

# CCD 解体新書 その5

## 「フラットフィールドイングって何？」

上野 宗孝

〈東京大学教養学部宇宙地球科学 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

E-mail: ueno@chianti.c.u-tokyo.ac.jp

関西で良く使う言葉で『難儀なもん（厄介なもの）』と言う言葉がありますが、このフラットフィールドイングというものは、まさしくこの『難儀なもん』だと思います。どうして難儀かと聞かれると、大抵答えにも難儀してしまうのが『難儀なもん』のゆえんだと思います。

さて最初の回で紹介したように CCD は 2 次的に光ダイオードをならべたものです。従って素子毎に微妙に特性が違っていることは避けられない問題です。近年の半導体技術は極めて高く、またその特性も安定していますから、隣り合う素子の特性が 2 倍も違うというようなことはほとんどありませんが（通常そのような素子は欠陥画素として扱われます）、天体観測上まったく無視できるほどには特性が揃っていません。それでも最近の CCD 検出器の感度などの均一性は非常に優れていますから、CCD を用いて天体観望を行っている範囲においては、その特性差はほとんど気にする

必要なくなっています。しかし天体からのフラックスを測定する場合や、空の明るさよりも暗い天体の検出を行う際には、きちんとしたフラットフィールドイング処理を行う必要が出てきます。少し説明が前後してしまいますが、この『フラットフィールドイング』とは本来、画素毎の感度差を補正する操作のことを言います（図 1 参照）。

ところで CCD の暗電流とか感度というものは、ある意味で物理的な確率過程だと考えることができます。従って宇宙望遠鏡のように特種な条件下で強度の宇宙線被爆を受け、そのことによる半導体自身の劣化でも生じないかぎり、動作環境条件が変わらない範囲において、長期的に見てもそれほど変化する性質のものではありません。もちろん赤外線検出器のように異種の半導体を接合しているものは、熱サイクルによるストレス疲労により素子の劣化がありますから、長期的には無視できない時間変化を伴います。しかしそれで

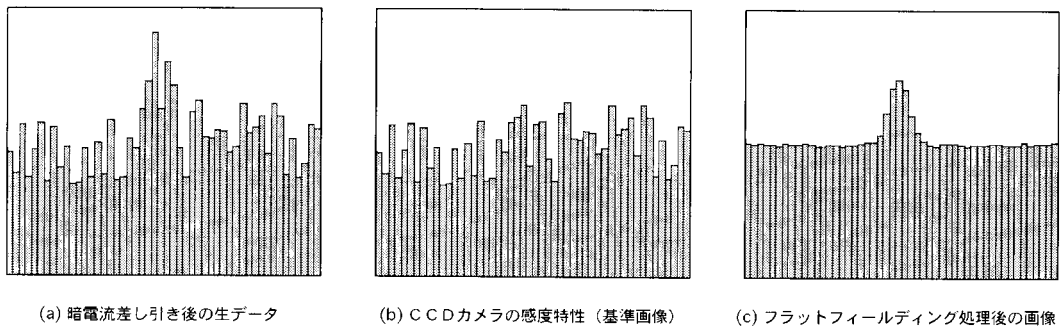


図1 フラットフィールドイング処理

フラットフィールドイング処理の一元的な模式図。暗電流差し引き後の生データ画像(a)を CCD カメラの感度特性を示す基準画像(b)で割り算することにより、実際の信号強度（ここでは平坦なスカイ背景光の上にポイントソースがある場合）を示す画像(c)を得ることが出来る。図中の縦軸は信号強度、横軸は画素を示す（通常の CCD 画像の 1 列を取りだしたもの）。

も一連の観測中にそれらの特性が変化するという可能性はまずありません。それではどうして多くの人がフラットフィールドイングということに『難儀』な思いをしなければならないのでしょうか。その理由は大きく分けると以下の2点に集約されていると思います。

**その1：感度ムラ特性（基準画像）を得ることができない**

**その2：得られた感度特性で補正しても目に見えるムラが残る（補正しきれない）**

まず1番目の問題から考えましょう。フラットフィールドイングとはどのような操作を行うかと言いますと、もっとも簡単には一様な光源を観測し、その際得られた画像で全ての画素の特性を規格化（その基準画像で、得られたデータの各々を割り算する）してしまえば良いわけですから原理的には非常に単純です。しかし宇宙空間にはそのような都合の良い光源は存在しません。そこで我々は何らかの一様と見なせる光源を用いてキャリブレーションを行うわけですが、このことがしばしば問題を複雑にしています。

