新型ブレーキディスクの開発

金森成志*（東海旅客鉄道株式会社）　上林賢治郎（東海旅客鉄道株式会社）
狩野泰（財団法人鉄道総合技術研究所）　坂口篤司（住友金属工業株式会社）

Development of New-type Brake Disc

Seiji Kanamori, Central Japan Railway Company.　1545-33, Ohyama, Komaki City, Japan
Kenjiro Kanbayashi, Central Japan Railway Company.　1545-33, Ohyama, Komaki City, Japan
Yasushi Karino, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo, Japan
Atsushi Sakaguchi, Sumitomo Metal Industries, LTD, 1-109, Shimaya 5-chome, Konohana-ku, Osaka, Japan

We conducted a research on reducing weight of the components under the spring of the Shinkansen rolling stock in order to improve high speed stability and ride quality. We developed a new brake disc with modified configuration and a new lining with improved materials. The brake testing was performed using the new brake disc and lining.We measured the friction coefficient, disc temperature, lining temperature and the amount of lining wear. The findings of our study are as follows.

1) The new disc has a higher friction coefficient compared to the conventional disc. Through several tests, the new disc was confirmed to have high heat resistance.
2) By improving the contact surface condition of the lining, the friction coefficient can be stabilized and the temperature rise of the disc and the lining can be prevented during braking.

We believe the data obtained from our study is useful in putting the new brake disc and lining into practical use.

キーワード：ブレーキディスク、ライニング、摩擦係数
Key words :　Brake disk, Lining, Fiction coefficient

1.　緒言

著者らは、次世代の新幹線車両に関する技術開発に取り組んできた。開発においては、車両を軽量化し走行安定性と乗り心地を向上させること、及び緊急時に高い減速度をもって停止することを課題としている。車両の軽量化、特にばね下質量の低減は、走行安定性や乗り心地の向上に加え、地上側の地盤振動や騒音低減にも密接に関連する。一方、高い減速度を有することは、地震時といった緊急時に短い距離で停止することができ、安全性を高める上で重要である。地震時には回生ブレーキが使用不能となり機械ブレーキを使用せざるを得ず、ディスク、ライニングへの熱負荷は飛躍的に増大する。このような背景から、ディスク、ライニングには最高速度から停止までの負荷に耐えられる特性が要求され、確実な摩擦力とともに、耐摩耗性、耐熱性、高強度、高靭性といった高いスペックが求められている。

2.　目的

本研究では、最適なディスクの検討、及びライニング開発を行い、軽量化かつ高い減速度性能を有するブレーキ装置の開発を目的とする。

3.　試験方法

3.1　供試品

空制ブレーキ動作中、ディスクはライニングとの摺動熱及び押付け力により微小変形する。その変形を極力小さくなるように、ディスク形状及び締結ボルト位置を有限要素法により最適化検討した。Fig.1 に試験品の写真を示す。なお、ディスクの材質は熱に対する相変態を抑制するため、材料の成分を現行から一部変更している。ライニング材質は摩擦性能の安定化と耐熱性の向上を図り、従来の 2 元系銅系焼結合金を 3 元系銅系焼結合金とし、さらに Pb レスとして環境配慮を行っている。なお、締結部を変更したことで、質量は約 90kg／軸を達成している。

(a) Conventional type (b) New type

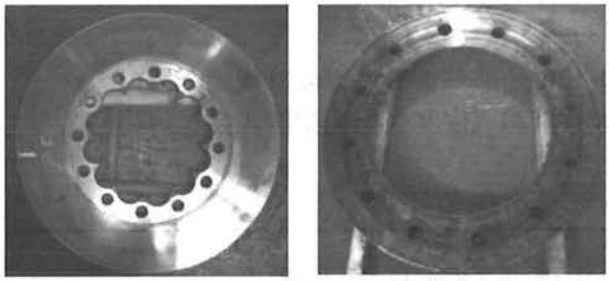

Fig.1 Geometry of Brake Disc

3.2 試験内容

3.1 項で示した試験品を用いて、定置試験、車両走行試験装置、及び試験車（N700 系 Z0 編成）において性能確認を実施した。定置試験はディスク付車輪単体、車両走行試験装置は試験台車 1 台を用いたブレーキ試験である。

