

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

メタマテリアルの熱伝導率予測

### 2 研究者氏名:

宮崎 康次

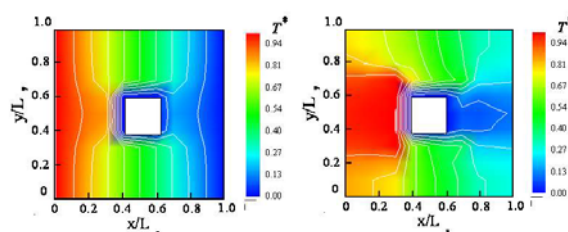
### 3 研究のねらい:

近年、ナノテクノロジーの飛躍的な進歩により、従来不変と思われていた様々な物性が人工的に制御可能となってきた。そのような自然界には存在しえない極めて特異な物性を持つ物質は、総称してメタマテリアルと呼ばれている。本研究では、このメタマテリアルの概念を熱工学に適用、ナノ構造によって熱伝導率を物性の壁を越えて低減させること、その熱伝導率を数値解析により予測すること、さらには予測を通してマルチスケールな熱伝導計算を確立することをねらいとする。熱伝導率の低減によるエネルギー高度利用の実現としての一例が熱から電気を直接発電する熱電半導体の物性の壁を超えた高効率化である。これまで超格子構造や量子ドット超格子構造に見られるような薄膜技術に基づいて生み出されたナノ構造で、その高効率化が達成されたことは記憶に新しいが、メタマテリアルの熱伝導率予測を通して、ナノ多孔体のような薄膜技術に頼らないナノ構造による熱電半導体の物性改善も本研究のねらいである。

### 4 研究成果:

#### (1) フォノン輸送によるナノ孔を有する薄膜の熱伝導解析

本研究では、格子振動(フォノン)が熱を輸送する半導体もしくは絶縁体を対象とした。フォノンが熱を輸送する場合、膜厚が数 100nm 以下となる薄膜の膜厚方向における熱伝導率は、バルクの熱伝導率を大幅に下回ることが知られている。これは、熱輸送方向のナノ構造の大きさ $L$ がフォノンの平均自由行程 $\lambda$ より小さくなり、通常拡散的な熱伝導現象が弾道的な輸送になるためと考えられている。このような現象は、拡散的な熱輸送(フーリエの式)が大前提とされている熱伝導方程式では扱えないため、ボルツマン輸送方程式によ



(a)  $Kn=0.1$

(b)  $Kn=10$

図1 ナノ孔をもつ薄膜の熱伝導解析結果

てフォノン輸送を解き、 $Kn$  数( $=l/L$ )で整理する解析手法が薄膜や超格子構造の熱伝導率予測で利用され、よく実験結果が示されてきた。本研究では、このフォノン輸送を解く手法を2次元、3次元に拡張し、ナノ多孔体の熱伝導率を数値解析した。これまでフォノン輸送計算では、先に述べたような薄膜の厚み方向の熱伝導率計算が一般的であったため、境界条件では等温条件のみが利用されてきた。そこで、はじめに境界条件に工夫の必要のない、ナノ孔をもつ薄膜の熱伝導計算を行った。これは2次元にフォノン輸送計算を拡張したためにできるようになった計算である。得られた見かけの温度分布の一例を図1に示す。赤色が高温、青色が低温である。 $Kn$  数が小さい条件(a)は熱輸送が拡散的であり、一方、 $Kn$  数が大きい(b)は熱輸送が弾道的に行われる条件に対応する。具体的にはSiのフォノンの平均自由行程が室温でおよそ200nmあると言われており、計算対象をSiと考えれば、(a)の横幅(すなわち膜厚)は2 $\mu$ m、(b)の横幅は20nmの計算に対応する。その結果、膜厚20nmの薄膜における熱伝導では、熱輸送の障害物(ここではナノ孔)の背後に弾道輸送に起因する熱輸送の影が生じ、見かけの熱輸送量が減少していることが確認できる。さらにそのときの正味の熱伝導率(熱流束と両端の境界で与えた温度差から求められる)は、本来の熱伝導率の6%程度にまで減少していることが計算結果として得られた。

#### (2) ナノ孔界面の境界条件

先の計算では、孔の界面におけるフォノンの反射境界条件を鏡面反射(3割)と拡散反射(7割)の重ね合わせを仮定( $p=0.3$ )、計算した。しかしこの鏡面反射と拡散反射の配分を決める $p$ パラメータは、超格子構造の熱伝導率計算では、実験結果に合うようにフィッティングパラメータとして利用されるため、熱伝導率の数値解析予測が難しい原因の一つとなっていた。そこで本研究では、薄膜計算に対して $p$ パラメータが熱伝導率計算結果に対してどれだけ影響を与えるのか調べた(図2)。グ

