

プラスチック光ファイバーのインパルス応答波形および 周波数伝達関数測定における諸問題

橋爪 信郎*・齋藤 千晴*・清水 貴弘*
橋本 陽介*・前本 浩史*・仁田 直貴*・西田 晃*

(平成18年10月30日受理)

Some Problems Encountered in the Measurement of Impulse Response Waveform and Frequency Transfer Function of Plastic Optical Fiber

Nobuo HASHIZUME, Chiharu SAITO, Takahiro SHIMIZU,
Yousuke HASHIMOTO, Hiroshi MAEMOTO, Naoki NIDA and Akira NISHIDA

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

Various attempts to measure precisely impulse response waveforms and frequency transfer functions of a plastic optical fiber (POF) of 1mm in diameter and 0.5 in N.A. are reported in this paper.

The waveforms showed a remarkable difference when the POF end surface was placed at the glass window position of the hermetic container of the photodiode (PD) on one hand, and in contact with the semiconductor surface after breaking the glass on the other.

An optical oscilloscope (OOS) was tested. Output waveforms measured with the OOS showed insignificant differences from those measured with the PD with the POF end surface placed at the glass window position.

The waveforms measured with the PD changed their profiles as the POF length was varied: The peak of the pulse moved from the pulse rear to the front with increasing length. Waveforms theoretically calculated by using measured far-field patterns (FFPs) and non-scattering approximation could clearly explain the features of the measured waveforms.

Measurements of frequency transfer functions were carried out by using a newly designed 1:1 relay lens placed in front of the PD.

The measured transfer function was characterized by well-known large attenuation at the frequency equal to the reciprocal of the waveform width. The frequency transfer function measured with and without the relay lens especially showed a difference at the frequency mentioned above.

Key Words: plastic optical fiber, impulse response waveform, frequency, transfer function, far-field pattern, optical oscilloscope, relay lens

* 広島工業大学電子・光システム工学科

1. 本研究の背景・目的

プラスチック光ファイバー（POF：Plastic Optical Fiber）は、石英系ファイバーに較べてコア径が大きく、開口数（NA：Numerical Aperture）が大きいため光源との結合及びファイバー間の接続が容易である。また、耐環境特性が良く、曲げや衝撃に強く折れにくいので取り扱いが容易である。そのため、接続や分岐、曲げの多いオフィス内、家庭内、車載などの短距離伝送媒体として期待されている。近年、特に MOST（Media Oriented System Transport）や IEEE1394 などのマルチメディアネットワークシステムの導入が考えられる自動車 LAN 用配線材として注目されている。

本報告が対象にするステップインデックス型 POF（SI-POF）は 300 万近い大量の伝搬モードが存在する多モードファイバーである。伝搬モードが異なるとファイバー軸方向の光伝搬時間が異なる（モード分散がある）影響が主要因でパルス波形が劣化し、周波数特性が制限される。また、100m 以内の短い伝送距離ではモード結合やモード変換などの影響で、モード分布が入射条件に依存し、ファイバー長によって変化するためパルス波形、周波数帯域を予測することが難しい。したがって、POF を用いた短距離通信システムでは、モード分布の変化を考慮した設計が必要となる。

一方、インパルス応答波形、周波数伝達特性を正確に測定するためにはファイバーからの出射光を受光器にもれなく集光する必要がある。高 NA のプラスチック光ファイバーの場合、受光器にフォトダイオード（PD）を用いる限り市販の PD では受光角の制限などの問題のため、全光束を正確に捕捉することは難しい。

インパルス応答波形と周波数伝達特性は本来はフーリエ変換を通じて結びつくものである。しかしながら、上述のようにそれぞれの特性そのものの精密測定法が開発途上にあることを考えると、本報告の段階においては、それぞれの特性を個別に測定し、両者の関連を検討することは意味があると考えられる。

本報告はインパルス応答波形および周波数伝達関数を様々な条件で測定し、ファイバー内でのモードの移行や波形の変化を調べることで、インパルス応答波形および周波数伝達関数の精密測定に指針を与えることを目標としている。

2. 実験および検討

2.1 実験装置

実験装置の構成を図 1 に示す。測定対象の POF（三菱レイヨン SH4001）の直径は 1.0mm、NA は 0.5 である。

POF の入射端に入る光線は回転ステージを用いて POF 軸に対して傾斜させることができる。また、対物レンズの組合せを用いて入射端において平行光線にすることも、集光光線にすることもできる。

