

レーザ光を用いた鉄道用高速大容量通信システム ー在来線における性能試験ー

中川 伸吾* 松原 広 中村 一城 辰井 大祐 (鉄道総研)
春山 真一郎 寺岡 文男 (慶應義塾大学)

The Mobile Broadband Telecommunication System for Railways Using Laser Technology:
A Field Test on the Conventional Line
Shingo Nakagawa*, Hiroshi Matsubara,
Kazuki Nakamura, Daisuke Tatsui, (Railway Technical Research Institute)
Shinichiro Haruyama, Fumio Teraoka (Keio University)

We developed a mobile telecommunication system applicable to the railways using the laser beam communication technology. It can establish a continuous bidirectional communication between an equipment on the running train and another one on the ground, which pursue each other dynamically. It provides more high-speed internet connection and improves customer service and efficiency of operator's telecommunication. We carried out a field test using trains in service, and obtained the result of the transfer rate of approximately 700Mbps on the TCP layer between the ground and the train running at a speed of approximately 130km/h.

キーワード：移動体通信，レーザ光通信，高速大容量通信，旅客サービス，ハンドオーバー

(Keywords: Mobile communication, Laser beam communication, Broadband communication, Passenger service, Handover)

1. はじめに

近年，移動体通信技術は目覚ましい発展を遂げており，サービス事例も続々と出現している。一般向けのサービスとしては，2009 年に国内初のサービスが開始されたモバイル WiMAX⁽¹⁾ が注目されている。サービスエリアは 2010 年 9 月末時点で，三大都市圏や全都道府県庁所在都市，およびそれらの周辺の一部地域であり，エリア内であれば在来線の走行速度においておおむね利用可能である。

日本の鉄道における旅客サービスとしての移動体データ通信は，2006 年に商用サービスが開始されたつくばエクスプレスでの無線 LAN サービス⁽²⁾が先駆的事例である。また，JR 東海では，列車無線のデジタル化にともない，2009 年 3 月に東海道新幹線の N700 系車両において無線 LAN 接続サービス⁽³⁾を開始した。これは沿線の漏洩同軸ケーブルを活用するもので，基地局を新たに設置する必要がなく，鉄道環境に特化したサービスとして注目を集めている。海外でも，ヨーロッパや韓国的高速列車などで，HSPA (High Speed Packet Access) などを用いた車内での無線インターネット接続サービスが導入されている。

一方，大容量の無線通信技術としてレーザ光を用いた光

通信技術があり，人工衛星の通信やビル間通信に利用されている⁽⁴⁾。これはレーザ光の高い指向性を活かして長距離通信を実現し，また拡散しないことによる秘匿性をもつ通信方式であるが，列車のように高速に移動しかつ不規則に振動する移動体へは応用されていない。

場所に捉われないネットワーク接続環境に対する需要が今後ますます高まることが予測される中，鉄道においてもより大容量の，幅広い場面で活用できるネットワーク接続環境を提供できれば，旅客サービス面での鉄道の利便性向上，また業務系アプリケーションの性能向上につながられる。

このような背景から，我々は，レーザ光通信技術の地上・列車間通信への適用を目指して研究・開発に取り組んだ。本稿では，開発した通信システムと，その性能を確認するために実施したフィールド試験について述べる。

