

技術論文

X-Y リニア誘導モータ(LIM)を用いた搬送分岐システムの特性 —作用面積の異なる台車における分岐特性の比較検討—

Characteristics of Transport and Switch Systems Using X-Y Linear Induction Motor (X-Y LIM)
—Comparative Investigation on Switching Characteristics of the Reaction Plate Difference—

和田 隆一^{*1}, 高安 智史^{*1}, 乾 成里^{*1} (正員), 大平 鷹一^{*1} (正員)

Ryuichi WADA, Satoshi TAKAYASU, Shigeri INUI (Mem.), Yoichi OHIRA (Mem.)

Authors reported X-Y linear induction motor (X-Y LIM) which is able to transport and switch in the arbitrary directions. According to transport system, we have to change the carrier shape. We performed comparative investigation of switching angle when center of gravity position and loading weight of carrier are changed. In this paper, the reaction area size ratio of the carrier is 1:1 and 3:2 for compare.

Keywords : X-Y LIM, transport and switch, switching angle, center of gravity, reaction area size ratio.

1 緒言

現在、病院や工場のクリーンルームで使用されているリニアモータ式搬送システムは一次元駆動が主流である。この場合、搬送物を積載した台車を分岐させる一方法として、一般に一担停止が採用されているが、この方法では搬送時間の増加が懸念される。分岐機構には、ターンテーブルなどの接触分岐が用いられるが、機械的接触にともなう発塵の抑制をしなければならない。このような現状を考慮し、筆者らは非接触支持を可能にする二次元の任意方向駆動 X-Y リニア誘導モータ(X-Y LIM)を提案し[1]、搬送分岐システムの直線搬送部に磁気式支持およびローラ式支持の2方式、分岐部には空気式支持を用いることで、高速、低騒音、低振動、無発塵の搬送分岐を実現することができた[3]。

このような背景から、今日まで X-Y LIM 単体における現象の解明および台車に積載する重りの質量と重心位置の変化が分岐角度、回転角に与える影響などについて報告を行ってきた[2-10]。

本論文では、一部産業界などで使用されている搬送システムの台車は形状が様々であることを考慮し、推力の作用する面積(二次導体)が異なる台車にそれぞれ重りを積載し、台車の分岐方向推力を変えた場合について以

下の項目に関する検討を行う。

- (1) 推力が作用する二次導体の寸法比 1 : 1 の台車(正方形台車)に対する分岐角度特性の解明
- (2) 作用面積の異なる 2 つの台車(正方形台車, 長方形台車)に対する分岐角度の比較

2 システム構成

2.1 搬送・分岐システム

Fig.1 に X-Y LIM 式搬送分岐システムの概略を示す。本システムは、X-Y LIM、直線搬送部、分岐部、空気浮上設備、制御盤、計測装置[3]から構成されている。直線搬送部には、4 台の一次元駆動の加速用 LIM があり、閉ループ制御を行うことで、分岐部に一定速度で台車を進入させることができる。分岐部には X-Y LIM が設置されている。直線搬送部は長さ 2,500mm であり、台車を一定速度まで加速し、X-Y LIM が組み込まれている分岐部に進入させる。分岐部は長さ(x 軸方向)2,400mm、幅(y 軸方向)1,600mm であり、空気浮上設備を用いて 8 気圧程度の圧縮空気ですべての台車を浮上させることにより完全非接触分岐を行う。

2.2 台車

Fig.2, Fig.3 は作用面積の異なる台車であり、各台車の図中右側に推力が作用する寸法を示す。推力が作用する二次導体の寸法比は、3 : 2 (長方形台車, Fig.2), 1 : 1 (正

連絡先： 乾 成里, 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1, 日本大学工学部電気電子工学科,
e-mail: inui@ee.ce.nihon-u.ac.jp

^{*1} 日本大学

方形台車, Fig.3)である。正方形台車は, 二次導体の長さ 265mm, 幅 265mm であり, 長方形台車と寸法を統一するため正方形台車の前後には推力の作用しないアクリルを用いた。ただし, 両台車とも幅 265mm 一定なのは, 本システムにおける直線搬送部の幅の制約からである。Table 1 に台車の仕様を示す。

