



マグネチックループアンテナの改良および評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-02-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 村井, 宏輔, 重井, 宣行, 葭谷, 安正, 小暮, 裕明, 戸越, 俊郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007533

マグネチックループアンテナの改良および評価

村井宏輔^{*1}, 重井宣行^{*2}, 葭谷安正^{*3}, 小暮裕明^{*4}, 戸越俊郎^{*5}

Improvement and Evaluation of Magnetic Loop Antenna

Kousuke MURAI ^{*1}, Nobuyuki SHIGEI ^{*2}, Yasumasa YOSHITANI ^{*3},
Hiroaki KOGURE ^{*4} and Toshiro TOGOSHI ^{*5}

要旨

7MHz 帯の半波長ダイポールアンテナの場合、全長を短くしたものであってもスペースの限られた場所への架設は容易ではない。そこで、本研究で提案するマグネチックループアンテナは円形型の微小ループアンテナに分類され、直径 1m 程度の大きさでありながら 7MHz 帯のアンテナを設計することができる。本研究においては、7MHz 帯で使用できるようにコンデンサの設計及び製作を行った。さらに、メインループに高周波エネルギーを供給する役割と、インピーダンス・マッチングの役割のあるファラデーループの大きさによる違いについても調査をおこなった。共振周波数の調整はコンデンサの容量、VSWR の調整はファラデーループの結合を変えることで、VSWR を 1.0 にすることが可能であることが分かった。さらに、本研究で製作したアンテナを用いて交信を行ったところ、神奈川県横浜市のアマチュア局と交信することができた。

キーワード: 小型アンテナ, ファラデーループ, アマチュア無線, 通信実験, インピーダンス整合, ものづくり

1. はじめに

アンテナは、送信装置から発生した高周波エネルギーを空間へ輻射するために必要不可欠な装置であり、電波法施行規則（以下、「施行規則」という。）第4条の3第2項で規定された電波のスペクトル区分ごとの電波伝搬の特徴や物理的な架設条件など考慮して設計される^[1]。たとえば、30MHz 未満の周波数帯では、半波長ダイポールアンテナを地面に対して水平あるいは垂直に架設する方法や鋼管柱による垂直アンテナが一般的である^[2]。7MHz 帯の半波長ダイポールアンテナの場合、アンテナの全長が 20m 程度にもなるため、延長コイルを挿入してアンテナの全長を短くしたものが市販されているが、マンションのベランダなど限られた空間への架設は容易ではない。一方、本研究で提案するマグネチックループアンテナ（以下、「MLA」という。）は円形型の微小ループアンテナに分類でき、直径 1m 程度の大きさで 7MHz 帯のアンテナを架

設することができる^[3]。すなわち、7MHz 帯で従来の方法と比較した場合、アンテナの全長が 1/20 程度で済むため、ベランダなど限られた空間に架設できることや自転車等の輪行袋に収納して移動運用ができるといったメリットがある。

そこで、本研究では、平成 21 年 3 月 17 日付の総務省告示第 126 号で規定された「施行規則第 13 条の 2 の規定に基づくアマチュア局に割り当てられた周波数帯」のうち、指定周波数が 7, 100kHz の 7.0~7.2MHz のすべての周波数で送受信可能な MLA を製作し、ファラデーループの改良とその評価を試みる。

2. マグネチックループアンテナ

2-1. メインループ

メインループは、直径 1m の円形になっており、インダクタンス成分が含まれる。無線通信の場合、指定された周波数で高周波エネルギーを効率よく空間に輻射させる必要がある。この周波数を共振周波数という。共振周波数 f は、メインループのインダクタンス成分 L_A とこれを打ち消すための容量成分 C_A から求められ、関係式は次のようになる。ここで、インダクタンス成分 L_A は、メインループの形状で決まる定数である。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_A C_A}} \quad (1)$$

2016 年 8 月 22 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 電子情報コース

(Dept. of Technological Systems: Electronics and Information Course)

*3 メカトロニクスコース (Mechatronics Course)

