

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05996

研究課題名(和文) 高電界技術を用いたナノ粒子の分散挙動制御とその応用に関する研究

研究課題名(英文) Research on Dispersion Behavior Control and Its Application of Nanoparticles Using High Electric Field Technique

研究代表者

花岡 良一 (HANAOKA, RYOICHI)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：90148148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：凝集したカーボンナノチューブ(CNT)またはカーボンブラック(CB)を有機溶媒に懸濁し、バリア放電と電界効果により粒子分散が効率的に行える手法を開発した。これらの手法は、化学薬品やその他の添加物を全く使用しない新規な分散法であり、放電分散法(DDM)、電界分散法(FDM)と命名された。凝集体の少ない分散効果と良好な分散安定状態は、DDMとFDMの併用によって得られことを立証した。また、分散したナノ粒子(CNT, CB)をフィラーとするエポキシコンポジットとエラストマーコンポジットを試作した。それらの機械的・電気的特性を計測し、機械的強度の向上と電気的特性の制御が可能であることを明確にした。

研究成果の概要(英文)：It has been demonstrated that the agglomerates of a carbon nanotube (CNT) or carbon black (CB) suspended in organic solvents can be dispersed satisfactorily by the barrier discharge generating under ac high voltage and the effect of electric field without particular chemical agents or additives. These new electrical methods are named as Discharge dispersion method (DDM) and Field dispersion method (FDM), respectively. The superior dispersibility of nanoparticles is obtained by the combination of DDM and FDM. On the other hand, it has been revealed that the mechanical and electrical properties of nanocomposite materials can be improved by using dispersed CNT or CB particles as filler. Two types of the nanocomposite (epoxy resin composite and elastomer composite) with a different particle concentration are fabricated to examine their electrical and mechanical properties. These properties reveal a nonlinear variation by adding a slight amount of nanoparticles in the range 0.01 to 0.1 wt%.

研究分野：高電圧工学， 電力工学

キーワード：ナノ粒子均一分散 フッ素系溶媒 カーボンナノチューブ カーボンブラック 放電分散法 電界分散法 ナノコンポジット

1. 研究開始当初の背景

一般に、ナノスケールの粒子は、サブミクロン以上の粒子とは異なる粒子表面特性や相互作用を発現する。すなわち、粒子間に強い van der Waals 引力が働く。DLVO 理論におけるナノ粒子間の静電反発は、同じ表面電位でもポテンシャル障壁が低下し、静電反発による分散効果が低減する。その為、ナノ粒子は強固な凝集性を持ち、分散化は容易でない。ナノ粒子の分散には、100 mV 程度の高い電位が必要であるが、通常の分散方法ではこのような表面電位は得られない。本研究では、主にカーボンナノチューブ (CNT) とカーボンブラック (CB) に着目している。このような炭素系ナノ粒子は、近年、ナノ粒子の低コスト大量合成に関する技術革新が進み、ナノサイエンスとナノテクノロジーのフロント・ランナーと言われ、広範囲な電子的、化学的および機械的応用分野に有望な材料として高く期待されている。しかし、これらのナノ粒子も付着・凝集性が著しく高いので、ナノ材料として応用するには、粒子の分散制御が極めて重要な技術基盤になる。近年、液体中でナノ粒子を実際の製品に应用できるレベルまで効率良く分散する技術、およびナノ粒子を利用した様々な紛体プロセスの総合的な技術発展が強く望まれ、これらの研究を遂行することは、今後、我が国のナノテクノロジーを進展させ、高度化する上で極めて重要である。従来、炭素系ナノ粒子は疎水性であり、これを溶媒中に分散するには、表面修飾による親水化が必要となる。一般的には、強酸処理による表面官能基の導入、高分子分散剤の吸着手法、金属酸化物被覆による化学的手法等がある。また、物理的・機械的手法によるビーズミル法やビーズミルと超音波を組み合わせた分散技術等がある。しかし、いずれの手法も、一度凝集した粒子を分散することは容易ではなく、分散に時間が掛かり、かつ容器からの不純物混入が問題となる。更に、機械的分散法では、分散したナノ粒子の再凝集が起こる。このような状況に鑑みて、本研究で提案した高電界技術による分散法は優位点が多く、今後、普及が予想されるナノ粒子の応用技術分野に高い有用性を持つ。

