

## 続・天の川が見える怪

白井 正(京都学園大学)

## 1. はじめに

『天文教育』2006年11月号に掲載された、加藤賢一氏の「天の川が見える怪」[1]で、単純に考えると天の川の表面輝度は低すぎて肉眼では見えないはず、との問題提起があった。この投稿には、天の川のような広がった表面輝度の低いものでも、肉眼のビニング機能によって見えるようになるのではないか、という筆者のコメントも加えられていた

その時は推測だけだったが、その後、肉眼の機能についての法則や具体的なデータを見つけたので、それらを紹介したい。ただし、筆者には畑違いのことであり、多少の誤解がある箇所もあると思うが、その点をご容赦いただきたい。

## 2. 表面輝度と見かけの角度の関係

図1は、夜空の表面輝度（単位は、等/平方秒）ごとに、天体の見かけの大きさ（横軸；分を単位とした対数）と、検出限界の（肉眼で検出できる最も暗い）天体の表面輝度（縦軸；単位は等/平方分）をプロットしたものである<sup>注1)</sup>（ここでは、夜空の表面輝度の単位は、等/平方秒、天体の表面輝度は、等/平方分を用いた。また、6.以降では天の川の表面輝度について、等/平方度も併記した。1等/平方度=8.9等/平方分=17.8等/平方秒で換算できる）。一方、図2は、図1のデータと同じだが、縦軸に検出限界の合成等級（表面輝度×面積に相当する）を取ってある。なお、ここでの天体の表面輝度と等級は、大気の減光は考慮していない。

環境省の全国星空継続観察（スターウォッチング・ネットワーク）では、毎年2回夜空

の表面輝度を写真から測り、その推移を得ているが、これによると定点観測地24ヶ所のうち、最も暗い観測地点（沖縄県竹富町）の平均が22等/平方秒、最も明るい観測地点（愛知県名古屋市）の平均が15等/平方秒である（[2]、同様のグラフは[3]にもある）。

図1の元になったデータは、Clarkによる夜空の表面輝度ごとの検出限界のコントラスト（天体の表面輝度/夜空の表面輝度）の表で（[4]のTable F.4、ClarkのWebページ[5]にはグラフのみある）、その更に元になったのがBlackwellの実験[6]である。

この実験は、第二次大戦中のアメリカにおいて軍事目的で行われたもので、視力1.0前後の20歳前後の女性7人が、背景（夜空に相当）と検出すべき刺激光（天体に相当）のそれぞれの明るさと、刺激光の面積を変えて計90000回の計測が行われた。ただし、背景となるスクリーンは観測者の視点からは10度程度の角度で見えており、その外側は徐々に暗くなっているため、実験室での背景と夜空とは同じ条件ではない。そして背景の中央に刺激となる光を15秒間与えて、観測者は見えたか見えないかを記録していった。刺激光を与える時間を15秒間まで増やしていく間は検出限界が暗くなり続けるが、15秒を超えると一定になったので、この時間間隔が選ばれた（つまり、肉眼はある程度の時間積分をしており、肉眼や望遠鏡で検出限界ぎりぎりの天体を見る場合も、見えないからといってすぐにあきらめるのではなく、しばらくじっと見続ける方が良さだろう）。

