

# 方形マグネチックループアンテナの製作

山添義顕\*<sup>1</sup>, 重井宣行\*<sup>2</sup>, 葭谷安正\*<sup>3</sup>, 谷口雄二\*<sup>4</sup>, 小暮裕明\*<sup>5</sup>

## Production of Square Magnetic Loop Antenna

Yoshiaki YAMAZOE\*<sup>1</sup>, Nobuyuki SHIGEI\*<sup>2</sup>, Yasumasa YOSHITANI\*<sup>3</sup>, Yuji TANIGUCHI\*<sup>4</sup>, Hiroaki KOGURE\*<sup>5</sup>

### 要旨

アマチュア無線通信には、135 kHz 帯から 249 GHz 帯まで多数の周波数帯が割り当てられている。これらの周波数帯で 7 MHz 帯が国内通信に最も適しており、7,000 kHz~7,200 kHz の周波数の使用が認められている。この 7 MHz 帯でマグネチックループアンテナの使用実績があるが、そのほとんどが円形タイプである。円形タイプのマグネチックループアンテナの場合、省スペース化を図れるが分解が難しく、移動運用には適さない。また、ファラデーリングを用いるため、アンテナ特性に大きな差が現れる。そこで、本研究では 4 本の角パイプを組み合わせた 1 m 四方の方形タイプのマグネチックループアンテナを製作し、ファラデーリングの最適な設置角度を求めた。また、このアンテナに可変コンデンサを取り付けて、アマチュア無線通信に許可された 7 MHz 帯全域の周波数を使用できるようにした。このアンテナで実際に通信実験を行い、東海地方のアマチュア局と交信できることを確認した。さらに、移動運用の際に必要なアンテナの地上高や指向特性を調査し、その調査結果をまとめた。

キーワード：小型アンテナ、ファラデーリング、アマチュア無線、地上高、指向性、通信実験、ものづくり

### 1. はじめに

アマチュア無線では様々な周波数帯が割り当てられており、それぞれの周波数帯の任意の周波数で送受信が可能である。国内通信に最適な周波数帯として、7,000 kHz~7,200 kHz が割り当てられている。この周波数帯を 7 MHz 帯という。7 MHz 帯で送受信する場合、アンテナの長さが 20 m 程度になるため、広大な敷地を必要とする。そこで、限られた敷地内で送受信可能な小型アンテナを使用することがあり、その一つとして、マグネチックループアンテナ(以下、「MLA」という)が使用されている[1]。一般的な MLA は円形で、村井らの研究でも直径 1 m の円形 MLA を製作し、実際に通信できることを確認した[2]。このアンテナは省スペースで設置できるため移動運用にも適しているといえるが、直径 1 m の円形では持ち運びが容易ではない。また、最適な誘導結合度が定量化されておらず、実際の送受信において調整しづらいといった問題点があった。そこで、本研究では 1 m 長のアル

ミ角パイプに分解可能な 1 m 四方の方形 MLA を製作する。また、誘導結合度を測定して最適な状態を求め、送受信時における問題点の解決を図る。

### 2. MLA

#### 2. 1 MLAの概要と特徴

環状のコイルをエレメントとしたアンテナをループアンテナという。MLA はループアンテナの一種であり、微小ループアンテナやスモールループアンテナと呼ばれる。また、アンテナには電界型と磁界型があり、MLA は磁界型に分類され、磁界成分を検知する[3]。

MLA は、使用する周波数の波長  $\lambda$  に比べて十分小さいアンテナで、一般にループ長は  $\lambda/10$  以下といわれている[3]。

そのため、MLA はマンションなどのベランダへの設置や移動運用にも使用されている。

#### 2. 2 MLAの構造

MLA は 1 次側の結合ループ(以下、「ファラデーリング」という)と 2 次側のメインループから構成されており、無線機からの高周波エネルギーを 2 次側に電磁誘導で誘起させ、メインループから輻射する。

メインループには断面が 30 mm×20 mm のアルミ角パイプを用い、パイプ相互は L フックボルトで十分に固定することで接触抵抗の低減を図った。また、ファラデーリングには同軸ケーブル(5D-SFA)を用い、横 330 mm、縦 240 mm、周囲長約 901 mm の楕円形とした。

