2017年度日本液晶学会賞 論文賞Ｂ部門 受賞記事
本論文は日本液晶学会の学会誌「液晶」に掲載された論文賞受賞記事です。
液晶学会にご入会いただけましたら、この他にも最新技術の紹介、講座記事など
研究に役立つ論文などがオンラインでいつでもご覧いただけます。
会員申込は http://jlcs.jp/access/enrollment から。

総 説

サーマルマネージメント分野で特異な熱伝導などの機能を発揮し，注目される液晶性樹脂

上 利 泰 幸[*1]，岡 田 哲 周[*2]

ほかの高分子と異なり，例外的な熱物性（高熱伝導率や負の熱膨張率など）をもつ液晶性高分子は，次世代自動車やパワーデバイスなどでも期待され，ますます利用が進むサーマールマネージメント材料の分野で，キーマテリアルであるが，最近，日本を中心に研究が進み，種々の特異な熱特性が見いだされた．そこで，高熱伝導性高分子材料の研究者の立場から，高分子の熱伝導を分子論的に述べた後，液晶性高分子の高熱伝導発現の原因とその特徴と，複合化時の特異な特性を説明する．

キーワード：熱伝導率，熱膨張率，フォノン，複合材料，サーマルマネージメント

1. はじめに

高分子の熱伝導率は金属やセラミックに比べ，一般的に非常に低い（**Fig. 1**; 0.15～0.3 W/(m·K)）．そのため元来，高分子は気体を複合し，断熱材として種々の分野で利用されてきたが，20年ぐらい前から，エレクトロニクス分野を中心に放熱性を向上させるため，成形性に優れる高分子材料の高熱伝導化が望まれるようになった．しかし，高分子自身の高熱伝導化には限界があった[1)]．そのため，高熱伝導性フィラーを複合することによって，高分子材料を高熱伝導化することが行われている[2)]．すなわち，金属やセラミックとの合せ面や電子部品の取り付け部の接触熱抵抗を低く抑えるために，複合高分子材料を用い，熱伝導性グリスや熱伝導性接着剤，熱伝導シートなどの開発が行われた．導熱グリースは熱交換器などの金属部品の繋ぎ目に用い熱伝導を助け，熱伝導性接着剤は冷却フィンと本体の金属を繋ぐ接着に用いられ，また熱伝導性導熱シートはパワートランジスタと基板との間に挟み，放熱を促進する分野に利用されてきた．最近ではノート型パソコンや携帯電話のように，さらに高集積化し高出力になっている基板が，ますます小型化する機器に搭載され，放熱性の問題がさらにクローズアップされるようになってきた．特に，環境・エネルギー問題が深刻化する中，電気・ハイブリッド車など自動車の普及などの再生可能エネルギーの利用をはじめ，家電・産業機器の効率化によって，2050年には全世界の二酸化排出量の70％の削減が目指されている．その約50％の分野でパワーデバイスが活躍することが期待されている．そこで，SiC基板などのパワーデバイスが利用され始めているが，それを推進するために用いる高分子材料の高放熱化が強く望まれている．

そのため，発熱問題が進化してサーマルマネージメント材料へと拡大する中，高分子自身の高熱伝導化や複合高分子材料の開発の研究も行われるようになった．特に，熱が流れるとき移動するフォノン（音子）があまり散乱しにくいと考えられる，電気絶縁性の液晶性高分子の開発が進んできた．また，熱は電子を伝播体として移動することも知られている．そのため，電気伝導性の大きな銅や銀などは熱伝導率も非常に大きい．しかし，ポリアセチレンも高い熱伝導率（7.5 W/(m·K)）をもつと報告されているが，研究はあまり進んでいない．また最近，フィラーを複合化した液晶性高分子材料の熱伝導率に相乗効果が発現することが見いだされた[3)]．さらに，配向した液晶性高分子の熱膨張率が負になることも知られ，低温下での隙間の発生抑制などに効果が期待されている[4)]．

このように，液晶性高分子は棒状のメソゲン基を有するため，高熱伝導や負の熱膨張率などの熱物性に対して，特異な特性を発現することが期待される．

そこで本稿では，高分子材料の熱伝導率の研究を行ってきた者から見た，液晶性高分子の熱伝導率や熱膨張率に関

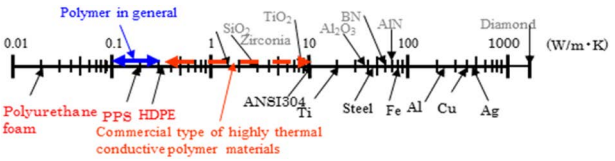


Fig. 1 Thermal conductivity of various types of materials.

*1 Yasuyuki Agari
大阪市立工業研究所加工技術研究部・研究フェロー
大阪府大阪市城東区森之宮1–6–50（〒536–8553）
E-mail: agari@omtri.or.jp
*2 Akinori Okada
大阪市立工業研究所加工技術研究部・研究員
受理：2016.6.7

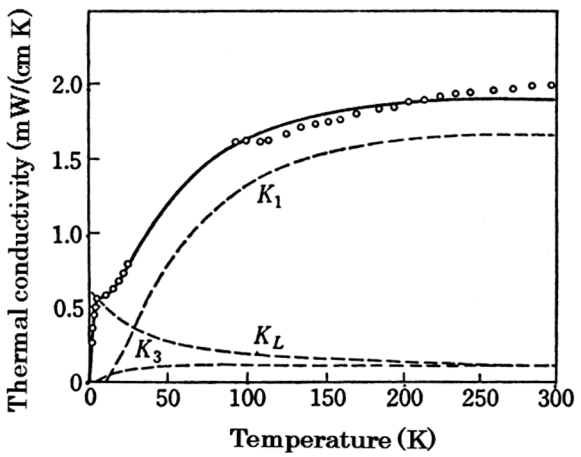


Fig. 2 Thermal conductivity of PMMA (——, – – – –: Estimated value, measured value).

