



計測情報処理

6. 状態量の測定

計測システム研究室 章 忠

5. 表面と力学的量の測定

5.1 表面を測る

1)角度を測る、2)表面粗さを測る

5.2 質量と力を測る

5.3 速度と加速度を測る

1)空間フィルタ、2)相関法による速度センサ、
3)ドップラー速度計、4)加速度センサ

5.4 力とトルクを測る

1)ひずみゲージ、2)ロードセル(荷重計)、3)トルク、
4)電圧素子、5)馬力(動力)の測り方

5.5 強さと硬さを測る

1)引っ張り・圧縮試験、2)衝撃試験、3)硬さ試験

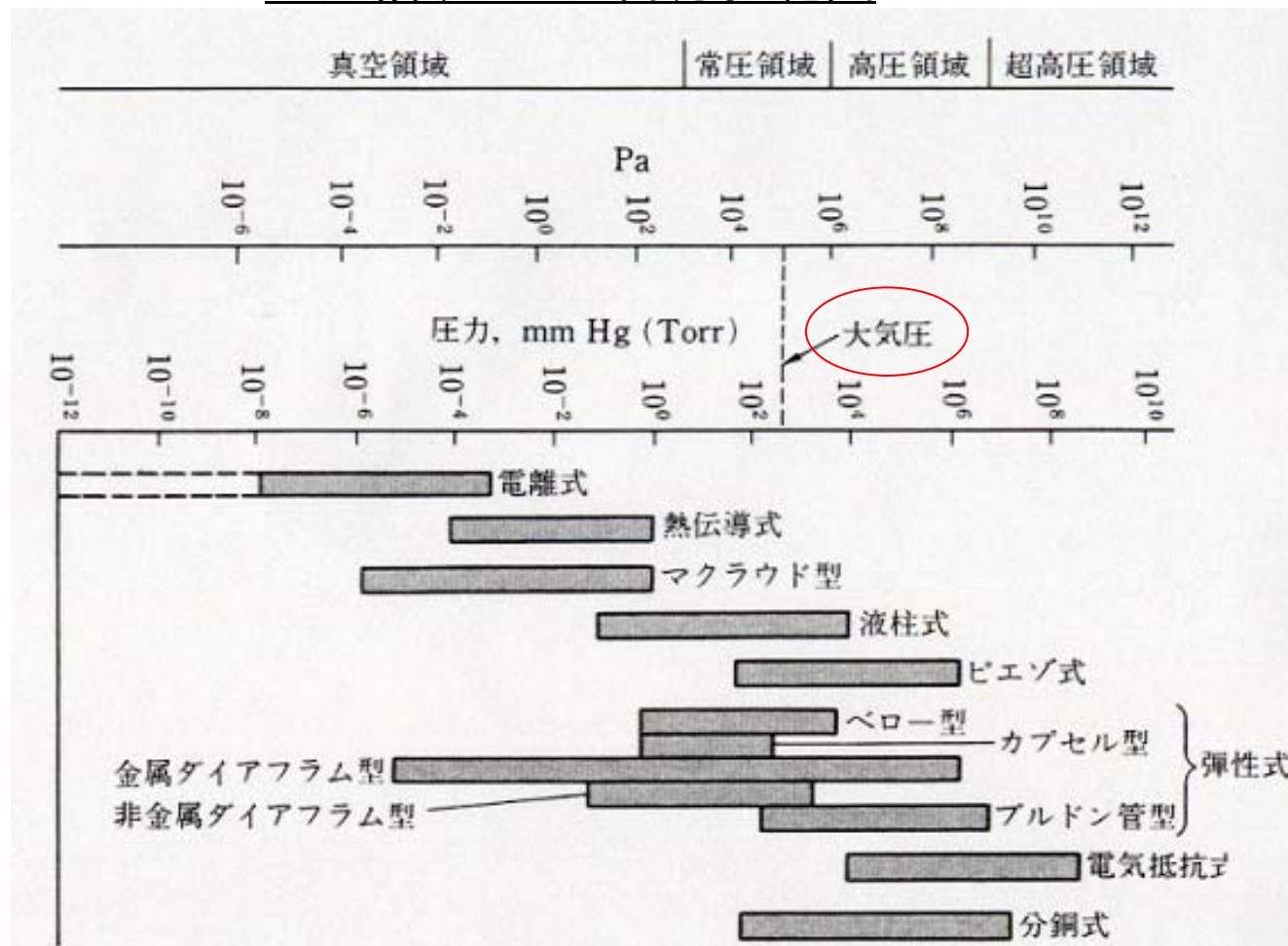
6. 状態量の測定

6.1 圧力の測定

絶対圧：絶対真空を基準
ゲージ圧：大気圧を基準

流体の圧力は流体の接している壁面または、流体中の任意の面に垂直に働く単位面積あたりの力で定義される。

圧力領域と圧力計分担範囲

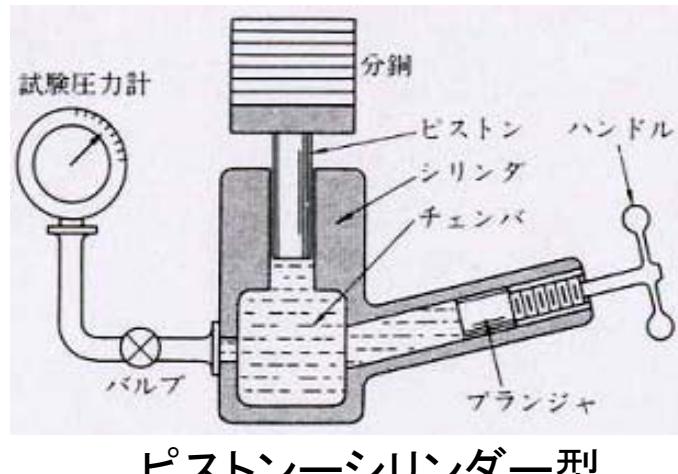


圧力の単位換算表

	Pa	bar	kgf/cm ²	atm	mmHg	mmH ₂ O	psi
1 Pa	1	10^{-5}	1.0197×10^{-5}	9.8692×10^{-6}	7.5006×10^{-3}	0.10197	1.45×10^{-4}
1 bar	0.1 M	1	1.01972	0.98692	750.062	1.0197×10^4	14.503
1 kgf/cm ²	0.0980 M	0.98067	1	0.96784	735.559	1.00003×10^4	14.217
1 atm	0.10133 M	1.01325	1.03328	1	760	1.0333×10^4	14.706
1 mmHg	0.13332 k	0.3332×10^{-4}	1.3595×10^{-3}	1.316×10^{-3}	1	1.3595×10	1.933×10^{-2}
1 mmH ₂ O	9.80665	0.9806×10^{-4}	0.99997×10^{-4}	0.9678×10^{-4}	7.356×10^{-2}	1	1.422×10^{-3}
1 psi(lb/in ²)	6.895 k	0.06895	0.07039	0.0680	51.715	7.030×10^2	1

6.1.1 高圧を測る(kPa～Gpa)

1) 分銅式圧力計(kPa～GPaまで, 0.1%の精度)



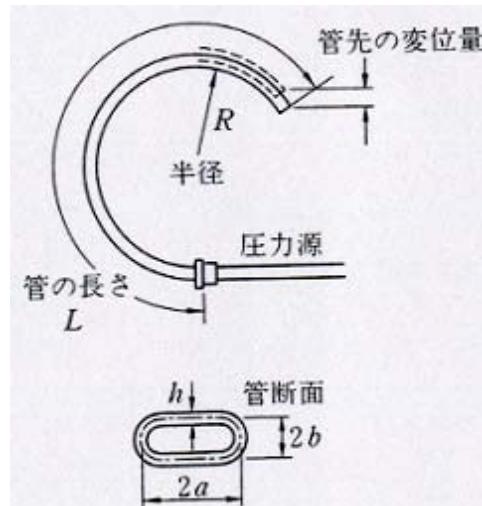
圧力媒体として潤滑油などの油を用いて、次式により圧力 p を求める。

$$p = \frac{Mg}{A}$$

M : ピストンと分銅の総量(kg), g : 重力加速度,
 A : ピストンーサリンダの平均断面積



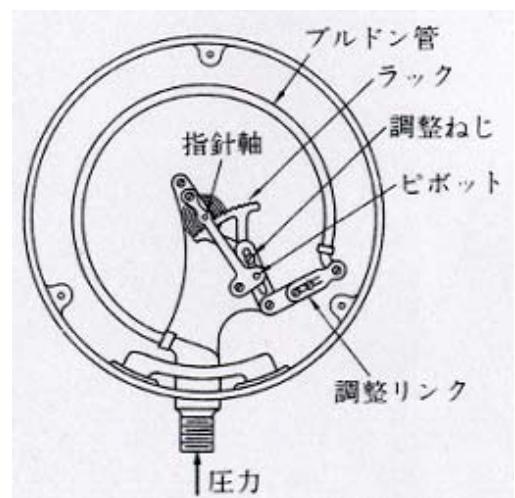
2) 弹性変形式圧力計(10^4 ～ 10^9 Pa)



弹性材料で作られた薄板や容器が圧力を受けて変形することを利用する。

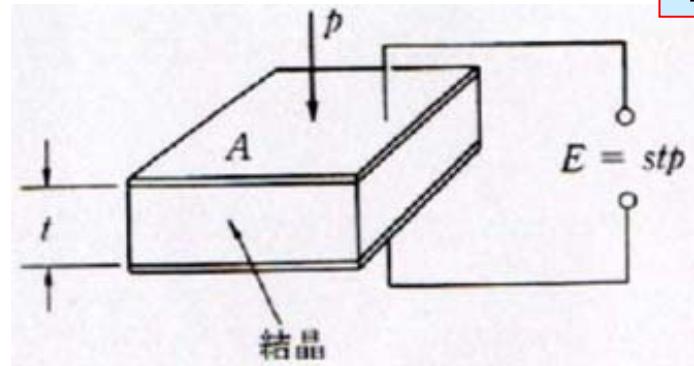
管端の動きはリンクと歯車(ラック-ピニオン)の組み合わせによって指針の回転に変化させる。

