

2015年度
博士学位申請論文

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

Switchable Absorption/Reflection/Transmission
Surface and Its Application to Antenna Structures

指導教員 橋本 修 教授

青山学院大学大学院

理工学研究科

理工学専攻電気電子工学コース

北川 真也

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 従来の研究例	3
1.2.1 電波吸収/反射/透過の切替え技術	3
1.2.2 アンテナの反射波低減技術	6
1.3 提案する反射波低減手法	9
1.4 本論文の目的	11
1.5 本論文の構成	12
第2章 電波吸収/反射切替板の設計	16
2.1 はじめに	16
2.2 ダイオードの緒元測定	16
2.2.1 ダイオード緒元測定用基板の構造及び等価回路	16
2.2.2 測定方法	20
2.2.3 測定結果	22
2.3 周期構造の検討	28
2.3.1 構造及び等価回路	28
2.3.2 周期構造による反射率への影響	30
2.3.3 反射率の斜入射特性	36
2.3.4 切替板の試作及び測定結果	39
2.4 吸収特性の両偏波対応	41
2.4.1 切替板の構造及び等価回路	41
2.4.2 切替板の設計	43
2.4.3 切替板の試作評価	47
2.5 むすび	50
第3章 アンテナリフレクタへの適用	51
3.1 はじめに	51
3.2 放射パターン	51
3.2.1 アンテナの S_{11} 特性	51
3.2.2 放射パターン評価	53

3.3	反射波低減特性	56
3.4	むすび	58
第4章	電波吸収/透過切替板の設計	59
4.1	はじめに	59
4.2	切替板の構造及び等価回路	59
4.2.1	切替板の構造	59
4.2.2	切替板の動作及び等価回路	61
4.3	切替板の設計	63
4.3.1	裏面の構造	63
4.3.2	表面の構造	66
4.3.3	両面の構造	69
4.4	反射率及び透過率の斜入射特性	75
4.5	切替板の試作評価	78
4.6	むすび	82
第5章	アンテナレドームへの適用	83
5.1	はじめに	83
5.2	放射パターン	83
5.2.1	アンテナ・レドーム間距離特性	83
5.2.2	放射パターン評価	85
5.3	反射波低減特性	87
5.4	むすび	88
第6章	総括	89
参考文献		92
本研究に関する発表論文		97
その他の発表論文		98
謝辞		100

第 1 章 序論

1.1 研究背景

電波が物体に入射すると、図 1.1 のように反射、透過、吸収の物理現象が生じ、入射波のエネルギーは反射波、透過波のエネルギー及び吸収されたエネルギーの総和と等しくなる。それらの 3 つの物理現象は材料の特性及び厚さに依存し、材料の特性については、マイクロ波帯においては誘電率、透磁率等によって決まるものである。

一方、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[1]-[7]。これらの研究では、異なる周波数において反射と透過が切替えられている。また、電波吸収体に FSS を組み込むことにより電波吸収特性を制御した研究[8]-[10]、または電波吸収体の構成要素である抵抗被膜の形状を変化させることにより電波吸収特性を制御または薄型化を実現した研究[11]-[13]が報告されている。さらに近年の研究では、こ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。その一例としては、整合周波数可変型電波吸収体があり、電波吸収体の構造に可変容量ダイオードを組み込み、そのダイオードへのバイアス電圧によって整合する周波数を制御している[14]-[23]。

このようなアクティブ素子を用いた構造により入射電波に対する反射、透過、吸収の物理現象をアクティブに切り替えることが可能になり、そのような研究例が多く報告されている。これまでの研究では、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[24]-[26]、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設計・試作結果の報告例があるものの[27]-[37]、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 2 種類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。

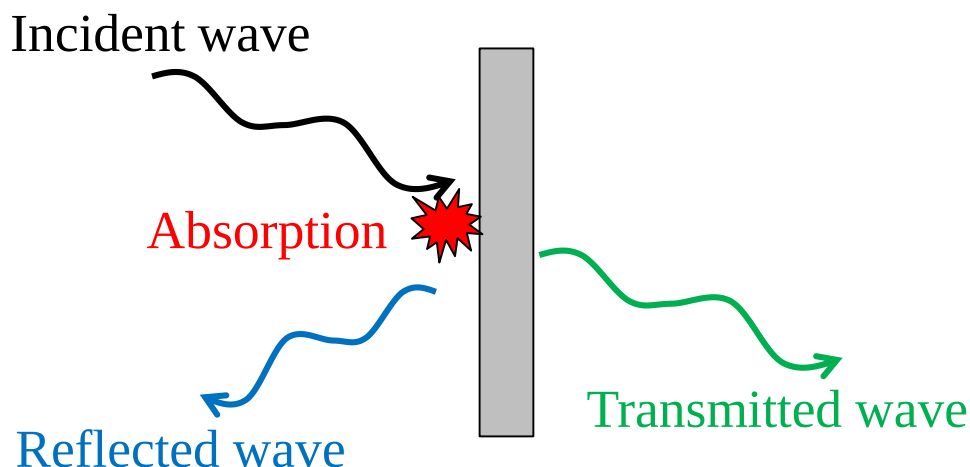


図 1.1 入射電波に対する反射，透過，吸収

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る．

電磁環境の悪化の一つの要因として周辺からの反射波がある．通常の壁などの構造物からの反射波に対しては電波吸収体を適用することによって反射波を低減している．一方，アンテナの利得を向上するためには大きな開口が必要となり，サイズも大きくなるため，大きな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．特にアンテナの送受信周波数と反射波を低減する周波数が同じ場合は実現が困難である．したがって，アンテナ性能を確保したままアンテナからの反射波を低減して周辺の電磁環境を改善するためには，電波送受信時と非送受信時で切替え動作を行う切替板が必要があり，その切替板をアンテナ構造部へ応用することが有効であると考えられる．そこで，本研究では設計・試作した吸収/反射，吸収/透過の2種類の両切替板のアンテナ構造部への応用について検討した．

1.2 従来の研究例

1.2.1 電波吸収/反射/透過の切替え技術

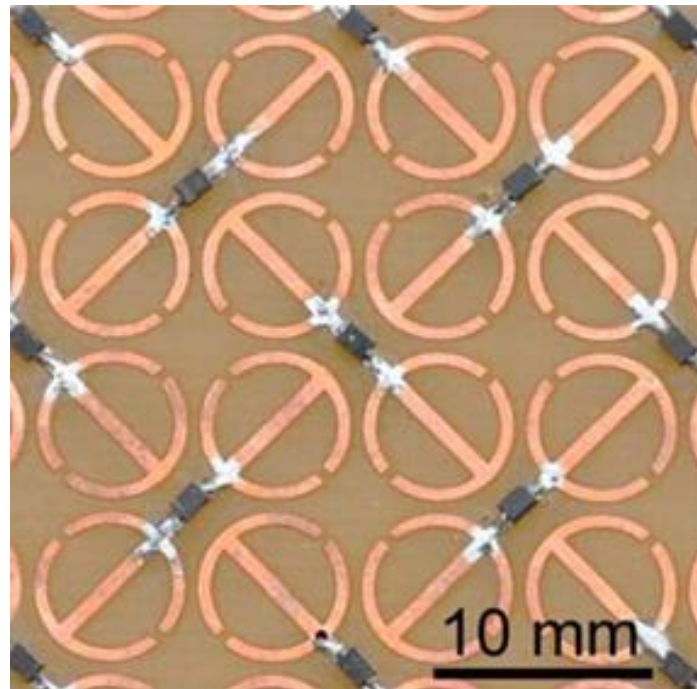
アクティブ素子を組み入れることにより吸収、反射または透過を切り替える手法の1つとしてダイオードを用いた研究が実施されている。

ダイオードを用いた電波の反射を制御する手法では、PIN ダイオードの順方向バイアスにより反射と吸収を切り替える手法が提案されている[24]-[26]。

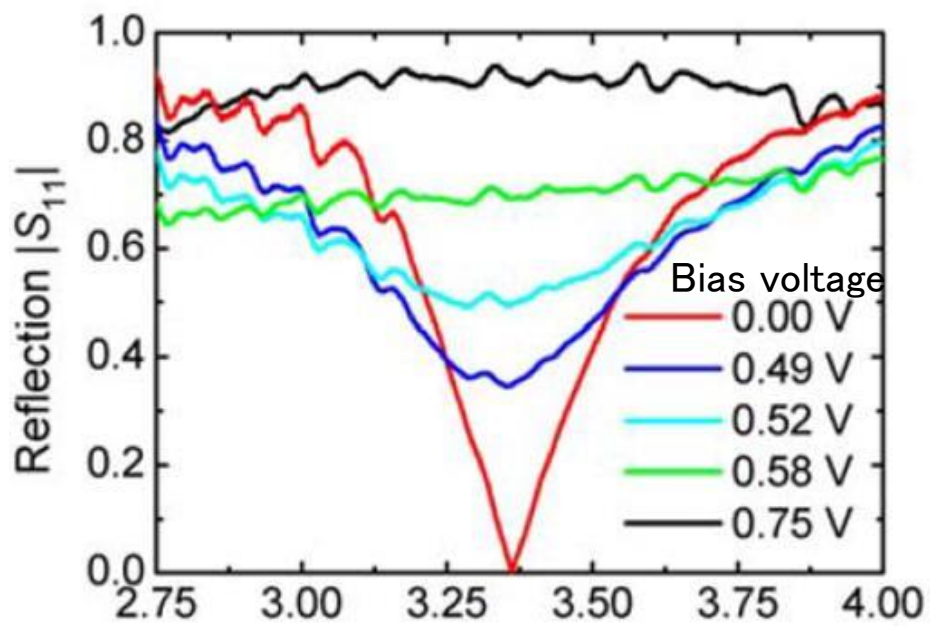
図 1.2 に PIN ダイオードを用いた反射と吸収を切り替える研究例を示す[25]。切替板の構造は図 1.2(a)に示すとおり、基板の表面に金属パターン及びダイオードを配置し、ダイオードに順方向バイアス電圧を印加することにより反射を制御する。この研究例ではバイアス電圧を変化させながら反射特性を評価しており、その反射特性は図 1.2(b)に示すとおりとなっている。順方向バイアス電圧を変化させることにより 3.3GHz 付近で反射率が変化し、バイアス 0V では反射率が 0 に近く電波吸収体として動作しており、0.75V を印加した状態では反射率が 1 に近づき、反射板として動作していることがわかる。しかし、このような吸収体と反射板を切替え可能な切替板は実現されているが、効率的な設計手法に関しては報告されていない。

一方、ダイオードを用いて電波の透過を制御する手法については、バラクタダイオードの逆方向バイアスで周波数特性を制御する手法や PIN ダイオードまたはショットキーダイオードの順方向バイアスにより反射と透過を切り替える手法[27]-[37]が提案されている。

図 1.3 に PIN ダイオードを用いて電波の透過を制御した研究例を示す[30]。切替板の構造は図 1.3(a)に示すとおり、基板の表面に金属の矩形パッチ及び矩形ループパターンを配置し、パッチ及びループ間に PIN ダイオードを配置している。また、裏面から表面のパッチへビアを通し、裏面からダイオードに順方向バイアスを印加する。この研究例では、ダイオードの ON/OFF による透過特性を評価しており、その透過特性は図 1.3(b)に示すとおりとなっている。図 1.3(b-1)に示すとおり、ダイオードに電圧を印加していない状態（OFF 状態）では 2.3GHz で透過しているが（透過率-0.2dB）、図 1.3(b-2)に示すとおり、順方向電圧を印加した状態（ON 状態）では同周波数において透過率が-20dB 以下となり、透過していないことがわかる。このように、電波の反射と透過を制御する切替板は実現されているが、吸収と透過を制御する研究例は報告されていない。



(a)切替板構造



(b)反射特性

図 1.2 ダイオードを用いて反射特性を制御した例 (参考文献[25])

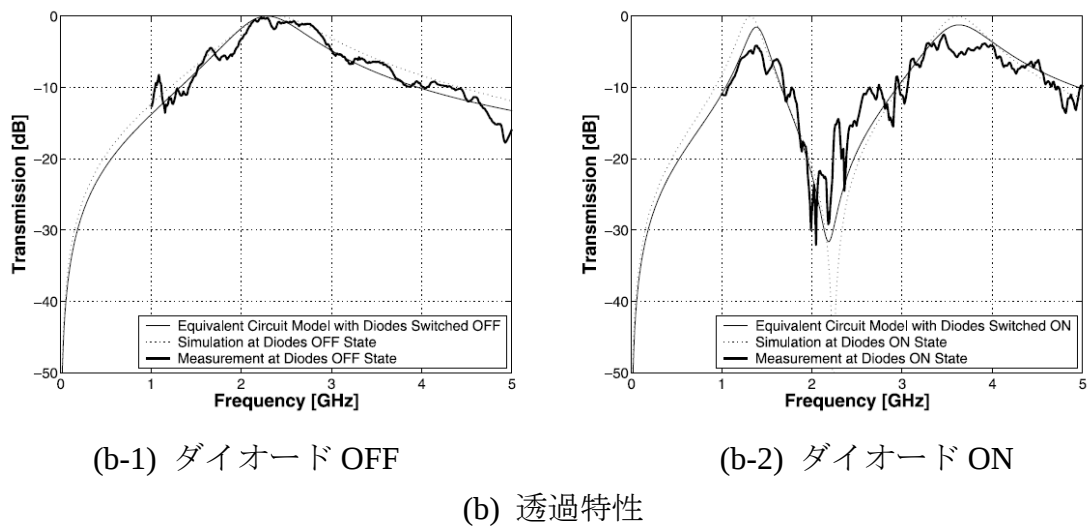
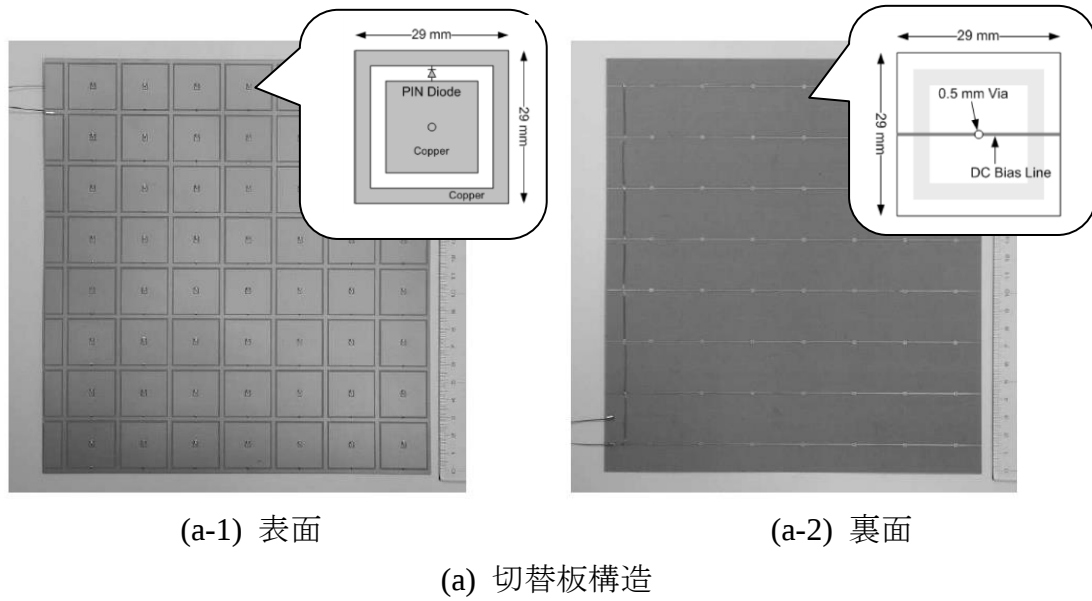


図 1.3 ダイオードを用いて透過特性を制御した例（参考文献[30]）

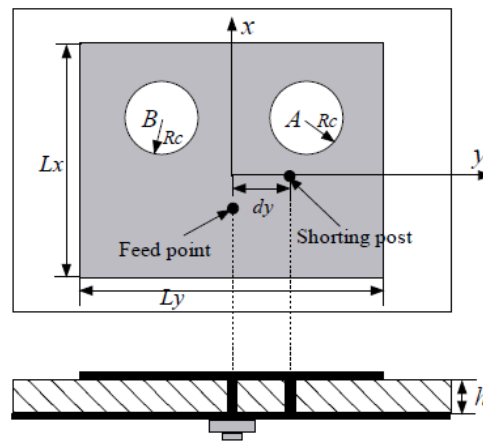
1.2.2 アンテナの反射波低減技術

アンテナ周辺の電磁環境改善の手法として、アンテナの反射波を低減に関する研究としては、アンテナ素子形状を変形する手法[38]-[45]と反射板を変形する手法[46]-[52]に大きく分類される。

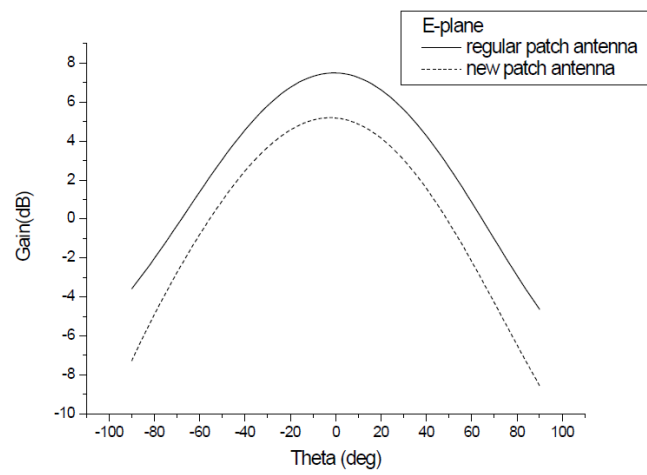
図 1.4 にアンテナの素子形状を変形させた研究例を示す[41]。当該アンテナは図 1.4(a)に示すとおり、パッチアンテナのアンテナ素子である金属パッチに円形の穴を2つ開けた形状となっている。電波がアンテナに照射されて反射波を形成する際に、パッチに流れる電流分布がパッチに開けた穴によって変化するために反射波が変化して低減される。アンテナ利得については、図 1.4(b)に示すとおり、穴を開けたアンテナ（点線）は穴を開けていないアンテナ（実線）と比較してアンテナ利得が 2dB 程度低下しており、パッチに開けた穴がアンテナ性能を劣化させていることがわかる。また、アンテナの反射波については、図 1.4(c)に示すとおり、穴を開けたアンテナ（点線）は穴を開けていないアンテナ（実線）と比較して 4.5GHz 付近及び 7GHz 以上において低減されているが、アンテナの動作周波数となる約 5GHz 付近では低減されていない。

一方、図 1.5 にアンテナ反射板の形状を変化させた研究例を示す[49]。当該アンテナは図 1.5(a)に示すとおり、特定の周波数に対して反射または透過する周波数選択板（FSS : Frequency Selective Surface）をダイポールアンテナの反射板として設置したアンテナである。アンテナは 3GHz で動作するダイポールアンテナであり、FSS は同周波数で阻止帯域となる透過特性を有する。アンテナ利得については、図 1.5(b)に示すとおり、FSS を用いた場合（実線）は、金属板を用いた場合（点線）と同等の利得が得られていることがわかる。これは FSS がアンテナ動作周波数において金属板として機能しているためである。反射波については、図 1.5(c)に示すとおり、FSS を用いた場合（実線）は金属板を用いた場合（点線）と比較して 2GHz 付近及び 5GHz 以上の帯域で低減されているが、動作周波数となる 3GHz 付近では低減されていない。また、FSS を反射板に用いた場合、反射波が低減されているのは到来電波が FSS を透過しているからであり、アンテナ背面に回路等の構造物がある場合、反射波に影響することが考えられる。

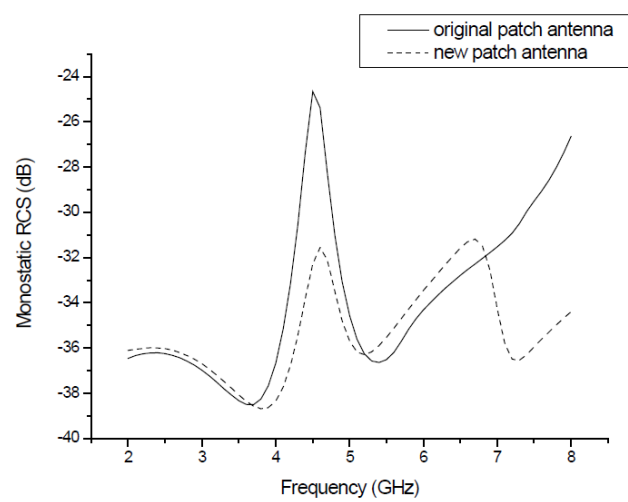
このように、アンテナの構造を変化させることによりアンテナの反射を変化させることができるが、アンテナ動作周波数以外のみでの低減またはアンテナの性能へ影響が生じるため、アンテナ動作周波数でアンテナ性能を劣化させずに反射波を低減するには、アンテナ使用時と未使用時でアクティブに特性を変化させることが必要となる。



(a) アンテナ構造



(b) アンテナ利得

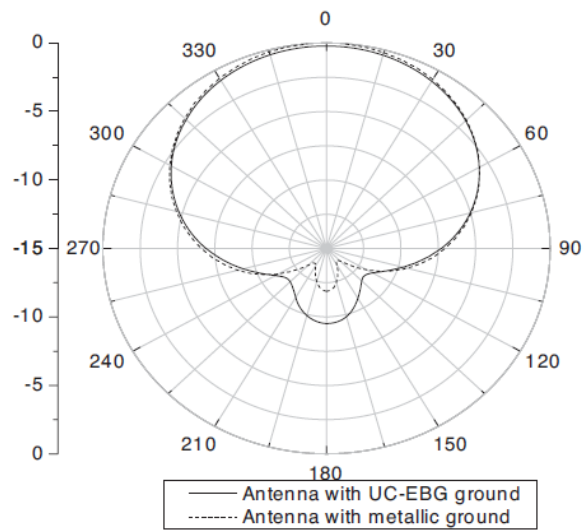


(c) アンテナの反射波

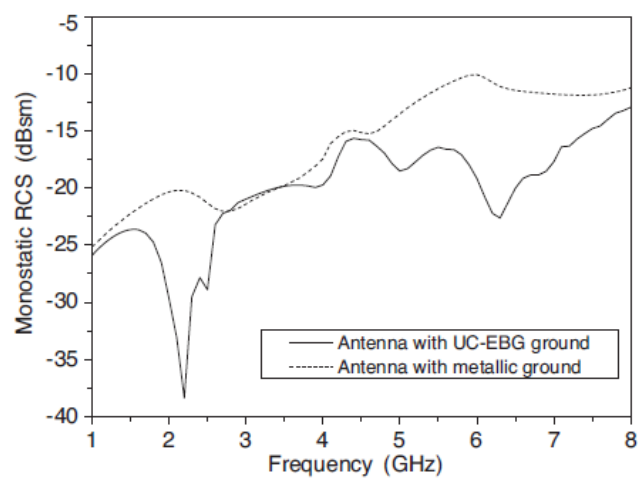
図 1.4 アンテナ素子形状を変化させた例 (参考文献[41])



(a) アンテナ構造



(b) アンテナ利得



(c) アンテナの反射波

図 1.5 アンテナリフレクタに FSS を適用した例 (参考文献[49])

1.3 提案する反射波低減手法

これらの研究背景を踏まえ、本論文では吸収/反射及び吸収/透過の切替板を設計・試作し、その2種類の切替板の応用例としてアンテナ周辺の電磁環境改善のための反射波低減手法を提案する。

1つ目はリフレクタ付のアンテナに対する手法を提案する。図 1.6 に示すとおり、電波吸収/反射切替板をアンテナリフレクタに適用し、アンテナ未使用時は電波吸収体として動作させることにより反射波を低減し、アンテナ使用時には反射板として動作させることにより金属リフレクタの場合と同等の利得及び放射パターンを得ることができる。

2つ目は平面アンテナに対する手法を提案する。電波吸収/反射切替板を用いた手法では、パッチアンテナのようなリフレクタが一体化した平面アンテナに対して適用困難であるため、図 1.7 に示すとおり電波吸収/透過切替板をアンテナ前方にレドームとして設置し、アンテナ未使用時は電波吸収体として動作させることにより反射波を低減し、アンテナ使用時には透過板として動作させることによりレドームなしの場合と同等の利得及び放射パターンを得ることができる。

上記の提案する2つの手法では、アンテナ未使用時と使用時にアクティブに電波を制御することにより、アンテナ性能を劣化させることなく反射波を低減することが可能となる。

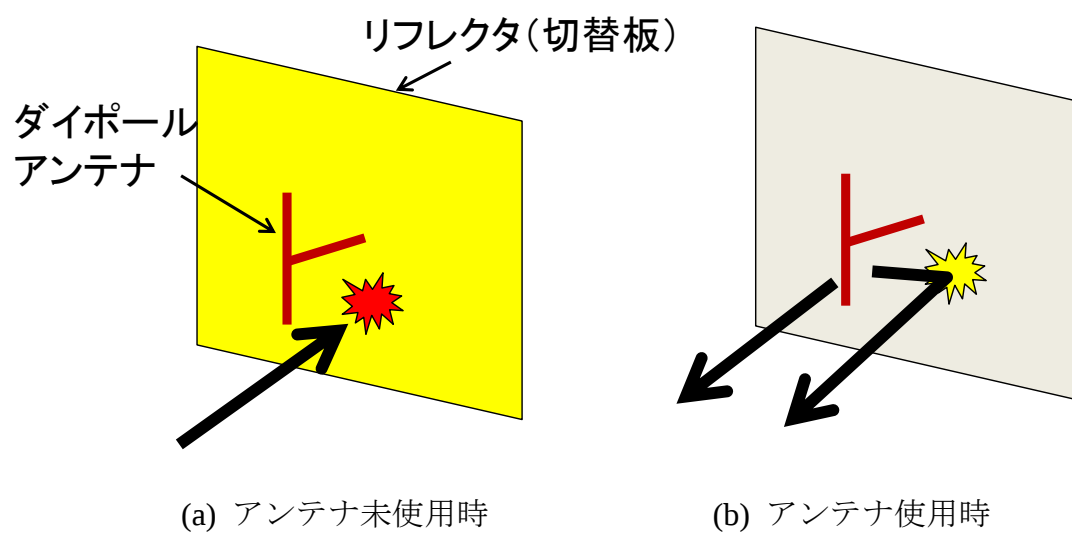


図 1.6 電波吸収/反射切替板による反射波低減手法

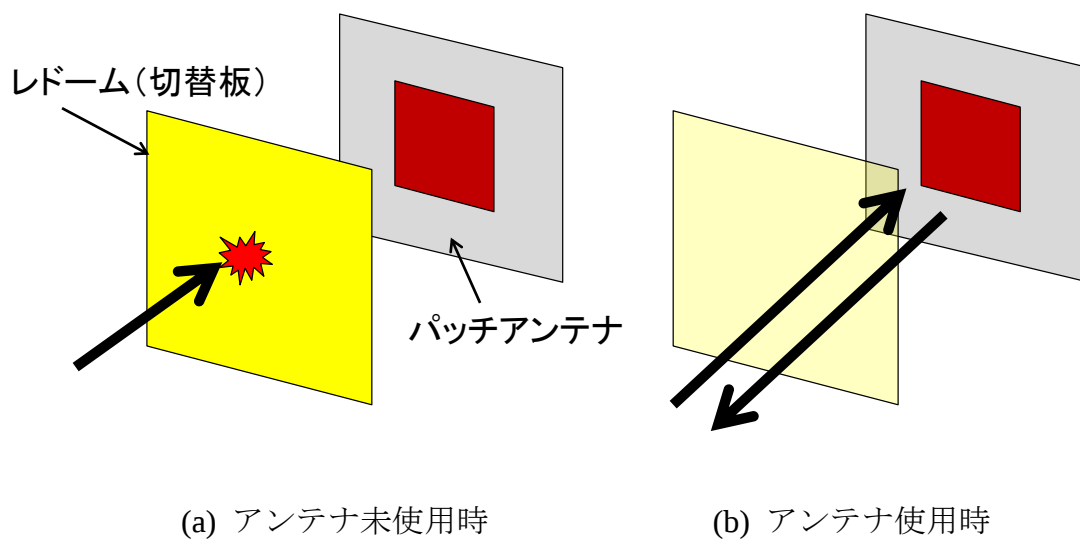


図 1.7 電波吸収/透過切替板による反射波低減手法

1.4 本論文の目的

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、その応用の1つとしてアンテナの構造部に適用することによりアンテナの反射波を低減する手法について検討した。対象アンテナとしてはダイポールアンテナ及びパッチアンテナとし、設計周波数は、気象レーダ等で用いられている9GHzとした。近年の気象レーダは、高出力増幅器の開発によって高出力化する傾向があり、アンテナ開口も非常に大きいため、反射波を低減する必要がある。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-20dB以下の反射率を目標値とした。さらに、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、透過板としては-1dB以上の透過率、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、吸収と反射を切替え可能な電波吸収/反射切替板を設計・試作し、切替板の反射特性を測定した。さらに切替板をダイポールアンテナのリフレクタに適用し、アンテナの放射パターン及び反射波低減効果を測定した。

次に、吸収と透過を切替え可能な電波吸収/透過切替板を設計・試作し、切替板の反射特性及び透過特性を測定した。さらに切替板をパッチアンテナのレドームに適用し、アンテナの放射パターン及び反射波低減効果を測定した。

1.5 本論文の構成

本論文では、電波吸収/反射切替板及び電波吸収/透過切替板を設計した後、電波吸収/反射切替板はダイポールアンテナのアンテナリフレクタに適用し、電波吸収/透過切替板はパッチアンテナのレドームに適用し、それぞれ放射パターン及び反射低減量について検討したものであり、全 6 章から構成されている。ここで、図 1.8 に本論文の構成を示す。

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。

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 0.1pF 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 1.5Ω 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、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 -21dB 、ON 状態では -0.1dB 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 -25dB 、ON 状態では -0.7dB 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 -20dB 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。

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 6.7dBi, 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、両偏波の到来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。

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。

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、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た。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 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。

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，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，本論文内容の総括を行い，今後の展望を述べた．

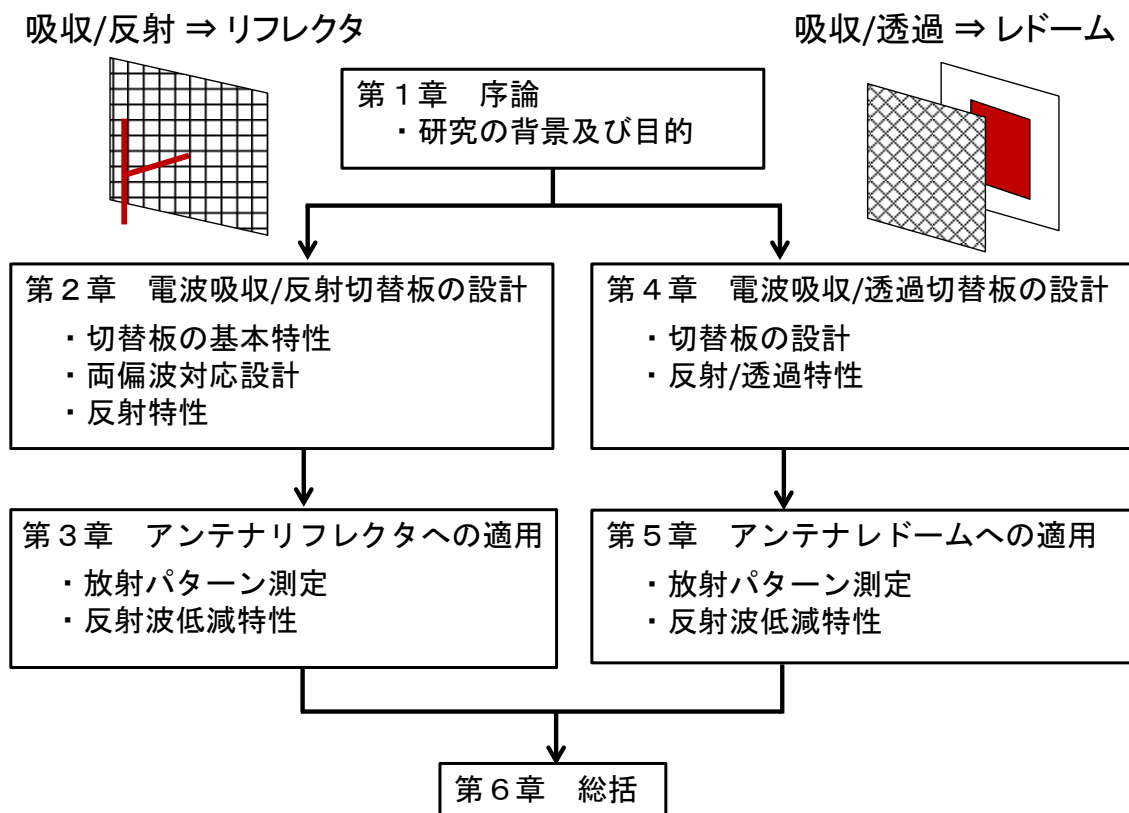


図 1.8 本論文の構成

第2章 電波吸収/反射切替板の設計

2.1 はじめに

本章では、電波吸収体と反射板を切り替えることができる電波吸収/反射切替板について検討した。まず、切替板に装荷するダイオードの緒元を測定した。次に、切替板に配置する周期構造が反射特性に与える影響について検討し、垂直偏波に対して切替え可能な切替板の試作評価を行った。さらに、周期構造に抵抗を装荷し、垂直偏波に対しては切替動作、水平偏波に対しては吸収動作を有する切替板を設計・試作し、反射特性を評価した。

2.2 ダイオードの緒元測定

2.2.1 ダイオード緒元測定用基板の構造及び等価回路

設計する電波吸収/反射切替板はダイオード（NXP Semiconductor 型番：BAP50-03）を用いるため、設計にはダイオード単体の緒元が必要となる。そこで、本研究では裏面を金属裏打ちした厚さ 1.6mm の誘電体基板（利昌工業 型番：CS3376C, 比誘電率：3.5, $\tan\delta$ ：0.005）表面に厚さ 35 μm の金属パターン及びダイオードを装荷し、自由空間法における反射率からインピーダンスを測定した。本測定法では、反射率の共振周波数及び反射減衰量から抵抗及びリアクタンスを測定する。本研究に用いたダイオードの主な諸元を表 2.1 に示す。

図 2.1 にダイオードが OFF 状態におけるインピーダンス測定用基板の構造及び等価回路を示す。基板の構造は図 2.1(a)に示すとおり、表面に金属パターンとして帯が 2 列配置されており、1 列当たり 6 つのギャップを設けて 12 個のダイオードが装荷されている。金属パターンの帯幅、ギャップ幅、間隔等は反射特性が X 帯で共振するように設計した。金属パターンのそれぞれの形状が反射率に与える影響については 2.3.2 項で述べる。入射及び反射方向は $-z$ 方向及び z 方向であり、電界は y 方向である。

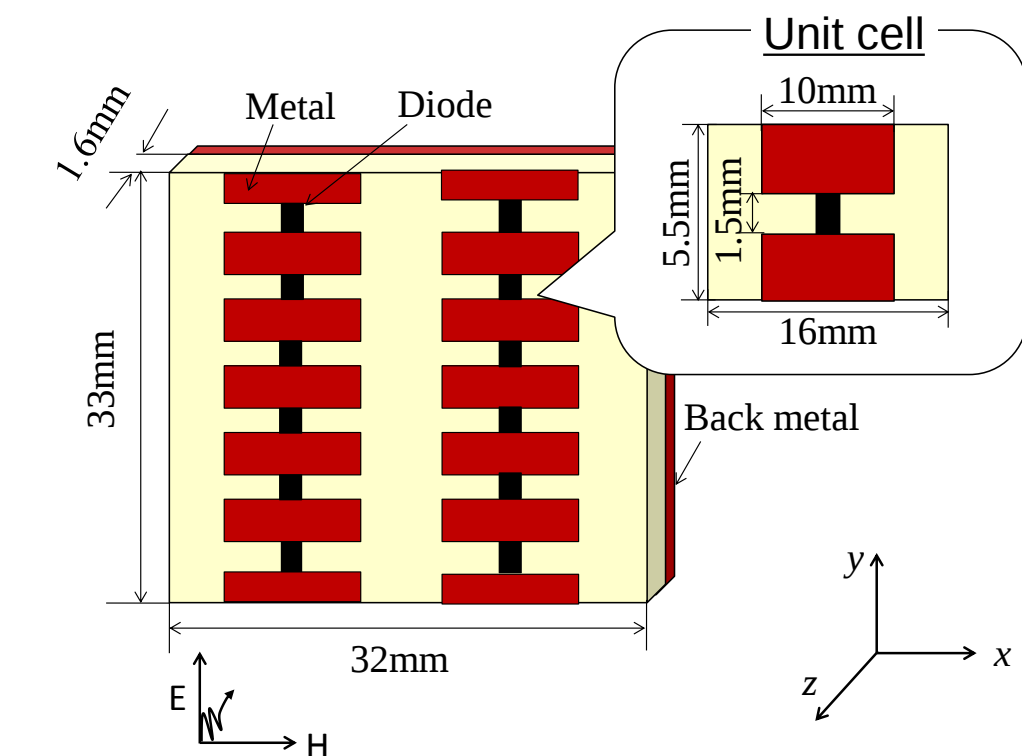
基板の等価回路を図 2.1(b)に示す。金属裏打ちされ、厚さが波長に対して薄く、

