

# 浮上式鉄道用台車および台車部品の開発(第2報:開発状況概要)

Development of Bogie and Products for MAG LEV Trains (2nd Report : Development Progress)

菅原繁夫/Shigeo Sugawara・関西製造所 専門部長

石原広一郎/Koichiro Ishihara・総合技術研究所 台車技術開発室 室長 工博

岸 佳孝/Yoshitaka Kishi・関西製造所 鉄道台車製造部 台車設計室

大島 浩/Hiroshi Oshima・東海旅客鉄道(株) リニア開発本部 副主幹

中西俊勝/Toshikatsu Nakanishi・東海旅客鉄道(株) リニア開発本部 主席

## 要 約

今年の4月より、山梨リニア実験線において第一編成リニア車両の走行試験が開始され、500 km/h走行を目指した各種開発品の実験が進められている。住友金属も台車をはじめ車輪ディスクブレーキ装置、支持脚などの開発設計を行い、本車両に採用されている。

また、すれ違い試験等を目的として現在製作中の第二編成車両にも、ブレーキ装置、支持脚などの台車部品が採用され、更に、車上電源を確保する誘導集電装置を搭載するための支持装置の開発も行っている。

本報では、これら台車および台車部品の開発状況を紹介する。

## Synopsis

Running tests of the first magnetic levitation vehicle started on the Yamanashi experimental line in April 1997, for certification of running speeds of 500 km/h of components developed. SUMITOMO METAL Ind. Ltd., developed for this vehicle such components as the bogie, disc brake system, landing gear, and so on.

The second vehicle is now being produced for passing-by tests.

For this second vehicle, we also developed a supporting frame for the inductive power collection system, in addition to the disc brake system and landing gear.

In this paper, we report briefly on those components and techniques used in their design.

## 1. 緒 言

山梨実験線において、先行区間の18.4 kmが完成し、'97年4月から、第一編成車両が走行試験を開始した。現在は、500 km/h走行試験を目指して速度向上試験中である(写真1)。

この車両は、実用化に向けて、500 km/hの高速走行における安全性や快適性、また耐久性の確認が今後順次なされる。更に現在製作中の第二編成車両とのすれ違い試験ほか、3年間の試験が予定されており、次世代の大量高速輸送機関として大きな期待を担っている。

今回、第一編成の台車を自主開発し、(米)航空機部品メーカーとの共同開発による第一編成用および第二編成の車輪ディスクブレーキ装置やブレーキ制御装置等の台車部品を製作納入した。また第二編成用の誘導集電支持装置も製作中である。

リニア車両の特徴は、磁気による浮上状態での走行であり、車両の軽量化が最も重要な技術目標となる。本報告では、そのような観点のもとに開発した台車および台車部品



写真1 第一編成リニア車両

Photo 1 First magnetic levitation vehicle (MAG LEV)

の設計・製作について述べる。

## 2. 台車

### 2-1 台車の概要

浮上式車両についても、従来鉄道と同様な働きを担う台車が用いられる。この台車は、鉄車輪と電気モータで走行する従来鉄道とは異なり、超電導磁石を両側面(すなわちリニア車体の両側面位置)に装備する。この超電導磁石と地上側コイルとの間で吸引・反発力を発生し、車両は浮上力・推進力を得る。

また浮上式鉄道では、車両が低速の時には U 字形のガイドウェイと呼ばれる走行路の中を上下・左右ともゴムタイヤ付き車輪を有する脚装置により案内されて走行し、ある一定のスピードに達すると脚を格納し浮上走行を行う。

台車にはこれら超電導磁石や脚装置のほか、磁石を超電導温度で保持するための冷凍装置、脚部品を駆動するための油圧源装置、車体を支持する空気ばねのほか、ダンパなどを装備する(写真 2)。