ブルドン管圧力計の構造



3) ピエゾ電気圧力計

ピエゾ電気効果: 圧力によって結晶表面に電荷が生じる現象である



ピエゾ電気効果

結晶の上下両面間に発生する電圧 E :

$$E = stp$$

p : 圧力, t : 結晶の厚さ, s : 電圧感度

電圧感度 s : $s = d / \varepsilon$

d : ピエゾ電気係数, ε : 誘電率

圧力の微分値に応答する感圧素子で、静圧に不向き

圧力結晶の特性

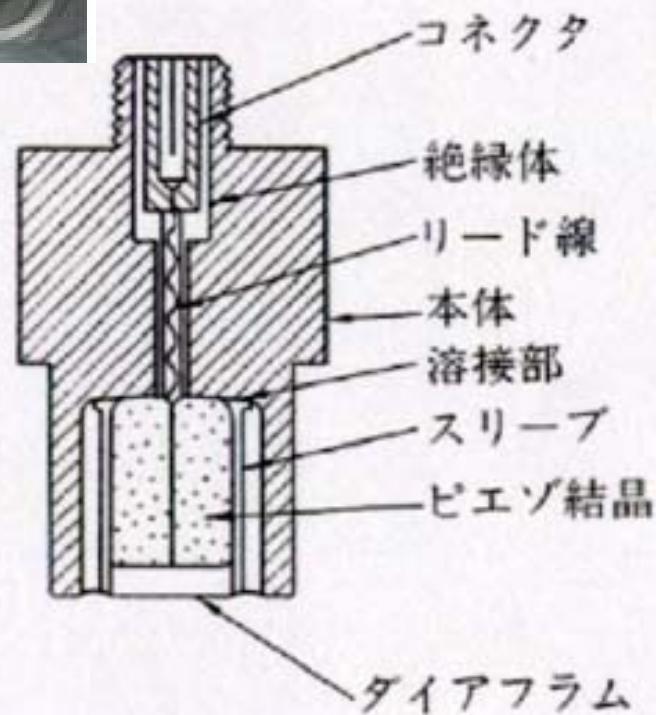
物質	方向	電圧感度 S ($\frac{\text{V/m}}{\text{Pa}}$)	誘電率 ε (F/m)
水晶	X カット 厚み方向	-0.050	4.06×10^{-11}
	Y カット 滑り	0.108	〃
ロシェル塩	X カット 45°長さ方向	0.098	444
ADP	Z カット 輪郭滑り	0.354	13.8
チタン酸バリウム	分極に平行	0.0106	1,200~1,500



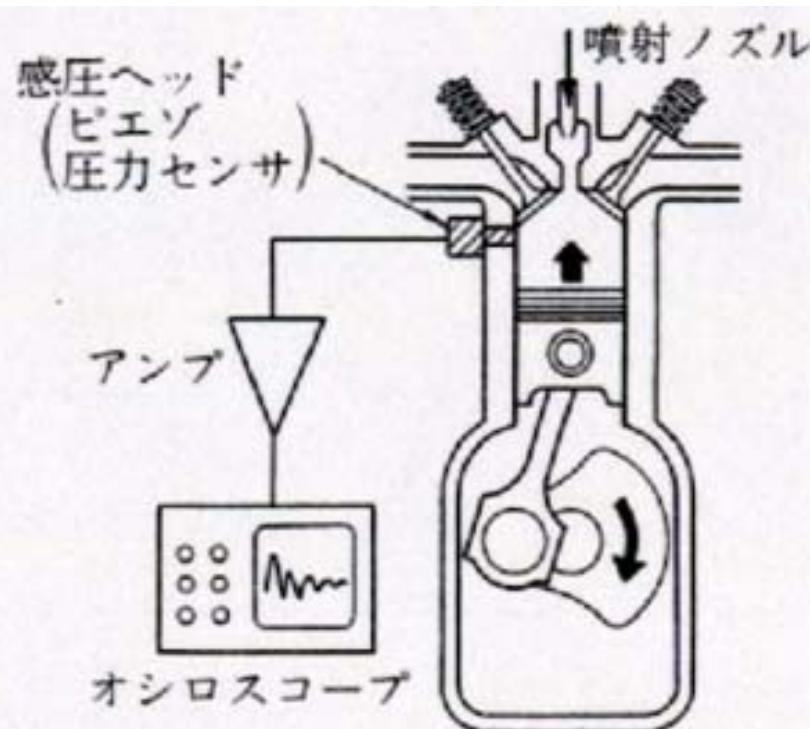
高圧ヘッドには、
脈動やサージ圧を
緩和する、
スロットルを採用



ピエゾ圧力センサによる内燃機関の圧力測定



(a) 感压ヘッド

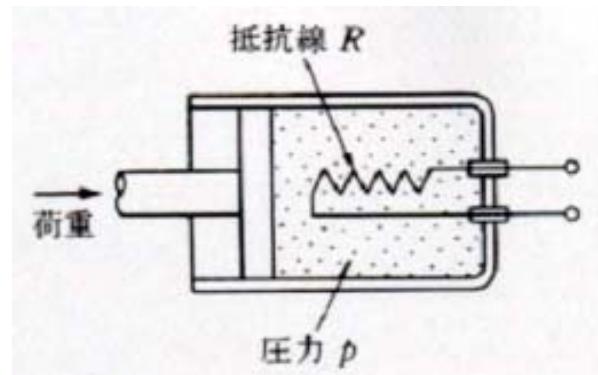


(b) 圧力測定例

4) 電気抵抗式圧力計(MPa～GPa, 超高圧域)

ピエゾ抵抗効果：1本の金属線にあらゆる方向から圧力が加わると電気抵抗が変化する。

金属(合金)のピエゾ効果の原理



1本の金属線にあらゆる方向から圧力が加わると電気抵抗が変化する。これは外圧によって金属の結晶格子が変形するため、自由電子の移動量が変化することによる。

圧力変化が小さい範囲では、圧力変化 Δp に対して抵抗値 R は次式となる。

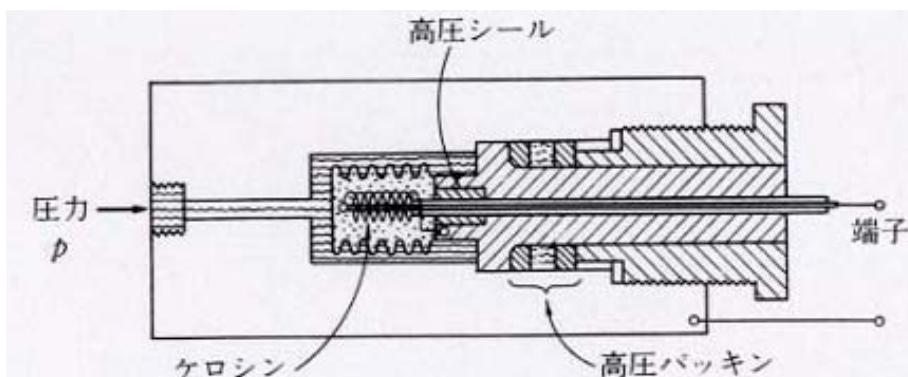
$$R = R_0 (1 + b \Delta p)$$

R_0 : 大気圧下における抵抗値, b : 抵抗の圧力係数

金属抵抗の圧力係数

材 料	抵抗の圧力係数 b (1/kPa)	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
マンガニン (Cu 84, Mn 12, Ni 4)	$+2.5 \times 10^{-8}$	45×10^{-4}
金クロム合金 (Cr 2, Au 98)	$+0.98 \times 10^{-8}$	2.4×10^{-4}

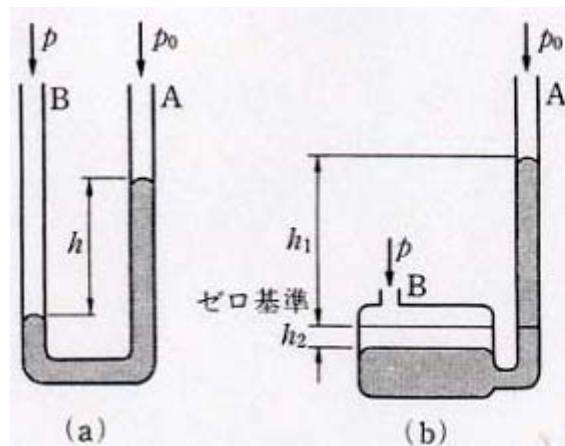
ピエゾ抵抗効果を用いた高圧用感圧素子



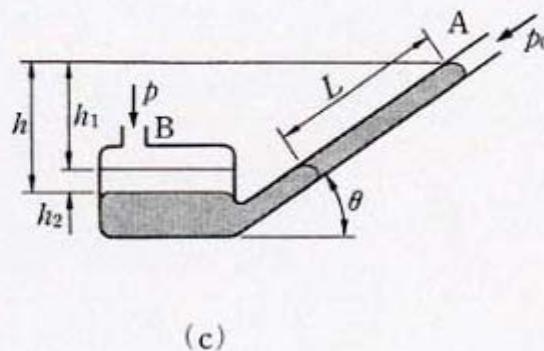
6.1.2 常圧を測る(10³~10⁶Pa)

1) 液柱式圧力計

液柱により生じる圧力と測定圧とを平衡させることにより圧力を読み取る。



液体:水,油,水銀



(a)の場合(U字管型)

$$p - p_0 = \rho g h$$

ρ :液体の密度, g :重力加速度

(b)の場合(U字管型)

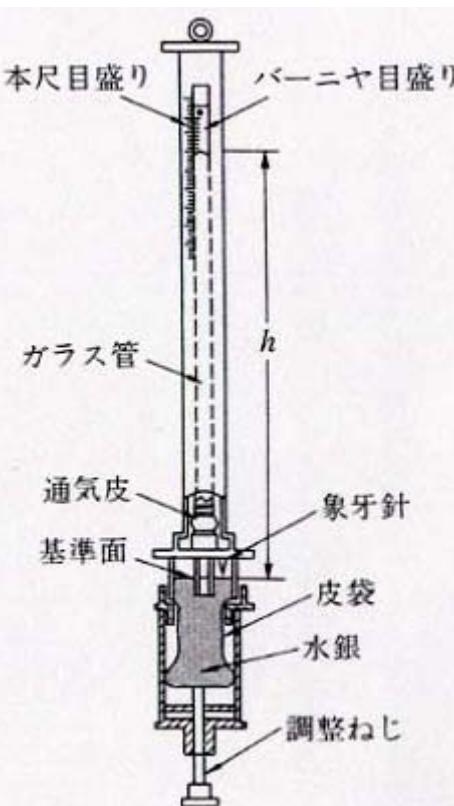
$$p - p_0 = \rho(h_1 + h_2)g = \left(1 + \frac{a}{A}\right)\rho h_1 g$$

