

近接場光学における非共鳴効果の理論 I

Theory of Non-resonant Effect in Near-field Optics I

山梨大院医学工学総合 坂野 斎

Univ. of Yamanashi I. Banno

E-mail: banno@yamanashi.ac.jp

近接場光学 (NFO) 系の光源であるナノ構造は、近傍の分子やナノ物質に縦電場と横電場の両方を入射する。通常の光学系にない縦電場の入射は NFO 特有の現象の原因と考えられる。縦電場と横電場は質的に異なり、それに対する分子やナノ物質の応答も異なる。実際、縦電場は電荷密度を源泉とし Coulomb の法則に支配され光源近くに留まるが、横電場は横電流密度を源泉とし、Ampere-Maxwell の法則、Faraday の法則に支配され磁場を伴い遠方に伝搬する。さらに、非相対論的ハミルトニアンの中で縦電場はスカラーポテンシャル (SP) として、横電場はベクトルポテンシャル (VP) の横成分として考慮されるが、SP, VP の依存性の違いは、それらに対する応答の違いの原因となる。この違いは共鳴条件下では現れず、非共鳴条件下で現れる [1,2]。本公演では、非共鳴条件下での SP と VP に対する線型応答の違い、2 次非線型応答の違いを議論する。

NFO 系でも誘電率を比例定数として全電場と分極を関係付ける構成方程式がよく使われてきたように、縦電場と横電場は区別されず、それらへの応答の違いは注目されてこなかった。その状況に至った原因は次のように考えている：多電子系の通常の扱いでは、縦電場は荷電粒子間の二体クーロン相互作用の内部エネルギーに転化され、横電場のみを励起の原因とみなす。この方法は横電場のみが入射される通常の光学系や放射場の正準量子化に適しているが、縦電場も横電場も励起の対等な原因とみなせる NFO 系に適していない。私たちが開発した NFO 多電子系に相応しい方法は、ナノ構造が生む外来の縦電場の近接場効果と電子の電荷が生む内在する縦電場の多体効果を切り分け、前者を横電場と対等な励起の原因とみなし、ゲージ不変性と電荷保存を保証するものである [3]。例えば、線型応答関数を介する、SP・VP と誘導電荷密度・誘導電流密度、 $\Delta\hat{\rho}(\mathbf{r}, t)$, $\Delta\hat{j}_i(\mathbf{r}, t)$ (Heisenberg 演算子) の因果関係は次となる：

$$\begin{aligned}\Delta\hat{\rho}(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{i\hbar} \int_{-\infty}^t dt_1 \int d^3r_1 \left\{ [\hat{\rho}^{(0)}(\mathbf{r}, t), \hat{\rho}^{(0)}(\mathbf{r}_1, t_1)] \Delta\phi(\mathbf{r}_1, t_1) - [\hat{\rho}^{(0)}(\mathbf{r}, t), \hat{j}_i^{(0)}(\mathbf{r}_1, t_1)] \Delta A_{i1}(\mathbf{r}_1, t_1) \right\} \\ &= \Delta\hat{\rho}_{\phi}(\mathbf{r}, t) + \Delta\hat{\rho}_{\mathbf{A}}(\mathbf{r}, t),\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\Delta\hat{j}_i(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{i\hbar} \int_{-\infty}^t dt_1 \int d^3r_1 \left\{ [\hat{j}_i^{(0)}(\mathbf{r}, t), \hat{\rho}^{(0)}(\mathbf{r}_1, t_1)] \Delta\phi(\mathbf{r}_1, t_1) - [\hat{j}_i^{(0)}(\mathbf{r}, t), \hat{j}_i^{(0)}(\mathbf{r}_1, t_1)] \Delta A_{i1}(\mathbf{r}_1, t_1) \right\} - \frac{q}{m} \hat{\rho}^{(0)}(\mathbf{r}, t) \Delta A_{i1}(\mathbf{r}, t) \\ &= \Delta\hat{j}_{\phi i}(\mathbf{r}, t) + \Delta\hat{j}_{\mathbf{A} \text{ nli}}(\mathbf{r}, t) + \Delta\hat{j}_{\mathbf{A} \text{ li}}(\mathbf{r}, t),\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、演算子 $\hat{\rho}^{(0)}$, $\hat{j}_i^{(0)}$ はそれぞれ非摂動系の電荷密度、電流密度の i 成分、 $\Delta\hat{\rho}_{\phi}$, $\Delta\hat{\rho}_{\mathbf{A}}$ ($\Delta\hat{j}_{\phi i}$, $\Delta\hat{j}_{\mathbf{A} \text{ nli}}$) は、それぞれ SP, VP と交換子の結合で非局所的に誘導された電荷密度 (電流密度の i 成分)、 $\Delta\hat{j}_{\mathbf{A} \text{ li}}$ は、交換子と関らず VP によって局所的に誘導された電流密度の i 成分であり、この項が非共鳴条件下で強調される。非線型応答においても、交換子と関わらない非共鳴条件下で強調される因子があり、この因子と SP・VP との結合で多様な項が現れる。[1] で開発した NFO 系の応答理論によって共鳴条件下と非共鳴条件下の光近接場でどのような線型、非線型効果が強調されるか識別する。

[1] I. Banno, "Response Theory in Near-field Optics: Two Distinct Dipole Transitions", 14th International Conference on Near-field Optics, Nanophotonics, and Related Technics, (浜松市, 2016 年 9 月 We-10A-5).

[2] 坂野 斎, "近接場光学における 2 種の双極子遷移", Optics and Photonics Japan 2016 (2016 年秋 IPC3).

[3] 坂野 斎, "ナノ構造と非放射場の理論," 応用物理学会講演会 (2013 年秋 17p-D2-2); "非放射場と放射場を対等に扱う単一感受率による光学の理論 I, II, III, IV, V", 応用物理学会講演会 (2013 年秋 18p-C13-1, 2014 年春 17p-F6-5, 秋 18p-C1-1, 2015 年春 12a-A12-1, 2016 年春 19a-S622-13).