出射端に於ける出射光遠視野パターン（FFP）の測定は FFP 測定装置（浜松ホトニクス A3267-12/LEPAS-11）で行った。装置の最大計測角度は ± 45 度、許容ファイバーコア径は 1.5mm Φ 以内である。

光インパルスの発生にはピコ秒パルス発振器（浜松ホトニクス PLP-01）を用いた。パルス幅は 72ps である。他の測定機器の精度を考えるとインパルスとみなせる。波長は 647nm である。

インパルス応答波形の測定には a) アバランシェフォトダイオードモジュール（APD モジュール）とオシロスコープ（アジレント 54835A）の組合せ、あるいは b) 光オシロスコープ（OOS, 浜松ホトニクス C8188-03）を用いた。

周波数伝達特性の測定には高周波振幅変調半導体レーザー装置（旭データシステム ALP-7003CA/ALTH-103RS）、高周波ネットワークアナライザ（アジレント 8714ET）、APD モジュールを用いた。等倍リレーレンズを POF 出射端と APD モジュールの間に設置した。出射光のすべてを APD 受光面に導くためである。

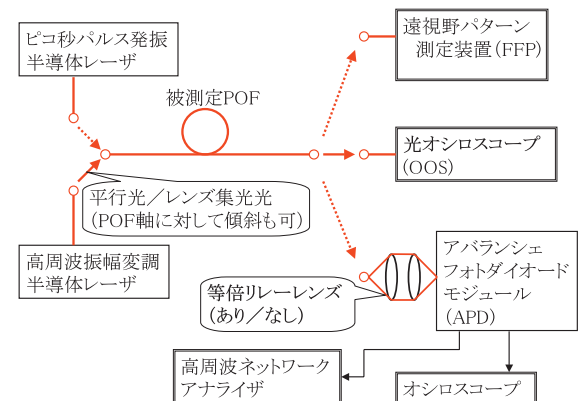


図1 実験装置の構成

2.2 FFP 測定と同一伝搬角 θ 上の平均化処理

実測した出射光遠視野パターン（FFP）は中心軸に対して非対称であり、中心軸は POF 軸とは必ずしも一致しない。主に POF 端面の平面度、垂直度によるものと思われる。本実験では以下の補正・平均化処理を行った。

中心軸の位置は原データを基にその分布の中心を視覚的に選んだ。平均化処理は伝搬角 θ と $\theta + \Delta\theta$ ($\Delta\theta = 1$ 度) にある光線数の総和を中心軸の周り一周分（回転角 $\Phi = 0 \sim 360$ 度）に亘り求め平均化した。なお縦軸は比較・検討しやすくするために、最大値を 1 とした。

2.3 POF 出射端面が APD 受光面から離れていることが 測定インパルス応答波形へ及ぼす影響

波形測定に用いた APD モジュール（浜松ホトニクス C5658）に内蔵されている APD（S2382）は図 2 に示すようにパッケージ（TO-18）に収納され、半導体受光面の前にガラス板と窒素が封入されたスペースがあり、直径 0.5mm の受光面はガラス窓表面から 0.9mm 離れている。したがって、POF をガラス窓に密着させたとしても出射光の一部は受光面で受け止められない。POF の NA は 0.5 であるから、出射角の最大値は 30 度である。特に 30 度に近い光線は小さい角度の光線より受光されない率が高い。出射角の大きい光線は POF 中の光路長が大きく、POF 通過時間が大きいのでインパルス波形の劣化に大きく影響を与える。出射角の大きい光線が受光面で受止め難くなると波形が正確に測定できない。

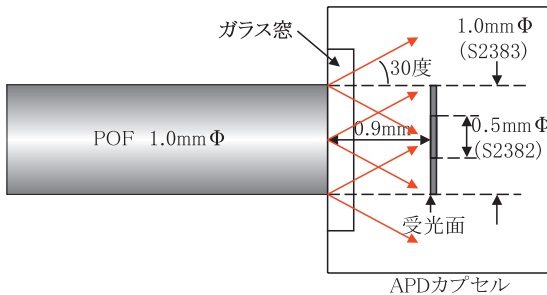


図2 POF 出射光と APD 受光面の関係

図 3 は POF 出射端面と APD 受光面の距離を変化させた時のインパルス応答波形の変化の様子を示す。POF 長は 10m、POF への入射光は NA0.65 の対物レンズで集光してある。測定はパッケージのガラス窓を除去し、POF 出射端面と APD 受光面の距離を任意に変化させた。両者を密着することもできる。図 3 から、POF 出射端面と APD 受光面の距離を大きくすると波形の左の主ピーク（小角度光線が寄与する）の割合が次第に大きくなる。受光器に入射する光線の角度分布がパルス波形に影響を及ぼしていることが明らかである。波形の正確な測定のためには出射端面と APD 受光面を密着させることが理想である。

