

CCD 解体新書 その2

「CCD 検出器の持つ諸問題」

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

CCD に関する特集の2回目になります。今回はごく一般の方にも CCD というものを理解していただくため、CCD 検出器の問題点を一個一個拾い上げていこうと思います。もちろん問題点と言っても非常に簡単なものから非常に複雑なものまでありますから、今回は問題点の洗い出しということで、説明が複雑となる事柄に関しては後の回に説明を棚上げしておこうと思います。今回取り上げる問題点の多くは少しでも CCD をご存じの方には、『そんなの当たり前』と思われるかも知れませんが、一度きちんとまとめておくべきだと思います。敢えて箇条書きに書き連ねることにしました。

さてそれでは CCD を実際に天文観測に用いる場合には、どのような問題があるのでしょうか。今回は天文観測用に開発された CCD カメラを中心に話を進めます。もちろんハンディービデオや防犯用のモニターカメラなどの、一般用途に開発された CCD カメラを用いて天体観測をすることも可能です。しかしこれらを用いた場合には、これからとりあげる問題点以外に多くの問題点があり、これらに関しては本文の最後に少しだけ触れることにします。

さて CCD の問題点の第一番目として、まず CCD にはノイズ（雑音）があることがあげられるでしょう。そんなことは当然だと思われるかも知れませんが（無ければもっと素晴らしい）、一口にノイズと言っても様々な種類（起源）のノイズがあります。実際に CCD カメラのデータを扱ってみると、実際の観測データには本当に様々な種類のノイズが混じりあったものがあることが分かります。これらのノイズの中には、全くランダムに存在し感度を悪くするだけで統計的には比較的性

質の良いノイズ成分もあれば、系統的に生じるために実際のデータを取り扱う上で非常に深刻な問題となるノイズもあります。ですから一口にノイズと言ってもデータを扱う上では注意が必要で、自分の扱っているデータの中にどのようなノイズが混入しているかを見極める必要があります。このノイズの問題に関しては次回詳しく紹介しようと思います。

ノイズに関してもう一点触れておきますと、CCD 検出器は外部からの雑音や環境刺激に対して強いかどうかという問題があります。これは素子固有の問題というよりもコントロールする電気回路全体を含めた問題です。まず第一に CCD 素子は振動による影響をほとんど受けません（もちろん露出中に検出器面が大きく振動すると像がぶれるという可能性はありますが）。一般に振動でノイズが励起される現象はマイクロフォニックノイズと呼ばれる現象で（文字通り回路自身がマイクロフォンになってしまう）、高いインピーダンスの配線が冷却デュアーの中を走り回っていた昔の赤外線測光器の時代には随分悩まされた現象です。CCD 検出器では光ダイオードの出力から電荷を電圧に変換するところまでの一連の回路の全てが、単一のシリコン基板の中に形成されています（これが Solid State の真髄）。そして CCD 素子から出力されるのは、低いインピーダンスの信号線のみですから、振動で回路の配線が揺れて静電容量が変化しても、ほとんど影響を受けることはなくなっています。これに対して外部からの電磁場ノイズに対してはどうでしょうか。これは CCD 素子よりもそれをコントロールする電気回路が、どの程度外部からのノイズ源に対して影響され難

く設計されているのかに依存しますので、カメラの置かれた環境や CCD カメラの種類によって状況が全く変わってきます。但し一般的に言えることは、露出中には外部からのノイズを拾う心配はまず無いということです。CCD コントロールの電気回路は、一般的に露出最後の読み出しの際にしか動作していませんので、それ以外の時のノイズには影響されないのが普通です。またこれ以外の環境刺激としては放射線という問題があります。前回触れたように可視光用の CCD 検出器は X 線に対しても検出器となるくらいですから、当然放射線環境下では入射光以外による信号が生じます。また CCD 検出器は多かれ少なかれ宇宙線に対しても反応し、これもノイズの原因となります。また非常に強い放射線に対しては半導体自身の劣化が生じますから、CCD 検出器としてもダメージを受け、暗電流（後の回で説明します）などのノイズが増加します。以上が環境刺激に対して起こる CCD 検出器のノイズの振る舞いです。

