

C-RED 3 による アディティブ・マニファクチャリングと溶接のモニタリング

C-REDは、600 FPSフルフレームで稼働する640 x 512 SWIRカメラです。これは特に産業アプリケーション用に
つくられており、高性能だけでなく、低SWaP（サイズ、重量、消費電力）で低価格という特長が組み合わさった製品です。

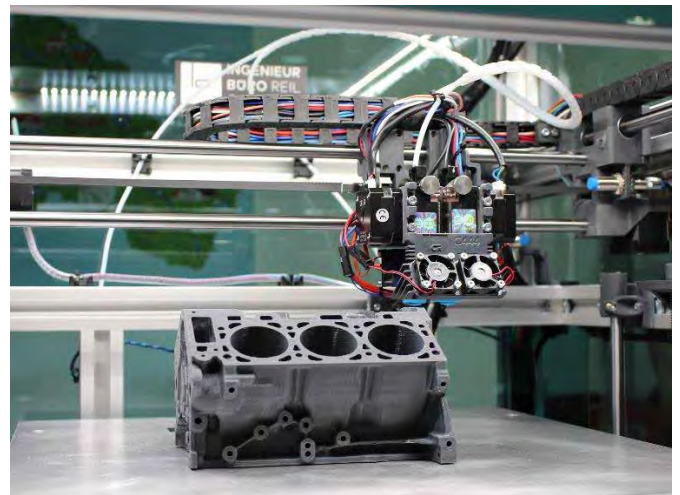
この「FOCUS On...」アプリケーションノートでは、溶接蒸着の非接触モニタリング用にC-RED 3を使う
アプリケーションに注目します。ワイヤー・アーク方式アディティブ・マニファクチャリングと、
被覆アーク溶接の2つのユースケースで、画像システムの空間分解能と時間分解能に注目します。

V0.0 26/11/2021

1. 金属アディティブ・マニファクチャリング

アディティブ・マニファクチャリングは、3Dデータに従って材料
を1層ずつ積層させていくことで部品を作り上げていくプロセスの
ことで、この技術は自動車や航空宇宙産業で広く使われています。

金属アディティブ・マニファクチャリングの手法には、ワイヤー・
アーク溶接、粉末床熔融結合、熱溶解積層方式、レーザ金属溶接
などがあります。いずれのプロセスでも、溶接中の熔融プールを
制御することが重要です。プロセス中の形状や温度は、溶接の
最終的な特性（電気抵抗、構造、残留応力など）に影響します。



カメラ技術

カメラ技術の進歩により、メーカーはアディティブプロセスの非
接触モニタリングに頼ることができるようになりました。これには、
オペレーターを危険な環境から解放し、溶接チップの位置合わせ、
熔融プールの適切な形成の確認など、溶接プロセスに関する信頼
性の高い情報をリアルタイムに提供できるという利点があります。

イメージングに関しては、SWIR領域（900～1700nm）は、可視
領域（400～750nm）と比べると複数のメリットがあります。

材料によっては透視できるなど、特別な特性を利用することができ
ます。SWIRでは、プラズマや金属蒸気ではなく、熔融プールや
高温で凝固した溶融物がはっきりと見えます。さらに、SWIR画像
からの熱測定は、対象となる温度範囲（300°C～5000°C）で
正確に測定することができます。ユーザーは、プロセス中に熔融
プールの均質性を評価し、ヒートプロファイルを制御することができ
ます。（ノ）

最後に、溶接にレーザを用いる方法では、金属の最大吸収率に
合わせて波長を選択します。このとき鉄や銅などの金属には、
SWIR領域である1064nmのYAGレーザが多く使用されます。

低輝度（背景になる冷えた溶接部）と高輝度（熔融プール、レーザ
など）の両方を飽和することなく撮影するためには、非常に広い
ダイナミックレンジが必要となります。また、熱源から材料表面、
そして材料内への非常に速いエネルギー移動の物理的プロセス
を撮影するには、超高速なフレームレートが必要です。

