

眼の解像度とカメラの解像度

藤江 龍登

1. はじめに

天体望遠鏡の分解能は古くは 19 世紀の W. R. ドーズ(William Rutter Dawes 1799-1868)の考えた理論(公式)を基に計算、表示されることがありましたが、この理屈でいくと口径が大きければ大きいほど分解能は高くなり、かつ、同一の口径の望遠鏡は全て同じ分解能になってしまいます。

しかし、ご存知のように現実には鏡面の研磨精度、レンズの研磨精度により、分解能は大きく変わるので、現在ではこのドーズの分解能はほとんど使われなくなりました。

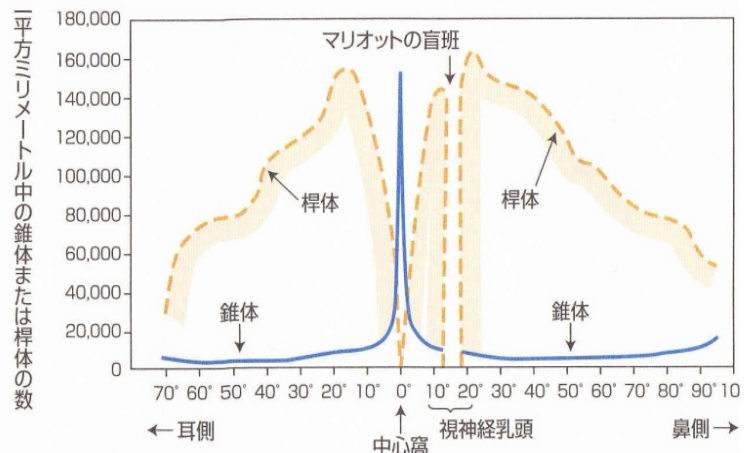
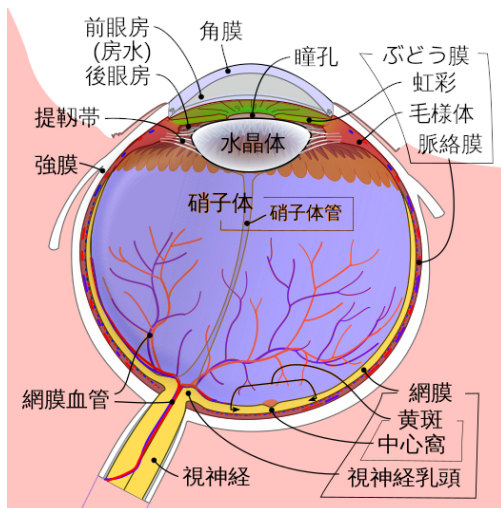
この望遠鏡の研磨精度の評価についてはフォーコーテストなどの方法がありますが、今回は、望遠鏡光学系の難しいお話は抜きにして、「人間の眼と CMOS カメラではどの程度細かく見えるのか」についてお話をしていきたいと思います。

2. 人間の眼の分解能

人間の眼の分解能は諸説あって、単純にカメラの解像度と比較することは出来ません。

まず眼の構造は下図のようになっていますが、角膜、水晶体等の透光体が完全な状態であると考え、どれだけ細かく見えるのかは、網膜細胞密度に大きく依存することになります。

そして、その網膜上の視細胞の配列は一様ではなく、明所視、色覚、詳細な視力を司る「錐体細胞」は網膜の中心窩付近に集中しており、周辺は白黒の明暗識別、暗所視、動体検知を司る「桿体細胞」が占めています。



これらの視細胞間の平均距離は3~5 μm ですが、中心窩付近で錐体間の距離は2.5 μm 近くになり、1mm当たり縦横約400個、1平方ミリ当たり16万個並ぶことになります。(周辺では4万個程度に落ちます)

ちなみに、視力(遠方視)の分解能はほぼこの中心窩付近の細胞密度に依存し、細胞間距離が3 μm の際の分解能が1秒角に相当し、これが基準の視力1.0となります。

このように、網膜の視細胞密度とそれによる分解能は中心と周辺で異なり、対象となる光も異なり、分解のアルゴリズムもカメラとは異なりますが、これを強引にカメラ解像度に換算すると概ね、9600Pixel \times 9000Pixelの解像度に相当すると考えられています。

