カーボンブラック・ポリエチレン複合体の パーコレーション現象と絶縁破壊の強さの臨界指数

学生員 富村 哲也* 正 員 岡本 徹志**
正 員 中村 修平* 非会員 大下 昭憲*

Percolation Phenomena and Critical Exponent of Dielectric Breakdown Strength of Carbon Black-Polyethylene Composites

Tetsuya Tomimura*, Student Member, Tetsushi Okamoto**, Member,
Shuhei Nakamura*, Member and Akinori Ohshita**, Non-member

This paper addresses the critical exponent of dielectric breakdown strength of composites made with carbon black and polyethylene below the percolation threshold for the first time. At first place, the percolation threshold p_c is determined based on the critical exponents of resistivity and relative permittivity of the composites. Dielectric breakdown strength E_B of the composites below p_c is measured by using an impulse voltage in the range of 10 kV to 40 kV in order to avoid the effect of joule heating. Although the observed data of E_B seem to be well fitted to the straight line with the slope of 0.9 on a double logarithm of $(p_c - p)$ and E_B , a method of least squares gives the slopes of 0.72 ± 0.12 and 0.96 ± 0.05 for the composites made with BP2000 and Asahi-Thermal, respectively. It has been found that finite carbon black clusters play an important role in the dielectric breakdown of the composites.

キーワード : カーボンブラック, ポリエチレン, 複合体, パーコレーション理論, 臨界指数, 絶縁破壊

Keywords : carbon black, polyethylene, composite, percolation theory, critical exponent, dielectric breakdown

1. まえがき

絶縁性樹脂と導電性粒子から成る複合体は、絶縁性から導電性へと幅広い抵抗率の変化と大きな誘電率の変化を示す^{(1) - (3)}。このような複合体は、塗料、抵抗体、センサー、カラーコピー機における帯電用ローラ、固体高分子燃料電池のセパレータ並びにガスカートなど工学的に重要な材料である。複合体に用いた導電性粒子が形成するクラスターの大きさ、導電率及び誘電率などの振る舞いは、複雑系^{(4) (5)}の一つとして、パーコレーション閾値 p_c からの距離 $|p_c - p|$ を変数として、それぞれの物理量の臨界指数を用いて表現される⁽⁶⁾。

このような絶縁性樹脂と導電性粒子から成る複合体にお

いて、導電性粒子の充填に伴う抵抗率の変化の仕方は、良く知られているように、2つの転移点を示す⁽¹⁾。充填に伴い最初に現れる転移点は、絶縁性の抵抗率から急激な減少を示す導電性粒子の体積分率である。更に導電性粒子を充填すると、その抵抗率の急激な減少が緩やかになる。このような抵抗率の変化を与える導電性粒子の体積分率が2番目の転移点となる。このように導電性粒子を絶縁性樹脂に充填した複合体における抵抗率の変化の仕方に2つの転移点が存在するため、抵抗率の変化より得られるパーコレーション閾値が曖昧であることがある。例えば、絶縁性から導電性になる最初の転移点における抵抗率の急激な減少は、電極間を橋絡する導電性粒子が形成されたために生じるものであり、この最初の転移点がパーコレーション閾値であるとしている^{(2) (3) (7)}。一方、2番目の転移点を越える導電性粒子の体積分率 p に対する抵抗率 ρ の変化の仕方は、導電率の普遍則⁽⁶⁾に則り、臨界指数 $t = 2$ を与える⁽⁸⁾。これは、有限系を対象とした無秩序抵抗網の抵抗の変化から求まる臨界指数と一致し、この2番目の転移点をパーコレーション閾値としている⁽⁸⁾。

* 三重大学工学部電気電子工学科
〒514-8507 津市上浜町 1515
Dept. Electronics, Mie University
1515, Kamihama-cho, Tsu 514-8507

** ㈱東芝
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4
Toshiba Corporation
2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

