

2012/12/17

HDR Mode の設定方法

センサーテクノロジー株式会社
技術部

内容

概要	3
HDR MODE の使用方法	3
はじめに	3
HDR Mode(Piecewise Linear Response)の動作原理	3
HDR Mode 設定画面の説明 :	5
HDR Mode の設定方法の具体例	7
2-Slope Mode の設定方法 :	7
Vlow2 の効果 :	8
Knee1 point para の効果 :	9
3-Slope Mode の設定方法 :	10
Knee point 2 の設定方法	11
Knee point 1 の設定方法	12
Knee point 1 と Knee point 2 の設定パラメータの関係について	12
3-slope mode における Vlow2 の効果	13
3-slope mode における” Knee1 point para” の効果	14
トータル露光時間の影響について	16
まとめ	17
参考文献	17
APPENDIX	18
A-1 HDR Mode の効果	18
A-2 HDR Mode の画質に与える影響	20

概要

本報告書では、CMOSIS 社製 CMV4000(CMV2000) CMOS イメージャーの Piecewise Linear Response 機能 [1]を用いた光学的なダイナミックレンジの拡大方法について説明します。具体的には、センサーテクノロジー社製 STC-CMC4MCL/STC-CMB4MCL カメラのコントロールソフトウェア CLCtrl2 に用意されているダイナミックレンジの拡大機能である HDR Mode の使用方法について解説します。

また、画質は、HDR Mode において低下するが、その原因がオーバーフロー電位の印加であり、その画質低下の程度は印加されるオーバーフロー電位の絶対値に依存することを実験的に明らかにします。

また、実際の取得画像から HDR Mode の効果について考察します。

HDR Mode の使用方法

はじめに

通常のカメラの仕様では、照度と出力信号間の関係である感度曲線は線形応答に設定されています。感度曲線が線形応答に設定されたカメラの場合、明るさが大きく異なるような像を取得する際、光学的なダイナミックレンジが不足し明るい部分と暗い像の部分と同時に取得する事が非常に困難になります。

カメラコントロールソフトウェア : CLCtrl2 に用意されている HDR Mode を用いると入射物体光の任意の明るさのレベルに感度曲線の屈曲点(Knee Point)を最大 2 か所設定することができます。この Knee point ごとに感度曲線の勾配を低減させることで露光時間内の感度曲線が複数の勾配で構成され最終的に感度曲線が対数変換されたような形状となり光学的なダイナミックレンジを増加挿せることができます。

この HDR Mode の機能は、イメージセンサーの Piecewise Linear Response (区分線形応答) の機能を基に作られておりその機能の概要を次節で説明します。

HDR Mode(Piecewise Linear Response)の動作原理

イメージセンサーの区分線形応答機能は、イメージセンサーに入射される弱い光以外は、各ピクセルに設定された電位を超えて蓄積された電荷をオーバーフローさせ蓄積電荷量をクリップする機能を持っています。このクリップレベルは、同一の露光時間内で最大 2 回設定できるため 3 つのスロープを持った応答曲線を実現することができます。詳

細に関しては Fig.1 で説明します。

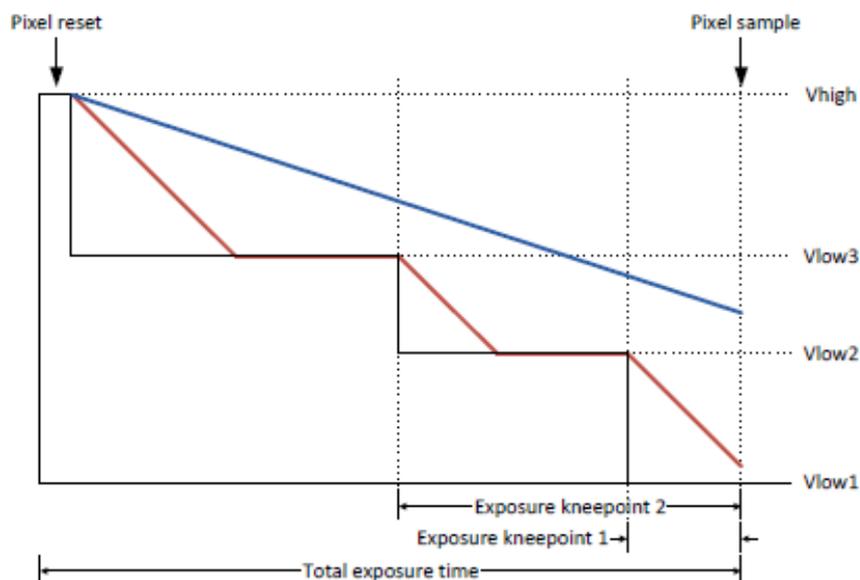


Figure 1 Piecewise Linear Response機能の詳細説明図

Fig.1 において、赤線はピクセルが飽和するような強い光が各々ピクセルに入射された場合の蓄積電荷の露光時間内の変化を現しています。図からも分かるように光が照射されたピクセルは、露光期間内に設定された 2 つの時間幅に対して設定された異なる電位レベルで蓄積電荷量がクリップされていることが分かります。Fig.1 において、このクリップが露光時間の終了までの間に 2 回起こることでピクセルの飽和がおきていないことに注意してください。

また、図中の青線は、弱い光が入射された場合の蓄積電荷量の変化を現しています。弱い光が入射された場合、上記のクリップが起こらないため通常の線形な感度曲線であることが分かります。

図中のオーバーフロー電位” Vlow2” , ” Vlow3” 及び異なる時間幅に設定された” ExposureKneepoint 1” , ” Exposure Kneepoint 2” は、カメラコントロールソフト：CLCtrl2 の” HDR” タブ内の設定画面で設定することができます。この設定画面から各々のパラメータを設定することで Fig.2 に示すような感度曲線を実現することができます。

