ブローホール発生に伴う溶接現象の観察とその発生検知に向けた検証*

－画像センシングによるインプロセス溶接モニタリング技術の開発－

笠野 和輝**, 荻野 陽輔***, 福本 智****, 浅井 知***, 佐野 智一***

Observation of welding phenomena with blowholes for detection of welding defects*

－ Development of in-process welding monitoring technology with image sensing technology －

by KASANO Kazuki**, OGINO Yosuke***, FUKUMOTO Satoshi****, ASAI Satoru***, and SANO Tomokazu***

Arc welding is important technology for manufacturing that is directly linked to quality and productivity. Especially GMAW with Ar or CO₂ shielding gas is widely used in various industries because of its high productivity. To achieve high quality and productivity, in-process welding quality control technology will be required. In this study, the authors observe welding phenomena with Blowholes(BH) by using high speed cameras to develop in-process welding defects detection technology with image sensing methods. By observing welding phenomena with BH bubbling phenomena are observed just under the arc and on the surface of molten pool. It was found that the bubble generation on the surface of the molten pool is correlated with the pinhole generation, and the bubble generation just under the arc is correlated with the blowhole generation.

Key Words: Arc welding, In-process welding quality control technology, Image sensing, Welding phenomena, Defects, Blowhole

1. 緒 言

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、製品品質と製造効率に直結するコア技術である。溶接工程では製品品質を保証する為に、溶接後に検査工程を設け溶接欠陥や継手性能といった品質を担保している。一方、溶接後検査工程において品質に問題が生じた場合は、製品は補修工程に運ばれ対処される。補修工程の存在は、補修作業を実施する為に余剰の人員コストが発生する事に加え、手戻りの増加によるスムーズなモノづくりを阻害する要因となる。その為、今後より一層の製品品質と製造効率の両立に向けては、溶接後ではなく溶接中にインプロセスで異常の検知ができ、異常を検知した瞬間に溶接を停止し自工程内において対処できる事が望ましい。溶接後検査で手直しとなる要因の1つに溶接部で生じた溶接欠陥が挙げられる。溶接欠陥の中でも、ビード表面に生じるピットや外観検査では発見が困難なブローホール (Blow Hole, BH) は、グラインダーによる研削やガウジングを行った後に再度溶接を行う必要があり、手直し工数の増加および溶接欠陥低減に向けた対策を講じるのに時間を要する事につながり課題となる。

ピットの発生をインプロセスで検知する技術は従来画像センシングによる溶接中ビード表面形状検査技術が開発されている¹⁻³⁾。本技術ではピット発生を高精度に検知できるものの、ビード表面に存在するピットのみが検知対象であり、ビード内部に内在するBHの検知は不可能である。BHのインプロセス検知技術は、電流・電圧波形解析^{4,5)}に加え、溶接中の音やシールドガス流量など種々の溶接中の情報を複合して統計的に解析し、正常な条件で溶接を行った時に得られる情報を基にしきい値を設け、しきい値以上の異常が認められた時にBH発生と判別する手法⁶⁻⁸⁾が採られてきた。こうした手法は正常時の溶接と類似した施工条件下では高精度にBH検知が可能であるものの、施工条件を変更した場合には再度しきい値の設定が必要であり、しきい値の汎用性に課題が残る。また、電流・電圧波形や他の施工中の情報はBH発生を直接検知している訳ではない為、BH発生検知精度にも課題が残る。こうした溶接中の情報を統計的に解析する手法の他に、溶接ビード内部を溶接中に超音波により検査する技術も開発が成されてきている⁹⁾。本技術はBHが発生した事を直接検知できる点が特徴であるものの、BHは球状の形状を呈しており超音波での検出が難しい事に加え、設備コスト面での課題がある。以上の事から、今後更なる高品質化・高効率化に向けたインプロセス溶接欠陥検知の実現には、ビード表面のピットだけでなくビード内部に形成されるBH発生に直接関連する挙動を検知できる様な技術の開発が望まれる。BHやピットの発生要因は種々あるものの、その中でも実操業において溶接前工程での処理に起因する溶接部表面上の異物によるBHについては、その発生現象について分析が進められている。特に防錆剤である

