

KOOLS 用 CCD カメラのリニアリティー調査

2007/11/27 尾崎忍夫

概要

KOOLS 用の CCD カメラに関しては Shutterless Photon Transfer 法においてリニアリティーの調査がなされ、10,000 カウント付近でリニアリティーが折れ曲がる不具合が確認されている(詳細は服部氏製作の報告書を参照のこと;<http://www.oao.nao.ac.jp/%7Ekools/hattori/ccd.html#gain>)。

CCD のもう一方の読み出し口から読み出せるようになったので、今回はより直接的な測定方法である、露出時間とカウント値との関係を調べた。

その結果、リニアリティーに同様の折れ曲がり確認された。また、4 秒以下の露出時間において、リニアリティーのずれが確認され、これはシャッターの開閉時間が影響しているようである。

1、実験手法

光源は LED、KENWOOD の定電圧電源、定電流ダイオード組み合わせた。

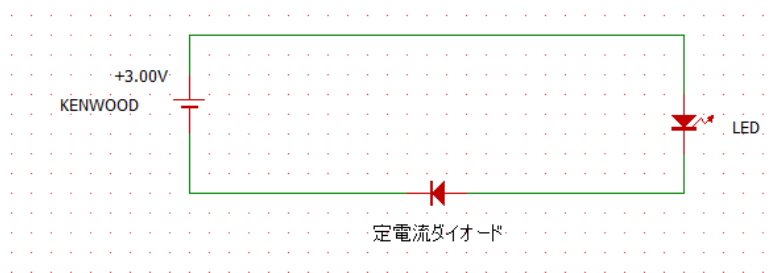


図 1: 光源

電流計で電流の安定性をモニターしたところ、10分間で 1%以下の安定性を示した。

LED と定電流ダイオードの型番が分からないので、この安定性がどのくらいの光量の安定性に相当するのかわからない。

上記の光源を KOOLS の望遠鏡取り付けフランジ部に置いて、キムワイプを適当に重ねてディフューザーにした。キムワイプの量を調整することで明るさの調整を行った。

露出時間は 1 秒から 1024 秒までで、リニアリティーの折れ曲がりがあると予想される露出時間は密にサンプルした。

光源の変動を補正するために、不定期に 128 秒露出を行った。図 2 は 128 秒露出のデータのカウント値の変動を示している。約 5% 程度の変動が見られる。このカウント値の変動は、データ取得時間から内挿して変動量を求めて、補正をおこなった。