以上の理由により、C-RED 3カメラは溶接モニタリングに最適
なカメラです。

本書では、C-RED 3の性能を実証するため、アーク溶接による
実験的なユースケースを2つ説明します。

2. C-RED 3 を使ったユースケース

ワイヤー・アーク・アディティブ・マニュファクチャリング (WAAM)

WAAMは指向性エネルギー堆積法(≒デポジション方式)の1種で、溶接アークの中に金属ワイヤーを制御された速度で供給する方法です。

これは溶融した金属ワイヤーを、先に堆積された層に部分的に溶融しながら重ねることで材料の積層を可能にしています。なお、このプロセスによる出力品は高密度の部品です。

積層プロセスは高温になるため、部品には残留応力が発生し、これが歪みの原因となることがあります。WAAMの課題の1つは、溶融中・冷却中の溶接部の材料の温度を管理することです。

溶接プロセスのパラメータ(温度、材料の厚さなど)を最適化するための研究は現在も続けられています。溶融プールのモニタリングや、積層後の熱分布の研究も1つのテーマです。

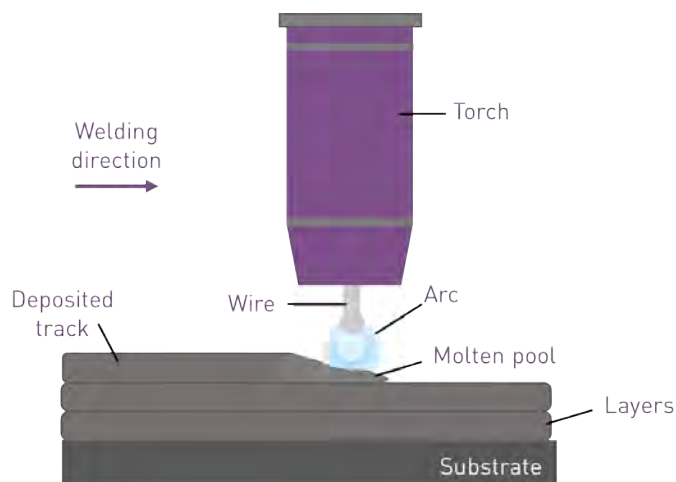


図1: WAAMの動作原理

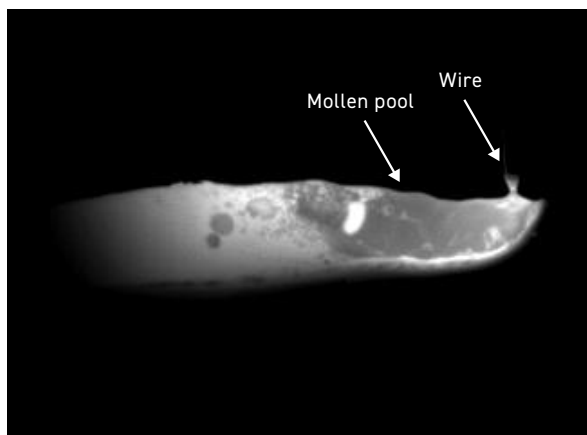


図2: ワイヤーメタルを完全に溶かして、ウェルドプールに堆積させています。

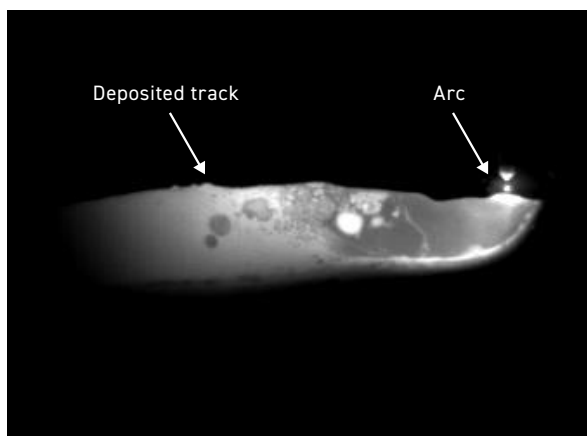


図3: ワイヤーメタルの溶融には電気アークを使用しています。溶接の均質性をリアルタイムで評価することができます。

WAAM実験の撮像結果

C-RED 3カメラと50mmのレンズを組み合わせ、溶融プール内の金属の状態を調べる溶接モニタリング実験を行いました。

Lowゲイン、最大フレームレート(600FPS)、露光時間1 μ sの超短時間露光(短時間チューニング最適化モードで利用可能)の設定で撮影しました。なお光学フィルターなしでSWIRの全帯域を撮影しています。

