

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：57403

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01263

研究課題名（和文）微小物体から気体への熱伝達におけるマイクロとマクロの境界

研究課題名（英文）The boundary between micro and macro in heat transfer from micro-bodies to gases

研究代表者

高松 洋（Takamatsu, Hiroshi）

熊本高等専門学校・八代・熊本キャンパス・校長

研究者番号：20179550

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ビーム状の自立薄帯を流体中で加熱して流体の熱伝導率を測定するマイクロビームMEMSセンサの設計への応用を直接的な目的とし、センサから周囲流体への熱伝達に及ぼす気体の希薄性の影響および自然対流の影響を明らかにするため実験および数値シミュレーションを行った。その結果、センサ幅を代表寸法としたクヌッセン数が $Kn < 0.033$ なら希薄性の影響が現れないこと、センサ長さを代表寸法としたレイリー数が $Ra < 10$ なら自然対流の影響を受けずに熱伝導のみに支配されることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱伝達に及ぼす気体の希薄性および自然対流の影響を明らかにしたことは、MEMS応用技術の開発という応用の観点で重要である。しかし、それ以上に、これまで伝熱分野であまり想定されていなかったスケールの微小伝熱面から気体への伝熱におけるマクロとマイクロの境界、すなわち気体を連続流体として取り扱える範囲が $Kn < 0.05$ であり、従来から流体力学的観点からの限界値（0.01）と同じオーダーであることを実験的に明らかにした点の学術的意義が大きい。また、自然対流の影響を無視し、熱伝導のみを仮定してよい限界が $Ra < 10$ であることを示した点も学術的に大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study aims directly at designing a microbeam MEMS sensor that measures the thermal conductivity of a fluid by heating a beam-shaped free-standing thin strip in the fluid. Experiments and numerical simulations were conducted to elucidate the effects of gas rarefaction and natural convection on the heat transfer from the sensor to the surrounding fluid. It was revealed that the rarefied gas effect does not appear if the Knudsen number, with the sensor width as the representative dimension, is $Kn < 0.033$, and that the effect of natural convection is negligibly small if the Rayleigh number, with the sensor length as the representative dimension, is $Ra < 10$, indicating that heat conduction alone prevails.

研究分野：熱工学

キーワード：微小伝熱面 熱伝達 気体希薄性 高クヌッセン数 自然対流発生限界 熱伝導支配

1. 研究開始当初の背景

シリコンテクノロジーの発展に伴い、MEMS センサ・アクチュエータやマイクロフレイディクスがあらゆる分野で用いられるようになって久しい。これらのデバイスやシステムでは、従来の機器に比べて様々なパーツの大きさを格段に小さくできる一方、体積に対して表面積が極めて大きい、流体の粘性や表面張力の影響が大きい、加熱した場合には熱損失が大きい、などといった微細な寸法ならではの特性を考慮する必要がある。

本研究代表者は、シリコン基板上に設けた溝の上に懸架した長さ 10 μm 程度の自立薄帯センサ(マイクロビームセンサ：図1)を流体試料中で加熱して流体の熱伝導率を測定する方法を考案した[1]。このセンサは両端が熱容量の大きな基板と一体になっているため、センサを直接通電加熱すると両端の温度が不変のまま中央部のみの温度が上昇する。流体の熱伝導率の決定には、その熱伝導率によってセンサの温度上昇が異なることを利用するが、この方法の独創的な点は、センササイズが小さいため温度上昇が 1ms 未満で定常に達し、かつ自然対流の影響も無視できるため、流体の熱伝導率を定常状態で測定できることにある。研究代表者はこのセンサの特長を活かして 5 μL の液体試料の測定に成功し、高価な医療用の液体の測定を行った。さらに応用の拡大を目指し、センサの温度上昇が気体の流速の影響を受けないこと[2]や、ガスクロマトグラフィの TCD (熱伝導率検知器) として利用できることなども明らかにしてきた。しかし、解決すべき課題も存在する。これまで用いてきた長さ 10 μm、幅 0.5 μm、厚さ 40 nm 程度のセンサは、電気的な外乱に弱いことに加え、ヘリウムなど分子の平均自由行程が大きい気体の測定に限界がある。したがって、センサはより大きいほうが望ましいが、サイズが大きすぎると自然対流の影響を受ける可能性がある。マイクロビームセンサは、周囲流体の熱伝導特性を測定・検知して利用するデバイスの中では、構造と原理が最も単純で堅牢であるためさらに用途が拡大できると期待されるが、汎用的に使えるようにするには最適なサイズが決定できなければならない。