よく知られているように、人間の視細胞には明るいところで働く錐体（感度は低い分

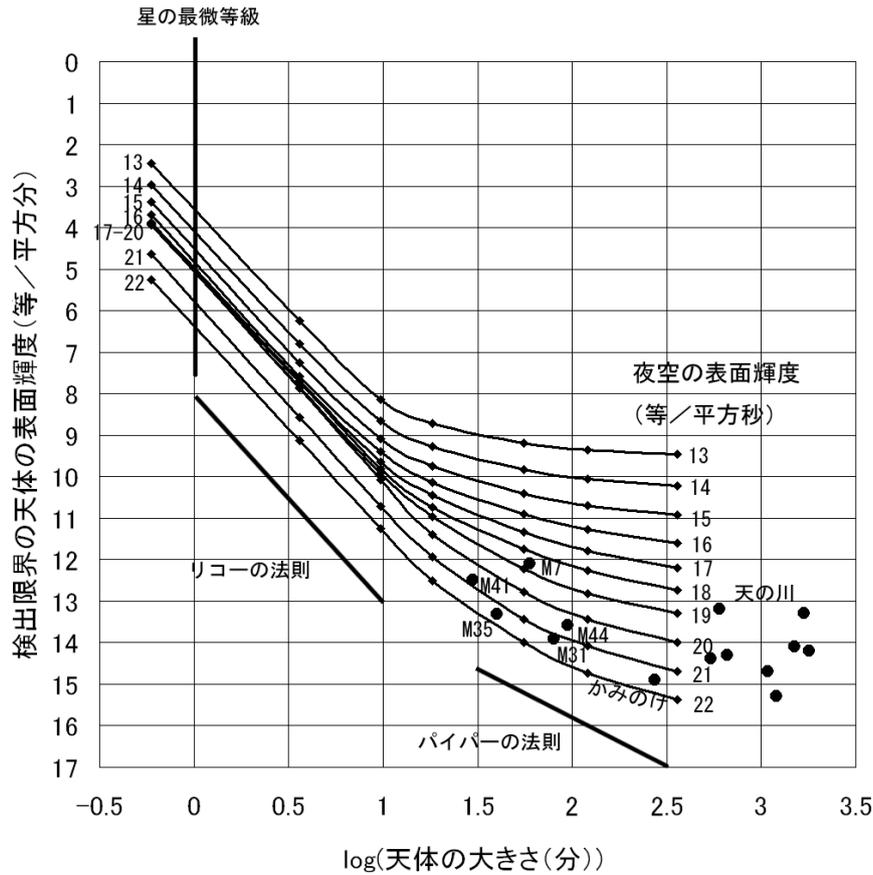


図 1 夜空の表面輝度ごとの、天体の見かけの大きさ(横軸)と検出限界の天体の表面輝度(縦軸)との関係。天の川のデータは表 1 から、じょうぎ座を除いたもの。

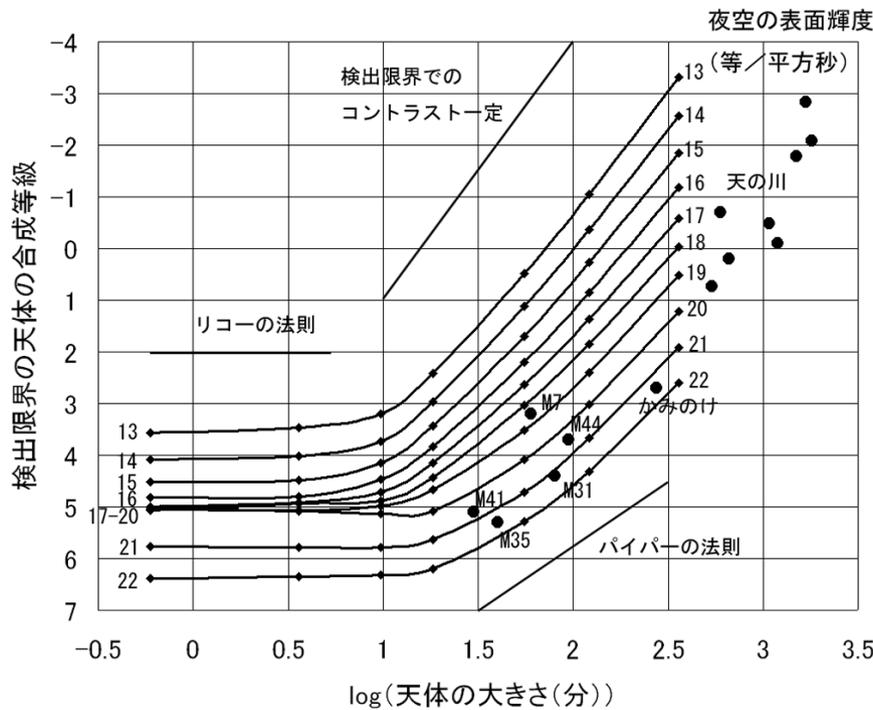


図 2 夜空の表面輝度ごとの、天体の見かけの大きさ(横軸)と検出限界の天体の合成等級との関係。天の川のデータは表 1 から、じょうぎ座を除いたもの。

解能は高い。視野の中心に集中)と、暗いところで働く棒体(感度は高いが分解能は低い。視野の周辺にある)の2種類あるが、観測者は視線の中心を自由に選べたので、それぞれの場合に応じて、中心視(錐体)と周辺視(棒体;いわゆる「そらし目」)のどちらか良い方を選んでいく。実験で得られた背景の表面輝度、刺激光の表面輝度、刺激光の面積の組み合わせは43点通りで、これらの点を内挿した値が図1の◆である(つまり、これらの点の実験で得られた値ではない。また、点を結ぶ曲線はエクセルで引いた平滑線である)。

注1) Clark [4]の表で検出限界としているのは、観測者が50%の確率で検出できた表面輝度であるが(偶然当たった確率は除いている)、図1、図2では検出確率90%の表面輝度を示している。これは、Blackwell [6]の実験では、観測者は検出確率が90%以上にならないと自信を持って見えたとは言わなかったことによる。検出確率90%の表面輝度の値は、検出確率50%の値を1.62倍(−0.52等級)すればよいので[6]、図にはこの値をプロットした。逆に図の曲線を下に0.52等だけ平行移動させると、検出確率50%の曲線になる。この変更では図の曲線の形は変わらないので、2.から5.までの議論には影響しない。ただ、6.で天の川が見えるときの最微等級には影響するので、その点については6.の注5)で触れる。

### 3. リコーの法則

それでは、図1を見ながら肉眼の特性を見ていきたい。まず、一番下の線(夜空の表面輝度が22等/平方秒)では、天体の見かけの大きさが10分以下では、直線の傾きが−5になっている。つまり、天体の一辺の見かけの大きさが10倍(面積が100倍)になると、検出できる表面輝度は5等暗くなる、つまり1/100になるから、この面積を積分した光の

