

# 感温液晶を用いた電子線照射下における高分子絶縁材料内部の温度分布測定

Measurement of 3D temperature distribution within high molecular insulation material under the high energy electron beam irradiation with micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystal

鈴木敬久<sup>1</sup>      三觜健太<sup>2</sup>      田中康寛<sup>2</sup>      高田達夫<sup>2</sup>      福永香<sup>3</sup>  
Yukihisa Suzuki      Kenta Mitsuhashi      Yasuhiro Tanaka      Tatsuo Takada      Kaori Fukunaga

首都大学東京<sup>1</sup>      武蔵工業大学<sup>2</sup>  
Tokyo Metropolitan University      Musashi Institute of Technology  
独立行政法人情報通信研究機構<sup>3</sup>  
National Institute of Information and Communications Technology

## 1 はじめに

宇宙空間において、人工の構造物に使用されている構成材料は高エネルギー粒子線やプラズマに曝されている [1]。高エネルギー粒子線が材料内部において運動エネルギーを失う場合、様々な衝突過程を経て熱エネルギーに変換される [2]。このときに高分子絶縁材料の構成分子と荷電粒子の相互作用により、分子結合の切断などが起こり材料自身の性質に影響を与え、劣化が促進されることが予想される。また絶縁材料が荷電粒子線に曝された場合、材料内部に空間電荷が蓄積し、内部に高電界が誘導されることにより、絶縁破壊に至ることが懸念されている。このような背景から高分子絶縁材料内に入射した荷電粒子の運動エネルギーの減衰をはじめとする物理過程を理解し、その振る舞いを明らかにすることが望まれている。

絶縁材料内に入射した荷電粒子の振る舞いを知るための手法として、PEA 法 [3] のような材料内部における電荷の蓄積の空間分布を測定する手法がある。こういった手法は材料内の空間電荷の蓄積及び散逸を測定する方法として有用である。しかしこれらの手法では、材料に入射した高エネルギー荷電粒子が空間電荷として蓄積されるまでの物理的な過程やメカニズムを直接的に知ることが出来ない。高エネルギー粒子の絶縁材料内における運動エネルギーの減衰を温度上昇として測定することは入射粒子の高分子絶縁材料内での相互作用メカニズムを知る方法の1つとして有効であると考えられる。そこで我々はこの温度上昇の分布を測定するために、感温液晶マイクロカプセル (MTLC; Micro-encapsulated Thermo-chromic Liquid Cystal) [4][5] を用いて材料内部の三次元温度分布を非接触、非侵襲で測定する新しい手法の導入を検討した。

本研究の目的は高分子絶縁材料内に入射した相対論的高エネルギー電子を対象にして、運動エネルギーの減衰と空間的な電荷の蓄積に関してそのメカニズムを知るために、MTLC を用いたエネルギー吸収分布推定法を開発し、その適用可能性を検討することである。本稿ではエネルギー吸収分布推定のための MTLC を用いた温度上昇分布の測定の予備的な結果を示す。また MTLC 法により得られた温度分布を、PEA 法により得られた空

