



自動運転のためのシリコンフォトニクス技術を利用した 高信頼性車載光ネットワーク(SiPhON)の実証

Demonstration of a Highly Reliable Si-Photonics-Based In-Vehicle Optical Network (SiPhON) for Autonomous Driving

野口大輔^{*1}
Daisuke Noguchi

岩瀬正幸^{*1}
Masayuki Iwase

森本政仁^{*1}
Masahito Morimoto

川原啓輔^{*1}
Keisuke Kawahara

椎野雅人^{*1}
Masato Shiino

澤田由香^{*1}
Yuka Sawada

島貫斉史^{*1}
Hitoshi Shimanuki

吉田浩信^{*1}
Hironobu Yoshida

鳥光 悟^{*2}
Satoru Torimitsu

大石慧介^{*2}
Keisuke Oishi

高橋 慶^{*2}
Kei Takahashi

石川 慶^{*3}
Kei Ishikawa

森田 稔^{*4}
Minoru Morita

〈概要〉

自動車業界では自動運転への転換のため、車載通信アーキテクチャの技術革新が進んでいる。自動運転車には、センサ類の電子機器増大に対応した大容量かつ低遅延で、EMC (Electromagnetic Compatibility: 電磁両立性) 性能の高い車載ネットワークが必要である。これらを満足するには、光通信技術の適用が考えられる。しかしながら、自動車の厳しい環境下に複数の発光素子を搭載した場合には、システムの信頼性劣化が課題となる。この課題を解決するためにSiPhON (Silicon-Photonics-based in-vehicle Optical Network) システムでは、光源となるDFB (Distributed Feedback: 分布帰還) レーザを独立して配置し、光変調器と受信機が集積されたシリコンフォトニクスデバイスがリング状に接続され、独立したCW (Continuous Wave: 連続波) 光源と光変調器の多段の直列接続により高速通信が可能であることを実証した。

1. はじめに

近年、自動車業界はCASE (Connected, Autonomous, Share and Service, Electric) に象徴される100年に一度の変革が進んでいる。自動車が電動化し、電子制御され、カメラ、LiDAR (Light Detection And Ranging: 光検知と測距)、レーダーなどのセンサ類とAI (Artificial Intelligence: 人工知能) による認知、判断により自動運転を実現し、更には、スマートフォンのようにクラウドネットワークと常時接続し、情報のやり取りやソフトウェアのアップデートが可能になりつつある。自動車の進化に伴い、通信のアーキテクチャも変革が求められている。図1に、車載通信アーキテクチャの変遷を示す。

図1(a)は、従来のフラット型と呼ばれる構成で、ECU (Electrical Control Unit: 電子制御装置) 間を効率的に相互接続する概念がなく、膨大な数のワイヤーハーネスが車内縦横に張り巡らされていた。車両の電子制御が進んだ現在では、車載用に開発され

たネットワークシステムが導入され、図1(b)に示すドメイン型へ移行している。各ドメインでの処理はDomain Controllerで制御され、ドメイン間はGatewayを介して通信を行う。ドメイン型の適用によって、車載ネットワーク全体での連携動作が可能となった。しかし、各ドメインのネットワークは車内に分散しているため、機器間を接続するワイヤーハーネス全長は依然として長く、ワイヤーハーネスのコストや質量が無視できない課題となっている。将来の高度自動運転では、更に、接続されるセンサやカメラなどの電子機器は増えていくため、車載ネットワーク上の各センサ情報を束ね、幹線として中央コンピュータへ送信する図1(c)に示すゾーン型のアーキテクチャが志向されている。高度自動運転における幹線の伝送容量は、表1に示すように100 Gbpsを超える。

更に、電気自動車のEMC要件は厳しく、電気配線は電磁場の影響を受けやすいためシールド付きケーブルが必須となる。シールド付きケーブルでは、質量や可撓性も課題となる。また、伝搬距離が数mに及ぶ幹線では、伝搬損失が甚大であり広帯域化が困難である。これらの課題を解決するため、近年、光通信技術の車載適用が盛んに研究されている。

