

コースティングダウンモードにおけるブレーキ引きずりメカニズムの解明と引きずり安定化および低減手法

Identification of Brake-drag Mechanism in Coasting-down Mode and Proposal of Brake-drag Stabilization and Reduction Methods

小林 靖*
Yasushi KOBAYASHI

樋口 祐多*
Yuta HIGUCHI

中村 直樹**
Naoki NAKAMURA

要 旨

台上試験によるコースティングダウンモード中のブレーキ各部品の変位および引きずり抵抗値のモニタリングをおこなった。本モード中には、ブレーキ引きずり計測過程の前に暖気走行によるブレーキ作動過程が存在し、この時ブレーキディスクは温度上昇とともに熱変形する。その後の引きずり計測過程では、ディスク温度の低下とともに熱変形から戻ってくるディスクがインナ側のパッドに近づき、干渉した時に引きずりが発生する。また、その時のブレーキディスクに対するインナ側のブレーキパッドの姿勢が、ディスク回転方向に対し回入側が狭く回出側が広いクリアランスとなる姿勢の時、パッドがディスクに吸い寄せられて引きずりが突如増大する。この吸い寄せられる力は、ディスクとパッド間に発生する負圧による力である。これにより、引きずり低減のための構造であるパッドリターンスプリングの回入側と回出側の荷重設定バランスおよびキャリパロールバック量とキャリパボデー変形量の指針を設けることで、ブレーキの引きずり値を安定させるとともに低減させることができた。

ABSTRACT

The displacement of brake parts and values for brake drag were monitored during bench testing in coasting-down mode. In this mode, the brake-drag measurement process is preceded by a brake operation process while the vehicle is running warm, and at this time the brake disks undergo heat deformation as their temperatures rise. The subsequent brake-drag measurement process involves a reduction in disk temperature. This is accompanied by a return of the disk from its heat-deformed state so that the disk approaches more closely to the inner pad, and when it impinges on the pad, drag occurs. Also, when the inclination of the inner brake pad to the brake disk at that time is such that there is less clearance between the disk and the pad on the rotation input side (leading side) and there is more clearance on the rotation output side (trailing side), the pad is drawn toward the disk so that the drag suddenly increases. This force that draws the pad and disk together is the force of the vacuum pressure generated between them. This force was successfully used to both stabilize and reduce brake drag by establishing a setting that balances the load from the pad return spring, which is a structure for the purpose of reducing drag, between the leading side and trailing side, and by establishing guidelines for the amounts of caliper piston rollback and caliper body deformation.

1. まえがき

近年において地球環境保護の観点から、低燃費化への要求の高まりに伴いディスクブレーキには多様な引きずり低減手法が提案されている。また、燃費を予測するために必要な走行抵抗を計測するモードがコースティングダウン(C/D)モード^{(1),(2)}であるが、実車を走らせて計測していたため、路面や空気抵抗などのさまざまな影響を受け、

測定結果のブレーキ引きずりが安定しなかった。今回はモードを台上試験に置き換えて解析をおこなった。これにより、テスト条件によるばらつきは減ったが、依然として測定結果にはばらつきが存在していた。つまり、仕様ごとにブレーキの引きずりの実力値を把握しようにも、妥当な値の判断が容易ではなかった。また、新たな引きずり改善手法を提案しても、その効果の定量的な評価が容易ではなかった。そこで、台上試験にてモード中のブレーキ引きず

* 四輪 R&D センター

** 日信工業株式会社

りのメカニズムを解明し、その引きずり値に影響を与える主要因を特定することで、引きずりの安定化をはかる。それをもとにさらなる引きずり低減のための仕様を構築することができる。本開発では量産車において主流となっている1ピストンピンスライドタイプキャリパのフロントブレーキについて明らかにする。

2. 開発のねらい

本開発は以下の3点を主なねらいとした。

- (1) 引きずりのメカニズムの解明
- (2) 引きずりの主要因の特定
- (3) 引きずりの安定化および低減手法の提案

ブレーキの引きずりを安定的に低減させることは、燃費向上にとって重要である。ブレーキキャリパの基本構造をFig. 1に、これまで知られているブレーキ引きずりの一般的なメカニズムの概要をFig. 2に示す。ブレーキを作動した状態から解除した時、キャリパのピストンがピストンシールの弾性変形によってロールバック（ピストンR/B）しディスクから離れる位置に戻ってくる。この時、パッドはディスクに接触したままとなりブレーキ非作動時にも発生する抵抗値がブレーキの引きずりである^{(3),(4)}。最近では、引きずりの低減のために、このパッドをバネによりピストンと一緒にディスクから離す構造（Fig. 3およびFig. 4）を持ったキャリパも存在しているが、計測した引きずりは安定しなかった。

