



A. Tomioka

局所レーザ溶接による金属ナノワイヤー極細配線の実現と皮膚貼付け型フレキシブル回路への適用

富岡 明宏*

1. 研究の目的と背景

金属ナノワイヤー^{1,2)}の研究はナノテクノロジーとともに急速に進展してきたが、現状では最大でも長さ 0.3mm にしかならず、配線材料として実用的な長さを確保するためには、溶接などの手法でつなぎ合わせる必要があり(図1)、ここに微視的物体のレーザ加工・処理技術の新たな展開が切望されている。

金属ナノワイヤーの交差・近接部分には表面プラズモンの電界増強効果が期待でき、レーザ波長を表面プラズモン共鳴に一致させれば、通常よりもはるかに高強度のレーザ加工・処理が実現できる。しかもこの手法では、必要とされる交差・近接部分のみをピンポイントで加熱し³⁾、局所光溶接を施すことが可能となろう(図1)。

このようにして作製された局所光溶接金属ナノワイヤーの応用先として有望なのが、皮膚貼付け型センサ回路⁴⁻⁶⁾である。痛みを伴わずに心拍数や血中酸素濃度を計測できる非侵襲型皮膚貼付け型センサ回路が実用化すれば、壮年者の健康意識の高まりによる健康維持のための身体運動が、ややもすれば過度に陥り却って健康を害することのないよう、運動負荷が適度かどうかをリアルタイムに自分で把握することが可能となる。また介護が必要な高齢者の身体状態・健康状態も、高齢者に負担をかけることなくモニタリング可能になる。センサ回路への今後の要望として、(1)運動しても壊れない柔軟回路、(2)重量を軽くするため

電源電池を廃止し、代わりにワイヤレス給電⁷⁻⁹⁾を利用する、の2点が挙げられる。

本研究で探求する局所光溶接した金属ナノワイヤーは柔軟回路に必要な極細配線として機能する。同時に、極細の金属ナノワイヤーを束ねた配線材料は、1本の太い金属線よりも表面積が格段に大きく(図2)、従って理想的な高周波用配線材料となり、数十 cm 以上離れてもワイヤレス給電できるマイクロ波周波数帯の受電アンテナとして格好の材料となる可能性が高い。スマホ等の Wi-Fi に使われているマイクロ波は指向性が高く、電波の拡散が少ないため、長い距離にわたって電力を有効に運ぶのに適しており、現在主流の MHz 帯「置くだけ充電」に代わる次世代技術として注目されている^{9,10)}。

本論文では、ラボ用マイクロ波オープン^{11,12)}を使った均一加熱法により長さ・太さのそろった極細金属ナノワイヤーを作製、これを塗布した配線に局所光溶接を行い、長さ 0.1 mm に満たないナノワイヤーどうしを 10 cm 以上の距離にわたって電氣的に接合する。その導電性評価とともに、曲げ加工時の電氣的な屈曲耐性を評価する。最後にマイクロ波周波数帯でのワイヤレス給電の実用性を評価するため、この金属ナノワイヤーをアンテナ型に塗布し、RFID 用送信機^{10,13,14)}から送った電波をこの金属ナノワイヤー・アンテナで受信して、受信感度の高さを市販の受電アンテナと比較試験を行う。

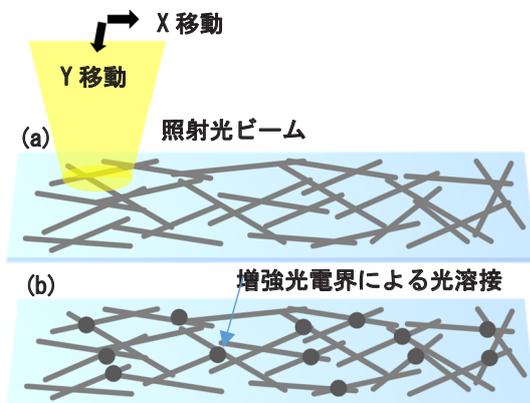


図1 局所光溶接による金属ナノワイヤーの相互接合。(a)光照射中、(b)照射後。本数を減らし、まばらに表示。

2. 実験方法

2.1 ラボ用マイクロ波オープンを使った金属ナノワイヤーの作製

本研究で導入したラボ用マイクロ波オープンを使うと、丸底フラスコに入れた反応溶液全体がマイクロ波を吸収し、内部から均一に加熱されるので、全体に反応条件が揃い、長さ・太さのそろった極細金属ナノワイヤーが作製で