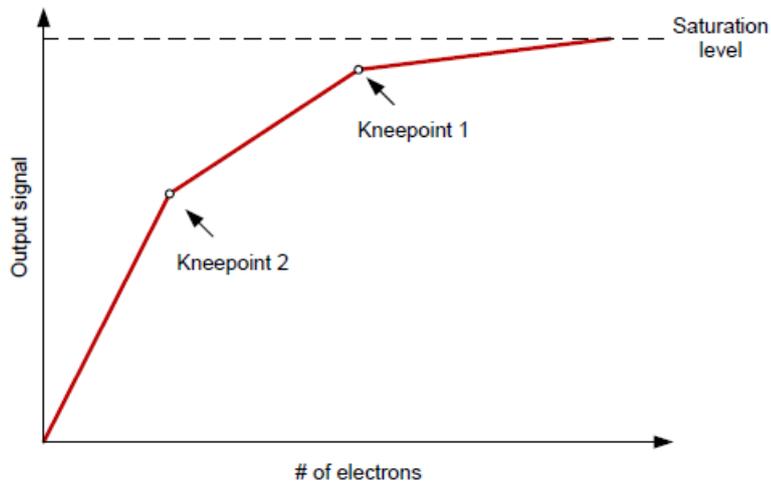


Figure 2 Piecewise Linear Response 機能で実現される感度曲線

Fig.2 において、” Kneepoint1” ,” Kneepoint 2” の配置は、Fig.1 の” Vlow” の設定値と” ExposureKneepoint1” , ” Exposure Kneepoint2” の時間幅で決まるスロープの傾きの交点として決められます。

HDR Mode 設定画面の説明 :

カメラコントロールソフトウェア : CLCtrl2 で用意されている HDR Mode は、Fig.3 に示す画面で構成されています。 各々の設定項目の内容を以下に示します。

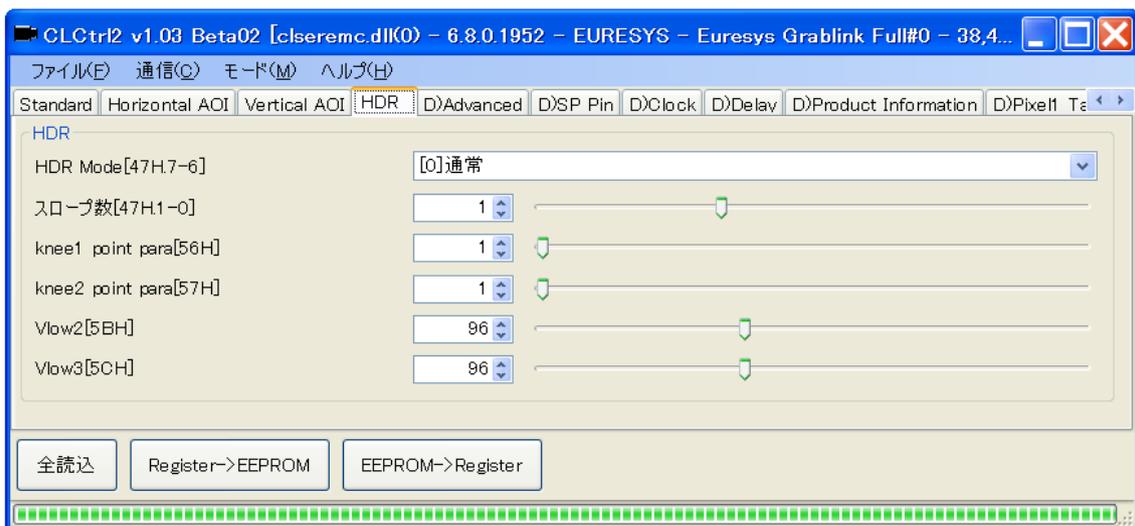


Figure 3 HDR Mode の設定画面

HDR Mode :

“通常” と “自由設定” が選択でき各々の機能を以下に示す。

通常 : 出力信号と入射光強度の関係が線形な感度曲線になります。

自由設定 : 出力信号と入射光強度の関係が屈曲点(Knee point)を持つ非線形な感度曲線になります。

スロープ数 :

1 から 3 まで設定可能でその数値は各々以下の機能となります。

1 : HDR Mode 設定項目の “通常” と同等機能であり線形の応答曲線を持った動作となる。

2 : Kneepoint1 が設定され任意の 2 つのスロープで構成された感度曲線になります。 以後、このモードを 2-Slope Mode と呼びます。

3 : Kneepoint1 と Kneepoint2 が設定され任意の 3 つのスロープで構成される感度曲線になります。 以後、このモードを 3-Slope Mode と呼びます。

Knee1 point para :

Knee1 point para は、Knee point 1 の露光時間幅を設定するパラメータです。このパラメータの設定値で Knee point 1 以降のスロープの傾斜を制御できます。

Knee2 point para :

Knee2 point para は、Knee point 2 の露光時間幅を設定するパラメータです。このパラメータの設定値で 3-Slope Mode の 2 番目のスロープの傾斜を制御できます。

Vlow2 :

Vlow2 は、Kneepoint1 の電位（出力信号レベル）を設定するパラメータです。

Vlow3 :

Vlow3 は、Kneepoint2 の電位（出力信号レベル）を設定するパラメータです。

HDR Mode の設定方法の具体例

この章では、実験結果を基にした具体的な HDR Mode の設定方法について述べます。

実験には、STC-CMB4MCL を用いました。カメラの設定条件を Table 1 に示します。また、試験光源として照度を校正した拡散板付白色 LED の面照明装置を用いて被試験カメラの感度曲線を測定しました。以下に実験結果及び設定方法の詳細について述べます。

2-Slope Mode の設定方法：

2-Slope Mode は、Kneepoint1 のみが現れるモードであり、その結果 2 つのスロープで感度曲線が構成されることになります。

実際のワークからの物体光をカメラで画像に変換した際、往々にして飽和が生じます。その場合 Knee point の設定で飽和を緩和することが可能となり、その時に重要なのが 1) “どの程度の明るさのレベル” から 2) “どれぐらい感度曲線の低減” を行うかが重要なパラメータとなります。

このように線形感度曲線上の Knee point 1 の信号レベルに対応した配置と新たな感度曲線の勾配と設定パラメータとの相関を実験的に知ることでワークの性状と照明光で決まる物体光に対して最適な非線形な感度曲線をデザインすることが可能になります。次節以降 HDR Mode での Knee point の設定パラメータと感度曲線の形状の相関関係に関する実験結果を紹介しますので感度曲線のデザインの参考にしてください。

このモードで用いるパラメータの設定を Table1 に示します。

Table 1 Table 1 Camera 及び HDR Mode の設定項目

設定項目		設定値
Camera Settings	ゲインの現在値	55
	露光時間(ライン単位)	200
	デジタルゲイン	0
	アナログゲイン	×1.6
HDR Mode Settings	Vlow2	Arbitrary value.
	Vlow3	Do not care.
	Knee1 point para	Arbitrary value.
	Knee2 point para	Do not care.