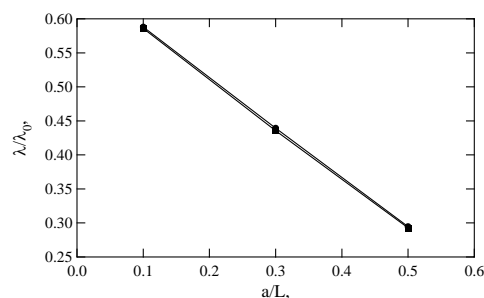


図2  $p$ パラメータと見かけの熱伝導率( $Kn=1$ )

ラフは $Kn=1$ とした結果であり、横軸は孔一辺の長さと膜厚の比、縦軸は見かけの熱伝導率を示している。グラフ中では、鏡面反射( $p=1$ )と拡散反射( $p=0$ )の両極端の例を示しているがほとんど違いが得られなかった。超格子構造といった界面が繰り返しフォノンの輸送を変える構造では、その反射形態が結果に増幅されて効果が表れるものの、本研究が扱うナノ孔のようなフォノンが反射を一回しか経験しないような構造では、反射形態よりも構造で反射することのほうが重要であるためと考えられる。

### (3) ナノ多孔体の熱伝導計算

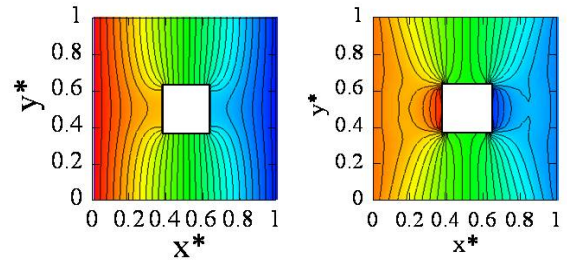
次に本研究では、境界条件として新しく熱流束一定条件を与えることで、周期構造に対する計算を可能とした。熱電半導体に応用することを考慮すると、薄膜だけでなくナノ構造物の熱伝導率予測を可能とすることが必須と考えたためである。

計算結果の一例を図3に示す。 $Kn=0.1$ では先の薄膜計算と同様に熱輸送は拡散的に行われ、等温線も縦に平行になっている。一方、 $Kn=5$ では熱輸送が弾道的になり、ナノ孔の背後に熱輸送の影が生じている。そのような温度分布を見やすくするために図3(b)をプロットしなおしたものが図4である。図では、周期境界条件も意識してある。 $y^*=0.5$ が計算領域の中心ラインであり、ナノ孔の前面と背面の温度分布を示している。孔の前面ではフォノンが反射されるため温度が上昇し、背面ではフォノンが輸送されないため温度が低下していることがわかる。その結果、全体的な熱輸送とは反対方向に温度勾配がついている直観的には受け入れ難い結果が得られている。このような解析結果が正しいかどうかは、実験による検証が今後必要と考えている。

次に先の薄膜計算と同様、温度差と熱流束から見かけの熱伝導率を計算した結果を図5に示す。グラフの横軸は、ナノ孔の大きさ、縦軸は見かけの熱伝導率を示している。図中実線は、フーリエの法則を仮定したときに得られる見かけの熱伝導率の上限と下限の見積もりを示している。 $Kn$ 数が1以下のとき、すなわち計算領域で激しくフォノン同士が衝突し、熱輸送が拡散的なときは、これまでの見積もりの下限とほぼ同じ値を示しており、本解析手法がそれなりに妥当であることが示されている。一方、 $Kn$ 数が1より大きくなり、徐々に弾道輸送の影響が強くと表れ始めると、熱伝導率は大きく低減する結果が得られた。この結果を熱電半導体に応用することを考える場合、電子輸送(一般的に平均自由行程が10nm以下)が拡散的、フォノン輸送(一般的に平均自由行程が100nm以下)が弾道的なナノ多孔体を作製することとなる。図5では、 $Kn=1\sim5$ という計算が上記の条件に相当し、拡散的な電気伝導率の低減は青いライン(下限)、熱伝導率の低減が▲または▼印の値となり、その差が物性の壁を越えた高効率化として、ナノ構造の利用によって得ることができることを示している。

### (4) 分子動力学法によるフォノン特性の計算

これまで行ったフォノン輸送計算では、ナノ孔界面でのフォノンの反射条件、フォノンの平均自由行程やフォノンの速度(音速)といった条件を得ることができない。ナノ孔界面でのフォノン反射条件は、ナノ多孔体の熱伝導率予測結果にそれほど影響を及ぼさないことがわかったため、ここでは特にフォノンの平均自由行程やフォノンの速度について計算を行った。本分子動力学計算では、代表的な半導体としてSiを対象とした。Siの分子動力学計算は様々なポテンシャルで様々な現象が計算されており、ここでは特に熱輸送現象をよく表現できるとされているStillinger-Weberポテンシャルを用いた。このポテンシャルは熱膨張をよく説明し、すなわち原子間の非線形な振動



