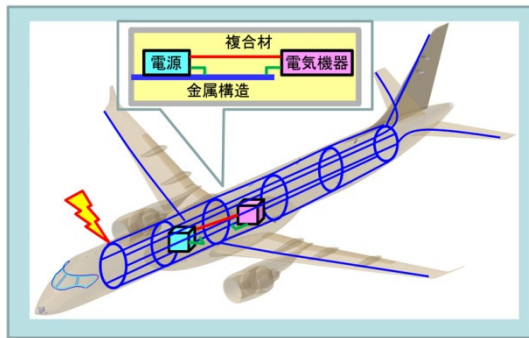


# 複合材構造体の電流流入による電源への影響を防止する グランドラインの解析評価技術の開発

Development of Analytical Design Techniques for Ground Lines  
to Prevent Effects of Inflow of Current into Composite Structures on Power Sources



青井 辰史\*<sup>1</sup>  
Tatsufumi Aoi

宮原 弘臣\*<sup>1</sup>  
Hiroomi Miyahara

池田 顕夫\*<sup>2</sup>  
Akio Ikeda

清水 九史\*<sup>2</sup>  
Hisashi Shimizu

山脇 一生\*<sup>2</sup>  
Kazuki Yamawaki

万戸 雄輝\*<sup>3</sup>  
Yuki Mando

近年開発が進む、電気抵抗率が金属に比べて高い炭素繊維強化プラスチック(以下、複合材)が多用される製品では、雷などの外乱による電磁影響(電流流入、電気機器間のグランドラインを介した干渉)を低減するためにグランドラインの設計が必要となっている。そのため、三菱重工業株式会社は、複合材構造体内のグランドラインの電磁影響を低減するための解析評価技術を構築した。対象周波数域を分けて、準静電磁界解析+回路解析(低周波域)と有限差分時間領域法に基づく電磁界解析(高周波域)の2方法を補完活用したグランドライン構造の解析評価技術を構築した。電流路確保、誘導磁場影響の対策評価、及びグランドラインを共有する電源間干渉影響の評価を行い、モックアップを用いた試験と解析により、解析評価技術の妥当性を確認した。

## 1. はじめに

電動化や搭載電子システムの高度化が進んでいる航空機等の移動体製品では、重量軽減のため、構造体の複合材化が進んでいるが、その高抵抗率(金属比3桁高)のため、電流帰路としてグランドラインを構造体に施工する必要がある。雷電流が電動化、また高度化される搭載電子システム機器の動作に影響しないよう、電磁気特性を評価するための解析技術が必要となっている。今回、市販電磁界解析ツールを活用したグランドライン構造の解析評価技術を開発した。モックアップを用いた模擬配線を用いて、電源系への電磁ノイズ影響と雷電流流入の影響評価について、解析評価手法を試験評価により検証した結果について報告する。

## 2. 要求事項及び課題(背景)

### (1) 電気システムに関する要求及び設計ツール化対象

航空機等の移動体製品には、その駆動や制御のためのシステムが搭載されており、CO<sub>2</sub> 排出削減などのトレンドを受けてその電動化が進展している。

搭載される電気機器システムには、①軽量化、②電源品質の維持確保、③雷電流の流入影響の電氣的対策や、④地絡電流の影響、⑤電磁干渉や外部電磁界影響対策(誘導雷を含む)などが必要である。本報では、このうち①、②及び③の要求に係る解析評価技術について検討を行った。

②電源品質の維持確保の関連規格は、航空機の場合、MIL-STD-704(航空機の電力特性の MIL 規格)が挙げられる。対象周波数域として、電気機器電源の動作周波数は DC(直流)~数百 Hz 程度であり、規格要求は DC 及び 10Hz~1MHz である。また、③雷電流や④地絡

\*1 総合研究所 電子・物理研究部 主席研究員

\*2 総合研究所 電子・物理研究部

\*3 総合研究所 電子・物理研究部 工博

電流の混入影響の関連規格は、MIL-STD-464(機器システムの電磁環境要求)及び MIL-STD-461(機器レベルの耐雷試験要求)がある。雷及び地絡電流の周波数成分を考慮すると、対象周波数域は数 Hz~1MHz 程度である。従って、対象とする全周波数域は DC~1MHz である。

