

0121 電磁浮遊溶融 Fe 液滴および Si 液滴の熱伝導率測定に及ぼす静磁場印加効果

(東北大院工)○ (正) 杉岡健一 (東北大工) 馬場雄也 (東北大院工) (正) 塚田隆夫*

(東北大工) 杉江一寿 (東北大多元研) 小島秀和 福山博之

1 緒言

溶融金属や溶融半導体の正確な熱物性値は材料製造プロセスの熱設計において重要である。しかし、金属や半導体などは融点が高く、融液の反応性が高いため熱物性値測定が困難とされていた。近年、導電性溶融液滴を電磁浮遊法により浮遊させることで、容器からの汚染の回避と過冷却状態を実現し、広い温度領域において正確な熱物性値測定が可能となった。しかし、熱伝導率に関しては、液滴内に生じる magnetohydrodynamic(MHD)対流による熱移動を伴うため、正確な測定を行うことは困難であった。最近、我々は浮遊液滴に静磁場を印加することで MHD 対流を抑制し、熱伝導率を正確に測定する方法を提案した^{1,2)}。本研究では、本測定法を用いてシリコンおよび鉄の熱伝導率測定を行うとともに、軸対称モデルによる電磁浮遊液滴内対流に及ぼす静磁場印加効果の数値シミュレーションを行い、両物質の熱伝導率測定における最適条件の検討を行った。

2 実験及び数値計算

図 1(a)および 1(b)に、溶融シリコン及び鉄の熱伝導率測定において用いた RF コイルの幾何学形状をそれぞれ示す。RF コイルに高周波電流を流すことで、試料内に発生する誘導電流のジュール熱により、試料を加熱溶融させるとともに、溶融液滴に働くローレンツ力により浮遊させる。また、液滴内に発生する対流を抑制するために軸方向に一樣な静磁場 B_0 を印加した。熱伝導率の測定には、レーザー加熱 AC カロリメトリー法^{1,2)}を使用した。

数値解析では、軸対称を仮定し、電磁浮遊液滴内に発生する浮力対流、マランゴニ対流および MHD 対流を考慮した。電磁場解析には有限差分法と境界要素法の Hybrid 法を用いた。また、熱流動解析にはコントロールボリューム法を用い、計算格子を液滴内では 80×100 、周囲領域では 30×100 、滴表面において格子間隔が密となるように配置した。実験結果との比較を行うに当たり、以上より求めた液滴内対流を考慮し、実験と同様にレーザー加熱 AC カロリメトリー法を数値的に実行し、熱伝導率の数値解を得た。

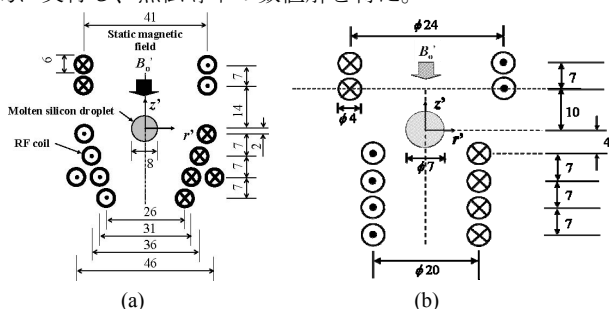


Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic levitator with a static magnetic field for measurement of the thermal conductivities of (a) Si and (b) Fe.

3 結果および考察

図 2 に各静磁場強度におけるシリコン液滴の熱伝導率 κ に関する実験結果および軸対称モデルによる数値計算結果を示す。なお、計算で用いた真の熱伝導率は 5T の実験値の $55[\text{W}/(\text{mK})]$ である。図中の点線は熱伝導支配の場合の計算

結果である。印加静磁場強度が大きくなるに従い、熱伝導率が減少し、4T および 5T の結果はほぼ同じ値になることがわかる。また、軸対称モデルを用いた計算結果と実験結果は良好に一致することがわかる。2T 以下の場合には、対流が十分に抑制されていないため、熱伝導率は過大評価される。

図 3 に各静磁場強度における鉄液滴の熱伝導率 κ に関する実験結果および軸対称モデルによる数値計算結果を示す。なお、計算で用いた真の熱伝導率は 10T の実験値の $39[\text{W}/(\text{mK})]$ である。シリコン同様に印加静磁場強度が大きくなるに従い、熱伝導率が減少し、9T および 10T の結果はほぼ同じ値になることがわかる。また、軸対称モデルを用いた計算結果と実験結果は良好に一致している。

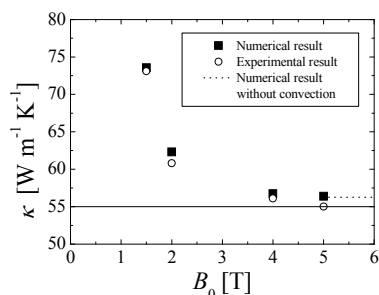


Fig. 2 Effect of a static magnetic field on the thermal conductivity of Si.

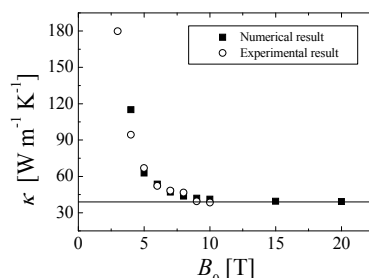


Fig. 3 Effect of a static magnetic field on the thermal conductivity of Fe.

4 結言

溶融シリコン及び鉄の熱伝導率に及ぼす液滴内対流の影響を実験と数値シミュレーションにより検討した。その結果、シリコンの場合には4T、鉄の場合には9T以上の静磁場を印加することで、液滴内対流の影響が無い真の熱伝導率を測定できることがわかった。

謝辞

この開発は独立行政法人科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業による成果である。

引用文献

- 1) H. Kobatake, H. Fukuyama, I. Minato, T. Tsukada and S. Awaji, *Applied Phys. Letters*, 90, 094102 (2007)..
- 2) H. Kobatake, H. Fukuyama, I. Minato, T. Tsukada and S. Awaji, *J. Appl. Phys.*, 104, 054901 (2008)

*TEL : 022-795-7260

e-mail: tsukada@pcel.che.tohoku.ac.jp