

分析化学に向けたハイエントロピー合金

西 島 喜 明

1 緒 言

光と貴金属原子表面の自由電子との共鳴現象である、表面プラズモン共鳴は屈折率による光学応答や、表面増強ラマン散乱 (SERS)、表面増強赤外吸収 (SEIRA) による微小分子検出により、分析化学にとって極めて重要な地位を占めるようになってきた。一方でプラズモン共鳴が起こる元素は金、銀、銅、アルミニウム、白金、パラジウムなどいくつかの元素に限られる。これらの原子は豊富な自由電子を有し、かつ電気抵抗が小さいことで効率の良い共鳴が実現できる。強い光増強効果を得るためには、銀やアルミニウムを使うが、銀は空気中の酸素、窒素酸化物、硫黄酸化物などによって容易に酸化され、プラズモン共鳴が消失する。アルミニウムは表面に緻密な酸化膜を形成するために、それ以上酸化が進まずに安定なプラズモン材料が形成できるが、最も電場が強い金属表面は利用できない。化学的な安定性を得るためには金を使うことが好ましい。さらにプラズモン共鳴は金よりも弱い、白金やパラジウムもプラズモン共鳴を示すことが知られており、研究用途に利用されている。さらに、水素吸蔵機能や触媒活性などの有用な機能を有している。一方でこれらの貴金属類は、投機的な目的で取引がされるなどの影響で、価格自体が高い上に、世界情勢によって大きく変化し不安定である。特に近年のウクライナ情勢やイスラエル情勢により、金の市場価格は爆発的に上昇している。金は10年前の2015年と比較するとおよそ2倍の価格になっている。一番価値の低い銅であっても多くの利用がなされており、容易にお金に換えることができるため、銅線やマンホールの蓋の盗難も発生している。このような状況であることから、プラズモニクスの研究にかかる費用は年々高くなっており、少なくとも私にとっては材料を用意すること自体が研究の負担になっている。このような観点から新しい有用なプラズモン共鳴材料を探索することは極めて重要である。我々は新しい材料として合金材料のプラズモン応用を目指して研究を行っている^{1)~7)}。

2 2原子、3原子系の合金材料

プラズモン共鳴にかかわる材料コストの低下と、新たな機能の創出を目指して、研究を開始したが、作製した

金属材料がプラズモン共鳴を示さない場合、あまり有用性が得られない。したがって、既にプラズモン共鳴を示すことがわかっている系で、合金化時に及ぼす影響を明らかにすることがよいと考え、金銀合金系でのプラズモン共鳴を探索した。この研究を開始するに先立ち、金銀合金に関する論文を検索したところ、Elsayedらのグループが化学合成によって合金ナノ微粒子を作製する研究が報告された。それ以外にもいくつかの研究で、化学合成によりナノ微粒子を作製し、その透過スペクトルを計測した結果について報告があることを見つけた。いずれの研究でも、ナノ微粒子のMie散乱の式に基づいて光学特性を評価・解析していたが、誘電率について明確な議論がなされていなかった^{8)~10)}。プラズモニクスの研究において、金属材料の複素誘電率は例えば時間領域差分法 (FDTD法) や有限要素法 (FEM法) による解析でも必須のパラメーターである。これが議論されていない点で、プラズモニクスの研究としては不十分であると考えた。以上の観点から、我々がプラズモニクスの研究を行う際には必ず誘電率を解析し、またFDTD計算によるシミュレーションでプラズモン特性を評価することを必須であると考えて研究を推進している。

ここで、誘電率の取り扱いに関して注意すべき点がある。単一の金、銀、銅といったプラズモン材料の金属の誘電率であっても、文献によって異なる値を示す点である。

図1にそれぞれの金属元素で様々な文献から取得した複素屈折率をグラフ化したものを示す。多くのFDTDソフトなどで採用されているものとして、PalikやJohnson and Christyのデータがある。それらと比較しても他の文献値は異なる値を示す^{11)~17)}。当然のことながら、これらの異なる誘電率を持つデータを使って計算を行うと、異なる結果を示すことになる。これは実験的に決めた誘電率であり、例えば製膜手法がスパッタリングであるか、熱蒸着、EB蒸着であるか、基板加熱の有無、製膜速度など、諸々の製膜条件によって大きく異なる。これは粒界サイズなどの膜質による影響が大きい。例えば粒界サイズが小さく、自由電子の平均自由行程よりも小さな粒界サイズであれば、プラズモン共鳴時に電子が振動している際に粒界によって電子散乱が発生するためである。この電子散乱はドルーデモデル内の緩和定