MLA の等価回路図と製作した方形 MLA を図 1 に示

2023 年 9 月 1 日 受理

\*1 総合工学システム学科電子情報コース卒業生

(Graduation of Technological Systems : Electronics and Information Course)

\*2 総合工学システム学科エレクトロニクスコース

(Dept. of Technological Systems : Electronics Course)

\*3 元知能情報コース (Formerly, Intelligent Informatics Course)

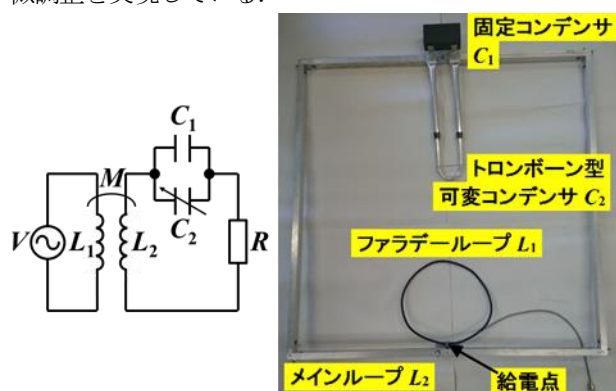
\*4 生産技術センター (Production Engineering Center)

\*5 小暮技術士事務所 (Kogure Consulting Engineers)

す。1 次側, 2 次側のインダクタ成分をそれぞれ  $L_1, L_2$  とし, これらの誘導結合を  $M$  とする。また, 固定コンデンサと可変コンデンサのキャパシタ成分をそれぞれ  $C_1, C_2$ , 各種損失による抵抗成分を合わせて  $R$  とする。

固定コンデンサは内部に銅板を複数積み重ねたものを黒い箱型ケースに納めている。この構成の場合, 静電容量は銅板の面積に比例する。そのため, 箱の内部温度によって銅板の面積が変化し, 静電容量がわずかに変化してしまうという欠点がある。

トロンボーン型可変コンデンサは長さの調整が可能なアルミパイプであり, このアルミパイプを上下にスライドさせることで可変コンデンサを構成し, 共振周波数の微調整を実現している。



(a)等価回路図 (b)製作した方形 MLA  
図 1 MLA の等価回路図と製作した方形 MLA

メインループは垂直設置とし, ファラデーリングをメインループと同一面上に設置した場合を設置角度  $0^\circ$  と定義する。ファラデーリングは給電点を通る鉛直方向の中心軸にて任意の角度で回転させることが可能である。本研究ではこのファラデーリングの設置角度(以下, 「ループ設置角度」という)を調整することで誘導結合度の定量化を模索する。

また, アマチュア無線通信では送信周波数が変わるので, 共振周波数は  $7,000 \text{ kHz} \sim 7,200 \text{ kHz}$  の  $7 \text{ MHz}$  帯全域を可変できることが望ましい。本研究では  $C_1$  により共振周波数を  $7 \text{ MHz}$  帯付近におおよそ決定し, そこから  $C_2$  を変化させることにより微調整し, 目的とする送信周波数に共振させる。  $C_1, C_2$  が並列に接続されていることを考慮した上で, 共振周波数  $f$  を式(1)に示す[2]。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2(C_1 + C_2)}} \quad (1)$$

### 3. 実験評価項目

#### 3. 1 電圧定在波比

電圧定在波比(以下, 「VSWR」という)は電圧の最大振幅と最小振幅の比をとったもので表される。周波数ごと

の VSWR を計測することで, その周波数におけるインピーダンスマッチングの状態がわかる。インピーダンスマッチングが完全な場合, VSWR は 1 となり, インピーダンスマッチングがとれていないほど VSWR は高くなる[4]。

また, VSWR より, アンテナからの反射電力が計算できる。アンテナからの反射電力  $P_{\text{ref}}$  を式(2)に示す[4, 5]。

$$P_{\text{ref}} = 100 \left( \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \right)^2 [\%] \quad (2)$$

市販のアンテナでは VSWR1.5 以下を保証したものが多く, このときの反射電力  $P_{\text{ref}}$  は式(2)より 4%以下になる。本研究でも周波数帯域幅の基準として用いる。

#### 3. 2 スミスチャート

スミスチャートとは反射係数面状に正規化インピーダンス等位線を記入した円形の図である。円の上半分が誘導性, 下半分が容量性となっており, インピーダンスの実部及び虚部の値が視覚的に得られる。円の軌跡が図の中心を通る際, インピーダンスマッチングが完全にとれていることを意味する[2]。