### 2-2 台車の構成

台車を構成する部品と、各部品の開発方法(共同開発の場合はその相手)を第 1 表に示す。

特に、台車枠や車輪ディスクブレーキ装置およびブレーキ制御装置が主要な開発部品である。

### 2-3 台車の役割

浮上式車両の中で台車が果たす主な役割を以下に挙げる。

- ①乗り心地の向上
- ②高速時の超電導磁石による浮上力、推進力の車体への伝達
- ③低速時の車輪走行力、案内力の伝達
- ④減速時のブレーキ力の伝達
- ⑤非常時(超電導破壊状態：クエンチ)の緊急着地力の伝達
- ⑥超電導用冷却機器の搭載
- ⑦油圧機器の搭載

## 3. 台車枠

### 3-1 台車枠の役割

台車枠には浮上時と車輪走行時の全く異なる荷重条件に耐える強度が必要である。また、超電導磁石を安定して支持するために十分な剛性が求められる。

一方、浮上して走行するためには台車は軽量としなければならず、強磁場内での使用となるため台車枠には非磁性であるアルミ合金が採用されているが、この中でも、高強

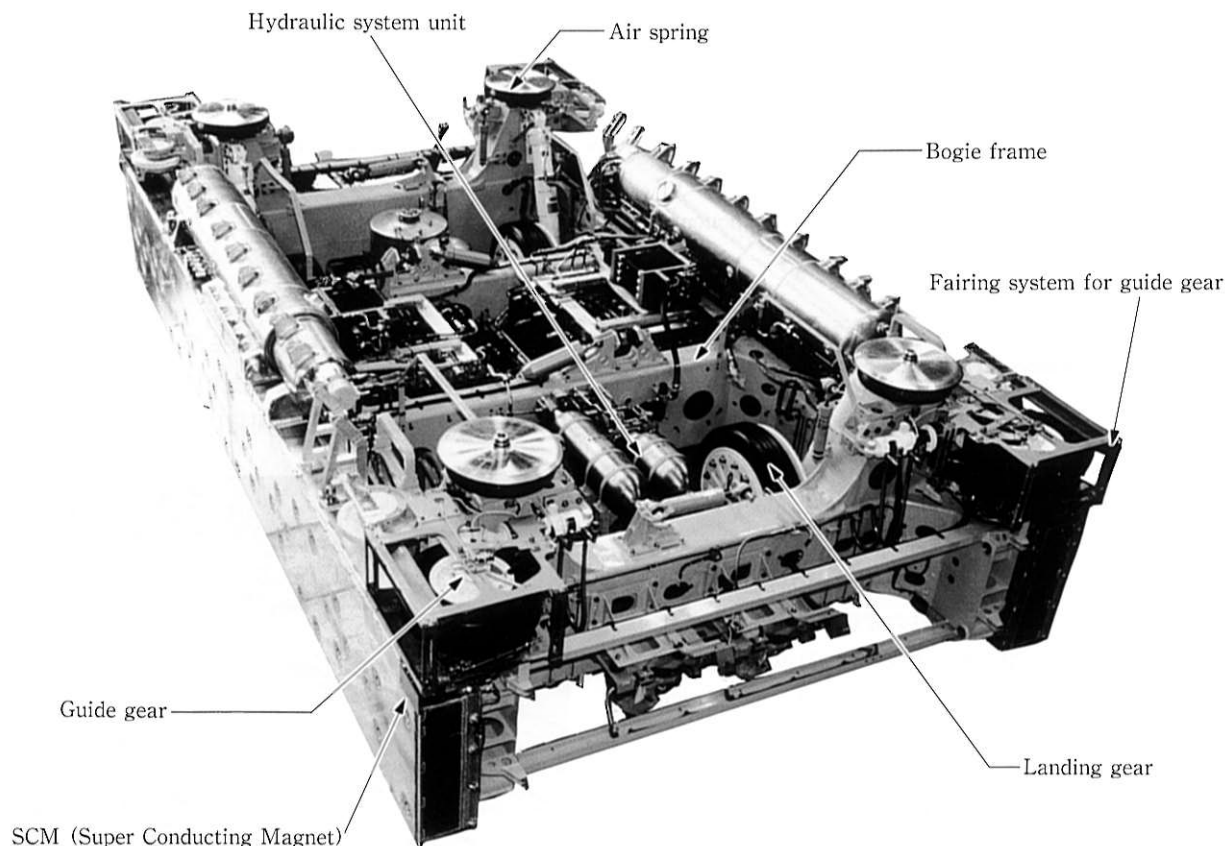


写真 2 第一編成用リニア台車  
Photo 2 Bogie for first MAG LEV

第1表 台車の構成部品とその開発方法

Table 1 Bogie component and corporated developer

Bogie component	Corporated developer
• Bogie frame (Side beam, Cross beam, Buffer beam)	Sumitomo Metal
• Landing gear (Four ; Hydraulic operation)	Sumitomo Metal, JR Central, Kayaba
• Disk brake	Sumitomo Metal, JR Central, Some disc brake makers
• Brake controller	Sumitomo Metal, JR Central, Some brake controller makers
• Guide gear (Four ; Hydraulic operation)	Sumitomo Metal, JR Central, (Fairing system)
• Emergency landing disk (Four ; Under side beam)	—
• Guide stopper (Four ; Near guide gear)	—
• Lateral damper (Two ; On buffer beam)	—
• Vertical damper (Four ; Near air spring)	—
• SCM (Two ; Beside side beam)	—
• Cryogenic device	—
• Hydraulic device	—

