多重電極上に置いた紫外線硬化性樹脂ベース懸濁物中の CNT の多相電圧印加による一方向配列[†]

鈴木 寛*

Carbon Nanotube Alignment in Uncured Suspension above the Multiple-Electrode by Applying Multi-Phase Voltage

by

Hiroshi SUZUKI*

Multiwalled carbon nanotubes in uncured ultraviolet ray curing resin suspension were aligned by applying traveling electric field. In general, the size of the area where the multiwalled carbon nanotubes were continuously aligned by applying electric field is restricted by an interelectrode distance. In this study, the restriction of the alignment area size was removed by adoption of the multiple-electrode and application of the multi-phase voltage.

The multiple-electrode used to the experiment was constructed by 24 long and slender electrodes. A cover glass was put on the multiple-electrode, and the suspension was dropped on the cover glass. Rectangular and eight-phase voltage was applied to the multiple-electrode. The phase differences between voltages applied to one and the neighboring electrodes were ± 45 degrees. The multiwalled carbon nanotubes in the suspension were aligned in much wider area than the interelectrode distance by applying the traveling electric field generated by the multi-phase voltage. In the latter half of this paper, the theoretical background for the experiment based on the method proposed by the author was shown. Furthermore the influences of the number of phases in the multi-phase voltage and the suspension thickness on fluctuation of the carbon nanotube orientation were theoretically clarified.

Key words:

Composite, Carbon nanotube, Alignment, Multiple electrode, Traveling electric field

1 緒 言

カーボンナノチューブ (CNT) は新材料として注目され、とくに電気的特性に注目した数多くの研究がなされている^{1), 2)}. この CNT の利用の拡大のために樹脂などで固めて複合材化する場合が多い。

短繊維を用いた複合材料と同様に、繊維状の CNT の複合材内部での方向分布は、複合材の特性に大きく影響する³⁾. とくに、一方向に配列するとその方向の特性が向上することもあり、様々な方法を使って一方向に配列する工夫がなされている⁴⁾. 一般的には、CNT と樹脂などとの懸濁物を一方向に伸ばし、配列方向を一方向に揃えることが多い^{5), 6)}. 磁界^{7), 8)}や電界^{9), 16)}を未硬化の懸濁物に印加して CNT の方向を一方向に配列する方法も研究されている。

電界印加による CNT の方向制御の研究では、1 組の電極の間に CNT と樹脂との懸濁物を置き、電極の片方を接地して、もう片方の電極に直流または交流電圧を印加する場合が多い。電界によって生じる力のモーメントが十分大きければ、懸濁物中にある電気伝導性を持つ CNT が系全体のエネルギーレベルを最小にする方向、すなわち電界の方向に配列するのである。初期の研究では、直流電圧の印加や⁹⁾、直流電圧と交流電圧の比較がなされた¹⁰⁾。

Park ら¹¹⁾による系統的な研究後は、交流電圧を印加して CNT を一方向に配列する研究が多い。しかし、近年でも直流電圧を基本とする研究もなされている^{12), 13)}。

電界を利用し比較的大形の一方材料の作製も試みられている。大きさ 2kV のピーク・トゥ・ピーク電圧を電極に印加して 25mm×50mm サイズの一方材料が作製されている¹⁷⁾。しかし、このような 1 組の電極間で CNT を一方向に配列する方法では、作製される複合材のサイズは電極の間隔に制限される。

何本ものワイヤ状電極を平行に配置して、その上に薄いガラス板を置き、さらにその上に CNT と未硬化エポキシ樹脂の懸濁物を滴下して、大きな一方材料フィルムの作製も試みられている^{18), 19)}。文献 18)の方法では、電界の方向は電極に垂直となるので、電極付近では配列方向が一方から大きく外れてしまう。文献 19)では電極をそれと垂直な方向に振動させこの問題を解決している。

本研究では、細長い 24 本の電極を平行に置いた多重電極を使用して、その多重電極の上にカバーガラスを置き、さらにその上に懸濁物を滴下した。細長い電極 8 本を一組にして隣合う電極と位相差が 45°の多相矩形波電圧を印加し、懸濁物に移動電界を印加した。この移動電界印

[†] 原稿受理 平成26年10月29日 Received Oct. 29, 2014 ©2015 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 八戸工業大学工学部機械情報技術学科〒031-8501 八戸市大字妙
Hachinohe Institute of Technology, Myo, Hachinohe 031-8501.

