

CCD 解体新書 その1

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 検出器は天文観測において、不可欠のものになったと言ってよいでしょう。しかし CCD の持つ問題点やデータ処理の方法について系統的に紹介されたことが少ないようです。このシリーズでは CCD の問題点を洗い出し、それらを明らかにしていく形で、どのような取り扱いとデータの処理を行っていけば良いかをまとめていく予定です。シリーズ第1回目の今回は概論を行い、2回目には問題点の洗い出し、それ以降は個々の問題点とその対策を明らかにしていくつもりです。

「CCD」, という単語もすっかりお馴染みになりました。ハイテクの時代と呼ばれる今日、数多くの用途に CCD というものが利用されています。天文観測に CCD 検出器が登場して久しく、今日では単に光の検出器としてだけではなく、赤外線や X 線の検出器としても CCD の技術が用いられています。CCD の利用は今日さらに広がりを見せつつあり、学術目的の観測装置から個人レベルの天文観測まで幅広く普及しつつあるようです。特に近年安価で使いやすい CCD カメラシステムが発売され始めたため、個人ユーザーへの拡がりに加速がかかったように思われます。そのような状況下、私自身 CCD に関する話を学生などに紹介する機会が増え、一度 CCD 検出器の原理から応用までを書き物にまとめておきたいと思っていたところ、天文月報編集部の方で CCD に関する特集を考えておられているというお話をお聞きし、この原稿を書くこととなりました。正直を申しますと、私自身は可視光の CCD を扱った経験はそれほど多くありません(数度あるのですが)。しかし本年9月号の天文月報で紹介させていただきましたように、赤外線 CCD 検出器の実用化と開発には長らく携わってまいりました。赤外線の CCD を扱う中で、冷却した条件下における CCD の動作に関しては、可視光 CCD 以上に厳しい状況を余儀なくさせられるという経験を持ちました。赤

外線の CCD は可視光の CCD よりもはるかに低温で駆動する必要があるため、CCD にとってはほとんど極限とも言える状況での動作となります。また私が開発を進めている PtSi ショットキーバリアー型検出器¹⁾では、検出器部分も可視光の CCD とほとんど同じ構造をしており、電荷を転送する部分つまり CCD そのものは可視光のものと全く同じものです。一般的に CCD を冷却するという事は、意外と曲者で思わぬ落とし穴がある

CCD の特集の第一回に当たる今回は、まず CCD に関する概論を行いたいと思います。以降の回には CCD 検出器による光の検出(光ダイオードの動作)、低温下における CCD の電荷転送、CCD の読み出し雑音とは何か、CCD データのキャリブレーション、CCD 検出器の将来等についてまとめていきたいと考えています。

いささか蛇足ですが、この原稿を書く上で一つの動機となったのは天文観測などに CCD を用いる際のハンドブック的なものが皆無であることです。天文観測のように冷却した条件で、低速度・低雑音モードで CCD を動作させると、民生品のように室温・テレビ用のフォーマットの条件で CCD を駆動するのと全く違った種類の問題が生じて来ます。このような特殊な条件下での CCD の振る舞いについて記述されたものは非常に少な

いように思います。このためどうしても手探りで実験を進めているのが現実です。さらに民生品で CCD 検出器を用いる場合と、天文用に用いた場合の CCD 検出器の駆動条件の違いから、共通の常識が通用しないこともたくさんあります。さらに残念なことに国内で CCD の開発に携われておられるメーカーの方々も、通常の条件以外での CCD の振る舞いについて知識を持たれた方は限りなく少ないように思われます。日本の会社において CCD は儲かりうるフィールドに属していることが、我々にとってはいささか不幸な結果となっています。そのような状況があるため天文学者はしばしば、通常の CCD に関する常識を天文用カメラの世界にも大幅に外挿してしまう結果となっています。例えば一つの会話に「このカメラの CCD にはホットピクセル（暗電流値が非常に大きな画素）があるから、もっと素子の温度を下げて使いたいけど、これ以上冷却すると転送効率が落ちるから」「だよ、ね。」と。

転送効率は温度の低下とともに悪くなるという事実は、天文会に蔓延する一つの迷信だと思います。後の回に紹介しますが転送効率はある温度で最悪値を持ち、確かにその温度よりも高い温度ではこの関係は成立しますが、その温度よりも低い範囲では逆転します。またこの最悪値は同一の CCD でも駆動条件により変化します。