例えば赤外線波長帯では一般的に空が明るいいため、空の背景光自身をフラットな光源だと見なせる場合があります。もちろん天体の存在しない領域はありませんし、空の明るさにも模様がありますから（例えば近赤外線波長帯でのOH夜光の雲など）、統計的な処理によりそれらの影響を取り除くことが必要になります。しかしそれでも赤外線波長帯では比較的良好な一様光源を使える可能性があります（空が明るいこと自体はけっして観測に有益なことではありませんが）。但し赤外線波長帯においても波長が長い領域（典型的には2.3  $\mu\text{m}$  よりも長波長側）になると、望遠鏡の鏡面などの構造物から発する（装置起因の）熱輻射が空の明るさを上回りだしますので、十分な注意が必要となります。

これに対して可視光の波長帯ではどうでしょう

か。可視光波長帯ではそれほど空が明るくありません。従って広い波長幅で広視野の観測を行う際になければ、背景光で十分な光量を稼ぐ事は困難です。またそれが可能な場合においても、背景光に対して星の輝度の寄与が大きいため、統計的にこれらの影響を防ごうとする際には、背景光のレベルが十分に高い赤外線観測の場合よりも注意が必要になります。このような事情から可視光観測では通常フラットフィールドイングのキャリブレーションのため、人工的な光源（ドームフラット：ドーム内にスクリーンを置きそれに照明を当てるなど）が用いられています。しかしこれらの方法で求められた、一様と思われる画像で割り算をしても、十分なキャリブレーションが行えないというケースにしばしば出くわします。その理由について考えてみましょう。

最初にも書いたように CCD 自身の感度特性は条件さえ変わらなければ 100% 変化しないと考えてさしつかえありません。しかし CCD 自身の特性を変えうる要因として一つだけ無視できない条件があります。それは CCD の光ダイオードに加えられるバイアス電圧です。この電圧に対して光ダイオードの量子効率には僅かな依存性を持ちます。

しかし通常の CCD カメラでは、この電圧源として安定なものが供給されているでしょうし、たとえこの供給電圧が多少変化しても CCD 全体の画素の特性が、近似的には相似的な変化を起こすはずですから、深刻な問題にはならないはずで

次に CCD 検出器単体ではなく、望遠鏡に取付けた CCD カメラをシステム全体で見た場合、画素毎の量子効率が変化するのに寄与する要因には何があるかを考えてみましょう。一般的にシステムとして CCD カメラを見た時、感度のばらつきは CCD 素子自身の特性の非均一性よりも、それ以外の要因が支配的であることが一般的です。それらを列挙すると、CCD 検出器表面の塵などの汚れ、光学系の非均一性や光学系に付着した塵など

が考えられます。これらは観測中に変化する可能性のある要因です。

一般的に可視光の CCD カメラでは収束光中に(観測波長のバンドパス)フィルターが置かれています。このためフィルターの透過特性の非均一性やフィルター表面の塵などがあると、フィルターを切り替えて再び元の位置に戻した際、その再現性が悪いとフィルター交換の度にカメラとしての感度特性が変化してしまう可能性があります。このような場合、特性が変化する前の基準画像を用いて、変化した後の天体画像を補正するときちんとした補正が出来なくなるはずで

これに対して赤外線カメラでは、通常リオストップを確保するために再結合系の光学系が用いられることが多く、フィルターは通常リオストップ付近つまり光学的には瞳位置の前後に置かれていることが多いです。従ってこの場合にはフィルターの位置精度の再現性は問題になりません(瞳位置は光学的に見ると、像面に対してフーリエ変換面となっているため)。しかし一方逆に赤外線カメラでは、入射窓が望遠鏡の像面に近い所に設計されていることが多く(フィールドレンズと呼ばれる再結合光学系の第一レンズが、像面に近いところに置かれる設計が最も一般的なため)、このため入射窓上の塵や汚れは直接像面上の汚れとして認識される場合があります。さらにこれらとは関係なく、光学系全体が重力的な歪み(たわみ)などの影響で幾何学的な相対位置が変化し、光学的な特性が変化する場合も考えられます。これらの要因によってカメラ全体としてみた場合のフラットフィールドイング特性が時間的に変化する場合があります。従ってこのような場合には一晩の観測の間でも、単一の基準画像では十分なキャリブレーションが得られない場合があります。

これに対して、CCD 自身の感度特性や光学系の特性が変化していない場合にもフラットフィールドイング処理がうまくできない場合があります。実際にはこのケースの方が多くのように思います。