*受付日 2020年4月30日 受理日 2020年8月26日

**正 員 住友重機械工業株式会社 Member, Sumitomo Heavy Industries, LTD.

***正 員 大阪大学大学院 工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

****学生員 大阪大学大学院 工学研究科 Student member, Graduate School of Engineering, Osaka University

Fig. 1 Schematic image of specimen for observing welding phenomena with welding defects

Zn リッチプライマーを塗布した鋼板溶接時の異物からのガス発生およびBH 形成機構については種々報告が成されており¹⁰⁻¹⁴⁾，溶融池内部にプライマーから発生したガスによる気泡が生じ¹⁵⁻¹⁷⁾，一部のガスが溶融池表面から外部に放出される気泡発生現象が観察される事が報告されている^{18,19)}．こうした溶接部表面上の異物から発生したガスによる気泡発生現象はBH 発生に強く関連する現象であると考えられ，高精度なインプロセスBH 発生検知技術の開発につながると期待されるが，これまでに溶接部の気泡発生とBH 発生検知との相関性を詳細に検証された例は無い．

本報ではこうした背景を踏まえ，高精度なインプロセスBH 発生検知技術開発を目的に，溶接部の異物から発生したガスが溶融池内部に混入し，放出される際の気泡発生現象を高速度カメラにより詳細に観察すると共に，こうした気泡発生現象とBH 発生挙動との相関性について考察した．

2. 実験方法

2.1 溶接欠陥発生に伴う溶接現象の検証方法

2.1.1 溶接試験体作製方法・溶接条件・溶接後検査方法

本実験ではBH やピットの有無による溶接現象の差異を検証する為，実験的にBH やピットを再現可能なT 字隅肉試験体を作製した．Fig.1 に本実験で用いた溶接試験体の模式図を示す．(a) は本溶接側の反対側を点状に2 点仮付けを行った．(b) は本溶接の反対・側面をシール状に仮付けすると共に，本溶接側も両端10mm の範囲をシール状に仮付けした．シール状の仮付けは実施工における箱状の製品を溶接する様な場合に内面を借り付けした後に外面を溶接する状態を模擬しており，溶接中に発生したガスがシール状の仮付け溶接部が存在する為に本溶接側と反対側から外部へ放出されず，BH が発生し易い状態を再現することを目的に施工した．(c) はシール状の仮付けに加え，溶接部に存在する異物を再現する為にZn リッチプライマー（以下，プライマーと表記）

Table 1 Welding conditions

Base metal (mm)	SM490A (50 x 100 x 12)
Joint type	Fillet joint
Welding wire (mm)	YGW-12 (1.2)
Power source	DC nopulse mode
Current (A)	300
Voltage (V)	30
Shielding gas	Ar+20%CO ₂
Welding Speed (mm/s)	5

を塗布した．プライマーの塗布方法を(d)に示す．プライマーは下板の溶接施工面全体，上板の下板と接触する面全面に塗布し，溶接中にプライマーから発生したガスが溶融池の中に混入する状態を再現した．本実験では溶融池内に混入するガスの内，混入後に外部に放出されにくいと考えられる溶融池底部におけるガス混入を想定し，上板と下板の重なり部にプライマーが塗布された試験体とした．仮付けをして組み立てた試験体に，それぞれ約90mm の溶接長で本溶接を行った．シール状の仮付けを施工した試験体およびシール状の仮付けを施工しプライマーを塗布した試験体は，本溶接の開始・終了箇所において仮付け溶接ビードと本溶接ビードが重なるように施工し，溶接始末端部において溶接部で発生したガスが外部に放出されず溶融池内に残存され易くした．

Table 1 に溶接条件を示す．母材にはSM490A を用い，2 枚の鋼板を組み合わせT 字隅肉継手とした．溶接ワイヤにはYGW-12 (φ1.2mm) を用い，溶接電源はパルス無し直流モードで電流300A，電圧30V とし，シールドガスにはAr+20%CO₂ ガスを用いた．本溶接条件では溶滴移行形態がスプレー移行となり，溶接定常部では安定した溶接が可能である．溶接速度は5mm/s とし，溶融池が常にアーク直下