各試験において、摩擦係数、ディスク温度、ライニング温度、ライニング摩耗量、及びディスク変形量を評価値として性能確認を実施した。なお、ディスク温度は摺動面直下 6mm、ライニング温度は直下 6.5mm に施工した熱電対で測定を実施している。

4. 試験結果

4.1 基本特性試験

減速度を向上させるためには、すべての速度域からのブレーキに対し安定した摩擦特性（μ 特性）を有していることが必要である。Fig.2 に各初速度からの平均摩擦係数を示す。この結果から、現行ディスクと比較して新型ディスクは摩擦係数が高く、かつ安定して推移していることがわかる。試験後のディスク表面を観察した結果、ライニングからの移着層は現行品と比較して新型のほうが均一に拡がって伸びている。これは、ディスク／ライニングの当たりが向上したことと、ライニングの材質を変更したことが、摩擦係数の向上と安定化に繋がったと考えられる。

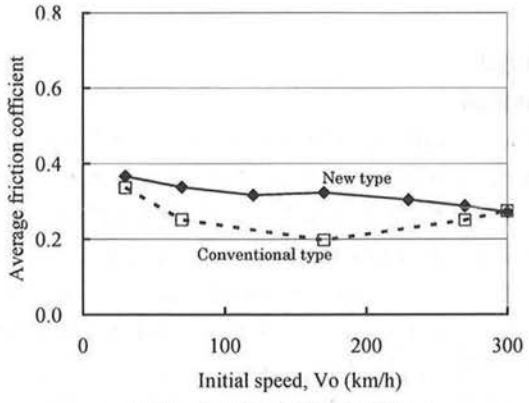

Fig.2 Average friction coefficient

Fig3 に非常ブレーキ時のディスク、ライニング温度結果を示す。縦軸の最高温度は、全測定点（3 点／ディスク）の最高温度をそれぞれ拾い、それらの平均値を算出して整理した結果である。

初速 300km/h からの非常ブレーキにおいて、新型ディスクのディスク温度は 400℃程度、ライニング温度は 800℃程度である。一方、現行ディスクのディスク温度は 450℃程度、ライニング温度は 800℃となっており、ばらつきを考慮するとほぼ同等である。新型ディスクは現行ディスクより質量が約 20kg 軽量化されており、熱容量が低下しているにも関らず温度結果は同等であった。ディスクとライニングの面当たりが向上したことにより温度上昇を抑制できていると考えられる。なお、初速 300km/h におけるライニング摩耗量は、現行ディスクでは約 270 μ m/stop であるのに対し、新型ディスクでは約 220 μ m/stop であり、メンテナンスの観点からも優れていると言える。

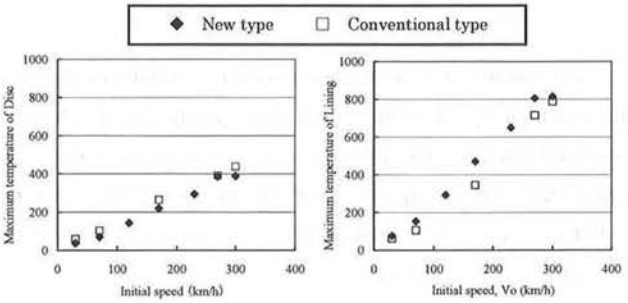

Fig.3 Maximum temperature of Disc and Lining (Stationary test)

