

氏 名	北 川 真 也
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博理工甲 第19号
学位授与の日付	2016年3月31日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号) 第4条第2項該当
学位論文題目	電波吸収/反射/透過の切替板とそのアンテナへの応用に 関する研究
論文審査委員	主 査 教 授 橋 本 修 副 査 教 授 林 洋 一 副 査 教 授 松 谷 康 之 副 査 東京工業大学准教授 西 方 敦 博

## 論 文 の 内 容 の 要 旨

北 川 真 也

電波が物体に入射した場合、その電波は自由空間と物体の境界において反射、透過、吸収が生じる。これらの現象は物体の誘電率及び透磁率等に依存し、それらは電波の波長に対して小さい分子構造等によって決定される。近年は波長に対して小さい構造を人工的に構成するメタマテリアルの研究が盛んに進められており、さらにメタマテリアルにアクティブ素子を組み入れることにより物質の特性をアクティブに制御する研究も進められている。

アクティブ素子を組み入れたメタマテリアルでは、アクティブ素子の制御により入射電波に対して反射、透過、吸収の切替え動作が可能となる。従来の研究では、吸収/反射の切替板については実験的に実現されているが、設計手法に関しては報告された例はない。また、反射/透過の切替板については報告例があるものの、吸収/透過の切替板については報告されていない。そこで、本研究では吸収/反射、吸収/透過の切替板の設計手法及びその応用について検討した。吸収/反射の切替板は反射波の振幅変調等への応用が考えられ、吸収/透過の切替板は壁または窓に適用した無線通信の

シールド制御等への応用が考えられる。さらに、両切替板の応用例としては、アンテナ構造部への適用による周辺の電磁環境改善が考えられ、本研究では設計・試作した両切替板のアンテナ構造部への応用についても検討した。

すなわち、電磁環境が悪化する要因の一つとして壁などの周辺からの反射波があり、アンテナも反射体として周辺の電磁環境を悪化させる要因となるが、アンテナ構造部に電波吸収体を適用するとアンテナ性能が劣化する。そこで、アンテナ構造部に切替板を適用して切替え動作を行うことにより、電波送受信時はアンテナ性能を確保し、電波送受信時以外では反射波を低減することが可能となる。

このような背景を踏まえ、本論文では電波吸収/反射切替板及び電波吸収/透過切替板を設計・試作し、アンテナ構造部としてアンテナリフレクタとアンテナレドームへの適用について検討した。具体的には、電波吸収/反射切替板を設計及び試作評価し、ダイポールアンテナのリフレクタに適用した場合の放射パターン及び反射波低減効果について検討した。また、電波吸収/透過切替板を設計及び試作評価し、パッチアンテナのレドームに適用した場合の放射パターン及び反射波低減効果について検討した。

このように本論文では、電波吸収/反射切替板の設計・試作及びそのアンテナリフレクタへの適用、電波吸収/透過切替板の設計・試作及びそのアンテナレドームへの適用について検討を行ったものであり、全6章から構成されている。

第1章「序論」では、メタマテリアルの研究動向及び電波吸収/反射/透過の切替板について説明した上で、その応用例の1つとしてアンテナへの応用を示し、本研究の目的及び意義、さらに本論文の構成について述べた。

第2章「電波吸収/反射切替板の設計」では、電波吸収体と反射板を切替え可能な電波吸収/反射切替板の設計及び試作評価した。設計周波数は、気象レーダ、衛星通信等で用いられている9GHzとした。また、電波吸収体としては一般的な吸収性能として用いられる-20dB以下の反射率を目標値とした。さらに、アンテナ構造部として用いられるレドームに一般的に要求される性能が挿入損失1dB以下であることから、反射板としては同様の損失となる-1dB以上の反射率を目標値とした。

まず、反射特性の切替えに用いるダイオードの特性を計測した結果、ダイオードがOFF状態では0.1pFのキャパシタと40Ωの抵抗の直列回路、ON状態では0.3nHのイ

