

ナノフォトニクス技術のテラヘルツ領域への応用と、それを支える高度な電磁界解析技術

～法政大学 柴山純教授に聞く～

ナノフォトニクスおよびテラヘルツなどの先端技術分野では、革新的な技術開発が急速に進展しています。ナノスケールで光を自在に操る技術やテラヘルツ分野での高感度センシング技術は、通信やバイオセンシングなどでの応用が期待されています。こうした新時代の扉を開くために、新たな観点に基づく機能素子の創出がカギを握っています。その実現には、複雑な物理現象の正確な解析に加えて、安定性と計算効率を兼ね備えた電磁界解析手法の実現が欠かせません。本書では、ナノフォトニクスやテラヘルツ分野の電磁界解析の最前線で活躍される法政大学の柴山純教授に、これまでの研究成果や電磁界解析が果たす役割について話を聞きました。

法政大学 理工学部
電気電子工学科

柴山 純 教授
(電子情報通信学会フェロー)

1. ナノフォトニクスの物理特性と活用分野

— ナノフォトニクスや、柴山教授の研究テーマである「プラズモニクス」について教えてください。

柴山 : ナノフォトニクスは、光の波長よりもさらに小さいナノメートルサイズ (10億分の1メートル) のスケールで、光や電磁波を制御する技術分野です。ナノフォトニクスの中には「プラズモニクス」と呼ばれる分野があります。これは、金属と、ガラスやシリコンなどの誘電体と呼ばれる材料の境界面に沿って伝搬する「表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polariton : SPP)」を活用する技術分野です。SPPは表面電磁波であり、金属中の自由電子と光波との相互作用により発生します。

一般的な光技術では、回折限界という物理的な制約により、光を波長以下の領域に閉じ込めることが困難でした。しかし、SPPを利用すれば、波長よりも小さい領域への光の閉じ込めが可能になります。こうした特殊な性質を活用し、次世代の高速光通信で活用される光電融合デバイスや光ナノ回路、バイオセンサなどへの応用が期待されています。

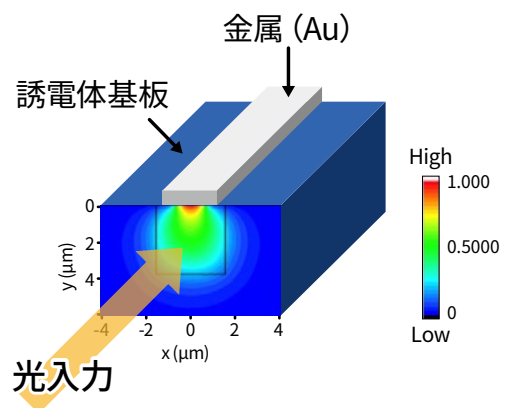


図1 プラズモニック導波路と電磁界分布の例

図1は、SPPが伝搬する、誘電体基板上に金属薄膜 (Au) が配置されたプラズモニック導波路を示しています。その構造の金属-誘電体界面に沿って伝搬するSPPの電磁界分布を色分けしたシミュレーション結果を正面に表示しています。光の波長は1.55 μm です。図1からは、波長よりも小さい1 μm 以下のスケールに光の局在している様子が確認できます。

2. 柴山教授が取り組むナノフォトニクスやテラヘルツ分野の研究内容

— 柴山教授が注目し取り組まれているナノフォトニクス分野の研究テーマや内容について教えてください。

柴山： ナノフォトニクス分野では、光回路のさらなる小型化を目指し、金属-誘電体-金属 (MIM) 構造によるプラズモニック導波路の設計に取り組んでいます。この構造は、中央の誘電体層を金属で挟むことで、波長よりもはるかに小さい領域にSPPを閉じ込め、伝搬させることができます。これにより、従来の光導波路と比較して大幅な小型化が実現可能です。

また、プラズモニック導波路を用いた機能素子の研究にも取り組んでおり、たとえば、プラズモニック導波路を利用した超小型の波長分割器を提案しています(図2)。動作のメカニズムは以下のとおりです。

