

積分方程式法による金属細線の近接場光解析

—細線サイズに対する近似精度の検討—

Analysis of Near Field Light of Metallic Nano Wires by Using an Integral Equation Method

-Computational Accuracy for the Approximation of the Wire Radius-

○奥田太郎¹, 竹内嵩², 岸本誠也², 大貫進一郎³

*Taro Okuda¹, Takashi Takeuchi², Seiya Kishimoto², Shinichiro Ohnuki³

Abstract: Recently, near field light has attracted attention in developing ultra-high density recording and microfabrication technologies. In this paper, near field light for metallic nano wires is analyzed by using a boundary integral equation method. We discuss computational accuracy of the boundary integral equation method for changing the size of the objects.

1. まえがき

近年, 光記録や光微細加工技術などの分野で近接場光の利用が注目されている. この近接場光に対する解析法として, 境界型の積分方程式法が報告されている^[1]. 本文では, 積分方程式法に準静的な近似を用いた場合の細線サイズに対する計算精度の検討を行い, その適応条件を明らかにする.

2. 解析法

Figure 1 に示す任意断面を持つ, z 軸方向に一様な金属細線を仮定する. 細線表面での境界条件より, 以下の式が得られる^[1].

$$\mathbf{n} \cdot \varepsilon(\omega)(\mathbf{E}_0^+ + \mathbf{E}^i) = \mathbf{n} \cdot \varepsilon_0(\mathbf{E}_0^- + \mathbf{E}^i), \quad (1)$$

但し, \mathbf{E}_0^+ と \mathbf{E}_0^- はそれぞれ境界面における内部と外部の電界, \mathbf{n} は細線表面に対する単位法線ベクトル, \mathbf{E}^i は入射電界である. また, 金属細線の誘電率 $\varepsilon(\omega)$ は Lorentz-Drude モデルを用い, 以下の式で与えられる^[2].

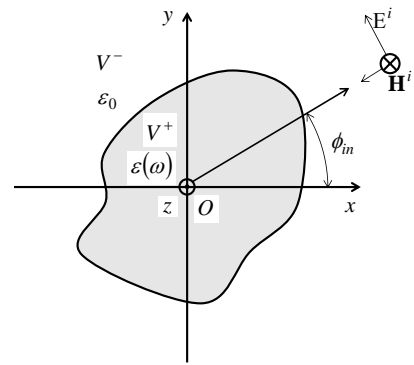
$$\varepsilon(\omega) = \left(1 - \frac{A_0 \omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma_0)} + \sum_{l=1}^K \frac{A_l \omega_p^2}{(\omega_l^2 - \omega^2) - j\omega\gamma_l} \right) \varepsilon_0, \quad (2)$$

但し, ω_p : プラズマ周波数, ω_l : 媒質固有の共振周波数, γ_0, γ_l : 衝突周波数, A_0, A_l : 媒質定数とする.

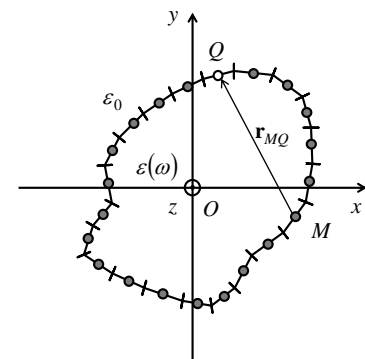
ここで, 細線断面が入射波の波長より十分小さい場合, 断面境界上における任意の点 Q では以下の式が成立する.

$$\mathbf{n}_Q \cdot \mathbf{E}_0^\pm(Q) = \mp \frac{\sigma(Q)}{2\varepsilon_0} + \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \oint_S \sigma(M) \frac{\mathbf{r}_{MQ} \cdot \mathbf{n}_Q}{r_{MQ}^2} dS_M, \quad (3)$$

但し, \mathbf{r}_{MQ} は点 M から点 Q までの距離ベクトル, σ は表面電荷密度である.



(a)Metallic nano wire.



(b)Discretization on the surface.

Figure 1. Geometry and coordinate systems.

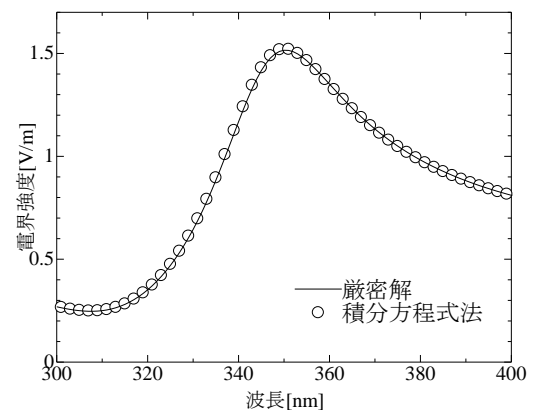


Figure 2. Electric field intensity for varying the incident wavelength.

