

触ってみたら何が分かる？

- 山形大学大学院
理工学研究科
機械システム工学専攻
高橋一郎

内 容

冷たさを感じるのはどっち？

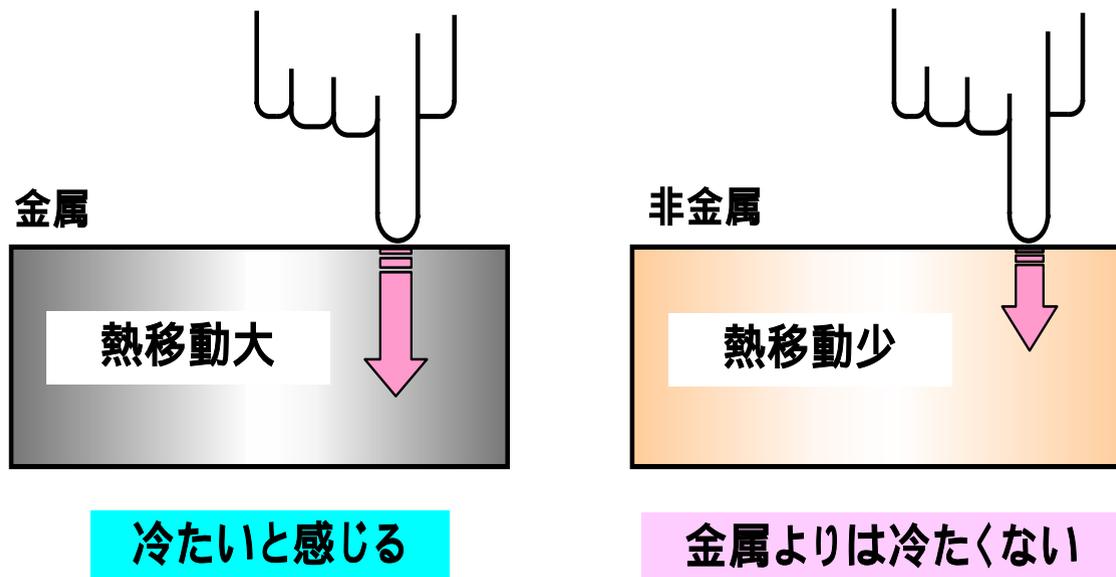
新開発・固体熱物性テスター

温度応答例と測定理論

- 熱物性計測を製造現場で応用する
- 複合材の熱物性評価研究会
- 高分子樹脂射出成形品の品質検査
- 新素材の熱伝導率測定
- プラスチック資源ごみの分別
- 金属材料の劣化・寿命診断