非常に高い空間分解能により小さな介在物など、溶融プールの詳細な状態を撮影することができます。

また、高い時間分解能により、積層造形中のウェルドプールの動きを追跡することができます。

First Light Imaging社のYouTubeのチャンネルで撮影した動画をご覧ください。

"Wire Arc Additive Manufacturing with C-RED3"



First Light Imaging社はWAAMイメージングに際し、Photon Lines社とLMGC Laboratoryと協力しています。

マニュアル・メタル・アーク・ウェルディング (MMAW)

マニュアル・メタル・アーク・ウェルディング (手動金属アーク溶接) もまた、電気アークを熱源として金属を溶融するプロセスです。

溶接機から電気が供給され、電極 (陰極) と母材との接点にアークを発生させます。

このような溶接工程では高温、煙、粉塵などが発生するため、厳しい環境下での撮影が求められます。

また、シーン内の温度変化が大きいので、カメラは非常に明るい被写体と背景によるコントラストを同時に処理できる必要があります。

MMAW 実験画像の結果

C-RED 3カメラをベースにした校正済みイメージングシステムを使用して、手動溶接実験のビデオを撮影します。

600FPS、ハイダイナミックレンジ (HDR) モード、露光時間 50 μ s に設定し、溶接部表面温度のリアルタイムモニタリングを行いました。

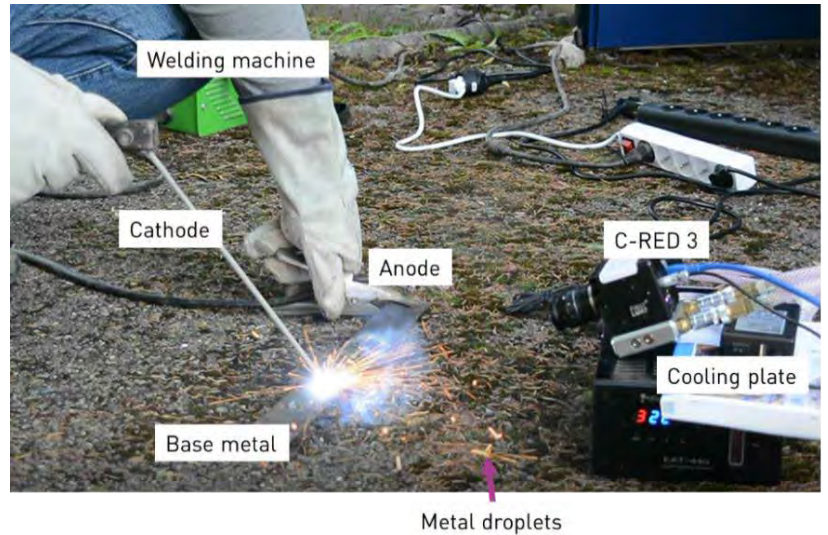
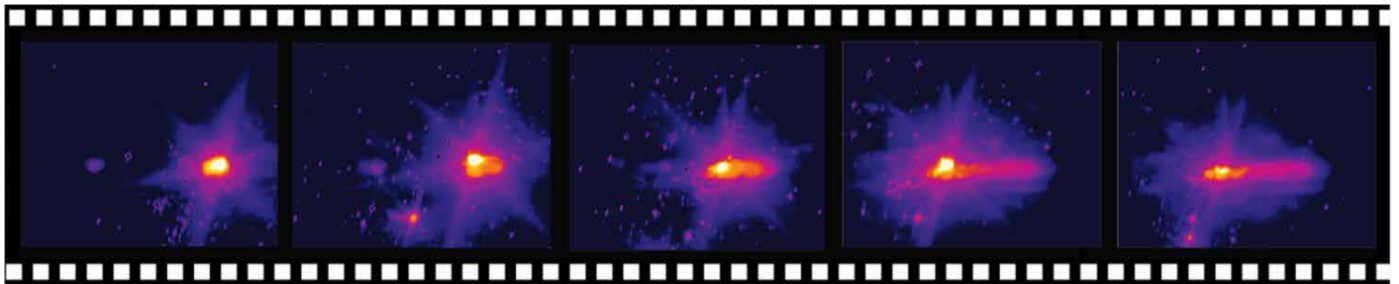


