

ブレーキディスク動的変形量の測定・評価手法

嵯峨 信一* 豊崎 康博*

Measurement and Evaluation Method of the Dynamic Deformation of the Brake Disk

Shin-ichi SAGA Yasuhiro TOYOSAKI

The disk brake is mounted on the high speed vehicle from a thermal problem point of view. By the influence of the frictional heat generated remarkably by a higher speed, the braking performance of the disk and the pad is reduced in some cases. Therefore, past researches have been conducted mainly with a focus on the friction surface observed by the high-speed thermo camera. Then, we have established a method of measuring the disk deformation during braking. In this paper, we report on the results of the investigation of the relationship between the deformation and the friction phenomenon executed by dynamo bench tests.

キーワード：ブレーキディスク，変形，摩擦現象，非接触変位計，アクティブ除振台，サーモカメラ

1. はじめに

高速走行する新幹線電車はディスクブレーキ方式を採用している。この方式はブレーキディスクにパッドを押し付けて摩擦力を得るもので、特に地震などの停電時は回生ブレーキを使わずに停止させるため、速度が高いほど顕著な摩擦熱が発生し、ディスクとパッドはその熱影響を受けて性能が低下する場合がある。

ブレーキ中のディスク摺動面を高速サーモカメラで観察すると、ディスクの発熱状態が時々刻々と変化し、このときのディスクとパッドは熱影響により複雑に変形・摺動しているものと推測される。このため、パッド形状を変更するなどして接触性を改善し、さらに安定した摩擦力を得ようとする研究開発¹⁾が行われている。

過去の研究事例では、ブレーキ鳴きなどのディスク固有振動モードに関する研究、有限要素法によるディスク変形と締結ボルトの強度評価^{2) 3)}に関する報告はあるが、ブレーキ時におけるディスクの動的な熱変形を実測した研究は行われていない。

そこで、本研究では、ブレーキ時におけるディスク動的変形量の把握を目的に、変形量の測定手法を検討・確立し、さらに変形量とその様態ならびに摩擦熱の関係について詳細に調べた。

2. ブレーキディスク動的変形量の測定手法

2.1 センサの選定

2.1.1 レーザ変位計

高速回転かつ高温となるブレーキディスク摺動面の変形を測定するには、非接触式でかつ熱影響を受けない変

位センサを用いる必要がある。また、高サンプリング周波数の計測により回転角度の分解能を高められることも重要である。レーザ変位計は非接触式変位センサとして最も一般的なものであり、その他の非接触式変位センサに比べて測定距離が長く、高温のディスク摺動面から放出される輻射熱の影響を少なくできるメリットが期待できる。

レーザ光源は一般的に、波長 650nm 程度の赤色レーザを用いる場合が多いが、近年はスポット径をさらに極小化できる短波長の青色レーザ (400nm 程度) が増えてきたことから、青色レーザ変位計 (MicroEpsilon 社 ILD1700BL-500) を用いて測定を行った。本センサの分解能は 30 μ m、測定距離は 200 ~ 500mm、アンプのサンプリングは 2.5kHz である。

センサは反フランジ側のディスク摺動面 (外周部) から 250mm の離隔を確保し、図 1 のように設置した。本実験では、中央締結型ディスク (複数回の台上試験を行った後のもの) に等面圧パッドを組み合わせた。

ディスク変位量の測定結果を図 2 に示す。図 2 (a) は緩解時に低速で測定した 1 回転分の変位量を表し、P-P 値は 1000 μ m を示している。これはダイヤルゲージで実測したディスク外周部の変位 P-P 値 160 μ m と大きく異なる値である。また、図 2 (b) に示す初速 300km/h から非常ブレーキを掛けた条件では、細かな変動に加えて、ブレーキ直後から停止するまで比較的大きな負の変位 (ディスクが凹む方向) を示している。

これらの結果はレーザ変位計の測定原理から、ディスク摺動面に移着したパッド成分が形成する微小な凹凸によりレーザ光が散乱して反射光量が減少し、ディスク摺動面との距離を誤検出した可能性を示している。したがって、ディスク変形量の測定にレーザ変位計を用いるのは適切でないと考えられる。

