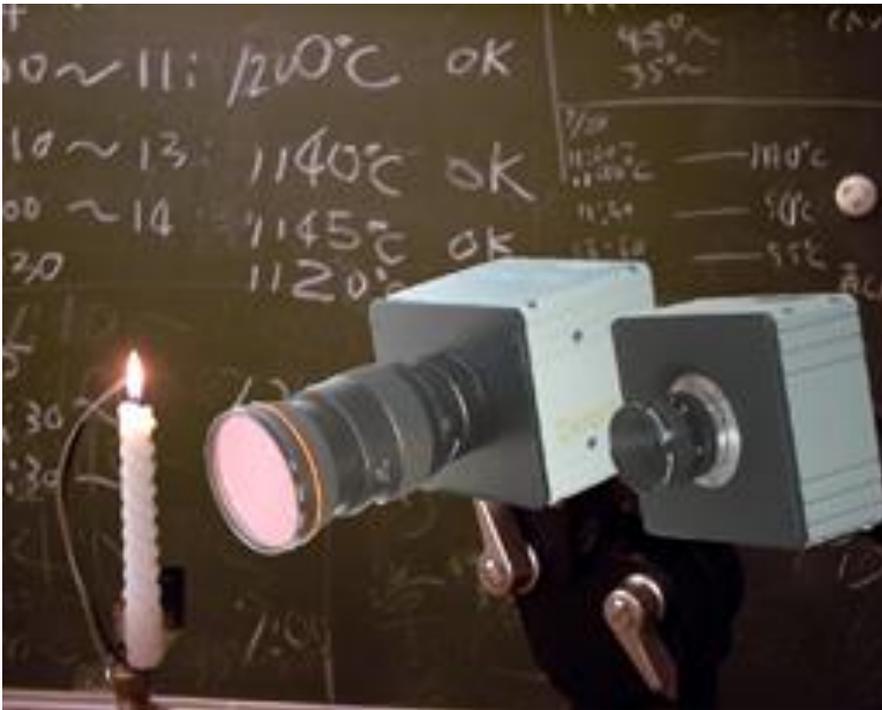


2色式サーモビューワの原理と応用例

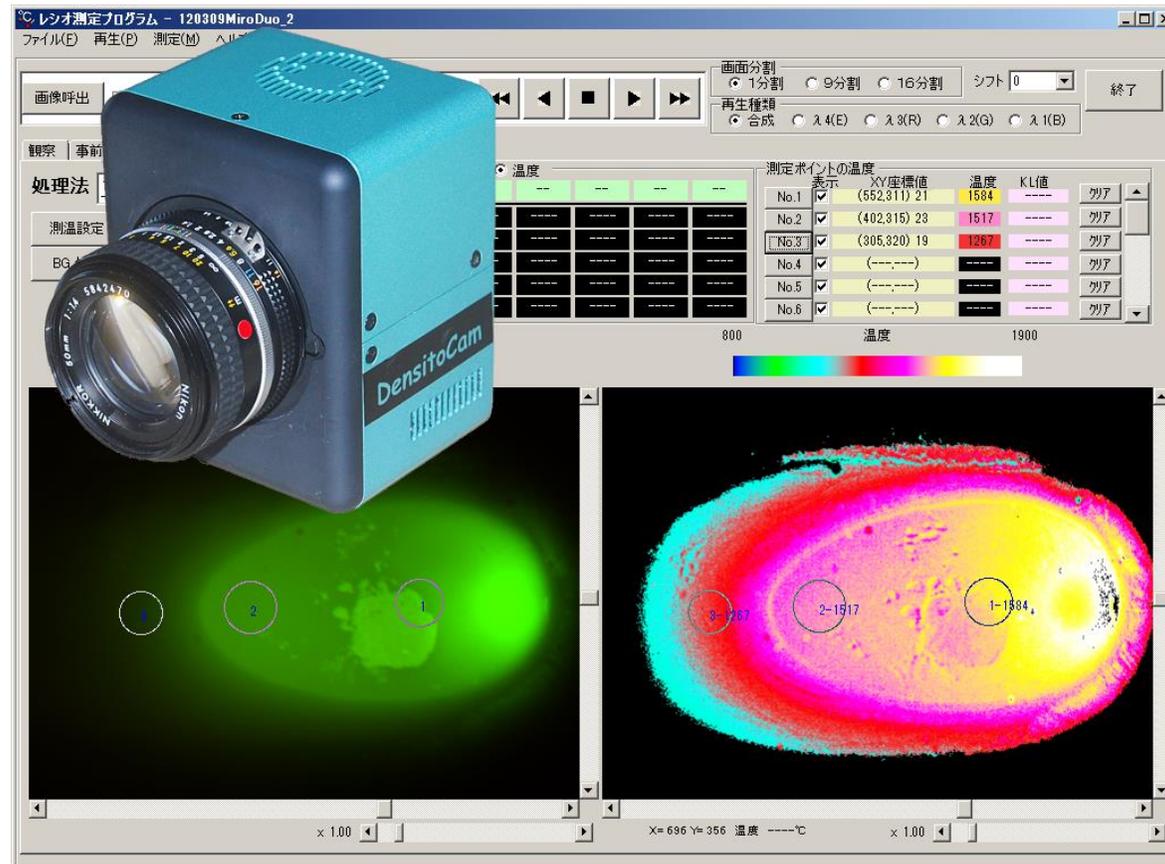


2022年4月15日

 Mitsui Photonics Ltd.
株式会社三井フォトニクス
臼井寛之

2色式のサーモビューワとは？

- 非接触で2次元の温度分布を画像として取得するシステム。



2

普通の(単色式)のサーモビューワと何が違う？

一般的なサーモビューワの長所・短所

- 簡便に温度分布が把握できる
- 様々な種類がある
- 低い温度から計測が可能(0°C 以下)

× 放射率補正が不可欠

物質、距離、形状、温度によって異なるため正確な温度計測は困難

× ガラス越しの温度計測ができない(専用の窓材が必要)

ガラスの吸収波長が赤外($2.5\text{-}3\mu\text{m}$)にあるため

× 専用のレンズが必要

赤外用の光学系を使用する必要あり



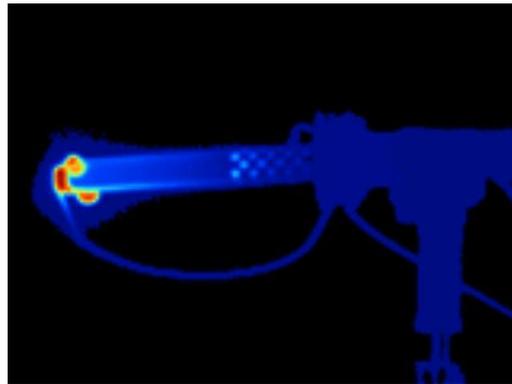
2色式サーモビューワの長所・短所

- 放射率補正が不要で、高精度の温度計測が可能
 - ガラス越しの計測が可能
 - 通常のレンズ、光学系が使用可能
 - 高速度カメラの使用で高速現象の温度計測が可能
 - 温度較正は納入時のみで、被写体が変わっても必要なし
- ×高温(300°C以上)の計測のみが可能

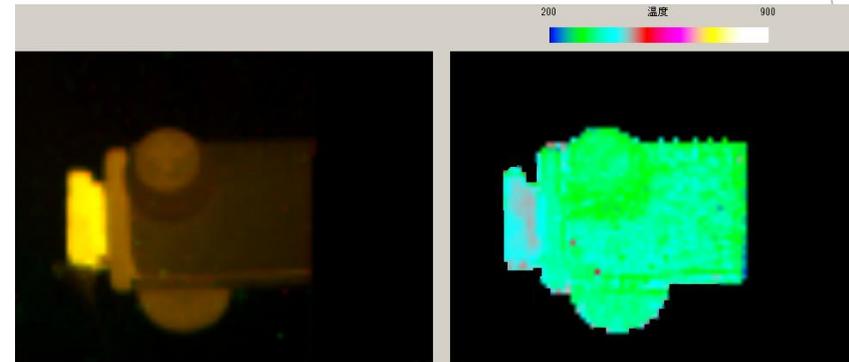
サーモビューワとの比較(半田ごて)



半田ごての温度を計測



サーモビューワの結果
放射率によって先端の温度が高く計測されている。

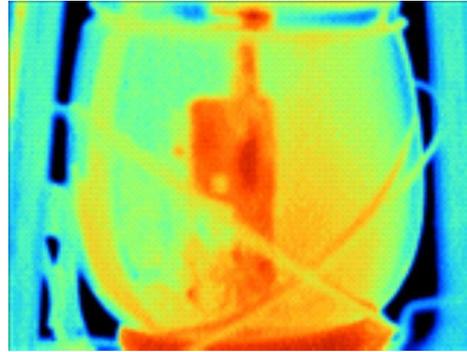


サーメラの結果(右が温度分布)
放射率が異なってもほぼ同じ温度として計測できる。

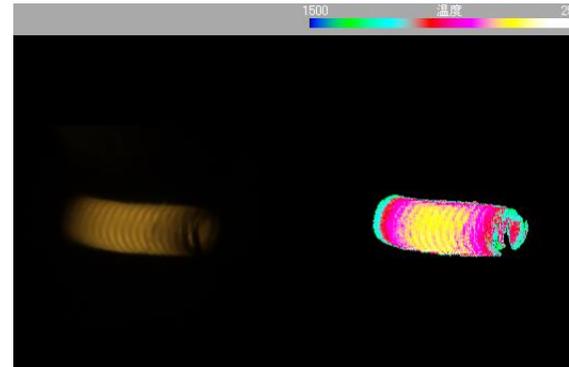
サーモビューワとの比較(ガラス越し)



