特集　第 21 回システムインテグレーション部門講演会

計測自動制御学会論文集
Vol.58, No.1, 61/71（2022）

電子回路利用に向けた漆膜の電気絶縁特性評価

花田信子*・三井雅史**・志築文太郎**
山口佳樹**・橋本悠希**

Evaluation of Electric Insulation Properties of Lacquer Films for the Use to Electronic Circuits

Nobuko HANADA*, Masashi MITSUI**, Buntarou SHIZUKI**,
Yoshiki YAMAGUCHI** and Yuki HASHIMOTO**

Lacquer, which is called Urushi in Japanese, is natural coating material having various merits such as resistance to water and chemicals, and has been used in traditional Japanese crafts. We investigated electric insulation properties of lacquer films for using them as board and coating material of electronic circuits. The results of our experiments showed that the lacquer films have humidity dependence on the insulation resistivity in the 25–75% range of relative humidity, because they have hygroscopicity. The lacquer films have an insulation resistivity of approximately $10^{15}\,\Omega\cdot$cm at room temperature. However, the insulation resistance decreased by 4–5 orders of magnitude at higher than a certain voltage. It was clarified that the insulation performance at lower than 5 V in the electronic circuits could be maintained by using the lacquer film, which was more than 5 μm of thickness.

Key Words: lacquer film, electric insulation properties, electric circuits

1. 序　　論

漆は耐水性，耐薬品性，抗菌性などの優れた特性をもちあわせており，人や環境に対して優しい無公害の天然樹脂塗料である．そのため，日本では古くから食器などの日用品，船舶，建築物などの塗料として漆が広範囲に利用され，日本独特の装飾美をもった伝統工芸として世界に知られている．また，再生産可能な天然樹脂であるため環境負荷も低く，現代社会の重要な課題である「自然との共生」に適することから，SDGs への取り組みとして漆を積極的に利用する活動も行なわれている [1]．しかしながら，現在の漆の用途は工芸品や文化財の修復程度しか存在せず，需要をどのように創出するかが課題となっている．これに対して近年，自転車やスケートボードなど，これまで使われなかったモノに漆を塗布していくという試みが進んでいる [2),3)]．また，漆の堅牢性に着目し，乾漆 (麻布などを糊漆で貼り重ねて素地を作る) という技法を用いて製作した漆板を直接構造材として家具などに利用する研究も存在する [4]．さらには，紫外線に暴露されると色が変化することを利用して，紫外線レーザーによる漆面上への文様描画手法も提案されている [5] など，漆の可能性を広げる試みが進められている．

このような状況の中，われわれは漆の電気絶縁性に着目した．漆は，(3–10) $\times 10^{15}\,\Omega\cdot$cm の体積抵抗率および 25〜100 kV/mm の絶縁耐力を有することが知られている [6]．このことから，漆を電子回路のレジスト材として利用することが可能だと考えられる．実際，沈金 (漆面に刃物で文様を彫り，金紛などを埋め込む) という技法で漆面に配線パターンを描き，楽器インタフェースの一部として用いた例が存在する [7]．ただしこの例では，制御回路は別に存在し，一体化されていない．そこでわれわれは，絶縁機能をもつ塗料として漆膜を捉え，電子回路の絶縁材料や構造材として完全に一体化させることを提案・実証してきた [8]．本提案の基本構造は，漆膜上に導電性インクによる回路パターンと電子部品が実装されており，さらにこれを漆で覆ったものである (**Fig. 1** (a)) [9]．このように，漆に包まれ，漆の感性的情報や優れた耐性が付与された回路を，われわれは漆回路と名付けた．漆回路の利

* 早稲田大学先進理工学部　東京都新宿区大久保 3–4–1
** 筑波大学大学院システム情報工学研究科
つくば市天王台 1–1–1
* Department of Applied Chemistry, Waseda University, 3–4–1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo
** Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 1–1–1 Tennodai, Tsukuba
（Received March 29, 2021）
（Revised November 10, 2021）

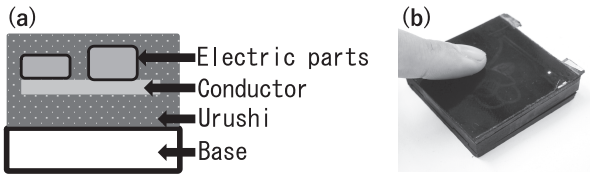


Fig. 1　(a) Structure of Urushi circuit. (b) Urushi touch interface [9]

 © 2021 SICE

点は，現在ある家具や日用品に対して塗料である漆を塗布し，その中にさまざまな機能を実装できる点にある．これにより，新たな機能を追加するたびに電子機器が増えることがなくなり，空間的な圧迫が生じない．また，漆の高い装飾性によりユーザーの満足感も高まることが期待できる．硬化後の漆は人に対して無害で衛生的であるため，日常的に肌が触れ合う食器類や子供用品などに対しても安心して利用できる．以上から，漆回路は現在最も注目されている IoT 分野，特にスマートホーム分野の普及に大きく貢献できるものと考えられる．

これまで，漆回路の例として，漆の膜上の導電体に触るとLED ランプが光る静電容量式タッチセンサ[10] やこれを拡張したマルチタッチセンサ[11]，アンテナと IC チップを内蔵した漆 NFC（Near Field Communication）[12] などを試作した．また，漆回路の多層化を実現するために，漆が紫外線に分解されるという特性を利用した非接触な漆膜加工手法を開発し，Fig. 1 (b) に示すような漆タッチインターフェイスを試作した[9),13)]．以上を通して，回路として利用可能であることを実証してきた一方，漆の具体的な電気絶縁特性に関する報告はこれまでに少なく，電子回路への応用を想定されたものではないため不十分だった[14)~16)]．そこで本研究では，漆膜がどのような電子回路に対応可能であるかを検証するため，漆膜の電気絶縁特性を明らかにすることを目的とする．

2. 実験方法

漆の主成分はフェノール性脂質のウルシオールであり，これが酸化重合すると網目構造をもつ[17)]．漆は漆液を硬化したものであり，漆液には，ウルシオール，水，水不溶分である糖タンパク質，水可溶分である多糖類（ゴム質）と酵素が含まれている．成分比は産地などにもよるがウルシオールが 50～70%，水が 20～40%であり，これらが大部分を占める．今回は，漆の枝からかきとったままの漆液である瀬〆漆（中国産，（株）箕輪漆行製）を用いた．漆液の硬化方法は 2 つあり，室温・高湿度下において酵素による酸化反応で硬化させる方法と高温で焼き付ける方法がある．本研究では硬化ムラをなくすため，焼き付けによる漆液の硬化を採用した．銅板（50 mm × 50 mm × 3 mm，純度 99.9%程度，タフピッチ銅板）に漆液を塗布した後，空気中において 250°C で 10 分間加熱することで焼き付けを行ない，漆膜を作製した．1 回の焼き付けで数枚の漆膜を作製した．渦電流式膜厚計（DT-156, CEM 社製）を用いて漆の膜厚を測定した．銅板上漆膜に対して，右上端の 17 mm × 17 mm 正方形領域内の 30 カ所で膜厚を測定し，その平均値を算出した．同様に，右下端，左上端，左下端，中央での 17 mm × 17 mm 正方形領域内においても膜厚の平均値を求め，これら 5 領域の平均値を漆膜の膜厚とした．