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

特集：車両技術

2.1.2 静電容量式変位計

次に、非接触式の変位センサとして、静電容量式変位計を検討した。この方式はセンサと測定対象物間の静電容量を測って距離を算出する仕組みのため、前述のようなパッド移着物による影響を受けにくいと考えられる。ただし、レーザ変位計に比べて測定距離が著しく短いことから、高温のディスク摺動面から放出される輻射熱の影響に注意が必要である。

これらを考慮し、センサ使用温度が世界最高クラスの 200℃である MicroEpsilon 社 CS3 を用いて測定を行った。本センサの分解能は 60nm、測定距離は 3mm、アンプのサンプリングは 7.8kHz、センサヘッド直径は 30mm である。センサは反フランジ側のディスク摺動面(外周部)から約 1.5mm の離隔を確保し、図 3 のように設置した。

ディスク変位量の測定結果を図 4 に示す。図 4 (a) の緩解時に低速で測定した 1 回転分の変位 P-P 値は 125 μm で、ダイヤルゲージで測定したディスク外周部の 1 回転分の変位 P-P 値 130 μm と良い一致を示した。また、図 4 (b) に示した初速 300km/h から非常ブレーキを掛けた条件では、ブレーキ直後に負の変位を示し、減速に伴って正の値に増大する傾向を示した。

このような傾向は、ディスク締結ボルトの応力変動を反転した波形と似ており、ディスクの変形量が比較的正しく捉えられているものと考えられる。

以上の結果から、静電容量式変位計を用いて動的変形量を評価することとした。

2.2 センサの配置

ディスク摺動面の変形量を捉えるためには、“点の変位”であるセンサの設置個数を可能な限り増やし、“面の変形(面外変形)”として測定するのが望ましい。

いま、ディスクは軸対称構造かつ軸中心に回転することに着目すると、同一半径方向に直線配置されたセンサ上を回転通過するディスクの変形量は、極座標系で表すことができる。

直径 30mm のセンサヘッドを 120mm のディスク摺動幅内に設置するため、センサ配置は反フランジ側ディスク摺動面の内周部、中央部、外周部、車輪リム部の 4 箇所とした。このうち、車輪リム部は台上試験機の振動成分を検出・除去する目的で追加したものである。ディスク内周端部からの位置はそれぞれ 17mm、54mm (ディスク締結ボルト孔の位置)、105mm、161.5mm、これを車軸中心からの半径に換算するとそれぞれ 257mm、294mm、345mm、401.5mm となる。

複数のセンサを配置する場合、それを支える機構・部材が大型化し、それらが輻射熱で膨張や変形を起こしてセンサとディスクの離隔が確保できなくなり、接触・損

傷あるいは振動増大などの問題を招くことが試作段階で判明した(図 5 (a))。このため、本測定では熱影響の低減を狙い、図 5 (b) に示すような片持ちの簡素な支持構造を考案した。

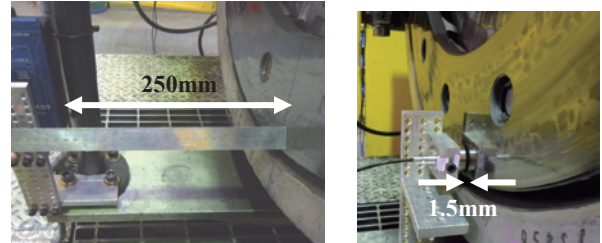
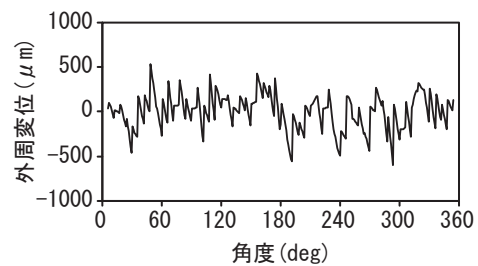
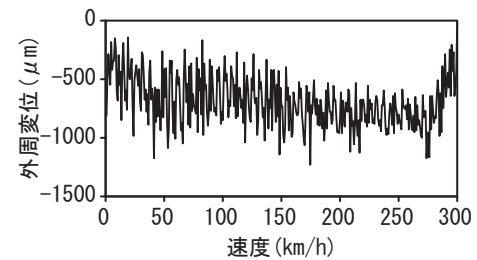