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

*5 慶應義塾大学 (Keio University)

2-2. 周波数調整用コンデンサ

MLA の共振周波数は, LC 回路における共振周波数の関係式から求められる. アマチュア局の場合, 動作することを許される周波数帯に幅があるため, 式(1)の容量成分 C_A を可変することで共振周波数 f が変えられる. C_A の値が増えれば f は低くなり, 逆に C_A を減らせば f は高くなる. また, 容量成分 C は 2 つの導体間隔を d , 導体面積を S とおくと次式の関係がある.

$$C \propto \frac{S}{d} \tag{2}$$

すなわち, 式(1)と式(2)より導体の間隔 d を変えず, 導体の面積 S を増やすと容量成分 C が増えて共振周波数 f が低くなり, 逆に S を変えず d を大きくすると C が減り f が高くなる. この原理を利用して, 箱型のコンデンサをメインループ内側の先端に取り付けて, 指定周波数の 7,100kHz になるよう容量成分の値を決める. さらにメインループの下側にアルミパイプを取り付け, このパイプを上下に移動させることで可変コンデンサを構成し, ± 100 kHz の範囲で共振周波数を変えられるようにする.

以上のように, 箱型のコンデンサで共振周波数を 7.1MHz になるよう固定し, アルミパイプを上下に移動させることで, アマチュア局に指定された 7.0~7.2MHz のすべての周波数で送受信が可能になる.

2-3. ファラデーリング

ファラデーリングの構成を図 1 に示す. なお, ファラデーリングの解釈については現在も確定しておらず, ここでは私案として提示する. ファラデーリングは, メインループに高周波エネルギーを送り込む給電部とインピーダンス・マッチングを行う整合部からなる. 給電部は同軸ケーブルの芯線と編組線を短絡させ, 整合部の芯線とを接続した構造になっている.

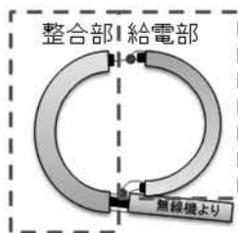


図 1 ファラデーリングの構成

給電部に高周波電流が流れると, 給電部とメインループの相互誘導作用によってメインループに高周波電流が流れる. そのため, 相互インダクタンス M_A が変わると入力インピーダンスが変化し, 高周波エネルギーが効率よく空間に輻射されにくくなる. 整合部は同軸ケーブルの

編組線側を開放させた構造になっており, このケーブルの芯線と編組線との間の容量成分を使って, 送信装置から接続された同軸ケーブル (以下, 「給電線」という.) のリアクタンス成分を打ち消すようにする. すなわち, 送信装置とアンテナ間には特性インピーダンス 50Ω の給電線を使用するため, 整合部では 50Ω より低い入力インピーダンス Z_m を 50Ω に合わせる. このように, 特性インピーダンスと入力インピーダンスを一致させることをインピーダンス・マッチングという.

2-4. 等価回路

MLA は, ファラデーリングの給電部から電磁誘導によりメインループに高周波エネルギーを供給する. そして, メインループでは, ファラデーリングからの高周波エネルギーを空間に輻射する. すなわち, いずれも円形状の立体構造になっているので, ノーマル・モード・ヘリカルアンテナとして解析する^[4]. また, ファラデーリングに整合部が含まれるが, 今回はインピーダンス・マッチングされた状態で考える. 簡易的な等価回路を図 2 に示す.