Fig.4 に示すように, 台車の中心を原点 o として台車の分岐方向を y_c 軸, 進行方向を x_c 軸とする。

3 実験方法と解析

3.1 実験方法

台車を直線搬送部から分岐部へ進入速度 $V_m = 0.5\text{m/s}$ 一定で進入させる。分岐部に進入した台車は, 分岐部に設置してある X-Y LIM より推力を受ける。X-Y LIM の中心を原点とし, Fig.1 に示すように, 進行方向を x 軸, 分岐方向を y 軸とし, 台車に作用する進行方向推力を F_x , 分岐方向推力を F_y とする。この X-Y LIM から受ける推力を, $F_x = -8\text{N}$ 一定(逆相制動)とし[3], $F_y = 10 \sim 25\text{N}$ に変化させ, 正方形台車と長方形台車それぞれの分岐角度について実験を行う。

また, 直線搬送部には, Fig.1 に示すように, 一次元加速用 LIM が複数個設置されており, これらの閉ループ制御を行い台車を一定速度まで加速した速度を進入速度 V_m とし, 分岐部に進入する直前に設置されている速度センサによって測定を行う。分岐部では台車の走行軌跡を観測するために, 台車の前後に取り付けられているカラーマーカーを CCD カメラが読みとり, 色抽出して, ラベリング処理により分岐角度を算出している[12]。

Fig.5 に台車の分岐形態の一例を示す。台車は, X-Y LIM の推力に振られて, 前部が回転を伴いながら分岐を行い, 分岐部内の端の直前で分岐を終了する。このときの分岐角度 θ は, X-Y LIM の中心と分岐終了後の台車の中心を直線で結び, その直線と x 軸がなす角とする。

重心位置偏倚については, 重りの積載位置を台車の x_c 軸上あるいは y_c 軸上を移動させることにより行っている。なお, 台車の中心を原点とし, 重りを進行方向に配置する場合を $+x_c$ とし, 分岐方向に配置する場合を $+y_c$ とする。この重心位置は, Fig.4 に示すように重りを台車の積載可能位置の最も外側に積載したときが最大重心偏倚である。積載する重りは, 幅 60mm, 長さ 200mm で, 高さは 11mm と 36mm の 2 種類の直方体である。重りの質量を 1.0kg, 3.4kg に可変して検討を行う。重りは長辺を x_c 軸と平行に積載する。従来は x_c 軸上の重心偏倚につい

て検討を行ってきたが[4-10], 本論文では, y_c 軸上の重心偏倚 $y_c = -7.62\text{mm}, 0\text{mm}, +7.62\text{mm}$ の各点において, 検討を行う。なお, 台車寸法の制約から $|y_c| \leq 7.62\text{mm}$ となっている。

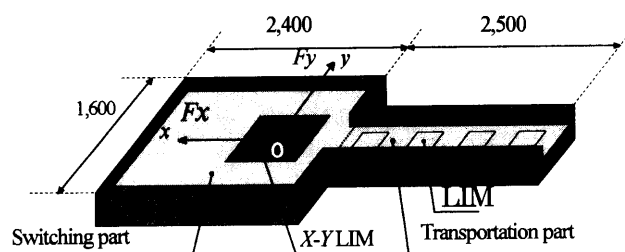


Fig. 1 Schematic diagram of transport and switch system (unit: mm).

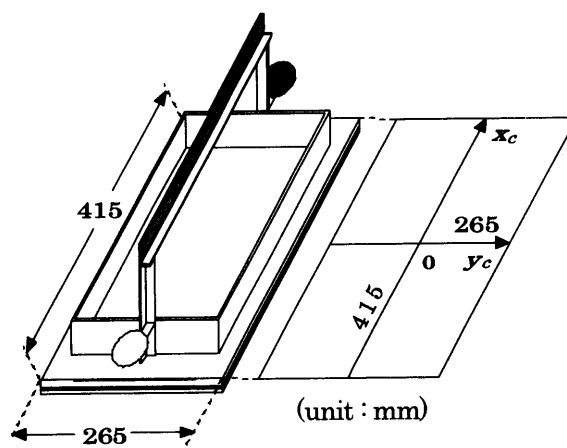


Fig. 2 The carrier with rectangle reaction plate.

