

## 質問コーナー

「物性なんでも Q&A」第 2 回

### 金属の光学的性質(1)

佐藤勝昭 東京農工大学／科学技術振興機構

今回は金属の光学的性質に関する質問を集めてみました。関係する質問は 34 項目あり、内容も多岐にわたります。紙数の関係で、重要と思われる質問)に絞って、2回に分けて紹介します。なお、また、一部については、やりとりを省略しています。今回は、「#243 金属はなぜ光る」、「#291 金属光沢の魅力」、「#672 貴金属の色」、「#34 斜め入射の金属反射率について」、「#84 斜め入射の反射における複素数の屈折角」について示します。「#194 アルミニウムの反射率」、「#202 アルミの UV 反射率」、「#401 金属と合金の反射」、「#648 高反射率の金属が太陽光を吸収して熱くなる訳」、「#404 表皮効果と金属の反射」については、次回述べます。

表1 金属の光学的性質に関する質問の一覧

分類	番号	質問内容	所属
金属光沢	243	金属はなぜ光る	主婦?
	291.	金属光沢の魅力	教員
色	661.	ドルーデ則、バンド間遷移と貴金属の色	企業
	672.	貴金属の色	企業
斜め入射の反射率・屈折角・吸収	34	斜め入射の金属反射率について	企業
	84	斜め入射の反射における複素数の屈折角	企業
	844.	入射角によるアルミニウムの反射率の変化	企業
	169	斜め入射の光吸収	学生
種々の金属の反射率	194	アルミニウムの反射率	企業
	202	アルミの UV 反射率	院生
	346	アルミニウムの反射率	院生
	401	金属と合金の反射	企業
	646.	金、銀、Ni、Al、Cu の反射率	企業
491	モリブデンの反射率	院生	
光吸収と熱	648	高反射率の金属が太陽光を吸収して熱くなる訳	企業
表皮効果	404	表皮効果と金属の反射	企業
反射率温度変化	480.	金属反射率の温度変化	企業
	558.	ステンレスの赤外領域における反射率の温度依存性	企業
分類	番号	質問内容	所属

	951	ステンレスの反射率の温度変化	学生
反射と透過	164	アルミと酸化アルミの光学的性質	学生
吸収と反射	303	金属の吸収係数、反射率	企業
赤外反射・吸収	591.	金属の赤外反射・吸収特性	企業
	258	中赤外における金属の反射	企業
	354	金属の近赤外反射特性	企業
吸収端	212	金属の吸収端とプラズマ振動数	企業
金属の光吸収	394.	金属による光吸収	企業
	921	金属内の光吸収	企業
透過	791	金属で可視光が透過する厚み	院生
金属の誘電率	37	低周波における金属の誘電率について	企業
	46	金属の誘電率	学生
	519	金属の誘電率のシミュレーション	企業
屈折率	458	反射スペクトルと屈折率	院生
薄膜反射	114	メタルの上に材料を積層したときの反射率の求め方	企業
プラズマ	823	Cr のプラズマ周波数	企業

### 243. 金属はなぜ光る

---

Date: Mon, 18 Aug 2003 18:35:35 +0900

Q: はじめまして。突然、メールで失礼します。物性に関する質問に答えていただけると聞き、この文章を書きました。私がお尋ねしたいことは、「金属はなぜ光るのか？金属光沢の原因は何か？」という質問です。お答えいただけると幸いです。宜しく願いいたします。S

---

Date: Tue, 19 Aug 2003 10:18:47 +0900

A: S様、佐藤勝昭です。メールありがとうございます。S様の御所属、受けられた教育の経歴などがわかりませんので、理科系の教育を受けられた社会人の方で、金属に関連する企業にお勤めであるとしてお答えします。

金属が「光る」というのは、いうまでもなく「反射率が高い」ということです。たとえば、650nm(赤色)の光に対する反射率を書き出してみると、金:95.5%、銀:98.5%、銅:96.6%、アルミニウム:90.3%、白金:71%、鉄:64.5%などとなっています。金属光沢とは、平坦な表面からの反射率が高いため、鏡のように周囲のものを映し込むという点にあります。金属でなくても、半導体のゲルマニウムやシリコンは反射率が高く、620nm(赤色)の光に対してそれぞれ 48%、36%の反射があり、よく研磨した場合、金属光沢を示します。

