

# 長い露出時間：C-RED2 で画像取得を最適化する方法

長い露出時間を使った近赤外イメージング、これは一筋縄ではいきません。露出時間が長くなると非常に微弱なシグナルでも検出して画像化できますが、既存のSWIRカメラではほとんどの場合、物理的な限界があります。C-RED2はSWIR 640x512のInGaAsカメラで、長時間露光（1秒以上）と超長時間露光（1分以上）での画像取得を最適化する、スマートなパラメータチューニングの可能性を広げます。

## 1. 長い露光時間を使った場合の一般的な問題

### 問題1：ダークレベルとそれに関連するノイズ

カメラには本来持つ読み出しノイズと暗電流があります。実際の読み出しノイズは暗さによってノイズが増し、露出時間は長くなればなるほど、ダークシグナルは高くなり、ピクセルは速く飽和します。

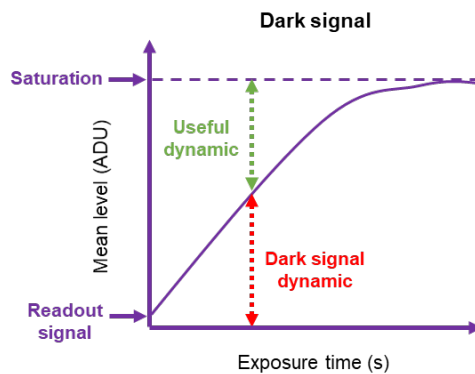


Figure 1 - Typical behavior. Dark signal increases linearly with exposure time, until the saturation of the sensor is reached.

### 問題2：ダークシグナルの非均一性 - DSNU (Dark Signal Non Uniformity)

すべてのピクセルが同じ暗電流を持つわけではありません。そのため、空間的な非均一性が生じます。

これをダークシグナルの非均一性 (Dark Signal Non Uniformity: DSNU) と言います。

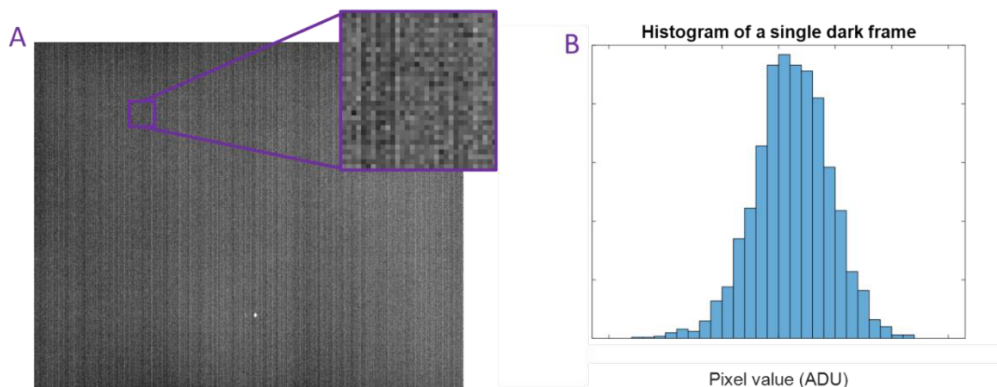


Figure 2 - Illustration of typical Dark Signal Non Uniformity. (A) Acquisition of a single image in dark conditions. The patterned column noise is caused by the dark current. (B) Histogram of the single image A.

この暗電流 [e-/pix/s] は、センサー内で熱によって発生した電子によって生じます。  
 ピクセルは、温度とともに暗電流が指数関数的に増大します。一般に7～8℃ごとに倍増します。