(a)  $Kn=0.1$  (b)  $Kn=5$   
図3 ナノ構造物の熱伝導計算( $a/L=0.2$ )

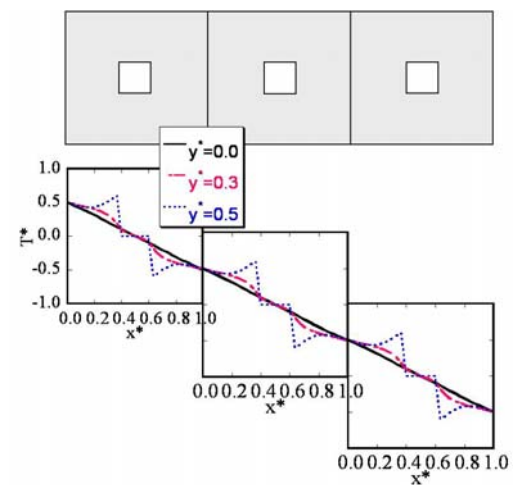


図4  $Kn=5$ ,  $a/L=0.2$  の温度分布

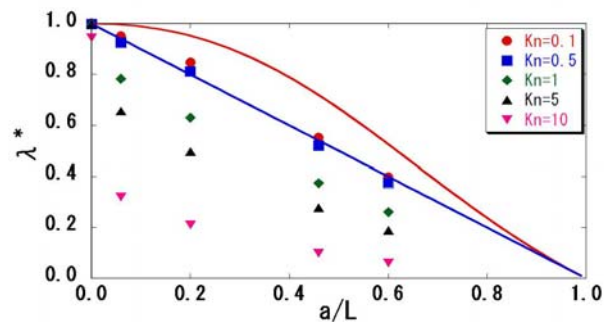


図5 見かけの熱伝導率計算結果

を表すため本計算にも最適であると考えた。温度の境界条件には速度スケール法による定温条件を与え、周囲を周期境界条件とするため、計算領域の中心を高温 $T_H$ 、両端を低温 $T_L$ とした。はじめにフォノンの平均自由行程を見積もるため、構造のない薄膜の熱伝導計算を行った。計算モデルを図 6 に示す。周囲を周期境界条件としているため、計算モデルは薄膜に見えない形状ではあるが、温度を一定条件とする境界条件であること、さらに速度スケール法はフォノン輸送を分断する極めて強い温度制御方法であることから薄膜の熱伝導現象に近いモデルである。計算結果を図 7 に示す。フォノン輸送の計算結果と同様に計算領域中心の温度勾配は小さくなり、薄膜の厚み方向の弾道輸送の影響が計算結果にも表れている。この温度勾配をフォノン計算結果と比較した結果、およそフォノンの平均自由行程は 80nm と見積もられた。この長さは、熱伝導率、比熱、音速から見積もられる平均自由行程と同等であり、分子動力学計算の妥当性を示す材料でもある。さらにナノ孔を有する薄膜についても計算を進めた結果、フォノン輸送計算に似通った熱輸送の影が現れた。もちろん実験による直接的な温度分布計測が必要ではあるが、分子動力学計算とフォノン輸送計算といったまったく異なる基礎式を用いる解析で、定性的に一致する結果が得られることは、フォノンの平均自由行程の見積もり結果に加えて、双方の手法の妥当性を示していると考えている。

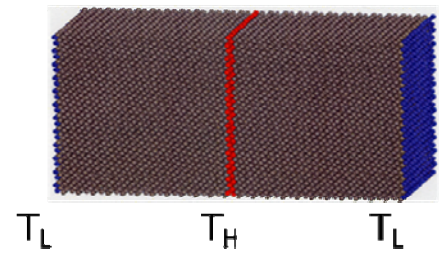


図 6 薄膜の計算モデル

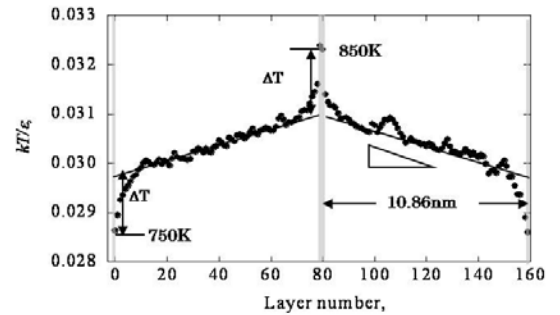


図 7 分子動力学計算結果(温度分布)