図2 屈曲状態の金属ナノワイヤー。ここでは大きな比表面を例示するため、多数のナノワイヤーからなるバンドルとして表示している。

*大阪電気通信大学 工学部電気電子工学科 教授

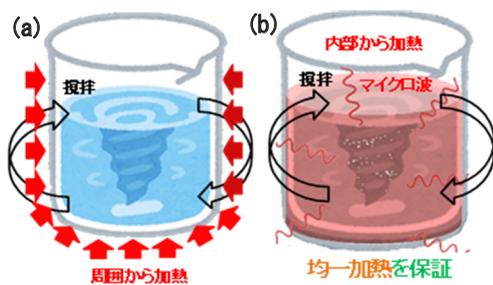


図3 (a)オイルバス中で周囲から加熱する方法と(b)マイクロ波により溶液内部から均一に加熱する方法の違い。

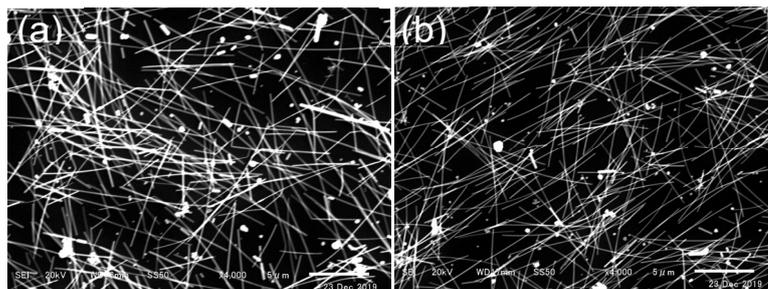


図4 (a)オイルバス加熱、(b)マイクロ波オープン加熱で作製した銀ナノワイヤー。スケールバーは5 μm 。

きると期待できる。通例使用されるオイルバス加熱^{15, 16)}とはこの点が大きく異なる(図3)。本研究で探求するマイクロ波周波数での高い導電性には、表皮効果の影響を受けない、極細で長さもそろったナノワイヤーが適していると期待される。1 GHz 程度のマイクロ波の波長は溶液中でも数 cm であり、これよりはるかに短い長さ 0.1 mm 以下の金属ナノワイヤー両端では、マイクロ波電磁波による電界はほとんど同位相であり、金属ナノワイヤーは放電を起こさないと考えられる(長さ数 cm 以上の磁性金属線を入れると、バチバチと放電して溶けてしまうが)。高い導電性を要求されるので、本研究では金属中で最も導電性の高い銀を使って、銀ナノワイヤーを作製する。

2.2 局所光溶接の概要

局所光溶接の概念図を図1に示した。最大でも長さわずか 0.1 mm の金属ナノワイヤーを、各1か所ずつ局所溶接して相互に接合、バンドル化することをめざす(図2)。この場合、どのナノワイヤーも両端が固定されている訳ではないので、互いに滑り合い、位置ずれが可能となる(図2)。従って、バンドル全体を曲げたときに互いにナノワイヤー位置がずれて、曲げの内側・外側の曲率半径の違いを吸収して破断しなくなり、屈曲耐性を示すと期待できる。

3. 実験結果および考察

3.1 ラボ用マイクロ波オープンを使った銀ナノワイヤーの作製

まず高温溶液処理によって銀ナノワイヤーを作製する際、従来法のオイルバス加熱^{15, 16)}とマイクロ波オープンで反応液を均一加熱した場合の銀ナノワイヤー試料を電子顕微鏡で比較した(図4)。マイクロ波オープンで加熱した方は、有意に細く、長さも長くなっている。また、銀ナノ粒子の生成など副反応も大きく抑制され、銀ナノワイヤーが選択的に成長していることがわかる。マイクロ波オープンの利用について多数の報告^{11, 12)}が出されているが、温度を高くして反応時間を短くできる利点を活用する例が多い。これに反して Ostwald Ripening 機構¹⁷⁻¹⁹⁾により銀ナノワイヤーの伸長が最も促進されるのは 175°C 付近のみであり、本研究では反応溶液の精密な温度管理が必要である。また本研究の2段階溶液処理では、まず 140°C で

