

MACKEY T 型に関する検討

平野 賢^{††} 牧野 滋^{†‡} 伊東 健治[†]

[†] 金沢工業大学 〒921-8812 石川県野々市市扇が丘 7-1

E-mail : [†] b6700829@planet.kanazawa-it.ac.jp, [‡] makino@neptune.kanazawa-it.ac.jp

あらまし MACKEY 並列配置型は、MACKEY 基本型(Wi-Fi 2 GHz 帯)と MACKEY 広帯域型(Wi-Fi 5 GHz 帯)の 2 つのアンテナを並列に並べたため、アンテナが大きくなってしまいう課題があった。左右のグリッド幅が異なる MACKEY A 型(Asymmetric type)を MACKEY 並列配置型に用いることで、中央のグリッドを共有する方法を示す。グリッドが共有されることでグリッド枚数が 3 枚となり、小型になると考えられる。グリッド枚数が 3 枚となるモデル MACKEY T 型(Triple grid type)を提案する。提案する MACKEY T 型は Wi-Fi 2GHz / 5 GHz 帯を自由空間のみならず金属上においても動作することを示す。

キーワード MACKEY, W-Fi, 相互結合, 金属上, パラメトリックスタディ

Feasibility Study of MACKEY type T

Ken Hirano^{††} Shigeru Makino^{†‡} and Kenji Itoh[†]

[†] Kanazawa Institute of Technology 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa, Japan

E-mail : [†] b6700829@planet.kanazawa-it.ac.jp, [‡] makino@neptune.kanazawa-it.ac.jp

Abstract A MACKEY parallel arrangement model was proposed in which an original MACKEY (Wi-Fi 2 GHz band) and a MACKEY wide-band type (Wi-Fi 5 GHz band) are arranged in parallel. However, the parallel arrangement model is large substrate width. In this paper, a MACKEY type T is proposed, where one of the two grids of an original Mackey and that of a wide-band type are shared. A prototyped type T model is shown to not only work in free space but also on a metal plate over the Wi-Fi 2 GHz / 5 GHz bands.

1. まえがき

近年スマートフォンやタブレットに代表される通信技術の普及に伴い、眼鏡や時計などに通信機器を設けたウェアラブルデバイスの発展が急速に進んでおり、IoT 分野のさらなる発展が期待されている。これらのデバイスはインターネット回線を通じて、どこにいても簡単に家庭内などに構築された無線ネットワークに接続が可能であることから、テレビや冷蔵庫といった家電製品の無線化が求められている。無線化に伴い搭載されるアンテナに求められる条件は、小型・薄型化、周囲の金属などの影響を受けずに設置することができる柔軟性が求められている。

周囲の金属の影響を受けない小型アンテナとして MACKEY(Meta-surface inspired Antenna Chip developed by KIT EOE Laboratory, 以下：基本型)が考案されている[1]。測定した基本型は、自由空間だけでなく金属上においてもインピーダンス特性および放射特性の劣化が少ないことが報告された[2]。基本型は Wi-Fi 2 GHz 帯(2.40 から 2.50GHz, 比帯域幅：4.08%)に適用するために設計されているが、2 周波数共有アンテナとしては、MACKEY O 型(2 周波共有モデル)[3] や MACKEY

E 型(2 周波共有モデル)[4], Wi-Fi 5 GHz 帯(5.15 GHz から 5.35 GHz および 5.47 GHz から 5.725 GHz, 比帯域幅：10.6%)に適用するアンテナとしては、MACKEY 広帯域型(Wi-Fi 5 GHz 帯, 以下：広帯域型)[5]や MACKEY O 型(Wi-Fi 5 GHz 帯)[6]が報告されている。しかしながら、1 つのアンテナで Wi-Fi 2 GHz / 5 GHz 帯の帯域を満たすアンテナは提案されていない。

