

一過性の温度測定のための薄フィルム・ゲージおよび同軸熱伝対

概要

以下に記述されるゲージは、高度に一過性の表面温度（たとえば風洞テストの衝撃装置、ピストンエンジンの一サイクル中のシリンダー壁の温度変化、あらゆるタイプの工業的な利用、研究的な仕事などの高度に一過性の温度を記録することが重要な場合）を測定することができます。ゲージの反応時間はマイクロ秒の範囲であることが証明されています。これは実現可能な反応時間を規定する測定ラインの電子装置（増幅器、A/D 変換器など）のダイナミックな能力に強く依存することに注意することが重要です。

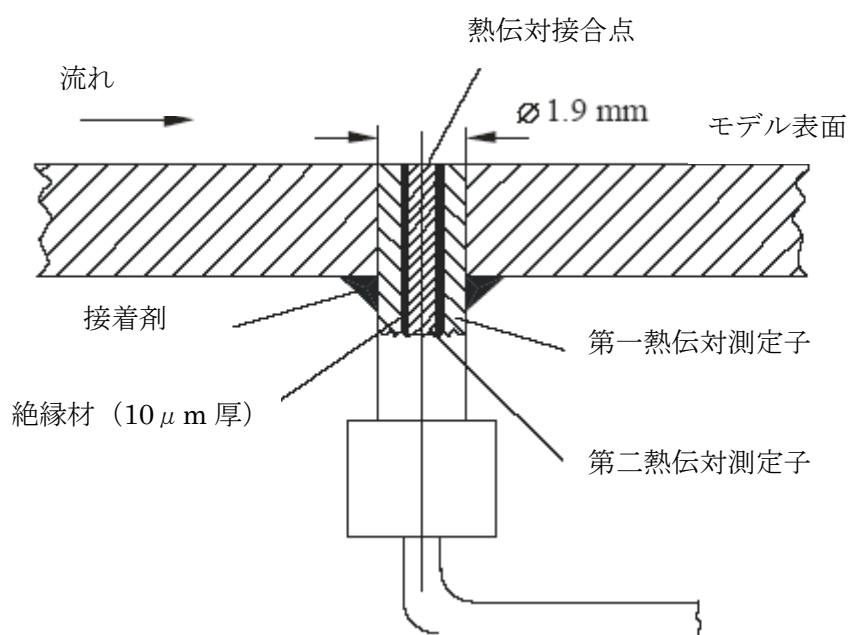
もちろんこのゲージは時間経過に対し一定の温度を測定するのにも適していますが、一過性の測定にその優れた性能を発揮します。物理的に与えられた高度に一過性のプロセスでは、すべてのゲージは測定点の時間に依存した温度を代表し、これはゲージの周囲の加熱あるいは冷却環境とおおきく異なっているかもしれません。たとえばピストンエンジンではフラッシュ壁に装着された温度ゲージは、シリンダー内の平均ガス温度の変化ではなく、その反応時間に応じてシリンダー壁の温度変化を記録します。測定されたゲージの経時表面温度およびその熱的性質によって、ゲージに温度変化を与えた加熱環境からゲージへの経時ヒート・フラックスを再計算することができます。これは半無限体への熱伝導理論によって行われます。典型的には約 10 ミリ秒のようなゲージを設計することによって、半無限厚体の要求は満足されます。減少ヒート・フラックスの方向は、ゲージの測定表面に垂直になります。

一般に薄フィルム・ゲージは熱伝対より非常に高感度です。これは温度変化を 0.1K、ヒート・フラックスを 0.5W/cm^2 のオーダーで測定可能です。熱伝対はこれより一桁の位で低感度ですが、そのデザインから堅牢で操作しやすく、過酷な環境条件と非常に大きなヒート・フラックスに耐えることができます。条件によっては薄い蒸着金属フィルムあるいは金属スパッター・フィルムは破壊されるかもしれません。たとえば流れに乗った小さな粒子の衝撃やあまりに大きなヒート・フラックスが生じるフィルム内の大きな熱歪が破壊を生じるような場合です。したがってきれいな環境下での比較的低いヒート・フラックスに対してフィルム・ゲージが推奨されます。一方過酷な条件化の大きなヒート・フラックスに対しては同軸熱伝対がよい選択になります。