#### (5)フォノンの分散関係(音速)

800K の均一な温度条件の下、Si の分子動力学計算を行い、ナノ構造がフォノンの分散関係(音速)に与える影響を調べた。原子面の縦方向、横方向に抽出し、時空間 2 次元フーリエ解析を行うことで横軸に波数、縦軸に周波数を得ることができる。はじめに孔がないときの分散関係を図 8 に示す。横波には、人工的なモードが薄く残っているが、縦波、横波ともにこれまで解析ならびに実験で報告されている Si のフォノンの分散関係と定量的にもよく一致していた。これは SW ポテンシャルが熱輸送をよく表現できるポテンシャルであることに起因している。

この結果に基づき、次に構造をもつフォノンの分散関係を求めた。図 9 に違いがよく現れる縦波の分散関係とモデルを合わせて示す。ナノ孔が周期的に空いている場合、超格子構造に見られるようなゾーンフォールディングが

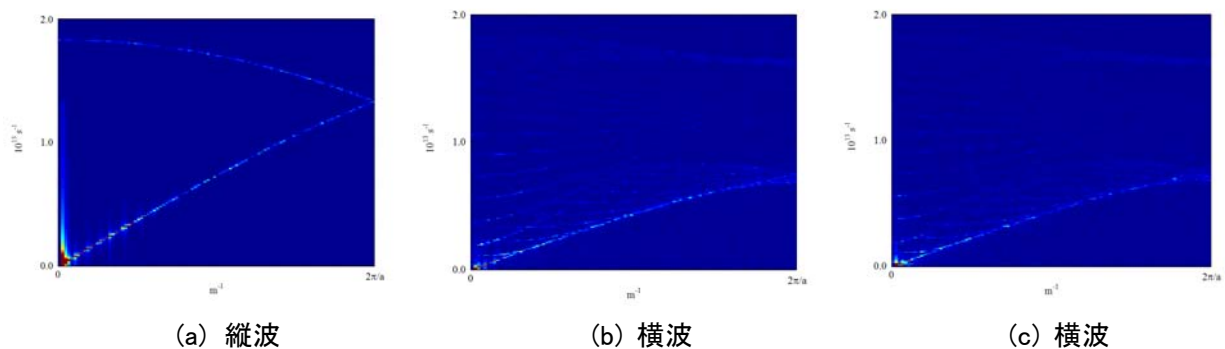


図 8 分子動力学計算から得られた Si の分散関係((001)方向)

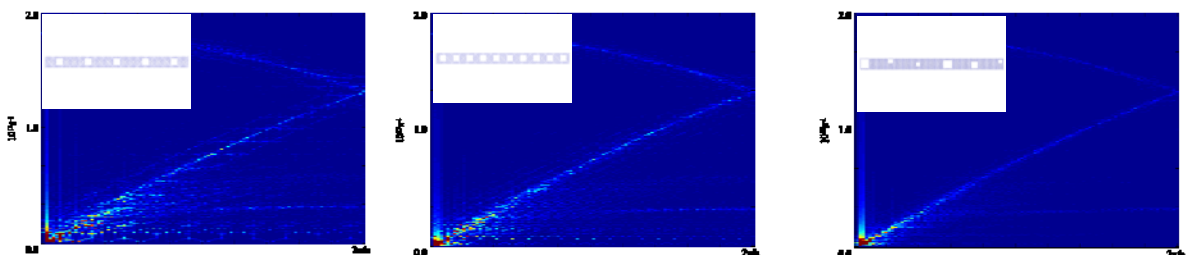


図 9 ナノポーラス Si の分散関係((001) 方向), 縦波)



得られ、音速が低下する結果が得られた(図中周期的に水平にラインが入っている)。これは、孔のような構造でも周期的に配置されれば、異種物質と同等な効果が得られることを示している。しかし、周期的である場合には、格子動力学法でも同様な結果を得ることができるため、一例として、孔のサイズも配置も周期的でない場合について計算を試みた結果が図 9 右のグラフである。周期孔のときに見られたゾーンフォールディングは見られないものの、音速が低下し、図 8 の孔なしのとき(9420m/s)と比較しておよそ 2 割音速が低下した(7790m/s)。

