



炭素系フィラーを用いたプリンタ用 高熱伝導定着ローラ

High Thermo-Conductive Fuser Roller with Carbon Filler for Printers

中島 晋吾*
Shingo Nakajima

翠 弘志朗
Koshiro Midori

窪 大樹
Daiju Kubo

内場 勇介
Yusuke Uchiba

山内 雅晃
Masaaki Yamauchi

木澤 一浩
Kazuhiro Kizawa

当社は、レーザービームプリンター（LBP）の重要部品であるポリイミド定着ローラを1993年から製造している。近年では、高速印刷に適用可能な高熱伝導定着ローラを開発しており、強靱なポリイミド樹脂と熱伝導性の高いカーボンナノファイバーとを複合化した複合材料を使用している。カーボンナノファイバーは熱伝導性に優れた材料である一方で、ナノ材料にカテゴライズされており、規制等のリスクが高まっている。今回は、このカーボンナノファイバーを代替できる材料として、同じく炭素系のフィラーである黒鉛フィラーについて適用検討を行い、新しい高熱伝導定着ローラを開発したので、その詳細について報告する。

Since 1993, Sumitomo Electric Industries, Ltd. has been manufacturing polyimide fuser rollers, important parts for laser beam printers (LBPs). In recent years, we have developed a high thermal conductive fuser roller applicable to high-speed printing systems. It uses a composite material that combines carbon nanofiber with high thermal conductivity and tough polyimide resin. Carbon nanofiber is a material with excellent thermal conductivity, but there is a high risk of residuals when taken into the body and it is subject to regulation. We have developed a new fuser roller using graphite filler, a carbon-based filler that can substitute for carbon nanofiber.

キーワード：レーザービームプリンタ、ポリイミド、熱伝導率、黒鉛、定着ローラ

1. 緒言

現在、省エネルギーによる環境負荷の低減は、多くの電子機器において共通の課題であり、OA機器に関しても、その例外ではない。電子写真方式を採用したレーザービームプリンター（以下LBP）では、消費電力の70%近くがトナーを紙に熱圧着させる定着器に使用されている。そのため、定着器の消費電力の大半を占めるスタンバイ状態での消費電力を低減することが省エネルギーの観点から重要な課題であった。

一般のローラ定着器（図1 (a)）では、ローラ内部に設置されたハロゲンヒーターの輻射熱により1~3mm厚の金属製ローラを150℃から180℃に加熱している。この加熱された金属ローラと加圧ローラの上にトナーの付着した記録紙が通過することにより、トナーが記録紙に熱定着される。

この為、ローラ定着器でプリントを開始してから完了するまでの時間を短くするには、常時ローラを加熱しておく必要があり（スタンバイ状態）、どうしても消費電力量が大きくなってしまふ（図2、クイックモード）。

一方、この予熱をやめることにより消費電力量を低減することができるが、逆にプリントを開始してから完了するまでの時間は大幅に長くなってしまふ（図2、省エネモード）。

この二律背反の関係にある省エネルギーと印刷開始速度の両立を達成しているのが、オンデマンド型定着器である。

オンデマンド型定着器は、セラミックヒーターにより発生した熱を熱容量の小さい数十μm厚のポリイミド定着ローラ

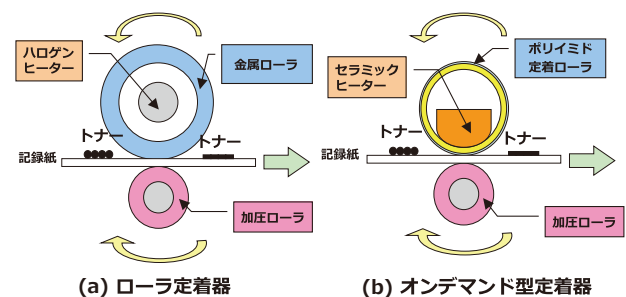


図1 ローラ定着器とオンデマンド定着器の構造比較

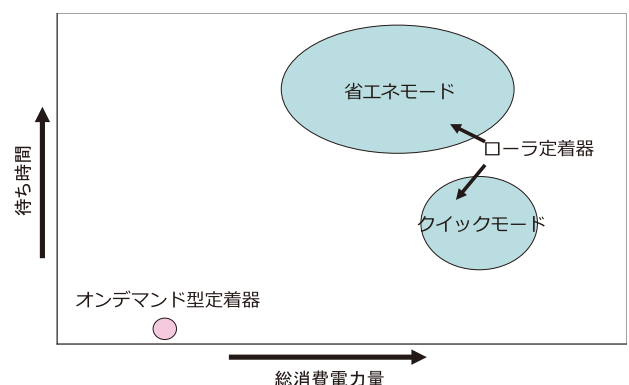


図2 LBPの総消費電力量と待ち時間の関係

ラを介して直接トナーに伝えることができるため、消費電力を従来のローラ定着器より大幅に抑えたまま、印刷開始速度を速くすることが可能である（図1 (b)、図2）⁽¹⁾。

