

日本熱電学会講習会

# 熱電物性の計測技術

物質・材料研究機構

ナノアーキストテクノロクス材料研究センター

熱エネルギー変換材料グループ

磯田 幸宏

# 講習内容

1. 熱電特性について
2. 計測に必要な基本事項
3. 熱電特性計測の規格
4. 熱電特性計測の基本
5. ランドロビン試験の結果
6. 計測に必要なこと

# 熱電特性とは

# 最大出力と最大温度差

熱電発電

$$P_{max} = \frac{E^2}{4R} = \frac{(\alpha\Delta T)^2}{4R}$$

E:熱起電力 R:内部抵抗  $\alpha$ :ゼーベック係数

ペルチェ冷却

$$\begin{aligned}\Delta T_{max} &= T_h - T_c \\ &= \frac{1}{2} Z T_c^2\end{aligned}$$

Z:性能指数

# 熱電材料の性能パラメーター

- 性能指数

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho\kappa}$$

$\alpha$  : ゼーベック係数 ( $\mu\text{V/K}$ )

$\rho$  : 比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ )

$\kappa$  : 熱伝導率 ( $\text{W/Km}$ )

- 出力因子

$$TPF = \frac{\alpha^2}{\rho}$$

$\alpha$  : ゼーベック係数 ( $\mu\text{V/K}$ )

$\rho$  : 比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ )

- 有効最大出力

$$\begin{aligned} p_{\max} &= \frac{(\Delta E)^2}{4R} \\ &= \frac{(\Delta E)^2}{4\rho(L/A)} \end{aligned}$$

$R$  : 内部抵抗 ( $\Omega$ )

$\rho$  : 比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ )

$L$  : 長さ ( $\text{m}$ )



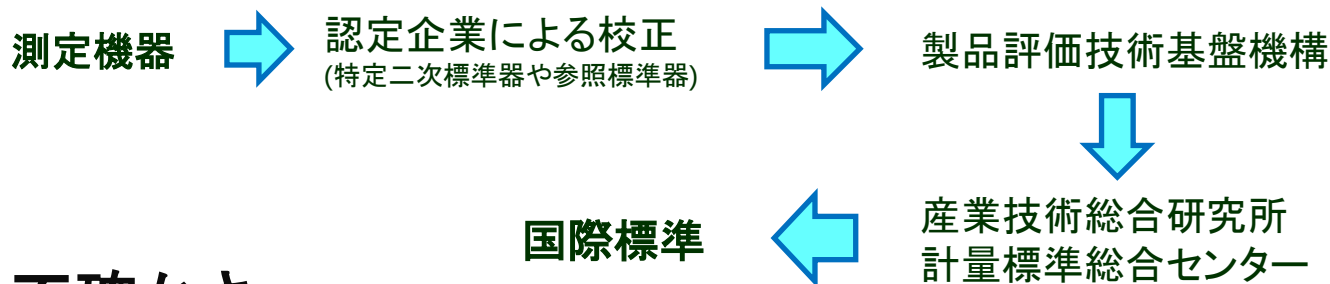
# 計測に必要な基本事項

# 計測におけるトレーサビリティと不確かさ

## トレーサビリティとは？

計測機器はより正確な標準器によって校正される。この時に校正の連鎖を通じて国際標準にたどり着けることが確かめられている場合、この計測機器により得られた結果は国家標準にトレーサブルであるという。

計測機器等の校正・試験所用の規則  
ISO/IEC 17025 (JIS Q 17025)



## 不確かさ

これまでは「誤差」や「精度」といった概念が計測の信頼性を表すために用いられてきました。今は「不確かさ」が計測データの信頼性を表すための新しい尺度としてもちいられています。

# 物理量では有効桁数が重要な意味を持つ

## 物理量の数値表現での有効数字(有効桁数)

有効桁数3桁とは元になる数字の大きさに対して不確かさが100分の1以下になる様な数値表現のことである。同じように全体に対する不確かさが10000分の1以下ならば有効桁数5桁となる。

数値表現において確実な数値が存在する最も高い位から最も低い位までの桁数を数えれば、その桁数が有効桁数となる。

12.4 ■ で0.01の桁は確実な値がわかるので不確かさは0.1とすると  
全体に対する不確かさは  $\frac{0.1}{10} = \frac{1}{100}$  100分の1 以下なので  
有効桁数は3桁とわかる

0.0132 ■ で不確かさは0.0001、全体に対する不確かさは  $\frac{0.0001}{0.01} = \frac{1}{100}$   
 $1.32 \times 10^{-2}$ と表すと有効桁数は3桁

加減乗除すると使ったデータの中で一番少ない有効桁数で統一される



# 物性測定には道具が重要

道具は測定量によって選ばれる  
道具によって有効数字が決まる

例えば 長さの測定 何を測るのか

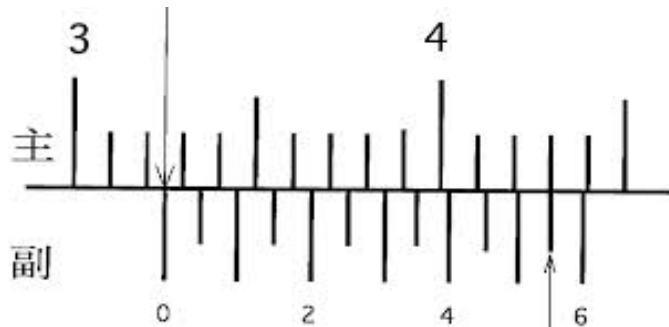
|      |            |
|------|------------|
| 道路   | レーザ測定器、巻き尺 |
| 机    | 巻き尺 ものさし   |
| 鉛筆   | ものさし、ノギス   |
| 紙の厚さ | マイクロメータ    |



# ノギスの有効数字

(a) 副尺の0が主尺のどの辺にあるかを見る。

下の場合、副尺の0は、主尺の32mmと33mmの間にあるから、32mmを確保する。



(b) 次に、副尺の線と主尺の線が一直線になっている位置の副尺の目盛りを読む。

上の場合では5. 5

最後に(a)と(b)の読みを加算する

(a) 主尺 32.0 mm

(b) 副尺 0.55 mm

+) \_\_\_\_\_  
計            32.55 mm

ノギスの不確かさは 0.05mm    有効桁は3桁



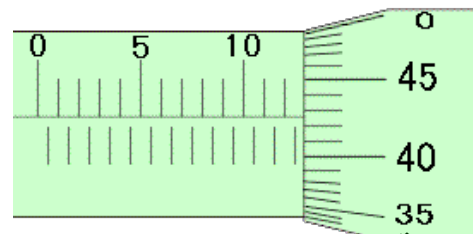
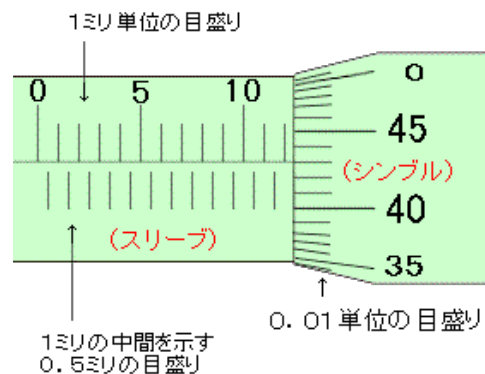
# マイクロメータの有効数字

マイクロメータで測定した時、図に示すような目盛であったとすると、目盛から読みとることができるのは

スリーブの目盛は $12+\alpha$

シンプルの目盛( $\alpha$ )は43

従って $D=12+\alpha=12.0+43/100=12.43\text{mm}$



上の図のようにシンプルの目盛りで千分台はだいたいしか分かりませんので目測でおおよその値を読取ります。

スリーブの目盛は $12.5+\alpha$

シンプルの目盛( $\alpha$ )は42.5

従って

$D=12.5+\alpha=12.5+42.5/100=12.925\text{mm}$



有効桁数は4桁

# 熱電特性計測の規格

# 熱電特性に関するJIS規格

日本規格協会を通じて、日本ファインセラミックス協会が「石油代替電源用新素材の試験・評価方法に標準化に関する調査研究」の中で、平成8年から3ヶ年間「熱電特性測定方法の調査研究」を行った。

JIS 規格として2002年に制定された。

R1650-1「ファインセラミックス熱電材料の試験方法―第1部：熱電能試験方法」

R1650-2「ファインセラミックス熱電材料の試験方法―第2部：抵抗率試験方法」

R1650-3「ファインセラミックス熱電材料の試験方法―第3部：熱拡散率・熱容量・熱伝導率試験方法」

# 熱電物性の計測に関する国際規格

## 国際標準規格 (2023)

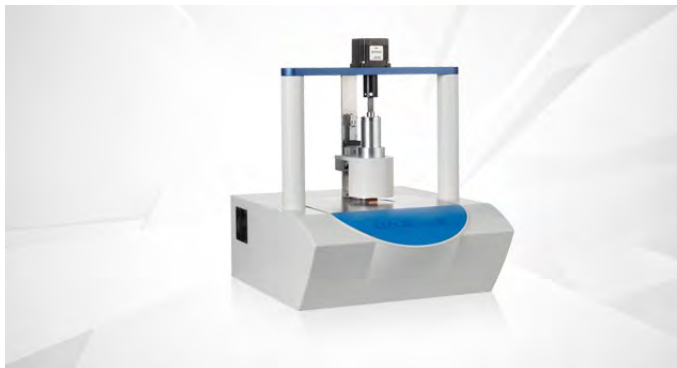
- ISO 24687「ファインセラミクス(アドバンスドセラミクス、アドバンスドテクニカルセラミクス)—室温および高温でのバルク熱電材料のゼーベック係数と電気伝導率の測定」

## アドバンス理工



<http://advance-riko.com/thermoelectric-evaluation-system/>

# LINSEIS



<https://linseis.jp/>



# Quantum Design



<https://www.qdusa.com/products/ppms.html>

# NETZSCH



<https://analyzing-testing.netzsch.com/ja>



TEMTE Inc.



<http://temte.ca/ZT-Scan.html>

# 物性計測の魔物

物性測定には便利な測定装置が開発されています



装置はブラックボックスの場合が多い

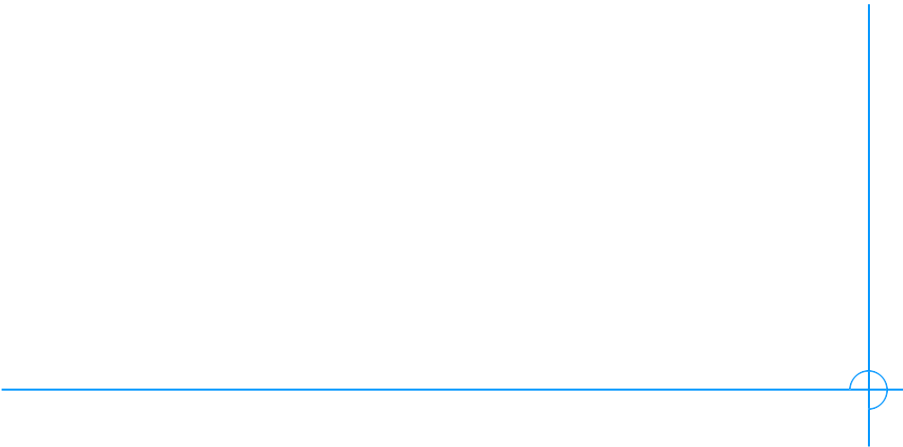


- 測定の原理を理解して測定しているか
- 開発された装置の使い方を良く理解しているか
- 開発された装置の測定条件を理解しているのか
- 開発された装置での測定結果は信用できるのか
- 開発された装置の測定結果の有効数字を理解しているか
- 測定データの取り扱いは正しいか



# 熱電特性計測の基本

# 比抵抗計測の基本

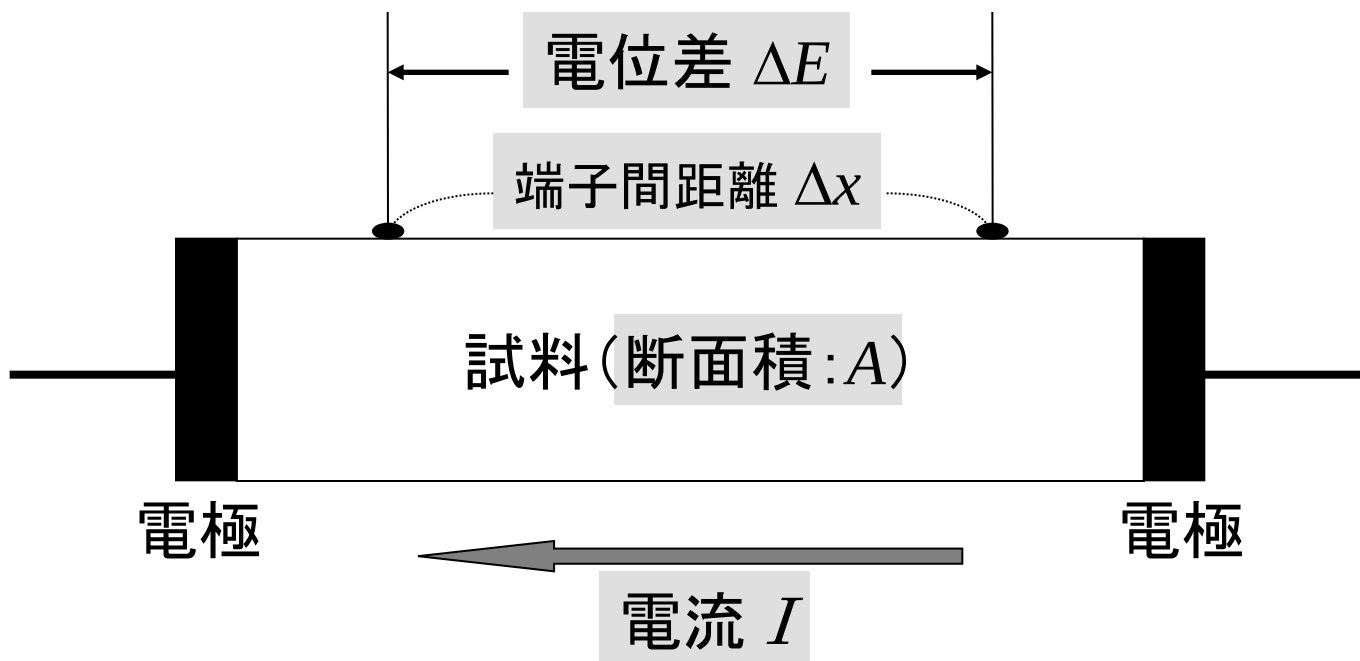


# 比抵抗測定の基本

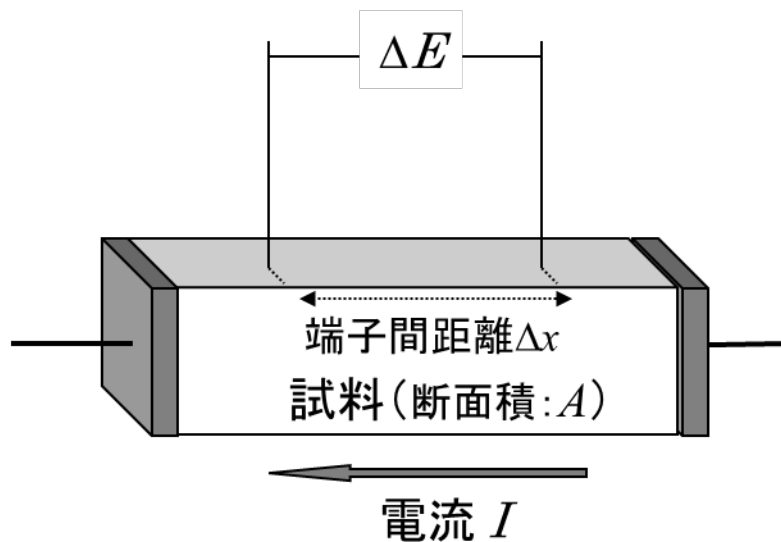
## 四端子法

$$\rho = \frac{\Delta E}{I} \frac{A}{\Delta x}$$

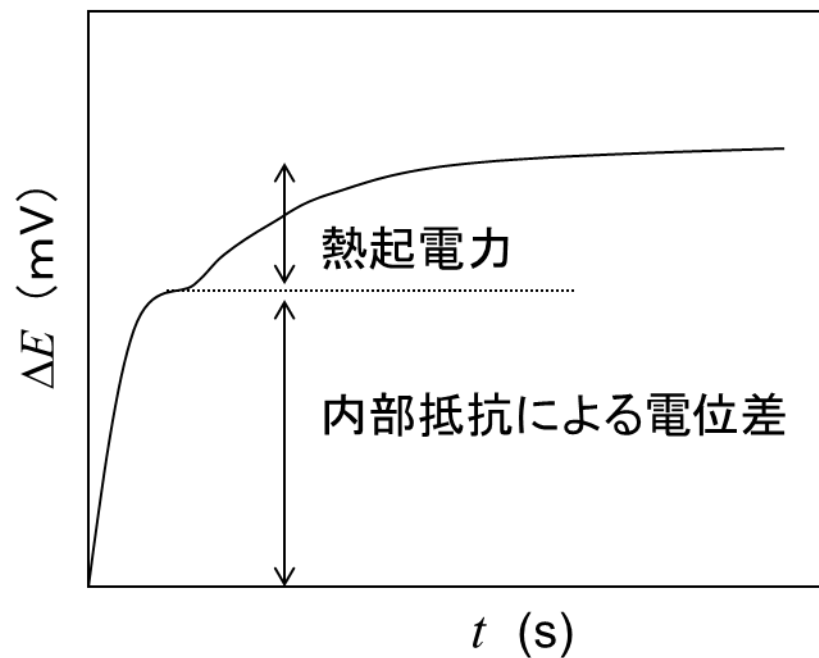
$$\left( \sigma = \frac{I}{\Delta E} \frac{\Delta x}{A} \right)$$



