



研究ノート

変動する温度の測定技術

*香 月 正 司

現在、人類が消費するエネルギーは、大半が燃焼によってまかなわれているし、最初に火を利用ようになってから5百万年以上になるといわれる。それにもかかわらず、火炎中で起っている諸現象は非常に複雑で、われわれがそれらを完全に知るには至っていない。かつては燃焼設備の開発や運転に当っては、入出力を管理する技術だけでもかなりの成果を挙げることができたが、エネルギー節約や大気汚染防止が叫ばれるようになった近年においては、火炎中の諸現象を、より詳しく知らなければ十分に効果が上らない状況になっている。

燃焼状態を知る手段の一つとして、熱電対を利用した温度測定が広く普及しており、大規模燃焼設備のシステム制御に組込まれているのは衆知の通りである。しかし、一般に用いられる保護管付き熱電対では、極めてゆるやかに変化する温度、もしくは、すばやく変動する温度の平均値しか促えることができない。たいていの工業用火炎では、未燃混合気と燃焼ガスが入り乱れた乱流状態を形成しているので、このような火炎中に上述の熱電対を挿入しても、真の温度変動は測定できないことになる。しかしそのような変動の測定が、ほんとうに必要なのだろうか。たとえば、現在問題になっている窒素酸化物の大半は1700℃以上の高温で急速に生成され、それ以下の温度範囲での生成量はほとんど問題とならないことが分っているが、もし1700℃の燃焼ガスと200℃の未燃混合気が入り乱れて半々に存在する場所に、先の熱電対を挿入すれば、われわれの得る温度は約950℃でしかない。この測定値しか持たないわれわれは、1700℃において生成される窒素酸化物の量を予測することも、理解することも不可能となるわ

けである。

熱電対の応答が、すばやいガス温度の変化に追従できない理由は、熱電対が熱容量を持つためであり、保護管を付けた場合にはさらに大きな熱容量が加わることになる。したがって、熱電対の応答速度を上げるためには、極力細い熱電対を用いなければならない。現在われわれの研究室で用いている熱電対は、素線径25 μmのPt/Pt-13% Rhに薄いシリカ被覆を施したものである。これでもなお熱容量が存在するため、その応答時定数は8~10 msとなる。したがって、図1に示すように、ガス温度の変動を矩形波と仮定すると、10 Hz程度の変動に対してはそこそこの追従を示すものの、500 Hzになると、やはり平均温度付近で小さな変動を示すに過ぎないことが分る。

いま、熱電対は非常に細いので、放射および伝導による熱損失が無視できると仮定すると、

$$\frac{\rho c V}{\alpha s} \frac{dT_j}{dt} = T_g - T_j \quad (1)$$

ただし、 T_g , T_j はガスおよび温接点の温度、 α は熱伝達率、 ρ , c , s , V はそれぞれ熱電対素線の密度、比熱、接点表面積、接点体積である。ここで $\rho c V / \alpha s$ が温度に無関係な定数とすると、熱電対の応答特性は一次遅れであることが分る。 $\rho c V / \alpha s = \tau_j$ とおけば、

