

私の CCD 観測事始め

浦田 武

〒424 静岡県清水市村松原1-6-1

最近アマチュアにも比較的入手が容易になった CCD カメラを小望遠鏡に装着して小惑星の位置観測を行った。この体験談を筆者が指導を受けた恩師への書簡の形式で綴る。

〇〇先生：

拝啓

ここ数年の異常気象はしろうと目にみてもただ事ではないような様子です。恐龍の大絶滅も最近の話題の一つですが、そうした宇宙規模のタイムスケールからすれば、この異常も些細な出来事なのかも知れませんが、やはり夏は積乱雲が垂直に盛り上がり、秋から冬は連日澄みきった晴天が続いてくれないと困ります。

その後たいへんご無沙汰しておりまして申し訳ありません。先生に最後にお会いしてから、もうかれこれ 20 年近くも経つわけですね！

私の方はその後も小惑星にとり憑かれた状態が続いておりますが、たまに彗星も忘れない程度に見ておりますのでご安心下さい。しかし永らくお会いしていないうちに、この業界も随分様変わりいたしました。そのあたりの報告も兼ねて近況をお知らせしたいと思います。

まず、私は最近になって ST6 という名前のアメリカ製の冷却 CCD カメラ（以下、単に CCD と書く事にします）を使って小惑星の位置観測を始めました。難しい仕組みは知りませんが CCD というのはテレビの撮像管みたいなもので、感度が非常に高く（量子効率がいいと言うのだそうですね）、これまでの銀塩写真に代わるものとして近年

はプロの先生方も天体観測に多用しているそうです。望遠鏡に取り付けた時の写真を同封しましたのでご覧下さい。

もちろん私のようなアマチュアが個人で使えるものですから言ってみれば『おもちゃ』のようなものかも知れませんが、それでもこれをして明治維新、文明開化だと感想をもらした友人もいた程ですから、小なりといえども期待しないわけにはいきません。

難しい構造はさておき、ピクセルと呼ばれる光を感じる素子が基盤目状にならんでいて、それぞ

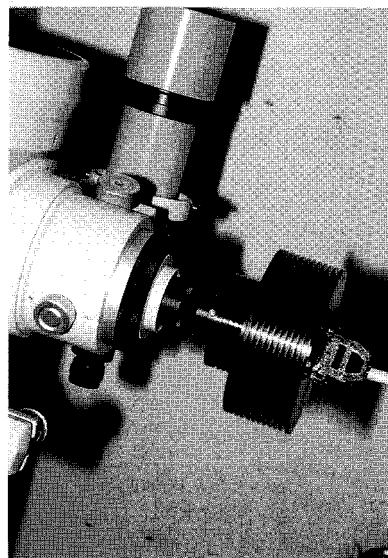


写真1 望遠鏡に装着した ST6 CCD カメラ

Takeshi Urata : My First CCD observation with a Small Telescope

れのピクセルがあたった光の量に応じた値をデジタルで記憶してくれますので、これをパソコンで処理すると『CCD=座標測定器』になりますし、また『CCD=測光器』としても使える事になります。1つのピクセルが写真でいえば粒子に相当する、と考えればいいという事になりましょうか。

あ、パソコンですか？ パーソナルコンピュータの略です。先生とお話していた頃はプログラム電卓が出始めた頃でしたが、あの頃の大型コンピュータの性能に届きそうなものが私の部屋にも、それも机の上に載ってしまう程になりました。

まさしくパーソナルです。

ST 6 の CCD のサイズは 8.6×6.5 mm, この中に 375×242 のピクセルが整然と並んでいて、1つのピクセルは 16 ビット ($2^{16} = 65536$) の階調で対象の明るさを表現してくれます。CCD のサイズが非常に小さいので、あまり長い焦点距離のカメラは写野が狭くなり、極端な場合は位置測定につかう比較星が採れなくなります。また、小惑星ですと大抵の場合、相手はファインダーで見えませんが望遠鏡（赤道儀）のポインティング精度を如何に上げるかも大問題です。精度良く位置測定をしたければ長焦点ほどいいわけですから、写野の広さを天秤にかけてちょうどいいところ、つまり妥協点を捜さなければなりません。幸い比較星のカタログは GSC (HST Guide Star Catalogue) という 14~15 等級までの微光星を網羅する高密度のものを使う事が出来ます。