2. 研究の目的

大きさが 1~100 nm 範囲のナノ粒子は、100 nm 以上の粒子に比べて、物理的、化学的性質・機能が著しく変化するため、様々な分野で利用・応用が検討されている。しかし、ナノ粒子は付着・凝集性が著しく高いため分散挙動制御が極めて困難である。合成したナノ粒子を利用する場合、ナノ粒子の分散安定化を達成しない限り、粒子応用デバイスなどへの新たな実現は極めて困難である。本研究は、主にナノカーボン粒子に着目し、従来の化学的および機械的分散法に代わって、高電界技術を用いた効率的な分散法を構築し、均一性に優れかつ再凝集性を抑制したナノ粒子の

分散を実現する。更に、分散したナノ粒子をナノマテリアルの構造原料として応用する技術に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

各種多層カーボンナノチューブ (MWCNT : ファイバー状、コイル状、カップ積層状) およびカーボンブラック (CB) を供試ナノ粒子として用い、バリア放電と電界効果を利用した粒子分散システムを構築する。また、分散溶媒の最適選定とそれに懸濁したナノ粒子の均一分散化を図る。得られたナノ粒子の顕微鏡観測、粒子分散評価、粒子構造解析、再凝集性評価などを実施し、本手法による分散化が実現できることを立証する。更に、分散したナノ粒子をフィラーとする各種コンポジットを試作してそれらの機械的・電気的特性を計測し、ナノマテリアルの特性を明確化する。以下に研究方法を具体的に記述する。

(1) ナノ粒子分散システムの構築

バリア放電分散法 (以下、DDM と称す) と電界分散法 (以下、FDM と称す) による分散セルを設計・製作し、それらを併用した分散システムを構築する。

(A) DDM 分散装置の設計と製作

図 1 は設計・製作した DDM 分散装置の外観を示す。

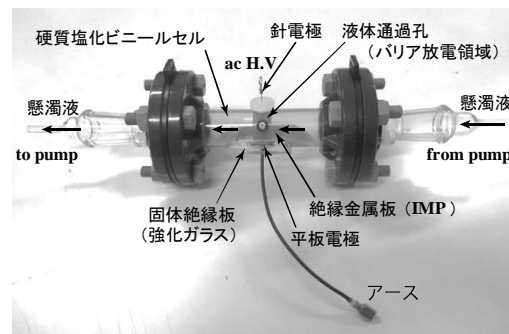


図 1 製作した DDM 分散装置の外観

- ① DDM 分散セルは、厚さ 3mm の硬質塩化ビニール製から成る円筒形である。
- ② バリア放電を生じさせる電極系は、針—平板電極 (針電極は先端曲率半径が約 50 μm のタングステン製、平板電極は SUS 製の矩形平板) である。針電極は円筒セル内の懸濁液中に取り付けられ、その周囲には液体の通過孔が設けられている。この通過孔は、バリア放電領域であり、懸濁液は必ずこの孔を通してようになっている。バリア放電に必要な固体絶縁板は、厚さ 3 mm の強化ガラス板であり、その裏側 (セル外部) にアースした平板電極が取り付けられている。
- ③ 強化ガラス板上 (セル内部の懸濁液中) には、針電極に対抗して SUS 製の絶縁金属板 (IMP) が設けられている。この IMP の存在によって、バリア放電が安定かつ広がりのある強いスパークになる。なお、針先端と IMP 間の間隔 (ギャップ長) は 5 mm に設定する。

④ ナノ粒子を混合する懸濁液の溶媒として、有機溶媒（オクチルアルコール：2-octanol, 2-ethyl-1-hexanol 等）や各種のフッ素系液体を用い、バリア放電の発生や分散後のナノ粒子応用を勘案して、最適溶媒を選定する。

