

ユビキタス時代における高速高スループットを実現する赤外線通信プロトコル (IrBurst) の研究開発とグローバル標準化

代表研究者 松 本 充 司 早稲田大学 大学院国際情報通信研究科 教授
 共同研究者 深 町 文 範 早稲田大学 大学院国際情報通信研究科 博士課程 1 年
 〃 吉 田 靖 幸 早稲田大学 大学院国際情報通信研究科 修士課程 2 年

1 研究調査の目的

本研究調査の目的は、携帯電話、PDA 等からギガビットブロードバンドネットワークに接続されたホストポット、駅売店、公衆情報キオスク、コンビニエントストアおよび家庭に設置されたセットトップボックス等を介して、ネットワーク内にあるサーバやデータベースに直接リンクして大容量マルチメディアコンテンツを瞬時に受けられるダウンロードサービスを実現することであり、広帯域ネットワークと携帯型デバイス間のインタフェースを構築し、人に優しくかつ安全な光ワイヤレスでラスト 1 m のインタフェースを実現しようとするものである。

2 研究の背景

近年、xDSL 技術や FTTH 技術により、ネットワークの広帯域化が進み、インターネットを介してメール等の文字情報だけでなく、添付ファイルとして、音声、写真、映像情報等を交換することが日常化しつつある。また、個人間でのコンテンツの交換だけでなく、Web ページのコンテンツの配信も行なわれている。さらに、広帯域網は、自宅やオフィスだけでなく、街頭でも利用され始めており、ビルの壁面等に設置された大画面ディスプレイへの広告配信サービスやコンビニエンスストア等でネットワークに接続された情報端末を介した音楽、ゲーム等のダウンロード販売サービスも始まっている。

しかしながら、このようなダウンロード販売サービス端末の背後にあるネットワークが十分な速度を確保できていたとしても、ユーザにコンテンツを受け渡す部分での速度が十分でなく、結果的にこれらの端末での滞留時間が長くなっている。具体的には、コンテンツの受け渡し手段として、コストやメンテナンス性の観点から安価ではあるが書き込み時間の遅い記録メディア (MD 等) に頼らざるを得ず、結果的に「分オーダー」での滞留時間になってしまっている。もし、非接触で高速転送が可能な技術があれば、高速ネットワーク内の情報が携帯型プレーヤ、PDA 等に直接ダウンロードすることができれば、情報交換にかかわる総転送時間が短縮されることとなる。

図 1 に高速ネットワークから身近なデバイスへの高速転送の方法を示した。

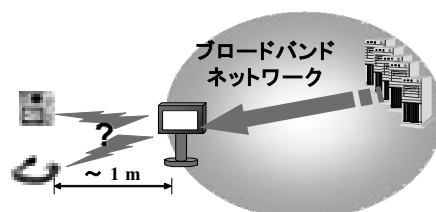


図 1 ユーザへのコンテンツ入手手段

2.1 赤外線通信の特徴

IrDA 規格による赤外線通信の最大の特徴は、“Point & Shoot”である。赤外線リモートコントローラでテレビ、ビデオ、エアコン等をコントロールする場合と同様、人間にとって簡単なインタフェースで実現できる。すなわち、意識的に情報を取得したり、提供したり、交換したりするような場合に適している。

常時通信しているわけではなく、発光素子として使用されている赤外線 LED の消費電流も非常に小さいので、電池のサイズが制限されていながら、長時間での動作を要求される携帯電話、PDA、ポータブルオーディオプレーヤ等のモバイル機器であっても、少ない消費電力での動作が可能である。また、航空管制用電子機器や医療用電子機器等の動作へ影響を及ぼす電磁波を放射することなく、直接目に照射されても安全な光源を使用しているため、航空機等の公共交通機関や病院等の医療機関での利用が可能である。

非接触のインタフェースであるのでコネクタ等の機構部品を用意する必要がなく、街頭やコンビニエンスストアに設置されたダウンロード端末等であっても、記録媒体を利用した場合に危惧されるようなガム等によるいたずらを避けることができるので、メンテナンスコストを低く抑えることができる。