(c)の場合(傾斜管型)

$$p - p_0 = \rho g \left(\frac{a}{A} + \sin \theta \right) L$$



フォルタン型水銀気圧計



2) 弹性変形式圧力計

液柱式の1次圧力計は設備の姿勢の制約もあり、産業用や日常生活では不向きである。そのため、弹性変形式の2次圧力計が広く普及している。

原理は、密閉容器の一部あるいは全体を薄い弹性板でつくり、容器内外の圧力差によって生じる弹性板の変形を変位量として取り出す。

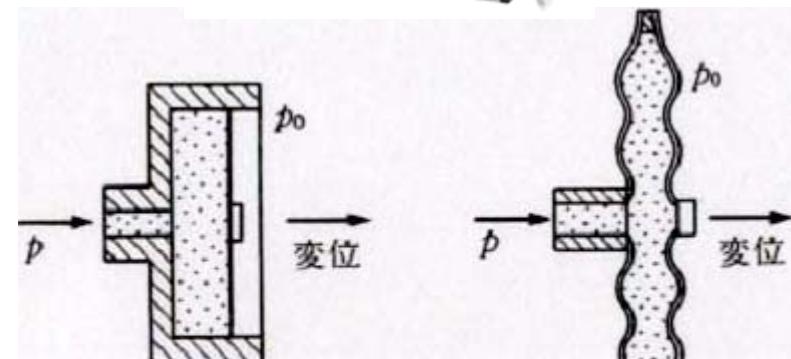
ダイアフラム型、カプセル型、ベロー型

弹性材料：リン青銅、黄銅、鋼、ゴム、
Si, Ge など

金属ダイアフラム型：上限100MPa程度
非金属ダイアフラム型：下限10Pa程度

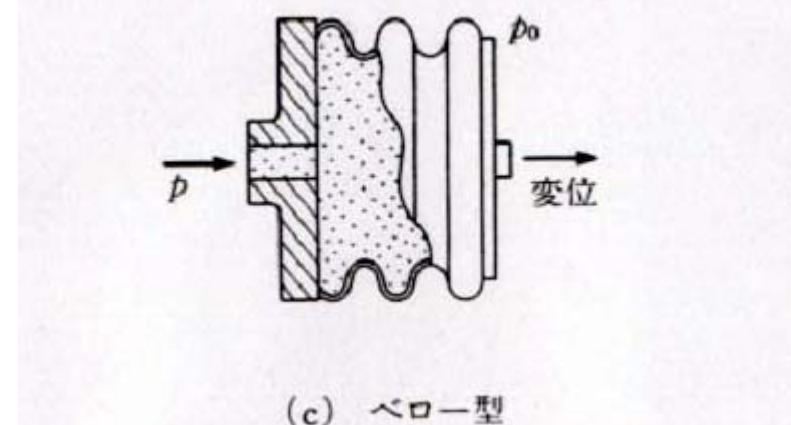


円筒形隔膜式圧力計



(a) ダイアフラム型

(b) カプセル型

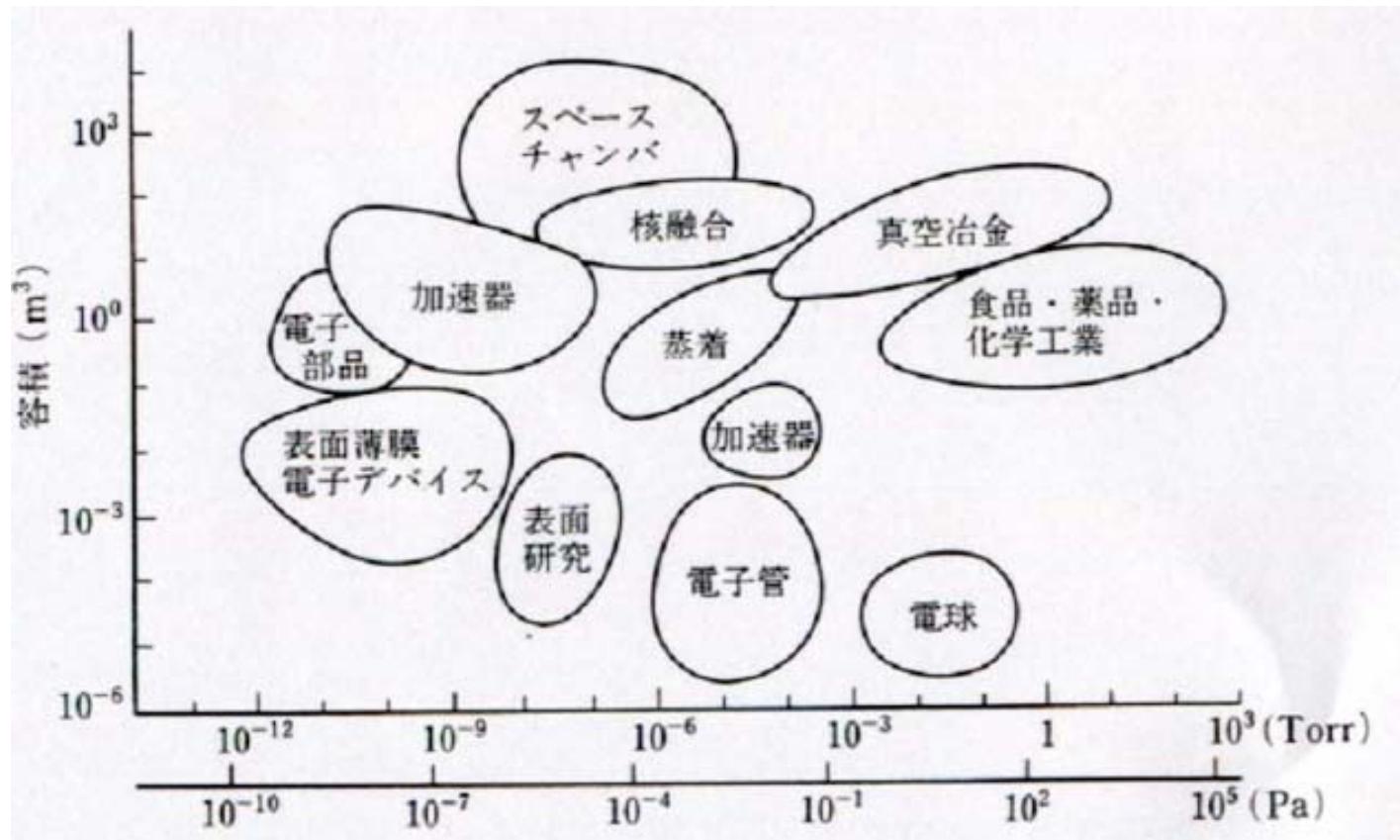


(c) ベロー型

6.1.3 真空を測る(1kPa以下)

日常家庭で使われている真空とは大気圧以下の環境を意味する。
真空計で測られる圧力は、そのほとんどが絶対圧である。

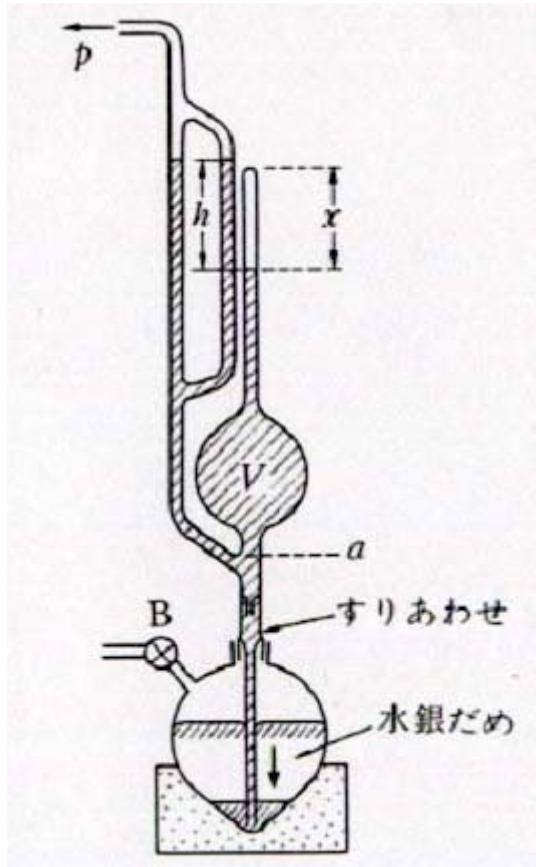
基礎研究から生産まで広く支える真空技術



1) 液柱式圧力計

単純なU字管型から気体の圧縮を利用したマクラウド型まで、水銀柱を用いる血圧計が常圧から 10^{-6} Paまでの真空領域で使われている。

マクラウド型真空計



aから上にある球状部と細管部の容積を V , 細管部の断面積を S とする。図中の高さ h と x を測定すると次式で表されるボイルの法則($PV=$ 一定)が成り立つ。

$$pV = (h + p) Sx$$

$$\text{圧力: } p = \frac{Shx}{V - Sx} \text{ (Pa)}$$

通常の状態: $V \gg Sx$

もし $h=x$ となるように測定すれば次式となる。

$$p = \frac{S}{V} h^2 \text{ (Pa)}$$

S/V が既知であれば h の高さから p がわかる。

2)弹性変形式圧力計

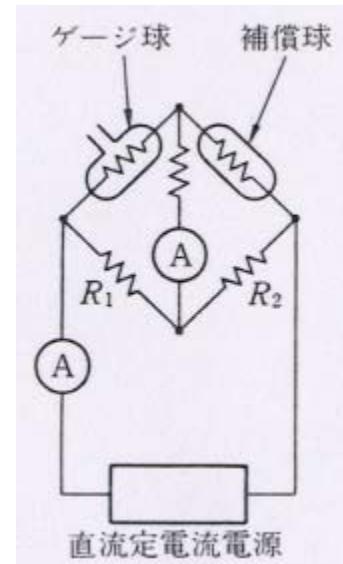
弹性変形圧力計として金属ダイアフラム型が用いられる。 $25 \mu\text{m}$ 厚程度の薄い金属ダイアフラムを使用し、片側を高真空で封じたものは大気圧以下 10^{-3}Pa 近くまで感度を持つ2次圧力計である。薄膜の変形量は対電極板との間の容量変化として検出し、交流ブリッジなどで測定する。

