

## リニアアレーMACKEYの検討

辻 開生<sup>††</sup> 宮下 圭介<sup>†</sup> 若山 喜一<sup>†</sup> 牧野 滋<sup>†‡</sup> 伊東 健治<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 金沢工業大学 〒921-8812 石川県野々市市扇が丘 7-1

E-mail : <sup>†</sup> c6001926@planet.kanazawa-it.ac.jp, <sup>‡</sup> makino@neptune.kanazawa-it.ac.jp

**あらまし** エナジーハーベスティングのためには、電波を効率よく受信できるアンテナが必要である。そのため、アンテナ素子構造を連続的に配置し、利得や指向性を向上させるアレーアンテナがしばしば用いられる。このことから本論文では、小型機器への搭載を想定した金属上で動作するアレーアンテナについて検討した。アレーモデルには給電回路の設置を考慮し、背面給電が可能な MACKEY II を採用した。一般的なアレーアンテナは素子間隔を半波長で設計するが、MACKEY II は 1/4 波長間隔での設計が可能であり、小型化が期待できる。また、4 素子リニアアレーアンテナを検討し、各パラメータの最適化により、放射される電波の指向性、利得を改善し、金属上で動作するリニアアレーMACKEY を検討した。

**キーワード** MACKEY, Wi-Fi, アレーアンテナ, 指向性, 不平衡給電

## Consideration of the linear array MACKEY

Kaisei Tsuji<sup>††</sup> Keisuke Miyashita<sup>†</sup> Kiichi Wakayama<sup>†</sup> Shigeru Makino<sup>†‡</sup> and Kenji Itoh<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Kanazawa Institute of Technology 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa, Japan

E-mail : <sup>†</sup> c6001926@planet.kanazawa-it.ac.jp, <sup>‡</sup> makino@neptune.kanazawa-it.ac.jp

**Abstract:** For energy harvesting, an antenna that can receive radio waves efficiently is required. For this purpose, array antennas are often used, in which antenna element structures are arranged in a continuous manner to improve gain and directivity. Therefore, in this paper, an array antenna operating on metal is investigated for installation in small devices. The array model is MACKEY II, which can be rear-fed, in consideration of the installation of the feeding circuit. The array antenna is designed with a half-wavelength spacing, while the MACKEY II can be designed with a quarter-wavelength spacing, which is expected to reduce the size of the antenna. A four-element linear array antenna was also investigated to improve the directivity and gain of the radiated signal by optimizing each parameter. A linear array MACKEY operating on metal was also investigated.

### 1. まえがき

近年 IoT 分野のさらなる発展が期待され、製品の無線化が進んでいる。更に、電波をエネルギーに変換するエナジーハーベスティングも注目されており、センサーネット用端末に電力を供給することでバッテリーを必要としない端末の実現が可能となる。このような無線化に伴い、搭載されるアンテナに求められる条件は小型・薄型化だけでなく、金属の有無に関わらず設置可能であるという設置場所の自由度が求められる。金属上で動作可能なアンテナとして、MACKEY II[1]が提案された。本報告ではエナジーハーベスティングに焦点を当て、より受信効率が良いとされるアレー化構造を施したリニアアレーMACKEY を提案する。通常、アレーアンテナは素子間隔を 1/2 波長で設計されることが多いが、アレー化した MACKEY は 1/4 波長間隔での設計が可能である。本検討では素子間隔 1/4 波長

で設計した MACKEY が放射するビームの利得と指向性の向上とともに、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。

### 2. MACKEY II

図 1 に MACKEY II のモデル図を示す。上部から順に①グリッド基板、②アンテナ基板、③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。MACKEY II は、①Grid plate の金属板端部に電流が流れることでアンテナとして動作している。アンテナ長さ  $l$  とグリッド幅  $g$  で共振周波数を制御してインピーダンス整合を行う。図 2 に MACKEY II の自由空間と金属上における VSWR 特性の解析値を示す。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おり、Wi-Fi 2 GHz 帯の使用帯域を概ね満たしていることがわかる。