2.2 IrDA プロトコルスタックの課題

図 2 に現行の IrDA のプロトコルスタックを示す。

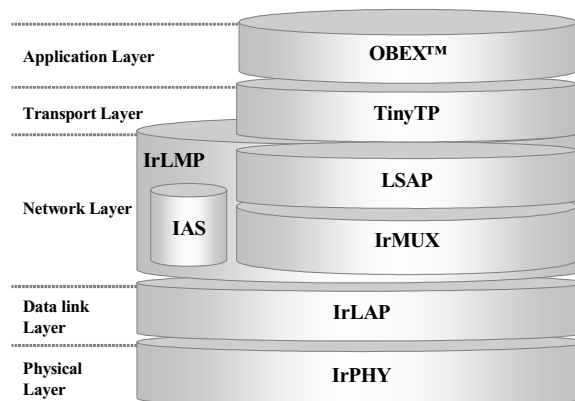


図 2 現行の IrDA プロトコルスタック

IrPHY は物理層であり、SIR, FIR, VFIR ごとに伝送時の符号化方式を規定している。IrDA 規格は送受間の信号の干渉を避けるため、半二重通信方式を採用している。したがって、送受間の通信方向の切り替えが発生し、切り替えによるオーバーヘッドが少なからず存在する。これを避けるため、データリンク層に相当する IrLAP (Ir Link Access Protocol) では、SIR, FIR では連続して7 パケット、VFIR では連続して127パケットまで連続して転送することが可能なウィンドウ機能を備えている、しかしながら、さらに上位のアプリケーションプロトコルによってパケットの連続転送機能が十分に生かされていない。

IrLMP (Ir Link Management Protocol) では、論理チャネル (LSAP: Link Service Access Point) による多重化機能 (IrMUX: Ir MUltipreX) に加え、各論理チャネルを管理する情報データベース (IAS: InformationAccess Service) を備えている。TinyTP (TinyTransPort) は、各論理チャネル上での文字通り最小限のトランスポート機能として、フロー制御およびパケットの分解、再構成機能を備えている。

アプリケーションレイヤの OBEX (OBject EXchangingprotocol) は、名刺情報の交換を始めとした小規模の情報 (オブジェクト) を交換するための手順である。OBEX は名刺交換だけではなく、最近ではクレジットカード情報をモバイル端末と POS 端末の間で交換する通信手順 IrFM (Financial Messaging) を上位に乗せて、赤外線による支払いにも利用されている。

OBEX は、小規模な情報 (数100バイト程度) を確実に交換する目的で設計された。その手順は、1 パケット

ごとにレスポンスを求めるいわゆる“Stop & Go”手順になっている。IrDA 規格では、1 パケットの最大長は IrLAP 層で2048バイトであり、IrLMP 層、TinyTP 層で3バイト、OBEX 自身でも数バイトから数10バイトのヘッダを持つため、1 パケットあたり2000バイト程度しかデータ領域として利用できない。IrDA 規格は半二重通信であるので、OBEX で2000バイトを越えるデータをやりとりしようとする、通信方向の切り替えが発生し、相手からの応答を待った上で再度通信方向の切り替えてから続きを送信することになる。MP3 のようにデータ圧縮されたコンテンツであっても、圧縮率にもよるが標準的には5分程度の演奏時間で5M バイト程度のデータ長となる。OBEX で5M バイトの情報を送受信しようすると、5000 回もの切り替えが発生することになる。レスポンスパケットの転送時間はパケットサイズがデータ転送パケットと比べ十分小さいことから無視できるので、ターンアラウンド時間（切り替え待ち時間）を10ms とすると、50秒分に相当する。4Mbps の転送速度で5M バイトのデータは10秒で転送できるので、転送待ち時間が6 倍にも延びてしまうことになる。これを図3に示す。