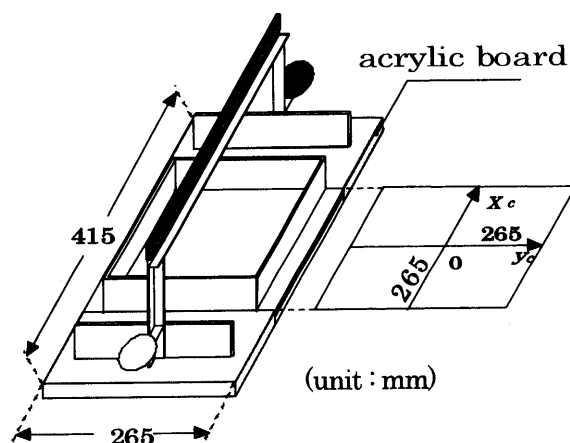


Fig. 3 The carrier with square reaction plate.

Table 1 Specifications of carriers.

Square carrier	
Outside dimension	W290×L430×H186mm
Mass	9.5kg
Secondary conductor	Fe + Al composition board Fe: W265×L265×t4.5mm Al: W265×L265×t4.0mm
Non-magnetic substance	acrylic board W265×L150×t8.0mm
Rectangle carrier	
Outside dimension	W290×L430×H186mm
Mass	9.5kg
Secondary conductor	Fe + Al composition board Fe: W265×L415×t4.5mm Al: W265×L415×t4.0mm

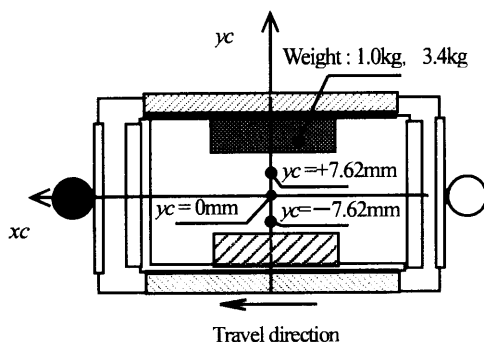


Fig. 4 The center of gravity on carrier.

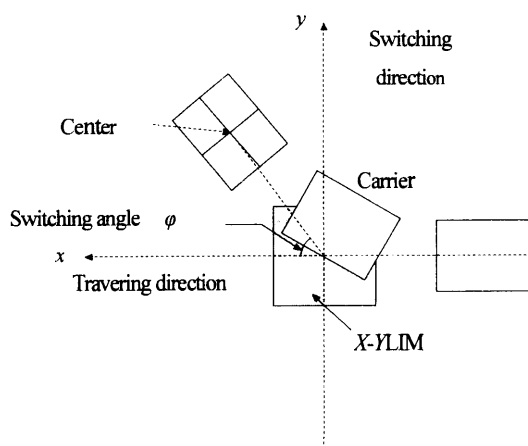


Fig. 5 Example of the carrier motion.

3.2 解析

X-Y LIM の設置してある分岐部では、台車の運動は剛体の平面運動として取り扱うことができるので、進行方向、分岐方向の並進運動と重心における回転運動として考える[13]。長方形台車は 83×53、正方形台車は 53×53 の微小剛体要素に分割し、各要素に作用する推力、力のモーメントについて台車の作用面積における総和を求め、微小時間毎に計算を行うことで台車の位置が求められる。重りを積載した台車の重心位置は、式(1)により与えられる。

$$\vec{r}_g = \frac{\sum (m_{i,j} \cdot \vec{r}'_{i,j})}{\sum (m_{i,j})} \quad (1)$$

$\vec{r}_g$: 質量中心点の位置ベクトル [m]

i, j : 要素番号

$m_{i,j}$: 各要素の質量 [kg]

$\vec{r}'_{i,j}$: 各要素の位置ベクトル [m]

式(1)におけるベクトルの始点は、台車の中心としている。本論文では、重りを x_c 軸と平行に移動させただけであることから、重心位置の偏倚は一方向のみの考慮となっている。各要素の運動は式(2)～(4)で与えられる[14]。

$$m \frac{d^2 G_x(t)}{dt^2} = F_x \quad (2)$$

$$m \frac{d^2 G_y(t)}{dt^2} = F_y \quad (3)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = N \quad (4)$$

m : 台車の質量[kg]

$G_x(t)$: 台車重心の x 方向偏倚[m]

F_x : 各微小剛体要素に作用する x 方向推力[N]

$G_y(t)$: 台車重心の y 方向偏倚[m]

F_y : 各微小剛体要素に作用する y 方向推力[N]

I : 慣性モーメント[kg・m²]

θ : 台車と x 軸がなす角[rad.]

