

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」

研究開発テーマ事後評価用資料

令和元年 7 月 31 日

(2019 年 7 月 31 日)

目 次

1. 研究開発テーマ	3
2. プログラムオフィサー (PO)	5
3. 採択課題	6
4. 研究開発テーマのねらい (目標)	7
5. 研究課題の選考について (参考)	9
6. アドバイザーの構成について	10
7. 研究開発テーマのマネジメントについて	13
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：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	18
8. 2研究開発課題：高分子ナノ配向制御による新規デバイス技術の開発	19
8. 3研究開発課題：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	24
8. 4研究開発課題：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	26
8. 5研究開発課題：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	30
9. 総合所見	34

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。この様な問題解決のために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、さら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證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) フォトリフラクティブポリマー

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ラ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

(東京農工大学 名誉教授)

3. 採択課題

採択年度	プロジェクトマネージャー	課題事後評価時（H30年度実施）の所属・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 （中間評価（H27年度実施）時の所属・役職）	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 特任教授	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が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、我が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、我が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。今回開発された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リ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。また複屈折値 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ので、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)ナノハイブリットポリマー、(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～終了まで
久我 隆弘	東京大学	教授	平成 21 年 11 月～終了まで
本多 德行	キヤノン株式会社総合 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～終了まで
高田 俊二	富士フイルム株式会社	嘱託	平成 21 年 11 月～終了まで
中西 八郎	東北大学	監事	平成 21 年 11 月～平成 29 年 3 月
西川 恵子	千葉大学	教授	平成 21 年 11 月～終了まで
八瀬 清志	産業技術総合研究所	研究部門長	平成 21 年 11 月～終了まで

*1) 後任として下記の小山氏に就任していただいた。

小山 剛史	キヤノン株式会社 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～終了まで
-------	--------------------------------------	-------	------------------

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大面積化、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いた。

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た。

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だすアドバイスを頂いた。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。

さらに、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いただいた。

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～終了 まで

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た。

ステージⅢ終了時点（平成 31 年 3 月）におけるアドバイザー構成は以下の通りである。

氏名	所属・役職	任期
池本 陽一	積水化学工業株式会社 人事部 リスクマネジメントグループ長	平成 21 年 11 月～平成 31 年 3 月 31 日
梅原 俊志	日東電工株式会社 取締役 専務執行役員	平成 29 年 7 月～平成 31 年 3 月 31 日
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～平成 31 年 3 月 31 日
小山 剛史	キヤノン株式会社 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～平成 31 年 3 月 31 日
雀部 博之	千歳科学技術大学 名誉教授	平成 21 年 11 月～平成 31 年 3 月 31 日
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～平成 31 年 3 月 31 日
千田 武	セリオ国際特許事務所 弁理士	平成 24 年 9 月～平成 31 年 3 月 31 日
西川 恵子	千葉大学 大学院融合科学研究科 特任教授	平成 21 年 11 月～平成 31 年 3 月 31 日
八瀬 清志	特定国立研究開発法人産業技術総合研究所 機能材料コンピューテーショナルデザイン研究センター 招聘研究員	平成 21 年 11 月～平成 31 年 3 月 31 日

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した。
- (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した。
- (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した。
- (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。

人的交流の活動として、横浜市、那須町、諏訪市の 3 都市でフォトニクスポリマー国際会議を開催し、世界の著名な研究者も含めたフォトニクスポリマー関連の専門家と交流する場を設けた。どの国際会議もフランス、アメリカ、インドネシア、韓国、台湾、イギリス、スペイン、中国、スイス、チェコ、インド、オーストラリアなどから百数十名～数百名の参加者を得て盛況であった。

(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。その後は、訪問していない大学や課題のある研究機関を重点に、必ず年に数回サイトビジットを行った。S-イノベ開始直後に多くのサイトビジットを行った理由は、研究計画方針を的確に立案させるためとグループ内の研究機関の実情を良く把握するためである。