さらに、①軽量化のために、移動体の電気システムはその電源ラインの電流帰路を共用して使用される場合がある。実際のシステム設計では、これらの要求に対応した検討が実施できることが必要である。

## (2) 課題

従来の金属構造体では、構造フレームとしてアルミ合金やチタン合金が主として用いられており、その抵抗率は小さいため(約  $3 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ )、その抵抗値やリアクタンスは通常  $1 \text{m}\Omega$  以下レベルと低く、電流が流れた際に発生する電圧降下が小さいため、金属構造を直接電流帰路として使用する事が多い。

一方、複合材構造体では、抵抗率は約  $1 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5} \Omega \text{m}$  と約 100~1000 倍大きく、電流が流れた際の電圧降下が大きいため、複合材構造を電流帰路として用いると電源間の干渉が大きく適用が難しいという問題がある。そのため、電流帰路として金属を基材としたグラウンドラインを構造体に施工する必要がある。

従って、複合材構造と金属グラウンドラインが混在する体系となり、大きく抵抗率が異なる複数の電流経路が存在し、電流経路を簡単に特定できない課題があるため、(1)雷など大電流の流入に対する電流路確保、及び電磁場影響の評価が必要であった。また、1つの共有グラウンドラインに複数の電源が接続され、ある電源の動作が他の電源に影響を与える課題があるため、(2)グラウンドラインを共有する電源間干渉影響を考慮した解析評価技術の構築が必要であった。

## 3. 解析モデル

### 3.1 解析手法

雷電流の周波数特性である数 Hz~1MHz の電流経路の評価、及び電気機器電源の動作周波数 DC~数百 Hz における干渉を同時に評価する必要があるが、一つの解析手法では精度良く実用的な計算時間で評価することは難しいため、準静電磁界解析と回路解析(低周波域)と有限差分時間領域法に基づく電磁界解析(高周波域)の2方法を補完活用することを検討した。周波数範囲として、(1)DC~100kHz までは低周波域の手法を、(2)100kHz~1MHz は高周波域の手法を適用した。

#### (1) 低周波解析(DC~100kHz)

準静電磁界解析(時間変化に対して変位電流が流れない状態で適用可能な電磁界解析手法)では、有限要素法、またはモーメント法により電磁界を解析する。得られた解析結果から、出力対象の部材の間の電気回路パラメータ(R:抵抗, L:インダクタンス, C:容量, G:コンダクタンス)をSパラメータとして出力し、回路解析で電流、電圧を計算する。解析ツールとして、市販ツールである Ansys Q3D Extractor を用いた。

#### (2) 高周波解析(100kHz~1MHz)

FDTD 法(Finite Difference Time Domain Method(有限差分時間領域法))で電磁界を解析する。電界、磁界の出力を用いた積分計算から直接対象部の電圧、電流を出力する。解析ツールとして、市販ツールである Ansys EMC Plus を用いた。

### 3.2 検証項目

2章で提示した課題に対して、(1)電流路確保及び電磁場影響に関して、複合材を含む構造に雷電流が流入した場合の構造を流れる電流分布を評価した。また、(2)グラウンドラインを共有する電源間干渉影響に関して、グラウンドラインを共有した2つの電源系を設定し、片側(加害側)の電

源に給電した場合に、もう片側(被害側)の電源端子部に生じる電圧、電流を評価した。

### 3.3 試験供試体と試験セットアップ

#### (1) 試験供試体

複合材、樹脂、及び金属要素から構成される試験供試体全体図を図1に示す。対象となる航空機や交通システムなどの移動体製品は10mオーダの構造であるが、試験供試体は、約10分の1スケールで作製した。周波数帯が最大1MHz(波長300m)であり、定在波の影響は実対象及び供試体共に無視でき、本寸法は特に問題ないと判断した。また、供試体内にグラウンドラインを共有した2つの電源ラインを設置した。供試体 A-A 断面図を図2に示す。供試体は六角形断面を有する立体構造で骨格を樹脂で構成し、底面はアルミパネルを取り付けた。表面側には複合材パネル単体を設置した場合と、耐雷対策を考慮して Cu メッシュを付与した複合材パネルを取り付けた場合を評価した。グラウンドラインを導体断面積 50mm<sup>2</sup> の金属導体ケーブルで構成し、パネル間を電氣的に接続した。