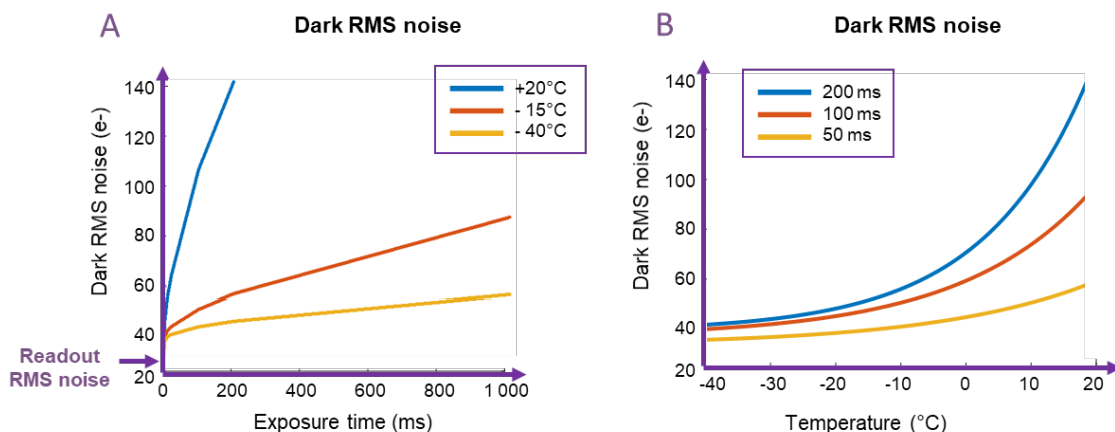


Figure 3 - Experimental measures of dark RMS (Root Mean Square) noise as a function of integration time and temperature.

注意：短い積分時間では、暗電流は問題とはなりません。

### 問題3：不良ピクセル

不良ピクセルは電気的な効果から生じ、非常に長い長露光時間で現れてくることがあります。  
 その結果、画像上ではこれがホワイトピクセル、またはブラックピクセルとなります。Fig 4をご覧ください。

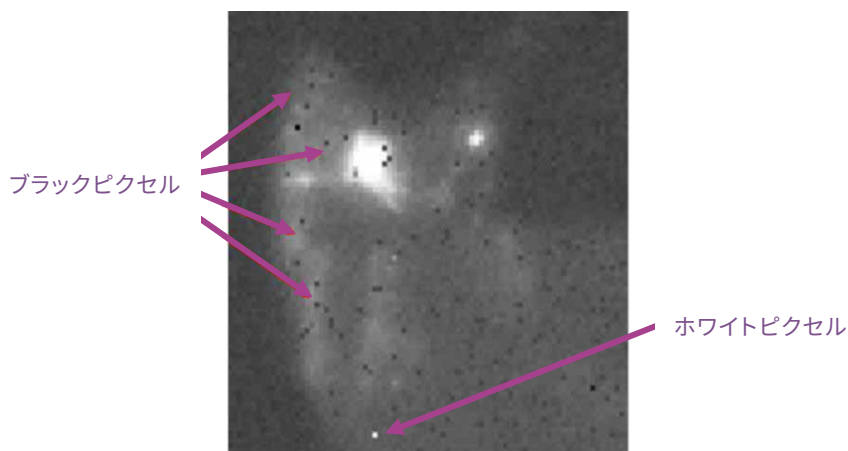


Figure 4 - Illustration of defective pixels at long exposures. Image is cropped and contrast is enhanced.

