The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

J. Plasma Fusion Res. Vol.88, No.5 (2012) 251-260

解説

プラズマとメタマテリアルとの出会いによる新マテリアル

酒井　道
京都大学大学院工学研究科

（原稿受付：2012年2月3日）

近年注目されているメタマテリアル構造とプラズマ状態を組み合わせることで，従来のメタマテリアルやプラズマを超えた新たな電磁波媒質としての“材料”・状態・システムが生まれると期待できる．特に広範囲のパラメータ領域を包含する複素誘電率の効果，および誘電率が伝搬電磁波の電界に依存する非線形効果は，特異な現象を生み出し，新たなプラズマ応用分野への開拓にもつながると期待される．

Keywords:
metamaterial, refractive index, permittivity, permeability

1．はじめに

ある“モノ”（後で述べるように，これは，「物質」という意味だけではなく，もっとあいまいに一般化されたシステムなども含みたい）が，AとBとCという構成要素からできていると考えよう．そのとき，そのモノが全体としてどのような機能をもつか考えてみると，まず最初に浮かぶ推論は以下のようになるだろう：Aがどのくらい含まれて，Bがどのくらい含まれて，そしてCがどのくらい含まれているから，それぞれの構成比に応じて全体の機能が決まる，というものだ．このように，いわば，線形なシステムを仮定してまず分析する，というのが最初の常套手段である．しかし，そのような考え方では成り立たない場合は，もちろんある．例えば，プラズマと同様に自由電子が活躍する表面プラズモン現象[1,2]を考える．金のナノ粒子を金コロイドとして溶液の中に分散させると，青色や赤色に見えることがある．溶液に分散させるので金の色が薄まってだんだん無色透明に近づいていく，というのではない．表面プラズモン現象は狭義の意味ではメタマテリアルとは言えない[3]が，メタマテリアルの考え方[4] もこの例と同様に，1＋1は2となる，という線形的な現象を超えていくことをめざしている．そのときにキーとなるポイントは“形状を工夫する”という点となるが，その点についてはまた2章で説明したい．

ここで，やや抽象的な説明になるが，“メタマテリアル”という言葉が意味するところを考えてみたい．“メタマテリアル”とは，言葉としては，“マテリアル”を超えた（“メタ”）もの，ということを意味している．恐らく，「材料」という「物質」的な側面を想起するだろうが，ここでは，新物質を作る，という意味よりは，従来考えていた材料学的な側面を大幅に拡張することを狙っている．つまり，例えば材料開発においてなんらかの壁があるので，ブレークスルーするための切り札としてメタマテリアルを用いる，ということだけが目的ではない．もちろん，後で述べるような，屈折率を負にする，といったことはバルク材料を使っては実現できないので，そのような側面もあるにはあるが，それに止まらない．

むしろ，材料学的な側面を含みながら，それ以外の分野に対しても，従来の考え方を凌ぐコンセプトを提供するもの，と考えたい．ここで，仮定として，波に対して作用するもの，という点をまず押さえておく．そして，以下この解説で述べる例としては，光を含んだ電磁波に対して作用する場合を考える．同様の考え方は音波や海面の波といった波動の制御にも適用できる（津波による被害を防ぐために，海岸近くの海面にメタマテリアル構造物を建築することも可能だろう）．そして，より広義のメタマテリアルとして，波動への機能を超えて，例えば高機能の機械材料として存する機能傾斜材料[5]の考え方との交流にまで発展させることも可能であろう．要は，メタマテリアルというのは，概念や設計の指針を与える漠然とした形態を意味すると言っても間違いではないと思う．

そして，本解説では，従来提案されてきたメタマテリアル構造とプラズマとの組み合わせの妙について説明する．プラズマとメタマテリアルの相性は極めて良い，と筆者は捉えており，メタマテリアルの構成要素の1つとしてプラズマを位置づけて，そのような構造全体を「プラズマ・メタマテリアル」と呼ぶことができると考えている．以下，この解説においては，2章ではこれまで研究されてきた従来のメタマテリアル一般の概要について，努めてわかりやすく説明したい．3章が本解説の主要な記述であり，プラズマと従来のメタマテリアルの組み合わせによる新機能について説明を行い，4章で今後の展望を含めてまとめたい．なお，本解説では，メタマテリアルやプラズマの電磁波応答について，その知識が少ない初学者の方でも理解いただけるように心がけて執筆した．より詳細な議論は筆者

Novel Materials Generated in Harmony between Plasmas and Metamaterials
SAKAI Osamu　　*author's e-mail: osakai@kuee.kyoto-u.ac.jp*

©2012 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research
NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

らの最近のレヴュー論文[6]にまとめているので，そちらをご参照いただきたい．メタマテリアル以前の，国内における電磁波とプラズマの機能性構造との相互作用については，本学会誌の以前の小特集[7]に詳しい．また，メタマテリアル全般の内容に関しては，いくつかの専門書[4,8]が出ていると同時に，我が国での現在の研究状況として文献[9]や新学術領域研究「電磁メタマテリアル」のホームページ[10]もご参照いただきたい．

2．メタマテリアルとは

1章で少し触れたように，メタマテリアルとして高機能性を発揮する源泉は，意味ある形状，である．より具体的な定義は次のようになる．波動の波長に対して，繰り返し周期長が十分に短い空間周期構造において，その微細構造に機能的な設計を施したものを，メタマテリアルと呼ぶ[3]．以下にその微細構造例を2つ示すが，ここでキーポイントとなるのは，実はプラズマ物理の教科書[11-13]でおなじみの“遮断”と“共鳴”である．

図1(a)は，金属壁に囲まれた長方形断面の穴である．これが，実は，メタマテリアル分野で知られた機能性の微細構造のうちの一つであり，キーワードは“遮断”である．それを理解する一つの手段として，マイクロ波の導波管をイメージする．マイクロ波の教科書（例えば，文献[14]）が説明するように，マイクロ波は，各周波数に応じて基本モードが伝搬するサイズの導波管の規約が決まっている．ここで，1つの導波管に対して，故意に周波数を低くしていこう．すると，導波管の中の波数がゼロとなる周波数が現れ，それ以下では導波管の中にマイクロ波は伝搬しない．すなわち，これは遮断周波数であり，非磁化プラズマ中を伝搬する電磁波に現れる波動現象ときわめて似ている．外部磁場がないプラズマの場合，この遮断周波数は，電子のプラズマ周波数である．すなわち，プラズマ空間の比誘電率の表式としてドルーデ型誘電率

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{\mathrm{pe}}^2}{\omega^2} \quad \text{（無衝突の場合）} \tag{1}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{\mathrm{pe}}^2}{\omega(\omega + \mathrm{i}\nu_{\mathrm{m}})} \quad \text{（衝突性の場合）}$$

を考えると，遮断周波数，すなわちプラズマ周波数以下では誘電率が負となることがわかる（ただし，衝突性の場合はν_{m}に応じて誘電率が負となる周波数が下がる）．ここで，ωは対象となる電磁波の角周波数，ω_{pe}は電子プラズマ周波数，ν_{m}は中性粒子に対する電子の弾性衝突周波数である．

