

リニア振動アクチュエータの効率測定法の検証

Verification of Method for Efficiency Measurement of Linear Oscillatory Actuator

水野 勉^{*1}(正員), 大久保 光範^{*1}, ト 穎剛^{*1},
柄澤 誠^{*1}, 磯野 祐輔^{*1}, 中川 洋^{*2}, 村口 洋介^{*2}

Tsutomu MIZUNO (Mem.), Mitsunori OHKUBO, Yinggang BU,
Makoto KARASAWA, Yusuke ISONO, Hiroshi NAKAGAWA, Yosuke MURAGUCHI

We already proposed the method for efficiency measurement of the linear oscillatory actuator (LOA) with a load cell between a LOA and a load motor. However, output of load cell is not an accurate value, because the inertial force affects the load cell under high-speed reciprocating motion of the LOA. In this paper, we verify that the proposal method for efficiency measurement is appropriate by deducing equations of motion. Moreover the proposal method is verified by the both simulation and measurement. Output of load cell becomes larger than the accurate thrust in both simulation and measurement. However, the accurate mechanical power is equal with the proposal one. Therefore, it becomes clear that the proposal method for efficiency measurement is appropriate.

Keywords: linear motor, linear oscillatory actuator, efficiency, mechanical power, method for efficiency measurement, load cell, observer

1 まえがき

リニア振動アクチュエータ (以下, LOA) は, リニアコンプレッサ[1,2]や電動ハブラシ[3]などに適用されており, その応用分野の拡大が期待されている。LOA の効率測定は, LOA の性能評価として重要である。そこで, 筆者らは, 試験用 LOA と負荷モータとの間にロードセルを装着した LOA の効率測定法や動推力測定法をすでに提案している[4,5]。

筆者らが提案した LOA の動推力測定法や効率測定法は, 回転モータの測定法に準拠して試験用 LOA と負荷モータとの間にロードセルを装着した構成である[6]。そして, ロードセルの出力から効率を算出していた。しかし, LOA が往復運動をすることからロードセルに慣性力が作用する。そこで, 慣性力の影響を除外するために, ロードセルの出力と変位を入力とした観測器を用いることで動推力を測定できることを検討してきた[5]。しかし, 効率測定法では, そのような検討を行なっておらず, 効率測定法の検証は不十分であった。

本論文では, 筆者らが提案した効率測定法の妥当性

を, まず運動方程式を導出して LOA の機械出力について検討した。次にシミュレーションと実測の両面から妥当性を検証した。

本論文では, LOA の効率測定法に関する以下のことを述べる。

- 1) LOA の効率測定法
- 2) 妥当性の検討

2 LOA の効率測定法

2.1 効率測定法

Fig.1 にすでに提案している LOA の効率測定モデルを示した[4]。試験用 LOA 可動子と負荷モータ可動子

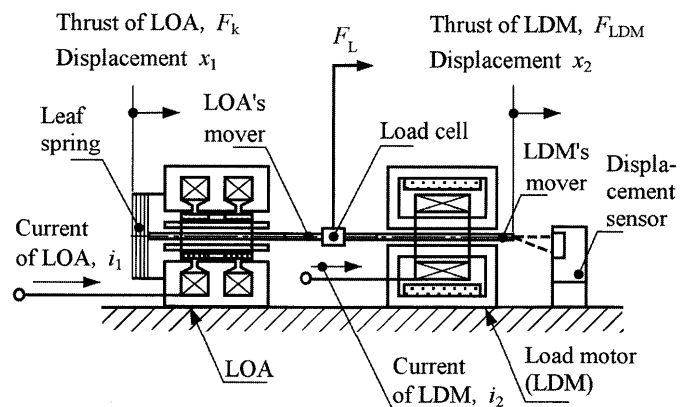


Fig. 1 Model for efficiency measurement of LOA.

