

研究成果展開事業
－戦略的イノベーション創出推進プログラム－
(S-イノベ)

研究開発テーマ「フォトニクスポリマーによる
先進情報通信技術の開発」

研究開発テーマ中間評価（Ⅱ）用資料

平成29年3月6日

1. 研究開発テーマ

「フォトニクスポリマーによる先進情報通信技術の開発」（平成 21 年度発足）

(1) 研究開発テーマの概要

21 世紀社会の根源的な課題は安心安全でエネルギー消費の少ない低炭素社会を実現することである。この実現に最も有効な方法は、多様な情報を高速にかつ安全に伝える高度な情報技術を開発し、個と個、個と社会が相互に結ばれ、臨場感あふれた高度コミュニケーション社会を実現することである。これにより人や物の移動を最小限にすることが可能となり、エネルギー消費低減、遠隔治療や教育、更には犯罪防止などに寄与する。すなわち安心安全社会の構築につながるのである。

現状では急速な高齢化に伴って、老人が運転する自動車が登校途中の児童の列に突っ込んだり、アクセルとブレーキを踏み間違えてコンビニ店に突っ込んだり、更には高速道路を逆行して、多くの痛ましい死傷者を出している。この様な問題解決には前方の障害物を検知し、自動的にブレーキがかかる安全自動車の開発が進められている。しかしこれではまだ安全を十分に担保するものではなく、走行中に前後左右を認識し、更には人が飛び出すかどうかを各種センサーを用いて察知し、徐行する自動運転車の開発が求められている。そのためには前後左右の人間や自転車を認識し、また近くを走る自動車相互の通信、交通信号や路地に設けられたセンサー、更にはサテライトからの信号を素早く処理し安全かどうかを確かめながら自動運転する技術開発をする必要がある。その実現にはいわゆる人工知能を進展させなければならないが、それと同時に極めて重要なのが大量の情報を瞬時に処理する、数百ギガヘルツで作動するスイッチング素子の開発である。

本研究開発テーマでは、近年、急速に発展してきた光物理や光エレクトロニクスの技術と、広範な産業技術に道を開くフォトニクスポリマー科学とを融合し、実用技術や産業技術として大きく展開させる。展開する技術としては、超高速大容量フォトニック通信から高度のセキュリティを保證する量子通信にわたる諸技術を対象とする。具体的には、単光子発生を含む光発生、光変調、光伝送、光信号処理、光メモリ、ディスプレイなどについての革新的な技術開発を行い新しい光産業の創出を目指す。

(2) プログラムオフィサー (PO) による公募・選考・研究開発テーマ運営にあたっての方針

高度コミュニケーション社会を実現し、安心安全でエネルギー消費の少ない低炭素社会とするためには、現存の情報通信技術の限界を越えた革新的な情報通信技術、とりわけ革新的フォトニック通信技術の開発が不可欠である。本研究開発テーマではフォトニック通信技術を革新することにより、高度コミュニケーション社会の基盤技術を確立する。開発の要点はさまざまな特性を自在に操作できるポリマーフォトニクス材料をベースに光技術を展開することである。開発した技術を 10 年後には実用技術や

産業技術として確立することを目指す。対象としては、超高速大容量フォトニック通信から高度のセキュリティを保障する量子通信にわたる諸技術を扱う。具体的には、光子発生を含む光発生、光変調、光伝送、光信号処理、光メモリ、ディスプレイなどがその対象となる。各技術課題については、基礎的な視点と実績に裏打ちされた独創的な技術の構築を行う。ブレークスルーにつながり得るような発想の転換も期待する。以下に、課題例を5件挙げる。

1) フォトリフレクティブポリマー

分子設計を自在に行えるポリマー材料により大面積で高速応答可能なフォトリフレクティブシステムを開発する。このためには、ポリマー材料で問題になる経時安定性や透明性を解決し、駆動電場を低減又は無電界で機能する新材料の開発を行う。また、開発したポリマー材料により、ホログラフィックディスプレイ、生体認証などの新しい技術を開発する。

2) ナノ配向制御

適切に分子設計することによりポリマー分子を規則的に配列した液晶ナノ構造を作成し、新規デバイス技術を開発する。特に、液晶の自発的高次構造形成を用いてさまざまな光機能を大面積で実現することが重要である。具体的には、偏光制御素子や回折格子などの光学素子、光散乱を適度に制御したフィルム、ファイバーシステムに組み込み容易なポリマーフォトニック結晶、さらには高精細ディスプレイにもつながる技術などである。

3) 大容量光メモリ

急速に増大する情報ストック量に対応し同時に情報ストックに要する消費エネルギーを軽減する新しい技術の開発を期待する。そのためには、光偏光を利用して記録する材料、システムを開発し、単位当たりの情報量を飛躍的に増大する。このためには記録媒体として3次元的に超高密度で記録可能な新しい材料の開発が必要である。

4) ナノハイブリッドポリマー

ポリマー材料に種々のナノ粒子を担持することにより従来のフォトニック材料を越える機能を生み出すことが期待される。またポリマー材料の易加工性を発展させさまざまなフォトニックデバイスを開発する。光機能としては超高速の光変調などがある。従来の材料の限界を越えた新材料を開発し、光ファイバーネットワークや自動運転車に組み込み可能なデバイスとして確立させる。また8Kテレビなどに対応可能な光ファイバーやコネクタの開発を行う。

5) 量子フォトンクス

高度なセキュリティを保障する将来の情報通信技術として量子情報諸技術が開発されているが、現状技術は極低温動作や光ファイバーへの組み込みが困難などの問題がある。ポリマーフォトンクス技術により室温で動作し光ファイバーシステムへの組み込みが容易な量子情報技術を開発し、実用技術として発展させることが期待される。開発テーマとしては、オンデマンド単一光子発生、高効率な光子対発生、光量子メモリ、などである。

2. プログラムオフィサー (PO)

氏名 宮田 清藏

(電気通信大学 特任教授)

3. 採択課題

採択年度	プロジェクトマネージャー	中間評価（H27年度実施）時所属・役職	研究開発課題
平成 21年度	堤 直人	京都工芸繊維大学 教授	高速応答性有機フォトリフラクティブポリマーの創製と先進情報通信技術の開発
	戸木田 雅利	東京工業大学 准教授	高分子ナノ配向制御による新規デバイス技術の開発
	谷田貝 豊彦	宇都宮大学 教授	テラバイト時代に向けたポリマーによる三次元ベクトル波メモリ技術の実用化研究
	杉原 興浩	宇都宮大学 教授	ナノハイブリッド電気光学ポリマーを用いた光インターコネクタデバイス技術の提案
	白田 耕蔵	電気通信大学 特任教授	ポリマーナノ光ファイバーによる量子フォトンクス情報通信技術の開発

4. 研究開発テーマのねらい（目標）

ほんの数年前まで我国のディスプレイ産業は技術をリードし、世界市場を席卷していた。特に大型大画面の液晶テレビに関しては独壇場といっても良い状況であった。しかし、現在、我国の大型液晶テレビメーカーは韓国や台湾、中国メーカーに対して非常な苦戦を強いられている。その代表例がシャープであって台湾のメーカーに買収されている。それでは液晶テレビのニーズが消失したのだろうか。むしろ新興国を中心にしてその需要は益々増大しているのである。代って登場したのが韓国や台湾のメーカーである。今や彼らが破竹の勢いであるが、その基幹部品すなわち光散乱板、偏光フィルム、プリズム板、カラーフィルタ、視野拡大フィルムなどの高分子機能フィルム類は、我国の化学産業が独占状態であって、その供給がないと彼らは生産できない。すなわちフォトニクスポリマーを用いた部材産業は世界最先端技術を有し、現在でも多くの利益を挙げている。

一方 8K などの高精細なディスプレイは我が国が最先端技術を有している。現在のハイビジョン（2K）より 16 倍の情報量が必要であり、現在用いられている同軸ケーブルでは大容量の画像を送れないため、何本も必要である。現在開発中のポリマー光ファイバーやコネクタを用いれば極めてコンパクトになり、この面でも多くのメリットがある。

また冒頭でも述べたが安全安心な社会を構築するためには高度な情報通信技術を深化させなければならない。

そのために現在保持しているフォトニクスポリマーの強みを生かし、次世代の光通信、ディスプレイ、超密度記録素子などの技術開発を行って、高度コミュニケーション化社会を支える産業創造の礎とすることが本研究開発の目的である。