さて次の問題点としてあげられることは、CCD 検出器は光を受ける場所によって感度が違うという点でしょう。もちろんこの問題は写真フィルムや写真乾板を用いた場合にも生じる現象です。CCD 検出器は前回触れたように 2 次元検出面上に光ダイオードを集積したものですから、1 個 1 個独立した検出器がそれぞれの場所での光の検出を行なっています。普通の CCD でも数十万個の検出器が並んでいるわけですから、その一つ一つが全て同じ特性を持つというのは、統計的には大変なことを意味しています。現在のハイテク技術をもってしても、感度や暗電流などが一つの狂いもなく揃っている CCD 検出器を作るということは不可能なことだと思えます。では逆にどうしようもないほど特性がバラバラかと言われればそうとも言えません。皆さんが普段目にしておられる民生用の CCD カメラでは、画素間の感度差の補正を電氣的に全く行っていない場合が多いようです。しかしこのようなカメラを使って撮影された

映像を見ても、画面に凸凹を感じるという経験をされた方はほとんどおられないのではないかと思います。現在の半導体技術を用いると、画素間のバラつきは 1% 程度には抑え込むことが可能となっていますから、我々が映像として眺めて楽しむぶんには全く申し分のないレベルまで素子の均一性は到達しています。実は検出器内の感度の均一性もこのレベルまで達すると、CCD 素子固有の感度ムラよりも検出器の表面に付着した塵やレンズなどの光学素子に付着した塵、そして光学系自身の透過率の不均一性の方がはるかに大きな感度ムラを生じてしまいます。

しかし一方これが天文観測で用いられる場合には状況が変わってきます。天文観測では画像としての美しさよりも、1 画素 1 画素の情報が重要となります。例えばある星の明るさを調べる（測光）ためには、その星の光が広がっている範囲にある画素の信号量をきちんと調べる必要があります。ところが天文用に開発された CCD は一般的に民生用に開発されたものと比較すると、感度の均一性が少し劣ります。また民生用のカメラと同様に光学系も感度ムラを生じます。これらを含めて検出器の感度ムラはきちんと補正してやらなければ、天体から来る光の強さを例えば 1% の精度（約 0.01 等級の精度）で測定してやることはできません。またもっと深刻な状況としては空の明るさよりも 100 倍暗い天体の検出（人間の目のように対数的な感覚を持つ検出器では困難ですが）には、感度の均一性が当然 1% よりも良くなければ、得られた画像の凸凹の方が観測したい天体よりも大きな値となり、検出自体が不可能になってしまいます。このような感度の不均一性を補正する操作を天文観測の世界ではフラットフィールドイング（文字通り平坦にすること）と呼んでいます（民生 CCD の業界では 2 点補正と呼ばれています：ちなみに 1 点補正とは暗電流の差し引きのことを指します）。

さらに画素ごとの感度ムラも問題ですが画素内

での感度ムラも気を付けておく必要があります。民生用の CCD は普通インターライン型 CCD¹⁾を用いています。このタイプの CCD では、一つの画素内で感度のある部分よりも無い部分の方が大きな面積を占めています。従って星の広がり非常に小さくなるように光学系を設定すると、星の光が時によって感度の全く無い部分に落ち込んでしまう状況が起こりえます。このような場合にはその星の光を全く検出することができなくなってしまいますので、天体観測のシステムとしては不合格となります。これはもちろん極端なケースですが、天文用に用いられるフレーム転送型 CCD²⁾の場合にも画素内の感度ムラは存在します。特に表面入射型フレーム転送型 CCD の場合は、インターライン型 CCD のように不感領域こそありませんが、画素内に結構大きな感度ムラがあります。これは主として検出器表面で配線材料として用いられているポリシリコンなどが光を吸収するために起こる現象で、このようなケースでは画素内の位置によって感度の波長依存性も変化します。

さらに次にあげられる問題点は、入射した光の量に対して得られる信号の強度、つまり線形性はどの程度あるかという問題です。これは直線性とも呼ばれる問題ですが、この比例関係が一次直線で表されるのかどうかと言うことが問題になります。原理的に考えてみますと、残念ながらこの関係は直線とは少しずれてしまうはずですが、しかし現実的には通常の測定で無視できる範囲で直線近似ができれば満足できるわけです。一般的にこの非直線性を生じる原因としては、光ダイオード自身の非直線性（露出中に蓄積された電荷によって感度特性が変化する）、CCD の出力アンプの持つ非直線性（電荷から電圧に変換する際の非直線性を含む）、さらに CCD のデータ取得回路の持つ非直線性が上げられます。これらに関しては詳しい説明を必要としますので後の回に棚上げしておきます。

