The Micromeritics No.62 (2019) 51-58
DOI: 10.24611/micromeritics.2019011

樹脂系複合材料における低次元粉体フィラーの添加効果

Additive Effect of Low-Dimensional Powder Filler in Development of Resinous Composite Materials

堀田　裕司
Yuji HOTTA
（国研）産業技術総合研究所 構造材料研究部門　研究グループ長
Group leader, Structural Materials Research Institute,
National Institute of Industrial Science and Technology (AIST), JAPAN

抄　録

CO_2 削減目標が掲げられているパリ協定，国連サミットで採択された SDGs（Sustainable Development Goals（持続可能な開発目標））など，人類の持続可能な社会を構築するべき目標が定められている。この様な社会的背景の中で，軽量性の観点から樹脂（プラスチック）系の複合材料が注目され，情報・家電・輸送機器・福祉医療機器・ロボットなどの各種産業分野において重要な材料となっている。一方で，樹脂の機能性や機械特性は低く，その物性向上に粉体フィラーの果たす役割は大きい。特に繊維状，板状のアスペクト比の大きな低次元フィラーは複合材料の開発において注目されている。本稿では，機械的な粉体処理によって，低次元フィラーを高アスペクト比化するための粉体処理プロセスについて述べるだけではなく，機能系（高熱伝導性複合材）と構造系複合材料（CFRP）の機能物性と成形性向上における低次元フィラー（六方晶窒化ホウ素；h-BN）の添加効果とその有用性について紹介する。

ABSTRACT

In the Paris Agreement and SDGs (Sustainable Development Goals), the goal to establish a sustainable society was adopted. From this background, resin-based composite materials with light weight property have an attention. In particular, the composite materials having light weight property are important for various industrial fields such as information, electricity, transportation, welfare medical, robots, sports and so on. On the other hand, resin materials (plastics) have low functionality and mechanical properties compared to ceramic and metal materials. In the development of composite materials, powder as a filler plays a large role in the improvement of material properties. Therefore, R & D on the improvement of functional and mechanical properties, and formability have been actively carried out. In this paper, the effect of low dimensional filler addition on improvement of functional properties and formability of composite materials will be introduced. In order to improve the functional properties and formability of composite materials, two-dimensional h-BN filler with high aspect ratio was prepared by mechanical powder processing. Addition of the developed h-BN filler led to improvement of the functionality and formability on the composite at low filler loading.

Copyright © 2018 The Author. Published by Hosokawa Micron Corporation. This is an open access article under the CC BY 2.1 JP license (http://creativecommons.org/licenses/by/2.1/jp/).

解説

1 はじめに

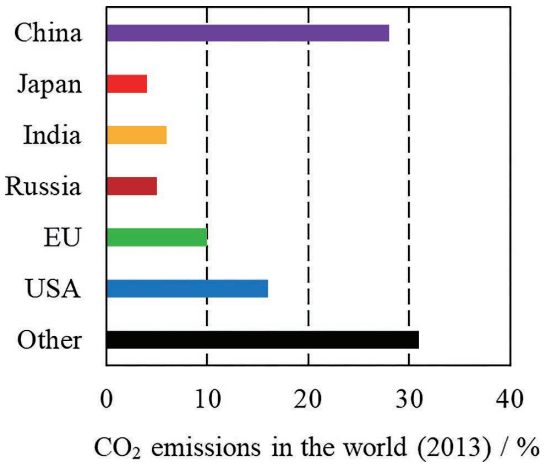
人類が持続可能な社会を構築することを目標として，国連サミットで2015年にSDGs（Sustainable Development Goals（持続可能な開発目標））が採択され，さらには2016年にパリ協定が発効された。2013年における世界のCO_2排出量（322億トン）のうち，日本は4%程度の排出量である。しかしながら，日本においては2030年までに2013年比で26%のCO_2削減が，パリ協定では目標[1]となっている（**図1**）。そのため，CO_2削減目標に向けた多様な材料開発とシステムつくりは不可欠となっている。その中で，軽量性の観点から樹脂（プラスチック）系の複合材料が注目され，情報・電気・輸送機器・福祉医療機器・ロボットなどの各種産業分野において重要な材料として期待されている。一方で，プラスチックの機能性や機械特性の物性はセラミックスや金属と比較して乏しく，物性向上のために粉体フィラーを樹脂と複合化した複合材料の開発は重要となっている。