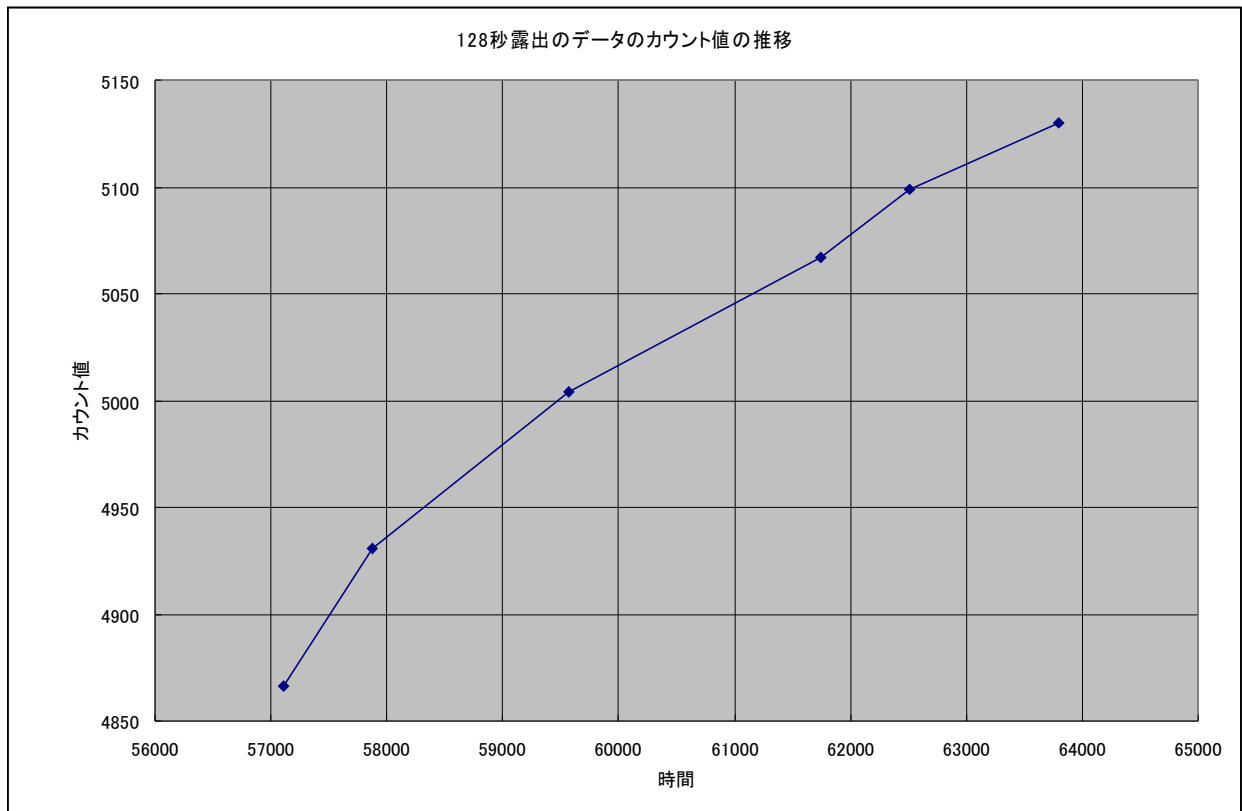


図 2: 128秒露出のデータのカウント値の時間変動。縦軸はバイアスを引いた後のカウント。横軸は時間(秒)。

2、結果

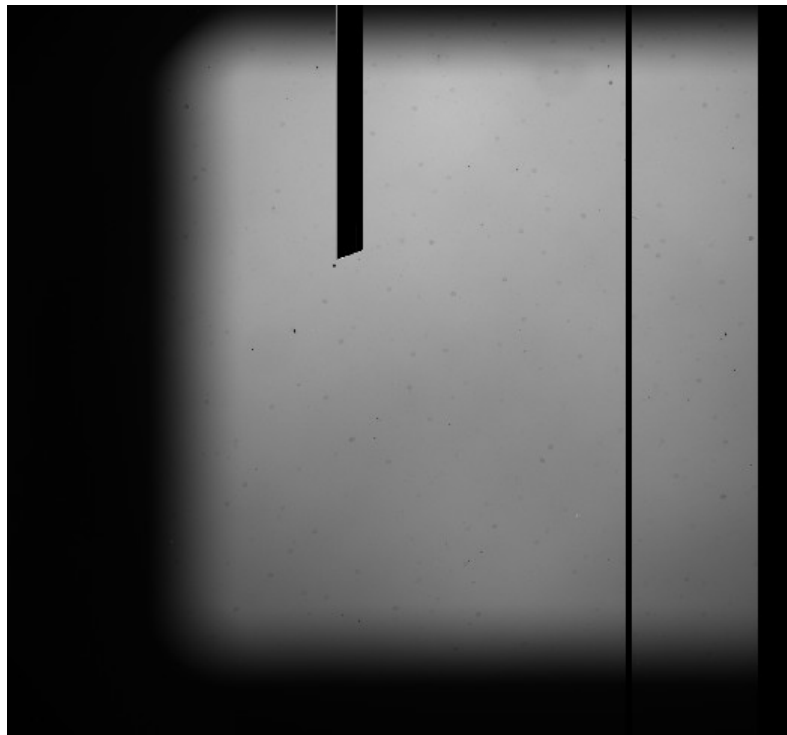


図 3: 得られたイメージ

用いたクロックパターンは center1000 で、図3が得られたイメージである。

イメージ上の4箇所の 11x11 ピクセルの領域の平均値と露出時間の関係をプロットさせたのが下図。横軸は露出時間、縦軸はバイアスを引いたカウント値。オーバースキャン領域はバイアス値として参照できる点がないので、バイアス値としては中央上にあるデフェクト部分のカウントを用いた。