低損失な誘電体はインダクタで表され、そのインダクタと並列に表面の金属パターン及びダイオードの回路が接続される回路となる．金属パターンの回路は帯によるインダクタとギャップによるキャパシタの直列 LC 回路となり、ギャップのキャパシタに対して並列にダイオードの回路が並列に接続されることになる．ダイオードが **OFF** 状態は抵抗とキャパシタの直列回路となる[31]．この等価回路におけるダイオードのインピーダンスはダイオード単体のインピーダンス及び周期構造によって決まる．この等価回路を用いて、自由空間のインピーダンス Z_0 により反射率が決まるため、反射率から **OFF** 状態のダイオードのインピーダンスを求めることができる．

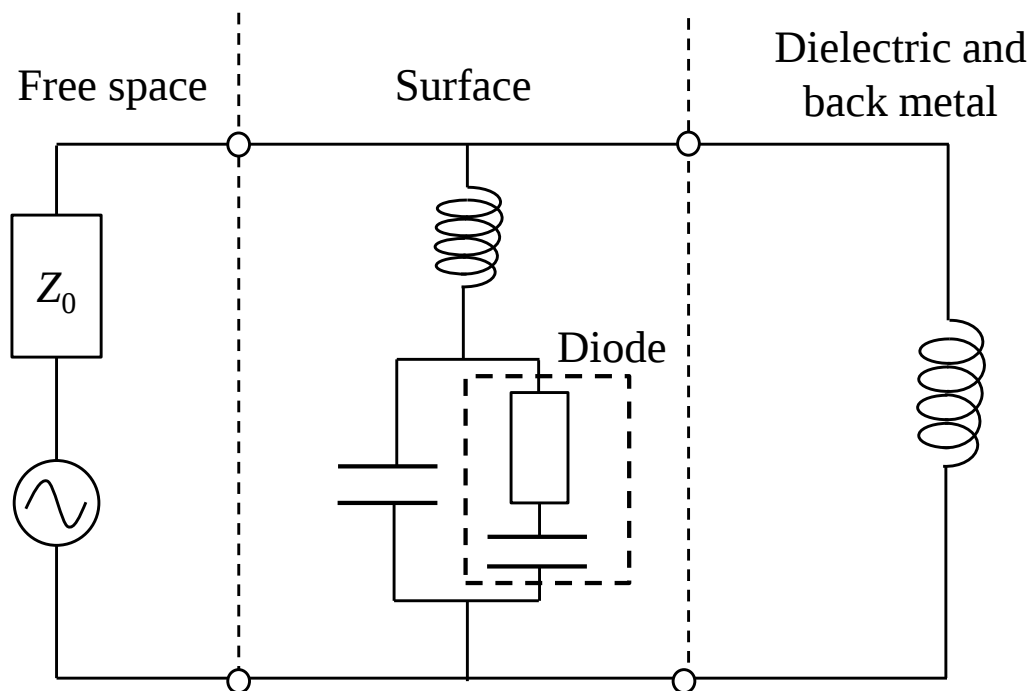
一方、図 2.2 に **ON** 状態におけるインピーダンス測定用基板の構造及び等価回路を示す．誘電体基板は **OFF** 状態用基板と同一であり、図 2.2(a)に示すとおり表面の金属パターンは X 帯で共振するように設定した．また、順方向バイアス電圧を印加するため、基板上下に電源線を配置した．測定用基板の等価回路は図 2.2(b)に示すとおり、**OFF** 状態用基板と同様であり、ダイオードは抵抗とインダクタの直列回路となっている[30]．たまた、この等価回路におけるダイオードのインピーダンスはダイオード単体のインピーダンス及び周期構造によって決まる．

表 2.1 ダイオードの主な諸元

Type	PIN
Size	1.8mm×1.35mm×1.1mm
Maximum forward current	50mA
Maximum forward voltage	1.1V
Maximum reverse voltage	50V

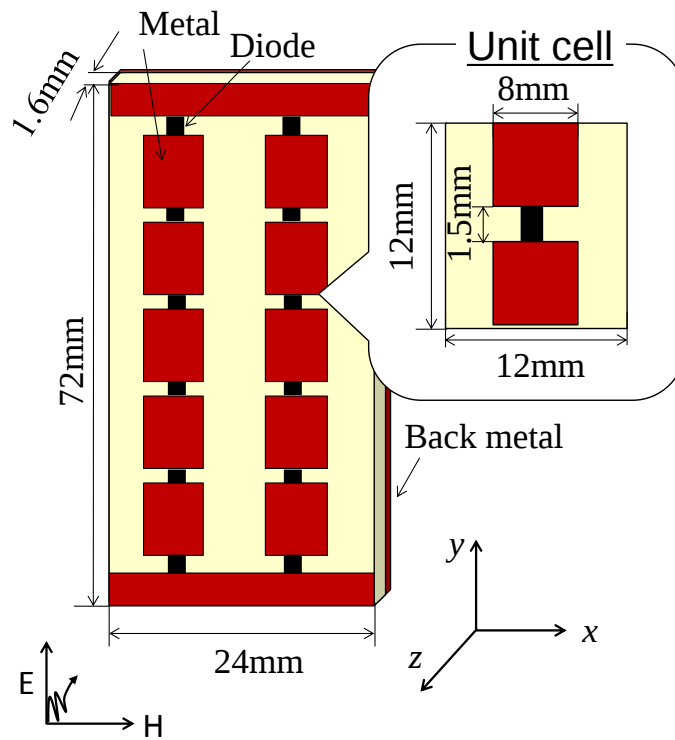


(a) 基板構造

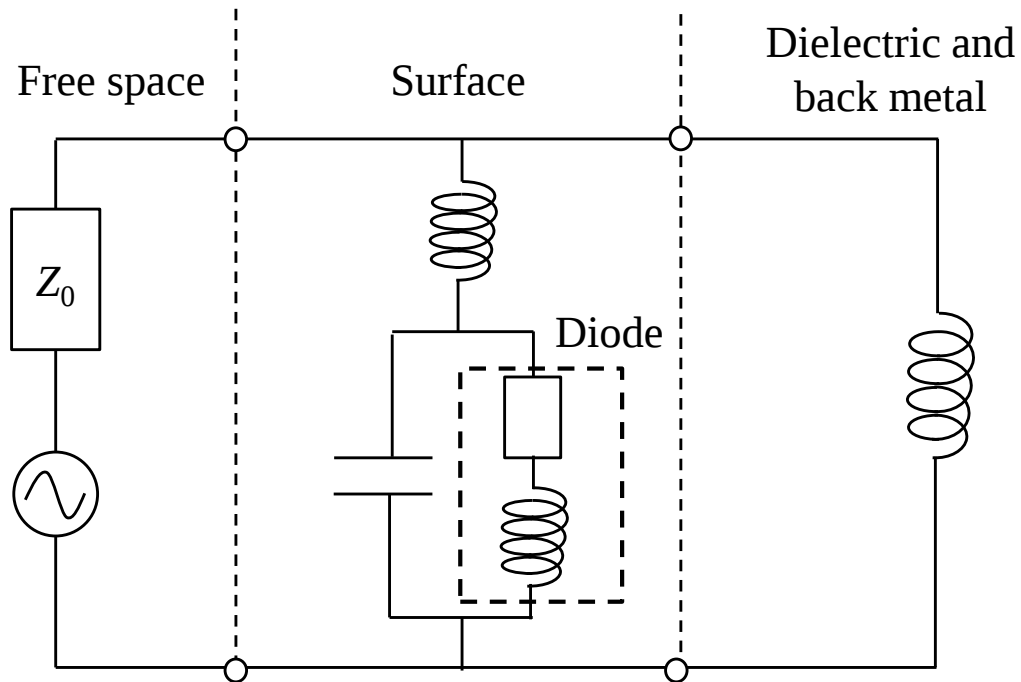


(b) 等価回路

図 2.1 OFF 状態のダイオード特性測定用基板



(a) 基板構造



(b) 等価回路

図 2.2 ON 状態のダイオード特性測定用基板

2.2.2 測定方法

前述したダイオード測定用基板を用いて、自由空間法の反射率からダイオード単体のインピーダンスを測定する。測定方法は自由空間法で反射率を測定するとともに、有限積分法に基づく電磁界シミュレータ **MW STUDIO** を用いて、同様に反射率を解析し、共振周波数及び共振時の反射率を解析結果と比較してインピーダンスを推定する手法とした。

電磁界シミュレータを用いて周期構造をもつ供試体の反射率を解析する手法には、1ユニットセルを解析する手法とフルモデルを解析する手法がある。1ユニットセルの解析では周期境界条件を適用し、周期構造が無限に配置された場合の反射率を解析する。したがって、測定値と比較する場合、周期構造の実物が波長に対して十分に大きい必要がある。一方、フルモデルの解析では、吸収境界条件を適用し、供試体からの反射量を同サイズの金属板からの反射量で規格化して反射率を算出する。ダイオード特性測定用基板は1波長程度の大きさであるため、フルモデルの解析手法を用いた。

図 2.3 に解析モデルを示す。それぞれの方向に対して供試体より 16mm（設計周波数の半波長）大きい解解析空間を設定し、それぞれの境界に吸収境界条件を適用した。

図 2.4 に反射率の計測系を示す。ベクトルネットワークアナライザ（VNA : Vector Network Analyzer）を用いて、アンテナ・供試体間距離を 1.5m として反射波を計測し、供試体と同サイズの金属板からの反射波を基準である 0dB として反射率を計測した。したがって、反射率 R は(2.1)式で算出される。ここで、 S_{11DUT} は供試体、 $S_{11metal}$ は同サイズの金属板を設置した場合の S_{11} である。なお、測定においてダイオードを ON 状態とした場合は、ダイオード1つ当たり順方向バイアス 1V を印加した。

$$R = \frac{S_{11DUT}}{S_{11metal}} \quad (2.1)$$

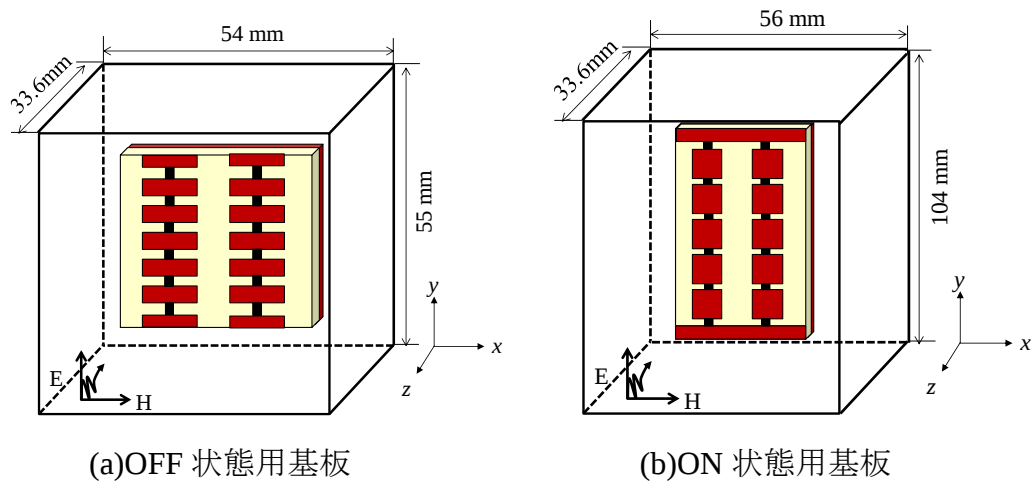


図 2.3 ダイオード特性測定用基板の反射率の解析モデル

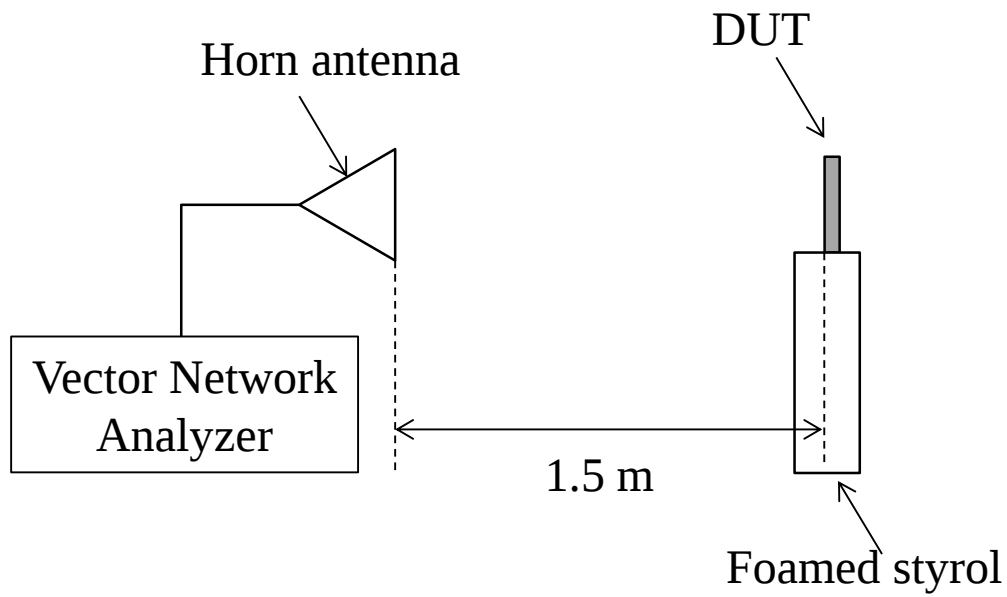


図 2.4 反射率の測定系

2.2.3 測定結果

図 2.5 に OFF 状態のダイオード特性測定用基板の反射率の測定結果を示す。共振周波数は 9.05GHz であり，その周波数において反射率は-18.2dB となった。一方，ダイオードの抵抗を 50Ω として，キャパシタンスを変化させた場合における反射率の共振周波数の解析結果を図 2.6 に示す。結果から，キャパシタンスを増加させると共振周波数が低周波側にシフトしていることがわかる。この結果と図 2.5 の計測結果を比較すると，共振周波数が 9.05GHz の場合はダイオードのキャパシタンスは 0.1pF となる。次にダイオードのキャパシタンスを 0.1pF として，抵抗を変化させた場合の共振周波数における反射率の解析結果を図 2.7(a) に示す。この結果と図 2.5 の測定結果を比較すると，反射率が-18dB の場合は抵抗が 22Ω または 40Ω となる。ここで，反射率をスミスチャートで表示すると図 2.7(b)となる。測定値と 2 つの抵抗値における反射率を比較すると 40Ω の解析結果が測定値に近いことがわかる。したがって，OFF 状態のダイオードの抵抗は 40Ω となる。

図 2.8 に ON 状態のダイオード特性測定用基板の反射率の測定結果を示す。結果から，共振周波数は 8.9GHz，反射率は-9.1dB となった。また，ON 状態ではダイオードの抵抗を 1Ω としてインダクタンスを変化させた場合における反射率の共振周波数の解析結果を図 2.9 に示す。インダクタンスを増加させると共振周波数が低周波側にシフトしており，測定結果と解析結果を比較すると，ダイオードのインダクタンスは 0.3nH となる。次にダイオードのインダクタンスを 0.3nH として抵抗を変化させた場合の共振周波数における反射率の解析結果を図 2.10(a)に示す。この結果と図 2.8 の測定結果を比較すると反射率が-9dB の場合は 1.5Ω または 25Ω となる。ここでもスミスチャートの図 2.10(b)で比較すると 1.5Ω の解析結果と実測値にほぼ一致し，抵抗は 1.5Ω となる。

以上をまとめるとダイオード単体の特性は表 2.2 のとおりとなる。また，図 2.11 に測定したダイオード単体のインピーダンスを用いてそれぞれの基板の反射率の解析結果と測定結果の比較を示す。結果から得られたダイオード単体の緒元を用いた解析結果は測定値と良好に一致していることがわかる。

表 2.2 ダイオード単体の特性結果

State	Resistance	Reactance
OFF	40Ω	0.1pF
ON	1.5Ω	0.3nH

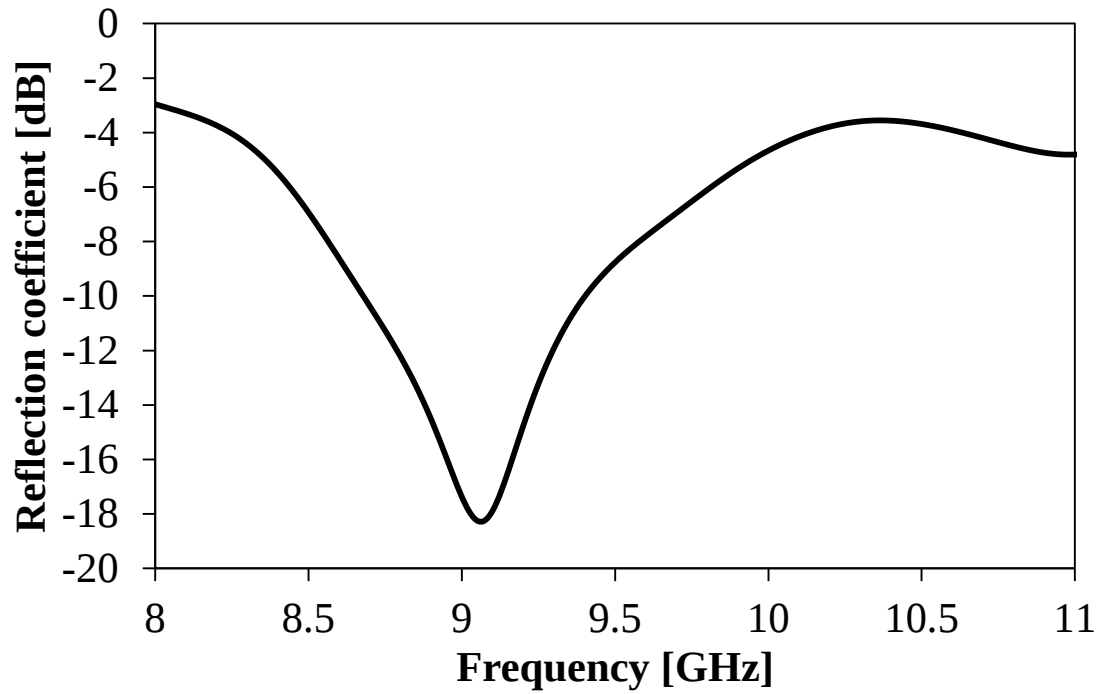


図 2.5 OFF 状態の測定用基板の反射率の測定結果

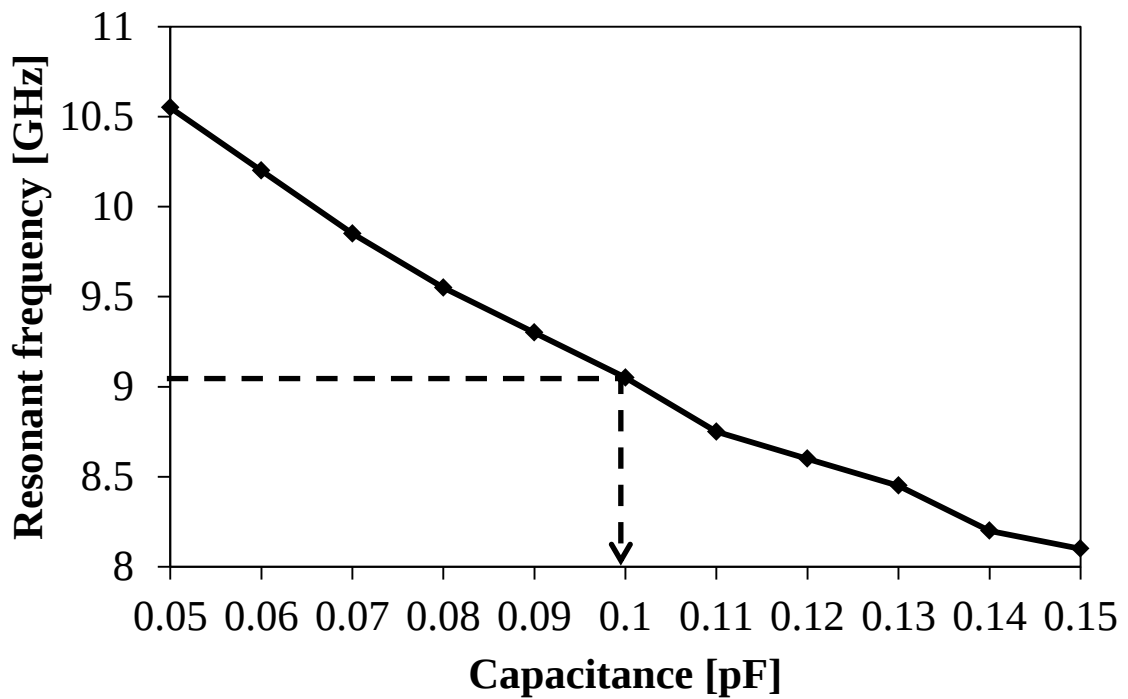
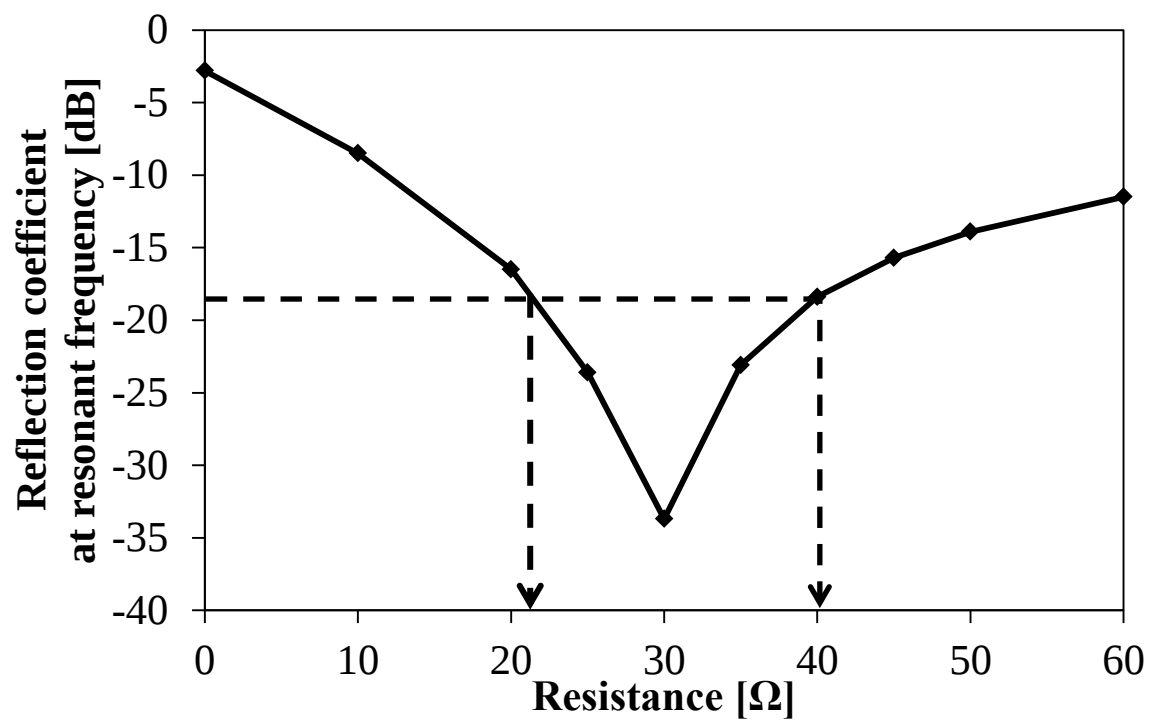
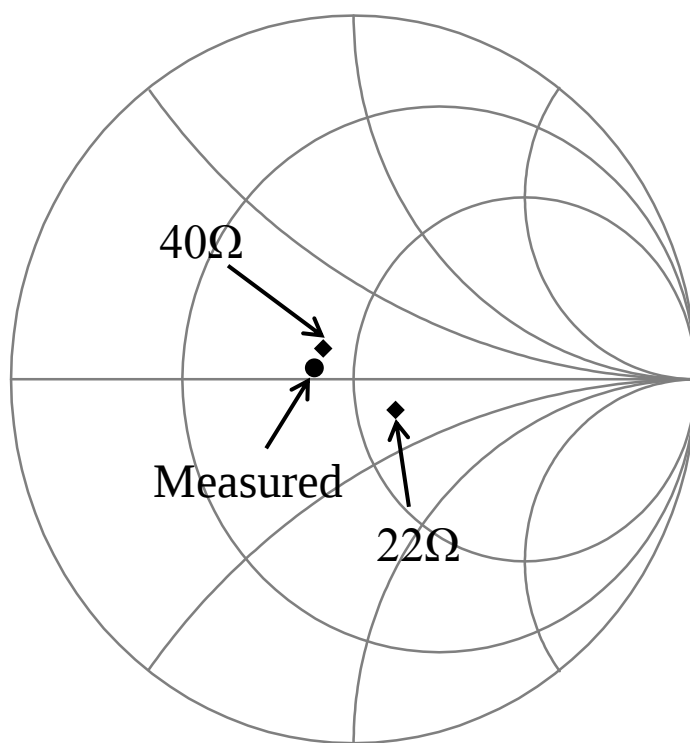


図 2.6 ダイオードのキャパシタンスに対する共振周波数の解析結果



(a)振幅



(b)スミスチャート

図 2.7 ダイオードの抵抗に対する反射率

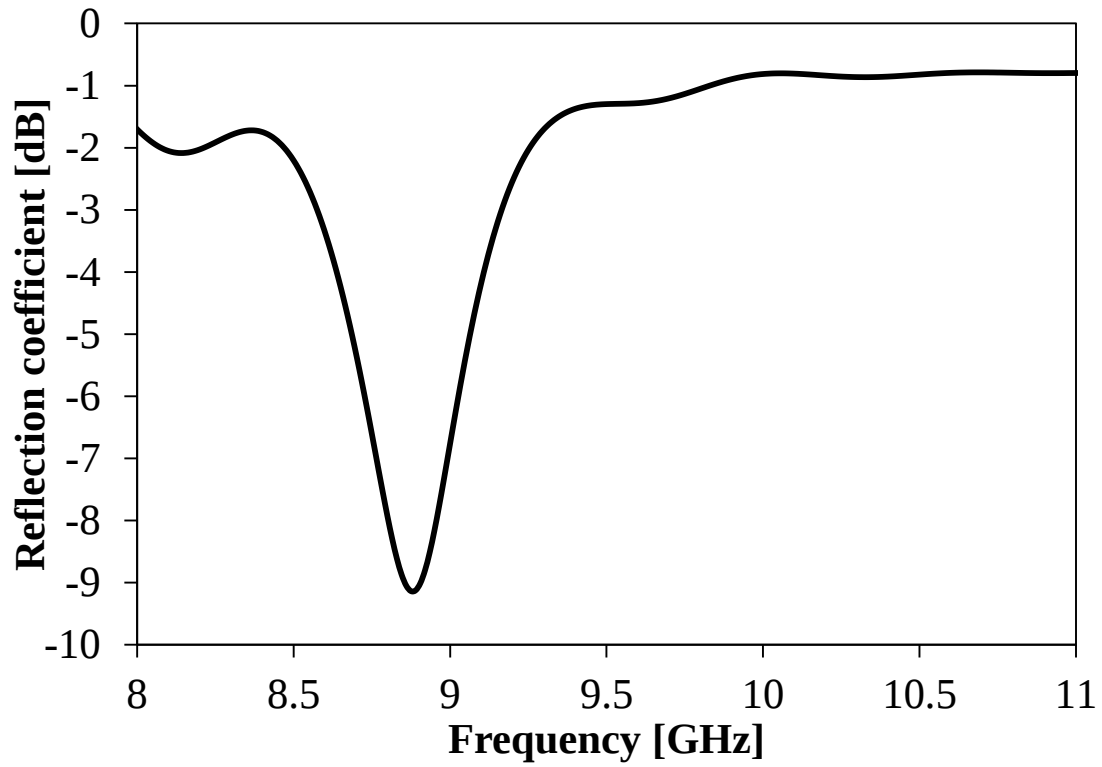


図 2.8 ON 状態の測定用基板の反射率の測定結果

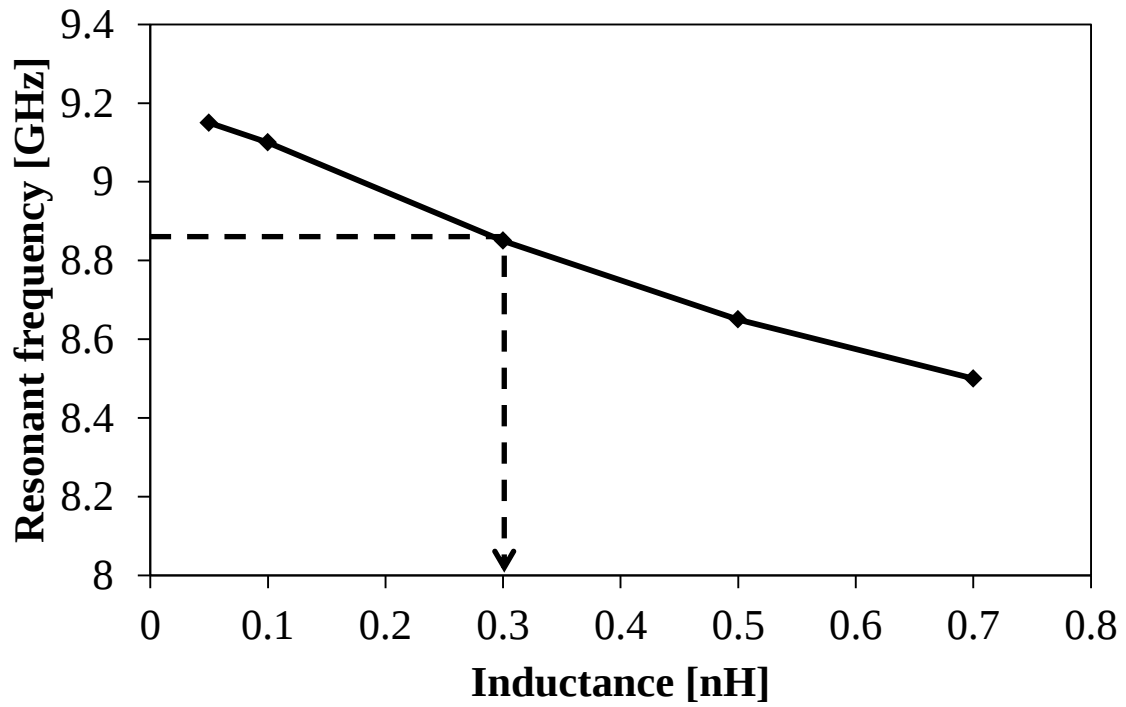
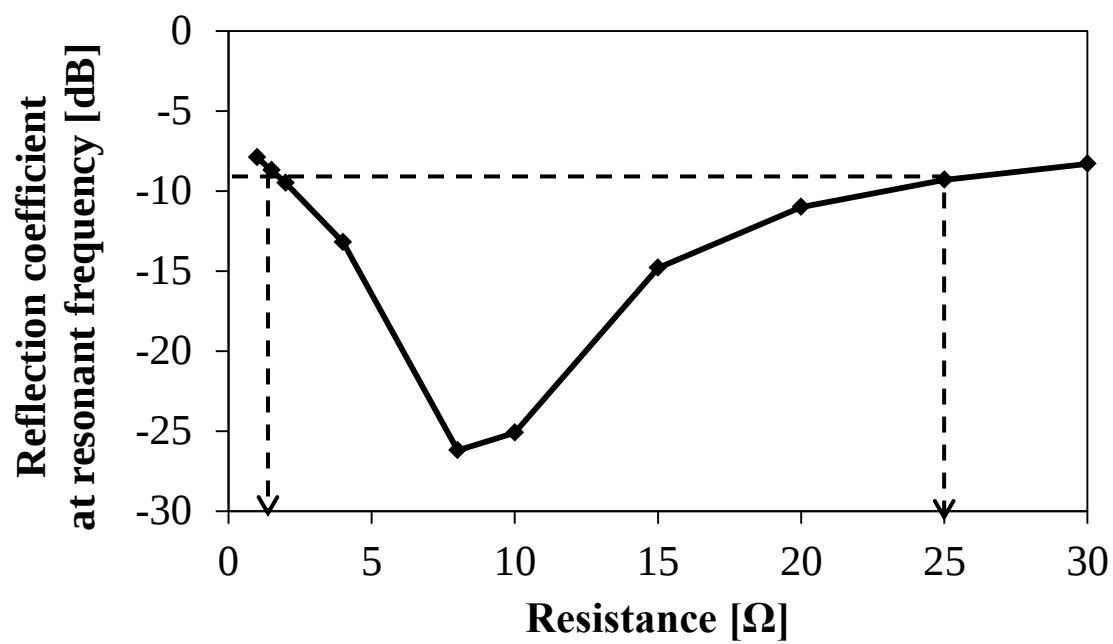
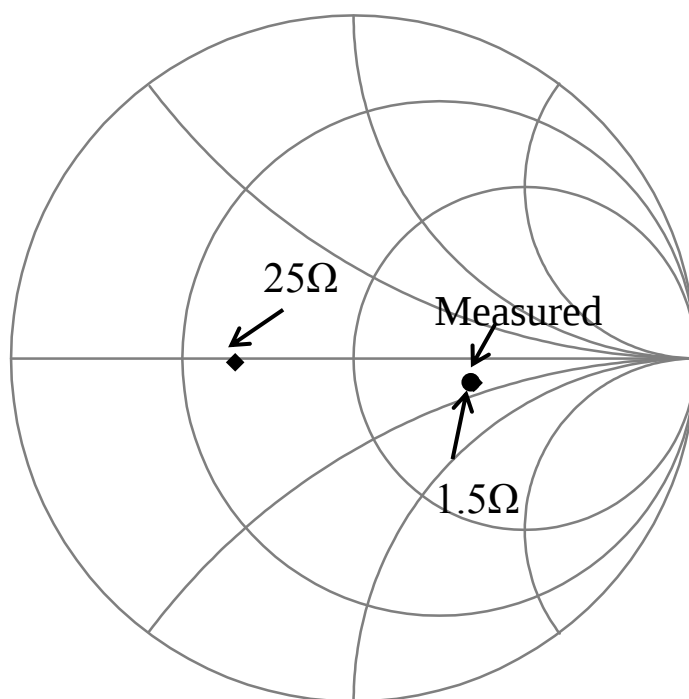