金属壁に囲まれた穴に話を戻して，これを2次元面内に周期的に配置しよう（**図1**(b)）[15]．つまり，微細な導波管構造が縦横に多数整列した構造である．穴形状としては，長方形でなく円形でも同様の効果が得られることがわかっており，つまりは金属板にドリルで穴を開ければ済む．この構造全体に対して電磁波が入射する場合を考えると，微細導波管で決まる遮断周波数以下の電磁波は反射される．この様子を巨視的に俯瞰すると，この構造全体は誘電率が負の媒質と等価とみなせる．事実，この表面には擬似表面プラズモンと呼ばれる表面波が伝搬することが知られており，負の誘電率状態のプラズマ表面を伝搬する表面波と同様である．以上をまとめると，2次元の板状導体に周期的に微細な穴を配置した構造は，電磁波の電界に特徴的に応答し，誘電率が負となるメタマテリアルである（実は，誘電率が負となるバルク材質は，マイクロ波帯ではほとんどなく，これが“メタ”な材料，と言われる所以となっている）．この構造と同様の効果を生じるものとして，金属細線の整列したアレイ状態も負の巨視的誘電率を与えるものであり[16,17]，この場合は3次元構造としても実現できる．

さて，次のメタマテリアルの構造例を見てみよう．このメタマテリアルは，“共振（共鳴）”がキーワードであり，電磁波中の磁界への応答性が特異である．**図2**(a)に示すように，導体がアルファベットの"C"の字が逆向きに組み合わさったような構造をしており，二重分割リング共振器という[18]．磁界がリングを貫くように入射する場合を想定する．すると，リングには電磁誘導の法則によって周回電圧が誘起される．この電圧によってリングには電流が流れるが，その流れ方はリング一周分の等価的なインピーダンスに依存する．高周波帯では，リングに沿ってはインダクタンス（誘導）成分Lが生じ，また内側と外側のリングが近接しているところではキャパシタンス（容量）成分Cが生じる．つまり，リング一周分のインピーダンスは，LとCの直列回路である．LとCの直列回路が直列共振を起すことは，電気回路の基礎的な了解事項である．そして，直列共振の前後で，インピーダンスの虚数成分はゼロを横切って符号が変わる．つまり，誘起された周回電圧によって流れる電流は，共振の前後で非常に大きな値をとり，かつ符号が逆である．この電流によって新たな磁界が発生するとみなせる．つまり，統合的にみたとき，局所的に磁界と磁束密度が逆向きになることがありえる．このような二重分割リング共振器がアレイ状に並んでいれば，それは巨視的に（空間平均として）透磁率が負であることを意味す

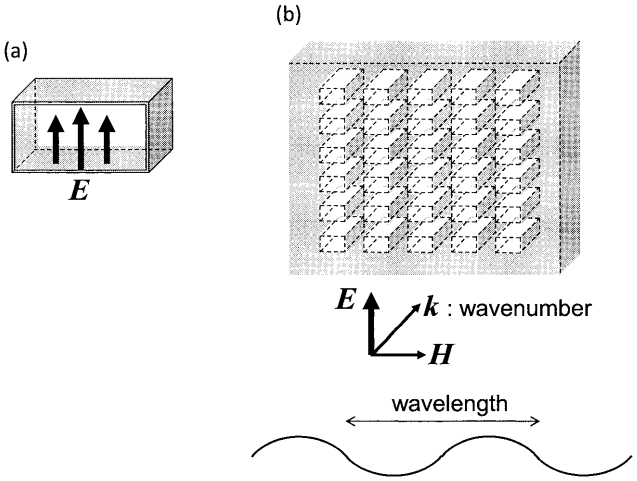

図1　誘電率を負とするメタマテリアル構造．(a)単一微細構造．(b)単一構造を集積化したアレイ構造．Eは電磁波の電界，Hは磁界，kは波数ベクトルを表す．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

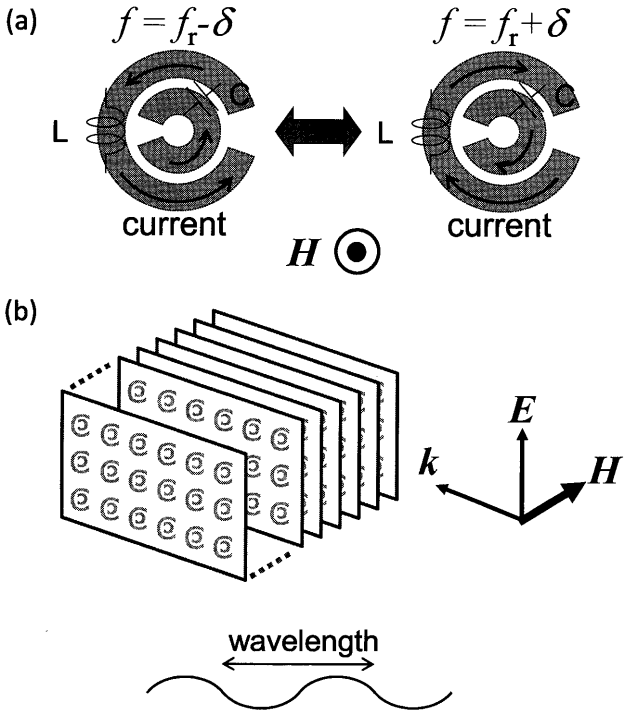

図2　透磁率を負とするメタマテリアル構造．(a)単一微細構造．(b)単一構造を集積化したアレイ構造．電磁波の周波数 f が LC 共振周波数 f_r より少し低い場合と少し高い場合を示す．

る．透磁率が負となるようなバルク材質は，マイクロ波から光波の領域で知られておらず，メタマテリアルならではのものといえよう．透磁率が負となっていることの実験的な実証としては，TM 波に対するブリュースター現象の観測などがある[19]．

メタマテリアルがどのように際立った効果を生み出すかを説明する前に，以上で述べたようなメタマテリアルの特徴を整理しておこう．まず，1つ目は，均一な材料においては取り得ないパラメータ値を実現可能な点である．これは，誘電率や透磁率が負になる，といったことで理解できる．第1章の冒頭で示した内容のように金属や誘電体のパラメータが線形に混成されたものでは，もちろんない．2つ目として指摘できるのは，そのようなパラメータ値が現れる周波数を，構造設計により制御可能である点である．上の例では，負の透磁率は直列共振によって引き起こされるから，直列共振周波数を変える（例えば二重分割リング共振器において，リングの間の隙間の間隔を変えて C を変える）ことで各周波数での透磁率値を正あるいは負の値として調整できる．

さて，上記の2つの例に戻る．誘電率と透磁率が負となることが，学術的な新規性を越えて，我々の好奇心を刺激する理由を説明しよう．誘電率や透磁率が単独で負となると電磁波は伝搬できないが，同時に負となると電磁波が特異な状態で伝搬可能となる．通常の電磁気学やマイクロ波工学で示される屈折率 N の表式は $N=\sqrt{\varepsilon}$ というように比誘電率 ε で表されているのが普通である．でもこれは，暗黙のうちに比透磁率 μ が1である，ということを前提にしたものだ．マクスウェル方程式に立ち戻って考えてみると，

$$N=\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\mu} \tag{2}$$

がより正確な表式であることがわかる[6]．ε と μ が両方とも負である場合，式(2)の計算を複素数として行うと，N が負となることがわかる（N も ε も μ も，一般的に複素数である）．つまり，メタマテリアルを用いれば屈折率が負の状態を作り出すことができ，しかも正負にわたって屈折率を制御して設定できることになるが，それにより大変奇妙な2つの現象を予見できる．

