

広帯域特性及び広角な斜入射特性を 有する電波吸収体の最適設計

防衛大学校理工学研究科後期課程

電子情報工学系専攻 エレクトロニクス工学教育研究分野

秋山 佑佳

平成31年3月

目次

| | |
|--------------------------------------|--------------|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.1.1 RAMの開発動向及びRAMに要求される特性 | 1 |
| 1.1.2 最適化手法を用いたRAM設計の課題 | 3 |
| 1.2 研究の目的 | 7 |
| 1.3 本論文の構成 | 7 |
| 第2章 垂直入射時において広帯域特性を有するRAM | 9 |
| 2.1 まえがき | 9 |
| 2.2 広帯域特性を有するRAM設計 | 9 |
| 2.2.1 RAMの設計モデル | 9 |
| 2.2.2 GAの概念 | 11 |
| 2.2.3 単目的GA及びランダム探索法と比較したNSGA-IIの優位性 | 12 |
| 2.2.4 目的関数の設定 | 17 |
| 2.3 設計変数が目的関数に与える影響 | 17 |
| 2.3.1 厚さの影響 | 17 |
| 2.3.2 クラスタリング分析 | 20 |
| 2.3.3 比誘電率の影響 | 25 |
| 2.4 比誘電率の周波数分散性を考慮した最適設計 | 26 |
| 2.5 まとめ | 39 |

第3章 連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM41

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 3.1 | まえがき | 41 |
| 3.2 | RAM の設計モデル | 42 |
| 3.3 | 誘電性材質を用いた RAM 設計 | 45 |
| 3.3.1 | TM 波入射時の斜入射特性の検討 | 46 |
| 3.3.2 | TE 波入射時の斜入射特性の検討 | 51 |
| 3.3.3 | 接着層を追加した場合の影響 | 54 |
| 3.4 | 磁性材質を用いた RAM 設計 | 56 |
| 3.4.1 | TM 波入射時の斜入射特性の検討 | 57 |
| 3.4.2 | TE 波入射時の斜入射特性の検討 | 60 |
| 3.4.3 | 接着層を追加した場合の影響 | 67 |
| 3.5 | 誘電性材質及び磁性材質から成る RAM の特性比較及び考察 | 69 |
| 3.6 | 両偏波特性に関する検討 | 69 |
| 3.7 | まとめ | 72 |

第4章 設計変数のロバスト性を考慮した RAM74

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 4.1 | まえがき | 74 |
| 4.2 | 広帯域特性を目的とした RAM のロバスト設計 | 74 |
| 4.2.1 | ロバスト設計の概念 | 74 |
| 4.2.2 | 最適化手法 | 76 |
| 4.3 | 垂直入射時におけるロバスト設計 | 80 |
| 4.4 | 斜入射時におけるロバスト設計 | 93 |
| 4.4.1 | TM 波入射時の斜入射特性の検討 | 93 |
| 4.4.2 | TE 波入射時の斜入射特性の検討 | 101 |

| | |
|-----------------------|------------|
| 4.5 まとめ | 109 |
| 第 5 章 結論 | 111 |
| 謝 辞 | 114 |
| 参考文献 | 115 |
| 研究業績 | 123 |

第1章 序 論

1.1 研究背景

1.1.1 RAM の開発動向及び RAM に要求される特性

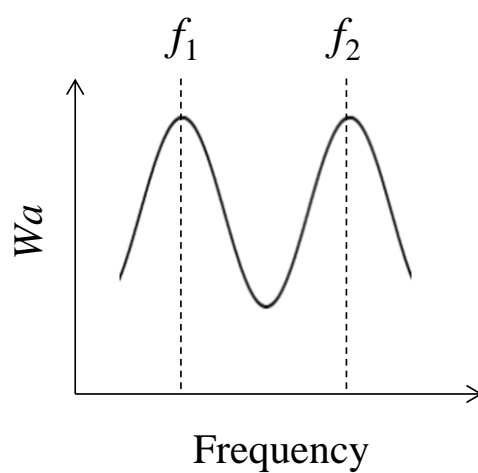
電波吸収体 (Radar Absorbent Material : RAM) は電波暗室の設計だけでなく、通信障害対策やノイズ対策等、様々な場面で必要とされ、幅広く利用されている[1]–[4]。RAM は使用用途に応じて周波数帯域が異なり、要求される性能も広帯域特性、斜入射特性、両偏波特性等で異なる。そのため、RAM の設計には、目的に応じた材質や形状の選択が求められる。一般的に、RAM の材質には導電性材質[5], [6], 誘電性材質[7], [8], 磁性材質[9], [10]及び人工材質[11]–[13]の他、これらを組み合わせた複合材料があり[14]–[17], 形状にはピラミッド型や平板型に加えて抵抗皮膜等がある[18]–[24]。

ここで近年の RAM の開発動向をまとめたものを表 1.1 に示す[25]。表 1.1 に示すように RAM を要求性能ごとに比較すると、電波暗室で利用される広帯域特性を有する RAM、高度道路交通システム (ITS : Intelligent Transport Systems) で利用される斜入射特性を有する RAM、室内無線 LAN (Local Area Network) や電子料金収受システム (ETC : Electronic Toll Collection System) で利用される両偏波対応の RAM 及び自動車レーダーで利用されるミリ波対応の RAM がある。それぞれ使用用途に応じて優れた特性を有するが、構造上の制約や周波数の制約、加工及び製作精度を要する等のデメリットがある[26]–[30]。

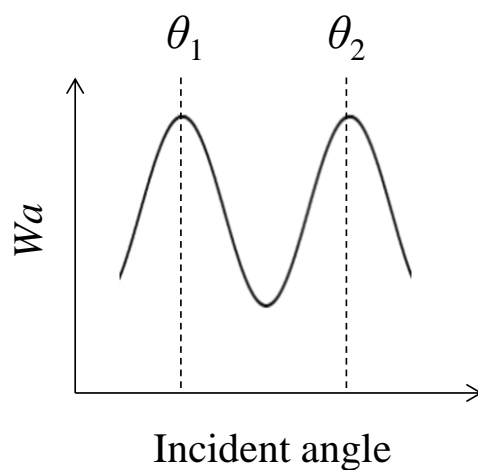
以上より、加工が容易で、かつ使用用途を拡大できる平板型の RAM を用いて、これら複数の要求性能を満たすことが RAM 設計に求められる。形状が平板型で広帯域特性を有する RAM は一般的に多層構造であることから[31]–[35], 本論文ではその基本形である 2 層平板型 RAM を用いて検討する。2 層平板型 RAM の性能を示す電波吸収量 (Wave-absorption amount : W_a [dB]) は、受信周波数及び入射角に対して、RAM を構成する各層の電気材料定数によって決定する。具体的には、整合入射角度及び偏波が 1 つの場合、2 層平板型 RAM は広帯域特性を満たすことができ、整合周波数及び偏波が 1 つの場合、2 層平板型 RAM は広角度の斜入射特性を満たすことができる[36], [37]。図 1.1 に 2 層平板型 RAM が有する特性を示す。これらの特性を最大限に満たすには、RAM の電気材料定数に最適値を与える必要があることから、その算出に最適化手法を用いる必要がある。

表 1.1 RAM の開発動向.

| 項目 | 要求性能 | 形 状 | 用 途 | デメリット |
|----|------|--------|------------------|---|
| 1 | 広帯域 | ピラミッド型 | 電波暗室 | 立体構造で大型化 |
| 2 | 斜入射 | 平板型 | ITS | 周波数に制約 (5.8 GHz) |
| 3 | 両偏波 | 平板型 | 室内無線 LAN, ETC | 周波数に制約 (2.4 GHz/5.2-5.3 GHz, 5.8 GHz) |
| 4 | ミリ波 | 抵抗皮膜 | 自動車 レーダー | 非常に薄型なため, 加工・ 製作精度が必要 |



(a) 広帯域特性.



(b) 広角度の斜入射特性.

図 1.1 2 層平板型 RAM が有する特性.

1.1.2 最適化手法を用いた RAM 設計の課題

これまで電磁波問題に対して最適化手法を適用した研究は多数報告されており、鳥や魚の群れのように集団的行動によって餌を効率良く探索できる動物の習性を模倣した粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization : PSO) の適用[38]–[43]、自然淘汰に基づく生物の進化を模倣した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) の適用[44]–[49]がある。PSO の利点として、アルゴリズムとパラメータ設定が簡易な点、離散的設計変数だけでなく連続的設計変数の最適化問題にも効果的な点、また、目的関数の収束が速いため、少ない計算回数で最適解に到達しやすい点が挙げられる[50]。その一方で、設計変数に制約条件がある場合でも設計変数空間外の解が出る点や局所解に陥りやすい点が欠点として挙げられる。GA は目的関数や制約条件の感度を利用しないことが他の最適化手法と異なる点として挙げられ、それによって不連続な問題や微分不可能で感度を求めることができない問題、離散変数を含む問題等、数理的手法では取り扱うことのできない問題に対して適用することが可能である。また、多数の探索点を同時に扱い、確率的な方法によりそれらの探索点を更新していくため、多峰性のある問題であっても大域的な探索を行うことが期待できるという特徴がある。一方で、収束時間が長いという点が欠点として挙げられる[51]–[53]。これらの特徴を踏まえ、RAM の電気材料定数の最適値算出には制約条件を設ける必要があることから、GA の方が適していると言える。

最適化手法を適用した RAM 設計に関して、これまで多くの研究が行われており、垂直入射時[54]、[55]や斜入射時[56]において最適設計された平板型構造の RAM が提案されている。文献[54]では、磁性材質から成る 5 層平板型 RAM が提案されており、これは 20 dB 以上の W_a を周波数 1.7~8.5 GHz の間で満たすことから、垂直入射時に広帯域特性を有すると言える。しかしながら、10 GHz 以上の周波数範囲では 20 dB 以上の W_a を満たさないことから、周波数の制約がある。また、文献[55]では、誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM が提案されており、 W_a の最大値は大きいですが、20 dB 以上の W_a を満たす周波数は 2.21~2.69 GHz と低周波数帯域のみであり、これは文献[54]と比較して広帯域特性において劣る。図 1.2 及び図 1.3 に、文献[54]、文献[55]で提案する RAM の周波数特性をそれぞれ示す。以上より、垂直入射時、少ない層数で低周波数帯域から広帯域特性を満たす RAM の設計が求められる。

さらに、文献[56]では、誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM が提案されており、入射角 30 deg.の斜入射時において、TM 波 (Transverse Magnetic Wave)、TE 波 (Transverse Electric Wave) とともに広帯域特性をよく満たす。しかしながら、周波数は 20~25 GHz と高周波数帯域に限定されており、制約がある。また、連続

した斜入射時に常に広帯域特性を満たすわけではなく、入射角にも制約がある．図 1.4 に、文献[56]で提案する RAM の周波数特性を示す．最適化手法を用いた RAM 設計に限らず、斜入射時の広帯域特性は特定の入射角の場合が多く、連続した斜入射時に広帯域特性を満たす RAM の研究は少ない[57]．文献[57]で提案する 2 層平板型 RAM は、20 dB 以上の W_a に対して、周波数 8.0 GHz から比帯域幅 40 %の広帯域特性を有しており、これを 0～30 deg.以内の入射角範囲で常に満たす．図 1.5 に、文献[57]で提案する RAM の周波数特性及び入射角特性を示す．以上より、斜入射時、低周波数帯域から、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を満たす RAM の設計が求められる．

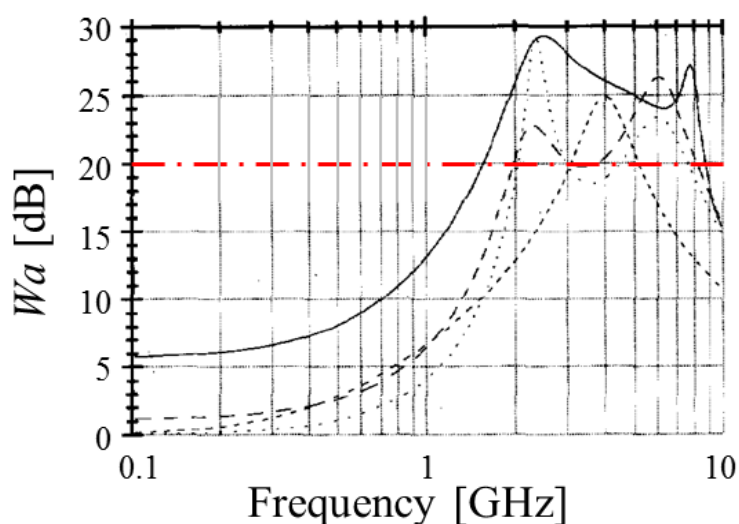


図 1.2 文献[54]で提案する 5 層平板型 RAM の周波数特性.

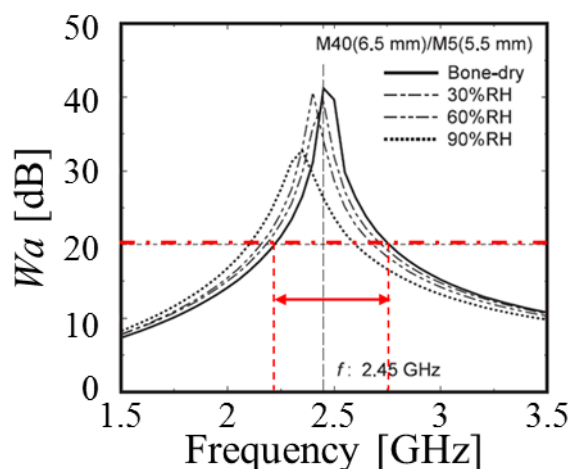


図 1.3 文献[55]で提案する 2 層平板型 RAM の周波数特性.

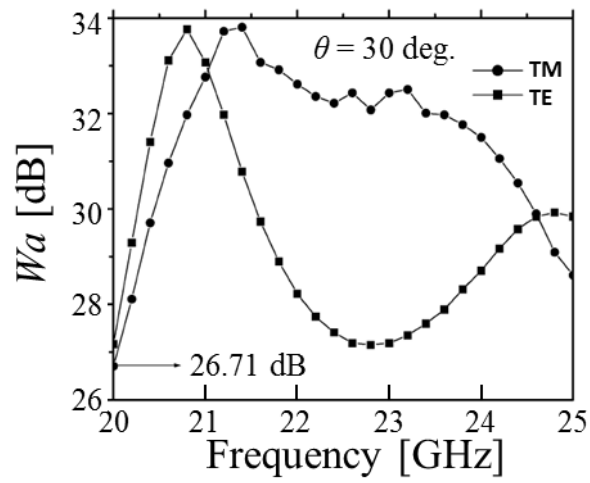


図 1.4 文献[56]で提案する 2 層平板型 RAM の周波数特性.

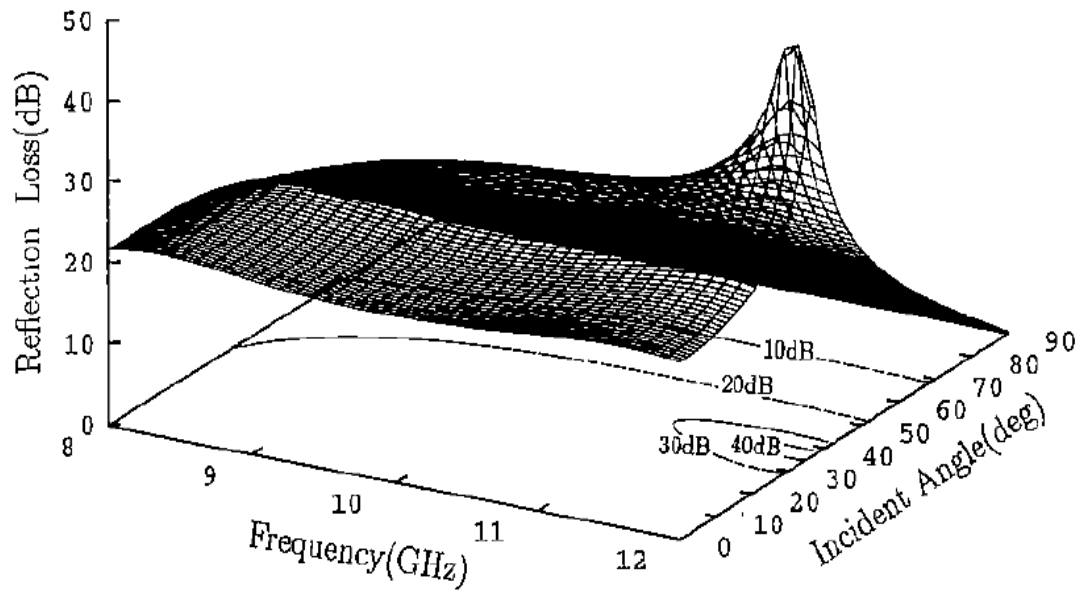


図 1.5 文献[57]で提案する 2 層平板型 RAM の周波数特性及び入射角特性.

ここで、文献[54]–[56]に共通して見られる課題として、最適設計の場合、最適解が確定値であるため、製作時に設計変数に誤差が生じた際、要求性能を満たすことが困難な点が挙げられる。そのため、設計変数に対してロバスト性を持たせる、ロバスト設計が求められる。ロバスト設計とは、設計変数やパラメータの変動区間において、その最悪値を取る場合でも制約条件を満たす設計領域において、目的関数の最悪値を改善する手法や目的関数の変動量を最小化する手法のことを言い、これにより、要求性能を確実に満たす **RAM** の設計が可能となる。しかしながら、これまで、設計変数である **RAM** の電気材料定数に対してロバスト性を考慮した研究は無い。文献[58]は、設計手法の中で **GA** にロバスト性を持たせた内容であり、設計変数そのものに対してロバスト性を持たせたものではない。以上より、設計変数に対してロバスト性があり、かつ垂直入射時及び連続した斜入射時において広帯域特性を満たす **RAM** の設計が求められる。

1.2 研究の目的

本研究では、垂直入射時及び連続した斜入射時に、広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM の設計に関する検討を行う。はじめに、GA を用いた最適設計により、20 dB 以上の W_a を満たし、かつ広帯域特性を満たす RAM の設計を目指す。この際、目標値の W_a を満たす比帯域幅の最大化を行うとともに、その周波数帯域幅の最小値である最小周波数の低周波化を同時に検討する。

次に、設計変数の製造誤差を考慮したロバスト設計を行う。これにより、設計変数にばらつきが生じた場合でも、低周波数帯域から広帯域な周波数範囲で高い電波吸収効果を得る RAM の設計を目指す。また、この検討を通して、RAM 製作において重要となる、設計変数の変動可能な誤差範囲を示す。

1.3 本論文の構成

本論文では、RAM の広帯域特性に着目し、垂直入射時及び連続した斜入射時において広帯域特性を満たす 2 層平板型 RAM を設計した。その際、GA を用いた最適設計に加えて、設計変数の製造誤差を考慮したロバスト設計を行った。本論文は、これら一連の研究をまとめたものであり、5 章から構成されている。図 1.6 に本論文の構成を示す。

以下、各章の概要を示し、本論文の流れを述べる。

第 1 章「序論」では、研究背景として、近年の RAM の開発動向を示し、最適化手法を用いた RAM 設計の課題について述べ、本研究の目的と全体構成を示した。

第 2 章「垂直入射時において広帯域特性を有する RAM」では、誘電性材質を用いて、垂直入射時において広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM の設計手法を提案する。このとき、GA を RAM の電気材料定数最適化に適用するが、多目的 GA を用いることで、広帯域特性及び最小周波数の低周波化を同時に考慮した電気材料定数最適化による設計手法を示す。

第 3 章「連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM」では、垂直入射時の設計手法を斜入射時にも応用することで、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM の設計手法を提案する。このとき、入射角 0 deg. から指定された最大入射角まで、広帯域特性が常に得られることを目的とする。垂直入射時との違いとして、斜入射時は誘電性材質に加えて磁性材質を用いて RAM の設計を行い、両者の特徴を比較する。加えて、設計した RAM の両偏波特性について検討し、考察する。

第 4 章「設計変数のロバスト性を考慮した RAM」では、垂直入射時及び斜入

射時において，設計変数にロバスト性を有し，かつ広帯域特性を満たす 2 層平板型 RAM の設計手法を提案する．これは，確定値の最適解では，製作時に設計変数に誤差が生じた場合，要求性能を満たすことが困難という最適設計の課題を克服することを目的とする．また，製作した RAM の製造誤差がその範囲内に含まれるかを容易に判別できるよう，RAM に求められる W_a の最小値に対して，設計変数の変動可能な範囲を示す．

第 5 章「結論」では本研究のまとめを述べる．

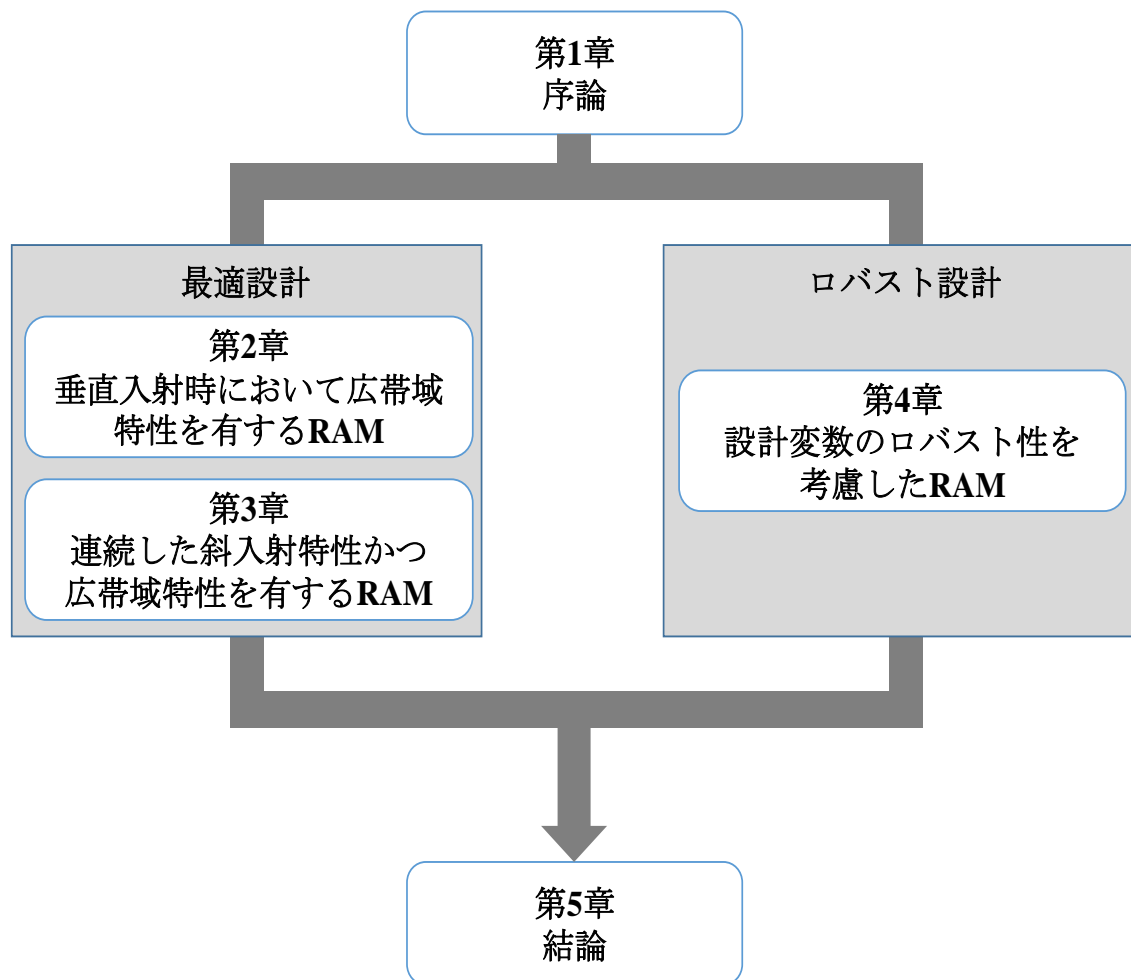


図 1.6 本論文の構成.

第2章 垂直入射時において広帯域特性を有する RAM

2.1 まえがき

本研究では GA を RAM の電気材料定数最適化に適用し、垂直入射時において、広帯域特性を有する RAM の設計手法を提案する。RAM の構造は使用用途を拡大できるよう 2 層平板型 RAM とし、その材料には均質材料でかつ等方性材料を用いる。広帯域特性を目指す上で、目標値の W_a を満たす比帯域幅の最大化を行うとともに、その周波数帯域幅の最小値である最小周波数の低周波化を同時に検討する。

本章では、2.2 で広帯域特性を有する RAM 設計について説明する。RAM の機能を最大限に発揮させるために、受信周波数に応じた RAM の電気材料定数、すなわち比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さの組み合わせを特定する必要がある、その理由を理論式から確認する。また、GA の概念について説明し、単目的 GA 及びランダム探索法と比較した多目的 GA の優位性を示す。2.3 では、設計変数が目的関数に与える影響について説明する。厚さについては吸収層と表面層の厚さの比から、その影響について説明し、比誘電率については、クラスタリング分析結果からそれらが目的関数に与える影響について確認する。2.4 では、比誘電率の周波数分散性を考慮した最適設計について述べ、得られた結果について考察を行う。2.5 で本章のまとめとする。

2.2 広帯域特性を有する RAM 設計

2.2.1 RAM の設計モデル

図 2.1 に誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM の構成を示す。 W_a [dB] の算出式は、金属板に近い方から RAM の層を 1 層目、2 層目、... k 層目としたとき、次のように表せる[59]。ここでは、入射波が TE 波の場合について示す。特性インピーダンス及び伝搬定数を

$$\dot{Z}_{C(k)TE} = \frac{\dot{\mu}_{r(k)} \cos \theta}{\sqrt{\dot{\epsilon}_{r(k)} \dot{\mu}_{r(k)} - \sin^2 \theta}} \quad (2.1)$$

$$\dot{\gamma}_{(k)} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r(k)} \dot{\mu}_{r(k)} - \sin^2 \theta} \quad (2.2)$$

とすると (λ : 自由空間における波長), 規格化入力インピーダンスは

$k = 1$:

$$\dot{Z}_{(k)TE} = \dot{Z}_{C(k)TE} \tanh(\dot{\gamma}_{(k)} d_{(k)}) \quad (2.3)$$

$k \geq 2$:

$$\dot{Z}_{(k)TE} = \dot{Z}_{C(k)TE} \frac{\dot{Z}_{(k-1)TE} + \dot{Z}_{C(k)TE} \tanh(\dot{\gamma}_{(k)} d_{(k)})}{\dot{Z}_{C(k)TE} + \dot{Z}_{(k-1)TE} \tanh(\dot{\gamma}_{(k)} d_{(k)})} \quad (2.4)$$

と表せる. 以上より, 規格化入力インピーダンスを用いて Wa は,

$$Wa_{TE} = 20 \log_{10} \left| \frac{\dot{Z}_{(k)TE} - 1}{\dot{Z}_{(k)TE} + 1} \right| \quad (2.5)$$

となる. 但し,

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r - j\epsilon_i \quad (2.6)$$

$$\dot{\mu}_r = \mu_r - j\mu_i \quad (2.7)$$

とする. 上式から明らかなように, 2 層平板型 RAM の場合, 図 2.1 の青色で示す吸収層及び緑色で示す表面層の電気材料定数の値によって Wa は決定する. 誘電性材質を用いることから, 複素比透磁率は $1 - j0$ とする. 以上より, 各層の比誘電率実部, 比誘電率虚部及び厚さの値を設計変数とする. 本検討では, Wa について 99 % の吸収率に相当する 20 dB を指標としており, 広帯域特性については Wa が 20 dB 以上となる周波数帯域幅の拡大を目指す. はじめに, 計算する周波数範囲を 0.1~15.0 GHz に指定し, その範囲内において最大限に広帯域特性を有する RAM を設計する. このとき, 0.01 GHz 刻みで計算を行う. また, 入射角

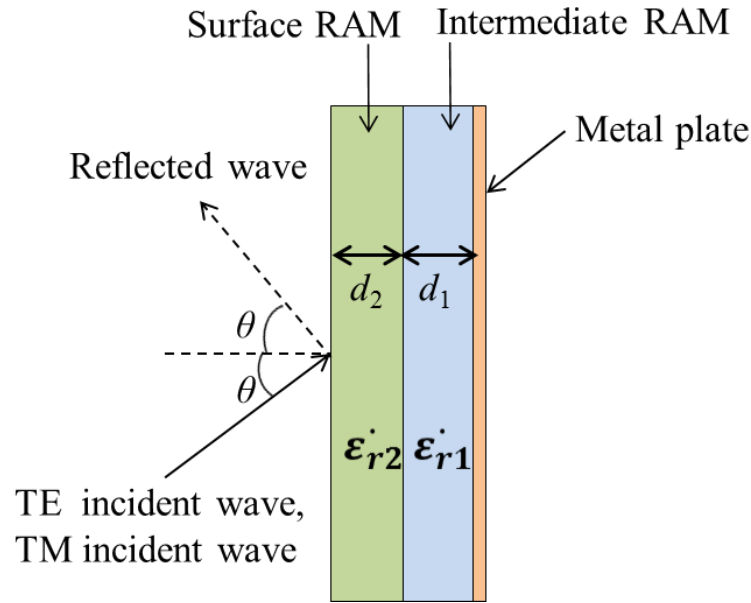


図 2.1 2 層平板型 RAM の構成(誘電性材質).

については 0 deg.とし，垂直入射時を検討する．このとき，最小周波数，すなわち W_a が 20 dB 以上となる第 1 番目の周波数を低周波化させることが重要となる．それは，所望の設計周波数が必ずしも高いわけではなく，必要とされる設計周波数に対して，同じ厚さでより広帯域な性能が得られる RAM を設計するには，最小周波数をより低くした方が良いからである．したがって，本検討では広帯域特性及び最小周波数の低周波化という 2 つの目的関数を最適化する．

2.2.2 GA の概念

GA は自然淘汰に基づく生物の進化を模倣した探索法であり，確率的な探索法の 1 つである．GA では解候補の 1 つ 1 つの設計変数を遺伝子として表現するが，通常，設計変数は複数あるため複数の遺伝子により 1 つの解候補が表現される．その解候補を個体と呼び，個体が持つ複数の遺伝子をまとめて遺伝子型と呼ぶ．最適設計問題における設計変数ベクトルが遺伝子型に相当し，設計変数ベクトル中のそれぞれの設計変数が遺伝子に相当する．GA ではさらに個体を集めた個体集団を考え，個体集団の大きさは人口と呼ばれる．個体の持つ遺伝子型が最適設計問題という環境において評価され，淘汰・選択が行われ，さらに，個体の遺伝子を交叉，突然変異などの遺伝子操作によって更新するという手順を繰り返すことで，より良い設計解を得るという手法である．そのため，GA は設計変数空間内で最適解の探索を行うことができる[51]．したがって，本論文のように設計変数に対して制約条件を設ける最適設計問題には GA が適している．

2.2.3 単目的 GA 及びランダム探索法と比較した NSGA-II の優位性

GA は通常，単目的最適化であるため目的関数を広帯域特性のみとして 2 層平板型 RAM を設計した場合，その周波数特性を図 2.2 に実線で示す．各層の比誘電率実部を 1～20，比誘電率虚部を 0～20 とし，厚さ（合計値）は 1～20 mm とする．これは周波数 0.1～15.0 GHz にて広帯域特性を有するよう最適化した結果である．計算回数は 2,000,000 回（人口 100，世代数 20,000）で，計算時間は 4.22 時間，20 dB 以上の W_a が得られる周波数帯域幅は 6.77 GHz (8.20～14.97 GHz) である．ここで，GA を用いて広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM を設計した場合の問題点として，20 dB 以上の W_a を初めて得る周波数が 8.20 GHz と高いことが挙げられる．この問題点を解決するため，目的関数を広帯域特性 ($f_1(x)$) 及び最小周波数の低周波化 ($f_2(x)$) の 2 つとし，式(2.8)に示すようにそれぞれの目的関数に対して q_1 , q_2 という重み係数を付け検討したところ，2 目的関数を同時に満たす重み係数の最適値は得られない．

$$F(X) = q_1 \times f_1(x) + q_2 \times f_2(x) \quad (2.8)$$

これは，目的関数空間での実行可能領域が非凸であり，パレート解が凹んでいることが理由として考えられる．なお，パレート解とは，多目的最適化問題において，トレードオフを表す解の集合のことを言う[60]．このような場合，重み付き総和法では導出できず，多目的関数を同時に最適化することができない．単目的最適化手法を用いて複数の目的関数を最適化する場合，それぞれの目的関数に付ける重み係数の最適値が必ずしも見つかるとは限らない．また，結果がパラメータに依存してしまうため，それらを変更しながら最適化のプロセスを何度も繰り返す必要がある．したがって，複数の目的関数を最適化する場合，単目的最適化手法では不十分である．

次に，ランダム探索法を用いて 2 目的関数に対して最適化を行い，設計した 2 層平板型 RAM の周波数特性を図 2.2 に破線で示す．設計変数の範囲は GA の場合に等しい．計算回数についても同様に 2,000,000 回で，計算時間は 4.01 時間である．図 2.2 より，20 dB 以上の W_a が得られる周波数帯域幅は 7.86 GHz (7.14～15.00 GHz) であることが確認できる．ランダム探索法は GA の場合と比較して計算時間が短い．さらに，目的関数に最小周波数の低周波化を追加することで，20 dB 以上の W_a が初めて得られる周波数は 1.06 GHz 低周波化し，周波数帯域幅についても広帯域化していることが分かる．したがって，目的関数を 2 つとして検討した方がより良い結果が得られることをランダム探索法から確認できる．

しかしながら、ランダム探索法についても最小周波数の低周波化が十分に満たされているとは言えない。

以上の理由から、2つの目的関数に対して多目的最適化手法を用いることとし、多目的GAの1つであるNSGA-II (Non-dominated sorting genetic algorithm-II) [61]–[63]を用いる。図 2.3 にプログラムのフローチャートを示し、手順を以下に示す。

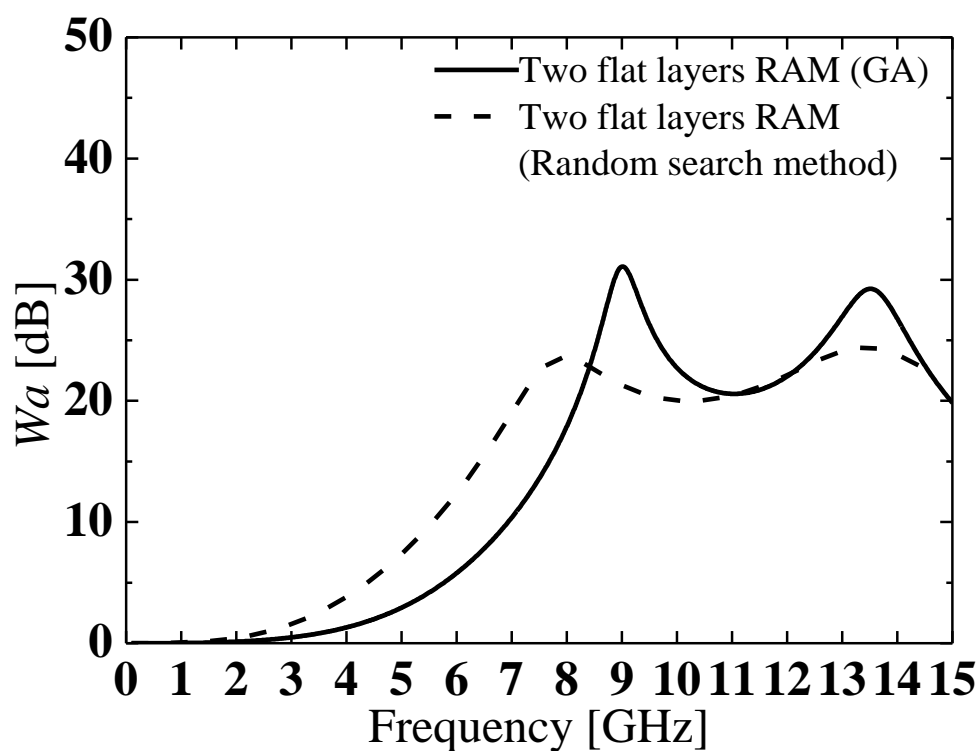


図 2.2 GA 及びランダム探索法を用いて設計した 2 層平板型 RAM の周波数特性.

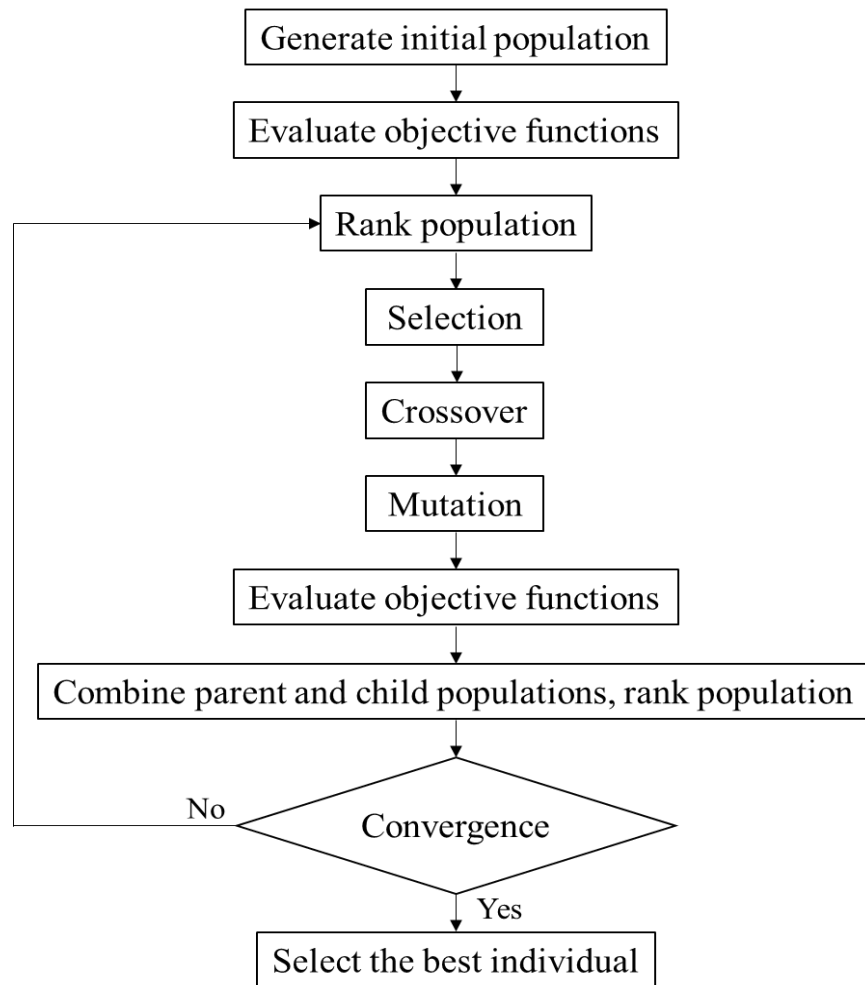


図 2.3 プログラムのフローチャート.

まず個体集団のランク分けを行う．目的関数の評価を行った後，個体集団を，非劣解のグループと非劣解以外のグループに分ける．このうち非劣解のグループに入る個体のランクを 1 とし，これらの個体を一時的に消去する．さらに残りのグループについて，残った解の中から非劣解と，それ以外のグループに分け，その非劣解のランクを 2 とする．ランク付けされた個体の数が，人口 N_p と等しくなるか， N_p を超えるまでこの操作を続ける．

次に，個体の間引きを行う．ランク分けにおいて，人口 N_p を超えた時点のランクを k とする．ランク 1 からランク k までの個体の数を N_k ($N_k > N_p$) とする．このとき， $(N_k - N_p)$ 個の個体を以下の手順に基づき，ランク k の個体群から取り除く．

- (1) ランク k の個体群において， j 番目の目的関数に対して大きい順に個体の並び替えを行う．個体間の目的関数 f_j の差を利用し，以下の式に基づいて，目的

関数 j についての個体 i の混雑度 C_j^i を定める．図 2.4 にランク k が非劣解の場合の模式図を示す．

$$C_j^i = \frac{f_j^{i-1} - f_j^{i+1}}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} \quad (2.9)$$

ここで， f_j^{i-1} ， f_j^{i+1} は並び替えられた前後の個体の目的関数 j の値であり， f_j^{\max} ， f_j^{\min} は，ランク k の個体群中での目的関数 j の最大値と最小値である．これを全ての目的関数 j ($j = 1, 2, \dots, S$) について行い，個々の目的関数について求めた個体の混雑度 C_j^i を足し合わせ，目的関数空間上の個体 i の混雑度 C^i を以下の式を用いて求める．

$$C^i = \sum_{j=1}^S C_j^i \quad (2.10)$$

ただし，図 2.4 の個体 A 及び個体 B のように，各目的関数値の最大，最小の値を持つ個体の混雑度には十分大きな値を与えておき，間引きの対象から除外する．

- (2) 混雑度 C^i が小さいものから順に， $(N_k - N_p)$ 個の個体を取り除く．このようにして得られた N_p の個体を **P 集団** と呼び，**P 集団** をメモリに保存する．

その後，**P 集団** の N_p の個体に対して，交叉・突然変異の遺伝子操作を行う．この交叉・突然変異は単目的最適化問題の場合と同様である．さらに，交叉・突然変異によって遺伝子型が更新された個体集団の適応度を評価する．この個体集団を **Q 集団** と呼ぶ．**Q 集団** と，間引きの結果残った **P 集団** とを混ぜ合わせ，個体集団のランク分けのステップに戻る．

以上の手続きを，探索が収束するまで続ける．**NSGA-II** では，**GA** では個体に対する評価から突然変異までの操作を世代と表現するが，次世代の選択において，**P 集団** を常に淘汰プロセスの候補に入れることで，優秀な遺伝子を持つ個体が探索途中で消滅することを防止している．そして，目的関数空間上の混雑度に基づいて，個体を間引く，すなわちエリート保存を行うことで，広い設計空間上を満遍なく探索することが期待できるため，広い範囲に分布したパレート最適解集合が得られる．

多目的関数では目的関数間のトレードオフ関係を明らかにするためパレート

解集合の全容を把握する必要があるが，NSGA-II を用いた場合その必要性が無く，広大な解空間を持つ問題の最適化に適している．以上の理由から，本章の最適化問題に対して NSGA-II を適用し，最適な設計変数を探索することで，広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM の設計を行う．

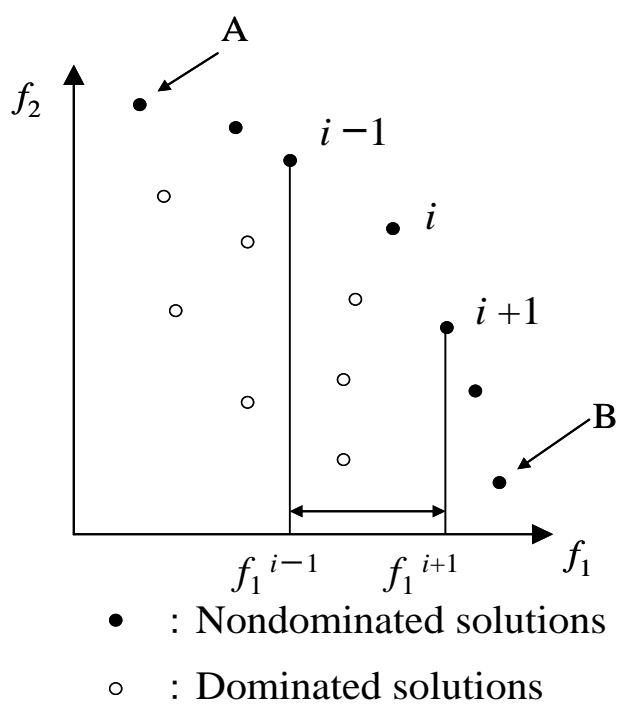


図 2.4 ランク k が非劣解の場合の模式図.