図 2.9 ダイオードのインダクタンスに対する共振周波数の解析結果



(a)振幅



(b)スミスチャート

図 2.10 ダイオードの抵抗に対する反射率

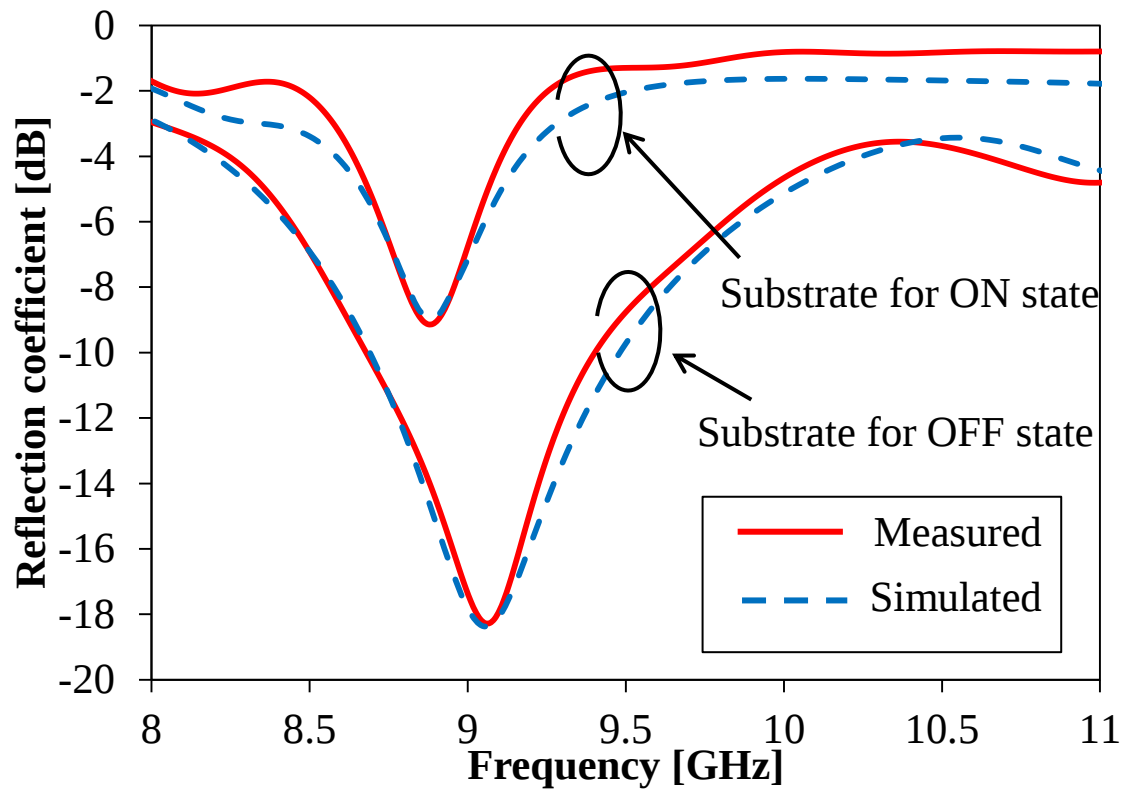


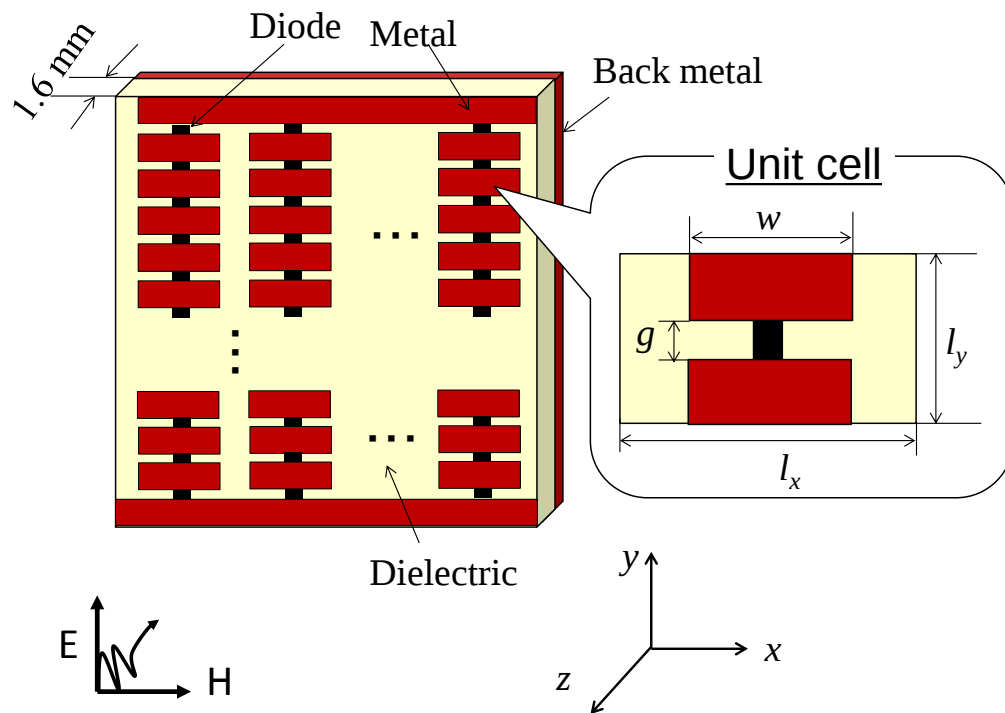
図 2.11 反射率の解析結果と測定結果の比較

2.3 周期構造の検討

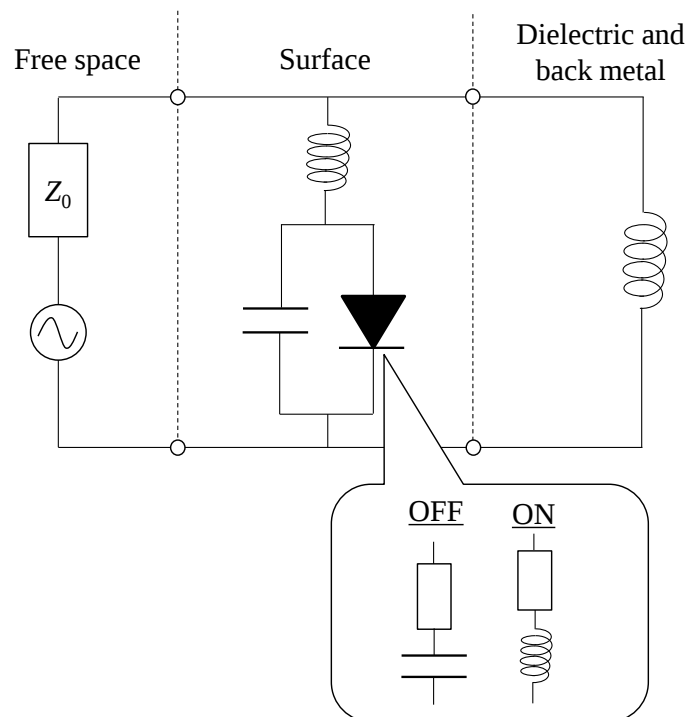
2.3.1 構造及び等価回路

前項で得られたダイオードの緒元から、ダイオードが OFF 状態の方が抵抗値が大きいため、設計する電波吸収/反射切替板では、ダイオードが OFF 状態で電波吸収体、ON 状態で反射板として機能するように設計する。図 2.12 に本研究で提案する電波吸収/反射切替板の構造及び等価回路を示す。図 2.12(a)に示すとおり、ダイオード測定用基板と同様の誘電体基板表面に金属パターン及びダイオードが配置されている。金属パターンは x 方向に間隔 l_x で幅 w の金属帯が配置され、それぞれの金属帯は y 方向に間隔 l_y でギャップ幅 g のギャップを設け、そのギャップにダイオードを装荷している。ここで、入射波は $-z$ 方向、偏波は y 方向としている。切替板両面の上下には DC 電圧用直流電源ラインを配置している。

図 2.12(b)に示すとおり、等価回路はダイオード測定用基板と同様であり、ダイオードが OFF 状態では抵抗とキャパシタの直列回路となり、共振周波数においてダイオードの抵抗により切替板のインピーダンスが自由空間のインピーダンス Z_0 と整合することにより電波吸収体として機能する。一方、ダイオードが ON 状態では切替板が同周波数において共振せず、抵抗も小さくなるため、反射する。なお、本研究では、9GHz において電波吸収体と反射板を切り替える切替板の実現について検討した。



(a)構造



(b)等価回路

図 2.12 電波吸収/反射切替板の構造及び等価回路

2.3.2 周期構造による反射率への影響

切替板表面の周期構造による反射率への影響について検討した．周期構造のパラメータは図 2.12(a)に示すとおり， l_x , l_y , w , g の4つである．ダイオードを OFF 状態として X 帯で共振するように各パラメータの基準を設定し，それぞれのパラメータを変化させて反射率の変化を解析した．各パラメータの基準及び変化を表 2.2 に示す．

図 2.13 に解析モデルを示す．解析は切替板の1ユニットセルを解析する手法であり， x - y 面に電気壁， y - z 面に磁壁とした周期境界条件を用いて反射率を解析した．なお，このときのダイオードは OFF 状態として 2.2 項で得られた 40Ω の抵抗及び 0.1pF のキャパシタの直列回路として解析した．

表 2.2 パラメータの基準及び変化量

	l_x	l_y	w	g
基準	15 mm	5 mm	10 mm	2.0 mm
変化量	± 3 mm	± 1 mm	± 3 mm	± 0.5 mm

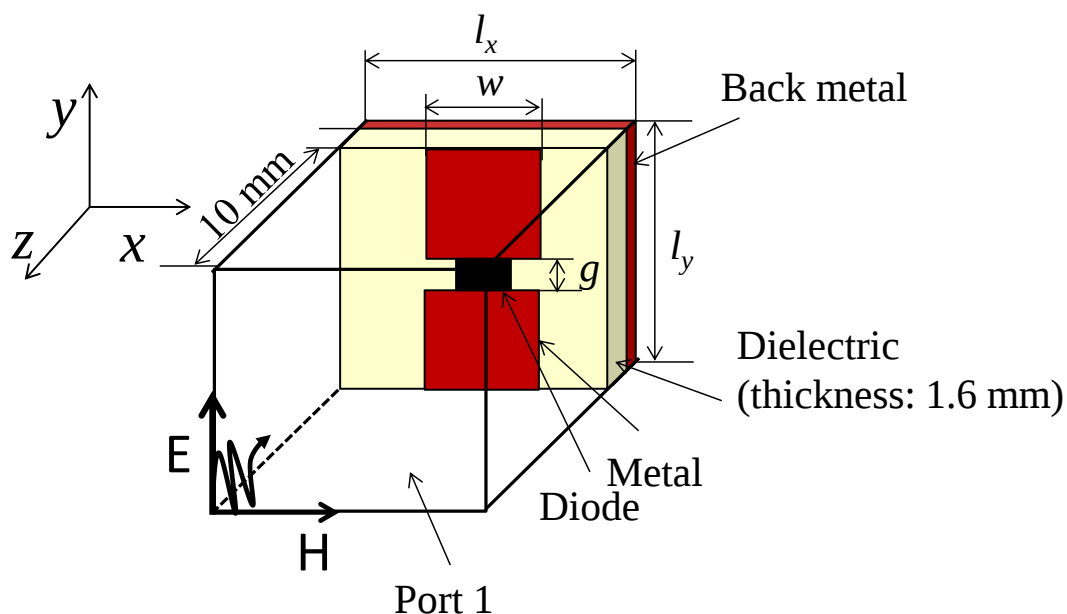


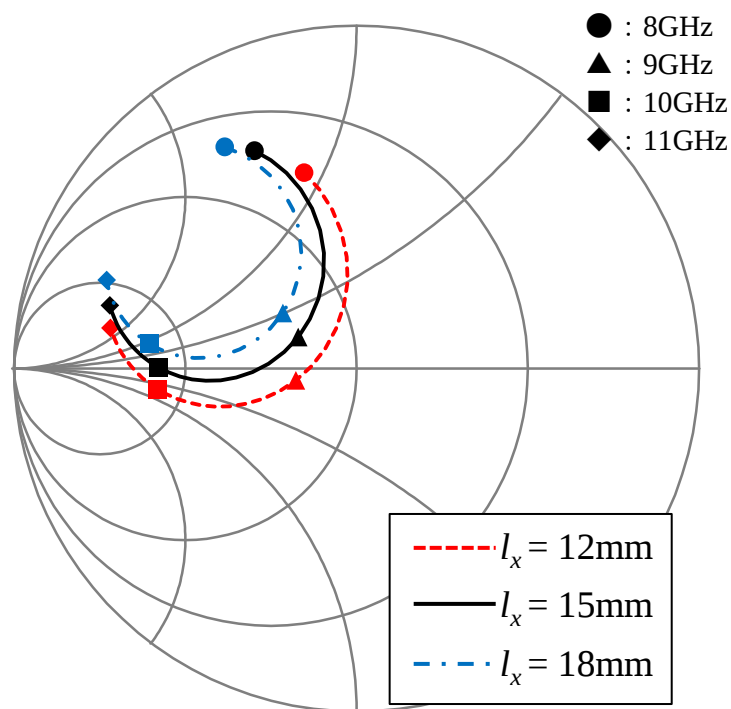
図 2.13 反射率の解析モデル

図 2.14 に l_x に対する反射率の変化を示す. 図 2.14(a)のアドミタンスチャートの結果から, 共振周波数付近の 9GHz における反射率が l_x の増加とともに等コンダクタンス円を反時計回りに回転する軌跡に近い軌跡を描いていることがわかる. これは図 2.12(b)に示す等価回路において, キャパシタンスが減少していることを示している. この理由は l_x を増加させることにより, 単位面積当たりの並列接続される金属のギャップ数及びダイオード数が減少するため, 等価回路のキャパシタンスが減少しているためである. したがって, 図 2.14(b)に示すとおり, l_x の増加とともに共振周波数が高周波側にシフトしていることがわかる.

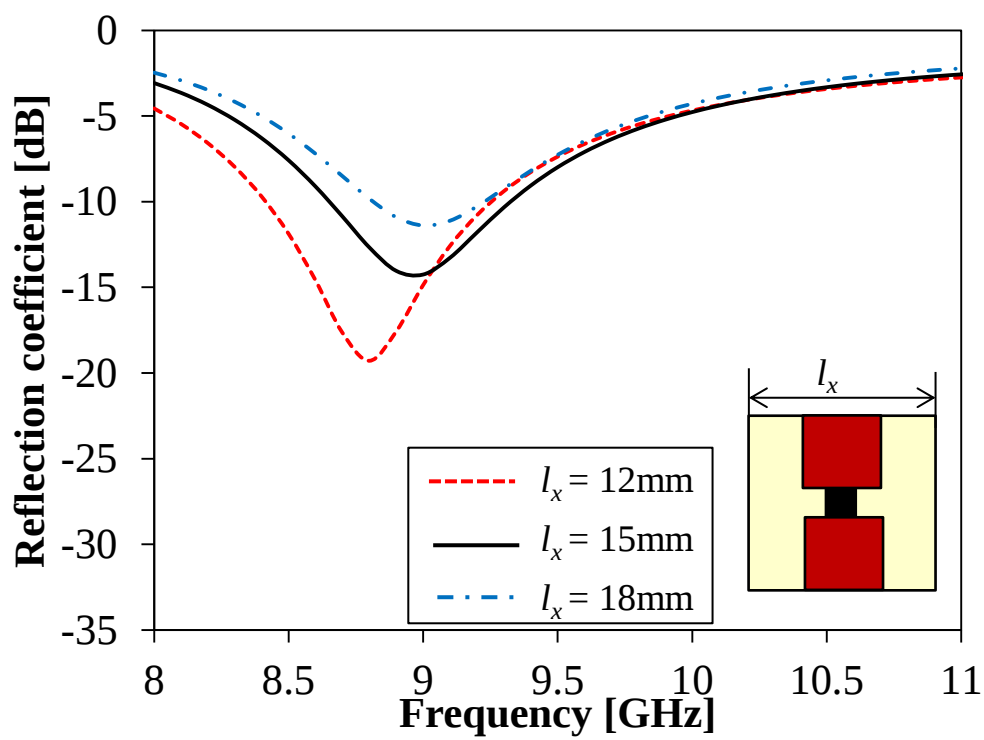
図 2.15 に l_y に対する反射率の変化を示す. 図 2.15(a)のアドミタンスチャートの結果から, l_y の増加とともに等コンダクタンス円を時計回りに回転する軌跡に近い軌跡を描いていることがわかる. これは図 2.12(b)に示す等価回路において, キャパシタンスが増加していることを示している. この理由は l_y を増加させることにより, 単位面積当たりの直列接続される金属のギャップ数及びダイオード数が減少するため, 等価回路のキャパシタンスが増加しているためである. また, l_y の増加とともに抵抗が小さくなる軌跡を描いている. これはキャパシタンスと同様に単位面積当たりの直列接続のダイオード数が減少するため等価回路における抵抗が減少するためである. したがって, 図 2.15(b)に示すとおり, l_y の増加とともに共振周波数が低周波側にシフトしており, そのシフト量は l_x によるシフト量よりも大きいことわかる.

図 2.16 に w に対する反射率の変化を示す. 図 2.16(a)のアドミタンスチャートの結果から, w の増加とともに抵抗が大きくなることがわかる. これはダイオードに電流が流れて抵抗として動作するときの整合に影響しているためであると考えられる. また, 図 2.16(b)に示すとおり, w による共振周波数への影響は小さい. したがって, ダイオードの抵抗は不変であるが, 共振周波数を一定に保ったまま w を変化させることによって等価回路における抵抗を変化させて整合を取ることができる.

図 2.17 に g に対する反射率の変化を示す. 図 2.17(a)のアドミタンスチャートの結果から, g の増加とともに抵抗が小さくなることがわかる. これは w と同様にダイオードが抵抗として動作する際の整合に影響しているためであると考えられる. また, 図 2.17(b)に示すとおり, g の増加とともに共振周波数が高周波側にシフトしていることがわかる. これはギャップ幅が大きくなるため, ギャップによるキャパシタが減少するためである.

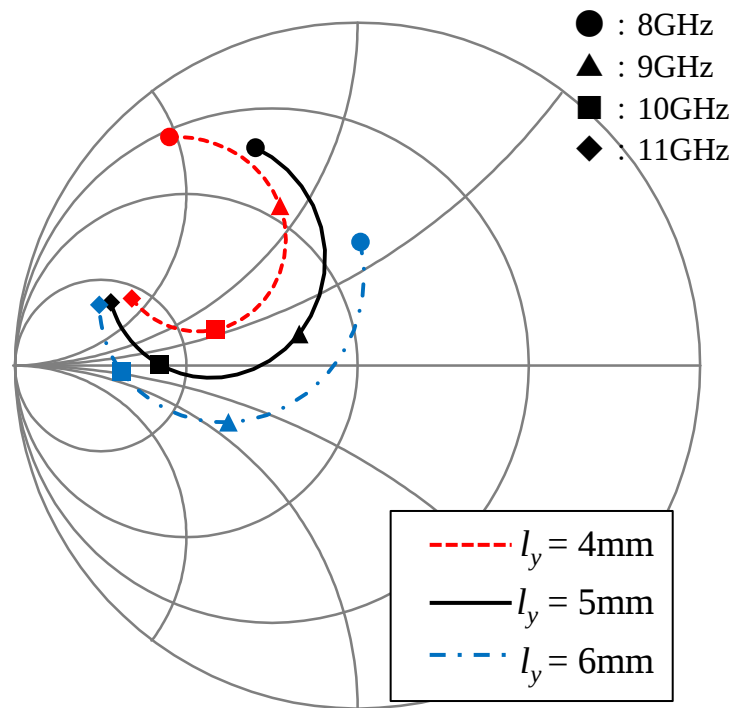


(a) アドミタンスチャート

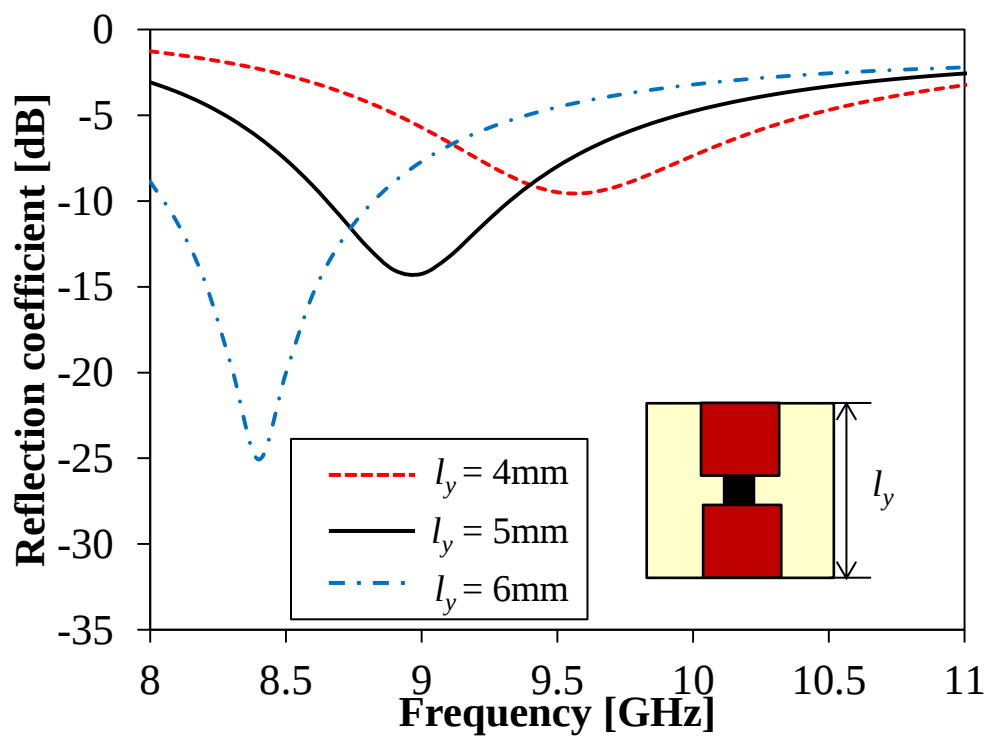


(b) 周波数特性

図 2.14 l_x による反射率の変化

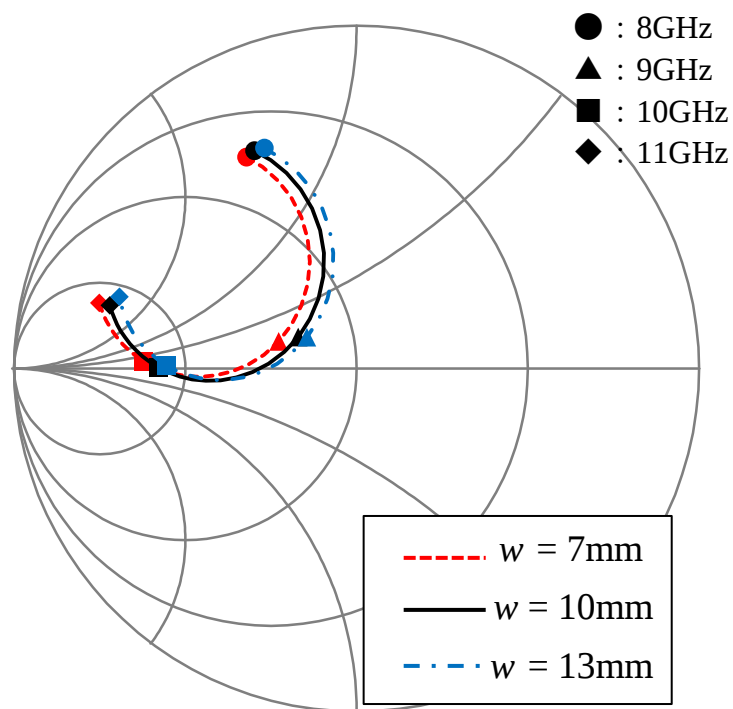


(a) アドミタンスチャート

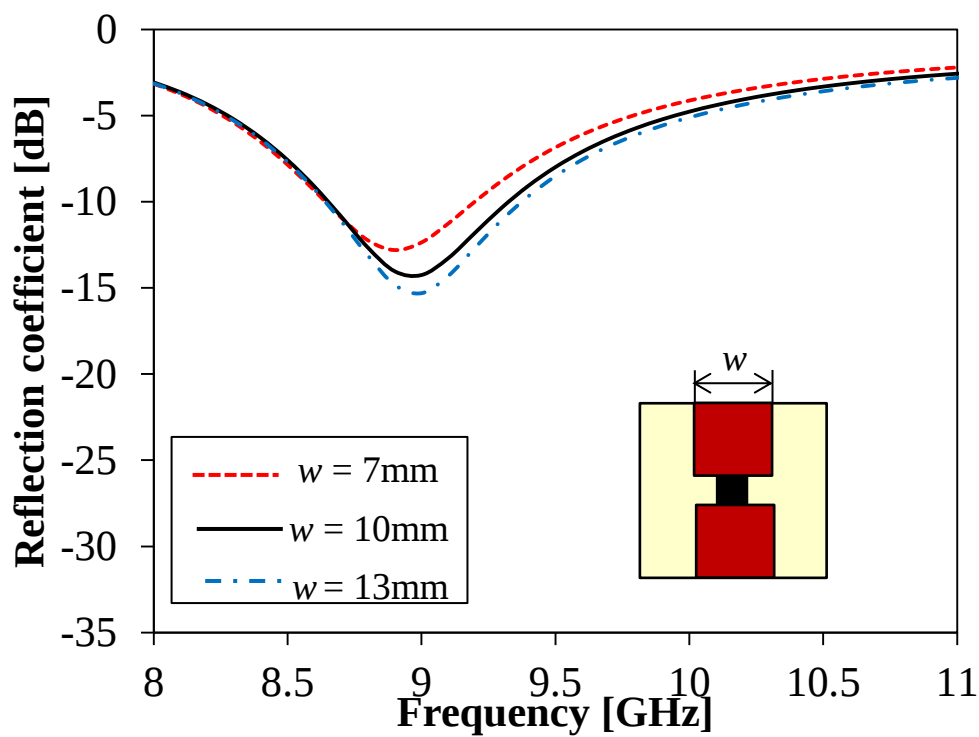


(b) 周波数特性

図 2.15 l_y による反射率の変化

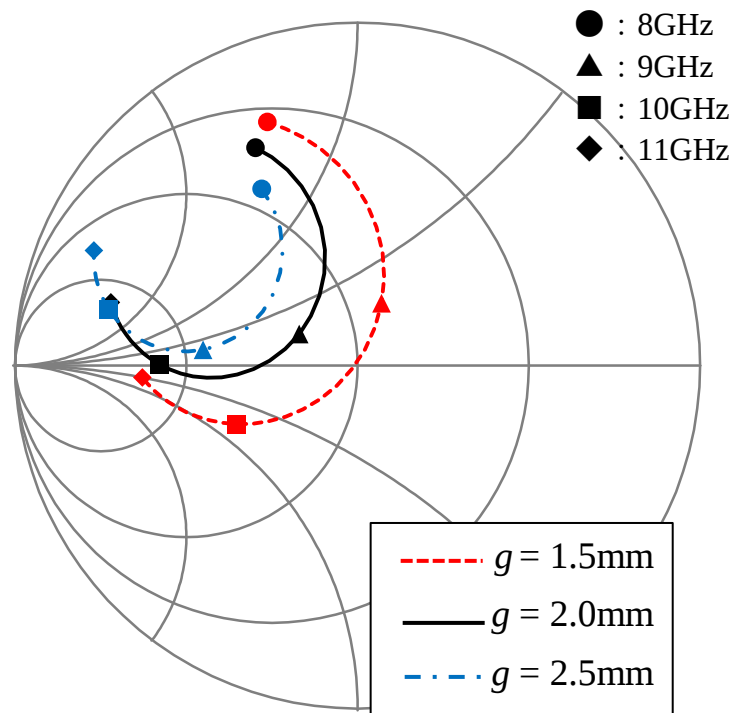


(a) アドミタンスチャート

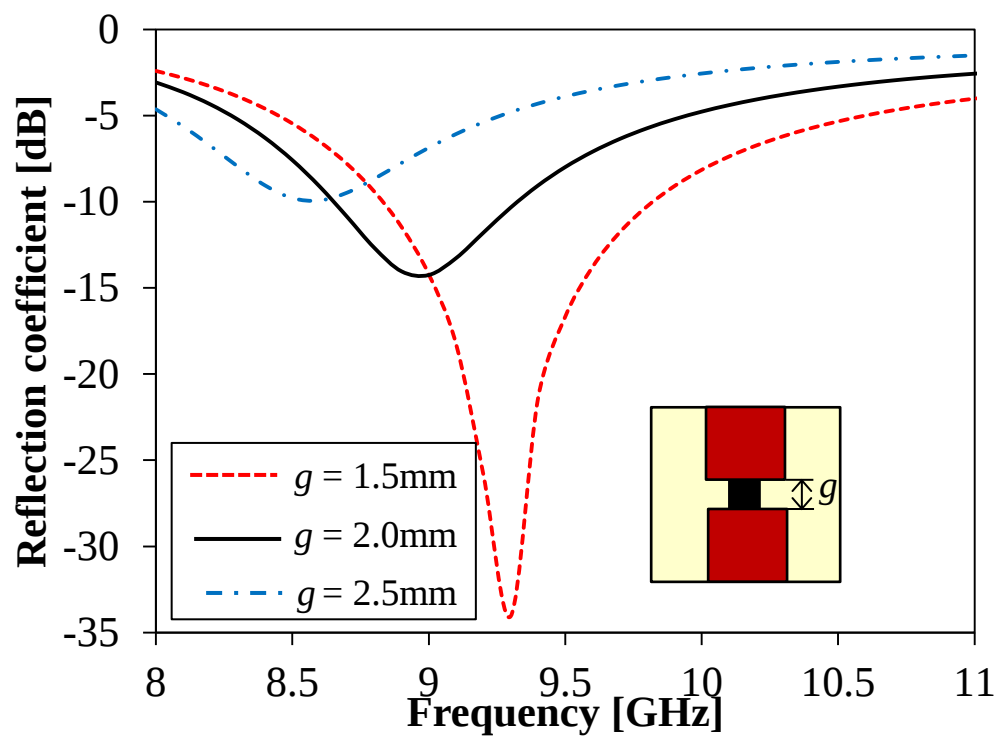


(b) 周波数特性

図 2.16 w による反射率の変化



(a) アドミタンスチャート



(b) 周波数特性

図 2.17 g による反射率の変化

2.3.3 反射率の斜入射特性

前項で示した周期構造が反射率へ与える影響を考慮して、9GHz で電波吸収体として機能するようにそれぞれのパラメータを選定した。図 2.18 に選定した切替板の構造を示す。周期構造は半波長以下となるため、反射波にグレーティングローブは生じない。この構造を用いて、斜入射に対する反射率を解析した。解析モデルは図 2.12 と同様であり、斜入射特性の解析が可能な周期境界条件を用いて1ユニットセルを解析した。

図 2.19 に TE 波における斜入射に対する反射率の解析結果を示す。図 2.19(a) のダイオード OFF 状態では 30° までは 9GHz において -20dB 以下の反射率となり電波吸収体として動作しているが、 45° では共振周波数が低周波側に大きくシフトし、吸収量も減少していることがわかる。一方、図 2.19(b)のダイオード ON 状態では角度によらず -0.1dB 以上の反射率が得られていることがわかる。

図 2.20 に TM 波における斜入射に対する反射率の解析結果を示す。図 2.20(a) のダイオード OFF 状態では 20° まで電波吸収体として動作しているが、 30° で吸収量が減少していることがわかる。また、図 2.20(b)のダイオード ON 状態では角度の増加とともに反射率が減少する傾向があるが、9GHz において -0.5dB 以上の反射率が得られていることがわかる。

通常の誘電損失材料を用いた電波吸収体では、TE 波及び TM 波の斜入射に対して 35° 程度まで吸収特性が得られていることから[53]、本切替板は TE 波に対しては同等、TM 波に対しては少し狭い角度範囲となった。TM 波では、角度が大きくなると入射電界と平行なギャップ幅が異なるようになり、整合が取れなくなるためであると考えられる。

以上の結果から、検討した構造の切替板は TE 波に対しては正面から 30° ，TM 波に対しては正面から 20° の斜入射において電波吸収/反射切替板として動作することを確認した。

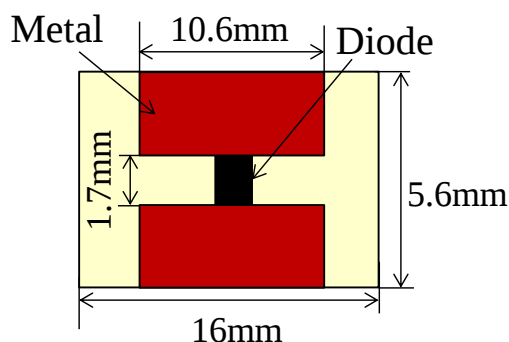
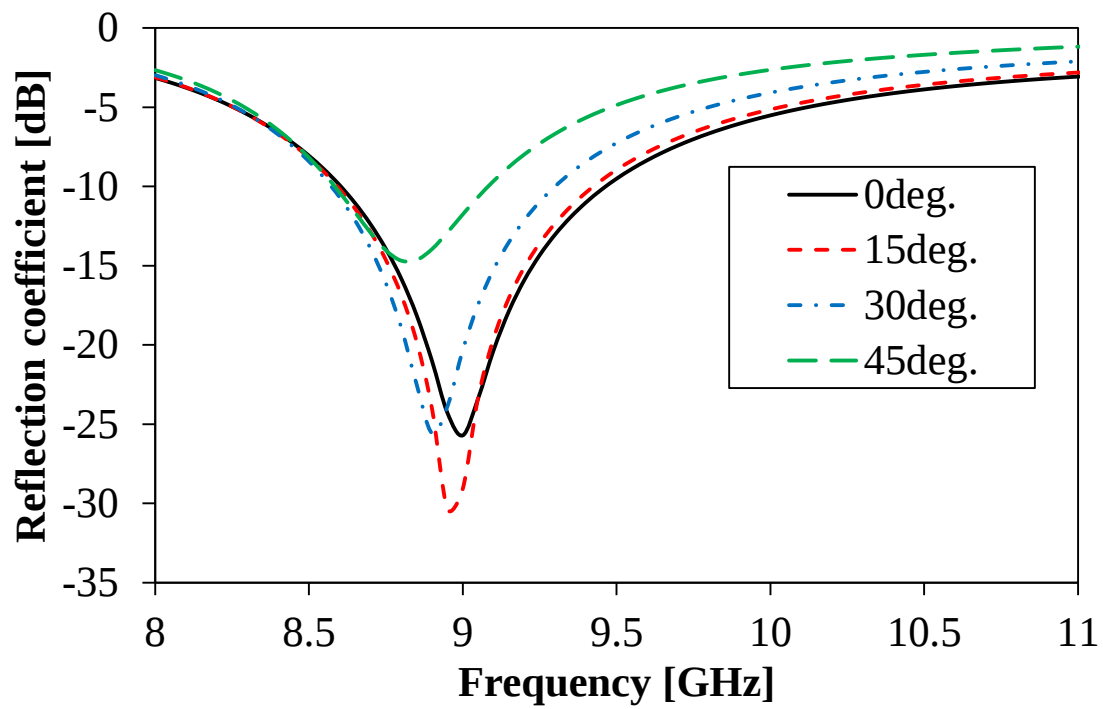
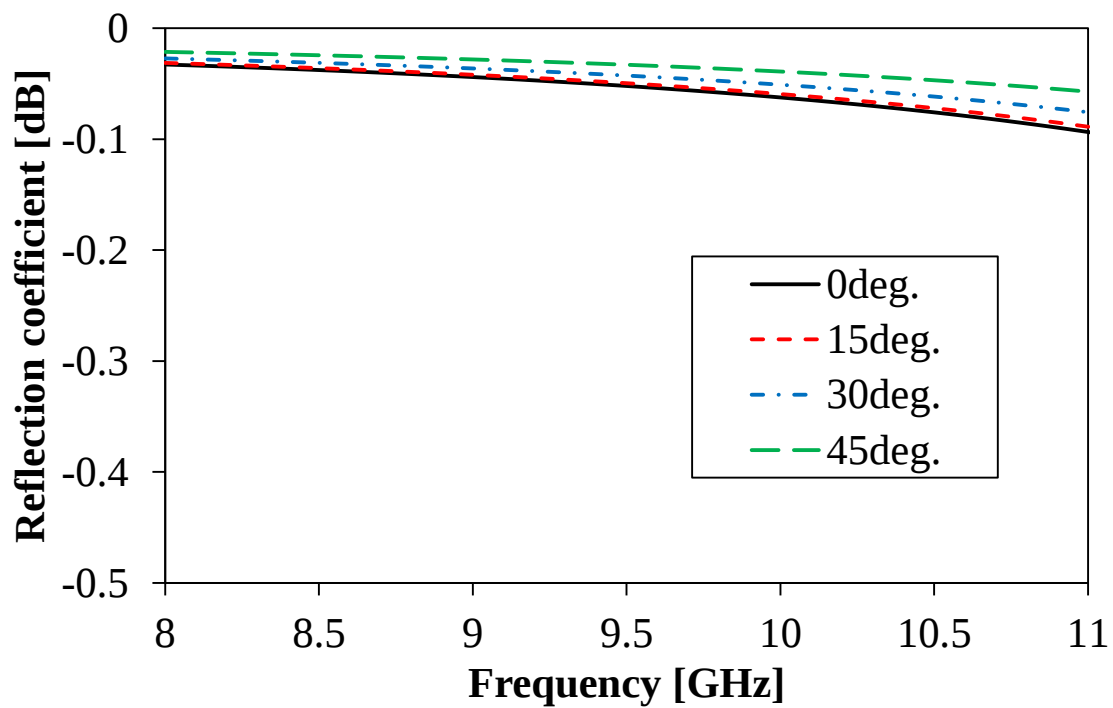