2. 開発した光通信システム

開発した光通信システムの鉄道環境での適用イメージを図 1 に示す。本システムはレーザスキャン方式を採用しており，レーザ光通信装置を列車の最後尾と沿線の地上に設

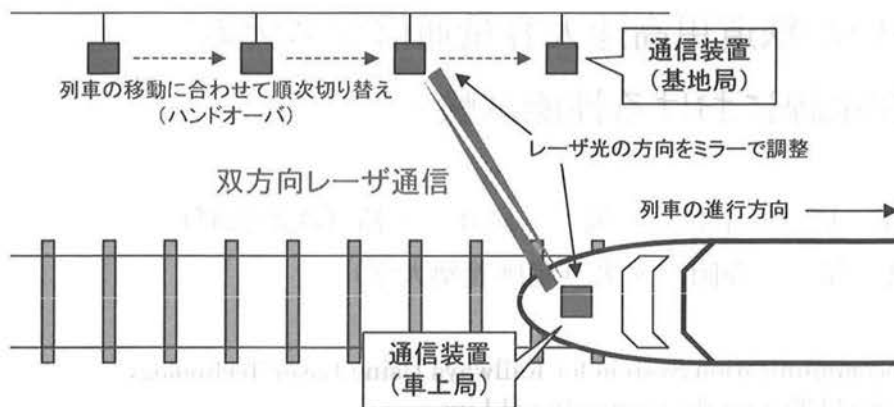


図1 鉄道沿線でのレーザスキャン方式による光通信

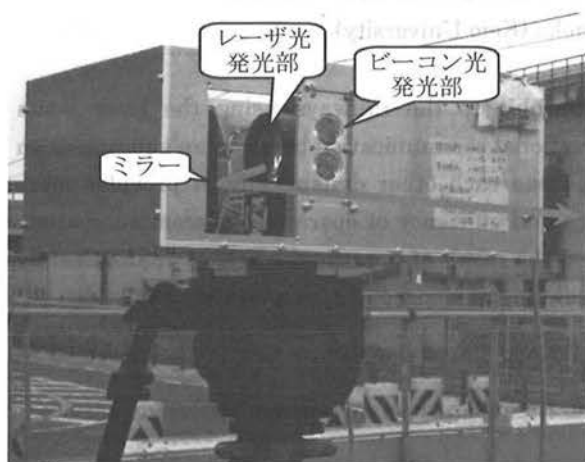


図2 開発した通信装置の外観

表1 開発した通信装置の諸元

大きさ	W470×D260×H162(mm)
重量	12kg(耐振機構含む)
通信距離	最長約300m
ビーコン光の波長	850nm(赤外線)
レーザ光の波長	785nm(赤外線)
送信出力	+1dBm
送信ビームサイズ	距離200m伝搬時で直径1m
受光光量	-6dBm ~ -34dBm
受入許容角度	±0.15°
レーザ光の強度	クラス1M

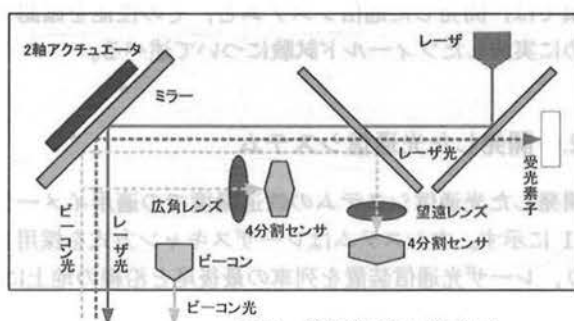


図3 通信装置の構成図

置し、装置内のミラーの傾きを動的に調整しながら、互いにレーザ光を相手に向けて発射することで双方向通信を行う。以下、列車側の通信装置を車上局、地上側の通信装置を基地局と呼ぶ。両装置はデータ伝送用のレーザ光のほかに、これとは波長が異なる赤外光である、位置検出用のビーコン光を搭載している。両装置は、それぞれ相手側が発するビーコン光をセンサで受光して、そのビーコン光に向けてレーザ光を発射する。レーザ光通信においては、

原理的に1対1での通信しか行えないことや、通信距離の制限により、線路沿いに複数の基地局を設置して順次切り替えながら連続的に通信できる仕組みが必要である。この切り替え機構はハンドオーバーと呼ばれる。

開発した通信装置を図2に、その諸元を表1に示す。大きさ・重量は車上への搭載や沿線地上への設置が可能なレベルである。また、レーザ光の強度はJIS規格(JIS C 6802「レーザ製品の安全基準」)において「裸眼では安全」(ビーム内で光学器具を使用しない限り安全)とされるクラス1Mのレベルとした。伝送速度は、物理層レベルで理論上1.25Gbpsである。通信距離については、基地局の数を減らすための通信距離の延伸と、基地局を沿線や車上に置くための小型軽量化がトレードオフの関係にあることから、曲線等の線路形状をふまえて検討し、300~400m程度の通信距離で十分な通信性能を得られることを目標とした。