に存在しており、溶融池底部で発生したガスが溶融池に混入し易い状態とした。

溶接後には溶接ビード外観の目視確認を行いピットの有無を確認すると共に、X線によるRT検査をJIS Z3104に準拠した手法で実施し、BHの有無を検証した。本研究では実操業で補修対象となる $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBHを検査対象とした。

2.1.2 溶接現象観察方法

Fig.2に溶接現象観察方法、Table 2に溶接現象観察条件を示す。Fig.2(a)に示す様に、本実験では溶接進行方向に対し前方および後方の2方向に高速度カメラを設置し、両カメラ間でシャッタータイミング同期を取った状態で前後方向からの溶接現象を同時に観察した。溶接進行方向前方に取り付けた高速度カメラは、溶接トーチに対して 45° の角度で溶接部を観察する様にし、アークにより溶融されている箇所が直接観察できる様にした。溶接進行方向後方に取り付けた高速度カメラは、溶接トーチに対して 30° の角度とし、溶融池全体が観察できる様にした。本実験では前方からの観察においてよりアーク直下部分の溶接現象を詳細に観察する為に、Fig.2(b)に示す様に溶接進行方向前方のノズルを20mm切除した。

2.2 溶接中欠陥発生検知検証方法

本実験では、実操業において溶接部の一部に異物が存在した場合を再現し、溶接欠陥が発生する箇所の検知可否を検討した。Fig.3(a)に試験体の模式図を示す。溶接継手はT字隅肉溶接継手とし、試験体組み立て前に上板および下板

の一部にプライマーを塗布した。プライマー塗布位置をFig.3(b)に示す。プライマーは下板の溶接施工面、上板の下板と接触する面に50mmの幅で塗布し、本溶接の溶接線長約280mmの内の一部に異物が存在する状態を再現した。本実験も2.1と同様に溶融池内に混入したガスの内、混入後に外部に放出されにくいと考えられる溶融池底部でのガス混入を想定し、上板と下板の重なり部にプライマーが塗布された試験体とした。更に本実験ではプライマー塗布回数を変更することによりプライマー塗布量を変え、溶接部で発生するガス量を変化させ、BHの発生傾向の変化を併せて検証した。プライマー塗布後に、膜厚計(LZ-990 / Kett社製)を用いFig.4に示す箇所のプライマー膜厚を計測し、Table 3に示す様にプライマー塗布回数により塗布量が変化している事を確認した。プライマーを塗布した上板と下板をFig.3(a)に示す様にシール状の仮付け溶接を施工し組み立て、溶接中に発生したガスがシール状の仮付け溶接部が存在する為に本溶接側と反対側から外部へ放出されず、BHが発生し易い状態を再現した。本実験における溶接条件、溶接後検査方法、溶接現象観察方法は2.1と同条件・同手法とした。

Table 2 Observation conditions

Camera (Forward)	Q1V (nac Image Technology Inc.)
Camera (Backward)	HX-7 (nac Image Technology Inc.)
Framerate (Hz)	1000
Optical band-path filter (nm)	980

Fig.2 Method for observation of welding phenomena

Fig.3 Schematic image of specimen for detecting welding defects by observing welding phenomena

Fig. 4 Schematic image of measurement position of Zn-rich primer coating thickness

Table 3 Thickness of Zn-rich primer coating

Coating times	Plate	Average thickness of primer coating (μm)
1	Upper	5.0
	Under	6.2
3	Upper	13.6
	Under	11.9

Fig. 5 Schematic image of method for blowing the molten pool with a hammer and welding phenomena observation method