1つ目は，「完全レンズ」である．電磁波が2つの物質の境界面に入射するとき，入射角と屈折角を表す法則に，スネルの法則があり，屈折率が重要なパラメータである．2つの物質の屈折率（入射側 N_0，透過側 N_1）が異なるとき，$N_0 \sin\phi_0 = N_1 \sin\phi_1$ となるように屈折角が決まる．ここから，2つの物質の間で屈折率の符号が異なれば，入射角 ϕ_0 に対して屈折角 ϕ_1 は符号が逆となり，電磁波は境界面で折れ曲がるように進むことがわかるだろう．

そして，正の屈折率媒質の中に板状の負の屈折率媒質が存在すれば，レンズと同様に両側に焦点をもち，かつ回折限界を超えうることが指摘されており，これを「完全レンズ」という．理論的に提案された後，実際にメタマテリアルで負の誘電率体と負の透磁率体を実現して組み合わせた実験結果でもって証明された[20]．

負の屈折率状態がどのように働くかを示すため，**図3**を例示する．これは数値計算の結果[6]であり，矩形の負屈折率領域近辺で電磁波が励起されたときにどのように伝搬するか，そして位相速度がどのようになるかを示す．矩形領域の下辺近くで励起された電磁波は，放射状に広がる（電磁波の電力とその流れの向きを表すポインティングベクトル（**図3**中の左側半分領域の矢印）も放射状に外向きである）．矩形領域の中を斜め上方向に伝搬した電磁波は左端や右端に到達するが，例えば左端の辺では矢印で示したように折れ曲がるように屈折して外部へと出ていく．これは実験結果としても，境界面での折れ曲がり現象として実証されている．また，図中の同一位相点に着目すると，時間経過と共に位置が動いているが，矩形領域内では領域外の点とは反対に，励起点に向かって動いている（**図3**中の右側半分領域の矢印で示す）．これは，位相速度が負であることを示しており，確かに矩形領域内で屈折率が負であることがわかる．

予見される奇妙な現象の2つ目は「クローキング（隠れ蓑）」である．日本の昔話にもあるように，物理的に実体はあるものの，その周囲を特殊な層で覆うことでどの方向から見てもその形態を見えなくするものだ．その“特殊な層”として，正負にわたって屈折率を制御可能なメタマテリアルが有効となる．実体の表面から丁寧に屈折率分布を制御する層を設定することで，その層の中を電磁波は実体に沿って迂回するように伝搬し，反対側に抜けていく．理論的にその概念が提案された後[21]，実験的にもその原理が実証されている[22]．

以上のように，メタマテリアルの考え方は，純粋に最先端の科学としての興味を引き起こすだけでなく，広く一般

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

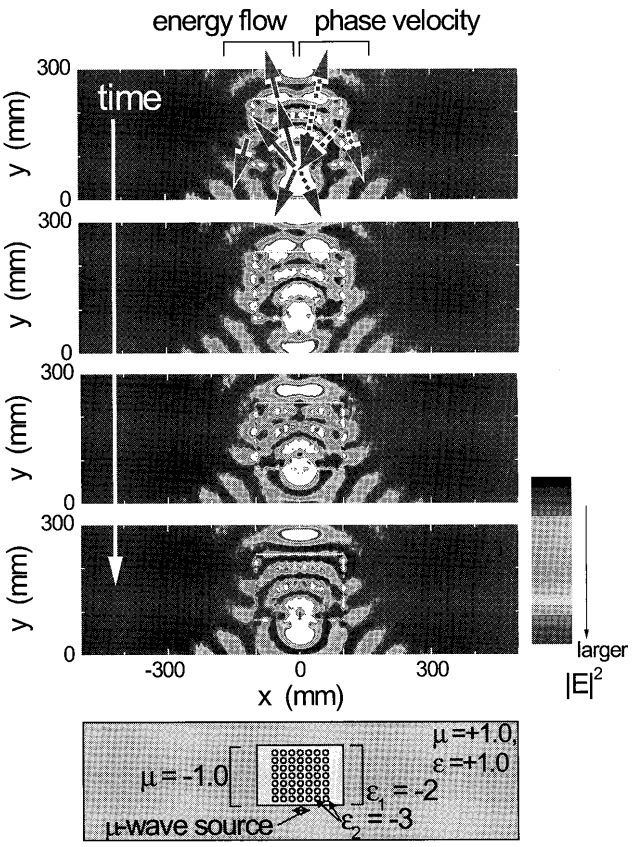

図3 有限の大きさを持つ負の屈折率領域の内外を伝搬する電磁波の様子に関する数値計算[6]．マイクロ波の周波数は，2.45 GHz である．

に我々の知的好奇心を刺激する．現在はマイクロ波からミリ波の領域でこのようなメタマテリアルの研究が進展してきた．そして，マイクロ波の領域においては，特に伝送線路型のメタマテリアル[23]として実用化の一歩手前のものもある．一方，おそらく限りなく応用性の広い可視光領域では，ナノサイズでかつ実用的な大きさの構造作製がそれほど容易でないことから，実証実験も応用展開もまだ今後の課題であるが，現在は構造作製技術の進展にも力点が置かれながら研究が進行している．

3．プラズマが組み込まれたメタマテリアル

以上に述べたように，メタマテリアルは主には固体材料により実現するための実証研究が進んできた．では，このようなメタマテリアルにおいて，プラズマをその構成要素として取り込むことにどのような学術的進展を期待でき，また将来的にどのような実用面において優位性があるだろうか．まずは，3.1で我々がこれまで検討してきた形態について説明し，3.2でその物理的側面と機能について述べる．

3.1 プラズマ・メタマテリアルの構造

プラズマをメタマテリアルの構成材として用いる場合，プラズマをメタマテリアルの一様な背景物質のように扱う方法と，プラズマそのものにも微細周期構造を持たせる方法が考えられる．

プラズマそのものに微細な周期構造を持たせる第一歩として，我々は円筒形状のプラズマを2次元に配列し，フォトニックバンドの形成と禁制帯の観測を行った[3,7,24-26]．その後，円筒形のマイクロプラズマの1次元チェーン状構造を形成し，その周囲に局在表面波が伝搬することも確認した[3,27]．前者は誘電率が正の領域，後者は誘電率が負の領域での機能性の発現であり，詳細は以前の当学会誌の小特集[7]を参照いただきたい．その後，円筒形プラズマと二重らせん状導体細線の組み合わせによる負屈折率体の生成について報告し[6,28,29]，本格的にプラズマを構成要素とするメタマテリアルの特異性を明らかにした．一方で，それらの検討と平行して，2章で説明した巨視的に負の誘電率を示す穴あき導体板の穴の中にマイクロプラズマを埋め込むことで，巨視的な負の誘電率をプラズマ生成によって制御できることも示した．

一方，プラズマをメタマテリアルの一様な背景物質として扱う場合は，固体の微細周期構造の応答性をプラズマ媒質が有意に影響を及ぼすことを想定している．最近，我々は誘電率が負となる高密度プラズマ中に二重分割リング共振器アレイが設置されている場合について，その特異な応答特性を明らかにしている．この物理的意味については，次の3.2と3.3で詳述する．