注意：これらのピクセルは短い露光時間では通常に動作できるため「不良ピクセル」とはなりません。

#### <忘備録>

長い露光時間では、センサーのパフォーマンスは暗電流によって制限されます。

これは露光時間に比例して増加し、温度によって指数関数的に増大します。

さらに、非常に長い露光時間では不良ピクセルが現れます。

長い露光時間で異なるカメラの性能は、センサー自体と、  
 画像取得を改善するためにカメラ側で行われる最適化の両方に依存します。

## 2. C-RED によるソリューション

### STEP1: C-RED2の冷却

C-RED2は空冷では-15°Cまで冷却できますが、最高性能を得るためには-40°Cまで冷却することができます。

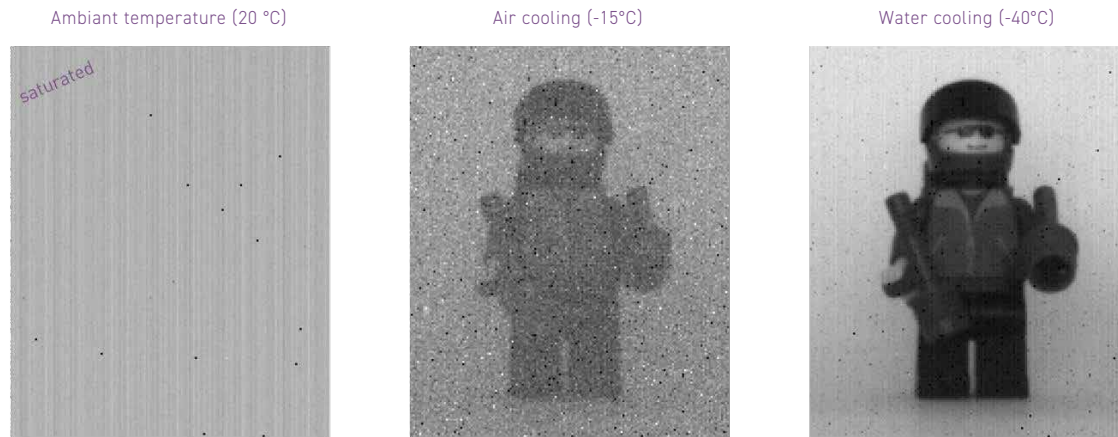


Figure 5 - Effect of cooling down the camera at long exposure time.

### STEP2: C-RED2のオンザフライ型 DSNU 補正を適用する

ダーク／算出バイアスフレームを設定するには2つの方法があります。カメラへのアクセスが容易な場合は、正確なダーク値を得るためには画像取得中に。もしカメラへのアクセスが容易ではない場合は、画像取得に先駆けておこないます。実際に、10種類までの「プリセット」バイアスモードをカメラに保存することができます。これは、10種類のカメラ設定／露出時間に(ノ)

対応しています。

その後、ダーク補正ファイルをC-RED2カメラに直接組み込むことができます。その結果、お持ちのFirstLightVision®GUIに直接表示することができ、画像取得中にバッファに保存された画像は自動的にダーク補正され、後処理をおこなう必要はありません。これがオンザフライ型のダーク補正です。

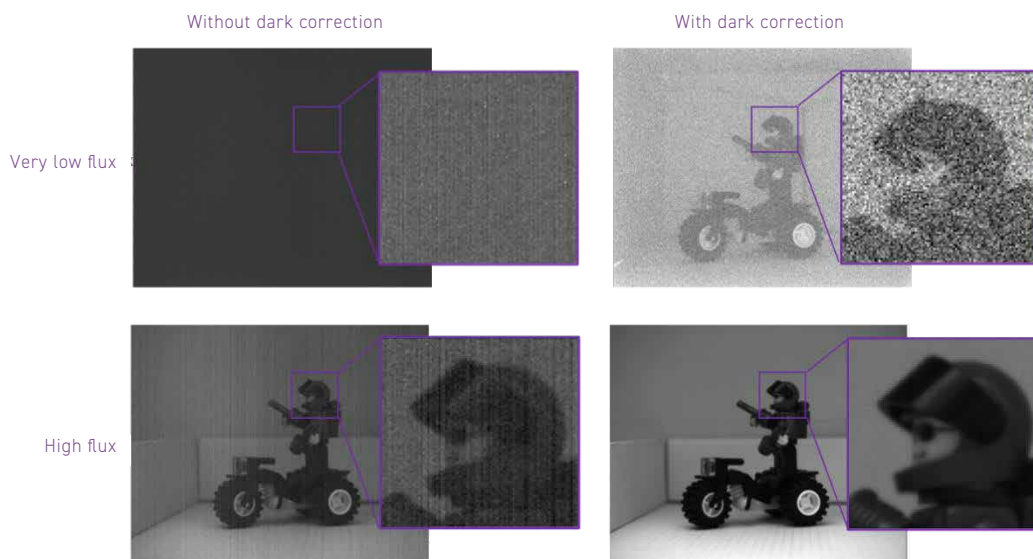


Figure 6 - Real time image, as displayed by the GUI and as saved in the buffer, when the dark correction is not applied and when it is.