私は昨年秋にこの CCD を入手したのですが、これを口径 25 cm, 焦点距離 854 mm の写真用反射鏡（主鏡が双曲面で補正レンズを用いるタイプで、現在アマチュアの間で人気の高いものです）に取付け、やっとこの 2 月末から試験観測を開始したばかりです。1ピクセルは 23×27 ミクロン (μm) の大きさですから、854 mm という焦点距離では角度に換算すると 5.6×6.6 秒にもなってしまいます。測定精度をコンスタントに 1 秒角以内に収めたい小惑星の位置観測用ですから、これで

は実用にはなるまいと思ってこの冬の間はこれまでどおり写真観測に徹していました。そして、春も近くなりそろそろ小惑星のシーズンも終了間際になりましたので、やっと重い腰を上げテストを始めたという訳です。

実をいいますと CCD での位置観測自体はこの春が初めてではなく、昨年秋に 3 夜ほど経験しました。この時は ST 4 という今の ST 6 の子分格のものですが、本来は写真撮影時のガイドを自動で行う目的で作られたもので、CCD のサイズはマッチの頭ほどしかないたったの 2.6×2.6 mm 角でした。ピクセルサイズは 14×16 ミクロンでしたから ST 6 よりは分解能は高くなりますけど、データは 8 ビットですから 256 階調しか取れません。

また、焦点距離が 854 mm の場合ですと 2.6 mm 角は天球上では 11 分角にしかありません。私の赤道儀の目盛環はバーニヤで 0.1 度まで読み取れますが、あとあとの整約の事を考えると、11 分角の写野では少なくとも 2~3 分角の精度で筒先を向けなくてはなりません。この程度の精度が要求されるようになりますと大気差を始めとするいろいろな要因が絡み、目盛環の読み取り値など意味がなくなり、ほとんど気休めにもなりません。

さて、先生もご存じのようにこれまでの写真による小惑星などの位置測定では、ネガや乾板上の星像の黒みの中心の位置をもって座標値としていました。

CCD の場合ですと、これが星の光を受けたピクセルの輝度のピークが座標値を示すだけの事で、あとの整約計算はこれまでと特に変わったところはありません。

問題は 1つのピクセルのサイズがあまり大きいと分解能は上がらないという事です。せっかく昨秋に入手した ST 6 が文字どおり冬眠していたのも、約 6 秒角という計算上の分解能では実用になるまいと踏んでいたからです。でも案ずるよりは産むが易しとはこの事でしょうか。実際に小惑星

表1 : 小惑星1992 BHの観測例

1992 BH

Id. T. Urata (1993 observations)

Epoch 1993 Aug. 1.0 TT = JDT 2449200.5

M	68.06655	(2000.0)	P		Nakano	Q
n	0.17886088	Peri.	21.20151	-0.93811265	-0.28334179	
a	3.1197932	Node	140.54695	+0.25516803	-0.95427660	
e	0.1557752	Incl.	18.26470	+0.23416647	-0.09525549	
P	5.51	H	12.1	G	0.15	

Residuals in seconds of arc

911212	033	0.1-	0.1+	920202	385	0.9+	0.7+	930326	801	0.1-	0.1-
911212	033	0.2+	0.3+	920206	809	1.1-	1.5-	930414	385	0.3-	0.0
911213	033	0.6+	0.3-	920206	809	1.3-	1.3-	930414	385	0.3-	0.2+
920124	385	0.8-	0.5-	920206	809	2.2-	1.6-	930414	385	0.3-	0.0
920124	385	(2.8+	1.1-)	920209	385	0.2-	2.1+	930418	385	0.1-	0.0
920125	385	0.8-	0.9-	920209	385	0.4-	0.9+	930418	385	0.1-	0.1-
920125	385	0.6-	0.2+	920212	809	1.2-	2.0-	930418	385	0.1-	0.4-
920130	809	2.5+	0.5-	920212	809	2.1-	1.9-	930419	801	0.4-	0.5+
920130	809	1.5+	0.1-	920212	809	(2.8-	1.9-)	930419	801	0.0	0.4+
920130	809	0.5+	0.7+	920221	385	0.3+	1.5+	930424	801	0.3+	0.4+
920202	809	1.1+	0.6+	920221	385	1.2+	0.7+	930424	801	0.1+	0.2+
920202	809	1.0+	0.4+	920222	885	0.1-	0.3-	930513	385	0.8+	0.3-
920202	809	0.6+	0.8+	920222	885	1.0+	0.1+	930513	385	0.4+	0.3-
920202	385	0.4-	1.9+	930326	801	0.2-	0.1+	930513	385	0.3+	0.6-