当社では、このポリイミド樹脂^{*1}のローラ表面にトナーの付着を防ぐためのフッ素樹脂^{*2}をコーティングしたポリイミド定着ローラ（以下定着ローラ）を生産しているが、近年の高速印刷化に対応する為には、定着ローラの強度（主としてMIT試験^{*3}にて測定）をできるだけ維持したまま、熱伝導率を向上させることが必須である。本報告では、ポリイミド樹脂と炭素系フィラー（黒鉛、カーボンナノファイバー^{*4}）の複合材料を用いた定着ローラの特長について、以下、詳細を述べる。

2. 開発の背景

定着ローラは、セラミックヒーターにより加圧変形しながら回転するため、この応力への耐久力が必要となる。また、定着時には、常にセラミックヒーターによる加熱を受けるため、200℃以上の長期耐熱性が必要とされる。このため、定着ローラのベース樹脂の材料には、耐久性、耐熱性に優れたポリイミド樹脂を使用している。

当社が製造している定着ローラの構成を表1に示す。この定着ローラは、'17年に印刷速度45枚/分に対応するために開発した高熱伝導定着ローラである。

表1 従来機用定着ローラの構成

名称	機能	厚み (μm)	材質
トップ層	定着チューブへのトナー付着抑制	12	フッ素樹脂+カーボン
プライマ層	トップ層/ベース層の接着 静電気のアースへの誘導	4	フッ素樹脂+接着成分+カーボン
ベース層	強度保持トナーへの熱伝達	60	ポリイミド+CNF

LBPの印刷速度をより高速化するためには、セラミックヒーターより発生した熱を、より速くトナーに伝えれば良い。このためには、定着ローラの熱伝導率を向上する必要がある。そこで、当社では'06年より定着ローラの熱伝導率を向上するためにカーボンナノファイバー（以下、CNF）を使用している⁽²⁾。

CNFは単体での熱伝導率が1,200W/mKと非常に高く、また、耐久強度的にも優れる材料であるが、原料価格が非常に高いというデメリットがある。また、CNFは'09年に厚生労働省労働基準局長通達として発表されたナノ材料の定義に含まれる。現状、CNFは使用規制の対象となっていないが、ナノ材料は、そのサイズの小ささから体内のあらゆる所へ移動する、その比表面積の大きさから反応性が高い、体内残留性が高い、高アスペクト比をもつナノ材料はアスベストと同等のリスクを持つ可能性がある⁽³⁾、と

いった懸念があるため、このCNFを代替し得る材料を用いた高熱伝導定着ローラの開発に着手した。

3. 黒鉛系フィラーの適用検討

3-1 熱伝導性フィラーの選定

CNFフィラーの代替を考えた場合に問題となるのは、ローラの高熱伝導率化である。先述したようにCNFの単体での熱伝導率は1,200W/mKと他の熱伝導性フィラーの値を大きく超えている（表2）。

表2 熱伝導性フィラーの熱伝導率

フィラー種	熱伝導率(W/mK)
シリカ	1~10
アルミナ	20~40
AlN	70~270
黒鉛	100~200
BN	60~300
CNF	1,200

ポリイミド樹脂にCNFを配合した場合の膜厚方向の熱伝導率を示す（図3）。樹脂と熱伝導性フィラーとの複合材料の熱伝導率は、樹脂の熱伝導率と熱伝導性フィラー単体の熱伝導率、そして、熱伝導性フィラーの充填率で決定されるが、熱伝導性フィラーがマトリクスとなる樹脂の中で3次元的なネットワークを構成し、熱の通り道（熱伝導パス）を形成することによってもその熱伝導率は変わってくる。