加により懸濁物中のCNTを電極の間隔より広い範囲で一方向に配列させることを試みた。

本研究ではどの電極も接地していない。懸濁物中に作用する電界の強さはもちろん、方向も周期的に変化する。著者はこのような電界下にある電気伝導性を有する直線状の物体の配列方向の3次元予想モデルを提案している²⁰⁾。また、2次元電界下で大きさや方向が周期的に変化する条件においてサイズが多層CNTと変わらないカーボンナノファイバ(CNF)の配列方向を理論的に予測できることを実験的に示している²¹⁾。さらに、今回の研究とは条件が異なるが、電極の間隔より長い領域において懸濁物中のCNFを一方向に配列している²²⁾。

実験に先立って理論的にCNTの方向を予想し、実験条件を決定した。2次元有限要素法を用いて電圧印加の各ステップにおける懸濁物中での静電界を求め、求めた静電界を提案しているモデルに代入し、移動電界下におけるCNTの配列方向とCNTに作用するモーメントの最大値を求めた。このようにして、懸濁物中のCNTが概ね一方向に配列する実験条件を決定した。この論文の後半では、実験条件の決定にあたり検討した一組の電極の本数と懸濁物の厚さが配列方向やモーメントに与える影響についての予想結果を示した。

2 供試材料および実験方法

2・1 供試材料と懸濁物

実験に使用するCNTは昭和電工製VGCF-Hで、気層法により作製されている。CNTの直径は $0.15\mu\text{m}$ 、長さは $10\sim 20\mu\text{m}$ である。母材としてスリーボンド製紫外線硬化性アクリル樹脂TB3042Bを使用した。この樹脂の粘度は $500\text{ mPa}\cdot\text{s}$ で、中粘度の樹脂である。

購入したCNTを紫外線硬化性アクリル樹脂に重量含有率 w_f が $0.1\text{wt}\%$ になるように加え、超音波ホモジナイザを用いて10分程度超音波処理を行い、CNTと紫外線硬化性樹脂の懸濁物を作製した。

2・2 実験方法

Fig. 1に多重電極、懸濁物保持用トレーおよび電圧印加のための装置の構成の模式図を示す。多重電極では幅

Fig. 1 Schematic views of the multiple electrode, the tray for holding a suspension and block diagram for applying traveling electric field to a suspension.

0.2mm の細長い電極24本が 1.2mm の間隔で平行に並んでいる。多重電極はペークライトをベースとする銅張基板をフライス盤で切削し作製したものである。この多重電極の上に、厚さが 0.15mm で一片の長さが 30mm の正方形カバーガラスに内寸 $24\text{mm}\times 24\text{mm}$ で厚さ 0.5mm の塩化ビニル製枠を張り付けた懸濁物保持用トレーを置いた。このトレーの内にCNTと紫外線硬化性樹脂の懸濁物を適量滴下した。

Fig. 1には本論文で使用する直角座標系 x - y - z も合わせて示した。平行に置いた直線状の電極で構成される面内でさらに電極に垂直な方向に x 軸、この面に垂直な方向に y 軸、直線状の電極の方向に z 軸をとった。

トレー内にCNTと紫外線硬化性樹脂の懸濁物を厚さ約 0.15mm になる量滴下し、その後、多重電極に多相電圧を印加し、懸濁物に移動電界を印加した。所定時間経過後に懸濁物に紫外線を照射して樹脂を硬化させ、CNT/紫外線硬化性樹脂複合材を作製した。この後、光学顕微鏡を使用して複合材中のCNTの配列を観察した。

多重電極を構成する個々の電極には $0\text{V}/250\text{V}$ の矩形波電圧を印加した。前述のように多重電極には24本の電極が存在する。電極8本を一組として、隣り合う電極間の電圧の位相差を 45° とした。

