

標準測光システム

市川 隆

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: ichikawa@astr.tohoku.ac.jp

可視光や近赤外線では天体の明るさの単位に「等級」を用いています。天文学では最も長い歴史のある測光単位ですが最近では様々な測光システムの乱立で「標準等級」が混乱してきました。原点の定義が様々でフラックスへの変換も不明確です。そこでこれまでの標準測光システムを復習し、標準システムへの正しい変換方法、0等級のフラックス、新しい定義に基づくシステムを紹介します。

1. 測光システムの混乱

観測に慣れたベテランでも測光システムの複雑さにしばしば悩まされます。例えば可視光ではジョンソンのUBVシステム、カズンズの R_cI_c システムなどは良く知られたものですが、銀河の観測に使われているものだけでも十種類以上あります。近赤外線ではジョンソンによるJKLMNなどが最初ですが、現在は同じJHKと称していながら天文台毎にシステムが異なり、標準システムと呼べるものではありません。

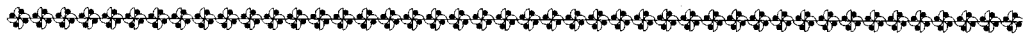
可視光での多様な測光システムはどれにも利点があります。しかし問題はそれぞれのシステムと他のシステムと関係式や変換式が明らかでない、フラックスへの変換方法についても明確に定義されていない場合が多いことです。また基準となる星の等級の決めかたも様々です。ひとつの測光システムだけを使い、基準天体に対する相対的な明るさや色だけを研究する場合は問題ありません。しかし過去の観測結果と比較したり他の波長での観測結果をつないでエネルギー分布を調べるためには広く普及している標準の測光システムを用いる必要があります。

ある測光システムから別のシステムへの変換式を作るためにはそれぞれのシステムでたくさんの数と

種類の天体の測光を相互に行わなければなりません。しかし大変手間のかかる仕事なのでその手続きを省略して自分だけのシステムを提案して使っている例も多数見受けられます。そのような論文を引用し別のデータと比較するとき大変困ります。

2. 標準等級システムへの変換

観測した測定値を標準等級システムに変換するためにはフィルターシステムが標準のものとは異なることによる色効果を正しく補正することから始めます。この手続きは非常に大切でこれを怠ると系統的誤差の原因になります。この変換式を作るためには青い星から赤い星まで多数の標準星を観測する必要がありますが、一度決定するとしばらくはそのまま使えます。次に大気吸収を補正します。大気吸収の量を知るために標準星を様々な天頂距離で観測します。大気吸収は毎日変化しますので、観測日毎に決定する必要があります。しかしわずかの雲があっても大気吸収は変化してしまいますから日本のように天候の変化が速い場所では特に難しい観測と言えます。観測者が快晴だと思って観測しても後で解析してみるとうまく決まらないことがしばしばあります。「快晴」の判断はなかなかやっかいです。天気が余り良くない時は目的の天体の近くにある標準星を観測して大気吸収の補正を



省略できますが、天気が悪くない時は空の透明度の変化も激しいはずですので注意が必要でしょう。

ところで近赤外線では大気吸収の補正に関して重要な問題が知られています。一般に近赤外線では透過率の高い大気の窓に形状を似せてフィルターが作られてきました。しかしジョンソンの近赤外線フィルターシステムは大気中の水蒸気吸収の強い所まで含んでいるため彼のシステムを標準とするのは正しくないことが知られています¹⁾。水蒸気の吸収は天文台の標高が低くなる程増加し、大気の透過特性が変わります。そのため実質的なフィルターの透過特性が大きく変化してしまいます。これをフォーベス効果と言ひ、1800年代前半には知られていました。フィルターの両端が大気吸収によって大きく削られてしまうと吸収の効果は大気の高さに対して1次式では表せなくなり、天頂距離と等級の関係が図1のような曲線になります。そしてその形は観測した時の大気の水蒸気量に強く依存します。可視光ではUバンドを除いて一般には無視できる程度のものですが、赤外線観測の場合、図1の点線のように単純に直線で近似して大気圏外での明るさを求めると吸収の補正に大きな間違いをおかします。水蒸気量は天文台の高度に

強く依存します。また日々変化します。従って今のフィルターシステムでは標準測光システムを作ることが非常に困難とされています。日本でも赤外線観測が盛んです。多くの研究者がエライヤス²⁾やイギリス赤外線望遠鏡用の測光標準星を用いて天体の明るさを求めています。しかし水蒸気が非常に異なる日本の環境では正しく彼らのシステムに変換できているとは言い難いでしょう。