図 1 青色レーザ変位計 図 3 静電容量式変位計

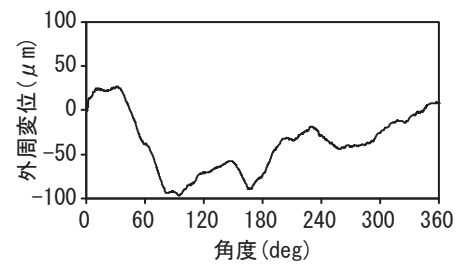


(a) 緩解時 1 回転分

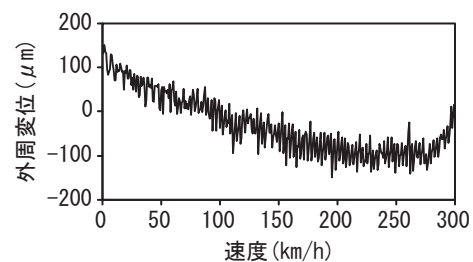


(b) 300km/hからの非常ブレーキ

図 2 ディスク変位量の測定結果(レーザ変位計)

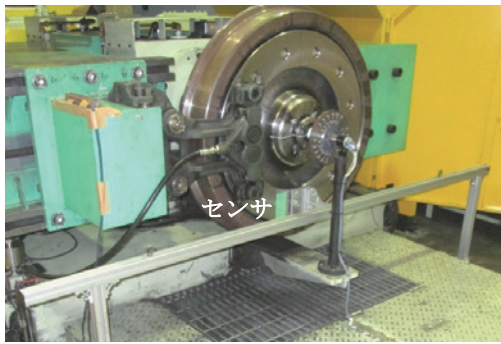


(a) 緩解時 1 回転分

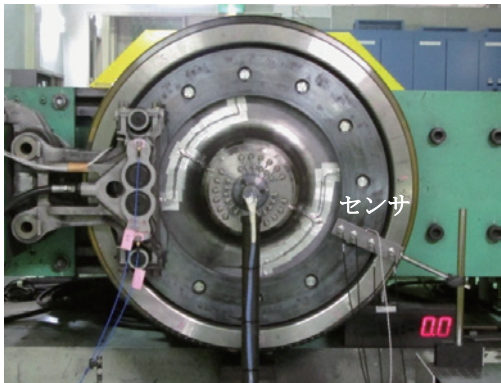


(b) 300km/hからの非常ブレーキ

図 4 ディスク変位量の測定結果(静電容量式)



(a) 試作品



(b) 考案品

図5 センサの支持構造

2.3 外乱影響の除去

供試体や想定車両質量を模擬するためのフライホイールを高速で回転させる台上試験機は、回転軸の共振点がいくつか存在する。この回転系の振動に加えてブレーキ時の摩擦振動が重畳し、台上試験機の床面や基礎等に伝搬する。すなわち、センサからみれば台上試験機自体が振動の外乱源となっている。

したがって、測定時に振動絶縁を図るには、前述したような支持構造を用いてセンサを3次元空間の仮想的な不動点に固定する方法が理想である。そこで、以下に示す4種類の支持方式について、摩擦熱と摩擦振動が生じない回生ブレーキ条件（初速 300km/h）において、試験機振動の影響を評価した。この結果を図6 (a) に示す。