金ナノ粒子を生成させた後、成長方向を1次元方向に制御する触媒 PVP 高分子¹⁷⁻¹⁹⁾と硝酸銀を外部から注入してから温度を 175°C に上げ、銀ナノワイヤーの生成を開始する。このため、他のマイクロ波処理の報告例とは違って密閉容器の利用はできず、開放系システムを採用し、シリコンチューブを使って予備加熱した硝酸銀と触媒 PVP 高分子を外部から丸底フラスコ内に注入する装置を構成した。還元剤のエチレングリコールは吸湿性が高く、フラスコ内に湿度が入り込まないように、常にアルゴンガスを吹き込んだ。また、銀ナノワイヤーの生成に伴って溶液粘度が上昇するので、圧縮空気で攪拌するマグネチックスターラーの回転速度も途中で上昇させる必要があり、常に外部から反応溶液の攪拌状態をモニタする必要がある。これらの点を達成できるように、カスタム仕様のマイクロ波オープン・システムを構築した。

オイルバスで加熱した場合、容器の周囲からのみ加熱され内部溶液の温度が場所によって不均一になるため、1次元銀ナノワイヤーに成長しなかった銀ナノ粒子が多く観測され、銀ナノワイヤーの長さも不均等だった(図4(a))。マイクロ波オープンで加熱した場合は、溶液の内部から一斉に加熱されるため、全溶液の温度が均一に上昇し、銀ナノ粒子の生成が極めて少なく、銀ナノワイヤーの長さも揃って、長さ 2 μm 以下の銀ナノワイヤーは観察されなかった(図4(b))。銀ナノワイヤーを長くして、少ない本数でも巨視的な導電性経路を高い確率で形成するには、銀ナノワイヤー作製時の温度管理が重要だと判った。

3.2 銀ナノワイヤー塗布配線の電気特性

塗布した銀ナノワイヤーの導電性を評価するため、プラスチックシート上に長さ 2 cm の直線パターンを塗布した。1回の塗布で長さ 1 cm 当たり銀ナノワイヤー分散液の使用量は 0.4 μl であった。作製後 10 倍に濃縮した銀ナノワイヤー分散液を用意し、1~5 往復塗布した直線パターンを 3 試料ずつ作製し(表1の縦3行に相当)、各試料3か所、合計 9 か所の導電性を比較した(表1)。塗布回数を重ねる毎に劇的に抵抗値が低下し導電性が向上している。4 往復、5 往復塗布では、塗布された銀ナノワイヤーの「隙間」を、後から塗り重ねた銀ナノワイヤーが埋め、連続的な導電性経路が形成されるので、劇的に導電性が向上する

表1 直線塗布10倍濃度銀ナノワイヤーのDC抵抗 塗布回数依存性とアニーリング・紫外光照射の効果 (空白は高抵抗のため測定不能.)

塗布回数	抵抗値(Ω)											
	アニーリング前			アニーリング後			光照射(10分)			光照射(10+10分)		
	A-B	B-C	A-C	A-B	B-C	A-C	A-B	B-C	A-C	A-B	B-C	A-C
1往復				85M			19k	200M	200M	7.5k	33k	36.2k
		120M			910			189.1			769	
2往復	270M	130M	270M	3.4M	8.7k	3.4M	4.6k	4.1k	8.5k	3.7k	3.8k	7.6k
	3.2M	3.5k	3.1M	370	110	342	162.9	93.5	256.3	158.3	91.7	250
	219	1.0k	1.3k	50.6	130.3	181.5	46.5	93.7	163.1	46	114.3	159.7
3往復	38M	50M	74M	906	3.2k	3.9k	1.2k	1.6k	2.7k	1.1k	1.4k	2.5k
	131	1.48k	1.26k	38.1	107.4	145.6	52.3	173	225.2	51	169.4	220.3
	167.3	216.4	353.5	51.1	66.4	116.8		63			61.8	
4往復	277.7	170.7	413	75.7	62.1	137.5		60.6			60.9	
	32.2	38.9	120.4	31.7	22.8	64.8	40.6	19.5	64.5	40.8	14.1	63.4
	24.4	66.9	110.9	19.2	36.5	55.6	13.9	35.1	43.1	13.3	32.5	54.6
5往復	35.1	155.1	189.7	18	110.3	127.6	10.7	44.8	56.4	10.5	43.1	
	21.9	36.4	43.4	11.5	9.33	22.3	6.4	5.4	11.5	6.2	5.1	11.2
	52.6	33	85	14.9	16.6	31.9	10.3	11.7	21.8	9.9	11.7	22
	21.3	22.7	38.9	19	13.2	33.5	12.7	9.6	21.6	12.6	9.1	22

