

独立行政法人**科学技術振興機構**
創造科学技術推進事業
追跡調査報告書

平尾誘起構造プロジェクト(1994～1999)
総括責任者 平尾一之

2005年3月報告

平尾誘起構造プロジェクト追跡報告書要旨

平尾誘起構造プロジェクトは、非晶質物質とくにガラスを対象に、種々の外部場から刺激を与えて局所的な内部構造を誘起し、それにもなつて発現される多くの特性を利用して新規な光学材料・素材・デバイスを創出するとともに、誘起された構造およびその形成過程を原子、分子レベルで解明し、さらには制御する手法を探索する狙いをもって推進された。その結果、フェムト秒レーザーの集光照射による構造誘起がとくに有効な手段となし得ることを見出し、この手法を駆使することにより屈折率変化を利用した光導波路の形成や Bi 系酸化物ガラスの超高速・高効率光スイッチング、希土類イオン含有ガラスの価数制御による光メモリーの大容量化、Ba・B系ガラス中での単結晶成長など、将来の光情報通信システム構築や光コンピューター設計の基礎となる知見を幅広く蓄積した。これらの成果は、「フェムト秒レーザープロセッシング」として材料科学の分野に新しい流れを形成し、アモルファス金属や高分子など非晶質物質全般を取り込んだ新材料の作製方法として世界的に拡大するに至っている。またこのようなアプローチを通じて、従来は受動的な構造材料に過ぎなかったガラスを能動的・先端的機能材料の地位に引き上げる結果になった。

これら一連の研究活動はプロジェクト終了後も各方面に引き継がれ、それぞれ独自の展開を見せている。一例として、JST の国際共同研究事業「フォトンクラフトプロジェクト」は平尾プロジェクトの成果のさらなる展開を目指して推進されており(2000-2005)、価数変化によるガラス内への画像書き込み、ファイバーレーザーの広帯域光増幅器、アップコンバージョンの原理を使った波長変換デバイス(米国企業と共同開発中)、無機薄膜状の結晶レリーフ格子、周期的格子の自己組織的作製など、実用化につながる結果が多く発表されている。また超先端電子技術開発機構(ASET)の「超高密度電子 SI 技術プロジェクト」では、平尾プロジェクトの光導波路を応用した「直角光路変換素子」が製品化され、光スイッチの展開としては、非線形性の大きい光ファイバーによる波長変換装置、光/光カースイッチ、波長増幅器などの製品が出現している。

プロジェクト終了から5年経過した現在、上記のとおり一部の製品化は進んでいるものの、本来指向していた光通信システムや光コンピューターが現時点で本格化していないこともあって、未だ量産規模の事業まで成長したものはない。NTT の予測では 2015 年には全光通信システムが実現するとされ、また 2008 年頃から立ち上がりはじめるという見方もある(現在の回線が絶対的に不足し、光分野の技術に依存せざるを得なくなる)。とすれば、今後その時期に向けて産官学それぞれの研究機関で光機能材料から光通信システムに至る応用・実用化の研究開発が加速されることは必至であり、その時点で平尾プロジェクトの諸成果が見直され、その応用展開が活発に進められることになるであろう。そのような過程を通して平尾プロジェクトへの、よ幅広い立場からの評価が定まってくると思われる。

なお平尾プロジェクトに対する外部からの評価では、「材料科学の領域に新たな分野を開拓し、光情報処理の基盤となる新材料を多数提供した功績は大きい」とする高い評価とともに、間口を広げすぎて個々のテーマに対する掘り下げが不足、とくに誘起構造形成のメカニズムについてあまり解明されていないのが物足りない」とい批判もあったことを付け加えておく。

1. はじめに	1
2. プロジェクト研究終了後の科学技術を取りまく環境の変化	1
3. プロジェクトの成果とその後の展開	2
3.1.プロジェクト目標の達成状況.....	2
3.2.プロジェクト研究成果の意義.....	2
3.3.研究のその後の展開.....	3
3.4.科学技術へのインパクト.....	12
4. 研究成果の波及効果, インパクト	13
4.1.科学技術の流れ誘発(産業面を含む).....	13
4.2.学会・研究会・分科会などへの影響.....	14
4.3.研究個別テーマへの影響.....	15
4.4.産業面への影響.....	15
4.5.報文被引用数から見る影響度.....	16
5. 参加研究者の活動状況	18
5.1.プロジェクトから育った人材の状況.....	18
5.2.学位取得.....	19
5.3.受賞.....	19
6. 創造科学技術推進事業に関する意見	22
6.1.事業の意義.....	22
6.2.仕組み、運営面に関する提言.....	23
6.3. プロジェクト参加者の実体験からの感想.....	25
7.プロジェクトの成果・展開に関する外部有識者の意見	26
7.1.総論(全体像).....	26
7.2.テーマ別各論.....	27
8.アンケート調査結果	28
8.1.新たな科学技術分野の開拓.....	28
8.2.学会、分科会、研究会等の創設.....	29
8.3.科学・技術のレベルアップへの寄与.....	30
8.4.新たな産業分野の創出.....	30
8.5.総括責任者に対する評価.....	31

1. はじめに

平尾プロジェクト以前からナノ秒・ピコ秒領域のレーザー光をGe-P共ドーブ系光ファイバーに照射することにより第2高調波を発生させ、屈折率を上昇させることは知られていた^{1,2}。あるいはフェムト秒レーザーを時間分割分光などの測定・評価に利用することも行なわれていた。しかしフェムト秒領域の超短パルス光を加工用の手段として物質の内部に誘起構造を生成し、得られた光学特性を新規な機能性材料に結びつける実験的な試みは見られなかった。平尾誘起構造プロジェクトでは、フェムト秒レーザーを含む光やX線その他の電磁場を外部刺激の形で物質と相互作用させて局所的な電子状態を変化させ、通常の化学反応では得られない未知の構造を誘起させることにより、特異な機能を持った光通信用の材料や素子・デバイスを創出することを目的に研究を推進した。

研究の対象物質としては光学材料に適した透明性を備えるとともに多くの元素に対するすぐれた溶解力を有し、高強度・高硬度で加工性に富み、かつ外部からの刺激に応じて新たな構造をつくりやすいなど種々の特性をもったガラス材料を選んだ。

具体的な進め方としては、各種の電磁波や光、位相のそろったコヒーレントフォノンなどの外部場を利用した誘起構造の形成を行い、次に光磁気効果、ポンプ・プローブレーザー分光、電子線などを用いた観測手法を駆使して誘起構造生成のメカニズムとダイナミクス、さらに誘起構造とそれにより発現する機能との相関を解明する。同時にこれらの知見を基礎として電子構造や機能を制御する可能性を追究する。また分子動力学法、分子軌道法などを使ったコンピューターシミュレーションにより誘起構造の原子・電子レベルでの解析・設計を行なうなどのアプローチを主な内容とした。因みにプロジェクトに先立って京大平尾研究室でサマリウムの2価イオンによる常温ホールバーニングが見出されていたことが、このプロジェクトを立ち上げる直接のきっかけになった。

2. プロジェクト研究終了後の科学技術をとりまく環境の変化

平尾誘起構造プロジェクトでは、それまでは時間分割分光などもっぱら測定・評価手段として使用されてきたフェムト秒(パルス)レーザーを、ガラス系材料の内部に集光照射して瞬間的な高温高圧状態を作り出し、特異な機能を備えた局所的誘起構造を得るためのツールとして用いることにより、多岐にわたる高機能性光学材料・素子・デバイスを創出した。この手法はいわゆる「フェムト秒レーザープロセッシング」の呼称で材料科学の分野に新しい流れを生み出し、ガラス以外にアモルファス金属や高分子など非晶質物質全般を加工の対象に取り込んだ「化学反応によらない新材料の作製方法」として世界的に拡大するに至った。またこのようなアプローチの結果、従来「受動的な一般構造材料」に過ぎなかったガラスを「高テク

¹ U.Osterberg, W.Margulis; Opt.Lett., 11,516(1986)

² R.H.Stolen, H.W.K.Tom Opt.Lett., 12,585(1987)

「ノーゾーの産物としての能動的・先端的機能材料」の地位まで引き上げることになった。

3. プロジェクトの成果とその後の展開

3.1. プロジェクト目標の達成状況

平尾誘起構造プロジェクトの研究目的は、非晶質物質とくにガラスを主な対象とし、

- (1)これに種々の外部場を与えて出現する構造を実験的・理論的に解明すること
 - (2)それらの構造が、どのような時間経過で生成するかを追跡し、誘起構造形成機構を明らかにすること
 - (3)外部場の影響を調べて、誘起構造制御の可能性を探ること
- であった。

この段階では具体的な外部場の種類や誘起される構造・機能について特定されておらず、定量的な目標設定もない関係で、達成状況の把握は「いさか漠とした視点から行なわざるを得ない(少なくとも数値的には云々できない)。しかしスタート後のある時期から「外部場による刺激」のかなり部分を「フェムト秒パルスレーザー」に特化し、その光照射により物質内部の電子構造を変化させ幾多の誘起構造を生成したこと、それらの構造に由来する特異な性質を測定評価することで新たな機能光学材料・素子・デバイスに結びつけたこと、その結果として来るべき光情報通信システム構築のための基盤となる諸技術を創出し得たこと等々の成果から、前記各項にあげた目的はまず達成できたと判断される。

ただし、フェムト秒レーザーを駆使しての広汎な「ものづくり」に重点をかけた反面、(2)の「誘起構造形成メカニズムの分子・原子レベルでの解明」については、その後の展開を含めていさか物足りないとする向きもある。この瑕疵については外部からの評価もさまざまに分かれているが、いずれにしてもプロジェクト全体の業績を大きく割り引くものではない。

3.2. プロジェクト研究成果の意義

平尾プロジェクトでは外部場の刺激をガラス物質の内部に及ぼすことで、新しい光機能材料や素子、デバイスを生み出した。終了から5年後の今日では、その一部は製品化されているものの、未だ量産規模の事業まで成長したものは見られない。経過年数の少なさや「フォトン・コスト(レーザー設備と運転に要する費用)」の高さなどの事情もあるが、プロジェクトが本来指向していた「光情報通信システム」あるいは「光コンピューターシステム」が現時点で本格化しておらず、なお時期尚早の段階にとどまっていることも大きい理由と考えられる。NTTの予測によれば2015年には全光通信システムが現実のものになるとされ、また2008年頃から徐々に立ち上がりはじめるとする見方