まず人工光源を用いた時にはいくつかの技術的な問題に直面します。人工光源は大局的に様なものを得ることが困難です。例えばスクリーンのようなものを用いて一様光源を実現しようとした時、その全面を均一な明るさでライトアップすることは容易なことではありません。さらにその光源を望遠鏡を通してピンボケの状態で見ている(スクリーンは普通ドーム内におかれているため望遠鏡の焦点面ではピンボケ像となっている)わけですから、さらに話がややこしくなります。特に光学系の構成にもよりますが、ピンボケの状態とピントが合った状態では光学系の伝達特性が変わるのが普通です。このためこれを用いて補正できるのは、主として CCD 素子固有の空間周波数の高い成分のみということになります。

それでは空間周波数成分の低いものに関してはどうすればよいでしょうか。最も簡単には空の背景光を用いることが考えられます。可視光では背景光だけで十分なフラックスを得ることが困難であることは先に触れましたが、空間方向に平均することで低い空間周波数成分に関しては十分な S/N を持った情報を取りだしてやれる可能性があります。この結果この両者を用いて必要な全空間周波数成分に関しての補正を行うことが可能となるはずで(図 2)。

ただしこの際には図 2 中に示したように両者の補正の間にはクロスオーバーが存在することになりますので、この部分を上手につないでやらないと特定の周波数成分に関して過補正になってしまったり、逆に補正できていない周波数成分が残ったりする可能性があります。

ところでこのような操作が本当に有効かどうかについても触れておく必要があるでしょう。一般的に人工光源による補正は、CCD の高空間周波数成分を主として補正しますので、この部分については問題が深刻ではありません。何故なら CCD の各画素の量子効率の非均一性が存在する場合でも、その波長依存性は極めて相似的であるため、

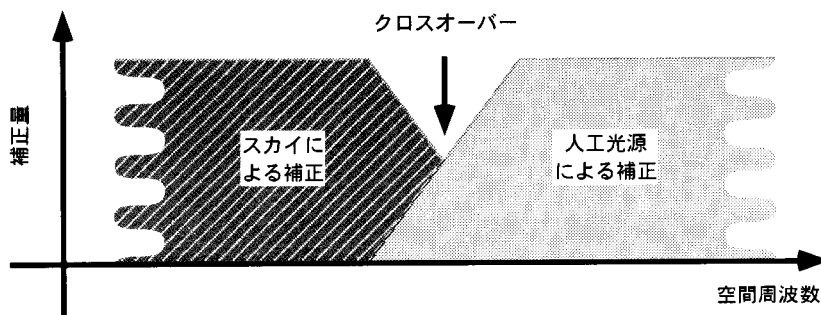


図2 2種類のキャリブレーション源を用いたフラットフィールドイング

特定の波長で行ったキャリブレーションが他波長においても有効であると考えられます。

但し CCD 表面の塵や汚れに関してはこのかぎりではなく、これらによって生じる干渉パターンには波長依存性があり、補正しきれない特性として残存します。

次に空間周波数成分が中程度から低い領域の補正に関してはどのようなことが起こるのでしょうか。この空間周波数領域で問題となる現象としては、光学系の干渉によって生じる現象が最も深刻な問題です。比較的多い例は光学系の内部反射などによって生じるフリッジ現象（内部反射した光が透過光や多重反射光と干渉を起こし干渉縞の見える現象）です。この現象は明らかに波長依存の現象であり、このような現象に対しては光源の色特性の違いが深刻な問題となります。例えば広波長幅で観測を行う場合には、観測したい天体の色特性（色温度）に対して、空の背景光の色特性が大きく違う場合が考えられます。さらに人工光源の持つ色特性もそれらと大きく違っている場合が多く、これらを用いて補正を行うとフリッジ現象を取り除くことは原理的に不可能となります。また同様に空の背景光や天体自身に強い輝線スペクトルがある場合には、この問題はさらに深刻になります。このような補正不可能な現象に関しては、天体観測用の CCD カメラを製作する際に、設計上十分

