

ERATO 小池フォトニクスポリマープロジェクト事後評価報告書

総括責任者：

小池 康博【慶應義塾大学理工学部物理情報工学科／教授】

研究体制：

分子デザイングループ（慶應義塾大学 K2 タウンキャンパス、Polytechnic 大学）

光機能発現グループ（慶應義塾大学 K2 タウンキャンパス）

応用グループ（慶應義塾大学 K2 タウンキャンパス）

評価委員：

鈴木 孝治【慶應義塾大学理工学部応用化学科／教授】

○谷岡 明彦【東京工業大学大学院理工学研究科／教授】

原 宏【富士写真フィルム株式会社／取締役執行役員】

宮田 清蔵【NEDO 技術開発機構／シニアプログラムマネージャー】

（○は主査）

1. 総合評価（評価の概要）

評価：秀 (Excellent)

本プロジェクトは小池総括責任者（以下、総括と略す）の、A. Einstein の「揺動説理論」と P. Debye の「光散乱理論」に基づいた基礎的かつ独創的な論文“Origin of Excess Light Scattering in Poly (methyl methacrylate) Glasses: Macromolecules Vol.25, No.18, pp. 4807-4815” から出発し、同総括の革新的発想と強いリーダーシップのもとに、屈折率分布型ポリマー光ファイバー、ゼロ複屈折フォトニクスポリマー、高輝度光散乱ポリマー導光体を中心に、基礎から応用に至るまで、システムティックに研究が進められた。

いずれのテーマにおいても独創的な成果が得られており、光機能性のポリマー技術の進歩への寄与は非常に大きいと評価できる。本分野での、全体構成力は高く、小池プロジェクトの成果だけでも光機能性ポリマーの教科書が書けるレベルである。ま

た、各グループの構成員の力も各々のテーマの中で十分発揮されている。さらに、本研究の成果は、高い実用性をもっており、同時に産業界との連携・国内外の研究機関との共同なども強力に進められており、高く評価できる。本研究は ERATO に相応しい成果を得ており、日本発「知の創成」に大いに貢献した。

分子デザイングループでは、全フッ素化ポリマー材料に注目し、非常にシステマティックに、ファイバー材料に適した特性を有する各種モノマーの分子設計から研究を始めた。フッ素系ポリマーの分子設計は、単なる炭化水素からなるポリマーとは異なり難しい点があるが、分子デザイングループはいくつかの困難を乗り越えることによって、多くのフッ素系高分子を新しく合成した。特に、近年合成に成功した Poly(perfluoro-2-methylene-4-methyl-1,3-dioxolane [通称 Poly(PFMMD)]) は、有機高分子中では GI 型 POF (屈折率分布型プラスチック光ファイバー) 材料として最高のものであり、極めて独創性が高いと評価される。この結果は、光ファイバー関連の研究者及び企業に大きなインパクトを与えており、新フッ素系高分子の探索研究が活性化された。今後本ポリマーがこの方面の主流になると考えられる。

光機能発現グループでは、ゼロ複屈折光ポリマーの実現と高光散乱導光ポリマーの実現を目標に掲げた。ゼロ複屈折光ポリマーに関する最大の成果は、可視域の波長よりも小さなサイズの炭酸ストロンチウム (SrCO_3) 結晶を高分子に混合することにより、複屈折が互いにキャンセルされ、延伸をしても光学異方性が生じないことを明らかにした点にある。このようなナノサイズの無機化合物の混合による光機能性の発現は、従来の発想を超えた成果である。また無機粒子混合によって、光透過性の減少などの問題なども解決された。光の波長と無機粒子とのサイズからすると、本機能が発現することは、科学的に非常に興味深い現象である。高光散乱導光ポリマーに関しては、Mie 散乱理論に基づく多重散乱解析を用いて、低密集領域の密度が増加するときの単一散乱の振る舞いを測定した。この結果は、高密度領域における散乱現象の特徴を示唆しており、大変興味深い。さらにこのグループは、これらの測定に基づいて高光散乱導光ポリマーの導光板を設計し、その性能を改良した。これはこの解析手法の実用性を示しており、LCD バックライト等、様々な光散乱デバイスで応用されることが期待される。またマイクロオーダーの光散乱物質を高分子に混入し、如何に光を効率よく特定方向に散乱させるかの検討を行い、Mie 散乱理論が低濃度ではよく散乱効果を示せること、補正すれば高濃度でも多重散乱挙動を精度よく予測できることを示した。これらの成果は極めて創成性に富んでいる。