#### 3. 3 指向性と受信電力

アンテナの指向性は, アンテナから輻射される電波強度を方位とともに表す指標になる。これには, 送信アンテナの周囲に受信アンテナを設置し, 受信アンテナの受信電力から求められる。受信電力を測定する際, 送信アンテナからの距離の目安として, 遠方界が始まるとみなせる  $\lambda/2\pi [\text{m}]$  が使われる[3]。  $7 \text{ MHz}$  の場合, この距離は  $6.8 \text{ m}$  以上となる。

送信アンテナと受信アンテナとの距離を  $R$ , 送信電力を  $P_t$ , 送信アンテナの絶対利得を  $G_t$ , 受信アンテナの絶対利得を  $G_r$  とおいたとき, 受信電力  $P_r$  を式(3)に示す[5]。

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi R^2} \right)^2 G_t G_r \quad (3)$$

この式から送信アンテナの指向性を図示するには, 送信アンテナの絶対利得が必要である。しかし, (3)式から  $P_t, G_r, R$  を固定した場合,  $P_r$  と  $G_t$  は比例関係にある。そこで, 本研究では指向性を視覚的に捉えられるようにするため, アンテナ周囲で実際に測定した電波強度を使って指向性を表す。

### 4. 実験における測定環境

アンテナ特性の測定には RigExpert 社製 AA-600 アンテナアナライザを使用した。

また, アンテナと測定機器との接続には, 約  $13.7 \text{ m}$  の同軸ケーブル(5D2V)を使用した。この同軸ケーブルは, ケーブルの長さがアンテナ特性に影響しないように送信周波数と波長短縮率から実測して製作されたものである。

アンテナは、給電点の地上高を約2mの位置に設置した。図2に設置環境を示す。



図2 実験時の設置環境

### 5. 事前実験

事前実験として、MLAの共振周波数が7,080kHzになるように可変コンデンサ $C_2$ を調整した。実測結果(以下、「MLA条件値」という)は、 $L_2=2.84\mu\text{H}$ 、 $C_1=156\text{pF}$ 、 $C_2=22\text{pF}$ であった。このときの共振周波数 $f$ の理論値は式(1)より約7,079kHzとなる。一方、アンテナアナライザで測定すると、7,080kHzのとき、VSWRは最小値1.08であった。また、VSWR1.5以下の周波数帯域幅は7kHz程度であった。測定結果を図3に示す。

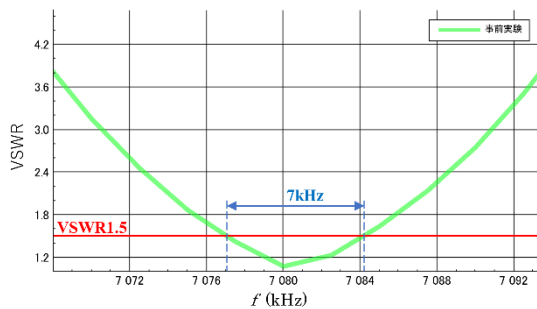


図3 事前実験

MLA条件値を同じ値に設定し、ループ設置角度を変えると、VSWRの最小値が大きく変化する、スミスチャートにおいても、円の大きが大きく変化した。

以上のことから、ループ設置角度を変えたときのVSWRの変化と、トロンボーン型可変コンデンサの位置調整による共振周波数の変化を確かめた。

### 6. ファラデーリング設置角度実験

#### 6.1 各種条件

MLA条件値を $L_2=2.84\mu\text{H}$ 、 $C_1=155\text{pF}$ 、 $C_2=24\text{pF}$ とした。このときの共振周波数 $f$ の理論値は式(1)より約7,059

kHzとなる。ループ設置角度を測るために分度器を使用した。測定の様子を図4に示す。

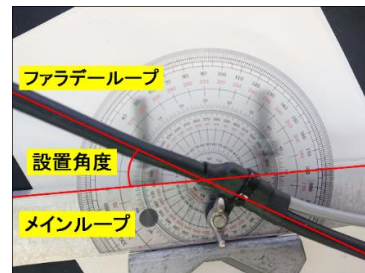


図4 角度測定に用いた分度器

#### 6.2 結果と考察

最もVSWRが低くなるループ設置角度を測定すると35°で、このときのVSWRは1.03であった。このときの反射電力 $P_{\text{ref}}$ は式(2)より約0.02%になる。また、スミスチャートを見ると、円の軌跡はほぼ中心を通っており、インピーダンスマッチングがほぼ完全にとれていた。そこで、35°から10°ずつ35±30°まで変化させたときのアンテナ特性を測定した。

