

# 真空下における粉体物質の 熱伝導率測定

宇宙研 坂谷 尚哉

# 目次

1. 粉体熱伝導率のサイエンスバックグラウンド
  - a) 地殻熱流量観測
  - b) 小天体の熱進化
  - c) 月面サバイバル
2. 粉体の熱伝導率に関する先行研究
3. 研究目的
4. ガラスビーズの熱伝導率測定実験
  - a) 粒径・温度依存性
  - b) 測定深さ依存性
5. 考察, 課題

# 1. サイエンスバックグラウンド

Fourier の法則  $q = -\underset{\text{熱伝導率}}{\overset{\circlearrowleft}{k}} \frac{dT}{dx}$

物質	銅	ガラス	木材	発泡スチロール
熱伝導率 (W/mK)	400	1	0.1	0.04

粉体の熱伝導率 @真空

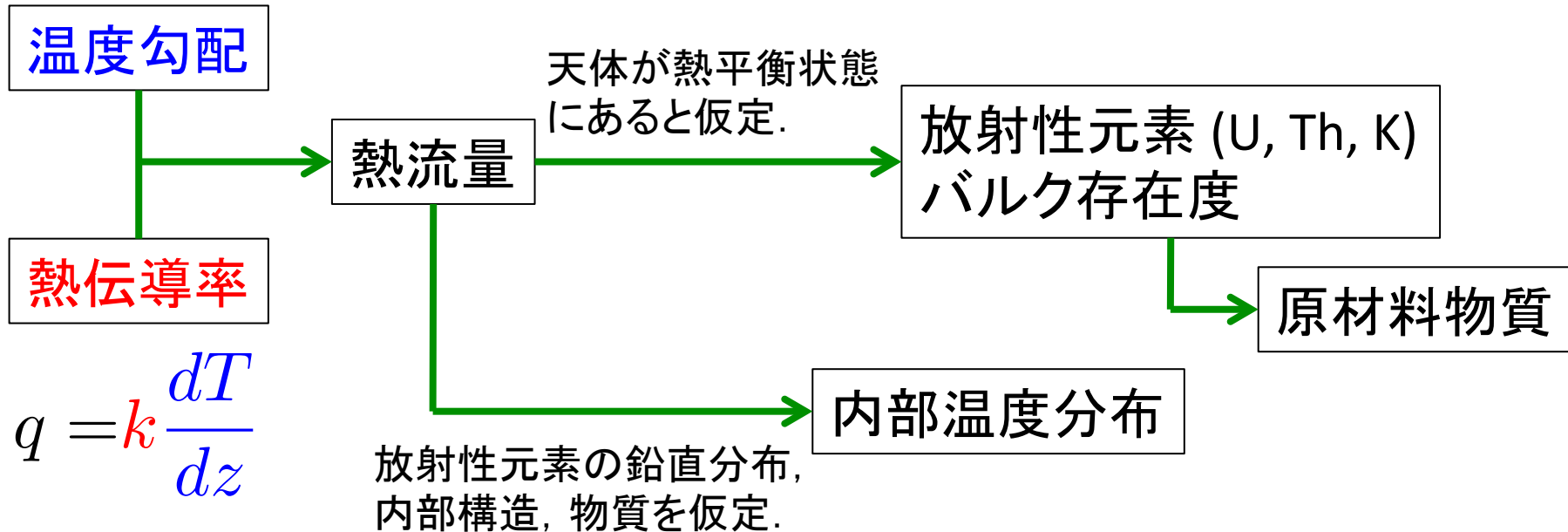
➡ 0.001 W/mK 超低熱伝導率 !!

天体表層はレゴリスで覆われており, 非常に特異な環境.

# 地殻熱流量観測

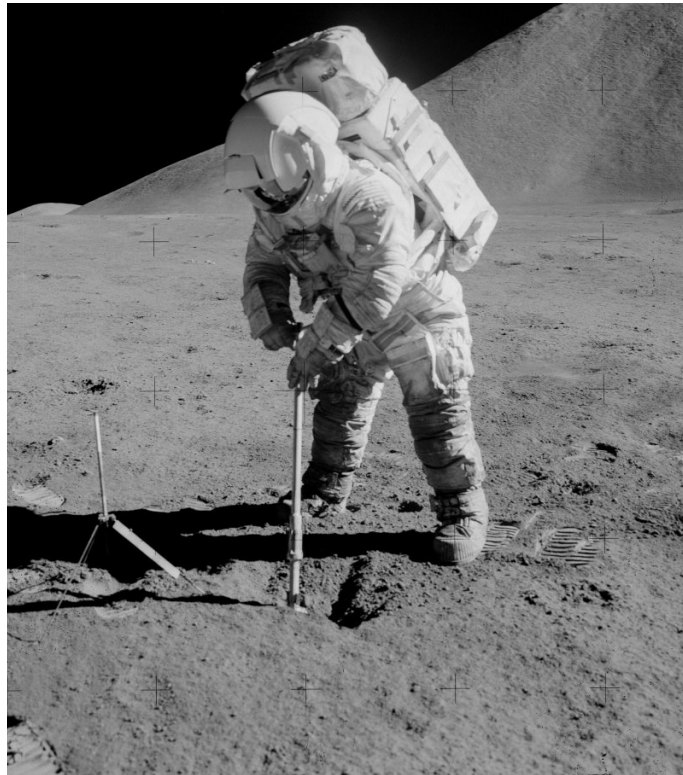
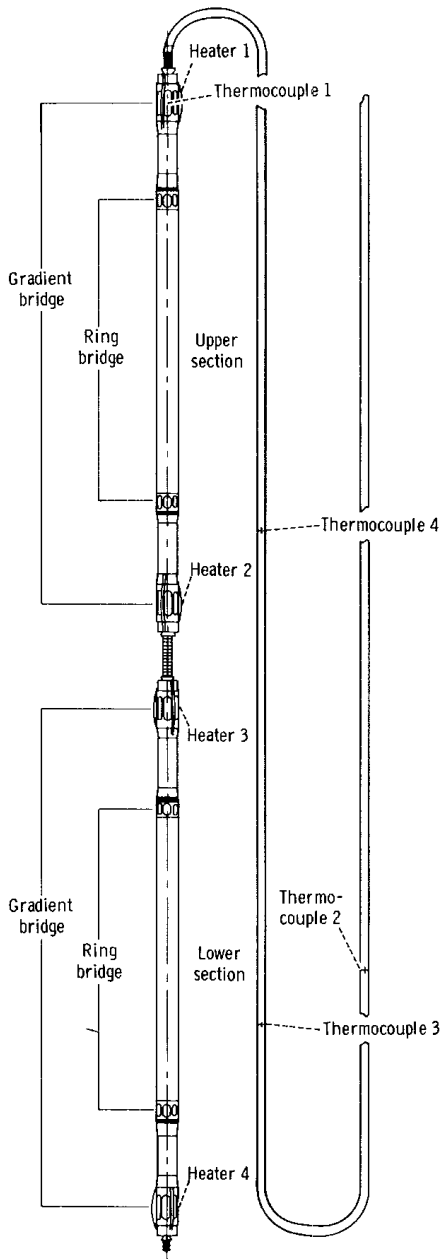
地殻熱流量・・・天体内部の熱的な状態を反映.

放射性元素発熱, 潮汐加熱, 永年冷却・・・



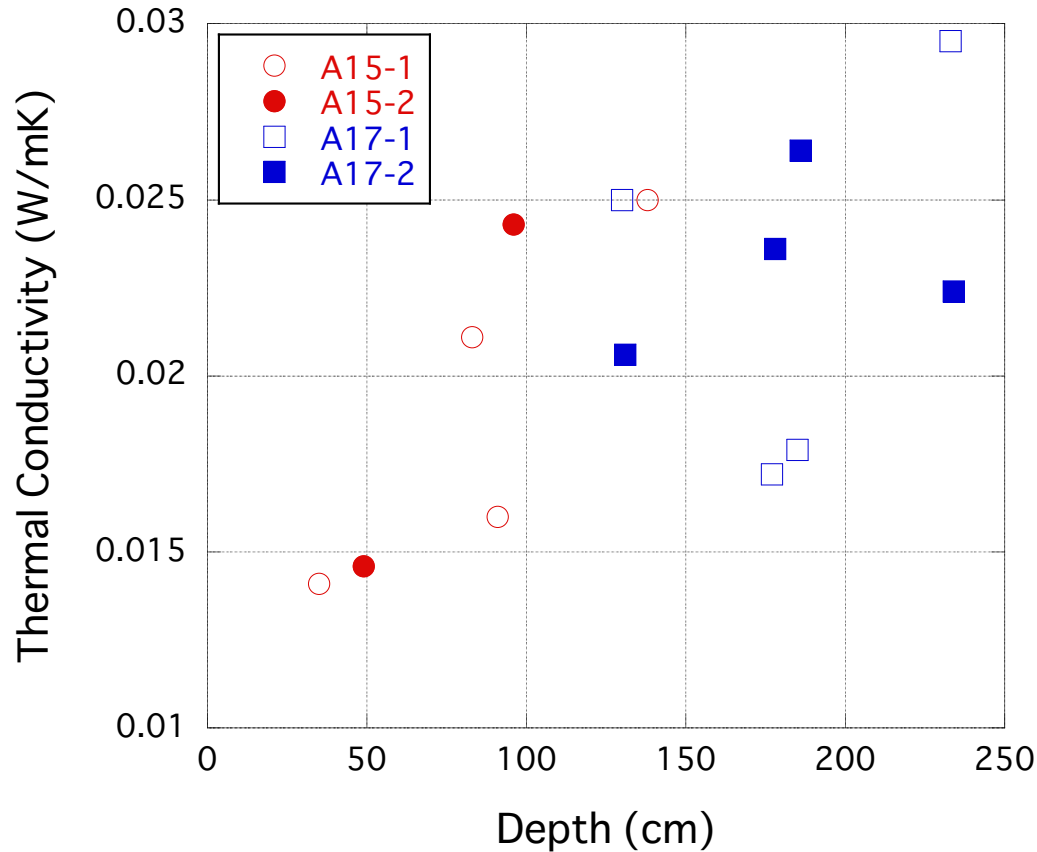
# アポロ熱流量観測

レゴリス中のドリル掘削穴にプローブを挿入し、熱伝導率と温度勾配を独立に測定。



アポロ熱流量プローブ  
(Langseth et al., 1973)

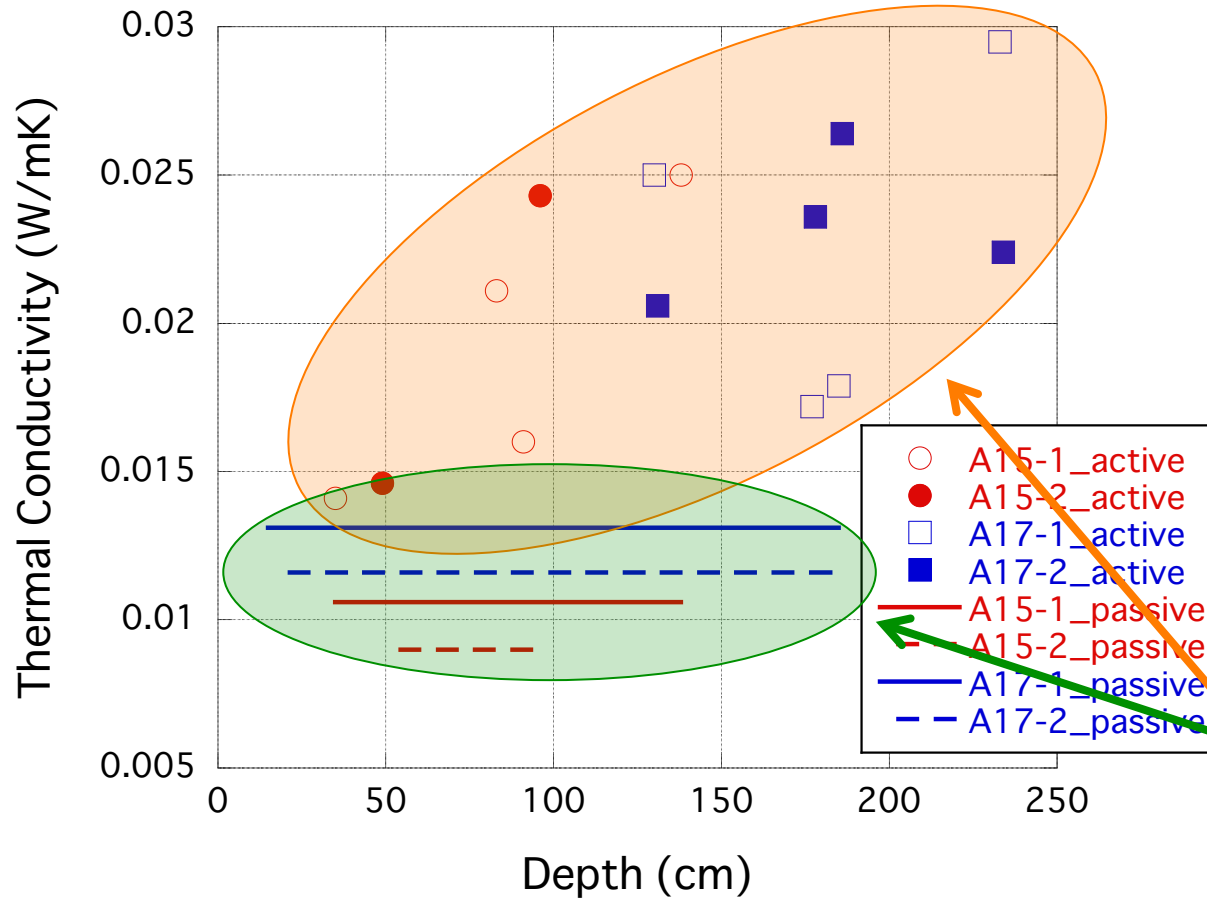
# ヒーター加熱時の温度上昇率から熱伝導率を推定 (Langseth et al., 1972;1973)



ドリル掘削によるレゴリスの状態 (主に密度と圧縮応力) の変化

オリジナルな熱伝導率とは異なる？

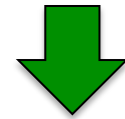
# 年周期の温度振幅の深さ方向減少率から熱拡散率を推定 (Langseth et al., 1976)



長周期の温度変化



より広い範囲の熱特性を反映



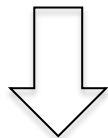
圧密の影響は受けていない？

これらの違いを定量的に説明できていない。

年周期温度変動の位相差，日食時の温度振幅・位相差からの推定値とも非調和的 (Takita, 2007)



