Propulsive Force Simulation of Cylindrical Linear Synchronous Motors and Improvement in the Propulsive Force Fluctuations

Tomoyuki Lee Student Member (fwpf6616@mb.infoweb.ne.jp)

Naoki Maki Member (naokmaki@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp)

Keywords: cylindrical linear motor, linear synchronous motor, magnetic field simulation, propulsive force fluctuation

Cylindrical linear synchronous motors with permanent magnets (CLSM) have merits of compactness, high efficiency and easy to support because of no end-windings and negligible radial force. A propulsive force simulation method of the CLSM was developed using FEM analysis code ANSYS.

Fig. 1 shows the comparison between simulation and experimental results of propulsive force characteristics along traveling position under the armature current of 40 [A] for the experimental CLSM and its excitation phase angle of 120, 150 and 180 electric degrees. It is found that the simulation results are well agreed with the test results of an experimental model machine, which shows the effectiveness of the simulation method.

In order to increase propulsive force and decrease its fluctuation, countermeasures of (a) providing spaces between adjacent permanent magnets, (b) combining adjacent two iron teeth, (c) increasing pole numbers from 6 to 8, (d) increasing the thickness of the moving inner iron, are considered. The simulation results of propulsive force characteristics along the traveling position before and after countermeasures are shown in Fig. 2. The propulsive force fluctuation of 650 [N] is reduced from 1050 [N], which corresponds to the considerable reduction rate of 61 [%]. The average propulsive force of 180 [N] are increased from 1890 [N] which corresponds to about 10 [%]. However, there are limits in decreasing propulsive force fluctuation with these methods.

Taking notice of putting mountains of the propulsive force of one armature upon valleys of the propulsive force of another armature

Fig. 1. Propulsive force characteristics along the traveling position under 40 [A] armature excitation

to reduce the propulsive force fluctuation., a novel countermeasure, in which the separated two armatures are excited from phase shifted currents by the electrical phase angle difference corresponding to the separated position, is proposed.

Fig. 3 is the cross-sectional view of the novel CLSM, and Fig. 4 shows the influence of the thickness of the spacer attached between two armatures on propulsive force fluctuation under armature current of 25 [A]. The considerable reduction of propulsive force fluctuation of 140 [N] and increase in average propulsive force of 40 [N] are obtained in case of the spacer width of 90 electric degree compared with ones in case of the spacer width of 0 electric degree.

Fig. 2. Propulsive forces along the moving position before and after a countermeasure

Fig. 3. cross-sectional view of the novel CLSM

Fig. 4. Propulsive force fluctuation under excitation

円筒型リニア同期モータの特性解析と推力脈動改善

学生員 李 友行* 正 員 牧 直樹*

Propulsive Force Simulation of Cylindrical Linear Synchronous Motors and Improvement in the Propulsive Force Fluctuations

Tomoyuki Lee*, Student Member, Naoki Maki*, Member

Cylindrical linear synchronous motors with permanent magnets have merits of compactness, high efficiency and easy to support because of no end-windings and negligible radial force. A propulsive force simulation method of the cylindrical linear synchronous motors was developed using FEM analysis code ANSYS, and the simulation results were well agreed with the test results of an experimental machine, which shows the effectiveness of the simulation method. Two kinds of countermeasures for decreasing propulsive force fluctuations were proposed and the effects of their countermeasures were cleared using the simulation method. One of them are the novel countermeasure, in which the separated two armatures are used and excited from phase shifted currents by the electrical phase angle difference corresponding to the separated position, and it is found that the novel countermeasure was very useful.