度と耐応力腐食割れ性の観点から 7 N 01-T 7 材を選択し、主に  $t=3\sim 3.5$  の板厚で台車枠を設計した。

この台車枠に求められる性能を以下に挙げる。

- ①軽量であること。
- ②十分な剛性を有すること。
- ③各種荷重条件の下で耐久性を有すること。
- ④異常時に十分な強度を有すること。
- ⑤非磁性体であること。
- ⑥空気抵抗低減のフェアリング機構を有すること。

台車枠の設計にあたっては、台車に負荷される荷重を見積もり、台車枠に発生する応力を算定し、疲労試験データと比較することが必要である。台車に負荷される荷重を整理すると次のようになる。

まず、高速走行時には約 10 cm 浮上して走行し、超電導磁石がガイドウェイから、上下、左右、前後の荷重を受け、台車枠はこれらの荷重を支える。

次に、車両が低速のときには浮上せずに支持脚によるタイヤ走行を行う。このときは支持脚により上下荷重を、案内脚により左右荷重を受け、更に超電導磁石により前後荷重を受ける。また、このような走行時の動的な振動により台車に負荷される荷重は加速度換算で、繰り返し変動荷重として設計に考慮している。

更に、異常時の減速には、支持脚に組み込まれた車輪ディスクブレーキ装置により前後力を受ける。また、超電導磁石の超電導状態が振動などの熱発生により破壊された場合、急速に磁気力が失効する(クエンチと呼ばれる)。この場合、上下方向と左右方向の荷重がそれぞれ緊急着地輪と左右ストッパ輪により、安全に支持される構造になっている。

これらの荷重と負荷される部位を第2表に示すが、台車枠の各部位がこれらの荷重下で安全余裕を有しながら、かつ最も軽量になるように設計する必要がある。

### 3-2 台車枠の設計

軽量で耐久性に優れた台車枠を製作するため、次の三項

第2表 台車に負荷される荷重と部位

Table 2 Force loaded on bogie

	Over lift-off speed	Under lift-off speed	Emergency braking
Vertical load	Vehicle weight SCM (Levitating force)	Vehicle weight Landing gear	Vehicle weight Landing gear
Lateral load	SCM (Guidance force)	Guide gear	Guide gear
Longitudinal load	SCM (Thrust) (Braking force)	SCM (Thrust) (Braking force)	Landing gear (Disc brake)

目の条件をすべて満足するような設計を FEM 解析を用いながら行った。このフローを第1図に示す。また台車枠の完成後、静荷重負荷試験を実施して、剛性値と発生応力を計測し、製品が設計どおりに製作できていることを検証した。

