

# 「能動的熱素子による革新的サーマルマネジメントデバイスの創成」

長岡技術科学大学 材料工学専攻 博士後期課程 3年

藤原 健志

## [研究背景・目的]

熱分野において、ヒートシンクや熱流体を用いた機構に代表されるように熱を能動的に制御する手法が存在する。これらを電子デバイスのように一つの熱の能動素子として開発することができれば、放熱、蓄熱、吸熱などをより高度に制御可能となることが予想される。しかしながら、これまでに能動的な熱素子の設計に関する研究は計算的には予測されているが、いまだ実証に至っていない。我々は熱能動素子のモデル材料を合成し、その微細構造の解析および熱伝導特性を評価することにより熱の能動素子の機能解明を行うことを最終目的とし、研究を行っている。熱の能動素子を合成するためには異なる熱伝導率を持ち、それが外部環境(主に温度)の影響で変動する2種の材料を組み合わせる必要があるが、本報告ではそのモデル材料としてポリシロキサン樹脂と六方晶窒化ホウ素(BN)から成る有機-無機ハイブリッド材料(二層膜)を合成し、その内部の微細構造解析およびその内部構造による熱物性の変化を評価した。

## [研究内容]

### ◆ 熱伝導率の異なる材料を接合したモデル材料の合成

ポリシロキサンとBNナノシートの混合溶液に対し、表面に微細な凹凸形状を持つ電極を用いて電場印加することにより、内部構造制御された有機-無機ハイブリッド材料の合成を行った。本手法は、電極表面の凹凸付近で発生する電場集中により局所的に高い電場強度を利用可能である(図1)。

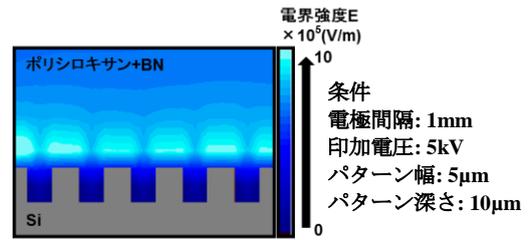


図1 電場シミュレーション結果

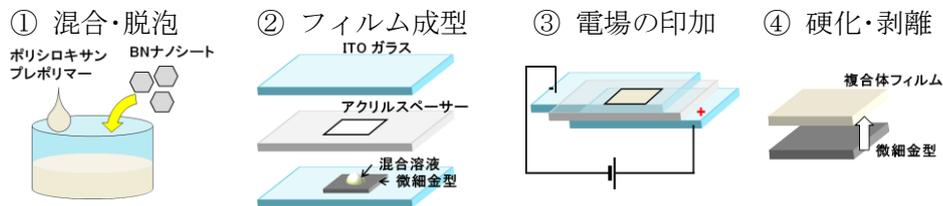
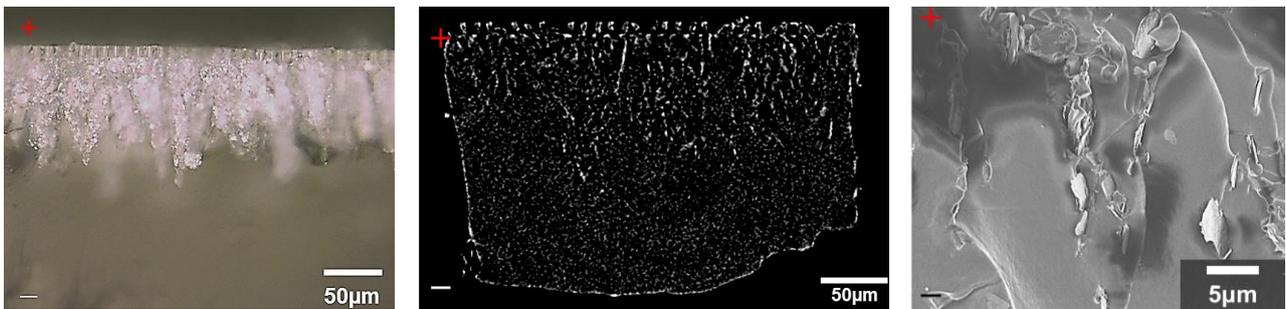


図2 複合体合成手順

### ◆ 複合体の微細構造解析

複合体の内部構造(フィラーの配向性およびフィラー間距離)は熱伝導へ大きく影響することから、微細構造を観察し、制御することが極めて重要である。BNナノシートが陽極側へ柱状構造を持って集められること、またそれらが膜面に垂直配向状態で、さらにネットワーク構造を持つことが確認された(図3)。



(a) 光学顕微鏡像(断面)

(b) X線CT像

(c) SEM像(断面)

図3 複合体内部のBNナノシート分散状態(陽極側:電極による凹凸形状あり)

