

C-RED 2 ER による 拡張波長型 SWIR イメージング

C-RED 2 ERは、高感度の拡張短波長赤外線（1300～2200 nm）カメラです。
VGA（640x512ピクセル）のER-InGaAsセンサーを採用し、最高600Hzのフレームレートを実現しています。
このような性能を搭載したカメラは、市場で唯一であり、本当に画期的なカメラと言えます。
ライフサイエンス、防衛、レーザ計測、産業などの分野で、新たなイメージングやセンシングの可能性を開きます。
本書では、C-RED 2 ERの世界をご紹介します。

VO.1 07/06/2021

1. 拡張波長型とは？

拡張波長型 InGaAs（長波長 InGaAs）

InGaAs 材料は短波長の赤外光を吸収するため、この波長領域のセンサーとして使用することができます。

標準的な InGaAs ベースのセンサーは、長波長側で 1.7 μm までのカットオフ波長となっています。これらのセンサーは、リン酸インジウム (InP) 基板上に InGaAs 材料の光吸収層を成長させて作られています。このとき、光吸収層の成長には格子整合性（基板と同じ格子定数を持っていること）が取れている必要があります。InGaAs 材料の感度波長範囲は、材料の組成比を変えることにより（この場合はインジウムを多く添加）、バンドギャップエネルギーが小さくなり、長波長側のカットオフ波長を拡張（ $\sim 2.5 \mu\text{m}$ ）することができます。

このカットオフの長い $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ は、「拡張波長型 InGaAs」と呼ばれています。

画質への影響

ただし InGaAs 材料の組成比を変えると、材料の格子定数も変わってしまいます。少しでも InAs を多く添加すると、結晶の格子定数が大きくなり、基板とのミスマッチ（格子の不一致）が生じて結晶の品質が低下します。格子の不一致があると、結晶構造の欠陥が多くなり、画質に悪い影響が出てしまいます。そのため、これまでは拡張波長型 InGaAs のイメージセンサーが普及していませんでした。