総量(合成等級に相当)は一定になっている。図2では、縦軸に合成等級を取っているので、この部分は水平となる。

これは、リコーの法則(Rocco's law)として知られているもので、一般に検出すべき刺激光の表面輝度がLのときに、肉眼の検出限界の面積Aは、kを定数として

$$L \times A^n = k \quad (1)$$

で表される。ここで、nは0から1までの値をとるが、刺激光の面積が小さい時はn=1で、この場合がリコーの法則に当たる。このとき、網膜が受ける光の総量(合成等級)は検出すべき刺激光の大きさに関わらず一定となるが、これはCCDカメラでいうと、像の大きさが1ピクセルの大きさよりも小さい場合で、このとき検出できるかどうかは、像の形に関係なく1ピクセル内に入る光の総量で決まることに相当する。

網膜では視細胞で光を受けた後、ガングリオン細胞と呼ばれる細胞を経由して神経に伝えられるが、一つのガングリオン細胞が多数の視細胞とつながっていて、あたかも一つの大きな視細胞のように働くために、リコーの法則が成り立つことになる。

リコーの法則が成り立つ範囲は肉眼にとっては点光源で内部構造は分からず、その上限が分解能に相当する。明るいところでの分解能1分が視力1.0の定義なので、これは肉眼の暗闇での分解能が、昼間よりも落ちることを意味する。例えば、おおぐま座のミザールとアルコルの角距離は12分なので、昼間の分解能を保っていれば、楽に分解できるはずだが、筆者は分解できない。

また、夜空の表面輝度がだんだん暗くなると(図1、図2で下方の線に移って行くと)、分解能が低くなっていく(1ピクセルの大きさが大きくなっていくことに相当する)。ただし、夜空の表面輝度が20等/平方秒より暗いときは「そらし目」をして棒体を使ってい

るが(後述 5.)、夜空の表面輝度が暗くても、天体が十分に明るければ中心視が出来て錐体が使えるので、その場合の分解能はこの図よりも高くなりうると考えられる。

#### 4. パイパーの法則

天体の見かけの大きさがもっと大きくなると、図 1 の曲線の傾きが緩やかになるが(図 2 では曲線が上に向かい始める)、これは(1)式で  $n$  が 1 より小さくなることに相当する。特に(1)式で  $n=0.5$  (図 1 での傾きが  $-2.5$ 、図 2 での傾きが  $2.5$ ) の場合は、パイパーの法則 (Pipper's law) と呼ばれている。パイパーの法則は、CCDカメラでビニング (いくつかのピクセルの信号を足し合わせて 1つのピクセルとして扱う) をする場合に相当すると考えられる<sup>注2)</sup>。ビニングをすると分解能は落ちるかわりに、広がった淡い天体も検出できるようになるが、肉眼でも同じことが行われているのである。

夜空の表面輝度が暗いときは、見かけの大きさが 5 度程度までパイパーの法則が成り立っているが、夜空が明るいときは見かけの大きさが 30 分程度までしか成り立たず、それ以上では図 1 でプロットした線が水平になっている(図 2 では、傾き 5 になっている)。つまり、もはやビニングされないので、天体の面積がこれ以上大きくなっても検出限界は変わらないことになる(3.と 4.については [7],[8]を参照した)。

注 2) 入射する光の強さが同じピクセルを  $A$  個ビニングする場合を考えると、ノイズは  $\sqrt{A}$  倍になる。ある一定の  $S/N$  で検出できるとすると、シグナルも  $\sqrt{A}$  倍必要になるので、1ピクセルあたりの光の強さ(表面輝度)  $L$  はピクセル数  $A$  で割って  $\sqrt{A}/A=1/\sqrt{A}$  倍となって、パイパーの法則と一致する。CCDカメラの  $S/N$  については、[9]に詳しい。

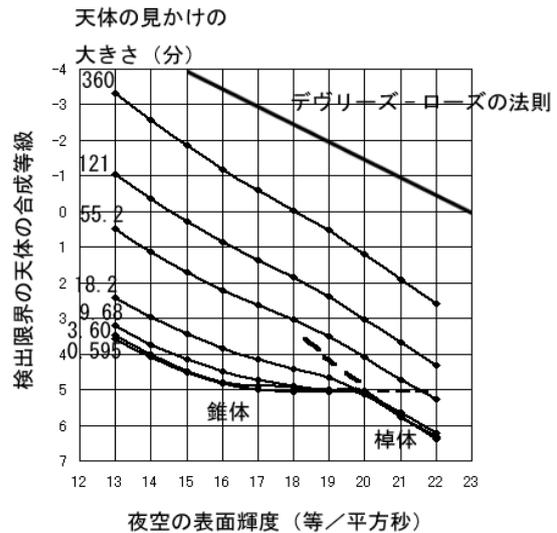


図 3 天体の見かけの大きさごとの、夜空の表面輝度(横軸)と検出限界の天体の合成等級(縦軸)との関係

#### 5. 錐体から棒体への移行

図 1、図 2 の線を上から見て行くと、夜空の表面輝度が 1 等暗くなっても(1本下の線に移っても)、最微等級(ここでは、最微等級は星のような点光源についてとする)は 0.5 等程度しか暗くならない(図 1 では、天体の表面輝度(縦軸)の単位が「等/平方分」なので、見かけの大きさが 1 分での表面輝度が、星の等級に相当する。横軸の見かけの大きさは対数を取っているので、横軸の値が 0 (図 1 の太い縦線)での縦軸の値を読めばよい。実際には暗い星の分解能は 1 分よりも悪いが、リコーの法則が成り立っているので、見かけの大きさを 1 分として計算して構わない)。