上記要求に対応する車載光ネットワークの既存規格として、25/50G BASE-AU (IEEE802.3cz, Multi-Gigabit Optical

*1 研究開発本部 エレクトロニクス研究所

*2 研究開発本部 サステナブルテクノロジー研究所

*3 研究開発本部 フォトニクス研究所

*4 AT・機能樹脂事業部門 AT開発部

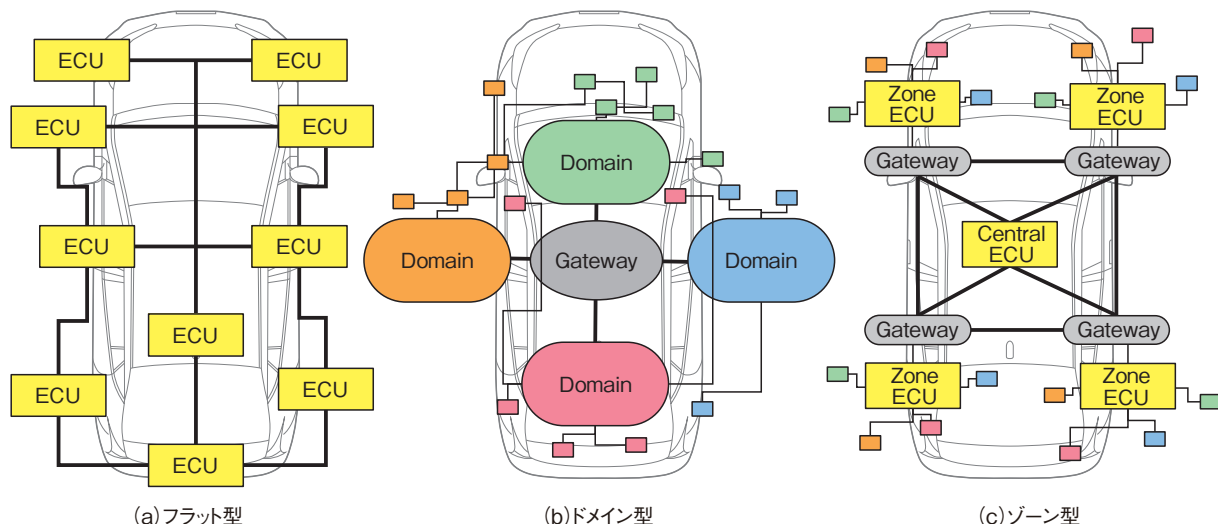


図1 車載通信アーキテクチャの変遷
Transition of in-vehicle communication architecture.

表1 自動運転で要求される伝送容量
Transmission capacity required for autonomous driving.

Required Communication Capacity		
4K Camera	>10 Gbps	X 5 ~ 12
LiDAR	>1 Gbps	X 2 ~ 6
RADAR	>100 Mbps	X 4 ~ 10
Cellular, Connected	>10 Gbps	
Infotainment	>100 Mbps	

Automotive Ethernet 通称OMEGA)¹⁾がある。OMEGAでは発光素子として、中心波長980 nmのVCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser:垂直共振器面発光レーザ)を使用する。しかしながら、自動車の厳しい温度環境に複数のVCSELを搭載した場合には、システムの信頼性が課題となる。車載通信システムには高い信頼性が要求されるため、我々はシリコンフォトニクス技術を基盤とする新しい通信アーキテクチャを提案した^{2)~7)}。

2. SiPhONシステムの概念

SiPhONシステムは、光源となるCWレーザを独立して配置し、光変調器と受信機が集積されたシリコンフォトニクスデバイスをリング状に接続することで相互通信を行うシステムである。シリコンフォトニクスは、シリコン基板上に光導波路と電子回路の両方を集積する技術で、光を利用した高速・大容量伝送と省電力を兼ね備えた革新的な技術である。図2に、MASTER装置とGateway装置で構成されるSiPhONシステムの概念図を示す。

Gateway装置は、車体を区画ごとのゾーンに分割した時、各ゾーンに配置されるセンサ群のインターフェースとなる。各ゾーンで集約された信号は、リング状の光ネットワークを周回しMASTER装置に至る。

2.1 装置構成

SiPhONシステムにおけるMASTER装置とGateway装置の構成を、図3に示す。

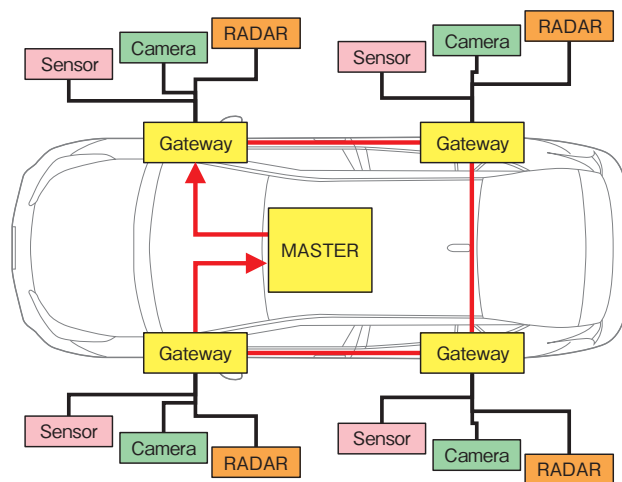


図2 SiPhONシステムの概念図
Conceptual diagram of the SiPhON system.

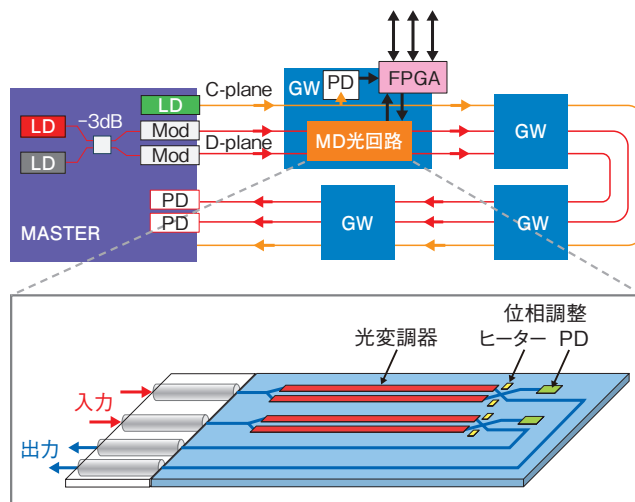


図3 装置構成
Device configuration.