連絡先: 水野 勉 〒380-8553 長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部電子電気工学科,
e-mail: mizunot@gipwc.shinshu-u.ac.jp

^{*1}信州大学 ^{*2}神鋼電機

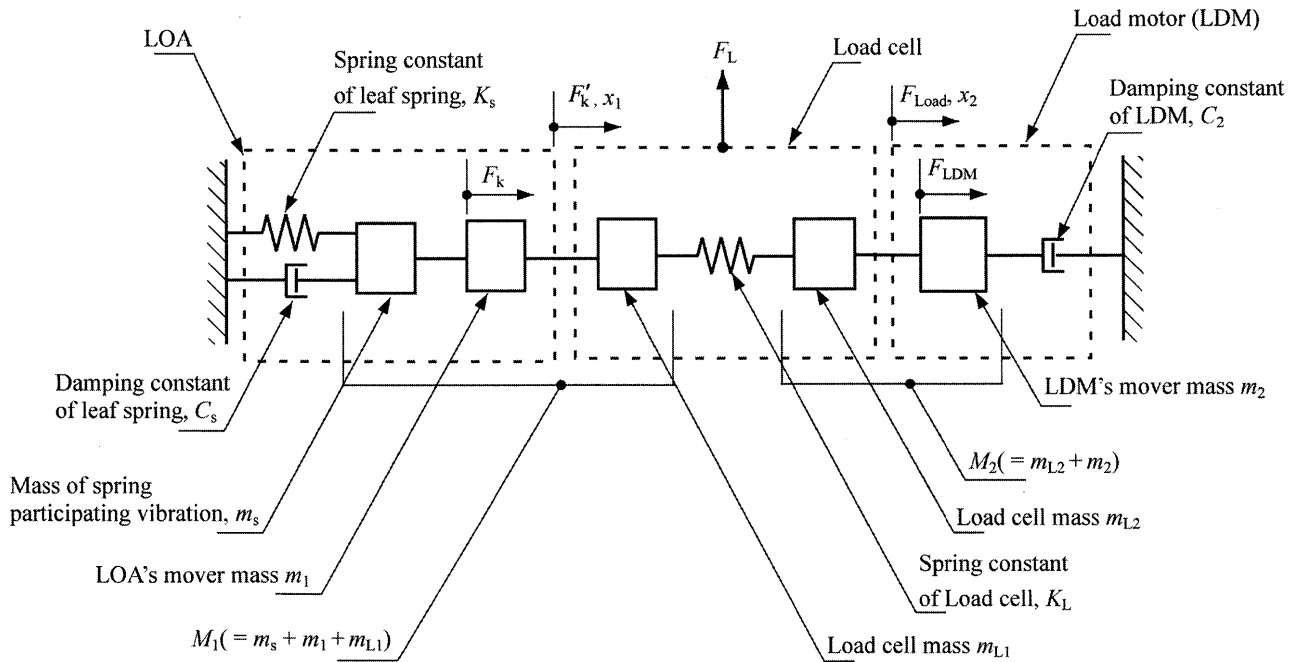


Fig. 2 Dynamic model of efficiency measurement.

との間にロードセルが装着されている。試験用 LOA は磁石可動形であり[4,7], 共振用に板ばねが取り付けられている。負荷モータにはコイル可動形リニア直流モータ (以下, LDM) を用いた[8]。

すでに提案した効率測定法 (提案法) では, LOA と LDM との間に装着したロードセルの出力 F_L と, LDM 可動子の変位 x_2 をレーザ変位計で測定する。上述の測定値を用いて, LOA の効率 η を下式で求めていた[3]。

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$P_o = f \oint F_L dx_2 \quad (\text{W}) \quad (2)$$

$$P_i = f \int_0^T v_1 i_1 dt \quad (\text{W}) \quad (3)$$

ここに, P_o : 機械出力(W), P_i : 入力電力(W), f : 周波数(Hz), F_L : ロードセルの出力(N), x_2 : LDM 可動子の変位(m), T : 周期(s), v_1 : LOA の入力電圧(V), i_1 : LOA の電流(A), t : 時間(s)

LOA 可動子が高速な往復運動を行なうとロードセルに慣性力が作用する。よって, ロードセルの出力 F_L は正確に負荷モータの推力を測定することができない。式(2)で示した LOA の機械出力 P_o が正確であるという論議は不十分であり, 本論文では提案した LOA の効率測定法の検証を行なう。