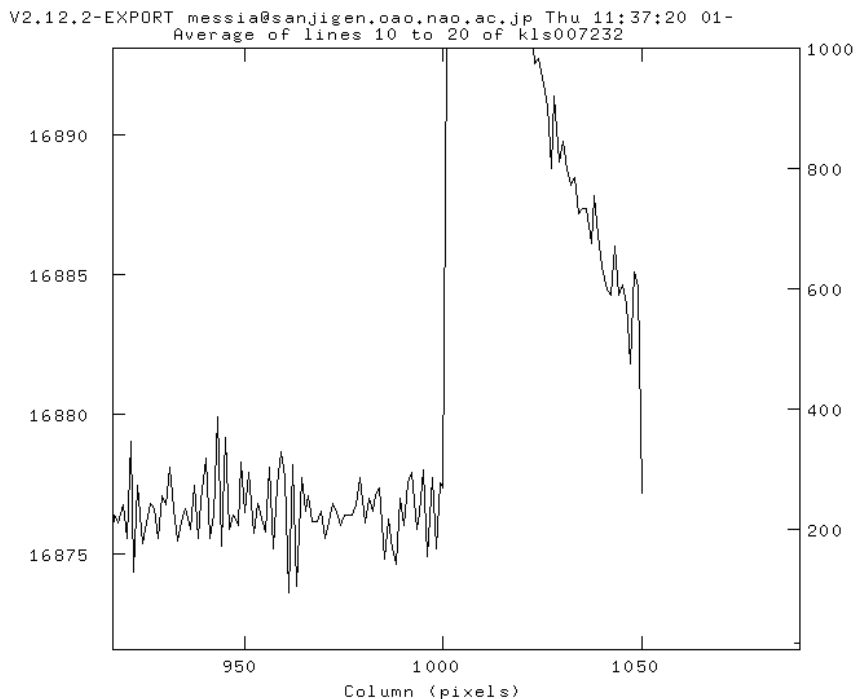


図 4:オーバースキャン領域付近の拡大図。データは1秒露出だが、光がほとんど入っていない領域を選んだので1000ピクセル以下はバイアスレベルと考えて良い。1001ピクセル以上がオーバースキャン領域。