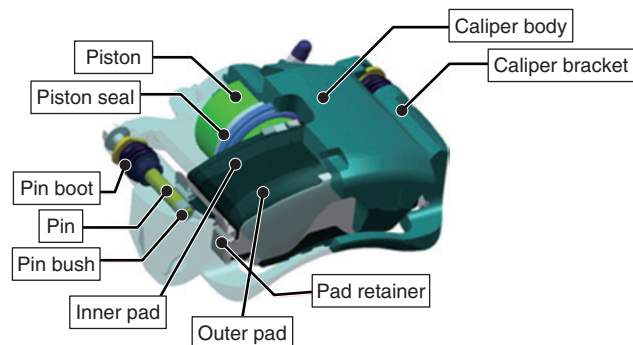


Fig. 1 Basic caliper structure

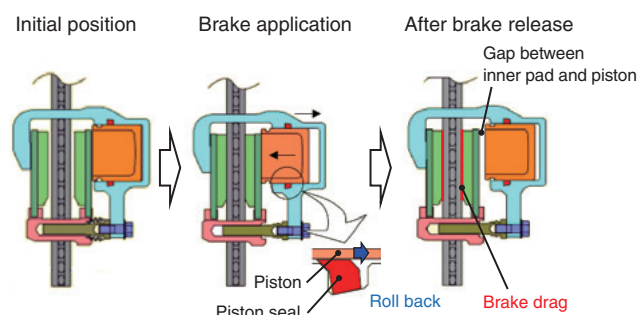


Fig. 2 Conventional brake drag theory

C/Dモードを台上試験に置き換えた時の車速とブレーキパッド温度計測結果をFig. 5に示す。特徴はブレーキ引きずり計測過程の前に、エンジン暖気のための走行によりブレーキ作動が繰り返される過程が存在することである。その後、車速140 km/hから0 km/hまで自然減速させる。この自然減速過程を5回繰り返す時の抵抗値をブレーキパッド有り無しで計測し、その差をブレーキによる引きずり値としている。この図から、ブレーキの繰り返し作動過程において、ブレーキパッドの温度が上昇しているのがわかる。

モードでの台上試験にて計測したフロント1軸分（片輪のデータを2倍したもの）のブレーキ引きずりのデータをFig. 6に示す。ブレーキ引きずり計測の1回目（1st C/D）の途中で突然引きずりが増加し、2回目は不安定ながらも引きずりが増大しながら、車速低下とともに減少していく。

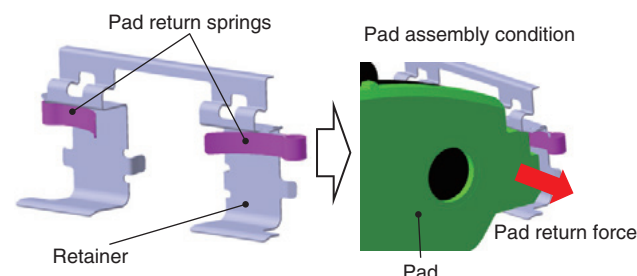


Fig. 3 Example of pad return spring structure

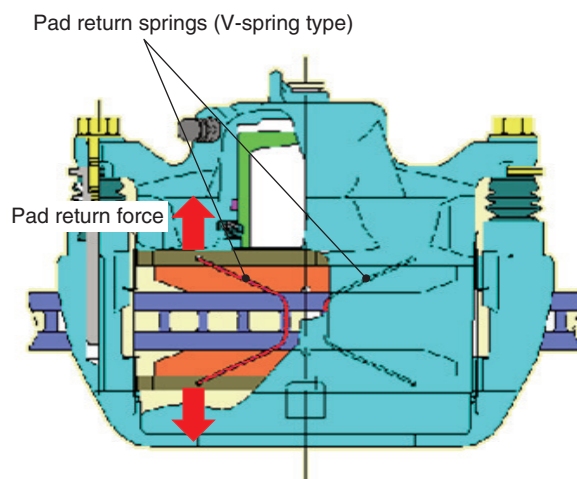


Fig. 4 Example of pad return spring structure (V-spring type)