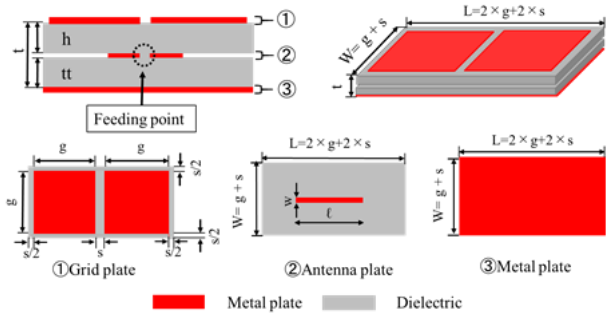


図1 MACKEY II\_モデル図

表1 従来 MACKEY IIの整合パラメータ

パラメータ	長さ [mm]
$l$	29.0
$g$	33.5
$L$	68.0
$W$	34.0
$w$	1.1
$s$	0.5

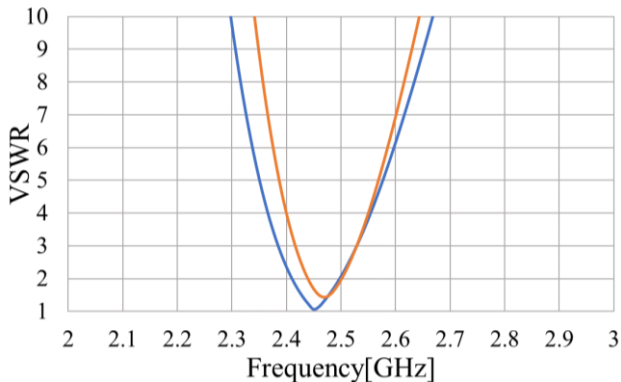


図2 初期パラメータ MACKEY IIの VSWR 解析結果

### 3. MACKEY IIのアレー化

MACKKEYのアレー化に際し、分配回路を設置する必要があるため、素子構造は背面給電が可能なMACKEY IIを採用した。また、本検討では電界面、磁界面のそれぞれに一次的に配列した2種類の4素子リニアアレーモデルについて検討を行った。図3にアレー化を施したMACKEY IIの2種類のモデルについて、鳥瞰図を示す。

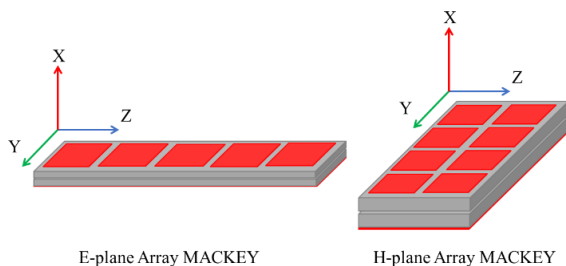


図3 リニアアレーMACKEYの鳥瞰図

図3に示したモデル図のうち、電界面に素子を配列したモデルをE面配列\_MACKEY\_不平衡型(以下:E面配列モデル)、磁界面に素子を配列したモデルをH面配列\_MACKEY\_不平衡型(以下:H配列モデル)とする。図1で示したMACKEY IIでインピーダンス整合を行い、そのパラメータを図3に示したように配列する。しかし、表1に示した初期パラメータを用いたアレー化モデルではグリッド板が線路として動作し、十分な利得向上が見込めないことが分かっている。そこで、スリット幅 $s$ を大きくすることでグリッド板同士を離し、線路として動作しない構造を考えた。E面配列モデルについて、スリット幅 $s$ を変更した際の各損失の解析結果を図4にまとめた。また表2に自由空間、表3に金属上における、各損失の解析結果をまとめており、 $s = 0.5, 1.0, 5.0, 10, 15$  mmの5つのスリット幅 $s$ について記載している。図4より、自由空間と金属上共にスリット幅 $s$ の変化によって熱損失はほとんど変化しないが、反射損失は大きく変化し、 $s = 0.5$  mmから $s = 4$  mmまでの間で反射損失が2.92 dB軽減されている。また、 $s = 10$  mmのとき総損失が自由空間、金属上共に最も小さくなる。このことからE面配列モデルの最適なスリット幅 $s$ は10 mmであることがわかる。

