

# C-RED 3 による 高速SWIRハイパースペクトルイメージング

ハイパースペクトルイメージングは、従来の分光法とイメージングを組み合わせ、  
分光情報と空間情報を同時に収集するものです。

C-RED 3カメラの感度と速度は、このようなシステムのスループットを最適化するために非常に役立ちます。  
1200Hzで動作するシステムを設計し、標準的なユースケースでテストすることで、  
高速ハイパースペクトルイメージングの実現性を実証しています。

VO.0 17/09/2021

## 1. ハイパースペクトルイメージングとは？

ハイパースペクトルイメージング (HSI) とは、デジタルイメージングと分光法を組み合わせたもので、従来のイメージングにスペクトルの次元を加えたものです。元々は航空機や衛星から地上のリモートセンシングのために開発されたもので、農地や森林、鉱山などの分析には成熟した技術です。ここ数年では、(ア)

製品 (医薬品、プラスチック、食品など) の産業分析のための重要なツールとして利用されています。SWIRバンド (900~1700nm) におけるHSIは、生産管理のための新しい技術であり対象物の空間的特性と分光的特性に同時にアクセスできるという利点から、対象物の表面の化学組成に関する貴重な情報が得られます。

### プッシュ・ブルーム方式

HSIは、2つの空間次元(x,y)と1つのスペクトル次元( $\lambda$ )のデータキューブを取得することで構成されています。最も一般的な構成はラインスキャンによる「プッシュ・ブルーム」方式で、空間線(y)と全スペクトル範囲をカメラで同時に取得します。第2の空間次元( $\lambda$ )

(x)は、時間をかけてスキャンされます。このスキャン原理により、空間分解能とスペクトル分解能が互いに独立しているため、両者の性能が最適化されます。各空間座標におけるスペクトルの値は、その場所にある物体の化学組成に関する情報を提供します。

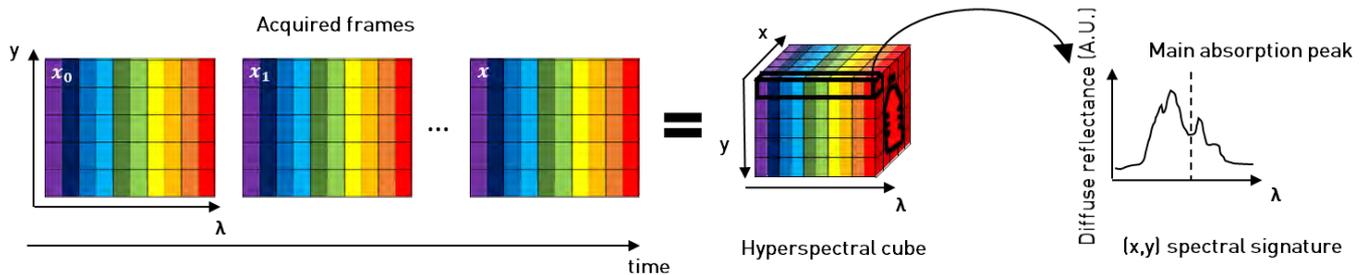


図1: ハイパースペクトルイメージングの基本原理。一連のフレーム(y, $\lambda$ )を時間的に取得(x,y, $\lambda$ )し、ハイパースペクトルデータキューブを生成します。各位置(x,y)における物体のスペクトルの値がキューブに含まれています。

### 新たな課題

従来の空からのHSIアプリケーションでは、カメラと解析対象の間に距離があるため、高速な情報取得速度は必要ありませんでした。しかし、新しい市場には新しい課題が付きものです。ほとんどのHSIシステムは、工業生産ラインで使用されているコンベアに対応する速度がありません。情報を取得しつつ生産性を維持するためには、ハイパースペクトルイメージングの取得速度を(ア)

上げることが重要になっています。プッシュ・ブルーム方式では、スペクトルと空間分解能においてシステムが製品を分析できる速度は、カメラの最大フレームレートに直接依存しています。高フレームレートの場合、露光時間は必然的に短くなるため、読み出しノイズの少ない高感度で高速なカメラが必要となります。