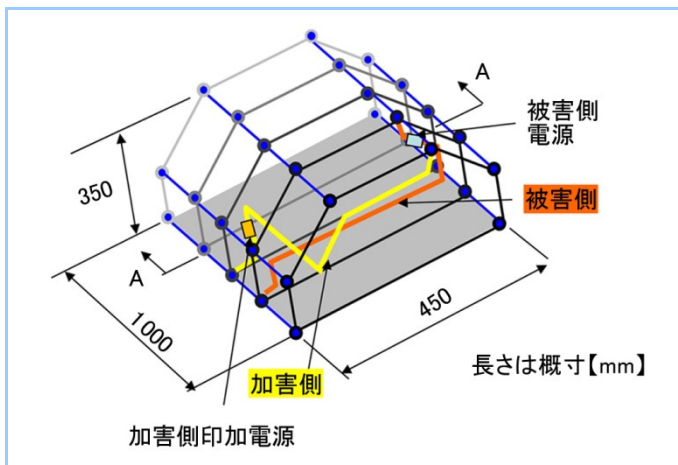


図1 試験供試体(全体)

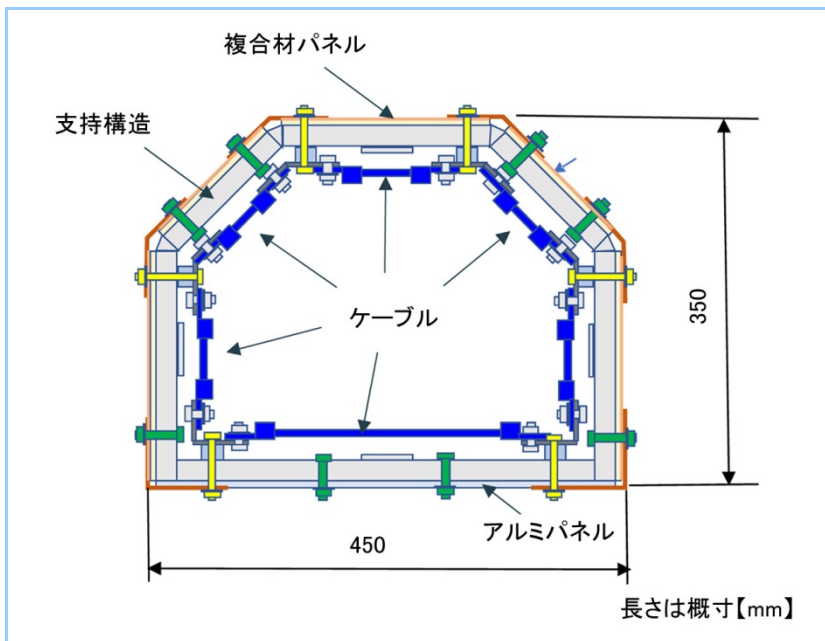


図2 試験供試体(A-A 断面)

#### (2) 試験セットアップ及び試験条件

電流印加の試験セットアップの構成イメージ及び試験状況を図3に示す。試験供試体に、電源から電流を印加して評価した。周波数特性の評価のために、単一周波数の電流(0.1Hz~最大1MHz)を印加した。また、雷電流波形に対する評価のために、航空機分野で用いられる試

験規格<sup>(1)</sup>に基づく模擬雷電流波形(Component A:1kAピーク)を印加し、過渡的な特性も評価した。設計適用性を考慮し、ケーブル種類(50mm<sup>2</sup>ケーブル, 15mm幅銅編組ケーブル), Cuメッシュ有無, 電流の引入れ/引抜き組合せ(1点/均等, 均等/均等)を変えた5ケースを試験した。試験に用いた印加波形例を図4に示す。