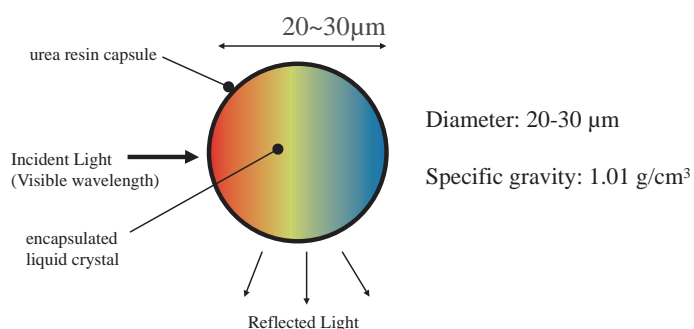


図1 感温液晶カプセルの構造。コレステリック液晶が尿素樹脂の中に封入されている。可視光を入射すると温度に応じた波長の光が散乱される。

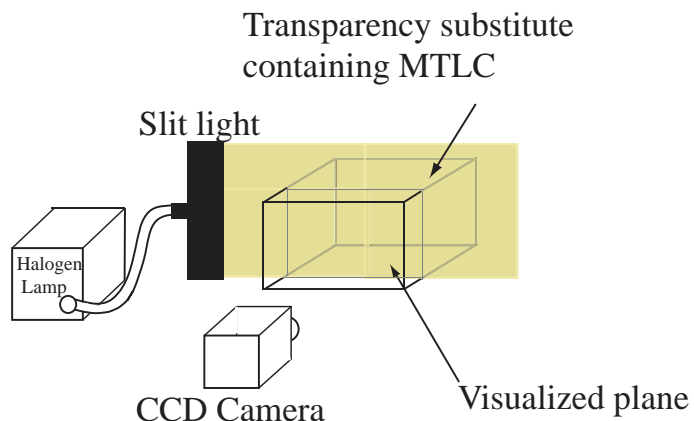


図2 温度分布可視化のための実験装置の概略図。間電荷分布と比較検討する。

## 2 MTLC を用いた3次元温度分布測定の原理 [6]

本研究では図1に示すような構造を持つMTLCを微少な温度プローブとして用いる。図に示すようにMTLCは感温液晶（コレステリック液晶）をゼラチン又は尿素樹脂によりマイクロカプセル化したものである。このように液晶をマイクロカプセル化することにより、外部の物質と化学反応などの相互作用をなくすることができるのがMTLCの利点である。また20-30 $\mu$ mのサイズなので温度変化に対する応答性が高く、適切な濃度で測定対象物に分散させることにより、高空間分解能が得られる。MTLCは温度分布可視化の対象とする透明度の高い媒

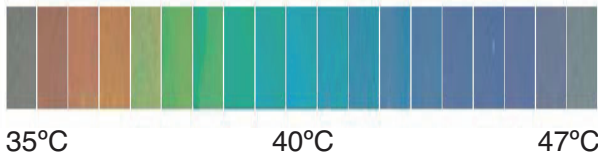


図3 感温液晶カプセルに関する温度と散乱光の色の対応関係。

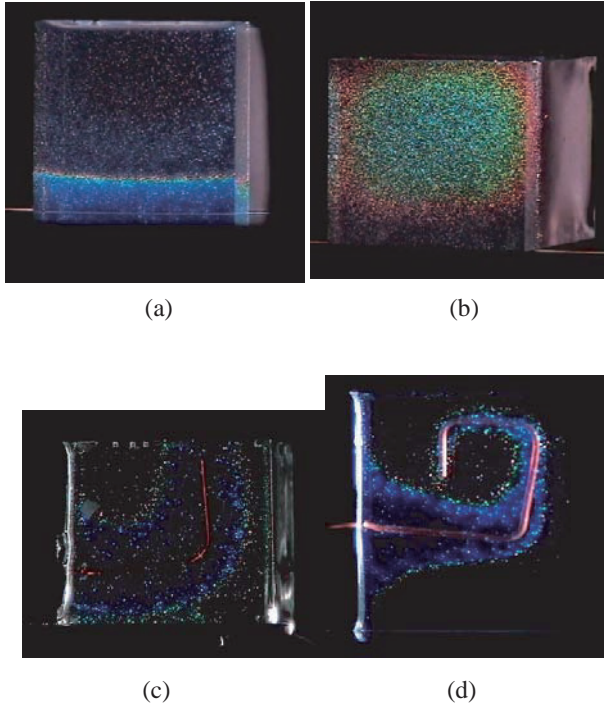


図4 エポキシ樹脂の内部の2次元温度分布の可視化。(a) 試料の底部より加熱した場合。(b) 底面より加熱した場合 (a) の加熱後の温度緩和の様子。(c) および (d) 内部に金属線を埋め込んだ試料

質、すなわち液体、ゲル、固体中に、均一に分散させて用いる。

温度分布を可視化するための測定装置の基本構成を図2に示す。図のように可視光源をスリット光にしてMTLCを含む透明媒質に入射する。そうするとスリット光上のMTLCにより光が反射され、スリット光断面内の温度分布が可視化される。さらにスリット光を空間的に掃引することにより、媒質内部の三次元の温度分布を観測することが可能である。