Fig. 2 に漆膜試料板の写真と電極の形状を示す．試料内部を流れる体積漏れ電流と試料表面を流れる表面漏れ電流を分離するために，電極系は主電極，対向電極，ガード電極で構成した．漆膜上に銀ペースト（UV700-SR1J，田中貴金属工業（株）製）を塗布することにより，直径 20 mm の円形の主電極，内径 28 mm，外径 38 mm で主電極と同心リング状のガード電極を作製した．対向電極は基板である銅板とした．漆膜の体積漏れ電流（体積絶縁抵抗）を測定するために，対向電極を正極とし，ガード電極と主電極を負極（接地）とした．体積漏れ電流測定時に対向電極とガード電極間の表面漏れ電流が測定装置の上限値に達してしまい設定印加電圧まで測定ができなかった．そこで表面漏れ電流値を小さくするために試料の端にはシリコーン（KE347T，信越化学工業（株）製）を塗布した．

漏れ電流（絶縁抵抗）測定の実験装置概要および測定時の試料写真を **Fig. 3** に示す．測定は，試料をポリエチレン製の容器に密封した状態で行なった．試料の下に集電用の Cu film（銅箔，厚さ 0.1 mm）を置いて，導線をはんだで取り付けた．さらにその下に絶縁用の Silicon Nitride Plate（SiN 板，厚さ 1 mm）を置いた．一方，試料の主電極上に集電用

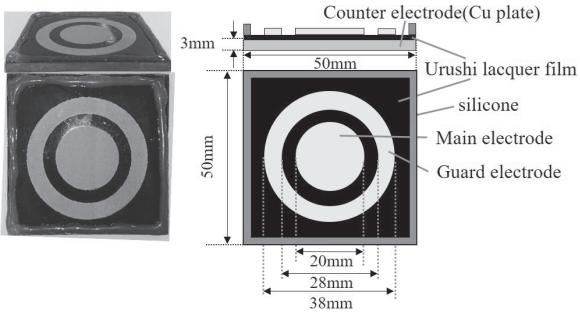


Fig. 2 Photograph and schematic of sample plate

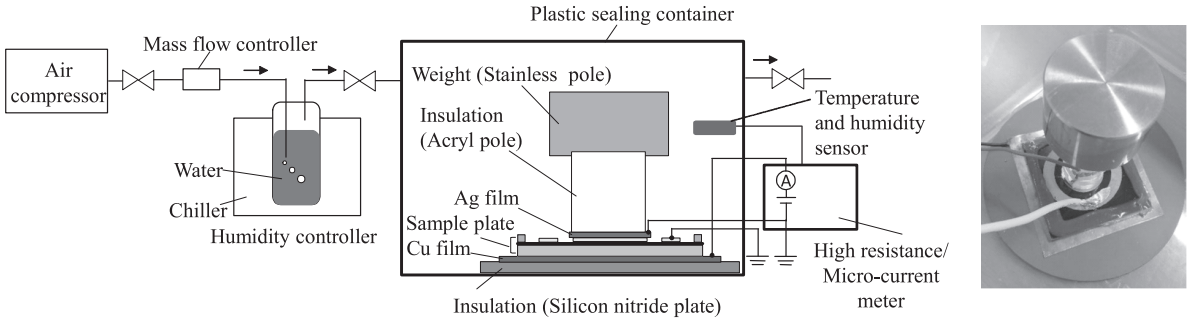


Fig. 3 Schematic and photograph of experimental apparatus

の Ag film（銀泊，厚さ 0.05 mm）を載せ，導線をはんだで取り付けた．銀箔上に絶縁用のアクリル棒を載せ，その上に重し用のステンレス棒を置いた．ガード電極上には導電性銅箔テープ（CUS-8T，タカチ電機工業製）を貼り付けて，その上に導線をはんだで付けた．

漆膜の室温での吸水率は 2.1%（相対湿度 70%）と比較的高い[18]．そこで，室温での電気絶縁特性に対する湿度の影響についても確認した．ポリエチレン製密封容器に湿潤空気を供給することで湿度を制御した．湿潤空気の作製は，水が入ったバブリング容器にコンプレッサーにより 100 cc/min の空気を供給することで行なった．温度を室内空調により 25°C に設定し，湿潤空気の相対湿度が 25，50，75%となるようにバブリング容器内の水の温度をチラーにより制御した．3 章に示す印加電圧に対する絶縁抵抗値測定については，各湿度に達し安定してから (湿度制御開始から 5 時間以上) 測定を開始した．すべて温度 25 ± 4°C，湿度 25 ± 7%，50 ± 6%，75 ± 8%の条件で測定した結果を示している．

直流電圧印加および漏れ電流（絶縁抵抗），容器内の温度・湿度測定は超高抵抗/微小電流計（5450，(株) エーディーシー製）を使用して行なった．直流電圧を 0.1 V 刻みに増加させ 60 V まで測定した．各電圧での印加時間を 100 s，電圧切り替え時間を 10 s とした．絶縁抵抗値は 1 s ごとに計測し 100 s の平均値とした．一般的な電子回路利用では高電界は必要ないことが多いため，これまでに報告されている絶縁耐力 (25〜100 kV/mm) [6] より低い 20 kV/mm 以下の範囲で漆膜の絶縁抵抗測定を行なった．

3. 実験結果および考察

3.1 漆の印加電圧に対する電気絶縁抵抗

Fig. 4 に 25°C，湿度 25，50，75%での漆膜の印加電圧に対する絶縁抵抗値を示す．Batch 1 と Batch 2 は，再現性を確認するために同じ種類の漆液から，別の時期にそれぞれ焼き付けを行なったものである．Batch 1，2 の漆膜に対して，各湿度で複数回測定を行なった．**Table 1** に測定条件と各試料の漆膜厚を示す．Batch 1 において湿度 25% (B1-25-1) では，初期の印加電圧で絶縁抵抗値は $10^{11}\,\Omega$ 程度となり，印加電圧を増加させてもほぼ一定値を保ち 50 V において $1.5\times10^{11}\,\Omega$ となった．50 V における絶縁抵抗値を体積抵抗率に換算すると $1\times10^{15}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$ となり，文献値の $(3\text{–}10)\times10^{15}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$ [6] に対して同程度の桁数となった．しかしながら，50 V 以上になると，絶縁抵抗値が $1\times10^{6}\,\Omega$ 程度まで 5 桁減少して 60 V までその値を保った．湿度 50%（B1-50-1，B1-50-2），75% (B1-75-1) においては，初期の印加電圧で $10^{10}\,\Omega$ 程度となり，それぞれ 3 V および 13 V で絶縁抵抗値が 4〜5 桁減少した．このようにすべての湿度において，初期印加電圧では絶縁抵抗値が 10^{10}〜$10^{11}\,\Omega$ となり，ある印加電圧以上では 4〜5 桁減少して $10^{6}\,\Omega$ 程度となった．

