

可視光通信技術の実用性向上に関する研究

村田政隆、高瀬麻以*、遠藤英明*、前多良則**、鈴木昭二***、
菅原智明、松村一弘、宮原則行

Research on the Improvement in Practicality of Visible-Light-Communications Technology

Masataka Murata, Mai Takase*, Hideaki Endo*, Yoshinori Maeda**, Suzuki Sho'ji***,
Tomoaki Sugawara, Kazuhiro Matsumura and Noriyuki Miyahara

要 旨

近年、長寿命・省エネという理由で照明利用が普及している LED は、人が感じられないほど高速で点灯・点滅制御が容易にできる素子であることから、10 年程前より無線方式の可視光通信分野での利用技術開発も進められてきた。しかし、一般的には複数個の LED を使用したり、商用電源から LED の電力を供給したりするシステムが多く、小型で低消費電力の LED 通信技術の開発事例は少ない。筆者らは、海中で計測制御機器間の無線通信を安価で容易に実現すべく、水中可視光通信技術の開発を行ってきた。これまで、蛍光灯下であっても、一つの LED と一つのフォトダイオードの組合せで、淡水中において 1[m] 程度の通信には成功したが、光軸一致という制約条件があり、実用性に欠けていた。そこで、受光用機器の広範囲化に関する実験的検証を行った結果、受光角を最大 80[deg.] 程度まで広げられる可能性があることがわかった。

1. はじめに

水産・海洋分野の計測・制御技術では、有線手段が用いられるのが一般的である。しかし、水の流れがある環境では、この有線が外乱と成り得るため、リアルタイムで計測や制御を可能とする、安価な無線化技術が求められている。陸上での無線化には電波を利用できるが、電波は水中での減衰が激しい。免許不要の微弱電波等を用いた場合、淡水中での効果的な無線計測事例¹⁾はあるものの通信距離は短く、海水中に至っては、ほぼ通信不可能となる²⁾。例えば、通信距離の向上を図るため、

電波強度を高めた場合、機器の製造や取り扱いに許可や免許が必要となることから、汎用技術としての普及は見込めない。

これまで、海水中での免許を必要としない無線化技術として、LED による光通信技術に着目してきた。近年の光通信技術は、照明等に使用されている LED 光に通信機能を具備した照明分野³⁾をはじめ、高度交通システム (ITS)⁴⁾、海洋分野^{5,6)}等での通信分野で応用技術開発が進んでいるが、海水中での利用例はほとんどない。

そこで、海水中での使用を目指し、これまで試

* 東京海洋大学

** 株式会社コムテック 2000

*** 公立はこだて未来大学

作してきた可視光通信機器⁷⁾を用い、実用性向上に関し、実験的検証を行った。

2. 試作機の通信条件

2.1 試作機の概要

これまで、魚類の生体情報の取得や、構造物の小型スケールモデル実験での利用を目的に、小型の光通信機器を試作してきた。この試作機では、水による減衰が小さい可視光域を用い、低消費電力の観点から、低電圧で効率的に発光する赤色LEDを採用している。本試作機の構成を図1に、外観を図2に、主仕様を表1に示す。

