

平成25～27年度  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「電波が使い難い環境下において LED 照明光通信技術を用いて  
複数端末が同時接続可能な光無線 LAN を実現するための  
組込みソフトウェアの高度化」

研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者 中国経済産業局

委託先 地方独立行政法人山口県産業技術センター

# 目次

<b>第1章 研究開発の概要</b> .....	<b>3</b>
1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	3
1-1-1. 研究背景.....	3
1-1-2. 研究目的及び目標.....	3
1-1-3. 実施内容.....	6
①複数台同時接続可能な双方向光無線 LAN システムの開発.....	6
①-1 シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究.....	6
①-2 1対N双方向光無線 LAN を実現するための通信制御プロトコルの研究.....	7
①-3 LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発.....	7
①-4 携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発.....	7
①-5 電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの船用向け実装.....	8
②評価.....	8
②-1 LED 照明評価と光無線 LAN システム性能評価.....	8
②-2 船上フィールド実験.....	8
1-2. 研究体制.....	9
1-2-1. 研究組織.....	9
1-2-2. 管理体制.....	9
1-2-3. 管理員及び研究員.....	10
1-2-4. 他からの指導・協力者及び指導・協力事項.....	11
1-3. 成果概要.....	12
①複数台同時接続可能な双方向光無線 LAN システムの開発.....	12
①-1 シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究.....	12
①-2 1対N双方向光無線 LAN を実現するための通信制御プロトコルの研究.....	12
①-3 LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発.....	13
①-4 携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発.....	13
①-5 電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの船用向け実装.....	13
②評価.....	14
②-1 LED 照明評価と光無線 LAN システム性能評価.....	14
②-2 船上フィールド実験.....	14
1-4. 当該研究開発の連絡窓口.....	14
<b>第2章 複数台同時接続可能な双方向光無線 LAN システムの開発</b> .....	<b>15</b>
2-1. シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究.....	15
2-1-1. ベースバンド光強度変調方式.....	15
2-1-2. 伝送環境の特性.....	16
2-1-5. 受信品質の解析と評価.....	18
2-1-6. 光無線トランシーバーの物理特性の評価.....	18
2-2. 1対N双方向光無線 LAN を実現するための通信制御プロトコルの研究.....	20
2-2-1. 有線 LAN、電波無線 LAN、光波無線 LAN の比較.....	20
2-2-2. 光無線 LAN におけるトポロジーの選択.....	21

2-2-3. 光無線 LAN に適切なフレームフォーマット .....	21
2-2-4. 光無線 LAN の通信制御プロトコルの実装 .....	23
2-3. LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発 .....	24
2-3-1. プロトタイプの開発 .....	24
2-3-2. プロトタイプによる伝送レート測定 (物理層) .....	25
2-3-3. フィールド実験用アクセスポイントの開発 .....	26
2-3-4. 評価結果をふまえたアクセスポイントの改良 .....	27
2-4. 携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発 .....	28
2-4-1. プロトタイプによるネットワーク速度の評価 .....	28
2-4-2. フィールド実験用小型送受信モジュールの開発 .....	30
2-4-4. 送受信モジュールの小型化 .....	32
2-5. 電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの船用向け実装 .....	34
2-5-1. 電力線搬送通信機器を船舶で使用する為の課題抽出 .....	34
2-5-2. フィールド実験を考慮した電力線通信ネットワークの評価 .....	35
2-5-3. 船内に敷設可能な光無線 LAN アクセスポイントの開発 .....	38
<b>第3章 (開発システムの) 評価 .....</b>	<b>39</b>
3-1. LED 照明評価と光無線 LAN システム性能評価 .....	39
3-1-1. LED 照明器の評価 .....	39
3-1-2. 光無線 LAN アクセスポイントの評価 .....	41
3-1-3. 船級承認のための評価試験 .....	42
3-1-4. 総合動作試験 .....	46
3-2. 船上フィールド実験 .....	48
3-2-1. 洋上試験 .....	48
3-2-2. 洋上試験結果の検証 .....	48
<b>第4章 全体総括 .....</b>	<b>50</b>
4-1. 複数年の研究開発成果 .....	50
4-2. 研究開発後の課題・事業化展開 .....	51
4-2-1. 研究開発後の課題 .....	51
4-2-2. 事業化展開 .....	52

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1. 研究背景

(一)組込みソフトウェアに係る技術

(3)川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

#### エ. 製品・サービス使用環境の向上

東日本大震災以降、首都圏を中心に電力不足の懸念が高まり、あらゆる産業において省エネルギー、スマート化へのニーズが高まってきている。省エネ効果を出すことができる設備のひとつに LED 照明化がある。白熱球と比較すると約 8 割の削減効果、蛍光灯と比較しても 5 割の削減効果が見込める（業務用直管蛍光灯との比較）。

一方、スマートフォンをはじめとする携帯情報端末の急速な普及によって、業務においても、様々なシーンで活用されている。特に、携帯性・機能の高さから現場作業時での活用に対する期待が大きい。しかしながら、これらは通常 Wi-Fi を用いてアクセスするため、劣悪な電磁環境、水中などの電磁波が通じない環境、電磁波を嫌う環境下では使えない。

船舶分野においても、地球温暖化対策と共に、燃油の高騰による輸送費に対する燃料費の比率が大きくなり経営戦略的に省エネ・最適運行システムへの強いニーズがある。同時に、機関モニタリング、船内内線、船員の安全確保や最適配置の確認等、船内作業における携帯情報端末の利用ニーズが高い。しかしながら、船内は鋼板で遮蔽された空間が多いことから電磁環境を確立しにくい上に、各国を航行するためそれぞれの国の電波法にも対応させる必要がある。

#### オ. 製品の開発拠点のグローバル化への対応及び各種規格への対応

船舶分野は、電波法上では船室内でも屋外の扱いになる。このため、各国を航海する商船にとって、新たな無線発生源を投入することは、航海が予想される国への電波法申請が同時に必要となる。このようなことから、JRCS (株) にて先行販売している J-SNet は無線 LAN を活用していることから販売先は国内のみ航海する船舶に限定している。提案している本システムが実用化すれば、電波法の縛りが無くなり、国内外を問わず販売可能となる。

### 1-1-2. 研究目的及び目標

#### 1-1-2-1. 研究目的

本研究開発では、LED 照明を活用した光無線 LAN システムを開発する。具体的には、LED は超高速に点灯制御できる特性を活用することで、LED 照明器自体が光無線 LAN アクセスポイントとなり、電波式の無線 LAN アクセスポイントと同じように、照明光の届く範囲に来るだけで複数の端末が、同時に LAN アクセスできる装置を開発する。これによって、これまで電波が使えなかった環境下においても当該照明器の光の届く範囲に在るだけで、ネットワークア

アクセスができるようになる。同時に、光は電波と異なり、身体や電子機器への影響を無視できることから、妊婦、航空機内や生命維持装置など、微弱な電磁波の影響が無視できない場合でも安心してネットワークアクセスができるようになる。

LED 照明を利用した通信機器は幾つか提案されているが、複数の端末が同時に接続できる光無線 LAN アクセスポイントとして実用化された例は未だ無い。本研究課題では、LAN アクセスポイント機能が付加された世界初の光無線 LAN アクセスポイント機能を持った LED 照明器を開発する。電波の届かない、あるいは使用し難い環境下においても、この照明の光の届く範囲に来るだけで、無線 LAN として端末の利用ができることになる。電力線搬送通信 (PLC) との組み合わせによって、通常の照明器に代えて、本研究課題で開発した無線 LAN アクセスポイント機能付き LED 照明器に交換するだけで光無線 LAN 環境が実現できる。これによって、電波式の無線が主たる通信手段であるキャリアスマートフォンなどの携帯情報端末が使えなかった船舶内や電磁環境が確立しにくい環境下においても携帯情報端末による様々なソリューションが提供できるようになる。

## 1-1-2-2. 研究目標

川下企業である商船会社と通信キャリア系企業において、商船会社の目標である、低コストで省エネ、廃棄物低減、高度 ICT 化、及び通信キャリア系企業の目標である、新たな業務支援ソリューションに向けたに資する技術を確認することで“iv) 利用品質の向上に向けた技術の高度化”に対応する。

### ア. 組込みソフトウェア開発技術の創出

#### iv) 利用品質の向上に向けた技術の高度化

本研究では、近年、急速に普及している LED 照明を用いて、LED を高速に ON/OFF することでデータ通信をする光無線技術を用いて、世界で初めて複数台の端末が同時接続可能な光無線 LAN アクセスポイント付き LED 照明装置を開発する。双方向通信を実現するため、利用者端末への送信を LED 照明(可視光)で行い、端末からデータを受信する側を赤外線通信で行う。これが実用化できれば、照明光の届く場所ならネットワーク環境が提供できる。ネットワークインフラは、電源線にデータ通信信号を重畳させる電力線搬送通信(PLC)を用いて電源ラインを通信線として用いることで、LED 照明による光無線 LAN を低コストでくまなく利用できるようにする。これらを用いれば、通信線がない場所でも、照明器を用いることで、どこでも端末とオンラインで情報交換ができるようになる。また、LED 照明を LAN アクセスポイントとして利用可能にする。

川下企業のひとつである船舶会社では、既に LED 照明化している船舶で新たに通信線を敷設する必要がなく容易にネットワーク可能な改造が可能になる。また、同じく通信キャリア系企業にとっては、電波が使いにくい現場作業下において携帯情報端末を利用した新たな業務支援ソリューションが提供できるようになる。このことによって、低コストで省エネ、廃棄物低減、高度 ICT 化に資する技術を確認することで、当該企業が求めている利用品質の向上に向けた技術の高度化に対応する。

本研究開発の最終目標は、次のとおりである。

開発テーマ	目標値
<p>①複数台同時接続可能な双方向光無線 LAN システムの開発</p>	<p>【1-1】 シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究            低価格化と部品入手の容易さを考慮して、シングルチップ型白色 LED を用いた光無線 LAN アクセスポイントを開発する。具体的な通信速度は<u>端末1台接続時に、下り 5Mbps 以上、上り 1Mbps 以上の通信速度を目指す。</u></p> <p>【1-2】 1対N双方向光無線 LAN を実現するための通信制御プロトコルの研究            複数台の端末が安定して通信ができるネットワーク制御組込みソフトウェアを開発する。具体的な目標として、<u>最大5台の端末が同時に接続できる装置とする。</u></p> <p>【1-3】 LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発            研究によって得られた LED 点灯制御技術と、通信制御プロトコルを用い、光無線 LAN アクセスポイント機能を持った LED 照明器を開発する。<u>通信可能距離は3メートル以上を目指す。</u></p> <p>【1-4】 携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発            携帯情報端末の外部接続ポートに容易に装着できる小型送受信モジュールを開発する。<u>端末の大きさは、標準的なスマートフォンの1/3以下の大きさを目指す。</u></p> <p>【1-5】 電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの船用向け実装            電力線通信ネットワーク技術と可視光通信技術の船舶で使用するため、<u>船級に対応した機器の構成を目指す。</u> 実用化のための船級取得の目処を立てる。</p>
<p>②評価</p>	<p>【2-1】 LED 照明評価と光無線 LAN システム性能評価</p> <p>1) LED 照明器の評価            通信機能を付加した状態で、照明器としての性能評価に問題がないことを確認する。</p> <p>2) 光無線 LAN アクセスポイントの評価            通信トラフィックの評価と、受光範囲、ノイズに対する耐性評価などを行う。</p> <p>3) 船級承認のための評価試験            本研究期間内に船級取得に向けて技術的性能、法的規則を調査・検討し、船級を取得する。</p> <p>4) 総合動作試験            可視光通信技術、電力搬送技術、携帯情報端末を組み合わせたシステムの動作試験を行う。<u>予定している機能を全て満足することを目指す。</u></p> <p>②-2 船上フィールド実験</p> <p>1) 洋上実験            川下企業である川崎汽船株式会社の協力を得て、開発したシステムの一部を実際の大型船舶に装備し、実際に洋上でのフィールド実験を行うことで、性能・信頼性などを検証する。</p>

### 1-1-3. 実施内容

#### ①複数台同時接続可能な双方向光無線 LAN システムの開発

シングルチップ型白色 LED を用いて複数台同時接続できる双方向光無線 LAN 装置の開発に係る技術的課題として、シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究、1対N双方向光無線 LAN を実現するための通信制御プロトコルの研究、LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発、携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発、電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの船用向け実装をする。

##### ①-1 シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究

(担当実施機関：株式会社アイデンビデオトロニクス、  
地方独立行政法人山口県産業技術センター)

図1(b)に示すように、シングルチップ型白色 LED は、青色 LED チップを光らせて、黄色蛍光体が発光することで白色を得る方式で、現在、照明用の LED としては、この方式がほとんどである。この LED を用いた可視光通信機器は、今のところ例がない。理由は、蛍光体の蓄光・残光時間による遅延が発生することにある。共同申請者は、長年、光通信に関する研究をしてきているが、シングルチップ型白色 LED を用いた開発は未経験である。

本研究課題では、LED をフリック (ON/OFF) して、情報を伝達する変調方式として 4PPM、又は Inverted 4PPM を採用することにした(図2)。目標の 5 [Mbps] を達成するためには、1ビットあたりの情報伝達時間は 200 [nsec] 以下にする必要がある。つまり、4PPM の場合、1ユニットで 2ビット送信できると解釈できるため、フリックの周波数は 2.5 [MHz] 以上にする必要がある。蛍光体レスの LED では、10 [MHz] 以上のフリックも比較的容易である

が、シングルチップ型の場合、蛍光体の蓄光時間を考慮すると、単純なフリックではビットエラーになる可能性が高い。このようなことから、改良型 4PPM を検討する必要がある。ここでは、試験用回路を製作し、代表的な照明用 LED チップを用いて、フリック周波数による正確な発光特性を測定し、最適と考えられるフリックパラメーター(発光時間など)を研究することで、LED の発光特性に合わせた動的にチューニング可能な変調機能を搭載した組み込みソフトウェアを開発する。

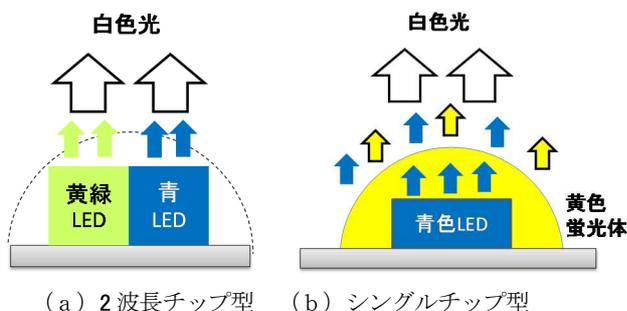


図1 白色 LED の発光方式

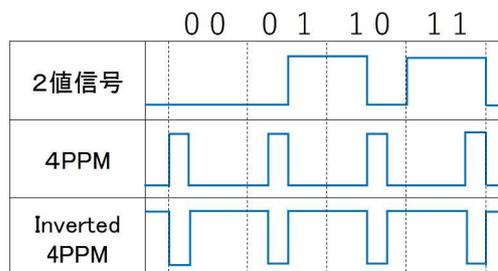


図2 2値信号と 4PPM 変調方式

## ①-2 1対N双方向光無線 LAN を実現するための通信制御プロトコルの研究

(担当実施機関：株式会社アイデンビデオトロニクス、  
地方独立行政法人山口県産業技術センター)

本研究では、1対Nの双方向可視光通信を実現するため、複数の端末から情報を送信される「上り」方向の信号を制御する通信制御プロトコルを確立する必要がある。また、複数台の端末が同時に動作する場合の多重アクセスの制御プロトコルが必要である。複数端末がアクセスできる VLC アクセスポイントの実用化例は、未だ無いことから、成功すれば世界初である。本研究開発では、IEEE802.3に規定された有線イーサネットのCSMA/CD方式をベースに、制御プロトコルの研究開発を行う。ただし、この場合、電波と同じく、衝突の発生を正確に検知できない場合も予想される。そこで、無線 LAN の規格である IEEE802.11x に規定されている CSMA/CA (with RTS/CTS) の両面について検討を行う。

基礎的研究では、まず机上シミュレーションを行い、端末のデッドロックが発生しないプロトコルと条件を導き出す。最終的には、FPGA マザーボード上にプロトコルを展開した組み込みソフトウェアを開発して、アクセス制御シミュレーション試験を通じて最終的なプロトコルを導き出す。

## ①-3 LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発

(担当実施機関：株式会社アイデンビデオトロニクス、JRC S株式会社、  
地方独立行政法人山口県産業技術センター)

確立した変調方式および通信制御プロトコルから、光無線 LAN アクセスポイントとして実現する。高速な制御と、プログラムの多様性を考慮して、組み込みメイン CPU には、FPGA を用いる。FPGA の開発に際しては、VHDL や Verilog-HDL などのロジック言語を用いることが一般的であるが、ハードウェアに慣れていない技術者でも開発可能にするため、C言語などの高級言語で開発できる手法を取り入れることで、短納期と迅速な保守体制を整備する。初年度では、能力に余裕を持たせたハイスpek的な性能で、理想の通信が可能な装置で開発を行い、3年目に実機に近い小型のアクセスポイントを開発する。

## ①-4 携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発

(担当実施機関：株式会社アイデンビデオトロニクス、JRC S株式会社  
地方独立行政法人山口県産業技術センター)

本研究では、子機側の機器にはスマートフォンやタブレット PC 等の携帯情報端末を使用する。携帯情報端末との接続では、端末に容易に接続ができ、利用者の邪魔にならない小型双方向光無線 LAN ターミナルを開発する。多重アクセスを実現するために高速演算処理が可能な制御プロセッサと、アクセスポイントとの接続性を高めるための受光用フォトランジスタの最適化、アップリンクの接続性を高めるための高輝度で広い指向性を持った赤外線 LED を用いる。小型送受信モジュールでも、メインプロセッサはFPGAを用いる。アクセスポイントを同様に初年度では、能力に余裕を持たせたハイスpek的な性能で、理想の通信が可能な装置で開発を行い、3年目に実機に近い小型送受信モジュールを開発する。

## ①-5 電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの舶用向け実装

(担当実施機関：JRCS株式会社)

本研究では開発した光無線 LAN システムと電力線搬送通信を組み合わせ、船級承認を考慮した技術基準に基づいて LED 照明と通信機能を一体的に実装することで、一般的に船舶で使用されている LED 照明を置き換えるだけで通信機能を使用可能となる通信機能付き LED 照明器具を開発する。

## ②評価

開発システムの総合的な評価を実施することで、製品化に向けた課題を明確にする。

### ②-1 LED 照明評価と光無線 LAN システム性能評価

(担当実施機関：株式会社アイデンビデオトロニクス、JRCS株式会社  
地方独立行政法人山口県産業技術センター)

#### 1) LED 照明器の評価

照明器本来の性能評価と、高速発信機構を付加することによる妨害波発生評価を行う。JIS C 8157 一般照明用電球形 LED ランプ (電源電圧 50[V]超) 一性能要求事項への適合から、照明器としての性能を評価する。また、JIS 照度基準 (JIS Z 9110:2010) に基づき、異なる作業領域の照度を評価し、把握する。

#### 2) 光無線 LAN アクセスポイントの評価

通信トラフィックの評価と、受光範囲、ノイズに対する耐性評価などを行う。具体的には、①上りと下りの通信トラフィック、②通信可能な距離と範囲などを評価する。

#### 3) 船級承認のための評価試験

本研究期間内にアドバイザーである日本海事協会と川崎汽船の助言を受けながら、船級取得に向けた技術的性能、法的規則を調査・検討し、下記の評価試験を実施する。尚、研究終了後に船級を取得し、製品化に着手する。具体的には、①環境試験 (振動、温度、湿度)、②EMC 試験である。