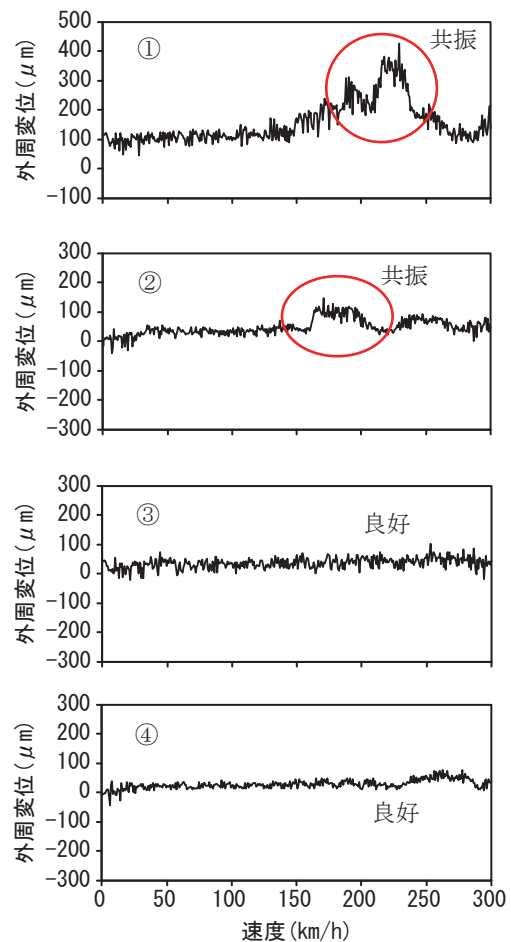
- ① 鉄板の上に固定する場合
- ② 空気バネ式除振台の上に固定する場合
- ③ アクティブ制御式除振台（パッシブモード）の上に固定する場合
- ④ アクティブ制御式除振台（アクティブモード）の上に固定する場合

除振台は、空気バネ式が明立精機社 AET-0405、アクティブ制御式が明立精機社 ME40-0405L を用いた。アクティブ制御式とは6自由度アクティブ除振機構により、空気バネ式では得られない振動低減効果（振動伝達率：-40dB @ 10 ~ 100Hz）を有する除振台である。

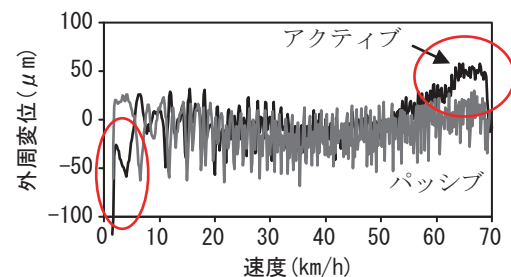
条件①と条件②ではともに試験機の共振による影響が

顕著に表れているのに対し、条件③と条件④はいずれも影響が低く抑えられているのが分かる。特に振動低減効果が優れていたのは条件④のアクティブ制御式除振台のアクティブモードであった。しかし、図6 (b) に示した機械ブレーキ時においては、ブレーキ作用時の比較的大きな振動などの外乱を検知して除振制御機構が作動し、大きなドリフト（赤丸箇所）を生じさせる場合があり、最悪の場合にはセンサとディスクが接触して機械的あるいは熱的な損傷を引き起こす可能性が考えられる。

したがって、振動低減効果が次いで高かった条件③のアクティブ制御式除振台のパッシブモードを用いて評価するのが妥当であると判断した。



(a) 回生ブレーキ



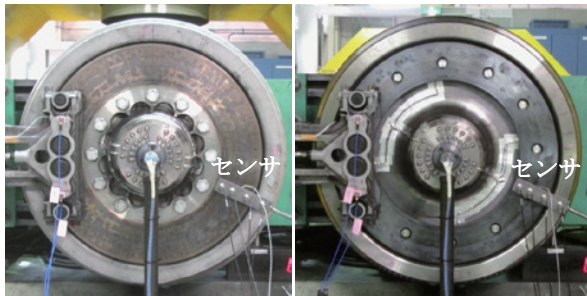
(b) 機械ブレーキ

図6 ディスク変位量の振動影響比較（外周部）

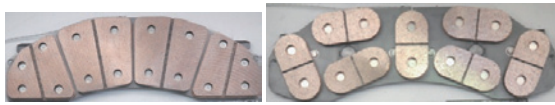
3. ブレーキディスク動的変形量の評価手法

内周締結型ディスクおよび中央締結型ディスク（いずれも複数回の台上試験を行った後のもの）を供試体として、ブレーキ時のディスク動的変形モードを把握し、熱変形モードとの関連性を調べた。