Wi-Fi 2 GHz 帯と Wi-Fi 5 GHz 帯を満たすために、2 つのアンテナを並列に配置したモデル MACKEY 並列配置型(以下：並列配置型)[6]が報告されている。並列配置型は、基本型と広帯域型の 2 つのアンテナを並列に並べたため、基本型のグリッド枚数 2 枚と広帯域型のグリッド枚数 2 枚の計 4 枚となりアンテナが大きくなってしまいう課題があった。並列配置型を小型にするアイデアとして、基本型のグリッドと広帯域型のグリッドを共有することでグリッド枚数は計 3 枚となり、小型になるアイデアが提案されている[7]。

本報告では、はじめに左右のグリッド幅が非対象となる MACKEY A 型(Asymmetric type, 以下:A 型)の設計限界を示す。設計限界を元に、Wi-Fi 2 GHz 帯用の MACKEY A 型(以下：A 型_2 GHz)と Wi-Fi_5 GHz 帯用

の MACKEY A 型(以下：A 型_5 GHz)を組み合わせ、グリッド枚数が 3 枚となるモデル MACKEY T 型(Triple grids type, 以下：T 型)を示し、検討する。

2. 従来の MACKEY

2.1. MACKEY 基本型(Wi-Fi 2 GHz 帯)

図 1 に基本型のモデル図を示す。上部から順にアンテナ基板、グリッド基板、金属板となっており、それぞれの間を誘電体が満たしている。

表 1 に基本型の設計パラメータを示す。基本型は、アンテナ長 l で虚部を、グリッド幅 g で共振周波数をコントロールし、整合を行う。図 2 に基本型の自由空間と金属上の VSWR 特性を示す。図 2 より、自由空間だけでなく金属上においても動作していることがわかる。また、比帯域幅は自由空間では 7.31%，金属上では 5.21% となっており、Wi-Fi 2 GHz 帯の使用帯域を満たしていることがわかる。

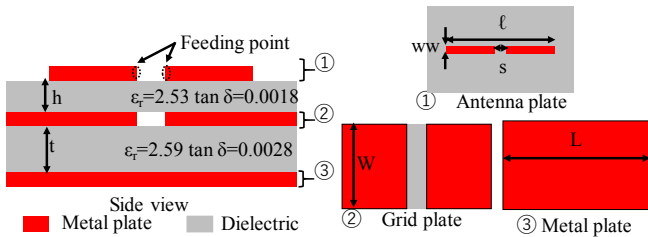


図 1 基本型のモデル図

表 1 基本型の設計パラメータ

基本型パラメータ	値
アンテナ長: l	27.0
グリッド幅: g	27.5
基板横幅: L	55.5
基板縦幅: W	30.0
アンテナの縦幅: ww	1.0
スリット幅: s	0.5
アンテナ基板の誘電体厚: h	0.74
グリッド基板の誘電体厚: t	3.12

Unit[mm]

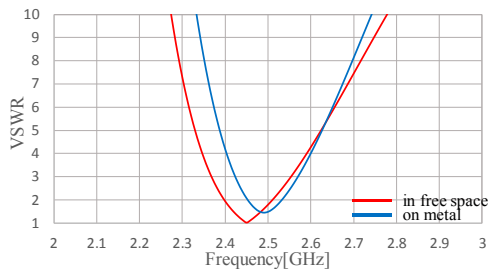


図 2 基本型の自由空間と金属上の VSWR 特性

2.2. MACKEY 広帯域型(Wi-Fi 5 GHz 帯)

広帯域型は基本型と同様の構造となっているが、基板縦幅に対して適切な基板横幅を選択することで、単一の共振点しか持たない MACKEY が双方性の特性を得られることが報告されている[5]。

表 2 に広帯域型の設計パラメータを示す。なお、表 2 に示していないパラメータは表 1 と同様とする。図 3 に広帯域型の自由空間と金属上の VSWR 特性を示す。図 3 より、自由空間だけでなく金属上においても動作していることがわかる。また、比帯域幅は自由空間では 19.7%，金属上では 20.7% となっており、Wi-Fi 5 GHz 帯の使用帯域を満たしていることがわかる。

表 2 広帯域型の設計パラメータ

広帯域型パラメータ	値
アンテナ長: l	12.8
グリッド幅: g	10.8

Unit[mm]