#### 4) 総合動作試験

実験室内において、開発した装置の総合動作試験を行う。

### ②-2 船上フィールド実験

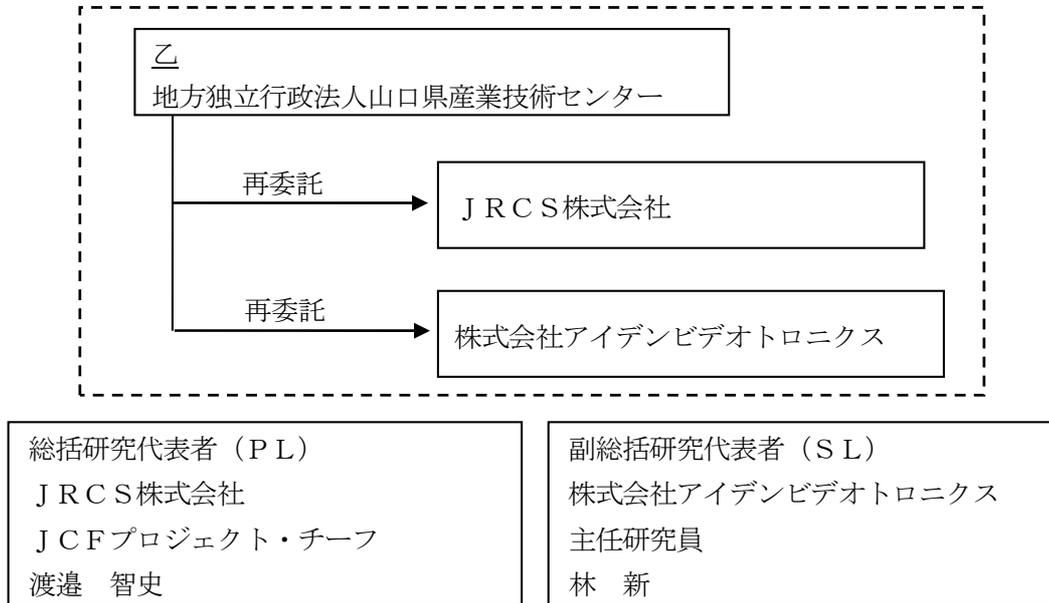
(担当実施機関：株式会社アイデンビデオトロニクス、JRCS株式会社  
地方独立行政法人山口県産業技術センター)

#### 1) 洋上実験

実用化のためには実際の船内での実験を通じて、機器の問題、ユーザー視点での課題抽出などが重要である。また、川下企業でアドバイザーの川崎汽船 (株) の協力を得て開発したシステムを実際の船舶に装備して洋上でのフィールド実験を行う。

## 1-2. 研究体制

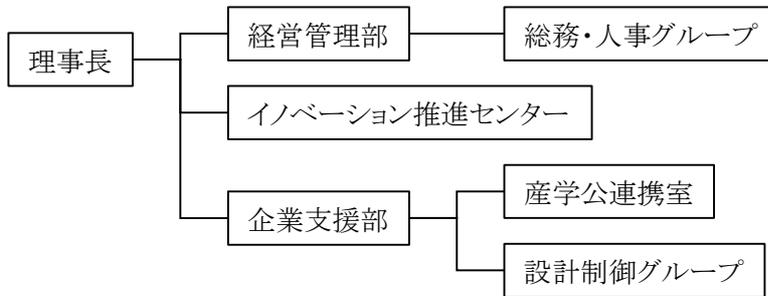
### 1-2-1. 研究組織



### 1-2-2. 管理体制

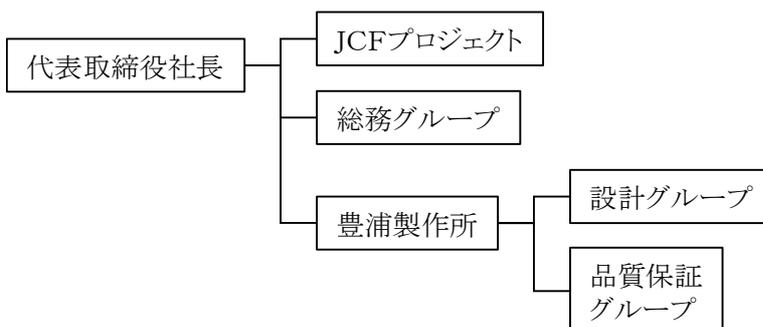
#### ①事業管理機関・研究実施機関

[ 地方独立行政法人山口県産業技術センター ]



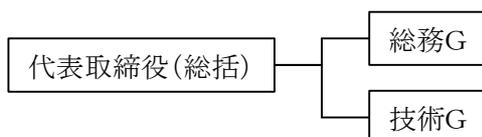
#### ② (再委託先)

[ J R C S株式会社 ]



③ (再委託先)

[ 株式会社アイデンビデオトロニクス ]



1-2-3. 管理員及び研究員

【事業管理機関】 地方独立行政法人山口県産業技術センター

①管理員

氏名	所属・役職
石田 浩一	企業支援部 産学公連携室 室長
岡本 理代美	企業支援部 産学公連携室 主任主事
江藤 秀哲	経営管理部 総務・人事グループ・主任

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
吉木 大司	企業支援部設計制御グループ・ 専門研究員	①-1、①-2、 ①-3、①-4、 ②-1、②-2
松本 佳昭	イノベーション推進センター・ サブリーダー	①-3、①-4、 ②-1、②-2

【再委託先】

1) JRCS株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
渡邊 智史	JCFプロジェクト・チーフ	①-3、①-4 ①-5、 ②-1、②-2
藤本 清春	豊浦製作所 設計グループ・課長	①-3、①-4、 ①-5、 ②-1、②-2
海原 学	豊浦製作所 設計グループ・主任	①-3、①-4、 ①-5、 ②-1、②-2
山本 栄作	豊浦製作所 設計グループ	①-3、①-4、 ②-1、②-2
植木 卓也	豊浦製作所 設計グループ	①-3、①-4、 ②-1、②-2
串山 拓也	豊浦製作所 設計グループ	①-3、①-4、 ①-5、 ②-1、②-2

藤永 栄治	JCFプロジェクト・課長	①-3、①-4、 ①-5、 ②-1、②-2
稲田 智浩	豊浦製作所 品質保証グループ・部長	②-1、②-2
中村 勝博	豊浦製作所 品質保証グループ・課長	②-1、②-2
長岡 和正	豊浦製作所 品質保証グループ・課長	②-1、②-2

2) 株式会社アイデンビデオトロンクス

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
林 新	技術G・主任研究員	①-1、①-2、 ①-3、①-4、 ②-1、②-2
石井 敏郎	技術G・主任技師	①-1、①-2、 ①-3、①-4、 ②-1、②-2
柿沼 泰隆	技術G・技師	①-1、①-2、 ①-3、①-4、 ②-1、②-2

1-2-4. 他からの指導・協力者及び指導・協力事項

氏名	所属・役職	備考
今村 剛	一般財団法人日本海事協会 材料艀装部・部長	推進会議アドバイザー
松尾 守	一般財団法人日本海事協会 機関部・主管	推進会議アドバイザー
山本 浩之	一般財団法人日本海事協会 材料艀装部	推進会議アドバイザー
秋山 治之	川崎汽船株式会社 造船計画チーム・チーム長	推進会議アドバイザー
野間 慧	川崎汽船株式会社 造船計画チーム・チーム員	推進会議アドバイザー
石川 岳	川崎汽船株式会社 造船計画チーム・チーム員	推進会議アドバイザー
濱井 龍明	株式会社KDDI 研究所・アドバイザー	推進会議アドバイザー
松本 充司	早稲田大学 理工学研究所 名誉教授	推進会議アドバイザー

## 1-3. 成果概要

### ①複数台同時接続可能な双方向光無線 LAN システムの開発

#### ①-1 シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究

##### 1) 通信変調方式の最適化研究

シングルチップ型白色 LED を用いて、照明器としての性能を落とさずに高速通信を可能とする通信変調方式を確定するために、周囲環境ノイズの影響や各種変調方式の比較検討を行った。また、物理層数値モデルによる受信品質の評価も行い、環境ノイズにも比較的耐性が高く、照明光としてのちらつきもない I-4PPM 変調が照明光通信の変調方式として適していることが判った。

また、「光デュオバイナリー符号」の検討も行い、I-4PPM 変調では 2 値 (0/1) である信号を 3 値化 (-1/0/1) するで、デジタル信号の帯域利用率が高められることを確認した。これにより、光デュオバイナリー符号を用いれば、通信速度を I-4PPM 変調の 2 倍にできる。

##### 2) 通信変調回路の開発

通信変調方式の最適化研究を進める上で必要となるプロトタイプを開発して、基礎通信試験を行った。また、プロトタイプでの試験結果を基に、フィールド実験用光無線 LAN アクセスポイント及び小型送受信モジュールの通信変調回路 (アナログフロントエンド回路) の設計を行った。

フィールド実験用光無線 LAN システム (アクセスポイント及び小型送受信モジュール) のアナログフロントエンド回路では、オートゲインコントロール回路や PD 受光感度の向上など最適化を行ったが、電源ノイズやシングルチップ型白色 LED に含まれる蛍光体の影響を十分に取り除くことができず、物理層レベルでの通信速度は 2Mbps に留まった。

#### ①-2 1対N双方向光無線 LAN を実現するための通信制御プロトコルの研究

##### 1) 通信制御プロトコルの研究

1 対 N 双方向光無線 LAN を実現するために、照明光無線 LAN における MAC (Media Access Control、媒体アクセス制御) 層のフレームフォーマット及び通信制御プロトコルを確立した。具体的には、電波無線 LAN (IEEE802.11) や現行の光通信 (JEITA CP-1221 ~1223) を参考に、照明光 (空間光) における「隠れ端末問題」を解決できるフレームフォーマット及び通信制御プロトコルとした。

##### 2) 通信制御シミュレーションによる複数台接続時のトラフィック計測

上記、通信制御プロトコルの研究を進める中で比較検討を行った通信制御プロトコル (CSMA/CD, MACA(MA/CD with RTS/CTS), PCF) の数値シミュレーションを行い、複数台同時通信時のトラフィック評価を行った。その結果、「隠れ端末問題」を解消しつつ、複数台通信時のトラフィックも比較的確保できる MACA をフィールド実験用光無線 LAN システムに実装し、端末 5 台の同時接続を実現した。

また、実装に際して、通信の衝突を避けるための待ち時間 (≒競争窓) の最適値を確認した。その結果、シミュレーション上では物理層 2Mbps に対して、平均ネットワーク速度

1.72Mbps を実現できる条件を定め、フィールド実験用光無線 LAN システムに実装した。実装したシステムにおいて、平均ネットワーク速度 1.70Mbps (最高 1.86Mbps) を得た。

### ①-3 LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発

#### 1) 実験用プロトタイプシステムの開発

基礎的な光通信実験を行えるプロトタイプを開発し、研究開発の初期段階において、アクセスポイントから送受信モジュールへの可視光通信は最大 1.27Mbps、平均 0.91Mbps を実現した。また、通信距離は 2 メートルまで確認した。

また、プロトタイプを用いた環境試験 (EMC 試験、振動試験) も実施し、基礎通信実験の結果と合わせて、フィールド実験用光無線 LAN アクセスポイントの設計に反映させた。

#### 2) フィールド実験用アクセスポイントの開発

①-1、①-2 及びプロトタイプの研究開発結果を基に、フィールド実験用光無線 LAN アクセスポイントの試作開発を行った。また、試作したフィールド実験用光無線 LAN アクセスポイントを用いて②評価を行い、その評価結果を踏まえて、更に熱対策と船舶への設置性を高めたアクセスポイントを開発した。

なお、試作した光無線 LAN システム (アクセスポイント及び送受信モジュール) で、最大通信距離 3 メートルを達成した。

### ①-4 携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発

#### 1) 実験用プロトタイプシステムの開発

基礎的な光通信実験を行えるプロトタイプを開発し、研究開発の初期段階において、送受信モジュールからアクセスポイントへの赤外光通信は最大 1.30Mbps、平均 0.96Mbps を実現した。

また、プロトタイプを用いた環境試験 (EMC 試験、振動試験) も実施し、基礎通信実験の結果と合わせて、フィールド実験用送受信モジュールの設計に反映させた。

#### 2) フィールド実験用送受信モジュールの開発

①-1、①-2 及びプロトタイプの研究開発結果を基に、フィールド実験用送受信モジュールの試作開発を行った。また、試作したフィールド実験用送受信モジュールを用いて②評価を行い、その評価結果を踏まえて、ロジック構成やアナログフロントエンド回路の見直しを行い、小型かつ携帯情報端末からの給電で動作する小型送受信モジュールを開発した。

### ①-5 電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの船用向け実装

#### 1) 電力線通信実験装置の開発

JRCS 社内の船内模擬実験設備を用いて、船舶環境を模擬した電力線搬送通信 (PLC) 実験を行い、船舶環境による PLC 通信への影響がないことを確認した。

#### 2) 船内に敷設可能な PLC 装置付き光無線 LAN アクセスポイントの開発

船上フィールド実験及び実用化に向けて、電力線通信 (PLC) の船舶内使用に関する調査を行い、通信関連を管轄する総務省に対して、船舶内での PLC 使用の申し入れを行った。その結果、現行法下では船内での PLC 使用は認められないとの回答を得た。

## ②評価

### ②-1 LED 照明評価と光無線 LAN システム性能評価

#### 1) LED 照明器の評価

フィールド実験用アクセスポイントを用いて、光学特性試験を行った。具体的には、①全光束測定、②配光特性、③相対分光分布測定、④色彩計算（色度・相関色温度・演色評価値）、⑤光度測定を行い、照明器として必要な性能が満たされていることを確認した。なお、相関色温度に関しては、5000K の LED チップを用いたが、4PPM 変調の影響を受け、5700K 程度になることが確認された。

#### 2) 光無線 LAN アクセスポイントの評価

フィールド実験用アクセスポイントを用いて、1対1及び1対N複数台通信時のネットワーク速度を評価した。評価の結果、1対1のネットワーク速度（下り（可視光）1.86Mbps、上り（赤外光）1.12Mbps）に対して、シミュレーション結果と同等である17%の速度低下に収まることを確認した。ただし、送受信モジュール間で通信帯域を等分できていないため、通信制御プロトコルのパラメーター調整は必要である。

#### 3) 船級承認のための評価試験

フィールド実験用アクセスポイント及び送受信モジュールを用いて、船級承認のための評価試験を実施した。具体的には、振動試験、EMC 試験、温度試験を行い、それぞれ NK 船級規格を満足していることを確認した。ただし、温度試験に関しては、LED 照明の異常点滅動作が見られたため、アクセスポイントに熱対策を施して、規格をクリアした。

#### 4) 総合動作試験

フィールド実験用アクセスポイント及び送受信モジュールを用いて、総合動作試験（通信試験）を実施した。具体的には、通信範囲（距離、角度）、通信速度、電力線通信（PLC）を介した通信速度を確認した。

### ②-2 船上フィールド実験

#### 1) 洋上実験

フィールド実験用アクセスポイント及び送受信モジュールを用いて、船上フィールド実験（通信実験）を実施した。具体的には、通信範囲（距離、角度）、通信速度を確認し、実用化に向けた性能評価を行った。なお、電力線通信（PLC）に関しては、法規制のため、船舶内での PLC 通信実験はできなかった。

## 1-4. 当該研究開発の連絡窓口

（事業管理機関） 地方独立行政法人山口県産業技術センター  
（連絡窓口） イノベーション推進センター サブリーダー 松本佳昭  
TEL:0836-53-5061 FAX:0836-53-5071  
E-mail: matumoto@iti-yamaguchi.or.jp

## 第2章 複数台同時接続可能な双方向光無線 LAN システムの開発

### 2-1. シングルチップ型白色 LED を用いた高速通信技術の研究

#### 2-1-1. ベースバンド光強度変調方式

本光無線 LAN システムは、空間光の特徴を考慮し、IM/DD ベースバンド方式で情報伝送を行っている。「IM」とは送信データに応じて送信光強度を変化させる強度変調 (Intensity Modulation) 方式であり、「DD」は送信光が直接に受光素子に入射し、光電変換により電気信号となる直接検波 (Direct Detection) 方式である (図 2-1-1)。

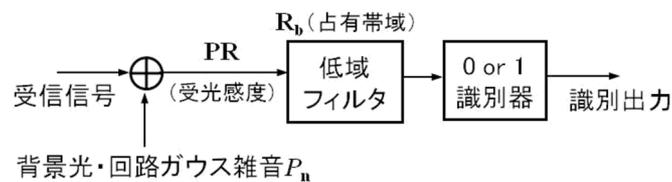


図 2-1-1 IM/DD ベースバンド方式の物理モデル

照明光を利用して光強度変調方式の評価基準は主な、信号占有帯域、所要受信パワー、信号の識別範囲、光の変調により生じるちらつきの 4 つの要素がある。その 4 つの要素について、3 種のベースバンド光強度変調方式 OOK-NRZ、L-PPM、Duo-binary の比較を表 2-1-1 に示す。

表 2-1-1 ベースバンド光強度変調方式の比較

	信号占有帯域	所要受信パワー	信号の識別範囲	照明光のちらつき
OOK-NRZ	$R_b/2$	$P$		$\Delta$ (区間内光パワー不定)
L-PPM	$(R_b/2)(L/\log_2 L)$ $R_b$ (4PPM)	$P/\sqrt{(L/2)(\log_2 L)}$ $P/2$ (4PPM)		$\odot$ (区間内光パワー一定)
Duo-binary	$R_b/3$	$2P$		$\circ$ (区間内光パワー不定 パルス緩め)

本システムは、その 4 つの要素を総合的に考慮し、下り方向 (可視光) は照明と通信ともに適切な I-4PPM (Inverted Four Pulse Position Modulation) 方式を選定し、上り方向 (赤外線) は IrDA の標準により 4PPM 方式を採用した (図 2-1-2)。



図 2-1-2 本システムの変調方式

## 2-1-2. 伝送環境の特性

今回のシステムにおける伝送環境、即ち、空間光チャンネルには、主な 3 つの影響が考えられる。これらの影響は、物理モデル (図 2-1-3) においては、伝送路の雑音モデル (光受信信号の電力揺らぎ) として定義することができる。

- ① 信号光と背景光によるショット雑音及び、電子回路の熱雑音；
- ② 船舶の振動及び放射揺らぎ；
- ③ 光反射によるマルチパス。

具体的には、1 つ目の①信号光と背景光によるショット雑音及び、電子回路の熱雑音は、式 (1) のように定義する。

$$P_n = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 \begin{cases} \sigma_{\text{thermal}}^2 = \frac{4kT}{R_F} B \\ \sigma_{\text{shot}}^2 = 2qRP_F B + 2qI_b(\lambda)B \end{cases} \quad (1)$$