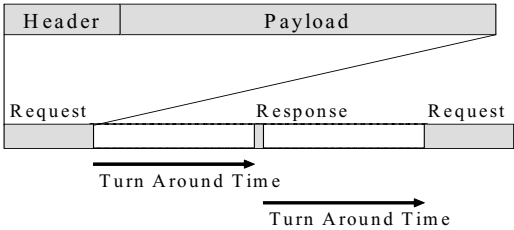


図3 OBEX によるマルチメディアコンテンツの転送

切り替え待ち時間には、最小限物理層での動作回復時間に相当する時間および IrLAP 層以上のレイヤでのプロトコル処理時間を含んでいる。IrLAP 層、IrLMP 層、TinyTP 層は、固定長ヘッダであるので、比較的処理は単純でハードウェア化することも可能である。一方、OBEX では、データは、タグとデータ本体の対の形で表現される。OBEX によるファイル転送では、ファイル名、ファイルサイズ等の情報が送られた後にファイル本体が転送される。図4では、便宜上ファイル名、ファイルサイズ等の情報部分をヘッダとして標記している。このようなデータ形式では、全てのデータを読み取って、タグとデータ本体を分割し、タグの種別ごとにデータ本体を処理する必要がある。このような処理をハードウェア化することは非常に困難であり、CPU によるソフトウェア処理に依存する。したがって、OBEX によるデータ転送では、必ず CPU によるソフトウェア処理が介在し、その分切り替え待ち時間が増加することとなる。

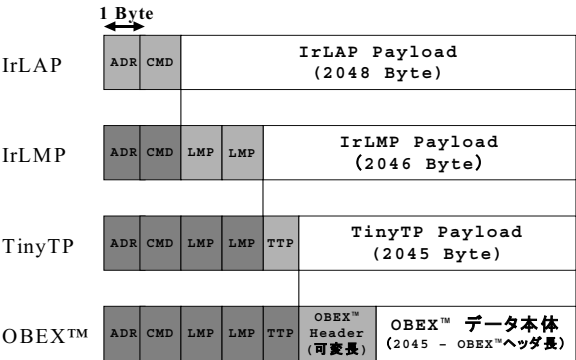


図4 レイヤ毎のペイロードサイズ

さらに、他のプロトコルスタック（Bluetooth でも情報交換手順として採用）上でも動作するようにも設計されていることもあり、本来 TinyTP 層で行うフローコントロール機能等も OBEX 上でインプリメントされており、プロトコル全体からみて冗長な部分を有している。これもオーバーヘッドの要因となる。

3 IrBurst の概要

3.1 基本コンセプト

赤外線を用いた通信はモバイル機器でのメリットが多いが、プロトコル上の制約により本来の性能を生かすことができなかった。このため、下位のプロトコルが提供する半二重通信におけるオーバーヘッドを軽減させる機能を生かす方策として、筆者等によって提案されたのが赤外線高速情報通信プロトコル IrBurst である。

図 5 に IrBurst の基本コンセプトを示した。IrBurst では、IrLMP の持つ論理チャンネルの多重化機能を用いて、制御情報と転送すべきデータを別の論理チャンネルに分けて伝送する。制御情報を転送するチャンネル（以下、制御チャンネル）では、データを転送するチャンネル（以下、データチャンネル）の取得、開放の制御、データの属性情報（ファイル名、生成日時、著作権者等の情報）の交換を行う。