SiPhONシステムには、同期信号を送送するコントロールプレーン (C-plane) と 10 Gbps以上の伝送容量を有するデータプレーン (D-plane) とがある。各装置は、FPGA (Field Programmable

Gate Array：現場でプログラム可能な集積回路)で制御され、MASTER装置はCW光源/MZ (Mach-Zender) 型光変調器と光スイッチを集積したシリコンフォトニクスデバイス/光信号を受信する光受信機を有する。CW光源としては、DFBレーザを採用し、光スイッチによって、予備系への切り替え機能を有している。Gateway装置はMD光回路を有する。MD光回路はModulator (変調器)とDetector (受信機)が集積されたデバイスである。ここで、MASTER装置から任意のGateway装置へ信号を送信する場合は、CW光をMASTER装置内のMZ型光変調器で変調し、変調光を送信する。信号を受信するGateway装置はシリコンフォトニクスデバイスに集積されたPD (フォトダイオード)によって信号を受信する。そのほかのGateway装置は、変調光を次段のGateway装置へそのまま受け渡す。任意のGateway装置から信号を送信する場合は、MASTER装置から与えられるCW光をそのGateway装置内の変調器で変調し、その変調光がリング状の光ネットワークを周回し、MASTER装置内の光受信機で受信される。本開発では、データ信号となるD-planeは10 Gbps、同期信号となるC-planeは1.25 Gbpsとして理論検証を行った。

2.2 MD光回路

具体的な光回路の中身について説明する。MD光回路はMZ型光変調器とPDが集積されており、信号の送受信を一つのデバイスで担う。MD光回路は2chの光変調器、PDを有し冗長性を確保している。ここで、MD光回路はMZ型光変調器の一对のバイアス値 (2値: High/Low) の組み合わせによって、消光特性を変化させることができ、この消光特性の変化を利用し電圧制御によって3つの動作モードを選択する。図4に、MD光回路が行う3モードの動作概念図を示す。

- ①光パワーの減衰を抑え、次段のGateway装置へ光信号を受け渡す: Thru動作。
- ②MASTER装置から送信される光信号をGateway装置で受信する: Listen動作。
- ③光変調器によってCW光を変調し、光信号を送信する: Talk動作。

バイアス値の組み合わせで①～③の動作を選択し、任意のGateway装置とMASTER装置がそれぞれ送信機、受信機となる。

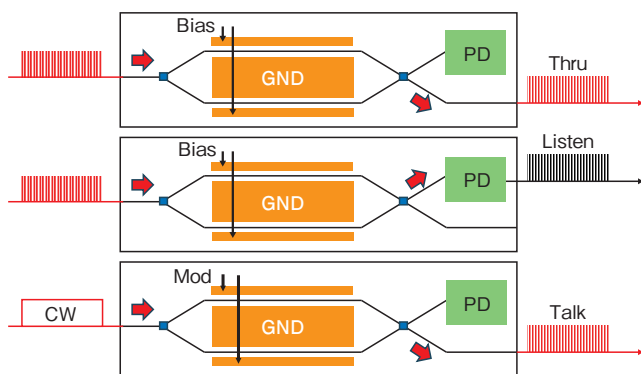


図4 MD光回路の3モード動作
Three-mode operation of MD optical circuit.

3. 既存規格に対する利点

SiPhONシステムと既存の車載通信規格とを計算機シミュレーションによって比較し、その優位性について明らかにした。

3.1 システム信頼性

ゾーン型の車載通信ネットワークでは、EMC性能や伝搬距離の観点から光化が優位であり、前述のOMEGAが標準化されている。OMEGAに対するSiPhONシステムの利点について説明する。OMEGAでは、スター型やツリー型、デージーチェーン型などのトポロジーが想定されるが、5台のGateway装置をデージーチェーン型として接続したネットワークと、同数のGateway装置を接続するSiPhONネットワークのシステムとの信頼性について比較する。図5に、デージーチェーン型としたOMEGAのネットワーク構成を例示する。

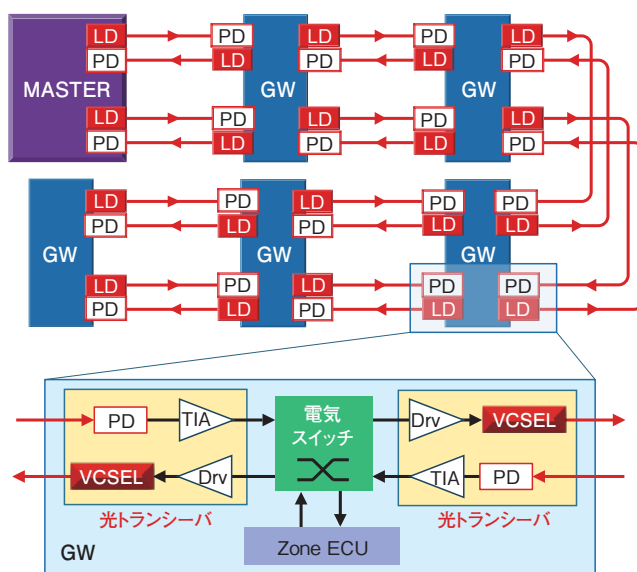


図5 デージーチェーン型としたOMEGAのネットワーク構成
Daisy chain network configuration of OMEGA.