な注意を払う必要のある項目です（光学系に十分な反射防止を施すことや並行平面の組み合わせが出来ないような配慮が必要です）。

次に別のケースとして、ある瞬間には理想的な感度特性の基準画像となるデータを取得できているにもかかわらず、きちんとした補正が出来ない場合について考えてみましょう。この状況で一番目の原因として考えられるのは、検出素子の入射光量に対する非直線性の存在です。可視光の検出器にしても赤外線検出器にしても同じことですが、蓄積型の検出器では露出前に全部の画素をリセット操作と称して一定のバイアス電圧（逆バイアス）を与えるのが一般的です。露出中には光電子が出るたびに最初に与えられた電荷を少しずつ食いつぶしながら光の検出を行っています。このことは蓄積前と蓄積後では光ダイオードに加わっているバイアス電圧が違っていることを意味します。このため全ての蓄積型検出素子は、厳密には蓄積された電荷量に対して量子効率が依存性を持つこととなります。

しかし幸いにしてこの効果は可視光で用いられているシリコン CCD では非常に小さいです。これは一般的にシリコン光ダイオードでは構造的に十分な逆バイアス電圧を加えておくことができるため、蓄積電荷によって生じたバイアス電圧の変化が相対的に小さく抑えられ、それによる量子効

率の変化が極めて小さいためです。

これに対して InSb 等の材料を用いた赤外線検出器では、光ダイオードの特性の悪さと暗電流を小さく抑える目的から、小さな逆バイアス電圧を加えた状態での使用が一般的となっています。このため蓄積電荷によって量子効率に大きな影響が出る素子もあります。特に初期の InSb 素子では飽和領域まで蓄積を行うと、バイアス電圧を本当に食い尽くしてしまうタイプのももあり、このような素子では極めて非直線性が大きく現れていました。

また電荷を電圧として取りだすためのアンプにも非直線性がありますから（この問題は CCD の出力アンプを定電流駆動することで大幅に改善されます）、多くの検出器に関して非直線性は避けがたい問題となります。特に赤外線カメラを用いた観測では注意が必要で、観測時に蓄積された電荷量に近い電荷領域で得られた基準画像を用いないと、きちんとした補正が出来ない可能性があります。このため観測時にはそのための操作を怠らないようにする必要があります。

非直線性以外の要因として考えられるのが、感度特性の補正の際に起こる原点の不定性という問題があります。これは検出器温度の変化などにより暗電流値が変化した場合などに生じる現象です。通常の画像処理ではデータ画像から暗電流成分の画像（通常はシャッターを閉じて得られた画像）の差し引きを行い（この時点で画像は信号成分+ノイズのみになっているはずですので）、その画像を感度補正の基準画像で割り算するというのが通常の方法です。しかしその際に暗電流画像の差し引きがうまく行えないと、補正時の原点が狂うことになり、きちんとした補正が行えなくなる可能性があります。これは一般的なデータ処理を見ていると、比較的良く見掛ける現象のようです。

また CCD カメラコントロールの電気系が不安定なために、出力信号の DC 成分に不安定性がある場合にも同じ問題が生じます。この問題避け

るためには CCD 素子の温度制御や電気系の安定性が良いことが一番望ましいですが、そうでない場合には極力同じ条件下で時間間隔も短い暗電流画像の取得を必ず確保と言うことが重要になります。

以上取り上げたさまざまな要因やそれらが複合的に作用する状況でフラットフィールドイングは容易に『難儀』な問題となりえます。そしてその多くの問題はきちんとしたハードウェアを製作することによって解決できる問題です（しかし InSb カメラなどの場合は 0.1 K の素子温度の変化が大きな暗電流変化を生じるわけで、長時間の温度安定性をこの精度で保つことは容易ではないと思いますが）。しかし共同利用の装置の中にもこれらの問題を内在したまま公開されているものを、しばしば見かけます。従ってそのような装置を用いて観測を行う際には十分な注意が必要となります。このため今回の最後に良好なフラットフィールドイング処理のために一般的な注意事項をまとめておきます。

1. 装置の安定性が十分に証明されていない場合には、十分頻繁に暗電流画像の取得を行う。
2. フラットフレームの基準画像を得る際には、観測時となるべく近い条件のものを用いる。装置の再現性の保証されていないものに関しては、光学系のコンフィギュレーションを変更する前に基準画像を作るための操作をしておく。

以上2点は、観測後データ解析を行う際に非常に重要になります。これらの操作は実際の観測時間にとっては一見ロスタイムになり、無駄な事を行っているように見えますが、最終的にきちんと解析することの出来ないデータが沢山得られるよりは、質の高いデータが確実に得られたほうが生産的だと思います。どの程度の時間をこの操作に振り分ければよいかは、装置毎に違いますので一般的な議論は出来ませんが、装置の素性が判らない場合には、十分すぎるほどのキャリブレーションデータを取得することが望ましいでしょう。