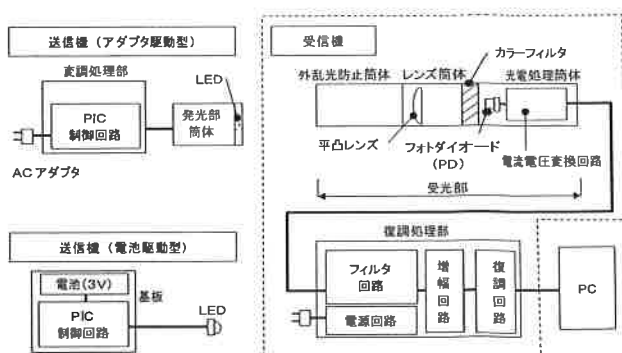


図1 試作機の構成

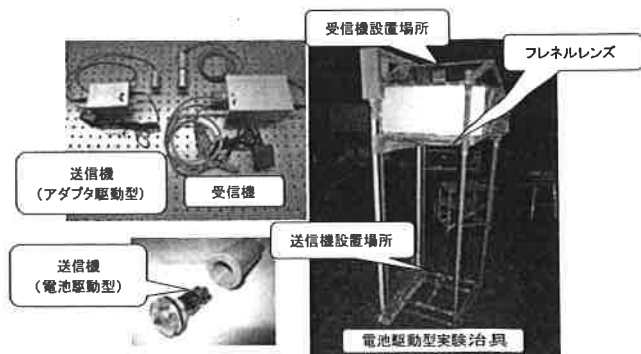


図2 送受信機および電池駆動型実験治具

表1 試作機主仕様

送信機	【LED】	Kingbright社	受信機（受光部）	【フォトダイオード（PD）】	浜松ホトニクス社
	メーカ	L934SRD-G		メーカ	S5973-02
	サイズ [mm]	φ3.2 × 4.6		サイズ [mm]	φ5.4 × 3.75
	ピーク波長 [nm]	660		受光面サイズ [mm]	φ0.4
受信機	輝度 [mcd]	500 @IF = 20mA	受信機（受光部）	受光面積 [m ²]	0.12
	指向角 [deg.]	60		最大感度波長 [nm]	760
	【アダプタ駆動型】			受光感度 [A/W]	0.3 @ λ = 660nm
	LED駆動電流 [mA]	35	受信機（受光部）	【平凸レンズ】	
電池駆動型	通信距離 [m]	1		直径/有効径 [mm]	20.00 / 19.00
	LED駆動電流 [mA]	7		焦点距離 [mm]	25.00
	通信距離 [m]	1		【カラーフィルタ】	
実験治具搭載時	（実験治具搭載時）		通信	直径/有効径 [mm]	24 / 18.5
	基板サイズ [mm]	1.6 × 2.5		カットオン波長 [nm]	600 (LongPass)
	使用電池	CR1220 (3V)		通信速度 [bps]	2.4k
				変調周波数 [Hz]	約 38k

送信機は、LEDに安定した電流を供給することを目的としたアダプタ駆動型と、無線化の実用性を考慮した電池駆動型の2種類を試作し、それぞれLEDは1個だけ使用することで低消費電力化を図っている。受光部には、外乱光の低減を図った外乱光防止筒体、LED光の収束を目的に平凸レンズを設置したレンズ筒体、LEDの波長の近傍の光のみを通過させるカラーフィルタ、そして、フォトダイオード（以下、PD）と電流電圧変換回路を搭載した光電処理筒体による構成とした。LED、PD共に1個ずつを使用した送受信機であっても、光軸がほぼ一致した条件では、どちらも空气中で1[m]程度の通信可能距離であることは確認している。ただし、電池駆動型では、集光効率を高める目的で、直径が317.5[mm]、焦点距離が約213[mm]のフレネルレンズを固定した実験治具を用いており、この治具を使用すれば、1[m]離れた水中通信も可能であった。

本試作機は、低消費電力化や、使用上無視できない蛍光灯や日光等の外乱光がある中で、どの程度まで通信距離を延伸化できるかを検討するために設計・試作を行い、通信距離1[m]を実現した。ただし、光は距離の二乗に反比例して減衰するため、光軸一致が通信の主な必要条件となる。光軸一致は極めて自由度の低い使用条件であるため、これまで実用的通信技術の確立には至っていない。

そこで、まずはこの試作機の通信条件を明らかにし、次に通信エリアの広範囲化につながる技術改善について、実験的検証を行うこととした。

2.2 現状の実力値の評価

現状において、試作機の実力値を評価するため、光環境の再現性が高い無窓室で実施した、通信確認実験の概要を図3に示す。

本実験では、光学ベンチとX軸ステージを用い、光軸方向の距離L[mm]と光軸のズレd[mm]による受光強度と通信状態の確認を試みた。まず、初期状態(L=0,d=0)を調整し、L=0～900[mm]、d=0～10[mm]について、オシロスコープにより信号振幅電圧A[mV]を測定した。なお、通信状態は、1秒毎に送信する文字列を10回連続で正常に受信した場合を、通信可能な状態と定めた。