(1) フォトリフラクティブポリマー

物が立体的に見えるのは我々が光の波長（色）の強弱と位相差を同時に観測しているからである。この状況の再現を可能とするものがフォトリフラクティブ素子である。従来発表されていたフォトリフラクティブ（PR）素子には外部から電界を印加していたが、堤グループはカルバゾール基とアゾベンゼン基を分子内に有するモノシック化合物を分散させた PMMA（ポリメチルメタクリレート）フィルム素子が電圧印加なしで大きな PR 効果を示すことを世界で初めて示した。この素子を用いて将来的には立体テレビを目指す、近未来では応答スピードが少し遅くても良い立体デジタルサイネージを開発目標としている。

(2) ナノ配向制御

高分子は分子量が大きいので、無機、有機、金属などの微粒子を混合させてもフィルム形成能力を有している。また主鎖や側鎖を化学的に修飾することにより、

液晶的性質を付与させることが可能である。戸木田グループは、数十 nm のダイヤモンド粒子を均一に高分子中に分散させる技術を開発した。ナノダイヤとマトリックスの屈折率の差が極めて大きいため、このフィルムは前方錯乱光が著しく大きく数ミクロンの薄膜でよく、また散乱光に色むらが発生しない。したがってこのフィルム上にプロジェクター投影すれば、前方散乱光として像がカラーコントラストも含め鮮明に映し出される。その他にキラルスメクチック液晶を用いて分子オーダーで表面に凹凸を付ける技術などが開発され、各種の光学的に興味深いフィルムや非吸収型偏光板などが作製されつつある。また複屈折率 Δn が極めて大きなフィルムも開発されており、新しいタイプの光位相板への期待が大きい。これからもコレステリック液晶構造をマイクロキャビティーとして利用しそこに発光色素を導入することによる平面レーザーなど各種の光学部品が次々と開発されてゆくと考えられる。これらの光部品は次世代のディスプレイ技術の基幹部品になると考えられ、大きな産業の芽となるであろう。

(3) 大容量メモリ

高度情報化社会の進展に呼応した情報記録への強い要請に対応するためには、大容量のメモリが必要となる。特に国民背番号の導入や公的場所、例えば原発事故における首相と東電のやり取りなどを全てに亘って記録として残しておくような社会となると考えられる。大容量の情報記録には従来の方法とは異なる革新的手法を開発しないと上記のような要請に応えられない状況となっている。そのためエネルギーを用いた従来型の記録方法から、光の偏波面も利用して記録する方式は、同一部位で入射角度を変えて記録が可能であるので、従来法の数百倍の高密度化が容易である。谷田貝グループはこの知見から各種分子の検索を行い、多重記録に成功している。アーカイブスとして使用するためには長時間記録が安定に保持されなければならない。長期評価法も開発しつつある。またデータ入力速度を高めるためにページデータ記録方式を採用している。当面の目標として 3 テラバイト/ディスク (5 インチ) メモリシステムの実証試験を行う。

(4) ナノハイブリットポリマー

自動車開発においてはエネルギーを効率的に使用するために軽量化がはかられている。動力系は銅などの配線が使われるが情報系の配線や機能素子はポリマーを主体とした光学素材が求められている。それは銅系配線と比べると約 10kg 位の軽量化が図られる上に、外部電磁波などによる誤作動を防げるからである。この目的のために杉原グループは光インターコネクトを開発している。これからの自動車は GPS 機能に加え衝突防止、自動運転、人間の飛び出し検出機能、いねむり防止など、従来より、はるかに各種の情報を得、それを処理して安心、安全に運

転できる機能が求められている。杉原グループは既にプロトタイプの光インターコネクトデバイスを作製しており、性能だけでなく、製造法まで含めて検討を行っている。これらの技術が完成すれば自動車だけでも兆円産業になる。また当然一般の通信技術に応用されるので、巨大な産業が創出されることになる。このグループに、平成 27 年度から光インターコネクトデバイスとポリマー光ファイバーを連結する技術開発を行う大学が参画し、より実現性の高いシステム開発をねらう。

(5)量子フォトニクス

具体的に単光子を室温で安定的に発生させる技術の開発である。白田グループは光ファイバーをサブミクロンサイズまで細くすることによりファイバーラインへの高効率単光子発生に成功した。現状の発生効率は世界のトップレベルであるが、更にナノファイバー長さ方向にグレーティングを作製し光閉じ込めを強め、実用レベルの技術を開発している。本手法はグレーティング作製に対してガリウムイオンを用いてガラスファイバーをエッチングするので、厳しい精度が要求されるため長時間必要であり、産業化にはこれがネックとなる。それに対して発光源である量子ドットを含むレジスト材料をナノファイバーにコーティングした後に UV 照射によってグレーティングを作製する方法を考案した。この方法は単光子発生光源の産業化に適しているため、誰でも単光子発生が容易に得られるので、量子暗号通信などの分野が急速に発展すると考えている。

5. 研究課題の選考について（参考）

(1)量子フォトニクス、(2)ナノハイブリッドポリマー、(3)ナノ配向制御、(4)フォトリフラクティブポリマー、(5)大容量光メモリの 5 課題について JST のホームページを通して公募を行った。全部で 20 件の応募があった。これに対して以下に示すアドバイザーの先生方に書類選考をお願いした。その評価に従って採択課題の 2 倍 10 件について、(1)～(5)までの分野において応募者にプレゼンをお願いした。独創性、研究成果の産業化への可能性、企業の意欲などの観点から慎重に審査を行った結果、最終的に PO が 5 課題を選択した。

6. アドバイザーの構成について

平成 21 年度テーマ発足時

アドバイザー名	当時の所属	役職	任期
小池 康博	慶應義塾大学	教授	平成 21 年 11 月 ～27 年 3 月
池本 陽一	積水化学工業株式会社環境・ライフラインカンパニー京都研究所	所長	平成 21 年 11 月～現在
久我 隆弘	東京大学	教授	平成 21 年 11 月～現在
本多 德行	キャノン株式会社総合 R&D 本部基盤技術開発統括部門オプティクス技術開発センター	所長	平成 21 年 11 月～ 平成 24 年 3 月 ^{*1)}
雀部 博之	千歳科学技術大学	名誉教授	平成 21 年 11 月～現在
高田 俊二	富士フイルム株式会社	嘱託	平成 21 年 11 月～現在
中西 八郎	東北大学	監事	平成 21 年 11 月～現在
西川 恵子	千葉大学	教授	平成 21 年 11 月～現在
八瀬 清志	産業技術総合研究所	研究部門 長	平成 21 年 11 月～現在

* 1) 後任として下記の小山氏に就任していただいている。

小山 剛史	キャノン株式会社 RDT 戦略推進センター 光学技術戦略統括	上席研究 員	平成 24 年 4 月～現在
-------	--------------------------------------	-----------	----------------

長年、大学や研究所においてフォトニクスポリマーの高機能化に関する研究、結晶構造や高次構造に関する研究、光物理プロセスなどに関する研究を行って、高い業績を挙げた方々にアドバイザーの就任をいただいた。また企業においてフォトニクス分野の材料開発から応用までを経験した後、研究開発マネジメントしている方々に就任頂いた。これらの方々は基礎的研究から企業化の為の技術開発まで見通し、評価できる人材である。

具体的に、小池教授はポリマーオプティカルファイバー (POF) の世界的牽引者であって、多くの賞を受けている。また液晶ディスプレイの面積化、視野拡大に大きな業績を挙げている。現在内閣府による研究資金 FIRST の研究代表者である。我々のプロジェクトとの連携も考慮してアドバイザーになって頂いた。

池本氏は積水化学工業 (株) の環境・ライフラインカンパニー京都研究所長である。

住宅に POF を引き込み、各種情報機器及び端末と連結しスマートハウス化などに興味を有しており、産業化の観点から評価頂く。

久我教授は光物理プロセスが専門で、単光子発生やその周辺の科学及び技術に関する高度な専門家である。

本多博士は（株）キヤノンオプティクス技術開発センター長である。カメラレンズその他、ポリマーを使用していることから基礎から企業化まで広い視野と高い見識を有しており、多くのアドバイスを頂いている。

雀部名誉教授は理化学研究所時代、すなわち早くからフォトニクスポリマーの大きな可能性に着目し、広範囲に亘る業績を挙げてきた。

高田博士は富士フイルム（株）の先端技術研究所長として、ポリマーから有機光機能性材料の開発や、光機能素子の開発に従事すると共にマネジメントを行ってきた。データだけでなく実際の試作品を創り出すアドバイスを頂いている。この考えが研究開発の加速化に貢献した。