このような CCD の話は自分で観測装置を開発される方に読んで頂きたいことはもちろんですが、観測装置のユーザーとして CCD データを解析される方にも読んでいただきたいと思います。ハードウェアを自分で開発された経験のある方は、CCD の特徴などにも自然に慣れ親しまれることと思いますが、そうでない方は装置がきちんと働いているかいないかの判断が難しいのではないかと思います。そこでハードウェアを触られない方で、CCD のデータを扱われる方にも、是非このような CCD の基本的な知識を頭の隅においていただきたいのです。もちろん観測装置自身

や観測条件に全く問題の無いケースには、観測装置の手順書や与えられたソフトウェアの流れに添ってデータの解析を進めれば、全く問題が無いと言うケースもあると思います（世の中の観測装置はあまねくこのようにありたいと常々思っていますが）。しかしいろいろなケースで一筋縄では行かない状況に出くわした経験をお持ちの方も多いのではないかと思えます。このような時に CCD に関する最低限の知識を全く持たずに、データの解析をしてしまうことは、極めて危険なことではないでしょうか。

少し前置きが長くなってしまいました。CCD の登場は天文観測にとって非常に大きな意味合いを持っているのはご存じのとおりです。CCD の特長をもう一度まとめておきますと、写真乾板と比較して量子効率（入射光子数に対して検出できる割合）が高いことが第一であろうと思います。現在天文用の CCD では概ね 100 % にも達する量子効率を持つものがあります。これは通常 1 % オーダーの量子効率とされている写真乾板を使用する場合と比較して、文字通り 100 倍程度の感度向上になります。つまり感度の点で言えば望遠鏡の口径が 10 倍になったことに相当するわけです。次に入射光量に対して得られる、出力信号の大きさ（得られる電荷数）の線形性が非常に良好でかつ、そのダイナミックレンジ（線形性が得られる範囲）が非常に広いことが優れています（写真乾板のダイナミックレンジはニジミを考慮しなければ 8 ビット前後、CCD では 16 ビット程度が得られる）。また天文観測で用いる際 CCD 検出器は、増感や現像時の手間もなく、コンピューターから全て直接制御できるシステムになりうる点も見逃せないメリットです。

CCD の登場は民生品の世界にも大きなインパクトを与え、テレビカメラの世界では従来用いられてきた撮像管（ビジコン）に置き代わっています。撮像管は真空管であるのに対して CCD は半導体センサー（いわゆるソリッドステート）であ

るため、寿命が半永久的に長く、ウォーミングアップも不要です。振動やショックにも強く、明るい光に対する焼き付き現象も無いため実用面で極めて優れています。さらに撮像管と比較すると検出器自身の体積が小さいばかりか、駆動に高電圧を要さないことなどからシステム全体の小型化が可能で、現在おなじみのハンディカメラが実用化されているのも CCD が登場した恩恵です。

さてそれではこの「CCD」とは一体何物でしょうか？ CCD は英語の Charge Coupled Device (電荷結合素子) の略で検出部分を指す言葉ではなく、電荷の転送をつかさどる部分の名称です。従って CCD は画像検出器以外にも、アナログ信号の遅延線やデジタルオシロスコープ用の一時記憶素子などにも用いられています。有名な話なのでご存じの方も多いと思いますが、CCD は 1970 年アメリカのベル研究所の W.S. Boyle と G.E. Smith という人達によって発明 (開発) されました²⁾。この時代 CCD が開発される以前から既に光ダイオードと呼ばれるシリコン半導体センサーの 2 次元化が進められていました。光センサーも 1 素子とか 2 素子を扱っている間は、それぞれのダイオードからリード線を引き回して信号の測定をすれば良いですが、例えば 1000×1000 画素を持つ画像センサーの素子毎にリード線をつないで出力させることは現実的に不可能です。そこでこの問題を解決する方法として考えられたことが、2 次元的に並んだ素子を順番に時系列な情報として読み出すことでした。一番最初に発明された方法は、それぞれの画素にスイッチを一つずつ用意し、それらの中の一つを選んで順番に ON にしてやることにより、それぞれの画素からの出力を順番に取り出す方法でした。この回路の方式のことを MOS スイッチ方式と呼び、電気的な構造が非常に単純で (メモリーの読み出し方式に似ている)、製作・コントロールともに簡便なため、現在でも検出器の評価や一部の用途で用いられています。しかし後の回で紹介するように検出器としての雑