グラウンドラインを共有する電源間干渉影響の評価は、供試体内にグラウンドラインを共有した2つの電源ラインにおいて、片側(加害側)の電源に給電した場合に、もう片側(被害側)の電源端子部に生じる電圧, 電流を評価した(図1)。

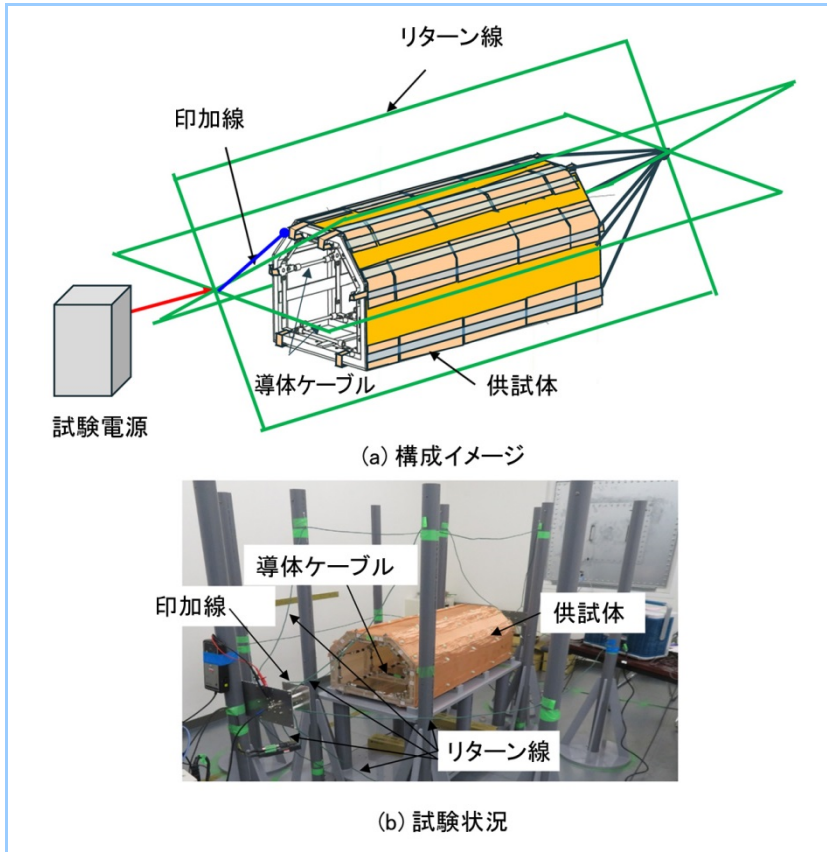


図3 試験セットアップ

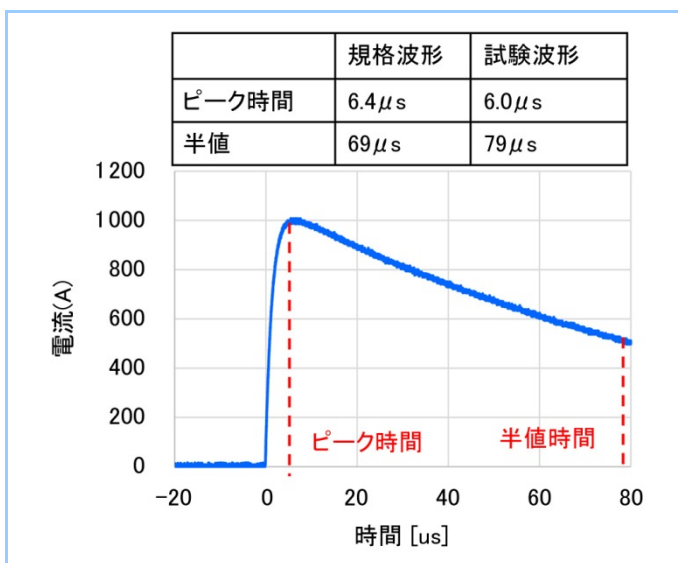


図4 模擬雷電流波形例

### 3.4 解析モデル

#### (1) Ansys Q3D Extractor モデル

モデルを図5に示す。ケーブル径や接続金具などは試験供試体の寸法に合わせてモデル

化し、部材や接触抵抗部の抵抗値は、直流での測定値を用い、該当部分のモデル要素の導電率に反映した。2点間のインピーダンスの周波数特性を解析にて評価し、計測結果と比較してモデルの妥当性を確認した。解析は周波数 0.1Hz, 10kHz 及び 1MHz で実施した。

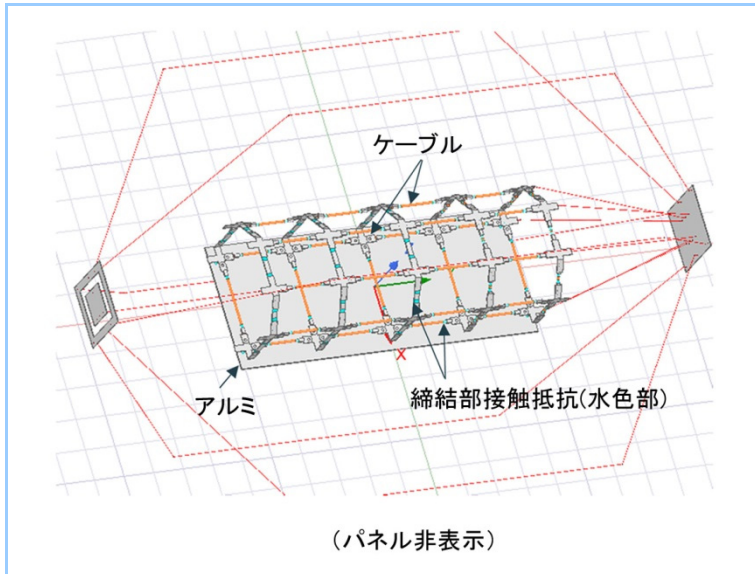


図5 解析モデル(Ansys Q3D)