中西名誉教授は、有機及びポリマーの分子設計及び合成、素子化までの一貫した研究を行い、2次の非線形有機素子が世界で最も高性能であることを示した。更にこれを用いた素子が実用化されている。

西川教授は、液晶やイオン液体の構造と機能の関係を物理的手法で明らかにし、多くの基礎的研究成果を挙げこの分野の指導者の一人である。

八瀬博士は、産業技術総合研究所の研究部門長であるが、光と物質の相互作用を解明し、電流注入型発光素子、具体的には有機 EL、ポリマー発光ダイオードなどの先駆的研究を行うと共に、研究者に対するマネジメントを行っている。

更に、平成 22 年 8 月から、知財分野に関するアドバイスをいただくために、企業の特許部門を経験された下記の方にアドバイザーに就任して頂いている。

山内 啓滋	東京工業大学 (元王子製紙)	産学官連 携研究員	平成 22 年 8 月～ 平成 24 年 5 月
千田 武	セリオ国際特許事務所 (元日本ゼオン)	弁理士	平成 24 年 9 月～現在

以上述べたように、アドバイザーの方々には極めて高い研究業績及び卓越したマネジメント力を有している。それらの経験を通してサイトビジットやテーマ推進会議において適格な助言を頂いている。

平成 28 年 10 月 1 日におけるアドバイザー構成は以下のとおりである。

氏名	所属・役職	任期
池本 陽一	九州積水工業株式会社 代表取締役社長	平成 21 年 11 月～現在
久我 隆弘	東京大学 総合文化研究科広域科学専攻関連基礎科学系 教授	平成 21 年 11 月～現在
小山 剛史	キャノン株式会社 イメージコミュニケーション事業本部 ICP 戦略企画センター 上席担当部長	平成 24 年 4 月～現在
雀部 博之	千歳科学技術大学 名誉教授	平成 21 年 11 月～現在
高田 俊二	千葉大学 大学院融合科学研究科 客員教授	平成 21 年 11 月～現在
千田 武	セリオ国際特許事務所 弁理士	平成 24 年 9 月～現在
中西 八郎	東北大学 名誉教授	平成 21 年 11 月～現在
西川 恵子	日本学術振興会 幹事 千葉大学 大学院融合科学研究科 特任教授	平成 21 年 11 月～現在
八瀬 清志	特定国立研究開発法人産業技術総合研究所 材料・化学領域補佐	平成 21 年 11 月～現在

7. 研究開発テーマのマネジメントについて

本研究のマネジメントにおいて、

- (1) S-イノベを構成している研究者、企業関係者などが研究しやすい環境を創る。JST 担当者にそれぞれの思いを的確に伝えることを旨とした。
- (2) S-イノベに携わっている構成員全員の交流を図る。その結果各課題間での共同研究を推進する。
- (3) できるだけ研究現場を訪問し、研究実施状況を把握すると共に、詳細な討論を行うサイトビジットを実施する。
- (4) 特許の専門家をアドバイザーボードに入れ特許申請を推進する。
- (5) デモンストレーションを含めた対外発表の推進。この5項目を柱にして研究開発マネジメントをしてきた。年に数回のサイトビジットは研究分担者にとって負担が大きいとの声も聞かれたが、PO の信念として実行した。

以下それぞれの項目について述べる。

(1) 研究しやすい環境の整備

研究者にそれぞれの年度に何をしたいのかをよく聞き、予算措置などに関して出来るだけの要望を実現すべく JST の担当者と協議して対処した。また高額な装置を購入したいとの要望があった場合、その装置が研究開発にどのように貢献するのかを明らかにしたうえで重点配分を行った。

(2) 人的交流と課題間共同研究の推進

各研究開発課題は完全に独立ではなく、フォトニクスポリマーを軸として光科学技術分野に特化している。そこでまずそれぞれの課題の開発リーダー、研究リーダー及びそれらを支える主な研究者達及びアドバイザーの先生方との人的交流を活発にすることが重要であると考えた。お互いに何を考えているかが十分理解できれば信頼が生まれ、S-イノベ内での共同研究が生まれ、更なる研究の輪が広がり産業化へのブースタになると思ったからである。そのような意味で全員が集まったテーマ推進会議を年2回開催し、十分な討論の時間を取ると共に、終了後には必ず意見交流会を開いた。

相互交流の結果としてサンプルのやり取りから出発して実際に共同研究に至ったケースがある。平成28年10月に International Workshop on Photonics Polymer for Innovation(IWPPI)を開催した。那須(栃木県)といういささか不便な場所であったが、世界13か国から研究者175名の参加者を得て大変盛況であった。

(3) サイトビジット

研究進捗状況を正確に知るためには、実際の研究現場を訪問し実験を直接見学すると共に、研究者などと討論することが重要である。研究がスタートしたのは、平

成 22 年 1 月以降であったので、平成 22 年 4 月からサイトビジットを開始した。平成 22 年に 11 回、平成 23 年に 10 回それぞれの研究現場を見学した。その後も現在まで年に数回サイトビジットを行っている。目的達成の方法は今の状況で良いか。研究遂行中に問題はないか。基礎データを取るだけでなく、実際に考えていたように機能するかなど明らかにすべく素子を作製することをお願いした。これにより素子作製上の問題点も明らかになった。またサイトビジットをするときには必ずアドバイザーの先生方に同行をお願いした。1 回の訪問時間は 2~3 時間であった。すなわち現場見学と説明 0.5~1.0 時間、プレゼン及びディスカッション 1~2 時間位であった。議事録を作成し、必ずプロジェクトマネージャー (PM) に確かめてもらった。

(4) 特許申請の奨励

特許を申請して下さいと言っただけでは、多くの大学人は面倒がってしないことが多いし、また折角申請しても十分な範囲まで考えないケースも多い。良いアイデアを早くしかも確実に特許化するためにサイトビジットの折に特許の専門家に必ず同行いただいた。討論の過程で特許性があると思う時、後日、同様な特許が出されているかいないかを調査して知らせると共に、同様な特許があった場合でも特許請求範囲などに関してアドバイスし、特許申請のサポートを行った。

(5) 国際会議の開催と国外での研究発表の奨励

平成 23 年 12 月 1 日から 2 日に亘って第一回フォトニクスポリマー国際会議を主催した。2 日間の参加実数は 559 名（講演者 45 名、ポスター発表 52 名、招待者 47 名、一般 415 名）であり、日本、韓国、米国、カナダ、オランダ、スウェーデン、ルーマニアなどからの参加者があった。本 S-イノベの各グループメンバーが国際会議の主な委員を務めた。JST 理事長に開会の挨拶を頂いた。この発表により S-イノベの研究成果は着実に世界に発信されると共に研究推進の原動力ともなった。このような意図から S-イノベ研究者と一緒に研究発表やデモンストレーションするようにアドバイスしている。

平成 28 年 10 月 11 日から 14 日まで那須町のホテルサンバレーにて **International Workshop on Photonics Polymer for Innovation** を開催した。参加者は不便な場所にもかかわらず、161 名（うち招待講演者 33 名、一般参加者 123 名、招待者他 5 名）と多く、海外の参加者は上記の国々に加えて UK、フランス、スペイン、台湾、インド、タイ、ベトナムなど 14 か国の研究者が加わって密度の濃い発表がなされた。招待講演者の、光増幅器を開発し長距離光通信を実現させた無機光ファイバーの専門家は、我々のポリマーフォトニクスに大変興味を示し、また 良いアドバイスを頂いた。

特筆したいのは S-イノベで開発された装置、光学部品、システムなどを展示し、大変大きい反響を得たこと、また毎晩杯を交わしながら研究内容だけでなく、その哲学、予算のありかたなど各方面の話をしながら交流し、中には共同研究にも発展するものもあったことである。

(6) 研究開発テーマの進捗状況の把握、評価

時には嫌がられることもあるが、アドバイザーや特許専門家と共にサイトビジットを行ってリアルな進捗状況を把握するよう努めている。また、年2回行うテーマ推進会議（研究進捗会議）におけるプロジェクトマネージャー（PM）からの発表を聞いた上で、アドバイザーの先生方から助言を頂いている。ステージⅠ、Ⅱの中間評価は、アドバイザーの先生方による各PMのヒヤリングを参考にして行った。ステージⅠの中間評価では全グループが計画通りの成果を挙げたのでそのままステージⅡに進むことを認めた。ステージⅡの中間評価においては、堤グループに関して進行が遅れていたため他の研究機関も入れて研究開発を推進する提案をしたが、最終的には参画企業の申し出もあり、中止を決定した。この結果、ステージⅡ終了時点で課題数は4となった