1 : 日大理工・学部 電気 2 : 日大理工・院・電気 3 : 日大理工・教員 電気

式(1), (3)を考慮すると以下の積分方程式が導かれる。

$$\sigma(Q) - \frac{\lambda}{\pi} \oint_S \sigma(M) \frac{\mathbf{r}_{MQ} \cdot \mathbf{n}_Q}{r_{MQ}^2} dS_M = 2\varepsilon_0 \lambda \mathbf{n}_Q \cdot \mathbf{E}^i, \quad (4)$$

ここで, λ は次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_0}{\varepsilon(\omega) + \varepsilon_0}. \quad (5)$$

式(4)を離散化することで得られた連立 1 次方程式より, 表面電荷密度 σ を求める。

3. 解析結果

媒質が銀の円柱に, $-x$ 方向に進む H 波が入射した場合の解析を行う。ここで, 円柱の半径を変化させた場合について厳密解と積分方程式法で得られた数値結果を比較し, 計算精度について検討する。

Figure 2 は, 円柱の半径を 3nm とした時の入射波長に対する電界強度を示す。図より厳密解と数値結果が図上で一致している事が確認できる。また, 入射波長が 350nm のとき共振現象が確認でき, 最も高い電界強度が得られる。

Figure 3 は, 円柱の半径に対する共振波長の推移を示す。円柱の半径が小さいほど厳密解と数値結果が一致していることが分かる。

Figure 4 は, 円柱の半径に対する共振時の電界強度の推移を示す。円柱の半径が小さいほど積分方程式法と厳密解が一致していることが分かる。このときの厳密解との相対誤差を Table 1 に示す。半径 20nm 以上では 10^{-1} オーダー, 半径 5nm から 15nm では 10^{-2} オーダー, 半径 4nm 以下では 10^{-3} オーダーの相対誤差となる。

4. まとめ

積分方程式法を用いて金属細線における近接場光解析を行い, 細線のサイズに対する近似精度の検討を行った。細線の半径を 4nm 以下とすれば厳密解と 3 桁程度一致することを確認した。

5. 謝辞

本研究の一部は, 科研費基盤研究(C)No.22560349, カシオ科学振興財団研究助成, 及び, 日本大学学術研究戦略プロジェクトの援助を受けて行われた。

6. 参考文献

- [1] I. D. Mayergoyz, D. R. Fredkin, and Z. Zhang : "Electrostatic (plasmon) resonances in nanoparticles", Phys. Rev. Vol.B 72(15), pp.155412-1-55412-15 (2005).
- [2] A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, and M. L. Majewski : "Optical Properties of Metallic Films for Vertical-Cavity Optoelectronic Devices," Appl. Opt. Vol.37, pp.5271-5283 (1998).
- [3] 奥田太郎, 大貫進一郎 : 「積分方程式法による微小金属柱の近接場光の解析」, 電気学会第 2 回学生研究発表会, 3-10, 2011 年 9 月 6 日, 早稲田大学。

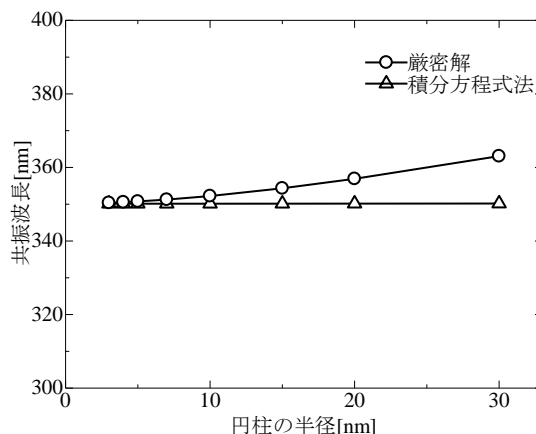


Figure 3. Resonance wavelength for varying the radius of the nano wire.

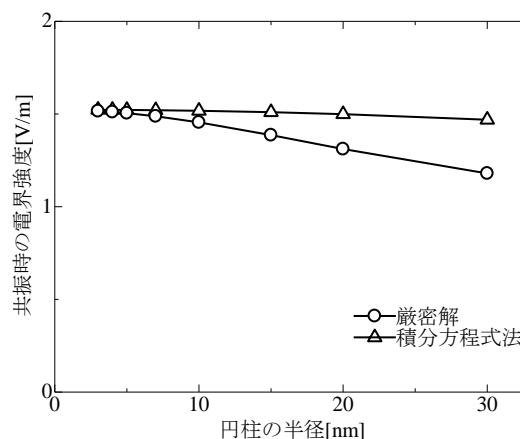


Figure 4. Amplitude of the electric field at the resonance wavelength.

Table 1. Relative error of the boundary integral equation method.

円柱の半径 [nm]	共振時の電界強度[V/m]		相対誤差
	積分方程式法	厳密解	
3	1.5231	1.5160	4.6593.E-03
4	1.5226	1.5110	7.7040.E-03
5	1.5221	1.5047	1.1593.E-02
7	1.5206	1.4881	2.1850.E-02
10	1.5175	1.4550	4.2978.E-02
15	1.5099	1.3863	8.9138.E-02
20	1.4993	1.3111	1.4350.E-01
30	1.4693	1.1796	2.4553.E-01