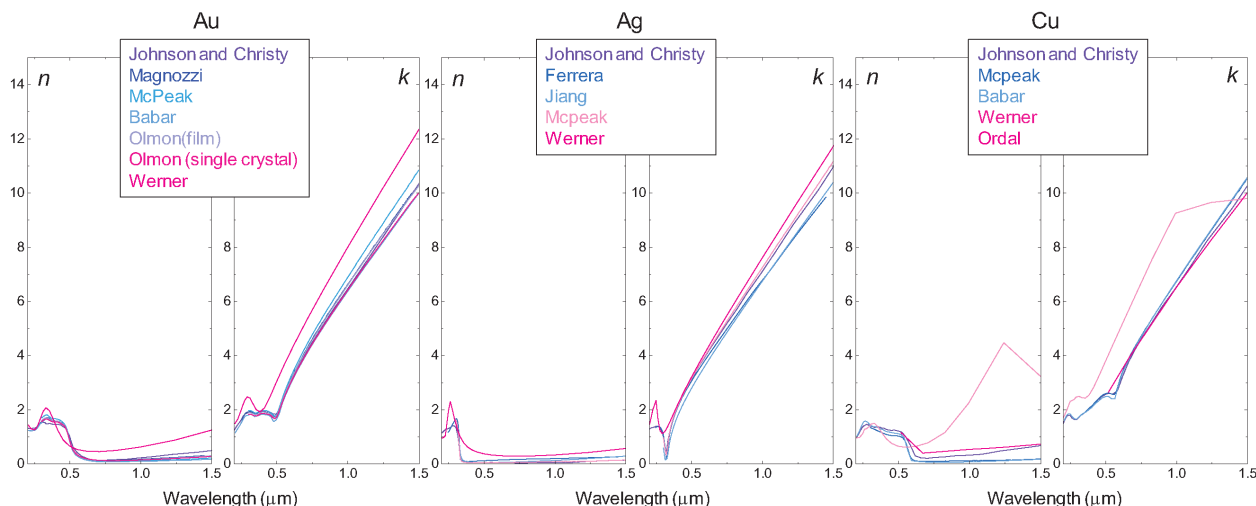


図1 様々な論文から引用した、金銀銅の複素屈折率

数 Γ に大きく影響を与える。 Γ は誘電率の実部・虚部ともに含まれる数字であるが、この値が大きくなることにより、逆数である緩和時間 τ は小さくなる。そのため、プラズモン共鳴が持続する時間は低下する。また、製膜した金属材料に含まれる不純物も無視できない量存在するときには、自由電子密度や電子の相対質量に影響を与え、ドルーデモデルのプラズマ振動数 ω_p にも影響を与える。これらの要因によって各実験結果が示す誘電率が異なってくると推察される。したがって、FDTD などのシミュレーション手法と実験値の一致精度を高めていくことを目指すためには、実際に自分が作製している条件で誘電率を決定することが必須であるといえる。しかし、プラズモン共鳴特性についてある程度の傾向を知るために FDTD 計算を行うのであれば、既存の文献から利用した誘電率でよいといえる。したがって本研究で報告している誘電率についても、筆者らの手法と他の研究グループが報告している手法での結果は異なる結果となっていることもある。例えば金と銀の合金では Leite らや Coviello らが報告しているが、いずれも筆者らの結果とは異なる結果になっている^{18)~22)}。金と銀はあらゆる組成で、均一な FCC 構造を形成することが知られているが、作製方法や評価方法の違いにより、異なる誘電率が報告されている。

また、2 元あるいは 3 元合金の研究をしている際に、問題となったのが合金化をした際に相変化が発生するという点である。金と銀、あるいは銀と銅はどの組成においても均一に混合し面心立方格子構造を形成することが知られている。一方で金と銅に関しては AuCu 、 Au_3Cu 、 AuCu_3 の組成が有名であり、 Au_3Cu および AuCu_3 は面心立方格子、 AuCu は正方晶を取ることが知られている。結晶状態は当然のことながら光学的な性質にも大きな影響を与える。実際金銀銅合金を作製した際には X 線結晶構造解析を行った際に、二つのピークが重なったよう

なブロードな X 線解析結果がみられ、完全に均一な構造となっていないということを推定される結果となった。相分離が発生しているときには、組成の異なる領域で粒界が形成しており、電子散乱が強くなることが想定される。実際に誘電率を計測してドルーデモデルにより解析をしたところ、これらの組成においてダンピングが大きくなることがみられた。すなわち、結晶が混在していることにより電子の散乱が高められてしまい、プラズモン共鳴の持続時間が低下していることをこの結果は示していることになる。この点が 2 元あるいは 3 元合金系の限界であろうという結論に至った。一方で 3 元合金系において、様々な組成で X 線結晶構造解析を計測した結果、例えば金と銅の合金に銀を混ぜ合わせていくと、この二つに分離したピークが互いに近接していく様子が観測された。つまり、銀が金と銅との間のノリのような、界面活性剤のような役割を果たしており、徐々に均一に混和していくが、完全には混和しないことも観測された。この現象は研究を行っていた 2016 年当時では、自身の調査不足により原理を解明することができなかった。しかし、のちにハイエントロピー合金 (HEA) の基礎的な考え方を学んでいくと、当時の研究結果が意味することが理解できるようになってきたのである。