応用研究グループでは、全フッ素化ポリマーが石英系無機材料に比較しても低材料分散であることを示し、屈折率が径方向に変化する GI 型 POF が 30GHz を超える

伝送帯域幅を有することなどを始めて明らかにしたことなど特筆すべき成果を上げた。さらに、高分子光ファイバーでは不可能とされた 1Gbps で伝送する GI 高分子光ファイバーを作製し、それを用いて高精細動画・双方向リアルタイムコミュニケーションシステムを実現した。このことが独創的であることは当然だが、また同時に野心的企画でもある。また実際に作製された GI 型 POF を、従来の無機光ファイバーケーブルと接続しニューヨークなどと実時間で映像・音声を送信できることを示したが、これは社会や一般人に対し、高分子機能の信頼性を与えるのに大きく貢献した。また、光ファイバーネットワーク（ギガハウスタウンプロジェクトなど）を完成させ、一部の病院やマンションに採用されるに至った。小池総括が提唱する「ファイバー・トゥ・ザ・ディスプレイ」は、このような技術に基づく新たな文化の提案と位置づけられており、遠隔医療、映像文化を展開し、産学官が結集し日本発のシステムとしてその実現をはかりつつある。

本プロジェクトは、小池総括の革新的発想と強いリーダーシップのもとに推進され、光機能性のポリマー技術の進歩への寄与が非常に大きい。各グループの構成員の力も、各々のテーマの中で十分発揮されている。さらに、研究の成果は、高い実用性をもっており、同時に産業界との連携・国内外の研究機関との共同なども強力に進められており、高く評価できる。3 研究グループの設定と人員配置は適当であり、慶應義塾大学から借用したプロジェクト拠点（K2 タウンキャンパス）には、フォトニクスポリマーの作製と評価装置が並び、研究はスムーズに進められた。またサテライトラボのポリテクニク大学（ニューヨーク）は、分子デザインに貢献した。さらに研究グループ間での相互作用をもたせており、外部の研究者との交流もまた活発であった。小池総括は国際研究集会の議長として、又は招待講演者として活躍し、ERATO での成果を世界に普及させた。小池総括は、責任者としての指導力、運営力も卓越しており、研究者間の和を保ちながら独創性、個性を育て、日本発「知の創成」に大いに貢献した。

2. 評価の詳細

(1) 分子デザイングループ

ポリマーでは、C-H ボンドにより生じる吸収損失のために透光性が低下し、このため光の伝送距離は制限されてしまう。PMMA に代表される光学ポリマーは、化学

構造の中に C-H ボンドを含んでいるため、近赤外領域における吸収損失が大きい。分子デザイングループではこの問題を解決し、さらに広帯域な伝送を実現するために、全フッ素化ポリマー材料に注目し、非常にシステマティックにファイバー材料に適した特性を有する各種モノマーの分子設計から研究を始めた。

フッ素系ポリマーの分子設計は、単なる炭化水素からなるポリマーとは異なり、難しい点が多い。また、フッ素原子を取り扱う化学は、毒性などの危険性があるために、日本の大学ではあまり行われていなかった。分子デザイングループは、このような困難を乗り越えて、多くのフッ素系高分子を新しく合成した。その中では今までに開発された企業の製品よりも光吸収損失が少なく、また Tg（ガラス転移温度）が高く、材料分散に優れた、極めてファイバーとしてのポテンシャルの高いものがある。したがって得られた成果には、高度に独創性があると認められる。

