

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：82642

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760220

研究課題名（和文） 樹脂系複合材料を一次構造材として用いた次世代航空機における電磁干渉解析技術の研究

研究課題名（英文） Evaluation of electromagnetic interference characteristics of next-generation aircrafts based on composite materials

研究代表者

ニッ森 俊一（FUTATSUMORI SHUNICHI）

独立行政法人電子航法研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20551211

研究成果の概要（和文）：樹脂系複合材料を一次構造材として用いた次世代航空機等における電磁干渉特性を検討するため測定と数値解析の両面で検討を実施した。様々な構造を有する CFRP 積層板の電磁界遮蔽量測定を実施し、実際の航空機等に用いられる擬似等方性積層板ではアルミニウム板と同等の遮蔽特性（50 dB 程度）となることを確認した。さらに、壁面の一部を CFRP 積層板で構成した構造体内部に蓄えられる電磁界エネルギー（Q 値）を測定評価し、アルミニウム製構造体内部の電磁界特性とほぼ同等であることを確認した。また、FDTD 法を用いた電磁界数値解析を実施し、航空機内部の電磁界特性を検討した。

研究成果の概要（英文）：To evaluate the electromagnetic interference characteristics of next-generation aircrafts based on composite materials, the electromagnetic characteristics of the these materials are measured and analyzed. First, the electromagnetic shielding characteristics of various types of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are evaluated. The quasi-isotropic CFRP laminates have shielding effects around 50 dB, which is almost the same as the aluminum plate. In addition, the electromagnetic field (EMF) characteristics inside the CFRP structure made of woven fabrics were evaluated using the reverberation chamber. The measured quality factor confirmed no significant difference in the aluminum and the CFRP sidewalls. Finally, based on the measured parameters, the EMF inside the aircraft cabin is analyzed using FDTD method.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,696,000 |
| 2011年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2012年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気・電磁環境、樹脂系複合材料、航空機、炭素繊維、数値解析、FDTD、遮蔽、CFRP

1. 研究開始当初の背景

樹脂系複合材料は、アルミニウム合金と比較して比強度が高く、高性能かつ機体の軽量化による運用コスト低減が達成できるため、民間航空機分野においてもその応用が進ん

でいる。例えば、ボーイング 787 型機で炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP）使用比率は重量比 50% に達し、主翼および胴体を含む主要一次構造材の大部分が CFRP で構成されて

いる。大幅な燃費向上と CO2 排出削減に寄与することから、将来的には大部分の航空機において一次構造材は金属材料から複合材料に置き換わる見込みである。

一方、現代社会のユビキタス化に伴い、携帯電話や高速無線データ伝送など携帯電子機器 (Portable Electronic Device, PED) の航空機内利用の要求が高まっている。これらは機内で比較的強い電磁波を放射し、また一般の PED にも従来にない広帯域不要妨害放射の可能性があるため、航法装置や無線機器などへの電磁干渉 (Electromagnetic interference, EMI) が懸念される。さらに、従来電波的には遮断された空間であった金属製航空機と比較して、将来の樹脂系複合材で構成された航空機では電磁波の機外漏洩量が増加し、地上の無線設備に対する EMI の可能性がある。

航空機内外における電磁環境特性について、アルミニウム合金を主要構造材として用いた従来の航空機では、これまでの膨大な測定実験結果に基づき、PED の影響評価手法および機内使用ガイドライン等が確立され、研究担当者らは既存の航空機に対する電磁環境両立性 (Electromagnetic compatibility, EMC) の評価を実施している。しかし、樹脂系複合材料を主要構造材料として用いた航空機内外における電磁環境特性は、機内電波伝搬特性および遮蔽・減衰特性が明らかとなっていないため、詳細な調査検討が必要である。また将来、樹脂系複合材料や PED 等の無線局の使用は航空宇宙分野のみならず、自動車、鉄道など多くの分野での応用が期待されている。このことから研究代表者は幅広い分野において、電磁環境の推定法と EMC の評価手法が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、樹脂系複合材料を主要構造として用いた航空機内において、従来金属製航空機との機内外における電磁環境基本特性の違いの解明および PED が航法装置および無線機器に及ぼす EMI を定量的に評価するため基礎技術を検討し、将来の樹脂系複合材料の広範な利用に向けた EMC 技術を確立することである。具体的には、次の 3 項目について実験と数値解析の両面から研究を進める。