CNFフィラーは単体で非常に熱伝導率の高いフィラーだが、CNFよりもより少ない配合量で膜厚方向の熱伝導パスを形成できる熱伝導性フィラーを選定すれば、熱伝導性フィラー単体の熱伝導率で劣る材料を用いたとしても、複合材料として同等の熱伝導率を得ることができると考えた。

そこで、繊維状で面方向に配向しやすいCNFフィラー（100nmφ×5μm）よりも、膜厚方向への熱伝導パス形成

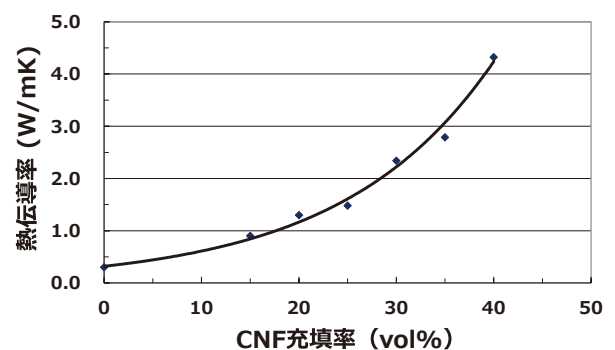


図3 CNF 充填率と膜厚方向の熱伝導率

が期待でき、かつ単体での熱伝導率にも優れる、10μm前後の黒鉛系フィラーを選定し、その形状による熱伝導パスの形成について検討を行った。

3-2 黒鉛系フィラーの種類

選定した黒鉛フィラーの種類について以下に説明する。

(1) 鱗片状黒鉛

天然黒鉛の中でも最も代表的な黒鉛フィラー。形状は鱗片状（うろこ状、葉片状）で、比較的、黒鉛化度が高い（純度85~99.9%）（写真1 (a)）。

(2) 人造黒鉛

天然黒鉛に対して人工的に製造された黒鉛。コークスを主原料とし、これにピッチ、タールを加え加熱、混練、成形し焼成したうえで、3000℃程度の高温にて黒鉛化し製造される。主に黒鉛電極として使用されるため、これを粉砕し粉末化したものも人造黒鉛と呼ばれる。熱処理されているため通常の鱗片状黒鉛より黒鉛化度が高い（純度99.9%）。形状は鱗片状（写真1 (b)）。

(3) 球状黒鉛

鱗片状黒鉛を機械化処理にて球状に加工した黒鉛。球状黒鉛は通常の鱗片状黒鉛から製造され、鱗片状黒鉛に比べ、かさ密度値が高く、比表面積が小さい。また球状のため鱗片状黒鉛と違い、フィルムの面方向に配向せず、膜厚方向への熱伝導パスの形成へ寄与すると考えた（写真1 (c)）。

(4) 薄片化黒鉛

黒鉛に硫酸等の酸で処理した膨張黒鉛を加熱膨張させ、シート状（グラファイトシート）にした後、粉砕したもの。

黒鉛を剥離することで、元の黒鉛よりもグラフェン積層数が少ない、グラフェンライクな黒鉛となるため電気特性、熱特性に優れる。一方、表面が酸性化しており樹脂の機械特性を低下させる場合がある（写真1 (d)）。