ループ設置角度が35°以上の測定結果を図5と図6に、ループ設置角度が35°以下の測定結果を図7と図8に示す。いずれのスミスチャートも周波数 $f$ が高くなるにつれ、時計回りで変化した。

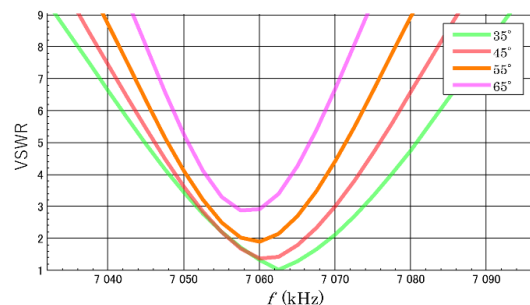


図5  $f$ -VSWR特性 (ループ設置角度35°以上)

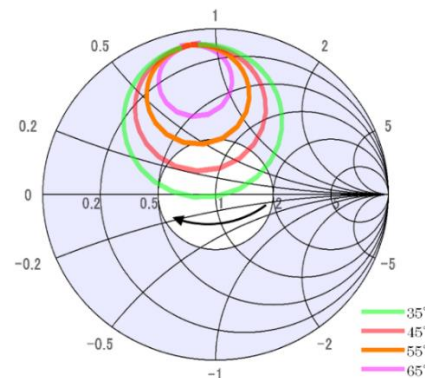


図6 スミスチャート (ループ設置角度35°以上)

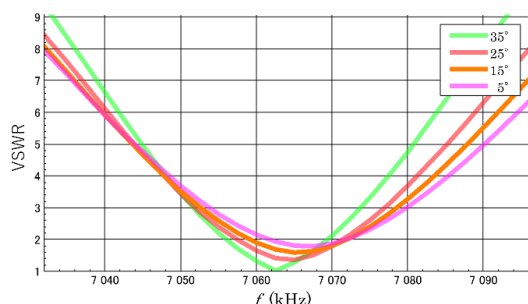


図7  $f$ -VSWR 特性 (ループ設置角度  $35^\circ$ 以下)

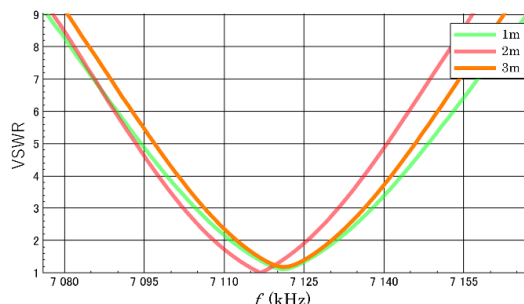


図9  $f$ -VSWR 特性 (地上高変更実験)

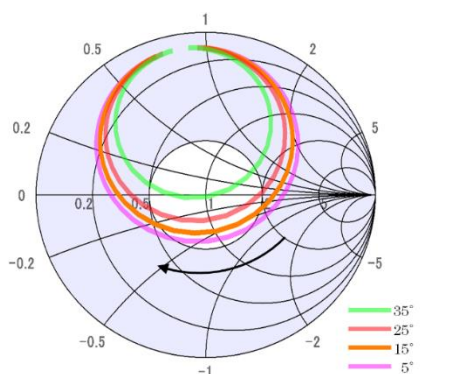


図8 スミスチャート (ループ設置角度  $35^\circ$ 以下)

図6及び図8より, ループ設置角度の変化によって給電点インピーダンスが変化しており, この角度が大きくなるほど, 誘導結合度が小さくなり, 疎結合の状態になっていた[6].

以上の結果から, ループ設置角度を  $35^\circ$ に調整すると, 最も実用性の高いアンテナになることがわかった.