- ① 図2 (a) の下部のギャップ部分へ入射された光は、金属表面でSPPに変換されます。その後、SPPはギャップに沿って伝搬します。
- ② 構造中の誘電体(水色部分)の寸法がSPPの波長分割特性に影響を与えます。波長 $1.31\ \mu\text{m}$ と $1.55\ \mu\text{m}$ の光の分割を意図して設計した場合、 $1.31\ \mu\text{m}$ の波長成分はPort 1に、 $1.55\ \mu\text{m}$ の波長成分はPort 2に出力されます。

この構造は、ギャップの幅や誘電体部分の寸法、分岐角度などを精密に設計することで、所望の波長をポート別に分けることができる特長があります。さらに、SPPが狭い領域に局在する性質を利用しているため、波長よりも小さなサイズで光の制御が可能となり、従来の光学素子では実現困難な超小型の光分波器を実現できます。ただし、入力結合部でのSPP変換効率の改善や金属による光吸収で生じる損失の低減など、今後解決すべき課題は残っています。

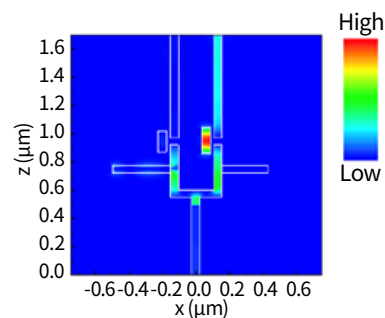
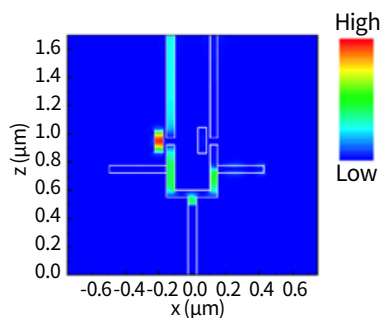
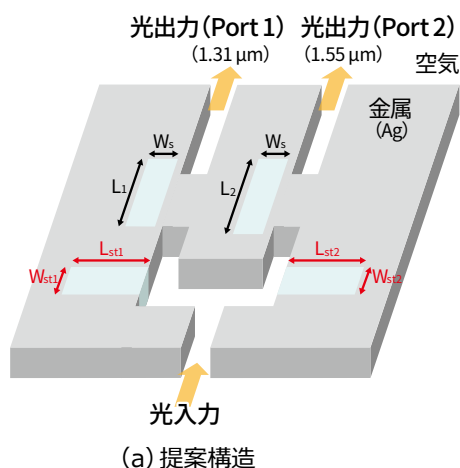


図2 プラズモニック導波路を用いた波長分割器

— テラヘルツ分野の研究テーマや内容についてはいかがでしょうか。

柴山： 私たちは、フォトニクス技術のテラヘルツ分野への応用も進めています。光波帯では、SPPを利用して物質の特性を計測するセンサが実用化されています。これは、表面プラズモン共鳴 (Surface Plasmon Resonance : SPR) センサと呼ばれています。

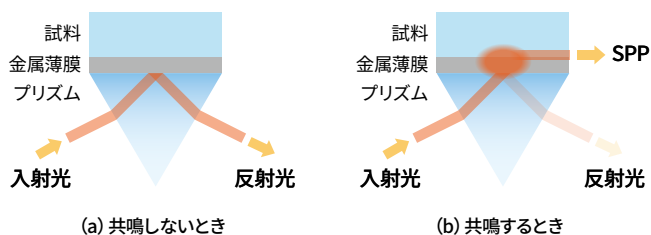


図3 SPRセンサの基本構成

SPRセンサでは、評価対象の生体分子やDNAサンプルなどの試料を金属薄膜の表面に置きます。そして、試料の光吸収スペクトルを計測することで、分子の屈折率や濃度などを検出できます。このSPRセンサをテラヘルツ帯でも実現できないか検討しています。