3.2 プラズマ・メタマテリアルの機能(1) 複素誘電率の効果

最近我々がまとめたレヴュー論文[6]では，その題名として"Plasmas as Metamaterials"としているが，その意味としてはプラズマを構成要素とするメタマテリアル，という側面だけではなく，プラズマそのものが従来のマテリアルを超えうる特性を持つ，という我々の主張を込めた．ここでは，その誘電率が，複素数としてかなり自由に値を取りうること，そして強い非線形性を持つことの2つについて詳しく説明したい（プラズマの持つ導電性や磁場応答性を考慮すると，将来的には磁場応答（透磁率制御）に関する提案も可能であると思われる）．

まず，誘電率が複素数であり，その実部と虚部の値がほぼ自在に設定可能なこととその意味について，以下に述べる[26,29]．式(2)について，2章において屈折率が負となりうる説明をするときに，誘電率と透磁率も含めて複素数であることを述べた．非磁化プラズマの誘電率は，式(1)に示したように，衝突性の場合には複素数となる．この式をよく見ると，周波数以外の部分で可変なのは，プラズマ周波数と弾性衝突周波数である．プラズマ周波数の2乗は，プラズマ密度に比例する．また，弾性衝突周波数は電子温度と中性粒子密度の関数であり，電子温度はここで扱う低温プラズマではせいぜい2－3倍程度しか変化しないことを考慮すると，大まかには中性粒子密度（弱電離プラズマの場合，ほぼ圧力）で決まると言ってよい．つまり，パラメータはプラズマ密度と圧力である．

図4に，プラズマの誘電率を複素平面上にプロットしたものを示す．圧力が低い状態でほぼ無衝突のプラズマとすると，電子密度を上げることで実軸上を負の方向に大きくなる．また，ある状態で電子密度が一定の場合，圧力が増加していくと，半円を描くように変化する．圧力が大気圧に近い状態では，電子密度を増やすことで，ほぼ実数部が

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

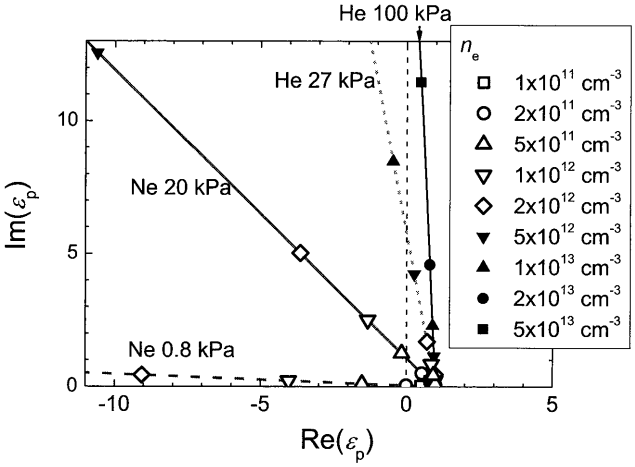

図4　種々の気体種・中性粒子気体圧力・電子密度(n_e)に対する，プラズマの比誘電率[6,26].

ゼロで虚部だけを大きくしていくことも可能である．つまり，プラズマ密度（これはある程度プラズマ生成電力で制御できる）とガス圧力を適切に選ぶことで，実部が1より小さい複素数平面上の誘電率値が設定可能である．このように，特に誘電率が負の領域で，細やかに誘電率が設定可能な物質は，通常の材質としてはほとんど存在しないし，固体のみで構成されたメタマテリアル構造でも実現は大変困難である．

しかし，この特性だけだと，メタマテリアルという工夫なしに，プラズマは特筆すべき特性を持っている，という事実を確認したに過ぎない．また，誘電率の実数部と虚数部が自在に設定できる，という特性は，実は少し片手落ちのところがある．つまり，式(2)によると，誘電率の実数部・虚数部が，各々，直接的に屈折率の実数部と虚数部に接続するのではない．事実，負の誘電率媒質は，虚数部がゼロで実数部が負の場合，屈折率は純虚数になってただエバネッセント波が存在するだけだ（最も，先にも述べたように，表面波は伝搬して，その意味では利用価値は高いが）．

一方，このようなプラズマが，メタマテリアルで実現される様々な透磁率の値（負を含んだ値）の媒質と組み合わさった場合，その特性が特異に現れてくる．ここで，まず屈折率の実数部は位相変化をもたらし，虚数部は減衰を生じることを再認識しておく．屈折率の実部が大きくなると，位相速度が遅くなり，波長が短くなり，境界面ではスネルの法則により折れ曲がり角が大きくなる．また，虚数部が大きくなると，媒質中で電磁波の振幅がどんどん小さくなる（逆に，波の増幅があるようなゲイン媒質中では，虚数部が負となるといえる）．つまり，電磁波への直接的な働きかけを考えれば，屈折率の実数部と虚数部をそれぞれ制御することに意味がある．以下，**図5**を参照しながら説明を行う[30].

比透磁率が1のときについて，ほぼ無衝突の場合（誘電率の虚数部がほぼゼロの場合），衝突性が強い場合（誘電率の実数部がほぼゼロの場合），その中間の場合のいずれにおいても，プラズマの電子密度を変化させると，屈折率の虚数部が増加する．つまり，電磁波の減衰量が増加するという変化が一様に見られる（やや特異な特性としては，衝突性が強い場合には，屈折率の実部が1より大きくなる．式(1)を見ると，プラズマの屈折率の実数部は一見1より小さいように思うが，衝突による虚数部が作用してこのような特性が現れる）．以上が，メタマテリアル効果がなく，プラズマ単独で予想される特性である．

次に，メタマテリアル効果が追加されて，比透磁率が－1の場合にどのような特性が現れるかを考える．この場合，屈折率を表す複素平面上では，式(2)により，誘電率変化に伴う動作点の動きは90°回転することがわかる．つまり，先ほど比透磁率が1のときに議論した内容について，実数部（位相変化への効果）と虚数部（減衰への効果）がまったく入れ替わることがわかる．まず，いずれの場合も一様に，プラズマ密度が増加すると屈折率の実部はゼロから負の方向に絶対値が大きくなる．波動の振幅の変化は少し複雑である．プラズマ密度の増加に従い，衝突性の場合は振幅は減少する方向だが，無衝突に近くなるにつれて振幅がいったん増加し，さらに密度が増えることでまた減少に転じる．