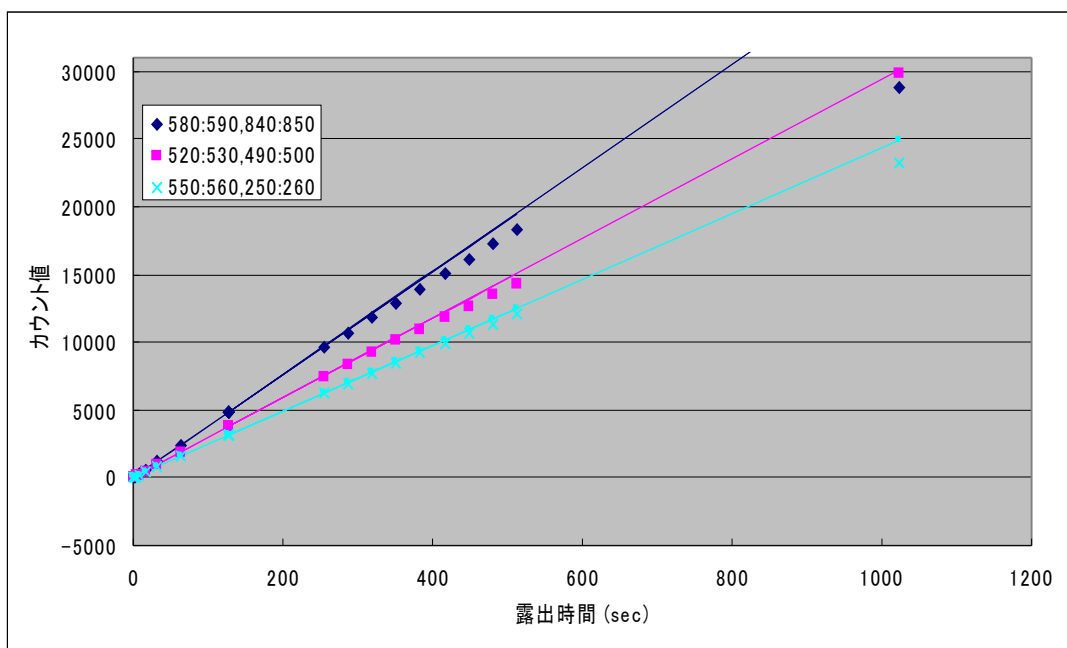


図 5:リニアリティーの状況

図5は横軸に描かれている直線は露出時間 64 秒のデータ点と原点を結んだ線である。

大きなカウント値において、データ点は直線より下に位置しているのがわかる。

見やすくするために、Linearity Residual というパラメーターを用いる。この定義は以下のとおり。

$$(\text{Linearity Residual}) = 100 \times \left(1 - \frac{S_M(DN)/T_{EM}}{S(DN)/T_E} \right)$$

(参考文献 Janesick, J. R. 2001, Scientific Charge-Coupled Devices (SPIE press), p117)
 ここで T_E は露出時間、 $S(DN)$ はそのときのカウント値、 T_{EM} と $S_M(DN)$ はバイアスレベルとサチるレベルとの真ん中あたりにおける露出時間(ここでは 64 秒を採用)とそのときのカウント値。(低照度やサチる間際にはリニアリティーからずれている可能性がある。) 基準の直線の傾きより緩やかになるとマイナスになる。

ノイズはフォトンノイズと読み出しノイズ、バイアスの変動だけを考慮する

$$d(LS) = d \left\{ 100 \times \left(1 - \frac{S_M/T_{EM}}{S/T_E} \right) \right\} = 100 \frac{S_M}{T_{EM}} \frac{T}{S^2} dS$$

$$dS = \frac{\sqrt{n RN^2 + \eta n S}}{n \eta} + S_{off}$$

ここで n は平均をとるピクセル数で、今回の調査では 121 ピクセルで一定である。RN は読み出しノイズ(11e)、 S はカウント値、 η はゲインで 2.25e/ADU を採用した。 S_{off} はバイアスの変動に伴う系統誤差で 2 カウントを採用している(図6は代表的なフレーム内のバイアスレベルの変動)。 S は平均値であることに注意。