光軸のズレdの条件ごとに、光軸方向の距離Lに対する信号振幅電圧Aの変化について、波形

例を図4に示し、全ての測定値をまとめた結果を図5に示す。

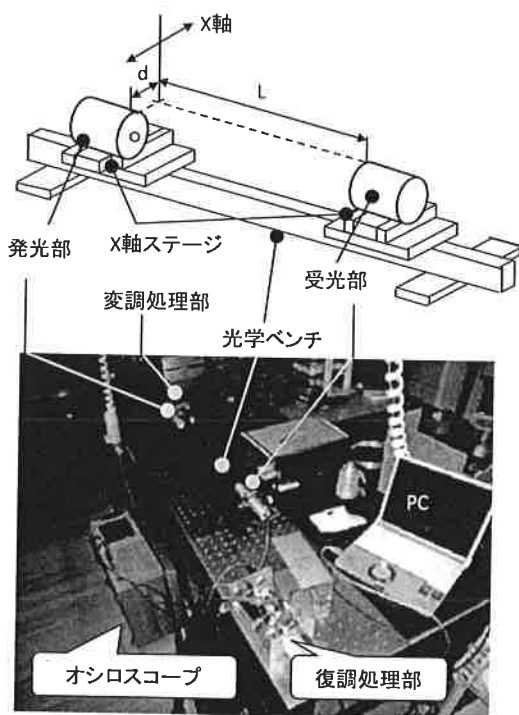


図3 通信確認実験の概要

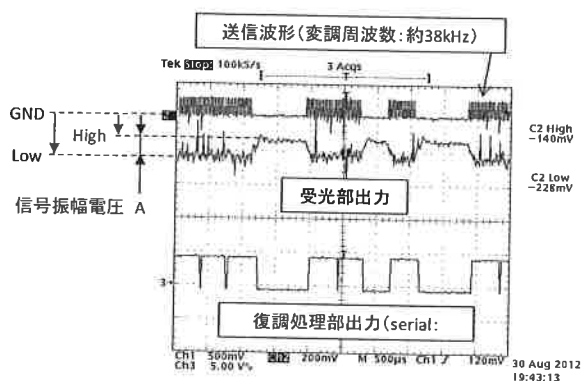


図4 観測波形例 (L=570mm: 通信限界距離, d=0mm)

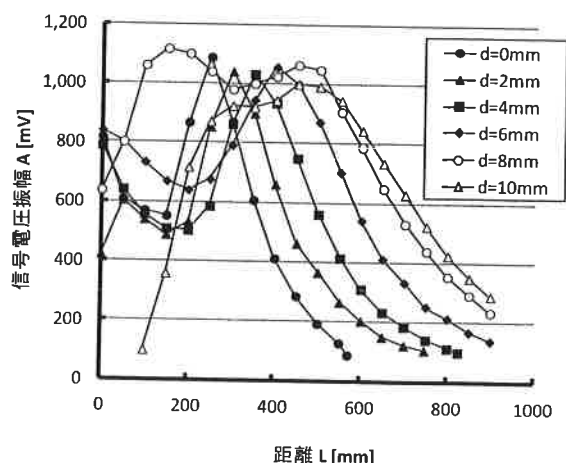


図5 距離Lに対する信号振幅電圧Aの変化

本実験では、 $A=100[\text{mV}]$ 以上であれば、正常に通信できることがわかった。また、測定結果に極大値が観測され、LEDやPDが傾いて固定されていたことが予想された。そこで、測定値からこの傾きについて検討した結果、筒体軸に対し、光軸が約 $1.8[\text{deg}]$ 傾いていると予測された。組立の状態に置き換えると、LEDやPDを約 $0.1[\text{mm}]$ の段差に固定した場合に相当し、組立誤差が反映された結果と思われる。また、アルミ製の筒体は表面処理していたため、極大値の発生は反射光が影響した可能性も考えられる。

本実験においては、 $d=10[\text{mm}]$ 、 $L=900[\text{mm}]$ において、 A は $200[\text{mV}]$ 以上であり、通信限界の $100[\text{mV}]$ までには余裕がある。各測定値において、極大以降の減衰状況について、距離の逆二乗に対する A の変化を最大値で正規化してまとめた結果、図6に示すように比例することを確認した。よって、本試作機の最大通信距離は $1,100[\text{mm}]$ 程度と推定できた。

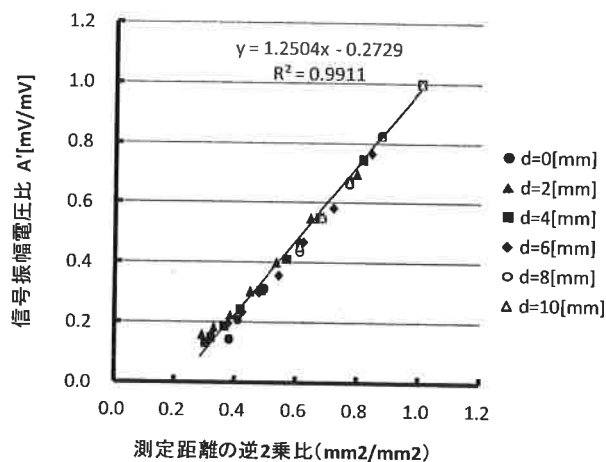


図6 距離による信号振幅電圧の減衰

当初、平凸レンズは、LED光を安易な方法で収束させることを目的に、便宜上LEDから受光する光は平行光であるとの前提で用い、PDを平凸レンズの焦点距離の位置に固定した。その結果、通信距離の延伸効果は明らかに認められたが、実際のLED光はコリメートしておらず、指向角 $60[\text{deg}]$ をもつ。そこで、実際の光の収束状況を実験的に確認した。

