

目に見えない熱を探る

森 久史
材料技術研究部
(主任研究員)

辻村 太郎
同
(主管研究員(前部長))



もり ひさし つじむら たろう

はじめに

人間が感じる「熱さ」は温感感覚であり、一般的に「温度」と呼ばれるものです。温度は、物体の暖かさ・冷たさを示す尺度であって物理で述べる熱とは異なると考えられています。では物理的な概念で言う熱というのはどのような概念なのでしょう。物理的な概念での「熱」は、高温の物体から低温の物体へ移動するエネルギーの流れや分子や原子の運動に関連するエネルギーの一つの形態を表しているものであると考えられています。したがって、熱を探るには、エネルギーの流れやエネルギー変化、例えば温度変化、熱量変化などを測定すれば良いということになります。現在まで温度計やサーモグラフィ等の様々な方法が適用されており、また近年、光科学などの発展もあって先端的な測定方法も提示されてきています。

鉄道では、ガスタービンや火力機器とは異なり、熱に対する問題については少ないように思われます。しかし、台車部品、すり板、変速機、電動機等の機能低下原因の多くが熱の影響であると考えられており、部品の熱劣化に対する使用状態の良否判定、その判断に基づく走行時の温度上昇の防止対策等、鉄道においても熱を探ることは大変重要な課題であります。そこで、本節では熱及び熱の測定概念について述べ、鉄道部品に対する熱の影響と熱測定及び熱対策の幾つかの例を説明しようと思います。

熱とは

熱を辞書で調べて見ますと、「物体間での仕事の中で、物体移動以外のエネルギーの移動形態を熱という」と書かれています。簡単な例を挙げますと、水の中に酸を入れた状態、紙に火をつけた状態あるいは消しゴムでノート上に書いた文字を消す状態が挙げられます。それぞれの例で見ると、水の中に酸を入れた場合、酸が水と反応して異なった成分に変化します。すなわち、酸と水という状態から異なった混合液という状態に移り、活性化エネルギー

が変化します。また、紙に火をつけると、紙の成分と酸素が反応分解し、ガスとすすが発生します。この場合、紙が燃えカスとガスに状態が変化し、分解エネルギー、放射エネルギー、活性化エネルギーが変化します。さらに消しゴムでノート上に書かれた文字を消した場合、ゴムと紙との間に生じる摩擦によってゴムが著しく減少します。このゴムの減少で構造変化が生じるとともに運動エネルギーとポテンシャルエネルギーが変化します。上のそれぞれの例でそれぞれエネルギー状態が変化しているために熱が発生し、酸の場合には反応熱、紙の燃焼では燃焼熱、消しゴムの場合には摩擦熱というように熱が定義されます。

この「熱」というものをもう少し微視的な立場から見よう。図1に物質を構成する原子モデルを示しました。物質中の原子同士はバネで結合されていると近似されます。各原子は、常に反発力と引力との作用で微視的に位置の状態を変化させていますが、状態変化は原子レベルの範囲であり、物質中の原子は見かけ上静止しているように

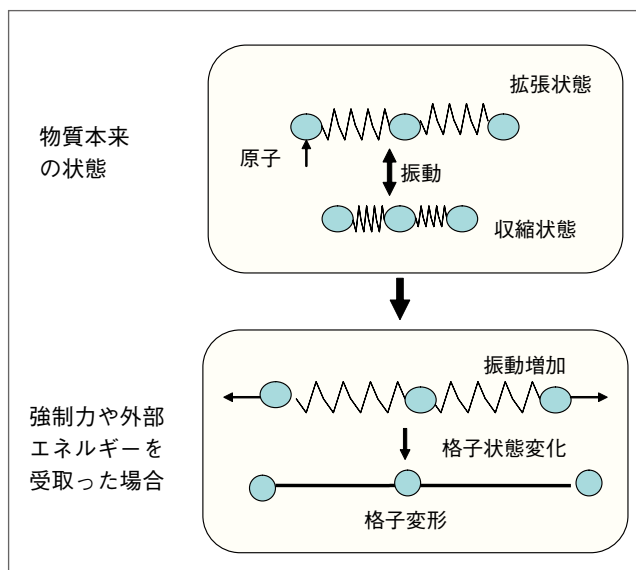


図1 微視レベルで見た熱の説明

表1 代表的な熱定数とその単位

熱量	$J = \text{cal} = W \cdot s = A \cdot V \cdot h = N \cdot m$
比熱	$J / \text{Kg} \cdot K = \text{cal} / \text{Kg} \cdot K$
熱伝導率	$W / m \cdot K = \text{kcal} / m \cdot h \cdot K$
熱伝達率	$W / m^2 \cdot K = \text{kcal} / m^2 \cdot h / K$
熱膨張	K^{-1}