N : 力のモーメント[N・m]

台車の重心を通る垂線についての慣性モーメント I と力のモーメント N については、式(5)～(7)で与えられる。

$$I = \sum m_{i,j} \cdot r_{i,j}^2 \quad (5)$$

$$\vec{N} = \sum (\vec{r}_{i,j} \times \vec{F}_{i,j}) \quad (6)$$

$$N = \sum (y_{i,j} \cdot F_{x_{i,j}} - x_{i,j} \cdot F_{y_{i,j}}) \quad (7)$$

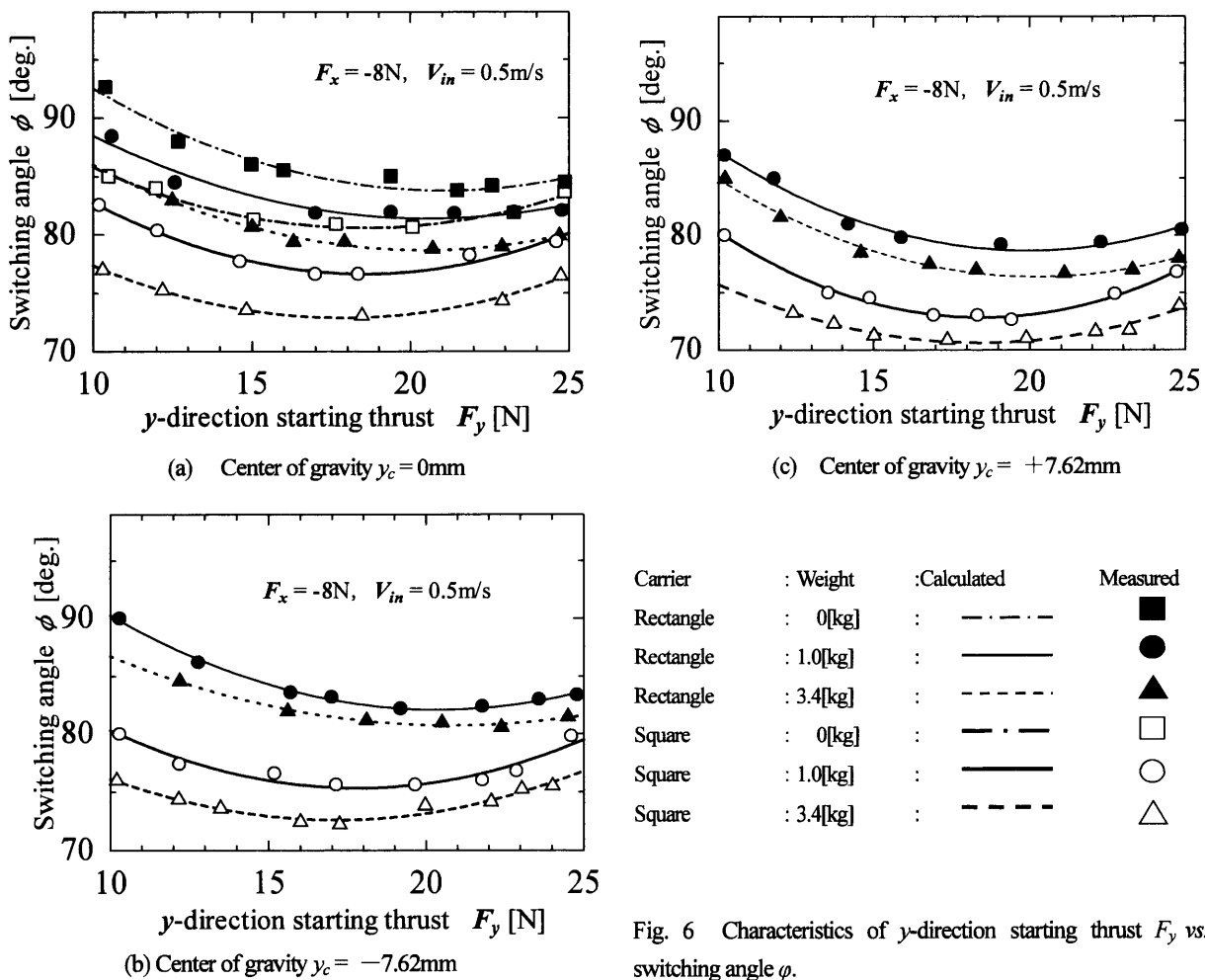


Fig. 6 Characteristics of y -direction starting thrust F_y vs. switching angle ϕ .