3. 再現が難しい標準測光システム

フィルターはできる限り標準システムに近づけることが重要です。しかし現実には検出器の違い、ガラス材の透過率の違いなどで、例え同じフィルターを作っても標準システムと同じにすることはできません。ジョンソンは1954年にUBVシステムの標準星を³⁾、1965年にそのフィルター透過特性を発表しました⁴⁾。しかしこのフィルターを用いて標準星を観測しても色効果の補正なしでは正しい等級を与えないことがわかっています。標準星を発表した後に検出器の変更などにより感度特性が微妙に変化してしまっていたからです。ジョンソンと言えども自分が1954年に発表した標準星にシステム変換する作業を怠ることは許されませんでした。

現在ではオリジナルの透過特性がどんなものであ

ったかを知るために、最初の標準星が色補正なしで再現できる人工的な透過特性を作って、それを標準測光システムとしています。その中で最も信頼度が高いのは、Uバンドがブーザー⁵⁾、BとVバンドがアズゼニスとストライジス⁶⁾、R_cとI_cバンドがベッセル⁷⁾の計算したものです(図2)。標準システムに合わせてフィルターを新たに製作する場合、用いる検出器と鏡の反射率、レンズの透過率などを合成したものがこの「理想的」な標準システムの透過特性に合うように作るべきでしょう。

近赤外線においては先ほど述べたよ

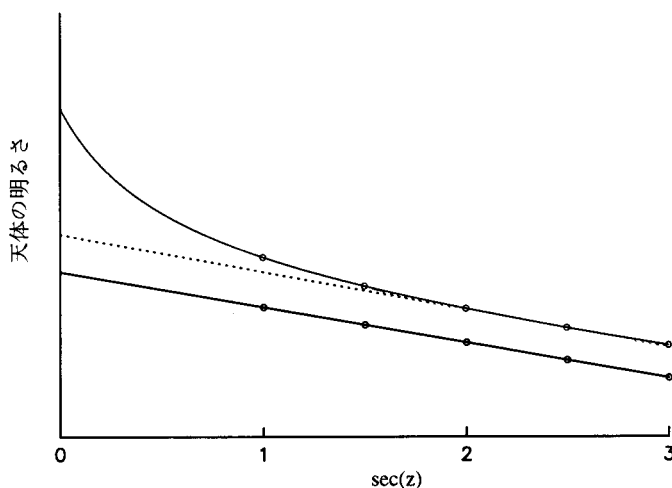


図1 大気吸収とフォーベス効果。横軸はエアマス、zは天頂距離。

うに天文台毎に異なる大気吸収のために標準測光システムが存在しません。そこで水蒸気吸収の影響の少ないバンド特性をモデル計算し、大気吸収と式が1次式で表せるような理想的なシステムがヤングたちによって提案されています(図3)。バンド幅は狭くなるために効率は落ちますが、世界中で使える標準システムを作ることを優先しています。

4. 等級の原点

目的天体のフラックスは等級の原点となる星のフラックスが知られていれば標準等級から求めることができます。さて等級の原点はどのように決められているのでしょうか。これが実に様々で等級システムの混乱の一因になっています。ベガが0等星であり、等級の原点であると誤解している人が多いようですが正確ではありません。ベガが0等に近いは単なる偶然です。代表的な測光システムについて原点の決定方法を紹介します。

国際式 $P_g P_v$ システム：今は使われていませんが現在の標準等級システムの原点がここにありますので紹介しておきます。最初の原点は北極星です。北極星を2等級と定義することから出発しています⁸⁾。その後こぐま座ラムダ星を6.5等と定義し直して北極星野の暗い星が多数観測されました。そしてローマで開催された1922年の第1回IAU総会で北極星野の96個の星を国際式等級の