3 HEA の探索とプラズモン応用

上記合金プラズモン材料について、限界を感じていた時に、HEA という概念を知る機会が得られた。HEA とは 2004 年に提案された概念で、定義として 5 種類以上の元素を等原子数比で混合するものである。日本でも 2018 年に京都大学の乾先生を中心とした研究グループにより、新学術領域研究が立ち上げられ積極的に研究がなされてきた新規性の高い材料群である。HEA 化することにより、得られる特徴としては、高い配置エントロピーにより、相状態が熱力学的に安定化されることが期

待できる。一方で、原子サイズの異なる金属同士が結晶を形成するため、原子半径が小さい原子と大きな原子が混在することにより、結晶は歪んだ形状を取ることが考えられる。これにより優れた力学的特性が現れることが報告されている。ここでいうエントロピーとは、配置エントロピーのことを指し、 $S = -R \sum \ln(X)$ によって定義される値である。この定義式に基づいて HEA は $1.5R$ 以上の配置エントロピーを持つものと定義される。5 種類以上の等原子数比にて混合した場合に S の値が最大化することから、5 種類の原子が等原子数比で必要となる。さらに、混合する原子の数を 6 原子、7 原子…と増やしていくと、配置エントロピーはどんどん大きくなっていくので、多くの組成で HEA となりうる。一方で、3~4 元素の場合には、ほとんどの組成で S は $1.5R$ 以下の値になるため、ミドルエントロピー合金、2 元素の場合にはローエントロピー合金と定義される。熱力学的な観点から考えるなら、元素群が混ざる・混ざらないを決めるのは、混合ギブス自由エネルギー変化が負であるときに発生する。配置エントロピーが高い状態というのは、エンタルピー的に不利な変化であっても、自由エネルギー変化を負にすることにより、反応を進める駆動力となりうる。つまり、5 種類以上の元素を混ぜることにより、通常では混合して単一相を形成することができない合金の組み合わせであっても、均一な組成の金属を形成できるものと期待できる。

HEA の化学センサーへの適応を調べてみると、多くが電気化学的なアプローチで研究がなされている。特にサイクリックボルタンメトリー法 (CV 法) が主たる実験手法である。その中で、対象として、グルコースを対象とした検出手法では、R. Gokul らが、FeCoNiMnCr の HEA、R. Ashwini らは NiCrCuCoFe の HEA を使って、検出感度が向上していることを示している。尿酸を対象としたセンサーでは、Z. Qingqing らは $\text{Co}_2\text{CrMnFeNi}$ の HEA、R. Ashwini らは NiFeCrCoCu の HEA でセンサーの感度向上を実現している。アスコルビン酸では D. Zhao らが $10\text{Pt}-10\text{Ti}-80\text{Al}$ 、L. Jin らは PdPt というミドルエントロピー、ローエントロピー合金で、R. Shashanka らは Yttria dispersed Fe-18Cr-13Ni S. Rajendrachar らは $23\text{Fe}-21\text{Cr}-18\text{Ni}-20\text{Ti}-18\text{Mn}$ の HEA で、Yttria dispersed Fe-18Cr-13Ni はギ酸に対しても効果があることが示されている。これらの結果を眺めてみると、Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu という第 4 周期に位置する遷移金属元素が主体であることがわかる。一方で一部の研究は PdPt のローエントロピー合金での研究例はあるが、金、銀をはじめとしたその他の貴金属元素に関して HEA の調査をした研究は以下で述べる北川らの例など少数である。さらに、プラズモニクスなど光科学的な応用をしている研究例は筆者らの研究を除いて報告されていないのが現状である^{23)~32)}。