本論文はカーボンブラック（CB）と高密度ポリエチレン（HDPE）から成る複合体を対象として、まずCBの体積分率に対する抵抗率 ρ 及び誘電率の変化から、パーコレーション閾値を明らかにした。次に、パーコレーション閾値以下の試料を対象として、インパルス電圧を用いて、この複合体の絶縁破壊の強さ E_B を調べた。その結果、CBの充填に伴う E_B の減少の仕方は、CBクラスターの相関距離 ξ ⁽⁶⁾に依存していることが示唆された。

2. 試料及び実験方法

バインダー樹脂として高密度ポリエチレン（HDPE）（HY430：三菱化学（株）製）を用いた。用いたCBはAsahi-Thermal（（株）旭カーボン）とBP2000（キャボット社）である。それらの性質は表1に示す。表1に示す表面積は、窒素吸着法（BET法）⁽⁹⁾で求めた値である。BP2000とAsahi-Thermalは、市販のCBの表面積の上限と下限に近い値であると考えている。粒径が同一の場合、表面積が大きいCBほど、ハイストラクチャー⁽¹⁰⁾と呼ばれる。吸油量は、ジブチルフタレート（DBP）を用いて計測された値である。ストラクチャーが発達している場合、空隙容積が大きくなり⁽¹⁰⁾、吸油量が大きくなる傾向にある。従って、吸油量の値からも、BP2000はAsahi-Thermalよりハイストラクチャーと考える。また表1の粒子径は、電子顕微鏡観察により求めたCBの平均的な大きさを表している⁽¹¹⁾。BP2000の粒径は市販のCBの中でも小さい部類に属する。

これらのCBはHDPEと混練する前に、CBに吸着した水分を除去する目的で100℃・1時間空気中にて加熱処理を行った。HDPEとCBの混練は、ミキシングロール法（ラボプラストミル：MU25型、（株）東洋精機製）で140℃・15分間行った。混練物の塊を80℃まで徐冷し、カッターにて数mm程度の大きさに裁断した。この140℃・15分間の混練とその後の裁断は、5回繰り返した。このようにして得られた裁断された複合体を150℃で10分間加熱しながらプレス機によって成形した。CBの体積分率 p が小さく抵抗率 ρ が大きい場合は薄いシート状にし、一方、 p が大きく ρ が小さい場合は厚いシート状にし、結果として0.05mmから2mmの厚さのシート状試料を作成した。その後、直径30mmに銅を真空蒸着することにより電極をもうけた。 p の値はHDPEの比重を0.954g/cm³、CBの比重を1.8g/cm³として求めた⁽⁸⁾⁽¹²⁾。

抵抗の測定は空気中で行った。抵抗が20M Ω 以上の場合は、振動容量型電位計（TR-84M：タケダ理研（株）製）を用いて、直流電圧印加後30分値を電流として採用した。一方、抵抗が20M Ω 以下の場合はデジタルエレクトロメータ（195A：ケースレー社製）を用いた。

誘電率の測定は、LCRメータ（HP-4284A：HP社製）を用いて行った。LCRメータの位相の読みとり限度は0.01°である。

表1 用いたカーボンブラックの性質

Table 1. Carbon blacks used in this experiment.

	surface area (m ² /g)	oil absorption value (cc/100g)	particle size (nm)
BP2000	1475	330	15
Asahi-Thermal	19	26	90

図1 CBの体積分率 p に対する抵抗率 ρ の変化

Fig. 1. Change of ρ with volume fraction p of CB.