2.4 APD モジュールと光オシロスコープの差

インパルス応答波形の測定を APD モジュールと光オシロスコープそれぞれを用いて行い比較検討した。APD モジュールの APD ガラス表面に POF 出射端面を密着させた。結果を図 4 に示す。前項の実験と同じく POF は長さ 10m、入射光は NA0.65 の対物レンズで集光してある。APD モジュールの立上り時間は 0.35ns、オシロスコープが 0.35ns、総合した立上り時間は 0.5ns である。

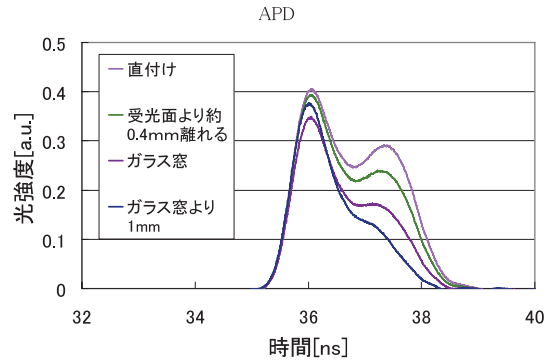


図3 POF 出射端面と APD 受光面の距離を変化させた時のインパルス応答波形の変化

OOS は受光面積が 1.0mm × 2.5mm、等倍りレーンズが設置されており、その NA が 0.65、レンズ径が 50mm という仕様である。立上り時間は 0.175ps である。OOS は NA0.5 の POF からの出射光をすべて受光することができるとメーカー仕様は謳っている。

図 4 に示す 2 つの波形の立上がり時間の違いは、APD と OOS が持つそれぞれの立上がり時間で説明できる。立下り部分には大きな差異が見られない。認められる小さな差異も、OOS がより広い角度の光を受止めることができるとしたときとは逆に現れている。このことから、OOS はベンダーが主張する“POF からの出射光の全てを受け取る”ということに疑問が生ずる。

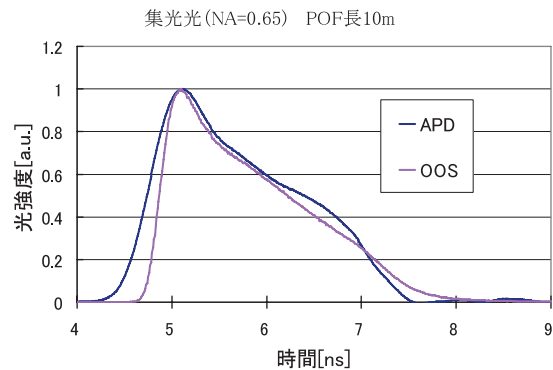


図4 APD と OOS によるインパルス応答観測波形のちがい（集光光入射）

次に、出射光 FFP の主成分を大角度にすることで APD と OOS との差異をより明確なものとするべく、平行光をファイバーに対し 25° 傾斜させて入射し、再度測定・比較した。結果を図 5 に示す。そのときの出射光 FFP を後出の図 7 の POF 長 10m の特性で示す。25 度付近に分布が集中している。図 5 においても、波形の立上がりには光電変換機の機種による差異が認められるものの、立下りには大きな差異がないことが見て取れる。よって APD と OOS とでは、受光している角度分布に大きな差はないと考えられる。

