

新規波形選択材料による電磁界干渉抑制の研究開発 (165106001)

Electromagnetic interference suppression based on waveform-selective materials

研究代表者

若土弘樹 名古屋工業大学

Hiroki Wakatsuchi Nagoya Institute of Technology

研究期間 平成 28 年度～平成 30 年度

概要

通信機器や電子回路が外部電磁界にさらされ動作に影響を及ぼす電磁干渉は電磁研究における重要な問題として認識されている。とりわけ、この問題は同一周波数上で通信用電波と電磁雑音が入り混じった場合に解決が困難となる。本研究プロジェクトでは、近年研究代表者によって世界で初めて実現された波形選択材料を開発・応用することで同一周波数上での電磁干渉問題の解決を目指した。具体的な成果の一例として、波形選択材料による制御を従来の吸収特性のみに限らず、一般的な散乱特性まで拡張した。これによって波形選択材料の応用可能性を広げ、金属筐体内部で発生する電磁干渉問題を柔軟に解決する手法を提案した。波形選択材料は異なる同一周波数電波を新たな自由度パルス幅に応じて制御できることから、その他多様な電磁問題においても利用が期待される。

1. まえがき

電磁干渉問題は電磁雑音（ノイズ）によって通信機器や電子回路の動作に影響を及ぼす重要な問題として認識されている。とりわけ、この問題は電磁ノイズと通信用電波が同一周波数成分を持つと解決が一層困難となる。これは、一般的な電磁干渉対策として用いられる電波吸収体やシールドの多くが同一周波数上では常に同じように振舞うことにも起因している。特に、国際的にも標準化されている ISM 帯は様々な用途への利用が認められているため、干渉問題はより深刻な状況にある（例：2.4 GHz 帯は電子レンジ、WiFi、Bluetooth にも利用）。

これに対して、近年研究代表者はメタサーフェスと呼ばれる金属の周期構造に、ダイオードなどの回路素子を統合することで、新規電磁特性「波形選択性」を有する人工材料を開発した（図 1）。この特性は入射波によって導電部に誘起される電荷の周波数成分を 1)ダイオードの整流作用を通して主に「直流成分」へと変換し、2)それに対するキャパシタやインダクタなどの「時間領域応答」を組み合わせることで実現され、世界で初めて同一周波数でも波形、すなわちパルス幅に応じて任意電波を吸収することに成功した。本 SCOPE 研究開発では波形選択性の特性を拡張し、様々な電磁干渉問題において新たな解決手法として応

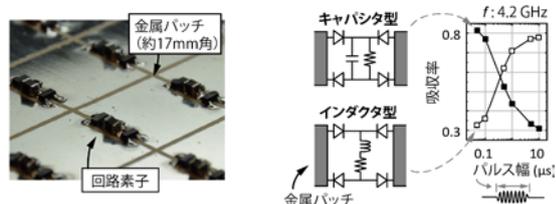


図 1. 波形選択材料（波形選択メタサーフェス）。金属パッチ間に配置する回路構造に応じて、同一周波数でも異なるパルス幅電波を吸収。

用することを目指した。

2. 研究開発内容及び成果

まず、ここでは広く反射特性の制御に用いられるカット・ワイヤ（図 2a）と呼ばれる長方形の金属によってメタサーフェスの周期ユニットセルを構築した。また、バビネの原理（Babinet's Principle）に基づき、これとは相補的な構造を 90 度回転させたスリット構造（図 2d）によって透過特性を制御した。ここで、それぞれの構造において電

界の集中する箇所、従来の波形選択メタサーフェスで用いられた回路構造（図 1 および図 2b、c の挿入図参照）を接続した。これによってパルス幅に応じて反射・透過特性を制御することに成功した。一例として、図 2b ではカット・ワイヤにキャパシタ型の回路構造を接続した結果を示す。ここでは 50 ns の短いパルスを整流し、そのエネルギーをキャパシタ部分へ流入させることで、カット・ワイヤ固有の共振現象（強い反射特性）を抑制できていることが分かる。一方、長いパルスや連続波（CW: Continuous Wave）はキャパシタ部分が完全に充電されて回路部が機能なくなるため、カット・ワイヤ固有の共振現象が再び現れ、強い反射特性に至った。なお、インダクタ型の回路構造を用いることによって、これとは反対の特性を得ることができた（図 2c）。これはインダクタの起電力によって短パルスの流入が遮断し、反射特性が向上したためである。一方、長いパルスでは周波数ゼロ成分の影響によって起電力が弱まり、入射波によって誘起された電荷が抵抗へと流