2.2 機械出力の測定原理

前節で述べたように, 提案法の妥当性を検討するためには, P_o について明らかにする必要がある。Fig. 2 に効率測定の力学モデルを示した。本論文で用いたロードセルのばね定数は $K_L = 45.5 \text{ MN/m}$ である。よって, ロードセルのばね要素によって生ずる共振周波数 ($f = 1730 \text{ Hz}$) は LOA の駆動周波数 ($f = 37.3 \text{ Hz}$) よりも十分に大きい[5]。したがって, ロードセルの減衰定数が LOA の特性に影響を与えないために, これを無視した。

Fig. 2 に示した力学モデルに基づいて運動方程式を導出すると下式となる。

$$F_k = M_1 \ddot{x}_1 - K_L(x_2 - x_1) + K_s x_1 + C_s \dot{x}_1 \quad (\text{N}) \quad (4)$$

$$F_{LDM} = M_2 \ddot{x}_2 + K_L(x_2 - x_1) + C_2 \dot{x}_2 \quad (\text{N}) \quad (5)$$

$$F_L = K_L(x_2 - x_1) \quad (\text{N}) \quad (6)$$

$$F_k' = F_k - K_s x_1 - C_s \dot{x}_1 \quad (\text{N}) \quad (7)$$

$$F_{Load} = F_{LDM} - C_2 \dot{x}_2 \quad (\text{N}) \quad (8)$$

ここに, F_k : LOA の動推力(N), M_1 : m_1 と m_s および m_{L1} の和 ($= m_1 + m_s + m_{L1}$) (kg), m_1 : LOA の可動子質量(kg), m_s : 振動に関与する板ばね質量(kg), m_{L1} : ロードセルの質量(kg) (Fig. 2 参照), x_1 : LOA の可動子変位(m), K_L : ロードセルのばね定数(N/m), K_s : 板ばねのばね定数(N/m), C_s : LOA の減衰定数(Ns/m), F_{LDM} : LDM の推力(N), M_2 : m_2 と m_{L2} の和 ($= m_2 + m_{L2}$) (kg), m_2 : LDM

の可動子質量(kg), m_{L2} : ロードセルの質量(kg) (Fig. 2 参照), C_2 : LDM の減衰定数(Ns/m), F_k' : 加振力(N), F_{Load} : 負荷(N)

式(4)~(8)に基づいて LOA の効率測定ブロック線図は Fig. 3 となる。LOA の出力は LOA が負荷に対して行う仕事率であることから、機械出力 P_o は次式で表される。

$$P_o = f \oint F_{Load} dx_2 \quad (W) \quad (9)$$

F_{Load} は Fig. 3 に基づいて下式で表すことができる。

$$F_{Load} = F_L + M_2 \ddot{x}_2 \quad (N) \quad (10)$$

上式に示したように、 F_{Load} は F_L と $M_2 \ddot{x}_2$ との和であり、 $F_{Load} \neq F_L$ である。式(10)を式(9)に代入して展開すると下式となる。

$$P_o = f \oint F_L dx_2 + f \oint M_2 \ddot{x}_2 dx_2 \quad (N) \quad (11)$$

LDM の変位 x_2 が正弦波で振動しているときに、 $M_2 \ddot{x}_2$ と x_2 との位相差は 180 deg である。よって、下式が成立する。