図 2.18 選定したパラメータの周期構造

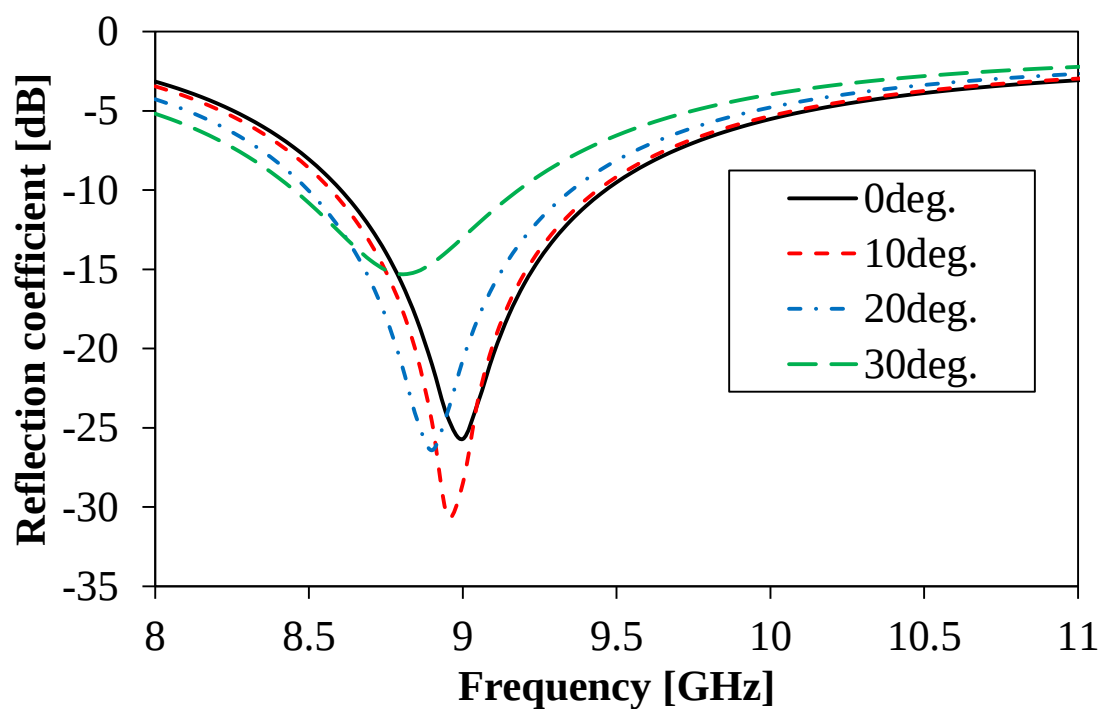


(a) ダイオード OFF

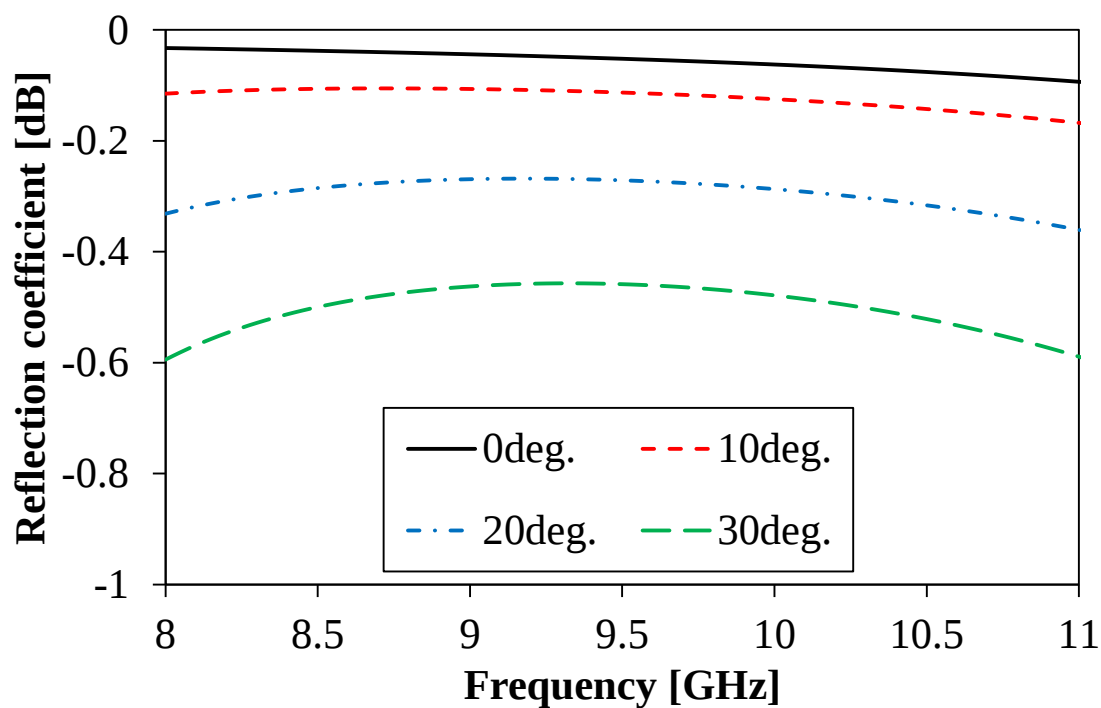


(b) ダイオード ON

図 2.19 斜入射に対する反射率の変化 (TE 波)



(a)ダイオード OFF



(a)ダイオード ON

図 2.20 斜入射に対する反射率の変化 (TM 波)

2.3.4 切替板の試作及び測定結果

前項で選定した構造について、試作評価を実施した。図 2.21 に試作した切替板を示す。試作した切替板は、縦 6 周期×横 2 周期であり、サイズは縦 33.6mm×横 32mm である。また、ダイオードに DC 電圧を印加するために上下に電源線を配線した。

図 2.22 に試作した切替板の反射率の解析モデルを示す。試作基板の大きさは約 1 波長程度となっているため、境界条件を吸収境界条件としたフルモデルの解析手法で反射量を解析し、同サイズの金属板の反射量との相対値で反射率を算出した。

図 2.23 に試作切替板の反射率の解析及び実測結果を示す。結果からダイオードが OFF 状態の場合は 9GHz において反射率が大きく低減されて -21dB となっており、電波吸収体として動作していることがわかる。一方、ダイオードが ON 状態の場合は同周波数において反射率は -0.1dB となり、反射板として動作していることがわかる。また、測定結果は解析結果と概ね一致していることから、設計どおりの切替板が実現できていることを確認した。

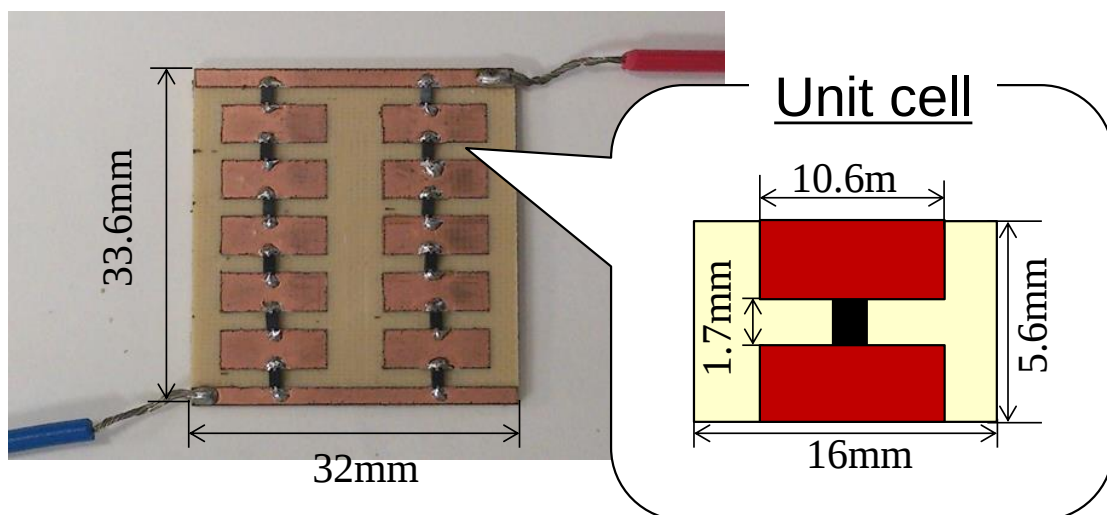


図 2.21 試作した切替板

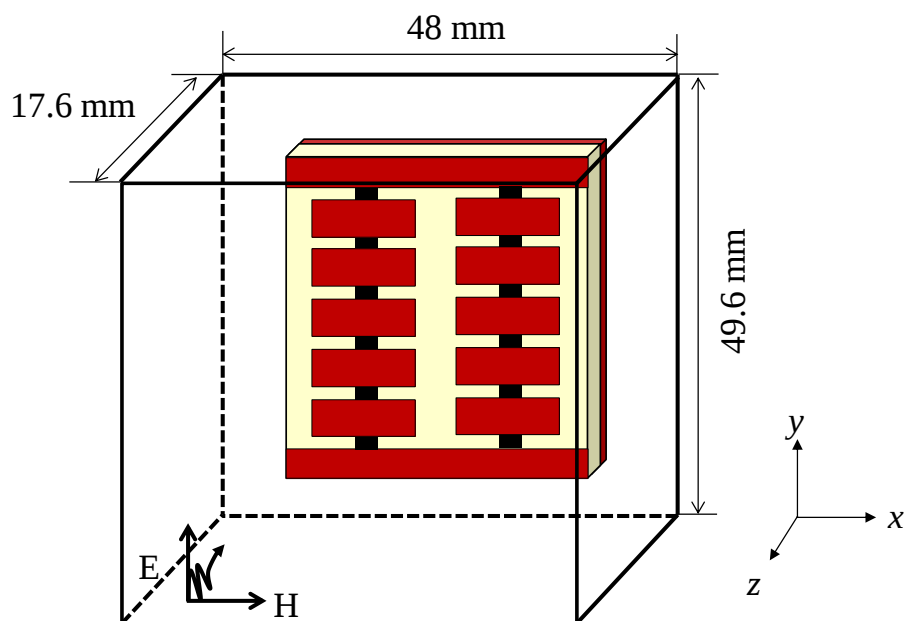


図 2.21 試作した切替板の解析モデル

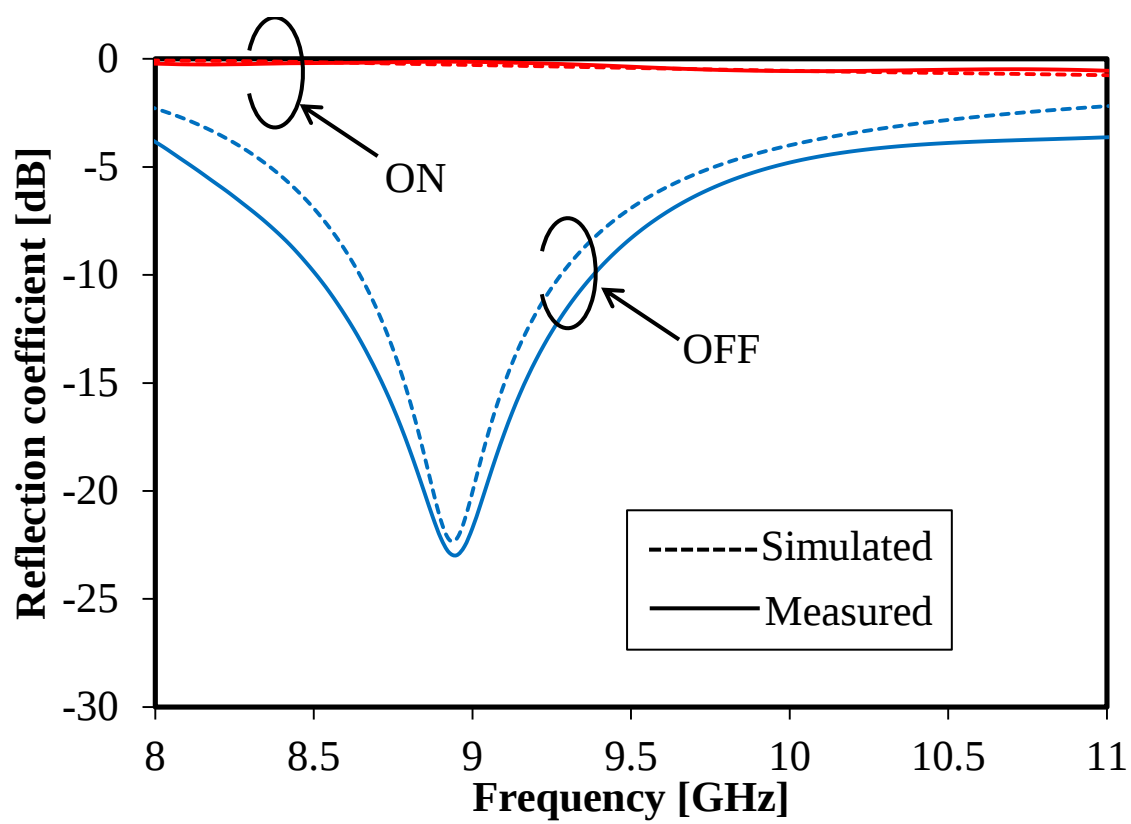


図 2.23 切替板の反射率

2.4 吸収特性の両偏波対応

2.4.1 切替板の構造及び等価回路

前項で試作した切替板に対して、さらに本検討では吸収特性の両偏波対応について検討した。検討する切替板では一方の偏波に対しては電波吸収体と反射板の切替え動作し、他方の交差偏波に対しては電波吸収体として動作する。このような切替板を実現してアンテナリフレクタに適用した場合、アンテナが送受信に用いる偏波に対しては電波送受信時と電波非送信時で電波吸収体と反射板を切替えてアンテナ性能を劣化させずにアンテナからの反射波を低減し、アンテナが送受信に用いない交差偏波に対しては電波吸収体として反射波を低減することが可能となり、さらなる電磁環境改善に寄与するものと考えられる。

図 2.24 に提案する切替板の構造を示す。本切替板は垂直偏波に対して電波吸収/反射切替特性、水平偏波に対しては電波吸収特性を有する。基本的な構造は前項で検討した切替板と同様であり、水平偏波に対して電波吸収体として動作するため、水平方向に r [Ω] のチップ抵抗が装荷されている。ユニットセルは図に示すとおりであり、水平方向の周期はグレーティングローブが発生しないように半波長となる 16mm とした。また、アンテナリフレクタに適用した場合、アンテナを設置するために中央に 1.5mm のスペースを設けている。

図 2.25 に切替板の等価回路を示す。図 2.25(a) の垂直偏波に対しては前項の等価回路と同様であり、ダイオードの OFF, ON により反射率を切替えることができる。図 2.25(b) の水平偏波に対しては、垂直偏波とほぼ同様の等価回路となるが、ダイオードの部分がチップ抵抗による抵抗に置き換えられている。

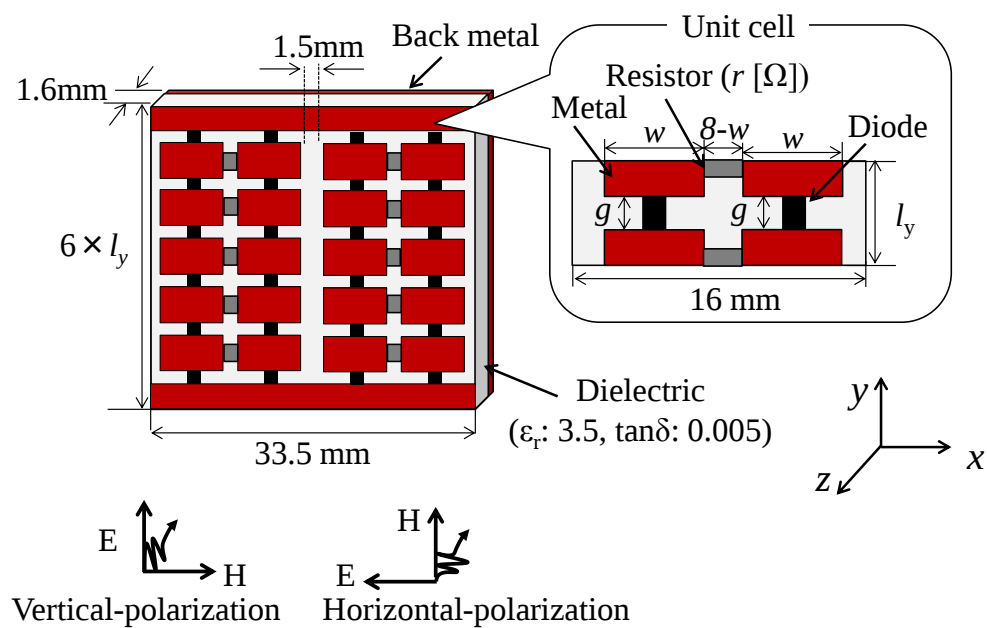
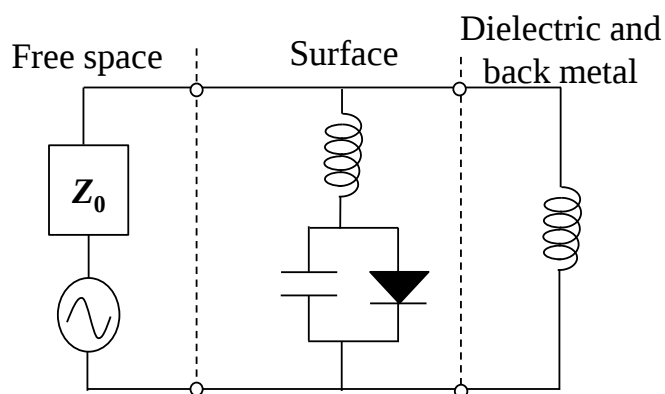
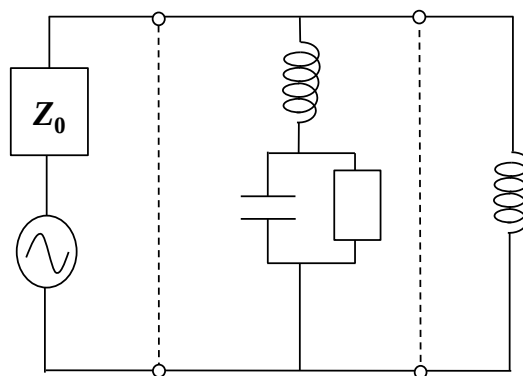


図 2.24 切替板の構造



(a) 垂直偏波



(b) 水平偏波

図 2.25 切替板の等価回路

2.4.2 切替板の設計

本切替板では、9GHz において垂直偏波に対してダイオード OFF 状態で吸収体、ON 状態で反射板として動作し、水平偏波に対しては吸収体として動作するように設計した。設計パラメータは図 2.24 に示す構造において、 l_y 、 w 、 g 及び r となり、多くのパラメータがある。ここで、ダイオードを装荷するためのギャップ幅 g 及びチップ抵抗を装荷するためのギャップ幅 $8-w[\text{mm}]$ はそれぞれの回路素子の大きさに制約されて大きく変化させることができないため、 $g=2\text{mm}$ 、 $w=7\text{mm}$ （チップ抵抗を装荷するギャップは 1mm ）に初期設定し、他のパラメータ l_y 及び r を変化させることにした。

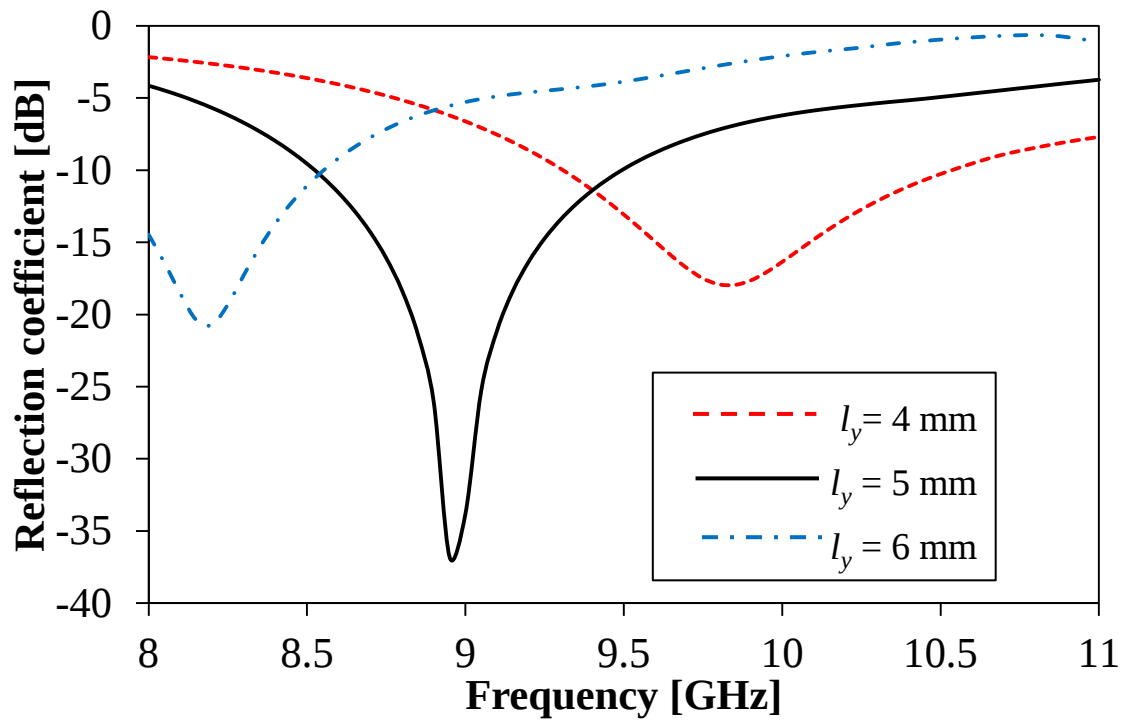
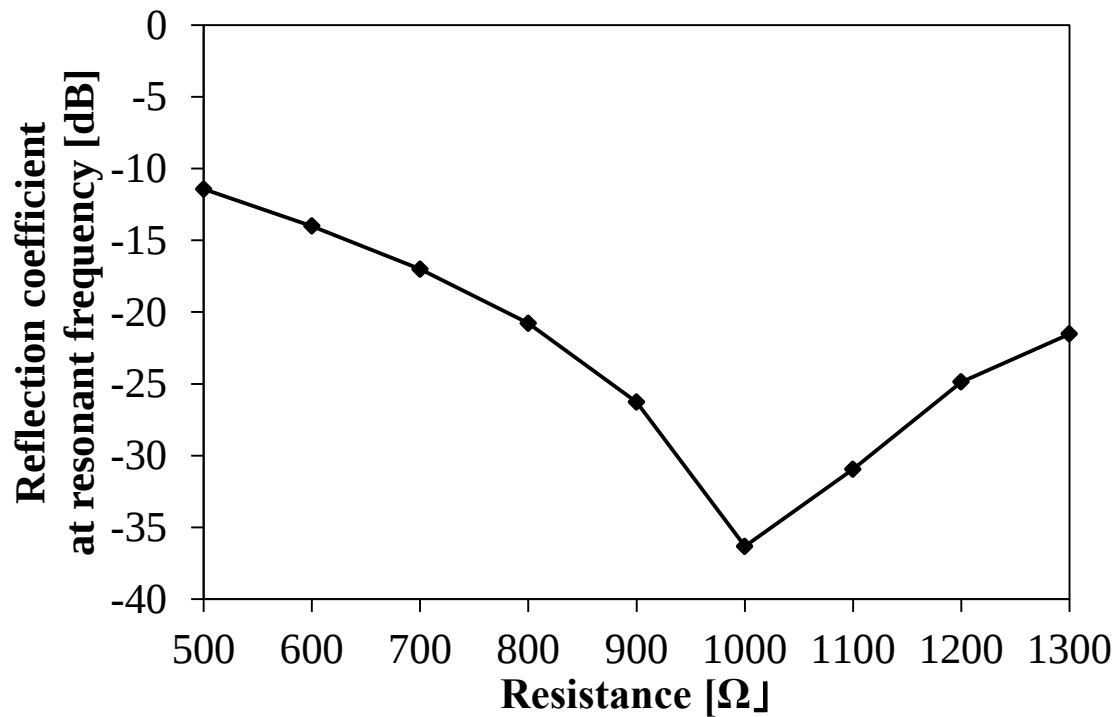
解析手法は 2.3.4 項と同様であり、供試体から 16mm 離れた位置に吸収境界条件を適用し、フルモデルの切替板に対して反射量を解析し、同サイズの金属板からの反射量との相対値から反射率を算出した。

図 2.26 にダイオードが OFF 状態で l_y を変化させた場合の垂直偏波における反射率の解析結果を示す。なお、この解析において、チップ抵抗は配置していない状態とした。結果から、 l_y を大きくすると共振周波数が低周波側にシフトしていることがわかる。これは 2.3.2 項で述べたとおり、単位面積当たりの直列接続したギャップ及びダイオードの数が減少するため、図 2.25(a) の等価回路におけるキャパシタンスが増加するためである。また、ダイオードの数が変化するため、抵抗の値も変化し、 l_y を 5mm とした場合に整合しており、反射率が -33.8dB になっている。したがって、9GHz において吸収体として動作させるため $l_y=5\text{mm}$ とした。

次に水平偏波に対して吸収体として動作するため、チップ抵抗を配置して r を変化させた。図 2.27 に水平偏波に対して、 r を変化させた場合の共振周波数における反射率の解析結果を示す。 r によって共振周波数における反射率は変化しており、 r を $1\text{k}\Omega$ とした場合に反射率が最も低減して -36dB となった。したがって、水平偏波に対して吸収体として動作させるため、 $r=1\text{k}\Omega$ とした。また、このときの共振周波数は 8.9GHz となった。

2.3.2 項で示したとおり、共振周波数は素子を設置するギャップ幅によって変化するため、水平方向のギャップ幅 ($8-w[\text{mm}]$) を調整するために w を変化させて水平偏波に対して 9GHz で共振し、吸収体として動作するように設計した。 w を変化させた場合の水平偏波の反射率の解析結果を図 2.28 に示す。 w を増加すると共振周波数は高周波側にシフトすることが確認でき、 w が 6.9mm の場合に共振周波数が 9GHz となっていることがわかる。したがって、水平偏波に対して吸収体として動作させるため、 $w=6.9\text{mm}$ とした。

以上から、 $l_y=5\text{mm}$ 、 $r=1\text{k}\Omega$ 、 $w=6.9\text{mm}$ として設計した切替板の両偏波に対する反射率の解析結果を図 2.29 に示す。結果から設計周波数である 9GHz において、垂直偏波に対してはダイオードが OFF 状態では-24.7dB となって吸収体として動作しており、ダイオードが ON 状態では-0.5dB となり反射板として動作していることがわかる。一方、水平偏波に対してはダイオードが OFF 及び ON 状態において-30dB 以下となり、ダイオードの状態に因らず常に吸収体として動作することを確認した。設計では、垂直偏波、水平偏波それぞれに対して設計したが、それぞれ設計で用いたパラメータが他方の偏波に大きく影響せず、それぞれの偏波の特性が両立可能であることを確認した。

図 2.26 l_y の変化に対する反射率（垂直偏波）図 2.27 r の変化に対する共振周波数における反射率（水平偏波）

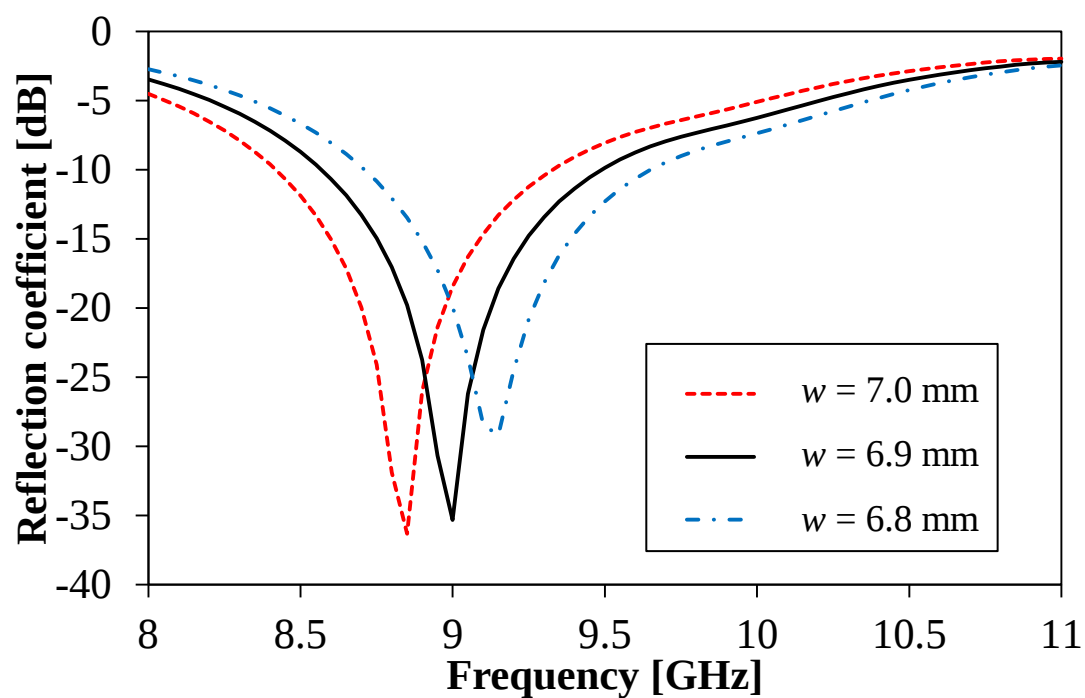


図 2.28 w の変化に対する反射率 (水平偏波)

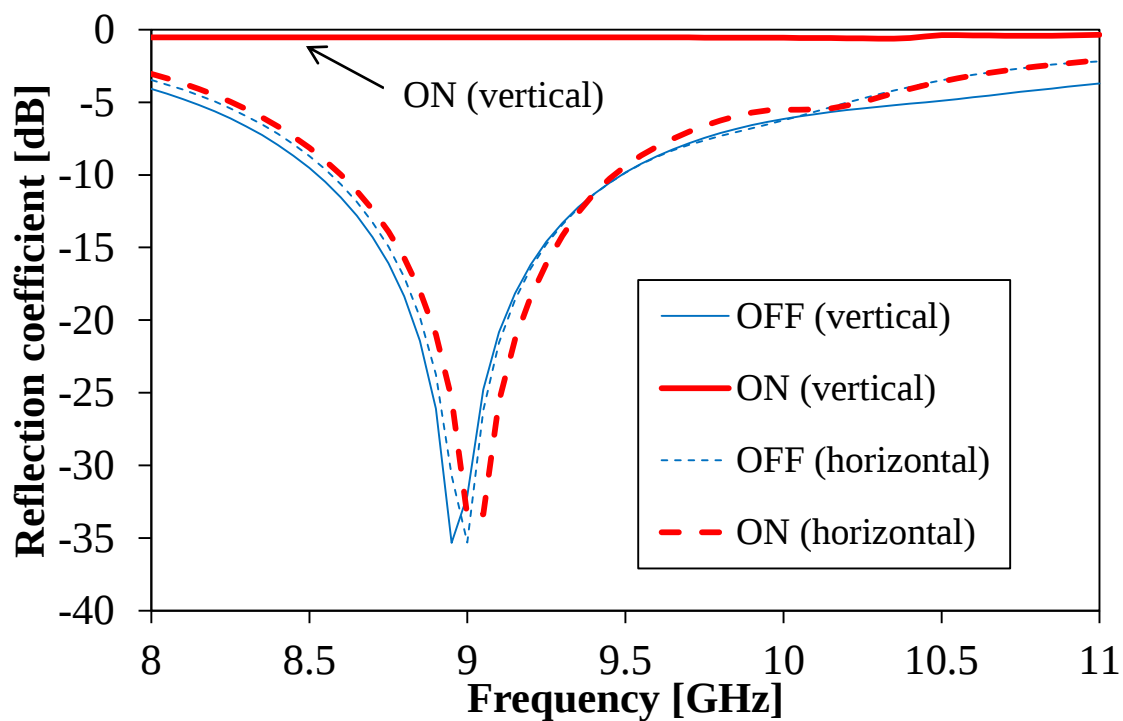


図 2.29 設計した切替板の反射率

2.4.3 切替板の試作評価

前項で設計した両偏波対応電波吸収/反射切替板を試作し、反射率を測定した。図 2.30 に試作した切替板を示す。また、用いた $1\text{k}\Omega$ のチップ抵抗（釜屋電機 型番：RMC1/16SK102FTH）の諸元を表 2.3 に示す。

図 2.31 に垂直偏波に対する試作切替板の反射率の解析及び測定結果を示す。結果からダイオードが OFF 状態の場合は 9GHz において反射率が大きく低減されて -25dB となっており、電波吸収体として動作していることがわかる。一方、ダイオードが ON 状態の場合は同周波数において反射率は -0.7dB となり、反射板として動作していることがわかる。また、測定値は解析結果と概ね一致していることから、設計どおりの切替板を実現できていることを確認した。また、図 2.32 にダイオードが ON 状態で反射板として動作した場合の反射率の位相を示す。金属板からの反射位相は $\pm 180^\circ$ であるのに対して、切替板の反射位相は 9GHz において 45° 程度の差が生じているのがわかる。これは切替板の金属パターン及びダイオードのインダクタンスにより位相がシフトしているためである。切替板を反射板として動作させ、アンテナリフレクタに適用した場合、この位相差が影響することも考えられるため、第 3 章の放射パターン評価において確認する。

図 2.33 に水平偏波に対する試作切替板の反射率の解析及び実測結果を示す。解析結果に対して測定結果の共振周波数が 100MHz 程度高周波側にシフトしているのは試作誤差によるものと考えられる。しかし、 9GHz においてダイオードの状態に因らず -20dB 程度の反射率となっており、電波吸収体として動作していることがわかる。

以上の試作評価の結果から、垂直偏波に対してはダイオードが OFF 状態では電波吸収体、ON 状態では反射板として動作し、切替特性が設計どおりに得られていることを確認した。また、水平偏波に対してはチップ抵抗により電波吸収体として動作し、設計どおりの特性が得られていることを確認した。したがって、両偏波に吸収特性を対応させた電波吸収/反射切替板が設計どおりに実現したことを確認した。

表 2.3 チップ抵抗の主な諸元

Size	1.6mm×0.8mm×0.45mm
Resistance tolerance	1%
Rated power	0.1W

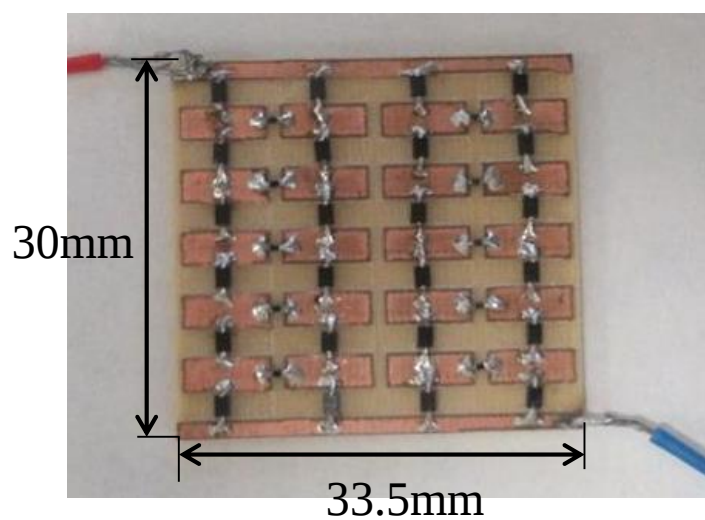


図 2.30 試作した切替板

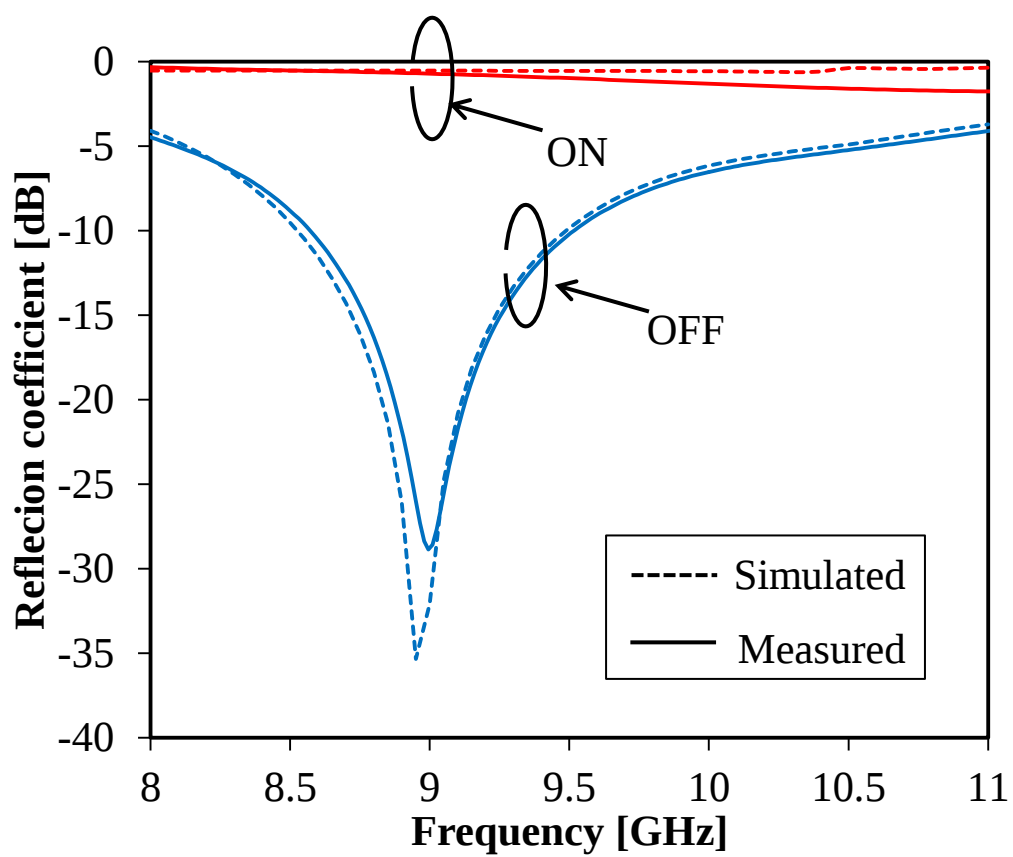


図 2.31 切替板の反射率（垂直偏波）

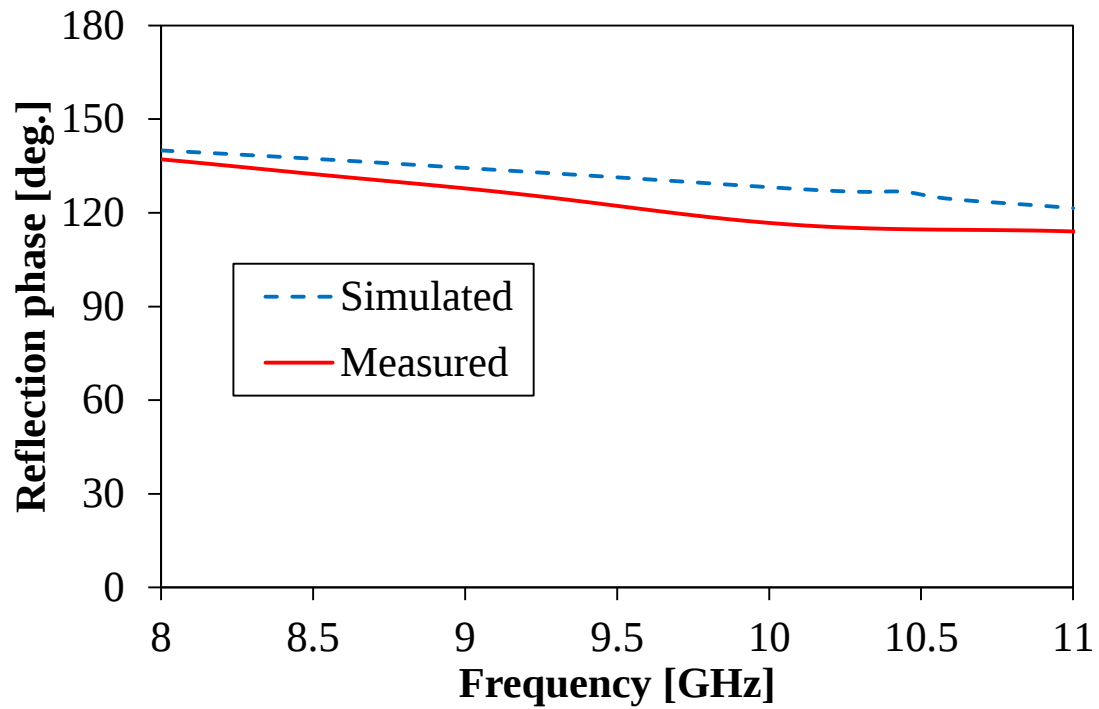


図 2.32 ダイオード ON 時の切替板の反射位相（垂直偏波）

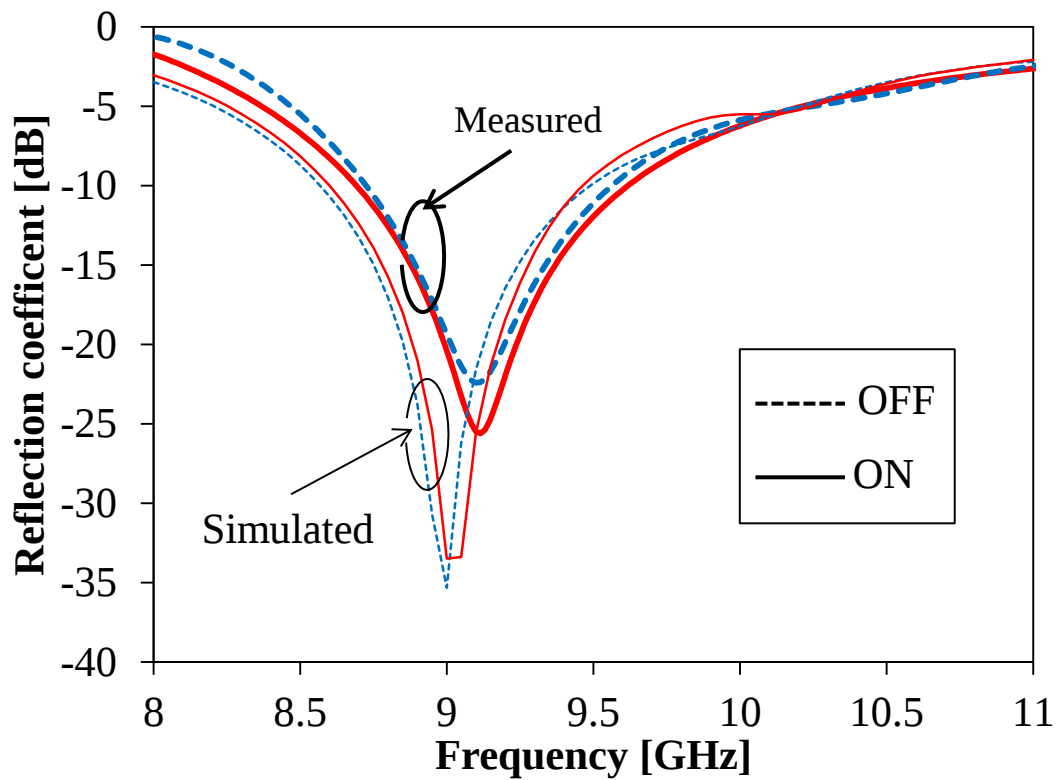


図 2.33 切替板の反射率（水平偏波）

2.5 むすび

本章では、電波吸収体と反射板を切替え可能な電波吸収/反射切替板を設計し、試作評価を行った。その結果は次のとおりである。

まず、ダイオードの ON/OFF における緒元について、ダイオードを配置した基板の反射率から測定した結果、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 1.5Ω の抵抗の直列回路となった。

