

# レイヤ2ネットワーク冗長化プロトコルの障害復旧性能評価と車載イーサネットへの適用検討\*

## Failure Recovery Performance Evaluation of Redundancy Protocol in Layer 2 Network and its Application to an Automotive Ethernet

吉田 拓人  
Takuto YOSHIDA

小谷 安弘  
Yasuhiro KOTANI

加来 芳史  
Yoshifumi KAKU

We considered the redundancy of an automotive Ethernet. The failure recovery time of redundancy of an automotive Ethernet network is an important consideration from a fail-safe perspective. In this paper, we measure the recovery time of Link Aggregation (LA) and Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) using Cisco Systems switches. As a result, the average recovery time for LA was 628.150 ms. For RSTP, it was 641.923 ms/1801.527 ms (direct/indirect link failure). We concluded that it is difficult to apply LA and RSTP directly to an automotive Ethernet, because a communication disruption of up to a few seconds can be fatal to control system communications for vehicle motion control.

Key words :

Information, communication, and control, High-speed communication, Interior network/vehicle network, Automotive Ethernet

### 1. まえがき

CASE (Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric) および SDV (Software Defined Vehicle) といった車両レベルのトレンドは、自動車産業全体に大きな影響を与えている。これらのトレンドに対応すべく、車両電子プラットフォームは、従来のセントラルゲートウェイ型および現在のドメイン統合型からセントラル・ゾーン型のアーキテクチャ (ゾーンアーキ) <sup>1)</sup> へ移行しようとしている。

Fig. 1 にゾーンアーキの概念図を示す。ゾーンアーキはセンサやアクチュエータが接続されるゾーン ECU と中央のセントラル ECU から成る。また、ゾーン ECU とセントラル ECU はバックボーンネットワー

クによって接続される。ゾーンアーキのバックボーンネットワークは、通信が多重化されるため、大容量通信技術が必要である。さらに、タイムセンシティブなトラフィックの制御や上位のサービス通信をサポートする必要がある。これらの要件を満たす通信技術として車載イーサネット <sup>2)</sup> が注目されており、バックボーンネットワークの最有力候補である。

ゾーンアーキテクチャのバックボーンネットワークは、物理的な障害や機器の故障に対する堅牢性が要求される。特に、通信の持続性が不可欠であるため、車載イーサネットには適切な冗長化やバックアップメカニズムの実装が必要となる。Fig. 1 の破線に示すように、ゾーンアーキの各 ECU 間の通信経路は必ず 2 つ以上あり、ECU 間の通信経路に障害が発生したとし

ても、冗長化プロトコルにより冗長経路へと切り替えられる。

民生用イーサネットでは、Link Aggregation (LA) <sup>3)</sup> や Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) <sup>4)</sup> などの冗長化プロトコルが用いられており、車載ネットワークにおいてもこれらの技術を適用できる可能性がある。ただし、民生と車載では冗長化プロトコルに対する性能要求が異なるため、冗長化プロトコルの性能評価を行い、車載適用が可能か検討する必要がある。特に、フェールセーフの観点から、通信経路に障害が発生してから冗長経路へ切り替えられるまでの時間 (障害復旧時間) は重要な検討事項となる。

本稿では、Cisco Systems 製の民生イーサネットスイッチ (ESW) を用いて LA と RSTP の障害復旧時間を計測し、車載イーサネットへの適用を検討する。LA の性能評価では、2 つの ESW 間に 2 本の物理リンクから成る 1 本の論理リンクを作成し、1 本の物理リンクが途絶した際に、データがもう 1 本の物理リンクへ切り替わるまでの時間を計測する。RSTP 試験では、3 つの ESW を用いてリングトポロジを作成し、直接/間接リンク障害が発生した際に、スパンニングツリーの再構築にかかるまでの時間をそれぞれ計測する。評価結果から、LA と RSTP の障害復旧時間に影響を与える要因を考察し、障害復旧時間の改善策を検討する。さらに、これらの冗長化プロトコルの車載適用の可能性についても言及する。

