

コネクタの緩みによるその高周波等価回路の変化

Effect of loose contact on its high-frequency equivalent circuit

○松田和樹, 林優一, 水木敬明, 曾根秀昭

○Matsuda KAZUKI, Yu-ichi HAYASHI, Takaaki MIZUKI, Hideaki SONE

東北大学 (Tohoku University)

キーワード: 電磁両立性 (Electromagnetic Compatibility), 接触不良 (Contact Failure)

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6 番 3 号 東北大学サイバーサイエンスセンター・本館・曾根・水木研究室

松田和樹, Tel: (022)795-6094, Fax: (022)795-6096, E-mail: b0im4025@s.tohoku.ac.jp

1.はじめに

電子機器が動作する際に生じる放射電磁波によって、他の電子機器が電磁的干渉により影響を受けることが問題となっている。これらの問題に対しては、製品に対し規格を設け試験を行うことで対策が行われている。また、近年の電子機器の動作速度の高速化に伴い、高周波領域における放射電磁波の規制も求められている。規格試験は、機器が使用される環境を模擬するため複数の機器を相互接続させた状態で行うものや、機器を単一で動作させ試験を行うものなど、規格により様々な環境で試験が行われる。規格試験の際の環境と、実際に機器が使用される環境を比較すると、相互接続部での差異が考えられる。規格試験時には、機器同士の接続部分においてトルクレンチ等を用いて規定のトルクで管理することが可能となる。しかし、実際に機器が使用される際には、機器の利用者が接

続部を手締めすることが多く、接続部が規定トルクで管理されていない恐れがある。このように相互接続部分のトルク管理が不十分な場合、トルク管理された接続部に比べ機器から生じる放射電磁波が増大することが報告されている¹⁾。こうした報告は、規格試験に合格した電子機器であっても、実際に利用される際には規制を満たしていない可能性があることを示している。この問題に対しては、接続部のコネクタに求められる接触要件の提案や利用者への注意喚起等の観点から、接続部におけるコネクタのトルク管理が不十分な場合の放射電磁波の増大に関する定量的な評価が重要である。例えば、シミュレーション等によりトルク管理が不十分なコネクタからの放射電磁波の増大を予測することが出来れば、機器利用時に相互接続部の接触性能が劣化し放射電磁波が増大した場

合を事前に想定して機器を設計することが可能となる。こうした予測を行うためには、相互接続部のコネクタの等価回路を与えることが効果的であると考えられる。

そこで、本報告では、トルク管理が不十分なコネクタからの放射電磁波の増大に関する定量的評価を行うため、手締めを行った際の相互接続部のコネクタの等価回路を明らかにする。

なお、本報告では、相互接続部における接触面の定量的評価を行う基礎的検討として、高周波信号の伝送に頻繁に使用される SMA コネクタを測定対象とし測定を行う。

2.測定

相互接続部におけるコネクタの高周波素子を明らかにするために Common-Mode⁴⁾電流(以下 CM 電流)の測定と Time Domain Reflectometry²⁾(以下 TDR)の測定の二種類の測定を行う。前者の測定では、コネクタの緩みにより発生する放射電磁波を観察するための測定として、放射電磁波の主要因の一つとなる CM 電流の測定を行う。後者の測定では、コネクタの緩みにより生じる高周波素子の推測を行うための測定を行う。

また、接触部での高周波素子と接触部分を原因として発生する CM 電流の対応を観察するため、二つの実験を並行して行った。

2.1 CM 電流測定

図 1 にコネクタの緩みが放射電磁波に与える影響を測定するための測定環境を示す。測定環境は、測定対象と計測機器を電氣的に分離するための 2 枚の銅板、CM 電流を測定する電流プローブ及び TG 付きスペクトラムアナライザ(ADVANTEST R3131A)により構成される。2 枚の銅板にコネクタ付きセ

ミリジットケーブルを接続し、図 1 中の左端コネクタは規定トルクである $0.65\text{N}\cdot\text{m}$ のトルクで締め付けた。同図の右端のコネクタでは手締めを模擬するためにコネクタを 120° 回転させ緩みを生じさせた。図 2 にその様子を示す。本稿では、規定トルクで締め付けられた位置からコネクタを 120° 回転させた位置を手締めによって接続された状態とする。コネクタを手締めによって接続させた状態において、左端から $107\text{dB}\mu\text{V}$ の信号を励振させ、電流プローブを用いて CM 電流を観測した。また、CM 電流測定と後述の TDR 測定の対応関係を観察するため、二つの測定を並行して行った。測定は 10 回行い、測定毎にコネクタの接触状態を同様に保ち、図 1 と図 4 (後述) の測定系の測定機器の交替を施し測定を行った。