この課題を解決するには、まず、極小物体からの熱伝達に対する期待の希薄性の影響(rarefied gas effect)を明らかにする必要がある。これについては、高度上空の飛行物体などを想定して古くから理論的・実験的研究が行われてきた。その結果、現象の理論的取り扱いにはクヌッセン数 Kn (分子の平均自由行程と代表寸法の比) の大きさにより以下の通り分類されている[3, 4]。

- $10 < Kn$ 自由分子流域
- $0.1 < Kn < 10$ 遷移域
- $0.01 < Kn < 0.1$ スリップ域
- $Kn < 0.01$ 連続流体域

MEMS の実用化に伴い、マイクロ流路内に気体を流す場合や気体中でアクチュエータが作動するような場合にも気体の希薄性の影響を考慮する必要があるため、近年でも様々な研究が行われている(例えば[5, 6])。これらの研究のほとんどが狭い隙間の平行平板間や環状部の熱伝達を想定したものであるのに対し、本研究で対象とする系は、伝熱面そのものがサブミクロンあるいはミクロンサイズであり、かつ静止流体中に置かれている。この状況は、気体分子と固体分子間の衝突に対して気体分子同士の衝突が少ないという平板間の希薄気体効果とは異なるが、応用の観点からこれまでに想定されておらず実験的検証もなされていない。さらに、気体を連続体として扱える領域が上述の分類とは異なり $Kn < 0.001$ としているものも散見される[7]。このように限界が 1 桁も異なる原因は、対象となる系が、分子動力学や気体分子運動論で対象となるミクロな系と連続流体力学で対象とするマクロな系の接続領域、すなわち取り扱いが難しいメゾスケールであることに加え、実験的に確かめる方法がなかったからだと推察される。したがって、本研究で行う単純な系で連続流体域の限界を実験的に求めることは、応用だけでなく学問的にも極めて重要であると考えられる。

次に解決すべきは自由対流の影響である。球まわりの熱伝達については物体が小さくなると自然対流の影響が小さくなることがよく知られている。

球から周囲流体への熱伝導の場合には $Nu = 2$ になることが解析より明らかなので、球まわりの自然対流の実験整理式は、 $Nu = 2 + C_f(Pr) Ra^n$ のように表され、直径が小さくなって Ra (レイリー数) が小さくなると 2 すなわち熱伝導のみの場合に漸近するように作成されている。しかし、球以外の場合、例えば無限媒体中に置かれた一様加熱細線の場合にはこのような極限値は存在しない。これに対して、本研究で対象とする系では両端の温度が不変であるので定常熱伝導の状態が存在し、球の場合と

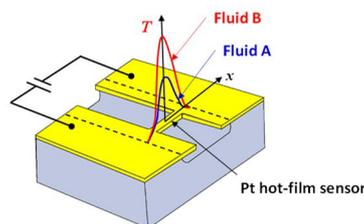


図1 マイクロビームセンサ

同様 Ra が小さくなると自然対流から熱伝導支配に漸近すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、通常の場合の対象であるマクロスケールの現象の取り扱い限界に対する以下の二つを明らかにすることにある。