キーワード：円筒型リニアモータ，リニア同期モータ，磁界解析，推力脈動

Keywords: cylindrical linear motor, linear synchronous motor, magnetic field simulation, propulsive force fluctuation

1. はじめに

リニアモータは、非接触で任意の方向に直接推進力を与えることが出来る特徴をもち、粘着や伝達の性能に依存しない高い加減速度が得られ、変速機構がないため経年劣化も少なく保守性、信頼性に優れている。

このリニアモータは構造上から平板型と円筒型に分類され、円筒型リニアモータは平板型に比べてコイル端部がないことから漏れ磁束が少なく主磁束が増加し、コンパクトで高効率が得られる。また、構造が軸対称なので磁気吸引力が相殺され、支持が容易になる利点を有する⁽¹⁾。

本研究の目的は、上記の特長を有する円筒型リニアモータに永久磁石を使用した円筒型リニア同期モータ（以下、CLSM と略記）の特性解析を行い、それに基づいて推力の脈動を改善することである。永久磁石を用いた同期モータにおいては一定トルクに主に 6 次調波のコギングトルクが重畳することが理論的に示されている⁽²⁾。一方、リニア同期モータの場合には電機子端部の影響があり、特に 2～4 極機ではその影響が大きくなる。また、ここでは装置の小型化をはかる点から電機子鉄心の先端部を磁気飽和させて用いている。このような場合には 6 次調波のコギング推力の

大きさが長さ方向に対して変動することになる。したがって、ここで取り扱うリニア同期モータの推力と推力脈動は回転型モータとかなり異なることが予想される。そこで、まず試作した CLSM 機の推力特性実験結果と、有限要素解析ソフト ANSYS を用いた解析結果を比較し、解析法の妥当性を示す⁽³⁾⁽⁴⁾。

推力脈動低減並びに推力増大のため、CLSM 試作機において①界磁磁極間に空間を設ける、②2つの隣接するティースを1つに合体させる、③移動子側の磁極数を6極から8極に増やす、④内径鉄心厚みを増大するといった対策を施した解析モデルを作成し、対策前後における移動位置に対する推力脈動について比較検討する。

従来、推力脈動の低減対策として主に、①ティース先端部にアール（曲線部）を設けたり、永久磁石間に任意の空間を設けることにより磁束の変化を緩和する、②スロット／磁極コンビネーションを調整したり、ティースまたは永久磁石の長さやピッチを調整して磁気エネルギーの変化を抑える方法などが検討されてきた⁽⁵⁾。しかし、これらの対策では平均推力が減少する問題が生じ、推力脈動減少と平均推力増大の両方を達成させることは困難であった。

そこで、推力脈動の山と谷を重ね合わせるにより推力脈動を相殺することを目的として、電機子を2分割して機械的にずらして配置し、2電機子間の離れた距離に相当する電気角だけ位相をずらして通電させる、新しい方式を提案する。この山と谷を重ね合わせる考えはリラクタンスト

* 東海大学

〒259-1292 平塚市北金目 1117

Tokai University

1117, Kitakaname, Hiratsuka-shi 259-1292

ルクだけを利用するハイブリット型ステッピングモータにあるが⁶⁾、そこでは2組の回転子を使用し、2組の電機子巻線の電流は同相に励磁する。これに対して、リニア同期モータに対する本提案は、隣接する2組の電機子コイルに離れた距離にほぼ相当する電気角だけ位相をずらして電流を通電させることを特徴としている。その中でも、電気角で90°ずらしたものがコギング推力を低減し平均推力の減少を抑える点から最適であることを解析により示す。

この新しい方式における推力脈動の変化について解析検討し、推力脈動を低減しかつ平均推力を増大するように電機子間距離の最適化をはかった⁷⁾。さらに、2電機子間に挿入するスペーサ材質の影響を検討し、非磁性スペーサが望ましいことを明らかにする。

本稿では、まずCLSM試作機の推力特性実験結果と解析結果との比較検討により解析法の妥当性を示し、次にCLSMの推力脈動を改善する新しい方式を提案し、解析法を用いてその効果と有用性を明らかにする。

2. CLSM 試作機の構造と推力特性⁽³⁾⁽⁴⁾

CLSM 試作機の縦断面と外観を図1に、その諸元を表1に示す。電機子巻線は三相の3コイルから成り、各コイルの両側をティースで挟んだブロックを3個重ねた非常にシンプルな構造である。ティース先端部には推力脈動を低減するため両端に3[mm]のアール（曲線部）を設けている。

図1 CLSM 試作機の縦断面と外観

Fig. 1. Longitudinal cross-sectional and external views of a experimental CLSM.

