

TEモード・メタサーフェイス型ワイヤレス給電システムの理論的パフォーマンスの解明と従来型給電手法との比較に関する調査

研究代表者 若 土 弘 樹 名古屋工業大学 テニユアトラック助教

1 序論

ワイヤレス給電は電子機器などを「無線で」手軽に給電できる技術として注目され、近年急速に普及してきたスマートフォンや電子タブレットから将来活躍が期待される電気自動車まで幅広い需要がある。世界的にも、無線給電機器の販売・利用を促進するため、WPC(Wireless Power Consortium) [1]は2009年に世界初の統一規格 Qi 標準を策定した。ただし、従来の給電システム(図1左)は導電性コイルから構成され、安全性、システムの厚み、給電効率(60から70%程度)などの問題が懸念され、さらなる普及に歯止めをかけてきた。

一方、これらの問題を克服可能な新たな手法として、人工媒質であるメタサーフェイス[2]を用いた給電手法(図1右)が開発されている[3]。なお、メタサーフェイスとは二次元上に構築された電波波長よりも短い金属の周期構造を指す。このメタサーフェイスを用いた給電システムでは、エネルギー源として使用される表面波はメタサーフェイス内を伝播するため、外部への影響を大きく低減できる。また、厚みも1mm以下で作成可能であり、従来システムの10分の1以下の厚みで実現可能である。さらに、例えば2GHzの表面波で給電、4GHzの表面波で通信を行うなど、給電パネル上で無線通信機能を導入することもできる。本研究ではこれらのメタサーフェイス型ワイヤレス給電システムの自由度を拡張するため、システム上を伝播する表面波の制御機能として一時的に透過または吸収する特性を開発した。なお、以下ではメタサーフェイスの吸収特性について報告するものの、実際のワイヤレス給電システムではエネルギーを吸収する代わりに、そのエネルギーを一時的に蓄え、その後電子機器などへと給電することを想定している。また、本研究では計画変更書に記した通り、報告書タイトルとは一部異なる内容について調査研究を実施した結果を報告する。

2 理論・方法

申請者はこれまで電波吸収体として図2 a, bのような複数の回路素子から構成されるメタサーフェイスを開発した[4-6]。通常、電子機器の動作に影響を及ぼす高強度電波はインパルス状など励振時間が短い電波波

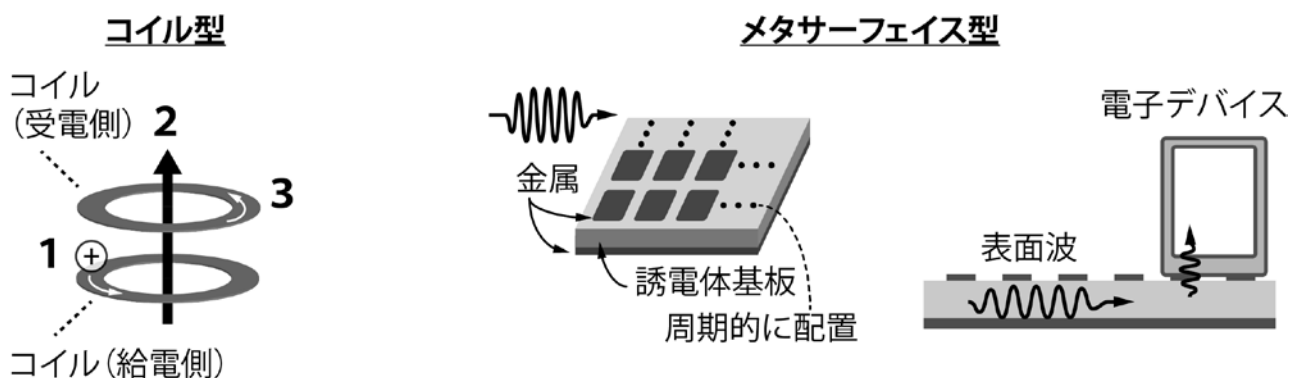


図1。(左)コイル型ワイヤレス給電システムと(右)メタサーフェイス型ワイヤレス給電システム。なお、メタサーフェイスとは人工的に構築された金属の周期平面を指す。コイル型では給電システム側に埋め込まれたコイルに電流を流すことで磁束を発生し、給電される電子機器に組み込まれたコイルを通して電荷を発生する。これをエネルギーとして受電デバイスに供給する。一方、メタサーフェイス型ではメタサーフェイス自身が表面波の伝播をサポートし、このエネルギーをインピーダンスマッチングした電子デバイスへと供給する。この手法では周波数を変えることで電力供給と同時に通信を行えるメリットなどもある。