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。

ステージⅢにおいては、主に企業を集中的に訪問し、S-イノベの研究進捗状況だけでなく、各企業での S-イノベ研究成果の活用についてディスカッションした。産業創出の企業側の意思を確認するとともに今後の研究活動、事業活動に対してアドバイスをを行うためである。その結果、上市の時期に違いはあるものの、ほぼ全ての企業で S-イノベ技術の一部または全部の事業化、産業化を図ることを検討していることが確認できた。

(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た。

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）もの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ンクスに大変興味を示し、また 良いアドバイスを頂いた。

最終年度の平成 30 年度には、その集大成として S・イノベの研究成果を広く世界に発信するために、諏訪市の後援を受けて同市内のホテル紅屋にて国際会議 **International Workshop on Photonics Polymer for Innovation(IWPPI)2019** を 10 月 15 日から 19 日まで開催した。世界 14 か国から研究者 217 名（うち招待講演者 32 名、一般参加者 186 名、招待者他 13 名）が参加し、平成 28 年度以上に盛況であった。基調講演者として、かつて米国の「情報スーパーハイウェイ構想」の素案を作りあげた大学教授にポリマーレンズのユニークな研究を発表いただいた。S・イノベの各課題研究リーダーおよび開発リーダーからの成果発表が行われ、ステージ I ～ III までの成果および産業化に向けた取り組みを発信した。同会議では、米国の大手 IT 企業の新しいハードウェアプロダクトに関して講演いただいた同社開発マネージャーは我々の研究に大いに興味を示し、今後の共同研究に繋がる可能性を広げた。

これら国際会議の活動において特筆したいのは 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た。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た。

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。

ステージⅢの事後評価では、目標に対する達成状況や学術的な成果だけでなく、新産業の創出という観点や事業化に対する状況も勘案し、アドバイザーの先生方と共に最終評価を行った。最終的な事後評価の評点としては、「S」が2課題、「A」が2課題である。

(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。

ステージⅡまではJSTが100%研究費を負担していたが、ステージⅢにて企業側も50%（中小企業の場合は1/3）の研究費を負担するマッチングファンドに移行した。この時点で企業側の事業判断にて参画企業2社が撤退した。撤退に際して、それまでの特許などは残る企業や新しく参加する企業が自由に使えるように交渉して、了解を得た。

一方、研究の成果に対して多くの企業から高評価を得て新規参入があった。

戸木田グループには従来の企業に加えて民間企業1社が新規参入した。杉原グループには新たに民間企業4社が参加した。白田グループには新たに民間企業2社が参加した。

この様に組織が大きく変化したが、皆リスクを冒してでも参加したいと思わせる成果をあげているからであり、これにより各課題において研究開発の実用化についてリアリティが大きく増したと考える。

(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進行した。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た。

実例としては、杉原グループにおいて、白田グループの参画機関が作製したTEC（コア拡散）光ファイバーを、シリコン光導波路モジュールに適用させる実験を行い、光ファイバーとシリコン光導波路との結合損失低減に寄与した例などがある。

(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に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（平成 27 年度終了）**

(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。さらにこの大きな 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・上市

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、透明感は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。

以上をシーズ技術に、参画企業 3 社が異なる方式での透明スクリーンを開発した。開発と並行して、サンプルを展示会に出展、希望されるユーザーに配布し、ニーズ等の情報収集を行った。実際の展望室イベントにサンプルという扱いながら提供が確定し、フィールドテストとして視認性や施工性、耐久性などの現場データを収集した。このイベントに採用された最大の理由は、展望室の窓に貼っても視界を妨げないという開発品の高い透明性であり、本テーマにて提案した「透明スクリーン」というコンセプトに対し、実際のニーズがあることが確認された。