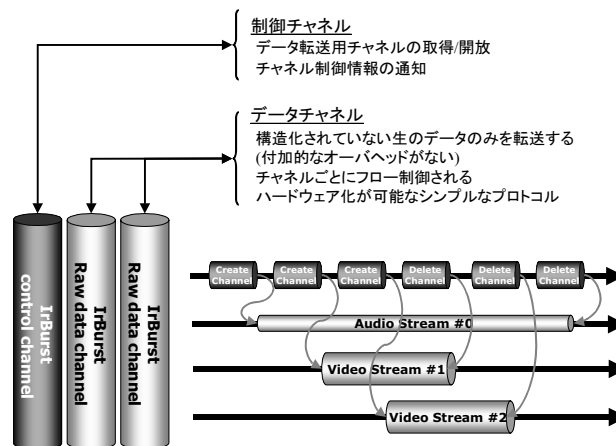


図 5 IrBurst の基本コンセプト

データチャンネルでは、それぞれのデータごとに新たなチャンネルを取得し、専用のチャンネルを転送用に占有させる。これによって、新たな付加的な情報を付ける必要がなくなり、TinyTP のペイロード部分をすべてデータ転送に利用することができる。また、制御チャンネルには、データ転送の開始あるいは終了時にしか情報は流れないので、通常、データ転送中はデータチャンネル上に流れたものだけが流れ続けることになり、いわゆるウィンドウサイズとして定義されたパケット数分（SIR, FIR で最大 7 パケット, VFIR で最大 127 パケット）まで連続して転送しつづけることが可能である。したがって、転送時の通信方向の切り替えが、OBEX と比較して SIR, FIR で 1/7, VFIR で 1/127 に抑えることが可能となる。前述と同様の条件で、FIR で 5Mbyte の情報を転送する場合、オーバーヘッド分が 50 秒から 7 秒程度にまで短縮されることとなる。また、本 IrBurst 方式によるとデータ転送中は、TinyTP のペイロード上にデータを分割して載せていくだけであり、TinyTP 以下のプロトコルでは、5 バイトの固定長のヘッダを処理するだけであるので、特に複雑なプロトコル処理を必要としない。従って、DMA (Direct Memory Access) 等を用いたハードウェア化が可能となり、安価で低性能の CPU でコントロールされるような機器であったとしても、切り替え時間の内プロトコル処理に要する部分を大幅に短縮することができる。

3.2 プロトコルスタック

図 6 は、IrBurst のプロトコルスタックである。

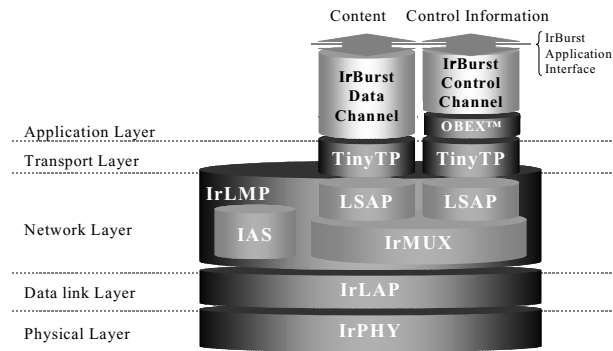


図 6 IrBurst のプロトコルスタック

IrDA の規格上、OBEX™ の実装は必須ではないが、事実上全ての IrDA 機器に OBEX™ が実装されている。従って、IrBurst をサポートしていない相手であってもデータの交換だけは可能するためには、OBEX でのデータ転送はサポートすることが必要となる。

また、IrBurst の制御チャンネルで交換される情報は、OBEX で扱うことが可能な小規模のものであるので、IrBurst の制御チャンネルは、OBEX 上で実現することとした。これにより、IrBurst の制御メッセージを受け付けない相手に対しては、OBEX に切り替えて円滑に通信を継続することができる。一方、OBEX 上に実現したアプリケーションは、名刺交換だけではなく、クレジット情報の交換や通信相手のアプリケーション起動等、多岐に渡る。従って、OBEX に通じたシステム開発者、ユーザも多い。OBEX による制御を取り入れたことにより、IrBurst は OBEX の拡張として位置付けることができ、これらの OBEX システム開発者やユーザを取り込むことも可能となる。データチャンネルは、IrLMP レイヤで確保可能な LSAP 数 - 1 (制御チャンネル分) まで確保が可能である、コンテンツによっては、複数のデータを並列に転送したいケース (ステレオ音声を左右別チャンネルで伝送する、映像に字幕を文字情報として別に送る等) にも対応可能である。

3.3 IrBurst の性能評価

図 7 は VFIR における OBEX と IrBurst の転送効率を比較したものである。OBEX では 10msec のターンアラウンド時間 (通信方向の切替え時間) ですでに転送効率が 5 % (800kbps 相当) 以下にまで低下しているが、127パケット連続で転送した場合 (IrBurst_127, 数字の部分が連続転送するパケット数を表す) では、90%以上の性能が得られており、30msec のターンアラウンド時間の場合でも80%の性能を維持できる。

