

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 24 年 5 月 14 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560444

研究課題名（和文） EBG電波吸収板による電波強度分布リアルタイム計測装置の開発

研究課題名（英文） Development of real-time radio-wave power imager
by EBG absorber

研究代表者

八木谷 聡 (YAGITANI SATOSHI)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：30251937

研究成果の概要（和文）：本研究では、EBG（Electromagnetic Band Gap）構造を持つ薄板状の電波吸収体（EBG 電波吸収板）を用いて、吸収される高周波電波強度の板面上での 2 次元分布を計測する手法を検討した。700 MHz～2.7 GHz で吸収周波数を可変できる EBG 電波吸収板を設計、試作し、その吸収性能を解析した。それを用いて、約 35 cm 四方の面上に入射した電波パルス（強度及び偏波）の空間分布をリアルタイム（約 30 msec 毎）に計測することのできる、従来にはない電波強度分布計測装置を構築した。

研究成果の概要（英文）：A thin electromagnetic band-gap (EBG) absorber was employed to capture the 2-d image of absorbed radio-frequency (RF) power distribution. An EBG absorber tunable in the frequency range of 700 MHz-2.7 GHz was designed and fabricated, and its absorption performance was analyzed. The 2-d distribution of incident RF power as well as polarization on a 35-cm square area was captured and visualized in real time (every 30 msec).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：電波情報工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：電波強度分布、EBG、電波吸収体、電磁環境計測、可視化

1. 研究開始当初の背景

様々な電子機器から放射される電波（電磁波）ノイズが、実際にどこから発生しているかを特定するためには、機器周辺で電波ノイズの空間分布を計測することが必要である。そのために従来、電磁界センサを空間的に走査する装置（アンテナポジショナ等）が広く用いられてきた。しかし単一または複数のセ

ンサ位置を自動的に調整しながら 2 次元/3 次的に走査する機構が必要であり、またセンサを走査しながら各位置での計測を順次行うため、例えば数十 cm 程度の空間の計測に対して数分程度の時間が必要であった。近年の電子機器の高周波化・デジタル化に伴い、バースト的に短時間のみ放射されるような電波ノイズパルスが電磁環境に及ぼす影響が重要になっているが、そのような速いパル

スの空間分布を同時に計測することは不可能であった。

一方、従来にはない電磁気的特性を持つ人工媒質「メタマテリアル」の一つとして EBG (Electromagnetic Band Gap) 構造が注目されていた。薄板状の 2 次元 EBG 構造 (以下 EBG 板と呼ぶ) としては、例えば誘電体基板の表面に波長より十分小さいサイズの方角電極を並べ、それぞれの電極の中心から裏面のグラウンド板に向かってビア (ショートピン) を接続したマッシュルーム型がある。これは入射電波に対して等価的に LC 並列回路として働き、例えば数 cm 角の方角電極を並べ、各方形電極間に抵抗 R を接続することで GHz 帯の電波に対する薄型電波吸収体 (電波吸収板) として利用できることが知られていた。

研究代表者は、この EBG 電波吸収板に入射した電波の電力が、各方形電極をつなぐ抵抗により吸収されていることに着目し、それぞれの抵抗での消費電力を計測すれば、EBG 板面上に入射した電波強度の 2 次元空間分布を高速に計測できるはずであると着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、数 GHz の高周波電波を吸収できる EBG 板を用い、そこで吸収された電波強度の 2 次元分布を高感度、高分解能で高速に計測し、PC 画面に表示・可視化する装置を構築した。それにより数十 cm 角の領域において msec オーダの電波パルスの空間分布を計測する手法を確立することを目的とした。

これにより従来はシミュレーションでしか解析することができなかった、機器から放射される速い電波ノイズパルスの伝搬の様子を実際に計測することができる、また本装置は EBG 板を電波吸収体として利用しているので、被測定装置から放射される電波の空間分布を (反射等により) 乱すことなく計測できる、などの利点が考えられる。これらは電磁環境工学 (EMC) やアンテナ・伝搬の学術分野において電波ノイズパルスの発生・伝搬理論を検証する上で非常に有用であると期待される。

