フィルムにおける画像工学のデジタル画像への適用

～冷却CCDによる天体撮像での応用例～

岡野 邦彦[†]

天体は暗い背景に置かれた自己発光物であることから極端な明暗差があり、画像表現が難しい。それをうまく表現する方法が銀塩フィルムでは古くから工夫されてきた。冷却CCDカメラによる天体画像を綺麗に仕上げるために、このフィルムで培われてきたのと似た処理をデジタル的に実施する「デジタル現像」と呼ばれる方法が成功を収めている。

キーワード：天体画像、銀塩写真、色彩強調、デジタル現像

1. ま え が き

天体画像の撮影にCCDが使われはじめたのは、1980年頃のことである。最初はきわめて高価な機材であり、天文台などの施設で研究用として使われていた。しかし、1990年にアマチュア向けの天文用CCDカメラが数十万円という価格で登場して以来、アマチュアの天文愛好家の間にも急速にCCDカメラが広がっていった。

研究用としてCCDカメラが重宝された理由は、高感度に加え、その入射光量に対する出力特性がリニアであることで、「測定」という観点では従来の写真（以下では銀塩写真と呼ぶ）より優れていることは疑いない。天文学研究の世界でCCDが急速に銀塩写真に置き換わっていったのは当然の成り行きである。

しかし、それをアマチュアが使う場合には少し意識の違いがある。アマチュア天文愛好家の大多数は研究や新天体の発見を目指しているのではなく、天体を美しく撮ることに楽しさを感じている人が少なくない。そして、CCDカメラの使用目的に「美」という観点が入ってくると、CCDのリニア特性が必ずしも有利に働かないのである。一般の写真でも、デジタルカメラの画像が銀塩写真の美しさになかなか追いつけないことは今となっては周知の事実であろう。天文愛好家の世界では、その問題がCCD導入後のかなり初期の段階から問題視され、さまざまな工夫がなされてきた。本稿で紹介する「デジタル現像法」といわれる処理は、天体画像を美しく見せるという観点では大きな成功を収めた処理であり、天文愛好家の間では世界的に広く普及している。

2. 冷却CCDカメラとはなにか

最初に天文用に使われるCCDカメラについて簡単に説明しておく。天文用といっても基本的な動作はデジタルスチルカメラと大きくは変わらない。しかし、天体画像は多くの場合長時間（数分から数時間）の露光蓄積を要する。現在市販されている普通の（天体用でない）デジタルスチルカメラは、高価なものでも15秒程度までしか露出はできない。最大の理由はCCDの暗電流といわれるノイズにある。銀塩フィルムの場合、暗闇でシャッターを開放しておいても光が来ないかぎり感光はしないが、CCDは回路を露光状態（発生した光電子を蓄積する状態）にすれば、CCD内部で発生する熱電子も蓄積され始める。これが「暗電流」あるいは「ダークノイズ」と呼ばれるもので、長時間露出においては大きな障害になる。

最新のCCDは暗電流が非常に少なくなってきたが、それでも常温では高々数十秒が露出時間の限界である。暗電流はCCDの温度が低いほど少ないので、この問題を軽減するには、CCDを氷点下数十度まで冷却すればよい。温度が7℃程度下がる毎に暗電流は半分になるといわれる。天体用を主目的とするCCDカメラは必ずこの冷却機能を持っていることから、「冷却CCDカメラ」と呼ばれている。

天文台用では冷却を液体窒素等で行うカメラもあるが、そのようなものはアマチュアが使うのは難しいため、市販の冷却CCDカメラでは冷却にはペルチエ素子が使われ、素子発熱面からの熱は空冷または水冷で放熱する。

図1にアマチュア向け市販カメラ（空冷）の例を示す。現在市販されているカメラの画素数は10～600万画素。価格帯は概ねCCDの大きさ（画素数ではない）に対応し、20～200万円程度となっている。その大多数は、高感度を得るために赤外ブロックフィルタさえ内蔵しないモノクロカメラで、カラー画像はRGB分解撮像で得るのが一般的である。惑星などを除けば大多数の天体は短時間では形状が変化し

[†] CCDアストロノミーネット

"Application of an Image Processing Technique for Photographic Films to the Digital Image Data ; An Example of Astronomical Imaging by Cooled CCD Cameras" by Kunihiro Okano (CCD Astronomy Network, Nishi-Harima)

図1 冷却CCDカメラ (米・SBIG製, ST-7E)