はじめに、発光部と受光部および光学系の位置関係を図7に示す。

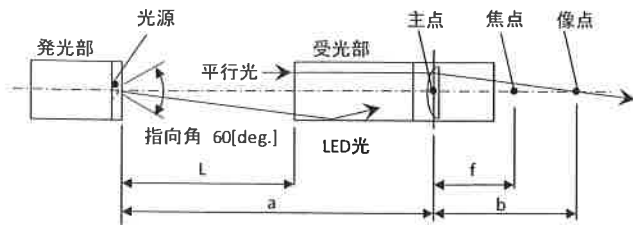


図7 発光部・受光部・光学系の位置関係

受光部に固定した平凸レンズの主点（レンズと光軸の交点）と光源（発光部）の距離を a 、主点と像点（レンズによって光が収束する点）の距離を b 、焦点距離を f とした場合以下の式が成り立つ。

$$1/a + 1/b = 1/f \quad (\text{レンズの公式})$$

そこで、LEDの光が収束する様子をデジタルカメラで撮影して、画像から像点の位置を求め、レンズの公式にあてはめてまとめた結果を図8に示す。

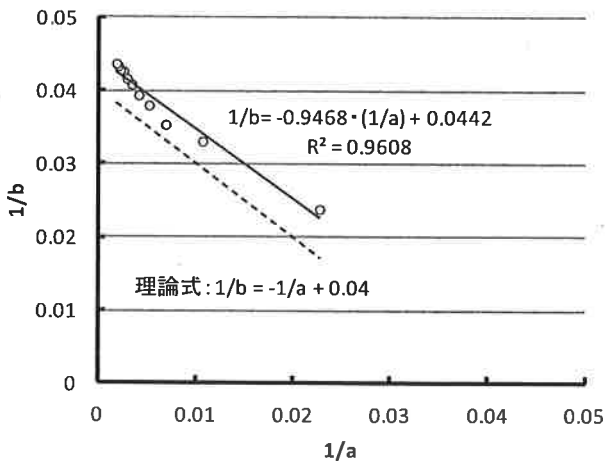


図8 光学系の確認実験結果

平行光の場合、測定値は、図8に示す理論式にほぼ一致するはずである。しかし、測定値の近似直線式切片の逆数が示す焦点距離は、22.6[mm]と算出されたため、本試作機において、PD固定位置を変更すれば、今まで以上に感度を高められる可能性があることがわかった。

3. 通信範囲の広範囲化改善

これまで、光軸方向の通信距離の延伸化を図ることを考えてきたが、実用的には、ある程度の入射角を持っていても通信を確立できなければならない。そこで、通信範囲の広範囲化を図った実験を行った。

3.1 複合放物面型集光器 (CPC)

光を効率よく集光する目的で使用した、複合放物面集光器 (Compound Parabolic Concentrator: 以下、CPC) の概要を図9に示す。

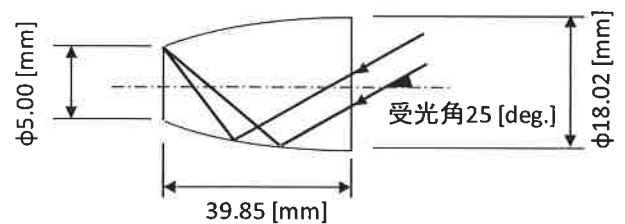


図9 複合放物面型集光器 (CPC)

本実験では、EdmundOptics社のCPC（型式：NT65-442）を使用した。受光角25[deg.]の光はCPC内で反射して、出射側口径に収束する仕様であり、結像を考慮せず集光効率を高める光学部品である。受光角が0に近づくほど、出口中心に収束していく。現在、CPCは、太陽光発電システム等において、高効率変換パネルで商用化利用されることが多く⁸⁾、平行光を集光して熱利用する技術開発^{9),10)}にも有益な部品ある。本実験では、受光部をカラーフィルタ、CPC、光電処理筒体の順で構成し、従来に比べ、どの程度受光強度が高くなるかの比較実験を行った。実験の概略図を図10に示す。

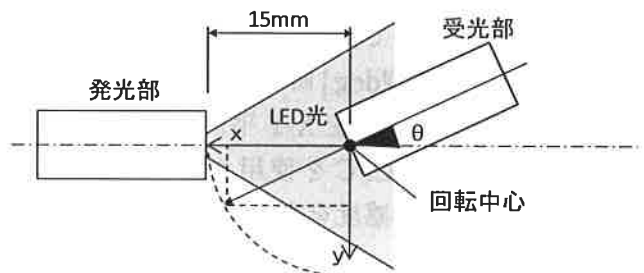


図10 角度範囲確認の実験概略図

本実験では、最も受光強度が強い角度を確認し、これを初期状態 0[deg.] を定めた。その後、2[deg.] ステップで、正常通信条件の信号振幅電圧 A が、100[mV] 以上を満たす角度まで調べた。従来の CPC なしの信号振幅電圧を A 、CPC ありの信号振幅電圧を A' とした場合、CPC の効果がれば、PD の受光量は増加し、信号振幅電圧 A' は A よりも増加することが期待できる。そこで、角度ごとにどの程度の増幅効果があるのかを増幅率 A'/A として、 $\theta = 0[\text{deg.}]$ 、CPC なしの基準状態に対してどの程度の増幅効果があるのかを相対感度 α としてそれぞれ求め、まとめた結果を表 2 に示す。