気体の希薄性が現れる限界。すなわち、伝熱面が分子の平均自由行程に対してどの程度の大きさであれば気体の希薄性の影響が現れず、通常の熱伝導として取り扱っていいか。

自然対流の影響が現れる限界。すなわち、伝熱面がどの程度の大きさであれば、自然対流の影響を無視することができ、熱伝導のみに支配されているとみなしていいか。

このように、本研究で対象とする系は、伝熱学的には極めて単純で基本的なものであるにもかかわらず、これまでに想定されていなかったニッチの領域である。

3. 研究の方法

(1) 気体の希薄性の影響について

実験は、長さ $9.4 \mu\text{m}$ 、幅 $0.43 \mu\text{m}$ 、厚さ 40 nm のマイクロビームセンサを気体中で通電加熱し、予め求めておいた温度と電気抵抗の関係から温度上昇を測定した。これを様々な種類の気体中で圧力をパラメータとして行うため、圧力が真空から約 10 気圧まで可変の圧力容器 (図 2) を製作し、それを恒温槽中で一定温度に保って実験を行った。気体は 5 種類 (HFC32, アルゴン, 窒素, ネオン, ヘリウム), 圧力は $10^{-3} \sim 10^6 \text{ Pa}$, 気体の温度 (恒温槽の温度) は 20°C である。表 1 に実験に用いた気体の熱伝導率と分子の平均自由行程を参考のため示す。また、センサ周りの熱伝導シミュレーションにはソフトウェア MSC Mark/Mentat を用い、無次元化した基礎方程式を解いた。

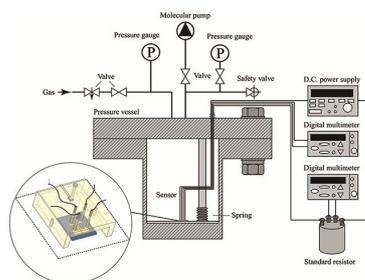


図 2 実験装置

表 1 実験に用いるガスの特性 (大気圧 25 °C)

ガス	HFC-32	Ar	N2	Ne	He
熱伝導率 (mW/(m·K))	13	17.4	25.6	49.1	153.5
分子の平均自由行程 (nm)	83.6	62.4	63.7	114.5	188.1

(2) 自然対流の影響について

自然対流の検討は数値シミュレーションで行った。できるだけ一般性のある結果を得るため、センサの両端が熱容量の大きい基板に支持されている (オーバーハングがない) 状況を仮定し、長さ:幅:厚さが $1:0.1:0.02$ のセンサを仮定した。シミュレーションには COMSOL Multiphysics を用い、無次元基礎方程式 (ナビエ-ストークス方程式, エネルギー方程式, センサ内熱伝導方程式) を解いた。センサ材料は白金または金, 流体は空気, 酸素, 二酸化炭素, 水, メタノール, エタノール, トルエンを想定し, センサ長さ l を代表寸法としたグラスホフ数 $Gr (= g\beta_0 l^3 / \nu_f^2 \cdot (q_v \cdot l^2 / k_s))$, g は重力加速度, β_0 は体膨張率, ν_f は流体の動粘度, q_v は単位体積当たりのセンサ発熱量, k_s はセンサの熱伝導率) が $10^{-7} \sim 10^7$ の範囲でセンサの平均温度上昇を求めた。

4. 研究成果

(1) 気体の希薄性の影響について

図 3 に加熱量が等しい場合の各種気体中のセンサの温度上昇を圧力に対して示す。圧力が十分高い場合, 圧力にかかわらず温度上昇が一定値を示すのは, センサ周りの熱伝達が熱伝導のみに支配され, かつ気体の熱伝導率が圧力に依存しないからである。そして, 熱伝導率が高い気体ほど温度上昇は小さい。一方, 真空下では気体の種類にかかわらず圧力が低くなるにつれて温度上昇が大きくなるが, これは気体の希薄性の影響が現れていることを示している。図中の破線は, センサ周りの熱伝導に対するシミュレーション結果 (計算結果) を示している。

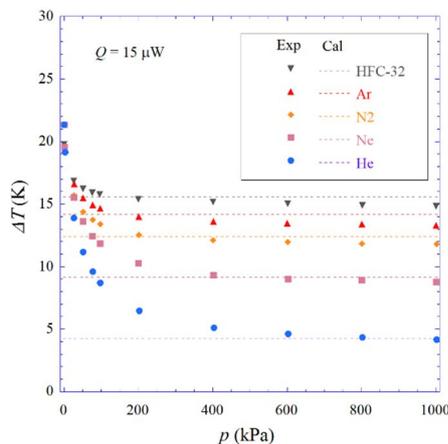


図 3 センサの温度上昇と圧力の関係

計算値は実験値とおおむね一致しているが、完全に一致していないのは、センサの幅が長さ方向に完全に一様でなく、かつ縁にバリが形成されていること、およびセンサ根元部に形成されたオーバーハングの長さが一様でなく、かつ正確に計測しにくいことなど、シミュレーションに用いたモデルと実際の状況が完全には一致していないことが原因だと考えられる。