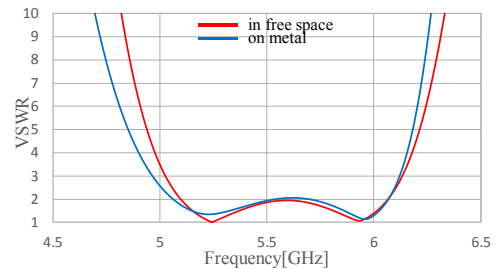


図 3 広帯域型の自由空間と金属上の VSWR 特性

3. MACKEY 並列配置型のスペースの検討

Wi-Fi 2 GHz / 5 GHz 帯の使用帯域を満たすため、基本型と広帯域型を並列に並べたモデル並列配置型を示す。図 4 に並列配置型のモデル図を示す。並列配置型は基本型と広帯域型の間に相互結合の影響を小さくするため、スペース(以下、sp)を設けている。過去の検討では $sp = 1 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$ について検討が行われていた。sp を 5 mm 以上設けることで、相互結合の影響が小さいことが報告されている[7]。今回の検討では、小型化の観点から $sp = 2 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$ について検討し、相互結合の影響が小さい sp について検討を行う。給電に関しては、2つの給電を別々に行っている。表 3 に整合をとった各 sp の設計パラメータを示す。なお、表 3 に示していないパラメータは表 1 と同様とする。

図 5 に各 sp の自由空間における VSWR 特性を、図 6 に放射パターンを示す。また、表 4 に各 sp の自由空間の比帯域幅および正面方向における X 方向での利得を示す。図 5 および表 4 より、VSWR 特性において自由空間と金属上で Wi-Fi 2 GHz / 5 GHz 帯の使用帯域を

満たしていることがわかる。図 6 および表 4 より、sp が 4mm の場合において、sp = 5mm の性能の利得との差が少ないことがわかる。このことより、並列配置型の最小の sp は 4mm であることがわかる。

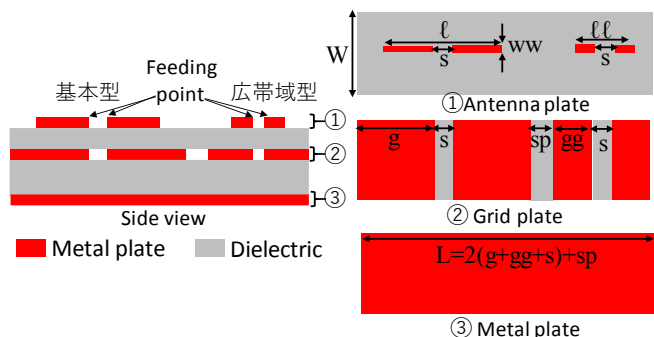


図 4 並列配置型のモデル図

表 3 並列配置型の設計パラメータ

スペース : sp	2	3	4	5
アンテナ長 : l	28.7	27.9	27.9	27.7
アンテナ長 : ll	14.6	14.4	14.3	14.8
基板横幅 : L	76.6	78.4	79.5	80.5
グリッド幅 : g	26.6	26.8	26.8	27
グリッド幅 : gg	10	9.9	9.8	10.6

Unit[mm]