3)電気式圧力計

気体の性質を直接的に電気信号として取り出す形の圧力計である。通常 100Pa 以下の真空度測定用の2次圧力計として採用され、真空制御のための検出部としても広く使われている。

(a)熱伝導式真空計

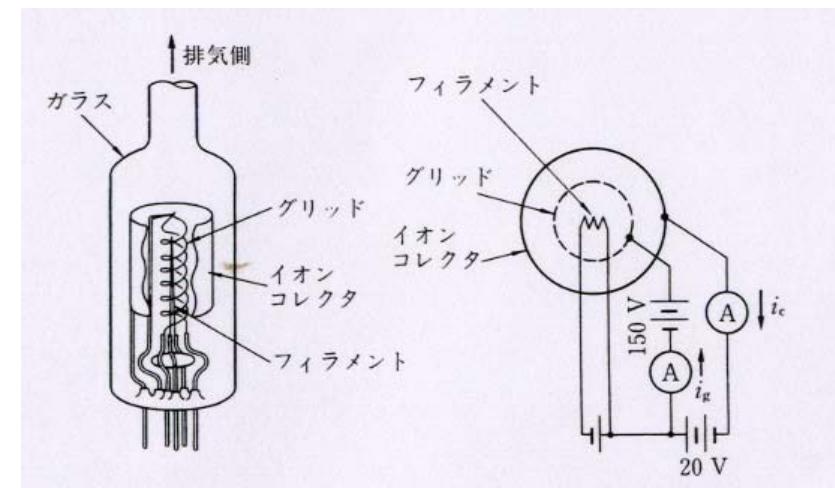
真空管型ヘッドの中で気体分子の平均自由行程が比較的短く衝突回数が多い圧力領域では加熱されたフィラメントに衝突する分子が熱エネルギーを持ち去り、フィラメントを冷却する。圧力が低くなると衝突回数が減少してフィラメントの温度が上昇し、その抵抗値が増加するため、抵抗値の変化から圧力を求めることができる。



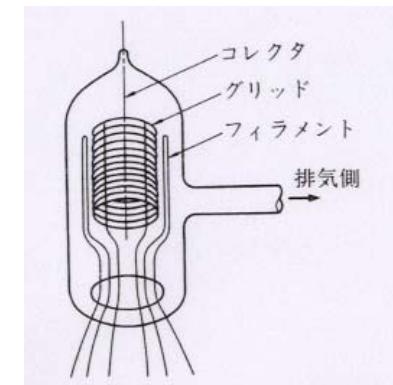
デジタルピラニ真空計GP-1000G
アルバック イーエス(株)

(b)電離式真空計

温度一定のもとでは圧力と分子密度とはほぼ比例することから、分子をイオン化してイオン電流を測ることで圧力を求める方法である。



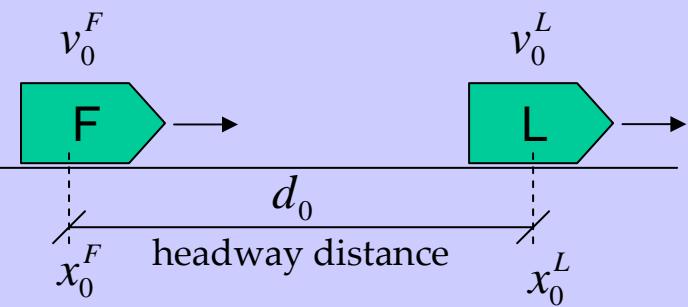
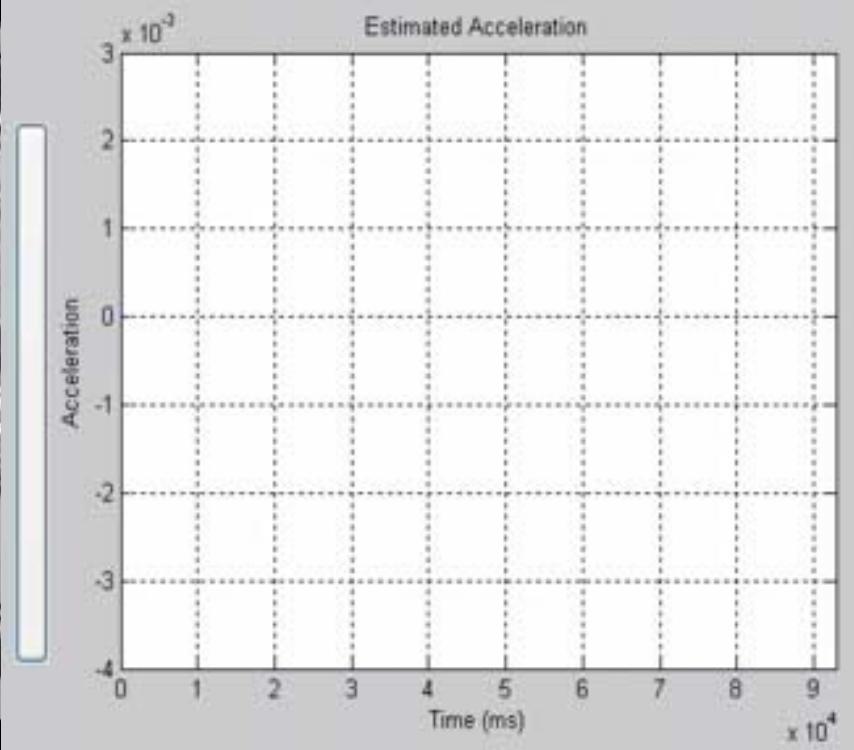
3極管型電離式真空管



バイアード・アルパート
(B-A)型電離式真空計

Break Time

2) ドライバのクルマ追跡モデル



$$a^F(t) = \alpha \frac{v^F(t - \tau_n)}{\Delta x(t - \tau_n)} \Delta v(t - \tau_n)$$

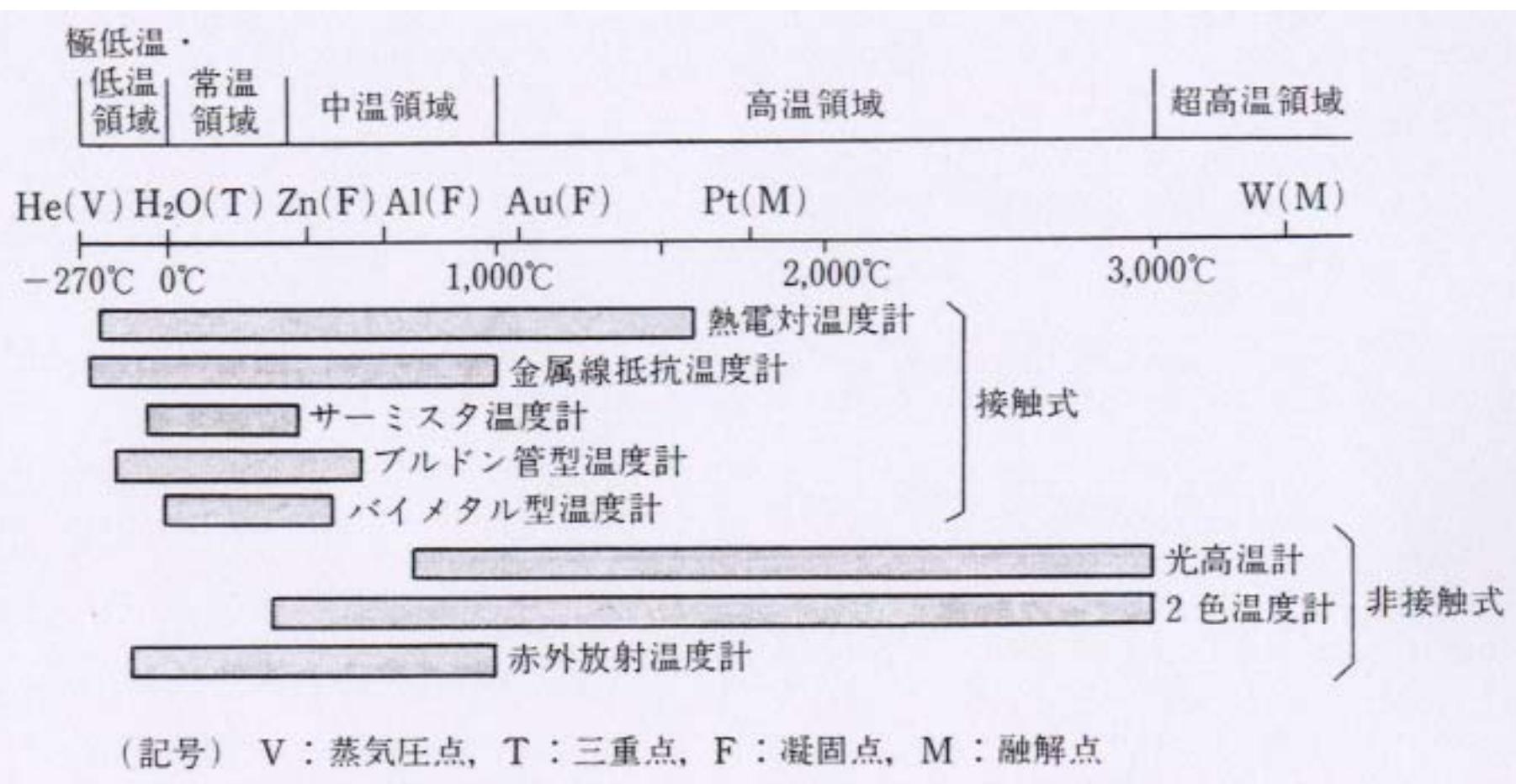
$a(t)$ = acceleration applied by driver at time t
 α = sensitivity gain

