

厚膜レジストを用いた平坦かつ平行な配線面をもつ MRI 用折り畳みマイクロコイル

A folded multilayer micro coil for MRI with flat and parallel wiring layers by thick resist

精密工学専攻 35号 佐藤萌子

Moeko Sato

1. 研究の背景と目的

核磁気共鳴画像法 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) は、核磁気共鳴信号 (NMR: Nuclear Magnetic Resonance) を利用し、計測対象内部のプロトン (^1H) 密度を画像化する手法である。MRI は放射線を使用せず、非破壊かつ非侵襲であるため医療の現場で広く利用されている。また、近年では MRI を使用した、小動物や植物などの微小試料の画像化にも応用されている⁽¹⁾⁽²⁾。微小試料の画像計測には高分解能な画像が求められる。しかし、分解能を向上すると 1 画素に対する体積が減少し信号強度が微弱となるため、SNR (信号対雑音比: Signal to Noise Ratio) が低下し、内部構造の判別が困難になる。そのため微小試料の MRI 画像計測では SNR を向上することが重要である。

これまでに感度を向上した MRI 信号受信用マイクロコイルの研究が行われている⁽³⁾。MRI 画像の SNR を向上するには、コイルの寄生容量や抵抗値の低減、巻き数の増加などが有効である。そこで、フレキシブル基板と 3 次元治具を用いた折り畳み多層コイルが試作された⁽⁴⁾。このコイルでは配線の径を変化させることで配線同士の対向面積を小さくし、寄生容量を低減していた。しかし、フレキシブル基板は剛性が低いため、配線面が平坦ではなかった。また基板の剛性が低いと力が加った際のたわみが大きくなるため、組み立て後に配線面同士が平行ではなかった。これらにより寄生容量の低減が不十分であるという問題があった。

そこで本研究では、厚膜レジスト層を用いた平坦かつ平行な配線面と並列配線により、低寄生容量かつ低抵抗な MRI 用折り畳みマイクロコイルを提案する。

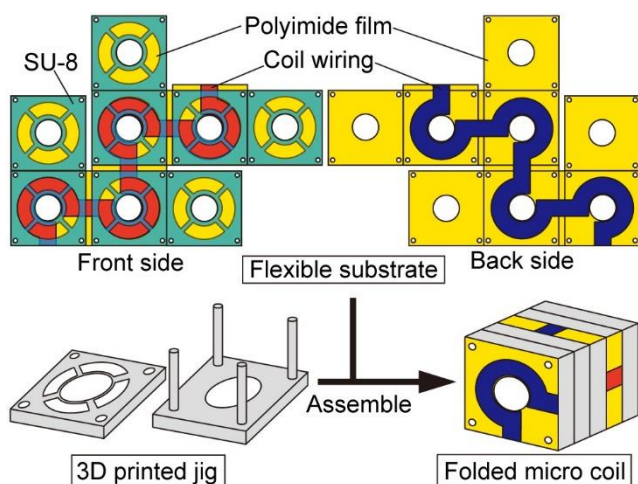


Fig. 1 Concept of folded micro coil which assemble flexible substrate and 3D printed jigs