このデータを元に、温度上昇の計算値と実験値の比 ($\Delta T_{cal}/\Delta T_{exp}$) をクヌッセン数 $Kn (= \lambda/w$, λ は分子の平均自由行程, w はセンサ幅) の逆数に対して示したのが図4である。上述の理由で $\Delta T_{cal}/\Delta T_{exp}$ は Kn^{-1} が十分に大きい領域で1を超えているが、気体の種類にかかわらずほぼ一定値 (~ 1.08) に漸近する。一方、 $Kn^{-1} < 30$ ではいずれの期待の場合も $\Delta T_{cal}/\Delta T_{exp}$ が漸近値より小さくなり、希薄性の影響が現れてくる。

伝熱面から気体への熱伝導に及ぼす希薄性の影響を表すために、図5に示すような表面(界面)での温度ジャンプ(気体分子の温度と伝熱面表面の温度差) ΔT_i を想定し、表面(界面)熱抵抗 $R (= \Delta T_i/q$, q は熱流束) を導入する。図6は R をパラメータとして仮定してシミュレーションで求めたセンサの無次元温度上昇 θ_{ave} と無次元表面抵抗 $A (= R \cdot k_s/l$, k_s はセンサの熱伝導率, l はセンサ長さ) の関係を示す。この関係を用いれば、実験で求められた θ_{ave} に対応する A を求めることができる。

図7は、このようにして求めた無次元表面熱抵抗 $KA (= (k_f/k_s) \cdot A = R \cdot k_f/l$) と Kn^{-1} の関係が気体の種類にかかわらずほぼ一つの曲線で表されることを示している。そして Kn^{-1} の増加とともに減少し、 $Kn^{-1} = 30$ でほぼ0となった。したがって、 $Kn < 0.033$ であれば希薄性の影響を考慮しなくてよいことが明らかになった。

薄帯状のセンサと周囲の気体分子の相互作用をイメージすると、センサ幅は、センサ上面の垂直方向から衝突する分子に対する伝熱面積を表す指標であるのに対し、センサの横方向からの分子に対しては何の意味ももたない。したがって、現象を考慮すると、幅 w のセンサを周囲360度から観た場合の投影幅の平均値、すなわち

$$w_{eff} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} w \cos \theta d\theta / \pi = 2w/\pi$$

が重要な代表寸法になると考えられる。このことを考慮すると希薄性の影響が現れない領域、すなわち伝熱の観点で気体を連続体とみなしてマクロ的な取り扱いが可能な範囲は $Kn < 0.05$ となる。この値は、流体力学的な観点での連続体の境界値0.01と同じオーダーであるが、5倍の違いがあり、スリップ流れの条件 ($0.01 < Kn < 0.1$) の範囲に入っている。