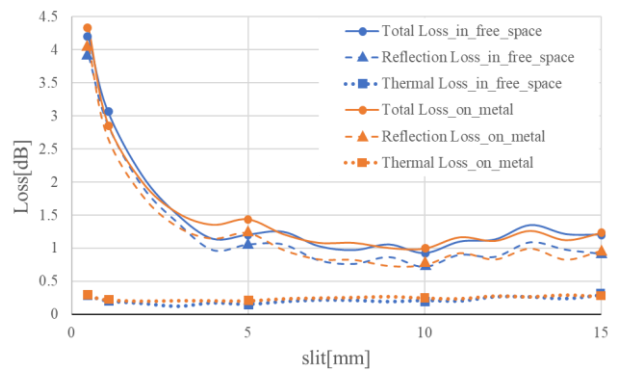


図4 E面配列モデルにおけるスリット幅 $s$ に対する各損失の変化

表2 E面配列\_スリット幅 $s$ に対する各損失\_自由空間( $s = 0.5$  mm ~ 15 mm)

slit幅[mm]	0.5	1.0	5.0	10	15
総損失[dB]	4.17	3.11	1.21	0.93	1.21
反射損失[dB]	3.89	2.91	1.06	0.72	0.92
熱損失[dB]	0.27	0.2	0.15	0.21	0.29

表3 E面配列\_スリット幅 $s$ に対する各損失\_金属上( $s = 0.5$  mm ~ 15 mm)

slit幅[mm]	0.5	1.0	5.0	10	15
総損失[dB]	4.29	2.93	1.43	0.99	1.22
反射損失[dB]	4.02	2.71	1.23	0.75	0.96
熱損失[dB]	0.27	0.22	0.2	0.25	0.27

H面配列モデルのスリット幅  $s$  の変化に対する各損失の解析結果を図5に示し、表4に自由空間、表5に金属上における、各損失の解析結果をまとめており、E面配列モデル同様に5つのスリット幅  $s$  について記載している。図5より、E面配列モデル程大きな変化はないが、スリット幅  $s$  の変化とともに反射損失が変化し、スリット幅  $s$  を大きくする程、損失が減少していくことがわかる。本検討ではモデルサイズの観点からスリット幅  $s = 10 \text{ mm}$  が最適であるとし、そのパラメータを用いる。

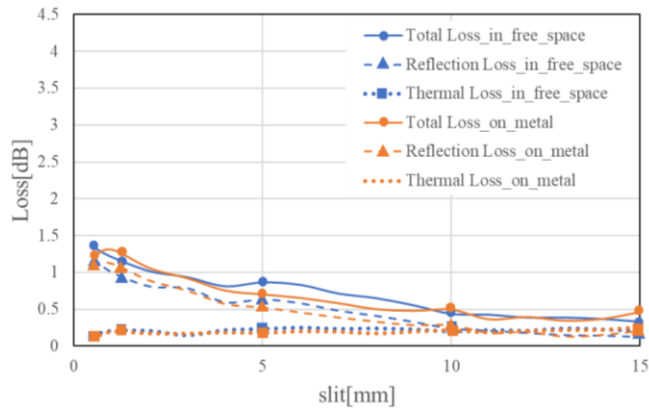


図5 H面配列モデルにおけるスリット幅  $s$  に対する各損失の変化

表4 E面配列モデル\_スリット幅  $s$  の変化に対する各損失の値\_自由空間 ( $s = 0.5 \text{ mm} \sim 15 \text{ mm}$ )

slit幅[mm]	0.5	1.0	5.0	10	15
総損失[dB]	1.35	1.21	0.87	0.44	0.33
反射損失[dB]	1.2	1.01	0.64	0.24	0.12
熱損失[dB]	0.15	0.2	0.23	0.2	0.21