さらに，比透磁率が純虚数（+j）の場合について考えてみると，図には示していないが，これまでに述べた内容か

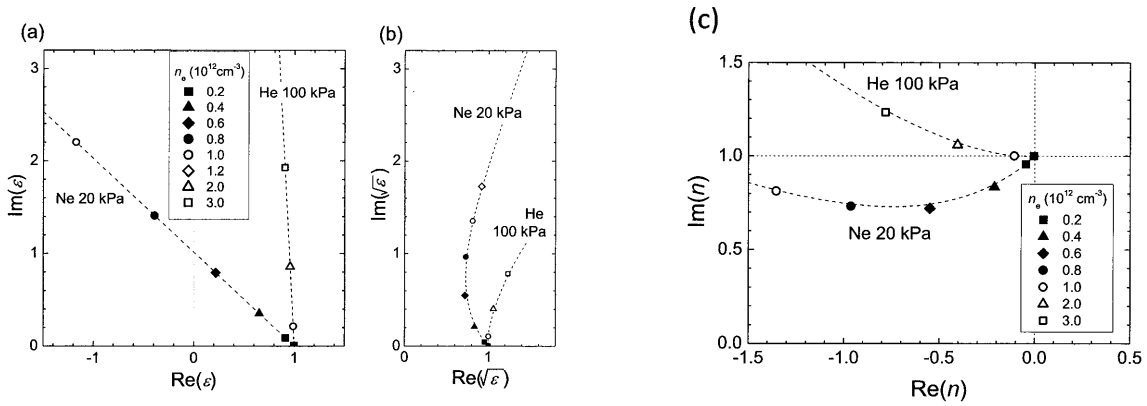

図5　比誘電率・比透磁率と屈折率の関係[30]．(a)対象とする気体・プラズマパラメータでの比誘電率．(b)比透磁率が＋1のときの複素屈折率．(c)比透磁率が－1のときの複素屈折率．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

ら次のようなことが容易に類推できる．プラズマ密度を増加させるに従い，屈折率の実部は正からゼロとなり負へと変化する．すなわち，虚数部は存在するので減衰による損失はある程度生じるものの，屈折率は正負を連続的に行き来できる．波長の変化，位相速度の変化，波数ベクトル（伝搬方向）の変化等において，劇的な変化が生じうることがわかるだろう．

以上のように，メタマテリアル効果によって電磁波媒質の透磁率がある程度自由に制御できるが，そこへ誘電率が複素数として制御可能なプラズマ媒質が重畳されることで，統合的な効果として，プラズマ分野においても，メタマテリアル分野においても，これまで議論されてこなかったような特徴的な現象が現れることがわかった．我々は，実験的な検証として，**図6**に示すように，比透磁率が－1のときに議論したような，プラズマ密度の単調な変化に対して波動振幅の増加・減少が入り組んで現れる現象を観測している[6,30]．

3.3 プラズマ・メタマテリアルの機能(2) 非線形効果

次に，プラズマの誘電率が強い非線形性を持つことによる，プラズマ・メタマテリアルの特異な特性[6,31]について議論しよう．誘電率が非線形性をもつ，とは，誘電率の値が電界に依存しない線形な部分と電界に依存する非線形な部分の和で表されることを示している．つまり，電界が弱い時は誘電率はほぼ線形，すなわち一定の値を持つが，電界が強くなると誘電率は電界強度に応じて変化する．もう少しこの非線形項の効果を具体的に述べると，電磁波が伝搬し，ある値の電界が空間に存在するようになると，その空間の誘電率が変化する．それによって，電磁波の伝搬姿態が変わる．するとその空間での電界値も変わるので，さらに誘電率が変化する．このような変化が非平衡に進行し，何らかの条件で平衡状態に達するまで続く．ここでは，この非線形項はプラズマ生成に伴うプラズマ密度の変化により，式(1)のプラズマ周波数が電界の関数となることを想定している．一般的に，電離係数が指数関数項を含むことを念頭に置くと，プラズマの誘電率の非線形項は，光領域での非線形結晶におけるカー効果（電界の2乗の依存性を持つ）より強いと言える．

ここでも，まずメタマテリアル効果がない通常の場合を考えよう．当然，透磁率は正であり，プラズマがない場合屈折率は1である．電磁波がプラズマ生成用空間に入射されると，電磁波電力（あるいは電界）が小さい場合は，電磁波はただ伝搬する．電界が強くなってきてプラズマが生成され始めると，空間の比誘電率が1から少しずつ小さくなる．簡略化して議論するため生成されるプラズマは対象とする領域で均一であると仮定すると，その空間の屈折率も少しずつ小さくなり，電磁波の伝搬の様子も少しずつ変化し，例えば波長は徐々に長くなる．そして，誘電率がゼロ，屈折率もゼロとなると，電磁波は遮断状態となり，伝搬不可能となる．つまり，それ以上電磁波の電力が大きくなってもプラズマ生成効果はそれ以上生じなくなり，電子密度は一定値にとどまり，平衡状態に至る．このような状態は，マイクロ波によるプラズマ生成において一般的に見られる現象である（ただし，誘電率が負となることで生じる表面波伝搬を考慮に入れると，事情は異なってくる．文献[32]を参照いただきたい）．

次に，メタマテリアル効果が生じるとどのような変化が生じるかを考える．メタマテリアル効果としては，前項と同様に，透磁率を負（例えば，－1と仮定）とする媒質を想定する．この場合，プラズマが存在せずに誘電率が＋1の場合は，屈折率は虚数となるので，電磁波は対象空間部には伝搬できない．ここで，何らかの原因でプラズマが発生し，誘電率が負の領域に少しでも入ると，屈折率は実数となって，電磁波は伝搬することができるようになる．すると，プラズマ生成がなされて誘電率はさらに負の方向に大きくなり，電磁波伝搬はより一層進む．誘電率と電界の値として平衡状態に達するときの値は，入射電磁界の電力とプラズマの損失のバランスで決まるだろう．

上記で述べた，“何らかの原因でプラズマが発生”するのはどのような場合が想定できるだろうか．一つは，単純に，系外のプラズマ生成電力によりプラズマが生成される場合である．例えば別の周波数の電源により高密度プラズマが生成されてもよいし，別の空間で作られた高密度プラ

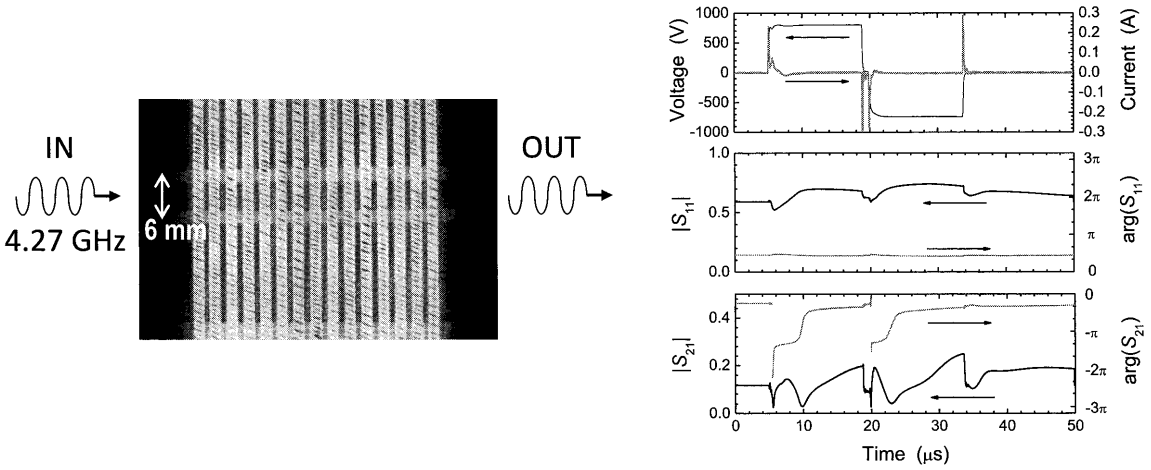

図6 透磁率の変化による電磁波伝搬の変化[6]．被覆金属線の二重らせん構造におけるNe(20 kPa)中での可視発光（左図）と，伝搬マイクロ波の時間発展信号．放電電圧・電流の時間発展と共に，反射(S_{11})・透過(S_{21})信号の時間変化を示す．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