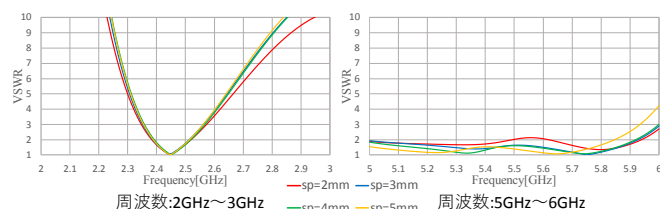


図 5 自由空間における各 sp の VSWR 特性

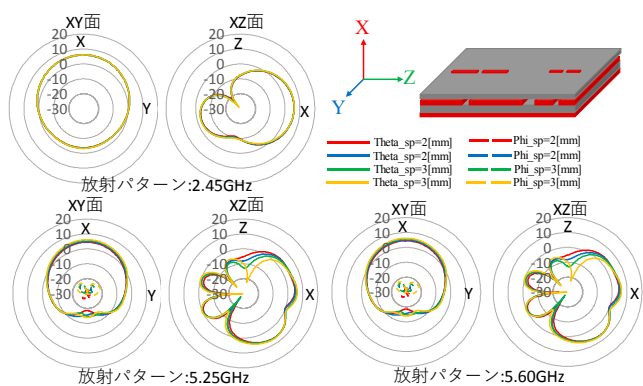


図 6 自由空間における各 sp の放射パターン

表 4 並列配置型の比帯域幅および X 方向の利得

スペース : sp	2mm	3mm	4mm	5mm
比帯域幅[%] (2~3GHz)	8.1	6.9	8.1	8.1
比帯域幅[%] (5~6GHz)	18.8	18.8	18.0	17.0
利得[dB] (2.45GHz)	6.1	6.1	6.1	6.2
利得[dB] (5.25GHz)	4.5	4.9	5.8	6.2
利得[dB] (5.60GHz)	7.3	7.7	7.6	7.4

4. MACKEY 並列配置型の小型化について

3 章で示した並列配置型の基板横幅を小さくするアイデアとして、基本型のグリッドと広帯域型のグリッドを共有する方法が提案されている[7]. 図 7 にグリッドを共有したモデルを示す. 緑の点線は Wi-Fi 2 GHz 帯に適用するために動作し、青の点線は Wi-Fi 5 GHz 帯に適用するために動作すると考えられる. 並列配置型に比べ、緑と青の点線で重なっている部分が別々の周波数帯のグリッドとして動作するため、グリッド枚数が 3 枚となり、全体の横幅は小さくなると考えられる. グリッド枚数が 3 枚となるモデルを MACKEY T 型 (Triple grids type, 以下 : T 型) を検討する. また、グリッドを共有するため、1 周波数に対応するグリッド幅は左右で非対称となる. 左右のグリッド幅が非対称となるモデルを MACKEY A 型 (Asymmetry type, 以下 : A 型) が提案されている[7]. 図 8 に A 型のモデル図を示す. 今回の検討では、Wi-Fi 2 GHz / 5 GHz 帯の検討を行っているため、2 GHz 帯のスリット幅は相互結合の影響を小さくするための sp の役割となる. 従って、Wi-Fi 2 GHz 帯のグリッドのスリット幅(sp)は、3 章で検討した相互結合の影響が小さい 4 mm, 5 GHz 帯のグリッドのスリット幅は、0.5 mm とする.

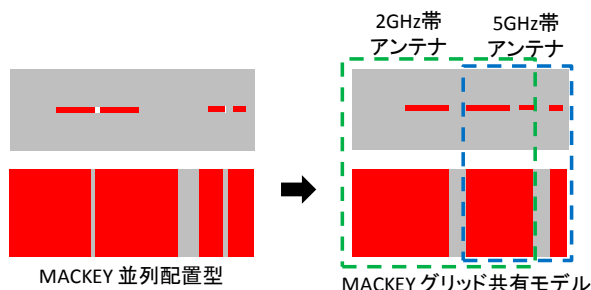


図 7 グリッド共有した MACKEY

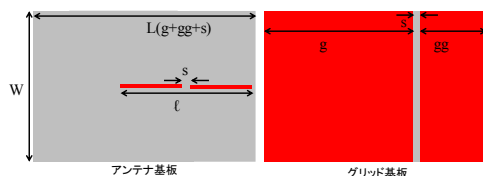


図8 A型のモデル図

5. MACKEY A 型のパラメトリックスタディ

5.1. MACKEY A 型(Wi-Fi 2 GHz 帯)

共有グリッド幅 gg を 2 mm から 12 mm まで 2 mm ごとに固定し、アンテナ長 l および第 1 グリッド幅 g_1 で整合を行った。表 5 に整合を行った寸法を示す。なお、表 5 に示していないパラメータは表 1 と同様とする。図 9 に整合を行った各 gg の自由空間における VSWR 特性と金属上における VSWR 特性を示す。また、基本型の VSWR 特性も重ねて示す。表 6 に各 gg における比帯域幅を示す。図 9 より、設計周波数において左右のグリッド幅が異なっても整合がとれていることがわかる。小型アンテナの場合、体積と比帯域幅には比例の関係があるため、表 6 に示すように、全体の横幅が小さくなる(体積が減少)につれて比帯域幅が減少していることがわかる。