もある(現在の回線が絶対的に不足し、光分野の技術に依存せざるを得なくなる)。とすれば、その時期に向けて産官学それぞれの研究機関で光機能材料から光通信システムに至る基礎・応用・実用化の研究開発(とくに実用化に焦点を当てた)が加速されることは必至であり、平尾プロジェクトで蓄積された光導波路(三次元光回路)や光スイッチ、光メモリーをはじめとする諸成果があらためて見直され、それらをベースにした応用展開が活発に進められることになるであろう。言うまでもなく光情報通信事業が一つの産業分野として確立するまでには幾多の技術面でのブレークスルーを必要とするが、そのような過程を通して平尾プロジェクトへの、より広い立場からの評価が定まってくると思われる。

3.3. 研究のその後の展開

3.3.1. フェムト秒レーザーによる光導波路作成

A. 超短パルス(フェムト秒)レーザーの集光照射により、ガラス内部へ高屈折率化をともなう誘起構造が三次元的に形成できることを見出した。この誘起屈折率変化がガラスの局所的な高密度化に起因していることを確かめた。この光誘起構造を連続的に形成させることで、種々のガラス材料中に立体的光導波路を書き込むことができた。

B. 超先端電子技術開発機構(ASET)がNEDOの委託を受けて実施した「超高密度電子SI技術プロジェクト」(1999 - 2003)中の「光電気複合実装技術」テーマで、セントラル硝子(株)が前項の成果を応用する形で「直角光路変換素子(直角型導波路)」を開発、製品化した。平面回路の素子間をつなぐインターコネクションや高密度実装に有用である。近い将来、シングルモード光通信への利用を狙っている。

(参考: 平尾プロジェクトと時を同じくして、ハーバート大学の Eric Mazur 教授がレーザーを用いた光導波路の研究を進めていた。ただし論文発表や特許出願は本プロジェクトがより早い時期に行なっている)。

3.3.2. 光スイッチ

(1) ビスマス系ガラスによる光スイッチ

A. 酸化ビスマスを高濃度に含有する $\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 系ガラスが 200 フェムト秒以下の超高速で高効率に光をスイッチすることを見出した。この知見をもとに、光カースイッチ動作の実証を行なうとともにテラヘルツスイッチを実現した。さらに高強度の光を入射しても遅い応答成分や光による損傷が観測されず、実用的な材料であることも確かめた。

B. プロジェクト終了後も同系統の研究が継続され、Bi 酸化物を含む非線形性の大きい光ファイバ

ーを作製、波長変換装置、光 / 光カースイッチ、波長増幅器 (Eu 共存系) などのデバイスや製品に活かされている(いずれも製品化、サンプル提示の段階にある - 旭硝子(株))。

- C. 将来、超高速情報処理技術の光コンピューターや光通信における光制御 (光 / 光スイッチ) などへの応用が期待される。ここで注意すべきは、光スイッチに関する開発のコンセプトが日本と米国で異なっている事実である。すなわちわが国ではもっぱら「低損失指向」で超短時間応答の方向にあるのに対し、米国では「低分散指向」の傾向が強く、一本のファイバー中で波長の異なる光を束にし、ここから分ける「波長多重システム」を取ろうとしている。この方式は応答時間に関しては従来技術の範囲内 (10 ピコ秒程度でよい) にあり、実用化への距離もその分短いかもしれない。

(2) 金属微粒子分散ガラスによる光スイッチ

- A. ポンプ・プローブ法やフォトンエコー法の測定技術を確立し、超高速時間応答 - スwitchingの研究に利用する基礎を作った。
- B. Ag, Au, Cu などの金属微粒子を分散させたガラスの非線形光学応答機構をフェムト秒パルスレーザーを用いたポンプ・プローブ法により解明し、主たるメカニズムが電子温度の上昇によっていることを明らかにした。さらに電子 / 格子相互作用の寄与を定量的に評価し、応答速度向上のための指針を与えた。
- C. 前項の材料を用いて光カーシャッター型光スイッチを試作し、繰返し周波数 2.5THz の超高速スitchingが可能であることを実証した。
- D. その後の展開として、LB法によりAu超微粒子を自己組織化、二次元配列させて (静電気力の作用でガラス基板の表面にはりつく) Auナノ粒子分散ガラスとし、フェムト秒レーザー照射時のエネルギー緩和のダイナミクスを調べた。
- E. タペストリー (縞状) 格子のフーリエ変換パターンにより、強度分布を一定にした状態で三次元的に分波する手法を開発した (JST 国際共同研究「フォトンクラフトプロジェクト」における展開)。

3.3.3. 希土類イオン含有ガラスによる誘起構造

(1) フェムト秒レーザーによる元素の価数制御 (Sm^{3+} の光還元など)

- A. フェムト秒レーザーの照射により、ガラス中の希土類元素の価数状態を制御できることを見出した (例: $\text{Sm}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{2+}$)。ホールバーニングなどと組み合わせて三次元的な書き込み・消去可能な超高密度光メモリスシステムを構築できる。またレーザー誘起導波路中の希土類イオンだけを選択的に還元することも可能である。
- B. フォトンクラフトプロジェクトにおける前項の応用展開として、ガラス内部の異なった深さ部位に

任意の色つき図形(画像)や文字を書き込む(読み出す)技術を開発した。Ar レーザーを光源に、 Sm^{2+} の蛍光を読み出すもので、すでにある企業で商品化されている。

- C. さらに広範囲な展開として、ファイバーレーザー(クリスタルファイバー)を用いた光増幅器の実用化を検討している(JST 国際共同研究「フォトンクラフトプロジェクト」- 3.4.1.参照)。現在の光ファイバー増幅機能は Pr, Eu, Tm などの希土類イオンによっているが、適用できる帯域に制限がある。ここでは「一つのポンプレーザーで全通信帯域の増幅を実現すること」を基本的な狙いとし、その方向で成果が出つつある。具体的には希土類の代わりに Bi, Cr イオンを活性種として使うことにより幅広い帯域を得ようとするものである。
- D. 希土類元素以外の価数制御への展開例として、Mn, Fe を共ドーブしたケイ酸塩ガラス内に赤外フェムト秒レーザーを集光照射し、 Mn^{2+} から Mn^{3+} への持続的光酸化を観測したことがあげられる。レーザー照射後、集光域が紫色に変化し、無色透明なガラス内に三次元カラー画像が形成された。酸化領域の広がりは数百 nm から数 mm まで調整可能である。この方法は透明物質内での遷移金属イオンの空間選択的価数制御に利用できる(フォトンクラフトプロジェクト)。
- E. また Ag^+ ドーブケイ酸塩ガラスに 800nm のフェムト秒レーザーを室温で照射することにより Ag^+ を Ag 原子に還元し、次いで 500 nm のアニールでナノ粒子化した。試料は照射の段階で焦点近傍領域が灰色になり、アニール後に黄色を呈した(フォトンクラフトプロジェクト)。

(2) Tm^{3+} ドーブガラスのアップコンバージョン蛍光

- A. Tm^{3+} をドーブしたフッ化インジウム系ガラスで、他種のフッ化物ガラスや酸化物ガラスに比べて強度の大きい紫外および青色アップコンバージョン蛍光を観測した。発光強度と高い熱安定性から、紫外・青色アップコンバージョンレーザーへの期待がもてる。
- B. アップコンバージョンの原理を応用して波長変換機能の展開を図っている(フォトンクラフトプロジェクト)。赤外域の二つの光を交叉させて可視光を出すシステムで、走査すれば三次元のディスプレイになる。立体レーダーなどの用途を視野に入れて、ある米国企業との共同開発を進めている(米国 - システム技術、日本 - ガラス材料技術をそれぞれ担当)。

(3) 光誘起希土類含有ガラスの長時間残光

- A. Eu^{2+} , Tb^{3+} などの希土類イオンを添加したガラス($\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系)が紫外線照射後、長時間にわたって蛍光を発し続ける長残光現象を観測した。さらに赤外フェムト秒レーザーの集光照射により、多光子励起を通じて同様の長残光を発生する領域をガラス内部に形成できることを見出した。昼光励起を利用した無電源夜間標識や三次元ディスプレイ、光メモリへの応用が期待できる。
- B. この研究テーマもフォトンクラフトプロジェクトにそのまま引き継がれ、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の組成比を変えた一連の試料で長寿命の残光が検討されている。この長時間残光は、ガラスマトリックス中

のトラップにある正孔と電子の再結合が生じ、その再結合中心と Eu^{2+} の間でエネルギー移動が進むことによるものと推定した。

(4)希土類イオン含有ガラスの輝尽発光および磁場誘起ファラデー効果

- A. Eu^{2+} , Ce^{3+} 低原子価イオンをドープしたガラスの輝尽発光を観測した。また Tb^{3+} など常磁性希土類イオン含有ガラスについてファラデー効果を測定した。希土類イオン/ガラス系についてははじめてのデータであり、赤外光の検知・大容量光メモリー・ファラデー回転素子などへの利用が期待できるが、低効率などの問題もあってプロジェクト終了後は継続されていない。
- B. 別タイプの継続研究として、 Eu^{2+} をドープしたフッ化アルミネート系のガラスで偏光依存光散乱を観測した(フォトンクラフトプロジェクト)。試料を150フェムト秒パルスレーザービーム(800nm)で励起すると、光偏光面に沿って異方性光散乱が認められた。光誘起された永続的ミクロ構造による散乱と推定した。

3.3.4. フェムト秒レーザーによるガラス中の結晶育成

- A. バリウムとホウ素を含む酸化物ガラス混合系 ($\text{BaO} / \text{TiO}_2 / \text{B}_2\text{O}_3$) にフェムト秒レーザーを集光照射しつつ適正な速度で焦点位置を連続的に移動させることで、非線形光学材料として有用なホウ酸バリウム (BaB_2O_4 , BBO) のファイバー状単結晶を成長させることに成功した。光機能性材料素子、とくに波長変換機能(結晶)素子に活用できるとともに、光による新たな結晶構造の誘起法として広く応用できる。
- B. 光誘起結晶化の展開として、非晶質の無機 ($\text{In}_2\text{O}_3 + 1\text{wt}\% \text{TiO}_2$) 薄膜上に近赤外フェムト秒パルスレーザーを照射して結晶レリーフ格子を作製した例がある。結晶化したレリーフ構造の形状は走査速度および集光点の高さに敏感で、最適照射条件で円錐形の断面が得られた(フォトンクラフトプロジェクト)。