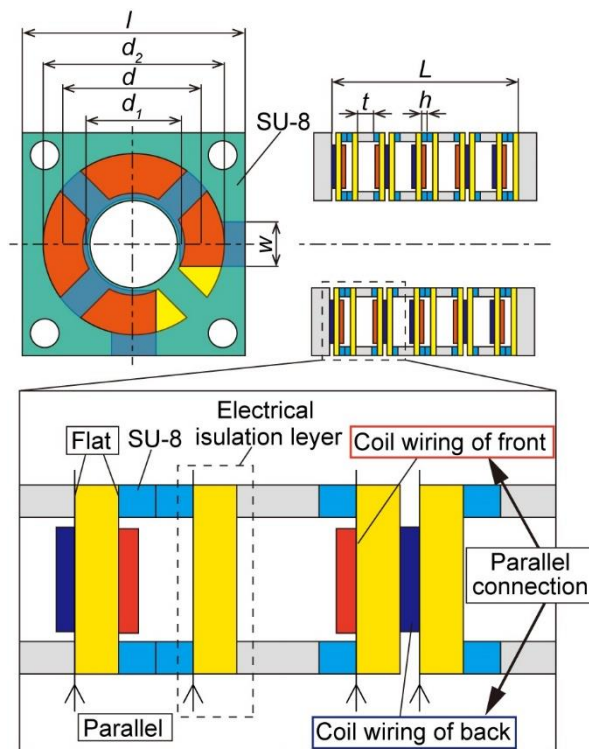


Fig. 2 Advantage of the folded micro coil

2. 提案するコイルの概要

Fig. 1 に提案するコイルの概要を示す。片面に厚膜レジストである SU-8 の層をもち、両面に配線をもつ 2 次元なフレキシブル基板と、3D プリンタで出力した 3 次元治具を組み合わせることで試作する。折り畳み後の図を Fig. 2 に示す。フレキシブル基板の上に SU-8 層が存在することで、フレキシブル基板の剛性が向上し、これにより配線面が平坦になる。また剛性が高いことで力が加わるときのたわみが小さくなるため、折り畳み後に配線面同士が平行な位置になり、寄生容量を低減することができる。SU-8 層の形状は、コイル配線の間には SU-8 ができる限り存在しないようにすることで誘電率を抑えるために、配線間隔保持用の 3 次元治具と同様に中空の骨組み構造とした。また、Cu/ポリイミド/Cu の 3 層フレキシブル基板の両面に配線を形成し、それらを並列に接続した。これによりコイル全体の合成抵抗を低減することができる。

組み立ての際の位置合わせについては、正確に行うために 4 つの柱をもつ位置合わせ用治具を使用し、間隔保持用の 3 次元治具とフレキシブル基板の各マスの 4 つの角には位置合わせ用の穴を設置した。さらに組み立て後に配線同士が向かい合っている間にあるポリイミド層が絶縁層として働く。これにより配線間の距離が近い状態でも電氣的に絶縁することが可能である。以上により、寄生容量を低減しても抵抗値が増加し難い MRI 用マイクロコイルの実現が可能である。

3. コイル設計と試作プロセス

3.1 コイルの設計

折り畳みコイルの設計値を Table 1 に示す。巻き数 10、コイル長さ 8.1 mm、直径 6.3 mm、配線幅 1.5 mm、間隔保持用の 3 次元治具の厚さ 0.5 mm とした。直径 4 mm 程度の計測対象の MRI 画像計測を想定し、計測対象挿入用の穴の直径は 4.6 mm とした。また、SU-8 層の設計値を Table 2 に示す。SU-8 層の厚さ 10 μm 、内側の円の直径 5.1 mm、外側の円の直径 8.0 mm、一辺の長さ 10 mm とした。

また、折り畳みマイクロコイルと寄生容量を比較するための寄生容量比較用コイルを試作した。寄生容量比較用コイルは SU-8 層を形成せず、両面に配線を形成し、それらを並列接続した。また、抵抗値を比較するための抵抗値比較用コイルも試作した。抵抗値比較用コイルは SU-8 層を形成せず、片面にのみ配線を形成した。コイル配線の設計値は折り畳みコイルと同値とした。

Table 1 Parameters of folded micro coil

Turn N [-]	10
Length L [mm]	8.1
Diameter d [mm]	6.3
Line width w [mm]	1.5
Thickness of jigs t [mm]	0.5

Table 2 Parameters of SU-8 layers

Thickness of SU-8 layer h [μm]	10
Diameter d_1 [mm]	5.1
Diameter d_2 [mm]	8.0
Length l [mm]	10