$$f \oint M_2 \ddot{x}_2 dx_2 = 0 \quad (W) \quad (12)$$

$$P_o = f \oint F_{Load} dx_2 = f \oint F_L dx_2 \quad (W) \quad (13)$$

したがって、式(13)は式(2)を用いて P_o を求めることができることを示しており、提案法による効率測定は妥当である。

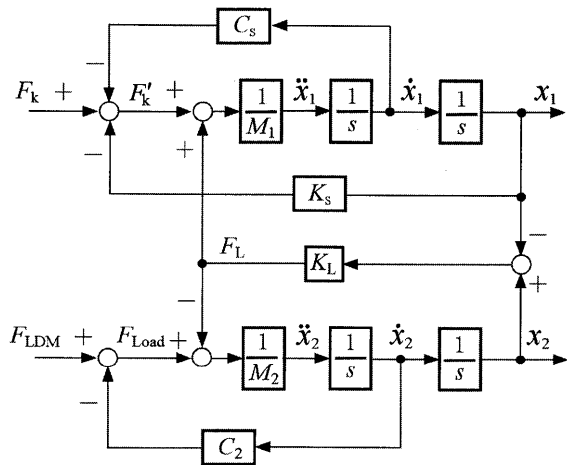


Fig. 3 Block diagram of efficiency measurement model.

3 シミュレーションを用いた妥当性の検討

前章で、提案法が妥当であることを理論的に明らかにした。本章では、ダイナミックシミュレーションソフト (Simulink Ver. 5.0, The Mathworks Inc.) を用いて効率測定法の妥当性を明らかにする[9]。

3.1 LOA と LDM およびロードセルの仕様

Table 1 に本論文で用いた LOA と LDM およびロードセル (共和電業, LUR-A-500NSA1) の仕様を示した。Fig. 2 に示したように、 m_1 は LOA 可動子の質量、 m_s は振動に関与する板ばねの質量であり、 m_{L1} はロードセルの質量である。また、それらの和が LOA の振動に関与する質量 M_1 である。 m_s は下式を用いて算出した。

$$m_s = \frac{K_s}{(2\pi f_r)^2} - (m_1 + m_{L1} + M_2) \quad (kg) \quad (14)$$

ここに、 f_r : 固有振動数(Hz)

また、LOA および LDM の減衰定数 C_1 と C_2 は、可動子変位の減衰特性の実測値を用いて算出した。さらに、LOA と LDM の推力定数は、それぞれ $K_f = 70$ N/A と $K_{fL} = 100$ N/A であり、それぞれ変位 $x = 0$ mm にお

Table 1 Specifications of LOA, LDM, and load cell.

Item	Symbol	Value	(unit)
LOA	Mass of mover	m_1	0.553 (kg)
	Mass of spring participating vibration	m_s	0.757 (kg)
	Spring constant	K_s	109 (kN/m)
	Damping constant	C_s	34.66 (Ns/m)
	Thrust constant	K_f	70 (N/A)
LDM	Mass of mover	m_2	0.566 (kg)
	Damping constant	C_2	13.26 (Ns/m)
	Thrust constant	K_{fL}	100 (N/A)
Load cell	Mass	m_{L1}	0.017 (kg)
		m_{L2}	0.053 (kg)
	Spring constant	K_L	45.5 (MN/m)

いて直流電流を流して実測した[7,8]。

3.2 機械出力の算出

Fig. 3 に示したブロック線図と Table 1 に示した LOA と LDM およびロードセルの仕様を用いてシミュレーションを行って、機械出力を算出した。後述する実測を模擬してシミュレーションを行なった。

Table 2 はシミュレーション条件であり、 $F_k = 36 \text{ N}$ 、 $F_{LDM} = 20 \text{ N}$ で F_k と F_{LDM} の位相差 θ は 190 deg とした。また、周波数 f は共振周波数である $f = 37.3 \text{ Hz}$ とした。

Fig. 4 に、共振周波数 ($f = 37.3 \text{ Hz}$) におけるシミュレーション結果を示した。図(a)は推力と変位の時間特性であり、図(b)は推力-変位特性である。同図は以下のことを示している。

1) F_L と F_{Load} の最大値はそれぞれ 44 N と 24 N であり、その比は 1.8 であった。また、両者の位相差 $\phi = 87 \text{ deg}$ (6.5 ms) であった。これは、式(10)に示したように F_{Load} が F_L と $M_2 \ddot{x}_2$ との和であること、すなわち慣性力が作用していることに起因している。

2) 図(b)に示したように、 $F_L - x_2$ 特性と $F_{Load} - x_2$ 特性のリサージュ波形は異なる結果となった。しかし、両者の P_0 は 3.7 W と一致した。

