

〈一般研究課題〉 車載イーサネット通信系の伝搬特性を考慮した  
通信品質シミュレータの開発

助成研究者 名古屋工業大学 矢野 佑典



## 車載イーサネット通信品質シミュレータ開発のための 通信系の伝搬特性の測定

矢野 佑典  
(名古屋工業大学)

### Experimental Investigation of Propagation Characteristics of Automotive Ethernet System for Communication Quality Simulation

Yusuke Yano  
(Nagoya Institute of Technology)

#### Abstract :

This study aims to develop a simulator for communication quality degradation to clarify the characteristics of disturbances that causes communication errors in automotive Ethernet of 100BASE-T1. An evaluation system for a communication system simulating ISO 11452-4 and OPEN Alliance test was constructed, and the propagation characteristics of signal and disturbances in a communication system were measured and implemented into the simulator. As a result, for the signal propagation characteristics for short cables, it was found that the attenuation of differential mode was small and had a slight effect on the signal waveform. For mode conversion, it was also found that the mode conversion changed differently in the low- and high-frequency bands depending on the communication cable length. Furthermore, signal and disturbance propagation was simulated based on these measurements, and it was confirmed that reasonable results can be obtained.

#### 1. はじめに

自動運転やコネクティッドカーの実現には、高速・大容量な次世代車載通信が不可欠である。車載通信には高い安全性・信頼性が要求されるため高いEMC(Electromagnetic compatibility)性能の確保が課題である。本研究ではより技術課題の多いイミュニティを扱う。これは、近年5Gの普及やEV・HVモータや電力変換回路の高速動作化により車載環境で生じる妨害波が異なっており、

車載イーサネットも高速動作するため、この変化に沿ったイミュニティ評価・設計の見直しが必要と考えられるためである。車載イーサネットのイミュニティ評価・設計法の確立のためには、通信エラーを発生させる妨害波の特徴を捉え、それに基づき評価・設計を行うことが重要であると考えられるが、この点は現行のISO 11452-4[1]等のイミュニティ評価の国際標準規格やOPEN Alliance規格[2]等の業界団体が要求値を定めたものでも触れられていない。

筆者らのこれまでの研究[3-10]では車載イーサネットに対し妨害波を注入するための研究を行っており、特に文献[7-10]では車載イーサネットがパルス性妨害波のパルス幅に依存してエラーが増加する傾向が見られた。しかしながら、そのエラー増加のメカニズムの解明には至っていない。他にはいくつかの報告[11-12]がされているが”どんな妨害波が通信エラーを引き起こすか”を明らかにした報告はされていない。

本研究の目的は、車載イーサネットの通信エラーを発生させる妨害波の特徴を明らかにすることである。そのために、妨害波が印加された際の通信品質劣化を解析可能なシミュレータの開発を行う。シミュレータ上での信号の伝搬や妨害波の信号との重畳を精度よく模擬するためには、実際のイミュニティ評価環境での信号や妨害波の伝搬に関わる電気特性を組み込む必要がある。そこで本研究では、図1の赤破線で囲んだ部分を対象に車載イーサネット(100BASE-T1)の通信系の評価環境を構築し、その高周波特性を測定した。