これに対して Batch 2 においては，湿度 25%（B2-25-1）と 75%（B2-75-1，B2-75-2）の試料で初期印加電圧では絶縁抵抗値が 10^{10}〜$10^{11}\,\Omega$ となり，Batch 1 と同様にある印加電圧以上で 4〜5 桁減少して $10^{6}\,\Omega$ 程度になった．しかし，湿度 50%の全試料（B2-50-1，B2-50-2，B2-50-3）と湿度 75%の一部試料（B2-75-3）では，60 V までの印加電圧で絶縁抵抗値の減少は見られなかった．湿度 50%の 2 つの試料（B2-50-2，B2-50-3）については，50 V 付近で微小電流計の測定最大値を上回ったため測定を終了した．これらの試料は測定後に絶縁を保てない状態になっていたため，膜厚の薄い部分が局所的に存在して絶縁破壊したと考えられる．

これらの結果より，まず漆膜の絶縁抵抗値に対する湿度依存性について考察する．漆膜の吸水率は 2.1%（相対湿度 70%）という報告があり，フェノール樹脂の 0.1〜0.2%（70%）に比べて 10 倍以上高い[18]．また，過去の文献においては，70°C，91%RH 中で 2000 時間程度維持すると，漆膜の絶縁抵抗値が 2 桁程度減少することが報告されている[16]．しかし，本測定結果では，初期印加電圧で絶縁抵抗値は湿度に関係なく 10^{10}〜$10^{11}\,\Omega$ 程度となった．Fig. 4 の結果を体積抵抗率でプロットしたグラフを **Fig. A. 1** に示す．Fig. A. 1 の結果を用いて，初期印加電圧 (1 V) での体積抵抗率測定時の湿度に対してプロットしたグラフを **Fig. 5** に示す．湿度 25%では，文献値 $(3\text{–}10)\times10^{15}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$ [6] に近い〜$10^{15}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$ となり，湿度 50%では 4×10^{14}〜$1\times10^{15}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$，湿度 75%では 8×10^{13}〜$2\times10^{15}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$ の範囲に分布した．これらの結果より，湿度が大きいほど体積抵抗率の分布の範囲が大きくなって，湿度 75%では下限の体積抵抗率が 1 桁低下しており，湿度に依存していることがわかった．

しかし，絶縁抵抗が 4〜5 桁減少するときの印加電圧値については，湿度に関係なく 3〜50 V までばらついており，むしろ試料個体特性のばらつきが見られた．試料個体特性のばらつきは，同じ Batch のなかでも焼き付けたときの温度分布の違いに依存している可能性がある．焼き付けの温度が 30°C 違うと漆膜の特性に差が出るという報告がある[19]．焼き付け温度は漆内の重合反応量や水分量などに影響していると考えられ，絶縁特性の違いの原因になっている可能性があげられる．つぎに，Batch 依存性について考察する．Batch 1 ではすべての試料で 50 V までに絶縁抵抗が 4〜5 桁減少したのに対し，Batch 2 では半分の試料でしか同じ特性が見られなかった．残りの半分の試料では，50〜60 V までの測定で絶縁抵抗値が 10^{10}〜$10^{11}\,\Omega$ のまま保たれていた．よって，Batch 2 には，印加電圧を増加させても，絶縁抵抗値が高いまま変化しない試料が存在することがわかった．Batch 1 および 2 において漆液の種類は同じものを使用しているが，別の時期に漆液を購入してそれぞれ焼き付けを行なったものである．漆液は産地などで成分のバラつきがあることが報告されている[20]．また中国産漆液については，主成分のウルシオールが 60〜70%，水分 20〜30%，含窒素物およびゴム質が合わせて約 10%という報告があり，成分比にも幅がある[21]．本実験のように漆を薄膜として使用する場合，漆液中混合物の不均一性や成分量の違いが顕著に現われやすく，Batch による特性の違いをも

