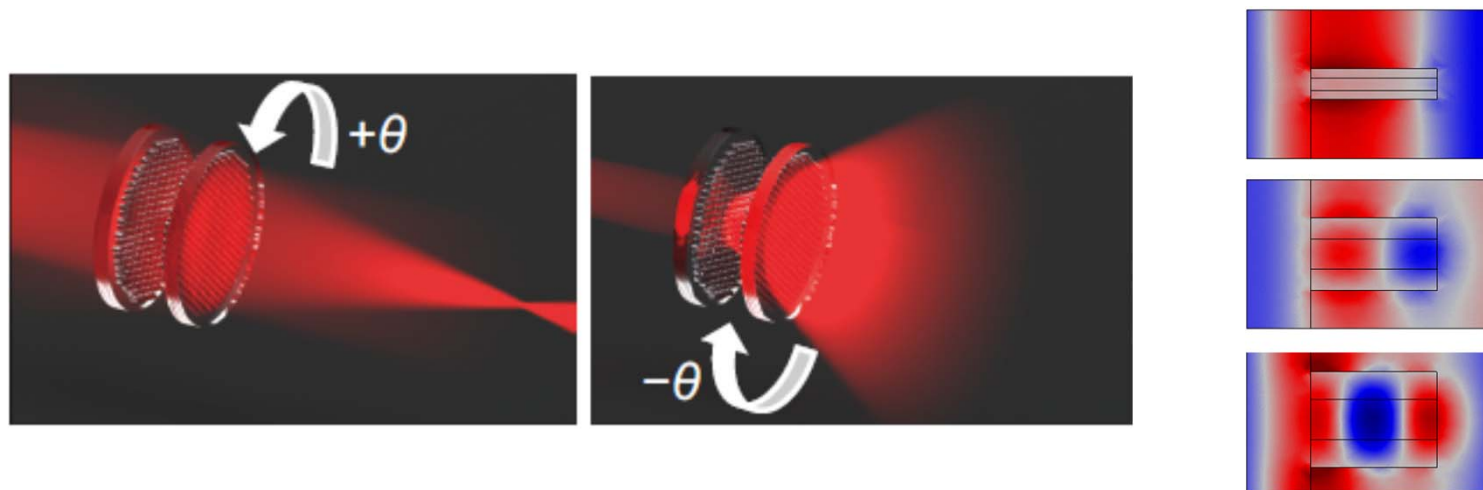


誘電体メタサーフェスの電磁場解析と 東工大TSUBAME3.0での利用



岩見健太郎

東京農工大学 大学院工学研究院
先端機械システム部門

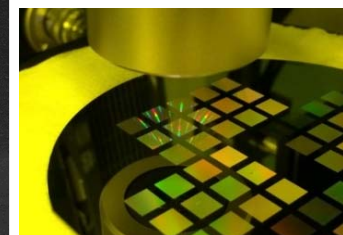
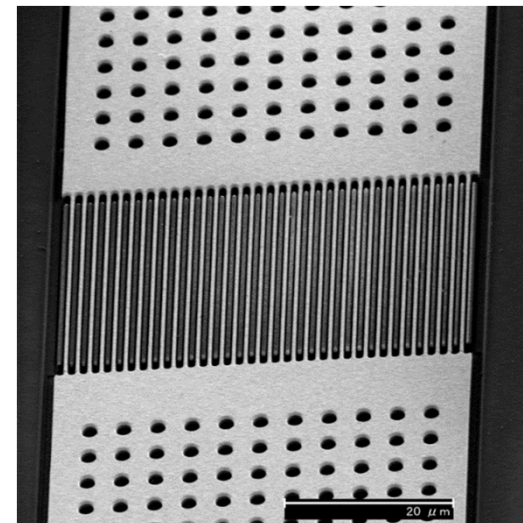
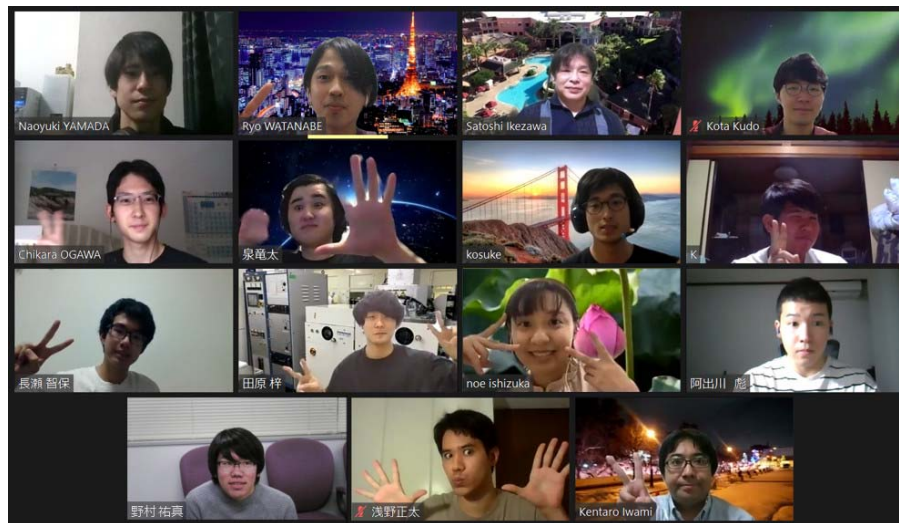
東京農工大学 岩見研究室

Topics: MEMS/NEMS, プラズモニクス、メタサーフェス
Group Members in 2020AY

教員2名

大学院生: 7, 学部生: 6

研究内容: メタレンズ、ホログラフィ、ガスセンサ



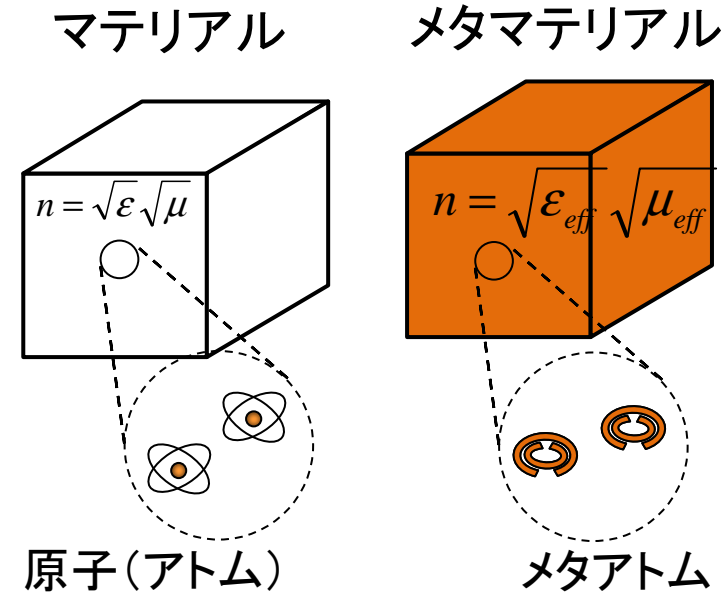
本日の内容

1. メタサーフェス・メタレンズの概要
2. 誘電体導波路とCOMSOLによる電磁場解析
3. 可変焦点メタレンズ
4. まとめ

メタマテリアルとメタサーフェス

- 光メタマテリアル

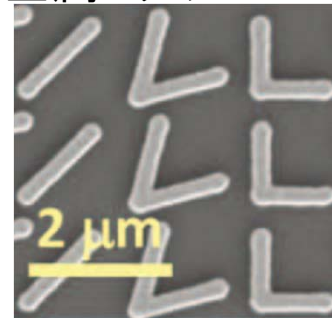
- ✓サブ波長サイズの構造 (メタアトム)からなる、屈折率が制御された物質
- ✓負の屈折率など、自然界に存在しない特性も可能