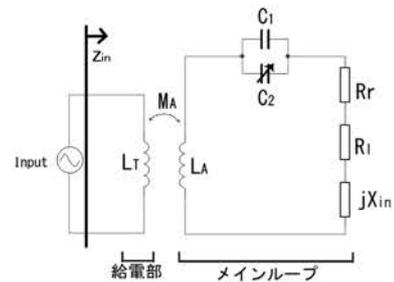


図 2 等価回路

図の一次回路は, 送信装置を表す高周波電源と給電部のインダクタンス成分を表す L_T からなる. 二次回路はメインループに対応し, L_A をメインループのインダクタンス成分, C_1 を箱型のコンデンサ, C_2 をアルミパイプの上下移動で調整可能な可変コンデンサ, R_r を放射抵抗, R_l を熱損失抵抗, jX_m をアンテナ近傍でのリアクタンス成分とする. また, 図中の M_A は相互インダクタンスを表す. また, 共振時のファラデーリングの給電部から見た入力インピーダンス Z_m は式(3)で近似される^[4].

$$Z_m \approx (R_r + R_l) \left(\frac{L_T}{M_A} \right)^2 \tag{3}$$

この式は, L_T が増加すると入力インピーダンス Z_m が増え, M_A が増加すると Z_m が減ることを表している. すなわち, ファラデーリングとメインループとの疎密結合の度合いと, ファラデーリングの整合部と Z_m との関係により, 空間への輻射条件が変わる.

3. 評価方法

MLA の効率、インピーダンス・マッチングに関する効率と MLA から空間に放出される効率がある。今回はインピーダンス・マッチングに関する効率のみを、VSWR とスミスチャートを使って検討する。

3-1. VSWR

アンテナの入力インピーダンスが給電線の特性インピーダンスに等しくない場合、高周波電力がアンテナに供給されず、送信装置に戻ってくる現象が起きる（以下、送信装置に戻ってくる電力を「反射波」という。）。そのため、インピーダンス・マッチングが取れていない場合、送信装置からアンテナへ進む電力（以下、送信装置からアンテナへ進む電力のことを「進行波」という。）が一定であるため、反射波が多くなる。このとき、給電線上では反射波と進行波とが干渉しあい、定在波が発生する。この定在波の度合いのことを VSWR という。この VSWR を測定することにより、インピーダンス・マッチングの状態やアンテナへの伝送効率を調べられる。インピーダンス・マッチングが取れている場合の VSWR は 1.0 となる。VSWR と電圧反射係数ならびに伝送効率の関係を表 1 に示す。これらの関係を求める際、式(4)の電圧反射係数 Γ と VSWR の関係式ならびに式(5)の伝送効率 T と電圧反射係数 Γ の関係式を用いた^[5]。たとえば、VSWR が 1.3 の場合、98%がアンテナに供給されることを意味する。

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (4)$$

$$T = 1 - \Gamma^2 \quad (5)$$

表 1 VSWR, 電圧反射係数 (Γ), 伝送効率 (T) の関係

VSWR	Γ	T	VSWR	Γ	T
1.0	0.00	1.00	2.0	0.33	0.89
1.1	0.05	1.00	2.5	0.43	0.82
1.2	0.09	0.99	3.0	0.50	0.75
1.3	0.13	0.98	3.5	0.56	0.69
1.4	0.17	0.97	4.0	0.60	0.64
1.5	0.20	0.96	4.5	0.64	0.60

3-2. スミスチャート

スミスチャートは、伝送線路のインピーダンス・マッチングを設計する際に用いられる、周波数ごとの複素インピーダンスを示す円形の図形である。この図から、インピーダンスの実数部や虚数部の値を得ることができる。