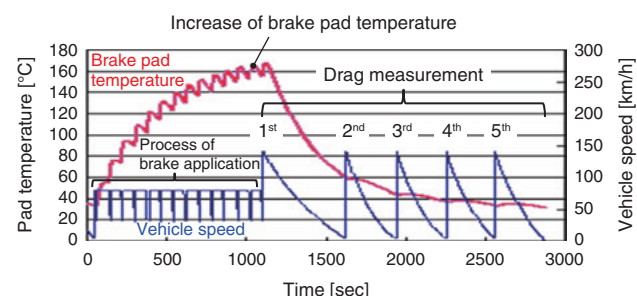


Fig. 5 Bench test condition in C/D mode

また、3回目以降からは徐々に値が減少し安定していく。

これらの原因を突き止め、ブレーキ引きずりの安定化および低減の手法を提案することを研究の目的とする。

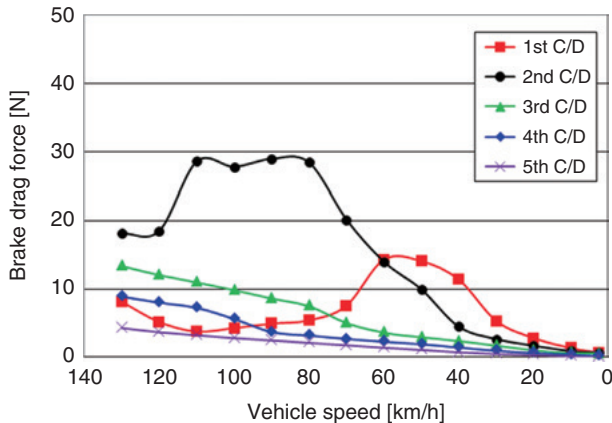


Fig. 6 Brake drag force variability in each C/D

3. ブレーキ引きずりメカニズムの解明

3.1. 改造キャリパによる引きずり確認

引きずりメカニズムを解明するための試験用キャリパを Fig. 7 に示す。本キャリパは引きずりがインナパッドもしくはアウトパッドのどちらで発生しているかを確認することを目的としている。よって、量産キャリパを加工して、インナパッドとアウトパッドに入るディスク回転方向に対する接線方向の抵抗力を別々に計測することができるようロードセルを配置した。

これを用い、台上で C/D モード中のブレーキ引きずり抵抗力を計測したデータを Fig. 8 に示す。アウトパッドは引きずり抵抗力を検出せず、インナパッドのみに引きずり抵抗力を検出した。

3.2. 変位計測

インナパッドのみが引きずりを発生させている理由を確認するため、量産部品を用い、キャリパボデー、インナパッド、アウトパッド、ディスクの変位を各2点ずつ計測しながら台上で C/D モード試験をおこなった。計測箇所を Fig. 9 に示す。また、それによって得られたモード中の各過程にて計測した各部品の位置を Fig. 10 に示す。

Fig. 10 の過程2のディスク位置より、引きずり計測の前の繰り返しブレーキ作動過程では、ディスクの温度が上昇することによるアウトパッド側へのディスク熱変形が確認できる。このディスク変位に追従するためにキャリパボデーおよびインナパッドとアウトパッドが外側へ移動する。しかし、引きずり計測をおこなう Fig. 10 の過程3でわかるように、その後ディスクの温度が低下することにより、変形していたディスク形状がインナパッド側へ戻って