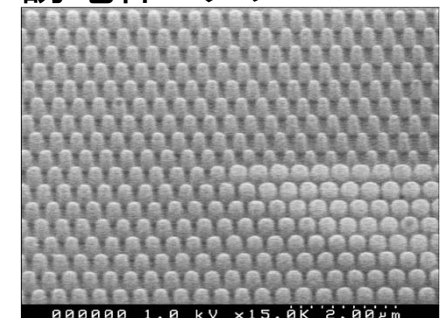
- メタサーフェス

- ✓メタマテリアルのうち平面的なもの
- ✓微細加工との親和性
- ✓金属や誘電体の微細構造の配列

金属メタサーフェス

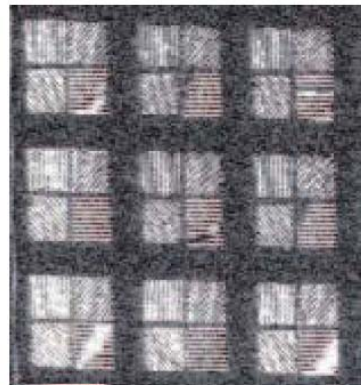
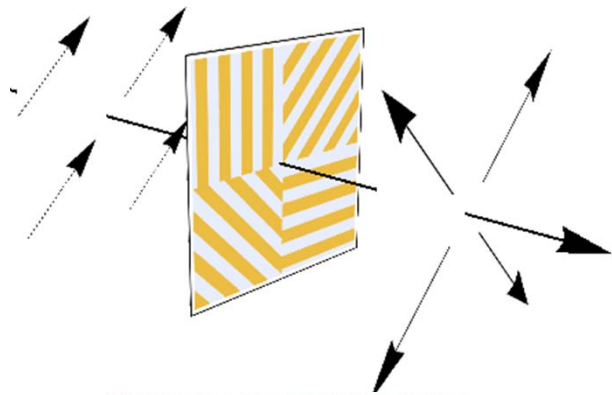


誘電体メタサーフェス



メタサーフェスで可能な光機能

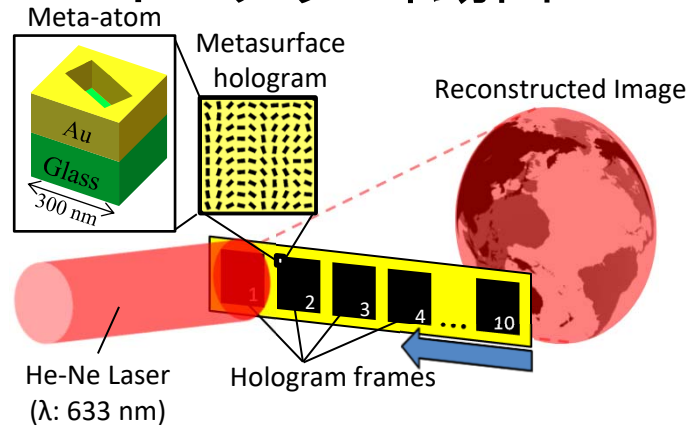
ベクトルビーム素子



Au nanoslit array

K. Iwami et al, APL 2012

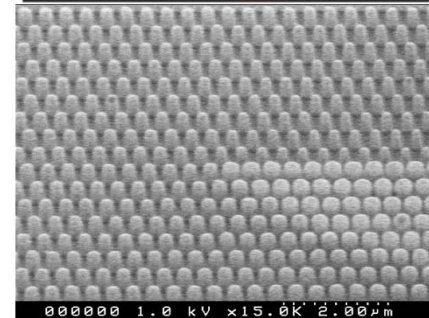
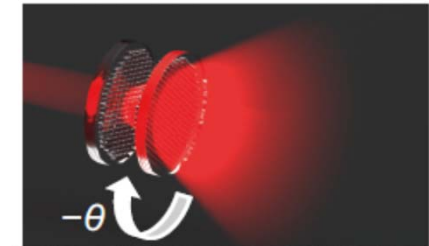
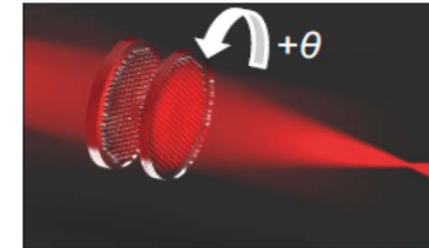
ホログラフィ動画



Au nanoaperture array

R. Izumi, et al, Opt. Exp 2020

回転可変焦点レンズ



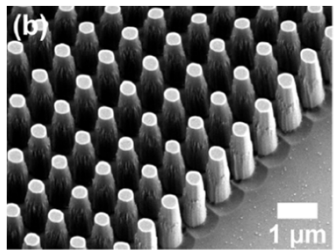
Si pillar array

K. Iwami et al, Opt. Exp. 2020

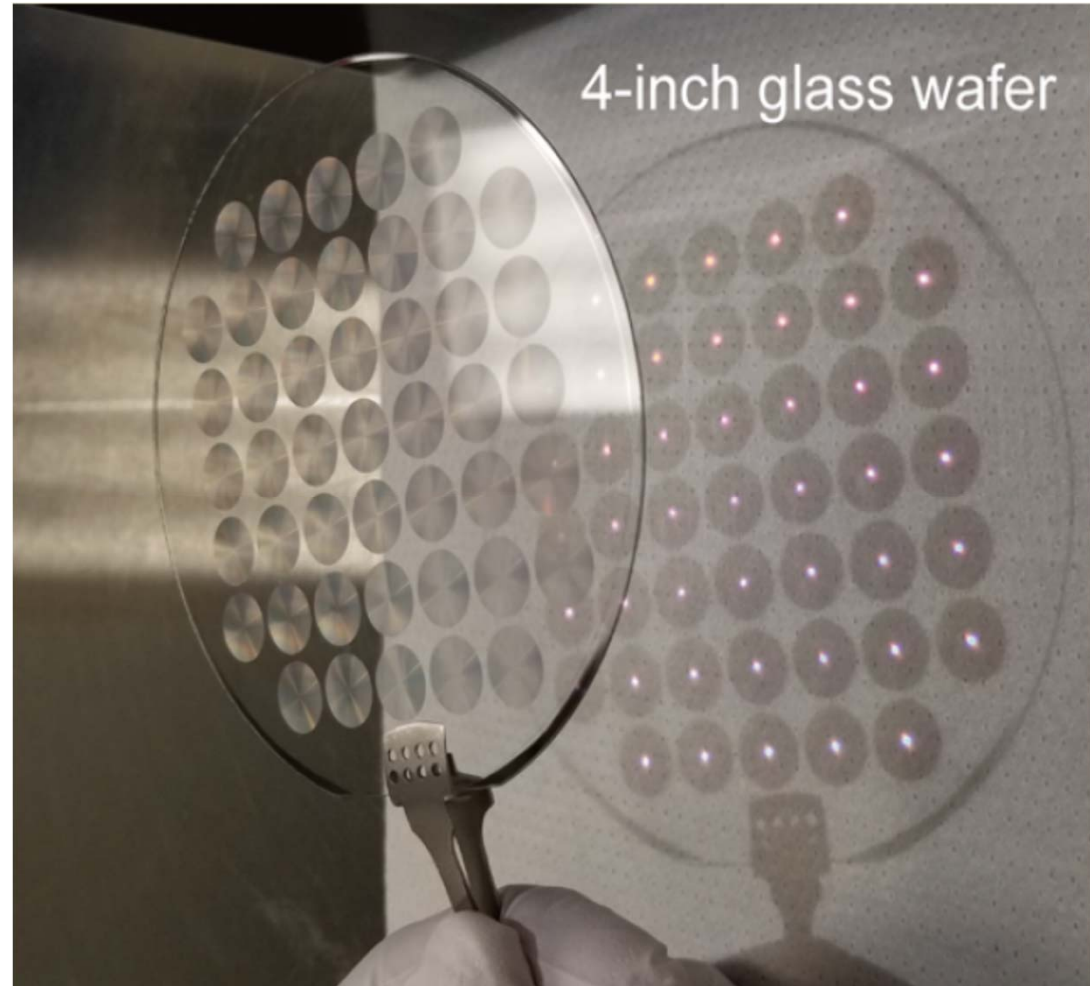
光に与える位相分布を制御することで、様々な光機能を実現

メタレンズとは

- メタサーフェス (メタ表面)を応用したレンズ
- 小型・薄い ($\sim \lambda / (n-1)$)
- リソグラフィ1回で製作可能



石英ガラスピラー



Harvard Univ. Capassoら、Nano Lett. **19**, 8673 (2019)

Top 10 Emerging Technologies for 2019



3 ENGINEERING : TINY LENSES WILL ENABLE DESIGN OF MINIATURE OPTICAL DEVICES

Thin, flat metalenses could replace bulky glass for manipulating light

The top 10 emerging technologies for 2019

	1. Bioplastics for a Circular Economy		6. Collaborative Telepresence
	2. Social Robots		7. Advanced Food Tracking and Packaging
	3. Tiny Lenses for Miniature Devices		8. Safer Nuclear Reactors
	4. Disordered Proteins as Drug Targets		9. DNA Data Storage
	5. Smarter Fertilizers Can Reduce Environmental Contamination		10. Utility-Scale Storage of Renewable Energy