同軸熱伝対

タイプ E（クロメル／コンスタンタン）およびタイプ K（クロメル／アルメル）の同軸熱伝対が、さまざまな標準サイズ（長さ、直径）で用意されています。ひとつの熱伝対が、典型的には厚さ 10 ミクロンの電気絶縁体を間に挟んで二番目の熱伝対の上から据え込まれ

ているそのユニークなデザインがその特徴です。急激に変化する表面温度を正確に測定することが重要な壁を貫通して熱伝対を取り付けることができます。場合によっては壁の温度を直接測定することが必要です。このような場合には測定子の材料の熱的性質（ $\rho c k$ 値）が周辺の壁と極力近くなければなりません。このことは、同軸熱伝対を使って表面温度を速く測定することによって伝導熱量を決定するためには必要ではありません。通常熱伝対は測定子の後部を壁に接着することによって固定されます。ネジによって固定することもでき、高温での操作の場合に推奨されます。

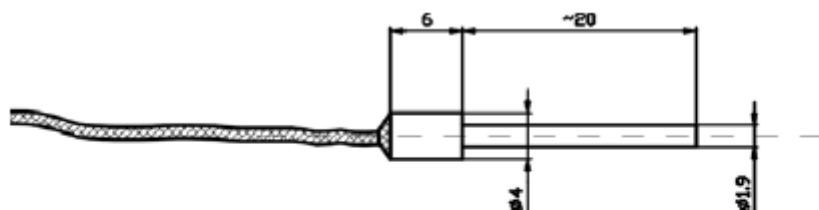


同軸熱伝対のセットアップと取り付けの原理

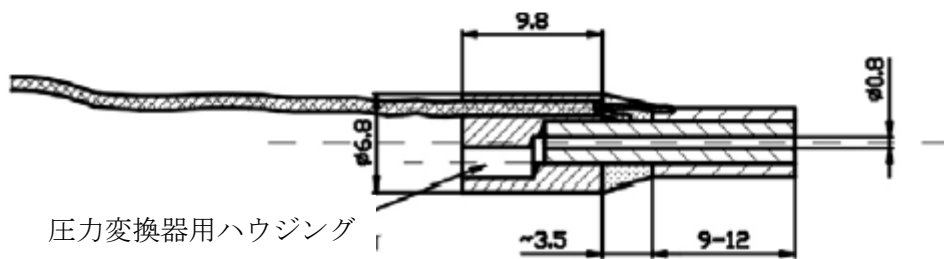
もちろんテスト壁の指定の位置の内部温度を測定するために、熱伝対を「貫通していない」穴に設置することもできます。この場合、熱伝対と周囲の壁との間に電気的な絶縁材は必要ありません。

通常、サンドペーパーで熱伝対の前面を研磨することで接合点の形を整えます。このことによって生成する微小な擦り傷が熱伝対のアクティブな接合点を作ります。これは非常に少しのアクティブな量を表し、短い反応時間を得ることができます。前面の研磨によってカーブした壁に完全に合致することが可能となり、熱伝対と壁との間に測定の妨げとなる段や溝がなくなります。熱伝対の接合点を研磨することでゲージは非常に堅牢になり、過酷な環境での使用に適したものとなります。たとえば、流体に運ばれてきた高速の粒子の衝撃は熱伝対の操作に何の影響も与えません。失敗した場合には、前面を再び研磨して熱伝対をアクティブにします。

