

熱クラック性能向上ブレーキディスクの開発

Development of Brake Disk Rotor with High Resistance for Heat Cracking

東 雄 一* 中 村 康 治* 棚 橋 努*
Yuichi AZUMA Koji NAKAMURA Tsutomu TANAHASHI

要 旨

高速、高負荷での制動の繰り返しによる熱履歴でブレーキディスクに発生する亀裂寿命に対して、新しいブレーキディスク用鋳鉄材料を開発し寿命の向上を図った。

ブレーキディスク用鋳鉄材料は、パーライト基地中に黒鉛が晶出した片状黒鉛鋳鉄であるが、この黒鉛の特性に注目し、晶出量と形状を制御することにより熱クラック性能を向上させた。

材料設計としては、黒鉛化に重要な影響を及ぼすC量を3.5～4.0Wt.%とし、形状を連続、大型化するためにCaを適量添加することの特徴とする。その結果、熱亀裂寿命は現行量産材と比較して約4倍となった。

ABSTRACT

Brake disk rotor suffers from heat crack provided by heat hysteresis with repetition of acceleration and deceleration at high speed and high load. Then, new material for brake disk rotor has been developed to achieve higher heat crack resistance.

Conventional cast iron for brake disk rotor has a structure of flake graphite crystallized on perlite. New material has been developed by controlling graphite shape and crystallized volume, its provides higher heat crack resistance.

Alloy design has chemical composition of 3.5 to 4.0 Wt.% C, and Ca added to continue and enlarge shape of graphite.

As a result, developed material provides 4 times longer life than conventional material.

1. まえがき

近年、自動車に求められる性能は、ユーザーの嗜好の多様化などにより年々多岐にわたるようになっている。このため、装備の充実による車重の増加や車両の大型化を招いた。その結果、ブレーキに対する負荷も増大し、連続降坂時や高負荷ブレーキの繰り返しによる熱的疲労によりブレーキディスクに亀裂が発生し、最終的には板厚方向に貫通してジャダーの発生原因となる事象が懸念された。特に高速からの制動の頻度が高い欧州地域ではこのような事象の発生が懸念された。

このような熱亀裂寿命を向上させるためには、ブレー

キ容量を増加するなどの手段が考えられるが、これは同時にディスク重量の増加を招き、バネ下重量の増加による操安性の低下や乗り心地の悪化につながる。

そこで、重量を増加させずに熱亀裂寿命を向上させることが可能な材料の開発を行った。

熱亀裂寿命を向上させるためには、制動時に発生する熱エネルギーをできる限り早く放散させること、すなわち材料の熱伝導特性を向上させることが必要である。しかし、ブレーキディスクには熱伝導特性以外に機能上から求められる多くの特性があり、これらを高度にバランスさせることが要求される。

* 栃木研究所

2. 開発の狙い

2. 1. ブレーキディスクに求められる特性

ブレーキシステムの中で、ブレーキディスクは高速で回転するとともにブレーキ摩擦材と摺接することにより運動エネルギーを熱エネルギーに変換し、走行中の車両を速やかに停止させる役割を担う。その作動速度域は停止状態から 200km/h の高速域にまでおよび、ブレーキディスクと摩擦材界面に発生する摩擦現象も非常に複雑であり、現状未解明の部分もある。

このような使用環境下におかれるブレーキディスクに求められる代表的な特性は以下のようになる。

- (1) 制動時に発生する熱に対する耐久性を有する。
- (2) 広い速度領域にわたり安定した制動力を発生するとともに、制動時に異音や振動を発生させない摺動特性を有する。
- (3) 使用状況下で負荷される応力に耐え得る強度を有する。
- (4) 使用環境下での十分な耐食性を有する。

本開発では特に(1)に述べた熱に関する特性と(3)に述べた摺動特性の向上に着目し、その他の特性は現行量産材と同等以上となるブレーキディスクを目標とした。

2. 2. 材料に求められる特性

ブレーキシステムを考えた場合、その性能は車両の性能やユーザーのニーズなどにより調整する必要があり、主として摩擦材で行われる。しかし、相手材となるブレーキディスクの摺動特性、熱伝導性、耐食性に対する寄与度も非常に大きい。