と考えられる。同時に、試料による抵抗値のばらつきも塗り重ねるに従って大きく抑制され、揃ってくるのが分かる。往復塗布回数を増やすことによって劇的に導電性が向上するが4往復以降では導電性向上が飽和してきているので、5往復塗布で十分と判断できる。各試料ごとに塗布の不均一性が見られるが、30分間アニーリングにより導電性の不均一性はかなり解消される。さらに、10分間紫外光照射すると試料間の導電性ばらつきが解消される。これは、銀ナノワイヤー交差部では銀ナノワイヤーが近接し、隙間があってもそこに発生する紫外エバネッセント場の電界増強により熱的に銀ナノワイヤーどうしが「光溶接」される効果が発揮されたと考えられる。こうして本研究の主目的である「光溶接」の実現が確認できた。

当初は、レーザを用いて紫外エバネッセント場を発生させる予定だったが、ビーム径1mmのレーザ光を直径数cmに広げる光学系が完成できなかった。これはコロナ蔓延の影響で、大学内共同利用施設である3D先端加工センターの工作機械利用が長期間事実上許可されなくなったためである。そこで代替措置として、光学顕微鏡の70W Xeランプ(紫外光成分が多い)を取り外し、銀ナノワイヤーへの紫外光照射に使用し、実験を行った次第である。上記に記したように、このXeランプでも銀ナノワイヤーの「光溶接」が実現できたので、研究目的は達成されたと考えている。

次に、銀ナノワイヤー配線を塗布したプラスチックシートを90°に曲げた状態、および平らに戻した状態での導電性を比較し、銀ナノワイヤー配線の屈曲耐性を検証した結果を表2に示す。表の下半分、印刷塗布用に開発されたPET(ポリエステル)シートに塗布した場合を見てみよう。

領域1では、最初の導電性100%(相対値)が屈曲後平らに戻しても79%に低下したと言う事は差し引き21%のナ

ノワイヤーが折れてしまい、79%だけが最終的に交差部で電気的接触を維持していると解釈できよう。この意味では79%と途中の70%の差、9%は曲げている最中は交差が外れて70%に低下するが折れているわけではなく、平らに戻すと交差が回復する可逆的な接触になっていると解釈できるだろう。このようにして、屈曲によって非可逆的に折れてしまう銀ナノワイヤー、常に導通している交差部、一時的にはずれるが導電性が回復する可逆的な導通の3種類に分類できる。測定した他の2領域では、屈曲により交差が外れる割合が高く、はらつきが観測された。

表の上半分、ポリイミドシートの場合は、屈曲中も元に戻した後も常に導通を維持している交差部が82%、97%、98%とポリエステルシートの場合よりも優位に多い。

表2 銀ナノワイヤー配線を90°屈曲時の導電性変化
ポリイミドシート上

導電性(相対値)	屈曲前 [%]	90°屈曲中 [%]	平に戻すと [%]	常に導通 [%]	可逆的に導通 [%]	非可逆的に断裂 [%]
領域1	100	82	77	82	-5	23
領域2	100	97	99	97	2	1
領域3	100	98	99	98	1	1
ポリエステルシート上						
領域1	100	70	79	70	9	21
領域2	100	36	72	36	36	28
領域3	100	29	37	29	8	63