次に、測定したダイオードの緒元を用いて、切替板の金属パターンによる反射率への影響について等価回路を用いて検討し、 9GHz の垂直偏波に対して切替え可能な切替板を試作評価した結果、ダイオードが OFF 状態の反射率は -21dB で吸収体として動作しており、ダイオードが ON 状態の反射率は -0.1dB で反射板として機能していることを確認した。

さらに、垂直偏波に対しては切替板、水平偏波に対しては吸収体として動作する切替板を設計及び試作評価し、垂直偏波に対しては反射率 -25dB と -0.7dB の切替え動作、水平偏波に対しては反射率 -20dB の吸収体として動作することを確認した。

それぞれの切替板は設計どおりの結果が得られたことから、電波吸収体と反射板を切替え可能な電波吸収/反射切替板を設計どおりに実現可能であることを示した。

第3章 アンテナリフレクタへの適用

3.1 はじめに

本章では、第2章において試作した吸収特性を両偏波に対応した電波吸収/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た場合の放射パターン及び反射特性を金属板リフレクタの場合と比較してそれぞれ評価した。まず、切替板を反射板として機能させてアンテナリフレクタに適用した場合のアンテナの反射特性及び放射パターンを測定した。次に切替板を電波吸収体として動作させた場合のアンテナの反射波低減効果を測定した。

3.2 放射パターン

3.2.1 アンテナの S_{11} 特性

第2章で試作した切替板をアンテナリフレクタに適用するため、9GHz で動作するダイポールアンテナを試作した。図 3.1(a)に試作したアンテナの構造を示す。アンテナは切替板と同様の誘電率であり、厚さが 0.8mm の誘電体基板に金属パターンを構成したものであり、同軸コネクタを接続して給電した。図 3.1(b)に示すように切替板の中央にスリットを設けてアンテナを設置し、裏側から給電してアンテナを動作させた。

図 3.1(b)の状態、ダイオードを ON として切替板を反射板として動作させた場合のアンテナの S_{11} 特性を測定した。図 3.2 に S_{11} の解析及び測定結果を示す。解析では同軸コネクタもモデル化し、そのコネクタから給電した。解析及び測定結果において、切替板をリフレクタに適用した場合の S_{11} は同サイズの金属板をリフレクタに適用した場合と概ね同様となっていることがわかる。また、解析結果と比較して実測結果の共振周波数が高周波側にシフトしているのは試作誤差に因るものである。結果から、9GHz において試作アンテナの S_{11} は両方のリフレクタの場合において -10dB 以下となっており、アンテナとして動作していることを確認した。

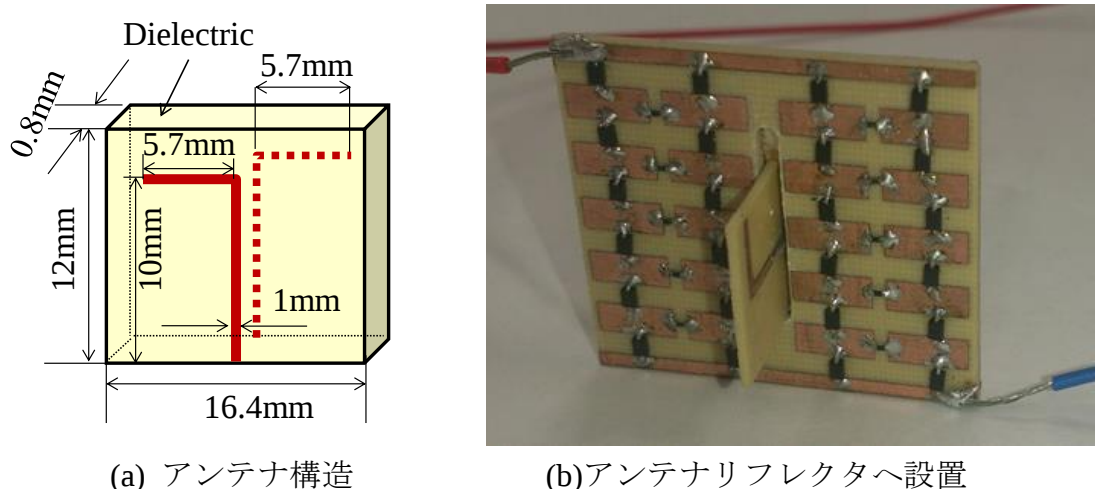


図 3.1 試作したダイポールアンテナ

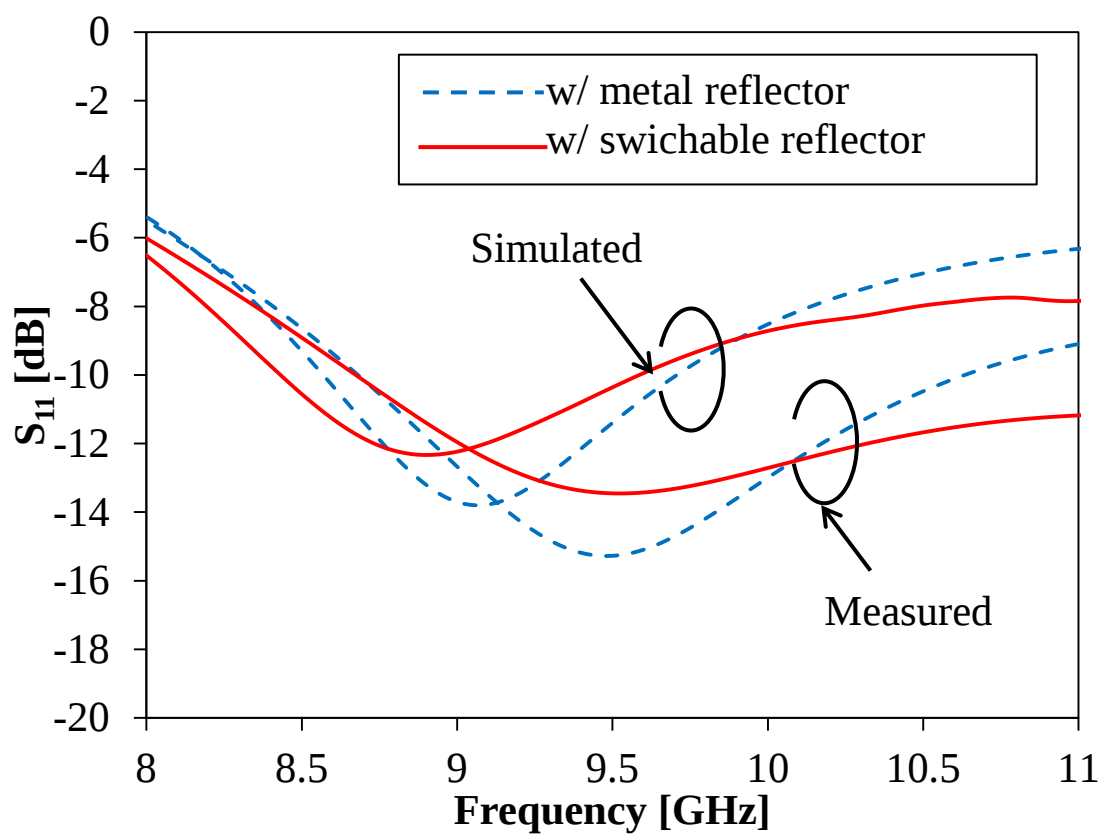


図 3.2 リフレクタ付ダイポールアンテナの S_{11}

3.2.2 放射パターン評価

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アンテナリフレクタに適用し、9GHz における放射パターンを評価した。図 3.3 に放射パターンの座標系を示す。評価する放射パターンは yz 面の E 面と xz 面の H 面の 2 面とした。評価ではダイポールアンテナに切替板をリフレクタに適用した場合と同サイズの金属板をリフレクタに適用した場合の放射パターンを比較した。

図 3.4 に放射パターンの計測系を示す。供試アンテナを回転台に設置し、比較法を用いてアンテナ利得を計測した。

放射パターンの解析手法はフルモデルの解析とし、図 3.1(b)の構造で周辺に吸収境界条件を適用して放射パターンを解析した。

図 3.5 に E 面、図 3.6 に H 面の放射パターンの解析及び測定結果を示す。それぞれの結果から、切替板をアンテナリフレクタに適用した場合の放射パターンは金属板をアンテナリフレクタに適用した場合と同等の放射パターンが得られていることがわかる。また、表 3.1 に正面方向 ($\theta=\phi=0^\circ$) におけるそれぞれの結果を示す。解析及び測定結果において、正面方向に対して約 0.2dB の差で同等の利得が得られていることがわかる。2.4.3 項において、切替板を反射板として動作させた場合、反射位相が金属板と 45° 程度異なっていることを確認したが、アンテナリフレクタに適用した場合の放射パターンにはその位相差による影響は小さいことを確認した。

以上の結果から、ダイオードを ON 状態で反射板として動作させた切替板は金属板と同等のアンテナリフレクタとして機能することを確認した。

表 3.1 正面方向における利得

	w/ metal reflector	w/ switchable reflector
Simulated gain	7.1 dBi	6.9 dBi
Measured gain	6.9 dBi	6.7 dBi

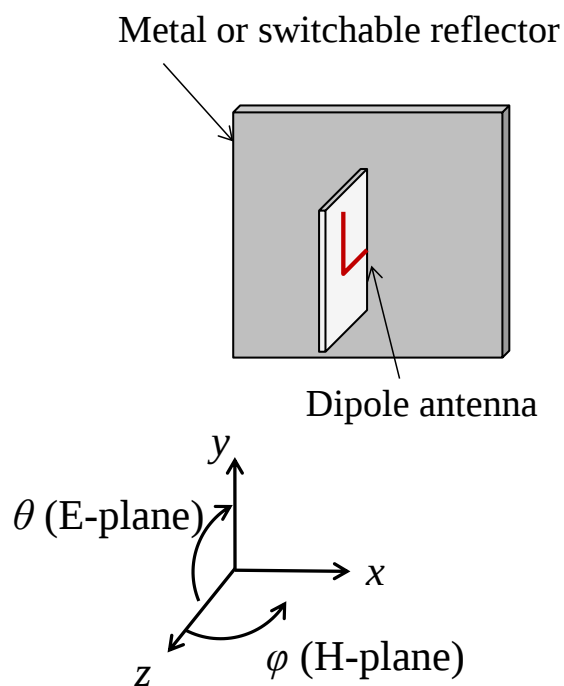


図 3.3 放射パターン座標系

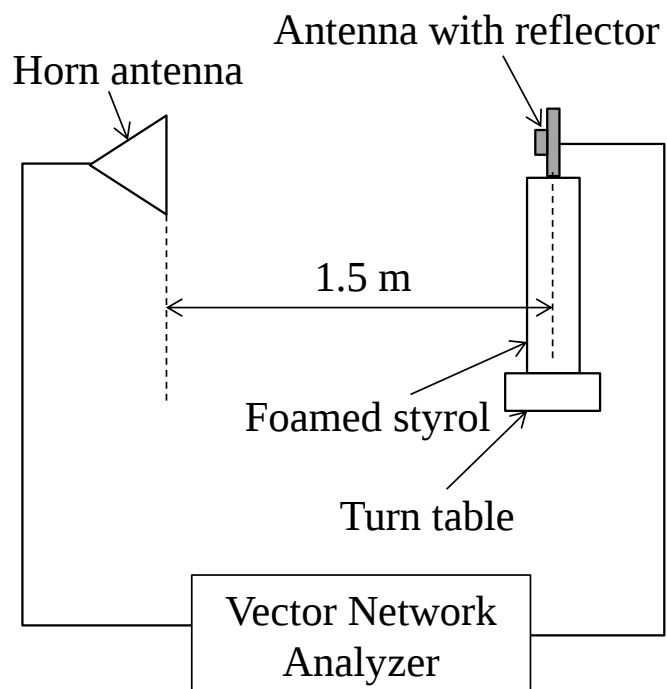


図 3.4 放射パターン測定系

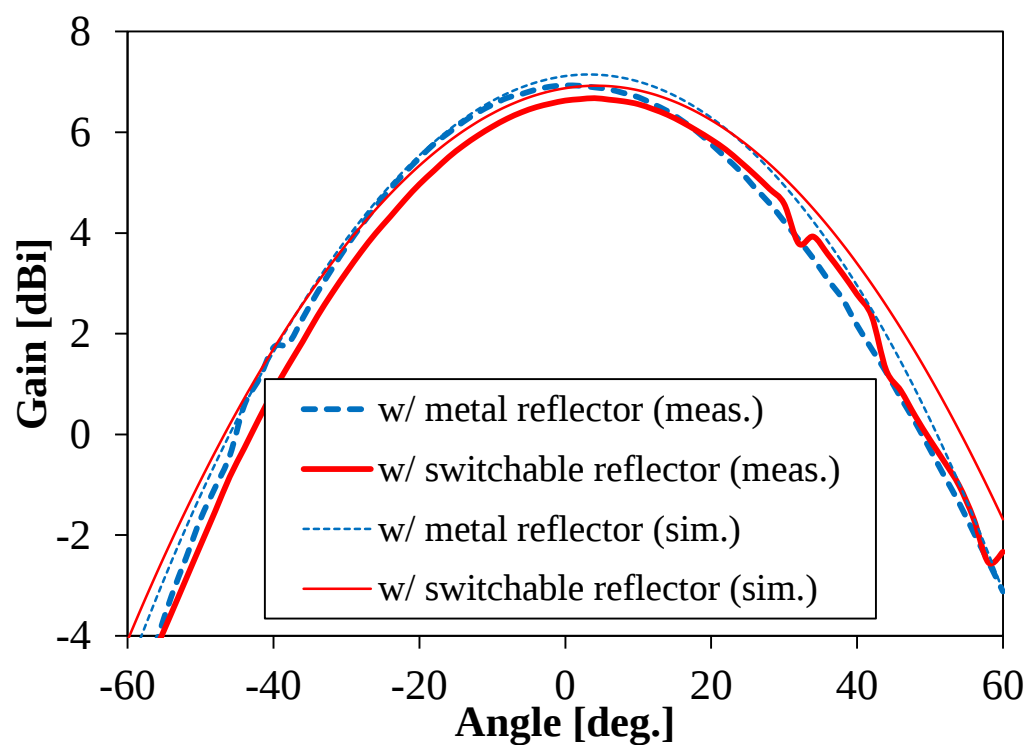


図 3.5 E 面の放射パターン

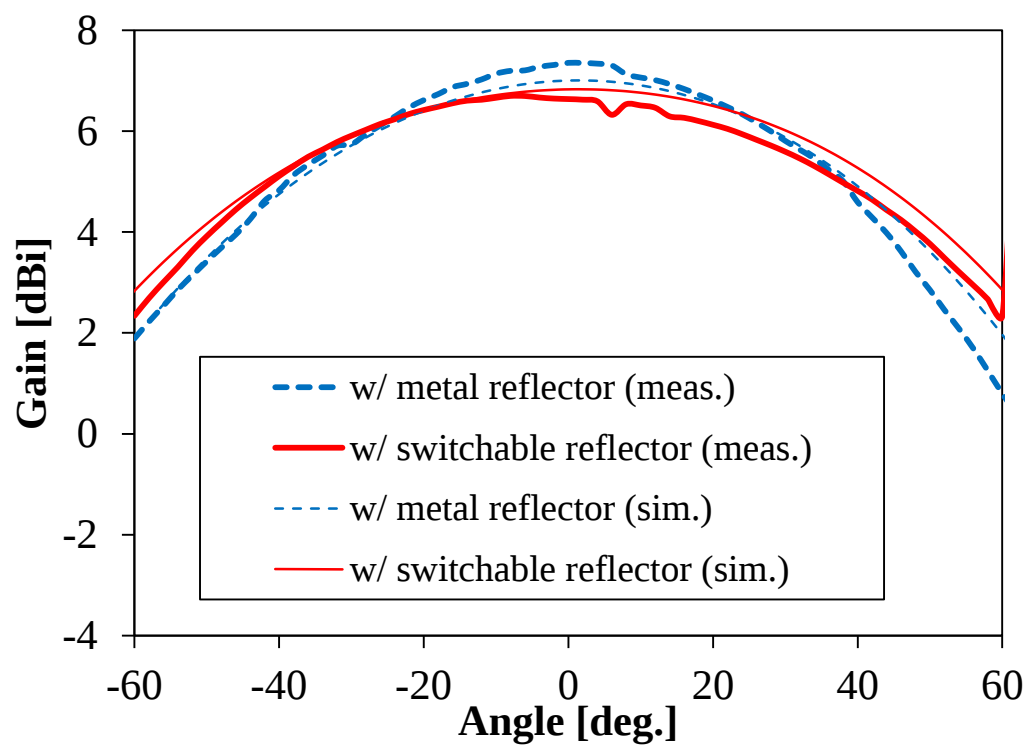


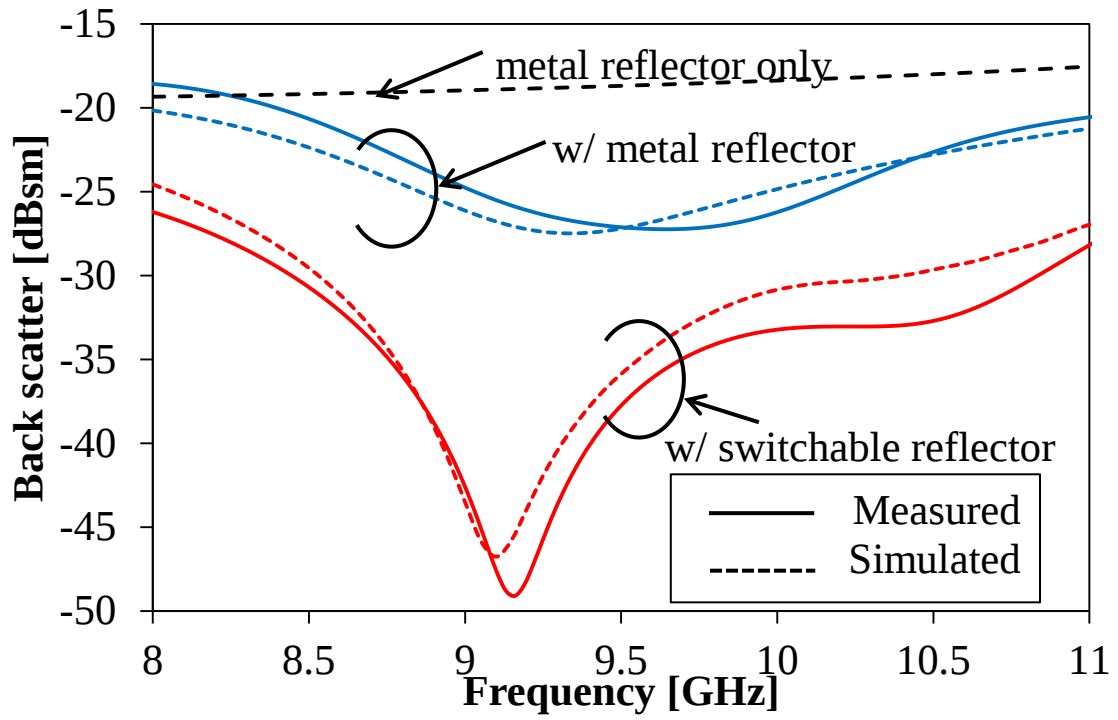
図 3.6 H 面の放射パターン

3.3 反射波低減特性

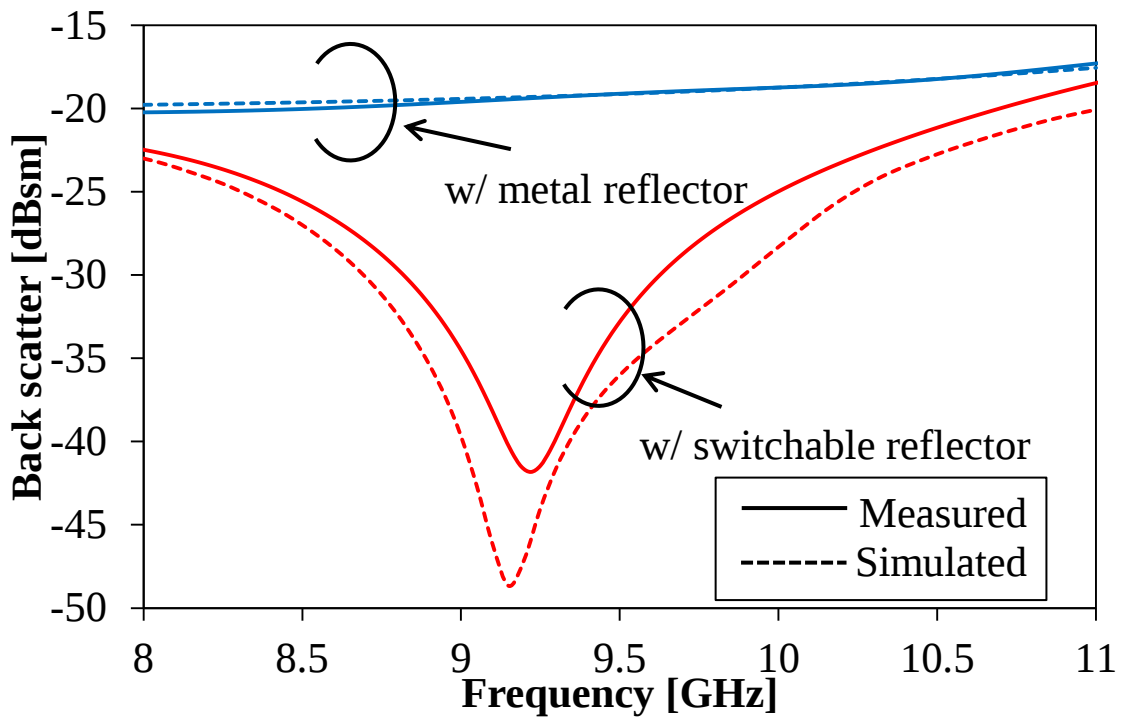
ダイオードを OFF 状態で吸収体として動作させた切替板をダイポールアンテナのアンテナリフレクタに適用し、反射波低減特性を評価した。入射及び反射方向は正面方向とし、図 3.3 の座標系において入射及び反射電波の方向は $-z$ 方向及び $+z$ 方向とした。また、垂直偏波と水平偏波の両偏波について反射波を解析及び測定により評価した。このとき、アンテナ終端からの反射により再放射が発生しないようにダイポールアンテナは 50Ω の抵抗で終端した。評価ではダイポールアンテナに切替板をリフレクタに適用した場合と同サイズの金属板をリフレクタに適用した場合の反射量を比較した。なお、解析は放射パターンと同様に供試体周辺に吸収境界条件を適用したフルモデルの解析手法とした。

図 3.7 にそれぞれの偏波に対する反射特性の解析及び測定結果を示す。図 3.7(a)の垂直偏波の結果では、リフレクタと同サイズの金属板のみの反射波と比較して、金属板をアンテナリフレクタに適用した場合においても反射波が 9.5GHz 付近で低減されているのがわかる。これは入射波とダイポールアンテナの偏波が同一であり、到来した電波がアンテナに給電され、整合終端に吸収されているためである。しかし、その低減量は 5dB 程度であり、リフレクタ及びアンテナ構造からの散乱波による反射量が確認できる。そこで、切替板をリフレクタに適用した場合は反射波が大きく低減され、アンテナ動作周波数である 9GHz において金属板をリフレクタに適用した場合と比較して 18dB の低減効果が得られた。一方、図 3.7(b)の水平偏波の結果では、金属板をリフレクタに適用した場合は周波数特性が平坦となり、反射波が低減されていないことがわかる。これは入射波とダイポールアンテナの偏波が直交するため、到来電波がアンテナに給電されないためである。そこで、切替板をリフレクタに適用した場合は反射波が低減され、9GHz において金属板をリフレクタに適用した場合と比較して 16dB の低減効果が得られた。

以上の結果から、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は、両偏波に対して金属アンテナリフレクタの場合と比較して 15dB 以上の低減効果が得られるアンテナリフレクタとして機能することを確認した。



(a)垂直偏波



(b)水平偏波

図 3.7 アンテナの反射特性

3.4 むすび

本章では，第 2 章で試作した電波吸収/反射切替板をダイポールアンテナのアンテナリフレクタに適用した場合の放射パターン及び電波反射低減特性を評価した．その結果は次のとおりである．

まず，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アンテナリフレクタに適用した場合の放射パターンを評価した結果，金属板のリフレクタの場合と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．

次にダイオードを 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た場合の反射波低減特性を評価した結果，金属板のリフレクタの場合と比較して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機能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機能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．

第4章 電波吸収/透過切替板の設計

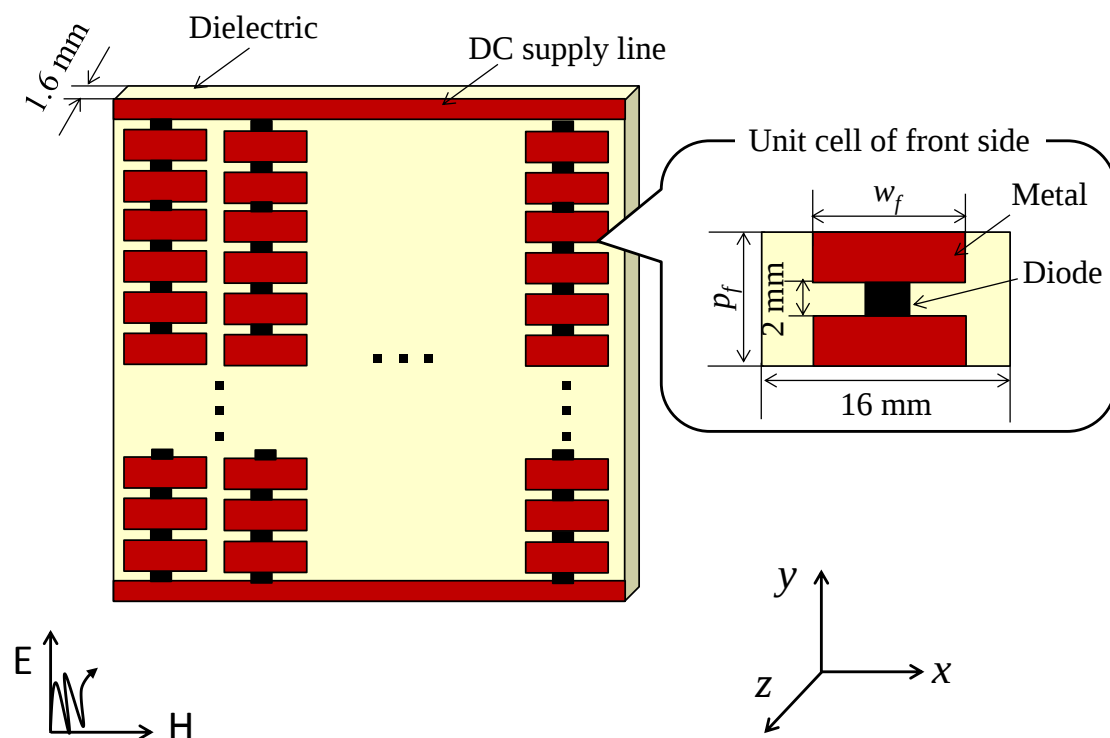
4.1 はじめに

本章では，電波吸収体と透過板を切替え可能な電波吸収/透過切替板について検討した．本切替板は両面に周期構造を配置し，ダイオード OFF 状態で裏面が反射層，表面が吸収層となり，電波吸収体として動作する．まず，ダイオードが OFF 状態で，それぞれの面について反射層または吸収層となるように周期構造を検討し，両面で吸収体として動作するように検討した．次にダイオードが ON 状態で透過板として動作することを確認した．そして，設計した切替板を試作し，反射率及び透過率の評価を行った．

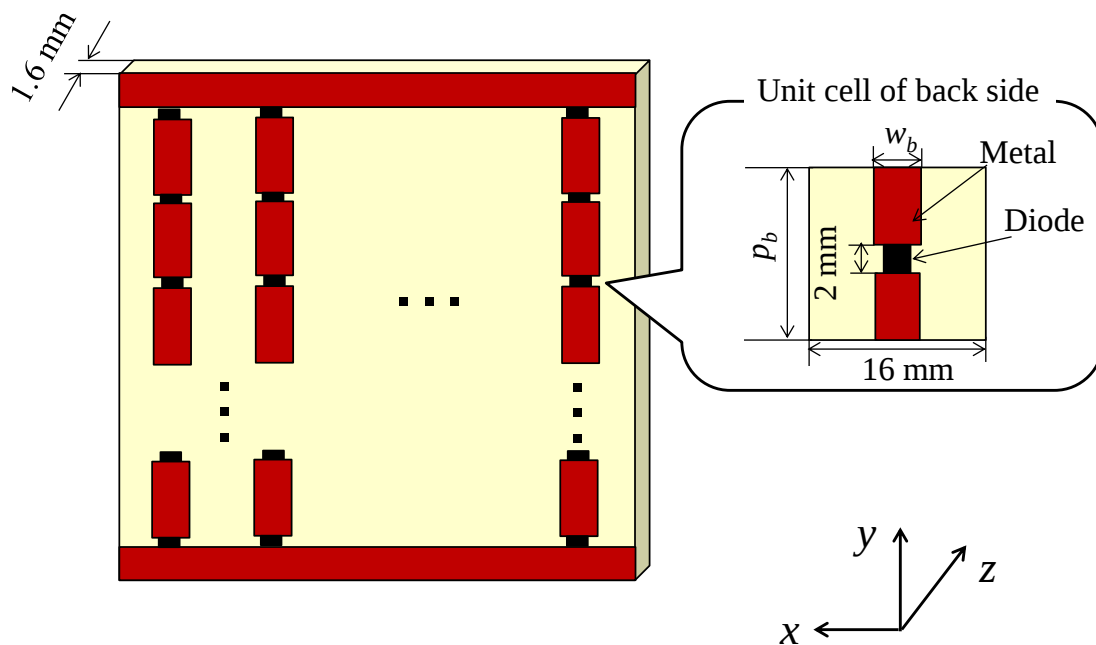
4.2 切替板の構造及び等価回路

4.2.1 切替板の構造

図 4.1 に電波吸収/反射切替板の表面及び裏面の構造とそれぞれの周期構造のユニットセルを示す．ここで，入射波の伝搬方向は $-z$ 方向，電界の向きは y 方向としている．本切替板は誘電体基板の両面に金属帯が x 方向に間隔 16mm で配置されている．本切替板は 9GHz で電波吸収体と透過板を切り替えるものとし， x 方向の間隔は反射波にグレーティングローブが生じないように約半波長とした．それぞれの金属帯について，表面は間隔 p_f ，裏面は間隔 p_b で幅 2mm のギャップを設け，ダイオードを装荷した．誘電体基板及びダイオードは第2章で設計した電波吸収/反射切替板に用いたものと同様である．表面及び裏面の金属帯の幅はそれぞれ w_f ， w_b である．また，切替板両面の上下にはそれぞれの面において DC 電圧用直流電源ラインを配置している．



(a) 表面



(b) 裏面

図 4.1 試作したダイポールアンテナ

4.2.2 切替板の動作及び等価回路

図 4.2 に切替板の動作を示す．電波吸収体として動作させた場合，裏面を反射層，表面をダイオードの抵抗を用いて吸収層として機能させることにより，本切替板は誘電体をスペーサとした抵抗被膜型電波吸収体として動作する．一方，透過板として動作させた場合，入射した電波は両面とも透過する．

図 4.3 に本切替板の等価回路を示す．誘電体は伝送線路となり，その伝送線路と並列に両面の周期構造によって決定されるインピーダンスが挿入される等価回路となる．ここで，周期構造の等価回路は金属帯によるインダクタ，金属帯間のギャップによるキャパシタの直列回路となる．そのキャパシタと並列にダイオードが挿入され，そのインピーダンスはダイオード単体のインピーダンス及び周期構造によって決定される．第 2 章で述べたとおり，ダイオードは OFF 状態では抵抗とキャパシタ，ON 状態では抵抗とインダクタの直列回路となる．切替板の反射率及び透過率は，これらのインピーダンスと自由空間のインピーダンス Z_0 によって決まるため，ダイオードの ON/OFF により反射率及び透過率を変化させることができる．