Fig. 6 Schematic image of cross section image

Fig. 7 Weld bead appearance and X-ray inspection results

2.3 溶込み形成過程検証方法

溶接中の溶込み形成過程と異物からのガス発生との相関性検討、および溶接中に形成される溶融池の長さを計測する為、溶接中に試験体をハンマーでたたき落とすことにより溶融池を除去する実験を実施した。Fig.5に溶融池を除去した方法の模式図を示す。試験体にはFig.1(a)と同じT字隅肉溶接継手を用い、溶接条件も2.1と同様の条件とした。また、溶接中に溶接トーチのほぼ真上の位置から高速度カメラを用いて溶接現象を併せて観察した。溶接現象の観察はTable 2の溶接部前方からの観察と同様の条件とし、ワイヤ先端部位置を明瞭に観察しアーク点弧位置を推測する為、カメラに取り付けたバンドパスフィルタの透過波長と同じ波長のレーザー外部照明を用いアーク光の輝度を低減させて観察した。溶接中にハンマーで試験体を叩き落とし、強制的に溶接を終了させ溶融池を除去することにより、クレーター部に溶接終了直前の溶込み形成状態が保持される様にした。こうして作製した試験体について、クレーター部の形状から溶接中に形成されていた溶融池の長さを計測する

と共に、Fig.6に示す様に下板と上板が重なる箇所で切断し、図に示した観察方向で断面マクロ観察を行い、上下板との重なり部における上板方向への溶込み形成状況を確認した。

3. 実験結果

3.1 溶接欠陥発生時の溶接現象の検証

3.1.1 ビード外観観察・RT結果

Fig.7にビード外観およびX線RT結果を示す。(a)に示す点状に仮付け溶接を施工した試験体ではビード表面にピットは認められず、ビード内部において $\phi 1.0\text{mm}$ より小さいBHのみが存在した。(b)に示すシール状に仮付けした試験体も同様にビード表面にはピットは認められず、ビード内部において $\phi 1.0\text{mm}$ より小さなBHのみが認められた。BHの数は点状に仮付けした試験体に比べるとシール状に仮付けした試験体の方が多かった。一方、(c)に示すシール状に仮付け溶接を施工しプライマーを塗布した試験体ではビード表面にピットが認められると共に、ビード内部に $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBHが多数認められた。

3.1.2 溶接現象観察結果

Fig.8に溶接進行方向前方から溶接現象を観察した結果を示す。前方から観察した溶接現象は(a)に示す定常状態および(b)に示すアーク直下で気泡が発生する現象の2つに大別された。(a)の定常状態ではアークが点弧している箇所下部に溶融池が存在しており、アークにより溶融池が押し下げられる様子が観察された。気泡はFig.8(b)に示す様にアーク直下のアークにより押し下げられた溶融池表面で発生する様子が認められた。

Fig.9に溶接進行方向後方から溶接現象を観察した結果を示す。後方から観察した溶接現象は(a)に示す定常状態および(b)に示す溶融池表面で気泡が認められる現象の2つに大別された。定常状態ではアーク点弧部分から溶接部後方にかけて溶融池が形成されており、更に後方では溶融池が凝

固する様子が観察された。気泡はFig.9(b)に示す様にアーク点弧位置に近い箇所もしくは溶融池後方で発生する様子が認められた。アーク点弧位置に近い箇所での気泡はアーク近傍から流れ込んできた溶融金属により覆われ、数ms～数十ms以内に消滅した。溶融池後方で発生した気泡は消滅せず、ビード表面に残存した。Fig.10に各試験体毎に溶接中に認められた気泡発生現象を目視でカウントした回数を示す。点状の仮付けのみの試験体は他の試験体に比べ、いずれの気泡発生挙動の観察回数も少なかった。シール状に仮付けした試験体では、点状仮付け試験体に比べるとアーク直下での気泡発生観察回数が増加した。プライマーを塗布した試験体では他の2つの試験体に比べいずれの気泡発生回数も増加し、特にアーク直下の溶融池における気泡発生回数が増加した。

