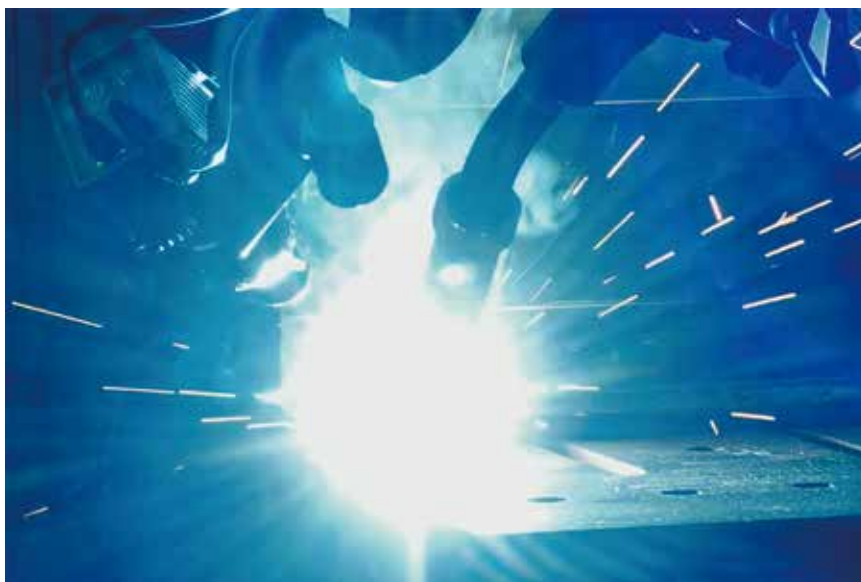


# インプロセス溶接欠陥検知に向けた溶接画像センシング技術の研究

## Study on Welding Image Sensing Technology for In-Process Welding Defects Detection

● 笠野 和輝\*  
Kazuki KASANO



アーク溶接向け画像センシング技術  
Image sensing technology for arc welding

インプロセスでの溶接欠陥検知に向け、アーク近傍の溶接現象観察技術を検証した。本研究では可視～赤外光の波長範囲にかけてアーク光の分光分析を行うとともに、種々のバンドパスフィルタを用いて溶接現象を観察し、アーク光の輝度が低く、かつアーク近傍の溶接現象が明瞭に観察可能な観察条件を検証した。その結果、1300nm近傍の赤外光波長領域の光を選択的に透過するフィルタおよび本波長領域において受光感度を有したセンサを組み合わせることにより、実操業への適用も可能な溶接画像センシング装置でアーク近傍の溶接現象の観察が可能であることを明らかにした。

An observation method for welding phenomena near arc had been verified, which purpose is to establish the technology for detecting welding defect in process in the near future. In this study, arc light which wavelength region is from visible to infrared had been performed spectral analysis, welding phenomena had been observed using variety types of optical band-pass filters, and observation condition was verified, which arc light brightness is lower and in which can be observed welding phenomena more clearly. As a result, welding phenomena near arc could be observed with combination of filter, which transmit infrared light in the wavelength region near 1300nm selectively and sensors, which are sensitive to these wavelength region, even using a welding image sensing device which can be applied to real production lines.

### 1 まえがき

アーク溶接技術は、素材同士を接合し製品を製造する上で製品品質、能率およびコストに直結するコア技術である。特にアルゴン (Ar) や炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) をシールドガスに用い、外部から溶接ワイヤを供給しながら溶接を行うガスメタルアーク溶接 (GMAW : Gas Metal Arc Welding) は施工能率に優れることから、当社において建設機械、クレーン、フォークリフトおよび船舶といった産業車両の製造に用いられている。GMAWは、ワイヤと母材との間に高温のアークを点弧させることにより、ワイヤおよび母材を溶かして熔融池を形成し、冷却・凝固の過程を経て素材同士を接合する溶接法である。

接合の過程において、溶接部では外部からのガスの巻き込みや素材同士が十分に融合しないことによる溶接欠陥が形成されることがある。こうした溶接欠陥は溶接継手強度の低下や破壊の起点となることから、現状では溶接施工後に検査工程を設け、溶接継手中に欠陥が含まれた製品が出荷されないように管理されている。一方、検査工程において溶接欠陥が検出された場合には、手直しや補修溶接が行われ、製造の能率低下やコスト増加につながる。今後製品品質、能率およびコストパフォーマンスの向上による競争力強化の観点からは、溶接中にインプロセスで溶接欠陥発生を検知し、溶接を停止させて手直しや補修溶接を行う必要性を最小限に抑える「溶接自動化」に向けた技術の開発が望まれている。

