搬送装置の磁石ブレーキ式定位置停止機構の開発*

梅 森 肅^{*1}, 松 井 一 三^{*2}
細 越 寿 則^{*3}, 砂 子 田 勝 昭^{*4}

Development of Magnetic Regular Position Stopper for Wagon

Takashi UMEMORI^{*5}, Kazumi MATSUI,
Toshinori HOSOGOE and Katsuaki SUNAKODA^{*5} Hachinohe Inst. of Tech., Dept. of Energy Eng., Ōbiraki 88-1, Hachinohe-shi, Aomori, 031-8501 Japan

We propose a new regular position stopper mechanism of the running wagons being capable of the wide application about the weighty matter storing system. It is composed from the magnetic brake and the spring system installed on the wagon. The wagon decelerates in the preselected speed level by the magnetic brake. The brake mechanism installed in the wagon collides against the stopper and comes to a stop at the regular position suppressing the shock by the action of the spring system. It gives the distinction that the wagon is without using the feed-back control system and makes the rapid stopping action. About making up the 1.5 ton wagon running test equipment, we made a clear for the fundamental design methods, analyzing the action modes, and stopping about the error 1 mm.

Key Words: Magnetic Brake, Magnetic Regular Position Stopper, Multi-Story Parking Garage

1. ま え が き

立体駐車場、立体収納庫等における入れ換えシステムでは、重量物搬送台車を正確に定まった位置に停止させる技術が必要であり、従来の考え方では、フィードバック制御によるのが普通である。しかし、このような適用例では走行台車の速度が低い、乗り心地は考慮外である、停止動作が速い、停止精度の高いことが望まれる等、旅客車両の定位置停止とは適用条件が異なっており、著者らは、磁石ブレーキを使って閉ループ制御なしで、1 mm オーダの精度で定位置停止できる新しい機構を開発した。本論文は、この構想を具体化するため、質量 1.5 t の走行台車による実験装置を作って、基本動作を確認するとともに、基本設計思想をまとめたものである。

2. 定位置停止の原理

図 1 は本定位置停止機構の原理を示す。ブレーキ用電磁石は進行方向の振れと、吸着方向の動きに自由度を与えるよう支持し、その支持点は進行方向にだけ自由度を与え、ばね、ダンパ系を挿入してある。電磁石の磁極面は紙面に平行であり、これとわずかな空げきを保って鉄製のブレーキ板を進行方向に設けてある。ブレーキ板には停止位置に対応して突起状のストッパ A, B, C … が設けてあり、電磁石を励磁しなければ走行台車は素通りし、励磁すれば電磁石がもち上がり、振り子のアームについた爪が引っかかるような機構になっている。ストッパ A, B, C … のいずれで停止するかを選択して、その停止するストッパの手前で電磁石ブレーキを励磁すると、電磁石はブレーキ板に吸着して走行台車の動きでアームはもち上がり、この過程で走行台車にブレーキ力加わりながら、アームの爪がストッパに当たり停止動作を行う。このとき台車の残存エネルギーはばね系のたわみによって吸収し、最終的にはばね系の平衡位置で停止する。台車の走行抵抗力を小さくしてあれば停止位置は 1 mm オーダの高い精度が得られる。

本定位置停止機構は、周知の衝撃吸収機能の付いた

* 原稿受付 1998 年 11 月 9 日.

^{*1} 正員, 八戸工業大学エネルギー工学科(〒031-8501 八戸市大字砂子大開 88-1).^{*2} 日本電設工業(株)(〒110-0008 東京都台東区池之端 1-2-23).^{*3} 八戸工業大学エネルギー工学科.^{*4} 正員, 三和テッキ(株)(〒140-8669 東京都品川区南品川 6-5-19).

Fig. 1 Mechanism of regular position stopper

Fig. 2 Model of regular position stopping

単なるストップとは異なり、

- ・停止精度は衝撃緩衝のためのストロークの影響は受けて、1 mm オーダの精度で停止できる。
- ・停止点は複数設定して選択停止できる。
- ・ストップのエネルギー吸収能力は、ブレーキと併用するため1けた小さくてよい。

の特徴があり、また、フィードバック制御による方法に比べて停止動作が速い点に特徴がある。

通常の機械ブレーキでは押し圧方向の強度が必要なものに対し、磁石ブレーキは押し圧方向の強度は基本的に不要であり、ブレーキ機構は片面接触の簡単な構造でよい。ため、定位置停止機構の付加を容易にしている。