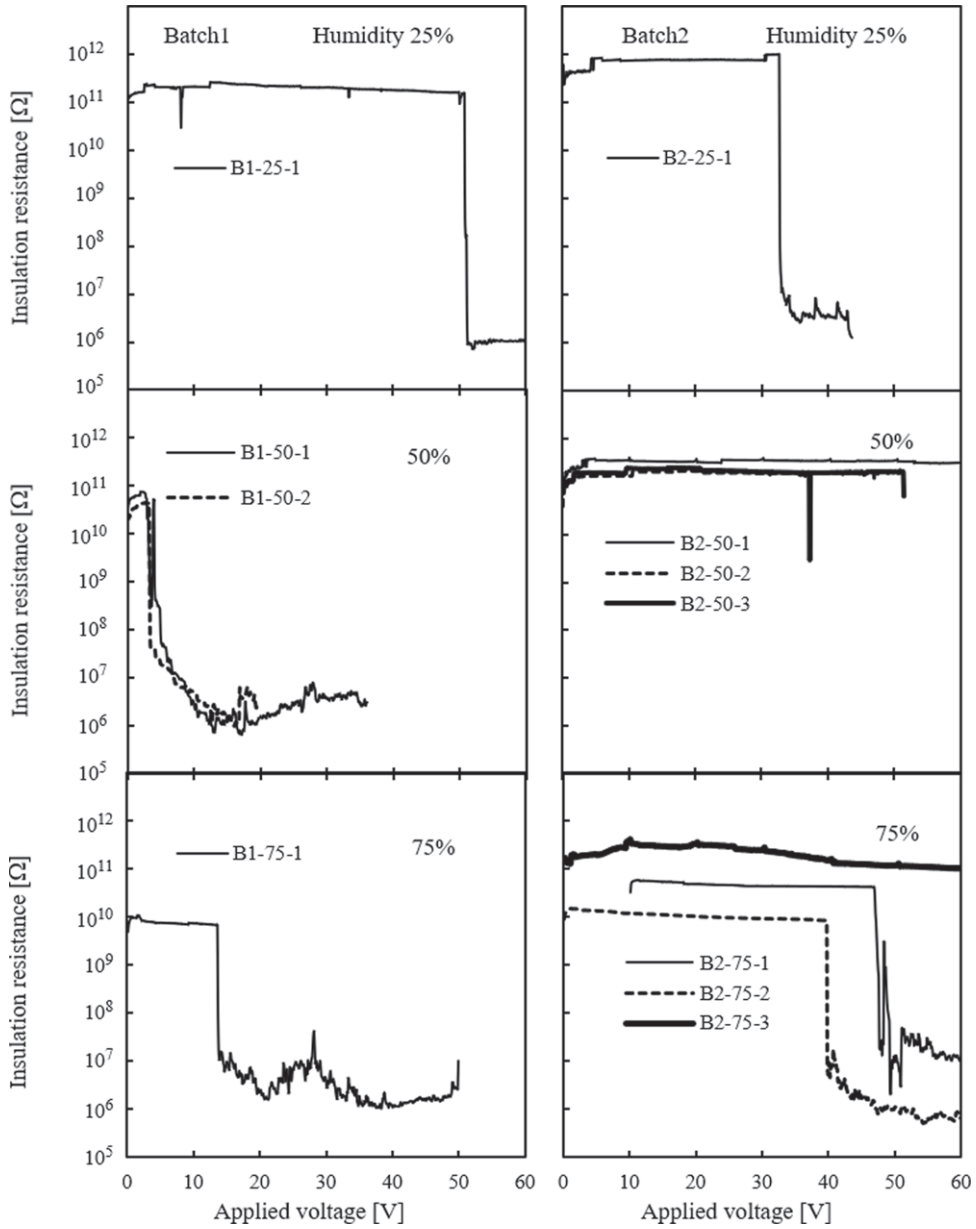


Fig. 4 Insulation resistance corresponding to applied voltage properties for (a) samples of Batch 1 and (b) Batch 2 at 25, 50 and 75% of humidity and at 25°C

Table 1 Sample names and film thickness of Batch 1 and 2, and humidity condition of insulation resistance measurement

Humidity (%)	Batch 1		Batch 2	
	Sample name	Film thickness (μm)	Sample name	Film thickness (μm)
25	B1-25-1	4.0	B2-25-1	7.2
50	B1-50-1	3.1	B2-50-1	7.3
	B1-50-2	2.9	B2-50-2	6.0
			B2-50-3	2.7
75	B1-75-1	3.6	B2-75-1	6.2
			B2-75-2	2.4
			B2-75-3	2.6

たらしたと考えられる．Batch 1 と Batch 2 の漆液の組成分析を行なった (**Table A. 1**)．文献 20) の方法に従い，加熱減量分を水分とし，主成分はエタノールで溶解した成分を秤量した．ゴム質は熱水に溶解した成分を秤量し，エタノールと熱水に不溶な成分を含窒化物とした．その結果，Batch 1 のほうが Batch 2 に比べて水分量が大きくなった．ウルシオー

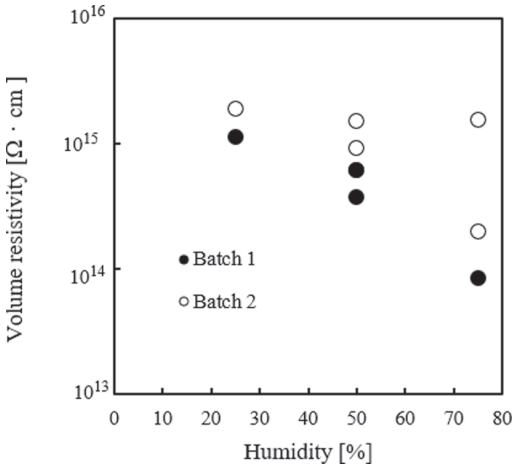


Fig. 5　Volume resistivity at 1 V of applied voltage corresponding to humidity for samples of Batch 1 and Batch 2

ルに対するゴム質，含窒素物の割合にあまり変化がないことから，両者の違いは水分量にあると考えられる．漆の硬化には高温の焼き付け処理を行なったが，水分量が多いほど漆膜内に気泡が多く発生する可能性が高くなる．気泡がある部分の膜厚は薄くなってしまうため，Batch 1 の湿度 50%や 75%が Batch 2 と比較して低い電圧で絶縁抵抗値が減少したのだと推測される．同一 Batch 内のばらつきについては，気泡の発生場所・発生状況によって実験結果への影響度に差があったのではないかと考えられる．

3. 2　漆の印加電界に対する漏れ電流

さらに，漆膜の電気伝導機構および本測定で観測された急激な絶縁抵抗値減少の要因について考察する．各試料での膜厚の違いを取り除いた上で電気絶縁特性を評価するため，Fig. 4 で示した結果を印加電界に対する漏れ電流値として示したグラフを **Fig. 6** に示す．Batch 1 において湿度 25%での試料（B1-25-1）は，漏れ電流値が印加電界増加と共に 10^{-12} A から 10^{-10} A まで増加した後，12.4 kV/mm において急激に 5 桁増加し 10^{-5} A となった．湿度 50%（B1-50-1，B-50-2），75%（B1-75-1）においても漏れ電流値の急激な増加が見られたが，そのときの印加電界は 50%で 1.1 kV/mm，75%で 3.8 kV/mm となり，湿度 25%の場合に比べて低くなった．Batch 2 においては，湿度 25%（B2-25-1）で漏れ電流値増加が起きた印加電界は 4.5 kV/mm となった．湿度 75%の B2-75-1，B2-75-2 の試料では 7.5，16.7 kV/mm で漏れ電流値増加が起き，湿度 25%に比べて大きくなった．これらの結果より，漏れ電流値の急激な増加の開始は，印加電界で比べても一定値にならず，試料ごとの特性のばらつきによるものと考えられる．

印加電界に対する漏れ電流値の線形グラフを Fig. 6 の各グラフ中に示す．漏れ電流の急激な増加が起きた試料については，増加直後の印加電界範囲までを示している．漏れ電流増加前の印加電界範囲において，印加電界に対する漏れ電流値は直線関係（$I \propto E$）になっており，オームの法則に従っていることがわかった．絶縁体の伝導機構は，一般的に電子性伝導の場合でもイオン性伝導の場合のどちらにおいても，オームの法則に従うため，この結果からはどちらの伝導機構か言及できない．ただ不純物起因のイオン性伝導の場合は低電界では $I \propto E$ となり，高電界においては $\log I \propto E$ に従う [22]．本結果の範囲では $\log I \propto E$ に従う電界領域は見られないことから，不純物起因のイオン性伝導ではないことが示唆された．

漏れ電流の急激な増加の要因として，空間電荷制限電流に起因する可能性を考察する．電極から漆薄膜への電荷注入を示唆する空間電荷制限電流が流れている場合には，存在するトラップに注入電子が充満する印加電界で電流の急激な増加が見られることがある．その場合には，電流の急激な増加後の空間電荷制限電流は印加電界の 2 乗に比例するチャイルド則に従う [22]．そのため両対数グラフで傾きが 2 になる場合に，空間電荷制限電流が流れていることになる．**Fig. A. 2** に Fig. 6 の両対数グラフを示す．漏れ電流の急激な増加が見られた電界以上で，ほとんどの試料は傾きが見られなかった．傾きが見られた B1-50-2 と B1-75-1 の試料について，高電界での傾きを求めるとそれぞれ 3.0 と 2.4 となった．これらの結果より，空間電荷制限電流を示唆する領域は見られないことがわかった．