前述の金銀銅の 3 元合金系はミドルエントロピー合金であり、配置エントロピーが足りないために、相分離状態にある金と銅の混和が完全には起こらなかったと推察される。つまり、この組成に対して新たな金属元素を添加することにより、配置エントロピーを劇的に向上させて、単一組成の合金材料が期待できると着想した。以上の原理に基づいてプラズモン共鳴を示す HEA の構築を目指す。前述のように、プラズモン共鳴を示す金属材料は限りがある。そこで、周期表上で 11 族の銅族元素である金、銀、銅の隣に位置する 10 族元素で、誘電率的にプラズモン共鳴を示しうる、パラジウムと白金を使い、金、銀、銅、白金、パラジウムからなる合金材料を用いることとした。貴金属系の HEA については、京都大学の北川らが世界的に見ても先導的な研究をしてきた³³⁾³⁴⁾。主として、化学的な合成手法で作製され、二酸化炭素の還元触媒を始めとして種々の触媒として利用できることが示されている。この 5 種類の元素はいずれの場合もプラズモン共鳴を示すために、この HEA もプラズモン材料として使えることが大いに期待できるものである。筆者ら研究指針に基づき、この HEA についても、これまでの研究と同様に誘電率を決定することを目指す。そのため、薄膜を形成する必要がある。そこで、あらかじめこの 5 種類で HEA を形成している蒸着材料を購入し、真空蒸着により製膜することを試みた。しかし、ここで問題が発生した。エントロピーの効果により均一に混合しているとはいえ、真空中で加熱をすると銀などの蒸気圧が大きな金属元素から先に蒸発してしまい、熱蒸着装置の温度内で白金はほとんど蒸発しなかった。そこでスパッタリングによる製膜に切り替えて作製を試みた。スパッタリング法であれば、Ar ガスプラズマの物理的な衝突によって原子が飛散していくため、蒸気圧のことなる金属材料からなる HEA であっても、組成を維持したまま製膜できると期待される。X 線結晶構造解析、STEM による元素分析などで作製した薄膜の評価を行ったところ、良好な均一組成の合金が形成されていることを示す結果が得られた。例えば X 線結晶構造解析の結果では、HEA は面心立方格子 (FCC) 構造特有の回折ピークを示した。ピークはローレンツ関数で良好にフィッティングすることができ、均一の組成となっていることが推定される。(111) 面のピーク角度は、それ以外の金属のピークと比較してもおおむね中間的な箇所に位置していることから、合金が形成されていることをうかがわせる結果になった。また、X 線光電子分光法 (XPS 法) では、各元素のピークが元の単体の元素のピークと比較して、いずれのピークもシフトしている結果が得られた。このことから、金属間の結合様式が例えば Au-Au が Au-Ag というように、異原子間の結合に置き換わっていることが推測される結果が得られた。そこで分光エリブソメトリーによって複素誘電率の決定を

試みた。分光エリプソメトリーでは紫外可視（350 nm から 1000 nm）と中赤外（2.5 μm ～20 μm ）の範囲で 2 種類の異なる装置を用い、それぞれ個別に算出した誘電率データを一つの誘電率データとして、ドルーデ・ローレンツモデルにより、解析を行った。データを図に示し表にまとめる。

ドルーデ・ローレンツモデルはドルーデ項とローレンツ項によってあらわされる。ドルーデ項もローレンツ項もいずれも複素数によって表現され、複素誘電率と呼ばれる。誘電率の実部は、電場を印可された際に発生する電束密度の大きさに関するものであり、虚部は電場印可時から電束密度が発生する際に生じる遅延時間である。実部と虚部は互いに独立な関数として存在するのではなく、クラマース・クロニツヒの式によってあらわされる関係式により、互いに結び付けられる。HEA の複素誘電率をみると、ローレンツ項は紫外可視から中赤外の広範囲にわたってブロードな振動が存在している。一方で、振動子数は 1 で十分に良い精度で解析できている。これは、HEA の合金形成によって、多数の金属バンドが形成され、バンド内吸収の吸収体が広帯域にわたって存在していることを示す結果となっている。これは他の単体金属と比べて広い吸収帯である。同時に誘電率の実部は負の値となっている。負の値が大きければ大きいほど、高い反射率を示す。HEA の誘電率の実部は、金銀銅と比較すると絶対値としては小さくなっているが、白金、パラジウムと比較すると絶対値として大きな値となっている。このことから HEA もプラズモン共鳴を十分に示す金属材料となっているといえる。

この誘電率を利用すると、時間領域差分法（FDTD 法）や有限要素法（FEM 法）による電磁界シミュレーショ

ンなどによってナノ構造体の光学特性を評価することができる。すなわち、事前に新しい合金材料のプラズモン特性を評価することが可能となる。二つの装置で測定した結果の隙間の波長帯域は、ドルーデ・ローレンツモデルによる外挿となってしまいが、おおむね光領域ですべ