冷たさを感じるのはどっち？

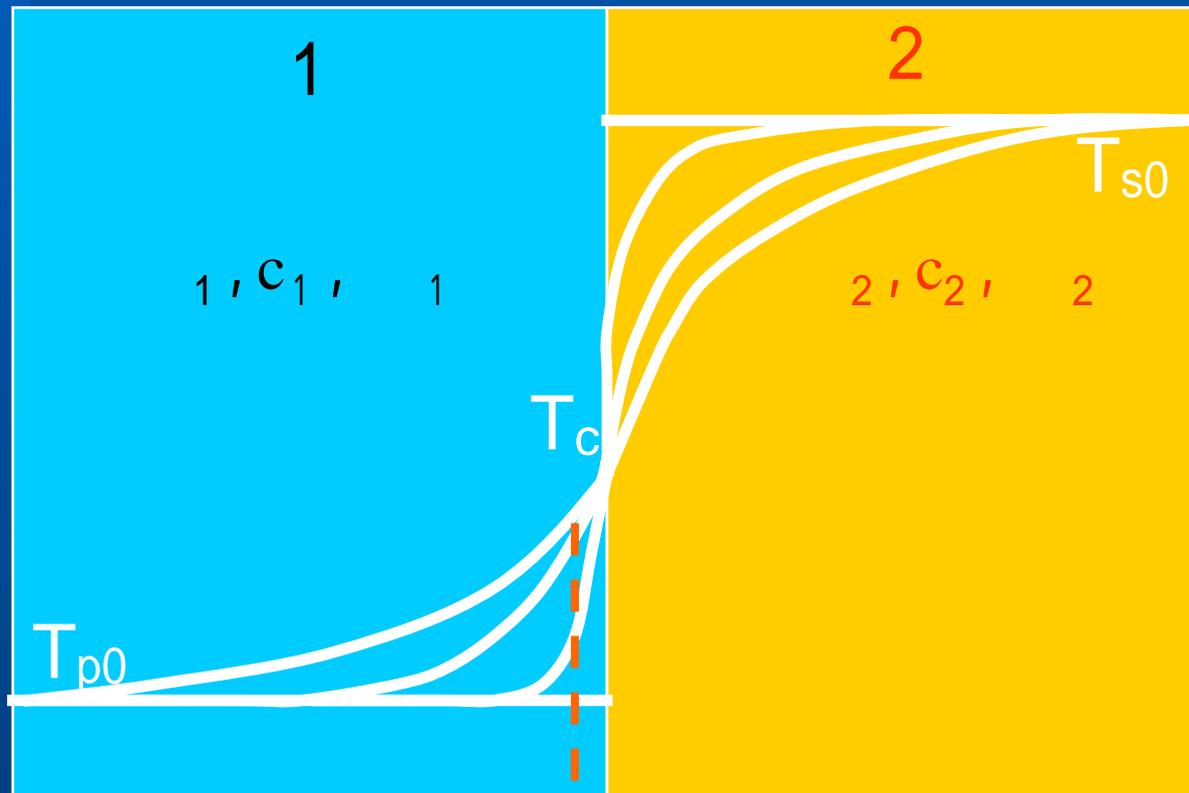
基本コンセプト



手に感じる冷たさの違い 温度プローブを点接触させたときの
温度応答を分析 理論温度応答との比較によって熱3定数を
同時測定

二つの半無限物体が接触した直後の温度分布

接触界面温度 T_c は時間変化しない

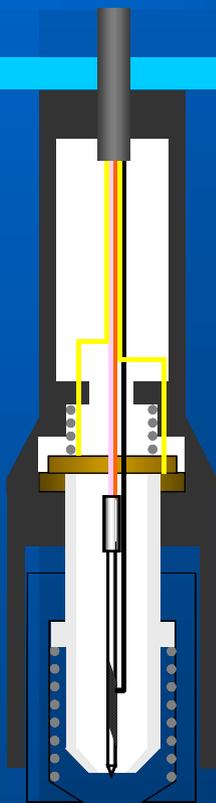


大きな温度変化が観測される位置

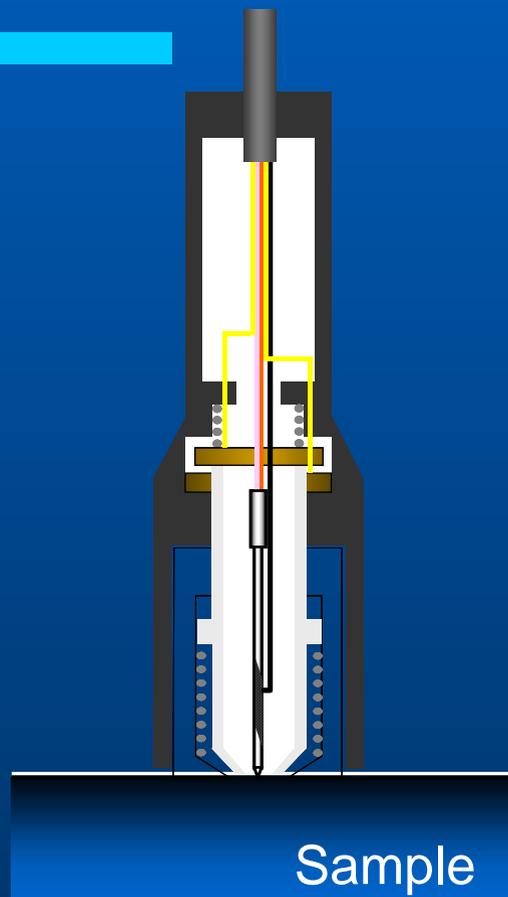
新開発・固体熱物性テスター



プローブホルダーの改良開発



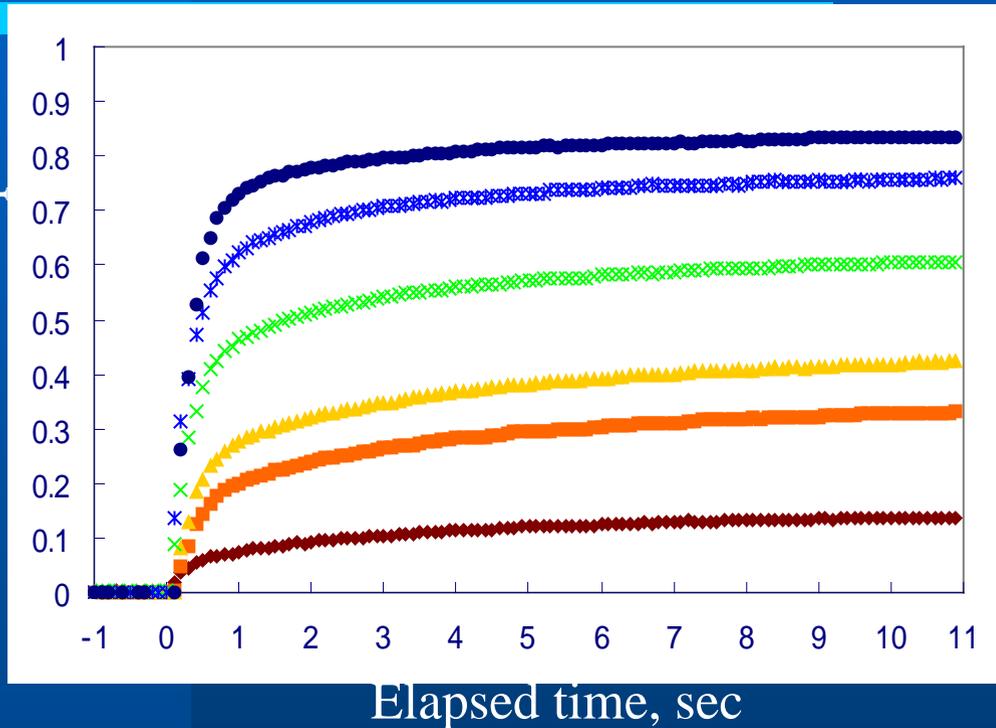
Heating mode



Measuring mode

樹脂や金属の温度応答曲線測定例

Dimensionless temperature



熱伝導率
W/(m·K)

- アルミニウム 230
- * アームコ鉄 73.1
- × JIS-SUS304 16.0
- ▲ リファセラムZR1 2.95
- 石英ガラス 1.39
- ◆ 塩化ビニル 0.16

$$\text{無次元温度} = \frac{\text{プローブ温度} - \text{プローブ初期温度}}{\text{試料初期温度} - \text{プローブ初期温度}}$$

