

## 小池フォトリクスポリマープロジェクト中間評価報告書

総括責任者： 小池 康博 【慶應義塾大学理工学部 教授】  
研究体制： 分子デザイングループ  
光機能発現グループ  
応用グループ  
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 【東京工業大学理工学研究科有機・高分子物質専攻 教授】  
原 宏 【富士写真フイルム株式会社 執行役員】  
宮田 清蔵 【東京農工大学 学長】  
F.Kajzar 【Commissariat a l'Energie Atomique, Research Director】

### 概要

このプロジェクトは、次の4つ研究領域に焦点を当てるものである。

- 1) 屈折率分布型ポリマー光ファイバー ( Graded-Index Plastic Optical Fiber (GI-POF) )
- 2) 高輝度光散乱ポリマー導光体 ( the Highly Scattering Optical Transmission (HSOT) )
- 3) ゼロ複屈折フォトリクスポリマー ( the Zero-Birefringence Photonics Polymer )
- 4) 高出力屈折率分布型光ファイバー増幅器及びレーザー ( the High-Power Graded-Index optical Fiber Amplifiers and Laser )

小池総括責任者は、A. Einstein の「揺動説理論」と P. Debye の「光散乱理論」に基づいた論文 “ Origin of Excess Light Scattering in Poly (methyl methacrylate) Glasses ” を *Macromolecules* Vol.25, No.18, pp. 4807-4815 に発表しているが、この論文が上記の4つの領域の端緒となった。この論文は以下のことを明らかにしている。

1) 数百 dB/km の過剰散乱の原因となるサイズの大きい不均質構造は相関長が数百オングストロームの等方的構造である。

2) 不均質構造は  $T_g$  よりも低温でポリマー化する間に生成され、一方、 $T_g$  よりも高温で十分な熱処理により消滅する。

3) 偏光散乱の増大する原因は、ポリマーガラス中にトラップされて残っているモノマーが少量ポリマー化したためである。

4) 少量のポリマー化が起きない限り、 $T_g$  より低温での熱処理中に残っているモノマーが凝集して過剰散乱の原因となるようなことは自然には起こらない。

これらの結果は低損失・広帯域な GI-POF の発展の突破口となった。添加物質のサイズにより、反射屈折 ( mm )、散乱 (  $\mu\text{m}$  )、分極 ( nm ) などの効果を生じさせる反応場を有するポリマー中を、光がどのように通過するのかという観点から、小池総括責任者はポリマーに対する持論を再構築した。小池フォトリクスポリマープロジェクトは上記サイズ毎の分類に従って順調に研究を進めている。小池総括責任者のこの独創的な研究は GI-POF

の発展に寄与しただけでなく、高輝度光散乱ポリマー導光体、ゼロ複屈折性フォトニクスポリマー、高出力ポリマー光ファイバー増幅器およびレーザーなどのアイデアについても深く関連するものである。

本プロジェクトはポリマーに関する上述の研究を効果的に推進するために、次の 3 つのグループから構成されている。

- 1) 分子デザイングループ
- 2) 光機能性発現グループ
- 3) 応用グループ

この 3 グループは小池総括責任者の優れたリーダーシップのもと、相互に協力関係がよく築かれている。各グループに関する評価及びコメントを以下に記す。

#### (1) 分子デザイングループ

ポリマー中の 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する。このため光の伝送距離が制限される。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、このグループでは全フッ素化ポリマー材料に注目し、ファイバー材料に適した特性を有するモノマーの分子設計の研究を行っている。このグループで開発されたすべての新規材料は、高い Tg をもち、熱的安定性が優れ、材料分散が低い。そのためこれらの材料は光ファイバーとして優れた材料になると期待できる。

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。

このグループは、例えば光ファイバーの屈折率分布制御に関するノウハウのような、様々な深い知識を持つ他のグループと密接に情報交換し、また共同研究を継続することが強く望まれる。

このグループが開発したポリマーは非常に重要である。近い将来、このポリマーを安価に生産出来る新しいプロセスを開発しなければならない。このグループの規模は小さいが、アクティビティは非常に高い。

#### (2) 光機能発現グループ

ポリマーは様々な成形段階にて鎖状の分子が配向するために複屈折が生じる傾向がある。一般にこの複屈折は、液晶ディスプレイのように偏光を扱う光デバイスの性能を低下させる原因となっている。したがって、光デバイス中の複屈折をできる限り低く抑えたまま成形を行うことが非常に重要となる。市販品の製造では、一般にポリマー分子の配向を最小にするように工夫した成形手法が広く採用されている。この理由は、複屈折はポリマー固有の特性であり、複屈折の無いポリマーを実現することは難しいと考えられているためである。

