筐体内に配置された電波吸収体の効果的な電磁界抑制に 対する一検討

小玉 和輝*, 小野 裕司**, 和田 光司*, 橋本 修*

A Study on Effective Suppression of Electromagnetic Field by an Absorbing Material Inserted into a Cavity Resonator

Kazuteru KODAMA*, Hiroshi ONO**, Kouji WADA* and Osamu HASHIMOTO*

*青山学院大学理工学部 (〒157-8572 東京都世田谷区千歳台6-16-1)

**株式会社トーキン (〒982-8510 宮城県仙台市太白区太子堂21-1)

*College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University (6-16-1 Chitosedai, Setagaya-ku, Tokyo 157-8572)

**Tokin corporation (21-1 Taishidou, Tashiro-ku, Sendai-shi, Miyagi 982-8510)

概要 本論文では、近傍電磁界に対する電波吸収体の評価法である、筐体内に電波吸収体を配置した場合のQ値の低下率から吸収量を評価する方法に対し、FDTD法による計算値と測定値の比較および筐体内の磁界分布の解析を行った。この結果、筐体内に電波吸収体としてフェライト材を装荷した場合のQ値の低下率が、装荷位置を変えた場合においても計算値と測定値において、それぞれ2%以下の違いで良好に一致することにより、この評価法におけるFDTD法の有効性を確認した。さらに、筐体内部の磁界強度が電波吸収体を装荷することにより、筐体内全体において抑制されることを定量的に確認することで、今後の近傍電磁界の効果的な抑制に対するFDTD法の有用性を示すことができた。

Abstract

Validity of finite difference time domain (FDTD) method is examined by evaluating the absorption performance from the variation of Q factor under the condition that the absorbing material is inserted into a cavity resonator. The magnetic field distribution in a cavity resonator is visually observed. As a result, we confirmed that the decreasing rate of Q factor was agreed with the calculated and measured results, and both corresponded in the difference in 2 percent. Consequently, validity of FDTD method for examination mentioned above is confirmed. We confirmed that magnetic field distribution in the cavity resonator was drastically weakened when the absorbing material is inserted into the cavity resonator.

Key Words: Near Electromagnetic Field, Absorbing Materials, Q Factor, FDTD Method

1. まえがき

マイクロ波、ミリ波帯における電子機器の実用化に伴い、筐体内において使用されるIC等がノイズ源として働き、電磁界結合や共振現象が生じることにより、他の素子に悪影響を及ぼすことが指摘されている^{1)~4)}。これらの問題に対する対策法として、例えば、筐体内に電波吸収体を配置し、各素子間の電磁界結合や共振現象を緩和することが考えられている^{5)~9)}。しかし、筐体内の電波吸収体はノイズ源の近傍電磁界中に配置されることになり、通常市販されている遠方電磁界に対して設計された電波吸収体では、その吸収効果がどの程度保証されるかわからないのが実状である。

このような背景において、近傍電磁界に対する電波吸収体の評価法として、(1)対象とする電波吸収体の近傍に微小ループアンテナを配置して、そのカップリングの変化から吸収効果を評価する方法¹⁰⁾や、(2)実際に筐体内に電波吸収体を装荷した場合のQ値より評価する方法¹¹⁾が報告されている。本論文では、これらのうち後者の評価法に着目し、

筐体モデルとして方形空洞共振器を用い、その内部に電波吸収体としてフェライト材料を装荷した場合のQ値をFDTD法を用いて計算し、測定値と比較検討を行った。また、電波吸収体を装荷した場合の筐体内における電磁界の抑制効果を視覚的に確認するため、筐体内の磁界強度分布を観察した。これらの結果より、Q値に着目した近傍電磁界の抑制効果の評価法やその効果的な抑制に対するFDTD法の有効性および有用性を検討した。

2. 解 析

2.1 解析方法

本解析では、Fig. 1 に示すTE₁₀₁モードにおいて共振周波数 $f_0 = 1.18\text{GHz}$ の方形空洞共振器 (180mm × 90mm × 180mm) を用い、そのセルサイズ ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) は (1.14mm, 2.00mm, 2.00mm) とした。測定で用いる共振器の導体壁は銀で構成されており、その導電率は一般に $\sigma = 6.29 \times 10^7 [\text{S/m}]$ であることが知られているが、酸化等の影響により実際には、多少変化している。そこで解析では、共振器内に何も装荷されていない状態においてQ値の計算