i, j : 要素番号

$m_{i,j}$: 各要素の質量 [kg]

$r_{i,j}$: 各要素と重心位置との距離 [m]

$\vec{N}$: 力のモーメントベクトル [Nm]

$\vec{r}_{i,j}$: 各要素の位置ベクトル [m]

$\vec{F}_{i,j}$: 各要素の合成推力ベクトル [N]

$x_{i,j}$: 各要素と重心位置との X 方向距離 [m]

$y_{i,j}$: 各要素と重心位置との Y 方向距離 [m]

$F_{x,i,j}$: 各要素に作用する X 方向推力成分 [N]

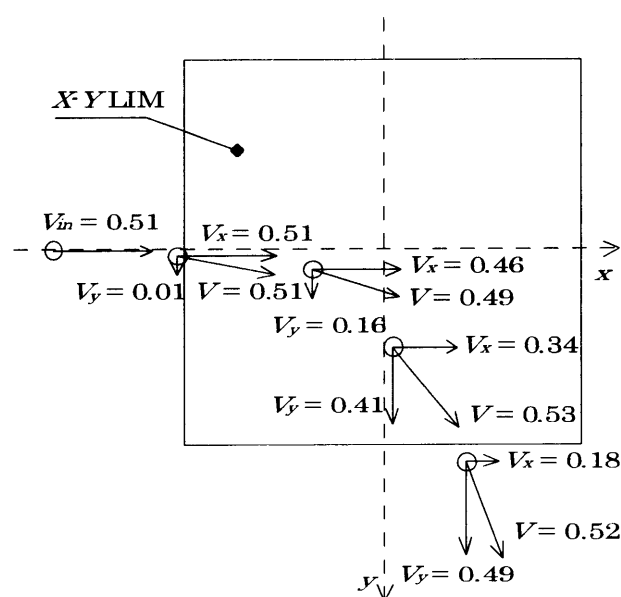
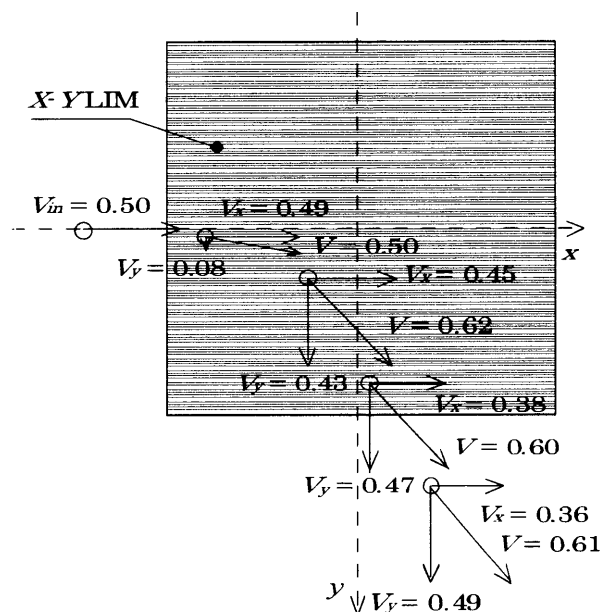
$F_{y,i,j}$: 各要素に作用する Y 方向推力成分 [N]