図 3 に CM 電流の測定結果を示す。10 回の測定に対応するいずれの波形も同様の概形を示しているが、最大 10dB 程度のレベル差があることが確認出来る。

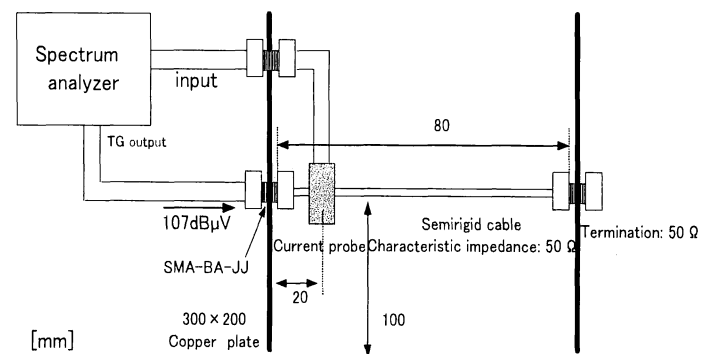


図 1. CM電流測定環境

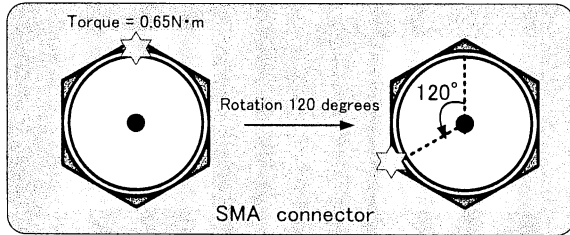


図2 手締めを模擬したコネクタの緩み

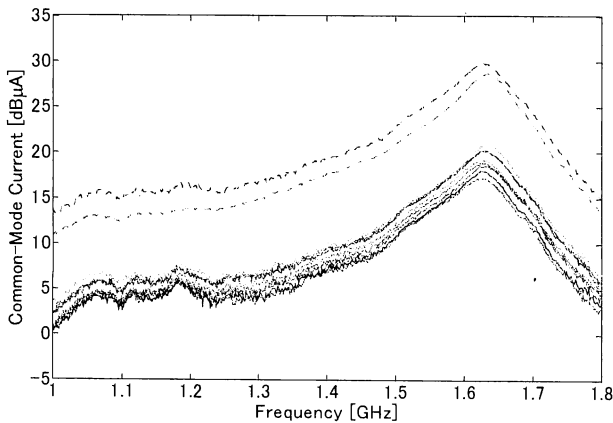


図3 CM電流の測定結果

2.2. TDR 測定

TDR 測定では、被測定物に対してステップ波を入力し、被測定物からの反射波を観測することで相互接続部での高周波素子の推定を行う。図4にTDR測定の測定環境を示す。CM電流測定と同様の被測定系に加え、入射波を生成するためのパルスジェネレータ (PG)、反射波を分離させるための方向性結合器 (Mini-Circuits, ZFDC-20-5-S) と 35 dB 増幅させるためのアンプ (COSMOWAVE, LNA270WS)、反射波形を測定するオシロスコープ (Agilent MSO6104A) により構成される。測定を行う際には、CM電流測定と同様に手締めを模擬するためコネクタを 120 度緩めた状態で、PG より電圧 1.5V、立ち上がり時間 1.0ns のステップ波を入力し反射波を測定した。本測定では、誘電体としてテフロンを使用した同軸線路を用いているため、空

間分解能は 10 cm である。被測定系がセミリジッドケーブルとコネクタからなる比較的単純な構成でありセミリジッドケーブルのインピーダンスは既知であることから、上述の空間分解能でも十分な効果が挙げられると考えられる。また、入射波と反射波を分離するため、方向性結合器と被測定系の間に 1 m の同軸線路を設けた。2.1 節で既述した通り、測定は 10 回行い CM 測定と並行して行った。

図5にTDR測定結果を示す。波形の立ち上がり付近が緩んだコネクタの位置に該当する。全ての波形でコネクタの位置においてピークが存在することを確認できる。また、図5の実線、破線で示された各結果は図3の結果と対応している。