つぎに，漆膜の構造から電気伝導機構を考察する．漆膜は，ウルシオールが酸化重合した構造となっている．また不純物として，有機化合物である糖たんぱく質，多糖類と Cu イオンを含むラッカーゼ酵素を含んでいる．室温で漆膜を作製する場合は，ラッカーゼ酵素がウルシオールを酸化することにより，酸化重合反応が進んで膜となる．ラッカーゼ酵素が，電子および H^+ を抜き出すことでウルシオールを酸化させ，酵素中の Cu イオンは 1 価から 2 価となる．ラッカーゼ酵素は空気中の酸素との反応により水を生成して，1 価の Cu イオンに戻る [23]．酸化したウルシオールは 2 量体などを生成して酵素酸化反応が進み，その後はウルシオールの不飽和側鎖が空気中の酸素により自動酸化して架橋反応が進んで硬化する [17), 24]．本研究における試料は，空気中において 250°C の焼き付けで作製されているため，熱による自動酸化と重合反応により漆膜が生成されている．ラッカーゼ酵素は，50°C 以上になると失活するので硬化反応には寄与していないが，漆膜中に存在はしており Cu イオンも何らかの形で残存していると考えられる．そのため，今回の電流値の急激な増加の要因として，酵素中の Cu イオンの存在が考えられる．詳細な伝導機構は，不純物の量とその結合状態を明らかにする必要があり，今後さらなる検討を進めていく．

つぎに漏れ電流値が，ある印加電界以上で 4〜5 桁増加する現象の再現性について調べた．Fig. 6 で示した Batch 1 の B1-25-1（湿度 25%），B1-75-1（湿度 75%）の試料に対してサイクル特性を評価した．それぞれ電界を 15，14 kV/mm まで印加させた後に，一度電界印加を終了させた．その後，同様にして電界印加を 2 回行なった．**Fig. 7** に示すように B1-25-1

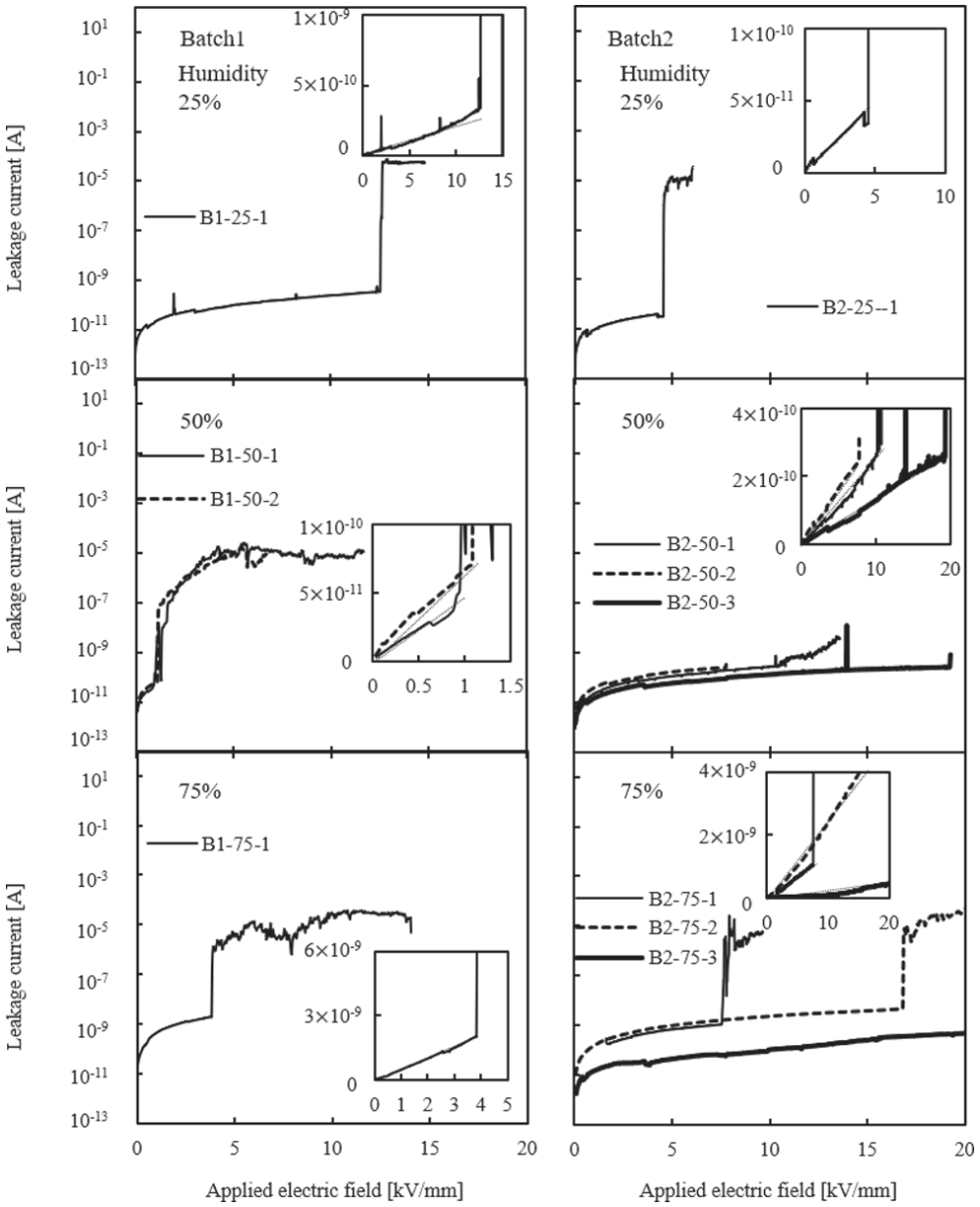


Fig. 6 Leakage current corresponding to applied electric field properties for (a) samples of Batch 1 and (b) Batch 2 at 25, 50 and 75% of humidity and at 25°C

の試料においては，1 回目で 12.4 kV/mm で漏れ電流値が増加した後，2 回目では初期印加電界で 10^{-9} A となり 1 回目の 10^{-12} A には戻らなかった．印加電界の増加と共に緩やかに増加して，12 kV/mm 以上では 1 回目と同じ 10^{-5} A 程度となった．3 回目は，3.0 kV/mm 付近で漏れ電流値が低下して変動が見られたものの，5.0 kV/mm 以上では 2 回目とほぼ同じ挙動を示した．このためこの試料は，一度漏れ電流値が増加すると 2 回目以降は元の特性には戻らず漏れ電流が大きくなることがわかった．B1-75-1 の試料では，1 回目で漏れ電流値が 3.8 kV/mm において増加した．2 回目，3 回目では 1 回目と同様に初期電界では 10^{-11} A 程度となり，電界増加と共に漏れ電流値が増加して，4.0 kV/mm 付近で 10^{-6} A まで増加した．この試料は漏れ電流値増加の再現性をもつことがわかった．これらの結果より，試料によって漏れ電流値増加の再現性に有無があることがわかり，試料個体特性のばらつきによるものと考えられる．湿度 25%で測定した試料は 12.4 kV/mm と高い電界で漏れ電流の増加が起きたため，不可逆な構造変化が生じ，サイクル特性を確認できなかった．一方で，湿度 75%で測定した試料は約 4 kV/mm と低い電界での漏れ電流増加であったため，可逆な構造変化に留まり，繰り返し同じ特性が再現できたと推測される．