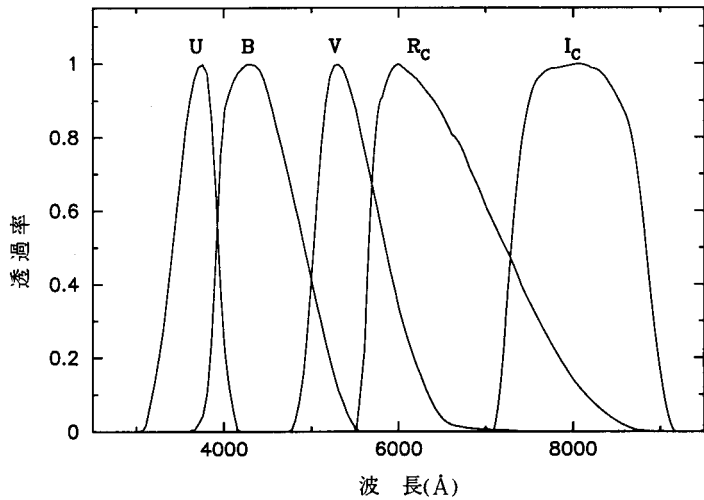


図2 標準測光システムの理想的な透過特性

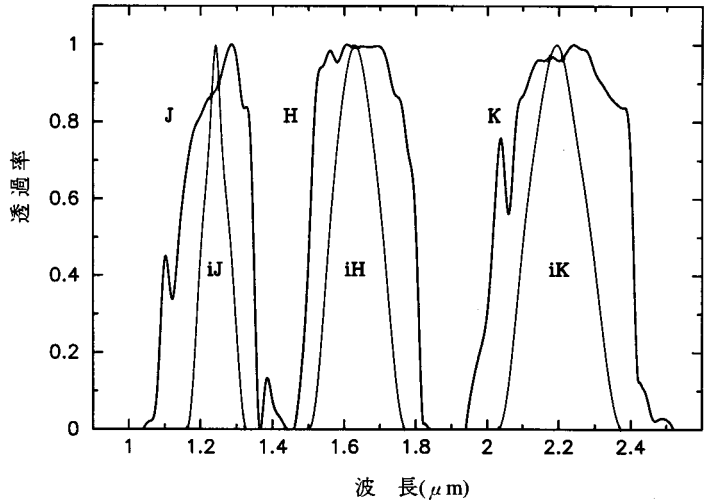
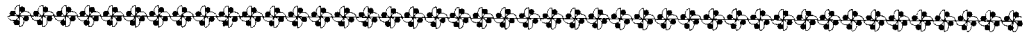


図3 従来の近赤外線測光システムと新しく提案されたフォーベース効果の少ない測光システム(青線)



原点にすると決められました。ここで正式に標準等級システムが認知されたわけです。

ジョンソン UBV システム：国際式システムの後いくつもの測光システムが提案されましたが、ジョンソンのUBV システムに落ち着きました。等級の定義は1953年に与えられています⁹⁾。すなわち国際式標準星の中の北極星野6個の星の P_V 等級を V 等級と同一と見なすことで V 等級の原点としました。透過特性が良く似ており、色補正が少なかったからです。U と B 等級については6個の A0 型主系列星 (α Lyr, γ UMa, 109 Vir, α CrB, γ Oph, HR3314) の平均の U - B, B - V カラーを 0 等とすることで定義しました (U = B = V)。ここで初めてベガ (α Lyr) が登場します。ベガは平均からわずかにずれていて、U=0.02, B=0.03, V=0.03 等です。

カズンズ $R_C I_C$ システム：赤と写真赤外域で最も良く使われている測光システムです。クロン・カズンズシステムとも呼ばれ、古い文献では R_{KC} , I_{KC} などと書かれることがあります。このシステムはクロンが1951年に定義しましたが測光精度や星の数が十分でなく、カズンズが1975年に大幅に改善しました。0 等級の定義についてクロンは国際式システムに、カズンズはジョンソンに習いました。カズンズは南アフリカ天文台で観測を行っているのでベガの観測はできません。そこで E 領域と呼ばれる南天の標準星野にある7等より明るい6つの A0 型主系列星の平均を $V - R_C = 0$, $V - I_C = 0$ としました。ベガの明るさはテラーが $R_C = 0.03$, $I_C = 0.024$ 等と与えています。ここで注意すべきことは3つの R と I システム (ジョンソン, クロン, カズンズ) でベガの明るさが異なることです。ジョンソンの RI システムではベガは $R_J = 0.07$, $I_J = 0.09$ 等です。ところで余談ですが、カズンズは90歳代半ばの高齢にもかかわらず今でも観測を続けているそうです。70歳を越えてから現在世界中で使われている標準測光システムを完成したことになります。

近赤外線：最も良く使われるエライアスの測光システムではベガをすべてのバンドで0等とすると定

義しています²⁾。ここでベガを原点にするシステムが登場したわけです。しかし V=0.03 等, JHK_L=0.00 等というのは混乱を引き起こしそうです。ちなみにジョンソンの近赤外線システムではベガは J=0.03, K=0.02 等です。原点をジョンソンに習うか、あるいは便宜的にベガを0等とするかは天文台毎に異なります。このように近赤外線システムは原点も統一されていないので精度の高い観測を必要とするときは標準星の定義についても注意をはらう必要があります。

