

## ■はじめに

デジタルカメラの性能評価システムを提供している DxO Mark 社では、2002 年以降に発売された 500 機種近くのデジタルカメラの性能を評価し、その結果を Web サイト上に公開している。特に RAW 画像データから解析したイメージセンサの性能データは、我々カメラ、イメージセンサエンジニアにとっては非常に有効である

(<https://www.dxomark.com/category/camera-reviews/>)。

当該性能データは信号レベル対 SNR のカーブにて提示されており、各ポイントでの数値も読み出せる。もしこの数から感度電子数や飽和電子数などイメージセンサの基本特性パラメーターを導出できれば、約 20 年間にわたる膨大な数のイメージセンサの特性、さらにその性能推移など有効な情報を得ることができると考えられる。

そこで当該 SNR カーブのデータからイメージセンサの基本特性パラメーターを導出する方法を考案し、Excel で簡単に計算できる Tool を作成、さらに DxO Mark 社が評価したデジタルカメラのイメージセンサ基本特性パラメーターを算出し、その推移を整理してみようと思う。

## ■性能データ算出の方法

### 【準備編】

デジタルカメラの最終出力信号レベルが 118digit(8bit)になる時のイメージセンサの像面露光量を  $H_m(\text{lx} \cdot \text{Sec})$  とした時、ISO は下記①式で表される。

$$ISO = \frac{10}{H_m} \quad \text{-- ①}$$

(参照) [http://www.cipa.jp/std/std-sec\\_j.html](http://www.cipa.jp/std/std-sec_j.html) "CIPA DC-004-2020 デジタルカメラの感度規定"

感度電子数は像面露光量  $H_m=1$  の時に発生する電子の数量であるので、これを  $e[\text{Sens}]$  ( $e/\text{lx} \cdot \text{Sec}$ ) とすると、デジタルカメラの最終出力信号レベルが 118digit(8bit)になる時の発生電子数  $e[\text{Sig}]$  (@118digit) は、①式を利用して下記で表すことができる。

$$e[\text{Sig}](@118digit) = e[\text{Sens}] * \frac{10}{ISO} \quad \text{-- ②}$$

さらに、信号の飽和レベルを 100% とし、上記条件での信号レベルに対する飽和レベルの比率を  $R$  (デジタルカメラの  $\gamma$  特性により決定される) とすると、所望の信号レベル  $\text{Sig}(\%)$  における電子数  $e[\text{Sig}]$  は②式を利用して下記③式で表される。

$$e[\text{Sig}] = e[\text{Sig}](@118digit) * \frac{R}{100} * \text{Sig} = \frac{R * e[\text{Sens}]}{10 * ISO} * \text{Sig} \quad \text{-- ③}$$