Fig.1 Analytical model of resonator

Fig.2 Attachment position of material

値が測定値と一致するように導電率を測定値から推定し、ここでは $\sigma = 3.465 \times 10^7 [\text{S/m}]$ とした。

このような構成において、共振器内に電波吸収体（以下、試料と称す）として、厚さ5.7mm、大きさ10.0mm×10.0mmのNi-Zn系のフェライトをFig. 2に示すような励振面に直交する面の異なる4箇所に装荷した場合のQ値を計算した。

ここで、装荷したフェライトの複素比誘電率（ $\hat{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ）および複素比透磁率（ $\hat{\mu}_r = \mu_r' - j\mu_r''$ ）の摂動法¹²⁾を用いた測定値は、 $f_0 = 1.18\text{GHz}$ において、それぞれ $\epsilon_r' = 11.3 - j0.947$ および $\mu_r' = 0.1 - j7.17$ である。また、以上の検討を行うと共に、筐体内の電磁界抑制効果を視覚的に確認するため、Fig. 1のxz面において磁界強度を求め観察した。

2.2 f_0 の計算

まずFig. 1の α 点の磁界 H_x 成分に、励振を与えたことによる影響を考慮せず励振する方法であるハードラテス¹³⁾により、幅広い周波数スペクトルを有する式(1)で示す gaussian パルスを入力し、 β 点における磁界 H_x 成分の時系列データを観察した。そして、この観測された時系列データにFFT処理を施し f_0 を求めた。

$$H_x(n\Delta t) = e^{-(n\Delta t - T)/0.29T^2} \quad (1)$$

この式において $f_0 = 1.18\text{GHz}$ 、周期 $T = 0.646/f_0$ とした。また、 Δt は時間ステップ、 n は繰り返し数である。ここで、FFTにより処理された周波数分解能 Δf は

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (2)$$

と、時系列データ数により決まる。本研究では、計算時間の関係で、サンプル数 $N = 65536$ 、時間ステップ $\Delta t = 1.354251294 \times 10^{-12}\text{sec}$ で行っているが、このデータをそのままFFT処理すると周波数分解能は11MHzとなり、高精度に f_0 を求めることができない。そこで、観察した時系列

Fig.3 Calculated result of resonant frequency

データにGPOF(Generalized Pencil of Function)法¹⁴⁾を施すことにより、32倍まで外挿した後、FFT処理を施し周波数分解能を向上させた。Fig. 3はその結果を示したもので、試料非装荷時におけるGPOF法を併用した場合と併用しない場合の f_0 の比較を示している。この図において横軸は周波数、縦軸は周波数スペクトラムであり、周波数分解能が0.36MHzと大幅に向上しており、 $f_0 = 1.1778\text{GHz}$ であることがわかった。

なお、FDTD法による計算時間は、コンピュータPentiumIII(600MHz)を用いて、約24時間（約1日）であり、GPOF法を用いずに、今回の周波数分解能を達成するためには、約770時間（約32日）の計算時間が必要になると推定される。

2.3 Q値の計算

2.2より求めた f_0 のCW波を α 点の H_x 成分に励振し、セル各点における電磁界成分を求め、この電磁界を用いて共振器内に蓄えられるエネルギーの時間平均値 W と共振器内において単位時間あたりに失われるエネルギー P を計算した。そして、得られた W と P から、式(3)を用いてQ値の計算を行った。

$$Q = 2\pi f_0 \frac{W}{P} \quad (3)$$

Fig. 4 (a), (b)はそれぞれ試料非装荷時と試料装荷時の計算周期に対するQ値の計算結果を示している。ここで、横軸は周期、縦軸はQ値をそれぞれ表している。

結果よりQ値は600周期目において、試料非装荷時で18046、試料装荷時には、装荷位置Aで911、装荷位置Bで1007、装荷位置Cで2429、および装荷位置Dで2424であり、装荷位置Cの値は装荷位置Dとほとんど変わらないことが観察できた。ここで、式(4)からなる低下率を定義すると、試料を装荷した場合、その値は装荷位置A～Dの順に95.0%、94.4%、86.5%および86.5%とQ値が大幅に低下しており、側面の中心部ほど、低下率が高いことが確認できた。

$$\text{低下率}[\%] = \frac{\text{試料非装荷時のQ値} - \text{試料装荷時のQ値}}{\text{試料非装荷時のQ値}} \times 100 \quad (4)$$

(a) In the case of no material

(b) In the case of material inserted in resonator

Fig.4 Calculated result of Q value

3. 測定

3.1 測定系

方形空洞共振器（共振周波数 $f_0 = 1.18\text{GHz}$ ，大きさ： $180\text{mm} \times 90\text{mm} \times 180\text{mm}$ ）を，ベクトルネットワークアナライザ（HP8510C）に接続し，共振器内部における試料非装荷時と試料装荷時について，Fig. 5 のように透過係数 S_{21} を測定し，この結果と式(5)を用いることによりQ値を求めることができる。

$$Q = \frac{1}{\left(1 - 10^{-\frac{IL_0}{20}}\right) \frac{\Delta f}{f_0}} \quad (5)$$