W：電力量、s：秒、h：時間、A：電流、V：電圧、
N：力、m：長さ、Kg：重量、K：温度

見えます(基準エネルギー)。この基準エネルギーの状態にある原子構成に対して力、変位、電磁力等を外部から与えた場合、運動、ポテンシャル、活性化、反応、弾性、電磁気、放射等のエネルギーが原子の運動に影響を与えるようになり、原子振動の増加によって原子間の反発力と引力との平衡が破れ、原子同士の衝突が増加します。さらに外部エネルギーが増加すると、原子で構成されている物質が、ミクロ的に構造変化したり、永久変形したり、磁気安定性が破れたりとも構造とともに物質のエネルギー状態が変化します。熱とはこのような構造変化と物質の状態エネルギーの変化を表していると考えられます。

熱はエネルギー変化であると言えますがそれは抽象的な概念であり、実用上においてはエネルギー変化を定量的に表す必要があります。探り方は後ほど述べますが、熱を定量的に表すパラメータとして、表1に示すように、熱量、比熱、熱伝導率、熱伝達率、熱膨張率などがあります。比熱とは、ある物体の温度を1℃上昇させる熱量、熱伝導率とは、物質内の単位時間内に流れる熱量、熱伝達は物質と外部との熱量差、熱膨張は1℃あたりの歪量のことを表します。このようなパラメータを単位の次元解析から見ますと、それぞれ、力や電気、時間、温度との関係に換算することができます。温度は沸点、融点、凝固点の物質構造の変化を表すパラメータであると考えれば、熱は外部エネルギー変化と構造変化の両方を表しているということが分かります。また、熱のパラメータには電圧、力などの外部エネルギーを表す次元を有していることから、熱は力や電気、温度などを測定して探ることができると言えます。

熱を探るための重要な約束事

熱を探るということは、エネルギー変化の一部分を電気や機械、光などを使って調べようとするものであり、いわば、自然の流れであるエネルギー変化というものを、何ら

表2 熱測定方法

直接測定	カロリメータ、サーモグラフィー
間接測定 (従来)	放射温度計、圧力温度計、熱電対温度計 バイメタル温度計、光温度計
間接測定 (先端)	レーザフラッシュ、音響効果、赤外線、 サーモリフレクタンス

間接測定とは、温度や電圧などを介して測定する。

かの形で切り取って定量化するという作業になります。その切り取り作業を行うには、2つの約束事を守らなければなりません。2つの約束事とは熱力学第2法則と熱量保存則です。熱力学第2法則とは「熱とは必ず高温の物体から低温の物体へと移動し、低温の物体から高温の物体へと自発的に熱が移動することはありえない」という約束であり、変化は必ず高いポテンシャルから低いポテンシャルにしか生じないという方向性を持つということです。一方の熱量保存則とは、「熱が移動した際に外部に熱が流出しなかったならば、高温の物体が失った熱量と、低温の物体が接触した物体から得た熱量は等しい」ということです。熱量保存則からすれば、状態変化がないということは、見かけ上のエネルギーが移動せず、常に同じ温度に保たれているということの意味し、熱が発生しないということが理解できます。

熱を探る方法

熱を探る方法には様々な手法がありますが、主な手法と先端的な手法を表2に示します。探る方法は、部材や構造物などの状態で探る場合と素材レベルなどで探る場合の2つに大別されます。

部材や構造物などの状態で熱を探る場合、直接カロリメータを用いて測定する方法と電気や力を原理とした温度計を用いて、温度差から熱を定量的に測定する方法もあり、その温度計には放射温度計、圧力温度計、熱電対温度計、光温度計、バイメタル温度計があります。また反射及び放射熱をセンサーで関知して熱量を測定するサーモグラフィーなどもあり、極めて多くの手法が存在します。さらに近年では、光学的検出器の開発が進み、レーザフラッシュ(レーザを照射)、音響効果(音波照射)、赤外線照射、サーモリフレクタンス(光学)などの物理的手法を応用した熱測定等が検討されるようになってきました。これら新しい

熱測定手法は、測定物にレーザや音波、赤外線等を照射して、その反射を検知して測定を行う原理であり、従来の、測定物の温度を受け身的に感知しているのと異なっています。今は、実際の部材や構造物の熱測定では温度計を用いた測定がほとんどであり、超高温場の場合には輻射温度計が用いられ、広域な熱量測定ではサーモグラフィーが用いられているのが現状であり、今後の新しい測定手法に期待するところは大きいです。

一方、材料開発等の素材レベルでの熱量測定はカロリーメータが用いられ、動的並びに静的測定が行われます。動的熱測定では、物質を等しい速度で温度上昇あるいは温度降下させた際に生じる相構造、すなわち、変性や相転移、融解などの状態変化などの熱量を測定する方法です。静的熱測定では、一定温度条件下で2つ以上の物質を混ぜ合わせた時に生じる反応熱、浸漬熱、吸着熱、溶解熱、混合熱