試験時の供試体外観を図7に、試験前の初期状態におけるディスク摺動面の静的変形量（1回転分）を図8に示す。内周締結型ディスクは180度の幅で、P-P値190 μm の変形がみられ、中央締結型ディスクは90度の幅で、P-P値110 μm の変形がみられる。いずれのディスクも複数回の台上試験を行った後のものであるが、初期変位は剛性に優れた中央締結型ディスクの方が小さい。

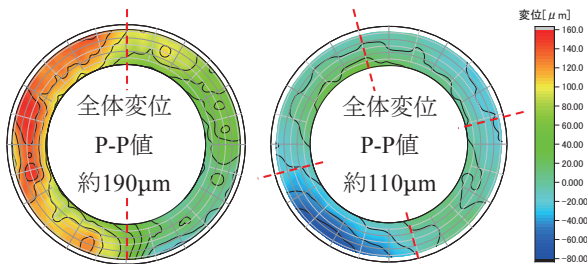


(a) 内周締結型ディスク (b) 中央締結型ディスク



(c) リジットパッド (d) 等面圧パッド

図7 供試体の外観



(a) 内周締結型ディスク (b) 中央締結型ディスク

図8 ディスク摺動面の静的変形

3.1 動的変形モード

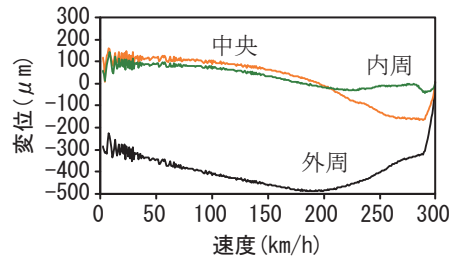
ブレーキ装置の組み合わせには、内周締結型ディスク+リジットパッド、中央締結型ディスク+リジットパッド、中央締結型ディスク+等面圧パッドの3種類がある。これらに対して、初速120km/h、230km/h、300km/hからの非常ブレーキ条件における台上試験を実施し、ディスクの動的変形量を測定した。ただし、中央締結型ディスクの中央部では、締結ボルト孔が異常値を示し、内周および外周における変位値により補間すると内外周変位の正しい評価ができなくなる。このため、締結ボルト孔に相当する異常値（具体的には締結ボルト孔の位置に相

当する回転角度における測定値）を除外した。また、センサの熱ダメージを考慮して試験回数は2回までとし、ディスク摺動面における変形量と発熱状態の比較を目的に、高速サーモカメラを用いた観察も併せて実施した。

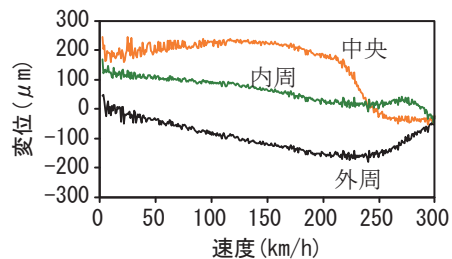
3.1.1 巨視的変形量

初速300km/hからブレーキを掛けた際の各変位量の測定結果を図9に示す。

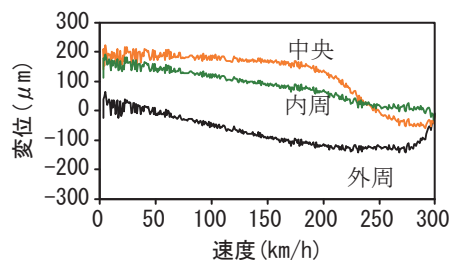
図9(a)の内周締結型ディスクでは、ブレーキ直後から外周部変位が顕著な負値を示すこと、変位全体のP-P値は約600 μm と大きいことが分かる。図9(b)の中央締結型ディスクでは、速度250km/hから中央部変位が増大し、変位全体のP-P値は約350 μm で内周締結型ディスクの約60%に低減することが分かる。図9(c)の中央締結型ディスクに等面圧パッドの組み合わせでは、中央部変位の挙動がリジットパッドの条件よりも若干減少し、P-P値は約300 μm であった。