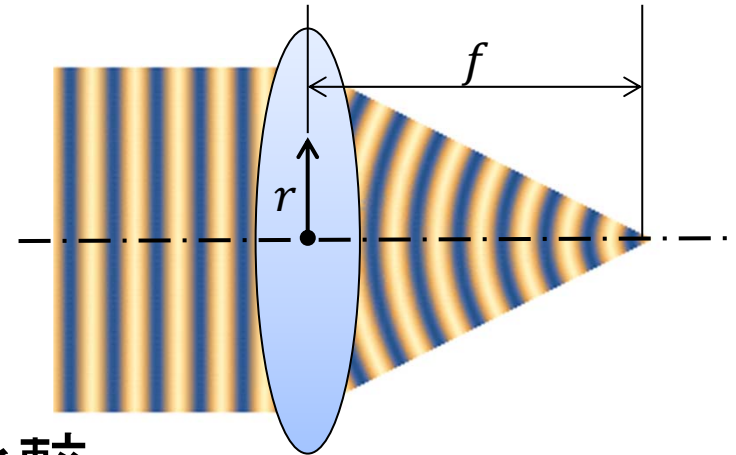
<https://www.scientificamerican.com/article/top-10-emerging-technologies-of-2019/>

メタサーフェスレンズ：“メタレンズ”の例

- 凸レンズの波面変換

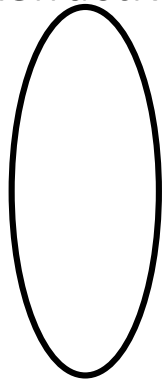
- 入射平面波を
収束球面波に変換

$$\text{位相分布: } \phi(r) \sim \frac{\pi}{\lambda f} r^2$$



- 既存のレンズとメタレンズの比較

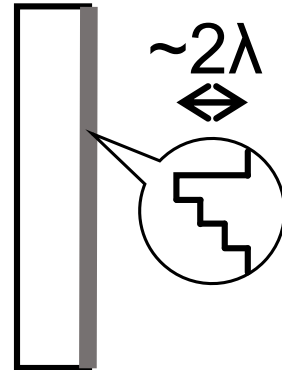
Refractive



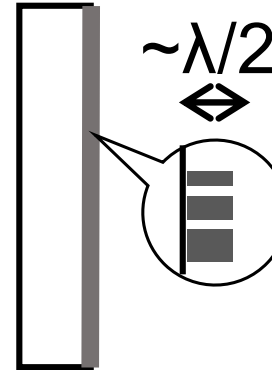
Fresnel



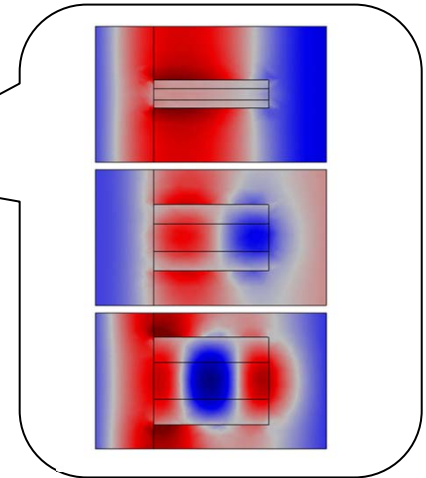
Diffractive



Metalens



誘電体柱型メタアトム
による位相遅延



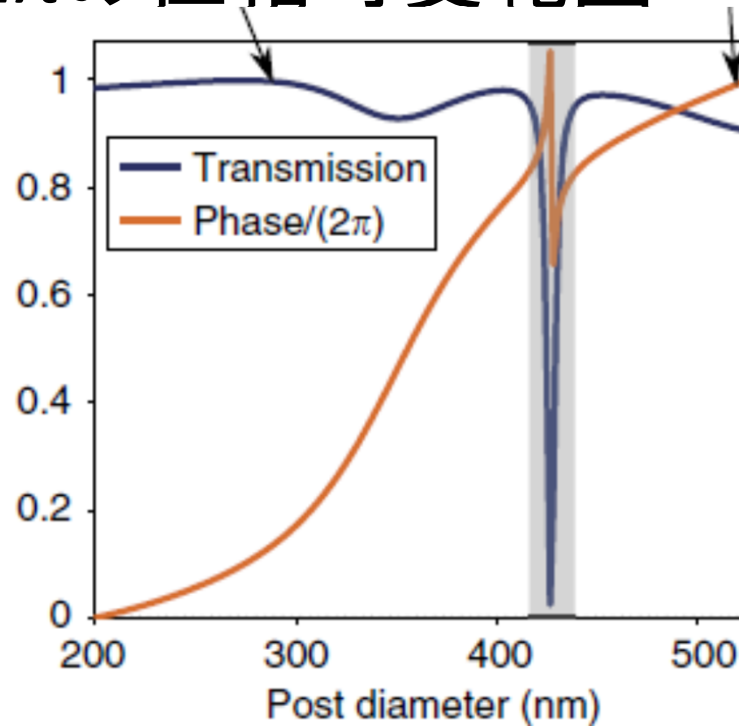
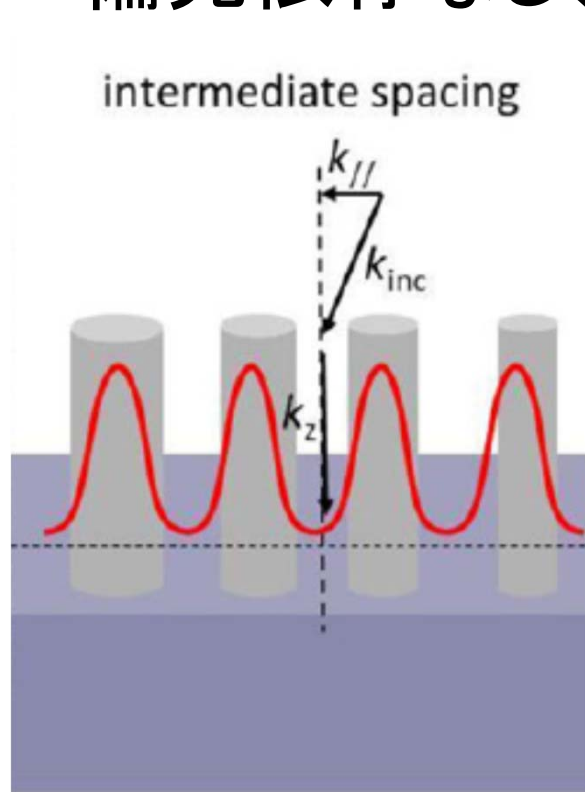
メタサーフェス・メタレンズでは個々のメタアトムの寸法・形状によって位相変化を与える

本日の内容

1. メタサーフェス・メタレンズの概要
2. 誘電体導波路とCOMSOLによる電磁場解析
3. 可変焦点メタレンズ
4. まとめ

メタアトム：Si誘電体導波路

- 誘電体の円柱状導波路の伝搬位相遅延を利用
- 柱の直径に応じて透過光の位相が変化
- 偏光依存なし、 2π の位相可変範囲



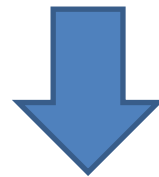
a-Si 円柱
高さ940 nm
 $\lambda=1550$ nm
周期 800 nm