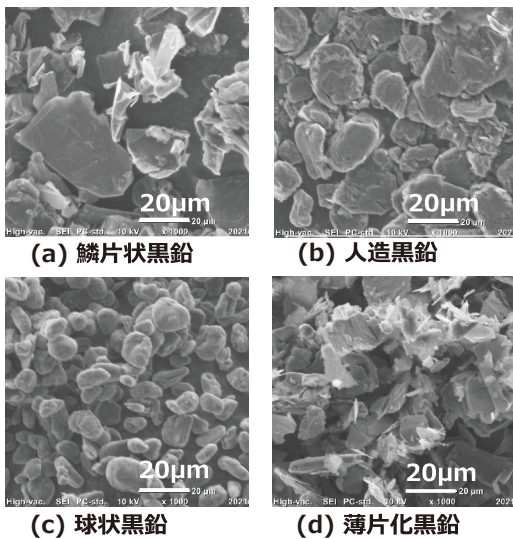


写真1 黒鉛フィラーの形状

3-3 熱伝導率測定方法

まず、前述の黒鉛フィラーの中から本用途に最適なフィラーを選定することとした。

(1) フィラーの分散方法

熱伝導性フィラーの分散性は、複合材料の物性を大きく左右する。黒鉛系フィラーの分散性を向上する方法としては、酸化処理、プラズマ処理、表面ポリマー被覆といった表面化学処理や、界面活性剤等の分散性向上剤の添加、超音波による分散やロールミルの使用といった物理的な混合、分散強化が知られている（表3）⁽⁴⁾。しかし、酸化処理やプラズマ処理は、バッチ処理となるため、大量のフィラーを扱う工業用途には適用が難しく、表面ポリマー被覆や、分散性向上剤の添加では、残留した成分が、300℃を超えるポリイミド焼成温度で分解してしまうため、分散性向上による強度向上の効果が得られないばかりか、逆に、ポリイミドの強度低下を引き起こしてしまう。また、ポリイミドの前駆体であるポリアミック酸溶液（以下ポリイミドワニス）は高粘度であるため超音波による分散性向上には向かない。そこで、黒鉛系フィラーの分散性を向上させるには、物理的剪断力による分散方法が最適と考え、3本ロールミル^{*5}による分散方法を採用することとした。

表3 フィラーの分散方法

手法分類	具体例
表面処理	表面化学処理／修飾 酸化処理、プラズマ処理、オゾン/UV処理
	表面ポリマー被覆 ポリビニルアルコール、ポリビニルピロリドン
分散向上剤添加	溶剤添加 アセトン、トルエン、メタノール、エタノール
	界面活性剤添加 非イオン界面活性剤、陽イオン界面活性剤、陰イオン界面活性剤
分散・混合強化技術	超音波混合・分散 超音波照射による分散機
	高シエア混合・分散 ロールミル、高速ミキサー

(2) 熱伝導率測定方法

熱伝導率の測定は、周期的加熱法による熱拡散率測定装置を用いた。この装置により熱拡散率αを測定し、下式(1)より定着ローラの厚み方向の熱伝導率λを算出した。ここで、ρは密度、Cpは比熱である。

$$\lambda = \rho \cdot C_p \cdot \alpha \dots\dots\dots (1)$$

(3) 熱伝導率測定結果

今回、定着ローラの熱伝導率の目標値は1.0W/mKで、本仕様を満たすために先述のCNFを16vol%充填している。フィラー単体での熱伝導率の差を考慮し、3本ロールミルを用いてポリイミドワニスに各種黒鉛フィラーを20vol%分散充填した。これら黒鉛充填ポリイミドワニスを塗布焼成し定着ローラとし、熱伝導率を評価した結果を示す（図4）。

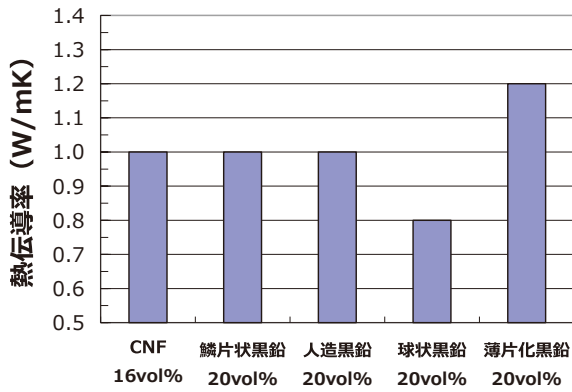


図4 黒鉛フィラー使用定着ローラの熱伝導率

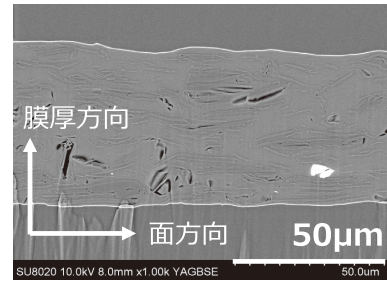
鱗片状黒鉛は、20vol% 充填で熱伝導率1.0W/mKと目標値をクリアした。人造黒鉛に関しても1.0W/mKと熱伝導率の目標値をクリアしたが、通常の鱗片状黒鉛と同等の熱伝導率であったことから、熱伝導率に対する黒鉛化度の影響は大きくないと推測された。

次に、膜厚方向の熱伝導率向上を狙った球状黒鉛だが、熱伝導率は0.8W/mKと鱗片状黒鉛と比較しても熱伝導率が低く、目標値を下回った。各定着ローラの断面SEMの結果を示す(写真2)。鱗片状黒鉛では、各フィラーが完全に面方向に配向してしまっているものの、マトリクスであるポリイミド樹脂中にぬれ性良く、均一に黒鉛フィラーが分散しており、膜厚方向にもフィラーが均一分散している(写真2(a))。

