

開口角測定 of 歴史

History of the measurement of an aperture angle

○太田清貴¹, 植松英穂²*Kiyotaka Ohta¹, Eisui Uematsu²

Abstract: In order to improve an object lens of a microscope, the immersion method was devised in the middle of the 19th century. By this method, a field of view of the lens become dark. Then, the lens which looks bright was developed. An aperture angle came to be measured as an index which showed the brightness of the lens. However, measurement of the angle was difficult. In 1878, Ernst Abbe introduced a concept of the numerical aperture as the index, he succeeded in precise measurement of the aperture angle of the lens.

1. はじめに

顕微鏡は,16 世紀に Zacharias Jansen により発明されたことが知られている.17 世紀には Antonie Leeuwenhoek や Robert Hooke によって顕微鏡が作製され,生物学の発展に大きく寄与した.この顕微鏡の性能を上げるために様々な技術が開発されてきたが,その一つに分解能を良くする方法として液浸法がある.

本研究では,液浸法を用いた対物レンズについて調査した.その中でも特に,対物レンズの性能を表す一つの指標を考えた Ernst Abbe の研究内容について考察する.

2. 液浸法の歴史

液浸法とは,対物レンズとプレパラート間,またはコンデンサーとプレパラート間に光学ガラスの屈折率に近い屈折率を持つ液体を満たすことで光の道筋を変化させる方法である.液浸法が誰によって最初に考案されたのか知られていないが,1840 年 Giovanni Amici が油を使った液浸対物レンズを作製したことが知られている.しかし,当時その油が高価であったために,彼は 1853 年に油の代わりに水を使った液浸対物レンズを最初に作った.このレンズは,広く普及することになる.

他方 Francis Wenham は,現在でも光学ガラスやレンズの接合に使われているカナダバルサムを研究し,それとほぼ同じ屈折率を持つゼラチンと緑のシロップを混ぜた液体を作った.その後,様々な液体の屈折率を測定した.また,1866 年に Ernst Gundlach が水よりも高い屈折率を持つ液体を探し,グリセリンを使った新しい液浸対物レンズを作製した.他にも,1871 年に Robert Tolles は,Wenham のカナダバルサムの研究をもとにして,当時クラウンガラスとほぼ同じ屈折率を持つカナダバルサムを用いて液浸対物レンズを作った.液浸法で利用する液体は,水,グリセリン,カナダバルサム,血液

等,色々な液体が使われるようになったが,液体を入れることにより光が透過しにくくなるため,光量不足が問題になった.

3. 開口角測定 of 歴史

この光量の問題を解決するために,19 世紀後半になると開口角の大きい対物レンズが作製されるようになった.開口角とは光軸とレンズの最も外側に入る光線とがなす角度の二倍であるので,その数値が大きいと明るく見える.

開口角の測定は誰によって始められたのか知られていないが,調査した限りでは Wenham が最も早い.彼は 1872 年に液浸法を用いていない空気の時の開口角を 170°,水を用いた液浸法の開口角を 100°と測定し,翌年彼はバルサムを用いた液浸法の開口角を 79°と測定した^[1].液浸法を用いると開口角が小さくなってしまいが,色収差を減らすことが出来るという利点がある.Wenham と開口角測定に関して論争していた Tolles はバルサムの開口角を 100°と測定し,明るいレンズであることを主張するが,Wenham によって 82°が限界であると指摘された.このように開口角は測定精度において問題があった.液体がこぼれてしまうこと,また液体に空気の粒やゴミが混入してしまうこと,あるいは保存方法によって変色してしまったことが原因であった.

1878 年に Abbe は開口数という概念を導入し,液浸法における対物レンズの開口角を計算で求めることができる開口数測定器(アペルトメーター)を開発した.そして彼は水の場合の開口角を 111°そしてバルサムの場合の開口角を 94°30' と計算で求めた.

