トーチろう付けにおけるろう溶融域のインプロセス 画像計測技術の開発*

石丸伊知郎** 白川善晴*** 松岡康博** 川邊俊一*** 平林久明***

A Development of In-process Image Processing Technique for Measuring
the Molten Area of Braze Filler Metal in Torch Brazing

Ichirou ISHIMARU, Yoshiharu SHIRAKAWA, Yasuhiro MATSUOKA, Shin'ichi KAWABE and Hisaaki HIRABAYASHI

Skilled workers control the braze filler metal supply while simultaneously monitoring the formation of a metal molten area. This ensures high-reliability brazing of workpieces engaged in various states. In order to emulate the technique of skilled workers', an image processing method that monitors the formation of a metal molten area using a CCD camera is proposed. This method makes use of the fact that brazing is inevitably conducted in a reducing atmosphere. In a reducing atmosphere, the surface of a molten braze filler metal becomes a mirror having a high regular reflectance. A band pass filter and a light source so as to eliminate the burner flame light and infrared radiation light from the workpiece surfaces optically as interference lights in order to receive only the regular reflected light from the molten area were selected. The proposed method was applied to the automatic torch brazing of copper pipes in order to experimentally verify its effectiveness for high-reliability brazing.

Key words: brazing, face-fed brazing, regular refrected light, band pass filter, image processing

1. 緒 言

ろう付けの自動化には大きく分けて2つの方式がある。1つは置きろう付け方式、もう1つは差しろう付け方式と呼ばれる。置きろう付け方式は、リング状あるいはシート状に加工し部品化したろう材をあらかじめ接合部に組み込んでおき、ろう付け工程においてはこのろう材を加熱し溶融することによりろう付けを行う。また、差しろう付け方式は接合部近傍を加熱しながら、線材状のろう材芯線を適宜接合部に供給しながらろう付けを行う。差しろう付け方式による自動化設備は、ろう材の供給機構を必要とするが、ろう材の供給量を制御することが可能であり、はめあい状態に大ききなばらつきを生じる部品間の接合への適用が期待される。しかし従来は、ろう材の供給量はあらかじめプロセス条件として求めておいたろう材供給時間で一定量の供給を行うだけであり、一品ごとで異なるはめあいの違いにフレキシブルに対応していなかった。

ろう付けの自動化の研究には、レーザレンジファインダ等による被接合部材であるパイプ位置の三次元位置計測技術^{1)~3)}、放射光計測によるパイプ表面の非接触温度計測技術^{4)~7)}の事例が知られている。しかし、ろう材供給量をはめあい状態の違いに応じて可変制御するための計測技術に関する研究事例はなかった。またろう材の溶融状態を計測する技術としては、置きろう付け方式における抵抗ろう付けにおいて半導体レーザのスポット光を照射しその反射光強度変化を計測する手法が提案されている⁸⁾。しかし、本研究が対象としているトーチろう付けで問題となるバーナ光、炎色反応光、あるいは、熱による輻射

光の外乱光除去は考慮されていない。また、溶接の分野において溶融池の形状をその熱画像である輻射光を画像処理することにより認識し、溶け込みの適応制御を行う計測手法が提案されている^{9) 10)}。母材を溶融する溶接では、溶融池が最も温度が上昇しているため温度上昇領域を分離認識することにより、溶融池を検出することができる。しかし、ろう付けは母材の熱を利用してろう材を溶融するため温度分布のみではろう溶融域を検出することはできない。

そこで著者らは、はめあい状態の異なる部品を信頼性高くろう付けすることを目的に、トーチろう付けにおける接合部のろう溶融域を計測する手法を提案する¹¹⁾。本手法は、ろう付けが必ず還元雰囲気の中で行われるため、ろう溶融域が必ず高い正反射率の鏡面状態になることに着目した画像計測手法である。