移動子には径方向に着磁された永久磁石が6極配置されており、これには最大エネルギー積 $(BH)_{\max} \geq 350 [\text{kJ/m}^3]$ のNd-Fe-B（信越化学N48）を使用している。

磁界解析には、有限要素解析ソフトANSYS 6.1を使用した。図2にCLSM解析モデリングを示す。モデリングにおいては構造が軸対称のため、解析は縦断面上部のみを与え、軸対称の設定を施すことにより要素分割数を減らし計算時間の短縮を図った。全体の解析領域はモータの外径に対して2倍、軸方向に対して2倍の領域にとったので、これはモータの断面積で4倍、体積で8倍に相当する。

CLSM解析の要素分割を示す図3において、分割数は約28000点である。解析環境はCPUにIntel PentiumIII Processor 733 [MHz]、メモリ256 [MB]、OSにMicrosoft Windows 2000 Professional 搭載の計算機を用いた。このとき、1ケースあたりの計算時間は約10分であった。

表1 CLSM 試作機の諸元

Table 1. Parameters of the experimental CLSM.

Total length of armature core	150 [mm]
Outer diameter of armature core	140 [mm]
Inner diameter of armature core	101 [mm]
Slot length of armature core	16 [mm]
Teeth length of armature core	6.5 [mm]
Number of poles	4
Diameter of armature conductor	1.2 [mm]
Number of turns of one slot coil	88
Outer diameter of moving part	98 [mm]
Inner diameter of moving part	72 [mm]
Thickness of inner iron	10.25
Width of a permanent magnet	22.5 [mm]
Thickness of a permanent magnet	2.75
Air gap length	1.5 [mm]

図2 CLSM 試作機の解析モデリング

Fig. 2. Analysis modeling of the experimental CLSM.

図3 CLSM 試作機の要素分割

Fig. 3. Finite element division of the experimental CLSM.

図4 無励磁時の磁束線図と磁束密度ベクトル図

Fig. 4. Magnetic flux flow and magnetic flux density vector diagrams under no excitation condition.

図5 無励磁における位置に対する推力特性

Fig. 5. Propulsive force characteristics along the traveling position under no excitation condition.

図4(a)に無励磁時における磁束線図を、図4(b)に磁束密度ベクトル図を示す。ここで、移動子6極の永久磁石は径方向に着磁されている。CLSM縦断面は左右対称なので、図4(a)の磁束線図も左右対称となっており、さらに電機子両端から磁束がわずかに漏れていることが確認できる。図4(b)の磁束密度ベクトル図において、最大磁束密度は内径鉄心部にて1.79[T]と高くなり局部的に磁気飽和すること、ギャップ中の最大磁束密度は1.00[T]となることが分かる。

電機子コイルを励磁せず、移動子側を移動させた場合における推力特性の計算値と実験値を比較して図5に示す。推力測定はロードセルを用いて片側2500点、往復5000点と細かく行い、計算は移動子を電気角にて 30° (3.75 [mm]) ずつ移動させて実施した。推力は移動位置に対して相当に振動しているが、計算値は実験値と比較して絶対値は幾分異なるものの、変動傾向はよく一致することが分かる。

図6は、移動子の位置を固定し電機子電流40[A]で励磁した場合の、その通流位相に対する推力特性の解析結果を示す。推力は電流通流位相 150° において最大2220[N]を

図6 電機子電流の通流位相に対する推力特性の解析結果 (40[A]励磁)

Fig. 6. Propulsive force characteristics versus armature excitation phase angle (40 [A] excitation).

図7 励磁時の位置に対する推力特性 (40 [A]励磁)

Fig. 7. Propulsive force characteristics along the traveling position under armature excitation condition (40 [A] excitation).