する研究の現状や今後の期待について述べる．まず高分子の熱伝導率の分子論的説明やその機構を説明した後，液晶性高分子の高熱伝導性発現理由について考察する．そして，高熱伝導化において不可欠となる複合液晶高分子材料について説明する．さらに，液晶性高分子に特異な熱膨張特性について述べる．最後に，将来的展望についても述べる．

2. 高分子の熱伝導率

2.1 一般的高分子の熱伝導率

高分子の熱伝導率(λ)に関する研究は，古くから行われ，Klemensの格子構造における熱伝導理論に基づき，高分子を多くの欠陥をもつ結晶体として解析している[5]．非晶性高分子の熱伝導率を理論解析して，たとえば，ポリメタクリル酸メチル（PMMA）の場合，λは式(1)で与えられると報告している[6]．

$$\lambda = K_1 + K_L + K_4 \tag{1}$$

ここで，K_1は孤立鎖としての格子振動の寄与の1/3，K_3は3次元結晶としての横波の寄与の2/3，K_Lは3次元結晶としての縦波の寄与の2/3であり，予測した熱伝導率は**Fig. 2**に示すように実験結果とよく一致する．

理論的に見積もった熱伝導率は実測値に近く，10 Å程度の格子欠陥を数多くもつ結晶と位置付けていた．

また，ポリエチレンなど高結晶性高分子では，結晶内や粒界の欠陥が少なくなることで熱伝導率を制限する欠陥が少なくなり，その熱伝導率は大きくなる．多結晶体であるポリエチレンの温度依存性を**Fig. 3**に示すとおりになる[7]．その熱伝導率は温度上昇とともに低温では上昇するが，比熱が飽和するデバイ温度付近でピークを示した後は，非調和性のフォノン相互の散乱が激しくなるので，温度上昇とともに減少する．高温での高結晶であるポリエチレンの熱伝導率は，非調和性のフォノン相互の散乱が制限因子であると考えると分子間振動だけに支配されるので，温度の上昇とともに反比例して減少することや，300 Kでの熱伝導率が0.4 W/(m·K）であることが予測できると述べている．

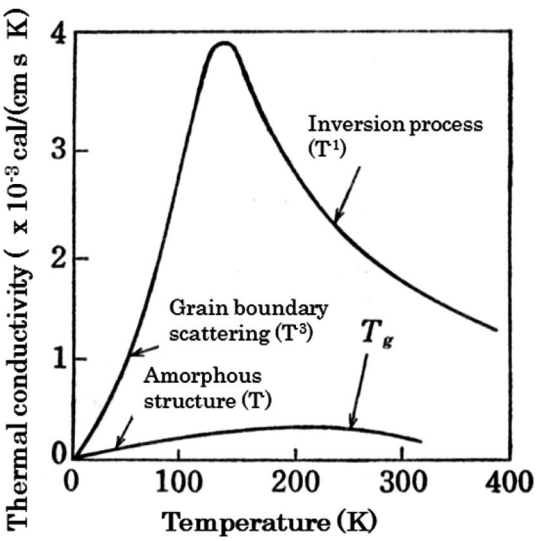


Fig. 3 Thermal conductivity of polyethylene.

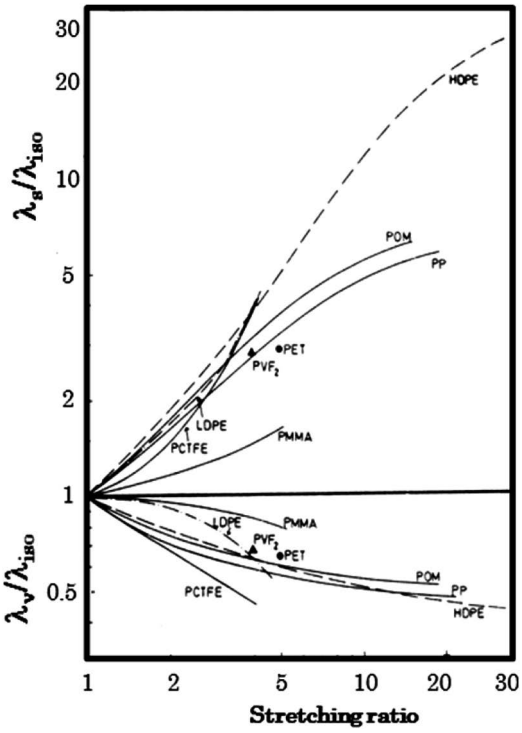
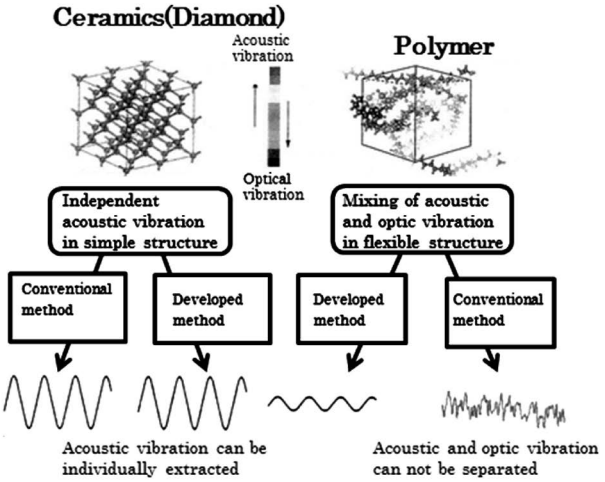


Fig. 4 Thermal conductivity of various types of polymers at several types of stretching ratio(λ_s, λ_v and λ_{iso}: thermal conductivities in the stretching direction, in vertical direction to stretching, and in isotropic state, respectively.

さらに，高分子では分子鎖方向の熱伝導率が非常に大きいことから，延伸による高熱伝導化が期待された．各種高分子の熱伝導率を延伸比に対してプロットした[8]（**Fig. 4**）．いずれの高分子も延伸するにしたがい延伸方向の熱伝導率は炭素同士の共有結合が数多く存在するため，大きく増大し，高密度ポリエチレンでは30倍延伸で等方系の熱伝導率の25倍以上となり，10 W/(m·K）以上の熱伝導率を示すことがわかる．一方，繊維径の方向の熱伝導率は延伸倍率が大きくなるほど低下した．これは，その方向に占める共



Conventional method: Independent frequency model
Developed method: Frequency response model

Fig. 5 Thermal conductive simulation by equilibrium molecular dynamics.

