

SONY ICX424AL CCDイメージセンサと WATEC T065カメラモジュールの特性調査

柳澤正久¹, 阿部新助²

Characteristics of SONY ICX424AL CCD image sensor and WATEC T065 camera module

Masahisa YANAGISAWA, Shinsuke ABE

Abstract

We put together the characteristics of the CCD image sensors, ICX424AL manufactured by SONY Inc. and the camera modules, T065 manufactured by WATEC Co., Ltd. The sensors and the modules are used in two cameras on-board a small spacecraft, EQUULEUS, to observe lunar impact flashes. The launch of the spacecraft is scheduled to be in 2019.

Keywords : ICX424AL, T065

1 はじめに

2019年打ち上げ予定の超小型深宇宙探査機EQUULEUS (エクレウス) [1]では、世界初となる宇宙からの月面衝突閃光の観測が行われる。観測用カメラDELPHINUS (デルフィネス、DLP) [2]では、SONY社のICX424AL CCDイメージセンサを搭載したWATEC社のT065カメラモジュールが使われる。これらの仕様や性能はそれぞれData Sheet [3]および仕様書 [4]にまとめられているが明確でない部分もある。以下ではこれらを一括にまとめ、どれくらいの明るさの閃光が観測可能かを知るのに役立つ。

Figure 1にセンサとモジュール内での光入射からデジタル出力までの流れを簡略化したものを示す。センサ上

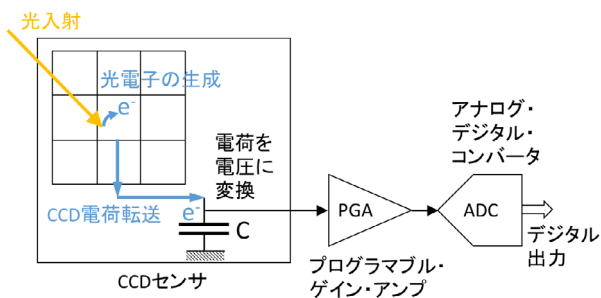


Figure 1. CCDイメージセンサとそれを用いたカメラモジュールでの光入射からデジタル値出力までの流れ。

の画素の一つに光が入射すると光電効果によって電子 (光電子) が発生する。それぞれの画素で生じた電子 (電荷) は、CCDによって順番に運ばれ、コンデンサを充電し、生じた電圧が出力される。一つの画素の電圧が出力されるごとにコンデンサはリセットされ、画素の明るさに対応する電圧が次々と出力される。センサの出力電圧は、アンプで増幅された後、ADコンバータによってデジタル値に変換されカメラから出力される。なお、この図によればセンサの出力電圧は負になるが、以降はすべて絶対値で話を進める。

2 CCDイメージセンサ SONY ICX424AL の特性

2.1 全量子効率 $q(\lambda)$

光電子の生成効率を表し、光の波長 λ の関数として次のように定義されている。

$$q(\lambda) \equiv \frac{\text{その画素で発生する光電子数}}{\text{1つの画素(遮蔽領域も含む)に入射する光子数}} \quad (1)$$

単に量子効率と呼ばれることが多いが、分母には感度をもたない領域に入射し無駄になってしまう光子も含まれるので注意が必要である。一方、分光感度 $s_0 f(\lambda)$ は次のように定義されている。

Received on September 1, 2017.

¹ 基盤理工学専攻

² 日本大学理工学研究科航空宇宙工学専攻

$$s_0 f(\lambda) = \frac{\text{その画素で単位時間に発生する電荷 [C/s]}}{\text{1つの画素(遮蔽領域も含む)に入射する光パワー [W]}} \quad (2)$$