4.2 繰返しブレーキ負荷試験

4.1 項で示した基本特性に加え、摺動面となるディスクはその耐久性を確認しておく必要がある。本研究では、初速 300km/h から 0km/h まで非常ブレーキを負荷し、それを 1000 回繰り返す試験を実施した。Fig.4 に繰返し負荷過程でのディスク変形量（ディスク最外周分の反り量）を示す。この結果から、ディスクの反りは最外周で 0.75mm 程度であり、試験回数 500 回を超えたあたりから一定となっている。過去に現行ディスクを使用した耐久試験では、最大反り量が 1.4mm 超であったことから、新型ディスクの構造が反り抑制に貢献していることがわかる。

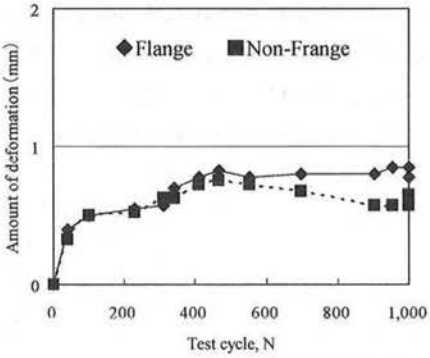

Fig.4 Deformation of brake disk

Fig.5 は反り抑制の効果を模式的に表したものである。ブレーキ負荷とともに現行では反りが大きくなり、ディスクとライニングの偏当たりが顕著になる。偏当たりが顕著になると、

ブレーキ性能やディスク・ライニングの局所温度上昇、ライニングの偏摩耗につながるため、新型ディスクの構造はこれらの防止につながっている。繰返し負荷後のディスク状態を観察した結果、深さ方向にある程度の入熱は観察されたが顕著なきずは発生しておらず、耐久性に問題のないことが確認された。

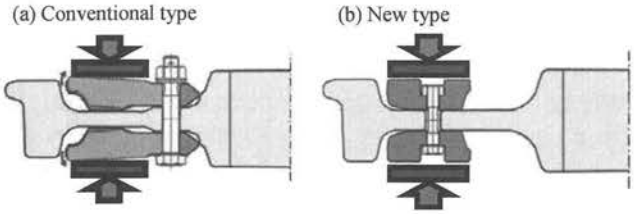

Fig.5 Schamatic diagram of cross section

4.3 車両走行試験装置でのブレーキ試験

定置試験による結果が良好であったことから、JR 東海技術開発部所有の車両走行試験装置において初速 330km/h までのブレーキ試験を実施した。試験台車は新型ディスクを搭載した N700 ベースの台車である。ブレーキ試験時の外観を Fig.6 に示す。

Fig.6 Brake test of bogie (komaki)

非常ブレーキ時のディスク、ライニング温度結果を Fig.7 に示す。部位により若干のばらつきはあるが、値として問題ないことが確認された。

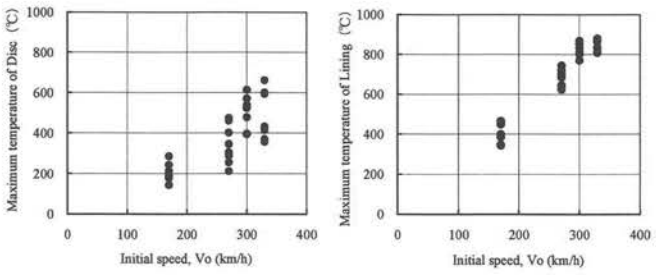

Fig.7 Maximum temperature of Disc and Lining (Bogie test)

4.4 N700 系 Z0 編成現車試験

前項までの結果が良好であったことから、JR 東海所有の試験車 N700 系 Z0 編成に搭載して走行試験を実施した。非常ブレーキ時のディスク、ライニング温度結果を Fig.8 に示す。前項までの結果と同様、すべての速度条件で問題ない値であることが確認された。