表5 E面配列スリット幅  $s$  の変化に対する各損失の値\_金属上 ( $s = 0.5 \text{ mm} \sim 15 \text{ mm}$ )

slit幅[mm]	0.5	1.0	5.0	10	15
総損失[dB]	1.21	1.31	0.7	0.5	0.46
反射損失[dB]	1.11	1.12	0.52	0.28	0.21
熱損失[dB]	0.1	0.19	0.18	0.21	0.26

#### 4. パラメータを最適化した MACKEY II

給電方法は電力分配回路による損失を抑えるため、給電箇所が少ない MACKEY II\_不平衡型[2] (以下: 不平衡型) の構造を使用する。図6に不平衡型のモデル図を示し、表6にスリット幅  $s = 10 \text{ mm}$  の整合パラメータを示す。また、図7に同モデルの放射パターンの解析結果を示す。モデル構造は図1に示した MACKEY II と同様で、スルーホールによってモデル背面からの給電を可能にしている。図7より、不平衡型1素子の放射パターンは無指向性に近いことがわかる。

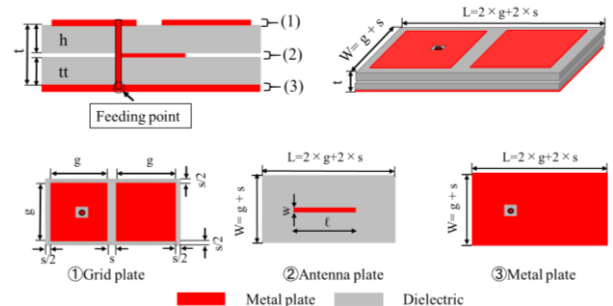


図6 MACKEY II\_不平衡型\_モデル図  
表6 不平衡型\_  $s = 10 \text{ mm}$  整合パラメータ

パラメータ	長さ [mm]
$\ell$	28.8
$g$	35.1
$L$	90.2
$W$	45.1
$w$	1.0
$s$	10.0

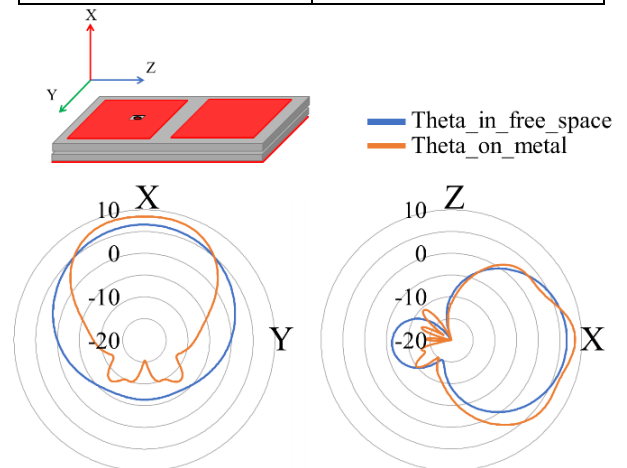


図7 不平衡型\_放射パターン  
表7 不平衡型\_正面利得

	自由空間	金属上
正面利得[dB]	6.59	8.57

#### 5. リニアアレー-MACKEY

##### 5.1 E面配列 MACKEY\_不平衡型

図8にE面配列モデルのモデル図を示す。モデル構造は図6に示した不平衡型と同様で、E面方向に4素子配列しており、素子間隔は1/4波長である。モデルの各パラメータは表8に示した数値を使用する。図9にE面配列モデルの自由空間と金属上における各給電点のVSWR特性を示す。図9より、各給電点において自由空間、金属上ともにWi-Fi2GHz帯の帯域を概ね満たしており、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。