Vlow2 の効果 :

Vlow2 は、ピクセルに蓄積される電荷のクリップポイントを設定するパラメータで感度曲線上のどの位置に Knee point を設定するかを決める重要なパラメータです。Fig.5 に Knee1 point para を 80 に固定し Vlow2 をパラメータとして変化させた時の感度曲線を示します。図中の凡例の記号は、以下の内容を意味するものとします。

Ref : 通常モード (感度曲線が線形応答) のデータ



Fig.4 に”Vlow2”を変化させた場合の 2-slope Mode の感度曲線の変化を示します。

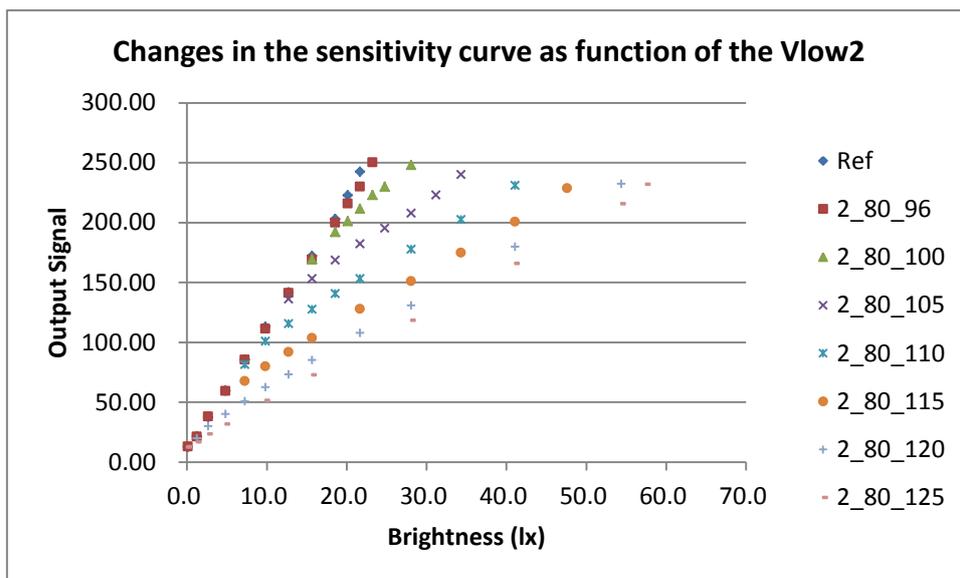


Figure 4 2-slope Mode における設定パラメータ”Vlow2”の効果

Fig.4 より Vlow2 を変化させることで Knee point 1 がベースとなっている Ref.の線形な感度曲線上を移動していることが分かります。この Knee point の Output signal 軸への射影成分を Table 2 に示します。

Table 2 2-slope Mode における Knee Point の設定レベル (Vlow2 依存性)

Vlow2 value	Output Signal Level
96	220
100	180
105	140
110	100
115	60
120	20
125	15

Table 2 の結果より、2-slope Mode において出力信号の任意のレベルに Knee Point が設定可能になります。

Knee1 point para の効果 :

Knee1 point para は、設定した Knee point 以降に現れる感度曲線の勾配を決定するパラメータです。 その設定値と感度曲線の勾配の関係を Fig.5 に示します。

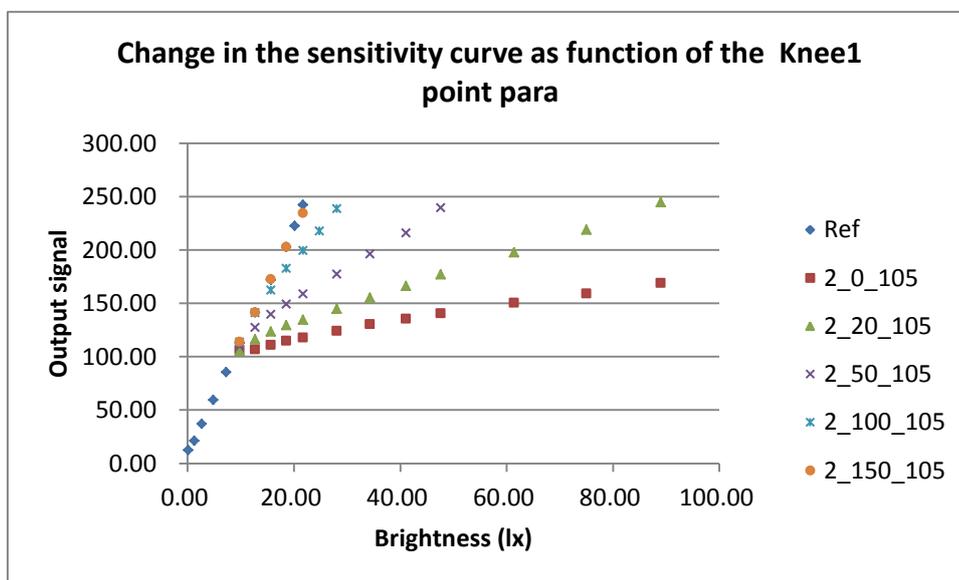


Figure 5 設定パラメータ”Knee1 point para”と感度曲線の勾配との関係

Fig.5 の測定結果から”Knee1 point para”設定値に対する Knee point 以降の感度曲線の勾配変化を Table 3 に示します。 但し、感度曲線の勾配変化量は、Ref(通常モード

の感度曲線)に対する割合で表示しています。

Table 3 Reference の感度曲線に対する Knee point 以降の感度曲線勾配の変化

Knee1 point para value	Slope of sensitivity curve for the Ref. (%)
0	6.3
20	14.7
50	28.0
100	55.0
150	91.3

3-Slope Mode の設定方法 :

3-Slope Mode は、Kneepoint1 と Kneepoint 2 の二つの Knee point が現れるモードであり、その結果 3つのスロープで感度曲線が構成されることになります。