Fig.8 Observation results of welding phenomena from forward direction

Fig.9 Observation results of welding phenomena from backward direction

Fig.10 Number of bubbling phenomena

3.2 インプロセス溶接欠陥検知手法の検討

3.2.1 ビード外観観察・RT 結果

Fig. 11 に溶接箇所の一部にプライマーを塗布した試験体を溶接し、ビード外観観察およびX線RTの結果を示す。プライマーを1回塗布した試験体ではビード表面にピットは認められなかったものの、プライマーを塗布した箇所の近傍においてBHが認められた。一方、プライマーを3回塗布した試験体ではプライマーを塗布した箇所を含む近傍においてビード表面にピットが1箇所認められ、更にビード内部にもBHが認められた。

3.2.2 溶接現象観察結果

溶接箇所の一部にプライマーを塗布した試験体を溶接した際にも、3.1.2節で述べた気泡発生現象が同様に認められた。Fig. 12 にプライマーを1回塗布した試験体での溶接欠陥発生箇所、アーク直下および溶融池表面で観察された気泡発生現象を溶接線全長に渡り高速度カメラの映像から目視でカウントした結果から、1sec毎に気泡発生現象が観察された頻度を導出し、溶接速度からアーク直下にあたるワイヤ先端部位置を算出しプロットした結果を示す。溶接スタート位置から50mmまでの区間ではアーク直下における気泡

発生の観察が認められたものの、最大でも4回/sec程度の回数であり、本区間ではBHの発生は認められなかった。一方、プライマー塗布区間にあたる溶接スタート位置から55～105mm区間では、アーク直下での気泡発生回数が溶接スタート位置から50mmまでの区間に比べ増加した。こうした気泡発生現象観察頻度の増加と共に、 $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBHの発生が多数認められた。プライマー塗布区間通過後も溶接スタート位置から105～120mmの区間にかけては、プライマー塗布区間と同程度の頻度でアーク直下における気泡発生が観察されると共に、 $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBHの発生も併せて認められた。溶接スタート位置から120mm以降は徐々にアーク直下での気泡発生現象観察頻度は減少し、 $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBH発生は認められなかった。

Fig. 13 にプライマーを3回塗布した試験体での溶接欠陥発生箇所、アーク直下および溶融池表面で観察された気泡発生現象を溶接線全長に渡り高速度カメラの映像から目視でカウントした結果から、1sec毎に気泡発生現象が観察された頻度を導出し、溶接速度からアーク直下にあたるワイヤ先端部位置を算出しプロットした結果を示す。溶接スタートから10～50mm区間ではアーク直下での気泡発生が最大で6回/sec観察されたものの、 $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBHの発生は

Fig. 11 Weld bead appearance and X-ray inspection results

Fig. 12 Correlation between welding defects, locations and frequency of bubbling phenomena (1 time coated)

Fig. 13 Correlation between welding defects, locations and frequency of bubbling phenomena (3 times coated)

Fig. 14 Weld bead appearance and cross section image to upper plate

認められなかった。溶接スタート位置から41mmの位置において(i)に示す様な溶融池表面での気泡発生現象が溶接進行方向に対し後方から観察した結果において認められたものの、Fig.9(b)に示したアークに近い位置での気泡発生現象と類似しており、ピット発生にはつながらなかった。溶接スタート位置から50~55mmの間はアーク直下での気泡発生観察頻度は増加しないものの、 $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBHの発生が2箇所で認められた。プライマー塗布区間にあたる溶接スタート位置から55~105mmの間ではアーク直下における気泡発生現象の観察頻度が溶接スタート位置から55mmにかけての区間に比べ増加した。溶接スタート位置から93mmに溶接が達した時、Fig.13(ii)に示す様に後方から溶融池表面を観察した観察結果において、溶融池の後方の表面で気泡の発生が認められた。(ii)の気泡はFig.9(b)に示した溶融池後方における気泡発生現象と類似しており、発生

した気泡は消滅すること無く溶接終了後もピットとして残存した。溶接後にピット発生位置をビード外観観察により計測した結果、溶接スタート位置から約70mmの箇所にピットが存在していた。プライマー塗布区間通過後も溶接スタート位置から105~120mmの区間にかけてはプライマー塗布区間と同程度の頻度でアーク直下における気泡発生が観察されると共に、 $\phi 1.0\text{mm}$ 以上のBHの発生も併せて認められた。溶接スタート位置から125mm以降は気泡発生現象の観察頻度がプライマー塗布区間に比べ低下すると共に、BHの発生も認められなかった。