示し、かつ電流位相に対して正弦波分布を示していることが分かる。

図7は、電機子電流40[A]で励磁した場合の、電流通流位相 120° 、 150° 、 180° における移動位置に対する推力特性の計算値を実験値と比較して示す。電流位相 120° 、 180° における結果と実験値がほぼ一致し、特に推力脈動の傾向が非常によく一致することが分かる。電流通流位相 150° のときに最大推力を示すが、計算値は実験値よりも幾分大きくなっている。これは、機械損や鉄損の影響を解析には考慮していないためと思われる。

3. CLSMの推力脈動改善

前章にて解析を行ったCLSMの推力脈動低減策として、次に示す4つの対策を解析上にて行った。

① 永久磁石間に空間を設ける。これは永久磁石より発生する磁束の変化を緩やかにするものであり、大きく取りすぎると推力が減少するので、推力減少と推力脈動低減のトレードオフの点から経験的に電気角で 30° に相当する3.75 [mm]の空間を設けた。これにより、永久磁石幅は22.5 [mm]から18.75 [mm]へと3.75 [mm]短くなる。

② 2つの隣接するティースを1つに合わせる。図8(a)の

図 8 隣接するティースの合体

Fig. 8. Combination of adjacent teeth.

図 9 対策前後の移動位置に対する推力比較
(40 [A] 励磁)

Fig. 9. Propulsive forces along the moving position before and after a countermeasure (40 [A] excitation).

ように 2 つの隣接するティース部を図 8(b) のように 1 つに合わせ、有効磁束量を増やし推力の増大をはかる。

③ 6 極の磁極を 8 極に増やす。移動幅が 22.5 [mm] を超えると電機子端部において対向する永久磁石が一部欠落し、これによって全体の磁束量が減少し推力が低下する。そこで、移動子側の磁極数を 8 極に増やし、移動する全区間内において電機子と永久磁石が対向するようにする。

④ 鉄心部の最大磁束密度が 1.79 [T] と高くなっているのを、これを磁気飽和のない 1.3 [T] 程度に減少させる点から、移動子側の内径鉄心の断面積が 1.4 倍程度になるように、内径鉄心の外形寸法は同じのままその厚みだけを 5 [mm] 増やす。すなわち、内径鉄心の内直径だけを 72→62 [mm] に変更する。

図 9 に移動子側を電気角にて 30° (3.75 [mm]) ずつ移動させ、電機子電流 40 [A] で励磁した場合の、対策前後の移動位置に対する推力特性を示す。対策前後ともに位置の影響で推力は脈動する。対策前は位置 30° で最大 2460 [N]、位置 240° で最小 1410 [N] と 1050 [N] の推力脈動があるのに対し、対策後は位置 270° で最大 2260 [N]、位置 150° で最小 1860 [N] と 400 [N] の推力脈動となり、対策を施すことにより 650 [N] (約 61%) も低減させることが出来る。

表 2 に対策前後における励磁時の最大推力、最小推力、平均推力並びに推力脈動を比較して示す。最小推力は対策前の 1410 [N] から 1860 [N] に 450 [N] (約 32%) 増大した。これは、推力脈動対策を施したことによる推力の平滑化、並びに移動子側磁極を 6 極から 8 極に増やしたことにより移

表 2 対策前後における励磁時の推力脈動と平均推力

Table 2. Average and fluctuation of the propulsive force before and after countermeasures under excitation.

Countermeasure	Before	After
Maximum thrust [N]	2460	2260
Minimum thrust [N]	1410	1860
Thrust fluctuation [N]	1050	400
Average thrust [N]	1890	2070

動幅が大きくなった場合に推力の減少を抑えたことに起因している。これによって平均推力は対策前の 1890 [N] から 2070 [N] に 180 [N] (約 10%) 向上した。