#### (6) 数値解析結果のまとめ

上述したようにナノ構造における熱伝導 $\lambda$ を計算し、熱伝導率低減のメカニズムを考察してきた。その結果、 $\lambda=Cv\ell/3$  で表わされる、フォノンの平均自由行程  $\ell$  もしくはフォノンの速度(音速) $v$  が熱伝導率低減にどのように影響するのかを詳細に調べることができた。特にフォノン解析計算では、ナノ構造により平均自由行程  $\ell$  が人工的に短くできること、それによって見かけの熱輸送量が減少すること、分子動力学計算からは、ナノ孔によって音速が低下することが求められた。これらのメカニズムが解明されたことにより、例えば硬い物質すなわちヤング率が大きい物質には音速を低くする設計、フォノン平均自由行程が長い Si のような物質には、ナノ構造(ここではナノ孔構造)でフォノン輸送を人工的に跳ね返す設計が熱伝導率を低減させるのに有効であることが求められた。

#### (7) 実験による数値解析結果の検証

材料をナノサイズにまで湿式粉砕機で碎き、それを固めることでナノ孔をもつ構造体を作製、熱伝導率の低減について確かめた。作製したサンプルを図 10 に示す。グラフの横軸は粒子の直径、縦軸は含まれる割合である。利用した材料はビスマステルライド熱電半導体であり、60nm 程度にまで粉砕できている。図中右上はサンプルの SEM 写真であり、ナノ孔がうまく生成されていることも確認できる。このサンプルの熱伝導率を 3 $\omega$ 周期加熱熱伝導率計測法で調べた結果、0.25W/(m $\cdot$ K)とバルクの 1 割程度にまで低減されていることが確かめられた。他の熱電半導体としてコバルト酸ナトリウムについても実験したところ 0.23W/(m $\cdot$ K)とやはりバルクの 1 割程度にまで低減できた。

ただし電気伝導率についても大幅に低下し、最終的な熱電半導体の効率の目安である ZT はビスマステルライドのナノ構造で 0.16 であった。数値解析モデルと異なり、残っている母材部分が完全な単結晶状態ではないために電子も激しく散乱されたためと考察できる。今後は、ナノ孔を以下に制御しながら、母材部分を完全な状態に残すかが課題である。

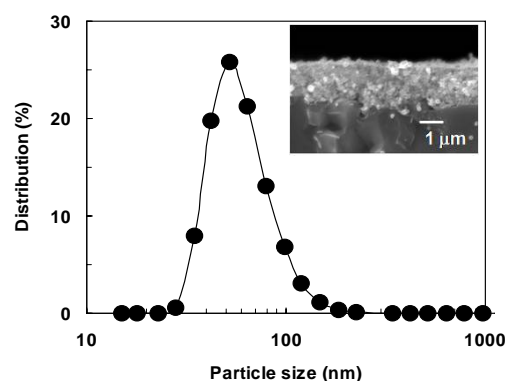


図 10 ナノ粒子を用いたビスマステルライドナノ構造と粒子直径分布

#### (8) 走査型熱顕微鏡の開発と極微細領域の温度分布測定

解析モデルの妥当性を示すため、微小領域の温度分布を計測するための走査型熱顕微鏡(SThM)の開発を行った。SThM は、原子間力顕微鏡(AFM)の探針を熱電対として、表面にコンタクトしながら温度測定を行う装置の総称である。図 11 に探針作製法と作製した探針(W-Ni 熱電対)を示す。この針により表面形状を測定、温度分布を測定した結果を図 12 に示す。依然、モデルの妥当性を示すまで温度測定の空間分解能が届いていないものの、従来の赤外顕微鏡の空間分解能を大幅に超える装置を開発できた。今後走査型熱顕微鏡に関するノウハウを蓄積すると共に、測定しやすいサンプルの作製も続けることで、解析モデルの妥当性を示すことを目指す。