金属の高い反射率は、金属に高密度の自由電子( $10^{22}$  個/cm<sup>3</sup> 以上)が含まれていることが原因です。これが、同時に、高い電気伝導率の原因にもなっています。光は電磁波ですが、その電界が中に入ろうとすると、自由電子が動いて強い電子分極が起き、入ってきた光の電界とは逆の電束が誘起されるため、光が金属の中に入りにくくなるのです。金属では、反射率の高い波長での誘電率は負の値を示します。これを電磁波の「自由電子による遮蔽」といいます。これは、金属の箱の中におかれたラジオが聞こえなくなるのと同じ現象です。一方、半導体の場合には、純粋のものではせいぜい  $10^{14}$  個/cm<sup>3</sup> くらいの密度の自由電子しかありませんから、高い反射率は自由電子によるものではありません。半導体の場合は、高い屈折率をもっていることが原因です。シリコンの屈折率は 3.6、ゲルマニウムの屈折率は 5.3 もあるのです。この高い屈折率の原因は、バンド間の直接遷移による強い吸収が可視光領域に存在することによって、強い電子分極がおきることで、専門知識が必要ですので、「半導体の金属光沢は、高い屈折率による」という理解でよいと思います。

---

Date: Tue, 19 Aug 2003 18:40:34 +0900

Q2: 佐藤様、丁寧なお返事をいただき、ありがとうございます。目に見える色の話を本で読んでいた際に、例えば、赤は赤色に見える波長の光が目には届くからだと言われていました。それでは、金色や銀色ってどんな光なのかなと思ったのがきっかけです。金属光沢が金属の反射率が高いことまた、それに自由電子の存在によって光が反射されるということは、金色とは、金に当たって反射した色をみており、金属ではより多くの波長の光が反射して目に届いていると理解してよいでしょうか。また、お時間のあるときで結構です。よろしくお答えください。お願いいたします。S

---

Date: Tue, 19 Aug 2003 21:53:35 +0900

A2: S 様、佐藤勝昭です。銅の赤、金の金色、銀の白色のちがいは、反射率が光の波長によって異なることから来ています。銅では、可視光のうち、波長 600nm より長い波長の光の反射率が高いが、550- 400nm の反射率が低いため、人間の目では、赤を感じる視細胞のみが強く刺激されて赤く見えます。一方、金では、波長 550nm より長い波長(赤、橙、黄、緑)に対しては高い反射率を示すが、500nm 以下の波長(青緑、青、紫)では低い反射率なので、目では赤の視細胞と緑の視細胞が刺激され黄色に見えるのです。銀では、可視光線のすべての波長にわたって高い反射率を示すので、赤、緑、青の視細胞が全部刺激され、白く見えるのです。詳しくは、拙著「金色の石に魅せられて」(裳華房)をご覧ください。

---

Date: Sat, 23 Aug 2003 15:43:19 +0900

---

AA: 佐藤様、お返事ありがとうございます。大変参考になりました。ありがとうございました。

---

## 291. 金属光沢の魅力

---

Date: Sat, 29 Nov 2003 16:43:48 +0900

Q1: 佐藤勝昭 先生、ホームページを見てメールをしています。私は N 専門学校で非破壊検査を教えている教員です。

金属の持つ独特の光沢は何か怪しい魅力を持っています。金属の性質とどのような関係があるのかを知りたくて、先生の著書「金色の石に魅せられて」を読ませていただきました。自由電子の運動による選択反射によって金属光沢が生じることを知りました。金属の反射率が大きくなる原因、金や銅はプラズマ周波数の違いによって反射率が急激に落ちるところが可視光の範囲にあるので色として見えてくる、ということは理解できました。ここまできたら金属の怪しい光沢の原因まで知りたくなりました。

たとえば、CG などでは物体の表面を金属らしく見せるときに反射率と光沢を大きくするだけでなく、ハイライトの近くに急に暗くなる部分を作るとか、光沢の分布をわざと乱す、ということを行います。このようなあたりも自由電子の運動から説明できるものなののでしょうか。妖しい魅力の光沢を説明してほしい、という工学的でない質問で申し訳ありませんが、教えていただければ幸いです。T