以上のことより、推力脈動の対策案は平均推力にて約 10%、推力脈動にて約 61% 低減し、有効であるといえる。

4. 新しい CLSM の推力脈動改善策^⑤

前章までは CLSM の構造上の観点から磁束の変化を緩やかにすることに着目し、推力脈動を改善してきた。しかし、これらの手法では推力脈動を改善し平均推力を増大するには限界がある。そこで、推力脈動の発生パターンに着目し、推力脈動の山と谷を重ね合わせることでより推力脈動を相殺するように、電機子を機械的にずらして配置し、2 電機子間の距離に相当する電気角だけ位相をずらして通電する新しい方式を提案する。

この新しい方式の磁界解析を行うにあたり、CLSM 改良機の諸元を表 3 に、その断面図を図 10 に示す。各電機子巻線は三相の 3 コイルから成り、非磁性スパーサを挟んで配置する。移動子には着磁された永久磁石が 14 極配置されており、この永久磁石には Nd-Fe-B を使用する。電機子間スパーサ長は 0~8 [mm] (電気角で 0°~120°) まで変化させて、その平均推力と推力脈動を評価した。

磁界解析には、有限要素解析ソフト ANSYS7.0 を用い、解析環境は CPU に Intel PentiumIII Processor 733 [MHz]、メモリ 384 [MB]、OS に Microsoft Windows XP Professional 搭載の計算機を用い、要素分割数は約 28000 点である。1 ケースあたりの計算時間は約 10 分であった。

図 11(a) にスパーサ長 90° (6 [mm]) における無励磁時の磁束線図を、図 11(b) に磁束密度ベクトル図を示す。磁束線の流れは電機子をずらしているため左右対称にならず、また電機子両端から磁束がわずかに漏れていることが確認できる。磁束密度ベクトル図において内径鉄心部の最大磁束密度 2.04 [T] を示し、ギャップ中の最大磁束密度は 0.90 [T] である。

図 12 に電機子電流 25 [A] で励磁した場合において、スパーサ長が発生推力の変化に及ぼす影響を示す。なお、スパーサ長が 60°, 90°, 120° のときにはそれぞれ 2 電機子間に通流する電流位相をその位相角分ずらしている。スパーサ長 0° の場合に位置 30° で最大 920 [N]、位置 120° で最小 680 [N] と 240 [N] の脈動が生じる。スパーサ長 60° の場合に位置 30° にて最大 980 [N]、位置 120° にて最小 760 [N] と

表 3 CLSM 改良機の諸元

Table 3. Parameters of the improved CLSM.

Total length of armature core	126 [mm]
Slot length of armature core	9 [mm]
Teeth length of armature core	7.2 [mm]
Diameter of armature conductor	0.8 [mm]
Number of turns of one slot coil	48
Total length of moving part	181 [mm]
Thickness of inner core	4.7 [mm]
Width of a permanent magnet	11.5 [mm]
Thickness of a permanent magnet	2 [mm]
Air gap length	0.8 [mm]

図 10 CLSM 改良機の縦断面

Fig. 10. Longitudinal cross-sectional view of the improved CLSM.

(a) 磁束線図

(a) Magnetic flux flow diagram

(b) 磁束密度ベクトル図

(b) Magnetic flux density vector diagram

図 11 CLSM 改良機の無励磁時における磁束線図と磁束密度ベクトル図

Fig. 11. Magnetic flux flow and magnetic flux vector diagrams of improved LSM under no excitation condition.

220 [N] の脈動があり、スペーサ長 120° のときは位置 30° において最大 960 [N]、位置 120° において最小 740 [N] と 220 [N] の脈動が生じる。スペーサ長が 60°, 120° の場合には、スペーサ長 0° と比較し推力脈動は 20 [N] (約 8%) と低減効果は小さい。しかし、スペーサ長 90° の場合には位置 120° で最大 890 [N]、位置 60° で最小 790 [N] と 100 [N] の推力脈動に減少し、スペーサ長 0° と比較して 140 [N] (約 58%) もの大きな低減効果を得ることが出来る。