この原理による温度と散乱光の色の対応関係の例を図3に示す。この対応関係は35-45°Cの範囲で呈色するMTLCを水に分散させた時に得られた物である。散乱光はCCDカメラによって入射光に対して135度の角度で観測した。図のように温度が上昇するとともに、反射光の色が赤から緑を経て紫に変化していることが分かる。

### 3 MTLCによる温度分布測定のための試料の作成

ここでは、電子線照射による温度上昇の可視化のための予備的な検討として透明度の高いエポキシ樹脂を使用

する。試料の作成法は以下の通りである。粘度の低い液体のエポキシ樹脂を用意し、その中にMTLCを分散させる。MTLCが十分均一に分散した後に硬化剤を混ぜ、エポキシ樹脂の硬化を行った。上記の手順において気泡が試料中に混入しないように十分に注意をした。

作成した試料中の温度分布を可視化した例を図4に示す。試料のサイズは30mm×30mm×30mmであり、0.05wt%のMTLCを試料中に均一に分散させている。ここで使用しているMTLCの発色範囲は35°C(赤)から40°C(紫)である。図4(a)は試料中の熱伝導を観測するために、底部からヒーターにより加熱した結果である。図に示すように温度分布が色の層として可視化されているのが分かる。また図4(b)は底面からの加熱を停止した後の温度緩和の可視化結果である。図に示すように試料の周辺部が赤く呈色しており、周辺部から冷却が起こっていることが分かる。図4(c)および(d)はMTLCを分散させた試料内部に金属線を埋め込んだ物である。金属線を加熱することにより試料内部の金属線近傍からの熱伝導の様子が明確に観測できる。以上のようにこのような試料を作成することにより、エポキシ樹脂内部の温度分布が可視化されることが確認できた。

### 4 電子線照射実験

我々はエポキシ樹脂に入射する高エネルギー電子の振る舞いを絶縁体へのエネルギー吸収分布の観点から理解するために、第3節で作成したMTLCを分散させた試料を用いて予備的な電子線照射実験を行い、温度上昇分布の可視化を試みた。図5は実験配置の概略図である。図に示すように高エネルギー電子線ビームをz軸正の方向から照射し、可視光をy軸にそった方向から入射することにより、電子線からのエネルギー吸収による温度上昇分布を可視化する。

照射実験において使用した試料のサイズは30×30×10mmであり、MTLCは30°C(赤)から40°C(紫)までの呈色範囲を持つものを試料中へ0.01wt%分散させた。電子線源は日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の1号加速器[7](コッククロフト・ウォルトン型電子加速器)を用いた。照射する電子線の加速エネルギーは1.0MeV,1.5MeV,2.0MeVの3条件とし、電流密度はすべての条件において130nA/cm<sup>2</sup>とした。また電子線の照射時間はすべての条件で300sである。実験時の室温は17°Cである。温度分布の時間変化は可視化された2次元色分布としてCCDカメラで測定し、非圧縮形式(BMP形式)の時系列画像データとして記録した。

試料に電子線を照射した結果を図6示す。これらの図はCCDカメラによりリアルタイムに得られた画像を各加速エネルギーの条件に対して照射開始より60s間隔で示したものである。

全ての加速条件において、電子線の照射開始後に試料上面部が青く呈色している。本実験における1-2MeVの加速エネルギーの条件では、電子は相対論的な速度に達する。またエポキシ樹脂の屈折率はおおよそ1.5~1.6で