---

Date: Sun, 30 Nov 2003 00:14:30 +0900

A1: T 様、佐藤勝昭です。私も絵描きの端くれなので、金属光沢を表現するのに、同様の手法を使います。これは、金属光沢と言うよりは、周りの映り込みを表現しているといった方がよいでしょう。たとえば、真っ白なまるい部屋の中央に金属の円筒があって、壁に一樣な照明がされていれば、単に白い円柱に見えるでしょう。実際の場合には、部屋にあるさまざまな物体や、窓からの光、天井のランプなどが、映り込みます。特に円柱や球面体であれば、凸面鏡の原理でそれが圧縮された形に見えますからハイライトのすぐ隣に暗い影が見えたり、(金属表面が完全に平らでなければ)像がゆがんだり、散乱してぼやけたりします。しかし、平板の金属の optically flat (波長の程度にまで平坦) な面であれば、単に鏡があるだけで、妖しい金属光沢には思えないでしょう。

---

Date: Sun, 30 Nov 2003 01:16:35 +0900

Q2: 佐藤勝昭 様、返信ありがとうございます。メールを読みながら「金色の石に魅せられて」の裏表紙にある写真を見ていると合点がきました。明暗のコントラストが大きいのは正反射での光源と観察ポイントの位置関係によるものですね。CG でも物体にエッジをつけてエッジからの反射を表現すると金属らしく見えてくることを思い出しました。真っ白い紙の反射率は 90%を超えていたと思いますので、乱反射ではなく正反射をして反射率が高いものは自由電子が関係する金属の反射以外には少ない、と理解してよろしいのですね。金属表面での微妙な曲がりなどが周囲の写り込み仕方を敏感に反映するほど正反射率が高い、これが怪しい光沢の源であると分かりました。お忙しいなか、まことにありがとうございました。

---

Date: Mon, 1 Dec 2003 12:54:25 +0900

A2: T 様、佐藤勝昭です。金属でなくても反射率が高い物質が、鏡面研磨されていれば、金属光沢が見られます。シリコン、ゲルマニウムは半導体で、自由電子はそれほど多くないですが、十分金属光沢を示します。また、「金色の石に魅せられて」をよく読んで頂ければ、黄鉄鉱  $\text{FeS}_2$  の金属光沢は、自由電子の関係する色ではなく、赤から緑にかけての波長に対する強い吸収帯の存在のために高い反射率をもたらしていることが記述されています。(p.70 付近)

---

Date: Wed, 3 Dec 2003 00:33:57 +0900

AA: 佐藤先生、金属以外で金属光沢のあるものについて教えていただき、ありがとうございました。私は小学生のころ黄鉄鉱をもらってその金ぴかが嬉しくてずっと宝物にしていました。後にどこか

の温泉の土産物屋の店頭で黄鉄鉱がひどく安値で並んでいたのにショックを受けた記憶があります。「金色の石に魅せられて」は黄鉄鉱のことが書いてあるので何気なく買い求めたものでした。読んだはずでしたが難しかったのかあまり記憶に残っていませんでした。今回ひょんなことから読み返して、金属光沢のメカニズムから、先生のサイトにたどり着いて金属結合の話まで興味深く勉強をさせていただきました。

金属の怪しい光沢はあまり怪しくないという結論は、ちょっと拍子抜けでした。黄鉄鉱の金色は赤から緑にかけての強い吸収帯が高い反射率をもたらしているというのはなかなかピンときませんが、「深き闇にこそ光あり」というようなパラドキカルな魅力を感じます。黄鉄鉱をもう一度机の中に入れておくことにしようかと思っています。

---

## 672. 貴金属の色

---

Date: Sun, 6 Nov 2005 11:32:37 +0900

Q: 佐藤勝昭先生、S\*と申します。ネット上には名前を伏せていただきたいと思います。

花村先生の固体物理学という本を図書館から借りました。149ページにAgの場合のプラズマ周波数とバンド間の遷移による誘電率の変化が描かれ、更に合成した場合の曲線も記載されていてとてもわかりやすかったです。疑問なのですが、“金色の石に魅せられて”の本には貴金属の色の原因としてハイブリッドプラズマ状態による選択反射が挙げられていますが、厳密には卑金属も含めた金属全般に当てはまることと考えるのですが、違いますでしょうか。それとも可視光の波長で反射率の大きな変化が見られるのが貴金属という意味でしょうか。貴金属は、金、プラチナ、銀、パラジウム、ロジウム、イリジウム、ルテニウム、オスミウム、の8種の元素の総称と理解しているのですが、銅を貴金属に含める考え方もあるようです。お忙しいとは存じますが、ご回答いただければ幸いです。