### <お客様へのメッセージ>

ハイパースペクトルイメージングは、空間分解能とスペクトル情報を組み合わせたものです。新しい産業アプリケーションでは、高フレームレート、高感度カメラをベースにしたハイスループットシステムが必要とされています。

## 2. C-RED 3 によるハイパースペクトルイメージング

超高速 SWIR ハイパースペクトルイメージングの実現性を実証するため、First Light Imaging 社と ATIS 2.0 社は、プッシュ・ブルーム方式の Proof-of-Concept スタンドアローン (ノ)

### システムデザイン

物体で反射した光はまずフロントレンズで捉えられます。次にスリット (2 枚のカミソリの刃) によって線状の空間次元 (y) にフィルタリングします。スリット間の距離は、分光分解能を最適化するために手動で調整できます。その後、コリメートレンズでスリットを無限遠に再結像させます。スペクトルは回折格子で分割され、(ノ)

システムを開発しました。このシステムは、640 個の空間ピクセルと 3.4nm のスペクトル解像度で、1200Hz のフレームレートを達成しています。

結像レンズで画像化されます。カメラは線状の空間上の各波長 (y, λ) の情報を持つフレームを撮影します。2 つ目の空間次元は、モーター駆動のミラーで撮影範囲を走査することで取得されます。このミラーによる走査は、対象物が直線的に動くことで代替できます (例: 生産ライン上のコンベアなど)。

