

ブレーキディスクの 表面温度を可視化する

嵯峨 信一

車両制御技術研究部(ブレーキ制御 副主任研究員)



さが しんいち

はじめに

近年、世界的な環境意識の高まりから新幹線に代表される高速鉄道が注目されています。国内外の高速鉄道は「より安全に、より速く、より快適に」をモットーに営業速度の向上やブレーキ力の向上を計画し、車両開発を進めています。

しかし、高い車両性能を目指す場合においても、異常時には機械ブレーキのみが動作することを求められることから、ブレーキディスクの温度上昇は必至となり、その熱に起因した様々な問題が懸念されるため、正確な温度を測定する必要があります。ところが、熱電対を用いた一般的な温度測定手法では、応答速度が遅いことや測定位置がディスクの表面から数mm深さの内部に限定されるなどの理由から、時々刻々と変化するディスクの表面温度を正確に測定することが困難になっています。

そこで、高速サーモカメラを用いてディスクの表面温度を可視化し、評価することができる解析装置を開発しました。ここでは、この解析装置の特長や機能について紹介します。

ブレーキディスクの現状



図1 赤熱するブレーキディスク

実物大のブレーキディスクを用いて、台上ブレーキ試験を行った際の様子を図1に示します。供試体のブレーキディスクは新幹線電車に搭載されているものと同等で、車輪の板部にボルトで締結されており、“車輪側ディスク”と呼ばれ

ています。

図のように初速度270km/hから機械ブレーキによって運転士が通常扱う最も強いブレーキ(常用最大ブレーキ)を作用させた場合には、摩擦熱によりディスクの表面が800℃を超えて円環状に赤熱します。これを“ヒートリング”と呼んでいます。一般的に、“ヒートリング”が発生するような温度になると、摩擦係数が不安定になることや、熱変形や熱亀裂を発生させることが知られています。また、非常ブレーキとなるとより強いブレーキ力が負荷されるため、さらに高温に達して様々な問題が懸念されます。

こうした現状に対し、従来の熱電対による温度測定手法では、将来の速度向上やブレーキ力の向上に対応した新型ブレーキシステムの評価が困難となる可能性があります。

したがって、熱電対に代わる新たな測定手法を用いてブレーキディスクの正確な温度を把握するとともに、将来に向けた機械ブレーキシステム(ブレーキディスク、ライニング、はさみ装置)の見直しを図る必要があります。

サーモカメラ映像の比較

標準的なサーモカメラと開発したサーモカメラを同時に用いて、初速度270km/hから機械ブレーキによる常用最大ブレーキを作用させた際のサーモ映像を図2に示します。

標準的なサーモ映像では、目視で観察した場合(図1参照)と同様に“ヒートリング”がみられます。これは、人間の目(一般的に1/60sec程度)と標準的なサーモカメラのシャッター速度が低いため、流れた映像が撮影されているのです。

温度測定はサーモ映像の中で指定した固定点(数点)に限定されます。さらに、測定温度の幅が500~900℃と比較的狭いため、赤熱したディスクの表面温度を精度良く測定することが困難となっています。したがって、瞬間的な挙動であるディスクの表面温度を捉えることができませんでした。

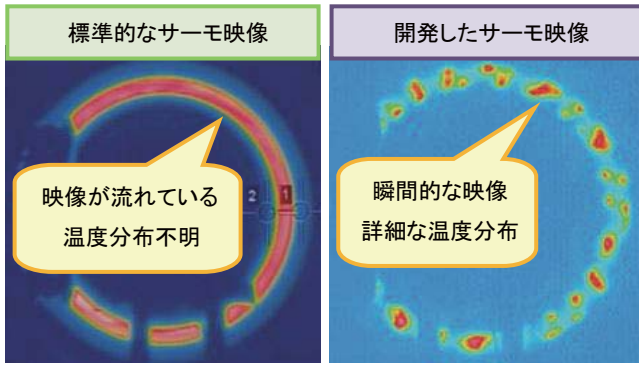


図2 サーモ映像の比較

一方、開発したサーモ映像では、ディスクの表面に局所的な高温領域が存在しているのが分かります。これは、開発したサーモカメラのシャッター速度が高いため、瞬間的な映像として捉えられていることを示しています。すなわち、目視や標準的なサーモカメラでは“ヒートリング”として捉えられた温度分布の正体は、高速で回転する局所的な“ヒートスポット”の集まりであることが明らかになりました。