ないから3色に分けて撮ることに問題はない。RGB各画像を異なる日に撮る場合さえある。

カメラからの画像データは、モノクロ16ビットで出力される。大部分の画像処理は16ビットのまま実施され、プリントの段階で各色8ビットに変換する。

3. CCD画像の不自然さの原因と対策

3.1 銀塩写真が美しく感じる理由

1990年初頭からアマチュアに広まった冷却CCDによる天体画像は、その高感度によって従来の銀塩写真とは比較にならない拡大率と分解能を実現し、その威力に皆が驚かされた。しかし、同時にCCD画像特有の不自然さを指摘する声も直ちに聞かれたのである。シャドウが黒くつぶれて星雲の淡い部分はノイジー。ハイライト部は白く飛んでしまう。要するに、CCD画像は美しくなかった。

この問題は、その後に現れた初期の一般撮影用デジタルスチルカメラで感じたのと共通な不自然感であろう。しかし、天文用のカメラは当時から16ビット(65536階調)ものダイナミックレンジをもっていた。その冷却CCDカメラの画像が、プリント上では通常の銀塩写真にラチチュード(明暗差の許容量)でまったく及ばないのはいったいどうしたわけなのだろうか。

一般に、天体は反射物ではなく自己発光物であることがほとんどで、しかも背景は暗く、加えて星雲の周辺部は非常に淡い。星雲の背後にある明るい星が星雲を輝かせているケースもある。すなわち、通常の写真に比べ、極端な明暗差があり、撮影もプリントも難しい対象といえる。わかりやすく言えば、闇夜に輝く裸電球が薄暗く照らす対象を、電球のフィラメントと同時にプリント上に表現しようとしているようなものといえよう。それを、デジタルカメラでありがちな図2(上)のような状態にせず、図2(下)のような画像にしたいというわけである。(この作例は上下とも同じ画像データで、画像処理のみが異なる。ど

図2 極端な明暗差のある画像例

んな処理を施したかは次節に述べる。)

面白いことに、銀塩写真はこのような極端な明暗差を実にうまく表現する。その秘密は主に現像過程での化学的な非線形現象にあるらしい¹⁾²⁾。

フィルム上のたくさん光があたった部分は、現像中にその部分にある現像液は早く消耗し(慣習で現像液が疲労すると言う)、現像の化学反応が鈍化することでハイライト部の感度を自動的に落とすことになる。その結果、ハイライトはなかなか飽和せず、フィルムの受光量と濃度の関係は図3のようなS字型となる。S字の裾部分を特性曲線の脚部、ハイライト部を肩と呼ぶ。脚部の方は主に銀塩フィルムのベース濃度がゼロでないことから発生する。この脚部域では特性線がやはり寝ているが、これにより露出不足部のコントラストが低下してノイジーな印象を緩和する効果がある。

S字の直線部分の傾き($\tan \theta$)をそのフィルムのガンマ値(γ)という。ガンマが高いほどハイコントラスト(硬調)なフィルムとされる。同じフィルムでもS字の形状や γ 値は現像時間によって変化する。例として、図4にコダック・テクニカルパンTP2415フィルム(白黒)の特性曲線を示した。フィルムの特性は現像剤の成分によっても超軟調

図3 銀塩フィルムとCCDの特性の差

図4 TP2415フィルムの特性カーブと現像時間

から超硬調まで大きく変えることができる²⁾。

一方の冷却CCDカメラの特性は、受光量と信号レベルは直線関係にある(全領域でガンマが一定、通常は $\gamma=1$)。このままではプリント可能な最大値(飽和レベル)で突然白く飽和することになる。その結果、主要部(中間調)を同じ調子(ガンマ)で表現しようとすれば、プリントの紙上に表現できるラチチュードは銀塩写真の方が大きくなるのは図3からも理解できる。シャドウまで同じガンマで表示すれば低レベルでのノイズも目立つことになる。

もしトーンカーブを図3のようなS字にするだけで問題が解決できるなら、その特性をトーンカーブ調整で再現するのも簡単だろう。しかし、S字に特性曲線が寝てきたハイライト部は、そのままでは非常に低コントラストで鮮鋭感