⑤ 供試ナノ粒子を適当な濃度で溶媒に懸濁した後、あらかじめホモジナイザーを用いて機械的分散を施し、その後、分散システムに導入して均一分散化を開始する。

⑥ 試験用変圧器を用いて、針電極に 60 Hz 交流高電圧（約 18 kV_{rms}）を印加し、バリア放電を発生させる。

(B) FDM 分散装置の設計と製作

FDM 分散装置は、DDM による粒子分散効果を更に強化して分散性を高める目的で使用される。図 2 は設計・製作した FDM 分散装置の外観を示す。

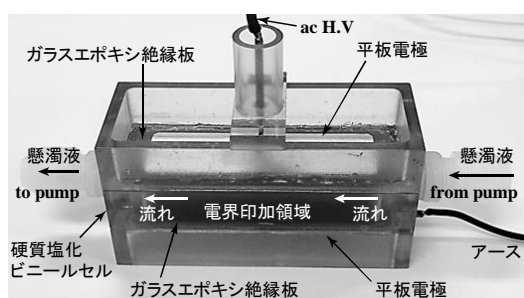


図 2 製作した FDM 分散装置の外観

① FDM 分散セルは、立方体の硬質塩化ビニール製である。

② ガラスエポキシ樹脂製（厚さ 2mm）の矩形板が電界印加領域（粒子分散空間）を隔てて平行に取り付けられ、各板の上面と下面には電極として銀ペーストが塗られる。上面の電極には交流高電圧（約 6 kV_{rms}）が印加され、下面の電極はアースされる。

③ 固体絶縁板を介した平行平板電極間の空間には、ほぼ平等電界（約 10⁷ V/m）が印加され、その空間を懸濁液が通過する。その時、粒子は上下のガラスエポキシ板に激しく衝突し、懸濁液内の粒子は分散される。なお、DDM によって付与されると思われる粒子表面の ζ 電位は、ガラスエポキシ板の高い絶縁性により消失することはない。

上記(A)と(B)に示した粒子分散セルは、報告者が長年培った放電技術のノウハウを活かして設計された。

(C) ナノ粒子分散システムと分散方法

ナノ粒子の分散化は、DDM 分散セルと FDM 分散セルをビニールパイプで直列に連結し、図 3 に示されるように、液体ポンプを用いて二つの分散セル内を一定時間循環することにより分散度を高める。すなわち、ナノ粒子の凝集体は、DDM で発生したバリア放電衝撃波により分散され、FDM によって粒子と固体障壁との衝突効果により更に細かく分散される。なお、分散に要する時間は、100 分程度としている。

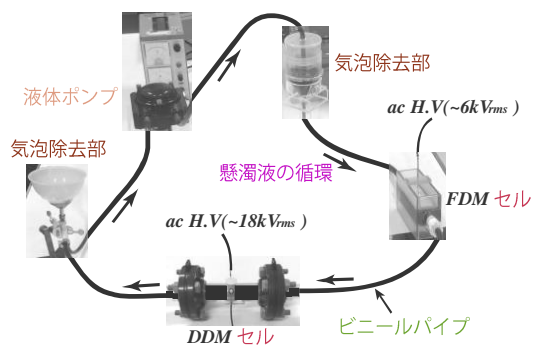


図 3 粒子分散システムの概略

(D) 粒子分散評価

DDM と FDM の併用によって分散したナノ粒子は、以下の方法によって評価する。

① 走査型電子顕微鏡（SEM）観測とレーザー透過光強度による評価：分散処理前後におけるナノ粒子の SEM 観測を行い、部分的な粒子の分散状態を詳細に調べ評価する。また、透明ガラス製の Hele-Shaw セルに供試懸濁液を導入して半導体 YAG レーザーを照射し、透過光強度をフォトダイオードで検出することによって、粒子の沈降状態を計測し分散度を評価する。

② フーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）による粒子構造解析：電気的分散処理前後におけるナノ粒子の FTIR スペクトルを計測し、粒子に修飾されるイオン結合状態を調べ、これに伴う粒子表面電位（ζ 電位）の考察から、粒子再凝集性に関する知見を得る。

(2) コンポジットの試作と機械的・電気的特性の計測

分散したナノ粒子をフィラーとして、エポキシコンポジットおよびエラストマーコンポジットを試作し、それらの機械的・電気的特性を明確にする。

(A) エポキシコンポジットの試作

本研究では、2 液混合型エポキシ樹脂を用いたエポキシコンポジットを試作する。

① 主剤（ビスフェノール A）と分散したナノ粒子懸濁液を用い、粒子濃度 0.01~0.1 wt% の範囲で計量してビーカーに注ぐ。これを「混合物 A」とする。

② 80°C の恒温槽で約 30 時間加熱し、混合物 A から溶媒を気化して取り除く。その時、主剤とナノ粒子のみが残る。これを「混合物 B」とし、室温まで冷却する。

③ 硬化剤を混合物 B に添加し、マグネチックスターラーで 10 分間、回転数 400 rpm で攪拌してナノ粒子を均一に混合する。これを「混合物 C」とする。攪拌時に生成された気泡は真空ポンプで脱泡する。

④ 混合物 C を試験片型取り容器（シリコン製）に導入し、室温で 72 時間放置して硬化する。その後、更に硬化度を高めるため、80°C の恒温槽内で 12 時間乾燥して供試試験片を得る。なお、機械的特性計測用の試験片は、JIS-K 7161 (ISO 527-1) に定められた 1BA 型

(厚さ 3 mm のダンベル型) とし、電気的特性計測用の試験片は、厚さ 3 mm、直径 50 mm の円盤型とする。

⑤ 完成した試験片の内、電気的特性計測用試験片には、両面に銀ペーストを塗布して、主電極とガード電極を設ける。

⑥ 特性の比較のため、ナノ粒子を含まないエポキシ樹脂も上記と同じ条件で試作する。

(B) エラストマーコンポジットの試作

本研究では、ポリロタキサンのエラストマーを用いる。ポリロタキサンエラストマーとは、鎖状高分子としてのポリエチレングリコール、環分子としてのシクロデキストリン、栓子分子としてのアダマンタンアミンから構成され、多くの環分子に線状高分子が浸透した超分子構造を有するエラストマーである。リング分子は、軸方向ポリマー分子上を摺動し回転することができる。

① エラストマーと分散したナノ粒子懸濁液を、粒子濃度 0.01~0.1 wt% 範囲で計量し、ビーカーに注ぐ。これを「混合物 A」とする。

② 混合物 A から溶媒および気泡を除去するため、脱気しながら 80°C の真空乾燥器で約 72 時間放置する。

③ 加熱して溶媒を気化すると、エラストマーとナノ粒子の混合物が残る。これを「混合物 B」とし、室温まで冷却する。

④ 混合物 B を自転・公転ミキサーを用いて、回転数 2000 rpm で 8 分間攪拌し、エラストマー内のナノ粒子を均一混合する。これを「混合物 C」とする。

⑤ 混合物 C を試験片型取り容器(シリコン製)に導入し、その中の混入気泡を取り除くため、70°C の真空乾燥機内で 2 週間脱気する。なお、機械的特性計測用の試験片は、厚さ 5 mm のダンベル形とし、電気的特性計測用の試験片は、厚さ 5 mm、直径 50 mm の円盤型とする。

⑥ 混合物 C を硬化するため、170°C に設定した恒温槽で 2 時間加熱した後、供試試験片を得る。

⑦ 完成した試験片の内、電気的特性計測用試験片には、両面に銀ペーストを塗布して、主電極とガード電極を設ける。

⑧ 特性の比較のため、ナノ粒子を含まないエラストマーも上記と同じ条件で試作する。

(C) コンポジットの機械的・電気的特性計測

① 機械的特性の評価：引張圧縮試験機を用いて破断試験を行い、コンポジットの最大応力、破断応力、ヤング率、破断に至るまでの伸びを計測する。これらの機械的特性は、ナノ粒子濃度の関数として評価する。