Fig. 1には電圧印加のための装置の構成も示した。2CHのマルチファンクションジェネレータ4台を同期させ、 45° ずつ位相が異なる矩形波を発生させた。この矩形波を小型ピエゾドライバモジュールに入力し、 $0\text{V}/250\text{V}$ の矩形波電圧を発生させた。発生させる矩形波の周波数を 1kHz とした。このようにして移動電界を懸濁物に印加した。

3 実験結果

2・1で述べたようにしてCNTと未硬化紫外線硬化性樹脂の懸濁物を作製し、2・2で述べた装置を用いて移動電界をこれに印加して、懸濁物中のCNTをFig. 1に示した x 軸の方向、すなわち平行に置いた直線状の電極で構成される面内でさらに電極に垂直な方向に一方向に配列させた。顕微鏡観察結果をFig. 2に示す。

Fig. 2(a)の写真は、横 1.68mm 、縦 1.26mm の範囲を示しており、移動電界の方向は紙面縦方向である。紙面縦方向に黒く伸びる筋がこの方向に配列したCNTで、写真の全ての位置でCNTが一方向に配列していることが分かる。Fig. 1に示したように平行に置いた直線状電極の間隔は 1.2mm で、写真はわずかではあるが電極の間隔より広い範囲を示している。2・2で述べた方法に従って移動電界をCNTと未硬化紫外線硬化性樹脂の懸濁物に印加すれば、電極の位置の影響を受けずにCNTを一方向に配列することができることが分かる。

Fig. 2(b)の写真は、Fig. 2(a)に示した写真の一部を拡大したものである。超音波ホモジナイザを用いた10分程度の超音波処理では一部にCNTの塊が残っているものの、CNTが連なって一方向に配列していることが分かる。また y 軸方向からの観察ではあるが、この写真の倍率でも

(a) Observation of a wider range than the electrode interval

(b) Closeup observation of Fig. (a)

Fig. 2 Optical micrograph of CNT alignment in the composite.

複合材の全域にわたって連なった CNT のピン트가合っていた。x-y 面内において CNT が x 軸に平行に配列したと考えられる。

文献 19)では電極を振動させ、電極の近くで懸濁物中の CNT が一方向に配列しない問題を解決した。本研究では、電極を振動させるのではなく、電極に印加する矩形波電圧に位相差を持たせることにより電極付近で CNT が一方向に配列しない問題を解決した。

4 CNT の配列のシミュレーション

4・1 シミュレーション方法

著者は今回の実験のように大きさや方向が周期的に変化する電界下にある電気伝導性を有する直線状の物体の配列方向の予想モデルを提案している²⁰⁾。このモデルの簡単な説明のために、2次元の x-y 平面内で電界の強さも方向も周期的に変化する場合を考える。電界の x 方向成分を E_x 、y 方向成分を E_y としよう。電界の 2 乗、すなわち E_x^2 、 E_y^2 、 $E_x E_y$ の時間平均を I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{xy} とすると、応力と同じように電界の 2 乗の時間平均 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{xy} は 2 階の対称テンソルであり、二つの主値を持つ。この空間に電気伝導性を有する直線状の物体が置かれると、大きい方の主値の方向に直線状の物体は配列する。また、直線状の物体に作用する力のモーメントの大きさの時間平均の最大

値は主値の差に直線状の物体の寸法や媒体の誘電率からなる定数をかけて求めることができる。

本研究での CNT の配列方向と CNT に作用するモーメントの評価方法について説明する。多重電極の電極 n 本を一組とし、隣り合う電極間の電圧の位相差を $360^\circ/n$ としたときに、 n 個の各ステップで懸濁物中に生じる静電界の x 方向成分 E_x および y 方向成分 E_y を、2 次元有限要素法を用いて求めた。実験では一組の電極本数 n は 8、位相差は 45° である。求めた n ステップの静電界より、提案したモデルを用いて移動電界下における CNT の配列方向 ψ と、電界の 2 乗の時間平均の主値の差 $\bar{T}'_{max}$ を求めた。主値の差 $\bar{T}'_{max}$ は CNT に作用するモーメントの最大値に比例する。配列方向 ψ は Fig. 1 に示した x 軸と CNT の中心軸がなす角度である。また、パラメータ $\bar{T}'_{max}$ に $(2\pi a^3/3)\epsilon_1/\{\ln(2a/b)-1\}$ を掛けると CNT に作用するモーメントとなる。ここで、 a は物体を回転だ円体で近似したときの長軸の半長、 b は短軸の半長、 ϵ_1 は媒体の誘電率である。静電界を求めるにあたり、未硬化樹脂の比誘電率を 120²³⁾、カバーガラスの比誘電率を 6、基板のベース部分の比誘電率を 5 とした。