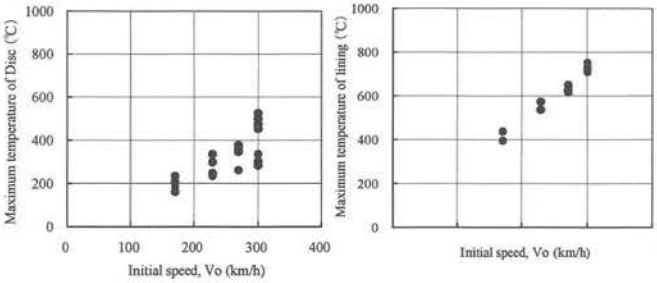

Fig.8 Maximum temperature of Disc and Lining (Z0 test)

4.5 等面圧ライニングの開発

本項の目的は、1)各ブレーキにおけるディスク、ライニング温度の低減、2)ブレーキ摩擦力の安定と向上、を目指したライニングの要素開発である。1)、2)の目的を達成するためには、ディスク/ライニングの面当たりを更に向上させることが重要と考え、ライニングの構造を変更することで目的の達成を試みた。

Fig.9 に構造変更したライニング（以下、等面圧ライニング）の外観を示す。等面圧ライニングは、ソリッド状であった従来のライニングを多分割し、押付け方向に対して柔軟性を持たせることで当たりの向上を図ったライニングである。等面圧ライニングを使用して、初速 365km/h までの定置ブレーキ試験を行った結果を Fig.10 に示す。等面圧ライニングを使用した場合、ディスク、ライニングの最高温度は大幅に低減されており、構造変更を行ったことで優位性が明らかに出ている。最高温度の低減は、面当たりが向上したためと考えられる。面当たり向上によりディスク面内の温度分布が均一化し、ディスクの局所的な変形や損傷を防止することが可能である。

また、初速 365km/h からの非常ブレーキにおいて、等面圧ライニングを使用した場合、摩擦係数が約 6%上昇していることも確認され、ブレーキ力が向上するとともに、ディスク、ライニングの温度低減効果が確認された。

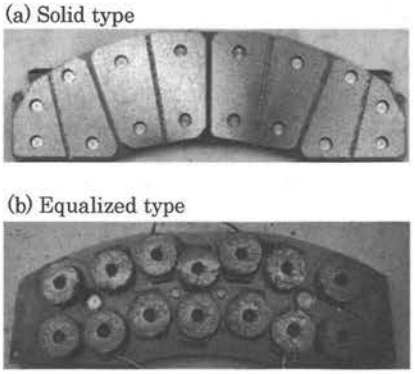

Fig.9 Geometry of lining

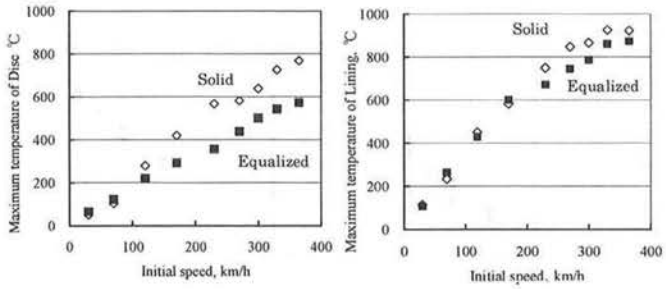

Fig.10 Superiority of equalized structure（Stationary test, ～365km/h）

定置で確認した等面圧ライニングを使用して、車両走行試験装置においてブレーキ試験を実施した。本項では、開発したライニングの等面圧性を確認するため、台車に装着した 8 枚のライニング温度結果を次の式によりパラメータ化し、ブレーキ時のディスク、ライニング温度を把握した。なお、ライニング 1 枚あたり 4 点の熱電対を施工し（得られる各点の温度を T①～T④とする）、ライニング内の温度ばらつきを評価できるものとしている。

(a)各ライニング内の温度のばらつきを評価する。

$\Delta T1$（℃）

= （T①、T②、T③、T④の中の最大値）

－（T①、T②、T③、T④の中の最小値）

※No.1～8 部位の各ライニングについて上式で評価

(b)台車内 8 枚のライニング温度のばらつきを評価する。

$\Delta T2$（℃）

= （Tave(No.1)、・・Tave(No.8)の中の最大値）

－（Tave(No.1)、・・Tave(No.8)の中の最小値）

ここで、Tave は各ライニング T①～T④の平均値である。上式から、ΔT1 が高いほど各ライニング内には温度のばらつきが生じていることを示す。また、ΔT2 が高いほど 1 台車内のライニング温度のばらつきが大きいことを示している。