### STEP3: C-RED2の暗電流の最適化

暗電流は、FirstLightVision®GUIで「DarkOptim」レベルカーソル機能を使用して簡単に調整できます。  
非常に長い露光時間の場合は、画像取得中にカーソルを最大で100までにチューニングすることをお勧めします。



Figure 7 - Screenshot of the Camera DarkOptim cursor in FirstLight Vision® GUI.

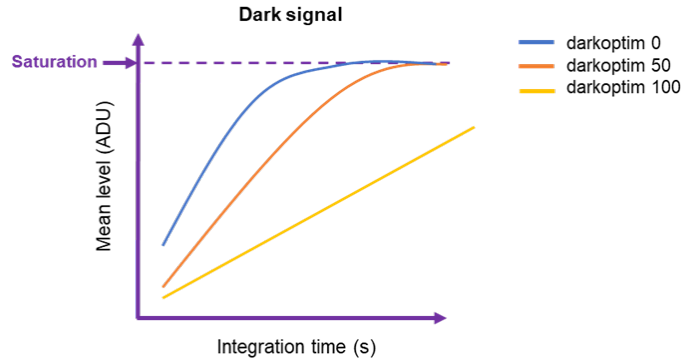


Figure 8 - Simulated data illustrating the effects of tuning the darkoptim parameter. When tuning the darkoptim parameter, the dark current can be decreased and it becomes possible to integrate longer without reaching saturation.

注意：短い積分時間では、DarkOptimを0に設定することが推奨されます。

### STEP4: 不良ピクセルの削除

C-RED2は、可能な限り長い露光時間で最も少ない不良ピクセル数となるように最適化されています。  
これは2つの簡単な手順で行われます。

#### a) 不良ピクセル数を減らすチューニングプロファイル

C-RED2のハードウェア最適化により、露光時間と用途に応じて定義済みの次の3つのプロファイルから選択可能です：

- General\_use = デフォルトモード  
= 応答速度と暗電流の間の妥協点での設定
- Long\_exposure = 応答速度に合わせて暗電流を最適化
- Short\_exposure = 検出器の速度を最適化



Figure 9 - Screenshot of the Camera parameters menu in FirstLight Vision®.

The profile can be selected in the First Light Vision® GUI

長い露光時間では、「Long\_exposure」プロファイルによって不良ピクセルの数を効率的に低減できます。オンザフライで補正が適用されます。このチューニングにより、異なる用途に対してカメラのパフォーマンスを最大限に引き出すことができます。

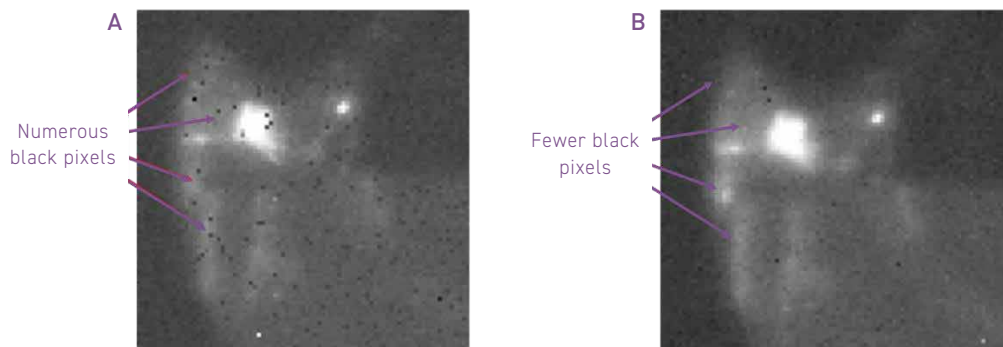


Figure 10 - Experimental illustration of the defective pixel hardware optimization using the long exposure time tuning.  
(A) No optimization. (B) FLI proprietary hardware optimization..