4・2 電界が大きな区間での電界の等高線と電気力線

実験では一組の電極の本数 n を 8 としている。任意の電極間の懸濁物中の電界は、8 ステップの電圧印加を経て元の状態に戻る。Fig. 3 に 0V とした電極と 300V の電圧を印加した電極の間の懸濁物中に生じる電界の等高線を示した。二つの電極と等距離にある直線がカバーガラス表面と交わる位置に原点 O を置き、Fig. 1 と同様に、カバーガラスと懸濁物の境界に沿って x 軸、懸濁物の厚さ方向に y 軸をとった。y 軸上で懸濁物の区間を 6 等分し、0.025mm 間隔の点を通る電気力線を Fig. 3 にあわせ示した。懸濁物に生じる電界は、電極の電圧が 0V と 300V のこの区間で最も大きく、CNT の回転は主としてこの状態のときに生じる。

電気力線に注目する。Fig. 3 では y 軸上で懸濁物の厚さの 1/2 より上部を通る電気力線は、両側の電極より外側まで伸びている。また、それより下部に位置する電気力線もカバーガラス表面 (x 軸) と鋭い角度で交わっている。

本研究では、電極に印可する電圧に位相差を与え、図に示した区間が次々に移動する。すなわち、Fig. 3 に示した状態が懸濁物全体に広がる。CNT は電界に沿って配列するので、やや不正確な表現であるが、移動電界を懸濁物に

Fig. 3 Electric fields(unit:V/m) and electric flux lines in the suspension in one step.

印可し, Fig. 3 に示した状態が懸濁物全体で生じることによって懸濁物全体で CNT が一方向に配列するといえる。

4・3 実験とほぼ同一の条件下での CNT の配列の予想

4・1 に示した方法に従って, 実験とほぼ同一な条件下での CNT の配列方向 ψ と, CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ を求め Fig. 4 に示した. 実験では印加電圧が 250V であるのに対し, 計算では 300V としていることが実験と計算で異なる部分である. 計算で得られるパラメータ $\bar{T}'_{max}$ は実験の 1.44 倍となる. 印加電圧の違いは予想した CNT の配列方向 ψ に影響を与えない. 図中の x および y については Fig. 3 を参照されたい.

Fig. 4(a) に示した CNT の配列方向 ψ は, たとえば $x=0$ 付近のように, 電極間中央付近ではほぼ 0° となる. x が増加して, 電極の中央の位置 ($x=0.6\text{mm}$) の直前で最小値 ψ_{min} をとり, 電極の中央の位置で 0° となった後に最大値 ψ_{max} をとる. しかしその角度は, $y=0.025\text{mm}$ とカバーガラスに極めて近い位置でも $\pm 5.4^\circ$ 程度と予想された. 図から分かるとおりこの蛇行は懸濁物上表面に行くにしたがって

小さくなる. 懸濁物全体でみれば CNT は一方向に配列するといえる。

Fig. 4(b) に示した CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ は, 電極間中央で最大値 $\bar{T}'_{max-max}$ をとり, 電極の中央の位置で最小値 $\bar{T}'_{max-min}$ をとる. 最大値 $\bar{T}'_{max-max}$ は, カバーガラス表面からの距離 y の影響は小さく, ほぼ一定値である. 最小値 $\bar{T}'_{max-min}$ はカバーガラス表面に近づくほど小さくなる. 最大値と最小値の比 $\bar{T}'_{max-max}/\bar{T}'_{max-min}$ は, カバーガラス表面から懸濁物厚さ t の $1/3$ の位置すなわち $y=0.05\text{mm}$ で 1.47, $2/3$ の位置すなわち $y=0.10\text{mm}$ で 1.37 となっている. 十分大きな電界を懸濁物に印可すれば, CNT を一方向に配列する上でこの程度の力のモーメントの違いは問題となることはないであろう。