テラヘルツ帯で実現するためには、SPPやSPRを発生させる必要があります。これらは光領域で発生する一方、残念ながら、テラヘルツ領域では金属表面上に発生しません。ところが、半導体を利用すると状況が変わります。SPPやSPRを発生させるためには誘電率の実部が負になる必要がありますが、テラヘルツ帯でこれを実現できる材料があります。その候補の一つが、アンチモン化インジウム (InSb) です。

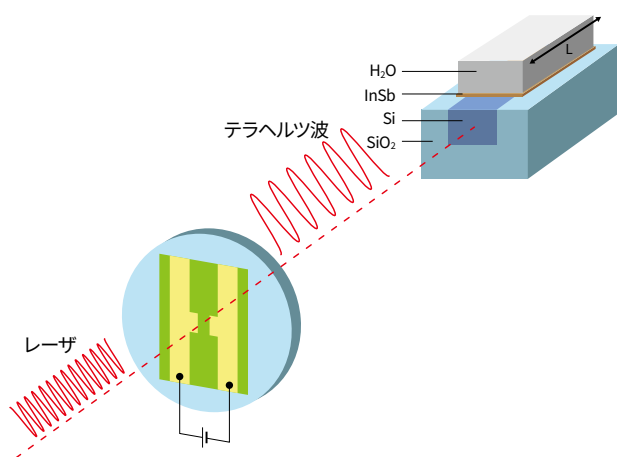


図4 テラヘルツ帯SPRセンサと光伝導アンテナ

図4の右上には、私たちが提案するテラヘルツ帯SPRセンサを示しています。このセンサは、 $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{InSb}$ の多層薄膜で構成され、 InSb 層が負の誘電率をもつ材料として機能します。 InSb の上に設置する H_2O は、センシング対象となる試料です。このセンサにテラヘルツ波を入射させるとSPRが発生し、試料の屈折率などに応じてテラヘルツ波の減衰量が変化します。

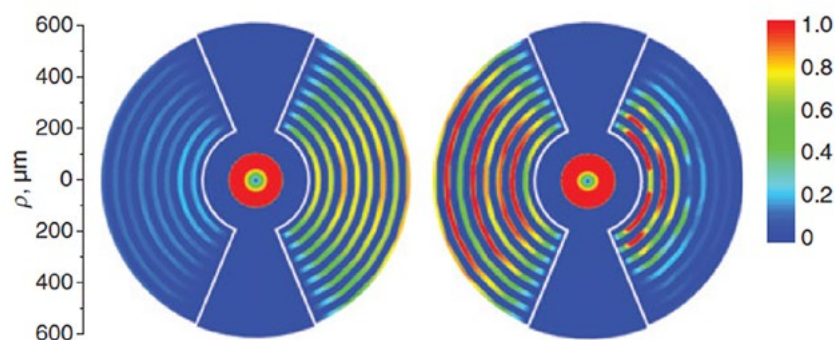
なお、SPRセンサには、別途、テラヘルツ波を発生させる素子が必要です。その一例として、図4の左下に、光波からテラヘルツ波を発生させる光伝導アンテナを示します。このアンテナの半導体基板には、H型の金属電極が設けられています。この金属電極間に光レーザーパルスを照射すると、半導体内部にはキャリア（電子・正孔）が生成されます。これらのキャリアは、電極に印加されたバイアス電圧により加速され、このアンテナからテラヘルツ波として放射されます。

InSb を用いたテラヘルツ帯SPRセンサは、温度変化や溶液濃度などの検出に加えて、テラヘルツ波の高い物質透過性や分子振動モード検出能力を活かし、多様なバイオセンシングや非破壊検査分野への応用が期待されます。さらに、従来の可視・近赤外領域のSPRセンシングでは困難であった分子固有の振動帯域の直接観測がテラヘルツ波によって可能になると期待されています。これにより、医療・化学分野における新材料評価や薬物動態解析など、より広範な応用展開が見込まれています。