# 熱流量計測



プローブ挿入による  
レゴリスの状態変化

- 空隙率 (密度)
- 応力場
- 接点点数
- サイズ sorting
- 温度場の乱れ
- …

## レゴリス

- 形状
- サイズ分布
- チャージ
- …

## 補正

プローブ挿入  
前のレゴリス  
の状態

レゴリスの  
状態変化の  
程度・範囲

## 熱伝導率の変化

パラメータ依存性調査  
メカニズムの理解

モデル物質：  
ガラスビーズ

単純化

パラメータコントロール

# 小天体の熱進化

## 惑星形成

ダスト ( $\sim \mu\text{m}$ )



微惑星 ( $< 10 \text{ km}$ )

衝突合体成長

母天体 ( $100 \sim 1000 \text{ km}$ )  
原始惑星 ( $> 1000 \text{ km}$ )

地球型惑星・木星型惑星コア  
小惑星・彗星

現在の太陽系の姿に至るまでに天体はどのような熱進化・変成を経験してきたのか？

レゴリス層の断熱効果

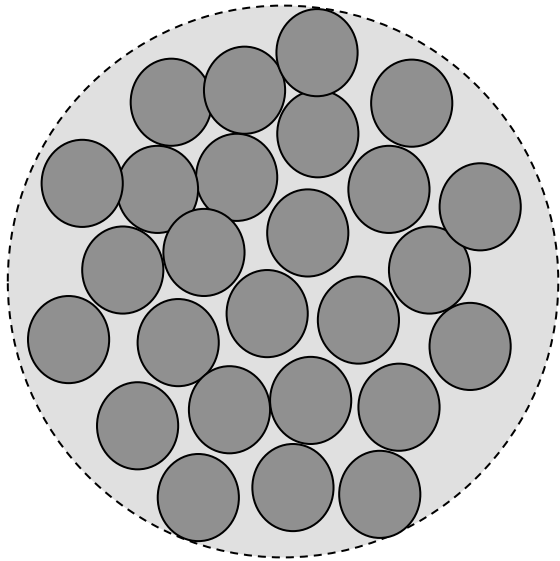


微惑星サイズより小さな天体においても大規模な熱変成を経験した可能性がある。



微惑星形成時からの熱史を紐解く

## 小天体の熱進化計算例



### 熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho Q(t)$$

$\rho$ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)

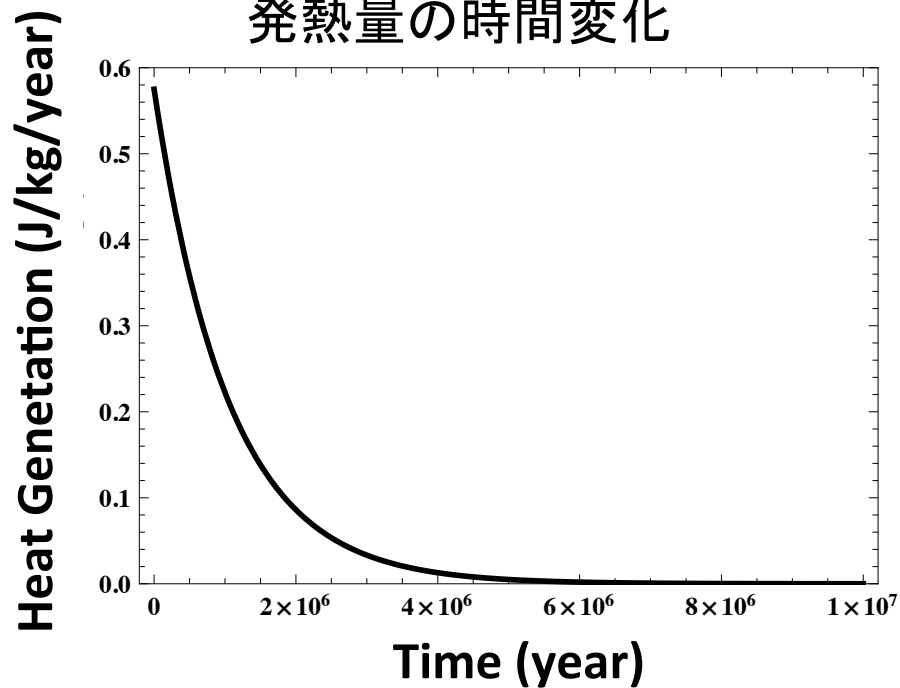
$c$ : 比熱 (J/kg K)

$k$ : 熱伝導率 (W/mK)

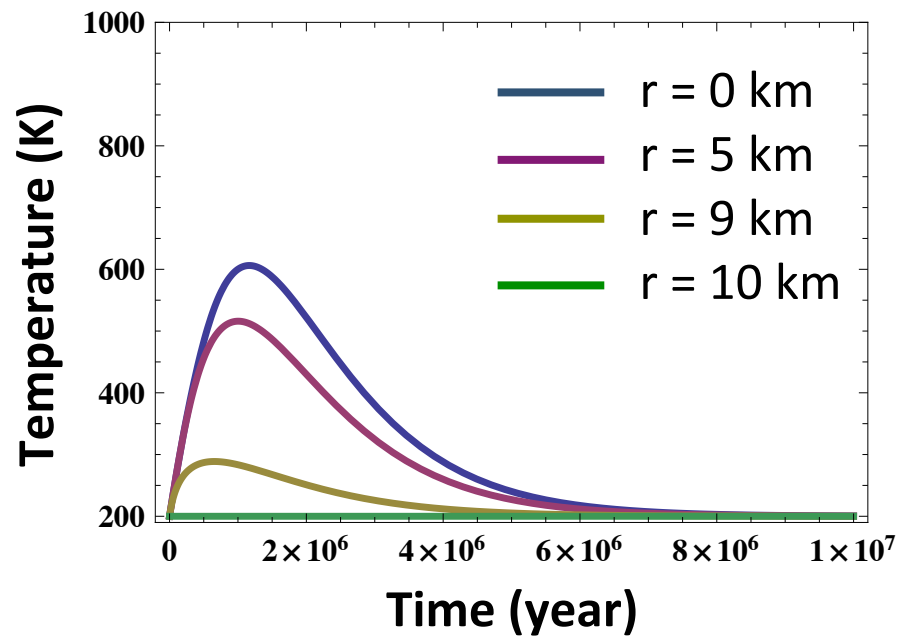
$Q(t)$ : 単位質量当たりの内部発熱量 (W/kg)

- 半径 10 km
- 熱源は  $^{26}\text{Al}$  ( $T_{1/2} = 0.73 \text{ My}$ )
- $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \times 10^{-6}$  (Miyamoto et al., 1981)
- 初期温度は一様に 200 K
- 表面温度は 200 K で一定
- 一様な熱物性を仮定

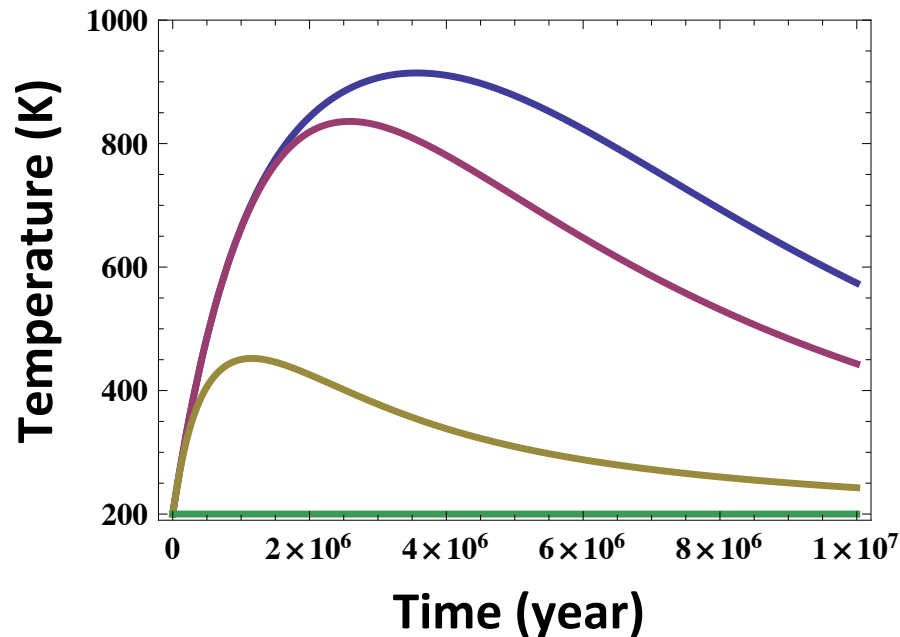
発熱量の時間変化



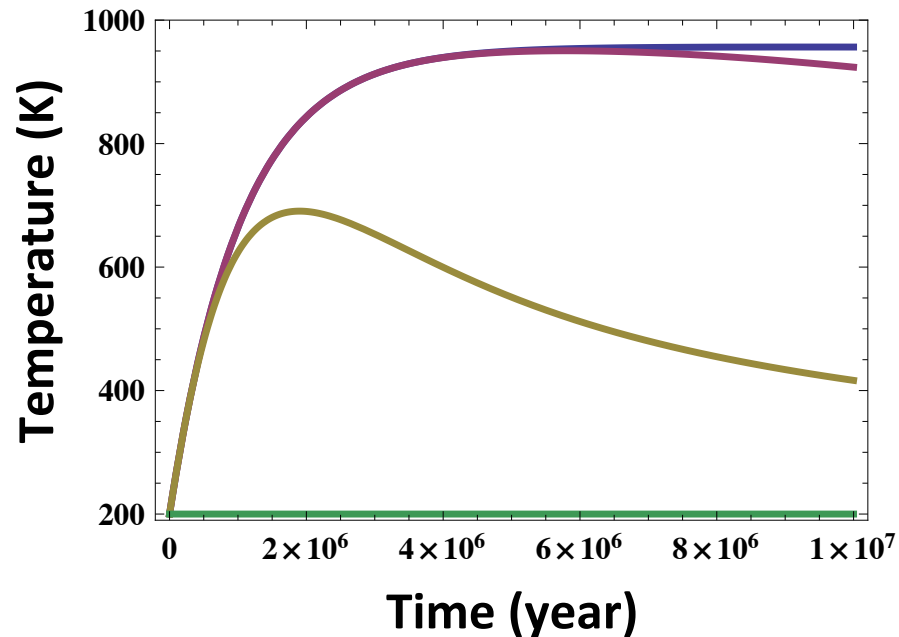
熱伝導率 1 W/mK: インタクトな岩石



熱伝導率 0.1 W/mK: 多孔質岩石



熱伝導率 0.01 W/mK: ダスト堆積物



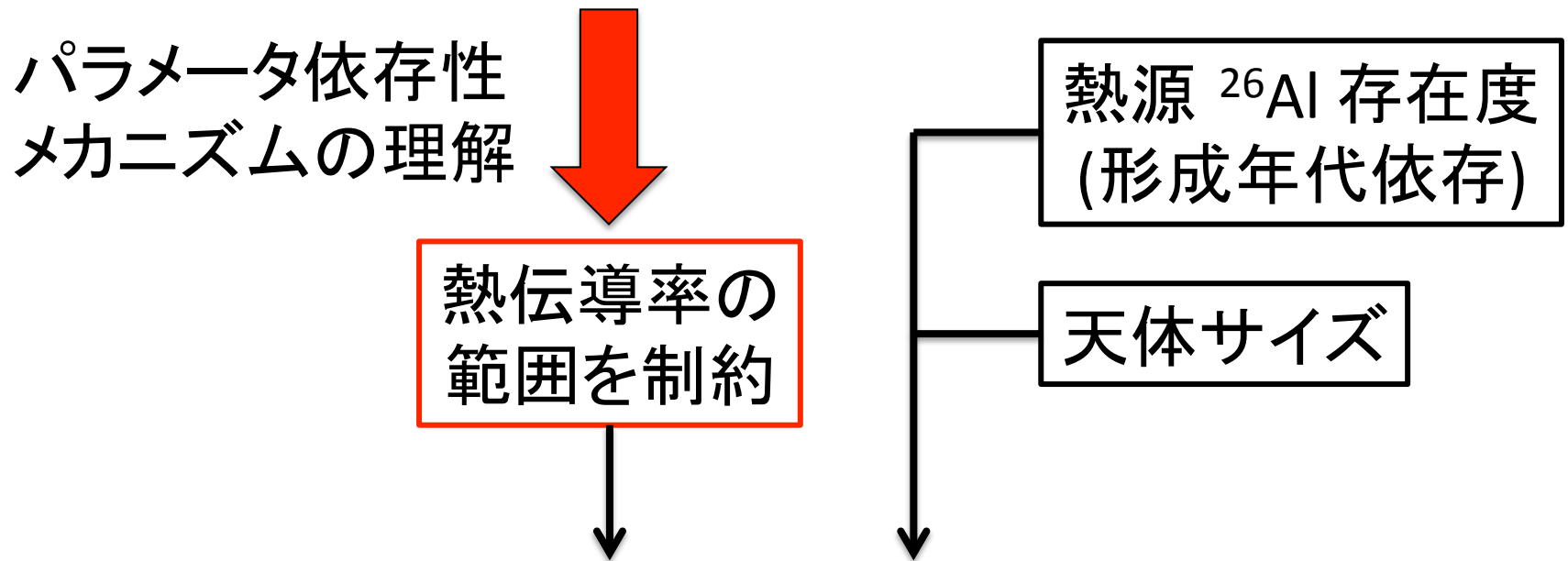
## 小天体 = 微小重力天体

- レゴリスの状態は全く不明.
- 微小重力環境での粉体の熱伝導率測定実験も困難.

レゴリス層の熱伝導率範囲を制約することにより、太陽系初期天体の熱進化を制約することができる.