(7) 研究開発テーマの研究計画の見直し

研究計画の見直しは、各課題からの申告に基づき、その時々の研究開発環境や事業環境により適切に判断し、研究の進展と目標の達成のために適宜見直しを行った。

戸木田グループが担当している透明スクリーンに関しては、大型のフィルム化にも成功し、商業施設の展望室の窓ガラスに貼られ、曇った日などにはここにビルや山が見えるはずとして窓ガラスに画像を投影している。また、銀座でショーウインドウに商品などのバックグラウンドとして使われている。更に将来的には自動車のフロントガラスに地図情報などを表示するヘッドアップディスプレイの用途としても期待できる。これらの成果はダイヤモンド微粒子を互いに凝集させることなく高分子中に均一に分散させる技術が確立されたことによる。この様な成果に着目し、民間企業1社が平成28年度から参加した。

一方、谷田貝グループには民間企業1社が平成26年度新規参入した。この企業は、次世代の技術として、谷田貝グループの成果に注目して参加してきたものである。

なお、堤グループの成果当初の計画を十分達成できないと認め、ステージⅢには進ませないことに決定した。

(8) 課題間の連携推進

課題内では試料の作製、評価、デバイス化などそれぞれの参加者が役割分担をし

ながら研究を進めており、十分な連携関係が構築されている。課題間については PO としていつも奨励していることもあって、徐々にその話し合いがなされており進行しつつある。例えば有機合成、分子設計、デバイス研究者間で本来のグループ外を通して連携が行われつつある。

(9) 研究課題の誘導

サイトビジットにおいてツビッターイオンを合成し、それを電圧によって配向させるような提案があった。これは原理的に同一には配向しないことを説明し、その項目の研究は止める事とした。その年度において成果が挙げられたと思われる研究グループに対しては、追加予算の配分などを行って研究推進のブースタとしている。また材料探索などにおいてあまり手を広げ過ぎている場合は焦点を絞って研究し、早く決着をつけ、その結論を十分検討してから次の材料へと行くようにアドバイスしている。

8. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況

8.1 研究開発課題名

**【高速応答性有機フォトリフラクティブポリマーの創製と先進情報通信技術の開発】
堤グループ**

(1) 研究開発課題の達成状況

我々が立体的に物をとらえることができるのは、光の強弱及びその位相を認識しているからである。立体視を可能とする方法はいくつか実施されている。最もポピュラーなものは、偏光させた光で像をスクリーン上に投影し、これを偏光眼鏡で見ることにより、立体感が得られる。テレビなどの場合は眼鏡にシャッターが付いており、右と左が相互に開閉する。この時、像の情報をこの開閉にシンクロさせて送れば偏光を用いる時と同様に立体感を視聴者に与える。これらの方法は見ている者に多大な疲労感を与える。一方コンピュータを用いて立体像を示す方法も検討されているが、現状では正面を0としたある範囲の角度内であって、多くの人達と立体像を楽しむのは難しい。その他にも提案はあるが、それぞれ問題点がある。

本研究の方法は機能化したポリマーを用いて本格的な立体像を形成する技術の開発である。光の強度及び位相情報を制御可能な材料、すなわち大きなフォトリフラクティブ (PR) 効果を示す新材料の開発に成功した。

ここまではステージⅠの成果である。この成果を礎にしてステージⅡに取り組んだ。上記した材料は初期の性能は確かに良かったが時間経過とともに結晶化が起こる結果、光が散乱され当初の性能を示さなくなる欠点があった。また、実用的には十分な性能ではないことも明らかになってきた。これらの問題を解決すべくトライアルを種々試みたが企業側の条件を満たす材料の合成は出来なかった。

プログラムオフィサーとしてもステージⅡになって企業や大学へサイトビジットを繰り返し、分子合成に関して種々のサジェスションをしたが、参画企業もこのままではサポートすることはできないとのことであった。

それまでの経緯を評価委員会に諮り、この課題はステージⅡをもって終了とした。

8.2 研究開発課題名

【高分子ナノ配向制御による新規デバイス技術の開発】

戸木田グループ

(1) 研究開発課題の達成状況、産業創出の核となる技術の確立に資する成果

① 光学材料に適した高分子材料、キラルドーパント、レーザーダイの合成開発

本研究の目的は、系統的にモノマー、高分子の合成を行い、液晶ポリマーの複屈折値、キラル液晶ドーパントのねじれ力、レーザーダイの量子収率などの値の向上を図ることである。

液晶の複屈折値 Δn を大きくする試みとして、一連のジアセチレン芳香族誘導体（数十種ほど）を合成し、大きな Δn を有する分子系を見出した。更にこの大きな Δn は、異常光の屈折率 n_e が大きくなったことによるものであり、大きな n_e を達成できるという結果もあわせて得た。高分子材料への展開も順調に推移している。

従来のナフチルエチルアミンを基盤にしたキラル液晶ドーパントに加え、キラル環状2量体液晶化合物の合成を試み、らせんねじれ力（HTP）を評価した。分子を環に閉じることでねじれ形態が凍結し HTP が上がるというコンセプトによるもので、予想通りに HTP が高い値を達成できた。この値は、数パーセント程度のキラルドーパント混合で青、緑、赤の可視光を反射するラセンピッチを得られることを示し、ホスト液晶の性質を変えずにラセン誘起が可能となった。加えて、内部に光反応性の物質を有する環状2量体を設計、合成した。光反応点が環内部で近接しているため、光照射により分子内架橋反応がマイクロ秒オーダーの時間で完了するとともに、HTP が著しく低下するという現象を見出した。このことは、短時間の光照射でコレステリック液晶のピッチを大きく変化させることができ、光メモリ、光照射による画素化など新たな応用展開を可能にさせてきた。

分布帰還型コレステリック液晶レーザーは、易加工性、波長可変、超小型化、可撓性など優位な特性を持った面発光レーザーデバイスとなる。しかし、その実現（連続（CW）発振）には、発振の閾値（エネルギー）を著しく下げる必要がある。ステージ I では、まずその第一段階として、高性能色素の開発を進めてきた。その結果、共役拡張型ピレン誘導体色素が量子効率、吸光度、液晶マトリックス中での配向性という3つの因子を満足することに着目し、コレステリック液晶中に高濃度でドーピングさせ、かなり低い閾値を得た。これは従来のクマリン系色素（DCM）より低い値であり、連続発振の実現への可能性を示唆するに十分な進展を見たといえる。

② レーザー発振フィルム、偏光分離フィルム、波長分離フィルムのための、高分子ナノ周期構造の新たな創製とその光学特性の評価

ナノ構造の創製技術は、レーザー発振、偏光分離、波長分離フィルムの創製をはじめ

めたとした今後の応用展開に必須のものである。本研究グループは、多くの高分子系、具体的には

1. コレステリック液晶フィルムへのナノらせん周期創生
2. キラル Sc 液晶高分子フィルム表面の荷電アンジュレーション・ナノ周期構造創生
3. 棒状高分子 SmA の層構造を利用したナノ周期構造創生
4. 低分子液晶・高分子液晶の混合均一液晶からの相分離を利用した構造創生
5. 棒状高分子溶液液晶の粘弾性相分離ゲルとオプチカルマイクロファイバー創生
6. 液晶を一ブロックとする液晶ブロック共重合体の合成とマイクロ相分離構造の配向制御
7. 高分子コロイダル微粒子によるコロイダル結晶創生

など、世界をリードする独創的手法（ソフトマテリアル場における自発的構造創生）により周期構造を持つフィルムを創生してきた。ここで非常に重要なことは、いずれも欠陥のない、あるいは欠陥が極力抑えられた構造を大面積で作成できることであり、上記1の光学特性に関する基礎研究成果に加え、応用展開のための材料設計の指針を示すことができた。

③高分子膜中へのナノ粒子分散技術の確立とその光散乱効果の評価に関する基礎研究と透明スクリーンの開発研究

水分散性の良い数十 nm 径のナノダイヤモンド (UDD) を開発し、水溶性 PVA と混合させ数 μm 厚の均一分散薄膜を得る技術を開発した。透明基板上へのコーティングは、表面硬度、屈折率を向上させるだけでなく、媒体と UDD の大きな屈折率差のため高い光散乱効果を生み出すとともに、散乱光に色むらが発生しない。ステージ I では、光散乱の角度依存性を詳細に調べ、UDD を含むコーティング膜では、透明感が変わらないが散乱強度が増幅されることを認めた。すなわち、ガラス、PMMA などへの単純薄膜塗布により、透明スクリーンが作成できることになる。薄膜からの散乱であり、文字、画像のにじみ現象もなく鮮明な像を作り出すことができ、光直進性の強いディスプレイに対する視野角拡大スクリーンとして有用な素材となる。