信号光    背景光

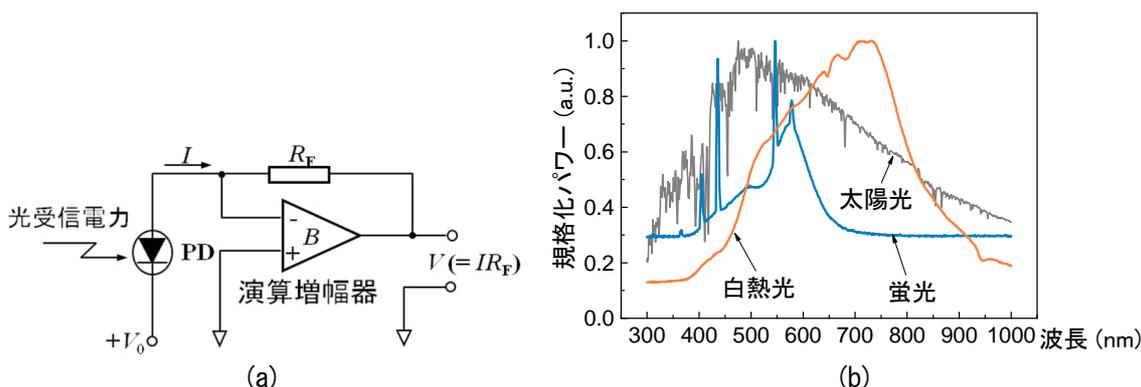


図 2-1-3 空間光チャンネルにある雑音

熱雑音は PD 外部に接続された回路・負荷抵抗、即ち熱による生じられる雑音である。図 2-1-3 (a) の回路を利用する場合、熱雑音  $\sigma_{\text{thermal}}^2 = 4kTB/R_F$ 、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は環境の絶対温度 (K) である。

ショット雑音は PD 内部の光電変換と背景光、即ち光による生じられる白色雑音であり、 $\sigma_{\text{shot}}^2 = 2qRP_F B + 2qI_b(\lambda)B$  である。ここで、 $q$  は電子の電荷、 $I_b(\lambda)$  は、背景光の雑音電流であり、波長特性を持っており一様ではない。図 2-1-3 (b) は通常の屋内に存在している背景光雑音である。

また、式 (1) 中の  $R$  は、白色 LED の受光感度 (受信品質を左右する重要なパラメーター) であり、白色 LED と PD との波長分布強度の積分で表れる。

$$R = \frac{1}{n} \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} W_{\text{LED}}(\lambda) W_{\text{PD}}(\lambda) d\lambda \quad (n: \text{サンプリング数}) \quad (2)$$

図 2-1-4 に示された LED と 2 種類の PD を用いた場合の受光感度  $R_{PD-S6967}$  と  $R_{PD-S6036}$  は、それぞれ 0.4287 (A/W) と 0.3729 (A/W) である。

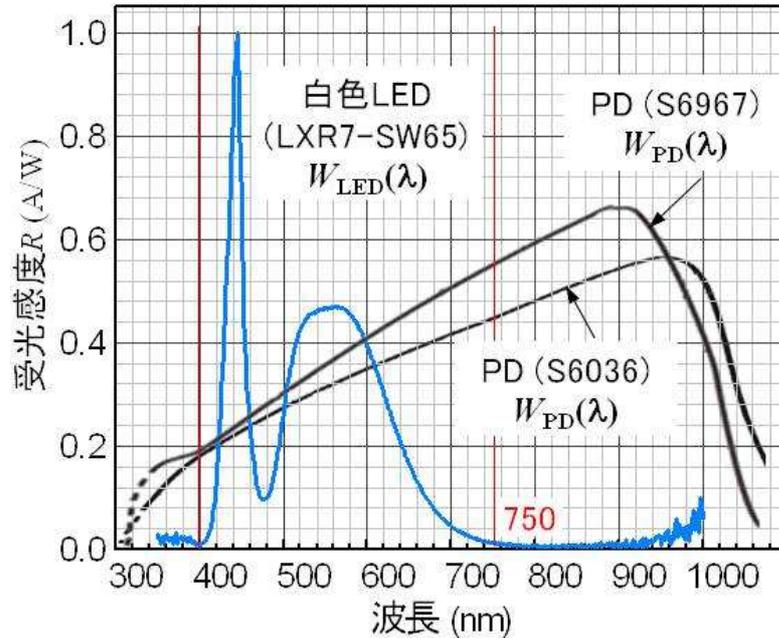


図 2-1-4 白色 LED に対応する PD の受光感度

2 つ目の②船舶の振動及び放射揺らぎによる影響に関しては、変調方式の評価を行うための試験用回路を用いて、実際に振動試験を行い、その影響を物理モデルに反映させた。振動試験は、変調方式への影響の他、ハードウェアへの物理的な影響なども確認している。

一方、屋内の空間光で光無線通信を行うときに、図 2-1-5(a)に示すように、直接の信号光のみではなく、壁や床などの複数回の反射によりマルチパスを生じる。そのために、直接信号光及び、1 次と 2 次反射光のパルス応答レベルの数値シミュレーションを行った。結果を図 2-1-5(b)に示す。この結果より、直接光による受信レベルに対して、マルチパスによる反射光の影響は十分に小さいと言えるため、物理モデルにはマルチパスの影響を加えなかった。

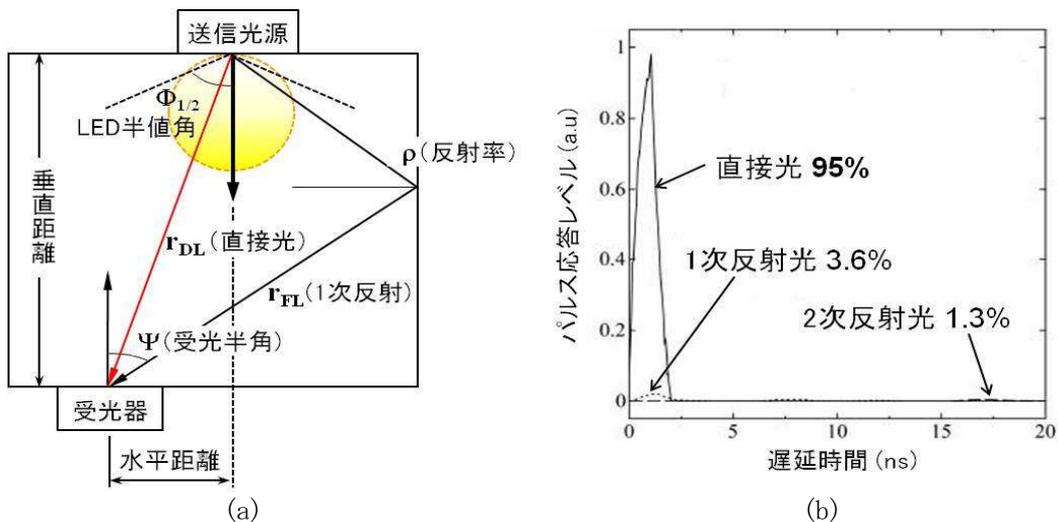


図 2-1-5 光反射によるマルチパスの影響

## 2-1-5. 受信品質の解析と評価

変調方式と伝送環境の雑音特性（SNR：信号対雑音の比）が決まれば、受信品質を反映する受信ビット誤り率 BER を求めることができる。各種強度変調方式の BER のシミュレーション結果を図 2-1-6 に示す。

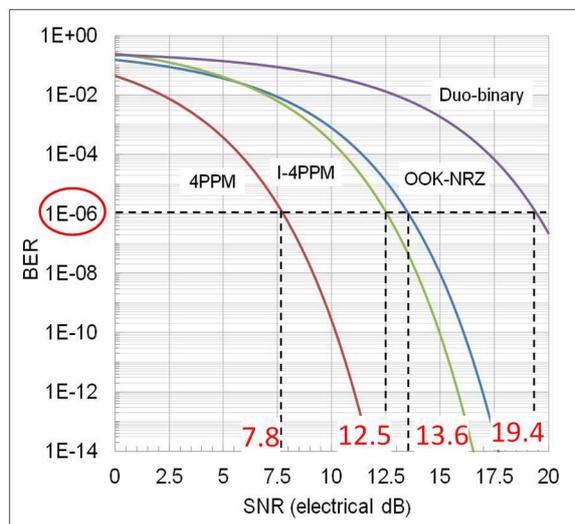


図 2-1-6 各種強度変調方式の BER 比較

この結果より、例えば  $BER < 10^{-6}$  を達成するために必要な SNR は、4PPM 変調がもっとも最小であり、データ伝送効率が低いと言える。しかし、4PPM 変調を用いると照明光として明るすぎるのが、プロトタイプによる動作検証で確認されたため、次点の I-4PPM 変調が最適だと考えられる。

## 2-1-6. 光無線トランシーバーの物理特性の評価

前述までの物理モデルを用いた数値シミュレーションに加えて、本研究開発で用いるフォトダイオード（PD）に関して、光をレンズで集光するレンズ系 PD と受光面の面積を広くすることで受信感度を高める大面積系 PD で、通信距離及び通信角度の違いを比較した。図 2-1-7 に通信距離依存性の結果を、図 2-1-8 に通信角度依存性の結果を示す。

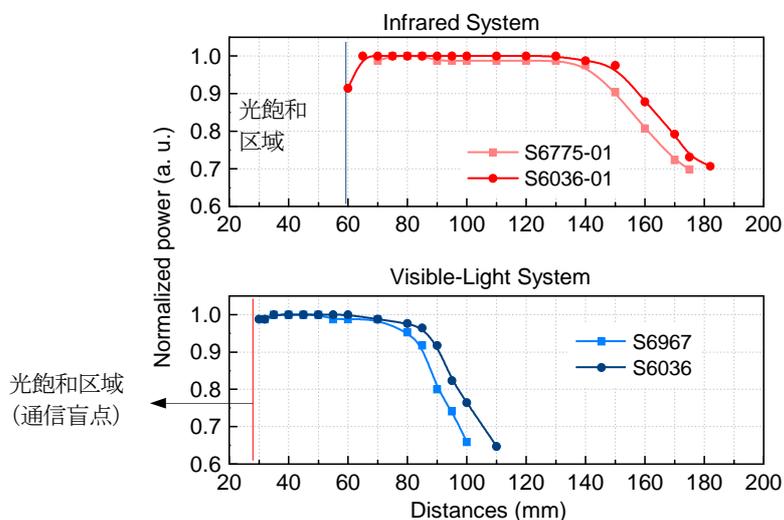


図 2-1-7 通信距離依存性

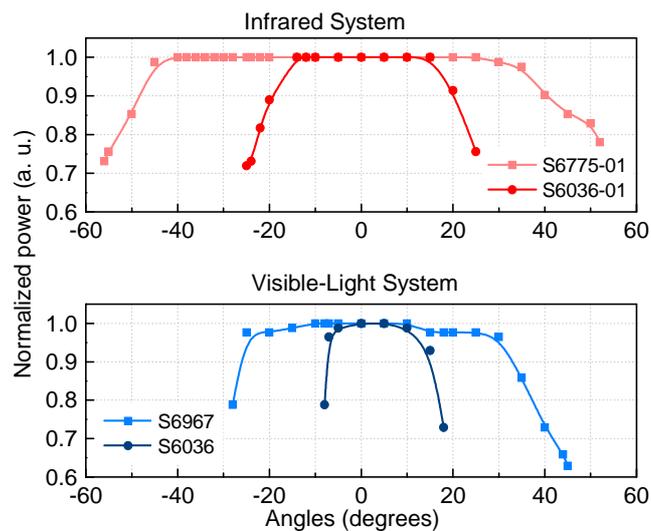


図 2-1-8 通信角度依存性

これらの結果より、通信距離に対する影響はレンズ系、大面積系に大きな違いは見られませんが、広い通信角度を確保できる大面積系フォトダイオードをフィールド実験用光無線 LAN システムに用いることとした。

## 2-2. 1対N双方向光無線LANを実現するための通信制御プロトコルの研究

### 2-2-1. 有線LAN、電波無線LAN、光無線LANの比較

比較項目	有線LAN	無線LAN	光無線LAN
標準規格	IEEE802.3	IEEE802.11	JEITA CP-1221, 1222, IEEE802.11に基づき <b>新規開発・策定</b>
伝送媒体	ケーブル	電波	光波
アクセス制御	CSMA/CD方式	CSMA/CA方式	光CSMA/CA or CD方式
PCで必要とするNIC	PC内蔵有線LANカード	PC内蔵無線LANカード	USB等で接続の光無線ドングル
伝送方式	MLT-3,5(100,1000BASE-TX,T)	SS, OFDM, MIMO等	OOK, (SC)4PPM, (SC)I-4PPM
フレームフォーマット	IEEE802.3 DIX規格 (物理ヘッダ+Ethernetフレーム)	IEEE802.11 (物理ヘッダ+MACフレーム)	JEITA CP-1221, 1222, IEEE802.11に参考 (スタート部+有効データ+終端部)
PCの接続先となる機器	ハブ	アクセスポイント	光アクセスポイント(LED照明器具)

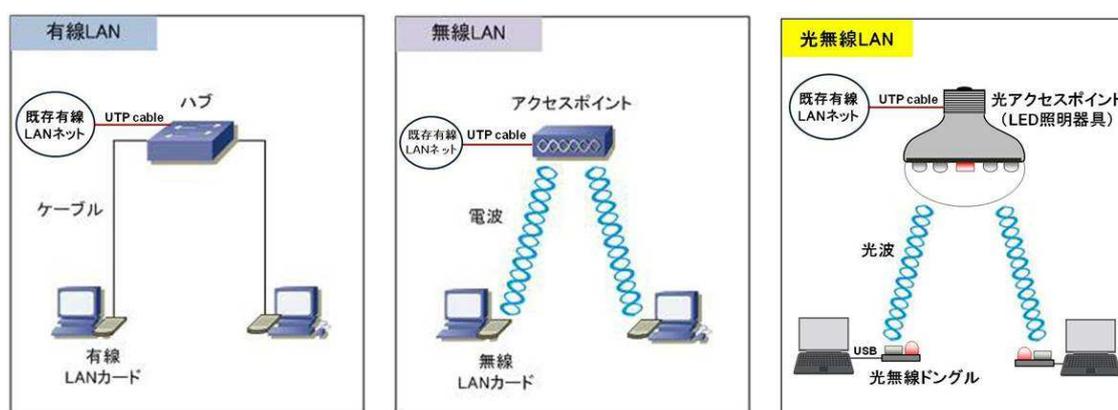


図2-2-1 異種LANの比較

有線LAN、電波無線LAN、光無線LANの特徴を図2-2-1に示す。光無線LANは光波を使って通信するために、無線LANとの主な違いは、伝送媒体に依存するアクセスポイント（LED照明器具と併用）及び、クライアント側のデータ通信ドングル（光電子デバイス）である。そこで、LANとしての物理層の変調方式だけではなく、ネットワークの最適な構成や無線チャンネルのアクセス制御機能など、空間光MAC層を検討する必要もある。

光無線LANのMAC(Media Access Control)層を考える上で基本的な特徴について述べる。光無線LANの下りはLED照明であり、その点滅によってデータを送信する。そのためすべての端末に対して同じデータ送信をすることになる。これは既存のイーサネットと同じで、端末は受信したデータのヘッダを見て自分宛なら受け取り、そうでなければ破棄する方式である。一方、上りは指向性のある赤外線であり、特定のアクセスポイントと正確に通信するために光は拡散しないように設計するため、データは上部（天井）にあるアクセスポイント（照明）のみに届く。そのため、ある端末がデータ送信中であることを、他の端末は知ることができない。電波無線LANにおいても、ある端末が遠くの端末と競合していることを検出できず、衝突が起きてしまうことがある。これを隠れ端末問題という。光無線LANの端末においてはこの隠れ端末問題が他の全ての端末に対して発生することになる。光無線LANのプロトコルではこの問題への対策が必要である。

## 2-2-2. 光無線 LAN におけるトポロジーの選択

本研究で検討をした光無線 LAN の伝送トポロジー及び特徴を表 2-2-2 に示す。

表 2-2-1 各方式の光無線 LAN の構成

親機:ビーム、子機:ビーム	親機:拡散、子機ビーム	親機:拡散、子機:拡散
<b>利点</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・伝送効率が最大</li> <li>・子機間干渉が無い</li> </ul>	<b>利点</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・伝送効率が良好</li> <li>・照明での適合性がある</li> <li>・子機間干渉が無い</li> </ul>	<b>利点</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・照明での適合性がある</li> <li>・光軸調整が不要</li> </ul>
<b>欠点</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・光軸調整が双方向で必要</li> <li>・照明での適用が難</li> </ul>	<b>欠点</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・光軸調整が片方向必要</li> </ul>	<b>欠点</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・子機間干渉がある。</li> <li>・アクセス制御が複雑</li> </ul>

今回の照明器具を用いて光無線 LAN の基本要件は三つがある。即ち、①照明での適合性がある；②データ伝送効率が良好；③子機間の干渉が少ない；④多元接続を実現するための大前提として、空間全二重が確保できる上行（アップリンク）方式。以上の4点を考慮することにより、今回は親機可視光拡散（照明のため）、子機赤外線（全二重のため）中等指向性（ $\pm 20^\circ$ ）の伝送トポロジーを選定した。

## 2-2-3. 光無線 LAN に適切なフレームフォーマット

前述の隠れ端末問題（マルチアクセス（1対N）時のパケット衝突問題）を解決するために、IEEE802.11のCSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance）方式を参考する。しかし、光無線 LAN 通信の時、光の直線性により、各端末同士の間互いに検知できないので、直接に 802.11 の CSMA/CA 方式中の「CS」を利用することができない。そこで、我々は、「CSMA」の中の「MA」のみを保留し、「CS」の代わりに RTS/CTS を加えた MACA 制御方式（図 2-2-2）により、衝突問題を解決する。

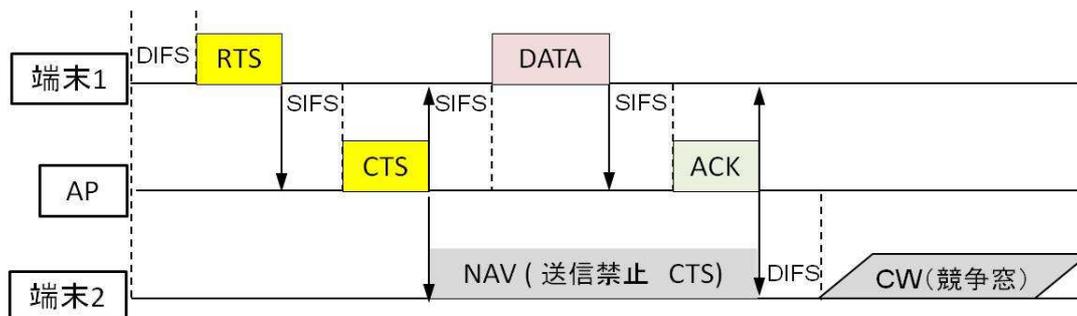


図 2-2-2 衝突回避方式

なお、電波産業会（ARIB）の光無線 LAN では、受信信号を折り返し送信することで衝突検知をする CSMA/CD 方式が規格化されている。また、電波無線 LAN の規格にはオプションとして PCF（Point Coordination Function）方式と呼ばれるアクセスポイントが全ての端末を順番にポーリングし、送受信を管理する手法もある。そこで、これらを比較するシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図 2-2-3 に示す。