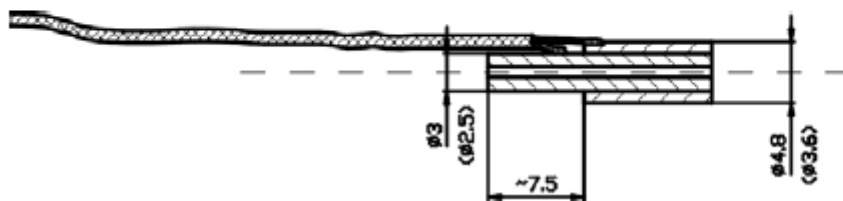
反応性の媒体などの特別な場合には、熱伝対の前面を 1 ないし 2 ミクロンの厚さの真空蒸着金属で覆うこともできます。通常クロームがこのコーティングに最適ですが、条件に応じて他の材料を使うこともできます。



標準モデル KL



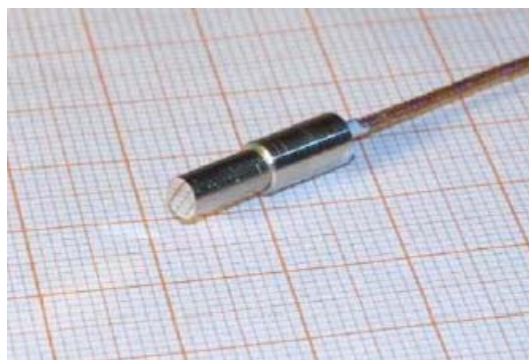
圧力測定用アダプタ付のモデル MI



アダプタなしのモデル MI



モデル KL



圧力タップなしのモデル MI



圧力タップなし、取り付け用ネジ付のモデル MI 圧力タップ、アダプタ、圧力変換器付のモデル MI

Thermocouple	Outer diameter [mm]	Pressure tap	Length of active part [mm]	Overall length [mm]
KL	1.9	no	20	26
MI with adapter	4.8	yes	12	25
	3.6	yes	12	26
MI without adapter	4.8	possible	12	20
	3.6	possible	12	20

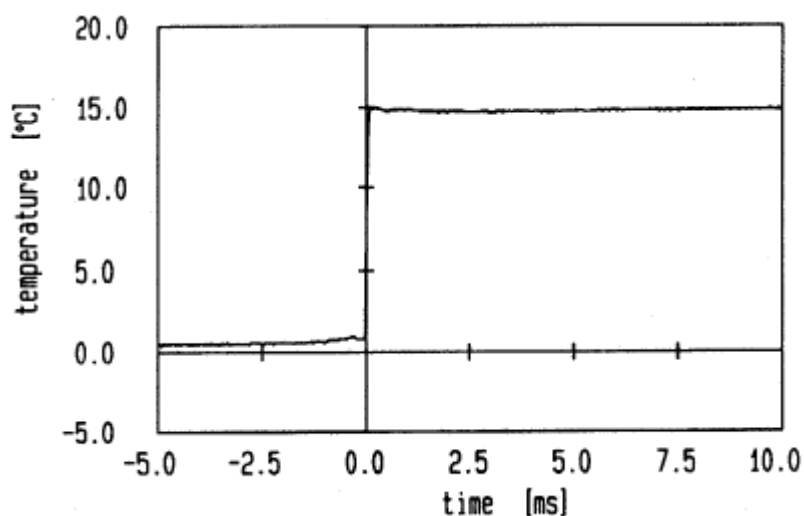
顧客の特別な要求に合うように、熱伝対の設計を変更することもできます。

熱伝対モデル KL の標準径は 1.9mm です。長さは典型的なもので 20mm ですが、要望に応じて変更できます。ワイヤを熱伝対に接続する部分を保護するために直径 4mm のスリーブが後部にあります。

多くの場合に表面温度を測定すると同時に、その近くの場所の圧力を測定する要求があります。この目的のためにモデル MI は熱伝対の中央部を貫通して圧力タップが開けられています。この圧力タップはその後端部でアダプタを解して通常の圧力変換器に接続されます。典型的な場合、タップの直径は 0.8mm（他の径も可能）で、アクティブな熱伝対の径は 3.6mm または 4.8mm です。これらの寸法はインパルス装置の操業要求を満足するために、熱伝導の半無限体理論によって選ばれています。すなわち、最大測定時間 10 ミリ秒の間に、圧力タップや壁と外側の熱伝対との継ぎ目から現れる、半径方向へのヒート・フラックスによって温度測定が乱されることがありません。これらの端子はショック・トンネルでテストされ、単一の熱伝対および圧力ゲージとの間で、温度信号も圧力信号も差がないことが確認されています。