ズマを該当空間に輸送してもよい．

また，別の機構（以下，(a)と呼ぶ）としては，非線形過程を通した遷移現象が考えられる．電界としてかなり強い値を持つように，電磁波の電力をどんどん高めていったとき，誘電率が負の状態に一気に遷移することがありえる．それは，次のような状態と考えられる．電磁波が遮断状態であっても，対象空間が有限の大きさである限り，エバネッセント波としての成分が多少は存在して，（入射電磁界中の電界より）小さい値ではあるが電界は有限の値を持つ．つまり，もともとの入射電磁界が極めて強ければ，何10dBダウンの電界であっても，誘電率が負となるプラズマの生成は可能だろう．もっとも，この場合，プラズマ生成現象は非常に高速に進行する必要があるだろう．低速に進行する場合には，次に述べるのと同様の機構が支配的となると思われるからである（正確には，時間軸上でのWKB（Wentzel-Kramers-Brillouin）近似が成り立たないような高速現象である必要がある，という表現となる）．

さらに想定できる状況（以下，機構(b)と呼ぶ）として，そしてこれが一番実験的にありえる状態と考えられるが，エバネッセント波の効果による負の誘電率状態のプラズマ生成と負の屈折率空間形成が同時進行する現象を考えたい．この様子を**図7**に示す．屈折率が虚数の場合，電磁波は伝搬できないが，少しは対象領域に浸み込む成分があり，これをエバネッセント波という．エバネッセント波は，対象領域の境界部で最も振幅が大きく，内部に進むに従い指数関数的に減少する．当然電界成分を持ち，それが十分な大きさであればプラズマ生成をもたらす．そして，さらに大きな電界であれば，プラズマ密度は誘電率が負となるまで高くなり，結果としてエバネッセント波の領域の屈折率が実数の負となり，その瞬間に電磁波が伝搬可能な領域に変わる．すると，伝搬可能な領域の前面にあるエバネッセント波が存在する領域も前進する．このように，プラズマ生成・電子密度上昇と共に誘電率が負の領域が生じ，徐々に屈折率が負の領域が広がりながら，その前面のエバネッセント波の領域が電離面として作用する．

以上のように物理的な側面から説明した内容は，**図8**に示すような非線形動力学で使用される分岐図と位相線図において表現される（以下の議論は，非線形動力学に馴染みのない方には用語・表現が不慣れかもしれないが，ご容赦いただきたい．参考にしていただける非線形動力学の専門書は，例えば[33, 34]である）．分岐図の曲線は，方程式系

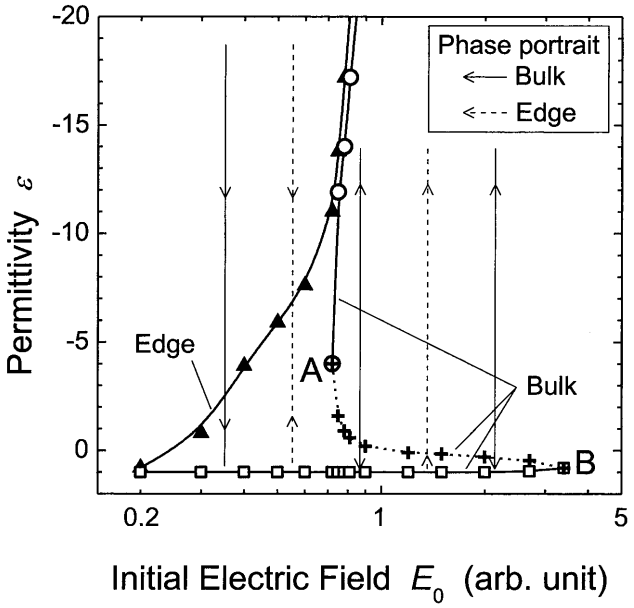

図8　図7の配置における，励起マイクロ波電界強度と中心部（Bulk）および端部（Edge）における誘電率に関する分岐図[31]．比透磁率が－1の場合．図中の矢印が，各電界強度における位相線図を示す．

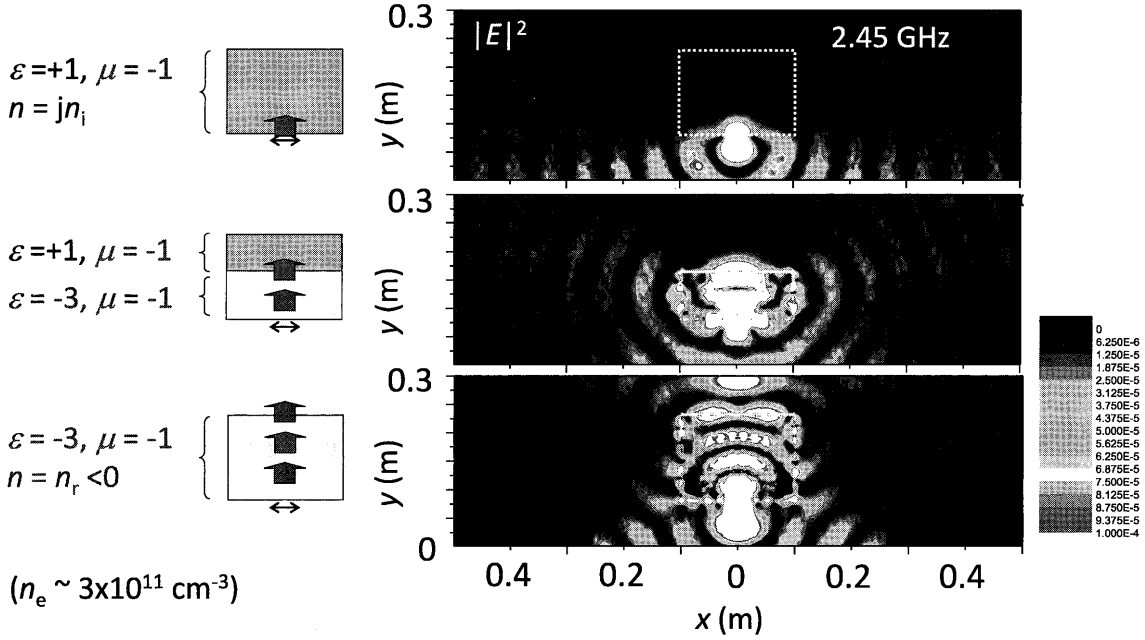

図7　有限の大きさを持つ負の屈折率領域の内外を伝搬する電磁波の様子に関する数値計算[6]．マイクロ波の周波数は2.45 GHzであり，下辺から徐々にプラズマ生成領域が進行する様子を模擬している．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

が満たす平衡状態（時間微分項がゼロ）の解を表している．位相線図の矢印の向きは，方程式系に含まれる微分方程式において，平衡解ではない状態（時間微分項がゼロではない）がどの方向に動作点として動くかを示している．平衡状態の解として存在するもののうち，位相線図の矢印がその方向に向いていれば安定解（その周囲の状態はその解に漸近していく場），矢印がそこから離れる方向であれば不安定解（少しでも状態が曲線上から外れれば，その解から遠ざかる方向に状態が変化する）である．機構（a）については，分岐図上でS字型の曲線を描くものとして表現でき，屈曲する点AおよびBが境となって動作領域が分離できる（非線形動力学の表現では，サドルノード分岐が2つ組み合わさった形，と言える）．機構(b)については，中心部と端部とでの分岐図を重ねて描き，位相線図の向きが各々逆向きになるところでの動きを想定することで解釈できる．