ンダクタと $1.5\Omega$ の抵抗の直列回路であることがわかった。これらの特性を用いて、基板表面にダイオードを組み込んだ切替板について検討し、等価回路を用いて切替板の構造による反射率への影響を考察した。そして、切替板を試作評価した結果、ダイオード OFF 状態では $-21\text{dB}$ 、ON 状態では $-0.1\text{dB}$ の反射率となり、電波吸収体と反射板で切り替えられていることを確認した。

次に、垂直偏波に対しては電波吸収体と反射板の切替え動作、水平偏波に対しては電波吸収体として動作するように、両偏波に対応した切替板について検討した。その切替板の構造では、垂直偏波に対する切替え動作のために垂直方向にダイオードを配列し、水平偏波に対する吸収動作のために水平方向にチップ抵抗を配列している。そして、それぞれの偏波に対して設計し、試作評価した。垂直偏波に対してはダイオードが OFF 状態では $-25\text{dB}$ 、ON 状態では $-0.7\text{dB}$ の反射率で切替え動作をしており、水平偏波に対してはダイオードの状態に関わらず $-20\text{dB}$ 以下の反射率であり電波吸収体として動作していることを確認した。

これらの結果より、垂直偏波に対しては電波吸収体と反射板の切替え動作、水平偏波に対しては電波吸収体として動作する電波吸収/反射切替板が設計と概ね一致した特性が得られたことから、吸収特性を両偏波に対応した切替板が実現可能であることを示した。

(学術雑誌 [1], [3], 国際会議議事録 [1], [4])

第3章「アンテナリフレクタへの適用」では、切替板の応用例としてのアンテナ周辺の電磁環境改善の観点から、第2章で試作した電波吸収特性を両偏波に対応させた電波吸収/反射切替板をダイポールアンテナのリフレクタに適用し、アンテナ性能及び反射波低減効果について検討した。

最初に、ダイオードを ON 状態で反射板として動作させた切替板をダイポールアンテナのリフレクタに適用し、金属板のリフレクタの場合と比較して放射パターンを評価した。正面方向の利得は切替板をリフレクタとした場合は $6.7\text{dBi}$ 、金属板をリフレクタとした場合は $6.9\text{dBi}$ であった。放射パターンも同等な結果が得られたことからアンテナリフレクタに適用した切替板は金属板と同等なアンテナリフレクタとして動作していることを確認した。

一方、ダイオードを OFF 状態で電波吸収体として動作させた切替板をアンテナリフレクタに適用し、金属板のリフレクタの場合と比較して反射波低減効果を評価した。

切替板のリフレクタの場合は、垂直偏波に対しては18dB、水平偏波に対しては16dBの反射波低減効果が得られ、両偏波の入射波に対して反射波を低減できることを確認した。

これらの結果より、切替板をアンテナリフレクタに適用し、電波送受信時には切替板を反射板として動作させて金属板と同等のアンテナ性能を確保し、電波送受信時以外には切替板を電波吸収体として動作させて両偏波の入射波に対して反射波を低減可能であることを示した。

(学術雑誌 [2], 国際会議議事録 [2], [3])

第4章「電波吸収/透過切替板の設計」では、電波吸収体と透過板を切替可能な電波吸収/透過切替板の設計及び試作評価した。電波吸収/反射切替板と同様に設計周波数は9GHzとし、電波吸収体としては-20dB以下の反射率、透過板としては-1dB以上の透過率を目標値とした。

本切替板の構造は切替板の両面に金属のパターン及びダイオードが配置されており、垂直偏波に対してダイオードがOFF状態で電波吸収体として動作し、ダイオードがON状態で透過板として動作するように設計し、試作評価した。

試作した切替板はダイオードOFF状態では反射率-27.1dB、透過率-17.1dBとなり、入射した電波のエネルギーのうち0.2%が反射、2%が透過していることから97.8%が吸収されており、電波吸収体として動作していることを確認した。一方、ダイオードON状態では透過率が-0.3dBとなり、入射した電波のエネルギーのうち93%が透過していることから透過板として機能していることを確認した。