フィラーには，アルミナ，ジルコニア，炭化ケイ素，シリカなどの三次元の球状形態，タルク，マイカ，グラフェン，六方晶窒化ホウ素（h-BN）などの二次元の板状形態，カーボンナノチューブ，セルロースナノファイバーや炭素繊維などの繊維状の一次元形態がある。特に低次元形態のフィラーは，その形態から材料の機能性や強度・弾性率などの機械特性，耐疲労特性の向上において魅力的な素材である。当グループでは，一次元形態のフィラーとしてナノセルロース[2]，カーボンナノチューブ[3]及び炭素繊維，二次元形態のフィラーとしてマイカ[4]やh-BN[5,6]を対象として，フィラーの高アスペクト化のための機械的な粉体処理プロセス開発および，そのフィラーを用いた複合材料の物性や成形性向上に関して研究開発を進めている。本稿では，例として一次元（炭素繊維），二次元（h-BN）の低次元形態のフィラーを用いた機能系と構造系複合材料のトピックについて述べ，複合材料の物性向上への低次元フィラーの魅力や粉体処理プロセスの役割について紹介させて頂く。

2 粉体プロセスを利用した二次元形態の高アスペクト比h-BNフィラーの開発

樹脂系材料の熱伝導率の向上のためには，高熱伝導性を有するアルミナや窒化アルミニウムなどの球状セラミックフィラーを大量に樹脂と複合化し，熱伝導パスを形成させることによって高熱伝導化を図る研究が多数報告されている[7–10]。しかしながら，樹脂と比較してセラミックスフィラーの比重は大きいため，樹脂中にフィラーを高充填すると材料の重量が増し，樹脂特性の軽量性が損なわれる。また，フィラー充填量の増大により材料自体が脆くなることから実用上の問題を生じることが指摘されている。そのため，低フィラー充填量での樹脂系複合材料の機能発現に関する研究開発は重要な課題である。

h-BNは，様々なセラミックスフィラーの中でも軽量，低硬度，絶縁性且つ高熱伝導性の特性を有す



	目　　標	
China	2005年比2030年までに	GDPあたり60～65%削減
Japan	2013年比2030年までに	26%削減
India	2005年比2030年までに	GDPあたり33～35%削減
Russia	1990年比2030年までに	70から75%に抑制
EU	1990年比2030年までに	40%削減
USA	2005年比2030年までに	26～28%削減

図1 2013年における世界の二酸化炭素（CO_2）排出割合と，パリ協定での各国のCO_2削減目標
Fig. 1 CO_2 emission ratio in the world (2013) and the targets of CO_2 reduction in each country in the Paris Agreement.

ることから樹脂系複合材料のフィラーとして注目されている。h-BN は，板状粒子が積層した二次元形態を有している。熱伝導率の向上においては，同じ充填量でも高アスペクト比ほどパーコレーション状態を引き起こすため，熱伝導パスを形成することによって低フィラー充填量で複合材料の熱伝導率向上が期待される[11]。そのため，板状フィラーである h-BN では，粉砕を抑制しながら積層構造から板状粒子を剥離させて高アスペクト比の h-BN フィラーを開発することが重要となる。h-BN の様な積層板状フィラーの剥離技術はいくつか報告されている。積層体の層間は van der Waals 力などの比較的弱い結合によって形成されているため，スコッチテープで剥離を繰り返すことで，単層に近い剥離シートを得ることが可能である[12]。しかしながら，工業的にフィラーを取り扱う上では，処理量や処理速度のスケールアップが必要であり，機械的な粉体処理プロセスの検討が必要となる。機械的な剥離プロセス技術の検討例としては，超音波法[13]，流体の渦を利用した Vortex fluid 法[14]が報告されているが，超音波法ではキャビテーションが液中に存在する粉体に様々な方向から付与される。そのため，h-BN フィラーの粉砕が引き起こされること，長時間の操作を必要とすることなどの問題があり，高アスペクト比の h-BN フィラーを得られていないのが現状である。効率よく且つ粉砕を抑制しながら板状粒子の剥離を行うためには，積層粉体の積層面に向かって強いせん断力を付与できる湿式ジェットミル[15]や回転ディスクミル[16]の様な流体のせん断力を活用した機械的な粉体処理プロセスが有用となる。これらせん断力を活用した h-BN の剥離モデルを**図 2** に示す。形状異方性の高い h-BN は，流体の流れに従って配向するため，h-BN の端面に向かってせん断力が加わり，h-BN の積層体から剥離粉体を得ることが期待できる。超音波処理，湿式ジェットミル処理，回転ディスクミル処理によって作製した h-BN 粉体および原料 h-BN における粒度分布および厚さ分布から算出した粒子径（D_{50}）と厚さ（T_{50}）を**表 1** に示す。超音波による処理では，原料の h-BN と比較して厚さは若干低下しているが，粒子径も小さくなっており粉砕が引き起こされていることが分かる。その結果，超音波処理ではアスペクト比（D_{50} / T_{50}）の