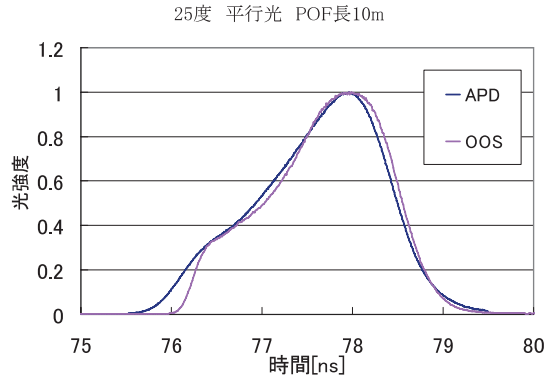


図5 APD と OOS によるインパルス応答観測波形のちがい（斜め平行光入射）

2.5 インパルス応答波形と POF 長、出射光 FFP の関連

POF 長を変えるとインパルス応答は遅延時間のみならず波形も大きく変化する。パルス波形は POF の最大通信容量と密接に関連する。パルス波形の変化は POF 中の光の伝搬角分布（モード分布）の変化によってもたらされる。それ故に POF 長を変化させたときのインパルス応答波形と FFP の変化について検討した。

受光方法としては POF 出射端面を APD のガラス面の位置に置く方法で行った。APD 受光面に密着させるという理想的条件ではないが、この方法でも定性的な結果は得られる。入射光をファイバー軸に対し 25° 傾斜させた平行光とし、POF 長をカットバック方式で 60 m・40 m・20 m・10 m と変化させたときのインパルス応答波形を図 6 に示す。

POF に入射されたインパルス光は、単一モード（伝搬角）で POF 中のモード結合・モード変換がないと仮定すれば、出射時にもインパルス光のままのはずである。しかし実際には図 6 に示すように、出射パルスは幅を持つ。POF 長が増えるにしたがって、最初パルス前半にあったピークが、しだいに後半に移動する複雑な変化を示した。比較し易いように図のパルス立上り時刻は揃えてある。

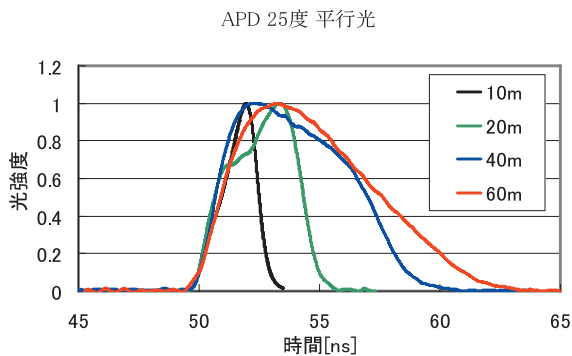


図6 POF 長の変化によるインパルス応答波形の変化

図 7 はそれぞれの条件での出射光 FFP である。POF 長 10 m では 25° の光成分の強度が大きく他の角度では小さいことが分かる。これは入射光の“ファイバーに対し 25° の平行光”という特徴が強く現れているためである。しかし、20 m, 40 m, 60 m と POF 長が大きくなるにつれ、25° 以外の浅い角度の光が増えてきて、インパルス応答もダブルピークの状態へと変化している。この原因として POF 内での光散乱（モード結合・モード変換）が考えられる。POF 長が大きくなると、それだけ内部での散乱の影響も大きくなり、入射時に信号が持っていた特性が失われてしまう。たとえば 20 m の FFP には光強度のピークが 25° という特徴がまだ見られるものの、それよりも浅い角度の光強度が 10 m のときに比べ上がってきている。パルス波形としては時間的に早い部分の強度が上がり、パルス幅が広がりダブルピークの形になっている。40 m になると FFP のピークは 10° 付近の浅い角度にシフトしており、25° 付近ではわずかに強くなっているだけである。インパルス応答波形もピークは時間的に早い部分にあり、後方に小さな 2 つ目のピークとしてしか入射光の特徴が現れておらず、パルス幅も大きくなっている。60 m になると FFP においてもインパルス応答においても入射光の特徴を確認することはできず、パルス幅は 40 m よりもさらに大きくなっている。