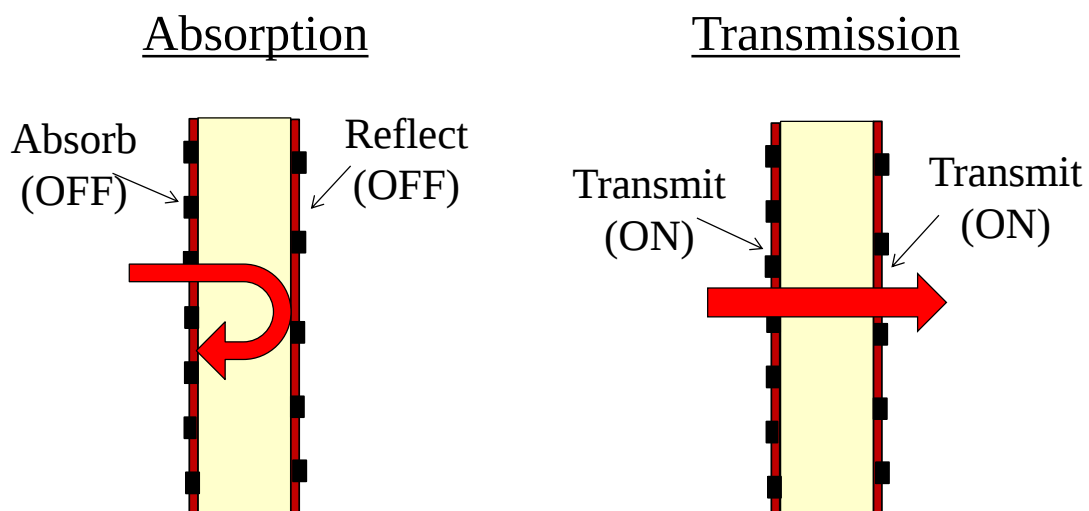


図 4.2 切替板の動作

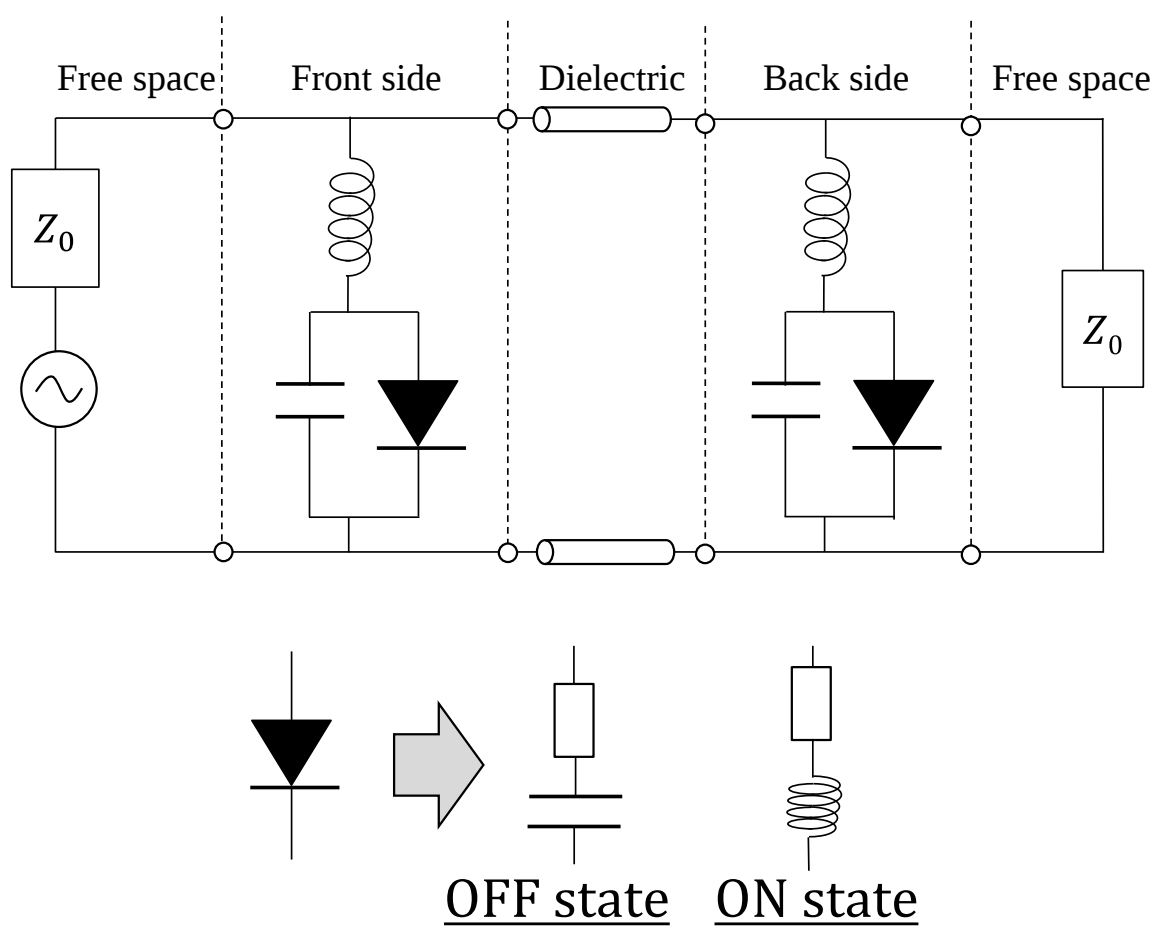


図 4.3 切替板の等価回路

4.3 切替板の設計

切替板の周期構造のうち、周期 p_f , p_b 及び帯幅 w_f , w_b が反射率及び透過率に与える影響について電磁界解析によって検討した。まず、ダイオードが OFF 状態で切替板が電波吸収体として動作するために片面ずつ検討した。次に両面に周期構造を配置し、ダイオードが OFF 状態における切替板の吸収特性及び ON 状態における切替板の挿入損失について検討した。

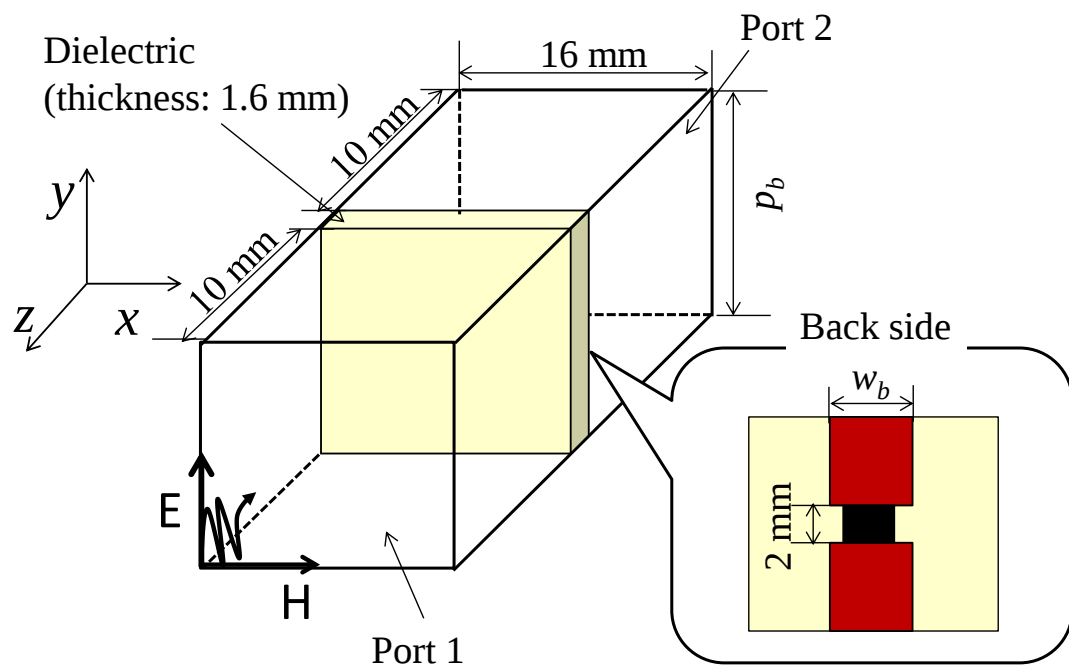
4.3.1 裏面の構造

図 4.2 の動作から、ダイオードが OFF で裏面が反射層として機能する必要があるため、裏面のみの解析モデルで透過阻止量を解析した。図 4.4 に誘電体の裏面のみに周期構造を配置した解析モデル及び等価回路を示す。図 4.4(a) に示すモデルにおいて、 x - z 面及び y - z 面を周期境界条件とし、ダイオードが OFF 状態における p_b 及び w_b の変化に対する透過率を解析した。図 4.4(b) に示すとおり、ダイオードが OFF 状態では、等価回路におけるダイオードは抵抗とキャパシタの直列回路となるため、金属パターンのインダクタとダイオードのキャパシタが直列共振し、ダイオードの抵抗が小さい場合に裏面が反射板として動作する。

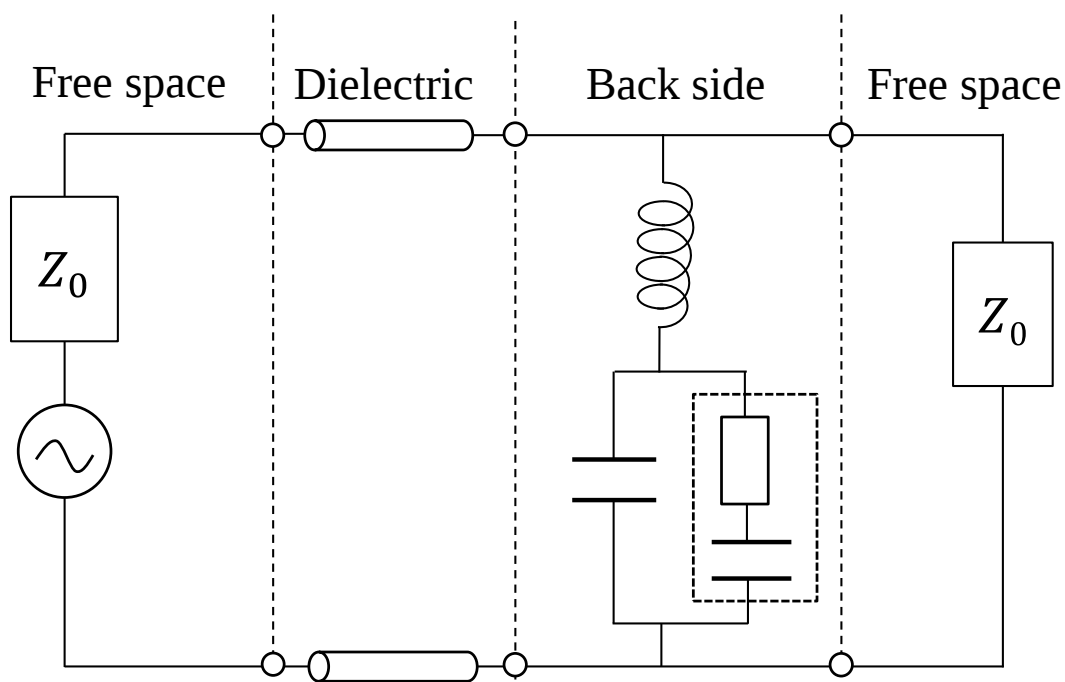
図 4.5 に w_b を 8mm として p_b を変化させた場合の透過率の解析結果を示す。 p_b が大きくなるほど共振周波数が低周波側にシフトするとともに阻止量が増大しており、帯域内で阻止量がピークを持つのは $p_b=12\text{mm}$ であることがわかる。阻止特性が得られるのは、図 4.4(b) に示す等価回路において、金属帯のインダクタとギャップ及びダイオードのキャパシタが直列共振しているためである。 p_b が大きくなるほど単位面積あたりのギャップ及びダイオードの数が減少するため、直列接続されるキャパシタの数が減少し、等価回路におけるギャップ及びダイオードのキャパシタンスが増大するため共振周波数が低周波側にシフトする。また、同様にダイオードの抵抗の数が減少するため、等価回路におけるダイオードの抵抗が減少するため阻止量が増大する。

図 4.6 に p_b を 12mm として w_b を変化させた場合の透過率の解析結果を示す。 w_b の増大により共振周波数が高周波側にシフトしているが、これは w_b の増大により等価回路のインダクタンスが減少するためである。

以上の結果から、帯域内において反射層として機能し、低い透過率を得るために $p_b=12\text{mm}$ とした。また、共振周波数は w_b により調整可能であることを確認した。

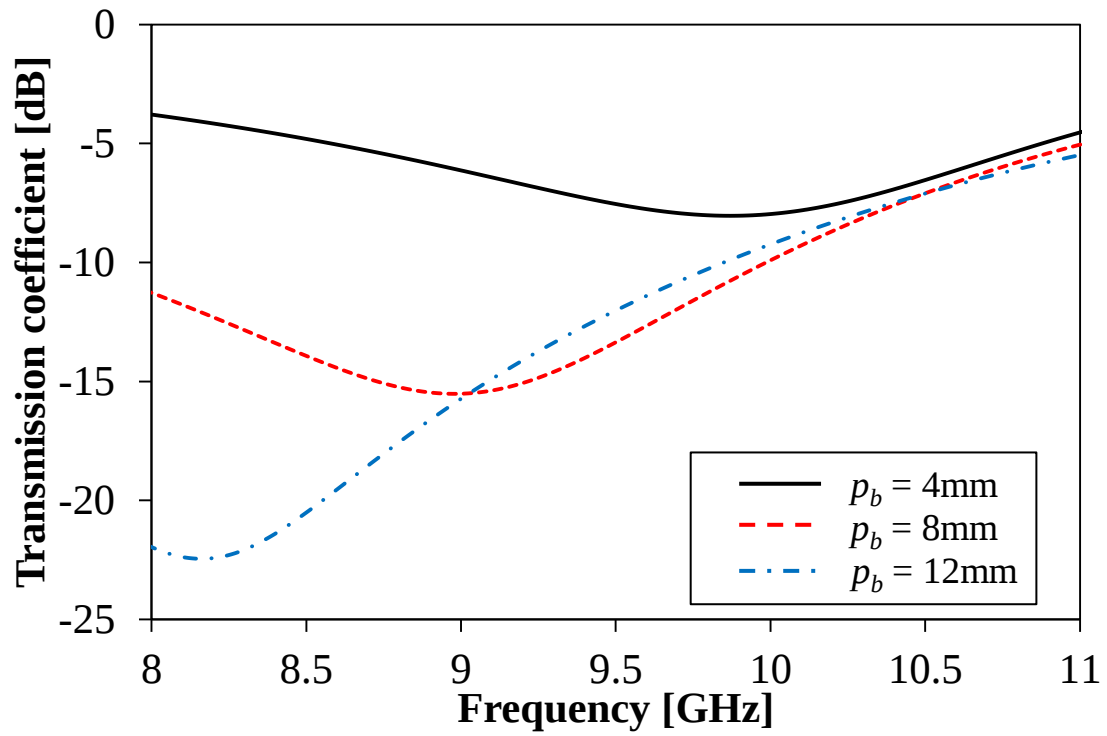
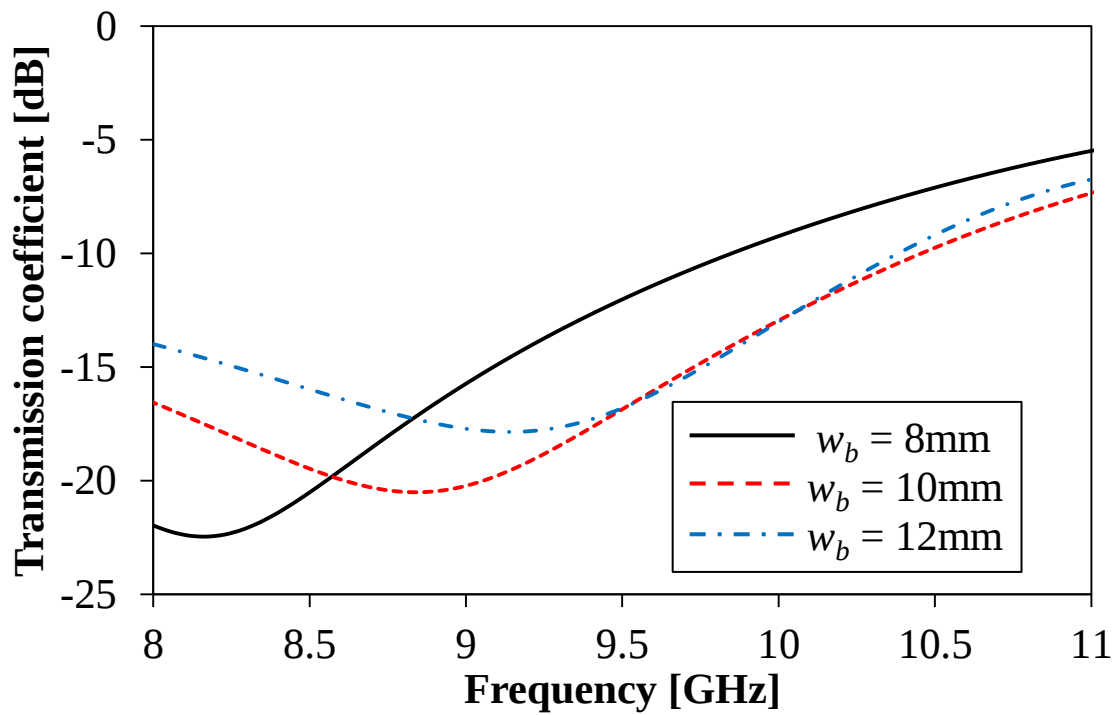


(a) 解析モデル



(b) 等価回路

図 4.4 裏面構造の解析モデル及び等価回路

図 4.5 p_b の変化に対する裏面構造の透過率($w_b=8\text{mm}$)図 4.6 w_b の変化に対する裏面構造の透過率($p_b=12\text{mm}$)

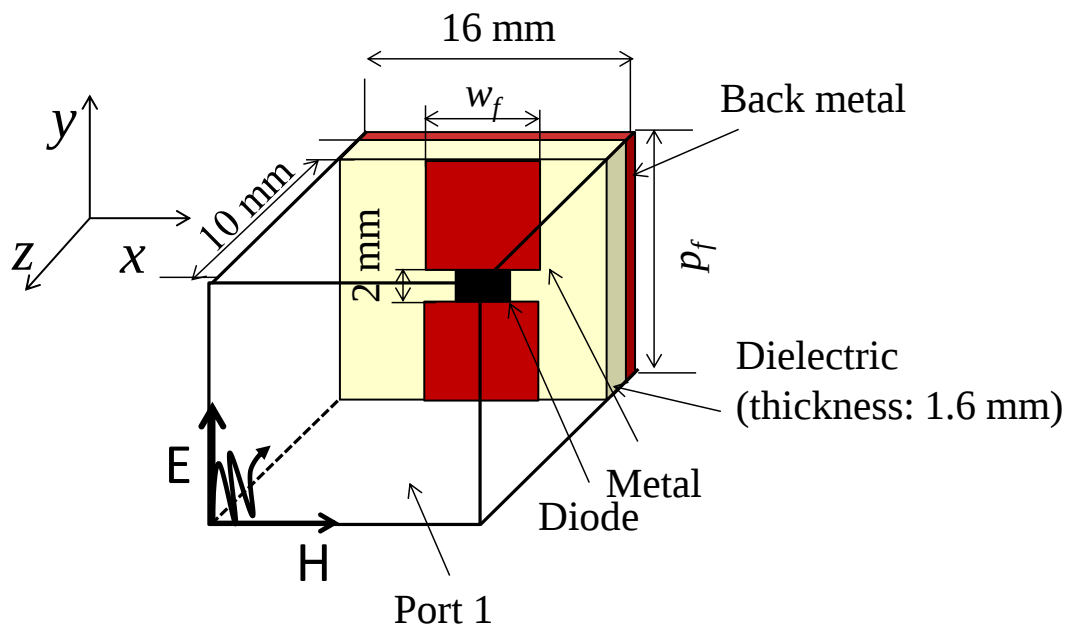
4.3.2 表面の構造

図 4.2 の動作から，ダイオードが OFF で表面が吸収層として機能する必要があるため，裏面を金属として表面のみの解析モデルで反射率を解析した．図 4.7 に誘電体を金属裏打ちし，表面に周期構造を配置した解析モデル及び等価回路を示す．図 4.7(a)に示すモデルにおいて，境界条件は図 4.4(a)と同様に周期境界条件を用いて，ダイオードが OFF 状態における p_f 及び w_f の変化に対する反射率を解析した．図 4.7(b)の等価回路において，ダイオードは図 4.3(b)で示したように抵抗とキャパシタの直列回路となり，裏面が短絡された誘電体の伝送線路と表面の周期構造が並列共振し，ダイオードの抵抗が Z_0 と一致した場合，電波吸収体として動作する．

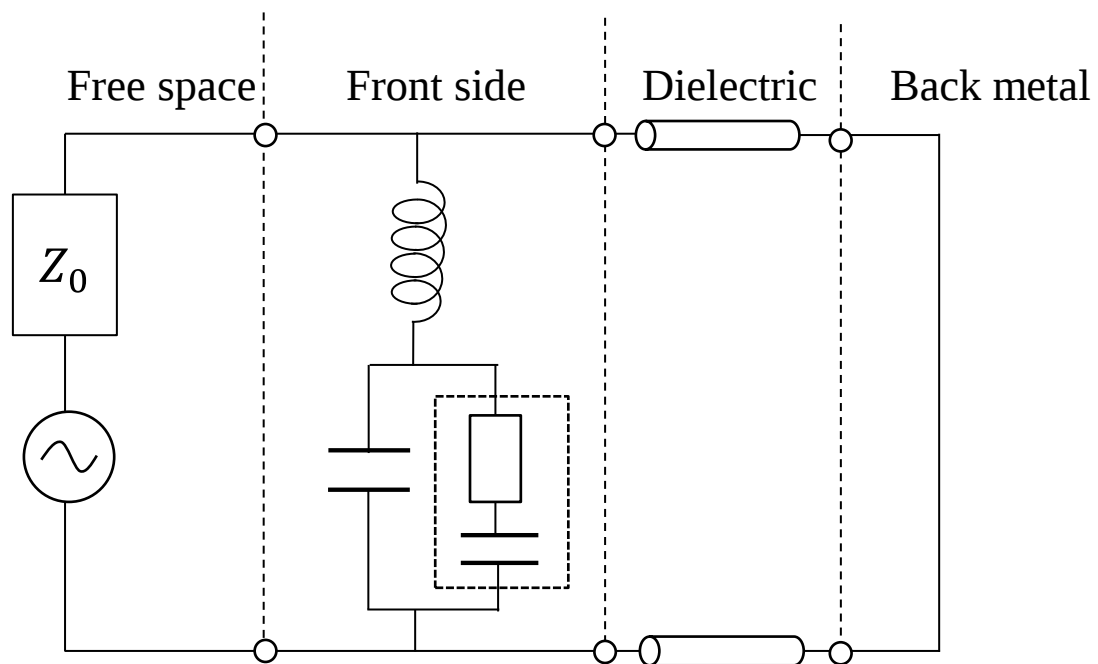
図 4.8 に w_f を 8mm として p_f を変化させた場合の反射率の解析結果を示す． p_f が大きくなるほど共振周波数が低周波側にシフトしており，共振周波数における反射率が変化していることがわかる．4.3.1 項で示したように裏面構造の p_b と同様に p_f を大きくすることにより，図 4.7(b)に示す等価回路におけるキャパシタンスが増大するため共振周波数が低周波側にシフトし，抵抗が小さくなるため共振周波数における反射率が変化している．また，帯域内で共振し，最も整合が取れているのは $p_f=6\text{mm}$ の場合であることがわかる．

図 4.9 に p_f を 6mm として w_f を変化させた場合の反射率の解析結果を示す． w_f を大きくするにつれて共振周波数が高周波側にシフトするとともに，共振周波数における反射率が変化していることがわかる． w_f を大きくするにしたがって，等価回路におけるインダクタンスが減少するため共振周波数が高周波側にシフトし，抵抗が変化しているため共振周波数における反射率が変化している．

以上の結果から，帯域内において表面が吸収層として機能し，低い反射率を得るために $p_f=6\text{mm}$ とした．また，共振周波数及び振幅は w_f により調整可能であることを確認した．



(a) 解析モデル



(b) 等価回路

図 4.7 金属裏打ちした表面構造の解析モデル及び等価回路

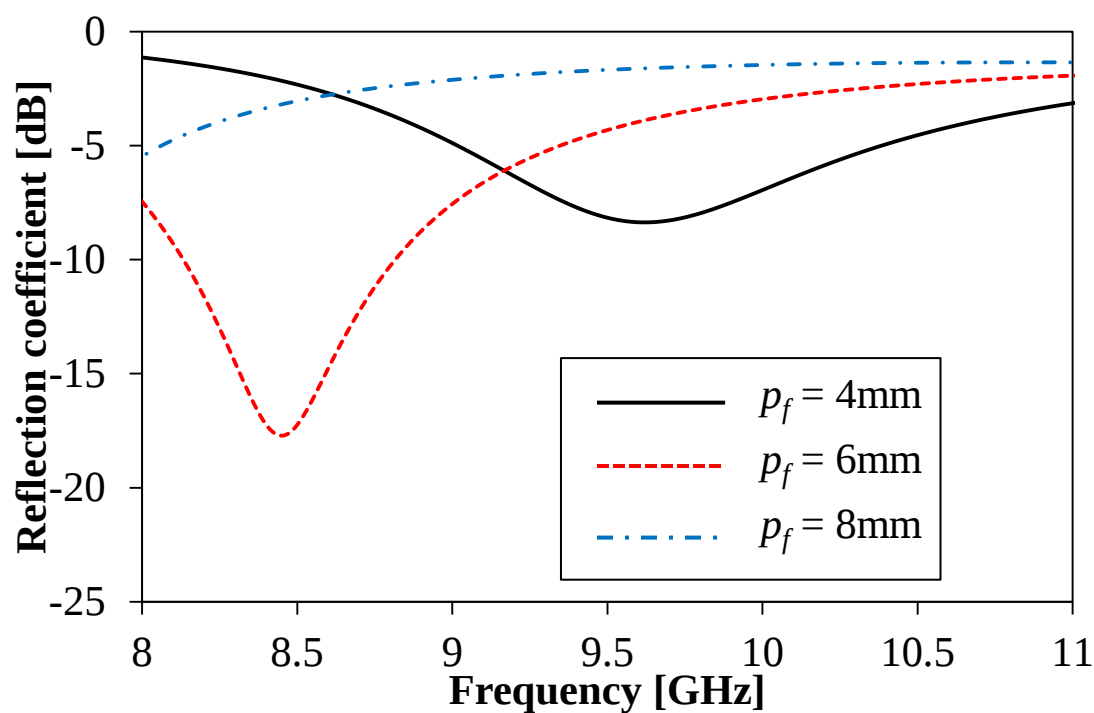


図 4.8 p_f の変化に対する表面構造の反射率($w_f = 8\text{mm}$)

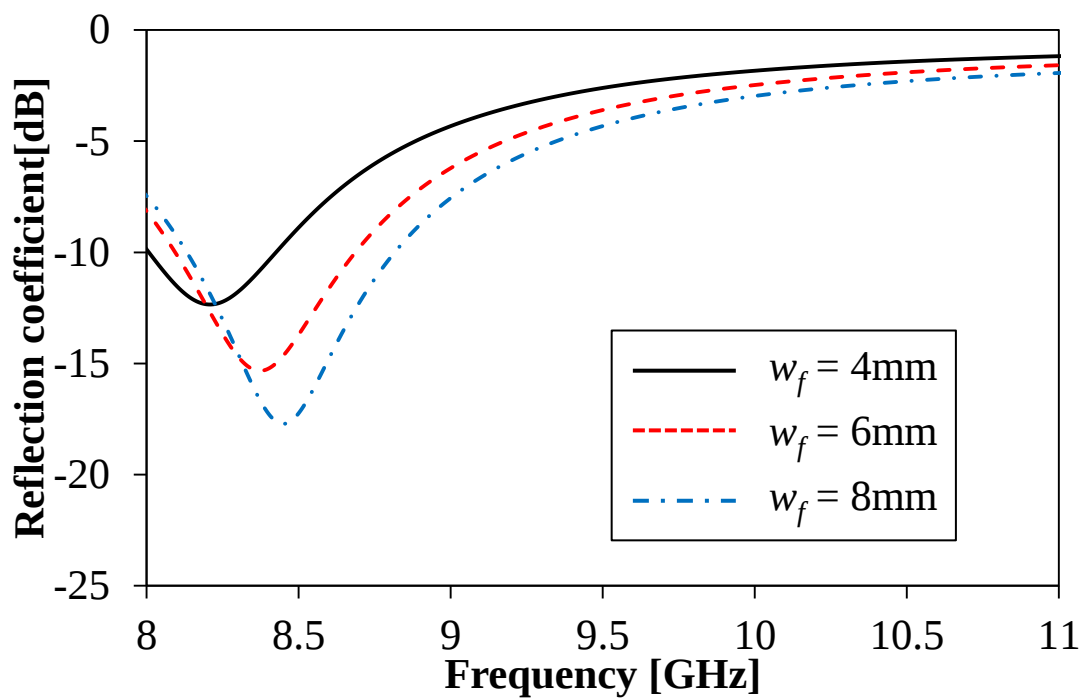


図 4.9 w_f の変化に対する表面構造の反射率($p_f = 6\text{mm}$)

4.3.3 両面の構造

4.3.1 及び 4.3.2 項の結果から、ダイオードが OFF 状態で両面に周期構造を配置して電波吸収体として動作させるために $p_f=6\text{mm}$, $p_b=12\text{mm}$ に設定し, w_f 及び w_b の調整により 9GHz における切替板の実現可能であることが確認できた. また, p_f 及び p_b は 9GHz で半波長以下となるため, 反射波にグレーティングローブは生じない.

両面に周期構造を配置し, $p_f=6\text{mm}$, $p_b=12\text{mm}$ とした場合の w_f 及び w_b の変化に対する反射率及び透過率を解析した. 図 4.10 に解析モデルを示す. p_b を p_f の整数倍とすることにより境界が一致するため, 周期境界条件を適用し, ダイオードが OFF 及び ON 状態の w_f 及び w_b の変化に対する反射率及び透過率について検討した.

図 4.11 にダイオード OFF 状態で w_b を 8mm として w_f を変化させた場合の切替板の反射率及び透過率の解析結果を示す. 図 4.11(a)の反射率から, w_f の変化による共振周波数の変化は小さく, 共振周波数における反射率の低減量に影響しており, w_f が大きいほど反射低減量が増大していることがわかる. また, 図 4.11(b)について, 反射率が低減している 9.2GHz における透過率は-15dB 以下と小さいことから, その反射率の低減量は透過によるものではなく吸収によるものであることがわかる.

図 4.12 に w_f を 8mm として w_b を変化させた場合の切替板の反射率及び透過率の解析結果を示す. 図 4.12(a)の反射率の結果から, w_b が大きくなるほど共振周波数が高周波側にシフトし, w_b が 4~6mm の場合に 9GHz で共振することがわかる. また, 図 4.12(b)の透過率の結果から w_b が大きくなるほど透過率は減少し, 9GHz において-15dB 以下となっていることがわかる.

以上の結果から, w_f により反射低減量, w_b により共振周波数を調整することが可能であり, 9GHz において電波吸収体として動作することを確認した.

次にダイオードが ON 状態における切替板の透過率について検討する.

図 4.13 に w_b を 8mm として w_f を変化させた場合の切替板の透過率の解析結果を示す. 高周波側で透過率が大きく低減されており, 9GHz においては w_f が大きいほど透過率が減少していることがわかる.

図 4.14 に w_f を 8mm として w_b を変化させた場合の切替板の透過率の解析結果を示す. 11GHz 付近で共振して透過率が減少しているが, w_b が小さいほど共振が鋭くなり, 9GHz における透過率の減少が小さくなっていることがわかる.

以上の結果から, ダイオードが ON 状態では 9GHz では切替板は共振せずに透過板として機能させることが可能であり, w_f , w_b とともに小さいほど低損失な透

過板として機能することを確認した。

したがって、切替板を実現するためには、可能な限り小さい w_f , w_b を用いてダイオードが OFF 状態で電波吸収体として機能させる必要がある。

本検討では、9GHz で切替板として機能するように $w_f=8\text{mm}$, $w_b=5\text{mm}$ とした。図 4.15 に設計した切替板の周期構造、図 4.16 にその反射率及び透過率の解析結果を示す。図 4.16 の結果から、ダイオードが OFF 状態では反射率が-23dB、透過率が-13dB となっていることから入射波のエネルギーのうち 0.5%が反射、5%が透過しており、約 94%が吸収されている。一方、ダイオードが ON 状態では透過率が-0.6dB となり、挿入損失 0.6dB の透過板として動作している。

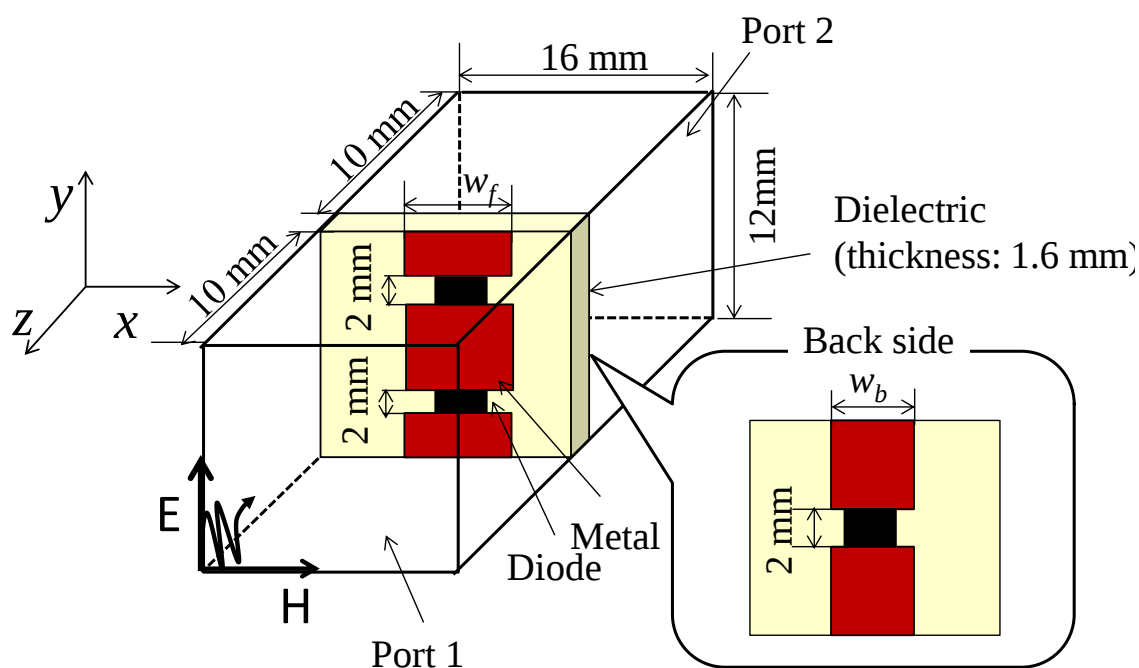
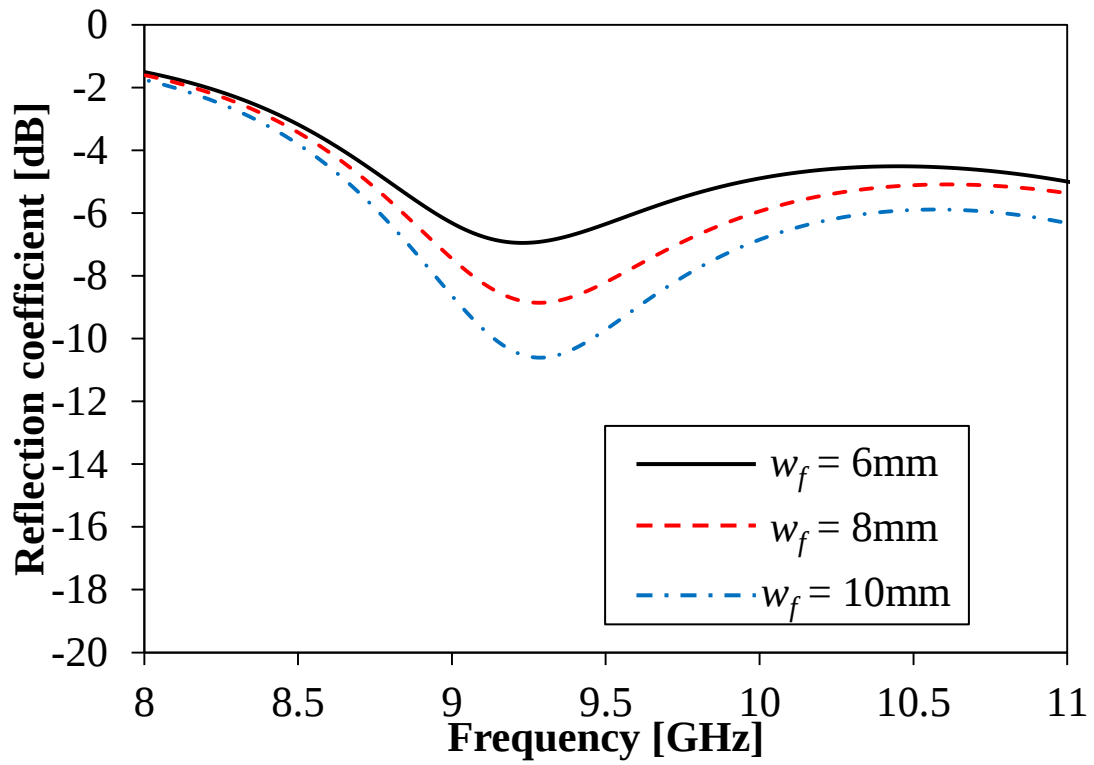
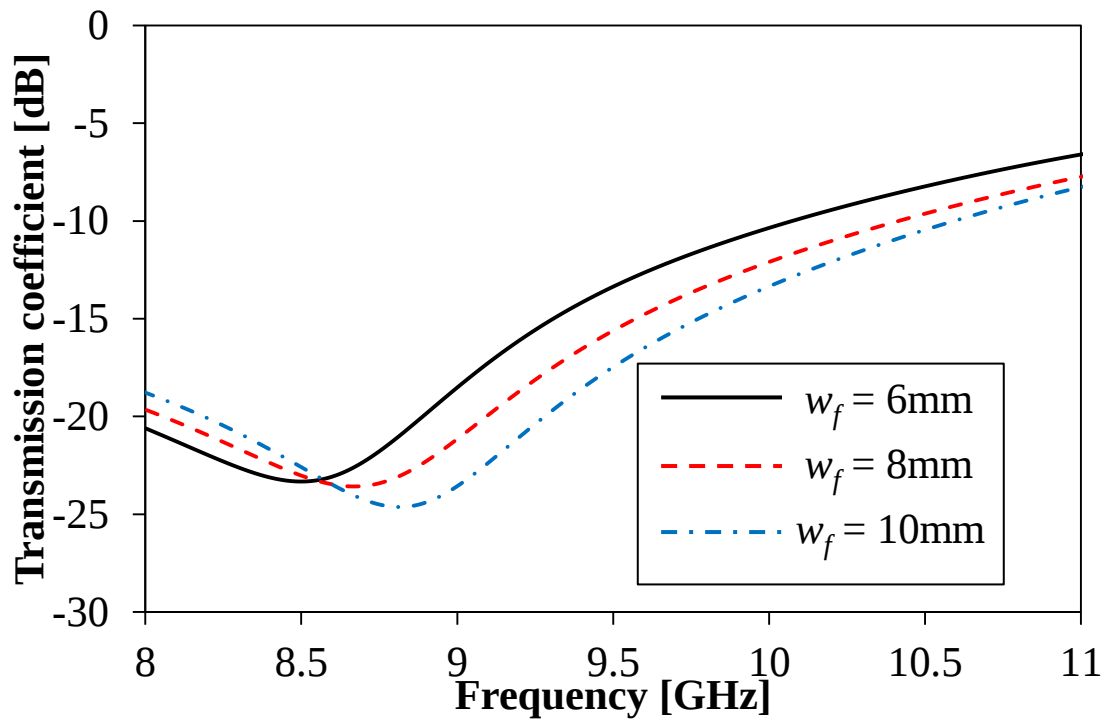