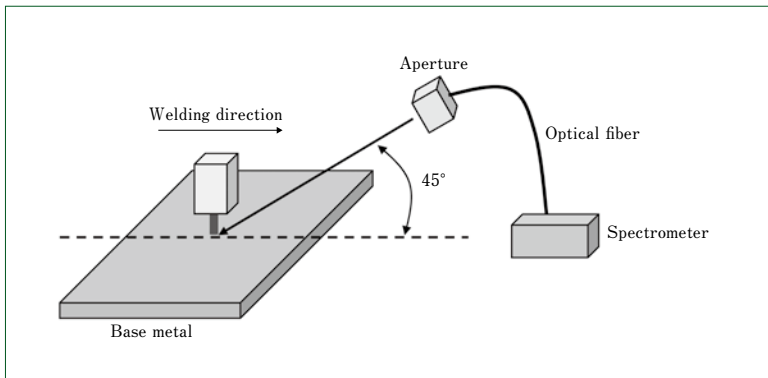


図1 アーク分光分析手法<sup>(20)</sup>  
Spectroscopic measurement method during welding

表1 アーク分光分析条件<sup>(20)</sup>  
Spectroscopic measurement conditions

Spectrometer (400-850 nm)	HR4000 (OptoSirius Corporation)
Spectrometer (900-1700 nm)	NIR QUEST (OptoSirius Corporation)
Optical fiber	P400-2-VIS/NIR (OptoSirius Corporation)
Integration time (ms)	100

インプロセスで溶接欠陥の発生を検知する技術の一例として、溶接中の電流・電圧波形を解析する手法<sup>(1)~(6)</sup>や、溶融池の形状を画像センシング技術によりモニタリングするといった手法<sup>(7)~(9)</sup>が開発されてきている。こうした技術はインプロセスでの溶接欠陥発生検知が可能であるものの、溶接欠陥発生以外の要因でも変動しやすい溶接中の電流・電圧波形や溶融池形状の変化を欠陥発生検知指標としていることから、検知精度や施工条件が変化した場合の汎用性に課題が残る。

溶接欠陥発生に伴い認められる溶接現象については、その発生メカニズムの観点から種々検討が成されてきており<sup>(10)~(15)</sup>、溶接欠陥の形成とアークのごく近傍の溶接現象が強く相関することが報告されている。すなわち、こうした溶接欠陥発生と強く相関する溶接現象を検知することが、欠陥検知精度や汎用性に優れたインプロセスでの溶接欠陥検知技術の開発につながると期待される。

アークのごく近傍での溶接現象の観察は、一般的なビデオカメラでは超高輝度なアーク光に阻害され困難である。これまでにアーク光より輝度が高いレーザー光を外部光源として用いる手法が開発され<sup>(16)</sup>広く利用されているものの、レーザー光源の安全性や光学セッティングの煩雑さから実操業での利用には課題が残る。一方、従来アーク光の輝度は紫外~可視光にかけては高輝度であるものの、より長い波長領域である赤外光波長領域では輝度が低下することが報告されている<sup>(17)</sup>。このことから、アーク光の発光特性に基づき、アーク光の発光強度が低い波長領域を選択的に透過するフィルタ、およびこうした波長領域に受光感度を有したセンサを選定することにより、外部光源を用いることなくアークのごく近傍の溶接現象の観察が可能であることが示唆されている。しかし、これまでに赤外光波長領域まで含めて溶接現象観察結果を検証した例はない。

表2 溶接条件<sup>(20)</sup>  
Welding conditions

Base metal (mm)	SM490A (200×300×12)
Joint type	Bead on plate
Welding wire (Diameter/mm)	YGW-12 (1.2)
Power source	DC nopulse mode
Current (A)	300
Voltage (V)	30
Shielding gas	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>
Welding speed (mm/s)	5
Extention (mm)	20