# 小天体の熱進化

- ダストの状態は不明 (形状, 空隙率...)
- 微小重力環境

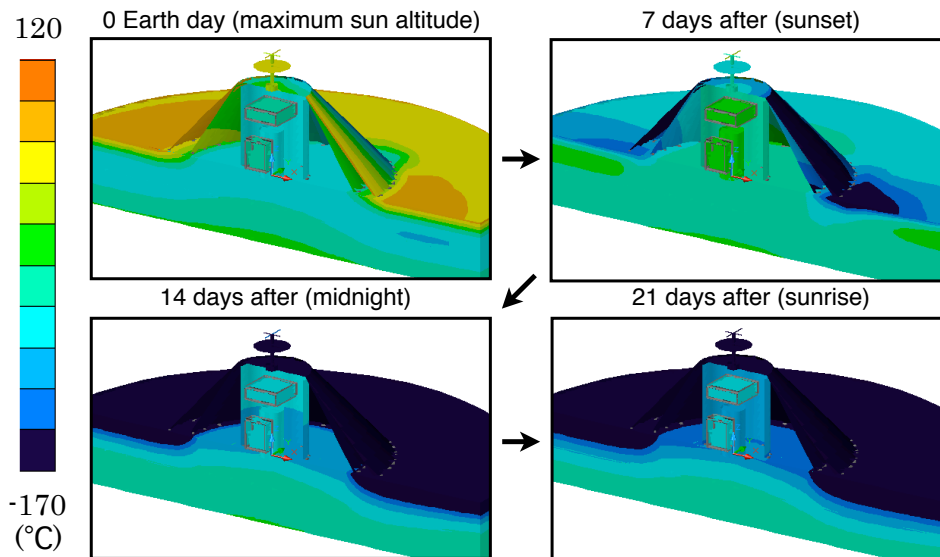


天体 (物質) の熱進化 (熱変成・分化)

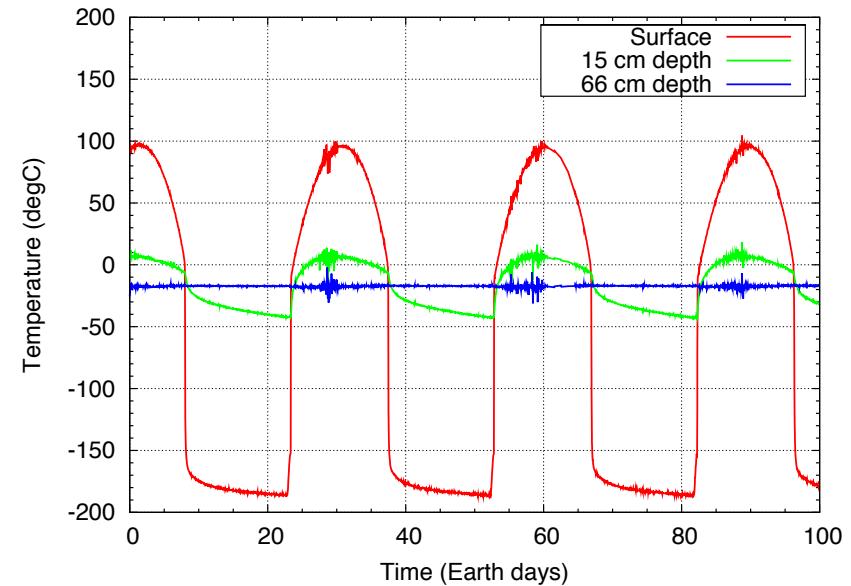
# 月面サバイバル

## SELENE-2 サバイバルモジュール

月面温度: -200 ~ +100 degC  
長期間のその場観測のためには機器を熱的に保護する機構が必要.



Apollo 17 Heat Flow Experiments



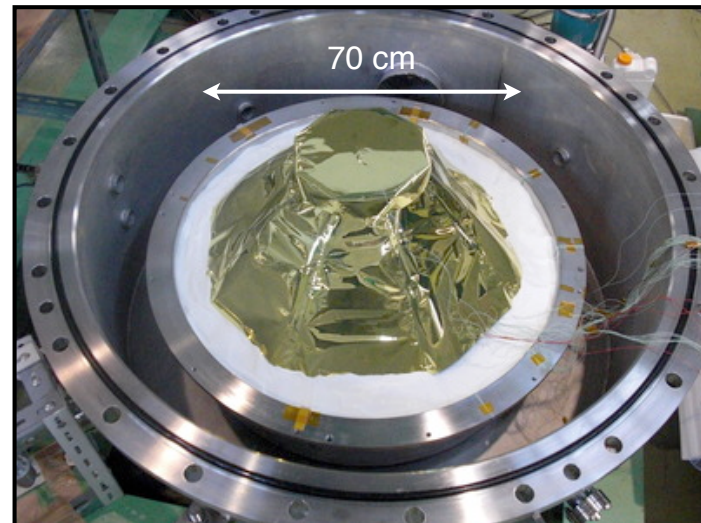
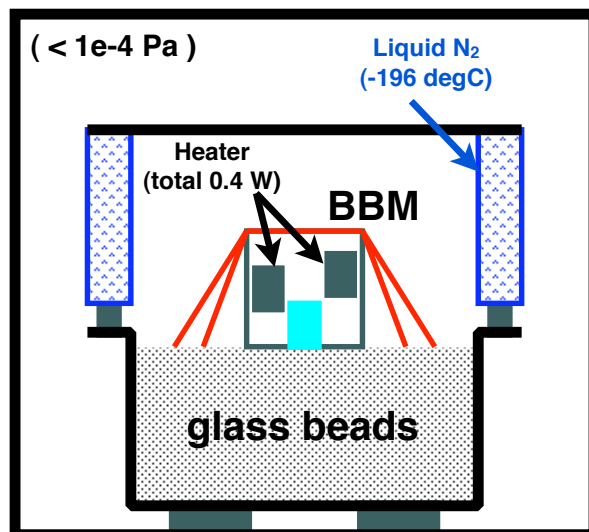
レゴリスの山を作り, 内部の温度を安定させる.

サバイバルモジュール = 月面レゴリスと熱的に  
カップリング



レゴリスの熱伝導率はサバイバルモジュールの性能  
を決める重要なパラメータ.

- 月表層の熱伝導率範囲の推定.
- 実験室での表層模擬物質 (ガラスビーズ) の熱伝  
導率コントロール.





## 2. 粉体の熱伝導率に関する先行研究

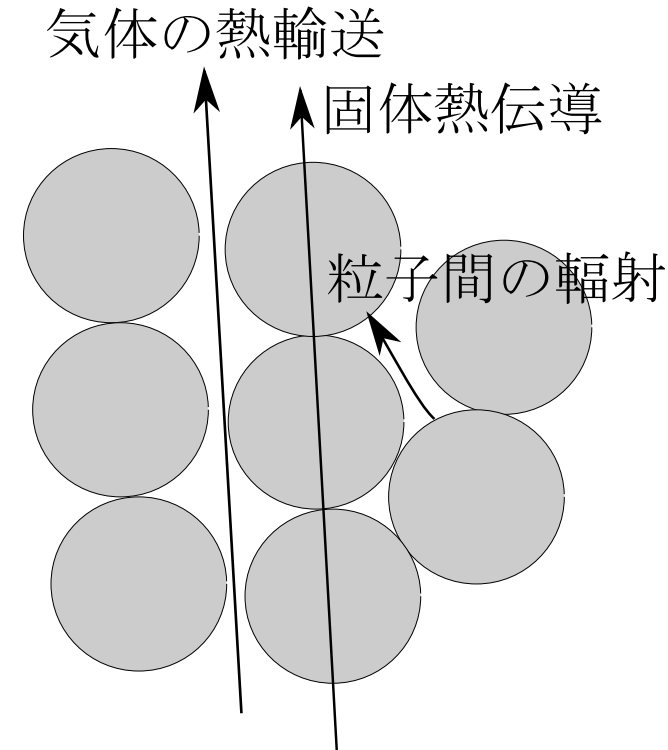
# 粉体の熱伝導率

$$k_{eff} = k_{gas} + k_{solid} + k_{rad}$$

~ 0.1 W/mK @1 atm

$$k_{vac} = k_{solid} + k_{rad}$$

~ 0.001 W/mK



熱伝導率は2つ, もしくは3つの寄与の合計として測定される.

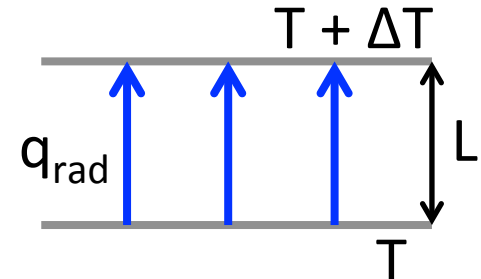
## 固体伝導率 …… 接触点での熱伝達状態に強く依存

- 接触点の数・配列
- 粒子の熱伝導率
- 接触面積

モデル化が困難

## 輻射伝導率 …… 温度に強く依存

- 粒子表面の輻射率
- 温度
- 粒子間距離



$$q_{rad} = \varepsilon\sigma[(T_1 + \Delta T)^4 - T_1^4]$$
$$q_{rad} = k_{rad} \frac{\Delta T}{L}$$



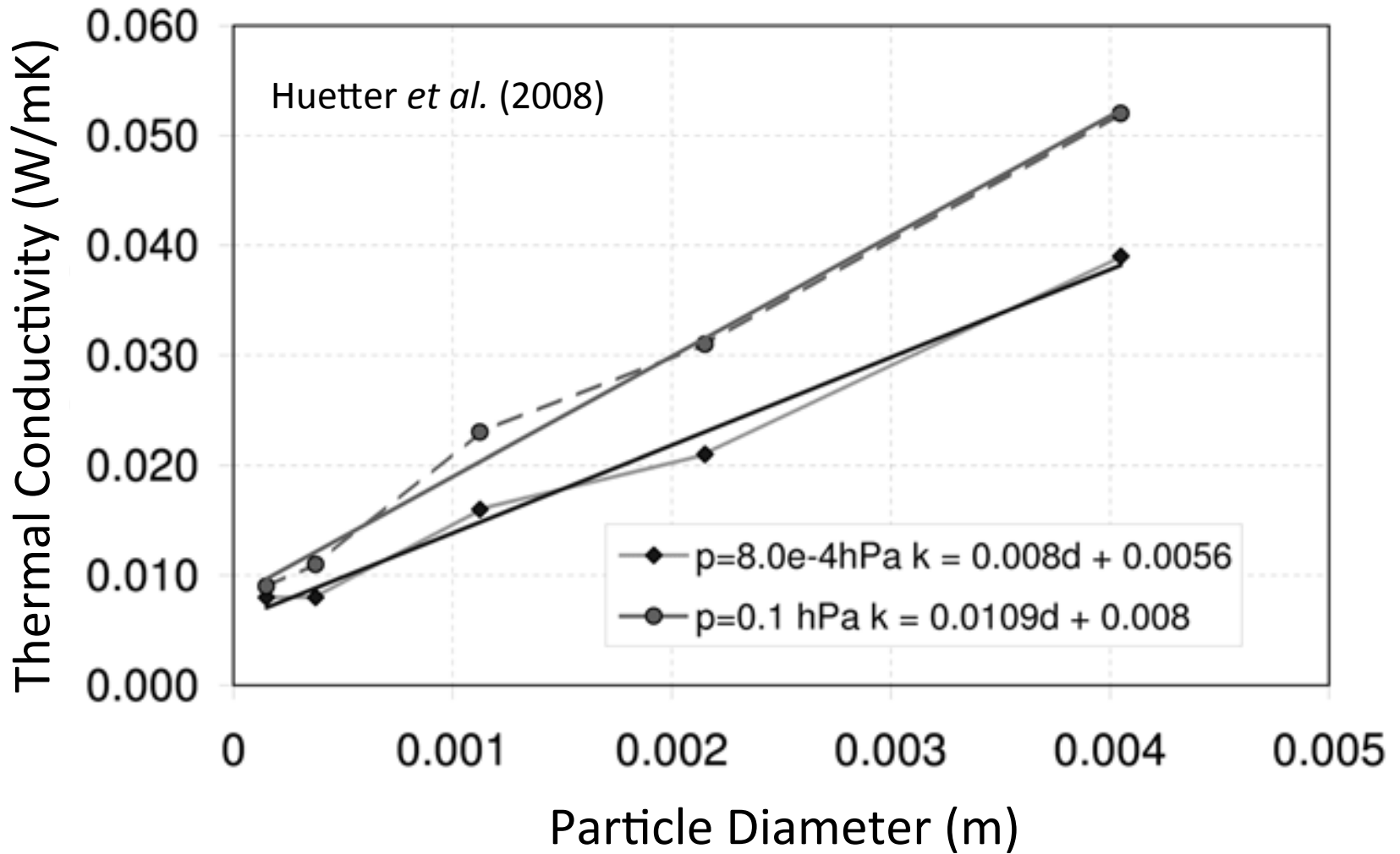
$$k_{rad} = 4\varepsilon\sigma L T^3$$

それぞれ多くのパラメータに依存.

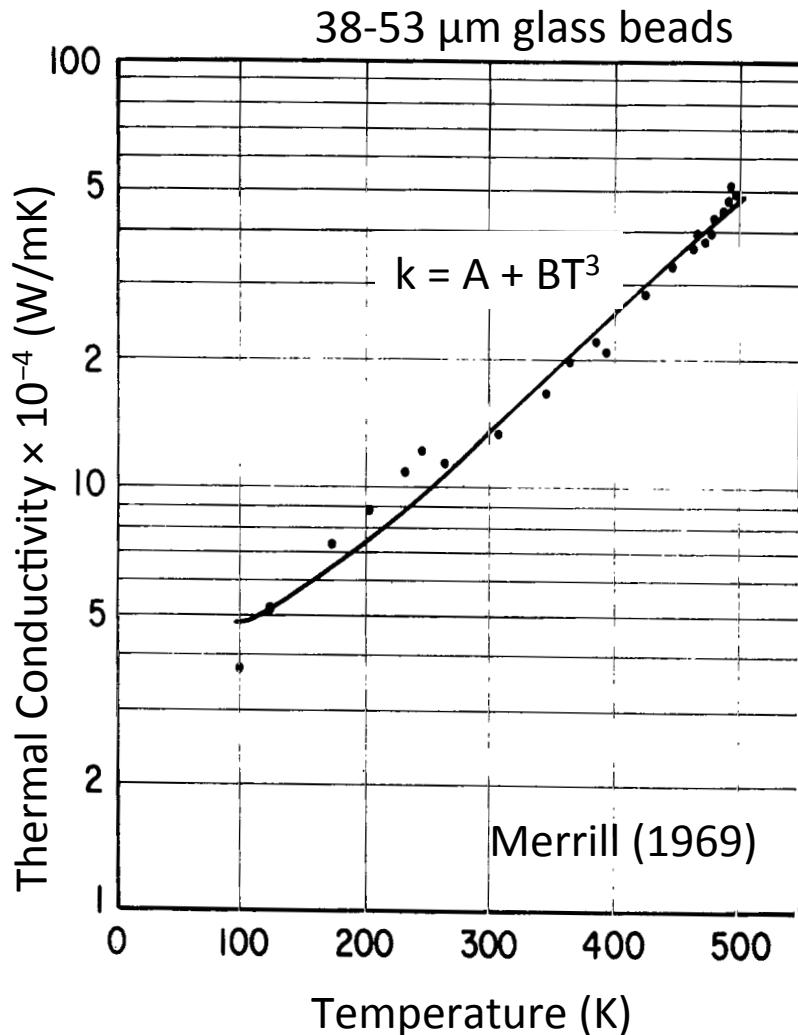
# 過去のパラメータ依存性調査の実績

パラメータ	サンプル	メカニズム		Reference
		固体伝導率	輻射伝導率	
粒径	ガラスビーズ	接触点数？	粒子間距離	Merrill (1969) Huetter et al. (2008)
温度	ガラスビーズ 玄武岩粉体 月レゴリス		温度	Merrill (1969) Fountain and West (1970) Cremers et al. (1970)
空隙率 or 密度	玄武岩粉体 月レゴリス	接触点数？	粒子間距離？	Fountain and West (1970) Cremers et al. (1970)
応力	<del>XXXXXXXXXX</del>	接触面積？		
粒径分布	ガラスビーズ	接触点数？	粒子間距離？	Huetter et al. (2008)
粒子形状	<del>XXXXXXXXXX</del>			
粒子組成	<del>XXXXXXXXXX</del>			