3.3.5. 色素分散系の光ポーリングによる第二高調波発生

- A. アゾ色素を分散させたシリカガラス、アゾ色素を側鎖に導入したポリイミドおよび架橋ポリウレタンの各系に光ポーリング処理を施し、色素分子の双極子を光起電場により周期的に配向させ、自発的に位相整合させて高い二次非線形光学効果を有する誘起構造を得た。無機ガラスはゾル-ゲル法で合成したもので、いずれの系も高い剛性を持ち、その結果第二高調波の緩和が小さく、安定な非線形性を維持し得た。高効率波長変換素子や新しい型の画像メモリーなどへの応用が期待されるが、その後実用面での展開は見られない。
予想外の結果として、ポリメチルメタクリレート(PMMA)を用いた場合、膜厚を大きくすると強い二次高調波が発生し、基本波との干渉が長時間続いて緩和時間が長くなることを見出された。

- B. 前項のテーマはフォトクラフトプロジェクトに引き継がれ、第 2 高調波の位相整合条件を満たす⁽²⁾格子が高分子フィルム中に光学的に誘起されることを認めた。さらにフェムト秒レーザーの干渉によりアゾ色素をドープした PMMA 中に永続的ホログラフィック回折格子や二次元の周期的微細構造を生成させた。後者の周期は各ビーム間の角度変化により制御できる。
- C. 同じくフォトクラフトプロジェクトで、Nb₂O₅-TeO₂ バルクガラスにポーリング処理を施した系について第二高調波強度の緩和を調べた。熱的ポーリングで誘起される二次非線形性は安定しており一方、光ポーリングの場合は第二高調波強度の減衰が急速に進んだ。光学的ポーリング処理で誘起される二次非線形性は、レーザー照射で形成される荷電欠陥構造が関与していると見られる。

3.3.6. 超短パルスレーザーによるアブレーション加工

- A. 超短パルスレーザー (150fs-30ps) を光源に用い、クロム薄膜、ポリイミド、ガラスセラミックグリーンシート、シリカガラス、サファイア基板のアブレーション加工を行なった。ガラス上のクロム薄膜ではシャープなエッジを持つ加工パターンが得られたが、パルス光の強度むらに起因する残渣が堆積した。パルス幅を最適化することで均一加工ができる。他の材料についても、試料の融解や変質を生じない条件を設定することにより加工可能である。
超短パルスレーザーを工業的に応用するためにはフォトンコストの低減が必須である。
- B. アブレーション加工の広義の展開として、フェムト秒レーザーで金型に溝を彫りここに導電性インクを微量注入、転写する「インクジェット方式による高密度・高精細の配線技術 - 導電性回路形成技術」が開発された(クラスターテクノロジー(株))。中小企業コンソーシアムのプロジェクト金型によるファインピッチ電子回路パターンニングに関する研究開発の一環として推進されたもので、2005.1.26 - 27 開催のベンチャーフェア (東京フォーラム)において、クラスターテクノロジー社の北岡首席研究員 (平尾プロジェクト研究員) から発表された。

3.3.7. 微小球レーザー

- A. 活性種としてNdを添加したフッ素系ガラス微小球 (150 μm 径) を作製し、レーザー誘起による微小球レーザー発振を実現した。発振波長は 1050nm および 1330nm であり微小球の表面が自動的に共振器になっているため、通常のレーザーに必要な共振ミラーを装着しないですむ点の特徴である。耐久性にすぐれたガラス材料での発振ははじめての例といえる。
- B. 超小型レーザー素子や光通信システムへの応用が考えられるが、プロジェクト終了後のフォローは行なわれていない。

3.3.8. フェムト秒レーザー照射による回折格子の作製

- A. 赤外フェムト秒パルスレーザーを石英系光ファイバーに集光照射することにより周期的な屈折率変化を与え、長周期のファイバー回折格子を作製した。得られた波長選択特性はガラス転移点以下の熱処理に対して安定であり既存の紫外線照射によるもの比べて大きな特徴を示した。波長多重光通信システムなどへの応用が期待できる。
- B. ナノ回折格子の展開として、超短パルスレーザーの集光照射によりシリカガラスの内部に周期的な格子を自己組織的に作製した。得られたナノ格子は20nm幅の縞状周期構造からなりこの領域で酸素の濃度が低くなっていることが認められた。レーザー入射光と発生するプラズマ電場の干渉によりガラス内部に誘起されたものである(フォトンクラフトプロジェクト)。

3.3.9. ガラス誘起構造のシミュレーション

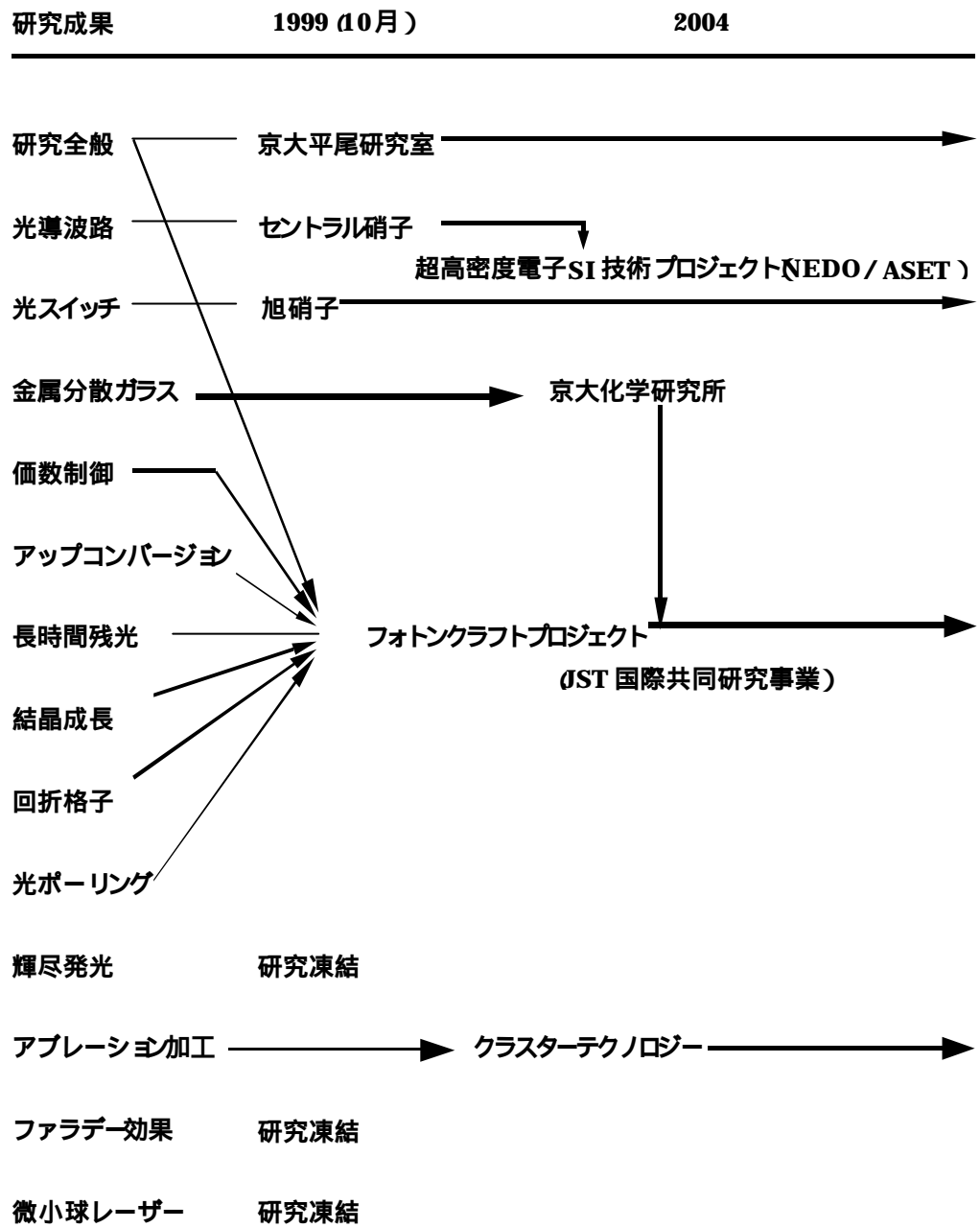
- A. 高精度分子軌道計算法の DV-X α 法を用いて石英ガラスの電子構造、および外部電場により誘起される電子構造変化のシミュレーションを可能にした。誘起された電子構造は酸素の電子がSiのd軌道に移動することにより生じ、その結果として屈折率変化がもたらされることを突き止めた。ガラス(非晶質物質)全般の光・電場誘起構造形成のメカニズムを解明し、新たな誘起構造創出の指針を得る上で有用である。
- B. 周期的な屈折率変調構造により光領域でのバンドギャップ特性を実現するフォトニック結晶について、計算機シミュレーションによる構造設計と特性解析を行なった。とくに従来未検討の金属微粒子分散ガラスを対象に、フォトニックバンド実現のための条件を明らかにした。
なお、本節(3.3.)の内容に関連する参考資料を以下に図表の形でまとめた。

図表 3 1 平尾誘起構造プロジェクトの展開状況

年度	事柄
1994	平尾プロジェクト開始
1995	第 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8回 研究セミナー
	第 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10回 研究会
	第 1回 全体会議
1996	第 9, 10, 11, 12, 13, 14回 研究セミナー
	第 11回 研究会
	第 2回 全体会議
	東京報告会 (研究経過報告)

年度	事柄
1997	第15,16,17,18,19,20回研究セミナー
	第3, 4回全体会議
	研究発表会
	フォトニック材料の物性と応用シンポジウム
1998	第21,22,23,24,25回研究セミナー
	第5回全体会議
	次世代フォトニクス材料 デバイスシンポジウム
	日本セラミックス協会学術賞受賞
1999	第21,22,23,24,25回研究セミナー
	平尾誘起構造プロジェクトシンポジウム(終了報告会 .京都)
	International Symposium on Active Glass (京都)
	平尾プロジェクト終了
	ASET 超高密度電子SI技術プロジェクト開始
	日本化学会学術賞受賞
2000	2000 JST国際共同研究事業「フォトンクラフトプロジェクト」開始
	NEDO「ナノガラス技術プロジェクト」開始
	「フェムト秒加工研究会」発足(レーザー技術総合研究所)
	第10回TEPLAハイテクビデオコンクール受賞
	Morey賞受賞
2002	2002 米国セラミックス協会フェロー賞受賞
2003	2003 日本経済産業大臣賞受賞
2004	2004 第20回国際ガラス学会(京都)
	米国材料協会(MRS)に「フェムト秒レーザー応用セッション」新設,平尾教授招待講演
2005	Otto-Schott Research Award受賞(独 Ernst Abbe Fund - 予定)