④インクジェットによるコレステリック液晶のドット印刷による画素化

ステージ II の前倒し研究として行った研究であり、反射型ディスプレイ (外光を利用したディスプレイ方式) のための反射型画素の開発である。その反射型画素として、有力なのがコレステリック液晶ガラスであり、青、緑、赤の三画素はらせんピッチを変えるだけで作り出せる。コレステリックフィルムの作成技術は本グループの得意とするところであり、すでに多くの高分子素材 (ポリエステル、ポリペプチド、ポリシラン、セルロース等) で開発済みである (②-2 の成果)。これらコレステリック固体

を用い、点描表示をインクジェット方式で行った結果、高い限界反射効率を持つドットを、効果的に印刷できることを明らかにした。

以上述べたように、ソフトマテリアル場での自発的ナノ構造創生による光学機能材料開発に関する本研究グループのアイデアは独創的であり、かつ応用の視点に立てば、完全配向で大面積化が可能となり、材料の基本的光学特性の向上化と合わせて、かなり高いレベルの基盤開発技術を獲得してきた。すなわち、具体的な光学要素材料としての成型加工、製膜技術を確立するとともに、具体的光学製品（非吸収型透明偏光板、波長分離フィルム、反射型画素集積フィルム、分布帰還形レーザー発振フィルム、ポリマーブラシ液晶によるセルフリー・ディスプレイ、ナノ粒子分散による高屈折率、高光散乱、高熱伝導性フィルムなど）をイメージできるところまでシーズ技術を進展してきたと言える。

(2) 最終目標達成の可能性

本研究グループで開発している光部品すなわち位相差フィルム、偏光フィルム、光拡散フィルム等は既に商品化されている。そこで本研究開発品と商品との相違を明らかにすべく表に示す。表で明らかのように開発されたフィルム類は既存フィルムと比較して優位的な特徴を有している。また原料コストも安価なので、既存製品に十分打ち勝って浸透し、産業として大きく成長するのではないかと思われる。

光学フィルム	位相差フィルム	偏光フィルム	光拡散フィルム
概要	$\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 板の薄肉化	従来の吸収型と異なり、2 倍以上の省エネ効果	光拡散の高効率化による透明化と極薄化
方式	高複屈折液晶フィルム	非吸収型	分散性ナノダイヤモンド
特性	・高複屈折 (Δn)	・自発的構造形成を利用した単純プロセッシング	・高屈折率 ($n=2.4$) ・力学物性も向上 ・分散液の単純塗布で作製
特長・課題	高い Δn を達成 (ステージ I) 異常高屈折率として高い n_e を達成 → 今後、高配向化と最適化	コレステリック液晶の選択反射、ナノ周期構造、液晶の相分離などを利用し、多くの手法により非吸収型偏光板の可能性を示唆 (ステージ I)。 → 実現に向け鋭意検討	極少量で高い散乱強度が得られ、透明性と極薄化を実証 (ステージ I)。 → 透明スクリーンとしての実現に向け最適化
他社	・延伸フィルム: (A 社) ・液晶高分子フィルム: 参加企業	・ナノインプリント技術を応用した (トップダウン方式) (B 社)	・マイクロレンズを用いた $300\mu\text{m}$ のフィルム (C 社)

各システム要素の開発は上述したように順調に推移している。本グループは、これらを統合して、液晶レーザーディスプレイの開発を提案している。その競合優位性、市場性、そして企業戦略適合性を下記に示す。

①競合優位性

・現在の代表的なフラットパネルディスプレイである液晶ディスプレイと比較して広い色再現域を有し、かつ最大で消費電力を大きく低減できる。また、視野角特性においては、コントラストのみならず色ずれも現行より大幅に低減することができる。この、視野角による色ずれは有機 EL ディスプレイにおいても発生しており、本技術の優位な点である。

・特許面では材料・プロセス・部材の各方面から押えている。

②市場性

・モバイル機器の爆発的な増大、大型 TV の新興国での普及、デジタルサイネージなどの新たな用途拡大により、フラットパネルディスプレイのマーケットは今後も飛躍的に拡大していく。更に、映像再現能力の向上に対するニーズも強く、たとえば次世代映像技術として開発が進められているスーパーハイビジョンでは高精細・高色再現性ディスプレイが必須となる。数量が増え、性能も向上していく中、ディスプレイが消費するエネルギーの増大は大きな課題である。

・本グループが開発ターゲットとしている液晶レーザーフィルムは高性能（高精細、高色再現性、広視野角）かつ省エネディスプレイを実現できる。

・また、液晶レーザーディスプレイの基幹技術は我が国が競争力を有する有機・高分子科学技術に基づく「素材・部材」にあり、設備投資でマーケットの勝敗が決まる現在のフラットパネルディスプレイとは異なる市場競争環境となる。本技術の確立は我が国のディスプレイ産業の復権につながるものと考えられる。

③企業戦略適合性

・参画企業は高分子液晶を用いた高性能 LCD 用光学フィルムを製造・販売している。本グループの開発ターゲットの事業化には高分子ナノ構造のコントロール、光学フィルムとしての均一性、品質の確保及びその品質管理技術等が必須となるが、これらの要素技術の一部は現行製品の製造を通じて獲得済みである。

・液晶レーザーディスプレイで用いる光シャッター（ねじれネマチック（TN）液晶モードでも可）は電圧駆動型であり、フレキシブル・プリンテッドエレクトロニクス技術が確立された際には相互に組合すことにより、新たな市場開拓につながるものと考えられる。

8.3 研究開発課題名

【テラバイト時代に向けたポリマー三次元ベクトル波メモリ技術の実用化研究】

谷田貝グループ

(1) 研究開発課題の達成状況

共同研究を行っている4つの参画機関が定期的に、また、機会ある毎に検討会を開いている。問題点を共有化し、密な連携の下に研究を進めている。内部討議で技術的問題の解決糸口が見つけれないときは、外部の専門家にご指導を仰ぎに行くこともある。また、積極的に学会発表を行い、関連発表を聴講することにより、広い範囲からも知見を集めている。その結果、記録方式、新材料、システム評価の3つのコアすべてが歩調を合わせて設定目標を達成しつつある。開発項目によっては計画以上に進捗して結果を出しているものもある。これらのことから、ステージⅡに関しては順調に目標を達成できたと認められた。

(2) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

ベクトル波は強度、進行方向、振動面(偏光)、位相の各情報を持つ。現状のDVD、ブルーレイディスクはこれらの情報の内、強度情報、更にその2値情報しか用いていない。本グループは先ずベクトル波を従来ポリマーに記録できることを実験的に証明した。そして、なぜベクトル波がポリマーの中に記録されるかの原理を解明した。

解明された原理を基に、実用化に供せられる材料開発に取り組んだ。その結果、従来材料に比較して性能指数が大幅に向上した新材料を見出した。更に、この材料にOH基を導入し、共有結合を介したポリマーマトリックスとの結合・固定化を図ることにより、記録安定性が飛躍的に増すことも見出した。これを用いた基礎記録実験において、大きい多重度の記録・再生が可能であることを実証した。

記録密度目標達成のための光学方式の開発では、ベクトル波情報の中の進行方向を変えて多重記録する方法(角度多重)、偏光面を変えて多重記録する方法(偏光多重)、位相情報を用いて多値記録する方法の各方法を考案し、実験的に検証した。

システム評価では、包括的評価のためにコリニア記録方式及びオフアクシス記録方式のシミュレーションシステムを開発している。その中で、コリニア記録方式のS/N比推定、ページ間クロストークノイズに発生機構を推定するシミュレーションソフト等の開発を行った。材料評価では重要評価項目をリストアップし、評価体系構築を進めている。更に偏光記録を含めた光学厳密理論式の構築にも成功している。

このようにステージⅢ移行に必要な基本的、基礎的な技術開発成果が得られている。

(3) 最終目標達成の可能性

① 競合優位性

大容量の代表的メモリとしてはハードディスク、半導体メモリ、磁気テープと光メモリがあり、将来とも用途別に棲み分けが行われるものと推定される。この中で光メ

メモリはハードディスク、半導体メモリに対し省エネの点で優れ、磁気テープにはアクセスタイムの点で優れている。光メモリは、非磁気記録であることから、水害や磁気嵐などに対するデータの信頼性、耐災害性という面ですぐれた方式である。光メモリはビット当たりのコストで磁気テープより劣るとの指摘があるが、公文書保存等の実用化においてはこの点が重要になると思われる。