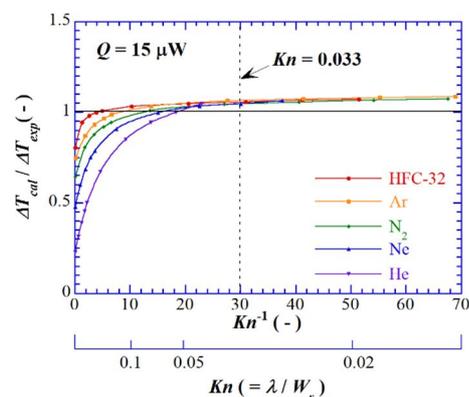


図4 温度上昇(熱伝導の場合と実験値との比)とクヌッセン数との関係

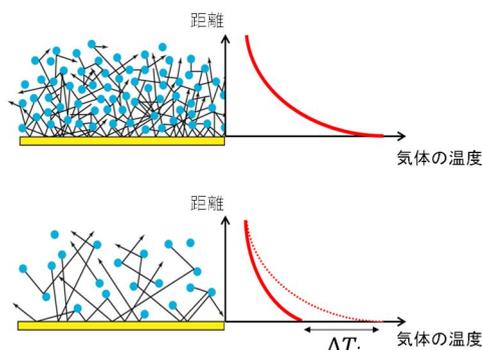


図5 希薄性効果のモデル化

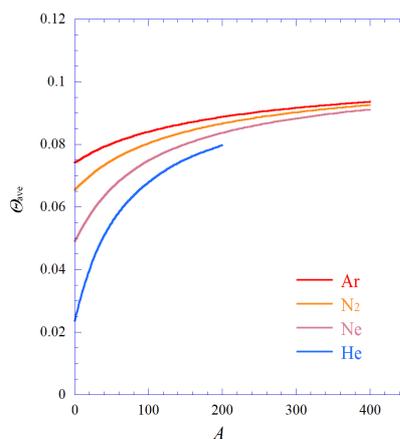


図6 表面熱抵抗と平均温度上昇の関係

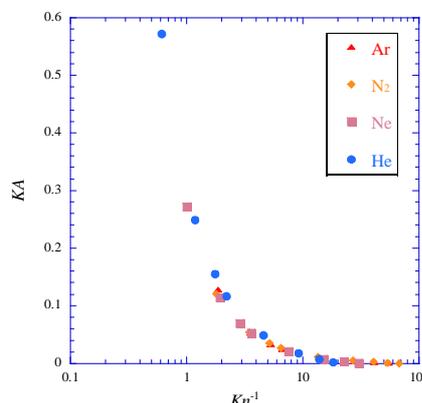


図7 希薄性効果による表面熱抵抗と Kn の関係

(2) 自然対流の影響について

図8は、熱伝導のみを仮定した場合に対する自然対流シミュレーションによるセンサの平均温度上昇の比 $\theta_{ave}/\theta_{ave,conduction}$ とレイリー数 $Ra (= g\beta_0\Delta T_{cal}l^3/\nu_f^2 \cdot Pr_f)$ の関係を示す。流体の種類およびセンサ材料にかかわらず、 $Ra < 10$ であれば自然対流の影響を受けずほぼ熱伝導のみに支配されることが明らかになった。

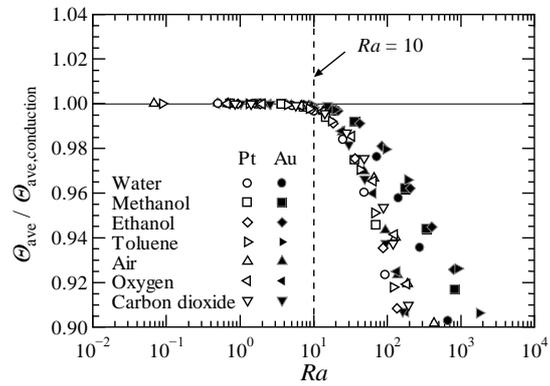


図8 自然対流の効果と Ra の関係

<引用文献>

- [1] H. Takamatsu et al., Measurement of fluid thermal conductivity using a micro-beam MEMS sensor, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 117, 2018.
- [2] H. Takamatsu et al., Effect of gas flow on the temperature rise of a micro-beam-type thermal conductivity detector, *Proc. ASME 4th Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer Int. Conf.*, MNHMT2013-22076 (6 pages), 2013.
- [3] G.S. Springer, Heat Transfer in Rarefied Gas, in 'Advances in Heat Transfer' 7, 1971.
- [4] C. Shen, 'Rarefied Gas Dynamics' Springer, 2005.
- [5] R. Rabani et al., Heat Conduction Characteristics of Rarefied Gas in Nanochannel, *J. Appl. Fluid Mechanics*, 13, 2020.
- [6] H. Yamaguchi et al., Conductive heat transfer in a gas confined between two concentric spheres: From free-molecular to continuum flow regime, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 108, 2017.
- [7] G.E. Karniadakis-A. Beskok, 'A Micro Flows: Fundamentals and Simulations', Springer, 2002.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藏田 耕作 (Kurata Kosaku) (00368870)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関