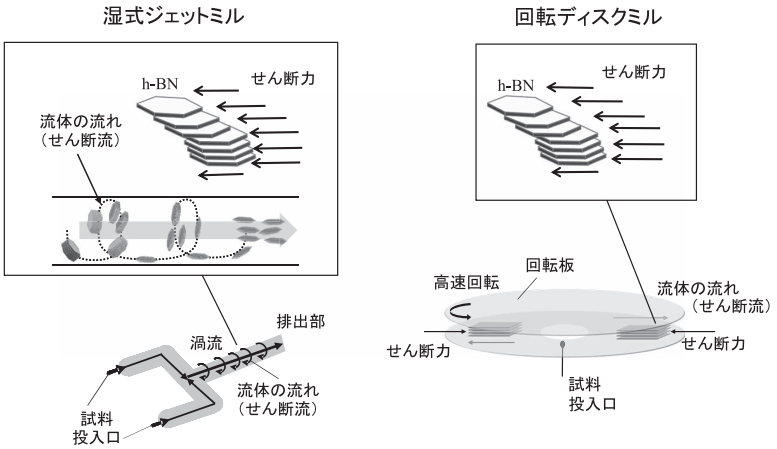


図 2 湿式ジェットミル，回転ディスクミルによる h-BN の剥離モデル
Fig. 2 Exfoliation model of h-BN powder by wet-jet milling and rotating disk milling equipment.

表 1 原料 h-BN 及び処理の異なる剥離 h-BN のメジアン径（D_{50}），メジアン厚さ（T_{50}），アスペクト比（D_{50}/T_{50}）
Table 1 Medium diameter (D_{50}), medium thickness (T_{50}), and aspect ratio (D_{50} / T_{50}) of raw h-BN and h-BN exfoliated by different milling methods.

	粒子径 (D_{50}, μm)	平均厚さ (T_{50}, μm)	アスペクト比 (D_{50}/T_{50})
原料 h-BN	13.8	0.162	85
超音波処理 h-BN	9.2	0.107	86
湿式ジェットミル処理 h-BN	13.2	0.048	275
回転ディスクミル処理 h-BN	13.5	0.090	150

向上は見られない。一方，湿式ジェットミルや回転ディスクミルの様なせん断場での処理では，原料のh-BNの粒子径はほとんど低下せず，厚さは低下していることが分かる。つまり，せん断流による粉体処理プロセスを利用することで，処理工程での粉砕を抑制しつつh-BNの剥離が進行することを意味する。このことから，せん断場を利用した機械的な粉体処理プロセスによって，高アスペクト比のh-BNフィラーを効率的に作製することが可能となる。

同じ粉体充填量で樹脂中にh-BNを複合化した場合，高アスペクト比のh-BNフィラーで作製した複合材料の熱伝導率は，効率的な熱伝導パスの形成によって向上することが予測できる。実際，剥離した高アスペクト比のh-BNをポリアミド6（PA6）に10～40 vol %の充填量でh-BNを複合化した複合材料の熱伝導率は，**図3**に示す様に1.5～2倍の熱伝導率向上が見られ，高アスペクト比すなわち二次元形態の高度化が複合材料の機能物性の向上に寄与することが分かる。具体的には，剥離h-BNフィラーを用いた複合材料の熱伝導率は，フィラー充填量10 vol %で1 W/m·Kのものが2倍の2 W/m·K，40 vol %の充填量で4 W/m·Kのものが7 W/m·K以上まで向上する。せん断場での粉体処理プロセスによる高アスペクト比のh-BNフィラー開発は，低フィラー充填量での複合材料の熱伝導性向上に大きく寄与する。また，原料h-BNの複合材料（充填量：20 vol %）の熱伝導率は2 W/m·Kを示すが，高アスペクト比の剥離h-BNフィラーを用いることで，1/2量の10 vol %充填量で同等の熱伝導率の値を示す。このことは，より軽量な高機能複合材料を形成させることが可能であることを意味する。さらに，図の中に示しているSEM像は，原料h-BNフィラーおよび剥離h-BNフィラーで作製した複合材料（充填量：20 vol %）の破断面である。明らかに破断面の様子が異なり，原料h-BNフィラーを用いた複合材料の場合，フィラーはほとんど観察されないが，剥離h-BNフィラーを用いた複合材料の場合ではh-BNフィラーの様子が観察される。すなわち，剥離に伴うフィラー数が多くなり，パーコレーションによる熱伝導パスが形成されることが示唆される。この様に，粉体の剥離プロセスは，樹脂系の複合材料において高比重のセラミックスフィラーの使用量の低減化を導き，軽量特性を有した高機能性の樹脂系複合材料開発に寄与する。