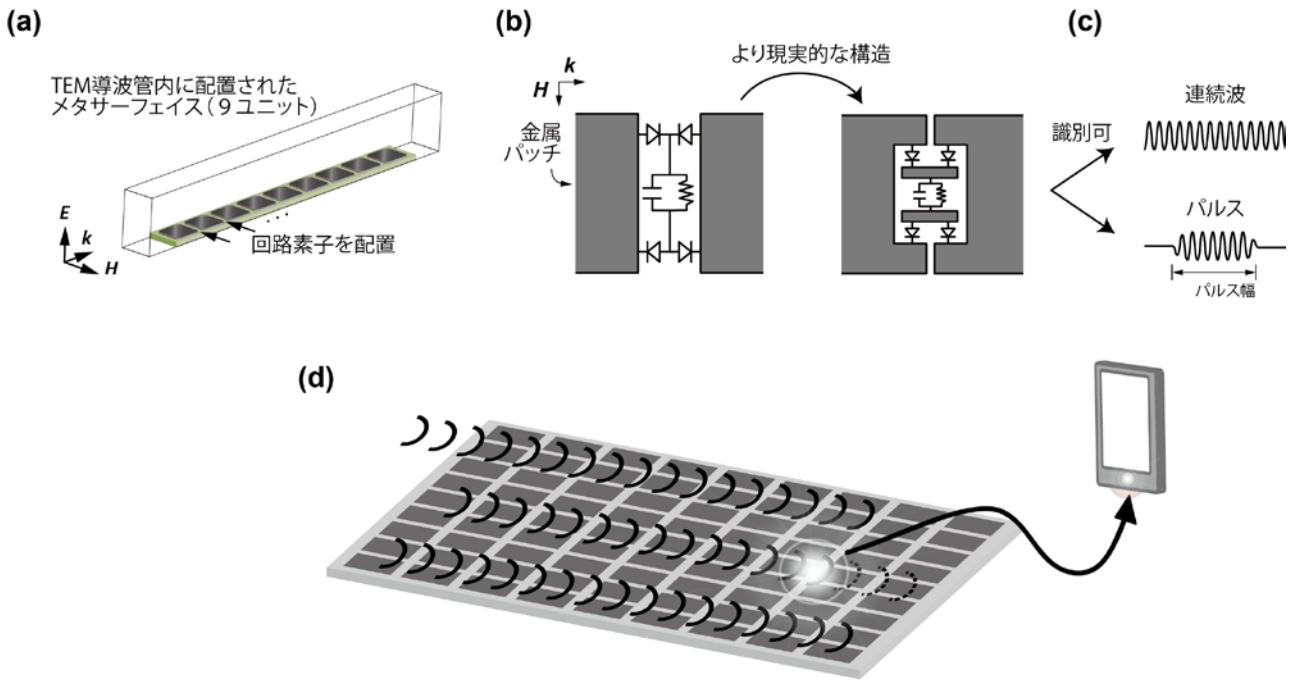


図2. 先行研究によって開発されたメタサーフェイス電波吸収体。(a) 表面波に対する特性を評価するため、9ユニット分の周期構造を配置。(b) 誘電体基板上の金属パッチ間には、ダイオード・ブリッジの役割を果たす4つのダイオードを配置。その中にはキャパシタと抵抗を並列に接続。(c) このようなメタサーフェイスは同一周波数でもパルス幅に応じて入射電波を識別できる。短いパルスのエネルギーはキャパシタに充電され、その後抵抗にて消散することが可能となる。一方、十分に長いパルスや連続波はキャパシタを完全に充電してしまいうため、このような吸収メカニズムを得ることができない。(d) ワイヤレス給電システムへと応用したイメージ。メタサーフェイス上を伝播する電波エネルギーを一時的に操作し、ここではエネルギーを消散する代わりに、キャパシタ部分で蓄えられたエネルギーを電子機器などに利用することを想定。