また、他の周波数 ($f = 1 - 100 \text{ Hz}$) においても上述と同様の結果が得られた。したがって、シミュレーションによって提案法の妥当性を確認した。

4 実測を用いた妥当性の検討

4.1 観測器の構成

本章では、実測を用いて提案法の妥当性を明らかにする。ここで、 F_{Load} を直接実測することができないために、観測器を用いて F_{Load} を推定することとした。式(10)より F_{Load} の推定値 F'_{Load} は下式で与えられる。

$$F'_{Load} = F_L + M_2 \ddot{x}_2 \quad (\text{N}) \quad (15)$$

上式に基づいて、観測器を構成すると Fig. 5 となる。同図に示したように、観測器を用いることで F_L と x_2 の実測値を用いて F_{Load} の推定を行うことができる。

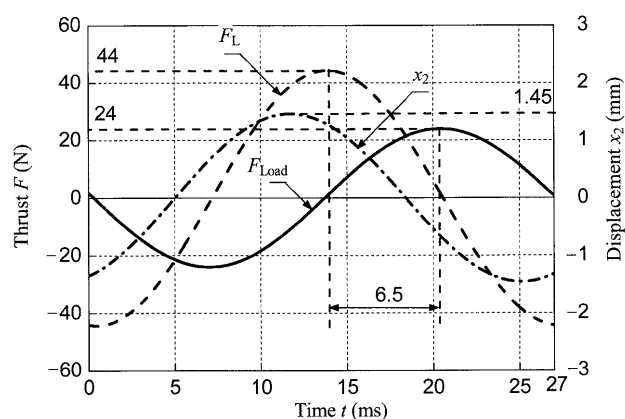
4.2 妥当性の検討

前節で述べたように F_{Load} を実測できないために、推定値 F'_{Load} を用いて妥当性の検討を行なった。

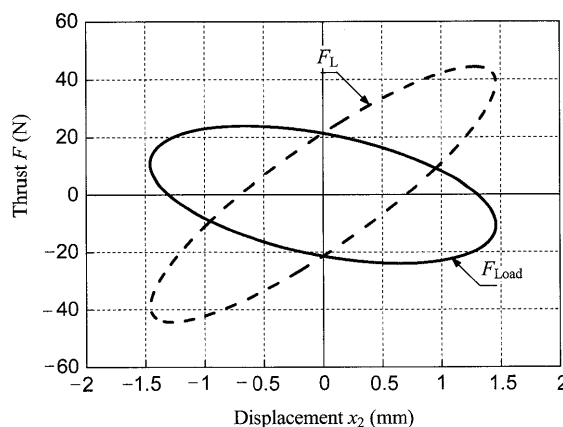
LOA および LDM にそれぞれ $I_1 = 0.28 \text{ A}$ 、 $I_2 = 0.18 \text{ A}$ の交流電流を流して、LOA と LDM に推力を発生させて F_L と x_2 を実測した。なお、周波数 f は共振周波数である $f = 37.3 \text{ Hz}$ とした。 I_1 と I_2 との位相差、すなわち

Table 2 Simulation conditions.

Item	Symbol	Value	(unit)
Maximum value of kinetic thrust of LOA	F_k	36	(N)
Maximum value of kinetic thrust of LDM	F_{LDM}	20	(N)
Phase difference θ between F_k and F_{LDM}	θ	190	(deg)
Frequency	f	37.3	(Hz)



(a) Thrust, displacement vs. time characteristics.



(b) Thrust vs. displacement characteristics.

Fig. 4 Simulated values at resonant frequency ($f = 37.3 \text{ Hz}$, $F_k = 36 \text{ N}$, $F_{LDM} = 20 \text{ N}$, $\theta = 190 \text{ deg}$).

