

身近な金属の
マイクロ組織を読む
第 81 回

溶接の見える化

はじめに

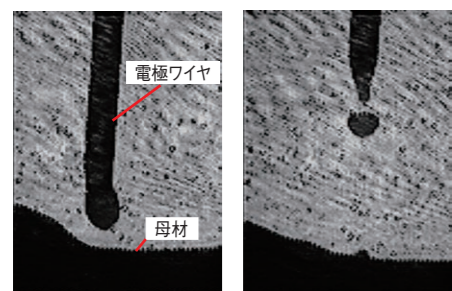
最近、「仕事の見える化」などプロセスや中身が見えることが重要だという論調の本が流行っています。「仕事の見える化」は、仕事の仕組みと流れを誰にでもわかるようにし、仕事に関する多様な情報を広く公開して、全体の仕組みを理解しながら、全体最適に創意工夫を促す狙いがあるようです。「ものづくり」でも同じことが言えます。

第三期科学技術基本計画の推進戦略「ものづくり技術分野」では、「科学に立脚した日本型ものづくりの再構築」が基本的な取り組み方針として示されました¹⁾。科学に立脚したものづくりという意味で、製品の性能や製造プロセスにおける様々な物理量をデジタル化、計測し、現象を科学技術で説明する「ものづくり計測」が重要な役割を果たします。

溶接・接合は、固体・液体・気体にさらにプラズマも関与する複雑な現象であり、高温から低温までさまざまな状態を扱うなど条件が複雑に絡み合い、これまで現場の経験則や過去のデータから推測し、論理や数値などで必ずしも明確に説明できない暗黙知によって制御してきた現象も多くあります。これを明示的・客観的に捉えるため、溶接・接合の現場で起こる現象を物理学のアプローチからさらに、諸現象の原理原則、本質をモデル化して、現実の課題を解決するための「溶接の見える化」について紹介したいと思います。直接目で見ることににより解ってくることもたくさんあります。



ティグ溶接 (SUS304) マグ溶接 (SS400)
図1 ティグ溶接におけるアークの状況とマグ溶接



短絡移行 (低電流) スプレー移行 (高電流)
シールドガス: Ar+20% CO₂ (ワイヤ径: 1.2mm 溶接電流: 120A)
シールドガス: Ar+20% CO₂ (ワイヤ径: 1.2mm 溶接電流: 300A)
図2 マグ溶接時の移行形態の違い

アーク溶接現象の観察

溶接に用いるアークやガス炎は、多量の放射熱 (赤外線) や光線 (可視光線、紫外線) を放射するためにアーク溶接挙動を裸眼で直視することは、絶対に避けなければなりません。そのため、作業者は溶接面を着用し、その遮光ガラス越しに溶融池を覗き、アーク、溶融池、さらに溶接ワイヤ等の挙動について情報を得ています。しかしながら、より深い理解のためには、このようなアーク溶接挙動を静止画はもとより、動画として記録できることが望まれます。最近では、ビデオカメラの高速化、高ダイナミックレンジ化 (ダイナミックレンジとは撮影可能な明るさの範囲をいう) がはかられ、特に、高速カメラにおいては、撮像素子の進歩により撮影感度、輝度分解能および空間解像度がますます向上しています。しかし、これらをアーク溶接の撮影に用いるためには、いくつかのノウハウが必要です²⁾。

溶接現象の観察には、カメラの特性と撮影条件をきちんと把握することが重要です。計測したい溶接現象を的確に撮影するために必要にして十分な照明方法とカメラの感度を考え、最適な撮影方法を決めなければなりません。

溶接アークは最高温度が約3万度までになる非常に高温のプラズマです。一方このプラズマと母材および電極との界面では、数千度の大きな温度差があり、このような状態での撮影にはアークの発光スペクトルを遮断する狭帯域の干渉フィルターの使用や、パルス照

明による短時間露光によるS/Nを向上させるなどの手法が有効です。ビデオカメラには、通常可視光以外をカットするフィルターが内蔵されていますが、アーク溶接の撮影時には、念のために強い紫外線と赤外線を防止する目的で紫外 (UV) カットフィルター・赤外 (IR) カットフィルターを使用します。また、アーク光は、カラービデオカメラに対して高輝度過ぎることが多く、ちょうど溶接面の遮光ガラスに近い働きをする減光 (ND) フィルターが必要です。

アーク自身の観察においては、アーク光中の特定元素の輝線だけを透過させたり、逆にアーク光の輝線を避けて、溶融池の熱放射光だけを透過させるようなフィルターの使い方が非常に有効です。図1にSUS304をティグ溶接したとき、ならびにSS400をマグ溶接したときのアークの状況を示します。いずれもバンドパスフィルターを使用し、6,000コマ/sで撮影しました。図2にマグ溶接時の移行形態の違い (小電流時の短絡移行と大電流時のスプレー移行) を示します。非常に大きな温度差がある状況でも、条件を選べば溶接状況を観察することが出来ます。