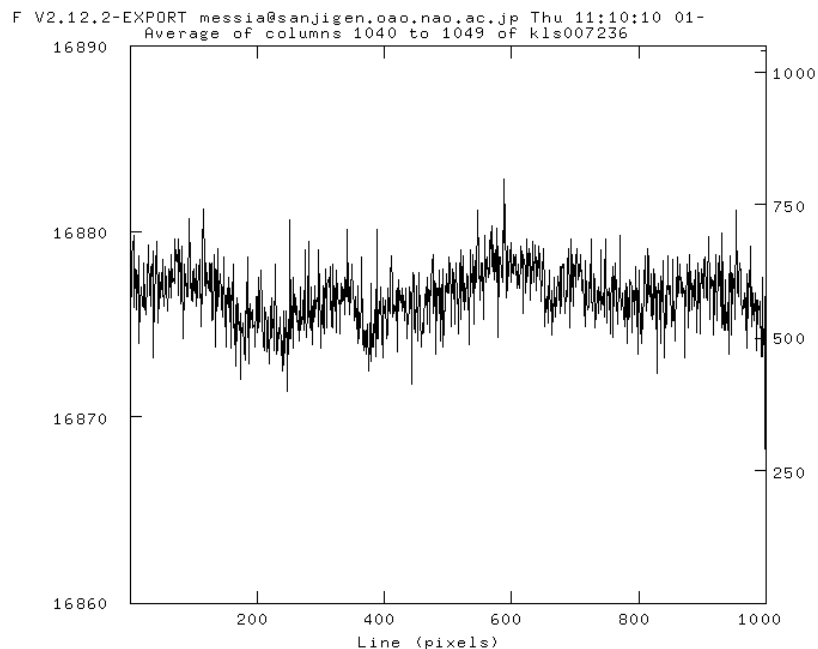


図 6: オーバースキャン領域を 10 ピクセル平均したもの

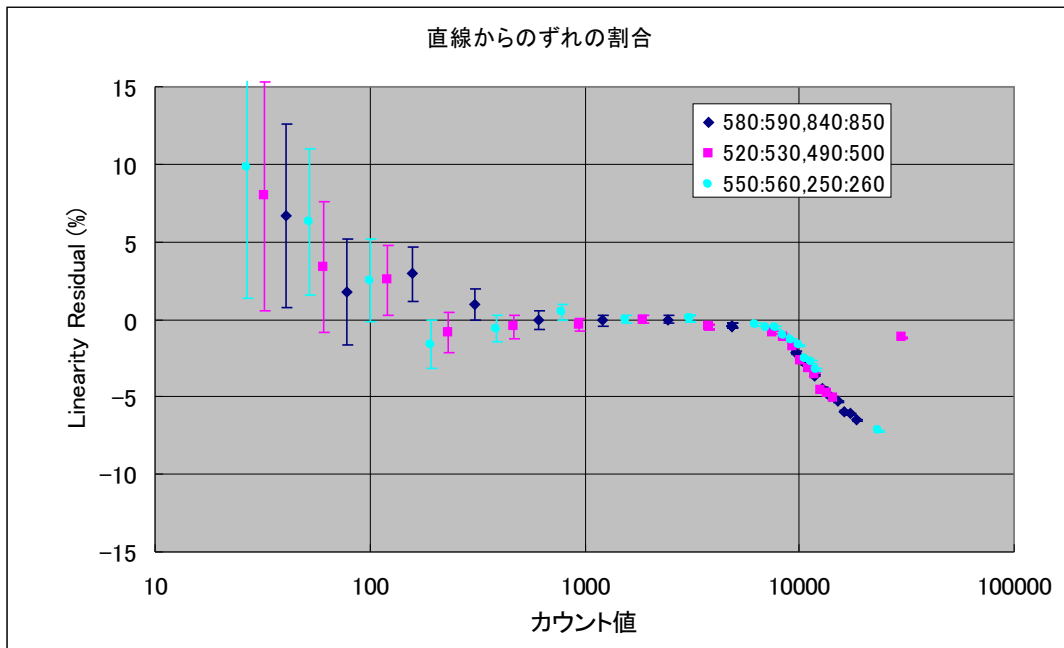


図 7: Linearity Residual とカウント値との関係

照度の異なる場所を比較しているため、横軸カウント値にすることで、比較しやすくなる。図7の一番右端の紺色とピンクの点はサチッてしまっている点。1000 カウント以下からバイアス変動の系統誤差の影響が大きくなり、100 カウント以下の誤差成分はほとんどがその系統誤差である。

7,000 カウント以上で明らかに系統的なずれがみられる。この手法においてもリニアリティーの折れ曲がり確認できた。

100カウント以下において、露出時間が小さくなるにしたがって、上へずれる傾向が見られる。最大で10%のずれとなっている。各データ点の誤差は大きいですが、複数のデータ点が全て同じ傾向を示しているため、この傾向は優位と考えられる。