2. ろう溶融域検出技術の課題と対策

ろう付け作業を必ず還元雰囲気の中で行うのは、加熱溶融時の酸化による接合部の品質劣化を防止するためである。なお本研究で対象とした銅パイプの材質は、りん脱酸銅であり、パイプ径7mm、パイプの肉厚は0.7mmである。また、ろう材はりん銅ろうであるB-CUP 2 (線材径: 1.6mm) を用いている。りん銅ろう付けの場合、ろう材中に含まれるりんが還元作用をもたらし、ろう材溶融域表面は鏡面状態となる。これは、画像計測の観点から見ると正反射率が非常に高いことを意味する。本ろう溶融域検出では、この高い正反射率に着目している。

図1にろう溶融域検出光学系の構成概略を示す。本検出系は鏡面正反射光を計測するための多段照明¹²⁾及び外乱光を除去するバンドパスフィルタとCCDカメラにより構成されている。

CCDカメラで計測する受光輝度は、式(1)に示す3つの輝度の線形和として観測される。

* 原稿受付 平成11年9月7日

** 正会員 (株) 日立製作所 生産技術研究所 (横浜市戸塚区吉田町292)

*** (株) 日立製作所 生産技術研究所

Fig.1 Schematic diagram of optical devices for measuring the molten area of braze filler metal

$$\begin{aligned} \text{CCD受光輝度} = & \text{炎（バーナ光, 炎色反応光）} \\ & + \text{パイプ表面からの輻射光} \\ & + \text{ろう溶融域からの正反射光} \quad (1) \end{aligned}$$

本研究ではバーナに酸素-プロパンバーナを用いている。また、ろう材を接合部に供給する際、バーナにより微量のろう材が燃えて強い炎色を呈する。このため、炎の成分としてはバーナ光と炎色反応光を考慮する必要がある。また、パイプ表面は予熱動作により加熱されているため、パイプ表面からは温度上昇量に応じた多量の輻射光が放出される。

本手法では、炎と輻射光を光学的手法により取り除くことにより、ろう溶融域からの正反射光を高S/N比でCCDカメラにより受光し、単純なソフト処理のみでろう溶融域を抽出可能とし、短いサンプリングタイムでフィードバックすることを目指すとしている。そこで、除去したい炎と輻射光、及び正反射光を得るための光源の分光強度分布を分光計測器により求め、ろう溶融域の分光反射率、CCDカメラの分光受光感度特性を考慮して、S/N比

$$\begin{aligned} \text{S/N比} = & (\text{正反射光CCDカメラ受光輝度}) / \\ & ([\text{炎} + \text{輻射光}] \text{ CCDカメラ受光輝度}) \quad (2) \end{aligned}$$

が十分高くなるバンドパスフィルタおよび光源の選定を行った。

3. 外乱光除去適正バンドパスと光源の選定

3.1 分光計測による外乱光除去適正バンドパスの選定

図2に炎、輻射光の分光計測実験の構成を示す。

分光計測器（メーカー：浜松ホトニクス（株）、型式：PMA-11）は測定波長域が300～800nmであり、波長分解能は3nmである。水銀ランプを用いて輝線スペクトルの半値幅を評価したところ、12nmであった。また、種々の分光計測結果を相対比較し最終的にCCDカメラでの受光輝度比率を算出するため、露光時間（100ms）等、分光計測器の測定条件を後述の光源の分光計測時も合わせて実験した。また、分光計測器ディテクタの設定は銅パイプ、火口、ろう材供給方向との相対位置に対し、ろう付け装置におけるCCDカメラとの相対位置（水平角：25°，仰角：30°，ワーキングディスタンス：200mm）と同様に設置した。計測は、酸素-プロパンバーナにより銅パイプを加熱し、ろう材を加熱位置に供給しながら行った。

図3に炎と輻射光の分光計測結果を示す。ろう材が燃えることにより生じる炎色反応によるスペクトルは589nmと768nmに輝線スペクトルとして存在することが分かった。また、輻射光はプランクの法則からも分かるように、長波長域に行くに従い

その強度が強くなっている。図4に酸素-プロパンバーナ光のみの分光計測結果を示す。酸素-プロパンバーナ光は目視で確認できる青色から目視確認のできない紫外域の短波長成分が主である。しかし、その相対強度は図3から分かるように炎色反応光、輻射光の成分より極めて低いことが分かる。

Fig.2 Structure of measuring the spectral distribution of burner flames light and infrared radiation by spectrometer