スミスチャートの見方を図 3 に示す。

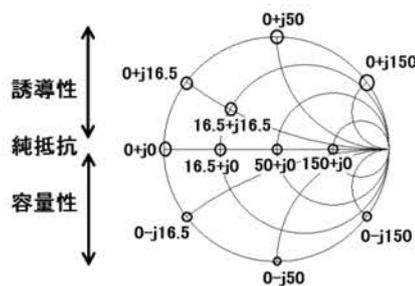


図 3 スミスチャート

図には、直径の異なる 4 つの円が描かれている。水平な線は虚数成分が 0 の純抵抗のみであり、左から右に行くにしたがって抵抗値は高くなる。この直線上では虚数成分が 0 であるので、この直線上を測定点が交差したときの周波数が、アンテナの共振周波数である。スミスチャートの測定点が抵抗値 50 Ω と交差したとき、給電線の特性インピーダンス 50 Ω と一致した状態になるので VSWR が 1.0 になる。このときの共振周波数がわかれば、効率よく輻射できる送信周波数がわかる。また、この水平な線を境に、上側が誘導性リアクタンス成分を下側が容量性リアクタンス成分を表す。たとえば、図 3 で最も大きな外側の円の場合、実数部はゼロであるが、円周上の上半分では $j16.5 \Omega$, $j50 \Omega$, $j150 \Omega$ のように誘導性リアクタンス成分が増え、下半分では $-j16.5 \Omega$, $-j50 \Omega$, $-j150 \Omega$ のように容量性リアクタンス成分が増える。MLA の場合、ファラデーリングとメインリングの誘導結合が大きくなると円が大きくなり、この結合が小さくなると円が小さくなるという特徴がある。

4. 設計と製作

4-1. 仕様

製作するアンテナの仕様を表 2 に示す。送信周波数は、式(1)で示した共振周波数を考えればよいので、メインリングの形状で決まるインダクタンス L_A とメインリング下側に取り付けられたアルミパイプの上下移動による可変コンデンサ C_2 の計 2 か所を別々に測定した。測定には、Almost All Digital Electronics 社製 L/C Meter IIB を使用した。 C_2 はアルミパイプを縮めたとき 22pF が得られ、伸ばしたとき 6pF であったので、14pF が可変コンデンサの中央値になる。そこで、同じ測定器を使って 14pF になるようアルミパイプの長さを調節した。また、給電線には 13.9m の 5D2V を使用する。この長さは 7.1MHz の半波長に同軸ケーブルの短縮率を乗じた長さに相当し、給電線による反射波の影響を回避する目的で選んだ。

表2 仕様

項目	条件
メインループの直径	954mm
指定周波数 (f_c)	7,100kHz (7.1MHz)
共振周波数 (f)	7.0~7.2 MHz
VSWR	1.3 以下
特性インピーダンス (Z_0)	50Ω
可変コンデンサ (C_2)	6~22pF, 中央値: 14 pF
メインループの インダクタンス (L_A)	2.37μH

4-2. コンデンサの設計および製作結果

ここでは、周波数調整用コンデンサで述べた方法と表2の仕様に基づいて設計する。メインループのインダクタンス $L_A = 2.37\mu\text{H}$ および指定周波数 $f_c = 7.1\text{MHz}$ を式(1)に代入すると、コンデンサ $C_A = 212\text{pF}$ が求められる。ここで、可変コンデンサ C_2 はあらかじめ 14pF に調整してあるので、箱型のコンデンサ C_1 は、次式から求められる。

$$C_1 = C_A - C_2 = 212 - 14 = 198 \text{ pF} \quad (6)$$

すなわち、計算上は $C_1 = 198\text{pF}$ のコンデンサを製作すればよい。ところで、このコンデンサはメインループ上側の先端に取り付けるので、受風面積はできるだけ小さい方がよい。そこで、タカチ社製 SW125B を 2 個用意し、1 個あたり 99pF になるよう製作し、2 個並列にネジ止めして使用する。製作した実物写真を図4に示す。

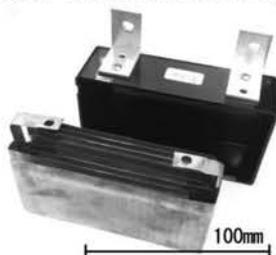


図4 製作したコンデンサ(102pF)

図のように、銅板を積層して 99pF になるよう、式(2)の右側に空気中の誘電率 ϵ を乗じた関係式にしたのち、銅板の間隔 d と面積 S に留意して製作したが、実際には 102pF と 97pF になった。この場合、 $C_1 = 199\text{pF}$ になるので、指定周波数は $f_c = 7,083\text{kHz}$ に下がった。ところで、共振周波数 $f = 7.0\text{MHz}$ のときは $C_A = 220\text{pF}$ 以下、 $f = 7.2\text{MHz}$ のときは $C_A = 206\text{pF}$ 以上であればよいので、可変コンデンサ C_2 の値は 14pF まで可変できればよい。表2より、 C_2 の可変域は 16pF であるので、1pF のズレは送受信に影