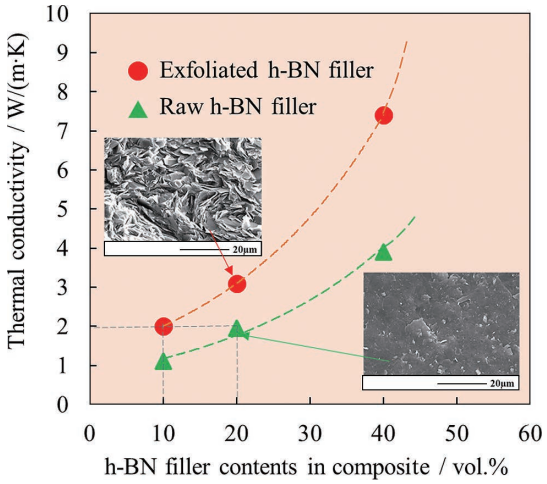


図3 原料h-BNフィラー，剥離h-BNフィラーを用いた複合材料の熱伝導率

Fig. 3 Thermal conductivity of h-BN / PA6 composite as a function of h-BN filler contents.

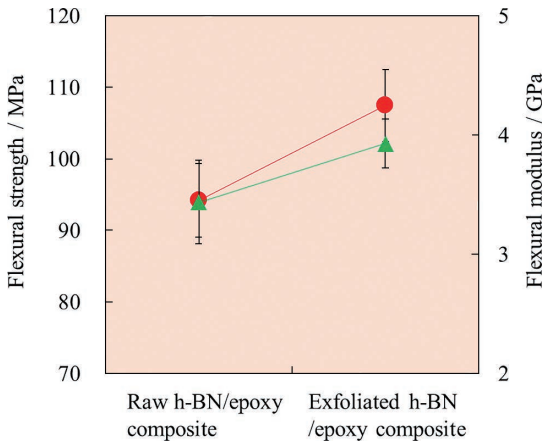


図4 原料h-BNフィラー，剥離h-BNフィラーを用いた複合材料（充填量:2.5 vol %）の曲げ強度（●）と曲げ弾性率（▲）

Fig. 4 Flexural strength (circle mark) and flexural modulus (triangle mark) of raw h-BN / epoxy and exfoliated h-BN / epoxy (filler loading : 2.5 vol %).

また，材料を実用的に用いる場合，振動場や応力場が材料にかかることになるため，機能物性だけでなく強度などの機械特性や疲労特性の把握が必要となる。剥離h-BNとエポキシを複合化した複合材料の曲げ強度と曲げ弾性率を**図4**に示す。曲げ強度，曲げ弾性率の機械特性は剥離h-BNを用いることで，原料h-BNの複合材料と比較して14%向上している。つまり，剥離によって高アスペクト比化したh-BNフィラーは複合材料の機械特性向上に寄与

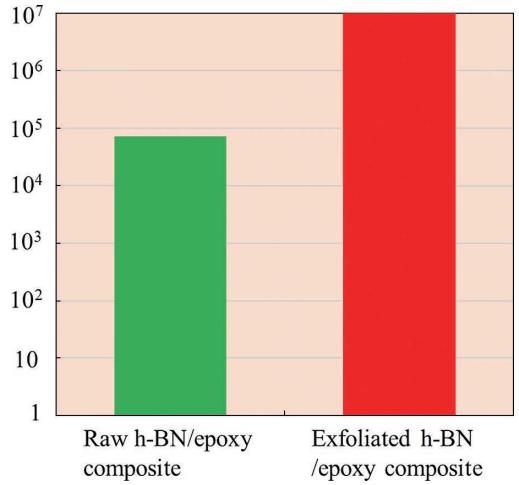


図 5 原料 h-BN フィラー，剥離 h-BN フィラーを用いた複合材料（充填量：2.5 vol %）の疲労特性。周波数 5 Hz，応力 36 MPa で試験実施

Fig. 5 Fatigue measurement of raw h-BN / epoxy and exfoliated h-BN / epoxy (filler loading : 2.5 vol %, measurement frequency: 5 Hz, stress: 36 MPa).