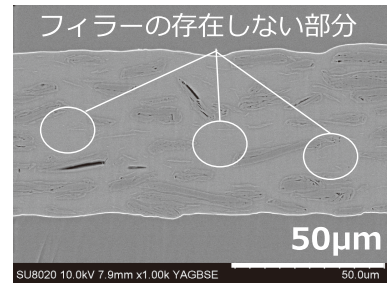
一方の球状黒鉛は比表面積が小さいため、フィラーが存在する部分と、フィラーが存在しない部分とが存在しており、膜厚方向への分散が均一でなくなっている(写真2(b))。このため膜厚方向の熱伝導パスができにくく、熱伝導率が狙いよりも低くなったと考えている。また、球状ではない形状のフィラーも散見され、3本ロールミルでの分散時に受ける剪断応力でフィラーが解砕してしまったのも熱伝導率が狙いよりも低くなった一因と考えている。

最後に、薄片化黒鉛については、熱伝導率1.2W/mKと目標値をクリアし、他の黒鉛系フィラーと比較して熱伝導率が高くなった。薄片化黒鉛は比表面積が大きく、鱗片状黒鉛と同様、マトリクスであるポリイミド樹脂中にぬれ性良く均一に分散している(写真2(c))。また、薄片化黒鉛はフィラーの厚みが薄く、より柔軟であるため、鱗片状黒鉛よりも面方向に配向しにくく、一部、膜厚方向にフィラーが配向しており、膜厚方向にも密にフィラーが充填されている。このため薄片状黒鉛では膜厚方向の熱伝導パスが形成され、熱伝導率が鱗片状黒鉛と比較して高くなると考えられる。

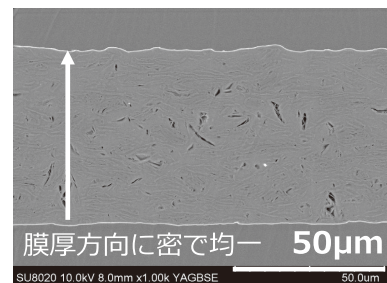
以上の結果から、20vol%の充填率で最も熱伝導率の高い薄片化黒鉛を選定し、充填率を変えた時の定着ローラの熱伝導率を測定した。



(a) 鱗片状黒鉛



(b) 球状黒鉛



(c) 薄片化黒鉛

写真2 黒鉛フィラー使用定着ローラの断面SEM

(4) 薄片化黒鉛の充填率と熱伝導率

薄片化黒鉛の充填率を変えて作製した定着ローラの熱伝導率を示す(図5)。薄片化黒鉛はCNFと比較してフィラー単体での熱伝導率が低いにもかかわらず、充填率が15vol%までの範囲では定着ローラの熱伝導率が変わらない。これはCNFが膜厚方向に配向しにくい繊維状であるため低い充

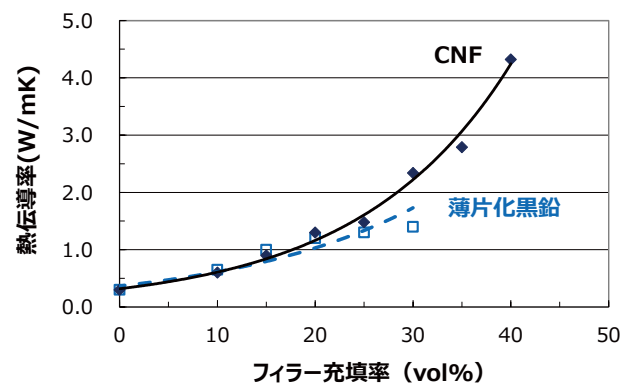


図5 フィラー充填率と定着ローラの熱伝導率

填率では熱伝導パスができず、熱伝導率が上がりにくいものに対して、薄片化黒鉛では15vol%以下の低い充填率でも熱伝導パスが形成でき膜厚方向の熱伝導率が高くなっているためと考えている。