電球のフィラメントを
ガラス越しに計測。

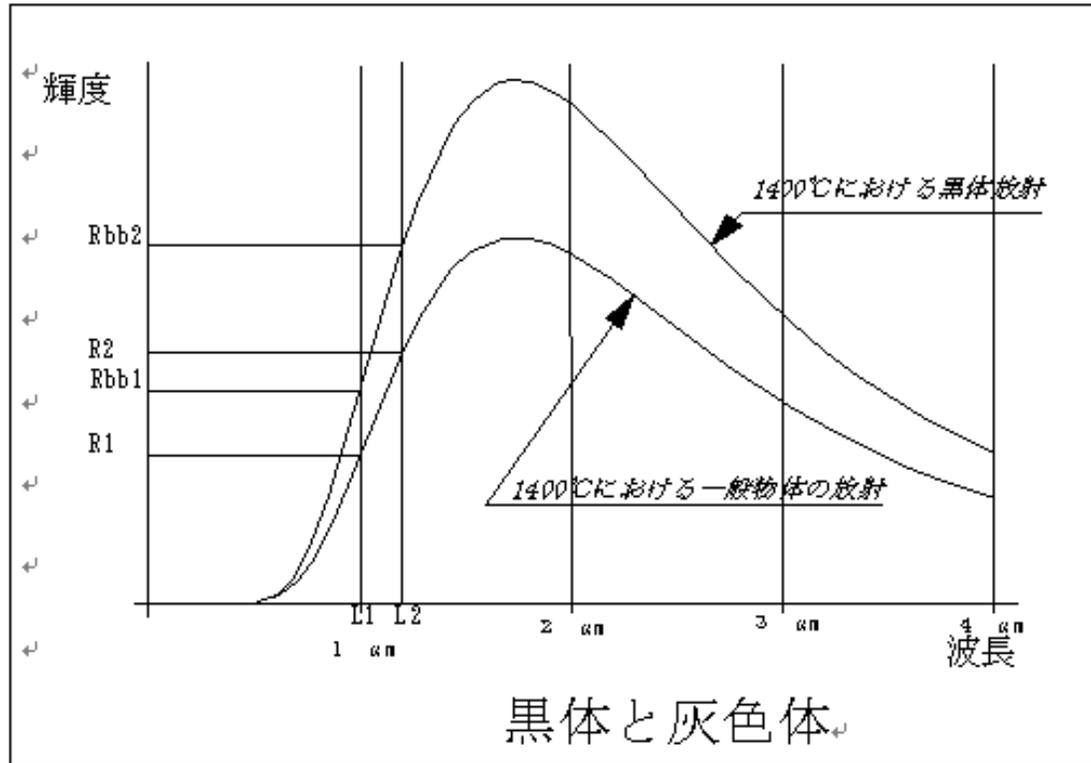


サーモビューワの結果
ガラスを透過せずにガラス
に映る反射の影響を受け
る。



サーメラの結果
(右が温度分布)
ガラス越しの温度計測
が可能。

2色法の計測原理



$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\tau \varepsilon R_{bb1}}{\tau \varepsilon R_{bb2}} = \frac{R_{bb1}}{R_{bb2}}$$

ε =物体の放射率

τ =物体と測定システム間の透過率

黒体の放射エネルギーの2波長における比と灰色体の放射エネルギーの同じ2波長における比は等しくなる。

2色法の数式的理解

波長 λ の単波長における物体の放射エネルギーと真温度の関係は、Planckの放射則で得られるが、3000Kelvin以下の温度計測域ではWienの近似方程式が使用でき下式で表される。

$$M_{\lambda} = \frac{c_1 \varepsilon \tau}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

M_{λ} : 放射の強さ

λ : 波長 μm

c_1 : 第1放射定数 $= 2 \pi c^2 h = 3.741844 \times 10^{-16} [\text{w}/\text{m}^2]$

c_2 : 第2放射定数 $= c h/k = 1.438769 \times 10^{-2} [\text{m K}]$

T : 真温度 (Kelvin)

ε : 放射率

τ : 透過率

2色法の数式的理解

前式をTについて解くと

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln\left(\frac{C_1 \varepsilon \tau}{M_\lambda \lambda^5} + 1\right)} \quad \text{となり}$$

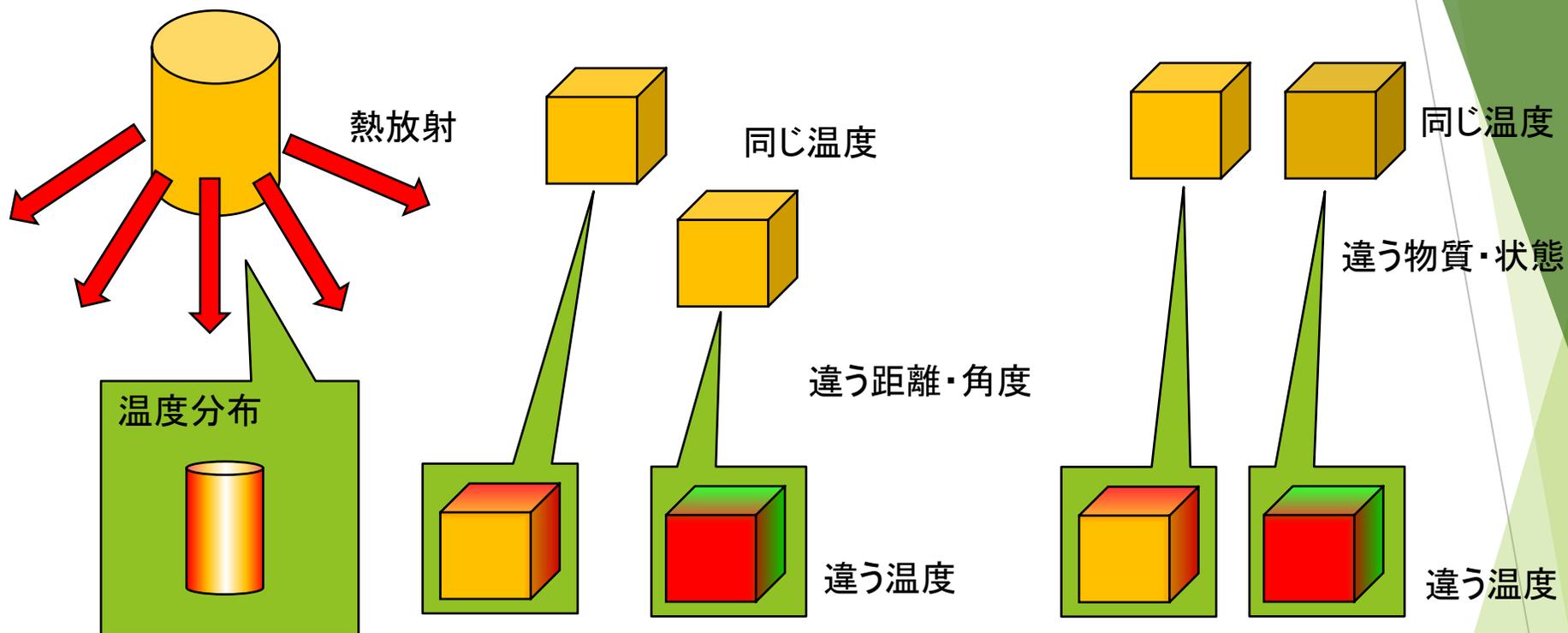
2波長の放射強度の比を $R = \frac{M_{\lambda_2}}{M_{\lambda_1}}$ とし、

2つの波長における放射率と透過率がほぼ等しいとすると
Tは以下のように表される

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{\ln R - 5 \ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}$$

温度Tは2波長の放射強度の比Rと相関関係にある。

サーモビューワの問題点

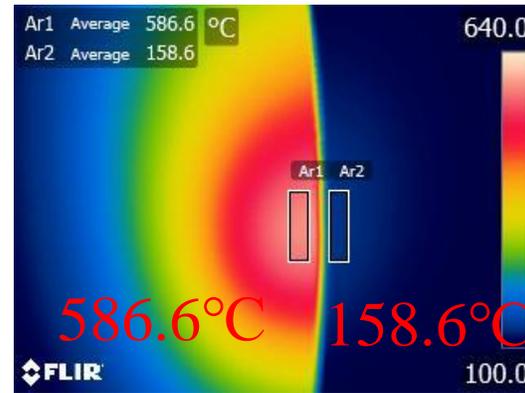


全ては放射率が原因です。

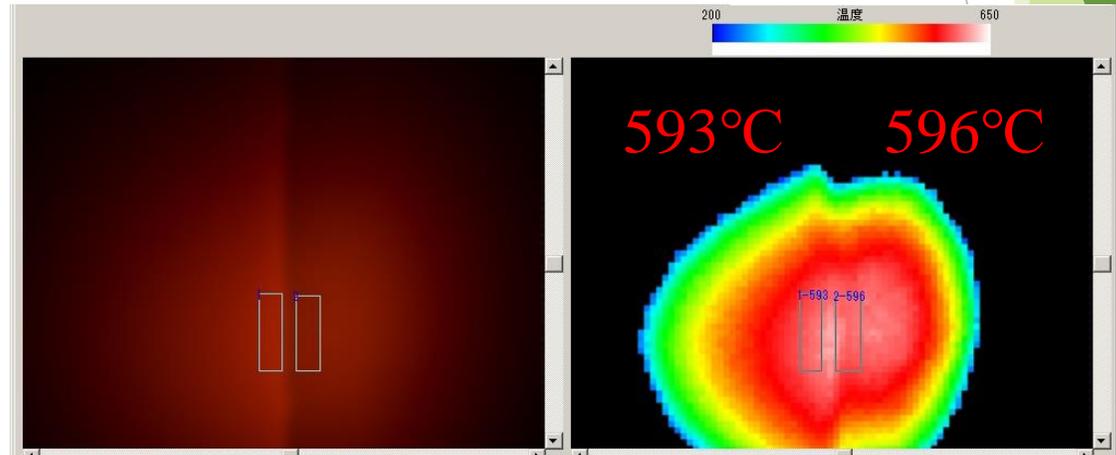
放射率は、物質、温度、波長、形状、表面状態などによって異なるため、正確な値を知るのは困難である。