3.3 溶込み形状観察結果

Fig.14(a)に溶接中に試験体をハンマーにて叩き落とし、溶融池を除去した試験体のビード外観を示す。試験体のクレーター部はハンマーにて叩き落とされる直前まで溶融し

Fig. 15 Measurement result of penetration depth to upper plate

ていた溶融池の一部が外部へと流れ出した形跡が認められたものの、溶融池は完全に除去されてはならず、一部の溶融池はクレーター部に残存していた。クレーター部の溶融池が除去された部分の形状を計測した結果、溶接中に存在していた溶融池は約 18mm の長さであった。Fig. 14(b) に下板表面部における上板方向への溶込み形状を観察した結果、Fig. 15 に Fig. 14(b) のクレーター部の溶融池が存在していた箇所の前方先端部位置から溶接部後方にかけて、上板方向に形成された溶込み形状を計測した結果を示す。溶融池先端部から約 5mm 位置にかけて溶込み深さが増加し、5mm より後方では溶込み深さはほぼ変化しなかった。Fig. 16 に溶接部の真上から溶接現象を観察した結果を示す。アークはワイヤの先端部位置において点弧しており、アーク点弧部の下には溶融池が流れ込んでおりアークは溶融池上に点弧していた。溶融池先端部とアーク点弧位置との距離は約 2.9mm であった。

4. 考 察

本節ではインプロセスでの BH 発生検知技術開発に向け、溶接現象観察結果において認められた気泡発生現象と BH 発生との相関性について考察する。3.1 節において点状に仮付けをした試験体では気泡発生回数が他の試験体に比べ少なく、BH の数も同様に少なかった。シール状に仮付けをした試験体は点状に仮付けをした試験体に比べるとアーク直下での気泡発生回数が増加し、BH の数も合わせて増加した。プライマーを塗布した試験体では特にアーク直下での気泡発生回数が増加すると共に、BH の数が他の試験体に比べ著しく増加した。このことから、溶接中に発生したガスが外部に逃げにくく、且つガス発生量が増加するほど気泡発生現象が観察される回数が増加し、これに伴い BH も増加すると思われる。加えて、3.2 節において、溶接部の一部にプライマーを塗布した試験体では、主にプライマー塗布範囲で BH が発生し、この範囲においてアーク直下における気泡発生現象の観察頻度が著しく増加する事が明らかとなり、アーク直下における気泡発生現象の観察頻度と BH 発生との

Fig. 16 Observation result from directly above the weld part

間に相関性が認められた。プライマーを塗布した T 字隅肉溶接継手の BH 発生現象については従来 X 線を用いた溶融池内部の透過観察結果から、上板と下板の合わせ部から蒸発・気化したプライマーによるガスがアーク直後の溶融池内部に侵入し、BH やピットが形成されることが報告されている¹⁷⁾。プライマーの蒸発・気化挙動は近藤ら²⁰⁾、大谷ら²¹⁾により、溶込み形成部の内でプライマーの蒸発・気化温度である 1373～1473K に達した部分からガスが発生すると報告が成されている。3.3 節において溶接部の溶込み形状およびアーク点弧位置と溶融池位置を検証した結果、アークは溶融池先端部から約 2.9mm の位置で点弧しており、溶込みはこの位置よりやや後方の約 5mm の位置で最大となった。このことから、アーク直下からアーク直後においても更に溶込みが形成されており、この範囲においてもガスが発生することが示唆される。こうして発生したガスがアーク直下において外部に放出されたことにより、本実験において認められた様なアーク直下での気泡発生現象につながったと考えられる。一方、GMAW では溶滴移行に伴って溶融池内部において溶接部後方への対流が生じることが報告されており²³⁾、アーク直下で発生した瞬間には完全に外部に放出されず、一部が溶融池後方にまで輸送されると推測される。このことが、Fig. 12・13 においてプライマー塗布区間を通過後もおおよそ溶融池の長さに対応した区間において気泡発生現象が観察され、更に BH 発生も認められる要因であると考えられる。また、Fig. 13 において溶接スタート位置から 93mm の位置に溶接が達した時にその後方部の溶融池表面において気泡が発生し、気泡は消滅せずにピットとしてビード表面に残存することが確かめられた。溶接終了後にビード外観を観察した結果、ピットは溶接スタート位置から約 70mm の位置に存在していた。Fig. 14(a) で溶融池長さが約 18mm であり、気泡発生位置とピット発生位置との距離はほぼ溶融池長さに対応した距離であった。これは、上記した溶融池後方に輸送されたガスの一部が、溶融池が凝固する直前位置において外部に放出され、溶融池の後方において気泡発生現象が観察されたものと考えられる。このことから、溶接部後方の溶融池表面の気泡発生現象を観察