などを測定する方法です。

動的測定は主に構造変化に着目した熱測定であるのに対し、静的測定は構造変化と反応エネルギー変化の両方に着目した熱測定であると言え、材料開発の目的に応じて測定方法が選択されます。

鉄道における熱の事例

鉄道では、ガスタービンや火力機器とは異なり、熱に対する問題については少ないように思われます。しかし、台車部品、すり板、変速機、電動機等の機能低下原因の多くが熱の影響であると考えられており、鉄道においても熱を探ることが重要です。例えば鉄道車両を見てみましょう。鉄道車両を構成している主な機械部品は金属材料から構成され、設計上から合わせて材料設計されているために耐用寿命は保証されているはずですが、応力集中、疲労、摩耗、熱影響などによって部品が劣化することが時折見られてきました。中でも車輪やすり板や軸受、ブレーキディスク、歯車、変速機などの摺動部品では摩擦熱、電動機等の電気機器部品では電気抵抗によるジュール熱の影響によって劣化し、劣化に熱が影響していることがわかります。図2にはブレーキディスクの摺動面と軸受内輪の外観を示します。ブレーキディスクでは表面に黒い斑点上の模様が観察されます。この黒い斑点状の模様はヒートスポットと呼ばれ、摩擦熱を受けていることを表しています。このヒートスポットの中心とヒートスポット未発生部分の表面状態及び金属組織を観察したのが図3ですが、ヒートスポット未発生部分では表面に何ら特徴は見られず、その状態での金属組織は針状であるのに対し、ヒートスポットの中心では熱を受けて表面に微視亀裂が発生し、金属組織は微細化しているのがわかります。また軸受内輪では、テンパカラーと呼ばれる色の変化が観察されます。このテンパカラーは、内輪表面に施されている、りん酸塩皮膜の皮膜が酸化している状態であり、表層が変質して発生していると考えられます。そのほかに、車輪にも制輪子との摩擦でブレーキディスクに見られるような熱き裂の発生も挙げられます。このように、熱を受けた場合には材質変化やき裂が発生して劣化するということがわかり、鉄道部品を開発する