サーモ映像に含まれるすべての点の温度が得られ、測定温度の幅も標準的なサーモカメラに比べて広いので、従来では困難であった速度300km/hで高速回転するディスクの表面温度をより詳細に可視化・把握することが可能となりました。

開発した解析装置の特長

こうして可視化されたブレーキ中の瞬間的な温度分布に対し、さらに詳細な解析を行う必要があります。そこで、可視化で用いたサーモカメラと併せて解析装置を開発しました。なお、それらの諸元は表1のようになっています。

サーモカメラの目に相当する検出素子により、有効画素数である約6万点の温度を測定することができ、1秒間に30枚収録される映像は高速回転するブレーキディスクを約1/7000secのシャッター速度で“静止映像”として捉えたものを連続描写したものです。また、特殊なフィルタにより、測定温度の範囲が300～1100℃と広いのが特長で、任意の点または領域における最大値、平均値、最小値をそれぞれ得ることができます。

サーモ映像に加えて、アナログ信号(8ch)も同時に収録することで、速度、回転角度、摩擦係数などの他に、熱電対で測定した温度との比較も容易になります。さらに、解析する領域の指定、温度ヒストグラム、任意の条件によるデータの抽出など、各種解析機能を持っています。

近年では、同様な性能を持った海外製のサーモカメラが販売されていますが、いずれも汎用品であるために、高速で回転するブレーキディスクのような特殊な対象物の解析

表1 解析装置の諸元

項目	仕様
検出素子	InSb (インジウムアンチモン) FPA (2次元センサ)
有効画素数	256 (pixel) × 236 (pixel)
検知波長	3.5～4.1 μm 4.5～5.1 μm
温度精度	対象物温度100℃以下 ±2℃ 対象物温度100℃以上 ±2%
測定温度範囲	-40～70℃ 20～150℃ 100～300℃ 300～1100℃
シャッター速度	最大 約1/7000sec
フレームレート	30/sec
サンプリング時間	アナログ信号 1msec, 2msec
測定時間	900sec, 1800sec
主な機能	解析領域指定 データ収録(表面温度, アナログ) 温度ヒストグラム 任意の回転角度抽出 任意の固定点追跡 任意の放射率設定

には必ずしも向いているわけではありませんでした。そのため、開発した解析装置は温度測定に限らず、ブレーキ時に発生する摩擦熱に伴うディスクの変形やディスクとライニングの接触状態の把握、あるいは発生する熱応力の評価に有効であると考えられます。

解析の機能

開発した解析装置の各種解析機能について、詳しく紹介します。解析に用いるソフトウェアの画面を図3に示します。このソフトウェアでは、サーモカメラを遠隔操作して映像を取得するとともにアナログ信号も収録し、ブレーキディスクに特化した解析を行うことができます。