また、他の研究機関でも次世代光メモリとしてホログラフィックメモリが研究されている。学会研究発表から判断すると、本グループはベクトル波を情報記録に採用し、新材料を採用すると、位相多重化による大容量化技術などのメモリシステム技術において、記録密度、記録の信頼性に勝っている。

特許出願は、特に新記録方式、新材料の面で内容の漏れが無いように推進していく。

②市場性

情報量は大きな速度で今後加速する。アーカイブ用も大きく伸びる。アーカイブはほとんどの期間は保存されているだけである。そのため、単なる保存期間はエネルギーを消費しないことが強く望まれる。またアーカイブにおけるアクセスタイムは、通常の間が IT 関連作業において特段の苦痛を感じないことが求められる。これらの点で光メモリの右に出るものはない。

具体的アーカイブ用途としては、医療データ(特に、CT や MRI 等の画像診断データ)、先端科学データ(加速器、観測衛星データ、物理実験データ等)、データセンター用コールドデータが特にこれから発展すると思われる。他にも放送映像、書籍や戸籍等の公文書のデジタル化、芸術画像のデジタル化等が考えられる。

本グループの開発しているメモリシステム及び記録感光材料の市場先としては、これらアーカイブのためのメモリシステム業界、記録メディア業界、アーカイブセンター業界、クラウド業界が考えられる。

この様に、市場規模は巨大で飛躍的に成長し、世の中の持続可能な発展のために必要不可欠なものと確信できる。しかし、市場の特徴としてはローカルな規格では発展に支障が出る可能性があり、公機関も参画していただき、普遍的な規格の構築が必要と思われる。

③企業戦略適合性

参画企業は現在アーカイブメモリ及びその装置システムをビジネスとして一定のシェアを有している。次世代のシステムとして本研究に注目し、ステージⅡから参画した。普及すれば規格が統一された製品を多量に出せる。

④懸案事項・問題点

材料探索をしてきた参画機関がステージⅢに移行するにあたって脱退を申し出た。

ただし、事前の調整により特許等の扱いによるプロジェクト推進への悪影響いは避けられた。

8.4 研究開発課題名

【ナノハイブリッド電気光学ポリマーを用いた光インターコネクトデバイス技術の提案】

杉原グループ

(1) 研究開発課題の達成状況

本課題の目的は、フォトニクスポリマー屈折率の制御、大きな電気光学効果（印加電圧によって屈折率が変化する効果）を有するポリマー、及び従来のポリマーの屈折率範囲を大幅に広げるような新規有機-無機ハイブリッド材料の設計・合成を行うこと、更にポリマーの特長を活かした光導波路作製プロセスを開発し、近赤外光励起シングルモード自己形成導波路技術などの作製実装技術を確立して、将来の高速光インターコネクトデバイスを開発することである。

このデバイスのターゲットは、将来の高速光配線の搭載が期待される様々な分野（情報機器、末端光通信、車載光通信）であり、本グループでは、主に自動車用途を念頭に置いて開発中である。今後自動車はますますインテリジェント化され、自動運転に代表される予防安全機能や車外との情報交換機能の高度化が求められている。従来の電子システムでは、電磁波による誤動作対策に多額のコストをかけて対策している上に、将来の高速性も限界がある。またハーネスを含む光配線は銅配線より軽量なので、燃費の向上や省資源につながる。

本研究グループでは、

- ① 高性能ポリマー材料開発
- ② それを用いた光導波路プロセスデバイス開発

の両面からの要素技術開発を行っている。開発した高性能フォトニクスポリマー材料、光導波路作製簡易プロセス・実装法などを駆使することにより、現在、プロトタイプ的光インターコネクトデバイスを試作し、その性能評価を行っている。各要素技術開発については、高性能化や小型化により目標を達成している。それとともに、要素技術の統合プロセスを行って、プロトタイプデバイスを作製している。その過程で新たな課題も浮き彫りになっている。それらの課題を解決するためにポリマー光ファイバー(POF)を研究する大学に本グループへの参加をお願いした。実際新たに光ファイバーをコネクトする方法を開発し、光インターコネクトシステムのさらなる高度化に、実りある成果を挙げている。現在 8K テレビの開発が盛んにおこなわれている。通常のハイビジョンテレビは 2K であり 8K は 16 倍の情報量が必要である。これに対応するために同軸ケーブルが数多く必要となるが参画したチームの開発したポリマー光ファイバーとそのコネクタを用いれば 1 本で済んでしまう。これは 8K ディスプレイの設置を容易にし、かつ大幅な重量低下と省エネを

もたらす。そのために世界中のディスプレイメーカーから注目されている。また一部の企業ではポリマー光ファイバーの製造が始まっている。

(2) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

① 高性能電気光学ポリマーの開発

色素の配向安定性を向上させるべく、アダマンチル基ポリマーをマトリクスとして用いた結果、非線形光学特性、熱安定性、屈折率精密制御性、透明性、光導波路デバイス加工性にバランスのとれた高性能電気光学ポリマーを実現できた。特に自動車用途には耐熱性が必要である。これに関しては高温で長時間の耐熱性を実現した。また、耐熱性電気光学ポリマー大量合成手法に挑戦中である。

② 複合系ポリマーの屈折率制御

光導波路デバイス作製には屈折率の精密制御が重要である。例えば、小型の光導波路や高効率な回折格子を作製するためには、屈折率の制御範囲を従来のフォトニクスポリマーより広範囲に実現する必要がある。今回、酸化チタン、酸化ジルコニウム、あるいは中空シリカなどのナノメートルサイズの超微粒子を、2次凝集を抑制してフォトニクスポリマーに均一分散させる技術を確認し、透明でかつ高/低屈折率ハイブリッド材料を開発した。屈折率は、ナノ粒子種やナノ粒子濃度を変化させることで制御可能であり、また世界最高レベルの高屈折率ハイブリッド材料を実現した。本ハイブリッド材料についても、その屈折率制御性や透明性について、材料設計開発指針を得ることができた。

③ 自己形成シングルモードポリマー光導波路

無調芯実装技術として有効性を発揮する自己形成光導波路についても、近赤外域の照射光でのシングルモード自己形成導波路を実現した。これは光硬化性モノマーと重合開始剤・増感剤の適切な選択及びレーザー照射法の工夫による。本近赤外励起による自己形成光導波路の実現により、実際の光源（例えば VCSEL など）からの出射光で直接自己形成光導波路が無調芯でアライメント実装できるという利点があり、実装コストの大幅な低減につながる。

④ サブミクロンサイズの光導波路

シリコン細線導波路は、そのコアサイズがサブミクロンであり、超小型の光回路として、チップ内光インターコネクションへの適用が期待されている。しかしながら、シリコン導波路は、(1) 広帯域の光変調ができない、(2) 大きな正の熱光学定数を有し、温度変化で導波条件が変動する、(3) 小径のためファイバーや受発光素子との接続が困難であるという欠点を有する。そこで、シリコン導波路上のクラッド

に電気光学ポリマーを塗布し、(1)の欠点を克服すること、同様にクラッドにハイブリッド材料を塗布し、(2)の欠点を克服したアサーマル光導波路を実現すること、更に近赤外光で重合できる材料を開発し自己形成導波路を実現して(3)を克服することを提案した。

⑤光インターコネクต์デバイスの試作

上記に開発した高性能フォトニクスポリマー材料や光導波路デバイス作製プロセスを駆使することにより、実際にプロトタイプデバイス作製に成功し、自己形成光導波路作製やシリコン/ポリマー光変調導波路については、そのデモンストレーション展示も行い、関係各方面から問い合わせが届いている。また、アサーマル光導波路も実現できた。

更に、中途参画の機関が開発した屈折率分布 (Graded Index:GI) 型プラスチック光ファイバー (POF) を用い、従来のガラス光ファイバーでは困難であった抜き差し可能なインターコネクต์の開発が行われた。新規にボールペン型インターコネクต์を中途参画の企業と共同開発することにより、横ずれ、縦ずれに対しても低損失、広帯域を保つ低コスト GI 型 POF インターコネクต์を実現した。また、高精細映像伝送のデモンストレーションを行い、POF2016 など国際会議で発表し大きな反響を呼んだ。

(3)最終目標達成の可能性

市場性等

光インターコネクต์素子のターゲット市場は、高速多機能光トランシーバとして自動車用途である。大手の自動車メーカーだけでも約 1 千万台/年生産しているので、大きなマーケット規模になると考えている。大きな規模になるには、高級車から導入され、大衆車まで普及させるために、より一層のコスト低減努力が要求される。