$$\Delta v(t - \tau_n) = [v^L(t - \tau_n) - v^F(t - \tau_n)] : stimulus$$

6.2 温度の測定

温度は我々の日常生活と密接な関係を持つ。我々の日常生活はもちろんのこと、生産活動の場である産業界で対象となる温度範囲はきわめて広い。

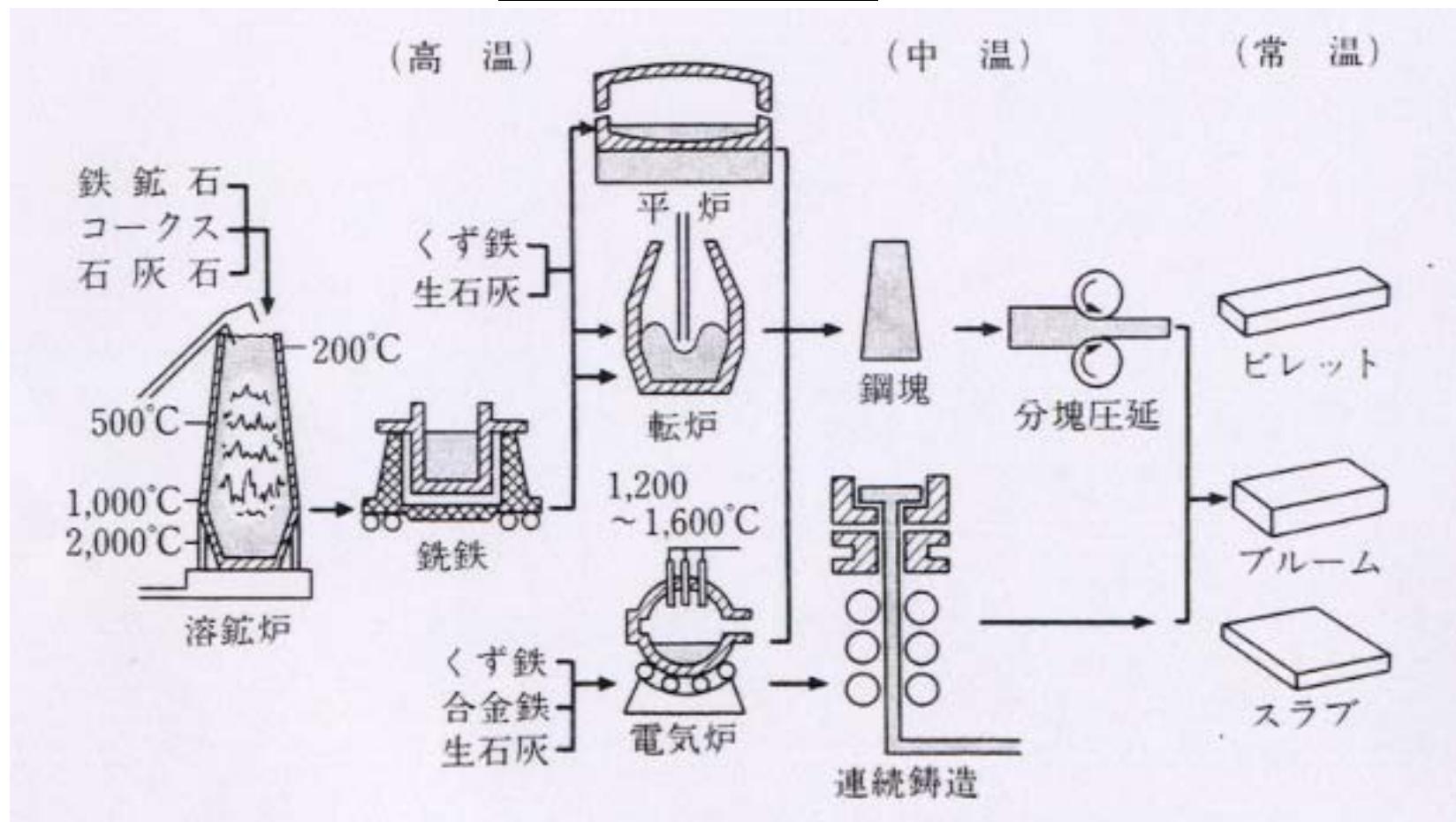
温度領域と温度計分担範囲



6.2.1 高温を測る(1,000~3,000°C)

高温測定の例は産業界では金属やセラミクスなどの素材製造プロセスで数多く見られる。

製鉄・製鋼プロセス



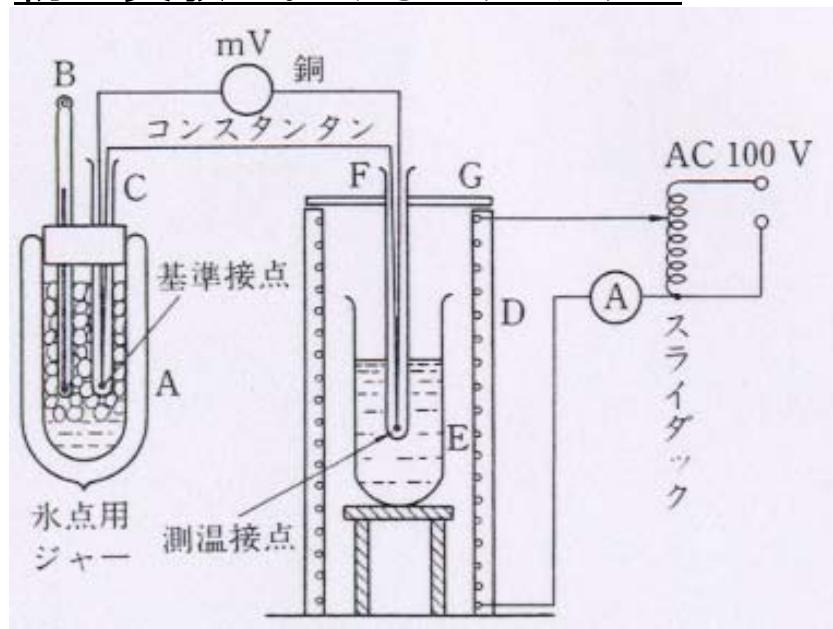
1)接触式測温

最も広く使われているものが熱電対で、原理は**2種類の金属線の両端を接続して作った閉回路の接合点に温度差を与えたとき電流が流れる効果(ゼーベック効果)**に基づく。2つの接合点の1つを基準温度に保っておけば他の接合点の温度と発生電流の間には関係があり、温度が電流の形で読み取られる。通常は閉回路を開き、そこに発生する電位差を読み取る方法を用い、この電圧を熱起電力と呼ぶ。

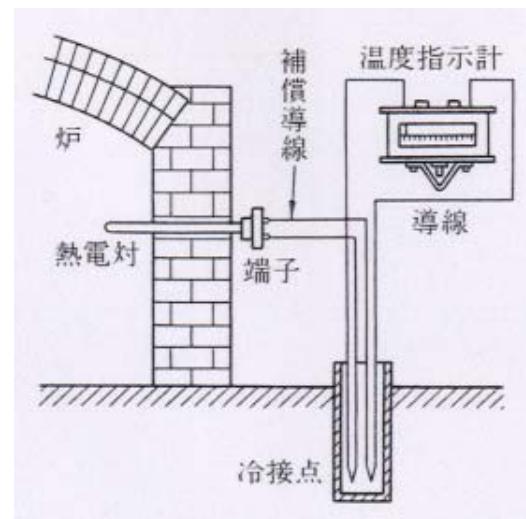


山里産業(株)

物理実験におけるセットアップ



高温炉の温度計測システム



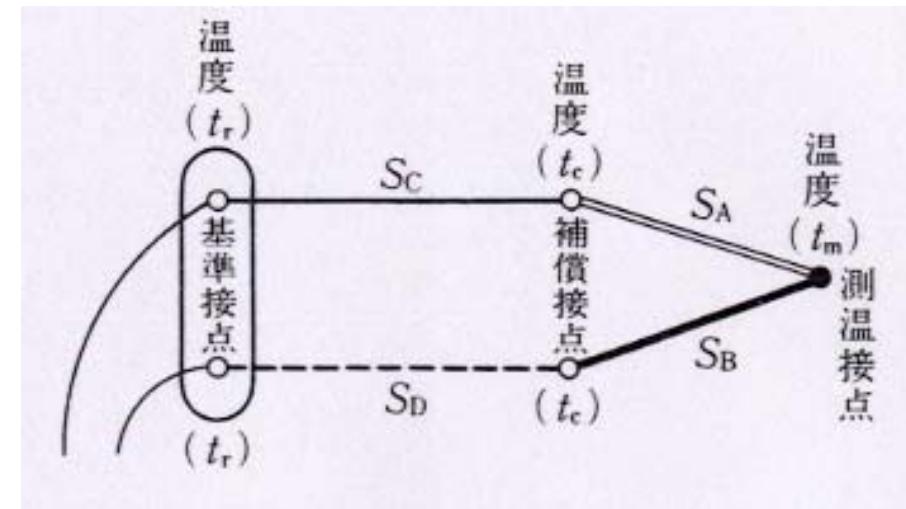
(b)補償導線

工業用計測では測温ヘッド部と基準接点との間が離れていることが多く、長い熱電対線材が必要となりコスト高となる。そのため、熱電能がそれに近い安価な線材で長い部分を置き換える方法が採用され、この導線を補償導線と呼ぶ。それぞれの熱電能を S_n で表すと、