図5 エッジ効果の発生原理

図6 カラーフィルムでのエッジ効果発生例

のない、いわゆる「眠い画像」になってしまうはずである。実はこの点にも銀塩写真は巧みな対策を用意している。

明暗境界のごく狭い部分に関してだけは、あまり光のあたらなかった部分にある疲労していない現像液が自然に拡散することで、上記の現像鈍化が解消される。その結果として、ハイライト部分の境界や、点や線の像の周囲にのみ「エッジ効果」が発生することになり(図5)、それがハイライトの低鮮鋭度感を解消するのである。

現像時に、現像液をむやみに攪拌すると眠い(鮮鋭感のない)画像になってしまうというのは、モノクロ自家現像時代には常識であった。場所によって疲労度が異なってくるはずの現像液をどんどん攪拌してしまうことで、上で説明した現像効果を台無しにしてしまうわけである。

希釈現像による高鮮鋭度化という手法もあった。これは現像液を標準より希釈して使うというものである。現像液を希釈したことで、上記で説明した光が多く当たっている部分での現像液の疲労が早く進み、現像での画像処理効果を促進する。

このような巧みな手法とその特性は、モノクロフィルム

の時代に蓄積されてきたノウハウなのだが、それらはカラー時代にも継承されている。図6は、月面をカラーポジフィルム（フジ・RVP「ベルビア」）で撮影したものの部分拡大である。デジタル処理は加えていない。月縁においてエッジ効果効果が発生しているのを確認することができる。こんなに拡大しないで全体像を見れば、このエッジ効果で人の眼には月縁が一段とクッキリとした印象になる。このような効果はハイライト部全体に起こっており、写真の鮮鋭感を増す効果を果しているのである。カラーフィルムにおけるエッジ効果の発生原理はモノクロフィルムの場合と若干異なるが、これについては後述する。

つまり、銀塩写真はその現像過程において光の当たり方や写っている映像の形状に合わせ、場所によって画像処理を自動的に変えているということになる。このような特性が銀塩写真が人の眼に自然に感じる秘密であろう。そして、これらの効果は全画面均一な処理、例えば、トーンカーブ補正等では再現できないはずである。

3.2 デジタル現像法

銀塩写真の美しさを求めるならば、まずは銀塩写真の処理を真似することが第1歩に違いない。そのような考えから、冷却CCDによる天体画像で銀塩写真の現像特性を再現する単純な手法として考案されたのが、デジタル現像（DDP：Digital Development Process）と呼ばれる方法である³⁾。

CCD画像 j 番目のピクセルの元信号レベル X_j に対し、以下のような画像除算を含む非線形処理を実施し、処理結果 Y_j を得る（全ピクセルに対して実施する）。

$$Y_j = kX_j^\gamma / (<X_j> + a)^\gamma + b \quad (1)$$

ここで、 γ は図3で説明した画像特性曲線のガンマ値を意味する。銀塩写真の γ は普通は1ではない。CCDの元データは通常 $\gamma=1$ （線形）であるが、式(1)の γ を目標値に設定すれば特性の変更もできる。これはデジタル現像の考え方には無関係なので以下の議論では γ は1としておき、式中の γ を省略することにする。

式中の $<>$ は画像をわずかにぼかしたデータを使うことを意味する。このぼかしによって、処理後の画像にエッジ効果が発生する。すなわち、このぼかしが、明暗境界での現像液の拡散混合に匹敵する効果を生ずる。エッジ効果の発生法はいわゆるアンシャープマスク処理とよく似ているが、通常の画像処理で実施されるアンシャープマスク処理は線形フィルタである。また結果として得られる画像も、アンシャープマスクとDDPとはまったく異なる印象となる。なお、式(1)の変換によって特性曲線は双曲線になるので、双曲変換とも呼ぶこともある。

式(1)中の a 値がハイライトで特性線が寝はじめるレベルを決める係数である。 b 値は脚部が始まるバック濃度を決めている。これによって画像の特性線は銀塩写真のようなS字となる。 k 値は処理前後でのレベル合わせのための係数

図7 DDPによる特性変換

で通常は $k=a$ としておく。 $a=10,000$, $b=100$ の場合の特性線を図7に示した。

デジタル現像（DDP）を実施した画像では、 $X > a$ のハイライト部では特性線が寝てくるが、それと同時に、その領域でのみエッジ効果が加わることになる。一方、 $X_j < a$ では(1)式の分母が $<X_j> + a \sim a$ であるから、中間輝度部（直線部）や脚の部分にはエッジ効果が加わらないのに注意されたい。また、低レベル部は特性が寝て低コントラストになることで露出不足部のノイズな印象を緩和する。