このプロジェクトでは、ゼロ複屈折光ポリマーを実現することを目的とし、従来からのポリマーに対する理解の仕方に疑問を持ち、ポリマーの複屈折の原因を研究してきた。具体的には、無機複屈折ナノ結晶のドーピング、ナノサイズの等方的な粒子のドーピング、異方性の低分子量有機化合物のドーピング等の方法を試みている。これらの手法はすべて独創性が高く、ここから得られた知見は学術的提案に溢れている。また、これらの手法は実用的で、産業への多大なる貢献が見込まれるため、今後もプロジェクトはこれらの技術の開発の努力を継続するべきである。

HSOT ポリマーに対し多重散乱解析を用いることで、このグループではこれまで解析が難しいとされていた高散乱体密度領域の解析に取りかかっている。粒子が相互に接近している高密度領域における新しい解析手法の提案は学術的に非常に重要である。導光板または液晶ディスプレイバックライトの拡散板のような、HSOT が大いに強みを発揮する分野での応用では、比較的高密度に粒子をドーピングすることが必要である。それ故、このプロジェクトの成果は有用かつ実用的である。散乱を用いたこのようなデバイスは今まで実験と直感を頼りに設計され開発されてきた。しかし今後は、デバイスのより正確な設計と開発のためにも多重散乱解析法を発展させていくべきである。特に今後の産業の成長株である液晶ディスプレイの分野に貢献することが期待されるので、この研究テーマの寄与と発展が強く望まれる。

HSOT ポリマーの主要な問題は基本的には解決されたと見なすことができる。近い将来、ゼロ複屈折フォトニクスポリマーが更に発展することは非常に重要である。評価委員会は今後このグループが高出力屈折率分布ポリマー光ファイバー増幅器とレーザーの開発に重点を置くことを提案する。

### (3) 応用グループ

このグループは、ポリマー化学の知識と光通信技術を組み合わせる手法を用いて、高速伝送用プラスチック光ファイバーの研究開発を行っている。更に、実用化に向けた研究を行うために、周辺デバイス及びネットワークシステムの提案を含めた研究を行っている。

このグループでは、これらの手法により、伝送速度が Gb/秒クラスを越えるプラスチックファイバーを実現し、また超高速ネットワークシステムを提案することができた。これは学術的価値、及び将来の情報社会の発展という二つの視点から見て、優れた結果が得られたことを意味する。

このグループでは、全フッ素化ポリマー材料固有の特性、つまり高い透光性と低い材料分散性を光ファイバーに持ち込み、屈折率分布の精密制御を再検討すること、また伝送モード特性解析を行うことなどによって、プラスチック光ファイバーの帯域幅と透光性を劇的に向上させることに成功した。これは高速通信の媒体としての POF の実用化を大きく進展させることに寄与したということである。さらに、このグループは全フッ素化 POF がいくつかの点で石英ファイバーよりも優れた特性を持つことを見出した。例えば、高速伝

送性は光源の広い波長範囲で維持されているため、波長によって屈折率分布を制御する必要がない。そのため、全フッ素化 POF の実用性は高いと評価することができる。評価会でのデモンストレーション実験からも全フッ素化 POF の可能性が示されたが、リアルタイム通信のような未来の情報技術に大いに貢献できる。優れたネットワークシステム設計を含む今後の研究が期待される。

評価委員会は、このグループが、出来るだけ早期に POF のさらに高速の紡績プロセスを確立し、分子デザイングループが開発したポリマーをファイバー化することを求める。近年、小池総括責任者は大学、政府、病院そして会社、システムインテグレーション、家庭用電化製品、データ通信等から構成されるギガハウスタウンプロジェクトを開始した。このプロジェクトの起源はポリマーの過剰光散乱の解析にさかのぼる。その後、小池総括責任者は様々なフォトニクスポリマーとその複合材料を考案した。ERATO プロジェクトからサポートを受けているこの研究は、今や実際に世界的規模でのリアルタイムの社会的コンタクトとコミュニケーションを容易に行えるようにすることへと応用の範囲を広げている。この着想は世界規模でのエネルギー消費の節約を可能にする。

このプロジェクトは、認知度が高い国際的雑誌への多くの論文発表、国際会議での発表、本会議講演および招待講演を行い、さらに 9 つの特許の出願と、26 の総論と書物での公表を行った。非常に印象的なこれらの成果や結果は、総括責任者が、有機合成、高分子化学、および応用分野の、互いに補い合う能力を持つ優れた 3 つの研究グループを結集し、相乗効果を出すことによって、可能になったものである。研究チームが、光伝搬と光と不均一ポリマー媒体との相互作用の物理のみならず、モノマーとポリマーの基本特性を良く理解し、活用したこともまた、上述の成功の理由である。