物理的意味がはっきりするようにSI単位系での単位を [] 内に記した。なお、[C/s]=[A]である。ここで、 s_0 は最大分光感度であり、 $f(\lambda)$ は分光感度特性の波長依存性を表す関数である(最大値は1)。 $q(\lambda)$ と $f(\lambda)$ の間には次のような関係がある。ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 e は素電荷である。

$$q(\lambda) = \frac{\text{単位時間に発生する光電子数}}{\text{単位時間に入射する光子数}} = \frac{\text{単位時間に生じる電荷}/e}{\text{入射パワー}/(hc/\lambda)} = s_0 f(\lambda) \frac{hc}{e\lambda} \quad (3)$$

ICX424ALの $q(\lambda)$ はPointGrey社によって測定されている[5](Fig. 2)。一方、SONYのData Sheetには $f(\lambda)$ のみが載っている(s_0 の値はない)。確認のためSONYの $f(\lambda)$ から式(3)を用いて計算した全量子効率をFigure 2に示す。波長依存性は一致しており、最大値が一致するように s_0 を決めると、0.21 A/Wとなる。 $f(\lambda)=1$ となるのはこのセンサでは $\lambda=500$ nmのときであり、この値はこの波長での感度を表す。そしてこの波長でのSiフォトダイオードの感度[6]に近い。このイメージセンサの各画素の受光部はSiフォトダイオードであることを考えると妥当な値であろう。2社のデータには整合性がある判断できるが、この s_0 の値はSONYによって公表されたものではないので、以下では、Point Grey社の測定した $q(\lambda)$ を使う。

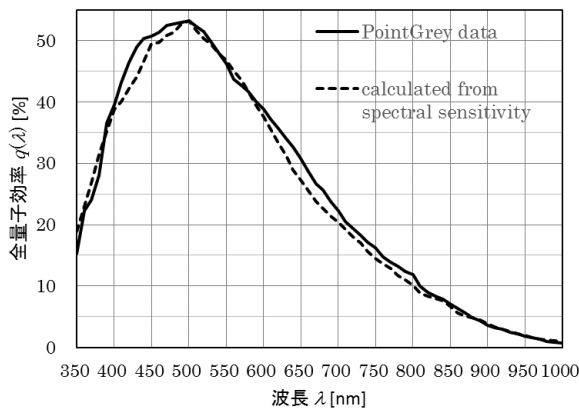


Figure 2. CCDイメージセンサ SONY ICX424ALの全量子効率。実線はPointGrey社のデータ[5]。破線は分光感度特性として公表されているSONY社のデータ[3]をもとに式(3)より計算した。

2.2 変換効率 S_V

生じた光電子はCCD(Charge Coupled Device)によって転送され、CCDイメージセンサの出力直前で電圧に変換される。簡単に言えば、容量 C のコンデンサに電荷

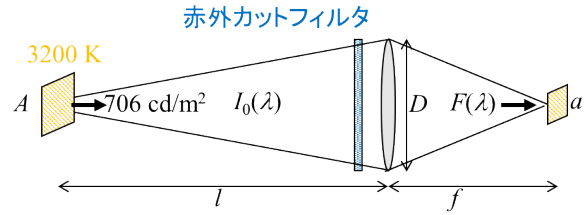


Figure 3. SONY社のData Sheet[3]に記載されている感度測定方法。 f はレンズの焦点距離に等しいと近似する。

として入力され、そのコンデンサの電圧として出力される。変換効率は以下の式で定義される。SI単位は[V/e-]である。単位中の[e-]は電子1個を表し、光によって生じた光電子1個につき何ボルトの電圧が出力されるかを表す。出力電圧は電子の数に比例する。

$$S_V = \frac{\text{その画素に対応したセンサの出力電圧 [V]}}{\text{1つの画素で発生した光電子数 [e-]}} \quad (4)$$

SONYは、Figure 3のように、3200 Kの黒体と同様のスペクトルで単位面積当たり706 cd/m²の光度を発する被写体(面積A)を撮影した時の、センサの出力電圧をSensitivity=880 mVとして公表している[3]。706 cd/m²に対応する放射強度を $I_0(\lambda)$ とすると次の関係がある[7]。なお、 $I_0(\lambda)$ のSI単位は光の波長をnmで表せばW/m²/sr/nmである([sr]は立体角の単位)。

$$706 \text{cd/m}^2 = \int 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot y(\lambda) \cdot I_0(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