それでも、夜空の表面輝度が 16 等/平方秒まで暗くなる間は、最微等級も暗くなり続けているが、16 等/平方秒から 20 等/平方秒までは最微等級はほとんど変化していない。

その理由を図 3 で説明するが、この図のデータは図 2 と同じで、天体の見かけの大きさごとに、夜空の表面輝度(横軸)と、検出限

界の天体の合成等級（縦軸）をプロットしたものである（図2の一番左に縦に並んだ各点が、図3の一番下の曲線上の各点に対応している）。この図では、曲線の傾きは大部分が $-0.5$ で、夜空の表面輝度が1等暗くなると、検出限界の天体の合成等級は0.5等暗くなることを示しているが、これはデヴリーズ-ローズの法則（de Vries-Rose Law）または平方根の法則として知られている<sup>注3)</sup>。

しかし、下方の線（天体の見かけの大きさが小さい場合）では、夜空の表面輝度が16等/平方秒あたりから水平になり、20/平方秒の付近で急に折れ曲がっている。これは、夜空の表面輝度が20等/平方秒よりも明るいところでは錐体（中心視）を、それより暗いところでは棹体（そらし目）を使っていることで説明できる。錐体は16等/平方秒付近で感度の限界を迎えるが<sup>注4)</sup>、まだ棹体の感度は低いので、この移り変わりの部分では天体の検出限界はほとんど変化しないことになる（図3の右下の点線は、錐体と棹体の検出限界を延長したもの）[6]。

一方、天体の見かけの角度が大きい場合は（図3の上方の線）、錐体は視野の中心以外には少ないので最初から棹体が使われるため、夜空の表面輝度が18等/平方秒付近でも検出限界は暗くなり続けている。つまり、最微等級はほとんど同じでも、夜空の表面輝度は4等くらいの違いがありうることになる。

注3) デヴリーズ-ローズの法則はノイズが、天体の大きさに相当するピクセル範囲（天体の大きさが1ピクセルより小さい場合は1ピクセル）に入る夜空の光の強さ（光子数）で決まっている場合に成り立つ。この場合の検出限界は、

$S/N = \text{天体の光} / \sqrt{\text{夜空の光}} = \text{一定}$ となるので、この式の対数を取って等級に換算すると、

天体の合成等級 $-$ 夜空の表面輝度 $/2 = \text{一定}$ となって、図3の曲線の傾き $-0.5$ に相当する。ただし、天体の見かけの大きさによって傾きが少しずつ異なっているため、この単純な式だけでは説明できない要素も残っている[10]。

注4) CCDカメラでは、ノイズが読み出しノイズで決まっている場合に相当し、このときの検出限界は夜空の表面輝度によらなくなる。一方、棹体では読み出しノイズに相当する成分は小さいので、暗い天体まで検出できることになる。

## 6. 天の川は見える！

それでは本題の天の川が肉眼で見えるかどうかを考える。天の川の表面輝度について、ここではLeinert & Richer [11]のデータを用いた（他にも、当研究会のメーリングリストに仲野誠さんが寄せた情報によると、1983年以前の『理科年表』には星野光の全天分布が掲載され、また、南天についてはHoffmann et al. [12]がある。天の川の表面輝度については、古い文献のデータは互いに大きく異なっているが、[11]と[12]のデータはほぼ一致している）。

Leinert & Richer [11]は、1970年代に打ち上げられた探査機ヘリオス1とヘリオス2のデータから、6等より明るい星からの寄与を除いた天の川の表面輝度の断面図を8カ所で得ている。ただ、観測の主目的は黄道光の測定だったので、測定は黄道面に平行に、銀河面に対しては斜めに行われた。

Leinert & Richer [11]のグラフでは、天の川の表面輝度はS10(vis)という単位（1平方度あたりの表面輝度を10等星（実視等級）の個数で表したもの）で表されているが、グラフから読んだ値を、等/平方度と等/平方分に変換して、表1にまとめた（Blackwell