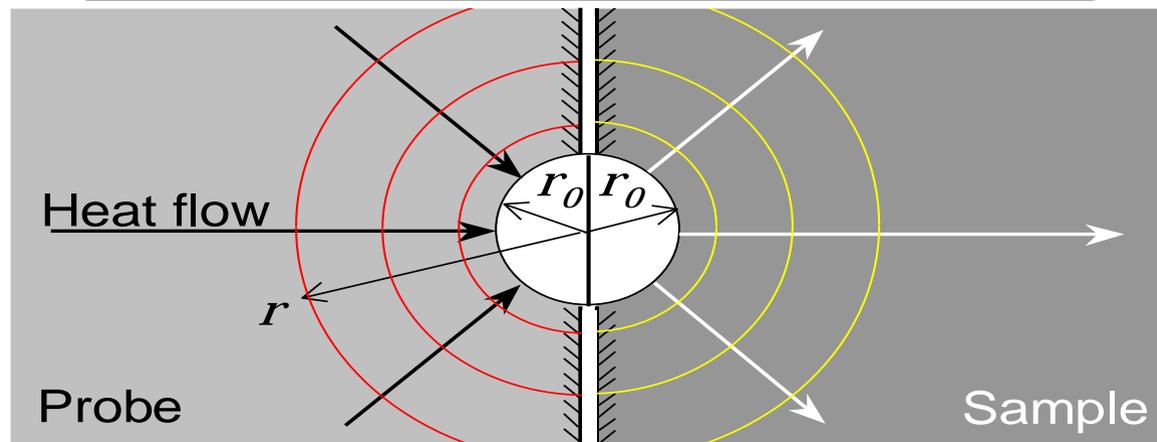


Fig.1 Thermal contact model

支配方程式

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = a_p \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_p}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right)$$

初期条件： $T_p(r_0, 0) = T_{p0}, \quad T_s(r_0, 0) = T_{s0}$

境界条件： $T_p(\infty, t) = T_{p0}, \quad T_s(\infty, t) = T_{s0}$

$$T_p(r_0, t) = T_s(r_0, t), \quad \lambda_p \left. \frac{\partial T_p}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -\lambda_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=r_0}$$

無次元温度： $T_p^* = \frac{T_p - T_{p0}}{T_{s0} - T_{p0}}$

プローブ側理論温度応答解

$$T_p^* = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\beta}{\beta+1} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{C}{\sqrt{t}} \right) + \frac{\zeta - \beta}{\eta(\beta+1)(\eta-1)} \exp \left(X^2 - \frac{C^2}{t} \right) \operatorname{erfc}(X)$$

熱伝導率、熱浸透率、比熱容量が測定可能

$$\eta = \frac{r_1}{r_0}, \quad C = \frac{r_1 - r_0}{\sqrt{a_p}}, \quad X = \frac{C}{\sqrt{t}} + \frac{(\beta + 1)(\eta - 1)}{2C(\zeta + 1)}\sqrt{t}, \quad b = \frac{2C}{\sqrt{\pi}}$$

熱伝導率比

$$\beta = \frac{A\eta}{1 - A\eta}$$

EXCELのマクロ利用で自動処理

熱浸透率比

$$\zeta = (\beta + 1)^2 \left(A - \frac{B}{b} \right) \eta(\eta - 1) + \beta$$

熱伝導率 $\lambda_s = \beta \cdot \lambda_p$

熱浸透率 $\xi_s = \zeta \cdot \xi_p$

 熱拡散率と比熱容量

$$a_s = \left(\frac{\lambda_s}{\xi_s} \right)^2$$

$$(\rho C)_s = \frac{\xi_s^2}{\lambda_s}$$

$$\frac{C}{\sqrt{t}} \ll 1 \quad \text{開始5秒以上で}$$

$$T_p^* \cong \frac{\beta}{\eta(\beta + 1)} - \frac{2C}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{\beta}{\eta(\beta + 1)} - \frac{\zeta - \beta}{(\beta + 1)\eta(\eta - 1)} \right\} \sqrt{t}$$

$$T_p^* = A - B/\sqrt{t}$$

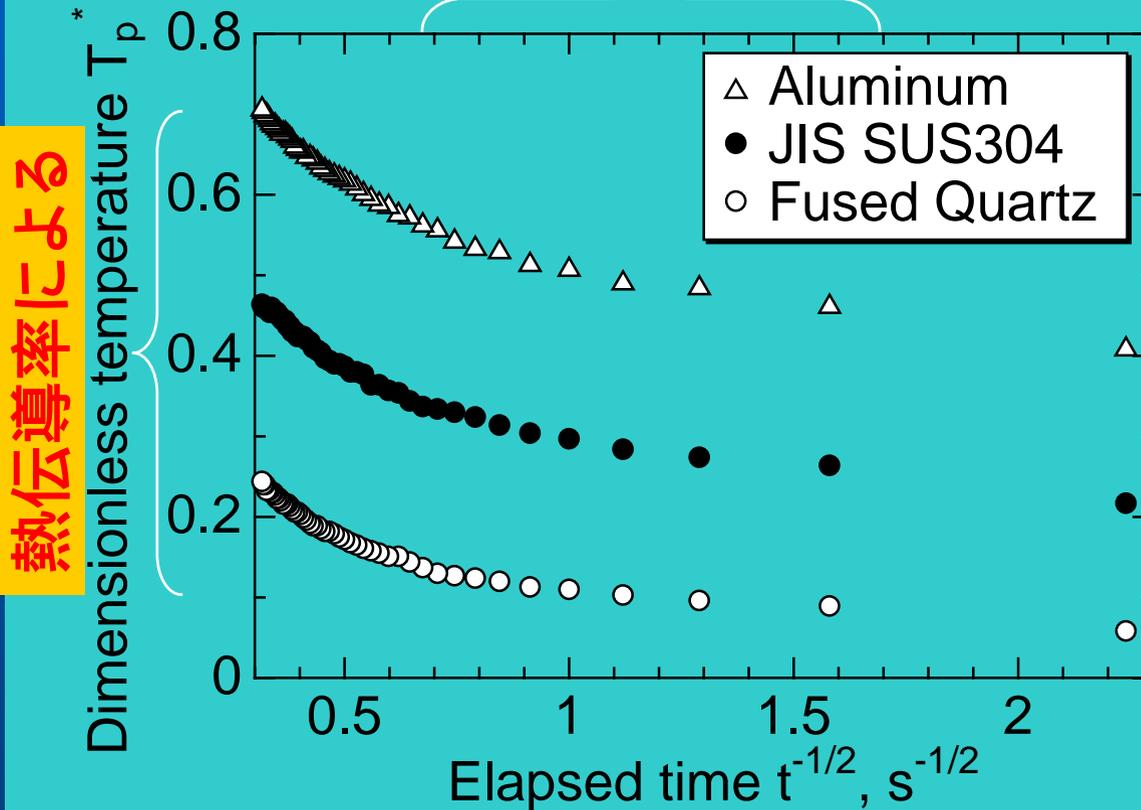
この時間帯における実測温度応答から T_p^* の係数AとBを決定する。

プローブの実測温度応答曲線と理論温度応答曲線とをカーブフィッティングと b を決定する。

(この両者は接触半径の関数)

