

## CREST 研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」

### 追跡評価報告書

#### 総合所見

本研究領域は、情報処理・通信、材料、ライフサイエンスなど、基礎科学から産業技術にわたる広範な科学技術の基盤である光学および量子光学に関して、光の発生、検知、制御および利用に関する革新的な技術の創出を目指すために設定された。ここでは、幅広い研究分野に関わり、情報処理・通信や計測技術などの飛躍を目的とした量子ドット、フォトニック結晶、非線形光学などによる新しい光機能素子の原理や技術、生体観察・計測、産業・医療などへの利用を目的とした未開拓の波長域を発生可能とする新しい光源・検出手法の開発・高度化と利用技術、近接場光などを利用した光と物質の局所的相互作用の解明と超微細加工や大容量メモリなどの利用技術、光による量子的制御技術や光の本質に基づく新たな物質科学、新材料に関するものを対象とし研究が行われた。

本研究領域では、6つの分野（デバイス、バイオ応用、高強度レーザー光源、半導体光源、量子情報、材料・物性・計測）において、研究領域終了後もほぼ全ての研究課題で精力的な研究の継続・発展が図られ、基礎的な現象の解明、その応用、そして実用化を目指した進展が見られる。論文数はグループで違いはあるものの全体で 367 報を数え、世界と熾烈な先陣争いを行っている研究グループもある。論文の被引用数の高さから推察されるように、国際的にも高い水準と評価される。本研究領域の研究成果の発展として、大型研究助成金（科研費以外で 1 億円以上）を野田、兒玉、五神、馬場、平山の 5 グループが獲得しており、研究成果の技術水準の高さを支える資金的基盤を継続的に受けている。

量子情報、材料物性・計測分野の基礎的な物理現象の解明では、超伝導体、半導体励起子、有機強誘電体で幾つかの基本的な光物理現象の発見、メカニズムの解明が進んでいる。実用には直ちには繋がらないものの、これらの分野の基礎的事象の理解の進展には大きな意義が認められる。

基礎研究から応用、実用に繋がる研究の進展としては、半導体材料・ナノ構造の開発による四色集積ナノコラム LED 技術、水銀殺菌灯の効率に並ぶ世界最高の外部量子効率の深紫外 LED デバイス技術、フォトニック結晶のレーザーでは究極的である室温で連続発振する高ビーム品質・ワット級(1.5W)・単一縦横モードレーザー技術、新規現象である Cu 膜背面への高強度レーザー励起による高効率のテラヘルツ波発生技術やテラヘルツ波をベクトルビームや光渦などの特殊なビームを広帯域に生成する電場波形制御技術、レーザー生成高密度プラズマによる高密度電子ビーム制御と X 線自由電子レーザーへの応用技術、TW 級光パラメトリック・チャープ・パルス増幅を用いた広波長帯域・高出力の超短パルスレーザー・高次高調波発生技術などがある。また、色素分子内電荷移動の解明、人工光合成膜の開発などを通じた人工光合成システム技術、医療向けの照明用 LED と画像用 CMOS センサーから成る in vivo 脳イメージングデバイス技術など、多彩な研究成果が発展的に得られている。さらに、

野田と宮永のグループ間融合研究によるフォトニック結晶面発光型レーザー（PCSEL：Photonic Crystal Surface Emitting Laser）、励起固体レーザーの実現は、高効率・小型・保守フリーなどの利点があり、今後の発展が大いに期待される。

特許出願は実用化に繋がる重要指標であるが、本研究領域終了後の出願（国内 90 件、国際 48 件）は少数研究課題に集中しているものの高く評価できる。複数の研究課題で企業との連携による実用化を目指した着実な動きがあることも評価したい。基礎的研究は多くの論文を生むものの、実際に役立ち、市場に投入される技術になるものは極めて少ない中で、本研究領域終了後の研究継続から真に市場投入される技術の発展を大いに期待する。

以上より、光量子科学技術において、基礎的物理現象の理解の進展、基礎研究から応用、実用に繋がる多彩な研究成果が得られており、社会への高い波及効果への期待の高さなどの状況から、本研究領域は研究終了後も非常に高い成果を上げていると評価できる。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域終了以降、367 報の論文が発表されたこと、32 件の著名な表彰を受賞し、助成金総額が 1000 万円以上の新規助成を 33 件獲得していることなどから、精力的な研究が行われていることが伺える。特に、本研究領域の研究成果の発展として、大型研究助成金（科研費以外で 1 億円以上）を野田（JST 戦略的創造研究推進事業 CREST/ACCEL、NEDO プログラム）、兒玉（文部科学省最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム）、五神（文部科学省最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム、革新的医療技術創出拠点プロジェクト）、馬場（JST ACCEL）、平山（JST ALCA、NEDO）の 5 グループが獲得しており、研究成果の技術水準の高さを支える資金的基盤を継続的に受けている。