(1) 樹脂系複合材料で構成された構造体の遮蔽特性および伝搬特性の測定・定量化技術：航空機および航法装置で用いる周波数帯である 400 MHz~6 GHz において、航空機に適用される材料構造を持つ CFRP 積層板の電磁波遮蔽・減衰量の測定を実施し、無負荷 Q 値等、その基本特性の定量化を行う。航空機内は電磁環境的には準閉空間となるため、PED 放射電磁波による内部定在波と外部

に漏れる電磁波の両方の評価が必要である。

(2) 樹脂系複合材料構造体の数値モデル化および妥当性検討：上記 (1) で得られた遮蔽特性および伝搬特性測定結果に基づき、樹脂系複合材料構造体の数値モデル化の基本検討を行う。本研究では、電磁界数値解析法として時間領域差分法 (Finite-difference time-domain method, FDTD) を用い、三次元構造内の定在波および外部漏洩電磁波の検討を行い数値解析結果の妥当性と有効性を確認する。また、(1)、(2)をアルミニウム合金製構造体に対しても実施し比較することで、従来金属との電磁環境基本特性の違いを検討する。

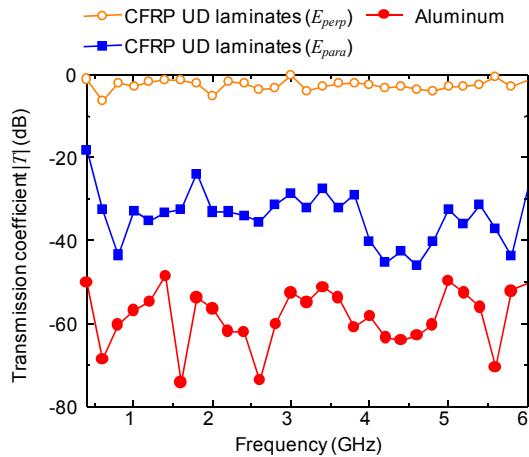
(3) 樹脂系複合材料を用いた航空機の機内外電磁環境および経路損失の解析推定技術：(1)、(2) で得られた結果を踏まえ、樹脂系複合材料を主構造材として用いた航空機内における、機内の PED から放射される電磁波について、航空機を数値モデル化し、FDTD 法に基づく数値解析を行う。ここで、機内外における電磁界強度および干渉経路損失 (Interference pass loss, IPL) について解析評価を行い、機外漏洩量評価および EMI 定量化に向けた基本検討を実施する。ここで IPL とは、PED から放射された電磁波が機内・窓等・機上アンテナ・機内ケーブルと伝わり、機上装置まで到達するときの伝搬損失である。

3. 研究の方法

樹脂系複合材料を主要構造として用いた航空機において、機内外の電磁環境特性および機内持込み携帯電子機器が航法装置および無線機器に及ぼす電磁干渉を定量的に評価するための基礎技術を確立するため、実験と数値解析の両面から検討を進める。具体的には以下の 5 点について検討を行う。

(1) 最も基本的な特性である、樹脂系複合材料の遮蔽量 (シールド効果) を取得するため、CFRP 積層板の 400 MHz~6 GHz における電磁界遮蔽量を測定評価する。ここで、遮蔽量測定評価法は IEEE 規格 (IEEE Std 299-2006) に準じたプロトコルとする。また、複素誘電率も同時に取得し、これらを併せ FDTD 数値解析に必要な材料定数とする。

(2) 側面が CFRP 積層板で構成された立方体内部において、PED 放射電磁波を想定した 400 MHz~6 GHz の電磁波をアンテナから放射し、内部電界値および外部漏洩電界値を測定評価する。ここで、内部定在波の影響を評価するため、6 面体内部にリバブレータ (回転金属反射板) を設置し、統計的マルチパス環境を実現する測定系を構築する。リバブレータ設置時および未設置時の内部電界値の違いおよび外部電界値測定結果から、CFRP 積層板で構成された立方体の遮蔽量および