3. カメラの解像度

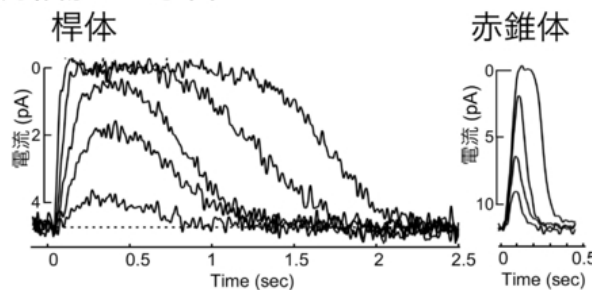
最近の天体用 CMOS カメラの解像度は高いもので SONY 製 IMX455 フルサイズセンサーを使用した ZWO 社の ASI6200MC Pro は9576Pixel×6388Pixel など、非常に高解像度のものが出てきました。これは水平解像度だけを見ると、ほぼ人間の目の解像度に近づいてきたこととなります。しかし、「どこまで細かく見えるか」は単純に解像度だけでは比較出来ず、それぞれの特徴が異なります。

4. 眼の特徴とカメラの特徴

ご存知のように視細胞は蓄光が出来ませんので、長時間露光しても見える星の明るさは大きく変わりませんが、反面、CMOS センサーは長時間露光すると、センサーに入って来る光子の数により明るさが変わります。

では入って来る光(光子)をどの程度電子に変換出来るかという「量子効率(EQ)」で見ると、人間の眼はほぼ100%近く、つまり光子1個が入ってきただけでそれを感じる事が出来ます。

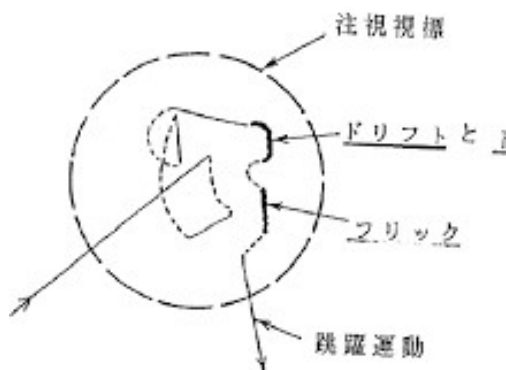
視細胞の応答



しかし、CMO センサーの EQ は 50~80%程度であり、「感度」という点ではまだ人間の方が優れています。ただ光刺激に対する応答速度という点では、左図にあるように、桿体細胞で0.1秒近く、赤錐体細胞では0.2秒近くかかってしまい、これは CMOS センサーがナノ秒単位で動作するのに対して、ずいぶんゆっくりとしたものとなっています。

5. 眼の特徴を活かした観望

これらの特徴を基に考えますと、眼視では出来る限り明るく、分解能が高く、集光力のある望遠鏡が必要であることは言うまでもありませんが、同時に、出来る限り視線は動かさず、一点を見つめて、空気の揺らぎが少ない瞬間(ラッキーイメージング)を捉える必要があることはご存知のとおりです。



加えて、眼には「固視微動」という不随意の動きがあり、これはフリック(数秒に一度の跳躍的移動)、ドリフト(1秒に数度の数10 μ m単位の移動)、トレモア(1秒に数十回の数 μ m単位の移動)の三種類があります。

この中で「解像度」に関連しているのは高周波数の微細な動きであるトレモアで、この動きによって補完され、眼の解像度が視細胞の密度より解像度が上がる結果となっています。

視細胞の密度からだけでは視力は1.0~1.2以上にはなりません、それ以上の視力が出るのはそのおかげです。

しかし、この「固視微動」の能力も年齢とともに衰え、屈折異常や透光体に異常がなくても、年齢とともに遠方視の解像度は低下する傾向にあります。

従って、眼視の際に「昔は細かい星像まで見えたのに…」というのは、加齢とともに水晶体が黄変したり、白内障になったりといった透光体の変質の問題だけではなく、このような固視微動の機能低下、眼筋の機能の低下による要因もありますので、白内障の手術をしても、その点が改善するわけではありません。

眼視観望を継続される場合は、この特性も考慮に入れておく必要があります。