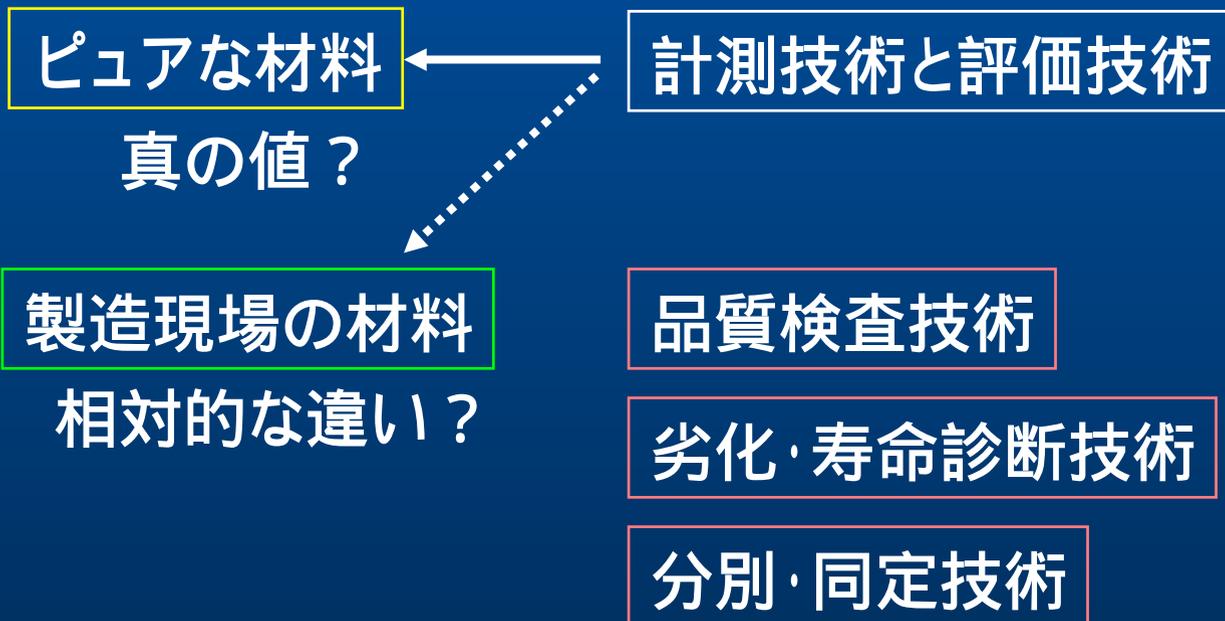
温度応答 $T_p^* - 1/t$ 関係

熱浸透率と熱伝導率による



熱物性計測を製造現場で応用する

熱物性情報・・・熱伝導率
熱拡散率 a
熱浸透率
比熱容量 c



複合材の熱物性評価研究会

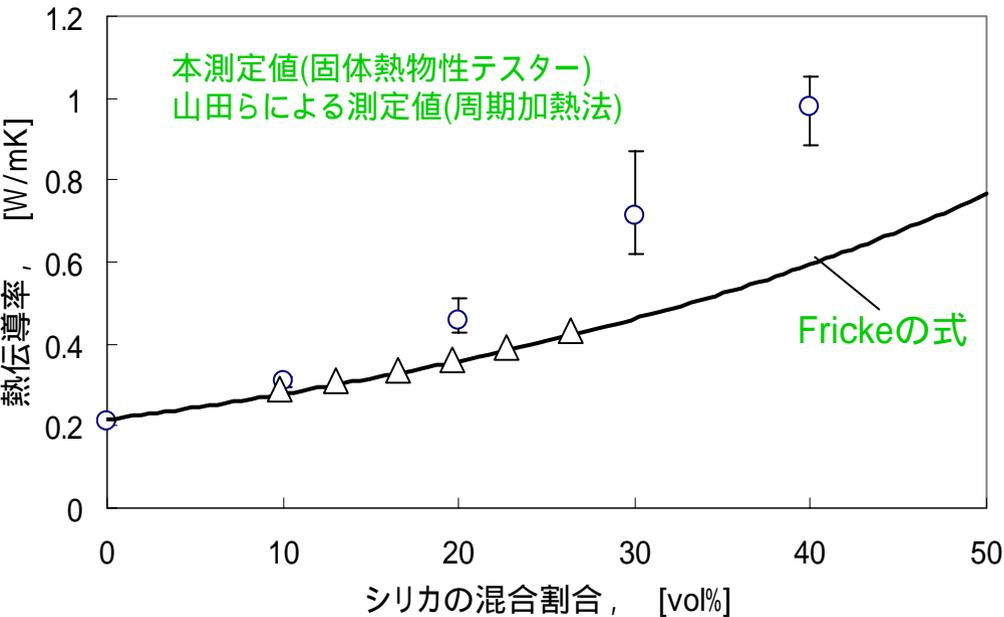
[提供:秋田大学 山田教授]

	アクリル樹脂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
熱伝導率 W/mK	0.21	6.21	36.0
密度 kg/m ³	1190	2600	3880