Faraon et al Nat. Commun. 2015

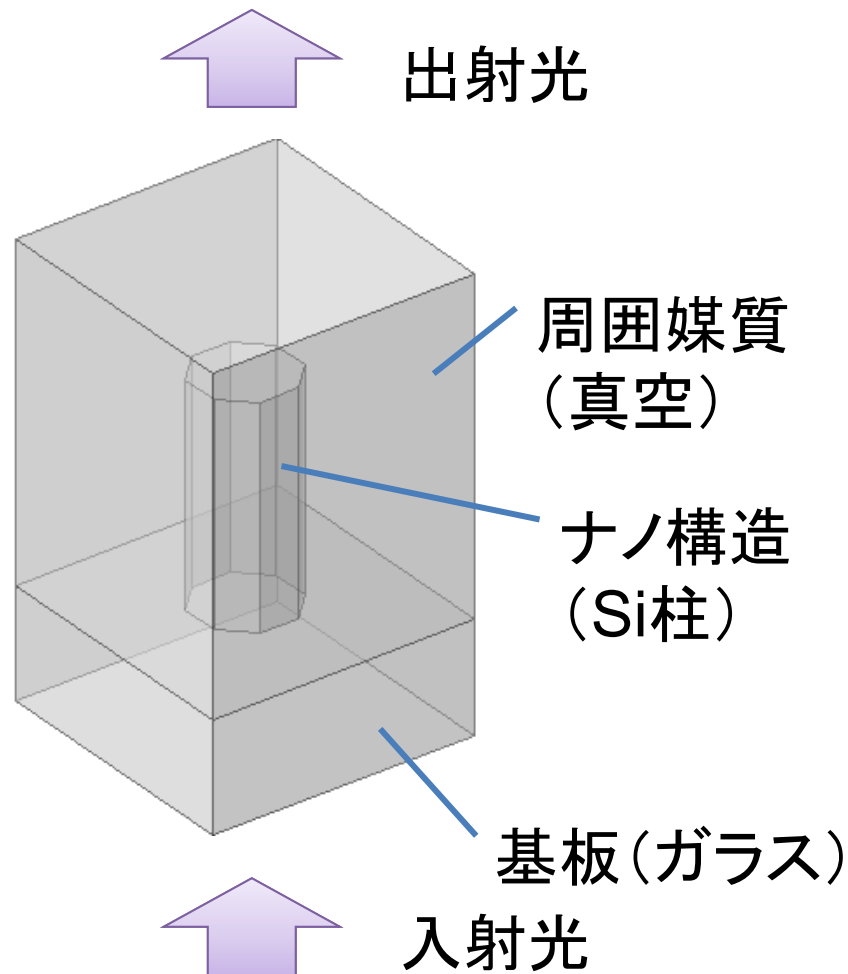
メタアトム設計のための電磁場解析

- あるナノ構造の光学応答を知りたい
- 設計波長における光透過率と位相遅延を求めたい: 高い透過率と $0\sim 2\pi$ の位相遅延の双方が重要
- 3次元計算でやりたい
- 調和振動(単色光)の定常計算でよい
 - FDTD法 (Finite Difference Time Domain: FDTD法: 時間領域)
 - RCWA法: 周期構造のみ
 - FEM (COMSOL等): 定常状態の計算なら低コスト



- COMSOLの「波動光学」モジュールの「電磁波(周波数領域)(ewfd)」フィジックスを利用

やること



- 空間中に、計算したい構造を定義する
- それぞれの領域に物質定数 (比誘電率 $\epsilon_r(\omega)$, 比透磁率 $\mu_r(\omega)$,)を設定する
- 入射光電場 E を定義する (単色調和振動を仮定)
$$E(\mathbf{r}, t) = E_0(\mathbf{r}) \exp i\omega t$$
- 空間にメッシュを切る
- 電場の波動方程式
$$\nabla^2 E_0 - \mu_r \epsilon_r k_0^2 E_0 = 0$$
を解いて電場の空間分布 $E_0(\mathbf{r})$ を求める
- 透過率と位相遅延を算出

COMSOLのMaterial Library Si

結晶Si

COMSOLのMaterial Library -> 光学 -> Inorganic Material

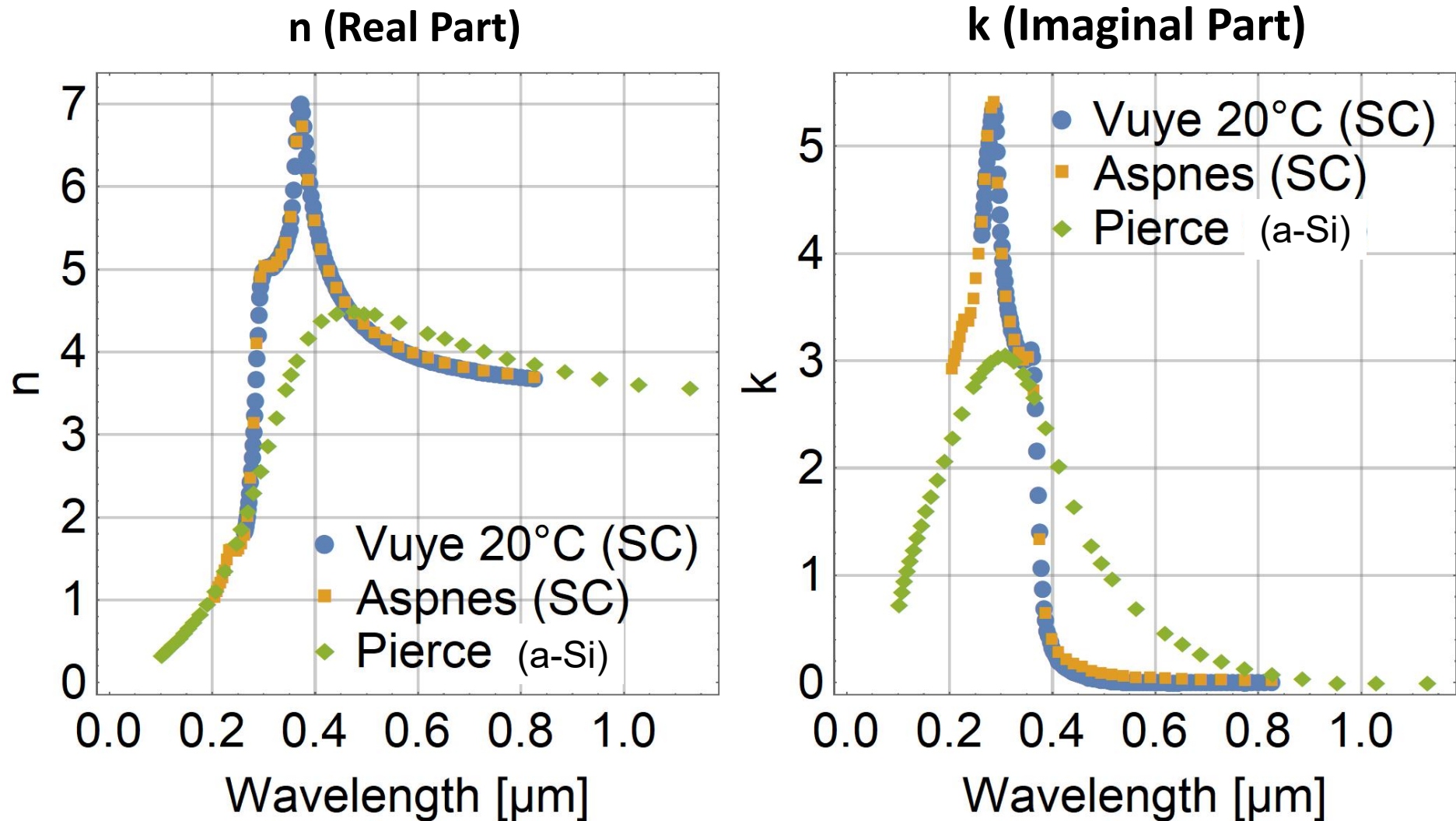
材料名	refractiveindex.info の材料名	出典
Si (Apsnes)	Aspnes and Studna 1983: n,k 0.21-0.83 μm	Phys. Rev. B 27, 985-1009 (1983)
Si (Edwards)	Edwards and Ochoa 1980: n 2.5-25 μm	Appl. Opt., 19, 4130-4131 (1980)
Si (Li)	Li 1980: n 1.2-14 μm ; 293 K (Temp.)	JPC Ref. Data 9, 561-658 (1993)
Si (Salzberg)	Salzberg and Villa 1957: n 1.36-11 μm	JOSA, 47, 244-246 (1957) Appl. Opt. 23, 4477-4485 (1984)
Si (Vuye)	Vuye et al. 1993: n,k 0.26-0.83 μm (Temp.) SC [111] wafer	Thin Solid Films 233, 166-170 (1993)

アモルファスSi

材料名	refractiveindex.info の材料名	出典
Si (Pierce)	Pierce and Spicer 1972: α -Si; n,k 0.0103-2.07 μm	Phys. Rev. B 5, 3017-3029 (1972) (Palik. Ed., Handbook of optical constants of solids 1985)

標準材料ライブラリ->Elements->Si やMEMSライブラリ->Semiconductors->Siは屈折率が入っていなかったり、あっても定数だったりするので注意を要する