3. 研究の方法

本研究で用いた EBG 電波吸収板の原理的な構造を図 1 に示す。隣接する方形電極 (マッシュルーム) 間が 377Ω の抵抗で接続されている。マッシュルームサイズが電波の波長に対して十分小さいとき、EBG 板の断面図及びその簡易的な等価回路は図 2 のようになる。ビアを介して表面の方形電極とグラウンド間

に流れる電流により与えられるインダクタンス L と、方形電極間の空隙により与えられるキャパシタンス C に並列に、抵抗 R が接続されている。垂直に入射する電波から見ると、この EBG 板は LCR 並列回路で構成される表面インピーダンスを持つ。LC 共振周波数では L と C の並列部のインピーダンスが無限大となるため、EBG 板は等価的に表面抵抗 R を持つシート抵抗となる。 R を 377Ω に選ぶと、垂直入射電波の波動インピーダンス $Z_0 (= 377 \Omega)$ と整合して電波を吸収する。以上の原理はいわゆる $\lambda/4$ 型電波吸収体と同じであるが、EBG 電波吸収板では、その厚さを波長よりも十分小さくすることが可能である。

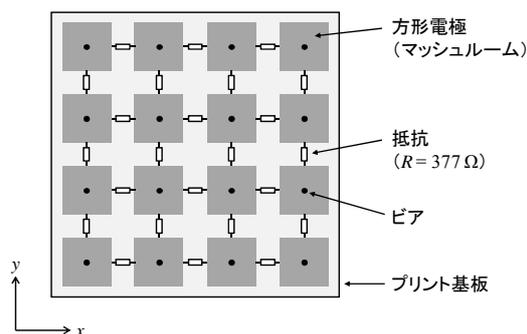


図 1 : EBG 電波吸収板

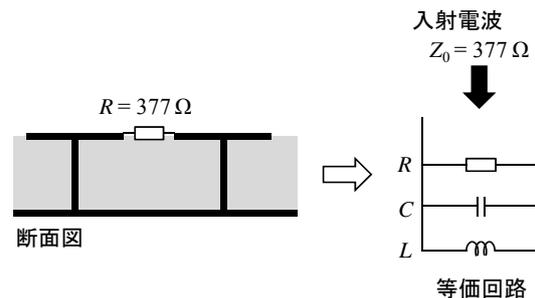


図 2 : EBG 電波吸収板の等価回路

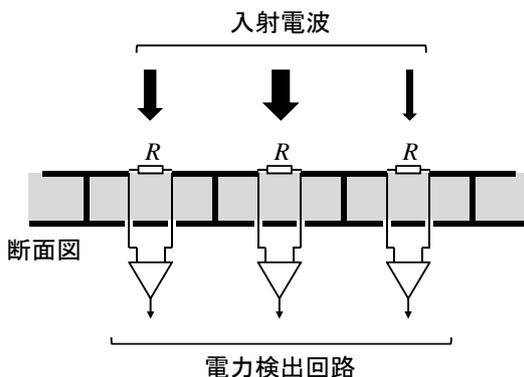


図 3 : 吸収電力の計測

共振周波数では EBG 構造の LC 並列回路のインピーダンスが無限大になるため、入射電波のエネルギーは表面に配置された抵抗のみに集中し、そこで吸収 (消費) される。図 1 の EBG 電波吸収板に x 及び y 方向に電界偏

波を持つ電波が入射したとき、それぞれの電力はEBG板表面でマッシュルームをx及びy方向に接続する抵抗により吸収される。このとき、図3のように各抵抗で消費される電力を検出すれば、EBG板表面での吸収電力の2次元分布、すなわち入射した電波強度の2次元分布を計測できる。電力検出回路はEBG構造への影響を防ぐためにEBG板の裏面に設置する。さらに上述のようにx及びy方向の抵抗で吸収される電力をそれぞれ検出することで、入射電波の強度分布のみならず、その偏波方向も同時に計測することが可能となる。