Date: Sun, 06 Nov 2005 17:45:39 +0900

A: S様、佐藤勝昭です。私が「金色の石に魅せられ立て」で取り上げ貴金属はAu, Ag, Cuのみです。これらは、d電子殻が10個の電子で満ちており、しかもフェルミ準位から2-4eVほど深い位置に存在し、3d→Efの光学遷移が可視域付近に存在していることが、ハイブリッドプラズマの生じる原因と思います。Ru, Rh, Pd, Ir, Ptなどは、関与する4d(or 5d)→Ef遷移は赤外域に来るので、着色に結びつかないようです。

Date: Sun, 6 Nov 2005 21:54:41 +0900

AA: 佐藤勝昭先生、ご返信ありがとうございます。どうしても疑問だったので質問させていただきました。”金色の石に魅せられて”の52ページに実際の金属では基本的にドルーデの法則が成り立つと考えられていると書かれている通りで、卑金属結晶でもプラズマ振動は起こっているが、バンド幅との関係もあってAuやCuのように可視域に反射率の変化が起こる金属結晶が少ないということですね。更に勉強してみます。懇切丁寧なご返信をありがとうございました。

---

## 34. 斜め入射の金属反射率について

---

Date: Thu, 1 Mar 2001 12:28:31

Q1:佐藤勝昭教官 殿

はじめまして、A社のTと申します。全くの素人でご質問するのもお恥ずかしいのですが、何卒、ご教授ください。光の反射についてですが、媒質が空気・ガラス等については、下記理論式が成り立つと把握しております。

- 
- $R_p = \tan^2(\phi_1 - \phi_2) / \tan^2(\phi_1 + \phi_2)$
  - $R_s = \sin^2(\phi_1 - \phi_2) / \sin^2(\phi_1 + \phi_2)$

- $T_p = \sin(2\phi_1) \cdot \sin(2\phi_2) / \{\sin^2(\phi_1 + \phi_2) \cdot \cos^2(\phi_1 - \phi_2)\}$
  - $T_s = \sin(2\phi_1) \cdot \sin(2\phi_2) / \sin^2(\phi_1 + \phi_2)$
- ※  $R_p$ :P 偏光入射での反射率、 $R_s$ :S 偏光入射での反射率、 $T_p$ :P 偏光入射での透過率、 $T_s$ :S 偏光入射での透過率  
 $\phi_1$ :入射角、 $\phi_2$ :屈折角

媒質が金属においては、どのような理論に基づいているのでしょうか。その場合、上記のような偏光の違いを理論式で導けるのでしょうか。本件について、学べる著書などがございましたら、ご紹介ください。以上、お忙しいところ恐れ入りますが、よろしくお願いいたします。

Date: Thu, 1 Mar 2001 18:40:56

A1:T 様、佐藤勝昭です。

メールありがとうございます。Tさんが書かれた斜め入射の反射率の公式は金属の場合にも適用できます。その際、 $\phi_1$ と $\phi_2$ の関係として知られているスネルの法則  $\sin \phi_1 / \sin \phi_2 = n_2 / n_1$  において  $n_1$  は空気なら 1 とおいて良いのですが、 $n_2$  の代わりに、複素屈折率  $N_2 = n_2 + i\kappa_2$  を用いればよいのです。すると、 $\phi_2$  は複素数になります。(複素数の角度って考えにくいですが、数学的にそうなるかと理解下さい。)こうして求めた  $\phi_2$  をあなたの書かれた公式に代入し、2乗のところを絶対値の2乗とすればよいのです。なお、2乗しない式では  $r_p, r_s$  ともに複素数になります。エリプソメトリで測定されるのは、 $r_p/r_s$  の絶対値と位相です。理論式は、例えば、山田・佐藤他著「機能材料のための量子工学」(講談社サイエンティフィク)p.151-154をお読み下さい。

Date: Fri, 2 Mar 2001 16:07:53

Q2:A社のTです。お忙しいところ、ご教示いただきまして、ありがとうございました。早速、計算を試みたところ、複素屈折率値次第で、大きく様子が異なりました。誤計算をしていることも考えられますが、正しい複素屈折率の物性値を代入したいと考えます。複素屈折率を構成する屈折率実数部  $n_2$  と屈折率虚数部  $\kappa$  ( $= \alpha \cdot \lambda / 4\pi$ ,  $\alpha$ :吸収係数)の物性値を理科年表等で調べてみましたが、見つかりませんでした。単純金属(金、銅、アルミ等)の上記物性値は、存在するのでしょうか? 何度も恐縮ですが、よろしくお願いいたします。また、ご紹介いただいた本は、早速、後日、探してみたいと思っております。