本構成では冗長性を考慮し2 Laneの光ネットワークを想定する。この時、システム全体では20台のVCSELが搭載されることとなる。OMEGAの最大の課題は、多数の光トランシーバを搭載することによる信頼性の低下である。一般に、発光素子の寿命は温度が10℃上昇するごとに半減し、更に、電流密度の上昇でも急激に短寿命化する。OMEGAで適用される980 nmのひずみ系のVCSELでは、低電流動作であれば10年以上の平均寿命が実現されているが、20台のVCSELを搭載した場合では、システム寿命は極端に短くなる。また、Gateway装置はゾーン型のアーキテクチャでは、温度環境の厳しいルーフやエンジンルームなどに搭載することにも必要となるほか、直接変調型のVCSELでは、自己発熱によって環境温度以上の動作温度となる。一方、SiPhONシステムでは、発光素子はMASTER装置内のDFBレーザに限定され、このレーザを一定温度範囲で制御することによってレーザ寿命を極めて長く延命することが可能である。ここで、OMEGAとSiPhONのシステムとしての故障が発生する間隔の平均を示す平均故障間隔MTTF (Mean Time-To-Failure)を比較したグラフを、図6に示す。

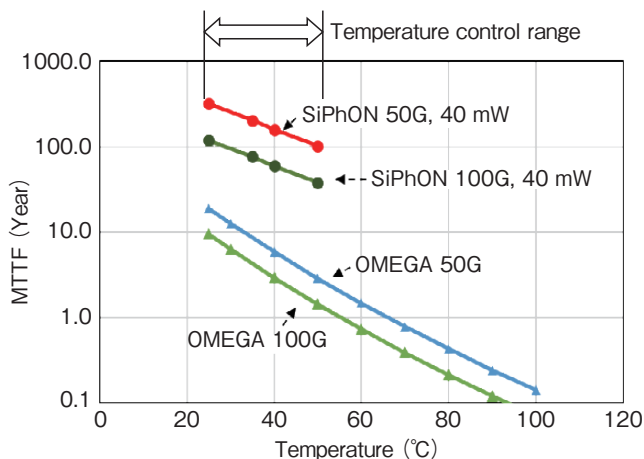


図6 OMEGA-SiPhON MTTF比較
OMEGA-SiPhON MTTF comparison.

グラフでは、伝送容量50 Gbpsと100 Gbpsの2つの条件でSiPhONとOMEGAのMTTFを比較している。伝送容量100 Gbpsでは4台の25 Gbps光源が必要となることから、システムの寿命はより短寿命となる。SiPhONシステムは、MASTER装置内の光源のみ動作温度範囲を25℃から50℃に限定することで100年以上のシステム寿命が見込まれる。一方、5台のGateway装置をデジーチェーン型として接続したOMEGAネットワークでは、Gateway装置の環境温度が80℃に達するとシステムとしての寿命は1年に満たないことが分かる。

3.2 低遅延性

次に、イーサネットで作成されるデジーチェーン型のシステムとSiPhONシステムとの遅延性について、6台のビデオカメラがそれぞれ非圧縮の4K 60 pの映像をDashcamに送信する場合の映像トラフィック遅延について、計算機シミュレーションによって比較した。

回線容量100 Gbps車載通信ネットワークについて検討する。比較対象となるイーサネットネットワークは、映像伝送用の規格であるAVB (Audio Video Bridging) と低遅延の時刻同期規格であるTSN (Time-Sensitive Networking) の組み合わせの「AVB+TSN」仕様に構成される。対象とするイーサネットシステムの構成を、図7に示す。

比較するSiPhONシステムの構成を、図8に示す。

図9は、イーサネットシステムにおけるビデオカメラ6からDashcamへの映像トラフィックの遅延の時刻推移である。各ゾーンのイーサネットスイッチで8 μ sの遅延が生じるため、最小でも34 μ s、最大で90 μ s遅延が発生した。

図10は、SiPhONシステムにおけるビデオカメラ6からDashcamへの映像トラフィックの遅延の時刻推移である。エンド間最小の遅延は3.5 μ s、最大の遅延は12 μ sとなった。更に帯域占有率の高いGatewayのTalkを増やす最適なスロット割り当てパターンを適用することによって、スロットサイズ9000バイト、ガードバンド100 nsにおいて約84 Gbpsのトラフィックを2.1 ~ 3 μ sのレイテンシで収容可能であることを確認し、50 Gbps以上の伝送性能を得られる見通しを得た。

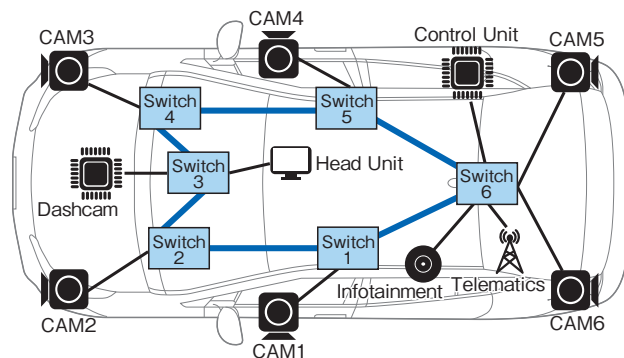


図7 イーサネットシステムの構成
Ethernet system configuration.

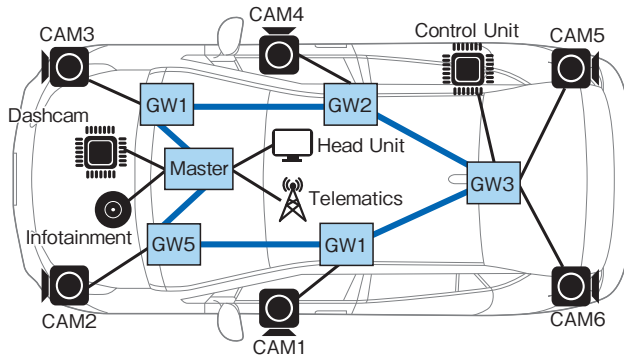


図8 SiPhONシステムの構成
SiPhON system configuration.