することが見出される。原料 h-BN フィラーよりも剥離 h-BN フィラーはアスペクト比が大きく且つ粒子数が多いため，複合材料における破壊進展の分散が引き起こされ，機械物性の向上に寄与したと考えられる。さらに，複合材料の曲げ疲労特性を評価した結果を**図 5** に示す。周波数 5 Hz で 36 MPa の一定応力を付与し続けた場合の破断までの繰り返し数が，原料 h-BN フィラーを充填した場合，10^5 回であったのに対し，剥離 h-BN フィラーを充填した複合材料では 10^7 回でも破断しなかった。高アスペクト比の剥離 h-BN によって機械・疲労特性が向上，すなわち材料としての信頼性が向上することを示唆している。この様に，機械的な粉体処理プロセスを活用することによって高アスペクト比の高機能性低次元フィラーの開発が可能であり，樹脂系複合材料の軽量且つ低フィラー充填での機能性発現効果を導く。さらには機械特性および疲労特性向上に伴う信頼性の付与が実現可能である。

3 一次元形態の繊維フィラーを用いた構造系複合材料への粉体のアドバンテージ

炭素繊維などの一次元形態の「軽くて強い」特徴を有する繊維は樹脂を複合化することによって，軽量構造材料として自動車や航空機，産業機器，スポーツなどの様々な分野で期待あるいは利用されている。特に，熱可塑性樹脂をマトリックスとして用いた炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は，加熱による溶融特性が優れることから，成形時間の短縮などの生産性に係るコスト低減が期待され，新しい高速成形技術の研究開発が活発に行われている。しかしながら，熱可塑性樹脂の熱伝導率は約 0.1～0.3 W/m·K 程度であり，10 W/m·K の熱伝導率を持つ炭素繊維と比較して極めて低い。この物性の違いによって，CFRP の高速成形プロセスの一つとして期待されているマイクロ波などの電磁波加熱成形[17]では，炭素繊維が加熱されると樹脂へ熱は伝わりにくいために，複合材料中で熱が籠ることになる。その結果，繊維近傍の樹脂が過度に熱せられ，熱劣化が引き起こされる問題が生じる。そのため，CFRP の熱劣化抑制を考慮したマトリックスの開発は研究開発課題の一つである。本項では，電磁波（マイクロ波）での CFRP 成形を実現するため，マトリックスの熱伝導率を h-BN を添加することによって制御し，その熱伝導率が CFRP の熱劣化や成形などに与える効果について紹介する[18–20]。

図 6 は，熱伝導率の低いポリアミド 6（PA6）と不連続炭素繊維からなる CFRP，PA6 と h-BN からなる高熱伝導性マトリックスから作製した CFRP に，マイクロ波をそれぞれ 15 秒，60 秒間照射した後の破断面の様子である。h-BN および樹脂は炭素繊維と比較して誘電率が低いためマイクロ波の吸収が弱く加熱されないが，炭素繊維は誘電率が高いためにマイクロ波を選択的に吸収し急速に加熱され

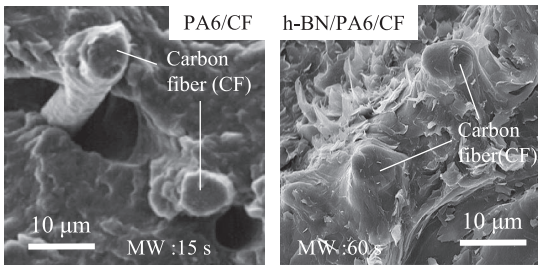


図 6 一般的な PA6 マトリックス，高熱伝導化した h-BN/PA6 マトリックスの CFRP にマイクロ波（MW）を照射した後の破断面の様子。マイクロ波照射時間は，それぞれ 15 秒と 60 秒

Fig. 6 Fractural surface of microwave (MW)-irradiated CFRP composites with convectional matrix (PA6) and high-thermal conductive matrix (h-BN/PA6). MW irradiation time: 15 s and 60 s.

る。高熱伝導化していないマトリックスで構成されたCFRPにおいては，マイクロ波照射によって炭素繊維近傍の樹脂が分解し，空孔が観察される。一方で，マトリックスに高熱伝導性フィラーのh-BNを複合化した高熱伝導性マトリックスで構成したCFRPは60秒間マイクロ波を照射したにもかかわらず，マトリックスに熱分解の様子は見られない。この様に，熱伝導性の粉体フィラーを利用してマトリックスを高熱伝導化することによって，複合材料の繊維と樹脂の界面の熱劣化を抑制する効果が引き起こされる。