必要性が材料を発展させるとよく言われる。しかし、ここではそれは当てはまらない。小池プロジェクトでは材料が必要性を広げ、我々の未来を約束するというを示した。フォトニクスポリマーの新しい機能を創成すること、すなわち小池総括責任者の目指す目的は、このプロジェクトを通じて首尾良く進展している。よって「小池フォトニクスポリマープロジェクト」は“ A ”と評価され、継続するに値すると結論される。

## 1. 研究の実施状況と今後の見込み

### 評価 A

本プロジェクトの独創性は、新しいフォトニクスポリマーを提案し、その機能を成功裏に利用した点にある。驚くべきことに、本プロジェクトによって新規に創出された革新的な機能は 1 つに止まらず 4~5 に及ぶ。新しい装置の開発に成功したことも、もう一つの注目すべき点である。その中には、前述した光ファイバーアンプ、ゼロ複屈折性光ポリマー、高輝度光散乱導光ポリマー、および屈折率分布型ポリマー光ファイバーが含まれる。

本プロジェクトの基礎的な研究における独創性は、モノマーやポリマー分子の光に対する吸収、散乱、偏光といった光の基本的な性質や特性を追求したことである。ポリマー科

学の分野では、数多くのポリマー材料がすでに製造され、実際に使用されている。また、研究者の数も多い。このように競争の激しい研究分野において、本プロジェクトは際立って独創的な新機能を持つ、さまざまなポリマーを創出することに成功した。

彼らはまた、粒度分布を計量する実験的手法や、ミーの散乱理論に基づいて出力波分布を求める計算科学的手法、またポリマー材料の光学特性を評価する実験的方法について提案し、開発した。このような革新的なアイデアを形あるものにするために、彼らは光ファイバーを製造する装置や、新規な光導波器作製のためのテンプレートといった装置の開発に多大な努力と資金を傾注した。様々な新しい光学ポリマーを創生し、さらにそれを革新的な装置へと応用することは、本プロジェクトの大いなる努力によって可能となったのであり、その達成したものについてその功績を高く評価すべきである。

各グループに関する評価とコメントを以下に記す。

#### (1) 分子デザイングループ

これまで、いくつものモノマーの合成に成功しているが、それらすべては光ファイバーとして必要な性質（高い  $T_g$ 、高い熱安定性、低光損失、低材料分散）を備えている。彼らはまたこれらモノマーについて、容易に合成する方法と低い材料コストを実現し、特許出願も行っている。もしこれらの材料を GI-POF の製造に使うことが出来れば、性能と価格の両方において極めて実用的な高速 POF が実現されることになる。未来の光ファイバーネットワーク社会に向けた研究が大いに期待されているが、この研究グループは他のグループと密接に情報交換し共同研究を組むことによって大いなる成果に至ると考えられる。

#### (2) 光機能発現グループ

従来、複屈折はポリマーに固有な性質であるので、複屈折を示さないポリマーを実現することは困難であると考えられてきた。本プロジェクトはポリマーに対するこの従来の理解の仕方に対して疑問を持ち、ゼロ複屈折光学ポリマーを実現すべく、複屈折の原因を追究した。具体的には、無機複屈折性ナノ結晶のドーピング、ナノサイズの等方性粒子のドーピング、異方性の低分子量有機化合物のドーピング、等々の方法を試みていることである。このようにして複屈折を補償するという提案と研究は極めて独創性の高いものである。

HSOT ポリマーの研究についていえば、彼らは従来解析困難であった散乱体の濃度が高い領域での解析を実行している。低濃度領域で多重散乱解析を行った報告例は多いが、濃度が高くなると困難であったし、実際有効な解析法も多くはなかった。高濃度領域での散乱現象は学術的に興味深いものであるが、実際の応用上でも極めて重要である。それ故、これは大変意義のある取り組みである。この研究に必要な装置類は適切な時期に用意されている。また、研究者全員のやる気は十分であるように見える。