形であることが多い。開発された電波吸収体はこの点に着目し、同一周波数でも励振時間、すなわち「パルス幅」の短い電波の吸収に特化するように設計された(図2c)。

具体的な吸収原理は以下の通りである。最初に表面波がメタサーフェイスに到来した場合、周期的に配置された金属パッチに電荷を誘起する。この電荷は設計周波数において各パッチ上で共振現象を引き起こす。この時、各パッチ間に配置されたショットキー・ダイオードによって誘導電荷が整流される。なお、各パッチ間のギャップにはダイオードが4つずつ配置されており、これらはダイオード・ブリッジの役割を果たしている。したがって、誘導電荷は全波整流されることになり、本来周波数成分 f を持つ誘導電荷は非常に多くの周波数成分へと変換される。ただし、半波整流ではなく全波整流されていることから、そのエネルギーの大部分は直流成分すなわち周波数ゼロ成分へと変換される[4]。この周波数成分に対するキャパシタの時間

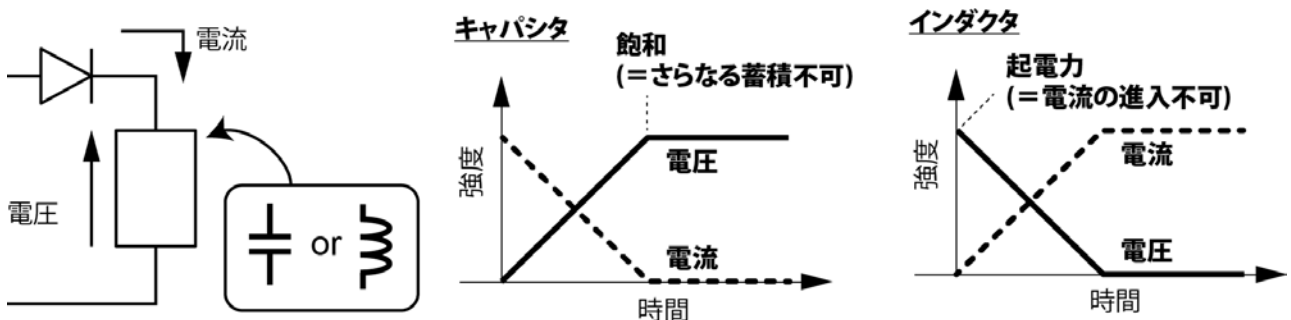


図3. 整流した電波信号に対するキャパシタとインダクタの時間領域応答

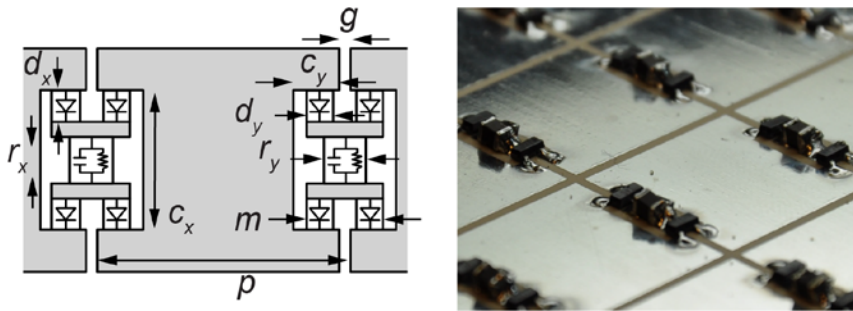
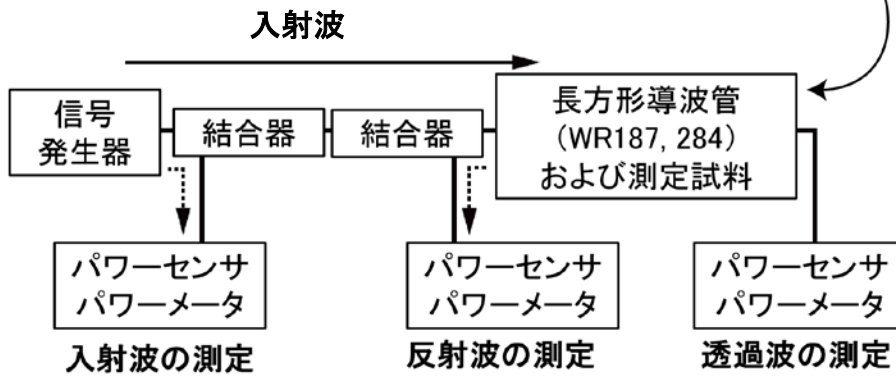