② 電気的特性の評価：LCR ハイテスタを用いて、コンポジットの誘電率、誘電正接 ($\tan\delta$)、体積抵抗率などを計測する。これらの電気的特性は、ナノ粒子濃度の関数として評価する。

4. 研究成果

(I) 粒子分散システムによるナノ粒子の分散

(1) ナノ粒子の分散様相(MWCNT 粒子分散例)

ナノ粒子は、粒子間の強い van der Waals 引力によって強固な凝集体を形成し、溶媒中への分散性は極めて低い。本研究で構築した粒子分散技術(DDM と FDM)は、凝集したナノ粒子を有機溶媒等に懸濁し、その中で高電界を発生させ、バリア放電と電界効果により均一分散する手法である。これは、従来の方法と全く異なり、酸や界面活性剤、その他の添加物を全く使用しない新しい分散法である。この手法を用いれば、絶縁性液体以外、例えば、オクチルアルコール(2-octanol, 2-ethyl-1-hexanol 等)やフッ素系液体(HFC43-10, HFC-52-13p 等)のような弱導電性液体中でもナノ粒子の分散化が効率的に実現できる。図 4 は代表的な分散処理前後の懸濁液様相を示す。電気的分散処理前の懸濁液(図 4(a))は、MWCNT 凝集体が溶媒に分散せずに沈降し、溶媒は透明であるが、分散処理後の懸濁液(図 4(b))は、黒色に変色する。



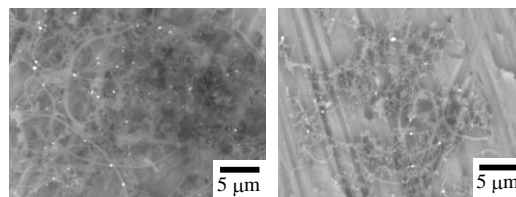
(a) 放電処理前 (b) 放電処理後

図 4 電気的分散処理前後の MWCNT 懸濁液 (溶媒: 2-octanol, 放電時間 90 分)

(2) SEM 観測による粒子分散評価

DDM で発生したバリア放電ストリーマの衝撃波によって、CNT に機械的ストレスが与えられ、ナノ粒子凝集体(CNT, CB)は分散され、FDM によってナノ粒子と固体障壁との衝突により、更に細かく分散される。従って、DDM と FDM の併用により、ナノ粒子は均一分散できる。

図 5 は MWCNT 懸濁液における機械的処理後と電気的処理(DDM - FDM 併用分散処理)後の粒子画像例を示す。図 5(a)はホモジナイザーで機械的に 90 分間分散した画像であり、図 5(b)は機械的処理後に電気的処理を行った画像である。MWCNT は、電気的処理によって凝集体がよく解きほぐされている。なお、電気的処理後の CNT または CB 粒子には、放電による顕著な損傷は見られない。



(a) 機械的処理後 (b) 電気的処理後

図 5 機械的処理後と電気的処理後の粒子 SEM 画像例 (溶媒: HFC-52-13p)

(3) 分散安定性の評価

粒子分散安定性をレーザー入射光と透過光の比率（光透過率）によって評価した。図6はMWCNT懸濁液のレーザー光透過率と日数の代表的な関係を示す。同図のCurve 1は、機械的処理した懸濁液の光透過率を示し、Curve 2は、機械的処理に加えて電気的処理した懸濁液の光透過率を示す。両者を比較すると、電気的処理を施した懸濁液の光透過率は低いことから、粒子の沈降が抑制され安定な分散状態が長く保たれる。