表 4 に励磁時の最大推力、最小推力、平均推力並びに推力脈動に及ぼすスペーサ長の影響を示す。スペーサ長 60° 並びに 120° では平均推力がそれぞれ 60 [N]、70 [N] 増大するが、推力脈動の低減が少ない。スペーサ長 90° の時はスペーサ長 0° と比較し平均推力が 40 [N] (5%) 増大し、かつ推力脈動を相当に低く抑えることができる。

以上のことから、平均推力を増大し推力脈動を低減するには、スペーサ幅は 90° が最適であるといえる。

図 12 スペーサ長が励磁時の推力変動に及ぼす影響 (25 A 励磁)

Fig. 12. Effect of spacer length on propulsive force fluctuations under excitation condition (25 [A] excitation).

表 4 CLSM 改良機の励磁時の推力脈動と平均推力

Table 4. Average and fluctuation of the propulsive force of the improved CLSM under excitation condition.

Spacer length	0°	60°	90°	120°
Max. thrust [N]	920	980	890	960
Min. thrust [N]	680	760	790	740
Thrust fluctuation [N]	240	220	100	220
Average thrust [N]	800	860	840	870

(a) 磁束線図

(a) Magnetic flux flow diagram

(b) 磁束密度ベクトル図

(b) Magnetic flux density vector diagram

図 13 磁気連結 LSM の無励磁時の磁束線図と磁束密度ベクトル図

Fig. 13. Magnetic flux flow and magnetic flux vector diagram of connected LSM under no excitation condition.

次に、電機子間スペーサに非磁性体を用いて電機子間を磁氣的に完全に分割する方式(磁気分割方式)と、機械加工の容易さや機械強度の観点から外径鉄心のみを磁性体とする磁氣的に連結する方式(磁気連結方式)について、磁界解析しその特性を比較検討する。

図 13(a) に磁気連結方式の無励磁時における磁束線図を、図 13(b) に磁束密度ベクトル図を示す。磁気連結方式の磁束線図は図 11(a) の磁気分割方式の磁束線図と比較し、中央の外径鉄心部にも磁束が通っていることが分かる。磁束密度ベクトル図において、最大磁束密度は内径鉄心で 2.04 [T]、ギャップ中の磁束密度は 0.90 [T] となり、磁気分割方式とほぼ同じ値である。

図 14 に電機子電流 25 [A] で励磁した場合において、駆

図 14 磁気連結分割 CLSM の励磁時の推力変動 (25 [A] 励磁)

Fig. 14. Propulsive force fluctuation of the connected and divided CLSM under excitation condition (25 [A] excitation).

表 5 磁気連結分割 CLSM の励磁時の推力脈動と平均推力

Table 5. Average and fluctuation of the propulsion force of connected and divided CLSM under excitation.

System	Divided	Connected
Maximum thrust [N]	890	890
Minimum thrust [N]	790	710
Thrust fluctuation [N]	100	180
Average thrust [N]	840	800

動位置に対する発生推力の変化を磁気分割方式と磁気連結方式に対して比較して示す。両方式ともに推力脈動の傾向は一致しているが、磁気連結方式においては位置 120° において最大 890 [N] を示し、位置 60° において最小 710 [N] と 180 [N] の推力脈動が生じる。磁気分割方式と比較すると推力脈動が 80 [N] (80%) 増大する。

表 5 に、磁気分割方式と磁気連結方式における励磁時の最大推力、最小推力、平均推力並びに推力脈動を示す。平均推力は磁気分割方式から磁気連結方式にすることで 40 [N] (約 5%) 低下する。

以上のことから、推力脈動を低減し平均推力を増大させる最適条件はスパーサ幅を 90° とし、スパーサ材質に非磁性体を用いることであるといえる。

5. おわりに

円筒型リニア同期モータ (CLSM) の特性解析と推力脈動改善を行い、次の成果を得た。

(1) CLSM の推力特性解析を有限要素法を用いて行い、試作機の実験値と比較して推力脈動状態を含めてよく一致する結果を得て、解析の妥当性を明らかにした。

(2) 磁極間に空間を設ける、隣接ティースを合体する、磁極数を増やす、内径鉄心の厚みを増やす対策により、平均推力は 10% 増大し、推力脈動は 61% 低減できる。