柴山：テラヘルツ帯では、新たな機能素子として、テラヘルツ波の周波数により出力方向を制御できるテラヘルツ表面波分割器を提案しています。図5 (a) は分割器の外観（ただしマイクロ波サイズへスケールアップ）を表しています。金属基板に同心円状の溝（グレーティング）が施されています。金属表面にはSPPが伝搬しない一方で、微細な溝を作り込むと疑似SPPが伝搬します。図5 (b) と (c) はそれぞれ、周波数1 THzと1.5 THzの電磁界分布のシミュレーション結果を表しています。この分割器の動作について説明します。円盤状のメタ表面構造の中心からテラヘルツ波を入射すると、金属基板上のグレーティングに疑似的なSPPが発生します。周波数1 THzのSPPは主に円盤の右方向へ、1.5 THzのSPPは主に左方向へ伝搬します。この分割器は、テラヘルツ波をさまざまな方向に分割でき、テラヘルツ通信システムなどの素子への応用が期待されています。その一方で、表面にエネルギーを閉じ込める効率が十分ではない問題も見つかっており、さらなる改良が求められています。



(a)



(b) 1 THz

(c) 1.5 THz

図5 テラヘルツ表面波分割器

- (a) テラヘルツ表面波分割器の外観（マイクロ波サイズへスケールアップ）
- (b) (c) 周波数1 THzと1.5 THzの電磁界分布のシミュレーション結果

3. 電磁界解析技術に求められる役割と、顕在化する技術的課題

— 電磁界解析技術が求められている背景と、期待される役割とは何でしょうか。

柴山：これらの研究では、電磁界解析技術がきわめて重要な役割を果たしています。電磁界を取り扱う機能素子の研究開発では、設計段階での試作コストや開発時間を削減するため、精度が高く効率的な電磁界解析が不可欠です。特にナノフォトニクスやテラヘルツ分野のような微細領域を対象とする場合、従来以上に高度な解析手法が求められています。

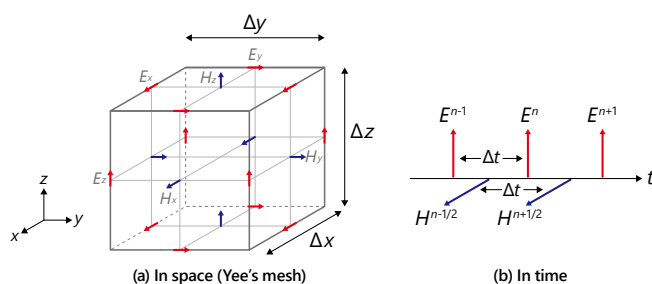


図6 FDTD法での電磁界の配置

(a) 空間配置 (Yeeメッシュ)：

直交座標系の立方体の辺に電界 E (赤矢印) を、面の中心に磁界 H (青矢印) を交互にずらして配置。

(b) 時間配置：

電界 E と磁界 H を時間軸上で半時間ステップ ($\Delta t/2$) ずらして配置。

Yeeメッシュは、Maxwell方程式の差分化に適しており、数値計算の安定性が高いと言われています。

— 現在の電磁界解析技術で顕在化している技術的課題について教えてください。

柴山：電磁界解析の主要な課題は、計算量とメモリ使用量の増大への対処です。特にSPPにおける金属と誘電体の界面で電磁界が急激に変化する現象を扱う場合、その振る舞いを精度よく捉えるためには、空間の計算刻み幅を非常に細かく設定する必要があります。

SPPを計算する代表的な電磁界解析手法の一つに、Maxwellの方程式を時間領域で直接解く有限差分時間領域法 (FDTD法) が挙げられます。以前から陽解法 (※1:用語解説参照) FDTDが広く利用されていますが、この手法では、解析の安定性を確保するため、Courant条件を満たす必要があります。SPPの計算では空間の刻み幅を小さく選ばざるを得ず、Courant条件により時間の刻み幅も極端に細くなります。その結果、計算時間は膨大になります。