校正

ヒート・フラックスを決定するために熱伝対の熱力学特性 ($\sqrt{\rho c k}$ 値) がわかっていなければなりません。この値は個々のゲージごとに接触法を用いて校正されます。これは二つの半無限体が突然接触した場合に、一定時間後に両者の初期温度とそれらの $\sqrt{\rho c k}$ 値によって定まる定常温度になるという、よく知られている熱拡散問題に基づいています。下の図は冷たい熱伝対を熱い液体に浸したときの、初期温度から一定の接触温度になるまでの急速な温度上昇を示しています。

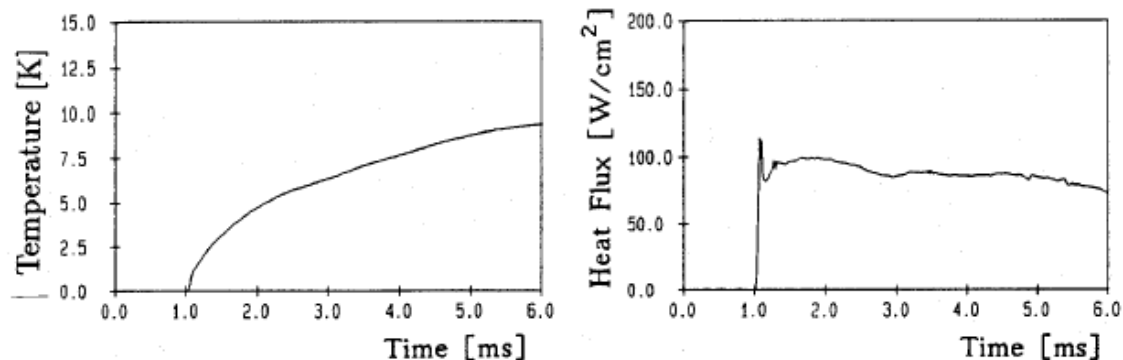


同軸熱伝対を熱い液体に急速に浸した場合の温度上昇の信号

製作された熱伝対の温度に対する感度は定期的にチェックされています。これは、それぞれのタイプ (E および K) について公開されている標準データとおなじであることが分かっています。