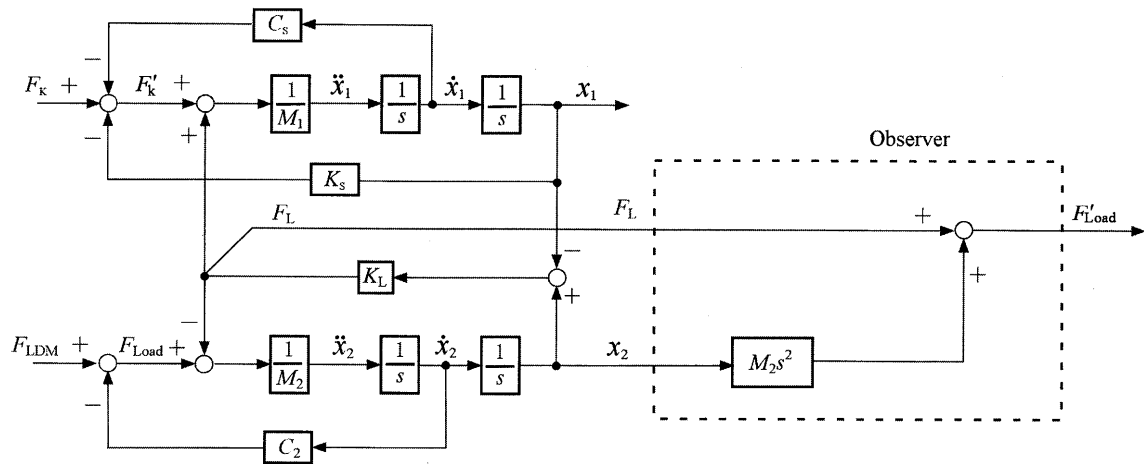


Fig. 5 Structure of observer.

F_k と F_{LDM} の位相差が 180 deg のときに P_o が最大となる。しかし, LDM の速度起電力定数 $K_e (= K_{fl}) = 100 \text{ N/A}$ と大きいことと, 駆動アンプの最大出力電圧との関係から I_1 と I_2 との位相差 $\theta = 190 \text{ deg}$ と設定した。

Fig. 6 に共振周波数 $f = 37.3 \text{ Hz}$ における効率測定法を用いた実測結果を示した。図(a)は推力と変位の時間特性であり, 図(b)は推力-変位特性である。同図は以下のことを示している。

- 1) F_L と F'_{Load} の最大値はそれぞれ 48N と 23N であり, その比は 2.1 であった。また, 両者の位相差 $\phi = 82 \text{ deg}$ (6.1 ms) であった。これは, 式(10)に示したように F'_{Load} が F_L と $M_2\ddot{x}_2$ との和であることに起因している。
- 2) 図(b)に示したように, $F_L - x_2$ 特性と $F'_{Load} - x_2$ 特性のリサージュ波形は異なる結果となった。しかし, 両者の P_o は 3.7W と一致した。