表 1 HEA の複素誘電率の実験データの抜粋

紫外可視			中赤外		
波長 (nm)	ϵ_1	ϵ_2	波長 (nm)	ϵ_1	ϵ_2
250	-2.69	5.28	1800	-44.25	61.55
300	-3.34	6.76	2000	-50.69	72.13
350	-4.41	8.21	2200	-57.23	83.39
400	-5.7	9.93	2400	-63.9	95.52
450	-6.97	11.86	2600	-70.32	107.87
500	-8.18	13.91	2800	-76.78	121.09
550	-9.36	15.98	3000	-82.94	134.51
600	-10.58	18.04	3200	-88.97	148.54
650	-11.89	20.1	3400	-94.83	163.09
700	-13.29	22.18	3600	-100.37	177.77
750	-14.83	24.39	3800	-105.86	193.36
800	-16.46	26.7	4000	-110.78	208.28
850	-18.16	29.16	4500	-122.54	248.33
900	-19.89	31.72	5000	-132.53	288.43
950	-21.66	34.46	5500	-141.42	330.37
			6000	-148.9	371.67
			7000	-160.83	454.09
			8000	-170	538.69
			9000	-176.85	621.73
			10000	-182.16	704.89

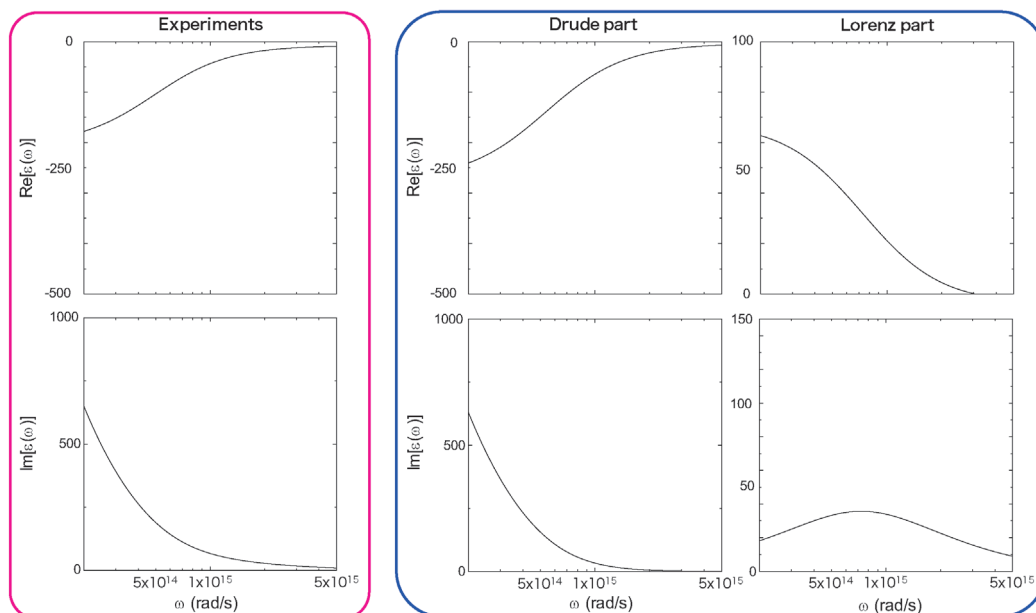


図 2 実験的に求めた HEA の複素誘電率とドルーデ項、ローレンツ項に分割したデータ

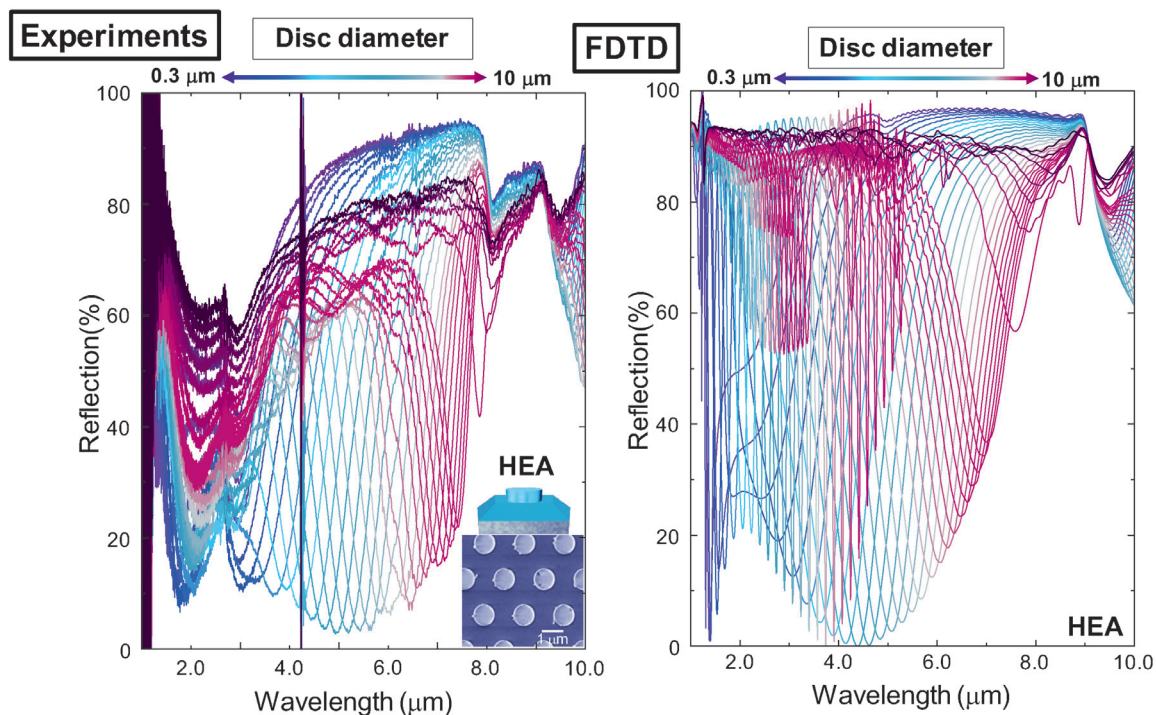


図3 HEAで作製したMIM型メタ表面の光学特性
左は実験値であり、右は実験的に得た誘電率で計算したシミュレーション結果である。

での波長を網羅した結果になっているといえる。例えばナノ微粒子やナノロッドをHEAで形成した場合の光学特性を評価することもできるし、ボウタイ構造のように半導体微細加工で作製した、ナノ構造体の光学特性も評価できる。筆者らの研究室では、非分散赤外線吸収法（non-dispersive infrared absorption, NDIR）を利用した気体分子検出のためのセンサー構築に向けて、有用な赤外光源を構築するために、プラズモニクスを利用した研究を展開している。