これらの結果より、電波吸収体と透過板の切替え可能な電波吸収/透過切替板が設計と概ね一致した特性が得られたことから、切替板が実現可能であることを示した。

(学術雑誌 [4], 国際会議議事録 [5])

第5章「アンテナレドームへの適用」では、電波吸収/透過切替板の電磁環境改善の応用例として、第4章で試作した電波吸収/透過切替板をパッチアンテナのレドームに適用し、アンテナ性能及び反射波低減効果について検討した。

まず、ダイオードをON状態で透過板として動作させた切替板をアンテナレドームに適用し、レドームなしのアンテナ単体の場合と比較して放射パターンを評価した。正面方向の利得はレドームありの場合は11.5dBi、レドームなしの場合は11.3dBiであ

り，放射パターンもほぼ同等な結果が得られたことから，透過板として動作させた切替板はアンテナ性能への影響が小さい良好なレドームとして機能していることを確認した。

また，ダイオードを OFF 状態で電波吸収体として動作させた切替板をアンテナレドームに適用し，レドームなしの場合と比較して反射波低減効果を評価した結果，レドームによって25dBの反射波低減効果が得られることを確認した。

これらの結果より，切替板をレドームに適用し，電波送受信時には切替板を透過板として動作させてアンテナ性能を確保し，電波送受信時以外には切替板を電波吸収体として動作させて反射波を低減可能であることを示した。

第6章「総括」では，本論文の総括を行い，今後の展望を述べた。

## 発表論文

本研究に関する論文

### 【学術雑誌】

(査読のあるもの)

1. S. Kitagawa, R. Suga, and O. Hashimoto, “A switchable microwave reflector using pin diodes,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E97-C, no. 7, pp. 683-688, July 2014.
2. 北川真也，須賀良介，橋本修，“電波吸収／反射切替板を用いた X 帯アレーアンテナの電波反射低減効果に関する検討,” 信学論 (C), vol.J97-C, no.12, pp.542-548, Dec. 2014.
3. S. Kitagawa, R. Suga, K. Araki, and O. Hashimoto, “Dual-polarization RCS reduction of X-band antenna using switchable reflector,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E98-C, no.7, pp. 701-708, July 2015.
4. 北川真也，須賀良介，橋本修，荒木純道，“ダイオードを用いた電波吸収/透過切替板,” 信学論 (C), vol.J98-C, no.12, Dec. 2015. (採録決定)

(査読の無いもの)

1. 北川真也，須賀良介，橋本修，“集中定数素子を用いた位相制御による電波反射低減効果の検討,” 信学ソ大, C-2-66, p.91, Sept. 2013.

2. 北川真也, 須賀良介, 橋本修, “ダイオードを用いた電波反射及び吸収特性の能動的制御に関する基礎的検討,” 信学技報, EMCJ2013-89, pp.169-174, Oct. 2013.
3. 北川真也, 須賀良介, 荒木純道, 橋本修, “吸収特性を両偏波に対応した電波吸収/反射切替板の設計,” 信学ソ大, C-2-53, p.76, Sept. 2014.
4. 北川真也, 須賀良介, 荒木純道, 橋本修, “電波吸収/透過切替板の試作実験,” 信学総大, C-2-32, p.52, Mar. 2015.
5. 北川真也, 須賀良介, 橋本修, 荒木純道, “電波吸収/透過切替板のレドームへの適用に関する検討,” 信学技報 MW2015-43, pp.29-34, June 2015.

#### 【国際会議議事録】

(査読のあるもの)

1. S. Kitagawa, R. Suga, and O. Hashimoto, “Electrically switchable reflector implemented on dielectric substrate,” *2013 Thailand-Japan Microwave*, TU2-20, Dec. 2013.
2. S. Kitagawa, R. Suga, and O. Hashimoto, “A novel switchable reflector applied to antenna reflector for antenna radar cross section reduction,” *2014 IEEE Radar Conference*, 9232, pp. 800-802, May 2014.
3. S. Kitagawa, R. Suga, and O. Hashimoto, “Switchable reflector for radar cross section reduction of X-band dipole array,” *15th International Radar Symposium*, W2G.3, pp. 420-423, June 2014.
4. S. Kitagawa, R. Suga, K. Araki, and O. Hashimoto, “Switchable reflector for dual-polarized antenna radar cross section reduction,” *2014 IEEE International Microwave and RF Conference*, T41B-03, pp. 201-204, Dec. 2014.
5. S. Kitagawa, R. Suga, K. Araki, and O. Hashimoto, “Active absorption/transmission FSS using diodes,” *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, pp.1538-1541, Aug. 2015.