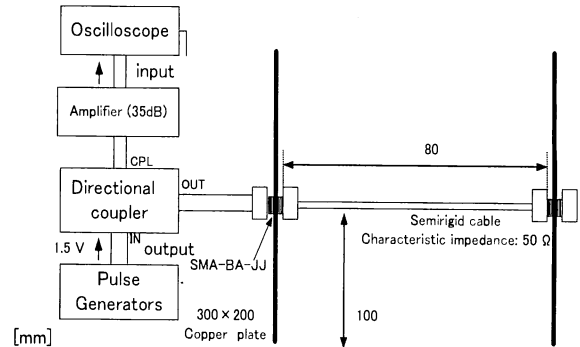


図4 TDR 測定環境

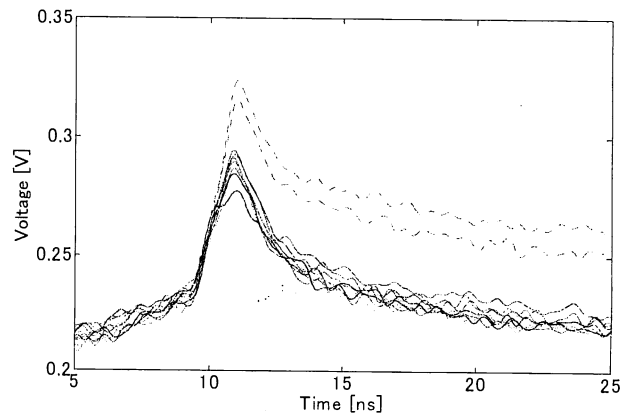


図5 TDR 測定結果

3. 考察

3.1. 接触面の等価回路

回路を構成する基本要素である抵抗 R 、インダクタ L 、コンデンサ C に対し TDR 測定を行った際の反射波の応答を図 6 に示す^{2),3)}。図 5 の実線で示される波形は、立ち上がり立ち下りを持ちピークの前後でほぼ等しい電位となっており、図 6 (b)と同様の応答を示している。このことより被測定部を等価回路を用いて表現した場合、その等価回路にインダクタンス L が存在すると考えられる。また、同図の破線で示される波形は、図 6 (a)と同図(b)の双方の特徴を表しており、実線同様にピークを持ち、ピークの前後の電位が異なっている。このことは、インダクタンス L と抵抗 R の直列成分が存在することを示しており、被測定部を等価回路で表した場合、その等価回路にインダクタンス L と抵抗 R の直列成分が存在すると考えられる。

ここで同軸ケーブルと手締めを行ったコネクタ部分を等価回路を用いて表現することを考える。図 7 (a)に示すように、同軸ケーブル部分はラダー回路で示すことができ、同図の四角で囲まれた部分がコネクタの接触面となる。接触面においてインダクタンス L と抵抗 R の直列成分が観測されたことから、コネクタの接触面は図 7 (b)で示すことが出来ると考えられる。また、接触状態により抵抗 R の値が変化し、図 5 の実線と破線で示される応答の変化が起きたと考えられる。

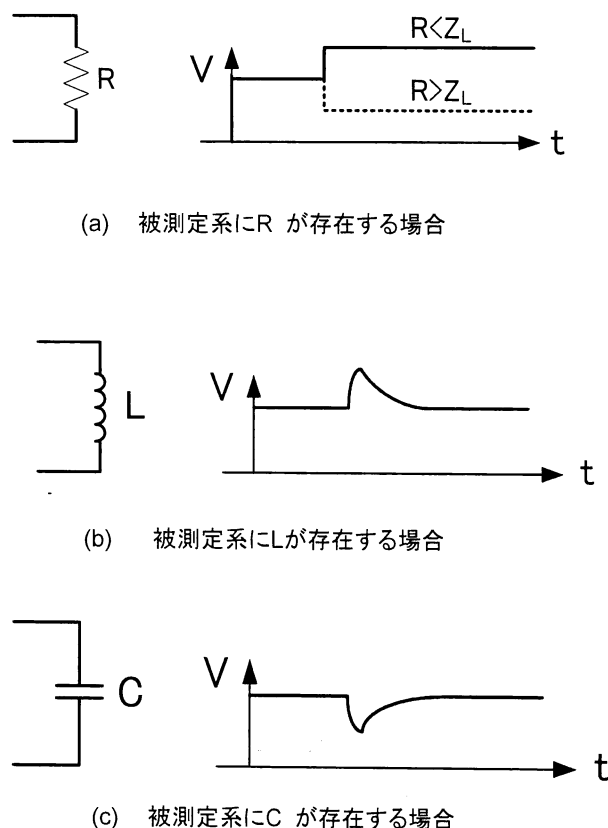
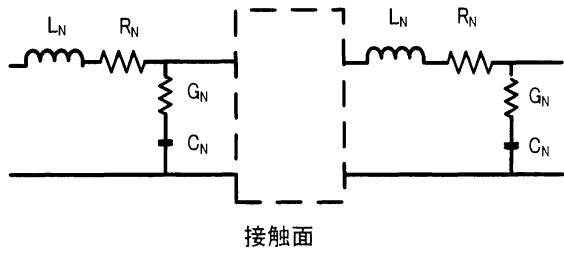
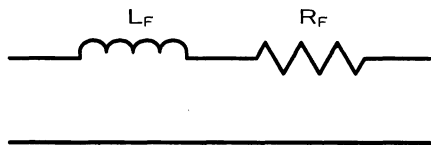