EBG構造のLC共振周波数は、マッシュルーム構造自体により形成されるインダクタンスL及びキャパシタンスCにより決まり、EBG板の形状及びサイズにより固定されてしまう。その吸収特性は一般に鋭い(狭帯域な)ため、そのままでは共振周波数付近の電波しか計測することができない。そこで可変容量ダイオードにより共振周波数を制御する手法を用いた。各マッシュルーム間の抵抗と並列に高周波可変容量ダイオードを挿入してバイアス電圧を印加することで、EBG板のキャパシタンスを変化させ、LC共振周波数(すなわち計測したい入射電波の周波数)を制御する。

4. 研究成果

(1) EBG電波吸収板の吸収特性の解析

今回試作を行ったEBG電波吸収板の一例を示す。サイズ347mm×347mm、厚さ1.6mmのプリント基板にEBG構造が形成されており、裏面にはさらに電力検出回路基板が設置されている。表面に33×33=1089個の方形電極(マッシュルーム)を配置し、各方形電極のサイズは10mm角、電極間のギャップ長は0.5mm、セルサイズ(配列周期)は10.5mmとした。この試作EBG板では共振周波数を700MHz~2.7GHzに変化させることができる。

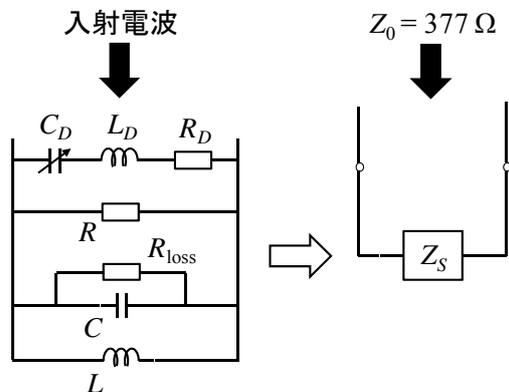


図4：試作EBG板の等価回路

この試作EBG板の簡易等価回路は図4のようになる。L及びCはマッシュルーム構造で決まるインダクタンス及びキャパシタンスである。CD、LD及びRDは可変容量ダイオードのキャパシタンス、寄生インダクタンス及び等価直列抵抗を表し、Rは電波を吸収するためにEBG板表面に装荷した抵抗である。また、用いた誘電体基板(FR-4)の誘電損失を抵抗分R_{loss}としてCに並列に挿入してある。この等価回路を伝送線路的に見て、上側に自由空間の波動インピーダンス($Z_0 = 377 \Omega$)を持った入射波源が接続されていると考えると、入射電波の反射係数が理論的に計算できる。なおここでは、図4の全ての素子を考慮した等価表面インピーダンスZ_Sが377Ωと整合するように、EBG板表面への装荷抵抗Rは620Ωに選んだ。

試作EBG板の電波吸収特性を電波暗室にて測定し、電磁界シミュレーション及び等価回路で得られた理論計算値との比較を行った。図5に垂直入射電波に対するそれぞれの反射係数(|S₁₁|)を示す。実線が実測値、破線がシミュレーション、薄線が等価回路による計算結果であり、可変容量ダイオードのCDをいくつかの値に変化させたときの結果を表している。3.で述べたように、CDの値に応じて共振周波数(最も効率よく入射電波を吸収する周波数であり、反射係数が極小値をとる)を変化させられることが確認できる。