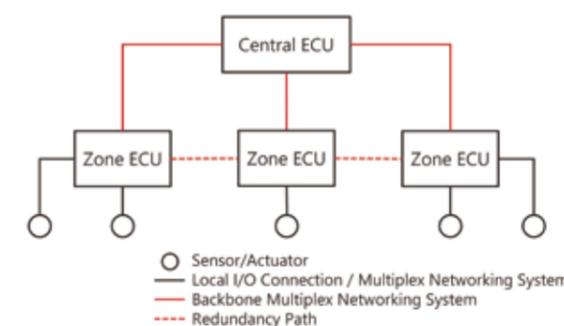


Fig. 1 Zone Architecture

### 2. 冗長化プロトコル

本章では、LA と RSTP の概要と冗長化プロトコルとしての動作を説明する。

#### 2.1 Link Aggregation (LA)

LA は物理層およびデータリンク層における帯域拡張の技術である。帯域拡張は複数の物理リンクを 1 つの論理リンクにまとめることで実現する。また、複数の物理リンクを使うため、LA は冗長化プロトコルとしても使用できる。

LA による帯域拡張の動作を Fig. 2 に示す。LA は ESW 間の複数の物理リンクを LAG (Link Aggregation Group) として束ね、1 本の論理的な通信経路とみなして LAG 内の通信経路にトラフィックを振り分けることで ESW 間の通信帯域を拡張する。また、障害発生時の LA による経路切替の動作を Fig. 3 に示す。LAG を構成する通信経路で障害が発生した場合、LAG 内の正常な通信経路に切り替えることで通信を継続できる。



Fig. 2 Expansion of Communication Bandwidth by LA



Fig. 3 Route Switching in Case of Failure by LA

#### 2.2 Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP)

RSTP はループ構成のネットワークでループ経路内を同じフレームが流れ続けること (ブロードキャストストーム) を防止するための技術である。また、ある 2 点間でリンク障害が発生した場合、2 点間の経路を迂回路へ切り替えることができるため、冗長化プロトコルとしても使用される。

RSTP に対応した ESW は互いに Bridge Protocol Data Unit (BPDU) と呼ばれる自身の情報を含んだフレームを交換し、各 ESW とそのポートの役割を決定する。Table 1 にポートの役割を示す。一部の ESW のポートをフレーム転送禁止とすることで Fig. 4 に示すようにループを持たないスパンニングツリーを形成し、ループ経路内を同じフレームが流れ続けることを防止する。

経路に障害が発生し、ネットワークトポロジーが変化すると、RSTP はスパンニングツリーを形成し直し、

\* (公社)自動車技術会の了解を得て、学術講演会予稿集 (秋) の文献番号 20236270 より一部加筆して転載

2点間の経路を迂回路へと切り替える。RSTPの障害モードは直接リンク障害と間接リンク障害の二つに大別される。直接リンク障害は代替ポート (AP) を持つ ESW のルートポートで起こる障害である。ESW が障害を検知すると代替ポート (AP) をルートポート (RP) へ即変更することで、Fig. 5 に示すようにスパンニングツリーを再形成する。

間接リンク障害は代替ポートを持つ ESW が直接接続されていないリンクで起こる障害である。ESW が障害を検知すると Proposal/Agreement プロセス (高速にスパンニングツリーを形成するための BPDU を用いた ESW 間の交渉プロセス) による隣接 ESW との交渉を行い、Fig. 6 に示すようにスパンニングツリーを再形成する。したがって、いずれのリンク障害に対しても、スパンニングツリーを再形成することで通信を再開することができる。

Table 1 Role of Ports in RSTP

Port	State	Description
Root Port (RP)	Forwarding	Ports that receive BPDUs Learn the source MAC address
Designated Port(DP)	Forwarding	Ports that send BPDUs Learn the source MAC address
Alternative Port(AP)	Discarding	Port for backing up the RP Do not learn source MAC address
Backup Port (BP)	Discarding	Port to back up the DP Do not learn source MAC address