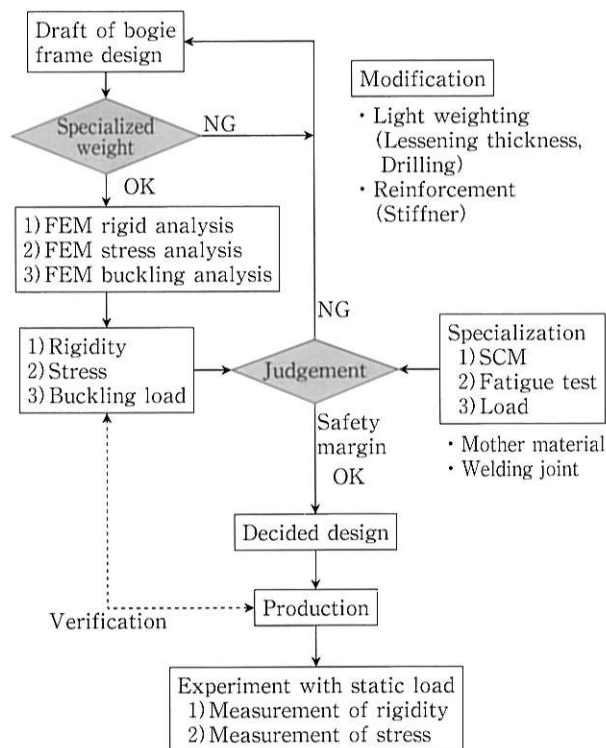
第2図には解析例として、FEM 応力解析の応力分布を示す。

#### (1)剛性

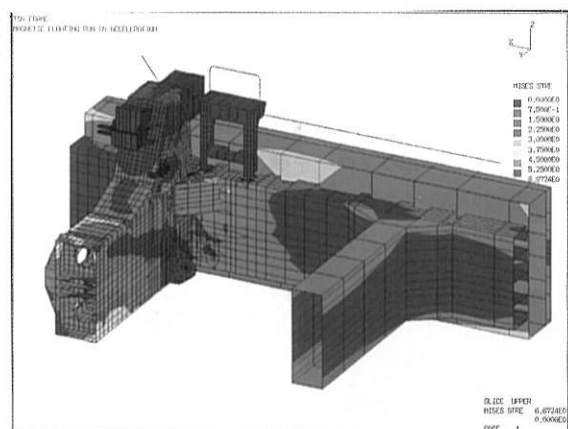
台車枠に要求される性能として、超電導磁石を強固に固定支持し、外荷重が誘発する弾性振動による超電導磁石の内部発熱が規定値に収まるように高い剛性を確保することが第一に挙げられる。このため、超電導磁石支持剛性の仕様内に入るように FEM 解析を実施し設計した。

#### (2)強度および耐久性

浮上力確保のため枠自体の軽量化が重要で、応力の低い部位に適切な薄肉材を採用したり、孔明けによる肉抜きをすることが必要になる。また逆に高応力部には補強のリブを付けることにより、全体として効率的な軽量化を図ることが要求される。このような軽量化の手段を講じるためには走行の各種条件下(浮上走行、車輪走行、ブレーキ時など)での発生応力を高精度に算定することが必要である。FEM 応力解析により対象を精度良くモデル化して、発生応力を求め、母材や溶接継ぎ手部の疲労試験データと比較することにより、10年の走行に耐え得るように耐久性を検討



第1図 台車枠の設計フロー  
Fig.1 Design flow of bogie frame



第2図 応力解析例(1/4モデル)  
Fig.2 Example of stress analysis(1/4 model)

し設計した。

また、車輪ディスクブレーキ動作時や超電導磁石クエンチ時のような異常時には、各部材が耐力を越えない設計とした。

### (3)変形抵抗

側ばり、端ばり、横ばりなどの梁外板は薄板で構成している。したがって、圧縮側の荷重が負荷される部位では、座屈により大きく変形する可能性がある。そこで、FEM座屈解析を実施し、変形抵抗を調べた。座屈解析では座屈モードと座屈発生荷重を確認し、仕様の各種荷重下で、十分な安全余裕を持つように設計へ反映した。