これらの中で、基礎的な研究の発展、としては、末宗の超伝導体のクーパー対が関与した発光の確認、五神の亜酸化銅中の励起子ボース・アインシュタイン凝縮への挑戦、岡本（宮野グループ）による有機強誘電体の光・テラヘルツ波による制御などの進展がある。これらは直ちに応用に繋がるものではないが、基礎的事象を深く理解し、将来新規応用に結び付けるという意味で意義ある進展である。

応用に繋がることを期待できる研究成果は、岸野および松岡による半導体材料開発とナノ構造を用いた発光波長制御と平山による深紫外光源開発、野田および馬場によるフォトニック結晶デバイス開発、兒玉および門脇の新原理によるテラヘルツ波の発生と五神による電場波形制御、宮永による広波長帯域高出力超短パルスレーザーの開発と渡部による高次高調波発生、太田による医療技術に向けた素子開発、橋本による光合成メカニズムの解明と人工光合成システムの研究などがある。また、宮永、野田のグループ間融合研究による PCSEL 励起固体レーザーも注目される。

これらは、単に基礎研究に留めず、社会的・経済的に貢献するための努力が行われている証拠であり、高く評価したい。

研究領域終了後に、野田は 84 報の論文を発表した。その内、国際的に幅広い読者を持つ

著名な科学誌などにも 10 報の論文が掲載された。また、野田の紫綬褒章、兒玉の宅間宏記念学術賞、平山、馬場、宮永、松岡の文部科学大臣表彰には本研究領域の研究成果が貢献している。

これらは、広範な科学技術基盤である光学および量子光学において、革新的な技術の創出を目指した本研究領域が発展し、実を結んだ重要な研究成果と言える。

## 2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

### (1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

全般に被引用数トップ 10%以内に入る注目度の高い論文が多く、それぞれの分野で国際的に高いレベルの研究が進められ、その研究分野で科学技術上の貢献をしている。

本研究領域は広範な研究分野に渡っているため、研究成果の比較は困難であるが、幾つかの特記すべき研究成果を以下に取り上げる。

フォトリソグラフィ結晶は、一時期、光通信分野で大きな期待を持たれたが、完全なフォトリソグラフィ結晶が得られず具体的な光制御の活用法も明らかでなかった。その中で野田、馬場の二人が地道に研究を進め、着実な成果を上げてフォトリソグラフィ結晶デバイスの研究で世界をリードしている。野田はワット級フォトリソグラフィ結晶面発光レーザの開発など基礎から応用へと研究を進め、馬場はスローライト効果の応用を中心に、フォトリソグラフィ結晶デバイスの研究発展に向け大いに貢献している。

兒玉による高強度レーザ誘起プラズマ制御技術は、従来不可能な極限状態における光指向性制御、レーザ航跡場により電子ビームの加速技術を可能とした。また、レーザ航跡場電子加速による超小型コヒーレント X 線源を開発し、医療・製造産業への応用に向けて、世界中の高エネルギー密度の電子ビーム制御研究のイノベーションに繋がった。

平山による深紫外 LED の研究成果が研究領域終了後、次の JST 戦略的創造研究推進事業 ALCA 革新技術領域 低炭素社会実現に向けた新発想型「水銀ランプ殺菌灯の代替となる縦型高効率・深紫外 LED の開発」(2015 年度～2019 年度)で飛躍し、世界最高の外部量子効率 EQE=20.3%の深紫外 LED を実現した。

岸野によるナノコラム InGaN 系レーザの発振波長制御は、新しい発想で物理的に興味深く、多色一体光源 (マイクロ LED) の可能性を切り拓いた。被引用数が高く国際的にも注目される論文を多く発表している。一方で、他の手法と比較しての性能やコストなど実用化への課題もあるが今後期待する。

宮永による広波長帯域高出力超短パルスレーザの開発と渡部による高次高調波発生は、光源の高機能化と波長領域の拡大による新たな光応用を加速するものと期待される。

宮野のテラヘルツ光による電子型有機強誘電体制御、五神のキラル構造によるテラヘルツ光制御と励起子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 実現へのステップ、橋本の人工光合成システムの研究と海洋藻類の色素分子内電子移動の解明など、基礎研究の重要な進展に寄与している。