上記までの総括として、各種単位系におけるデジタルカメラの入力信号に対する出力信号の関係を図 1 に示す。

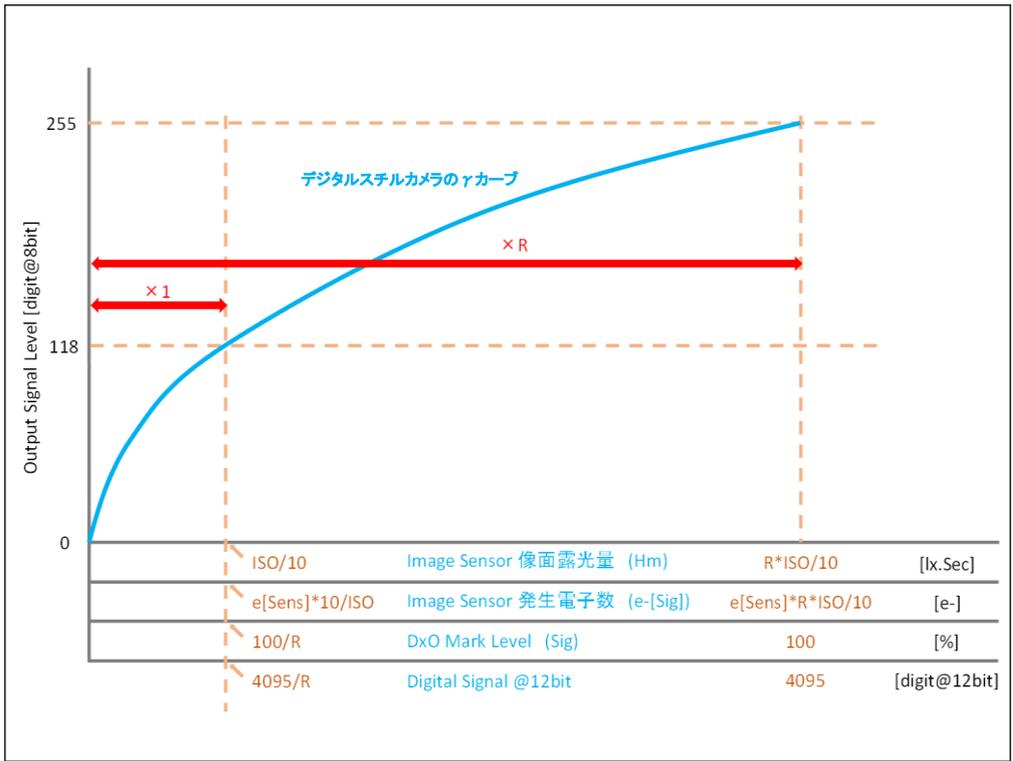


図1 各種単位系におけるデジタルカメラの入力信号に対する出力信号の関係

一方、イメージセンサの信号電子数： $e[\text{Sig}]$ 、Dark Noise 電子数： $e[\text{DN}]$ 、Shot Noise 電子数： $e[\text{ShotNoise}]$ 、PRNU 電子数： $e[\text{PRNU}]$ とすると、イメージセンサから出力する信号の SNR は④式で表すことができる。

$$\text{SNR} = 20 * \text{Log} \left( \frac{e[\text{Sig}]}{\sqrt{e[\text{DN}]^2 + e[\text{ShotNoise}]^2 + e[\text{PRNU}]^2}} \right) \quad \text{-- ④}$$

ここで

$$e[\text{ShotNoise}] = \sqrt{e[\text{Sig}]} \quad , \quad e[\text{PRNU}] = k * e[\text{Sig}] \quad (k \text{はPRNU 係数}) \quad \text{-- ⑤}$$

であるので⑥式のように

$$\text{SNR} = 20 * \text{Log} \left( \frac{e[\text{Sig}]}{\sqrt{e[\text{DN}]^2 + e[\text{Sig}] + (k * e[\text{Sig}])^2}} \right) \quad \text{-- ⑥}$$

となり、これを展開すると⑦式のような  $e[\text{Sig}]$  を変数とした 2 次方程式が得られる。

$$\left( k^2 - 10^{\frac{-\text{SNR}}{10}} \right) * e[\text{Sig}]^2 + e[\text{Sig}] + e[\text{DN}]^2 = 0 \quad \text{-- ⑦}$$

ここで、⑦式に③式を代入し整理すると下記式が得られる。

$$\left( k^2 - 10^{\frac{-\text{SNR}}{10}} \right) * R^2 * e[\text{Sens}]^2 * \text{Sig}^2 + 10 * \text{ISO} * R * e[\text{Sens}] * \text{Sig} + 100 * \text{ISO}^2 * e[\text{DN}]^2 = 0 \quad \text{-- ⑧}$$

【実施編】

さて、実際に DxO Mark 社が公開しているデジタルカメラのイメージセンサの性能データは先にも述べたように信号レベル対 SNR のカーブにて提示されてはいるが、巻末の参照 (DxO Mark からのデータ取得手法) の方法により実質の ISO ゲイン、Sig と SNR の関係を数値として読み出すことができる。そこでまず ISO、Sig、SNR を係数とした下記の⑨式の形に変換する。

$$R^2 * Sig^2 * k^2 * e[Sens] - \left(10^{\frac{-SNR}{10}}\right) * R^2 * Sig^2 * e[Sens] + 100 * ISO^2 * e[Sens]^{-1} * e[DN]^2 = -10 * ISO * R * Sig \quad \text{-- ⑨}$$

ここで上記係数に関する要素をまとめて

$$R^2 * Sig^2 = A \quad - \left(10^{\frac{-SNR}{10}}\right) * R^2 * Sig^2 = B \quad 100 * ISO^2 = C \quad - 10 * ISO * R * Sig = D \quad \text{-- ⑩}$$

とおくと、下記⑪式のように整理される。

$$A * k^2 * e[Sens] + B * e[Sens] + C * e[Sens]^{-1} * e[DN]^2 = D \quad \text{-- ⑪}$$

さて、⑪式は  $k$ 、 $e[DN]$ 、 $e[Sens]$  の 3 種類の変数からなるので、3 元連立方程式を解くことでこれらの値を求めることができることが想定される。そのためには 3 系統のシチュエーションにおける  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  の値を準備すればよいことになる。 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  の値は ISO、Sig、SNR の値から計算により算出されるので、これを DxO Mark 社が公開しているデジタルカメラの性能データから適用させれば、各デジタルカメラに用いられているイメージセンサの  $k$ 、 $e[DN]$ 、 $e[Sens]$  の数値が求められることになる。