ここでは，“プラズマ・メタマテリアル”という観点で説明したが，プラズマ源の開発という観点でも有用性を議論できる．高密度プラズマをマイクロ波で生成することを考えた場合，これまでは外部磁場を用いたECR（Electron Cyclotron Resonance）プラズマの生成表面波の利用[32]が主な解決法であった．それに対し，ここではまた別の手段として，高密度プラズマが負の誘電率を持つことに着目し，負の透磁率媒体と組み合わせることで効果的であることを予測した．事実，最近の我々の実験により[35]，2重分割リング共振器アレイによりメタマテリアルとして負の透磁率状態を実現し，周波数2.45 GHzのマイクロ波を用いて電子密度が約2×10^{11} cm^{-3}のプラズマ（比誘電率として約－2）が生成されていることを確認した（**図9**）．これまでのマイクロ波プラズマ生成の実験で内在していたものの明確には指摘はされてこなかった，透磁率が正であるという前提条件を，メタマテリアル，非線形性，といった観点を加えることで展開可能であることを示すことができたと考えている．

4．おわりに

以上のように，メタマテリアル研究とは，光学的・電磁的新材料の研究とその応用現象の探求，という観点が主流であろうが，プラズマとメタマテリアルが出会って生じるものは，新マテリアルという観点と，マテリアル分野からシステムやスキームという観点にまで広がる可能性を持つ．3章で示した例のうち，3.2の複素数効果は電磁波媒質としての新材料と限定してよいだろうが，3.3の非線形効果の特徴的な発現は，材料という本解説の題名を越えた，プラズマ生成現象と一体となった状態，システム，スキームと言った意味合いだとご理解いただけるだろう．

今後の展開として，まず学術的には，負のパラメータ媒質に関する研究とそれ以外の展開に分けて考えられる．両者とも筆者が考えるだけでも極めて多くの可能性が指摘できるので，以下で触れる内容にこだわらずに多くのグループによる多数の研究が望まれる．負のパラメータ媒質に関しては，例えば表面波伝搬に関するものが挙げられるだろう．先に少し触れたように，表面波は負の誘電率を持つ高密度プラズマと正の誘電率を持つ誘電体の境界領域に伝搬・分布するが，ここに透磁率が正負となる変化を考えると多様な表面波伝搬の可能性があると指摘されている[36]．例えば，我々は媒質の局在性による局在表面波の利用と，そこにおける非線形媒質としての扱いを考慮する検討を始めている．負のパラメータ媒質以外に関する展開については，機能性微細周期構造が多種多様な形で提案もされているし，今後の提案も期待できるだろう．それぞれの構造に対して，プラズマを全体的に，あるいは部分的に作用させることが考えられる．それにより，これまでメタマテリアル分野でも実現できなかったような“新マテリアル”が実現できると予想している．

応用としては，クローキング作用の実現が一番大きなものと考えられる．その前に，すでにいろいろな提案がある電磁波が無反射となるプラズマステルス技術が実験的に検討されるだろう．クローキング現象の理論的検討は，最初

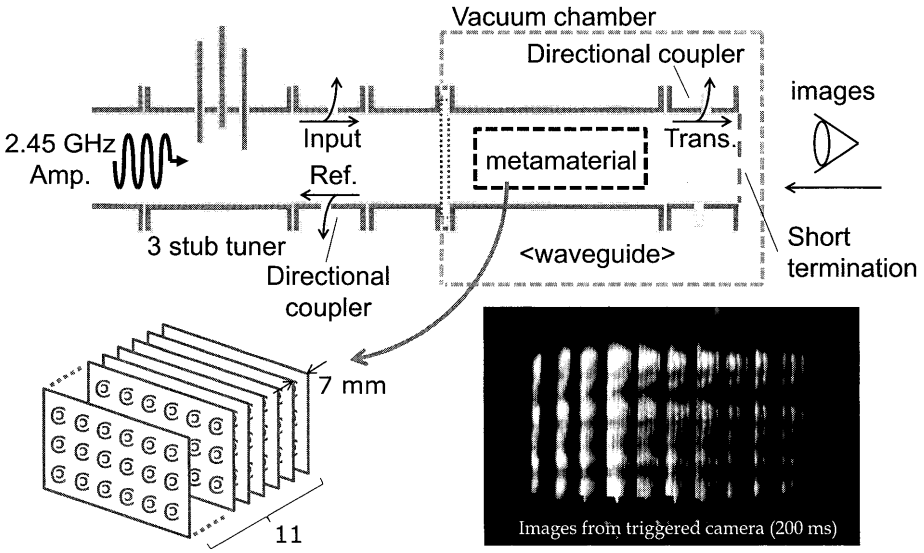

図9　二重分割リング共振器アレイを用いたマイクロ波プラズマ生成実験．図中の写真が，生成プラズマの可視発光の様子（図中のimagesが観察方向）．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

の提案[21] から大きく広がりを見せており，それに合わせてプラズマの適用に適したものに注目していく必要がある．以上は，実用性の観点からせいぜいテラヘルツ波領域までであろうが，赤外光以上の領域に対しては，ごく小さな物体に対する作用か，それとも大きな物体に対してはプラズマと同様にふるまう疑似媒質の提案が必要であると考えている．

もう一つの応用として，大電力マイクロ波の制御が挙げられる．小電力のマイクロ波信号の回路素子としては，プラズマを用いた素子が高機能性を発揮できても，すでに広く使われている固体素子を市場で置き換えることは難しい．今後，マイクロ波・ミリ波電力伝送で必要とされる素子に対して，プラズマを用いると，固体素子で対応できない高出力のマイクロ波の制御ができる可能性がある．実は，3.3で述べた内容は，実はスイッチング効果に等価であることがわかる．つまり，プラズマの生成の有無を通して，大電力マイクロ波のスイッチングを行うことと等価である．

最後となったが，関連する海外の研究動向にも触れておこう．プラズマに機能的な空間構造を持たせて電磁波伝搬に対する制御性を指摘したものとして，周期構造の効果[37]とアンテナ構造[38]がある．プラズマの時空間構造の効果について理論的にまとめた書籍[39]もある．その後，筑波大学で教鞭を取られた故北條先生のグループや我々のグループが空間周期構造について研究を進めた[7]．その間に，別の流れとして，イリノイ大学のグループが可視光とプラズマ構造の相互作用について検討を行ってきている[40]が，プラズマの構造のほうが光の波長より十分大きな場合を主に扱われているので，レーザー共振器からのアナロジーとしての意味合いが近いだろうが，プラズマ・メタマテリアル研究とは親戚筋のものであることには違いない．一方，最近，仏国トゥールーズの大学・研究機関のグループが，空間周期構造から出発したプラズマの機能性構造について実験・理論の両面で精力的に研究を進めている[41,42]．中国・韓国でもプラズマの空間周期構造に関する論文が輩出しているが，著者の知る限り，まだ明確に理論と実験を結びつける成果は報告されていない．