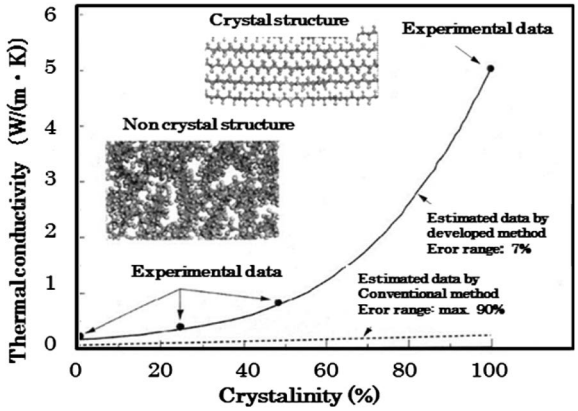


Fig. 6 Comparison of thermal conductivity of polyethylene at various types of crystallinity, with the result in simulation.

有結合の量が減少したためかもしれない．

これは結晶格子における高熱伝導化の要件の一つである，格子間の結合の強さが大きく反映したものと考えられる．また，そのほかの要件である，“パッキング性が大きい”に該当するポリエチレンが最も熱伝導率が大きくなったものと考えられる．棒状のメソゲン基をもつ液晶性高分子もこの二つの要件をもっているため，高熱伝導化が期待される．

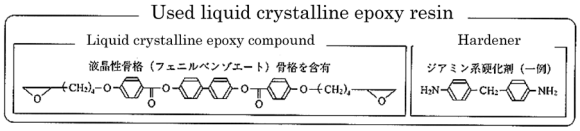
2.2 熱伝導に関わる分子運動のシミュレーション

最近，分子シミュレーションに関する研究が種々，行われるようになってきた．鴇崎らは，平衡分子動力学法を工夫することで，高分子の熱伝導率を見積もることに成功している[9]．上記のように熱は超音波であるが，量子化するとフォノンと呼ばれる．フォノンには光学フォノンと音響フォノンがあるが，熱伝導を担うフォノンは基本的には低周波極限の振動（音響フォノン）である．ダイヤモンドのような比較的調和性に優れた振動である場合は，音響フォノンは，高周波の振動である光学フォノンと干渉し合わないので，従来の分子シミュレーションでも定量的に分離でき，熱伝導率を見積もることができた．しかし，高分子は分子鎖が非常に柔軟であるため，振動に非調和部分が増え，散乱の原因となるため，両フォノンを有効に分離できなかった．そこで，鴇崎らは，特定の周波数の応答成分以上をカットし，散乱成分を分離して音響フォノンに対応する低周波数成分だけを抽出した．それを用いて熱伝導率を計算している（**Fig. 5**）．そして，ポリエチレンへこの方法の適用を行うと，**Fig. 6**に示すとおり，各結晶化度におけるポリエチレンの熱伝導率の実測値とよく一致した．すなわち，従来法では予測値は実験値1, 2および3と全く異なるが，新しく開発された方法で計算した予測値は，よく合致したと述べている．

このように，分子構造から熱伝導率を予測できることは，さまざまな分子構造が考えられる液晶性高分子の高熱伝導化の設計のために有効であると考えられる．

そこで，**Table 1**のような液晶性高分子の熱伝導率を高磁場下状態で測定し，その熱伝導シミュレーション結果と比較して，予測値と実験値が比較的よく一致したと報告している．

Table 1 Comparison of thermal conductivity of liquid crystalline polymer under applying of magnetic field, with the results in simulation.



Direction of evaluation	Thermal conductivity (W/(m·K))	
	Measured	Estimated (Crystalinity: 50%)
Magnetic direction (Z axis)	0.72	0.76
Vertical to magnetic direction (X axis)	0.21	0.26

3. 液晶性高分子の熱伝導率

3.1 液晶性高分子繊維の熱伝導率

液晶性高分子の熱伝導率の研究は，繊維の分野から始まった．すなわち，高強度・高弾性率である主鎖型液晶性高分子の熱伝導率は，一般の高分子の場合よりも大きく，0.3 W/(m·K) 以上あり，ベクトラで，0.37～0.45 W/(m·K) とされている．その中でも最も熱伝導率が大きいのは，ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール（PBO；**Fig. 7**に示す）であり，ポリエチレンと同様に高延伸すると37 W/(m·K) になると報告されている[4]．

3.2 一般的液晶性高分子の熱伝導率

液晶性材料は，棒状構造をもつため，一般的に配向の影響を受けやすく，配向方向の熱伝導率は比較的大きい

が，その垂直方向は小さいと比較的古くから考えられている[10–12]．これは繊維の場合と同じであるがフィルムや成形品の場合には，さまざまな方法で配向させて熱伝導率の向上を行っている．また，液晶状態での分子の乱れが少ないスメチック相の熱伝導率はネマチック相の場合に大きいと考えられ，スメチック相を利用した高熱伝導化がよく行われている．配向方法としては，せん断力を用いるだけでなく，磁場や電場を用いる場合が多い[13–15]．

種々の分子構造をもつ液晶高分子に磁場をかけて配向して測定した熱伝導率を**Fig. 8**に示す[13]．化学構造によって，多少異なるが，ほぼ同じような値となり，それよりも配向度の影響が非常に大きく，配向度1では，2.5 W/(m·K) までの熱伝導率を示す．また，原田らは熱硬化性樹脂である液晶性エポキシ樹脂の系について，磁場下で配向した後に熱伝導率を測定し，磁場の強さは，2Tぐらいで充分であると述べている[14]（**Fig. 9**）．さらに，ラビング配向によって高熱伝導率を得ている研究もある[16,17]．液晶性アクリル樹脂系において，フィルムの重ね方を工夫し，種々な形で並べたときに，熱伝導率が大きく変動する[17]（**Fig. 10**）．ここで，面方向にランダムに配向した場合でも0.5 W/(m·K) 付近の熱伝導率をもち，液晶性高分子の効果が発現していると考えられる．

成形加工性に優れる熱可塑性液晶高分子の高熱伝導化についても，ベクトラなどこれまでの主鎖型液晶高分子以外についても研究がなされるようになった．吉原らは，スメ

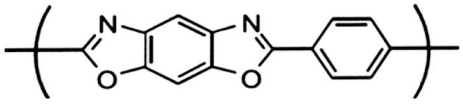


Fig. 7 Chemical structure of PBO.