## (2) Ansys EMC Plus モデル

モデルを図6に示す。下面パネルと銅メッシュは面要素で、それ以外は線要素でモデル化し、部材や接触抵抗部の導電率は、実測値を基にメッシュサイズ 20mm を考慮して換算した値を用いた。金属導体ケーブルの各要素を流れる分岐電流を出力した。FDTD 法では低周波域の解析時間が長くなるため、周波数特性については、高周波(100kHz, 1MHz)条件のみ解析評価した。

図6中に示した①～⑥は長手方向の導体、⑦は電流注入方向から長手方向内側1段目の導体の各番号である。本導体を流れる電流について解析評価を行った結果を4章にて後述する。

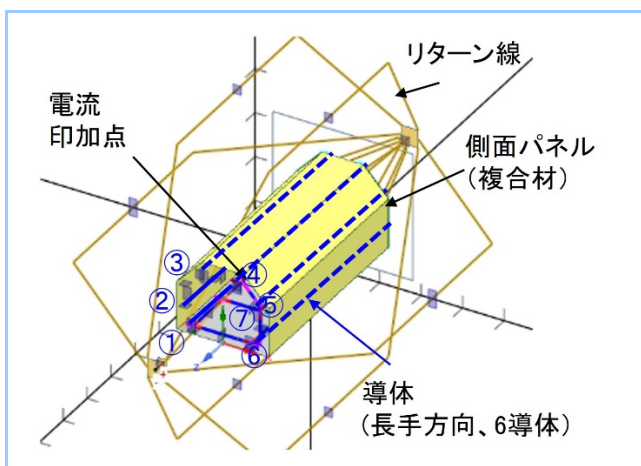


図6 解析モデル(Ansys EMC Plus)

## 4. 検証結果

### 4.1 電流路確保及び誘導磁場影響の対策評価

図7～9に試験供試体に 0.1Hz, 10kHz, 1MHz の各周波数成分の電流が流入した場合において、構造を流れる電流分布の計測値に対する解析精度の評価結果を示す。3章で説明した試験を実施した5ケースで評価した結果、解析誤差はほぼ 6dB 以内となる結果が得られた。航空機で