その他の公表論文

#### 【学術雑誌】

(査読の無いもの)

1. 北川真也, 角田亮太, 須賀良介, 橋本修, “2種類の周期構造を用いた位相制御

- による電波反射低減効果の検討,” 信学ソ大, C-2-65, p.90, Sept. 2013.
2. 北川真也, 須賀良介, 橋本修, “ダイポールアンテナのレーダ反射断面積に関する基礎的検討,” 信学総大, B-4-21, p.359, Mar. 2014.
  3. 角田亮太, 北川真也, 須賀良介, 橋本修, “3種類の矩形パッチによる垂直入射における電波反射低減効果の広帯域化の検討,” 信学総大, C-2-50, p.80, Mar. 2014.
  4. 北川真也, 須賀良介, 橋本修, “再放射の干渉キャンセルによるダイポールアンテナの RCS 低減に関する検討,” 信学技報, EST2014-7, pp.35-40, May 2014.
  5. 角田亮太, 北川真也, 須賀良介, 橋本修, “金属パターン配列を用いた位相干渉による反射波低減周波数の広帯域化に関する検討,” 信学技報, EST2014-8, pp.41-45, May 2014.
  6. 角田亮太, 北川真也, 須賀良介, 橋本修, “金属パターンアレーを用いた反射波低減周波数の広帯域化に関する検討,” 信学ソ大, C-2-50, p.73, Sept. 2014.
  7. 角田亮太, 北川真也, 須賀良介, 橋本修, “パッチアンテナの終端負荷の最適化による RCS 低減,” 信学総大, C-2-31, p.51, Mar. 2015.
  8. 北川真也, 須賀良介, 橋本修, 荒木純道, “パッチアレーアンテナの RCS に関する等価モデルの基礎的検討,” 信学技報, EST2015-7, pp.33-38, May 2015.
  9. 北川真也, 須賀良介, 橋本修, 荒木純道, “表面インピーダンスを用いた反射板付ダイポールアレーの RCS 解析に関する検討,” 信学ソ大, C-15-11, p.202, Sept. 2015.

#### 【国際会議議事録】

(査読のあるもの)

S. Kitagawa, R. Suga, and O. Hashimoto, “Design of dipole antenna with reflector for RCS reduction using reradiation interference cancellation,” *Asia-Pacific Microwave Conference 2014*, FR3G-38, pp.1393-1395, Nov. 2014.

#### 審査の結果の要旨

電波が物体に入射した場合、その電波は自由空間と物体の境界において反射、透過、吸収が生じる。これらの現象は物体の誘電率及び透磁率等に依存するものであるが、金属パターンの構造を用いて周波数によって反射と透過を制御する周波数選択板

(FSS : Frequency Selective Surface) がシールド材料等への応用に向けて多くの研究が報告されている。また、電波吸収体に FSS を組み込み電波吸収特性を制御または薄型化を実現した研究も報告されている。

さらに近年の研究では、それらの構造にアクティブ素子を組み込むことにより、反射または透過特性をアクティブに制御する研究が報告されている。これらの研究では、同一周波数においてアクティブ素子の制御により入射電波に対して吸収、反射または透過の切替え動作が可能となる。従来の研究では、吸収/反射の切替板については実験的に実現されているが、設計手法に関しては報告された例はない。また、反射/透過の切替板については報告例があるものの、吸収/透過の切替板については報告されていない。そこで、本研究では吸収/反射、吸収/透過の切替板の設計手法及びその応用について検討している。吸収/反射の切替板は反射波の振幅変調等への応用が考えられ、吸収/透過の切替板は壁または窓に適用した無線通信のシールド制御等への応用が考えられる。さらに、両切替板の応用例としては、アンテナ構造部への適用による周辺の電磁環境改善が考えられ、本研究では設計・試作した両切替板のアンテナ構造部への応用についても検討している。