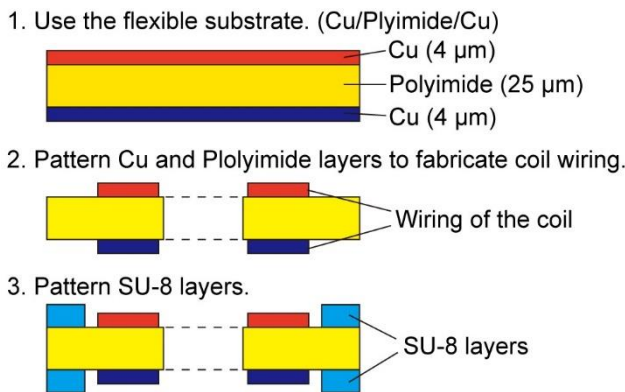


Fig. 3 Fabrication process of a flexible substrate with unfolded wiring pattern

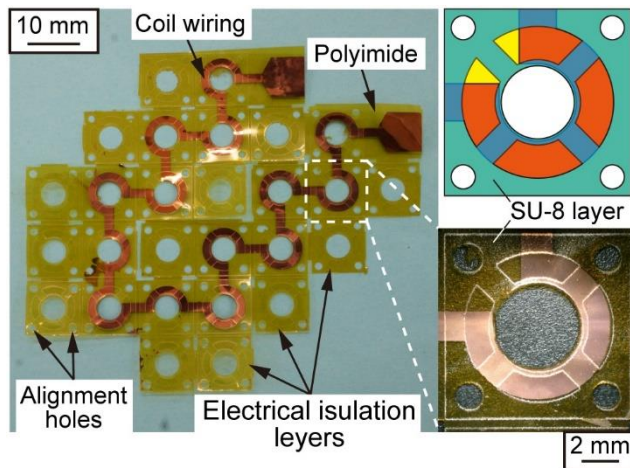


Fig. 4 Photograph of the folded micro coil wiring

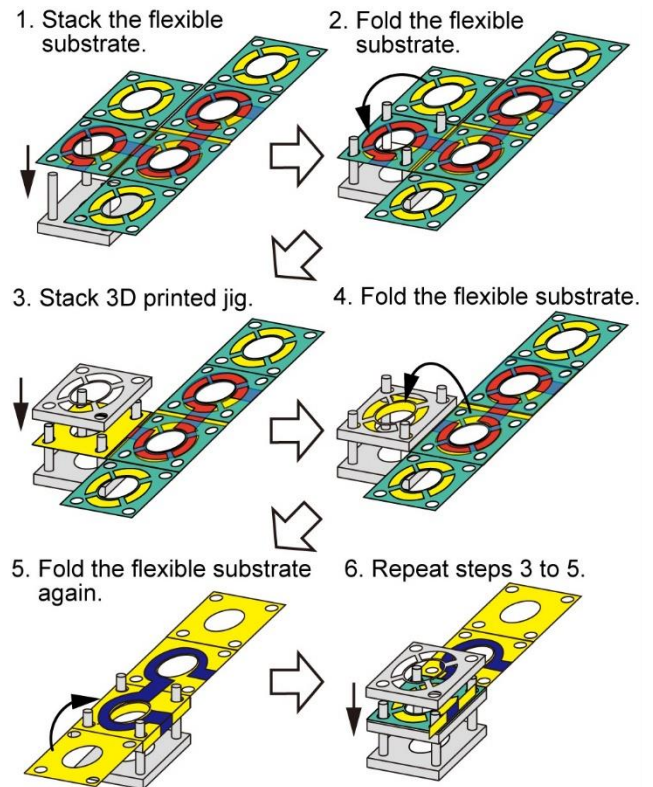


Fig. 5 Assembling process of the folded micro coil

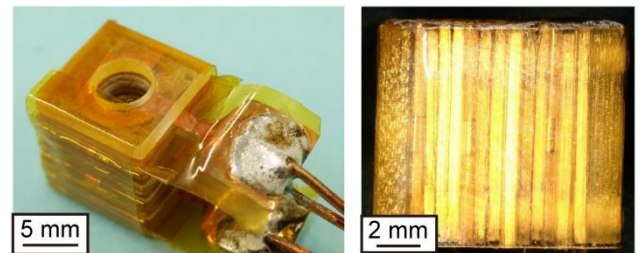


Fig. 6 Photographs of the folded micro coil

3.2 試作プロセス

Fig. 3 に折り畳みマイクロコイルの配線パターンを試作プロセスを示す。Cu 層が 4 μm 、ポリイミドが 25 μm の厚みをもつ Cu/ポリイミド/Cu の 3 層フレキシブル基板を用いた。まずコイル配線は、フレキシブル基板にフォトレジストを塗布し、露光・現像を行い裏と表の両面の Cu 層をエッチングすることで試作した。また計測対象挿入用の穴と位置合わせ用の穴は、フレキシブル基板のポリイミド層をエッチングすることで形成した。次に、厚膜レジストである SU-8 を塗布し、露光・現像をすることで SU-8 層を形成した。Fig. 4 に試作した折り畳みコイルの配線パターンと SU-8 層の写真を示す。

試作したコイル配線と 3 次元治具の組み立てプロセスを Fig. 5 に示す。まずフレキシブル基板の 4 つの穴に位置合わせ用の 3 次元治具の 4 つの柱を挿入する。次にフレキシブル基板を折り畳む。そして間隔保持用の 3 次元治具の 4 つの穴に位置合わせ用の 3 次元治具の柱を挿入し、フレキシブル基板の上に積み重ねる。その後フレキシブル基板を 2 回折り畳む。以降、間隔保持用の治具の積み重ねとフレキシブル基板の 2 度の折り畳みを繰り返すことで折り畳みコイルを試作する。Fig. 6 に試作した折り畳みコイルの写真を示す。