ここで，共振周波数 f_0 ，3dB帯域幅 Δf および挿入損失 IL_0 である。

Fig. 6 に試料を装荷した共振器の内部構造を示す。また，筐体とカバーとの間の隙間の影響により，Q値が変化しないように，全体で44箇所をネジで固定し，測定の再現性が

Fig.5 Resonance response

Fig.6 Inside view of resonator

得られるようにした。

3.2 測定結果

Table 1 に3.1で述べた測定法により測定した結果を示す。また，Table 2 に試料非装荷時と試料装荷時のQ値の測定値，計算値および式(5)を用いたQ値の低下率をまとめた結果を示す。なおTable 2 において，低下率をD.R(Decreasing rate)と表している。

Table 1 より，試料を装荷することで f_0 は低下するが，その影響は小さいこと，またQ値は試料を装荷することで試料非装荷時に比べて大幅に低下し，その値は装荷位置Aで最も低く，続いてB，C，Dの順に高くなっていくことがわかった。

そしてTable 2 より，計算値と測定値において本検討で用いた試料の場合，わずか $10.0\text{mm} \times 10.0\text{mm}$ 程度の大きさの試料を装荷しても，それぞれの装荷位置において筐体内部のQ値は大きく低下し，磁界強度を弱める効果があることがわかった。これより，フェライト材のQ値低減に対する定量的効果を確認することができた。さらに，Q値は側面の中心である装荷位置Aにおいて最も低下し，計算値が911，測定値が1129であり，その違いを式(4)の低下率で示すと，95.0%に対して93.8%と，両者は1%程度の誤差で良好に一致することがわかった。そして装荷位置B～Dについてもそれぞれ低下率が2%以下の誤差で良好に一致することを確認した。なお，計算値と測定値はわずかに異なるが，その理由は，(1)測定において，試料を壁面に固定するために使用した両面テープの効果を解析において考慮しなかった影響，(2)試料の材料定数の測定誤差等と考えら

Table 1. Measured results of Q values

Material	f_0 [GHz]	Δf [MHz]	IL_0 [dB]	Q
No material	1.1776	0.0675	29.1	18079
Position A	1.1767	1.045	52.5	1129
Position B	1.1768	0.885	51.3	1333
Position C	1.1773	0.451	45.0	2631
Position D	1.1771	0.428	44.9	2769

Table 2. Measured and calculated results of Q values

Material	Calculated	Measured	D.R(Cal.) [%]	D.R(Mea.) [%]
No material	18046	18079	—	—
Position A	911	1129	95.0	93.8
Position B	1007	1333	94.4	92.6
Position C	2429	2631	86.5	85.4
Position D	2424	2769	86.5	84.7

れる。

また、Q値について、装荷位置において、端からの距離が等しく高さが異なる場合はほとんどQ値が変化しないのに対し、高さが等しく端からの距離が異なる場合には大きくQ値が変化することがわかった。これは、本検討において共振器のモードがTE₁₀₁であり、磁界強度が側面の中心部程強くなるためである。

以上の検討結果から、装荷位置を変えて試料を装荷し、Q値の低下率が変化した場合においても計算値と測定値の差は試料の装荷位置によらず2%以下で良好に一致することがわかり、本検討に対するFDTD法の有効性が確認できた。

3.3 磁界強度分布の計算

Q値に着目した計算結果の傾向を磁界強度においても確認するため、Fig. 7におけるxz面の磁界強度分布を、試料非装荷時と位置Aに試料を装荷した場合について可視化した結果をFig. 8 (a), (b)に示す。この図において、縦軸はx方向の寸法、横軸がz方向の寸法である。また、磁界強度の弱い場所程薄く、強い場所程濃く表示されている。Fig. 8 (a), (b)より、試料を装荷することで、筐体内全体にお

Fig.7 Reference plane for observation of magnetic field distribution

Fig.8 Magnetic field distributions in resonator

いて試料非装荷時と比べて磁界強度が低下することが確認できた。特に試料を装荷した場所と側面の中心部において磁界強度が最も低下していることを確認した。

以上の結果から、試料を筐体内に装荷した場合、装荷した場所だけでなく、筐体内全体における磁界強度の抑制効果の分布を確認でき、筐体内へ電波吸収体を配置して、より効果的に筐体内の電磁界を低減する検討に対して、今後のFDTD法解析の有用性を示すことができた。