## 7. 地上高変更実験

### 7. 1 各種条件

送受信時におけるアンテナの給電点の高さによるアンテナ特性の変化を調べるため, ループ設置角度を  $35^\circ$ としたうえで, 給電点の高さを 1m, 2m, 3m に変化させて給電点インピーダンスを測定した. このときの MLA の条件値は  $L_2=2.84\mu\text{H}$ ,  $C_1=154\text{pF}$ ,  $C_2=22\text{pF}$ であったので, 共振周波数  $f$ の理論値は式(1)より約 7,119 kHz となる.

### 7. 2 結果と考察

VSWR の測定結果を図9に示す. この図から VSWR の最小値を実測した結果, 1 m のときは 7,121 kHz で 1.12, 2 m のときは 7,117 kHz で 1.01, 3 m のときは 7,121 kHz で 1.19であった. また, 表1には VSWR と反射電力の関係を示す.

図10には, スミスチャートでの測定結果を示す. スミスチャートでは, 周波数  $f$ が高くなるにつれ, 時計回りで変化した.

表1 給電点の高さと VSWR, 反射電力

給電点高	VSWR	反射電力[%]
1m	1.12	0.43
2m	1.01	0.002
3m	1.19	0.75

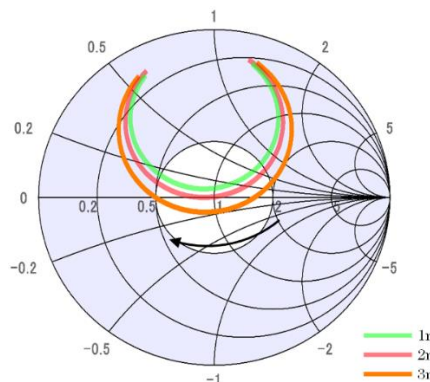


図10 スミスチャート (地上高変更実験)

給電点の高さを 2 m, ループ設置角度  $35^\circ$ を基準として, 「6.ファラデーループ設置角度実験」の図5と図7で示した VSWR の最小値と反射電力との関係を表2に示す. 表2より, 設置角度が基準から外れることで反射電力が 2.4%以上増えている. 一方, 表1では 0.8%以内の増加に抑えられている.

表2 ファラデーループ設置角度と VSWR, 反射電力

ループ設置角度	VSWR	反射電力[%]
$25^\circ$	1.37	2.44
$35^\circ$	1.03	0.02
$45^\circ$	1.38	2.55

図10より, 地上高 2m を基準に低い場合は誘導性に, 高い場合は容量性が現れているように見える. 円は大きく変化していない. 一方, ファラデーループの設置角度を変化させた図6と図8の場合, 円の大きさが大きく変化している. また, 図9の  $f$ -VSWR 特性からは誘導性などの変化は読み取れないが, 表1と表2の VSWR に着目すると, 表1の地上高を変化させたときの方が 1.2

以下に抑えられている。このようなことから、給電点の高さの変化はファラデーリング設置角度と比較してアンテナ特性に与える影響が小さいことがわかる。

## 8. 共振周波数変化の測定

### 8. 1 各種条件

トロンボーン型可変コンデンサ  $C_2$  の容量を変化させたときの共振周波数の変化を調べるため、スライド部分の長さを概ね 7MHz 帯全域をカバーできると見込んだ 1 cm~11 cm の区間において 2 cm 刻みで変化させ、そのときの VSWR を測定した。また、スライド部分の長さが最小と最大のときの VSWR も測定した。なお、MLA 条件値として  $L_2=2.84 \mu\text{H}$ ,  $C_1=154 \text{ pF}$  を用いた。

### 8. 2 結果と考察

本実験では VSWR が最小値をとった周波数を共振周波数の実測値とする。スライド長の変化による静電容量  $C_2$  の変化、共振周波数の理論値と実測値及び誤差率を表 3 に示す。

表 3 共振周波数の理論値と実測値の誤差

スライド長[cm]	静電容量 $C_2$ [pF]	理論値 $f_t$ [kHz]	実測値 $f_M$ [kHz]	誤差率 $\varepsilon$ [%]
最小	30	6962	6989	0.388
1	28	7000	7010	0.143
3	26	7039	7038	0.014
5	24	7079	7078	0.014
7	21	7139	7138	0.014
9	19	7180	7180	0
11	17	7222	7232	0.138
最大	7	7443	7447	0.054