## (2) 研究成果の応用に向けての発展状況

本研究領域の研究成果が、実用化一步手前まで漕ぎつけたことや、実用化を明確に目指した研究が幾つか進展しているところを高く評価する。

具体的には、ナノ構造あるいは半導体材料の開発で光源の波長領域を拡大しようとする取り組み（岸野、松岡、平山）の光源の研究は、今後幅広い応用が期待できる。広い可視領域の光源はコストの問題が解決できれば実用化の可能性はある。

岸野は大面積 Si 基板上ナノコラム規則配列 LED による黄緑色の LED 発光を確認し、将来の高密度二次元ナノコラム LED のアレイ化への道を拓いた。松岡は企業連携による窒化物半導体青色 LED・LD 向けの InGaN 系新材料基板を開発した。平山の深紫外 LED 光源の効率が水銀殺菌灯に並んだ事から、医療・農作物の病害防止、紫外線硬化樹脂応用技術関係での幅広い応用拡大が期待され、企業との連携で実用化に大きく踏み出し具体化している。

広い波長範囲で制御できる大出力の超短パルスレーザ光源（兒玉、渡辺、宮永）も電子分光を含む幅広い物性研究の光源として、あるいは加工用光源として期待できる。

野田の熱輻射制御デバイスは新しいエネルギー有効利用への展開が期待される。また、野田の PCSEL を励起光源とした宮永の固体レーザも、コスト・信頼性などの課題を克服できれば実用化が大いに期待できる。本研究領域内での連携研究として、野田グループの研究成果が宮永グループで活用され、大出力、高効率、高品質ビームの固体レーザの実現に繋がったことは特筆すべきで、日本発の国産技術による新しいレーザシステムに成長することを期待する。

馬場の格子シフト型フォトニック結晶導波路 (LSPCW) と Si の大きな非線形光学効果を組み合わせ発現させる波長変換、光遅延チューニング、パルス圧縮など機能を応用する諸デバイスは、実用化に近い。橋本の人工光合成は、光による水素発生触媒に繋がっており、実用化を目指した企業連携の研究へと進展していることから、社会からのニーズが大きい課題として更なる進展を期待する。

テラヘルツ波の発生（宮野、寺門）と制御（五神）などの研究成果も、ネットワークの末端における大容量トラフィック伝送で、今後の IoT への応用にも資するものであり、テラヘルツ波の応用の幅を拓げるものとして期待される。太田のバイオメディカルフォトニック LSI は脳機能の解明に貢献する技術であり、医療への応用が期待される。これらの研究の幾つかが企業と連携して研究を進めていることは高く評価される。これらは、単に基礎研究に留めず、社会的・経済的に貢献するための努力が行われている証拠である。

研究領域終了後の特許出願は国内 90 件、国際 48 件を数え、多くが野田、平山の二課題に集中してはいるが、応用に対する取り組みとして高く評価される。

一方で、基礎的研究の成果と市場投入できる製品のレベルには大きな乖離があるのが現実である。従来技術の組み合わせで目的を達成できる低コストの代替手法がないかなどの市場性を把握した上で、今日まで積み上げて来た貴重な成果を社会的・経済的に役立つ技

術に繋げるよう戦略的な取組みを期待する。

### (3) その他の特記すべき波及効果

概ね当初狙った目標に向かって研究が継続されている。堀の局所光シミュレーションは量子ドット構造間の光エネルギー伝達が数独の解を導く制約充足問題や粘菌の生態の基本動向を示す充足可能性問題などの計算機科学に応用できる事を示し、新たな CREST 研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス基盤技術」(2015年度～)の研究課題「ナノ光学と光カオスを用いた超高速意思決定メカニズムの創成」を導いた。

人材のキャリアアップについては、個々の課題の研究者グループの多くが、被引用数の高い多数の論文を発表したり、著名な賞の受賞など、グループ構成員のキャリアアップや人材育成に大いに繋がっている。また、兒玉の例のように、研究に参加する海外留学生を多く受け入れ、研究者同士が多様な国際人材と交流できる機会を作っていることは、人材育成にも十分に繋がっている。

海外の研究者とのネットワーク形成では野田が多く海外研究機関との共著論文を発表しているのが注目される。また、幾つかの課題で企業と連携した開発に発展しており、産業界とのネットワーク形成の努力がなされている。また、兒玉も海外との共同研究を多く展開させており、国際レベルでの研究者間ネットワークが継続的に醸成されていると判断される。