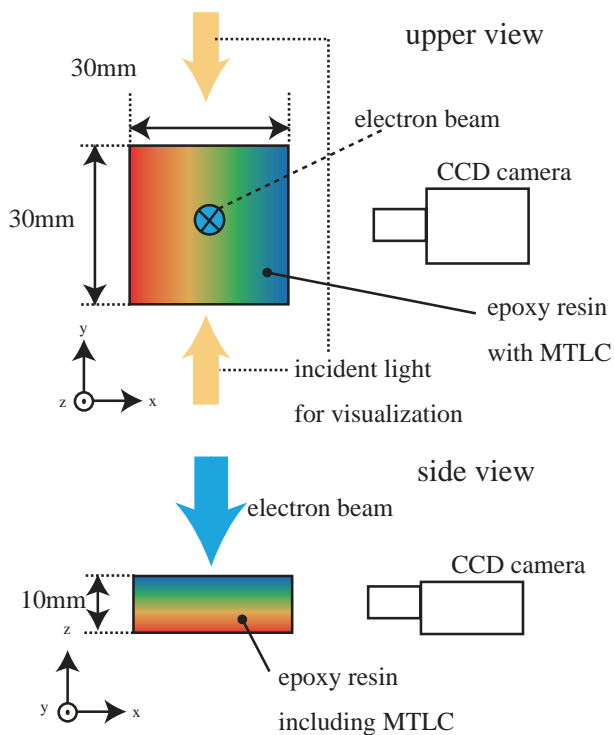


図5 高エネルギー電子線照射実験における試料内温度分布可視化の概要図。

あり上記の加速エネルギー領域の電子がエポキシ樹脂中に入射したとき、媒質（エポキシ樹脂）における光速を超える条件になっているのでチェレンコフ放射の条件を満たす。[8] この青い呈色はチェレンコフ放射による電磁エネルギーの放出であると考えられる。

図より MTLC の呈色が試料の上面部付近から起きていることがわかる。これらの結果より MTLC を用いた計測法により電子線の照射に起因する試料へのエネルギー吸収が温度上昇として可視化されたことがわかる。試料内の温度は試料上面部から上昇し、試料下部方向に向かって熱が伝播している。加速エネルギーの違いによる試料の呈色の違いに注目した場合、例えば電子線照射後 120s の画像を比較すると、加速エネルギーが高くなるに従って MTLC による呈色範囲が試料下部へ広がっていることがわかる。以上の結果は、加速エネルギーの増大による電子の試料への侵入深さの増加とそれに伴う熱源の深部への移動を示唆している。また同一照射時間内に照射される電子線エネルギーの総和が増加することによって試料に吸収される全熱エネルギーが増加することによる効果もこの実験結果に含まれていると考えられる。

## 5 高エネルギー電子線によるエネルギー吸収と空間電荷の蓄積

ここでは電子線による試料内部へのエネルギー吸収と試料内部への電荷の蓄積分布に関して考察する。電子線照射による試料内の空間電荷の蓄積は、従来から用いられている PEA 法 [3] を用いることによりわかる。図7に示すのは電子線を加速エネルギー 1MeV、電流密度