絶縁破壊の強さを測定するための試料は、抵抗率及び誘電率の測定を行った試料の蒸着電極をアルコールで除去したものである。絶縁破壊の強さの測定は、課電によるジュール加熱をできるだけ避けるためにインパルス電圧を用いた。試料をシリコン油に浸し、インパルス発生装置（SGS-200/6：Haefely社製）を用いて、インパルス電圧の立ち上がりで試料が破壊するように10kVから40kVのインパルス電圧を印加した。試料は球-平板電極系間に置いた。球の直径は5mmである。平板は直径が20mmである。インパルス電圧の波頭長及び波尾長はそれぞれ1.2 μ sec及び50 μ secである。絶縁破壊の強さの測定に際して、インパルス電圧及び試料に流れる電流波形をオシロスコープ（Power Pro 610：Nicolet社製）で観測し、インパルス電圧の最大値をその試料の破壊電圧 V_B とした。オシロスコープの読みとり速度は13.3nsecである。

3. 実験結果及び検討

〈3・1〉 CBの充填に伴う抵抗率と誘電率の変化 図1はCBの体積分率 p に対する抵抗率 ρ の変化を示す。 p_2 以下の体積分率の複合体の ρ を測定する際の直流電界は10kV/cmである。 p ($p < p_1$) が小さい領域では、複合体の ρ はHDPEのそれとほぼ同程度の値を示す。更にCBを充填すると ρ は急激な減少を示し、 p が p_2 を越えると、 p に対して緩やかな ρ の減少を示す。このような導電性粒子と絶縁性樹脂から成る複合体において、導電性粒

図2 $(p - p_c)$ に対する抵抗率 ρ の変化 ($p > p_c$)
Fig. 2. Change of ρ for the samples with $p > p_c$ as a function of $(p - p_c)$.

図3 $(p_c - p)$ に対する比誘電率 ϵ_r' (100 kHz) の変化
Fig. 3. Change of ϵ_r' at 100 kHz as a function of $(p_c - p)$.

子としてのCBの体積分率に伴う ρ の変化の仕方に2つの転移点が存在することはよく知られている⁽²⁾⁽³⁾。

導電性粒子と絶縁性樹脂から成る複合体の p_c 以上の p における抵抗率 ρ は臨界指数 t を用いて

$$\rho \propto (p - p_c)^{-t} \dots\dots\dots (1)$$

と表される。 t の値は、三次元系では $t = 2$ である⁽⁶⁾⁽⁸⁾。図1に p_2 と示された値は、Asahi-Thermal 及び BP2000 では、それぞれ $p_2 = 0.244$ 及び $p_2 = 0.031$ である。 p_2 以上の体積分率では、電流の電界依存性がオーミックになる特徴がある⁽¹⁾⁽⁸⁾。これら p_2 の値は、図2に示すように、 p_2 を p_c とし、 p ($p > p_2$) に対する ρ の変化が式(1)を満たすように選んだものである⁽¹⁾⁽⁸⁾。図

図4 CBクラスターの模式図と等価回路
(a) 複合体中のCBクラスターの凝集状態の模式図
(b) CBクラスター間のギャップの模式図
(c) (b) に対する等価回路

Fig. 4. Tentative images of CB clusters in a composite and an equivalent circuit :

- (a) Tentative image of CB cluster dispersion in a composite.
- (b) Tentative image of a gap between CB clusters.
- (c) An equivalent circuit of (b).

図5 抵抗率 ρ に対する比誘電率 ϵ_r' の変化
Fig. 5. Change of ϵ_r' at 100 kHz with ρ .

中に示す直線の傾きは -2 である。

図3は、100 kHzにおける比誘電率 ϵ_r' の値を p_c ($p_c = p_2$) からの距離 $|p_c - p|$ ($p < p_c$) に対して示す。図中に示す直線の傾きは -1 である。複合体の ϵ_r' の p に対する変化の仕方も、式(1)と同様に臨界指数 s を用いて

$$\epsilon_r' \propto |p - p_c|^{-s} \dots\dots\dots (2)$$

と表され、ここで $s = 1$ である⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。このように、図1に示す p_2 は、抵抗率及び比誘電率の臨界指数を満足することから、 p_c と結論された。