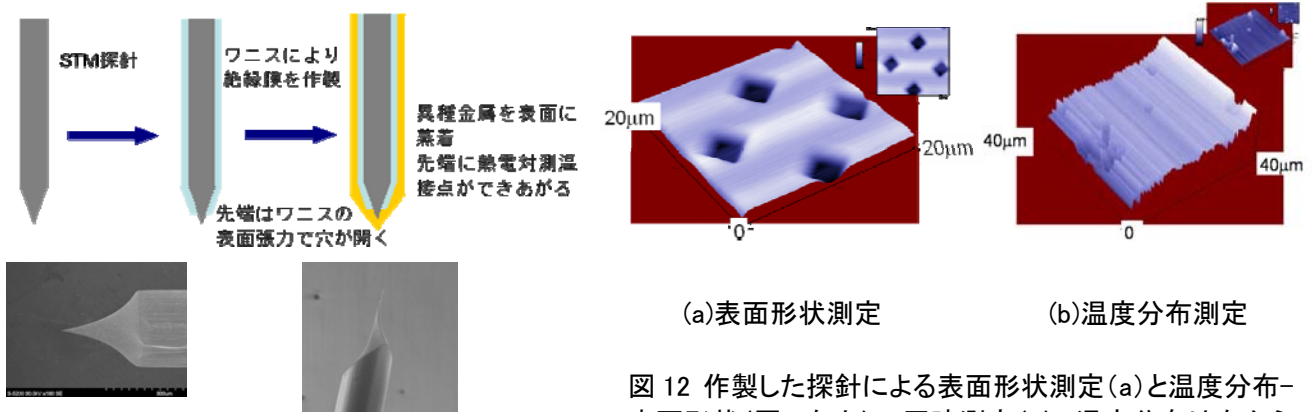


図 11 SThM の探針作製法と作製した探針

## 5 今後の展開

### (1) 今後の研究の展開

本研究では、ナノ構造を熱伝導方程式で扱えるように、フォノン輸送理論によって見かけの熱伝導率を求め、フォノン輸送理論で必要となるフォノンの特性を調べてきた。しかし、フォノンの状態密度関数やフォノンの散乱項までを求めるに至らず、今後の課題として残すことになった。フォノンの状態密度関数については、時間周波数解析を進めることで得られることがわかっており、フォノンの散乱項については、ウェーブレット解析のような時間周波数解析を施すことでフォノンの周波数時間変化を調べれば手がかりがつかめるものと考えている。

フォノン輸送計算については、散乱項の積分計算の負荷が大きいため 2 次元計算でとどまっているが、近年の計算機の飛躍的な進歩により 3 次元計算についても可能となったため現在計算を進めている。現状、3 次元構造のほうが 2 次元構造よりも大きく熱伝導率を低減できることが初期段階の結果として得られている。また共同研究による地球シミュレーターの利用により、さらに複雑な計算も可能であることは既に確認できた。

今後の研究の展開として注力していきたいのは、解析モデルを実験から証明することである。特に開発を進めた SThM を用いた実験では、それなりの解像度が得られており、サンプル作製さえうまくいけばフォノンの弾道輸送に起因する温度分布が取れそうな段階にある。本実験は、ノウハウの塊のようなところもあり、引き続き実験を進めていきたい。さらに本研究を通して獲得した 3 $\omega$ 熱伝導率計測法は、いろいろなナノ構造の熱伝導率を測定するツールとして利用できそうである。熱電半導体に限らず、ナノ構造(特に薄膜)の熱伝導率評価を進めていけるようになった。

上記の実験に加え、本課題のねらいでもある熱電半導体の物性の壁を越えた高効率化については、ナノ多孔体の作製法に戻り、研究を展開していきたいと考えている。特に薄膜技術に頼る作製法でなく、自己組織化を利用するようなナノ構造をもった大きな素子の実現を目指すつもりである。

### (2) 他の研究事業への展開

本研究の計算結果に基づき、文部科学省の科学研究費補助金(若手研究A:H18~H20 年度)や知的クラスター創成事業(第 II 期)(H19~H23 年度)に研究をつなげることができた。本プロジェクト遂行中にもフランスの Ecole des Mines de Nancy のグループと連携して、H17~H18 年度は日仏交流促進事業(SAKURA)を推進、イギリスの Surrey 大学から留学生を受け入れるなど国際交流も活発に行ってきた。今後も日本に限らず海外の研究者とも積極的に交流を進める予定である。

### (3) 実用化に向けた展開

熱電半導体の国内トップメーカーであるコマツエレクトロニクスを傘下に持つ小松製作所の中央研究所と共同研究を進め特許を出願した。また複数国内メーカーとも研究を進めている。さらに本年度からは、福岡地区が採択された知的クラスター創成事業(第 II 期)(H19~H23 年度)に「ナノテク無機材料の高性能化とLSI応用の研究開発」として参加している。知的クラスターでは地元メーカーとナノテクによる高効率熱電半導体の実現を目指して、取り組みを進めていく計画である。

## 6 領域内外での活動とその効果

### (1) 領域内の活動とその効果

領域内メンバーの田丸博晴 助教、富田知志 助教との交流がきっかけで、国内のメタマテリアル研究グループとつながりができ、理化学研究所で理研シンポジウムでの研究発表につながった。さらにメタマテリアルハンドブックの執筆にも加えていただいた。富田知志 助教にはナノポーラス Si を作製できる研究者(藤井 稔 准教授(神戸大学))も紹介していただき、サンプルを提供していただくまでに至った。増淵雄一 准教授とのつながりでは、「高分子ナノテクノロジー研究会」で招待講演を準備していただいた。引き続き、領域メンバーとはいろいろな形、いろいろなテーマで研究を推進していきたいと考えている。