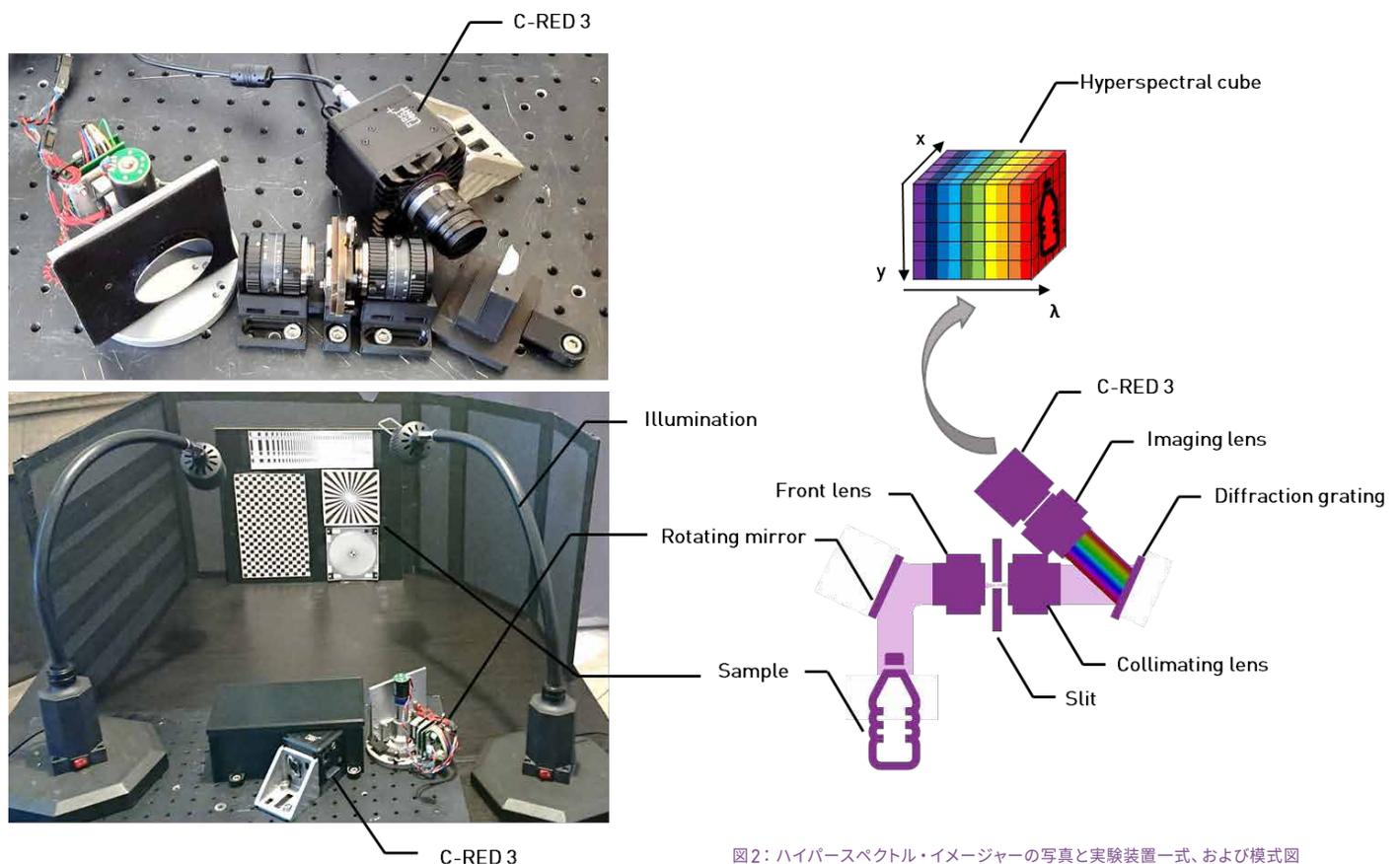


図2: ハイパースペクトル・イメージャーの写真と実験装置一式、および模式図

回折格子の効率は、ブレイズ角 (効率が最大となる波長) と入射角に依存します。また、回折格子と対物レンズの組み合わせにより、スペクトルバンドの数と垂直方向の視野が決まります。焦点距離 25mm のイメージングレンズに、溝数 150 本/mm、公称ブレイズ角 5.4° (中心波長 1250nm) の回折格子を (ノ)

組み合わせの場合、本システムでは 3.4nm のスペクトル解像度が確保されます。他の 2 つのレンズは、分光分解能と垂直視野に影響を与えます。簡略化のため、フロントレンズおよびコリメートレンズの焦点距離も 25mm となっています。

### ソフトウェアとデータ処理

C-RED 3 ソフトウェア開発キット (SDK) を使用して、ATIS 2.0 が開発した HSI ソフトウェアにカメラを統合しました。このソフトウェアは、化学物質のリアルタイム識別・システム制御・データの (ノ)

取得を可能にしており、インターフェース上で複数の素材を同時に化学的にイメージングすることができます。ハイパースペクトルデータは、MatLab や ENVI に向けてエクスポートすることも可能です。

ハイパースペクトルデータキューブには、化学情報を提供するための処理が必要ですが、これはソフトウェアによってその場で実現できます。各 [x,y] 位置における対象物のスペクトル値は、コンボリューション演算を使用して、あらかじめ作成された (ノ)

基準スペクトルのデータベースと比較されます。相関関係の信頼度が十分に高ければ、対象物の化学組成を推測することができます。このワークフローは、キャップと胴体の材質が異なるペットボトルを例にして、以下のように説明されています。

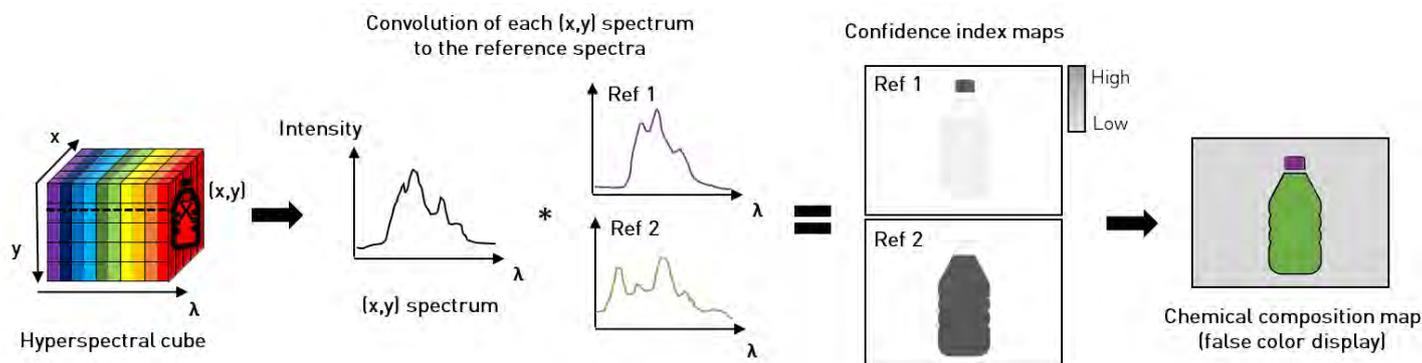


図3: ハイパースペクトルデータキューブからのデータの処理

基準スペクトルのデータベースを作成するためには、事前に校正を行う必要があります。組成がわかっている空間的に均一な (ノ)