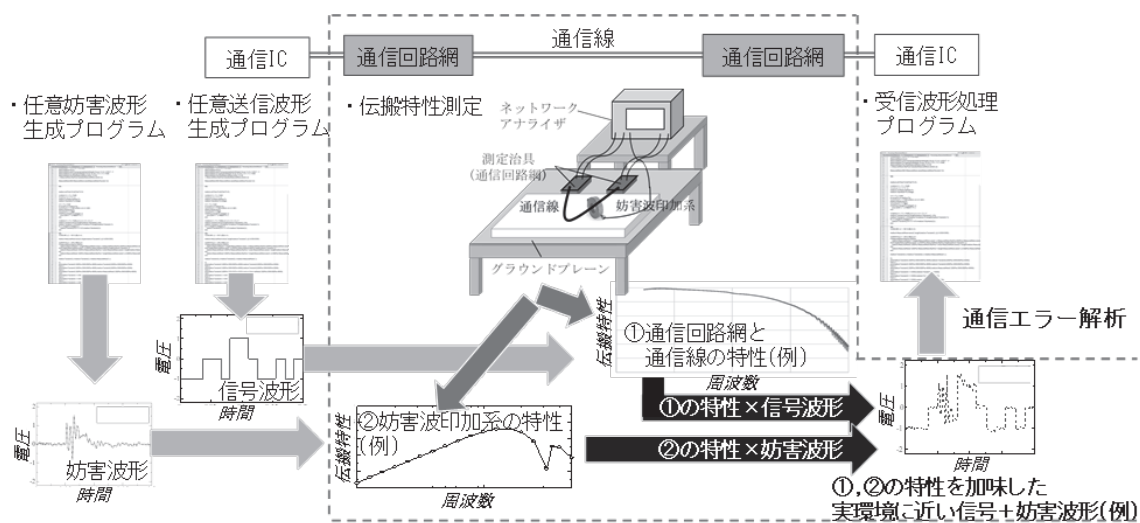


図1. 通信品質シミュレータの概略図

## 2. 実験方法

ハーネスに妨害波が照射された場合を考えると、通信ハーネスとシステムグラウンド間の電磁界によりコモンモード電圧・電流が励振される。コモンモード電圧・電流はハーネスを伝搬し、コネクタや通信基板部でのモード変換によりディファレンシャルモードに変換され、通信に悪影響を与える。

信号や妨害波の伝搬・モード変換特性はハーネス長により変化することが考えられるため、これをシミュレータに組込むためにハーネス長を変化させて通信系の電気特性を測定した。図2と図3に構築した評価系の概略図と評価環境を示す。この評価系はOPEN Alliance規格[13]を参考に構築した。この系は、高周波特性測定のためのVNA(Vector network analyzer、Agilent Technologies 社

E5071B)、特性抽出のための治具であるFixture 基板、車載イーサネット(100BASE-T1)の通信用ハーネスであるUTP(unshielded twisted pair)ケーブルで構成されている。

Fixture基板は通信系の電気特性を測定するための治具であり、特性インピーダンスが50 Ωのマイクロストリップ線路と、VNAと接続するためのSMA(Sub Miniature type A)コネクタ、UTPケーブルと接続するためのT1コネクタを実装した。

VNAとFixture基板とは、SMAコネクタを介して同軸ケーブルで接続した。

EMC評価系を参考にし、UTPケーブルは発泡スチロールを用いてシステムグラウンドから50 mmの高さに敷設した。また、OPEN

Allianceの通信系の特性測定系を参考にし、基板のグラウンドは銅ブロックと銅箔テープを用いてシステムグラウンドと接続した。

車載イーサネット通信系の特性は、VNAを用いたミックスドモードSパラメータ測定により評価した。ミックスドモードSパラメータには、通信信号の伝搬・反射特性を表すディファレンシャルモード特性 $|S_{dd21}|$ 、妨害波の伝搬・反射特性を表すコモンモード特性 $|S_{cc21}|$ 、妨害波の通信信号への干渉に関連するモード変換特性 $|S_{dc21}|$ が含まれるためである。

### 3. 実験結果

#### 3.1 ミックスドモードSパラメータ測定結果

通信系の各特性測定時に、信号や妨害波の伝搬・モード変換特性のハーネス長による変化を確認するために1 mと2mのUTPケーブルを用いた。ミックスドモードSパラメータの測定結果の一例として、信号の伝搬に関連するディファレンシャルモードの伝搬特性 $|S_{dd21}|$ 、妨害波の伝搬に関連するコモンモードの伝搬特性 $|S_{cc21}|$ 、妨害波が信号に重畳する際に関連するコモンモードからディファレンシャルへのモード変換特性 $|S_{dc21}|$ の測定結果を図4に示す。図4(a)の $|S_{dd21}|$ においては、100BASE-T1の通信周波数帯域である33.3 MHzより高い周波数帯まで減衰量が-1 dB以下であり、減衰が小さいことが確認された。また、ハーネス長を長くすることで損失が増加し、伝搬量が低下することが確認された。図4(b)の $|S_{cc21}|$ においては、ハーネス長に依存した共振が見られるものの、全体としてコモンモード伝搬量が大きい、つまり妨害波の伝搬量も大きいことが確認された。また、ハーネス長による伝搬量の差はほぼないことが分かった。これは、コモンモードの電磁波がケーブルとシステムグラウンド間の損失が非常に小さい部分(発泡スチロール≒空気)を伝搬することに起因すると考えられる。他に、ケーブル長を1 mから2 mに長くすることで30 MHz以降の周波数帯において共振周波数が低下していることが確認された。図4(c)の $|S_{dc21}|$ では、ケーブル長を長