### (2) 領域横断的活動とその効果

本年度は、蒲生領域オンサイトミーティング(彌田チーム)に参加し、自己組織化がナノ構造作製のキーテクノロジーになることを実感した。自分自身の研究進展状況とあわせて、彌田智一教授にはコンタクトをとり、研究を推進していきたいと考えている。このことについて、オンサイトミーティングでは、彌田先生から快諾を得ている。またナノ構造の熱電半導体の高効率化については、河本 邦仁教授(名古屋大学)ともコンタクトを取り、河本グループのメンバーである大瀧倫卓准教授(九州大学)と地理的に近いこともあり、JST プラザ福岡のコーディネーターと北九州産業学術推進機構(FAIS)のコーディネーターと共に月1回のペースで情報交換しながら研究を進め

ている。

## 7 研究成果の今後の貢献について

個人的な見解として、熱の分野においてナノ構造の熱伝導率予測という視点では、日本からはフォノン輸送のアプローチがなかったため、実用面から見た時に欧米に後れを取っていた形となっていた。その点では本課題を通して、欧米によりやく追いついたところと感じている。ただしその中でもすべてをコピーしたものではなかったため、ナノ多孔体の熱伝導率低減効果については、オリジナリティーのあるアプローチができたと自負している。薄膜技術に基づかないナノ構造生成技術とその応用の可能性を見出したことは、科学技術の進歩につながったと考えている。まだ社会の発展にはつながっていないが、提案するナノ多孔体技術で熱電半導体の高効率化につながれば、発電ならびに冷却技術に新しい一手を加えることにつながり、その功績は期待できる。

## 8 自己評価：

研究当初は、分子動力学法で得られたフォノンの特性をフォノン解析に導入するまでを計画していた。実際は、予想していたパラメーター(フォノンの界面における反射条件)がフォノン解析結果にほとんど影響を及ぼさないことなど予想外の結果もあり、当初の完全なマルチスケール解析の確立まで研究を進めることはできなかった。しかし、研究期間内にフォノン輸送解析の境界条件を工夫して、薄膜に限らないナノ構造に解析を適用できるようにしたこと、分子動力学計算によってフォノンの平均自由行程を見積もり、フォノンの分散関係を求めることで、ナノ多孔体が熱伝導に及ぼす影響を原子レベルから検討できたことは、当初の計画通りの成果だった。

さらに計算結果の妥当性を示すため、ナノ構造を作製、その熱伝導率を測定、従来のフーリエの法則からは予測できない極めて低い熱伝導率を結果として得るまでに至ったのも計画通りである。残念ながら作製したナノ構造では、電気伝導率もまた小さくなったため、ZTの改善までには至らなかったのが心残りである。解析の妥当性を示すための走査型熱顕微鏡の開発も当初の計画に追加したものであり、短い期間ながら、それなりの空間分解能で温度分布を測定できた。今後もノウハウを積み上げることで、解析モデルの妥当性を確認するだけでなく、本領域で獲得したバイオなどにも視野を広げた応用につなげていけるツールを獲得できたことは今後の研究を進めていくうえで大きいと感じている。

以上のように、当初の計画まで進められなかった課題も多々あるが、本研究遂行中に数値シミュレーションから実験までを遂行できるポテンシャルを獲得できたことは自己評価したい。

## 9 研究総括の見解：

ナノ多孔体など、ナノ構造によって変わる物性の数値解析による予測をめざした研究であり、シミュレーションの定式化がなされたという点で意義がある。しかしながら、熱伝導率予測のマルチスケール解析法の確立という最終目標には至らなかった。今後、物性科学の専門家との協力関係を築くと共に、新しい理論やシミュレーション手法を開拓していくことが必要である。

## 10 主な論文等

(1)論文(原著論文)発表 (国際5件、国内1件)

- 1. Koji Miyazaki, Toyotaka Arashi, Daisuke Makino, Hiroshi Tsukamoto, Heat Conduction in Microstructured Materials, IEEE transaction on Components Packaging and Manufacturing Technology, Vol.29, No.2, pp.247-253(2006).
- 2. 高尻雅之, 白川寿照, 宮崎康次, 塚本寛, “フラッシュ蒸着法によるn型ビスマステルライド系薄膜の生成”, 日本機械学会論文集A編, vol.72, No.723, pp.1793-1798,(2006).
- 3. Masayuki Takashiri, Theodrian Borca-Tasciuc, Alexandre Jacquot, Koji Miyazaki, Gang Chen, Structure and Thermoelectric Properties of Boron Doped Nanocrystalline  $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$  Thin Film, Journal of Applied Physics, Vol.100, 054315(2006).
- 4. Masayuki Takashiri, Makoto Takiishi, Saburo Tanaka, Koji Miyazaki, Hiroshi Tsukamoto, Thermoelectric properties of n-type nanocrystalline bismuth-telluride-based thin films deposited by flash evaporation, Journal of Applied Physics, Vol.101, 074301(2007).
- 5. Masayuki Takashiri, Toshiteru Shirakawa, Koji Miyazaki, Hiroshi Tsukamoto, Fabrication and characterization of bismuth-telluride based alloy thin film thermoelectric generators by flash evaporation method, Sensors and Actuators A, Vol.138, pp.329-334, (2007).
- 6. Masayuki Takashiri, Toshiteru Shirakawa, Koji Miyazaki, Hiroshi Tsukamoto, Fabrication and characterization of  $\text{Bi}_{0.4}\text{Te}_{3.0}\text{Sb}_{1.6}$  thin films by flash evaporation method, Journal of Alloys and Compounds,