パーコレーション閾値以下では、図4(a)に示すように、複合体中にはさまざまな大きさのCBクラスターが存

在するものの、有限な大きさのCBクラスター間には薄い樹脂層が存在する。図4(a)の上下の実線を電極とすると、CBクラスターは電極間を橋絡する、いわゆる「浸透現象」を生じていない。従って、 p_c 以下の複合体を流れる電流は、図4(b)に示すようにCBクラスター間に存在する薄い樹脂層に律速される⁽⁸⁾。従って、薄い樹脂層を抵抗 R_G とキャパシタンス C_G の並列回路で表し、CBクラスターの抵抗を R_{CB} で表すと、図4(b)は図4(c)に示す等価回路によって表される⁽²⁾。図4(a)の電極間の静電容量は、図4(b)に示す薄い樹脂層に起因した多くの静電容量(以降、簡単のためにマイクロキャパシタ⁽¹⁵⁾と呼ぶ)の合成である。

p_c 以下の p に対して、 10 kV/cm の電界下で測定された ρ と 100 kHz における ϵ_r' の変化を図5に示す。図より、CBの充填に伴い ρ の低下とともに ϵ_r' は大きくなる。図4に示したように、CBの充填に伴いCBの有限クラスター間に存在する樹脂層が薄くなり、 ρ が小さくなり、 ϵ_r' が大きくなるわけである。同じ ρ においては、Asahi-thermalを充填した試料系とBP2000を充填した試料系の ϵ_r' には顕著な差異はないと考えられる。

〈3・2〉 複合体の絶縁破壊の強さ

〈3・2・1〉 絶縁破壊過程と絶縁破壊の強さ 無秩序抵抗-キャパシタ網の高電界現象は、近年盛んに検討されている^{(15)~(19)}。高電界非線形現象は、Ohtsukiら⁽¹⁵⁾によって初めて報告された。図4(b)に示したCBクラスター間の電圧 V_G は、CBクラスターの長さを ξ ⁽⁶⁾とすると

$$V_G = \xi E \dots\dots\dots (3)$$

となる⁽¹⁵⁾。ここで、 E は課電電圧 V を試料厚さ d で除した平均電界である。 ξ はパーコレーション現象において重要な物理量の一つであり

$$\xi \propto |p - p_c|^{-\nu} \dots\dots\dots (4)$$

と表され、三次元系では、臨界指数 $\nu=0.9$ である⁽⁶⁾。一方、有限のCBクラスターとその間に介在する樹脂層を図4(c)と同様な等価回路を図6(a)に再び示す。無秩序抵抗-キャパシタ網は、図6(b)のように表される。図6(b)の上下端の太い実線は電極を意味する。また、図6(b)の破線で示す各辺は図6(a)で示される等価回路に対応する。図6(b)の上下端に高い電圧が印加されると、各辺に存在するマイクロキャパシタが絶縁破壊現象を生じ、抵抗に変化すると仮定する。

図7は無秩序抵抗-キャパシタ網の絶縁破壊過程を示す。図中の破線で示す辺は、図6と全く同じ意味を有し、上下端の太い実線は電極である。そのような場合、図7(a)に示すように、課電により、最初に一つのマイクロキャパシタがある電界 E_1 で絶縁破壊を生じる。破壊した箇所は実線にて示す。図7(b)に示すように、次々とマイクロキャパシタに絶縁破壊現象が生じ、図7(c)に示すように、全路破壊に至る⁽¹⁹⁾。最初の絶縁破壊から全路破壊に至る

図6 無秩序抵抗-キャパシタ網のモデル
(a) CBのクラスター間のマイクロキャパシタの等価回路
(b) 無秩序抵抗-キャパシタ網

Fig. 6. A model of random resistor-capacitor network :

- (a) An equivalent circuit of a micro-capacitor between CB clusters.
- (b) A random resistor-capacitor network.