通信装置の構成図を図3に示す。ミラーアクチュエータは新たに開発したもので、ミラーを上下・左右の2軸方向に制御でき、通信装置の小型軽量化に貢献している。

レーザスキャン通信を鉄道環境に適用するにあたって課題となる2つの点に対しては、それぞれ以下のような対策を施した。

(1)列車が高速に移動し、また不規則に振動する状況にあっても、相手装置のビーコン光を正確に捕捉し続けて高精度な追尾を行い、通信を維持する必要がある。このため本システムでは、2つの4分割センサを併用し、それぞれ広角レンズによる広範囲の捕捉、望遠レンズによる高精度の捕捉を行うことで、捕捉・追尾の高速化を図った。

(2)ハンドオーバーの際には原理的に通信の途絶が発生することから、列車の走行に合わせて自動的に、かつ短時間でハンドオーバーを行わなくてはならない。しかし通常の通信プロトコルでは、特にハンドオーバーによって車上側に新たなIPアドレスを設定する必要性が生じた場合、IPアドレスの重複を避けるため、設定に1秒程度を要する。本システムでは車上局の数が限られているため、あらかじめIPアドレスの重複を避けるように設定できる。この点を活かしてプロトコルから重複確認動作を除去し、理論上0.03秒でハンドオーバーが行えるようにした。

3. フィールド試験

開発したシステムを用いて、鉄道沿線での現地試験、およびその前段階として機能確認試験を実施した。本章ではその内容および結果について述べる。

〈3・1〉機能確認試験 開発したシステムの静的特性、および移動体通信への適用可能性を把握するため、1km以上の見通し距離が確保できる場所で機能確認試験を実施した。

2台の通信装置を対向して固定し、それぞれにPCを直結して通信を行い、ネットワークの性能を計測するベンチマークソフトである Netperf を用いてスループットを測定した。両装置間の距離を変えながら実験を行った結果、320mの距離において、TCPでの通信で923Mbps、UDPでは936Mbpsのスループットを得た。この値は通信距離が320m以下の場合も同じであった。さらに360mまで距離を伸ばしても、TCPで最大791Mbps、UDPで最大854Mbpsまでスループットが低下したものの、通信は可能であった。これにより通信距離の面で設計目標に達していることが確認できた。

鉄道環境でのフィールド試験においては、列車の窓ガラスや、基地局の収容箱の保護ガラスの影響が懸念される。特に本試験で利用する車両の窓ガラスには熱線吸収ガラスが用いられているため、これによる赤外光の減衰を考慮する必要がある。このため、列車窓ガラスを模擬した熱線吸収ガラスを2つの通信装置の間に設置し、同様に固定地間通信を行って熱線吸収ガラスの影響を評価した。その結果、ガラスの設置によって通信可能距離は短くなり、ガラスをレーザ光の光路に垂直に置いた場合200mとなった。ただ

し、通信可能距離の範囲内では、ガラスが無い場合と同じスループットが得られていることを確認できた。

〈3・2〉在来線沿線におけるフィールド試験 開発したシステムの鉄道環境への適用可能性を検証するため、2010年1月から2月にかけての5日間、JR西日本管内の東海道本線立花駅～甲子園口駅間でフィールド試験を実施した。試験機器の構成を図4に、試験の様子を図5に示す。試験区間は見通しのよい直線の複々線区間である。地上側では3箱の基地局収容箱を、100mごとに電化柱に取り付け、その中に基地局を収容し、それぞれ線路外に置いたハンドオーバー処理装置と光ファイバケーブルで接続した。一方、車上局は、4本の線路のうち最も基地局側を走る、下り新快速列車の最後部乗務員室の台に乗せて後ろ向きに固定した。列車の試験区間の通過速度は時速120～130kmであり、計算上およそ2.7～3秒ごとにハンドオーバーが実行されることになる。