2.2.4 目的関数の設定

設計変数 X に対して、目的関数を $F(X)$ 及び $G(X)$ の 2 つとし、 $F(X)$ を 20 dB 以上の W_a を満たす周波数の個数、 $G(X)$ を 20 dB 以上の W_a を満たす周波数の最小値と定義する．図 2.5 に目的関数 $F(X)$ 及び $G(X)$ の定義を示す．NSGA-II を用いて、 $F(X)$ を最大化し、 $G(X)$ を最小化することで、広帯域特性及び最小周波数の低周波化を同時に達成することを目指す．

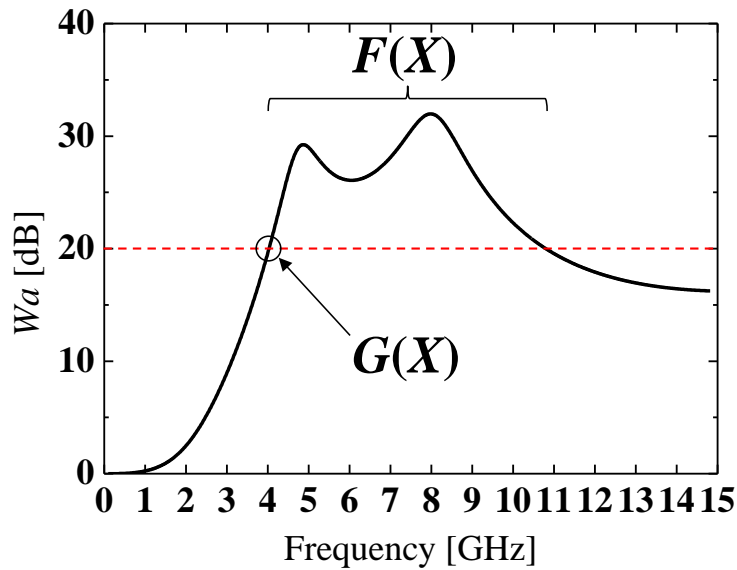


図 2.5 目的関数 $F(X)$ 及び $G(X)$ の定義．

2.3 設計変数が目的関数に与える影響

2.3.1 厚さの影響

2 層平板型 RAM の設計変数 X について各層の比誘電率実部を 1～1000，比誘電率虚部を 0～1000 とし，厚さ（合計値）を 1～20 mm に設定する．なお，計算回数は 2,000,000 回（人口 100，世代数 20,000）で，その計算時間は 9.95 時間である．広帯域特性及び最小周波数の低周波化の 2 つの目的関数の最適化結果を図 2.6 に示す．縦軸は 20 dB 以上の W_a を満たす最小周波数を表し，横軸は 20 dB 以上の W_a を満たす比帯域幅を表す．比帯域幅は， W_a が 20 dB 以上である周波数帯域幅の中心周波数に基づいて算出している．図 2.6 において，文献[55]の最小周波数 2.21 GHz 付近で最大限に広帯域特性を満たすのは点 A である．そこで点 A の特性を確認する．

ここで、同等の比帯域幅が得られる点 B を比較のため抽出し、点 A 及び点 B の最小周波数と厚さの関係を表 2.1 に示す。表 2.1 から、同等の比帯域幅が得られる場合、RAM の厚さが増すほど最小周波数の低周波化が達成されると言える。また、これは図 2.6 において全ての比帯域幅に対して同様であることが確認できる。さらに、同等の最小周波数が得られる場合についても同様に、RAM の厚さが増すほど比帯域幅は拡大していくことを全ての最小周波数に対して確認できる。したがって、これまで平面構造の厚さが大きいほど、その散乱や吸収、反射特性は広帯域化することが明らかにされているように[54], [64], 図 2.6 から 2 層の厚さの合計値が大きくなるほど、広帯域特性に優れることを確認できる。加えて、最小周波数についても、2 層の厚さの合計値が大きくなるほど、低周波化できることが分かる。

その中で、各層の厚さが与える影響について考察する。図 2.6 を吸収層と表面層の厚さの比 (d_1 / d_2) で表示した結果を図 2.7 に示す。図 2.7 から以下の 5 つの点が明らかである。

- (1) 比帯域幅が同等のとき周波数 2.5~6.0 GHz の範囲では d_1 / d_2 の値が等しい。
- (2) d_1 / d_2 の値が大きくなるほど、すなわち吸収層が表面層より厚くなるほど比帯域幅は拡大していく。
- (3) d_1 / d_2 が 1 以上、つまり吸収層の方が表面層より厚い場合、広帯域特性及び最小周波数の低周波化という 2 つの目的関数のうち、どちらかに優れた結果が得られる。
- (4) d_1 / d_2 が 1 未満、すなわち吸収層の方が表面層より薄い場合は、2 目的関数をどちらも満たさない結果が多く見られる。
- (5) 同等の比帯域幅の場合、 d_1 / d_2 の値が一定であっても、最小周波数を低周波化させることができる。

以上の結果から、最小周波数の低周波化について、比帯域幅が同等である場合、吸収層と表面層の厚さの比は無関係で、厚さの合計値にのみ比例する。一方、広帯域特性については、最小周波数が同等である場合、吸収層及び表面層の厚さの比に影響を受ける。特に、吸収層の厚さが表面層に比べて増すほど、2 層平板型 RAM はより広帯域特性を有すると言える。

表 2.1 点 A 及び点 B における 2 層平板型 RAM の最小周波数と厚さの関係。

| Point | Minimum frequency [GHz] | Thickness [mm] | Relative bandwidth [%] |
|-------|-------------------------|----------------|------------------------|
| A | 2.24 | 19.83 | 78.26 |
| B | 6.00 | 7.20 | 78.30 |

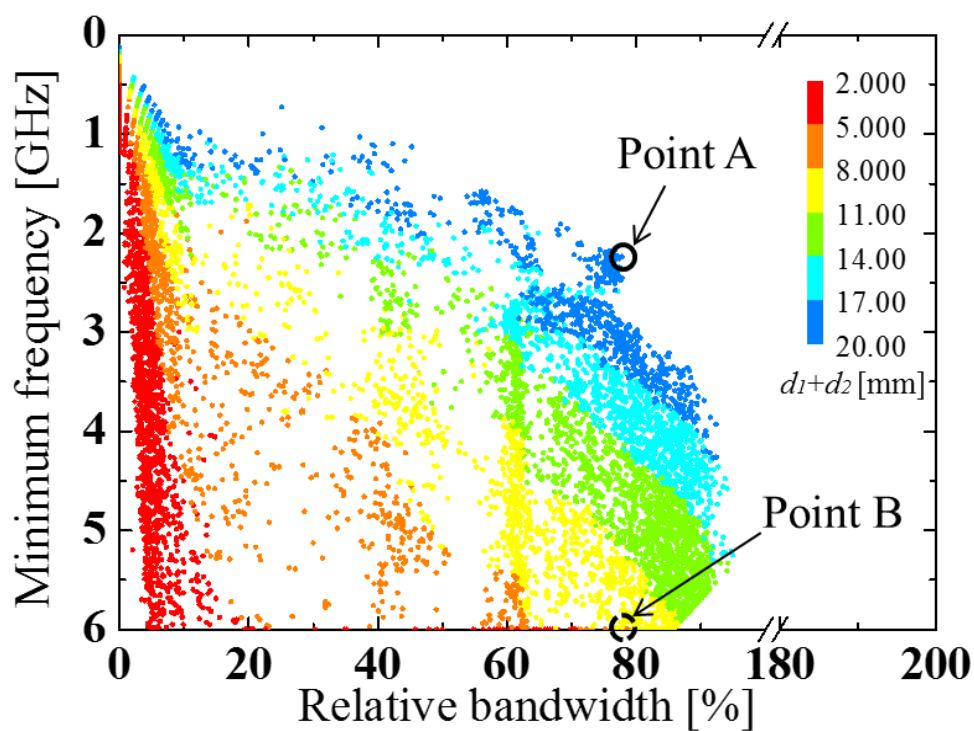


図 2.6 目的関数に対する最適化結果 (吸収層と表面層の厚さの合計値 $d_1 + d_2$ で表示した場合).

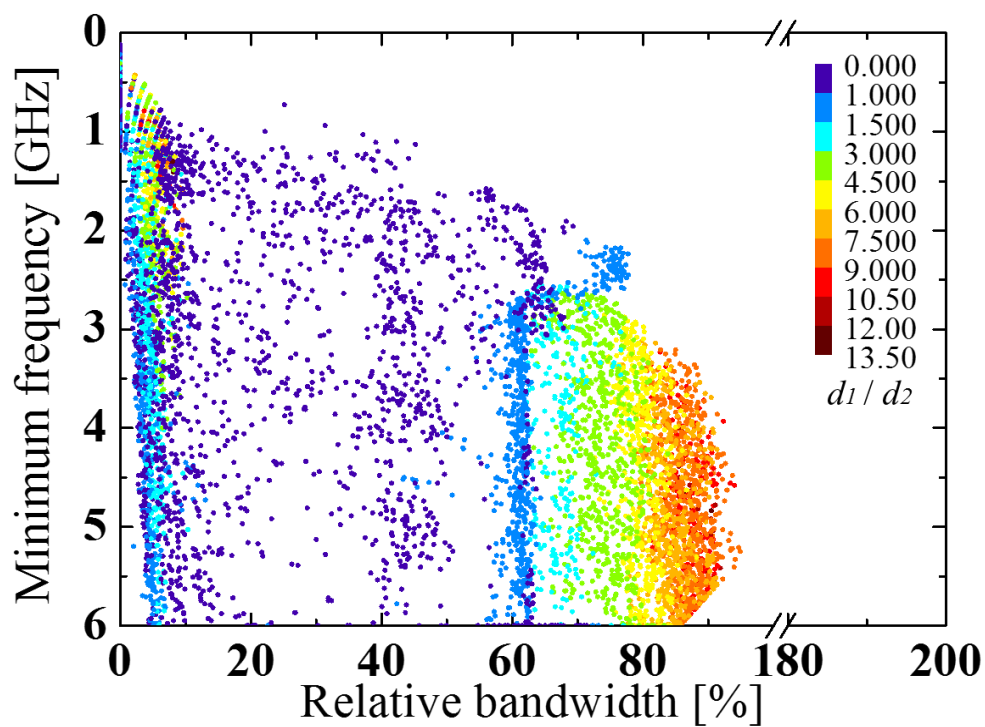


図 2.7 目的関数に対する最適化結果 (吸収層と表面層の厚さの比 d_1 / d_2 で表示した場合).

2.3.2 クラスタリング分析

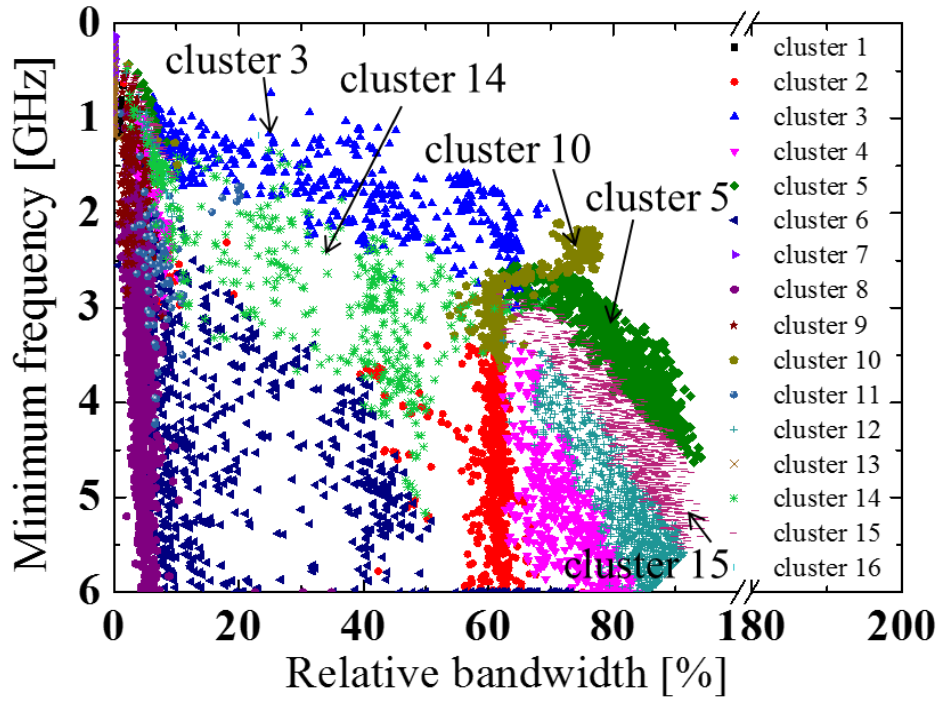
次に、図 2.6 に示す最適化結果に対して、パレート解のクラスタリング分析を行う[65]–[67]．ここではパレート解を類似度に基づいて分類する k-means++法[68]を用いて、6 つの設計変数の値が近似するデータを同じクラスに分類し、それぞれが有する 2 層平板型 RAM の特徴を抽出する．k-means++法は最初のクラス重心を決めるプロセスで、重み付き確率分布を用いることにより、標準的な k-means 法の反復を行う前にクラス重心を初期化するプロセスを行う点で改善が見られる．ここでは、図 2.6 の最適化結果に対して 16 個のクラスに分類した結果を図 2.8 に示し、クラス重心を表 2.2 に示す．本クラスタリングは、設計変数の傾向を見る目的で、その類似度に基づいて行ったため、全てのクラス重心が対象の設計変数と一致するわけではなく、分布上に載らない重心も存在する．図 2.8 から、 W_a が 20 dB 以上となる比帯域幅が狭い箇所にクラスの多くが存在することが分かる．ここで、縦軸の各最小周波数に対して最も右端に位置する点又はその近傍のクラス 3, 5, 10, 14, 15 についてその特徴を述べる．表 2.2 の設計変数を用いて 5 つのクラスに属する 2 層平板型 RAM の周波数特性を図 2.9 に示す．

表 2.2 からクラス 3 と 14 を比較すると、吸収層の比誘電率実部 ϵ_{r1} は 10 程度違うが、吸収層の比誘電率虚部 ϵ_{i1} 、表面層の比誘電率実部 ϵ_{r2} 及び表面層の比誘電率虚部 ϵ_{i2} はほぼ変わらず、厚さについては両者とも吸収層の厚さ d_1 に比べて表面層の厚さ d_2 の方が厚いことが分かる．しかしながら、厚さの合計値がクラス 3 の場合 16.4 mm であるのに対し、クラス 14 の場合は 10.3 mm であり、この厚さ 6.1 mm の差もしくは吸収層の比誘電率実部の差が広帯域特性に大きく影響すると推測される．そこで、次にクラス 10 と 14 を比較すると、特に吸収層においてクラス 14 の方が複素比誘電率の実部及び虚部の値が非常に大きい．一方、厚さについてはクラス 10 の方が 5.0 mm 厚いことが確認できる．ここで両者の周波数特性を見ると、図 2.9 から明らかなようにクラス 10 の方が広帯域特性及び最小周波数の低周波化という 2 目的関数に対して良い結果を有する．したがって、複素比誘電率の実部及び虚部と厚さの大小の差で比較した場合、広帯域特性及び最小周波数の低周波化に大きく影響するのは厚さであると言える．加えて、図 2.9 において 2 目的関数を最も良く満たしているのはクラス 5 であり、これはクラス 10 から最小周波数の低周波化を 0.26 GHz 犠牲にすることで、比帯域幅が 20 % 拡大している．さらに、クラス 5 と 15 を比較すると複素比誘電率の実部及び虚部は大きく変わらないが、厚さについてはクラス 15 が 13.6 mm であるのに対しクラス 5 は 19.6 mm であり、両者に 6.0 mm の差がある．この厚さの違いから、比帯域幅は 60 % 拡大するとともに、最小周

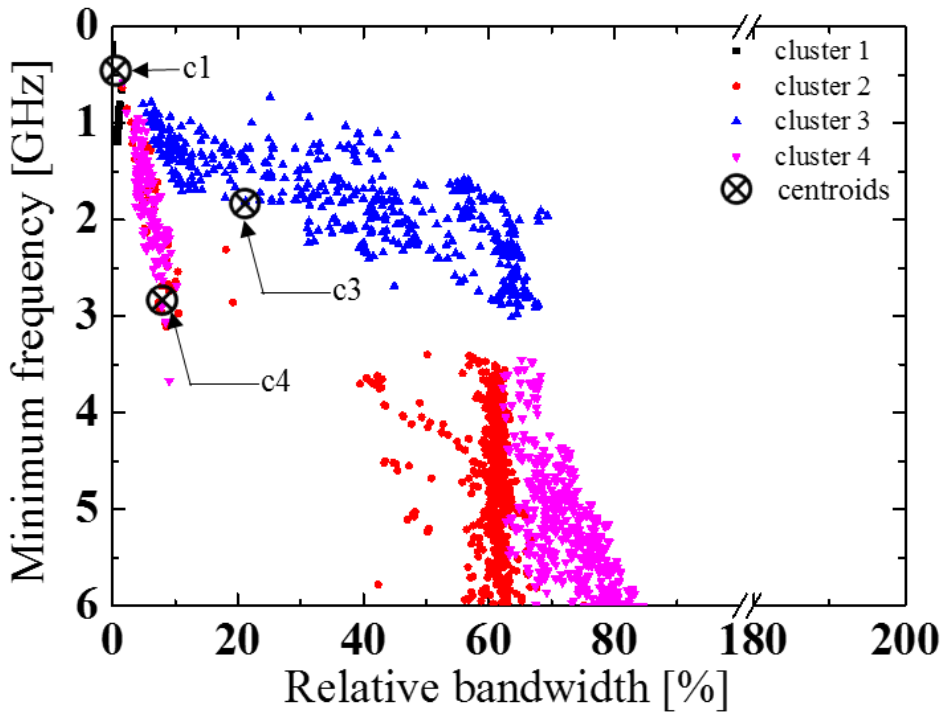
波数は 0.9 GHz 低周波化し、厚さが大きいクラスタ 5 の方が良い結果を示す。したがって、多目的最適化に加えてクラスタリング分析手法を用いることで、広帯域特性及び最小周波数の低周波化に最も大きく影響するのは設計変数の中で厚さであると考察できる。

表 2.2 クラスタ重心.

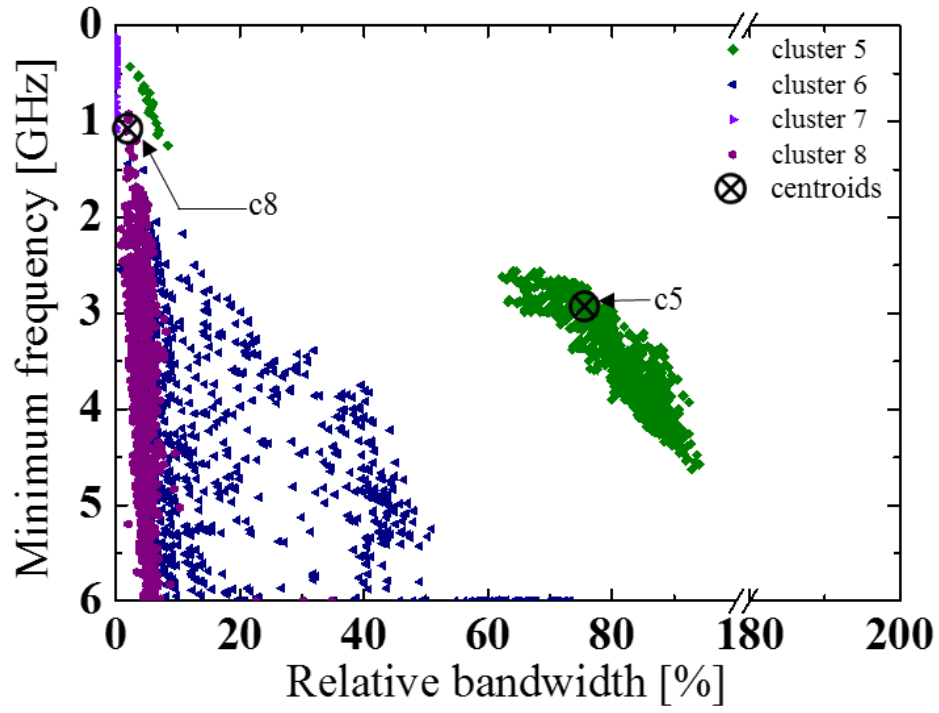
| cluster number | ε_{r1} | ε_{i1} | d_1 [mm] | ε_{r2} | ε_{i2} | d_2 [mm] |
|----------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 46.3 | 46.6 | 1.5 | 871.9 | 34.8 | 4.1 |
| 2 | 5 | 9.5 | 5.1 | 11.7 | 0.3 | 3.8 |
| 3 | 51.6 | 81.3 | 4.8 | 8.5 | 0.3 | 11.6 |
| 4 | 13.9 | 15.3 | 2.1 | 75.1 | 8.4 | 1.3 |
| 5 | 1.3 | 2.7 | 16.3 | 3.4 | 0.01 | 3.3 |
| 6 | 51.6 | 103 | 1.7 | 16.3 | 0.3 | 3.6 |
| 7 | 974.1 | 85.2 | 1.8 | 999.1 | 40.5 | 4.9 |
| 8 | 6.1 | 6.7 | 7.2 | 105 | 15.3 | 2 |
| 9 | 19.8 | 138.7 | 2.3 | 940.5 | 4.4 | 1.1 |
| 10 | 5 | 8.5 | 8.4 | 3.8 | 0.1 | 6.9 |
| 11 | 185 | 603 | 1.2 | 33.5 | 1.3 | 5.4 |
| 12 | 1.7 | 3.7 | 9 | 8.1 | 0.1 | 2.1 |
| 13 | 982.4 | 196.2 | 1.6 | 999.3 | 17.2 | 1.8 |
| 14 | 65.1 | 83.3 | 3 | 9.6 | 0.5 | 7.3 |
| 15 | 1.2 | 2.6 | 11.6 | 5.4 | 0.1 | 2 |
| 16 | 498.9 | 632.3 | 1.8 | 18.1 | 1.7 | 9.7 |



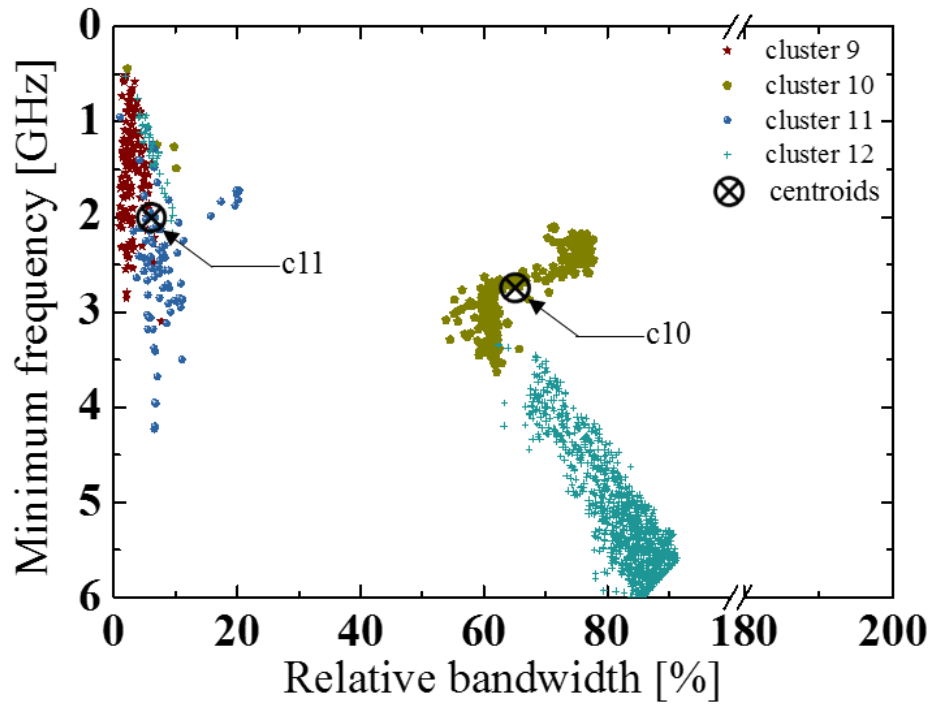
(a) クラスタ 1-16 全体図.



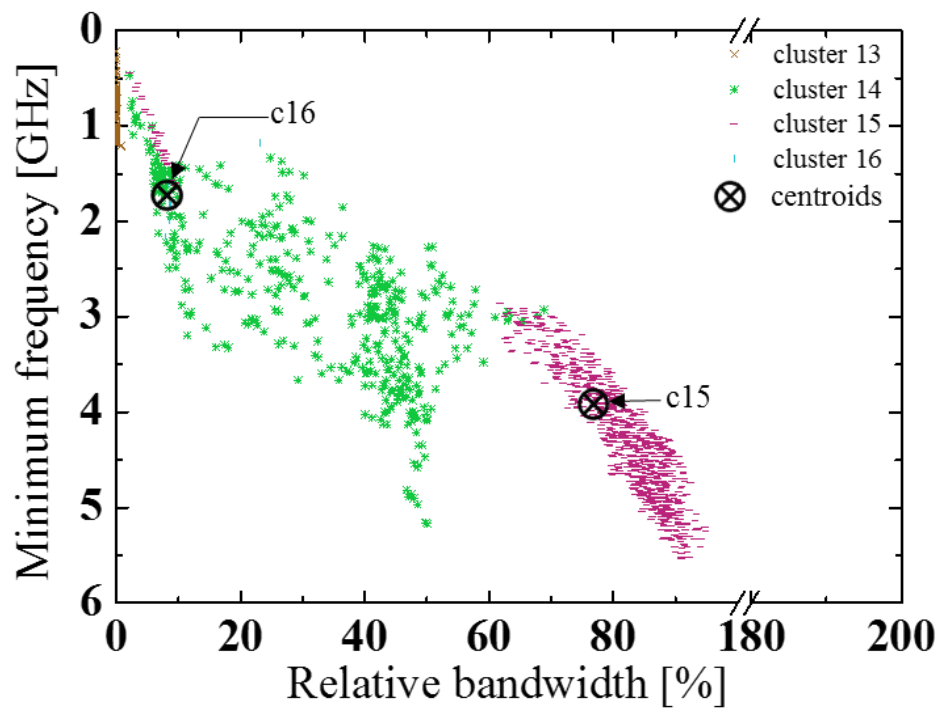
(b) クラスタ 1-4.



(c) クラスタ 5-8.



(d) クラスタ 9-12.



(e) クラスタ 13-16.

図 2.8 クラスタリング結果.

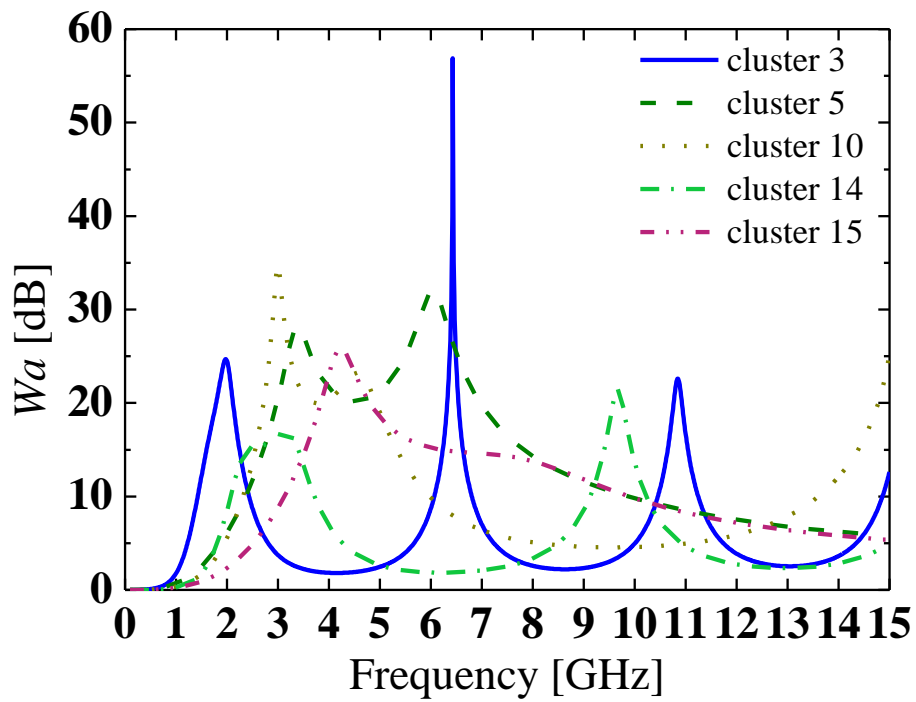


図 2.9 クラスタ 3,5,10,14,15 に属する 2 層平板型 RAM の周波数特性.

2.3.3 比誘電率の影響

図 2.8 から、クラスタ 1, 7 及び 13 は全ての設計変数が縦軸に沿うように分布し、比帯域幅は非常に狭いが他のクラスタと比較して最小周波数の低周波化に優れていることが分かる。

最小周波数の最大値はそれぞれ 1.19 GHz, 1.10 GHz, 1.21 GHz である。これらのクラスタについて、その重心を表 2.2 で確認すると、吸収層や表面層の比誘電率実部及び比誘電率虚部の値が他のクラスタより大きいことが確認できる。最小周波数の低周波化に影響を与える設計変数の特徴として、クラスタ 1, 7 及び 13 は 2 層ともに比誘電率実部及び比誘電率虚部の値が大きいわけではなく、表面層の比誘電率実部の値が大きい点が挙げられる。そこで、3 つのクラスタに分類される全ての設計変数のうち、表面層の比誘電率実部の値を最小周波数に対してプロットしたものを図 2.10 に示す。図 2.10 から、クラスタ 1, 7 及び 13 の表面層の比誘電率実部の最小値は 797 であり、定量的に示すと、1.21 GHz 以下の周波数範囲で 20 dB 以上の W_a を得るには、表面層の比誘電率実部が 797 以上の場合であると言える。このことから、2 目的関数のうち最小周波数の低周波化を満たすには、表面層の比誘電率実部が大きくなければならないことが分かる。

ここで、本論文の目的は 2 目的関数を同時に最適化した 2 層平板型 RAM を設計することであるが、図 2.9 においてクラスタ 5 は、20 dB 以上の W_a に対して最小周波数の低周波化を多少犠牲にしているが、最も広帯域特性を有している。このとき、クラスタ 5 の比誘電率実部及び虚部の値はクラスタ 1, 7 及び 13 に比べて非常に小さいことが確認できる。

したがって、低周波数帯域から広帯域な範囲で 20 dB 以上の W_a を満たすには、低周波数帯域では比誘電率の値が大きく、高周波数帯域では比誘電率の値が小さい必要があり、比誘電率の周波数分散性を考慮する必要があると言える。

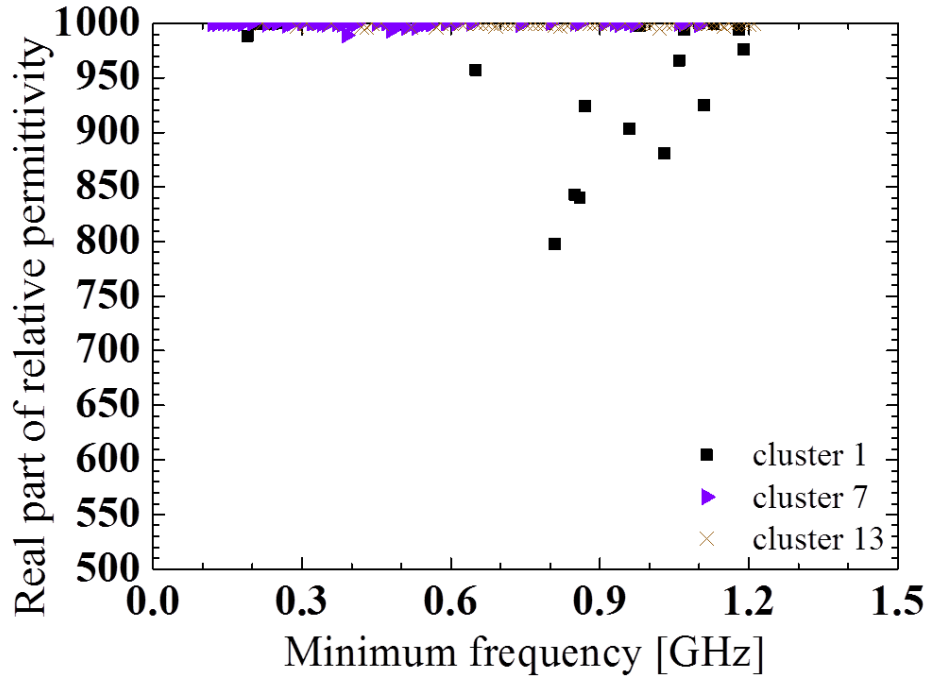


図 2.10 最小周波数に対する表面層の比誘電率実部 (クラスタ 1, 7 及び 13).

2.4 比誘電率の周波数分散性を考慮した最適設計

吸収層及び表面層の比誘電率に対して周波数分散性を考慮して最適化を行う．このとき，各層の複素比誘電率を次の式に基づいて検討する[54]．2.3 項では設計変数 X を各層の比誘電率実部, 比誘電率虚部及び厚さの計 6 つとしていたが，本項では以下の式を用いるため 10 個とする．このとき，周波数は f [GHz] とする．

$$\varepsilon_r(f) = \frac{\varepsilon_r(1 \text{ GHz})}{f^\alpha} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_i(f) = \frac{\varepsilon_i(1 \text{ GHz})}{f^\beta} \quad (2.12)$$

2 層平板型 RAM の設計変数 X の範囲について，1 GHz における各層の比誘電率実部を 1～20，比誘電率虚部を 0～20 とし，減衰係数 α , β については 0～1，厚さ (合計値) は 1～20 mm 及び 1～100 mm に設定する．比誘電率については，比誘電率実部が大きい物質を再現性良く製造することは非常に困難であるため上限値を 20 とし，厚さについては 2 目的関数に対する影響を比較できるように上限値を 20 mm 及び 100 mm とする．

ここで、周波数 1 GHz における比誘電率の上限値を 20 に設定したが、これを実現する手法について述べる。

比誘電率実部が高い物質として、チタン酸バリウム(BaTiO_3)、チタン酸カルシウム(CaTiO_3)、チタン酸ストロンチウム(SrTiO_3)等がある。 BaTiO_3 の焼結体の比誘電率実部は粒径依存性を示し、周波数 1 kHz において、平均粒径 1 μm 近傍で最大値 5000~6000 を示す[69]。また、表 2.3 に、測定周波数 2 GHz における CaTiO_3 及び SrTiO_3 の比誘電率実部及び $\tan \delta$ の値を示す[70]。そこで、非常に高い比誘電率実部を有するチタン酸化合物に対して、比誘電率実部を下げることを検討する。 BaTiO_3 の場合、空隙を設けることで、比誘電率実部が低下する。空気の比誘電率は 1.0 であるため、空隙の存在は全体の比誘電率を大幅に低下させる。そのため、 BaTiO_3 の空隙率が 20~40 % のとき、全誘電率は空隙率 0 % の場合に比べて 1/2~2/3 に低下する。一方で、 BaTiO_3 粒子は高誘電率のフィラー(充填剤)として、樹脂やゴム等の高分子材料に分散することで、高誘電率化の改質に使用することも可能である[69]。このように BaTiO_3 に空隙を設けたり、高誘電率のフィラーとして使用する手法を用いることで、最適値として出した設計変数の値が高い場合でも制御することができ、実現可能性がある。

次に、比誘電率虚部の高い値については、混合するグラファイト量を変化させることで得ることができる。図 2.11 に、カーボン混合発泡ポリスチロールの複素比誘電率の変化を示す。図 2.11 が示すように、グラファイト量を増加させた場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部の値がともに大きくなる[71], [72]。

したがって、はじめにグラファイトを混合することで、比誘電率虚部の値を設計変数の値まで増加させ、その後、前述の方法で比誘電率実部を低下させることで、高い比誘電率の値でも実現することが可能となる。

表 2.3 2 GHz における CaTiO_3 , SrTiO_3 の比誘電率実部及び $\tan \delta$ の値.

| Material | ϵ_r | $\tan \delta$ |
|------------------|--------------|-----------------------|
| CaTiO_3 | 170 | 5.55×10^{-4} |
| SrTiO_3 | 255 | 14.2×10^{-4} |

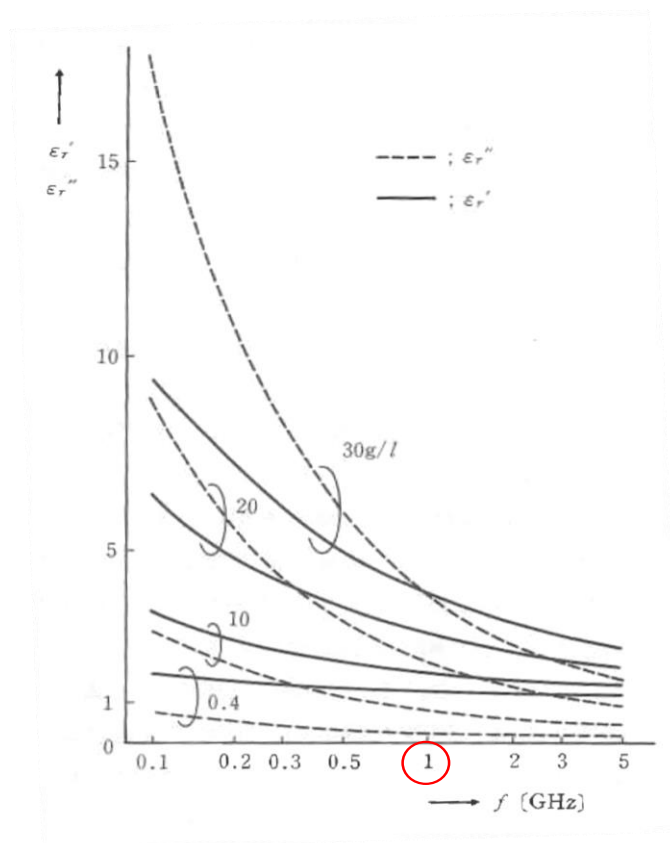


図 2.11 カーボン混合発泡ポリスチロールの複素比誘電率.