図7 無秩序抵抗-キャパシタ網の絶縁破壊過程
Fig. 7. Dielectric breakdown process in a random resistor-capacitor network :

- (a) Initial dielectric breakdown.
- (b) Dielectric breakdown process.
- (c) Complete dielectric breakdown.

マイクロキャパシタの絶縁破壊の強さは、それぞれ異なると考えられる。空間電荷の影響を無視し、図7のラプラス電界がある閾値電界を越えたときにマイクロキャパシタが絶縁破壊現象を示すモデルが数値計算されている。Bealeら⁽¹⁹⁾によると、全路破壊に至る最大の絶縁破壊の強さ E_B は、最初に生じる破壊電界 E_1 に等しく、

$$E_B \approx E_1 \propto (p_c - p)^\nu \dots\dots\dots (5)$$

となる。

〈3・2・2〉 複合体の観測された絶縁破壊の強さ 図8はAsahi-Thermalを充填した複合体にインパルス電圧を課電した際に観測された電圧波形を試料厚さ d で除した電界 E を示す。ただし、試料の p は 0.147 、 d は 0.17 mm である。同図には参考の為に、インパルス電圧波形も

図8 観測された電圧波形から求めた電界 E とインパルス電圧波形 (CB: Asahi-Thermal, $p = 0.147$)

Fig. 8. Electric field E across the sample of $d = 0.17$ mm and $p = 0.147$. The sample is made with HDPE and Asahi-Thermal. The value of E is estimated by dividing voltage across the sample by d . In the figure, a waveform of impulse voltage is also shown.

示す。図8より、 E はピークを示し、この最大値は絶縁破壊の強さ E_B に対応すると考えている。

p が大きくなると、図4に示すCBの有限クラスター間の樹脂層はより薄くなる。絶縁破壊は、図4に示すマイクロキャパシタが課電により抵抗に変化することにより生じると考えている。図7に示すように、これらのマイクロキャパシタが次々と絶縁破壊を生じ、全路破壊に至る際の最大値が絶縁破壊の強さに対応する⁽¹⁹⁾。従って、 p が大きくなると観測される絶縁破壊の強さはより低くなる。

図9は p 及び ρ に対する E_B の変化の仕方を示す。図9 (a) は p に対する E_B の変化である。図9 (a) に示すBP2000 から成る複合体の E_B は、 p の小さな領域から急激に低下し、一方、Asahi-Thermal から成る複合体の E_B は、 p の大きな領域までなだらかに減少している。図1に示したように、BP2000 は Asahi-Thermal に比べて、より小さな p から ρ の急激な低下を示した。従って、このような p に対する E_B の変化の仕方は、図1における p_2 以下の p に対する ρ の変化の仕方と対応すると思われる。しかしながら、図9 (a) より、CBの種類によって E_B に大きな差異はないと思われる。図9 (b) は、 ρ に対する E_B の変化の仕方を示す。図9 (b) より、同じ ρ の値における E_B の差異は明確ではないが、 E_B の値の範囲はほぼ同じであると思われる。

図10は、 $p_c - p$ に対する E_B の変化を示す。ただし、図9 (a) において、 p_c 付近の試料である $p = 0.029$ (BP2000 を充填した試料系) と $p = 0.225$ (Asahi-Thermal を充填した試料系) の E_B の値は、図10から除いた。これらの試料は、 ρ が低いために、ジュール熱の影響を受けている可能性があるからである。ジュール

(a) p に対する E_B の変化

(b) ρ に対する E_B の変化

図9 CBの体積分率 p と抵抗率 ρ に対する絶縁破壊の強さ E_B の変化

Fig. 9. Change of dielectric breakdown strength E_B with p and ρ :

(a) Change of E_B with p .

(b) Change of E_B with ρ .