通信試験は各日4回、合計で20回実施し、この中でスループットやパケットロスの測定、ハンドオーバー時間の測定、ハイビジョン動画の双方向伝送試験を行った。その結果、車上の制御用PCの不調でデータ送信に失敗した1回を除く全19回で地上・車上間の通信に成功した。スループットは、TCPのレベルでおよそ500～700Mbps、UDPで最大約850Mbpsが計測された(図6)。ただし、パケットロスが常時20～30%程度発生することが確認されており、この点では改善の余地があると考えられる。また、車上局が、3台の基地局のうち最後に通過する基地局との通信可能状態を6秒程度維持したことから、3.1節で述べた機能確認試験での結果と同様に、200m程度の通信が可能であることが確認された。

ハイビジョン動画の双方向伝送試験では、TCPを用いた際は、バッファリングや再送機能の効果により、地上側・車上側双方で、ハンドオーバーによる通信途絶の影響を受けずスムーズに動画を閲覧することができた(UDPを用いた際はハンドオーバー時に映像の乱れが若干生じた)。

ハンドオーバーについては、通信切断から次の基地局との安定した通信の確立まで0.4秒程度を要した(図7)。これは、列車振動等の影響を受けレーザ光の受信レベルが不安定になっていることが原因であると考えられる。アプリケーションによってはこの程度でも問題にはならないが、新幹線などを対象としたより高速域での通信では通信断などの問題にもつながりうると考え

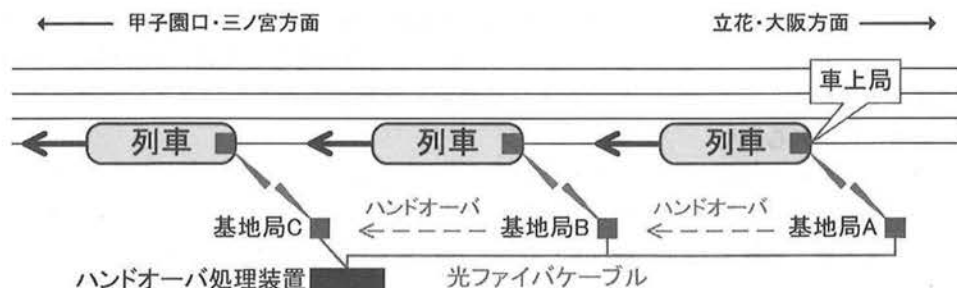


図4 在来線フィールド試験の機器構成



図5 在来線フィールド試験の様子

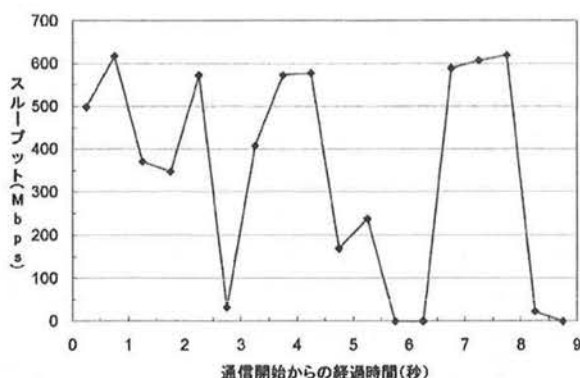


図6 在来線フィールド試験における
スループット測定試験の結果 (UDP)

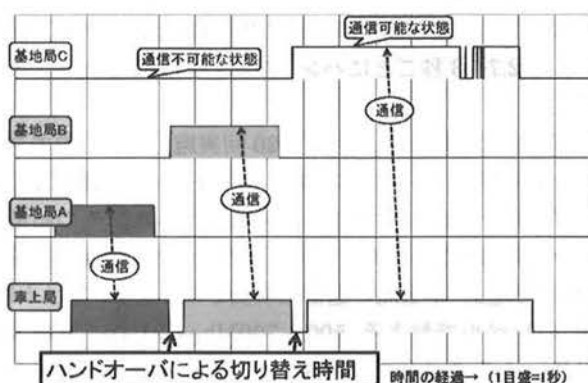


図7 ハンドオーバー性能試験の結果

られる。分析した結果、ハンドオーバー直後にパケットロスが発生し、通信の再確立に必要なシグナリングメッセージが失われているケースが多発していたことが確認されたため、実用化に向けては、耐振性能の向上、パケットロスの影響を受けないプロトコルの改良等により、さらなる改善を進める必要があることがわかった。