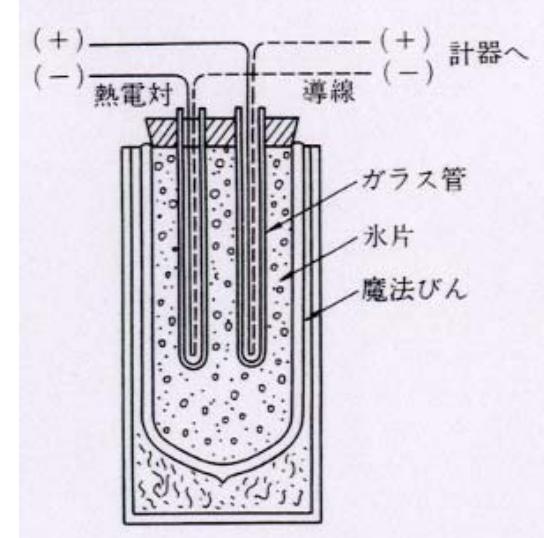
$$SA - SB = SC - SD$$

と表され、最終出力に現れる起電力は熱電対部分の熱起電力に等しくなる。

補償導線の接続



氷点式基準接点



(c)基準接点

基準接点を 0°C に保つことが標準的な使用法である。図のような氷点式のものが市販されており、精度の高い測温に使われる。電子冷却を用いたものもあり、測温システムにゼーベック効果とその逆現象であるペルチ工効果を併用していることになる。

ペルチ工効果:異なる2種の金属や半導体の接点に電流を流すと、接点部で発熱や吸熱の起こる現象である。

2) 非接触式測温

すべての物質は絶対零度以上で電磁波を放射することがわかっており、この電磁波を熱放射と呼んでいる。黒い物体は放射を吸収するが、その中でどのような波長でも100%吸収する理想的な吸収体を黒体と定義する。ある温度にある物体とそこから放出される放射パワーの波長分布は黒体について理論的に導かれたプランクの式に従う。

プランクの式は波長(μm)当たり、単位面積(m^2)から単位立体角(sr)内に放射されるパワー(W)，すなわち分光放射輝度と呼ばれる量 L_λ (W/m²·sr· μm)で表すと次式となる。

$$L_\lambda = \frac{C_1}{\pi\lambda^5} \left(\frac{1}{\exp C_2/\lambda T} - 1 \right)$$

非接触で物体の温度を
測る手法の基本式

ここで、 λ は波長、 T は温度であり、 C_1 、 C_2 はプランクの放射定数で、

$$C_1 = 2\pi c^2 h = 3.7418 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = 1.4388 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

で与えられる。なお、 c は光速、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数である。

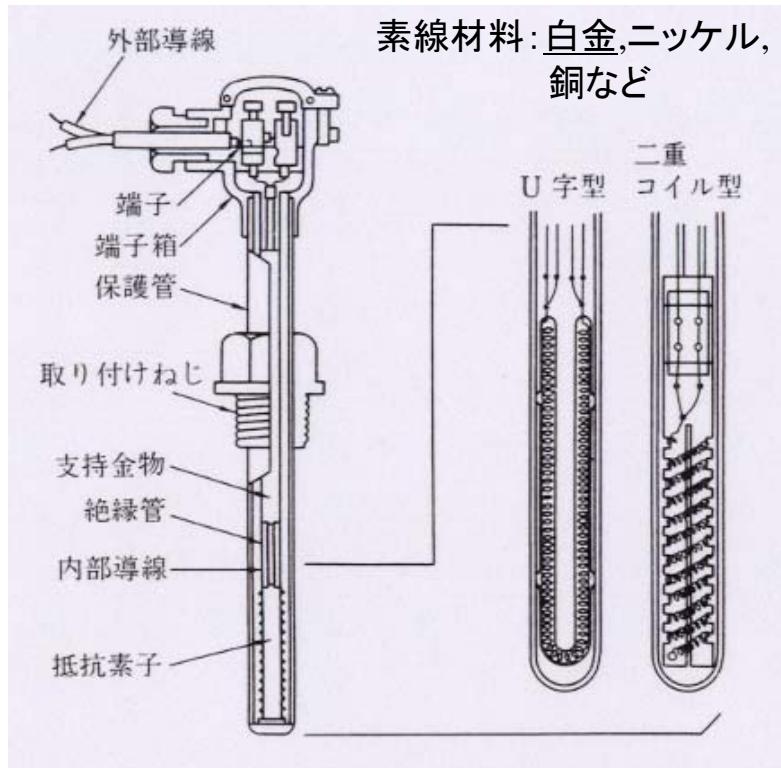
6.2.2 中温を測る(350~1,000°C)

中温域は金属の熱間加工や熱処理, 化学プラント中の反応過程など, 各種材料の生産中間工程と強いかかわりをもつ領域である。

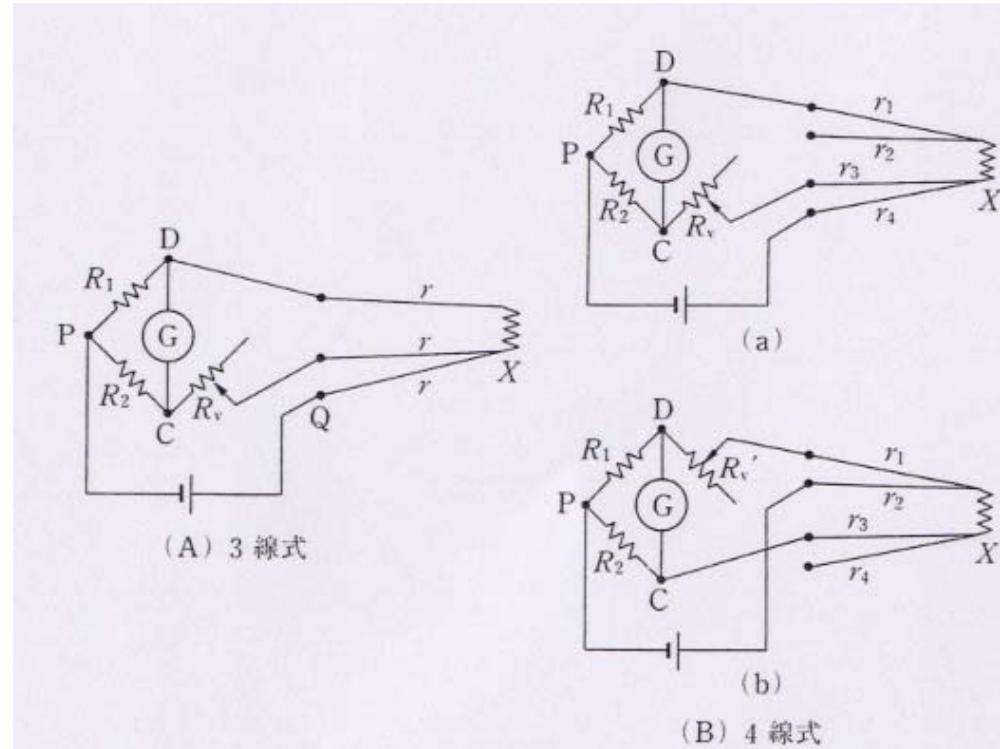
1) 接触式測温

熱電対が広く用いられているが, より高精度と安定性を望むには金属線抵抗値の温度依存性を利用した金属抵抗温度計が適している。原理は金属のもつ温度係数の活用したものである。

工場用センサヘッド部



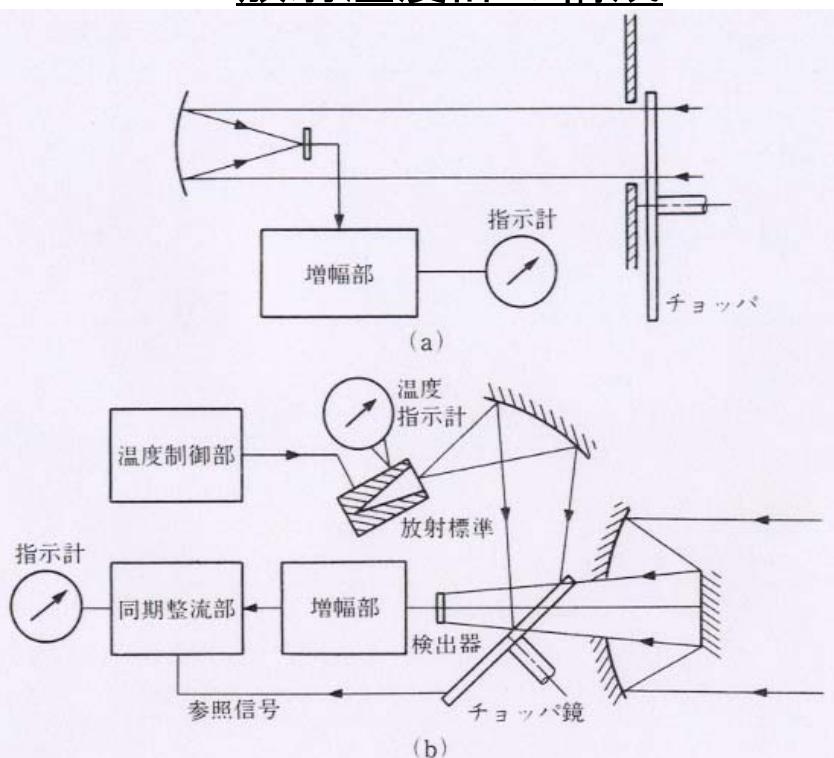
抵抗体のブリッジへの接続法



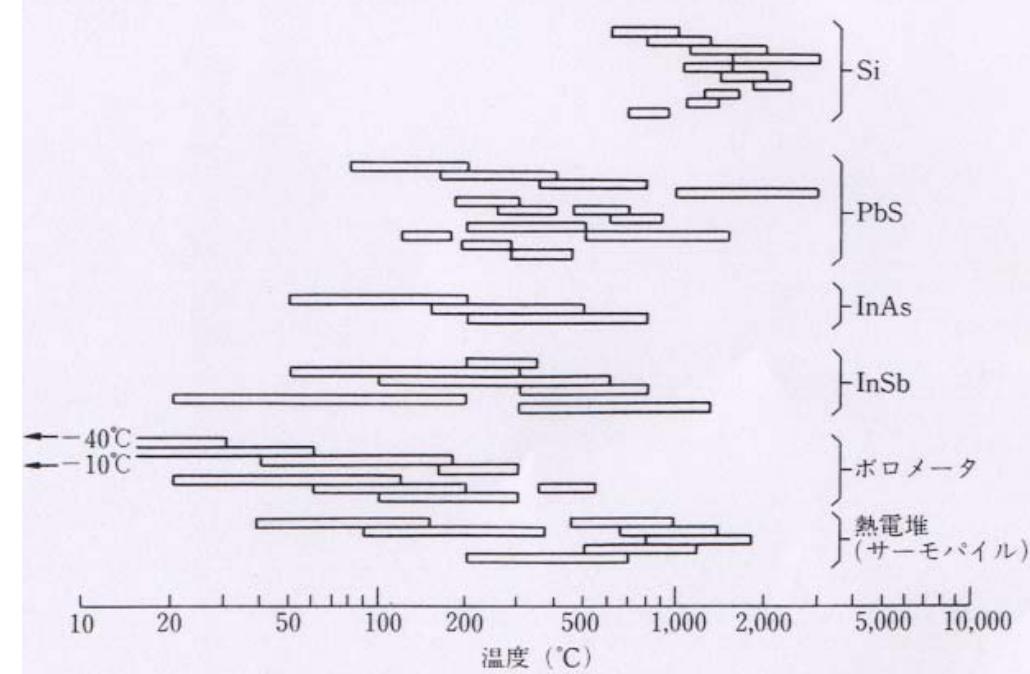
2) 非接触式測温

700°C以下の中・低温域の放射温度測定では、熱放射の分光分布が長波長領域に移動するとともに、放射エネルギーが極端に減少するため、赤外センサを用いてできるだけ広い波長域の放射全体を受ける方式を用いる。