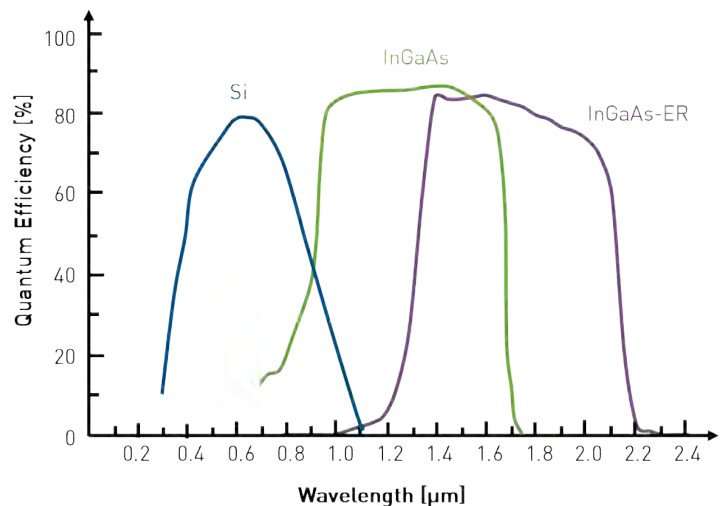


図1：シリコン、InGaAs、InGaAs-ERを用いたセンサーの量子効率曲線の比較（代表値）

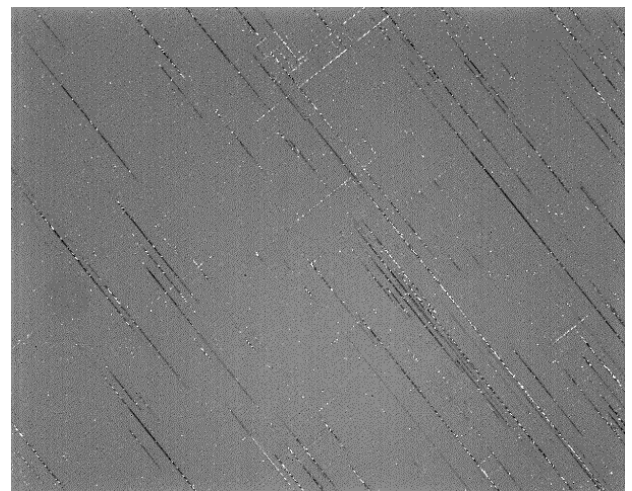


図2：暗闇の中で撮影されたRAW画像
撮影パラメータ：ミディアムゲイン、600fps、積分時間1.66ms

2. C-RED 2 ER カメラについて

C-RED 2 ERは、C-REDカメラシリーズの一部です。



図3：C-RED 2 ERカメラ

C-RED 2 ERを選ぶ理由

- **拡張SWIR領域の撮影：** C-RED 2 ERは1300～2200nmのスペクトル領域に感度があり、標準的なInGaAsベースのセンサーと比較すると長波長側にシフトしています。そのため、C-RED 2 ERでは新たなアプリケーションも可能になります！
- **工場出荷時に補正マップを内蔵：** 拡張波長型InGaAs特有のセンサー上の欠陥を補正し、非常に高い画質を実現します。この補正ファイルは、First Light Imaging社で作成しています。
- **オンザフライ補正：** 工場出荷時に内蔵されている補正マップに加えて、不良ピクセル補正や2種類の不均一性補正（バイアス補正とゲイン補正）もリアルタイムで適用できます。
- **簡単な組み込み：** C-RED 2 ERは、各サイドにあるメカニカルインターフェースにより、システムに容易に組み込むことができ、光学インターフェースはCマウントを搭載しています。C-RED 2 ERは、専用ソフトウェアのFirst Light Visionに対応しているだけでなく、汎用性の高いSDKでLabViewやMatLabなどとの連携が可能です。

C-RED 2 ERは、C-RED 2の長波長側をカバーしているため、撮影可能なSWIRスペクトルをシリーズで補完しています。(図4)

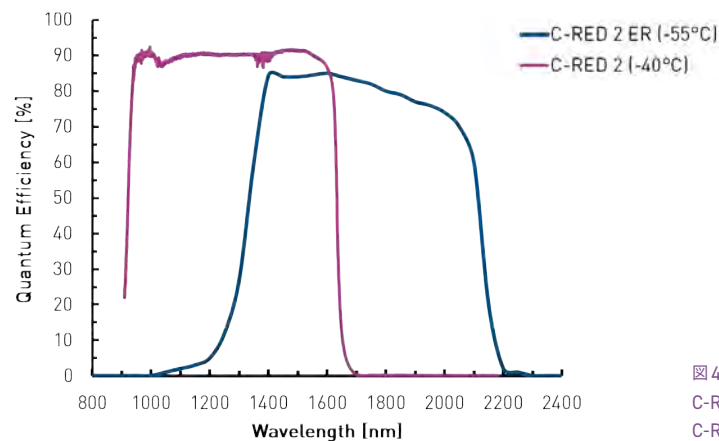


図4：
C-RED 2カメラと
C-RED 2 ERカメラの量子効率曲線

C-RED 2 ERはどのように制御できますか？

- ❖ C-RED 2 ERは、C-REDシリーズ専用開発された**グラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI)**である、First Light Visionに対応しています。USBインターフェースとCamera Linkインターフェースに適合しており、クロスプラットフォーム型 (x86 / ARM、Windows / Linux) となっています。GUIはユーザーフレンドリーで、簡単に制御できるだけでなくハイエンドな用途に対しても多機能を提供します。
- ❖ プログラマーがC-RED 2 ER用の独自のインターフェースを開発できるように、**ソフトウェア開発キット (SDK)**が付属しています。C/C++、Labview、Python、MatLabによる短いデモのソースコードを提供しています。C-RED 2 ERは、Micro Managerを使用して制御することもできます。

