OCT を含む全てのレーザー顕微鏡を扱う統一結像理論
Unified Image Formation Theory of All laser Microscopy including OCT

ニコン [1]，筑波大 [2]，　○福武 直樹 [1]，安野 嘉晃 [2]
Nikon[1], Tsukuba Univ.[2],　○Naoki Fukutake[1], Yoshiaki Yasuno[2]

E-mail: Naoki.Fukutake@nikon.com

光学顕微鏡の分解能は、回折により制限を受ける。結像理論が初めて定式化された当時、この回折限界が分解能を論じる上での基礎概念となった。当初は、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、現在では蛍光を含む様々な相互作用が顕微鏡に用いられている。蛍光には回折という概念が存在しないため、回折限界の原理は、蛍光顕微鏡には適用されない。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。したがって、様々な相互作用を用いた顕微鏡の光学分解能を比較するために、統一結像理論を構築することは有益である。

我々は、すべての相互作用に適用できる統一理論にするため、まず回折の概念を疑似位相整合に置き換えた。これは回折を最低次の疑似位相整合と捉えなおしたことに相当している。さらに、相互作用を表現する double-sided Feynman diagram を理論に取り込んだ。すべての光学現象は、Feynman diagram で描くことができるが、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)。左側の矢印は正周波数の電場、右側の矢印は負周波数の電場の出入りを表している。インコヒーレント相互作用も扱うために、電場を演算子で表現することで、真空場を自然な形で取り込んでいる。

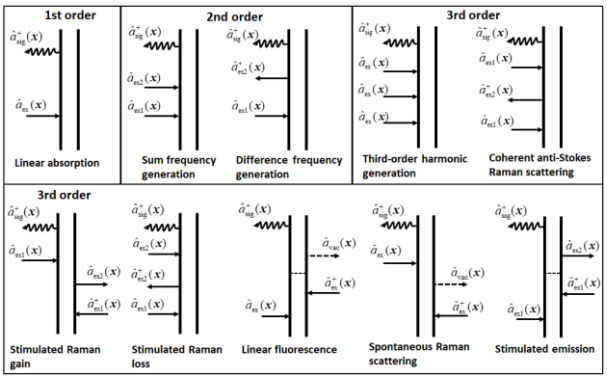

Fig. 1 Double-sided Feynman diagrams of some interactions.

我々の結像理論は、透過光・反射光・線形吸収を最低次の相互作用として含み、さらにすべての高次の相互作用(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 Feynman diagram と光学分解能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。

我々は、分解能の指標として 4-D aperture を定義した。これは、顕微鏡システムの 4 次元開口 A(f_x, f_y, f_z, ω)を透過した物体の空間周波数および光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おり、4 次元周波数に対するシステムの感度に相当している。これにより OCT を含む様々な顕微鏡の光学分解能の比較が容易になる。OCT のように光源が広いスペクトル幅をもち、かつスペクトル幅が分解能に強く影響を及ぼす装置もあるため、(f_x, f_y, f_z, ω)で記述する 4 次元理論が必須となる。Fig. 2 にいくつかの 4-D aperture の例を示す。ただし、光周波数に関しては単色としている。本講演では、光周波数も含めた 4-D aperture を示す予定である。

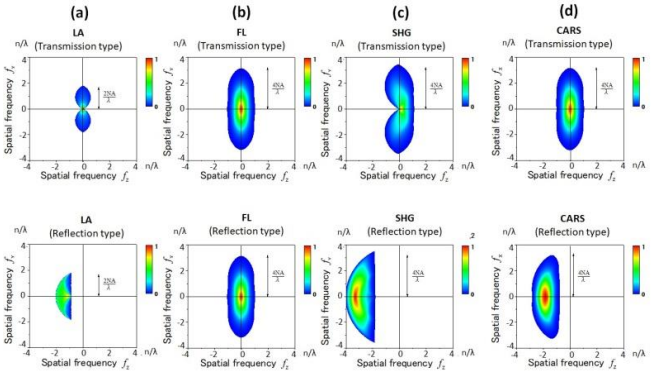

Fig. 2 4-D apertures of confocal microscopy. NA is 1.2. LA: linear absorption. FL: fluorescence. SHG: second-order harmonic generation. CARS: coherent anti-Stokes Raman scattering.

OTF が定義できる光学系においては、4-D aperture から 4 次元 OTF（通常の 3 次元 OTF の概念を含む 4 次元量）を求めることができる。4-D aperture は、OTF が定義できない光学系においても存在するため、分解能指標として最も基本的な物理量である。相互作用(Feynman diagram)ごとに 4-D aperture は計算される。Fig. 3 にいくつかの相互作用を分類した表を示す。OCT は反射光を用いるため $\chi^{(1)}$に属す。

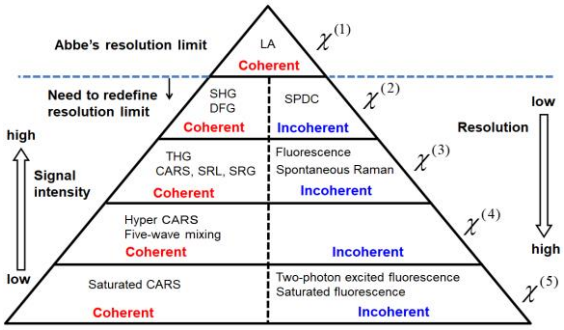

Fig. 3 A classification table of interactions