## 3-3 台車枠の製作

台車枠(写真3)の構成材料としては、溶接可能なアルミ合金の中でも最も強度の高い7N01材を選択し台車枠溶接組立完成後に熱処理としてT7処理を施した。

7N01材の選択は、車輪ディスクブレーキの使用やSCMクエンチといった、万一の異常事態でも十分な強度が確保されるようにするためであり、熱処理は7000系アルミで考慮すべき応力腐食割れに対する配慮である。

側ばり、端ばり、横ばりといった主梁は、主に板厚が $t3.5$ mmまたは $t3$ mmの圧延板材により構成し内部に剛性確保と荷重伝達のためのリブを設けている。その他、部位によっては形材あるいは鍛造品からの削り出し部材を効率よく使用した。台車枠の製造にあたっては、特に溶接部の品質に留意した。このため、溶接線の全ヶ所について浸透探傷検査を実施し、特に重要な部位についてはX線による検査も併せて実施している。

また、溶接品の強度上で重要なファクタをもつ溶接ビードの止端部分については、上記の非破壊検査はもちろん、グラインダによる手入を丹念に行い、アンダーカットやかぶさりなどの有害な形状がないように配慮した。

第3表に参考のためにリニア台車枠と新幹線用台車枠の諸元を比較して示した。

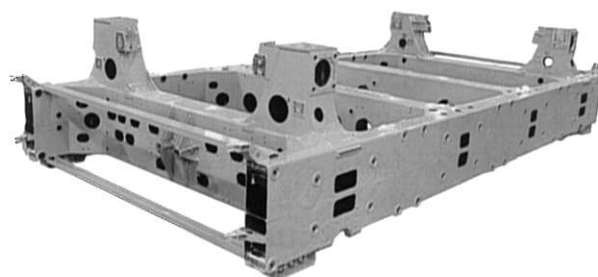


写真3 台車枠  
Photo 3 Bogie frame

第3表 リニア台車枠と新幹線用台車枠の比較  
Table 3 Comparison of bogie between MAG LEV and Shinkansen

	MAG LEV	Shinkansen (300 series Nozomi)
Size	L 5 240×W 2 602 ×H 1 125	L 3 420×W 3 120 ×H 1 000
Material	7 N 01-T 7	SM 50 YB
Thickness of main frame	t 3, t 3.5	t 8, t 6
Load (per one bogie)	* 16 ton	* 16 ton
Weight of bogie frame	550 kg	1 025 kg

\* When accomodating capacity

負担荷重はリニア台車枠と新幹線用台車枠ではほぼ同等であり、寸法がひとまわり大きいにもかかわらず、主要板厚は新幹線用台車枠 8 mm に対して 3.5 mm と薄く、重量はリニア用台車枠の方が約半分の重さしかない。

これは、リニア台車が強磁場中で使用されるため強力な磁気力を台車枠が受けないようにするため、新幹線用台車枠で使用されている鋼製材料に比較して、比重の小さく非磁性のアルミ合金を使用したためである。

#### 4. 支持脚装置

支持脚装置(写真 4)は低速時に車両を上下方向に支持するゴムタイヤ付の車輪を有した装置であり、一台車に 4 脚搭載され、浮上時に格納するためのアクチュエータと、バネ・ダンパの役割を担うオレオ機構を持つ。

浮上式鉄道では、車輪走行から浮上走行に移行した際に、空気抵抗とそれによる騒音の発生を避けるため支持脚装置を台車内に格納する必要がある。そのため、約 300 mm のロングストロークの引き上げ量を持つアクチュエータを開発した。

また、低速での支持脚走行時に安全で乗り心地の良い走行を確保するため、自動車のサスペンション機能にあたるバネ・ダンパ機構が必要となる。自動車ではコイルバネとダンパを併用しているのが普通であるが、浮上式鉄道ではスペースおよび重量の観点からオレオ機構を採用した。