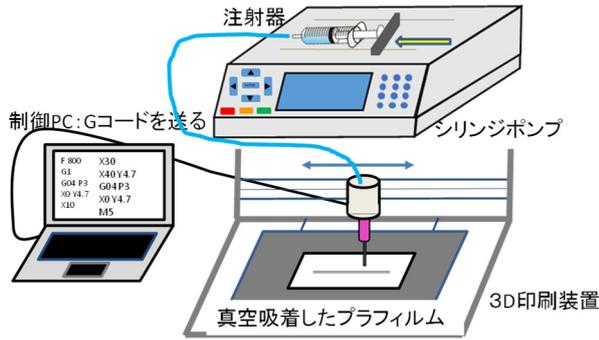


図5 3D加工機を改造した銀ナノワイヤー精密塗布装置

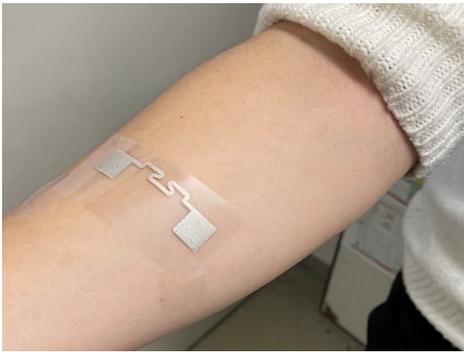


図6 銀ナノワイヤーを塗布して作った RFID 用受信アンテナ

この結果は以下のように解釈できるだろう。つまり、印刷塗布用に開発されたポリエステルシートは、銀ナノワイヤーが強く吸着するようデザインされている。従って、曲げると却って銀ナノワイヤーが折れやすい。他方、疎水性のポリイミドシートの場合には、屈曲時に一時的にシートから銀ナノワイヤーがはがれ、銀ナノワイヤーどうしの交叉がはずれて導電性がやや低下するが、銀ナノワイヤーは折れていないので、平らに戻すと交叉が復活して、導電性が回復する、可逆的な導電性を示すのだろう。機械分野では塑性変形・弾性変形という概念はポピュラーだが、脆弱でなく「回復力をもつ電気材料」というのは電気分野では新しい概念ではなかろうか。この試験に基づき、吸着力が弱めのプラスチックシートを基板に使うことにより、電気的な屈曲耐性が実現できると期待できる。

3.3 3D加工機を使った精密印刷技術による銀ナノワイヤー・シートアンテナの作製^{20,21)}

市販のシートアンテナの形を模して、正確な形状で銀ナノワイヤー分散液を塗布できるよう、3D加工機の改造を行った(図5)。エンドミルを固定する部分に金属ノズルを固定し、シリンジポンプからテフロンチューブ経由で一定流量で送り、プラスチックシート上にシートアンテナ形状に銀ナノワイヤー分散液を塗布した。市販のマイクロ波UHF帯シートアンテナは、利用する周波数・希望する指向

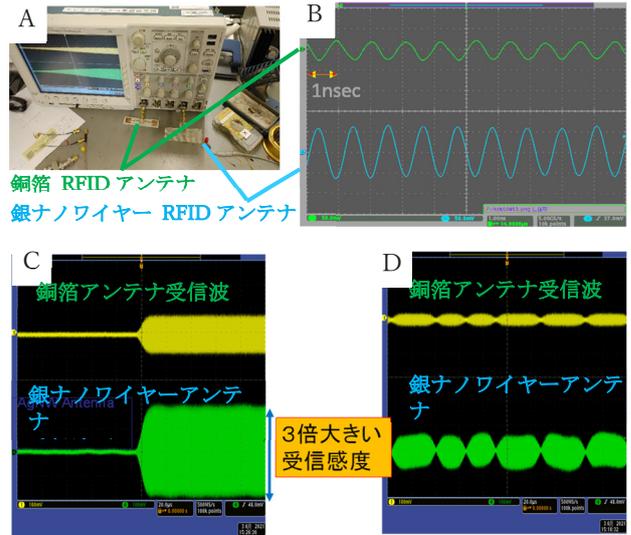


図7 銀ナノワイヤーを塗布して作った RFID 用受信アンテナの受信性能試験

特性によって様々な形状のものが設計・開発されている。銅箔をアンテナ線路に使った市販アンテナと比較して、素材としての銀ナノワイヤーの有利性を判断するためには、それらのアンテナ形状を正確に再現することが必須である。本研究で開発した3D加工機を改造した銀ナノワイヤー精密塗布装置は、正確なアンテナ形状を再現するのに役立った。

図6が試作した銀ナノワイヤー・アンテナである。比較のため、0.3 mm厚のガラスエポキシ基板の表面銅箔(16 μm厚)をPCB基板加工機で切削加工した銅箔シートアンテナも試作して両者のアンテナ受信特性を周波数920 MHzで比較した(図7A)。厚さとしてはより薄く、金属量の少ない銀ナノワイヤー・アンテナの方が振幅の大きな波形が受信されており、金属量がより少なくても銀ナノワイヤー・アンテナの方が受信感度が高いことがわかる。これは断面が長方形(幅1 mm厚さ16 μm)のバルク銅配線よりも、多数の銀ナノワイヤーを積層させた銀ナノワイヤー・ネットワークの方が比表面積が大きく、表皮効果により配線の表面しか電流が流れない影響を銀ナノワイヤー・ネットワークは受けない利点を証明している。ちなみに920 MHzの高周波では銀、銅とも表面から約2 μm(表皮, Skin Depth)までで電磁波の電界振幅は1/eとなる。Skin Depthは $1/\sqrt{\pi f \sigma \mu}$ で与えられ、 f は高周波の周波数、 σ 、 μ はその周波数での金属の導電率と透磁率。従って、厚さ16 μmのバルク銅配線では断面積のほとんどで電磁界が0となり、ごく表面の表皮2 μmでのみ電流が流れるのに対し、太さ約0.1 μmの銀ナノワイヤーでは全断面積に有効に電流が流れることになる。つまり銀ナノワイヤーの比表面積の大きさが、高周波UHF帯での高いアンテナ感度をもたらすことが証明された。微細金属線の集合体为本質的な利点となったと言える。