さらに、SPPの物理現象を正確に再現するには、金属や半導体材料の分散特性 (周波数による誘電率の変化) を適切にモデル化することが不可欠です。これを怠ると、解析結果が本来の物理現象から乖離 (かいり) します。また、現実の材料では、非線形性や温度、キャリア密度の変動など、さまざまな要素がSPPに影響を与えます。これらを解析モデルに反映させることで、解析の複雑さは飛躍的に増します。加えて、複雑な構造体やナノメートルスケールの微細構造を解析する際には、高度なメッシュ生成技術や、シミュレーション領域の境界条件設定も重要です。これらの課題を克服し、より現実的で効率的な解析を実現するためには、数値計算手法の改良や、並列計算技術の進展が今後ますます求められるでしょう。

— 柴山教授は、FDTD法へ陰的な計算技法を世界に先駆けて導入し、計算が簡素でかつ高効率な電磁界解析手法を実現しました。この成果が認められ、2018年には電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティの最高賞であるエレクトロニクスソサイエティ賞を受賞され、2023年には電子情報通信学会からフェロー称号を受賞されました。その成果の概要について教えてください。

柴山 : FDTD法は、計算手順が比較的容易です。一方で、数値計算の安定性を保つための条件(Courant条件)の制約により、空間刻み幅を小さく設定すると、それらに応じて時間刻み幅を小さく設定する必要があります。その結果、計算時間が非常に長くなる欠点があります。その傾向は、ナノフォトニクスやプラズモニクスなどの微小構造を解析する際に顕著です。

この問題を解決するため、私たちは陰解法である局所一次元(Locally One-Dimensional : LOD)法を世界で初めてFDTD法へ導入し、時間刻み幅の制限を完全に除去しました。LOD法は空間方向ごとに逐次的に陰的計算を行う手法であり、時間刻み幅を空間刻みに依存せずに設定できるため、計算効率が大きく向上します。実際に、LOD-FDTD法を用いることで、計算時間を従来のFDTD法の1/2から1/10程度まで短縮できることが確認されています。ただし、陰的な計算になるため、代数計算だけで解を得ることはできず、連立方程式を解くことが必要になり計算は複雑になります。しかし、計算の複雑さにもかかわらず、時間刻み幅を大きく選べることで計算時間を短縮できるという大きな利点があります。

LOD-FDTD法の簡素さと効率の良さは世界中の研究者へ次第に認められ、LOD-FDTD法を初めて報告した論文は2025年時点で400件以上引用されています。現在、各国の研究者により改良や拡張が進められ、国内外の教科書にも取り上げられています。LOD-FDTD法は、本書で取り上げたナノフォトニクスやテラヘルツ分野の機能素子の研究でも、重要な役割を果たしています。

— 若いエンジニアが電磁界解析に取り組む上で、留意すべき事項は何でしょうか。

柴山 : 電磁界解析は非常に有用なツールですが、解析結果を無条件に信頼すると、誤った結論に至る恐れがあることを十分に認識する必要があります。プラズモニクス分野における金属など、材料の物理パラメータに周波数特性(分散性)を持つ構造を解くケースでは特に、以下の点に留意する必要があります。

