

課題番号	LR012
------	-------

**先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム)  
実施状況報告書(平成 25 年度)**

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	超高速・超広帯域光ファイバ光源を用いたリアルタイム光断層計測とその医用応用
研究機関・ 部局・職名	東京大学・先端科学技術研究センター・教授
氏名	山下 真司

1. 当該年度の研究目的

本研究の目的は、申請者が最近進めてきた独創的な新しいモード同期法による超高速・超広帯域光ファイバ光源を利用して光コヒーレンストモグラフィ(OCT)による超高速・超高分解能リアルタイム光断層計測システムを構築し、さらにその医用応用を図るものである。ここでの新しいモード同期法とは以下の2つ、

① 共振器内の分散を利用した分散チューニング法による超高速・広帯域波長可変光発生

② ナノカーボン可飽和吸収素子による受動モード同期による超短パルス発生

であり、どちらも申請者が最近提案した独自技術である。これらの超高速・超広帯域光ファイバ光源を Swept-Source OCT (SS-OCT) または Spectral-domain OCT (SD-OCT)システムにおいて用いれば、他の光源では為し得なかった超高速・超高分解能でのリアルタイム OCT システムを実現でき、超高速・超高分解能での断層計測が必要とされている医用分野への応用が期待できる。

第一のテーマ、分散チューニング法による超高速・広帯域波長可変光発生については、前年度に実現した短共振器・超高速波長スキャン分散チューニングレーザを完成させ、生体試料を用いた高速 SS-OCT システムの実証を行なう。さらに、波長 1.5 $\mu\text{m}$  および 1.3 $\mu\text{m}$  帯のみならず、1 $\mu\text{m}$  帯での超高速・広帯域波長可変光発生についても試みる。波長 1 $\mu\text{m}$  帯は眼科応用にとって重要な波長である。第二のテーマ、ナノカーボン受動モード同期レーザによる超短パルス発生については、散逸モード同期光ファイバレーザによる高パルスエネルギー化を進めるとともに、波長 1 $\mu\text{m}$  帯および 2 $\mu\text{m}$  帯での動作も実現する。また、これらのレーザをシードとした広帯域スーパーコンティニウム(SC)光による SD-OCT システムを完成させ、生体試料などの観察を行う。

さらに、医療分野の共同研究者とともに、これらの SS/SD-OCT システムの耳鼻科・内科・眼科領域への応用を進めてゆく。

2. 研究の実施状況

第一のテーマについては、まず高速波長掃引と高コヒーレンスとの両立を図るためのパラメータの最適化を進めた。分散と変調だけでなく非線形性を取り入れた分散チューニングレーザの正確なモデルを初めて提案し、そのモデルを元にシミュレーションを行ない、パラメータの最適化を進めた。シミュレーションの結果、共振器長を短くし、さらに正弦波変調の代わりに外部変調器でパルス変調を利用して異常分散領域で変調周波数を下げていく方向に波長掃引を行うことにより、80kHz 以上の波長掃引レートで 5mm 以上のコヒーレンス長（瞬時線幅 0.5nm 以下）が得られることがわかった（図 1）。この結果を元に、短尺のチャープ光ファイバグレーティング（CFBG）を異常分散領域で用いてパルス変調を利用することにより、より広い掃引帯域が得られ、かつより深くまで SS-OCT 干渉信号が取れることを確認した（図 2）。波長 1 $\mu$ m 帯の分散チューニングレーザにも成功している。また、分散チューニングレーザを広帯域光源として SD-OCT に用いることにも成功している（図 3）。

第二のテーマについては、昨年度に開発した高強度短パルス8の字光ファイバレーザを用いた超広帯域（SC）光源を実現した。シミュレーションにより SC 光発生のための非線形光ファイバの最適化を図り、波長 1 $\mu$ m から 2 $\mu$ m 以上に広がった SC 光を得た。これを SD-OCT システムの光源とすることで、高分解能（約 4 $\mu$ m）な OCT 画像を取得できた（図 4）。波長 1 $\mu$ m および 2 $\mu$ m 帯のナノカーボン短パルス光源も実現している。