は安全上重要な機器では 6dB 以上の設計マージンが選定されることが多く<sup>(2)</sup>、過大な設計マージンを考慮せずに済む十分な精度で解析評価できることが確認できた。また、周波数特性について、図9に示すように 1MHz では Ansys Q3D Extractor の精度が Ansys EMC Plus よりも悪い結果が得られた。従って、解析設計手法の適用範囲として、低周波域で Ansys Q3D Extractor を用い、高周波域では Ansys EMC Plus で使い分けを行うことで約 6dB 以内の精度で評価できることを確認することができた。

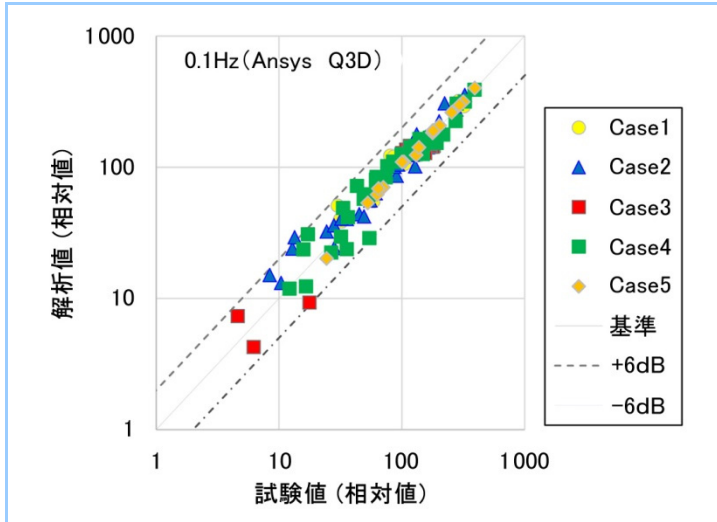


図7 単一周波数特性評価結果(0.1Hz)

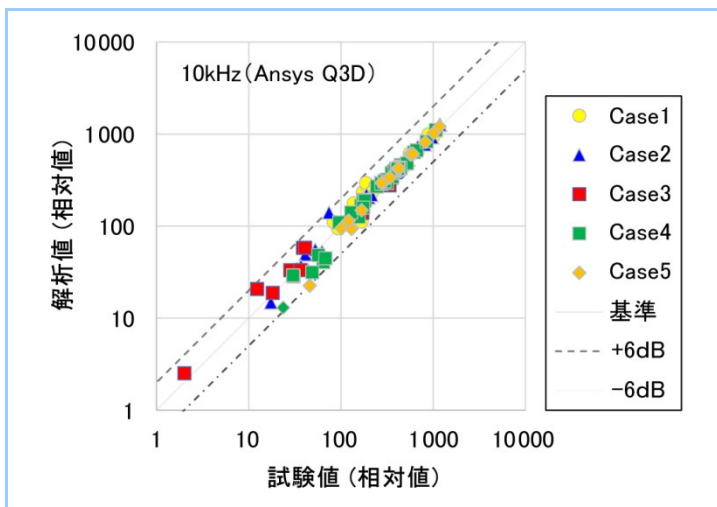


図8 単一周波数特性評価結果(10kHz)