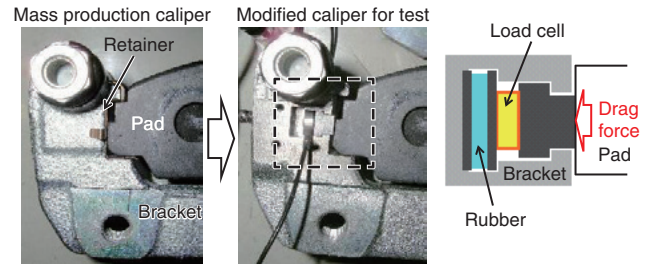


Fig. 7 Test caliper structure

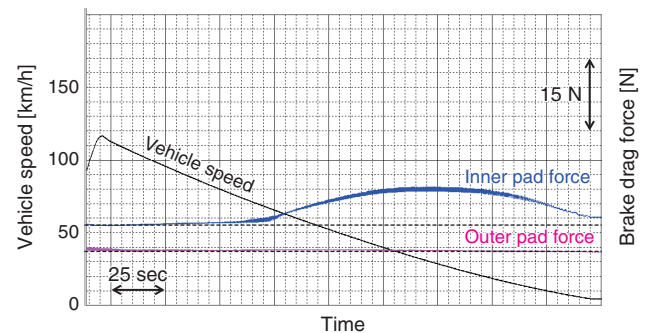


Fig. 8 Brake drag torque of each inner and outer pad in C/D mode

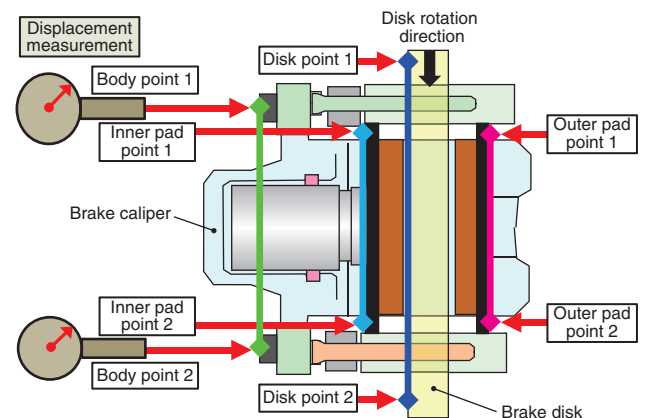


Fig. 9 Measurement points of each part

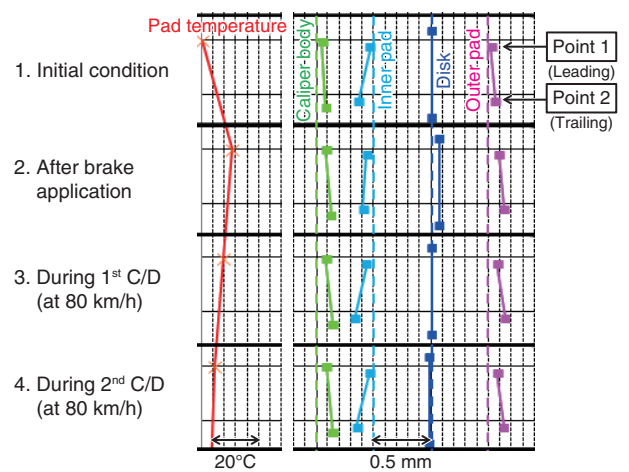


Fig. 10 Position of each part in C/D

くる。この時、ディスクがインナパッドを押すことで引きずり抵抗が発生する。この振る舞いにより、Fig. 8ではインナパッドからしか引きずり抵抗を検出できなかったと考えられる。

また、Fig. 11はC/Dモード中のディスクの熱変形による変位を時系列で示したものである。ブレーキ繰り返し作動中にディスクのアウトパッド側への変形が最も大きくなる⁽⁵⁾。その後、ブレーキ非作動中にはディスクが冷却され元の形状に戻る。この時、ディスク面の厚さ方向の熱膨張もあり、1回目と2回目の引きずり計測時のディスク面は、初期位置よりもインナパッド側の位置になる。その後3回目以降は冷却がさらに進み元の位置に戻る。これによりFig. 6のばらつきとされていた1回目と2回目に引きずりが発生し、3回目以降は引きずりが減少している理由も明確になった。

3.3. 負圧の発生

Fig. 12にC/Dモードのブレーキ引きずり計測過程におけるインナパッドのディスク回転方向に対する回出側

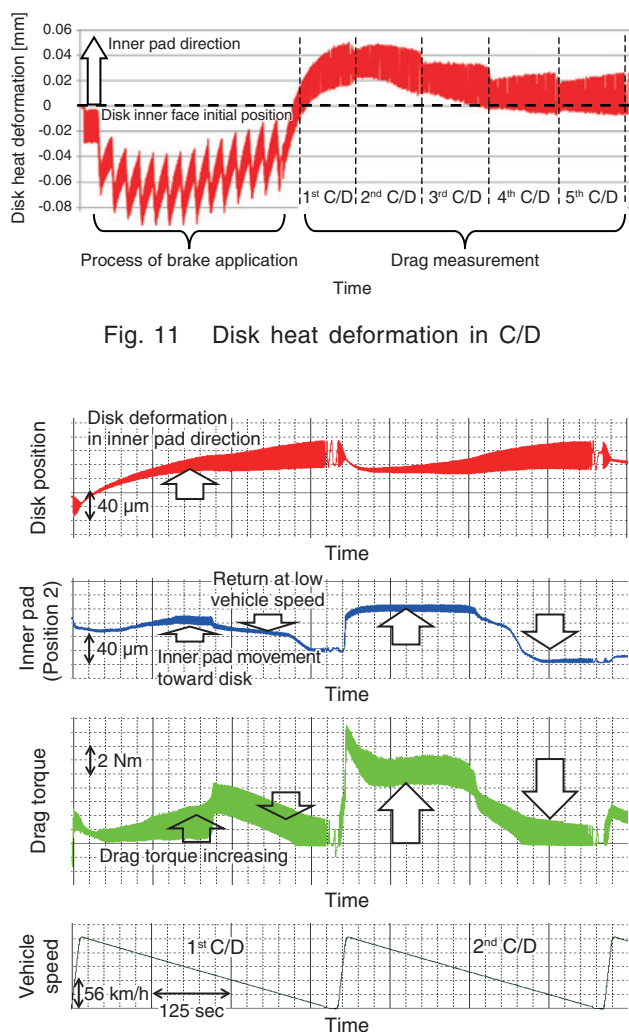


Fig. 12 Displacement behavior of each part in C/D mode

(Point 2)の変位、ディスクの変位、車速および引きずり抵抗力を時系列で示す。引きずり計測中のディスクがインナパッド側に近づく際に、インナパッドの回出側の位置がディスクの方向へ動いて引きずりが増大していることがわかる。このパッドの動きは車速が落ちてくると突然元の位置に戻る傾向がある。

Fig. 13, Fig. 14にはパッドの姿勢と負圧発生の流体解析による計算結果を示す。インナパッドの回入側が回出側よりディスクに近い位置関係となるパッド姿勢の時、インナ