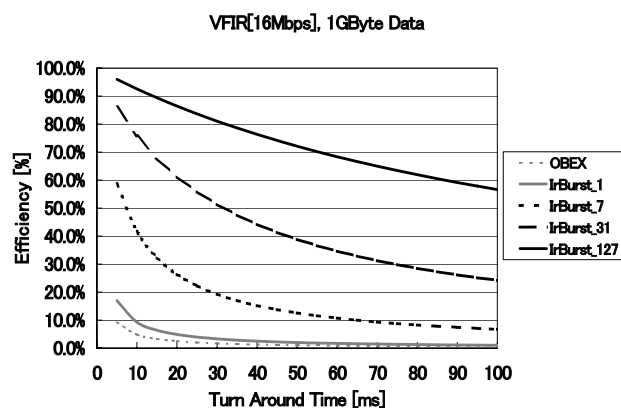


図 7 IrBurst と OBEX の性能比較

この評価から連続転送パケット数が多いほど、ターンアラウンド時間の影響が少なくなるといえる。また OBEX と連続転送パケット数が1の場合は、ターンアラウンド時間の影響は同じであるが、OBEX™ のヘッダ

情報およびレスポンスパケットのオーバーヘッドの影響でターンアラウンド時間の小さい状況では若干の改善が見られる。今後はコンテンツ自販機への適用を目指し、その効用を確認する。

4 赤外線発光部の高速化

4.1 概要

物理レイヤでの研究では主に超高速赤外線規格（UFIR）の開発を取り上げた。すなわちアイセーフレーザを用いた実際の通信システムの評価ならびに構築を中心に進めた。高速化に伴い発光素子の再選定が必要である。100MHz を超える高速変調が可能な発光系デバイスとしては、レーザダイオード（以下、LD と記載）が主に採用されるが、スタンレー電気株式会社が開発した高速空間伝送用光デバイス、iRAVBIT（アイラビット）は発光ダイオード（以下 LED と記載）で遮断周波数 100MHz を実現したデバイスである。これまでの速度では発光ダイオード（LED）が中心であったが、熱効率や高速化に限界があり、これに代わる発光素子が必要であり、シャープ株式会社が試作した波長 890nm 帯のアイセーフ半導体レーザを発光素子として適用可能かを検討した。

ここで、アイセーフ半導体レーザとは一般的なレーザダイオードと同様、高速変調に対応可能で発光効率がよいという特徴の他に、レーザダイオードに光拡散剤を混入したモールドを施して照射される光のスポット径を約千倍に拡大し、人間の眼（網膜）への安全性を確保したものである。

モールドを施すことによる特性への影響はない。

図 8 にアイセーフレーザの概念図を示す。レーザ発光面積は小さく発光ビームは強力であるが、拡散樹脂を施したカバーで覆うことにより、スポットサイズは1000倍に拡大され、レーザビームが拡散される。



図 8 アイセーフレーザの概念図

図 9 に試作されたアイセーフレーザ（LD）の概観を示した。さらに、図10に赤外線の送信状態を赤外線カメラで撮影した様子を示した。このアイセーフレーザを発光部に、ホトダイオードを受光部にした試作した周辺回路を示す。



図 9 アイセーフレーザ概観



図10 アイセーフレーザの発光状態

図10では赤外線の送信状態を赤外線カメラで撮影した様子を示した。レーザ発光面積は小さく発光ビームは強力であるが、拡散樹脂を施したカバーで覆うことにより、スポットサイズは1000倍に拡大され、レーザビームが拡散される。

4.2 LDとLEDの電気的特性の比較

従来の IrDA モジュールにおいて LED は、発光デバイスとして標準的な存在である。そのためマイコンや CPLD といった通信回路の制御系からの駆動について、多くのドライバ用 IC が用意されており、通信速度 100Mbps の実現に関しても LD に比べて電子回路系の大幅な変更が必要ないという利点があると考えられる。今後、実際の p1394b による実際の通信システム製作を考慮して、この LED と LD の性能比較を行うことが重要であると考え次のような比較を行った。