3. 定位置停止機構のモデルと研究手法

図2は定位置停止の基本構成モデルを示す。

ここに、

M : 搬送台車質量

F_a : 駆動力 N

F_b : ブレーキ力 N

L_a : 加速区間長 m

L_b : 仮想ブレーキ距離 m

V_a : 到達速度 m/s

F_a , F_b 一定、台車の走行抵抗は小さく、零と仮定できるとすれば、

$$F_a \cdot L_a = \frac{1}{2} M V_a^2 = F_b \cdot L_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、搬送台車が軽量であれば高速に加速されるが、仮想ブレーキ距離は変わらないことがわかる。実際にはブレーキ距離 L_b の手前、D 点にストップがあり、残存速度 V_x で、衝突運動を生じる。D 点は、あらゆる外乱を想定してこれより手前で自然停止することのない位置に設定する。

ここでは走行台車は定駆動力加速方式を例にして述べたが、どのような駆動方式を採用するかは、本定位置停止機構の基本的な問題ではない。したがって、本論文は磁石ブレーキの特性と、残存速度 V_x で衝突したときの衝撃力、停止位置精度を議論の対象とした。著者らは、これを磁石を振り子状に保持した機構でのブレーキ特性、ストップ衝突時の特性の2段階に分けて研究を進めた。後者については、一般性のある理論的把握と実験装置による実証の手法によったが、前者については実験を主体にして設計思想を模索する手法によらざるを得なかった。このため実験装置はスケール効果を考慮して、立体駐車場を想定した規模のものにした。

両段階における実験装置は、表1の諸元を基準にした。ブレーキ装置は、搬送台車の両側に取付けるものとして、実験装置では、ブレーキ装置は片側1個分、搬送台車質量は上記の1/2とした。

式(1)に表1の諸元を代入すると、ブレーキ力 $F_b = 905$ N が得られる。

4. 電磁石ブレーキの構成および特性

4.1 ブレーキ用電磁石の構成 図3(a)はE形鉄心による電磁石、図3(b)はリング状鉄心による電磁石を示す。励磁コイルが鉄心で保護されていること、強い吸着力でもブレーキ板に傷が付きにくいことのため本実験装置では後者を選択した。

ブレーキ電磁石の基本構成は「ブレーキ力」が与えられたときの吸着力の決定と、表2の諸元を算出することで達成できる。

電磁石の励磁 AT 、吸引力(吸着力) F 、磁極面積の関連は周知の次式で与えられる。

Table 1 Design condition of equipment

Mass of Wagon	Load	3000 [kg]
	No Load	1500 [kg]
Speed of Wagon		1.3 [m/s]
Brake Distance		1.4 [m]

(a) E shape iron core (b) Ring shape iron core

Fig. 3 Shape of brake magnet

$$AT = 8 \times 10^5 \times B \cdot g \quad AT \dots\dots\dots (2)$$

$$F = \frac{B^2 \cdot s}{2\mu_0} \quad N \dots\dots\dots (3)$$

ここに

B : 磁極における磁束密度 テスラ

g : 空げき長 m

s : 磁極面積 m^2

μ_0 : 真空透磁率 1.257×10^{-6} H/m

ただし、所要 AT は鉄心の磁気抵抗を無視した(注: 磁極が空げきを隔てて鉄面と対抗している状態で相互間に働く力を吸引力、磁極面が鉄面に密着している状態で相互間に働く力を吸着力として使い分けた)。また、経験的に得られた次の項目も構成上の参考にする必要がある。

①ブレーキ力(磁気摩擦力)は、吸着力×磁気摩擦係数で与えられる。磁気摩擦係数は0.3程度としてよい。これは、通常の鉄-鉄の摩擦係数より大きい。

②ブレーキ板の表面粗さによる吸着力の差は、平均表面粗さ1以下のオーダでは僅少であるが、平均表面粗さ10のオーダでは1/2程度と大幅に低減する。

③ブレーキ力は、速度1m/sオーダでは、速度による影響は小さい(渦電流ブレーキ力が相対的に大きい形状、激しい機械的振動の見られる状態ではようすが異なると思われる)。

④単位面積当たりの吸着力が大きいと接触面に傷が付くので磁極面の磁束密度は1テスラ程度が適当である。

⑤励磁 AT 一定の条件での磁極面の空げき磁束密度と、吸着力は接触面の数十ミクロンオーダで見た密着度に大きく依存する。接触面状態によるブレーキ力の変動を小さくするためには、ヨーク部の磁束密度がすでに飽和領域にあるようにするか、磁気回路に空げ