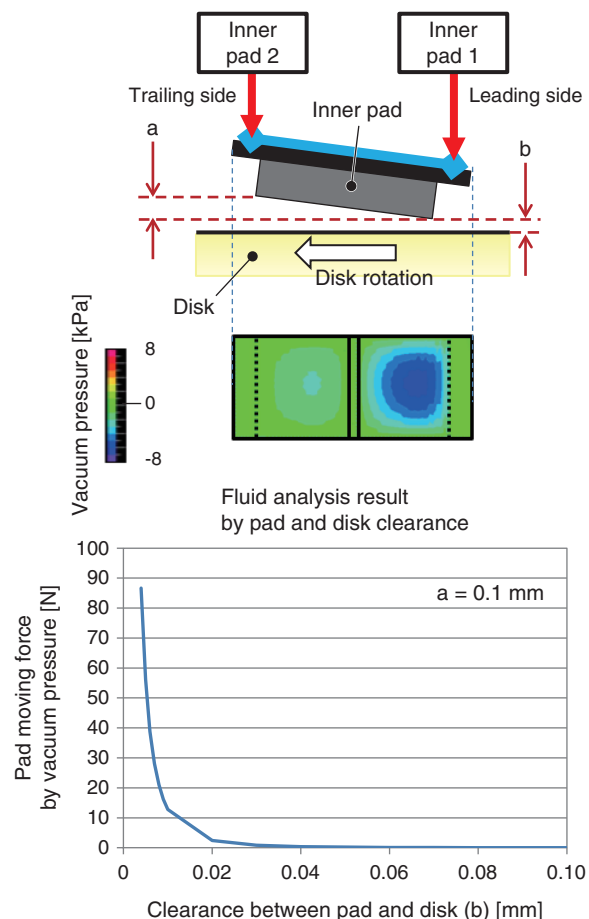


Fig. 13 Vacuum force simulation by pad and disk clearance

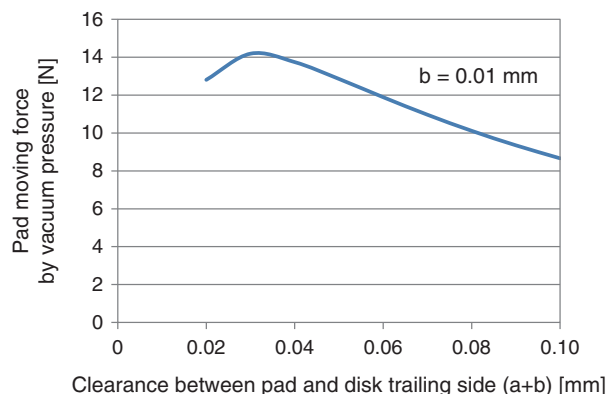


Fig. 14 Vacuum force simulation by pad inclination

パッドとディスク間に負圧による力が発生する。同じパッド姿勢でも、ディスクとのクリアランスが十分ある時は負圧はほとんど発生しない (Fig. 13)。Fig. 15 は実際にパッドに負圧センサを埋め込み、負圧の発生を計測した結果である。160 km/h 相当にてインナパッドを回入閉じの姿勢にセットした。これより、負圧の発生を検出すると同時に引きずり抵抗力も発生していることが確認できた。この負圧による力が、インナパッドをディスクへ引き寄せ、引きずりを増大させるきっかけとなっていると考えられる。

3.4. パッド姿勢と引きずり

Fig. 16 には、これまで計測したさまざまな引きずり計測のサンプルデータを、引きずり計測直前のインナパッドの姿勢の観点で整理したものを示す。引きずり計測直前のインナパッドとディスクのクリアランスが狭くても、パッドの回入側が回出側より近い姿勢の時でない引きずり

は増大しない。また、Fig. 16 の引きずりの傾向が示すように、引きずり値の大小はインナパッドとディスクのクリアランスや、インナパッドの姿勢の角度に比例していないこともわかる。これにより、Fig. 6 のデータのような急激に引きずりが増減する事象は Fig. 12 に示されたインナパッドの突然の移動によるものであり、原因は負圧であると考ええる。

以上より、C/D モードにおけるブレーキ引きずりのメカニズムを以下に整理する。モード中のブレーキ作動過程にてディスクの熱変形が起こる。その後のブレーキ非作動状態でのディスク冷却で形状が戻り、ディスクがインナパッドを押すことにより抵抗力が発生する。この時のインナパッドのディスクに対する姿勢が回入閉じの角度となる時、ディスクとインナパッドの間に負圧が発生し、インナパッドがディスクへ突然引き寄せられる。これをきっかけにインナパッドとディスクは接触し、ブレーキ引きずり値が急激に増大すると考えられる。

4. 引きずりの主要因の特定

引きずりが増大する主要因を特定するため、キャリパの子部品のパラメータスタディをおこなった。前章における引きずり発生のメカニズムの観点から、パッド姿勢および、ディスクとインナパッド間のクリアランスに関連するパラメータを抽出し、各部品精度および仕様差における引きずり値の影響を検証した。また、実車レイアウトなどの理由から、車種ごとに異なる項目として、キャリパ搭載位置およびピンのキャリパブラケット穴に対するクリアランス設定 (タイトとルーズ設定) の回入側と回出側違いに対する引きずり値への影響を検証した。検証したパラメータ項目を Table 1 に示す。