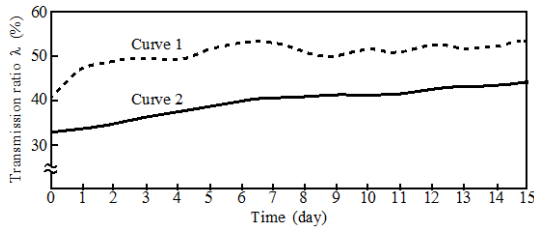


図6 レーザー光透過率と日数の代表的な関係（溶媒：HFC-52-13p）

(4) 分散に適合する最適溶媒の選択

DDM - FDM を併用したナノ粒子の電気的分散処理実験は、多種類の溶媒に付いて成された。その中でもフッ素系溶媒であるHFC-52-13p (Tridecafluorohexane: 分子構造 $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CF}_2\text{CF}_2\text{CHF}_2$) が最も適合すると結論された。この溶媒は絶縁耐力が高く (2.9×10^9 [$\Omega \cdot \text{m}$]), 安定したバリア放電が発生できる。また、沸点は適温の 71°C であるので、ナノ粒子懸濁液の溶媒を容易に気化でき、コンポジットの作成にも好都合である。表1はHFC-52-13pの主な特性を示す。

表1 HFC-52-13pの主な特性

Density [25°C] (kg/m^3)	1675	Thermal conductivity [25°C] ($\text{mW}/\text{m}\cdot\text{K}$)	91
Boiling point (°C)	71	Relative permittivity [23°C]	3.3
Viscosity [25°C] ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	0.81	Volume resistivity [23°C] ($\Omega\cdot\text{m}$)	2.9×10^{10}
Specific heat [25°C] ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	1.10	Electric conductivity [23°C] ($\mu\text{S}/\text{m}$)	3.4×10^{-5}
Surface tension [25°C] (mN/m)	13.4	Breakdown voltage (kV/2.5mm)	59

(5) 粒子の構造解析と再凝集性評価

図7はHFC-52-13pに懸濁したMWCNTのFTIRスペクトル例を示す。図中の(a)はホジナイザーによる機械的処理後のスペクトルを示し、(b)はDDM-FDM併用による電気的処理後のスペクトルを示す。両者のスペクトルには、 1531cm^{-1} にC=C結合、 2301cm^{-1} に CO_2 が観測される。C=C結合はCNT表面の分子構造を示す。 2301cm^{-1} は空気中の二酸化炭素のC=O伸縮振動であり、観測上避けられない。電気的処理後のスペクトルには、機械的処理で観測されないC-F結合 ($1100 \sim 1300\text{cm}^{-1}$), C=O結合 (1726cm^{-1}), およびC-H結合 ($2850 \sim 2960\text{cm}^{-1}$) が見られる。これは、CNT粒子表面にこれらの結合を有するイオンが存在することを示唆しており、放電エネルギーによってHFC-52-13pの分子構造が分解され、溶媒中に O^* , H^* , F^* のような種々の

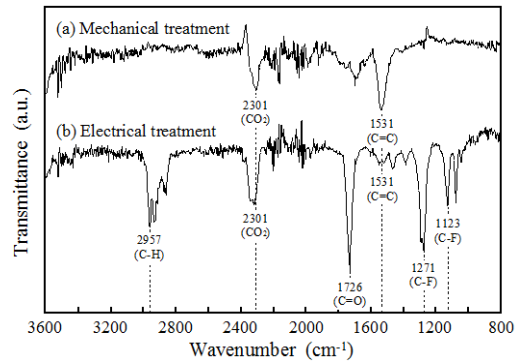


図7 FTIR スペクトルの例

活性イオンが生成されるため、これらのイオンが粒子表面に修飾したと考えられる。図6に示すように、懸濁液内の粒子が長期安定した分散状態を保つのは、これらイオンが粒子表面に ζ 電位を発生させ、粒子間に斥力を及ぼし、これが粒子の再凝集を防止するためと考えられる。計測によると、電気的処理後の粒子表面に現れる ζ 電位として、 $55 \sim 100\text{mV}$ が検出されている。なお、HFC-52-13pに含まれない酸素を持つC=O結合に関しては、バリア放電時に溶媒中に発生する気泡が分解されたものと考えられる。