図4. (上) メタサーフェイスモデルの寸法と実験試料。モデル中におけるキャパシタと抵抗が並列に接続された部分は必要に応じてインダクタなどと交換。寸法は $c_x=7.6$, $c_y=1.7$, $d_x=1.3$, $d_y=0.5$, $g=1.0$, $m=2.4$, $p=18.0$, $r_x=1.0$, $r_y=2.0$ (全て mm)。基板には Rogers3003 を使用し、厚みは 1.52 mm。
(下) 測定システム。



領域応答を組み合わせることで、所望の特性を得ることができる。すなわち、キャパシタのインピーダンスは $1/j\omega C$ であることから (ただし、 $j = -1$, $\omega = 2\pi f$, C はキャパシタンス)、キャパシタは十分にパルス幅の短い電波のエネルギーを蓄えることができる。したがって、並列に抵抗を接続することで、このエネルギーを消散することができる。一方、十分に励振時間の長い電波 (パルス幅の長い電波) については、キャパシタが完全に充電されるため、このような吸収メカニズムを得ることができない。ワイヤレス給電システムへの応用では、このキャパシタに蓄えられたエネルギーを抵抗で消散する代わりに電子機器へ供給することを想定している。なお、この時、抵抗値を大きい値に設定しておくことで抵抗側へのエネルギー流出を防ぐことにつながる。

本研究ではワイヤレス給電システムの表面上を伝搬する表面波のエネルギーをより柔軟に操作するため、まずこの特性とは反対となる吸収メカニズムを提案する。ここでは、従来構造に用いられていたキャパシタの代わりにインダクタを用いることに着目する。これは、図3に示すように先のキャパシタの時間領域応答に対して、インダクタは反対の応答を示すためである (なお、インダクタのインピーダンスは $j\omega L$ となる)。すなわち、周波数ゼロ成分へと変換された誘導電荷に対して、初期状態においてインダクタは非常に強い起電力を発生させ、その流入を遮断する役割を果たす。しかしながら、周波数ゼロ成分の影響により、起電力は徐々に弱められてより大きな電流が流入する。そこで、今度はインダクタに抵抗を直列に接続することで十分にパルス幅の長い表面波のエネルギー (すなわち、十分な時間経過の後のエネルギー) を吸収することができる。と予測される。

このような状況下において吸収特性を評価するため、協調解析 [4] と呼ばれる通常の電磁界解析に回路解析を組み合わせた手法を用いることで高速に数値シミュレーションを行った。実験に関しては信号発生器から発生したパルス変調された正弦波を導波管 (WR187, WR284) へと伝播させた (詳細な構成は図4参照)。

3 結果

キャパシタ型 (従来型) メタサーフェイス、インダクタ型メタサーフェイスの吸収特性を図5に示す。このうち、図5a, d は各パッチ間に配置された回路構造を示し、図5b, e は両メタサーフェイスに連続波およびショート・パルス (ここでは 50 ns 長) を照射したときの吸収特性を示す。この図から確認できるようにインダクタ型メタサーフェイスは従来のキャパシタ型メタサーフェイスとは反対となる吸収特性を示すことが分かった。さらに、図5c, f にあるように、4.2 GHz においてパルス幅を長くすることで、キャパシタ型メタサーフェイスは徐々に吸収特性が減少し、一方でインダクタ型メタサーフェイスは徐々に増加すること