それらの多くの要求を満たすために、現在までの市販量産車(四輪)の殆どには強度グレードが 250MPa 級の片状黒鉛鑄鉄 (FC250) が用いられている。本開発においても材料の基本仕様は FC250 とした。

3. 鑄鉄組織

鑄鉄材料の特性は材料組織の影響が大きいため、以下に組織について述べる。鑄鉄組織に影響を与える重要な成分としては、Fe 自体とそれに添加される C がある。この 2 元素の様々な温度における状態は、Fe-C 系二元系平衡状態図に示される。この図は材料組織を平衡状態という限定された状況下ではあるが、比較的容易に理解することを可能にする。

以下にこの Fe-C 系二元系平衡状態図を用いて、ブレーキディスクに用いられる鑄鉄材料の組織上の特徴を簡単に述べる。

Fig. 1 に Fe-C 系二元系平衡状態図を示す。一般に鑄鉄材料は C 量が 3.0～3.5Wt.% の領域を指す。代表的な組成として 3.3Wt.%C を考え、その顕微鏡写真を Fig. 2 に示す。

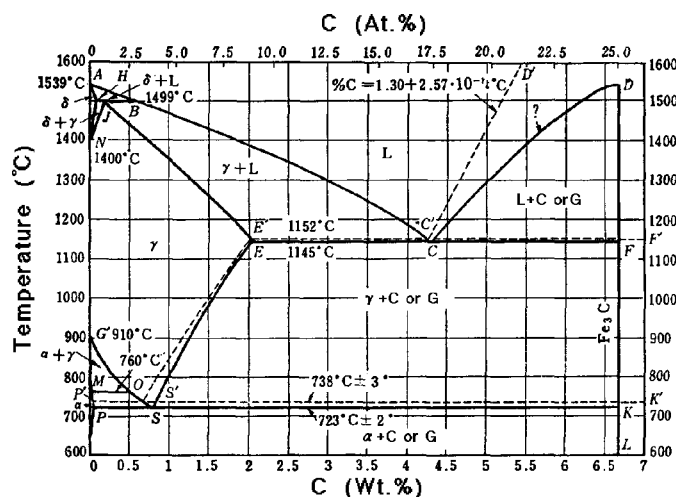


Fig. 1 F-C Equilibrium Diagram

3. 1. 黒鉛組織

Fig. 2に示した黒鉛(Graphite)は鋳鉄の特性を決定する重要な因子である。黒鉛はFig. 3に示すような結晶構造を有し、特定な方向に滑りやすい結晶面を有するため、固体潤滑効果を示す。また、黒鉛を3次元でミクロ観察するとFig. 4に示すような連続体となっているため、高い熱伝導性を示す。すなわち黒鉛の晶出量の大小により摺動特性、熱物性値が決定される。

しかし、黒鉛は鉄基地と比較すると非常に強度が低くその強度は事実上0に等しいため、その量は鋳鉄の強度を決定する重要な因子でもある。

また、鋳鉄の錆は通常、黒鉛と鉄基地の境界部より発生するため、境界部が少ないほど耐食性は向上する。

3. 2. 基地組織

Fig. 2の黒鉛以外の部分(黒と白の縞状の部分)を基地組織と呼ぶ。白い縞状の部分はFig. 1の炭素濃度が非常に低い α 相(フェライト)であり、黒い縞状の部分は Fe_3C で表される化合物(セメンタイト)である。