(2)特許出願

研究期間累積件数: 1 件

発 明 者: 高尻雅之, 宮崎康次

発明の名称: 熱電材料の製造方法 (特願 2006-154468)

出 願 人: 小松製作所, 九州工業大学

出 願 日: 2006 年 6 月

(3)その他の成果

国際会議

1. Koji Miyazaki, Yoshizumi Iida, Daisuke Nagai, and Hiroshi Tsukamoto, "Numerical Analysis of Heat Conduction in Nanostructured Silicon," Proceedings of the Asian Thermophysical Properties Conference, Paper No.147, 6pages, (2007).
2. Koji Miyazaki, Yoshizumi Iida, Daisuke Nagai, and Hiroshi Tsukamoto, "Molecular dynamics simulations of heat conduction in nano-structured silicon," The ASME-JSME 2007 Thermal Engineering and Summer Heat Transfer Conference, 'HT2007-32752 6pages, 2007.
3. Koji Miyazaki, Masayuki Takashiri, Jun-ichiro Kurosaki, Bertrand Lenoir, Anne Dauscher, and Hiroshi Tsukamoto, "Development of a Micro-generator Based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Thin Films," Proceedings of 26th International Conference on Thermoelectrics, 2007.
4. Koji Miyazaki, Masahiro Kihara, Hiroshi Tsukamoto, "Thermal radiative properties and thermal conductivity of porous media self-assembled silica particles," Proceedings of the 1st Energy Nanotechnology International Conference, ENIC2006-19074,(2006).

他10件

国内会議

1. 宮崎康次, 飯田良純, 氏福信禎, 塚本寛, "ナノポーラスSiの熱伝導分子動力学計算", 第44回日本伝熱シンポジウム, pp.591-592, (2007).
2. 櫻井篤, 圓山重直, 宮崎康次, 小宮敦樹, "フォノン放射輸送方程式を用いたナノ・マイクロスケール熱伝導シミュレーション", 第44回日本伝熱シンポジウム, pp.241-242, (2007).
3. 田中三郎, 滝石誠, 高尻雅之, 宮崎康次, 塚本寛, "3 $\omega$ 法を用いた薄膜の熱伝導率計測", 第44回日本伝熱シンポジウム, pp.81-82, (2007).
4. 宮崎康次, 飯田良純, 小田陽子, 塚本寛, "ナノ領域における熱伝導解析", 第56回理論応用力学講演会, pp.275-276, (2007).

他8件

招待講演 (国際1件、国内4件)

1. Koji Miyazaki, "Thermal conductivities of nano-structured materials," ATI seminar, University of Surrey, 2007 年 9 月.
2. 宮崎康次, "人工的な物性操作による熱電半導体の効率改善", 理研シンポジウム 2007 年 5 月.
3. 宮崎康次, "熱と流れにおけるサイズ効果とその利用", 日本機械学会 2006 年度年次大会 先端技術フォーラム, 2006 年 9 月
4. 宮崎康次, "ナノテクによる熱物性制御", 高分子学会 高分子ナノテクノロジー研究会, 2006 年 6 月.
5. 宮崎康次, "ナノテクノロジーによる熱輸送制御", 共同研究先企業, 2006 年 5 月.

著作物・解説記事 等

1. 宮崎康次, メタマテリアル ―最新技術と応用―, 「材料編 第8章 熱電メタマテリアル」, pp.204-219(2007).
2. 宮崎康次, 九工大 世界トップ技術, 「第4章 熱を電気に換える ～エコエネルギー技術～」, pp.180-185(2006).

3. 宮崎康次, “生命体の微細構造と熱物性の制御”, 表面科学 , Vol.27, No.2, pp.86-89, (2006).
4. マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック編集委員会, マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック, 第 2 章第 4 節 熱伝導, (2006).
5. 宮崎康次, 人工的なナノ構造で熱物性を変える, 週刊 ナノテク 11月7日号 特集1 Beyond Nature, (2006).