試料:円板状

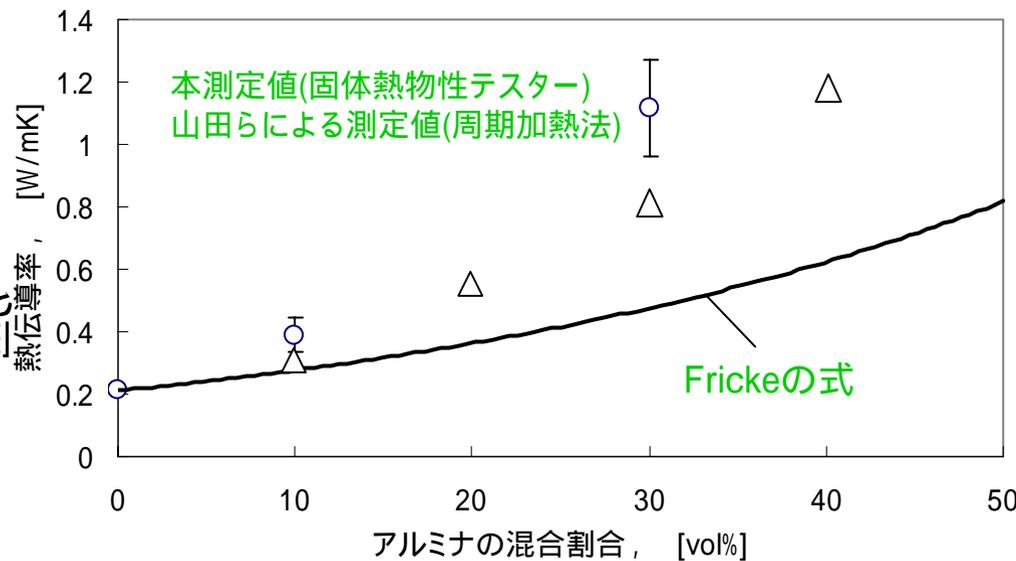
直径 100 mm 厚さ 5 mm

粒子径 10 ~ 25 μ m

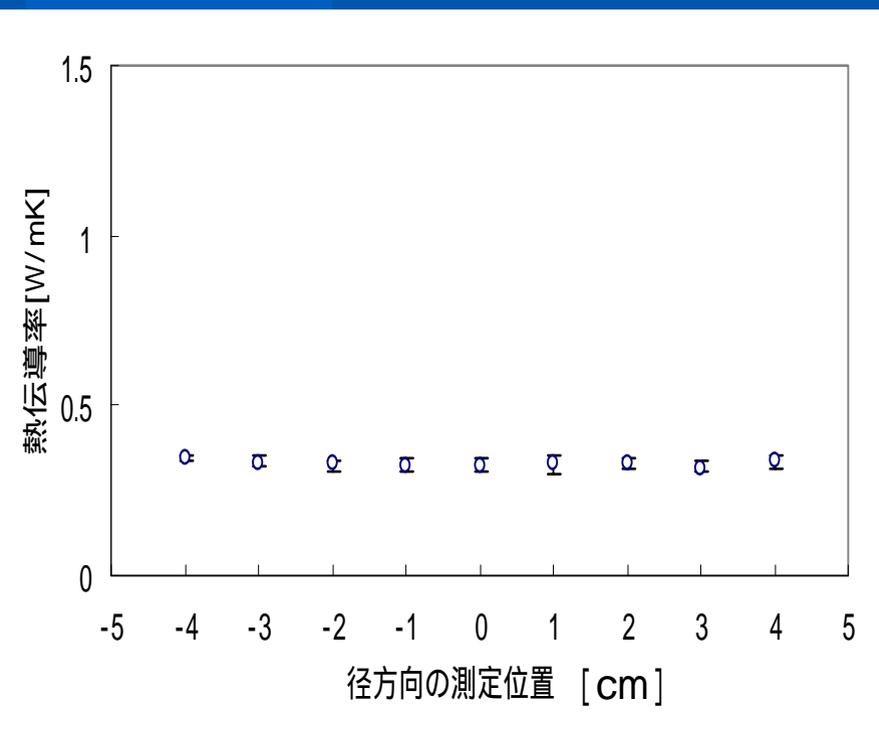


SiO₂混入アクリル樹脂の熱伝導率

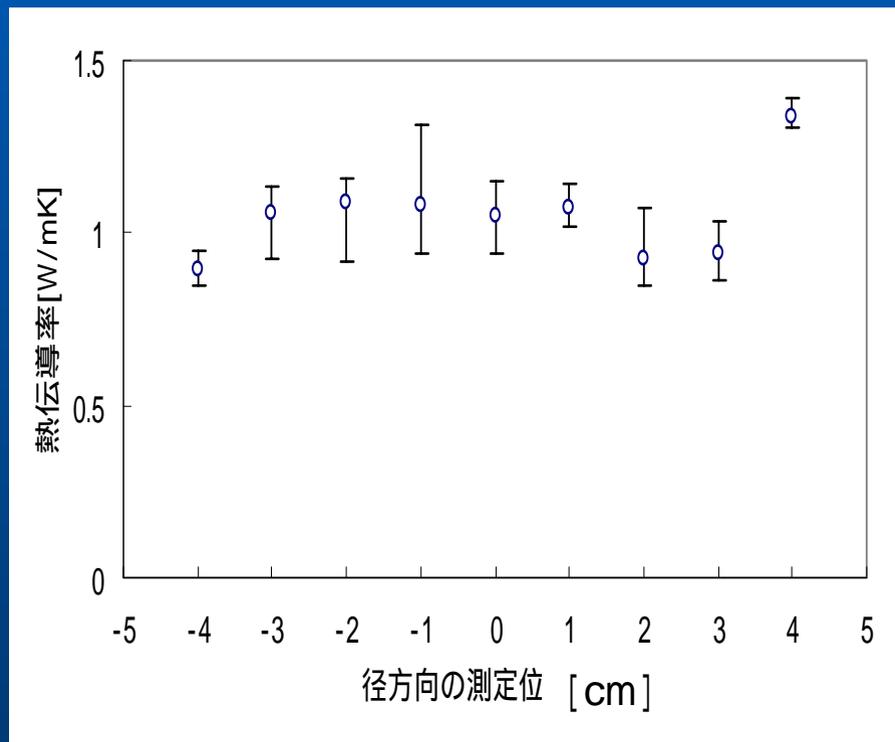
Al₂O₃混入アクリル樹脂の熱伝導率



SiO₂混入アクリル樹脂 熱伝導率の面内分布