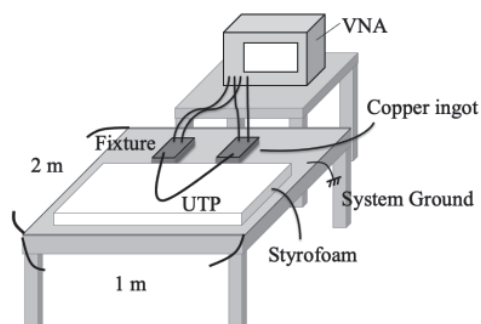


図2. 信号および妨害波の伝搬特性評価のための評価系の概略図

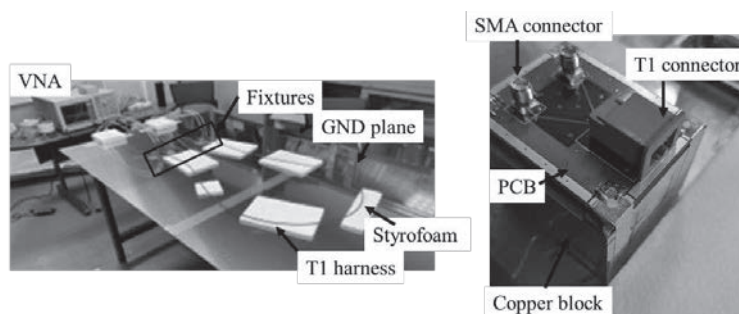


図3. 評価系、左：系全体、右：Fixture基板

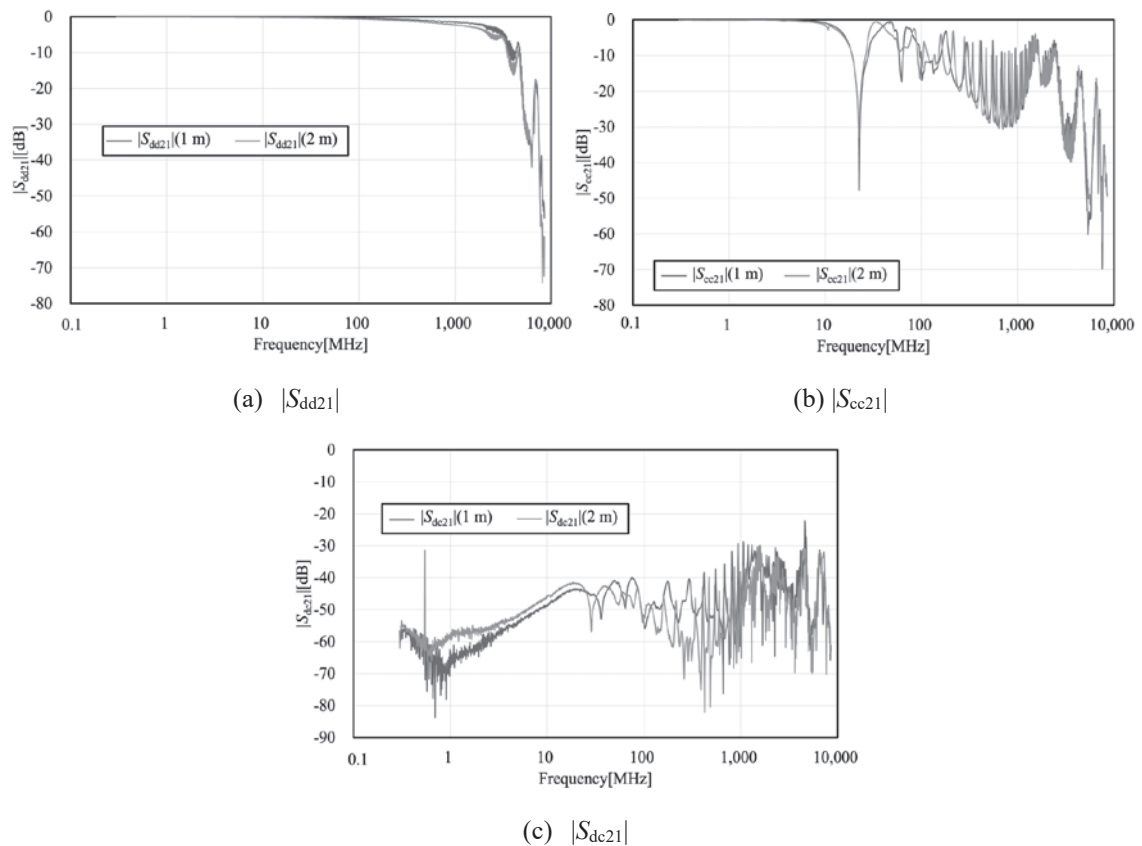


図4. ミックスドモードSパラメータの測定結果

くすることで50 MHzを超える周波数帯においてモード変換量が減少する傾向が見られた。これは、ケーブル長を長くすることで50 MHz以降での損失、つまりコモンモードの伝搬量 $|S_{cc21}|$ とディファレンシャルモードの伝搬特性 $|S_{dd21}|$ がそれぞれ減衰する影響を受けたものと考えられる。一方で、50 MHzより小さい周波数帯ではケーブル長が長いほうがモード変換量が大きい傾向が見られた。これは $|S_{cc21}|$ 、 $|S_{dd21}|$ の減衰がそれぞれ小さい一方で、ケーブルが長い分モード変換箇所が多く存在するためだと考えられる。

以上の考察を踏まえると、構築した評価系における各伝搬特性として妥当なミックスドモードSパラメータ測定ができていると考えられる。