[天文台コード] 033: カール・シュワルツシルド天文台の1.3mシュミット, 385: 日本平天文台, 801: ハーバード大学オークリッジ観測所, 809: チリのヨーロッパ南天文台の1mシュミット, 885: JCPM やきいも観測所, 口径20cm, 焦点距離800mmの双曲面写真鏡 (名取亮氏撮影, 筆者測定)

を撮影し、位置を求め、軌道計算を行ってみますと自分でもビックリする程のなかなか見られる精度を出してくれました。実例として MPC 22235 号に発表された 1992 BH という小惑星の軌道と、その残差 (観測値と計算値の差) をお目かけます。MPC はほぼ毎月発行されており、1950 年から 2000 年分点へと変更になったほかは以前とあまり変わったところはありません。

さて、この星は軌道長半径(a)が 3.12 AU ですからちょうど小惑星のメインベルトの外縁を回っている星です。この軌道は、洲本の中野圭一君が 9 つの惑星の他に、質量の大きい 5 つの小惑星の摂動までも加えて計算してくれたものです。

残差の欄は左から観測年月日、IAU の定めた観

測所コード、 $\Delta\alpha\cos\delta$ 、そして $\Delta\delta$ の順になっています。もちろん、こうして先生にお目かけののですから、手持ちの資料の中から一番見栄えの良さそうなものを同封する事にしました!

観測所コードのうち、385 となっているのが私の観測所で、昨年の日付のものは従来どおりフィルムからの測定値の残差、今年の日付のものが CCD (ST 6) を使った観測の残差で、両者とも使った望遠鏡は同じです。また、コード 801 はオークリッジ、昔はハーバードのアガシ観測所と言っていたところの 1.5 m 反射望遠鏡に CCD を付けての観測 (こちらはまさかまさか ST 6 ではないと思いますが、実際どのようなものか知りません)。

こうして自分の CCD での観測の残差を見るとピクセルサイズの割には「おー、ちゃんと 1.5 m 望遠鏡と張り合っているわい」と満足に思うのです。これが単に盲亀の浮木うどんげの花でない事を願いたいものです。私はこういう残差を見る時、いつも相対誤差がどれ位あるのかを気にしています。もちろん同一夜に同じ比較星の組み合わせで測定した場合のです。同封の残差は 2 回の衝での観測をリンクして軌道改良したものに過ぎません。観測をうまく表現する軌道を計算するのでから観測に大きな誤りがない限り、観測数が少なければ残差の絶対値は小さくても不思議ではありませんから（釈迦に説法、河童に水練ですよね。すみません）。この例でもたったの 2 回の衝からの軌道です。でも同一夜の残差の相対誤差はいずれもかなり小さく、それも複数夜にわたって同じ傾向が伺えますから、1 ピクセルが 6 秒角の CCD からの測定としては上出来と考えています。ちなみに 1992 BH のこの春の予報上の明るさは衝の頃で約 17 等級（B 等級）でしたが、測定はかなり楽に出来ました。ただ写真からでもこのくらいの精度でいつも測定しているアマチュアの仲間がいる事も確かです。その点ではお見せする資料だけではフィルムに対して不当な評価を与える危険性があるのかも知れません。

しかし、測定顕微鏡で淡い星像の中心を決めるのはなかなか神経を使う辛い作業ですから、CCD のように極めて事務的に、且つ器械が測定値を決めてくれるという感じは、プログラムは自分で書いたくせになぜか責任を転嫁してしまったみたいで非常に気楽です。

CCD での座標測定は輝度のピークを求めるという事を初めに申し上げました。専門的にはいろいろな手法があるそうですが、私の場合は単純に各ピクセルの輝度の重心を出しているだけの極めて簡単な方法です。これについては群馬の小林隆男君からいろいろアドバイスをいただきました。

彼は以前は小惑星の同定計算や彗星の軌道計算

を沢山やっていましたが、日本の（或いは世界の？）アマチュアによる CCD アstrometry の草分けで、特に周期彗星の観測を中心に熱心に行っています。天文台にあるような立派な施設では、星像は沢山のピクセルにまたがるのだそうですが、私が主に観測対象にしているような 17 等級クラスの小惑星を ST 6 で写しても、せいぜい 2×2 の合計 4 ピクセルくらいにしか反応していません。