銀緯	星座	天の川の幅(度)	表面輝度			
			天の川	その外側	天の川の正味	
			等/平方度			等/平方分
26	たて	10	3.9	5	4.3	13.2
43-	わし	11	4.2	4.7	5.4	14.3
43+	わし	9	4.3	4.7	5.5	14.4
150	ペルセウス	20	4.8	5.1	6.4	15.3
168	ぎょしゃ	18	4.7	5.2	5.8	14.7
206	いっかくじゅう	30	4.5	5.2	5.3	14.2
223	いっかくじゅう	25	4.4	5.1	5.2	14.1
330	じょうぎ	25	3.7	4.7	4.3	13.2
348	さそり	28	3.8	4.9	4.4	13.3

表1 天の川の表面輝度 (Leinert &amp; Richer [11]のグラフより)

の実験[6]では、背景と刺激光の境界ははっきりしているのに対して、天の川の表面輝度は連続的に変化しているので、天の川の境界をどこにとればよいかは不明確である)。天の川は周囲とのコントラストで見えるので、天の川の正味の表面輝度は、天の川の表面輝度をその外側の表面輝度（これは夜空の表面輝度に含まれる）から引いたものになる。

天の川はわし座（銀緯 43 度）の付近で、二股に分かれているので、銀緯がマイナス(43-)とプラス(43+)の 2 つに分けた。また、銀緯 150 度付近は、天の川の切れ目に当たっているので、表面輝度は低くなっている。

表 1 を見ると、天の川の表面輝度は場所にもよるが 4~5 等/平方度、その外側は 5 等/平方度くらいで、天の川の正味の表面輝度は 4.5~5.5 等/平方度となる。これは加藤[1]が『理科年表』[13]を用いて推定した値ともほぼ一致する。

図 1 には天の川の正味の表面輝度（表 1 の一番右の列）を、図 2 には、表 1 の天の川の幅を一辺とした正方形内の天の川の合成等級

をプロットしてあるが、日本からは見えないじょうぎ座の値は除いている。

天の川が見える条件は、図 1 の曲線を外挿して（図 1 の曲線の傾きは負か 0 かで、正になることはない）、夜空の表面輝度で 19~21 等/平方秒、最微等級で 5~5.5 等程度となる<sup>注 5)</sup>。

ただし、図 1、図 2 では大気の減光は考慮していないので、この最微等級は、地上での見かけの等級である。『理科年表』[13]によると、国立天文台において透明度が良好な場合、地平線からの高度 50 度での減光量（地上と大気圏外での等級の差）は 0.3 等なので、結局、カタログの等級で 5 等前後の星が見えていけば、天の川も見えることが予想される。これは筆者の経験とも、日本流星研究会[14]の、

最微等級 4.5 等級の観測地・・・天の川は見えないが星がそれなりに見える（市街地郊外）

最微等級 5.0 等級の観測地・・・天の川が見えるところ（山、高原など）

という記述とも一致する。

このように肉眼は天の川の淡い光を広い範囲にわたって集めて見ていることになるが、逆にいえばこのときの肉眼の分解能は低くなっている。そこで、「近眼や遠視の人は（私は近眼かつ乱視がひどいですが）、メガネを外すと星は見えなくなるかも知れませんが、天の川は見えるはずですよ（私が試したところ、乱視がひどくても木曾ではメガネ無しで天の川を見ることが出来ました）」（西浦慎悟氏が当研究会のメーリングリストに投稿したメールより引用）ということになる。

注 5) 2. の注 1) で述べたように、図 1 は Blackwell [6] の実験での検出確率が 90% の値を用いたが、これを 50% にすると、図 1 の曲線が約 0.5 等下に平行移動することになるので、天の川の検出限界での夜空の表面輝度は 18~20 等/平方秒となって、天の川が見えるときの最微等級は、ほぼ 5.5 等（大気の減光を考慮すると 5 等より少し暗い程度）となる。ただ、天の川の表面輝度にもばらつきがあるので、0.5 等程度の細かい議論はあまり意味が無いだろう。

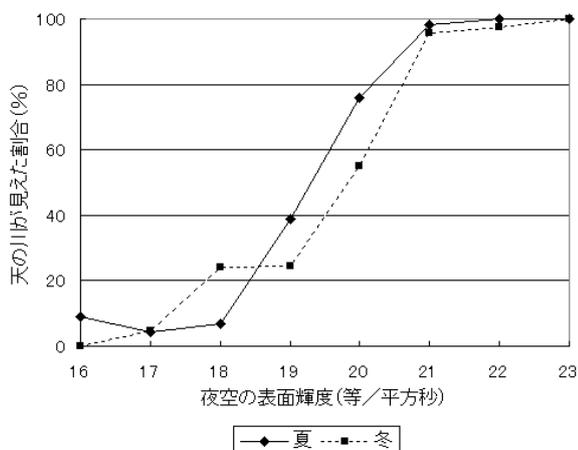


図 4 全国星空継続観察データによる、夜空の表面輝度ごとの天の川が見えた割合 (%)