# 粒径依存性



# 温度依存性: 固体・輻射伝導率の分離



温度依存性

→ 輻射寄与の温度依存性

$$k_{\text{vac}} = k_{\text{solid}} + k_{\text{rad}} = A + BT^3$$

Watson (1964)



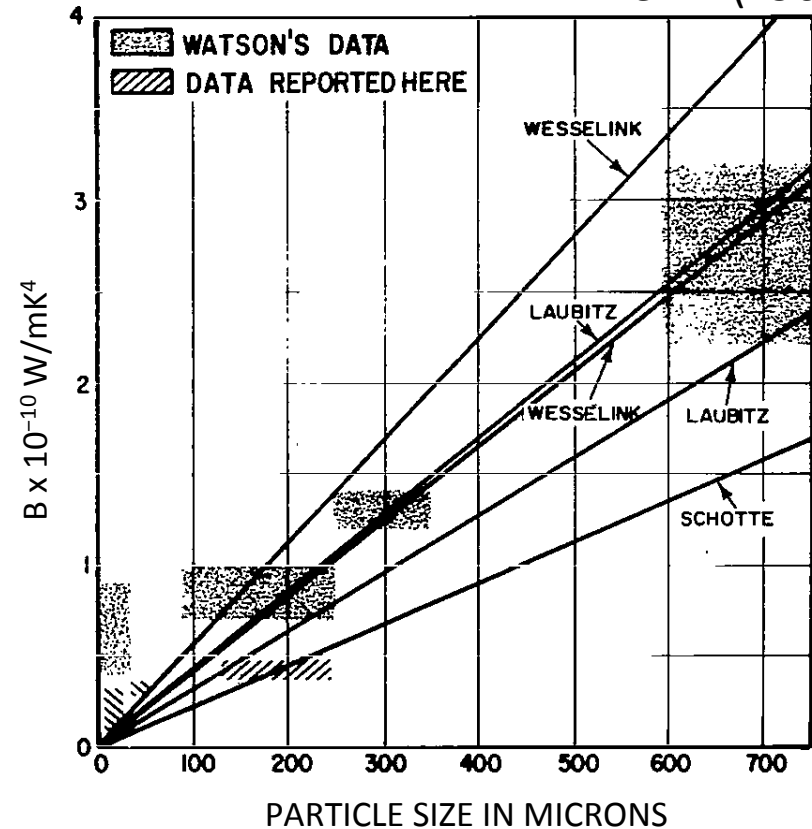
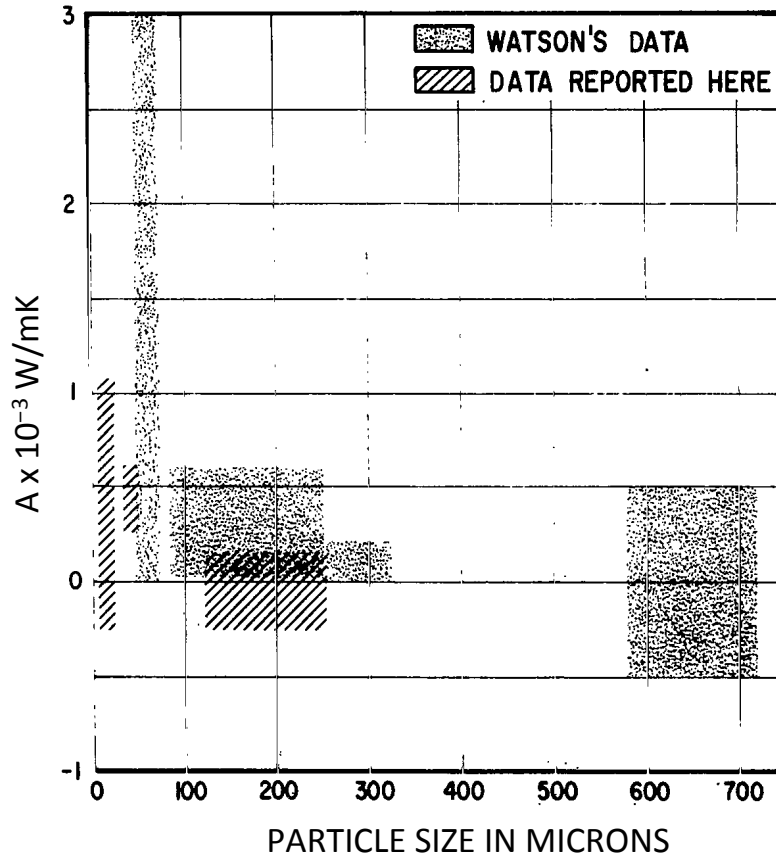
実験データへのフィッティングにより、AとBの値を決定.



固体伝導率と輻射伝導率の分離.

# 温度依存性: 固体・輻射伝導率の分離

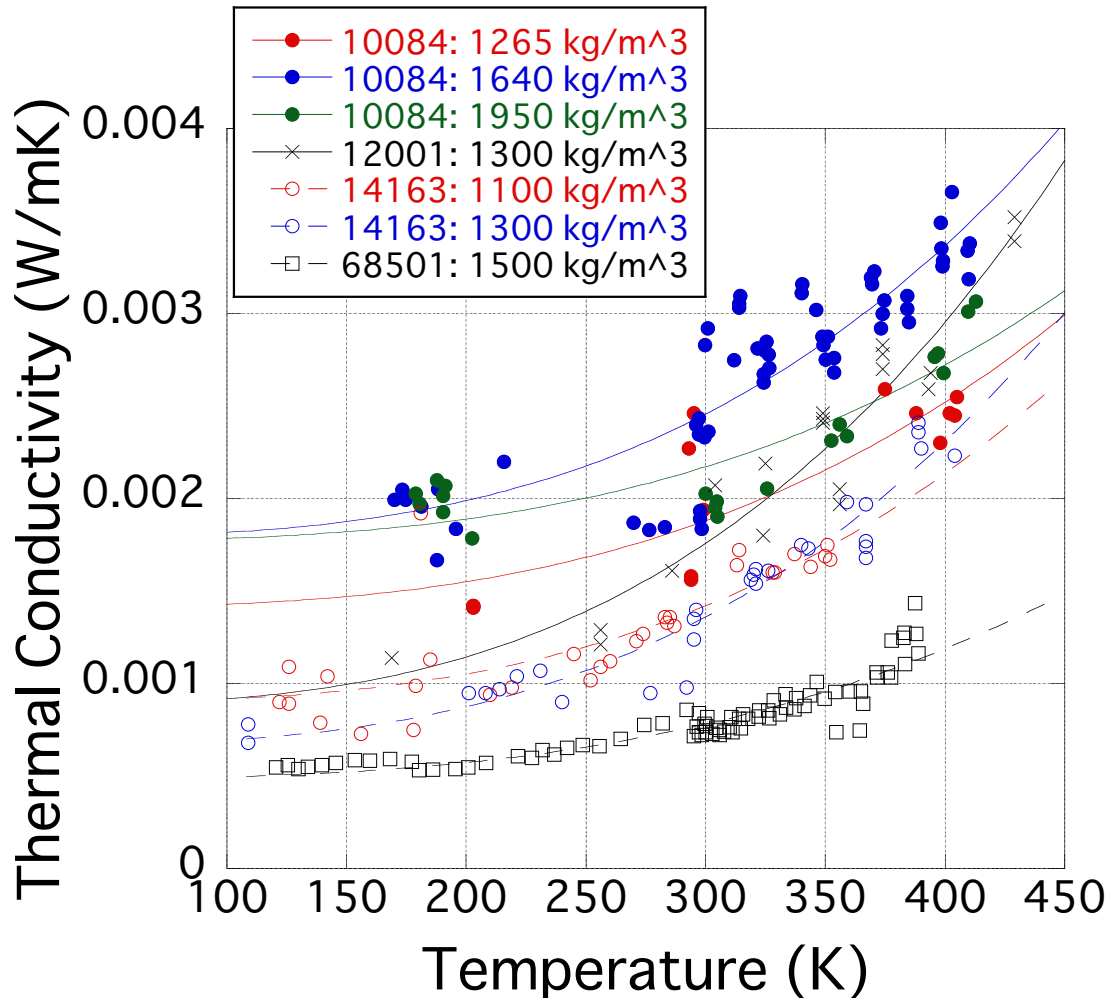
Merrill (1969)



固体伝導率は粒径が大きいほど小さい 輻射伝導率は粒径が大きいほど大きい

問題点: 空隙率のコントロールが不十分 (38 - 50%)

# アポロサンプルの熱伝導率



アポロサンプルの  
熱伝導率

< 0.004 W/mK

アポロ実測値  
表層

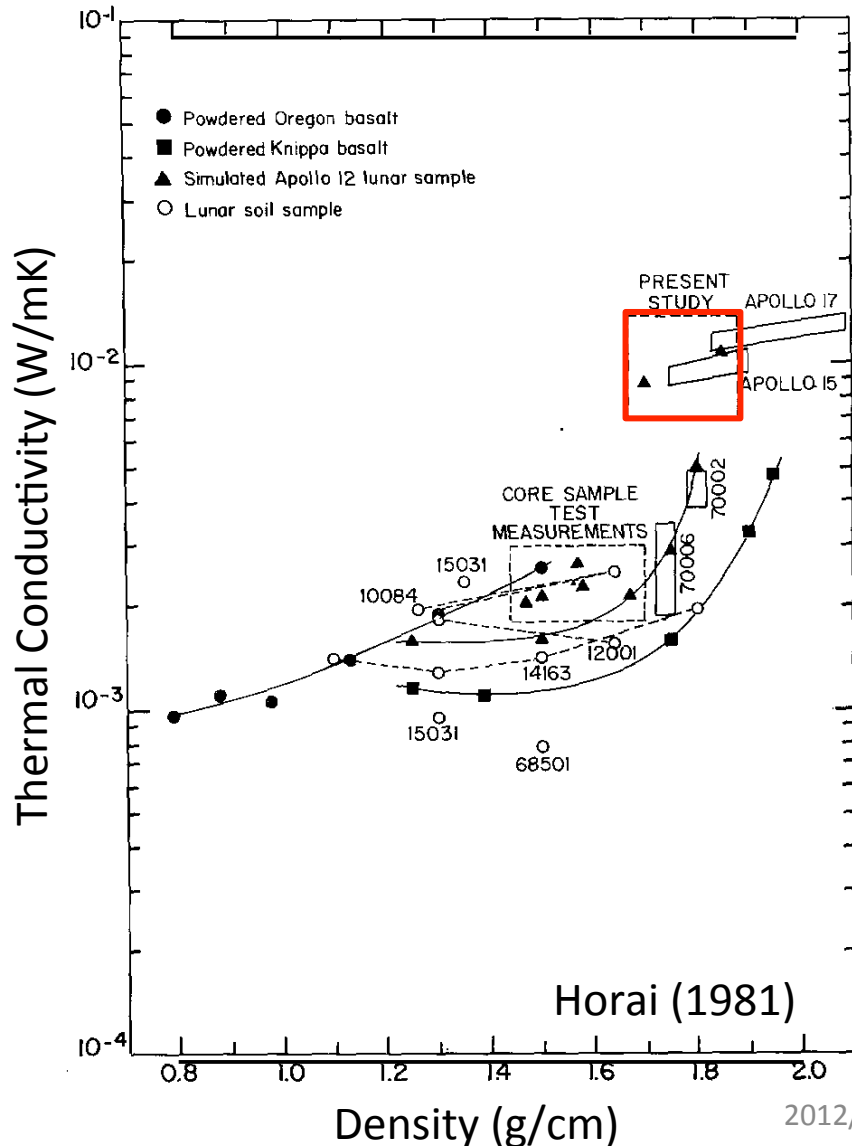
~ 0.0015 W/mK

深さ数十 cm 以深

> 0.01 W/mK



# レゴリスシミュラントの熱伝導率



唯一, 0.01 W/mK オーダーに達したデータ.

熱伝導率を測定する深さがこれまでよりも深い.



大きな自重により, 熱伝導率が増加.

熱伝導率の深さ分布は未調査.

# 先行研究の問題点

様々な実験が行われているが、実験条件がバラバラなため、結果の統一的な解釈ができない！

- 1つのパラメータを変えると他のパラメータも変化.
- 熱伝導率を測定した深さの記述がない.

# 3. 研究目的

## サイエンス目標

- 天体表層レゴリスの熱伝導率構造の推定
- 正確な熱流量 (*i.e.* 熱伝導率) の測定, 補正

## 手法

1. 熱伝導率のパラメータ依存性を調査 (先行研究の問題点を改善)
2. 熱輸送メカニズムの理解
3. 熱伝導率のモデル化

パラメータ	本研究	先行研究
気圧		○
粒径	✓	△
粒径分布		△
空隙率		△
温度	✓	○
荷重	✓	×
粒子組成	✓	×
粒子形状		×

# 4. 熱伝導率測定実験

- (a) 粒径・温度依存性
- (b) 深さ依存性

# サンプル

粒径がある程度揃っている球形ビーズを使用

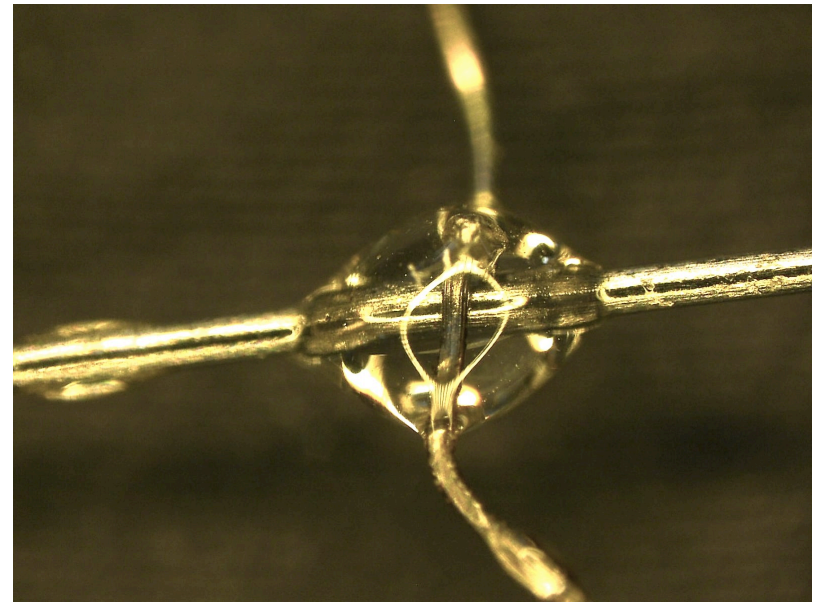
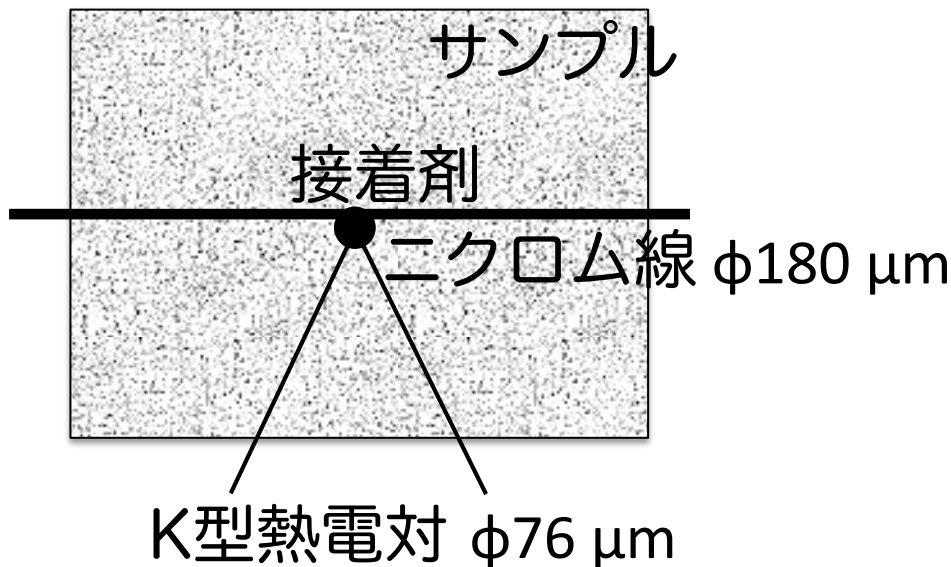
- 空隙の真空引きに十分なコンダクタンスを持つ。
- 測定ごとに一定の空隙率 (~ 40%) を得ることができる。

