

# ブレーキディスクの熱疲労

森 久史

材料技術研究部(主任研究員)

辻村 太郎

同(部長)



もり ひさし



つじむら たろう

## はじめに

ブレーキディスクが営業線の車両で最初に適用されたのは1935年にドイツのヘンシェル・バグマン車が始まりであると言われています。開発当初のブレーキディスクは鋳鉄製でしたが、それ以降、形状あるいは材質変更が行われて、様々なブレーキディスクが開発及び適用されてきました。図1に日本で開発されてきた新幹線用のブレーキディスクを模式的に示します。当初は一体型の鋳鉄製ディスクであったのが、分割型鋳鉄ディスク、鋳鉄と鍛造鋼の重ね合わせ型(クラッド型)ディスクが開発され、現在は主に一体型の鍛造鋼製ディスク(鍛鋼ディスク)が適用されています。ブレーキディスクでは開発当初から、摩耗低

減と熱き裂に関する対策案について検討が求められていました。材質及び形状改善により摩耗は低減し、鍛鋼ディスク導入後の一時期、熱亀裂はほとんど問題視されなくなっていました。しかし、最近、微視的な熱き裂の発生が認められるようになり、さらなるディスクの高性能化にむけて、熱き裂の対策が今後の課題になると考えられます。ブレーキディスクで発生する熱き裂は主に熱疲労が原因であると考えられます。そこでブレーキディスクの熱疲労について調べておくことは、今後よりよい性能のブレーキディスク開発のためにも極めて重要な事であると考えられます。本報においては、まずブレーキディスクと熱疲労の現象について簡単に説明し、その後熱疲労の原因となる熱応力に