## b) 不良ピクセルマップの独自編集

C-RED2では、不良ピクセルや欠陥のあるピクセルを置き替えるように自動的に補正がおこなわれます。残された不良ピクセルは簡単に識別することができ、FirstLightVision®GUIの不良ピクセルユーザーマップに追加することができます。

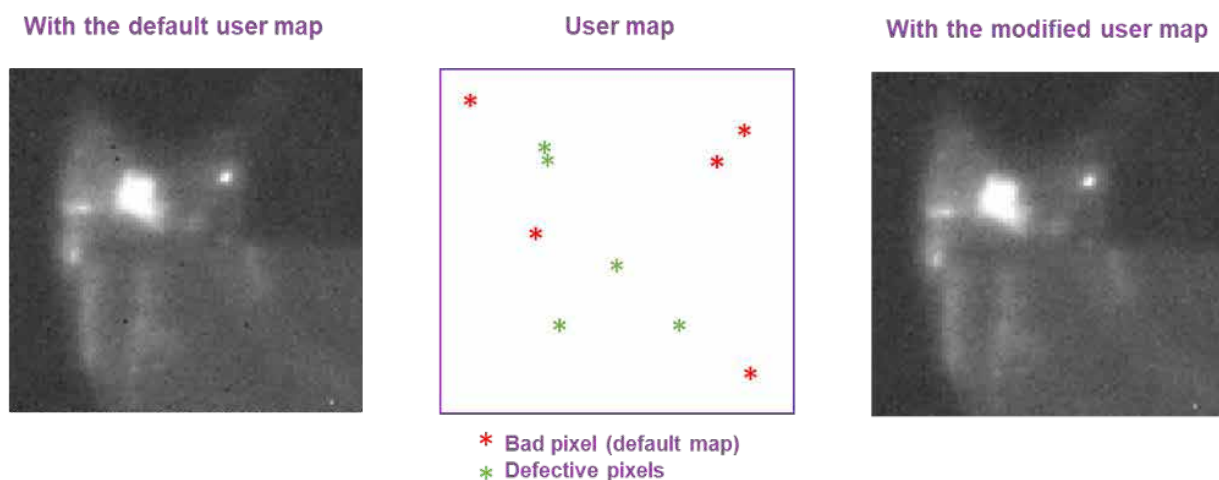


Figure 11 - Experimental illustration of the bad pixel map editing, after hardware optimization.

## 3. 結論

C-RED2は、要求の厳しい近赤外線アプリケーション用に設計された高性能カメラです。C-RED2では、非常に長い露光時間での質の高いセンシングが可能です。また、このカメラは、非常に高速なフレームレート（最大600fps）と非常に短い積分時間（ $\mu$ s）

でも使用できます。

このようなメリットから、C-RED2は非常に柔軟性があり、暗視から神経科学画像に至るまであらゆる用途に使用することができます。

### <見えないものを可視化するためのクイックガイド>

C-RED2は、長い露光時間での画像取得を最適化するソリューションを提供します。右の4つの簡単な手順に従ってください：

1. C-RED2カメラは  $-40^{\circ}\text{C}$  まで冷却します。
2. オンザフライ型ダーク補正を使用して、カメラを最適化します。
3. 「darkoptim」をチューニングして、SN比を最適化します。
4. ハードウェアの最適化で不良ピクセルを排除して、さらに必要に応じて不良ピクセルマップを残存不良ピクセルに対して補正するように編集します。

C-RED2に関するご質問、詳細に関しては、(株) オプトサイエンスまでお問い合わせください。

**First Light Imaging SAS**  
Europarc Sainte Victoire Bât 6, Route de Valbrillant, Le Canet 13590  
Meyreuil FRANCE  
Tel.: + 33 4 42 61 29 20  
[www.first-light-imaging.com](http://www.first-light-imaging.com)  
[contact@first-light.fr](mailto:contact@first-light.fr)

**First Light Imaging Corp.**  
185 Alewife Brook Parkway, Suite 210, Cambridge, MA 02138 USA  
[www.first-light.us](http://www.first-light.us)

**OPTO SCIENCE, INC.**

**株式会社オプトサイエンス**

〒160-0014 東京都新宿区内藤町1番地 内藤ビルディング  
Tel.: 03-3356-1064  
[www.optoscience.com](http://www.optoscience.com)  
[info@optoscience.com](mailto:info@optoscience.com)