4. 実験

4.1 平面度評価実験

折り畳みコイルと寄生容量比較用コイルの配線面がどの程度平坦であるかを評価するため、配線が形成されている14層の基板の高さを計測し平面度を算出した。Fig. 7に示すように、高さ計測にはマイクロSCOPEを用い、z軸ステージの可動範囲の最下点をz=0として計測した。Fig. 8に示すように、計測点は点A-1を基準としてそれぞれ2.5 mm間隔で点A-1~E-5までの24点とした。例として、折り畳みコイルの1層目のz座標の計測結果をTable 3に示す。次に計測した24点のz座標から、最小二乗法により最小二乗平面を算出した。a, b, cを定数、測定データを x_i, y_i, z_i として、

$$F = \sum \{(a + bx_i + cy_i) - z_i\}^2 \quad (1)$$

が最小となるa, b, cを求めることで最小二乗平面を算出した。最後に、24点の計測箇所の中で最小二乗平面に対して最高点と最低点のz座標の差を平面度として算出した。

折り畳みコイルと寄生容量比較用コイルの各層ごとの平面度を算出した結果、Table 4に示すように折り畳みコイルの平面度の平均が333.2 μm 、標準偏差が123.4 μm となった。また、寄生容量比較用コイルの平面度の平均が468.6 μm 、標準偏差が159.5 μm となった。折り畳みコイルの平面度の平均は約29%低減、標準偏差は約13%小さかった。よって平面度が小さく、かつばらつきも小さい折り畳みコイルを試作できた。折り畳みコイルの平面度が低減したことについては、SU-8層により基板の剛性が向上し、配線面が平坦化したことによるものだと考えられる。また標準偏差が小さかったことについては、折り畳み

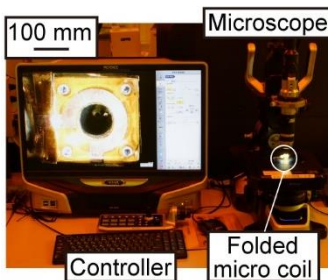


Fig. 7 schematic view of the experimental setup for height measuring

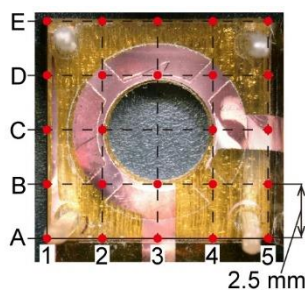


Fig. 8 Photograph of the measurement object

Table 3 Coordinate value of the z axis of folded micro coil

Coordinate value [μm]	1	2	3	4	5
A	6075.0	6133.8	6138.2	6013.9	5986.0
B	6007.9	5961.9	5971.4	5885.7	5853.5
C	5909.5	5944.9		5892.9	5891.4
D	5932.9	5985.4	5903.5	5897.2	5937.1
E	5888.9	5841.6	5796.3	5838.0	5853.0

Table 4 Flatness of the folded micro coil and the coil for comparison

	Folded micro coil	Coil for parasitic capacitance comparison
Average of flatness [μm]	333.2	468.6
Standard deviation of flatness [μm]	123.4	159.5

Table 5 Parallelism of the folded micro coil and the coil for comparison

	Folded micro coil	Coil for parasitic capacitance comparison
Average of parallelism [μm]	509.4	1009
Standard deviation of parallelism [μm]	156.2	412.0

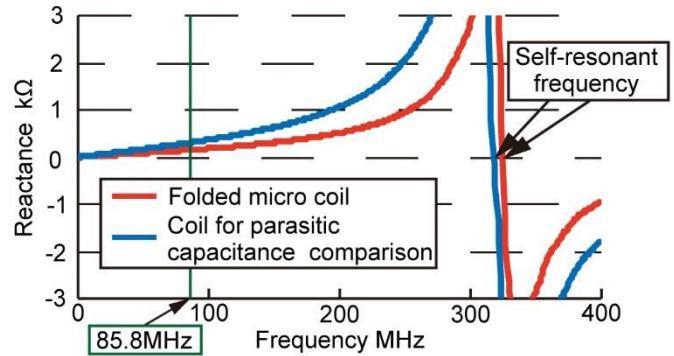


Fig. 9 Reactance of the folded micro coil and coils for comparison from 1MHz to 400 MHz