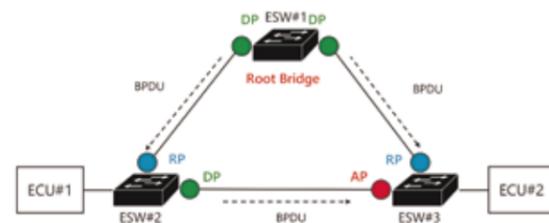


Fig. 4 Redundant Network with RSTP

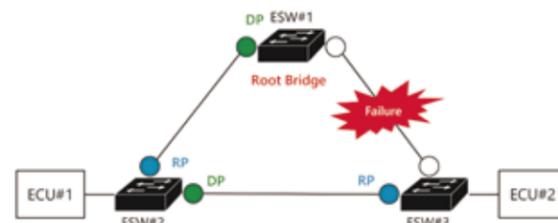


Fig. 5 Direct Link Failure

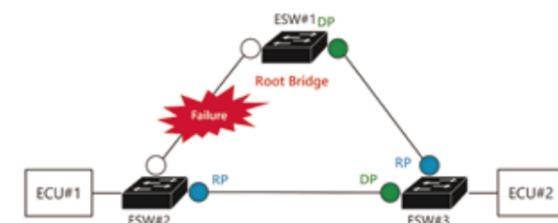


Fig. 6 Indirect Link Failure

### 3. 性能評価

本章では、Cisco Systems 製の ESW を用いて、LA と RSTP の障害復旧時間を計測する。

#### 3.1 試験環境

本試験の DUT (Device Under Test) は Fig. 7 に示す Cisco Systems 製 ESW の CBS250-8T-D-JP である。CBS250-8T-D-JP は企業ネットワーク向けの ESW であり、Cisco Systems 製品の中でも比較的ローエンドモデルである。この ESW は 1000BASE-T のポートを 8 つ具備しており、LA は IEEE802.3ad 規格に、RSTP は IEEE802.1w 規格にそれぞれ準拠している。

本試験では、ECU として Raspberry Pi 4 Model B を用いる。各試験で用いる Raspberry Pi は 2 台 (ECU#1, ECU#2) で、ECU#1 はパケットジェネレータ (Colasoft Packet Builder 2.0) によってパケットを生成し ECU#2 へ平均 20 ミリ秒間隔で定期送信する。ECU#2 は ECU#1 からのパケットを受信し、パケットキャプチャ (Wireshark) を用いて記録する。本試験において障害復旧時間とは ECU#1 から ECU#2 へ送信するパケットがリンク障害によって途絶してから、再び ECU#2 がパケットを受信し始めるまでの時間とする。



Fig. 7 Cisco Systems CBS250-8T-D-JP

#### 3.2 LA の障害復旧試験

Fig. 8 に LA の障害復旧試験の概要を示す。本試験では、2 台の ESW 間に LA によって 2 本の物理リンクを束ねた 1 つの論理リンクを作成する。そして、物理リンクのうち 1 本をケーブル抜去により強制的にリンクダウンさせ、リンクダウンさせた経路のトラフィックがもう片方の正常な物理リンクへ経路切替されるまでの時間を計測する。

ESW の LA に関する設定を Table 2 に示す。ESW#1 と ESW#2 は Gi (Gigabit Ethernet Port)1 と Gi2 を LAG に所属させ、Gi1 と Gi2 はそれぞれ対向の ESW の Gi1 と Gi2 と接続している。

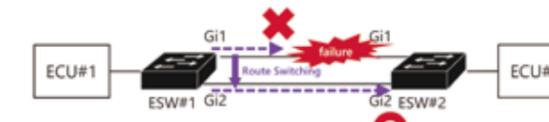


Fig. 8 LA Failure Recovery Test

Table 2 Switch Configuration of LA

ESW#	LAG
ESW#1	Gi1, Gi2
ESW#2	Gi1, Gi2

#### 3.3 RSTP の障害復旧試験

本試験では、3 台の ESW を互いに接続したリング型トポロジ上に RSTP によってスパンニングツリーを作成し、直接/間接リンク障害が発生した際に、スパンニングツリーが再構築され、通信が再開されるまでにかかる時間をそれぞれ計測する。

Fig. 9 に直接リンク障害試験の概要を示す。ESW#1 の Gi3 と ESW#3 の Gi3 間のリンクをケーブル抜去により強制的にリンクダウンさせ、直接リンク障害を発生させる。障害発生を ESW#3 が検知すると、自身の Gi2 ポートの役割を AP ポートから RP ポートへ切り替え、ECU#1 と ECU#2 の通信を再開させる。障害発生から通信再開までにかかった時間を計測する。

Fig. 10 に間接リンク障害試験の概要を示す。ESW#1 の Gi1 と ESW#2 の Gi1 間のリンクをケーブル抜去により強制的にリンクダウンさせ、間接リンク障害を発生させる。障害発生を ESW#2 が検知すると、Proposal/Agreement プロセスによってスパンニングツリーを再形成し、ECU#1 と ECU#2 の通信を再開させる。障害発生から通信再開までにかかった時間を計測する。