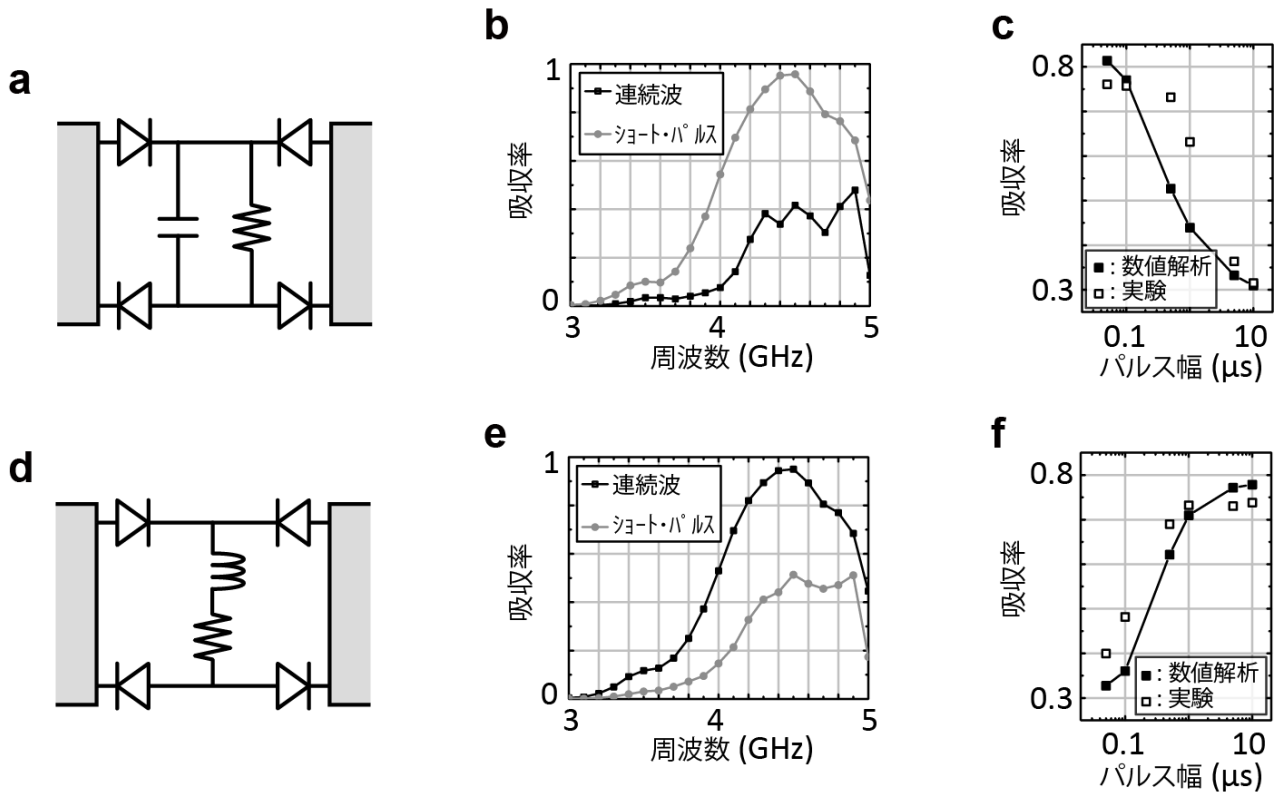


図5. (上) キャパシタ型メタサーフェイスと (下) インダクタ型メタサーフェイス. (a, d) パッチ間に配置された回路構造 (図2参照). (b, e) 連続波とショート・パルス (50 ns) に対する吸収特性. 入力電力は 15 dBm に設定. (c, f) 4.2 GHz におけるパルス幅依存性.

が確認された。すなわち、これらの特性を用いることで初期状態または一定時間経過後の表面波のエネルギーをワイヤレス給電システムに蓄える特性を得られたことが分かる。なお、この特性は時定数を変更することで簡単に変化させることが可能である。図6には図5c, fで用いられた時定数 τ (それぞれキャパシタ型では $\tau = RC = 10 \mu\text{s}$ 、インダクタ型では $\tau = L/R \approx 18 \mu\text{s}$)を10倍または10分の1に変化させたときの特性を示す (具体的にはキャパシタンス値、インダクタンス値を変更)。これにより、従来の吸収特性の曲線が任意に左右へとシフトされ、かつ時定数から求まる値によって飽和するパルス幅も制度良く推測されていることが確認できる。

本研究ではさらに高度な表面波の制御機能を開発するため、キャパシタおよびインダクタから構成される回路構造を統合した時の吸収特性を評価した。

その結果を図7に示す。こちらも図6と同様に図7a, dには回路構造、b, eには連続波と50 ns長のショートパルスに対する吸収特性、c, fには4.2 GHzにおけるそのパルス幅依存性を示す。なお、上段には両回路構造を「並列」に組み合わせた構造およびその結果 (以下並列型とする)、下段には「直列」に接続した構造と結果 (以下直列型) を示している。この時、並列型メタサーフェイスではキャパシタおよびインダクタの回路部分により、それぞれショートパルス、連続波を強く吸収できることが分かった (図7b)。しかしながら、4.2 GHzにおいてパルス幅を50 nsから10 μs まで変化させることで、中程度のパルス幅領域において吸収特性が一時的に減少することが確認された (図7c中四角■を参照)。これは、それぞれ独立したキャパ