図 4.10 切替板の解析モデル

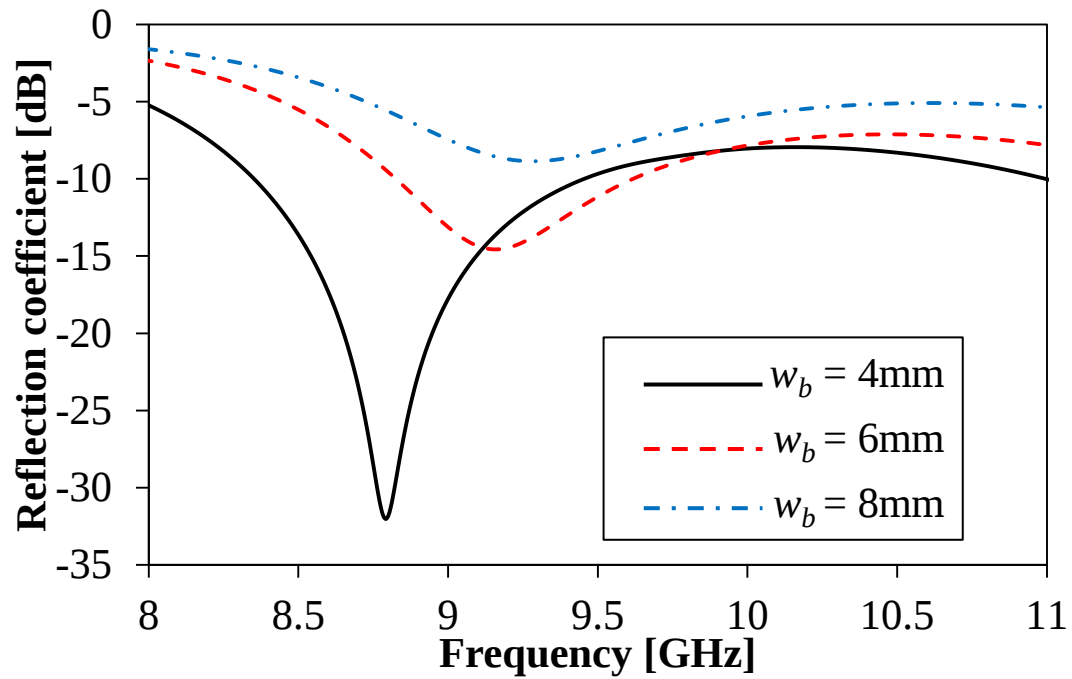


(a) 反射率

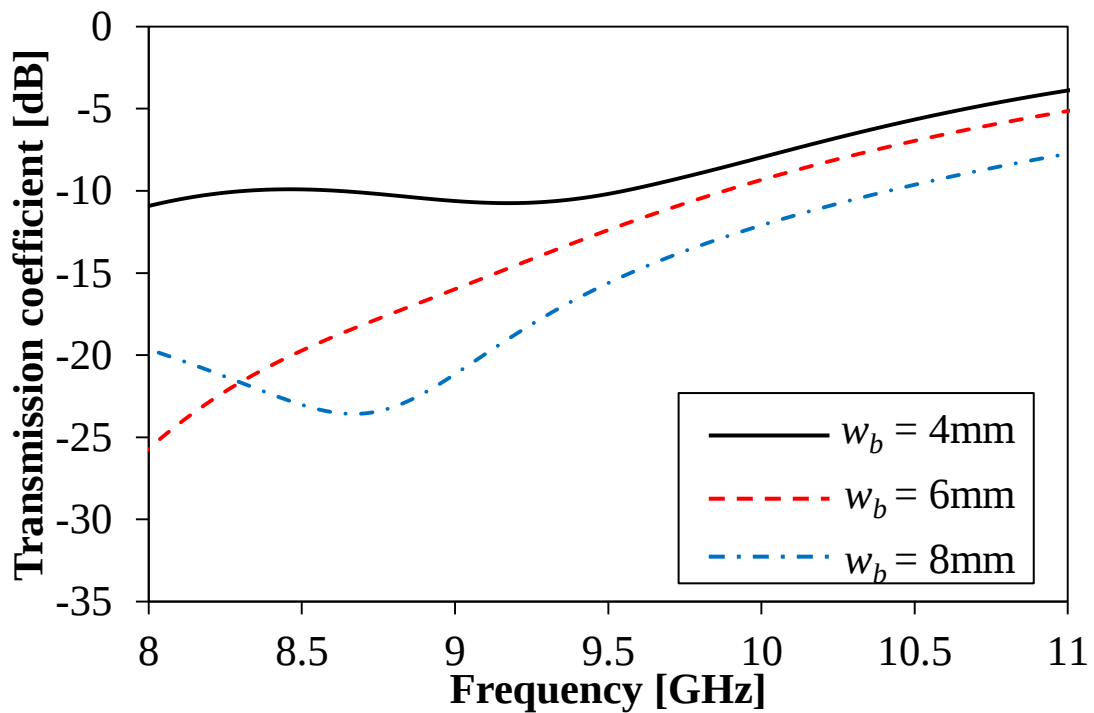


(b) 透過率

図 4.11 w_f の変化に対する反射率及び透過率($w_f = 8\text{mm}$)



(a) 反射率



(b) 透過率

図 4.12 w_b の変化に対する反射率及び透過率($w_f = 6\text{mm}$)

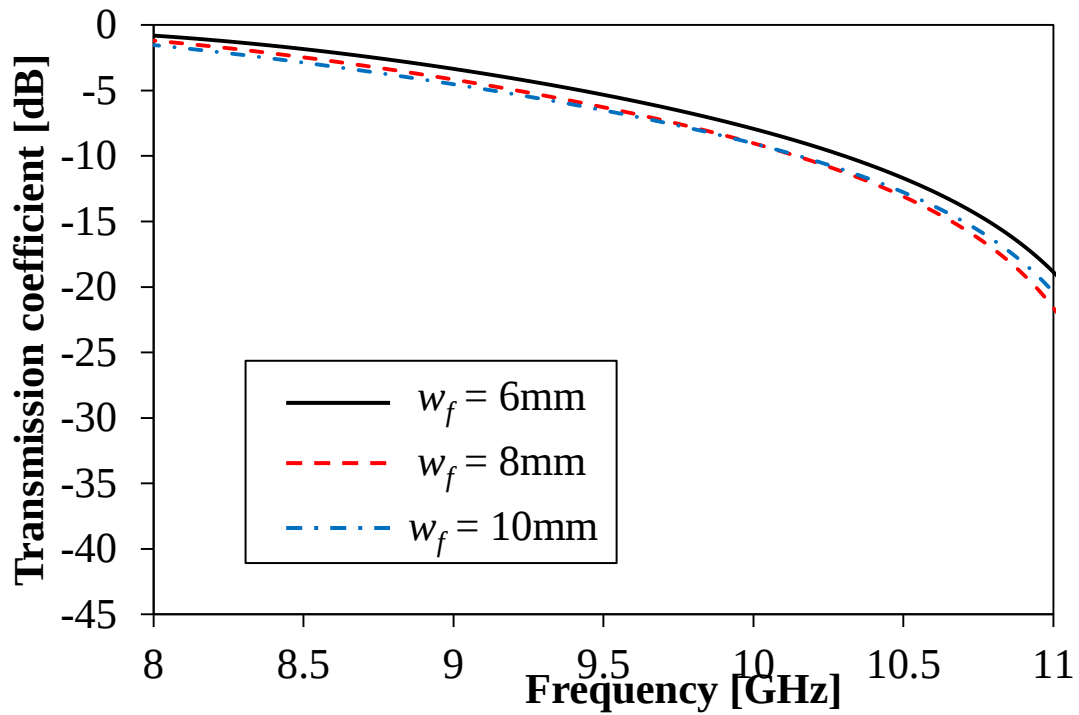


図 4.13 ダイオード ON 状態における w_f の変化に対する透過率($w_b=8\text{mm}$)

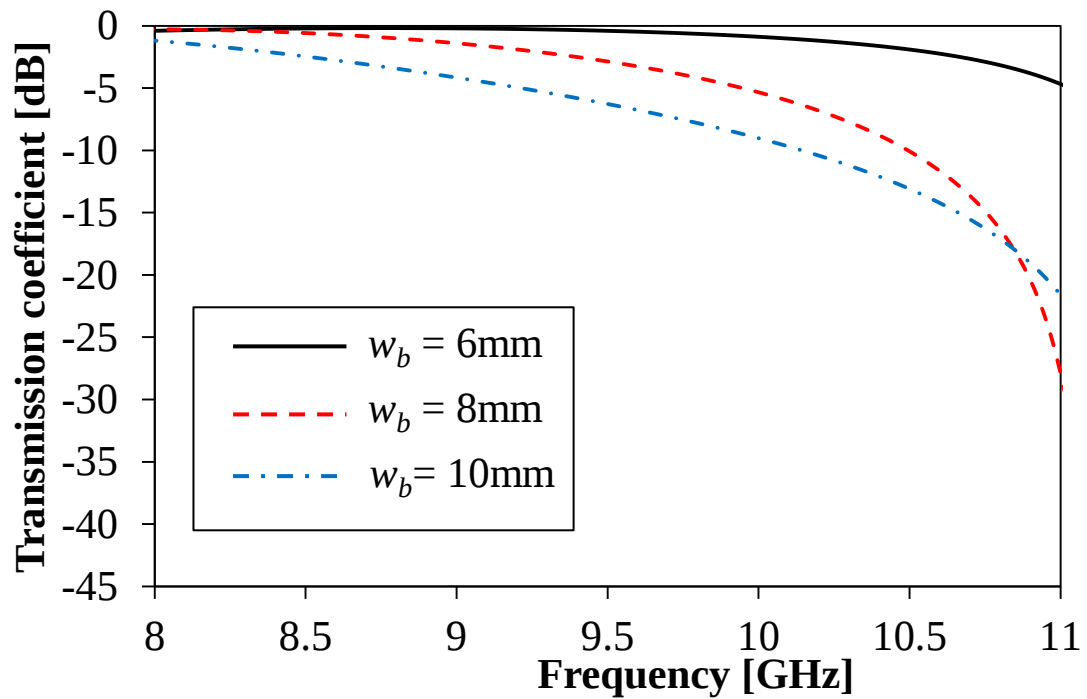


図 4.14 ダイオード ON 状態における w_b の変化に対する透過率($w_f=8\text{mm}$)

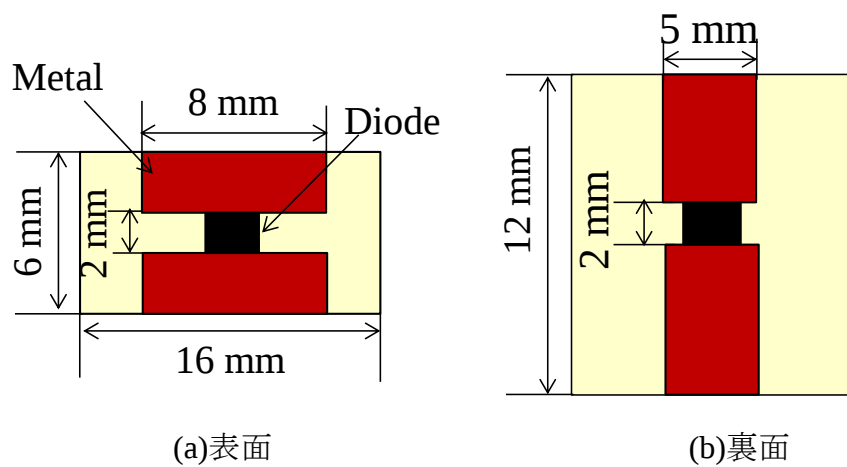


図 4.15 設計した切替板の周期構造

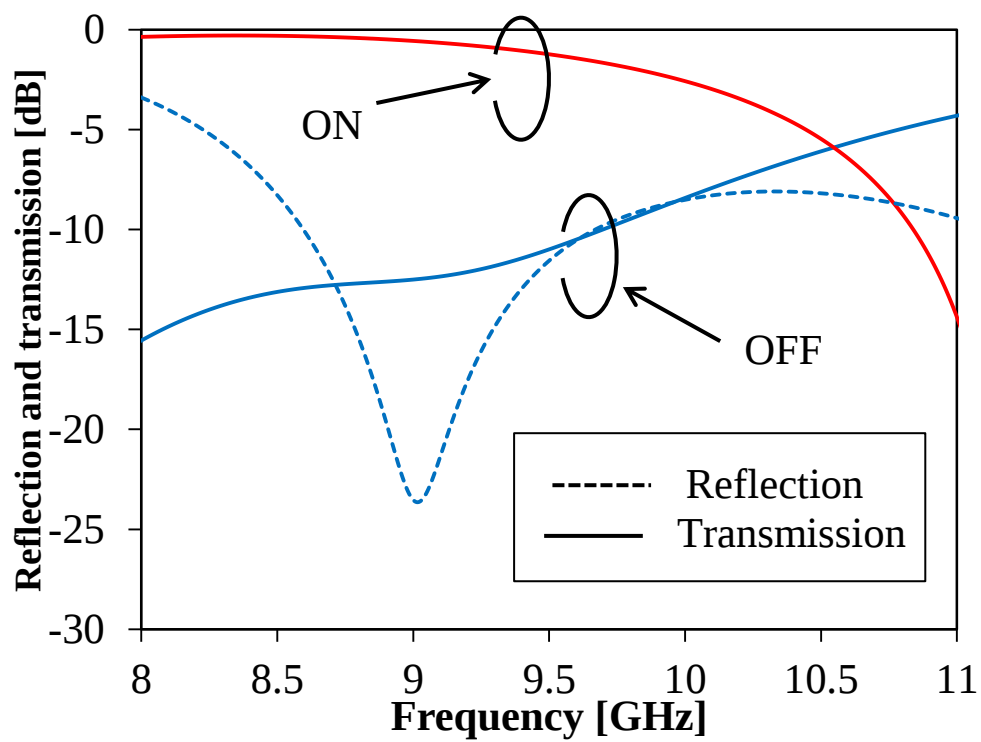


図 4.16 設計した切替板の反射率及び透過率

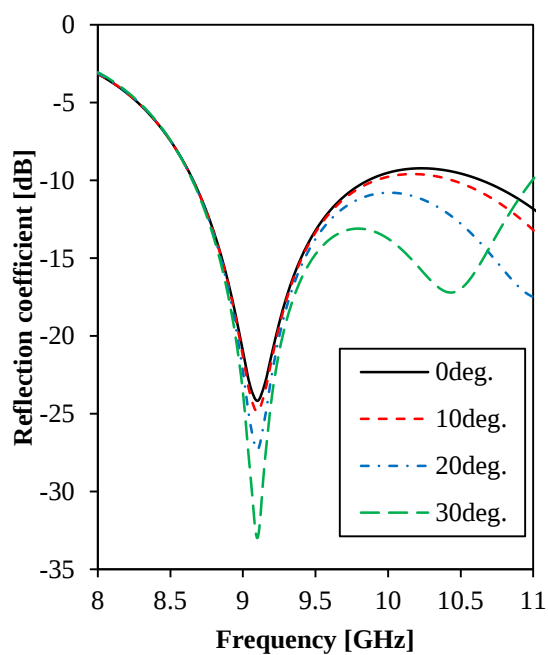
4.4 反射率及び透過率の斜入射特性

設計した切替板について、反射率及び透過率の斜入射特性を解析した。解析モデルは図 4.10 と同様であり、2.3.3 項と同様に斜入射特性の解析が可能な周期境界条件を適用して解析した。

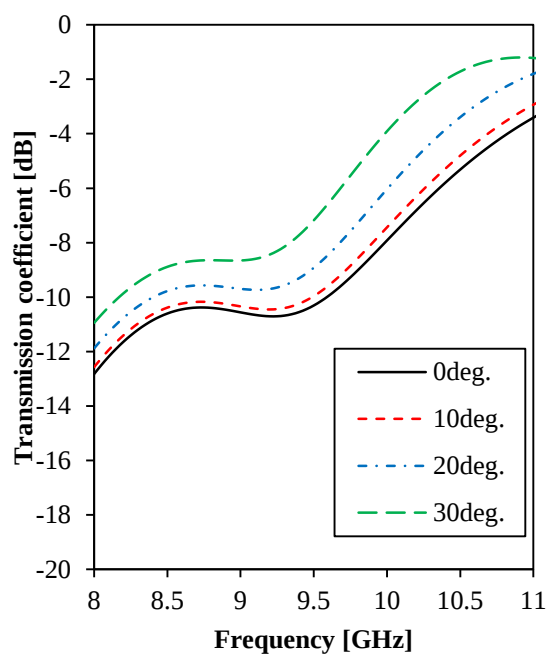
図 4.17 に TE 波における斜入射特性を示す。ダイオード OFF 状態で電波吸収体として動作させた場合、図 4.17(a-1)に示すとおり、9GHz 反射率は角度が大きくなると低減する傾向があるが、図 4.17(a-2)に示すとおり、透過率も増加するため、反射率の低減は透過によるものであることがわかる。透過率が-10dB 以下、反射率が-20dB 以下となり電波吸収体として動作するのは 20° までとなった。一方、ダイオード ON 状態で透過板として動作させた場合、図 4.17(b-2)に示すとおり角度によらず-0.5dB 以上の透過率が得られているのがわかる。

図 4.18 に TM 波における斜入射特性を示す。ダイオード OFF 状態で電波吸収体として動作させた場合、図 4.18(a-1)に示すとおり、角度とともに反射率が増大し、図 4.18(b-1)に示すとおり、透過率も増大していることがわかる。透過率が-10dB 以下、反射率が-20dB 以下となり電波吸収体として動作するのは 10° までとなった。一方、ダイオード ON 状態で透過板として動作させた場合、図 4.18(b-2)に示すとおり、角度によらず-0.6dB 以上の透過率が得られているのがわかる。

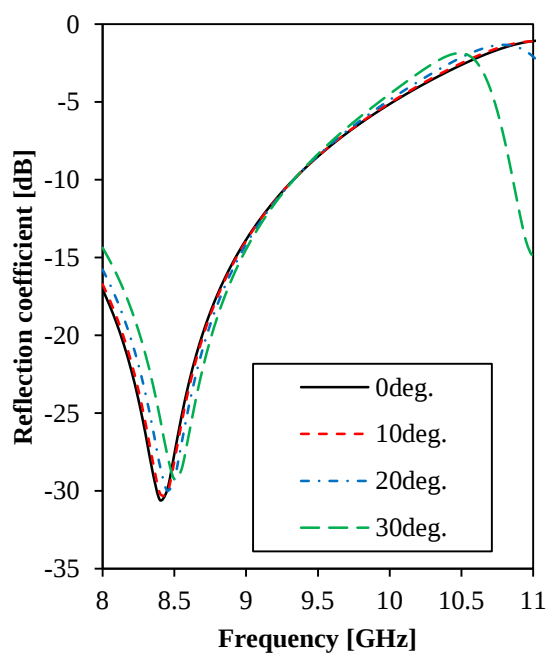
以上の結果から、設計した切替板は TE 波に対しては正面から 20° 、TM 波に対しては正面から 10° の斜入射において電波吸収/透過切替板として動作することを確認した。



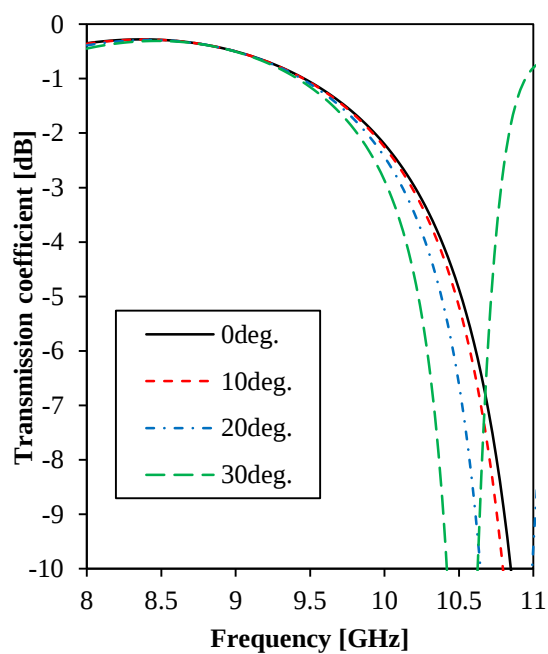
(a-1)ダイオード OFF (反射率)



(a-2)ダイオード OFF (透過率)

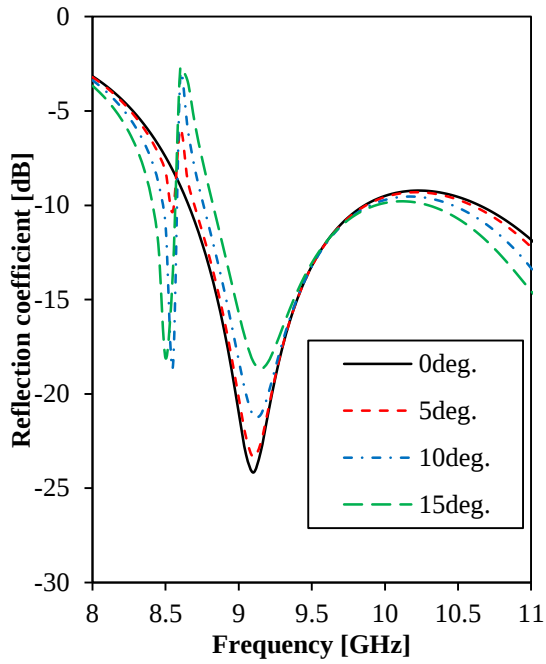


(b-1)ダイオード ON (反射率)

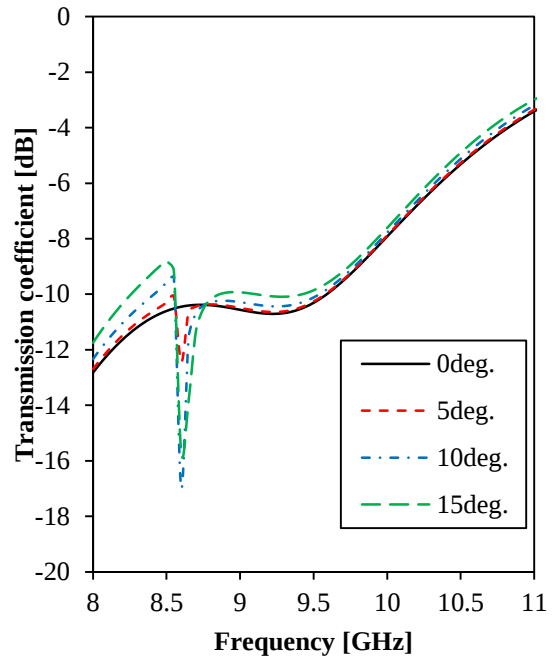


(b-2)ダイオード ON (透過率)

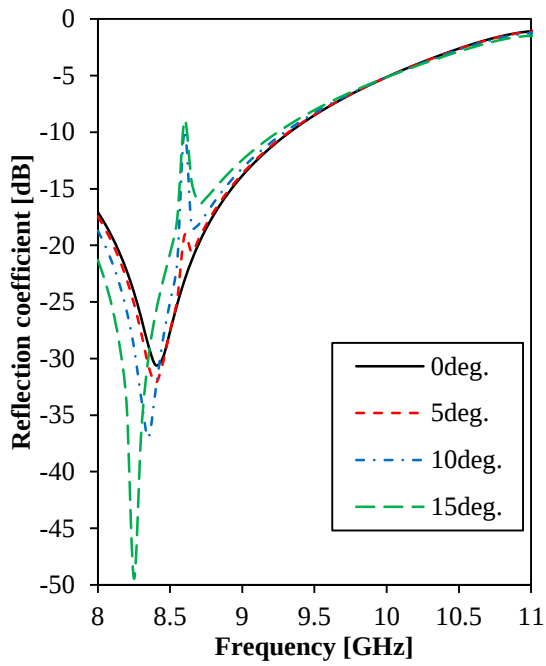
図 4.17 斜入射に対する反射率及び透過率の変化 (TE 波)



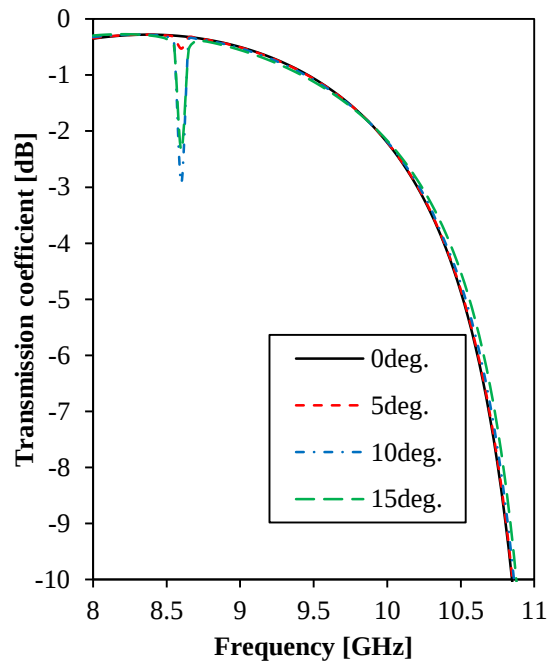
(a-1) ダイオード OFF (反射率)



(a-2) ダイオード OFF (透過率)



(b-1) ダイオード ON (反射率)



(b-2) ダイオード ON (透過率)

図 4.18 斜入射に対する反射率及び透過率の変化 (TM 波)

4.5 切替板の試作評価

試作切替板を図 4.19 に示す．試作切替板の表面は縦 12 周期×横 5 周期，裏面は縦 6 周期×横 5 周期であり，大きさは 72mm×80mm である．

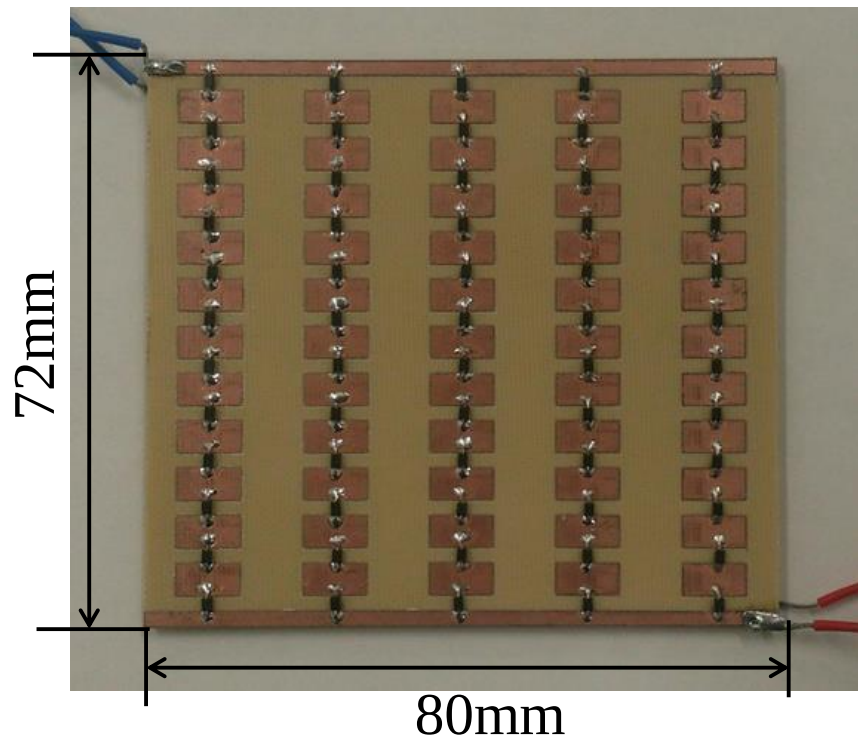
試作切替板について，反射率及び透過率を測定した．反射率は第 2 章で述べた電波吸収/反射切替板と同様である．図 4.20 に透過率の測定系を示す．透過率の計測はベクトルネットワークアナライザを用いて 300mm 角の遮蔽板に供試体と同サイズの穴を設け，その穴に切替板を設置して S_{21} を計測する．しかし，遮蔽板からの回折波が透過率に影響し，この測定系において穴を通過する電波との伝搬経路差が小さく，回折波は時間ゲートで抑圧できないため，その回折波を減算した後で空気からの S_{21} との相対値で(4.1)式から透過率 T を算出する．ここで， S_{21DUT} は切替板， S_{21air} は空気， $S_{21metal}$ は金属板をそれぞれ遮蔽板の穴に設置した場合の S_{21} である． $S_{21metal}$ は遮蔽板の穴を通過してくる電波はなくなるため，回折波により伝搬する S_{21} となる．

$$T = \frac{S_{21DUT} - S_{21metal}}{S_{21air} - S_{21metal}} \quad (4.1)$$

図 4.21 に透過率計測時におけるノイズフロアを示す．減算なしで測定を行った場合，回折波によりダイナミックレンジが 10dB 以下であるが，(4.1)式を用いて評価した場合は 40dB 以上のダイナミックレンジが確保できていることがわかる．

図 4.22 に反射率及び透過率の解析結果及び測定結果を示す．ダイオードが OFF 時は 9GHz において反射率が -27.1dB，透過率が -17.1dB となっていることから入射波のエネルギーのうち 0.2% が反射，2% が透過しており，97.8% が吸収されている．一方，ダイオードが ON 時は透過率が -0.3dB となり，挿入損失 0.3dB の透過板として動作している．また，測定値は概ね解析値と傾向が一致していることがわかる．

以上の結果から，試作した切替板は設計どおりに 9GHz において電波吸収体と透過板の切り替え特性が得られていることを確認した．



(a) 表面



(b) 裏面

図 4.19 試作切替板

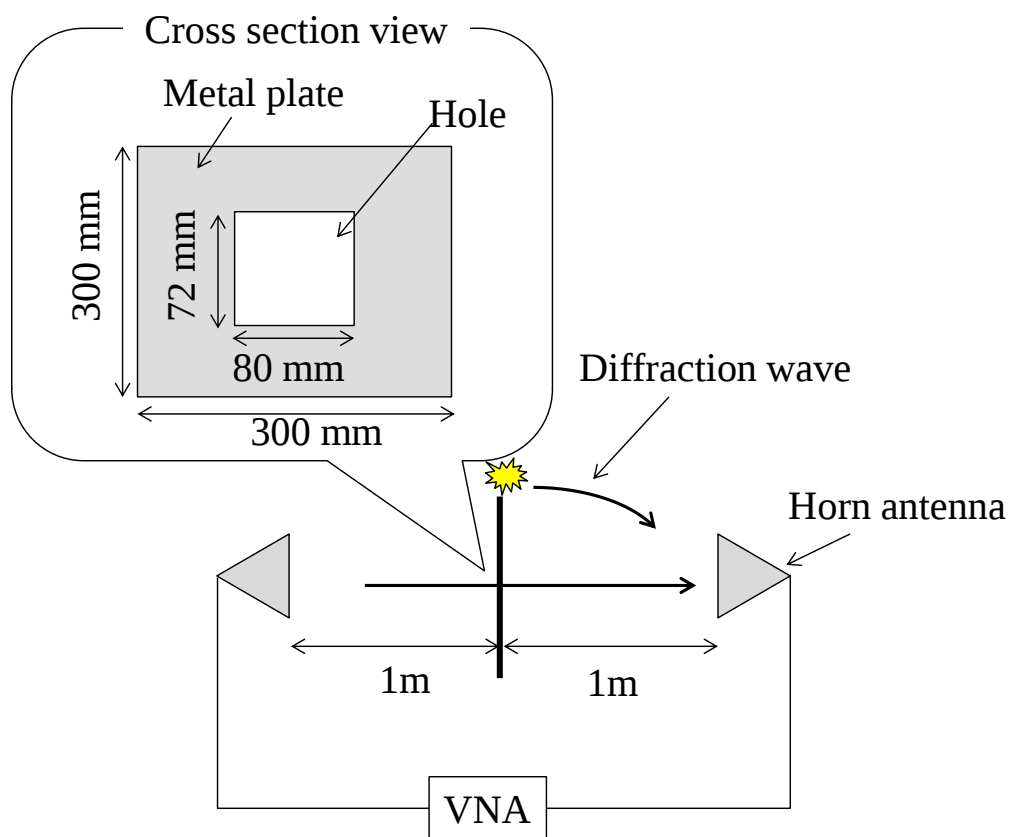


図 4.20 透過率の計測系

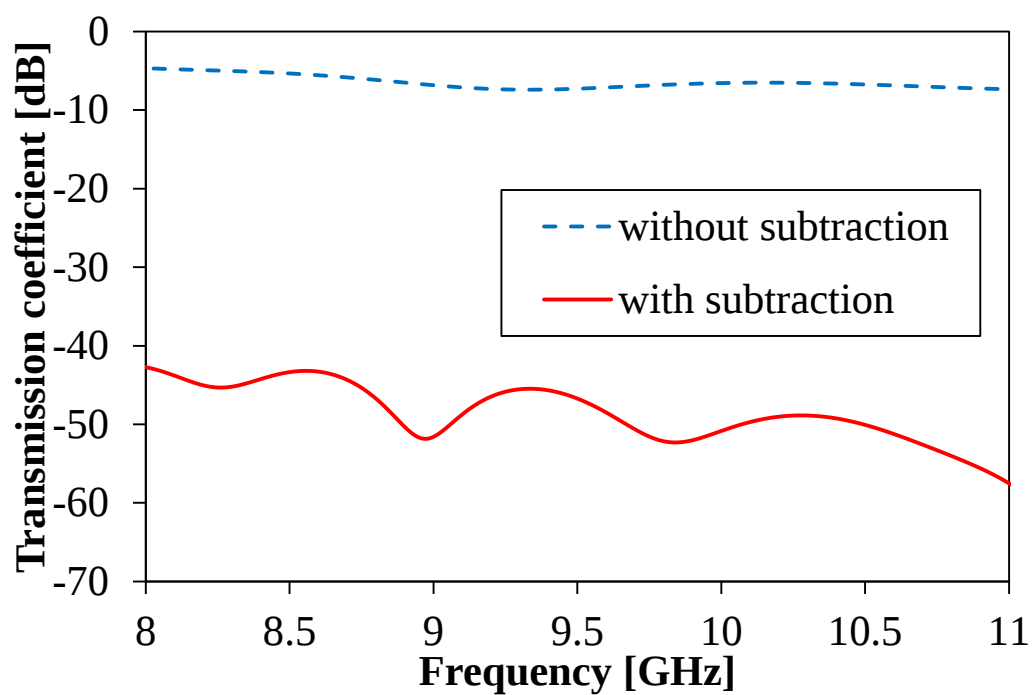
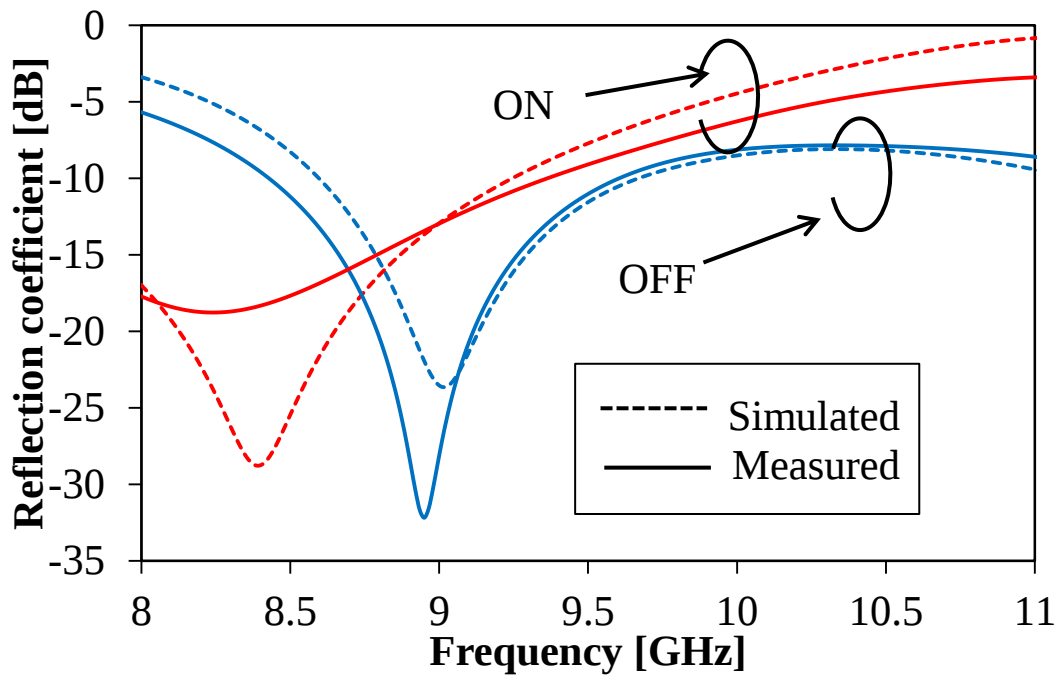
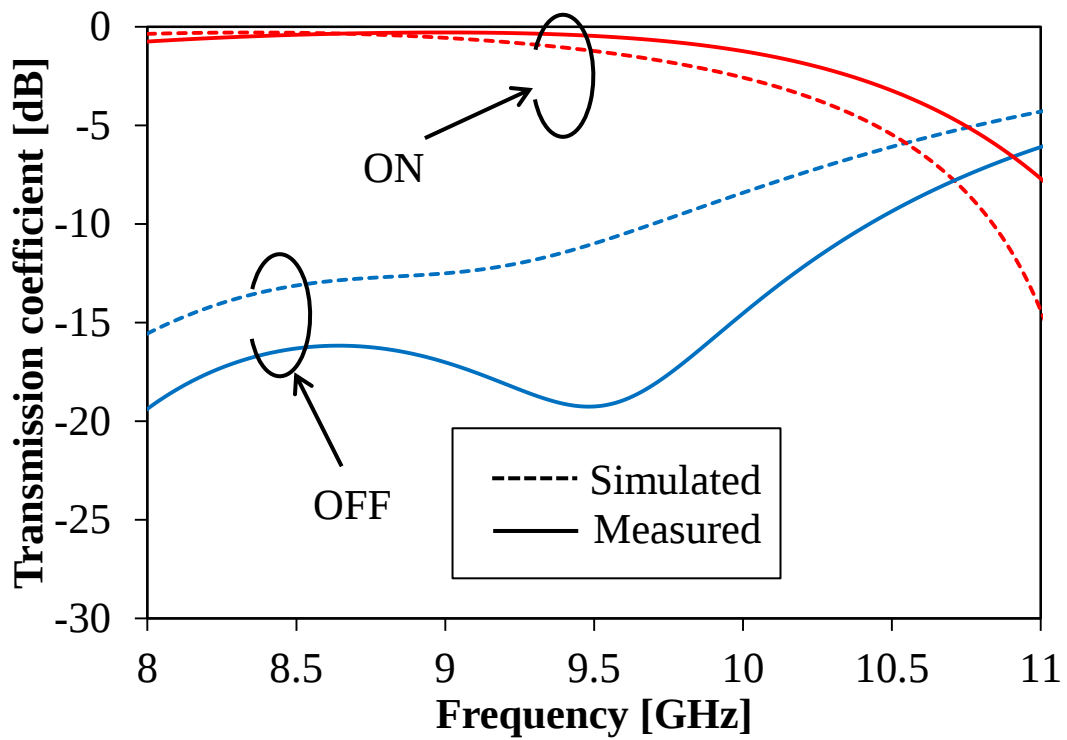