3. C-RED 2 ERによるイメージング

First Light Imaging社では最高の撮影体験を得るために、C-RED 2 ERカメラを-55°C (水冷) で撮影し、更に内蔵された補正マップを使用してRAW画像に発生した格子不整合アーティファクトを補正することを推奨しています。

C-RED 2 ERの冷却

C-RED 2 ERのセンサー温度は、常温から-55°Cまで自由に設定できます。C-RED 2 ERは本体のFANによる空冷で-15°Cまで冷却できますが、別途チラーをご用意いただくことによりそれ以下の温度で冷却できます。センサーの温度を下げることにより暗電流のノイズを最小化し、画質を向上することができます。詳細については、[C-RED 2 : long exposure time optimizations](#) を参照してください。

オンザフライ型イメージ最適化補正

First Light Imaging社は、拡張感度領域のセンサーの格子不整合アーティファクトを補正するため、オンザフライでの補正プロセスを開発しました。このプロセスでは、リアルタイムでイメージを補正し、あらゆるゲインや幅広い露光時間に対して適用することができます。ユーザーは、各補正前のRAW画像など、各補正プロセスのすべてのステップの画像にアクセスすることができます。

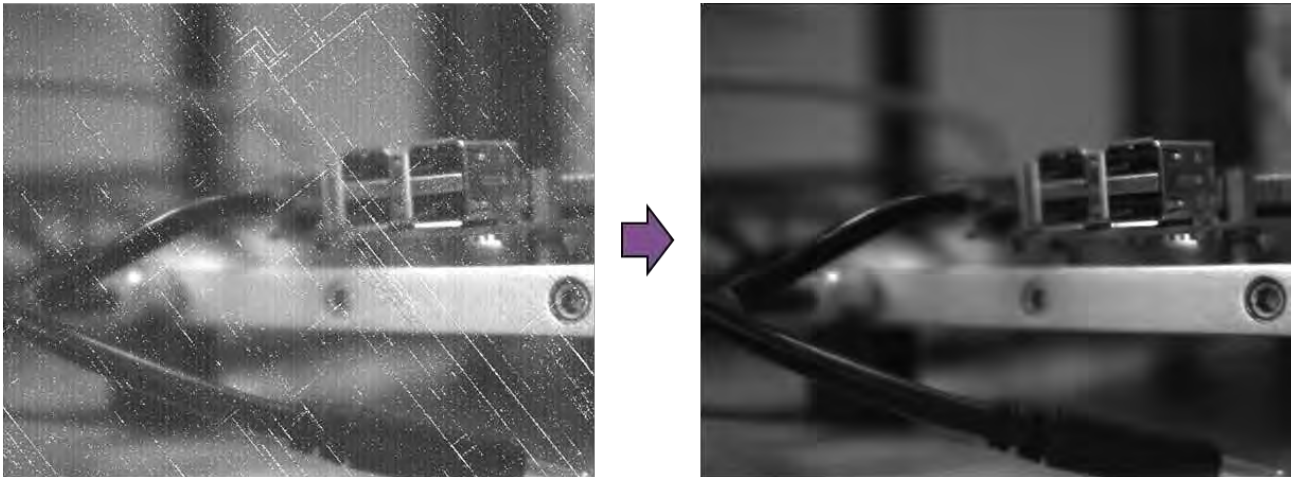


図5: 完全な補正処理を施す前と後
撮影パラメータ: ミディアムゲイン、300fps、積分時間3.33ms

- ❖ 補正を適用したC-RED 2 ERは、非常に高いオペレータビリティ (600FPSで98%以上) を実現しています。
- ❖ 補正を行っても、画像の空間分解能が低下することはありません。
- ❖ 補正はすべて物理モデルに基づいて行われます。補正された画像は物理的な意味を持ち、定量的な測定に使用することができます。
- ❖ 補正処理はすべてオンザフライで行われ、速度の低下やフレームレートの制限はありません。