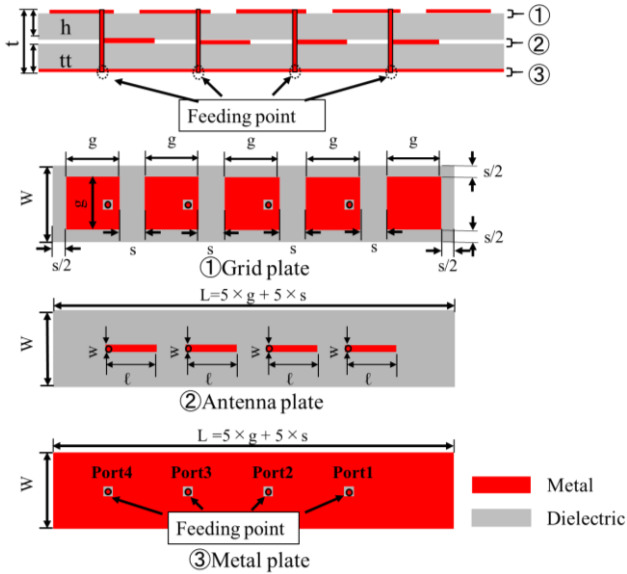


図 8 E 面配列 MACKEY\_不平衡型\_モデル図

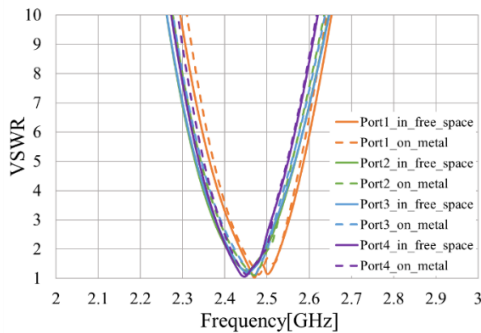


図 9 E 面配列モデル\_各 Port\_VSWR.

図 10 に E 面配列モデルについて、全ての Port に同振幅、同位相で給電した場合の 2.45GHz における自由空間と金属上の放射パターンの解析結果を示す。全ての Port に給電した際、E 面内において自由空間で  $\theta = 77.3^\circ \sim 111.4^\circ$ 、金属上で  $\theta = 76.6^\circ \sim 107.0^\circ$  の範囲にビームを放射しており、指向性を持っていることがわかる。また、正面方向の利得は自由空間で 9.55 dBi、金属上で 10.82 dBi となっており、1 素子の利得と比較すると自由空間では 2.96 dBi、金属上では 2.25 dBi 利得が向上した。このことから、E 面配列モデルについて、放射パターンに指向性を与え、利得を向上させられることがわかる。

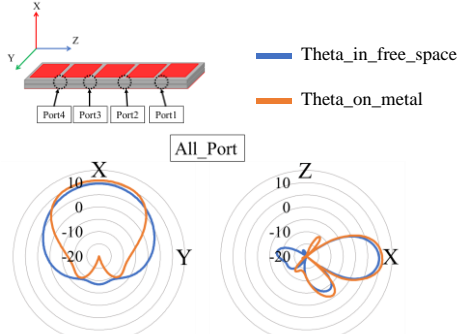


図 10 E 面配列モデル\_放射パターン\_全 Port 給電

また、図 11 に各素子に給電した場合の 2.45GHz における自由空間と金属上の放射パターンの解析結果を示す。それぞれの素子の放射パターンは無指向性に近

く、モデル中心付近である Port2, Port3 の正面利得が低くなっている。これは XZ 面の放射パターンにおいて正面方向以外に強く放射しているからであると考えられる。