実験結果の誤差率  $\varepsilon$  [%]はすべてのスライド長において 0.5%以下となった。この結果からトロンボーン型可変コンデンサを上下にスライドさせることによって、7 MHz 帯全域がカバーできていることが確認できた。

## 9. 指向性測定実験

### 9. 1 各種条件

通信の際に必要なアンテナの指向性を確認するため、電波の受信電力を測定する実験を行った。受信電力は受信点での電波の強さを表す。測定の際、送信アンテナから受信アンテナまでの距離は、遠方界が始まるとみなせる 6.8 m 以上離す必要があり、地形上周囲の障害物の影響が少ない測定地点をとれる距離として 12 m を設定した。無線機にアイコム社製 IC-705 を用い、送信出力を 70 mW に設定した。

受信電力の測定点を図 11 に示す。地形上周囲の障害物の影響が少ない測定地点をとれる距離として、アンテナ

給電点を中心とした半径 12 m の円周上を 45°間隔、8 地点とした。また、MLA のループ面方向を計測角度 0°とした。

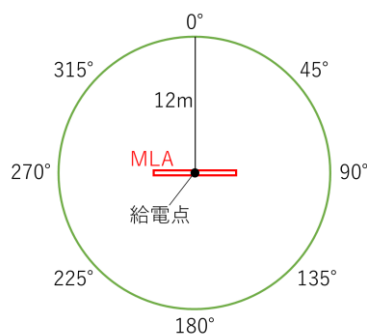


図 11 実験配置図

測定には Dearsee 社製 TinySA, 受信アンテナは垂直設置のロッドアンテナを使用した。

MLA 条件値は  $L_2=2.84 \mu\text{H}$ ,  $C_1=154 \text{ pF}$ ,  $C_2=22.5 \text{ pF}$  とした。このときの共振周波数  $f$  の理論値は式(1)より約 7,109 kHz となる。実際には VSWR が最小値を示した 7,108 kHz で送信し、受信電力を測定した。

また、受信電力を比較するため、1/4 波長の垂直型アンテナを基準アンテナとして同様の実験を行った。基準アンテナには 3.5/7/10/14/18/21/24/28/50 MHz 帯用短縮型ロッドアンテナ COMET 社製 HFJ-350M を使用し、大地に垂直に設置することで無指向性とした。基準アンテナは給電点の地上高を約 2 m の位置に設置した。カウンターポイズには  $3.5 \text{ mm}^2$  の燃線を使用した。

### 9. 2 結果と考察

実験で得られた指向性を図 12 に示す。アンテナの配置は赤枠で示している。基準アンテナは無指向性アンテナであり、受信電力は全ての受信点で -71.6 dBm であった。

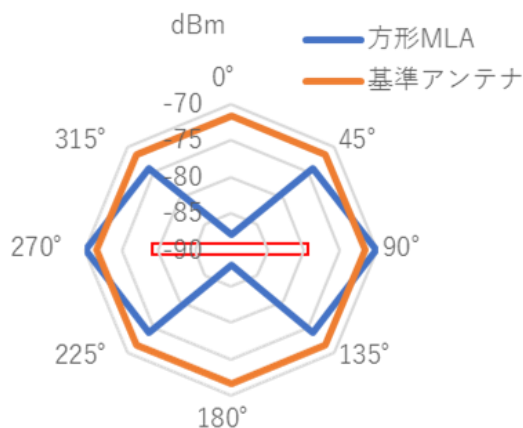


図 12 MLA の指向性

図 12 より MLA のループ面の延長方向に輻射が大きい

ことがわかる。それに対して、ループ面の垂直方向には輻射が非常に小さいことがわかる。また、基準アンテナとの比較ではループ面の延長方向において、基準アンテナ以上の受信電力があり、今回製作した MLA が性能面において優位性があることがわかった。

## 10. ファラデーリング設置角度の妥当性の確認

### 10.1 各種条件

「6. ファラデーリング設置角度実験」では VSWR とスミスチャートのみを評価項目としてループ設置角度を決定した。そこで、今回は受信電力を測定し、この角度の妥当性を検証する。

「9. 指向性測定実験」と同様の条件でループ設置角度を 5°, 35°, 45°としたときの受信電力を測定した。実験配置図を図 11 に示す。ただし、受信地点は図 12 で得られた指向性の最も強かった MLA のループ面の延長方向(90°)でのみ測定した。