C-RED 2 ERは、拡張されたSWIRレンジ (最大2200nm) での

高性能な科学的イメージングをRAW画像で実現します。

また、格子不整合アーティファクトをオンザフライで補正することも可能です。

4. なぜ「拡張波長」なのか？

拡張波長型 InGaAs は、標準的な InGaAs の限界である波長 1700 nm 以上の光の検出を必要とするアプリケーションに新たな可能性をもたらします。以下に C-RED 2 ER のアプリケーションの簡単な概要を掲載します。

ライフサイエンスと医療

透過率により、観察に適した4つの波長域があります。1番目の波長域(650~950nm)は、研究および分析の蛍光イメージングに広く使用されています。2番目の波長域(1100~1350nm)は、近年この領域に感度を持つカメラによって狙うことができるようになりました。現在では、小動物の生体内や細胞内での薬物の反応観察に使用されており、最近では臨床応用もされています。詳細は、アプリケーションノート [in vivo NIR-II Small animal imaging with C-RED 2](#) をご覧ください。

さらに、3番目の波長域(1600~1870nm)と、4番目の波長域(2200nm前後)の2つの波長域が存在します。3つめの波長域は、組織への光の散乱と吸収を最適化することで、光の浸透を促すことが可能です。これは脳深部のイメージングに最適です。また、光干渉断層計(OCT)のような他のアプリケーションでも、光の浸透深さが長くなるメリットがあります。

防衛・監視・セキュリティ

霧の中での昼間や夜間の視界は、監視アプリケーションにとって大きな課題となります。このような条件では、可視光域の画像の性能が低下するためです。雲や煙の中を撮影するために適した SWIR 波長域は、1350~1400nm と 1850~1900nm の2つの波長域が存在します。

軍用途においては、現在の暗視技術では見ることができない光を撮影することが可能な拡張波長型センサーは非常に興味深いものです。なぜなら、既に戦場で使用されている「見えない」レーザを見ることができるからです。

自由空間光学系 (Free-Space Optics : FSO)

自由空間での光の伝送は霧や埃・大気の流れなどの外乱の影響を受けますが、SWIR帯(900nm~1700nm)は霧や一部のプラスチックなどの障害物を透過する能力があるため、この波長域を使うことが有効であることが判っています。バンドパスフィルターと組み合わせるとより長波長を使用することで、透過率を最適化することができます。更に SWIR帯と ER-SWIR帯の両方には目に優しいレーザが存在し、この波長を利用することにより効率的で安全な自由空間での光通信が可能になります。より詳細については、アプリケーションノート [Free Space Optical communications with C-RED 3](#) をご覧ください。C-RED 2 ERは、例えば、適応光学系ループの波面センサーとして使用することができます。