### 3.2 モード変換特性を用いた妨害波伝達量シミュレーション

妨害波による通信品質劣化を考える上で、ディファレンシャルモード信号に重畳する妨害波の時間波形を観測することは特に重要である。そこで、前節の検討で得た結果のうちモード変換特性 $|S_{dc21}|$ を用いて、コモンモード励振された妨害波のディファレンシャルモードへの伝搬をシミュレーションした。通信線上にコモンモード励振される妨害波の種類は多岐にわたり、文献[1]の正弦波やAM/PM変調、ISO 7637-3[14]のパルス性の過渡妨害波、ISO 10605[15]の静電気放電等が存在するが、ここではこれまでの研究[7-10]で検討してきたコモンモード妨害波と共通のパルス性矩形波を用いた。図5に、コモンモードに入力したパルス波の電圧 $V_{in}$ とディファレンシャルモードに出力される電圧 $V_{out}$ を示す。図より、図4(c)の測定した特性に従ってパルスが減衰し伝搬していることが確認された。信号の伝搬に関しては、図4(a)に示す通り通信線を伝搬する信号はほとんど

減衰しないため、ここでは波形を省略している。この検討により、本測定に基づき得たミックスモードSパラメータを用いて、妥当な伝搬する信号・妨害波の波形が得られることを確認できた。

今後の課題は、評価モジュールに対して妨害波印加を行った結果と、本シミュレータを用いた通信品質劣化シミュレーション結果を比較・検討し、車載イーサネットの通信エラーを発生させる妨害波の特徴を明らかにすることである。