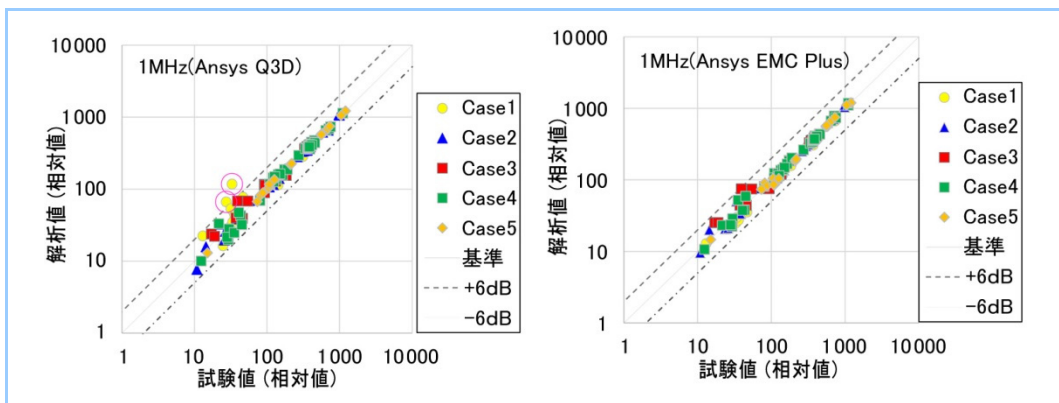


図9 単一周波数特性評価結果(1MHz)

これらの解析精度は、接触抵抗のばらつきや、形態によるインダクタンスのモデル化の精緻性を考慮することで、改善された結果である。図 10 に、接触抵抗を一律で与えた場合と、各構造要

素の抵抗計測値を与えて抵抗ばらつき考慮した場合の、グランドラインを構成する導体⑦(図6)を流れる電流の周波数特性の改善結果を示す。抵抗ばらつきの考慮により、計測値により近い電流値が得られた。この抵抗値のばらつきは、主として各ケーブル導体を接続している部位の接触抵抗がばらついているためである。今回の供試体の金属ケーブルの配置間隔は約 25cm ピッチであり、実際の製品構造サイズ(mオーダ)設計の場合、構造自体の抵抗が本試験よりも大きくなるため、抵抗値のばらつき影響は相対的に小さくなるので、本試験検証で見られた影響は小さいと想定される。

次に、試験供試体に図4に示した模擬雷電流(Component A:1kA ピーク)を印加して電流分布を計測した結果に対して、前記で確認した雷の高周波に対応可能な Ansys EMC Plus を用いて解析し試験結果と比較した結果を図 11 に示す。波形も良い一致が得られ、周波数特性だけでなく過渡的な特性に対しても解析モデルの設計適用性が検証できた。従って、電流経路の把握が本解析により行えるようになった。

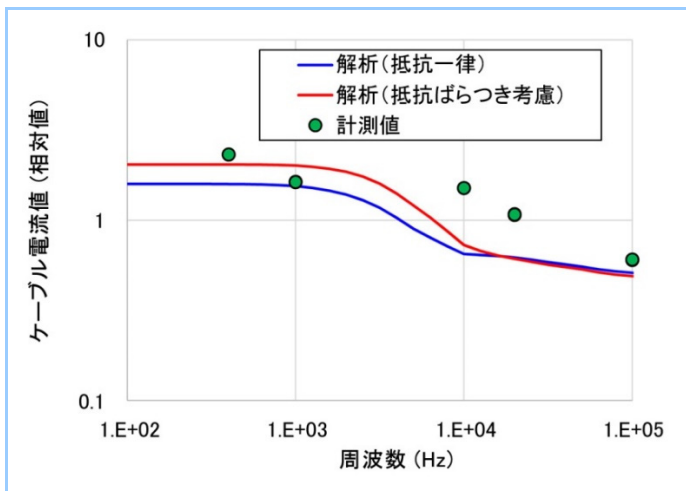


図 10 解析精度改善(抵抗影響)