Fig.6 に通常モード、2-slope Mode 及び 3-slope Mode に設定した場合の感度曲線の差異を示します。

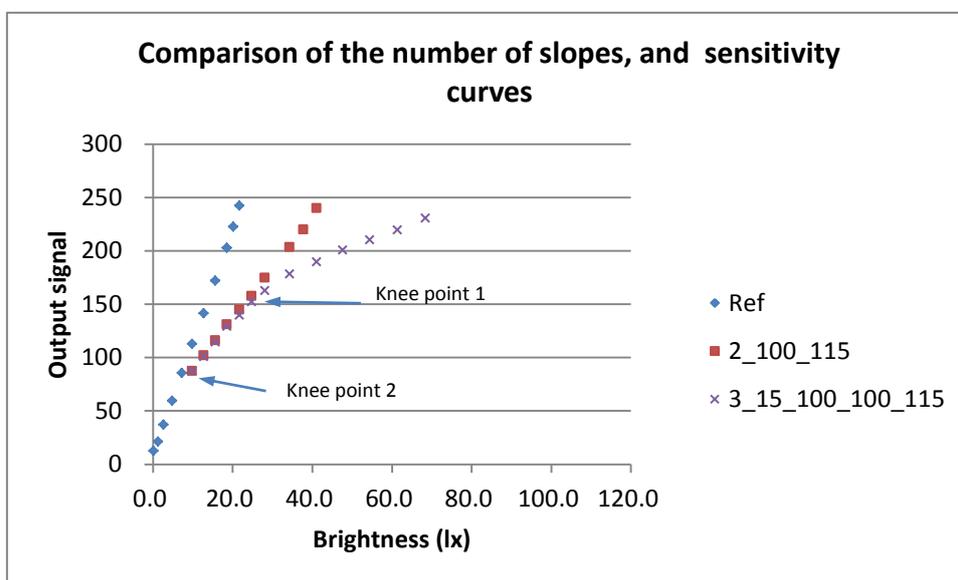


Figure 6 通常モード、2-slope Mode 及び 3-slope Mode の感度曲線比較

Fig.6 から分かるように 3-slope Mode では、Knee point が二つ設定され 3つのスロープで感度曲線が構成されていることが分かります。

Knee point 2 の設定方法

Knee point 2 は、HDR Mode タブの” Vlow3” と” Knee2 point para” で設定できます。“Vlow3” は通常モードの直線的な感度曲線上のどの位置に Knee point 2 を設定するかを決めるパラメータで 2-slope Mode における” Vlow2” と同じ動きをします。よって前記 Fig.4 に示されているデータ及び Table 2 を参照して位置を決めることができます。

“Knee2 point para” は、Knee point 2 以降のスロープの勾配を決めるパラメータであり 2-slope Mode における” Knee1 point para” と同じ動きをします。よって Fig.5 に示されているデータ及び Table 3 から任意の勾配を設定できます。

Fig.7 に Vlow3 を 110 から 120 まで変化させた時の感度曲線の変化を示します。図からも分かるように Reference の通常モードの感度曲線上を設定値に対応して Knee point が設定されていることが分かります。

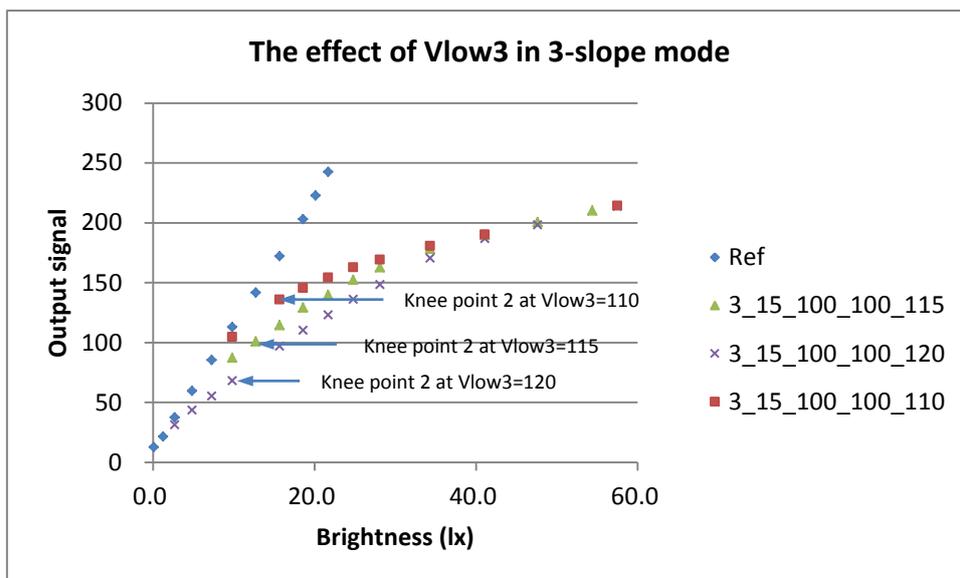


Figure 7 3-slope mode における Vlow3 の効果

次に Fig.8 に 3-slope mode における” Knee2 point para” の効果を示します。図中のデータは、Knee point 1 の設定パラメータを固定にし” Knee2 point para” を 50 から 150 の範囲で変化させた場合の感度曲線の変化を示しています。

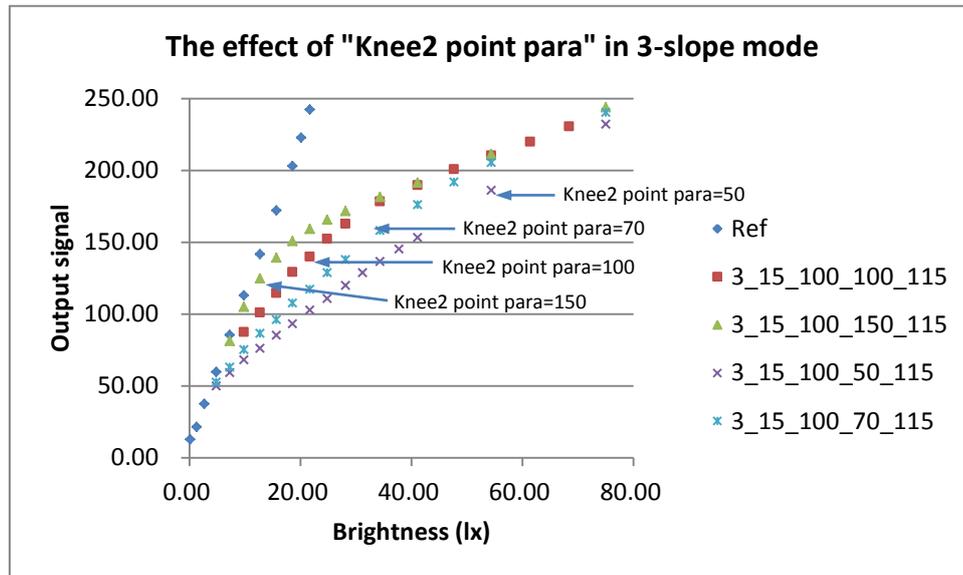


Figure 8 3-slope mode における” Knee2 point para” の効果

図からも分かるように設定するパラメータの値が小さくなるに従って勾配が寝てくるのが分かります。

Knee point 1 の設定方法

Knee point 1 は、Knee point 2 で新たに作られた感度曲線上に任意に設定されます。但し、Knee point 2 の感度曲線上に設定されるため、その設定値は Knee point 2 の設定パラメータの影響を受けることになります。