図 4.21 透過率測定時のノイズフロア



(a) 反射率



(b) 透過率

図 4.22 試作切替板の反射率及び透過率

4.6 むすび

本章では，電波吸収体と透過板を切替え可能な電波吸収/透過切替板の設計及び試作評価を行った．その結果は次のとおりである．

ダイオードが OFF 状態で電波吸収体として動作させるため，裏面は反射層，表面は吸収層として機能させる必要があるため，片面ずつ検討し，両面で電波吸収体となるように設計した．また，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-17.1 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動作していることを確認した．

試作した切替板は設計どおりの結果が得られたことから，吸収体と透過板の切替え可能な電波吸収/透過切替板を設計どおりに実現可能であることを示した．

第5章 アンテナレドームへの適用

5.1 はじめに

本章では、第4章において試作した電波吸収/透過切替板をパッチアンテナのレドームに適用した場合の放射パターン及び反射特性をレドームなしの場合と比較してそれぞれ評価した。まず、切替板を透過板として機能させてパッチアンテナの前方に設置したレドームに適用し、レドーム・アンテナ距離によるアンテナ利得へ影響を解析した。次にレドームありの場合のアンテナの放射パターンを測定した。さらに切替板を電波吸収体として動作させた場合のアンテナの反射波低減効果を測定した。

5.2 放射パターン

5.2.1 アンテナ・レドーム間距離特性

第4章で試作した切替板をアンテナレドームに適用するため、9GHzで動作する2×2パッチアレーアンテナを試作した。図5.1に試作したアンテナの構造を示す。アンテナは切替板と同様の誘電率であり、厚さが1.6mmの誘電体基板に金属パターンを構成したものである。図5.2に示すように、このパッチアレーアンテナの前方に透過板として動作させた電波吸収/透過切替板をレドームとして設置し、アンテナ・レドーム間距離 l に対する利得を解析した。解析手法は第3章のアンテナリフレクタへの適用した場合と同様に供試体周辺に吸収境界条件を適用したフルモデルの解析手法とした。図5.2の正面($\theta=\varphi=0^\circ$)におけるアンテナ利得を解析した結果を図5.3に示す。レドームなしの場合の利得は11.6dBiであり、レドームありの場合は $l=20\text{mm}$ 付近から l の変化とともに11.6dBiを中心に周期的に変化していることがわかる。これはレドーム・アンテナ間に定在波が生じているためであり、その周期は半波長の約16mmとなっている。この結果から、放射パターン及び反射低減特性の評価において、利得がピークとなる $l=24\text{mm}$ とした。

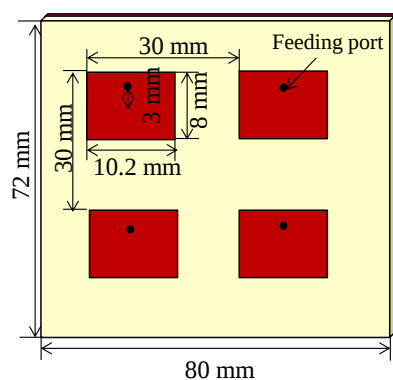


図 5.1 試作したパッチアレーアンテナ

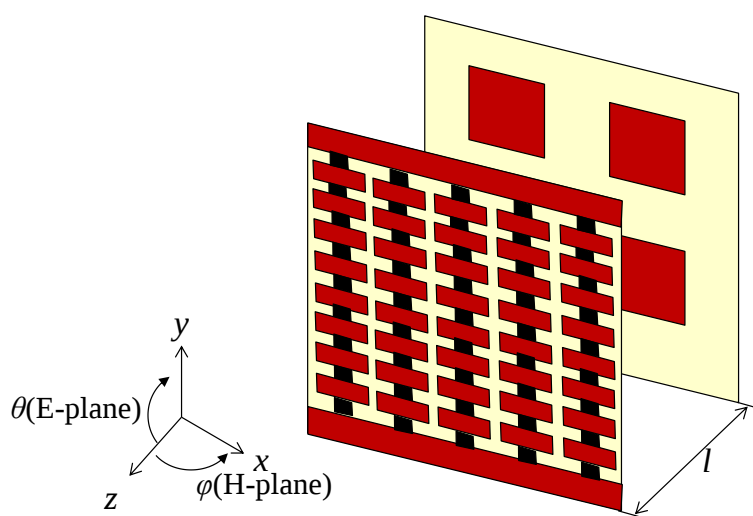


図 5.2 アンテナレドームの設置

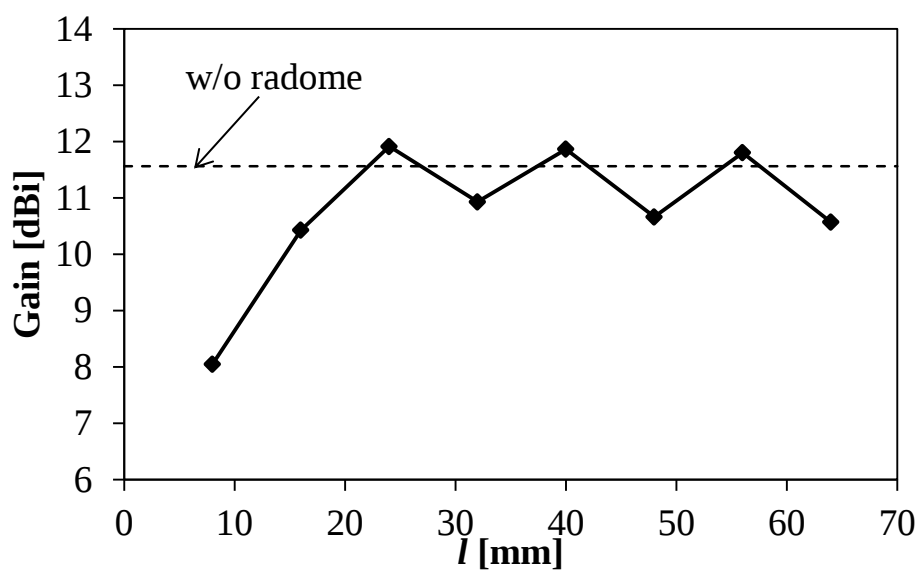


図 5.3 アンテナ・レドーム間距離に対する利得

5.2.2 放射パターン評価

ダイオード ON 状態で透過板として動作させた切替板を図 5.4 に示すとおり、間隔を 24mm としてパッチアレーアンテナのレドームに適用し、パッチアレーアンテナの放射パターンを評価した。測定は図 5.2 における yz 面の E 面と xz 面の H 面の 2 面とした。測定系は第 3 章のダイポールアンテナの測定系である図 3.4 と同様である。また、解析手法は前項と同様のフルモデルの解析である。評価ではレドームの有無の場合における放射パターンを比較した。

図 5.5 に E 面、図 5.6 に H 面の放射パターンの解析及び測定結果を示す。それぞれの結果から、レドームありの場合の放射パターンはレドームなしの場合と同等の放射パターンが得られていることがわかる。また、正面方向 ($\theta=\varphi=0^\circ$) におけるそれぞれの結果を表 5.1 に示す。解析及び実測結果において、正面方向に対して約 0.3dB の差で同等の利得が得られていることがわかる。また、レドームありの場合の方が利得が高くなっているのは前述した定在波によるものである。

以上の結果から、ダイオードを ON 状態で透過板として動作させた切替板は低損失で良好なレドームとして機能することを確認した。

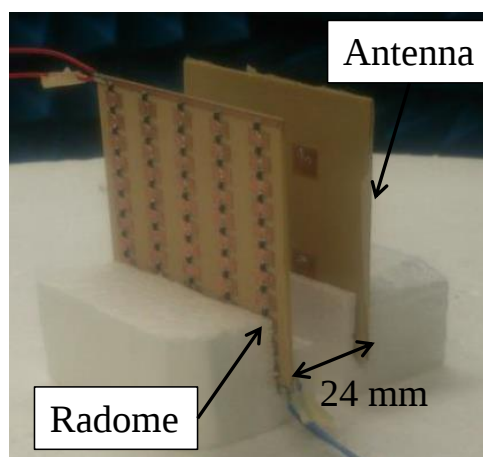


図 5.4 アンテナ・レドーム間距離に対する利得

表 5.1 正面方向における利得

	w/o radome	w/ radome
Simulated gain	11.5 dBi	11.9 dBi
Measured gain	11.2 dBi	11.5 dBi

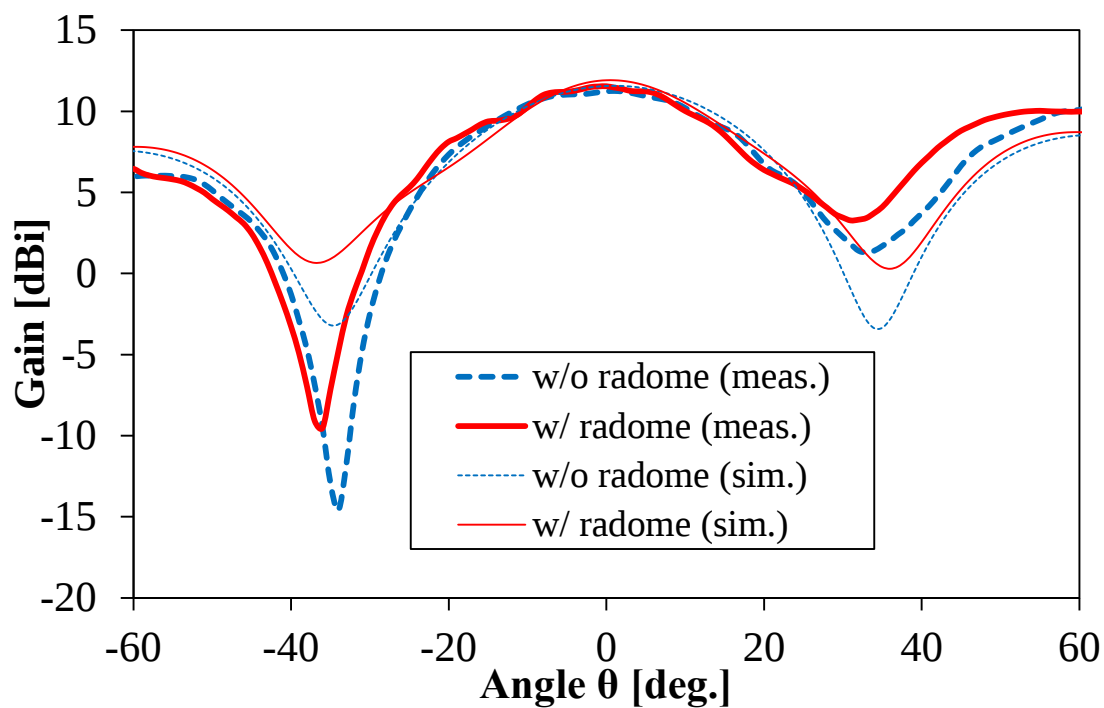


図 5.5 E 面の放射パターン

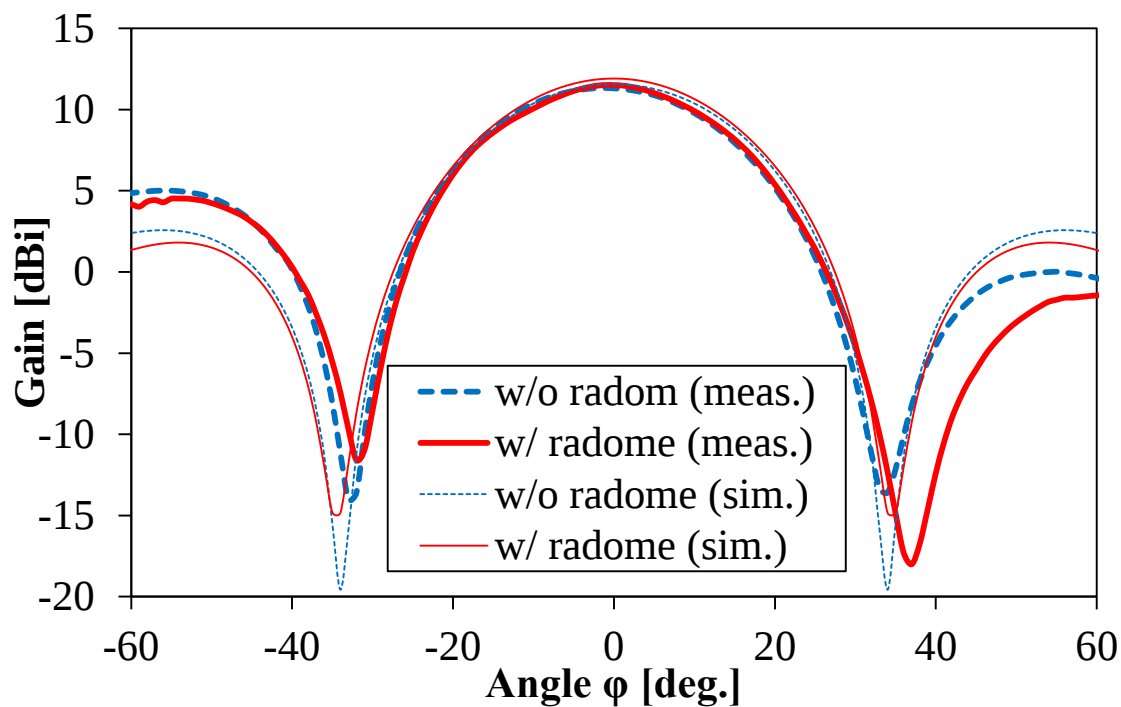


図 5.6 H 面の放射パターン

5.3 反射波低減特性

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パッチアレーアンテナのレドームに適用し、反射波低減特性を評価した。入射及び反射方向は正面方向であり、図 5.2 の座標系において入射及び反射電波の方向は $-z$ 方向及び $+z$ 方向とし、電界は y 方向とした垂直偏波に対する反射特性を解析及び測定した。このとき、アンテナ終端からの反射により再放射が発生しないようにそれぞれのパッチアンテナは 50Ω の抵抗で終端した。評価ではレドームの有無の場合における反射量を比較した。なお、解析は放射パターンと同様に供試体周辺に吸収境界条件を適用したフルモデルの解析手法とした。

図 5.7 に反射特性の解析及び測定結果を示す。レドームなしの場合は周波数に対してほぼ一定の反射特性を示しているが、レドームありの場合は切替板の吸収特性が大きくなる 9GHz において、反射波が大きく低減していることがわかる。反射低減量は切替板の吸収量と同等である 25dB となっていることを確認した。

以上の結果から、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は 25dB の反射波低減効果が得られるレドームとして機能することを確認した。

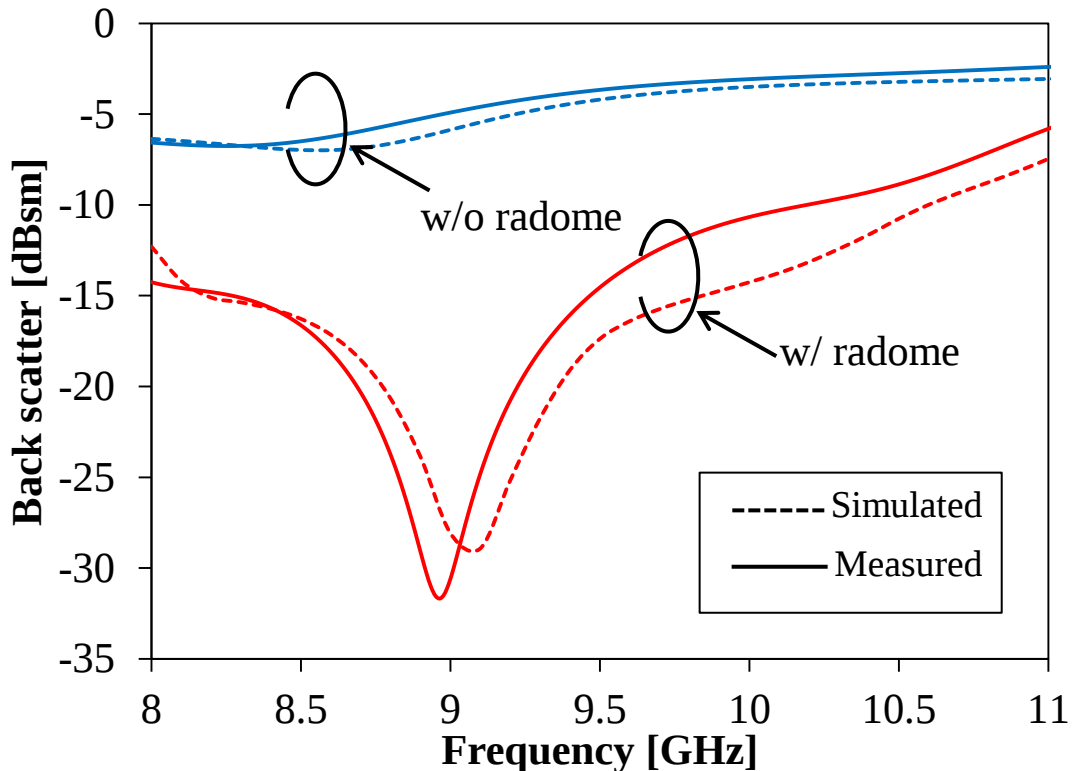


図 5.7 アンテナの反射特性

5.4 むすび

本章では、第4章で試作した電波吸収/透過切替板をパッチアレーアンテナのアンテナレドームに適用した場合の放射パターン及び電波反射低減効果を評価した。その結果は次のとおりである。

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高い利得が得られる位置に設置し、アンテナレドームに適用した場合の放射パターンを評価した結果、レドームなしの場合と同等な結果が得られたことからアンテナレドームに適用した切替板は良好なアンテナレドームとして動作していることを確認した。

次に、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た場合の反射波低減特性を評価した結果、レドームなしの場合と比較して 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、切替板をアンテナレドームに適用し、電波送受信時には切替板を透過板として機能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機能させることにより反射波を低減可能であることを示した。

第 6 章 総括

本論文では、電波吸収/反射/透過の切替板とそのアンテナへの応用について検討した。まず、電波吸収体と反射板を切替え可能な電波吸収/反射切替板を設計・試作し、その切替板のアンテナリフレクタへの適用について検討した。次に、電波吸収体と透過板を切替え可能な電波吸収/透過切替板を設計・試作し、その切替板のアンテナレドームへの適用について検討した。

以下に本研究によって得られた成果を総括する。

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た。

設計・試作した切替板は垂直偏波に対してはダイオードの ON/OFF によって電波吸収体と反射板の切替え動作、水平偏波に対してはチップ抵抗により電波吸収体として動作する。その切替板の反射率を計測した結果、垂直偏波に対してはダイオードが OFF 状態では-25dB であり電波吸収体として動作し、ON 状態では-0.7dB の反射率であり反射板として動作することを確認した、水平偏波に対してはダイオードの状態に関わらず-20dB 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、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/反射切替板が実現可能であることを示した。

第 3 章「アンテナリフレクタへの適用」では、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。

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た場合の正面の利得は 6.9dBi、金属板のリフレクタの場合は 6.7dBi であり、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。

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た場合、金属板のリフレクタの場合と比較して垂直偏波に対し

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。

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。

設計・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た。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 93%が透過していることから透過板として動作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/透過切替板が実現可能であることを示した。

第5章「アンテナレドームへの適用」では、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。

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パッチアンテナのレドームに適用した場合の正面方向の利得は 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。

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た場合、レドームなしの場合と比較して 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。

以下に本切替板の実用化に向けた展望について述べる。

本論文において切替えに用いたダイオードは ON 状態とするために 1V の順方

向バイアス電圧を印加し、約 10mA の電流が流れた。提案した切替板構造を用いて、大開口アンテナのリフレクタまたはレドームに適用し、上下からバイアス電圧を印加するには高電圧が必要となるため、バイアス電圧の印加方法に工夫が必要となる。

また、本論文では 9GHz において切替板を設計・試作し、同様の設計手法が他のマイクロ波帯の周波数帯でも有効であると考えられるが、自動車用レーダに用いられるミリ波帯のような高い周波数において設計する場合、ダイオードが ON/OFF 状態によって同様のインピーダンスとして動作するのか検証する必要がある。

参考文献

- [1] T. K. Wu, Frequency selective surface and grid array, John Wiley & Sons, July 1995.
- [2] C. Scott, The spectral domain method in electromagnetics, Artech House, March 1989.
- [3] B. A. Munk, Frequency selective surfaces: Theory and Design, Wiley-Interscience, April 2000.
- [4] 大平昌敬, 出口博之, 辻幹男, 繁沢宏, “任意形状素子を有する周波数選択板の等価回路による特性解析,” 信学論(C), vol.J87-C, no.12, pp.1030-1037, Dec. 2004.
- [5] K. Sarabandi, and N. Behdad, “A frequency selective surface with miniaturized elements,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 5, pp.1239-1245, May 2007.
- [6] T. R. S. Kumar, C. Venkatesh, "Application of double layer frequency selective surface for SMPS shielding," *2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 438-441, Aug. 2011.
- [7] H. Chen, Y. Ze, “An EMI shielding FSS for Ku-band applications,” *Antennas and Propagation Society International Symposium 2012*, pp. 1-2, July 2012.
- [8] 三谷浩史, 角和俊, 伊藤晶彦, 橋本修, “X 帯における FSS を用いた薄型抵抗皮膜電波吸収体の実用化検討,” 信学論(B), vol.J86-B, no.6, pp.1020-1023, June 2003.
- [9] 池田陽介, 松本好太, 橋本修, “分割導電膜を用いた 100MHz 帯用電波吸収体の超薄型化に関する研究,” 信学論(B), vol.J89-B, no.10, pp.2057-2061, Oct. 2006.
- [10] 浅田順之, “周波数選択板を用いた電波吸収体に関する基礎的検討,” 信学論(B), vol.J90-B, no.1, pp.56-62, Jan. 2007.
- [11] G. I. Kiani, K. L. Ford, K. P. Esselle, A. R. Weily, and C. J. Panagamuwa, “Oblique incidence performance of a novel frequency selective surface absorber,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 10, Oct. 2007.
- [12] G. I. Kiani, A. R. Weily, and K. P. Esselle, “A novel absorb/transmit FSS for secure indoor wireless networks with reduced multipath fading,” *IEEE Microw. Compon.*

Lett., vol. 16, no. 6, June 2006.

- [13] F. Costa, A. monorchio, and G. Manara, "Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 5, May 2007.
- [14] Y. Kotsuka and C. Kawamura, "Novel computer control metamaterial beyond conventional configuration and its microwave absorber application," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1627-1630, June 2007.
- [15] Y. Kotsuka and C. Kawamura, "Novel metamaterial based on the concept of autonomous control system of living cell and its EMC applications," *IEEE EMC-S Int. EMC Symp. Dig.*, WE-PM2-SS4, July 2007.
- [16] 童大亮, 西方敦博, 青柳貴洋, 小塚洋司, "可変容量ダイオードを用いた可変整合型電波吸収体の検討," 信学技報, EMCJ2008-1, pp.1-6, Apr. 2008.
- [17] 宮寄亮, 西方敦博, 青柳貴洋, 小塚洋司, "可変整合型電波吸収体の作成と測定," 信学技報, EMCJ2008-2, pp.7-12, Apr. 2008.
- [18] R. Miyazaki, A. Nishikata, T. Aoyagi, and Y. Kotsuka, "Tunable EM-wave absorber below 1 GHz using diode grid and its evaluation by large stripline," *Proc. 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 24P1-2, pp. 729-732, July 2009.
- [19] 勝田啓吾, 清水隆夫, 山中雄介, 森田聖史, 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," 信学技報, EMCJ2010-114, pp.85-90, Jan. 2011.
- [20] S. Yagitani, K. Katsuda, R. Tanaka, M. Nojima, Y. Yoshimura, and H. Sugiura, "A tunable EBG absorber for radio-frequency power imaging," *General Assembly and Scientific Symposium*, 978-1-4244-5117-3, Aug. 2011.
- [21] S. Yagitani, K. Katsuda, M. Nojima, Y. Yoshimura, and H. Sugiura, "Imaging radio-frequency power distributions by an EBG absorber," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E94-B, no. 8, Aug. 2011.
- [22] 津田祐己, 橋本修, 安住壮紀, "抵抗被膜と導体ライン間に装荷したバラクタダイオードを用いた可変整合型電波吸収体," 信学技報, MW2011-12, pp.21-26, Dec. 2011.
- [23] J. Zhao, Q. Cheng, J. Chen, M. Q. Zi, W. X. Jiang, and T. J. Cui, "A tunable metamaterial absorber using varactor diodes," *New J. Phys.*, 15, 043049, April 2013.
- [24] C. Mias and J. H. Yap, "A varactor-tunable high impedance surface with a resistive-lumped element biasing grid," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 7, pp.1995-1962, July 2007.

- [25] B. Zhu, Y. Feng, J. Zhao, C. Huang, and T. Jiang, "Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves," *Appl. Phys. Lett.* 97, 051906, 2010.
- [26] B. Lin, S. Zhao, Q. Zheng, M. Zhu, F. Li, and H. Zheng, "A varactor-tunable high impedance surface for active metamaterial absorber," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 43, pp. 247-254, Sep. 2013.
- [27] A. E. Martynyuk, J. I. Martinez, and N. A. Martynyuk, "Active frequency-selective surfaces based on loaded ring slot resonators," *IET Electron. Lett.*, vol. 41, no. 1, pp. 2-4, Jan. 2005.
- [28] M. Khosravi and M. S. Abrishamian, "Reduction of monostatic RCS by switchable FSS elements," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 3, no. 6, pp. 770-773, 2007.
- [29] G. I. Kiani, K. L. Ford, K. P. Esselle, A. R. Weily, C. Panagamuwa, and J. C. Batchelor, "Single-layer bandpass active frequency selective surface," *Microw. Opt. Techn. Lett.*, vol. 50, no. 8, pp. 2149-2151, Aug. 2008.
- [30] K. Chang, S. Kwak, and Y. J. Yoon, "Active frequency selective surfaces using incorporated PIN diodes," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E91-C, no. 12, pp. 1917-1922, Dec. 2008.
- [31] A. Munir and V. Fusco, "Characterization of switchable substrateless frequency selective surfaces," *Int. J. Elec. Eng. Inform.*, vol. 1, no. 1, pp. 42-52, Nov. 2009.
- [32] B. Sanz-Izquierdo, E. A. Parker, and J. C. Batchelor, "Switchable frequency selective slot arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 7, pp. 2728-2731, May. 2011.
- [33] P. Ludlow and V. Fusco, "Switchable radar cross-section evanescent wave guide antenna affiliation," *Microw. Opt. Techn. Lett.*, vol. 54, no. 8, pp. 1849-1851, August 2012.
- [34] L. Zhang, G. Yang, Q. Wu, and J. Hua, "A novel active frequency selective surface with wideband tuning range for EMC purpose," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 4534-4537, Nov. 2012.
- [35] W. Xu and S. Sonkusale, "Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber," *J. Appl. Phys. Lett.* 97, 031902, 2013.
- [36] B. Sanz-Izquierdo and E. A. Parker, "Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 2, pp. 764-771, Jan. 2014.
- [37] P. Kong, X.-W. Yui, L. Miao, and J.-J. Jiang, "Switchable frequency selective surfaces absorber/reflector for wideband applications," *IEEE Int. Conf.*

Ultra-Wideband, pp. 256-259, Sep. 2014.

- [38] X. He, S. Gong, Y. Ji, and Q. Liu, "Meshed microstrip patch antennas with low RCS," *Microw. Opt. Techn. Lett.*, vol. 46, no. 2, July 2005.
- [39] J. H. Zheng, Y. Liu, and S.-X. Gong, "Aperture coupled microstrip antenna with low RCS," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 3, pp. 61-68, 2008.
- [40] L. Liu, S. Matitsine, and P. K. Tan, "Electromagnetic smart screen for tunable transmission and reflection applications," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 251-254, 2008.
- [41] S.-C. Zhao, B.-Z. Wang, and Q.-Q. He, "Broadband radar cross section reduction of a rectangular patch antenna," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 79, pp. 263-275, 2008.
- [42] S. Monni et al., "Limiting frequency selectivity surfaces," *Proc. 39th Eur. Microw. Conf.*, pp. 606-609, Oct. 2009.
- [43] W. Jiang, Y. Liu, S. Gong, and T. Hong, "Application of bionics in antenna radar cross section," *IEEE Trans. Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1275-1278, Nov. 2009.
- [44] T. Hong, S.-X. Gong, W. Jiang, Y.-X. Xu, and X. Wang, "A novel ultra-wide band antenna with reduced radar cross section," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 96, pp. 299-308, 2009.
- [45] H.-Y. Xu, H. Zhang, K. Lu, and X.-F. Zeng, "A holly-leaf-shaped monopole antenna with low RCS for UWB application," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 117, pp. 35-50, May 2011.
- [46] Y. Li, Y. Liu, and S. Gong, "Microstrip antenna using ground-cut slots for low RCS with size miniaturization techniques," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 1, pp. 211-220, 2008.
- [47] H.-W. Yuan, S.-X. Gong, X. Wang, and W.-T. Wang, "Scattering analysis of a printed dipole antenna using PBG structure," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 1, pp. 189-195, 2008.
- [48] T. Wu, Y. Li, S.-X. Gong, and Y. Liu, "A novel low RCS microstrip antenna using aperture coupled microstrip dipoles," *J. Electromagn. Waves and Appl.*, vol. 22, pp. 953-963, 2008.
- [49] J. Ling, S.-X. Gong, B. Liu, H.-W. Yuan, W.-T. Wang, "A microstrip printed dipole antenna with UC-EBG ground for RCS reduction," *J. Electromagn. Waves and Appl.*, vol. 23, pp. 607-616, 2009.
- [50] H. Li, B.-Z. Wang, G. Zheng, and W. Shao, "A reflectarray antenna backed on FSS for low RCS and high radiation performances," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 15,

pp. 145-155, 2010.

- [51] L.-S. Ren, Y.-C. Jiao, J.-J. Zhao, and F. Li, "RCS reduction for a FSS-backed reflectarray using a ring element," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 26, pp. 115-123, 2011.
- [52] W. Jiang, T. Hong, and S. X. Gong, "Research on the scattering characteristics and the RCS reduction of circularly polarized microstrip antenna," *Int. J. Antennas and Propag.*, vol. 2013, pp. 1-9, June 2013.
- [53] 宗哲, 朝倉安彦, 橋本修, "5GHz 帯用塗布型電波吸収体に関する検討," 信学技報, EMCJ2000-116, pp.91-95, Dec. 2000.

本研究に関する発表論文

発表論文

- [1] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, and Osamu Hashimoto, “A switchable microwave reflector using pin diodes,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E97-C, no. 7, 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] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, Kiyomichi Araki, and Osamu 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, pp.338-347, Dec. 2015.
- [5] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, Osamu Hashimoto, and Kiyomichi Araki, “Study on RCS reduction of patch array using switchable absorption/transmission surface,” *IEICE Trans. Electron. Lett.*, July 2016 (to be published).

国際会議

- [1] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, and Osamu Hashimoto, “Electrically switchable reflector implemented on dielectric substrate,” *2013 Thailand-Japan Microwave*, TU2-20, Dec. 2013.
- [2] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, and Osamu 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] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, and Osamu 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] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, Kiyomichi Araki, and Osamu 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] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, Kiyomichi Araki, and Osamu Hashimoto, “Active absorption/transmission FSS using diodes,” *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, 5507, pp. 1538-1541, Aug. 2015.

口頭発表

- [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, MW2013-129, EST2013-81, 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, March 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.

その他の発表論文

国際会議

- [1] Shinya Kitagawa, Ryosuke Suga, and Osamu 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.

口頭発表

- [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.
- [10] 北川真也, 須賀良介, 橋本修, 荒木純道, “電波吸収体による円筒型空洞の RCS 低減特性,” 信学総大, C-2-79, p.100, Mar. 2016.

謝辞

博士後期課程における 3 年間，常に懇切丁寧な御指導賜りました青山学院大学理工学部電気電子工学科指導教員の橋本修教授に心より感謝申し上げます。橋本修教授には研究の進め方，論文の書き方など非常に多くのことを学ばせて頂き，数多くの国際会議等の発表機会を与えていただきました。

本論文の副査として貴重なご意見を賜りました本学の林洋一教授，松谷康之教授，東京工業大学の西方敦博准教授に深く感謝申し上げます。

本研究室の須賀良介助教には研究の進め方，論文の書き方及びプレゼンテーション方法など多くのご指導賜りました。心より感謝申し上げます。

東京工業大学の荒木純道教授には定期的な議論の場において，非常に貴重なご意見を賜りましたことを深く感謝申し上げます。

本研究室 OB であり，本学の宗哲助手には本研究及び博士後期課程修了者の先輩として貴重なご意見賜りましたことを感謝申し上げます。

本研究室の森孝子秘書には学会出張等の事務処理で多くのサポートを賜りましたことを感謝いたします。

また，本論文の発表会等の研究生活において，角田亮太氏をはじめとした本研究室の学部生及び大学院生の皆様には大変お世話になりましたことを感謝いたします。

防衛装備庁（旧防衛省技術研究本部）の皆様には本論文をまとめる機会を与えていただき，感謝申し上げます。特に電子装備研究所電子対処研究部センサ妨害研究室（旧センサ技術研究部電子戦基盤研究室）の皆様には実験装置の使用等多くの協力いただきましたことを感謝いたします。

最後に私を温かく見守ってくれた両親に感謝の意を表して謝辞といたします。