その結果、ステージⅢにて参加企業 3 社から、フィルム方式またはガラス方式として各社それぞれの商品名で上市するに至った。

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。

⑤金属ナノワイヤー透明電極の開発

ナノファイバーネットワーク構造を持つ透明電極材料や熱伝導性材料の創成を通して、ナノ～サブミクロンスケールのネットワーク構造体が電気伝導性、熱伝導性、光学特性に与える影響を明らかにし、1次元ナノ材料集合体を用いた材料設計の指針を示した。透明電極膜は、液晶ディスプレイをはじめとするさまざまなデバイスに用いられており、特に最近ではタッチパネルの普及によりその需要は高まっている。ITOは可視光に対する透過性の高さから透明電極膜として幅広く使用されているが、原材料に希少金属であるインジウムを用いているため生産コストがかかってしまう。一方、PET上にアルミニウムが薄膜状に蒸着されたアルミ蒸着PETは比較的安価で入手できる材料で、その優れたガスバリア性から食品の外袋などに応用されている。本グループは、アルミ蒸着PET上へ電界紡糸法を用いてポリスチレン（PS）ナノファイバーをネットワーク状に分散させ、Alグリッドを取り出すことで透明性と導電性を確保した透明電極膜を作製した。

以上をシーズ技術に参画企業が開発研究に取り組んだ。紡糸雰囲気を制御し、安定して細線ファイバーを製造することに成功し、本技術により、ランダム配線パターンを有するSi元型を実現できていることを確認した。

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、具体的な光学製品（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。シーズ技術をもとに複数の開発研究を遂行し、透明スクリーンを開発、市場開拓を行いながら、上市に至っている。

(2)最終目標達成の可能性

本研究グループでは、トップダウン的手法ではなく、適切な場を高分子に与え、これらの自発的な構造形成により光学材料へとポリッシュアップする手法を、多様な形

で示し、世界に先駆けた技術開発を行ってきた。液晶場でのソフトマテリアルの自発的な配向構造形成、高次構造形成、ブロック共重合体、ポリマーブラシ、コロイド微粒子などのアーキテクチャーなど、ソフトマターサイエンスの科学基盤を創生しながら、これを活用し、様々な光機能を持つ光学フィルムやデバイスを、単純プロセッシングにより、大面積で、歩留まり高く実現することを可能にし、多くの産業創出の礎となるフィルム創生技術を提供した。

本研究グループで開発してきた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) 異常光屈折率として高い 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 $300\mu m$ 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。さらに、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える。

透明スクリーンは画像の解像度や輝度はプロジェクターの性能によるところが大きく、高性能なプロジェクターは高価なものも多い。現在デジタルサイネージとして、小型液晶ディスプレイが店頭には多く見受けられる。透明スクリーンは、むしろ大型画面において、導入コスト及び装置の容積、重量において液晶ディスプレイに比べ大きなメリットがある。

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、品質の確保およ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。

透明スクリーンは 3 社がそれぞれの開発を進めつつ共同して市場開拓を進めている。参画企業 2 社は、真に透明な透明スクリーン用フィルムとして世に先駆けて上市し、高い透明性が求められる展望台などのイベントで採用頂き、好評を得ている。最近になり、国内の数社から類似製品が発表されるようになってきたが、高透明性という点で依然として優位を保っている。板ガラスメーカーの参画企業の製品は粒子散乱を利用した原理で投影像表示を可能とし、透明性、投影像の鮮鋭性ともに他社品より優れる。単板ガラスへのコーティングであるため、合わせガラスを含め、強化ガラスや複層ガラスなど市場で用いられている各種板ガラスに対応できる。透明スクリーンガラスはフィルムタイプに比べると認知はまだまだであるが、建築物などで汎用される板

ガラスに映像表示するニーズは広がっていくと期待される。東京オリンピック関連での採用が今後の市場開拓のチャンスとなる。

企業化にはまだ時間が掛かるが、将来期待されている素材がこのグループで開発されており、これらに関しては参画企業が寄付講座を大学にこの4月から設置し研究開発を継続することになった。