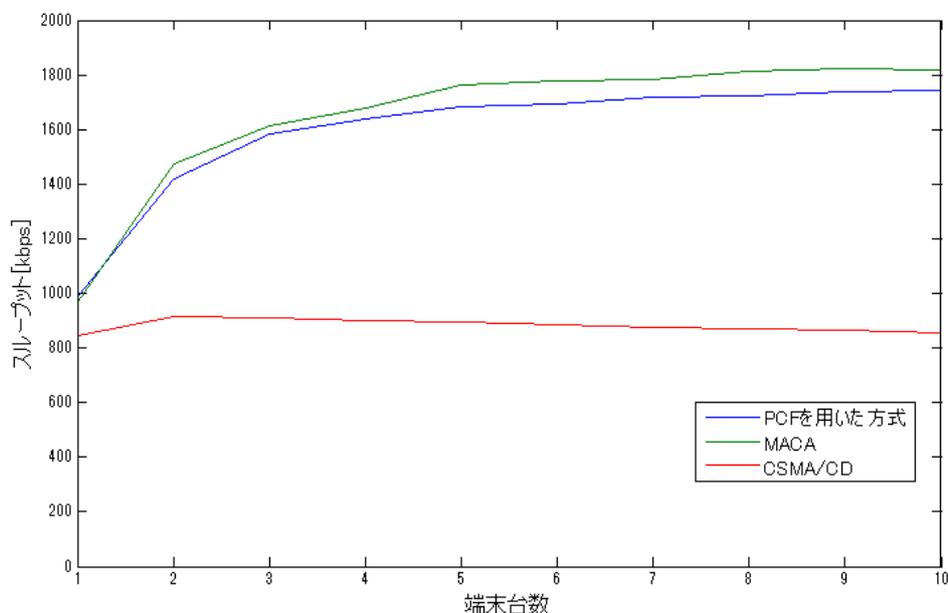


図 2-2-3 各プロトコルのスループット比較

CSMA/CD 方式は半二重のプロトコルであるため、チャンネルが上下合わせて 1000kbps 分しかない。一方 MACA 方式および PCF を用いた方式は全二重のプロトコルであるためチャンネルが上下それぞれ 1000kbps で合わせて 2000kbps ある。それが CSMA/CD 方式と他方式の差の大きな原因である。3 プロトコルとも端末台数が 1 台の時よりも 2 台のスループットが高い。これは各端末・アクセスポイントから前述のような確率密度関数の時間で送信パケットが発生するので、端末が 1 台の時は発生するパケット自体が少なくチャンネルが使用されない時間が多いためである。CSMA/CD 方式では端末が 3 台より増えるとスループットが減少するが、これは衝突が頻繁に起きることによりバックオフ時間が増えるためである。一方で MACA 方式および PCF を用いた方式の増加傾向は似ており、端末台数が増えるにつれてスループットの増加が収束していくようになっているが、減少はほとんどおきていない。また端末が 1 台の時を除いて MACA 方式のほうが PCF を用いた方式に比べてスループットが 20~70kbps 位高くなっている。さらに PCF を用いた方式では端末の LAN への出入りを検出して端末番号を付与するためのオーバーヘッドを考慮していないので、実際にはもう少しスループットが減少するはずである。よって本シミュレーションの結果からは、光無線 LAN のプロトコルとして MACA 方式が適当であるといえる。

## 2-2-4. 光無線 LAN の通信制御プロトコルの実装

フィールド実験用アクセスポイント及び送受信モジュールに実装する通信制御プロトコルは、前述のシミュレーション結果を踏まえ、MACA (RTS/CTS) 方式を用いる。本方式では、端末数が増加し、通信帯域の使用率が上がれば、もっとも効率的にスループットが増加することが判っている (図 2-2-4 参照)。そこで、フィールド実験用アクセスポイント及び送受信モジュールに通信制御プロトコルを実装する上で、スループットにもっとも大きな影響を与える競争窓 (CW) に関して確認した。競争窓は、前の通信終了後から次の通信を行うまでの待ち時間となるため、なるべく振れ幅は小さい方が良い。しかし、振れ幅が小さすぎると端末間の差異がなくなり、結果的に通信の衝突が起りやすくなってしまふ。

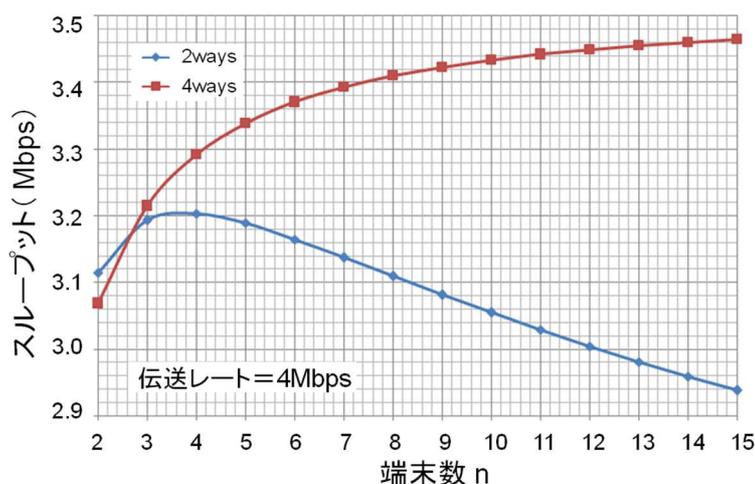


図 2-2-4 端末数とスループット

図 2-2-5 に競争窓とスループットの関係を示す。前述の通り、競争窓が小さいほどスループットが良いことが判る。そこで、実装するに当たってはスループットが 1.6Mbps を下回らないように条件を決めた。この時、シミュレーション上の平均スループットは、1.72Mbps となるが、実装後の実機においても平均 1.70Mbps のスループットが得られている。

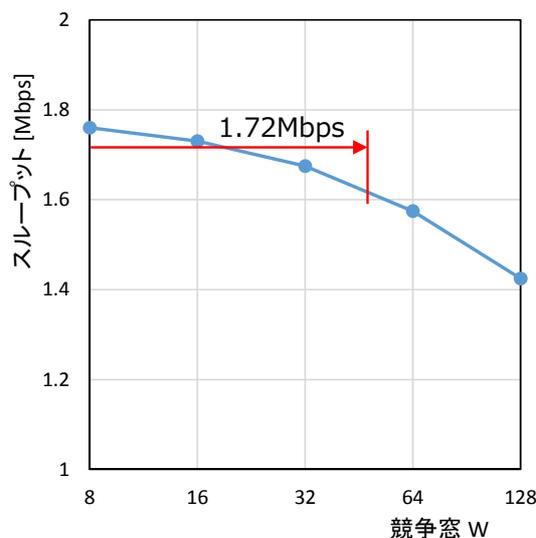
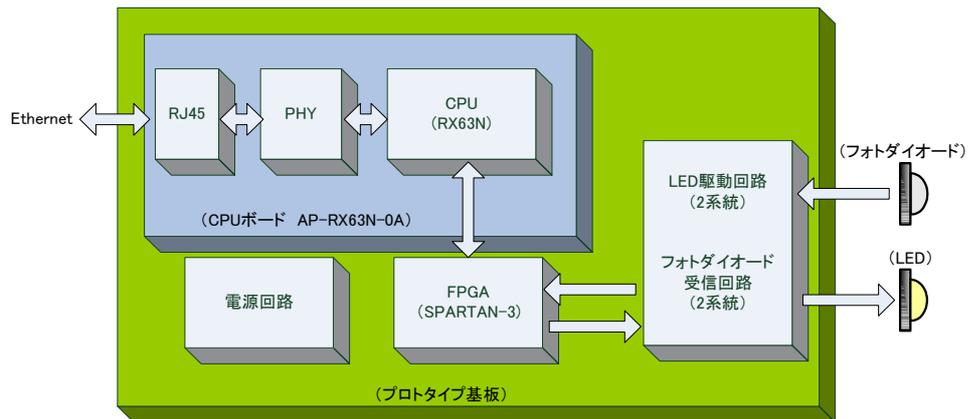


図 2-2-5 競争窓とスループット

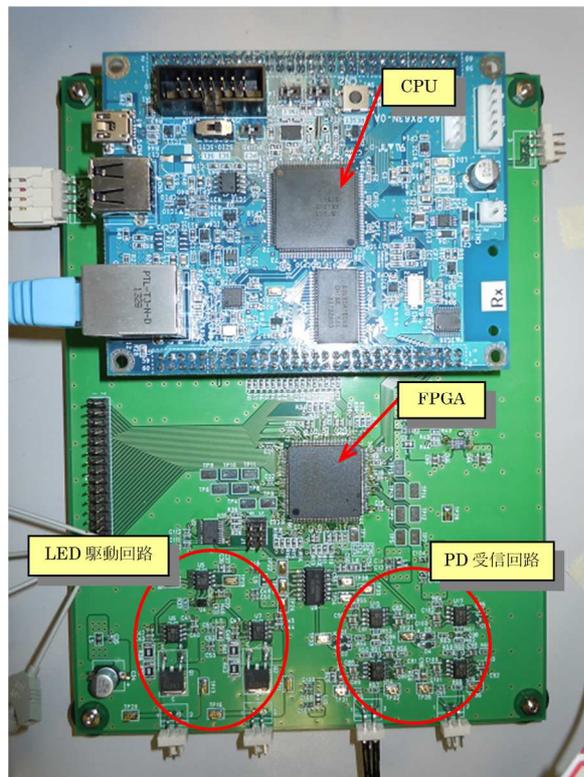
## 2-3. LED 照明器を用いた光無線 LAN アクセスポイントの開発

### 2-3-1. プロトタイプの開発

通信機能の評価実験を行うために、LED 照明器を用いた無線 LAN アクセスポイントの送信動作を擬似的に行うプロトタイプを開発した。プロトタイプの構成及び外観を図2-3-1に示す。プロトタイプでは開発時間短縮のため、ネットワーク処理を CPU で、変調及びフレーム生成を FPGA で行う構成とした。



(a) 構成



(b) 外観

図2-3-1 プロトタイプ基板

## 2-3-2. プロトタイプによる伝送レート測定 (物理層)

プロトタイプに開発した FPGA を実装し LED による通信を行う。FPGA 内部に組み込まれた PN 符号発生器より PN 符号 (PRBS23) を出力、それを I-4PPM 変調し CP-1222 フレームフォーマットに生成した信号を LED より送信する。フォトダイオードで受信した信号を復調しペイロードのみを誤り率測定器で測定する。クロック速度を変更して 10sec 間測定し ErrorFree となる時を伝送レートとする。

(使用機材)

送受信回路 : プロトタイプ基板  
 LED : SWR7-SW50 (NXP)  
 PhotoDiode : S6967 (浜松ホトニクス)  
 誤り率測定器 : MP8931A (アンリツ)

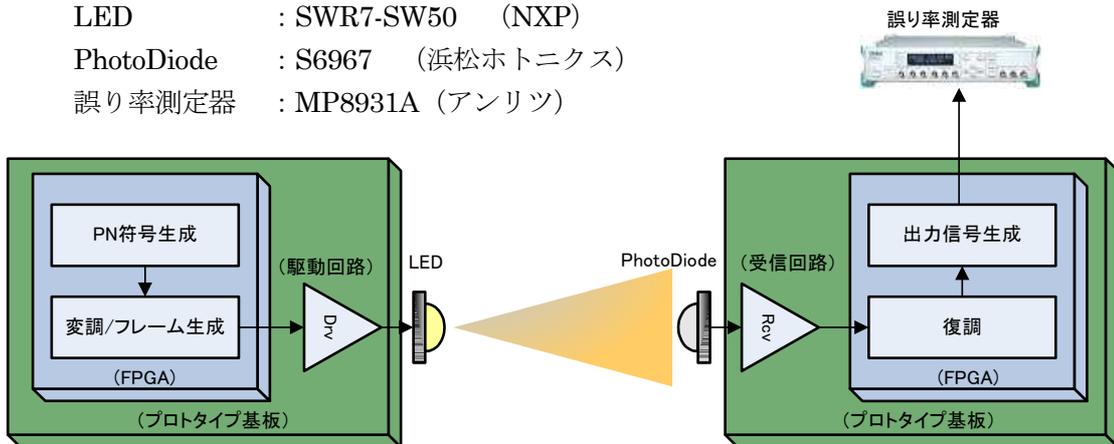


図 2-3-2 実験測定系

実験結果の一例を図 2-3-3 に示す。最終的に得られたプロトタイプでの伝送レートは 1.86 [Mbps]であった。

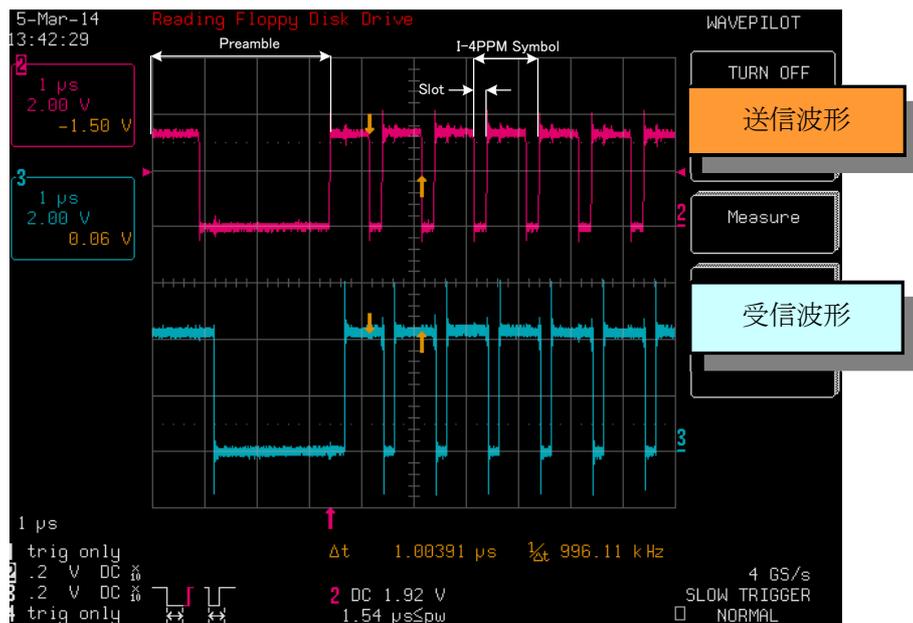


図 2-3-3 送受信信号波形

### 2-3-3. フィールド実験用アクセスポイントの開発

LED 照明器を用いたフィールド実験用光無線 LAN アクセスポイントを開発した。図 2-3-4 に構成と外観を示す。

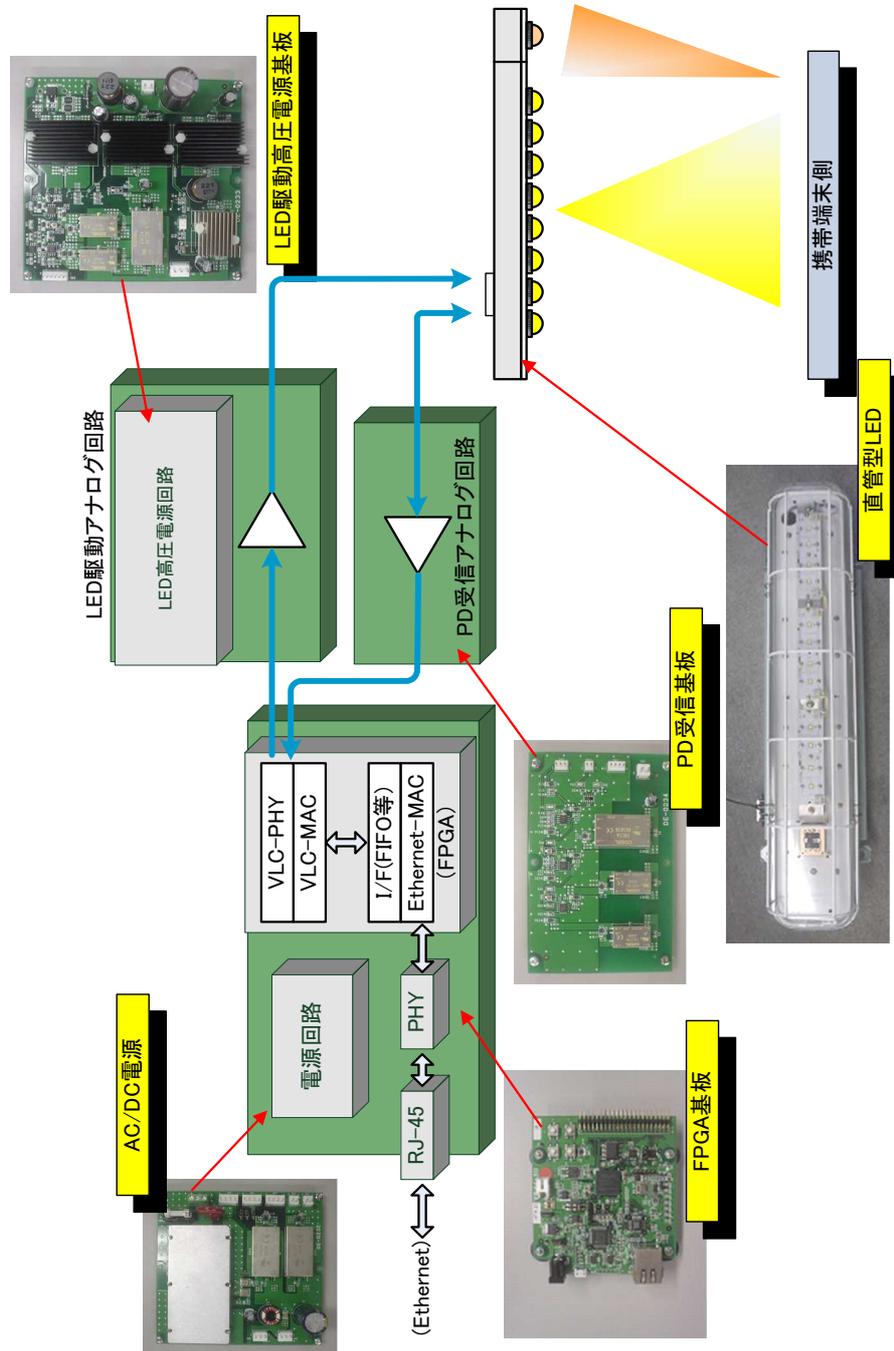


図 2-3-4 フィールド実験用 AP 構成図

アクセスポイントは、照明器であり送信機でもあるシングルチップ型白色 LED モジュール駆動・変調回路と、端末側からの赤外線通信の受信回路からなる。

白色 LED モジュールは、高輝度白色 LED 素子が 4 直列接続した構造を内部に持つ LED チップを 12 灯直列接続したものであり、その電源は約 140V、1A<sub>max</sub> となる。変調はこの高電圧を

高速でスイッチングする必要があるため、相当のノイズの発生が予想される。一方、赤外線通信の受光回路では、PD（フォトダイオード）の数十mVの微弱信号を高利得で増幅する必要があるため、回路内のノイズの存在は大きな問題となる。そこで、試作基板の設計製作に当たっては、ノイズの発生源となるであろう LED モジュールの駆動・変調回路と、ノイズに敏感な受信回路及び信号処理用 FPGA 基板の弱電系信号回路を、電氣的に絶縁することとした。そのため、図 2-3-4 に示す通り、4 枚基板の構成となっている。

なお、プロトタイプではネットワーク（Ethernet フレーム）処理を CPU で行っていたが、フィールド実験アクセスポイントに当たってはネットワーク処理も FPGA 内で行っている。

## 2-3-4. 評価結果をふまえたアクセスポイントの改良

動作検証や②評価から得られた結果を基に、製品化に向けて、アクセスポイントを改良した。具体的には、アクセスポイント内の温度上昇による異常点滅動作を防ぐための冷却機能の追加と、船舶内での設置性を向上させるための分離型筐体の開発である。