比誘電率に対して周波数分散性を考慮して最適化を行う際、計算回数は 2,000,000 回 (人口 100, 世代数 20,000) で、計算時間はそれぞれ 9.53 時間及び 14.39 時間である。式(2.11)及び式(2.12)に基づいて比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数分散性を考慮したときの 2 目的関数、すなわち広帯域特性及び最小周波数の低周波化に対する最適化結果を図 2.12 に示す。図 2.12 から、比誘電率の周波数分散性を考慮することで、最小周波数の低周波化及び比帯域幅の拡大が達成されていることを確認できる。さらに、図 2.12 では各最小周波数に対して最大の比帯域幅を有する点が一直線上に表れるという特徴が見られる。

ここで、比誘電率の周波数分散性を考慮していない場合と比較するため、表 2.1 に示す点 A(19.83 mm)と同等の厚さを有する点 C(18.1 mm)を直線上から抽出する。点 C における 2 層平板型 RAM の設計変数の値を表 2.4 に示す。候補としては、エポキシ樹脂 (比誘電率実部 14.5, 虚部 19.0) [73], (比誘電率実部 10.37, 虚部 2.78) [74]があり、所望の比誘電率に近いことから実現可能性がある。点 A, 点 C 及び図 2.12 において最も広帯域特性を有する点 D に示す 2 層平板型 RAM の周波数特性を図 2.13 に示す。図 2.13 から、点 C における最小周波数は 1.78 GHz であり、比帯域幅は 158.24 % である。すなわち、20 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最小周波数に対して 8.57 倍である。このとき 2 層平板型 RAM の厚さは 18.1 mm であり、比誘電率実部及び比誘電率虚部についてはその周波数特性を図 2.14 に示す。図 2.14 より、比誘電率実部及び比誘電率虚部の値は吸収層では 1.8 GHz 以下、表面層では 1.2 GHz 以下の範囲で急激に変化する。このことから、比誘電率の周波数分散性を考えた場合についても同様に、低周波数帯域において特に表面層の比誘電率実部の値が大きくなることを確認できる。図 2.14 において、表面層の比誘電率実部の最大値が 797 より小さい値の 95.4 である理由として、比誘電率の周波数分散性を考える際、1 GHz における各層の比誘電率実部の上限値を 20 に下げて設定したことが挙げられる。加えて、低周波数帯域から広帯域な範囲で 20 dB 以上の W_a を満たすには、比誘電率の値が低周波数帯域では大きく、高周波数帯域では小さい必要があることが示されている。

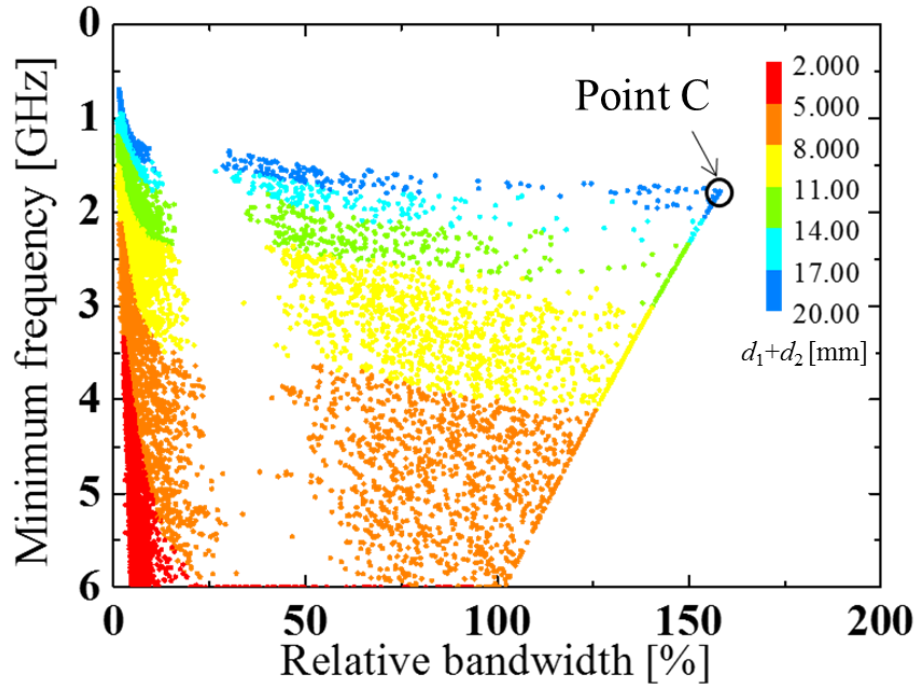
なお、図 2.12 の最適化結果が示すパレート解において、比帯域幅 40 % 付近で不連続な領域が見られるが、これは周波数特性曲線を描いた際に、 W_a が 20 dB 以上となる周波数範囲が継続して存在するかどうかによる。不連続な領域の左側と右側でパレート解の分布を分けた場合、それぞれに生じている現象を図 2.15 に示す。図 2.15(a)が示すように、一度 W_a が 20 dB を超えた後にそれを下回ると比帯域幅は狭いが、図 2.15(b)のように、 W_a が 20 dB を下回らなければ比帯域幅は広がる。両者の W_a の差異は僅かであるが、図 2.15(a)は一度 W_a が 20 dB を下回るのに対して、図 2.15(b)は 20 dB より高い値を保っているため、比帯域幅を計算すると大きな差が生じる。この差が不連続なパレート解として結果に表

れていると考えられる.

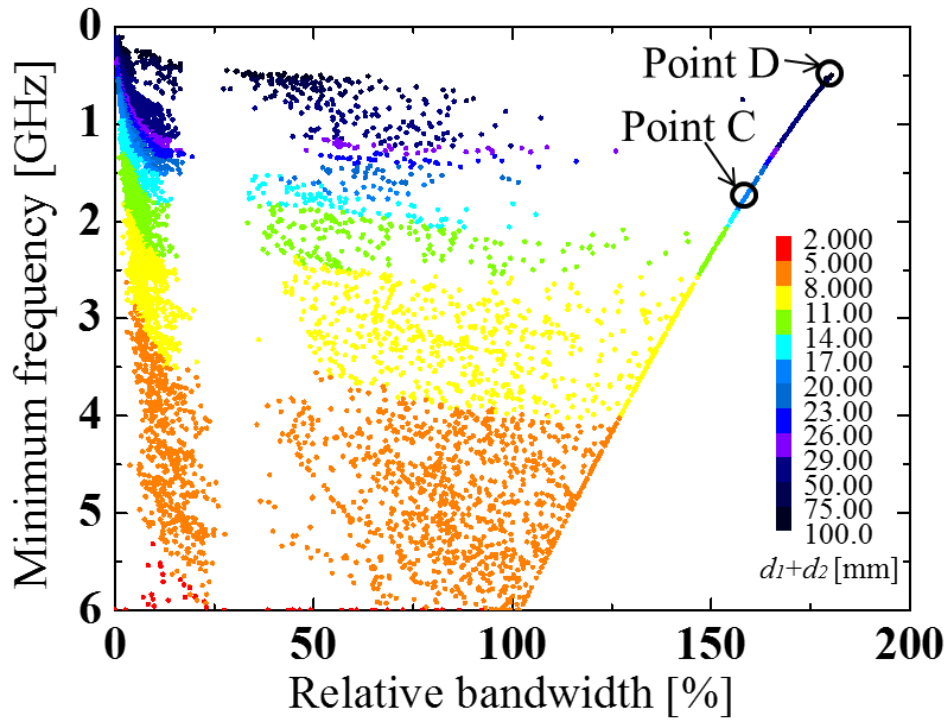
以上より, 設計変数の比誘電率実部及び比誘電率虚部に対して周波数分散性を考慮に入れることで, 広帯域特性及び最小周波数の低周波化の 2 目的関数を同時に最適化することが可能となり, 低周波数帯域も含めた広帯域な周波数範囲で 20 dB 以上の Wa を確保することができる.

表 2.4 2 層平板型 RAM(点 C)の設計変数値.

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 12.64 | 0.63 | 19.25 | 0.41 | 7.3 |
| Surface | 9.76 | 0.99 | 1.96 | 0.63 | 10.8 |



(a) 厚さの上限値が 20 mm の場合.



(b) 厚さの上限値が 100 mm の場合.

図 2.12 2 目的関数に対する最適化結果 (比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数分散性を考慮した場合).

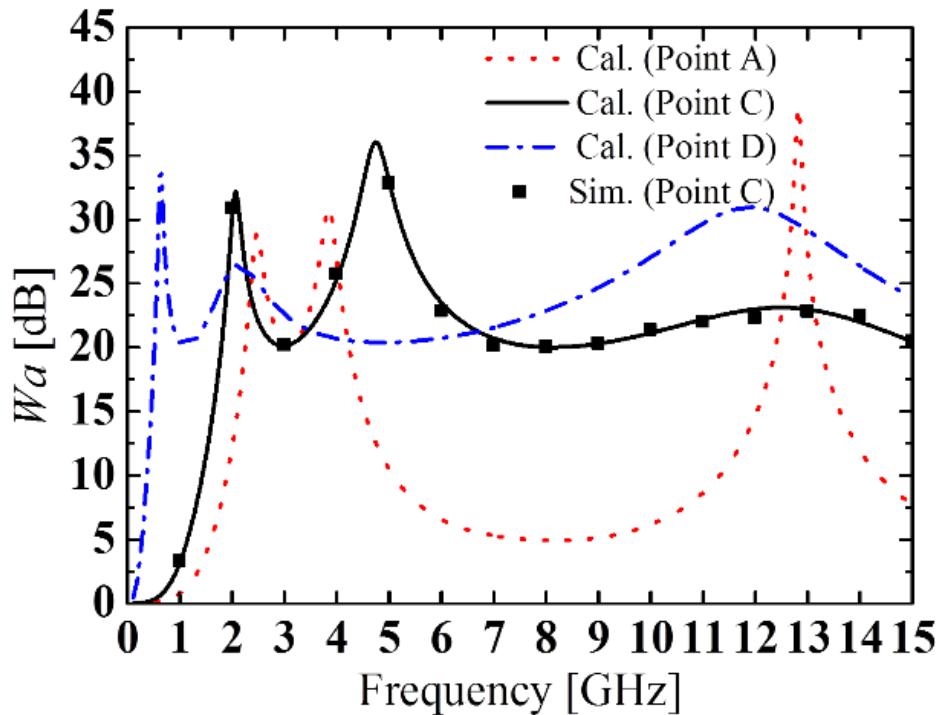


図 2.13 2 層平板型 RAM(点 A, C 及び D)の周波数特性.

次に、図 2.12 の最適化結果の分布において、各最小周波数に対して最大の比帯域幅を有する点が右端に直線上に表れる理由について考察する．この右端に位置する最適化結果の周波数を f [GHz], W_a が 20 dB 以上となる比帯域幅を BW [%]とすると、

$$f = -0.0746BW + 13.5847 \quad (2.13)$$

で表す直線に近似することができる．これは初期条件で指定した周波数範囲が 0.1～15.0 GHz であれば、各最小周波数に対して、上限値 15.0 GHz までの周波数の個数は決まっており、広帯域特性が得られるのはその最大値を取るときであることが理由として考えられる．そのため、指定した周波数範囲の上限値に対して、各最小周波数から見た比帯域幅の最大値が直線として表れている．なお、上限周波数を 20 GHz 及び 100 GHz とした場合でも、最適化結果の分布において、各最小周波数に対して最大の比帯域幅を有する点が一直線上に表れる．これは周波数が上昇しても計算の上限周波数が最大周波数となる RAM を作製できることを示している．

以上の結果から、本設計手法を用いることで指定した周波数範囲で最大限に

広帯域特性を有する RAM を設計できていることが確認できる．さらに，RAM の厚さの上限値を増加させることで，最適化結果の分布に表れる直線式上において所望の最小周波数を得られることが分かる．

ここで，設計変数の制約条件や設計手法について，提案手法と全く等しい研究例は無いことから，提案 2 層平板型 RAM と層数が等しく，近い設計変数の値を用いており，かつ実用化が想定された文献[55]と比較を行う．表 2.5 に，同じ層数を有する，文献[55]及び本提案手法により設計された 2 層平板型 RAM の特性の比較を示す．[55]では厚さ 12.0 mm のとき，最小周波数 2.21 GHz，比帯域幅 19.59 %であり，本提案手法により得られた 12.0 mm の 2 層平板型 RAM の特性は，最小周波数が 2.44 GHz と僅かに高周波化するが，比帯域幅は 156.50 %で，[55]と比較して非常に広帯域であることが分かる．また，[55]と同じ最小周波数 2.21 GHz の場合，厚さは 12.8 mm と僅かに増すが，比帯域幅は 160.19 %であり，非常に広帯域であることが確認できる．このことから，本提案手法により得られた 2 層平板型 RAM の特性は優れており，RAM の厚さを変化させて最小周波数を 1.78 GHz 以外とした場合についても，最大限の広帯域特性を有するよう設計できていることから，本手法は有効であると言える．

加えて，NSGA-II を用いた本検討の妥当性を確認するため，3 次元電磁界シミュレータ WIPL-D[75]を使用して，図 2.13 中の点 C における 2 層平板型 RAM の周波数特性を解析する．解析は周波数 1.0～15.0 GHz の範囲で 1.0 GHz ごとに行い，複素比誘電率の値は各周波数に応じた値を用いる．2 層平板型 RAM の大きさは 1.0 m 四方とし，その解析モデルを図 2.16 に示す．解析結果から得られた 2 層平板型 RAM の周波数特性 (Sim.) は図 2.13 の点で示す値であり，これは，実線で示す NSGA-II を用いた場合 (Cal.) の周波数特性とよく一致していることが分かる．以上より，NSGA-II による計算結果の妥当性を確認できる．

表 2.5 文献[55]及び本提案手法により設計された 2 層平板型 RAM の特性の比較.

| Item | $d_1 + d_2$ [mm] | Minimum frequency [GHz] | Relative bandwidth [%] |
|--------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| [55] | 12.0 | 2.21 | 19.59 |
| Proposed method | 12.0 | 2.44 | 156.50 |
| | 12.8 | 2.21 | 160.19 |

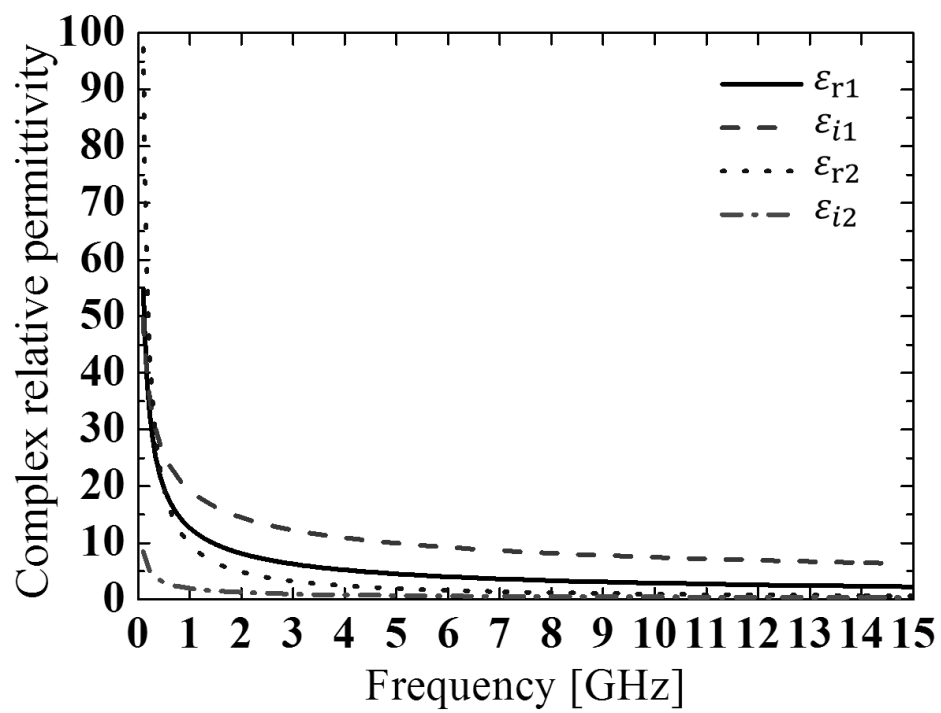
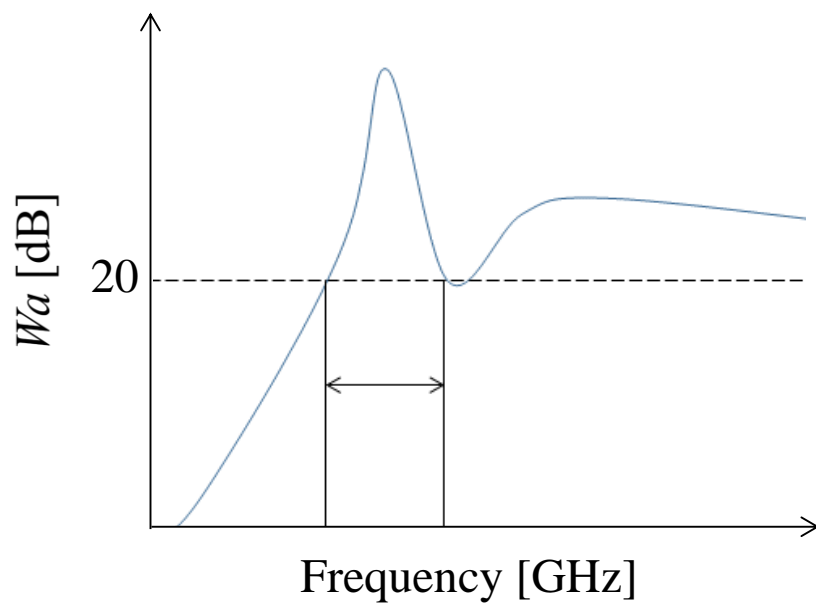
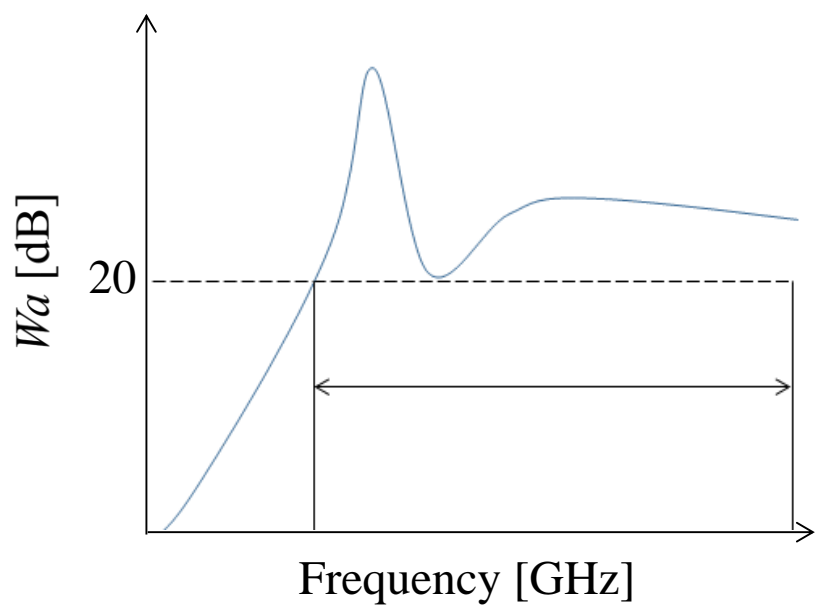


図 2.14 2層平板型 RAM(点 C)の比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数特性.



(a) 不連続な領域の左側.



(b) 不連続な領域の右側.

図 2.15 パレート解の分布が示す現象.

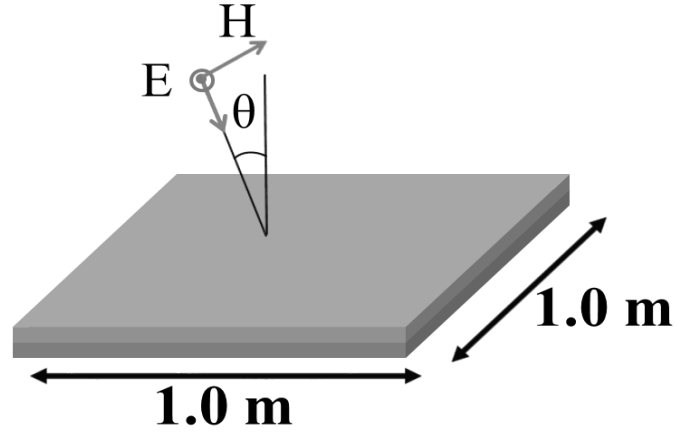


図 2.16 2 層平板型 RAM の解析モデル(TE 波入射).

最後に、本検討では複素比誘電率の周波数分散性を検討する際、式(2.11)及び式(2.12)を使用しているが、Debye 分散との比較を行う．ここで、複素比誘電率の Debye 分散の式は、

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_\infty + \frac{K_\epsilon}{1 + j\left(\frac{f}{f_\epsilon}\right)} \quad (2.14)$$

であり、比誘電率実部、比誘電率虚部はそれぞれ、

$$\epsilon_r' = \epsilon_\infty + \frac{K_\epsilon}{1 + \left(\frac{f}{f_\epsilon}\right)^2} \quad (2.15)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{K_\epsilon \left(\frac{f}{f_\epsilon}\right)}{1 + \left(\frac{f}{f_\epsilon}\right)^2} \quad (2.16)$$

ϵ_∞ : 極めて高い周波数における比誘電率

K_ϵ : $\epsilon_0 - \epsilon_\infty$ の値 (ϵ_0 : 極めて低い周波数における比誘電率)

となる．但し、

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.17)$$

である．このとき， f は周波数[GHz]， ε_∞ ， K_ε ， f_ε は物質固有の値を表す[76]，[77]．式(2.15)より，比誘電率実部は $f = 0$ のとき最大となり， $f \rightarrow 0$ の低周波数帯域に近づくほど大きくなる．式(2.16)を変形すると，

$$\varepsilon_r'' = \frac{K_\varepsilon f f_\varepsilon}{f_\varepsilon^2 + f^2} \quad (2.18)$$

となることから，比誘電率虚部は， $f = \sqrt{f_\varepsilon}$ のとき最大となる．したがって，Debye 分散では，比誘電率の周波数依存性は $f = \sqrt{f_\varepsilon}$ [GHz] を境に変化する．図 2.17 に Debye 分散による比誘電率の周波数特性を示す．なお， f_ε はカーボン含有のフェライトゴム吸収体の場合，フェライトの重量比及びカーボン含有率に依存する[77]．

本検討では，誘電性材質を使用していることから，フェライトの重量比は 0 である．前述したとおり，カーボン含有率は比誘電率虚部の値を大きくする度合で変化することから，文献[77]の $C = 0.3, 0.5, 0.7$ の結果を用いる．図 2.18 に f_ε ，フェライト重量比及びカーボン含有率の関係を示す． f_ε とフェライトの重量比は比例関係にあるため，フェライトの重量比が 0 の場合，図 2.18 から単純に減少すると考えてよい．そこで， f_ε の取り得る値は，およそ 2.8～3.5 と予想される．したがって， $\sqrt{f_\varepsilon}$ は 1.67～1.87 である．式(2.11)及び式(2.12)を用いた場合，比誘電率は周波数に反比例するため，この範囲より低い周波数帯域においてのみ，式(2.11)及び式(2.12)は Debye 分散が示す比誘電率の周波数分散とは異なる．

したがって，周波数 1.67 GHz 付近以下で広帯域特性を検討する場合は，Debye 分散と異なるため式(2.11)及び式(2.12)は使用できないが，本検討はそれ以上の周波数帯域であり問題無いと言える．

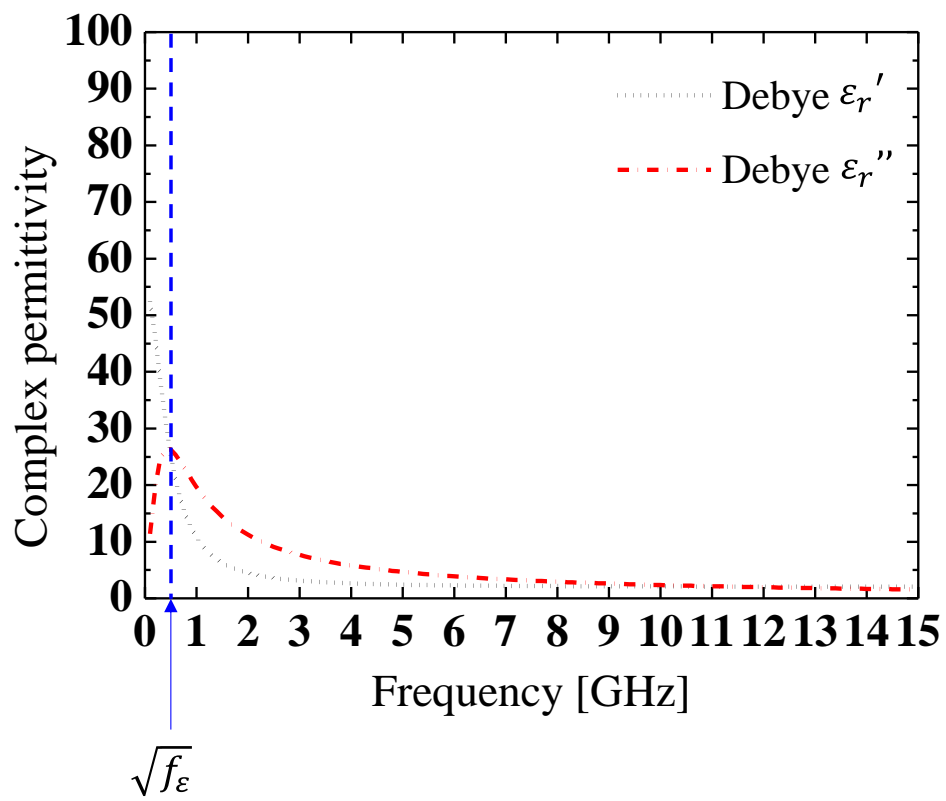


図 2.17 Debye 分散による比誘電率の周波数特性.

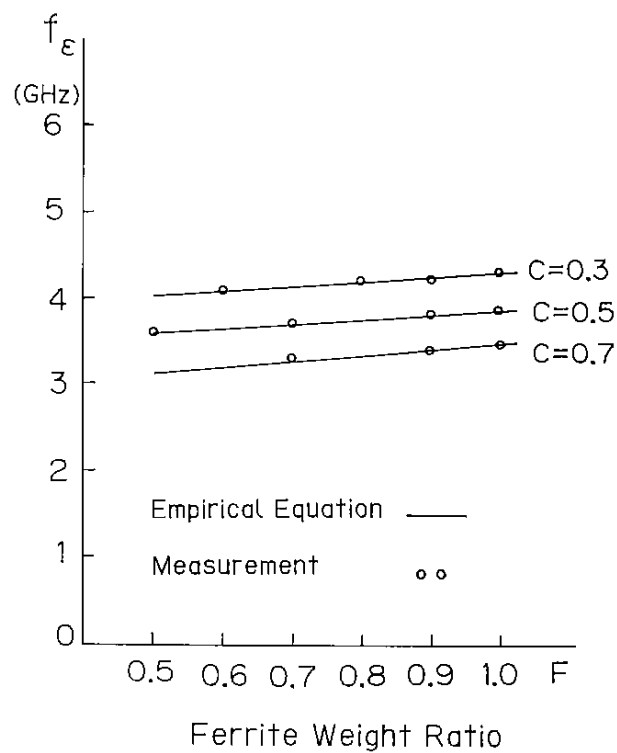


図 2.18 f_ϵ , フェライト重量比及びカーボン含有率の関係.

2.5 まとめ

本章では、多目的 GA の 1 つである NSGA-II を用いて、2 層平板型 RAM の広帯域特性及び最小周波数の低周波化を同時に考慮した電気材料定数最適化による設計手法を提案した。このとき、 W_a に対して 99 % の吸収率に相当する 20 dB を指標とし、これを満たす周波数の広帯域化及び最小周波数の低周波化を行った。周波数に対して制約条件を設けることも可能だが、その場合、制約条件を満たしていれば最適解となるため、本章で得られた最適解に到達するには、周波数の制約条件を少しずつ変化させ、探索していかなければならない。しかしながら、NSGA-II を用いた多目的関数のパレート解であれば、一度の計算から結果が得られ、かつその分布の中で基準に見合う解を選定することが可能である。以下に本章で得られた結果をまとめて示す。

- (1) NSGA-II を用いることで、20 dB 以上の W_a を満たす周波数の広帯域化及び低周波化が可能である。

広帯域特性を検討する際、周波数帯域幅の拡大だけでなく、最小周波数の低周波化を目的関数に追加して多目的最適化を行うことで、低周波数帯域における広帯域化が追求され、更なる広帯域特性を見出すことができた。また、同じ計算回数でも単目的 GA やランダム探索法に比べて、NSGA-II を用いることで 2 目的関数をよく満たす結果が得られた。

加えて、空隙率を変化させて比誘電率の値を制御し、高誘電率の物質を得ることで、より広帯域な電波吸収特性を得ることができた。

- (2) 低周波数帯域から始まる広帯域特性を満たすには、比誘電率の周波数分散性を考慮する必要がある。

最適化手法に加えて k-means++ 法というクラスタリング分析手法を用いることで、低周波数帯域から広帯域な範囲で 20 dB 以上の W_a を満たすには、比誘電率の周波数分散性を考慮する必要があることが明らかとなった。

そのため、比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数分散性を考慮して設計に係る最適化を行った結果、20 dB 以上の W_a に対して、比帯域幅 158.24 %、最小周波数 1.78 GHz を満たす、厚さ 18.1 mm の 2 層平板型 RAM を設計することが可能となった。

- (3) 所望の周波数範囲で最大限に広帯域特性を有する RAM 及び所望の最小周

波数を有する RAM の設計が可能である.

本設計手法を用いることにより, 所望の周波数範囲で最大限に広帯域特性を有する RAM を設計することが可能になった. さらに, RAM の厚さの上限値を増加させることで, 最適化結果の分布に表れる直線式上において所望の最小周波数が得られることを確認した.

(4) NSGA-II の計算結果には妥当性がある.

提案した多目的最適設計手法を用いて 2 層平板型 RAM の電気材料定数を決定し, シミュレータによる確認において, 垂直入射時, 提案した RAM の周波数特性が同等に得られることを確認した. これにより, 垂直入射時において広帯域特性を有する RAM の多目的最適設計手法は十分に適用できるものであることを示した.

第3章 連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM

3.1 まえがき

第2章では、垂直入射時において広帯域特性を有する2層平板型 RAM の設計を行った。これは、最小周波数の低周波化及び比帯域幅の最大化を同時に行うことで、広帯域特性を得るという設計手法である。本章では、この設計手法を斜入射時に適用し、入射角 0° から指定された最大入射角まで、広帯域特性を常に得られるようにし、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM の設計を行う。本章で述べる斜入射特性とは、RAM が入射角 0° から最大入射角まで連続的に電波を吸収できることを意味する。構造上の制約を克服し、かつ適用範囲を拡大することを目的として、RAM の構造は垂直入射時と同様に2層平板型 RAM を使用する。また、材料は均質材料でかつ等方性材料を用いる。

ここで、垂直入射時との違いとして、斜入射時は誘電性材質に加えて磁性材質を用いて RAM を設計し、両者の特徴を比較する。このとき、2層平板型 RAM の性能は受信周波数及び入射角に対して、各層の電気材料定数、すなわち複素比誘電率、複素比透磁率及び厚さの値によって決定する。したがって、それらの最適化を行う必要がある。 W_a の指標は垂直入射時と同様に 20 dB とする。TM 波入射時、TE 波入射時それぞれの場合で最適化を行い、その後、設計した RAM の両偏波特性について検討を行う。

本章では、3.2 で RAM の設計モデルについて説明し、複素比誘電率に加え、複素比透磁率の周波数分散性を考慮する。3.3 では、誘電性材質を用いて、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM の設計を行う。同様に、3.4 では、磁性材質を用いて、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM の設計を行う。この際、実用性を確認するため、接着層を追加した場合の検討も行う。3.5 では、誘電性材質及び磁性材質から成る RAM の特性を比較し、得られた結果について考察を行う。3.6 では、両偏波特性に関する検討を行い、3.7 で本章のまとめとする。

3.2 RAM の設計モデル

図 3.1 に誘電性材質及び磁性材質から成る 2 層平板型 RAM の構成を示す. Wa [dB] の算出式は, 金属板に近い方から RAM の層を 1 層目, 2 層目, ... k 層目としたとき, 次のように表せる[59]. 第 2 章で入射波が TE 波の場合の算出式を既に示したため, 本章では, 入射波が TM 波の場合の算出式を示す. 特性インピーダンス及び伝搬定数を

$$\dot{Z}_{C(k)TM} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_{r(k)}\dot{\mu}_{r(k)} - \sin^2 \theta}}{\dot{\epsilon}_{r(k)} \cos \theta} \quad (3.1)$$

$$\dot{\gamma}_{(k)} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r(k)}\dot{\mu}_{r(k)} - \sin^2 \theta} \quad (3.2)$$

とすると (λ : 自由空間における波長), 規格化入力インピーダンスは

$k = 1$:

$$\dot{Z}_{(k)TM} = \dot{Z}_{C(k)TM} \tanh(\dot{\gamma}_{(k)} d_{(k)}) \quad (3.3)$$

$k \geq 2$:

$$\dot{Z}_{(k)TM} = \dot{Z}_{C(k)TM} \frac{\dot{Z}_{(k-1)TM} + \dot{Z}_{C(k)TM} \tanh(\dot{\gamma}_{(k)} d_{(k)})}{\dot{Z}_{C(k)TM} + \dot{Z}_{(k-1)TM} \tanh(\dot{\gamma}_{(k)} d_{(k)})} \quad (3.4)$$

と表せる. 以上より, 規格化入力インピーダンスを用いて Wa は,

$$Wa_{TM} = 20 \log_{10} \left| \frac{\dot{Z}_{(k)TM} - 1}{\dot{Z}_{(k)TM} + 1} \right| \quad (3.5)$$

となる. 上式から明らかなように, 2 層平板型 RAM の場合, 図 3.1 の青色で示す吸収層及び緑色で示す表面層の電気材料定数の値によって Wa は決定する. したがって, 各層の複素比誘電率, 複素比透磁率及び厚さの値を設計変数とする. 本章では, 上述のように, 広帯域特性については垂直入射時と同様に Wa が 20 dB 以上となる周波数帯域幅の拡大を目指す. ここで, 複素比誘電率及び複素比透

磁率は受信周波数に依存するため、広帯域特性を有する RAM を設計するには、比誘電率及び比透磁率の実部及び虚部の周波数分散性を考慮する必要がある。

既に、第 2 章で、垂直入射時において、最小周波数を低周波化させるには、表面層 RAM の比誘電率実部の値が非常に高くなければならないことが明らかにされている。一方で、広帯域特性を満たすには、吸収層 RAM 及び表面層 RAM の比誘電率実部及び虚部の値が小さくなければならない。したがって、低周波数帯域から広帯域な周波数範囲で 20 dB 以上の W_a を満たすには、周波数分散性を考慮する必要がある、式(2.11), 式(2.12)に加えて以下の式を用いる。このとき、周波数は f [GHz] とする。なお、減衰係数を α_1 , β_1 , α_2 , β_2 と区別するため、式(2.11), 式(2.12)はそれぞれ式(3.6), 式(3.7)に書き換える。

$$\varepsilon_{r(k)}(f) = \frac{\varepsilon_{r(k)}(1 \text{ GHz})}{f^{\alpha_1(k)}} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{i(k)}(f) = \frac{\varepsilon_{i(k)}(1 \text{ GHz})}{f^{\beta_1(k)}} \quad (3.7)$$

$$\mu_{r(k)}(f) = \frac{\mu_{r(k)}(1 \text{ GHz})}{f^{\alpha_2(k)}} \quad (3.8)$$

$$\mu_{i(k)}(f) = \frac{\mu_{i(k)}(1 \text{ GHz})}{f^{\beta_2(k)}} \quad (3.9)$$

但し,

$$\dot{\varepsilon}_r = \varepsilon_r - j\varepsilon_i \quad (3.10)$$

$$\dot{\mu}_r = \mu_r - j\mu_i \quad (3.11)$$

とする[54]。以上の式を用いて、広帯域特性及び最小周波数の低周波化という 2 つの目的関数に対して最適化を行う。計算する周波数範囲は 0.1~20.0 GHz に指定し、0.01 GHz 刻みで計算を行う。

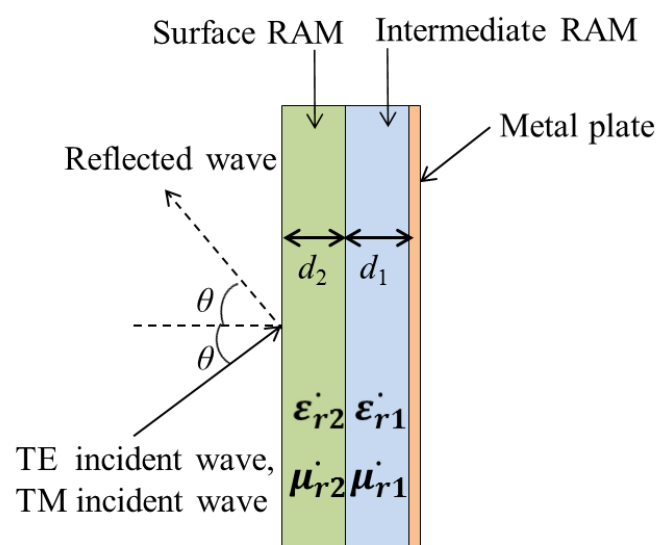


図 3.1 2 層平板型 RAM の構成(誘電性材質及び磁性材質).

3.3 誘電性材質を用いた RAM 設計

誘電性材質の特徴として、複素比透磁率が低下する高周波数帯域でも使用することができ、また、フェライト等の磁性材質に比べて軽量である点が挙げられる。VHF 帯(very-high-frequency band)及び UHF 帯(ultra-high-frequency band)では、RAM として磁性材質が効果的であり、UHF 帯よりも高い周波数帯域では、誘電性材質が効果的である[78]。本項では、誘電性材質のみを使用して、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM の設計を行う。

誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM の場合、計 10 個の設計変数が存在する。これらは、各層の比誘電率実部、比誘電率虚部(4 個)、各比誘電率実部及び虚部に対する減衰係数(4 個)、及び厚さ(2 個)である。2 つの誘電性材質の複素比透磁率は $1 - j0$ とする。これら 10 個の設計変数の範囲を表 3.1 に示す。加えて、厚さの合計値についても 50 mm 以下と設定する。比誘電率実部が高い物質を再現性良く製造することは極めて困難であるため、上限値は 20 とする。

はじめに、計算する周波数範囲を 0.1~20.0 GHz に指定し、0.01 GHz 刻みで計算を行う。その際、設計変数の範囲内において、広帯域特性及び最大入射角の拡大を目指す。広帯域特性は、20 dB 以上の W_a を満たす周波数の数を最大化することによって得られ、同時に、最小周波数、すなわち 20 dB 以上の W_a を満たす周波数の最小値を下げるのが重要である。以上より、垂直入射時と同じ 2 つの目的関数 $F(X)$ 及び $G(X)$ を使用し、 $F(X)$ を最大化、 $G(X)$ を最小化することで、広帯域特性及び最小周波数の低周波化を目指す。その際、入射角 0 deg. から最大入射角まで連続して 20 dB 以上の W_a を満たすよう最適化される。

表 3.1 設計変数の範囲.

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α_1 | ϵ_i (1 GHz) | β_1 | d [mm] |
|--------------|-------------------------|------------|-------------------------|-----------|-------------|
| Intermediate | 1–20 | 0–1 | 0–20 | 0–1 | 1–50 |
| Surface | 1–20 | 0–1 | 0–20 | 0–1 | 1–50 |

3.3.1 TM 波入射時の斜入射特性の検討

図 3.2 に、最大入射角が 45 deg. の場合の 2 目的関数に対する最適化結果を示す。なお、人口 100, 世代数 1,000 で大凡計算が収束することを目視にて確認した。計算時間は 6.12 時間である。

縦軸は 20 dB 以上の W_a を満たす最小周波数を表し、横軸は 20 dB 以上の W_a を満たす比帯域幅を表す。この中で、最も広帯域特性を満たすのは、点 E であると言える。また、最大入射角を 45 deg. とすると、 W_a が 20 dB 以上では、最小周波数が 2.39 GHz, 比帯域幅が 157.3 %であることが分かる。すなわち、20 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最小周波数に対して 8.36 倍である。図 3.2 の最適化結果において、分布の右端に直線に近似できる境界があるが、これは各最小周波数に対して最大の比帯域幅を有する点の集合である。

以上より、この最適化結果を用いることにより、最小周波数 2.39 GHz で、45 deg. 以内の斜入射時に、最大比帯域幅を有する 2 層平板型 RAM を設計することが可能である。

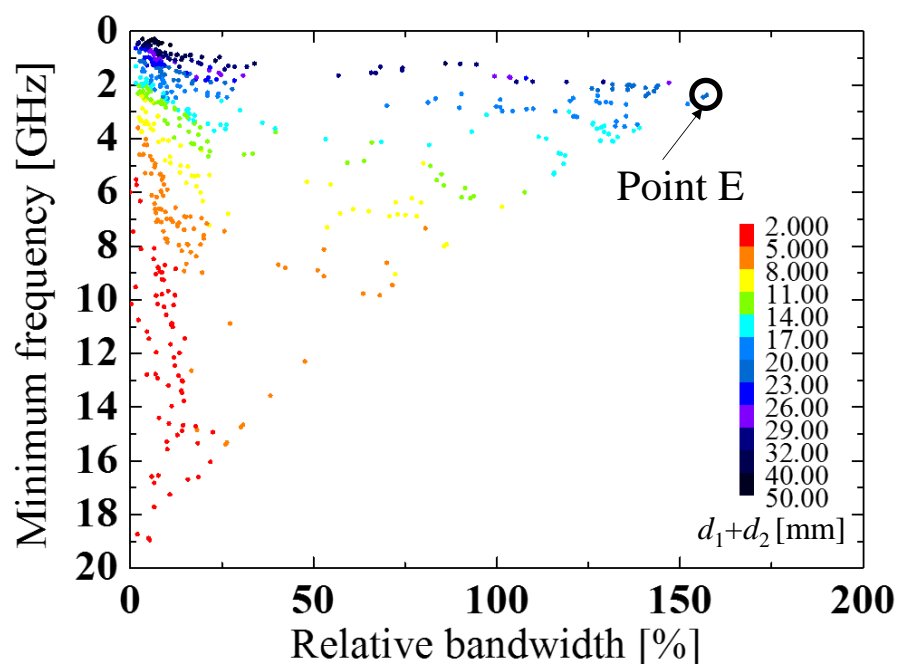


図 3.2 2 目的関数に対する最適化結果(TM 波入射時, 最大入射角 45 deg.).