さらに、このグループが提案した合成手法は低コストで、合成過程も容易であるために極めて実用的である。このグループが開発した材料をファイバー材料及び光材料としてのさらなる評価・試験を実施し、実用可能性を吟味することは非常に重要であり、そしてその可能性に大きな期待が持てる。特に、近年合成に成功した Poly(perfluoro-2-methylene-4-methyl-1,3-dioxolane [通称 Poly (PFMMD)]) は、市販の優れた全フッ素化 GI 型 POF の材料であるサイトップポリマーより、耐熱性や材料分散の点で優れている。PFMMD は、有機高分子中では GI 型 POF 材料として最高のものであり、極めて独創性が高いと評価される。この結果は、光ファイバー関連の研究者及び企業に大きなインパクトを与えており、新フッ素系高分子の探索研究が活性化された。今後本ポリマーがこの方面の主流になると考えられる。

大量製産をするためには、モノマーコストなどまだ課題が残っている。光学物性が優れているゆえ、例えば ERATO プロジェクト終了後の研究では、大量合成（1kg 位）して光ファイバーを作製し、実際的な機能を調べることにでも取り組んでもらいたいと考える。本高分子の Tg は 130°C 以上と高いために、スルホン酸基をうまく導入できれば、燃料電池用プロトン導電性膜としての新分野への発展等も期待される。一方本研究では、デバイスに最適な新たなフッ素系ポリマーと同時に優れたドーパントを得ており、この成功は評価されて良い。この成功により、最高機能の光ファイバーが実現できると見込まれる。

(2) 光機能発現グループ

本グループでは、ゼロ複屈折光ポリマーを実現することと、高光散乱導光ポリマーを実現することを目標に掲げている。

① ゼロ複屈折光ポリマー

ゼロ複屈折光ポリマーに関しては、高分子物質は主鎖方向と分子間方向では大きな異方性があるために、光学的にも異方性すなわち複屈折が生じやすい。これは、高分子を光学部品として用いる時には大きな問題となる。したがってゼロ複屈折性高分子及び、液晶ディスプレイにも応用可能な、高度かつ均一光散乱高分子板に研究の照準を絞ることは妥当であると考える。

本グループは目標達成のために、ランダム共重合体法、複屈折性結晶ドープ法、異方性低分子量有機化合物ドープ法を提案した。これは、主軸となる高分子の複屈折とは逆方向の複屈折を有する物質を加えることにより、ゼロ複屈折が実現できるという発想に基づいている。

本グループの最大の成果は、可視域の波長よりも小さなサイズの炭酸ストロンチウム結晶を高分子に混合することにより、複屈折がお互いにキャンセルされ、延伸をしても光学異方性が生じないことを明らかにした点にある。またトランススチルベンを2%混合するだけで、応力により複屈折が生じる光弾性効果をゼロにすることも成功した。ナノサイズの無機化合物の混合による光機能性の発現は、従来の発想を超えた成果である。また無機粒子混合による、光透過性の減少などの問題なども解決されている。光の波長と無機粒子とのサイズからすると、本機能が発現することは、科学的に非常に興味深い現象である。この解明を含めて更なる新規な技術発展が期待できる。

② 高光散乱導光ポリマー (HSOT ポリマー)

HSOT ポリマーの Mie 散乱理論に基づく多重散乱解析を用いて、低密集領域の密度が増加するときの単一散乱の振る舞いを測定した。この結果は、高密度領域における散乱現象の特徴を示唆しており、大変興味深い。さらに、このグループはこれらの測定に基づいて HSOT ポリマーの導光板を設計し、その性能を改良した。これはこの解析手法の実用性を示しており、LCD バックライト等様々な光散乱デバイスで応用されることが期待される。

またミクロンオーダーの光散乱物質を高分子に混入し、如何に光を効率よく特定方向に散乱させるかの検討を行い、Mie 散乱理論が低濃度ではよく散乱効果を示せること、補正すれば高濃度でも多重散乱挙動を精度よく予測できることを示した。これらの成果は極めて創成性に富んでいる。