パラメータスタディによりわかったことを以下に示す。インナパッドの姿勢に影響の大きいパッドリターンスプリングのパッド回入側と回出側の荷重比率を変えてブレーキ引きずり値への影響を確認した (Fig. 17)。回出側に比べ回入側のパッド戻し荷重が高いほど引きずり値が低く安定していることがわかる。縦軸はインナパッドのディスクに対する傾きを示し、パッドリターンスプリングの回入回出荷重比とパッド傾き姿勢との相関があることも確認できる。ここでは4種類の異なるキャリパで確認しているが、同じ傾向を示す。ただし、リターンスプリング荷重はピストンを押し戻す荷重以下の範囲で設定しなければ、インナパッドがピストンを押し戻してしまい、ブレーキ作動時の無効ストロークが増大してしまう。

次に、横軸にピストン R/B 量とキャリパボデー変形量の差をとり、それらの値が異なる仕様のキャリパにて引きずりへの影響を確認したものを Fig. 18 に示す。ピストン R/B 量とキャリパボデー変形量の差とは、ブレーキ解除後

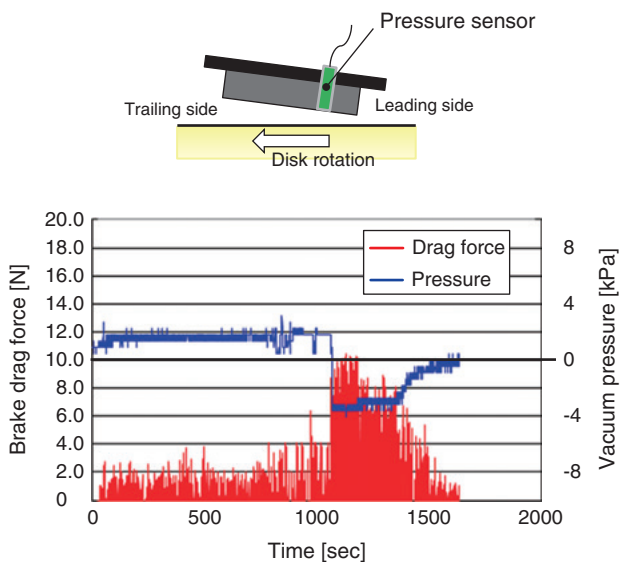


Fig. 15 Vacuum pressure between pad and disk

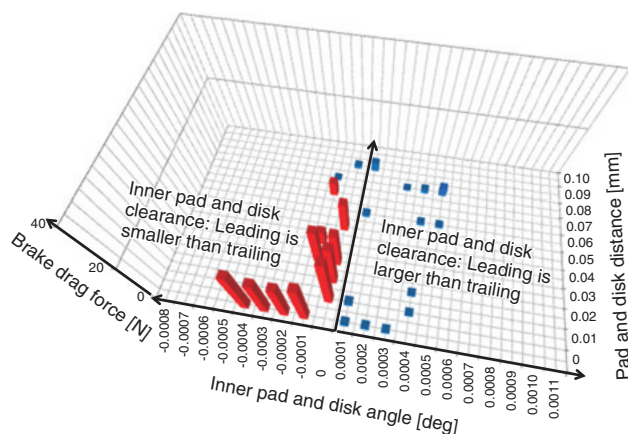


Fig. 16 Brake drag force by inner pad posture

Table 1 Parameter study items for caliper

Classification	Factor	Items
Accuracy	Pad inclination	Pad return spring force
Specification	Clearance between disk and pad	Piston roll back Body deformation
Installation condition	Body position	Car installation position Tight and loose pin application Car installation angle

のインナパッドとディスク間の存在しうるクリアランス量を意味し、それぞれの値はキャリパの仕様を把握する上で重要な値として管理している。C/D モード中においてはディスクが熱変形するため、ピストン R/B 量とキャリパボデー変形量の差から、さらにディスク熱変形量を引いた値がインナパッドとディスク間に残されたクリアランスとなる。ディスク熱変形量を一定とすると、Fig. 18 より、ピス

トン R/B 量からキャリパボデー変形量を引いた値が十分確保されていれば、引きずり値が低く安定している。これより、引きずり値を低くするためにはピストン R/B 量が大きい方が良い。しかし、ブレーキ非作動時にピストンがディスクからより離れた位置にいるため、ブレーキ操作時にピストンがディスク方向に移動する距離が長く、ブレーキペダルの操作量が増え、操作フィールの低下が発生する。また、キャリパボデー変形量が小さい方が引きずりは小さくなるが、一般的にキャリパボデー変形量を下げるとは肉厚増加を伴い、部品重量を増加させる必要がある。また、ディスク熱変形過程が存在する C/D モードにおいてはディスク熱変形量を減少させることが引きずり値の低減につながる。しかし、一般的な手法では熱容量を増やす必要があり、部品重量が増大する傾向がある。以上より、これらを最適なバランスで設計することがブレーキ引きずり値低減とブレーキ部品としての競争力の維持には重要である。

次に、ディスク回転中心軸に対するキャリパ車両搭載角度違いによる引きずりの結果を Fig. 19 に示す。車両搭載角度を変えても引きずりに対する影響は少ないことがわかった。