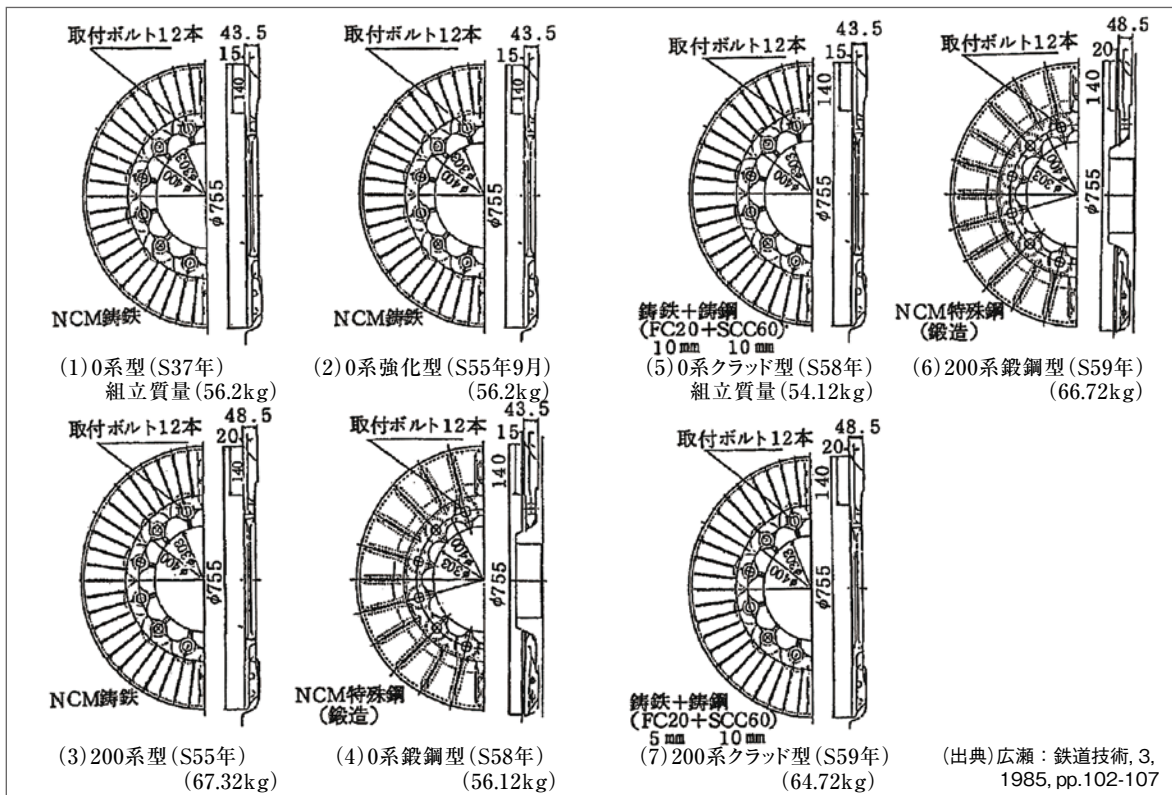


図1 新幹線用ブレーキディスクの形状及び材質の遷移

ついて述べます。その後にはブレーキディスクの熱疲労と熱疲労を受けたブレーキディスクの状態について説明いたします。

### ブレーキディスクとは

鉄道車両の機械ブレーキ方式としては踏面ブレーキ方式とディスクブレーキ方式が主に採用されて

います。ここでは、詳しくブレーキ方式について述べませんが、ディスクブレーキ方式は従来の踏面ブレーキ方式と比較して、ディスク・ライニングの組み合わせが比較的自由に取り得ること、直接車輪とこすらないので車輪に熱的負荷を加えないなどの様々な利点を有する方式であり、現在、新幹線電車などの高速車両に適用されています。

図2に現在の新幹線電車で使用されている一体鍛造型ブレーキディスクを示します。ブレーキディスクは肉厚のある円盤状のもので、表面はライニングとの接触を確実にするために平滑であります。ブレーキ時の発熱を考慮して、裏面はフィンと呼ばれる放熱機能を有する凹凸が設けられており、このような表裏非対称の複雑な形状をしています。ブレーキディスクはブレーキ時にライニングを表面に押しつけたことによる機械的応力、回転による遠心力、発生する摩擦熱による熱応力の発生が考えられますが最も負荷の大きいのは、摩擦熱による熱応力の発生であると考えられます。したがって、ブレーキディスクにおける熱疲労はブレーキディスクの設計において最も重要な特性であると考

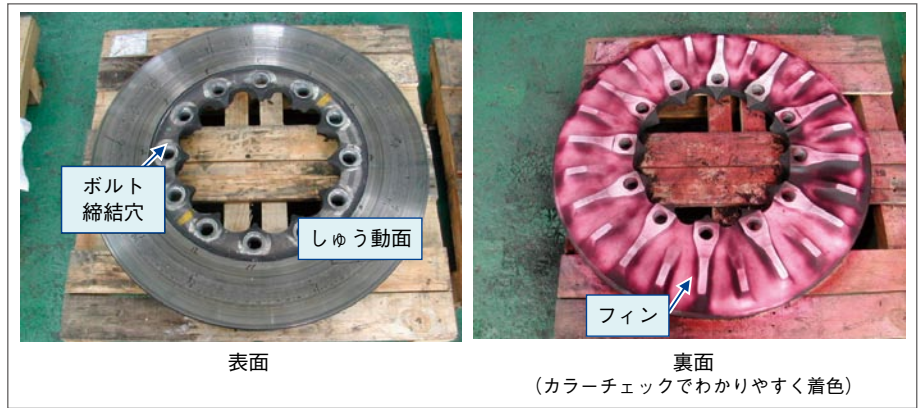


図2 ブレーキディスクの外観（一体鍛造鋼ディスク）

えられます。

### 熱疲労について

熱疲労は、一般的に、物質が加熱及び冷却の温度サイクルを繰り返し受けて発生する現象です。熱疲労の原因は、物体の熱伝導と熱膨張によって発生する熱応力が原因であると考えられます。ここで熱応力について簡単に説明します。図3に熱応力を考えるためのモデルを示しました。図に示すように、物体に熱を加えると前にも述べたように伸びが生じます。たとえば、単純な計算によると長さ100mmの鉄の棒を500℃に加熱した場合、熱膨張係数が $12 \times 10^{-6}/\text{℃}$ であるとすれば、全体で0.6mm伸びるとなります。一方、冷却した場合には収縮します。物体を拘束しない場合には、加熱及び冷却で生じた伸びや収縮は自由に生じることができます。しかし、伸びや収縮が拘束される際、加熱時には伸びが拘束されて物体内部に圧縮応力が発生するようになります。また、冷却時には収縮による逆の応力、すなわち引張応力が発生するようになります。この