本研究ではこうした背景を踏まえ、溶接欠陥発生と強く相関する溶接現象を検知することにより、インプロセスでの溶接欠陥発生検知技術の実用化につながるアークのごく近傍の溶接現象観察に適した溶接画像センシング方法を確立することを目的とし、可視~赤外光波長領域におけるアーク光の発光特性およびこれらの波長領域における溶接現象の観察結果について検証した。

## 2 実験方法

### 2.1 アーク分光分析手法

図1にアーク光の分光分析手法の模式図、表1に分光分析条件を示す。溶接進行方向の前方斜め45°の位置に光学絞りをセットし、光学絞りと分光器を光ファイバで接続して計測した。分光器には紫外~赤外(400~850 nm)および赤外波長範囲(900~1700 nm)に感度を有した2種類の分光器を用いた。分光器の積算時間は計測感度が保証される100msとし、溶接が定常状態になった後に複数回計測し、計測した結果の平均値を算出した。表2に、溶接条件を示す。母材にはSM490A材の平板を用い、ビードオンプレート溶接を行った。溶接ワイヤにはφ1.2mmのYGW-12ワイヤを用いた。溶接電源はパルスなし直流モードとし、シールドガスには80%Ar+20%CO<sub>2</sub>ガスを用い、溶滴移行形態がスプレー移行となり、安定した溶接が可能な溶接電流、電圧、速度および突き出し条件とした。

### 2.2 溶接現象観察方法

図2に溶接現象観察方法の模式図、表3に溶接現象観察条件を示す。アークのごく近傍の溶接現象を観察することを目的として、カメラは溶接進行方向の前方方向45°の角度で設置し、アーク点弧部をのぞき込むようにした。カメラには可視光領域を中心に感度を有したCMOSセンサを搭載したもの

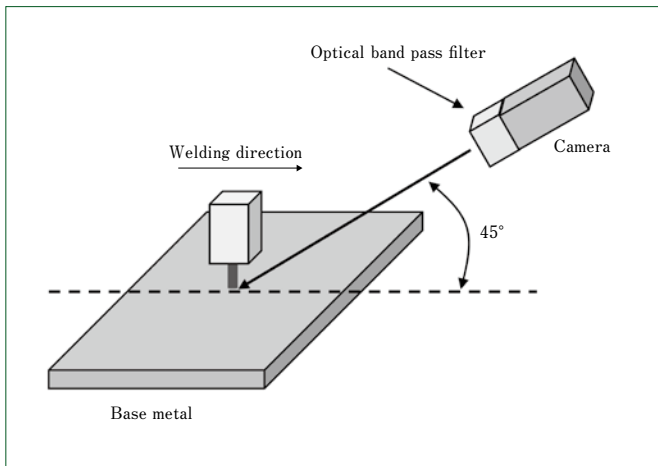


図2 溶接現象観察方法<sup>(20)</sup>  
Observation method of arc welding phenomena

表3 溶接現象観察条件<sup>(20)</sup>  
Observation conditions of welding phenomena

CMOS camera	acA2040-90 μm (Basler AG)
InGaAs camera	Bobcat320 (Xenics NV.)
Framerate (Hz)	100
Exposure time (μs)	5-10000
Transmission wavelength of optical band pass filter for CMOS camera (nm)	785
Transmission wavelength of optical band pass filter for InGaAs camera (nm)	1100, 1320
Full width at half maximum (nm)	10
Neutral density filter	ND8

と、赤外光領域を中心に感度を有したInGaAsセンサを搭載したカメラの2種類を用いた。いずれのカメラでの観察でも外部光源は用いずに溶接現象を観察した。本実験では各種波長域における溶接現象を観察すべく、それぞれのカメラに装着したレンズの先端部に、種々の中心透過波長を有する半値幅10nmの光学バンドパスフィルタ(BPF: Band Pass Filter)を取り付けた。カメラのフレームレートはともに100Hzとし、アークや溶融池の挙動を観察した。各BPFを取り付けた状態で溶接を観察し、1本の溶接ビードを溶接するなかで溶接定常部においてカメラの露光時間(E.T: Exposure Time)を種々変更し、アークや溶融池部分の輝度が異なる状態の映像を得た。溶接条件は、アーク光分光分析時と同様の表2に示す条件とした。