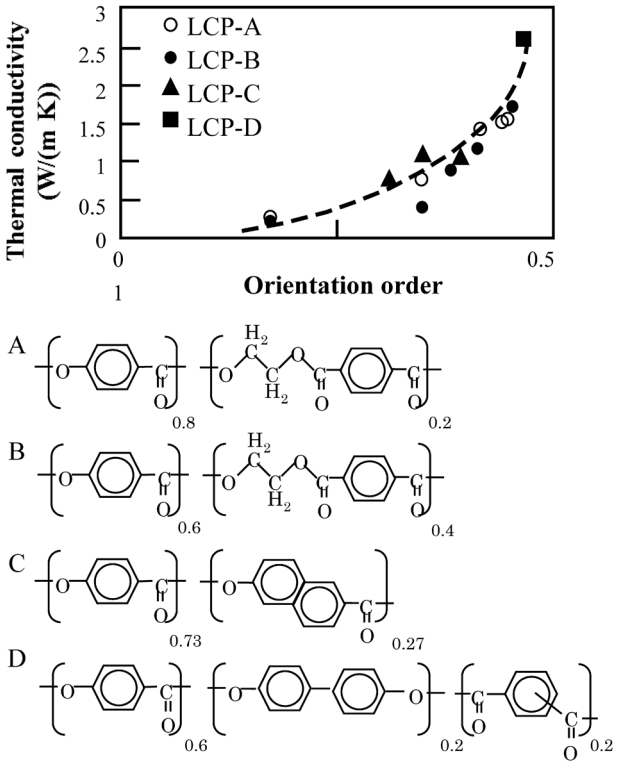
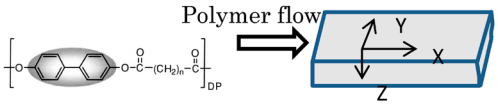
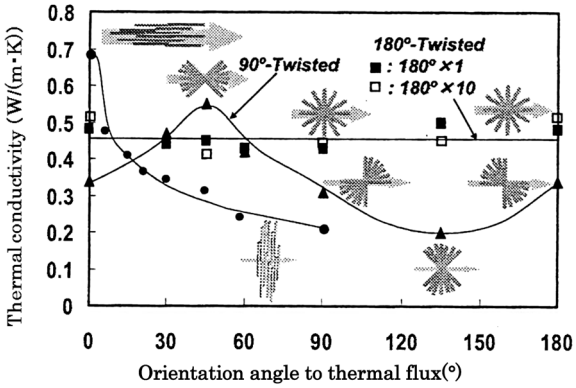


Fig. 8 Thermal conductivity of several types of liquid crystalline polymer at various types of orientation degree.

Table 2 Thermal conductivity of injection molded part of liquid crystalline thermoplastics.



Measuring direction	Thermal conductivity (W/(m·K))
Machine direction (X)	0.3
Traverse direction (Y)	0.3
Thickness direction (Z)	1.2



Chemical structure of liquid crystalline acryl monomer

Fig. 10 Thermal conductivity of liquid crystalline acryl resin in several types of orientation styles.

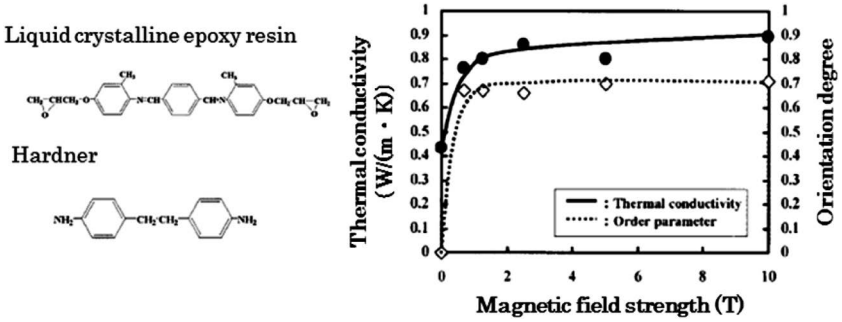


Fig. 9 Thermal conductivity of liquid crystalline epoxy resin cured at several types of magnetic field strength.

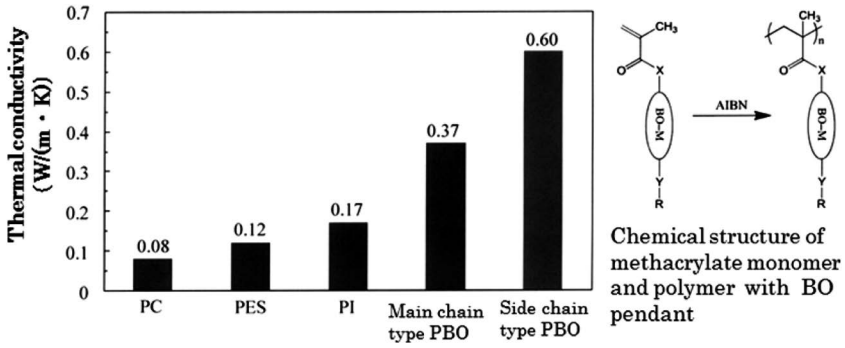


Fig. 11 Thermal conductivity of main and side chain type of liquid crystalline PBO.

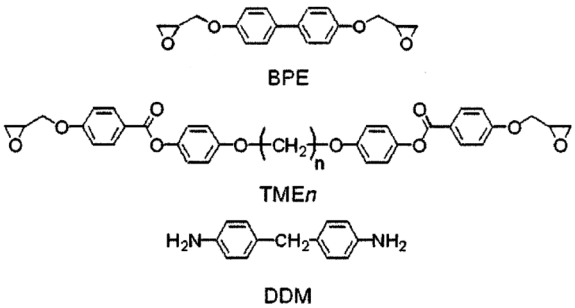


Fig. 12 Chemical structure of used twin mesogenic epoxy resin (TMEn) and hardener (DDM).