3.3 電子回路利用に向けた漆膜の電気絶縁特性

これまでの結果より，漆膜の電子回路利用に向けた電気絶縁特性について考察する．タッチセンサなどのセンサ IC や制御マイコンのほとんどは USB 給電や電池での駆動を想定し，定格 3〜5 V で設計されている．この電圧範囲では，漆膜

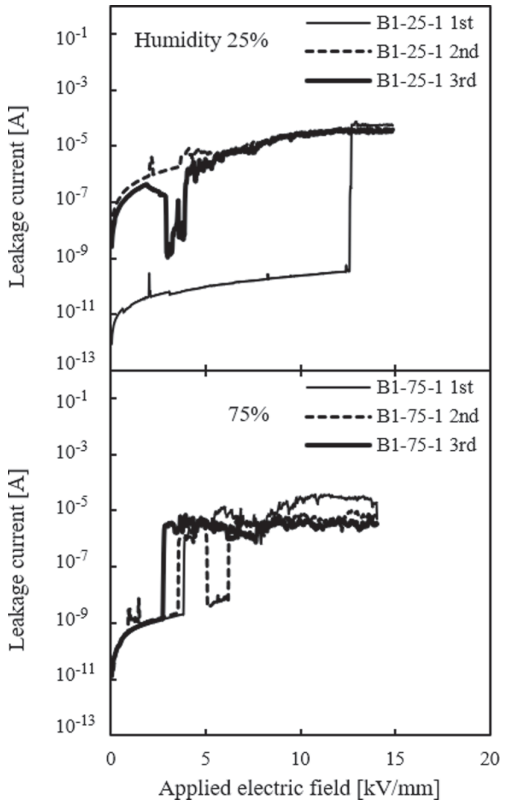


Fig. 7 Cycle properties of leakage current corresponding to applied electric field for Batch 1 of B1-25-1 at humidity 25% and B1-75-1 at humidity 75%

の絶縁抵抗率は $10^{15}\,\Omega\cdot$cm 程度となり電気絶縁体としての絶縁機能を有することがわかった．また，湿度の依存性が見られ，湿度が大きいほど体積抵抗率の分布の範囲が広くなったが，下限の体積抵抗率の低下は 1 桁であり，電気絶縁体としての絶縁機能は有している．しかし，Fig. 4 で示したようにある一定以上の印加電圧において絶縁抵抗値が 4〜5 桁減少した．この絶縁抵抗減少時の印加電圧は，試料によってばらつきが見られた．今回測定した試料 (11 sample) の 82%は 5 V 以上においての絶縁抵抗値の急激な減少であったため，基本的には電子回路利用に影響を与えない．しかし，18%の試料は 5 V 以下での絶縁抵抗値の急激な減少が見られ，半導体の体積抵抗率に近くなった．このときの印加電界は 1.1 kV/mm (Fig. 6) であるため，4.5 μm 以上の膜厚にしておけば 5 V 以下での絶縁抵抗減少が抑えられる．これらの結果より，電子回路利用には少なくとも 5 μm 以上の漆膜を用いることで 5 V 以下における絶縁性能を維持できる可能性が示された．また，電子回路での動作電圧を高くする場合には，その都度膜厚の調整を行なうことで必要な絶縁性能が得られる．逆に，半導体のような性質をもたせたい場合は，薄く塗布する，添加物を入れることなどで漆の特性を調整できる可能性がある．

他方，Fig. 7 に示したように印加電界に対する漏れ電流値のサイクル特性結果より，ある電界で一度漏れ電流値が急激に増加すると，低電界でも高い漏れ電流値を保ってしまう試料があることがわかった．この結果より，一度高電界が印加された漆膜は絶縁抵抗が著しく低下している可能性があるため，絶縁抵抗値の確認が実際の利用では必要になる．

4. 結　　論

本研究では漆膜の電子回路利用に向けて，高温で焼き付けを行なった漆膜に対して電気絶縁特性を評価した．漆膜の絶縁抵抗に対する湿度の影響および漆膜の Batch 依存性を調べた．さらに漆膜の印加電界–漏れ電流特性を示すとともに，電界印加のサイクル特性を調べた．以下に得られた知見を示す．

（1） 漆膜の電気絶縁体積抵抗率は，室温において $10^{15}\,\Omega\cdot$cm 程度となり電気絶縁体としての絶縁機能を有することがわかった．ある一定以上の印加電圧において，絶縁抵抗値が 4〜5 桁減少した．この絶縁抵抗減少時の印加電圧は，試料によってばらつきが見られた．絶縁抵抗減少が起きない試料も存在し，漆膜作製 Batch によってその割合に違いが見られた．漆液中の混合物の不均一性や成分量の違いが特性に違いをもたらしたと考えられる．また，漆膜は吸湿性をもつため，湿度 25〜75%の範囲において湿度の依存性が見られ，湿度が大きいほど体積抵抗率の分布の範囲が広くなり，下限の体積抵抗率が 1 桁低下することがわかった．

（2） 漆膜の電気絶縁特性を印加電界–漏れ電流特性で評価すると，オームの法則に従って漏れ電流の増加が見られ，ある印加電界以上でステップ的に 4〜5 桁電流値が増加した．電界印加を繰り返したサイクル評価では，ある電界で一度漏れ電流値が急激に増加すると，低電界でも高い漏れ電流値を保つ試料が存在することがわかった．このため一度高電界が印加された漆膜は，絶縁抵抗値の確認が実際の利用では必要になる．

（3） 電子回路利用には少なくとも 5 μm 以上の漆膜を用いることで，タッチセンサなどのセンサ IC や制御マイコンで用いられる USB 給電や電池駆動の電圧範囲内である 5 V 以下における絶縁性能を維持できる可能性が示された．今後は，電気的特性のさらなる検証を行なうと共に，5 V 以上への対応手法を検討し，より広範囲な応用を可能にしていく．また，実際にお椀などの食器類や家具などの漆器製品に対して各種センサや LED などを埋め込み，生活の中に溶け込む電子デバイスとしての活用を検証する．

参 考 文 献

1）漆ネクスト：https://www.urushinext.org/（2020/07/13 閲覧）
2）竹内　厚：KYOTO CRAFTS MAGAZINE，https://www.kougeimagazine.com/crafts_now/170726_tsutsumi/（2020/07/13 閲覧）
3）木下浩佑：Innovation Platform For MATERIALS and CREATORS，https://mtrl.com/magazine/dive-into-material-003/（2020/07/13 閲覧）
4）土岐，金田，尾関：構造実験に基づいた乾漆造形手法の研究，日本デザイン学会第 60 回研究発表大会，日本デザイン学会研究発表概要集，3A-01 (2013)