Fig.3 Result of measuring the spectral distribution of burner flames light and infrared radiation by spectrometer

Fig.4 Result of measuring the spectral distribution of oxygen-propane burner flames light by spectrometer

Fig. 5 Spectral distribution of burner flames light and infrared radiation corrected by CCD camera's spectral sensitivity

CCDカメラの分光受光感度特性¹³⁾を考慮した図3の分光強度分布を図5に示す。これは、図3の分光計測結果 $I(\lambda)$ とCCDカメラの分光受光感度特性 $C(\lambda)$ の積算である式(3)により得ることができる。

$$f_f(\lambda) = I_f(\lambda) \times C(\lambda) \quad (3)$$

λ は波長、 $f_f(\lambda)$ は炎、輻射光のCCDカメラ分光受光強度(図5)であり、 $I_f(\lambda)$ は炎、輻射光の分光計測結果(図3)、 $C(\lambda)$ はCCDカメラの分光受光感度である。

この結果、炎色反応光、輻射光をほぼ除去できる500nm以下の短波長域が正反射光検出には適正と考えた。しかし適正か否かは、ろう溶融域表面からの正反射光とのCCD受光強度比が十分高いか否かによる。これを評価するには、光源の分光強度特性はもちろんであるが、ろう溶融域の分光反射率、及び、上記と同様にCCDカメラの分光受光感度特性も考慮して評価する必要がある。

3.2 分光強度分布および空間強度分布を考慮した光源の選定

光源の選定には2つの項目を考慮する必要がある。1つは、前節において述べた500nm以下の短波長域において十分な光量を有すること、もう1つは、鏡面計測には必須である多段照明に適正な広い空間強度分布を有することである。

光源の選定は、白熱灯、放電管、蛍光灯に関して比較検討し、500nm以下の短波長域において光量が大きく、かつ、面光源で多段照明に適している点から蛍光灯が適していると判断した。そこで、蛍光灯の分光強度分布を更に詳細に評価することにした。

図6に蛍光灯の分光計測実験の構成を示す。本実験では、量販店で容易に入手可能である、蛍光灯(製品名：ハイルミック 明るい輪D色、メーカー：日立)を用いた。蛍光灯と分光計測器のディテクタとのワークディスタンスを、ろう付け装置における蛍光灯とCCDカメラとのワークディスタンス(400mm)に一致させた構成とした。図7に蛍光灯の分光計測結果を示す。

銅の分光反射率¹⁴⁾を考慮した、ろう溶融域からの正反射光の分光強度分布を推定した。計算結果を図8に示す。これは、光源の分光計測結果 $I_L(\lambda)$ に銅の分光反射率 $r(\lambda)$ を積算する式(4)により求めることができる。

$$R(\lambda) = I_L(\lambda) \times r(\lambda) \quad (4)$$

$R(\lambda)$ は正反射光分光強度(図8)、 $I_L(\lambda)$ は光源分光計測結果(図7)、 $r(\lambda)$ は銅分光反射率である。

Fig. 6 Structure of measuring the spectral distribution of fluorescent lamp by spectrometer

Fig. 7 Result of measuring the spectral distribution of fluorescent light by spectrometer

Fig. 8 Spectral distribution of the regular reflected light of fluorescent light from molten area with consideration of spectral reflectance of molten area

次に、CCDカメラの分光受光感度特性を加味してCCDカメラによる正反射光の分光強度分布を推定した。計算結果を図9に示す。これは、式(4)により求めた正反射光分光強度 $R(\lambda)$ にCCDカメラの分光受光感度特性 $C(\lambda)$ を積算する式(5)により求めることができる。

$$f_r(\lambda) = R(\lambda) \times C(\lambda) \quad (5)$$

$f_r(\lambda)$ は正反射光 CCD カメラ分光受光強度 (図 9) である。このように、前節において適切と考えた 500nm 以下の波長域において炎、輻射光に対しても十分な光量を有していることが分かった。

そこで、バンドパスフィルタとして色フィルタである型式 B390 と B480 の 2 種類を組み合わせる図 10 に示す分光透過率 $T(\lambda)$ を形成した。