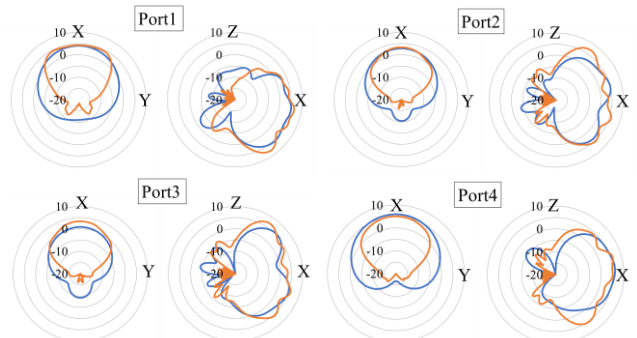


図 11 E 面配列モデル\_放射パターン\_各 Port 給電  
表 8 E 面配列モデル\_正面利得

Port名	全Port			
条件	自由空間		金属上	
正面利得[dB]	9.55		10.82	
Port名	Port1		Port2	
条件	自由空間	金属上	自由空間	金属上
正面利得[dB]	4.02	4.29	2.82	3.33
Port名	Port3		Port4	
条件	自由空間	金属上	自由空間	金属上
正面利得[dB]	0.83	3.35	5.97	5.07

## 5.2 H 面配列 MACKEY\_不平衡型

図 12 に H 面配列モデルのモデル図を示す。モデル構造は図 6 に示した不平衡型と同様で、H 面方向に 4 素子配列しており、素子間隔は 1/4 波長である。モデルの各パラメータは表 6 の数値を使用する。図 13 に H 面配列モデルの自由空間と金属上における各給電点の VSWR 特性を示す。図 13 より、各給電点において自由空間、金属上ともに Wi-Fi2GHz 帯の帯域を概ね満たしており、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。

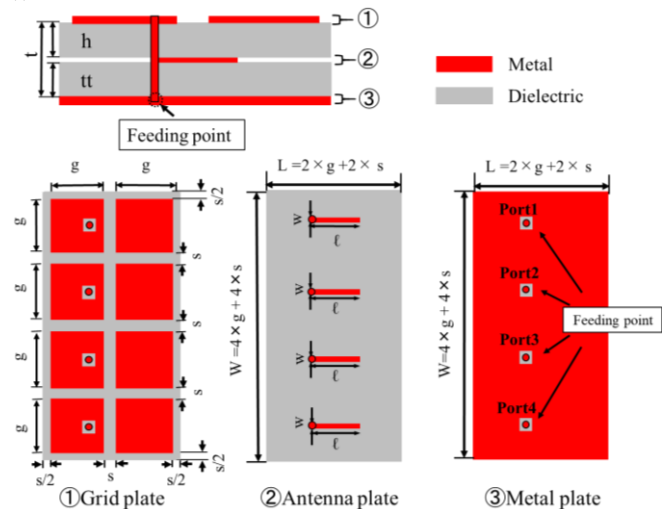


図 12 H 面配列 MACKEY\_不平衡型\_モデル図。

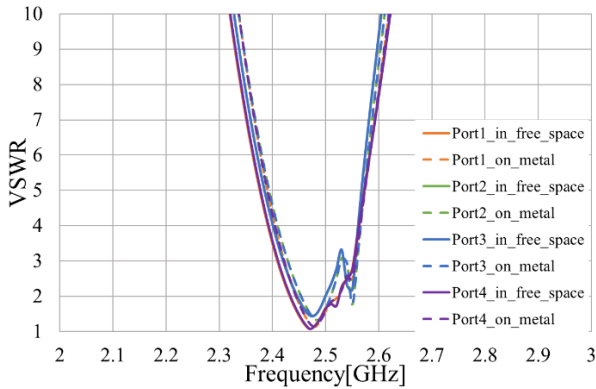


図 13 H 面配列モデル\_各 Port\_VSWR.

図 14 に H 面配列モデルについて、全ての Port に同振幅、同位相で給電した場合の 2.45GHz における自由空間と金属上の放射パターンの解析結果を示す. 全ての Port に給電した際、H 面内において自由空間で  $\phi = 68.4^\circ \sim 138.6^\circ$ 、金属上で  $\phi = 71.1^\circ \sim 126.5^\circ$  の範囲にビームを放射しており、指向性を持っていることがわかる. また、正面方向の利得は自由空間で 10.95 dBi、金属上で 11.79 dBi となっており、1 素子の利得と比較すると自由空間は 4.36 dBi、金属上は 3.22 dBi 利得が向上した. 以上のことから、E 面配列モデル同様に H 面配列モデルについても、放射パターンに指向性を与え、利得を向上させられることがわかる.