CFRPを高速に成形するためには，マトリックスの樹脂へ熱を高速に伝播させる必要がある。ポリプロピレン（PP）ペレット，原料および剥離したh-BNをPPに複合化したh-BN/PPペレット（h-BN含有量：2.5 vol %）を，それぞれ加熱プレスしてフィルム化し，**図7**に示す様なフィルムに1本の炭素繊維を挟み込んだ炭素繊維/PPおよび炭素繊維/h-BN/PPの試料を作製した。PPおよび原料h-BN/PP，剥離h-BN/PPフィルムの熱伝導率はそれぞれ0.12 W/m・K，0.26 W/m・K，0.44 W/m・Kであり，原料h-BNおよび前項で紹介した剥離h-BNを複合化することで高熱伝導化したマトリックスを準備できる。作製した試料に対して0.1Wの出力でマイクロ波照射を行い，赤外線サーモグラフィカメラを用いて試料の熱伝播を観察した熱画像が**図8**である。炭素繊維の軸方向に対する直交方向において，h-BN/PP/炭素繊維がPP/炭素繊維と比較して熱分布の幅が広くなり，熱伝播が引き起こされていることが分かる。また，剥離h–BNをマトリックス樹脂に含有した場合，原料h–BNを複合化したマトリックス樹脂と比較して熱伝播挙動が大きくなっており，h–BNの剥離化の効果が観察される。このことから，粉体処理プロセスによって作製した剥離h-BNのマトリックスへの添加は，CFRPの成形における熱伝播に有効に働くと考えられる。また，マイクロ波を10秒間照射した際の繊維からの距離と温度分布の関係を**図9**に示す。グラフ横軸の0 mmは炭素繊維の位置を示している。炭素繊維から1 mm離れた位置の温度変化に注目すると，PP/炭素繊維では室温から60°Cに，原料h-BN/PP/炭素繊維では室温から70°C，剥離h-BN/PP/炭素繊維では室温から100°Cと温度が上昇している。この現象は，マトリックスを粉体フィラーで僅かに高熱伝導化することで，前述した様にマトリックスの熱劣化を抑制するだけでなく，高速に熱伝播と試料温度の均質化が図れることを示している。実際，マトリックスをh-BN粉体

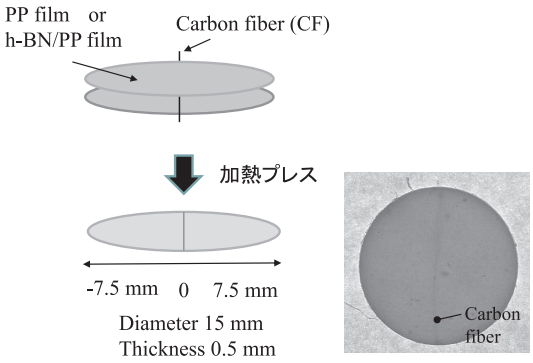


図7 マトリックスの熱伝播を観察するための試料

Fig. 7 Sample preparation for observing heat propagation to matrix from heated carbon fiber.

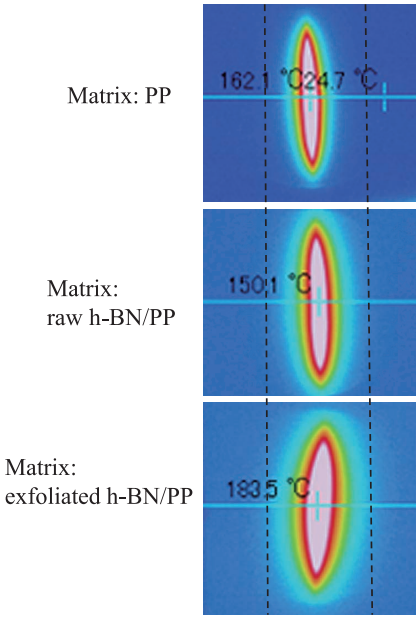


図8 **図7**で作製した試料にマイクロ波照射（出力：0.1W）したときの熱伝播の様子。上写真：PPマトリックス，中写真：原料h-BN/PPマトリックス，下写真：剥離h-BN/PPマトリックス。h-BNの充填量：2.5 vol %。点線は剥離h-BN/PPマトリックスを使用した試料の熱伝播の幅を表す

Fig. 8 State of heat propagation when irradiating microwave at 0.1 W power on specimen prepared in Fig 7. Top photograph : PP matrix, middle: raw h-BN/PP matrix, and bottom photograph: exfoliated h-BN/PP matrix. h-BN solid loading: 2.5 vol %. The width between dotted lines represents the heat propagation of sample using exfoliated h-BN/PP matrix.