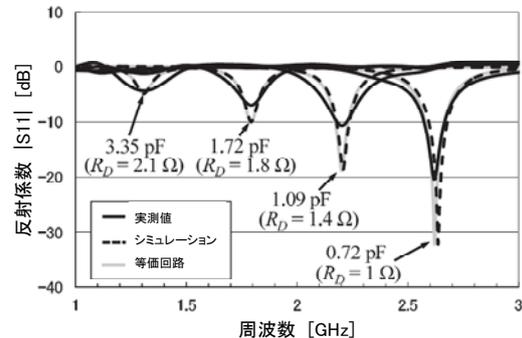


図5：電波吸収特性

ここでは共振周波数が下がるにつれて反射係数が大きくなる(吸収量が小さくなる)様子が見られているが、これは可変容量ダイオードの等価直列抵抗R_Dの影響である。等価回路(薄線)とシミュレーション(破線)は良く一致しており、等価回路解析の有効性を示している。一方、実測値(実線)においては共振周波数における吸収特性が緩やかになっているが、その原因としては、ネットワークアナライザを用いた反射特性の計測において、EBG板からの反射波パルスのみを分離して取り出すためのタイムゲート時間幅の設定が不十分であったため、共振周波数付近の急峻な変化を捉えられていないためと考えられる。

一方で、EBG 構造に高周波電波（平面波）が斜めに入射した場合の吸収特性を解析した。理論式及び電磁界シミュレーションに基づいて TE 入射及び TM 入射の場合の反射係数（吸収量）を解析し、吸収周波数及び吸収量の入射角依存性を評価した。59 cm×49 cm の大型 EBG 板を試作して電波暗室にて斜め入射電波に対する反射特性を計測した。理論解析、シミュレーション及び計測結果を比較したところ多少の差異が見られたが、これは理論解析やシミュレーションにおいて基板の誘電率や損失を正確に考慮できていないためであると考えられる。

さらに、EBG 構造に高周波電波（球面波）が入射したときの吸収量を評価するために、入射球面波を異なる入射角を持つ多数の平面波に展開し、各々の平面波に対する反射率を考慮して再合成することで、球面波の反射・吸収特性を計算する手法を検討した。本研究期間中においては、誘電体による球面波の反射・吸収を評価する際にこの手法が有効であることを確認したにとどまったため、今後はこの手法を EBG 電波吸収板に適用する必要がある。

(2) 電波強度分布計測・可視化装置の構築

本研究では、(1)で試作した EBG 電波吸収板を用いた 2 次元電波強度分布計測・可視化装置の構築を行った。本装置は EBG 板、データ収集・制御回路及び PC で構成されている。EBG 板の裏面には 8 行×8 列 = 64 点の電力検出回路（x 及び y 偏波用の 2 組）が配置されており、表面の各セルで吸収された電力及び偏波の 2 次元分布が計測される。電力検出回路としては RF 信号用パワーディテクタ（検出レベルが -70 ~ +10 dBm の広帯域対数増幅器）を用いている。計測された信号はデータ収集部に集められて A/D 変換され、PC へと転送される。PC ではデータが処理され、2 次元の電波強度分布画像として画面上に可視化される。また PC からは EBG 電波吸収板の共振周波数（可変容量ダイオードのバイアス電圧）やデータ取得タイミングなどをコントロールできる。本装置では最速で 1 秒あたり約 30 回（30 msec 毎）の分布計測および画像表示が可能である。

図 6 のように電波暗室にて標準ダイポールアンテナから 0 dBm の水平（x 方向）偏波を放射し、ある距離 d だけ離れた垂直面に EBG 板を置いて、裏面に設置された水平（x 方向）偏波計測用の電力検出回路により電波強度分布を計測した。

図 7 に電波強度分布の計測結果を示す。実線、破線及び薄線は、それぞれ距離 10 cm、30 cm、50 cm において、送信アンテナの放射指向性を考慮して斜め入射の平面波に対して求めた、1 セルあたり吸収されると考えら

れる電力（共振時）の理論値であり、●▲■がそれぞれの実測値（共振時）を表している。図 (a) 及び (b) は 1 GHz における x 軸上（TM モード）及び y 軸上（TE モード）の電力分布を、図 (c) (d) は 1.6 GHz における分布を表す。実測値の空間分布の形状はおおむね理論値と一致しており、本手法による電波強度空間分布計測の有効性を示している。実測値の絶対レベルには若干のばらつきが見られるが、これらの周波数においては EBG 板の吸収性能が十分でないこと（図 5 参照）や、EBG 板外周のエッジ部分による入射電波の散乱の影響であると考えられる。