# 4端子法(直流法)

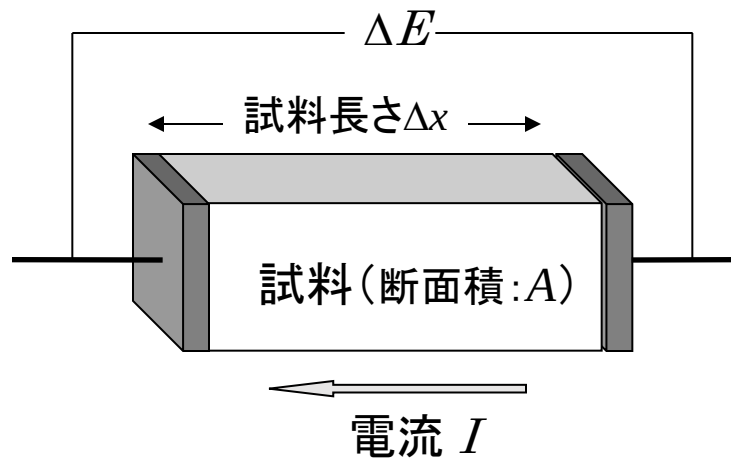


$$\rho = \frac{\Delta E}{I} \frac{A}{\Delta x}$$

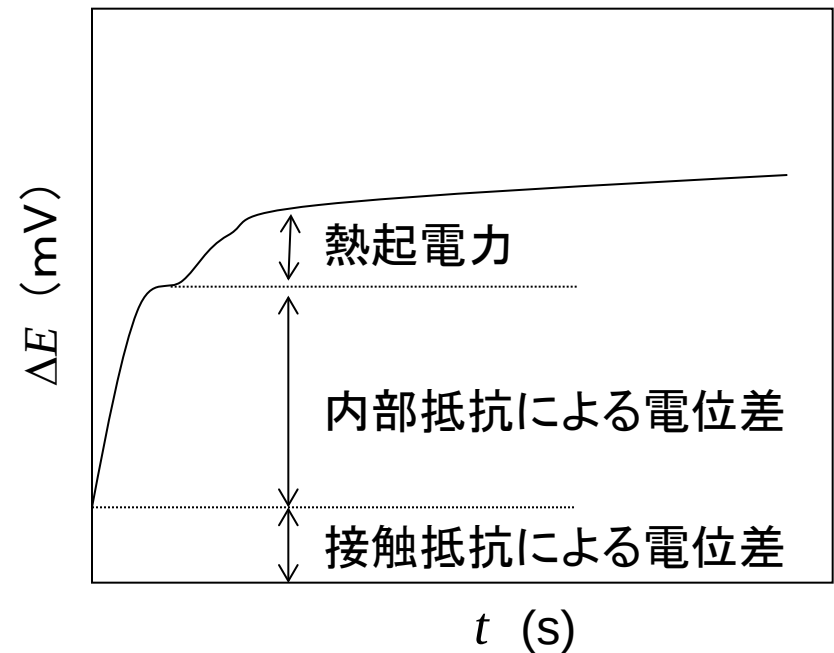


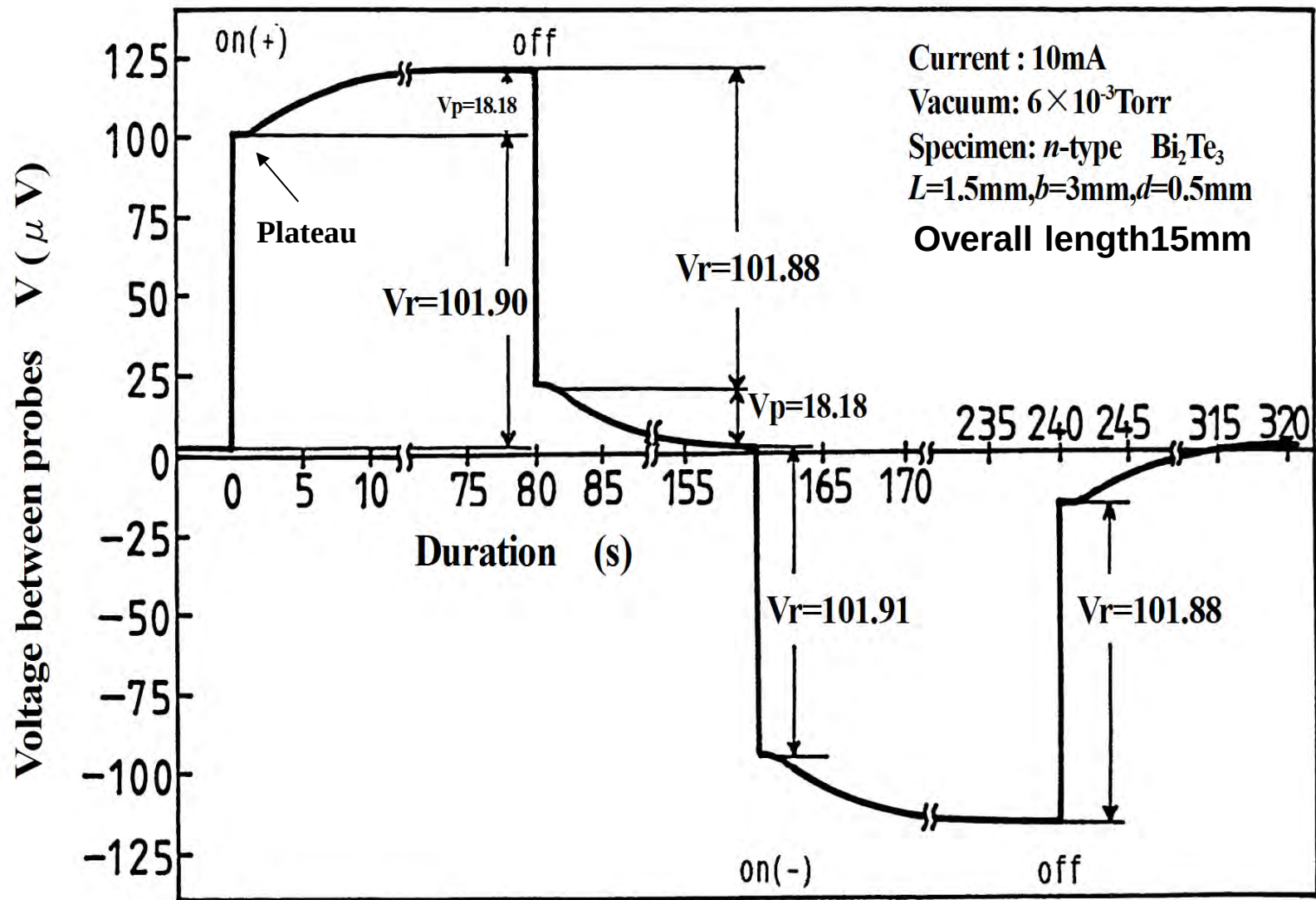


# 2端子法(直流法)



$$\rho = \frac{\Delta E}{I} \frac{A}{\Delta x}$$





ペルチェ効果による降下電圧と通電時間の関係

# n型Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>熱電材料の電気抵抗測定に 及ぼすペルチェ効果の影響

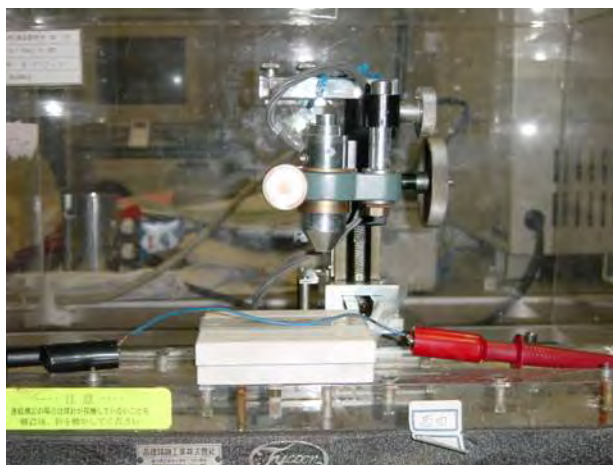
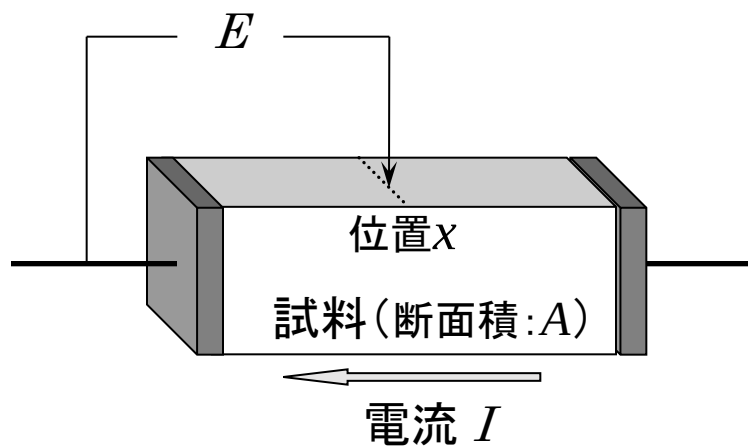
| 電流密度<br>mA/mm <sup>2</sup> | 断熱状態  |                | 計算値            | 真空中            |                | 空气中            |                |
|----------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                            | ΔT(K) | V <sub>p</sub> | V <sub>r</sub> | V <sub>p</sub> | V <sub>r</sub> | V <sub>p</sub> | V <sub>r</sub> |
| 6.6667                     | 0.39  | 78             | 101.9          | 18.18          | 101.89         | 13.63          | 101.92         |
| 33.333                     | 1.80  | 360            | 509.5          | 111.92         | 509.55         | 65.12          | 509.70         |
| 66.667                     | 3.24  | 680            | 1019.0         | 224.95         | 1019.20        | 125.00         | 1019.50        |

試料は、全長15mm、降下電圧端子間1.5mmで $\alpha=200\mu\text{V/K}$ 、 $Z=2.6 \times 10^{-3}\text{K}^{-1}$ である  
 $\Delta T$ は降下電圧端子間の温度差、 $V_p$ はペルチェ効果による電位差、 $V_r$ は電気抵抗による降下電圧である

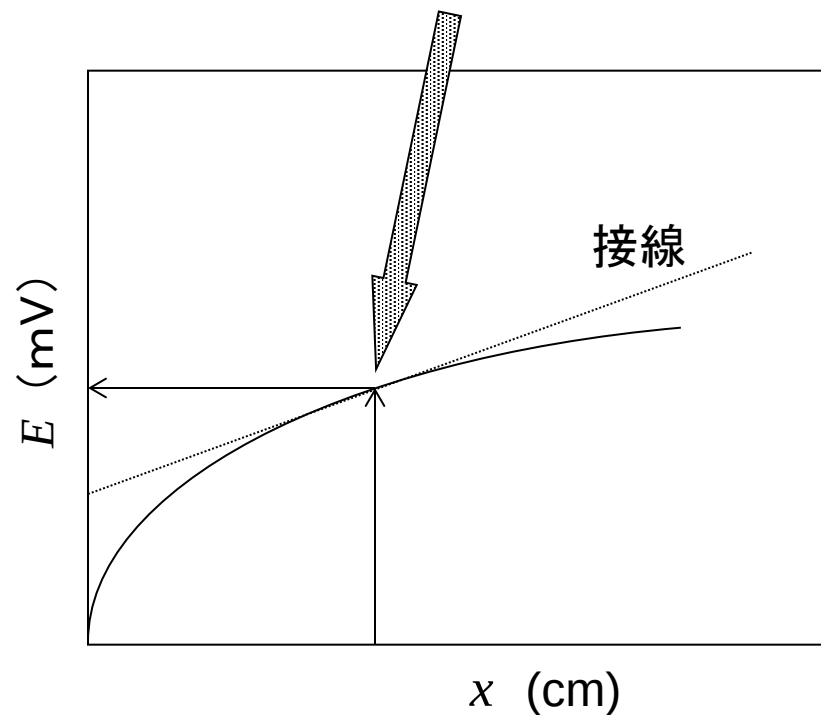
## 比抵抗測定での熱起電力の影響を防ぐには

- 試料の長さを長くして電流印可後のペルチェ効果の影響が現れる時間を遅くらせる
- 電極と測定端子間の距離をなるべく離す
- 準真空状態で測定する
- 測定を高速で行う

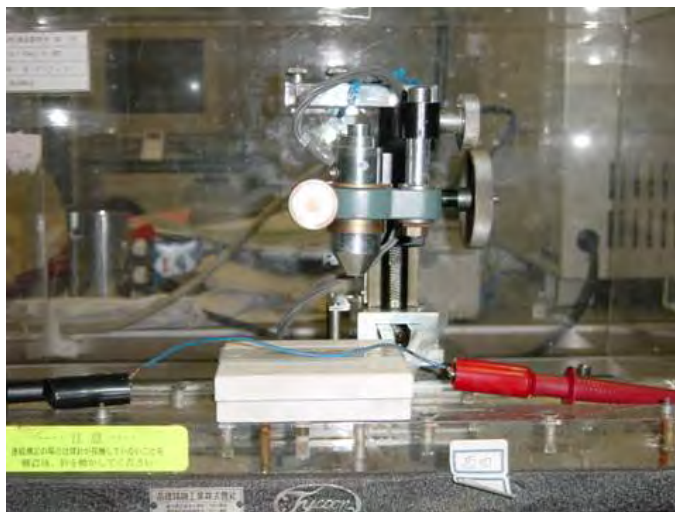
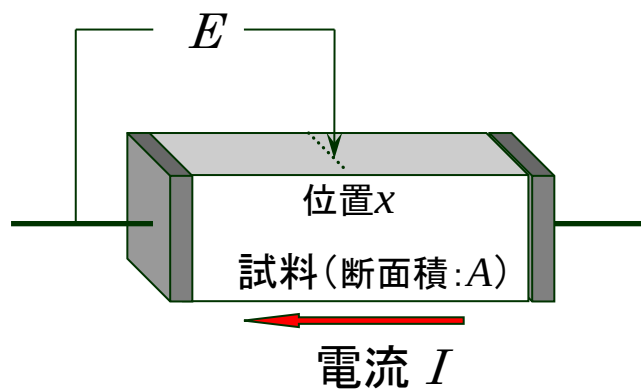
# 1探針法(直流法)



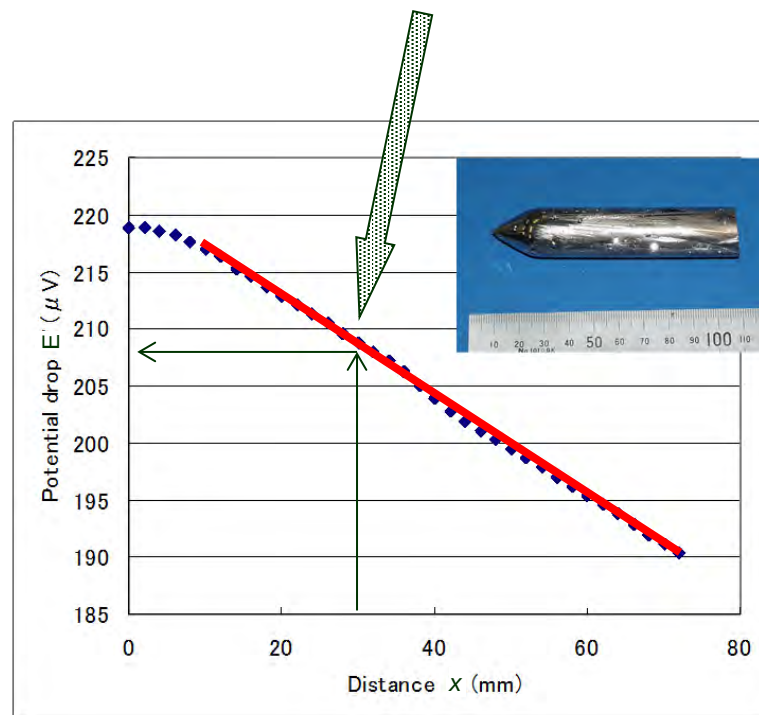
$$\rho = \frac{\Delta E A}{\Delta x I}$$



# 1探針法(直流法)

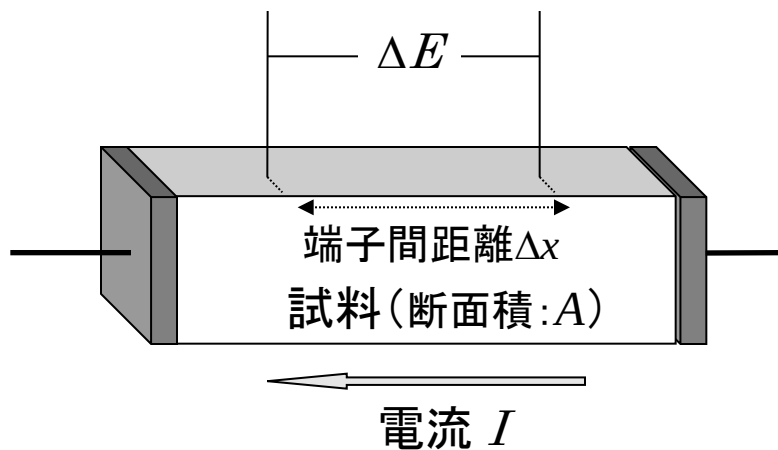


$$\rho = \frac{\Delta E A}{\Delta x I}$$

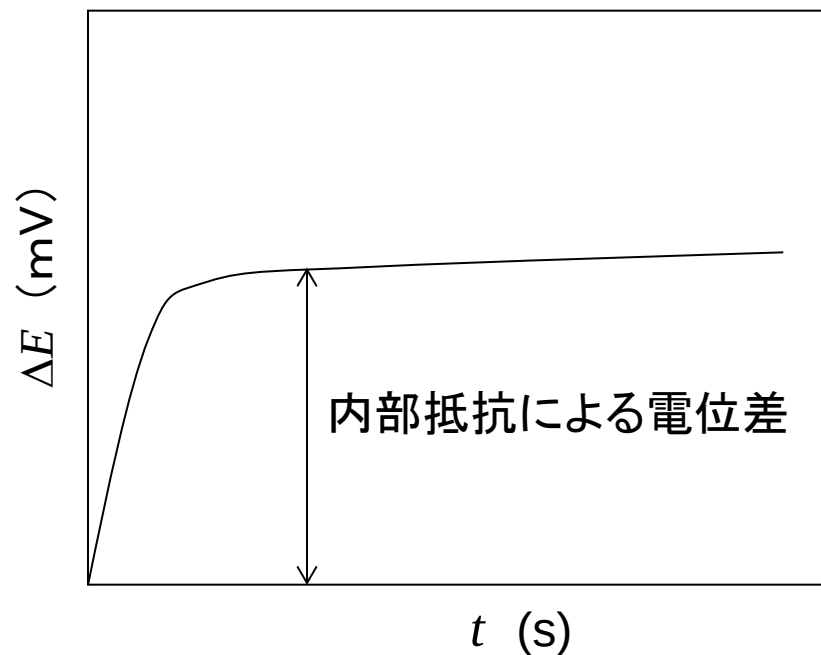
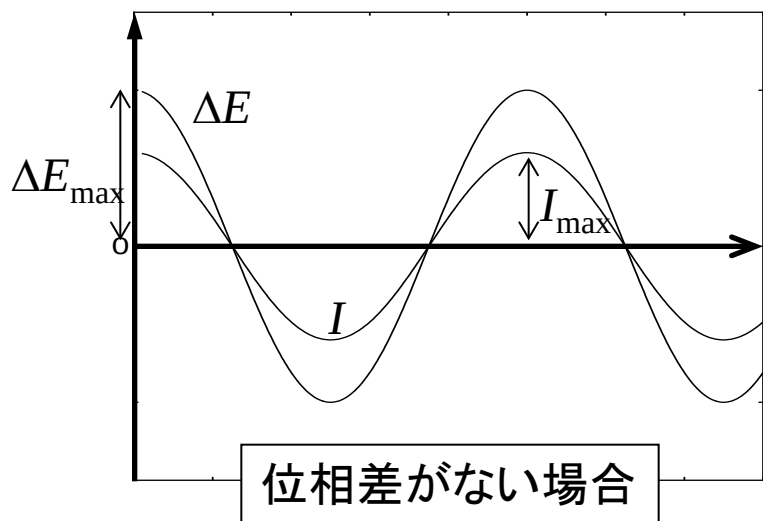