まず巻末の参照 (DxO Mark からのデータ取得手法) の方法により DxO Mark 社が公開しているデジタルカメラの実質の ISO ゲインを取得、そして SNR カーブからの 3 ポイント (SNR0dB 位置、中間位置、信号 100%位置) の Sig、SNR データを取得し、各ポイントでの  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  の値を求める。

デジタルカメラの最低 ISO ゲイン ISO(Min)での SNR カーブの各取得ポイントのデータにて計算した  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  の値が下記であったとする。

| ISO            |          | ISO(Min)        |                 |                 |                 |
|----------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                |          | $A$             | $B$             | $C$             | $D$             |
| 取得<br>Position | SNR0dB位置 | $A(L, ISO MIN)$ | $B(L, ISO MIN)$ | $C(L, ISO MIN)$ | $D(L, ISO MIN)$ |
|                | 中間位置     | $A(M, ISO MIN)$ | $B(M, ISO MIN)$ | $C(M, ISO MIN)$ | $D(M, ISO MIN)$ |
|                | 信号100%位置 | $A(H, ISO MIN)$ | $B(H, ISO MIN)$ | $C(H, ISO MIN)$ | $D(H, ISO MIN)$ |

上記結果を式⑪に代入すると下記⑫式を得る。

$$\begin{aligned}
& A(L, ISO MIN) * k^2 * e[Sens] + B(L, ISO MIN) * e[Sens] + C(L, ISO MIN) * e[Sens]^{-1} * e[DN]^2 \\
& = D(L, ISO MIN) \quad [ @SNR 0dB 位置 ] \\
& A(M, ISO MIN) * k^2 * e[Sens] + B(M, ISO MIN) * e[Sens] + C(M, ISO MIN) * e[Sens]^{-1} * e[DN]^2 \\
& = D(M, ISO MIN) \quad [ @中間位置 ] \\
& A(H, ISO MIN) * k^2 * e[Sens] + B(H, ISO MIN) * e[Sens] + C(H, ISO MIN) * e[Sens]^{-1} * e[DN]^2 \\
& = D(H, ISO MIN) \quad [ @信号 100%位置 ] \quad \text{-- ⑫}
\end{aligned}$$

これを行列式の形式で表記すると下記⑬式のように表される。

$$\begin{bmatrix} A(L, ISO MIN) & B(L, ISO MIN) & C(L, ISO MIN) \\ A(M, ISO MIN) & B(M, ISO MIN) & C(M, ISO MIN) \\ A(H, ISO MIN) & B(H, ISO MIN) & C(H, ISO MIN) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} k^2 * e[Sens] \\ e[Sens] \\ e[Sens]^{-1} * e[DN]^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D(L, ISO MIN) \\ D(M, ISO MIN) \\ D(H, ISO MIN) \end{bmatrix} \quad \text{-- ⑬}$$

さらに下記⑭式のように逆変換計算をすれば、 $k^2 * e[Sens]$ 、 $e[Sens]$ 、 $e[Sens]^{-1} * e[DN]^2$ の値が得られる。なお、逆変換計算は EXCEL の MINVERSE 関数と MMULT 関数を利用すれば容易に行える。

$$\begin{bmatrix} k^2 * e[Sens] \\ e[Sens] \\ e[Sens]^{-1} * e[DN]^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(L, ISO MIN) & B(L, ISO MIN) & C(L, ISO MIN) \\ A(M, ISO MIN) & B(M, ISO MIN) & C(M, ISO MIN) \\ A(H, ISO MIN) & B(H, ISO MIN) & C(H, ISO MIN) \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} D(L, ISO MIN) \\ D(M, ISO MIN) \\ D(H, ISO MIN) \end{bmatrix} \quad \text{-- ⑭}$$

算出された数値が

$$k^2 * e[Sens]=L \quad e[Sens]=M \quad e[Sens]^{-1} * e[DN]^2=N \quad \text{-- ⑮}$$

であるとすれば感度電子数： $e[Sens]$ 、Dark Noise 電子数： $e[DN]$ 、PRNU 係数： $k$  は下記⑯式で求めることができる。

$$e[Sens]=M \quad e[DN]=\sqrt{N * M} \quad k=\sqrt{L/M} \quad \text{-- ⑯}$$

なお、本計算に用いる係数 R は一般的に各デジタルカメラが有する  $\gamma$  特性に基づく数値であり個々のデジタルスチルカメラごとに相違がある。しかし、DxO 社では個別基準で ISO データを再測定することで統一化しており、その数値は R=7.8 としている。