4. 黒鉛充填定着ローラの長期耐久性

定着ローラの長期耐久性は、MIT 試験（耐折疲労試験）破断回数を指標として評価している。MIT 試験破断回数は、概ね定着ローラの引張破断強度と、屈曲時に定着ローラにかかる応力で決まることから、定着ローラの弾性率が高いほど低くなる傾向となる。このため定着ローラでは、熱伝導性フィラーの充填率を高くすると、熱伝導率は高くなる一方で、引張強度が低下し、弾性率が高くなるため、MIT 試験破断回数が極端に低くなってしまおうというトレードオフの関係がある。薄片化黒鉛の充填率を変えた場合の定着ローラの MIT 試験破断回数を示す（図6）。薄片化黒鉛は充填率15vol%で、MIT 試験破断回数の目標値10,000回を満たしており、熱伝導率についても目標値1.0W/mKを満たすことを確認した。

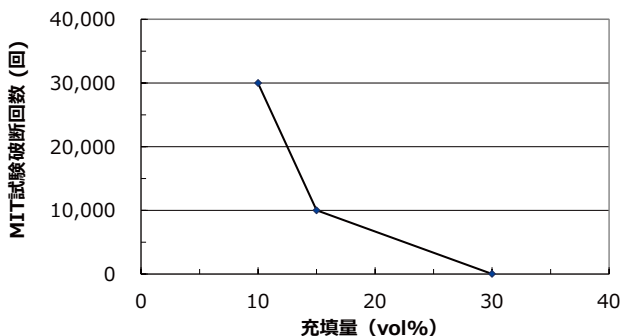


図6 フィラー充填率とMIT破断回数

5. 開発品の特性

開発した定着ローラの特性と構成を表4に示す。開発品

表4 開発品の構成と特性

項目		開発品	
構成	トップ層	材質	フッ素樹脂+カーボン
		厚み (μm)	12
	プライマ層	材質	フッ素樹脂+接着成分+カーボン
		厚み (μm)	4
ベース層	材質	ポリイミド+薄片化黒鉛	
	厚み (μm)	60	
熱伝導率(W/mK)		1.0	
MIT試験破断回数(回)		10,000	
印刷速度(枚/分)		45	

は、現行品同等の熱伝導率、MIT 試験破断回数を保持したままナノマテリアルであるCNFを代替し、原料費を大幅に低減することに成功した。また、実機評価においても45枚/分的高速印刷が可能であることを確認している。

6. 結 言

以上述べたように、従来の定着ローラに使用していたナノマテリアルであるCNFを、薄片化黒鉛に代替することにより、大幅なコスト低減を可能とする、高速印刷機（45枚/分）に適用可能な高熱伝導定着ローラの開発に成功した。今回開発した定着ローラは、ユーザー各社にサンプルを試供中で量産に向けた準備を開始している。

今後ともLBPのさらなる高速化、高耐久化という市場ニーズに対応した新しい定着部品の開発を進めていきたい。

用語集

※1 ポリイミド樹脂

繰り返し単位にイミド結合を含む樹脂の総称。合成樹脂の中で最高レベルの高い熱的、機械的、化学的性質を有する。

※2 フッ素樹脂

フッ素を含むオレフィンを重合して得られる合成樹脂の総称。耐熱性、耐薬品性の高さや摩擦係数の小さいことが特徴。

※3 MIT試験

MIT Folding Endurance Tester（耐折疲労試験機）を用いた破壊試験のこと。

※4 カーボンナノファイバー

炭素によって作られるグラフェンシート（グラファイトの1枚面）が多層の同軸管状になった物質。

※5 3本ロールミル

回転数の異なる3本のロールから構成された分散機。ロール間圧力を利用した圧縮作用と、速度の異なるロール間での剪断作用により分散を行う。

参考文献

- (1) 高田憲一、NIKKEI MATERIALS&TECHNOLOGY、No.138、pp.80-83 (1994)
- (2) 中島晋吾、内場勇介、御守直樹、鈴木良昌、菅原潤、溝口晃、木澤一浩、SEIテクニカルレビュー、第178号、pp79-83 (2011)
- (3) 藤本俊幸、加藤晴久、ぶんせき、2020 9、pp326-331 (2020)
- (4) 小池常夫、ネットワークポリマー、vol28、No.2、pp50-63 (2007)

執 筆 者

中島 晋吾* : エネルギー・電子材料研究所
グループ長



翠 弘志朗 : エネルギー・電子材料研究所



窪 大樹 : 住友電工ファインポリマー(株) 主査
工学博士



内場 勇介 : 住友電工ファインポリマー(株) 課長



山内 雅晃 : エネルギー・電子材料研究所 部長



木澤 一浩 : 中山住電新材料有限公司 総経理



* 主執筆者