2色法による放射率の異なる物体の計測

黒体スプレー 金属鏡面



通常のサーモグラフィでは放射率によって全く異なる温度が表示される。



放射率の異なる場合でも、2色法ではほぼ同じ温度として算出される。

ステンレス製の金属トレイの半分だけに黒体スプレーを塗布し、背面よりバーナーで加熱した際の金属地肌との温度を比較

熱電対での検証

タングステン板に熱電対を溶着し、バーナーで加熱して2色法と比較。



熱電対を抵抗溶接で溶着

放射率補正なしで熱電対とほぼ等しい温度を計測



使用するカメラの種類

高速度



カラー高速度カメラ

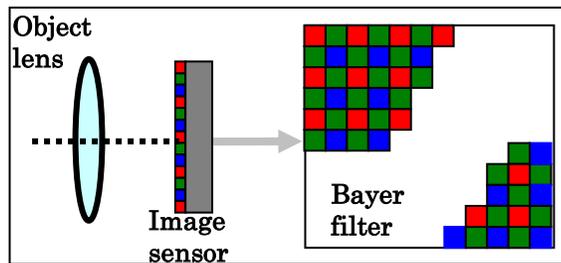
シリコンセンサー
550/600nm
900°C以上



モノクロ高速度カメラ
+2分岐光学系

シリコンセンサー
650/800nm
600°C以上

カラーセンサー



リアルタイム



DensitoCam U174

シリコン
カラーセンサー
550/600nm
900°C以上



DensitoCam Duo2

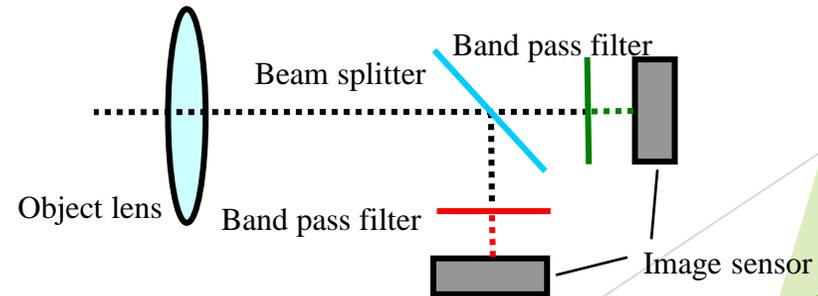
シリコンモノクロ
2センサー
800/975nm
500°C以上



DensitoCam Ingas128

インジウムガリウムヒ素
2センサー
1350/1550nm
300°C以上

モノクロ2センサー



設置例



熱疲労試験の
材料の温度計測

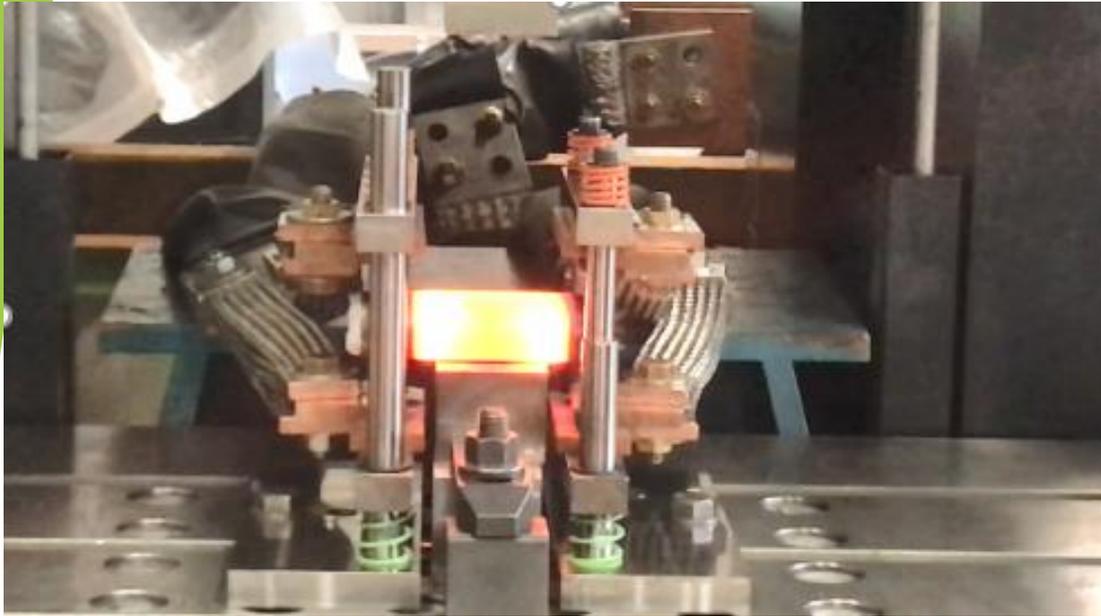


結晶成長時の
Siの温度計測



加熱炉の
材料の温度計測

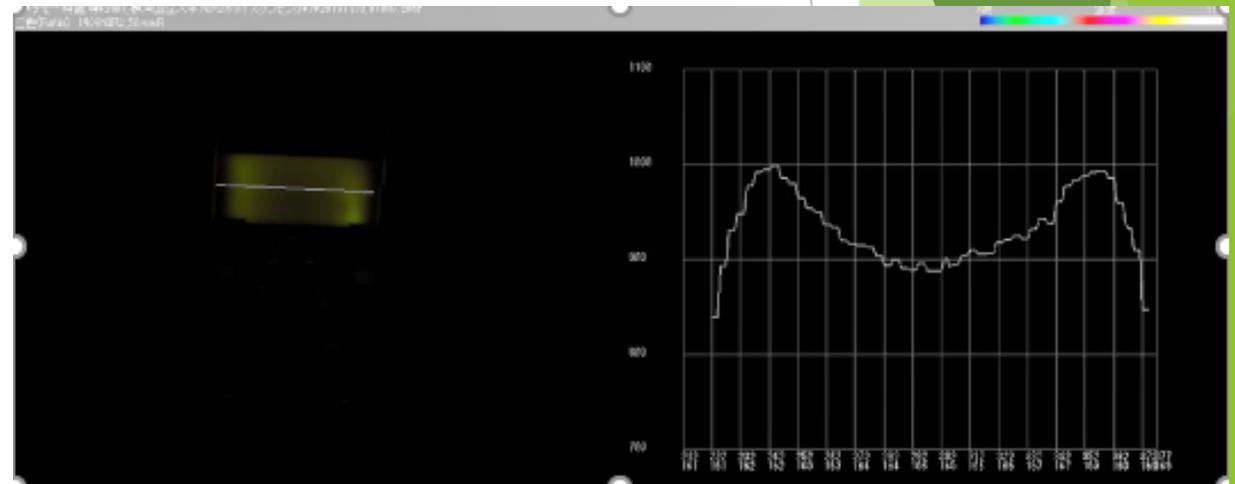
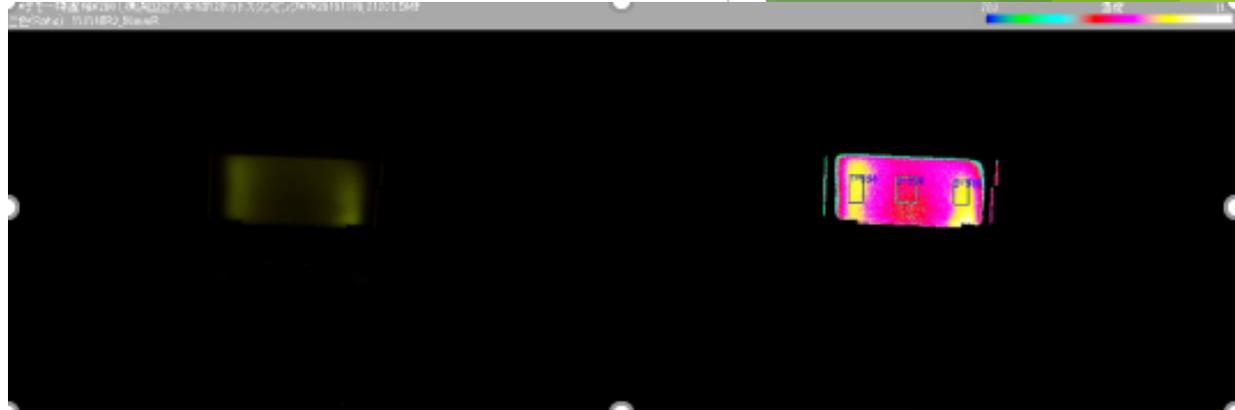
計測例