解析領域の指定

ディスクの表面に特化した解析を行うため、ブレーキディスクが円環形状であることに着目し、「中心座標」、「内

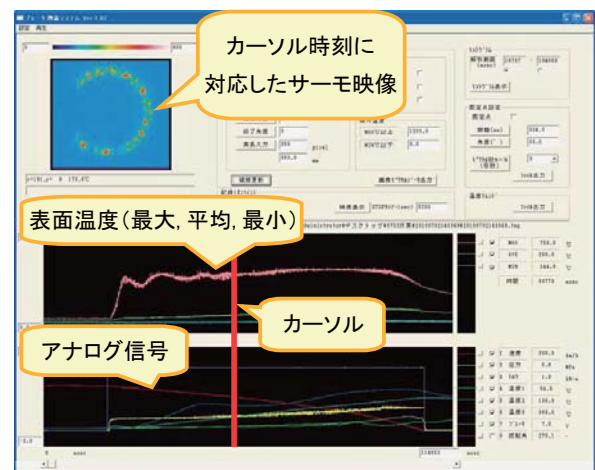


図3 本解析装置のソフトウェア画面

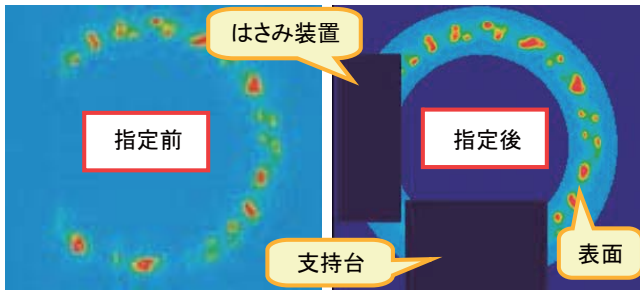


図4 指定した解析領域と解析除外領域

径」,「外径」および「開き角度」をそれぞれ入力することで、円形状～円環形状～扇形状までの解析領域を指定することができます。

ただし、解析する領域(形状)を指定してもディスクの表面に対して遮蔽物となる“は

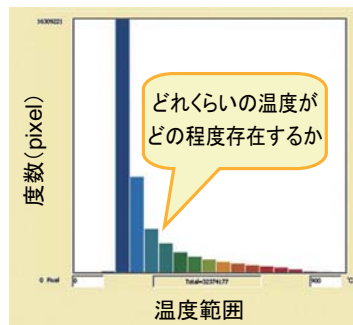


図5 温度ヒストグラム解析

さみ装置”や温度や歪みを測定するために取り付けられているスリップリングを固定している“支持台”が存在するため、これらを解析から除外する必要があります。そこで、解析を除外する領域として四角形状を3つまで定義できる機能を備えています。また、その他の除外機能として、温度範囲を指定することも可能です。

図4に円環形状の解析領域を指定した前後におけるサーモ映像を示します。右図に示した濃紺色の背景および黒い四角形状の領域が除外領域に相当します。

データ収録

通常収録するアナログ信号としては、ブレーキ指令の他に速度、ブレーキトルク、押付圧力、熱電対温度(ディスク内部、ライニング)、回転角度などが挙げられ、指定した領域において測定された表面温度(最大値、平均値、最小値)と併せてソフトウェア画面上にチャート表示されます(図3)。描画されたチャート上には、マウスで自由に時間軸移動できる縦線のカーソルが表示され、選択したカーソル時刻に対応したサーモ映像が表示されます。測定開始と終了のトリガは、ブレーキ指令またはマウスによる手動操作の選択が可能で、得られたデータは解析しやすい形式で出力することができます。

ヒストグラム解析

サーモ映像をみると、ディスクの表面には様々な温度分布が存在しています。これらの分布は視覚では容易に把握できますが定性的です。これを定量的に示すためには、“どれくらいの温度がどの程度存在するのか”を解析する必要があります。そこで、解析時刻をカーソルで指定し、任意