また、これらの OCT システムを利用した耳鼻科領域の医療分野の研究者との共同研究を進めた。生体モルモットの蝸牛内部構造を観察し、ある程度の蝸牛内構造の描出が可能であることが判明した（図 5）。非侵襲的に蝸牛内を観察できる可能性を示すもので、臨床応用が期待できる。

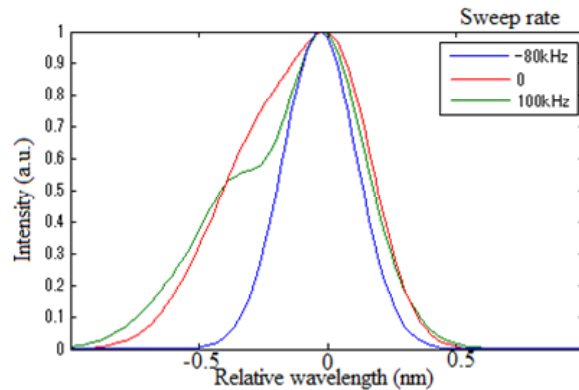


図 1 パルス (0.1ns) 変調分散チューニングレーザの瞬時スペクトルのシミュレーション結果

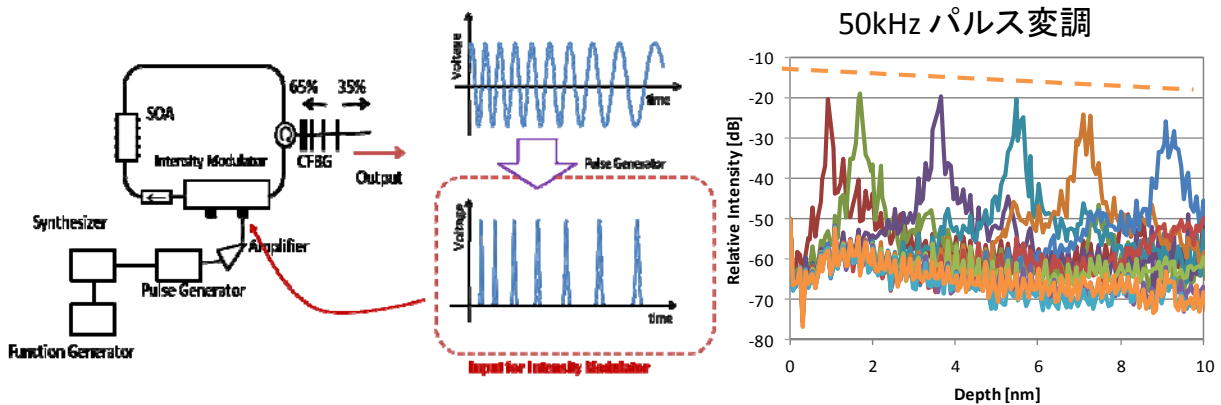


図 2 パルス (0.1ns) 変調分散チューニングレーザの実験系と SS-OCT 干渉信号スペクトル

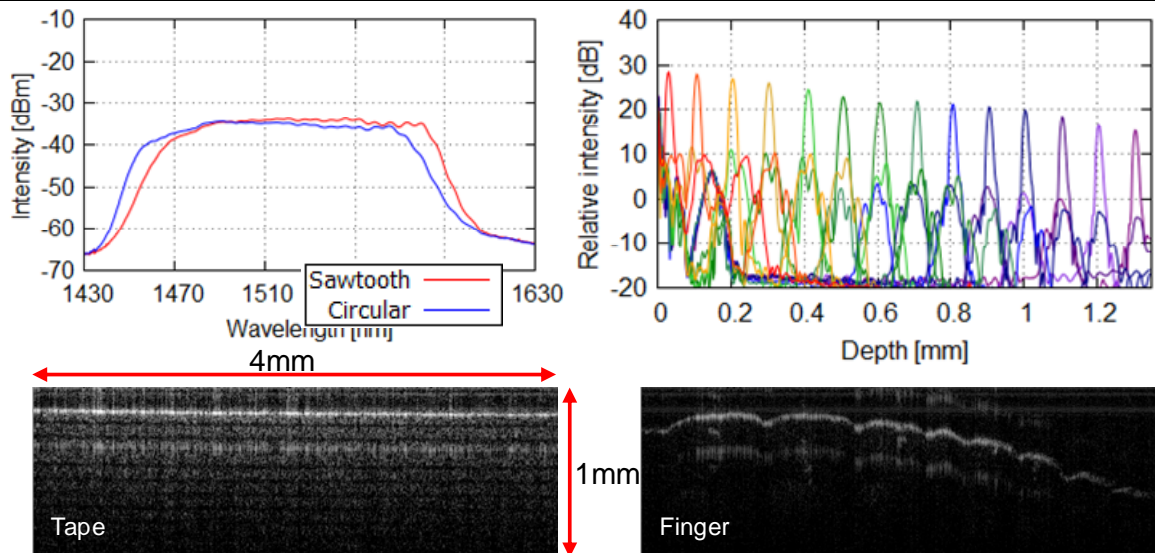


図3 分散チューニングレーザのSD-OCTへ応用した時の光スペクトル、干渉信号スペクトル、OCT画像

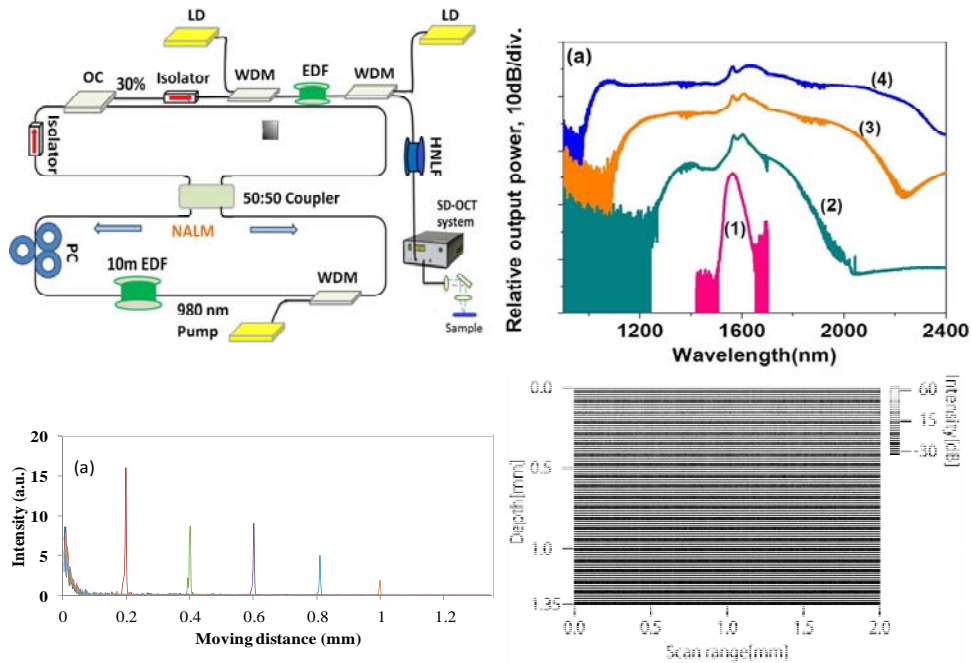


図4 短パルス8の字光ファイバレーザを用いたSC光源と光スペクトル、干渉信号スペクトル、OCT画像

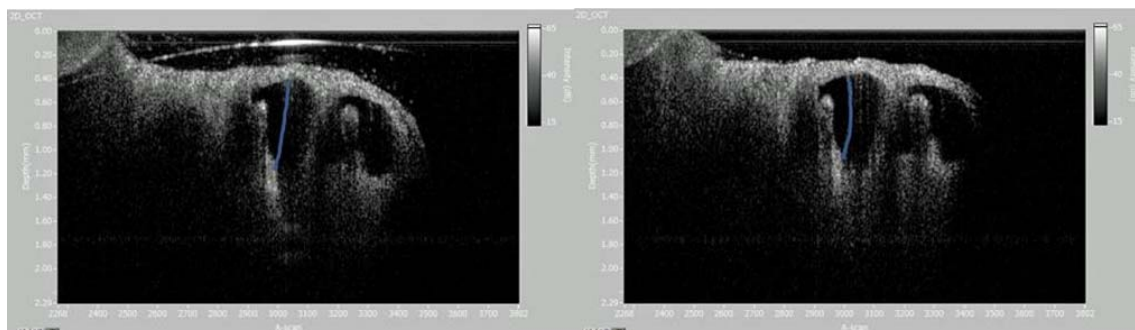


図5 抗利尿ホルモンV2作動薬投与前と投与後の蝸牛内部構造OCT画像

<p>雑誌論文 計 9 件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 5 件                  [1] L. Jin, A. Martinez, and S. Yamashita, "Optimization of output power in a fiber optical parametric oscillator," <i>Optics Express</i>, vol.21, no.19, pp.22617–22627, Sep. 2013.                  [2] A. Kakigi, Y. Takubo, N. Egami, A. Kashio, M. Ushio, T. Sakamoto, S. Yamashita, and T. Yamasoba, "Evaluation of the internal structure of normal and pathological guinea pig cochleae using optical coherence tomography," <i>Audiology and Neurotology</i>, vol.18, no.5, pp.335–343, Oct. 2013.                  [3] S. Yamashita, and Y. Takubo, "Wide and fast wavelength-swept fiber lasers based on dispersion tuning and their application to optical coherence tomography (invited)," <i>Photonic Sensors</i>, vol.3, no.4, pp.320–331, Dec. 2013.                  [4] B. Xu, A. Martinez, S. Y. Set, C. S. Goh, S. Yamashita, "A net normal dispersion all-fiber laser using a hybrid mode-locking mechanism," <i>Laser Physics Letters</i>, vol.11, no.2, Jan. 2014.                  [5] B. Xu, A. Martinez, S. Y. Set, C. S. Goh, S. Yamashita, "Polarization maintaining, nanotube-based mode-locked lasing from figure of eight fiber laser," <i>Photonics Technology Letters</i>, vol.26, no.2, Jan. 2014.</p> <p>(掲載済み一査読無し) 計 1 件                  [1] 山下真司, "グラフェンを用いた超短パルスファイバーレーザー," <i>光学</i>, vol.42, no.9, pp.446–452, Sept. 2013.</p> <p>(未掲載) 計 3 件                  [1] A. Martinez, B. Xu and S. Yamashita, "Nanotube based nonlinear fiber devices for fiber lasers (Invited)," <i>Journal of Selected Topics in Quantum Electronics</i>, to be published.                  [2] S. Yamashita, A. Martinez, and B. Xu, "Short pulse fiber lasers mode-locked by carbon nanotube and graphene (Invited)," <i>Optical Fiber Technology</i>, to be published.                  [3] 山下真司, "グラフェンの超短パルスファイバーレーザー応用," <i>レーザ研究</i>, 2014, 掲載予定</p>