自動車は安全性インテリジェント性が益々求められているので、デバイスやモジュールの高速化に向けた成長性はかなりあると考えられる。収益性に関しては集積度が高まり、自己形成によるパッシブ接合が多用される程大きくなる。また現在は自動車用を念頭に開発しているが、広くデータセンター用途や民生用への展開も可能であり、他事業へ大きく波及することを期待している。

(4) 事業化に向けた体制変更

ステージⅢの実用化開発においては、材料メーカーとともに、デバイス・システムメーカーの協力が不可欠であるが、当初予定されていた材料メーカーが事情により参画できなくなった。そこで化学メーカーが参加し参画大学の指導の下に量産手

法に道筋をつけた。

更に、システムメーカーとしてステージⅡより参画している企業にて、開発された各素子のデモ機にて各素子の実証検証が行われた。

8.5 研究開発課題名

【ポリマーナノ光ファイバーによる量子フォトニクス情報通信技術の開発】

白田グループ

(1) 研究開発課題の達成状況

本課題の目的は、シリカファイバーベースで発展してきたナノ光ファイバー（最細部の直径がサブミクロンのテーパファイバー）技術をフォトニックポリマーベースの技術に拡張し、近将来の高セキュリティ情報通信技術として期待されている量子暗号通信に資する実用技術を開発することである。特に、量子暗号通信に必須の単一光子列を通信用光ファイバー中に高効率/高繰り返しに発生する技術を開発する。技術的にはナノ光ファイバーにナノサイズの溝からなるブラッググレーティング構造、更に光共振器構造を造り込むことが開発のキーポイントである。フォトニックポリマー技術とシリカナノ光ファイバー技術を融合することにより、光加工により容易にナノ光ファイバーへのグレーティング加工を実現するポリマーナノ光ファイバー技術を確立する。ステージⅡまでに、ナノ光ファイバー作製技術、単一量子ドットハンドリング技術、シリカナノファイバーへのポリマーコーティング技術、ナノ光ファイバーモードへの理論限界光子放出の達成、レーザー照射によるナノ光ファイバーへのグレーティング加工技術、シリカファイバーベースのナノ光ファイバー共振器技術、などの要素技術の開発がなされた。特に、共振器増強ファイバーモード単一光子発光が実現できることを示した。また、このナノファイバーへの直接加工法と共にナノファイバーには直接に加工せずに共振器効果を実現する新方式の提案も行いポリマー量子光回路へも道を開き得る実証実験も行った。

(2) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

① シリカナノ光ファイバー作製技術

本課題の中核基礎技術であるシリカナノ光ファイバー作製技術を改良発展させ、高光透過率を維持しながら最細部直径が数百 nm のナノ光ファイバーまで作製可能な技術を実現した。近年では、世界的にナノ光ファイバー技術は注目を集め多くのグループが研究開発に参入しつつある。本課題で開発したナノ光ファイバー作製技術は具体的な製品として開発リーダ企業により商品化された。

② ナノ光ファイバーへの単一量子ドット高精度配置技術

本課題の眼目である単一光子発生には単一の量子発光体を精度良くナノ光ファイ

バー上に配置することが必須である。手法を検討した結果、ナノ光ファイバー上に量子ドットを配置する技術を確立した。配置位置精度は数 μm 以下で量子ドットをナノ光ファイバー上に配置できる。全ての操作はコンピュータ制御により自動的に行われる。1回の操作で各配置点に高い確率で単一の量子ドットが配置できる。

③ ナノ光ファイバーモードへの理論限界光子放出の達成

ナノ光ファイバー上に配置した量子ドットからの蛍光を定量的に計測し、ファイバーモードへ大きな効率で放出されることを実証した。世界の各所で実施されている方法と比べてトップレベルの値である。更に重要なことは、この結果は理論予測と完全に一致することであり、ナノ光ファイバーの方法が「理論の予測を超えた不確かさ」等を含まない設計可能なシステムであることを実証するものである。この事は今後の展開の重要な基盤を与えるものである。開発中のナノ光ファイバークレーティング（光共振器）と組み合わせれば、非常に高いファイバーモード放出効率が実現できることを示すものである。

④ ポリマーナノ光ファイバー作成技術

最細部直径が数百 nm 程度のナノ光ファイバーに数十 nm の膜厚でポリマーコートしたものをポリマーナノ光ファイバーと呼ぶ。ステージ I においてナノ光ファイバーにポリマーコートする技術を確立した。シリカファイバーへのポリマーコートは直径 $10\mu\text{m}$ を超える領域では極めて容易に行えるが、直径がサブミクロンの領域では、実効表面積が微小となり表面張力が微弱となるためポリマー溶液がナノファイバーを濡らすことができず通常のコーティング手法は適用できない。手法を検討した結果、ナノファイバーへのポリマーコーティングを実現した。更に、ナノファイバー近接場領域で 3 光子過程による樹脂硬化を引き起こし、ナノファイバーへのポリマーコーティングを行う方法も実現した。

⑤ レーザー照射によるナノ光ファイバークレーティング加工

レーザー光を位相マスクを通してナノ光ファイバー上に集光することにより数千個の微小穴列（グレーティング）を高精度に加工する技術を開発した。右に加工例の SEM 画像を示す。光学特性も良好であることが実証されつつある。

⑥ ポリマー量子光回路新方式の提案

通常の透明グレーティング上にナノファイバー部を接触させれば、ナノ光ファイバーに加工せずともナノ光ファイバーにグレーティング機能を付与できる。2 次元面にグレーティングを適宜に加工すればデザインされた量子光回路も実現可能な新

技術となり得る。実際に量子回路基板として、中央部にギャップを有するグレーティングを作製し、単一量子ドットを配置したナノ光ファイバーと組み合わせることにより分布帰還型の単一モード共振器／発光システムを実現した。これを用いて自然放出増強の実証を行い、ファイバーモードへの単一光子放出率数十%を実現している。

(3) 最終目標達成の可能性

当初計画に沿って諸要素技術が開発されている。レーザーによるナノ光ファイバーグレーティングの高精度超高速加工法は当初予測を越えた技術であり、応用技術としてはもとより基礎研究としてもインパクトを与え得る。また、ポリマー量子光回路の新方式は実現すれば実用技術として大いに発展し得る。速やかな実施検討を期待する。一方、本テーマ発足時と比べて、ナノ光ファイバー量子フォトニクスの世界の状況は大きく変わりつつある。ナノ光ファイバー量子フォトニクスはこの10年来、本課題のプロジェクトマネージャー（PM）が理論と実験の両側面から進展させてきた分野であるが、この2-3年来、欧米をはじめ世界の各所で研究機関が参入しつつある。PMが理論予測をしたもので実証に手が付けられていなかった基礎事項の中には、欧米の研究機関が実証し発展させつつあるものもある。本課題は「実用技術への展開」であり、その視点での重要事項は見逃さず世界のトップを走っている。

ナノ光ファイバー技術は順調に進展しているが、他方の重要因子である量子発光体については更なる注力が必要である。世界の各所で様々な量子発光体が研究開発されている。本課題で開発したナノ光ファイバーへの単一量子ドット配置技術は様々な量子発光体に拡張可能である。共同の範囲を材料研究者にも幅広く広げ研究を進展させることを期待する。

① 競合優位性

ファイバーモードへの高効率単一光子発生としては、本技術は他技術と比して大きな優位性を持っている。本技術は、本質的にテーパファイバー技術であり、テーパ加工を最適化すればほぼ100%に近い透過率に達する。従って単一量子発光体からナノファイバーモードへの発光効率がファイバーモードへの発光効率となる。一方、他の諸手法は発光の効率は良くてもファイバーモードへのカップリング効率が低くそれがネックとなっている。ナノファイバー光共振器技術が発展すれば高い効率が期待される。各開発過程でのキー技術の特許取得等は積極的に進めなければならない。

②市場性

量子情報技術は現状では商用技術にはなっていない。米国、ヨーロッパ、オーストラリアでは国家プロジェクトとして大規模に開発が進められている。2020年頃には限定用途での量子暗号通信の実現が期待されている。情報セキュリティ確保は国家レベルでの重要事項であり、特長ある簡便で優れた技術が確立すれば、適用範囲は民生分野にも拡大し大きな市場が期待できる。現状での最重要点は優れた技術を早期に確立することである。一方、量子情報の大規模市場とは別に、ナノ光ファイバー技術は量子光学／量子フォトニクス分野の重要な基本手法になりつつある。大型でないとは言え、レーザーで加工し諸機能を組込んだナノ光ファイバー等には量子フォトニクス研究開発向けの広範な市場も予測できる。また、量子フォトニクス以外でもバイオ分野をも含むセンサー応用開発の市場も予測できる。