サンプルをシステムで撮影し、平均化されたスペクトルをデータベースに保存します。

## パフォーマンス

以下の表は、Proof-of-Conceptシステムの性能をまとめたものです。

<b>Camera</b>	Model	C-RED 3
	Detector	InGaAs
	Resolution	640 x 512 pixels
	Pixel pitch	15 μm
	Control interface	USB 3
	Region Of Interest (ROI)	Yes
	ADC resolution	14 bits
<b>System</b>	Aperture	F/ 1.4
	Dimensions	160 x 120 mm
	Speed (230 bands)	1200 fps
	Speed (4 bands)	24 000 fps
<b>Spectral performances</b>	Spectral range	900 - 1700 nm
	Spectral bands	230
	Spectral sampling	3.4 nm
<b>Spatial performances</b>	Resolution	640 pixels
	Field of view (vertical)	20°
	Field of view (horizontal)	Up to 35°

高い分光分解能は、スペクトル値を細かいレベルで分離し、化学的な組成の正確な特性評価を可能にします。また、空間 (ノ)

分解能が高いため、詳細な情報を得ることができ、小さなサンプルの検出も容易になります。

ハイパースペクトルデータキューブは、時間軸に沿って取得されます。時間分解能が高いため、移動する物体や時間に依存するイベントの特徴を把握することができます。今回紹介した (ノ)

システムでは、35° x 20°の視野をカバーし、900~1700nmのスペクトル範囲で、3.4nmのスペクトル解像度を持つハイパースペクトルデータキューブを1秒ごとに取得することができます。

### 3. 実験結果について

ハイパースペクトルイメージングは、対象物に対し非接触・非破壊・高速分析・選別するソリューションです。ハイパースペクトルイメージングは、工業用途にも応用でき、生産ラインでは品質管理・欠陥・異物の検出などの用途があります。生産ラインでの検出は多くの場合、コンベア上を流れる対象物をインライン(ノ)

で測定することで生産量を確保します。高速ハイパースペクトルイメージングのデモンストレーションとして、開発したシステムをいくつかのユースケースで実際に使用しています。このソフトウェアは、空間的に分解された画像グラフと、組成分析の結果による画像への着色データを提供します。

#### 医薬品の仕分け

製薬業界では、ハイパースペクトルイメージングを利用していくつかの課題に取り組むことができますが、その1つが医薬製品の識別です。

実験では、肉眼ではパラセタモール、イブuproフェン、アシッドアセチルサリチル(アスピリン)の3つの医薬品を識別することはできず、2色のカプセルに入った製品も識別できません。

スペクトルに含まれる識別情報により、薬品ごとに色で強調され、主要な吸収ピークはグラフ上に破線で示されています。このような結果は、錠剤の品質モニタリングや選別に利用できる可能性があります。

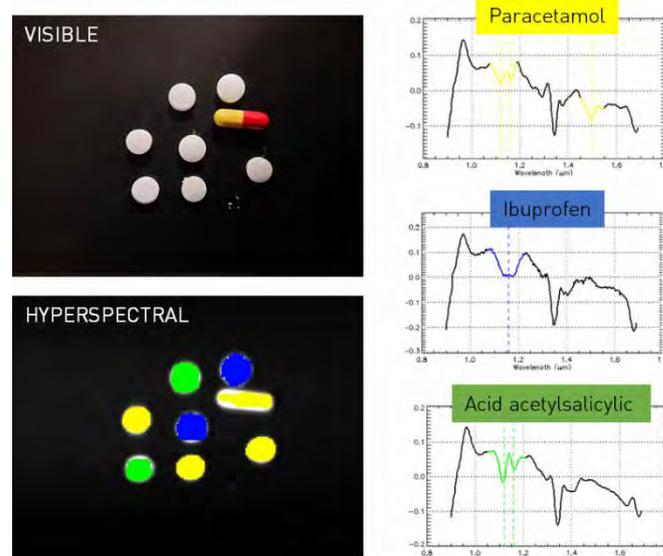


図4: 混合した錠剤を可視カメラとハイパースペクトル画像処理システム(画像への着色データ表示)で撮影した結果(左)実験で得られた医薬製品のスペクトルグラフ(右)