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) 研究開発課題の推進状況

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た。内部討議で技術的問題の解決糸口が見つけられないときは、外部の専門家にご指導を仰ぎに行くこともあった。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た。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、さらにその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。さらに、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・再生が可能なることを実証した。

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およ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た。その中で、S/N比推定、ページ間クロストークノイズの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た。さらに偏光記録を含めた光学厳密理論式の構築にも成功した。

(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。また、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た。

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、通常の人間が 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およ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は避けら

れた。

(4) 研究開発目標の達成度と新事業創出の可能性

システム企業の参画により 3次元ベクトル波メモリの原理を実証するプロトタイプ機器開発が一気に加速した結果、今回の独創性のある研究開発は最終目標を達成したと認められる。

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ต์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、およ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、さら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ต์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た。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、プロトタイプの光インターコネクต์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ต์する方法を開発し、光インターコネクต์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、アダマンチル基を含有する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を見いだした。

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およ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、さら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。(1)は、①において合成した高耐熱電気光学ポリマーをシリコン導波路にクラッドとして塗布し、超高速小型光変調器を実現した。また、高温においても変調動作が可能であり、極めて高い耐熱性を有することが明らかとなった。(2)は、②において合成したTiO₂ナノ粒子含有光硬化性樹脂を用いることで、ハイブリッド材料が有する負に大きな熱光学定数でシリコンの正の熱光学定数をキャンセルし、温度変化でも導波条件を一定にするアサーマル導波路を実現した。(3)は、2光子重合による赤外光励起自己形成光導波路を実現し、光ファイバー間の自動接続を行うとともに、シリコン導波路からの自己形成光導波路も実現できた。さらに、赤外感光樹脂を開発し、従来技術より非常に低い重合閾値で自己形成光導波路を実現でき、CW光で初めて近赤外光励起自己形成光導波路を達成した。作成した素子は世界最速のスイッチング応答性を示し、国際学会で多くの反響を得た。

⑤光インターコネクトデバイスの試作

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。

さらに、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トの開発が行われた。新規にボールペン型インターコネクト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インターコネクトを実現した。また、高精細映像伝送のデモンストレーションを行い、POF2016、IWPP2018など国際会議で発表し大きな反響を呼んだ。本GI型POFインターコネクトは、ステージⅢから企業2社に参画していただき、それぞれボールペン光インターコネクト技術の実用化、DIYのためのPOF工具の商品化を担当し、量産のための技術的課題をクリアした。POF工具については、商品化サンプルを提供するまでに至っている。

(3)最終目標達成の可能性

市場性等

光インターコネクト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

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。安全性や信頼性に高度な要求のある自動車用途の方が開発に時間が掛かるため、むしろデータセンター用途や、民生品への展開の方が早く始まると思われる。

2020年の東京オリンピックの開催に向けて、2018年12月より新4K/8K放送が開始された。各住宅や放送局では、衛星放送信号を専用のアンテナにより受信、中間周波数(IF: Intermediate frequency)信号へ変換、増幅し、屋内への配線の引き込みが行われる。このような状況の下、家庭内・ビル内でも光ファイバーの導入に対する期待が急速に高まってきている。そこで、フレキシブルかつ高速通信可能なGI-POFを用いて、4K/8Kの時代のための簡易型コネクタを実現するために「低雑音性GI型POF」を開発し、「8K非圧縮映像伝送のための多値変調」と「8K圧縮TV放送伝送のためのRadio over Fiber (RoF)」に極めて有用であることを明らかにした。GI-POFのメリットを活かすためには、市場で要求されているコネクタ、光モジュール、カット工具等を本プログラムで開発し、普及のための準備を整えた。

(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。

また、光インターコネクタモジュールの実装部分で協力していた参画企業がステージⅢから正式にグループのメンバーとなり、光接続や光変調器のモジュール化の進展が加速することになった。