サンプル	粒径 (μm)	空隙率 (%)
ガラスビーズ	53 – 63	42 +/- 2
	90 – 106	42 +/- 2
	355 – 425	42 +/- 2
	425 – 500	40 +/- 2
	710 – 1000	42 +/- 2

# 熱伝導率測定方法

## line heat source 法

サンプル中のヒーター線に発熱を与えたときの温度上昇率から熱伝導率を推定する。



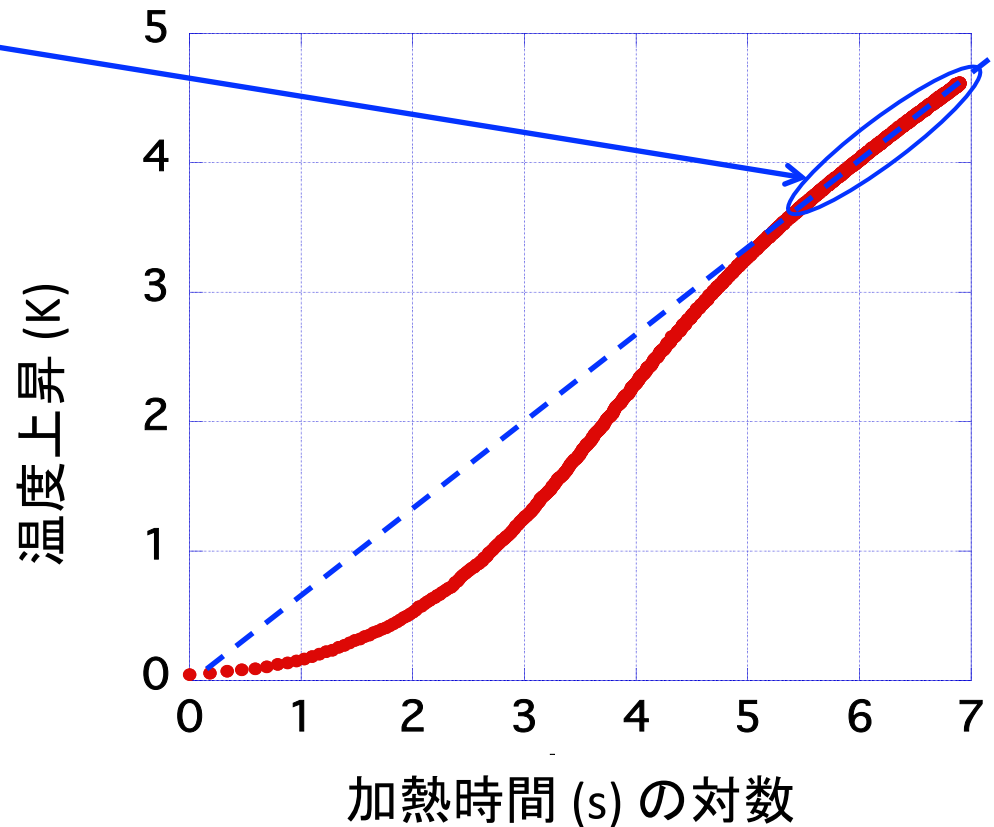
$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln t + c$$

q: ヒーター線の単位長さあたりの  
発熱量 (W/m)  
k: 熱伝導率 (W/mK)  
 $\Delta T$ : 温度上昇 (K)  
t: 時間 (s)

推定誤差 < 10%

- 電力誤差
- 傾き誤差
- サンプル境界の影響
- ニクロム線, 熱電対線を通った熱流出

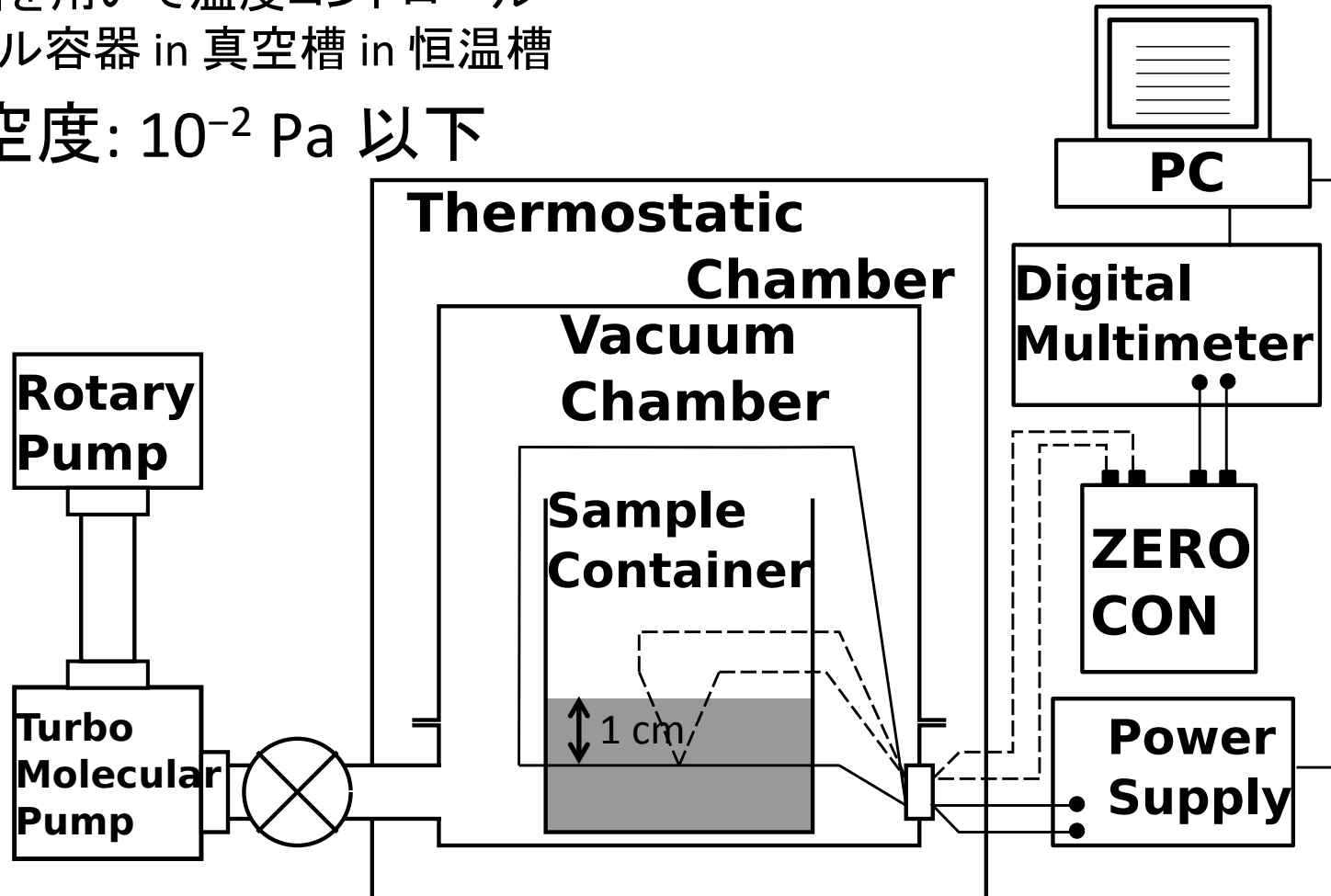
ヒーター線の温度上昇曲線



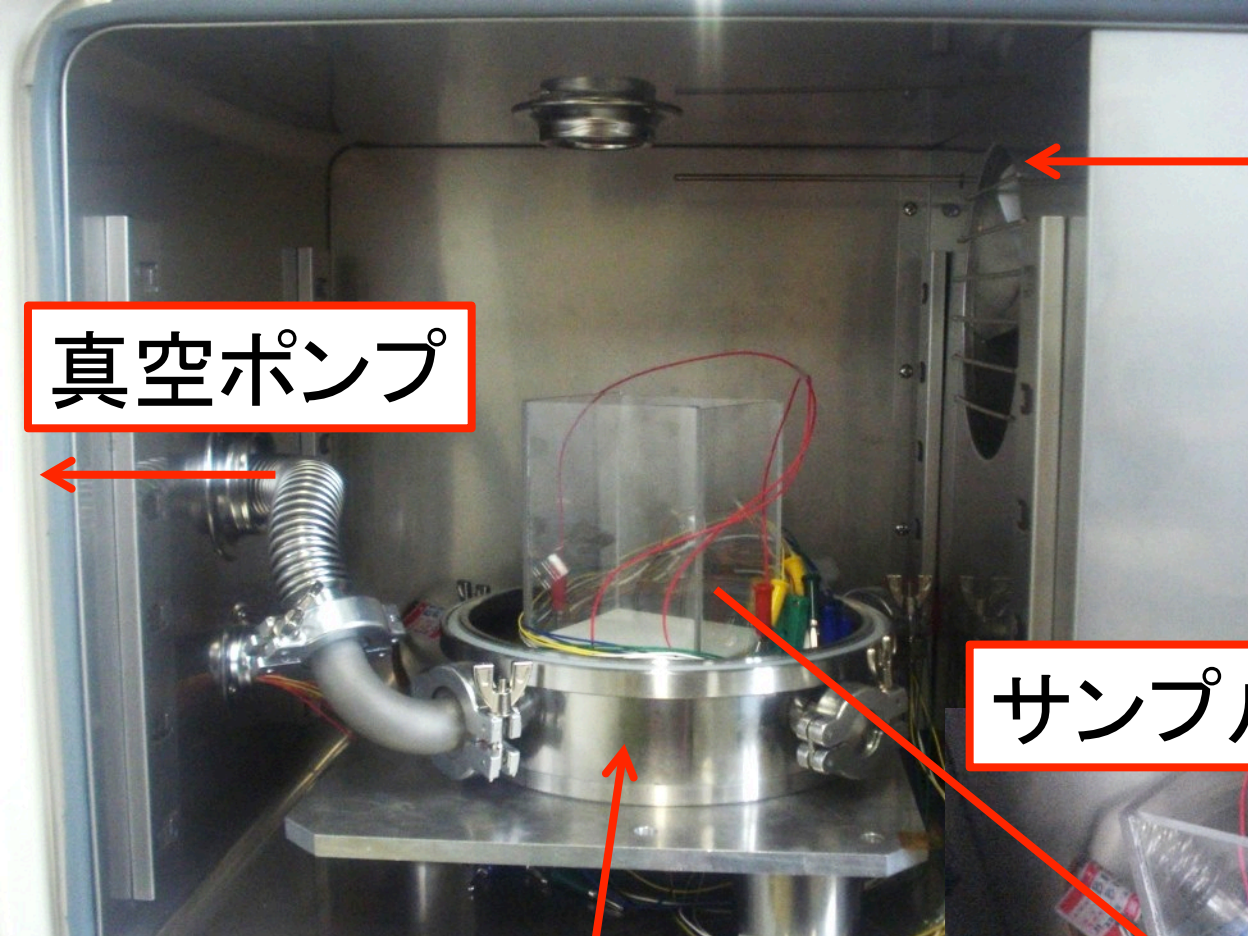
# 実験コンフィグレーション (a)