なお、光は雨、霧、雪などによって減衰するため、レーザ光通信の性能は視程と密接な関係があることが知られている⁶⁾。このため、降雨時に雨が列車窓ガラスを流れて屈折特性が変化することや視界不良となることが通信性能に影響することが懸念されたものの、このような状態で試験を行った際も晴天時と変わらない結果が得られた。ただし、降雨後に通信装置内で結露が発生して基地局が機能停止に陥ったことがあったため、通信装置・収容箱に結露を防ぐための構造が必要であることが確認された。

〈3・3〉新幹線沿線におけるフィールド試験 在来線で試験結果をふまえ、より高速な列車への適用可能性を把握するため、2010年3月の3日間、JR西日本管内の山陽新幹線新大阪駅～新神戸駅間でフィールド試験を実施した。設置条件の都合上、地上側の基地局は1台とし、上り線側の線路外にある防音壁に収容箱を取り付けて、その中に収容した。基地局の制御操作はこの防音壁に隣接するJR西日本所有の建物内で行うこととし、基地局から光ファイ

バケーブルを建物内に引き込んで制御用PCと接続した。一方、車上局は、上り列車の最後部乗務員室に搭載し、三脚に載せて後ろ向きに固定した。なお本試験では、基地局が1台のみであるためハンドオーバー試験は行わず、地上・車上間の1対1での通信性能の評価のみを目的とした。

通信試験は各日2回、合計で6回行った。列車の試験区間の通過速度は時速約240km～270kmであった。試験の結果、このような高速走行時においても、車上局・基地局は相互に相手方のビーコン光を捕捉でき、最長で約0.7秒の追尾に成功した。また、0.006秒程度ではあるが、基地局が車上局の発するレーザ光を受光し、物理層での通信を確立することができた。ただし、上位層におけるデータパケットの正常な送受信には至らなかった。

試験の結果、新幹線の窓ガラスによる減衰で通信距離が極端に短くなってしまうことが確認された。さらに、基地局設置位置から約50m先にある電化柱によって車上局・基地局間の光路が一時的に遮断されて通信が途絶し、その後再び互いが見通せる状況になってもビーコン光の再捕捉ができなくなっていたことが判明した。この試験により、基地局の設置条件、新幹線のガラスの影響に対する対策、新幹線の走行速度への対応などの点に配慮することが重要であることがわかった。

4. まとめ

本稿では、レーザ光を用いた鉄道用高速大容量通信システムおよびそのフィールド試験による評価について述べた。本試験の結果により、鉄道環境での地上・列車間通信における光通信の実現可能性を示すことができたと考えている。今後は、本試験で明らかになった課題をふまえ、通信システムの性能向上を進めるとともに、具体的なアプリケーションを想定した検討を進めていきたいと考えている。

なお、本稿で述べたフィールド試験の実施にあたっては、西日本旅客鉄道株式会社をはじめとする関係各社に多大な協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) UQ コミュニケーションズ株式会社公式サイト：
<http://www.uqwimax.jp/>
- (2) 晝間・眞部・町田：「つくばエクスプレスのインターネット利用環境整備」, JREA 2005年10月号, Vol.48, No.10 pp.26-28 (2005)
- (3) 杉山・吉澤：「東海道新幹線車内インターネット接続サービス」, JREA 2009年8月号, Vol.52, No.8 pp.27-30 (2009)
- (4) Devarapalli et al. : "Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol", RFC 3963 (2005)
- (5) 若森ほか：「光無線通信システムのための光波伝搬特性調査研究」, 電子情報通信学会技術研究報告 MW マイクロ波 MW2003-94, Vol.103, No.237 pp.143-148 (2003)