部電界値および外部漏洩電界値を測定評価

図 1. UD 材 CFRP 積層板の電磁界遮蔽特性
偏波・繊維方向直交 (E_{perp})、偏波・繊維方向平行 (E_{para})

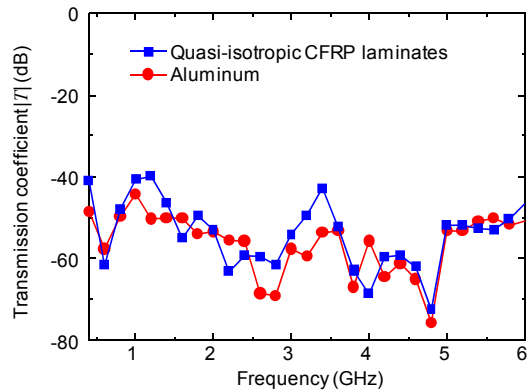


図 2. 擬似等方性 CFRP 積層板の
電磁界遮蔽特性

無負荷 Q 値等の基本特性を求める。

(3) 上記 (1) および (2) で取得した CFRP 積層板の遮蔽量、複素誘電率および 6 面薄板構造の立方体測定結果に基づき、CFRP 積層板で構成された立方体の三次元モデル構築および FDTD 数値解析を行う。FDTD 数値解析においても、解析モデル内部にリバレータを模した散乱体を設置し統計処理を行い、無負荷 Q 値等の基本特性を取得する。これらの結果から、数値解析結果の妥当性および有効性を確認する。

(4) 上記 (2) において実施した、6 面が CFRP 積層板で構成された立方体内部における内を、一部アクリル窓材が存在する場合について同様に検討する。アクリル材が存在することで変化する遮蔽量、内部定在波発生量および無負荷 Q 値を取得し、より実環境に近い状況における特性を把握する。

(5) 樹脂系複合材料を主要構造材として用いた航空機の例として、胴体等を数値モデル

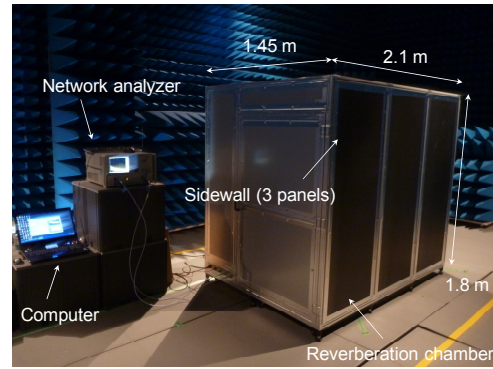


図 3. 反射箱を用いた構造体内部の電磁界エネルギー (Q 値) の測定状況

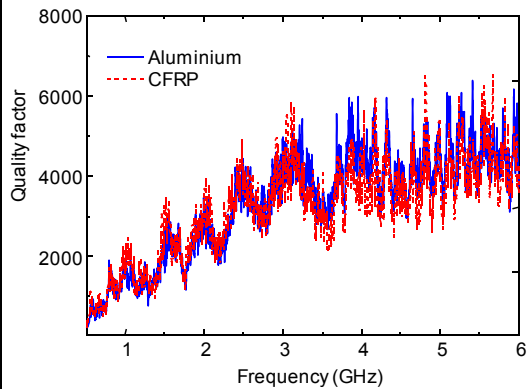


図 4. CFRP 構造体内部に蓄えられる電磁界エネルギー (Q 値)

化した航空機モデルを用いた FDTD 数値解析を行い、PED が航法装置および無線装置に及ぼす EMI の定量的な評価のための検討を行う。機内に PED を設置した場合の胴体内部および外部の電磁界強度および無線航法装置、無線通信装置、GPS 等の機器受信アンテナ端子までの IPL を推定するための基本的な解析評価を行う。