図表 3.2 プロジェクト終了後の進展状況 (継続・継承)



ナノガラス技術プロジェクト(NEDO) (2005年まで)

図表 3.3 プロジェクト終了後の展開に関する報文リスト

- 01 .邱他 ,J.Mater.Res. ,16(1),88(2001)
- 02 .邱他 ,Appl.Phys.Lett. ,77(13),1940(2000)
- 03 .司他 ,Appl.Phys.Lett. ,77(24),3887(2000)
- 04 .司他 ,J.Appl.Phys.90(10),4895(2001)
- 05 .邱他 ,Appl.Phys.Lett. ,79(22),3567(2001)
- 06 .邱他 ,Chem.Phys.Lett. ,333 (3/4),236(2001)
- 07 .藤田他 ,Jpn.Appl.Phys.Part 1 ,40(3B),1651(2001)
- 08 .藤田他 ,日本セラミックス協会学術論文誌 ,109(1270),484(2001)
- 09 .邱他 ,Opt.Lett. ,26(17),1347(2001)
- 10 .邱他 ,Opt.Comm. ,198(1/3),187(2001)
- 11 .藤田他 ,Opt.Lett. ,26(21),1681(2001)
- 12 .司他 ,Appl.Phys.Lett. ,80(3),359(2002)
- 13 .三浦他 ,Appl.Phys.Lett. ,80(13),2263(2002)
- 14 .片山他 ,Appl.Phys.Lett. ,81(5),832(2002)
- 15 .井上他 ,IEEE.J.Quantum Electronics ,38(7),867(2002)
- 16 .米崎他 ,J.Phys.D :Appl.Phys. ,35,2026(2002)
- 17 .司他 ,Appl.Phys.B75 ,847(2002)
- 18 .邱他 ,Appl.Phys.Lett. ,81(16),3040(2002)
- 19 .片山他 ,Jpn.Appl.Phys.Part 1 ,41(4A),2155(2002)
- 20 .片山他 ,J.Polym.Sci.Part B ,40(6),537(2002)
- 21 .片山他 ,J.Polym.Sci.Part B ,40(24),2800(2002)
- 22 .長谷川他 ,Chem.Mater. ,15,2011(2003)
- 23 .片山他 ,Chem.Phys.Lett. ,373,140(2003)
- 24 .下妻他 ,Phys.Rev.Lett. ,91(24),247405(2003)
- 25 .北岡 ,型技術 ,19(12),75(2004)
- 26 .杉本他 ,OFC(Optical Fiber Commucation Conference) ,2004,PDP26
- 27 .平尾他 ,Trans.Mater.Res.Soc.Japan ,29(1),3(2004)

3.4. 科学技術へのインパクト

3.4.1. フォトンクラフトプロジェクト(JST 国際共同研究事業 - ICORP)

- (1)平尾誘起構造プロジェクトの諸成果を継承し、さらに基礎・実用面でのさらなる展開を狙いとして、JST の国際共同研究事業(ICORP)「フォトンクラフトプロジェクト」が発足し現在推進中である。このプロジェクトは日本 - 中国の共同研究からなり、それぞれの代表研究者平尾一之京大教授、李儒新中国科学院上海精密光学機械研究所副所長の下で、2000-2005 の 5 年間実施されている。日本側は機能素子合成、機能解明の 2 グループからなり、京都府相楽郡九井はんなプラザで研究を進めている(平尾プロジェクトのメンバーも数名含まれる)。中国側の実施場所は上海精密光学機械研究所である。
- (2)本プロジェクトの目指すところは、レーザーの集光性、超短パルス化およびコヒーレンス性を最大限活用した、多光子過程など物質内の光 / 光相互作用による新しい材料の効率的な創製(フォトンクラフト)にある。たとえば、特定希土類元素の f-f 遷移を励起する二つのレーザー光と量子力学的な干渉効果によって物質の光学的な性質が劇的に変化する新しい現象の発見や、メソコピック粒子の周期的・規則的な配列などが期待される。本プロジェクトのキーテクノロジーは、「超高速、超広帯域、超高密度」である。
- (3)本プロジェクトでこれまでに得られた成果の中、平尾誘起構造プロジェクトの展開と目せられるものについては、前 3.3. の各項で具体的に触れているので参照されたい。

3.4.2. ナノガラス技術プロジェクト(NEDO)

- (1)平尾プロジェクトの直接的な展開ではないが、少なくともその成果が刺激となって、NEDO の「ナノガラス技術プロジェクト」が平尾教授をリーダーとして発足し、産総研関西センターとニューガラスフォーラムの共同研究の形で進められている(2001-2005)。参加者は産総研のガラス関連各グループ、京都大学(平尾教授)、北陸先端科学技術大学院大学(牧島副学長)、東京大学(井上助教授)、名古屋工業大学(野上教授)、三重大学(那須助教授)、東北大学(村山助教授)の各大学、および旭硝子、セントラル硝子、日立電線、HOYA、日本電気硝子、日本山村硝子、岡本硝子、旭テクノグラス、日本板硝子の企業 9 社である。
- (2)プロジェクトの目的は無機非晶質材料の構造を原子・分子レベルで制御し、新機能を付加したり、異質相を材料の表面や内部に並べる技術を開発してナノガラスにかかわる新材料開発に必要な基礎技術を構築することで、2005 年までにレーザー照射や CVD などにより原子・分子レベルの構造制御、超微粒子の構造制御、高次構造制御および三次元光回路材料技術に関するガラス構造制御技術を確立し、技術を体系化することを目標にしている。これまでに得られた成果として、DVD の表面に Co / ガラス薄層を設けてレンズ状にすることで容量を 4 倍にしたことや、フェムト秒レーザーによるガラスの強化(レーザー照射で内部にドット構造を作り、クラックの

伝播を止める - セントラル硝子の仕事で、平尾プロジェクトの一展開と位置付けられる、大面積薄板ガラスへの足がかりになる)などの実用化技術がある。これらはいずれも「FOCUS 21」に取り上げられている

4. 研究成果の波及効果 ,インパクト

4.1. 科学技術の流れ誘発 (産業面を含む)

4.1.1. 先端的玻璃テクノロジー分野の先導

(1)本プロジェクトの成果により「先端材料創製のためのガラステクノロジー」がクローズアップされ、世界的な注目を集めるとともに、ガラス技術の分野に「ナノ(機能性)ガラス」のコンセプトが持ち込まれた。

4.1.2. 「フェムト秒レーザープロセッシングによる材料づくり」の流れ誘発

(1)本プロジェクトで確立された「フェムト秒レーザープロセッシング」による材料づくりの大きい流れを世界的な規模で巻き起こした。レーザー利用の視点からすると、従来の「測定・解析用手段」から「加工・ものづくりのツール」への質的発展であり、通常の化学反応では得られないナノレベルの誘起構造をガラス材料の内部に、局所的に作り出した点に大きい意義がある。

(2)上記の「ものづくりの流れ」は、とくにガラス業界に顕著であり、現在では加工・ものづくり用のフェムト秒レーザー装置が、同分野の研究技術開発に必要なツールになっている。また装置の一般化と同時に、「フェムト秒レーザーで対象材料の内部に機能構造を誘起させる」実験手法も、研究の方法論として定着した。

4.1.3. 他種物質・材料分野への拡大

(1)ガラス材料以外に、高分子やアモルファス金属など、さまざまな非晶質材料を対象とする「フェムト秒レーザー加工」の技術分野が大きく広がり、制御技術を含めて世界規模で取り上げられるようになって一般化・普遍化への道を歩んでいる(それまではアブレーション加工など、表面加工的なものしかなかった)。レーザー学会などでも、「フェムト秒レーザー加工技術」に関する発表が急増している。

(2)生物関連では、生体細胞にフェムト秒レーザーを当て、屈折率変化 - 誘起構造を作る研究が進められている。

4.2.学会・研究会・分科会などへの影響

4.2.1.学会関連

- (1)本プロジェクトおよびその後の成果をベースに、第20回国際ガラス学会が京都で行なわれた(2004.9.26～10.2)。日本での開催は30年ぶりのことである。
- (2)米国材料協会(MRS - Material Research Society)に、「フェムト秒レーザー応用セッション」が新設され、2004.12に平尾教授が招待講演を行なった。
- (3)SPIE(The International Society for Optical Engineering)の Photonics West 国際会議でもフェムト秒レーザー加工が取り上げられている。

4.2.2.研究会その他

- (1)平尾プロジェクトの成果とそれに続く展開を一つのきっかけとして、「フェムト秒加工研究会」が(財)レーザー技術総合研究所(大阪科学技術センター)内に設けられた(2000年)。フェムト秒パルスレーザーを用いた加工技術の産官学連携による普及・啓蒙を目的とするもので、フェムト秒パルスレーザーの産業応用の可能性を調査し、国家プロジェクトへの提案を行なう「基盤を整備するとともに、レーザー光/物質の相互作用を明らかにし、産業面への応用展開を図る際の指針を提言する。調査・研究項目は、A.フェムト秒レーザー技術動向(ファイバー発振器を含む)、B.フェムト秒加工ダイナミクス、C.フェムト秒レーザーの産業応用可能性の3テーマからなる。

また上記とは別に、「フェムト秒超加工に関する技術および動向についての産官学の情報交流を行なうことにより、光産業技術の振興に資すること」を目的とする「フェムト秒超加工研究会」もあり、講演会やシンポジウム、パネルディスカッションなどの活動を行なっている。