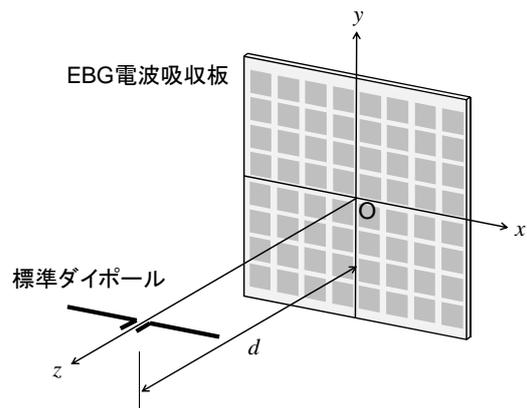


図 6：EBG 板による電波強度計測実験

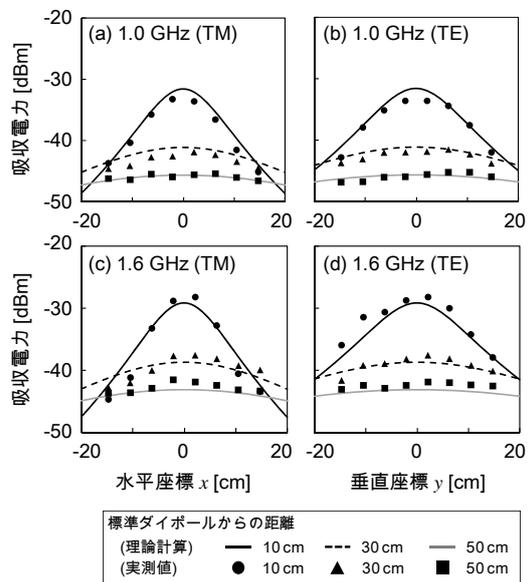


図 7：電波強度分布計測結果

さらに、EBG 電波吸収板の裏面に、電波強度を計測する検出器に加え、隣り合う計測点間の電波の位相差を検出するための回路を付加することで、高周波電波（平面波）の到来方向を推定できる EBG 電波吸収板を試作した。電波暗室にて 2 GHz の電波の到来方向推

定実験を行い、ほぼ理論通りの性能を得られることを確認した。

以上の成果は電子情報通信学会論文誌や技術報告に投稿し、採録された。また国際及び国内学会、展示会等において発表し、大きな反響が得られた。特に本研究で構築した電波強度分布計測・可視化装置は、国内外でも前例のないものであり、高周波電波強度の空間分布を手軽に計測、可視化できる手法として、学界だけでなく産業界からも大きく注目されている。

今後は、球面波入射を厳密に考慮した EBG 電波吸収板による電波吸収（計測）特性の解析、また精確な位相計測機能の付加による入射電波の波源位置の探索手法の検討を行いたいと考えている。

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 5 件）

- ① Yagitani, S., Katsuda, K., Nojima, M., Yoshimura, Y., Sugiura, H., Imaging radio-frequency power distributions by an EBG absorber, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol.E94-B, 2011, 2306-2315
DOI: 10.1587/transcom.E94.B.2306
- ② Yagitani, S., Katsuda, K., Tanaka, R., Nojima, M., Yoshimura, Y., Sugiura, H., A tunable EBG absorber for radio-frequency power imaging, Proc. XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium, 査読有, 2011, CD-ROM(4 pages)
DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6050776
- ③ 勝田啓悟, 八木谷聡, 田中諒, 能島正行, 吉村慶之, 杉浦宏和, 周波数可変型 EBG 電波吸収体の等価回路による解析, 電子情報通信学会技術報告, 査読無, EMCJ2010-114, 2011, 85-90
- ④ Katsuda, K., Yagitani, S., Morita, S., Nojima, M., Yoshimura, Y., Sugiura, H., A radio wave field distribution imager based on EBG absorber, Proc. 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 査読有, 2010, CD-ROM(1 page)
- ⑤ 八木谷聡, 勝田啓悟, 清水貴夫, 山中雄介, 森田聖史, 吉村慶之, 杉浦宏和, EBG 電波吸収体による 2 次元電波強度分布計測・可視化装置, 電子情報通信学会技術報告, 査読無, EMCJ2009-106, 2010, 47-52