輝度の分布から補間法などを用いピークを求めてみたりもしてみましたが、このようなサンプルが少ないケースでは無理のようでした。当然の事ながらガウス分布からの位置決めなどは夢のまた夢です。ST 4 での観測は僅かでしたので、はっきりとした事は申し上げられませんが、その時の測定の感触から『重心を求める』という単純な方法では、測定精度=ピクセルサイズの 1/5 程度、もしくは小林君によると、測定精度=ピクセルサイズ/またがるピクセルの数、という印象を持っていました（だからこその冬眠でした）。ところがこの 3 ヶ月ばかりの間のテストによると ST 6 では同じ手法でもピクセルサイズの 1/10 近くの座標測定精度が得られているようです。ピクセルサイズは ST 4 のほうが ST 6 より小さいのですから、その理由としてはデータのダイナミックレンジが、8 ビットから 16 ビットへと大幅に広がった事とか、CCD の感度の違いなどが挙げられるのではないかと想像しています。

ところで実例が 1 つだけではちょっと気が退きましたのでもう 1 つ、1993 EK という小惑星の軌道と残差もお目にかけます。a=2.28 AU ですからメインベルトの内側近くの星で、観測は発見も含めすべて CCD によるものです。こちらはたぶん 18 等級近い暗い星なのでピークがうまく出ず、測定誤差が大きいケースです。

本当の誤差の見積りは、動かぬ恒星を何度も測っておこなうのがスジだと思いますが、これはまだ試みておりません。

表2：小惑星1993 EKの観測例

1993 EK				Urata							
Epoch 1993 Mar. 14.0 TT = JDT 2449060.5											
M	53.88230	(2000.0)		P	Q						
n	0.28532250	Peri.	125.35689	-0.25557132	-0.96584973						
a	2.2851359	Node	339.32571	+0.84322380	-0.20111833						
e	0.1784777	Incl.	6.93572	+0.47292381	-0.16335766						
P	3.45	H	15.0	G	0.15						
Residuals in seconds of arc											
930302	385	0.1+	0.3-	930320	385	1.0+	0.7+	930413	385	0.2+	0.1+
930302	385	0.3-	0.0	930320	385	0.9+	1.2+	930413	385	1.0+	1.1-
930302	385	0.4-	0.7-	930320	385	0.8+	0.8+	930413	385	0.9-	1.4+
930313	385	0.8+	0.3-	930321	385	0.4-	0.8-	930414	385	0.4-	0.4+
930313	385	0.0	0.1-	930321	385	1.3-	0.5-	930414	385	0.0	0.6-
930313	385	0.5+	0.1+	930321	385	1.8-	0.4+	930414	385	0.2+	0.9-

天文台コードは表1と同じ

さて、この CCD でどれ位の暗い星まで撮影が可能か、というのたいへん興味があります。

この3月に発見されたミュラー彗星(1993 d)は、約17等級でしたが、これは僅か1分間の露光で写りました。でもササガに写ったというだけで、この露光時間では測定精度はいま一つでしたが、例えばエバハート博士が求めた選択区域57の星¹⁾のうち、18等級台の星は2分露光で全部を確認出来ます。

試しに6cm屈折に取り付け写したところ4分露光で16等級の小惑星を確認出来ました。口径6cmといえば肉眼で見える場合の限度は11等級くらいまでの筈ですから、それより5等級暗い星まで写った事になりますね。しかもこれが赤緯マイナス22度という超低空でしたからうれしくなります。

ここまで写ると口径15~20cm程度の手軽な望遠鏡と組み合わせ、暗い空を求めてクルマで移動観測などというのも面白い使い方かも知れません。また、天球上を高速で移動する特異小惑星の観測にも威力を発揮してくれるでしょう。

ところで私はST4とST6の二つしか知らないのですが、実際には他にもいろいろとアマチュ

アの手の届きそうな範囲の CCD があるようです。

パソコンもめまぐるしく新製品が登場していて、今日買って来た新品が明日にはもう陳腐化するかも知れません。導入のタイミングは半ばバクチみたいな様相を呈していますが、CCDにしても大同小異の世界のようです。それにもめげずにこと小惑星や彗星に関していいますと、もう十指に余るとまではいきませんが、かなりの方々 CCD による位置観測をされています。あの計算屋の中野君ですら CCD で観測を開始しました。