4 結果

4.1 推力が作用する二次導体の寸法比 1 : 1 の台車 (正方形台車) に対する分岐角度特性の解明

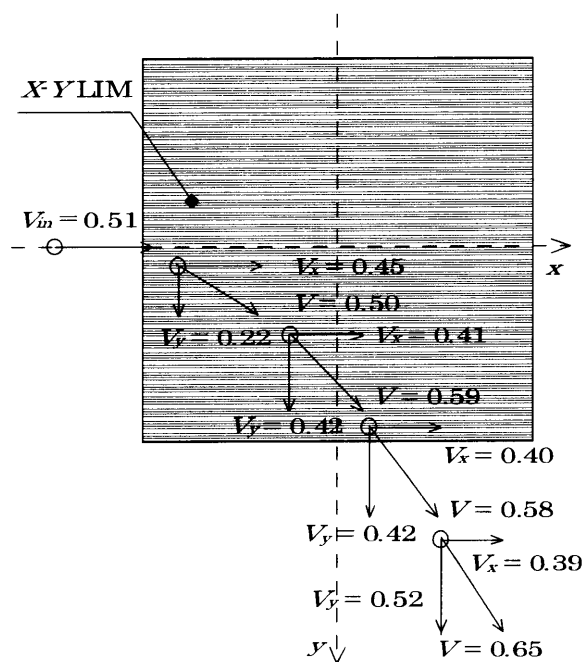
Fig.6(a)は、台車重心位置 $y_c=0\text{mm}$ に重りを積載したとき、 $F_x=-8\text{N}$ (逆相制動) [3], $V_m=0.5\text{m/s}$ を一定とし $F_y=10\sim25\text{N}$ に変化させたときの長方形台車[8]と正方形台車の ϕ との関係を示す。正方形台車では、 F_y を増加すると ϕ の減少傾向は極小値をとる 18N 付近までゆるやかである。この減少傾向は、 $F_x=-8\text{N}$ が逆相制動のため[3], 台車の進行方向に対してブレーキ力が働き、 F_y を増加すると X - Y LIM 上に台車の存在する時間が短くなるためと考えられる。台車の積載質量が増加するにしたがい、台車全体の質量が増加すると台車に作用する推力が同じでも、質量が増加した分だけ単位質量当りの推力が小さくなるため、 ϕ は指数関数的な減少傾向を示す。

Fig.6(b), (c)は、同一条件の下で重心位置をそれぞれ y_c

(a) y -direction starting thrust $F_y = 11.1\text{N}$ (c) y -direction starting thrust $F_y = 24.8\text{N}$

(unit : m/s, $F_x = -8\text{N}$, $\circ$: center of carrier, square carrier, $y_c = +7.62\text{mm}$)

Fig. 7 Velocity vector component of the carrier (Measured).

(b) y -direction starting thrust $F_y = 18.2\text{N}$

$= -7.62\text{mm}$, $+7.62\text{mm}$ に可変したときの F_y と ϕ の関係を示す。この場合、 $y_c = 0\text{mm}$ に比較して分岐角度 ϕ には減少が見られたものの、重心位置を可変しても I の差が小さいため、 ϕ の変化する傾向は同様であった。

Fig.7(a), (b), (c)は $y_c = +7.62\text{mm}$, $F_x = -8\text{N}$ 一定で、1/6秒ごとにプロットした速度ベクトル成分である。これらのプロットから、台車が X-Y LIM上を通過する時間を確認することができる。Fig.7(a)では、 F_y が小さいため、分岐方向速度成分 V_y の増加が小さく、台車の分岐は遅れている。Fig.7(b)では、 F_y が大きいため、Fig.7(a)に比較して大きな分岐を示している。Fig.7(c)では、X-Y LIM上へ台車が進入したとき、 F_y が大きく、 $F_x = -8\text{N}$ の逆相制動力[3]を大きく上回るため分岐方向へ急激な加速を示している。したがって、台車が X-Y LIM上に存在して推力を受ける時間が短縮されてしまうため、Fig.7(b)に比較して、 ϕ は小さくなっている。

4.2 作用面積の異なる2つの台車(正方形台車, 長方形台車)に対する分岐角度の比較

Fig.6(a), (b), (c)から分かるように長方形台車に比較して正方形台車では, F_y を可変しても二次導体の面積が小さいので LIM から推力を受ける時間が短く作用する力積が小さいため, ϕ への影響が小さい。また, 正方形台車では重心位置を可変しても I の変化が小さいため, ϕ への影響はほとんどない。