主に材料の均一性評価、接合評価に使用する

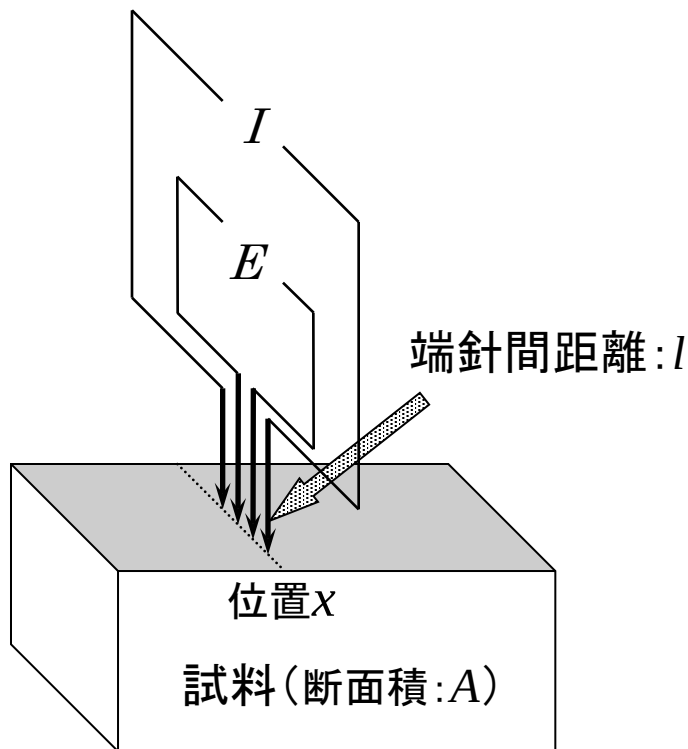
# 4端子法(交流法)



$$\rho = \frac{\Delta E_{\max}}{I_{\max} \frac{A}{\Delta x}}$$



# 4探針法(直流法)

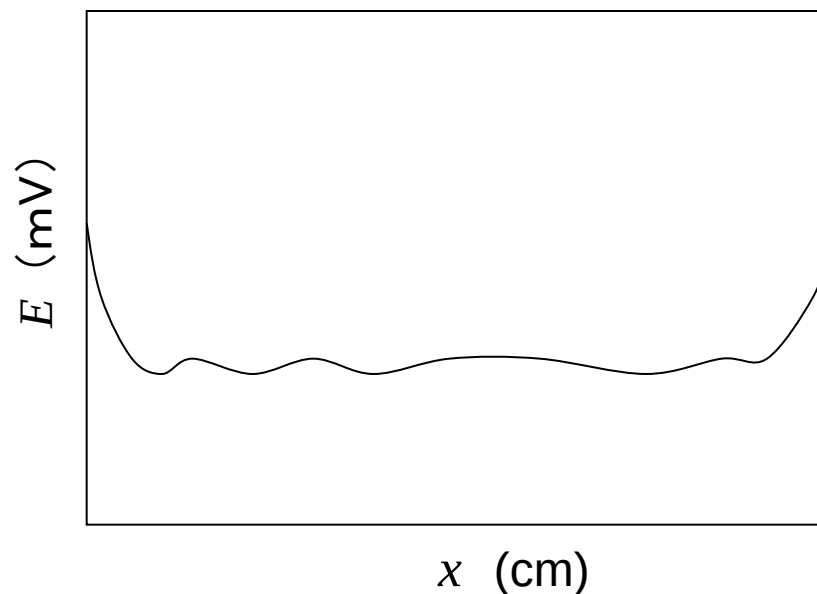


$$\rho = \frac{E}{I} 2\pi l$$

(十分に大きく厚い  
試料の場合)

$$\rho = \frac{E}{I} w F$$

(有限の厚さ  $w$  の試料)  
 $F$ : 補正係数





# ISO制定のためのBiTe系熱電材料における 比抵抗の試験結果

| 研究機関 | P型－1  | P型－2  | n型－1  | n型－2  |
|------|-------|-------|-------|-------|
| NIMS | 13.00 | 10.80 | 10.00 | 14.60 |
| A    | 13.76 | 11.68 | 10.74 | 14.97 |
| B    | 16.40 | 10.47 | 11.57 | 16.40 |
| C    | 14.00 | 10.81 | 21.00 | 15.13 |
| D    | 21.90 |       | 19.00 |       |

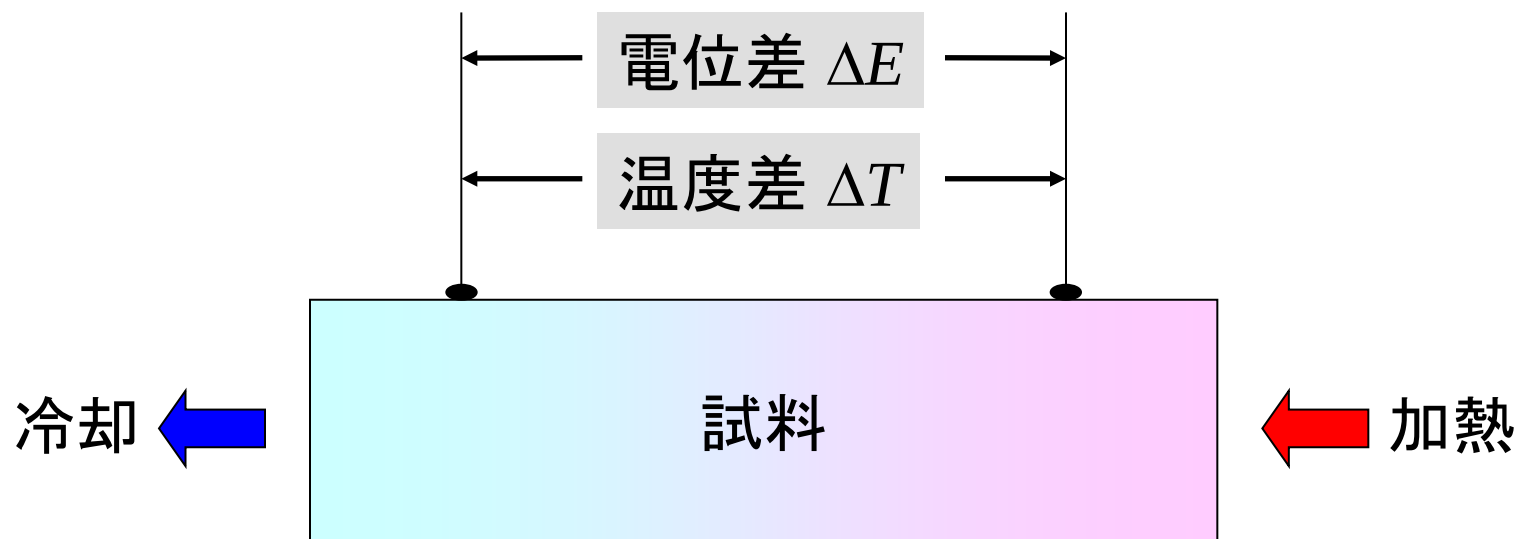
単位： $\mu\Omega\text{m}$

NIMSは高速直流法、Aは交流法、BとCは直流法、Dはファンデア・ポーク法

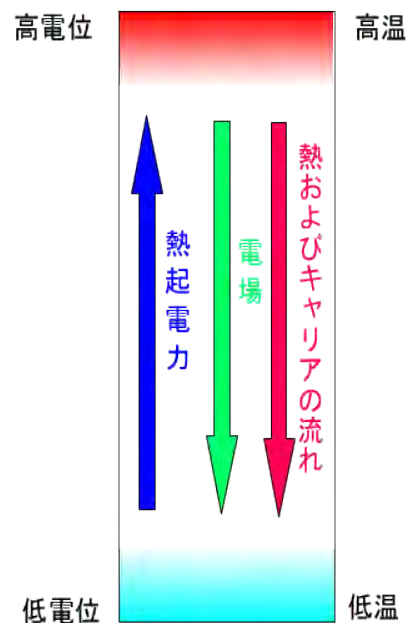
# ゼーベック係数計測の基本

# ゼーベック係数測定の基本

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta T}$$



# 熱起電力とは



熱起電力の発生 (n型半導体を例として)

両端に温度差を与えると、高温部から低温部への熱の拡散に伴い、n型半導体では電子が移動

高温部が高電位に低温部が低電位となり、高温部から低温部に向く電場が生じる

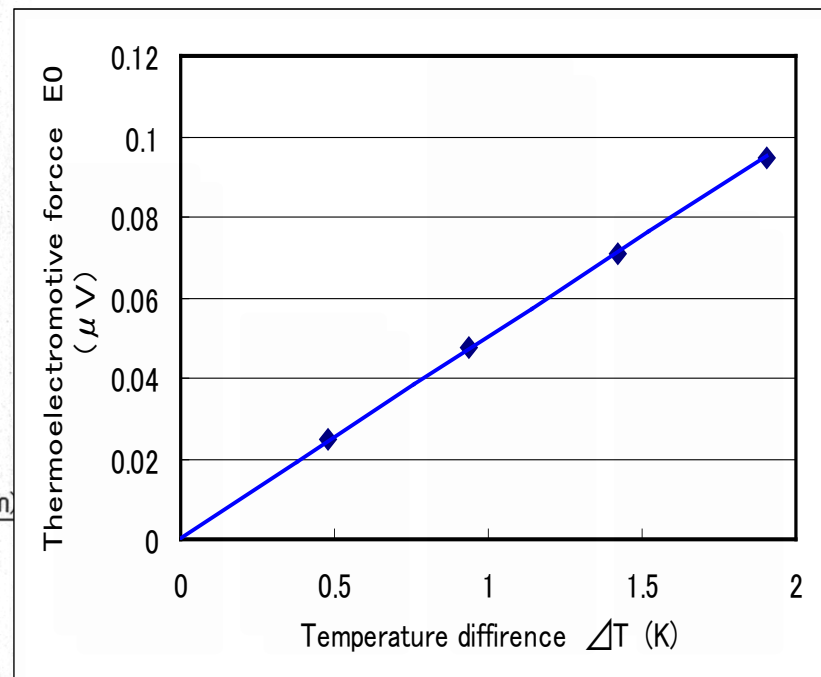
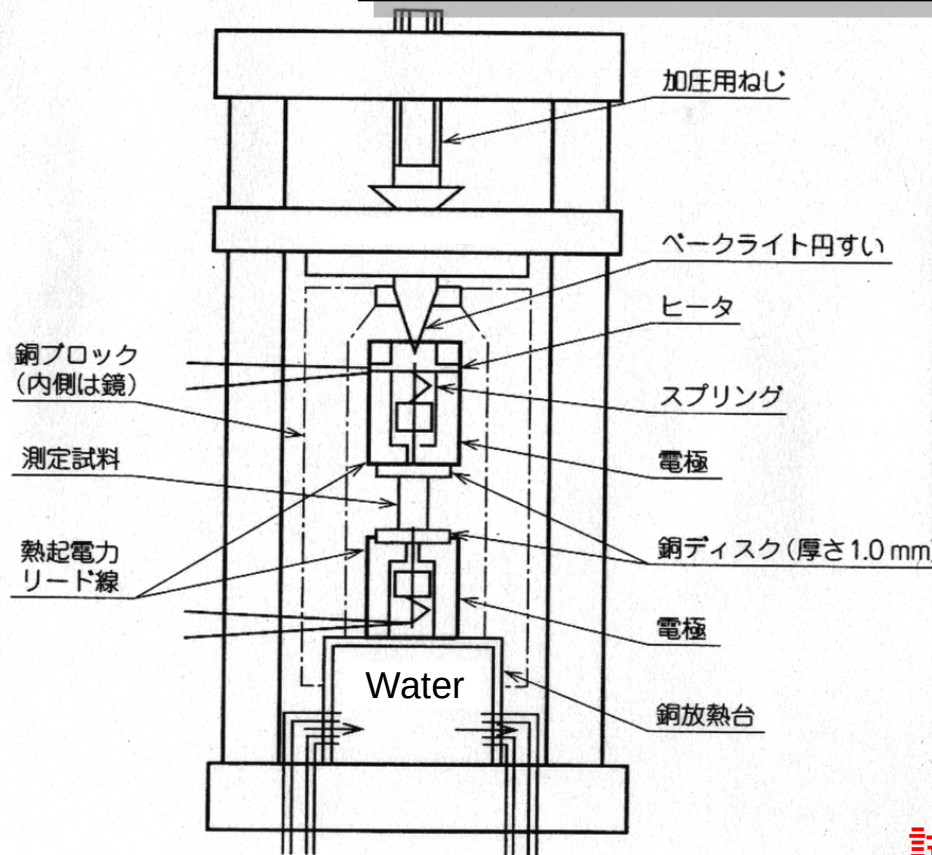
熱の拡散による電子の移動量の増加に伴って電場は強くなり、電場による力と熱拡散による力が釣り合い電子の移動が止まって平衡状態となる

熱拡散方向と逆向きに熱起電力が生じる  
このときの熱起電力は負と定める

# 室温用ゼーベック係数測定装置

1°Cあたりの熱起電力

$$\alpha = \frac{E_0}{\Delta T}$$



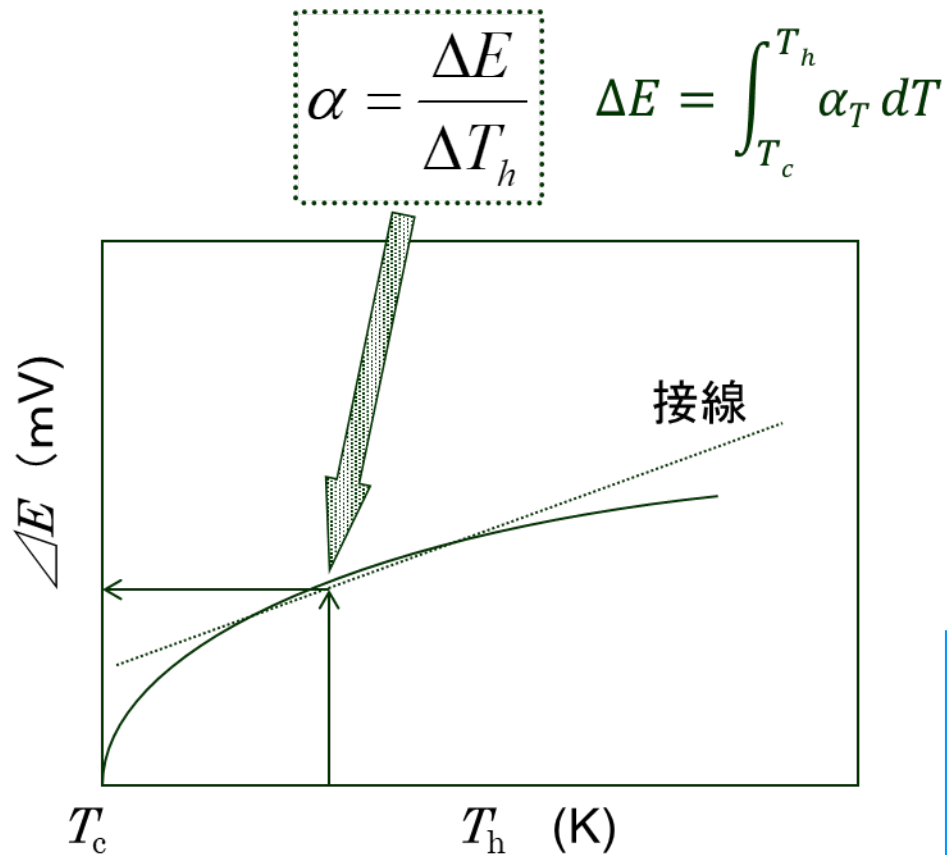
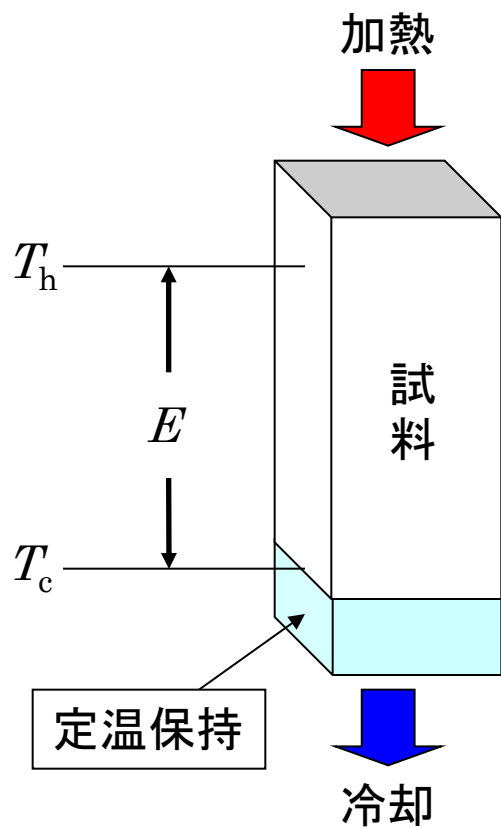
試料に与える温度差は2K以内に抑える

# ISO制定のBiTe系熱電材料における ゼーベック係数の試験結果

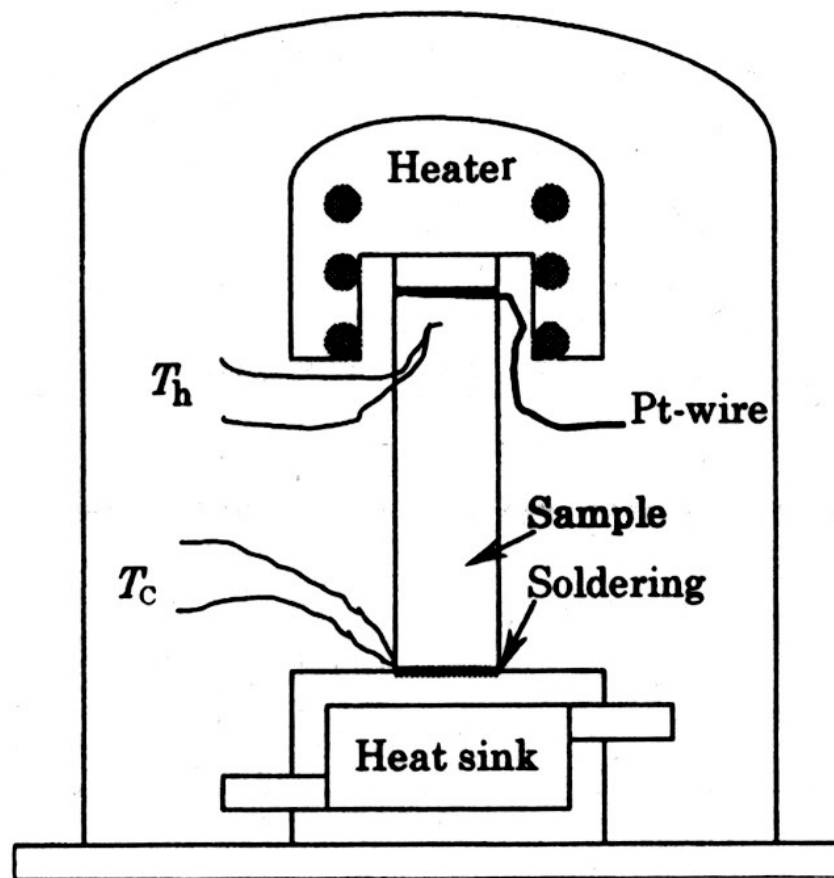
| 研究機関 | P型－1  | P型－2   | n型－1    | n型－2    |
|------|-------|--------|---------|---------|
| NIMS | 218.8 | 207.16 | －185.51 | －210.67 |
| A    | 213.0 | 204    | －189.0  | －210    |
| B    | 215.1 | 206    | －215.1  | －211.2  |
| C    | 200   | 196    | －200.0  | －242    |
| D    | 240   |        | －245.0  |         |