ESW の RSTP に関する設定を Table 3 に示す。STP モードはすべて RSTP とする。Priority が最も小さい ESW がルートブリッジとなり、ポートの役割を決める際の起点となる。Hello Time は BPDU の送信周期であり、本試験では設定可能な最小値である 1 秒を指定する。

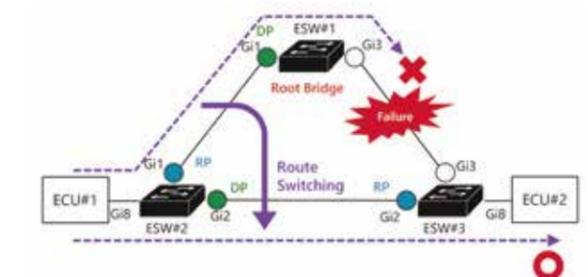


Fig. 9 RSTP Direct Link Failure Recovery Test

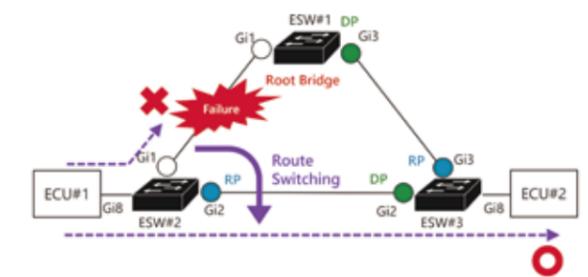


Fig. 10 RSTP Indirect Link Failure Recovery Test

Table 3 Switch Configuration of RSTP

ESW#	STP Mode	Priority	Hello Time
1	RSTP	0	1
2	RSTP	4096	1
3	RSTP	32768	1

## 4. 性能測定結果

Fig. 11 は、本試験で計測した LA と RSTP（直接リンク障害、間接リンク障害）の障害復旧時間の分布を示す。横軸は障害復旧時間を、縦軸は度数を示している。青色の柱は LA、橙色の柱は RSTP（直接リンク障害）、緑色の柱は RSTP（間接リンク障害）の試験結果を示している。

LA の障害復旧時間の平均時間は 634.130 ミリ秒、標準偏差は 199.030 ミリ秒であった。また、障害復旧時間の分布が 450 ミリ秒付近と 850 ミリ秒付近の 2 つに分かれた。直接リンク障害発生時の RSTP の障害復旧時間の平均時間は 641.923 ミリ秒、標準偏差は 200.764 ミリ秒であった。間接リンク障害発生時の RSTP の障害復旧時間の平均時間は 1801.527 ミリ秒、標準偏差は 448.851 ミリ秒であった。

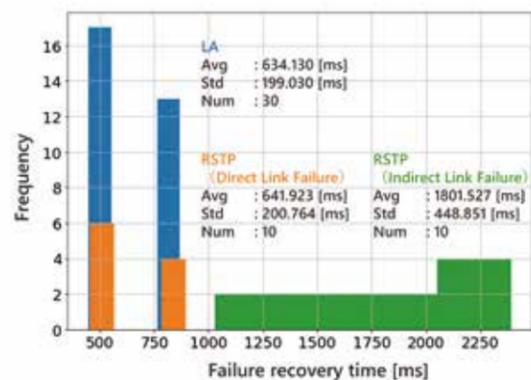


Fig. 11 Measured Failure Recovery Times for LA and RSTP

## 5. 考察

本章では、評価結果から LA と RSTP の障害復旧時間に影響を与える要因を考察し、復旧時間の改善策を検討する。さらに、これらの冗長化プロトコルの車載適用の可能性についても言及する。

### 5.1 リンクダウン判定時間と障害復旧時間

LA と RSTP（直接リンク障害）の障害復旧時間の分布が 450 ミリ秒付近と 850 ミリ秒付近の 2 つに分かれた。その主な原因は ESW 内の PHY のポートロール (Master/Slave 設定) により、リンクダウン判定時間が異なるためであると考えられる。