### 2-3-4-1. アクセスポイントの冷却機能

原因：電源用基板（DE-0233）実装部品からの発熱により、制御部内の温度が上昇。

制御部内の温度上昇により、基板の実装部品（DC-DC コンバータ）がメーカーの動作保証温度を超過し、部品の保護回路が働き電圧降下が発生。

対策：制御部内の温度測定結果を基に下記対策を実施した。

- ・電源基板（DE-0233）に搭載した部品（DC/DC コンバータ）の放熱方法の改良  
※ヒートシンクによる放熱 → 筐体を利用して放熱
- ・組込み部品のレイアウト変更による BOX 内の通風性の向上

### 2-3-4-2. アクセスポイントの設置性向上

理由：船上試験での機器設置時、LED 照明部と制御部が一体では大きく、設置場所に制約される事が確認された。（特に居住区画での設置）

対策：LED 照明部と制御部を分離できる構造とした。

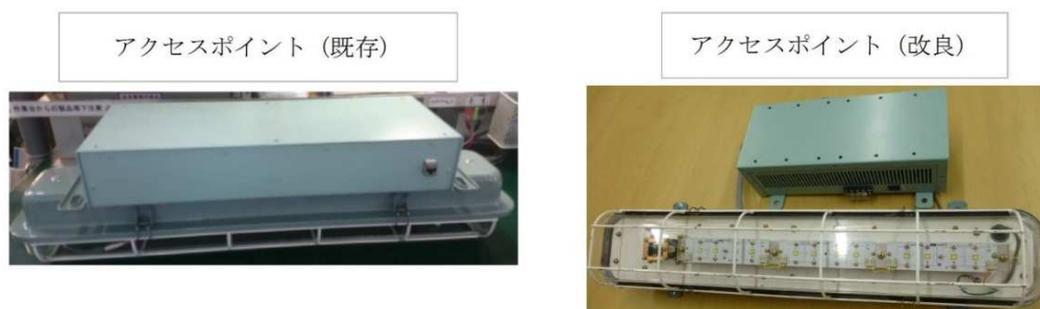


図 2-3-5 アクセスポイントの分離

## 2-4. 携帯情報端末に装着可能な小型送受信モジュールの開発

### 2-4-1. プロトタイプによるネットワーク速度の評価

通信機能の評価実験を行うために、小型送受信モジュールにおいてもアクセスポイントと同様にプロトタイプを開発した。プロトタイプの開発にあたっては、アクセスポイントと小型送受信モジュールでハードウェアを共通化している。ハードウェア構成に関しては、前節に記述しているので、ここではネットワーク速度の評価について述べる。

なお、簡易的なネットワーク速度の評価には、OS (Linux, Windows など) に実装され容易に用いることができる”ping”コマンドや”tftp”コマンドを用いることが多いが、プロトタイプにおいては、ネットワーク層において処理できるプロトコルに制限があり、”ping”や”tftp”を用いることができない。そこで、規定サイズのネットワークパケットを指定回数だけ送受信し、送受信に掛かった時間から、ネットワーク速度を算出するアプリケーションを開発し、評価を行っている。図 2-4-1 にネットワーク速度の測定環境を示す。

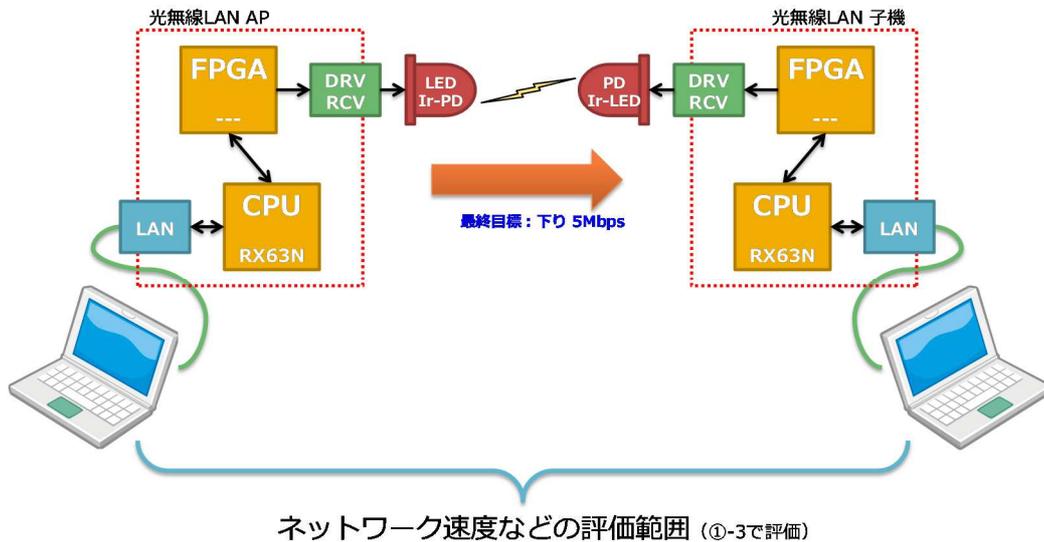


図 2-4-1 ネットワーク速度の測定環境 (下り (可視光))

ネットワーク速度評価用アプリケーションによる下り (可視光) の測定結果の一例を表 2-3-1 に示す。下りの速度評価に際しては、1 パケット 512bit の UDP パケットを 5 万回送信し、全パケットの受信が完了するまでの時間 (受信時間) を測定している。測定結果より、ネットワーク速度は最大 1.27Mbps、平均 0.91Mbps となる。これは、前節で測定したプロトタイプ基板の伝送レート 1.86Mbps に近く、ネットワーク層のソフトウェア処理などによる遅延を考慮すると、適切な結果と言える。ただし、測定結果にばらつきがあるため、実験環境によるネットワークパケットの状況を確認したところ、実験に使用した PC の OS (Windows 7) による評価実験とは無関係なパケットが多数見受けられ、これらの無関係なパケットが実験結果に悪影響を与えたと考えられる。そこで、フィールド実験におけるネットワーク速度の評価に関しては、ネットワーク速度評価アプリケーションである ipref を用いている。

表 2-4-1 : ネットワーク速度の測定結果 (下り (可視光))

回数	パケット送信数	受信時間[s]	ネットワーク速度[kbps]	回数	パケット送信数	受信時間[s]	ネットワーク速度[kbps]
1	50,000	21.480	1,192	6	50,000	20.157	1,270
2	50,000	24.814	1,032	7	50,000	22.157	1,155
3	50,000	34.814	735	8	50,000	64.160	399
4	50,000	20.147	1,271	9	50,000	20.647	1,240
5	50,000	52.815	485	10	50,000	82.139	312
						36.333	909

上り (赤外光) の測定結果の一例を表 2-4-2 に示す。上りの速度評価に際しては、1 パケット 512bit の UDP パケットを 3 万回送信し、全パケットの受信が完了するまでの時間 (受信時間) を測定している。測定結果より、上りのネットワーク速度は最大 1.30Mbps、平均 0.96Mbps となる。これは、上りの測定結果と同様に、ネットワーク層のソフトウェア処理などによる遅延を考慮すると、適切な結果と言える。また、同様に、測定結果にばらつきがあることも OS (Windows 7) による影響と考えられる。

最終目標として、小型送受信モジュール (上り) のネットワーク速度は 1Mbps を目指しており、プロトタイプでも達成できた。しかしながら、小型送受信モジュールにおいては、携帯情報端末と小型送受信モジュールを接続する USB インターフェースが通信上のボトルネックとなることも想定されるため、USB インターフェース設計も重要である。

表 2-4-2 ネットワーク速度の測定結果 (上り (赤外光))

回数	パケット送信数	受信時間[s]	ネットワーク速度[kbps]	回数	パケット送信数	受信時間[s]	ネットワーク速度[kbps]
1	30,000	15.803	972	6	30,000	41.815	367
2	30,000	24.481	627	7	30,000	13.813	1,112
3	30,000	11.834	1,298	8	30,000	14.491	1,060
4	30,000	12.501	1,229	9	30,000	35.814	429
5	30,000	12.490	1,230	10	30,000	11.834	1,298
						19.488	962

## 2-4-2. フィールド実験用小型送受信モジュールの開発

フィールド実験を行うための小型送受信モジュールを開発した。図 2-4-2 に構成と基板外観を示す。

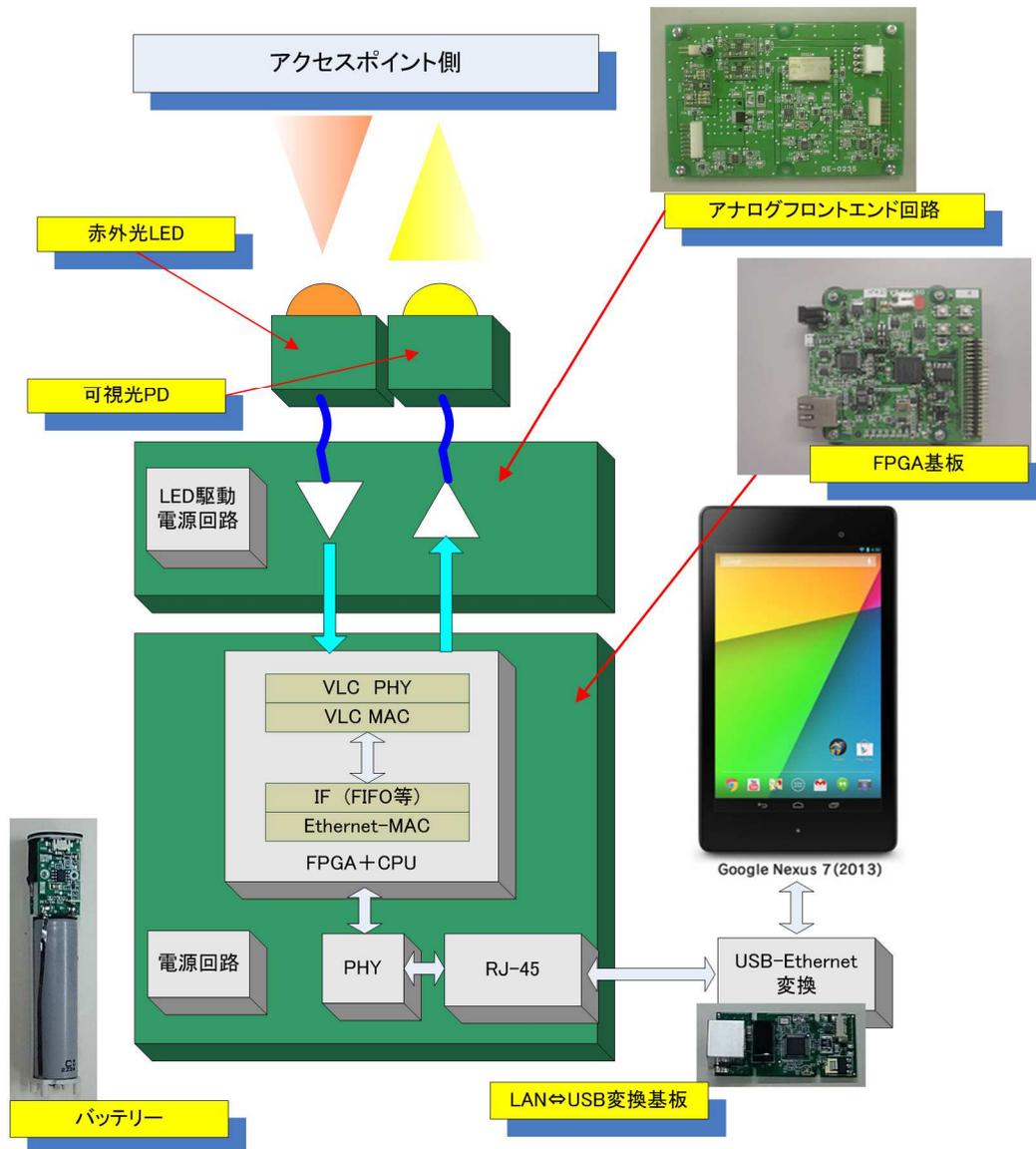


図 2-4-2 フィールド実験用小型送受信モジュール構成図

小型送受信モジュールの送受信用アナログフロントエンド回路は、アクセスポイントと異なり、LED 駆動・変調回路と PD 受信回路が一体化しており、電源の絶縁分離を行っていない。これは、LED の駆動電圧が低い事と、主電源の供給元にモバイルバッテリー等を使用するため省電力化であること、そして、装置の小型化の必要性からである。しかしながら、基本的な回路構成は、白色 LED の駆動・変調回路と同じである。大きく異なる点は、駆動する LED の種類・直列数の違いによる駆動電圧である。

駆動する赤外光 LED の一素子の駆動電圧は約 1.5V、3 灯直列で約 4.5V。駆動トランジスタの  $V_{ce}$  飽和電圧が約 2V、電流検出用抵抗の電位差が 1.5V (0.3A 駆動時) から、駆動電源は DC8V

程度となる。この駆動電源 8V は、5V のモバイルバッテリーから非絶縁型 DC/DC コンバータで発生する。

上り方向の通信距離の延長の為には、受信側の感度向上も必要であるが、S/N 比の観点から考えれば端末器側赤外 LED の出力光量の増加がもっとも有効である。しかし、バッテリー駆動が前提の本端末機では省エネ性、連続使用時間等の性能が求められ、また設計仕様上、増設できる赤外 LED の数に制限がある。

現状の回路では、赤外 LED 駆動用の電源に最大 8V/1A 出力の DC/DC コンバータを搭載している。赤外 LED の点灯電圧は約 1.5V. 電流検出、駆動トランジスタの飽和電圧を考慮すると、赤外 LED の搭載数は 3 直列が限界である。駆動電流を赤外 LED の最大連続電流の 1A にする方法も考えられたが、赤外 LED 素子への負担を考慮して、3 直列 2 並列回路 (計 6 素子) を組み込む形として全体で 1A 駆動とすることとした。

一方、可視光下り通信については、当初 1 個の可視光 PD で受信回路を構成していたが、目標通信距離 3m を達成するため、最終的にはアクセスポイントの赤外 PD 受光基板同様、可視光 PD も並列化した。

赤外 LED 素子、可視光 PD 素子を増設した端末器の送受光基板を、図 2-4-3 に示す。なお、当基板による実験を行った結果、送信赤外 LED の光が受信可視光 PD に干渉する事態が判明したため、最終的には 3D プリンターで出力した遮光板を設置した。

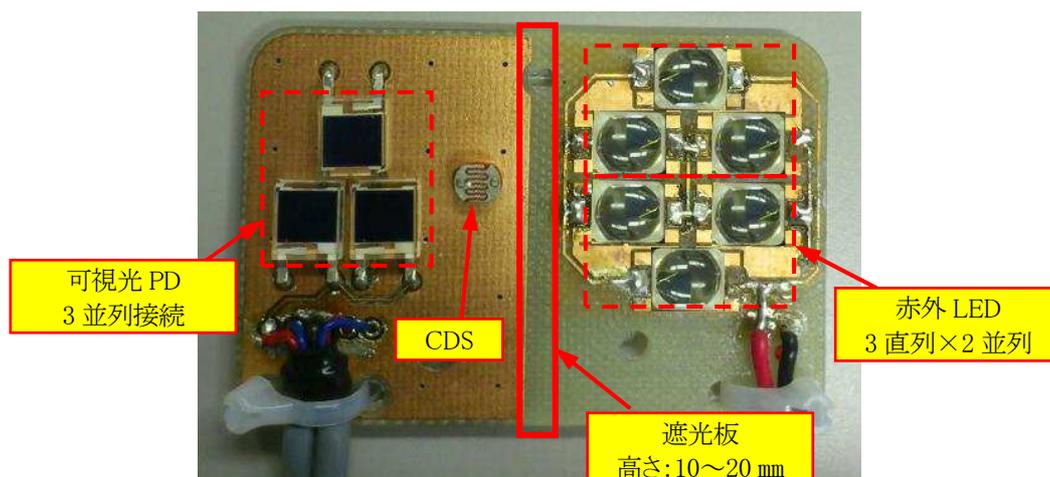


図 2-4-3 送受光基板

受信回路の基本的な構成も、アクセスポイントの赤外光受信回路と同じであるが、シングルチップ型白色 LED においては、蛍光体由来の蓄光・残光による波形の歪み影響を考慮する必要がある。

図 2-4-4 に可視光 PD 回路 (アナログフロントエンド回路内) の各ポイントで測定した波形を示す。白色 LED の受光波形①は、蓄光・残光と思われる影響により、矩形波とは程遠い波形に歪んでおり、さらに ON/OFF 比 (データのデューティ比) に応じて、波形全体が上下方向に波打ってしまっている (サグ発生)。この波形を、任意の直流電圧でコンパレートを行おうとすると、同じ 1bit 分のスロット幅でも前後の波形の HI/LOW 状態で大きく変化してしまう。そこで、受信信号を適切な LPF に通した波形②を用いて二値化する事により、波形の歪み・サグの影響を抑えて、通信データを復調できる (波形③)。

また、通信を行うにあたって、その通信距離の変化も信号に大きな影響を及ぼす。距離が2倍離れると、信号の振幅は約 1/4 になってしまう。そのため、広範囲にわたり通信を確立する為には、何らかの方法で AGC (オートゲインコントロール) 補正を行う必要がある。今回の試作基板では、AGC 機能を容易に実現するため、CdS センサを用いている。

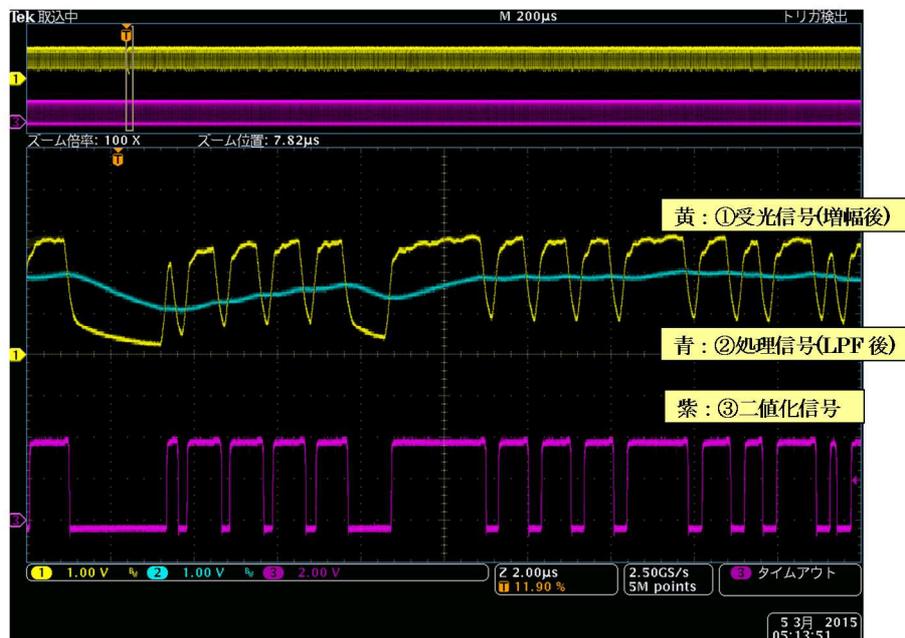


図 2-4-4 可視光 PD 受信回路の波形

ハードウェア同様、FPGA 内のプロトコル処理もアクセスポイントとほぼ同様である。参考までに、小型送受信モジュールのプロトコル処理の状態遷移を図 2-4-5 (次ページ) に示す。