5）小泉，橋本，苗村：紫外線制御を用いた漆器に対する文様描画手法，ヒューマンインタフェース学会論文誌，**18**-1, 27/34 (2016)
6）兵神装備（株）：エンジニアズブック技術データ集，**190**, 169 (2017)
7）Y. Suzuki: Urushi Musical Interface，http://yurisuzuki.com/archive/works/urushi-musical-interface/（2020/07/13閲覧）
8）橋本，小泉：漆をベースとした電子回路構築手法の基礎的検討，計測自動制御学会論文集，**51**-1, 64/71 (2015)
9）明神，橋本：紫外線照射法を用いた漆膜加工システムの開発，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，**22**-1, 31/40 (2017)
10）Y. Hashimoto, N. Koizumi, Y. Myojin, B. Shizuki and N. Hanada: The *Urushi* Circuit –Use of a Traditional Craft Material for HCI–, Proceedings of ACM CHI2015 Symposium on Emerging Japanese HCI Research Collection (2015)
11）K. Ikegawa, S. Aoyama, S. Tsuchikiri, T. Nakamura, Y. Hashimoto and B. Shizuki: Investigation of Touch Interface Using Layered Urushi Circuit, Proceedings of the 12th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2018), 115/122 (2018)
12）K. Saito, T. Nakamura, K. Kamezawa, R. Ikeda, Y. Hashimoto and B. Shizuki: Japanese Patterns as NFC Antennas for Interactive Urushi-ware, Proceedings of the 14th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2020), 443/451 (2020)
13）Y. Myojin and Y. Hashimoto: *Urushi*-based Electronic Circuit: Study on Characteristic of *Urushi*'s Dissolution by Ultraviolet Light, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, **4**-1, 11/18 (2016)
14）清水，稲井：漆の弾性化とその電気的特性，電気学会雑誌，**60**-621, 157 (1940)
15）稲井　猛：漆の工業的活用に就て（I），色材協会誌，**15**-9, 1/9 (1941)
16）谷野，藤代，渡辺：漆塗料の耐湿性と電子部品用保護塗料への応用，電気学会論文誌 A，**103**-7, 379/386 (1983)
17）小川俊夫：科学，13/26, 共立出版 (2014)
18）小川俊夫：うるしの科学，34，共立出版 (2014)
19）木下，上野，中里，宮田：伝統的焼付漆技法の研究—漆の焼付（高温硬化）に関する研究（1）—，保存科学，**37**, 34/45, (1997)
20）江頭俊郎：近赤外分光法による漆評価技術—漆液成分の迅速分析—，石川県工業試験場研究報告，54 (2004)
21）藤島，梶井，江頭：漆液の簡易品質評価に関する研究，石川県工業試験場研究報告，**25**, 33/36 (2013)
22）犬石，中島，川辺，家田：誘電体現象論，205/242，電気学会 (1973)
23）R. Oshima, Y. Yamauchi, C. Watanabe and J. Kumanotani: Enzymic Oxidative Coupling of Urushiol in Sap of the Lac Tree, Rhus vernicifera, J. Org. Chem., **50**, 2613/2621 (1985)
24）宮腰哲雄：漆学，67/87，丸善出版 (2016)

《付　　録》

Table A.1　Composition of lacquer liquid of Batch 1 and Batch 2

	Batch1	Batch2
Water (wt.%)	33.4	25.7
Urushiol (wt.%)	57.8	64.5
Rubber (wt.%)	7.6	8.5
Nitrogen-containing compounds (wt.%)	1.2	1.3

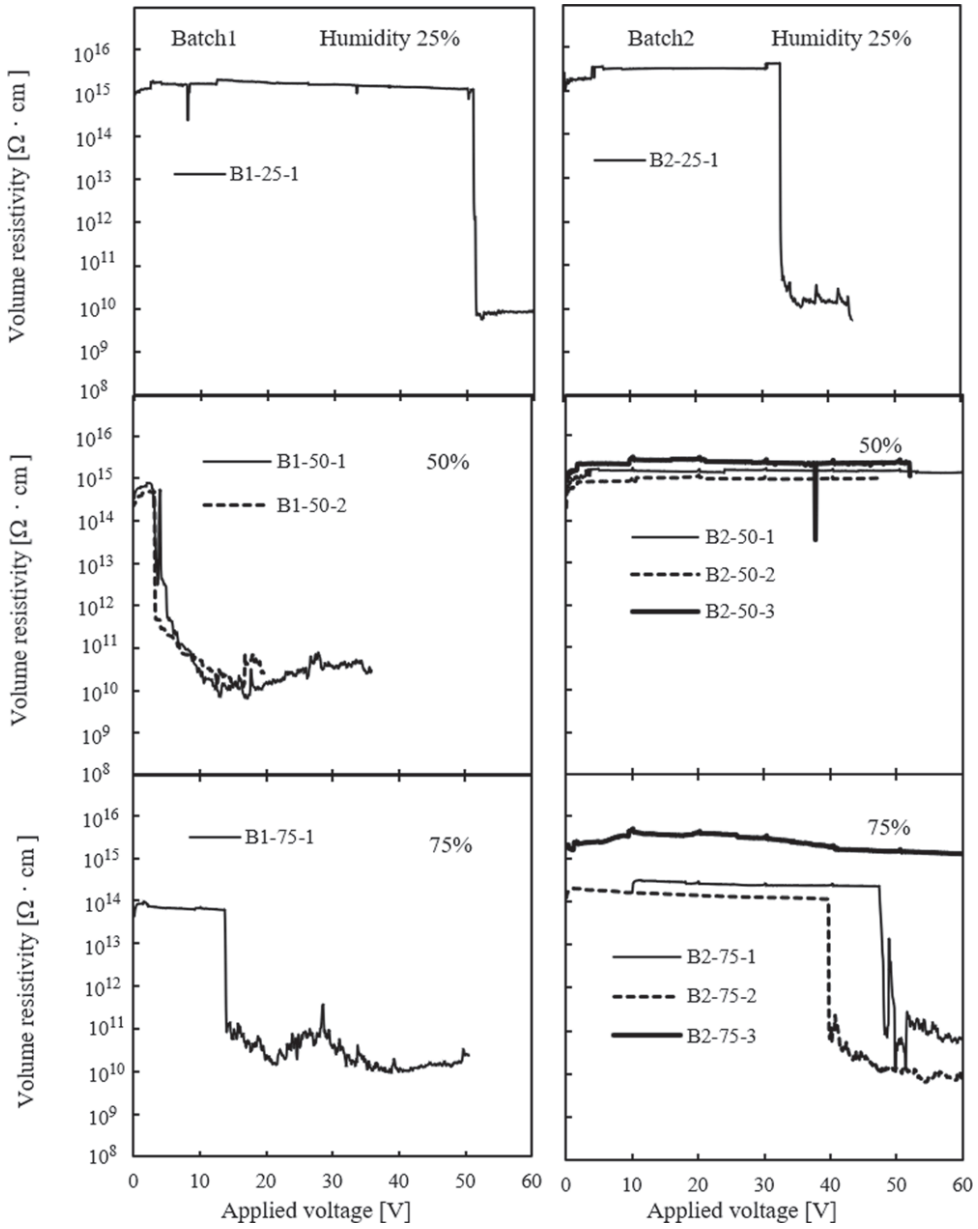


Fig. A.1　Volume resistivity corresponding to applied voltage properties for (a) samples of Batch 1 and (b) Batch 2 at 25, 50 and 75% of humidity and at 25°C