4. おわりに

本論文では、電子機器の筐体として、方形空洞共振器に電波吸収材を配置した場合のQ値の変化をFDTD法を用いて計算し、測定値と比較することにより、近傍電磁界におけるQ値に着目した抑制効果評価法や、効果的な電磁界抑制効果に対する、FDTD法の有効性および有用性を検討した結果、次のことがわかった。

(1) 測定値と計算値において、今回の検討で用いたフェライト材を装荷したことによるQ値の低下率は90%前後であり、また、その差はそれぞれ低下率が変化した場合においても試料の装荷位置によらず、2%以下の違いで良好に一致することがわかり、本解析の有効性を確認した。

(2) 筐体側面に試料を装荷した場合、TE₁₀₁モードの場合には側面の中心に試料を装荷する程Q値が低下すること、また試料の装荷位置を高さのみ変えた場合にはQ値がほとんど変化しないのに対し、端からの距離を変えた場合には大きく変化することを確認した。

(3) 筐体の中央面の磁界強度分布を観察した結果、試料非装荷時と比較して、試料装荷時では磁界強度が小さく抑制されており、その抑制範囲は筐体内全体に及んでいることがわかった。そしてこの結果より、Q値の低減が筐体内全体のエネルギーの低減であることを磁界強度分布に着目し視覚的に確認した。

(4) GPOF法を用いることにより、計算時間が大幅に低減でき、一例として共振周波数の計算時間において、約770時間程度の時間を要する計算を、約24時間程度で行うことができることがわかった。

以上のことから、近傍電磁界におけるQ値に着目した抑制効果評価法や、筐体内にデバイス等を配置する際の近傍電磁界に対する、効果的な電磁界抑制効果の検討に対するFDTD法の有効性および有用性が確認できた。また、今後の課題として、さまざまな試料や筐体を選択した場合の電磁界強度の抑制の検討が考えられる。

(2001.12.6-受理)

文 献

- 1) A.R.Djordjijevic and T.K.Sarkar: "An Investigation of Delta-I Noise on Integrated Circuits", IEEE-Trans.EMC, Vol.35, No.2, pp.134-147, 1993

- 2) 原 敦, 笠井真理子, 横田 等, 中村 篤: “基板形状及びICの電気特性が給電系放射ノイズに与える影響”, 信学技報, EMCJ99-22, pp.35-41, 1999
- 3) 小野恭裕, 秋野直治, 篠原慎一, 佐藤利三郎: “パッケージに用いた複合磁性材料によるICからの電磁雑音の抑圧特性”, 信学技報, EMCJ99-80, pp.23-28, 1999
- 4) 和田修己, 古賀隆治, 福本幸弘: “IC/LSIのEMC特性測定における電源系デカップリング”, 信学技報, EMCJ99-101, pp.1-6, 1999
- 5) 中野 健, 芳賀 知, 橋本 修: “フェライト材を用いたLSIからの放射抑制検討”, EMCJ2001-62, pp.63-68, Oct.2001
- 6) 芳賀 知, 中野 健, 須藤俊夫: “LSI動作モードと遠方界放射への関連”, 信学技報, EMCJ2001-2, pp.7-12, Apr.2001
- 7) 松原 亮, 宮内啓次, 石田康広, 桑原伸夫, 徳田正満: “コプレーナストリップライン構造のプリント基板による放射電磁界抑制効果の検討”, 信学技報, EMCJ2001-45, pp.1-6, Aug.2001
- 8) T.Akio, et al.: “Reduction Method of Voltage Fluctuation of DC Power Supply in Digital IC”, IEICE Trans.on Communications, Vol.**E83B**, No.3, pp.622-625, Mar.2000
- 9) 津田文史郎, 小野裕司, 篠原慎一, 佐藤利三郎: “複合磁性シートの線路装着による伝導電磁雑音の低減効果”, 信学技報, EMCJ1999-95, pp.37-42, 1999
- 10) 吉田栄吉: “複合磁性シートを用いた高周波ノイズ対策”, 2000EMC・ノイズ対策技術シンポジウム, 4-2-1, 2000
- 11) 橋本康雄, 栗原 宏: “ノイズ対策としての電波吸収体「フレキシールド」”, 工業材料, Vol.**46**, No.10, pp.36-40, 1998
- 12) 橋本 修: “電波吸収体のはなし”, 日刊工業新聞社, 2001
- 13) 橋本 修, 阿部琢美: “FDTD時間差分法入門”, 森北出版, 1996
- 14) Y.Hua and T.K.Sarkar: “Generalized Pencil-of-Function Method for Extracting Poles of an EM System from Its Transient Response”, IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol.**37**, No.2, pp.229-234, 1989