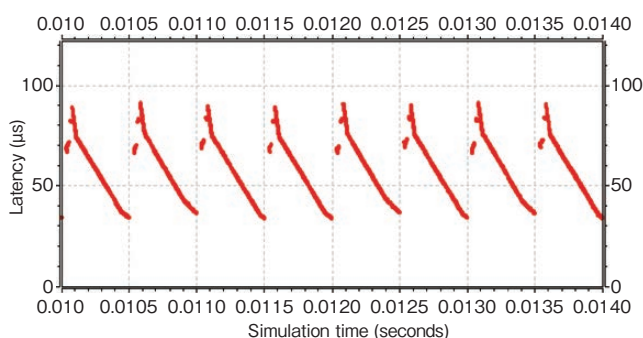


図9 イーサネットシステムにおけるビデオカメラ6からDashcamへの映像トラフィックの遅延の時刻推移
Time transition of delay of video traffic from video camera 6 to dashcam in an Ethernet system.

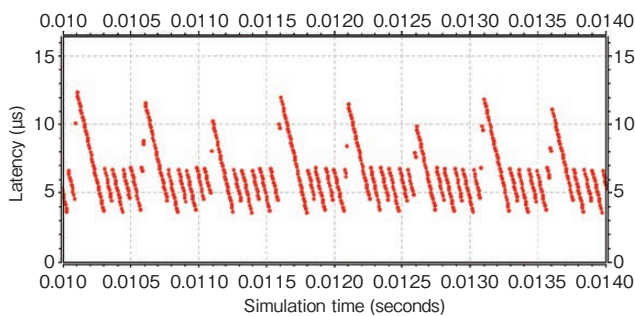


図10 SiPhONシステムにおけるビデオカメラ6からDashcamへの映像トラフィックの遅延の時刻推移
Time transition of delay of video traffic from video camera 6 to dashcam in a SiPhON system.

4. 試作・評価

MD 光回路を収容するパッケージとして、LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics: 低温同時焼成セラミックス) を選定した。LTCC は多層化が容易であり高密度実装に適している。また、キャビティの形成が可能であり、ワイヤーボンディングによる接続時の寄生インダクタンス低減が可能である。図 11 に、MD 光回路を収容した MD 光モジュールの構造を示す。

MD 光回路は、スペーサ基板としてシリコン基板 (厚み 300 μm) を用いて光軸の高さ調整を行った。スペーサ基板の表裏面にダイシングダイアタッチフィルムを貼り合わせ、光回路の実装を行った。

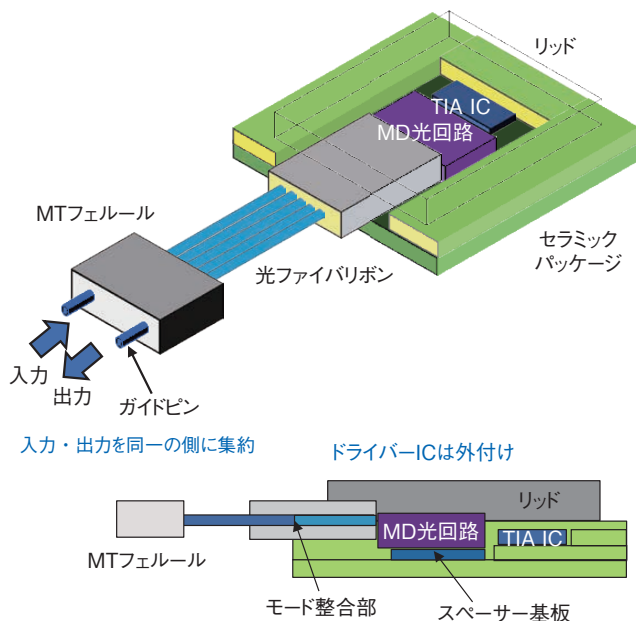


図 11 MD 光モジュールの構造
MD optical module structure.

光モジュール内部には、MD 光回路のほか、TIA (トランスインピーダンスアンプ) と平滑用コンデンサを内蔵している。光ポートは 250 μm ピッチ 8 心 (信号入力 2 心, 出力 2 心, 位置合わせ用 4 心) であり、シングルモードファイバと MD 光回路の光導波路は、バットジョイント (突き合わせ継ぎ手) 接続構造である。図 12 に、試作した MD 光モジュールの外観を示す。

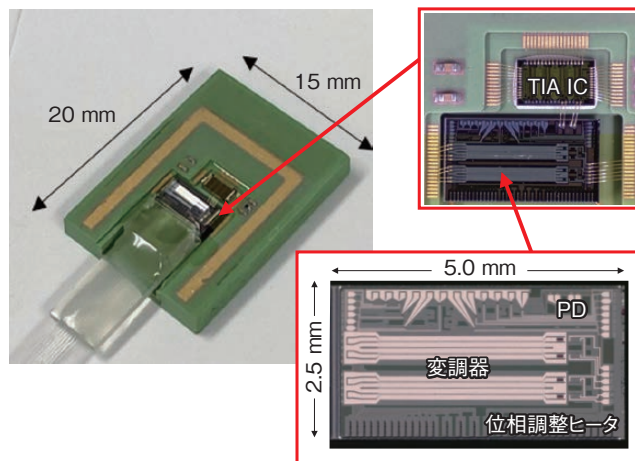


図 12 MD 光モジュール外観
MD optical module appearance.