Date: Sat, 3 Mar 2001 15:41:11

A2: 単純金属の複素屈折率  $n, \kappa$  については、Palik: Handbook of Optical Constants of Solid I (Academic Press 1985)p799, Palik: Handbook of Optical Constants of Solid II (Academic Press 1991)詳細なデータがあります。また、Landolt-BoernsteinのNew Series III-15b(Springer)に金属の光学定数があります。

Date: Sat, 3 Mar 2001 15:55:33

AA: 愚問にお付き合いいただき、ご教示いただきまして、ありがとうございました。早速、本を探してみたいと思っております。今後も、ホームページを拝見させていただきたいと思っておりますのでよろしくお願いいたします。

#### 84. 斜め入射の反射における複素数の屈折角

Date: Wed, 03 Apr 2002 19:18:41 +0900

Q: 初めまして。O株式会社のOと申します。

先生のHPを見まして、感心するとともに、こういうHPこそ必要であると痛感する次第です。HPを読んでいるうちに、長年疑問に感じていた事を質問したくなり、メールを差し上げる次第です。

現在私は、反射分光や分光エリプソを使って光学定数や膜厚を解析することをやっており、解析プログラムなど自作したりしていますが、「複素屈折率における複素数の角度の解釈」をとりあえ

ず棚上げて現在に至っており、是非この機会に先生の解釈を伺いたく存じ上げます。以前に物性なんでも Q&A の斜め入射の金属の反射率でも軽くふれられていますが、複素屈折率でスネルの法則をはめると、複素数の角度になります。これは一体どういう具合に解釈すれば、また、どのような物理的像を想像すればよいのでしょうか？お考えをお聞かせいただければ、幸いです。

Date: Wed, 10 Apr 2002 21:03:05 +0900

AA: O 様、佐藤勝昭です。

本学物理システム工学科の光エレクトロニクス分野の三沢和彦先生にメールを転送して、検討して頂きました。以下は、「複素屈折率でスネルの法則を適用したときの複素屈折角の物理的意味」についての回答です。

複素屈折率でスネルの法則を適用したときの複素屈折角の物理的意味についてお答えします。

物理で扱う複素量は形式的なものであり、実際の物理量は実数量であるということは、よく耳にすることと思います。波動の問題では、 $\phi(x,t)=A \cos(kx-\omega t)$  という波の式を  $\phi(x,t)=A \exp[i(kx-\omega t)]$  と書き表しますが、これは「計算が終了した時点で実部をとる」という暗黙の了解に基づいています。つまり、本当のところは  $\phi(x,t)=\text{Re}\{A \exp[i(kx-\omega t)]\}$  と書くべきところを  $\text{Re}\{\}$  の部分だけ省略していると考えるべきです。

では、この波の式はどこからでてくるのかというと、これはマクスウェル方程式から導出される波動方程式

$$\partial^2 \phi(x,t) / \partial x^2 + k^2 \phi(x,t) = 0$$

という波動方程式の解となっています。

一方、金属中を伝搬する電磁波の場合にマクスウェル方程式を変形していくと、波の式を複素表示したときには、波数  $k$  の部分が複素数を許すとすれば、上の波動方程式と同じ式の形になります。そこで、形式的な複素屈折率  $n=n+i\kappa$  を定義することになります。ここで**重要なのは、計算が終了した時点で実部をとる**、という約束を忘れてはいけません。

波の式  $\phi(x,t)=A \exp[i(kx-\omega t)]$  の  $k$  を  $k=n\omega/c$  と書き換えて代入すれば、 $\phi(x,t)=A \exp[i(n\omega x/c-\omega t)]$

ここで複素屈折率に置き換えて

$$\phi(x,t)=A \exp[i((n+i\kappa)\omega x/c-\omega t)]$$

さらに変形すると、

$$\phi(x,t)=A \exp[-\kappa \omega x/c + i(n\omega x/c - \omega t)] = A \exp[-\kappa \omega x/c] \exp[i(n\omega x/c - \omega t)]$$

となりますが、実部をとれば、

$$\phi(x,t)=A \exp[-\kappa \omega x/c] \cos[\omega(n x/c - t)]$$

となります。

この最後の実部のみが物理的意味があるものであり、その途中で実部と虚部をそれぞれ議論することは、思わぬ誤解を招くことになります。この点がスネルの法則で複素屈折角を表面的に捉えてしまう原因となっています。

最後の式をみると、 $\cos[\omega(n x/c - t)]$  は通常の正弦波ですが、 $\exp[-\kappa \omega x/c]$  は  $x$  とともに減衰する関数で、この部分が金属中に電磁波が進入するとともに消失していくことを物理的に表しています。