次に、2つの目的関数を満たすよう、最大入射角を徐々に増大させ、最大入射角の限界値を確認する。その結果、本検討における最大入射角は 60 deg.である。ここで、60 deg.より大きい入射角で最適化計算を行うと、解は存在しないことから、60 deg.が最大入射角であると結論づけている。図 3.3 に、最大入射角が 60 deg.の場合の 2 目的関数に対する最適化結果を示す。同様に、人口 100、世代数 1,000 で大凡計算が収束することを目視にて確認した。計算時間は 7.50 時間である。縦軸は 20 dB 以上の W_a を満たす最小周波数を表し、横軸は 20 dB 以上の W_a を満たす比帯域幅を表す。この中で、最も広帯域特性を満たすのは、点 F である。また、最大入射角を 60 deg.とした場合、 W_a が 20 dB 以上となる最小周波数は 8.88 GHz、比帯域幅は 77.01 %であることが分かる。すなわち、20 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最小周波数に対して 2.25 倍である。このことから、60 deg.以内の全ての入射角において、最小周波数 8.88 GHz から 20 dB 以上の W_a を常に満たしていることを確認できる。最大入射角が大きくなるにつれて全ての入射角で W_a が 20 dB 以上となる条件を満たすことは困難となるが、比帯域幅は 77.01 %であり、十分に広帯域特性を有していると言える。

以上より、0 deg.から最大入射角 60 deg.まで連続した斜入射特性かつ広帯域特性を得る 2 層平板型 RAM を設計することができる。

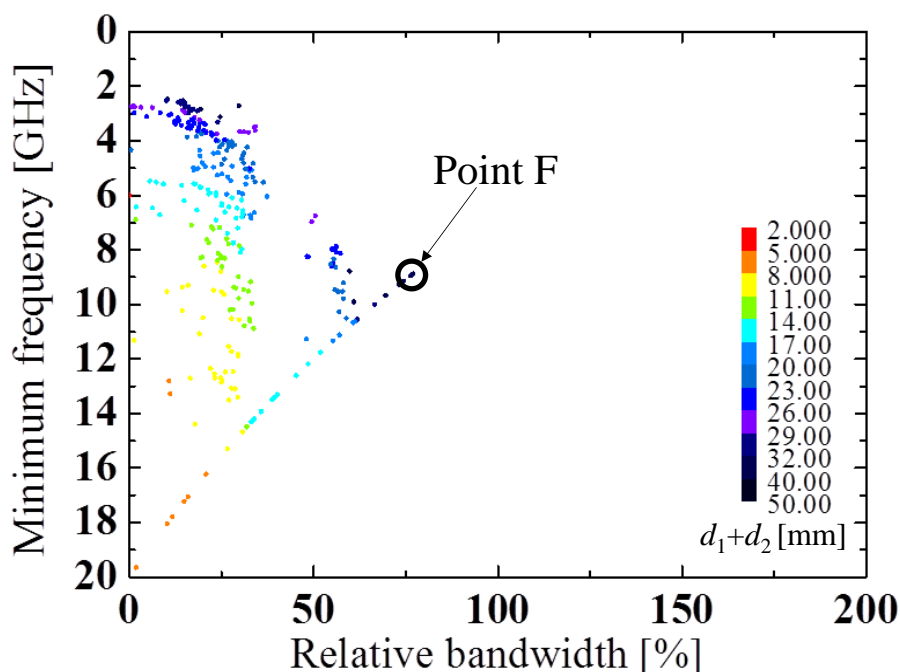


図 3.3 2 目的関数に対する最適化結果(TM 波入射時, 最大入射角 60 deg.).

次に、図 3.4 に、最大入射角が 60 deg.の場合に最適化された設計変数を有する提案 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。入射角はそれぞれ 0 deg., 15 deg., 30 deg., 45 deg.及び 60 deg.で、各入射角における周波数特性曲線を線で示す。また、表 3.2 に、60 deg.の最大入射角を満たす提案 2 層平板型 RAM の設計変数の値を示す。さらに、図 3.5 に比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数特性を示す。

図 3.4 から明らかなように、8.88 GHz から 20.0 GHz までの周波数範囲で、60 deg.以内の全ての入射角で 20 dB 以上の W_a が得られる。最大入射角が大きくなるほど全ての入射角で W_a が 20 dB 以上となる条件を満たすことは困難となるが、設計した提案 2 層平板型 RAM は連続した斜入射特性かつ広帯域特性を満たす。

最大入射角を 60 deg.としているが、参考として、図 3.6 に入射角が 61 deg.の場合の周波数特性を示す。図 3.6 より、入射角 61 deg.の場合、周波数 8.88 GHz 以上の範囲において、20 dB 以上の W_a を常時満たしていないことを確認できる。

ここで、NSGA-II を用いた最適化計算結果の妥当性を確認するため、有限要素法を用いたシミュレータ Ansoft HFSS ver. 13[79]を使用して、提案 2 層平板型 RAM の周波数特性を解析する。TM 波入射時において、周波数 10 GHz 及び 20 GHz で解析を行う。比誘電率実部及び比誘電率虚部の値はそれぞれの周波数に応じた値を使用する。図 3.4 において、RAM の W_a について、シミュレータによる解析結果は点(Sim.)で示しており、これらの値は、線で示す NSGA-II を用いた計算結果(Cal.)とよく一致していることが分かる。以上より、NSGA-II による計算結果の妥当性を確認することができる。したがって、本提案設計手法を用いることにより、最大入射角 60 deg.で比帯域幅 77.01 %を有する 2 層平板型 RAM を実現することができる。

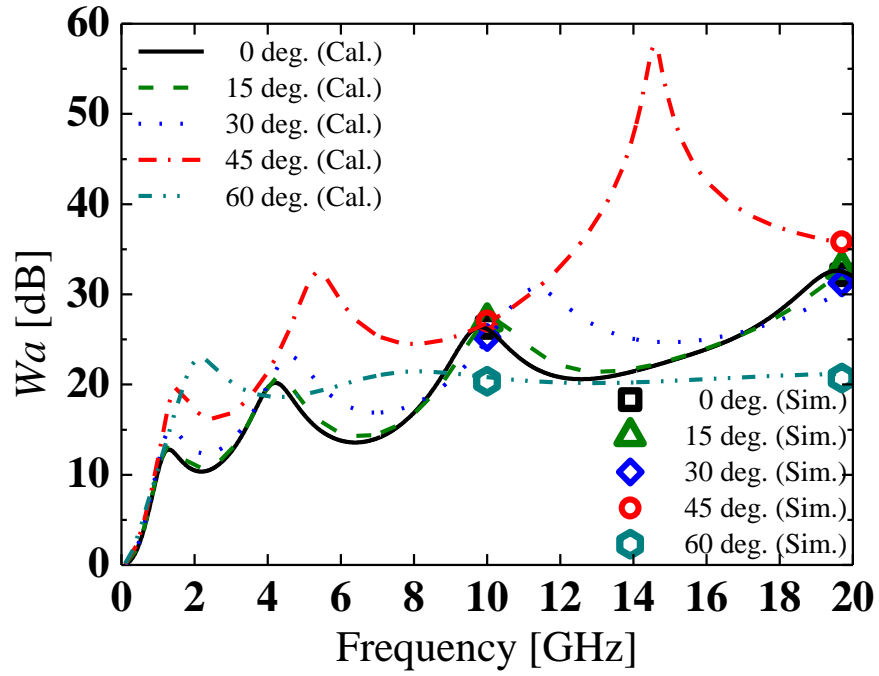


図 3.4 提案 2 層平板型 RAM の周波数特性(TM 波入射時, 最大入射角 60 deg.).

表 3.2 提案 2 層平板型 RAM の設計変数(TM 波入射時, 最大入射角 60 deg.).

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α_1 | ϵ_i (1 GHz) | β_1 | d [mm] |
|--------------|-------------------------|------------|-------------------------|-----------|-------------|
| Intermediate | 8.198 | 0.819 | 7.549 | 0.928 | 16.9 |
| Surface | 2.614 | 0.322 | 2.765 | 0.906 | 18.8 |

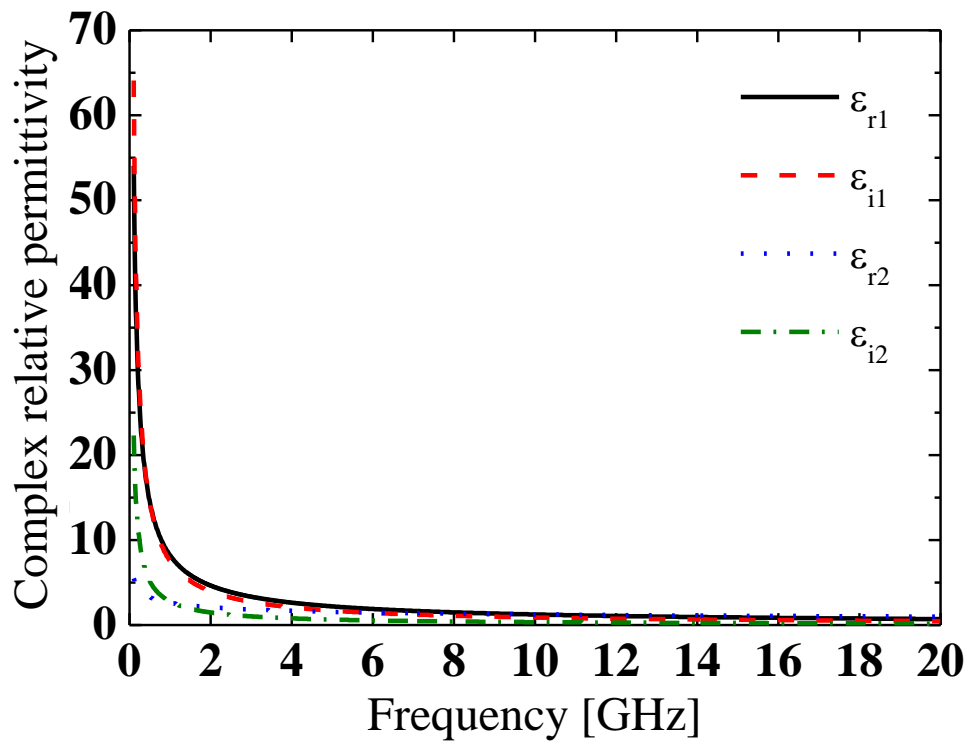


図 3.5 比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数特性(TM 波入射時，最大入射角 60 deg.).

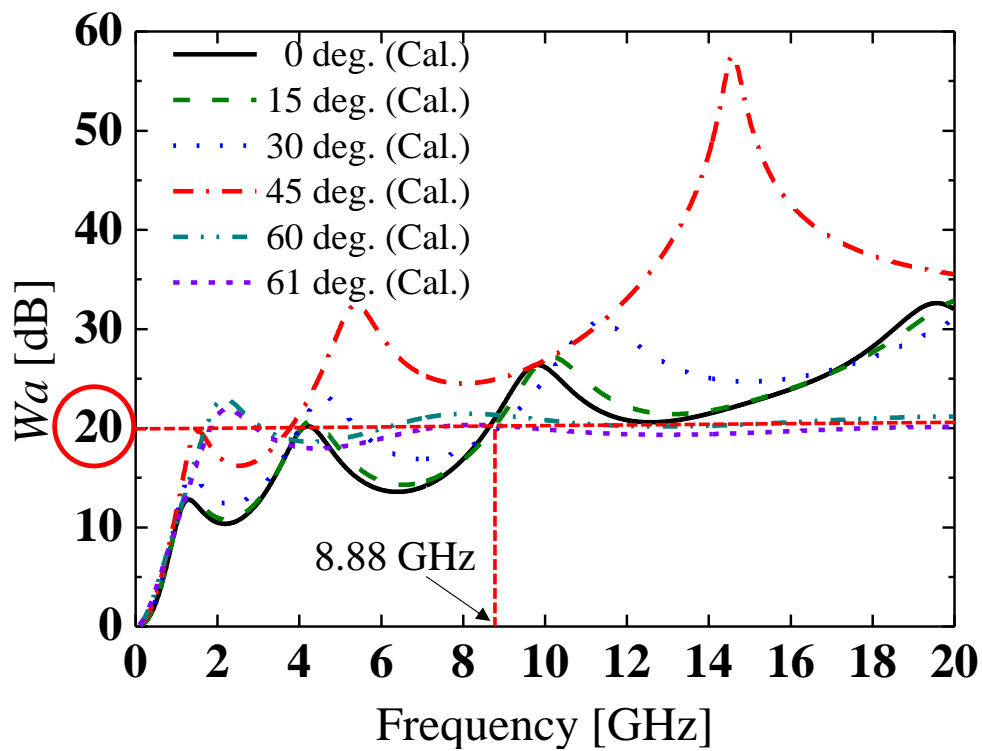


図 3.6 入射角が 61 deg.の場合の周波数特性.

3.3.2 TE 波入射時の斜入射特性の検討

TM 波入射時と同じ条件下で，TE 波入射時についても 2 層平板型 RAM の設計変数の最適化を行う．TM 波入射時と同様に，最大入射角の限界値を確認したところ，広帯域特性及び最小周波数の低周波化という 2 つの目的関数に対して 60 deg.までの最大入射角を得ることができる．人口 100，世代数 1,000 で大凡計算が収束し，計算時間は 6.94 時間である．図 3.7 に，TE 波入射時で最大入射角が 60 deg.の場合に最適化された提案 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す．また，表 3.3 に，60 deg.の最大入射角を満たす提案 2 層平板型 RAM の設計変数の値を示す．さらに，図 3.8 に比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数特性を示す．表面層 RAM の候補として酸化チタンを含むエポキシ樹脂[80]がある．この複素比誘電率は所望の複素比誘電率に近いことから，表 3.3 の設計変数の値は実現可能と言える．また，TM 波入射時，TE 波入射時ともに，第 2 章で示した手法を適用することで，提案する比誘電率の値は実現可能性を期待できる．

図 3.7 より，16.27 GHz から 20.0 GHz までの周波数範囲で，60 deg.以内の全ての入射角で 20 dB 以上の W_a が得られる．このとき比帯域幅は 20.27 %であり，20 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は，最小周波数に対して 1.23 倍である．この結果は，TM 波入射時と比較して，最小周波数の低周波化において劣るが，提案 2 層平板型 RAM は連続した斜入射特性かつ広帯域特性を満たしている．しかしながら，TE 波入射時において，最小周波数をさらに低周波化させることが課題であると言える．

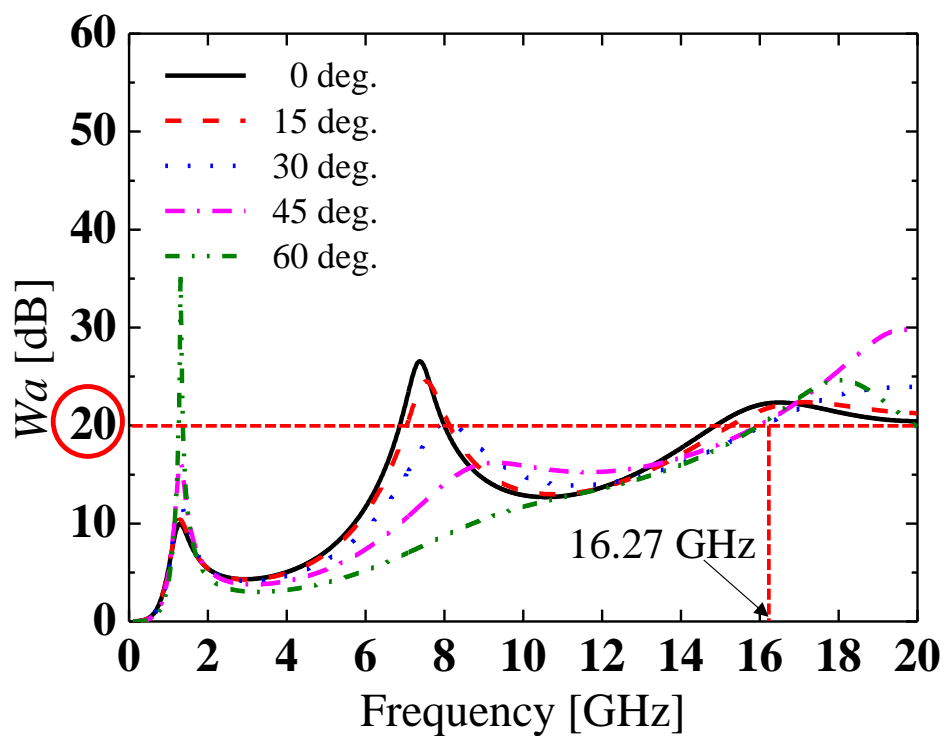


図 3.7 提案 2 層平板型 RAM の周波数特性(TE 波入射時, 最大入射角 60 deg.).

表 3.3 提案 2 層平板型 RAM の設計変数(TE 波入射時, 最大入射角 60 deg.).

| RAM | ε_r (1 GHz) | α_1 | ε_i (1 GHz) | β_1 | d [mm] |
|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|-----------|-------------|
| Intermediate | 9.100 | 0.694 | 3.679 | 0.555 | 14.0 |
| Surface | 16.24 | 0.897 | 1.338 | 0.724 | 4.79 |

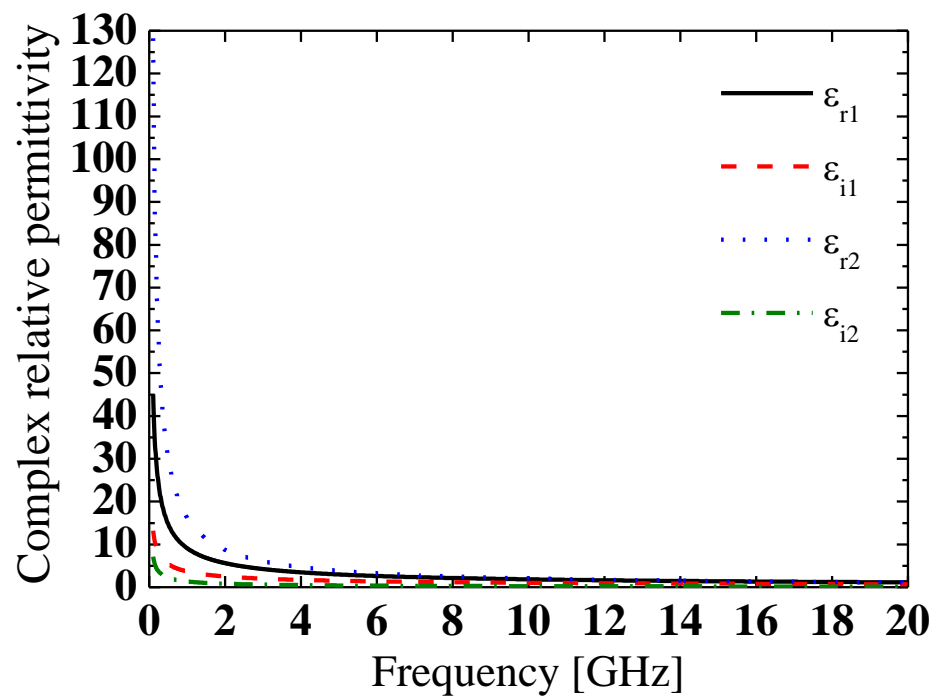


図 3.8 比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数特性(TE 波入射時, 最大入射角 60 deg.).

3.3.3 接着層を追加した場合の影響

設計した提案 2 層平板型 RAM に対して、計算結果の妥当性からその有効性を確認することができたため、ここではその実用性について確認する。

実際に 2 層平板型 RAM を使用する場合、金属板と吸収層の間及び吸収層と表面層の間に接着剤を塗布する。そこで、表 3.2 及び表 3.3 に設計変数を示す 2 種類の提案 2 層平板型 RAM に接着層を追加し、合計 4 層の平板型 RAM と考え、その入射角特性を確認する。接着層が 4 層平板型 RAM の第 1 層及び第 3 層となる。表 3.4 に、塗布するアクリル接着剤の電気材料定数を示す[81]。アクリル接着剤は、表 3.4 に示すように誘電性材質でできていることから、2 種類の 4 層平板型 RAM は、4 層全てが誘電性材質で構成される。図 3.9 に、誘電性材質から成る提案 2 層平板型 RAM について、接着層の有無による入射角特性の比較を示す。これは周波数 20 GHz における入射角特性を示す。図 3.9 より、TM 波入射時、TE 波入射時ともに、接着層の有無の違いによる入射角特性の変化は小さく、 W_a が常に 20 dB 以上となる入射角は、接着層の有無に関わらず等しいことを確認できる。TM 波入射時、入射角 0 deg.付近では接着層が無い場合の方が W_a は大きい、TE 波入射時は、全体的に接着層が有る場合の方が W_a は大きい傾向にある。

以上より、実際に使用することを考え、2 層平板型 RAM の間に接着剤を塗布した場合でも、接着層の影響は極めて小さく、その入射角特性はほとんど変化しない。特に、TE 波入射時は接着層を追加した場合の方が、全体的に W_a が僅かに増加する。これらの観点から提案 2 層平板型 RAM には実用性があると言える。

表 3.4 アクリル接着剤の電気材料定数.

| layer | ϵ_r | ϵ_i | d [mm] |
|----------|--------------|--------------|----------|
| Adhesive | 2.68 | 0.03 | 0.040 |

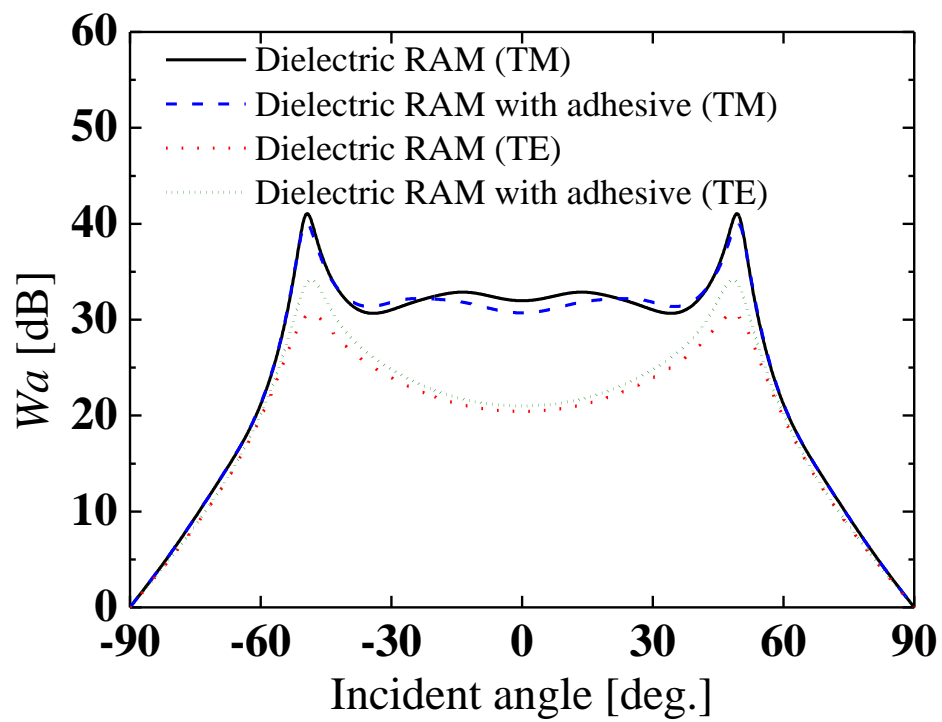


図 3.9 接着層の有無による入射角特性の比較(誘電性材質, 周波数 20 GHz).

3.4 磁性材質を用いた RAM 設計

本項では、磁性材質のみを使用して、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM の設計を行う。高周波数帯域では複素比透磁率が低下するため、低周波数帯域において磁性材質は適している。したがって、特に TE 波入射時に誘電性材質から成る RAM を用いた場合に課題であった、最小周波数の低周波化を解決するために、磁性材質を用いて 2 層平板型 RAM を設計する。

磁性材質から成る 2 層平板型 RAM の場合についても、計 10 個の設計変数が存在する。これらは、各層の比透磁率実部、比透磁率虚部(4 個)、各比透磁率実部及び虚部に対する減衰係数(4 個)、及び厚さ(2 個)である。2 つの磁性材質の複素比誘電率は $15 - j0$ [54] とする。これら 10 個の設計変数の範囲を表 3.5 に示す。1 GHz における各層の比透磁率実部及び比透磁率虚部の範囲は、それぞれ 1～20 及び 0～20 とし、他の設計変数の範囲は誘電性 RAM の場合と等しい。加えて、厚さの合計値についても 50 mm 以下と設定する。

誘電性 RAM の場合と同様に、計算する周波数範囲を 0.1～20.0 GHz に指定し、0.01 GHz 刻みで計算を行う。その際、設計変数の範囲内において、広帯域特性及び最大入射角の拡大を目指す。広帯域特性は、20 dB 以上の W_a を満たす周波数の数を最大化することによって得られ、同時に、最小周波数を下げることが重要であることから、誘電性 RAM の場合と同様に、2 つの目的関数 $F(X)$ 及び $G(X)$ を使用する。 $F(X)$ を最大化、 $G(X)$ を最小化することで、広帯域特性及び最小周波数の低周波化を目指す。その際、入射角 0 deg. から最大入射角まで連続して 20 dB 以上の W_a を満たすよう最適化される。

表 3.5 設計変数の範囲.

| RAM | μ_r (1 GHz) | α_2 | μ_i (1 GHz) | β_2 | d [mm] |
|--------------|--------------------|------------|--------------------|-----------|-------------|
| Intermediate | 1–20 | 0–1 | 0–20 | 0–1 | 1–50 |
| Surface | 1–20 | 0–1 | 0–20 | 0–1 | 1–50 |

3.4.1 TM 波入射時の斜入射特性の検討

図 3.10 に、最大入射角が 45 deg. の場合の 2 目的関数に対する最適化結果を示す。なお、人口 100、世代数 1,000 で大凡計算が収束することを目視にて確認した。計算時間は 7.02 時間である。縦軸は 20 dB 以上の W_a を満たす最小周波数を表し、横軸は 20 dB 以上の W_a を満たす比帯域幅を表す。図 3.10 の点 G の結果から、磁性材質の場合、最小周波数を 0.11 GHz まで低周波化できることを確認できる。このとき、比帯域幅は 185.13 % である。ただし、点 G の場合、最小周波数が非常に小さいため、比帯域幅が大きな値となっている。このとき、20 dB 以上の W_a を満たす最大周波数は 2.85 GHz と低い。図 3.10 内の右上に示す赤い点の集合はこの特徴を有しており、非常に低い周波数帯域から始まる制限的な広帯域特性であると言える。加えて、これらの RAM の特徴として、厚さが 3.28 mm (点 G) 程度と非常に薄いことも挙げられる。以上より、磁性材質から成る RAM は、最小周波数を大きく低周波化させることができるとともに、厚さ 5 mm 以下の非常に薄い 2 層平板型 RAM を設計することが可能であると言える。

一方、斜入射特性を有し、かつ 20.0 GHz までの広帯域特性を有する RAM は、図 3.8 の右端の青色の点 H で得られる。このとき、20 dB 以上の W_a を満たす最小周波数は 1.38 GHz、比帯域幅は 174.18 % である。すなわち、20 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最小周波数に対して 14.49 倍である。図 3.11 に、点 H で示す、最大入射角が 45 deg. の場合に最適化された設計変数を有する提案 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。各入射角における周波数特性曲線を線で示している。なお、45 deg. は 2 つの目的関数を満たすよう、最大入射角を徐々に増大させた場合に得られた TM 波入射時の限界値である。また、表 3.6 に、45 deg. の最大入射角を満たす提案 2 層平板型 RAM の設計変数の値を示す。さらに、図 3.12 に比透磁率実部及び比透磁率虚部の周波数特性を示す。吸収層 RAM の候補として Ni-Zn フェライト[82]、表面層 RAM の候補としてフェライト[83]が挙げられる。2 つの候補の複素比透磁率は所望の複素比透磁率に近いことから、表 3.6 の設計変数の値は実現可能と言える。図 3.11 に示すように、周波数特性は上下に振動するが、1.38 GHz から 20.0 GHz までの周波数範囲で、45 deg. 以内の全ての入射角で、20 dB 以上の安定した W_a の値が得られる。

ここで、NSGA-II を用いた最適化計算結果の妥当性を確認するため、誘電性 RAM の場合と同様に、シミュレータ Ansoft HFSS ver. 13[79]を使用して、提案 2 層平板型 RAM の周波数特性を解析する。TM 波入射時において、周波数 10 GHz 及び 20 GHz で解析を行う。比透磁率実部及び比透磁率虚部の値はそれぞれの周波数に応じた値を使用する。図 3.11 において、RAM の W_a について、シミュレータによる解析結果は点(Sim.)で示しており、これらの値は、線で示す NSGA-II

を用いた計算結果(Cal.)とよく一致していることが分かる．以上より，NSGA-II による計算結果の妥当性を磁性 RAM においても確認することができる．

したがって，本提案設計手法を用いることにより，最大入射角 45 deg.で比帯域幅 174.18 %を有する 2 層平板型 RAM を設計することが可能である．

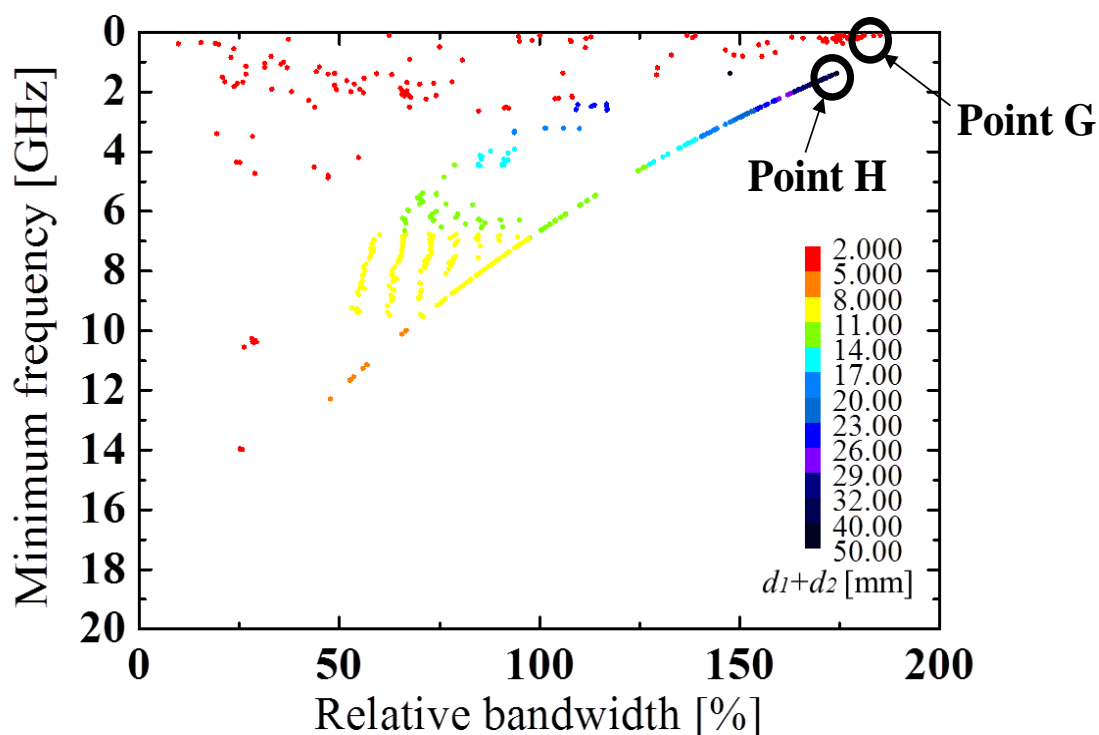


図 3.10 2 目的関数に対する最適化結果(TM 波入射時，最大入射角 45 deg.).

表 3.6 提案 2 層平板型 RAM の設計変数(TM 波入射時，最大入射角 45 deg.).

| RAM | μ_r (1 GHz) | α_2 | μ_i (1 GHz) | β_2 | d [mm] |
|--------------|--------------------|------------|--------------------|-----------|-------------|
| Intermediate | 2.938 | 0.270 | 18.80 | 0.752 | 1.81 |
| Surface | 10.49 | 0.00826 | 2.665 | 0.855 | 40.6 |

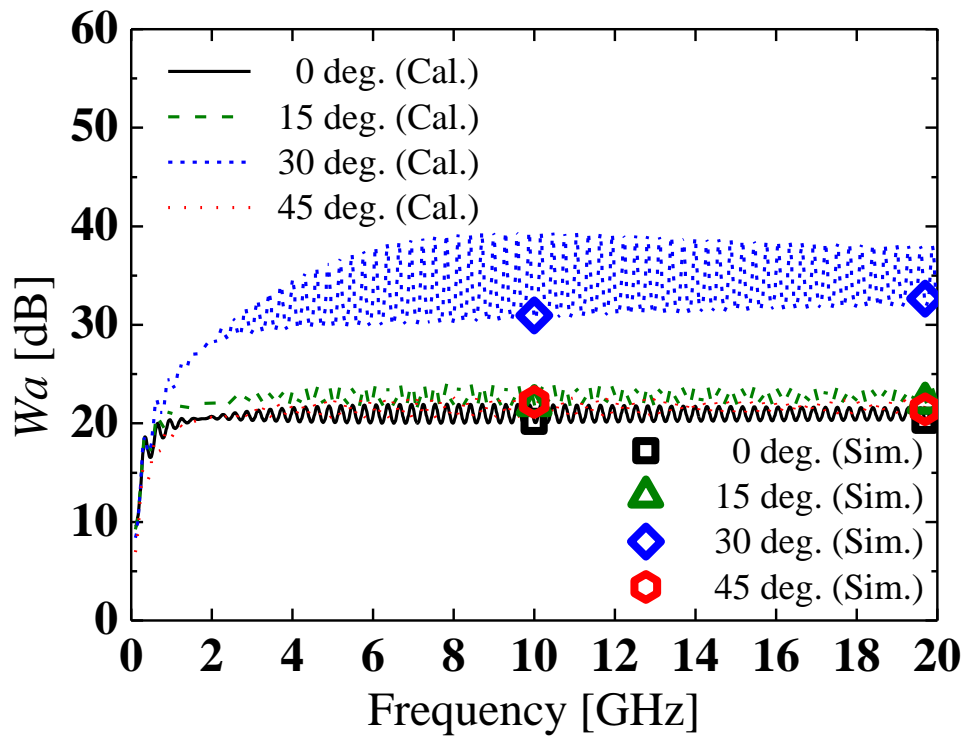


図 3.11 提案 2 層平板型 RAM の周波数特性(TM 波入射時, 最大入射角 45 deg.).

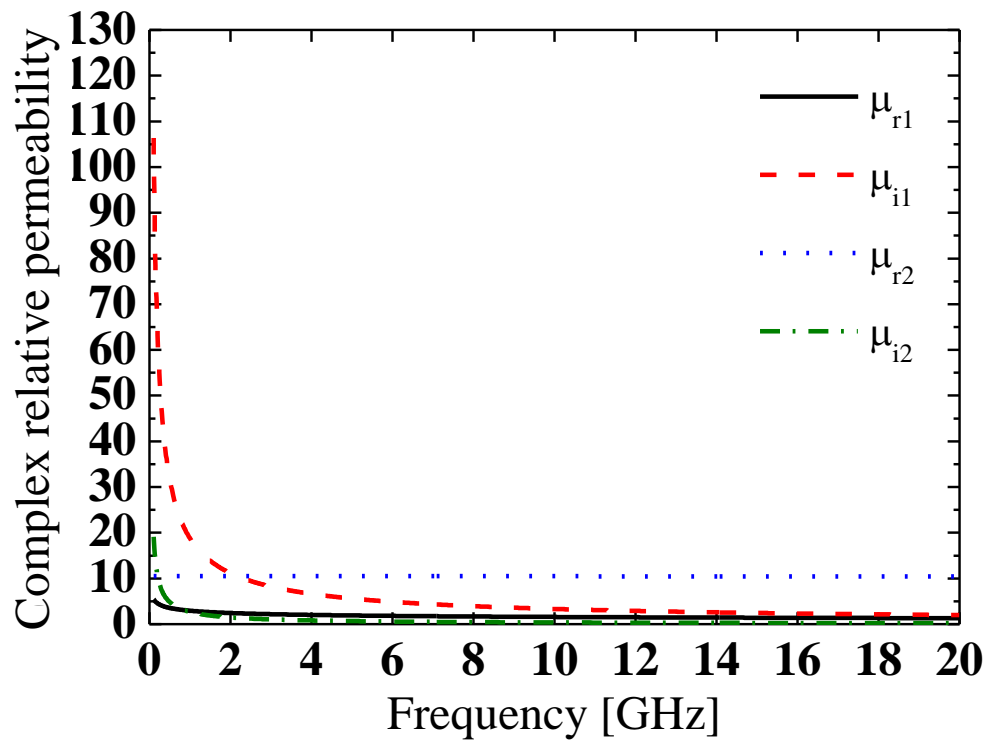


図 3.12 比透磁率実部及び比透磁率虚部の周波数特性(TM 波入射時, 最大入射角 45 deg.).

3.4.2 TE 波入射時の斜入射特性の検討

TM 波入射時と同じ条件下で，TE 波入射時についても 2 層平板型 RAM の設計変数の最適化を行う．TM 波入射時と同様に，最大入射角の限界値を確認したところ，広帯域特性及び最小周波数の低周波化という 2 つの目的関数に対して 45 deg.までの最大入射角を得ることができる．このとき，最小周波数を 0.11 GHz まで低周波化することができ，比帯域幅は 191.73 %を得る．しかしながら，この結果は，TM 波入射時の図 3.10 内の点 G の結果と同じ特徴を有しており，非常に低い周波数帯域から始まる制限的な広帯域特性を示す．最大入射角が 45 deg.のとき，この特徴を有する設計変数のみを得られ，連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM の設計変数は得られない．

ここで，TE 波入射時において，斜入射特性を有し，かつ 20.0 GHz までの広帯域特性を得られるのは，最大入射角が 40 deg.の場合である．図 3.13 に最大入射角が 40 deg.の場合の 2 目的関数に対する最適化結果を示す．なお，人口 100, 世代数 1,000 で大凡計算が収束することを目視にて確認した．計算時間は 4.63 時間である．縦軸は 20 dB 以上の W_a を満たす最小周波数を表し，横軸は 20 dB 以上の W_a を満たす比帯域幅を表す．図 3.14 に，TE 波入射時の最大入射角が 40 deg.の場合に最適化された提案 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す．また，表 3.7 に，40 deg.の最大入射角を満たす提案 2 層平板型 RAM の設計変数の値を示す．さらに，図 3.15 に比透磁率実部及び比透磁率虚部の周波数特性を示す．吸収層 RAM 及び表面層 RAM の候補として，厚さの異なるフェライト[83]が挙げられる．その複素比透磁率は所望の複素比透磁率に近いことから，表 3.7 の設計変数の値は実現可能と言える．図 3.14 に示すように，20 dB 以上の W_a に対して，提案 2 層平板型 RAM の最小周波数は 0.90 GHz で，比帯域幅は 182.77 %である．すなわち，20 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は，最小周波数に対して 22.22 倍である．また，この提案 2 層平板型 RAM は連続した斜入射特性かつ広帯域特性をともに満たしている．周波数特性曲線は TM 波入射時と同様に上下に振動するが，0.90 GHz から 20.0 GHz までの周波数範囲で，40 deg.以内の全ての入射角で 20 dB 以上の安定した W_a の値が得られる．したがって，本提案設計手法を用いることにより，TE 波入射時についても最大入射角 40 deg.で比帯域幅 182.77 %を有する 2 層平板型 RAM を設計することが可能である．

磁性 RAM の場合，最大入射角の限界値は TM 波入射時 45 deg.，TE 波入射時 40 deg.であり，誘電性 RAM に比べて低減している．しかしながら，磁性 RAM を用いることで，誘電性 RAM では TE 波入射時に特に課題であった，最小周波数の低周波化を達成できる．以上より，低周波数帯域において連続した斜入射特性かつ広帯域特性が求められる場合は，磁性 RAM の方が適していると言える．

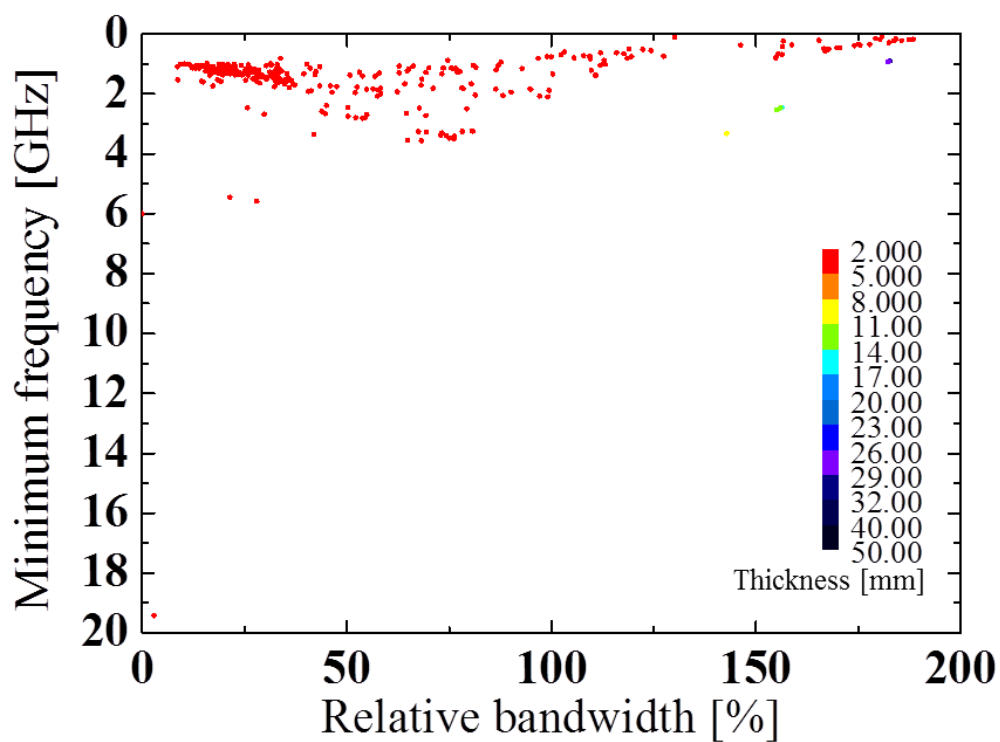


図 3.13 2 目的関数に対する最適化結果(TE 波入射時, 最大入射角 40 deg.).