5 結言

本論文は, これまでに報告してきた長方形台車[4-10]と新たに設計した正方形台車を用い, 作用面積の違いが台車の分岐に与える影響と各々の台車における分岐特性の比較を行って以下のような結果を得た。

(1) 推力が作用する二次導体の寸法比 1:1 の台車(正方形台車)に対する分岐角度特性の解明

正方形台車では, 質量や重心位置が変化した場合でも分岐角度が受ける影響は小さい。この理由は, 慣性モーメントの変化が小さく, 分岐角度が質量や重心位置の影響を受けにくいからである。

(2) 作用面積の異なる2つの台車(正方形台車, 長方形台車)に対する分岐角度の比較

長方形台車に比較して正方形台車は, 同推力の下では分岐角度が小さい。したがって, 分岐方向推力を変化させても分岐角度が受ける影響は小さいと考えられる。また, 推力を可変しても分岐角度の変化が小さいため, 台車の分岐には大きな影響がない。

以上のことから, 所要の分岐角度を得ようとするとき, 長方形台車に比較して, 正方形台車では積載物の質量, 積載位置の変化や分岐方向推力による分岐角度の変化が小さく安定した台車分岐が可能である反面, 制御性に劣るとも言える。一方, 正方形台車に比較して, 長方

形台車では分岐角度の変化範囲が広く制御性に優れるとも言える。

(2004 年 1 月 23 日受付, 2005 年 3 月 8 日再受付)

参考文献

- [1] 大平, 古関, 正田, X-Y リニア誘導モータの磁束分布特性について, 電気学会リニアドライブ研資, LD-90-19, pp.11-19, 1990.
- [2] 大平, 古関, 正田, X-Y リニア誘導モータ (X-Y LIM) の基本特性, 日本応用磁気学会誌, Vol.21, No.5, pp.929-939, 1997.
- [3] 大平, 古関, 正田, X-Y LIM を分岐に用いた浮上式搬送・分岐システムの基本特性, 電気学会論文誌 D, Vol.118-D, pp.105-110, 1998.
- [4] 宇津野, 乾, 大平, X-Y LIM を用いた搬送・分岐システムの分岐特性 —台車重心位置が分岐に及ぼす影響—, 日本応用磁気学会誌, Vol.24, No.4-2, pp.971-974, 2000.
- [5] 宇津野, 勘田, 乾, 大平, 台車重心位置の移動による搬送・分岐システムの分岐特性, 電気学会論文誌 D, Vol.120-D, No.8/9, pp.1000-1007, 2000.
- [6] 宇津野, 乾, 大平, 任意の台車重心位置による X-Y LIM を用いた台車分岐の検討, 日本応用磁気学会誌, Vol.25, No.4-2, pp.1191-1194, 2001.
- [7] 宇津野, 乾, 大平, X-Y LIM を用いた搬送・分岐システムの分岐特性 —推力と台車重心位置偏倚の影響—, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.1, pp.93-98, 2001.
- [8] 先崎, 乾, 大平, X-Y LIM を用いた搬送・分岐システムの分岐特性 —積載物の質量が台車分岐に与える影響—, 日本応用磁気学会誌, Vol.26, No.4, pp.637-640, 2001.
- [9] 先崎, 乾, 大平, X-Y LIM を用いた任意の台車重心における台車分岐の検討, 日本 AEM 学会誌, Vol.10, No.2, pp.193-199, 2001.
- [10] 八百板, 乾, 大平, X-Y LIM 式搬送・分岐システムにおける台車重心位置と質量変化が分岐角度に及ぼす影響, 日本 AEM 学会誌, Vol.11, No.2, pp.88-93, 2001.
- [11] 高安, 乾, 大平, X-Y リニア誘導モータ(LIM)を用いた搬送・分岐システムの分岐特性 —作用面積の異なる台車における比較検討—, 第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 4A01, pp.365-368, 2003.
- [12] 大山, 関口, 高安, 乾, 大平, X-Y LIM 式搬送・分岐システムにおける画像処理を用いた移動体の 2 次元座標計測, 電気学会リニアドライブ研資, LD-04-44, pp.27-30, 2004.
- [13] 原島 鮮, 質点系・剛体の力学, 裳華房, pp.116-135, 1971.
- [14] A.P. French, MIT 物理 力学, 培風館, pp.119-121, 1983.