単位：μV/K

# 熱起電力の微分法



# NIMSでの熱電能の温度変化測定装置





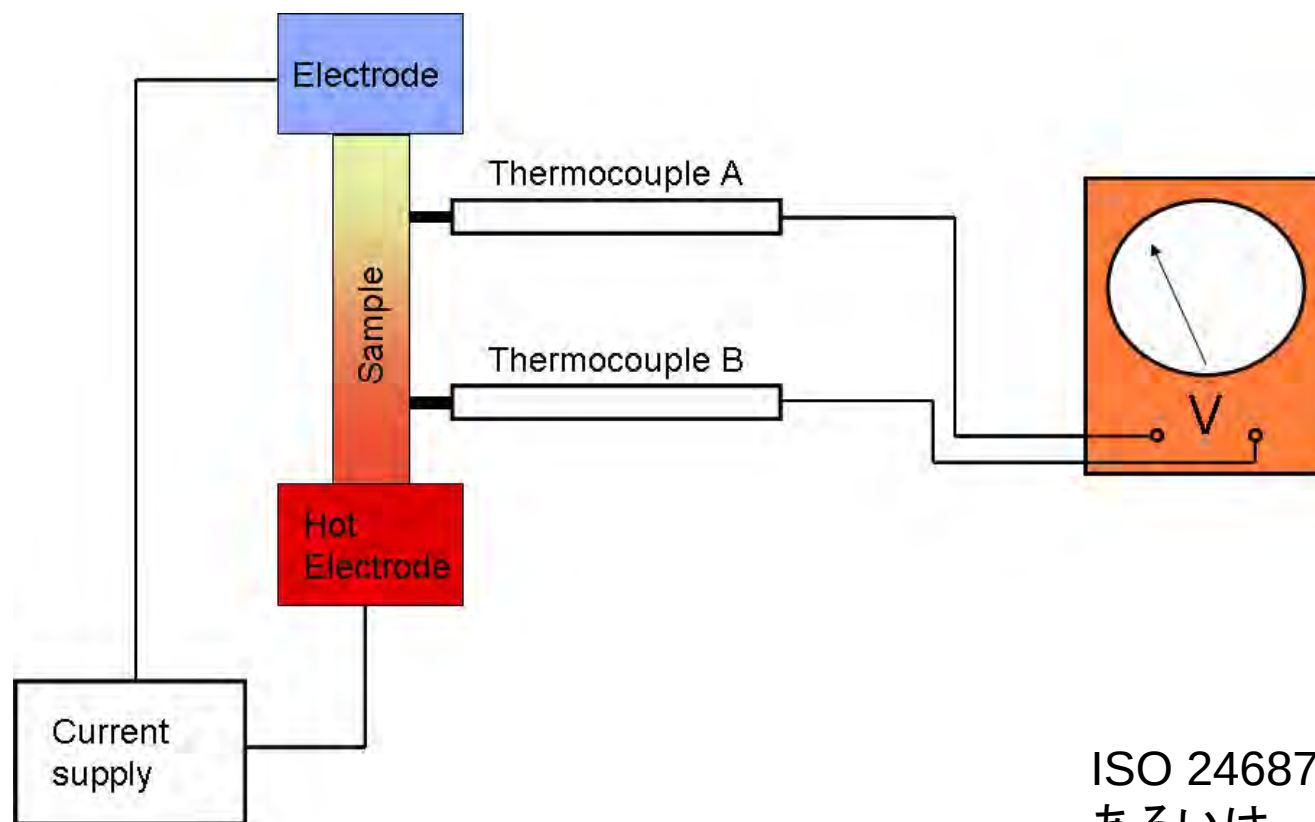
# ZEM-Ⅲ (ゼーベック係数と比抵抗測定)



アルバック理工株式会社 ZEM3

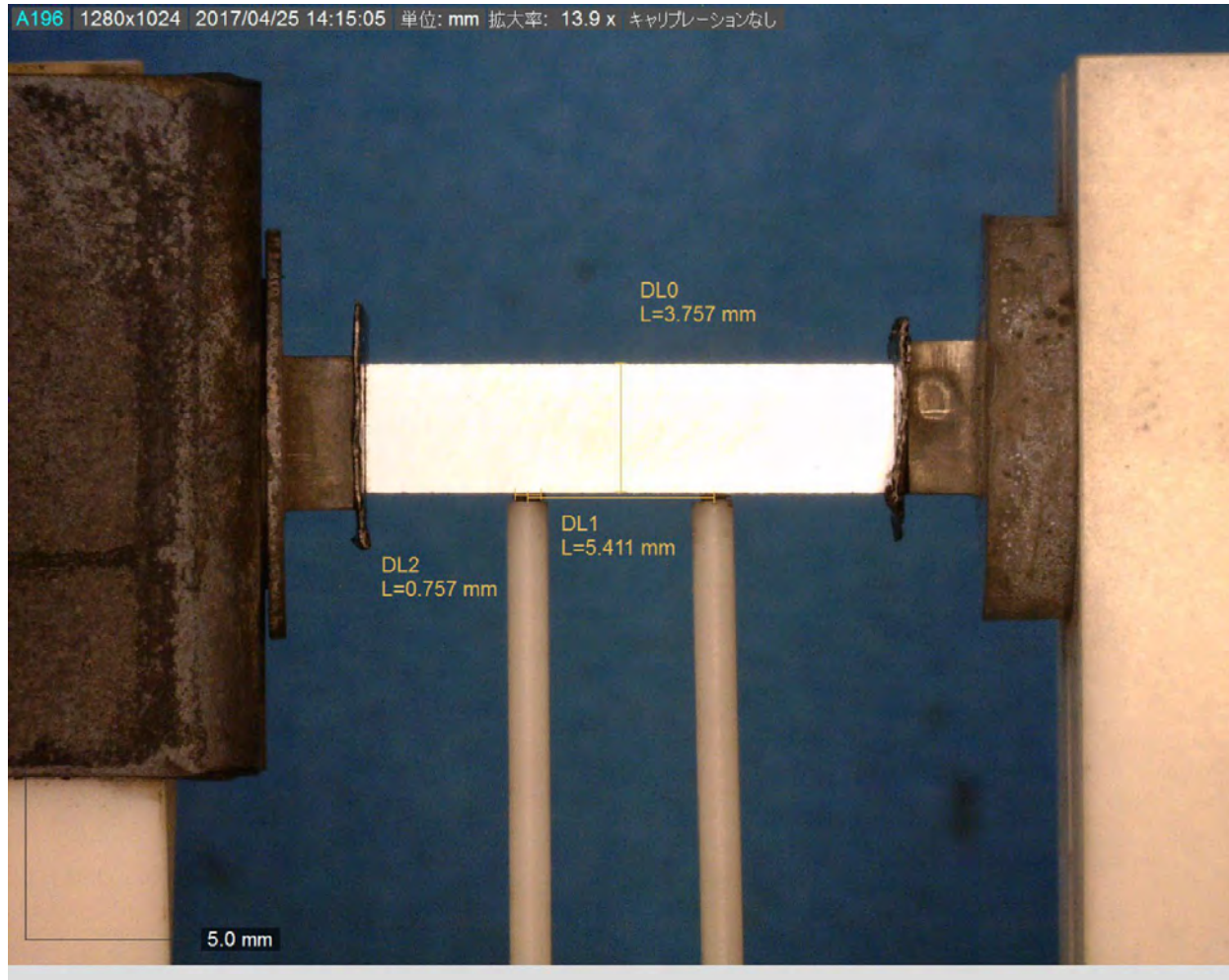
# ZEM-Ⅲの測定原理

## 国際規格に定義されている方法



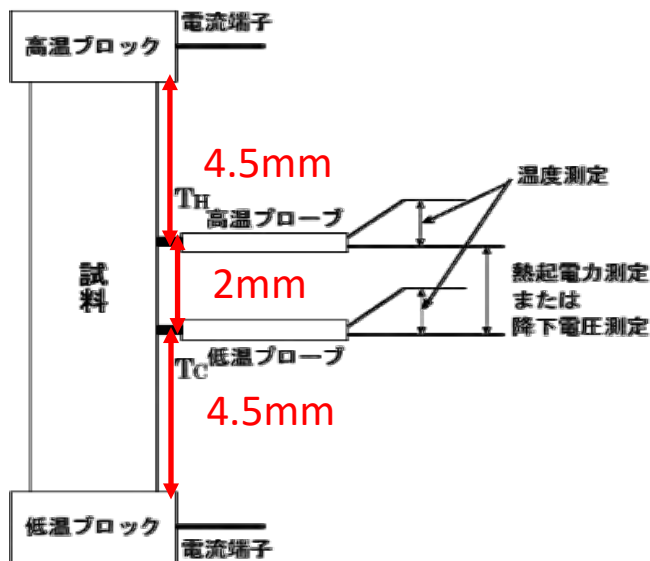
ISO 24687  
あるいは  
アルバック理工

# ZEM-Ⅲの試料セット



# ZEM-Ⅲ測定での注意点

一辺3mm角



## ゼーベック係数と抵抗率 測定の概略

### 望ましい測定

#### ■ ゼーベック係数

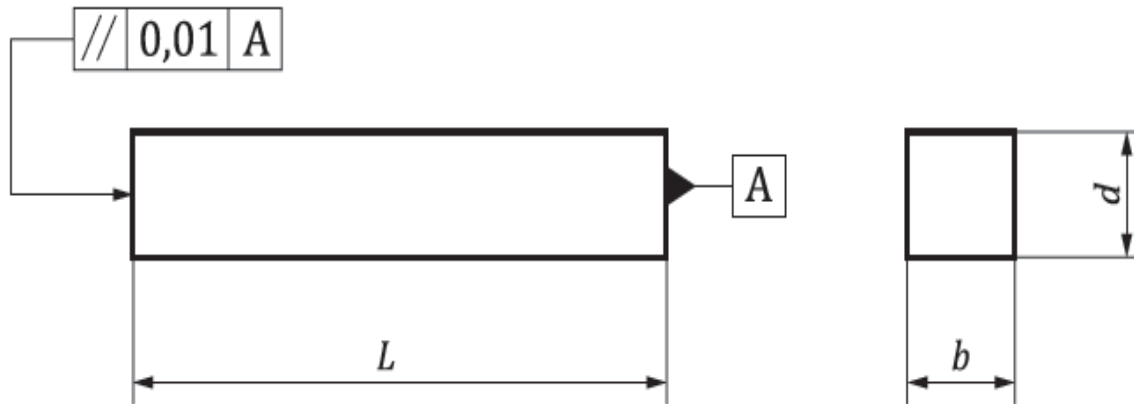
1. 試料のどの断面でも熱流束が均一
2. 熱ブロックと試料の接点から測定プローブと試料の接点までの距離が試料の直径(または一辺の長さ)の1.5倍以上
3. 測定プローブ間の温度差は3K以内、熱ブロック間の温度差は10K以内

#### ■ 抵抗率

1. 試料の研磨による均一性
2. 試料のどの断面でも電流密度が均一
3. 電極と試料が面接触
4. 試料の直径(または一辺の長さ)に対して電極と測定端子間の距離は約1.5倍以上
5. 測定端子間の距離は電流に直交する断面積の1/4程度

# 国際規格で定義されているサイズ

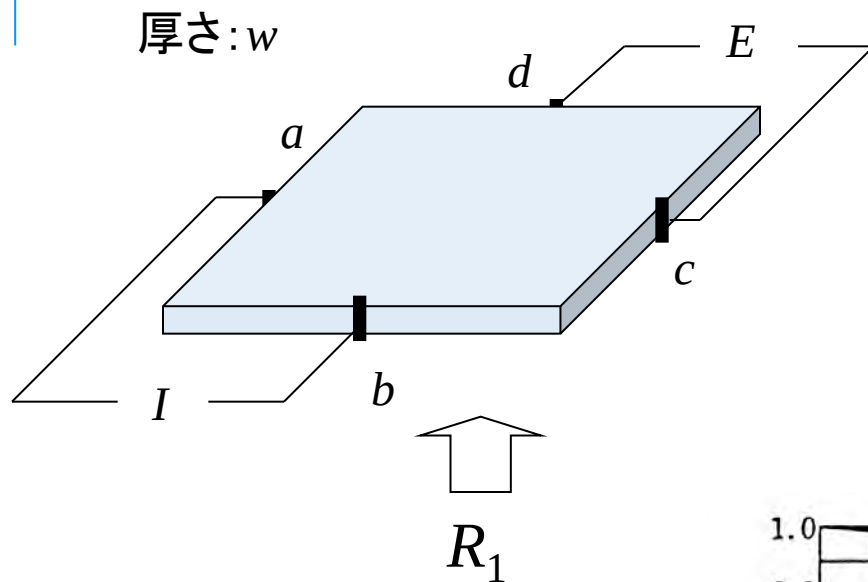
Dimensions in millimetres



| Width<br>$b$ | Depth<br>$d$ | Length<br>$L$ |
|--------------|--------------|---------------|
| 1,5 to 5     | 1,5 to 5     | 5 to 25       |

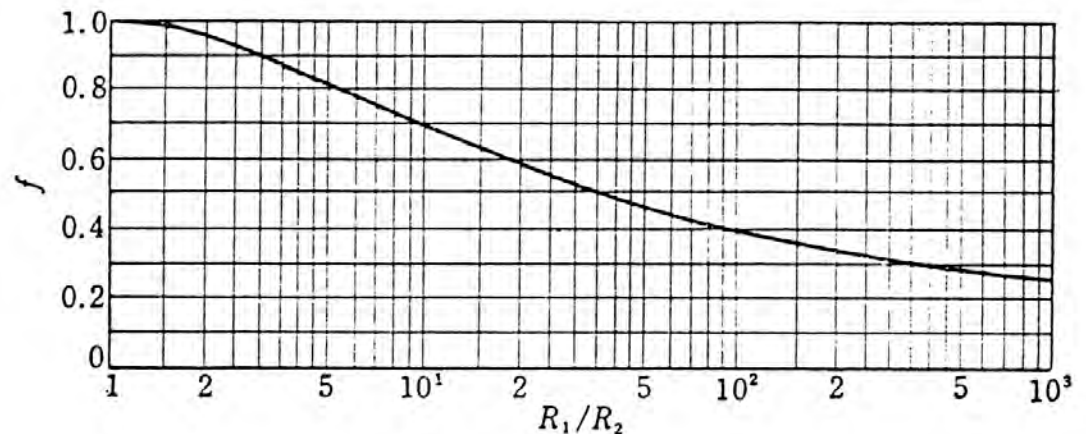
ISO 24687

# Van der Pauw法(直流法)



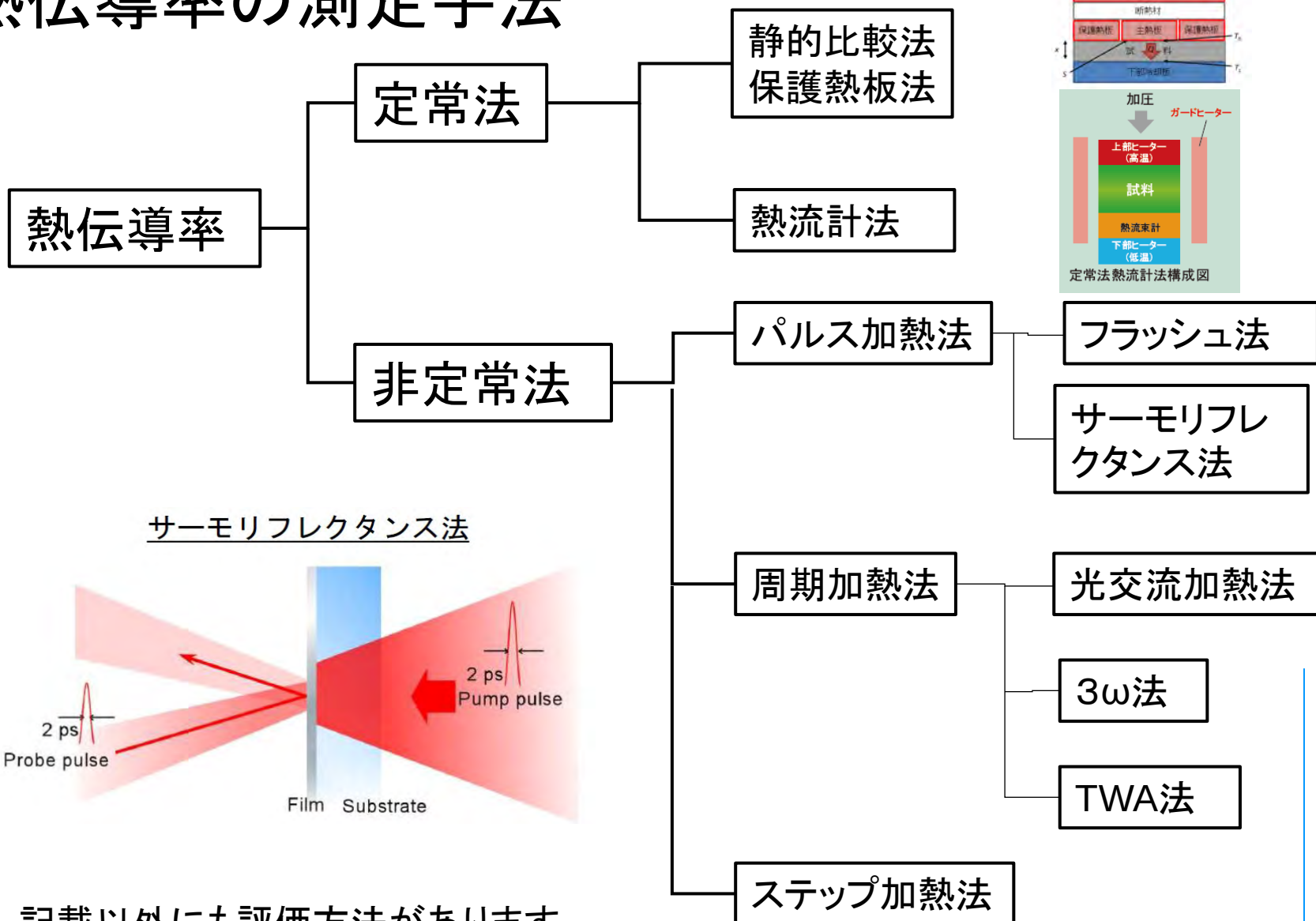
$$\rho = \frac{\pi w}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f(R_1/R_2)$$
$$\left[ R_1 = \frac{E_{cd}}{I_{ab}}, \quad R_2 = \frac{E_{da}}{I_{bc}} \right]$$