もっとも彼はこの種のもは、お手のものでしょう。

小惑星は恒星状に見えますから測定も簡単だろうと思われがちですが、限界に近いような暗いものは彗星同様に難しいものです。これまでは残差が2秒角以内程度であればよしとしていたのが、CCD を使いはじめてからは1秒を超えているものは大きいと思うようになりました。CCD を使いはじめてから観測の残差を見る目も少しは厳しくなったようです。

それでも CCD が全てにおいて優れているとも思っていません。細かく考えれば各ピクセル間に

ピッチの乱れはないのだろうか、また座標の直交性はどうか等々、現時点では小指の先ほどの大きさもない CCD では撮影範囲もたかが知れています。その点ではまだまだ写真には到底かないません。私もこれからも当分の間は写真と CCD の二刀流で行きたいと考えています。

どうもここまでは自分の事ばかり書き過ぎたようですが、もっともっと頑張っていて私など足元にも及ばない活動をしている仲間は全国にたくさんいます。1987 年ころから小惑星の発見ブームが起きているのです。これまでに日本で発見され番号登録された小惑星は、なんと 350 星を超えました。総数約 5600 星の 6% に達しているわけです。

先生のお宅に伺っていた頃には番号登録されていた数は、まだたしか 1800 星位、国産の星は 10 星ほどでしたから、総数で約 3 倍、国産はなんと 35 倍近くになった訳ですね！

特に 1990 年以降に登録された 398 星中、40% を超える 161 星が国内のアマチュアの発見なのです。

約 350 星のうちのほとんどがアマチュアの発見ですが、その中には地球に接近するアモールタイプの他、ヒルダタイプ、トロヤ群のものまで含まれており、アポロタイプの星も登録されるのは時間の問題です。小惑星搜索の網に偶然かかった新彗星も一つや二つではありませんから、これらはちょっとばかり自慢していいと思います。世紀末にふさわしく小惑星の地球衝突などの話題がかまびずしい最近です。時流に乗った大物狙いも結構ですが、それはそれとして楽しみながらやってこそその世界なのだと思います。

先生の提唱で 1974 年に初めて行った小惑星会議も 1986 年に第 2 回目が三島で開催され、その後も各地持ち回りで実施している程の人気です。相変わらず熱心なアマチュアが多数を占める会合ですが、『日清談判破裂してエ』などと騒ぐ人もいないかわりに小惑星に関わりの深い先生のご参加もちょっと少ない、と思っているのは私一人でしょ

うか？

小惑星ならぬ小彗星のように明確な核を持たないぼんやりとした集まりのせいかも知れません。そういえば尻尾もないので気楽ですけど。

会合周期は約 1 年、1994 年は埼玉で開催される事になっています。

私自身、CCD を使った位置観測は始めたばかりですからまだまだ暗中模索に近い状態ですが、今後は CCD の画像からパソコンに小惑星を捜せたり、測光という未知の分野にも足を踏み入れてみたいとも思っている矢先です。電話回線などで IAU に直接データ送信する事も可能になりました。写真のような現像処理という過程がありませんので、観測から十数分後にはもう測定結果が報告出来るというひと昔前でも想像がつかないような体勢も整いつつあります。

とりとめもなく書いてきましたが、ここは何しろ清水の片田舎。情報は十分ではありませんし、とんでもない間違い、失敗は慣れていますので不勉強の点がありましたらご指導いただければ幸いです。

今朝はかなり強い雨でしたが、昼には止んで今は大きな月が雲間からうっすらと覗いています。それでは今夜はこれくらいで失礼します。

敬具

二伸：

このお手紙を書き上げたのはもう数ヶ月も前の事なのですが、投函するまでに実は随分悩みました。文章の稚拙さはお許しをいただくしかありませんが、アマチュアによる CCD 観測はまだ緒に付いたばかりです。実際に先生がお読み下さる頃には環境もガラリと変わっているかも知れません。現実に 20 等級近い彗星の CCD 観測を始めた仲間もいる事をご紹介しておきます。

参 考 文 献

- 1) Everhart, E. 1984, "Finding your telescope's magnitude limit", *Sky & Telescope*, 67, 28.