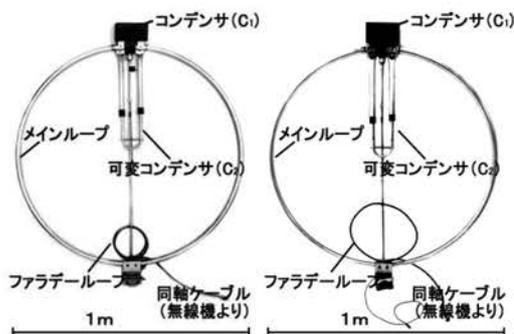
響しない。

4-3. ファラデーロープの設計および製作結果

ファラデーロープは、メインループに高周波エネルギーを供給する役割とインピーダンス・マッチングの役割がある。とくに、インピーダンス・マッチングにおいて、入力インピーダンス Z_m と特性インピーダンス Z_0 が一致しない場合、表2のVSWRが条件を満たさなくなり、送信装置の電力増幅器が故障するおそれがある。良好なインピーダンス・マッチングは、メインループとファラデーロープの直径比が 5 対 1 を満たすときであるが、ここでは直径比の異なる 2 通りの方法を考案した^[6]。直径比 5 対 1 で二重のファラデーロープ (以下、「二重 5 対 1」という。) と直径比 3 対 1 で一重のファラデーロープ (以下、「一重 3 対 1」という。) を製作し、比較検討した。

4-3-1. 二重 5 対 1

メインループとファラデーロープの直径比を 5 対 1 にした給電部分と整合部分が二重のファラデーロープを製作した。製作した実物写真を図5(a)に示す。メインループの直径は 954mm であるので、ファラデーロープの直径は 1/5 の 190.8mm になる。



(a) 直径比 5 対 1 (b) 直径比 3 対 1

図5 直径比の異なる MLA

4-3-2. 一重 3 対 1

メインループとファラデーロープの直径比を 3 対 1 にした一重のファラデーロープについて考える。このファラデーロープは、二重 5 対 1 のものを一重にすると、直径比が 3 対 1 になる。製作した実物写真を図5(b)に示す。この場合、ファラデーロープの直径が 318mm であるので、二重 5 対 1 に比べ、給電部がメインループに近づく。そのため、給電部からメインループに供給される高周波エネルギーが伝わりやすくなるため、相互インダクタンス M_A が大きくなる。二重 5 対 1 を一重 3 対 1 として使ったので、二重 5 対 1 のときの入力インピーダンスが 50Ω に満たない場合は今回の方法で 50Ω に近づき、二重 5 対 1

ですでに 50Ω を超えている場合はさらに増えることが予想される。

5. 実験結果と考察

実験結果の評価方法として、SDR-Kit 社製 DG8SAQ VNWA3E を使用した。このベクトルネットワークアナライザにより、VSWR の測定とスミスチャートによる結果表示が同時に行える。製作したアンテナは、屋外で建物の影響のない場所を選び、アンテナの給電点は地面から 2.1m の高さになるよう調整した。また、測定器と給電点の接続には 13.9m の 5D2V を使用した。

5-1. VSWR の測定結果

二重 5 対 1 ならびに一重 3 対 1 の VSWR の測定結果を図 6 に示す。表 2 の仕様と比較すると、いずれの場合も VSWR の最小値の周波数が 7.1MHz より大きく外れ、7.08MHz と 7.09MHz が得られている。