4.2.1 LD と LED の光出力の比較

最初に LED であるが、順方向電圧 (V_f) が 1.8V の時、順方向電流 (I_f) は 80mA 流れる。この条件下で発光される光の波長 (λ) は 870nm であり光出力 (P_o) は 40mW である。なお LED では順方向電圧の最大値は 1.8V である。それに対して LD は、順方向電圧 (V_f) が 2.0V の時、順方向電流 (I_f) は約 150mA 流れる。この条件下で発光される光の波長 (λ) は 890nm であり光出力 (P_o) は約 125mW である。また、スタンレーがリリースしている LED のデータシートをもとにして比較すると表 1 のようにまとめられる。

表 1 LD と LED の光出力の比較

項目	LED の値	LD の値	単位
順方向電圧	1.8 (max)	2.0	V
順方向電流	80	150	mA
発光波長	870	890	nm
光出力	40	125	mW
指向半値角	45	---	deg
遮断周波数	70 (min)	253	MHz

表 1 より消費電力を計算すると、LED は 144mW、LD は 300mW であることがわかる。順方向電流による駆動時の消費電力は、LD の方が LED よりも約2.0倍程度消費電力が大きいことがわかる。そこで次に光出力を比較すると、LD は LED の約 3 倍である。すなわち LED と比較して消費電力が約 2 倍の LD は光出力が約 3 倍になっており LD の方が光出力が大きいことがわかる。

4.2.2 LD と LED の周波数特性の比較

LD 及び LED の周波数特性を散乱行列 (Sマトリックス) の透過係数 S を測定することで計測を行った。図 11 に測定回路構成を示す。

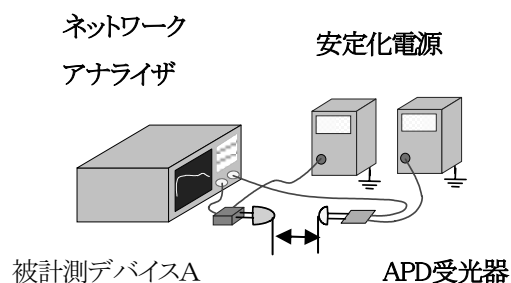


図11 測定回路構成

LD と LED は共に全く同一の条件で駆動させて計測を行った。距離を 10cm, 20cm と変えて測定を行った。なおこの結果は以前報告した内容とほぼ同じものとなった。測定結果を図12に示す。

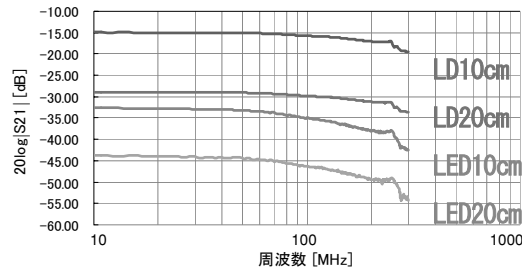


図12 LD と LED の距離別の周波数特性測定結果

図12より-3dB の周波数帯域は LD が 253.5MHz, LED が 117.3MHz であった。どちらも遮断周波数は 100MHz を超えており少なくとも 100MHz の変調は行えることがわかる。注目すべきは受光パワーである。例えば LD10cm で 10MHz 時の受光パワーは-15.0dBm である。同じく LED10cm では-32.5dBm である。単に差を求めるとその差は-17.5dBm であるグラフの縦軸は LOG をとって20倍しているため-17.5dBm の減少は値として約0.3倍ということになる。前述の表より光出力について LED は LD の0.32倍なので、計測結果はデータシートとほぼ一致していることがわかる。

ここでは、試作されたアイセーフ半導体レーザと発光ダイオードの諸特性を比較し、これら発光素子が 100Mbps の通信に適用可能であるかを検討した。その結果、受光器との距離を変えると受光パワーは距離の二乗に反比例して減衰するが、周波数特性はほぼ一定であり、-3dB 時の周波数帯域において両素子とも 100MHz を超える帯域特性が得られた。また光出力ではアイセーフ半導体レーザは発光ダイオードの約 3 倍であり、アイセーフ半導体レーザの使用により更なる長距離化、及び 200Mbps の通信にも適用できる見通しが得られた。構造の最適化によっては更なる高速化が期待できる。この実験結果よりアイセーフ半導体レーザは、100Mbps での光通信デバイスとして適用可能であることが分かった。なお、試作レベルのアイセーフ半導体レーザは、外形 3.0ϕ , 200mA_{p-p} 駆動で $\pm 15^\circ$ 方向に 250mW/sr の出力が可能である。