### 3 実験結果

#### 3.1 アーク光分光分析結果

図3に、400~850nmの波長範囲におけるアーク光分光分析結果を示す。400~650nmの波長範囲において複数の発光ピークが認められた。一方、650~850nmの波長範囲においても発光ピークは複数認められたものの、発光強度は400~650nmの波長範囲に比べると低下した。

図4に、図3より長波長側である900~1700nmの波長範囲におけるアーク光分光分析結果を示す。850nm以上ではアーク光の発光強度が400~650nm付近に比べると相対的に低下し、発光ピークもほとんど認められなかったが、900~1700nmの波長範囲のみを分光分析した結果、本波長範囲においてもアーク光の発光ピークが多数認められた。一方、1100nm付近と1300nm付近において局所的にアークの発光ピークが認められない波長範囲が存在した。

#### 3.2 溶接現象観察結果

400~850nmのアーク光分光分析結果(図3)において、アーク光の発光強度が低下し、発光ピークがほとんど認められなかった785nmの波長の光を透過するBPFをCMOSカメラに取り付け、種々のE.T.で溶接現象を観察した結果を図5に示す。E.T.が50μsではワイヤ先端部(Wire)、ワイヤが溶融し形成された溶滴(Droplet)、ワイヤおよび母材が溶融して形

成された溶融池(Moltenpool)のうち、アークのごく近傍のみが観察された。露光時間を50μsから100μsに増加させると、アーク光によるハレーションを起こした範囲(Arc)が増加し、アークのごく近傍の溶接現象の観察が困難になった。さらにE.T.を増加させると、ほぼアーク光によりハレーションを起こした箇所のみが観察された。

400~850nmに比べアーク光の発光強度が低下する900~1700nmの波長範囲において、アーク光の発光ピークが認められなかった1100nm、1320nmの波長の光を透過するBPFをInGaAsカメラに取り付け、種々のE.T.で溶接現象を観察した結果を図6および図7に示す。1100nmの波長の光を透過するBPFを用いた場合、E.T.が100μsではワイヤ、溶滴および溶融池のうちアークのごく近傍のみが観察された。露光時間を100μsから200μsに増加させると、アーク光によりハレーションを起こした範囲が増加したものの、E.T.が100μsの場合と同様にワイヤ、溶滴および溶融池部の現象が観察可能であった。また、溶融池部については、アークのごく近傍以外のより広い範囲まで観察可能であった。露光時間をさらに増加させると、アーク光によりハレーションを起こした範囲が増加し、アークのごく近傍の溶接現象の観察が困難となった。1320nmの波長の光を選択的に透過するBPFを用いた場合には、1100nmとほぼ同様の傾向であったものの、E.T.が200μsのときに溶融池部分の輝度が1100nmの場合と比べると高く、より明瞭に溶接現象の観察が可能であった。これらのことから、400~850nmの波長範囲に比べアーク光の発光強度が相対的に低下する900~1700nmの波長範囲において、アーク光の発光ピークが認められない波長の光を選択的に透過するBPFを用いることにより、アークのごく近傍の溶接現象を明瞭に観察できることが分かった。加えて、本実験では特に1300nm付近の光を選択的に透過するBPFを用いることにより、最も明瞭にアーク近傍の溶接現象を観察できることが確認された。

### 4 考察

本実験のアーク光の分光分析結果において、種々の発光ピークが認められた。アーク溶接では、アークプラズマ中に含

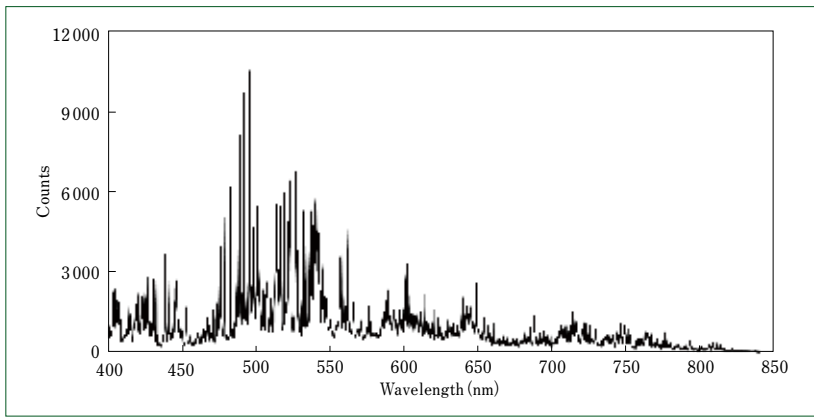


図3 アーク光の分光分析結果(400~850nm)<sup>(20)</sup>  
Spectroscopic measurement result of arc light in 400-850 nm wavelength