4. その後の展開

4.1 銀ナノワイヤー・シートアンテナを使ったワイヤレス給電の実現可能性^{20,21)}

図7で利用したアンテナ形状は、元々ワイヤレス給電可能なRFIDタグ^{10,13,14)}である。RFIDタグは商品に取付けてそれがどの商品か区別するための標章である。商品情報を記録した専用ICが配置されており、RFIDアンテナを介して、読取り装置(リーダ)とUHF帯電波を交信して情報交換する仕組みとなっている。薄型軽量の標章とするため、電池を内蔵せず代わりにワイヤレス給電を使ってリーダから届く電波を電力として動作するパッシブ方式が広がっている。本研究では、この点を活用するため、ICを取り外したRFIDタグのアンテナを真似て、銀ナノワイヤー・シートアンテナを制作した次第である(図6)。

電気回路としての詳細を次に述べる^{10,13,14)}。本来は線対称なダイポールアンテナ(平衡回路, Balanced circuit)であるが、これをグランドを持つ非平衡回路(Unbalanced circuit)に変換するループ構造(バラ¹⁰⁾, Balun)を介してSMAコネクタに接続される。この接続点には元々2端子のベアチップ極小RFID ICが並列接続されている。入力される電波信号をこのIC内で平滑化して、IC電源となる直流電圧を作り出し、ICを動作させる。ICは変調された入力電波をデコードしてコマンドとして解釈し、要求されている情報をIC内蔵のメモリから読み出した後、この情報を高周波変調信号としてアンテナから送り返す。我々はこのICを取り外しランドに変更してSMAコネクタを取付け、作製したアンテナを広帯域6GHzのオシロスコープに接続して受信特性を評価した。これが図7である。

1 m以上の距離でも商品情報をやり取りできる規格として採用されているUHF帯920 MHzの基本波が精度よく受信できる(図7B)だけでなく、RFIDリーダからのワイヤレス給電開始に合わせて受信電波が立上がり(図7C)、充電完了後のRFIDコマンド(RFID番号の間合せコマンドなど)で変調された電波も正しく受信できている(図7D)ことを示唆している。

4.2 Wi-Fi 2.4 GHz 帯での銀ナノワイヤー・アンテナのワイヤレス受電テスト^{20,21)}

試作したこの銀ナノワイヤー・シートアンテナは、やや受信感度が下がるもののスマートホンのWi-Fiで使われている2.4 GHz帯電波も近距離であれば受信可能であることが、2.4 GHz帯Active RFIDリーダとの交信により実証された(図8)。しばらく一定振幅の電波が続いた(図8(a), (b)の上半分)後、600 kHzで変調された2.4 GHz帯電波が受信された(図8(a), (b)の下半分)。アンテナ形状を工夫すれば、ワイヤレス給電と同時に、スマートホンとの交信によりデータをスマートホンに送り、スマートホン上のアプリに表示させることも可能であることが示唆される。今後皮膚貼付けセンサ回路への展開において、センサ出力をスマートホン上に数値やグラフ表示してリアルタイムに管理できることは大きな前進である。現在主

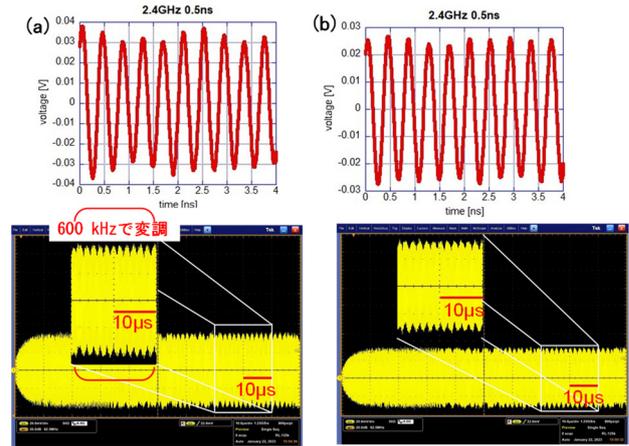


図8 2.4GHz RFID 送信機からの電波を(a)銀ナノワイヤー・シートアンテナ、および(b)銅箔アンテナで受信した波形

流の腕時計型センサデバイスは皮膚への密着性が低く、特に身体運動している最中に間断なくデータ計測するには不向きであろう。健康増進のため身体運動を習慣とする人が増えている中で、運動負荷を適正レベルに維持するためには、本研究で提案する密着性の高い皮膚貼付け型センサデバイスにワイヤレス給電+データ通信機能を搭載して、データをリアルタイムにスマートホン上に表示可能にすることは大きな進歩となるだろう。同時にセンサデバイスに電源電池が不要となり、デバイスの屈曲耐性が保証され、一層の軽量化も実現する。