Knee point 1 と Knee point 2 の設定パラメータの関係について

Knee point 2 は、イメージャーのレジスターの定義により Knee point 1 よりオーバーフロー電位の絶対値が大きい値である必要があります。そのため、Knee point 1 の配置を決めるパラメータ” Vlow2” は、Knee point 2 の配置を決めるパラメータ” Vlow3” に等しいか小さな値を設定しなくてはなりません。もし誤って” Vlow3” より大きな値を設定すると 2-slope mode の感度曲線と同等になるので注意が必要です (Fig.9 参照)。

また、感度曲線の勾配を決めるパラメータ” Knee1 point para” は、Knee point 1 以降の感度勾配が Knee point 2 以降の感度曲線の勾配よりも小さくならないため”

”Knee2 point para” の設定値と等しいか小さい値を設定する必要があります。もし誤って”Knee1 point para” を大きな値に設定した場合 Fig.9 に示すように感度曲線が直線の組み合わせで構成されるのではなく全体的に丸みを帯びて”Knee1 point para” を変更しても特性が変わらない感度曲線になります。

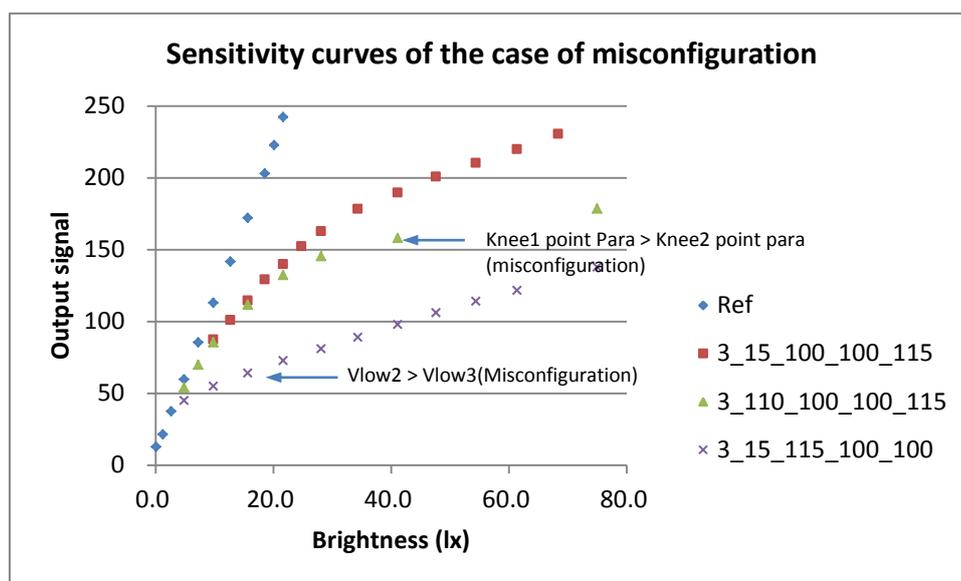


Figure 9 設定を間違えた場合の感度曲線

次に Knee point 1 に関する設定パラメータ”Vlow2” と”Knee1 point para” の 3-slope mode における効果について説明します。

3-slope mode における Vlow2 の効果

3-slope mode における Knee point 1 の設定パラメータ”Vlow2” は、Knee point 2 の設定パラメータ”Vlow3”、”Knee2 point para” によって通常モードの感度曲線から新たに枝分かれした直線的な感度曲線上のどの位置に Knee point 1 を配置するかを決めるパラメータです。

よって、3-slope mode で感度曲線をデザインする場合にどの位置から勾配を変化させるかの参考にするため Vlow2 を変化した場合の 3-slope mode の感度曲線を Fig.10 に示します。

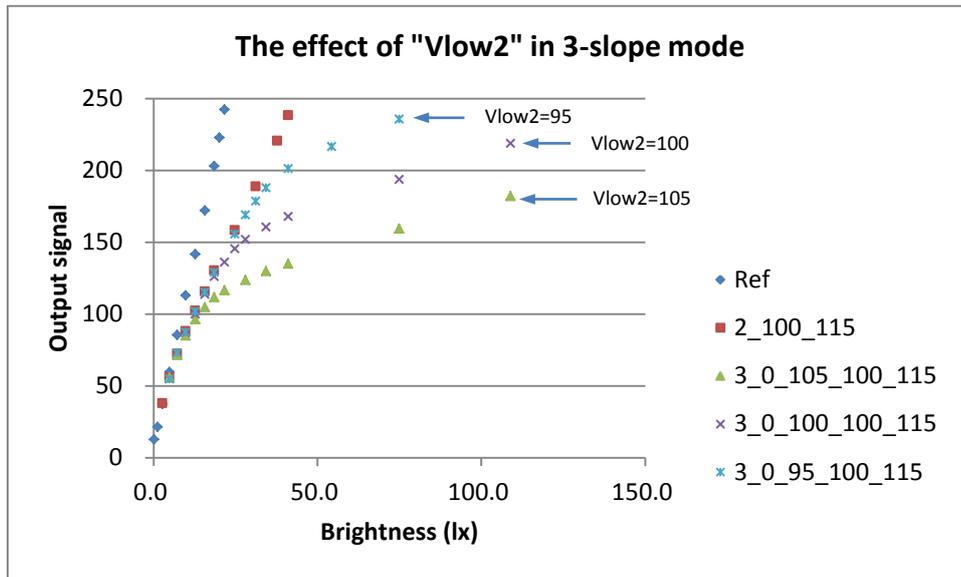


Figure 10 3-slope mode における” Vlow2” の効果

Fig.10 から分かるように Knee point 2 以降の感度曲線上を設定値の値が小さくなるにしたがって対応する出力信号値が大きくなる方向に移動していることが分かります。

3-slope mode における” Knee1 point para” の効果

Fig.11 に” Knee1 point para” を変化させた場合の感度曲線の変化を示します。図からも分かるように Knee point 1 以降の感度勾配が設定値により変化していることが分かります。