Table 3 Thermal conductivity of liquid crystalline epoxy resin in several types of composition.

Composition (Epoxy resin/hardener)	Thermal conductivity (W/(m·K))
BPE/DDM	0.3
TME8/DDM	0.85
TME6/DDM	0.89
TME4/DDM	0.96

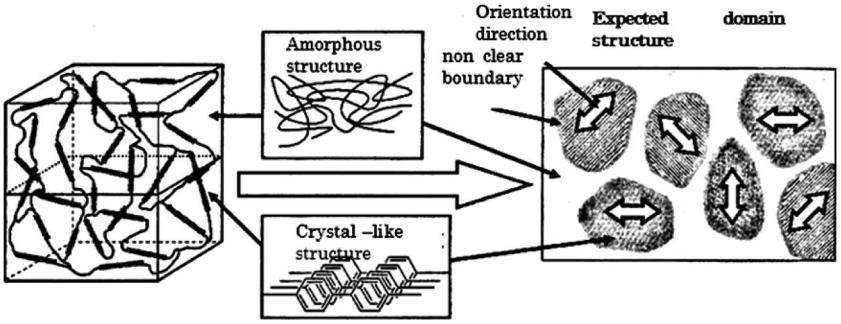


Fig. 13 Schematic image in highly thermal conductivity of twin mesogenic liquid crystalline epoxy resin.

クチック構造をもつが，流動方向と垂直な方向に配向する液晶生高分子を開発し，射出成形時に製品の厚み方向に大きな熱伝導率を得ることに成功している[18]（**Table 2**）．

また，溶媒を用いる溶液キャスト法では，磁場下などで配向しやすくより高熱伝導性を発現させると述べる報告もあり，PBO（**Fig. 7**）をリン酸溶液中で配向し，高分子単独でも2.5 W/(m·K) の伝導率を得ることに成功している[13]．

さらに，高熱伝導な液晶性高分子の研究は，通常，主鎖型タイプを用いている場合が多いが，長谷川らは，側鎖にベンズアゾール基をもつメタアクリレートを重合して得た側鎖型液晶性高分子を用いて，溶液キャスト法で作製したフィルムの熱伝導率は，フィルム厚み方向で大きくなり，主鎖型液晶性高分子フィルムの熱伝導率よりも大きくなったと報告している[19]（**Fig. 11**）．

3.3 等方性液晶性高分子の熱伝導率

竹澤らは，**Fig. 12** に示すビフェニル型およびツインメソゲン型エポキシ樹脂を硬化剤で作製し，異方性がなく高熱伝導であることを報告して注目を浴びた[20]（**Table 3**）．これは，生成したドメインが大きくなり，隣同士が連結しやすくなったためと考えられた（**Fig. 13**）．このことは，異方性がないときでも液晶性高分子が，通常の高分子よりも高い熱伝導率をもつことを示した，越智らの研究結果と一致する[17]．

4. 複合液晶性エポキシ樹脂の熱伝導率

液晶性高分子自身の熱伝導率は高くても前述のように，1 W/(m·K) 以下なので，一般的な応用分野で必要とされる熱伝導率を単独では得ることができない場合が多い．しかし，通常の複合高分子材料の熱伝導率は，150 W/(m·K) の熱伝導率をもつフィラーを用いても，30 W/(m·K) の熱伝導率をもつフィラーを用いた場合とほとん

ど変わらないが，液晶性高分子材料の熱伝導率は，30 W/(m·K) の熱伝導率をもつフィラーを用いても，フィラー量が30 vol%で，3 W/(m·K) となり，非常に効果的であるといえる[21]（**Fig. 14**）．そのため最近では，高熱伝導性フィラーを複合化した液晶性高分子材料の熱伝導率の研究が，徐々に増えてきた．そこで，それらの現状と相乗効果について紹介する．

竹澤らは，複合樹脂中のアルミナ粒子に液晶性樹脂が配向することで，スメクチック液晶が成長し，複合エポキシ樹脂の熱伝導率が増大することを見いだしている[3]．そして，その配向現象はアルミナ表面では起こるが，窒化アルミ粒子表面では発現しにくいことを偏光顕微鏡観察によって確認している[22]（**Fig. 15**）．これらが，相乗効果の最初の報告である．

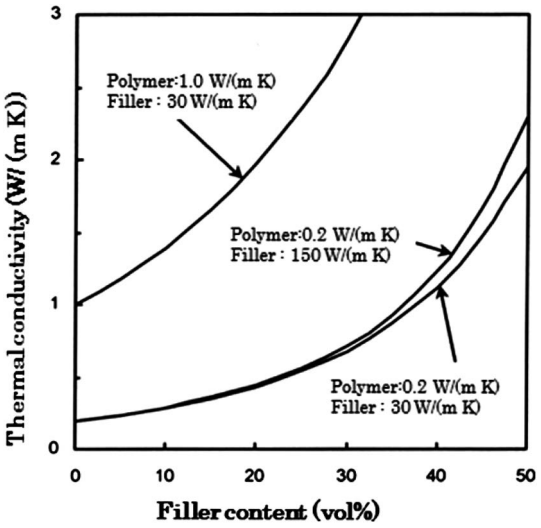


Fig. 14 Thermal conductivity of a composite estimated by Bruggeman model.