MD 光モジュールは、電圧制御によって 3 つのモード動作を選択する。Talk 動作時は一対のバイアス値を High とする必要があるが、片側を Low とすることで消光特性を変化させ、それぞれを Listen・Thru に割り当てる。Thru 動作時は挿入損失が極小であることが好ましいため、本試作デバイスではヒータ電流値 5.6 mA を調整ポイントに選択し、各動作条件を決定した。図 13 に、各バイアス条件における MD 光モジュールの消光特性を示す。

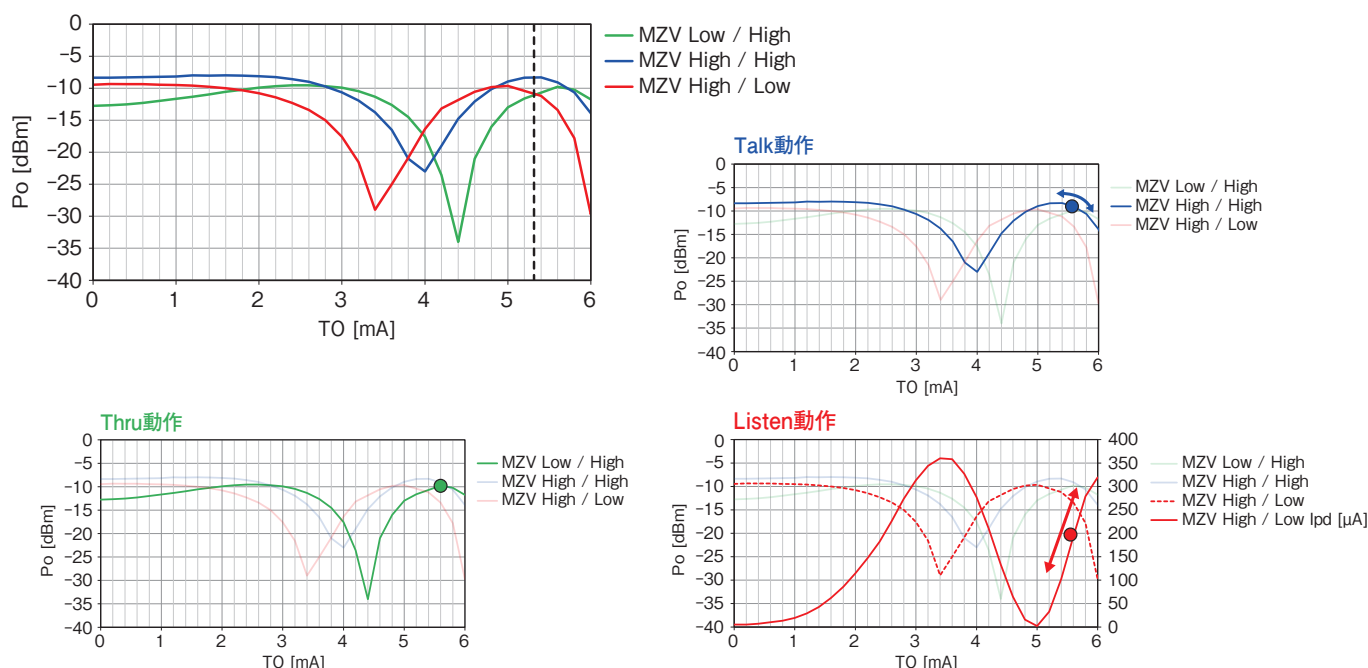


図 13 各バイアス条件における MD 光モジュールの消光特性
Extinction characteristics of MD optical module under each bias condition.

Listen動作において、消光はPDへ流入する光強度の増加を意味するため、光電流の増減をIpdグラフとして示している。Talk動作時は光出力が極大となるポイントから2 dB減衰のポイント、Listen動作時はIpdが極大となるポイントに近く、それぞれの動作に適合していると考えられる。Thru動作時の挿入損失は-10 dBとなり、Talk動作時では消光比は5.5 dBで良好なアイ開口を示した。Listen動作時は、ポストアンプの出力ではあるが、同様に良好なアイ開口を確認することができた。図14に、Talk動作時、Listen動作時のアイ波形を示す。

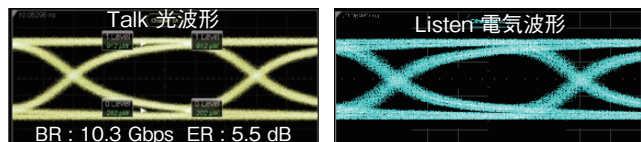


図14 Talk/Listen動作時のアイ波形
Eye waveform during Talk/Listen operation.

次に、SiPhONシステムでは試作したMDモジュールを多段接続する光ファイバケーブルが必要となる。将来的な車載適用のため、光ファイバケーブルについても信頼性と耐環境性能が求められるほか、本開発の主目的として、ワイヤーハーネスのコストや質量の削減がある。センサ類の増加によりワイヤリングシステムの質量、コネクタなどの部品点数も増加している。クルマ全体に配策されるワイヤーハーネスは、大型SUVで約50 kg、車両全体で約2%を占める。また、その構成部品は約2000点にも及ぶ。図15に、車載用ワイヤーハーネスの写真を示す。



図15 車載用ワイヤーハーネス
Automotive wire harness.