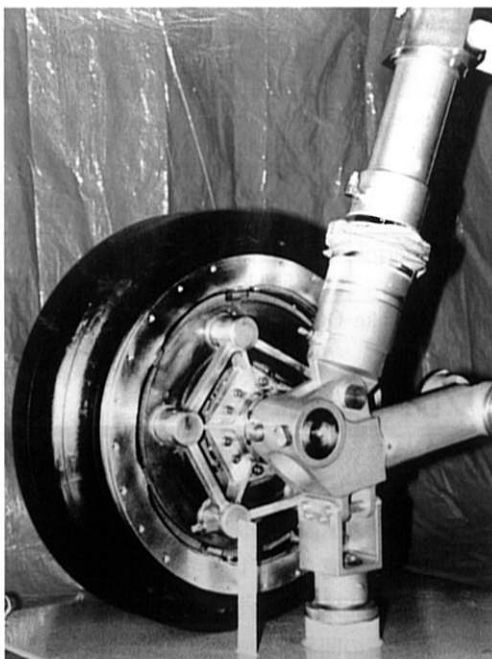


写真 4 支持脚  
Photo 4 Landing gear

オレオ機構とはシリンダ内に窒素ガスとオイルを封入したものである。ばね定数はこのガス圧により調整し、減衰機能は油室に設けたオリフィスの流動抵抗で得る仕組みである。これらの調整機構が簡単なため、支持脚装置のコンパクト化と軽量化が達成できた。

支持脚装置の性能確認試験としては、15 万回の上下動作確認試験などを実施し、十分な性能を確認した。

#### 5. 案内脚装置

案内脚装置(写真 5)は低速時に車両を左右方向に案内するゴムタイヤ付の車輪を有した装置であり、一台車に 4 脚搭載される。浮上時には支持脚同様、台車内に格納される。

浮上時にこれらの脚装置を格納するのは高速走行時の空力音の発生を避けるためである。更に案内脚には格納時に車両側面の平滑度を向上するために、脚格納動作に連動して開閉する案内脚フェアリング装置(写真 6(a)(b))を装備した。