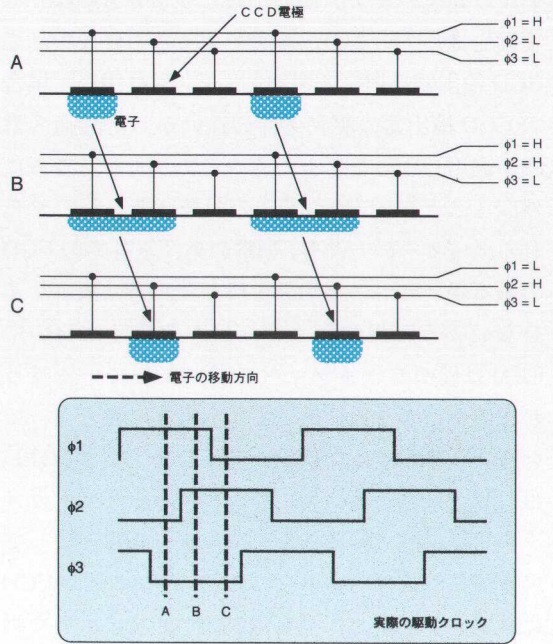


図1 表面チャンネル CCD (3相) における電荷転送の模式図

音が CCD と比較すると桁違いに大きくなるため、現在では実用的な素子には用いられていません。そしてこの MOS スイッチ方式のノイズ上の弱点を克服するものとして登場したのが CCD という技術なのです。

図1に3相 CCD の基本的な動作を示します。図に示したのは3相の CCD ですが4相の CCD でもほとんど同じように考えていただければ結構です。図で示したのは正確には表面チャンネル型という方式の CCD で、電極に加える電圧を図に示す順番で変化させて電荷を運んで行きます。よく CCD の電荷の転送をバケツリレーにたとえたりしますが、隣り合うバケツ間で電荷の受渡をするというよりも、バケツ自体が移動していると言えます。しかし基本的には電荷が移動していく半導体は固定されているわけですから、電荷が半導体中を移動させられていくことになり、このこと

が「転送効率」と言う問題を引き起こします。この話は後の回で詳しく紹介させていただきます。いずれにしてもこのような方法で、CCD 中では電荷の転送が行われています。ここまで書くと、それではこの最初と最後はどうなっているのかについて、疑問をお持ちになられることと思います。普通の CCD は縦方向に転送する CCD (垂直 CCD と呼ばれる) と横方向に転送する CCD (水平 CCD) の組み合わせで 2 次元の信号の読み出しを行っています。光ダイオードの検出器部と CCD 転送部がきちんと分離されたインターライン型というタイプのものでは、垂直 CCD の入り口は各画素からの電荷の蛇口に相当するトランスファーゲートから始まり、水平 CCD への受渡までが一続きのものになっています。また水平 CCD は垂直 CCD からの信号を受け取り、最終的に電荷量を電圧の形で出力する出力アンプへと送ります。図 2 にインターライン型 CCD の構造を示しますが、インターライン型 CCD では光ダイオード部、垂直 CCD、水平 CCD が完全に独立した部分を占めています。民生品に用いられる CCD のほとんどがこのインターライン型の CCD を用いています。これに対して図 3 のように独立した垂直 CCD を持たずに画素そのものを CCD としたフレームトランスファー型の CCD というものがありま

す。この方式では有効エリアのほとんどの部分を検出器として用いる事ができるため、開口率 (一つの画素ユニット中で検出可能な部分が占める面積比) が高く天文観測に適しています。基本的にシリコン半導体はそれ自身で光に対して感度がありますから、フレームトランスファー方式では垂直 CCD 自身で光を検出しているというのが正確な表現だと思います。またインターライン型の CCD では垂直 CCD や水平 CCD の部分で感度を持たないようにするため、この部分が光学的に遮蔽されているのが普通です。以下にそれぞれの方式の特徴を簡単にまとめておきます。

■インターライン型 CCD

- 全画素の電荷を一度に転送部 (CCD) に移動させることができるのでいわゆるシャッター動作ができる (民生用にとって便利な機構)

●開口率が高くできない

- 画素ピッチの小さいものを得るには高い加工精度 (配線ルール) を要する

■フレームトランスファー型 CCD

- 開口率を 100% 近くまで大きくできる
- 半導体の加工精度が悪くても CCD を製作できる
- 裏面照射型の CCD とすることにより量子効率を稼ぐことができる
- CCD と独立にシャッターを用意しなければ転