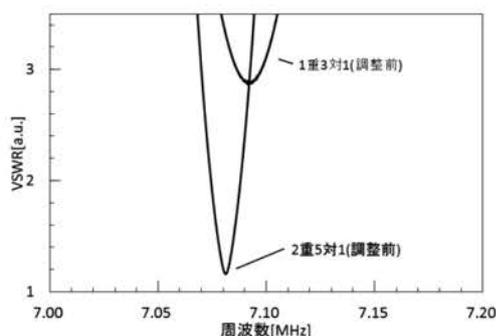


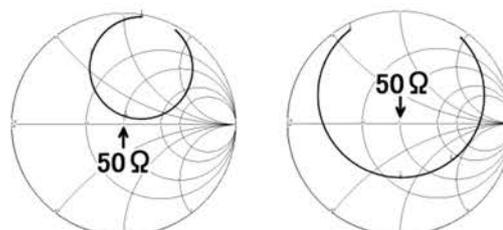
図 6 2 種類の VSWR 特性

これは C_1 の値が 198pF から 199pF になったことが原因であり、199pF の場合は 7.083MHz であるので、測定結果に問題ないことがいえる。メインループとファラデーループの直径比が 5 対 1 の場合、VSWR は 1.21 以下に抑えられているものの、さらなる VSWR の低減が求められる。一方、一重 3 対 1 の場合、VSWR 最小の周波数が 7.09MHz、そのときの VSWR が 2.86 であり、周波数が大きく外れていることに加え、アンテナへの電力供給の面においても高周波エネルギー全体の 77%しか供給されていないことがわかる。

5-2. スミスチャートによる結果

つぎに、2 種類それぞれのスミスチャートの結果を図 7 に示す。図 7(a) に示すメインループとファラデーループの直径比が 5 対 1 の場合、 Z_{in} が 50Ω に近づいた状態になっている。一方、同図(b)の一重 3 対 1 の場合、測定点の円が大きいこと、誘導結合の度合いが強く、密結合の状態にあることがわかる。また、円が $50+j0\Omega$ から大きく外

れているため、VSWR の最小値が 2.86 になったことが考えられる。この場合、結合状態を弱め、疎結合の状態にすることで、VSWR が改善される。



(a) 二重 5 対 1 (b) 一重 3 対 1

図 7 2 種類のスミスチャート

6. 改善策と通信実験

6-1. 改善方法

二重 5 対 1 の場合、ファラデーループを変形させ、メインループとの距離を近づけることにより、相互インダクタンス M_A が増え、 Z_{in} が 50Ω に近づく。変形したファラデーループを図 8 に示す。



図 8 変形二重 5 対 1 の MLA

一重 3 対 1 の場合、疎結合の状態にすることで、相互インダクタンス M_A が減り、 Z_{in} が 50Ω に近づく。そこで、ファラデーループとメインループに角度をつけることで解決した。このときの様子を図 9 に示す。



図 9 回転一重 3 対 1 の MLA

6-2. 改善結果

図 8 および図 9 のようにファラデーループを変形または回転させ、VSWR の測定ならびにスミスチャートを記録した。VSWR の結果を図 10 に示す。図 10 の VSWR 結果より、いずれの方法の場合も VSWR 最小のときの周波数が 7.08MHz

近傍にあり, そのときの最小値もほぼ 1.0 が得られた。

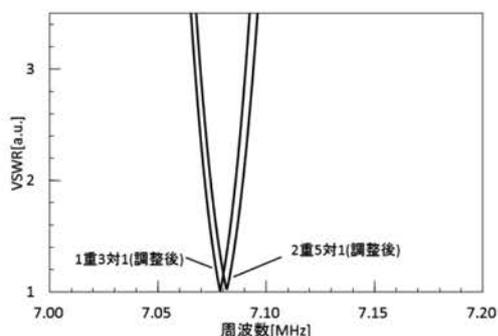


図 10 ファラデーループ調整後の VSWR 特性

つぎに, スミスチャートの結果を図 11 と図 12 に示す。それぞれ調整前後の結果を示している。調整後のスミスチャートはいずれの場合も Z_{in} が 50Ω と交差している。