図4: 溶接実験のセットアップ

図5: 溶接プロセスのタイムラズプ画像



画像を処理することにより、溶接中の金属の温度プロファイル調べ、冷却の均一性を評価します。

このデータでは、溶接部に「ガッター」と呼ばれる欠陥が見られます (下のグラフに赤い矢印で示した部分)。

このタイプの欠陥は、金属の厚さに対して過度に加熱されたことによって発生します。

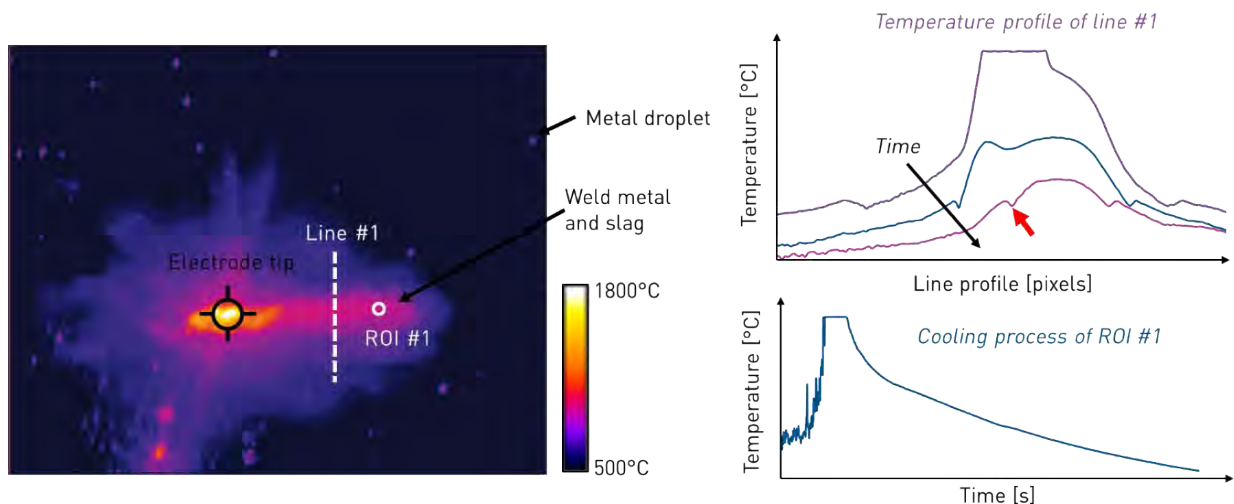


図6: 手動アーク溶接工程でのスナップショットと溶接温度プロファイルのモニタリング

3. C-RED 3 を使う理由

C-RED 3カメラでは、C-RED 2シリーズより冷却システムを取り除くことで、電気系を凝縮させ、非常に小型でコンパクトな高速SWIRカメラとなっています。溶接プロセスイメージングでこのカメラを使うメリットの数々についてご紹介します。