この中において、金属-誘電体-金属ナノ構造体（metal-insulator-metal nanostructures, MIM）型からなる中赤外プラズモン共鳴材料（プラズモン吸収体、光吸収メタ表面などとも呼ばれる）とその赤外放射制御について検討を行っている。HEAをこの構造体に適応した場合に、興味深い光学特性が得られることがわかったので、次にその光学特性について示す。

MIM型の構造体では下地の金属地板により光透過がなく、一方で上部ナノ構造体と下地の金属地板との間のプラズモン共鳴によって反射率が抑制され、無反射状態を形成する。この無反射状態が光吸収につながっている。Kirchhoffの熱放射の法則により、光吸収と熱放射が等価であるということが示されている。この原理を使うことにより、MIM構造を加熱するとプラズモン共鳴由来の赤外放射が得られる。金や銀のプラズモン材料を使うと、光吸収と光散乱が同時に発生してしまい、完全無反射条件を達成していても完全吸収となっていないために放射効率が最大でも70%程度になってしまうことが、筆者らの研究により示されてきた。この問題を解決

するためには、金属材料の吸収を向上させることが必要である。例えば実験的に金と誘電体層との密着性を向上させるための接着層として利用するCrやTiの厚みを上昇させることで改善できることを見いだしてきた。Crの厚みを通常使用する5 nmから50 nmまで厚くするとほぼ100%に近い放射効率が得られることを明らかにした。ただ、この方法では、加熱中に金とCrが合金化していくために、金の誘電率の変化によりプラズモン共鳴が低くなっていくことが想定される。そのため、長期的な安定性の低下や特性の変化が起こる系では限界があるといえる。したがって、プラズモン共鳴を示す金属自体で吸収効率を向上させることが好ましいと考えられる。そこで、HEAを使うとよいとの考えに至った。HEAの誘電率は上述したように、バンド内吸収の広がりにより、金銀銅よりも大きな吸収が紫外可視から中赤外までの幅広い波長帯域に存在することが示された。また誘電率の実部の負の値は金銀銅よりも小さなものとなっている。すなわちHEAはプラズモン共鳴を示すものの、金属自身の吸収が金よりも大きくなっているのである。そこで、筆者らの研究で得られたHEAの誘電率を市販のFDTDソフトに導入し、下部の地板は金、上部ナノ構造体をHEAからなるプラズモン材料のMIM構造体を設定し、実験的に作製した構造体と同程度のスペクトルを示すことを確認するとともに、FDTD計算により、吸収と散乱断面積を評価した。結果を図に示す。