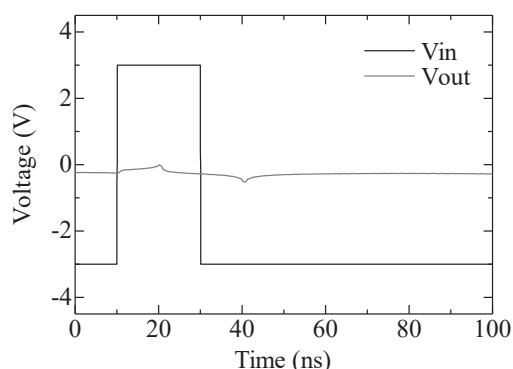


図5. 測定した $|S_{21}|$ に基づく妨害波伝搬シミュレーション

#### 4. まとめ

本研究では、車載イーサネットの通信エラーを発生させる妨害波の特徴を明らかにするための通信品質劣化シミュレータを開発することを目的として、通信系の電気特性を測定し、妨害波および信号の伝搬特性をシミュレータに組込むことを検討した。ISO 11452-4やOPEN Allianceの試験系を模擬して通信の評価系を構築し測定した結果、信号の伝搬特性に関しては減衰が小さく通信波形に対する影響はほとんど生じないことや、長さの異なる通信ケーブルでのモード変換量の大小関係がディファレンシャルモード・コモンモードの減衰量と関連して変化することなど、新たな知見が得られた。さらにこれらの測定結果に基づき、妨害波の伝搬をシミュレーションした結果、伝搬する信号・妨害波に関して妥当な結果が得られることを確認した。

#### 参考文献

- [1] ISO 11452-4, “Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods,” Apr. 2020.
- [2] OPEN Alliance, “IEEE 100BASE-T1 EMC Test Specification for Transceivers,” Ver.1.0, Oct. 2017.
- [3] 吉田征弘, 矢野佑典, 王建青, 石田武志, “100BASE-T1ケーブルへのESD試験の間接放電で生ずる妨害波の測定及び通信障害へのシミュレーション評価,” 電子情報通信学会技術研究報告書, vol. 121, no. 288, EMCJ2021-57, pp. 16-21, (オンライン開催), Dec. 2021.
- [4] 吉田征弘, 矢野佑典, 王建青, “車載EthernetケーブルへのESD間接放電試験で生ずる妨害波の特性,” 2021年電子情報通信学会ソサエティ大会, 講演論文集, (オンライン開催), Sep. 2021.
- [5] 矢野佑典, 遠藤光太, 和田修己, “較正系と試験系の違いによるTWCの妨害波注入特性の変化,” 電子情報通信学会技術研究報告書, vol. 121, no. 19, EMCJ2021-8, pp. 7-11, (オンライン開催), May 2021.
- [6] Kota Endo, Yusuke Yano and Osami Wada, “Dimension Dependence of Transfer Characteristics of Tubular Wave Coupler and Improvement of Directivity,” EMC EUROPE 2020, TS10-3, (Online), Sep. 2020. (査読あり)
- [7] Yusuke Yano, Tohlu Matsushima and Osami Wada, “Experimental investigation of



- communication quality degradation of 1000BASE-T 1 by pulse disturbance,” IEICE Communication Express (ComEX), Vol. 9, Issue 12, pp. 593–598, Dec. 2020. DOI: 10.1587/comex.2020COL0019
- [8] Yusuke Yano, Takashi Hisakado and Wada Osami, “Investigation of Communication Quality Degradation of 1000BASE-T 1 by Pulse Disturbance,” EMC EUROPE 2020, OD 08- 4, (Online), Sep. 2020.
- [9] リミンソン, 矢野佑典, 和田修己, “パルス性妨害波によるEthernet通信品質劣化の調査(1)～100BASE-TX and 1000BASE-T～,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 20, EMCJ2020-9, pp. 27-32, (オンライン開催), May 2020.
- [10] 矢野佑典, 木戸勇志, 久門尚史, 和田修己, “パルス性妨害波による車載Ethernetの通信品質劣化に関する調査,” 2019年電子情報通信学会ソサエティ大会, 講演論文集, B-4-55, p. 252, 豊中市, Sep. 2019.
- [11] S. Jeschke et al., "Susceptibility of 100Base-T 1 Communication Lines to Coupled Fast Switching High-Voltage Pulses," 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, pp. 1-5, 2020.
- [12] E. Panholzer, M. Aidam and S. Lindenmeier, "Optimization approach to reduce the emission signal to the vehicle antenna of an 100BASE-T1 ECU," 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, Mar 2021.
- [13] OPEN Alliance, ” Channel and Components Requirements for 1000BASE-T1 Link Segment Type A (UTP), ” Jan. 2021.
- [14] ISO 7637-3, “Road vehicles — Electrical disturbances from conduction and coupling — Part 3: Electrical transient transmission by capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines, ed.2, 2007.
- [15] ISO 10605, “Road vehicles - Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge, clause 8 "Component immunity test method (powered-up test)," Jul. 2008.