することにより、インプロセスでのピットの発生検知および発生位置の特定が可能であることが分かる。一方、本実験の試験体ではピット発生箇所以外で多数のBHが発生しており、BH発生箇所では溶接部後方の溶融池表面には気泡発生は認められていない。即ち、溶融池表面の気泡発生を捉えるのみではBH発生検知は困難であり、アーク直下でBH形成につながるガスが発生した瞬間の気泡発生現象を捉えることが、インプロセスでのBH発生検知に有効であると考えられる。

5. 結 言

本報では高精度なインプロセス溶接欠陥発生検知技術開発を目的に、溶接部の異物から発生したガスが溶融池内部に混入し、放出される際の気泡発生現象を詳細に検証すると共に、こうした気泡発生現象を捉えることによるBH発生検知の可能性について考察した結果、以下の様な知見を得た。

- (1) BHを実験的に再現する為に、T字隅肉溶接継手の上板と下板の仮付け方法を点付け・シール状仮付けとした試験体に加え、溶接部にプライマーを塗布した試験体を作製した。これらの試験体を溶接した結果、点状仮付けに比べシール状仮付けを施工した試験体の方が、更にシール状仮付け試験体に比べてプライマーを塗布した試験体の方がBHが多く発生した。
- (2) 上記した試験体の溶接中の溶接現象を観察した結果、溶接進行方向の前方からはアーク直下での気泡発生現象が観察された。加えて、溶接進行方向の後方からはアーク直後の溶融池表面・溶接部後方の溶融池表面での気泡発生現象が観察された。
- (3) プライマーを溶接線の一部にのみ塗布した試験体を溶接し欠陥発生箇所と気泡発生現象との相関性を検証した結果、ピットが発生した箇所では溶融池後方の表面において気泡発生が認められたものの、BH発生箇所では溶融池後方では気泡発生が認められず、アーク直下での気泡発生現象の観察頻度が増加した。
- (4) 気泡発生現象は溶接部でのガス発生に伴って観察される現象と考えられ、アーク直下の気泡発生現象を捉えることが、インプロセスでの高精度なBH発生検知に有効と考えられる。

参 考 文 献

- 1) FUJITA Yoshihiro, OGAWA Tsuyoshi, HIRANO Syozo, ASAI Satoru, OUDAKE Tatsuya and AIKAWA Tetsuro: Welding Monitoring System by using Visual Sensors - development of Welding Monitoring System for In-process Quality Control of Thick Walled Pipe (Report1) -, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.87(2010) (in Japanese)
- 2) Takashi MUROSAKI: Welding Inspection with Image Processing, Journal of The Japanese Society for Quality Control, Vol.44(2014) No.4 373-378
- 3) Yasuo Suga, Takayoshi Kawate and Tsuyoshi Nakano: Visual