また，BN複合液晶性エポキシ樹脂の熱伝導率が液晶状態では等方状態よりも大きいだけでなく，両状態とも予測値（Bruggemanモデル[23] およびMaxwellモデル[24]）よりも大きな熱伝導率を示したと，原田らは報告している[25]（**Fig. 16**）．ここで，高熱伝導率発現の原因として液晶ドメインによるフィラーのハニカム構造形成が考えられると述べている．

一方，複合熱可塑性エポキシ樹脂の熱伝導率は，フィラーの種類によらずBruggemanモデル[23] での予測値よりも増大し，高充填量の場合にその効果が大きいと報告されている[26]（**Fig. 17**）．ここで，30 vol%以上のデータを用いて，Bruggemanモデルを適用したときの液晶性高分子の熱伝導率は，真の熱伝導率の約2倍となり，相乗効果があると考えられた．これは，MgO粉間に存在する液晶相はMgO粉によって配向していないが，繋ぐ役目をしていることから相乗効果が発現したとしている（**Fig. 18**）．

これまで述べてきたように，複合液晶性エポキシ樹脂の熱伝導率が相乗効果を示す報告が数多くなされている．しかし，試料面方向の熱伝導率や表面処理剤の影響，熱伝導モデルの適用性についてもあまり考慮された例は少ない．そこで我々も，液晶性エポキシ樹脂にh-BN粒子を複合した系について検討した[27]．85 vol%以上で，面方向（2軸配向方向）に，60 W/(m·K) の熱伝導率をもつ複合液晶性エポキシ樹脂を得ることに成功し，さらにレーザーフラッ

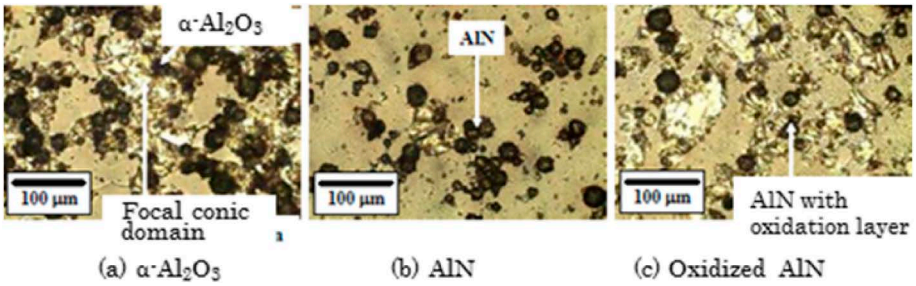


Fig. 15 POM images of the mesogenic epoxy resin.

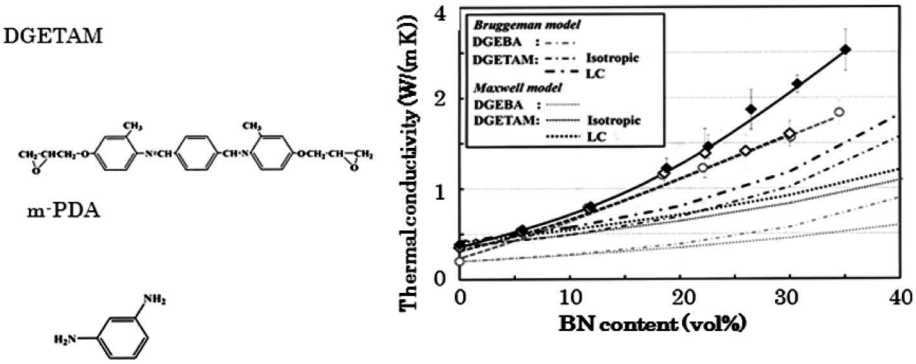


Fig. 16 Thermal conductivity of liquid crystalline epoxy resin (hardenner:m-PDA) filled with BN; Experimental data (DGEBA (○), DGETAM ((isotropic (◇), liquid crystalline (◆))), data estimated by Bruggeman and Maxwell models.

シュ法によって試料面方向の熱拡散率を測定し，それに密度と比熱を掛け合わせて，試料面方向の熱伝導率を求めた（**Fig. 19**）．そして30 vol%以上についてその複合液晶性エポキシ樹脂の熱伝導率に，我々が提案した熱伝導モデルの適用を試み[28]，よい適用性を示すことがわかった．また適用を行ったときの特性係数を用いて算出した，0 vol%時の予測熱伝導率，すなわち液晶性エポキシ樹脂の“みかけの熱伝導率”が測定値の3倍となり，大きな相乗効果を示した．しかしこの複合系では，熱伝導率に異方性があり平板形状をもつBN粒子の配向効果も加味されるため詳細を議論できなかった．そのため，さらにフィラーとして，球状および板状のアルミナ粉を用い，表面処理剤として，アミン系カップリング剤（*N*-(2-アミノエチル)-3-アミノプロピルトリメトキシシラン）を用いた．そして各種のアルミナフィラーを複合した液晶性エポキシ樹脂を圧縮成形によって，面方向に2軸延伸した円盤状試料を作製した[29]．そして，レーザーフラッシュ法によって試料厚み方向および面方向の熱拡散率を測定し，それに密度と比熱を掛け合わせて，厚み方向および面方向の熱伝導率を求めた．さらに，30 vol%以上の複合液晶性エポキシ樹脂の熱伝導率の結果を用いて，我々が提案した熱伝導モデル[28]に基づく予測式の適用を行い，いずれも，よい適用性を示すことを確認した（**Table 4**）．さらに，複合材料時の液晶性エポキシ樹脂自身の“みかけの熱伝導率”を見積もった（**Table 4**）．

球状フィラーを用いた場合，“みかけの熱伝導率”は熱伝導率測定値よりも厚み方向で大きかったが，面方向では小さくなった．また，カップリング剤処理によって厚み方

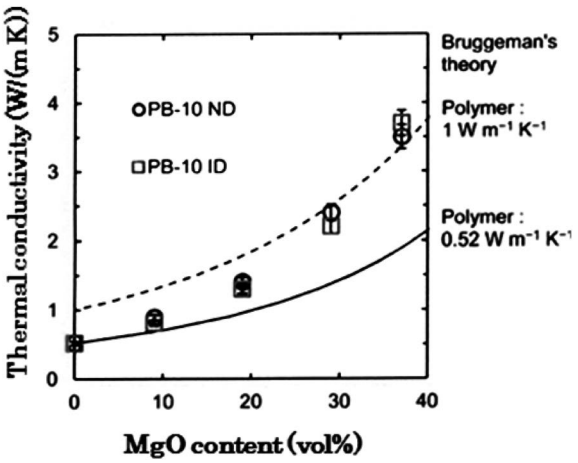


Fig. 17 Thermal conductivity of liquid crystalline polymer composite with MgO (○: thickness direction, □: vertical to thickness direction).

