた。その制御手法を用いると、一般的なスライディングモードサーボ制御(Sliding Mode servo Control : 以下 SMC と略記)を用いた場合と比べ、高速な応答と小さいオーバーシュートが両立できる。しかしながら、設計パラメータの調整が困難で残留振動を低減し、整定時間を改善することが困難であった。そこで、スライディングモードサーボ制御に加えフィードフォワード補償を用いた制御手法を新たに提案した。その制御手法を用いた場合のバルブの位置応答波形を Fig.7 に示す。Fig.7 より、提案制御手法を用いた場合、移動時間とオーバーシュートを VSMC とほぼ同じにしな



(a) Displacement of valve



(b) Acceleration

Fig.8 Time responses of displacement of valve and acceleration.

Table2 Positioning performances.

Cases	Moving time (ms)	Overshoot ( $\mu\text{m}$ )	Positioning error ( $\mu\text{m}$ )	Settling time (ms)
Case1	5.5	300	41	12
Case2	5.2	520	160	29

残留振動を低減できていることがわかる。さらに、この制御手法では制御系の構造の簡素化を実現している。

一方、EMV の実用化には、EMV の製造上のばらつきや経年変化を補償する制御系が必要となる。そこで、制御系設計パラメータの調整を自動的に行うことができる遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: 以下 GA と略記)を新たに提案し、その設計を行った。その GA では、複数の制御系設計パラメータを探索するために多変数の探索を可能としている。

#### ② バルブ位置決め制御系の耐外乱性能の検証

加振器に EMV を搭載し、バルブの駆動実験を行った。加振した場合としない場合のそれぞれのバルブの位置応答波形および加速度波形を Fig.8 に示す。ただし、0 s までは加速度が増加し、0 s で最大 7G となる振動を加えた。また、バルブシートは用いないものとし、制御系設計パラメータは加振器を用いた実験用に再調整を行ったものを用いた。Fig.8 (a)より、バルブの動作が不安定になることなく安定してバルブを駆動できていることがわかる。しかし、0 s において振動が増加し、それ以後においても残留振動が増加してい

ることがわかる。

また、主な制御性能を Table2 に示す。ただし、Case1 は、加振しない場合、Case2 は加振した場合を示し、移動時間は目標値が変化してからバルブが目標の位置に到達するまでの時間、整定時間は誤差が目標のストローク(6mm)の±2mm以内となるまでの時間としている。Table2 より、移動時間はほぼ同じであるものの、その他の制御性能においては劣化していることが分かる。これは、Fig.8 に示すとおり、バルブの動作が振動的になったためであると考えられる。

提案制御手法は、エンジンの最大振動に対して安定にバルブを位置決めできることから、EMV 用の制御系として有用であると考えられる。

以上のバルブ位置決め制御系に関する研究成果を、一件の雑誌論文、一件の国際会議、二件の国内学会にまとめ発表を行った。また現在、一件の雑誌論文を執筆し投稿中である。

一方、本研究におけるバルブの位置決め実験では、バルブシートを用いておらず、バルブの着座は行っていない。今後、参考文献[4]の手法を用いて、着座も含めたバルブ開閉実験を行う予定である。

本研究によって、EMV をエンジンに搭載するための基礎的な知見を得ることができた。今後、エンジンに EMV を搭載しその性能の検証を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] 打田正樹, 竹村昌也, 森田良文, 神藤 久, 藪見崇生, 「自動車エンジン用電磁駆動バルブのための磁石可動型リニア振動アクチュエータの設計」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 394-399, 2006 年 12 月
- [2] M. Uchida, T. Yabumi, Y. Morita, K. Fuwa and H. Kando, “Development of high-speed and compact moving-magnet-type linear motor for EMV ~ Positioning and Following Performance~”, Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 24, Nos. 3, 4, pp. 163-176, 2007
- [3] 打田正樹, 藪見崇生, 森田良文, 神藤 久, 「可変切換超平面をもつスライディングモードサーボ制御系によるリニアモータの位置決め制御」, 電気学会論文誌C部門誌, Vol. 126, No. 9, pp. 1112-1118, 2006 年 9 月
- [4] 打田正樹, 村田領平, 森田良文, 神藤 久, 藪見崇生, 「自動車エンジン用電磁駆動バルブ位置決め制御系の設計と DSP への実装」, 高速信号処理応用技術学会誌, Vol. 9,

No. 2, pp. 70-76, 2006年12月

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者および連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 打田正樹, 勝見広, 須波浩規, 坊向陽介, 「自動車エンジン用電磁駆動バルブの位置決め制御への遺伝的アルゴリズム応用の検討」, 福井工業大学研究紀要, 39 号, 2009 年, 査読有り, 掲載決定

[学会発表] (計 4 件)

(1) 国際学会発表

- ① Masaki Uchida, Hideyuki Hasegawa, Ryohei Murata, Yoshifumi Morita and Takao Yabumi, "Sliding Mode Servo Control with High Pass Notch Filter for Electromagnetic Engine Valve", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2008, pp.589-594, 2008, 査読有り

(2) 国内学会発表

- ① 小林弘樹, 打田正樹, 森田良文, 藪見崇生, 「自動車エンジン用電磁駆動バルブのための磁石付き固定子を有するリニア振動アクチュエータの設計」, 電気学会平成 21 年度産業応用部門大会, 2009 年 9 月, 査読無
- ② 長谷川英之, 打田正樹, 森田良文, 藪見崇生, 「フィードフォワード補償とスライディングモード制御による自動車エンジン用電磁駆動バルブの位置決め制御」, 2008 高速信号処理応用技術学会研究会, 2008 年 10 月, 査読無
- ③ 長谷川英之, 村田領平, 打田正樹, 藪見崇生, 森田良文, 「目標値整形とスライディングモード制御による自動車エンジン用電磁駆動バルブの位置決め制御」, 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集, 論文番号 3-073, 2008 年 3 月, 査読無

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: リニアアクチュエータ

発明者: 打田正樹, 小林弘樹, 森田良文, 藪見崇生

権利者: 福井工業大学, 名古屋工業大学, 大同特殊鋼株式会社

種類: 特許

番号: 2009-142952

出願年月日: 2009 年 6 月 16 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

打田 正樹(Uchida Masaki)  
福井工業大学・工学部・講師  
研究者番号：80454437