一方、溶融金属の湯流れを解析するためには、内部の湯流れの観察が不可欠であり、X線を用いた観察が必要となります。この場合には側面からX線を放射し、反対側で透過してきたX線を映像化することにより明瞭化を計ることになります。このとき、強力なX線ほど透過する厚さが大きくとれるため、最近では、放射光を用いた研究も行われています³⁾。図3にX線によるレーザー溶接時の湯流

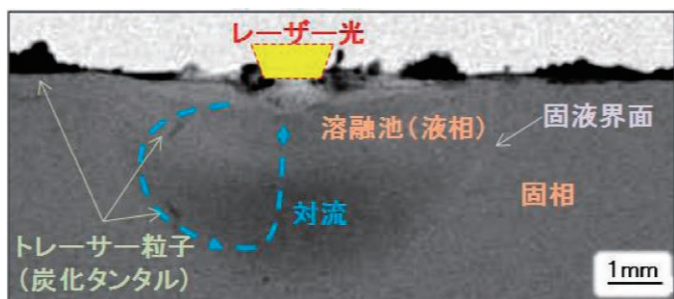


図3 X線によるレーザー溶接時の湯流れの観察

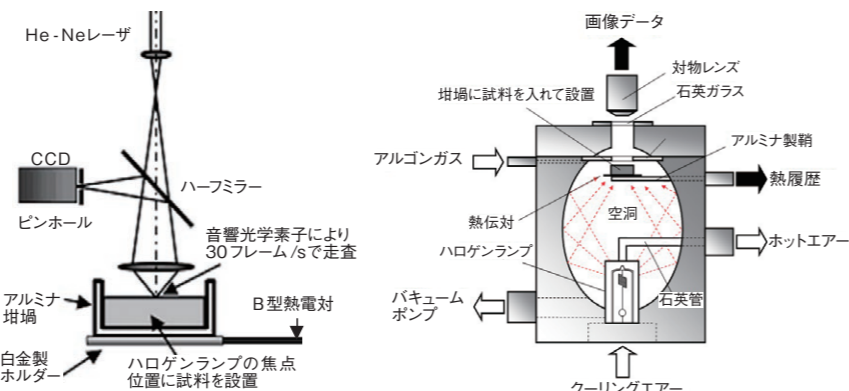


図4 共焦点レーザー顕微鏡を用いた高温その場観察システム
・合焦点像のみピンホールを通過できるため高温放射下で観察が可能。
・音響光学素子により光時間分解能観察が可能。

シリーズ

材料の素顔に迫る

大阪大学 接合科学研究所 教授
工学博士 小溝 裕一

この観察例を示します。図3は30keVの高輝度単色X線を用いて、アルミニウム合金のレーザー溶接時の湯流れをX線により観察したものです。固体と液体の密度の差から濃淡が違うことを利用していますが、湯流れを明瞭に観察するためには高融点 (融点3880℃) のトレーサー粒子を利用しています。

マイクロ組織変化のその場観察手法

室温でのマイクロ組織観察に用いられている光学顕微鏡を使用し、材料の加熱・冷却過程を追跡したとします。通常これらの顕微鏡では、白色光を試料に照射し、その反射光を観察しているため、試料の温度が800℃を超え、試料からの放射の影響が大きくなると観察が困難になり、1500℃を超えるような温度範囲では直接観察は不可能となります。

こうした加熱・冷却過程を直接捉えるため、赤外線イメージ炉と共焦点走査型レーザー顕微鏡を組み合わせたシステムが開発されています。図4に共焦点レーザー顕微鏡を用いた高温その場観察システムの概略図を示します⁴⁾。レーザー顕微鏡は試料表面をレーザービームにより走査し、試料からの反射光により試料の観察を行う顕微鏡です。また、赤外線イメージ炉の特徴は、非常に高速での加熱が可能であるため、溶接時の熱サイクルを再現でき、温度制御も精度良く行える点にあります。加熱速度、冷却速度の調整はハロゲンランプのon-off、ならびにガス吹きつけにより行い、熱電対により測定した温度で制御します。

He-Neレーザーを対物レンズに導き、試料の表面を走査すると、試料からの反射光は対物レンズを介して1次元のCCDアレイに導かれ、ここで反射光の強度変化を測定し、2次元のイメージを構築します。

この顕微鏡で用いている共焦点光学系では、検出器前面にスリットがある構造になっており、顕微鏡の焦点位置からの光のみが検出器に入射します。このため高温での観察において問題になる試料からの放射光が検出器に入りません。もちろん焦点位置の放射光は検出器に入射しますが、レーザー光の輝度が放射光の輝度と比較して十分に大きいため、放射光の影響をほとんど受けることなく、試料からの反射光のみを高いS/N比で検出できます。

試料は赤外線イメージ炉の中で加熱され、その試料の表面を石英ガラスの窓材を介して観察することができます。この観察では窓越しに試料を観察するために長作動距離の対物レンズを用いています。