- (2)平尾プロジェクトの影響を受けた形で、ニューガラスフォーラム(NGF)内にフェムト秒レーザー加工に関する研究会が設置された。
- (3)平尾プロジェクトの成果などを中小企業の技術レベル向上や人材の育成に活用する目的の下に、東大阪にナノテクノロジーの共同開発拠点を設置する計画が進んでいる。「大阪東部地域ナノテク加工産業集積活性化プロジェクト」(経産省05年度地域コンソーシアム事業指定)の事業名で、大阪府の中小企業支援施設「クリエイション・コア東大阪」を拠点とする。超微細加工技術を持つ中小企業が参入し、光通信・バイオ・環境・エネルギー・医療などの広い分野で研究開発、製品化を推進する。ビジネス効果は2010年度で1899億円を見込んでいる。平尾教授らの支援下に、京大・阪大・関西大・大阪産業大の各大学、産総研関西センター、大手電気メーカーの研究機関、商社なども参加する予定。

4.3. 研究個別テーマへの影響

4.3.1. フェムト秒光照射による屈折率変化のメカニズム

フェムト秒レーザー照射に起因するガラス内部の局所的屈折率変化については、最近そのメカニズムの解明が進んでいる。光照射で生じたプラズマが外部に拡散する力が振動波として伝播する。照射を止めると弾性圧縮が起こり、密度の分布が振動して中央部が高密度化する機構が提案された³。

4.3.2. 新しいタイプの屈折率

イオン種の選択や価数など、素材を加工しやすいように変えてやると、レーザー照射により屈折率が逆に低下する現象も最近見出されている

4.3.3. フェムト秒レーザーによる感光性ガラス内部への三次元光学素子作製

フェムト秒レーザー照射により感光性ガラスの内部に三次元のマイクロ光学素子を生成させた。レーザー光の集中照射でガラス試料内部に三次元の潜像を形成させ、熱処理により照射領域を改質、希フッ化水素酸水溶液で改質部分をエッチングして光反射・ビームスプリット機能を持つ中空マイクロリアクター構造を作製した。

4.3.4. 光による強誘電体ボーグドメインの制御

4.3.5. 強フォトン場での気相化学反応 (科研費特定研究フィールド)

いずれもフェムト秒レーザー照射による誘起構造を利用したもので、平尾プロジェクトの広義の波及研究と位置付けられる

4.4. 産業面への影響

4.4.1. フェムト秒レーザー発振装置の製品化

(1)平尾プロジェクトの影響もあって、サイバーレーザー(株)でフェムト秒レーザーをはじめ国産化した。Ti サファイア支持、分散型の加工用機器で操作が簡単、幅広く増幅できる特徴がある。ただし使用にともなう光学系の損傷があり、現在のところ装置寿命は5年程度である。

³ M.Sakakura, M.Terazima; Phys.Rev., B71,1(2005)

4.5. 報文被引用数から見る影響度

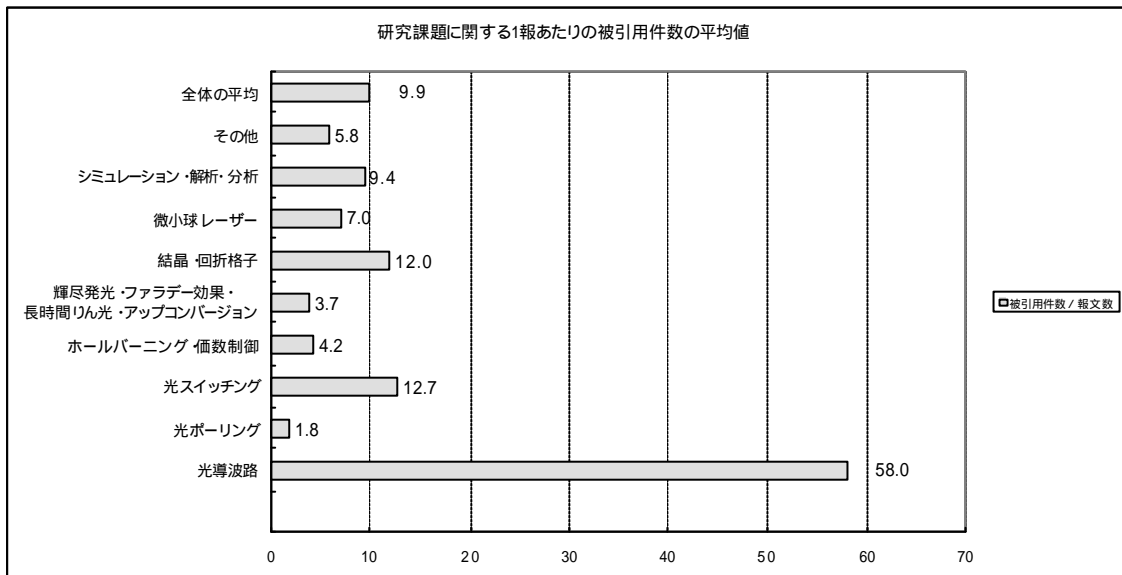
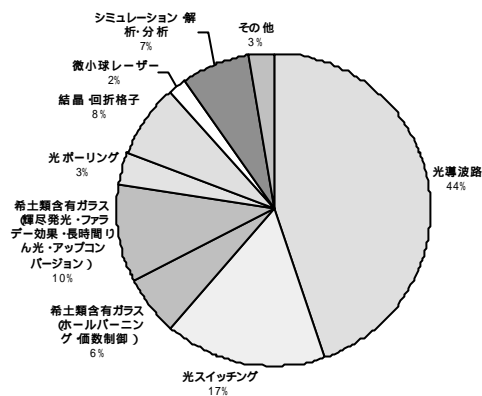
4.5.1. 研究課題(テーマ分野)別被引用件数

平尾プロジェクトから発表された学術報告 92 件(邦文は除く)を対象とする2004 年末までの被引用件数合計は 908 件、研究課題別の内訳は図表 4.1 のとおりで、報文数にも関係するが、光導波路、光スイッチング、希土類含有ガラス(表の 4,5 行を合せたもの)の引用が全体の約 80%を占めている。ただし被引用件数は該論文の発表時期が後になるほど少なくなるから、表の順位はその点を考慮して受け取る必要がある。

また一報文当りの被引用件数は光導波路に関するものが 58.0 件と圧倒的に多く、この技術に対する評価の高さがうかがわれる。

図表 4.1 研究課題別に見た報文の被引用件数

研究課題	報文数 (A)	被引用件数 (B)	(B)/(A)
光導波路	7	406	58.0
光ポーリング	16	29	1.8
光スイッチング	12	152	12.7
ホールバーニング・偏数制御	13	54	4.2
輝尽発光・ファラデー効果・長時間りん光・アップコンバージョン	25	92	3.7
結晶・回折格子	6	72	12.0
微小球レーザー	2	14	7.0
シミュレーション 解析・分析	7	66	9.4
その他	4	23	5.8
計	92	908	9.9



4.5.2. 個別論文被引用件数の年次推移

被引用件数上位の個別論文について、発表後の年次推移をまとめたのが図表 4.2 である。やはり光導波路に関する論文が長期にわたり引用され、しかもその数が年を追うごとに増加の傾向にあることが注目される（一般には発表後 3-4 年でピークに達し、後は下降する）。その技術的な価値が現在に至るまで維持されていることを示す。

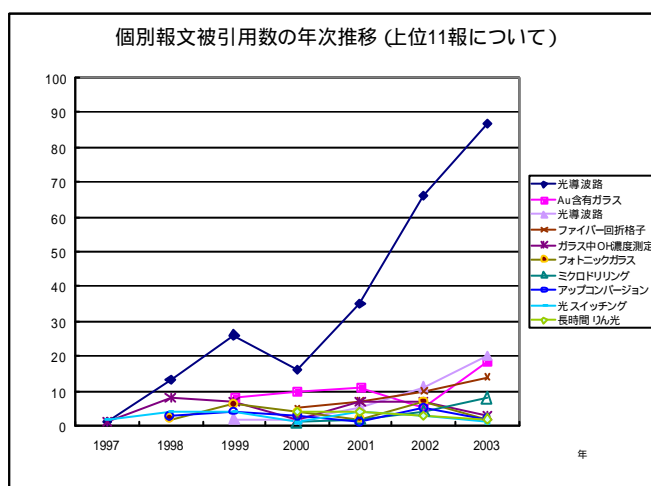
図表 4.2 個別報文被引用数の年次推移（上位 11 報について）

報文テーマ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	計
光導波路*	1	11	12	7	12	29	48	47	167
光導波路**		2	14	9	23	37	39	32	156
Au 含有ガラス			8	10	11	5	18	12	64
光導波路***			2	2	5	11	20	9	49
ファイバー回折格子				5	7	10	14	8	44
ガラス中 OH 濃度測定	1	8	7	2	7	7	3	4	39
フォトニックガラス		2	6	4	2	7	2	0	23
マイクロリング				1	2	4	8	6	21
アップコンバージョン		3	4	3	1	5	2	1	19
光スイッチング	2	4	4	1	4	3	1	0	19
長時間りん光				4	4	3	2	6	19

* フェムト秒レーザー照射による局所的屈折率変化 - 3次元光導波路の可能性示唆

** 安定な光導波路の形成を実証

*** 光導波路形成条件の詳細検討



検索 DB SciSearch 2004年12月現在

5. 参加研究者の活動状況

5.1. プロジェクトから育った人材の状況

5.1.1. プロジェクトから大学へ

プロジェクト終了後、次の各氏がそれぞれの大学で職についた。

田中耕一郎 京都大学大学院理学研究科助教授を経て現在教授

井上英幸 奈良先端科学技術大学助手を経て現在京都大学化学研究所元素科学国際研究センター光ナノ量子元素科学助手

邱 建栄 2005.2 から中国浙江大学教授 同大学未来材料センター長

5.1.2. 人材の流動化全般

プロジェクト終了後、邱建栄、三浦清貴、司金海、井上英幸の四氏は引き続き JST の国際共同研究事業(ICORP) 「フォトンクラフトプロジェクト」で研究を推進している

また北岡賢治氏は、一旦ミノルタ株)に復社後、クラスターテクノロジー(株)に移り、プロジェクトの経験を活かした研究開発の仕事に従事している

5.2. 学位取得

本プロジェクトでの業績をまとめて、以下の十名が工学博士の学位を取得した。

井上英幸、神原浩久、佐々木浩子、北岡賢治、杉本直樹、三浦清貴、近藤裕己、岸本正一、林正幸、Alongkarn Chutinan

5.3. 受賞

1998 平尾一之 日本セラミックス協会学術賞 (誘起構造を利用した光機能性ガラス に関する研究)

1999 平尾一之 日本化学会学術賞 (光機能を有する無機非晶質材料に関する研究)