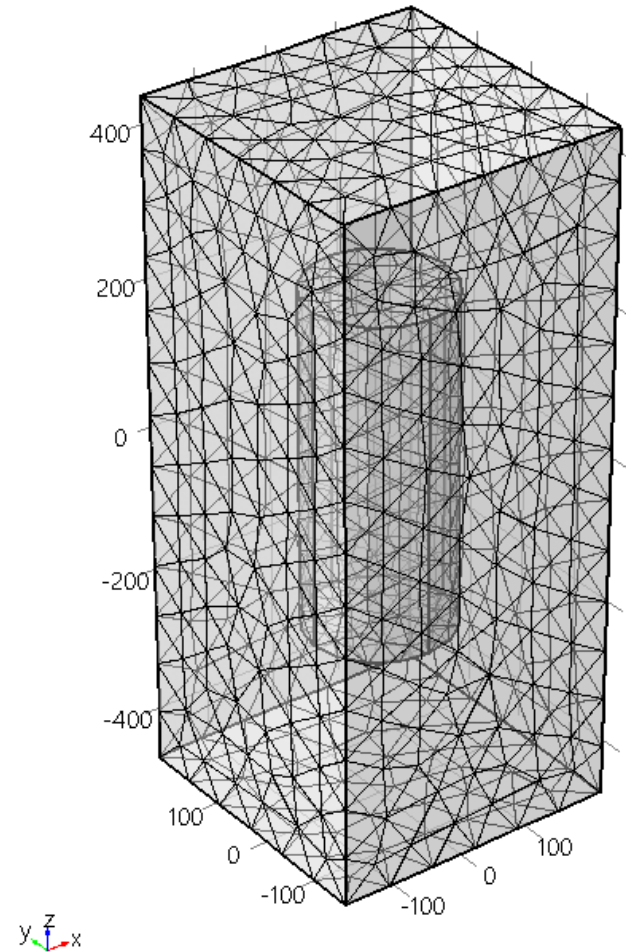
Refractive Index of Si at the visible region



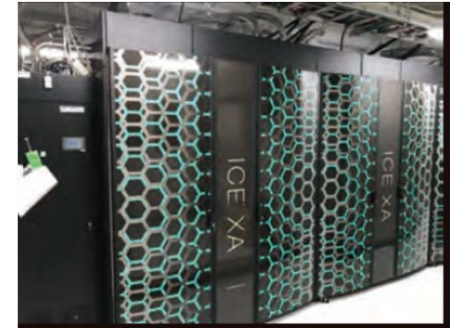
Si膜は800 nm未満で吸収が大きい

当初の計算条件

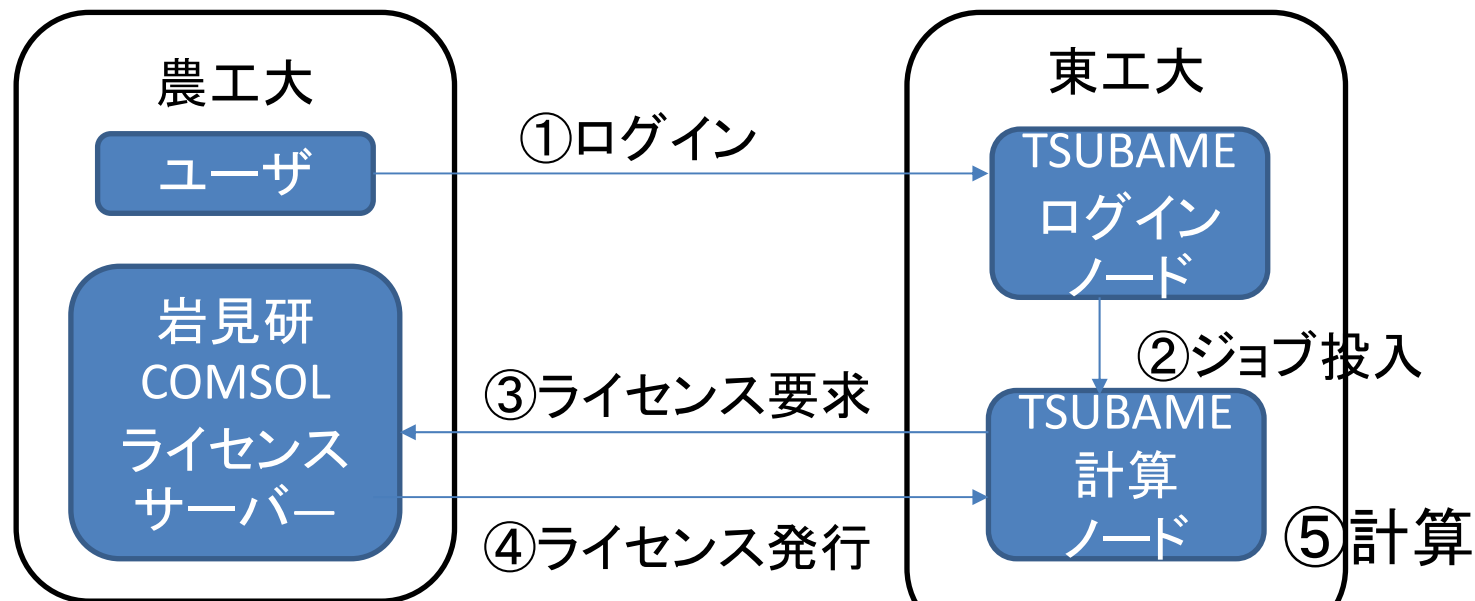
- 底面に入射ポートを設定
(周期、 x 方向偏光)
- 上面に出射ポートを設定
- $\pm x$ 側面、 $\pm y$ 側面に
Floquet周期境界条件を設定
- フィジックス制御メッシュを
用いてメッシュを自動生成
要素サイズは下記の通り
 - ✓ ノーマル (Normal)
 - ✓ 細かい (Fine)
 - ✓ より細かい (Finer)
 - ✓ さらに細かい (Extra Fine)
 - ✓ きわめて細かい (Extremely Fine)
- 東工大 TSUBAME3.0を利用



TSUBAME 3.0



- 東工大に設置された共用スーパーコンピュータ(理論性能47.2 PFlops)
- 一口10万円で約1000時間・ノード利用可能(1ノード当たりCPU28Core, Memory 240GB, 4GPU)
- 農工大で所有するネットワークライセンス(FNL)を提供することで、COMSOLの利用が可能に
- Rescale等、民間のHPCサービスでも同様の利用形態が可能



計算結果 (xz断面でx方向電場 E_x)

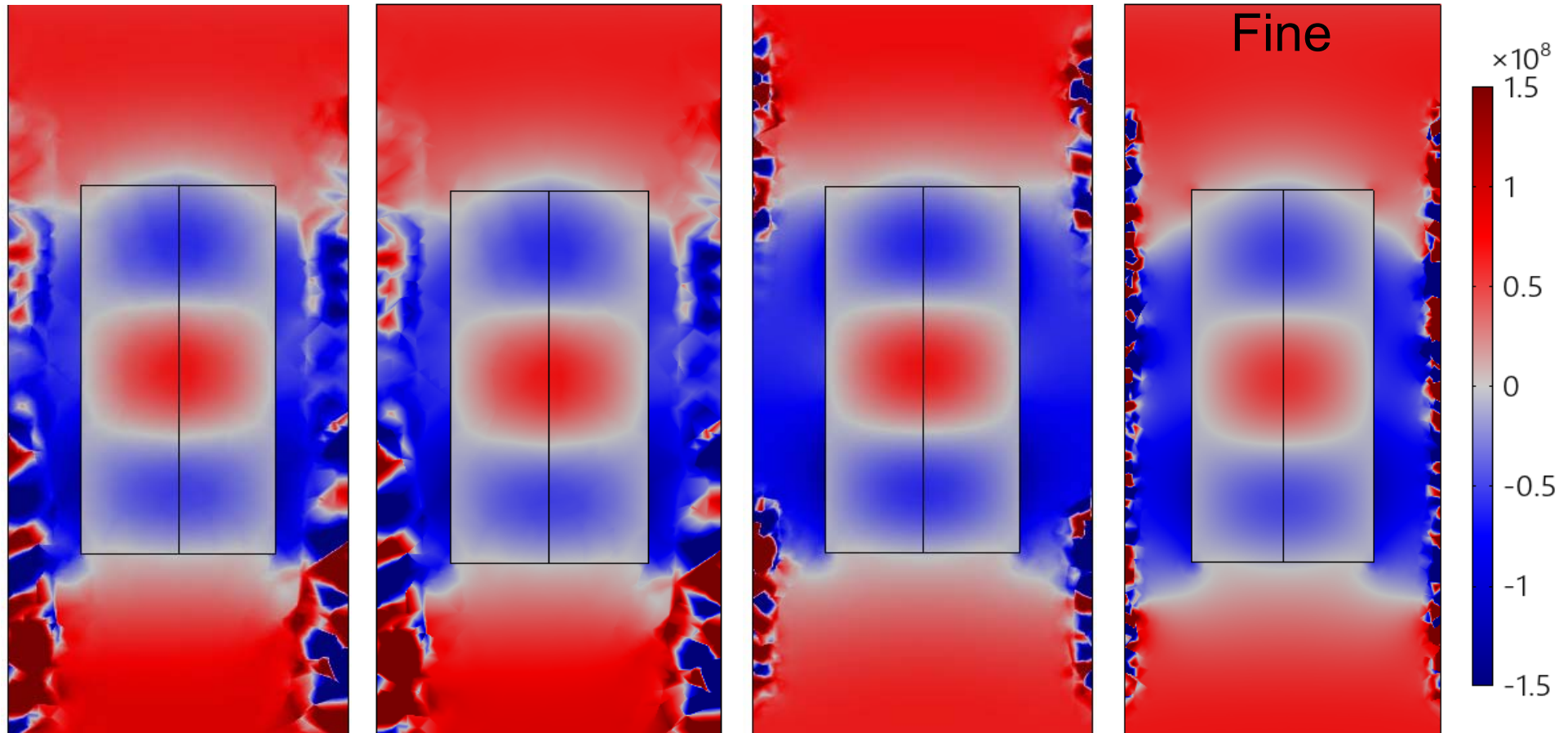
$d = 220 \text{ nm}$, $h = 450 \text{ nm}$, $\lambda = 800 \text{ nm}$