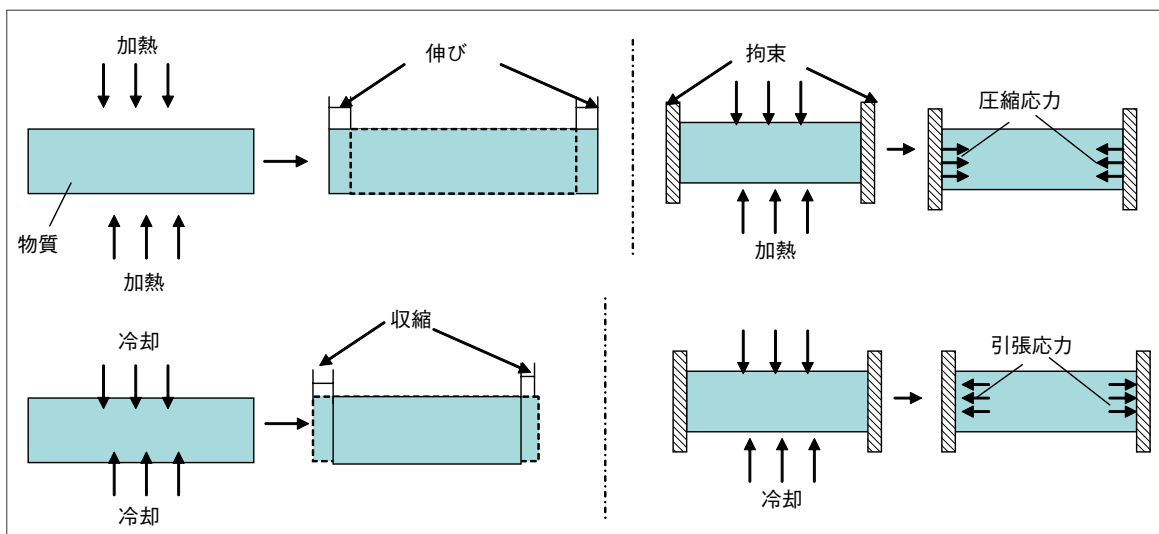


図3 均一加熱された場合の熱応力の発生の模式図

ように加熱と冷却の温度サイクルを与えると、物体に圧縮と引張の応力が繰り返しかかるようになります。これが熱疲労です。熱疲労は一般的に熱環境で用いられるジェットエンジンやガスタービン等の高温機器の設計において重要な要求特性です。ジェットエンジンあるいはガスタービンは運転中に温度上昇しますが休止中には温度が低下し、運転と休止間での温度差、すなわち運転・休止の繰り返しで熱疲労が発生するようになります。

また、拘束された熱環境下においての熱疲労のほかに、図4に示すように、物体の不均一温度サイクル、たとえば片側だけが加熱冷却される場合においても、温度サイクルを受ける側で熱疲労が生じます。この場合は、温度サイクルを受ける面と内部との温度差が影響し、温度差に応じた熱膨張差による熱応力によるものです。この場合、温度上昇が生じない内部が表面の伸びや収縮を拘束しているために生じるものであり、摩擦熱を受ける物体がこのような熱疲労型に近い状態になります。

このように基礎的に熱疲労を見ますと体系的に整理できますが、実際に構造物や物体に生じる熱疲労は、様々な因子や熱衝撃の発生などに影響を受け、解析が容易でないために実験室的な研究も十分には成果が得られていないのが現状です。したがって、熱疲労を研究するためにはまず、機器の使用状況（温度状態）を知り、製品の材質及び使用中の材質変化をまず把握することが必要になります。そこで次にブレーキディスクにおける熱疲労の状態を見てみましょう。

### ブレーキディスクに生じる熱疲労

ブレーキディスクは前にも述べたようにライニングとの摺動によって強い摩擦を受けます。熱力学の法則によると摩擦仕事は熱に変換されます。その結果、摩擦はブレーキディスクに熱として伝わるようになります。そして摩擦を受ける面、すなわち表面の温度が著しく上昇します。上昇した温度は一部が外部に放熱されますが、多くはブレーキディスク内部に伝わっていきます。その一方、裏側では、遠心力、回転等によってフィンから走行風が取り込まれ冷却された状態になります。すなわち、表面で加熱されて裏面で冷却された状態と同じとなり、表面と裏面の温度差が発生して厚さ方向に温度分布を持つようになり、ブレーキ時には表面に圧縮応力、内部に引張応力が作用し、ブレーキ開放後には温度降下により表面に引張応力、内部に圧縮応力が作用する熱疲労を受けるようになります。