さらに、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。

このように、材料(川上)からシステム(川下)までを網羅する企業が参画する体制を構築できたのは、プロジェクトマネージャー(PM)のマネジメント力と本研究グループの成果がすぐれているからである。また、FIRSTプロジェクトの成果であるGI-POFのインターコネクタ技術を実用に供するため、ステージⅢから企業2社が参画し、その実用化技術を担うことにより、開発→商品化の体制を整えることができた。自動車関連企業2社はステージⅢ終了後からは自社開発することになった。

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ーファイバー）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、さら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。ステージⅢにおいては量子ドット開発企業の参加を得て、既開発のナノ光ファイバー技術とグラジエントシェル構造を有する量子ドットの組み合わせにより極低温環境ではあるが高い繰り返しレートを有するファイバーインライン単一光子源の開発を達成し、さらに1桁高い繰り返し単一光子源にも道を開いた。

(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。また商品化した装置はナノ光ファイバーのみならず任意形状のテーパー光ファイバー作製装置としても機能でき、ファイバーモードコンバーターなどのフォトニック産業応用にも展開されている。

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。本技術は世界の他研究機関の追従を許さない技術である。ナノ光ファイバーフォトニクス標準技術化されることが望まれている。

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「理論の予測を越えた不確かさ」等を含まない設計可能な方法であることを実証するものである。この結果はさらに、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による光共振器と組み合わせることにより、非常に高いファイバーモードへの単一光子放出効率が実現できることを示すものであり、高効率のファイバーインライン単一光子源の開発の基礎を確立するものである。

④ポリマーナノ光ファイバー作製技術

最細部直径が数百 nm 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 $10\mu\text{m}$ を越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トを実現した。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ト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。作製されたナノファイバークレーティングは散乱損失が少なく高反射率/高透過率を示すなど光学特性も良好であることが実証された。

⑥ポリマー量子光回路新方式の提案

透明基板上に設計加工した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ことを数値シミュレーションにより示し、実験的に実現した。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える。

実際に量子回路基板として、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高い単一光子放出率を実現した。この方法は前項記載のレーザー加工による直接加工法と相補的な方法であり、両方法を使い分けることにより様々な目的/状況に対応可能となるものである。

⑦高繰り返し単一光子源の開発

ステージⅢにおいて新規参加企業による量子ドットと既開発技術と組み合わせ高繰り返しファイバーモード単一光子源の開発を行った。用いた量子ドットはグラジエントシェル構造を有するコア/シェル量子ドットであり、高い発光量子効率を示すものである。ただし難点は、スペクトル幅が広く、かつ高い発光量子効率の中性励起子と低い量子効率のイオン励起子（トライオン）が交差的に発光するなどの問題があった。本グループではこれらの問題を極低温技術と組み合わせで解決した。極低温化は実用技術化に逆行する側面もあるが、量子情報技術の分野では世界標準の単一光子検出器の動作温度が極低温であるなど、極低温技術は様々に用いられている。当グループではナノ光ファイバーを容易に組み込め、かつ光透過率の劣化も極低温でほぼゼロである電子冷凍クライオスタットを開発した。極低温ではトライオンの発光量子効率は約 100%になり、かつスペクトル線幅/放射寿命の点からも、量子発光体としてトライオンが優れていることを示した。更に、量子ドットは永続的にトライオン化できることを見出した。これらの結果を受けて、高い繰り返しファイバーモード単一光子源を実現した。現在の繰り返しの制限要因はトライオンの放射寿命であるが、共振器効果を導入することにより放射寿命は短縮化できるので1桁高い繰り返しへの拡張は実現できる。テーマ終了後も白田グループは低温高繰り返し高効率ファイバーモード単一光子源の開発を進めている。