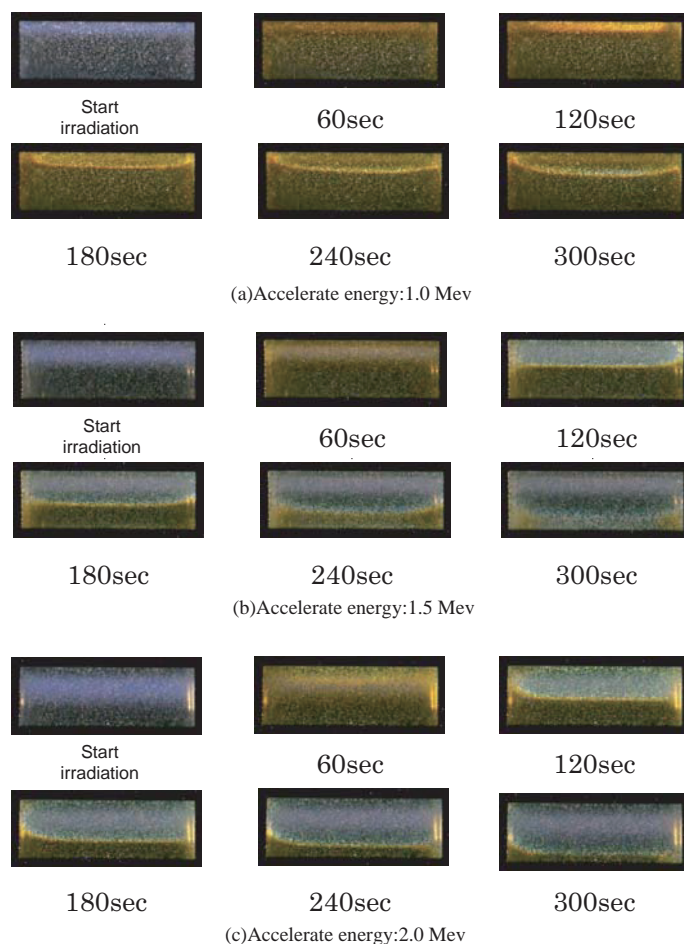


図6 電子線照射実験の結果:(a) 加速エネルギー 1.0MeV,(b)加速エネルギー 1.5MeV,(c)加速エネルギー 2.0MeV。電子ビームは試料上面から照射している。

130nA/cm<sup>2</sup> で 120s 間照射した場合の PEA により得られた空間電荷分布と MTLC による温度上昇分布の可視化結果である。

MTLC による可視化の結果から温度上昇による呈色は試料上面から 1.9mm の範囲で観測されており、このことから熱源のピークの位置は試料上面から 1.9mm の範囲内にあることが予測される。PEA 法による測定からは空間電荷の蓄積量が最大になる場所は試料上面から 2.6mm の位置であることが分かる。これらの事実から。電子が高分子材料中で停止する位置つまり電荷の蓄積が多い領域の近傍ではなく、それよりも上部の領域で荷電粒子の運動エネルギーから熱エネルギーへの変換の大部分が起こっていることが示唆される。

図8に示すのは電子の加速エネルギーに対する MTLC による発色領域の深さと空間電荷の蓄積が最大になる位置の依存性である。前節で示した結果と同様に、この図からは電子線の加速エネルギーの増加と共に MTLC による照射開始から 120s 後における発色領域の幅が深くなっていることが分かる。一方 PEA による測定から空間電荷が蓄積される位置も加速エネルギーの増加と共に深くなっていくことが分かる。これらの図から分かるように電子線が高分子試料中に落とすエネルギー分布の

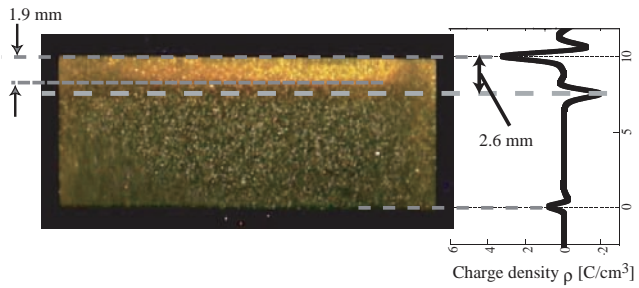


図7 MTLCによる試料の呈色とPEA法より得られた空間電荷密度分布の比較。これらは照射条件が加速エネルギー1.0MeV、電流密度130nA/cm<sup>2</sup>の場合の時に得られた結果である。

ピークの位置はMTLCにより発色している範囲の内部にあり、その位置は電子線の入射エネルギーの値によらず、常に電荷の蓄積がピークに達する位置よりも浅い位置にあることが分かる。

また電荷密度分布のピークと、熱源のピークの位置の差 $\Delta d$ とすると、 $\Delta d_{1.0\text{MeV}} < \Delta d_{1.5\text{MeV}} < \Delta d_{2.0\text{MeV}}$ となることが予測され、加速エネルギーの増加と共にそれぞれのピーク位置の差も増加していくことがこの予備実験の結果から示唆される。以上より電子の運動エネルギーから熱エネルギーへの変換による試料内へのエネルギー吸収分布に関してそのピーク位置が加速エネルギーに依存して深くなっていく度合いは、空間電荷の蓄積位置が深くなっていく度合いよりも小さく、熱源は表面付近に集中するような傾向にある。例えばチェレンコフ放射による電子のエネルギー損失を考慮した場合、図6などを見ると青い発光のピーク位置が電荷の蓄積位置より浅くなっている傾向が見られるので、MTLCによる結果はある程度妥当であると予想される。