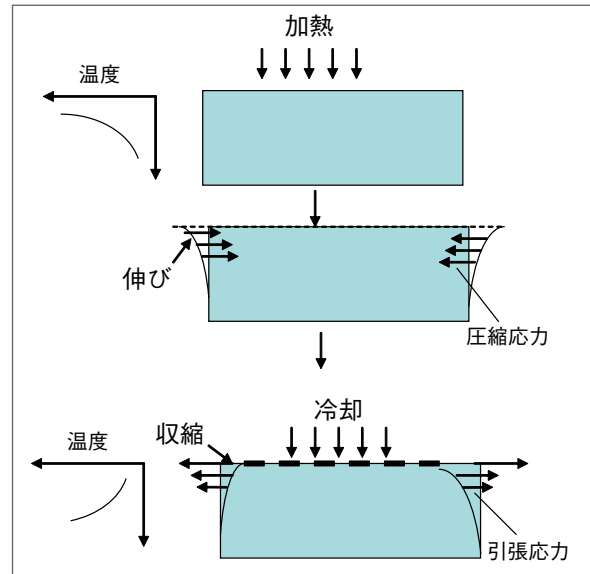


図4 片側加熱された場合の熱応力の発生の模式図

構造物や物質は熱疲労を受けても急激に破断に至らず、劣化、損傷して最終的に破断します。ブレーキディスクの場合には劣化及び損傷しても機能は維持され、急速に破断しないように図2に示すような複雑な形状に設計されています。しかし、今後、さらに高性能化したブレーキディスクを開発するには、熱疲労を受けても劣化や損傷をしない、あるいはより少なくするという設計が必要になります。そこで、ブレーキディスクに見られる劣化状況を見てみましょう。まず、鋼製ブレーキディスクでは熱疲労により、鋼のミクロ的な構造変化が生じるようになって材質が変化することが示されてきました。材質変化の一例として、試験的に繰り返しブレーキ負荷を与えて表層の金属組織を観察した結果を図5に示します。ブレーキ前では長細い針状の形状をした組織構造を示しています。しかし、ブレーキ負荷を繰り返していくと針状の構造が微細な四角の組織に変化していることがわかります。一般的に、鉄鋼材料に歪と熱を繰り返し加えると材料組織は微細化することが知られています。このような材質変化は歪と上昇温度に依存します。現行の車両では雨や風などの影響を受けることからきわめて複雑な温度状態になり、さらに発生する熱歪も一定ではないので、材質変化を定量的に表現することは難しい状態にあります。また、材質変化の他に、ブレーキディスクの劣化では図6に示すような熱き裂があります。この熱き裂は熱疲労の応力や歪が素材の本来の特性である破断応力あるいは破断歪を超えた際に生じると考えられています。熱疲労では、温度サイクルに応じた応力が付加されますが、歪は内部に蓄積され、熱疲労の回数を加えていくと表層の熱歪も増加していくことが分かってきています。こ

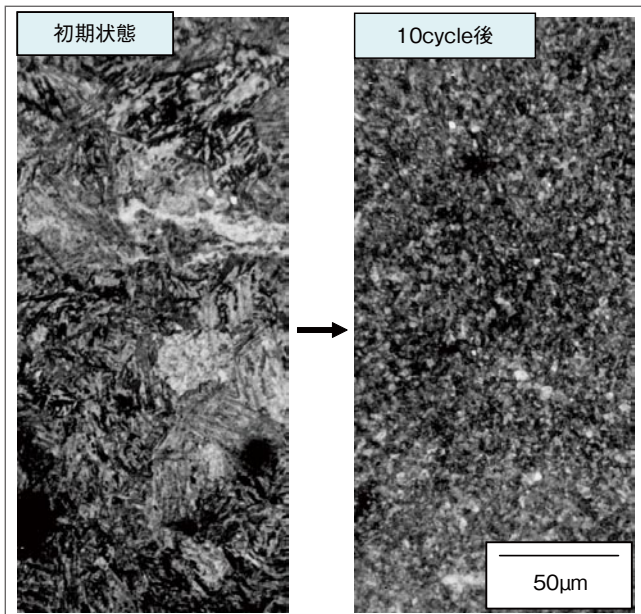


図5 試験的にブレーキ負荷を行った際のディスク表面の材質変化の例

のことから熱き裂は材質組織変化及び熱の相互作用で発生すると考えられます。ブレーキディスクの熱疲労に伴う劣化として材質変化と熱き裂を示しました。これら劣化の発生挙動は明らかにできましたが、材質劣化と熱き裂の相互作用や発生メカニズムについては今後の課題であると考えられます。