Table 2 Design condition of brake magnet

Exciting AT
Pole Area
Yoke Sectional Area
Air Gap for Action
Attractive Force
Spring Force for Suspension

Fig. 4 Testing equipment

き長を設けるように設計する。軟鋼材の飽和磁束密度は、約2テスラである。

⑥ブレーキ電磁石の動作前の空げき長は数ミリ程度であるが、このときの吸引力は吸着力の数%程度以上にあるよう構成し、吸着動作を確実にする必要がある。

⑦ブレーキ用電磁石は、非動作状態で、揺れ等で、ブレーキ板に接触しないよう、吸着力の数%程度のばね力で保持する必要がある。

本論文の実験装置のブレーキ用電磁石は、式(2)、(3)にブレーキ力 $F_b = 905$ N、①項の磁気摩擦係数0.3、④項の $B = 1$ T、⑥項の $g = 0.005$ mを代入して得られた吸着面積 $S = 0.00758$ m^2 、励磁 $AT = 4000$ ATの結果を用いた。これより、図3(b)における電磁石外径寸法は直径109 mm、高さ55 mmとした。

4.2 ブレーキ特性 図4は、アーム形電磁石のブレーキ特性を研究するために製作した実験装置の主要部を示したもので、見やすいように手前にある吸引鉄板を外してある。電磁石を取付けた振り子状アームの支点を垂直金属板に固定し、この金属板にはスライドベアリングを取付けて、リニアガイドレール上を移動できるようにしてある。また、その金属板にはラックギヤを取付け、固定側に設置した3.7 KW、6極の誘導電動機でブレーキ力に打ち勝つ駆動力を与え、誘導電動機はVVVFインバータで速度制御する。電磁石の吸引面とわずかな空げきを保つ位置に平行して厚さ10 mm ブレーキ用鉄板(図4では取外し状態)を設け、ブレーキ力は鉄板を進行方向に移動させる力を張力ロードセルで計測する。

図5は実験装置の電磁石ブレーキ部を示す。電磁石進行方向と、吸着方向の自由度はアーム根本に、直交する二つの回転軸を設けることで対応している。アーム長は、電磁石外径の2倍の219 mmを基準にした。ブレーキ板は地上側走行路に沿って施設されるので、地上側設備の占有空間の関係でブレーキ板の幅は小さいほうがよい。このためアーム長短縮、振れ角制約に対する動作特性を観察する目的で、アーム長168 mm、振れ角制限 60° の条件も設けるようにした。

図6は支持アーム長219 mmで、電磁石と鉄板の接触面が乾燥、水滴付着、油付着の状態におけるブレーキ特性、支持アーム振れ角特性の実験結果を示す。電磁石の励磁後、アーム長の距離の進行で、指示アームの振れ角は約 60° 、ブレーキ力は最大値の約80%に達すること、移動距離に対する支持アーム振れ角は表面付着物による影響はほとんどないことがわかる。ブレーキ力は鉄板が水濡れによって10%程度増加し、鉄板表面に油が付着すると30%程度減少することがわかる。

図7は乾燥面状態で支持アーム長168 mmおよび219 mmの2条件、支持アーム振れ角制限なしと、約 60° の制限付きの2条件で行ったブレーキ特性、支持アーム振れ角特性の実験結果を示す。移動距離に対する支持アームの振れ角はアーム長の短いほうが立ち上がり早いことがわかる。振れ角に制限を与えた場合は、当然それ以降振れ角は一定値を保持する。ブレーキ力はアーム長の短いほうが立ち上がり早く、振れ角に約 60° の制限を与えてもブレーキ力にはほとんど変化がないことがわかる。アーム長短縮と、振れ角制限方法はブレーキ性能を保持したまま、ブレーキ板の

Fig. 5 Electromagnetic brake

Fig. 6 The adherent on contact surface and brake characteristics

Fig. 7 Suspension arm construction and brake characteristics

幅を短縮するための有効な手段であることがわかる。この実験装置の例では、ブレーキ板の幅は本来 300 mm 程度必要であったものが 188 mm に短縮できた。

図 8 はアーム長 168 mm、接触面乾燥、速度 0.202 m/s で 10 回行ったブレーキ力特性のばらつきを示す。実線は 10 回の平均値をプロットしたもの、上下に区切られた領域は各点における最高値と最低値を示したものである。支持アーム振れ角は事実上ばらつきはないと見てよい。ブレーキ力のばらつきも比較的小さいことがわかる。