電磁環境が悪化する要因の一つとして壁などの周辺からの反射波があり、アンテナも反射体として周辺の電磁環境を悪化させる要因となるが、アンテナ構造部に電波吸収体を適用するとアンテナ性能が劣化する。そこで、アンテナ構造部に切替板を適用して切替え動作を行うことにより、電波送受信時はアンテナ性能を確保し、電波送受信時以外では反射波を低減することが可能となる。

このような背景を踏まえ、本論文では電波吸収/反射切替板及び電波吸収/透過切替板を設計・試作し、アンテナ構造部としてアンテナリフレクタとアンテナレドームへの適用について検討している。具体的には、電波吸収/反射切替板を設計及び試作評価し、ダイポールアンテナのリフレクタに適用した場合の放射パターン及び反射低減効果について検討している。そして、電波吸収/透過切替板を設計及び試作評価し、パッチアンテナのレドームに適用した場合の放射パターン及び反射波低減効果を検討している。

このように本論文では、電波吸収/反射切替板の設計・試作及びそのアンテナリフレクタへの適用、電波吸収/透過切替板の設計・試作及びそのアンテナレドームへの適用について検討を行ったものであり、全6章から構成されている。

第1章「序論」では、FSS等の研究動向及び電波吸収/反射/透過の切替板につい

て説明した上で、その応用例の1つとしてアンテナへの応用を示し、本研究の目的及び意義、さらに本論文の構成について述べている。

第2章「電波吸収/反射切替板の設計」では、電波吸収体と反射板を切替え可能な電波吸収/反射切替板の設計及び試作評価している。設計周波数は、気象レーダ、衛星通信等で用いられている9GHzとしている。また、電波吸収体としては一般的な吸収性能として用いられる $-20\text{dB}$ 以下の反射率を目標値としている。さらに、レドームに一般的に要求される性能が挿入損失 $1\text{dB}$ 以下であることから、反射板としては同様の損失となる $-1\text{dB}$ 以上の反射率を目標値としている。

まず、切替えに用いるダイオードの特性を計測した結果、ダイオードがOFF状態では $0.1\text{pF}$ のキャパシタと $40\Omega$ の抵抗の直列回路、ON状態では $0.3\text{nH}$ のインダクタと $1.5\Omega$ の抵抗の直列回路となった。そして、これらの特性を用いて、ダイオードを組み込んだ切替板について検討し、等価回路を用いて切替板の構造による反射率への影響を考察している。そして、切替板を試作評価した結果、ダイオードOFF状態では $-21\text{dB}$ 、ON状態では $-0.1\text{dB}$ の反射率となり電波吸収体と反射板で切り替えられていることを確認している。

次に、垂直偏波に対しては電波吸収体と反射板の切替え動作、水平偏波に対しては電波吸収体として動作するように、両偏波に対応した切替板について検討している。その切替板の構造では、垂直偏波に対する切替え動作のために垂直方向にダイオードを配列し、水平偏波に対する吸収動作のために水平方向にチップ抵抗を配列している。そして、それぞれの偏波に対して設計し、試作評価している。垂直偏波に対してはダイオードがOFF状態では $-25\text{dB}$ 、ON状態では $-0.7\text{dB}$ の反射率で切替え動作をしており、水平偏波に対してはダイオードの状態に関わらず $-20\text{dB}$ 以下の反射率であり電波吸収体として動作していることを確認している。

これらの結果より、電波吸収体と反射板の切替え動作、水平偏波に対しては電波吸収体として動作する電波吸収/反射切替板が設計と概ね一致した特性が得られたことから、吸収特性を両偏波に対応した切替板が実現可能であることを示している。

第3章「アンテナリフレクタへの適用」では、切替板の応用例としてのアンテナ周辺の電磁環境改善の観点から、第2章で試作した電波吸収特性を両偏波に対応させた電波吸収/反射切替板をダイポールアンテナのリフレクタに適用し、アンテナ性能及び反射波低減効果について検討している。