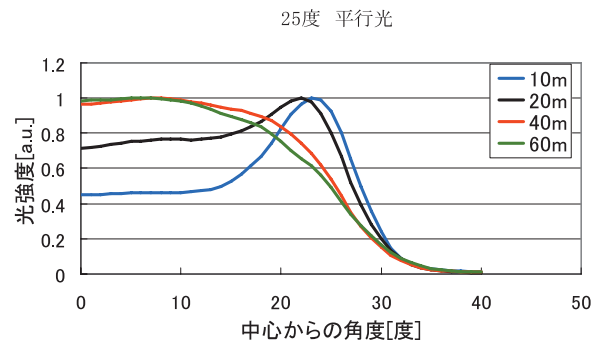


図7 POF 長の変化による FFP の変化

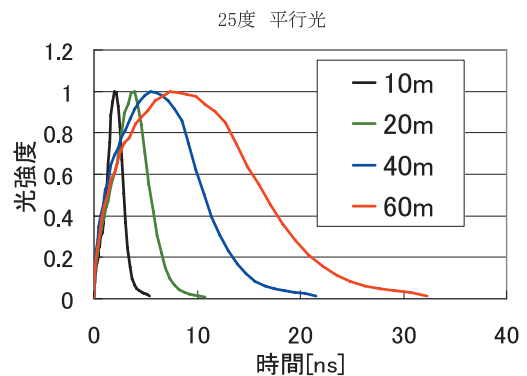


図8 出射光 FFP から計算した理論波形

図8は出射光 FFP の角度分布がPOF 中で入射端から変化しないで続いたと単純化して考えた理論波形である。現実には光散乱でPOF 中の角度分布は変化する。しかしながら図8の波形は図6の実測波形の特徴をよく表していることがみてとれる。

2.6 周波数特性測定用の等倍リレーレンズ

周波数特性測定に使用したAPD モジュール（浜松ホトニクス C5658-SPL-S2383, 受光面 1.0mmΦ のAPD (S2383) を内蔵）は図2から明らかなように、受光面が1mmΦであっても出射光をすべて受止めることができない。周波数特性を正確に測定するためには、パルス波形測定と同様、POF 出射端からの出射光を受光器ですべて捕捉する必要がある。APD モジュールの遮断周波数 f_c は600MHz である。

図9に示す等倍リレーレンズを設計し用いた。リレーレンズは顕微鏡用集光レンズ（ニコン C-C アクロマートコンデンサ, w.d.1.0mm, NA0.8, 瞳径 27.2mm, 4 枚組レンズ）を2組、背中合わせに、互いの後方焦点の位置が一致するように設置した。図から明らかなように、POF 出射端の外周から出射する光線でもレンズのNA 中にある。POF 出射光のFFP と等倍リレーレンズを通過後のFFP を比較するとほぼ同じであり、等倍リレーレンズが設計どおりに作動していることが確認できた。

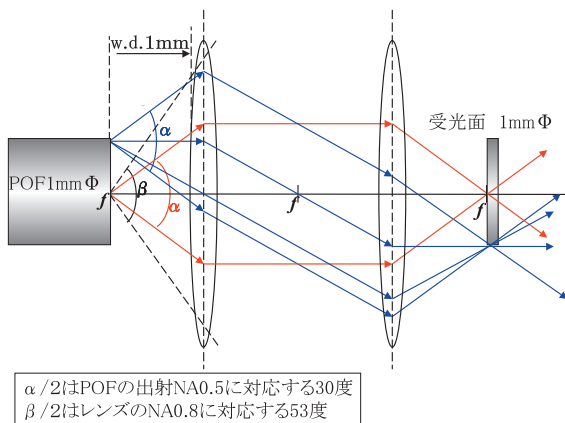


図9 周波数特性測定に使用した等倍リレーレンズ

2.7 POF 入射条件が周波数特性に及ぼす影響

理論的には、周波数特性はインパルス応答波形をフーリエ変換して得られる。a) 均一モード分布 (UMD) 入射, b) POF 中のモード結合, モード変換がない, c) POF が十分短い という仮定のもとでは、伝達関数の周波数特性は良く知られている特性, sinc 関数の自乗特性になる。おなじく, δ 型モード分布入射（平行光入射）を仮定すれば、周波数に依存しないフラットな特性を示すはずである。

図10に実測した周波数特性を示す。図はNA0.55のレ

ンズで集光した入射光と、0度から30度までの4つの角度それぞれで入射させた平行光に対する周波数特性である。POF 長は20m である。図中、“あり”、“なし”は等倍リレーレンズのあり、なしに対応する。集光光に対する周波数特性は減衰量、カーブの特徴いずれをとっても平行光10度の特性と20度の特性の間にあることが分かる。