このフィルタを通して得られる、炎、輻射光、及び正反射光のそれぞれの CCD 受光輝度は、CCD カメラの分光受光感度とバンドパスフィルタの分光透過率 $T(\lambda)$ を用いた式 (6)、(7) により求めることができる。

$$Y_f = \int (f_f(\lambda) \times T(\lambda)) d\lambda \quad (6)$$

$$Y_r = \int (f_r(\lambda) \times T(\lambda)) d\lambda \quad (7)$$

ここで、 Y_f は炎と輻射光の CCD カメラ受光輝度であり、 Y_r はろう溶融域正反射光の CCD カメラ受光輝度、 $T(\lambda)$ はバンドパスフィルタの分光透過率 (図 10) である。

これは、図 11 に示す炎、輻射光分光受光強度 $f_f(\lambda)$ 、正反射光分光受光強度 $f_r(\lambda)$ とバンドパスフィルタの分光透過率 $T(\lambda)$ を積算して求めたそれぞれの CCD 分光受光強度分布の面積を算出したのに他ならない。その結果、正反射光/炎、輻射光の輝度比率 SN

$$SN = \frac{Y_r}{Y_f} \quad (8)$$

は 15.6 であり、外乱光を除去してろう溶融域からの反射光を高 S/N 比で CCD カメラに画像検出可能である見通しを得た。

Fig. 9 Spectral distribution of regular reflected light from the molten area corrected by CCD camera's spectral sensitivity

Fig. 10 Spectral transmittance of band pass filter

Fig. 11 Spectral distribution of CCD camera after filtering

4. 自動ろう付け実験結果

図 12 にバンドパスフィルタを用いない場合の CCD カメラによる画像計測例を示す。このように、ろう付け時には正反射光、輻射光、炎が混在して計測されるためソフトによる画像認識技術のみでろう溶融域を抽出することはできない。図 13 に 3 つの各波長域における画像計測例を示す。本実験においては、500nm 以下の適正バンドパス領域ではろう溶融域の正反射光を S/N 比 15.6 と高 S/N 比で検出することができた。このような良好な画像が得られたことにより、単純な 2 値化処理のみでろう溶融域面積を求めることが可能となり、市販の汎用画像処理装置 (メーカー: 日立製作所、型式: HV-R 4) を用いてもサンプリングタイム 0.08s で処理することが可能となった。ろう材供給時間が 2~3s であることから、十分早いサンプリング速度と考える。

しかし、充分な S/N 比を得られない場合には、図 6 に示す距離 L を短くするか、あるいは光源光量を大きくしなくてはならない。本手法では、光源のみの分光計測結果からろう付け時の S/N 比を推定できるため、光源選択を効率良く行うことが可能である。

Fig. 12 Example of image processing result without band pass filter

Fig. 13 Example of image on monitor in each wavelength area

Fig. 14 Time series experimental data of molten area of brazing filler metal

また、ろう付けに適正な被接合部間のギャップは一般に0.1mm程度である。本実験では、それより広く、かつ、ばらつきを有する、ギャップが0.1~0.3mmのはめあい状態の悪い銅パイプ300本を実験機により自動ろう付けした。図14に自動ろう付け時のろう溶融面積計測の実験結果の平均的な例を示す。この場合、予熱時間は約2s、ろう材供給時間は約2s、浸透動作0.5sの合計4.5sでろう付けを終了している。ろう付け箇所1か所あたりのろう付け時間の目標は6s以下であり、十分仕様を満足している。また、ろう付けの良否判定をガス漏れ試験と、熟練作業者の目視判断により行った。ガス漏れ試験は、ろう付け後に生じている非常に微細な穴も発見して不良と判定することができる。しかし、長期の使用を求められる配管の場合、フィレット形状がきれいに形成されていることも重要である。これは、フィレットが接合部の強度保持に必要なためである。この形状の評価は、定量的な判定基準作成が難しいことから、熟練作業により行うのが適切と考えた。接合部のろう付け状態をガス漏れ試験にてチェックしたところ、良品率は99.5%であった。また、ガス漏れ試験で良品と判定された配管のフィレット形状を熟練作業者が評価した結果、不良と判定されたものはなかった。つまり、ろう付け成功率は99.5%であり、目標値95%以上を十分達成した。