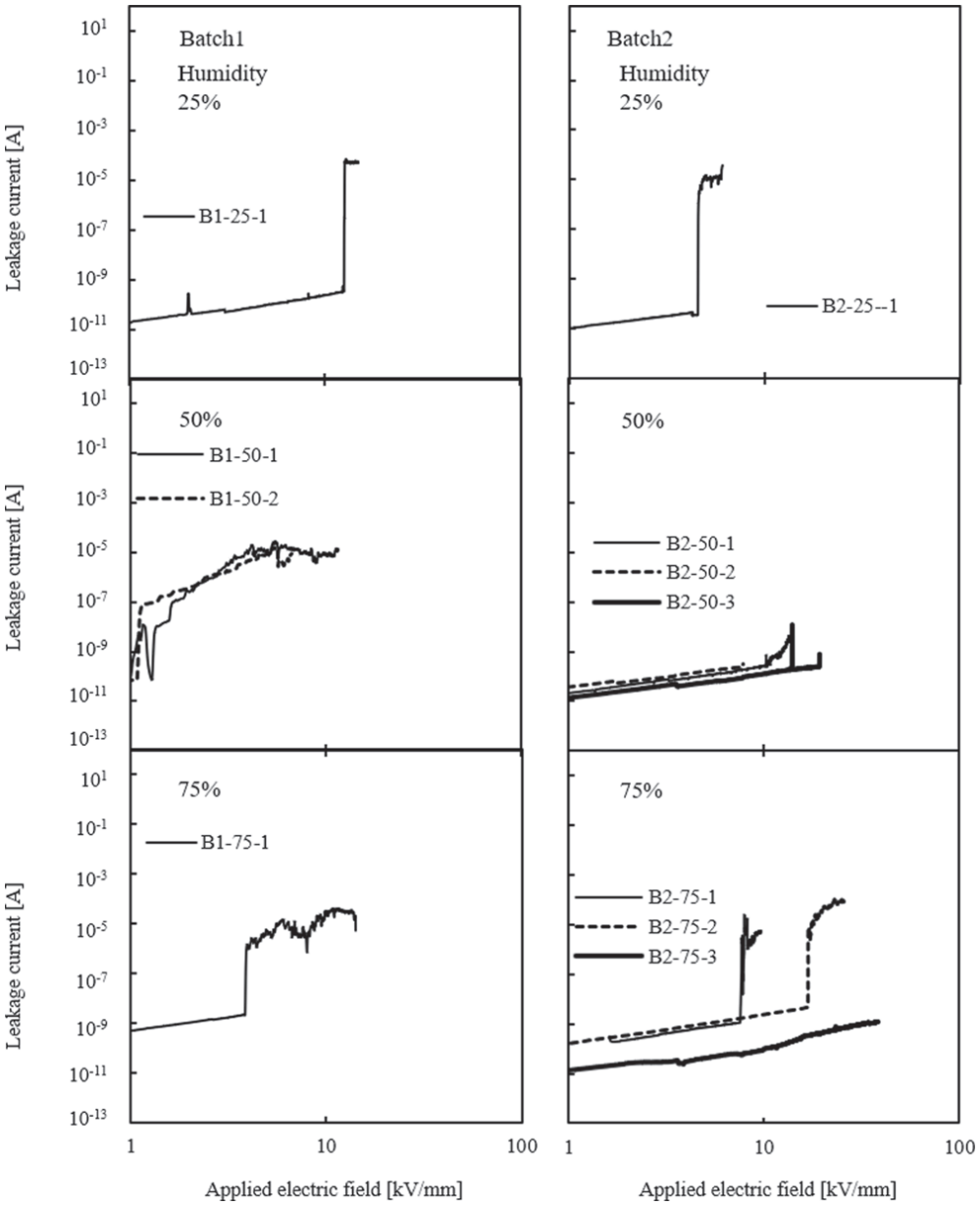


Fig. A.2 Log-log plot of leakage current corresponding to applied electric field properties for (a) samples of Batch 1 and (b) Batch 2 at 25, 50 and 75% of humidity and at 25°C

［著 者 紹 介］

花 田 信 子



2005 年広島大学大学院先端物質科学研究科量子物質科学専攻博士課程修了．2005 年～2006 年広島大学自然科学研究支援開発センター産学連携研究員．2006 年～2008 年ドイツカールスルーエ研究センターナノテクノロジー研究所客員研究員．2008 年～2010 年上智大学理工学部機能創造理工学科研究プロジェクトポストドクター．2010 年～2017 年筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻助教．2017 年早稲田大学先進理工学部応用化学科専任講師．現在に至る．博士（学術）．主として，水素貯蔵材料，水素エネルギーシステムに関する研究に従事．

三 井 雅 史



2016 年筑波大学理工学群工学システム学類卒業．2018 年筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻博士前期課程修了．同年筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻博士後期課程進学，現在に至る．主として，無機材料の電気絶縁特性に関する研究に従事．

志　築　文太郎



2000 年東京工業大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程単位取得退学．同年より筑波大学電子・情報工学系助手．現在，筑波大学システム情報系准教授．博士（理学）．主として，ヒューマンインタフェースに関する研究に従事．

山　口　佳　樹



2000 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)．2003 年筑波大学大学院工学研究科知能機能工学専攻修了．博士（工学）．同年理化学研究所横浜研究所研究員，2005 年筑波大学大学院システム情報工学研究科講師を経て，現在，筑波大学ステム情報系准教授．書き換え可能チップを用いた高効率計算システム，組込みシステム，および並列計算システムに関する研究に従事．

橋　本　悠　希（正会員）



2007 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)．2010 年電気通信大学電気通信研究科博士課程修了．2010 年大阪大学大学院情報科学研究科特任研究員 (JST-CREST)，2012 年日本学術振興会特別研究員 (PD)．2013 年筑波大学システム情報系助教．2017 年科学技術振興機構さきがけ研究員 (兼任)．現在に至る．インタラクティブ技術，触覚インタフェース，バーチャルリアリティ，漆回路などの研究開発に従事．博士 (工学)．