ながら高さ計測を行う中で、両方のコイルとも折り畳み前の基板部分の重みによって、中間層の計測中の基板部分が浮くことがあった。しかし折り畳みコイルはSU-8層の重みによって、計測中の基板部分の浮きが小さくなることで、平面度の標準偏差が小さくなったと考えられる。

4.2 平行度評価実験

折り畳みコイルと寄生容量比較用コイルの配線面同士がどの程度平行な位置にあるかを評価するために、平行度を算出した。基準となる平面はマイクロSCOPEのステージとした。計測データは平面度評価実験のデータと同じものを使用し、各層の最大値と最小値の差を平行度とした。14層それぞれで平行度を算出し、その値から平行度の平均を算出した。

折り畳みコイルと寄生容量比較用コイルの各層ごとの平行度を算出した結果、Table 5に示すように折り畳みコイルの平行度の平均が509.4 μm 、標準偏差が156.2 μm となった。また、寄生容量比較用コイルの平行度の平均が1009 μm 、標準偏差が412.0 μm となった。折り畳みコイルの平行度の平均は約50%低減、標準偏差は約62%小さかった。よって平行度が小さく、かつばらつきも小さい折り畳みコイルを試作できた。折り畳みコイルの平行度が低減したことについては、平面度と同様に、SU-8層により基板の剛性が向上したことでフレキシブル基板の配線面同士が平行化したことによるものだと考えられる。また、標準偏差が小さかったことについても、平面度の標準偏差と同様に、SU-8層の重みによって、折り畳みコイルの中間層の計測中の基板部分の浮きが小さくなることで平行度の標準偏差が小さくなったと考えられる。

4.3 電気特性計測実験

折り畳みコイルと2種類の比較コイルの電気特性を評価するために、電気特性の計測・算出を行った。ネットワークアナライザを用いて計測したリアクタンスの値をFig. 9に示す。自己共振周波数はリアクタンスが0になるときの周波数とした。インダクタンスは、周波数とリアクタンスを用いて、1~150 MHzの範囲の平均値をコイルのインダクタンスとして算出した。また、寄生容量は自己共振周波数、インダクタンスを用いて算出

した. 計測・算出した電気特性の結果を Table 6, Table 7 に示す.

電気特性計測の結果, 折り畳みコイル, 寄生容量比較用コイルの自己共振周波数はそれぞれ 325 MHz, 313 MHz となった. インダクタンスはそれぞれ 290 nH, 293 nH となった. また, これらの値から寄生容量を算出した結果, 折り畳みコイルと寄生容量比較用コイルはそれぞれ 0.827 pF, 0.884 pF となり, 折り畳みコイルの寄生容量は寄生容量比較用コイルに比べて 6.4% 低減した. これは折り畳みコイルの SU-8 層によりフレキシブル基板の剛性が向上し, フレキシブル基板の平面度と平行度が低減したことによるものだと考えられる. また, 折り畳みコイルと抵抗値比較用コイルの抵抗値は, それぞれ 2.37 Ω , 2.95 Ω となり, 折り畳みコイルは抵抗値比較用コイルに比べて 20% 低減した. これは両面配線を並列接続したことによるものだと考えられる.

4.4 MRI 画像計測実験と SNR 計測

折り畳みコイルと抵抗値比較用コイルを用いて MRI 画像計測を行い, 計測結果から SNR を計測した. Fig. 10 に MRI 画像計測のセットアップを示す. インピーダンスマッチングを行った受信回路を MRI 装置内に設置することで, 直径 4 mm の油脂球の MRI 画像計測を行った. なお, 定在波比 (SWR : Standing Wave Ratio) 計測を行った結果, 85.8 MHz における折り畳みコ

Table 6 Electro characteristics of the folded micro coil and the coil for parasitic capacitance comparison

	Folded micro coil	Coil for parasitic capacitance comparison
Self-resonant frequency [MHz]	325	313
Inductance [nH]	290	293
Parasitic capacitance [pF]	0.827	0.884

Table 7 Resistance of the folded micro coil and the coil for resistance comparison

	Folded micro coil	Coil for resistance comparison
Resistance at 85.8 MHz [Ω]	2.37	2.95