図7: C-RED 3カメラ

- **設置が簡単：** カメラ本体には複数のネジ穴がついており、自動溶接システムなどに簡単に設置することができます。C-RED 3の光学インターフェース(レンズマウント)はCマウント/CSマウントに対応しています。
- **インターフェースとソフトウェア：** C-RED 3には、First Light Imaging社製GUIソフトウェア「First Light Vision」が付属しております。さらに、SDKも対応しており、カメラはMatLab、LabView、Pythonなどとも連携できます。USBとCamera Link®でも利用可能です。
- **アンチブルーミング：** ブルーミング現象とは、明るくなりすぎた画素の信号が隣接した画素に伝わり、白い筋が入ってしまい、正確な情報が読出しできなくなる現象のことです。アンチブルーミング機能は飽和した信号が隣接画素へ侵入するのを防ぐため、溶接モニターなどで画角内に高輝度な部分があっても高品質な画像が得られます。
- **高感度：** C-RED 3は、温度調節機能を持たないカメラでは必然的に高くなってしまいう暗電流を、非常に高いフレームレートにより補うことができます。クロッピング(ROI)モードを使用してより高いフレームレート(最大32066FPS)で撮影した場合、暗電流は完全に無視することができ、カメラ全体のノイズは低いものとなります。
- **高速：** このカメラはフルフレーム画像(640x512ピクセル)の時、600FPSで撮影可能です。これにより溶解した金属の液滴など、高速移動する被写体を含む、溶接プロセスのクリアな画像を捕えることができます。
- **オンザフライ型1ポイントNUC補正：** C-RED 3では温度や露光時間の変化による影響を自動的に補正するために、適応型バイアス補正を搭載しています。この補正はカメラが自動的にダークフレームを計算するため、操作や実験の準備を簡素化します。
- **短い露光時間の最適化：** C-RED 3は非常に短い露光時間でも画像を撮影することができるので、明るい被写体の撮影に適しています。特定の電子的最適化モードにすることで、50usを下回る露光時間を達成することができます。
- **大きなダイナミクス：** センサーには、High、Medium、Lowのゲインの3つのゲインがあります。各ゲインでは33 ke⁻、129 ke⁻、1.4 Me⁻の飽和容量を提供し、用途に応じて感度を選択したいというニーズに応えます。
- **ハイダイナミックレンジ(HDR)モード：** LowゲインとHighゲインを組み合わせ、93.6dBのダイナミックレンジを持つハイダイナミックレンジモードが利用できます。HDRモード時でも600FPSで撮影できるため、溶融プールのクリアな画像を提供できます。

C-RED 3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、お客様のご利用の用途に合わせてハードウェアを最適化することができます。

4. 結論

アディティブ・マニュファクチャリングを使用した製造方法では、材料を何層にも重ねて3次元の部品を作り上げることができます。使用されている材料が金属の場合、製造した製品における均質性、及び機械的ストレスに対する堅牢性を保証するためには、溶接部の監視が非情に重要になります。

C-RED 3カメラは、高輝度の短波長赤外線（900～1700nm）に対応した高性能カメラです。研究用途や、工業・産業用途での工程監視などに最適なツールです。カメラは600FPSの（ノ）

今後の展開

C-RED 3は非常にフレキシブルに使用できるため、フリースペースオプティクス（FSO）から、過酷な環境下での温度モニタリングまで、様々な用途で使用することができます。（ノ）

高速撮影が可能で、瞬間的なイベントの撮影にも適しています。

C-RED 3カメラは、溶接プロセスを高い空間的・時間的分解能で撮影することができるため、積層プロセスを監視することでパラメータを最適化することができます。FLI社では、ワイヤー・アーク・アディティブ・マニュファクチャリング（WAAM）を研究用途の実験として、マニュアル・メタル・アーク・ウェルディング（MMAW）を産業用途の実験として、C-RED 3の活用方法を説明しました。

また、C-RED 3はOEMモジュールとしても提供可能なため、簡単に機械や装置へ組み込むこともできます。

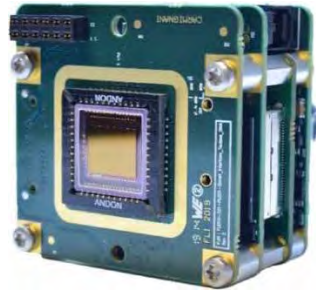


図8：C-RED 3 OEMモジュールカメラ

参考文献

- (1) L. P. Raut et R. V. Taiwade, «Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions », J. Mater. Eng. Perform., vol. 30, n° 7. p. 4768-4791, juill. 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05871-5.
- (2) U. Soy, O. Iyibilgin, F. Findik, C. Oz, et Y. Kiyani, « Determination of welding parameters for shielded metal arc welding », Sci Res Essays, p. 9.

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



記載内容および画像の転載、複製、加工などは禁止です。
また、記載内容は予告なく変更することがあります。ご了承ください。 Ver.1.0_2206