(II) ナノコンポジットの試作と機械的・電気的特性

(1) ナノコンポジットの試験片

図8は本研究で試作したエポキシコンポジットとエラストマーコンポジットの外観を示す。コンポジットの機械的特性は、引張圧縮試験機を用いて、最大応力(M.S), 破断応力(B.S), ヤング率(Y), 伸び(L)を計測し評価した。引張応力速度は、いずれも $5\text{mm}/\text{min}$ とした。また、電気的特性は、LCRテスターを用いて、比誘電率(ϵ_r), 体積抵抗率(R_v), 誘電正接($\tan\delta$)を計測し評価した。

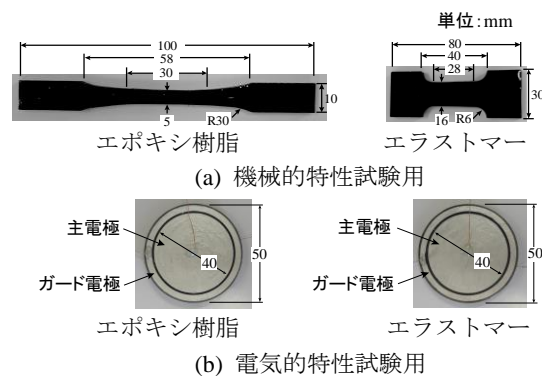


図8 ナノコンポジットの試験片

(2) 機械的特性評価

図9はMWCNT (ファイバー状粒子) をフィラーとしたエポキシコンポジットとエラストマーコンポジットの機械的特性と粒子濃度(ϕ)の代表的な関係を示す。

① 微量のCNT添加によって、コンポジットの機械的特性は上昇する。エポキシコンポジットのM.S, B.SおよびYは、粒子濃度 $\phi = 0.02$

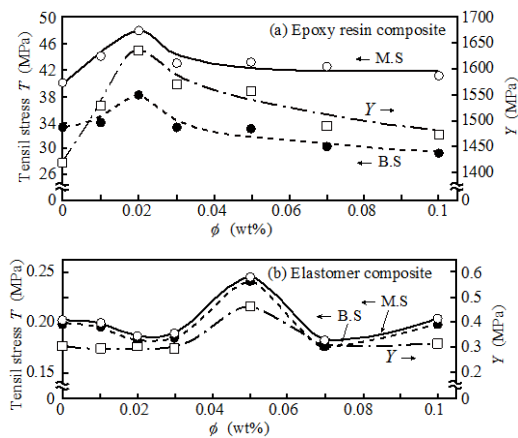


図9 機械的特性の代表例

wt%で最大値を示す。粒子を含まない $\phi=0$ wt%のエポキシ樹脂と比較して、M.Sが約1.2倍、B.Sが約1.13倍、 Y が約1.7倍となる。また、エラストマーコンポジットのM.S、B.Sおよび Y は、いずれも $\phi=0.05$ wt%で最大値を示す。 $\phi=0$ wt%のエラストマーと比較して、M.SとB.Sが約1.25倍、 Y が約1.22倍となる。機械的強度の上昇は、粒子の分散がマトリクスに作用する結合力を強化するためと考えられる。なお、破断までの伸び(L)は、エポキシコンポジットで3.20-3.85 mm、エラストマーコンポジットで27.5-38.0 mmとなり、 $\phi=0.01\sim 0.1$ wt%の範囲で殆ど同じであった。

② コンポジットのフィラー形状（MWCNT形状）をファイバー状からコイル状、カップ積層状に変化した場合も同様に機械的強度は上昇するが、粒子形状効果が見られる。三種類のCNT形状で最も高い機械的強度は、コイル状フィラーで得られ、カップ積層状フィラーでは最も低い。コイル状CNTは、物理的にマトリクスとの緊密な結合が得られ易く、バネ効果も関与していると思われる。