このようなデジタル現像を加えたCCD画像は、驚くほど銀塩写真的になることが確認できる。図8にはM63と呼ばれる銀河について、元画像（上）とDDP処理後の画像（下）を比較してある。銀河の中心部は極端に明るい反面、周辺は淡くバックグラウンドに溶け込んでいく。このような対象において周辺部から中央部まで自然なプリントを得るには特性曲線の変換とハイライトのエッジ効果の両方が同時に実施されることが非常に重要で、特性曲線の単純な変更だけでは決して実現できない。先出の図2で示した画像も下段の例にはDDPが施してある。

細かな星が大量にぎっしりと集まっている球状星団と呼ばれる対象を処理すると、エッジ効果が非常に重要であることがもっともよくわかる。図9にはその例を示した。左下が元画像で、中央は飽和してしまっている。 a 値を500, 1,500としてDDPを実施したのが上段の2枚である。元画像に比べ、星そのものも小さくシャープに表現されているのに注意されたい。また、単なるトーンカーブ変更で低コントラスト化した場合の例が右下である。全輝度を表示はできるが鮮鋭感を失ってしまう。

3.3 DDPによる色彩強調

ここまでは画像がモノクロであることとして話を進めて

図9 球状星団の処理例

図8 M63銀河のDDP処理

きたが、次にカラー画像の処理にDDPを発展させることを考える。

ここでもまず銀塩カラーフィルムの特性を考察することから始めよう。一般にカラーフィルムは真実の色を再現することを目標に開発されてはいない。広告などではわかりやすいようにリアルカラーと呼んでいることもあるだろうが、実際には真実の色ではなく、顧客が好む色を目指しているはずだ。一般に好まれるのは、真実の色よりも色彩度が高い鮮やかな色である。静物や花を写真に撮ると、実物よりずっと綺麗に写って驚くことがある。美術館で見た中世絵画の原画より売店の絵葉書の方が遥かに鮮やかな(現代人が好む)色になっていることもある。これらは現代のカラー写真がそのように演出されているためであろう。

天体用の冷却CCDカメラは基本的にはモノクロであり、カラー画像を得るには、RGB各画像を別個に撮って合成するという手法を取る事は第2節に述べた。このような方法でカラー天体画像を撮ってみると、色の美しさでも銀塩写真には及ばない。色が鮮やかに出ないのである。特にDDPを実施した場合、ハイライトのダイナミックレンジが圧縮されるわけであるが、それによってRGB各画像の輝度差も圧縮されてしまう。結果としてハイライト部は色が褪せたイメージになってしまうのは容易に予想できる。冷却CCDによるカラー画像でも、銀塩カラー写真と同様の演出を加えないと鮮やかな色彩の天体写真は撮れないに違いない。

実は、カラーフィルムの現像過程には、色彩を鮮やかにするための処理も含まれている。その代表的なものにDIR

カプラー (Development Inhibitor Releasing Coupler) を用いたインタイメージ効果 (あるいは重層効果) と呼ばれるものがある⁴⁾。これは、強く光があたった感色層がその現像過程で他の感色層の現像進行を妨害する物質を出すというものである。その結果、色飽和度の高い鮮やかな色彩の写真が得られるようになっている。また、図6で示したようなカラーフィルムでのエッジ効果もDIRカプラーの働きと考えられる。DIRカプラーの発明は古く、1966年のことであるが、その後改良されつつ、カラーフィルムの特性調整においては今も非常に重要な役割を担っている^{5) 6)}。

CCD画像でDDPを実施しつつインタイメージ効果を得るためには、上記DDPの式(1)をやや変更し、割算する方のばかしマスクを別の色で撮った画像に置換するだけでよい⁸⁾。例として赤画像を緑画像で割算処理する場合は、

$$Y_{jr} = kX_{jr} / (<X_{jg}> + a) + b \quad (2)$$

ここで添字の r と g は赤 (red) 画像と緑 (green) 画像を意味する。 γ は1として省略した。

例えば、赤画像 X_{jr} を青画像で作ったマスク $<X_{jb}>$ で、緑画像 X_{jg} を赤画像からのマスク $<X_{jr}>$ で、青画像 X_{jb} を赤からのマスク $<X_{jr}>$ でDDP処理をする場合、マスクの色を小文字で表して「RGB/brr処理」などと書くことにする。これによって単純なRGB分解によるやや地味な色彩のCCDの画像が、いわゆる色鮮やかな画像になる。