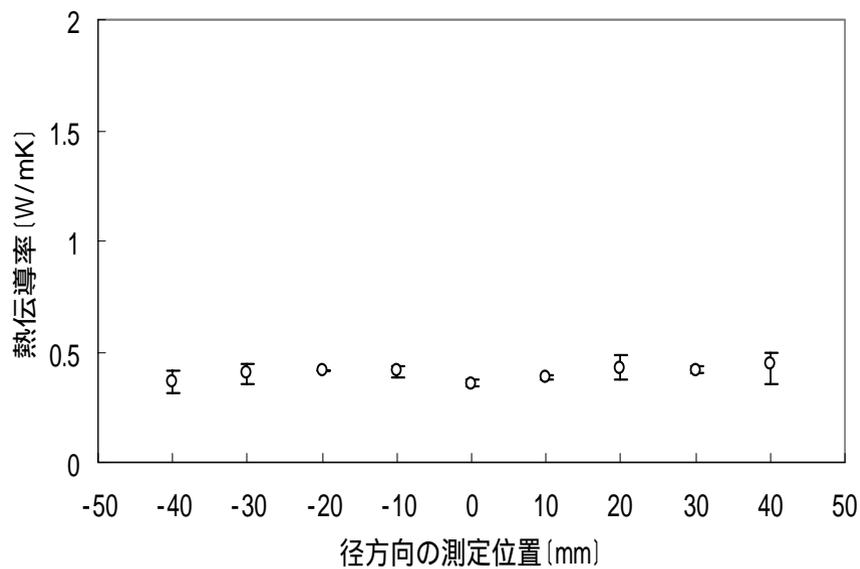
試料 =10 vol%



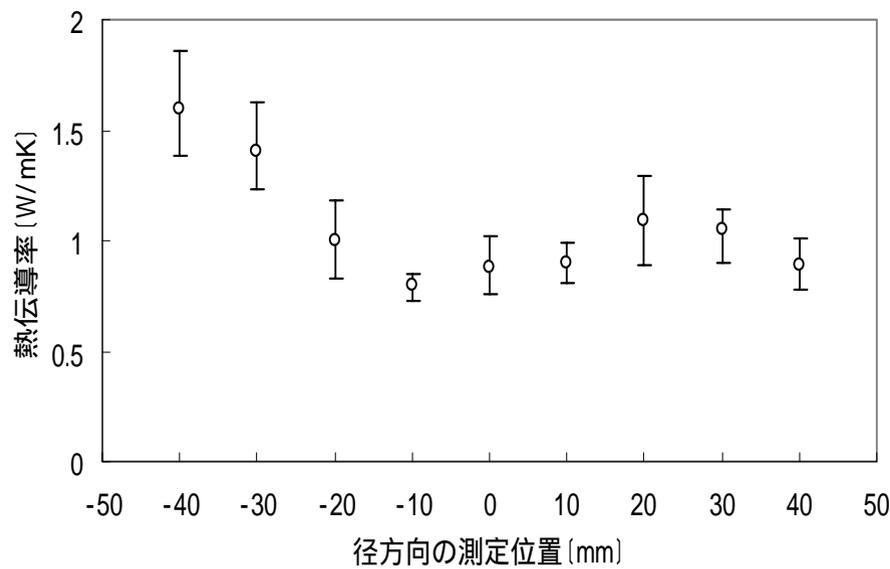
試料 =40 vol%

Al₂O₃ 混入アクリル樹脂

熱伝導率の面内分布



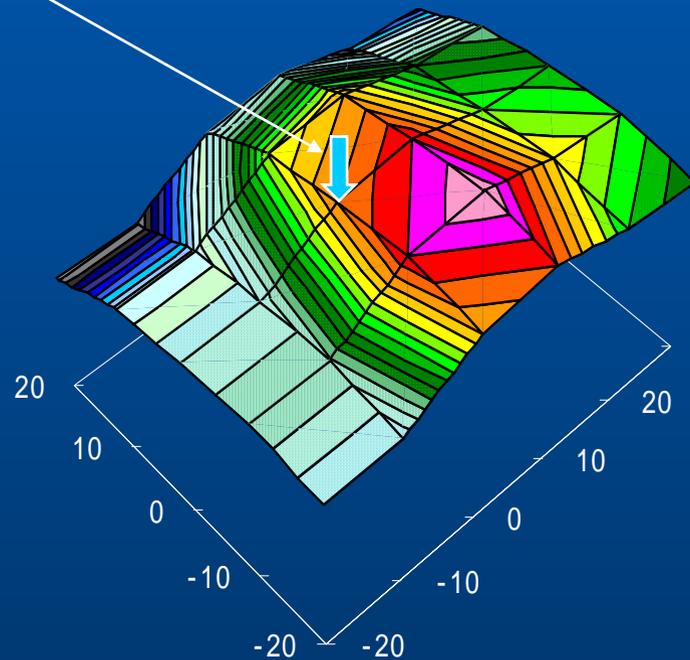
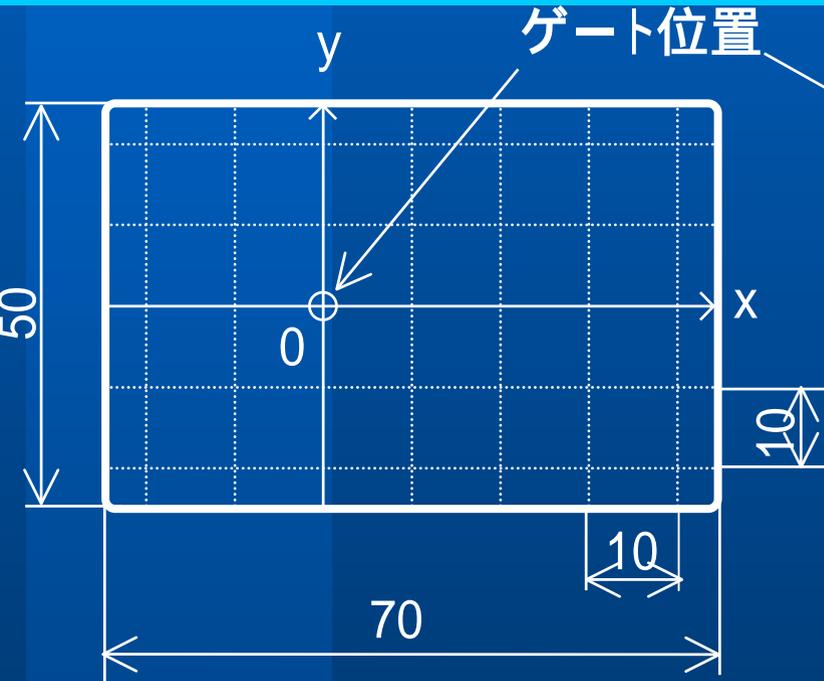
試料 = 10 vol%