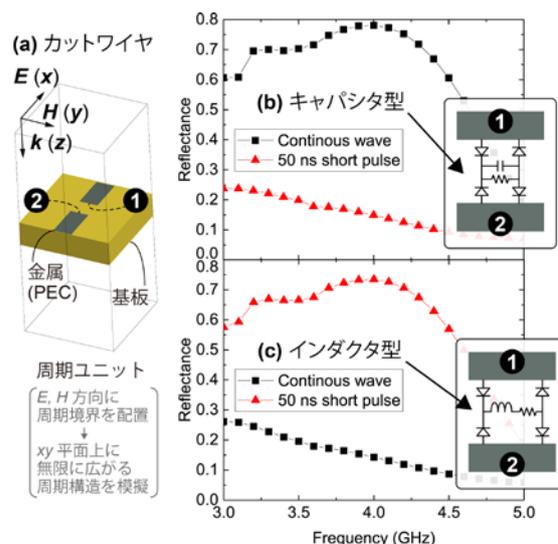


図 2. 波形選択性による反射および透過特性の操作。

(a) 反射特性の操作に用いられたメタサーフェスの周期ユニットと (b、c) その特性。①と②の間にキャパシタ型およびインダクタ型回路構造（図 1 参照）を接続することで、同一周波数でもそれぞれショートパルス (50 ns short pulse) と連続波 (Continuous wave) に対して反射特性を抑制。

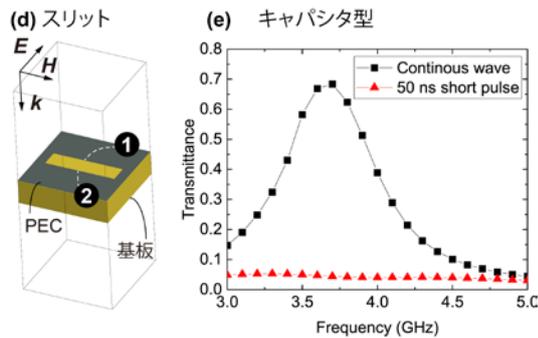


図 2 (続き)。(d) 透過特性の操作に用いられた周期ユニットと (e) その特性。①、②の間にはキャパシタ型構造を接続。

入し始める。これによって、カット・ワイヤ固有の共振現象が抑制され、反射特性の低下へとつながった。以上より、回路構造(キャパシタ型、インダクタ型)を変更することで特定波形を選択できることが分かった。また、同様の回路構造をスリット構造に接続することで透過特性を意図的に制御可能な波形選択性を得ることができた。図 2d、e にはこのうちキャパシタ型の結果を示す。

さらに開発された波形選択メタサーフェスを用いて同一周波数上で発生する電磁干渉問題へと応用した。具体的に取り扱った問題としては、一般的にも広く知られている金属管体内の共振現象となる。すなわち、金属管体は金属壁によって外部電磁界を遮蔽(シールド)することができるものの、その寸法に応じて決まる共振周波数を持っており、小さな開口部(図 3a 参照)が存在するだけで、共振現象によって外部電磁界の影響をより強く受けてしまう。この問題に対する一般的な解決手法としては、内部金属壁などに吸収材料を配置することが挙げられる。これによって共振エネルギーを消散し、外部からの影響を抑えることができる。しかしながら、これは同時に内部に設置される電子デバイスと外部との通信を遮断することにつながる。そこで、ここでは開口部を波形に応じて透過率を変化させる波形選択メタサーフェスへと置き換えた(既出図 2d の構造を利用)。

ここで使用した測定系は図 3b の通りとなり、ホーンアンテナから金属管体に向けて入射波を照射した。GND(グランド)板には電界検出用にモノポールアンテナを設置し、周囲の金属壁の無い場合とある場合の透過率(それぞれ T_1 、 T_2)からシールド効果(Shielding effectiveness = $10\log_{10} T_1 / T_2$)を算出した。