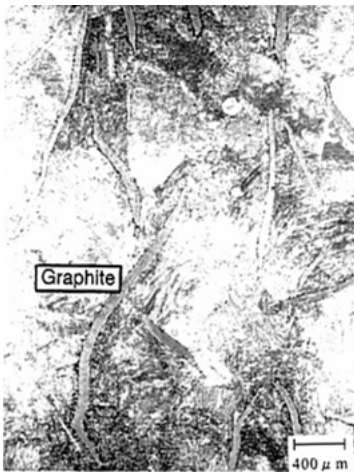


Fig. 2 Micro Structure of Conventional Cast Iron

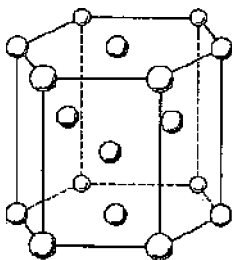


Fig. 3 Crystal Structure of Graphite¹⁾

フェライトは純鉄に近く、強度、硬度は低いが靱性が高い。逆にセメンタイトは硬くて脆いが強度は高いという特徴を持つので、この二つの組織の量と層間隔を調整することにより、必要とする材料強度を決定することが可能である。

またフェライトは上記特性により制動時に凝着摩擦による摩擦力を生じ、制動力を高める効果もある(Fig. 5)。

4. 材料設計の考え方

このように鋳鉄は材料組織により特性が大きく変化するため、材料設計を行う上ではこれらの組織をどのように制御し、部品に求められる特性を実現するかが非常に重要である。特に黒鉛の晶出量と形状は鋳鉄材料特性を支配する大きな因子となる。以下に本開発での材料成分設計の考えを述べる。

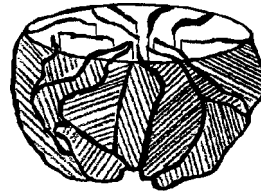


Fig. 4 Schematic of Flake Graphite

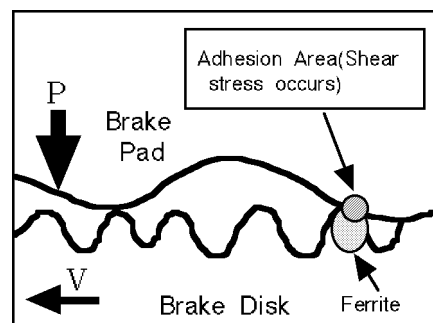


Fig. 5 Schematic of Adhesion Mechanism

4. 1. Cの影響

Cは鑄鉄の特性を考える上で黒鉛の晶出量、基地組織を決定する最も重要な元素である。通常、鑄鉄には3.0～3.5Wt.%のCを含有しているが、開発材では熱伝導性の向上を目指し、C量の増加を検討した。しかし、C量の増加は熱伝導性を良くする反面、強度の低下を招くため部品強度を保証するため150MPa級の強度グレードを確保できる4.0Wt.%を上限とした。

4. 2. Siの影響

SiはCに次ぐ黒鉛化促進元素であり、その効果は次式で表される。

$$C.E. = C + 1/3 \cdot Si \cdots \cdots (1)$$

ここで、C.E.は炭素当量と呼ばれ、黒鉛化の促進の指標であり、数値が大きくなるほど黒鉛が晶出しやすくなる。このようにSiはCと同様に鑄鉄の特性を決定する上で重要な役割を果たすため、Cと同様の考え方で成分量を決定した。

4. 3. Cuの影響

Cuは鑄鉄基地を強化し、強塩害地域での使用時に発生するブレーキディスク面の錆による層状剥離の防止に非常に有効である。その効果はFig. 6に示すようにCuの添加量の増大とともに増加するが、約1.0Wt.%以上では効果が小さくなる。

また、Cuは鑄鉄の組織のチル化を(Fe_3C が析出すること)促進し、加工性を低下させるため、通常材料では0.5Wt.%レベルの含有量に留まっていたが、開発材ではC、Siの量を見直すことにより、チル化し難い材料設計を行ったためCu量を1.0Wt.%に増加させ、耐食性を向上させることができた。

4. 4. Caの影響

Caは溶湯の脱酸作用があり黒鉛化を促進する。また、溶湯中のSと化合し、CaS化合物を形成しこれが黒鉛の結晶核になるとの説もある²⁾。これらの点から開発材の黒鉛形状を大型化するために微量のCaを添加した。