試料 = 30 vol%

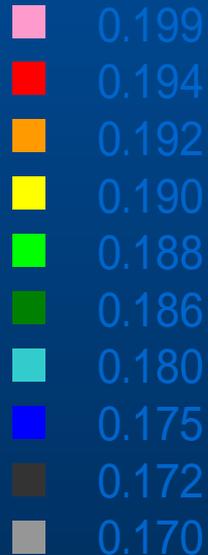
高分子樹脂射出成形品の品質検査

提供：世紀(株)



熱伝導率

W/(m·K)

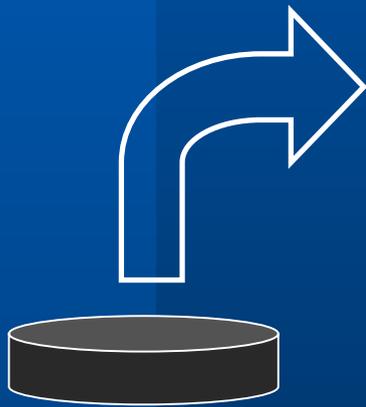


ポリプロピレン 厚さ1.5mm
成形条件： 453K, 10MPa

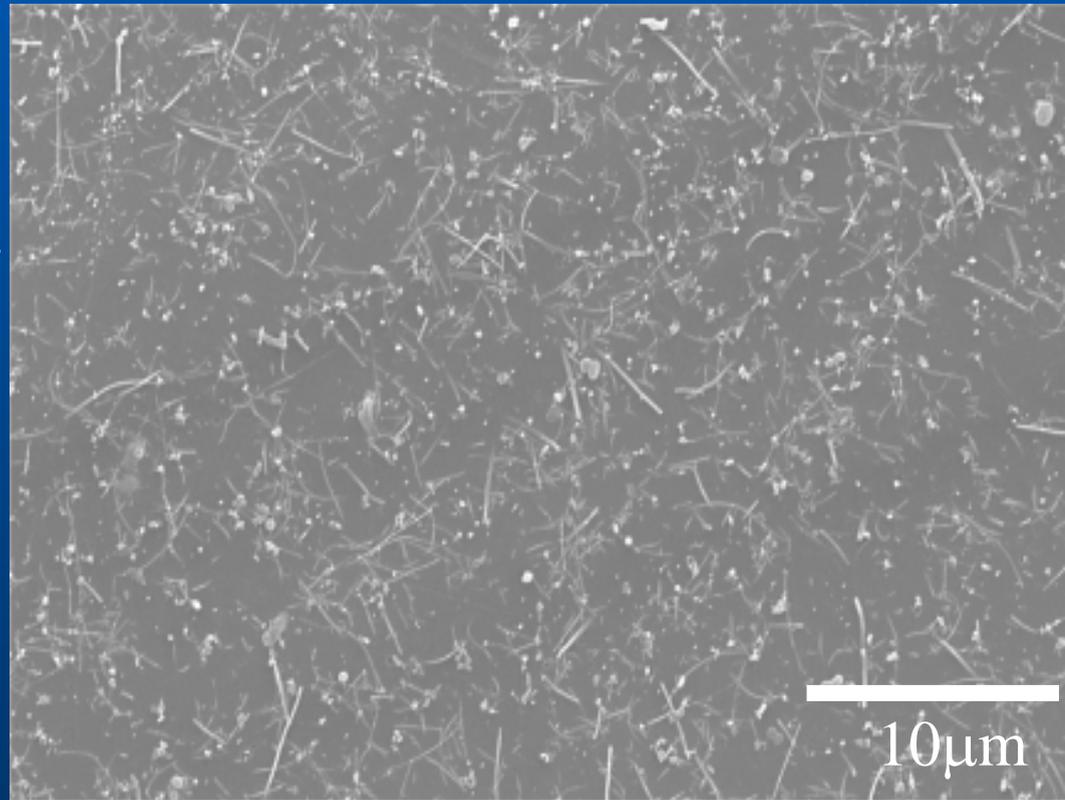
分散系複合材の熱物性測定例

CNTが面内方向に積層

ポリカーボネイトにCNTを
混入しホットプレス法で作成



直径40mm
厚さ 5mm



SEM at Plasma Etched Surface

提供：高橋辰宏助教授

分散系複合材の熱伝導率測定結果

試料	体積比 %	固体熱物性テスター (W/m·K)	レーザーフラッシュ法 (W/m·K)
ポリマー CNT入り	70 30	21.1	3.25
ポリマー 銅粉末(粒径10 μm)	70 30	1.51	1.26
ポリマー CNT + 銅粉末 (粒径10 μm)	70 15 15	14.2	2.89

$$\lambda_e = (\lambda_{\perp} \cdot \lambda_{\parallel}^2)^{\frac{1}{3}}$$



CNT入り試料: $\lambda_{\parallel} = 53 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