(3) 推力脈動の発生パターンに着目し、推力脈動の山と谷を重ね推力の脈動を相殺するために、2 電機子を機械

的・電氣的にずらして配置・通電する新しい推力脈動改善策を提案した。推力特性解析により、2 分割電機子間スパーサ幅は 90°、分割電機子間スパーサ材質は非磁性体が最適であることを示し、平均推力はさらに 5% 増大し、推力脈動もさらに 58% と大幅に低減できることを明らかにした。(平成 17 年 4 月 27 日受付, 平成 17 年 11 月 18 日再受付)

文 献

- (1) D. Howe and Z.Q. Zhu: "Status of Linear Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives in Europe", LDIA'98, KN-1, pp.1-8 (1998-4)
- (2) H. Tazima, et al: "Cogging Torque Analysis based on Electromagnetic Computation using FEM Method", T. IEE Japan, Vol.107-D, No.5, pp.635-641 (1987-5) (in Japanese)
田島文男, 他: 「有限要素法による電磁界計算に基づくコギングトルク解析」, 電学論 D, **107**, 5, pp.635-641 (1987-5)
- (3) T. Lee and N. Maki: "Magnetic Analysis and Performance Evaluation of Cylindrical Linear Synchronous Motors", 2004 National Convention Record IEEJ, 5-051, p.62 (2004-3) (in Japanese)
李 友行・牧 直樹: 「円筒型リニア同期モータの磁場解析と性能評価」, 平 16 電学大全, 5-051, p.62 (2004-3)
- (4) T. Lee and N. Maki: "Magnetic Field Simulation and Propulsive Force Characteristics of Cylindrical Linear Synchronous Motors", The 16th Symposium on Electromagnetics and Dynamics, A212, pp.153-154 (2004-6) (in Japanese)
李 友行・牧 直樹: 「円筒型リニア同期モータの磁場解析と推力特性」, 第 16 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, A212, pp.153-154 (2004-6)
- (5) K. Ohnishi: "Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Brushless Motors", T. IEE Japan, Vol.122-D, No.4, pp.338-345 (2002-4) (in Japanese)
大西和夫: 「永久磁石ブラシレスモータのコギングトルク低減」, 電学論 D, **122**, 4, pp.338-345 (2002-4)
- (6) M. Sakamoto and A. Tozune: "A Method of Correction of Torque Harmonics in Hybrid Stepping Motor", T. IEE Japan, Vol.114-D, No.12, pp.1269-1276 (1994-12) (in Japanese)
坂本正文・戸恒 明: 「ハイブリット型ステッピングモータの高調波トルクの低減法」, 電学論 D, **114**, 12, pp.1269-1276 (1994-12)
- (7) T. Lee and N. Maki: "Propulsion Force Characteristics of Linear Synchronous Motors with Divided Armature Structure", 2005 National Convention Record IEEJ, 5-070, p.85 (2005-3) (in Japanese)
李 友行・牧 直樹: 「分割電機子を用いたリニア同期モータの推力特性」, 平 17 電学大全, 5-070, p.85 (2005-3)

李 友 行 (学生員) 1980 年 9 月 4 日生。2003 年 3 月東海大学第二工学部電気工学科電気工学専攻卒業。2005 年 3 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期修了。同年 4 月 (株) 日立製作所オートモティブシステムグループに入社。在学中は円筒型リニアモータの研究に従事。

牧 直 樹 (正員) 1940 年 8 月 18 日生。1963 年 3 月名古屋工業大学卒業。同年 (株) 日立製作所入社。日立研究所に勤務し、磁気浮上式鉄道、超電導発電機、超電導マグネットの研究開発に従事。1996 年東海大学電気工学科教授、現在に至る。超電導回転機、リニアモータ、微生物電池などの研究開発に従事。工学博士。1994 年電気学会論文賞受賞。IEEE Fellow。