全ての角度において、増幅率が高くなったとはいえないが、0～10[deg.] の範囲では飛躍的に増幅率が高まっていた。0[deg.] で観測した CPC 取り付け時の信号振幅電圧は、増幅回路で飽和していると思われる、実際には 12.0 倍以上の光量を受光していると思われる。

表 2 角度範囲確認の実験結果

角度 θ [deg.]	CPCなし		CPCあり		
	信号振幅電圧 A [mV]	相対感度 α_1 $A / 974$	信号振幅電圧 A' [mV]	増幅率 A' / A	相対感度 α_2 $A' / 974$
0	974.0	1.00	11,686.0	12.00	12.00
2	820.8	0.84	7,764.0	9.46	7.97
4	654.4	0.67	5,796.0	8.86	5.95
6	620.8	0.64	2,500.0	4.03	2.57
8	585.6	0.60	1,766.0	3.02	1.81
10	526.8	0.54	2,647.2	5.03	2.72
12	499.2	0.51	814.4	1.63	0.84
14	452.8	0.46	425.6	0.94	0.44
16	422.4	0.43	371.2	0.88	0.38
18	396.8	0.41	352.0	0.89	0.36
20	369.6	0.38	485.6	1.31	0.50
22	358.4	0.37	563.2	1.57	0.58
24	369.6	0.38	419.2	1.13	0.43
26	313.6	0.32	337.6	1.08	0.35
28	286.4	0.29	209.6	0.73	0.22
30	126.8	0.13	152.0	1.20	0.16
32	—	—	134.4	—	—

※ α は、条件 $\theta = 0[\text{deg.}]$ CPC なし時の測定値 974.0[mV] に対する増幅率を示す

本実験結果について、視覚的イメージで捉えるため、CPC なしの 0[deg.] 時の振幅電圧を 1 として正規化し、受光強度を X-Y 平面にまとめた結果を図 11 に示す。CPC を使用すれば、10[deg.] 程度の範囲で比較的感受度を高められることが容易に想像できる。

CPC の受光角である 25[deg.] の状態では、出口面の ϕ 5.00[mm] の円周部に光が収束する。本実験では、CPC と PD の間には光学部品がなく、

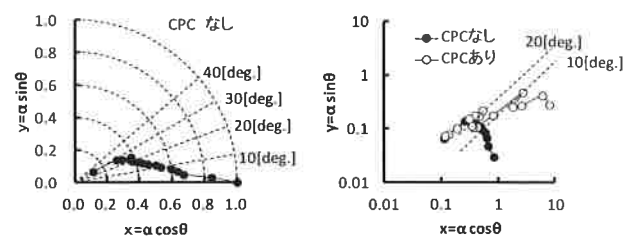


図 11 角度方向の受光強度と CPC 有無の比較

出口面中心部に固定した受光面 ϕ 0.4[mm] の PD の受光量は少ない。ゆえに、出口面円周上から放出される光を中心部に収束させる機構を設置すれば、CPC の仕様上の受光角まで、感度を高めることも可能であると考ええる。

以上より、本実験では、10[deg.] までの広範囲化を図れることを確認でき、光学改善により 25[deg.] までの広範囲化の可能性があることがわかった。

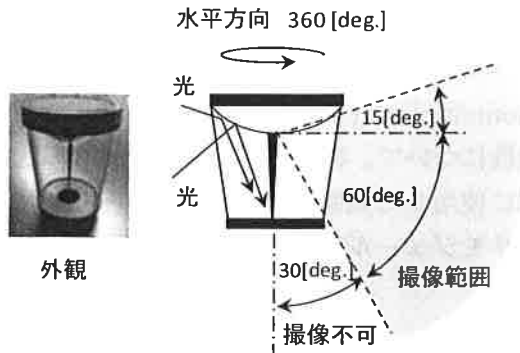
3.2 全方位ミラー

CPC を用いた受光器は、固定方法によって、かなり有効に利用できると思われるが、例えば、送信機を取り付けた魚と通信するような場合には、魚が受光角の死角に移動すると通信不可能になる。よって、より通信範囲の広範囲化を図る目的で、全方位ミラーを使用した実験を行った。

全方位ミラーは、全方位センサとも呼ばれ、図 12 に示すように水平方向には 360[deg.]、水平面に対しては約 75[deg.] の撮像範囲を持つ。広角カメラの撮影範囲のさらに外側にあるエリアまで撮影できるため、CCD カメラ等と組み合わせて、防犯やロボット技術、水中環境観測 11) に利用され始めている。この全方位ミラーを用いて、通信利用に関する実験的検証を行った。