(a) 内周締結型+リジット(非常ブレーキ)



(b) 中央締結型+リジット(非常ブレーキ)



(c) 中央締結型+等面圧(非常ブレーキ)

図9 各変位量の測定結果

3.1.2 微視的変形量

図10の左図はディスク摺動面の動的変形量(1回転分)を微視的に解析したもの、右図はディスク摺動面を捉えた高速サーモカメラ映像で、初速300km/hから270km/hおよび120km/hまで減速した瞬間のものである。

図10(a)の内周締結型ディスクでは、外周部変位がシャ

ンプーハット状に波打つこと、速度 170km/h からは中央部付近に局所的かつ周期的な凸状変形が出現し、変位の P-P 値は約 600 μm であった。この凸状変形はディスク板部に対応しており、裏面の放熱フィンをつなぐ板部の熱容量が小さいため、熱変形が生じ易いことを示している。また、変形範囲は図 8 で示した 180 度の幅を有しており、ディスクは静的な変形の影響を残しながら周方向に周期的な変形をなしていることが推測される。

図 10 (b) の中央締結型ディスクでは、中央部 (板部) の局所的かつ周期的な凸状変形が速度 170km/h からみられ、変位の P-P 値は約 350 μm と内周締結型ディスクの約 600 μm に対して約 40% 小さくなっている。また、凸状変形はディスク全周に生じていることから、ディスクは周方向へ均一に周期的な変形を生じていると推測される。

図 10 (c) の中央締結型ディスクと等面圧パッドの組み合わせでは、円周方向の局所的かつ周期的な凸状変形はリジットパッドに比べて緩和傾向であることが分かる。したがって、パッドの等面圧機構は微視的なディスク変形に対しても一定の追従性があり、凸状変形との過度な接触面圧を低減して入熱の集中を抑える効果が推測される。

ディスク摺動面の発熱状態を捉えたサーモ画像を観察すると、図 10 (a) の内周締結型ディスクでは、内外周に現れた発熱箇所が減速に伴って中央部に移動し、ディスク全周にわたってヒートスポットを形成している。図 10 (b) では内周締結型ディスクと同様に歪なヒートスポットが認められ、その発生箇所は板部である。このことから、リジットパッドを組み合わせた場合の微視的な変形と発熱の発生箇所は概ね一致していることが分かる。

図 10 (c) では等面圧パッドの接触性向上効果によってディスク全体に均一な発熱が認められ、最高温度はリジットパッドよりも約 200 $^{\circ}\text{C}$ 低く抑えられている。また、細かなヒートスポットは生じているが、それらは板部以外にもあることから、等面圧パッドの場合には変形と発熱の発生箇所は必ずしも一致しないことが分かる。

以上の結果から、ディスク変形によって局所的に面圧が高くなり易いリジットパッドでは、微視的な変形部と発熱部がある程度一致し、それらが相乗的に作用して変形が拡大し易いと考えられる。一方、ディスク変形の影響を受けにくい等面圧パッドでは、それらの相関性が低下するため、微視的なディスク変形と発熱が抑えられると考えられる。

3.1.3 微視的変形の周波数解析

ディスクの板部に生じる微視的な変形に加え、ディスク摺動面にはさらに細かな波長の異なる“うねり”あるいは“粗さ”が存在している。これらの時間変化について周波数解析を行うため、変位の基準値を $10^{-3}\mu\text{m}$ とした回転一定幅トラッキング解析 (変形のモード解析) を実施した結果を図 11 に示す。ただし、解析にはサンプリング時間の連続性を維持する必要があるため、異常