## 7. 全国星空継続観察データとの比較

環境省の全国星空継続観察（スターウォッチング・ネットワーク）では毎年夏と冬の 2 回、写真から測った天頂付近の夜空の表面輝度、天の川が見える／見えない、双眼鏡での最微等級を調査している。天の川が見える／見えないは、夏・冬ともそれぞれ 3ヶ所（夏は、はくちょう座、わし座、たて座。冬は、ペルセウス座、ふたご座、いっかくじゅう座）について調べられた。ここでは、その報告書 [2] から、平成 13 年度と 17 年度の夏と冬のデータの内、天気が「快晴」か「晴れ」で、同一地点で上記の 3 つの観察項目が揃っているもの計 535 個について<sup>注 6)</sup>、これまで述べてきた実験データとどのくらい一致しているかを調べた。

図 4 には、夜空の表面輝度ごとに夏・冬の天の川が見えた割合をプロットした。夏の天の川は南の地平線に向かって濃くなっているが、それでも天頂に近い、はくちょう座の天の川の方が見えた割合が高くなっているため、一番天頂に近い星座（夏ははくちょう座、冬はペルセウス座）で、天の川が見えた割合をプロットしている。

この図を見ると、夏の方が天の川が濃い分、見えた割合が高くなる傾向にある。しかし、夏と冬の違いはそれほど大きくはなく、天の川が見える割合は夜空の表面輝度が 20 等/平方秒で 5 割を超え、21 等/平方秒以上では、ほとんど 100% になっている。

全国星空継続観察で観察した天頂付近の天の川の表面輝度と、表 1 とは直接対応していないが、たて座やさそり座ほど濃くないとすると、正味の天の川の表面輝度は 5~6 等/平方度 (14~15 等/平方分) 程度と推定される。すると、実験データ (図 1) からは、天頂で天の川が見える条件 (検出確率 90%) は夜空の表面輝度が 20~21 等/平方秒となって、観察結果とよく一致しているといえる。

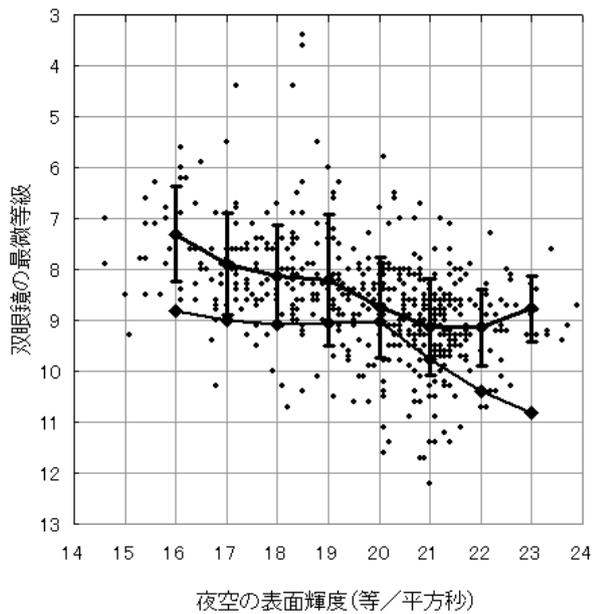


図 5 全国星空継続観察データによる、夜空の表面輝度ごとの双眼鏡での最微等級

図 5 は、夜空の表面輝度ごとに、口径 50mm 7 倍の双眼鏡での最微等級（1 つの参加団体に複数の参加者が観測した場合は、その平均値）をプロットした。下の線は実験データからの予測で、大気の減光を 0.3 等とし、双眼鏡では肉眼より 4.3 等暗い星まで見えるとした（図 3 の一番下の線を、4.0 等下に平行移動させたものに相当する）。また、上の線は夜空の表面輝度ごとの観測値の平均（エラーバーは標準偏差）である。

すると、観測値は実験データからの予測より、系統的に明るい星しか見えていないことが分かる。原因は不明だが、双眼鏡の手ブレ（実施の手引きでは双眼鏡を三脚に固定するか、仰向けに観察するかが推奨されているが、どこまで徹底されているかは分からない）などが影響しているのかも知れない。

観察された夜空の表面輝度は錐体から棹体への移行領域（5.）に当たっている。実際の観察では実験から得られた曲線のように明確な折れ曲がりは見られないものの、夜空の表面輝度が大きく変わっても、双眼鏡での最微

等級はあまり変わらない、という全体的な傾向は一致している。

注 6) 平成 18 年度の報告書では、夜空の表面輝度の表が、他の 2 つの観察項目の表と別になっているために使用しなかった。また平成 14～16 年度は、定点観測地 24 ヶ所以外の一般参加団体では夜空の表面輝度の測定は実施されていない。

平成 17 年度の夜空の表面輝度は天頂付近を撮影した写真から求められたが、平成 13 年度は特定の星（夏はヴェガ、冬はアルデバラン）を中心として撮影された。そこで平成 13 年度の夜空の表面輝度については、撮影時の高度が 60 度以上のものに限った。