### 10.2 結果と考察

実験結果を表 4 に示す。受信電力は負の値であるので、絶対値が小さいほど電波強度が強いことを意味する。

表 4 ファラデーリング設置角度と受信電力

ループ設置角度	受信電力[dBm]
5°	-75.1
35°	-70.1
45°	-76.1

表 4 の結果から、ループ設置角度が 35°のときに受信電力が最大となった。

このことより、VSWR とスミスチャートを評価項目として決定したファラデーリング設置角度はアンテナからの輻射電力の面でも妥当であったことがわかった。

## 11. 通信実験

### 11.1 各種条件

無線機に、八重洲無線社製 FT-817ND を用い、2.5 W の出力で本校寝屋川キャンパスから通信実験を行った。MLA 条件値は  $L_2=2.84 \mu\text{H}$ ,  $C_1=154 \text{ pF}$ ,  $C_2=24 \text{ pF}$  とした。このときの共振周波数  $f$  の理論値は式(1)より約 7,079 kHz となる。

### 11.2 結果と考察

実際に VSWR が最小値をとったのは、7,081 kHz 付近でこのときの VSWR は 1.06 であった。VSWR1.5 以下の範囲は 7,077 kHz~7,085 kHz であり、周波数帯域幅は 8 kHz であった。この通信実験の結果、2 局のアマチュア無線局と SSB モードで交信できた。交信時の情報を表 5

に示す。RS は相手局が受信した信号強度等を表す[7]。

表 5 通信実験結果

周波数 [kHz]	VS WR	反射電力 [%]	相手局 運用地	距離 [km]	RS
7,083	1.23	1.06	鈴鹿市	90	55
7,086	1.63	5.74	西尾市	130	59

送信出力 2.5 W という低出力で東海地方のアマチュア無線局と交信でき、それぞれ「55」、「59」の RS レポートが得られた。この結果から、製作した MLA の実用性が確かめられた。

### 12. むすび

本研究では 1 m×1 m の方形 MLA を製作した。この MLA は 1 m 長の角パイプに分解可能で、円形 MLA より高い可搬性が実現できた。また、ファラデーリングの最適な設置角度を求め、東海地方のアマチュア無線局と交信できた。その後、運用時に参考となるアンテナの各種特性について測定した。

## 謝辞

本研究の遂行にあたって、マグネチックループアンテナの普及活動を推進されている MLA48 メンバーの村吉統一氏、戸越 俊郎氏、中島 一氏、原田 要之助氏からさまざまな助言を頂きました。また、同じ研究室の平松 陽希氏、大阪公立大学高専無線研究会の東野 隼士氏には実験を行うにあたり協力していただきました。ここに御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 下地安男, 2015, CQ ham radio 2015 年 8 月号, Vol.70, No.8, pp.91-95, CQ 出版
- [2] 村井, 重井ほか, 2016, 大阪府立大学工業高等専門学校研究紀要, Vol.50, pp.75-80
- [3] 小暮裕明, 小暮芳江, 2013, コンパクト・アンテナの理論と実践[入門編], pp.71-73, CQ 出版  
[http://home.j00.itscom.net/kce/files/MLABasicsV2d\\_1.pdf](http://home.j00.itscom.net/kce/files/MLABasicsV2d_1.pdf)
- [4] 川上太知, 電気回路 II (Electric Circuit II, 最終閲覧日 2023-8-24, [https://www2-kawakami.ct.osakafu-u.ac.jp/omuccontent/uploads/sites/1161/Lecture\\_Data/Electric\\_Circuit\\_II/01\\_Lecture/11\\_lecture\\_electric\\_circuit\\_II.pdf](https://www2-kawakami.ct.osakafu-u.ac.jp/omuccontent/uploads/sites/1161/Lecture_Data/Electric_Circuit_II/01_Lecture/11_lecture_electric_circuit_II.pdf))
- [5] 鹿子嶋憲一, 2003, 光・電磁波工学, 電子情報通信学会編, pp.51,91-95, pp.133-141, コロナ
- [6] 中島一, 2017, 別冊 CQ ham radio QEX Japan No.25 2017.12 Winter, Vol.11, No.4, pp.48-52, CQ 出版
- [7] 重井, 黒田ほか, 2014 大阪府立大学工業高等専門学校研究紀要, Vol.48, pp.53-56