$$T_g = \left(1 + \tau_j \frac{d}{dt}\right) T_j \quad (2)$$

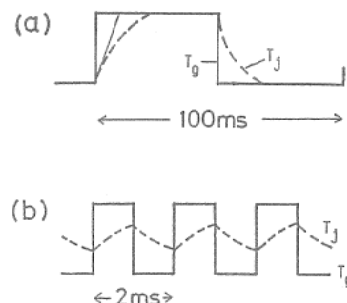


図1 ガス温度変化に対する熱電対温度の応答性

*香月正司 (Masashi KATSUKI), 大阪大学, 工学部, 機械工学科, 助教授, 工学博士, 燃焼工学

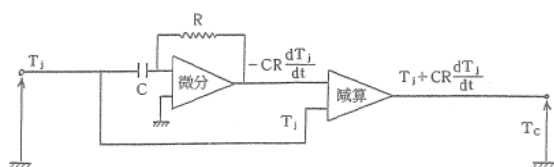


図2 一次遅れ補償の原理

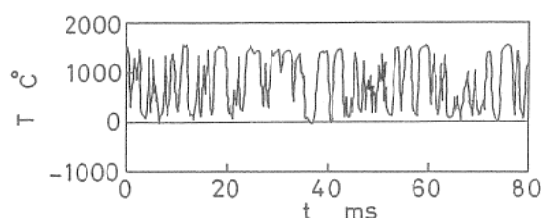


図3 乱流火炎内の温度変動

となる。

図2に示すような、微分回路および減算回路からなる一次遅れ補償回路を構成すると、回路の補償時定数 τ_c が τ_j に等しいとき、入力 T_j に対して得られる出力 τ_c は、ガス温度 T_g に等しくなる。すなわち、上述の極細熱電対にこの補償回路を組み合わせることにより、かなり正確な変動温度の測定が可能となるわけである。

標準的なブンゼンバーナによるプロパン-空気乱流予混合火炎（当量比0.7，平均流速5 m/s）において測定した例を図3に示す。温度はほぼ室温と断熱火炎温度の間を激しく変動しており、時間的には1～3 ms程度の間隔で変動している様子がよく分る。したがって、平均温度としては約800℃，変動幅は±750℃，周波数は数百Hzということになる。この温度変動の確率密度分布を調べて見ると、図4に示されるような双峰性分布が得られる。すなわち、図3に見られる変動の大部分は、室温に近い低温か、断熱火炎温度に対応する高温によって占められており、ガス温度が通常の鈍感な熱電対によって得られる平均的な温度をとる確率は極めて低いことが分る。

この補償回路付き熱電対も決して万能ではない。補償回路の雑音のため、高周波数領域でS/N比が低下し、補償可能な周波数は約1 kHz程度である。したがって、もしそれ以上の速い

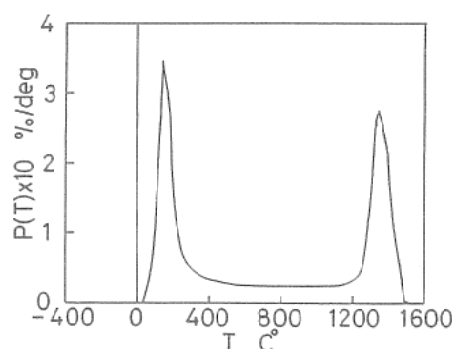


図4 乱流火炎内の温度変動の確率密度分布

変動が存在すれば、十分な追従性を期待することはできなくなる。また、放射伝熱が支配的な場においては、上に述べた一次遅れの条件が成立しなくなる。さらに、極細線に強度が期待できないことや、熱電対そのものに測定上限があるなどの理由により、測定対象が限定されてしまう。

工業的には、変動温度の測定装置はあまり利用されていないし、市販品もあまり見受けられなかったが、最近、アキュファイバー310（日本鉱業）と呼ばれる光ファイバー利用温度計測システムが発表された。これは感熱部であるサファイヤロッド先端に蒸着された金属フィルムの熱容量が極めて小さいため、高周波数でもガス温度に追従して、その温度に対応した熱放射を発するという原理に基づいている。この放射エネルギーはサファイヤから光ファイバーを通して信号として取り出される。このシステムでは、最高50 kHzまでの温度変動の測定が可能といわれ、興味深い。

これまでに述べた方法は、火炎中にセンサーを挿入しなければ測定ができないが、理想からすれば、非接触測定によって変動温度を知ることが望しい。最近ではレーザー光を利用したいくつかの測定技術が開始され、試用されているが、いずれも高度の技術と費用を必要とするものである。安易に取扱える工業用測定器として利用できるようになるには、まだかなりの時間がかかるであろう。