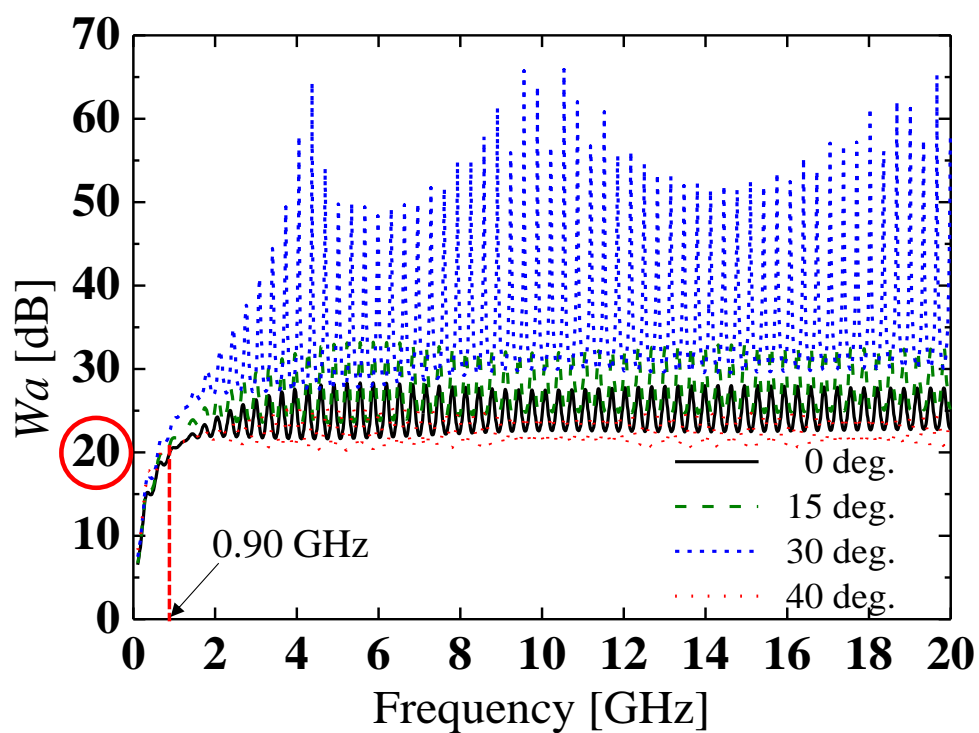


図 3.14 提案 2 層平板型 RAM の周波数特性(TE 波入射時, 最大入射角 40 deg.).

表 3.7 提案 2 層平板型 RAM の設計変数(TE 波入射時, 最大入射角 40 deg.).

| RAM | μ_r (1 GHz) | α_2 | μ_i (1 GHz) | β_2 | d [mm] |
|--------------|--------------------|------------|--------------------|-----------|-------------|
| Intermediate | 4.649 | 0.0967 | 19.84 | 0.765 | 2.53 |
| Surface | 19.11 | 0.00497 | 5.139 | 0.939 | 27.4 |

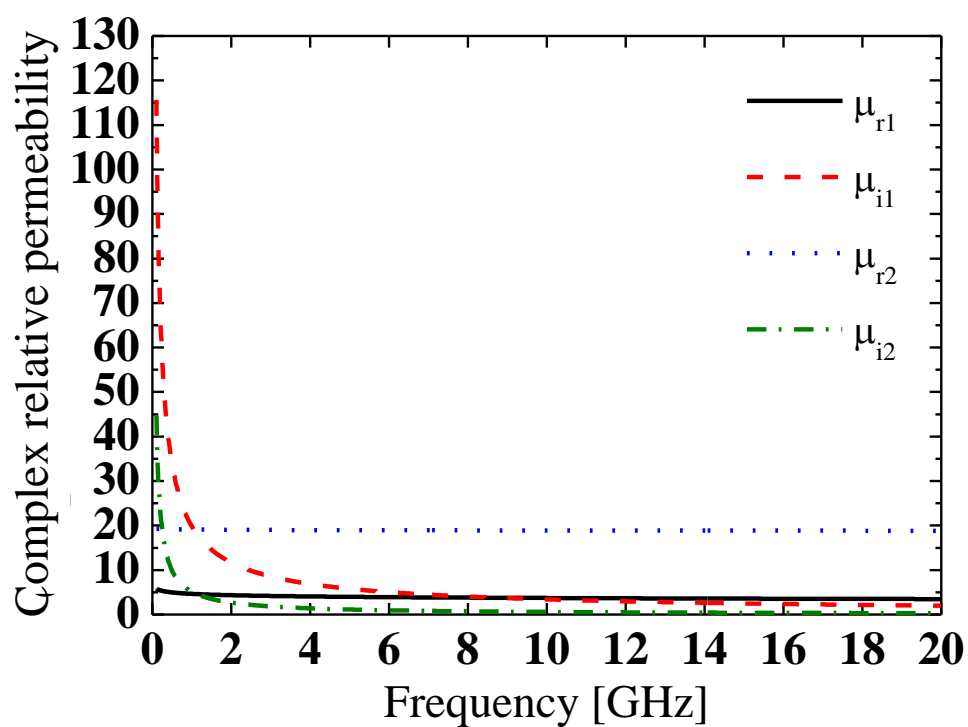


図 3.15 比透磁率実部及び比透磁率虚部の周波数特性(TE 波入射時, 最大入射角 40 deg.).

ここで、磁性 RAM の周波数特性曲線で見られた上下に振動する理由について考察する。上下の振動がより大きく見られた TE 波入射時の周波数特性の結果を用いて検討を行う。

表 3.6 及び表 3.7 より、斜入射時、磁性材質から成る 2 層平板型 RAM は、吸収層及び表面層の比透磁率実部及び比透磁率虚部の最適値が大きい傾向にある。一方、表 3.2 及び表 3.3 から、誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM の比誘電率実部及び比誘電率虚部の最適値は 10 以下の値が多く、小さい傾向にある。図 3.11, 図 3.14, 図 3.4 及び図 3.7 より、それぞれの設計変数から成る RAM の周波数特性を確認すると、全ての周波数特性曲線において上下振動は存在するが、磁性 RAM の場合、比透磁率の値が大きいため、上下振動がより顕著に表れている。また、磁性 RAM の場合、比透磁率の値そのものが大きいだけでなく、式(2.1)及び式(2.2)に示すように、掛け合わせる複素比誘電率の値を $15 - j0$ に設定しているため、更に増大され、上下振動も大きくなる。

ここで、複素比誘電率の値を $15 - j0$ から $1 - j0$ に変更した場合、磁性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の周波数特性曲線を図 3.16 に示す。図 3.16 より、上下振動が小さくなっていることを確認できる。

なお、TE 波入射時であれば、誘電性 RAM, 磁性 RAM に関係なく、計算に使用する式は式(2.1)から式(2.5)で変わらないことから、誘電性 RAM についても同様の事象が発生するか確認する。当初、 $1 - j0$ に設定していた複素比透磁率の値を $15 - j0$ に増加させた場合、誘電性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の周波数特性曲線を図 3.17 に示す。図 3.17 を図 3.7 と比較すると、増大した複素比透磁率を掛け合わせることで比誘電率の値が大きくなり、周波数特性曲線の上下振動の数が増えていることが分かる。磁性 RAM に比べて、誘電性 RAM は最適値の実部及び虚部の値が小さいため、上下振動は顕著には表れていないが、同様の事象が発生している。以上より、比透磁率や比誘電率の値が大きい時、周波数特性曲線は、狭い周波数間隔で上下に振動すると言える。

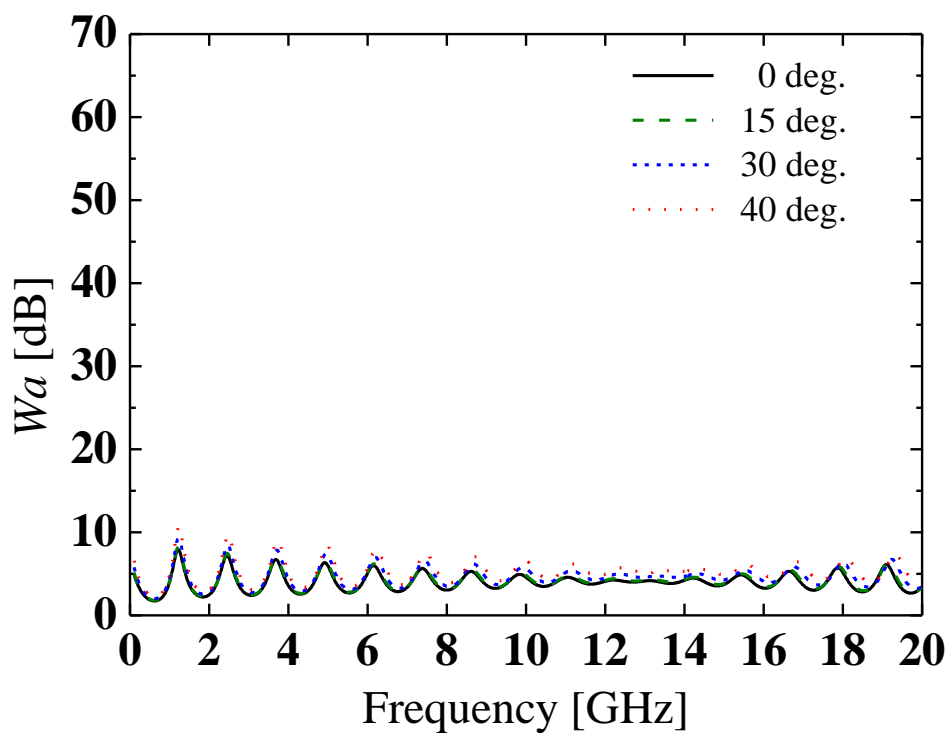


図 3.16 複素比誘電率の値を $1 - j0$ に変更した場合，磁性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の周波数特性(TE 波入射時，最大入射角 40 deg.).

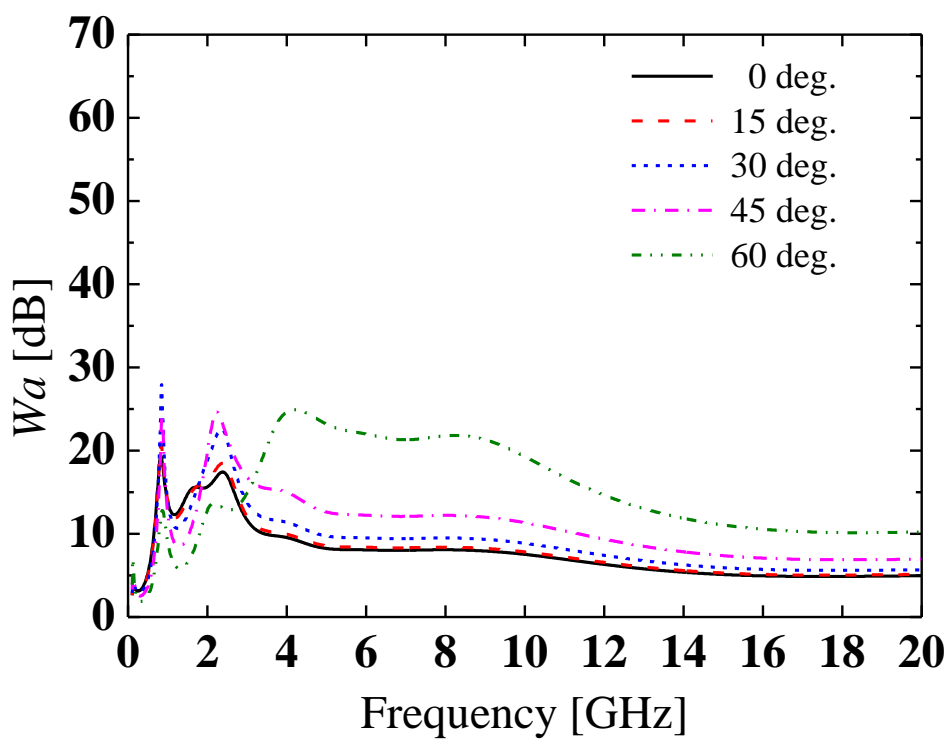


図 3.17 複素比透磁率の値を $15 - j0$ に変更した場合，誘電性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の周波数特性(TE 波入射時，最大入射角 40 deg.).

通常、フェライトのように共鳴周波数近傍で磁気損失を利用する磁性材質は、1 GHz 以下の周波数帯域において電波吸収特性に優れ、かつ電波吸収帯域幅も広いという特徴を有する。一方で、誘電性材質は、低周波数帯域で電界を加えても電流が流れず、抵抗による熱の発生はほとんど生じないが、高周波数帯域では周波数に反比例してコンデンサのインピーダンスが低くなるため、抵抗にも電流が流れることになり、その結果、抵抗体における熱の発生が生じ、電波エネルギーが熱エネルギーに変換されることで、電波吸収特性に優れる[84]。近年、これら 2 つの材質の特性を活かす目的で、磁性 RAM と誘電性 RAM を組み合わせた複合材料から成る RAM が開発されている[15], [77]。また、電波吸収壁の場合、前面に近い電界の強い部分には誘電性 RAM を配置し、金属板に近い磁界の強い部分には磁性 RAM を配置した構造を用いることで、電波を有効に吸収させることができる[14]。

しかしながら、本章において提案した磁性材質から成る 2 層平板型 RAM は、低周波数帯域だけでなく、高周波数帯域においても電波吸収特性に優れ、かつ広帯域特性を有している。この結果は、設計変数の比透磁率の値が高いことが影響している。このことから、磁性 RAM が高い比透磁率の値を有するとき、複合材料を使用しない場合でも、低周波数帯域から連続した広帯域特性を有する RAM を少ない層数の 2 層平板型 RAM で実現できることを示している。

ここで、本検討では周波数 1 GHz における比透磁率の上限値を 20 に設定したが、高い比透磁率の値を実現する手法について述べる。

比透磁率実部が高い物質として、強磁性体の $(\text{Fe}/\text{SiO}_2)/\text{SiO}_2$ 多層膜[[7/2.5 nm]/50 nm]がある。図 3.18 に、 Fe/SiO_2 [7/2.5 nm](破線)及び $(\text{Fe}/\text{SiO}_2)/\text{SiO}_2$ 多層膜[[7/2.5 nm]/50 nm](実線)の複素比透磁率の周波数特性の比較を示す[85]。図 3.18 が示すように、1 GHz における比透磁率実部及び比透磁率虚部の値はそれぞれ 100, 1000 程度である。磁性材質であるフェライトの場合、空隙を設け面積率を変えることで、比透磁率実部及び比透磁率虚部が低下する。フェライト板を磁界方向に連続となるように、電界方向に空隙をあけて反射体の上に配置する構造を用いることで、空隙率 50 %程度まで空隙無しのフェライトと同等の電波吸収特性を有することができる。これは、空隙率が大きくなるほど、実効的な比透磁率の値が小さくなるためである[86]。したがって、空隙を設けることで、同等の電波吸収特性を保ちながら、比透磁率の値を低下させることが可能となる。本手法を $(\text{Fe}/\text{SiO}_2)/\text{SiO}_2$ 多層膜にも適用することで、高い比透磁率の値でも実現することが可能となる。

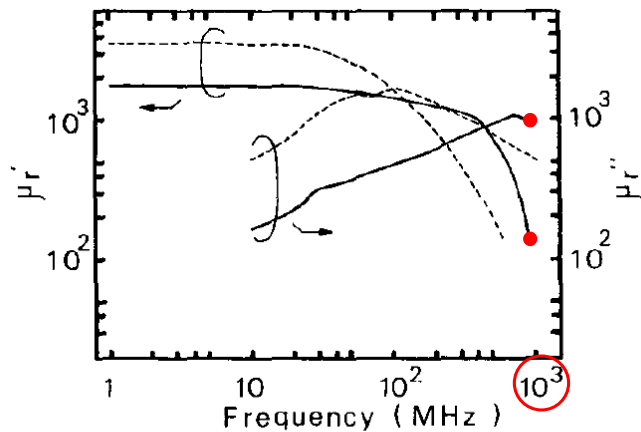


図 3.18 Fe/SiO₂[7/2.5 nm](破線)及び(F_e/SiO₂)/SiO₂ 多層膜[[7/2.5 nm]/50 nm](実線)の複素比透磁率の周波数特性の比較.

続いて、本検討では複素比透磁率の周波数分散性を検討する際、式(3.8)及び式(3.9)を使用しているが、この妥当性について述べる．通常、磁性材質が有する比透磁率は、高周波数帯域では低下してしまい、非常に小さい値となる．周波数 1 GHz よりも低い周波数帯域では、比透磁率実部、比透磁率虚部ともに、高い値から低い値へ周波数分散が見られる．一方で、1 GHz 以上の周波数帯域では、比透磁率実部、比透磁率虚部は、ともに単調に減少する．図 3.19 に比透磁率の周波数特性の一例を示す[9]．

以上より、周波数 1 GHz 以上の分散特性は単調減少であるため、式(3.8)及び式(3.9)と似た周波数特性を示すことから、本検討で使用することは問題無いと言える．

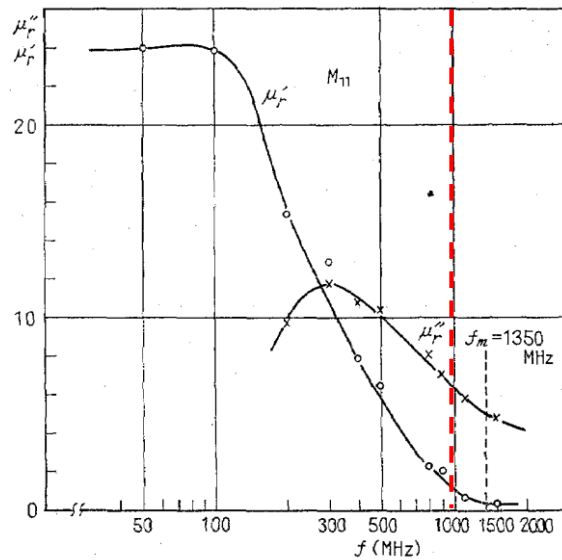
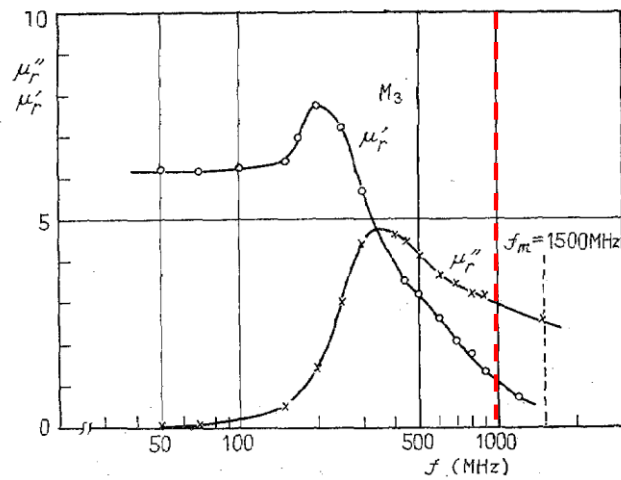


図 3.19 比透磁率の周波数特性の一例.

3.4.3 接着層を追加した場合の影響

設計した提案 2 層平板型 RAM に対して、計算結果の妥当性からその有効性を確認することができたため、ここでは誘電性 RAM と同じ手法を用いて、磁性 RAM についてもその実用性を確認する。

表 3.6 及び表 3.7 に設計変数を示す 2 種類の提案 2 層平板型 RAM に表 3.4 に示す電気材料定数の接着層を追加し、合計 4 層の平板型 RAM と考え、その入射角特性を確認する。接着層が 4 層平板型 RAM の第 1 層及び第 3 層となる。使用する接着剤の電気材料定数は表 3.4 に示すとおりで、誘電性 RAM の場合と同じものを使用する。アクリル接着剤は、誘電性材質でできていることから、2 種類

の4層平板型 RAM は、磁性材質と誘電性材質の組み合わせにより構成される。図 3.20 に、磁性材質から成る提案 2 層平板型 RAM について、接着層の有無による入射角特性の比較を示す。これは周波数 20 GHz における入射角特性を示す。図 3.20 より、TM 波入射時、TE 波入射時ともに、接着層の有無の違いによる入射角特性の変化は見られず、 W_a が常に 20 dB 以上となる入射角についても変化しないことを確認できる。そのため、磁性 RAM については、アクリル接着剤を用いたことによる入射角特性への影響は全く無いと言える。

以上より、実際に使用することを考え、2 層平板型 RAM の間に接着剤を塗布した場合でも、接着層の影響は見られないことから、磁性材質から成る提案 2 層平板型 RAM についても実用性があると言える。

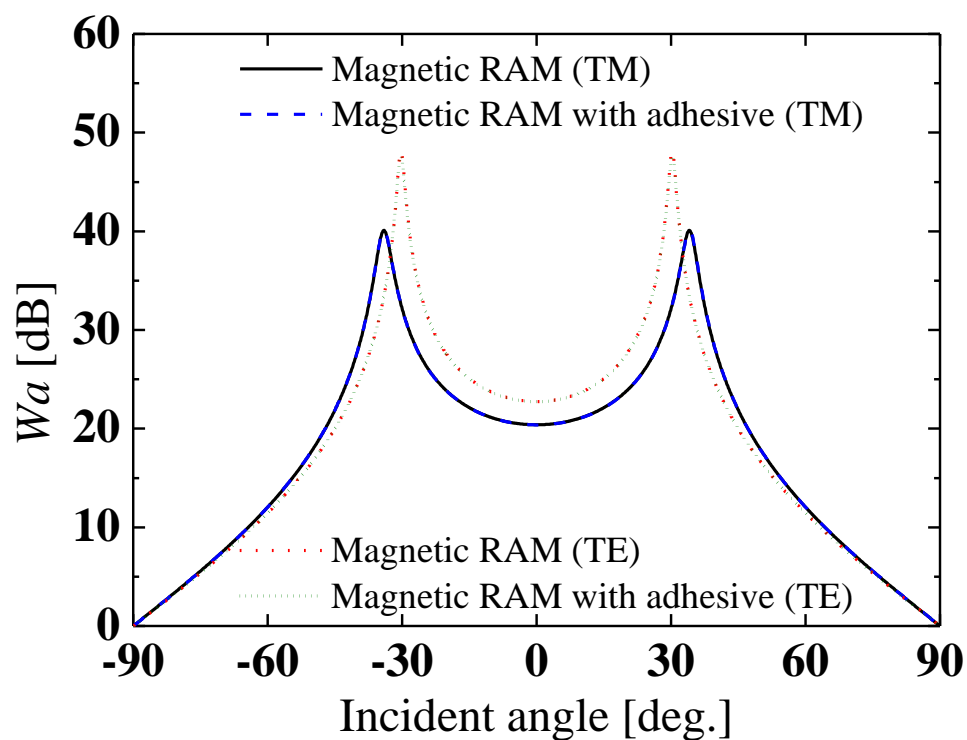


図 3.20 接着層の有無による入射角特性の比較(磁性材質, 周波数 20 GHz).

3.5 誘電性材質及び磁性材質から成る RAM の特性比較及び考察

誘電性材質及び磁性材質を用いて、TM 波入射時、TE 波入射時においてそれぞれ設計した提案 2 層平板型 RAM の特性を比較する。表 3.8 に、設計した 4 種類の 2 層平板型 RAM の結果を示す。表 3.8 より、誘電性材質と磁性材質から成る RAM の特性として、以下の点が挙げられる。誘電性 RAM の場合、最大入射角が 60 deg.であり、広角度の斜入射特性を有するという利点がある一方で、TE 波入射時、最小周波数の低周波化が十分に満たされないという課題がある。他方、磁性 RAM の場合、最大入射角は 45 deg.以下であり、誘電性 RAM に比べて小さいが、最小周波数の低周波化に優れる。

したがって、設計した 2 層平板型 RAM が有する特性を比較した結果から、より広角度の斜入射特性が求められる場合は、誘電性提案 2 層平板型 RAM が適していると言える。また、より低周波数帯域で広帯域特性及び斜入射特性が求められる場合には、磁性提案 2 層平板型 RAM が適していると考察できる。なお、文献[57]に示す 2 層平板型 RAM は、TM 波入射時、20 dB 以上の W_a に対して、最大入射角 30 deg., 最小周波数 8.0 GHz, 比帯域幅 40 %, 厚さ 4.7 mm という特性を有する。これと比較して、4 種類の提案 2 層平板型 RAM は厚さが増すが、本研究で目的としている連続した斜入射特性かつ広帯域特性に関して優れていると言える。

表 3.8 設計した 4 種類の提案 2 層平板型 RAM の特性.

| Material | Polarized wave | Maximum incidence angle [deg.] | Minimum frequency [GHz] | Relative bandwidth [%] | d [mm] |
|------------|----------------|--------------------------------|-------------------------|------------------------|----------|
| Dielectric | TM | 60 | 8.88 | 77.01 | 35.7 |
| | TE | 60 | 16.27 | 20.27 | 18.9 |
| Magnetic | TM | 45 | 1.38 | 174.18 | 42.4 |
| | TE | 40 | 0.90 | 182.77 | 29.9 |

3.6 両偏波特性に関する検討

各材料及び各偏波において設計した 4 種類の提案 2 層平板型 RAM について、その両偏波特性を確認する。

図 3.21 に、誘電性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の入射角特性を示す。また、図 3.22 に、磁性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の入射角特性を示す。図 3.21 及び図 3.22 は、4 種類の提案 2 層平板型 RAM に対して、20 dB 以上の W_a を満たす最小周波数でそれぞれ計算した入射角特性を示している。すなわち、計算周波数は、誘電性 RAM(TM 波入射時)は 8.88 GHz、誘電性 RAM(TE 波入射時)は 16.27 GHz、磁性 RAM(TM 波入射時)は 1.38 GHz、磁性 RAM(TE 波入射時)は 0.90 GHz である。図 3.21 及び図 3.22 において、 $W_{a\text{ TM}}$ は TM 波入射時における W_a 、 $W_{a\text{ TE}}$ は TE 波入射時における W_a をそれぞれ示す。また、at TM 及び at TE は、TM 波入射時で最適化された設計変数を使用していること、TE 波入射時で最適化された設計変数を使用していることをそれぞれ示す。

一例として、図 3.21 において、緑色の破線で示す $W_{a\text{ TE at TM}}$ は、TM 波入射時で最適化された設計変数を使用して、TE 波入射時における W_a を見た結果を表している。この $W_{a\text{ TE at TM}}$ において、20 dB 以上の W_a を満たす最大入射角は 13.7 deg. である。これは、TM 波入射に対して最適化計算が行われているため、TM 波入射時は最大入射角が 60 deg. と優れているが、TE 波入射時の場合は劣り、連続した斜入射特性を得ることが難しい。

さらに、図 3.21 において、青色の点線で示す $W_{a\text{ TM at TE}}$ では、最大入射角は 60 deg. である。最適化計算は TE 波入射について行われているが、TM 波入射時の最大入射角と TE 波入射時の最大入射角には差が見られない。これは、最小周波数が 16.27 GHz と高く、上限周波数 20.0 GHz までの周波数範囲が狭いことが理由として考えられる。

一方、図 3.22 において、 $W_{a\text{ TE at TM}}$ で 20 dB 以上の W_a を満たす最大入射角は 2.6 deg. であり、 $W_{a\text{ TM at TE}}$ の最大入射角は 4.8 deg. である。最適化計算は TM 波入射時と TE 波入射時で別々に実行されるため、最適化された設計変数は異なる。したがって、もう一方の入射角特性は劣り、連続した斜入射特性を得ることは難しい。以上より、20 dB 以上の W_a では、両偏波特性は得られないことを確認できる。 W_a の指標を 20 dB から 10 dB に低減することで、誘電性 RAM、磁性 RAM はそれぞれ 60 deg., 50 deg. 以内の入射角範囲で、両偏波特性を得られることが分かる。しかしながら、20 dB 以上の両偏波特性は依然として課題であり、これには TM 波入射時と TE 波入射時の同時最適化が必要である。

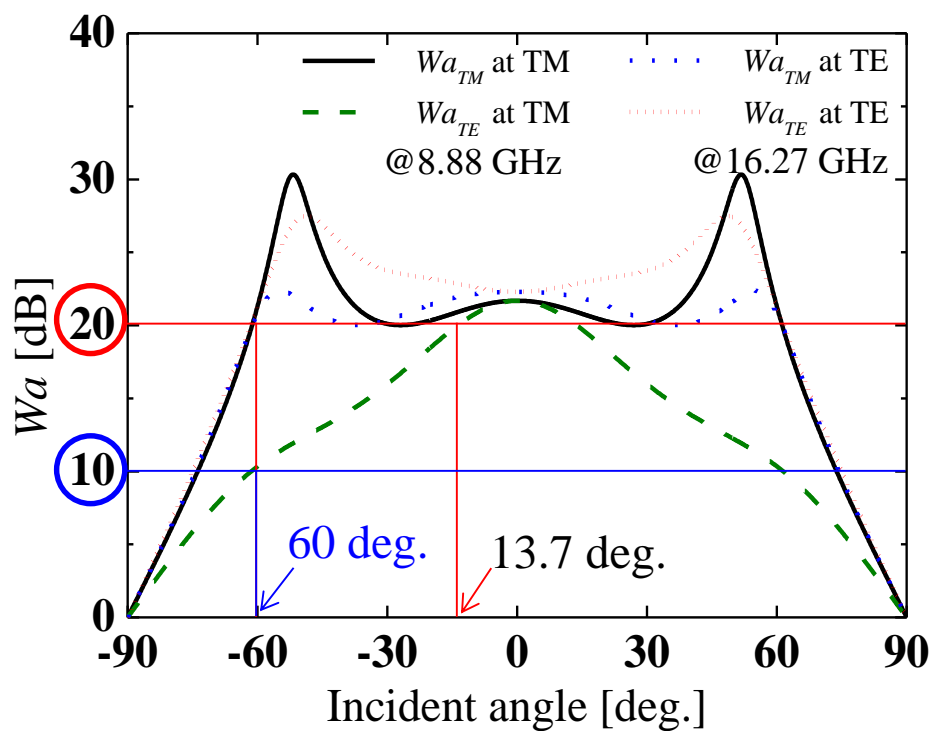


図 3.21 誘電性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の入射角特性.

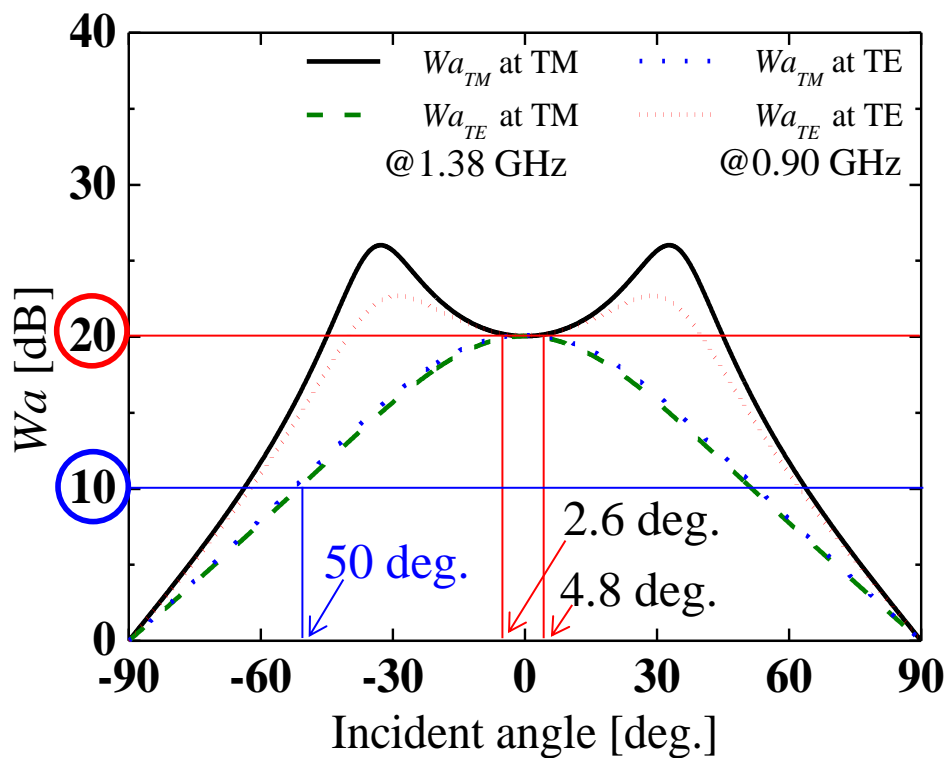


図 3.22 磁性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の入射角特性.

3.7 まとめ

本章では、第 2 章で提案した設計手法を応用し、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する RAM の設計を行った。斜入射特性を検討する際、広帯域特性を同時に目的関数に設定することで、特定の周波数帯に限定することがなく、使用用途の拡大を実現した。以下に本章で得られた結果をまとめて示す。

- (1) 垂直入射時と同様に NSGA-II を用いることで、斜入射時においても、20 dB 以上の W_a を満たす周波数の広帯域化及び低周波化が可能である。

広帯域特性を検討する際、最小周波数の低周波化を目的関数に加えて最適化することで、低周波数帯域における広帯域化が追求され、更なる広帯域特性を見出すことができた。また、空隙率を変化させて比透磁率の値を制御し、高透磁率の物質を得ることで、これまで磁性材料では困難であった高周波数帯域における電波吸収特性や広帯域特性を満たす 2 層平板型 RAM を設計することができた。

- (2) 多目的最適化の過程において、入射角を徐々に増大させ最大入射角を探索することで、設計変数内において、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を得ることが可能である。

最大入射角が大きくなるにつれて全ての入射角で W_a が 20 dB 以上となる条件を満たすことは困難となるが、誘電性材質及び磁性材質から、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM を設計することができた。

誘電性 RAM の場合、最大入射角が 60 deg. であり、広角度の斜入射特性を有するという利点がある一方で、TE 波入射時、最小周波数の低周波化が十分に満たされないという課題があった。したがって、より広角度の斜入射特性が求められる場合に誘電性提案 2 層平板型 RAM が適していることが分かった。

一方、磁性 RAM の場合、最大入射角は 45 deg. 以下であり、誘電性 RAM に比べて小さいが、最小周波数の低周波化に優れるという特性を有することが分かった。したがって、より低周波数帯域で広帯域特性及び斜入射特性が求められる場合には、磁性提案 2 層平板型 RAM が適していることが明らかとなった。

- (3) 提案する 2 層平板型 RAM は誘電性 RAM、磁性 RAM とともに、 W_a に対する接着層の影響は小さく、実用性がある。

誘電性 RAM の場合、接着剤を追加した 4 層平板型 RAM は全ての層が誘電性材質で構成される。TM 波入射時、TE 波入射時ともに、接着層の有無の違いによる入射角特性の変化は小さく、 W_a が常に 20 dB 以上となる入射角は、接着層の有無に関わらず等しいことを確認した。

一方、磁性 RAM の場合、接着剤を追加した 4 層平板型 RAM は、磁性材質と誘電性材質の組み合わせにより構成される。TM 波入射時、TE 波入射時ともに、接着層の有無の違いによる入射角特性の変化は見られず、 W_a が常に 20 dB 以上となる入射角についても変化しないことから、アクリル接着剤を用いたことによる入射角特性への影響は全く無いことを確認した。以上より、誘電性材質及び磁性材質から成る提案 2 層平板型 RAM の実用性を示した。

- (4) 提案 2 層平板型 RAM は、20 dB 以上の W_a では、両偏波特性を得ることは困難である。

最適化計算は TM 波入射時と TE 波入射時で別々に実行されるため、最適化された設計変数はそれぞれ異なることから、20 dB 以上の W_a で両偏波特性を得ることは困難である。しかしながら、 W_a の指標を 20 dB から 10 dB に低減することで、提案する誘電性 RAM、磁性 RAM はそれぞれ 60 deg., 50 deg. 以内の入射角範囲で、両偏波特性を得ることができた。20 dB 以上の両偏波特性を得るには、TM 波入射時と TE 波入射時の同時最適化が必要である。

- (5) NSGA-II の計算結果には妥当性がある。

提案した多目的最適設計手法を用いて 2 層平板型 RAM の電気材料定数を決定し、シミュレータによる確認において、斜入射時、提案した RAM の周波数特性が同等に得られることを確認した。これにより、垂直入射時だけでなく斜入射時においても、広帯域特性を有する RAM の多目的最適設計手法は十分に適用できるものであることを示した。

第 4 章 設計変数のロバスト性を考慮した RAM

4.1 まえがき

第 2 章及び第 3 章では，多目的最適化手法を用いて，垂直入射時及び斜入射時に広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM の設計を行った．これらは，NSGA-II を用いた最適設計手法であり，多目的関数のパレート解集合により一度の計算で結果が得られるだけでなく，その分布の中で，目的に応じて基準に見合う解を選定することができる点で優れている．一方で，最適解が確定値であるため，製作時に設計変数に誤差が生じた際，要求性能を満たすことが困難となる場合がある．そのため，状況次第では，設計変数に対してロバスト性があり，垂直入射時，斜入射時において広帯域特性を満たすことが必要となることから，本章ではロバスト設計手法を提案する．

ロバスト設計とは，設計変数やパラメータの変動区間において，その最悪値を取る場合でも制約条件を満たす設計領域において，目的関数の最悪値を改善する手法や目的関数の変動量を最小化する手法のことを言う．このロバスト設計により，垂直入射時及び斜入射時において広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM の設計を行う．最適設計と同様に，RAM 設計には均質材料でかつ等方性材料を用いることとする．

本章では，4.2 で広帯域特性を目的とした RAM のロバスト設計について説明する．その際，ロバスト設計の概念及び最適化手法について述べる．4.3 では，垂直入射時におけるロバスト設計について説明し，4.4 では，4.3 を応用して，斜入射時におけるロバスト設計について説明する．TM 波入射時，TE 波入射時それぞれの条件下で検討し，得られた結果について考察を行う．4.5 で本章のまとめとする．

4.2 広帯域特性を目的とした RAM のロバスト設計

4.2.1 ロバスト設計の概念

図 4.1 に，ロバスト設計と最適設計の比較を概念図で示す．図 4.1 で，最適設

計における目的関数の変動を黒の破線、ロバスト設計における目的関数の変動を緑の実線で示す。最適設計の場合、 F_{opt} は設計変数が最適解を取る時に得られる目的関数の最良値である。設計変数が Δx_0 の範囲で変動した時、最悪値を取る場合と F_{opt} との差を $\Delta F(x_{\text{opt}})$ とする。次に、ロバスト設計の場合、 F_{robust} は目的関数の平均値であり、設計変数が Δx_0 の範囲で変動する時、最悪値を取る場合と F_{robust} との差を $\Delta F(x_{\text{robust}})$ とする。ここで、最適設計とロバスト設計を比較すると、 $\Delta F(x_{\text{opt}})$ に比べて $\Delta F(x_{\text{robust}})$ は小さい。このように、ロバスト設計は、設計変数の平均値 x_0 に対して目的関数が最大となる設計解ではなく、設計変数の変動区間内で目的関数の最小値が最大となる設計、すなわち、目的関数の平均値からの変動分 $\Delta F(x_{\text{robust}})$ が最小となる設計をロバスト設計解として選択する。そのため、ロバスト設計は、前述したように、設計変数の変動区間において、最悪値を取った場合でも制約条件を満たす設計領域において、目的関数の最悪値を最大化する問題、あるいは目的関数の変動量を最小化する問題として定式化することができる[87]–[89]。

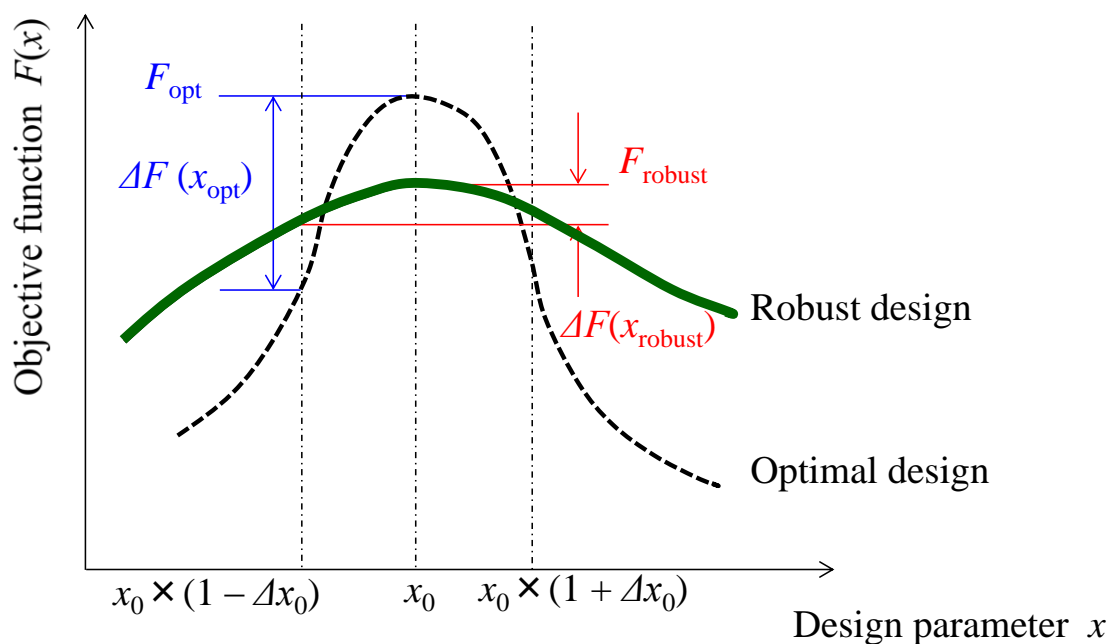


図 4.1 ロバスト設計と最適設計の比較(概念図).