さらに非常に基本的な問題点としては、CCD の

画素はきちんと方形なのかとか、表面は物理的に本当に平坦なのかという疑問があります。CCD の画素は現在の半導体加工技術の観点から見ると全く問題なく方形であり、その位置関係は極めて規則的であると言えます。このため CCD の画素間の相対的な位置精度は問題なく信じてよいということになります。例えば画面内での相対位置測定などは CCD カメラの得意とする分野です。但し光学系の収差により周辺が歪曲しているような場合には、当然その補正が必要となります。また CCD 検出器表面の局所的な平面性も焦点深度が問題になるよりもはるかに高い精度で保たれています。現在半導体の加工はサブミクロン(1 μm よりも細かい) 精度で行われています。このような加工を実現するためには、そもそも半導体材料の表面の平面性は極めて高い精度が要求されます。このため局所的な表面精度は自動的に保証されていると言えます。但しこれは小さなスケールの話で、CCD の端と端でも本当にそうかと言われる話は変わってきます。シリコン加工時には非常に高い表面精度を持っていた CCD 素子も、パッケージに封入される際に歪んでしまう可能性があります。また封入の際には平面性が保たれていた場合でも、環境温度によってパッケージに用いられている材料とシリコンの熱膨張率の差から、サーモスタットに用いられるパイメタル現象のようにして歪んでしまう可能性があります。この問題に関しては CCD ごとに保証された範囲を調べる必要があるでしょう。また CCD を焦点面に取付ける際には焦点深度と CCD 検出器の画素の大きさを検討して、取付け時の傾きを許容範囲に収まるように設計・調整する必要があることは言うに及びません。

また別の種類の基本的な問題点として CCD は焼き付き現象を起こすと言うことがあげられるでしょう。撮像管が広く用いられていた時代には、この焼き付きはしばしばお目にかかった現象です。例えばテレビの中継などを見ているとスポッ

トライトをカメラが通り過ぎる際に、スポットの尾を引いてしまう場面を覚えておられるのではないのでしょうか。このように明るい光に対して撮像管では焼き付きと呼ばれる現象があり、ひどい場合（強い光が長時間当たった場合）には、回復不能な焼き付き現象となってしまう。これに対して CCD 検出器には、このようなひどい焼き付き現象はありません。民生用途で用いている範囲では強い光が当たって、画面が飽和してしまうことはあっても、検出器がダメージを受けることはまずありません。もちろんレンズを通して太陽の光を集めて物理的に焼いてしまったら仕方ありませんが、それ以外では大丈夫でしょう。しかし天文観測用に CCD を極限レベルで用いて、微妙なレベルの撮像を行うと、あたかも焼き付きのような現象がわずかですが、それでも無視できない範囲で起こることがあります。この原因は 100% 理解されているとは言い難いのですが、ある程度の説明を加えることは可能です。しかし非常に詳しい説明が必要となるため、この問題も後の回に棚上げとします。

次に「どんな CCD でも冷やせますか」と言う質問には、「その素子の保証範囲で用いて下さい」としか答えられません。それを越える場合には自分の責任で行ってくださいということになります。別の回で説明しますが CCD 等に用いられる光ダイオードは温度を下げると暗電流という雑音源が小さくなります。天文用の CCD カメラは素子を冷却して用いていますが、どの CCD 素子も冷却に耐えるわけではありません。例えば民生用途の CCD では製作費用を下げるためにプラスチックのパッケージを用いています。プラスチックとシリコンでは熱膨張率が大きく違うために保証範囲を越えて冷却を行った場合にはパッケージか CCD 自身かのどちらかが壊れてしまう可能性があります。この問題を防ぐため、冷却用途に開発された CCD ではシリコンと非常に近い熱膨張率を持つセラミックのパッケージが用いられていま