最初に、ダイオードをON状態で反射板として動作させた切替板をダイポールアン

テナのリフレクタに適用し、金属板のリフレクタの場合と比較して放射パターンを評価している。正面方向の利得は切替板をリフレクタとした場合は6.7dBi、金属板をリフレクタとした場合は6.9dBiであった。放射パターンも同等な結果が得られたことからアンテナリフレクタに適用した切替板は金属板と同等なアンテナリフレクタとして動作していることを確認している。

一方、ダイオードを OFF 状態で電波吸収体として動作させた切替板をアンテナリフレクタに適用し、金属板のリフレクタの場合と比較して反射波低減効果を評価している。切替板のリフレクタの場合は、垂直偏波に対しては18dB、水平偏波に対しては16dB の反射波低減効果が得られ、両偏波の到来波に対して反射波を低減できることを確認している。

これらの結果より、切替板をアンテナリフレクタに適用し、電波送受信時には切替板を反射板として動作させて金属板と同等のアンテナ性能を確保し、電波送受信時以外には切替板を電波吸収体として動作させて両偏波の到来波に対して反射波を低減可能であることを示している。

第4章「電波吸収/透過切替板の設計」では、電波吸収体と透過板を切替可能な電波吸収/透過切替板の設計及び試作評価している。電波吸収/反射切替板と同様に設計周波数は9GHzとし、電波吸収体としては-20dB以下の反射率、透過板としては-1dB以上の透過率を目標値としている。

本切替板の構造は切替板の両面に金属のパターン及びダイオードが配置されており、垂直偏波に対してダイオードが OFF 状態で電波吸収体として動作し、ダイオードが ON 状態で透過板として動作するように設計し、試作評価している。

試作した切替板はダイオード OFF 状態では反射率-27.1dB、透過率-17.1dBとなり、到来した電磁波のエネルギーのうち0.2%が反射、2%が透過していることから97.8%が吸収されており、電波吸収体として動作していることを確認している。一方、ダイオード ON 状態では透過率が-0.3dBとなり、到来した電磁波のエネルギーのうち90%が透過していることから透過板として機能していることを確認している。

これらの結果より、電波吸収体と透過板の切替え可能な電波吸収/透過切替板が設計と概ね一致した特性が得られたことから、切替板が実現可能であることを示している。

第5章「アンテナレドームへの適用」では、電波吸収/透過切替板の応用例として、第4章で試作した電波吸収/透過切替板をパッチアンテナのレドームに適用し、アン

テナ性能及び反射波低減効果について検討している。

まず、ダイオードを ON 状態で透過板として動作させた切替板をアンテナレドームに適用し、レドームなしのアンテナ単体の場合と比較して放射パターンを評価している。正面方向の利得はレドームありの場合は11.5dBi、レドームなしの場合は11.3dBiであり、その他の方向への放射パターンもほぼ同等な結果が得られたことから、透過板として動作させた切替板はアンテナ性能への影響が小さい良好なレドームとして機能していることを確認している。

また、ダイオードを OFF 状態で電波吸収体として動作させた切替板をアンテナレドームに適用し、レドームなしの場合と比較して反射波低減効果を評価した結果、レドームによって25dBの反射波低減効果が得られることを確認している。

これらの結果より、切替板をレドームに適用し、電波送受信時には切替板を透過板として動作させてアンテナ性能を確保し、電波送受信時以外には切替板を電波吸収体として動作させて反射波を低減可能であることを示している。

第6章「総括」では、本論文の総括を行い、今後の展望を述べている。

これらの研究成果は、電子情報通信学会 和文及び英文論文誌、国際会議等での公表を通し、国内外において高く評価されている。

以上のように、本論文はアクティブ素子を組み入れた電波制御技術に関する極めて有用な資料を提供するとともに、その応用技術による電磁環境改善の分野に大きく寄与し、これらの分野の発展に大きく貢献するものと確信する。したがって、審査委員一同は北川真也氏が博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。