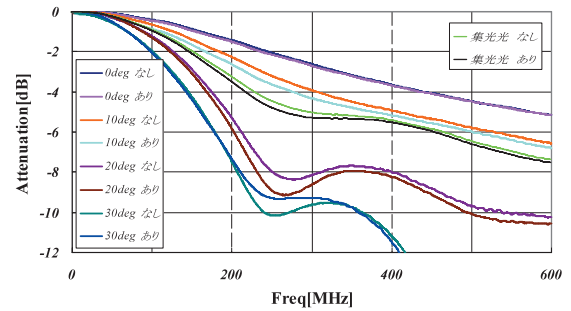


図10 POF 周波数特性の入射条件依存性

2.8 POF 長が周波数特性に及ぼす影響、および周波数特性とインパルス応答波形の関連

POF 長を変化させて周波数特性とインパルス応答波形をそれぞれ測定した。POF には20度平行光線を入射した。それぞれの結果を図11 および図12に示す。図から分かるように、POF が長くなると周波数特性の減衰量が増える。パルス幅が広がるのに対応している。また、周波数減衰量極大に対応する基本周波数 f は $f = 1/T$ の関係を満足する。 T はパルス幅である。

$$\begin{aligned} 10 \text{ m} &\rightarrow 500 \text{ MHz} \rightarrow 1/f = 2 \text{ ns} \\ 20 \text{ m} &\rightarrow 260 \text{ MHz} \rightarrow 1/f = 3.8 \text{ ns} \end{aligned}$$

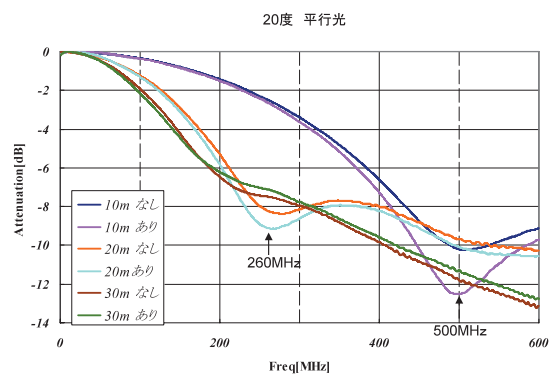


図11 POF 周波数特性の POF 長依存性

等倍リレーレンズがあるときは基本周波数近辺で sinc 関数の特徴である伝達関数の落込みがより明確にでている。

高次モードの光をよりよく集光することができるのでパルスの後縁付近でパルス振幅が増加するためであると考え

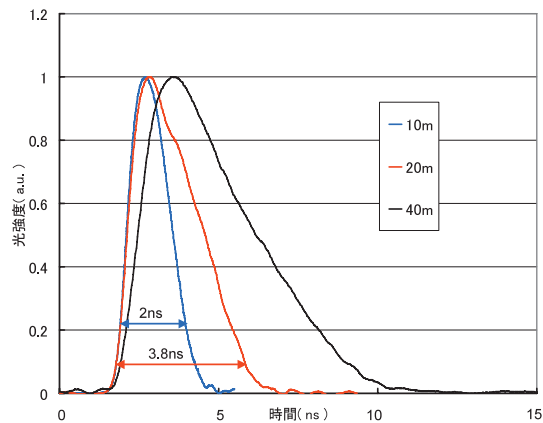


図 12 インパルス応答波形のパルス幅 T (図 11 の基本周波数 f と $f=1/T$ の関係にある)

られる。

3. 今後の課題

POF 中を伝搬する光のうち大角度成分はインパルス応答波形、周波数伝達関数に大きな影響を与えることが明らかになった。今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- ・インパルス応答波形と周波数特性とを同じ条件で測定することで、両者を対応させて検討する。
- ・応答波形に関する理論を精緻化し、波形変化、FFP 変

化とモード結合・モード変換の相互の関係を定量的に明らかにする。

- ・観測インパルス応答波形が APD か OOS かによってあまり差がないのは測定器の問題か、そもそも光パルス波形そのものにあまり差がないのか明確にする。
- ・オシロスコープ、光オシロスコープの FFT 機能を使ってインパルス応答波形から理論的周波数特性を算出し、実測周波数特性と比較・検討する。

謝 辞

本研究の一部は平成 17 年度および平成 18 年度私立大学等経常費補助金「私立大学教育研究高度化推進特別補助」(教育・学習方法等改善支援経費)“光情報技術の体験・対話型教育研究支援”のもとで行われたものであることを記して、それを可能にするに当ってご理解を賜り多大のご支援をいただいた関係の皆様に深謝いたします。

参 考 文 献

- 仁田・他, 応用物理学関係連合講演会, 24p-Y-11, p.1273, 2006
- 齋藤・他, 平成 18 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, pp.375-376, 2006