表5 A型_2 GHz 帯の設計パラメータ

共有グリッド幅 : gg	2	4	6
アンテナ長 : l	36.5	32.8	30.0
第 1 グリッド幅 : g_1	35.0	34.8	34.5
基板横幅 : L	41	42.8	44.5
共有グリッド幅 : gg	8	10	12
アンテナ長 : l	27.2	25.3	25.5
第 1 グリッド幅 : g_1	34.3	34.1	34.0
基板横幅 : L	46.3	48.1	50.0

Unit[mm]

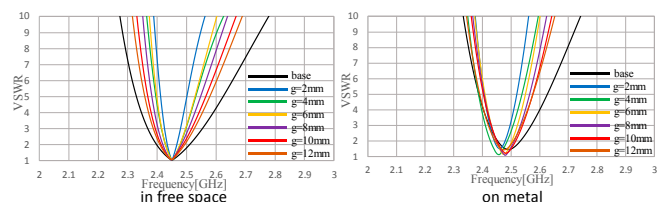


図9 A型_2 GHz 帯の VSWR 特性

表6 A型_2 GHz 帯の比帯域幅

gg	2	4	6	8	10	12
自由空間[%]	1.6	2.9	2.9	3.7	4.5	5.3
金属上[%]	2.4	3.7	3.2	3.6	3.6	4.0

5.2. MACKEY A 型(Wi-Fi:5GHz 帯)

共有グリッド幅 gg を 2 mm から 8 mm まで 2 mm ごとに固定し、アンテナ長 l および第 2 グリッド幅 g_2 で整合を行った。表 7 に整合を行った寸法を示す。なお、表 7 に示していないパラメータは表 1 と同様とする。図 10 に整合を行った各 gg の自由空間における VSWR 特性と金属上における VSWR 特性を示す。また、広帯域型の VSWR 特性も重ねて示す。表 8 に各 gg における比帯域幅を示す。図 10 より、設計周波数において左右のグリッド幅が異なっても整合がとれていることがわかる。表 8 より、基板横幅に変化が少ないため、A型_2GHz帯のように比帯域幅の変化があまり見られない。

表7 A型_5 GHz 帯の設計パラメータ

共有グリッド幅 : gg	2	4	6	8
基板縦幅 : W	32.5	32.5	32	30
アンテナ長 : l	17.9	14.8	12.5	12.8
第 2 グリッド幅 : g_2	15	14.3	13.6	12.6
基板横幅 : L	17.5	18.77	20.1	21.1

Unit[mm]

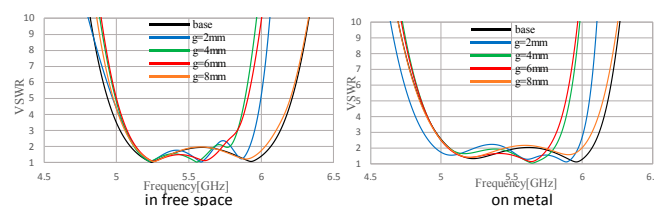


図10 A型_5 GHz 帯の VSWR 特性

表8 A型_5 GHz 帯の比帯域幅

gg	2	4	6	8
自由空間[%]	16.0	16.5	13.7	18.5
金属上[%]	20.4	14.0	15.6	20.0

5.3. MACKEY A 型のパラメトリックスタディまとめ

5.1 節および 5.2 節の結果より、基板横幅が最小でかつ Wi-Fi の比帯域幅を概ね確保できているのは、 gg が 8 mm であることがわかる。

6. MACKEY T 型の測定結果

5 章で検討した A 型を組み合わせた T 型を図 11 に示す。共有グリッド幅 gg は 5 章で決定した 8 mm とした。Wi-Fi 2 GHz 帯は第 1 アンテナ長 l_{01} および第 1 グリッド幅 g_1 で整合を行った。Wi-Fi 5 GHz 帯は第 2 アンテナ長 l_{02} および第 2 グリッド幅 g_2 で整合を行った。また、全体の寸法は基板縦幅 : $W=30$ mm × 基板横幅 :