#### 食品の品質モニタリング

食品業界では、ハイパースペクトルイメージングは不良品選別や品質モニタリングに使用されます。選別用途では、不純物(土、石、異物など)や欠陥(打撲など)を検出することが目的です。分光法に基づくシングルポイントモニタリングが広く使用されていますが、空間分解能によって管理可能な範囲が広くなり、食品汚染のリスクを軽減できます。この実験では、コーヒー豆の入った(ノ)

容器内の汚染物質の存在を検出することを目的としています。豆のスペクトルは、参照データベースに事前に登録しておきます。下の画像では、「良品」のオブジェクト(豆)がオレンジ色に着色されています。赤い矢印は、サンプルと基準となるコーヒーのスペクトルとの相関性が低いゾーンを示しています。このように、異物の存在をリアルタイムで表示できるため、直ちにサンプルを分離できます。

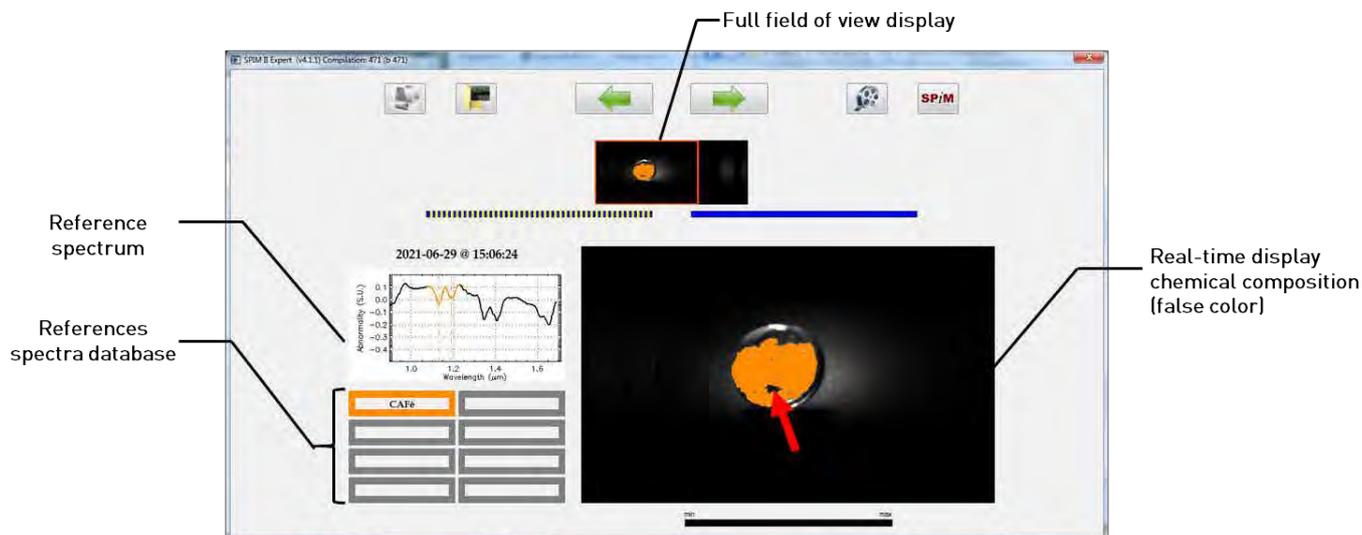


図5: 実験に使用したハイパースペクトルイメージング・ソフトウェアの画面

## 廃棄物・リサイクル産業

ハイパースペクトルイメージングは、プラスチックなどのリサイクル可能な素材を正確に選別することに利用できます。廃棄物の検出・特性評価・選別を効率的に行う技術の開発は、廃棄物産業における大きな課題です。リサイクル可能な素材の量は、選別技術の能力に直接依存するためです。プラスチックは、化学的組成は異なるものの、重量・色・密度が似ているため、選別が非常に難しい物の1つです。(ア)