Fig. 6 の結果から, 提案法で正確に機械出力 P_o を求めることができおり, 提案法が妥当であることが実測からも明らかとなった。

5 あとがき

本論文では, 筆者らが提案した効率測定法 (提案法) の検証を行なって妥当であることを示した。本論文で以下のことが明らかとなった。

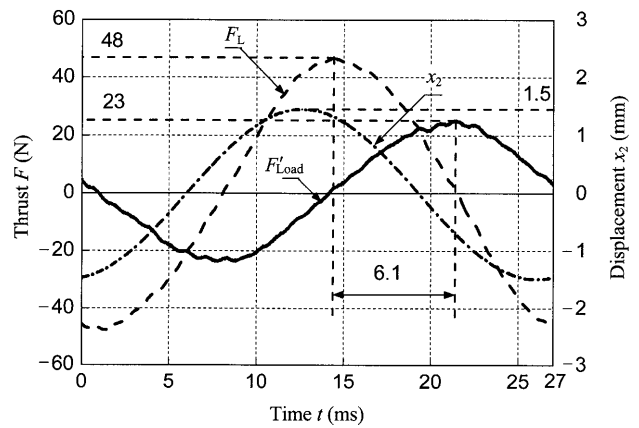
(1) LOA の効率測定法

提案法を理論的に検証することで, ロードセルの出力 F_L を用いても正確に効率 η を測定できることが明らかとなった。

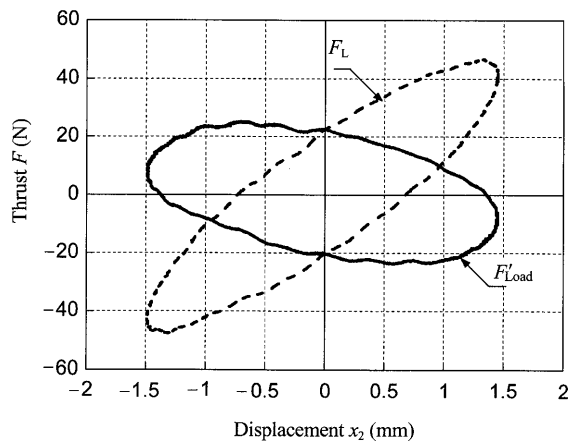
(2) 妥当性の検討

LOA の効率測定の提案法の妥当性をシミュレーションと実測の両面から検討した。

- 1) F_L と F'_{Load} の最大値は, シミュレーションと実測



(a) Thrust, displacement vs. time characteristics.



(b) Thrust vs. displacement characteristics.

Fig. 6 Measured values at resonant frequency ($f = 37.3 \text{ Hz}$, $I_1 = 0.28 \text{ A}$, $I_2 = 0.18 \text{ A}$, $\theta = 190 \text{ deg}$).

ともに異なる結果となった。これは、 F'_{Load} が F_L と $M_2\ddot{x}_2$ との和であること、すなわち慣性力が作用することに起因している。

2) シミュレーションと実測ともに F_L-x_2 特性と $F'_{Load}-x_2$ 特性のリサージュ波形は異なる結果となった。しかし、両者の P_0 は一致した。したがって、提案法は妥当な効率測定法である。

(2006年10月11日受付)

参考文献

- [1] Robert Reuven, Reuven Unger, Nichols vac der Walt, Linear compressors: motor configuration, modulation and systems, *1996 International Compressor engineering Conference*, pp. 341-346, 1996.
- [2] Masaya Inoue, Masayuki Kakuda, Shiichiro Hara, Design and research on a cylindrical moving-iron linear actuator for reciprocating applications, *Linear Drives for Industry Applications*, pp. 383-386, 2005.
- [3] 平田 勝弘, 一井 義孝, 有川 泰史, 動吸振一体型器リニア振動アクチュエータ, *T.IEE Japan*, Vol. 122-D, No. 4, pp. 346-351, 2002.
- [4] Hideo Yamamoto, Tsutomu Mizuno, Takuya Yaegashi, Kouyou Shibuya, Hajime Yamada, Efficiency characteristics of linear dc motor by using a novel measuring method, *3rd European Conference on Magnetic Sensors & Actuators*, pp. 51-52, 2002.
- [5] 水野 勉, 大久保 光範, ト 穎剛, 柄澤 誠, 中川 洋, 村口 洋介, リニア振動アクチュエータの動推力測定法の提案, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-06-18, pp. 11-16, 2006.
- [6] モータ技術実用ハンドブック編集委員会, モータ技術実用ハンドブック, 日刊工業新聞社, pp. 61-319, 2001.
- [7] Mizuno Tsutomu, Yaegashi Takuya, Takai Masaki, Utsuno Makoto, Yamamoto Hideo, Shibuya Kouyou, Yamada Hajime, A novel efficiency measurement of moving-magnet-type linear oscillatory actuator, *International Journal of Applied Electromagnetics and mechanics*, IOS Press, Vol. 15, No. 1-4, pp. 163-167, 2003.
- [8] 水野 勉, 宮下 俊仁, 矢島 久志, 唐 玉琪, 山本 秀夫, 渋谷 浩洋, 山田 一, 円筒状コイル可動形リニア直流モータの推力/入力比に関する考察, *T.IEE Japan*, Vol. 118-D, No. 4, pp. 444-449, 1998.
- [9] Mathworks, Using Simulink, Mathworks, 1999.