#### (3) 応用グループ

応用研究グループが行っているプラスチック光ファイバーの研究がとりわけ独創的であるのは、ポリマー材料の突っ込んだ探査と、広帯域ファイバーの開発の光学に基づく注意深い解析の独自の的方法論のゆえに、そしてさらに、マクロ分子化学に基づいて開発した屈折率分布の制御をものにしたことによってである。広帯域伝送媒体としてPOFのライバルである石英ファイバーに比べると、POFは理想的な屈折率分布を形成するのが容易であることが、本プロジェクトにおいて実験で証明された。さらにまた、広い波長域において広帯域幅を石英ファイバーで実現するのは困難であるが、全フッ素化したポリマー材料で作ったPOFでは可能であることが証明された。彼らが継続してきた実験とデモンストレーション実験によって、これらの結果は確固たるものになった。そしてわれわれはこれらが並外れて、顕著な世界級の成果であると評価するものである。

## 2. 研究成果の意義と将来性

### 評価 A

最近の研究の独創性について、幾つか述べるべきことがある。まず、高速データ伝送を実現するための光ファイバーに全フッ素化ポリマーを利用したことである。この全フッ素化ポリマーの伝送能力はこれまでの石英系マルチモードファイバーを上回っている。これはネットワーク端末のデータ転送だけでなく、幹線系にもプラスチック光ファイバーが使用される可能性を示している。近い将来、GI-POFは小・中距離の末端領域を中心に極めて大きな市場が期待される。

前述のGI-POFの応用として、驚くべきことに色素ドープしたGI-POFが利用された。ファイバー増幅器用として色素ドープされたGI-POFの機能は既存の色素ドープレーザーよりも上回っていることは注目するに値する。このプロジェクトのもう一つのユニークな研究の結果は高輝度光散乱ポリマー導光体を創出したことである。この研究により、透明材料よりもむしろ、不透明な光散乱ポリマーが導光体としてより効果的であることが主張された。驚くべきことに、これらのポリマーは実際にLCDの光源に代用することが出来た。

さらに、異方性のナノ粒子を、異方性のポリマーにドープするという着想もまたユニークである。このことから、複屈折のないプラスチック材料を製造することが可能になった。この研究の応用として、黒い吸収材料のドーピングに関して注目すべき結果が報告された。この報告によると、散乱導光ポリマーは従来のブラウン管に代わるディスプレイに利用することができた。

このプロジェクトはセミナー、会議での発表、プレナリー講演や招待講演、認知度の高い国際ジャーナルにおける数多くの論文発表、9つの特許出願と、26の総論及び書物での公表を通じ、この研究を普及させる目覚ましい努力を行っている。各グループに関する評価とコメントを以下に記す。

### (1) 分子デザイングループ

このグループは、いくつかのタイプのアモルファス全フッ素化ポリマー材料を提案し、合成した。この成果はフォトニクスポリマーの発展にとって非常に有益である。得られた新しい材料は、高い Tg、高熱安定性、低光損失性及び低材料分散性を有し、光ファイバー材料だけでなく、他の光ポリマーとしての可能性も有する。

更に言えば、フッ素化技術自体は既にいくつか提案されているが、既存のフッ素化技術の全ては複雑な合成過程を要し、生産コストを考慮すると実用的でないのが実情である。新たにプロジェクトで提案されたフッ素化技術は、極めて単純なプロセスで、かつ産業的に可能な低コスト材料で実現できるので、実用性は非常に高いと評価出来る。

### ( 2 ) 光機能発現グループ

ポリマーの複屈折の補償に関して、学術的にも実用的にも興味深く重要な、幾つかの結果が得られている。無機複屈折結晶をドーブする手法において、複屈折を補償するための結晶のサイズが非常に重要である。実際、正負の複屈折の結晶を混合して、相互の複屈折を補償できる結晶の最大サイズについてはこれまで明らかではなかった。それ故、このグループが実際に 200nm × 20nm サイズの結晶を合成してポリマーの複屈折を除去することに成功し、この結果をプロジェクトの成果としてサイエンス誌に発表したことは高く評価できる。実用面では、年々成長する液晶ディスプレイ産業に大きく貢献することが期待される。

HSOT ポリマーの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、様々な光散乱デバイスで応用されることが期待される。

### ( 3 ) 応用グループ

家庭またはオフィスのネットワークのような分野で、今後出現する驚嘆すべき技術としては、ディスプレイを家庭用情報端末に接続する技術に比較できるものはない。この応用グループによって得られた成果は世界の優れた技術の最先端の種になるかも知れない。このグループは近年のデジタル化の波に乗った巨大な民生用ネットワーク市場において、さらに発展し続けるべきである。その他、目を見張る点はこのグループが“高分解能モーションピクチャー”を利用した「リアルタイムコミュニケーション」の応用分野を提言し探求しており、真のブロードバンド社会をさらに追求している点である。我が国で生まれたこの技術は、日本の IT に大いに貢献し、ブロードバンド大国に導くであろうとすることができる。

以 上