本実験では、表 1 に示す従来受光部と同じ平凸レンズを固定した、全方位ミラーのマウントに適合するアダプタを試作し、レンズの焦点距離に PD を固定した。しかし、発光部を全方位センサに接触させるほど接近させ、室内を暗室状態として、図 13 に示すように LED 光が確認できる状態を作り出したのだが、信号振幅電圧が全く確認できなかった。

本実験の結果より、この構成では、集光要素がないため、LED 側で光を収束させることが、実現可能性が近い改善策であると考ええる。



主仕様

メーカー	ヴイストン社
型式	VS-C450MR
ミラー径	φ45 [mm]
撮像範囲	水平面に対し、上方約15 [deg.] 水平面に対し、下方約60 [deg.]
マウント	M37 × P0.75
寸法	φ59 × 71H [mm]

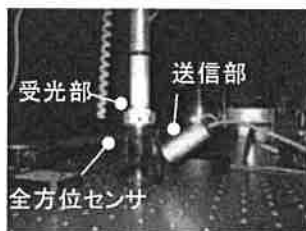


広角カメラ画像例

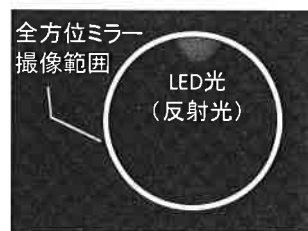


全方位ミラー画像例

図 12 全方位ミラー



実験状況



全方位ミラーの撮像例(暗室)

図 13 実験状況と取得画像

3.3 受光面積の改善効果

通信距離の延伸化、CPC や全方位ミラー等による広範囲化について実験的検証を行ったが、これ以上の改善には光学系の精度向上が必須である。しかし、一般的に光学部品は高価であり、設計・使用部品・加工・組立等全ての試作工程でコストを要すと、産業利用上、実用性が低くなると思われる。今回は、使用したPDの受光面積は、0.12[mm²]と非常に狭く、受光感度は光学系精度に強く依存してしまったことから、光学系を改善する前に、受光部を安価な手法で受光感度を高めることも必要と考えた。そこで、試作機からの抜

本的な改善を図るため、受光面積による受光感度改善効果について検討した。

発光部にはコリメートされたLED光を用い、LEDから約800[mm]離れた場所にPDを配置して、測定電圧の傾向を確認した。使用した浜松ホトニクス社の3種類のPDの主仕様を表3に示す。

表 3 PD の主仕様

	a	b	c
型式	S5973-02	S1133	S3994-01
感度波長 λ [nm]	320~1,000	320~730	320~1,100
受光感度 S [A/W]	0.45 (@780[nm])	0.3 (@560[nm])	0.65 (@960[nm])
受光面積 Ar [mm ²]	0.12	6.6	100
遮断周波数 fc [MHz]	1,000	- ※1	20
単価	約 4,500円	約 500円	約 12,000円
主用途例	光ファイバ通信 高速光計測	露出計 照度計	光パワーメータ

※1 データシート上に記載なし

本実験では、LED消灯時に観測した電圧を初期値とし、受光時の測定電圧と初期値との差を、PDが観測した出力電圧としてまとめた。なお、本実験では、各PDを1個の時と3個を並列接続した時について行い、表4に示すようにLED光のほぼ中心に受光面の中心(原点)を配置して、5[mm]ピッチで±15[mm]の位置まで移動させ出力電圧を測定した。その実験結果を図14に示す。

表 4 PD の主仕様

	a	b	c
型式	S5973-02	S1133	S3994-01
外形 [mm]	φ5.4	6.0 × 8.0	15.0 × 11.6
受光面サイズ [mm]	φ0.4	2.4 × 2.8	10.0 × 10.0
受光面積 [mm ²]	0.12	6.6	100.0
1個時の中心(原点)概略図			
※灰色部が受光面			
移動方向	← 移動方向 →		
3個時の中心(原点)概略図			
※灰色部が受光面			
試作基板例 b × 3個			