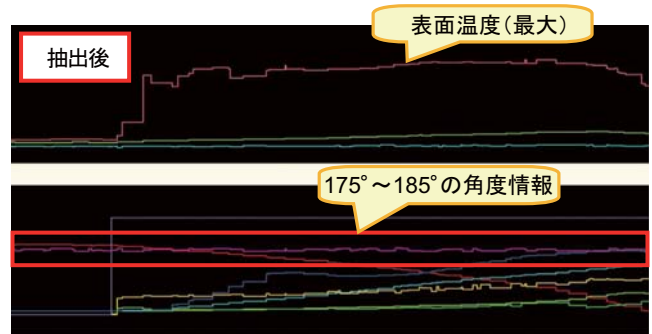
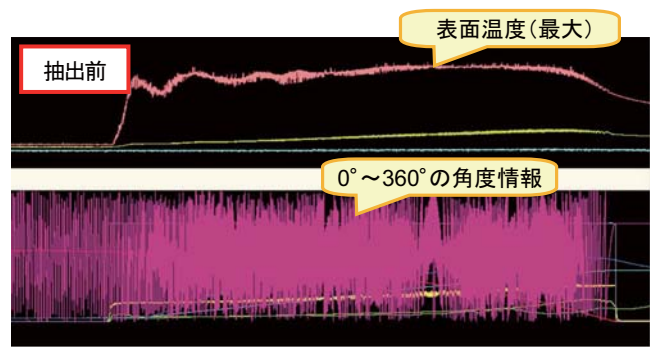


図6 回転角度抽出前後のチャート

の時間刻みにおける温度のヒストグラム解析が行えるようにしました。

図4で示したサーモ映像を全ブレーキ時間でヒストグラム解析した結果を図5に示します。高温になるにつれ、指数関数的に度数が減少しています。これは、高温の領域がその他の温度領域に比べて著しく少ないことを意味し、図4でみられる“ヒートスポット”が点在していることを表しています。

こうした解析によって、例えばブレーキ時間の違い、ディスクやライニング形状の違い、ライニングの摩擦特性の違い、接触状態の違いなどの評価を容易に行うことができます。なお、ヒストグラムもデータ出力することができます。

任意の回転角度抽出と固定点追跡

回転中のブレーキディスクが同じ回転角度に位置する際の比較を行うことができます。台上試験装置から出力される回転角度情報(例えば、1回転で180パルス)と時間情報をサーモ映像と一緒に記録することにより、ブレーキ中の任意の回転角度におけるサーモ映像および各種データの抽出が可能になります。

図6に抽出角度を $180^{\circ} \pm 5^{\circ}$ とした場合のチャートを示します。抽出前の回転角度情報は、 $0 \sim 360^{\circ}$ の変動を示していますが、抽出後には $175^{\circ} \sim 185^{\circ}$ だけが表示されているのがわかります。なお、これら抽出されたデータについても各種解析が可能です。

また、このような機能を活かし、回転する任意の固定点(1点)を追跡することができます。図7に固定点(9×9)の例を示します。固定点の寸法(pixel)は 1×1 , 3×3 , 5×5 ,

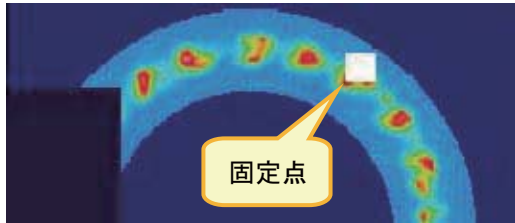


図7 固定点の例(9×9)

7×7, 9×9の5種類から選択が可能で、固定点で定義された各座標の温度がデータ出力されます。なお、固定点が解析除外領域に隠れた際には温度解析を行わないようにしています。

任意の放射率設定

一般的に、解析者は放射率を $\epsilon = 1.0$ として取得されたサーモカメラのデータに対し、測定対象物の温度域に合わせた放射率(一定値)を選択することで温度を算出しています。しかし、より正確な温度を得るには、様々な温度域に対応した放射率で換算することが必要です。そこで、100℃毎に放射率の設定ができるテーブル機能を持たせています。

解析事例

図8に示すようなブレーキディスク形状が異なる場合の解析事例を紹介します。比較した形状は、新幹線に使われている“現行型”と熱変形を抑制し、約3割軽量化した“小変形型”です。初速度300km/hから機械ブレーキによる非常ブレーキを停止まで作用させた条件において、ディスクの表面温度が最大となった際のヒートスポットの比較を図9に示します。