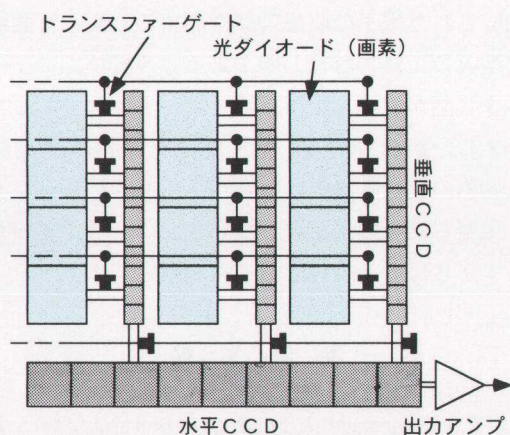


図2 インターライン型 CCD の構造

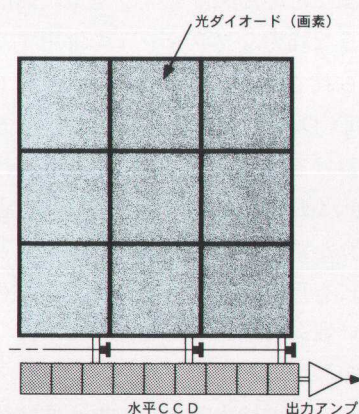


図3 フレームトランスファー型 CCD の構造

送中の光を防げない

以上がそれぞれの CCD の持つ特徴ですが、限られたセルユニットの中に CCD 電荷転送部を配置しながら、残ったスペースに光ダイオードを形成するインターライン方式では、通常 10~30% 程度の開口率が普通です。また画素の特に小さなハイビジョン用の CCD では、検出器上での開口率が 10% にも満たなくなる物もあるようです。このような CCD では実効的な感度を向上させるために、マイクロレンズを各画素毎に形成して見掛け上の開口率を向上させています。このような超微細加工技術を要するインターライン型 CCD の製造には日本企業の持つ優れた半導体製造技術が大いに腕を奮っており、民生用途の CCD に限れば世界中のシェアの大部分を日本の企業が寡占しています。とにかく民生品の世界では CCD 素子の大きさは小さければ小さいほど、カメラシステムを製作する際に用いるレンズも小さくできますから、システム全体の小型化に大きく貢献します。ビデオカメラの小型化を競う日本において、画素サイズの小さな CCD が開発されつつあることは、自然の成り行きというべきでしょう。

これに対してフレームトランスファー型の CCD では先にも紹介したように、電荷転送中にも光に対して感度を持ってしまいます。このためフレームトランスファー型の CCD の用途としては天文観測などの高感度カメラや車両速度自動監視機のような強力なフラッシュを併用するような用途に絞られているようです。フレームトランスファー型 CCD はマーケットの小ささゆえに、日本企業における開発は、それほど活発に行われていません。これに対して欧米の幾つかの企業では非常に優れた素子が開発されています。このようなところにも日本企業の持つ利益正義論が顔を出してしまい残念なかぎりだと思えます。

さて余談ですがこのフレームトランスファー型 CCD は、X線の検出器としても天文観測に用いられています。シリコン CCD は 0.1~10 KeV 程度

の X 線に対して良好な検出器と成りえます。この波長帯でシリコン半導体は入射エネルギーに関係なく、3.65 eV 当たり 1 個の電子-ホール (正孔) ペアを生成します。このため 1 露出中に 1 画素当たり 1 個以下のフォトンしか検出されない条件では、シリコン CCD はこの波長帯において 3 次元検出器 (2 次元の画像とエネルギー方向の分解能の両方が同時に達成される検出器) となります。X 線の検出にフレーム転送型の CCD が用いられるのは、可視光での状況と同様に、実効的な感度を高くしたいためです。ただし X 線は可視光線と違い、インターライン型 CCD の光学遮蔽に用いられているアルミ膜を通り抜け、光に対して反応しないはずの電荷転送部にも到達できるため、インターライン方式がインターラインになります。また X 線の検出には全てのフレームトランスファー型 CCD が OK と言うわけでもありません。通常 X 線の CCD には表面入射方式の Virtual phase CCD (VPCCD) と言うものが用いられています。1 KeV 以下のエネルギーを持つ X 線は表面から $2\mu\text{m}$ の領域で 90% 以上のフォトンが吸収されてしまいます。VPCCD では画素内の約半分領域が電極に覆われていないため、X 線の検出に有利だと考えられます。X 線 CCD の話は面白いのですが専門ではありませんので、これ以上詳しく書くことは避けますが、現在では X 線により生成された電子の収集効率を高めるために背面照射型 VPCCD に移行しつつあるようです。

少し話が脱線しながらのスタートとなってしまいましたが、以降の回で CCD の持つ諸問題や、転送効率の話、読み出し雑音からキャリブレーションに至る話を順次紹介していきたいと考えております。しばらくお付き合いをお願いします。

参考文献

- 1) 上野宗孝, 1995, 天文月報, 88, 399
- 2) W.S. Boyle and G.E. Smith, 1970 Bell syst. Tech. J., 49, 587