## 8. 星団・銀河も見える

図 1、図 2 には天の川に加えて、かみのけ座 (Mel 111 ; 2.7 等)、M7 (3.2 等)、M35 (5.3 等)、M41 (5.0 等)、M44 (プレセペ ; 3.7 等) といった散開星団とアンドロメダ銀河 (M31 ; 4.4 等) もプロットした（大きさと合成等級は、『天文年鑑 2005 年版』[15]のデータを用いた）。実際に肉眼で見える大きさは図 1 のプロットで用いたカタログ値より小さいが、それを補正しても図 1 の各点は左上に移動するだけなので、検出限界にはそれほど影響しないと思われる（肉眼で見える大きさはカタログ値より小さいので、まず左に移動するが、肉眼で見える中心部の表面輝度は全体（カタログから求めた値）より明るくなるので、さらに上に移動する。図 2 では同様に考えると、左下に移動する）。

すると、M7 は夏の天の川と同程度の見えやすさになるが、さそり座にある M7 は天の川に埋もれている分コントラストが低く（図 1、図 2 では考慮していない）、日本からでは南に低いので、条件は悪い。その他の散開星団と M31 は、淡い部分の天の川が見える程

度の夜空なら肉眼で見えることになる。

リコーの法則が厳密に成り立っていれば、6等星が見えている夜空なら、合成等級が6等の星雲・星団も見えることになるが、実際には天体の見かけの角度が大きくなるとリコーの法則に代わってパイパーの法則が成り立つようになる。しかし、それでもリコーの法則からのズレは急には大きくなるので、おおまかに言うと6等星が見えていれば、合成等級が4~5等より明るい星雲・星団が見える、といえる。

筆者は天の川が見えることには疑問を持っていなかったが、望遠鏡では星の限界等級より1~2等くらい明るい星雲・星団まで観望できることは不思議に思っていた。例えば、筆者が所有している25cm反射望遠鏡（ドブソニアン）の限界等級は13.8等だが、5等星までしか見えない夜空でも12等くらいの銀河まで見える。というのは以前、銀河など広がった天体についてカタログに記載された等級と大きさから、その天体が望遠鏡で見えるかどうかの判定式を作ろうとしたことがあったが、加藤[1]と同様な論法で計算したところ、判定式どころか銀河は望遠鏡では全く見えないことになってしまったからである。

望遠鏡で見たときの星の最微等級と広がった天体の検出限界の関係も、肉眼での場合と同様に考えると解決できそうだが、望遠鏡での検出限界は肉眼での場合とは倍率も、視野内（アイピース内）の夜空の表面輝度も異なるので、その詳細については稿を改めて考えたい。

### 9. 天の川の光の正体

加藤氏の投稿[1]を読まれた西浦氏から当研究会のメーリングリストに、「全くの偶然なのですが、私も以前「単純に考えると天の川が見えるのはオカシイのでは？」という疑問に突き当たりました。」という投稿があったの

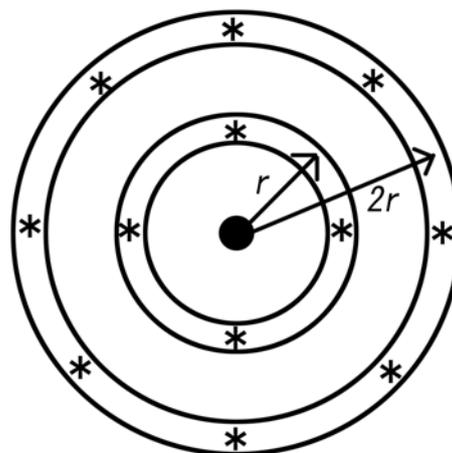


図6 オルバースのパラドックス

で、ここで紹介したい。

西浦氏は木曾観測所で助手の宮田隆志氏とともに、中高生を対象とした実習として、銀緯の異なる天域で、肉眼で星の数を数えさせると銀河系の構造が分かるのではないかと考えた。そして、肉眼で見える星がどのくらいの距離にあるかを見積もった。見かけの等級を  $m$ 、絶対等級を  $M$ 、距離を  $d$ （単位はパーセク）として、星間吸収を無視すると、

$$m - M = 5 \log(d) - 5$$

が成り立つので、G型星の絶対等級を5等（『理科年表』[13]などを参照）とすると、この星が6等に見える距離  $d$  は16パーセクとなるので、「あれ、妙に小さい値だなあ。本当？」。A型星としても絶対等級は1等だから、 $d$  は100パーセクにしかならない。銀河円盤の厚みは、太陽付近で2キロパーセク（『天文資料集』[16]などを参照）くらいなので、この計算では肉眼で銀河円盤を見通すことが出来ないことになって、「どうして天の川は見えるのだろう！！」。

西浦氏の結論はやはり、「銀河円盤（天の川）方向の星は、点としては分解できなくても、人間の目には広がった光源として見えるため

ではないか。」というものだった。この投稿を受けて、福江純氏は「要はオルバースのパラドックスと同じですね。天の川の方向では、近似的に無限遠まで星があるので、宇宙が明るいわけですね。」と返答したが、ここで、それをもう少し解説したい。