4・4 一組の電極の本数と懸濁物の厚さが配列方向やモーメントに与える影響

4・3 で示した計算結果は, 一組の電極の本数 n を 8, 懸濁物の厚さ t を 0.15mm としたときのものである. 一組の電極の本数 n や懸濁物の厚さ t の変化が, CNT の配列方向 ψ や CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ に与える影響について検討した結果を示す. 実際には実験に先立ってこれらの影響について検討を行い, 実験条件を決定している。

4・4・1 一組の電極の本数が配列方向やモーメントに与える影響 4・3 で述べた計算と一組の電極の本数 n 以外の条件を同一とし, この本数 n を 2, 4, 6, 8 および 10 と変化させ, CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} と, CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ の最大値 $\bar{T}'_{max-max}$ と最小値 $\bar{T}'_{max-min}$ を求めた. 結果を Fig. 5 に示した. ただし, n が 2 のとき CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} は懸濁物の板厚方向のすべての位置で 90° に近い値となったため, 図には示していない. Fig. 5(a) に示した CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} は, カバーガラス表面から懸濁物厚さ t の $1/3$ と $2/3$, すなわち $y=0.05\text{mm}$ および 0.1mm の位置についての計算結果である。

一組の電極の本数 n の増加とともに, CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} は, y が $t/3$ の位置でも $2t/3$ の位置でも減少する. Fig. 3 から分かるように, 電極に近い懸濁物中で電気力線はある角度を持って x 軸と交わる. 一組の電極の本数 n が 4, 6, 8, 10 と増加するにしたがって, この角度が小さくなり CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} は減少する。

Fig. 5(b) に, y が $t/3$ の位置での CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ の最大値 $\bar{T}'_{max-max}$ と最小値 $\bar{T}'_{max-min}$ の一組の電極の本数 n による変化を示した. 一組の電極の本数 n が増加すると, Fig. 3 に示したような印加電圧が異なる電極の間に位置する懸濁物中に生じる電界は大きくなる. しかしこの状態になる頻度は本数 n に反比例して減少する. 両者が影響し合って, モーメントの最大値に比例するパラメータ

Fig. 4 The CNTs direction ψ and the parameter $\bar{T}'_{max}$ in the experimental condition.

(a) Maximum values of the CNTs direction ψ_{max} (b) Maximum and minimum values of parameter $\bar{T}'_{max_max}$ and $\bar{T}'_{max_min}$ proportional to the moment.Fig. 6 Influences of the thickness of the suspension t on the CNTs direction ψ and the parameter $\bar{T}'_{max}$.

$\bar{T}'_{max}$ の最大値 $\bar{T}'_{max_max}$ および最小値 $\bar{T}'_{max_min}$ は、一組の電極の本数 n の増加とともにいったん増加するが、最大値をとった後に減少に転じる。

4・4・2 懸濁物の厚さが配列方向やモーメントに与える影響 4・3 で述べた計算と懸濁物の厚さ t 以外を同一とし、この厚さ t を 0.15mm, 0.3mm, 0.45mm と変化させ、CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} と、CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ の最大値 $\bar{T}'_{max_max}$ と最小値 $\bar{T}'_{max_min}$ を求めた。Fig. 6(a) にカバーガラス表面からの距離 y が $t/3$ と $2t/3$ の位置での CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} の変化を、Fig. 6(b) に y が $t/3$ の位置での CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ の最大値 $\bar{T}'_{max_max}$ と最小値 $\bar{T}'_{max_min}$ の変化を示した。

Fig. 3 から分かるように、電極に近い懸濁物中で電気力線はある角度を持って x 軸と交わる。懸濁物の厚さ t が 0.15mm, 0.3mm, 0.45mm と大きくなると、この角度が大きくなり CNT の配列方向 ψ の最大値 ψ_{max} は増加する。こ

(a) Maximum values of CNTs the direction ψ_{max} (b) Maximum and minimum values of parameter $\bar{T}'_{max_max}$ and $\bar{T}'_{max_min}$ proportional to the momentFig. 5 Influences of the number of electrodes in a subset n on the CNTs direction ψ and the parameter $\bar{T}'_{max}$.