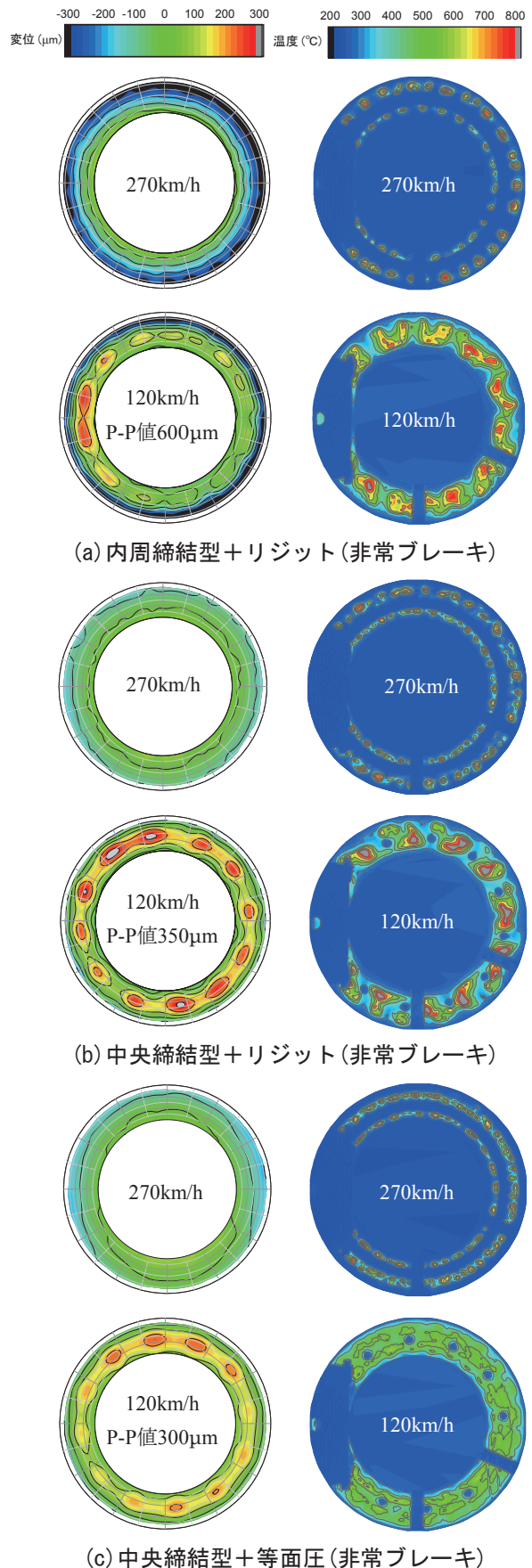


図 10 摺動面の動的変形 (左) と温度分布 (右)

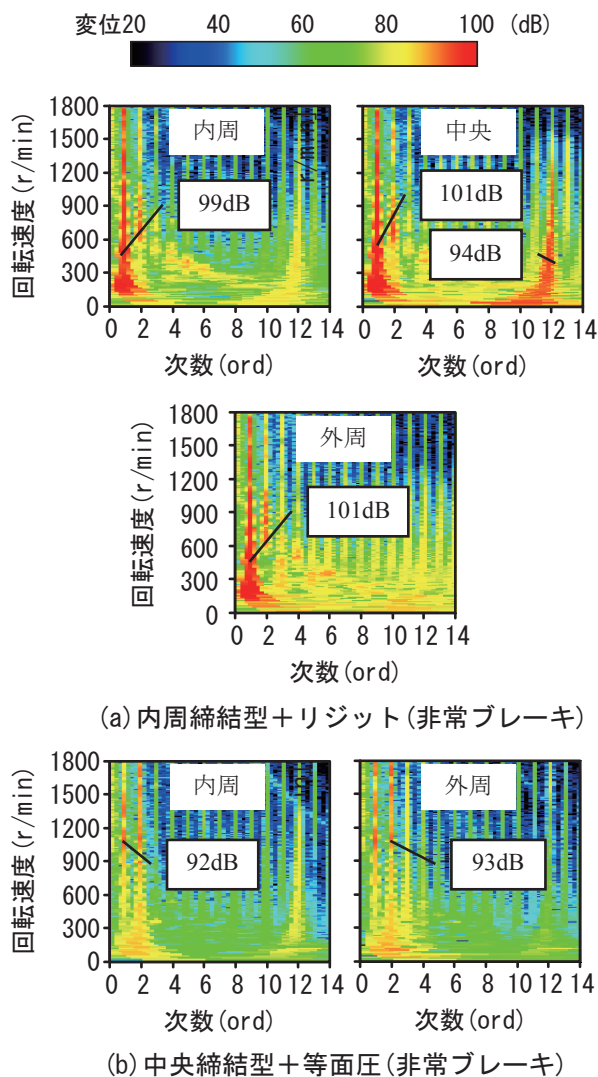


図 11 トラッキング解析の結果 (初速 300km/h)