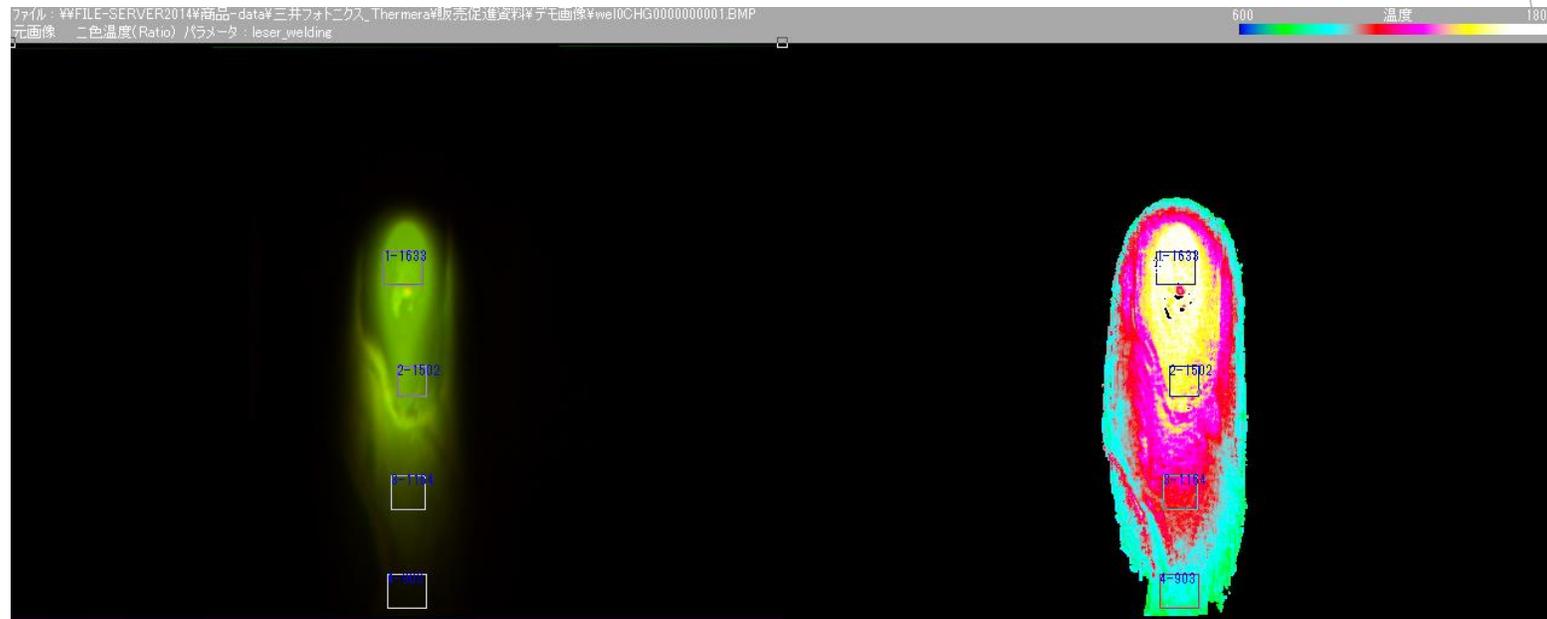
ホットスタンピング

温度計測範囲 700~1100°C

画像提供: 横浜国立大学 前野智美先生



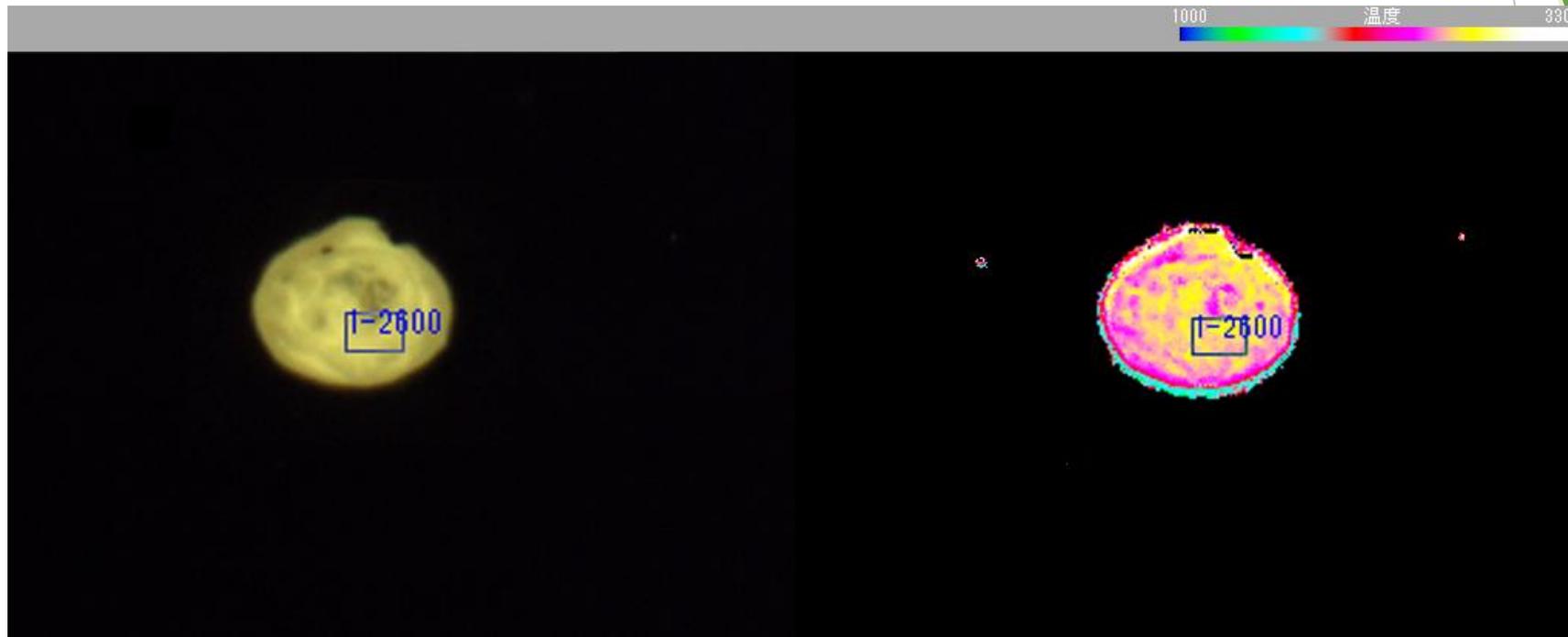
計測例



レーザー溶接の溶融プールの温度分布

温度計測範囲 900~1900°C

計測例

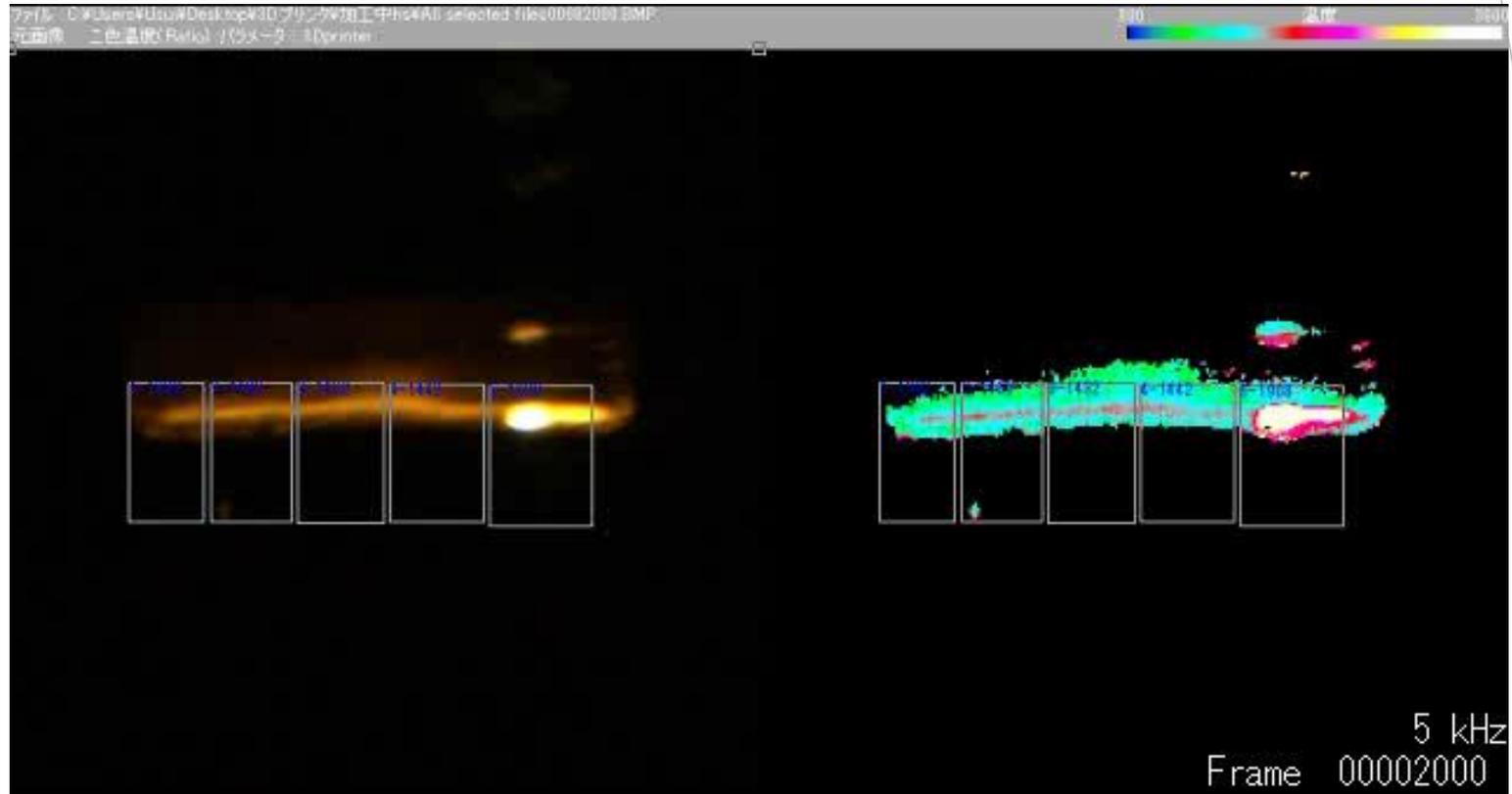


レーザー加工の溶融池の温度分布

温度計測範囲 1000~3300°C

撮影速度 15,000コマ/秒

計測例

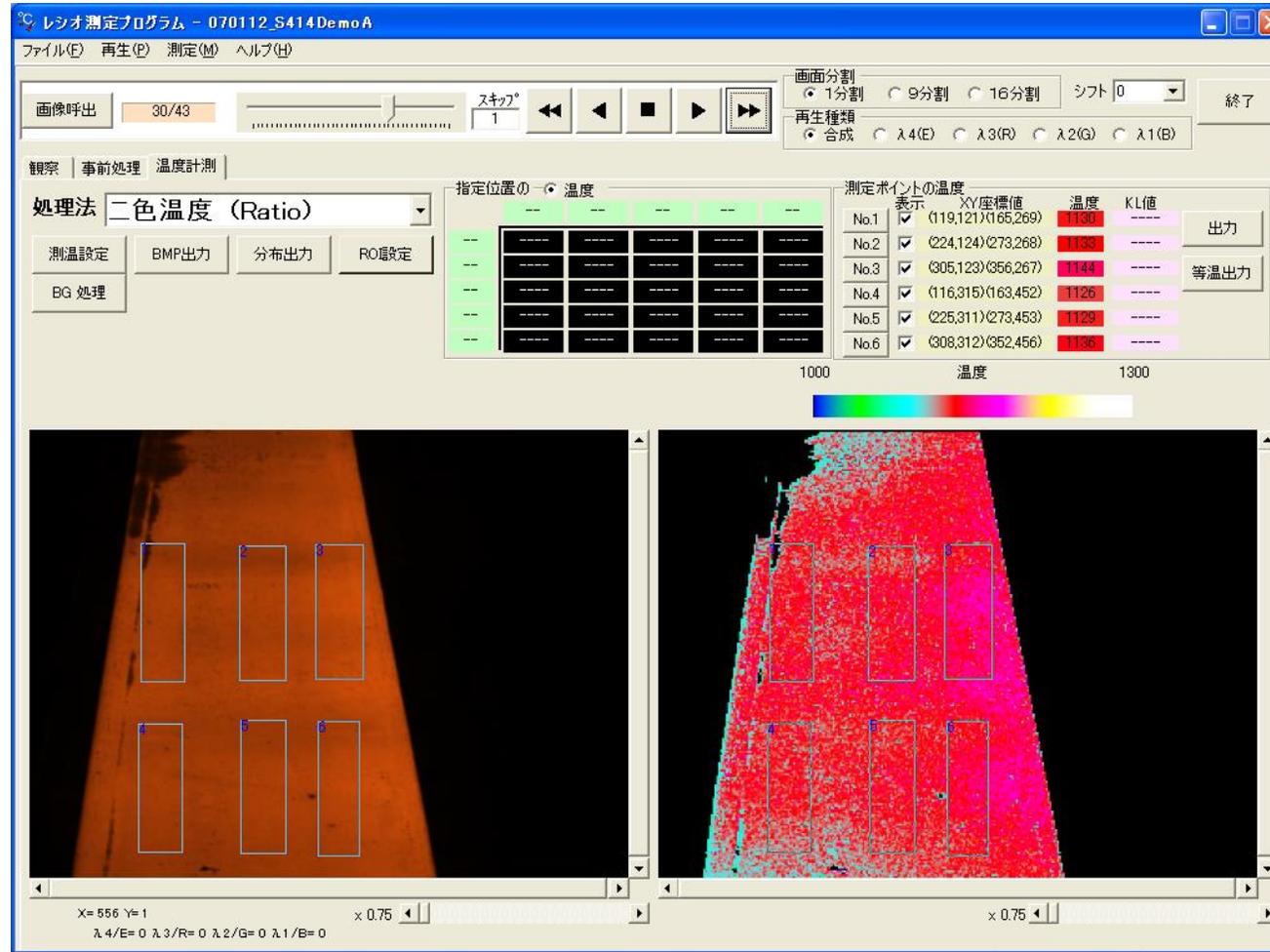


金属3Dプリンタの成型過程の温度分布

温度計測範囲 800~2000°C

撮影速度 5,000コマ/秒