その測定結果を図 3c に示す。ただし、ここでは波形選択メタサーフェスにインダクタ型回路(既出図 1 参照)を接続したため、開口部は同一周波数でも波形に応じて管体内部への透過率を変化させた。具体的にはショートパルス(図 3c 内 Pulse と表示)はインダクタの起電力の影響によって、導電部に誘起される電荷は回路内へと流入することはできない。このため、開口部は一般的なスリット構造と同様に振舞う。その結果、管体内部で強い共振現象が現れ、0 dB 以下のシールド効果を観測した(すなわち、金属壁無しよりも外部電界を強く検出)。一方、連続波(CW)を照射した場合、周波数ゼロ成分によって上記起電力が弱まり、誘導電荷は回路内部へと流入できるようになった。このため、開口部は従来とは異なり抑制された透過係数を示すことになった。したがって、同一周波数でも連続波では高いシールド効果を観測した(図 3c 内 CW 参照)。

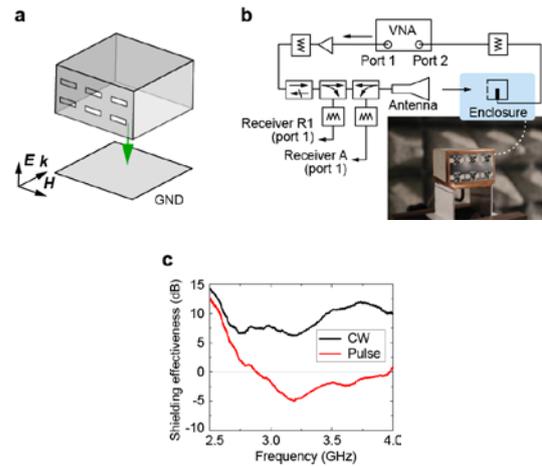


図 3. 電磁干渉問題への応用例。(a) 金属管体。(b) 測定系および使用された試料(金属管体前面に透過型波形選択メタサーフェスを設置)。(c) シールド効果の測定結果。同一周波数でも波形に応じて柔軟にシールド効果を変化。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

波形選択材料は既存の電磁問題に対して新たな自由度を与えて柔軟に解決できる可能性を秘めている。例えば、既出図 3 の事象において、パルス幅の長い外部からの電波波形を不要ノイズとみなして遮断する一方、内部から発振される短パルスは強い共振現象を利用してより遠方の外部アンテナと通信できるようになる。特に ISM 帯電波は通信に限らず多様な用途への利用に開放され、多数のユーザを収容すると同時に多数の電波が飛び交っている。このような周波数帯において、本研究は電磁干渉の抑制に限らず、任意電波の検出・操作に貢献できると考えられる。

4. むすび

本研究では近年研究代表者らによって開発された波形選択材料を用いて、同一周波数上で発生する電磁干渉の抑制を図った。最初に従来材料の概念を拡張し、一般的な散乱特性をパルス幅に応じて操作できることを実証した。次にこれら材料を用いて具体的な電磁干渉問題へと応用した。その結果、新たな自由度パルス幅に基づいて柔軟に電磁界を制御できることが分かった。本研究では波形選択性を用いた電磁干渉の抑制に焦点を当てていたものの、今後当該材料を用いることでその他既存の電磁問題にも適用できると期待される。

【誌上发表リスト】

- [1] H. Wakatsuchi, J. Long, and D. Sievenpiper, "Waveform Selective Surfaces," *Adv. Funct. Mater.* 29, 11, 1806386, 2019.
- [2] A. Li*, Z. Luo*, H. Wakatsuchi*, S. Kim*, and D. Sievenpiper, "Nonlinear, Active, and Tunable Metasurfaces for Advanced Electromagnetics Applications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 27439-27452, 2017 (*: equal contribution).
- [3] H. Wakatsuchi, F. Gao, S. Yagitani, and D.F. Sievenpiper, "Responses of Waveform-Selective Absorbing Metasurfaces to Oblique Waves at the Same Frequency," *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 31371, 2016.

【本研究開発課題を掲載したウェブページ】

<http://hw.web.nitech.ac.jp/index.html>