また、ディスク回転中心軸に対するキャリパの搭載位置（軸に対し前付きか後ろ付き）およびピンとピン穴の径方向クリアランス設定を回入側と回出側でタイトとルーズを入れ替えた時の引きずりの結果を Fig. 20 に示す。全体として値は 2 N 以下と低く、引きずり値への影響は少ないことがわかる。以上より、キャリパの実車搭載角度およびキャリパピンの入れ替えをおこなっても引きずり値への影響は小さいことがわかった。これらの結果から、キャリパの搭載角度は、レイアウトの都合で機種ごとに違っていても、引きずり値に対する寄与が低く、キャリパ単体としての性能であるパッド戻し荷重とピストン R/B およびボデー変形量（剛性）の寄与が大きいことがわかった。

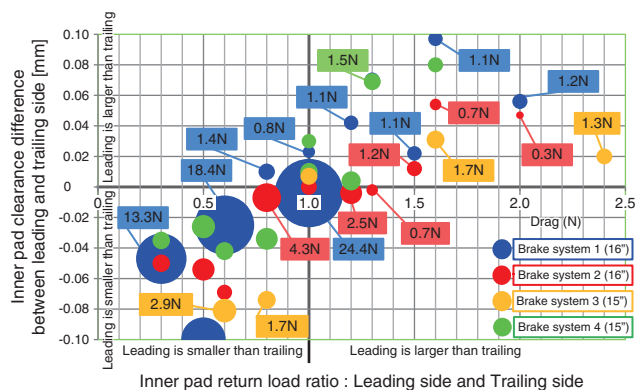


Fig. 17 Brake drag force by pad return spring load balance

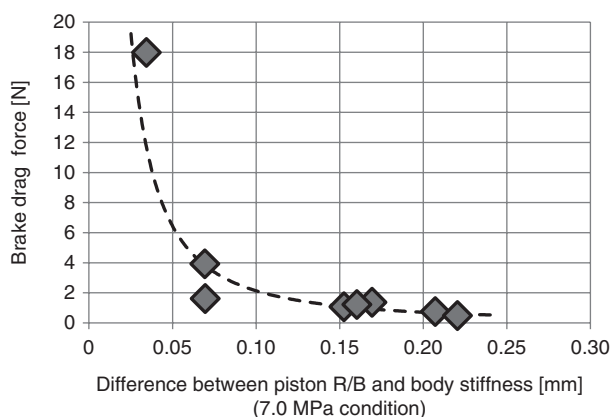


Fig. 18 Brake drag force by piston R/B and body deformation

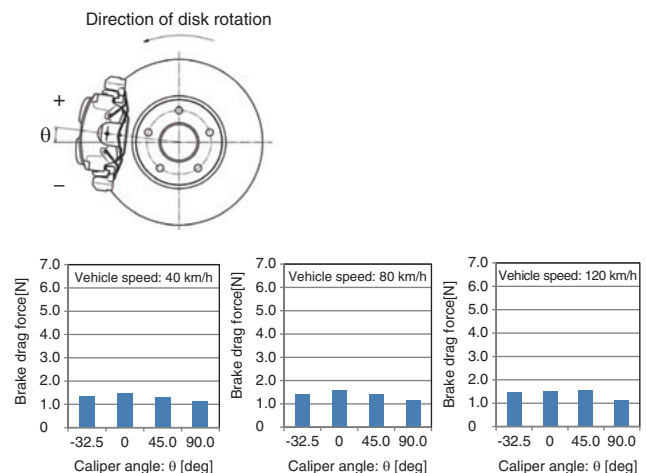


Fig. 19 Brake drag force by caliper installation angle

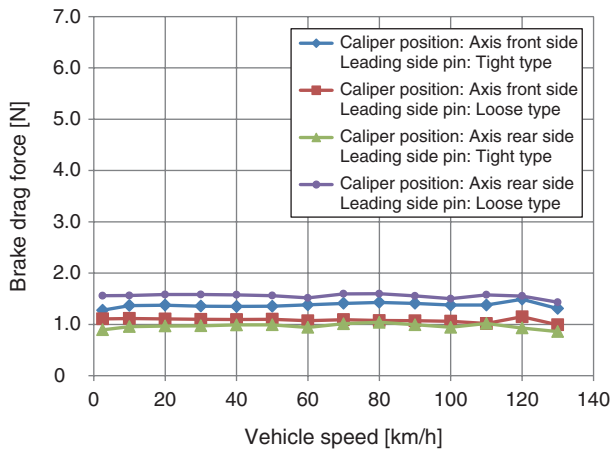


Fig. 20 Brake drag force by caliper position and pin type

5. 引きずりの安定化および低減手法の提案

ブレーキ引きずり安定化および低減手法を具現化するため、引きずりの主要因についての設計的な指針となるものを以下に定めた。

パッドリターンスプリング構造を設定する。その時、パッドとディスク間に負圧を発生させないため、ディスクに対するインナパッドの姿勢を回入側開きとする必要がある。この姿勢を安定的に保つためには、パッド戻しバネ荷重バランスのパラメータスタディ結果を整理した Fig. 21 の傾向より、パッドリターンスプリングの回入側のパッド戻し荷重が、回出側より大きい必要がある。目安として Fig. 21 の網掛けで示すエリアが設定のねらいとなる。グラフの色は、2 N 以下の引きずり値を低め安定とし青色、2 N 以上 4 N 以下をオレンジ色、それ以上を引きずり大として赤色として区分した。パッド戻し荷重を安定させるため、リテーナとパッドの間へのグリス塗布が望ましい。