<p>会議発表 計 29 件</p>	<p>専門家向け 計 26 件                  [1] Y. Wang, A. Martinez, and S. Yamashita, "High-pulse-energy all-normal, all-fiber passively mode-locked laser at 1.06 <math>\mu</math> m," <i>Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2013, San Jose, USA</i>, no.CW1M.7, 9–14 June 2013.                  [2] Y. Hasegawa and S. Yamashita, "Impact by fiber dispersion, nonlinearity, and saturable absorption in short-cavity mode-locked fiber lasers," <i>Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2013, San Jose, USA</i>, no. JTu4A.18, 9–14 June 2013.                  [3] Y. Takubo and S. Yamashita, "Dispersion-tuned wavelength-swept fiber laser using a reflective SOA and a grating pair for OCT application," <i>Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2013, San Jose, USA</i>, no.JTu4A.109, 9–14 June 2013.                  [4] L. Jin, and S. Yamashita, "Optimization of Multi-Watt Output Power in a Narrowband Fiber Optical Parametric Oscillator," <i>10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)</i>, Kyoto, Japan, no.TuA1-3, 30 June – 4 July 2013.                  [5] S. Yamashita, A. Martinez and B. Xu, "Carbon nanotube and graphene for short-pulse lasers and all-optical signal processing (invited)," <i>7th International Conference on Materials for Advanced Technologies, ICMAT 2013, Singapore</i>, 30 June – 5 July 2013.                  [6] S. Yamashita, A. Martinez and B. Xu, "Carbon nanotube and graphene for photonic applications (invited)," <i>SPIE-Active photonic materials V, San Diego, USA</i>, no.8808-25, 25–29 Aug. 2013.                  [7] B. Xu, A. Martinez, S.Y. Set, C. S. Goh, and S. Yamashita, "Turnkey, high power dissipative soliton all fiber laser using a hybrid modelocking mechanism," <i>Micro-optics Conference (MOC2013)</i>, Tokyo, Japan, no.G3, 27–30 Oct. 2013.                  [8] S. Yamashita, A. Martinez and B. Xu, "Nonlinear optical fiber devices using carbon nanotube and graphene for short-pulse fiber lasers (invited)," <i>International Optical Convergence Technology Conference (IOCTC 2013)</i>, Gwangju, Korea, 2 Oct., 2013.                  [9] 山下真司, "カーボンナノチューブ・グラフェンを用いた光ファイバレーザー(招待講演)," <i>レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会</i>, 大阪大学, 2013年4月19日.                  [10] Lei Jin, 山下真司, "2.4W output power from a fiber optical parametric oscillator by optimizing output coupling ratio," <i>電子情報通信学会 2013年ソサエティ大会</i>, 福岡工業大学, 福岡, no. C-4-5, 2013年9月17–20日.                  [11] 白畑卓磨, 山下真司, "分散チューニングを用いた 1 <math>\mu</math> m 帯高速・広帯域波長可変レーザー," <i>電子情報通</i></p>