のため、Fig. 6(a) に示す CNT の配列方向の最大値 ψ_{max} は懸濁物厚さ t の増加とともに増加する。

Fig. 6(b) に示したように、CNT に作用するモーメントの最大値に比例するパラメータ $\bar{T}'_{max}$ の最大値 $\bar{T}'_{max_max}$ も最小値 $\bar{T}'_{max_min}$ も、懸濁物の厚さ t の増加とともに減少する。カバーガラスのように比較的比誘電率が低い領域を介して比誘電率が高い懸濁物に電界が印加されると、懸濁物中の電界の強さはカバーガラス中に比べて低くなる。比誘電率が高い懸濁物の厚さが増加すると懸濁物中でさらに電界が低下する。よって、CNT に作用するモーメントの $\bar{T}'_{max}$ の最大値 $\bar{T}'_{max_max}$ も最小値 $\bar{T}'_{max_min}$ も懸濁物の厚さ t の増加とともに減少する。

5 結 言

本研究では、細長い 24 本の電極を平行に置いた多重電極を使用して、その多重電極の上にカバーガラスを置き、さらにその上に CNT と紫外線硬化性樹脂の懸濁物を滴下した。細長い電極 8 本を一組にして隣り合う電極と位相差が 45° の多相電圧を印加して懸濁物に移動電界を印加

し、懸濁物中のCNTを一方向に配列させることを試みた。得られた主な知見は以下のとおりである。

(1) 本研究で用いた移動電界を懸濁物に印可する方法により、電極の位置の影響を受けずにCNTを一方向に配列することができることを実験的に示した。

(2) 電圧が0Vの電極と所定電圧を印加した電極の間の懸濁物中の電界の等高線と電気力線を提示し、CNTの回転と整列は主としてこの状態のときに生じ、この状態が懸濁物全体に切り替わっていき、懸濁物の全域にわたってCNTが一方向に配列することを示した。

