

一体成形反射型対物レンズの開発

(東工大院・理工¹ さきがけ²) 藤原正規¹、藤芳暁¹、松下道雄^{1,2}

【背景】低温下での単一分子分光は集団平均では解明できない個々の分子の特性を調べるのに有力な手法だが可視・紫外域での例はほとんどない。これは低温で使えて、かつこの波長域に適した対物レンズがないからである。そこで我々は液体ヘリウム温度(1.5K)における可視・紫外域での単一分子分光の実現に向けて、現在対物レンズの開発を行っている。

我々は対物レンズと試料を共に液体ヘリウムにつけて試料の直近に配置して実験を行っている。この配置の利点はNAの高いレンズが使用でき、また試料とレンズの相対位置を精度良く一定に保つことが出来ることにある。今まで低温で使える対物レンズとして非球面単レンズを用いてきたが、色収差により可視・紫外域ではNA通りの空間分解能や検出効率を得られない。

色収差が無いレンズとして2枚の球面鏡で構成される反射型対物レンズがある。しかし市販の反射型対物レンズを液体ヘリウムにつけてしまうと2枚の球面鏡の相対位置がずれるため低温下での使用には耐えられない。そこで我々は低温下で使用可能な一体成形の反射型対物レンズ(NA=0.6)を設計・試作した。

【一体成形反射型対物レンズ】図1に設計・製作した反射型対物レンズを示す。このレンズは合成石英の表面にアルミニウムを蒸着して、中心をOとする凸球面鏡R1と凹球面鏡R2を形成しており、光線はR1とR2で2回反射してFに集光する。2枚の球面鏡が同一の合成石英と一体になっているので、低温に冷やしても光軸がずれずに使用できると考えている。球面収差に関しては最低次の収差を消すためにO-F間距離及びR1、R2の半径との比を $1:\sqrt{5}-1:\sqrt{5}+1$ としている。色収差に関しては光線が合成石英を通過することで生じる屈折を抑えた設計をしている。すなわちR4を平面とし、R3を中心Fの球面でカットしている。これにより平行光が入射するときは屈折しなくなる。一方、光線を斜めから入射する場合についても色収差が小さいことが光線追跡からわかった。

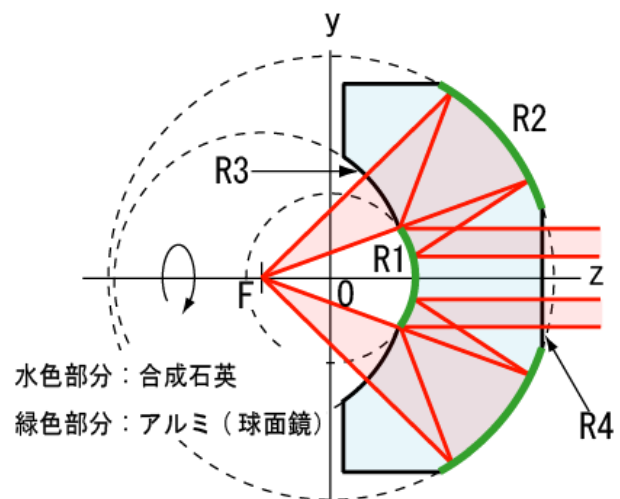


図1 設計・製作した反射型対物レンズ

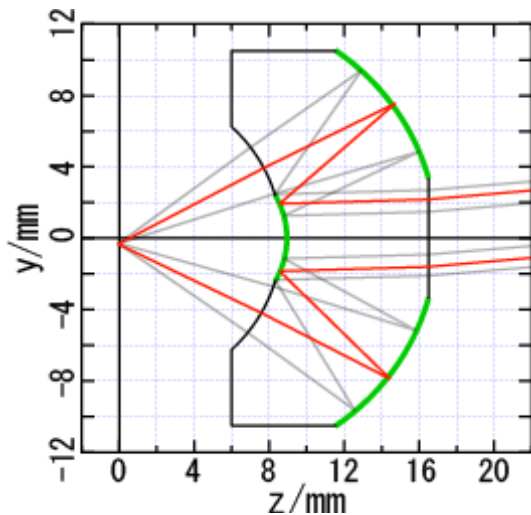


図2 光線追跡の様子

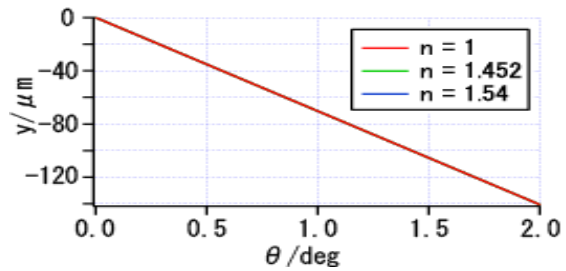


図3 入射角と y の関係及び屈折率 n 依存性

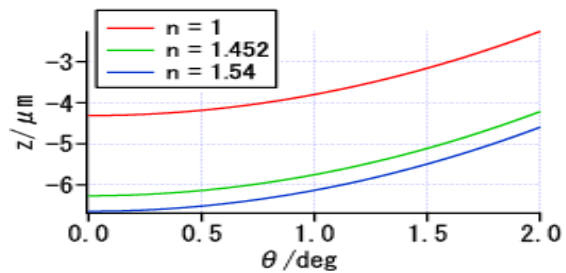


図4 入射角と z の関係及び屈折率 n 依存性

図2は原点を集光位置Fとして光線を斜めから入射したときの光線追跡の様子である。図の赤線は凸面鏡にあたる光線の高さ y を $\pm 1.8\text{mm}$ にしたものである。この光線に対して合成石英の屈折率 n を変えながら入射角と焦点の y 座標及び z 座標の関係を調べたのが図3, 図4である。ここで $n=1.452$ は波長 900nm に、 $n=1.54$ は波長 210nm の光線に対応している。図3では3本の直線が殆ど重なっており、 y 方向、すなわち画像を撮った時の画面上での色収差がほぼ無いことを示している。図4では z 方向に関しては色収差があり、波長 900nm と 210nm での差は $0.4\ \mu\text{m}$ になる。これは波長 210nm 、 $\text{NA}0.6$ での焦点深度(約 $0.6\ \mu\text{m}$)と同程度なので実際上問題にならないことがわかった。

【試作品による蛍光ビーズの蛍光像】
 実際に製作した反射型対物レンズを用いて像が撮れるかを確認するため、波長 430nm の励起光を対物レンズの後側から入射し、 $1\ \mu\text{m}$ の蛍光ビーズ(蛍光波長 480nm)の蛍光画像を測定した(図5)。この図から $100\ \mu\text{m}$ 四方に渡ってビーズの蛍光像が測定できた。

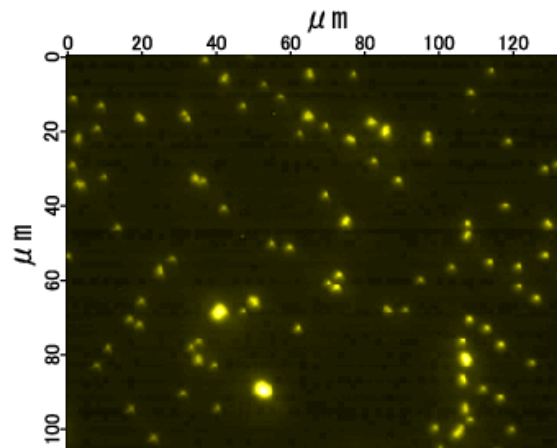


図5 反射型対物レンズで撮った $1\ \mu\text{m}$ の蛍光ビーズの蛍光像