4.3 皮膚貼付けセンサ回路への応用に向けて

銀ナノワイヤー・シートアンテナを使ったワイヤレス給電が実現すれば、現在主流の腕時計型ウェアラブルデバイスと異なり、(1)電源電池を廃し、軽量かつ柔軟なシート型センサデバイスが実現し、(2)皮膚密着型の高感度な生体計測が連続的かつリアルタイムに可能となる。またWi-Fi周波数2.4 GHzでのワイヤレス給電が成功すれば、センサデバイスへの給電だけでなく、センサデータをユーザスマートホンへ転送してリアルタイムにグラフ表示する機能⁴⁾なども実装可能となろう。UHF帯での高い送受信感度を維持するためには波長で決まるシートアンテナのサイズは5~10 cm程度とならざるを得ず、一般に開発されているセンサ回路はこれより小さく、シートアンテナと一緒に搭載してウェアラブルデバイス^{5,6)}とすることに大きな問題はないだろう。

通常の銅箔を切削加工(あるいはエッチング処理)して配線パターンを作製する手法では1枚のシートアンテナを削り出すにも、30分以上の時間を要する。本研究で開発したカスタム・マテリアルプリンターを使って銀ナノワイヤー分散コロイド液をプラスチックシート上に印刷塗布してアンテナを形成する手法は現状でも5分程度で終わる。インクジェットプリンタの技術を採用すれば30秒に短縮することは可能であろう。

不要な銅箔を削り取る（あるいは溶かし去る）のではなく、必要量の銀ナノワイヤーだけを使用して配線パターンを形成することは、資源の有効利用という観点からもエコロジカルで意義がある。さらに配線パターンは隙間を残した銀ナノワイヤーの重なり（ネットワーク構造^{15,16}、図1）から構成されているので、ぎっしり金属で埋め尽くされている通常の配線パターンと比べてさらに金属の使用量が少なくなっている。表皮効果により配線表面しか電流が流れない高周波用配線としては、このような銀ナノワイヤー・ネットワーク構造が有利である。

また、銀ナノワイヤー・ネットワーク構造では交差点で銀ナノワイヤーが相互に交差角度が変わりうる「柔軟性」が期待される。その結果、銀ナノワイヤー・ネットワーク構造は「曲げ」に対して原理的に柔軟となり¹⁷、バルクの板状構造である通常銅箔よりも「曲げられる」回路実現に適していると考えられる。

今後、本研究で開発した光溶接技術を活用して、高く、安定した導電性を示す銀ナノワイヤー堆積配線をマイクロ波通信に活用して行きたい。5Gから6Gへと、ワイヤレス無線技術への期待は高まっており、小電力デバイス用途でも小型シートアンテナを印刷技術で製造することは価値があろう。

5. 結び

本研究で導入したラボ用マイクロ波オープンは大きな効果があり、作製された銀ナノワイヤーは、従来法と比較して太さ・長さともそろい、スマートフォンのWi-Fiで使用される2.4 GHzマイクロ波周波数まで高い導電性を示した。マイクロ波周波数での長距離ワイヤレス給電応用をめざして、3D加工機を使って塗布・制作した銀ナノワイヤー・シートアンテナは市販品の銅箔受電アンテナよりも高い受信性能を示し、銀ナノワイヤー・シートアンテナがワイヤレス給電素子としての実用性をもつことが実証された。マイクロ波周波数での高い導電性には、(1)比較的低濃度の銀ナノワイヤー分散液を高速塗布することにより凝集体の生成を抑制すること、(2)塗布後、本研究で開発した「局所光溶接」により、ミクロな銀ナノワイヤー交叉点でのみエバネッセント場増強される、光電界による熱的な「溶接」が交叉点での接触電気抵抗を大幅に下げること、の両者が有効であることが証明された。これら2つの機械加工的な着想をナノテクノロジーに導入したことが、本研究に成果をもたらしたといえよう。

皮膚貼付け型センサ回路への応用としては、高周波表皮効果の影響を受けない大表面比の銀ナノワイヤーを積層した銀ナノワイヤー・ネットワーク構造をアンテナ線路に使用した点が画期的である。この工夫がワイヤレス給電につながり、現在主流の腕時計型デバイスと異なり、(1)電源電池を廃して軽量かつ柔軟なシート型センサデバイスが実現、(2)皮膚密着型の高感度な生体計測が連続かつリアルタイムに可能となる。周波数2.4 GHzでのワイ