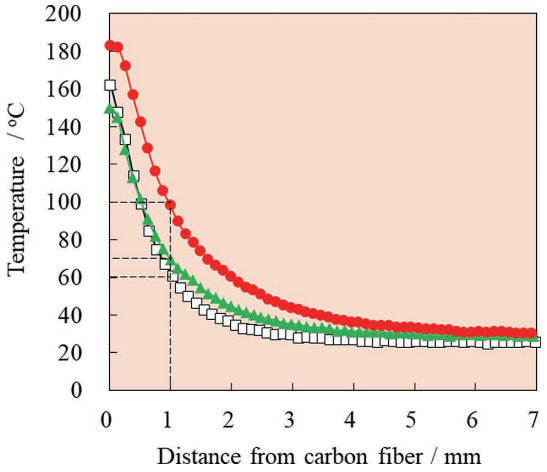


図 9 マイクロ波を 10 秒照射した時の，図 7 で準備した試料の炭素繊維からの距離と温度の関係。□：PP マトリックス，▲：原料 h-BN/PP マトリックス，●：剥離 h-BN/PP マトリックス。h-BN の充填量：2.5 vol %

Fig. 9 Relationship between the distance from carbon fiber and temperature on specimen prepared in Fig 7 when irradiating microwave for 10 sec. Square mark: PP matrix, triangle mark: raw h-BN/PP matrix, and circle mark: exfoliated h-BN/PP matrix. h-BN solid loading: 2.5 vol %.

で高熱伝導化した CFRP に関してのマイクロ波を用いた成形の様子を示す（**図 10 (a)**）。この時，マイクロ波照射よって 25 秒で成形が可能であった。一般的に 1 分以内での成形が目標の CFRP 分野においては，高機能な粉体フィラーを用いることで，高速に CFRP の成形を実現できることを示唆している。一方，h-BN フィラーを添加していないマトリックス樹脂を用いた CFRP においては 9 分間マイクロ波照射したとしても**図 10 (b)** に示す様に成形は出来ず，さらに熱劣化が観察された。この様に粉体処理プロセスによって開発した低次元フィラーは，低次元の繊維フィラーで構成された構造系複合材料の成形性を改善することができる。

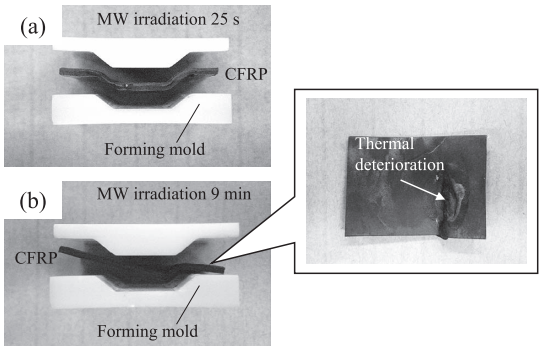


図 10 マイクロ波（MW）照射による CFRP の成形。(a) h-BN で高熱伝導化したマトリックスで構成した CFRP，(b) 一般的な樹脂マトリックスで構成した CFRP。MW 照射時間：(a) 25 s; (b) 9 min.

Fig. 10 Molding of CFRP by microwave irradiation. (a) CFRP composed of h-BN / resin matrix with high thermal conductivity and (b) CFRP composed of conventional resin matrix. MW irradiation time: (a) 25 s and (b) 9 min.

4 おわりに

樹脂系の機能性および構造系複合材料は，その軽量性から地球環境保全すなわち持続的社会構築のための材料として期待される。一方で，樹脂（プラスチック）の物性は低いため，セラミックスなどの粉体フィラーを複合化した複合材料の開発が重要となっている。そのため，物性を向上させるためには粉体フィラーの役割は大きい。本稿では，機能系と構造系複合材料の物性向上と成形性向上において，低次元の h-BN フィラー，並びに機械的な粉体処理プロセスが果たす役割について紹介させて頂いた。粉体を如何に処理するかで，複合材料の物性や成形性に影響を与えるため，複合材料の研究開発の展開には粉体工学的な発想は必要不可欠である。一方で，素材（粉体，繊維，樹脂）－材料化（複合化）－部材化（成形）に至る複合材料の研究開発の流れの中で，機械，材料，粉体，化学等の様々な研究分野の研究者と技術者が横断的に携わることで，複合材料の開発展開が益々活発化することを期待する。

References

[1] 平成 27 年度エネルギーに関する年次白書（エネルギー白書 2016），第 3 章 パリ協定を踏まえたエネルギー政策の変革，経済産業省資源エネルギー庁，(2017) 109–113.