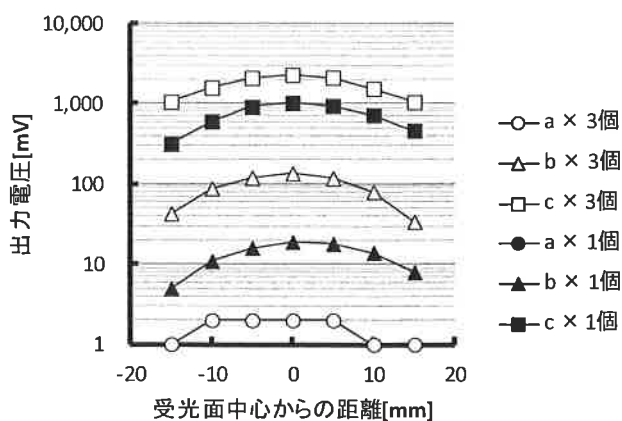


図 14 受光感度の実験結果

本実験において、S5973-02 を一つ使用した場合、出力電圧は 0[mV] だったので、図 18 には反映していない。

測定結果から、受光感度が最も高く、受光面積も最も広い S3994-01 の出力電圧が非常に高いことがわかった。また、全ての PD において、1 個の時よりも 3 個の時のほうが出力電圧は高くなった。MHz オーダーの搬送波周波数により可視光通信実験を行った結果、周波数特性的にも問題なく通信が可能であることを確認した。

また、この実験ではレンズによる収束を行っていないため、出力電圧は受光面積に大きく影響する。よって、受光感度が一番悪い S1133 であっても、受光面積が S5973-02 の 55 倍もあるため、S5973-02 よりも出力電圧が大きくなっている。

以上より、PD を複数個使用すれば、回路の修正も容易に対応可能な改善策といえる。ただし、多くの PD を使用する場合には、端子間容量の影響も大きくなるため、周波数特性を考慮した設計が必要である。

3.4 魚眼レンズと光電子倍增管

全方位ミラーは比較的安価に広範囲化を図れる可能性があるが、PD が受ける光は集光されていないため、直接光に比べ受光強度は小さくなる。また、PD は一般的な光電素子であるが、面積が小さく感度が低いものが多い。これまで、産業利用を見据え、送受信機には安価な部品類を選択してきたが、逆に、受信機に比較的高価な光学系を用いれば、加工精度や組立精度が多少悪くとも、簡単に広範囲化を図れる可能性があると考えた。そこで、全方位ミラーと PD の構成を、

広視野で直接光を取り入れる魚眼レンズと、PD に比べて受光感度が高い光電子倍增管 (PMT: Photomultiplier Tube) の構成による広範囲化の可能性について、確認実験を行った。本実験の受光部に使用した魚眼レンズや PMT を内蔵した光センサモジュール等の主仕様を表 5 に示す。

表 5 試作受光部主仕様

外観		
魚眼レンズ	取り扱いメーカー 型式 倍率 レンズ構成 レンズ写角 [deg.]	ダイモールディング工業 SUPER WIDE EYE 0.25X LENS 0.25 × 3郡枚 145 (@50mm)
カメラレンズ	メーカー 型式 画角 [deg.] レンズ構成 最小絞り 最短撮影距離 [m]	キヤノン EF 50mm F 1.8 II 対角:45 垂直:27 水平:40 5群6枚 F22 0.45
フィルタ	メーカー 型式 中心波長 [nm] 半値全幅 [nm] 最小透過率 [%]	EdmundOptics NT86-086 660 10 ≥85
光センサモジュール	メーカー 型式 感度波長範囲 [nm] 変換係数 [V/μA] 入力電圧 [V] コントロール電圧 [V] 周波数帯域 [kHz] 有効光電面 [mm] 最大感度波長 [nm]	浜松ホトニクス H10722-01 230 - 870 1 ±4.5 - ±5.5 +0.5 - +1.1 DC - 20 φ8 400

PMT は、入射した光が光電面に衝突して光電子が放出され、その電子が電子増倍部に次々に衝突して、2 次電子が放出されるもので、PMT の受光感度は PD の 1 万倍程度にもなる。PMT はこれまで、高い駆動電圧を必要とし、非常に高価な光学部品であったが、今回使用した光センサモジュールは、10 万円程度と比較的価格は抑えられており、電源電圧に ±5[V] を供給する仕様で扱いやすくなっている。この受光部で角度範囲実験の概略を図 15 に示し、その結果を図 16 に示す。

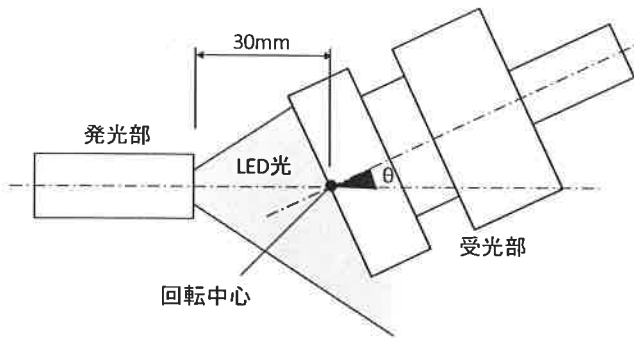


図 15 角度範囲実験概略

角度 θ [deg.]	信号振幅電圧 A [mV]
0	3,400
15	3,500
30	3,400
45	400
60	400
65	300
70	300
75	200
80	150