真実の色を誰も知らない天体画像での作例をお見せしてもわかりにくいので、まずはデジタルカメラによる花の画像でその効果を示すことにしたい (図10)。実物と見比べれば、真実の色に近いのは間違いなく未処理画像 (図10(a)) であるが、おそらく多くの方はRGB/brrのDDP処理を実施した色鮮やかな図10(b)のような傾向を好むのではないだろうか。

図11には、1996年に地球に接近して話題になった百武彗星のRGB/brrによる画像処理結果を示す。中性原子が発する青色光を自然に表現したこの作品は、DDP色彩強調処理が注目を浴びた代表的な例である。

元画像とマスク画像のいろいろな組合せが考えられるが、銀河などでは極端過ぎない自然な色彩強調が得られるものとして、合成画像 $S (=R+G+B)$ を用いて、RGB/sssの処理をするのがよいことが多い。図12にそのような例として、先ほど図8で示したM63銀河のカラー作例を示す。中央が飽和しないようにDDPで輝度を圧縮しつつも色彩を失わないことに成功している。仮に宇宙に出かけてM63銀河を肉眼で見てもこんな派手な色はないはずであるが、かといってこれは勝手な彩色ではなく現実存在する色を強調

していることに注意されたい。赤い部分は電離水素ガスが656nmの波長で光っている領域、青い領域は星生成が活発な高温で若い星が多い部分である。天体画像は鑑賞向けであっても単に美を追求した芸術作品ではなく、色は科学的背景を持たなければならないと考えている。この他の様々な天体画像についても興味を持っていただけるならば筆者のホームページ⁷⁾に公開してある。

4. む す び

本稿では天体画像で広く利用されているデジタル現像といわれる手法とその背景を解説した。天体画像におけるいろいろな画像処理の詳細は例えば文献9) 10)などを参照されたい。天体写真を美しく表現するという観点の処理は、学問としての天文学とは異なった領域であり、アマチュア天文家によって開発された手法も少なくない。デジタル現像など美しく見せるための手法は、ハワイにある日本の大型望遠鏡「すばる」の広報発表用画像などにも実際に採用されていると聞いている。天体画像と一般画像の処理には違う部分も多いと思うが、読者の方々に本稿が何らかの参考になれば幸いである。

(2002年7月3日受付)

〔文 献〕

- 1) 富田弘一郎編：「天体写真 (撮影と処理の新テクニック)」, 恒星社厚生閣 (1985)
- 2) 三井信夫, 大野隆司編著, 久下謙一, 小林裕幸著：「写真のケミストリー」, 丸善 (2001)
- 3) 岡野邦彦：「CCD画像を美しくするための画像処理」, 誠文堂新光社, インタラクティブアストロノミー誌, 5, p.62 (1996)
- 4) 三井信夫編著, 北村孝司, 久下謙一ほか著：「画像工学概論・I」, 丸善 (1999)
- 5) 池田秀夫, 原口暢之, 長岡克郎ほか：「超高画質カラーリバーサルフィルム『フジクロームプロビア100F, 400F』の開発」, 富士フィルム研究報告, FFRDEK, 46, p.1 (2001)
- 6) 入江康志, 中山知是：「次世代カラーリバーサルフィルムの開発」, KONICA Technical Report, 14, p.13 (2001)
- 7) <http://www.asahi-net.or.jp/~rt6k-okn/>
- 8) 岡野邦彦：「デジタル現像と色彩強調処理」, 誠文堂新光社, インタラクティブアストロノミー誌, 7, p.82 (1996)
- 9) R. Berry and J. Burnell：「The Handbook of Astronomical Image Processing」, Willmann-Bell, Inc. USA (2000)
- 10) 岡野邦彦：「冷却CCDカメラによる天体撮影テクニック」, 誠文堂新光社 (2002)

おのの くにひこ
岡野 邦彦 1984年、東京大学にて博士課程修了、プラズマ物理学の研究者だが天体写真家としても活動。1994年より、天文誌等で解説を執筆。1996年、CCDアストロノミーネットを創設。現在、(株)ODAC取締役、電力中央研究所上席研究員、(社)プラズマ・核融合学会理事、工学博士。

図10 DDP色彩強調による色の変化 (RGB/brr)

図11 百武彗星の色彩強調効果 (RGB/brr)

図12 M63銀河 (RGB/ssr)