2000 平尾一之 第 10 回 TEPLA ハイテク・ビデオコンクール賞 (光とガラスで情報の新世界を拓く)

2000 平尾一之 Morey 賞 (米国セラミックス協会ガラス部会が毎年世界で一人に授与)

2002 平尾一之 米国セラミックス協会フェロー賞

2003 平尾一之 日本経済産業大臣賞 (NEDO ナノガラス技術プロジェクト、次世代 DVD の研究開発)

2005 平尾一之・三浦清貴・邱建栄 Otto-Schott Research Award (独 Ernst Abbe Fund , フォトンによるガラスの誘起構造変化と光機能デバイスへの応用)

図表 5.1 プロジェクトの参加者リスト

グループ	プロジェクト 内での役職	氏名	現在の所属	現在所属での役職	参加時の所属	参加期間開始	参加期間終了
統括責任者	統括責任者	平尾 一之	京都大学大学院工学研究科材料化学専攻	教授	京都大学大学院工学研究科	1994/10	2000/3
	技術参事	三露 常男	松下電器産業㈱中尾研究所技術基盤強化室	主幹技師			
機能発現G	グループリーダー	鈴木 智雄				1997/4	1999/4
	グループリーダー	田中 耕一郎	京都大学大学院 理学研究科 物理学第一教室 光物性研究室	教授		1995/1	1996/12
	研究員	井上 英幸	京都大学化学研究所元素科学国際研究センター光ナノ量子元素科学	助手		1994/1	1999/9
	研究員	神原 浩久	NTTフォトニクス研究所複合光デバイス研究部		日本電信電話㈱	1995/5	1997/2
	研究員	北岡 賢治	クラスターテクノロジー㈱	社長付新技術開発担当	ミノルタカメラ㈱	1998/6	1999/9
	研究員	古宇田 光	日本電気㈱機能材料研究所	主任研究員	日本電気㈱	1998/4	1999/9
	研究員	佐々木 浩子	オリンパス光学工業㈱アドバンステクノロジーリサーチセンター		オリンパス光学工業㈱	1995/10	1996/9
	研究員	服部 哲也	住友電気工業㈱横浜研究所光通信研究部	主査			
	研究員	藤原 誠司	セントラル硝子㈱ファインケミカル事業企画室(宇部)オプティカルデバイス開発グループ			1996/4	1999/9
	研究員	三浦 清貴	セントラル硝子㈱ファインケミカル事業企画室(宇部)オプティカルデバイス開発グループ	主任研究員	セントラル硝子	1995/4	1997/3
構造形成G	グループリーダー	近藤 裕己	旭ガラス㈱中央研究所	主席研究員	旭硝子㈱	1998/4	1999/9
	グループリーダー	杉本 直樹	旭ガラス㈱中央研究所硝子セラミックス領域研究所	主任研究員			
	グループリーダー	三浦 清貴	セントラル硝子㈱ファインケミカル事業企画室(宇部)オプティカルデバイス開発グループ	主任研究員	セントラル硝子	1997/4	1998/3
	研究員	岸本 正一	日本板硝子㈱技術研究所関西研究センター 研究開発G		日本板硝子㈱	1994/10	1996/9
	研究員	桑原 純	筒中プラスチック工業㈱関東研究所		筒中プラスチック工業㈱	1995/4	1997/3
	協力研究員					1997/4	1998/3

グループ	プロジェクト 内での役職	氏名	現在の所属	現在所属での役職	参加時の所属	参加期間開始	参加期間終了
	研究員	野内 健太郎	昭和電線電纜(株)情報通信事業部情報通信研究開発部光エレクトロニクスG		昭和電線電纜(株)	1998/4	1999/9
	研究員	林 正幸	イビデン(株)技術開発部研究開発グループ			1997/4	1998/3
	研究員	三浦 清貴	セントラル硝子(株)ファインケミカル事業企画室(宇部)オプティカルデバイス開発グループ	主任研究員	セントラル硝子	1998/4	1999/9
	研究員	Davis Kenneth M.				1995/5	1996/8
	研究員	邱 建栄	2005年2月より 中国浙江大学教授 同大学未来材料センター長		山村硝子(株)	1995/4	1999/9
	研究員	司 金海			中国科学院	1997/6 1998/6	1997/8 1999/9
機能設計G	研究員	澤口 直哉	通商産業省工業技術院名古屋工業技術研究所構造プロセス部超変形機能研究室	研究員		1995/10	1996/3
	研究員	清水川 豊	姫路工業大学高度産業科学技術研究所	客員助教授		1994/10	1997/9
	研究員	牧野 至洋	(株)ダイキン空調技術研究所		ダイキン工業(株)	1995/4	1998/9
	研究員	Alongkam Chutinan	京都大学工学研究科電子物性工学専攻博士後期課程3回生			1998/4	1998/12

6. 創造科学技術推進事業に関する意見

6.1. 事業の意義

6.1.1. 戦略目標指向について

- (1) 戦略目標」に重点をかけすぎるとERATO 事業の目的そのものが中途半端になるおそれがある。むしろ戦略目標指向のスタンスはCREST にまかせて、ERATO は本来の「自由研究」「基礎研究」「創造的研究」を迫るべきである。その意味では、常に「リスクを負う部分」があってもよい。(内部)
- (2) 戦略目標指向」の進め方に関しては、同じJST 事業の中でもCREST のほうがより具体的な目標があるだけやりやすい。その点現在の ERATO は大変だし、責任者以下の当事者が気の毒に思われる。ERATO では「若手が興奮できるような場」を作るべくもっぱらチャレンジなところを扱うようにしたい。とくに「戦略」を重視する必要はなく、もともとあったシステムでよいと思う。(外部)
- (3) 戦略目標の設定により、研究に「方向性のしぼり」が出てきた。実用化や特許出願に重点がおかれる結果、「どんなプロジェクトに成長するか」の楽しみが希薄になってきた感がある。幸い平尾プロジェクトでは研究がうまく広がったが、戦略的しぼりのおかげで拡大できなかったプロジェクトもある。(内部)
- (4) ERATO ではまずオリジナルな発想で基礎科学を推進し、次の段階で実用化に結びつけるのが本筋であろう。後者の段階は必ずしもERATO でやることはない。ERATO では「起」承」のステージまでを集中してやるべきで、「転」以降はたとえば企業での開発にまかせればよい。(内部)
- (5) 戦略目標」を重視しすぎると NEDO プロジェクトとの区別がつかなくなり ERATO 本来の意義がぼかされてしまう。一口で言えば、文科省では「市場がはっきり見えていないところ」を扱えばよい。逆に経産省側はまずプレイヤーを決めて(会社を指定して)資金を出すパターンだから、現在縮小の方向にある企業の中央研究所的な活動をカバーしてやる戦略が絶対に必要で、そのために経産省/企業間でフォーラム作りを考えてみたらどうか。(外部)
- (6) 戦略目標」は言葉の使い方でもうにでもなる(リーダー次第といってもよい)から、弾力的な運営が望ましい。「一年ごとの戦略」などおおよそ無意味だし、戦略目標に添っていないものは不可」とする姿勢も感心しない。(内部・外部)
- (7) 同じ戦略なら、50年・100年スパンでの流れを見極めた上での確な領域を設定し、その後は研究者の自由にやらせるのがよい。たとえば「日本の強みをさらに強化する」「日本にないところを創り出す」「世界のどこにもない新たなものを創造する」など、基本のコンセプトをどこに置くのかははっきりさせることが重要である。さらには将来どんな社会にもってゆくのか・モラルやエコロジーの問題も取り込んだ「大きい社会の流れ」を想定し、そのためのルール作りを進める必要がある。

る。(内部)

- (8)「戦略目標」は現代では必要なスタンスであり ERATO でも若干の目的指向は当然と思う。ERATO の理想はあくまでも「基礎研究分野でのノーベル賞」を目指すところにあるが、実際には中々難しいだろう。(外部)

6.1.2. ERATO の基本理念

- (1)全体として JST、とくに ERATO のプログラムはすばらしいと思う。とくに以前の国家プロジェクトはもっぱら産・官の共同で「学」が入っていなかったのを、他に先んじて(あり余っている)大学の研究者をプロジェクトに取り込み、研究のレベルを著しく高めた点、賞賛に値する。(外部)
- (2)目的指向、実用化指向への変質にともない、ERATO の存在意義 - 本来の原則が崩れはじめていくように思われる。「ERATO とはそもそも何か？」をあらためて問い直すべき時期に来ている。このままでは、「実用化に結びつかない研究」は排除されてしまうし、同じ意味で「不成功に終わる研究」が増加すること必定である。(内部)
- (3)「基礎を創る研究」と「産業につながる技術開発」とは本質的に異なるものである。後者は商品化とビジネスが中心課題で、基本理念・方法論、その他すべての点で大学の研究(「ベンチャー」を含む)とはちがっている。この事実をまず認識することが重要と考える。(外部)
- (4)ERATO の「戦略目標的な進め方」には賛成できない。ERATO で何より先大事なものは、新しい概念や新しい理論、新しい領域の開拓であり、極限すればここでは実用化のことなど考えなくてもよい。(外部)

6.2. 仕組み、運営面に関する提言

6.2.1. プロジェクトの規模と期間

- (1)研究の規模は現状のままでよい。また、プロジェクトの期間も現行の5年が適切である。(内部)
- (2)分野により適正規模も異なるが、もともとセンスのいい人物なら仕事を十二分に発展させることができる筈だから、人を中心に規模の見極めをつけ、拡大するなら運用面でその都度広げてゆけばよい(プロジェクト別の仕分けがあつてよい)。ただし発展の程度に応じて新たな予算をつけるのでなければ意味がない。(外部)

6.2.2. 研究のロケーション

- (1)オフ・キャンパス方式は今後とも必要である。大学の研究と一線を画す意味があり、隔離された環境による「研究者集合体の共同意識」も強められる。けいいはんな地区のように多少不便な場所

でも、プロジェクトの成果さえ上がれば世界のどこからでも人は集ってくるから問題はない。(内部)