以上、まとめると、LD と LED は同じ半導体発光素子であるが、様々な面で違いがあることが明確になった。今回の比較検討において LD は LED よりも発光効率がよく周波数特性がよいことが明確になった。しかし駆動回路系においては LD は LED に比べ回路が複雑になることが考えられるため、今後の小型化や低消費電力化への課題があると感じた。

また LD は LED に比べて発熱が大きい。LD は内部温度の上昇に伴って光出力が低下するため、場合によっては LD 内部に搭載されているフィードバック用フォトダイオードを利用し、APC (Auto PowerControl) 駆動回路を検討する必要があるかもしれない。

4.2.3 L-I 特性 (光出力-電流特性)

レーザダイオードには流した順方向電流の大きさと、放射される光強度の関係を表す L-I 特性がある。ここでは可変電流源をアイセーフ半導体レーザにつなげ、流す電流を段階的に大きくして、放射される光強度を測定した。その結果を図13に示す。

順方向電流約 30mA にしきい値をもっていることが分かる。30mA 程度から光が照射され始め、その後は電流の増大に伴い線形に放射レベルも増大している様子が分かる。120mA までは電流を増やせば比例して放射レベルも増大することが分かった。なお半導体レーザの電氣的特性から 120mA 以上では素子が破損する恐れがあるため、計測は行っていない。

4.2.4 アイセーフ半導体レーザ遠視野像と近視野像

アイセーフ半導体レーザの遠視野像と近視野像について計測を行った。遠視野像ではビームの広がりをグラフで表した。まだ試作段階のデバイスということもありデバイスにかぶせた光拡散モールドの状況によって多少、拡散が異なっていることがわかる。試作デバイス 2 つについての遠視野像のグラフを図14に示す (縦軸：発光強度、横軸：角度)。

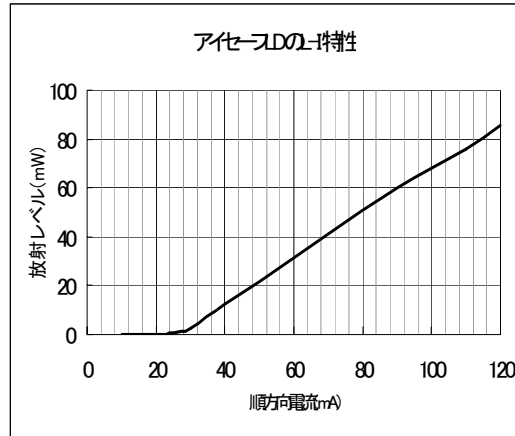


図13 アイセーフ半導体レーザの L-I 特性グラフ

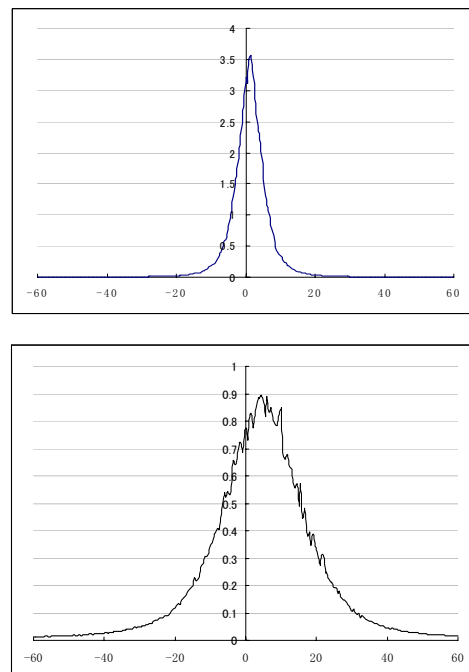


図14 アイセーフ半導体レーザの遠視野像

-60° から 60° までの角度について計測している。図14の左のデバイスのほうが拡散が少なく鋭いビームが出ていることがわかる。すなわち通信時には距離では優位であるが、指向半値角が鋭くなることがわかる。次に近視野像のグラフを図15に示す。