Fine

Finer

Extra fine

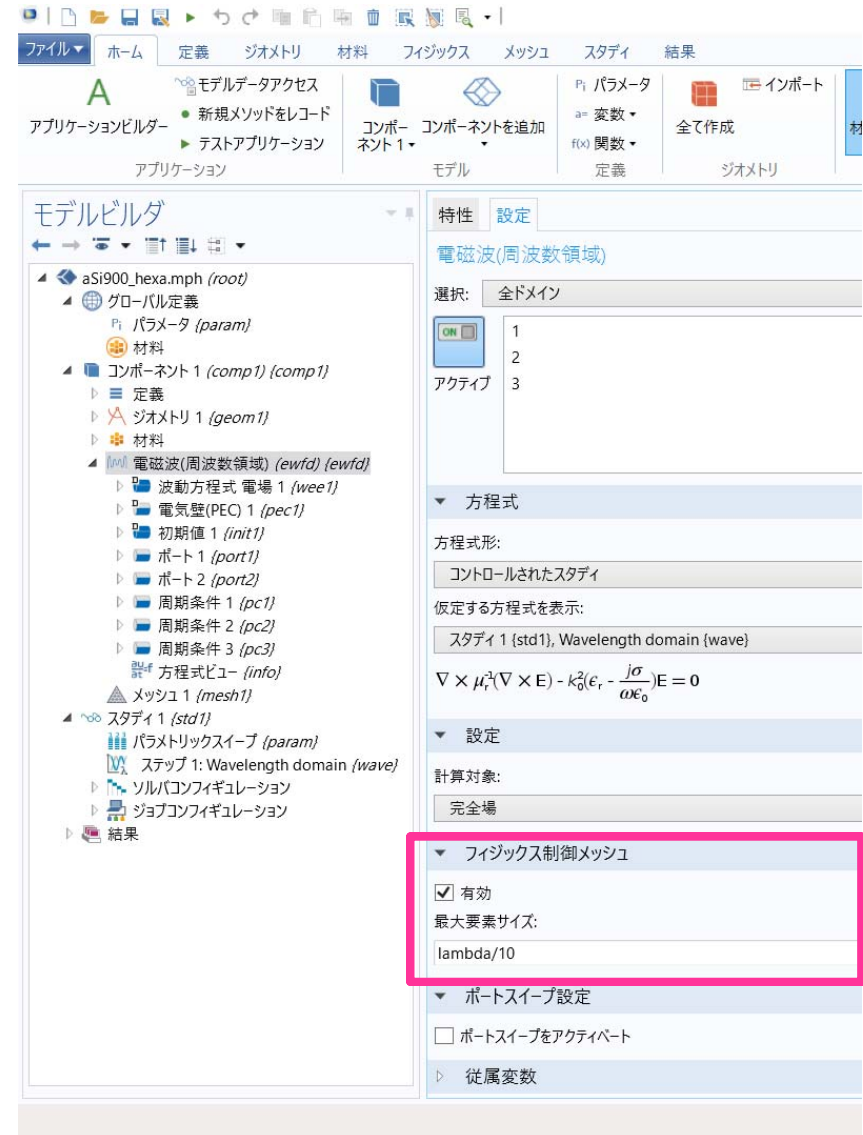
Extremely
Fine



- $\pm x$, $\pm y$ 境界とも周期境界条件(連続)の場合、境界付近で電場が異常に大きい領域(アーティファクト)がみられる 自然界には存在しないはず

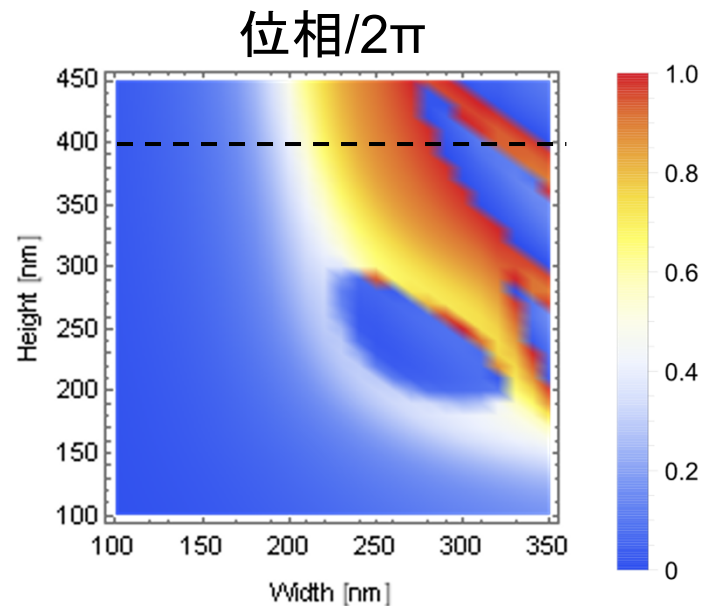
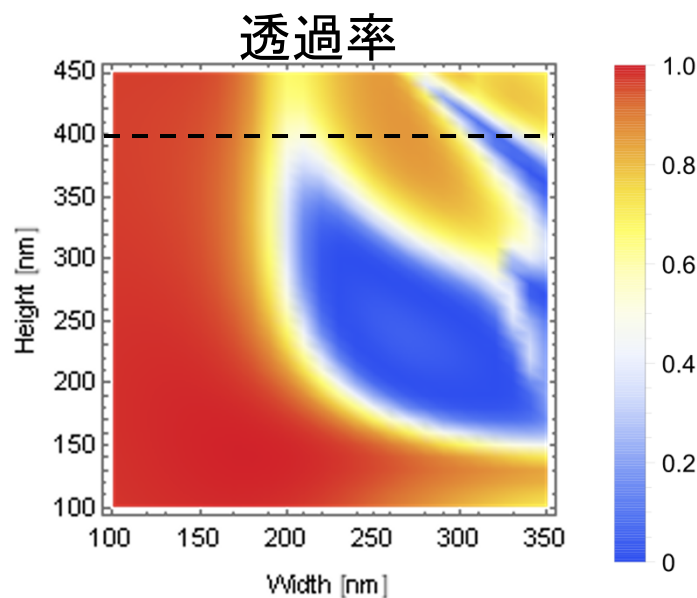
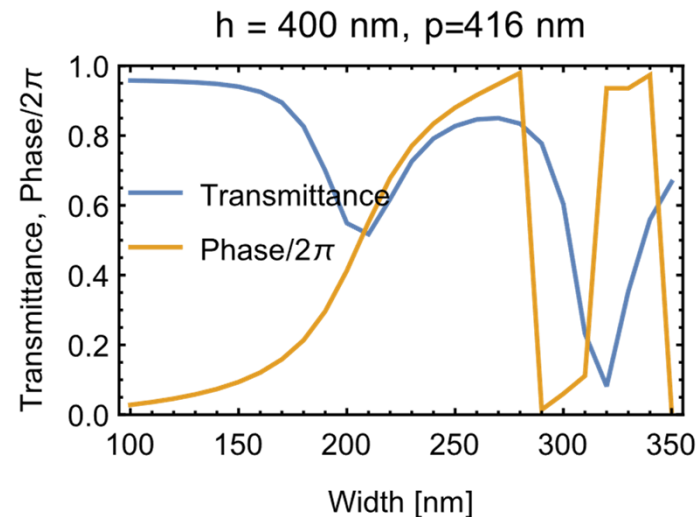
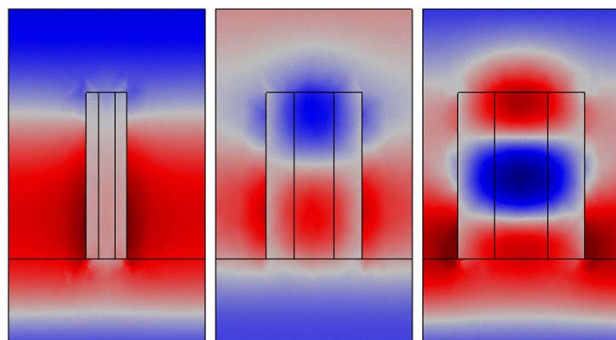
原因