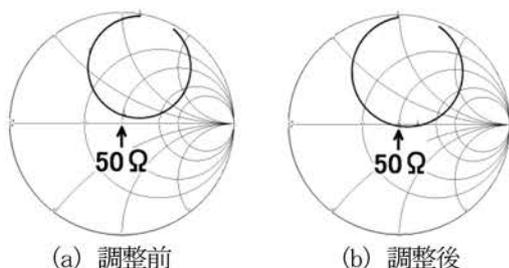


図 11 二重 5 対 1 調整前後のスミスチャート

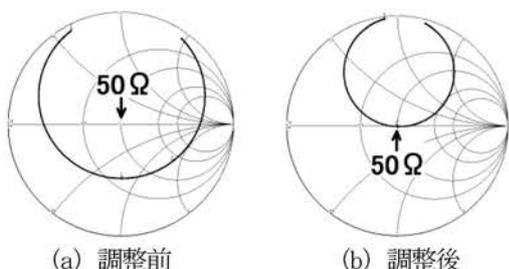


図 12 一重 3 対 1 調整前後のスミスチャート

以上の結果より, 円の軌跡が大きい場合は, 誘導結合が大きいのでファラデーループを回転させるなどして疎結合にすること, 円の軌跡が小さい場合は, ファラデーループをメインループに近づけるなどして密結合にすることで Z_{in} が 50Ω に近づくことを確認した。

6-3. 通信実験

変形二重 5 対 1 の MLA で通信実験を行った。ベクトルネットワークアナライザを外して YAESU 社製 FT-817ND を接続し, 送信周波数を 7.08MHz に合わせ, 空中線電力 5W で送信した。平成 28 年 3 月 4 日 16 時 32 分に神奈川県横浜市のアマチュア局と交信し, 相手局から 57 の RS レポートを受け取り, こちらからは 59 を送った。同様の通信

実験を, 平成 25 年 12 月にコメット社製 H-422 の水平ダイポールアンテナで行い, 埼玉県上尾市の局から 59 のレポートを受け取った^[7]。今回の交信は, 市販のアンテナを自作の MLA に変えただけで, 送信機等は同じ条件である。RS レポートに着目すると, 今回の信号強度が 2 段階小さいものの了解度が同じである。信号強度の違いは相手局の受信アンテナ設備や電離層の状態が変わるので, 今回の実験に影響しない。了解度が同じ値であるので, 市販のアンテナと 1/20 の大きさでほぼ同性能のアンテナを製作することができた。

7. むすび

本研究では, MLA を使用できるように, 共振周波数の調整のためのコンデンサや VSWR の調整のためのファラデーループの設計および製作を行った。その結果, MLA で市販のアンテナと同等の交信が行えた。

MLA でコンデンサの調整を行っても VSWR が合わない場合は, ファラデーループとメインループの結合を変えることで, VSWR を 1.0 に調整可能であることがわかった。

今後の課題として, VSWR 調整の自動化および輻射効率向上のための方策の検討が挙げられる。

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, 横田 稔 氏, 中島 一 氏からさまざまな助言をいただきました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 情報通信振興会編: 学習用(平成 27 年版)電波法令集, (情報通信振興会, 東京, 2015) pp. 163-164.
- [2] 津田 良雄: 実用デジタル無線技術, (情報通信振興会, 東京, 2012) pp. 188-191.
- [3] 小暮 裕明, 小暮 芳江: コンパクト・アンテナの理論と実践[入門編], (CQ 出版社, 東京, 2013) pp. 71-74.
- [4] 山田 吉英: ” ノーマル・モード・ヘリカル・アンテナの製作と測定”, RF ワールド, 14(2011) pp. 49-50.
- [5] 一之瀬 優: 1 陸技・無線工学 B(アンテナと電波伝搬) 完全マスター, (電気通信振興会, 東京, 2011) pp. 108-112.
- [6] 小暮 裕明 訳: ” 過小評価されているマグネチック・ループ HF アンテナの概要—その 2”, (http://home.j00.itscom.net/kce/files/VK5KLT_J2.pdf)
- [7] 重井, 黒田ほか: ” 府立大高専アマチュア無線の活動報告”, 大阪府立大学工業高等専門学校研究紀要, 48(2014) pp. 53-56.