値と判定される締結ボルト孔を含む中央部を対象外とした。図中の次数とは回転数を周波数に変換したものであり、1次はディスク1回転成分、2次は1/2回転成分、12次成分は1/12回転成分を表している。特に12次成分はディスク板部である。

図 11 (a) の内周締結型ディスクとリジットパッドの組合せでは、内周部と外周部に1次と2次成分が、中央部に1次、2次および12次成分が顕著に現れ、最大値は中央部と外周部の1次成分で101dBであった。図 11 (b) の中央締結型ディスクと等面圧パッドの組み合わせでは、内外周ともに減少傾向を示し、最大値は外周部の2次成分で93dBあった。

以上のことから、いずれのディスクも1次または2次、次いで12次成分が顕著で、これらの出現次数の傾向から、内周締結型ディスクでは比較的大きなスケールの変形が支配的であり、1次あるいは2次成分で比較すると、中央締結型ディスクの方が7~8dB小さい結果であった。また、中央締結型ディスクと等面圧パッドの組み合わせ

で、変位が最小となるなどの優位性が定量的に示された。

3.2 ブレーキディスクの伝熱解析

ブレーキディスクの摺動面に一様なブレーキ入熱を与えた場合の伝熱解析を実施し、熱変形モードを把握した。ただし、解析モデルは中央締結型ディスクで角度15°の扇形とし、締結ボルトの軸力により拘束した。なお、解析位置はセンサ測定位置と同じである (図 12 (a))。

ブレーキ条件は初速300km/hからの非常ブレーキとし、吸収エネルギーとブレーキ時間を考慮した熱流束をディスク摺動面に対して一様に与えた (等面圧パッドを想定)。解析結果を図 12 (b) に示す。変位の解析結果は実測値 (図 9 (c)) と絶対値では異なるが、内周部を除く変形の傾向は実測の結果と概ね一致した。

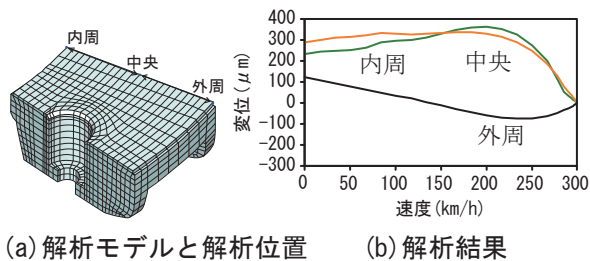


図 12 解析モデルと解析結果

4. まとめ

本研究ではディスク動的変形量の測定評価手法を確立し、変形モードは熱的要因が強く影響すること、中央締結型ディスクと等面圧パッドの組合せは、変形量と温度上昇を低く抑える組み合わせであることを明らかにした。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご指導を頂きました東海旅客鉄道株式会社ならびに伝熱解析でご協力を頂きました新日鐵住金株式会社の関係者各位に感謝いたします。

文 献

- 1) 金森成志, 難波広一郎, 宮部成央: ブレーキディスクの熱負荷低減に関する研究, 第22回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.15-63, 1720, 2015
- 2) 小玉航平, 泉聡志, 酒井信介, 新井浩, 浅野浩二: 非定常伝熱-応力有限要素法解析による鉄道用ブレーキディスク締結部の強度評価, 第12回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2005
- 3) 筒井貴也, 赤間誠, 桑原雅治, 一瀬謙輔: 有限要素法による新幹線電車ブレーキディスク取り付けボルトの応力解析, 日本機械学会関東支部第14期総会講演論文集, 2008