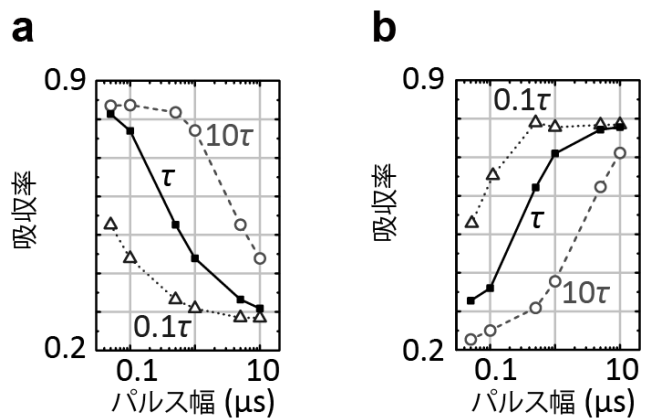


図6. (a) キャパシタ型メタサーフェイスと (b) インダクタ型メタサーフェイスのパルス幅依存性と時定数との関連性

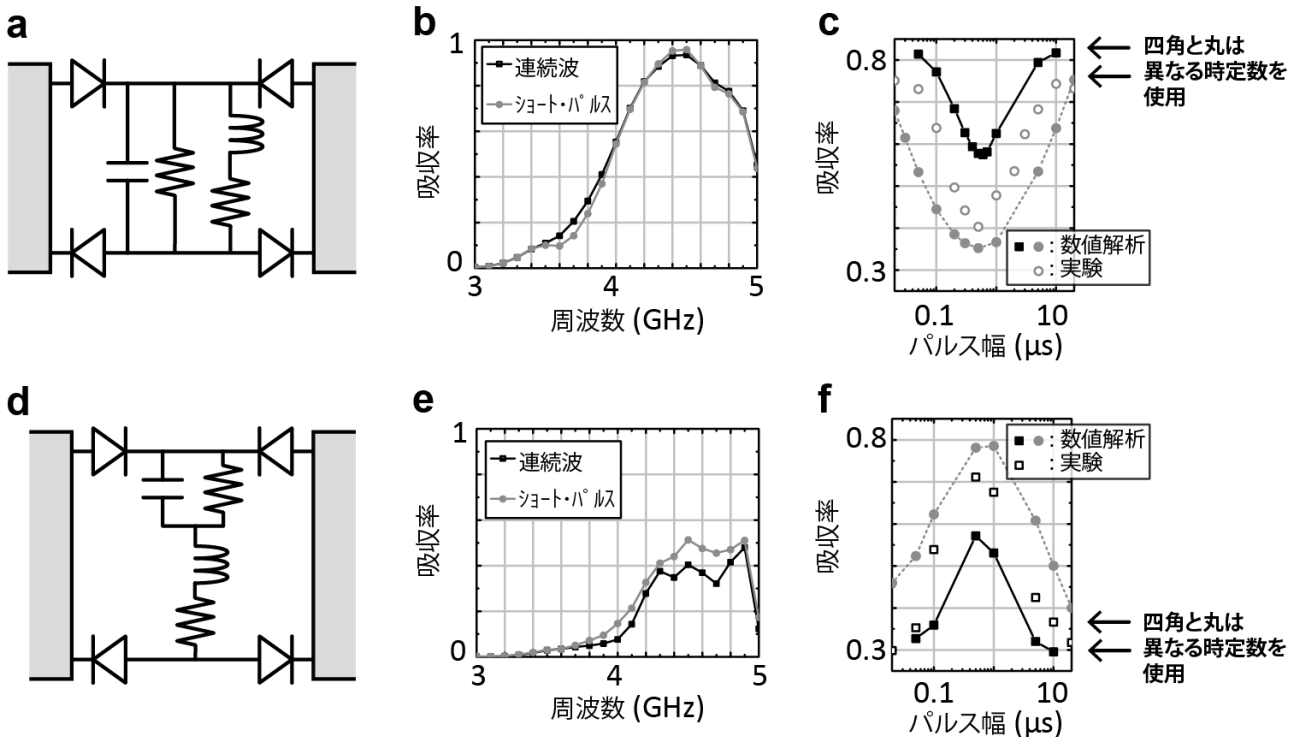


図7. (上) 並列型メタサーフェイスと (下) 直列型メタサーフェイス. (a, d) パッチ間に配置された回路構造 (図2参照). (b, e) 連続波とショート・パルス (50 ns) に対する吸収特性. 入力電力は 15 dBm に設定. (c, f) 4.2 GHz におけるパルス幅依存性. 時定数を変化させることでより大きな変化量を実現 (図6参照).