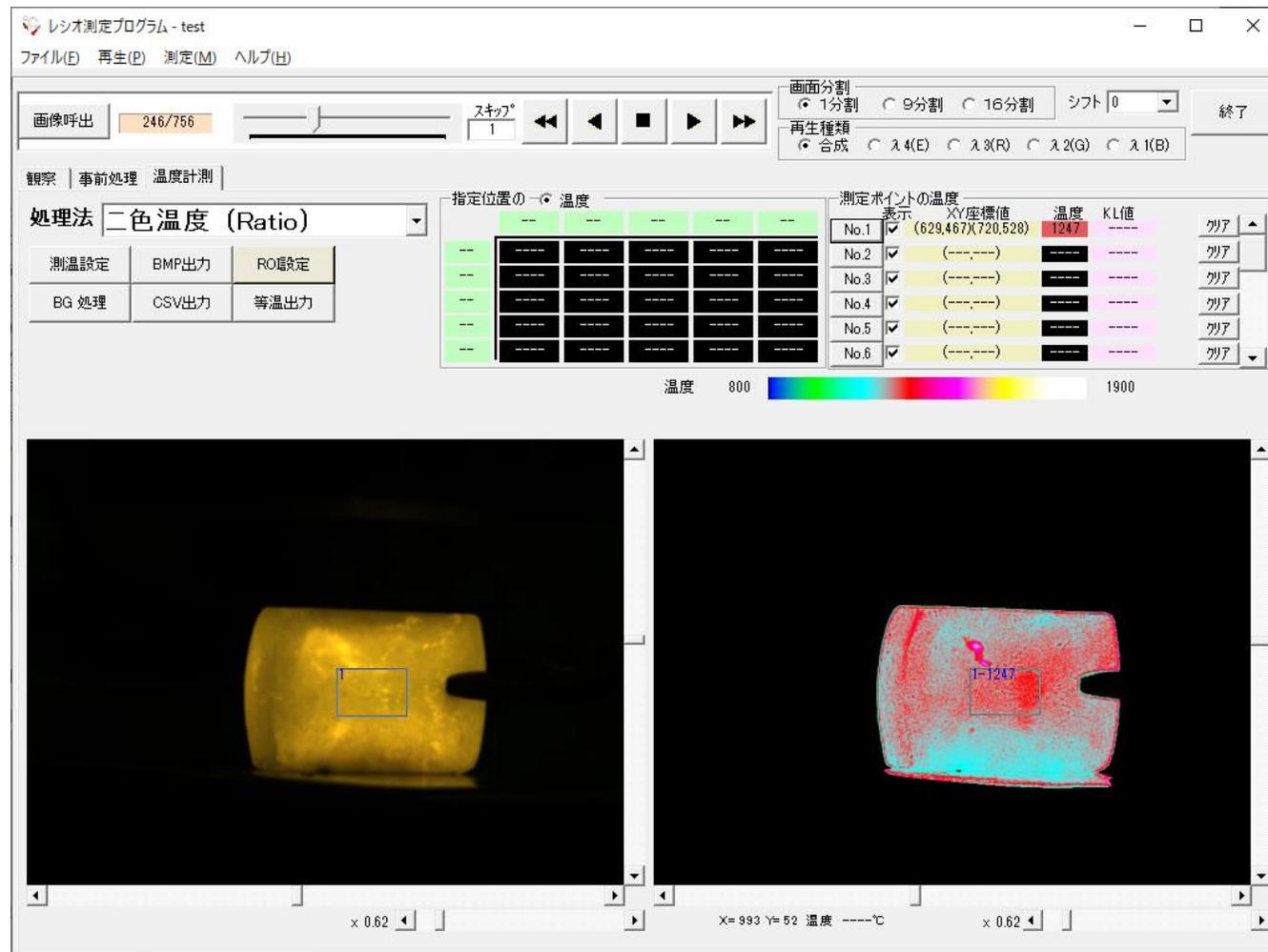
計測例



圧延

温度計測範囲 1000~1300°C

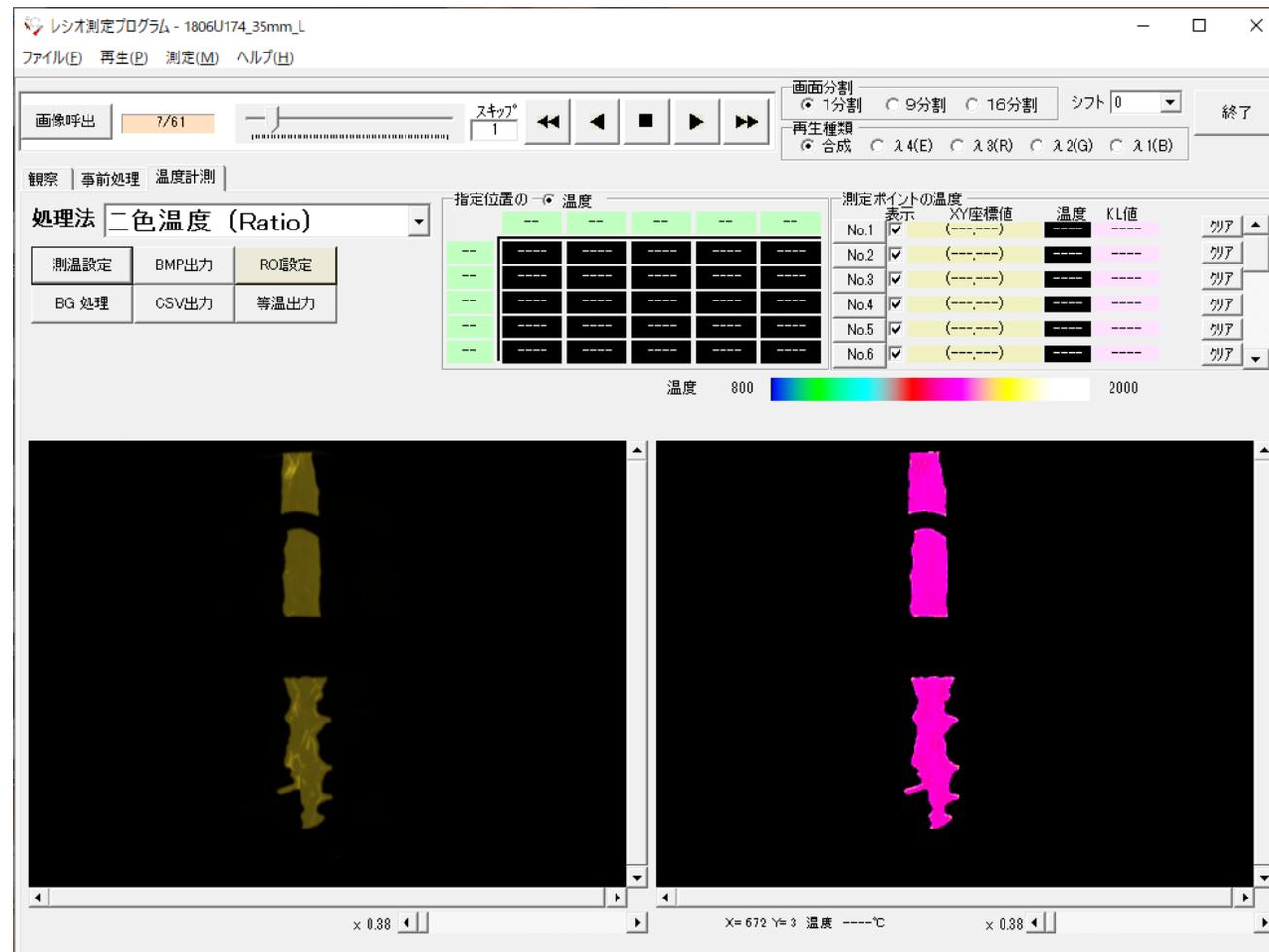
計測例



鍛造

温度計測範囲 800~1100°C

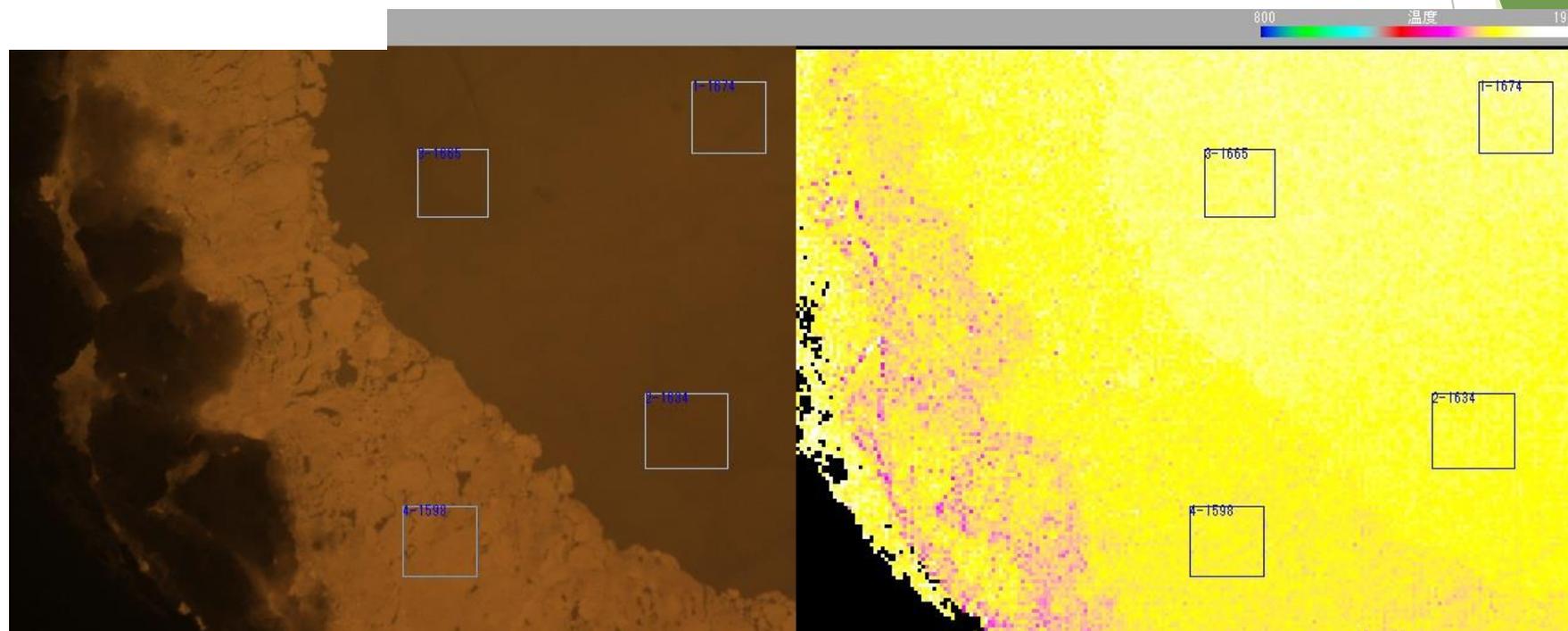
計測例



鑄造

温度計測範囲 800~2000°C

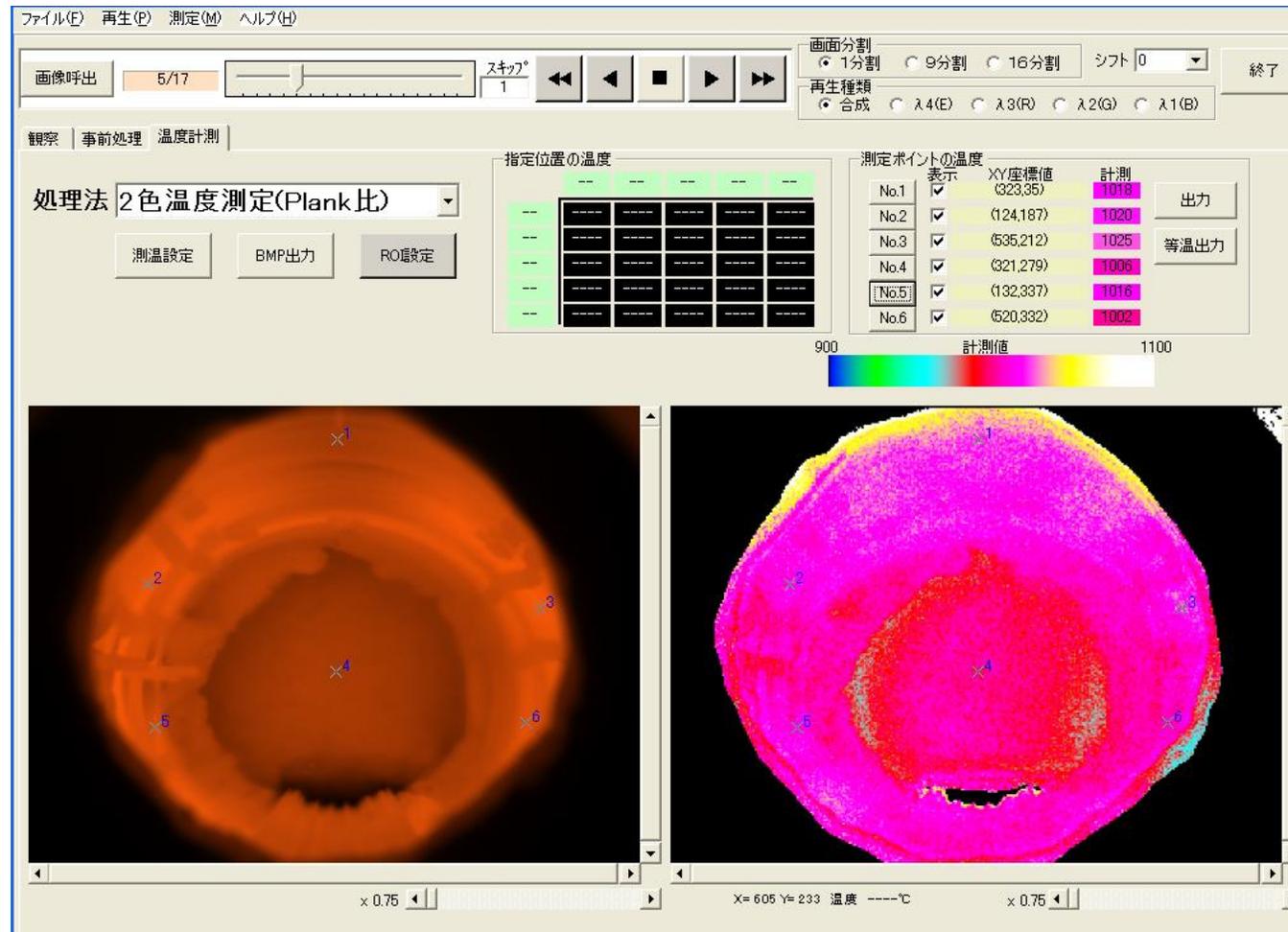
計測例



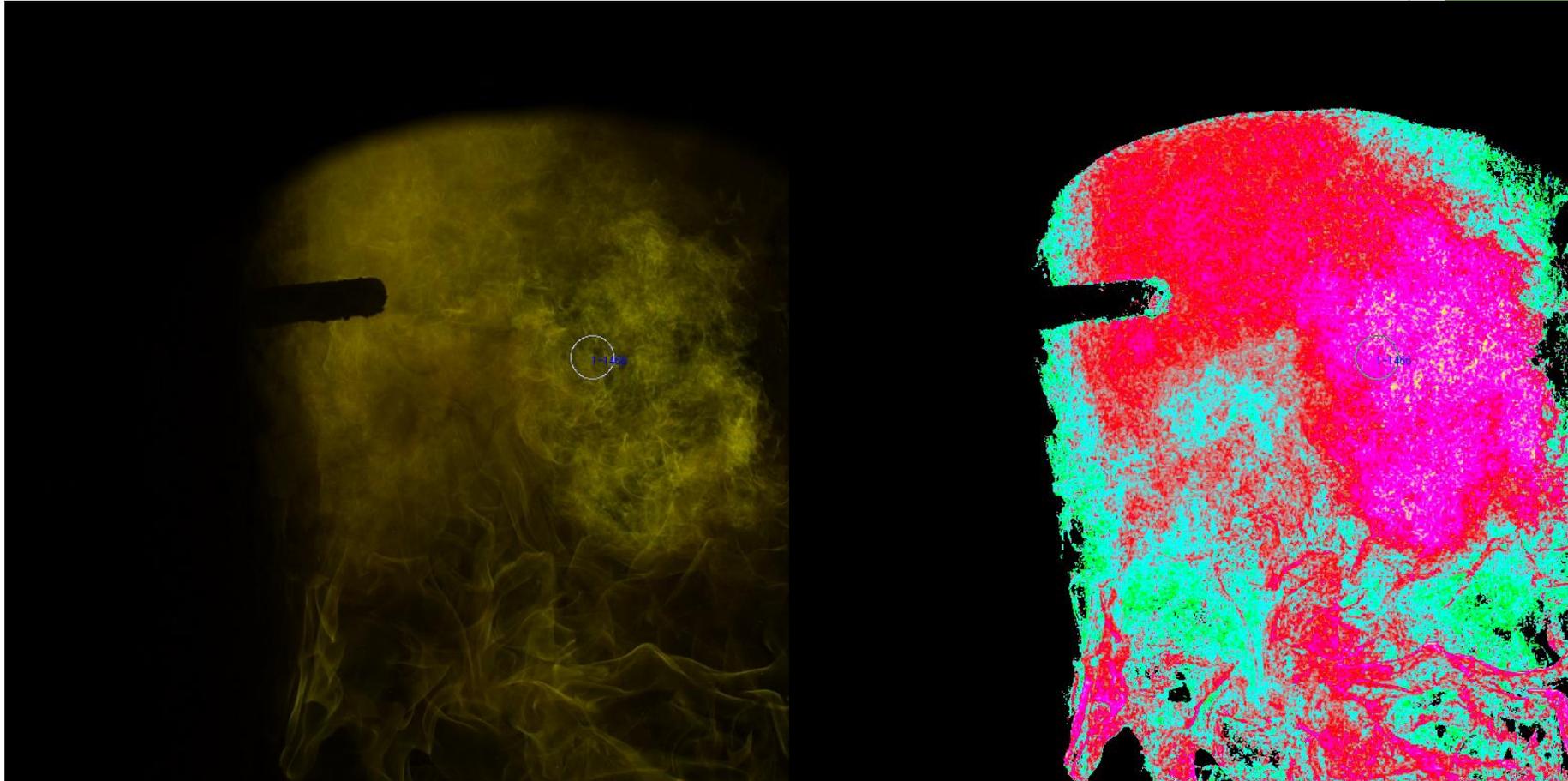
熔融炉

温度計測範囲 800~1900°C

計測例

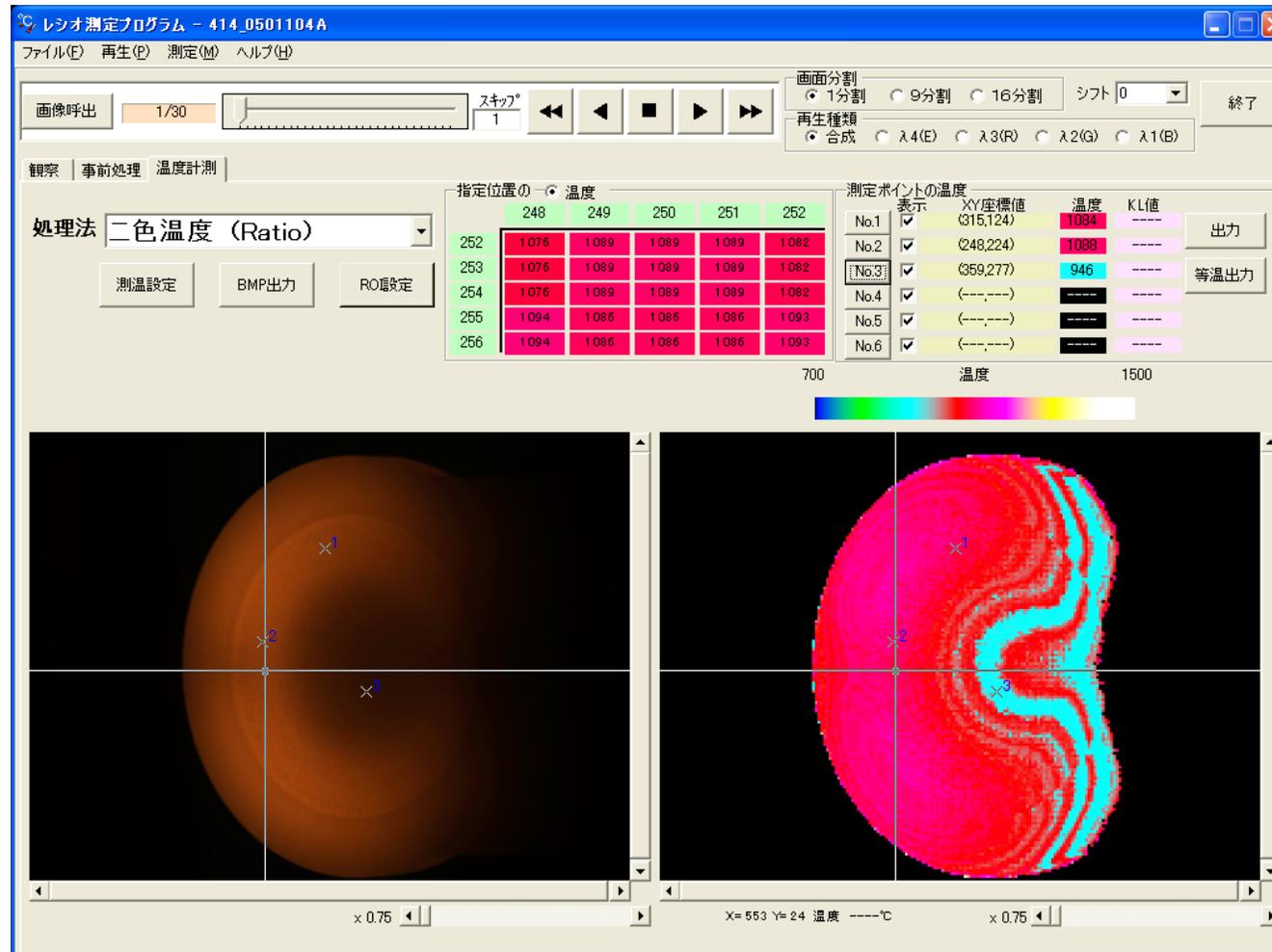


計測例



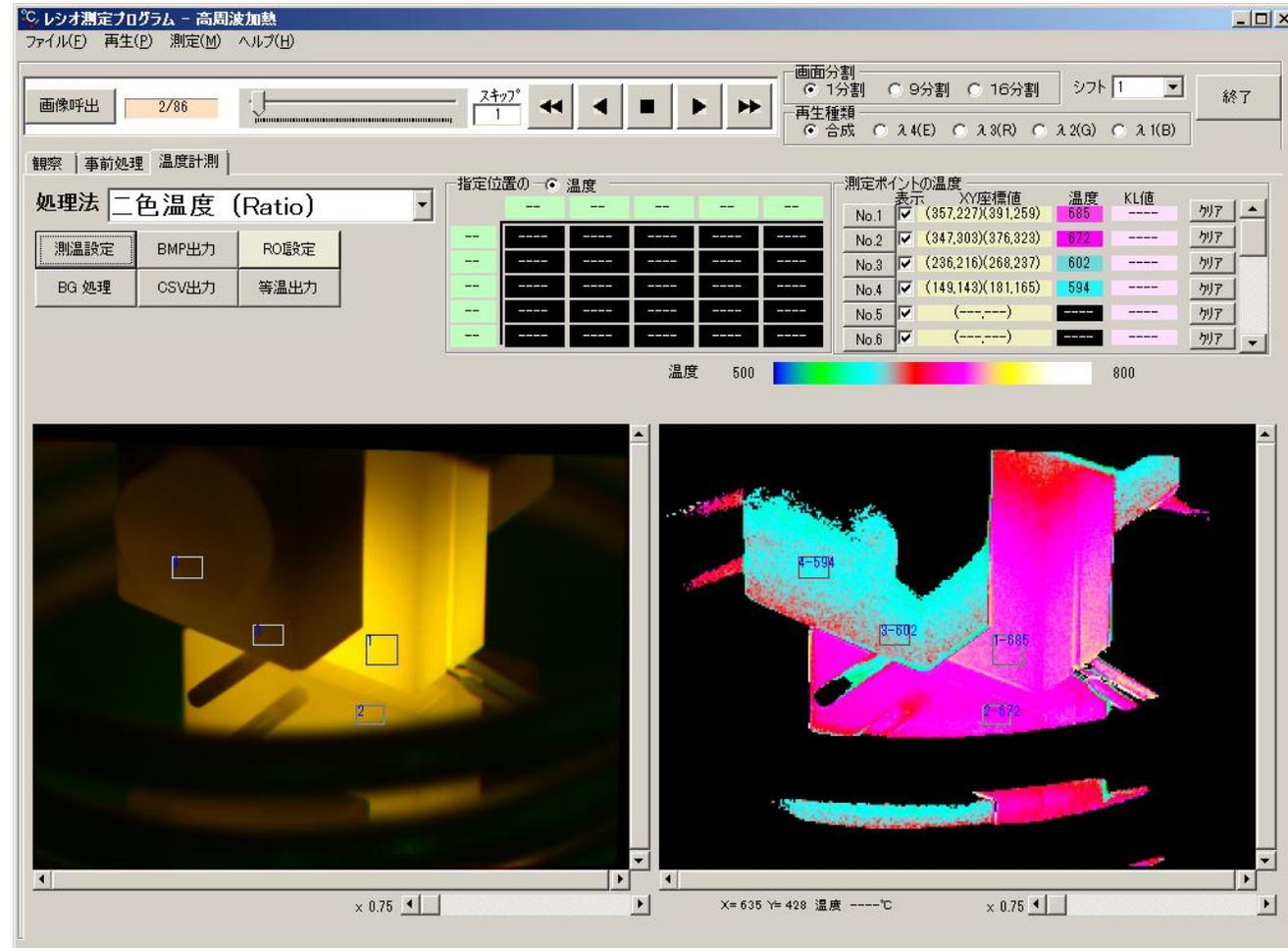