③ コンポジットの機械的強度は、微量のCB添加によっても上昇する。エポキシコンポジットのM.S、B.Sおよび Y は、 $\phi=0.02$ wt%で最大値を示す。 $\phi=0$ wt%のエポキシ樹脂と比較して、M.Sが約1.4倍、B.Sが約1.45倍、 Y が約1.36倍となる。また、エラストマーコンポジットのM.S、B.Sおよび Y は、いずれも $\phi=0.05$ wt%で最大値を示す。 $\phi=0$ wt%のエラストマーと比較して、M.SとB.Sが約1.28倍、 Y が約1.22倍となる。CB含有コンポジットは、MWCNT含有コンポジットよりM.SとB.Sの値が増加し、材料の強化効果が高い。

(3) 電気的特性評価

図10はMWCNT（ファイバー状粒子）をフィラーとしたエポキシコンポジットとエラストマーコンポジットの電気的特性と粒子濃度(ϕ)の代表的な関係を示す。

① 微量のCNT添加によって、コンポジットの電気的特性は変化する。エポキシコンポジットの特性は、 $\phi=0.02$ wt%で大きく変化し、これ以上の ϕ で R_v と ϵ_s は減少し、 $\tan\delta$ は増加する。また、エラストマーコンポジットの特

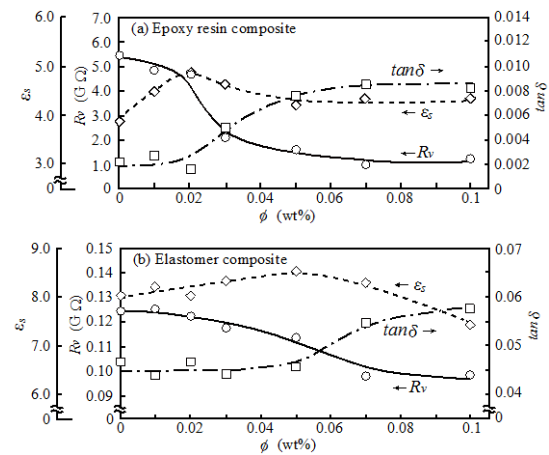


図10 電気的特性の代表例

性は、 $\phi=0.05$ wt%で変化し、これ以上の ϕ で R_v と ϵ_s の減少と $\tan\delta$ の増加が見られる。

② MWCNT形状をファイバー状からコイル状、カップ積層状に変化してもコンポジットの電気的特性には大きな相違は見られず、 R_v 、 ϵ_s および $\tan\delta$ の ϕ 依存性は、いずれも同様な傾向を示す。

③ コンポジットの電気的特性は、微量のCB添加によっても変化する。 R_v 、 ϵ_s および $\tan\delta$ の ϕ 依存性は、MWCNT含有コンポジットの特性と大きく変わらないが、同じ ϕ 値で比べると、CBの添加は R_v 値をより低くする。これは、CB粒子表面積がCNTより大きく、ネットワークの形成が容易なためと思われる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

- ① 平野靖奈, 澤崎広和, 花岡良一, 宮城克徳, 大澤直樹, 有機溶媒中の電気的CNT粒子分散, 電気関係学会北陸支部連合大会, No. A2-10 (2015)
- ② 平野靖奈, 澤崎広和, 花岡良一, 宮城克徳, 有機溶媒中に懸濁したCNTの電気的分散法, 電気学会 基礎・材料・共通部門大会, No. 17-E-p2-1, pp. 224 (2015)
- ③ H. Sawazaki, Y. Hirano, R. Hanaoka, K. Miyagi, N. Osawa, Y. Kanamaru, H. Anzai, Electrical Dispersion of CNTs in Organic Solvent: Combination Effect of Barrier Discharge and Electric Field, 19th Int. Symp. on High Voltage Eng., Pilsen, No. 234 (2015)
- ④ Y. Hirano, R. Hanaoka, N. Osawa, K. Miyagi, Y. Fijita, Y. Kanamaru, Electrical and Mechanical Properties of Nanocomposit Materials Containing Electrically Dispersed MWCNT, IEEE Conf. on Elect. Insul. and Dielect. Phenomena, Toronto, No. 65, pp. 554-557 (2016)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花岡 良一 (HANAOKA, Ryoichi)
 金沢工業大学 工学部 教授
 研究者番号: 90148148