シタ型、インダクタ型メタサーフェイスにおいてこのパルス幅領域では限定的な吸収特性となるためである (図5c, f 参照)。また、図6で示したように、両メタサーフェイスの時定数を変化させることで吸収特性の変化量を大きくすることに成功した (図7c 中丸●、○を参照) なお、これはメタサーフェイス型ワイヤレス給電システムにおいて一時的に表面波のエネルギーの伝播を許すことを意味しており、初期状態および十分な時間が経過した状態ではエネルギーを蓄えることを意味する。

一方、直列型メタサーフェイスについては、インダクタの起電力の影響によってショートパルスの流入を遮断し、長いパルスもキャパシタが完全に充電されてしまうために遮断することになり、その結果ショートパルスと連続波の両方に対して限定的な吸収特性を示すことが分かった (図7e)。ただし、並列型と同様に 4.2 GHz においてパルス幅をスイープすることで、中程度のパルス幅レンジでは一時的に吸収特性が変化し、このタイプのメタサーフェイスでは吸収率を増大することが分かった (図7f 中四角■、□を参照)。これはこの領域において独立したキャパシタ型、インダクタ型メタサーフェイスが比較的強い吸収特性を示すためである。さらに、これらの時定数を調節することでより大きな吸収特性の変化を実現した (図7f 中丸●参照)。なお、この特性はワイヤレス給電システムにおいては一時的に表面波のエネルギーを蓄える機能を導入することにつながると考えられる。

4 結論

本研究ではメタサーフェイス型ワイヤレス給電システム上を伝播する表面波のエネルギーを一時的に操作する機能を導入するため、同一周波数でも励振時間やパルス幅の長さに応じて吸収特性を変化可能なメタサーフェイスを開発した。これらのメタサーフェイスは表面波の伝播している初期、中期、後期状態など任意の時間においてエネルギーを吸収する特性を示すことが分かった。メタサーフェイス型ワイヤレス給電システムではこのエネルギーを吸収する代わりに電子機器へと供給することで、より柔軟に給電システムを構築する新たな選択肢を与えると期待される。

【参考文献】

- [1] <http://www.wirelesspowerconsortium.com/>
- [2] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 2059–2074, 1999.
- [3] A. Noda and H. Shinoda, "Selective Wireless Power Transmission through High-Q Flat Waveguide-Ring Resonator on 2D Waveguide Sheet," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, pp.2158-2167, 2011.
- [4] H. Wakatsuchi, S. Kim, J. J. Rushton, and D. F. Sievenpiper, "Waveform-dependent absorbing metasurfaces," *Physical Review Letters*, vol. 111, pp. 245501, 2013.
- [5] H. Wakatsuchi, J. Rushton, J. Lee, F. Gao, M. Jacob, S. Kim, and D. Sievenpiper, "Experimental demonstration of nonlinear waveform-dependent metasurface absorber with pulsed signals," *Electronics Letters*, vol. 49, pp. 1530–1531, 2013.
- [6] G. V. Eleftheriades, "Electronics: Protecting the weak from the strong," *Nature*, vol. 505, pp. 490–491, 2014.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Waveform selectivity at the same frequency	Scientific Reports, vol. 5, pp. 9638	Apr. 2015
Waveform-selective metasurfaces with free-space wave pulses at the same frequency	Journal of Applied Physics, vol. 117, pp. 164904	Apr. 2015
Designing flexible and versatile metamaterial absorbers	IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine	Accepted
Field visualisation of waveform-selective metasurfaces	9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics - Metamaterials 2015	To be presented in Sept. 2015
波形選択メタサーフェス	電子情報通信学会 総合大会, B-1-118, p. 118	2015年3月