恒温槽を用いて温度コントロール  
サンプル容器 in 真空槽 in 恒温槽

真空度:  $10^{-2}$  Pa 以下





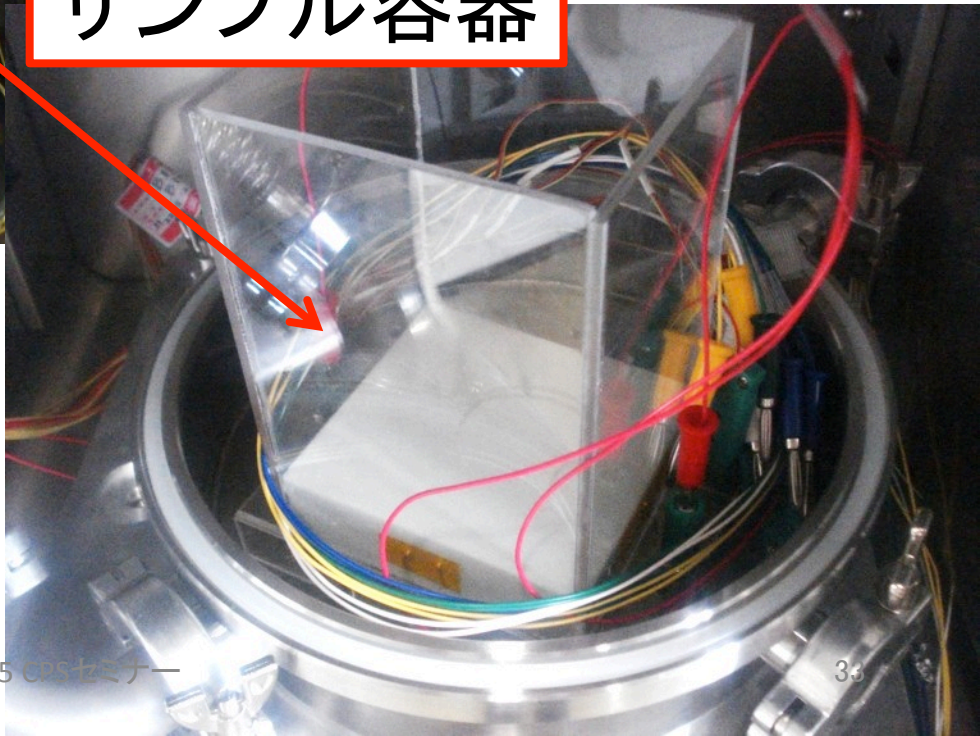


真空ポンプ

恒温槽

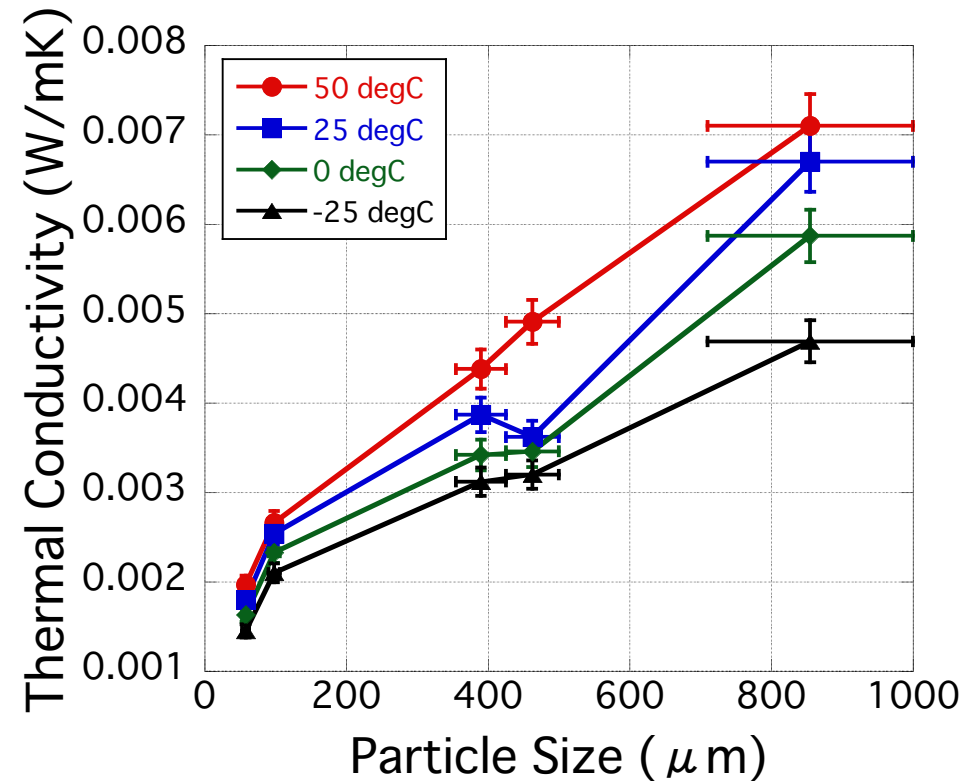
サンプル容器

真空槽

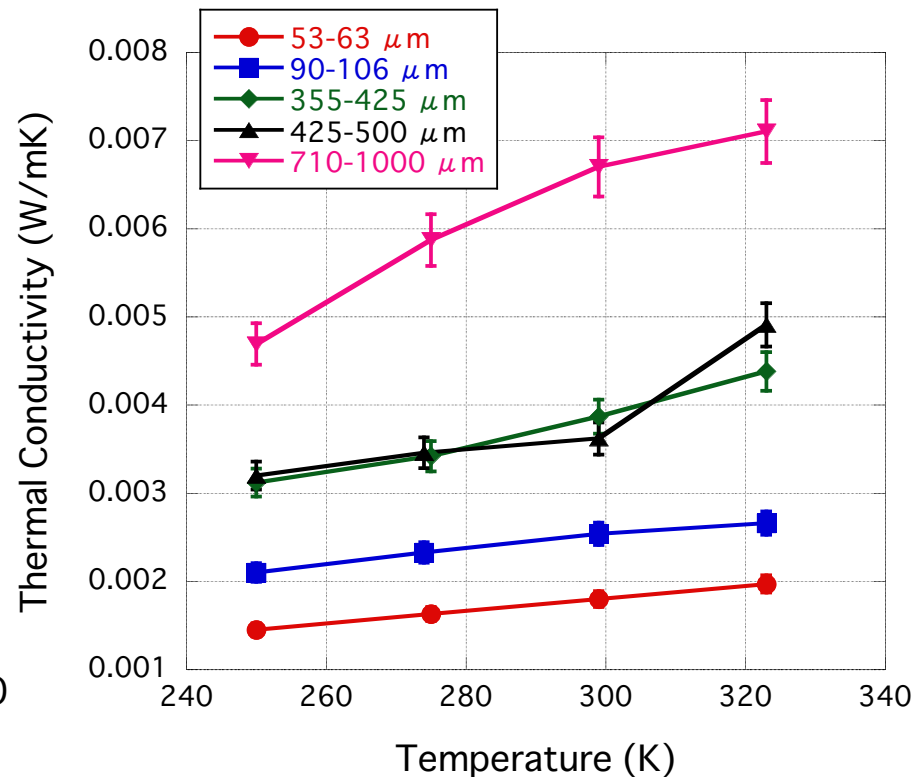


# 実験結果: 粒径・温度依存性

サンプル: ガラスビーズ, コンフィグレーション: (1)

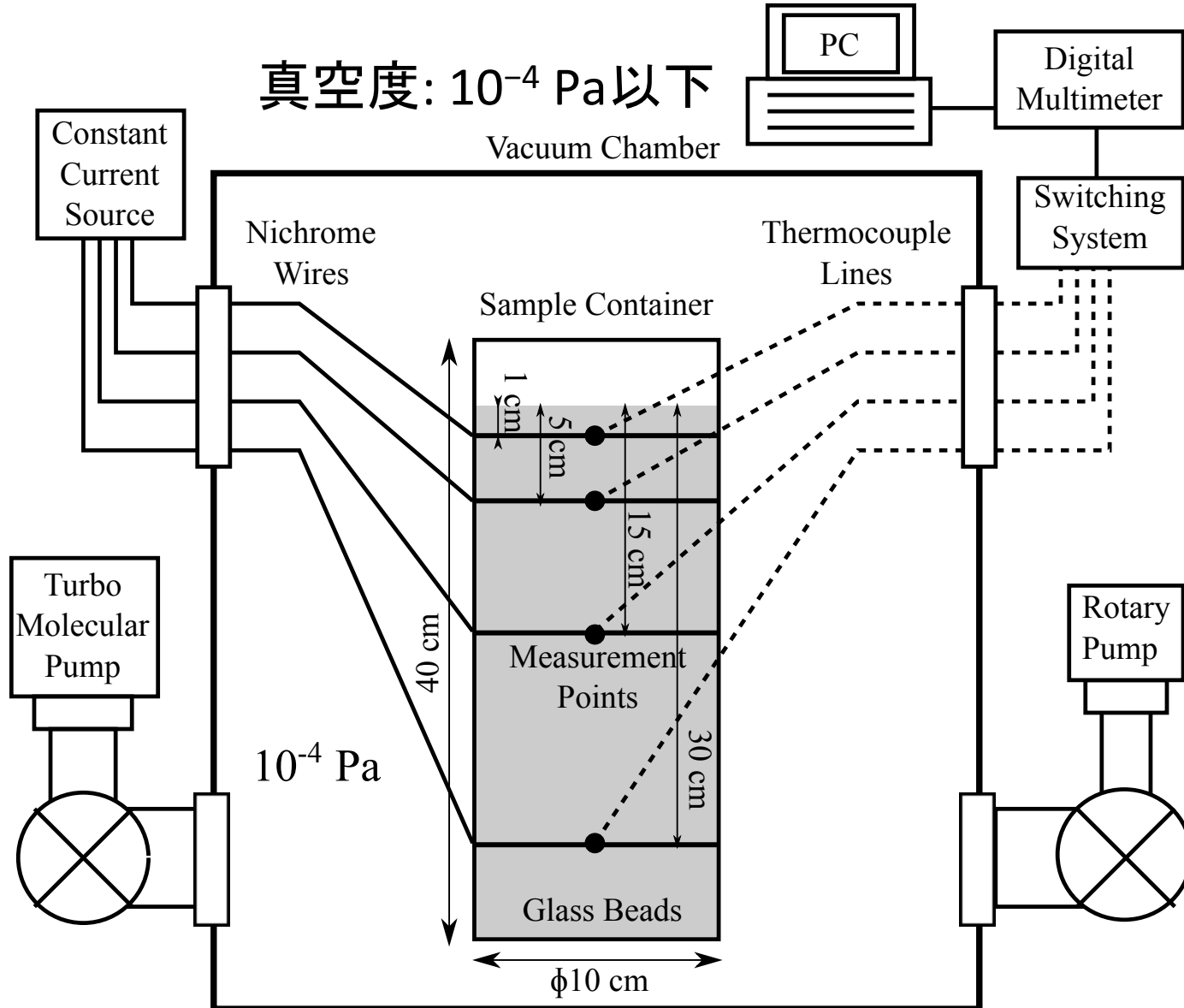


粒径の増加関数.



温度の増加関数.

# 実験コンフィグレーション (b)



サンプル容器

真空槽

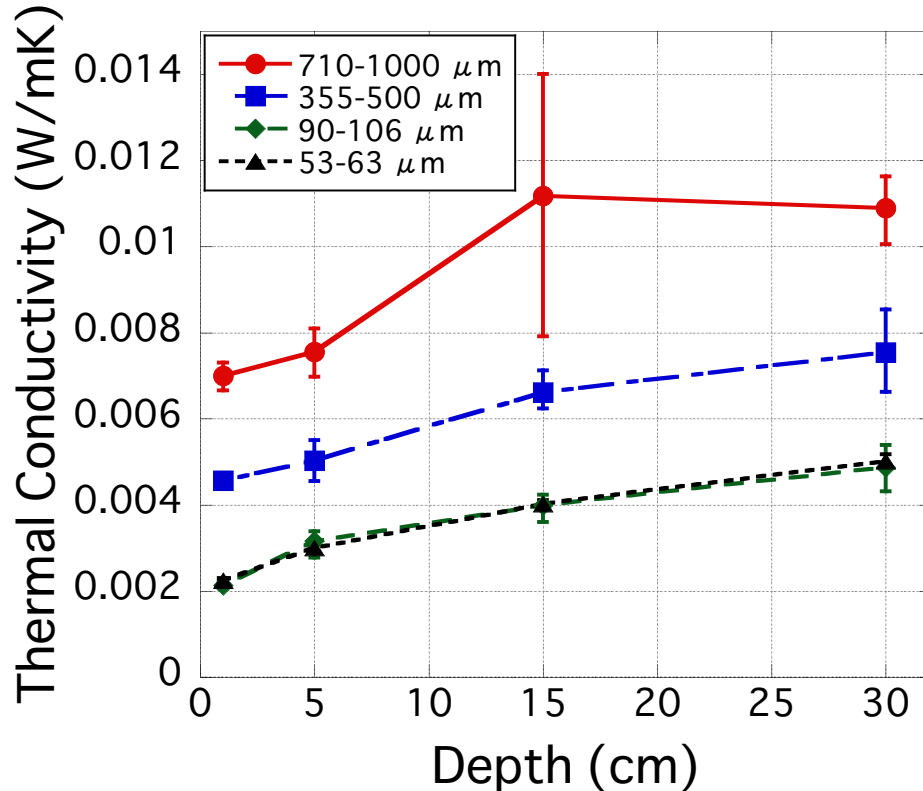


熱電対線

ヒーター線

# 実験結果：深さ依存性

サンプル：ガラスビーズ, コンフィグレーション: (2)



応力の増加

弾性変形により接触面積が増加.

密度の増加

せいぜい5%程度.  
2倍ほどの熱伝導率の変化は期待できない.

測定深さが深いほど熱伝導率が高くなった.

# 実験結果のまとめ

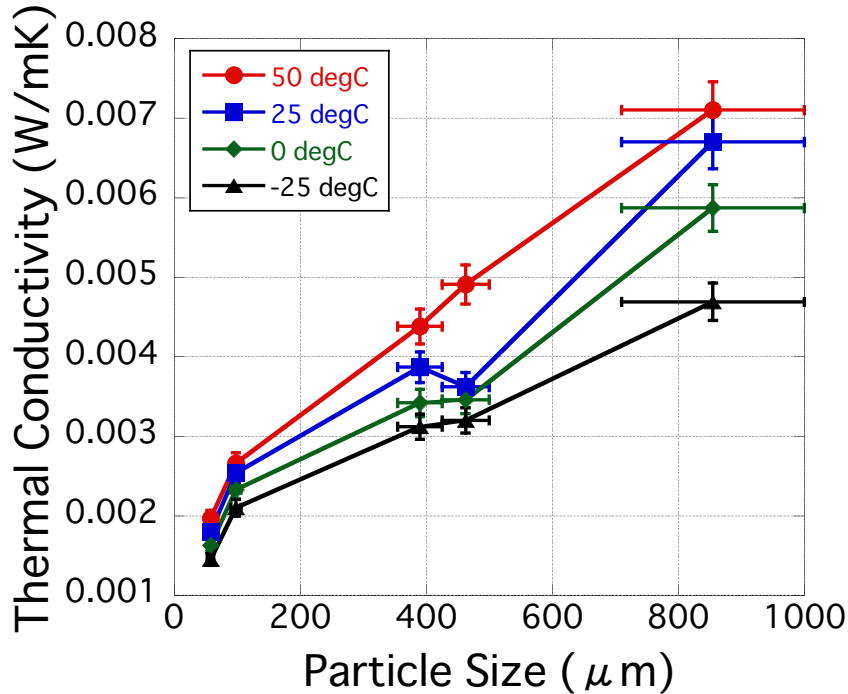
- (a) 熱伝導率の粒径・温度依存性
  - 粒径が大きいほど熱伝導率が高い.
  - 温度が高いほど熱伝導率が高い.
  
- (b) 熱伝導率の測定深さ依存性
  - 測定する深さが深いほど熱伝導率が高い.