障害復旧時間 ( $T_{fr}$ ) は式 (1) に示すリンクダウン判定時間 ( $T_{ld}$ ) と経路切替処理時間 ( $T_{rs}$ ) の合計時間である。

$$T_{fr} = T_{ld} + T_{rs} \quad (1)$$

リンクダウン判定時間 ( $T_{ld}$ ) とはリンクに障害が発生してから PHY の状態がリンクダウンへ遷移するまでにかかる時間である。本試験で使用した ESW がサポートする 1000BASE-T 規格では、リンクダウンを判定するためには、Master PHY の場合 350 ミリ秒、Slave PHY の場合 750 ミリ秒の時間を要する<sup>5)</sup>。また、ESW のようなマルチポートデバイス同士を接続する場合、PHY の Master/Slave 設定はリンクパートナーとのオートネゴシエーションの際にランダムに決まる。このことから、LA と RSTP（直接リンク障害）の障害復旧時間の分布が 450 ミリ秒付近と 850 ミリ秒付近の 2 つに分かれた支配的な要因は PHY のリンクダウン判定時間であると推察できる。

もう一方の経路切替処理時間 ( $T_{rs}$ ) とは LA による経路切替、RSTP によるポートの役割変更などに要するリンクダウン判定以外の処理時間である。LA と RSTP（直接リンク障害）の試験結果とリンクダウン判定時間より、LA と RSTP（直接リンク障害）による経路切替処理時間は約 100 ミリ秒要することがわかる。

### 5.2 間接リンク障害発生時の RSTP の障害復旧時間

RSTP（間接リンク障害）の障害復旧時間の平均値、標準偏差が LA と RSTP（直接リンク障害）の値よりも大きい。その主な原因は ESW 間で行われる

Proposal/Agreement プロセスによるものであると考えられる。Fig. 12 に ESW#2 と ESW#3 間の Proposal/Agreement プロセスのシーケンス図を示す。ESW#2 でリンクダウンを判定してから経路切替が完了するまでに BPDU が 3 回交換されていることがわかる。つまり、間接リンク障害時は直接リンク障害で要した障害復旧時間に加えて、3 回の BPDU 交換の時間を要する。また、ESW#3 が送信する Proposal BPDU は定期送信される BPDU の送信タイミング（本試験では 1 秒おき）で送信されるため、ESW#2 からの BPDU (Topology Change) を ESW#3 が受信してから、ESW#3 が Proposal BPDU を送信されるまでの時間は最大 1 秒のバラツキがある。

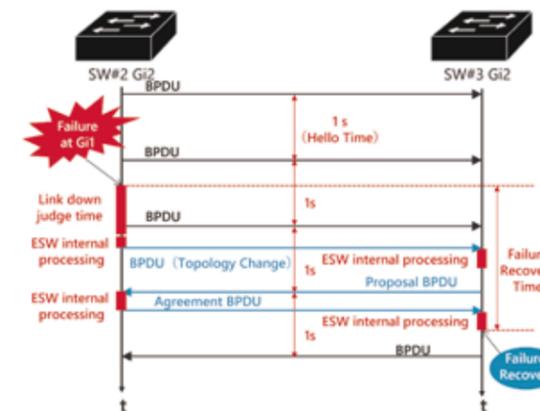


Fig. 12 Sequence of Proposal/Agreement Process between ESW#2 and ESW#3

### 5.3 障害復旧時間の改善

フェールセーフの観点から障害復旧時間はより短い方が好ましい。そこで本節では 5.1 と 5.2 節の考察を元に障害復旧時間の改善を検討する。

障害復旧時間の改善方法として次の二つが考えられる。一つ目は、リンクダウン判定時間に Open Alliance の規格<sup>6)</sup>で規定される値を採用する方法である。Open Alliance TC1 はリンクダウン判定時間を 2 ミリ秒以内と規定しており、1000BASE-T で規定される 350 / 750 ミリ秒 (Master/Slave) に要していた時間をほぼ削減できる。本手法を用いることで、LA と RSTP の障害復旧時間を約 350 ミリ秒もしくは約 750 ミリ秒改善できる。

二つ目は、RSTP の BPDU の送信間隔である Hello

Time を短くすることで、Proposal/Agreement プロセスに要する時間を短縮し、障害復旧時間を短縮する方法である。本試験では、DUT で設定可能な最小の送信間隔である 1 秒を設定しているため、これ以上に改善するためには、1 秒未満の Hello Time の設定をサポートする ESW の採用、またはソフトウェアの実装が必要となる。しかし、Hello Time を短くすると、BPDU がより短い間隔で生成されるため、ESW が多数の BPDU を処理する必要が生じ、CPU 負荷が過剰になる可能性がある。つまり、間接リンク障害の障害復旧時間と CPU 負荷はトレードオフの関係であるため注意が必要である。本手法を用いることで、間接リンク障害発生時の RSTP の障害復旧時間を試験結果から最大約 1 秒改善できる。

