

すべての光学顕微鏡を扱う統一結像理論 Unified Image Formation Theory to Deal with All Optical Microscopy

株式会社ニコン ○福武 直樹
Nikon corporation, ○Naoki Fukutake
E-mail: Naoki.Fukutake@nikon.com

顕微鏡の光学分解能は、「光の回折に起因した限界がある」とよく表現される。Abbe により、この回折限界という特性が示され、明視野顕微鏡の結像理論の基礎となった。Abbe の結像理論が定式化された当時は、照明された試料からの透過光を用いて像を形成する技術しかなかったが、現在は蛍光を含む様々な光学現象が顕微鏡に使われている。蛍光には回折という概念が存在しないため、当初の顕微鏡には機能していた回折限界の原理は、蛍光顕微鏡には適用できない。実際、蛍光共焦点顕微鏡は回折限界を超えた光学分解能を示す。にもかかわらず、回折限界がすべての顕微鏡において未だ引き合いに出されることは驚きに値する。

近年、様々な光学現象を用いた顕微鏡が開発され、それらを統一的に扱える結像理論を構築する必要に迫られている。我々は、量子光学的記法を用いて統一結像理論を定式化し、そこから光学現象ごとに解像限界が定義されることを導出した。この理論は、Abbe の理論を最低次の光学現象の場合として含み、さらにすべての高次の光学現象(蛍光を含む)を一つの統一式によって表現している。これは、すべての顕微鏡を俯瞰して、同じ土俵で理解するための理論的枠組みを提供するものである。これにより、これまで個別に扱われていた顕微鏡が、一つの原理によって統合され、さらに、光学現象を表現する Feynman ダイアグラムと解像限界の間に密接な関係があるという興味深い基礎原理が導かれた。この強力なツールを用いて、我々は次の定理を証明した：物体に先験情報がない限り、光学現象の種類が解像限界を決定する。

以下、本研究内容を概説する。一般に、光学顕微鏡は3つの要素で構成される。

- 励起光学系（波長と NA で瞳関数を定義）
- 試料中で起こる光学現象
- 信号集光系（波長と NA で瞳関数を定義）

励起光学系には、インコヒーレント面光源を用いたケーラー照明光学系やレーザー走査型光学系などがある。光学現象には、透過・吸収や蛍光だけでなく非線形現象も含まれる。信号集光系には、2次元検出器を用いた結像光学系や、レーザースポットごとに検出器で信号光検出する光学系などがある。

我々は、Abbe の結像理論を拡張し、すべての光学現象に適用できる統一理論にするため、①物体構造を線形・非線形感受率 $\chi^{(i)}(x, y, z)$ とし、②回折の概念を疑似位相整合に置き換え、③インコヒーレント過程も扱うために理論に真空場を組み込んだ。さらに、

分解能の指標として 3-D aperture を、「物体を構成する複素グレーティングの結像への寄与率」として定義した。これは抽象的概念であるが、顕微鏡システムの3次元開口を透過した物体周波数だけで像が再構成されるという物理的意味になっている。OTF が定義できる光学系においては、3-D aperture から2種類の OTF ($\chi^{(i)}(x, y, z)$ の実部と虚部に対する伝達関数) を簡単に求めることができる。

すべての光学現象は、double-sided Feynman ダイアグラムで描くことができる。これは、試料内の分子群に対する密度行列の時間発展を下から上に追跡しており、矢印は光電場を表現している (Fig.1)。

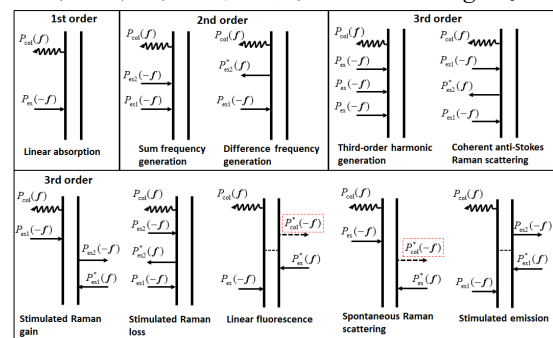


Fig. 1 Double-sided Feynman diagrams of some optical processes

以下、結論だけを述べる。ダイアグラム内には複数の矢印があり、各矢印には Table 1 に示したルールで3次元瞳関数が対応する。 $P_{ex}(f)$ と $P_{col}(f)$ はそれぞれ励起光学系と信号集光系の瞳関数を表している。

Table 1 Correspondence of pupil functions to arrows

	Excitation	Excitation	Vacuum	Signal
arrow	$\longrightarrow$	$\longleftarrow$	$\cdots\cdots\cdots$	$\sim$
Pupil function	$P_{ex}(-f)$	$P_{ex}^*(f)$	$P_{col}^*(-f)$	$P_{col}(f)$

3-D aperture はダイアグラム内にあるすべての瞳関数のコンボリューションにより求まる。Fig. 3 に例を示す。これにより解像限界の比較が容易になる。

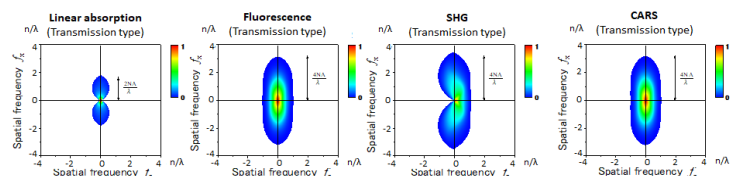


Fig. 3 3-D apertures for some kinds of microscopy. NA is 1.2

References

- [1] N. Fukutake, JOSA B **30**, 2665 (2013).
- [2] N. Fukutake, SPIE proceedings, 10500 (2018).