(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た。レーザーによるナノ光ファイバーク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た。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。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った。ナノ光ファイバー量子フォトニクスは本課題のプロジェクトマネージャー (PM) がこの 10 数年来、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 7-8 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。本課題の眼目は「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きた。既にファイバーモード高繰り返し単一光子源としてトップクラスの結果を得ており、今後さらに進展すると考えられるが、実用技術として

は量子ドットの長期耐久性などの問題は残されている。今後は材料開発の研究機関と協力して動作条件を特定しての高耐久量子ドットの確立などの開発が必要である。

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高い透過率を達成できる。従って単一量子発光体からナノファイバーモードへのカップリング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。

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年代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研究機関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。この様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存在する。開発リーダ企業の技術基盤は特殊光ファイバー作製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製装置は事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、エンターテインメントから、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、平成 27 年度のステージⅡを持って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この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たと言える。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なった。

その結果、透明スクリーンとして、ステージⅢから参画した企業を含めて3社の企業から商品が発売されたことは本グループの特筆に値する成果であり、すでに、あべのハルカスや東京タワーなど様々な場所でデモが行われ反響を呼んでいる。その他の素材に関しては参画企業が提供する大学の寄付講座で引き続き研究開発が行われる。

【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だ。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た結果、参画企業によるプロトタイプ機器での実証も含めた最終目標を達成した。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。

ステージⅡにて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。

新産業の創出については、他機関の技術より確実に優位な状況であることから、必ずや本技術が市場を切り開いていくと確信している。

【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、実証検証のリアリティが大幅に向上した。すなわち自動車向けに高温時の高速伝送という世界最高性能を有する技術の実現に目処を付けたのである。近い将来の自動運転車両の普及には、高性能（高速、低消費電力）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信ずる。

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。その際、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し、その技術の実現化に当たり、企業2社が新たに参加した結果、2018年12月に始まった新4k/8k放送へ実際に応用展開される見込である。

このグループは、材料/部品メーカー、組立メーカー、最終システムメーカーと次々に企業が参画した結果、最終的に企業6社、5大学の体制となり、川上から川下までを網羅する一大グループとなった。研究開発～実用化という観点で理想のグループであり、将来的に大きな市場を獲得しうる技術を確立したことは特筆に値する。これは、志の高いプロジェクトマネージャーが絶えずより良いグループ作りに邁進したことと、10年間という長期支援の相乗効果と言える。

【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。本課題ではナノ光ファイバーの高精度作製法から、ナノファイバー共振器、ナノ光ファイバー上への量子ドットの高精度配置法など基本技術が開発された。ナノファイバーへの回折格子（グレーティング）の新しい加工法の実現もあり、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。また量子発光体としては、グラジエントシェル量子ドットを低温環境で用いることにより、イオン化励起子（トライオン）が優れた特性を示すことを見出し、更にトライオン化する技術も開発した。このトライオン発光技術をナノ光ファイバー技術と組み合わせ高繰返しファイバーモード単一光子源を開発したことは評価できる。また関連技術ではナノファイバーの作製装置が参画企業から商品化され、その開発技術がファイバーモードコンバーターなどのフォトリック技術としても展開されていることは評価する。

本グループのプロジェクトマネージャーは独創性があり、研究成果はレベルの高い学術雑誌に多く掲載されるなど、学術的に高い成果を上げた。当初の目的である単一光子発生装置およびこれを組み込んだ量子暗号配信システムあるいは量子コン

ピュータなどの応用製品を完成させるという当初の目標を達成するにはテーマ終了後もまだ研究開発が必要である。今後の応用展開が加速されることを期待する

【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。研究開始されて以来この 3 月で 10 年を迎え終了した。スタートの時、10 年は長いと思ったが終わってみるとあっという間だったような気がする。正に光陰矢の如しであった。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。しかしステージⅢに入り、全員が最終的な応用を描いて研究を行った結果多くの成果が挙げたと思っている。テーマ推進会議の評価も大変良いものであった。