金属試料の観察を高温で行うためには、試料表面の酸化を防止し、清浄な表面が維持されることが大変重要です。もし、酸化が進行すると試料表面は酸化膜に覆われ、金属の表面を観察できなくなります。使用する不活性ガスArの純度を高くするため、ゲッターを通して供給するなど、酸化を防止するための工夫が必要です。

本装置を用いて観察したマイクロ組織変化の

一例として、図5にオーステナイト粒界からフェライトが生成する様子、図6に介在物を核としてフェライト変態が生じる様子を示します。図5は低炭素鋼をオーステナイト化した後、5℃/sの冷却速度で冷却中にオーステナイト粒界からフェライトが生成する様子を示したものです。また、図6は低炭素鋼を5℃/sで冷却中に、酸化物系介在物を起点としてフェライト変態が生じる様子を観察した結果です。

上に示した高温レーザー顕微鏡では、マイクロ

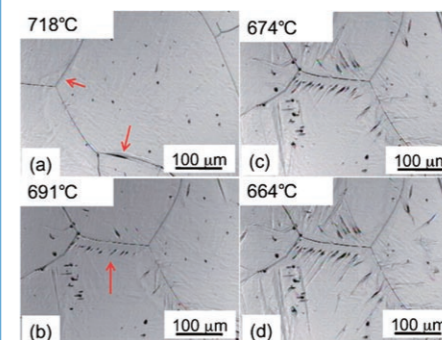


図5 オーステナイト粒界からフェライトが生成する様子

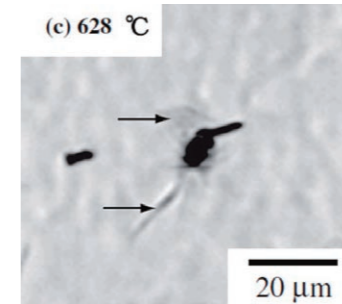
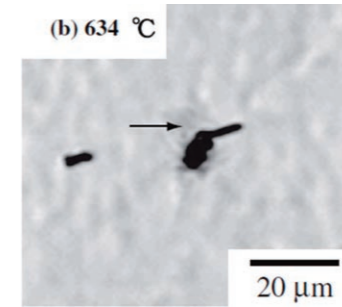
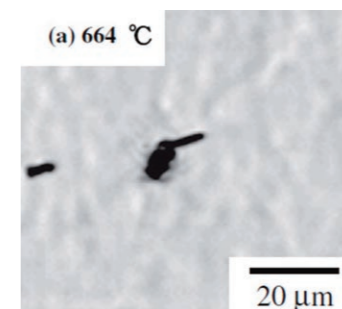


図6 介在物を核としてフェライト変態が生じる様子

組織が変化したことが直接目で見えますが、どのような相が現れてきたのか、どのような粒子が析出してきたのかというような内容はできません。そこで、図7のハイブリッドその場観察装置のように、高温レーザー顕微鏡システムを放射光施設Spring-8のビームラインに設置されている多軸回折計の軸上に搭載し、顕微鏡観察とX線回折測定を同時に行うハイブリッド観察システムが開発されています。この装置を用いると、相の変化と同時に同定もできるため、より深い現象の理解につながるものと期待されます。

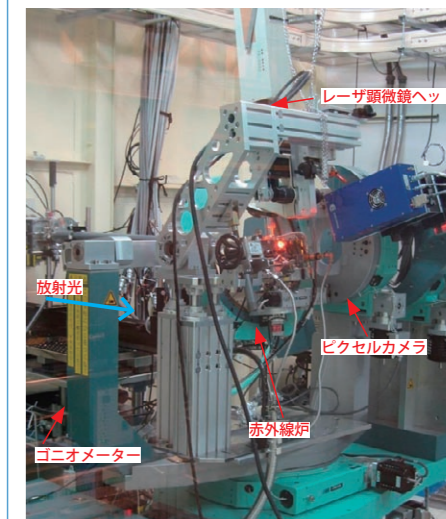


図7 ビームライン46XUに設置されたハイブリッドその場観察装置

おわりに

「溶接の見える化」により実際に観察した結果に基づき、本質をモデル化して、現実の課題解決に結びつけることが必要です。

ここでは紙媒体という制約から、静止画でしか掲載できませんが、動画で見ることによりさらに現象の理解が深まることでしょう。溶接・接合プロセスのビジュアル化データの一部は、大阪大学接合科学研究所のホームページでも公開していますし、関連のDVDは一般社団法人溶接学会から入手することも出来ます。

参考文献

- 1) 第三期科学技術基本計画 分野別推進戦略Ⅳ ものづくり技術分野
- 2) 小川洋司: ふえらむ, 10-3(2005), pp.180-184.
- 3) 山田ら: プラズマ・核融合学会誌, 89-7(2013), pp.500-506
- 4) 小溝裕一: 溶接学会誌, 80-8(2011), pp.671-682.