	<p>信学会 2013 年ソサエティ大会, 福岡工業大学, 福岡, no. C-4-32, 2013 年 9 月 17-20 日.</p> <p>[12] 長谷川雄大, 山下真司, “分散チューニングレーザーの波長掃引によるスペクトル線幅広がり,” 電子情報通信学会 2013 年ソサエティ大会, 福岡工業大学, 福岡, no. C-4-33, 2013 年 9 月 17-20 日.</p> <p>[13] 永井宏和, 山下真司, “パルス変調による分散チューニングレーザーの狭線幅化,” 電子情報通信学会 2013 年ソサエティ大会, 福岡工業大学, 福岡, no. C-4-34, 2013 年 9 月 17-20 日.</p> <p>[14] 長谷川雄大, 山下真司, “分散チューニングレーザーの波長掃引による波長幅の広がり,” フォトニックセンシング最前線, 東京大学, no.P-04, 2013 年 9 月 30 日.</p> <p>[15] 田久保勇也, 山下真司, “分散チューニングファイバレーザにおける波長可変帯域とスペクトル線幅の定量的評価,” フォトニックセンシング最前線, 東京大学, no.P-05, 2013 年 9 月 30 日.</p> <p>[16] 永井宏和, 山下真司, “パルス変調を用いた分散チューニングレーザー,” フォトニックセンシング最前線, 東京大学, no.P-06, 2013 年 9 月 30 日.</p> <p>[17] 田久保勇也, 長谷川雄大, 永井宏和, 山下真司, “分散チューニングを用いた高速・広帯域波長可変ファイバレーザの高性能化,” レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会第 2 回公開研究会, 名古屋大学, 2013 年 11 月 22 日.</p> <p>[18] 柿木章伸, 田久保勇也, 江上直也, 坂本幸士, 山下真司, 山嵜達也, “Optical Coherence Tomography による蝸牛内部構造のリアルタイム観察,” 第 23 回日本耳科学会総会・学術講演会, 宮崎シーガイアコンベンションセンター, 宮崎, no.123, 2013 年 11 月 24-26 日.</p> <p>[19] 山下真司, “カーボンナノチューブ・グラフェンによる超短パルス光ファイバレーザ(招待講演),” 先端光量子科学アライアンスセミナー, 電気通信大学, 2013 年 11 月 29 日.</p> <p>[20] 山下真司, “光ファイバによる増幅と非線形性,” 日本光学会(応用物理学会)第 40 回冬期講習会「光ファイバ技術の最前線」, 東京大学, 2014 年 1 月 16-17 日.</p> <p>[21] 山下真司, “カーボンナノチューブ・グラフェンを用いたモード同期光ファイバーレーザー(招待講演),” レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場, 福岡, 2014 年 1 月 20-22 日.</p> <p>[22] Y. Wang and S. Yamashita, “Numerical studies on generation of high energy pulses in an all normal dispersion mode-locked fiber laser with and without a physical bandpass filter,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE), ネストホテル那覇, 沖縄, no.OPE2013-234, 2014 年 2 月 27-28 日.</p> <p>[23] 長谷川雄大, 山下真司, “分散チューニングレーザーの高速波長掃引時の動作解析,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE), ネストホテル那覇, 沖縄, no.OPE2013-235, 2014 年 2 月 27-28 日.</p> <p>[24] 永田翼, 徐博, 山下真司, “8 の字型モード同期光ファイバレーザ励起 SC 光源を用いた SD-OCT,” 電子情報通信学会 2014 年総合大会, 新潟大学, 新潟, no.B-13-20, 2014 年 3 月 18-21 日.</p> <p>[25] 長谷川雄大, 山下真司, “分散チューニングレーザーの波長掃引時の新しい計算手法,” 電子情報通信学会 2014 年総合大会, 新潟大学, 新潟, no.C-4-24, 2014 年 3 月 18-21 日.</p> <p>[26] 田久保勇也, 山下真司, “分散チューニング波長掃引ファイバレーザのスペクトラルドメイン OCT への応用,” 電子情報通信学会 2014 年総合大会, 新潟大学, 新潟, no.C-4-25, 2014 年 3 月 18-21 日.</p> <p>一般向け 計 3 件</p> <p>[1] 山下真司, “カーボンナノチューブ・グラフェンによる超短パルス光ファイバレーザ(招待講演),” 最先端の光・レーザー技術勉強会 2013 (ファイバーレーザーセミナー・レーザー応用セミナー), パシフィコ横浜, 2013 年 10 月 16,17 日.</p> <p>[2] 山下真司, “光ファイバで何ができるのか?,” マイクロオプティクス特別技術セミナー, 東京都立産業貿易センター浜松町館, 2013 年 11 月 26-28 日.</p> <p>[3] 山下真司, “超高速・超広帯域光ファイバ光源を用いたリアルタイム光断層計測とその医用応用,” 2013FIRST シンポジウム「科学技術が拓く 2030 年」ポスター展示, ベルサール新宿グランド, 東京, 2014 年 2 月 28 日・3 月 1 日.</p>
<p>図書 計 3 件</p>	<p>[1] S. Yamashita, Y. Saito, and J. H. Choi (ed.), “Carbon Nanotube and Graphene Photonics,” Woodhead Publishing, 総ページ数 398, 2013.</p> <p>[2] A. Martinez and S. Yamashita, “Carbon nanotube and graphene based fiber lasers,” (A chapter in the book “Carbon Nanotube and Graphene Photonics” edited by S. Yamashita, Y. Saito, and J. H. Choi), Woodhead Publishing, 総ページ数 398, pp.121-143, 2013.</p> <p>[3] 山下真司, “超短パルス光ファイバレーザのためのカーボンナノチューブ/グラフェン可飽和吸収素子の設計(「ナノ・マイクロスケール機械工学」中の一節),” 東京大学出版, 総ページ数 266, pp.208-213, Mar. 2014.</p>