#### 2-4-4. 送受信モジュールの小型化

前述のフィールド実験用小型送受信モジュールでは、目標とするサイズ (標準的なスマートフォンの 1/3 以下) にならないため、動作検証などの結果を基に、回路見直しやテスト回路の削除を行うと共に、2 枚構成だった基板を一体化するなどして、更なる小型化を行った。

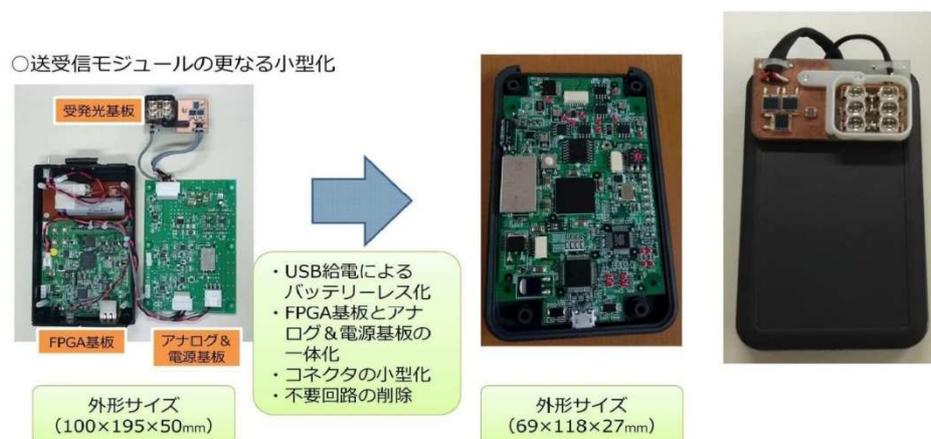


図 2-4-6 送受信モジュールの小型化



## 2-5. 電力線通信ネットワークと光無線 LAN システムの船用向け実装

### 2-5-1. 電力線搬送通信機器を船舶で使用する為の課題抽出

#### 2-5-1-1. 船舶での電路系統及び機器設置方法の検討

船舶環境において光通信を使用する照明の電路系統及び機器の設置方法、利用環境について検討を行った。図 2-5-1 は船舶での照明系統の概要を示した物である。船内の主要なデータ（機関データや航海灯データなど）は照明系統とは別の電路系統であり、主配電盤より電源が共有されている。その為、電路系統上、照明間の通信であっても、場合によっては分電盤、主配電盤を経由することとなる。その為、三相電源から単層電源への分岐、通信距離の増加、主配電盤や分電盤に接続せられている他機器の影響に対する対策が必要であることが分かった。

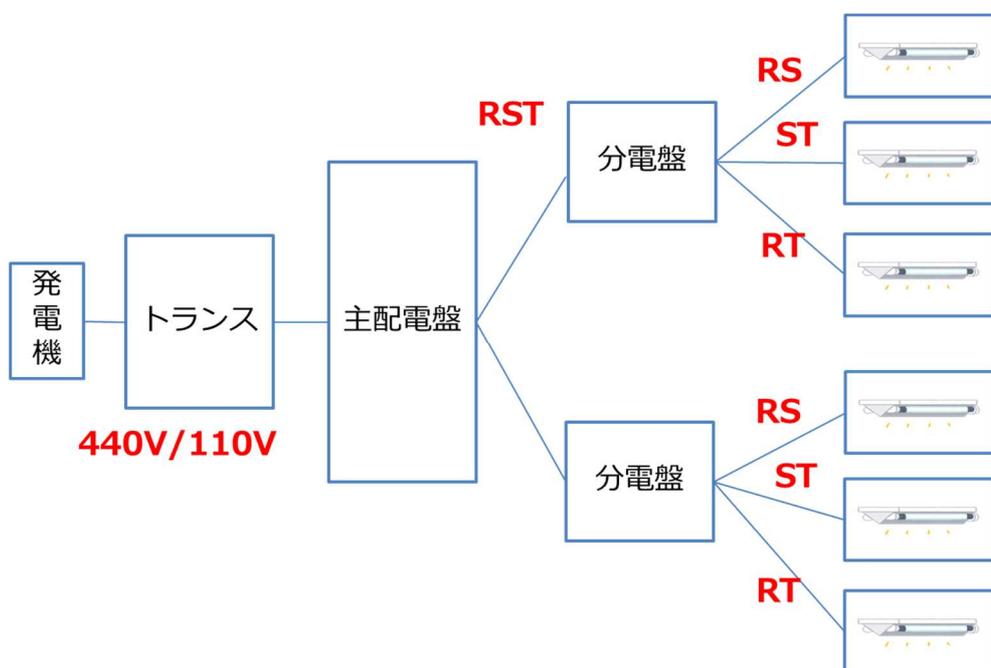


図 2-5-1 船舶での照明電路系統概要

#### 2-5-1-2. 電力線通信の船舶内使用に関する調査

船上フィールド実験及び製品化に向けて、電力線通信（PLC）の船舶内使用に関する調査を行い、通信関連を管轄する総務省（中国総合通信局経由）に対して、船舶内での PLC 使用の申し入れを行った。しかしながら、下記の理由で船上フィールド実験においては PLC の使用を認めることができないとの回答を受けた。なお、本研究開発で用いる PLC は、総務省の電力線搬送通信設備型式認定を受けている。

- 電波法施行規則第 44 条において、電力線搬送通信設備の型式指定は単相交流が条件に含まれている。船舶の電源ラインは三相交流が含まれており、型式指定の条件に該当しないため、型式指定設備の使用は認められない。
- 平成 26 年 3 月の電波法施行規則等の一部改正で、電力線搬送通信設備の使用を

「屋内」から「屋外（電気使用者の引き込み口における分電盤から負荷側に限る。）」に改正したが、船舶（屋外）での使用を認めるものではない。

- ・実験用電力線搬送設備として PLC 実験を行う場合も、「漏えい電界強度の低減技術の検証」などを目的とした実験のみ認められる。

総務省からの回答により、現時点では船舶での PLC 実験を行うことができないが、本年（H28 年）2月に屋外での使用可能な PLC 機器の使用許可が総務省より認可されたとの情報も得ている。今後は、船舶に光無線 LAN システムを製品化する上で PLC の使用は望まれるが必要条件ではないため、PLC 非搭載の光無線 LAN システムの製品化を先行しながら、船舶での PLC 使用が認められるように情報収集と関係部署への働きかけを継続する予定である。

## 2-5-2. フィールド実験を考慮した電力線通信ネットワークの評価

### 2-5-2-1. 電源線を鉄管で囲んでの伝送試験

船舶は鋼板で遮蔽された空間が多い為、鉄板で電線を加工事により高周波成分の信号がカットされ、PLC の通信が不能となる可能性に対する検証として、電源線を鉄管で囲んでの伝送試験を行った。

試験は、図 2-5-2 の構成で行った。電源線には、実際の船舶で使用されている標準的なケーブルを用いて、鉄管の長さを 22m とし、送信側パソコンより一定時間パケットを送り続け、受信側パソコン上で通信速度と受信状況を照合することで、鉄管で囲う事による通信への影響は無いと判断した。

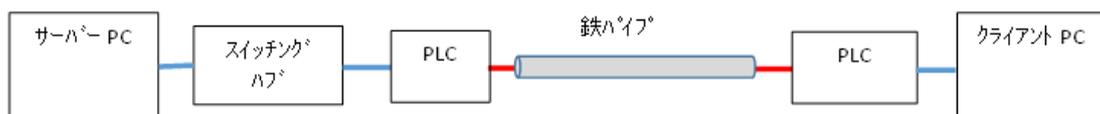


図 2-5-2 鉄管を用いての通信試験構成



図 2-5-3 鉄管拡大図

### 2-5-2-2. 船舶で使用されている発電機を用いた環境試験

船舶でのフィールド実験を考慮し、船舶仕様と同等の発電機及び給電回路を用いた通信実験を行った。



図 2-5-4 実験を行ったシミュレーター室

実験に使用した発電機は三相 3 線非接地型でトランスを介して AC100V の回路に電源を供給している。

この給電回路の RS 相の電源を用いて、電圧変動や周波数変動などの環境での通信実験を行った。試験結果を表 2-5-1 に纏めた。また、実験時の構成を図 2-5-5 に示す。

#### <電圧変動試験>

- ・日本海事協会が定める条件にて通信試験を実施。  
外部電源を次に示すように変動させ、機器の作動を確認する。  
電圧変動: AC 定常値  $100V \times \pm 10\%$  AC 定常値  $100V \times \pm 20\%$  (1.5 秒)

#### <周波数変動試験>

- ・日本海事協会が定める条件にて通信試験を実施。  
外部電源を次に示すように変動させ、機器の作動を確認する。  
周波数変動 AC 定常値  $60Hz \times \pm 5\%$  AC 定常値  $60Hz \times \pm 10\%$  (5 秒)  
\*試験は  $60Hz \times \pm 10\%$  で実施

#### <地絡試験>

- ・船舶内で発生し得る事故もしくは故障を想定し、R-S-T 相の何れかが船体に地絡した状態を再現し、通信試験を実施。

#### <ノイズ試験>

- ・船舶内で発生し得る動力 (モーター) によるノイズを想定し、PLC 通信を行う電源ラインに負荷を接続する事で再現し、通信試験を実施。

#### <異相間での通信試験>

- ・実際の船舶では同一区画の照明に於いても使用する相が異なる場合がある。いずれの相を用いても安定した通信を行う事が求められる為、異相間での通信試験を実施。

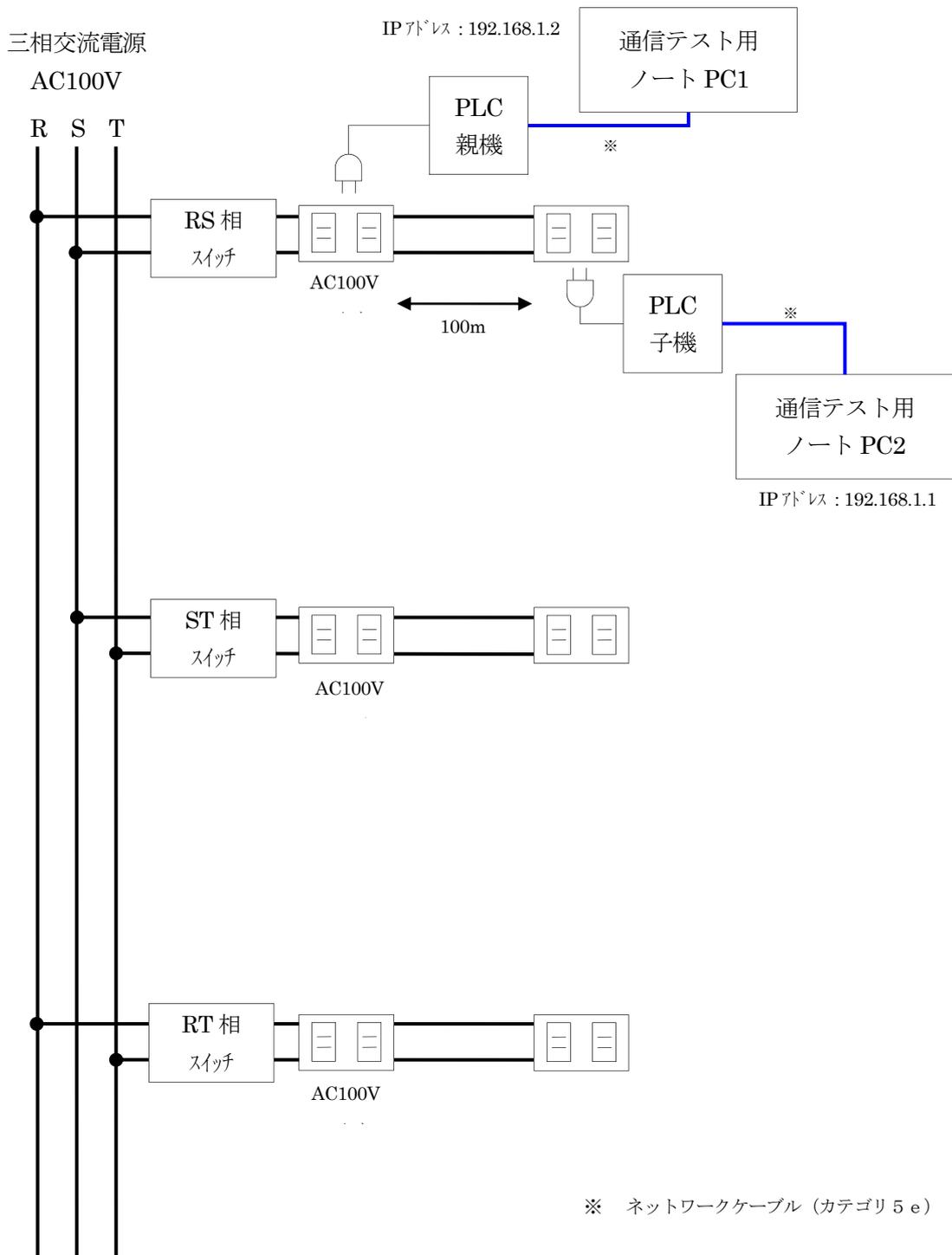


図 2 - 5 - 5 RS 相での電力線搬送通信試験構成

表 2-5-1 船で使用されている発電機を用いた通信実験結果

項目	試験概要	試験条件	通信可否
電圧変動試験	船級に定められている電圧にて通信試験を行った。 ・ AC100V±10% ・ AC100V±20%	電圧 80V	可
		電圧 90V	可
		電圧 110V	可
		電圧 120V	可
周波数変動試験	船級に定められている周波数にて通信試験を行った。 ・ 60Hz±10%	周波数 54Hz	可
		周波数 66Hz	可
地絡試験	各相それぞれを地絡させ、通信試験を行った。	R 相地絡	可
		S 相地絡	可
		T 相地絡	可
ノイズ試験	電力線搬送通信を行っている系統にノイズを発生させ通信試験を行った。	モーターノイズ混入	可
異相間での通信試験	3 相電源の異なる相に PLC を設置し通信確認を行った。	RS 相と ST 相	可
		RT 相と ST 相	可
		RS 相と RT 相	可

### 2-5-3. 船内に敷設可能な光無線 LAN アクセスポイントの開発

目的：フィールド実験用アクセスポイントを用いて②評価を行い、その結果を基に、製品化に向けてアクセスポイントの改良を行う。

評価結果：

振動試験 - 耐久・通信試験共に船級が要求する判定基準内であった。

EMC 試験 - 電源ラインから基準値を超える電波が発生。

→ フェライトコア（ノイズフィルター）の設置により対策。

温度試験 - 下記環境下で通信エラー（LED 異常点滅）が発生。

※周囲温度 55℃の環境下で 16 時間印可

→ 洋上試験に向けて、冷却ファンの設置により対策。

→ 製品化に向けて、ファンレス化し筐体への放熱構造により対策。

通信試験 - 総合動作試験と洋上試験を比較し、筐体の構造による通信不具合は無い。

設置作業性 - 居住区（司厨手員室）での設置に問題が有り。

→ 筐体の分割により、重量分散を行った。

## 第3章 (開発システムの) 評価

### 3-1. LED 照明評価と光無線 LAN システム性能評価

#### 3-1-1. LED 照明器の評価

LED 照明器としての性能を評価するため、照明関連試験として①全光束測定、②配光特性、③相対分光分布測定、④色彩計算 (色度・相関色温度・演色評価値)、⑤光度測定を行った。なお、照明関連試験に際して、試験機の制約から「LED 照明器」と「制御部」に分離 (図 3-1-1 参照) すると共に、通信状態を模擬するため連続的に通信パケットを送出する様にソフトウェアを改良した。

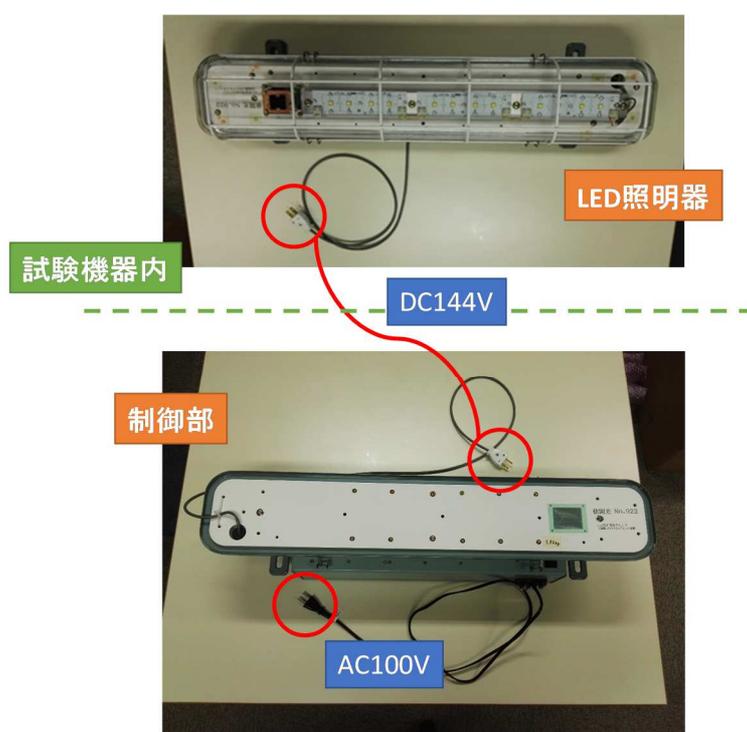


図 3-1-1 照明関連試験に用いたアクセスポイント

各測定結果を表 3-1-1、図 3-1-2～図 3-1-3 に示す。全光束測定では 5,400[lm]と、同サイズの蛍光灯器具 (20W×2 本、2,400～2,800[lm]) と比較すると、かなり明るいことが判る。これは天井高の高い機関室などに取り付けることを想定し、LED 出力を調整したためであり、必要に応じて出力を調整することで必要十分な明るさを提供することができる。また、LED 照明としての省エネルギー性能を確認すると、約 65[lm/W] (=5,400÷83.1) と蛍光灯器具の 65[lm/W] (=2,600/40) と同等となる。これに関しては、通信機能を有しているとは言え、電源回路などの最適化を行い、更なる低消費電力化を目指す必要がある。

配光特性に関しては、使用している LED チップ (LUXEON M LXR7-SW50) の配光特性と同じモノが得られており、可視光通信による配光特性への影響は見られなかった。ただし、相対色温度に関しては 5,674[K]と、LED チップの色温度 5,000K と比較すると、高い色温度となった。相対分光分布を確認すると、蛍光体の波長域で分光分布が低いことが判り、4PPM 変調の影響

により蛍光体が十分に励起されないことが原因と考えられる。これに関しては、今後再評価を行いたい。

また、演色評価数 Ra に関しては、79 と蛍光灯と同等の数値となっており、CIE（国際照明委員会）の定めた用途に応じた演色性の基準（表 3-1-2）によると、一般的作業に好ましい照明として十分な演色性を持っていることが判る。