- (2)総括責任者には別に大学などでの本務があるから ERATO との区別をきちんとつけるべきである。その意味でオフ・キャンパス方式がよいと思う。研究推進をまかせられる人がいれば分散させてもよいし、大学からある程度近い場所におくのも止むを得ない。(外部)
- (3)オフ・キャンパス方式には一長一短があり、運営の仕方による。あまりキャンパスから近い場所ではプロジェクトの独自性が出にくく、適度な距離をおいた方がよい(責任者のまわってくる頻度が少なく、研究者の能力にまかせられるメリットもある)。一方ではキャンパス内で学際的な利用ができることも望ましい。(内部)
- (4)場所の関係で文献類の閲覧に大きい不便を感じた。JST 文献センターに無料でアクセスできると同時に、ISI システムに加入しすべてのツールが揃うようにしてほしい。その都度、京大や産総研センターまで出向くのはエネルギーの浪費だし、時間もかかる。(内部)

6.2.3. 総括責任者の選び方

- (1)「人のリーダーの指導下に新しい流れを作ること」には自ら限界があり、時代とともに困難になりつつある(例外もあるが、せいぜいのところ当人の既存分野を若干広げる程度か)。この際、個人中心の流れはむしろ CREST にまかせ、ERATO ではいろいろな専門分野や方法論を持った先生方が集まり、共同作業することで新しい領域を作り出す仕組みを考えてみたらどうか。学者と技術者との混成も有効であろう。人の選び方については、ERATO でいい実績を上げた人達に選んでもらうのも一法である。(内部・外部)
- (2)現在では昔に比べて多くのファンクが設けられているので、「有能な先生」はすでに何らかの形で資金がついており、何が何でも ERATO にどびつく傾向も薄くなった。その分若手の中からリーダーを探す必要が高まっている。「グローバルな人物」が一つのポイントになるが、このあたりで外国人のリーダーを考えてみたらどんなものか(何か決定的な障害があるか?)。(内部)
- (3)リーダーの選出に当たっては、何よりも「創造的発想のできる人物」が最重要の基準となる。この点、審査委員会の選考だけでは偏ってしまうおそれがある。一案として、「匿名有識者」による個人的な意見も取り入れてみたらどうか。なお全体としては若手の方向に向けてほしい。(内部)
- (4)従来の傾向を見ると「功成り名遂げた大先生」が多いように見え、その点に選考委員会の安易さを感じられる。むしろ大先生方には学振など別の場でやってもらうのがよい。委員会の人選も重要な要素である。(内部)
- (5)総括責任者には、あるレベル以上の研究実績を持っていること、研究の苦しみをよく理解し、推進の仕方を肌で知っていること、国内外に良質の人脈を広範囲にもっていることが基本的に要求される。人によっては、子飼いの弟子ばかり集めたがる向きもあるが、感心しない。(外部)
- (6)審査委員としては、公正な眼で判断できること、その時々の問題処理が的確にできること、しかるべき「目利き」であることなどが望まれる。審査委員は一旦ゴーサインを出したら後々の評価段

階までついてまわり 結果まで含め一貫して責任を取るシステムにするべきである。そのためには研究推進時にもその都度意見を出せるポジションを与えるのがよいと思う (外部)

- (7)総括責任者の公募制には一長一短があり 半分指名、半分公募くらいがよいのではないかと、審査のやり方が問題で、何より審査委員の選び方が肝心である。(外部)
- (8)総括責任者の決め方を統計的 最大公約数的に行なうと、結果はどうしても平均的にならざるを得ず、飛躍をもたらす「特異な創造的才能」を探ることが難しくなる。その意味で現在の選考方式はいささか危ない面がある。たとえば野依教授のような特定の人に一切を任せて選んでもらうのはどうか。(外部)
- (9)公募制にした場合、科研費の配分と似たような形になって著名人の顔ばかり並び、若手の面白いところが出てこない。学問体系に関する自らのコンセプトを備えている人物であることが必須条件であり、そのような人材を発掘するには審査委員会のような形式上のシステムによらずとも「調査する人」「その結果を基に判断できる人」がしっかりしていれば十分機能を果たせる。(外部)

6.2.4. その他

- (1)総括責任者、技術参事、事務参事が三位一体となり 互いに平等な立場でプロジェクトを推進するのが理想的な形態で、これではじめて効率的な運営が可能になる。(内部)
- (2)責任者はおおまかな方向付けをして、後は研究者にまかせるやり方がよい。ただしその都度の成果を確認しながら進めることが重要である。(内部)
- (3)これまでの成功例および失敗例をつぶさに分析してみたらどうか。(内部)
- (4)いかなる場合でも エネルギーの 15%は研究者の自由にやらせること - 「草の根的スタンス」の重要性を十分認識した運営が重要と考える。(外部)

6.3. プロジェクト参加者の実体験からの感想

- (1)有能な研究者を多くの分野から幅広く集められたことが何よりよかった。(総括責任者)
- (2)ERATO での成果を「中小企業での人材育成」に役立たせたいと考えている。最近では有能な人材が中小企業に流れる傾向もある。(総括責任者)
- (3)ERATO で「学際的人脈」のできたことが大きい収穫であった。
- (4)ほとんどの研究者が「ERATO に参加できてよかった」と感じている。短期間、100%研究に集中できたことが共通した要因である。
- (5)最近では ERATO のプロジェクトに参加したこと自体が、研究者としての一つの「ステータスシンボル」となり 爾後の流動化をスムーズにしている感がある。ERATO のためにもよろこばしいことで、今後もこの傾向を維持できるように事業を運営してほしい。

7. プロジェクトの成果・展開に関する外部有識者の意見

本プロジェクトの成果とその後の展開についての外部有識者(7名)の評価は、後述のアンケート回答に連動して、肯定的なものから若干否定的なニュアンスのものまで広く分布している。評価の分かれるポイントは、「フェムト秒レーザー照射による誘起構造発現」の科学・技術面における位置付け、及びそのメカニズム(分子・原子レベルでの)解明の進捗状況の受け止め方にある((7)(8)(9)参照)。ここでは、その各々について総論(全体的評価)各論(テーマ別評価)に区分した形でまとめた。また ERATO 事業に関する意見を別項に記した。

7.1. 総論(全体像)

- (1)フェムト秒レーザーの高密度光照射により瞬間的な高温高圧状態を作り出し、ガラス内部の任意の場所に、任意の形状で微妙な構造変化を誘起する手法を確立し、その手法を駆使して材料科学の分野に新たな領域を開拓した。その後の展開でも多岐にわたる光現象を利用した広い応用例を発表し、光情報処理の基盤となる新材料を多数提供した功績は大きい。今後のさらなる進展に注目したい。
- (2)本プロジェクトで開発された光学材料・素子・デバイス類は将来の光通信に使える可能性が高い。ただメモリー用としては、コストや製造技術の面で現行の磁気材料に取って替わるのは困難と思われる。
- (3)フェムト秒レーザー照射によるガラス材料内部のドラスティックな変化(誘起構造)を通じて、ガラスを中心とするアモルファス材料全体(金属、高分子を含む)の研究技術開発に大きい刺激を与えた。学会や業界では、平尾プロジェクトの成果をふまえてこの種のテーマを取り上げる機会が急増した。とくに大手のガラスメーカーではフェムト秒レーザーによる加工・改質の研究が定番となり、さらにセラミックスや窯業の領域でもレーザー加工が導入され、新たな工業製品を生み出すきっかけを作った(これらの業界内に、新しいこと、新しいものを追求する意識改革)をもたらした。その意味では、「次世代加工」につながる成果を残したといえよう。
- (4)平尾プロジェクトの業績は国際的にも広く知られるところとなり、フェムト秒レーザーによるガラス内部への構造誘起を、「Hirao Effect」と呼んでいる向きもある。
- (5)上記各項の成果をベースに、「ガラスという平凡な材料」を一躍「先進的な光機能材料」に仕立て上げたことも平尾プロジェクトの仕事の一つに上げられる。
- (6)通常は「研究のツール」を持ち合わせていない材料研究者が、フェムト秒レーザーという強力なツールを自らのものとして取り込み、これをガラス素材と組み合わせて新しいものづくりを推進したところに大きい意義がある。
- (7)平尾プロジェクトは、発想はそれなりにすぐれているが、個々の問題をより深く掘り下げて検討するべきであった。各々のテーマについては面白い要素もあり、さらに突っ込むと大きい分野に成長する可能性は秘めているのだが、いずれを見てもその段階に達していない。とくに折角見

出された諸現象や、加工プロセスのメカニズムについてはほとんど解明されておらず、その点で ERATO の研究としてはいささかの物足りなさを感じる。(この点についてプロジェクトは、実際にはプロジェクト終了前に「メカニズム解明への方向転換」を行っており、その後フォトンクラフトプロジェクトなどを含めてこの面でも多くの成果を挙げたとしている)。

- (8) 光の照射でガラスの屈折率を変えることは以前から知られていたし、それ以外にも原理面や現象面で既知の部分も多くあった。(しかし、超高電場のフェムト秒レーザーを用いて空間選択的に誘起構造を創り出したのは本プロジェクトが最初であり、この点に大きい意義が認められよう)。
- (9) ガラス内部の誘起構造を利用する本プロジェクトの方向は、少なくとも現在のところ、マーケットの点であまり実用的とは思えない。とくに光スイッチ技術に関しては二次、三次非線形受容率の値もまだ小さく、機能的にも十分とはいえない。したがって企業側の関心もどの程度のものか疑わしい。一般に汎用品として現存の諸製品を置き換えるには、性能が現行品を凌駕すると同時にコスト的に引き合うことが絶対の条件であり、単に容量の大きいことや応答速度の速いことだけでは十分な要因とはならない。
- (10) プロジェクトの推進を通して、多くの有能な研究人材が育成されたことも重要な結果である。