図6 反射波形の概要

図 7 の回路図が示す物理的意味について考察を行う。手締めを行うことにより接続部では、接触している面同士において接触面の偏りや接触抵抗が生じると考えられる。図 8 (a)に示すような接触面の偏りが生じた場合、外側導体を流れる電流は、接触面において図 8 (b)に示すようなインダクタンス L の要因となる半ループの電流経路を形成する。この半ループにより等価回路には、インダクタンス L が含まれると考えられる。また、接触面の接触状態により接触抵抗が異なり、接触抵抗が大きい場合には、図 7 (b)に示すように等価回路に抵抗 R が含まれると考えられる。

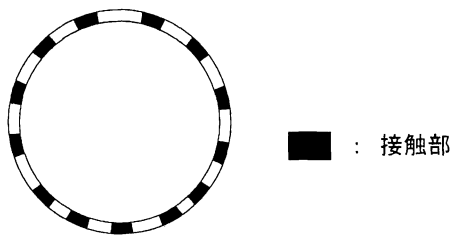


(a) コネクタ周辺の等価回路表現

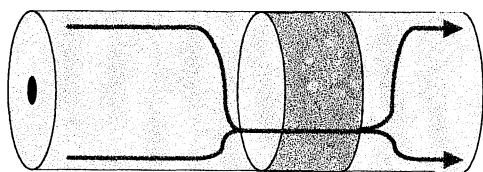


(b) コネクタ接触面の等価回路表現

図7 接触面の等価回路表現



(a) 接触面の断面図



(b) 接触面での電流路

図8 接触面での高周波素子

3.2. CM 電流のレベル差

図3のCM電流測定結果と図5のTDR測定結果を比較すると、各図の破線で示された波形だけが実線で示された他の波形とは異なる

応答を示していることがわかる。TDR測定結果を考慮すると、実線と破線では抵抗Rの存在に差異が見られる。抵抗Rにより接触面でのインピーダンスが増大することで接触面でのインピーダンスミスマッチが増大し、CM電流が増大したものと考えられる。

4. まとめ

本報告では、電子機器の相互接続部での利用者の手締めによる放射電磁波の増大を予測し、電磁両立性を保った製品の効率的な製造のために設計段階でシミュレーションを行うことを想定し、シミュレーションに用いるための等価回路を与えることに取り組んだ。その結果として、手締めされたトルク管理がなされていないコネクタの相互接続部を等価回路で表現した場合、図7に示すような等価回路で表現出来ることを明らかにした。本報告の応用例として、等価回路を用いて相互接続部における接触面でのインピーダンス不整合を計算することにより、利用者が手締めを行った際の放射電磁波の増大を予測することが可能となると考えられる。

5. 参考文献

- [1] 林優一, 水木敬明, 曾根秀昭, "コネクタの緩みが放射電磁波に与える影響に関する基礎的検討," 電子情報通信学会, 2010 ソサイエティ大会, CS-6-3, 2010.
- [2] Hewlett Packard, "Time Domain Reflectometry," Application Note 1304-2, 1998
- [3] Richard E. Matick, "Transmission Lines For Digital And Communication Networks," IEEE Press, 1995, pp.158-173
- [4] C. R. Paul and D. R. Bush, "Radiated emissions from common-mode currents," in Proc. 1987 IEEE Int. Symp. Electromag. Compat., Atlanta, GA, Sept. 1987, IEEE Electromag. Compat. Soc., pp 197-203