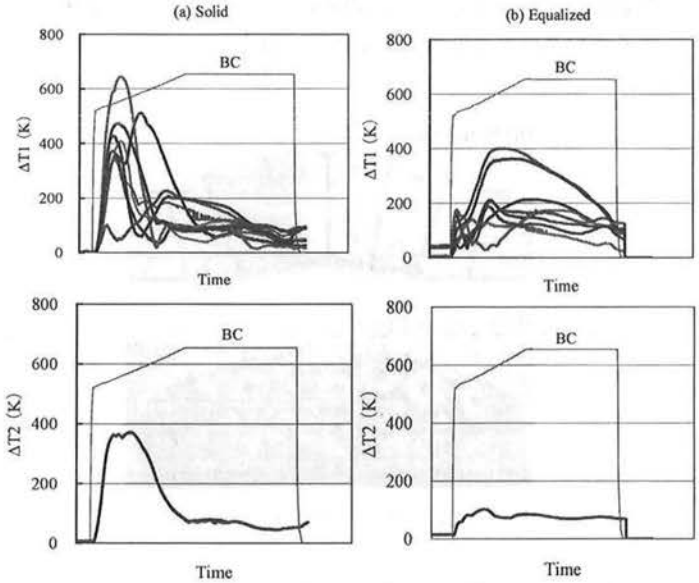

Fig.11 Effect of contact surface condition improvement

初速 330km/h から停止までの非常ブレーキ時の温度挙動を Fig.11 に示す。ブレーキ開始時は各ライニング内、台車内において温度ばらつきが大きいが、時間の経過とともにばらつきは小さくなる。現行ライニングと比較して等面圧ライニングを使用した場合、ブレーキ中の ΔT1、ΔT2 が相対的に低く、ブレーキ開始時のばらつきを抑えることが可能である。ばらつきを小さくすることは局所的な温度上昇を低減することであり、ライニングの偏摩耗やディスクへのダメージを軽減することに繋がる。

Fig.12 に各ライニングを使用して試験を実施した後のディスク表面状態を示す。両者を比較すると、摺動面上のライニングの移着状態が大きく異なる。等面圧ライニングを使用した場合、部分的な移着層が少なく、ディスクとライニングの当たりがより均一になっていると考えられる。

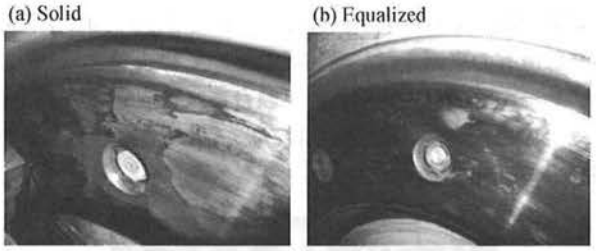

Fig.12 Surface condition after 365km/h brake test

5. 結言

新幹線電車用ブレーキディスクとして新型ディスク、及び新型ディスク用ライニングを開発した。試験品を用いて、定置による基本ブレーキ特性試験と繰返しブレーキ負荷試験、車両走行試験装置での台車ブレーキ試験、及び N700 系 Z0 編成での編成ブレーキ試験を実施した。以下に得られた結論を示す。

1）新型ディスクは高く安定した摩擦係数を有しており、ブレーキ時の温度に問題のないことを確認した。

2）構造変更したライニングを試作し、初速 365km/h からの非常ブレーキ試験を実施した。その結果、摩擦特性、ディスク、ライニング温度の面で等面圧ライニングの優位性を確認した。

3）新型ディスクは、台車ばね下質量の軽量化を達成するとともに、高い減速度性能を有している。