- “電磁波(周波数領域)(ewfd)”フィジックスの設定で、フィジックス制御メッシュを有効にしていなかった
→周期境界条件に対応したメッシュが生成されていなかった。
- Ver. 5.1



計算結果: $\lambda 900$ nm, aSi, 八角柱, 六方格子, p416nm

- 境界部分の異常電場はなくなった
- Normalメッシュでも、結果は安定



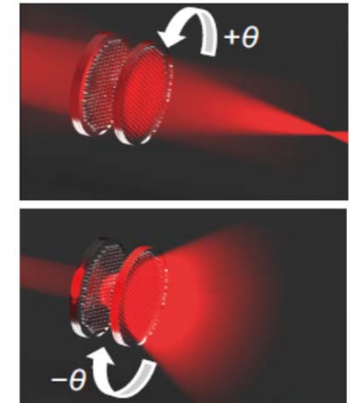
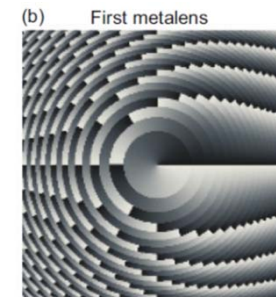
透過率が高く、0-2 π の位相をカバーできる設計解が得られた

本日の内容

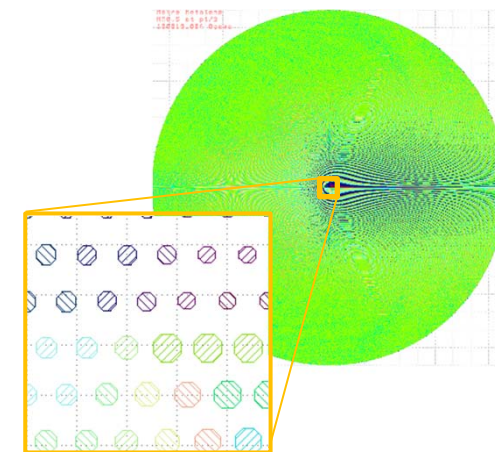
1. メタサーフェス・メタレンズの概要
2. 誘電体導波路とCOMSOLによる電磁場解析
3. 可変焦点メタレンズ
4. まとめ

回転型可変焦点メタレンズの設計

- モアレ・メタレンズ
 - ✓ 2枚のレンズに相対回転を与えると焦点距離が変化
 - ✓ 凹レンズにも凸レンズにもなる
 - ✓ 所望の位相分布を満たすようにメタ原子を配列



- レンズ使用
 - 柱の幅: 120~280 nm ($T > 0.6$)
 - レンズ直径: 2mm
 - 焦点距離可変範囲:
 $-\infty \sim 1.73$ mm, 1.73 mm $\sim +\infty$
with $\pm 90^\circ$ rotation



CAD Data of lens #1

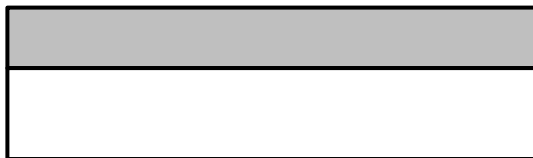
広い焦点距離調整が期待

製作プロセス

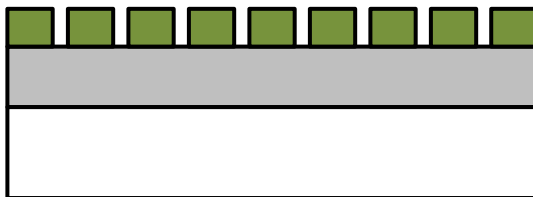
(a) Silica glass ($t = 525 \mu\text{m}$)



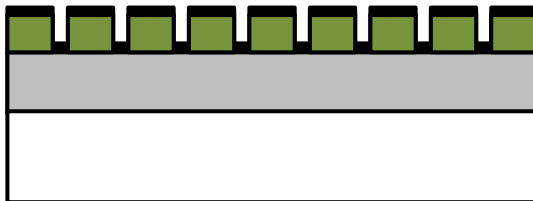
(b) a-Si sputtering (400 nm)



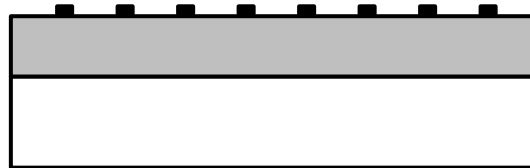
(c) EB lithography (Positive)



(d) Al evaporation (50 nm)



(e) Liftoff



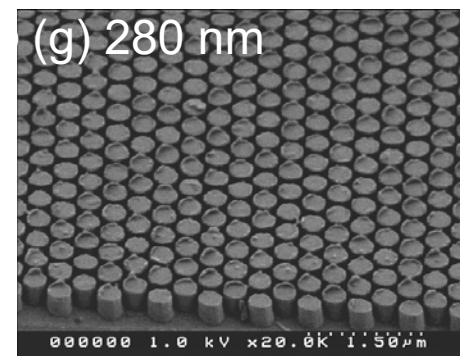
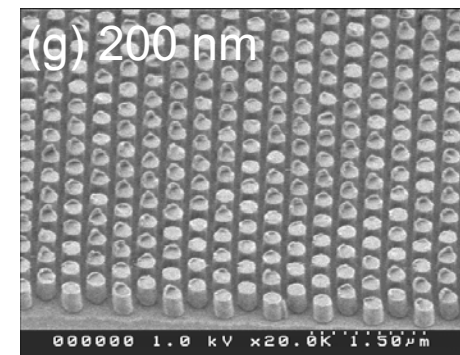
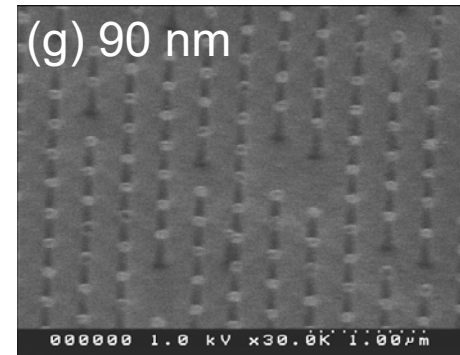
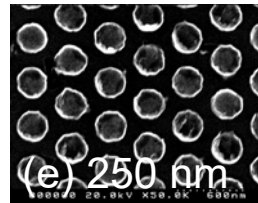
(f) Si ICP RIE