4.2.2 最適化手法

図 4.2 に誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM の構成及び設計変数を示す．設計変数は，1 GHz における各層の比誘電率実部，1 GHz における各層の比誘電率虚部，各比誘電率実部及び比誘電率虚部に対する減衰係数，そして厚さの計 10 個である．これらは第 2 章及び第 3 章で使用した設計変数 X と等しいが，本章では設計変数の変動倍率や平均値等を考慮するため，設計変数を x で表し，区別する．表 4.1 に設計変数の範囲を示す．ここでは，厚さの合計値に対する制約は設けない．本章で検討する 2 層平板型 RAM の構成は，第 2 章で使用了したものと同じである．また， Wa の算出式は，第 2 章及び第 3 章で用いた式を使用し，

$$FI(x) = Wa \quad (4.1)$$

とする．

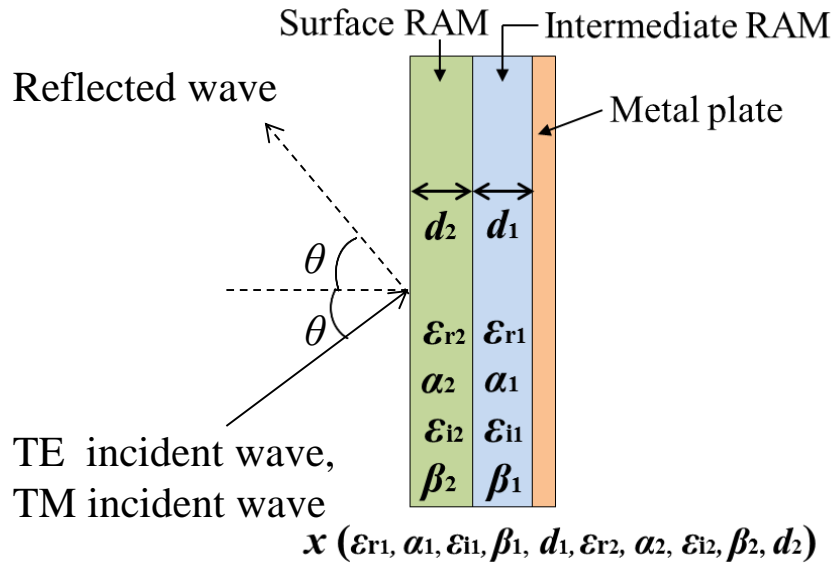


図 4.2 誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM の構成及び設計変数.

表 4.1 設計変数の範囲.

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α_1 | ϵ_i (1 GHz) | β_1 | d [mm] |
|--------------|-------------------------|------------|-------------------------|-----------|-------------|
| Intermediate | 1–20 | 0–1 | 0–20 | 0–1 | 1–20 |
| Surface | 1–20 | 0–1 | 0–20 | 0–1 | 1–20 |

設計変数 x に対して、設計変数の平均値を x_0 、設計変数のばらつきを示す変動倍率を 3σ とし、 3σ に対する変数を u とすると、目的関数 $F(x_0)$ は、式(4.2)で表され Wa の最小値を最大化する問題として定式化することができる。このとき、設計変数 x は式(4.3)で表される範囲で変動する。

$$\text{Maximize: } F(x_0) = \min\{FI(x) \mid x \in [x_0 \times (1 - 3\sigma) \leq x \leq x_0 \times (1 + 3\sigma)]\} \quad (4.2)$$

$$x = x_0 \times (1 + 3\sigma \times u), \quad -1 \leq u \leq 1 \quad (4.3)$$

ここで、設計変数の選択について説明する。一例として、設計変数 x_k が 2 個、すなわち x_1, x_2 の場合を示す。設計変数の変動倍率を 3σ とし、 3σ に対する変数 u が -1 から $+1$ の範囲で動くため、設計変数 x_k は平均値 x_{k0} から 3σ の範囲で動くことができる。ロバスト設計における最適化では、まず変数 u が目的関数に対して最悪値を取るように最適化される。次に、平均値 x_{k0} は最悪値を取る u の値を乗じた場合でも、目的関数が最良値を取るように最適化される。

図 4.3 に、設計変数の変動範囲を示す。このとき、2 つの設計変数の変動範囲そのものは等しいが、正方形で示される変動範囲の四隅の箇所(×印の箇所)は、2 つの設計変数が平均値から最も離れたポイントであり、確率的には起こりにくい箇所である。しかしながら、ロバスト設計は目的関数の最悪値を良くするよう最適化されるため、最悪値を取るこの 4 点のみを比較することになり、現実的とは言えない。

そこで、変数 u に対して、式(4.4)で表される制約条件を付加する。

$$(u_1)^2 + (u_2)^2 \leq 1 \quad (4.4)$$

その結果、設計変数の変動範囲は円となり、2 個の設計変数の変動の限界が確率的に等しくなる。これにより、変動範囲内の解全体が良くなるよう、設計変数を選択することが可能となる。図 4.4 に、制約条件を付加した後の設計変数の変動範囲を示す。変数 u が最悪値を取る時を×印で示しており、この値がより良い値になる変動範囲をさらに探索し、解全体が良くなるよう、設計変数は選択される。

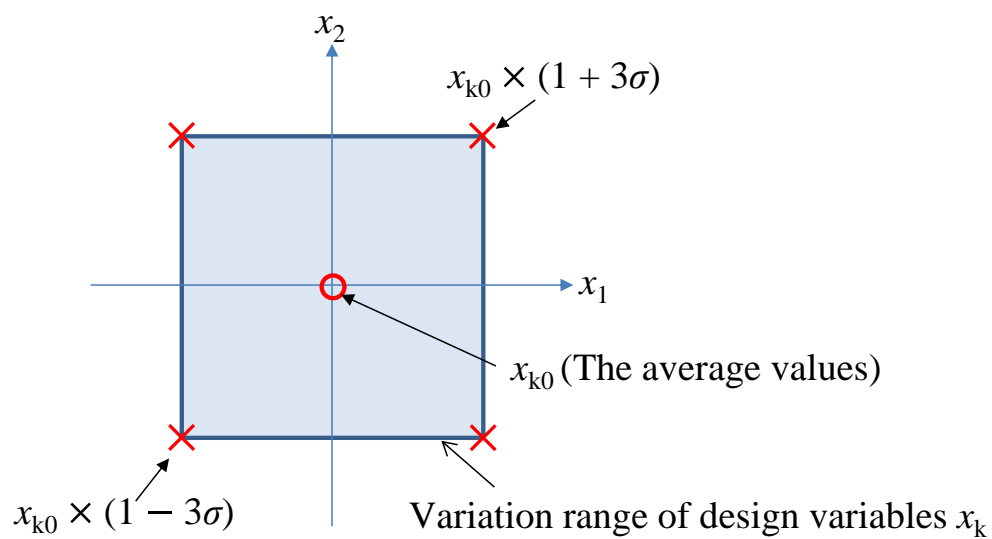


図 4.3 設計変数の変動範囲.

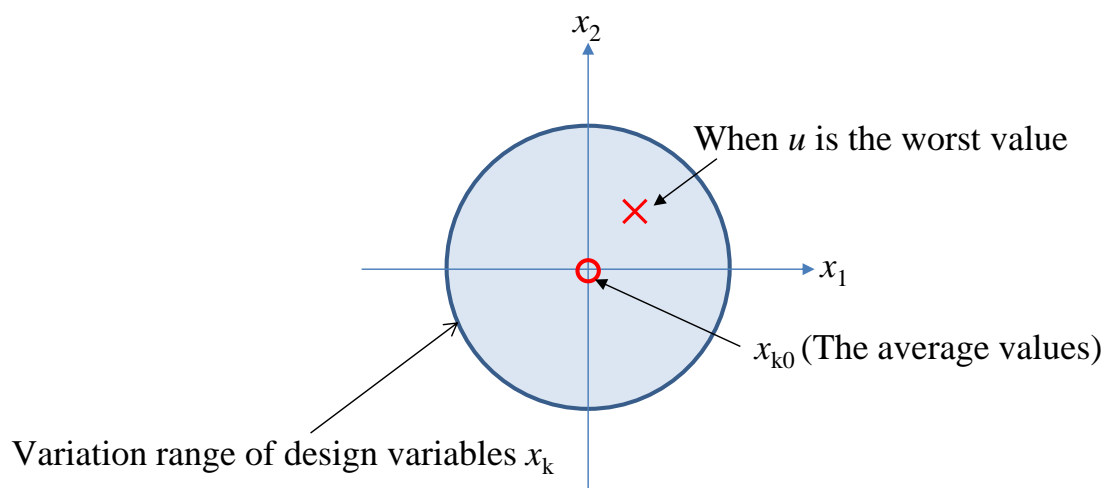


図 4.4 制約条件を付加した後の設計変数の変動範囲.

次に、設計変数の変動倍率 3σ の設定方法について述べる．変動倍率 3σ は自由に値を設定することができる．ここで、設計変数は、前述したように、1 GHz における各層の比誘電率実部、1 GHz における各層の比誘電率虚部、各比誘電率実部及び比誘電率虚部に対する減衰係数、そして厚さの計 10 個である．このうち、減衰係数に対しては変動倍率を考えず、1 GHz における各層の比誘電率実部、1 GHz における各層の比誘電率虚部及び厚さの計 6 個の設計変数に対して変動倍率を与える．ロバスト設計は、製作時に誤差が生じた場合にも、要求性能を満たすことを可能にする設計手法であるが、厚さについては、製作時の誤差は最大でも 5 % 以内に収まると考え、厚さの変動倍率 3σ は 0.05 を基準とする．一方、比誘電率実部及び比誘電率虚部の変動倍率の許容値は大きいほど、RAM の製作が容易になるため、それらの値を変動させ、検討する．

目的関数の最悪値を最大化する問題には、制約付き非線形多変数関数の最小値を求める関数 (fmincon) [90] が適している．その最適化手法は、計算周波数を 3.0～20.0 GHz まで 0.25 GHz 刻みで指定し、指定した周波数において得られる W_a の最悪値、すなわち最小値に着目し、その最小値を最大化する手法である．図 4.5 に最適化手法の概念図を示す．

加えて、設計変数を算出する最適化計算において、局所解に陥らないためには、初期点の設定が重要となる．そこで、Hammersley 法[91]を用いて、設計変数内で満遍なく散らばるように、初期点の候補を 30 点決定し、その中で最も良い解が得られた初期点を採用する．図 4.6 に Hammersley 法の一例を示す．これは変数 2 個(2 次元)に対して、それらの制約条件を 0～1 とし、サンプル数を 20 点出したものである．本論文では、全設計変数 10 個に対してサンプル数 30 点とし、設定した計算周波数範囲において W_a の最小値が最も大きくなる点を初期点として選択する．

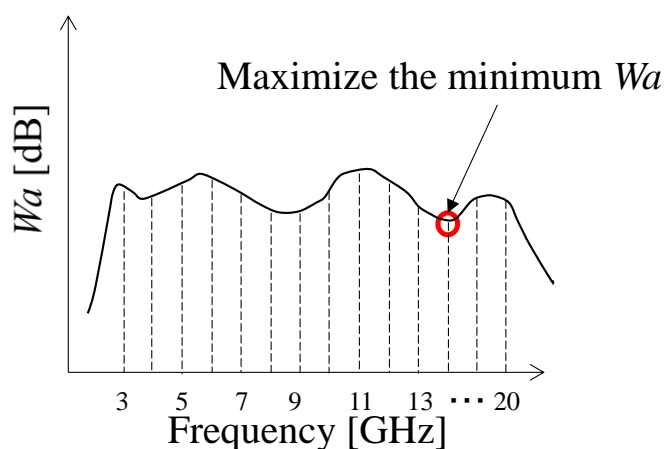


図 4.5 最適化手法の概念図．

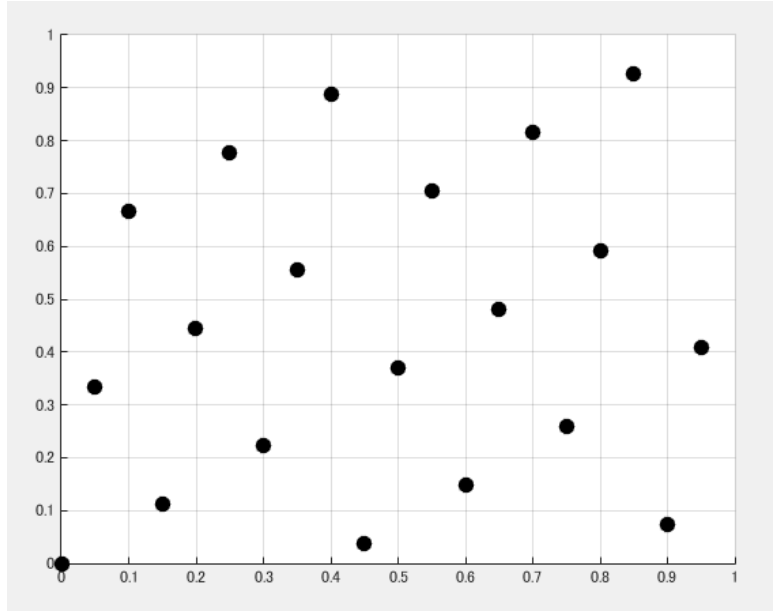


図 4.6 Hammersley 法の一例.

4.3 垂直入射時におけるロバスト設計

垂直入射時における 2 層平板型 RAM のロバスト設計を行う．表 4.2 に，設計変数の変動倍率 3σ の設定条件を示す．この際，ロバスト設計の効果を確認するため，変動倍率 3σ を 0 として最適化した，確定値を求める最適設計と比較する．まず， $3\sigma=0$ とした条件下で，最適化を行う．計算周波数については前述したように，3.0～20.0 GHz まで 0.25 GHz 刻みとする．最適設計の結果を以下に示す．表 4.3 に，図 4.1 の概念図でピーク箇所に値する最も良い結果である F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} を示す．括弧内に示す値は， x_{best1} から表 4.2 の変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である．この範囲内において，目的関数に対して最悪値を与える設計変数を x_{worst1} とし，表 4.4 に示す．

表 4.2 設計変数の変動倍率 3σ の設定条件.

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 0.3 | 0 | 0.3 | 0 | 0.05 |
| Surface | 0.3 | 0 | 0.3 | 0 | 0.05 |

表 4.3 F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 1.5088 (1.06~1.96) | 0.9997 | 7.3303 (5.14~9.52) | 0.5226 | 11.1 (10.5~11.6) |
| Surface | 9.5519 (6.69~12.41) | 0.9014 | 2.4410 (1.71~3.17) | 0.6660 | 6.5 (6.18~6.82) |

表 4.4 F_{opt} から 3σ を与えた時に最悪値となる設計変数 x_{worst1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 1.4866 | 0.9997 | 7.7265 | 0.5226 | 11.1 |
| Surface | 6.7743 | 0.9014 | 2.3768 | 0.6660 | 6.5 |

次に、ロバスト設計の結果を示す．設計変数に表 4.2 に示す 3σ の変動倍率を持たせて最適化を行う．表 4.5 に、図 4.1 の概念図で変動区間内の平均値である F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} を示す．括弧内に示す値は、 x_{best2} から変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である．なお、これらの値は表 4.1 に示す設計変数の範囲から上限値、下限値を考慮している．表 4.6 に、変動範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数 x_{worst2} を示す．

表 4.5 F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 1.3218 (1~1.71) | 0.8911 | 6.6826 (4.68~8.68) | 0.8179 | 14.8 (14.1~15.5) |
| Surface | 9.1561 (6.41~11.9) | 0.8795 | 2.5529 (1.79~3.32) | 0.5987 | 5.2 (4.94~5.46) |

表 4.6 最悪値となる設計変数 x_{worst2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 1.3354 | 0.8911 | 6.5942 | 0.8179 | 14.8 |
| Surface | 7.2211 | 0.8795 | 3.0924 | 0.5987 | 5.2 |

図 4.7 に、最適設計の結果として、表 4.3 及び表 4.4 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。また、図 4.8 にロバスト設計の結果として、表 4.5 及び表 4.6 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。これらは、周波数に対する W_a の推移を示している。図 4.7 及び図 4.8 内に緑色で示す計算周波数 3.0~20.0 GHz の範囲において、最適設計では x_{best1} の W_a の最小値は周波数 3.0 GHz の時に 28.6 dB であるのに対して、 x_{worst1} の最小値は、周波数 3.0 GHz の時に 13.1 dB である。一方、ロバスト設計では、 x_{best2} の W_a の最小値は周波数 20.0 GHz の時に 20.2 dB であるのに対して、 x_{worst2} の最小値は、周波数 20.0 GHz の時に 15.2 dB である。 W_a の最悪値を最大化する問題であるため、両者の最悪値を比較すると、最適設計の方が劣り、ロバスト設計の方が優れていることを確認できる。加えて、最適設計の場合、最適値 x_{best1} に変動倍率 3σ を与えると、周波数特性の形状は大きく変化し、 W_a は大きく劣化することが分かる。また、変動倍率 3σ の有無で、 W_a の最悪値の差を比較すると、最適設計では 15.5 dB であるのに対し、ロバスト設計では 5.0 dB と小さいことを確認できる。さらに、10 dB を W_a の指標とした場合、10 dB を満たす最小周波数は最適設計では 2.39 GHz であるのに対し、ロバスト設計では 1.96 GHz であり、ロバスト設計の方がより広帯域特性を満たしていると言える。以上より、垂直入射時に広帯域特性を満たす 2 層平板型 RAM のロバスト設計を達成することができたと言える。

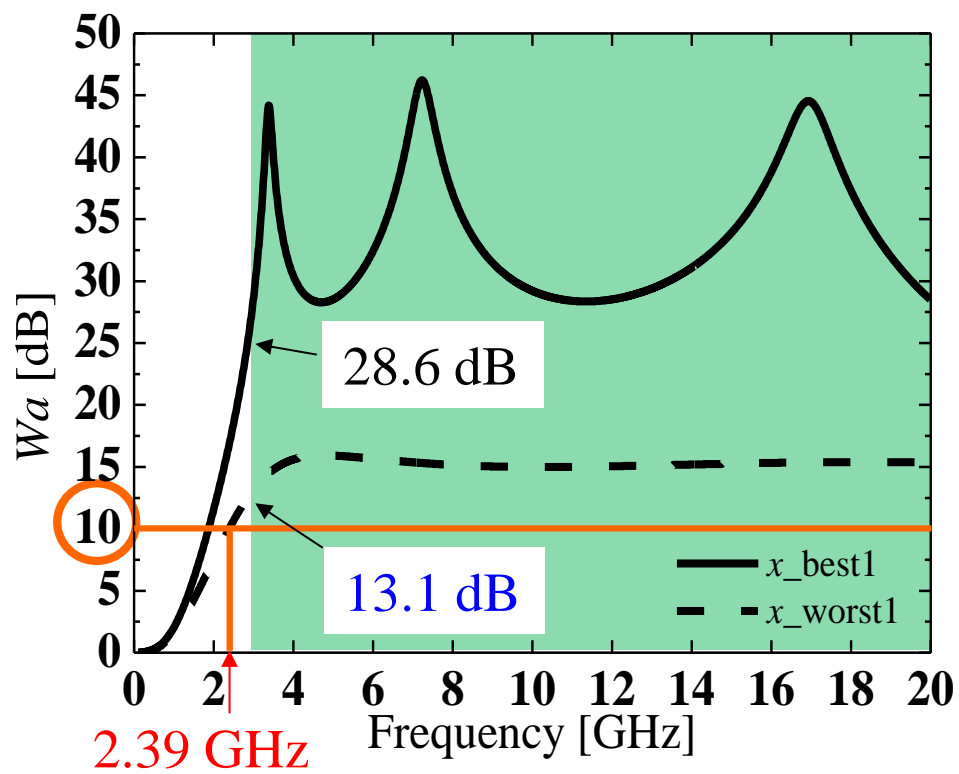


図 4.7 最適設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性.

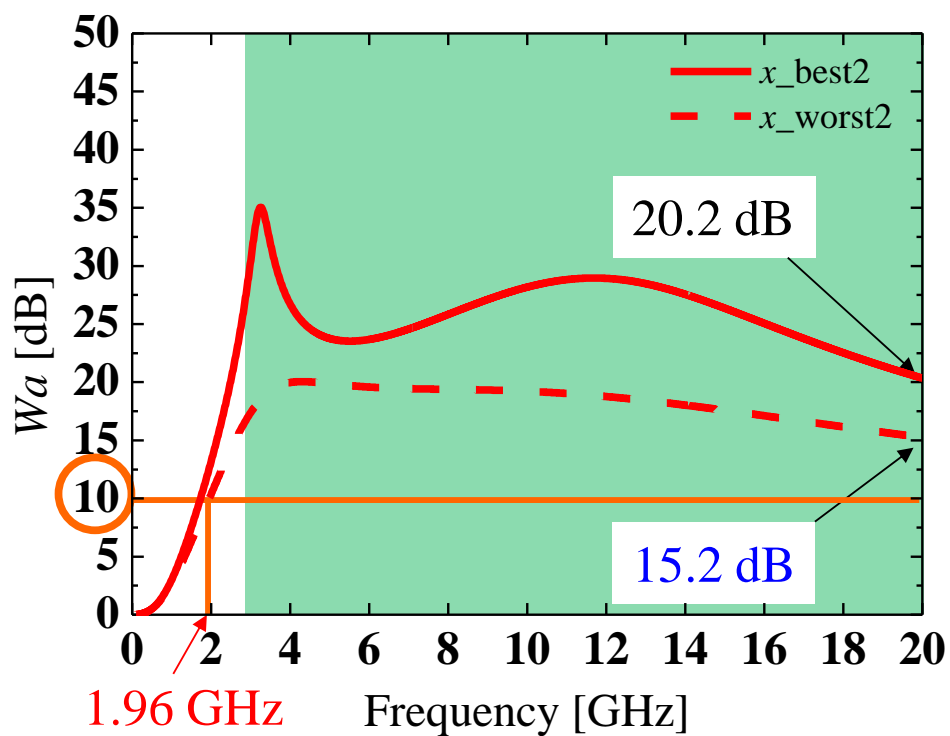


図 4.8 ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性.

次に、 W_a の最小値を 10 dB 及び 20 dB とし、それらに対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値を算出する。これにより、2 層平板型 RAM を製作する上で、変動倍率 3σ の指標を得ることができる。製作時に厚さに誤差が生じる時、最大でも 5 % 以内に収まると考え、厚さの変動倍率 3σ は 0.05 に固定する。

まず、垂直入射時、最小値が 10 dB 及び 20 dB となる W_a に対して、比誘電率実部及び比誘電率虚部の変動倍率 3σ を変化させ、その限界値を確認する。

設計変数の変動倍率 3σ を変化させた結果、最小値が 10 dB となる W_a に対して、表 4.7 に示す変動倍率が限界値として得られる。

表 4.7 10 dB の W_a に対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値.

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 0.483 | 0 | 0.483 | 0 | 0.05 |
| Surface | 0.483 | 0 | 0.483 | 0 | 0.05 |

表 4.8 に、最適設計のピーク箇所に値する最も良い結果である F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best1} から表 4.7 の変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である。なお、設計変数の範囲から上限値、下限値を考慮している。この範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数を x_{worst1} とし、表 4.9 に示す。

表 4.8 F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} .

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 1.5088 (1~2.23) | 0.9997 | 7.3303 (3.79~10.87) | 0.5226 | 11.1 (10.5~11.6) |
| Surface | 9.5519 (4.94~14.16) | 0.9014 | 2.4410 (1.26~3.62) | 0.6660 | 6.5 (6.18~6.82) |

表 4.9 x_{best1} から 3σ を与えた時に最悪値となる設計変数 x_{worst1} .

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 1.4722 | 0.9997 | 7.8122 | 0.5226 | 11.1 |
| Surface | 5.0383 | 0.9014 | 2.2926 | 0.6660 | 6.5 |

次に、ロバスト設計の結果を示す．表 4.10 に、変動区間内の平均値である F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} を示す．括弧内に示す値は、 x_{best2} から変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲であり、設計変数の範囲から上限値、下限値を考慮している．表 4.11 に、変動範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数 x_{worst2} を示す．

表 4.10 F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 1.5168 (1~2.24) | 0.9913 | 7.3225 (3.79~10.85) | 0.5298 | 11.3 (10.7~11.8) |
| Surface | 9.5571 (4.94~14.17) | 0.8956 | 2.4558 (1.27~3.64) | 0.6612 | 6.5 (6.18~6.82) |

表 4.11 最悪値となる設計変数 x_{worst2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 1.4804 | 0.9913 | 7.8467 | 0.5298 | 11.2 |
| Surface | 5.0428 | 0.8956 | 2.3177 | 0.6612 | 6.5 |

図 4.9 に、最適設計の結果として、表 4.8 及び表 4.9 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す．また、図 4.10 にロバスト設計の結果として、表 4.10 及び表 4.11 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す．図 4.9 及び図 4.10 内に緑色で示す計算周波数 3.0~20.0 GHz の範囲において、最適設計では x_{best1} の W_a の最小値は周波数 3.0 GHz の時に 28.3 dB であるのに対して、 x_{worst1} の最小値は、周波数 3.0 GHz の時に 9.69 dB である．一方、ロバスト設計では、 x_{best2} の W_a の最小値は周波数 4.66 GHz の時に 26.3 dB であるのに対して、 x_{worst2} の最小値は、周波数 3.0 GHz の時に 9.91 dB である．先程と同様に、両者の最悪値を比較すると、最適設計の方が劣り、ロバスト設計の方が優れていることを確認できる．加えて、10 dB 以上の W_a に対して、最適設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 146.17 % であり、ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 147.07 % である．すなわち、10 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最適設計の場合、最小周波数に対して 6.43 倍であり、ロバ

スト設計の場合 6.55 倍である．これらの結果は，ロバスト設計の方が広帯域特性に優れていることを示している．

以上より， W_a の最小値を 10 dB とした場合，比誘電率実部及び比誘電率虚部は 48.3 % まで，厚さについては 5 % まで変動可能であることが分かる．

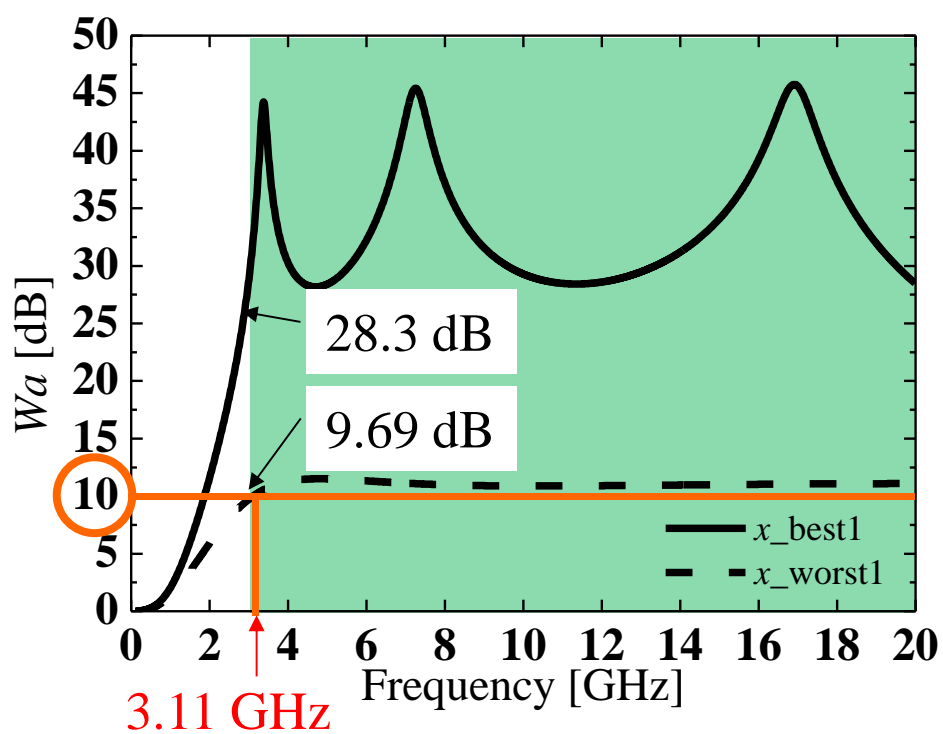


図 4.9 最適設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(10 dB を指標とした時).

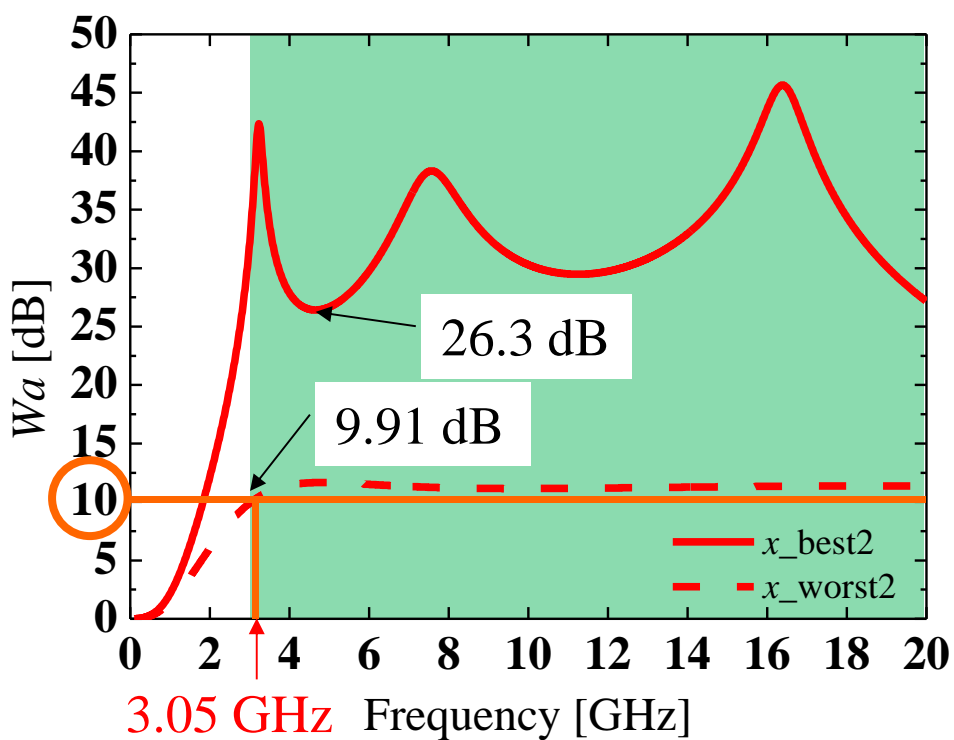


図 4.10 ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(10 dB を指標とした時).

同様に、最小値が 20 dB となる W_a に対して、表 4.12 に示す変動倍率が限界値として得られる。

表 4.12 20 dB の W_a に対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値.

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 0.13 | 0 | 0.13 | 0 | 0.05 |
| Surface | 0.13 | 0 | 0.13 | 0 | 0.05 |

表 4.13 に、最適設計のピーク箇所に値する最も良い結果である F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best1} から表 4.12 の変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である。この範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数を x_{worst1} とし、表 4.14 に示す。

表 4.13 F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 1.5088 (1.31~1.70) | 0.9997 | 7.3303 (6.38~8.28) | 0.5226 | 11.1 (10.5~11.6) |
| Surface | 9.5519 (8.31~10.79) | 0.9014 | 2.4410 (2.13~2.75) | 0.6660 | 6.5 (6.18~6.82) |

表 4.14 x_{best1} から 3σ を与えた時に最悪値となる設計変数 x_{worst1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 1.4997 | 0.9997 | 7.5042 | 0.5226 | 11.1 |
| Surface | 8.4183 | 0.9014 | 2.4203 | 0.6660 | 6.4 |

次に、ロバスト設計の結果を示す。表 4.15 に、変動区間内の平均値である F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best2} から変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である。表 4.16 に、変動範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数 x_{worst2} を示す。

表 4.15 F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 2.3561 (2.05~2.66) | 0.9335 | 6.9893 (6.08~7.89) | 0.5384 | 12.3 (11.7~12.9) |
| Surface | 8.9589 (7.80~10.12) | 0.8689 | 2.5596 (2.23~2.89) | 0.6939 | 6.1 (5.80~6.40) |

表 4.16 最悪値となる設計変数 x_{worst2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 2.3957 | 0.9335 | 6.6887 | 0.5384 | 12.4 |
| Surface | 9.6832 | 0.8689 | 2.7666 | 0.6939 | 6.2 |

図 4.11 に、最適設計の結果として、表 4.13 及び表 4.14 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。また、図 4.12 にロバスト設計の結果として、表 4.15 及び表 4.16 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。図 4.11 及び図 4.12 内に緑色で示す計算周波数 3.0~20.0 GHz の範囲において、最適設計では x_{best1} の Wa の最小値は周波数 3.0 GHz の時に 28.3 dB であるのに対して、 x_{worst1} の最小値は、周波数 3.0 GHz の時に 18.43 dB である。一方、ロバスト設計では、 x_{best2} の Wa の最小値は周波数 4.40 GHz の時に 23.97 dB であるのに対して、 x_{worst2} の最小値は、周波数 4.35 GHz の時に 20.04 dB である。この結果からも、両者の最悪値を比較すると、最適設計の方が劣り、ロバスト設計の方が優れていることを確認できる。加えて、20 dB 以上の Wa に対して、最適設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 144.67 % であり、ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 160.52 % である。すなわち、20 dB 以上の Wa を満たす上限周波数は、最適設計の場合、最小周波数に対して 6.23 倍であり、ロバスト設計の場合 9.13 倍である。これらの結果は、ロバスト設計の方が広帯域特性に優れていることを示している。

以上より、 Wa の最小値を 20 dB とした場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 13.0 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であることが確認できる。

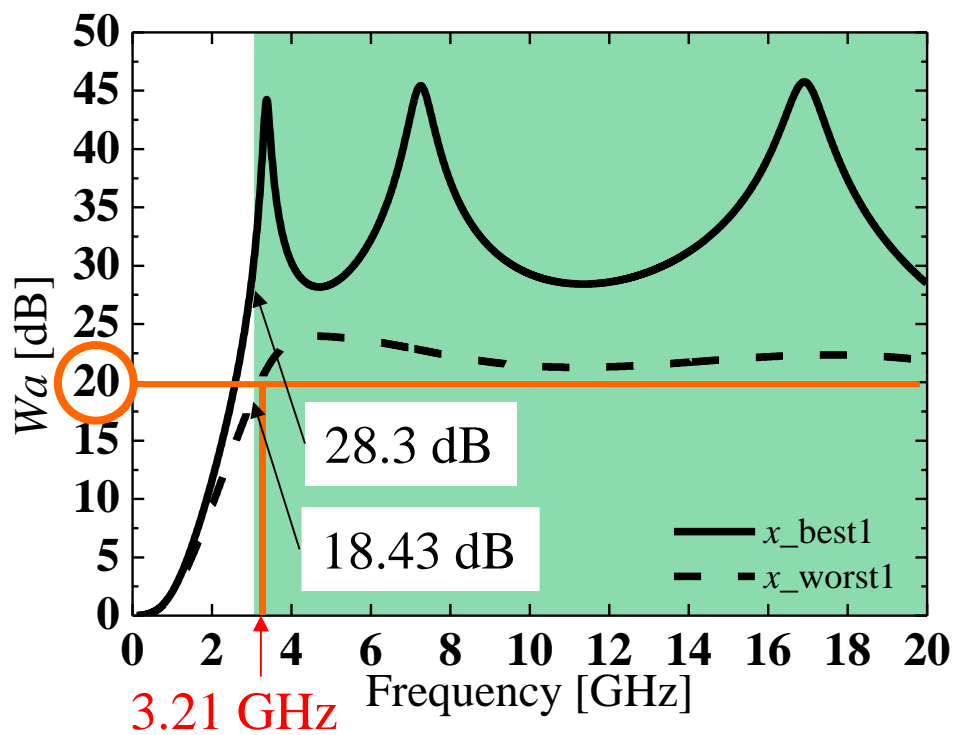


図 4.11 最適設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(20 dB を指標とした時).

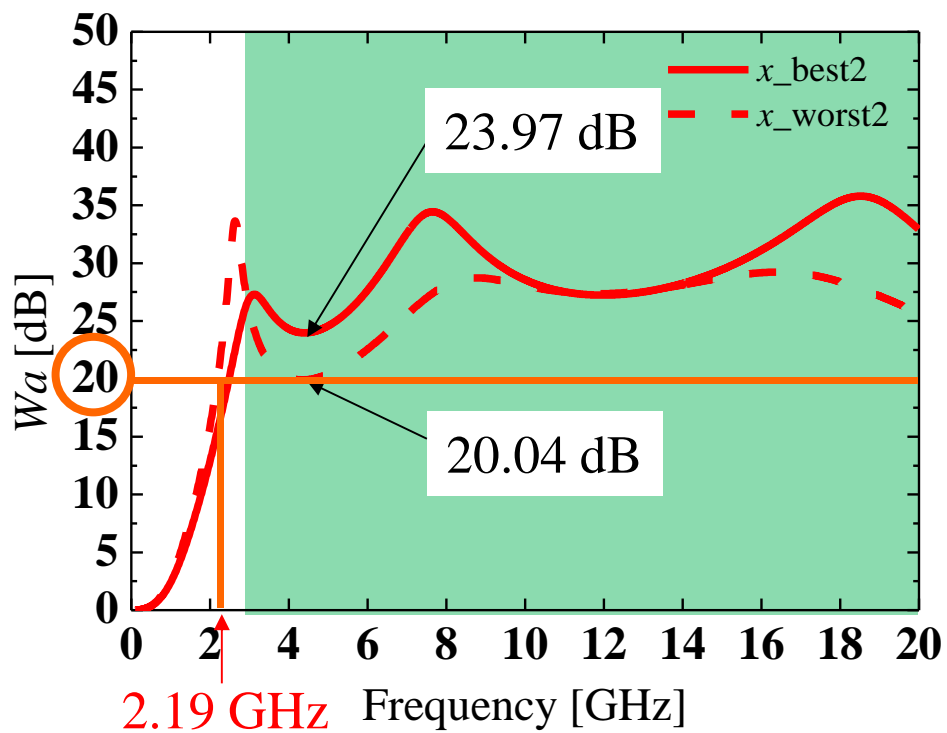


図 4.12 ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(20 dB を指標とした時).

ここで、設計変数に関する考察を行う．表 4.13 及び表 4.14 が示す、最適設計で得られた設計変数 x_best1 と x_worst1 を比較すると、両者の値は近似している．このうち、違いが見られるのは、吸収層の比誘電率虚部及び表面層の比誘電率実部の 2 箇所である．そこで、この 2 つの設計変数を x_best1 と x_worst1 の間に入れ替えることで、それぞれの設計変数が W_a に与える影響を確認する．

図 4.13 に、設計変数を入れ替えた前後で比較した 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す．黒色が x_best1 の場合、緑色が x_worst1 、そして青色が x_best1 の吸収層の比誘電率虚部を x_worst1 の値に変えた場合、赤色が x_best1 の表面層の比誘電率実部を x_worst1 の値に変えた場合の結果である．青線は黒線と比較して周波数特性の形状に大きな変化は見られないが、一方で、赤線は緑線に近い形状へと変化し、 W_a が大きく劣化していることが分かる．このことから、表面層の比誘電率実部は、入射面から吸収層に対して整合する役割が大きく、他の設計変数よりも W_a へ与える影響が大きいと言える．

したがって、表面層の比誘電率実部が 3σ の範囲で変化しても、周波数特性が変わらない範囲に、表面層の比誘電率実部の平均値を選択することで、ロバスト設計を実現できると言える．

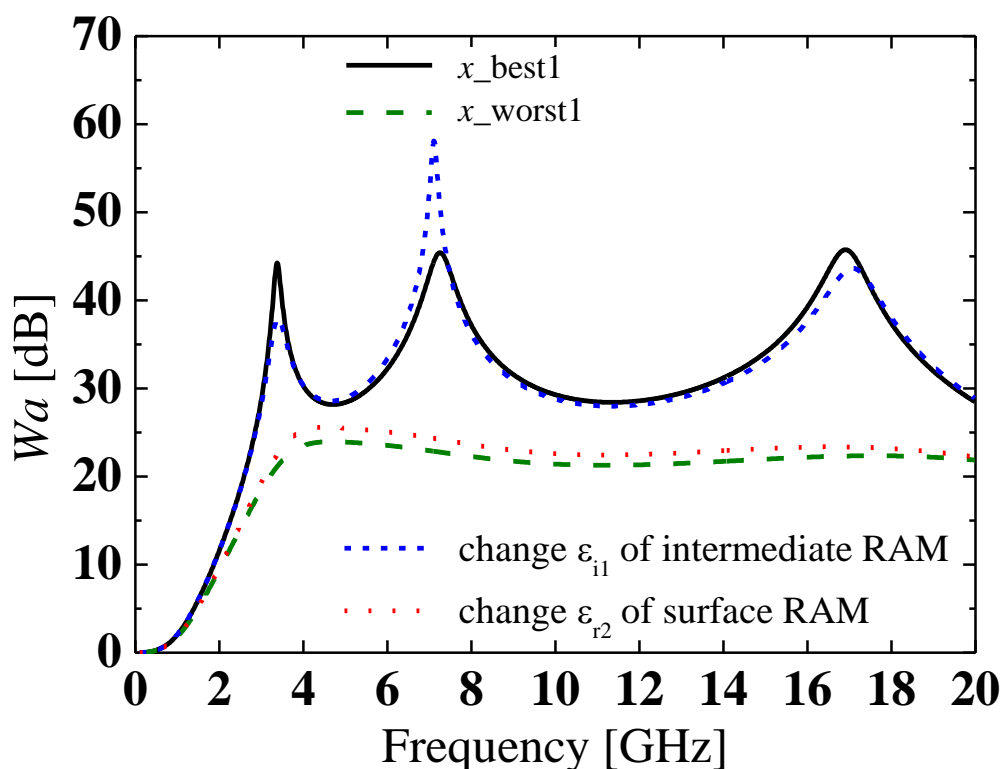


図 4.13 設計変数を入れ替えた前後で比較した 2 層平板型 RAM の周波数特性.