Fig. 7に黒鉛形状に及ぼすCa添加量の影響を示す。

Ca添加量は効果が最大に得られる0.04Wt.%とした。

4. 5. その他の元素の影響

鑄鉄中には他にS、Pなどの不純物元素が含有されるが、これらについては特性に大きな影響を与えないため、通常の片状黒鉛鑄鉄と同等の範囲で管理することとした。

5. 試験方法と結果

5. 1. 供試材

Table 1に開発材の成分を示す。供試材は量産操業用のキュボラにより、スクラップ材、工場内リターン材と鉄インゴットを溶解し、操業条件の調整(コークス量、投入タイミングの調整)によりC量を上昇させた。またキュボラ出湯成分を分析することにより、必要に応じて注湯取鍋で加炭処理を行った。Fig. 8に工程概要を示す。

溶湯はFig. 8に示したブレーキディスク用の砂型および直径30mm×長さ250mmのテストピース(以下、T.Pと略す)用砂型に所定の温度で鑄造し素材を得た。

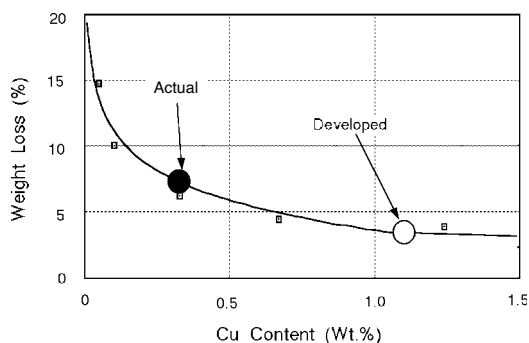


Fig. 6 Effect of Cu Content on Corrosion Property

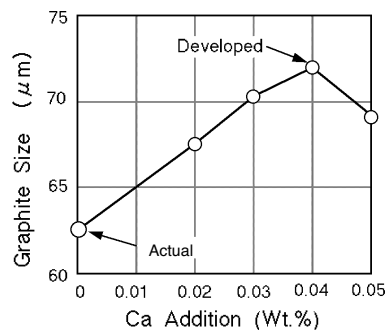


Fig. 7 Effect of Ca Addition on Graphite Size

Table 1 Chemical Composition of Cast Iron

	C	Si	Mn	S	Cu	Ca
Developed	3.9	2.05	1.00	<0.15	1.00	0.04
Actual	3.3	2.20	0.60	<0.20	0.50	No Add.

(Wt.%)

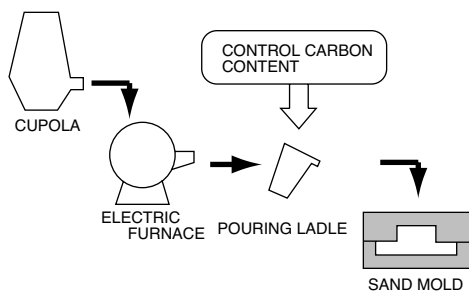


Fig. 8 Schematic of Casting Process

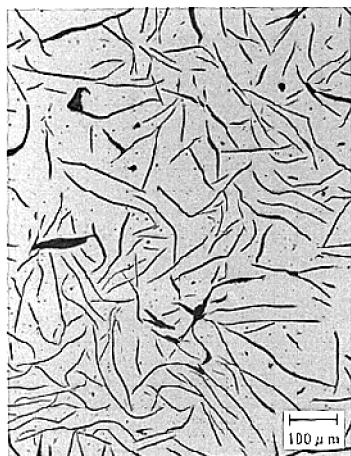
Table 2 Material Properties

	Thermal Conductivity (kW/m · °C)	Tensile Strength (MPa)	Fatigue Strength (MPa)
Developed	54.4	16.2	7.6
Actual	46.0	27.0	13.3