ここで $y(\lambda)$ は人の目の分光感度特性を表す比視感度である(555 nmで最大値1となる)[7]。温度 T の黒体放射の式(単位面積から半空間への単位波長当たりのフラックス)[8]を $B_T(\lambda)$ とおけば、スペクトルの形が同様なことから係数を g_{706} として $I_0(\lambda) = g_{706} B_{3200}(\lambda)$ と書ける。これを代入することによって、式(5)から g_{706} を求めることができ、 $I_0(\lambda)$ が得られる。

センサ面上の像(面積a)へのフラックス $F(\lambda)$ (SI単位はW/m²/nm)は、レンズから見た被写体と像の立体角が同じであるという条件、

$$A/l^2 = a/f^2 \quad (6)$$

および、レンズのF値の定義、

$$F \text{値} = f/D \quad (7)$$

を用いると次のように波長の関数として決まる。

$$F(\lambda) = I_0(\lambda) A \{ \pi(D/2)^2 / l^2 \} / a \cdot f_{\text{CM500S}}(\lambda) f_{\text{lens}}(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot f_{\text{CM500S}}(\lambda) f_{\text{lens}}(\lambda) \cdot \{ (\pi/4) / (F \text{値})^2 \} \quad (8)$$

ここで、 $f_{CM500S}(\lambda)$ は測定時に使われる赤外カットフィルタ Hoya CM500S の透過特性[9]、 $f_{lens}(\lambda)$ は一般的なレンズの透過特性である。また、 F 値=8で測定するように指定されている[3]。

一辺の長さ δ の正方形画素で露光時間 Δt に生じる光電子数は次式で与えられる。

$$N_e = \int \{ (F(\lambda) \delta^2 \Delta t) / (hc/\lambda) \} q(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

式(8)で決まる $F(\lambda)$ 、前節で述べた $q(\lambda)$ と共に、このセンサの画素サイズ $\delta=7.4 \mu\text{m}$ 、以下で述べる実際の測定での露光時間 $\Delta t=1/250 \text{ s}$ を代入し、式(9)を数値積分すると、SONYによる測定時に生じたはずの光電子数 N_e が得られる。

さて、SONYによる測定は実際には1/250秒露光で行われており、Data SheetのSensitivityは1/30秒露光に換算した値である[3]。実際に測定された出力電圧は $V_S=880 \text{ mV}/(1/30 \text{ s}) \times (1/250 \text{ s})=105.6 \text{ mV}$ であったはずである。これらより、変換効率が次のように求まる。

$$S_V = V_S / N_e = 27 \mu\text{V}/e^- \quad (10)$$

2.3 飽和電子数 N_{MAX}

センサに入射する光量が増加して、画素が光電子をそれ以上蓄えられなくなると出力電圧も頭打ちになる。この値は画素毎に10~20%異なり、Data Sheet[3]にはその最小値が、500 mVと記載されている。式(10)の結果より飽和電子数は次のように求まる。

$$N_{MAX} = 500 \text{ mV} / S_V = 1.9 \times 10^4 e^- \quad (11)$$

これは最小値であり、他の画素の飽和電子数はこれ以上のはずである。一方、Point Greyがまとめたセンサ比較表[10]では $N_{MAX}=1.4 \times 10^4 e^-$ である。違いの原因は分からない。

2.4 読み出しノイズ ΔN_e

露光時間の長短にかかわらず、ある画素の出力電圧に必ず含まれるノイズであり、電子数で表される。Point Greyの比較表[10]によれば、

$$\Delta N_e = 12 e^- \quad (12)$$

である。式(10)の値をもとに電圧に換算すれば0.3 mVである。

一方、読み出しノイズの定義とは異なるが、Data Sheet[3]には「Dark signal shading」という呼び名で、センサに光を入れない状態での出力電圧の最大値と最小値の差が、0.5 mVと記載されている。各画素に対応した出力電圧の時間的平均値が全画素で同じで、各画素で独立に起こる時間的変動によって、最大値、最小値が