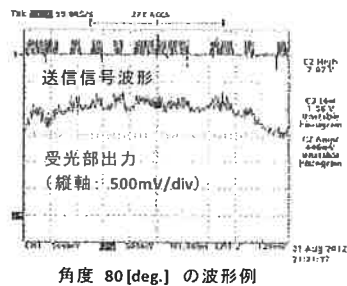


図 16 角度に対する信号振幅電圧の変化

本実験結果から、30[deg.]程度までは信号振幅電圧は3,000[mV]以上あり、本構成により従来の広範囲化が可能であることがわかる。また、角度が45[deg.]以上の場合では、Lowレベルが一定にならず、低周波ノイズと見受けられた。 $\theta=80$ [deg.]では、Aは概ね150[mV]以上を観測しているものの、この低周波ノイズのエンベロープに対して信号振幅が相対的に小さく、信号波形が埋もれてしまっているようであった。しかし、光センサモジュールは、受光感度を外部より電圧調整して使用するため、周囲環境光の変化や感度調整の状態によって、受信機での復調条件が異なる。よって、光センサモジュールを受光部に使用する場合には、実用上どのような影響を考慮し対策すべきかをもう少し実験を重ね、最適条件を見いだせば、復調は見込める。さらに、本実験の送信変調周波数が約38[kHz]であるのに対し、光センサモジュールのカットオフ周波数は20[kHz]であることから、送信変調周波数を20[kHz]以下にすれば、S/N比は向上するため、80[deg.]まで広範囲化を実現できる可能性は高くなる。民生用途レベルのコストパフォーマンスを考慮しなければ、光学部品をこのように変更すれば、広範囲化が可能である。

4 おわりに

本研究では、これまで水中光通信用途に試作してきた送受信機の実用性を高めるため、現状の通信範囲を確認し、広範囲化する改善策について実験的検証を行った。その結果、光学系の見直しが必要であることがわかったが、PDを用いた受光部分の改善だけでも、今まで以上には感度を高められる可能性が認められた。また、全方位ミラーを用いる場合、光学系の検討が必要だが、通信範囲の広範囲化の実現可能性はあると考える。そして、コスト性を考えなければ、魚眼レンズとPMTを内蔵した光センサモジュールを利用すれば、広範囲化の実現可能性があることがわかった。

以上より、今後の改善によって、水中に適用可能な可視光通信範囲を広げることにより、実用性を高められる可能性が大いにある。今後は、全方位ミラーと光センサモジュールの組合せ等についても確認を行いながら、技術開発だけでなく、計測・制御用途の研究開発に適用することをすすめていくことを考えている。

7. 参考文献

- 1) Mai Takase, Yohei Yoneyama, Masataka Murata, Kyoko Hibi, Huifeng Ren, Hideaki Endo: Mediator-type biosensor for real-time wireless monitoring of blood glucose concentrations in fish, Fisheries Science, Volume 78 (Number 3), (2012), P691-698
- 2) 村田政隆, 宮原則行: 水中無線計測実現へ向けての基礎的研究, 北海道立工業技術センター研究報告, 第9号, (2006), P58-60
- 3) 例えば, 春山真一郎: 可視光通信, 映像情報メディア学会誌 Vol. 64, No. 9, (2010), P1337-1338,
- 4) 例えば, 中川正雄: 可視光通信の世界 (工業調査会), (2006), P97-114
- 5) 長野浩樹: 航路標識状態監視等への可視光通信技術の導入に関する調査, 平成21年度研究成果報告書, 海上保安庁, (2010)
- 6) 土屋利雄, 松浦正己, 三輪哲也, 小栗一将, 「江戸っ子1号」開発プロジェクト委員会: 往還型深海探査機「江戸っ子1号」開発計画, 第23回海洋工学シンポジウム, (2012), OES23-010
- 7) 村田政隆, 宮原則行: 水中光通信技術に関する

- る基礎研究,北海道立工業技術センター研究報告,第11号,(2010),P60-62
- 8) 日本貿易振興機構:高変換効率太陽光パネルの有力メーカーとその動向,日本貿易振興機構,(2011)
- 9) 湯上浩雄:光ファイバーを用いた宇宙用太陽集光加熱微小重力材料実験炉の開発,平成9年度~平成11年度科学研究費補助金(基盤研究P)(2)一般)研究成果報告書,(2000)
- 10) 清水盛生,内藤均,佐原宏典:航空宇宙技術研究所における太陽熱スラスタの試作研究,独立行政法人航空宇宙技術研究所資料,(2003)
- 11) 鈴木昭二,金野僚一,山下成治,羽原智也,浜克己,宮武誠,村田政隆,松村一弘:海中モニタのための広視野画像システムの開発,平成23年度日本水産学会秋季大会講演要旨集,(2011),P119