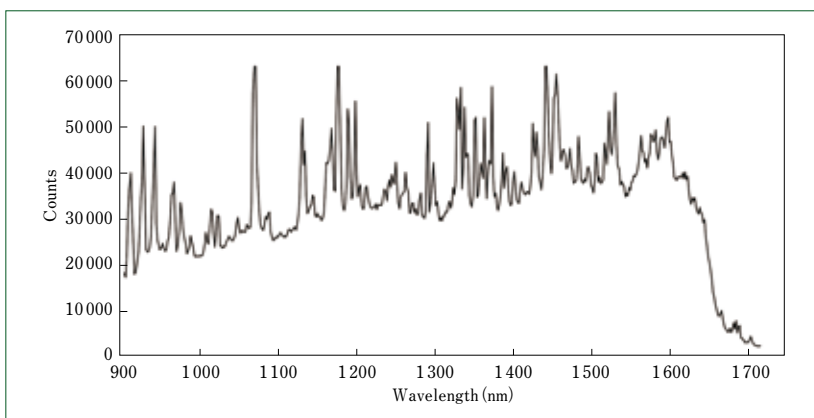


図4 アーク光の分光分析結果(900~1700nm)<sup>(20)</sup>  
Spectroscopic measurement result of arc light in 900-1700 nm wavelength

まれる元素やイオンが超高温環境下において、電子のエネルギー準位の変化に伴う離散的な発光ピークが認められることが報告されている<sup>(18)</sup>。本実験で認められた発光ピークを、米国標準技術研究所(NIST)が提供する原子発光スペクトルデータベース(ASD: Atomic Spectra Database)<sup>(19)</sup>より同定すると、主に鉄(Fe)、アルゴン(Ar)、炭素(C)および酸素(O)の発光ピークによるものと同定される<sup>(20)</sup>。これは、これまでにアーク溶接中の分光計測<sup>(21)</sup>およびアークプラズマシミュレーション<sup>(22)(23)</sup>による検証結果で報告されているように、アークプラズマ中においてワイヤや母材成分であるFeの蒸気が存在することや、アークプラズマの外縁部にArやOといったシールドガス成分が存在することが要因と考えられる。すなわち、こうした元素の発光ピークが存在しない波長範囲に中心透過波長を有したBPFを選定することにより、溶接現象を観察するうえで妨げとなるアーク光の輝度を低下させることが可能になると考えられる。

一方、発光ピークが存在しない波長範囲に中心透過波長を有したBPFを選定した場合でも、観察結果においてアーク光によりハレーションを起こした部分や、溶融池部分の見え方に差異が認められた。これは発光ピークが存在しないことによるアーク光の輝度低下だけでなく、アークのごく近傍に存在する溶融池部分の発光強度に起因するものと考えられる。

溶融池部分の発光特性は、溶融池表面温度に起因する熱放射エネルギーに基づき導出される。アーク近傍の溶融池温度は、アーク消弧直後の溶融池温度計測結果<sup>(24)</sup>から2000~2300 K程度と報告されている。図8に、Planckの放射則に基づき種々の温度での放射エネルギーを算出した結果を示す。放射エネルギーは温度が高くなるにつれ最大値が増加し、さらに最大値を示す波長が短波長側にシフトする。従来報告されている溶融池温度に近い温度である2223 Kや2073 Kでは、放射エネルギーは約800~900 nm以上の波長範囲で急激に増加し始め、1300 nm付近で最大値を示す。すなわち、アークのごく近傍の溶融池は1300 nm付近の波長の放射エネルギーが最大であり、最も発光輝度が高いと考えられる。このことが、本実験において1300 nm付近のBPFを用いたときに溶融池部まで含めて明瞭に溶接現象を観察できた要因であると考えられる。