## 5. 考察

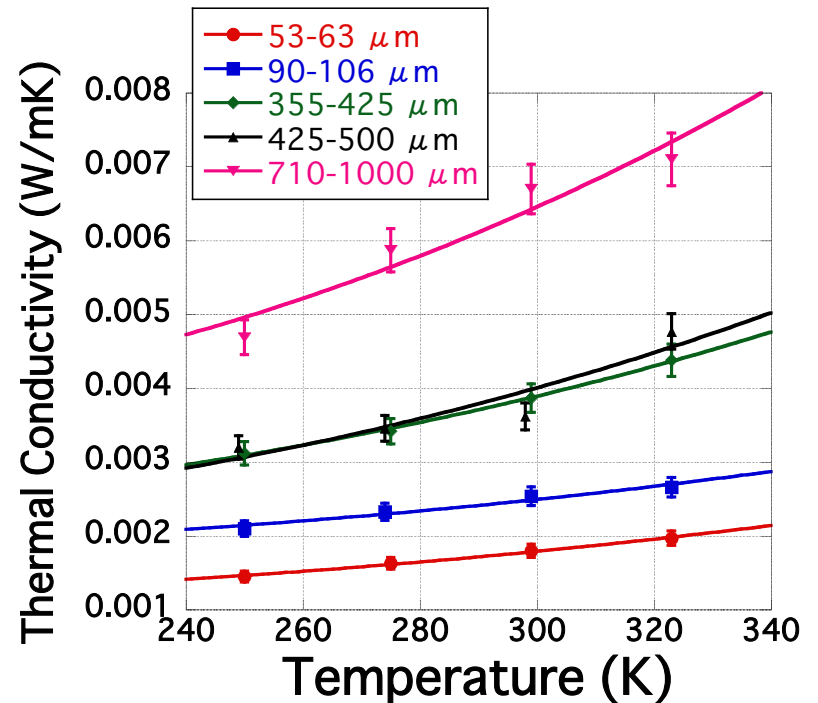
(a) 固体伝導率と輻射伝導率

(b) 応力依存性と天体重力の影響

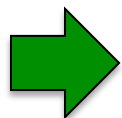
# (a) 固体伝導率と輻射伝導率



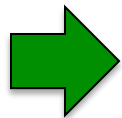
$k_{vac} = A + BT^3$  でのフィッティング



どのようなメカニズムか？



固体伝導率？ 輻射伝導率？



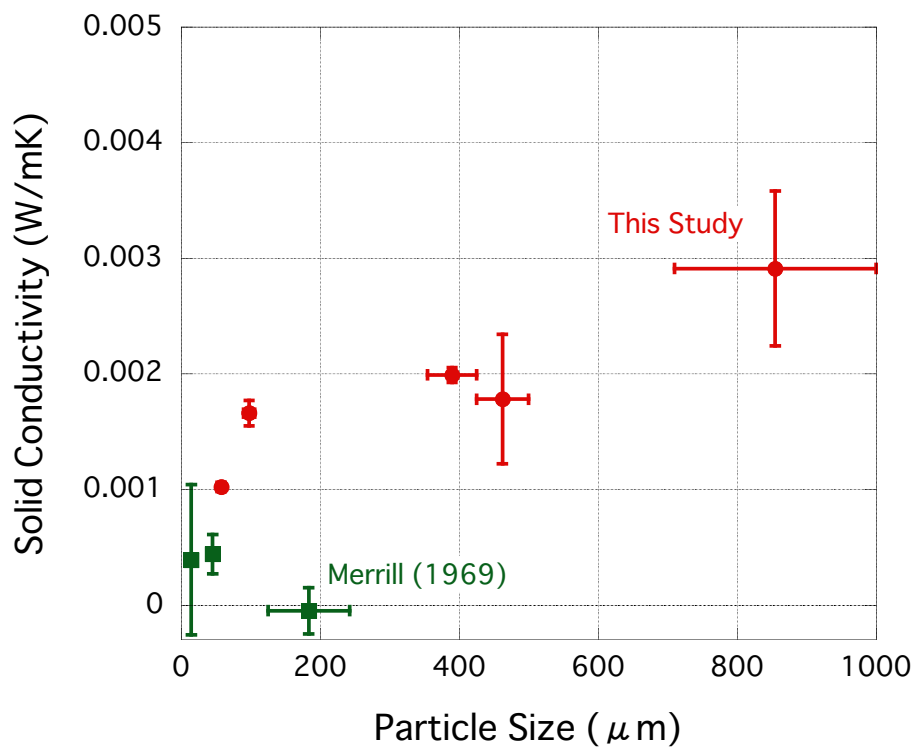
温度依存性を利用！



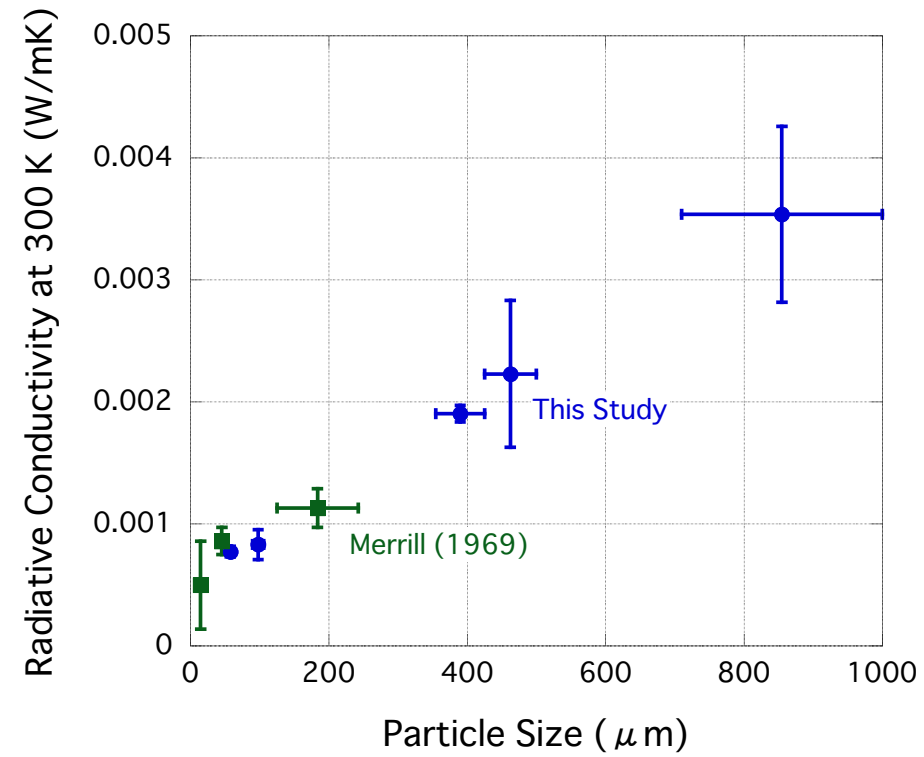
各粒径に対して A と B の値を決定.



# 固体・輻射伝導率 vs. 粒径



粒径の増加関数 (?)



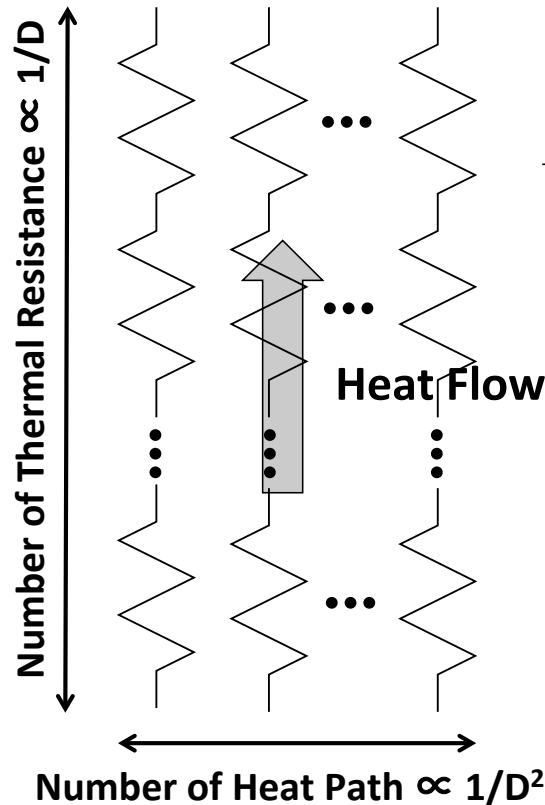
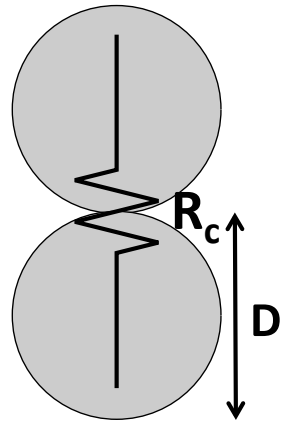
粒径の増加関数.

※ Merrill (1969) の結果とは大きく異なる.

空隙率コントロールの影響か.

# 固体伝導率

単位断面積，単位長さ中の接触熱抵抗の直列・並列接続



Merrill (1969) の解釈

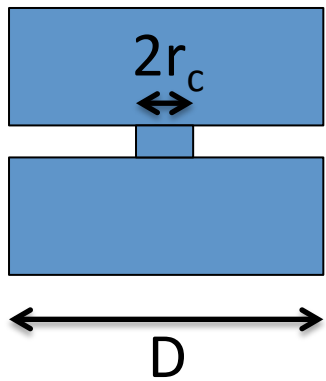
$$R = \frac{\text{単位長さ当たりの熱抵抗の数}}{\text{単位面積当たりの熱パスの数}} R_c$$
$$\propto \frac{1/D}{1/D^2} R_c = D R_c$$



粒径の増加に伴う，  
固体熱伝導率の減少

本研究の結果は説明できない。

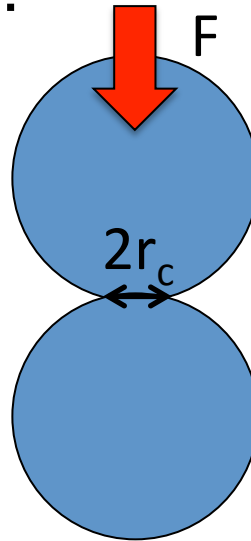
1つの接触点での熱抵抗 (*i.e.* 接触面積) の粒径依存性を取り入れる必要があるのでは？



$D \gg r_c$  のとき

$$R_c = \frac{1}{2kr_c}$$

Cooper et al. (1969)



$$r_c = \left[ \frac{3F(1-\nu^2)D}{8E} \right]^{1/3}$$

Timoshenko and Goodier (1951)

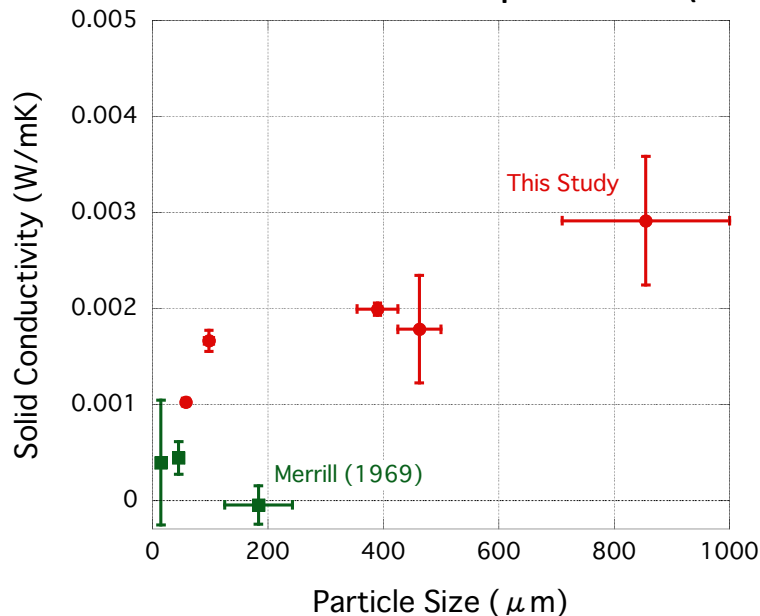
ある一定の応力場におかれた球の場合

$$F \propto \pi D^2 / 4$$

$$r_c \propto D$$

$$R_c \propto \frac{1}{D}$$

$R \propto DR_c$  と合わせると、  
固体伝導率は粒径に依存しない。



# 輻射伝導率

平行板近似モデル

$$k_{rad} = 4\varepsilon\sigma LT^3$$

粒子間距離  $L$  に比例.

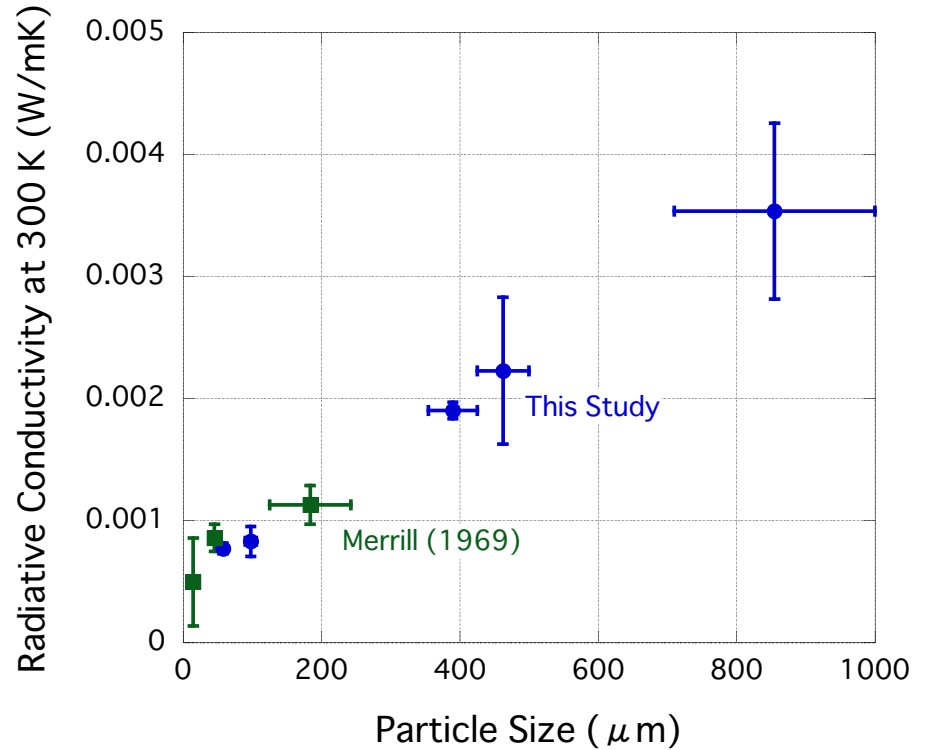
粒径の増加



粒子間距離の増加



輻射伝導率の増加



モデルと調和的な結果を得た.