表 3-1-1 測定結果

項目	測定結果
全光束 [lm]	5400
相対色温度 [K]	5674
演色評価数 Ra	79
光度 [cd]	1810
消費電力 [W]	83.1

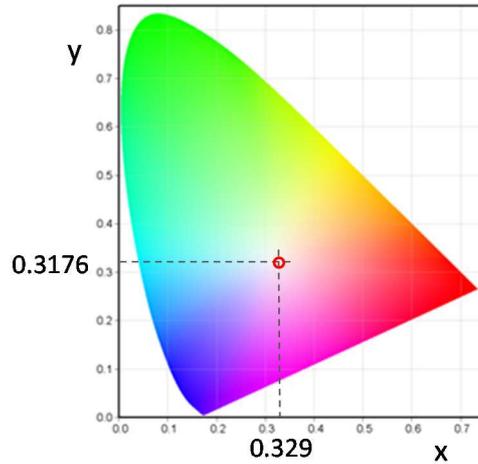


図 3-1-2 色度座標

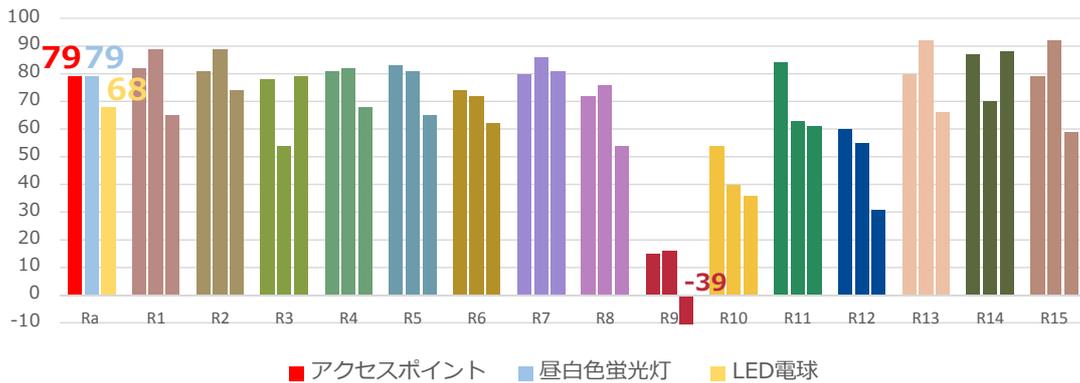


図 3-1-3 演色評価数

表 3-1-2 演色性と使用用途

範囲	使用用途	
	好ましい用途	許容できる用途
$Ra \geq 90$	色検査 美術館	
$80 \leq Ra < 90$	住宅・店舗 病院 印刷作業 織物作業	
$60 \leq Ra < 80$	一般的作業	事務所 学校
$40 \leq Ra < 60$	荒い作業	一般的作業
$20 \leq Ra < 40$		荒い作業

### 3-1-2. 光無線 LAN アクセスポイントの評価

開発した光無線 LAN アクセスポイントの評価は、主に複数台通信時のネットワーク速度に関して行った。ネットワーク速度の評価には、ネットワーク帯域測定ソフトウェアである”Iperf”を用いた。”Iperf”は、ネットワーク速度の評価に一般的に用いられており、測定対象となるネットワークの最大帯域パフォーマンスを測定することができる。

ネットワーク速度測定の様子を図 3-1-4 に、測定結果の一例を図 3-1-5 に示す。測定環境は、一般的なオフィスの天井にアクセスポイントを設置し、外光をブラインドで遮断した。また、天井に取り付けられたアクセスポイント以外の照明は消灯した状態で測定を行った。送受信モジュールは、アクセスポイントの直下 2m の地点とアクセスポイントから 4 方向に距離 2m、角度  $40^\circ$  の 4 地点に配置した。

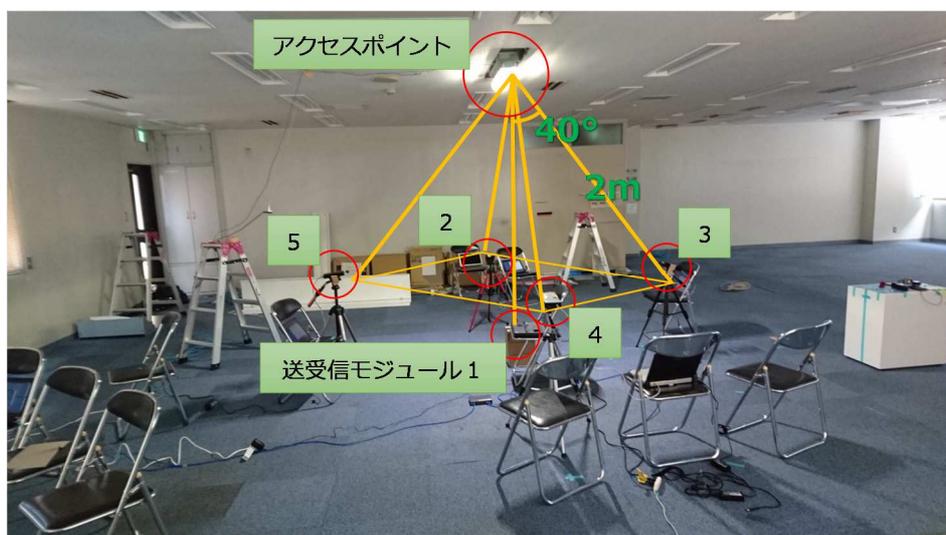


図 3-1-4 ネットワーク速度測定の様子

図 3-1-5 に測定結果の一例を示す。1 対 1 通信時の下り（可視光）と下り（赤外光）の最大ネットワーク速度は、それぞれ 1.86Mbps と 1.12Mbps であるが、1 対 N 通信になるとコリジョン処理の関係で、若干全体のネットワーク速度が低下する。しかし、下り（可視光）においても複数台通信時のネットワーク速度は 1.55Mbps と、約 8 割のネットワーク速度を維持しており、これまでのネットワーク速度（スループット）のシミュレーション結果と比較しても差はなく、概ね良好な結果と言える。ただし、複数台通信時に送受信モジュール間で通信帯域を等分できていない点は問題である。これに関して、特定の送受信モジュールが通信帯域を占有している訳ではないので、コリジョン処理のアルゴリズムと待ち時間に関するパラメータを調整する必要があると考えている。

一方、上り（赤外光）においては 1 対 1 通信時と複数台通信時でネットワーク速度の低下が見られない。通信制御プロトコルは、下り（可視光）と同様のアルゴリズム（動作）であるため、変調方式が下りの I-4PPM 変調に対して上りは 4PPM 変調にしていることが原因ではないかと推測される。この点に関しては、上り（赤外光）の目標通信速度 1Mbps を達成しているが、更なる高速化に向けて、今後も検証が必要である。

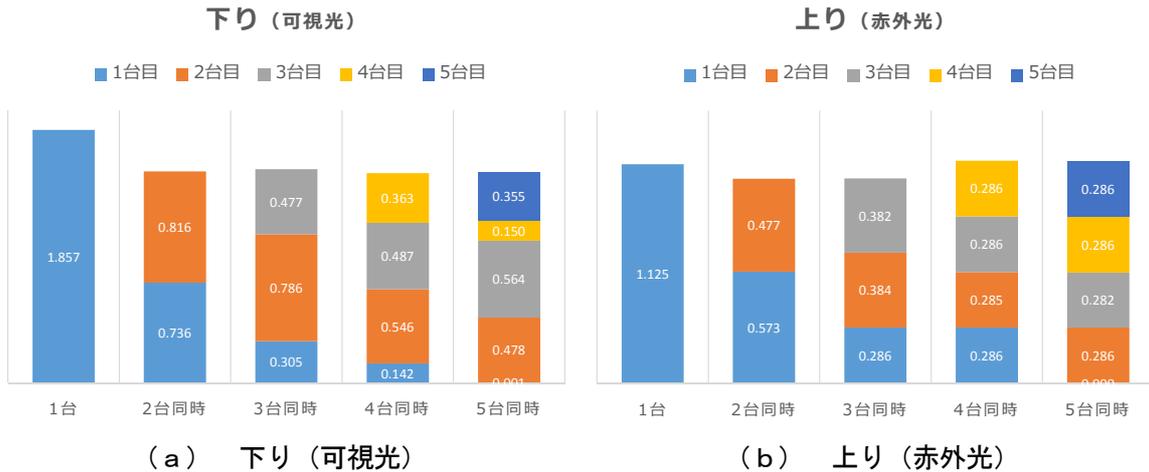


図3-1-5 ネットワーク速度の測定結果

### 3-1-3. 船級承認のための評価試験

船舶で実験を行うに辺り、船舶内に設置される他の電子機器類へ影響を与えないこと、また船舶内機器からの影響を受けないことが重要である。そこで、船級に基づく EMC 試験を行った。加えて、通常陸上で用いる機器ではあまり重要視されない振動に関しても、船舶では常に振動しているため、船級に基づいた振動試験を行い、システムに対する影響を確認した。

#### 3-1-3-1. EMC 試験

EMC(Electro-Magnetic Compatibility:電磁両立性)とは、電気機器が自身若しくは外部からの妨害電磁波に対して、機能・動作が阻害されないかを測定する耐性試験の事をいう。妨害電磁波には製品自身が発する物と、周囲の電気製品や自然界を起源とするものがあり、EMC 試験は前者の影響をみる「エミッション試験(EMI)」と後者への耐性を調べる「イミュニティ試験 (IMS)」に大別される。

試験は、フィールド実験用アクセスポイント及び小型送受信モジュールが放出しているエミッションレベル(妨害電磁波)の強度を測定し、日本海事協会が規定する上限値 (表 3-1-3) と比較し、対策の可否を検証した。その結果、アクセスポイントの電源ラインに基準値を超える電波の発生を確認した。この問題に対しては、当該電源ラインにフェライトコア (ノイズフィルター) を設置し、基準値を下回ることを確認した (図 3-1-7 参照)。



図3-1-6 EMC 試験の様子

表3-1-3 放射性エミッション試験における試験条件及び試験方法

試験項目	試験条件及び試験方法		判定基準
放射性 エミッション試験	次による放射性エミッション試験を行う		表中の上限値を 越えないこと。
	船橋又は甲板上に設置される機器は次による。		
	周波数範囲	上限値 (dB $\mu$ V/m)	
	150kHz~300kHz	80-52	
	300kHz~30MHz	52-34	
	30MHz~156MHz	54	
	156MHz~165MHz	24	
	165MHz~2GHz	54	
	上記以外の機器は次による。		
	周波数範囲	上限値 (dB $\mu$ V/m)	
	150kHz~300kHz	80-50	
	300kHz~30MHz	60-54	
	30MHz~156MHz	54	
	156MHz~165MHz	24	
	165MHz~2GHz	54	
・ 機器とアンテナの間隔は 3m とすること。			
・ 試験方法の詳細については、CISPR16-1. 16-2 による。			

(船用材料・機器等の承認及び認定要領 第7編1章より抜粋)

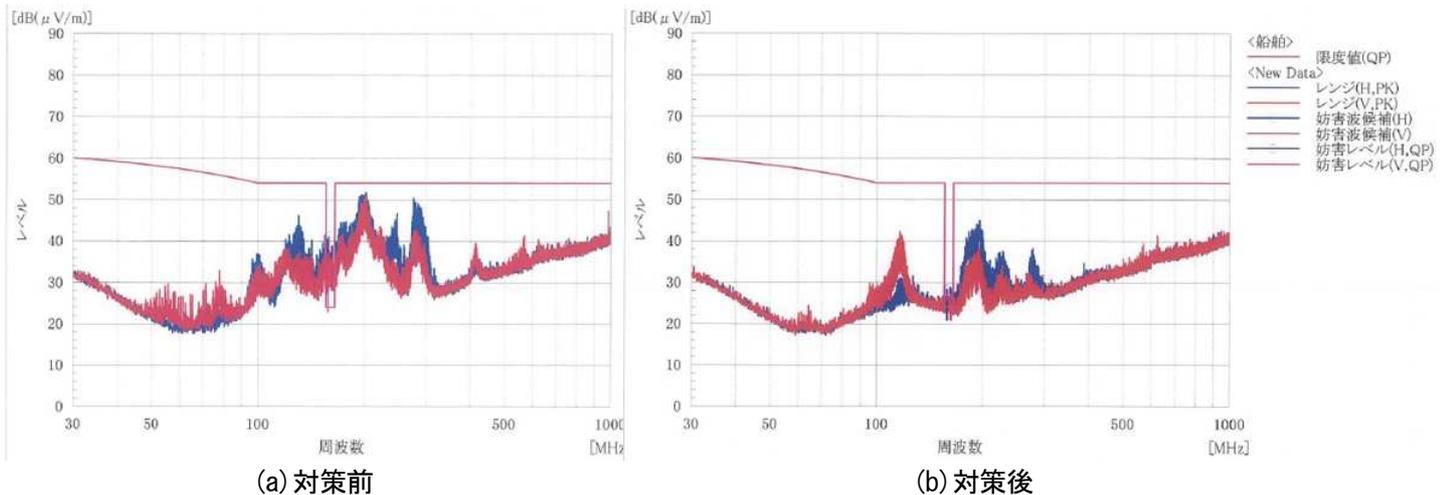


図3-1-7 放射性エミッション試験の結果 (対策前：上、対策後：下)

### 3-1-3-2. 振動試験

船舶は波によるローリング、ピッチング又、エンジンにより振動が発生する為、日本海事協会が規定する振動試験の判定基準 (表 3-1-4) を満たす必要がある。定められた試験方法に従い、機器の作動状態において 2Hz~100Hz の振動周波数に対して、振幅 $\pm 1$ mm 若しくは加速度 $\pm 0.7g$  で掃引し共振点を探す掃引試験を行った。



図 3-1-8 振動試験の様子

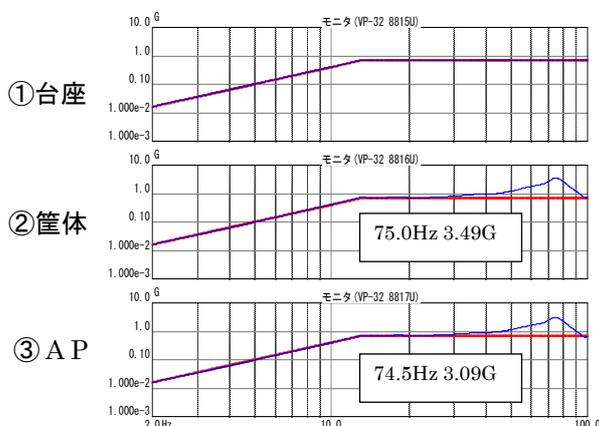


図 3-1-9 振動試験結果の一例（左右方向）

表 3-1-4 振動試験における試験条件及び試験方法

試験項目		
振動試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器の作動状態において 2(+3,-0)Hz~100Hz の振動周波数に対して、次に示す振幅又は加速度で掃引し共振点（増幅定数:Q<math>\geq</math>2 となる振動周波数）を探す掃引試験を行う。</li> </ul>	
	振動周波数	振幅又は加速度
	2(+3,-0)Hz~13.2Hz	振幅 $\pm$ 1.0mm
	13.2Hz~100Hz	加速度 $\pm$ 0.7g
	<ul style="list-style-type: none"> <li>共振が認められないときは、加速度<math>\pm</math>0.7g の振動を 30Hz で 90 分間加える耐久試験を行う。</li> <li>共振が認められたときは、対策を施して再び掃引試験又は共振周波数での振動（振幅又は加速度は掃引試験と同じ）を 90 分間加える耐久試験を行う。</li> <li>掃引試験において、共振点が互いに近接して複数認められた場合は、耐久試験に換えて 120 分間の掃引耐久試験を実施することができる。この場合の掃引の範囲は Q<math>\geq</math>2 となる有害な共振点（機器の動作不良が起こったり、チャタリング等の機械的振動を増長させたりする周波数をいう。）のうち最大のものにおける振動周波数を中心に 0.8 倍から 1.2 倍の範囲とする。</li> <li>試験中に機器の作動を確認する。</li> <li>試験は 3 軸方向について行う。</li> <li>ディーゼル機関、空気圧縮機等の振動条件が厳しい機関に装備する機器にあっては、試験条件を次により行う。</li> </ul>	
	振動周波数	振幅又は加速度
	2(+3,-0)Hz~25.0Hz	振幅 $\pm$ 1.6mm
25.0Hz~100Hz	加速度 $\pm$ 4.0g	
<ul style="list-style-type: none"> <li>試験方法の詳細については、IEC60068-2-6,TestFc によること。</li> </ul>		

(船用材料・機器等の承認及び認定要領 第 7 編 1 章より抜粋)

### 3-1-3-3. 温度試験

温度試験においても、EMC 試験、振動試験と同様に NK 船級規格に基づき、アクセスポイントを恒温槽に入れ、温度 55°C の環境下で 16 時間の点灯試験を行った。その結果、フィールド実験用アクセスポイントの照明が異常点滅し始め、通信できなくなる状態が発生した。そこで、熱電対を用いて発熱の大きな電子部品（主に DC/DC コンバーター）の温度を測定したところ、一部の部品で動作保証温度を超えていたことが判明した。

この発熱による異常点滅に対して、船上フィールド実験時には冷却ファンを追加して冷却性能を高める対策を行った（図 3-1-10 参照）。また、製品化に際しては、ヒートシンクの構造を工夫して筐体全体へ熱を逃がすことにより、ファンレス構造を維持できるようにした（図 3-1-11 参照）。

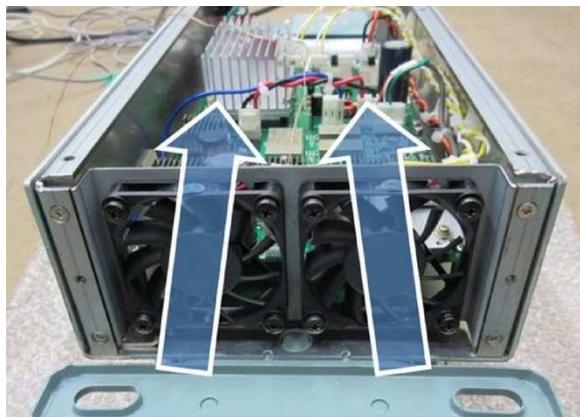
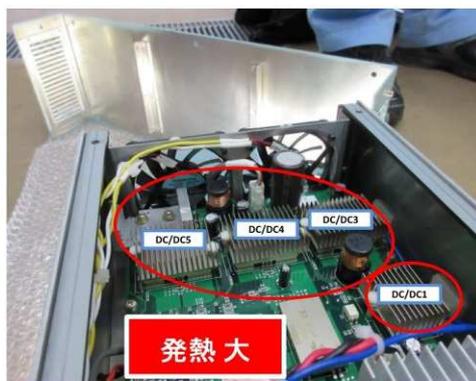


図 3-1-10 冷却ファンの設置

#### ○アクセスポイントの放熱性能強化



アクセスポイント  
・ファンによる強制空冷

筐体全体で放熱



アクセスポイント  
・部品熱を筐体を利用し放熱  
・ファンレス構造

図 3-1-11 アクセスポイントの放熱性能強化

### 3-1-4. 総合動作試験

#### 3-1-4-1. 最大通信距離

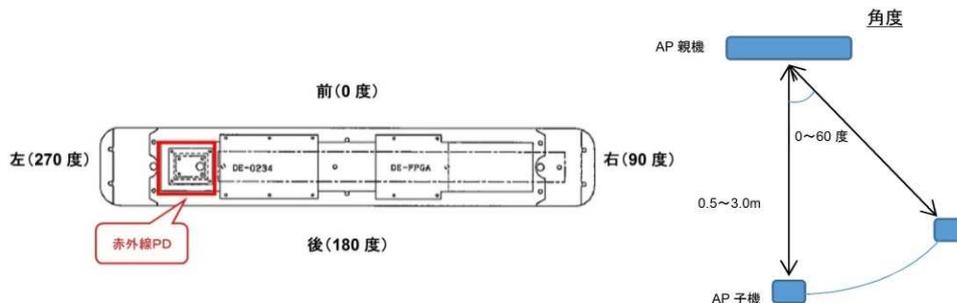
試験条件：FTP Server から FTP Client へのファイル転送速度を計測する。