7.2. テーマ別各論

- (1) 原子価制御と組み合わせた光導波路は平尾プロジェクトのすぐれた成果である。ただこのシステムを用いて光を遠方へ送る場合、パルスがくずれて高い周波数の光を発する問題があり、これに対処して実用化の方向に向けるためには、屈折率の分布構造による分散補償型の修正、もしくは光ファイバー自体の構造を改良する必要がある。それでも民生用の量産態勢を作り上げるのはコスト的な困難をとまなうであろう。安価な工業用レーザーの開発が鍵となるが、実現までにはかなり時間がかかると思われる。実際問題としては、導波路よりも「カスタム用の光配線」が有望である。
- (2) 光スイッチも成果の一つに上げられる。三次の非線形受容率⁽³⁾が共鳴線の近傍で大きいことが特徴だが、実用化に近いところまで持久力を持たせてほしい。二次高調波(SHG)でもサブピコ秒のかなり速い領域まで行くから、それを超える必要がある。超高速スイッチは将来必要になることはたしかだが、マーケティングの問題が大きい。
- (3) レーザーによる誘起結晶の作製については、以前からSi中に紫外光を当ててGe微結晶を析出させる研究はあった。平尾プロジェクトの成果はBBOがうまく使えるかどうかにかかっている。話の筋はいいと思うので、上手に進めれば分波器や光スイッチに利用できるだろう。
- (4) 微小球レーザーも本プロジェクトの一つの収穫であり、今後の展開が期待される。フッ化物ガラスはT_gが低いから構造の乱れが小さく、その分損失も少なく、距離を伸ばしやすい反面、水に弱く内部に微結晶がしやすいなど耐久性にからむ問題があり、これらの点を解決することが実用化のために必要である。ガラスの組成を選択することで安定性の向上に結び付けられるか

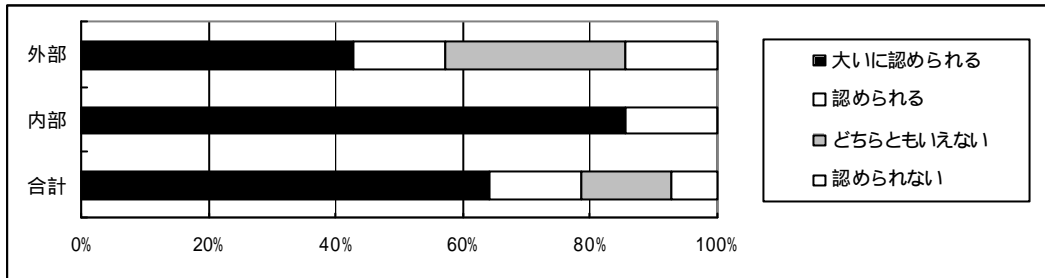
- どうか。また球の大きさをできるだけ揃えて発振波長のずれを防ぐことも重要である。
- (5)希土類含有ガラスのファラデー効果(磁気光学効果)はあまり新味のないテーマだが、もし「ファラデー効果を備えた光ファイバー」が実現すれば、光のアイソレーターや大電流・高圧電流の測定用素子などの利用面が拓かれよう。とくに後者は全世界の電力会社・送電屋が強い関心を示すにちがいない(磁場から電流を測ることは昔ともガラスでやっていた)。
 - (6)フェムト秒レーザーによるアブレーション加工はたしかに工業化につながりやすいが、製品にどんな特徴を与えるかが、キーポイントになる。
 - (7)希土類イオン含有ガラスの常温ホールバーニングではホールの空き方がまだ浅く、実用面では問題が残されている(さらなるブレイクスルーが必要とされる)が、その線に沿った展開がその後全く見られないのは不思議な気がする。フォローがなければ、ただやってみただけで終わってしまう。
 - (8)アップコンバージョンも以前から研究の対象になっていたが、青色ダイオードの出現でいささか色褪せてきた。輝尽発光ガラスや長残光ガラスについてもその後のかばかしい展開は見受けられない。
 - (9)レーザー光によるガラス中での結晶成長(Ag)については、コーニング社の古い特許があり現象自体はよく知られている。
 - (10)レーザー照射によるガラス密度変化の分子・原子的メカニズムはまだ解明されていない。レーザー光の強度によって誘起構造が微妙に変化するとともに、ガラスの種類・組成にも依存するので問題がさらに複雑になる(この点についてプロジェクトは、相分離構造の解明が重要であると考え、最近ではこれらの現象を統一的に解釈できる相分離理論や実験を進めている)。

8. アンケート調査結果

今回の取材者の内、総括責任者を除く14名(プロジェクト参加者、外部有識者各7名)を対象に、1. 新たな科学技術分野の開拓、2. 学会、研究会などの創設、3. 科学技術のレベルアップへの寄与、4. 新たな産業分野の創出、5. 総括責任者への評価、の5項目についてアンケートを行なった結果を下表に示した。

8.1. 新たな科学技術分野の開拓

	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1 大いに認められる	6	3	9
2 認められる	1	1	2
3 どちらともいえない	0	2	2
4 認められない	0	1	1

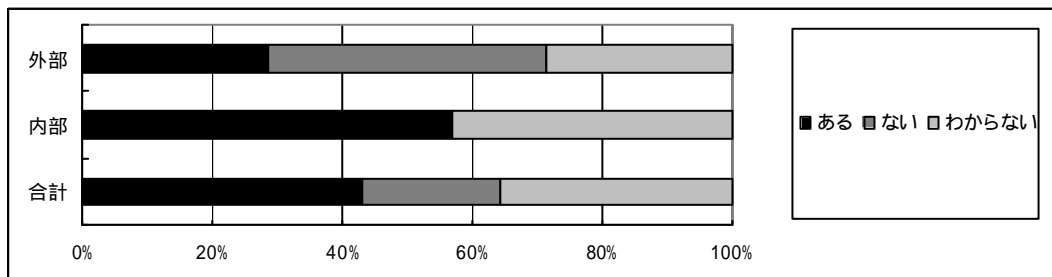


プロジェクト参加者の全員が肯定的な評価を与えている一方で、外部有識者中には態度保留、ないし否定的な回答も見受けられる。全体としては新分野の開拓を認めるものが約 80%に達している(外部有識者では約 60%)から、一応は前向きな評価と解釈してよいであろう。この傾向は以下の項目についても同様である。

8.2.学会、分科会、研究会等の創設

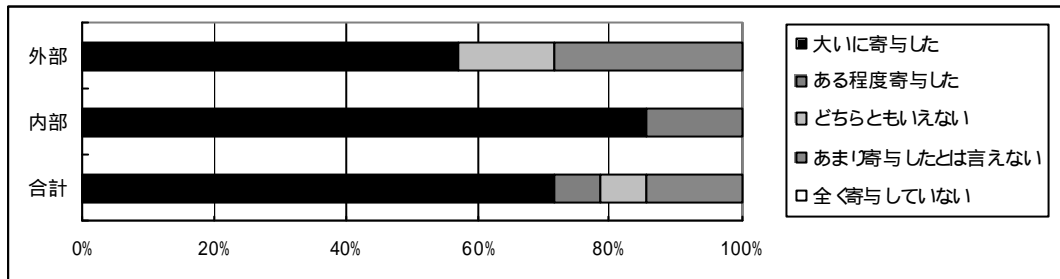
この項目については、各人の知識に依存する部分が多いので、否定的な回答はその意味で割り切らなければならない。むしろ具体的な内容については、本報告のプロジェクト終了後の展開および波及効果の節が理解の助けになるとと思われる。

	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. ある	4	2	6
2. ない	0	3	3
3. わからない	3	2	5



8.3.科学・技術のレベルアップへの寄与

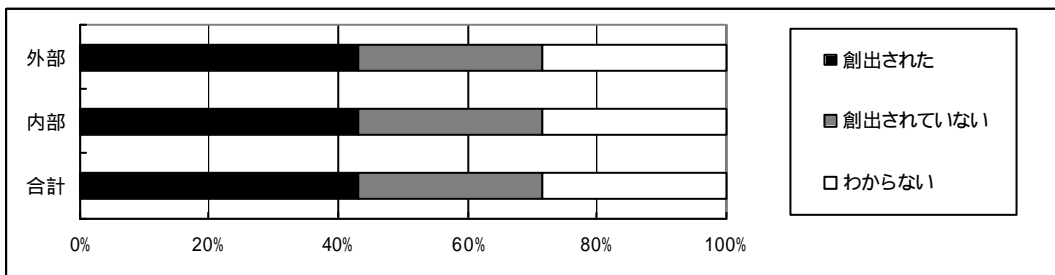
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 大いに寄与した	6	4	10
2. ある程度寄与した	1	0	1
3. どちらともいえない	0	1	1
4. あまり寄与したとは言えない	0	2	2
5. 全く寄与していない	0	0	0



内部のメンバーはともかく 外部有識者の過半数が「大いに寄与した」としているのは注目してよい。「あまり寄与していない」とする見方については、前節「外部有識者の意見」を参照されたい。

8.4.新たな産業分野の創出

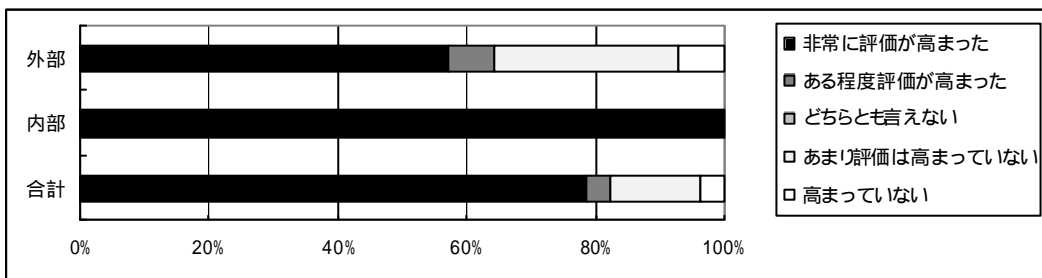
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 創出された	3	3	6
2. 創出されていない	2	2	4
3. わからない	2	2	4



「新たな産業分野の創出」をどう解釈するかで意見が分かれるところである。今日までに「事業化の段階に達したもの」や、まして「産業分野として収益をあげているもの」は現われていないから「創出された」のはせいぜい「事業に発展する芽」くらいのところ、それも「フェムト秒レーザープロセッシング」を一つの産業分野と見なせるかどうかは人により見解が異なるであろう。いずれにしてもプロジェクト終了後5年での設問としては、ささか無理があるように思われる。

8.5.総括責任者に対する評価

	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 非常に評価が高まった	7	4	11
2. ある程度評価が高まった	0	0.5	0.5
3. どちらとも言えない	0	0	0
4. あまり評価は高まっていない	0	2	2
5. 高まっていない	0	0.5	0.5



回答数に端数があるのは、一人で2項にまたがる回答があったことによる。回答者の主観的要素に強く依存する設問であるが、外部有識者を含めた大多数が、「総括責任者への評価が高まった」としている点を指摘しておく。本プロジェクトで行なった学会発表163件の内、ほぼ1/3の53件が招待講演であることや、依頼による総説が43報あった事実は、本プロジェクトへの注目度ないし責任者への評価のレベルを示唆するものといえよう。

以上