主材料である銅の価格は過去10年間で40%近く上昇しており、今後も上昇すると見込まれるため、ワイヤーハーネスの増加は車両価格にも影響する。近年、資源枯渇や価格変動などのリスク面からも銅よりも有利なアルミニウムへの置き換えのニーズが高まっている⁸⁾。

ハーネスの組み込み工数削減と、ワイヤリングシステムの単純化、軽量化を目的に、図16に示す電源-通信線一括接続ハーネスFASPULS® (Flexible Automotive Signal and Power Unified Line System)を開発した。

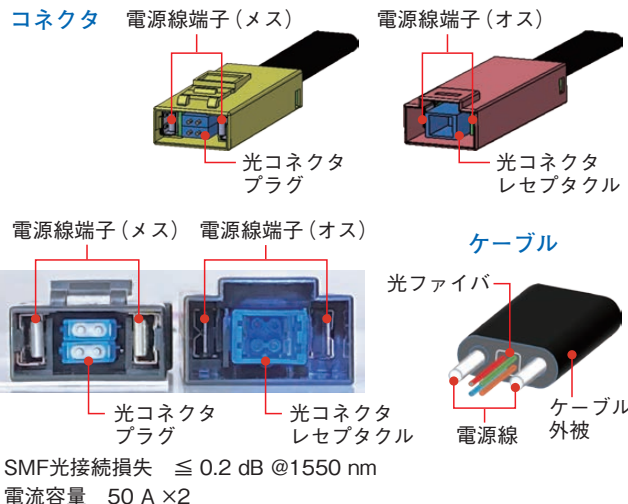


図16 電源-通信線一括接続ハーネスFASPULS
Signal and power unified line harness FASPULS.

FASPULSは電流量50 Aの電力取出し端子を2極設け、最大100 Aまでの電力供給を可能にした。電線にはアルミニウム電線を採用し、軽量化も図った。ケーブルの中央には4心の光ファイバを通信線として採用し、ファイバ線材には、航空機分野などへの応用で既の実績があるOFS社製のMicro-Links (μlinx) Avionics Fiber Optic Cablesを採用した。μlinxは光ファイバ心線上にアラミド繊維抗張力体を被せ、ETFE(フッ素系樹脂)外被覆を押し成形した構造により、引張りや曲げなどの外力に対しても堅牢に設計されている。図17に、高耐熱光ファイバケーブルμlinxの仕様を示す。

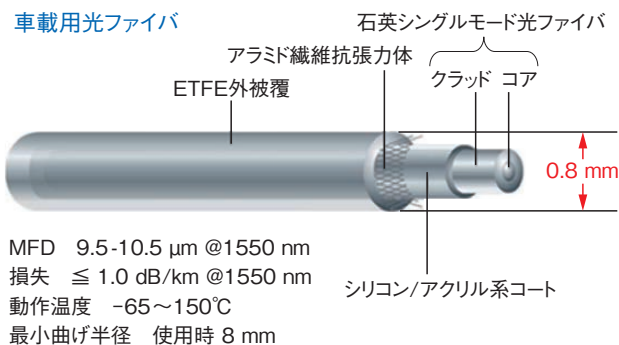
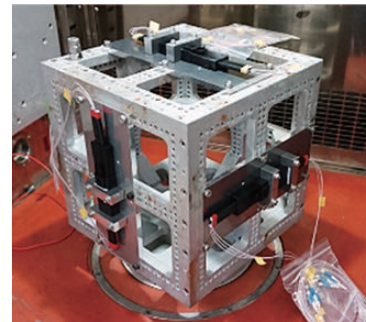


図17 高耐熱光ファイバケーブルμlinxの仕様
Specifications for high heat resistant optical fiber cable μlinx.

動作温度は-65~150℃であり、車載部品の要求規格を大幅に上回る高いマージンが得られる。また、車載環境では振動に対する耐性が要求されることから車載向けの信頼性試験を実施している。図18に、ISO規格で規定される試験条件(ISO16750-3)と振動試験機を示している。

車載ではTelcordia通信規格よりも長い時間、高い振動周波数条件が規定されている。試験前後での損失の変化はなく、損失値は光コネクタの損失規格以下であることを確認している。

	単位	車載ケーブル 振動試験 ISO16750-3	Telcordia 試験 GR326-CORE	参考 高圧コネクタ
方向数		3	3	3
試験時間	[h]	8	2	41.2
最大加速度	[m/s ²]	27.1	※	49
最小周波数	[Hz]	10	10	10
最大周波数	[Hz]	1000	55	200
スweep			45 Hz/min	1oct/min
通電パターン				250 A
温度	[℃]		23	



※ 1.5 mm (peak to peak)

図18 振動試験条件 (ISO16750-3) と振動試験機
Vibration test conditions (ISO16750-3) and vibration test machine.

5. 実証試験

SiPhON システムの理論実証を目的に慶応義塾大学矢上キャンパス研究棟にて、2024 年 3 月に実証試験を実施した。図 19 に、SiPhON システムの実証試験系を示す。MASTER 装置と 4 台の Gateway 装置が光リンクで接続されている。

2台の4Kカメラ、LiDAR及びCANインターフェースのレーダーがイーサネットスイッチを介して、Gateway装置に接続され、すべての情報はMASTER装置へ配信される。仮想走行

画面をモニター A に投影し、4K カメラで撮影し、SiPhON システムを経由し MASTER 装置からコンピュータに送信、物体認識などの画像処理を行い、モニター B に投影する実証試験を行った。各装置間は前述した FASPULS によって接続され、MASTER 装置に収容した電源ユニットから各 Gateway 装置へ電力を供給するほか、通信も 1 つのハーネスによって実現している。図 20 に、SiPhON システムによる伝送実証試験中の試験系写真を示す。