炉内火炎の温度分布
温度計測範囲 1000~1800°C

計測例



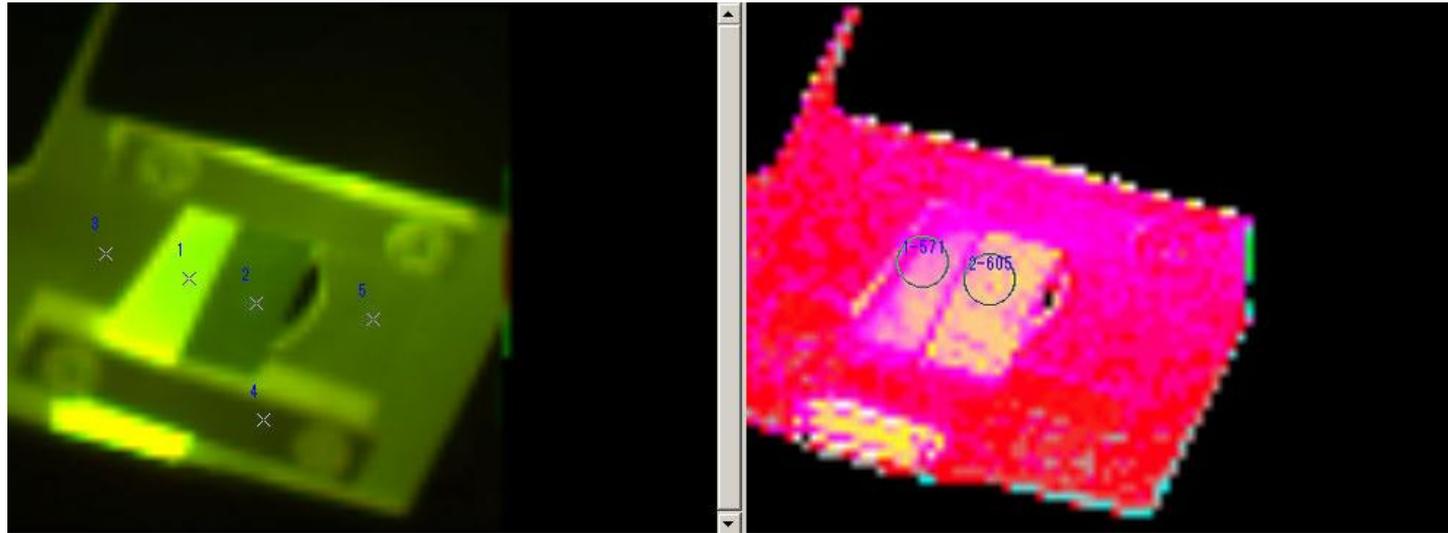
セラミックヒーターの温度分布
温度計測範囲 700~1500°C

計測例



金属の高周波加熱
温度計測範囲 500~800℃

計測例



チャンバー内の2種類の金属片の通電加熱
温度計測範囲 300~1000°C

納入事例

- 東北大学 用途:加熱炉
- 東北大学 用途:加熱炉
- 東北大学 用途:高周波加熱
- 東北大学 用途:プラズマ加熱
- 早稲田大学 用途:高周波加熱
- 法政大学 用途:燃焼
- 東京工科大学 用途:加熱炉
- 横浜国立大学 用途:高周波加熱
- 中部大学 用途:高周波加熱
- 大阪大学 用途:溶接
- 同志社大学 用途:燃焼
- 広島大学 用途:レーザー溶接