ゼロ複屈折高分子や光散乱高分子の創成は、液晶ディスプレイの開発にとって大変重要であり、この分野の研究者に大きなインパクトを与えた。また光散乱板については、多くの企業がその考え方を導入しようとしている。さらに Mie 散乱理論が、高分子・無機複合系によく適用できることを初めて示したことにより、多くの研究開発者が本理論を用いて解析し、結果としてデバイスの発展に貢献している。また従前からの主張の実証だけではなく、本プロジェクトの期間中に発見した、光の波長より短いナノサイズ結晶の混合による複屈折解消も、今後の科学的および技術的な発展にもつながる大きな成果であると言える。

(3) 応用グループ

応用グループが行っている研究がとりわけ独創的であるのは、ポリマー材料の目的にあわせた探索と広帯域ファイバーの開発が、独自の的方法論（光学理論に基づいた解析）により実施されている点にある。また、全フッ素化（PF）ポリマーが石英系無機材料に比較しても低材料分散であることを示し、屈折率が径方向に変化する GI 型作製の手法や、作製した GI 型 POF が 30GHz を超える伝送帯域幅を有することなどを初めて明らかにしたことなどは、特筆すべき成果であるといえる。

プロジェクトが発足する前から、PMMA 系 GI 型 POF においては、屈折率分布係数（g 値）が 2.45 と POF では優れた値を示していた。また全フッ素化ポリマー系 GI 型 POF においては、 $g = 2.30$ という値を出していたが、必ずしも理論どおりではなかった。本 ERATO プロジェクトの研究において初めて最適屈折率分布形状に近い理想分布を有する PF ポリマー系 GI 型 POF ($g = 2.05$) を得ることに成功し、重大な課題が解決された。

さらに、高分子光ファイバーでは不可能とされた、1Gbps で伝送する GI 高分子光ファイバーを作製し、それを用いて高精細動画・双方向リアルタイムコミュニケーションシステムの実現に取り組んだ。このことが独創的であるのは当然だが、また同時に野心的企画でもあった。何の理論根拠もなく高分子は“ダメ”と思っている研究者が多い中で、理論と実験で着実に高分子光ファイバーの可能性を追究してきた。

本グループの成果は世界的なインパクトを与え、多くの研究者がこの分野に参入した。また実際に作製された GI 型 POF を従来の無機光ファイバーケーブルと接続し、ニューヨークなどと実時間で映像・音声を送信できることを示したが、これは社会・

一般人に高分子機能の信頼性を与えるのに大きく貢献した。また、光ファイバーネットワーク（ギガハウスタウンプロジェクトなど）を完成させ、一部の病院やマンションに採用された。「ファイバー・トゥ・ザ・ディスプレイ」の概念は、小池プロジェクトがこのような技術に基づき、今後進める新たな文化の提案と位置づけられ、遠隔医療、映像文化を展開し、産学官が結集し日本発のシステムとしてその実現をはかりつつある。

（４）プロジェクトの運営に対して

高分子及びその混合物などを、分子レベルからさまざまなサイズの構造制御を行って、光の属性を任意にマニピュレートするという全体構想は、大変独創性に富んでいると認識されるし、また時機を得たものである。

またフッ素化学に強いポリテクニク大学岡本善之教授を研究顧問に迎え、米国にも研究拠点を置くなど国際的展開を計ったことは、研究の枠組みにも工夫が見られ、多くの成果を挙げるもととなっていると認められる。慶應義塾大学から借用したプロジェクト拠点（K2 タウンキャンパス）には、フォトニクスポリマーの作製と評価装置が並び研究はスムーズに進められた。

研究グループ間での相互作用を持たせている。例えば合成と評価の関係など、外部の研究者との交流も含めて活発であった。リーダーは国際研究集会の議長として、又は招待講演者として活躍し、ERATO での研究成果を世界に普及させた。

リーダーの強い指導力のもとに相手機関との研究交流を行ったことは、本プロジェクトを成功に導いた大きな要因と言える。

以上