実験と考察を重ね、アーク光の発光ピークが存在しない波長範囲、かつ溶融池の発光輝度が最大となるような波長範囲のBPFを選定するとともに、こうした波長領域に受光感度を有したセンサ搭載のカメラを組み合わせることにより、外部光源を使用せずにアークのごく近傍の溶接現象の観察が可能であることが検証できた。本研究での成果により、実作業において溶接欠陥発生と強く関連する溶接現象の観察が容易に

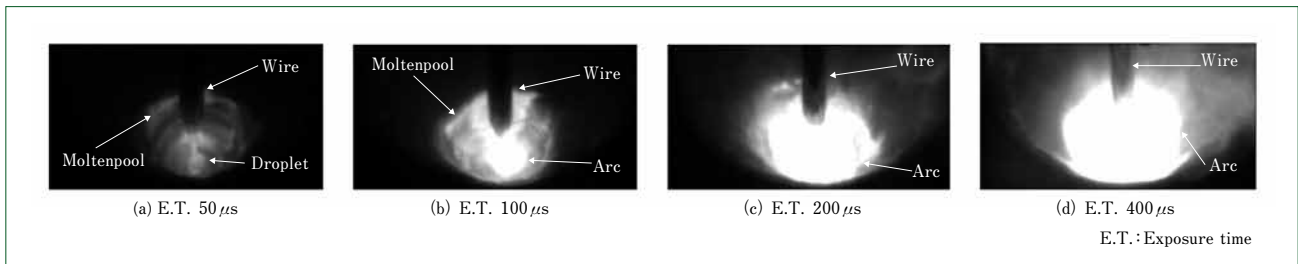


図5 溶接現象観察結果 (CMOSカメラ+中心透過波長785nmバンドパスフィルタ)  
Observation results using CMOS camera and optical band pass filter with transmission wavelength of 785nm

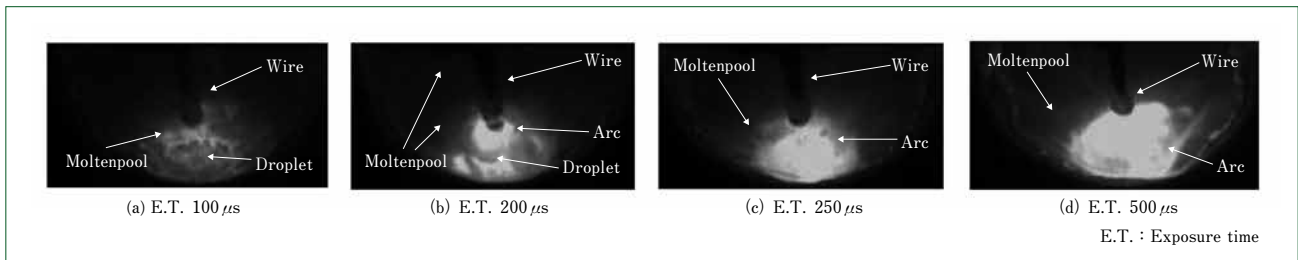


図6 溶接現象観察結果 (InGaAsカメラ+中心透過波長1100nmバンドパスフィルタ)  
Observation results using InGaAs camera and optical band pass filter with transmission wavelength of 1100nm

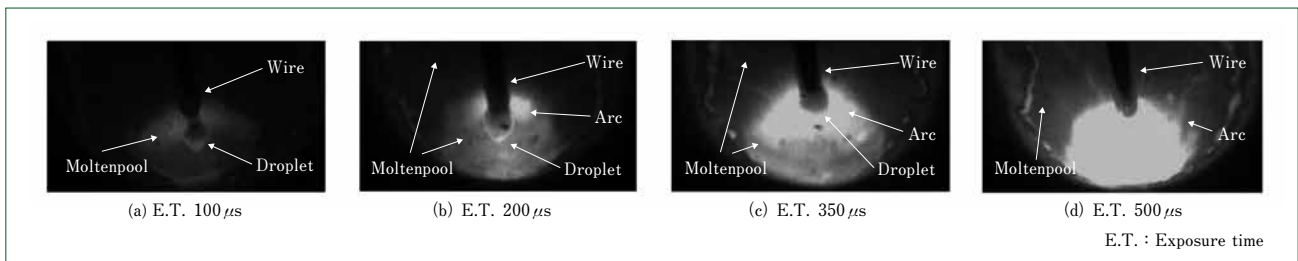


図7 溶接現象観察結果 (InGaAsカメラ+中心透過波長1320nmバンドパスフィルタ)<sup>(20)</sup>  
Observation results using InGaAs camera and optical band pass filter with transmission wavelength of 1320nm