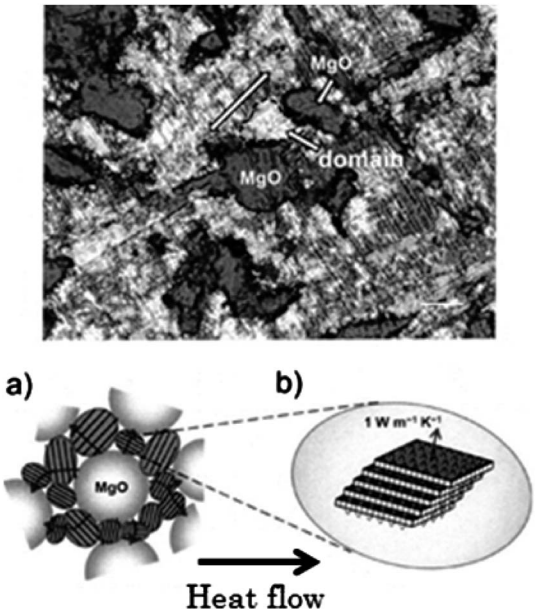


Fig. 18 Photograph of polarizing optic microscope of liquid crystalline polymer composite with MgO, and schematic model (a) bridge style, (b) LC domain.

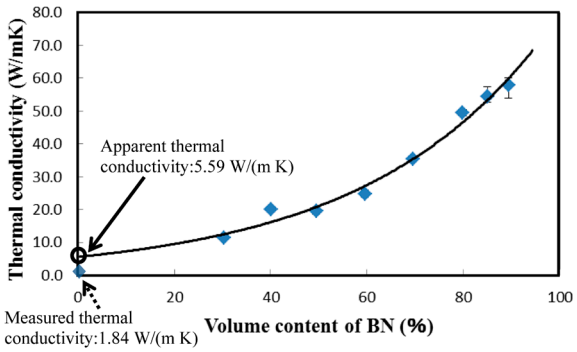


Fig. 19 Thermal conductivity of liquid crystalline epoxy resin filled with BN in the plate direction of the sample.

Table 4 Applicability of data in the liquid crystalline epoxy resin composite with larger than 30 vol% of Al_2O_3, to our model and “apparent thermal conductivity” estimated by our model.

Shape	Measurement direction in disc sample	Treatment of filler surface with coupling agent	Correlation coefficient	Measured thermal conductivity (λ_m) (W/(m·K))	Apparent thermal conductivity (λ_a) (W/(m·K))	λ_a/λ_m
Spherical	Thickness	Non-treated	0.983	0.228	0.366	1.61
Spherical	Thickness	Coated with amine type	0.997	0.228	0.424	1.86
Spherical	Disc plate	Non-treated	0.986	1.84	0.467	0.25
Spherical	Disc plate	Coated with amine type	0.999	1.84	0.510	0.277
Plate	Thickness	Non-treated	0.974	0.228	0.595	2.61
Plate	Thickness	Coated with amine type	0.865	0.228	0.427	1.87
Plate	Disc plate	Non-treated	0.974	1.84	0.878	0.477
Plate	Disc plate	Coated with amine type	0.915	1.84	1.175	0.639

向および面方向でも熱伝導率の向上させることとなった．これは，フィラーがメソゲン基の配向を阻害し，またカップリング剤の存在が界面抵抗の低下に繋がったと考えられる．

板状フィラーを用いた場合にも，“みかけの熱伝導率”は熱伝導率測定値よりも厚み方向で大きく，特に無処理のとき，2.6倍にもなった．一方，面方向では“みかけの熱伝導率”は熱伝導率測定値より小さくなった．これは，板状フィラーと液晶性樹脂の相互作用によって2軸延伸時の配向が液晶性高分子だけでなく板状フィラーについても阻害されたためと考えられる．しかしカップリング剤処理によって厚み方向および面方向での熱伝導率の向上の程度は小さくなった．これは，カップリング剤処理によって滑りやすくなり，配向阻害が小さくなったものと考えられる．

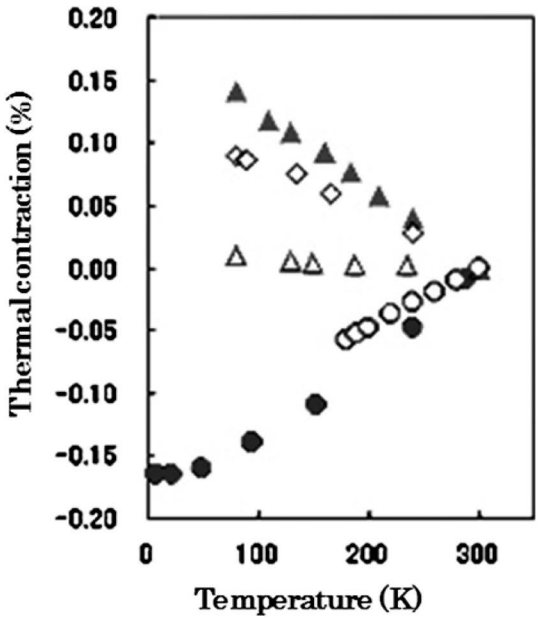


Fig. 20 Thermal contraction resin composite reinforced with several types of fibers (●: polyethylene, ▲: glass, ◇: Al_2O_3, △: carbon, ○: PBO).

このように，複合液晶性エポキシ樹脂の熱伝導率へ与える影響は複雑であることがわかった．しかし，フィラーによるメソゲン基の配向の阻害や板状のフィラーによる配向阻害促進による効果が期待され，それがうまく機能すれば熱伝導率は向上すると考えられる．

今後，液晶化だけでなく配向状態の確認や熱伝導率の異方性を測定して，種々の液晶性高分子やフィラーの複合材料について議論することで，より解明されていくことが期待される．

5. 液晶性高分子の熱膨張率

液晶性高分子は，これまでにない高分子特性として負の熱膨張特性をもつことが知られているが，この特性はフィブリル化したときの射出成形品などに限られている．しかし，液晶性高分子繊維のFRPでも負の熱膨張率をもつことがわかり（**Fig. 20**），低温化による隙間や高温による熱応力の発生を防止できることが期待される[4)]．