様式19 別紙1

<p>産業財産権 出願・取得状 況  計0件</p>	<p>(取得済み) 計0件  (出願中) 計0件</p>
<p>Webページ (URL)</p>	<p>最先端・次世代研究開発支援プログラム「超高速・超広帯域光ファイバ光源を用いたリアルタイム光断層計測とその医用応用」 <a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/yamalab/oct/index.html">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/yamalab/oct/index.html</a></p>
<p>国民との科 学・技術対話 の実施状況</p>	<p>東京大学電気系学科研究室公開(2013年5月17日、対象:一般、参加者数:約300名)、東京大学五月祭「近未来体験 2013」(2013年5月18,19日、対象:一般、参加者数:約1,000名)において、光に関する講義やOCTのデモを行った。また、2013FIRST シンポジウム「科学技術が拓く2030年」(2014年2月28日・3月1日、対象:一般、参加者数:約200名)においてポスター展示を行なった。さらに、本プロジェクトのホームページを開設し、研究内容のわかりやすい解説と研究成果の継続的な発信に務めた。</p>
<p>新聞・一般雑 誌等掲載 計0件</p>	
<p>その他</p>	

4. その他特記事項

## 実施状況報告書(平成25年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されません

## 1. 助成金の受領状況(累計)

(単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の 累計)	③当該年度受 領額	④(=①-②- ③)未受領額	既返還額(前 年度迄の累 計)
直接経費	122,000,000	98,888,000	23,112,000	0	0
間接経費	36,600,000	29,666,400	6,933,600	0	0
合計	158,600,000	128,554,400	30,045,600	0	0

## 2. 当該年度の収支状況

(単位:円)

	①前年度未執 行額	②当該年度受 領額	③当該年度受 取利息等額 (未収利息を除 く)	④(=①+②+ ③)当該年度 合計収入	⑤当該年度執 行額	⑥(=④-⑤) 当該年度未執 行額	当該年度返還 額
直接経費	0	23,112,000	0	23,112,000	23,112,000	0	0
間接経費	29,666,400	6,933,600	0	36,600,000	36,600,000	0	0
合計	29,666,400	30,045,600	0	59,712,000	59,712,000	0	0

## 3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	9,633,397	BOA、光ファイバクリーバ、光ファイバパッチコード
旅費	2,651,426	研究成果発表旅費(CLEO、SPIE、ACP)等
謝金・人件費等	9,735,259	特任研究員及び事務補佐員人件費
その他	1,091,918	学会誌投稿料(Optics Express)、学会参加費等
直接経費計	23,112,000	
間接経費計	36,600,000	
合計	59,712,000	

## 4. 当該年度の主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能 等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関 名
特殊光ファイバ融 着接続機	FSM-100P+	1	4,935,000	4,935,000	2013/11/28	東京大学
電気パルスジェネ レーター	EPG-200B-0050	1	777,000	777,000	2013/12/18	東京大学
APE社製高性能ス キャンニングオートコ リレーター	Short pulseCheck- 50ps/PMT-IR	1	2,623,425	2,623,425	2014/2/18	東京大学