$R_1/R_2 < 1.5$  なら  $f=1$



# 熱伝導率計測の基本

# 熱伝導率の測定手法

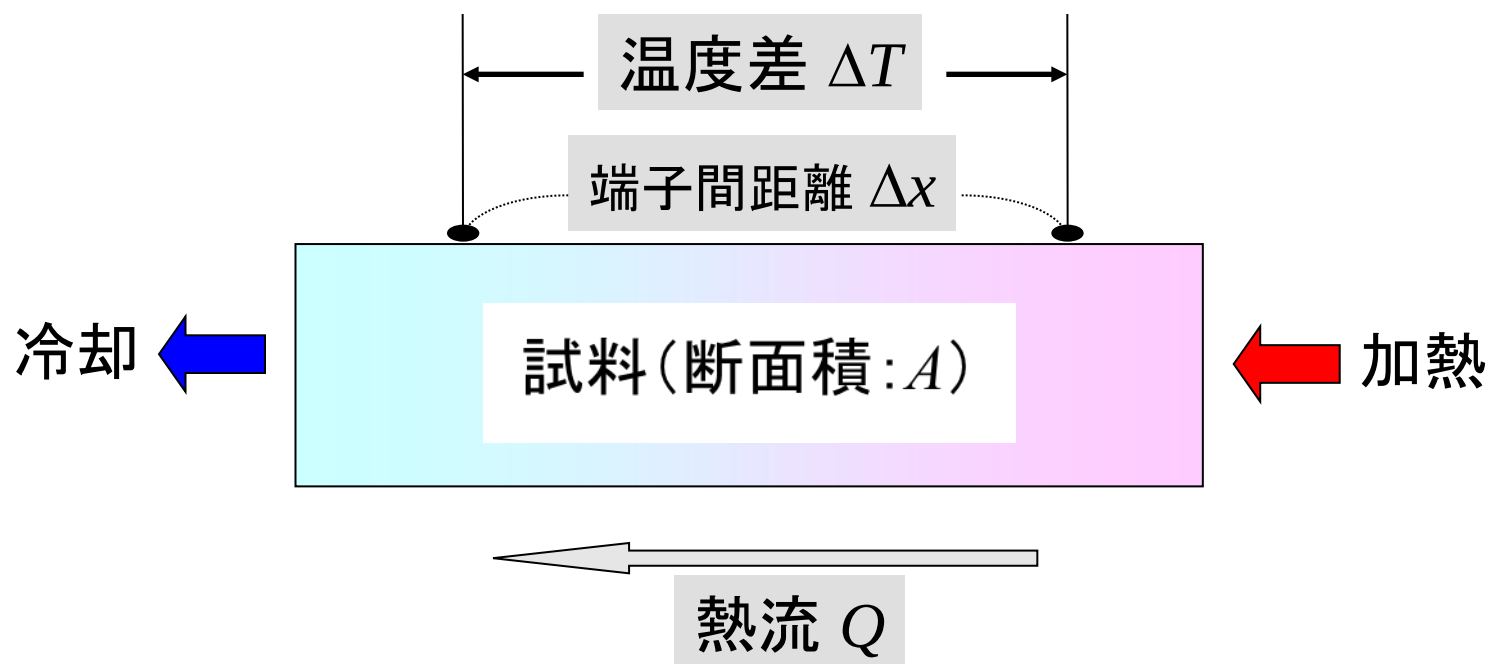


記載以外にも評価方法があります

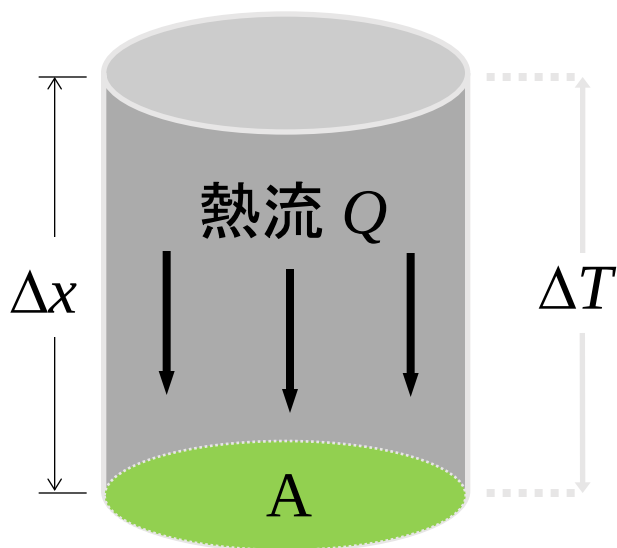


# 熱伝導率測定の基本

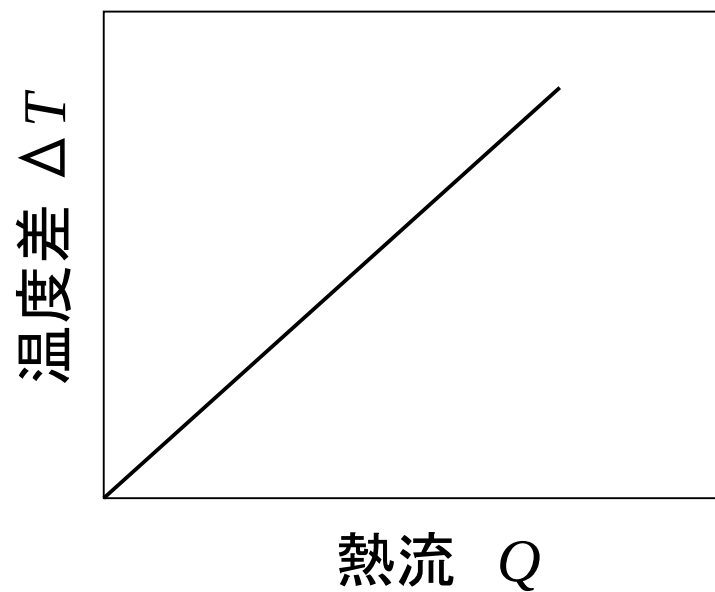
$$\kappa = \frac{Q}{\Delta T} \frac{\Delta x}{A}$$



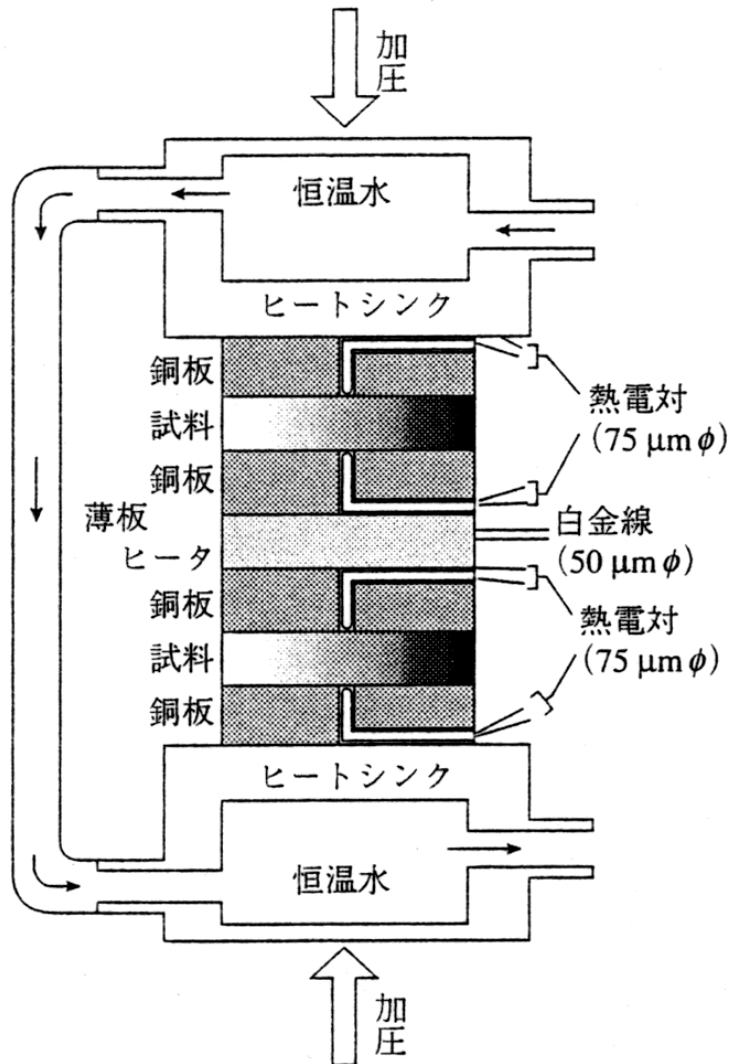
# 絶対法



$$\kappa = \frac{Q}{\Delta T} \frac{\Delta x}{A}$$

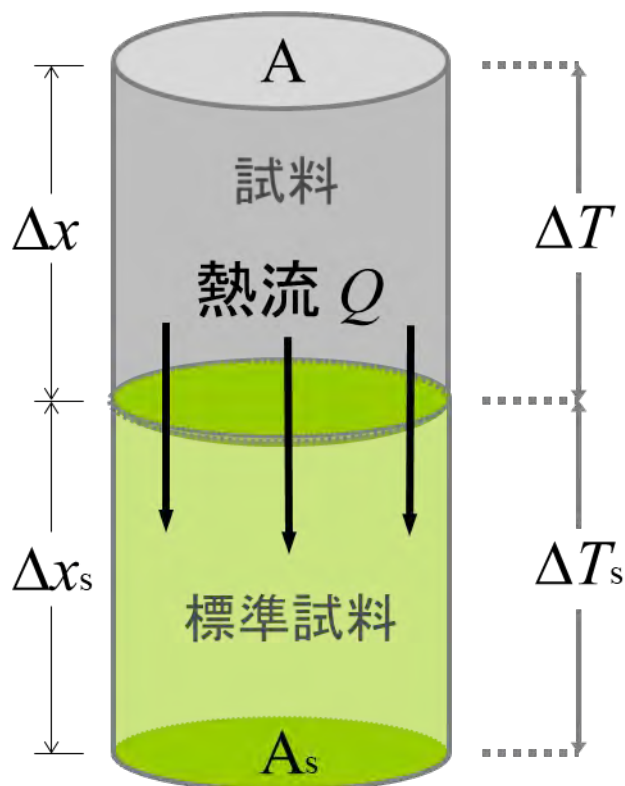


# 熱伝導率の絶対法測定装置

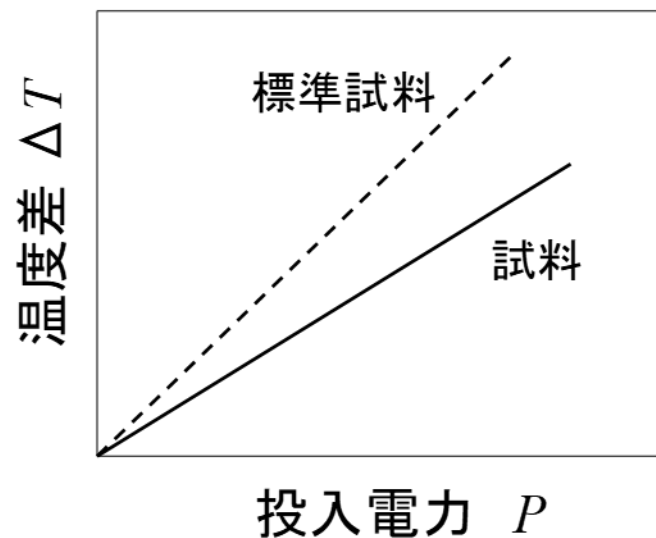


出典: 西田勲夫、熱電変換システム技術総覧、リアライズ社、(1995)

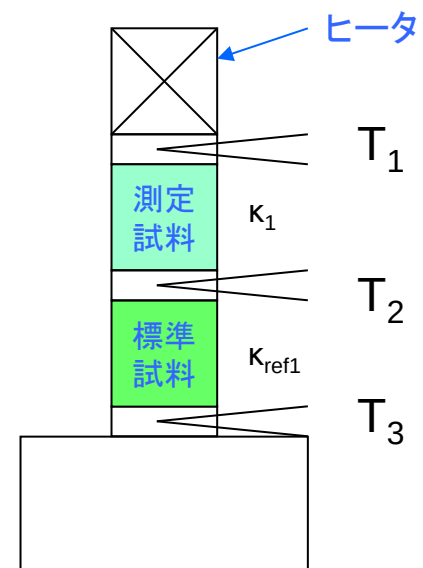
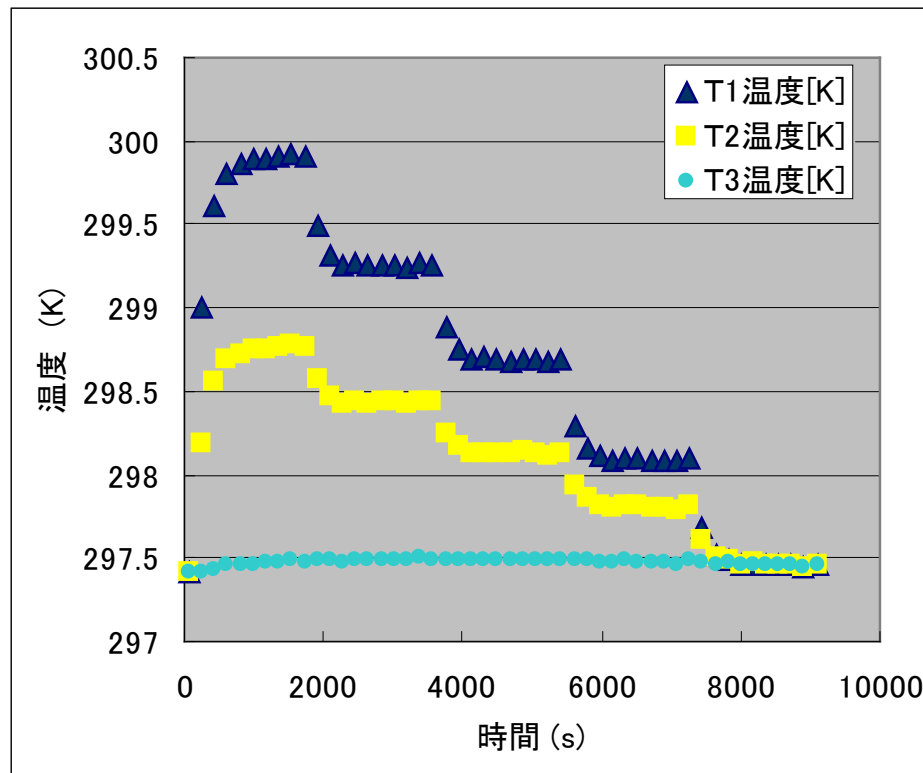
# 靜的比較法



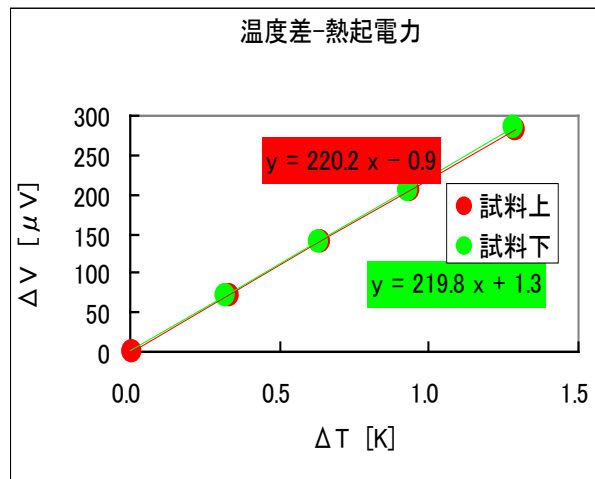
$$Q = \frac{A}{\Delta x} \kappa \Delta T = \frac{A_s}{\Delta x_s} \kappa_s \Delta T_s$$
$$\therefore \kappa = \left( \frac{A_s}{A} \right) \frac{\Delta T_s}{\left( \frac{\Delta x_s}{\Delta x} \right) \Delta T} \kappa_s$$



# 測定経過時間と測定端子の温度の関係

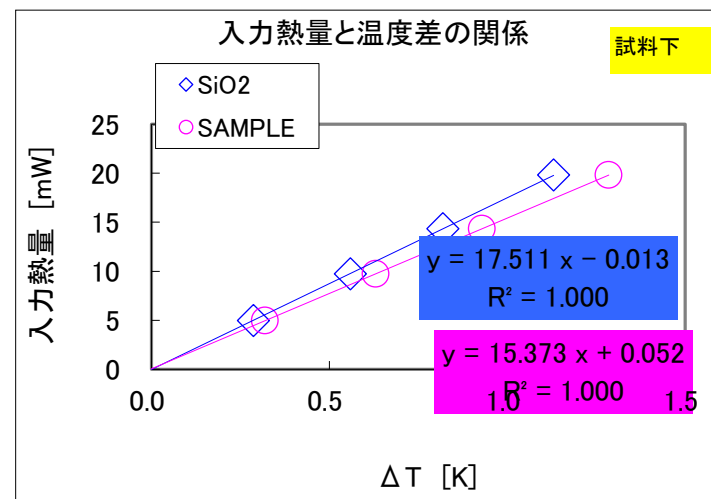
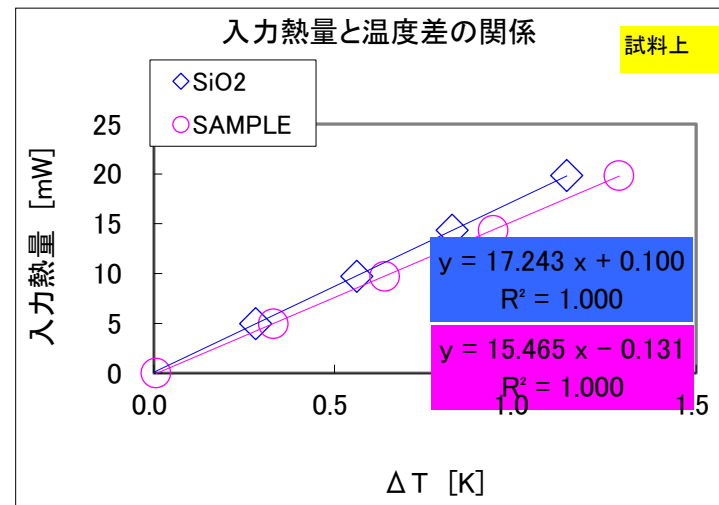