ヤレス受電にも成功したので、センサデータをユーザスマートホンへ転送してリアルタイムにグラフ表示する機能⁴⁾なども実装可能となろう。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの2019年度一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) Z. Q. Li (Ed.), "Anisotropic Nanomaterials: Preparation, Properties, and Applications", Springer, Heidelberg (2015).
- 2) A. Zhang, G. Zheng and C. M. Lieber (Eds.), "Nanowires: Building Blocks for Nanoscience and Nanotechnology", Springer, Switzerland, (2016).
- 3) E. C. Garnett, W. Cail, J. J. Cha, F. Mahmood, S. T. Connor, M. G. Christoforo, Y. Cui, M. D. McGehee and M. L. Brongersma, "Self-limited plasmonic welding of silver nanowire junctions", *Nat. Mat.*, 241-249 (2012), 11.
- 4) I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, "Wireless Sensor Networks", Wiley, (2010).
- 5) C. Harito, L. Utari, B. R. Putra, B. Yuliarto, S. Purwanto, S. Z. J. Zaidi, D. V. Bavykin, F. Marken, and F. C. Walsh, "Review—The Development of Wearable Polymer-Based Sensors: Perspectives", *J. Electrochem. Soc.*, 1-14 (2020), 037566, 167.
- 6) M. Chung, G. Fortunato and N. Radacsi, "Wearable Flexible Sweat Sensors for Health Care Monitoring: a Review", *J. R. Soc. Interface*, 1-15 (2019), 20190217, 16.
- 7) 高橋 俊輔, "ワイヤレス給電技術者育成のための基礎知識", イルカカレッジ, (2012).
- 8) 松木 英敏、高橋 俊輔, "ワイヤレス給電技術がわかる本", オーム社, (2011).
- 9) 篠原真毅, 小柴公也, "ワイヤレス給電技術 -電磁誘導・共鳴送電からマイクロ波送電まで-" 科学情報出版, (2013).
- 10) J. P. Curty, M. Declercq, C. Dehollain and N. Joehl, "Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems", Springer, (2007).
- 11) 柳田 祥三, 松村 竹子, "化学を変えるマイクロ波熱触媒", ケイ・ディー・ネオブック, 化学同人 (2004).
- 12) 財産法人産業創造研究所マイクロ波応用技術研究会編, "初歩から学ぶマイクロ波応用技術", 工業調査会 (2004).
- 13) K. Finkenzerler, "RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards,

- Radio Frequency Identification and Near-Field Communication”, Wiley, (2010).
- 14) D.M. Dobkin, “The RF in RFID: UHF RFID in Practice”, Newness, (2012).
 - 15) N. P. Dasgupta, J. Sun, C. Liu, S. Brittman, S. C. Andrews, J. Lim, H. Gao, R. Yan, and P. Yang, “Semiconductor Nanowires – Synthesis, Characterization, and Applications”, *Adv. Mater.*, 2137–2184 (2014), 26.
 - 16) S. Ye, A. R. Rathmell, Z. Chen, I. E. Stewart and B. J. Wiley, “Metal Nanowire Networks: The Next Generation of Transparent Conductors”, *Adv. Mater.*, 6670–6687 (2014), 26.
 - 17) A. Tomioka, A. Masuda, S. Fushii, Y. Matsuba and Y. Haru, “Role of polyvinylpyrrolidone bound on silver nanowire surface: Balancing among electrical conductance, sulfuration resistance, and flexibility”, *Phys. Status Solidi B*, 1–5 (2017), 1600717, 254.
 - 18) Y. Sun, B. Mayers, T. Herricks and Y. Xia, “Polyol Synthesis of Uniform Silver Nanowires: A Plausible Growth Mechanism and the Supporting Evidence,” *Nano Lett.*, 955–960, (2003), 3.
 - 19) S. Coskun, B. Aksoy and Husnu E. Unalan, “Polyol Synthesis of Silver Nanowires: An Extensive Parametric Study”, *Cryst. Growth Des.*, 4963–4969 (2011), 11, No. 11.
 - 20) K. V. S. Rao, P. V. Nikitin and S. F. Lam, “Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application”, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 3870–3876 (2005), 53, No. 12.
 - 21) N.C. Karmakar, “Handbook of Smart Antennas for RFID Systems”, Wiley, (2010).