この過程において 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、ステージⅠの終了時に一部企業がこのテーマから撤退した。しかし将来技術の優位性を考慮に入れた企業が現れ、どの研究課題にも企業のサポートが付き、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。そのためにステージⅢになる時に、参加大学は研究開発を継続したいとの希望があったが、企業と相談した結果プログラムオフィサーとして、この課題を中止する決断を下さざるを得なかった。これが残念であった。

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%負担 (中小企業の場合は 1/3) でも良いという多くの企業が現れ、結果として 5 課題から 4 課題と 1 課題減少したのにもかかわらず、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、参加企業間およびプロジェクトマネージャーでよく話し合ってもらい、必要とする企業に研究開発費を支給した。

現実には各企業持ち出しで研究開発を行った。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なかったであろう。最近はやほど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の開発が強く求められている。しかし従来型の無機材料では誘電率が大きく、スイッチングスピードは格子振動で規制されるので大電力が必要になりマキシマムでも 20GHz 程度が最速であると理論的に示されている。共役原子団を有するポリマーはスイッチングのメカニズムが電子遷移で発現するので数百 GHz でも応答可能であると言われていた。それではどのように現実社会では解決しようとしているのだろうか。それは 10GHz の無機材料を 10 から 20 個使用して速いスイッチングスピードに対応しようとしているのである。したがって極めて高価になる。

ポリマーは分子設計の自由度を有しており熱安定性と高い周波数に対応可能な材料開発が可能である。実際に杉原グループは参加大学との共同で、超高速 α で作動する素子を開発し世界最高水準の速度を達成した。この値は世界に大きなインパクトをあたえた。昨年度からは JST の国際共同課題となりドイツの大学との連携が進んでいる。

自動車部品関連の参加企業は自社開発を目指している。杉原グループの参加大学は、その他の企業との連携で JST の A-STEP プログラムにて更なる実装技術に仕立てるべく研究開発を行おうとしている。

インターネットは今では我々の生活において無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、実験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。この技術の肝はナノファイバーに光を閉じ込めることである。ナノメートルオーダー光ファイバー中に更に小さな穴をあけグレーティングを作成することに成功したからである。これは医用センサーなど他にもいろいろ応用可能である。将来が期待されている。

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程無かったが、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。例えば行政文書や個人番号に関する個人に付随した情報の記録が必要になっているし、あらゆる情報を蓄積しそれからニーズに対応して必要な情報を取り出すクラウド処理が進んできたからである。そのためにはビット当たりのコストが重要である。谷田貝グループは従来の磁気記録コストより格段に安価な光記録システムを開発することに成功した。将来、本システムが脚光を浴びることになるであろう。

戸木田グループは多くの光部品を開発してきた。透明スクリーンに関しては3社が競い合っている。参加企業の1社はポリマーフィルム中にナノメートルサイズの高屈折率粒子を均一に分散させ透明性を確保したうえで投射する像を発現する透明スクリーンを開発しショウウインドウ、劇場、サイネージへの応用と幅を広げている。別の1社はポリマーフィルムに限らず硝子への応用も考えている。もう1社は透明スクリーンを鏡に取り付け投影すると像が現れる製品を開発した。

また透明導電膜に関しても製造コストの低減などが検討されている。更なる光学部品に関しては参加企業が大学に寄付講座を設置し、更なる開発研究を行っている。

上記したようにわれわれの研究メンバーは卓越した成果を挙げ一部は上市されているし、更なる研究開発へと進展している。多くのプロダクトは組立産業とも連携して産業化することが肝要である。

また我々は多くの国際会議を開催し、国際的な人脈ネットワークも形成した。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し、多くの将来を嘱望される人材を育て上げた。これらの人材が活躍してイノベーションの立役者になることを期待している。

私はこのような多くの成果を挙げたテーマのプログラムオフィサーとして仕事ができたことに幸せを感じているし、関係諸氏および科学技術振興機構に感謝している。更にはこのようなプログラムが今後も継続的に続くことを希望している。

以 上