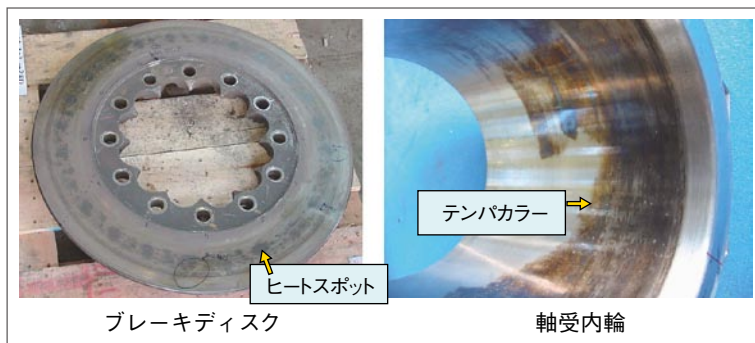


図2 鉄道部品における熱影響の発生例

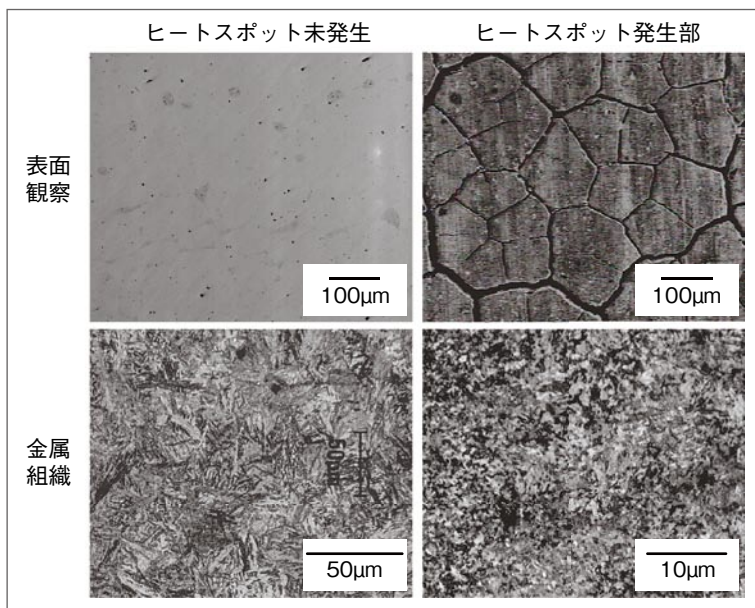


図3 ブレーキディスクのヒートスポット未発生部及び発生部の表面構造外観と金属組織

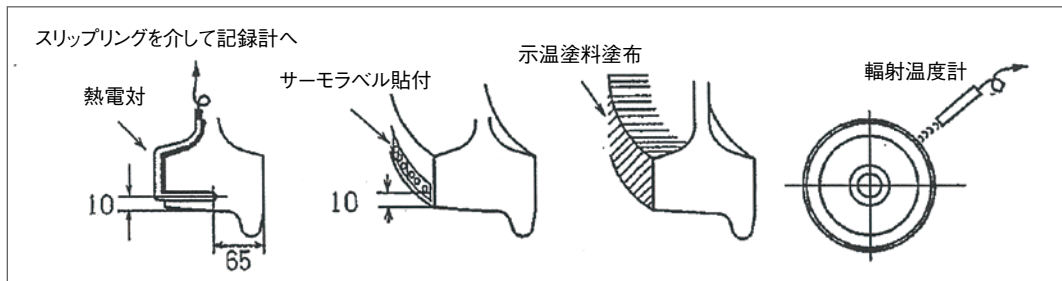


図4 車輪での温度測定方法の例

際においても、適用部位や適用素材において熱を探ることが重要になると考えられます。

鉄道部品で熱を探る

上述したように、鉄道部品においても、部品の熱測定や適用素材の研究開発に熱を探ることが必要になります。しかし、鉄道分野においては、現場の制約や走行時の動的測定等の問題から困難であり、当然のことながら、カロリメータを用いた直接測定は不可能です。また、図3で示した、ブレーキディスクのヒートスポット状態や金属組織、テンパカラーからの温度推定は、ヒートスポットの大きさ、発生場所、形態などのばらつき等が大きく、さらに基礎的なデータの整備を要するために、「熱が発生した」という定性的な判断は可能になるものの、定量的な判断は困難であり、さらに基礎的なデータを蓄積することが必要となることから難しいというのが現状です。そのため、鉄道分野における熱測定は主に熱電対温度計やサーモラベル、輻射温度計を用いた手法で評価されます。

図4は車輪での測定方法を示します。熱電対での測定は、部品に穴を開けて熱電対を通し、スリップリングを介し、熱電対の電圧差を温度として出力する方法です。サーモラベルは、上昇温度とともにラベルが変化するものであり、示温塗料は、サーモラベルと同様に温度毎に異なる色に変化するものです。輻射温度計は、輻射熱の反射をセンサーで取り込んで解析を行い、温度上昇を数値的に表す方法です。熱電対と輻射温度計は数値による定量的評価、サーモラベルや示温塗料の場合には、初期との定性的評価で熱の発生を判断することになり、現状で用いられているのは主に熱電対による手法です。

このような対策は鉄道部品の中でも強い摩擦を受ける部品等で重要です。著しい摩擦が生じる部品、特に軸箱や歯車箱などでは、材質劣化が生じる以前の段階で当該部品の熱を検知して状態の良否を判断し、その状態良否の判断を

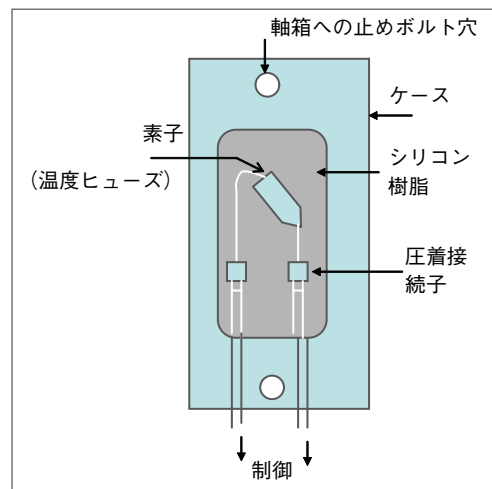


図5 軸箱に設置された軸箱過熱防止装置の軸温スイッチの構造

基準にして危険状態になることを防止するための過熱防止装置等が適用されています。図5は軸箱に設置された軸箱過熱防止装置の軸温スイッチの構造を示します。このスイッチは焼き付き等の温度上昇の監視のために軸箱に取り付けられており、油温が軸受けの焼き付き等で異常な温度に上昇した時に動作して、システムを通じて運転台故障表示を点灯し、非常ブザーを鳴動させ警報を出すシステムです。今後は、このような対策を講じることにより、熱を探り、そして熱に対して安全な構造を考えることが重要であると考えられます。

おわりに

本節では、目に見えない熱を探ると言うことで、熱を中心に基礎的な整理から鉄道の熱の影響までを簡単に述べてきました。今後、車両の高速化がさらに検討されるようになれば、現状よりも熱影響は増加することが見込まれます。そのため、新しい熱測定の導入や過熱防止装置等のより一層の検討を加える必要があると思います。[RRR]