2. 1 7,000 カウント以上でのずれ

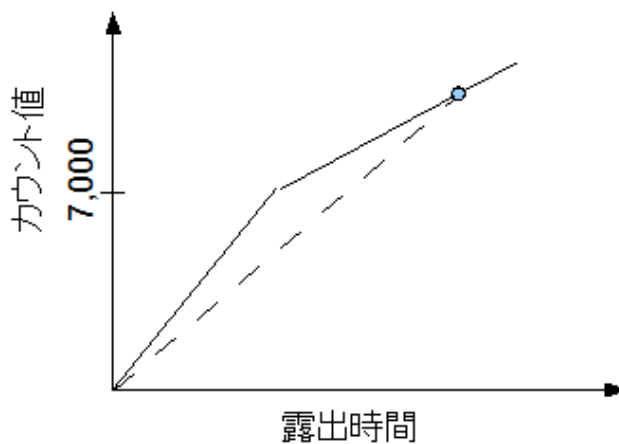


図 8:

カウント値が大きくなるにつれて Linearity Residual が小さくなっているのは、図8のように露出時間とカウント値の関係が途中で折れ曲がっていて、傾きが緩やかになっていることを示している。これは SPT 法で得られた結果と定性的に一致している。

5000 カウント以下のデータでは露出時間に対するカウント値の傾きは約 38.1、10,000 カウント以上 20,000 カウント以下のデータの傾きは 34.2 となった。図9はフィッティング結果のプロットである。傾きの変化の割合は 11% である。

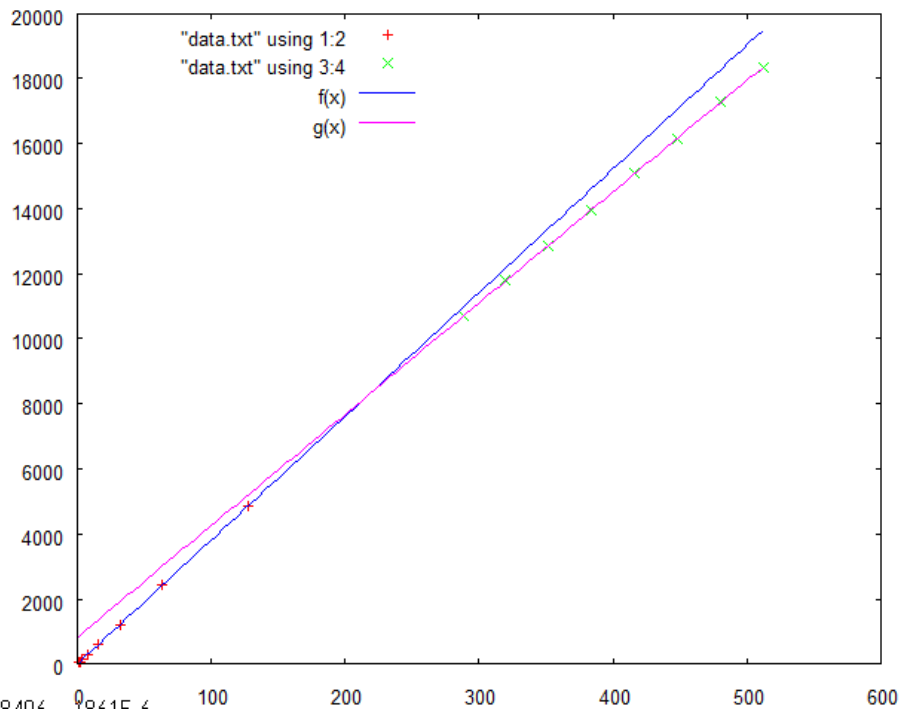


図 9:

SPT 法による変化は $2.25\text{e}/\text{ADU}$ から $2.67\text{e}/\text{ADU}$ なので 17% の変化であるだったので、少し食い違いがある。

CCD へ供給されているクロックや DC 電圧はカタログ推奨値を満たしているものであるし、そもそも、それらの設定は SprimeCam で使っていたものであって、そのときにはリニアリティーに異常は見られていないということであった。

このような状況は西はりま天文台の CCD カメラシステムでも発生した。CCD は EEV のものであるが、二つある読み出し口のどちらから読み出してもリニアリティーの不具合は改善されなかった。そのときには、リニアリティーの不具合とともに、シリアル方向の転送効率が異常に悪く、その点が今回と異なる。西はりまの場合には CCD 素子の読み出し口が静電破壊していたのが原因であった。