◆ 複合体中 BN ナノシートの配向度解析(X 線回折)

複合体中 BN ナノシートの膜面垂直方向の配向度を X 線回折結果から解析し、それぞれの複合体合成条件の違いによる影響を評価した(図 4)。配向度は X 線回折図形より膜面に対し、水平配向の(002)回折と垂直配向の(100)回折による下記の式から算出可能である。

$$\text{Intensity ratio}(\%) = \frac{I_{(100)}}{I_{(002)} + I_{(100)}} \times 100$$

◆ 熱伝導特性評価

複合体内部構造の熱伝導特性への影響を調査するために熱拡散率  $\alpha$  (m<sup>2</sup>/s)、比熱容量  $C_p$  (J/gK)、密度  $\rho$  (g/m<sup>3</sup>) を測定し、それらの結果より下記の式を用いて算出された熱伝導率  $k$  (W/mK) と配向度の関係性を評価した(図 5)。

$$k(\text{W/mK}) = \alpha \times C_p \times \rho$$

配向度向上に伴った熱伝導率向上が確認された。さらに、配向度向上に依存しない電極表面形状による熱伝導率向上も確認された。これは BN ナノシートの柱状構造により熱伝導パスが形成されたためと考えられる。

◆ BN ナノシートの柱状構造形成メカニズム

- ① BN ナノシートの面方向両端で分極が生じ、電場の向きに平行となるよう自発的に回転
- ② 近接する BN ナノシート同士がクーロン力により接合するとともに、BN ナノシートの持つ微小な負の帯電から陽極側へ電気泳動
- ③ 電極表面の凹凸先端で発生する電場集中領域に選択的に BN ナノシートが電気泳動し、さらに集められた BN ナノシート同士が次々に連結することにより柱状構造を形成

これらの挙動により形成された BN ナノシートの構造においては、ポリシロキサン中に単純に BN ナノシートを充填するだけでは実現不可能なほどにフィラー間距離を短くすることが可能である。

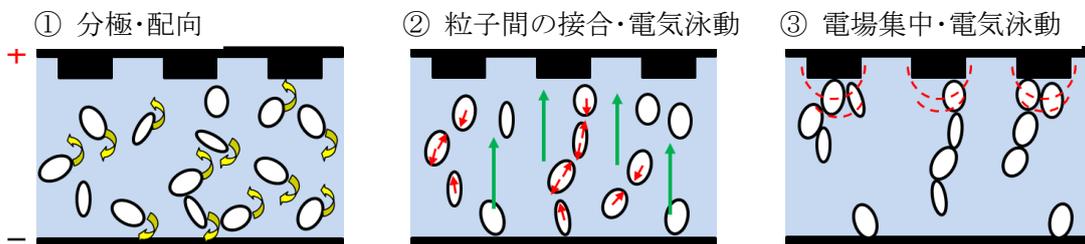


図 6 電場印加による BN ナノシートの挙動

[結論]

- ✓ 樹脂中の高熱伝導無機フィラーへの電場印加により比較的簡単に二層膜の合成に成功した
- ✓ 電場条件の違いにより複合体内部構造の制御(配向制御、柱状形成)に成功した
- ✓ 複合体内部構造の制御による熱伝導パス形成により熱伝導率向上を実現した
- 課題: 熱の能動素子の機能解明のために、高温領域における熱伝導特性も評価する必要がある

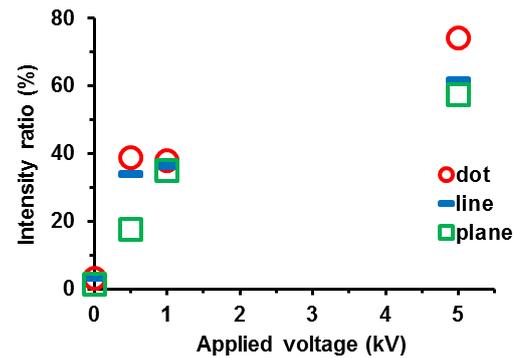


図 4 複合体合成条件による配向度変化

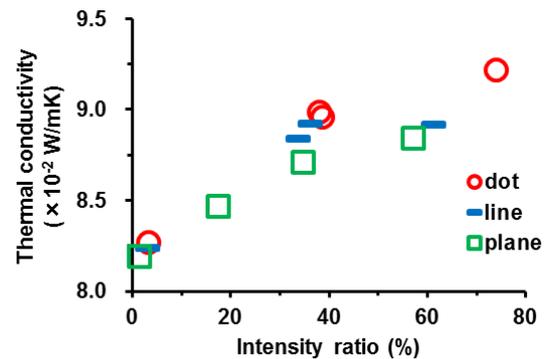


図 5 複合体内部構造と熱伝導率の関係