4. Abbe の対物レンズ作製

Abbe は液浸法の研究を進める過程で,対物レンズ作

1 : 日大理工・院(前)・物理, 2 : 日大理工・教員・物理

製の指標として開口数の概念を導入し、開口数を数値化するためのアペルトメーターを開発した。

4-1. Abbe による液浸法の研究

光の結像理論を研究していた Abbe は、顕微鏡に液浸法を用いる事で物体を鮮明に見る事が可能であることを知っていた。それで彼は従来の屈折計の精度を評価することを始めた。Abbe は、1872 年に光学について最初に書いた論文^[2]で、これまでの屈折計は精度が悪いと評価し、屈折率を正確に測定することができる機器の開発を行った。そして彼は、1874 年に光学について 2 番目に書いた論文^[3]で、自分で開発した屈折計を用いて、ガラスプリズムの屈折率は 1.70、クラウンガラスプリズムは 1.51、純水は 18℃ のとき 1.333 という計測結果を得た。また Abbe は計算によって空気の屈折率を 1.00030 と算出した。彼はこの論文で、この屈折計を使うと油の精製度やジュースの濃度測定も可能であると指摘している。

Abbe は 1874 年の研究によって得た空気と水の屈折率を用いて、顕微鏡の分解能を良くするための研究を進め、その翌年の論文^[4]において、コンデンサーとプレパラートの間に水を満たした液浸顕微鏡を考案し、その性能を評価した。Abbe は、プレパラートとコンデンサー間に水を満たすことで屈折率を変化させて分解能を良くした液浸法を考案した。プレパラートとコンデンサー間に空気を満たしている顕微鏡による像と水を満たしている像を比較すると、水の方が鮮明に見えることを見出した。そして彼はその屈折計を使って光学ガラスの屈折率により近い値を持つ液体を探し、当時広く使われていたカナダバルサムの代わりにシーダー油を用いた顕微鏡を 1878 年に開発した。Abbe が開発したこの液浸対物レンズを使った顕微鏡は、当時彼が勤めていた Carl Zeiss 社によって販売された。こうして Abbe の対物レンズを組み込んだ顕微鏡は Robert Koch によって利用された。1882 年に Koch がそれを用いて細菌を発見したことによって Abbe の顕微鏡は知名度を上げ、広く普及した。

4-2. アペルトメーターの設計意図

液浸対物レンズの問題として、像が暗くなってしまい、明るい対物レンズが研究され、開口角の測定が行われたが、液浸法を用いた開口角の測定の精度は悪く、開口角は計る人によって大きく異なっていた。

その様などとき、Abbe は 1878 年に開口数の概念を導入した。開口数 a は以下のように定義される。

$$a = n \sin w$$

n は空気あるいは液体の屈折率、 w は半開口角である^[5]。

アペルトメーターについての目的は、論文に記載されておらず、論文の論理展開を考えると次のようなことが考えられる。

Abbe は、あるレンズにおいて開口数が空気であろうと液体であろうと同じ値になることを見出し、測定しやすい空気の場合の開口角を測定することで、液体の場合の開口数を計算により求めた。つまり開口数さえ分かれば、どんな液体を使用したとしても、屈折率を代入するだけで、液浸法による対物レンズの開口角を計算で求めることができる。そして Abbe は、開口数と空気の場合の開口角が刻印されているアペルトメーターを製作した。このアペルトメーターの方法によって理想的な液体の開口角を正確に求めることに成功した。

5. まとめと今後の課題

顕微鏡の対物レンズの分解能を良くする方法として液浸法が用いられた。しかし液浸法を用いると、像が暗くなってしまいうため、明るいレンズが必要とされた。そのためには開口角の大きなレンズを作る必要があり、その角度が測定されるようになった。しかし、液浸法を用いた対物レンズの開口角測定は精度が悪かった。そこで Abbe は開口数の概念を導入し、アペルトメーターを作製することで、測定精度の問題を解決したことが明らかになった。

今後は、開口数の定式化への過程について調査したい。

6. 文献

- [1] “Apertures of Object-glasses”, Francis Wenham: Royal Microscopical Society, vol.9, pp29-32, 1873.
- [2] “Apparate zur Bestimmung des Brechungsexponenten und der Dispersion von Flüssigkeiten”, Ernst Abbe: Gesammelte Abhandlungen II, pp236-238, 1872.
- [3] “Neue Apparate zur Bestimmung des Brechungs und Zerstreuungsvermögens fester und flüssiger Körper”, Jenaischen Zeitschrift für Naturwissenschaft, pp96-174, 1874.
- [4] “A New Illuminating Apparatus for the Microscope”, The Monthly Microscopical Journal, pp77-82, 1875.
- [5] “Beschreibung des Apertometers”, Ernst Abbe : Gesammelte Abhandlungen I, pp113-118, 1877-1878.