熱の影響を受けると、試料の加熱により熱膨張が生じ、図4に示す有限クラスター間の間隙が広がる。これは p_c に近い p ($p < p_c$) を有する試料の ρ が正の抵抗温度係数を示すことから示唆されている⁽²⁰⁾。従って、ジュール熱は E_B を高くする影響があると考えられたからである。

図10に示す直線は傾き $\nu = 0.9$ である。 p に対する観測された E_B の値はこの直線によく一致すると思われる。また、最小二乗法をこれら観測結果に適用すると、BP2000 と Asahi-Thermal をそれぞれ充填した試料系の傾きは、それぞれ 0.72 ± 0.12 及び 0.96 ± 0.05 であった。従って、 E_B は、 $(p_c - p)^\nu$ に比例し、その臨界指数は $\nu = 0.9$ であることが示唆された。このような臨界指数 $\nu = 0.9$ は

図 10 $(p_c - p)$ に対する絶縁破壊の強さ E_B の変化

Fig. 10. Change of E_B as a function of $(p_c - p)$.

Beale らの数値計算からも示唆されている⁽¹⁹⁾。臨界指数 ν は、C B クラスターの直線的な長さを意味する相関距離 ξ の臨界指数でもある⁽⁶⁾。従って、図 10 に示すような C B の充填に伴う E_B の変化の仕方は、C B クラスターの相関距離 ξ に支配されていると考えられる。

4. まとめ

2 種類のカーボンブラック (C B) を導電性粒子として、バインダー樹脂としての高密度ポリエチレン (HDPE) にそれぞれ充填した複合体を対象として、抵抗率及び誘電率のパーコレーション現象を明らかにし、有限な大きさである C B クラスター間の樹脂層に起因したマイクロキャパシタを検討した。これから得られた知見を基に、複合体の絶縁破壊の強さを調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

C B の充填に伴い絶縁破壊の強さ E_B は低くなる。観測された E_B は、 E_B と $(p_c - p)$ の両対数上で直線に近似できた。観測結果はその直線の傾き $\nu = 0.9$ によく一致した。さらに観測結果に最小二乗法を適用して求めた傾き ν は、Asahi-Thermal を充填した試料系において 0.96 ± 0.05 、BP2000 を充填した試料系において 0.72 ± 0.12 であった。その結果、C B の充填に伴う E_B の減少の仕方は、C B クラスターの相関距離 ξ に依存していることが示唆された。

最後に、試料のご協力を頂いた三菱化学 (株)、(株) 旭カーボン並びにキャボット・スペシャルティ・ケミカルズ・インク (株) の皆様に心から感謝いたします。

本研究の一部は、平成 13 年度経済産業省即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業の委託を受けて行われたものである。

(平成 14 年 2 月 22 日受付, 平成 14 年 7 月 22 日再受付)