$L = 56.8 \text{ mm} \times \text{厚さ} = 4 \text{ mm}$ である。設計した T 型は基本型と同等の寸法であり、 $sp = 4 \text{ mm}$ の並列配置型に比べ約 30 % 小型化に成功した。

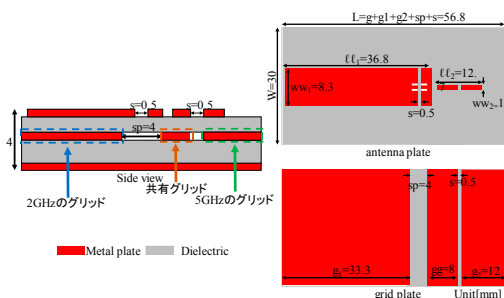


図 11 T 型のモデル図

T 型の自由空間と金属上における VSWR 特性を図 12 に放射パターン(2.45 GHz, 5.25 GHz, 5.60 GHz)を図 13 に示す。また、表 9 に自由空間と金属上における比帯域幅と正面(X)方向における利得を示す。

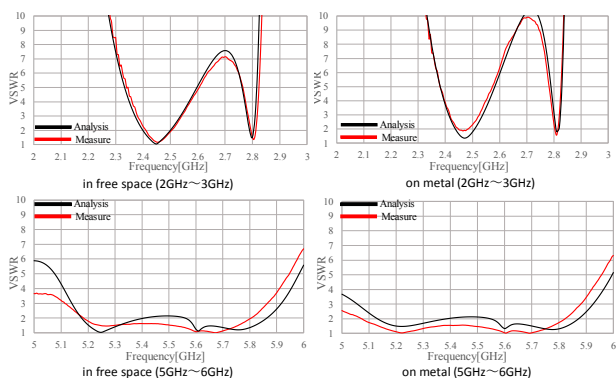


図 12 VSWR 特性の比較(解析結果と測定結果)

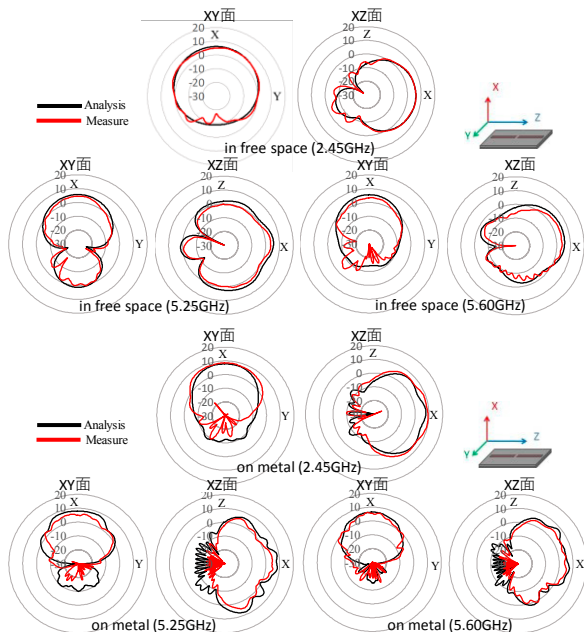


図 13 放射パターンの比較(解析結果と測定結果)

表 9 T 型の比帯域幅および X 方向の最大利得

	自由空間 (解析)	自由空間 (測定)	金属上 (解析)	金属上 (測定)
比帯域幅[%] (2~3GHz)	6.1	6.5	4.4	4.2
比帯域幅[%] (5~6GHz)	13.9	13.6	15.6	16.0
利得[dB] (2.45GHz)	6.1	5.5	7.8	8.51
利得[dB] (5.25GHz)	5.7	4.5	8.1	6.0
利得[dB] (5.60GHz)	5.7	3.6	6.4	6.3