また、ろう溶融計測を行わずにろう材供給時間を2sに固定して、同様の試験を銅パイプ100本につき行った。ガス漏れ試験にてチェックしたところ、良品率は49.0%であった。また、ガス漏れを生じなかった良品のフィレット形状を熟練作業者の目視判断にて評価したところ、20.4%が不良と判定された。つまり、ろう付け成功率は39.0%であり、本手法の有効性を確認することができた。

5. 結 言

本研究は酸素-プロパンバーナによるトーチろう付けにおいて、接合部のろう溶融域を計測する手法に関するものである。

- 1) ろう付けは必ず還元雰囲気においてなされ、ろう溶融域は必ず高い反射率を有する鏡面になる現象に着目したろう溶融域画像検出方式を考案した。
- 2) 鏡面反射光を検出するために外乱光となるバーナ光、炎色反応光、輻射光を光学的に除去する適正なバンドパスは500nm以下の波長帯であることを明らかにした。

本計測制御手法を用いて、はめあい状態の悪い部品（ギャップ：0.1~0.3mm、サンプル数：300）の自動ろう付け実験を行ったところ、ろう付け1点あたり4.5秒（目標：6秒以下）、成功率99.5%（目標：95%以上）と良好な結果を得た。

また、ろう付けは手法によらず必ず還元雰囲気内において行われる。このため、適正なバンドパスをろう付け手法と使用するCCDカメラごとに分光計測により求め直す必要はあるが、アセチレンバーナ等の他のトーチろう付け、あるいは外乱要素の少ない高周波ろう付けにも本溶融域計測技法は適用可能である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、常に的確なアドバイスをして頂いた、故 宇野正人氏（当時（株）日立製作所生産技術研究所）に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 山本裕一，岸本 真，石田淳一，リーファンテック：センサベースロボットの開発，シャープ技法，57（1993）28.
- 2) 篠原 司：自動化率84%のシャープ空調工場，三次元視覚センサで配管を自動ろう付け，日経メカニカル，2（1995）30.
- 3) 永島純雄：ろう付けロボット，東芝レビュー，42，11（1987）845.
- 4) 飯塚正美，山崎 勝，伊井 肇，遠藤一彦，今井勇人：ITVカメラを用いた温度測定による自動ろう付け装置，溶接技術，7（1995）84.
- 5) 飯塚正美，山崎 勝，伊井 肇，遠藤一彦，野中康広：視覚センサを用いた高度温度場計測による自動ろう付け，溶接学会全国大会講演概要，60（1997）22.
- 6) 増田正信，友田 茂，吉川嘉男，高岡清彦，安田 博：眼鏡枠用自動ろう付け装置の開発（第2報），溶接学会全国大会講演概要，10（1993）55.
- 7) 佐藤隆康，大久保曙，黄池尚義，平田好則：紫外線放射测温法による温度分布計測，溶接学会論文集，15，1（1997）64.
- 8) 菊池正雄，加柴良裕：抵抗ろう付けにおけるろうの流動検出によるインプロセス制御，溶接学会全国大会講演概要，57（1995）474.
- 9) 薄井重昭，島村隆宏，菅 泰雄：薄鋼板のTIG溶接における溶融池形状の認識，日本機械学会第4回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集（1996）109.
- 10) 菅 泰雄，薄井重昭，島村隆宏：溶融池形状認識による溶接部の溶込み制御，溶接学会全国大会講演概要，60（1997）48.
- 11) 石丸伊知郎，白川善晴，松岡康博，川邊俊一，朴木秀行，小筆裕二：差しろう付けにおけるろう溶融域の画像計測技術による新インプロセス制御方法，1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集（1998）542.
- 12) 秦 清治：はんだ付け外観検査技術の現状，プリント回路学会第6回学術講演大会（1991）47.
- 13) 日立超小型白黒カメラKP-M1カタログ.
- 14) 国立天文台編：理科年表机上版，丸善，69（1996）519.