近視野像はレーザダイオードの顕微鏡写真を元にした発光断面の像をグラフ化してものである。近視野像は通信のように、ある受光器めがけて集光して用いる場合には、有用なデータであり必要なゲイン領域の形状などについての情報を与えるものである。発光素子としてどのような特性を持ったアイセーフレーザを使用しているのかについて知ることができる。

5 問題点、今後の予定

現在は 100BASE-FX に準じた通信実験を行っているが、コーディング 8B10B を用いた UFIR 方式に準じたコントローラを試作しフロントエンド回路の検討ならびに実証実験を行う。

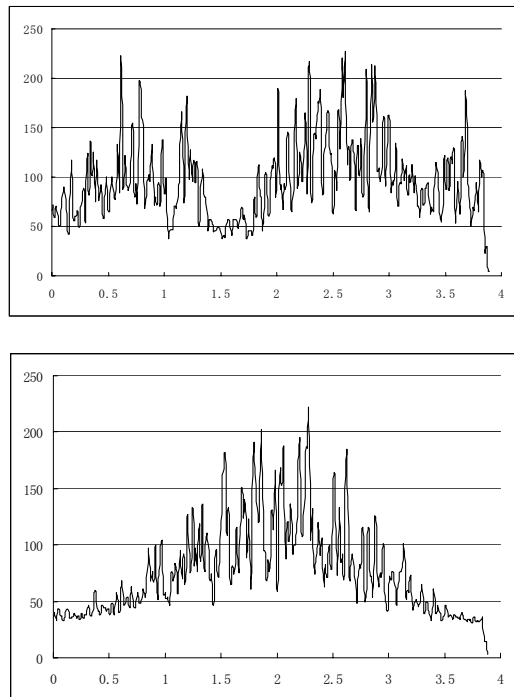


図15 アイセーフ半導体レーザの近視野像

6 おわりに

身の周りの最も身近なそして最も簡便な光ワイヤレス通信として近赤外線メディアを利用した IrDA による赤外線通信技術の最近動向，課題および展望を示した。この赤外線通信によるビジネスユースモデルが同じである Bluetooth がある。設立当初大いに注目されたが，その後実現の困難さ，セキュリティの問題，速度の問題等が表面化し，その展開が危惧されている。一方，赤外線は Bluetooth 技術を解決するものとして見直され，現在では携帯電話等に導入され，ようやくその普及が推測されている。

さらに赤外線メディアの特徴を活かし，将来普及が予測されている壁掛け TV のディスプレイとチューナーをワイヤレスで接続する高速伝送ツールと利用され始めた。これらの応用は一部の展開であり，今後研究が進むにつれ更なる展開が期待できる。

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
M. Matsumoto : “Evolutionfor Optical Wireless Communications in Personal Area Network Environment”	7th International Symposium on Contemporary Photonics Technology,	2004年 1 月 東京
H. Kawamura, M. Matsumoto:” OBEX Errata for Easy Implementation of IrBurst”	IrDA Symposium & General Meeting at Warwick University U.K.	2003.9.17-19 英国
H. Kawamura, M. Matsumoto:” IrBurst High-speed Information Transmission Profile”	IrDA Symposium & General Meeting at Warwick University U.K.	2003.9.17-19 英国
吉田靖幸, 松本充司, 河西秀典: “アイセーフ半導体レーザを用いた高速赤外線通信システムに関する検討”	電子情報通信学会/情報処理学会 /FIT2003 No.17	2003年 9 月 北海道
松本充司:” Personal Area Network (PAN) の担い手である赤外線通信の展望”	IEICE/COMSOC, SC-8-1, pp S-32	2003年 9 月
Y.Yoshida,M.Matsumoto, H.Kawanishi ; “A study on 890nm Eye-safe Leaser Diode for100Mbps wireless infrared communication”	第 5 回 YRP 産学官交流シンポジウム 2003, pp.132-133	2003年 7 月 横須賀
K.Kawamura, M.Matsumoto :” Feature, Specification, and the relationship with the other protocols	IrDA Symposium & Asian Summit at Waseda University	2003.6.26 東京