なり、今後インプロセスでの溶接欠陥発生検知技術の実用化につながると考えられる。

## 5 むすび

本研究で得られた知見を次に示す。

- (1) アーク光の発光特性を紫外～赤外光波長領域にかけて分光分析により検証した結果、赤外光波長領域では発光輝度が紫外～可視光に比べ低下する傾向を確認した。
- (2) アーク光の輝度が低下した赤外光波長領域においてもアーク光には多数の発光ピークが認められたものの、本実験では1100nmや1300nm近傍といった波長領域において発光ピークが認められないことを確認した。
- (3) アーク光の発光ピークが認められない波長領域の光を選択的に透過するフィルタと、本波長領域に受光感度を有するセンサを組み合わせることで溶接現象を観察した結果、特に1300nm付近の波長領域を選択することにより、アークのごく近傍の溶接現象を明瞭に観察できることを確認した。

### (参考文献)

- (1) S.ADOLFSSON, A.BAHRAMI, G.BOLMSJO and I.CLAESSON, On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding, WELDING JOURNAL-NEW YORK- 78 (1999), 59-s.
- (2) Y.X.CHU, S.J.HU, W.K.HOU, P.C.WANG and S.P.MARIN, Signature Analysis for Quality Monitoring in Short-Circuit GMAW, Welding Journal 83.12 (2004), 336s-343s.
- (3) T.P.QUINN, C.SMITH, C.N.McCOWAN, E.BLACHOWIAK and R.B.MADIGAN, Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding, Welding Journal-78 (1999), 322-328.
- (4) Zhifen Zhang, Xizhang Chen, Huabin Chen, Jiyong Zhong, Shanben Chen, Online welding quality monitoring based on feature extraction of arc voltage signal, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.70 (2014), 1661-1671.
- (5) C.S.Wu, T.POLTE and D.REHFELDT, A Fuzzy Logic System for Process Monitoring and Quality Evaluation in GMAW, Welding Journal, Vol.80 (2001), No.2, 33-38.
- (6) Seungmin Shin, Min Seok Kim, Sehun Rhee, Prediction of weld porosity (pit) in gas metal arc welds, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.104 (2019), 1109-1120.
- (7) YAMANE.S, OHSHIMA.K, Sensing and Control by Fuzzy Neural Network in GMA Welding, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.66 (2000), F37-42.
- (8) Takanashi Taro, Yamane Satoshi, Nakazima Toru, Yamamoto

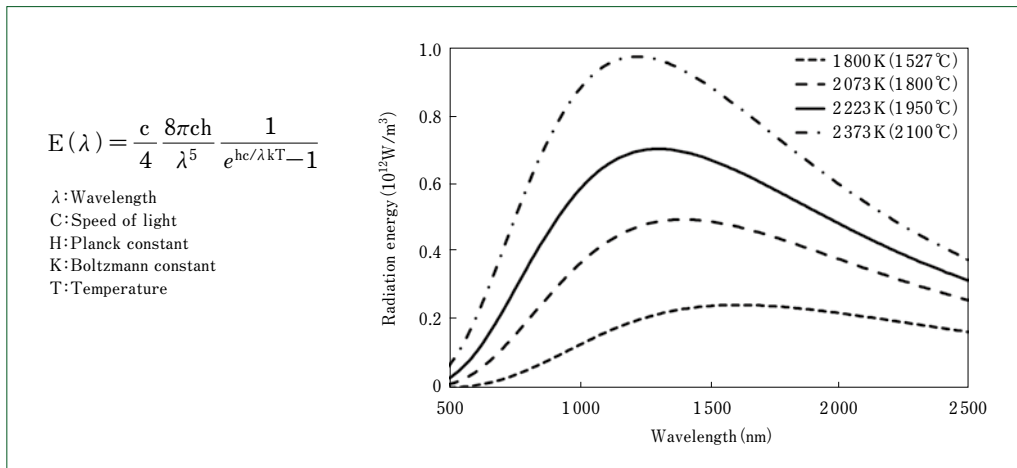


図8 プランクの放射則によるアーク近傍溶融池表面の放射エネルギー計算結果<sup>(20)</sup>  
Calculation results of radiation energy of molten pool just under arc with Planck's law