2層平板型 RAM を製作する上で、変動倍率 3σ の指標を得るため、他の Wa に対しても同様の方法で変動倍率 3σ の限界値を確認し、その結果を図 4.14 に示す。このとき、厚さの変動倍率 3σ は 0.05 に固定している。図 4.14 において、プロットした点を近似すると、次式で示される直線で表される。

$$Wa = -28.245 \times 3\sigma + 23.689 \quad (4.5)$$

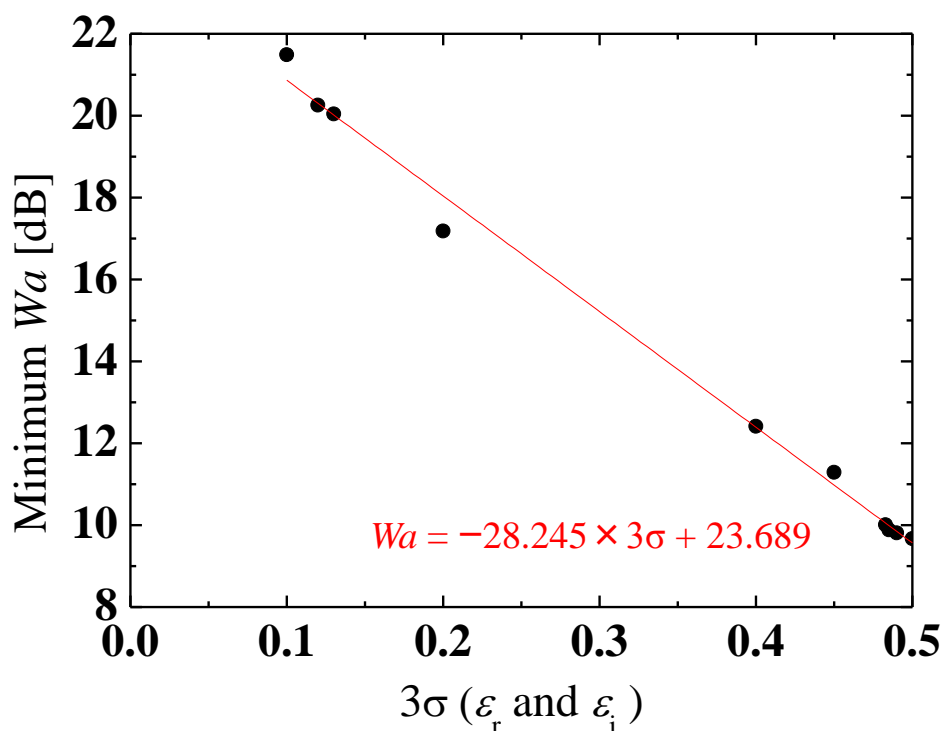


図 4.14 Wa の最小値に対する比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ の限界値 (垂直入射時).

この結果から、RAM を製作する際、必要な Wa の最小値に対して、比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ を求めることができ、それらの変動可能な範囲を知ることができる。これにより、製造誤差がその範囲内に含まれるかどうか判別することができ、RAM に求められる要求性能を確実に満たしているか確認することができる。

4.4 斜入射時におけるロバスト設計

4.3 項を応用して、連続した斜入射時における 2 層平板型 RAM のロバスト設計を行う。垂直入射時と同様に、ロバスト設計の効果を確認するため、変動倍率 3σ を 0 として最適化した、確定値を求める最適設計と比較する。なお、計算周波数については垂直入射時と同様に、3.0～20.0 GHz まで 0.25 GHz 刻みとする。TM 波入射時、TE 波入射時それぞれの場合で検討を行う。連続した斜入射時では、NSGA-II を用いた最適設計においても、 W_a の最小値が 20 dB 以上となる RAM を設計することは容易でないため、本検討では、 W_a の最小値を 10 dB 及び 15 dB とし、それらに対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値を算出する。これにより、2 層平板型 RAM を製作する上で、変動倍率 3σ の指標を得ることができる。

なお、厚さの変動倍率 3σ は 0.05 を基準とし、比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ が 0.05 以下となる場合のみ、厚さの変動倍率も変化させる。

4.4.1 TM 波入射時の斜入射特性の検討

連続した斜入射時、最小値が 10 dB 及び 15 dB となる W_a に対して、比誘電率実部及び比誘電率虚部の変動倍率 3σ を変化させ、その限界値を確認する。

設計変数の変動倍率 3σ を変化させた結果、最小値が 10 dB となる W_a に対して、表 4.17 に示す変動倍率が限界値として得られる。

表 4.17 10 dB の W_a に対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値。

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 0.435 | 0 | 0.435 | 0 | 0.05 |
| Surface | 0.435 | 0 | 0.435 | 0 | 0.05 |

表 4.18 に、最適設計のピーク箇所に値する最も良い結果である F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best1} から表 4.17 の変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である。なお、設計変数の範囲から上限値、下限値を考慮している。この範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数を x_{worst1} とし、表 4.19 に示す。

表 4.18 F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 5.6844 (3.22~8.15) | 0.9998 | 5.7779 (3.27~8.29) | 1 | 20.0 (19.0~20.0) |
| Surface | 1.8228 (1.03~2.61) | 0.2171 | 0.5707 (0.33~0.81) | 0.2518 | 20.0 (19.0~20.0) |

表 4.19 x_{best1} から 3σ を与えた時に最悪値となる設計変数 x_{worst1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 5.6845 | 0.9998 | 5.7780 | 1 | 20.0 |
| Surface | 1.0606 | 0.2171 | 0.5023 | 0.2518 | 20.0 |

次に、ロバスト設計の結果を示す．表 4.20 に、変動区間内の平均値である F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} を示す．括弧内に示す値は、 x_{best2} から変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である．なお、設計変数の範囲から上限値、下限値を考慮している．表 4.21 に、変動範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数 x_{worst2} を示す．

表 4.20 F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 5.7611 (3.26~8.26) | 0.3874 | 6.1808 (3.50~8.86) | 0.7424 | 20.0 (19.0~20.0) |
| Surface | 2.0779 (1.18~2.98) | 0.1596 | 2.8485 (1.61~4.08) | 0.5616 | 19.9 (18.9~20.0) |

表 4.21 最悪値となる設計変数 x_{worst2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 6.2648 | 0.3874 | 5.3368 | 0.7424 | 19.9 |
| Surface | 2.9146 | 0.1596 | 2.8646 | 0.5616 | 19.9 |

図 4.15 に、最適設計の結果として、表 4.18 及び表 4.19 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。また、図 4.16 にロバスト設計の結果として、表 4.20 及び表 4.21 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。それぞれ入射角 0 deg., 30 deg. 及び 60 deg. のときの結果を表示している。図 4.15 及び図 4.16 内に緑色で示す計算周波数 3.0~20.0 GHz の範囲において、最適設計では x_{best1} の W_a の最小値は周波数 6.73 GHz の時に 17.62 dB (入射角 0 deg.) であるのに対して、 x_{worst1} の最小値は、周波数 20.0 GHz の時に 6.37 dB (入射角 60 deg.) である。一方、ロバスト設計では、 x_{best2} の W_a の最小値は周波数 3.0 GHz の時に 12.04 dB (入射角 0 deg.) であるのに対して、 x_{worst2} の最小値は、周波数 4.43 GHz の時に 10.0 dB (入射角 0 deg.) である。垂直入射時の場合と同様に、両者の最悪値を比較すると、最適設計の方が劣り、ロバスト設計の方が優れていることを確認できる。加えて、10 dB 以上の W_a に対して、最適設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 118.30 % (1.73~6.74 GHz) であり、ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 155.55 % (2.50~20.0 GHz) である。すなわち、10 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最適設計の場合、最小周波数に対して 3.89 倍であり、ロバスト設計の場合 8.00 倍である。これらの結果は、ロバスト設計の方が広帯域特性に優れていることを示している。

以上より、 W_a の最小値を 10 dB とした場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 43.5 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であることが分かる。

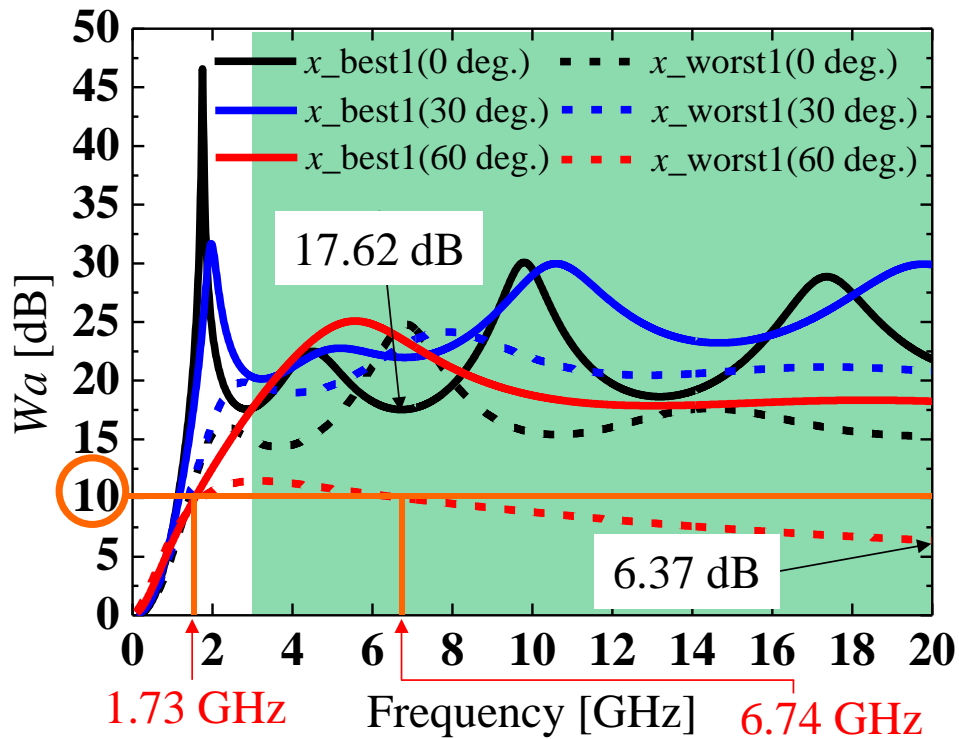


図 4.15 最適設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(10 dB を指標とした時).

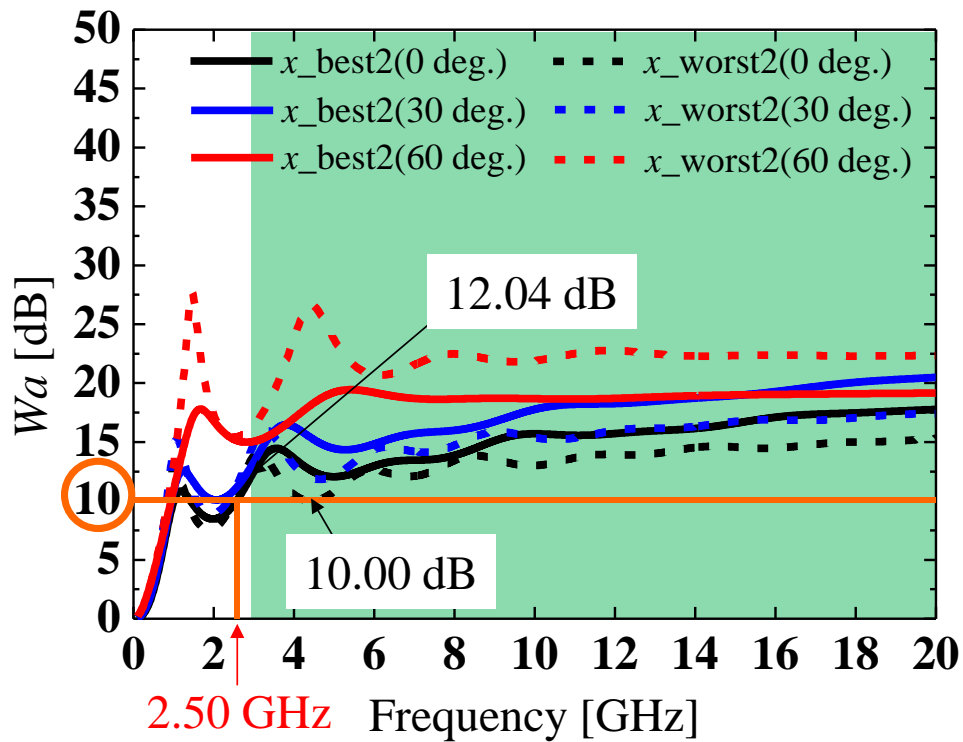


図 4.16 ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(10 dB を指標とした時).

同様に、最小値が 15 dB となる W_a に対して、表 4.22 に示す変動倍率が限界値として得られる。

表 4.22 15 dB の W_a に対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値.

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 0.099 | 0 | 0.099 | 0 | 0.05 |
| Surface | 0.099 | 0 | 0.099 | 0 | 0.05 |

表 4.23 に、最適設計のピーク箇所に値する最も良い結果である F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best1} から表 4.22 の変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である。なお、設計変数の範囲から上限値、下限値を考慮している。この範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数を x_{worst1} とし、表 4.24 に示す。

表 4.23 F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 5.6844 (5.13~6.24) | 0.9998 | 5.7779 (5.21~6.34) | 1 | 20.0 (19.0~20.0) |
| Surface | 1.8228 (1.64~2.00) | 0.2171 | 0.5707 (0.52~0.62) | 0.2518 | 20.0 (19.0~20.0) |

表 4.24 x_{best1} から 3σ を与えた時に最悪値となる設計変数 x_{worst1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 5.6828 | 0.9998 | 5.7771 | 1 | 20.0 |
| Surface | 1.6426 | 0.2171 | 0.5729 | 0.2518 | 20.0 |

次に、ロバスト設計の結果を示す。表 4.25 に、変動区間内の平均値である F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best2} から変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲であり、設計変数の範囲から上限値、下限値を考慮している。表 4.26 に、変動範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数 x_{worst2} を示す。

表 4.25 F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 5.6844 (5.13~6.24) | 0.9994 | 5.7770 (5.21~6.34) | 0.9989 | 20.0 (19.0~20.0) |
| Surface | 1.8324 (1.65~2.01) | 0.2177 | 0.5696 (0.52~0.62) | 0.2524 | 20.0 (19.0~20.0) |

表 4.26 最悪値となる設計変数 x_{worst2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 5.6890 | 0.9994 | 5.4486 | 0.9989 | 19.4 |
| Surface | 1.9365 | 0.2177 | 0.5762 | 0.2524 | 20.0 |

図 4.17 に、最適設計の結果として、表 4.23 及び表 4.24 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。また、図 4.18 にロバスト設計の結果として、表 4.25 及び表 4.26 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。それぞれ入射角 0 deg., 30 deg. 及び 60 deg. のときの結果を表示している。図 4.17 及び図 4.18 内に緑色で示す計算周波数 3.0~20.0 GHz の範囲において、最適設計では x_{best1} の W_a の最小値は周波数 6.73 GHz の時に 17.62 dB (入射角 0 deg.) であるのに対して、 x_{worst1} の最小値は、周波数 20.0 GHz の時に 15.11 dB (入射角 60 deg.) である。一方、ロバスト設計では、 x_{best2} の W_a の最小値は周波数 3.0 GHz の時に 17.58 dB (入射角 60 deg.) であるのに対して、 x_{worst2} の最小値は、周波数 3.0 GHz の時に 15.18 dB (入射角 0 deg.) である。この結果からも、両者の最悪値を比較すると、最適設計の方が劣り、ロバスト設計の方が優れていることを確認できる。加えて、15 dB 以上の W_a に対して、最適設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 152.57 % であり、ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 155.55 % である。すなわち、15 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最適設計の場合、最小周波数に対して 7.43 倍であり、ロバスト設計の場合 8.00 倍である。これらの結果は、ロバスト設計の方が広帯域特性に優れていることを示している。

以上より、 W_a の最小値を 15 dB とした場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 9.9 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であることが分かる。

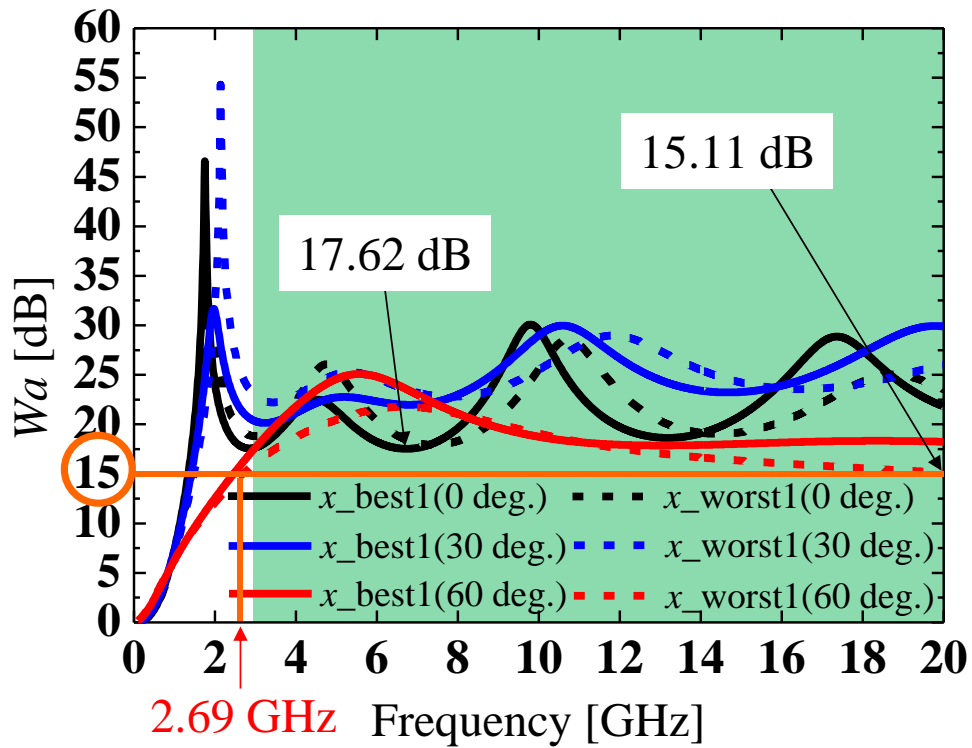


図 4.17 最適設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(15 dB を指標とした時).

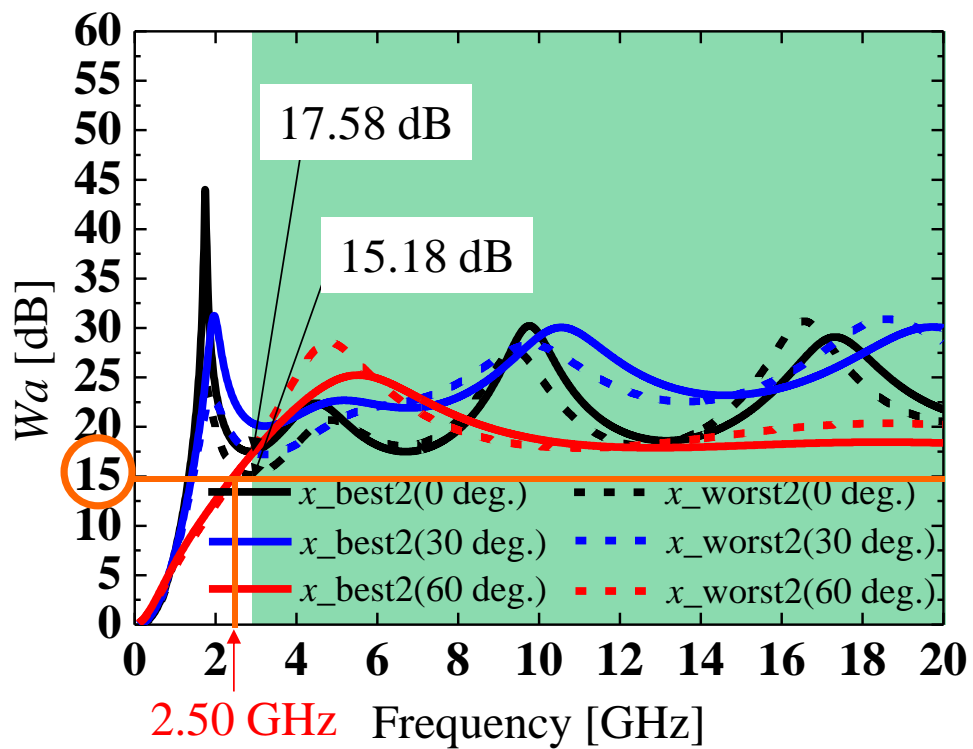


図 4.18 ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(15 dB を指標とした時).

2層平板型 RAM を製作する上で、変動倍率 3σ の指標を得るため、他の Wa に対しても同様の方法で変動倍率 3σ の限界値を確認し、その結果を図 4.19 に示す。ここで、比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ が 0.05 以下となる場合は、厚さの変動倍率 3σ についても 0.05 以下で設定している。TM 波入射時、最小値が 10 dB 及び 15 dB となる Wa に対して、比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ はそれぞれ 0.435, 0.099, 厚さの 3σ は 0.05 が限界値であることが分かる。しかしながら、連続した斜入射特性には限界があり、ロバスト設計において Wa の最小値が 20 dB を満たす RAM を設計することはできない。なお、 Wa の最小値において、ロバスト設計が可能な値は、最大で 17.5 dB であり、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さの 3σ の限界値は 0.005 である。

以上より、図 4.19 から、RAM を製作する際、必要な Wa の最小値に対して、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さの 3σ を求めることができ、それらの変動可能な範囲を知ることができる。これにより、製造誤差がその範囲内に含まれるかどうか判別することができ、RAM に求められる要求性能を確実に満たしているか確認することができる。

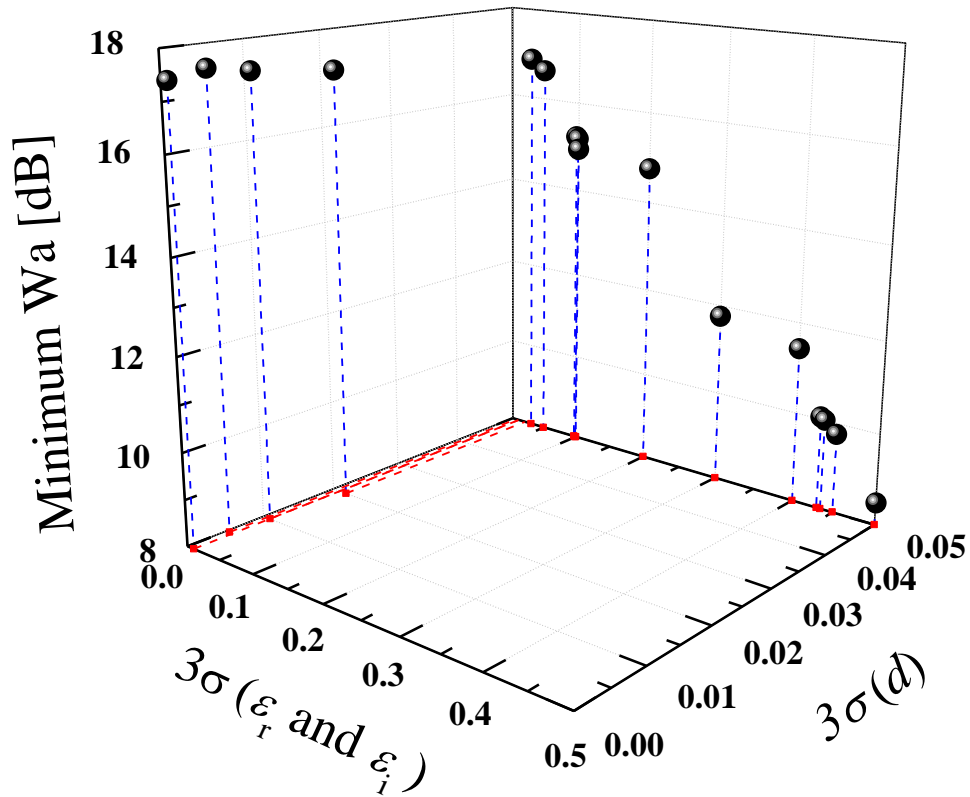


図 4.19 Wa の最小値に対する比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ の限界値 (TM 波入射時, 最大入射角 60 deg.).

4.4.2 TE 波入射時の斜入射特性の検討

TM 波入射時と同様の手法で，連続した斜入射時において，最小値が 10 dB 及び 15 dB となる W_a に対して，比誘電率実部及び比誘電率虚部の変動倍率 3σ を変化させ，その限界値を確認する．

設計変数の変動倍率 3σ を変化させた結果，最小値が 10 dB となる W_a に対して，表 4.27 に示す変動倍率が限界値として得られる．

表 4.27 10 dB の W_a に対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値．

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 0.15 | 0 | 0.15 | 0 | 0.05 |
| Surface | 0.15 | 0 | 0.15 | 0 | 0.05 |

表 4.28 に，最適設計のピーク箇所に値する最も良い結果である F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} を示す．括弧内に示す値は， x_{best1} から表 4.27 の変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である．この範囲内において，目的関数に対して最悪値を与える設計変数を x_{worst1} とし，表 4.29 に示す．

表 4.28 F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} ．

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 2.1634 (1.84~2.48) | 0.3975 | 3.3636 (2.86~3.86) | 0.6402 | 18.0 (17.1~18.9) |
| Surface | 3.0925 (2.63~3.55) | 0.4082 | 0.4386 (0.38~0.50) | 0.3177 | 8.4 (7.98~8.82) |

表 4.29 x_{best1} から 3σ を与えた時に最悪値となる設計変数 x_{worst1} ．

| RAM | ϵ_r (1 GHz) | α | ϵ_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 2.1648 | 0.3975 | 3.3758 | 0.6402 | 18.0 |
| Surface | 2.6307 | 0.4082 | 0.4329 | 0.3177 | 8.4 |

次に、ロバスト設計の結果を示す．表 4.30 に、変動区間内の平均値である F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} を示す．括弧内に示す値は、 x_{best2} から変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である．表 4.31 に、変動範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数 x_{worst2} を示す．

表 4.30 F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 2.5849 (2.20~2.97) | 0.6960 | 3.9264 (3.34~4.51) | 0.3109 | 12.7 (12.1~13.3) |
| Surface | 4.3958 (3.74~5.05) | 0.5166 | 1.5318 (1.31~1.76) | 0.7151 | 9.0 (8.55~9.45) |

表 4.31 最悪値となる設計変数 x_{worst2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 2.5586 | 0.6960 | 3.9463 | 0.3109 | 12.7 |
| Surface | 5.0294 | 0.5166 | 1.4763 | 0.7151 | 9.1 |

図 4.20 に、最適設計の結果として、表 4.28 及び表 4.29 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す．また、図 4.21 にロバスト設計の結果として、表 4.30 及び表 4.31 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す．それぞれ入射角 0 deg., 30 deg. 及び 60 deg. のときの結果を表示している．図 4.20 及び図 4.21 内に緑色で示す計算周波数 3.0~20.0 GHz の範囲において、最適設計では x_{best1} の W_a の最小値は周波数 10.86 GHz の時に 15.86 dB (入射角 0 deg.) であるのに対して、 x_{worst1} の最小値は、周波数 20.0 GHz の時に 7.48 dB (入射角 60 deg.) である．一方、ロバスト設計では、 x_{best2} の W_a の最小値は周波数 12.71 GHz の時に 12.52 dB (入射角 0 deg.) であるのに対して、 x_{worst2} の最小値は、周波数 12.35 GHz の時に 10.37 dB (入射角 30 deg.) である．TM 波入射時と同様に、両者の最悪値を比較すると、最適設計の方が劣り、ロバスト設計の方が優れていることを確認できる．加えて、10 dB 以上の W_a に対して、最適設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 139.60 % (2.68~15.07 GHz) であり、ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 157.78 % である．すなわち、10 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最適設計の場合、最小周波数に対して 5.62

倍であり，ロバスト設計の場合 8.47 倍である．これらの結果は，ロバスト設計の方が広帯域特性に優れていることを示している．

以上より， W_a の最小値を 10 dB とした場合，比誘電率実部及び比誘電率虚部は 15 % まで，厚さについては 5 % まで変動可能であることが分かる．

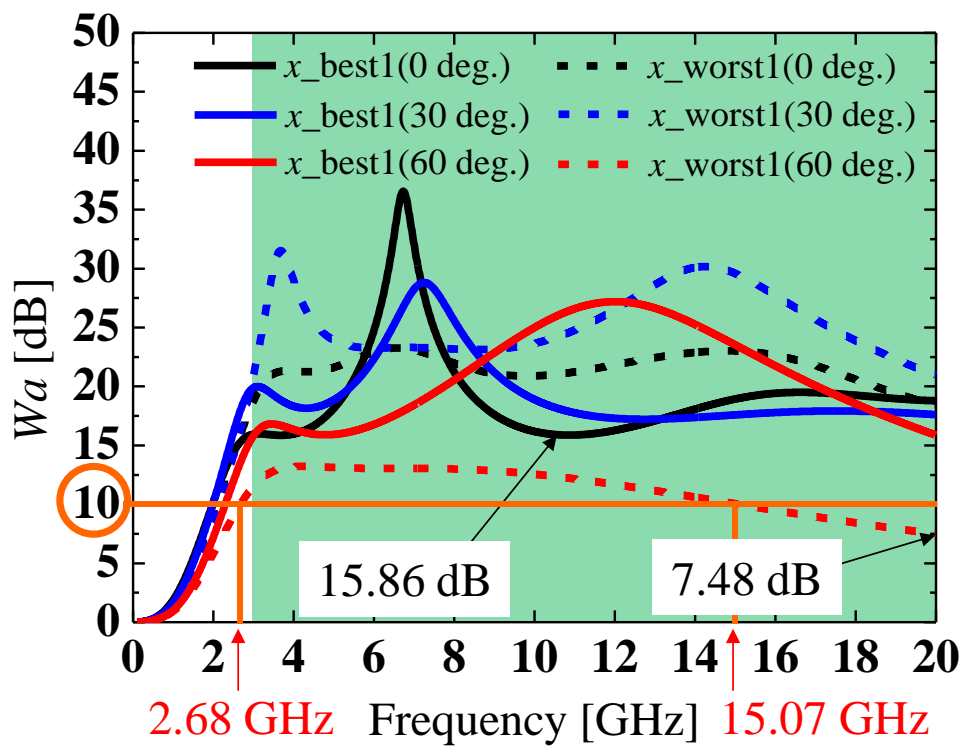


図 4.20 最適設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(10 dB を指標とした時).

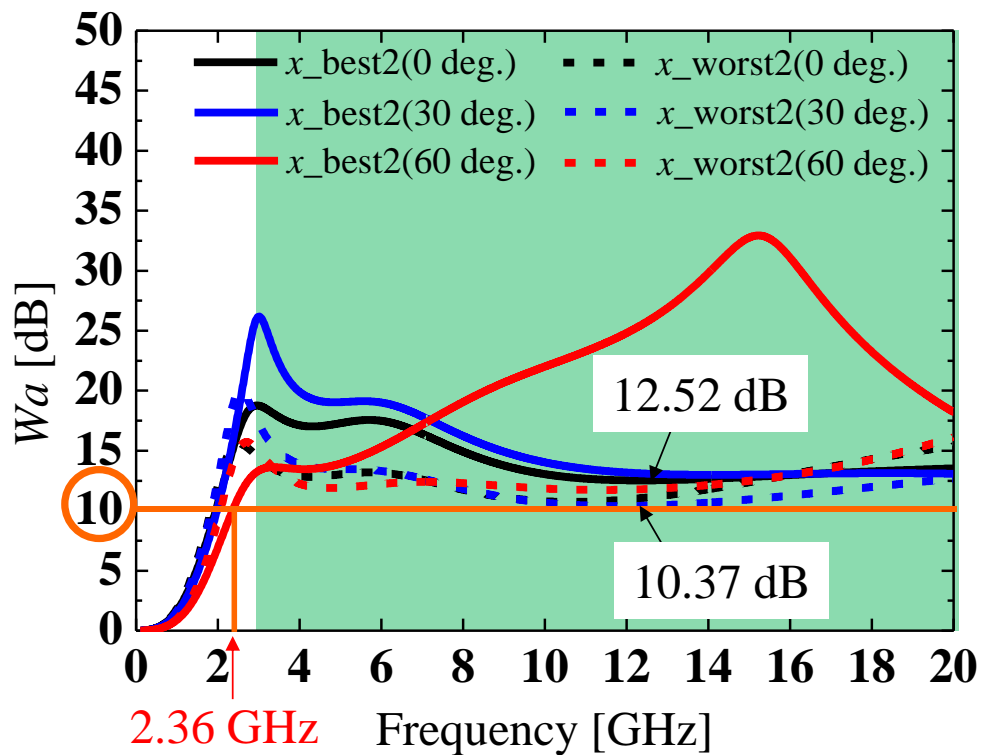


図 4.21 ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(10 dB を指標とした時).

同様に、最小値が 15 dB となる W_a に対して、表 4.32 に示す変動倍率が限界値として得られる。

表 4.32 15 dB の W_a に対する設計変数の変動倍率 3σ の限界値.

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 0.015 | 0 | 0.015 | 0 | 0.015 |
| Surface | 0.015 | 0 | 0.015 | 0 | 0.015 |

表 4.33 に、最適設計のピーク箇所に値する最も良い結果である F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best1} から表 4.32 の変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である。この範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数を x_{worst1} とし、表 4.34 に示す。

表 4.33 F_{opt} が得られる設計変数 x_{best1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 2.1634 (2.13~2.19) | 0.3975 | 3.3636 (3.31~3.41) | 0.6402 | 18.0 (17.8~18.2) |
| Surface | 3.0925 (3.04~3.13) | 0.4082 | 0.4386 (0.43~0.44) | 0.3177 | 8.4 (8.28~8.52) |

表 4.34 x_{best1} から 3σ を与えた時に最悪値となる設計変数 x_{worst1} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 2.1644 | 0.3975 | 3.3649 | 0.6402 | 18.0 |
| Surface | 3.0464 | 0.4082 | 0.4387 | 0.3177 | 8.4 |

次に、ロバスト設計の結果を示す。表 4.35 に、変動区間内の平均値である F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} を示す。括弧内に示す値は、 x_{best2} から変動倍率 3σ を与えた時に変動する範囲である。表 4.36 に、変動範囲内において、目的関数に対して最悪値を与える設計変数 x_{worst2} を示す。

表 4.35 F_{robust} が得られる設計変数 x_{best2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------|
| Intermediate | 2.1142 (2.09~2.14) | 0.4178 | 3.5065 (3.46~3.55) | 0.6538 | 17.5 (17.3~17.7) |
| Surface | 3.1649 (3.12~3.21) | 0.4156 | 0.5247 (0.52~0.53) | 0.3509 | 8.6 (8.5~8.7) |

表 4.36 最悪値となる設計変数 x_{worst2} .

| RAM | ε_r (1 GHz) | α | ε_i (1 GHz) | β | d [mm] |
|--------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------|-------------|
| Intermediate | 2.1162 | 0.4178 | 3.4803 | 0.6538 | 17.4 |
| Surface | 3.1886 | 0.4156 | 0.5245 | 0.3509 | 8.7 |

図 4.22 に、最適設計の結果として、表 4.33 及び表 4.34 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。また、図 4.23 にロバスト設計の結果として、表 4.35 及び表 4.36 の設計変数から成る 2 層平板型 RAM の周波数特性を示す。それぞれ入射角 0 deg., 30 deg. 及び 60 deg. のときの結果を表示している。図 4.22 及び図 4.23 内に緑色で示す計算周波数 3.0~20.0 GHz の範囲において、最適設計では x_{best1} の W_a の最小値は周波数 3.0 GHz の時に 15.86 dB (入射角 60 deg.) であるのに対して、 x_{worst1} の最小値は、周波数 20.0 GHz の時に 14.56 dB (入射角 60 deg.) である。一方、ロバスト設計では、 x_{best2} の W_a の最小値は周波数 3.0 GHz の時に 15.58 dB (入射角 60 deg.) であるのに対して、 x_{worst2} の最小値は、周波数 4.04 GHz の時に 15.06 dB (入射角 0 deg.) である。この結果からも、両者の最悪値を比較すると、最適設計の方が劣り、ロバスト設計の方が優れていることを確認できる。加えて、15 dB 以上の W_a に対して、最適設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 147.62 % (2.95~19.58 GHz) であり、ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の比帯域幅は 150.72 % である。すなわち、15 dB 以上の W_a を満たす上限周波数は、最適設計の場合、最小周波数に対して 6.63 倍であり、ロバスト設計の場合 7.11 倍である。これらの結果は、ロバスト設計の方が広帯域特性に優れていることを示している。

以上より、 W_a の最小値を 15 dB とした場合、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さは 1.5 % まで変動可能であることが分かる。

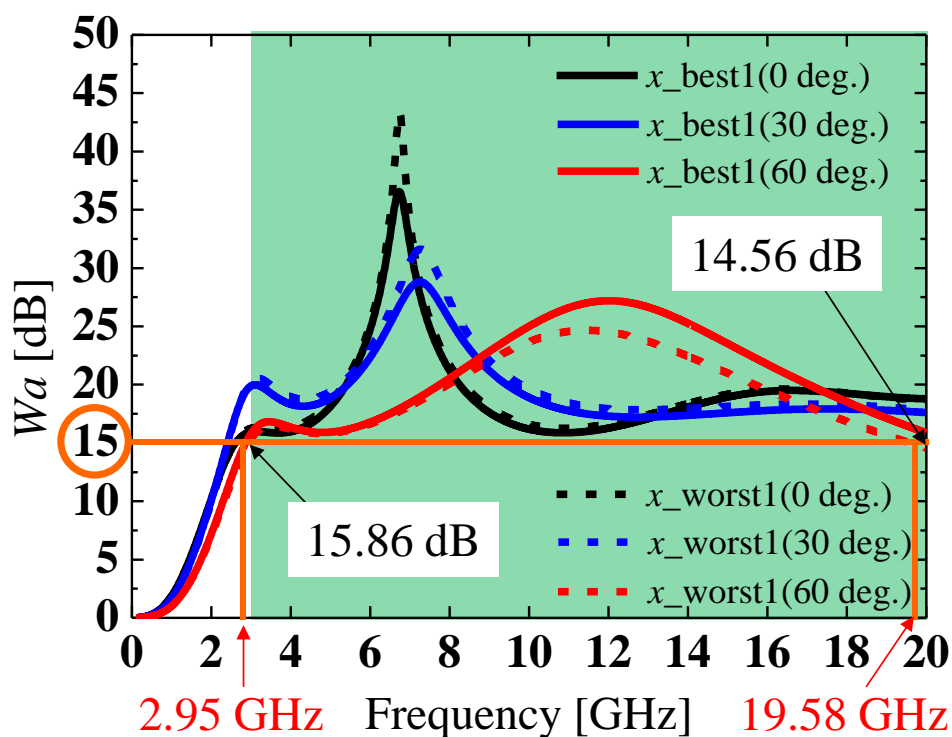


図 4.22 最適設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(15 dB を指標とした時).