このような動向の中で，我々の理論・実験研究は，明確にプラズマとメタマテリアルの双方の特性を生かし，有機的な複合体を形成しているものと自負している．しかし，他国の動向を見てもわかるように，従来のメタマテリアルの概念にとらわれずに，そこから想起される動機のみを重要視して，そして材料という枠組みから広がるような大きな分野としての発展を見込むべきであろう．これは定義から外れるからこの分野に属さない，というような排他的な考え方を謹んで，より広義に，そして新規参入を歓迎した進展が望まれる．そして，プラズマに内在しているにも関わらず未開拓な内容の可能性を追求し，広がる将来性を指摘することが少しでもできるとしたら，それが重要であると認識している．

謝　辞

理論・実験研究を一緒に行ってきた京都大学の学生である，李大成博士，下村卓也，前田潤，飯尾聡，今中浩輔，中村嘉浩の各氏，そして研究実施にあたっての京都大学の中村敏浩先生と占部継一郎博士との討論に感謝します．また，本研究の初期に一緒に研究を行った橘邦英先生（現大阪電気通信大学）との討論に感謝します．ここで行われた研究の一部は，科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究，基盤研究B，特定領域研究，新学術領域研究）およびNEDO（産業技術研究助成）の研究助成により行われました．

参考文献

[1] F. Forstmann and R.R. Gerhardts, *Metal Optics Near the Plasma Frequency* (Springer, Berlin, 1986).
[2] S.A. Maier, *Plasmonics, Fundamentals and Applications* (Springer, New York, 2007).
[3] フォトニック結晶のように単位構造内に複雑な形状の機能性構造を含まない周期構造体をメタマテリアルの分類に含めるかどうかについて，あまり明確な通説はないと思われる．フォトニック結晶では空間周期長が波長程度であることが通例なので，空間周期長と波長の間の関係で区別することも可能だろうが，最近は空間周期長が波長程度の構造でも“メタマテリアル”と呼称されることもある．これらの点については，文献[4]にある程度の議論が行われている．
[4] A. Sihvola (ed.), *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials* (Kluwer, Dordrecht, 2002).
[5] L.F. Chen, K.C. Ong, C.P. Nei, V.V. Varadan and V.K. Varadan, *Functionally Graded Materials: Design, Processing, and Applications Electronics* (Kluwer, Dordrecht, 2004).
[6] O. Sakai and K. Tachibana, Plasma Sources Sci. Technol. **21**, 013001 (2012).
[7] H. Hojo (ed.), New Applications of Interaction between Plasmas and Electromagnetic Waves -Spatiotemporal Designs Yield new Functions（プラズマと電磁波の相互作用の新規応用　－空間的・時間的デザインが拓く新機能－）, J. Plasma Fusion Res. **84**, 179 (2008).
[8] T.J. Cui, D.R. Smith and R. Liu, *Metamaterials, Theory, Design, and Applications* (Springer, New York, 2009).
[9] 北野正雄 他：小特集「メタマテリアル」応用物理 **78**, 502 (2009)
[10] http://www.metamate.net/
[11] T.H. Stix, *The Theory of Plasma Waves* (McGraw-Hill, New York, 1962).
[12] V.L. Ginzburg, *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas* (Pergamon Press, Oxford, 1964).
[13] D.G. Swanson, *Plasma Waves* (Academic Press, Boston, 1989).
[14] D.M. Pozar, *Microwave Engineering* (John-Wiley & Sons, Hoboken, 2005).
[15] J.B. Pendry, L. Martin-Moreno and F.J. Garcia-Videl, Science **305**, 847 (2004).
[16] W. Rotman, IEEE Trans. Antennas Propag. **10**, 82 (1962).
[17] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart and I. Youngs, Phys. Rev. Lett. **76**, 4773 (1996).
[18] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins and W.J. Stewart, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **47**, 2075 (1999).
[19] Y. Tamayama, T. Nakanishi, K. Sugiyama and M. Kitano, Phys. Rev. B **73**, 193104 (2006).
[20] R.A. Shelby, D.R. Smith and S. Schultz, Science **292**, 77

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

(2001).
[21] J.B. Pendry, D. Schurig and D.R. Smith, Science **312**, 1780 (2006).
[22] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr and D.R. Smith, Science **314**, 977 (2006).
[23] C. Caloz and T. Itoh, *Proc. IEEE* **93**, 1744 (2005).
[24] O. Sakai, T. Sakaguchi and K. Tachibana, J. Appl. Phys. **101**, 073304 (2007).
[25] T. Sakaguchi, O. Sakai and K. Tachibana, J. Appl. Phys. **101**, 073305 (2007).
[26] O. Sakai, T. Naito and K. Tachibana, Phys. Plasmas **17**, 057102 (2010)
[27] O. Sakai, T. Naito and K. Tachibana, Plasma Fusion Res. **4**, 052 (2009).
[28] O. Sakai, T. Naito, T. Shimomura and K. Tachibana, Thin Solid Films **518**, 3444 (2010).
[29] O. Sakai, T. Shimomura and K. Tachibana, Phys. Plasmas **17**, 123504 (2010).
[30] O. Sakai, S. Iio, T. Shimomura and K. Tachibana, Trans. Mat. Res. Soc. Jpn. **36**, 449 (2011).
[31] O. Sakai, J. Appl. Phys. **109**, 084914 (2011).
[32] I.P. Ganachev and H. Sugai, Surf. Coat. Technol. **200**, 792 (2005).
[33] R.A. Devaney, *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems* (Perseous Books, New York, 1989).
[34] *Bifurcation and Chaos*, edited by J. Awrejcewicz (Springer, Berlin, 1995).
[35] S. Iio, K. Imanaka and O. Sakai, *Proc. 33rd International Symposium on Dry Process* (Kyoto, 2011), p. 55.
[36] M. Cuevas and R.A. Depine, Phys. Rev. B **78**, 125412 (2008).
[37] G.G. Borg, J.H. Harris, N.M. Martin, D. Thorncraft, R. Milliken, D.G. Miljak, B. Kwan, T. Ng, and J. Kircher, Phys. Plasmas **7**, 2202 (2000).
[38] J. Faith, S.P. Kuo and J. Huang, Phys. Rev. E **55**, 1843 (1997).
[39] D.K. Kalluri, *Electromagnetics of Complex Media.* (CRC Press, Boca Raton, 1998).
[40] J.G. Eden, IEEE Photonics J. **3**, 302 (2011).
[41] J. Lo, J. Sokoloff, Th. Callegari and J.P. Boeuf, Appl. Phys. Lett. **96**, 251501 (2010)
[42] S. Varault, B. Gabard, J. Sokoloff and S. Bolioli, Appl. Phys. Lett. **98**, 134103 (2011).

酒井（さかい） 道（おさむ）

京都大学大学院工学研究科（電子工学専攻）・准教授，主な研究分野はメタマテリアルおよび大気圧プラズマの各種応用．最近，伝統工芸がどのように発祥してどのように生活に根付いてきたのか，興味を持っています．また，民間メーカーに勤務した経験から，大学と産業界との人的・技術的交流の促進にも少しずつ関わっていきたいと思っています．

NII-Electronic Library Service