適用する規格や冗長化プロトコルの設定値を変更することで、LA と RSTP の障害復旧を改善できる可能性を示した。しかし、上記の改善を実施したとしても、数百ミリ秒から 1 秒の復旧時間を要する。

### 5.4 LA と RSTP の車載適用

LA と RSTP は 5.3 の改善を行ったとしても復旧時間に数百ミリ秒から 1 秒の時間を要する。インフォテインメントシステムのような情報系通信の場合は、数百ミリ秒から 1 秒の通信途絶が発生したとしても、車両及びシステムの動作に大きな影響を及ぼさないと考えられる。しかし、車両の運動制御に関わる制御系通信の場合、数ミリ秒間隔の定期通信であるため、数百ミリ秒から 1 秒の通信途絶は致命的な問題になる可能性がある。車載イーサネットは、制御系通信と情報系通信のトラフィックが混在するゾーンアーキのバックボーンネットワークで使用される。つまり、車載イーサネットの冗長化プロトコルは、制御系通信の厳しい要求を満たす必要がある。そのため、LA と RSTP を車載イーサネットへ適用する場合は、高性能マイコンやハードウェア処理による高速化が必要と考える。

## 6. むすび

ゾーンアーキにおける車載イーサネットの耐障害性を向上させるために、冗長化プロトコルである LA と

RSTPの車載適用を検討した。フェールセーフの観点から、通信経路に障害が発生してから冗長経路へ切り替えられるまでの時間（障害復旧時間）は重要な検討事項であるため、本稿ではCisco Systems製のESWを用いてLAとRSTPの障害復旧時間を計測した。結果、LAの復旧時間の平均は628.150ミリ秒、RSTPの直接リンク障害における復旧時間の平均は641.923ミリ秒、間接リンク障害における復旧時間の平均は1801.527ミリ秒となった。考察では、PHYのリンクダウン判定時間やRSTPのProposal/Agreementプロセスを改善することで、障害復旧時間を数百ミリ秒から1秒にまで短縮できる可能性を示した。しかし、車両の運動制御を行う制御系通信において、数百ミリ秒から1秒の通信途絶は致命的な問題になる可能性があるため、LAとRSTPの車載適用は障害復旧時間高速化の課題がある。

## 参考文献

- 1) H. M. Kadry, A. Gupta, J. M. Lawlis and M. Volpone: Electrical Architecture and In-Vehicle Networking: Challenges and Future Trends, IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1009-1013 (2022), doi: 10.1109/ISCAS48785.2022.9937481
- 2) Matheus, K., & Königseder, T. : Automotive Ethernet, Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- 3) IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks---Virtual Bridged Local Area Networks---Amendment 4: Provider Bridges, in IEEE Std 802.1ad-2005 (Amendment to IEEE Std 802.1Q-2005), pp.1-74, 26 May 2006, doi: 10.1109/IEEESTD.2006.6044678.
- 4) IEEE Standard for Information Technology -Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Common Specifications - Part 3 : Media Access Control (MAC) Bridges: Amendment 2 - Rapid Reconfiguration, in IEEE Std 802.1w-2001, pp.1-116, 10 July 2001, doi: 10.1109/IEEESTD.2001.93287.
- 5) IEEE Standard for Ethernet, in IEEE Std 802.3-2018 (Revision of IEEE Std 802.3-2015), pp.1-5600, 31 Aug. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8457469.
- 6) Open Alliance : Advanced diagnostic features for 100BASE-T1 automotive Ethernet PHYs, 2017, pp.1-19

## 著者



吉田 拓人

よしだ たくと

半導体基盤技術開発部  
車載ネットワーク関連の要素技術開発に従事



小谷 安弘

こたに やすひろ

半導体基盤技術開発部  
車載ネットワーク関連の要素技術開発に従事



加来 芳史

かく よしふみ

半導体基盤技術開発部  
車載ネットワーク関連の要素技術開発に従事