その後、ブレーキディスクは上述の素材より量産と同等の加工を施し、部品単体テストと実車テストに供した。また、材料テスト用のT.Pは上記の素材より機械加工した。

5. 2. 材料特性

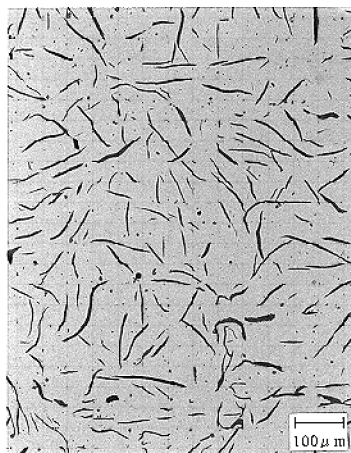
Table 2に開発材の材料特性の測定結果を、Fig. 9に材料組織を示す。



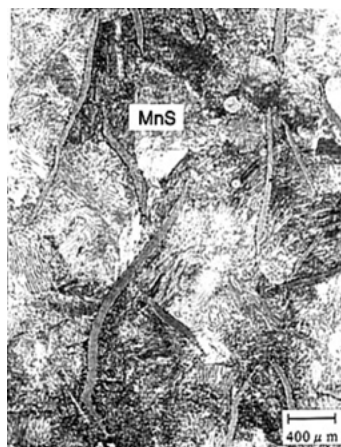
Developed (No etch)



Developed (Etching)



Actual (No etch)



Actual (Etching)

Fig. 9 Micro Structure

5. 2. 1. 材料組織

材料組織はブレーキディスクの断面を研磨し黒鉛組織を観察した後、5Wt.%硝酸アルコール溶液で腐食を施し基地組織を観察した。(Fig. 9)

黒鉛サイズはC量の増加とCa添加の効果により、量産材の62.5 μm から72.0 μm に拡大した。

また開発材の基地組織は100%パーライト組織となっており、大幅な強度の低下を招く遊離フェライトの析出や加工性の低下を招くセメンタイトの析出も認められない。

硫化マンガン(MnS)はMnとSとの化合物で硬度が低いため、摺動中に潤滑作用に寄与する。析出量は量産材と開発材で、ほぼ同等である。

5. 2. 2. 熱伝導率

熱伝導率は直径10mm厚さ2mmのT.Pを加工し、レーザーフラッシュ法により測定した。その結果、量産材と比較すると約10%の向上が確認された。

5. 2. 3. 抗張力

抗張力は素材よりJIS-Z-2201に規定される8号試験片を加工し、1mm/min.の引張り速度で測定した。開発材は熱物性値と摺動特性を向上させるため、C量を増加したが、部品強度を保証するために必要な150MPa以上を確保した。

5. 2. 4. 疲労強度

疲労強度は小野式回転曲げ疲労試験機により測定した。その結果、開発材の疲労強度は量産材に比較して約35%低下することが解った。このことは、疲労環境下での部品寿命の低下を意味するため、実際の使用環境下での寿命の推定を行った。

Fig. 10に開発材の耐久限度線図を示す。図中の応力測定結果は減速度1.0G相当の制動を行った際にブレーキディスクハット部のホイールボルト穴近傍に発生する最大応力である。同図より実際の使用状況での発生応力は片振り疲労限(ブレーキディスクの応力状態を考慮すると片振りとなる)以下であり、一般的な使用環境下での疲労破壊は生じないことが解った。

5. 3. 部品単体特性

5. 3. 1. 耐食性

耐食性は強塩害地域での使用状況を想定し、ブレーキディスクを電気炉中で250℃に加熱した後、室温の6Wt.%塩水中に浸漬するテストモードを繰り返し、酸化による重量の増減を計測して評価した。

現行量産材はCuの添加により耐食性を向上させ、強塩害地域での錆による層状剥離に起因するジャダーの発生を防止している。開発材はCuの添加量をさらに増加させることにより、量産材以上の耐食性を確保した。(Fig. 11)