また、図 15 に各素子に給電した場合の 2.45GHz における場合は、それぞれの素子の放射パターンは無指向性に近く、モデル中心付近である Port2、Port3 についても自由空間で 3.91dBi、金属上で 4.41dBi となっており、比較的利得ではあるが正面方向に十分に放射していることがわかる.

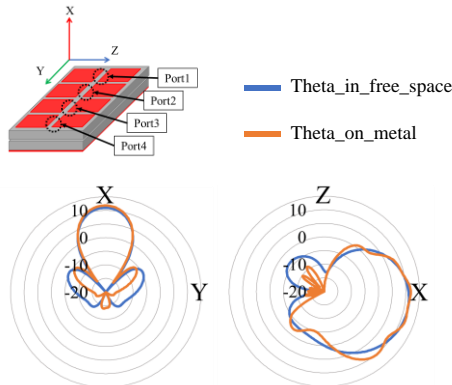


図 14 H 面配列モデル\_放射パターン\_全 Port 給電

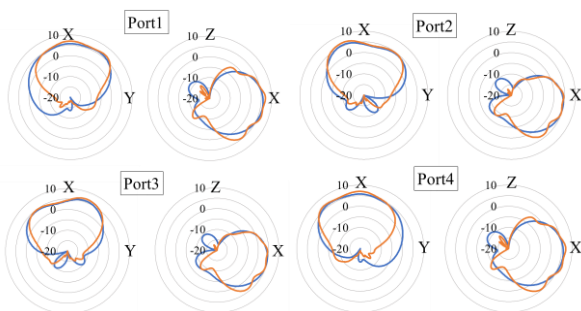


図 15 H 面配列モデル\_放射パターン\_各 Port 給電

表 9 H 面配列モデル\_正面利得

Port名	全Port			
条件	自由空間		金属上	
正面利得[dBi]	10.95		11.79	
Port名	Port1		Port2	
条件	自由空間	金属上	自由空間	金属上
正面利得[dBi]	5.84	7.04	3.91	4.41
Port名	Port3		Port4	
条件	自由空間	金属上	自由空間	金属上
正面利得[dBi]	3.99	4.36	5.79	7.01

## 6. まとめ

本検討では、3章で MACKEY のアレー化に伴う素子の配列方法と最適なスリット幅  $s$  についての検討を行い、反射損失、モデルサイズの観点から最適なスリット幅  $s$  は E 面配列、H 面配列共に 10 mm であることを示した. 4章ではスリット幅  $s$  を 10 mm としたときの単一素子モデルについて記述し、検討に使用するモデルの基礎構造となる MACKEY II\_不平衡型のモデルパラメータと、その放射パターンが無指向性となることを示した. 5章、6章において、電界、磁界面に対して配列し、指向性を持たせる E 面配列 MACKEY\_不平衡型、H 面配列 MACKEY\_不平衡型について検討した. 解析結果は検討した両モデルが自由空間、金属上に共に動作し、利得向上と素子を配列した面内において指向性を与えられることを示した. 以上のことから、素子間隔 1/4 波長で設計したりニアアレー MACKEY は利得向上と指向性付与を可能とし、自由空間と金属上で動作することを示した.

## 文 献

- [1] 宮下圭介, 田村俊樹, 牧野滋, 伊東健治, “新たな構造を用いて薄型化した MACKEY II の研究”, 信学技報, AP2020-12, pp.15-19, 2020.
- [2] Keisuke Miyashita, Shigeru Makino, Kenji Itoh, “Feasibility study of an unbalanced MACKEY type R with enhanced robustness on metal”, ISAP2021, 2021.