(g) Al mask removal

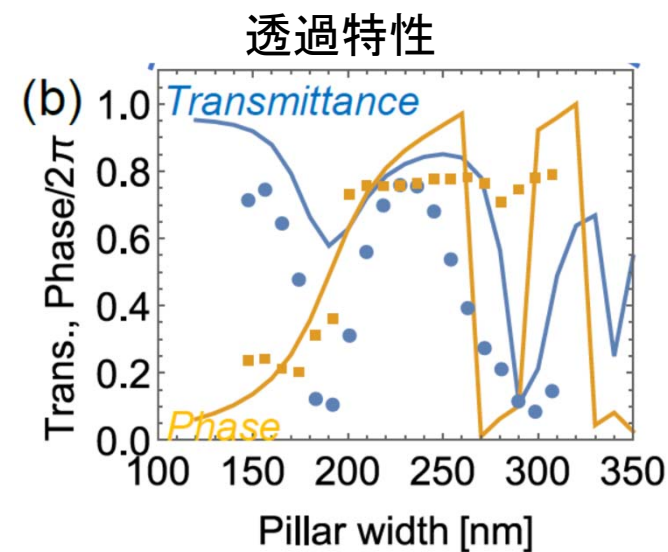
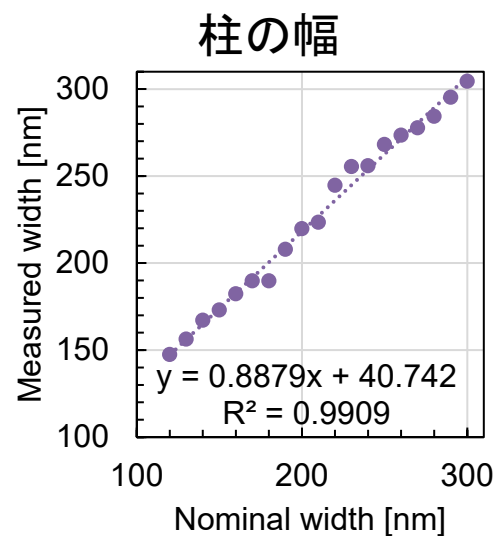
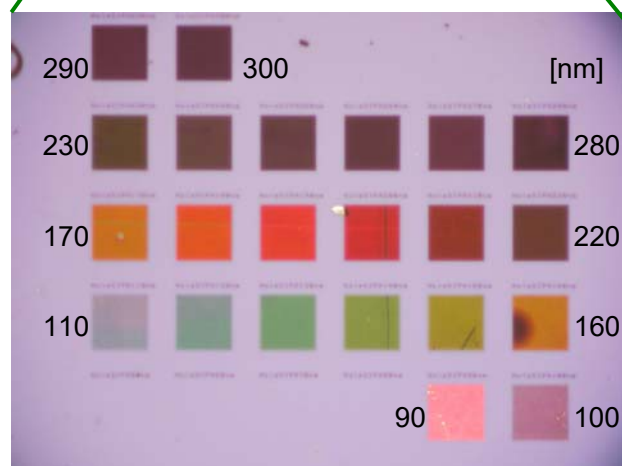
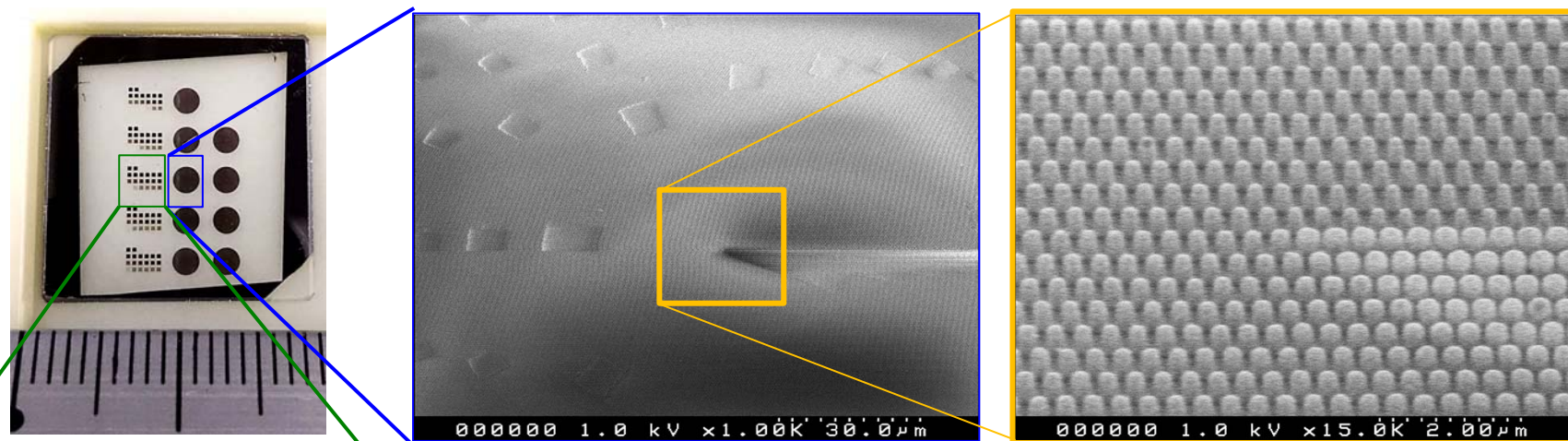


- Glass substrate
- Sputtered Si
- EB resist
- Al



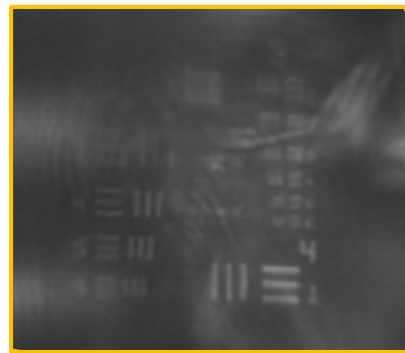
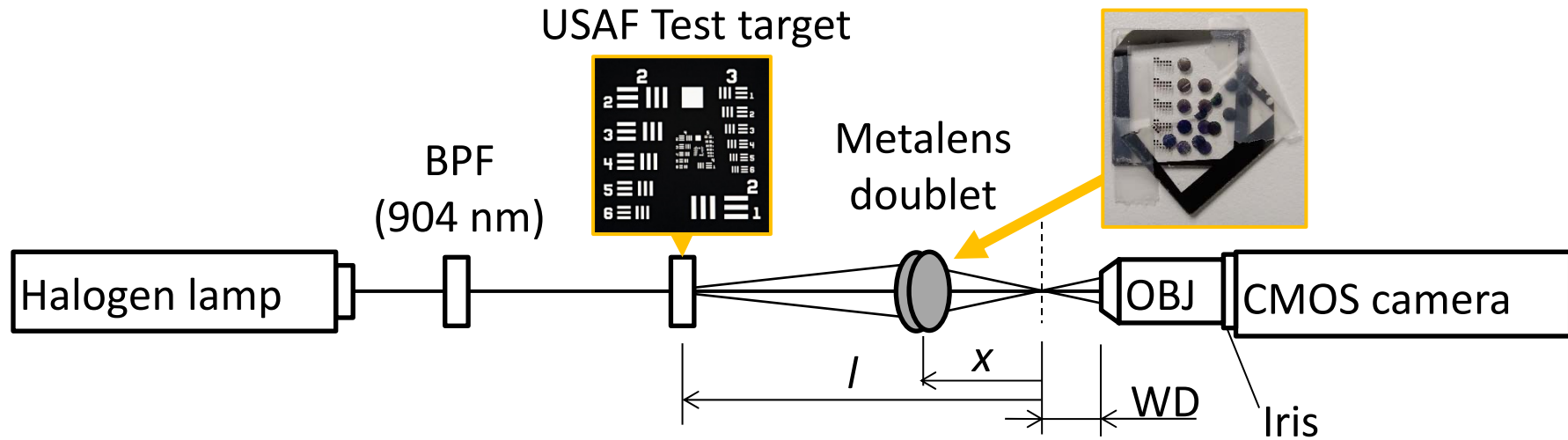
幅90 nm から 280 nm までの柱を製作

製作結果と透過特性

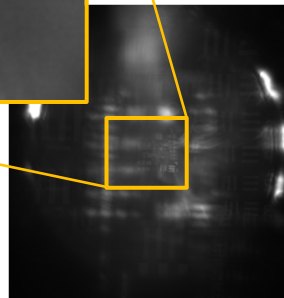


透過率と位相差の傾向は比較的一致した。

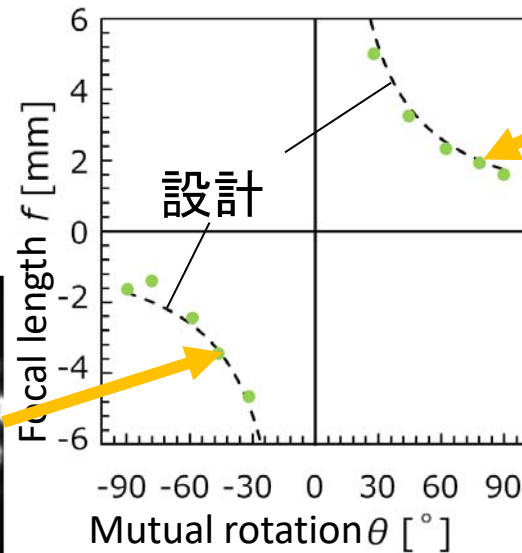
焦点距離測定結果



正立虚像



倒立実像



回転型可変焦点レンズの製作に成功

本日の内容

1. メタサーフェス・メタレンズの概要
2. 誘電体導波路とCOMSOLによる電磁場解析
3. 可変焦点メタレンズ
4. まとめ

まとめ

- マルチフィジックス解析ソフトCOMSOLを用いてSi柱メタ原子に関する電磁場解析を行った。
 - 東工大のスーパーコンピュータTSUBAME3.0の利用により、大規模な計算が可能となった。
 - ガラス基板上に形成されたSi 8角柱を用いて、波長900 nmの近赤外光において透過率60%以上、位相差 $0\sim 2\pi$ を達成する構造が得られることが分かった。
 - 実際にメタレンズを製作し、可変焦点を確認した。
-
- ✓ 斜め入射、他の波長に対する応答性
 - ✓ ナノ構造の光学応答を、どのようにマクロな光学素子と対応づけるか？たとえばCOMSOLの光線光学モジュールに持っていけるか？

ご清聴ありがとうございました