# 測定結果の解析例

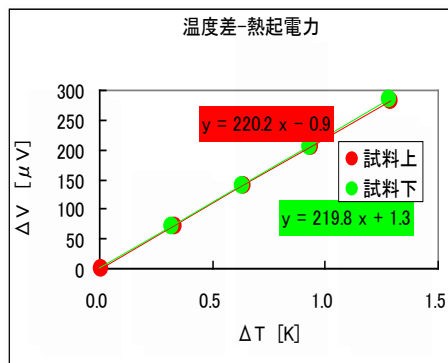
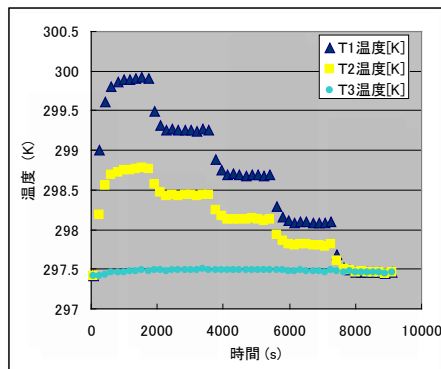


| SIZE    | SiO <sub>2</sub> | SAMPLE |
|---------|------------------|--------|
| 縦       | 4.344            | 4.418  |
| 横       | 4.284            | 4.415  |
| 断面積     | 18.610           | 19.505 |
| 高さ      | 4.701            | 4.710  |
| ΔT/Q(上) | 17.243           | 15.465 |
| ΔT/Q(下) | 17.511           | 15.373 |

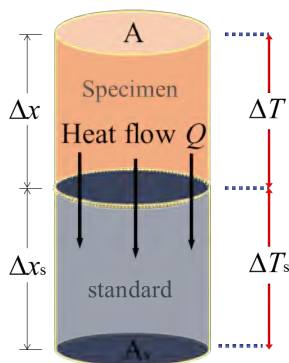
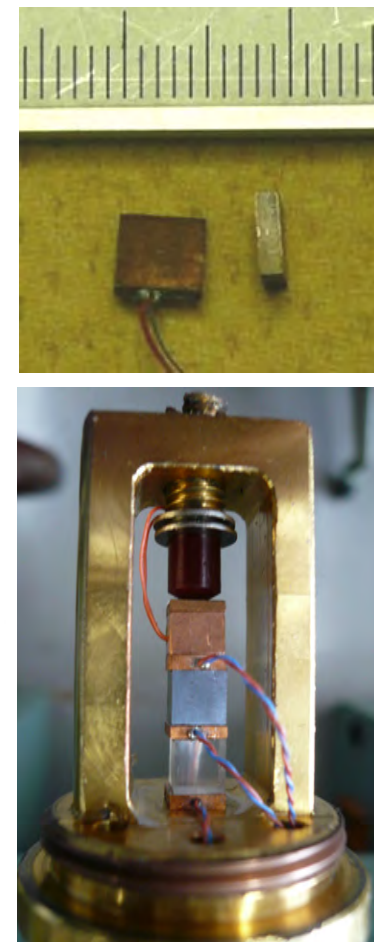
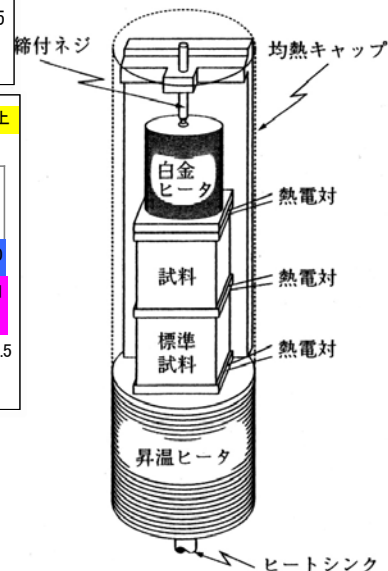
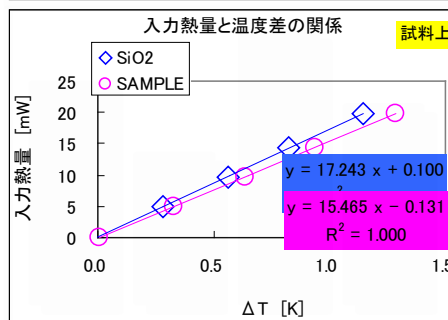
| 結果        | 上      | 下      | 平均    |
|-----------|--------|--------|-------|
| $\alpha'$ | 220.2  | 219.8  | 220.0 |
| $\kappa$  | 1.17   | 1.15   | 1.16  |
| 測定温度      | 297.80 | 298.57 | 298.2 |



# 高精度なゼーベック係数と熱伝導率同時測定システム



| 結果       | 上      | 下      | 平均    |
|----------|--------|--------|-------|
| $\alpha$ | 220.2  | 219.8  | 220.0 |
| $\kappa$ | 1.17   | 1.15   | 1.16  |
| 測定温度     | 297.80 | 298.57 | 298.2 |



$$Q = \frac{A}{\Delta x} \kappa \Delta T = \frac{A_s}{\Delta x_s} \kappa_s \Delta T_s$$

$$\therefore \kappa = \left( \frac{A_s}{A} \right) \frac{\Delta T_s}{\left( \frac{\Delta x_s}{\Delta x} \right) \Delta T} \kappa_s$$

ゼーベック係数  
熱伝導率

従来測定精度7%が0.5%に  
従来測定精度10%が1%に

静的比較法の概略図

# レーザフラッシュ法熱伝導率測定装置



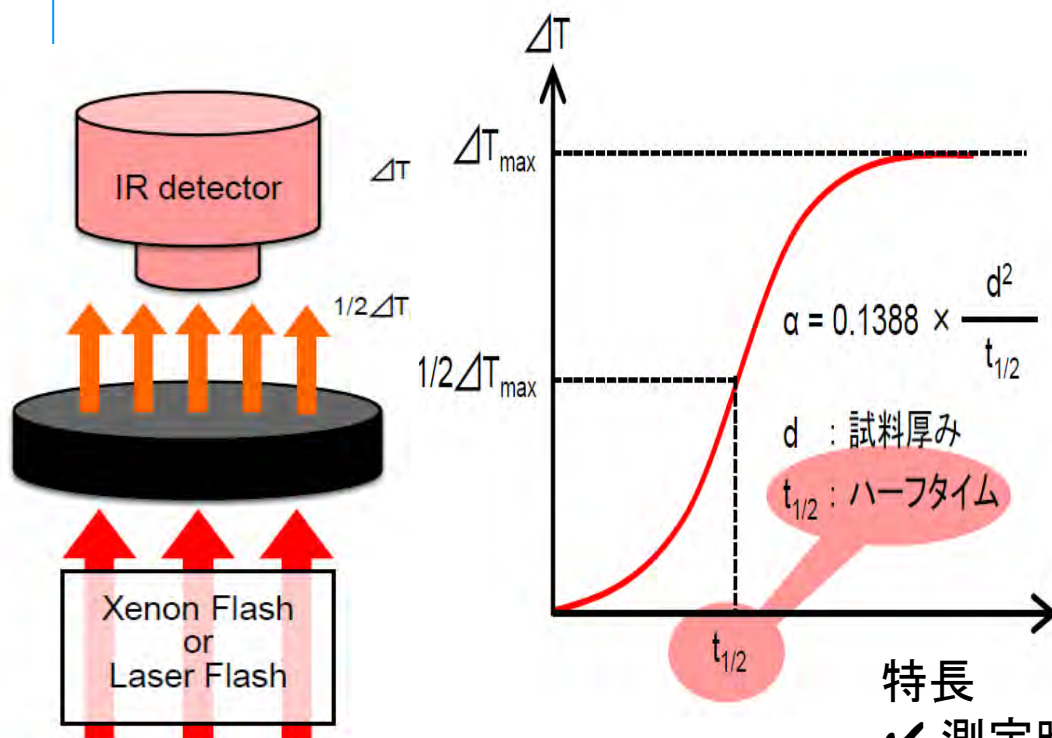
NETZSCH LFA467(HT)



アルバック理工 TC-7000



# レーザーパルス法



$$D = 0.1388 \frac{d^2}{t_{1/2}}$$

$$\Delta T_{max} = \frac{Q}{\rho C_p}$$

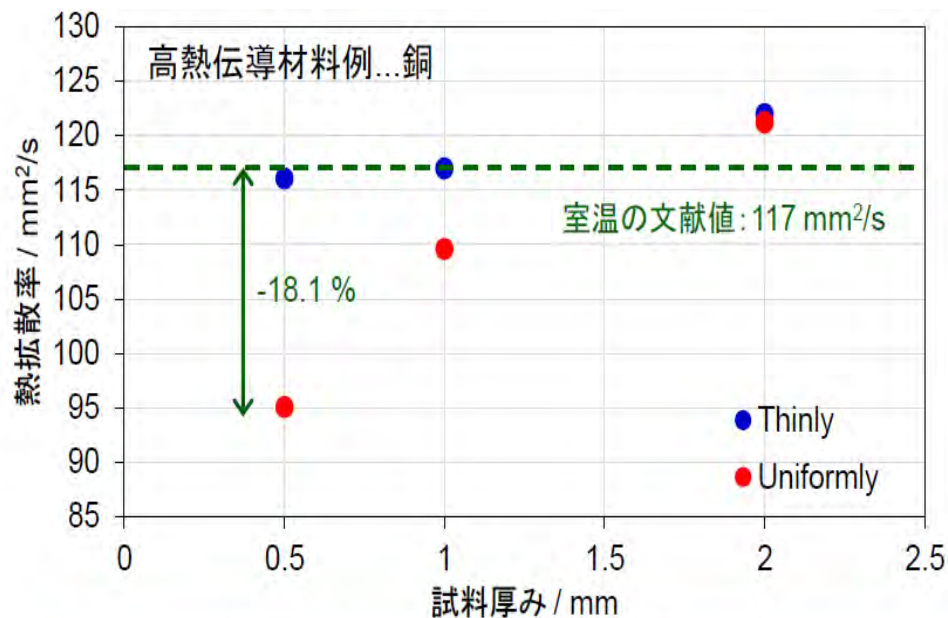
$$\kappa = \rho C_p D$$
$$= \frac{Q}{\Delta T_{max}}$$

d:試料の厚さ  
t<sub>1/2</sub>:ハーフタイム  
ρ:密度  
D:熱拡散率  
C<sub>p</sub>:比熱  
κ:熱伝導率

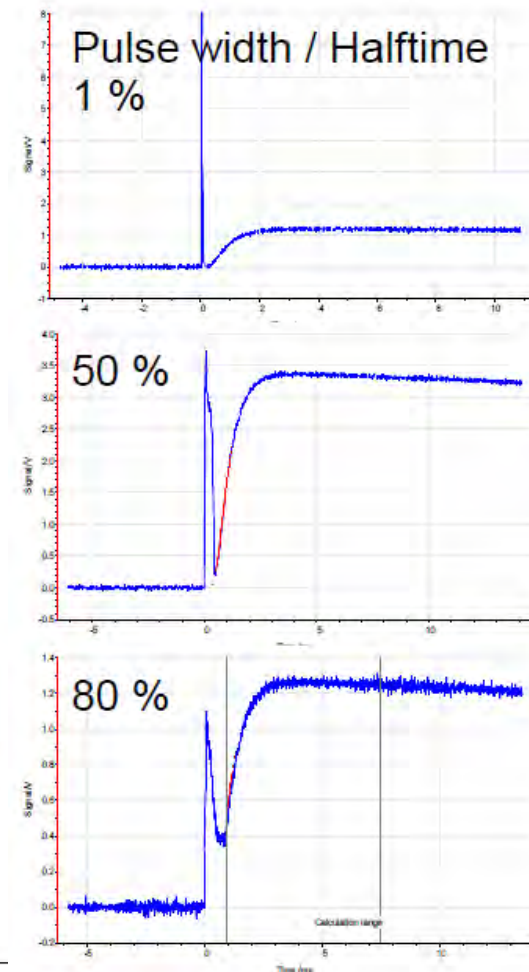
特長

- ✓ 測定時間が短く操作も簡便
- ✓ 非接触測定
- 接触熱抵抗が不確かさ要因に含まれない

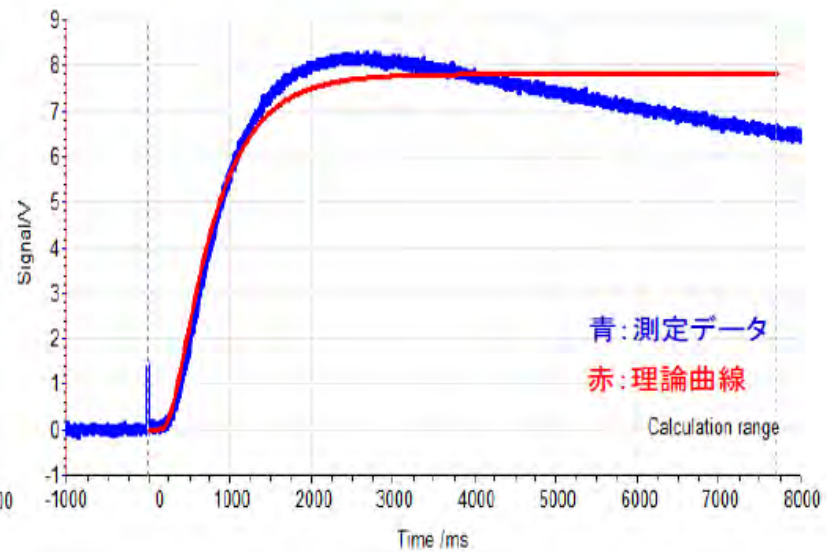
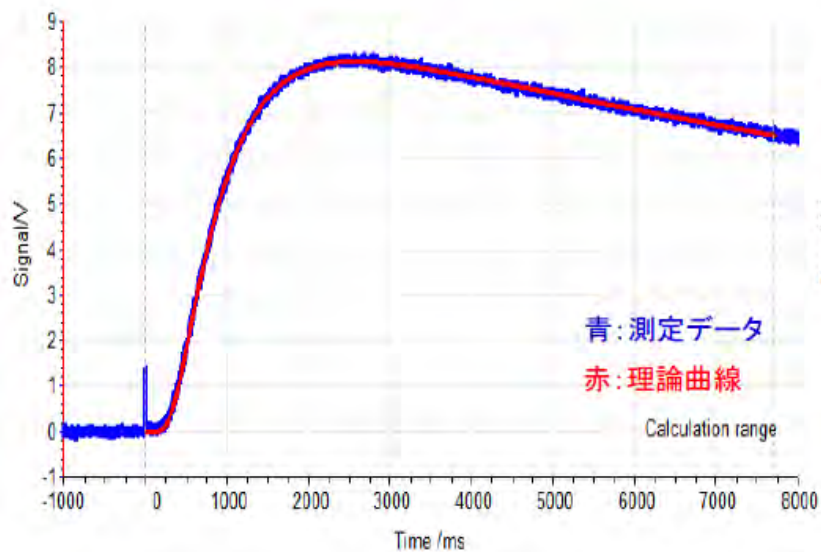
# レーザーパルス幅と黒化処理の違い



| 試料厚み<br>[mm] | 熱拡散率<br>[mm <sup>2</sup> /s]<br>まばらに黒化 | 熱拡散率<br>[mm <sup>2</sup> /s]<br>一様に黒化 | 誤差<br>[%] |
|--------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------|
| 2            | 122                                    | 121.2                                 | -0.7 %    |
| 1            | 117                                    | 109.6                                 | -6.3 %    |
| 0.5          | 116.1                                  | 95.1                                  | -18.1 %   |