結局、これまでの実験結果より、ブレーキ用磁石の支持アームは適度に短くして振れ角制限を設けることで、地上側のブレーキ板の幅を短縮できること、ブレーキ板の表面が極度の粗仕上げ、油付着の状態であれば比較的安定したブレーキ力が期待できることがわ

かった。なお、この実験装置では吸着力は 4 000 N のオーダであるが、機械的な片面押し付けの場合と異なり、ブレーキ板厚さ方向の強度は特に考慮する必要がないことがわかった。

5. 定位置停止動作の検討

5.1 走行実験装置 定位置停止機構の実用に際しては台車質量 M 、衝突速度 V_x が与えられたとき、ブレーキ電磁石支持点の移動ストローク、ばね定数に対して停止時の衝撃力、停止制度との関係が定量化されていなければならない。このため本機構の動作モードを分析して、動作理論を体系化する目的で走行実験装置を制作した。

図 9 は試作した実験装置を示す。走行台車は、鉄材を積んで積載質量相当の 1.5 t と、空車質量相当の 0.75 t を作った。走行路長は 5.4 m で、台車はリニアベアリングで支持し、台車の片側にラックギヤを取付け、地上側にある定格トルク 25.0 N・m ロッキングモータ 2 台で、軸に取付けたギヤで加速し、台車の加速速度は加速区間長によって調整するようにした。

台車の位置の全体的な計測はレール側に設けた 10 mm 間隔の白黒のしまを光検知することで行い、電磁石位置の変位は、変位をラックギヤで回転角に変換して回転形可変抵抗器で計測を行っている。

図 10 は電磁石ブレーキの構造を示す。アームの軸は進行方向の力が加わると ± 100 mm 平行移動できるようにリニアベアリングで支持し、移動方向にばね系が装着してある。ばね硬さ 32 100 N/m、ダンパーの減衰係数 4 180 N/(m/s) である。ただし、減衰係数は非直線性があるので動作領域近くの接線のこう配により算出した。

なお、ストッパ衝突時の剛体衝突を避けるため、ストッパ側に衝突吸収用のゴムを挿入してある。

5.2 動作モード 図 11 は、ブレーキ装置のばね系に着眼した等価モデルを示す。図 12 は、実験装置の

Fig. 8 Reappearance of brake characteristics

Fig. 9 Running test equipment

観測で得られた動作モードを示す。

5・3 動作の解析 図12のストップ衝突後の行程に対して、次の運動方程式が成立する。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad \cdots \cdots (4)$$

初期条件 $t=0$ で、 $x=X_0$, $\dot{x}=V_x$ を与えることで、動作の解が得られる。

ただし、

M : 台車質量

C : 減衰係数

K : ばね定数

X_0 : 初期変位 $= F_B/K$

V_x : ストップ衝突時の速度

F_B : ブレーキ力

Fig. 10 Electromagnetic brake

Fig. 11 Construction of stopper

Fig. 12 Action of stopper

これより、本機構の性能は次のように評価できる。

①ストップ衝突時の衝撃力：衝突時の最初の山の $M\ddot{x}$ のピーク値より算出できる。

②はね返り：最初の反復運動時の $|M\ddot{x}| < (\text{ブレーキ力})$ で生じ、停止位置が移動する。本実験装置では、 $(\text{ブレーキ力}) = F_B \cos \theta$ で評価できる (θ はブレーキ支持アームの水平とのなす角、ここでは 30°)。

③停止精度：上記はね返りが生じない前提では、 $Kx \leq (\text{台車の動く抵抗力})$ で定まる x の停止精度が得られる。

5・4 実験結果との照合 図13, 14は、ストップ衝突時を $t=0$ として、それぞればね系の変位および衝撃力の実験値(点線)と計算値(実線)の照合を示す。計算値の初期条件は実験値の $t=0$ における $X_0 = 0.030$ m, $V_x = 0.265$ m/s を用いた。記録計には 10 Hz のフィルタを挿入してある。これより、変位、周期は実験値と計算値とはよく合致していることがわかる。ストップ衝突時の衝撃力は、波形、ピーク値ともに差があるが、これは解析では、図11における質量 m を考慮していないためと考えている。基本的には質量 m を小さくすることで差は小さくできる。また、反発力についても多少の差が見られるが、これは衝突時の衝撃による計測系の振動が主原因と考えている。結局、走行台車の質量 M と、衝突時の速度 V_x が与えられると衝突時に生じる力、第1波の衝撃力と、第2波の反発力は、大略算出できることがわかる。