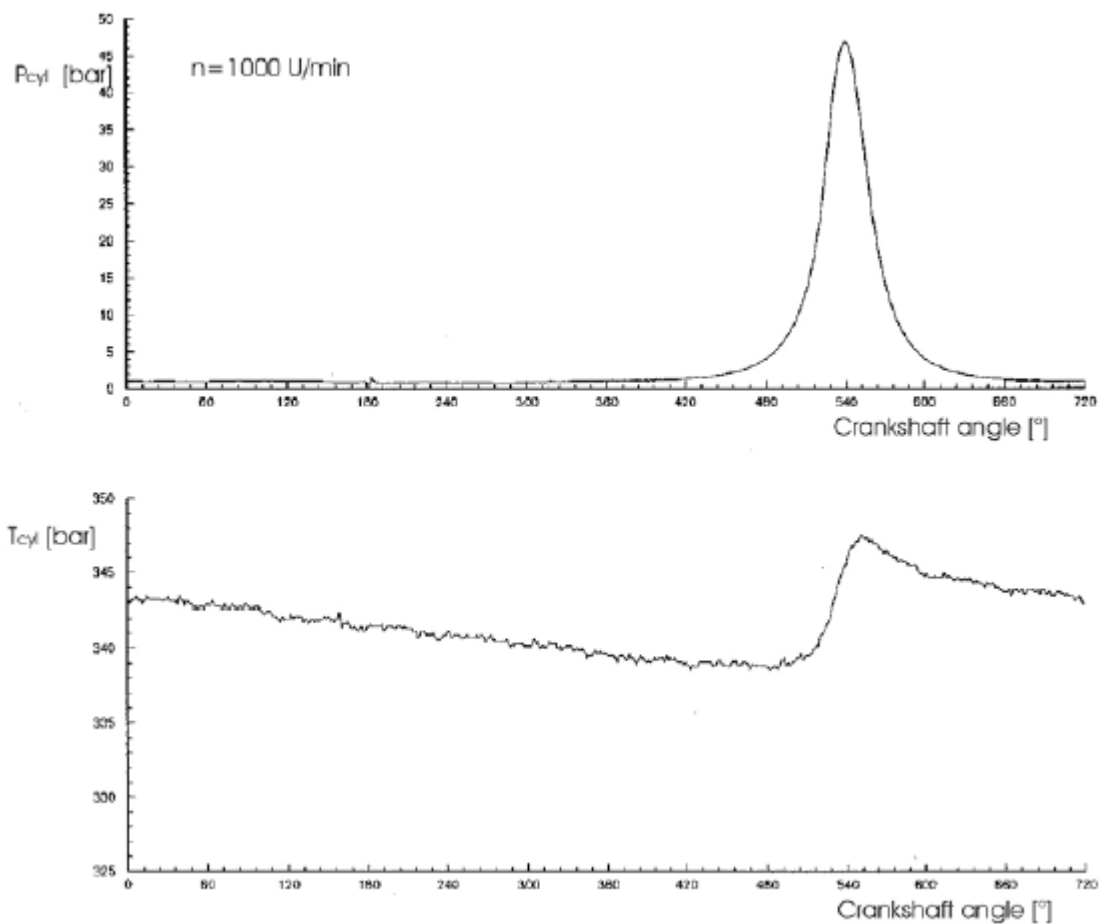
使用の例

下の図は風洞モデルに設置され、ショック・トンネル内の極超音速流下でテストされた同軸熱伝対の温度信号を示しています。



この場合、流れは $t=1\text{ms}$ の時点で始まり流れによる熱伝導流によってモデル表面の温度が継続的に上昇していることが明らかです。流れ開始時のヒート・フラックスが階段状に上昇していることが、この技術はマイクロ秒のオーダーの分解能でのヒート・フラックスの時間解析を可能にすることを見事に示しています。

研究目的で、駆動用ピストンエンジンのシリンダー内壁表面の温度変化を測定するために用いられています。下の図は研究目的の駆動用エンジンのシリンダー内の圧力とシリンダー表面温度をクランクシャフトの角度（分解能 1000min^{-1} ）の関数として示しています。期待されているように、温度信号は圧力信号を時間遅れなしに追いかけて上昇しています。

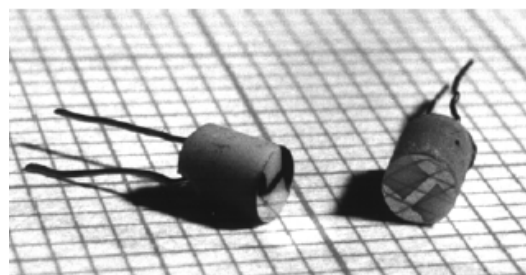
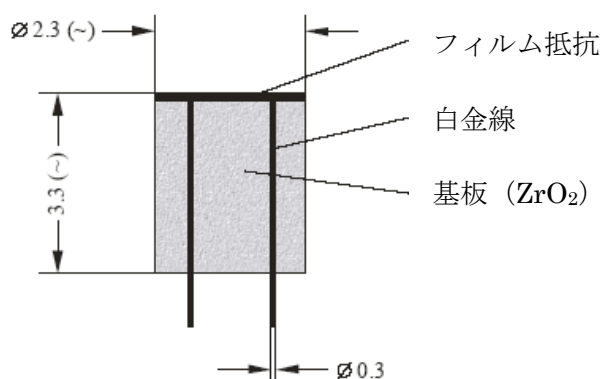