オリジナルの標準星はUBVについては1954年にジョンソンが、 $R_C I_C$ は1976年にカズンズが与えました。誤差の蓄積を避けるためにはできる限りこれらオリジナル星を標準星として観測すべきでしょう。しかしこれらのUBV星は明るいものが多く、 $R_C I_C$ 星は南天でしか観測できません。そこで暗い標準星や北天でも観測できる標準星が必要となり、たくさんの2次標準星が作られてきました。その中で特に有名なのがランドルトの赤道帯標準星です¹⁰⁾。南天でも南アフリカ天文台のグループがたくさんの暗い標準星を作っています。しかしベッセルはランドルトの等級と南アフリカ天文台の等級の間に系統的な誤差があると指摘しています¹¹⁾。特に赤い星と青い星でUバンドでは0.15等もの大きな差があります。また他のバンドでも赤い星に差が顕著です。私たちはランドルトの標準星を無条件に受け入れている傾向がありますが注意すべきでしょう。

5. フラックスキャリブレーション

さて正しく等級が求められてもそれだけでは他波長との比較ができません。なにか天体の明るさを表す単位が必要です。原点星が定義されたのでその星のフラックスを正確に測定すれば標準測光システムに基づくすべての星についてフラックスを求めることが可能となります。通常は単位としてフラックス ($W\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$ または $W\ m^{-2}\ Hz^{-1}$) を用います。さて0等星のフラックスはどのように決定されたのでしょうか。

標準システムの0等級のフラックスは分光的エネルギー分布(SED)が詳しく観測されている星を使います。SEDが最も精度良く観測されているのがベガです。精密に較正された分光装置と小型望遠鏡を用いて地上遠方に置かれた黒体炉(タンガステンランプや融点にあるプラチナや銅)とベガを交互に観測し、その時の大気吸収量を正確に評価することによりベガの絶対フラックスを求めることができます。このようにしてベガのSEDが1%の精度で求められています¹²⁾。一方でベガのモデル大気が詳しく計算されているのでそれも併用します¹³⁾。特にバルマー系列での吸収線の影響が評価できます。近赤外線についても同様に黒体炉と干渉フィルターで数多く観測されています。

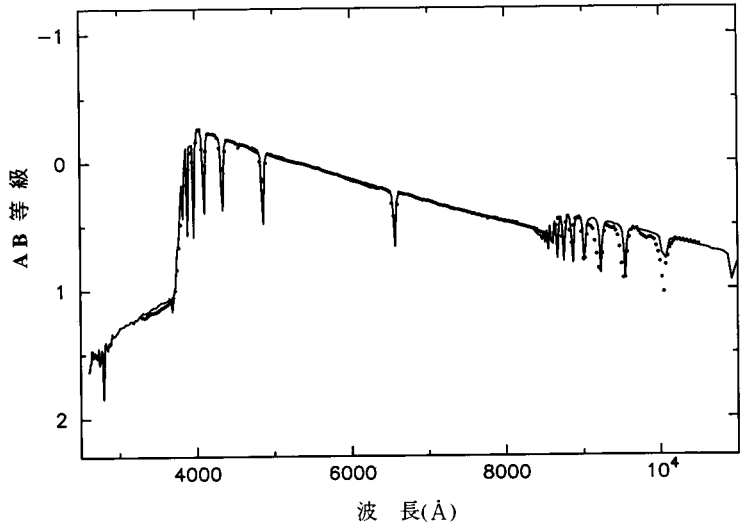


図4 ベガのスペクトル。点は観測、実線は大気モデル

1966年以前のものでしたので改訂すべきでしょう。

6. AB等級

次にSEDの観測などに使われ、最近銀河の観測などにも頻繁に見られるようになったAB等級について紹介します。スローン・デジタル・スカイサーベイ(SDSS)¹⁵⁾でも採用が決まった測光システムです。これまで述べてきた伝統的な等級システムのフラックスキャリブレーションは「等級 ⇒ フラックス」という手続きを踏んでいます。しかし実際にはフラックスへの変換が与えられていない測光システ

現在最も信頼されているベガのSEDを図4に示します。0等級のフラックスはこのベガのSEDを図2の透過特性を重みとして平均値を求めることで得られます。ただしベガのV等級は0.03等として補正します。表1はこうして求めた0等級のフラックスです。カッコ内の値は頻繁に引用されるジョンソンの値です¹⁴⁾。特にBバンドで大きく異なります。ジョンソンが用いたSEDデータは

表1 新しいベガのSEDに基づく0等級のフラックス。カッコ内の値はジョンソンの値¹⁴⁾。

	f_{λ} $\times 10^{-9} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$	f_{ν} $\times 10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$
ジョンソン U	4.24 (4.35)	1.86 (1.88)
B	6.45 (7.20)	4.18 (4.44)
V	3.69 (3.92)	3.68 (3.81)
カズンズ R_c	2.20	3.10
I_c	1.14	2.46