オルバースのパラドックスとは、もし宇宙の年齢が無限に古くて、宇宙の大きさが無限に大きいなら、夜空の表面輝度は太陽と同じになってしまう、というものである。星の絶対等級は一定で、しかも均等に分布していると仮定する。そして、地球を中心とした厚さ一定の球殻に分けて、夜空の表面輝度へのそれぞれの球殻の貢献度を考えると(図 6)、距離が 2 倍大きい球殻では、1 つ 1 つの星の距離も 2 倍なので、見かけの明るさは  $1/4$  倍になるが、球殻の表面積は 4 倍で厚さは同じなので、球殻内の星は 4 倍ある。すると、夜空の表面輝度への貢献度は、1 つの星の見かけの明るさ×星の数だから一定になって、夜空の表面輝度への貢献度は、球殻までの距離に依存しないことになる。そこで、もし宇宙の大きさが無限なら、こうした球殻が無限にあるので、遠くの球殻からの貢献度を足し合わせるたびに夜空の表面輝度は増え続け、最終的にはどの視線方向でも恒星の表面に当たることになってしまう(沢山の風船を飛ばしたときに、風船どうしが重なって背景の青空が見えない状態に相当する)。このオルバースのパラドックスは、星の絶対等級にばらつきがあっても、星を絶対等級ごとに分ければ、それぞれについて同様の議論が出来るので、全体としても成り立つ。しかし実際には宇宙の年齢は有限なので、我々が見ることの出来る宇宙の大きさも有限だから、このパラドックスは成り立たない(オルバースのパラドックスの解釈の歴史については、[17]に詳しい)。

『理科年表』[13]の「恒星の数と分布」の「全天の星の数」の項には、等級ごとの全天

の星明りの貢献度の表があるが、それによると、全天を平均した星明りの表面輝度は 118 S10(vis) (この単位については 6. を参照; 4.8 等/平方度) だが、6 等より明るい星からの貢献は、24 S10(vis) (6.5 等/平方度) に過ぎず、全体の星明りの 2 割程度しかない。天の川では、5 等より暗い星からの貢献の割合が更に大きくなっている(『理科年表』[13]の「恒星の数と分布」の「1 平方度あたりに観測される星の数」の項)。これは福江氏の指摘の通り、オルバースのパラドックスの原理が銀河円盤の果て、または星間吸収が大きくなるまでの間に限って成り立っているためだと考えられる。

## 10. まとめ

天の川の光は、肉眼では個々には見えない銀河円盤内の星々の光が集まって表面輝度が 4~5 等/平方度に達し、それを肉眼が 5°かそれ以上の範囲の光を足し合わせることによって、周囲とのコントラストで見えていると言える。肉眼は CCD カメラと異なり、天体の表面輝度や見かけの大きさ、夜空の表面輝度に応じて自動的に、空間的、それから時間的にも(1. 参照) 足し合わせる機能を備えているのである。

確かに、天の川のぼーっとした感じは、画像処理をしない写真では再現できないだろう(5 等星までしか写っていない星野写真では、天の川は写らない。逆に天の川が写った星野写真では、肉眼では見えない暗い星まで写っている)。

おそらく、ヒトに進化する遙か以前から、夜行性の動物が生存競争で有利になるために、こうした機能を発達させてきたに違いない。今回調べるまで全く気がつかなかったのに、肉眼にこのような機能が備わっていたとは、恐るべし肉眼!

謝辞：環境省全国星空継続観察の実施結果報告書[2]を送ってくださった、環境省 水・大気環境局大気生活環境室に感謝します。

### 参考文献

- [1] 加藤賢一、2006、天文教育、vol.18、No.6、p.31
- [2] 環境省 水・大気環境局、財団法人日本環境協会、1988-2006、「環境省全国星空継続観察の実施結果報告書」
- [3] [http://www.env.go.jp/press/file\\_view.php?serial=8663&hou\\_id=7635#graph04](http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=8663&hou_id=7635#graph04)
- [4] Clark, R.N., 1990, “Visual Astronomy of the Deep Sky”, Cambridge University Press
- [5] <http://clarkvision.com/visastro/omva1/index.html>
- [6] Blackwell, H.R., 1946, Journal of the Optical Society of America, 36, 624
- [7] <http://webvision.med.utah.edu/KallSpatial.html>
- [8] <http://www.journalofvision.org/5/10/6/article.aspx>
- [9] <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/LECTURE/OBS/reduction.html>
- [10] [http://webvision.med.utah.edu/light\\_dark.html](http://webvision.med.utah.edu/light_dark.html)
- [11] Leinert, C., & Richer, I., 1981, Astronomy and Astrophysics Supplement, 46, 115
- [12] Hoffmann et al., 1998, Astronomy & Astrophysics Supplement, 128, 417
- [13] 東京天文台編、2000、『理科年表』、丸善
- [14] [http://www.nms.gr.jp/forecast\\_leo01.html](http://www.nms.gr.jp/forecast_leo01.html)
- [15] 天文年鑑編集委員会、2004、『天文年鑑

2005年版』、誠文堂新光社

[16] 大脇直明ほか、1989、『天文資料集』、東京大学出版会

[17] エドワード・ハリソン、長沢工訳、2004、『夜空はなぜ暗い?』、地人書館

臼井正（京都学園大学）