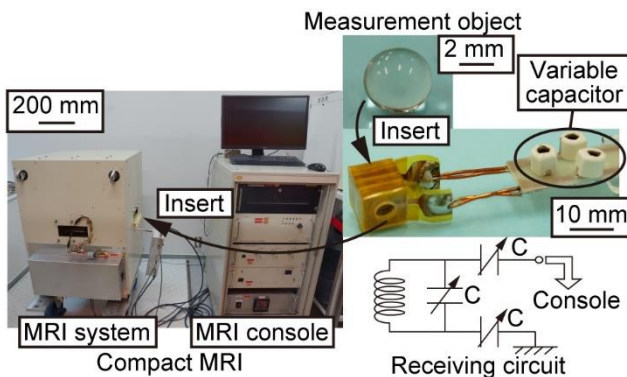


Fig. 10 Experimental setup for measuring MRI images

Table 8 Conditions for measuring MRI image

Sequence	Spin echo	Pixel size	100×100 μm^2
Sample	Cooking oil	Average	4

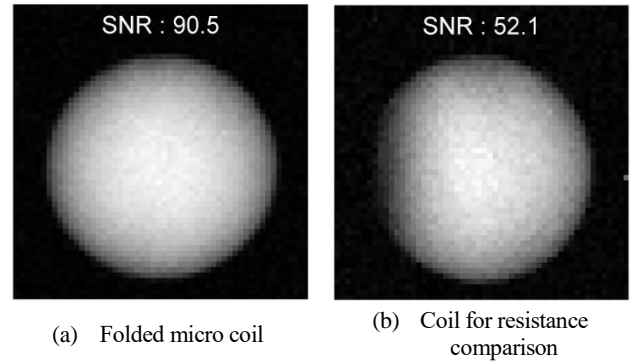


Fig. 11 MRI image of cooking oil

イルと抵抗値比較用コイルの SWR はどちらも 1.01 となった. MRI 画像計測の計測条件を Table 8 に示す. スピンエコー法を利用し, 画素サイズを 100×100 μm^2 , 繰り返し回数を 4 回として計測した. 計測した MRI 画像を Fig. 11 に示す. SNR を計測した結果, 折り畳みコイルと抵抗値比較用コイルはそれぞれ 90.5, 52.1 となり, 折り畳みコイルの SNR は 73% 向上した. これは抵抗値を低減したことでノイズが減少したことによるものだと考えられる. よって, 低ノイズな MRI 信号受信用コイルであることを確認した.

5. 結論

本研究では, 厚膜レジストである SU-8 の層により平坦かつ平行な配線面をもち, 両面配線が並列接続となっているフレキシブル基板と, 3 次元治具を組み合わせることで折り畳みコイルを試作した. 配線面の平面度と平行度を算出した結果, 平面度の平均は 333.2 μm , 平行度の平均は 509.4 μm となり, 寄生容量比較用コイルに比べてそれぞれ 29% 低減, 50% 低減となった. 電気特性計測を行った結果, 寄生容量, 抵抗値はそれぞれ 0.827 pF, 2.37 Ω であった. 寄生容量は寄生容量比較用コイルに比べて 6.4% 低減し, 抵抗値は抵抗値比較用コイルに比べて 20% 低減した. これらの結果より, SU-8 層によって配線面を平坦化・平行化することで寄生容量が低減し, かつ両面配線を並列接続することで抵抗値が低減することを確認した. MRI 画像計測を行った結果, 折り畳みコイルの SNR は 90.5 となり, 低ノイズな MRI 信号受信用コイルであることを確認した. 以上より, 厚膜レジストにより配線面を平坦化・平行化しフレキシブル基板の両面にある配線を並列接続することで, 低寄生容量かつ低抵抗な MRI 用マイクロコイルを実現した.

参考文献

- (1) 巨瀬勝美, NMR イメージング, 共立出版, (2014) p. 1.
- (2) A. J. Schwarz, A. Danckaert, T. Reese, A. Gozzi, G. Paxinos, C. Watson, E. V. Merlo-Pich, and A. Bifone, A stereotaxic MRI template set for the rat brain with tissue class distribution maps and co-registered anatomical atlas: Application to pharmacological MRI, *NeuroImage*, **32** (2006) pp. 538-550.
- (3) Y. Yokoyama, T. Dohi, A low Resistance and low parasitic capacitance micro coil for MRI fabricated by selective deposition on 3D printed stepped helical structures, *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems* (2016), pp. 477-480.
- (4) T. Izumizaki, T. Dohi, A high Sensitive and Low Parasitic Capacitance Folding Micro Coil with Multilayered Zigzag Diameter Wiring, *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems* (2020), pp. 465-468.