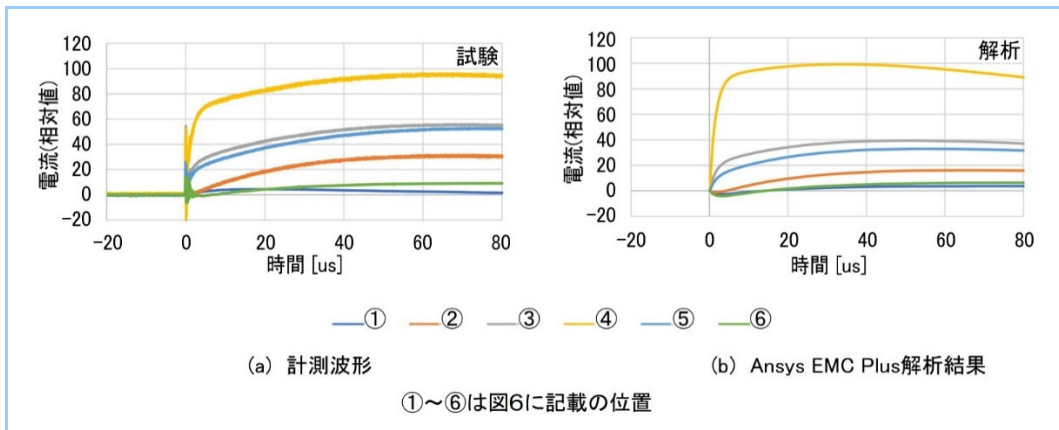


図 11 模擬雷電流印加評価結果

#### 4.2 グランドラインを共有する電源間干渉影響の評価

グランドラインを共有する電源間干渉影響について、図 12 に、加害側のシステムに 50Vpp の正弦波を印加した場合に被害側に加わる電流値、電圧値の試験値、及び Ansys Q3D Extractor による解析値の周波数依存性を示す。周波数が約 10kHz から電圧、電流が増加しており、電源間干渉の影響が見られているが、この試験値と解析値は非常に良い一致を示しており、電流値は 3.7dB 以内、電圧値は 2.4dB 以内であることを確認した。試験検証は周波数 0.1Hz~1MHz 範囲であるが、周波数 1kHz 以下ではほとんど特性に変化は見られず、DC まで拡張可能と考えられる。従って、DC~1MHzまでの周波数領域で、電源間干渉の影響評価に対する解析モデルの妥当性を確認することができた。

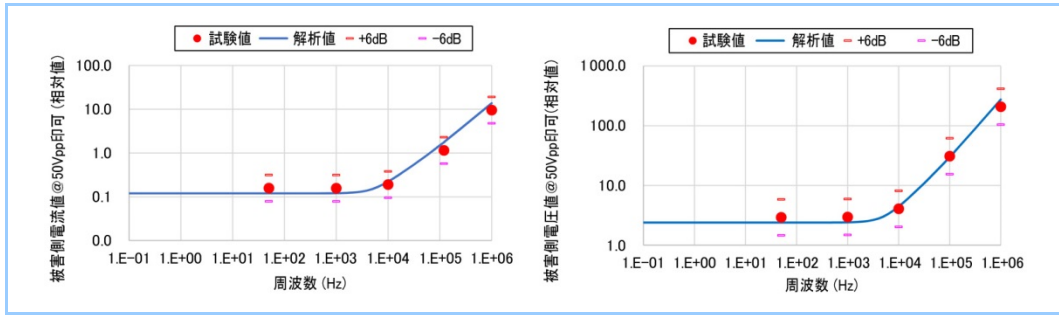


図 12 電源系ノイズ影響, 電圧降下評価結果

## 5. まとめ

電気抵抗の高い複合材の使用が進む航空機等の移動体製品において、雷電流が電動化、また高度化される搭載電子システム機器の動作に影響しないよう、電磁気特性を評価するための解析技術が必要である。準静電磁界解析+回路解析(低周波域)と、有限差分時間領域法に基づく電磁界解析(高周波域)の2方法を補完活用したグラウンドライン構造の解析評価技術を構築した。モックアップを用いて電流路確保及び誘導磁場影響の対策評価及びグラウンドラインを共有する電源間干渉影響の評価試験を行い、解析評価技術を検証した。解析によりグラウンドラインの設計が可能となり、試作や要素試験の削減につながるため、電磁界対策設計の効率化が期待できる。

今後、本技術の製品設計への展開を進めていくとともに、複合材構造体に対する総合的な電磁界影響に対する解析設計技術の確立を図っていく。

## 参考文献

- (1) SAE ARP5412, Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms
- (2) MIL-STD-464, ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTAL EFFECTS REQUIREMENTS FOR SYSTEM