生ずるのであれば、その差は読み出しノイズに関係しているはずである。式(10)の変換効率を使うと、 $0.5 \text{ mV} / S_V = 19 e^-$ となる。参考のために記しておく。

センサの特性としては、これ以外に、光が入射しなくても各画素に電荷が生じる暗電流特性(温度に依存する)があるが、そのデータは見つからなかった。しかし、これによって生じる電荷量は時間に比例するので、月面衝突閃光の観測時のようにフレームレートが大きく露光時間が、1/60秒あるいは1/30秒のように短い場合には、生じる電荷量は無視できる。

3 WATEC T065 カメラモジュールのアンプとADコンバータの特性

3.1 PGA (Programmable Gain Amplifier)

カメラモジュール内のPGAはCCDセンサからの出力電圧を-6~42 dBの範囲で増幅する[4]。センサ出力電圧 V_S と増幅後の電圧 V_O は、PGAの設定ゲイン $G[\text{dB}]$ と次の関係にある。

$$G = 20 \cdot \log_{10}(V_O/V_S) \quad (13)$$

3.2 ADコンバータ

カメラモジュール T065 の仕様書[4]によれば、使われている10 bit ADコンバータの入力上限は900 mVである。900 mVでの出力カウントが1023であるとすると、1 V当たりのカウントは次のようになる。

$$A_d = 1023 / 900 \text{ mV} = 1.1 \times 10^3 \text{ カウント} / \text{V} \quad (14)$$

4 応用

これまでに述べた値を使い、3000 Kの黒体放射スペクトルでRバンド5等級の月面衝突閃光によるカメラからの出力値を算出する。これらのパラメータはDLP/Equuleusが観測を目指している閃光にはほぼ対応している。

4.1 閃光からのフラックスを決める

温度 T の黒体放射を表す関数(単位面積からのフラックス)を $B_T(\lambda)$ とおく。地球-月近傍での太陽からの分光フラックスを5777 K [11]の黒体放射で近似し $g_S B_{5777}(\lambda)$ とおくと、これを全波長域で積分したものは太陽定数 C_S [11]に等しいはずである。

$$\int g_S B_{5777}(\lambda) d\lambda = g_S \cdot \sigma T^4 = C_S \quad (15)$$

この式から $g_S = 2.17 \times 10^{-5}$ が求まる。ここで、 σ はシュテファン・ボルツマン定数である。

一方、閃光温度を3000 Kと仮定し、それからの分光フラックスを $g_f B_{3000}(\lambda)$ とおく。Rバンドフィルタの透過特性[12]を $f_R(\lambda)$ とし、閃光と太陽のRバンド等級を m_f 、 m_S とすると、次に示す等級とフラックスの関係（ポグソンの式）が成り立つ。

$$m_f - m_S = -2.5 \log_{10} \left\{ \frac{\left(g_f \int B_{3000}(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda \right)}{\left(g_S \int B_{5777}(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda \right)} \right\} \quad (16)$$

$m_f=5$ 、太陽のRバンド等級は $m_S=-27.29$ [13]であるから、この式から $g_f=9.13 \times 10^{-17}$ となり、閃光からの分光フラックス $g_f B_{3000}(\lambda)$ が決まる。

4.2 生じる光電子数

レンズの口径を D とし、カメラレンズの透過率を波長の関数として $f_C(\lambda)$ で表すと、センサに入射する単位時間当たりの光子の数は、単位波長当たり

$$N_p(\lambda) = g_f B_{3000}(\lambda) \cdot \pi(D/2)^2 \cdot f_C(\lambda) / (hc/\lambda) \quad (17)$$