高速なハイパースペクトルイメージングを使用したアプリケーションを説明するために、プラスチック製品群を調べてみます。スペクトル値は、ハイパースペクトルデータキューブから取得されます。以下に示すように、各材料には固有のスペクトルデータがあります。したがって、プラスチック製品群の選別は、ハイパースペクトルイメージングを使用することで効率的に行うことができます。同様に繊維製品(綿、ウール、リネンなど)の材料にも特定の固有スペクトル特性があるため、素材の分別に使用できます。

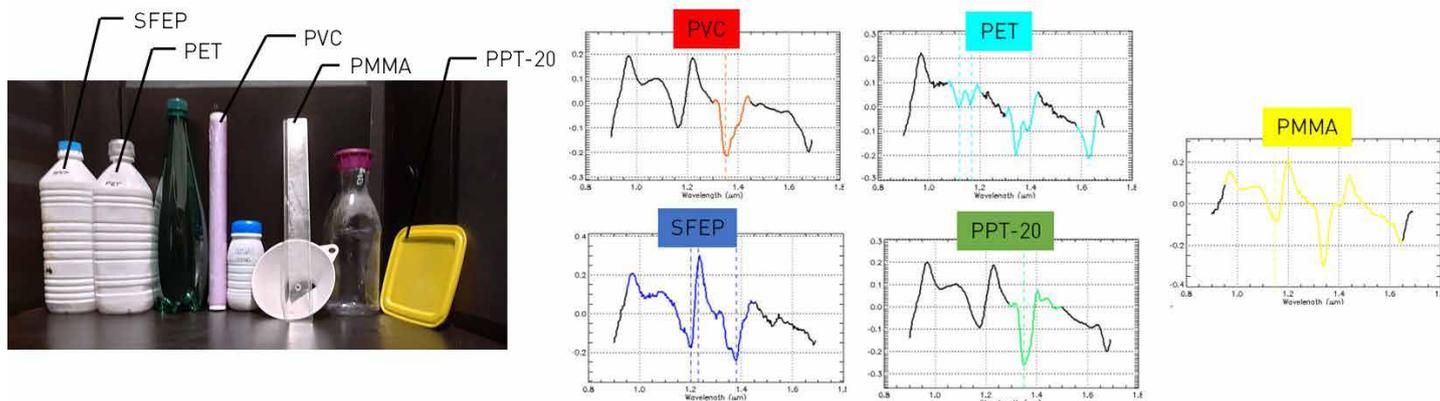


図6: 様々なプラスチックのサンプルと、その差別化を可能にする特定のスペクトルシグネチャ

## 超高速ハイパースペクトルイメージング

このシステムの高速性能を説明するために、レゴ®フィギュアが実験ボード上でバイクを走らせている様子を撮影した、ハイパースペクトルムービーを撮影しました。

キャリブレーションは、レゴ®フィギュアで行います。4種類のプラスチック(ヘルメット、手、バイク、胴体)は、事前にデータベースで分類しています。

レゴ®フィギュアが移動することで、完全な空間の分解能(320x720の空間ピクセルと230のスペクトルバンド)で撮影できます。ハイパースペクトル処理の結果は以下のように表示されます。システムの高速度撮影機能により、画像は不鮮明にならず、各フレーム時点でのレゴ®の空間構成を正確に調べることができます。



図7: バイクで高速運転しているレゴ®フィギュアの連続ハイパースペクトル画像。処理された画像は、SPiMソフトウェアインターフェースにリアルタイムで表示されます。

### <お客様へのメッセージ>

C-RED 3の感度は、僅かな露光時間でも高S/N比のデータを撮影することができます。これにより、カメラに設定可能な最大速度でシステムを稼働させることができます。  
: 320ピクセルx230バンドの構成で、毎秒1200フレーム

## 4. ハイパースペクトルイメージングにC-RED 3を使う理由は？

First Light Imaging社のC-RED 3は、これまでの高性能カメラで培ったノウハウを活かし、最先端の業界・市場に対応するために特別に設計されており、ハイパースペクトルイメージングに必要な多くの機能を備えています。



図8：C-RED 3カメラのSTD型(左)とOEM型(右)

C-RED 3カメラは、液体冷却システムを取り除き、搭載する電子機器を絞り込んだことで、非常にコンパクトな高速SWIRカメラとなりました。その魅力をご紹介します。