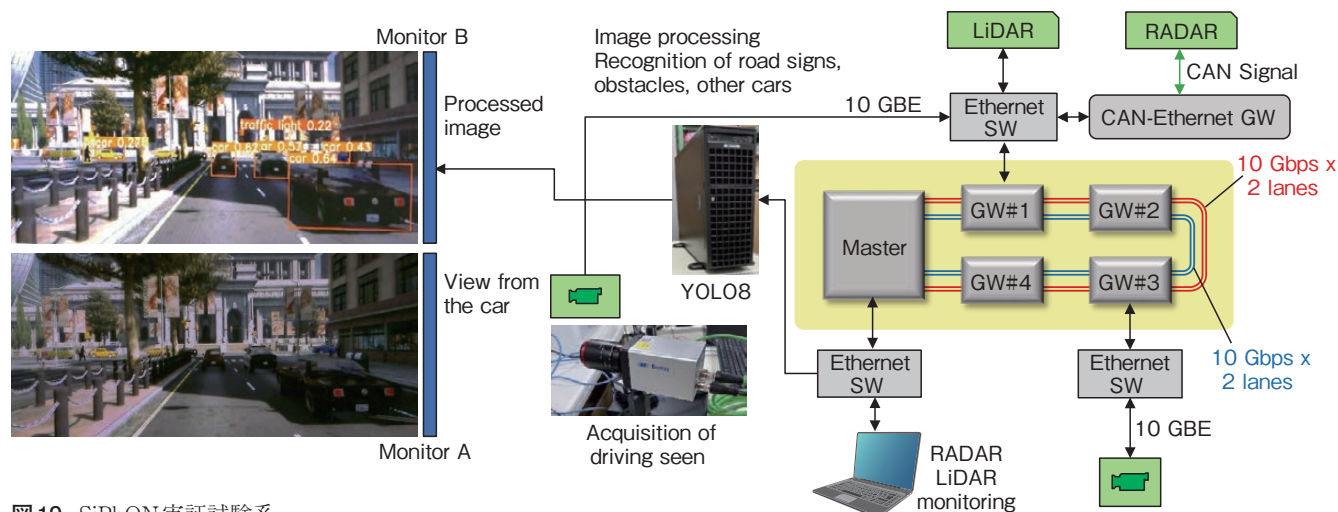


図 19 SiPhON 実証試験系
SiPhON demonstration test system.



図20 伝送実証試験中の試験系写真
Test system photo during transmission demonstration.

6. おわりに

本研究の成果では、独立したCW光源と光変調器の多段の直列接続により高速通信が可能であることを実証した。SiPhONシステムの実用化・普及に向けては、Gateway装置の接続段数強化とロスバジェット（許容伝送損失）の確保のため変調器デバイスの損失低減を行う必要がある。また、発熱に対する熱管理技術の進化や経済的な製造技術の高度化も必要である。今後、厳しい気象条件下や複雑な都市環境にも適合する高信頼な光モジュールの開発、実装帯域の改善を行い、車載光通信が50 Gbps以上の帯域を必要とする2035年頃の社会実装を目標に開発を推進する。

謝辞

本研究開発は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT：エヌアイシーティー）令和2年度～令和5年度委託研究（#21801）「高度自動運転に向けた大容量車載光ネットワーク基盤技術の研究開発」及び令和6年度委託研究（#23701）「完全自動運転のための高性能かつ高信頼な車載光ネットワーク基盤技術の研究開発」にて実施されたものです。本研究を共同で推進していただいた慶應義塾大学の津田裕之様、久保亮吾様、東京大学の中野義昭様、種村拓夫様、大阪大学の村田正幸様、荒川伸一様、株式会社メガチップスの天宮泰様、金 英毅様、情報通信研究機構（NICT）の高橋亮様、山本直克様、松本敦様に深謝します。

参考文献

- 1) IEEE Standard for Ethernet Amendment 7: Physical Layer Specifications and Management Parameters for Multi-Gigabit Glass Optical Fiber Automotive Ethernet, IEEE Std 802.3cz™.
- 2) 津田裕之, 久保亮吾他: 多機能光集積回路を利用した高信頼大容量車載光ネットワーク, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-32 (2021).
- 3) Onur Alparslan, et al.: "A zone-based optical architecture for intra-vehicle backbone networks", 電子情報通信学会フォトニクネットワーク (PN) 研究会信学技報, vol. 121, no. 386, PN2021-79, pp. 142-147 (2022).
- 4) 荒川伸一, 村田正幸他: 車載光ネットワーク SiPhON のレーザーダイオード故障に対する信頼性評価, 電子情報通信学会フォトニクネットワーク (PN) 研究会, 信学技報, vol. 122, no. 398, PN2022-65, pp. 125-129 (2023).
- 5) 荒川伸一他: 大容量車載光ネットワーク SiPhON の研究開発, 電子情報通信学会コミュニケーションシステム (CS) 研究会, 信学技報, vol. 123, no. 32, CS2023-5, pp. 20-25 (2023).
- 6) S. Arakawa et al.: "Demonstration of a Highly Reliable Si-Photonics-Based In-Vehicle Optical Network (SiPhON) for Autonomous Driving" ECOC' 24 (2024).
- 7) 高橋亮, 岩瀬正幸, 津田裕之: 車載光ネットワークの最新動向, 電子情報通信学会誌 vol. 107, no. 2, 2024 pp. 128-134 (2024).
- 8) 外山貴則, 池本浩平他: クルマの軽量化を実現するためのワイヤリングシステムの技術開発, 古河電工時報, 141 (2022).