さて、前置きが長くなりましたが、複素表示のスネルの法則は、 $\sin \theta_t = (\sin \theta_i) / n$  となり、形式的には  $\tilde{n} = n + i\kappa$  と複素数になります。しかし、複素表示はあくまでも波の式の中で使い、最終的に実部をとらなければなりません。

そこで、金属中での波の式  $\phi(x, t) = A \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$  を2次元的に考えましょう。ここで、 $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{r}$  はベクトルとなります。光が  $xy$  平面内で金属に入射したとし、界面方向を  $x$  軸、界面に垂直な方向を  $y$  軸とすると、この波の式は  $\phi(x, t) = A \exp[i(k_x x + k_y y - \omega t)]$

と内積の形で書かねばならず、屈折角  $\theta_t$  に対して、 $k_x = k \sin \theta_t = (n\omega/c) \sin \theta_t$ 、および  $k_y = k$

$\cos \theta_t = (n\omega/c) \cos \theta_i$  と成分表示します。この時の金属内での屈折角  $\theta_t$  がスネルの法則に従い、形式的に複素数だとします。

しかし、**重要なのは、「この時点で屈折角の実部と虚部の物理的意味を議論してはいけない」、**ということです。

ここで、スネルの法則  $\sin \theta_t = (\sin \theta_i)/(n+i\kappa)$  を代入すると、

$$k_x = (n+i\kappa)(\omega/c) \sin \theta_t = (n+i\kappa)(\omega/c) (\sin \theta_i)/(n+i\kappa) = (\omega/c) (\sin \theta_i)$$

となり、 $k_x$  は実数となりますが、 $k_y$  については、

$$k_y = (n+i\kappa)(\omega/c) \cos \theta_t = (n+i\kappa)(\omega/c) (1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} \\ = (n+i\kappa)(\omega/c) \{1 - (\sin^2 \theta_i) (n-i\kappa)^2 / (n^2 + \kappa^2)\}^{1/2}$$

となって、 $k_y$  は複素数になります。

計算の簡略化のために、 $k_x = k_x'$ 、 $k_y = k_y' + ik_y''$  とそれぞれの実部と虚部 ( $k_x'' = 0$ )、( $k_y'$ 、 $k_y''$ ) を使って表してみます。

すると、波の式は

$$\phi(x, t) = A \exp[i(k_x' x + (k_y' + ik_y'') y - \omega t)] = A \exp[i(k_x' x + k_y' y - \omega t)] \\ = A \exp[-k_y'' y] \exp[i(k_x' x + k_y' y - \omega t)]$$

となり、最終的に実部をとって、

$$\phi(x, t) = A \exp[-k_y'' y] \cos[i(k_x' x + k_y' y - \omega t)]$$

**この最終的に実数となった式で初めて物理的意味を議論することになります。**

$$\phi(x, t) = A \exp[-k_y'' y] \cos[i(k_x' x + k_y' y - \omega t)]$$

この式より、波は金属中をベクトル( $k_x'$ 、 $k_y'$ )の方向に進み、振幅は界面に垂直な  $y$  方向に進むにつれ、減衰定数  $k_y''$  で減衰する、という解釈となります。金属中の電磁波でおもしろいのは、「**波が界面に斜めに進んでいるとしても、振幅は界面からの深さだけの関数として減衰する**」という点です。

ご質問の答えとしては、屈折角は

$$\tan \theta = k_x' / k_y'$$

から計算すべきで、スネルの法則を単純に適用した複素屈折角から議論してはいけない、というのが結論となります。

Date: Sat, 3 Mar 2001 15:55:33

AA: この度は、私の興味本位の質問に対して、実にご丁寧にご解説いただき、感激いたしました。内容をじっくり読ませていただき、よく理解できました。今後はさらにこれをもとに自分なりに式などをフォローして、他の人にもわかりやすく説明できるようにしたいと思います。三沢和彦先生に cc またはお礼のメールを差し上げることも考えましたが、直接ではありませんでしたので、突然で失礼に当たるかと思い、誠にお手数をおかけして申し訳ないとは存じ上げますが、何卒よろしくお伝え下さいますよう、お願い申し上げます。今後ともよろしくお願ひ申し上げます。

---

所属：科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究事業本部

〒102-0075 東京都千代田区三番町5番地三番町ビル

---

(2007年12月9日受理)