最適化された自由空間での光学透過は次の用途に役立ちます。：

- ❖ 地上からの天体観測

- ❖ 自由空間での光通信

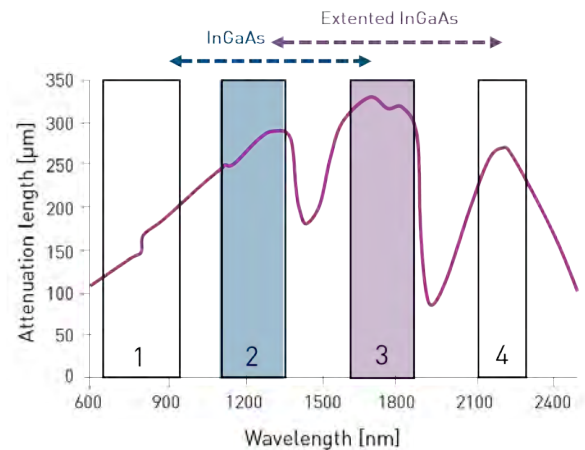


図6：200μmの厚さの脳組織の透過率
3番目の波長域は拡張波長型のカメラでのみ検出されます。

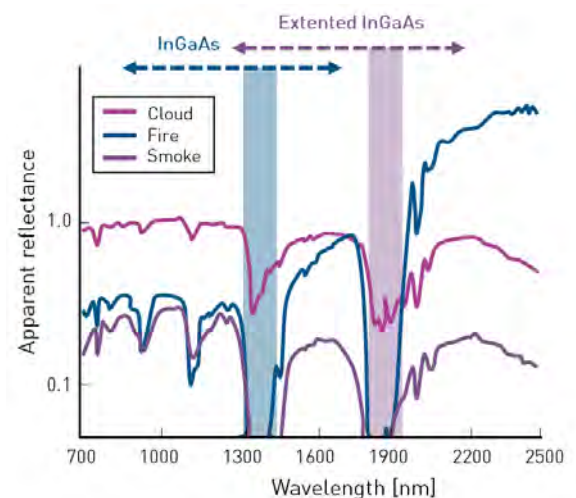


図7：様々な環境下での反射スペクトル
視界を確保するのに適した2つの波長域が確認できます。

サーモグラフィー

一般的に、温度が高いほど、また波長が長いほど、温度測定の誤差は大きくなります。したがって、SWIRおよびER-SWIRは、300°C~1600°Cの範囲の温度においてはMWIRやLWIRよりも高い精度で測定結果を提供できます。ER-SWIRは、SWIRより高い放射輝度により、300°C以下の温度の被写体の撮影を可能にします。

サーモグラフィーには以下のような多くのアプリケーションがあります。

- ❖ 高温のガラスを非接触測定
- ❖ アディティブ・マニュファクチャリングにおける溶融金属のモニタリング

農産物及び食品の検査

水は赤外領域に4つの吸収帯があり、その波長は1200nm、1450nm、1940nm、2950nmです。これらの波長で薄くスライスされた食品や葉物の吸収を測定することで、水分量を定量的に知ることができます。

果物や野菜などの厚みのある対象物では、水の吸収特性により可視領域（肉眼）では認識できない水分や欠陥を検出することができます。これは特に、食品の選別用途や作物畑の観察などに有効です。

スペクトル解析とハイパースペクトル・イメージング

スペクトル解析、つまり光と物質の相互作用を波長の関数として調べることは、さまざまな用途に使える強力なツールです。すべての元素は特定の吸収スペクトルを持っており、これを利用して物質の検出、物体の分類、プロセスの監視などを行うことができます。

ハイパースペクトル・イメージングやマルチスペクトル・イメージングの技術は、スペクトル情報を2次元の空間情報と組み合わせて分析することができます。更に高速度カメラでは、時間的な次元も分析に加えることができます。