図 12 および表 9 より Wi-Fi 2 GHz 帯と Wi-Fi 5 GHz 帯の比帯域幅を満たしていることがわかる。図 17 および表 9 より解析値と測定値の利得は概ね一致しており、放射パターンの形状も一致していることがわかる。

7. 電流分布による考察

T 型の電流分布を図 14 に示す。電流分布は図 12 の自由空間の解析結果より VSWR が落ち込んでいる点(2.45GHz, 2.80GHz, 5.25GHz, 5.60GHz, 5.79GHz)で算出した。

2.45GHz では、2GHz 用のグリッドと共有グリッドの上端および下端に同相の電流が流れており放射源として働いていることがわかる。また、 sp 周辺においては逆位相の電流が流れているため伝送線路として働いていることがわかる。

2.80GHz では、グリッドの上端および下端に同相の電流が流れており放射源として働いていることがわかる。また、2GHz のアンテナ上とアンテナ直下のグリッド基板上で逆位相の電流が流れているため伝送線路として動作していることがわかる。

5.25GHz では、グリッドの上端および下端に同相の電流が流れており放射源として働いていることがわかる。スリット周辺においては逆位相の電流が流れているため伝送線路として働いていることがわかる。2GHz 用のグリッドにおいてはグリッドの中央から左側と右側で逆位相の電流が流れているため、打ち消し、放射しないことがわかる。

5.60GHz では、グリッドの上端および下端に同相の電流が流れており放射源として働いていることがわかる。スリット周辺においては逆位相の電流が流れ、共有グリッド幅の左側と 5GHz 用のグリッド幅の右側においても逆位相の電流が流れており、伝送線路として働いていることがわかる。また、5.60GHz は 2.80GHz

の2倍波であり、2GHz用のアンテナに電流が乗るため、共振していると考えられる。図15に2GHz用のアンテナがある場合とない場合のVSWR特性の比較結果を示す。図15より、アンテナがない場合、5.60GHz近傍において、2GHz用のアンテナがある場合のような不連続な特性でないことがわかる。このことより、2GHz用のアンテナに電流が乗るため不連続な特性となっていることがわかる。

5.76GHzでは、グリッドの上端および下端に同相の電流が流れており放射源として働いていることがわかる。スリット周辺においては逆位相の電流が流れ、共有グリッド幅の左側と5GHz用のグリッド幅の右側においても逆位相の電流が流れており、伝送線路として働いていることがわかる。また2GHzのグリッド中央において逆位相の電流が流れているが、逆位相のため打ち消し合い、放射しないことがわかる。

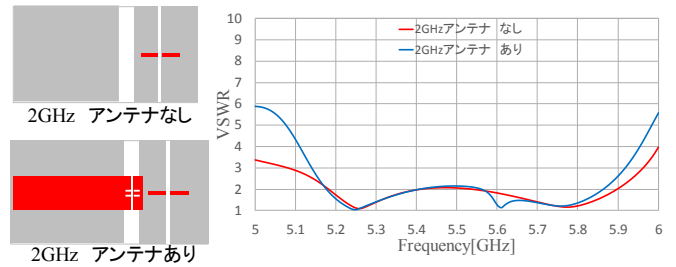


図15 T型の2GHz用のアンテナの有無の比較

8. まとめ

並列配置型の中央のグリッド幅を共有したT型を示した。提案したT型は基本型と同寸法であり、 $sp = 4\text{ mm}$ の並列配置型に比べ約30%小型化に成功した。測定したT型はWi-Fi 2 GHz帯およびWi-Fi 5 GHz帯を満たし、自由空間だけでなく金属上においても動作することを示した。