(3) 一組の電極の本数が増加すると、CNTはより一方向に配列するが、CNTに作用するモーメントはピークをとった後に減少に転じることを示した。

(4) 実験時に比べ懸濁物を厚くしていくと、CNTは一方向の配列から外れていき、またCNTに作用するモーメントも減少していくことを示した。

本研究の一部は、科学研究費補助金(25420029、代表：鈴木 寛)の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- W. Bauhofer and J. Z. Kovacs, "A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 10, pp. 1486-1498 (2009) .
- Alamusi, N. Hu, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu and J. Li, "Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites", *Sensors*, Vol. 11, No. 11, pp. 10691-10723 (2011) .
- J. M. Wernik and S. A. Meguid, "Recent developments in multifunctional nanocomposites using carbon nanotubes", *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 63, No. 5, Article ID 050801, 40 pages (2010) .
- Y. Ma, B. Wang, Y. Wu, Y. Huang and Y. Chen, "The production of horizontally aligned single-walled carbon nanotubes", *Carbon*, Vol. 49, No. 13, pp. 4098-4110 (2011) .
- Q. Wang, J. Dai, W. Li, Z. Wei and J. Jiang, "The effects of CNT alignment on electrical conductivity and mechanical properties of SWNT/epoxy nanocomposites", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 7-8, pp. 1644-1648 (2008) .
- B. Pradhan, R. R. Kohlmeyer and J. Chen, "Fabrication of in-plane aligned carbon nanotube-polymer composite thin films", *Carbon*, Vol. 48, No. 1, pp. 217-222 (2010) .
- G. Piao, F. Kimura, T. Takahashi, Y. Moritani, H. Awano, S. Nimori, K. Tsuda, K. Yonetake and T. Kimura, "Alignment and micropatterning of carbon nanotubes in polymer composites using modulated magnetic field", *Polymer Journal*, Vol. 39, No. 4, pp. 589-592 (2007) .
- M. Abdalla, D. Dean, M. Theodore, J. Fielding, E. Nyairo and G. Price, "Magnetically processed carbon nanotube/epoxy nanocomposites: morphology, thermal, and mechanical properties", *Polymer*, Vol. 51, No. 7, pp. 1614-1620 (2010) .
- P. V. Kamat, K. G. Thomas, S. Barazzouk, G. Girishkumar, K. Vinodgopal and D. Meisel, "Self-assembled linear bundles of single wall carbon nanotubes and their alignment and deposition as a film in a DC field", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 126, No. 34, pp. 10757-10762 (2004) .
- C. A. Martin, J. K. W. Sandler, A. H. Windle, M.-K. Schwarz, M.-K. Bauhofer, K. Schultec and M. S. P. Shaffer, "Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites", *Polymer*, Vol. 46, No. 3, pp. 877-886 (2005) .
- C. Park, J. Wilkinson, S. Banda, Z. Ounaies, K. E. Wise, G. Sauti, P. T. Lillehei and J. S. Harrison, "Aligned single-wall carbon nanotube polymer composites using an electric field", *Journal of Polymer Science Part B, Polymer Physics*, Vol. 44, No. 12, pp. 17511-1762 (2006) .
- M. Monti, M. Natali, L. Torre and J. M. Kenny, "The alignment of single walled carbon nanotubes in an epoxy resin by applying a DC electric field", *Carbon*, Vol. 50, No. 7, pp. 2453-2464 (2012) .
- H.-B. Cho, M. T. T. Huynh, T. Nakayama, S. T. Nguyen, H. Suematsu, T. Suzuki, W. Jiang, S. Tanaka, Y. Tokoi, S.-W. Lee, T. Sekino and K. Niihara, "Densely packed linear assemblies of carbon nanotube bundles in polysiloxane-based nanocomposite films", *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2013, Article ID 564307, 10 pages (2013) .
- Y. Shimamura, T. Chiba, N. Okuda and K. Tohgo, "Microscopic structure control of carbon nanofiller/epoxy composite by using AC electrical field and the effect on physical properties", *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 4, No. 11, pp. 1550-1562 (2010) .
- S. U. Khan, J. R. Pothnis and J.-K. Kim, "Effects of carbon nanotube alignment on electrical and mechanical properties of epoxy nanocomposites", *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, Vol. 49, pp. 26-34 (2013) .
- M. Felisberto, A. Arias-Duran, J. A. Ramos, I. Mondragon, R. Candal, S. Goyanes and G.H. Rubiolo, "Influence of filler alignment in the mechanical and electrical properties of carbon nanotubes/epoxy nanocomposites", *Physica B, Condensed Matter*, Vol. 407, No. 16, pp. 3181-3183 (2012) .
- Y.-F. Zhu, C. Ma, W. Zhang, R.-P. Zhang, N. Koratkar and J. Liang, "Alignment of multiwalled carbon nanotubes in bulk epoxy composites via electric field", *Journal of Applied Physics*, Vol. 105, Article ID 054319, 5 pages (2009) .
- W. Sun, H. Tomita, S. Hasegawa, Y. Kitamura, M. Nakano and J. Suehiro, "An array of interdigitated parallel wire electrodes for preparing a large-scale nanocomposite film with aligned carbon nanotubes", *Journal of Physics D, Applied Physics*, Vol. 44, Article ID 445303, 5 pages (2011) .
- J. Suehiro, "Technology for the filler orientation control, chapter 4 area enlargement technology of electrically aligned carbon nanotubes/epoxy resin composite film", pp.30-35 (2013), S&T Publishing Inc.

- 20) H. Suzuki, "Arrangement direction of a linear object having the high electric conductivity under the electric field whose magnitude and direction are periodically changed", the Bulletin of Hachinohe Institute of Technology, Vol. 32, pp. 189-197 (2013).
- 21) H. Suzuki and N. Taira, "Basic study for orientation control of CNF in epoxy resin by applied electric field with two pairs of cathodes", Materials System, Vol. 29, pp. 53-59 (2011) .
- 22) H. Suzuki and K. Kuga, "Alignment of carbon nanofibers in an uncured polymer using traveling electric field", Materials System, Vol. 32, pp. 19-27 (2014) .
- 23) K. Zahouily, C. Decker, E. Kaisersberger and M. Greener, "Real-time cure monitoring of UV-curable systems by using dielectric analysis and infrared spectroscopy", RadTech Europe 2003 Conference Proceedings, Vol.1, pp. 159-165 (2003) , Vincentz Network.