4. 研究成果

(1) 樹脂系複合材料の遮蔽量を定量的に検討するため、電波暗室内で様々な種類の CFRP 積層板の電磁界遮蔽特性の測定評価を実施した。結果の一例として、図 1 に炭素繊維の方向が単一であるユニディレクショナル材 (UD) の電磁界遮蔽特性を示す。UD 材は電磁界に対して偏波格子として働くことから、偏波と繊維方向が直交する場合と平行な場合では遮蔽特性が大きく異なる。測定結果から、UD 材を用いた CFRP 積層板の遮蔽特性の偏波依存性 (偏波比 20 dB 以上) を確認した。本特性は新たな構造を有する偏波格子やレドームとして活用可能であるため、特許出願を行った。また、UD 材が異なる角度で積層される平織材および擬似等方性積層板では、厚みが 0.3 mm 程度でもアルミニウ

ム板と同等の遮蔽特性 (50 dB 程度) となることを確認した。特に図 2 に示すように、航空機の主要構造材として使われる場合に用いる擬似等方積層板の場合、繊維が 45 度おきに積層されるため、遮蔽効果は非常に高く、400 MHz から 6 GHz においてはほぼ金属構造と同等の測定結果である。

(2) 電磁界反射箱を用いた構造体内部の電磁界特性評価系を構築し、壁面の一部を CFRP 積層板で構成した場合および一部窓材が存在する場合に構造体に蓄えられる電磁界エネルギー (Q 値) を測定評価した。図 3 に電波暗室内における測定状況を示す。側面を CFRP 積層板で構成した反射箱内部にリバブレータを設置し、統計的なマルチパス環境を再現可能である。図 4 に CFRP 構造体内部に蓄えられる電磁界エネルギーを示す。図から測定を実施した周波数帯でアルミニウム製構造体内部の電磁界特性とほぼ同等であることを確認した。

(3) 上記 (1) および (2) で得られた CFRP 積層板を用いた構造体の電磁界特性および材料定数等を用い、CFRP 積層板で構成された構造体内部の FDTD 数値解析を実施した。さらに、航空機数値モデルを用い、EMI の定量的な評価のための検討を実施した。機内に PED を設置した場合の胴体内部および外部の電磁界強度を解析推定し、無線航法装置、無線通信装置、GPS 等の機器受信アンテナ端子までの IPL を推定する見通しを得た。

本研究で得られた成果は、CFRP 積層板の電磁界特性について、構造の違いに起因する遮蔽特性の違いを初めて詳細に明らかにしたため、CFRP 材料を活用した産業分野に対する基礎データとしての活用が期待できる。さらに、CFRP 材料を用いた構造体内部における電磁界特性が、400 MHz から 6 GHz において、金属構造とほぼ同一となることを明らかにしたため、今後の航空機を含めた新材料応用の指針としての活用が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Shunichi Futatsumori, Akiko Kohmura, Naruto Yonemoto, Evaluation of electromagnetic field characteristics inside carbon fiber reinforced plastic structure using reverberation chamber method, Proceeding of the 43rd European Microwave Conference, 査読有、1 巻、2013、1-4
- ② Shunichi Futatsumori, Takashi Hikage, Masafumi Shirafune, Toshio Nojima, Akiko Kohmura, Naruto

Yonemoto, Numerical estimation of propagation characteristics of wireless communications in crowded aircraft cabin, Proceeding of the 29th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, 査読有、1 巻、2013、82-85