- 電磁界解析手法ごとの適用範囲と限界の把握 :
FDTD法や有限要素法(Finite Element Method : FEM)など、各種数値解析手法にはそれぞれ得意分野と制約があります。たとえば、SPRを詳細に解析する場合は、高密度なメッシュ設計や境界条件の工夫が求められ、数値的な安定性や計算精度にも注意が必要です。
- 利用する電磁界解析手法が適切かを確認 :
利用する電磁界解析手法で、必要な精度が十分に確保できていることを事前に検証することが重要です。はじめに、公開されているベンチマークモデルや既存の解析結果から解析対象に類似した構造を見つけ出し、解析結果の比較検証を行います。特にフォトニクスやテラヘルツ分野では、標準となるベンチマークケースが広く共有されていますので、これらを活用し、選定した解析手法が目標とする精度を満たしているか確認してください。もし十分な精度が得られない場合は、手法の再検討やパラメータの調整など、適切な対策を講じる必要があります。
- 材料特性の正確な把握 :
解析対象となる材料の誘電率や導電率、周波数特性などを正確に設定することが不可欠です。特に、材料が分散性を持つ場合、特定波長のみの誘電率や導電率では電磁界の振る舞いを正確に表現できません。この対処として、分散性を表現できる物理モデル(例 : DrudeモデルやLorentzモデルなど)の利用を考慮する必要があります。
- 結果の妥当性の検証 :
得られた解析結果が、理論的・経験的に予想される電磁界分布や境界面での振る舞いと一致していることを確認することが重要です。たとえば、SPPやSPRであれば、金属と誘電体の界面に電磁界の強い局在が現れるか、また、損失やエネルギーの保存則が満たされているかなどをチェックします。

4. 柴山教授が目指す今後の研究の方向性

— 柴山教授が今後目指す研究の方向性について教えてください。

柴山： 私たちの研究室では、これまで主に理論的な電磁界解析に焦点を当てて研究を進めてきました。特に、LOD-FDTD法を用いた効率的な解析手法を開発し、それを活用した新たなデバイス提案も行っています。今後は、これまで蓄積した理論計算の知見を活かしつつ、実験を伴う共同研究を通じて実用的なデバイスの開発にも注力していく方針です。

この取り組みの一例として、東京都立大学や情報通信研究機構（NICT）との共同研究により、テラヘルツ帯SPRセンサの3次元電磁界解析を進めています。解析結果が得られ次第、実際にデバイスを作製し、その動作や性能を実証・評価する計画です。研究の大きな目標はテラヘルツ帯SPRセンサの実用化です。理論解析では十分な動作が確認されていますが、実際にはInSbをシリコン基板上に高品質に積層し、デバイスとして整合良く作製するための製造プロセス上の課題が残っています。これらの課題解決を目指して、東京都立大学やNICTと連携し、試作と性能評価を段階的に進めていく計画です。

また、法政大学では、2024年度から北海道大学より藤澤剛教授を迎え、光分野の研究体制が強化されました。藤澤教授は電磁界解析を駆使した理論研究に加えて、実験的な研究も積極的に推進しています。現在、私たちの研究グループと藤澤教授との間で新たな共同研究のアイデアを模索しているところ です。

このように、従来は研究室単独で進めてきた取り組みを、現在では研究室や大学、研究機関同士での共同研究へと発展しています。これにより、電磁界解析を用いたデバイス設計から、試作や性能検証、そして実社会への応用に至るまで、一貫した流れで研究が推進されるようになっていきます。

— 本日はありがとうございました。

※1：陽解法と陰解法

現在、陽解法と陰解法は、時間発展を扱う数値解析で広く利用されている時間積分手法です。

陽解法は、既知の時刻における値のみを用いて、次の時刻の値を逐次的かつ直接的に計算します。この手法は計算式が比較的シンプルであるため、初学者の電磁界解析に適しています。ただし、陽解法には解析の安定性条件（Courant条件）が存在するため、時間刻み幅を十分小さく設定する必要がある場合計算時間が長くなりやすい傾向があります。また、時間刻み幅がCourant条件を超えて大きく選ぶと、計算が不安定になります。

陰解法は、次の時刻における未知の値を含んだ方程式を立て、その連立方程式を解くことで値を算出します。これにより、時間刻み幅を大きくとった場合でも計算が安定し、計算を高速化しやすいという特長があります。

本記事で紹介した研究の詳細については、柴山教授の下記著書をご覧ください。



Jun Shibayama, "FDTD Analysis of Plasmonic Devices," Springer Series in Optical Sciences, volume 78, Sep. 2025.

<https://link.springer.com/book/9789819681297>