# (b) 応力依存性

容器内の粉体の応力場は壁の影響により、静水圧平衡のそれとは異なる。

## 円柱容器内の応力分布 (Janssen の式)

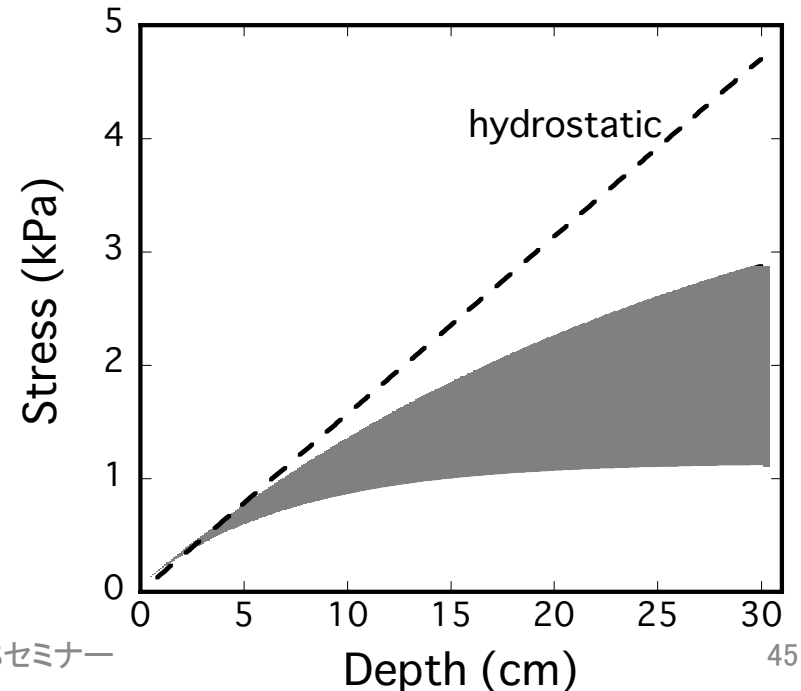
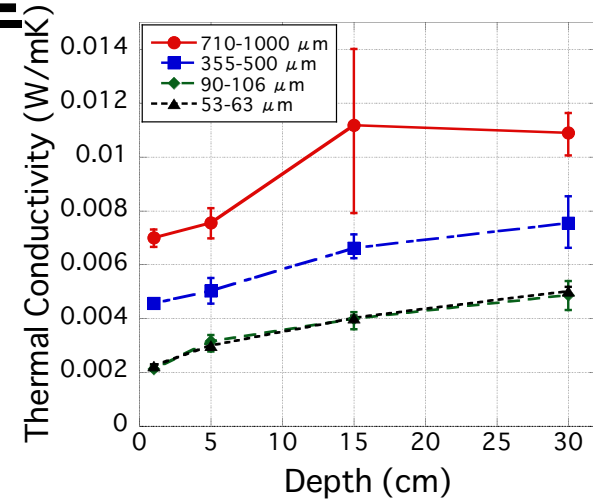
$$p = \rho g \frac{D}{4K\mu_s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4K\mu_s}{D} h\right) \right]$$

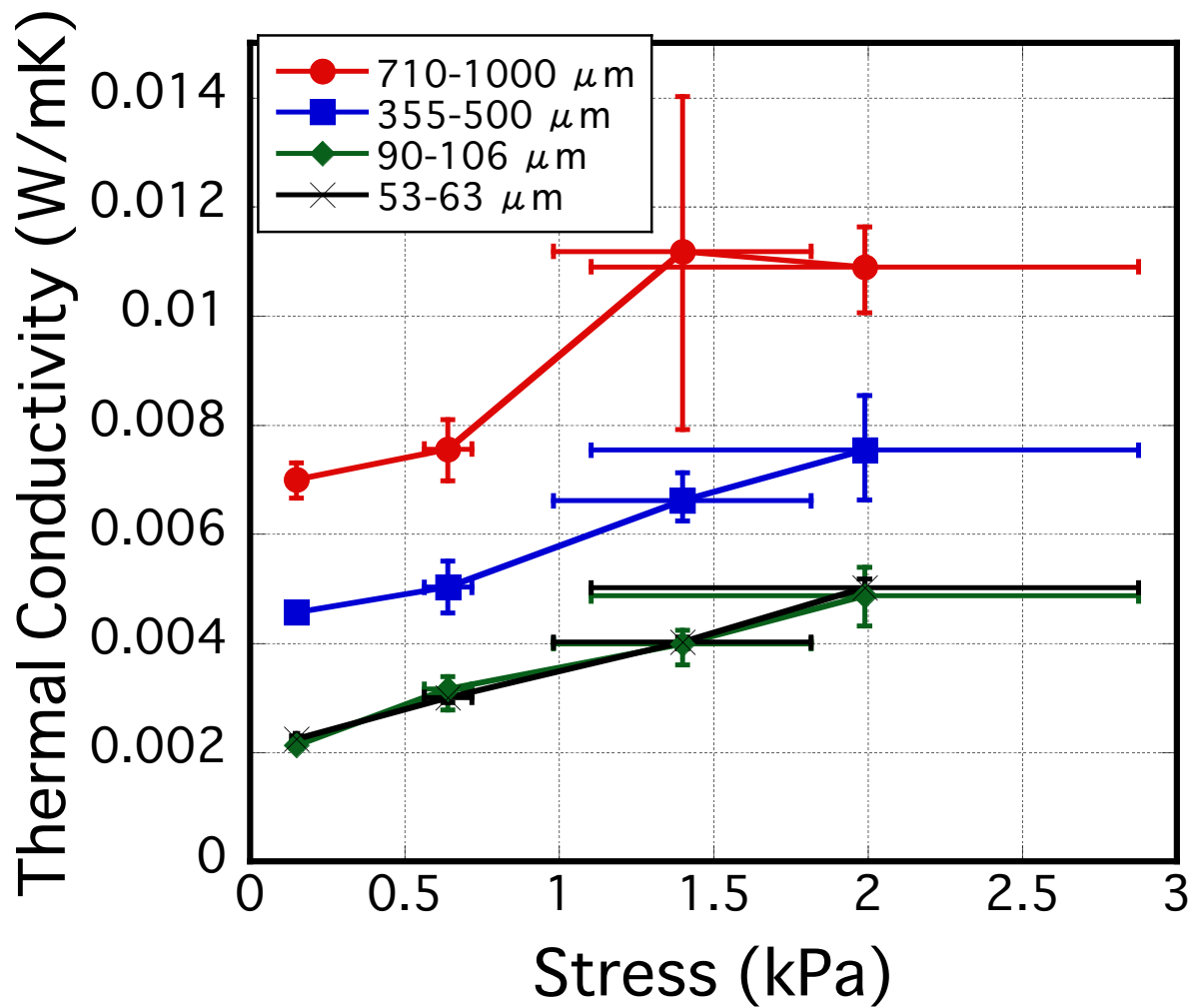
$\rho$ : バルク密度、 $g$ : 重力加速度、  
 $D$ : 容器直径、 $K$ : 鉛直応力と水平応力の比、  
 $\mu_s$ : 壁と粉体の静止摩擦係数、 $h$ : 深さ

未知のパラメータ  $\rightarrow K, \mu_s$

$K = 0.3 - 0.7, \mu_s = 0.3 - 0.5$  と仮定

Atewologun and Riskowski, (1991);  
Shin and Santamarina, (2009);  
shibashi et al., (1994).



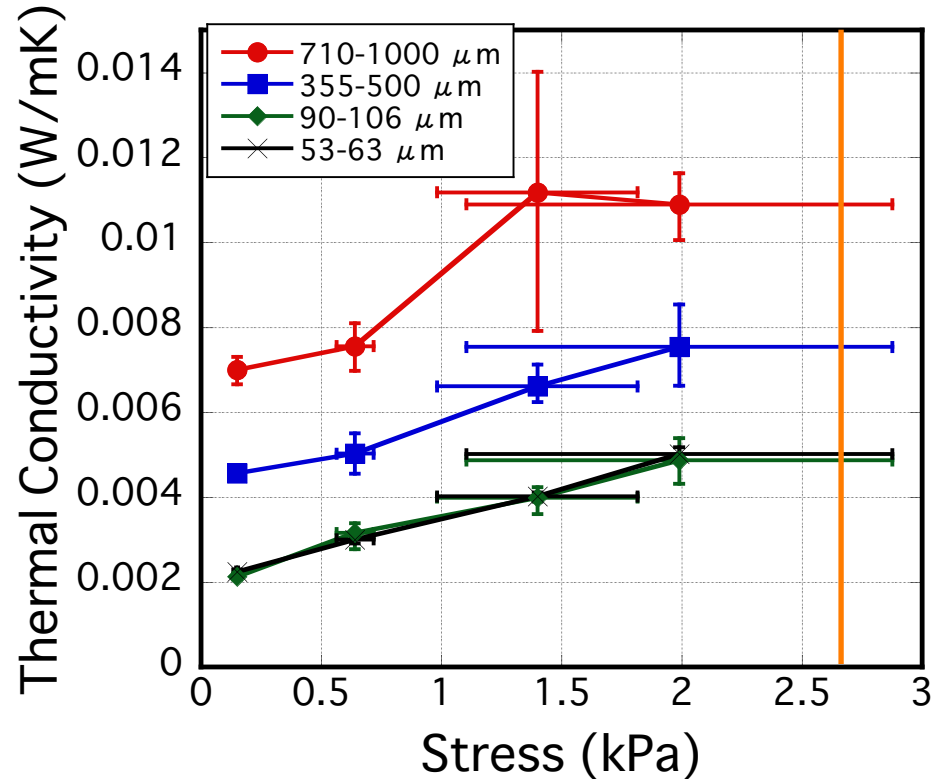
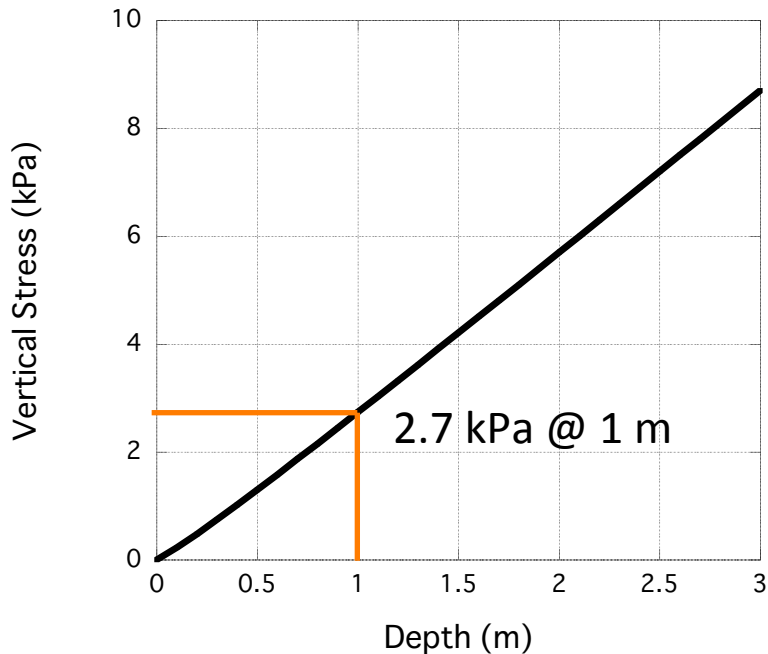


# ガラスビーズの熱伝導率 @ 月重力

月面深さ  
1 m 相当

深さ方向の密度分布を仮定

$$\rho(z) = 1920 \frac{z + 0.122}{z + 0.18} \quad (\text{Carrier et al., 1991})$$



応力の効果で深さ 1 m において熱伝導率は 0.005 W/mK 以上に増加する。

➡ レゴリスの熱伝導率が 0.01 W/mK に達する可能性もある。 47

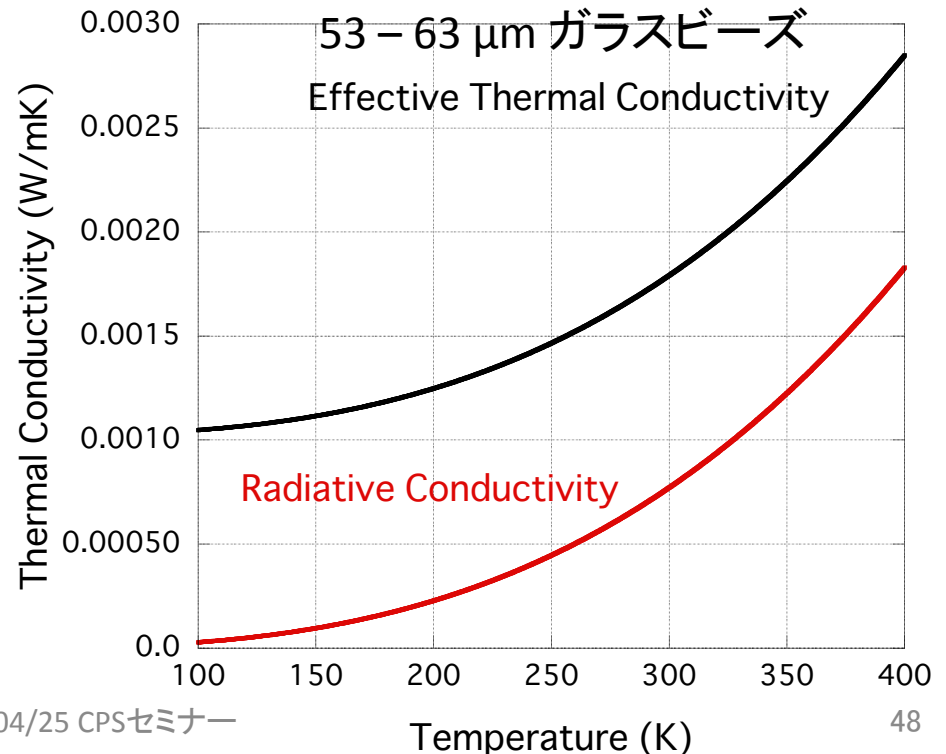
# 微小重力環境での熱伝導率

レゴリスの状態は不明だが、粒子にかかる応力は月・地球環境よりも小さい。



固体伝導率は輻射伝導率に比べて無視できるほど小さい？

- 輻射が支配的となり、温度に強く依存.
- $\mu\text{m}$  サイズの粒子の場合、低温環境で  $0.001 \text{ W/mK}$  以下になる可能性もある.





# 考察のまとめ

## (a) 固体伝導率と輻射伝導率

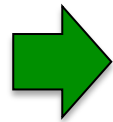
- 粒径が大きいほど固体伝導率は高かった.
- 単位体積中の接触点の数と接触熱抵抗の粒径依存性を考慮すると, 固体伝導率は粒径に依存せず, 一定.
- 粒径が大きいほど輻射伝導率は高かった.
- 粒子間距離の増加により輻射伝導率は増加.

## (b) 応力依存性と天体重力の影響

- 応力依存性を調査することにより, 天体重力の影響と深さ方向の熱伝導率構造を議論することが可能.
- 月重力環境では深さ 1 m 以深で 0.005 W/mK 以上になる可能性がある.
- 微惑星のような微小重力天体では輻射伝導率が支配的で, 温度に強く依存.

# 課題

- 粒径分布, 粒子形状, 空隙率依存性の調査.
- より正確な応力依存性の調査.  
自重ではなく, active な応力コントロールが有効.  
難しさ・・・微小な歪みのコントロール
- 熱伝導率のモデル化.  
現在, 進行中.



パラメータ	本研究	先行研究
気圧		○
粒径	✓	△
粒径分布		△
空隙率		△
温度	✓	○
荷重	✓	×
粒子組成	✓	×
粒子形状		×

## 天体表層への適用

- 熱伝導率構造の推定
- 熱流量値の補正
- レゴリスを含めた熱史計算