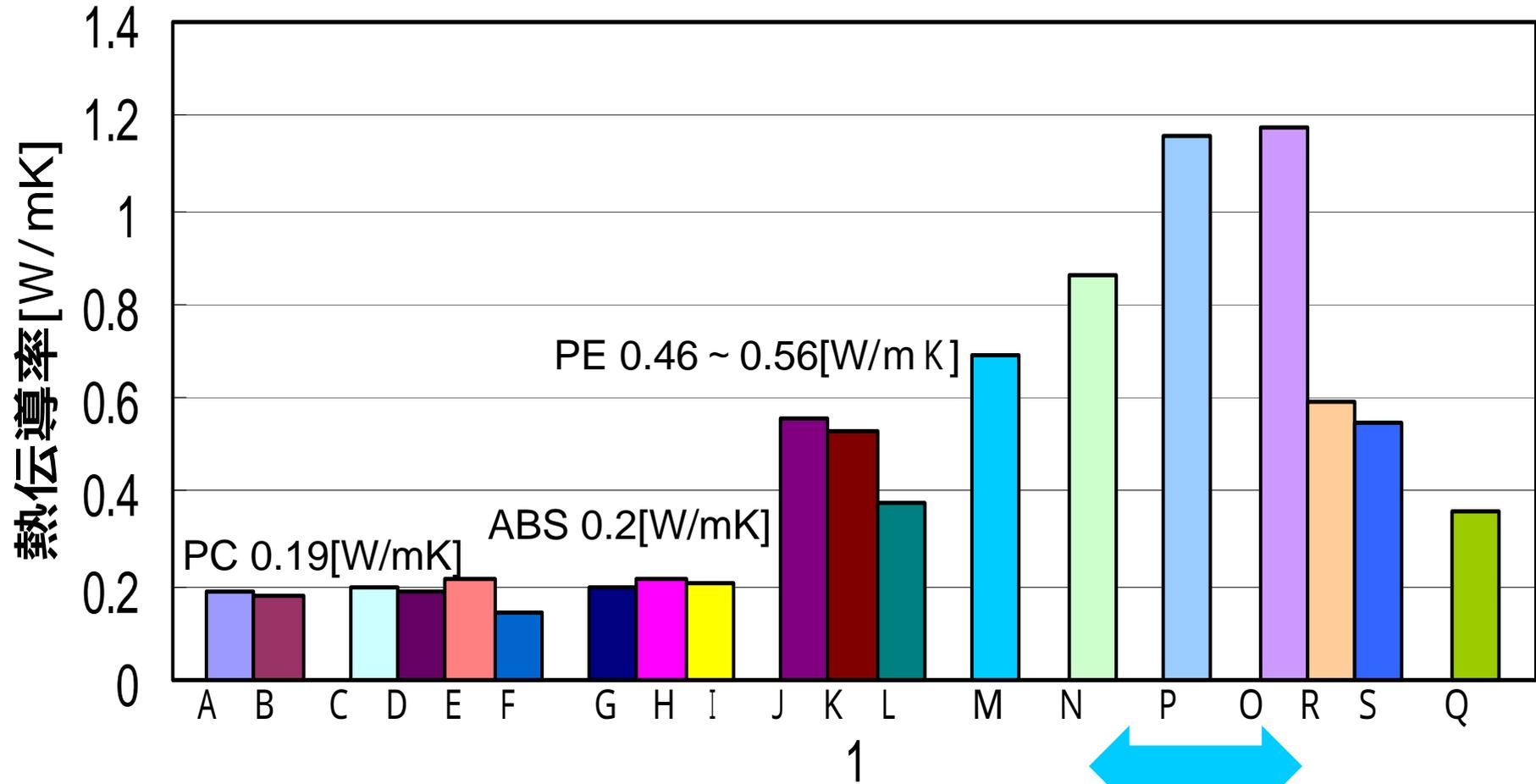
CNT + 銅粉末試料: $\lambda_{\parallel} = 31 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

プラスチック資源ごみの分別



似たもののグループ分け

測定結果グラフ



見た目でグループ分けした 材料の名前

ゴム製？

プラスチックの熱物性

エンジニアリングプラスチックの熱物性(室温)による分別			
エンジニアリングプラスチック		熱伝導率[W/mK]	熱浸透率[kJ/m ² s ^{0.5} K]
結晶性	ポリエチレンテレフタレート (PET)	0.08 ~ 0.17	0.389 ~ 0.567
	ポリアセタール樹脂 (POM)	0.23	0.69
	ポリフェレンサルファイド (PPS)	0.29 ~ 0.41	0.676 ~ 0.698
非結晶性	ポリカーボネート (PC)	0.19	0.21
	塩化ビニル樹脂 (PVC)	0.15 ~ 0.21	0.463 ~ 0.628
	エポキシ樹脂	0.2 ~ 0.21	
	アクリル樹脂 (PMMA)	0.21	0.61
	ABS樹脂	0.21 ~ 0.22	
	ポリエチレン (PE)	0.46 ~ 0.56	0.904 ~ 1.013

おわりに

- (1) 触ってみたら熱物性が分かる
- (2) リサイクル樹脂材の品質評価
分別・同定技術としての応用
- (3) 劣化・寿命診断技術としての応用
- (4) 手軽に使える熱物性テスターの普及
熱物性情報の利用拡大

実用熱物性測定法（熱擾乱による分類）

	点状 	線状 	面状 
	固体熱物性テスター (熱伝導率、熱浸透率)	ホットワイヤー (熱伝導率)	ホットディスク法 (熱伝導率、熱拡散率)
			レーザーフラッシュ (熱拡散率、比熱)
	レーザースポット加熱法(熱拡散率) 光音響法 (熱浸透率)	3 法 (熱伝導率)	ACカロリメトリー法 (熱拡散率) 温度波解析法 (熱拡散率)