放射温度計の構成



センサの種類により分類した市販放射温度計の測温範囲



- (a) 測温体からの放射を赤外センサで直接検出
(b) 内臓黒体からの放射を基準とした検出

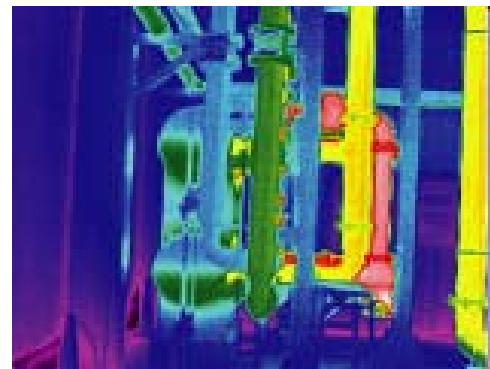
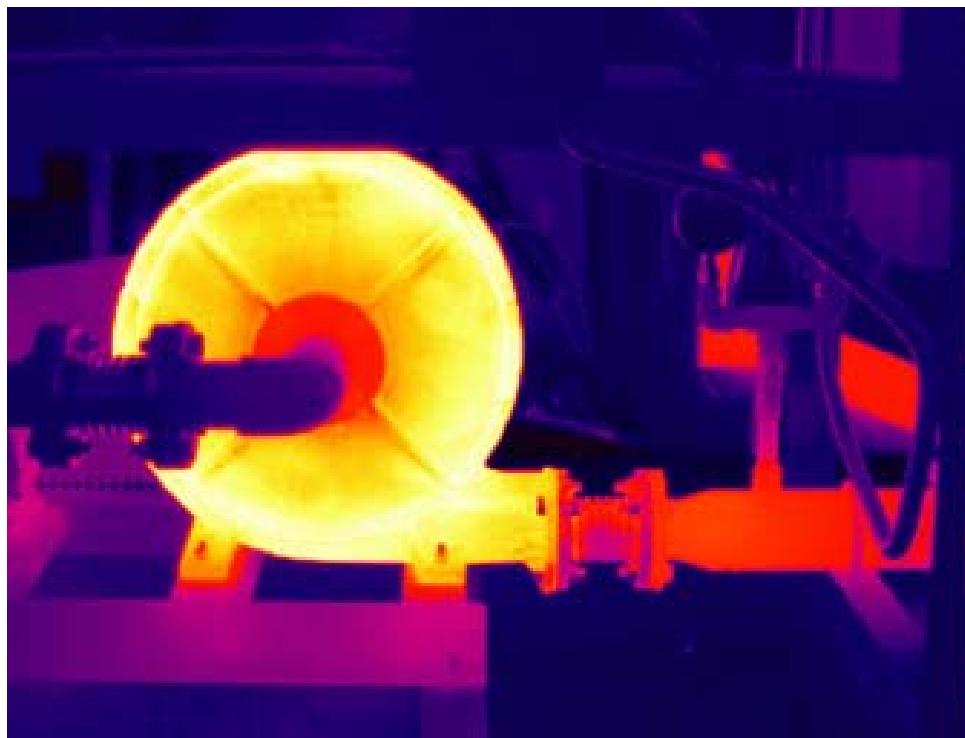
設備診断における温度計測の例

サーモグラフィは物体表面から放射されている赤外線エネルギーを温度に換算し、色で表すものである。

機械システムは、日常のメンテナンスや保守、劣化診断などが重要です。軽微な劣化も放置しておくと、効率の低下につながるだけでなく、トラブルの原因になる場合があります。サーモグラフィを使うと非接触で温度分布が測定でき、簡単に劣化診断を行うことができます。また、定点監視するとリアルタイムでの診断が可能で、より素早い対応が可能です。



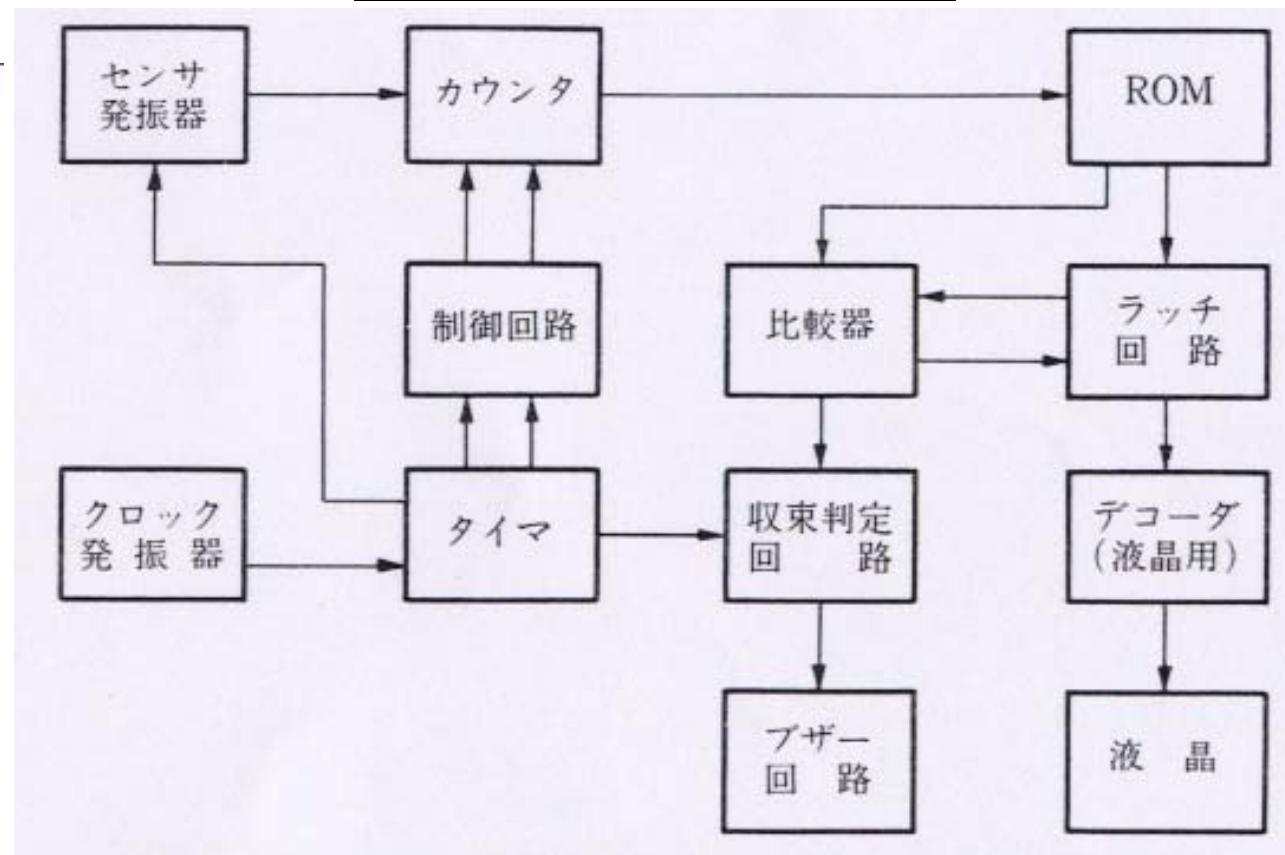
日本アビオニクス:赤外線
サーモグラフィ TVS-200



6.2.3 常温を測る(0~350°C)

常温測定用センサとしては,サーミスタ測温抵抗体のほかに,熱電対,金属測温抵抗体など温度一電気変換型センサが同様に使われている。原理的に簡単な物体の熱膨張を用いるものから放射温度センサに至るまで,きわめて多種多様なものが実用されている。