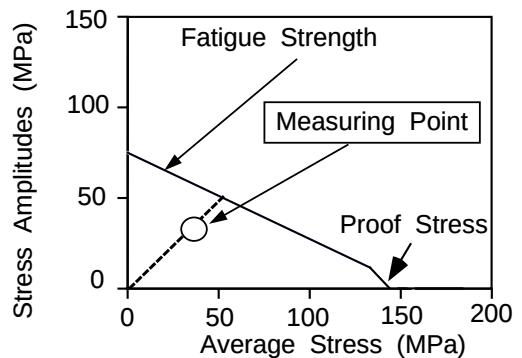


Fig. 10 Result of Fatigue Test

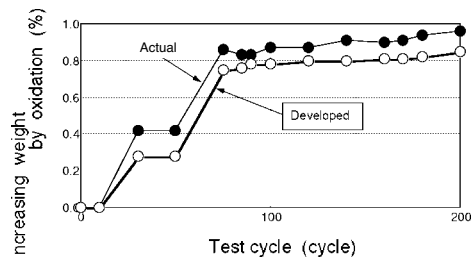


Fig. 11 Result of Disk Corrosion Test

Table 3 Result of Friction Performance Test

	μ -Average※	μ -Stability (%)	High Speed Effect※		Fade Min. μ ※	Water Recovery※
			160km/h	200km/h		
Developed	0.407	90.7	0.351	0.279	0.257	0.303
Actual	0.406	83.5	0.324	0.257	0.247	0.279

※：Friction Coefficient

5. 3. 2. 熱亀裂特性

熱亀裂特性は慣性ダイナモを使用し、対象とする車種の最高速度から0.6 G相当の制動を繰り返し、熱亀裂がブレーキディスクの板厚方向に貫通するまでの繰り返し数により寿命を評価した。

Fig. 12にC量と熱亀裂寿命の相関を示す。同図より熱亀裂寿命はC量の増加に比例して長くなることが解る。開発材は量産材に比較して約4.0倍の寿命を有する。

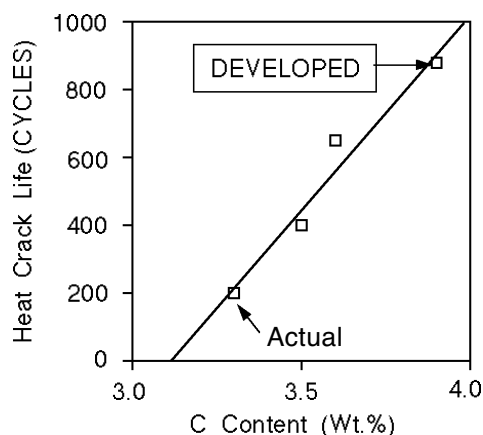


Fig. 12 Effect of C Content on Heat Crack

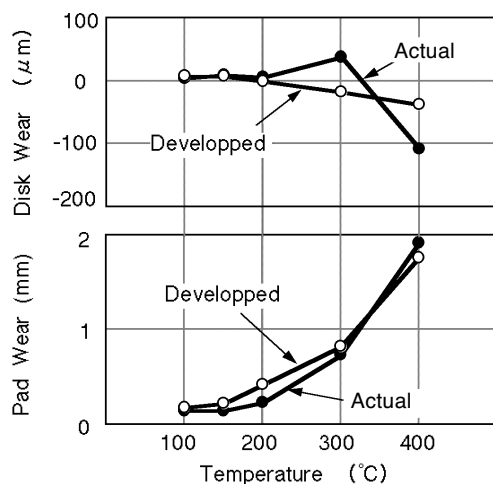


Fig. 13 Result of Wear Test

5. 3. 3. 効力特性

制動時のブレーキの効きはJASO-C-406に規定される慣性ダイナモによるテストを行った。開発材は黒鉛の晶出量が増加しているため、効力に影響を与える懸念があったが、Table 3に示すように量産材と同等レベルであった。

5. 3. 4. 摩耗特性

制動時に到達する温度環境下の摩耗特性の悪化の有無をJASO-C-427に基づき慣性ダイナモ上で代表的な温度での制動試験を行い確認した。

測定結果をFig. 13に示す。この結果より、開発材は量産材と同等の摩耗特性を示すことが解った。なお、図中で摩耗量がマイナスで示される部分は、摩擦材の転移を示す。

5. 3. 5. 静破壊強度

材料強度の低下による部品強度の低下を確認するため、Fig. 14に示す様な試験装置を用いブレーキディスクの単体強度確認を行った。その結果、Fig. 15に示すように開発材の適用を予定しているレジェンドでは2.4 G相当以上のトルクにて破壊することが解り、この数値は通常の路面状況下での制動を考えると約3倍の安全率を有することになる。