- ❖ メタン及びガスの漏出検知
- ❖ 空中からの農業マッピング
- ❖ 医薬品の選別

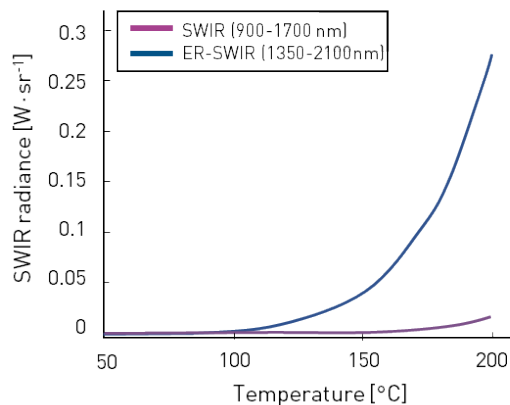


図8: SWIRおよびER-SWIRの各スペクトルにおける低温下での黒体の理論的な放射量

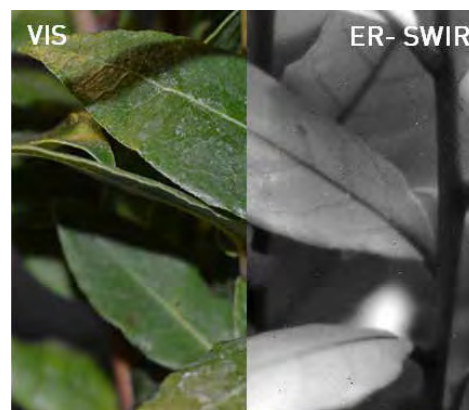


図9: 可視光とER-SWIRでの月桂樹の葉の比較

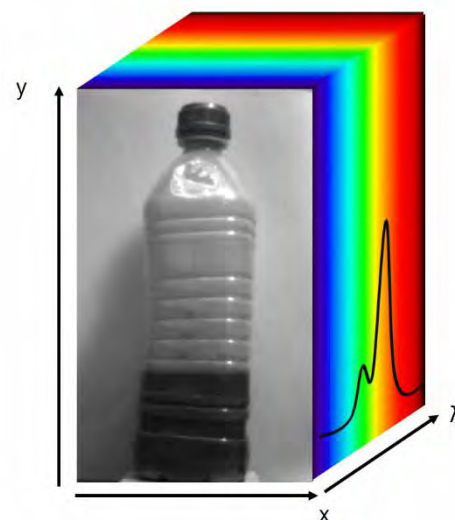


図10: ハイパースペクトルデータキューブの模式図

レーザおよびLiDARアプリケーション

SWIRよりも長い波長は、人間の目には見えないという点で非常に有用です。この不可視という特性から、この範囲のレーザは多くの用途に使われています。一つは、レーザ光の反射を測定することで距離を測ることができる「LiDAR」。LiDARシステムでは、標準的なInGaAsの検出限界を超えた2.05 μ mの波長のレーザが多く使用されます。また、C-RED 2 ERは、レーザビームの特性評価や光パワーの測定にも使用できます。

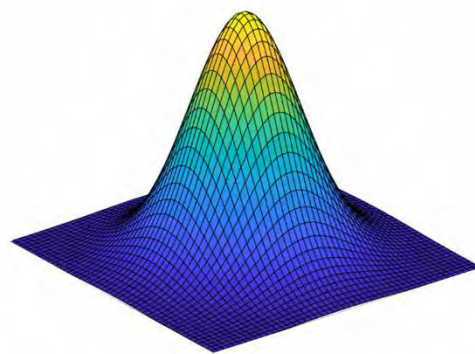


図11：レーザビームプロファイリング結果（シミュレーション）の例

5. 結論

C-RED 2 ERは、640x512ピクセルの拡張感度InGaAsセンサーを採用した唯一の最先端カメラです。要求の厳しいアプリケーションのために設計されています。First Light Imaging社では、C-RED 2 ERが天文学から農業まで様々な領域で全く新しい研究分野を切り開くものと考えています。

C-RED 2 ERは、非常に高速なフレームレート（最大600FPS）と短い露光時間で高品質な画像の提供を可能にします。ニーズに合わせて、完全なRAW画像または補正済みの画像を出力することができます。拡張感度域専用の補正プロセスは、センサーの物理学に基づいており、解像度や画像の物理的な意味を失うことなく、リアルタイムに撮影を最適化します。搭載されたこれら複数の撮影モードにより、C-RED 2 ERは非常に柔軟で、様々なアプリケーションに完璧に対応します。

<お客様へのメッセージ>

SWIR拡張領域のイメージングは、全く新しい研究分野です。

C-RED 2 ERは、優れたアプリケーションの扉を大きく開くため重要な資産です。

詳細情報またはアプリケーションに関してのご質問などは、(株) オプトサイエンスまでお気軽に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
contact@first-light.fr

First Light Imaging Corp.
185 Alewife Brook Parkway, Suite 210, Cambridge, MA 02138 USA
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
info@optoscience.com



OPTO SCIENCE