また、C/D モード中のインナパッドとディスクの接触を防ぐために、ピストン R/B 量からキャリパボデー変形量を引いた値を確保する必要がある。Fig. 22 の網掛けの示すエリアがねらいの仕様となる。

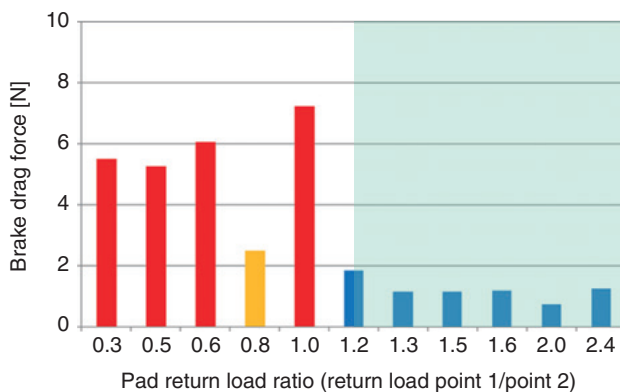


Fig. 21 Design target of pad return load balance

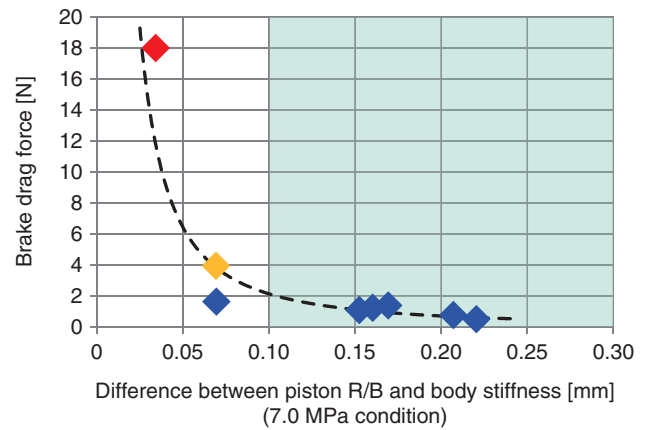


Fig. 22 Design target of piston R/B and body deformation

6. まとめ

台上試験において、C/D モード中のブレーキ引きずりのメカニズムを解明した。モード中のブレーキディスクは、ブレーキ繰り返し作動過程において熱変形する。その後の引きずり値計測過程においてディスク温度が低下し、熱変形から形状が戻ってくる。この時、ディスクとインナパッドが接触することにより引きずりが発生していることがわかった。また、その時インナパッドがディスク面に対して、回入側が回出側より近いクリアランスとなる姿勢の時、インナパッドとディスク間に負圧が発生する。これによりインナパッドがディスクに吸い寄せられるようにして接触する。これをきっかけに突然引きずり値が増大する現象が発生することがわかった。また、キャリパのパラメータスタディを実施することにより、引きずり値の安定化および低減のための以下の知見を得た。

- (1) パッドリターンスプリングの回入側および回出側のパッド戻し荷重設定は、回入側の荷重を回出側より高くし、ディスクに対するインナパッドの姿勢を回入開き状態にすること。
- (2) ピストン R/B 量からキャリパボデー変形量を引いた値を指標とし、これを十分確保すること。
- (3) ブレーキディスク熱変形量を少なくするディスク設計をおこなうこと。

参考文献

- (1) SAE J2263: Road Load Measurement Using Onboard Anemometry and Coastdown Techniques (2008)
- (2) SAE J2264: Chassis Dynamometer Simulation of Road Load Using Coastdown Techniques (2014)
- (3) 蒲生慶一, 鈴木伸二, 久米村洋一: CLZ 型ディスクブレーキの設計技術開発, TOKICO REVIEW Vol.43,

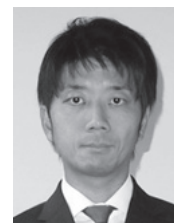
No.1, p.6-13(2001)

- (4) 蒲生慶一, 石井英昭, 鈴木俊次, 久米村洋一: ブレーキ引きずり低減技術の開発, TOKICO REVIEW Vol.42, No.1, p.20-26(2001)
- (5) 中井浩二, 野畑康寛, 斉藤範幸: ディスクの熱変形低減によるブレーキジャダー低減手法の開発, MAE テクニカルレポート, No.14, p.27-34(2005)

■ 著 者 ■



小林 靖



樋口 祐多



中村 直樹