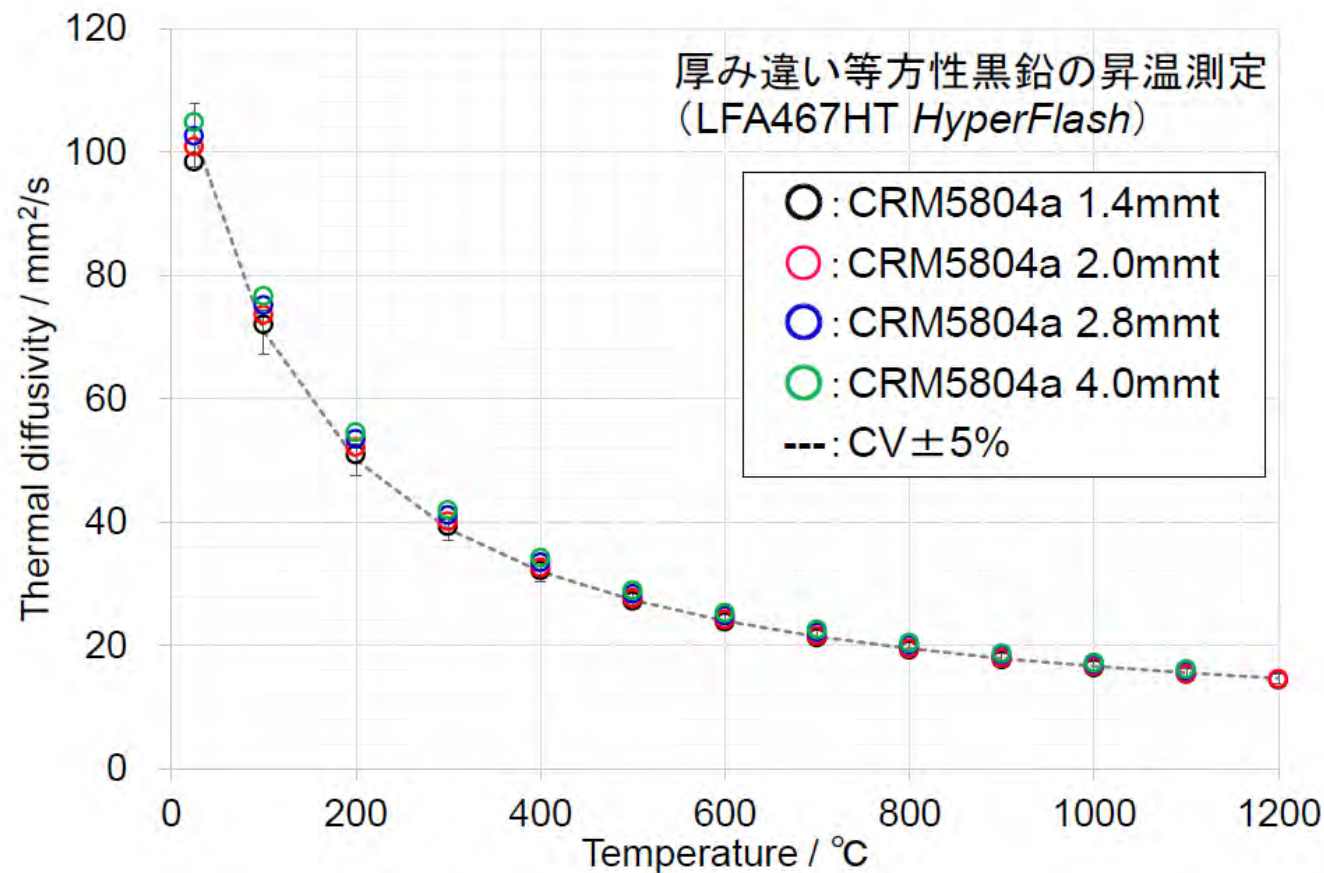


# 測定データと理論曲線

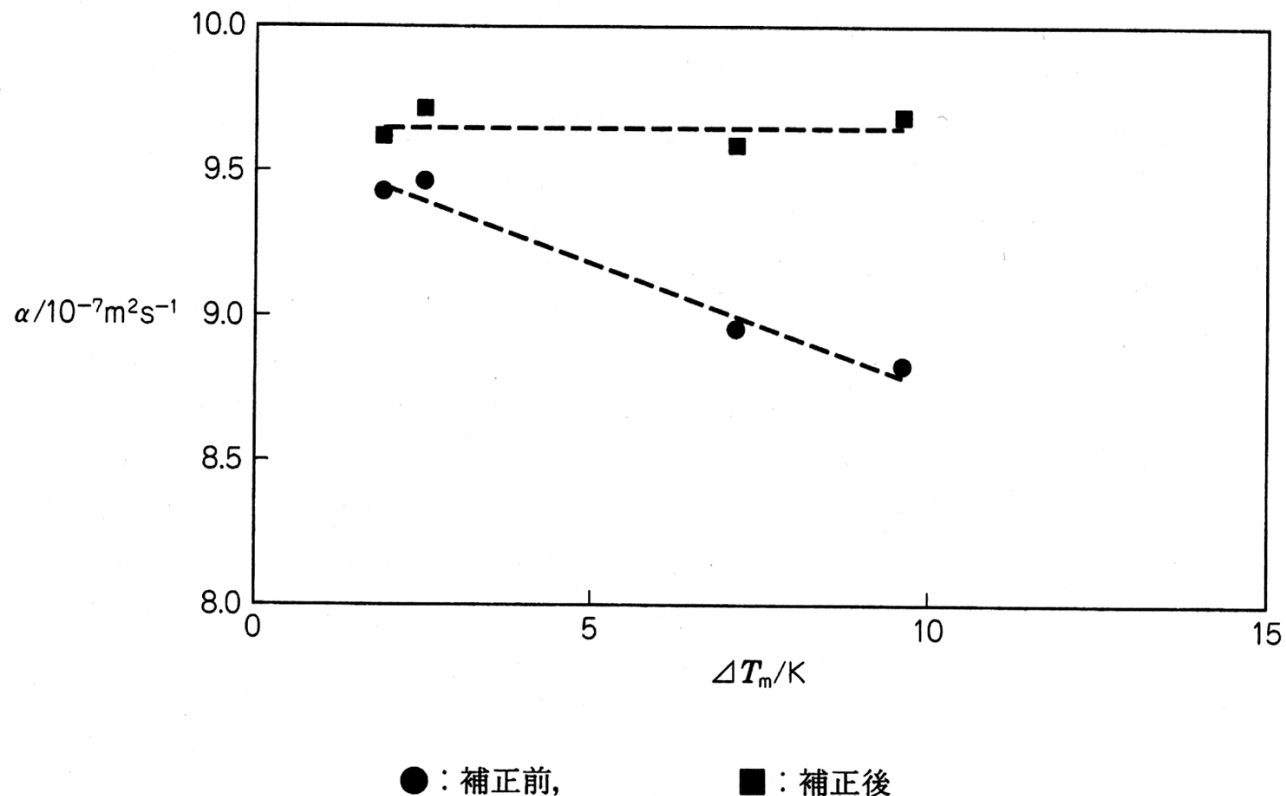


測定データと理論曲線が一致していること

# 試料の厚さによる違い



# レーザフラッシュ法におけるレーザ照射での 試料の温度上昇に伴う熱拡散率



試料: BiTe系熱電材料、解析法: 対数法

# 測定試料の注意点

測定試料は基本的に厚みが均一な平板固体、平行度0.01mm

密度は93%以上のもの

試料サイズは基本的には10mmΦか 10mm□

試料の厚さは1mm以上

厚み測定は不確かさが厚みの二乗で影響する

--→不確かさが10%あると熱拡散率は20%の不確かさになる

試料両面に黒化処理を行う

--→比熱測定や、S/N比の良いシグナルを得るためにも重要

--→熱拡散率の結果に悪影響を及ぼす場合がある

透光性がある試料には両面に金属コートを施す(Pt, Ag, Au etc. 100nm以上)

# BiTe系熱電材料における熱伝導率の試験結果

| 研究機関 | P型－1      | P型－2      | n型－1      | n型－2      |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| NIMS | 1.31～1.32 | 1.25      | 1.38～1.41 | 1.30      |
| A    | 1.24～1.25 | 1.18      | 1.34～1.38 | 1.23      |
| B    | 1.38      | 1.30～1.37 | 1.44～1.51 | 1.40～1.43 |
| C    | 1.31～1.38 | 1.32～1.40 | 1.41～1.53 | 1.51～1.61 |

単位：W/Km

NIMSとAは静的比較法、BとCはレーザフラッシュ法での測定

# 熱電特性測定における日本のラウンドロビンテスト

| 研究機関 | 試料   | 密度    | 熱電能<br>( $\mu\text{V/K}$ ) | 比抵抗<br>( $\mu\Omega\text{m}$ ) | 熱伝導率 (W/Km) |              |              | 性能指数( $10^{-3}/\text{K}$ ) |      |
|------|------|-------|----------------------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------------|------|
|      |      |       |                            |                                | 静的比較<br>法   | レーザー<br>ラッシュ | $\Delta T$ 法 |                            |      |
| NIMS | p型-1 | 6.739 | 204.3                      | 11.17                          | 1.38        | 1.11         |              | 2.7                        |      |
|      | p型-2 | 6.733 | 202.0                      | 11.07                          | 1.37        |              |              | 2.69                       |      |
|      | n型-1 | 7.800 | -198.1                     | 11.45                          | 1.53        | 1.23         | 1.47         | 2.24                       | 2.42 |
|      | n型-2 | 7.789 | -200.3                     | 11.26                          | 1.47        |              | 1.48         | 2.42                       | 2.45 |
| A    | p型   | 6.725 | 207.1                      | 12.00                          | 1.32        |              |              | 2.71                       |      |
|      | n型   | 7.789 | -201.5                     | 12.40                          | 1.42        |              | 1.46         | 2.31                       | 2.35 |
| B    | p型   |       | 202.0                      | 12.00                          | 1.3         |              |              | 2.62                       |      |
|      | n型   |       | -202.0                     | 11.90                          | 1.34        |              |              | 2.56                       |      |
| C    | p型-2 | 6.740 | 208.0                      | 12.60                          |             |              |              |                            |      |
|      | p型-3 | 6.750 | 206.0                      | 13.10                          |             |              |              |                            |      |
|      | n型-2 | 7.790 | -202.0                     | 11.90                          |             |              |              |                            |      |
|      | n型-3 | 7.800 | -202.0                     | 11.40                          |             | 0.96         |              | 3.73                       |      |
| D    | p型   |       | 203.3                      | 12.91                          |             |              |              |                            |      |
|      | n型   |       | -201.7                     | 15.82                          |             |              |              |                            |      |
| E    | p型   |       | 179.8                      | 14.00                          |             |              |              |                            |      |
|      | n型   |       | -166.0                     | 15.20                          |             |              |              |                            |      |
| F    | p型   | 6.74  | 220.0                      | 12.50                          |             |              |              |                            |      |
|      | n型   | 7.79  | -220.0                     | 11.20                          |             |              |              |                            |      |



# 国際ラウンドロビン試験

## 参加国

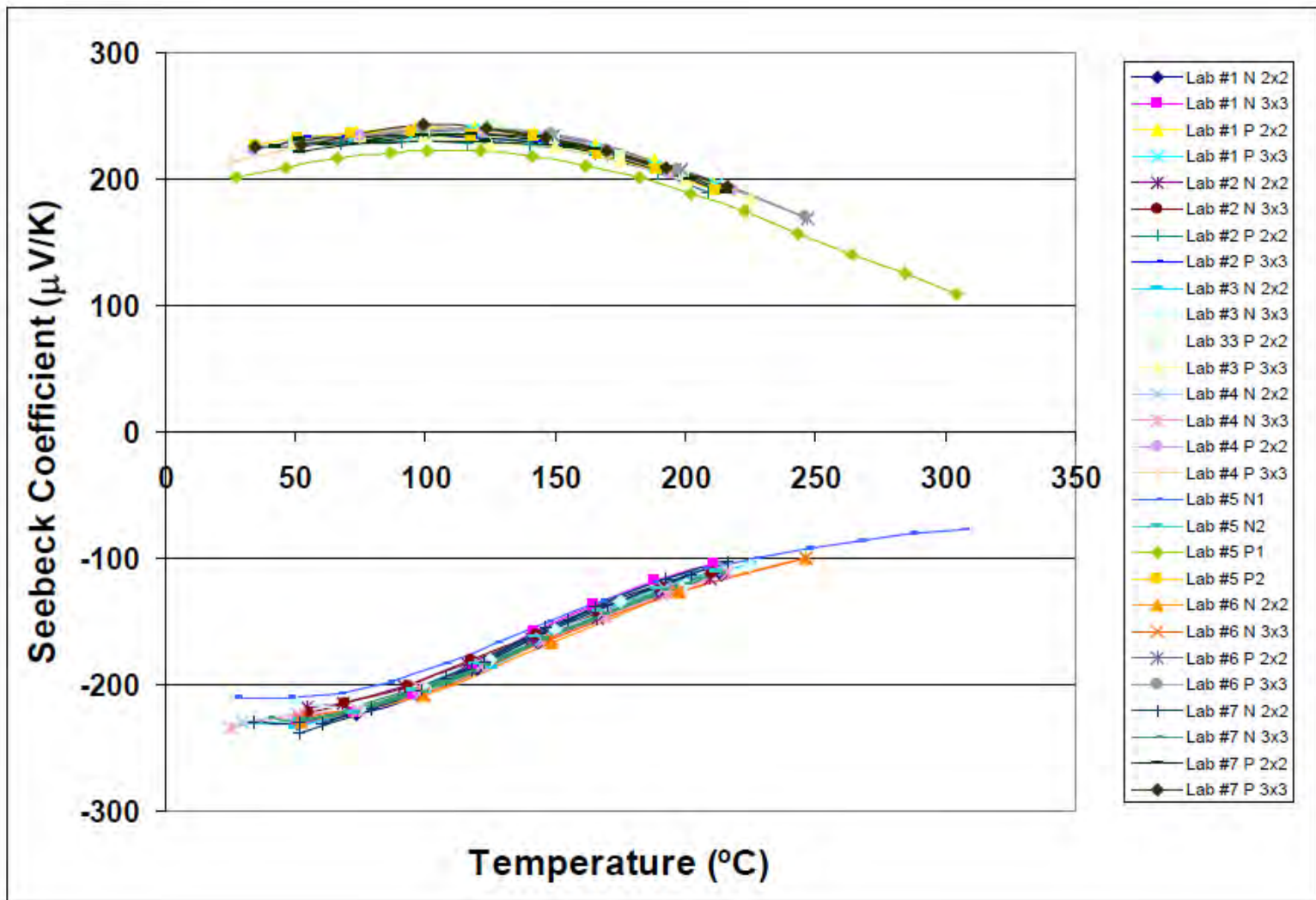
アメリカ、カナダ、ドイツ、中国、イギリス、フィンランド、イスラエル、オーストラリア、韓国の9カ国

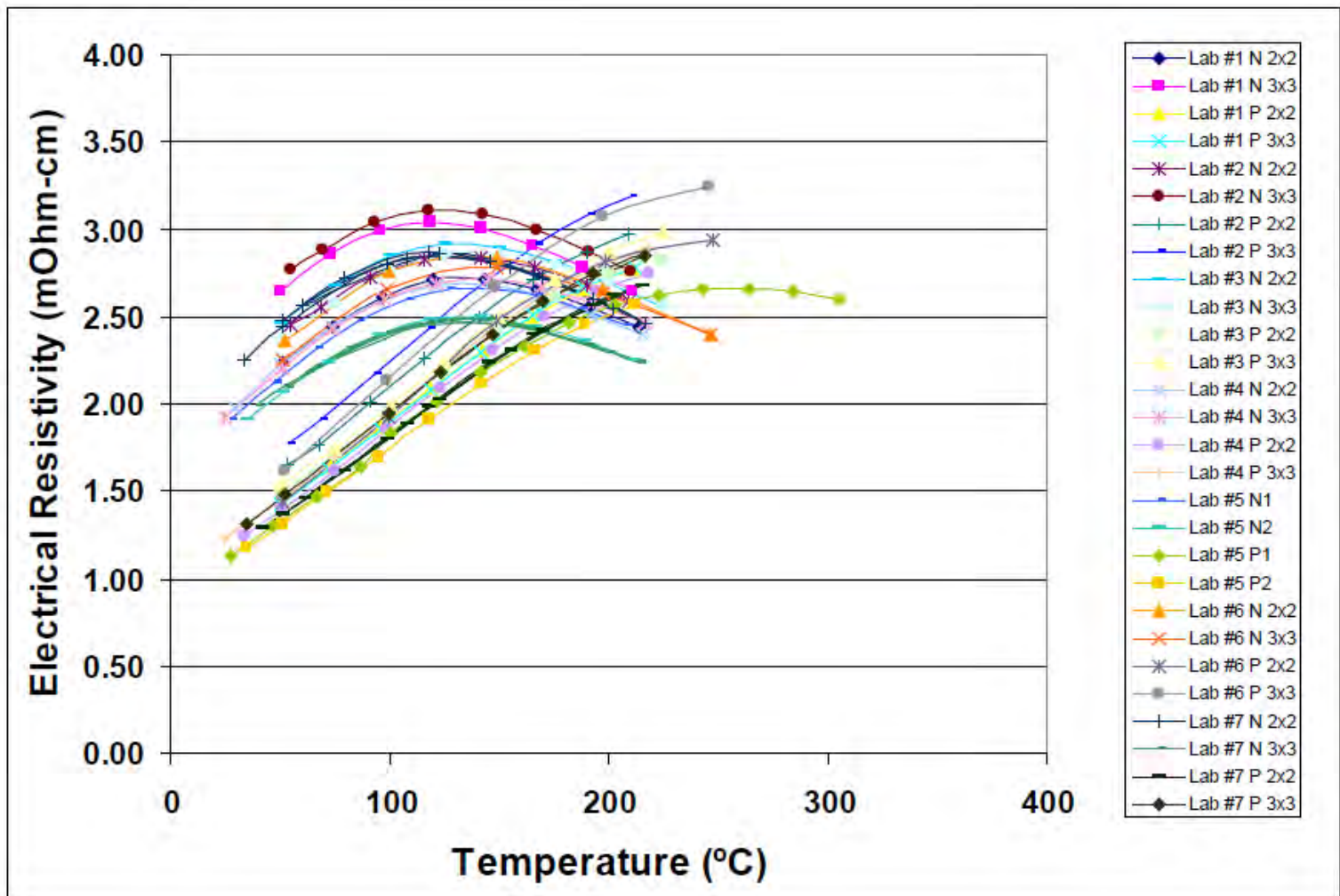
第一回試験: 2009から2010にはn型 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3.005}$ およびp型 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$

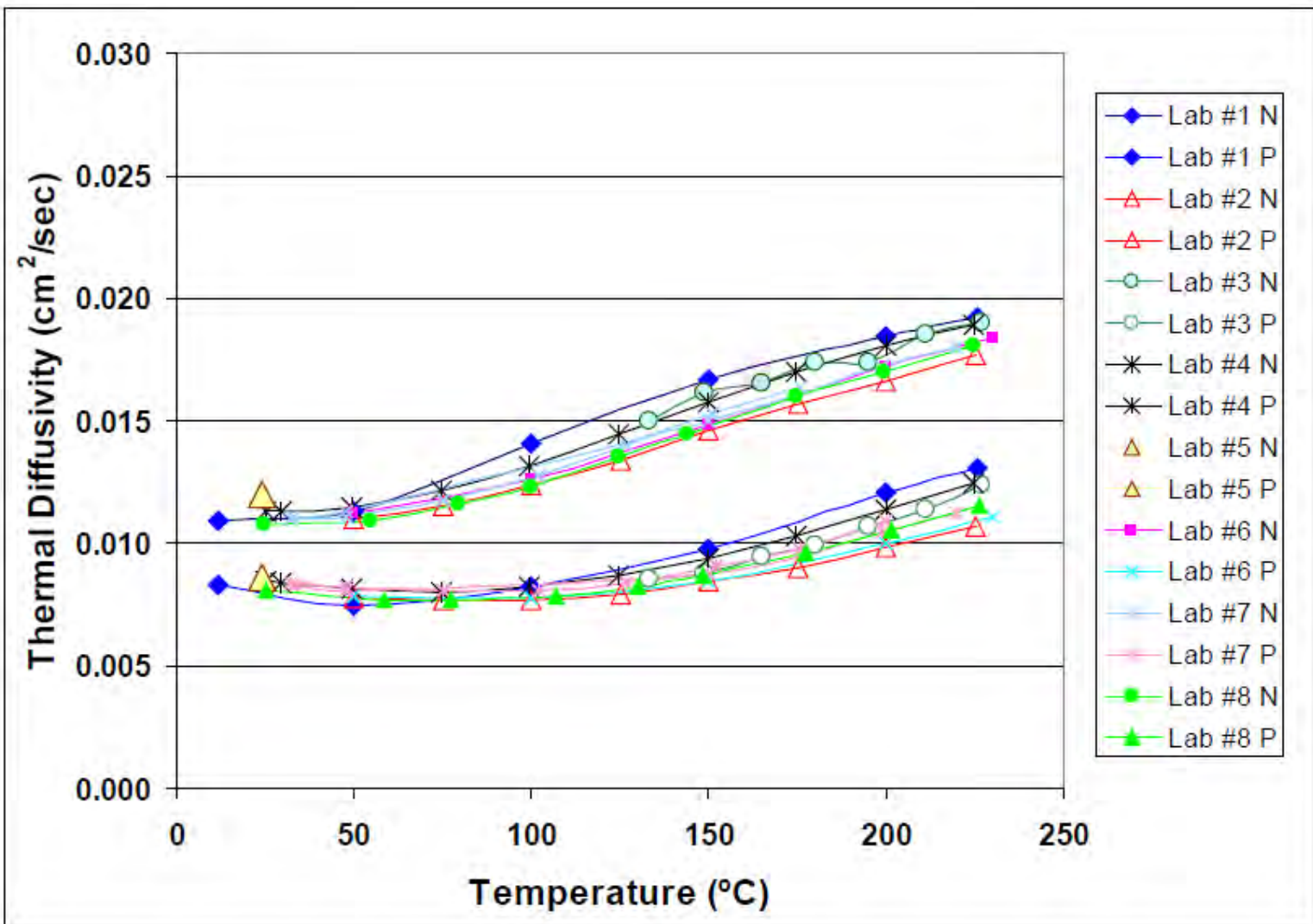
第二回試験: 2010から2011にはp型 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$