(参照) <https://www.dxomark.com/glossary/iso-speed/>

PRNU は一般的には下記⑰式のように dB、もしくは%で表記されることが多い。

$$PRNU = 20 * \text{Log } k \text{ (dB)} \quad PRNU = 100 * k \text{ (\%)} \quad \text{-- ⑰}$$

また、図 1 から明らかなように、飽和電子数を  $e[\text{Sat}]$  とすると、下記の計算により算出できる。

$$e[\text{Sat}] = e[\text{Sens}] * R * \frac{10}{\text{ISO}} = e[\text{Sens}] * \frac{78}{\text{ISO}} \quad \text{-- ⑱}$$

また、ダイナミックレンジ DR は、Min ISO における Dark Noise 電子数と飽和電子数の比であるので下記式より求まる。

$$\text{DR} = 20 * \text{Log} \left( \frac{e[\text{Sat}]}{e[\text{DN}]@Min ISO} \right) \text{ (dB)} \quad \text{-- ⑲}$$

感度電子数や PRNU の数値は ISO ゲインに対して変化しないが、Dark Noise 電子数の値はイメージセンサ内部のアンプゲイン換算の影響を受け、ISO ゲインに対して変化するのが一般的である。したがって、各 ISO ゲインに応じて上記の算出を個別に行うことが考えられるが、ISO ゲインが上がるとノイズが増え、ISO ゲインごとに感度電子数や PRNU の算出数値がばらついて出現することになる。したがって、ISO(Min)での計算により既知となった  $k$ 、 $e[\text{Sens}]$  の値をそのまま使い、ISO ゲインを変化させたときの Dark Noise 電子数を計算する方が好ましい。

⑱式を変形すると下記⑳式が得られる。

$$e[\text{DN}] = \frac{\sqrt{\left(10^{\frac{-\text{SNR}}{10}} - k^2\right) * 7.8^2 * e[\text{Sens}]^2 * \text{Sig}^2 - 78 * \text{ISO} * e[\text{Sens}] * \text{Sig}}}{10 * \text{ISO}} \quad \text{-- ⑳}$$

ここで、SNR が 0dB の位置の信号 Level を  $\text{Sig}[0\text{dB}]$  とすると、⑳式は㉑式のように変形できる。

$$e[\text{DN}] = \frac{\sqrt{(1 - k^2) * 7.8^2 * e[\text{Sens}]^2 * \text{Sig}[0\text{dB}]^2 - 78 * \text{ISO} * e[\text{Sens}] * \text{Sig}[0\text{dB}]}}{10 * \text{ISO}} \quad \text{-- ㉑}$$

$k$ 、 $e[\text{Sens}]$ 、ISO は既知の値であり、また  $\text{Sig}[0\text{dB}]$  の値は巻末の参照(DxO Mark からのデータ取得手法)の方法により取得できるので、これらの値を入力すれば各 ISO ゲインに対する Dark Noise 電子数  $e[\text{DN}]$  を求めることができる。

## ■注意事項

本計算によって算出された数値は、下記の点に注意しなければならない。

- 1) イメージセンサのノイズを Dark Noise、Shot Noise、PRNU の二乗平均としてモデリングしている。したがってそれ以外のノイズの影響が大きいイメージセンサの場合、本計算により求めた値と実際のイメージセンサ単体の測定値との差異は大きくなる。
- 2) DxO Mark 社のデータは各デジタルスチルカメラの RAW データ出力値から算出されている。各デジタルスチルカメラの RAW データにノイズリダクション等の信号処理が加わっていれば、本計算により求めた値と実際のイメージセンサ単体の測定値との差異は大きくなる。
- 3) 本来イメージセンサの性能比較評価は同一の IR カットフィルターを用いて行われるべきであるが、DxO Mark のデータは、各デジタルスチルカメラの RAW データから算出した数値であることから各デジタルスチルカメラの IR カットフィルターの特性差による偏差を含むことになる。
- 4) 飽和電子数はデジタルスチルカメラの RAW データ出力の最大値にて規定されることになる。一般的に当該ポイントはイメージセンサが本来持つ飽和電子数を最大限に活かすべく設定されるが、飽和面が画面に現れるのを避けるために若干低い値で設定されている（クリップされている）。したがって厳密なイメージセンサの飽和電子数はここで示した数値よりも若干大きいと想定される。