また京都三次元分光器第2号機でも同様のリニアリティーの不具合が確認されており、このときは転送効率にも問題なく、今回の状況と似ている。三次元分光器では SIGADC ボードを交換すると直ったという報告がある。しかし、SIGADC のどこに原因があったのかは分かっていない。

これらの過去の事例をみると、可能性として以下の二つが挙げられる。

- 1、CCD 素子の二つの読み出し口が共に壊れている。

これは予備の素子と交換することで、検証できる。

- 2、SIGADC が壊れている。

これは SIGADC にダミーの信号を入力することで、検証できる。

2. 2 100 カウント以下のずれ

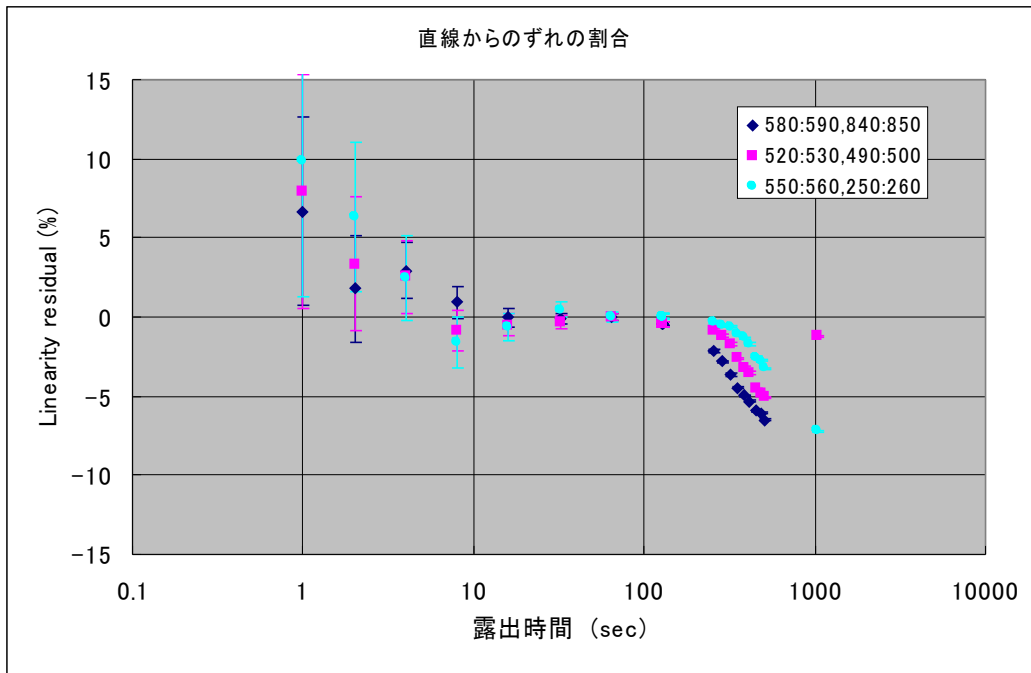


図 10: Linearity Residual と露出時間の関係

図10は横軸を露出時間にしたもの。これを見ると4秒以下で上の傾向がみられる。

この傾向の原因として、設定した露出時間と実際の露出時間が異なることが考えられ、この要因に挙げられるのがシャッターの開閉時間である。

シャッターに入力されている駆動信号をオシロで測定した。1秒露出と2秒露出の場合を測定し、試行はそれぞれ4回行った。4回の試行とも同じ値を示した。結果を下の表にまとめる。

設定露出時間	シャッター駆動信号
1 秒	1.01 秒
2 秒	2.00 秒

1 秒のときのずれも測定精度内と考えられるので、設定露出時間とシャッター駆動信号の出力時間の優位なずれは見られなかった。もし設定した露出時間と実際の露出時間が異なるなら、シャッター自体が原因と考えられる。