横軸に吸収断面積と散乱断面積の比をとって反射率をプロットしたところ、純粋な金や銀の場合には、比が

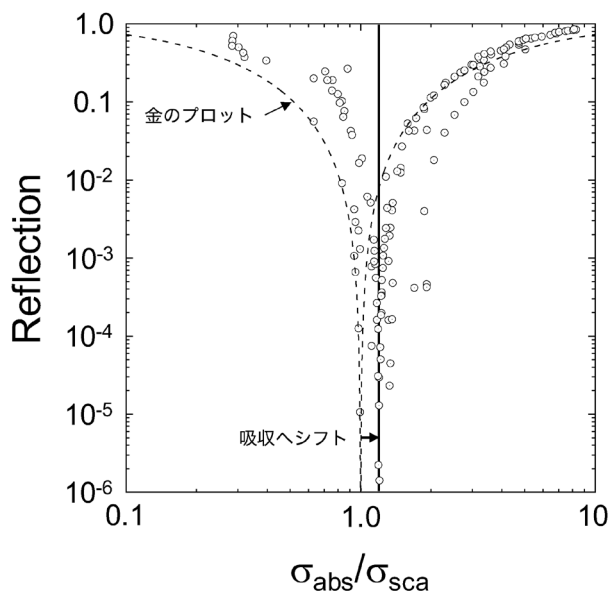


図4 反射率と散乱断面積および吸収断面積の比

1.0 となるところで、反射率が最小になる。つまり、完全に無反射状態になっているときには散乱断面積と吸収断面積が等しくなっていることがわかる。これが完全無反射条件における吸収および放射効率の低下の原因である。しかし HEA で同様の計算を行った場合には吸収側にシフトしていることがわかる。すなわち吸収断面積 > 散乱断面積となっている。これにより、HEA からなる MIM 構造は完全無反射条件において、完全放射を実現できる材料となりうることを示している。実験的な放射特性などは現在検討を行っているところである。

4 まとめと今後の展開

以上、合金プラズモン共鳴材料について、金と銀の合金で研究を開始した当初から HEA に至るまでの、筆者らの研究戦略と成果について、世界的な潮流も併せて示してきた。誘電率という基本的かつ必須のパラメーターを実験的に取得することは、自身の研究を進めるだけではなく、様座生実験研究者、理論研究者などにとっても非常に有益な情報を提供できる。特に近年では第一原理計算の発展により、材料の誘電率を求めることもできるようになってきている。今後本研究の HEA の誘電率の起源などについても、理論的に説明ができるようになってくると期待できる。

文 献

- 1) Y. Nishijima, S. Akiyama : *Opt. Mater. Express*, **2**, 1226 (2012).
- 2) Y. Nishijima, Y. Hashimoto, G. Seniutinas, L. Rosa, S. Juodkazis : *Appl. Phys. A*, **117**, 641 (2014).
- 3) Y. Hashimoto, G. Seniutinas, A. Balčytis, S. Juodkazis, Y. Nishijima : *Sci. Rep.*, **2**, 25010 (2016).
- 4) Y. Nishijima, Y. Hashimoto, A. Balčytis, G. Seniutinas, and S. Juodkazis : *Sens. Mater.*, **29**, 1233 (2017).