アクセスポイントを上部から見て、

赤外線 PD 側を 270 度と定義し、全 24 ヶ所で実施。

周囲方向・・・ 0 度/45 度/90 度/135 度/180 度/225 度/270 度/315 度

視野角 …… 20 度、40 度/60 度



結果：周囲方向により通信距離が異なる結果となる。

※アクセスポイントの赤外線 PD が近い方向 (270 度側) の通信距離が長い。

表 3-1-5 最大通信距離の測定結果

方向 視野角	0	45	90	135	180	225	270	315
20度	2.80m	2.85m	2.79m	2.75m	2.85m	3.10m	3.03m	2.90m
40度	2.10m	2.15m	2.00m	1.90m	2.40m	2.85m	2.90m	2.80m
60度	1.50m	1.55m	1.60m	1.30m	1.00m	2.05m	2.50m	2.10m

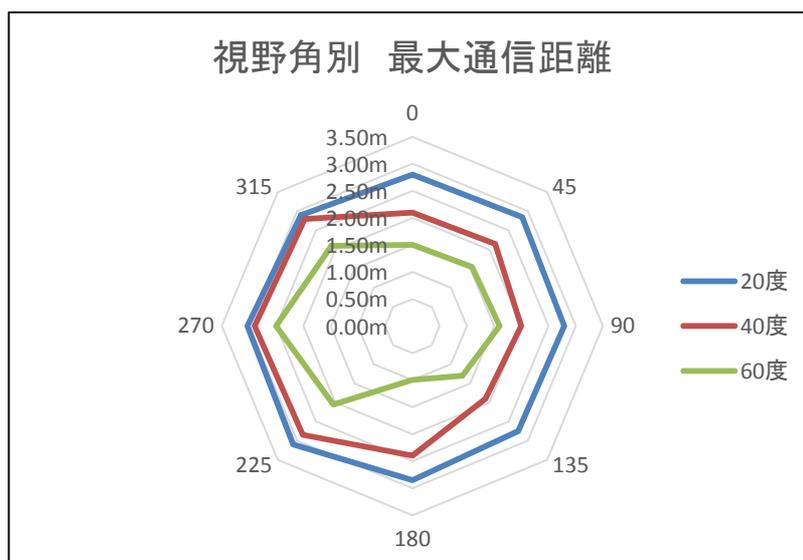


図 3-1-12 最大通信距離

### 3-1-4-2. 通信視野角

試験条件：FTP Server から FTP Client へのファイル転送速度を計測する。

アクセスポイントと送受信モジュールとの距離 2m と 3m。

周囲方向・・・ 0度/45度/90度/135度/180度/225度/270度/315度

視野角・・・ 0度から5度刻みで通信が切れるまで測定

結果：距離 2m の場合、視野角 65 度までの通信が可能。

通信距離の結果と同様に、赤外線 PD の位置が結果に影響を与えている。

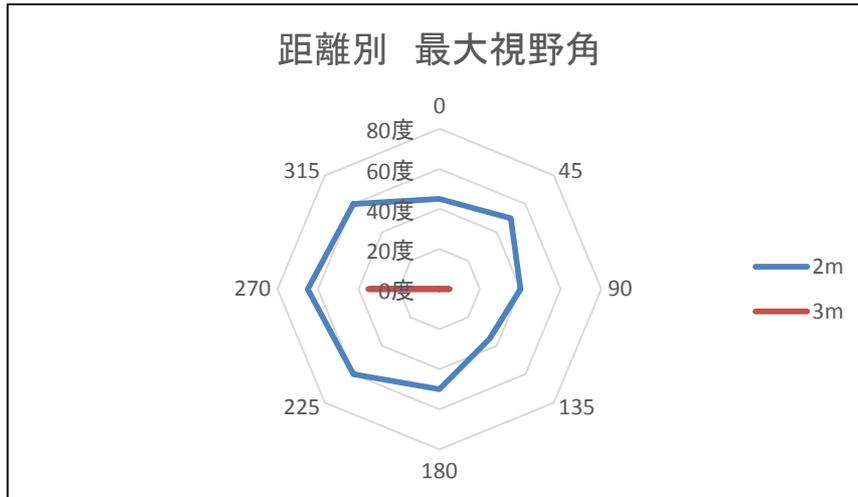


図 3-1-13 最大視野角

### 3-1-4-3. PLC を介した通信速度 (上り、下り)

試験条件：FTP Server から FTP Client へのファイル転送速度を計測する。

アクセスポイントと送受信モジュールとの距離 2m、視野角は 0 度。

結果：PLC を使用した事による、通信速度の低下は確認されなかった。

PLC のみの試験では、最大 60Mbps の通信速度が得られることを確認。

※メーカー仕様 (実行値：90Mbps)

表 3-1-6 PLC を介した通信試験の測定結果

可視光通信のみの通信速度 (距離 2m 角度0度)

記録項目	受信機(子機)の位置での照度	通信速度(下り)	通信速度(上り)
可視光のみの通信速度	429lux	1.77Mbps	1.06Mbps

PLCを介した際の通信速度

記録項目	受信機(子機)の位置での照度	通信速度(下り)	通信速度(上り)
PLCを介した通信速度	429lux	1.77Mbps	1.10Mbps

## 3-2. 船上フィールド実験

### 3-2-1. 洋上試験

目的：フィールド実験用アクセスポイントと送受信モジュールの性能試験を実施。

船名： シルバークイーン  
(川崎近海汽船株式会社)

航路： 八戸→苫小牧

判断基準：

総合動作試験との比較



総トン数	7,005t	全長	134.0m
航海速度	20.7ノット	車輛積載能力	トラック 69台 (12m換算) 乗用車 20台
旅客定員	600名 特等室 10名 (2名×5室) 1等室 88名 (洋室4名×17室、和室4名×5室) 2等環台 60名 / 2等室 362名 / ドライバーズルーム 80名		

図3-2-1 シルバークイーン (外観、諸元)

引用：シルバークイーン ウェブサイトより

[http://www.silverferry.jp/ship\\_guide/#silverQueen](http://www.silverferry.jp/ship_guide/#silverQueen)



(a) 試験場所1 (軸室)

(b) 試験場所2 (司厨手員室)

図3-2-2 船内の試験場所

結果：通信範囲 (距離、角度) は、総合動作試験よりも小さくなっている。

特に、試験場所1 (軸室) において、270度方向の通信範囲が極端に悪い。

通信速度は、下り：1.78Mbps、上り：1.07Mbpsで、動作試験と同程度である。

考察：通信範囲が全体的に小さいのは、時間などの制約で機器設定を十分行うことができなかったためと考えられる。

試験場所1では、アクセスポイントの270度方向直近に構造体があったため、270度方向の通信範囲に影響を与えたと考えられる (後述)。

■最大通信距離

方向 視野角	0	90	180	270
20度	2.80m	2.79m	2.85m	3.03m
40度	2.10m	2.00m	2.40m	2.90m
60度	1.50m	1.60m	1.00m	2.50m

方向 視野角	0	90	180	270
20度	1.80m			0.95m
40度	0.00m			0.93m
60度	0.00m			0.68m

方向 視野角	0	90	180	270
20度		1.85m	1.87m	
40度		1.61m	1.88m	
60度		1.48m	0.00m	

壁により計測限界距離

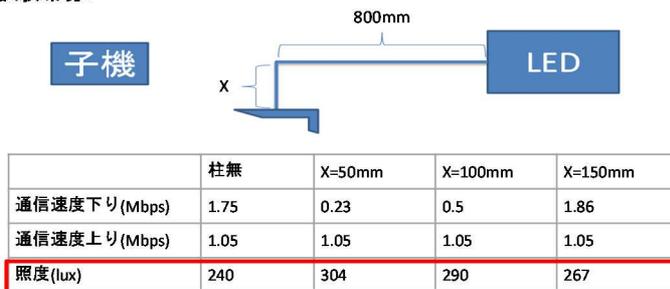
図 3-2-3 最大通信距離

### 3-2-2. 洋上試験結果の検証

目的：洋上試験の結果、軸室において 270° 方向の通信が極端に悪い結果であった。  
 原因として考えられる“柱等の障害物”による影響を疑似環境で検証した。  
 試験条件：アクセスポイントの中心から縦方向に 800mm、横方向に 50mm、100mm、150mm の位置に柱を置き、それぞれの通信速度を測定した。  
 アクセスポイント方向は 270 度側とし、  
 送受信モジュール（子機）間の距離は 2m、角度は 40°。  
 形状は、角柱（環境 A）との H 鋼（環境 B、船上と同型）の 2 種類で計測。

結果：両形状共に、光軸に柱（障害物）が近づくと、通信速度が低下する事を確認。  
 特に環境 B では 150mm 以内に近づくと、通信（下り）ができない。  
 上記より、船上試験で 270 度方向のデータが陸上と大きく異なった理由は船内の柱等の障害物による影響と確認された。

試験環境A



試験環境B

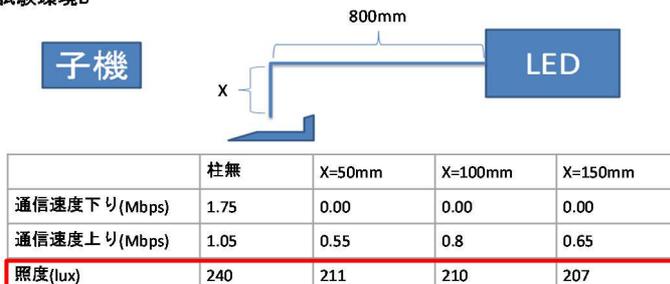


図 3-2-4 障害物による影響

## 第4章 全体総括

### 4-1. 複数年の研究開発成果

本研究開発は、電波が使い難い環境下においても、無線で快適にネットワークアクセスが可能となることを目的とし、LED照明を活用した光無線LANシステムの開発を行った。具体的には、高速に点灯制御できるLEDの特性を活かし、LED照明器自体が光無線LANアクセスポイントとなり、電波無線LANアクセスポイントと同様に、照明光の届く範囲に入るだけで複数の端末が同時にLANアクセスできる装置の開発を目指した。これにより、これまで電波が使えなかった環境下（例えば、航空機の機内や病院の集中治療室）においても、当該照明器の光の届く範囲内にいるだけでネットワークアクセスが可能となる。また、電力線搬送通信(PLC)と組み合わせることで、船舶のように空間が鉄板で遮蔽され、効率的に電波無線LANアクセスポイントを設置することができない場合においても、部屋の照明器を取り替えるだけでネットワークアクセスが可能となる。そこで、本研究開発では船舶でのLED照明光無線LANシステムの製品化第1号と位置づけ、通信速度（下り）5Mbps以上、通信距離3m以上、同時接続数5台以上を具体的な数値目標として研究開発に取り組んだ。

#### （1）通信速度

通信速度に関しては、照明器としての性能と低コストを両立できるシングルチップ型白色LEDを用いて高速可視光通信を目指したが、電源ノイズやシングルチップ型白色LEDに含まれる蛍光体の影響を十分に排除することができず、物理層レベルで2Mbpsに留まった。

#### （2）通信距離・通信制御

通信距離や同時接続数に関しては、I-4PPM変調や無線LANの通信プロトコルであるCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)をベースに光無線LANに適したMACA with RTS/CTSを開発し、それぞれ目標値を達成することができた。

#### （3）小型化

情報端末に取り付ける小型送受信モジュールに関しては、開発当初は195×100×50[mm]で、小型化が課題となっていた。部品の見直しと基板配線の見直し、多層基板化による小型化開発の結果、一般的なスマートフォンサイズである118×69×37[mm]まで縮小することに成功した。

#### （4）総合実験

開発したフィールド実験用光無線LANシステムのLED照明器としての評価やネットワーク評価、フィールド実験などを行い、製品化に向けた環境が整った。しかしながら、船舶内での電力線搬送通信(PLC)の利用は、総務省より現状の法令下では認められないとの回答であったため、船舶内での総合実験の実施は断念せざるを得なかった。

3年間の研究開発において、5台同時接続、通信距離3m以上、船級対応した機器構造、照明器としての性能の目標は達成できたが、「通信速度（下り）5Mbps以上」と「船舶でのPLC使用」の2点が目標未達となった。

## 4-2. 研究開発後の課題・事業化展開

### 4-2-1. 残された課題に対する対応

#### (1) 通信速度の向上

研究開発後の課題として、通信速度 5Mbps 以上がある。当初の目標通りの通信速度が見込めなかった原因の一つとして、シングルチップ型白色 LED の蛍光体が想定以上に可視光 PD の受信信号に影響を与えていたことが挙げられる。この問題は、本研究開発が照明器としての性能と低コストを両立できることを最重要テーマとしたことにより、白色 LED と可視光 PD の組み合わせや光学フィルター組込みの有無に関する検討に制約が掛かったことに起因している。

そこで補完研究においては、基本に立ち返り、白色 LED と可視光 PD の組み合わせ、またそれらに関するアナログ回路の最適化、光学フィルターの有無に着目し、高速可視光通信を実現する送受信回路の最適化研究を継続して実施する。併せて、ちらつきの影響が無く照明用展等制御方式として最適であると考え採用した変調方式である I-4PPM であるが、通信速度の向上に有利となる他の変調方式についても検討することとした。

#### (2) 船舶内での PLC を用いたシステム化の検討

もう 1 点の課題である船舶での PLC 使用については、韓国など一部船籍の船舶では PLC の使用が条件付き<sup>(注1)</sup>では有るが認められている。また、屋外で使用可能な国内初の PLC が本年 2 月に総務省の認可を受けたとの情報も得ている。

このような背景を含め、規制監督官庁に対し、PLC 機器メーカーと共に協議を重ね、法令の規制緩和に向けた検討をすることで、同機種の使用を含め補完研究を進めることとしている。

注 1：緊急通信で使用する周波数帯への発信制限。

## 4-2-2. 事業化展開

### (1) 船舶向け通信システムとしての市場

事業化展開に向けて、船舶での照明無線 LAN の活用方法について、JRCS の取引先である船社様（船主、運航管理会社）に対して行ったヒアリング結果を表 4-2-1 に示す。

表 4-2-1 ヒアリング結果

現状の通信インフラ	外航船	<ul style="list-style-type: none"> <li>船舶と陸上の通信は衛星通信を利用している。 ※一部船社では、福利厚生の一環として乗員の個人利用を認めている。(使用上限有り)</li> <li>日本国沿岸での通信は、国内の通信インフラ(携帯キャリア等)を利用している。</li> <li>一部船船では日本国内用のWi-Fi機器を搭載している。</li> <li>Wi-Fiの利用(個人利用)は公海上に限定している。 ※自社で利用ルールに制定</li> <li>新造船の主要な部屋には業務用有線LANケーブルを敷設している。</li> <li>10年以上前の船には LANケーブルが敷設されている船舶は少ない。</li> <li>機関室に有線LANケーブルが敷設されている船舶でも、実際には使用されていない。</li> </ul>
	内航船	<ul style="list-style-type: none"> <li>業務用船内LANは有線・無線共に無し。</li> <li>一部船社の新造船においては業務用有線LANケーブルを敷設されている。但し、このネットワークは外部通信専用。</li> <li>一部フェリーで案内所前でのWi-Fiスポットを検討したが設置はしていない。</li> </ul>
光無線通信に対するご意見	外航船	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wi-Fiと同様な環境で使用できることは便利。</li> <li>画像や動画が送れるトランシーバーが有ればすぐにでも欲しい。 →無線局の申請が不要のため。</li> <li>船内での各種センサー調整時、AMSのモニタリング画面をその場で確認出来ると作業効率が良い。</li> <li>危険物船のデッキ上で使用出来ると利用価値が高まる。</li> <li>タンク内のガス・油など運搬物の計量装置(温度・圧力・液面)との通信用に使用できると良い。</li> <li>E/Rは環境が悪いので端末利用は不可能では？ →耐油、耐ケミカル、防塵防爆などへの対応が必要。</li> <li>無線LANが他機器に影響をおよぼすのであれば光無線LANは有効。</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>インフラへの投資は費用対効果が第一。(=投資大)</li> <li>乗員の利用は、管理者(CAPT.C/E)から見ると管理責任(セキュリティ、使用量)が発生する。</li> </ul>
	内航船	<ul style="list-style-type: none"> <li>機関室は無人数運転を行わないためタブレットニーズは現状は無い。</li> <li>2015年、内航フェリーでの火災事故発生により、車両甲板への監視カメラ導入が予想される。</li> </ul>

調査の結果、海外航路の一部船舶において Wi-Fi が利用されていることがわかった。しかしながら、これらの利用目的は、乗員の福利厚生が中心であり、業務上のシステムとしての利用されている船舶はなかった。又、利用も公海上に限定する等、運用規定を各社で制定しており企業コンプライアンスは遵守しているとの回答であった。そのため、停泊中では使用しないようにするなどの、一部利用状態に制限をかけていると想定される。

国内航路の船舶では Wi-Fi 機器を搭載した船舶は確認されなかった。これは、船舶の航路の多くを国内大手通信キャリアの通信エリアがカバーしているため、乗員が容易にインターネット環境へアクセスできることが理由であった。

調査の結果、海外航路の船舶では乗員の福利厚生のため無線通信機器を利用しているが、電波を使用しない LED 照明光無線 LAN システムは寄港国の電波法に抵触しないため、常時船内で利用する事ができ、乗員の利便性向上が図れるシステムであることがわかった。ヒアリングの中でも実船試験搭載の要望を複数の船会社より得ている。

近年就航した船舶には「有線船内 LAN」が敷設されているが、機関室等では回転体に巻き込まれる可能性があり、安全性確保観点から特定の場所のみでしか使用できないため、普及が進んでいない。そこで、照明光無線 LAN システムは既存の有線 LAN と接続する事で PLC が使用できない船舶においても船内の複数箇所との通信が図れ Wi-Fi 機器と同等な無線通信が利用可能となる。又、照明光無線 LAN はトランシーバーとの置換えや、画像・動画送信機・監視カメラ機器等との組合せにより、市場性は更に高まる事がニーズ調査で確認している。

以上の事から、通信速度の向上(サポイン目標値、5Mdps 以上)と通信の安定性向上と共に、機器の更なる小型化と原価コスト低減の必要性を再確認することができた。

補完研究により、残された課題をクリアすることができれば、すぐにでも評価をしたいというニーズも受けていることから、3年以内の製品化に向けた取組を加速することにした。

## (2) 船舶以外の分野への展開

船舶以外の分野への展開については、可視光は、人体や他の電子回路等に全く影響を与えない。電波を使わない通信基盤として最大限のメリットが得られる分野と言えるのは医療ではないかと考えている。

現在、山口県では次世代産業クラスター構想として、医療と環境・新エネルギー分野を充填育成産業分野に位置づけている。その実行組織として、山口県産業技術センター内に、イノベーション推進センターを設置して具体的な研究開発の支援や、販路開拓を含めた取組を支援している。イノベーション推進センターでは、山口大学附属病院を始め県内主要病院との連携による医療関連分野の製品開発を推進している。医療関連分野は、規制分野でもあることから、東京本郷地域の医療機器製販企業や、業界団体とも密な連携をとることで、具体的な医療関連分野参入を推進している。

このようなことから、船舶向けの製品以外の出口として、医療分野への製品か可能性についても検討する。特に、医療に関しては、双方向だけでなくダウンリンクだけのデータ通信でも充分ニーズのあるソリューションが考えられる。補完研究においては、医療関連分野を視野においた製品化の可能性についても並行して検討する事としている。

**リサイクル適性 (A)**

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。