電子体温計の回路ブロック



1) 接触式測温

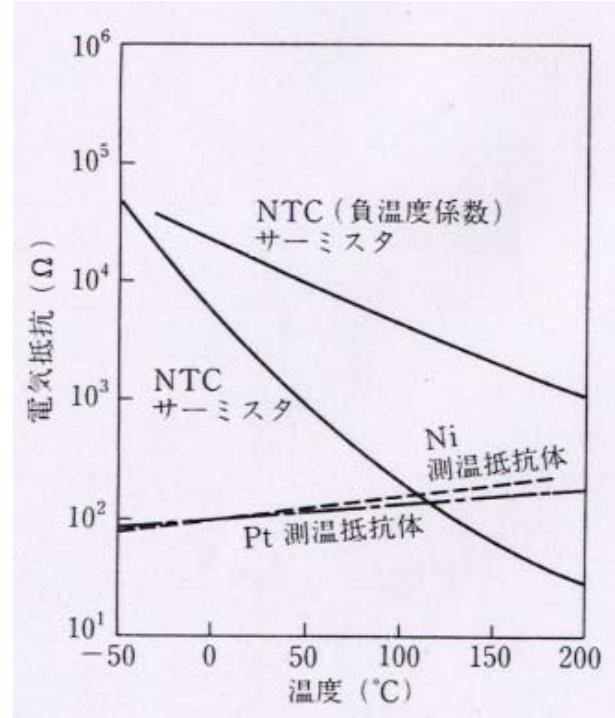
温度-電気変換型センサ

サーミスタはMn, Ni, Coなどの酸化物を焼結したもので、抵抗の温度係数が負となる形(NTC)の素子である。

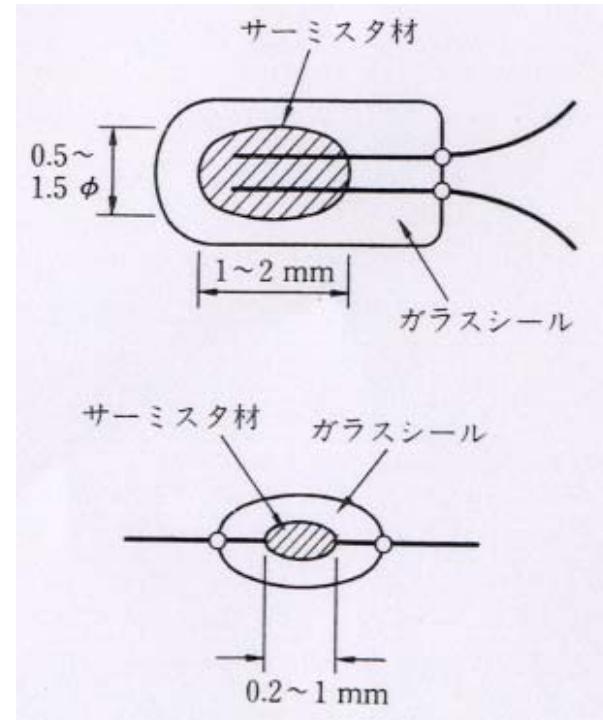
温度-抵抗特性式: $R = R_0 \exp B(1/T - 1/T_0)$

R_0 : 温度 T_0 における抵抗値, B : サーミスタ係数(3,500~6,000K)

サーミスタの温度-抵抗特性



ビート型サーミスタ素子



サーミスタは-50~350°Cの範囲で多く使われ、0.5~2%の精度をもつ。²⁵

2)非接触式温度計

熱型の赤外センサは測温体の表面から放射される赤外線のエネルギー量を赤外センサで直接に計測し、温度に換算するものである。物体温度が低くなるにつれて、波長領域は長波長側に移動していき、放射エネルギーも急激に低下していく(波長の4乗に反比例)。熱型の赤外センサの感度は高くないが、長波長赤外域まで平坦な分光感度特性をもち、かつ常温で使うことができる。常温にあるセンサで常温にある対象物からの放射を受けるとき、相互の間でのエネルギー流がわずかとなり、そのうえに計測器光学系自体を含む周辺がすべて放射源となる。



N-FOODPRO: 温度範囲-30～205°C
価格: 13,020



SM-220W(株)スカイニー
測定温度範囲 : -33～220°C
価格: 4,095

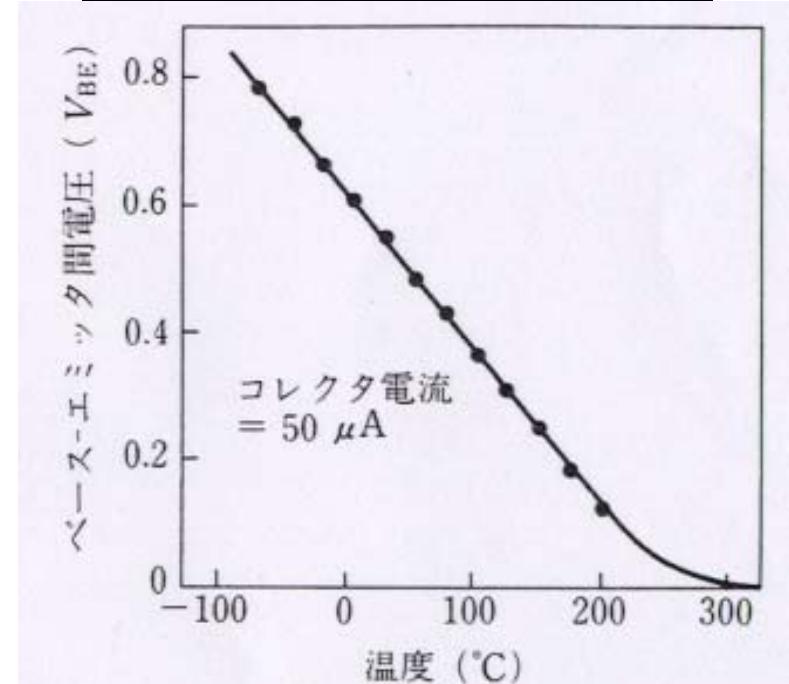
6.2.4 低温を測る(0°C(273.2K)以下

(平衡水素の三重点(13.8K)あたりまで)

マイナス数十°Cあたりまでは、常温用温度計で利用可能なものが多いため、それ以下になると限定された材料を用いた熱電対や抵抗型温度計、圧力式温度計（特に気体を用いたもの）が使用される。

熱電対の中でも、銅-コンスタンタン、アルメル-クロメルなどは、-200°Cくらいまで用いることができる。抵抗温度計では白金線が-260°Cくらいまで、また、常温測定用の一般的なNTCサーミスタでも-50°Cまで使用できる。

トランジスタの V_{BE} の温度依存性



トランジスタ回路は外部温度変位に対して敏感であり、その安定化のため苦労するが逆にこの欠点を温度センサに利用することができる。常温ならびに低温用センサには、ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} の温度依存性を利用することが多い。

温度基準

温度計の目盛りづけや校正には温度基準が必要であり、純粋な物質の凝固点、融解点、沸点、相平衡状態（三重点や蒸気圧点）などを温度定点とする方法が用いられる。

「1990年国際温度目盛り(ITS-90)」

この標準で測られる温度 T_{90} と国際セルシウス温度 t_{90} との関係は

$$t_{90} = T_{90} - 273.15$$

となる。

1990年国際温度目盛り(ITS-90)

定義定点物質 (状態)	ITS-90	
	T_{90} (K)	t_{90} (°C)
He(V)	0.65 3~5	— ↑ ヘルリウム蒸気圧目盛り ↓ 气体温度計
e-H ₂ (T)	13.8033	-259.3467
(B)e-H ₂ (V)	~17	
(B)e-H ₂ (V)	~20.3	
Ne(T)	24.5561	-248.5939
Ne(B)		
O ₂ (T)	54.3584	-218.7916
Ar(T)	83.8058	-189.3442
O ₂ (C)		
Hg(T)	234.3156	-38.8344
H ₂ O(T)	273.16	0.01
Ga(M)	302.9146	29.7646
H ₂ O(V)		
In(F)	429.7485	156.5985
Sn(F)	505.078	231.928
Zn(F)	692.677	419.527
Al(F)	933.473	660.323
Ag(F)	1,234.93	961.78
Au(F)	1,337.33	1,064.18
Cu(F)	1,357.77	1,084.62

B : 沸 点 (1気圧下での液相、気相の平衡状態)

C : 凝 縮 点 (1気圧下での液相、気相の平衡状態で液相がゼロとなる極限)

F : 凝 固 点 (1気圧下での液相、固相の平衡状態)

M : 融 解 点 (1気圧下での液相、固相の平衡状態)

T : 三 重 点 (液相、気相、固相の平衡状態)

V : 蒸気圧点 (液相、気相の平衡状態)

e-H₂: オルソ/パラの平衡水素

定点物質として高純度の純金属を用いるには、黒鉛るつぼなどに入れて、その周囲を中性または還元性ガス雰囲気にした温度可変電気炉中に置く。熱電対や抵抗温度計など接触式温度計では、センサヘッド部を溶融金属中に挿入して定点検出を行うことにより校正する。

常温や低温領域では、電気炉と低凝固点の定点物質との組み合わせを用いるほか、水の沸点装置や氷点水槽が実用される。水の三重点を実現するためのやや複雑な装置もあり、標準用として 10^{-4}°C 程度の精度が確保できる。水温槽、油温槽などが常温領域で有用であり、 $5\sim -50^{\circ}\text{C}$ ではアルコールとドライアイスを冷却剤としたものが使われる。低温・極低温域の校正装置として、液化ガスクライオスタットや極低温冷凍機なども開発されている。

放射温度計のような非接触方式に対しては、放射標準として標準電球や黒体炉が用いられ、特に定点物質るつぼを内蔵したものは、定点黒体とよばれている。黒体炉用の標準温度計としては白金抵抗温度計が用いられるが、標準放射温度計との比較校正法も標準化されている。

6. 状態量の測定

6.1 圧力の測定

6.1.1 高圧を測る(kPa～Gpa)

- 1) 分銅式圧力計(kPa～GPaまで, 0.1%の精度)
- 2) 弹性変形式圧力計(10⁴～10⁹Pa)
- 3) ピエゾ電気圧力計
- 4) 電気抵抗式圧力計(MPa～GPa, 超高圧域)

6.1.2 常圧を測る(10³～10⁶Pa)

- 1) 液柱式圧力計、2) 弹性変形式圧力計

6.1.3 真空を測る(1kPa以下)

- 1) 液柱式圧力計、2) 弹性変形式圧力計、3) 電気圧力計

6.2 温度の測定

6.2.1 高温を測る(1,000～3,000°C)

- 1) 接触式測温、2) 非接触式測温

6.2.2 中温を測る(350~1,000°C)

1)接触式測温、2)非接触式測温

6.2.3 常温を測る(0~350°C)

1)接触式測温、2)非接触式測温

6.2.4低温を測る(0°C(273.2K)以下

(平衡水素の三重点(13.8K)あたりまで)

演習問題VI:

次の語句を説明せよ。

- (1) ピエゾ電気効果
- (2) ピエゾ抵抗効果
- (3) 弹性変形
- (4) ゼーベック効果を説明せよ。
- (5) 補償導線について説明せよ。