- Hikaru, Application of Visual Sensor to Plasma Arc Welding System, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, 2010f.
- (9) YAMANE Satoshi, YUZAWA Hiroki, KANEKO Yasuyoshi, YAMAMOTO Hikaru, HIRAKAWA Manabu and OHSHIMA Kenji, Image Processing and Control of Weld pool in Switch Back Welding without Backing Plate, Welding International, Vol.19 (2005), No.11, 856-861.
- (10) YAMAZAKI Kei, IZUTANI Shun, YANAGI Keiichiro, SUZUKI Reiichi, NAKAMURA Kazuki, UEDA Yuji, UEZONO Toshiro, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu, Blowholes generate phenomenon in GMAW of galvanized steel sheet, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.90 (2012), 90-91.
- (11) IZUTANI Shun, YANAGI Keiichiro, YAMAZAKI Kei, SUZUKI Reiichi, NAKAMURA Kazuki, UEDA Yuji, UEZONO Toshiro, Blowholes reduction in GMAW of galvanized steel sheet, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.91 (2012), 396-397.
- (12) YUAN Yimin, Development of Hybrid Tandem GMAW Process, Journal of The Japan Welding Society, Vol.86 (2017), 90-94.
- (13) IZUTANI Shun, YAMAZAKI Kei, SUZUKI Reiichi, UEDA Yuji, NAKAMURA Kazuki, UEZONO Toshiro, Blowhole Generation Phenomenon and Quality Improvement in GMAW of Galvanized Steel Sheet, International Journal of Automation Technology, Vol.7, No.1 (2013), 103-104.
- (14) Shoko Tsuchiya, Yoshinari Ishida, Shinji Kodama, Yasunobu Miyazaki, decreasing porosities and improvement of fatigue properties on arc welding for galvanized high strength steel sheet, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.92 (2013), 34-35.
- (15) Nobuyuki Yamauchi, Yoji Inaba, and Takao Taka, Formation Mechanism of Lack of Fusion in MAG Welding, Journal of The Japan Welding Society, Vol.51 (1982), No.10, 843-849.
- (16) AKICHIKA Akira, The Visualization of Arc Welding Phenomenon using Laser Illumination, Journal of The Japan Welding Society, Vol.83 (2014), No.8, 598-601.
- (17) Omae, Wada, Manabe, Inoue, アーク光及び溶融池光の特性解析に関する研究(Only in Japanese Title), Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.34 (1984), 66-67.
- (18) Yoji OGAWA, Imaging Analysis of Welding Phenomena, Journal of High Temperature Society, Vol.37 (2011), No.3, 99-107.
- (19) NIST Standard Reference Database 78 "Atomic Spectra Database" (<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>).
- (20) Kazuki KASANO, Yosuke OGINO, Satoshi FUKUMOTO, Satoru ASAI, Study on welding phenomena observation method based on arc and molten pool light emission characteristics in visible and infrared wavelength region, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.38 (2020), No.2, 103-113.
- (21) TODA Kaname, NOMURA Kazufumi, MIMURA Kouhei, ASAI Satoru, Study of 3D temperature measurement of arc plasma in MAG welding, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.101 (2017), 368-369.
- (22) TSUJIMURA Yoshihiro, TANAKA Manabu, Numerical Simulation of heat source property with metal vapor behavior in GMA Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.30 (2012), No.1, 68-76.
- (23) OGINO Yosuke, HIRTA Yoshinori, Numerical simulation of GMA metal transfer phenomena including arc plasma, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.33 (2015), No.1, 1-12.
- (24) YAMAZAKI Kei, YAMAMOTO Eri, SUZUKI Keiichi, KOSHIISHI Fusaki, MIYAZAKO Shigeru, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu, NAKATA Kazuhiro, The Surface Temperature Measurement of Weld Pool by Infrared Two-Color Pyrometry, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.27 (2009), No.1, 34-40.