ただし今回の結果はまだ予備実験の段階で得られた物であり、今後可視化による温度分布の詳細な定量化が望まれる。また定量化された温度分布から熱源分布（電子によるエネルギー蓄積分布）を推定する手法を開発が必要である。さらにこれらの結果と比較できるようなシミュレーションを行う予定である。

## 6 まとめ

本研究では高分子絶縁材料への相対論的な高エネルギー電子線照射において、試料中での入射電子の振る舞いについての知見を得る手段の1つとして、MTLCによる電子線エネルギー吸収分布測定の方法を提案した。新しい手法の適用可能性を検証するために透明度の高いエポキシ樹脂にMTLCを分散させた試料を作成し、それを用いて予備的な電子線照射実験を行った。その結果MTLC法を用いることにより電子線照射による試料へのエネルギー吸収を温度上昇として可視化できることが確認できた。またPEA法から得られた空間電荷密度分布のピーク位置とMTLCを用いた電子線の持つエネルギー吸収による呈色範囲の加速エネルギー依存性について比較検討を行った。電荷密度のピーク位置と吸収エネルギーのピーク位置は、加速エネルギーが増加するにつ

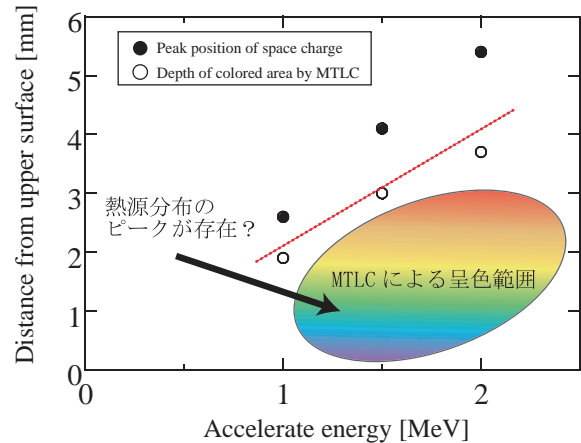


図8 MTLCによる発色領域の深さと空間電荷の蓄積位置の電子の加速エネルギーに対する依存性。

れて両者とも深くなっていくことが分かったが、その増加の割合は両者で異なる事が示唆された。これらの結果は予備的検討の段階であり、今後測定法を改善し、定量的な考察を行う予定である。

## 参考文献

- [1] J.-P. Catani and D. Payan, "Electrostatic Behaviour of Materials in a Charging Space Environment", Proc. 2004 IEEE Inter. Conf. Solid Dielectr., Toulouse, France, Vol. 2, pp.917-927, 2004.
- [2] 石川順三著, "荷電粒子ビーム工学", コロナ社(2001)
- [3] T. Maeno, T. Futami, H. Kusibe, T. Takada and C. M. Cooke, "Measurement of spatial charge distribution in thick dielectrics using the pulsed electroacoustic method", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, pp. 433-439, 1988.
- [4] J. L. Fergason, "Liquid Crystals in Nondestructive Testing," Appl. Opt., vol. 7, pp. 1729-1737, 1968.
- [5] D. Dabiri and M. Gharib, "Digital particle image thermometry: The method and implementation", Exp. Fluids, vol. 11, pp. 77-86, 1991.
- [6] Y. Suzuki, K. Fukunaga, M. Baba, M. Taki, and S. Watanabe, "Imaging the 3D Temperature Distributions Caused by Exposure of Dielectric Phantoms to High-Frequency Electromagnetic Fields", IEEE Trans. on Dielectrics and Electric Insulation, Vol. 13, pp. 744-750, 2006.
- [7] [http://www.taka.jaea.go.jp/tiara/665/japanese/Acc1/acc1\\_index.htm](http://www.taka.jaea.go.jp/tiara/665/japanese/Acc1/acc1_index.htm)
- [8] J. D. Jackson 著, 西田稔 訳, "ジャクソン電磁気学(下) 原書第3版", 吉岡書店, pp. 930-934, 2003.