本研究はJST CREST(JPMJCR16Q)の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 諸谷徹郎, 小鷹柁樹, 牧野滋, 林秀幸, 野口啓介, 廣田哲夫, 伊東健治, “AMC基板一体化ダイポールアンテナの提案”, 信学技報, AP2014-211, pp.1-5, 2014.
- [2] 小鷹柁樹, 諸谷徹郎, 牧野滋, 林秀幸, 野口啓介, 廣田哲夫, 伊東健治, “AMC基板一体化ダイポールアンテナの検討”, 信学技報, AP2015-6, pp.25-30, 2015.
- [3] 大坪靖治, 小鷹柁樹, 牧野滋, 廣田哲夫, 野口啓介, 伊東健治, 諸谷徹郎 “オフセット給電により2周波共有化したMACKEY O型の検討”, 信学技報, AP2016-21, pp.27-32, 2016.
- [4] 平野賢, 牧野滋, 野口啓介, 伊東健治, 廣田哲夫 “2周波共有アンテナMACKEY E型に関する検討”, 信学技報, AP2017-74, pp.35-39, 2017.
- [5] 諸谷徹郎, 牧野滋, 大坪靖治, 野口啓介, 廣田哲夫, 伊東健治, “小型アンテナMACKEYの広帯域化に関する一検討”, 信学技報, AP2016-52, pp.87-90, 2016.
- [6] 須永諄, 大坪靖治, 牧野滋, 廣田哲夫, 野口啓介, 伊東健治, 諸谷徹郎 “小MACKEY O型の広帯域化モデルの検討”, ソサイエティ大会, AP2016-52, B1-62, 2016.
- [7] 平野賢, 牧野滋, 野口啓介, 伊東健治, 廣田哲夫 “2周波共有アンテナMACKEY E型に関する検討”, 信学技報, AP2017-110, pp.15-20, 2017.

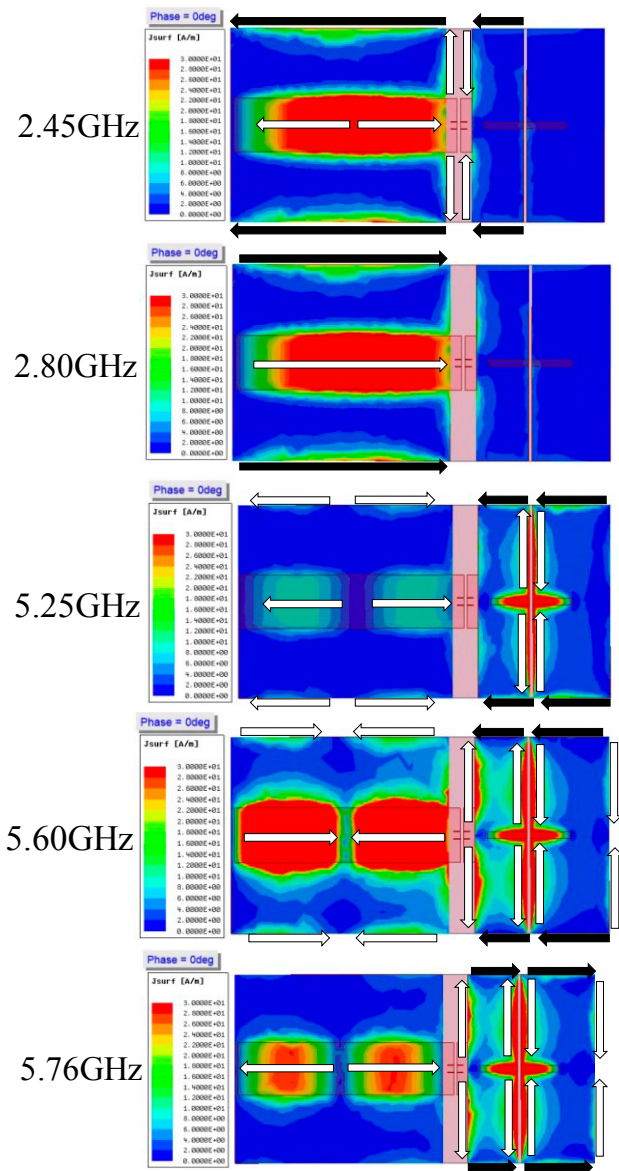


図14 T型の電流分布