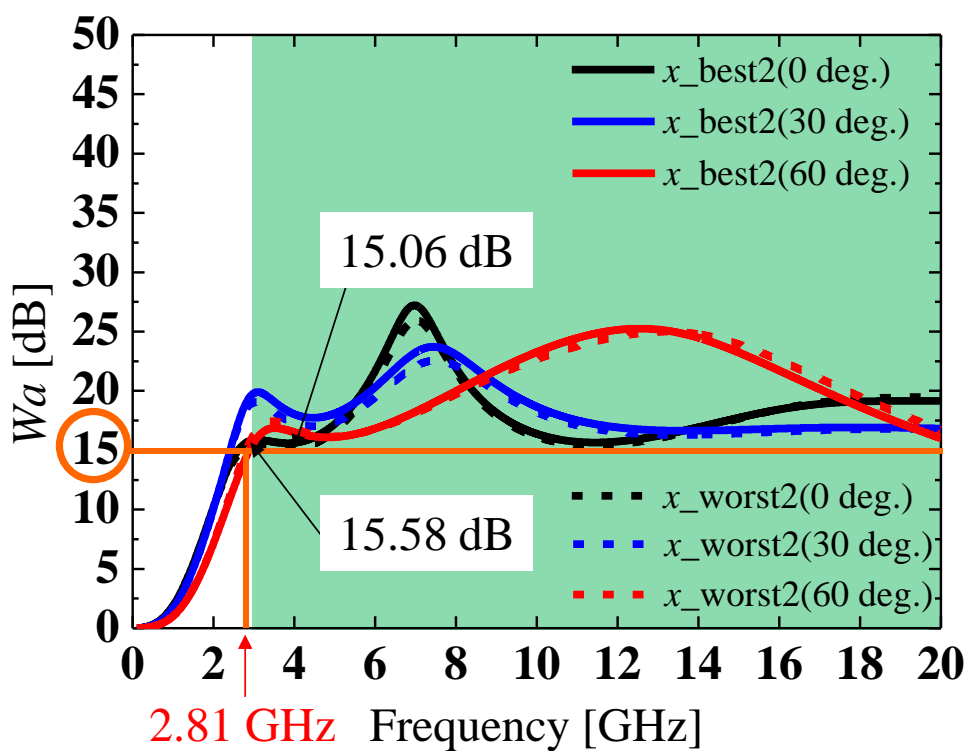


図 4.23 ロバスト設計による 2 層平板型 RAM の周波数特性(15 dB を指標とした時).

TM 波入射時と同様に TE 波入射時についても，2 層平板型 RAM を製作する上で，変動倍率 3σ の指標を得るために，他の W_a に対して同様の方法で変動倍率 3σ の限界値を確認する．その結果を図 4.24 に示す．ここで，比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ が 0.05 以下となる場合は，厚さの変動倍率 3σ についても 0.05 以下で設定している．TE 波入射時，最小値が 10 dB 及び 15 dB となる W_a に対して，比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ はそれぞれ 0.15, 0.015, 厚さの 3σ はそれぞれ 0.05, 0.015 が限界値であることが分かる．なお， W_a の最小値において，ロバスト設計が可能な値は，最大で 15.6 dB であり，比誘電率実部，比誘電率虚部及び厚さの 3σ の限界値は 0.005 である．TM 波入射時に比べて，TE 波入射時の方が全体的に比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ の限界値が小さい傾向にある．

以上より，図 4.24 から，RAM を製作する際，必要な W_a の最小値に対して，比誘電率実部，比誘電率虚部及び厚さの 3σ を求めることができ，それらの変動可能な範囲を知ることができる．これにより，製造誤差がその範囲内に含まれるかどうか判別することができ，RAM に求められる要求性能を確実に満たしているか確認することができる．

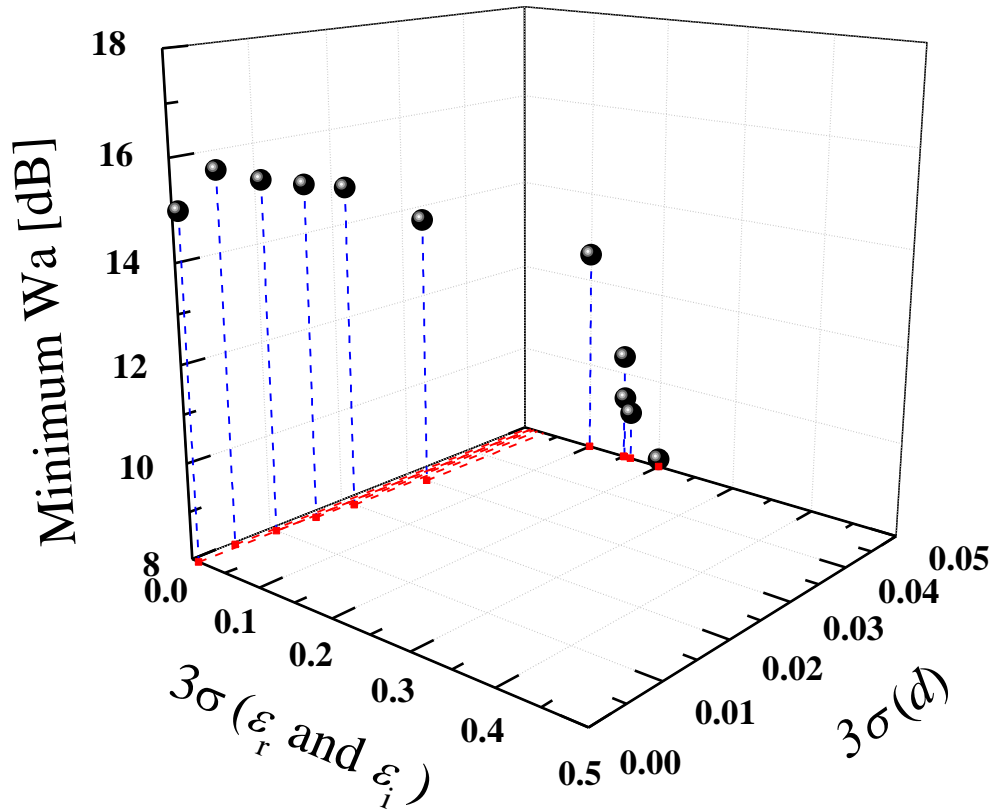


図 4.24 W_a の最小値に対する比誘電率実部及び比誘電率虚部の 3σ の限界値 (TE 波入射時，最大入射角 60 deg.).

最後に、最適設計と比較した、ロバスト設計の利点を述べる。NSGA-II を用いた最適設計の場合、 W_a に対して 20 dB という指標を定めるため、その指標を必ず超えるように最適化される。したがって、20 dB を超えるために最小周波数が高周波化する傾向が見られる。一方、ロバスト設計の場合、 W_a の最悪値を良くするよう最適化されるため、必ずしも 20 dB を超える RAM を設計できるとは限らないが、NSGA-II を用いた最適設計に比べて、低周波数帯域から W_a の大きな値を得ることができる。以上より、ロバスト設計は設計変数のばらつきの有無に関わらず、低周波数帯域から広帯域な周波数範囲で高い電波吸収効果を得る RAM を設計することが可能である。

4.5 まとめ

本章では、設計変数の変動区間において最悪値を取った場合でも制約条件を満たす設計領域において、目的関数の最悪値を最大化する手法を用いることで、誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM のロバスト設計手法を提案した。これは、最適設計の最適解は確定値であるため、製作時に設計変数に誤差が生じた場合、要求性能を満たすことが困難となる課題を解決するためである。なお、ロバスト設計においても、最適設計の場合と同様に、広帯域特性を有する 2 層平板型 RAM を設計することを目的とした。以下に本章で得られた結果をまとめて示す。

- (1) ロバスト設計においても、垂直入射時、斜入射時ともに、広帯域特性を有する RAM を設計することが可能である。

本手法は W_a の最悪値を良くするよう最適化されるため、必ずしも大きな W_a の値を得る RAM を設計できるとは限らない。しかしながら、NSGA-II を用いた最適設計に比べて、低周波数帯域から比較的大きな W_a の値を得ることが可能であり、広帯域特性を見出すことができた。

- (2) 指定した W_a の最小値に対して、設計変数である比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さの変動倍率 3σ を得ることが可能である。

垂直入射時、 W_a の最小値を 10 dB とした場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 48.3 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であり、 W_a の最小値を 20 dB に増加した場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 13.0 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であることを確認した。

また、TM 波入射時、 W_a の最小値を 10 dB とした場合、比誘電率実部及び

比誘電率虚部は 43.5 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であり、 W_a の最小値を 15 dB に増加した場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 9.9 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であることが分かった。

さらに、TE 波入射時、 W_a の最小値を 10 dB とした場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 15 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であり、 W_a の最小値を 15 dB に増加した場合、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さは 1.5 % まで変動可能であることが明らかとなった。

- (3) 必要な W_a の最小値に対して、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さの変動倍率 3σ の指標を得ることで、RAM の設計誤差の程度を判別することが可能である。

垂直入射時、斜入射時ともに、RAM を製作する際に必要な W_a の最小値に対して、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さの 3σ を求めることで、それらの変動可能な範囲を示すことができた。これにより、製作した RAM の製造誤差がその範囲内に含まれるかを容易に判別することができるようになり、要求性能を満たす RAM を製作する過程で重要な指標を得ることができた。

第5章 結 論

RAMは電波暗室の設計や各種電子機器の干渉防止等、様々な場面で必要とされていることから、これまで多数のRAMが開発されてきた。RAMの性能は受信周波数及び入射角に対して、その電気材料定数によって決定するため、様々な最適化手法を用いた設計例がある。そこで、本論文でも電気材料定数の算出に最適化手法を適用し、垂直入射時及び連続した斜入射時において、広帯域特性を有する2層平板型RAMを設計することを目的に一連の研究が行われた。

第1章では、研究背景として、近年のRAMの開発動向を確認するとともに、最適化手法を用いたRAM設計の課題について述べた。それらを踏まえた上で、本研究の目的を示し、全体構成を示した。

第2章では、多目的GAの1つであるNSGA-IIを用いて、2層平板型RAMの広帯域特性及び最小周波数の低周波化を同時に考慮した電気材料定数最適化による設計手法を示した。その結果、20 dB以上の W_a を満たす周波数の広帯域化及び低周波化を実現した。また、最適化手法に加えてクラスタリング分析手法を用いることで、低周波数帯域から広帯域な範囲で20 dB以上の W_a を満たすには、比誘電率の周波数分散性を考慮する必要があることを示した。そのため、比誘電率実部及び比誘電率虚部の周波数分散性を考慮して設計に係る最適化を行った結果、20 dB以上の W_a に対して、比帯域幅158.24 %、最小周波数1.78 GHzを満たす、厚さ18.1 mmの2層平板型RAMを設計することができた。さらに、所望の周波数範囲で最大限に広帯域特性を有するRAM及び所望の最小周波数を有するRAMの設計が可能であることを示すとともに、提案したRAMの周波数特性が同等に得られることをシミュレータにより確認し、本提案手法の妥当性を示した。

第3章では、第2章で提案した設計手法を応用し、連続した斜入射時において広帯域特性を有するRAMの設計手法を提案した。最大入射角が大きくなるにつれて全ての入射角で W_a が20 dB以上となる条件を満たすことは困難となるが、誘電性材質及び磁性材質を用いて、連続した斜入射特性かつ広帯域特性を有する2層平板型RAMの設計を実現した。その結果、誘電性RAMは、最大入射角が60 deg.であり、広角度の斜入射特性を有するという利点がある一方で、TE波入射時、最小周波数の低周波化が十分に満たされないという課題が明らかとなった。一方、磁性RAMは、最大入射角は45 deg.以下と誘電性RAMに比べて小さいが、最小周波数の低周波化に優れるという特性を有することが確認された。したがって、広角度の斜入射特性が求められる場合に誘電性提案2層平板型

RAM が適しており、低周波数帯域で広帯域特性及び斜入射特性が求められる場合には、磁性提案 2 層平板型 RAM が適していることが明らかとなった。加えて、提案する 2 層平板型 RAM は誘電性 RAM、磁性 RAM とともに、 W_a に対する接着層の影響は小さく、実用性があることを示した。さらに、両偏波特性について、20 dB 以上の W_a に対しては得られないが、 W_a の指標を 20 dB から 10 dB に低減することで、提案する誘電性 RAM、磁性 RAM はそれぞれ 60 deg., 50 deg. 以内の入射角範囲で、両偏波特性を有することを確認した。しかしながら、20 dB 以上の両偏波特性を得るには、TM 波入射時と TE 波入射時の同時最適化が必要である。

第 4 章では、設計変数の変動区間において最悪値を取った場合でも制約条件を満たす設計領域において、目的関数の最悪値を最大化する手法を用いることで、誘電性材質から成る 2 層平板型 RAM のロバスト設計手法を提案した。最適設計では最適解が確定値であるため、製作時に設計変数に誤差が生じた場合、要求性能を満たすことが困難となることがデメリットとして挙げられた。しかしながら、提案手法は設計変数にロバスト性を持たせるため、製作時に誤差が生じたとしても、その性能に問題がないことを示した。本手法を用いることで、垂直入射時、斜入射時ともに、広帯域特性を有する RAM のロバスト設計が可能であることを確認した。 W_a の最悪値を良くするよう最適化されるため、必ずしも大きな W_a の値を得る RAM を設計できるとは限らないが、NSGA-II を用いた最適設計に比べて、低周波数帯域から比較的大きな W_a の値を得ることが可能であり、広帯域特性を得ることができた。垂直入射時、 W_a の最小値を 20 dB とした場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 13.0 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であることを示した。また、TM 波入射時、 W_a の最小値を 15 dB とした場合、比誘電率実部及び比誘電率虚部は 9.9 % まで、厚さについては 5 % まで変動可能であることが明らかとなった。さらに、TE 波入射時、 W_a の最小値を 15 dB とした場合、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さは 1.5 % まで変動可能であることが明らかとなった。加えて、必要な W_a の最小値に対して、比誘電率実部、比誘電率虚部及び厚さの変動倍率の指標を得ることができた。

以上、本研究は、GA を用いた最適設計及び設計変数の製造誤差を考慮したロバスト設計という 2 つの手法により、垂直入射時及び斜入射時において低周波数帯域から広帯域特性を満たす 2 層平板型 RAM の設計を行った。NSGA-II を用いた最適設計の場合、 W_a に対して 20 dB という指標を定めるため、その指標を必ず超えるように最適化されるが、20 dB を超えるために最小周波数が高周波化する傾向が見られた。一方、設計変数に対してロバスト性を有するロバスト設計の場合、 W_a の最悪値を良くするよう最適化されるため、必ずしも 20 dB を超える RAM を設計できるとは限らず、特に、斜入射時においてはその設計が困

難であった．各設計手法には一長一短あるものの，RAM に求められる W_a の基準やロバスト性の考慮が必要か否かに応じて，設計手法を選択することが望ましい．これらの設計技術が様々な分野において利用される RAM 開発の一つの指針になるものと期待される．

今後の課題として，両偏波特性の向上を目的とした，TM 波入射時及び TE 波入射時の同時最適化，さらに，平面形状だけでなく曲面形状に対しても電波吸収特性を有する RAM の設計が考えられる．

謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました防衛大学校電気電子工学科の森下久教授，道下尚文准教授に深く感謝致します．航空自衛官である筆者に理工学研究科前期課程及び後期課程に進む機会を与えて頂き，終始適切なご教授と研究の指針を示して頂きました．また，豊富な人生経験から，研究のみならず公私にわたり多くのご指導及びご助言を賜り重ねて深く感謝致します．

また，本論文の審査を引き受けて頂き，数々の重要なご質問とご助言を賜りました中央大学理工学部電気電子情報通信工学科の白井宏教授，横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門の新井宏之教授，防衛大学校通信工学科の後藤啓次教授に心より感謝致します．

筆者の在学期間中，有益なご助言と活発なご討論を頂くとともに，本研究をまとめるにあたり，数々の貴重なご教示とご助言を賜りました京都大学大学院工学研究科機械理工学の西脇眞二教授，泉井一浩准教授，佐藤勇氣博士に深く感謝致します．

本研究は，国内大学院研修中に行ったものであり，本研究の機会を与えて頂いた防衛省航空幕僚監部情報通信課及び航空システム通信隊の皆様に深く感謝致します．また，在学期間中，研究活動及び研究室行事に共に取り組んだ森下研究室，道下研究室の卒業生，在校生の皆様に深く感謝致します．

本研究は以上の方々を始めとする多大なるご支援のもと達成できたものであり，謹んで御礼申し上げます．

最後に，研究活動を支え，応援してくれた家族に感謝致します．

参考文献

- [1] 栗原 弘, 田中 隆, 斎藤寿文, 柳川太成, “マイクロ波・ミリ波用電波暗室と超広帯域電波吸収体,” 電学論(C), vol.124, no.2, pp.257-263, 2004.
- [2] 佐藤光晴, 吉田栄吉, 菅原英州, 島田 寛, “偏平状センダスト・ポリマー複合体の透磁率と電磁波吸収特性,” 日本応用磁気学会誌, vol.20, no.2, pp.421-424, 1996.
- [3] 岡島達雄, 河辺伸二, 川本喜也, 池田哲夫, “フェライト混入率や電波吸収体設置方法による吸収効果: フェライト混入モルタルの TV 電波吸収特性に関する研究,” 日本建築学会構造系論文集, vol.61, no.482, pp.1-7, Apr. 1996.
- [4] 高瀬康治, 山口優介, 沖本浩二, 橋本 修, “誘電・磁気損失材料を用いたマイクロストリップ線路の高調波抑制に関する実験的検討,” 信学論(B), vol.J86-B, no.7, pp.1234-1236, July 2003.
- [5] 橋本康雄, 市原謙一, 石野 健, 清水康敬, “導電性繊維とポリエステル糸で織った抵抗布による $\lambda/4$ 型電波吸収体の実用化,” 信学論(B-II), vol.J72-B-II, no.9, pp.483-491, Sep. 1989.
- [6] 大塚健二郎, 橋本 修, 織田 満, 守田幸信, “マイクロ波帯における導電紙を用いた $\lambda/4$ 型電波吸収体に関する基礎的検討,” 信学論(B), vol.J83-B, no.7, pp.1043-1049, July 2000.
- [7] 木村健一, 橋本 修, “無線 LAN 通信環境における建材型電波吸収体の設置効果に関する実験的検討,” 信学論(B), vol.J88-B, no.1, pp.310-318, Jan. 2005.
- [8] 鈴木達也, “損失材含有率の低い誘電損失材料を用いた C 帯用薄型電波吸収体,” 信学論(B), vol.J98-B, no.7, pp.742-743, July 2015.
- [9] 内藤喜之, 末武国弘, 藤原英二, 佐藤正明, “フェライト吸収壁の電波吸収特性,” 信学論(B), vol.J52-B, no.1, pp.26-30, Jan. 1969.
- [10] 天野充博, 小塚洋司, “導体形状効果を利用した磁性電波吸収体の整合特性改善方法,” 信学論(B), vol.J86-B, no.7, pp.1165-1175, July 2003.
- [11] H. Yang, X. Cao, J. Gao, W. Li, Z. Yuan, and K. Shang, “Low RCS metamaterial

absorber and extending bandwidth based on electromagnetic resonances,” PIER M, vol. 33, pp. 31-44, 2013.

- [12] O. Luukkonen, F. Costa, C. R. Simovski, A. Monorchio, and S. A. Tretyakov, “A thin electromagnetic absorber for wide incidence angles and both polarizations,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, pp. 3119-3125, Oct. 2009.
- [13] 篠原純一, 道下尚文, 山田吉英, 羽田秀樹, “マッシュルーム構造による薄型電波吸収体の斜入射特性,” 信学ソ大, B-1-92, Sep. 2012.
- [14] 清水康敬, 末武国弘, 内藤喜之, 若山皖一郎, “誘電体層および磁性体層を組み合わせた電波吸収壁,” 信学論(B), vol.J53-B, no.7, pp.381-388, July 1970.
- [15] 内藤喜之, 水本哲弥, 高橋道晴, 脇田雄一, “ゴムフェライト装荷によるフェライト系吸収体の経済的広帯域化,” 信学論(B-II), vol.J76-B-II, no.7, pp.647-655, July 1993.
- [16] 内藤喜之, 安斎弘樹, 水本哲弥, “超広帯域電波吸収体の設計とその特性,” 信学論(B-II), vol.J77-B-II, no.10, pp.557-563, Oct. 1994.
- [17] 近藤隆俊, 吉門進三, “セラミックス複合体の電磁気的特性について,” Journal of the Ceramic Society of Japan, vol.109, no.1268, pp.326-331, Apr. 2001.
- [18] 安斎弘樹, 才川 亮, 水本哲弥, 内藤喜之, “ピラミッド形電波吸収体の特性解析ー近似モデルと TE 波への適用ー,” 信学論(B-II), vol.J78-B-II, no.3, pp.191-199, Mar. 1995.
- [19] A. Khajepour and S.A. Mirtaheri, “Analysis of pyramid EM wave absorber by FDTD method and comparing with capacitance and homogenization methods,” Progress In Electromagnetics Research Letters, vol.3, pp.123-131, 2008.
- [20] 木村健一, 久保知也, 橋本 修, “内装用一般建材を用いた三層型電波吸収体の基礎的検討,” 信学論(B), vol.J88-B, no.6, pp.1130-1138, June 2005.
- [21] 清水康敬, 西方敦博, 鈴木松一, “ゴムカーボンシートによるレーダ電波障害対策用吸収体,” 信学論(B), vol.J68-B, no.8, pp.928-934, Aug. 1985.
- [22] 花澤理宏, 橋本 修, “抵抗皮膜を用いたボード型 ETC 用電波吸収体に関する研究,” 信学論(B), vol.J85-B, no.5, pp.867-870, May 2002.
- [23] 渡邊慎也, 飯野一哉, 齋藤耕太, 橋本 修, “対流を考慮した抵抗皮膜を用い

た $\lambda/4$ 型電波吸収体の温度解析,” 信学論(B), vol.J88-B, no.11, pp.2296-2305, Nov. 2005.

[24] 高薄一弘, “最新電波吸収材料の開発[事例集]: 最適選定・設計・活用法・評価・測定法,” pp.186-190, 技術情報協会, Aug. 2006.

[25] 橋本 修, “電波吸収体の技術と応用 II,” pp.21-23, 37-39, 119-125, シーエムシー出版, March 2003.

[26] 宗 哲, 小野一則, 岩田武夫, 橋本 修, “吸音性能を有する C 帯円偏波用電波吸収体に関する実験的検討,” 信学論(B), vol.J86-B, no.7, pp.1246-1248, July 2003.

[27] 大塚健二郎, 鈴木宏和, 谷 健祐, 橋本 修, “石膏ボード型電波吸収体による無線 LAN 通信の伝送速度改善に関する基礎検討,” 信学総大, B-4-5, Mar. 2005.

[28] 遠藤哲夫, 花澤理宏, 橋本 修, “印刷シートを用いた $\lambda/4$ 型電波吸収石膏ボードに関する基礎検討,” 信学論(B), vol.J86-B, no.7, pp.1249-1250, July 2003.

[29] 土井 亨, 橋本 修, 田代了嗣, 井上貴雄, 藤田 淳, “黒鉛と変性ポリアミド系樹脂を用いた ETC 用電波吸収体に関する実験的検討,” 信学論(B), vol.J90-B, no.8, pp.761-763, Aug. 2007.

[30] 宗 哲, 吉岡典子, 中村かおり, 橋本 修, “炭素粒子混入エポキシ変性ウレタンゴムを用いた 60 GHz 帯用電波吸収体の実験的検討,” 信学論(B), vol.J82-B, no.3, pp.469-475, Mar. 1999.

[31] 橋本 修, “新電波吸収体の最新技術と応用,” pp.84-86, シーエムシー出版, Mar. 1999.

[32] 清水康敬, “ポイント周波数整合法による多層電波吸収体の設計,” 信学論(B), vol.J62-B, no.4, pp.428-434, Apr. 1979.

[33] 青柳貴洋, 清水康敬, “斜入射ポイント整合による多層型電波吸収体の設計,” 信学論(B), vol.J77-B2, no.7, pp.414-421, July 1994.

[34] 中村 隆, 出口竜成, 佐藤利三郎, “多層透過型電波吸収体,” 信学論(B), vol.J87-B, no.11, pp.1936-1942, Nov. 2004.

[35] 橋本流一, 山本真一郎, 畠山賢一, “ $1/4$ 波長整合層を用いた多層型電波吸収

体の設計,” 信学ソ大, B-4-44, Sep. 2011.

- [36] 橋本 修, “電波吸収体入門,” pp.37-41, 森北出版, Oct. 1997.
- [37] 橋本 修, “次世代電波吸収体の技術と応用展開,” pp.19-24, シーエムシー出版, March 2003.
- [38] N. Jin and Y. Rahmat-Samii, “Parallel particle swarm optimization and finite-difference time-domain (PSO/FDTD) algorithm for multiband and wide-band patch antenna designs,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.53, no.11, pp.3459-3468, Nov. 2005.
- [39] 柳生大輔, 田口光雄, “PSO を用いた地上波テレビデジタル放送受信アンテナの形状パラメータ最適化第 2 報,” 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 10-1A-02, Sep. 2011.
- [40] 李峻赫, 本田純一, 内田一徳, “PSO 法に基づいた基地局最適配置の数値計算アルゴリズムについて,” 映像情報メディア学会技術報告, vol.36, no.3, BCT2012-10, Jan. 2012.
- [41] 片山雷太, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, “PSO 法を用いた固体惑星内部探査レーダ用 Vivaldi antenna の最適化,” 信学ソ大, B-1-57, Sep. 2012.
- [42] グェン トゥワン ハン, 森下 久, 小柳芳雄, 泉井一浩, 西脇眞二, “PSO を用いた WiMAX 用 U 字型折返しダイポールアンテナの広帯域特性に対する寸法形状最適化,” 信学論(B), vol.J95-B, no.9, pp.1069-1077, Sep. 2012.
- [43] Y. Li, W. Shao, L. You and B. Wang, “An improved PSO algorithm and its application to UWB antenna design,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol.12, pp.1236-1239, Sep. 2013.
- [44] D.S. Weile and E. Michielssen, “Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.45, no.3, pp.343-353, Mar. 1997.
- [45] 大平昌敬, 出口博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, “最適化設計による多周波数帯共用一層周波数選択板,” 電学論(A), vol.123, no.3, pp.253-258, 2003.
- [46] 梶谷卓也, 辻 陽介, 桑原義彦, “疑似八木アンテナアレーの遺伝的アルゴリズムによる設計,” 信学論(B), vol.J86-B, no.2, pp.209-218, Feb. 2003.

- [47]堀 俊和, “広帯域・マルチバンドプリントアンテナ,” 信学論(B), vol.J87-B, no.9, pp.1130-1139, Sep. 2004.
- [48]岡本直樹, 谷口哲樹, 唐沢好男, “遺伝的アルゴリズムを用いた min-max 規範に基づくアレーアンテナの設計法,” 信学論(B), vol.J87-B, no.9, pp.1372-1382, Sep. 2004.
- [49]今井哲朗, “電波伝搬推定のための遺伝的アルゴリズムを用いたレイトレーシング処理の高速化法,” 信学論(B), vol.J89-B, no.4, pp.560-575, Apr. 2006.
- [50]G. Venter and J.S. Sobieski, “Particle swarm optimization,” AIAA Journal, vol.41, no.8, pp.1583-1589, Aug. 2003.
- [51]K. Deb, “An efficient constraint handling method for genetic algorithms,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol.186, no.2-4, pp.311-338, June 2000.
- [52]吉村允孝, 西脇眞二, 泉井一浩, “遺伝的アルゴリズムを用いた車両骨格構造の断面形状初期設計法,” 日本機械学会論文集(C), vol.70, no.689, pp.235-242, Jan. 2004.
- [53]泉井一浩, “GA による最適化手法の現状と初期設計時の多目的最適化への展開,” 溶接学会誌, vol.73, no.3, pp.155-160, Apr. 2004.
- [54]E. Michelssen, J.M. Sajer, S. Ranjithan, and R. Mittra, “Design of lightweight, broad-Band microwave absorbers using genetic algorithms,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol.41, no.6/7, pp.1024-1031, June/July 1993.
- [55]三浦健司, 関野 登, 久保田賢二, 岡 英夫, 小林正彦, 木口 実, 大友祐晋, “電波吸収機能を有する磁性粉配合混練型 WPC,” 木材学会誌, vol.62, no.1, pp.9-17, Jan. 2016.
- [56]S. Cui, D.S. Weile, and J.L. Volakis, “Novel planar electromagnetic absorber designs using genetic algorithms,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.54, no.6, pp.1811-1817, June 2006.
- [57]橋本 修, 辻村彰宏, “炭素粒子混入エポキシ変性ウレタンゴムを用いた広帯域 2 層型マイクロ波帯用電波吸収体の理論的検討,” 信学論(B), vol.J77-B-II, no.8, pp.47-49, Jan. 1994.
- [58]S. Cui and D.S. Weile, “Robust design of absorbers using genetic algorithms and the finite element-boundary integral method,” IEEE Trans. Antennas Propag.,

vol.51, no.12, pp.3249-3258, Dec. 2003.

- [59] 高薄一弘, “最新電波吸収材料の開発[事例集]: 最適選定・設計・活用法・評価・測定法,” pp.195-196, 技術情報協会, Aug. 2006.
- [60] 三宮信夫, 喜多 一, 玉置 久, 岩本貴司, “遺伝的アルゴリズムと最適化,” 朝倉書店, Apr. 1998.
- [61] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” IEEE Trans. Evol. Comput., vol.6, no.2, pp.182-197, Apr. 2002.
- [62] S. Dhanalakshmi, S. Kannan, K. Mahadevan and S. Baskar, “Application of modified NSGA-II algorithm to combined economic and emission dispatch problem,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.33, no.4, pp.992-1002, May 2011.
- [63] 申 鉉眞, 平野義鎮, 轟 章, “エリート初期集団 GA を用いる多目的トポロジー最適化の高効率化,” 日本計算工学会論文集, vol.2013, paper no. 20130006, 2013.
- [64] J. Huang and J.A. Encinar, “Refractarray antennas,” pp.97-98, John Wiley and Sons, 2008.
- [65] S. Hiwa, T. Hiroyasu and M. Miki, “Design mode analysis of pareto solution set for decision-making support,” Journal of Applied Mathematics, vol.2014, pp.1-15, Nov. 2014.
- [66] M. Shimosaka, D. Ishizuka, T. Yamada, K. Izui, S. Nishiwaki, “A clustering technique for analysis of non-dominated solutions in manufacturing system optimization problems,” Proceedings of the 47th Computers and Industrial Engineering, no.25, Lisbon, Portugal, Oct. 2017.
- [67] 齋藤堯幸, 宿久 洋, “関連性データの解析法 多次元尺度構成法とクラスター分析法,” pp.29-34, 共立出版, Sep. 2006.
- [68] J. MacQueen, “Some methods for classification and analysis of multivariate observations,” Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, vol.1, University of California Press, pp.281-297, Berkeley, 1967.
- [69] 竹内友成, 阿度和明, 蔭山博之, 本城国明, 斎藤唯理亜, C. Masquelier, 中村治, “等価回路を用いた BaTiO₃ 微粒子の二重構造の解析,” 日本セラミックス

協会学術論文誌, vol.102, no.1192, pp.1177-1181, Dec. 1994.

- [70]河島俊一郎, 大内 宏, “マイクロ波用誘電体セラミックスの研究開発,” 粉体および粉末冶金, vol.34, no.1, pp.1-7, Jan. 1987.
- [71]清水康敬, 末武国弘, “誘電性損失材料による実用的広帯域電波吸収壁,” 信学論(B), vol.J53-B, no.3, pp.143-150, Mar. 1970.
- [72]清水康敬, 杉浦 行, 石野 健, “最新電磁波の吸収と遮蔽,” pp.95-97, 日経技術図書株式会社, Sep. 1999.
- [73]須賀良介, 橋本 修, “FRP 対応電波吸収体の温度分布解析,” 信学論(B), vol.J88-B, no.4, pp.824-826, Apr. 2005.
- [74]柴田幸司, 荻野孝宏, 橋本 修, “フレンジ付矩形導波管を用いた透過波法による複素比誘電率測定に関する検討,” 信学論(B), vol.J86-B, no.7, pp.1344-1347, July 2003.
- [75]WIPL-D (Japan), Inc., WIPL-D Pro V13, ver. 2015.
- [76]D.C. Jenn, “Radar and laser cross section engineering second edition,” pp.340-341, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Aug. 2005.
- [77]S.A. Mirtaheri, T. Mizumoto, and Y. Naito, “The electromagnetic and dispersion characteristics of materials composed of rubber, carbon and ferrite,” IEICE Trans., vol.E73, no.10, pp.1746-1752, Oct. 1990.
- [78]上野秀典, 近藤隆俊, 吉門進三, “複合電波吸収材料の開発と評価,” 日本応用磁気学会誌, vol.22, no.2, pp.881-884, Apr. 1998.
- [79]Ansys (Japan), Inc., Ansoft HFSS ver.13.
- [80]加藤正則, 橋本 修, 中村貴之, 二川佳央, “1 層型樹脂系電波吸収体の照射電力に対する温度及び吸収特性変化の解析,” 信学論(B), vol.J86-B, no.10, pp.2182-2188, Oct. 2003.
- [81]音村亮輔, 鈴木達也, 須賀良介, 橋本 修, “広角度用二層型電波吸収体の設計チャート,” 信学論(C), vol.J97-C, no.12, pp.557-560, Dec. 2014.
- [82]橋本康雄, “電磁波吸収材料,” 日本ゴム協会誌, vol.57, no.4, pp.218-228, 1984.

- [83]内藤喜之, “フェライト吸収壁の厚さについて,” 信学論(B), vol.J52-B, no.1, pp.21-25, Jan. 1969.
- [84]山岸誠仁, “RF ワールド No.7,” CQ 出版株式会社, pp.107-114, 2009.
- [85]千田正勝, “高周波における軟磁性膜の透磁率測定と多層効果,” 日本応用磁気学会誌, vol.16, no.2, pp.425-430, Apr. 1992.
- [86]山下博司, 小野信幸, 橋本康雄, 石野 健, 井上光雄, 秋田慶一, “テレビゴースト防止を目的とした建材用電波吸収壁,” 信学論(B), vol.J61-B, no.8, pp.729-736, Aug. 1978.
- [87]小木曾望, “信頼性・ロバスト設計法の基礎と応用,” 日本機械学会講習会革新的ものづくりのための最適設計法入門, no.11-117, pp.109-124, Nov. 2011.
- [88]平野佑享, 山田崇恭, 小木曾望, 泉井一浩, 西脇眞二, 伊賀淳郎, “レベルセット法に基づく熱構造連成問題のトポロジー最適設計に対する不確定性を考慮したロバスト設計法,” 日本機械学会論文集(C), vol.77, no.773, pp.1-13, Jan. 2011.
- [89]植田圭一, 乙守正樹, 小木曾望, 山田崇恭, 西脇眞二, “定常確率過程による不確定性表現を用いたレベルセット法に基づくロバストトポロジー最適設計,” 日本機械学会論文集(C), vol.78, no.787, pp.928-942, Mar. 2012.
- [90]MATLAB, ver.8.4.0.150421 (R2014b), Mathworks.
- [91]L.E.G. Castanon, S.M. de Oca, and R. Morales-Menendez, “An application of random and hammersley sampling methods to iris recognition,” International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems IEA/AIE 2006: Advances in Applied Artificial Intelligence, pp.520-529, 2006.

研究業績

本研究に関する発表論文

- (1) Y. Ishii, T. Masaki, N. Michishita, H. Morishita, and H. Hada, “Experimental Consideration of RCS Reduction Using Thin Metasurface,” IEICE Commun. Express, vol.6, no.6, pp.249-253, June 2017.
- (2) 石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, 佐藤 勇気, 泉井 一浩, 西脇 眞二, “分散性のある複素比誘電率の最適化による広帯域な電波吸収体の実現,” 信学論(B), vol.J101-B, no.9, pp.749-758, Sep. 2018.
- (3) Y. Ishii, N. Michishita, H. Morishita, Y. Sato, K. Izui, and S. Nishiwaki, “Design Optimization of Radar Absorbent Material for Broadband and Continuous Oblique Incidence Characteristics,” IEICE Trans. Commun., vol.E102-B, no.2, pp.216-223, Feb. 2019.
- (4) Y. Ishii, N. Michishita, H. Morishita, Y. Sato, K. Izui, and S. Nishiwaki, “Robust Design of Radar Absorbent Material with Broadband Characteristics,” IEICE Commun. Express. (accepted)

国際会議発表

- (1) Y. Ishii, N. Michishita, K. Samejima, and H. Morishita, “A study for Radar Cross Section Reduction using Flat Layer Radar Absorbent Material,” International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM 2016), no.183, Montreal, Canada, July 2016.
- (2) Y. Ishii, T. Masaki, N. Michishita, H. Morishita, and H. Hada, “RCS Reduction Characteristics of Thin Wave Absorbers Composed of Flat and Curved Metasurfaces,” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2016), pp.192-193, Okinawa, Japan, Oct. 2016.
- (3) Y. Ishii, N. Michishita, and H. Morishita, “A Study on Radar Absorbent Material Using Dielectric Materials,” 2017 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP 2017), pp.67-68, Hokkaido, Japan, June 2017.

- (4) Y. Ishii, N. Michishita, and H. Morishita, "A Study for RCS Broadband Reduction due to Dielectric Constant of Radar Absorbent Material," 2017 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS USNC-URSI 2017), no.2151, San Diego, USA, July 2017.
- (5) Y. Ishii, J. Abiru, N. Michishita, and H. Morishita, "A Study for Radar Absorbent Material Composed of Dielectric Materials Considering Frequency Dependency," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017), no.1446, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- (6) T. Masaki, Y. Ishii, N. Michishita, H. Morishita, and H. Hada, "Bistatic RCS Reduction Characteristics of Flat and Curved Metasurfaces," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017), no.1444, Phuket, Thailand, Nov. 2017.
- (7) T. Masaki, Y. Ishii, N. Michishita, H. Morishita, and H. Hada, "Monostatic and Bistatic RCS Measurements for Thin Metasurfaces," 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (2017 IEEE CAMA), pp.351-352, Tsukuba, Japan, Dec. 2017.
- (8) Y. Ishii, N. Akiyama, K. Gamou, N. Michishita, and H. Morishita, "Optimized Design of Radar Absorbent Material Using Dielectric Material by Genetic Algorithm," The 2018 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation (VJISAP 2018), Da nang, Vietnam, May 2018.
- (9) N. Akiyama, Q.P. Quang, Y. Ishii, N. Michishita, and H. Morishita, "Characteristic Mode Analysis for U-Shaped Dipole Antenna," The 2018 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation (VJISAP 2018), Da nang, Vietnam, May 2018.
- (10) K. Matsubayashi, Y. Ishii, N. Michishita, and H. Morishita, "Study for low-profile antenna by addition of parasitic element for discone antenna," The 2018 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation (VJISAP 2018), Da nang, Vietnam, May 2018.
- (11) Y. Ishii, N. Michishita, and H. Morishita, "A Study for Design of Radar Absorbent Material with Broadband Characteristics," 2018 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS USNC-URSI 2018), no.1214, Boston, USA, July 2018.
- (12) Y. Ishii, N. Michishita, and H. Morishita, "Design of Broadband Radar Absorbent Material by Using NSGA-II," The 2018 Asian Workshop on Antennas and

Propagation (AWAP 2018), Pattaya, Thailand, July 2018.

- (13) Y. Ishii, N. Michishita, and H. Morishita, “Optimized Design of Broadband Radar Absorbent Material,” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2018), no.C3_1002, Busan, Korea, Oct. 2018.

研究会等

- (1) スセティオ アグン, 石井 佑佳, 沖 貴志, 道下 尚文, 森下 久, “A Comparison between Compact Range Measurements and Simulations,” 電子情報通信学会 2015 年ソサイエティ大会, B-1-49, Sep. 2015.
- (2) 石井 佑佳, 道下 尚文, 鮫島 圭, 森下 久, “層状平板型 RAM の RCS 特性,” 電子情報通信学会技術研究報告, 無線端末・アンテナシステム測定技術研究会, pp.12-19, Dec. 2015.
- (3) 石井 佑佳, 道下 尚文, 鮫島 圭, 森下 久, “2 層平板型 RAM の RCS 特性に関する検討,” 電子情報通信学会 2016 年総合大会, B-1-226, Mar. 2016.
- (4) 石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, “電波吸収体を用いたレーダー断面積の低減,” 電子情報通信学会技術研究報告, AP2016-94, pp.33-38, Sep. 2016.
- (5) 石井 佑佳, 道下 尚文, 鮫島 圭, 森下 久, “周波数に対して最適な誘電体材料電気定数を用いた RCS 減衰値評価,” 電子情報通信学会 2016 年ソサイエティ大会, B-1-123, Sep. 2016.
- (6) 石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, “平板構造を有する電波吸収体の特性に関する基礎検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, AP2017-47, pp.13-18, July 2017.
- (7) 石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, “PSO を用いた広帯域特性を有する電波吸収体の設計,” 電子情報通信学会 2017 年ソサイエティ大会, B-1-47, Sep. 2017.
- (8) 正木 智大, 石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, “薄型メタ表面のバイスタティック RCS パターンの測定,” 電子情報通信学会 2017 年ソサイエティ大会, B-1-160, Sep. 2017.
- (9) 石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, “GA を用いた誘電性電波吸収体の設計に関する検討,” 電子情報通信学会 2018 年総合大会, B-1-102, Mar. 2018.
- (10) 石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, “広帯域特性を目的とした電波吸収体のロバスト最適設計に関する検討,” 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会,

B-1-77, Sep. 2018.

表彰等

- (1) 2015 年度下半期アンテナ・伝播研究専門委員会学生奨励賞, June 2016.
- (2) The 2018 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation (VJISAP 2018) Young Scientist Award, May 2018.
- (3) The 2018 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP 2018) Young Scientist Award, July 2018.

その他（技術講演）

石井 佑佳, 道下 尚文, 森下 久, “高次基底関数モーメント法を用いた電波吸収体の RCS 解析,” 防衛装備庁第 12 回レーダ関連分科会, Feb. 2016.