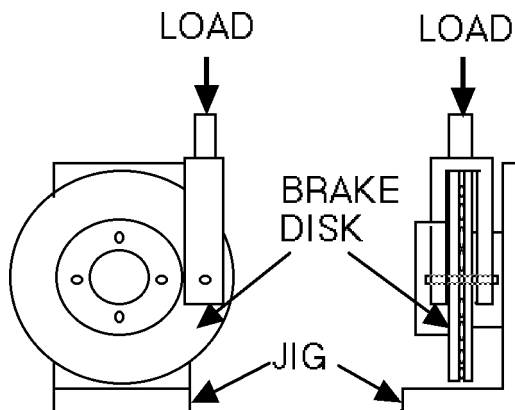


Fig. 14 Method of Static Strength Test

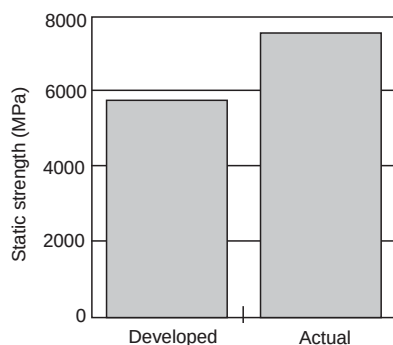


Fig. 15 Result of Static Strength Test

5. 4. 実車特性

制動時に発生するノイズは、慣性ダイナモ上での評価が困難なため実車を用いてテストを行った。

テストモードは実際の使用状況を考慮し、制動開始速度、温度、減速Gを組み合わせた様々な制動パターンで聴感ポイントにより評価した。また、ノイズを発生しやすくするため、テスト用の特殊なブレーキ摩擦材を使用した。

Fig. 16に代表的な領域の結果を示す。開発材は量産材と比較して、聴感上約2ポイント以上向上することが解った。このことは、開発材の黒鉛サイズが拡大した結果、ディスクと摩擦材間の摩擦係数の変動が少なくなり、摺動特性が向上したことを示す。

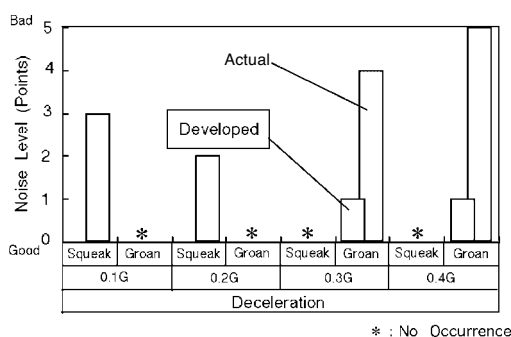


Fig. 16 Result of Noise Test

6. まとめ

本開発では、高負荷制動を繰り返した際にブレーキディスクに発生することのある熱亀裂の寿命向上を目的とし、新しいブレーキディスク用鋳鉄を完成させた。開発材は96年型レジェンドより適用を開始した。

- (1) 鋳鉄の主要成分であるC目標値を約4.0Wt.%に設定し、Caを約0.04Wt.%添加することで黒鉛の形状を最適化し材料の熱伝導率を約10%向上させた。
- (2) 上記材料をブレーキディスクに適用することによって、熱亀裂寿命は量産材の約4倍となった。
- (3) 上記材料をブレーキディスクに適用することによって、制動時に発生するノイズの頻度を低下させると共に聴感ポイントを約2ポイント向上させた。

謝 辞

本開発に当たり、鋳造素材の試作、機械加工と操業条件の改善等の鋳造加工全般およびテストに多大な御協力をいただいた浅間技研工業(株)の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本鋳物工業会編、「鋳鉄の材質」、1962年、p.8
- 2) 中江 秀雄、「鋳鉄の溶湯処理」、鋳鍛造と熱処理、1995. 1、p.3~9

■ 著 者 ■



東 雄一



中村 康治



棚橋 努