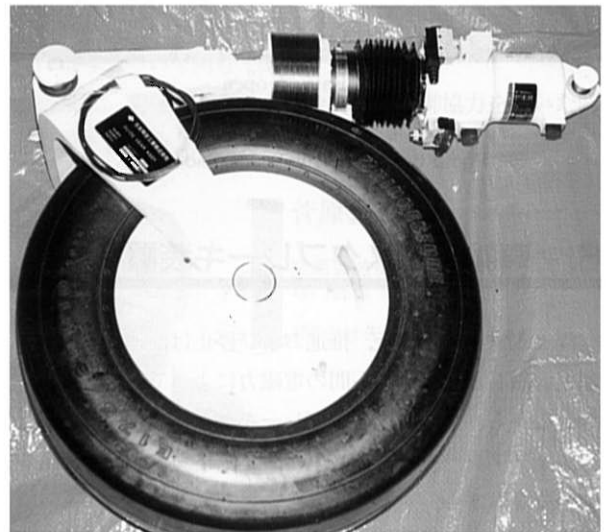


写真 5 案内脚  
Photo 5 Guide gear

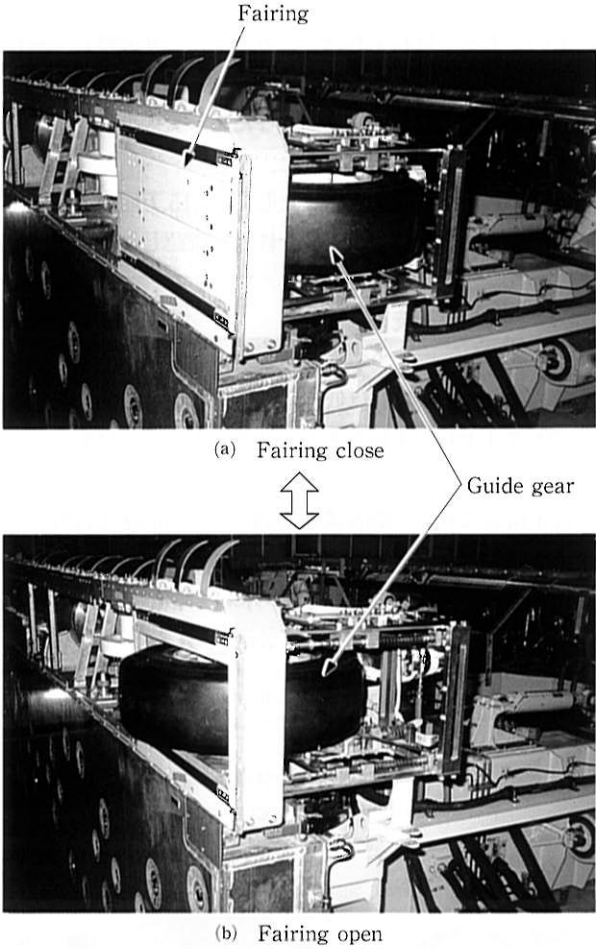


写真6 案内脚フェアリング装置  
Photo 6 Fairing system for guide gear

## 6. 車輪ディスクブレーキ装置

浮上式鉄道では浮上、推進および停止は、通常、すべて超電導磁石と地上側磁石間の電磁力によって行われる。しかしながら、電磁力によるブレーキが働かないときのバックアップブレーキとして、車輪ディスクブレーキと空力ブレーキを有する。

空力ブレーキは車体の屋根部分にある装置であり、高速時に空力板を開くことで空気抵抗により減速度を得る。このため、空力ブレーキは高速域では性能を発揮するが低速域ではあまり利かない。このため全速度域で性能を発揮することのできる車輪ディスクブレーキ装置を開発した。

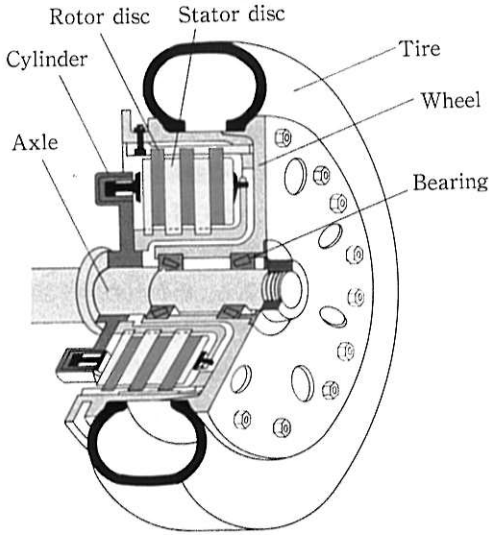
車輪ディスクブレーキ装置は支持脚装置のホイール内部に搭載される多板式の摩擦ブレーキである。車輪内にタイヤと連動して回転するカーボンディスク(ロータディスクと呼ばれる)と、車軸に固定したカーボンディスク(ステータディスクと呼ばれる)を交互に配置し、油圧シリンダでカーボンディスク同士を圧着させることによりブレーキ力を得る仕組みである。

このカーボンディスクは摩擦係数のばらつきが大きい

ため、安全に停止するためにはこれを制御する機能が別途必要となる。

今回我々は(米)航空機のブレーキ装置メーカーと、基本設計より共同開発し、数度の試作を重ねながら、ドラム回転試験により世界で初めて 550 km/h からの制動に成功した。

第3図に車輪ディスクブレーキ装置の断面図を示す。また、第4表にリニア用と航空機用の車輪ディスクブレーキ装置の基本諸元についての比較を示す。



第3図 車輪ディスクブレーキ断面図  
Fig.3 Disc brake

第4表 車輪ディスクブレーキの比較

Table 4 Comparison of disc brake between MAG LEV and airplane

	MAG LEV	Airplane (Boeing 747)
Wheel size (mm)	Diameter of rim : 558.1 Width of rim : 139.7	558.1 304.8
Weight (kg)	68	105
Absorbed energy (MJ)	57 (500 km/h)	Normal : 25~33 RTO : 50

RTO : Reject-Take-Off

## 7. ブレーキ制御装置

車輪ディスクブレーキは、制動力を得るための摩擦材であるカーボンディスクの摩擦係数のばらつきが相当大きい。そのため、その特性を考慮したブレーキ制御装置が必要となる。