KOOLS で用いているコパル社製の開口 $\phi 800\text{mm}$ のシャッターは、カタログによると開閉時間は 0.1 秒である。この影響を見積もるために、実際の露出時間が設定した値にオフセットのかかっている場合を検討した。その結果、+0.09 秒のオフセットがあった場合にデータをうまく説明できることが分かった。このオフセット量はコパルのシャッターの開閉時間と整合性がある。下図はそのときの状況。

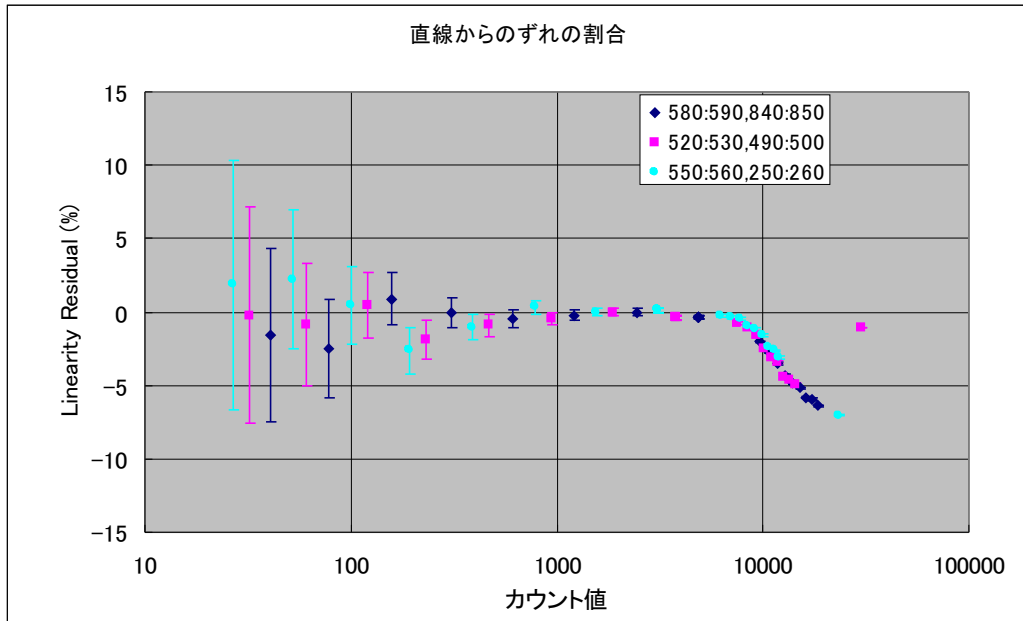


図 11: 露出時間に+0.09 秒のオフセットをかけたときの、Linearity Residual とカウント値との関係。

CCD 素子そのもののリニアリティーが低照度において悪くなっている可能性もある。これらの可能性を切り分けるためには、光源の明るさを明るくして、同様のテストを行えば良い。もしシャッターの開閉時間が原因であるなら、光源を明るくしても、4 秒以下で同様のずれが見られるはずである。もし CCD 素子のリニアリティーが低照度で悪くなっている場合には、光源を明るくすれば 4 秒以下の露出でもカウントを稼げるので、4 秒以下でもリニアリティーのずれはなくなるはずである。

まとめ

従来とは反対の読み出し口から読み出した場合のリニアリティーを調べた。露出時間とカウント値の関係を調べた。その結果、以下のことが分かった。

- 1、SPT 法により確認されていたリニアリティーの折れ曲がりを確認した。
- 2、この原因として、CCD の二つの読み出し口ともに壊れているか SIGADC ボードが壊れている可能性がある。
- 3、4 秒以下の露出においてリニアリティーからのずれが確認された。
- 4、シャッター駆動信号は測定精度の範囲内で正確に出力されていた。
- 5、シャッターの開閉時間が影響していると考えると、4 秒以下のずれが説明できることが分かった。
- 6、CCD 素子そのもののリニアリティーが低照度において悪くなっている可能性も捨てきれない。
- 7、(5)と(6)の可能性を切り分けるためには、光源を明るくして同様の試験をすれば良い。