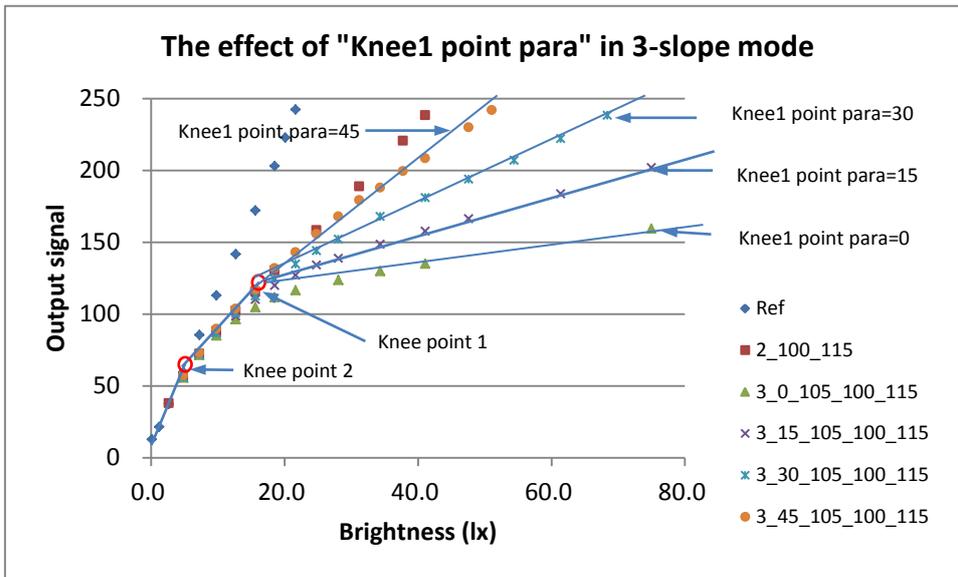


Figure 11 3-slope mode における” Knee1 point para” の効果

最後に、Table 4 に今回 3-slope mode における感度曲線の設定条件をまとめて示しておきます。この設定例を用いることで図示された感度曲線を容易に設定できます。

Table 4 3-slope mode における設定値と感度勾配のおおよその関係

Knee point2				Knee point1			
Position		Gradient		Position		Gradient	
Vlow3	Corresponding output signal level	Knee1 point para	Slope of sensitivity curve for the ref.(%)	Vlow2	Corresponding output signal level	Knee2 point para	Slope of sensitivity curve for the Ref. (%)
110	125	50	19.0	95.0	190.0	0	5.8
115	75	70	24.7	100.0	150.0	15	10.3
120	25	100	36.7	105.0	110.0	30	16.4
		150	61.3			45	24.6

トータル露光時間の影響について

HDR Mode では、トータルの露光時間が変化し通常モードの感度曲線の勾配が変化した場合、その感度勾配の変化に伴って **Knee point** の位置も変化することになります。Fig.12 に Line 単位の露光時間を、100, 200 及び 300 に変化させた場合の通常モードの直線的な感度勾配とそれらの感度勾配に対応した 3-slope mode の感度曲線を示します。

図からも分かるように **knee point** の位置が露光時間の増加とともに x 軸方向に移動していることが分かります。このように **Knee point** が移動するとそれ以降の感度曲線の勾配が一定だと最終的に出力信号レベルに差異が生じる事になります。よって、トータルの露光時間を変化させる場合最終的な感度曲線が変化することに注意する必要があります。

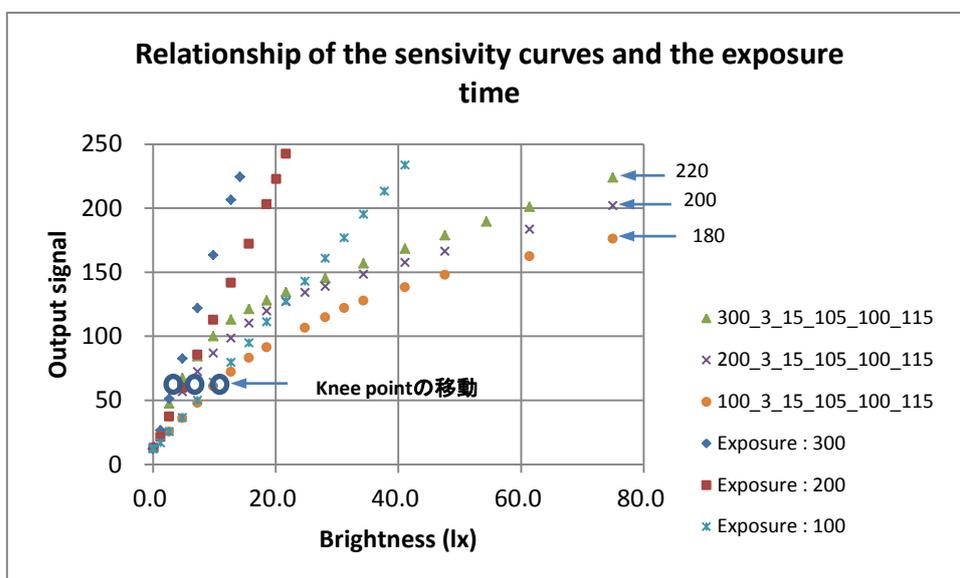


Figure 12 トータル露光時間の変化に伴う **Knee Point** の移動

まとめ

以下に今回の一連の実験結果から得られた知見を示します。

設定パラメータの設定範囲に関して：

2-slope mode の場合、単独の Knee point 1 が設定され、その配置及び勾配は各々”Vlow2”と”Knee1 point para”のパラメータで設定されます。その有効な設定範囲は以下の通りです。

$$90 \leq \text{Vlow2} \leq 125, 0 \leq \text{Knee1 point para} \leq 255$$

3-slope mode の場合、2つの Knee point が設定され、出力信号レベルの低い方から順に Knee point 2, Knee point 1 が設定されます。各々の設定パラメータの有効な設定範囲は以下の通りです。

$$90 \leq \text{Vlow2} \leq \text{Vlow3} \leq 125$$

$$0 \leq \text{Knee1 point para} \leq \text{Knee2 point para} \leq 255$$

また今回の一連の実験結果から得られた推奨範囲を以下に示します。

$$\text{Knee Point 1} : 90 \leq \text{Vlow2} \leq 105, 0 \leq \text{Knee1 point para} \leq 50$$

$$\text{Knee Point 2} : 110 \leq \text{Vlow3} \leq 125, 100 \leq \text{Knee2 point para} \leq 150$$

画質の低下に関して：

また、HDR Mode を使用した場合、各ピクセルにオーバーフロー電位が設定されるためそのピクセル間のクリップレベルのバラツキにより画質の低下が生じます。この画質の低下は、オーバーフロー電位の設定値に依存しているためできる限り Vlow2,または Vlow3 の設定値を大きく設定することで Knee point 以降の画質の低下をある程度小さく抑えることができます。この画質の低下に関しては Appendix A-2 を参照してください。

トータルの露光時間に関して：

トータルの露光時間を変化させた場合 Knee Point が移動するため最終的な感度曲線が変化することに注意が必要となります。

参考文献

- [1] CMV4000 datasheet v3, CMOSIS NV, pp26-pp28.