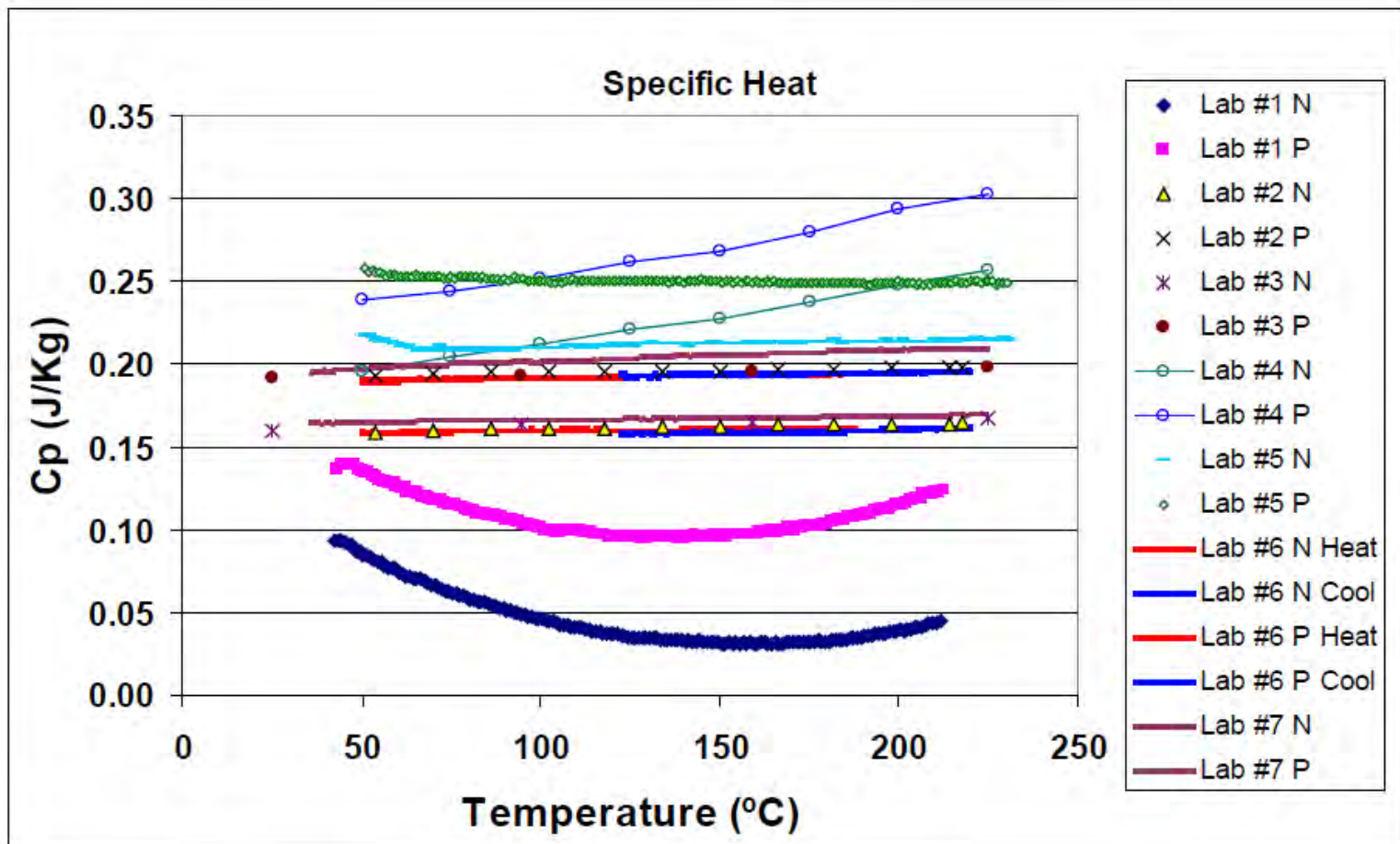
第三回試験: 2012にはn型 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3.005}$ の高温域RTから500°C

試料寸法: 2mmX2mmX15mm、  
3mmX3mmX12mm

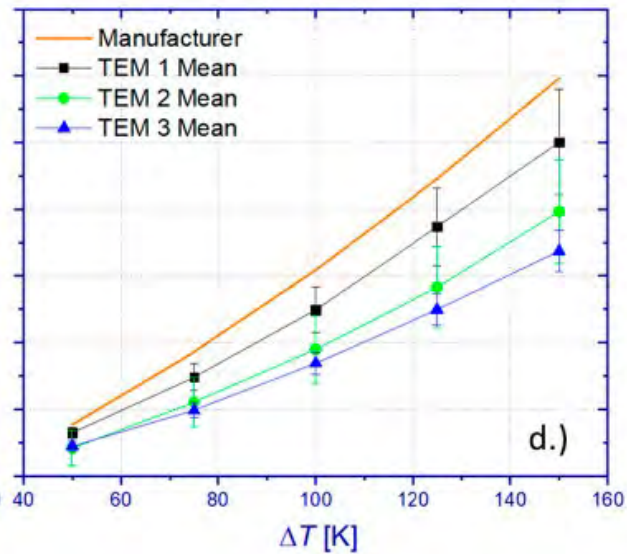
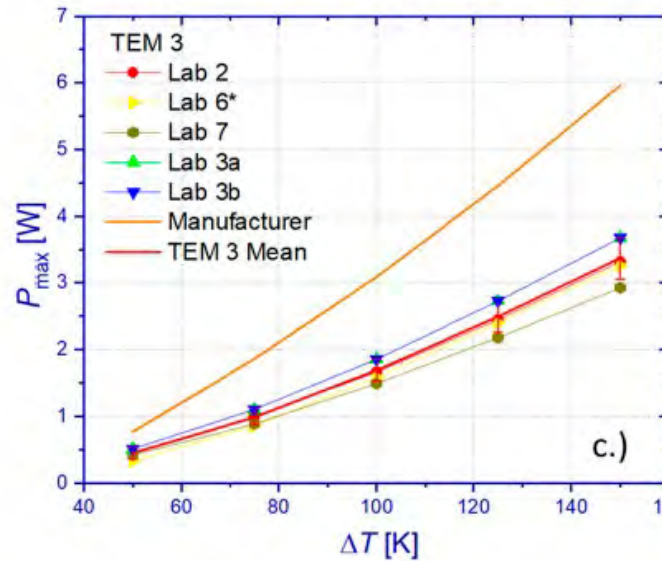
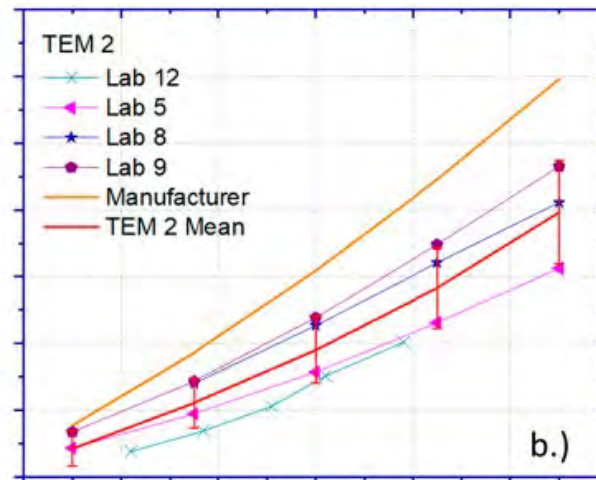
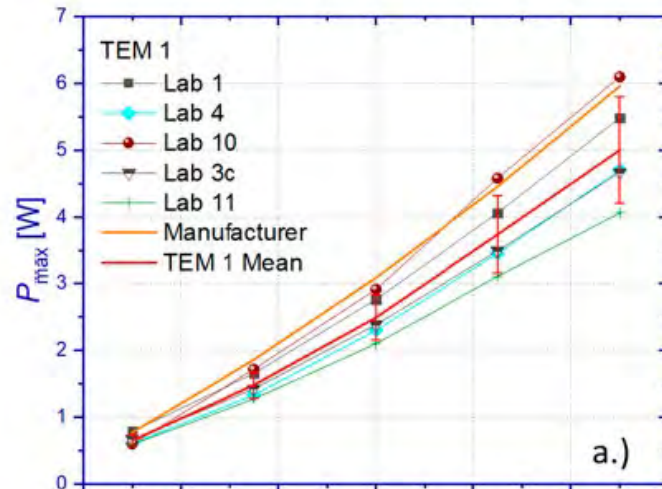




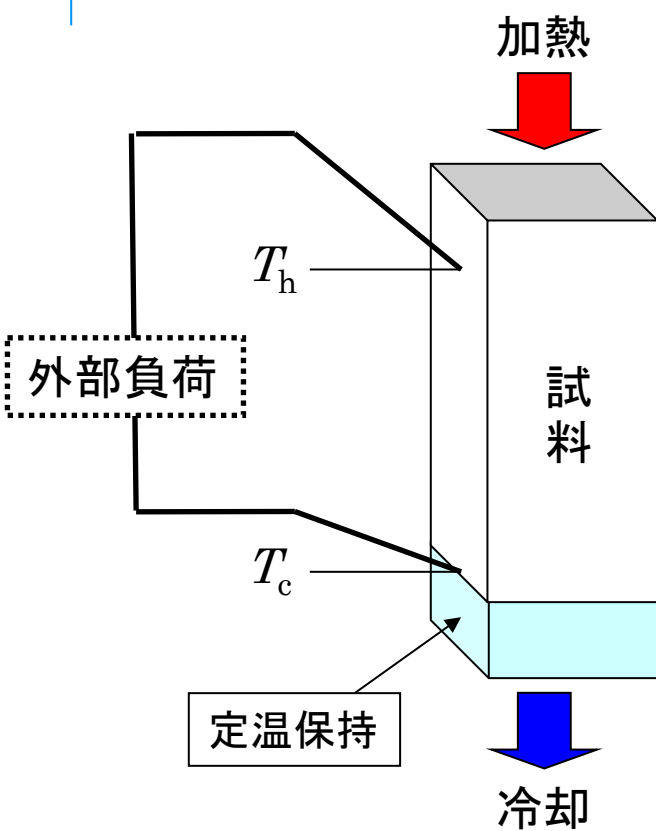








# 最大出力測定



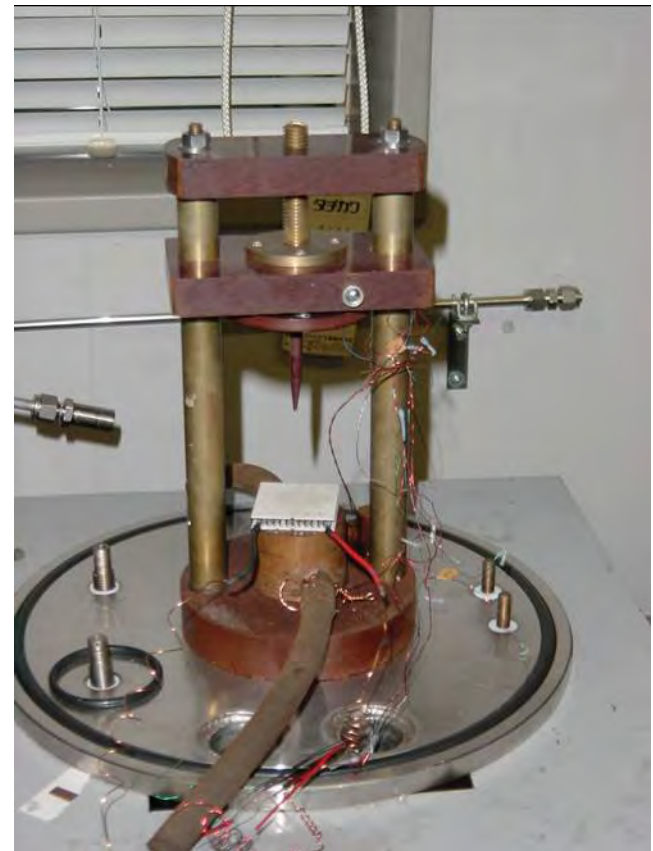
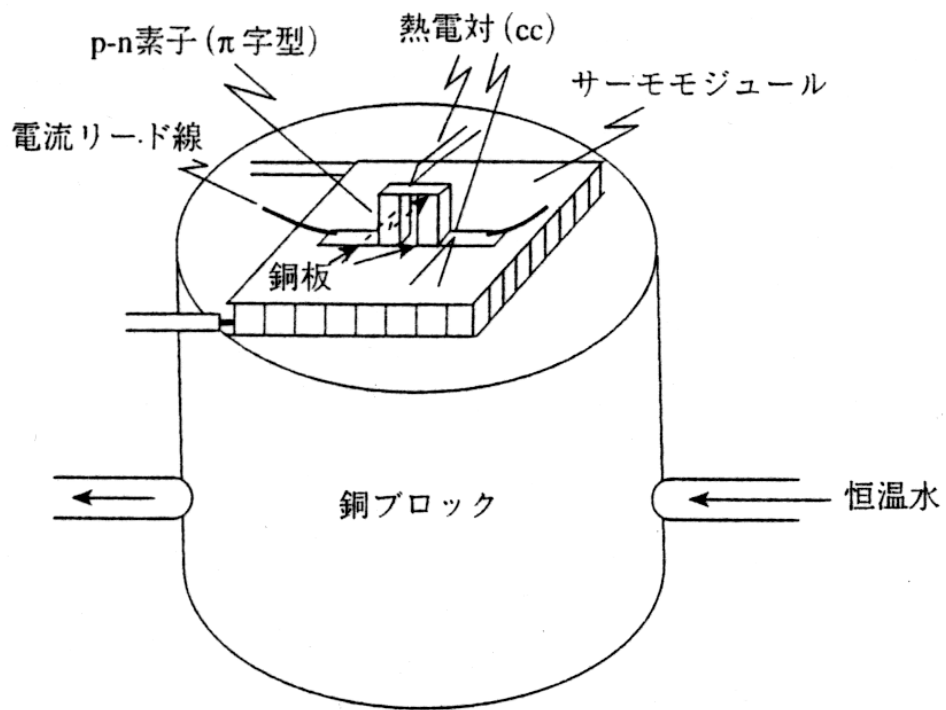
有効最大出力  $P_{\max}$

$$P_{\max} = \frac{\Delta E^2}{4R}$$

$\Delta E$ : 熱起電力  
 $R$ : 内部抵抗

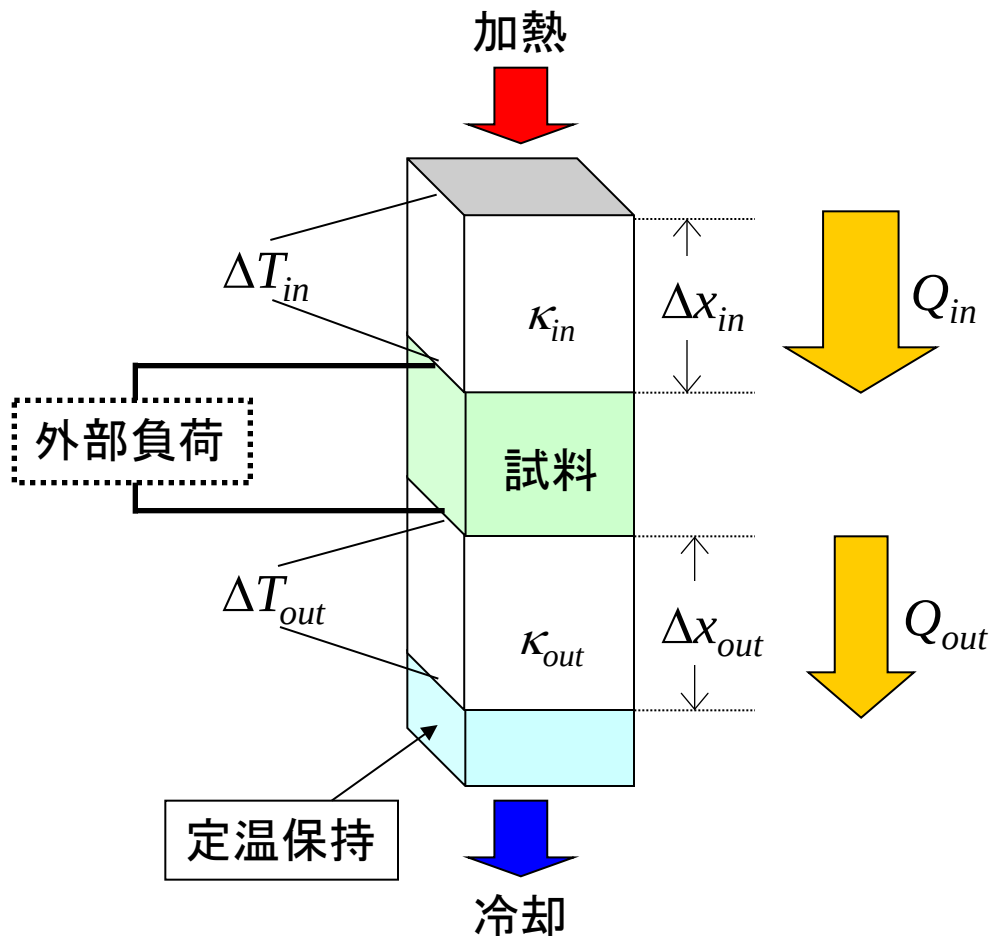


# 最大温度差測定





# 発電効率測定



$$Q_{in} = \frac{A}{\Delta x_{in}} \kappa_{in} \Delta T_{in}$$

$$Q_{out} = \frac{A}{\Delta x_{out}} \kappa_{out} \Delta T_{out}$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{Q_{in}}$$

## 「熱電特性を報告するための重要な考慮事項」がACS Energy Lettersのシニアエディタからの提案

- 異方性特性による誤った結果を避けるために、サンプルの同じ方向に沿って電気的特性と熱的特性を測定します。
- $zT$  を評価するには、同じ温度範囲で測定された電気輸送データと熱輸送データを使用します。
- 理論上の結晶密度の少なくとも 96～97% のサンプルを調査することが重要です。
- 対象の温度範囲内で相転移が予想される場合は、加熱サイクルと冷却サイクルの両方を測定する必要があります。
- 熱電デバイスには、熱特性と機械特性が十分に一致する n 型と p 型の両方の材料が必要です。デバイスの最適な動作温度は、2 つのコンポーネントのいずれかの  $zT$  を最大化する温度ではない可能性があります。
- ウェアラブルおよびフレキシブル熱電素子の分野では、デバイスからの電圧および電力出力の報告値は、デバイスの面積/質量によって適切に正規化される必要があります。これにより、電力については  $W/cm^2 \cdot K^2$  および  $W/g \cdot K^2$ 、電圧については  $V/cm^2 \cdot K$  および  $V/g \cdot K$  でデバイスの電圧と電力出力を比較することで、異なるデバイス設計および動作パラメータのレポート間の比較が容易になります。

# 最後にもう一度注意点

- 測定機器の校正はしていますか
- 測定装置の不確かさを理解していますか
- 測定装置のデータを鵜呑みにしていませんか
- 試料の作製は注意深く平行度0.01mmで仕上げる
- 平坦で密度の高い試料で
- 試料寸法はマイクロメータを使用して測りましょう
- 試料寸法は最小2mmX2mmX12mm以上で
- 比抵抗測定は高速測定で
- ゼーベック係数測定は装置の不確かさは7%である
- レーザフラッシュ法では黒化処理を両面に施す、またパルス幅の最適化、解析時のシグナルの理論曲線を一致させる
- 熱拡散率、比熱は不確かさが10%になる
- 性能指数の不確かさは誤差伝搬則で15%になる



ご静聴ありがとうございました

この講習を参考にしてよりよい測定を心がけてください