である。よって、動画撮影における1フレームの露光時間 Δt の間閃光は一定の明るさであると仮定すると、生じる光電子数は次式で表される。

$$N_e = \int N_p(\lambda) q(\lambda) \Delta t \cdot d\lambda \quad (18)$$

DLP/Equuleusで使われるカメラでは $D=35.7$ mmであり、 $f_C(\lambda)$ は400 nmから900 nmで1、他の波長では0と近似する。また、 $\Delta t=1/60$ sである。これらの値を入れて式(18)を数値積分すると、 $N_e=9.9 \times 10^2$ が得られる。

4.3 画素値 (カウント値)

レンズの光学的性質のため閃光は点像にはならない。像の明るさが半径3画素の範囲（面積28画素）で一様であるとすると、1画素当たりの光電子数は $n_e=35$ となる。式(12)で示した読み出しノイズよりは大きい。これによるCCDセンサの出力電圧は、

$$V_S = S_V \cdot n_e = 9.5 \times 10^{-4} \text{ V} \quad (19)$$

であり、カメラモジュールのPGAのゲインが $G=20$ dB (10倍)であれば、画素値 x は

$$x = V_S \times 10 \times A_d = 10 \quad (20)$$

となる。

5 まとめ

SONY ICX424AL CCD イメージセンサ、およびそれを搭載したWATEC T065 カメラモジュールのおもな特性は次の通りである。

SONY ICX424AL CCD イメージセンサ

全量子効率：Figure 2 の通り。

変換効率： $S_V=27 \mu\text{V}/e^-$ 。

飽和電子数： $N_{MAX}=1.4 \times 10^4 e^-$ または $1.9 \times 10^4 e^-$ 。

読み出しノイズ： $\Delta N_e=12 e^-$ 。

WATEC T065 カメラモジュール

PGAのゲイン： $-6 \sim 42$ dB

ADコンバータ： $A_d=1.1 \times 10^3$ カウント/V

参考文献

- [1] 船瀬龍 他：地球-月系ラグランジュ点探査CubeSat EQUULEUS の概要と開発状況，第61回宇宙科学技術連合講演会，3G04，新潟市，2017年10月。
- [2] 阿部新助 他：超小型6U深宇宙探査機EQUULEUS搭載カメラDELPHINUSの開発，第17回宇宙科学シンポジウム講演集，宇宙科学研究所/JAXA，2017年1月。
- [3] SONY ICX424AL Data Sheet, <http://www.alldatasheet.jp/datasheet-pdf/pdf/95421/SONY/ICX424AL.html> (2017.10.23 閲覧)。
- [4] カメラモジュール仕様書 T065, ワテック株式会社, 2016年4月。
- [5] Quantum Efficiency Curve Comparison for ICX445AL, Point Grey Technical Application Note TAN 2008006, http://www.lpriami.altervista.org/ImAstro/HR-Sensor_files/TAN2008006_Sensor_Response_Curve_Comparison_for_ICX445-4.pdf (2017.10.23 閲覧)。
- [6] 光半導体素子ハンドブック, 浜松ホトニクス, https://www.hamamatsu.com/jp/ja/hamamatsu/overview/bsd/solid_state_division/related_documents.html (2017.10.23 閲覧)。
- [7] 理科年表, 物理/化学, 光学的性質, 測光と測色, 国立天文台編, 丸善。
- [8] 原康夫：物理学基礎, 学術図書, 2016, 第14章。
- [9] HOYA, 色ガラスフィルター, 色補正フィルター, <https://www.hoyacandeo.co.jp/japanese/products/eo/color/07.html> (2017.10.23 閲覧)。
- [10] MONO CAMERA SENSOR REVIEW, Point Grey, <https://www.ptgrey.com/support/downloads/10625> (2017.10.23 閲覧)。
- [11] 理科年表, 天文, 太陽の諸定数, 国立天文台編, 丸善。
- [12] Bessell, M. S.: Standard Photometric Systems, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 43, pp. 293-336 (2005)。
- [13] Livingston, W. C.: Sun, in *Allen's Astrophysical Quantities* 4th ed. (Editor: Cox, A. N.), pp. 339-380, Springer (1999)。