車両を安全かつ正確に停止させるため、次の機能を持つブレーキ制御装置の開発を行った。

- ①トルクパターン制御機能：車両速度に応じてあらかじめ設定された制動力を確保する機能。

②アンチスキッド制御機能：車輪ロックによるタイヤの破損を防止保護する機能。

制御ロジックは航空機の制御メーカーと共同で、シミュレーション技術を駆使して、航空機用から浮上式鉄道用への改造とチューニングを行った。一般にカーボン以外のディスクブレーキで制動する場合、駆動油の圧力を制御の観測量にすることが多いが、この方法はブレーキトルクがブレーキ圧力に比例する場合に有効な方法である。

しかし、今回のように摩擦係数のばらつきが大きいカーボンディスクを使用した場合、トルク伝達特性が車輪回転速度やディスク温度によって変動するため、圧力を観測量とした制御ではブレーキトルクが大きく変動して車両の減速度が不安定になる。

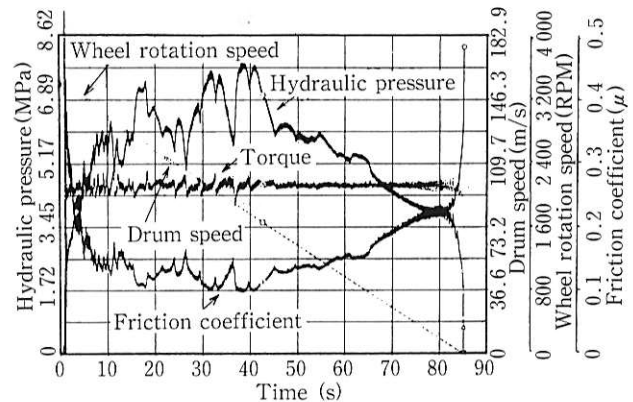
そこで本開発では、圧力を観測量にするのではなく、ブレーキトルクを観測量とし、このブレーキトルクを目標値に対しフィードバック制御することで、減速度を安定化するようにした。この点も本ブレーキ制御装置の大きな特徴の一つに挙げられる。

このブレーキ制御装置と車輪ディスクブレーキ装置からなるシステム全体の確認試験として、ドラム回転試験を行い、目標の 550 km/h からの制動に成功し、基本機能の確認を得た。

第4図にドラム回転試験の例として 550 km/h からのブレーキ中の諸特性の変化を示す。同図から、制動の途中で摩擦係数がばらつくが、圧力をそれに応じて制御しており、その結果、目標の一定したトルクが得られていることが分かる。

現在は山梨実験線の走行試験データを蓄積して検討し、より安全で信頼性のある高度な制御を目指した改良を継続している。

なお、車輪ディスクブレーキ装置およびブレーキ制御装置の開発については、前報<sup>1)</sup>で詳しく述べているため御参照頂きたい。



第4図 車輪ディスクブレーキ制動試験結果  
(550 km/hからの制動)

Fig.4 Result of braking test  
(Braking from 550 km/h)

## 8. 結 言

山梨リニア実験線では、高速走行試験を通して、各部品性能確認を始めとして各種の試験が実施されており、今後は更に第一編成車両と第二編成車両のすれ違い試験や耐久試験も予定されている。

今後これらの現車試験を通じて開発製品のより一層の性能向上と高い信頼性の確立に努め磁気浮上式鉄道の実用化に寄与していく所存である。

最後に、開発に当たり多大な御指導と御協力を頂いた関係の皆さまに心より厚く御礼申し上げます。



菅原繁夫/Shigeo Sugawara

関西製造所  
専門部長

(問合せ先：06(466)6258)

## 参考文献

- 1) 坂本, 岸, 高桑, 三上, 五十嵐, 大島, 「浮上式鉄道用台車及び台車部品の開発(第一報, 緊急用車輪ブレーキシステ

ム)」、住友金属, Vol.46, No.4, pp.69~76, 1994,