6. 応用分野と将来展望

急激に発展してきた高熱伝導性高分子材料への期待に，高熱伝導化の技術はある程度，応えてはいるが，相反機能解消などに対応できていないのが現状である．そのため，高熱伝導な液晶性高分子材料の発達が望まれている．また最近では，これまでの熱伝導だけでなく遮熱（熱反射，熱吸収），放熱（熱輻射），断熱や対流についても機能向上を行い，さらに液晶性高分子に特異な低熱膨張性の活用や耐熱化を行い，総合的に熱制御（サーマルマネージメント）（**Fig. 21**）を運用することがますます重要になっている．そのため，さらにこれらの分野でも液晶性高分子材料の活用が求められている．

そして今後も，未来の自動車や航空機，ロボット，医療

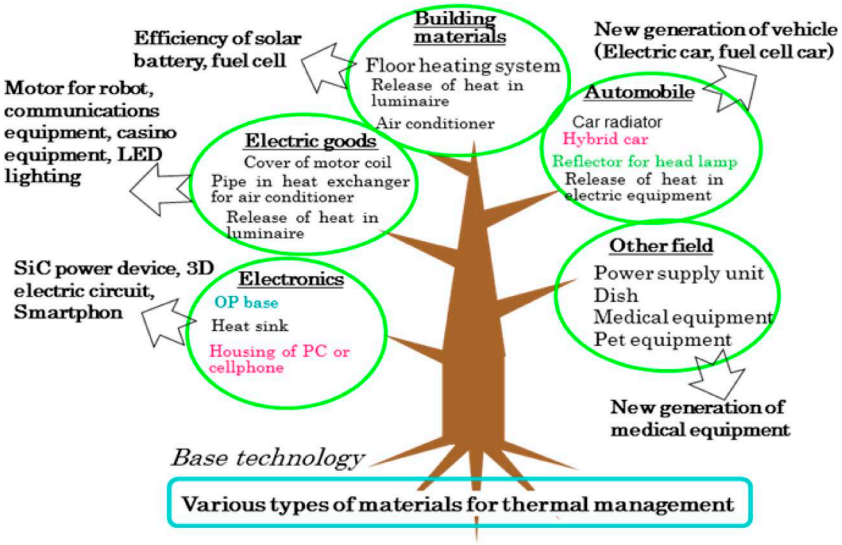


Fig. 21 Schematic concept of application of materials for thermal management.

機器などの部材としてさらに増大していくニーズに応えるため，ますます高分子材料の高放熱化などの熱的機能発現の技術が発展していくと期待される（**Fig. 21**）.

参 考 文 献

1) D. E. Kline and D. Hansen, *Thermal Characterization Technique* (Mercel Dekker, Inc., 1970).
2) 上利泰幸，高分子，**55**, 889 (2006).
3) 吉田優香，八木康洋，田中慎吾，竹澤由高，第60回高分子討論会予稿集 (2011).
4) 山中淳彦，鹿島俊弘，繊維と工業，**56**, 128 (2000).
5) 和田八三久，「高分子の固体物性」，p. 244 (1971), 培風館，東京.
6) W. Reese, J. Appl. Phys., **37**, 3227 (1966).
7) 和田八三久，応用物理，**35**, 908 (1966).
8) C. L. Choy, F. C. Chen and W. H. Luk, J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed., **18**, 1187 (1980).
9) 信時英治，鴇崎深夜，早川晃鏡，柿本正明，プラスチックエージ，**56**, 101 (2011).
10) J. A. Fisher and A. G. Fredrickson, Mol. Cryst. Liq. Cryst., **8**, 267 (1969).
11) C. K. Yun, J. J. C. Picot and A. G. Fredrickson, J. Appl. Phys., **42**, 4764 (1971).
12) W. Urabach, H. Hervet and F. Rondelez, Mol. Cryst. Liq. Cryst., **46**, 209 (1978).
13) 岡本敏，松見泰夫，斎藤慎太郎，宮越亮，近藤剛司，住友化学，**2011-I**, 18 (2011).
14) M. Harada, M. Ochi, M. Tobita, T. Kimura, T. Ishigaki, N. Shimoyama and H. Aoki, J. Polym. Sci. B Polym. Phys., **41**, 1739 (2003).
15) T. Kimura, J. Net. Polym. Jpn., **29**, 51 (2008).
16) K. Geibel, A. Hammerschmidt and F. Strohmer, Adv. Mater., **5**, 107 (1993).
17) T. Kato, M. Nagahara, Y. Agari and M. Ochi, J. Polym. Sci. B Polym. Phys., **43**, 3591 (2005).
18) S. Yoshihara, T. Ezaki, M. Nakamura, J. Watanabe and K. Matsumoto, Macromol. Chem. Phys., **213**, 2213 (2012).
19) 永井俊次郎，石井淳一，長谷川匡俊，第65回高分子学会年次大会予稿集 (2014).
20) M. Akatsuka and Y. Takezawa, J. Appl. Polym. Sci., **89**, 2464 (2003).
21) 赤塚正樹，竹澤由高，電気学会論文誌A，**123**, 687 (2003).
22) 吉田優香，田中慎吾，竹澤由高，第61回高分子討論会予稿集 (2012).
23) D. A. Bruggeman, Ann. Phys., **24**, 575 (1924).
24) A. Eucken, Forsch. Gebiete Ingenieur., B-3 (1932).
25) M. Harada, N. Hamamura, M. Ochi and Y. Agari, J. Compos. Part B., Eng., **55**, 306 (2013).
26) S. Yoshihara, M. Tokita, T. Ezaki, M. Nakamura, M. Sakaguchi, K. Matsumoto and J. Watanabe, J. Appl. Polym. Sci., **131**, 39896 (2014).
27) A. Okada, J. Kadota, H. Hirano, T. Fujiwara, J. Inagaki, Y. Yada and Y. Agari, 10th SPSJ Int. Polymer Conf., 2014, 5P-G5-107a.
28) 岡田哲周，門多丈治，平野寛，藤原武，稲垣順一，上利泰幸，第36回日本熱物性シンポジウム予稿集 (2015).
29) Y. Agari, A. Ueda and S. Nagai, J. Appl. Polym. Sci., **49**, 1625 (1993).