- ③ ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, 炭素繊維強化プラスチック積層板を用いた直方体反射箱内における構造体 Q 値の特性評価測定、2013 年電子情報通信学会総合大会通信講演論文集、査読無、1 巻、2013、2
- ④ Shunichi Futatsumori, Akiko Kohmura, Naruto Yonemoto, Evaluation of Microwave Shielding Characteristics of Quasi-Isotropic Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates Based on Unidirectional Materials, Proceedings of the Asia Pacific Microwave Conference 2012, 査読有、1 巻、2012、289-291
<http://dx.doi.org/10.1109/APMC.2012.6421575>
- ⑤ ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, 複合材料の電気的特性 -炭素繊維強化プラスチック積層板の電磁界特性-, 第 50 回飛行機シンポジウム講演集、査読無、1 巻、2011、1-4
- ⑥ ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, 磯崎栄寿, 日景隆, 野島俊雄, 大型旅客航空機における胴体側壁内装材の電気的特性 -フェノール樹脂を用いた FRP の材料定数測定評価-, 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会通信講演論文集、査読無、1 巻、2012、22
- ⑦ Shunichi Futatsumori, Akiko Kohmura, Naruto Yonemoto, Microwave shielding and polarization characteristics of carbon fiber reinforced plastic laminates with unidirectional materials, IEICE Electronics Express, 査読有、9 巻、2012、531-537
<http://dx.doi.org/10.1587/elex.9.531>
- ⑧ ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, 磯崎栄寿, 炭素繊維強化プラスチック擬似等方性積層板のマイクロ波帯電磁界遮蔽量の特性評価測定、2012 年電子情報通信学会総合大会通信講演論文集、査読無、1 巻、2012、377
- ⑨ ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, 複合材料の電気的特性 -炭素繊維強化プラスチック積層板の電磁界遮蔽特性-, 第 49 回飛行機シンポジウム講演集、査読無、1 巻、2011、827-831
- ⑩ ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, 直交繊維配向材を用いた炭素繊維強化プラ

スチック積層板のマイクロ波帯電磁界遮蔽量の特性評価測定、2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会通信講演論文集、査読無、1巻、2011、368

- ⑪ ニッ森俊一、河村暁子、米本成人、ユニディレクショナル材を用いた炭素繊維強化プラスチック板のマイクロ波帯電磁界遮蔽量の基本特性評価測定、2011年電子情報通信学会総合大会通信講演論文集、査読無、1巻、2011、383

〔学会発表〕(計10件)

- ① Shunichi Futatsumori、Evaluation of electromagnetic field characteristics inside carbon fiber reinforced plastic structure using reverberation chamber method、The 43rd European Microwave Conference、2013年10月9日、ニュルンベルグ(ドイツ)
- ② Shunichi Futatsumori、Numerical estimation of propagation characteristics of wireless communications in crowded aircraft cabin、The 29th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics、2013年3月25日、モントレール(アメリカ)
- ③ ニッ森俊一、炭素繊維強化プラスチック積層板を用いた直方体反射箱内における構造体Q値の特性評価測定、2013年電子情報通信学会総合大会、2013年3月21日、岐阜市
- ④ Shunichi Futatsumori、Evaluation of Microwave Shielding Characteristics of Quasi-Isotropic Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates Based on Unidirectional Materials、The Asia Pacific Microwave Conference 2012、2012年12月5日、高雄市(台湾)
- ⑤ ニッ森俊一、河村暁子、米本成人、複合材料の電気的特性-炭素繊維強化プラスチック積層板の電磁界特性-、第50回飛行機シンポジウム、2012年11月6日、新潟市
- ⑥ ニッ森俊一、大型旅客航空機における胴体側壁内装材の電気的特性-フェノール樹脂を用いたFRPの材料定数測定評価-、2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2012年9月14日、富山市
- ⑦ ニッ森俊一、炭素繊維強化プラスチック擬似等方性積層板のマイクロ波帯電磁界遮蔽量の特性評価測定、2012年電子情報通信学会総合大会、2012年3月22日、岡山市
- ⑧ ニッ森俊一、複合材料の電気的特性-炭素繊維強化プラスチック積層板の電磁界遮蔽特性-、第49回飛行機シンポジウ

ム、2011年10月27日、金沢市

- ⑨ ニッ森俊一、直交繊維配向材を用いた炭素繊維強化プラスチック積層板のマイクロ波帯電磁界遮蔽量の特性評価測定、2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2011年9月15日、札幌市
- ⑩ ニッ森俊一、ユニディレクショナル材を用いた炭素繊維強化プラスチック板のマイクロ波帯電磁界遮蔽量の基本特性評価測定、2011年電子情報通信学会総合大会、2011年3月11日、東京都

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：直線偏波の制御方法及びその装置
発明者：ニッ森俊一、米本成人、河村暁子
権利者：独立行政法人電子航法研究所
種類：特許
番号：特願2011-098137号
出願年月日：23年4月26日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ニッ森 俊一 (FUTATSUMORI SUNICHI)
独立行政法人電子航法研究所・その他部局
等・研究員
研究者番号：20551211