- Inspection of Bead Appearance by Stereo Vision, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.64(1999) (in Japanese)
- 4) SASAKI Yosuke, DAI Yingda, HIOKI Yukio, TU Siyang and NAKATANI Mitsuyoshi: Development of Welding Defect Detection System for Robotic MAG Welding, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.99(2016) 330 (in Japanese)
- 5) HAGA Takuya, HIRATA Yoshinori and NOMURA Kazufumi: Study on generation mechanism of weld imperfection in GMA welding, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.91(2012) (in Japanese)
- 6) Shoichiro Kaihara, Masaishi Kouketsu, Tatsuo Saitoh, Takehiro Murayama, Takehiro Arakawa, Keiichi Sakai: Development of In-Process Assurance Welding System -(No.2) Application for semi-automatic TIG and MIG weldings-, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.50(1992) 230 (in Japanese)
- 7) Shoichiro Kaihara, Masaishi Kouketsu, Terumi Nakamura, Takahiro Arakawa: Development of In-Process Assurance Welding System -(No.3) Application for semi-automatic TIG-, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.51(1992) 368 (in Japanese)
- 8) Akio Tejima: Real time diagnostic system of weld quality, Journal of The Japan Welding Society, Vol.69(2000), No.4, p75 (in Japanese)
- 9) FUJITA Yoshihiro, OGAWA Tsuyoshi, HIRANO Syozo, ASAI Satoru, YAMAMOTO Setsu, MIURA Takahiro, HOSHI Takeshi and OCHIAI Makoto: Visualization System for inner defect by using Laser-Ultrasonic Testing -Development of Welding Monitoring System for In-process Quality Control of Thick Walled Pipe (Report2)-, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, 2010f, 14 (in Japanese)
- 10) Hitoshi Matsui: 亜鉛めっき鋼板におけるブローホールの発生と防止, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.57(1995) 28-31 (in Japanese)
- 11) Takenouchi Masaru, Shimizu Takao: Arc Welding of Surface-treated Steel Plates., Journal of The Japan Welding Society, Vol.60(1991) 490-494
- 12) NISHIKAWA Yutaka, SUGA Tetsuo, NAKANO Toshihiko: Gas Pocket Generation in MAG Welding of Galvanized Steel Sheet, ISIJ International, Vol.35(1995) No.10 1213-1221
- 13) IZUTANI Shun, YANAGI Keiichiro, YAMAZAKI Kei, SUZUKI Reiichi, NAKAMURA Kazuki, UEDA Yuji, UEZONO Toshiro, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu: Blowholes reduction in GMAW of galvanized steel sheet (Part1: Influence of welding material), Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.90(2012) 92 (in Japanese)
- 14) NAKAMURA Kazuki, UEDA Yuji, UEZONO Toshiro, YANAGI Keiichiro, IZUTANI Shun, YAMAZAKI Kei, SUZUKI Reiichi, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu: Blowholes reduction in GMAW of galvanized steel sheet, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.90(2012) 94 (in Japanese)
- 15) 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 (in Japanese)
- 16) 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 (in Japanese)
- 17) YUAN Yimin: Development of Hybrid Tandem GMAW Process, Journal of The Japan Welding Society, Vol.86(2017), 90-94

- 18) 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)
- 19) 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 (in Japanese)
- 20) KONDO Taiga, YAMAMOTO Motomichi, SHINOZAKI Kenji, OTANI Naoyuki, KUSABA Takuya, KIJ I Noboru: Defect Formation during Fillet Welding on Primer Coated Steel Pipe, *Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society*, Vol.103 (2018) 390 (in Japanese)
- 21) OTANI Naoyuki, KUSABA Takuya, KIJ I Noboru, KONDO Taiga, YAMAMOTO Motomichi, SHINOZAKI Kenji: Effect of Welding Conditions on Defect Formation during Fillet Welding on Primer Coated Steel, *Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society*, Vol.105 (2019) 320 (in Japanese)
- 22) Yamazaki Kei, Yamamoto Eri, Suzuki Reiichi, Koshishi Fusaki, Miyazaki 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, p34-40 (in Japanese)
- 23) KOMEN Hisaya, SHIGETA Masaya, TANAKA Manabu and FUKUNISHI Yu: Incompressible SPH Simulation of Weld pool Convection with Molten Metal Droplets in a GMA Welding, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, Vol.33 (2015), No.4, p332-340 (in Japanese)