現行型ではディスクの表面の中心位置に比較的大きなヒートスポットが円周方向に集中して連なり、各ヒートスポット周辺の温度勾配が急激に変化している様子がみられることから、熱変形に伴う局所的な接触状態であるのが分かります。一方、小変形型では熱変形を抑制したことによって現行型に比べて良好な接触状態となり、比較的小さなヒートスポットがディスクの表面に分散・点在することで、温度勾配が緩和されているのが分かります。

図10に温度分布の比較を示します。現行型に比べて小変形型は軽量化され熱容量が小さいにもかかわらず、ディスクの表面における最高温度は現行型の956℃に対し、小変形型が920℃となり、最高温度が抑制されるとともに、赤熱する800℃を超えた温度分布も約6割低減されているのが分かります。

以上のような可視化と解析手法を用いて機械ブレーキを評価することにより、システムの最適化を図ることができます。

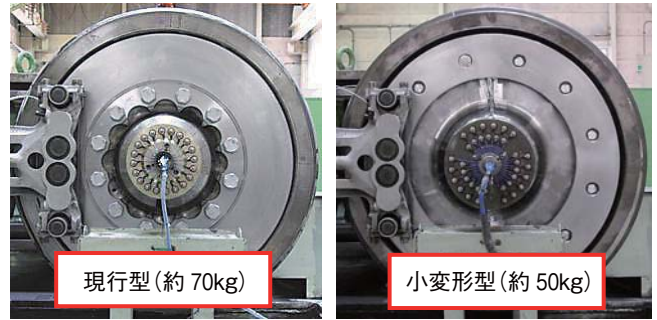


図8 ディスク形状の違い

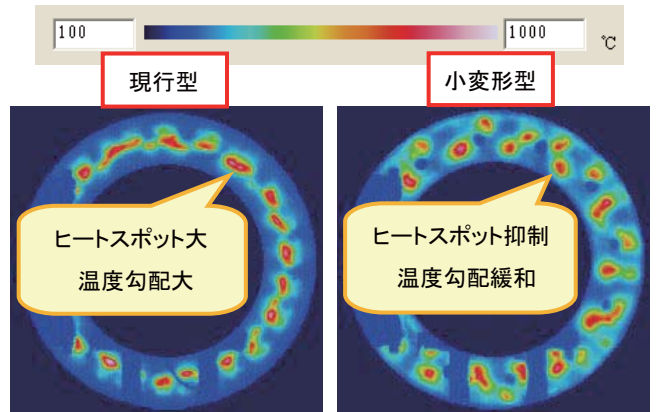


図9 ヒートスポットの比較(300km/h, 非常ブレーキ)

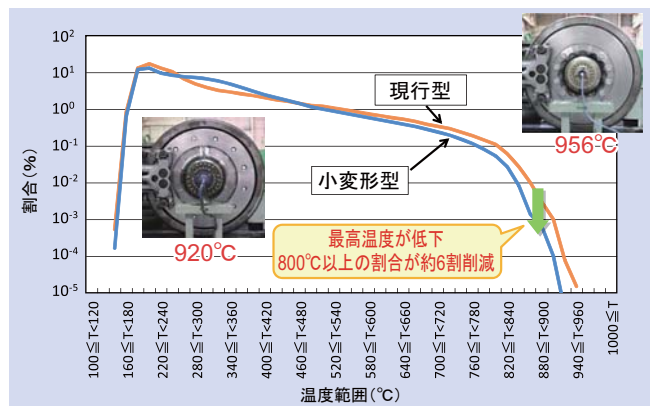


図10 温度分布の比較(300km/h, 非常ブレーキ)

おわりに

ブレーキディスクの表面における様々な温度解析が可能な解析装置について紹介しました。現在、ディスクの表面温度を低下させる研究開発を実施しており、本解析装置を用いて現車にも効果的な手法について見極める予定です。

最後に、本件にご協力頂きましたジャパン・イメージ&ネットワーク(株)、NEC-Avio赤外線テクノロジー(株)、住友金属工業(株)、大阪富士工業(株)の関係者各位に感謝の意を表します。RRR