表3は、走行台車質量 M 、衝突速度 V_x の変化に対して5・3節②はね返り条件理論値と、実験におけるはね返り発生の有無の照合を示す。表3中×, ○印は、それぞれ実験におけるはね返りのなし、ありの状態を

Fig. 13 Displacement

Fig. 14 Shock force

表す。表3中の Repetitive Force, および $F_b \cos \theta$ は、5・3節②における値である。これより、5・3節②のはね返り条件は4例中1例だけ実験結果と照合していないものの、大略成立することがわかる。

図15は反発を生じない条件で行った10回の実験による停止位置精度の実験結果を示す。

停止位置の誤差は、10回の実験の平均停止位置に対する偏差の最大0.45 mm, 標準偏差0.18 mmであった。台車の走行抵抗力をばね計りで計測すると、約10 Nで、停止精度は0.45 mmとなり、実験とよく対応することがわかった。

6. 考 察

本論文における定位置停止機構は、磁石ブレーキの使用と機械要素による定位置停止機構の2点に特徴がある。

定位置停止方法の一般的な考え方として代表的には、

- ・走行台車位置を連続的に、あるいは複数点検知してブレーキ力をフィードバック制御して停止する。
- ・ブレーキ作動位置を検知してブレーキを作動(オープンループ制御)停止する。

がある。前者のフィードバック制御方式では、平均減速度は最大減速度より小さく設定する必要がある、それだけ停止時間を長くする原因となる。後者のオープンループ制御による方式では走行台車の減速、質量に変動がある場合は基本的に大きな停止位置誤差を生じる。

本論文に提案した方式は、ブレーキ性能の最大減速度で減速して、速度零になる以前にストッパ衝突、停止させる方法であり、停止時間は上記フィードバック制御方式より基本的に短いと考えられる。そして、本方式は形の上ではオープンループ制御でありながら、速度、質量の変動に基づく減速度の偏差分は減速の途中の段階でストッパに衝突・停止させる動作によって処理してフィードバック制御と類似の動作を行う。さらに、磁石ブレーキは車輪の粘着に左右されずに強いブレーキ力が得られるため、減速度の増大による停止時間の短縮効果が期待できる。

なお、本機構は現存する「車止め」の機構とは衝突時の衝撃吸収の思想は共通であっても、台車の定位置

Table 3 Comparison with calculation

Mass of Wagon, M [kg]	750	750	1500	1500
Brake Force, F_b [N]	1018	1050	1096	1070
Collision Speed, V_c [m/s]	0.430	0.595	0.265	0.339
Repetitive Force [N]	-695	-811	-994	-973
$F_b \cos \theta$ [N]	882	909	949	927
Repetitive Motion	×	×	×	○

Fig. 15 Stopping point accuracy

停止思想の存在の有無が基本的に異なっている。

7. む す び

重量物入れ換えシステム等に適合する磁石式定位置停止装置について提案し、基本設計をする上での解析方法を明確にした。これによりフィードバック制御なしで、停止動作が速く、1 mm オーダの精度で停止できる定位置停止機構の実用が可能と考えられる。

本実験装置の製作に当たっては東北三吉工業(株)関口力氏の協力を受けたことを付記して、謝意を表す。

文 献

- (1) 松井一三・梅森肅・細越寿則・塩野谷純一, 搬送装置の磁石式定位置停止機構の開発, 平7年電気学会全大講論[2], No. 489 (1995), 290-291.
- (2) 松井一三・梅森肅・栗山義彦・田中宏, 磁気摩擦を応用した新しい輸送, 物流システムの研究, 平9年機械学会, 第6回交通・物流部門大会講論, No. 97-12 (1997), 165-168.
- (3) 松井一三・梅森肅・細越寿則・砂子田勝昭, 搬送装置の磁石ブレーキ式定位置停止機構の開発(4), 平10年機械学会, 第75期総会講論, No. 98-1 (1998), 378-379.
- (4) 松井一三・梅森肅・栗山義彦, 磁気摩擦における吸着力の評価法の検討, 平成10年機械学会, 第75期総会講論, No. 98-1 (1998-1), 378-379.