Appendix

A-1 HDR Mode の効果

HDR Mode は、光学的なダイナミックレンジが拡大されるため通常飽和せずに撮像することが難しい画像を取得することが可能になります。この章ではサンプル画像を用いてその効果を解説します。



Photo 1 通常モードで撮像した画像 (Exposure : 400 (Line), Analog Gain : 55)

Photo 1に Exposure Time : 400, Analog Gain : 55に設定した場合のサンプル画像を示します。写真からも分かるようにワークの反射率の差異により低反射の物体に対して最適な露光にした場合反射率が高い物体は完全に飽和していることが分かります。

この元画像に対して 2-slope, 3-slope mode の Knee point を設定することでどのような改善が見られるか以下に示します。

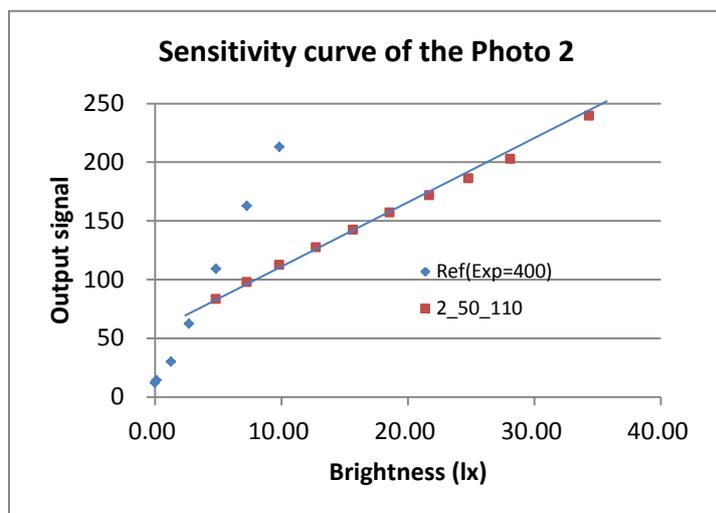


Photo 2 2-slope Mode Vlow2=110, Knee1 point para =50 の条件での取得画像及び感度曲線

Photo 2 の画像は、図中左端の 2-slope mode の感度曲線を付与して撮像した画像です。写真からも分かるように Photo 1 で見られた飽和が無くなり明瞭な画像が得られていることが分かります。

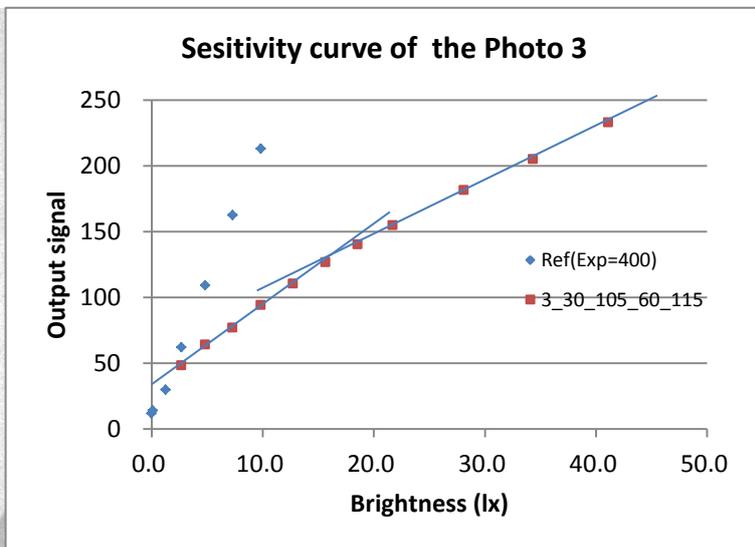


Photo 3 3-slope Mode Vlow2=105, Vlow3=115, Knee1 point para=30, Knee2 point para=60 の条件での取得画像

Photo 3 の画像は、3-slope mode で二つの Knee point を設定した場合の画像です。2-slope mode と同様に飽和が無くなっていることが分かります。

A-2 HDR Mode の画質に与える影響

画像の質を評価するための指針として取得画像の中心部の 48x48 ピクセルの画素値の標準偏差の大きさを評価を行った。 Fig.13 に出力信号の平均値を横軸にとり縦軸にデータの標準偏差を取り”Vlow2”及び”Knee1 point para”の設定値を変化させた時のグラフを示す。