〔学会発表〕（計 7 件）

- ① 能島正行, 八木谷聡, EBG 構造を持つ周波数可変型電波吸収体の斜め入射特性, IEEE APS Nagoya Chapter 学生発表会, 2011 年 11 月 5 日, 金沢工業大学 (石川県)
- ② 白木成児, 八木谷聡, 平木大輔, 能島正行, 吉村慶之, 杉浦宏和, EBG 電波吸収体による高周波波源探索システムの検討, 平成 23 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2011 年 9 月 17 日, 福井大学 (福井県)
- ③ Yagitani, S., Katsuda, K., Tanaka, R., Nojima, M., Yoshimura, Y., Sugiura, H., A tunable EBG absorber for radio-frequency power imaging, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium, 2011.8.16, The Istanbul Convention & Exhibition Centre (トルコ)
- ④ 勝田啓悟, 八木谷聡, 田中諒, 能島正行, 吉村慶之, 杉浦宏和, 周波数可変型 EBG 電波吸収体の等価回路による解析, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2011 年 1 月 28 日, 熊本高等専門学校 (熊本県)
- ⑥ Katsuda, K., Yagitani, S., Morita, S., Nojima, M., Yoshimura, Y., Sugiura, H., A radio wave field distribution imager based on EBG absorber, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010.9.24, 富山国際会議場 (富山県)
- ⑤ 森田聖史, 八木谷聡, 田中栄一, 波源電流源分布推定・可視化装置の開発, 電子情報通信学会総合大会, 2010 年 3 月 19 日, 東北大学 (宮城県)
- ⑥ 勝田啓悟, 八木谷聡, 森田聖史, 能島正行, 吉村慶之, 杉浦宏和, EBG 電波吸収体の吸収特性の解析 (その 2), 電子情報通信学会総合大会, 2010 年 3 月 17 日, 東北大学 (宮城県)
- ⑦ 八木谷聡, 勝田啓悟, 清水貴夫, 山中雄介, 森田聖史, 吉村慶之, 杉浦宏和, EBG 電波吸収体による 2 次元電波強度分布計測・可視化装置, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2010 年 1 月 21 日, 琉球大学 (沖縄県)

〔その他〕

ホームページ等

<http://reg.is.t.kanazawa-u.ac.jp/study/visual/top.html>

展示会への出展等（計 6 件）

- ① 八木谷聡, 電磁波可視化センサ, イノベーション・ジャパン 2011 (出展), 2011 年 9 月 21 日～22 日, 東京国際フォーラム

- ム（東京都）
- ② 八木谷聡，電磁界コンパス，イノベーション・ジャパン 2010（出展），2010年9月29日～10月1日，東京国際フォーラム（東京都）
 - ③ 八木谷聡，”見えない電磁波を視る”技術，金沢大学イノベーション創成センター協力会総会（出展），2010年6月17日，KKRホテル金沢（石川県）
 - ④ 八木谷聡，見えない電磁波を視る技術，第159回産学交流サロン（招待講演），2010年4月23日，横浜メディア・ビジネスセンター（神奈川県）
 - ⑤ 八木谷聡，”見えない電磁波源を視る”技術，金沢大学イノベーションフォーラム2010（招待講演及び出展），2010年3月8日，KKRホテル金沢（石川県）
 - ⑥ 八木谷聡，電波強度分布計測・可視化装置，イノベーション・ジャパン 2009（出展及び講演），2009年9月16日～18日，東京国際フォーラム（東京都）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八木谷 聡 (YAGITANI SATOSHI)
金沢大学・電子情報学系・教授
研究者番号：30251937

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

吉村 慶之 (YOSHIMURA YOSHIYUKI)
石川県工業試験場・電子情報部・
研究主幹

杉浦 宏和 (SUGIURA HIROKAZU)
石川県工業試験場・電子情報部・
主任技師