[2] Sato K., Tominaga Y., Hotta Y., Shibuya H., Sugie M., Saruyama T., Cellulose nanofiber/nanodiamond composite films: Thermal conductivity enhancement achieved by a tuned nanostructure, Adv. Powder Tech.,

29 (2018) 972–976.
[3] Yan X., Imai Y., Shimamoto D., Hotta Y., Influence of kneading time on network formation and electrical properties of wet jet milling treated and untreated SWCNT reinforced polyamide 6 nanocomposites by impedance spectroscopy, Polymer, 80 (2015) 18–26.
[4] Tominaga Y., Fukushima K., Takezawa Y., Shimamoto D., Imai Y., Hotta Y., Exfoliation of non-swelling muscovite on dodecylammonium chloride intercalation between layers using wet-jet milling, Adv. Powder Technol. 28 (2017) 1911–1919.
[5] Tominaga Y., Sato K., Shimamoto D., Imai Y., Hotta Y., Wet-jet milling-assisted exfoliation of h-BN particles with lamination structure, Ceram. Inter., 41 (2015) 10512–10519.
[6] Tominaga Y., Sato K., Yan X., Shimamoto D., Imai Y., Hotta Y., Exfoliation of hexagonal boron nitride using wet-rotating disc milling, J. Ceram. Soc. Jpn., 123 (2015) 512–515.
[7] Xu Y., Chung D.D.L., Mroz C., Thermally conducting aluminium nitride polymer-matrix composites, Composites Part A, 32 (2001) 1749–1757 .
[8] Ishida H., Rimdusit S., Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine, Thermochimica Acta, 320 (1998) 177–186.
[9] Sato K., Horibe H., Shirai T., Hotta Y., Nakano H., Nagai H., Mitsuishi K., Watari K., Thermally conductive composite films of hexagonal boron nitride and polyimide with affinity-enhanced interfaces, J. Mater. Chem., 20 (2010) 2749–2752.
[10] Shimamura A., Hotta Y., Hyuga H., Kondo N., Hirao K., Effect of amounts and types of silicon nitride on thermal conductivity of Si_3N_4/epoxy resin composite, J. Ceram. Soc. Jpn., 123 (2015) 908–912.
[11] Nielsen L.E., The thermal and electrical conductivity of two phase system, Ind. Eng. Chem. Fundam., 13 (1974) 17–20.
[12] Pacile D., Meyer J., Girit C.O., Zettl A., The two-dimensional phase of boron nitride: Few-atomic-layer sheets and suspended membranes, Appl. Phys. Lett., 92 (2008) 133107.
[13] Hernandez Y., Nicolosi V., Lotya M., Blighe F.M., Sun Z., De S., McGovern I., Holland B., Byrne M., Gun'Ko Y.K., High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite, Nat. Nanotechnol., 3 (2008) 563–568.
[14] Chen X., Dobson J.F., Raston C.L., Vortex fluidic exfoliation of graphite and boron nitride, Chem. Commun., 48 (2012) 3703–3705.
[15] Hotta Y., Shirai T., Sato K., Yilmaz H., Watari K., Hydrodynamic interaction of particles in Al_2O_3 slurries prepared by different milling methods, J. Am. Ceram. Soc., 92 (2009) 1198–1202.
[16] Tominaga Y., Hotta Y., Effect of process conditions on wet-rotating disc milling for exfoliation of hexagonal boron nitride, J. Soc. Powder Tech. Japan, 54 (2017) 437–441.
[17] Shimamoto D., Imai Y., Hotta Y., Kinetic study of resin-curing on carbon fiber/epoxy resin composites by microwave irradiation, Open J. Compo. Mater., 4 (2014) 85–96.
[18] Shimamoto D., Imai Y., Hotta Y., Suppression of thermal degradation for interface between carbon fiber and resin matrix in carbon fiber reinforced thermoplastic using hexagonal boron nitride, J. Ceram. Soc. Jpn, 122 (2014) 732–735.
[19] Shimamoto D., Tominaga Y., Imai Y. Hotta Y., Improvement of thermal propagation in carbon fiber/thermoplastic composite with hexagonal boron nitride powder, J. Ceram. Soc. Jpn., 123 (2015) 1055–1058.
[20] Tominaga Y. Shimamoto D., Hotta Y., Improvement of thermal and mechanical properties of carbon fiber reinforced plastic composite with exfoliated hexagonal boron nitride particles, J. Ceram. Soc. Jpn., 124 (2016) 808–812.

解説

〈著者紹介〉

堀田 裕司 Yuji HOTTA

〔経歴〕1997 年北海道大学大学院理学研究科博士課程修了。同年，工業技術院名古屋工業技術研究所（現産総研）に入所。現在，（国研）産業技術総合研究所 構造材料研究部門にて研究グループ長。
〔専門〕複合材料，セラミックス，分散。
最近は，機能系複合材料のフィラー調製技術，CFRP の新規成形技術，炭素繊維・CFRP の資源循環技術，等の研究に従事。
〔連絡先〕y-hotta@aist.go.jp