- 広島工業大学 用途:燃焼
- 徳島大学 用途:燃焼
- 九州大学 用途:燃焼
- 福岡大学 用途:溶融金属
- 大分大学 用途:触媒
- 産業技術総合研究所 用途:火薬の燃焼
- 産業技術総合研究所 用途:金属3Dプリンター
- 宇宙航空研究開発機構 用途:固体燃料の燃焼
- 石油基盤活性化センター 用途:燃焼
- 日本原子力研究所 用途:燃焼
- 高エネルギー加速器研究機構 用途:電子ビーム加熱
- 防衛省技術研究本部 用途:燃焼
- 電力中央研究所 用途:燃焼
- 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構 用途:金属3Dプリンター
- 沖縄工業試験場 用途:溶接
- 自動車メーカー 用途:金属の溶融
- 自動車メーカー 用途:通電過熱
- 自動車メーカー 用途:高周波過熱
- 自動車メーカー 用途:焼き入れ炉
- 金属メーカー 用途:圧延
- 金属メーカー 用途:溶銑
- 金属メーカー 用途:鑄造
- 金属メーカー 用途:鍛造
- 金属メーカー 用途:溶解炉
- 金属メーカー 用途:溶接
- 炉メーカー 用途:炉内の金属の温度
- ガラスメーカー 用途:溶融ガラス
- ガラスメーカー 用途:加熱炉の炉壁
- ガラスメーカー 用途:照明の電極
- 光学機器メーカー 用途:ガラスの成型
- 装置メーカー 用途:溶接
- 装置メーカー 用途:溶断
- 装置メーカー 用途:レーザー加熱
- 装置メーカー 用途:金属3Dプリンター
- プラントメーカー 用途:微粉炭燃焼炉
- 部品・機械メーカー 用途:炉内の材料
- 飲料メーカー 用途:ヒーター
- 電気機器メーカー 用途:金属加工
- 電気機器メーカー 用途:電池の爆発
- 電力会社 用途:金属の溶融
- その他多数