以上のことから、本データと実際のイメージセンサ単体の測定値には差異が発生することは致し方ないので、傾向を把握するという観点で閲覧していただくとありがたいです。

なお、本データに関する責任は一切負いません。

## ■【参照】 DxO Mark からのデータ取得手法

### ①サイトに進む

<https://www.dxomark.com/Cameras/>

### ②カメラメーカー、機種を選択

**DXOMARK**

English Search for your device brand or model

RANKINGS SMARTPHONES CAMERAS LENSES SPEAKERS BEST OF TECH HOW WE TEST GALLERIES VIDEOS

Smartphones **Sensors** Lenses Speakers

### Camera Sensor Rankings

DXOMARK's comprehensive camera test results database allows you to browse and select cameras for comparison, based on sensor characteristics, brand, price, launch date, resolution, sensor format and camera type.

| Any Brand |          |                |        | Any Price |             | Any Date |         |
|-----------|----------|----------------|--------|-----------|-------------|----------|---------|
| Canon     | Pentax   | Panasonic      | Nokia  | ▲         | ▲           | ▲        | ▲       |
| Nikon     | Olympus  | Phase One      | Leaf   | \$0       | to \$45,200 | 2002     | to 2021 |
| Sony      | Samsung  | Hasselblad     | Ricoh  | ▼         | ▼           | ▼        | ▼       |
| Leica     | Fujifilm | Konica Minolta | Mamiya |           |             |          |         |

ADVANCED FILTERS RESET FILTERS

RESOLUTION (MPix) 1

TYPE

SENSOR FORMAT

**カメラメーカー、機種を選択**

With DXOMARK you can display the cameras with three different views - Grid, List or Graph in order for you to have the best solution to compare the filtered results. Choose the cameras you want to compare from the results below. Then in the selection box, you can check up to three cameras at a time to compare their data.

### ③MEASUREMENT を選択

**DXOMARK**

English Search for your device brand or model

RANKINGS SMARTPHONES CAMERAS LENSES SPEAKERS BEST OF TECH HOW WE TEST GALLERIES VIDEOS

### Canon EOS R5 : Tests and Reviews

SCORES SPECIFICATIONS **MEASUREMENTS**

Canon EOS R5 (+) Add to compare

| DXOMARK Sensor Scores |           |
|-----------------------|-----------|
| Overall Score         | 95        |
| Dynamic Range (Depth) | 25.3 bits |
| Dynamic Range         | 14.6 EVs  |
| Light ISO             | 3042 ISO  |

**MEASUREMENT を選択**

### Canon EOS R5 side by side comparisons

Canon EOS R5 versus rival model with similar score

Canon EOS R5 Canon EOS 5D Mark IV

95 91

Compare

Canon EOS R5 vs Canon EOS 5D Mark IV

### ③ISO ゲインデータの取得

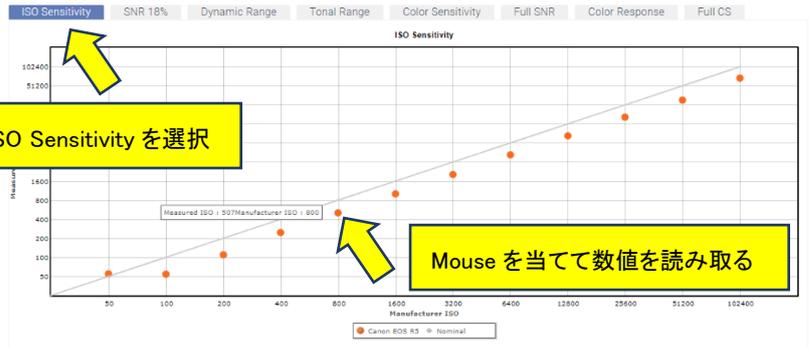
DXOMARK

English Search for your device brand or model.

RANKINGS SMARTPHONES CAMERAS LENSES SPEAKERS BEST OF TECH HOW WE TEST GALLERIES VIDEOS

#### Canon EOS R5 : Tests and Reviews

SCORES SPECIFICATIONS MEASUREMENTS



### ④SNR データの取得

DXOMARK

English Search for your device brand or model.

RANKINGS SMARTPHONES CAMERAS LENSES SPEAKERS BEST OF TECH HOW WE TEST GALLERIES VIDEOS

#### Canon EOS R5 : Tests and Reviews

SCORES SPECIFICATIONS MEASUREMENTS