### ブレーキディスク設計

ブレーキディスクでは従来、摩耗と熱き裂の影響について検討され、さまざまなブレーキディスクが開発されてきました。ブレーキディスクの設計では、ディスクの全体としての特性では安定した構造・形状があります。一方、ディスクの材料としては、耐摩耗性、高熱伝導率、低熱膨張係数、高比熱、低弾性率、高強度、機械加工性があります。劣化要因である熱き裂に着目した設計において、構造・形状の検討を見てみます。

熱き裂の発生は表層と内部の板厚方向の温度差に伴う熱応力が原因であると考えられます。全体の特性では主に構造変更、すなわちディスクの板厚及びフィンの数等の形状変更が考えられ、形状を変えることにより熱を放出し、熱応力を緩やかにする構造にしていると考えられます。また、材質変更では要求特性を満たす鍛造型強じん鋼材が適用されています。現在適用されている鍛鋼ディスクは従来の鑄鉄製ディスクに比べて耐摩耗性等に優れるブレーキディスクであると言えます。鍛鋼ディスクでは摩耗に伴うディスクの取り替え寿命が減少し、従来の鑄鉄製ディスクに比べて発生する熱き裂の量は減少しました。しかし、微視的な亀裂の発生が認められ、今後の対策としてさらに熱疲労に

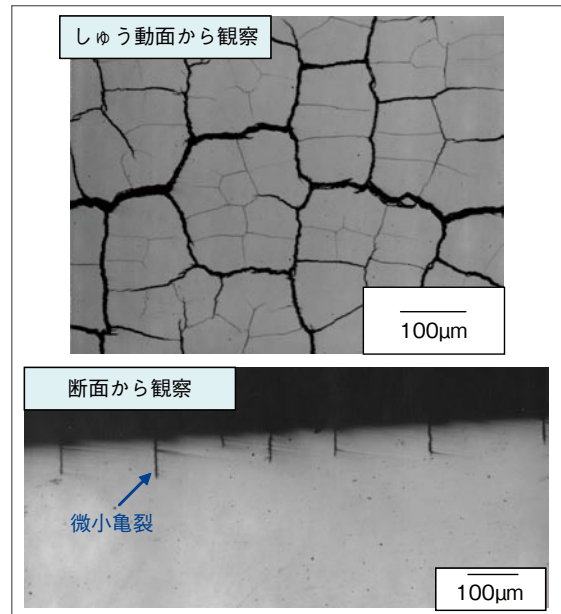


図6 ブレーキディスクに発生した微小亀裂の例

強いディスクの開発が望まれています。

一般的にブレーキディスクに見られる温度上昇は、輪重及びブレーキ初速度の2乗に比例すると考えられています。さらなる高速化やき裂対策のために肉厚増加を行うと、輪重増加が生じるためにさらに温度上昇が増加する方向になり、熱疲労しやすい方向に向かうと考えられます。また、熱容量の最小限化に対して冷却効果を向上させるために冷却フィン数を増加させると部分的な冷却効果が高まって温度勾配をさらに高めるために逆効果となります。このことから今後は熱伝達を低減した構造と軽量材料の適用が必要であると考えられます。

### おわりに

以上にブレーキディスクの熱疲労について簡単に述べてきました。これまで、ブレーキディスクの熱疲労対策として耐熱材料の積極的な使用や形状変更が行われてきました。また現在、温度上昇を抑えるために軽量化が重要視されるようになり、アルミニウム合金やセラミックス複合材を適用したブレーキディスクなどの開発及びその適用可能性の検討が進んでいます。しかし、ブレーキディスクの開発は容易でなく、時間もコストも要するようになります。まずは、ブレーキディスクの熱疲労を定量的に把握して適切な交換を行うことが必要でないかと考えられます。そしてそのかわり、新材料の適用、熱容量軽減、材質変化の可否などを含めブレーキディスクの材料設計指針をさらに検討することが必要になると考えられます。RRR