す。

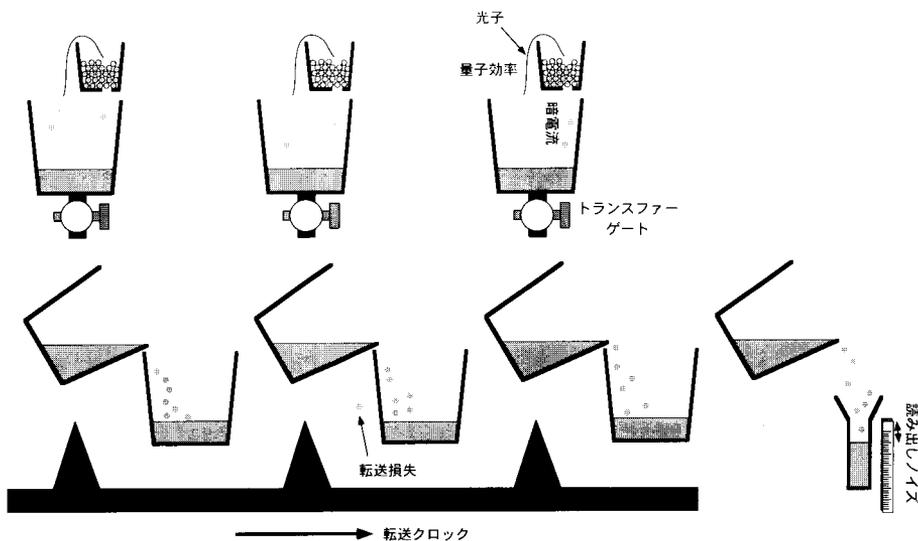
さて最後に一般用の CCD カメラを天体観測に用いた場合どのようなことが起こるかということについて少し触れておきます。まず根本的な問題として感度が悪いという点があげられます。例えば暗い部屋の中でビデオカメラがどの程度実用になるかを、考えてみて頂けるとよいでしょう。人間の目で判別可能な暗さでも、ビデオカメラでは何も写らない状況はあるでしょう。ビデオカメラの方が一般的に肉眼の水晶体よりも大きなレンズを使っているにもかかわらず、明らかに感度が悪いという事実から CCD 素子部分での感度を想像していただくことができます。これは民生用のカメラでは CCD 検出器の雑音（読み出し雑音と呼ばれるランダム雑音と暗電流による熱雑音の両方）が非常に大きい点、素子の量子効率自身が低い点、そして最も大きな点として天文用の CCD カメラと違って露出時間に 1/30 秒という制限がある点（感度が低い）原因となっています。もちろん一部の CCD は露出時間を長くする機能がついたものもありますが、一般的な CCD カメラでは CCD 素子を冷却していないばかりか、素子自身の発熱によりかなり高温で動作させられているものが多く、この結果熱雑音が大きくなっているため、露出時間を長くしてもそれほど感度が改善しないケースも多いようです。また日本仕様の CCD カメラはインターレースと呼ばれる偶数行の信号と奇数行の信号を交互に 1/60 秒毎に出力する方式が採用されています。この方式は画面のちらつきを防ぐのに有効だとされているのですが、ある一枚のフレームには半分の情報しか含まれていないこととなります。CCD カメラの種類によっては本当に偶数行と奇数行の信号を交互に出力しているものもあれば（この場合それぞれのフレームの有効露出時間は 1/30 秒）、毎回 CCD 上の電荷の全てを読み出して偶数行の信号を出力すべきときには $(2n)$ 行目と $(2n+1)$ 行目の信号を足し合わせ、奇数行の信号を取り出すときには

($2n$) 行目と ($2n-1$) 行目の信号を足し合わせているという CCD カメラもあります (この場合にはそれぞれのフレームの有効露出時間は $1/60$ 秒)。またビデオレコーダーで記録した CCD カメラの画像は、ビデオレコーダーの性能などから画面内での画素の絶対的な位置精度は悪いということも付け加えておきます (一枚一枚の画面を調べると明らかに小さなぶれがあります)。このように一般用の CCD カメラを天文用に利用する際には種々の問題があり、CCD を用いて天文観測を行う際には、やはり一般のカメラの流用ではなく天文用に開発された CCD カメラを使用することをお勧めします。

以上今回は CCD の問題点のまとめを行いました。『こんなことは言われなくても知っているよ』と思われた方が大半ではないでしょうか。しかし CCD カメラが広く普及し始めた今日、全く CCD カメラに触れたことのない方にも CCD カメラという物の雰囲気をつかんでいただくために、敢えて思いつくままに書き連ねました。次回からは雑音や CCD の転送などについて一つ一つまとめていきながら、今回棚上げした問題についても詳しく説明を加えていこうと考えています。

参 考 文 献

- 1) 上野宗孝, 1995, 天文月報, Vol. 88, No. 12.



光の検出 (光子 → 電子) ~ 電荷の転送 ~ 電荷量の測定