- 5) Y. Nishijima, S. Shimizu, K. Kurihara, Y. Hashimoto, H. Takahashi, A. Balčytis, G. Seniutinas, S. Okazaki, J. Juodkazytė, T. Iwasa, T. Taketsugu, Y. Tominaga, and S. Juodkazis : *Opt. Express*, **25**, 24081 (2017).
- 6) M. Takenaka, Y. Hashimoto, T. Iwasa, T. Taketsugu, G. Seniutinas, A. Balčytis, S. Juodkazis, Y. Nishijima : *J. Comp. Chem.*, **40**, 925 (2019).
- 7) Y. Nishijima, T. Sudo, Y. Matsuo, S. Juodkazis : *Engineering*, **49**, 81 (2025).
- 8) M. B. Cortie, A. M. McDonagh : *Chem. Rev.*, **111**, 3713 (2011).
- 9) N. E. Motl, E. E. Annan, I. T. Sines, L. Jensen, R. E. Schaak : *J. Phys. Chem. C*, **114**, 19263 (2010).
- 10) S. Link, Z. L. Wang, M. A. El-Sayed : *J. Phys. Chem. B*, **103**, 3529 (1999).
- 11) P. B. Johnson, R. W. Christy : *Phys. Rev. B*, **6**, 4370 (1972).
- 12) M. Magnozzi, M. Ferrera, L. Mattera, M. Canepa, F. Bisio : *Nanoscale*, **11**, 1140 (2019).
- 13) K. M. McPeak, S. V. Jayanti, S. J. P. Kress, S. Meyer, S. Iotti, A. Rossinelli, D. J. Norris : *ACS Photonics*, **2**, 326 (2015).
- 14) S. Babar, J. H. Weaver : *Appl. Opt.*, **54**, 477 (2015).
- 15) R. L. Olmon, B. Slovick, T. W. Johnson, D. Shelton, S.-H. Oh, G. D. Boreman, M. B. Raschke : *Phys. Rev. B*, **86**, 235147 (2012).
- 16) W. S. M. Werner, K. Glantschnig, C. A. Draxl : *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **38**, 1013 (2009).
- 17) M. Ferrera, M. Magnozzi, F. Bisio, M. Canepa : *Phys. Rev. Mater.*, **3**, 105201 (2019).
- 18) Y. Jiang, S. Pillai, M. A. Green : *Sci. Rep.*, **6**, 30605 (2016).
- 19) C. Gong, M. S. Leite : *ACS Photonics*, **3**, 507 (2016).
- 20) M. Rebello, S. Dias, M. S. Leite : *Acc. Chem. Res.*, **52**, 2881 (2019).
- 21) T. Gong, P. Lyu, K. J. Palm, S. Memarzadeh, J. N. Munday, M. S. Leite : *Adv. Optical Mater.*, **8**, 2001082 (2020).
- 22) V. Coviello, D. Forrer, V. Amendola : *ChemPhysChem*, **23**, e202200136 (2022).
- 23) G. Raj, R. Nandan, P. Gakhad, K. Kumar, A. K. Singh, K. K. Nanda : *Chem. Eng. J.*, **503**, 158041 (2025).
- 24) R. Ashwini, M. K. P. Kumar, M. Y. Rekha, M. S. Santosh, C. Srivastava : *J. Alloys Compd.*, **903**, 163846 (2022).
- 25) Z. Qingqing, L. Ruiyi, Y. Yongqiang, L. Zaijun, Sensors, Actuators : *B. Chemical*, **438**, 137790, (2025)
- 26) R. Ashwini, M. K. Punith Kumar, M. Y. Rekha, M. S. Santosh, C. Srivastava : *Carbon Trends*, **9**, 100216, (2022).
- 27) D. Zhao, G. Yu, K. Tian, C. Xu : *Bioelectron.*, **82**, 119 (2016).
- 28) L. Jin, Z. Zhang, Z. Zhuang, Z. Meng, C. Li, Y. Shen : *RSC Adv.*, **6**, 42008 (2016).
- 29) R. Shashanka, D. Chaira, B. E. K. Swamy : *Int. J. Sci. Eng. Res.*, **6**, 1863 (2015).
- 30) R. Shashanka, D. Chaira, B. E. K. Swamy : *Int. J. Electrochem. Sci.*, **10**, 5586 (2015).
- 31) S. Rajendrachari, V. Adimule, M. Gulen, F. Khosravi, K. K. Somashekharappa : *Materials*, **15**, 7591 (2022).
- 32) R. Shashanka, D. Chaira, B. E. K. Swamy : *Int. J. Sci. Eng. Res.*, **7**, 1275 (2016).
- 33) D. Wu, K. Kusada, T. Yamamoto, T. Toriyama, S. Matsumura, S. Kawaguchi, Y. Kubota, H. Kitagawa : *J. Am. Chem. Soc.*, **142**, 32, 13833 (2020).
- 34) D. Wu, K. Kusada, Y. Nanba, M. Koyama, T. Yamamoto, T. Toriyama, S. Matsumura, O. Seo, I. Gueye, J. Kim, L. Singgapulige, R. Kumara, O. Sakata, S. Kawaguchi, Y. Kubota, H. Kitagawa : *J. Am. Chem. Soc.*, **144**, 8, 3365 (2022).



西島 喜明 (NISHIJIMA Yoshiaki)
横浜国立大学 (〒240-8501 横浜市保土ケ
谷区常盤台 79-5). 北海道大学大学院情
報科学研究科生命人間情報科学専攻修了.
博士 (情報科学).
《現在の研究テーマ》プラズモニクスを駆
使した中赤外センサの構築.
E-mail : nishijima-yoshiaki-sp@ynu.ac.jp



『ぶんせき』再録集 vol. 1 出版のお知らせ

ぶんせき誌の過去記事の有効利用の一環として、『ぶんせき』再録集 vol. 1 が出版されました。2011 年から 2020 年まで、10 年間分の〈ミニファイル〉の記事が詰まっています。

下記 10 章からなり、それぞれ 12 から 14 の話題が集められています。

1. 実験器具に用いられる素材の特徴, 2. 分析がかかわる資格, 3. 顕微鏡と画像データ処理, 4. 最新の web 文献検索データベース, 5. ポータブル型分析装置, 6. 分析化学と材料物性, 7. 分析化学者のための多変量解析入門, 8. 土壌分析, 9. サンプルング, 10. 前処理に必要な器具や装置の正しい使用法。

本書はアマゾンオンデマンド出版サービスを利用して出版した書籍ですので、書店には並びません。アマゾンサイトからのネット注文のみとなりますので、ご注意ください。詳しくは「ぶんせき」誌ホームページをご確認ください。