- **高い感度とダイナミックレンジを実現：** C-RED 3の読み出しノイズは40e<sup>-</sup> rms以下です。また、ハイダイナミックレンジ (HDR) モードでは、93dBを実現しています。今までにない、大きなダイナミックレンジで分光吸収率を測定することができます。
- **クロッピングと関心領域 (ROI)：** クロッピングモードでは非常に低いノイズを維持しながら、より高速なフレームレート (最大 32,066fps) を実現できます。ハイパースペクトルイメージングにおいて、フレームレートと空間・スペクトルの解像度の最適化に非常に有効です。
- **高いフレームレート：** C-RED 3は、フルフレームモード時 600FPSで動作可能です。クロッピング時ではフレームレートは数 kHzまで向上できます (例：64 x 64 ピクセルの ROI の場合、9.5 kHz)。
- **低いカメラレイテンシ：** 通常の読み出しモードであるフルフレームの場合、露光が終了してからカメラリンク接続で最初の撮影データが現れるまでの遅延は 22.2 μs (デフォルト) で、7.4 μsまで設定可能です。
- **電子シャッター搭載：** C-RED 3にはフルフレームモードでは撮影パルスが 5 μs よりも短い電子シャッターが搭載されています。
- **アダプティブバイアス補正：** 温度や露光時間の変化によるダークフレームへの影響を補正するため、C-RED 3ではアダプティブバイアス補正を搭載しています。ダークフレームはカメラによって自動的に計算されます。工場出荷時に校正されているため、事前に複数のダークフレームを取得する必要がなく、実験を簡素化できます。
- **簡単な組込：** カメラは底面、側面、前面に穴が開いているため、システムに簡単に組み込むことができ、C/CS マウント光学インターフェースを備えています。OEM版では、さらに簡単に、どんなカスタムシステムにも対応できます。C-RED 3は、オリジナルのマルチカメラソフトウェア First Light Vision に対応しています。また、汎用性の高い SDK も付属するため、MatLab、LabView、Python などの連携が可能です。

**C-RED3は、プラグアンドプレイ対応のSWIRカメラです。**

C-REDシリーズのカメラは、お客様の特定のユースケースに合わせて  
ハードウェアを最適化することができます。

## 5. 結論

ハイパースペクトルイメージング (HSI) は、空間分解能とスペクトル次元を組み合わせたもので、物体の化学組成を空間的に分解して解析する技術です。要約すると、HSIは従来の2次元画像にスペクトルの次元を加えたものです。非接触のため、侵襲性がなく、離れた場所から測定する事が可能です。現在の課題は、HSIの撮影・処理速度を産業用コンベアに合わせた向上させ、生産ライン上で分析ができるようにすることです。これによる生産性と品質の向上は、すべての産業に共通する課題であると考えています。HSIは、製薬業界、食品業界、リサイクル業界、品質管理などで特に有用であることが実証されています。

本書で紹介したC-RED 3の実験は、高速HSIシステムの性能を示すものです。カメラの感度と、短い露光時間で高速撮影を(ノ)

行う能力を実証するために、さまざまな対象物を撮影しました。実験画像の取得からデータ処理までのワークフローを説明した項においては、リアルタイムでの正確な材料分類とサンプルの化学分析マップで実際の使用イメージをお伝えしました。

C-RED 3は、工業及び産業用に設計されたSWIRカメラであり、非常に高速で高品質なイメージング(フルフレームで最大600fps)を可能にし、短い露光時間であっても最高のパフォーマンスを発揮します。

C-RED 3を利用すれば、超高速ハイパースペクトルイメージングシステムが構築可能になります！

### さらなる進化

C-RED 3には、ユーザーが市場で常に一歩先を行くことを願って、カスタム開発や機械的な組込を迅速に行うためのOEMバージョンをご用意しています。



ATiS 2.0チームは、ハイパースペクトルイメージングシステムと画像処理、特に赤外線領域のスペシャリストです。

First Light Imaging社は、ハイパースペクトルイメージングシステムの設計と組立、HSIソフトウェアのカスタマイズ、及び実験キャンペーンにおいて、ATiS 2.0との実りある協力関係を築いています。

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](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)