ムが多数あります。一方 AB 等級は「フラックス ⇒ AB 等級」という手順を踏みます。星の明るさを原点にするのではなくフラックスで定義します。他波長観測との比較が容易になり全波長で使える等級システムです。AB 等級は次式で定義されます。

$$AB = -2.5 \log f_{\nu} (\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}) - 48.60$$

または

$$f_{\nu} (\text{Jy}) = 3631 \cdot 10^{-0.4 AB}$$

すなわち 3631 ジャンスキー(Jy)のフラットなスペクトルを持つ天体を全周波数で 0 等とするものです。3631Jy は波長 5480 Å でのベガのフラックス (3530Jy) を 0.03 等とすることで計算される値です。電波や X 線など他の波長ではベガが 0.03 等という概念はありませんが、とりあえず便宜的なものと考えれば全周波数での共通の等級システムが得られることになります。

この AB 等級はオークとガンが 1983 年に提案し AB79 と呼ばれていました。その後ベガのフラックスが詳しく測定されるに伴い改訂が必要になりました。私たちのグループは新しいベガの SED をもとに AB95 システムを提案しました。ただし混乱を避けるために上式の定義は変えずにベガの 5480 Å でのフラックス(3590Jy)を AB95 では 0.018 等とすることにしました¹⁶⁾。AB 等級は観測者自身にフラックスキャリブレーションを任されたシステムと言えます。フラックスを得ることができたら上式を用いてそのまま AB 等級に変換すれば良いことになります。可視光での観測のためには文献 16 に 4 個の標準星を与えましたが、今後星の数と種類を増やしていく予定です。

0 等のフラックスは各バンドでまちまちでした。それはベガのフラックスを 0 等の原点に用いているからです。例えば $B - V = 0.0$ といっても B と V バンドのフラックスは同じではありません。B と V バンドのそれぞれの 0 等でのフラックスが異なるからです。しかし AB 等級を用いる限り、例えば SDSS システムの場合、 $g' - r' = 0.0$ は正確に g' と r' でのフラックスが同じであることを示しています。

AB 等級の定義で初めて星の明るさを原点とする束縛から逃れたことになります。将来 AB 等級システムが広く使われ、標準システムとして認められるようになったら標準測光システムの長年の混乱に終止符が打たれるかもしれません。8 m 級望遠鏡で使えるような暗い標準星はまだありません。8 m 望遠鏡時代を迎え、可視光と近赤外線の理想的な標準測光システムの構築に真剣に取り組む時に来ていると言えるでしょう。

参考文献

- 1) Young A. T., et al., 1994, A&AS 105, 259
- 2) Elias, J. H., et al., 1982, AJ 87, 1029
- 3) Johnson H. L., Harries III. D. L., 1954, ApJ 120, 196
- 4) Johnson H. L., 1965, ApJ 141, 923
- 5) Buser R., 1978, A&A 62, 411
- 6) Azhuseinis A., Straizhis V., 1969, AZ 13, 316
- 7) Bessell M. S., 1990, PASP 102, 1181
- 8) Pickering E. C., 1884, Ann. Astron. Harvard College 14, 1
- 9) Johnson H. L., Morgan W. W., 1953, ApJ 117, 313
- 10) Landolt A. U., 1992, AJ 104, 340
- 11) Bessell M. S., Brett J. M., 1988, PASP 100, 1134
- 12) Hayes D. S., 1985, in IAU Symp. 111, Calibration of Fundamental Stellar Quantities, eds. Hayes D. S. et al. (Reidel, Dordrecht) p. 225
- 13) Castelli, F., Kurucz, R. L. 1994, A&A 281, 817
- 14) Johnson H. L., 1966, ARAA 4, 193
- 15) 浜部勝他, 1995, 天文月報 88, 341
- 16) Fukugita M., et al., 1996, AJ 111, 1748

Photometric Standard Systems

Takashi ICHIKAWA

Department of Astronomy, Tokyo University
Aoba-ku, Sendai 980

Abstract: In optical and near-infrared wavelengths, "magnitude" has been traditionally used as the brightness unit of astronomical objects. However, various photometric systems often cause confusions in terms of the standard stars and flux calibrations. The different definition of zero magnitude and the ambiguous flux calibration sometimes prevent us from accurate mutual comparison of photometric data. We review photometric standard systems and summarize their problems. A new photometric system AB95 is also proposed.