③企業戦略適合性

最近のナノ光ファイバー量子フォトニクスへの国内外諸グループの参入状況を考えれば、当初の商用化は諸機能を搭載したナノ光ファイバー自身、もしくは研究用単一光子発生システム等を念頭に置くべきである。これらの研究用機器市場は必ずしも大きくはないが、将来の量子情報関連市場の大きな発展のためには極めて重要である。このような研究用機器市場に対しては、柔軟に小規模多機能生産に対応できることが重要である。このような業態は我が国には少ないが欧米には優れた企業が数多くある。開発リーダである参画企業の技術基盤は特殊光ファイバー作成や微細加工技術であり、上記業態はその企業戦略とも一致し、かつそれに十分対応できる実力／経験と人員を有している。実際に本グループが開発したナノファイバー作成装置は企業化され販売されている。

9. 総合所見

【堤グループ】

本研究開発テーマは、現在低迷している日本の産業界特にディスプレイ業界に新風を入れるものと期待され、3Dディスプレイは、エンターテイメントから、視覚情報、医療分野に至るまで幅広く応用が期待されていた。しかしながらこれらの目的を達成するための諸性能を達成することが出来なかった。また将来的にも困難であろうという評価になり、研究開発を終了することにした。

【戸木田グループ】

ソフトマテリアル場での自発的ナノ構造創生による光学機能材料開発に関する本グループのアイデアは独創的であり、かつ応用の視点に立てば、完全配向で面積化が可能となり、材料の基本的光学特性の向上化と合わせて、かなり高いレベルの基盤開発技術を獲得してきたと言える。ステージⅡでは、具体的な光学要素材料としての成型加工、製膜技術を確立するとともに、具体的光学製品（非吸収型透明偏光板、波長分離フィルム、反射型画素集積フィルム、分布帰還形レーザー発振フィルム、ポリマーブラシ液晶によるセルフリー・ディスプレイ、ナノ粒子分散による高屈折率、高光散乱、高熱伝導性フィルムなど）として設計また性能評価を行った。その結果、透明スクリーンとして種々の場所でデモが行われている。

【谷田貝グループ】

今後の情報社会の核となるメモリについて、将来ニーズ動向を的確に捉え、目標値を設定して、計画通りに研究開発が進んでいる。一部項目については、前倒しで成果が出ている。参画している4研究機関の代表者、研究担当者が頻繁に連絡を取り合いながら推進し、定期的に(4~5回/年)全体会議を開き、研究方針をディスカッションしている。確実に成長が見込めるアーカイブメモリ市場にターゲットを置き、従来技術では限界に来ている光メモリをテーマとして設定したことの妥当性は、研究開始時点と状況は変わっておらず将来も変わらない。

この期間中にアーカイブメモリでビジネスを展開している参画企業が将来技術の柱にしたいとの要望があり本グループに参画した。これによりビジネスとしてのリアリティが大幅に向上したと考えられる。

【杉原グループ】

光インターコネクト技術は、ハイエンド情報機器のみでなく、様々な小型のローエンド機器や車にも搭載できる広いアプリケーションが期待できる。新たにステージⅡの期間中に多くの企業及び大学が参入し、実装技術のリアリティが大幅に向上した。

すなわち車載用途における高温で長時間の耐熱性を実現した。その際には、高性能と低コストを両立させる必要があり、本研究開発テーマがその解になると期待できる。

また超高速光通信系ではポリマー光ファイバーの方が理論的にも現実的にも優れていることが明らかになった。実際には光インターコネクトデバイスとの接続が重要になる。このような観点から杉原グループにプラスチック光ファイバー(POF)を研究する大学が参画することになった。その技術の実現化に当たり、企業2社が参加することになった。

【白田グループ】

単一光子発生は将来の量子通信技術にとって極めて重要である。ナノ光ファイバー共振器及び量子ドットの配置などで進展があった。ナノファイバーへの回折格子(グレーティング)の新しい加工法の提案もあり、ポリマーナノ光ファイバー共振器による単一光子発生の可能性が大になった。なお、量子ドットに関しては、これまでドット配置のためのハンドリング技術開発が主体であったので、材料開発など次の展開に対する準備がやや遅れている。この点に関しては材料開発の企業が新たに参加し量子ドットに関する研究を深めている。また単一光子発生に必要なナノファイバーの作成装置が参画企業から発売されている。

【感想】

本研究開発は、S-イノベ制度が発足した平成21年度の研究開発テーマの1つである。研究開始されたのは平成22年1月以降であるから、7年が経過した。ステージIはそれぞれ大学の研究者が有しているシーズを10年後の企業化研究に進められるように発芽させ、できれば茎へと育てる研究段階である。初期には単純に従来と同じような基礎的研究をすれば良いのではないかという認識の研究者もいた。その認識を改めてもらうことに注力した。今では全員最終的な応用を描いて研究を行っていると考えている。したがってここに来て多くの成果が挙がり、テーマ推進会議の評価も大変良いものであった。

しかしながら2008年のリーマンショックの厳しい経済状況を反映してか、一部の課題において企業がこの本テーマから撤退した。それでも、将来技術の優位性を考慮に入れた企業が現れステージII期間中は5課題で研究開発を行ってきた。この間、研究論文、特許は各グループ努力して、多くの成果を挙げてきた。しかし1課題については企業が要望するような性能を実現できないことが明らかになった。そのためにこのテーマを中止せざるを得なかった。

ステージIIIでは研究開発費の50%(中小企業の場合は1/3)を企業が負担する。それまでは研究開発費の全額をJSTが負担していた。それゆえ、研究の将来性が見込めないと企業は撤退する。事実そのような企業が現れた。すなわち平成22年発足時の企業

は5課題で7社であった。しかしステージⅢが始まるにあたっては、50%（中小企業の場合は1/3）負担でも良いという多くの企業が現れ、結果として4課題で13社と倍増した。一部の企業は100%負担でも良いというほどであったが、参加企業間及びプロジェクトマネージャーでよく話し合ってもらい、それぞれの企業に研究開発費を支給している。

現実には各企業持ち出しで研究開発を行っている。このことは各企業としてはかなり近い将来それぞれのターゲットが実用化可能であると考えている証拠である。一般的には、10年先を見通して研究開発することは極めて困難であると言わざるを得ない。社会は現在目まぐるしくしかも急速に変化するからである。例えば平成22年当時には老人に原因する交通事故がこれ程多く起こるとは誰も思っていなかったであろう。最近は何れも毎日痛ましい事故が起こっている。老人に対して運転規制を早急にする必要があるが、健全な老人も多いので、年齢だけの規制では過疎地などでは買物に行けなくなるので命の問題になる。このような社会情勢において、自動運転の技術の高度化は極めて重要である。自動運転にはあらゆる情報を取り入れる必要があり、数百GHzで作動するインターコネクトデバイスは誘電率が大きいので理論的にも実際にも前述したような高速での作動は無理である。ポリマーだけが実現可能である。

インターネットは今では我々の生活においてなくてはならない必須のものとなっている。一方サイバー攻撃がなされ多くの被害が出ていることも新聞などでよく目にする。この問題をクリアする技術が単光子による通信すなわち量子暗号通信である。また量子コンピュータも話題になっており理論的な研究が進みつつある。ここで問題なのは単光子を簡単に生成させる技術である。本課題の研究者は単光子生成をルーティン化する技術を開発した。この技術は世界的にも高く評価されており、今後の発展が大いに期待されている。

更に、公文書などは今まで紙媒体、磁気記録へと変化していたが、すべての情報を後世に残すアーカイブメモリに関しては現状技術では限界に来ている。それを解決するのは光波面を利用して記録させる方法である。この技術も平成22年当時ではニーズがそれほど無かったが、現在では当時では考えられなかった要望があることが明らかになった。

上記したようにわれわれの研究グループは卓越した成果を挙げていると思うが、多くのプロダクトは高性能部品であって直接商品になるものは相対的に少ない。これからは組立産業とも連携して産業化することが肝要である。交流会や国際会議を通してS・イノベの研究課題に限らず共同研究の芽が育ちつつある。これらを総合化して各企業が利益の出る体制を組み上げ、貢献できれば幸せである。そのために今一段の結束を図り一段の努力をしたい。

以上