典型的な工業的な用途としては、薄いプラスチックのフィルムを溶接する機械の溶接ダイの表面温度測定があります。高い感度の測定を必要とする用途に、このゲージは適しています。0.1K のオーダーの表面温度変化を、マイクロ秒の反応時間で測定することができます。320K を超える表面温度の場合には較正ファクタの温度依存性を考慮する必要があります。

ます。高エネルギーの粒子衝撃のようなフィルムを破損する可能性のある、過酷な環境条件にはこのゲージは適しません。

典型的なゲージの直径は 2.3mm で、長さは 3.3mm です。二本の白金線が基板に焼結によって埋め込まれています。後端に、電源供給と測定中の薄フィルムの抵抗変化を検出するためのワイヤが半田付けで固定されています。この技術は、基板の外側の円筒状の表面に沿って薄い導線で薄フィルムに電氣的な接続をしようとするときに発生する問題を根本的に減少します。

操作中には、薄フィルム温度計には 7ma から 10ma の定常的な電流供給が必要です。測定中に発生する基板の遷移表面温度が薄フィルム全体にわたっての電圧変化を生じ、これが基板表面温度の直接測定になります。薄フィルム温度計の理論の中では、薄フィルムは基板表面温度に何の影響も与えないと仮定しています。



センサーのセットアップと完成したセンサー

R_0 を薄フィルムの測定前のオーム抵抗とした場合、抵抗値は次のように変化します。

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T_s)$$

ここで、 α は温度感受性を示します。この結果電圧変化が生じ、それが表面温度の時間変化と直接比例します。

$$\Delta T_s(t) = \Delta u(t) / I R_0 \alpha$$

個々のゲージについて、温度感受性と熱特性 $\sqrt{\rho c k}$ の較正が、ひとつずつ行われます。試験体への取り付けは接着によって、あるいはアダプタを用いて行われます。定電流供給あるいは一貫した電流供給のついた特別な増幅器は、ご要望に応じて用意されます。

温度信号からヒート・フラックスの決定

温度信号からのヒート・フラックスの決定は、多くの標準的なテキスト・ブックに述べられている半無限体への一次元熱伝導の理論に基づいて行われます。これは、測定時間内に

理想的な条件でセンサーに侵入する熱パルスは、センサーの後端の温度に影響を与えないという仮定に基づいています。下に与えられる計算式は、半無限体の仮定が有効である限り、同軸熱伝対にも、薄フィルム温度計にも適用できます。これから熱伝対の最大推奨測定時間は 20ms、薄フィルムの場合は 100ms が得られます。これはゲージがヒート・フラックスを決定するために用いられる場合に限り有効です。定常的なあるいは非常にゆっくり変動する温度を測定する場合には、測定時間に関しての上限はありません。

一次元熱伝導理論は、表面ヒート・フラックス q_s と表面温度信号 $T(t)$ との間に次の関係を導きます。

$$\dot{q}_s(t) = \frac{\sqrt{\rho c k}}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{T(t)}{\sqrt{t}} + \frac{1}{2} \int_0^t \frac{T(t) - T(\tau)}{(t - \tau)^{3/2}} d\tau \right] .$$

データの評価のために、この式は次のように変形されます。

$$\dot{q}_s(t_n) = \frac{2\sqrt{\rho c k}}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n \frac{T(t_i) - T(t_{i-1})}{(t_n - t_i)^{1/2} + (t_n - t_{i-1})^{1/2}} .$$

この式は $t_0 = 0$ において温度は $T(t_0) = 0$ 、すなわち上の式中の温度は、初期温度に対して測定中の温度変化量を示しています。上に示されるヒート・フラックスはこの式では控除されています。



株式会社 ノビテック

〒150-0013 東京都渋谷区恵比寿 1-18-18

東急不動産恵比寿ビル7階

Tel: (03)-3443-2633 Fax: (03)-3443-2660

URL: <https://www.nobby-tech.co.jp>

E-mail: sales@nobby-tech.co.jp

Prof. H. Olivier

RWTH Aachen

Stoßwellenlabor

Templergraben 55

D-52062 Aachen

Phone: +49-241-8024606

Fax: +49-241-8022175

e-mail: olivier@swl.rwth-aachen.de