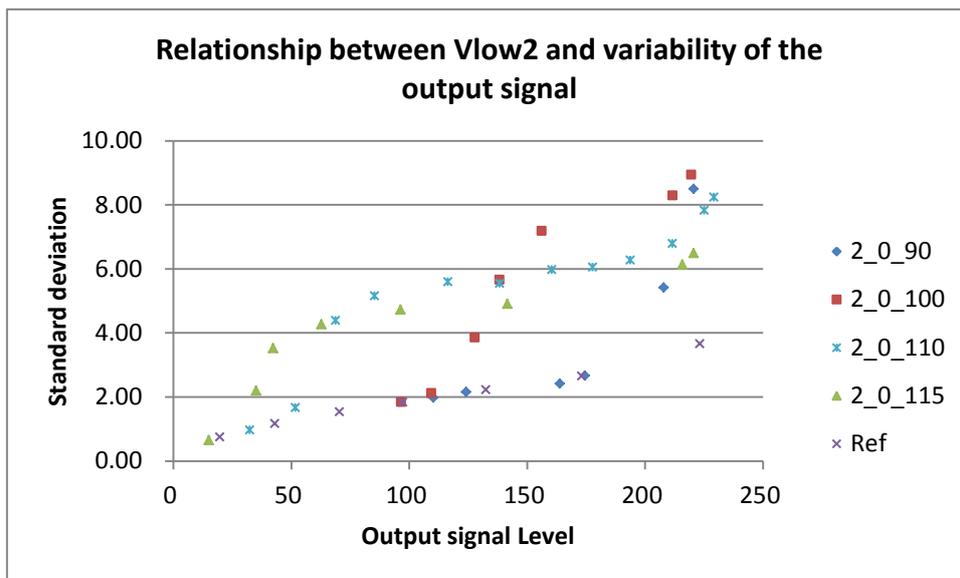


Figure 13 Vlow2 とデータのバラツキの関係

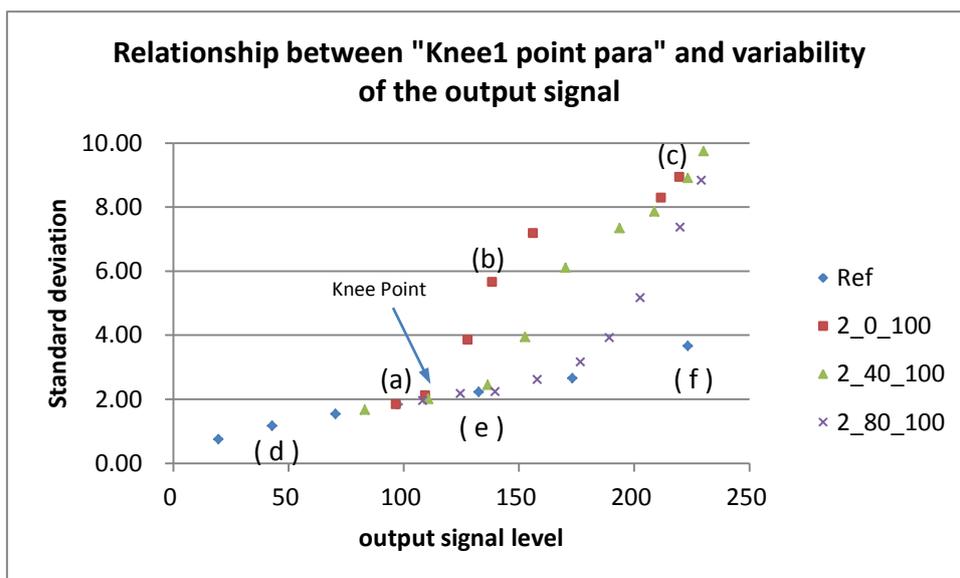


Figure 14 “Knee1 point para” とデータのバラツキとの関係

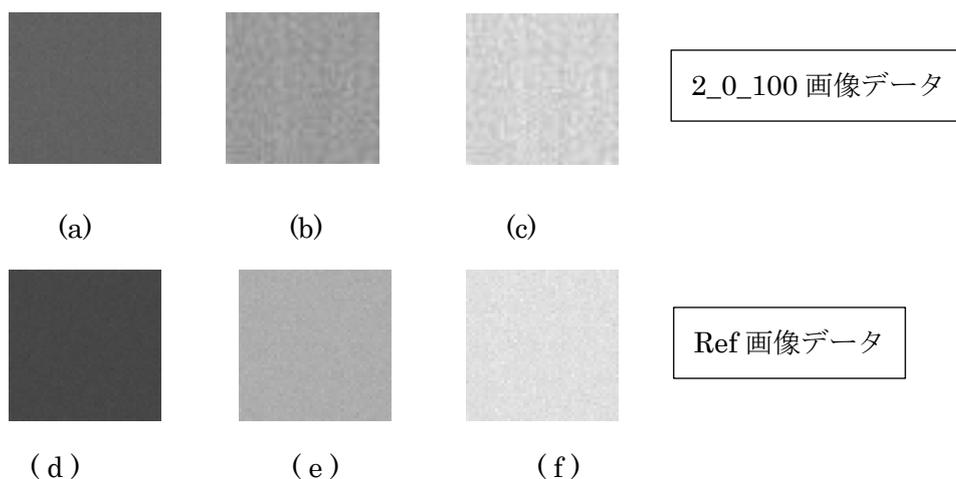


Photo 4 Fig.14 のデータの各部の画像データ

Fig.13,14 から、2-slope mode の場合 Vlow2, Knee1 point para の設定値に依存して画素データのバラツキが増加していることが分かる。これは、オーバーフロー電圧の設定が画素間でバラツキことが原因だと思われる。

また、Photo4 に Fig.14 中の任意の出力信号レベルにおける画像データを示す。Knee point 以降の画像データに画質の低下が顕著にみられる。

次に、一回の露光時間内に 2 回オーバーフロー電圧の変化が起こる 3-slope mode の場合のデータのバラツキを Fig.15 に示す。

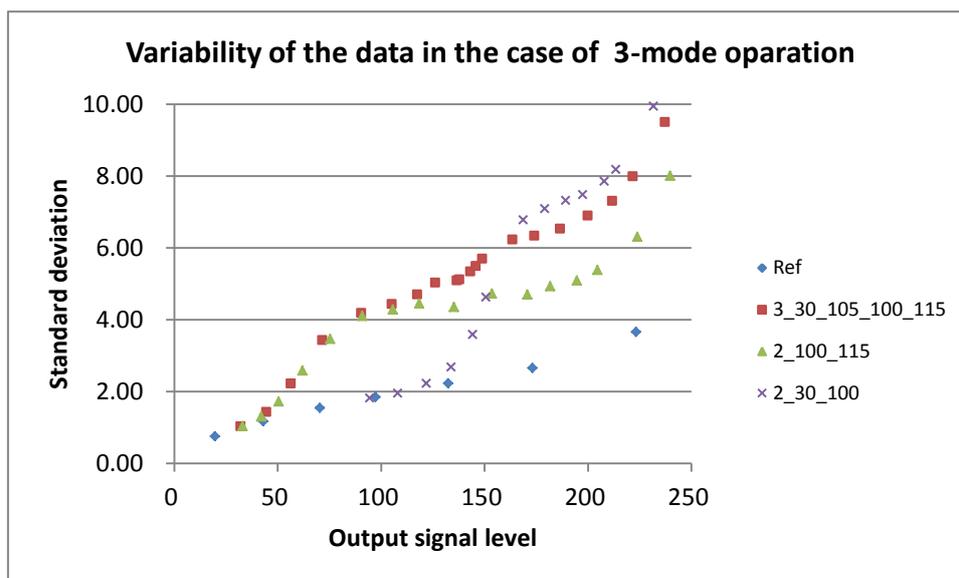


Figure 15 3-slope mode の場合の設定パラメータと画素データのバラツキの関係

Fig.15 の結果より 3-slope mode に於いてはオーバーフロー電位が 2 度設定されるため 2 段階でデータのバラツキが増加していることが分かる。しかしオーバーフロー電位を設定する D-A コンバーターが 1 台しかないためトータルのデータのバラツキは 2-slope mode の場合と等しくなることが分かる。