文 献

- (1) S. Nakamura: "Percolation Phenomena in Polymeric Materials", *J. Inst. Electrostat. Japan*, Vol. 25, No.3, pp. 142-147 (2001) (in Japanese)
中村修平:「高分子材料におけるパーコレーション現象」, 静電気学誌, **25**, pp.142-147 (2001)
- (2) Edited by E. K. Sichel: CARBON BLACK-POLYMER COMPOSITES, Marcel Dekker, New York (1982)
- (3) N. Probst: "8.1.2 Conductivity Imparted by Carbon Black to Composite", in Carbon Black, J. -B. Donnet, R. C. Bansal, and M. -J. Wang, Eds, pp. 273-281, Marcel Dekker, New York (1993)
- (4) 「特集-非線形現象の不思議」, 通信学誌, **80**, No.11 (1997-11)
- (5) 徳田 功, 合原一幸:「複雑系とカオス」, 電学誌, **118**, No.5, pp. 294-297 (1998-5)
- (6) D. Stauffer and A. Aharony: Introduction to Percolation Theory, Taylor & Francis, London (1992)
- (7) K. Miyasaka, K. Watanabe, E. Jojima, H. Aida, M. Sumita, and K. Ishikawa: "Electrical conductivity of carbon-polymer composites as a function of carbon content", *J. Materi. Sci.*, **17**, pp. 1610-1616 (1982)
- (8) S. Nakamura, K. Saito, G. Sawa, K. Kitagawa, and A. Snarskii: "Critical Exponent of Conductivity and Percolation Phenomena of Carbon Black-Polyethylene Composite", *T. IEE Japan*, Vol. 117-A, No. 4, pp. 371-381 (1997-4) (in Japanese)
中村修平・齋藤一彦・澤 五郎・北川恵一・A. Snarskii:「カーボンブラック・ポリエチレン複合体の導電率の臨界指数とパーコレーション閾値」, 電学論A, **117**, 4, pp. 371-381 (1997-4)
- (9) カーボンブラック協会編集:カーボンブラック便覧第三版, p. 108, カーボンブラック協会 (1995)
- (10) 同上, pp.76-77
- (11) 同上, p.67
- (12) F. Ehrburger-Dolle, J. J. Lahaye, and S. Misono: "PERCOLATION IN CARBON BLACK POWDERS", *Carbon*, **32**, No. 7, pp. 1363-1368 (1994)
- (13) I. Webman, J. Jortner, and M. H. Cohen: "Critical exponents for percolation conductivity in resistor networks", *Phys. Rev. B*, **16**, No. 6, pp. 2593-2596 (1977)
- (14) L. Efros and B. I. Shklovskii: "CRITICAL BEHAVIOUR OF CONDUCTIVITY AND DIELECTRIC CONSTANT NEAR THE METAL-NON-METAL TRANSITION THRESHOLD", *Phys. Stat. Sol. (b)*, **76**, pp. 475-485 (1976)
- (15) T. Ohtsuki and T. Keyes: "Conduction in random networks of super-normal conductors: Geometrical interpretation and enhancement of nonlinearity", *J. Phys. A: Math. Gen.*, **17**, pp. L559-L563 (1984)
- (16) L. Niemeyer, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann: "Fractal Dimension of Dielectric Breakdown", *Phys. Rev. Lett.*, **52**, No.12, pp. 1033-1036 (1984)
- (17) H. Takayasu: "Simulation of Electric Breakdown and Resulting Variant of Percolation Fractals", *Phys Rev. Lett.*, **54**, No.11, pp. 1099-1101 (1985)
- (18) T. Tanamoto and A. Toriumi: "A Percolation Approach to Dielectric Breakdown", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, No.3B, pp. 1439-1442 (1997)
- (19) P. D. Beale and P. M. Duxbury: "Theory of dielectric breakdown in metal-loaded dielectrics", *Phys. Rev. B*, **37**, No. 6, pp. 2785-2791 (1988)
- (20) T. Tomimura and S. Nakamura: "Temperature Dependence of Resistivity of Carbon Black-Polyethylene Composites Below and Above Percolation Threshold", *T. IEE Japan*, Vol. 120-A, No. 12, pp. 1108-1113 (2000-12) (in Japanese)
富村哲也・中村修平:「カーボンブラック・ポリエチレン複合体のパーコレーション閾値前後の抵抗率の温度依存性」, 電学論A, **120**, 12, pp. 1108-1113 (2000-12)

富 村 哲 也

(学生員) 2000年三重大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻修了。現在同大学院工学研究科博士後期課程材料科学専攻在学中。

中 村 修 平

(正員) 1973年信州大学・院・電気工学専攻終了。工博。77年三重大学助教授。電子材料工学に関する研究に従事。

岡 本 徹 志

(正員) 1994年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程結晶材料工学専攻修了。同年4月、株式会社東芝入社、現在に至る。主として、発電機、変圧器に関する絶縁材料の開発に従事。

大 下 昭 憲

(非会員) 1970年名古屋大学・院・博士課程電気及び電子工学専攻単位取得退学。工学博士(73年10月)。78年三重大学助教授。88年同大学教授。電子波動光学に関する研究に従事。