溶接施工管理への AE 法の適用に関する研究(第2報)*

—AE 法による高温割れの検出—

菊田 米男**, 荒木 孝雄**, 千原 啓生***, 岩本 博之****

Practical Application of Acoustic Emission Detection for Welding Process (Report 2)*

—Detection of AE Signal from Hot Cracking—

by Yoneo Kikuta**, Takao Araki**, Hiroo Chihara*** and Hiroyuki Iwamoto****

AE of hot cracking has been monitored and quantitatively correlated with crack length for SUS 310S stainless steel on TIG welding. It was found that there exists a linear relationship between length of hot cracking and the total summation of AE counts, and the total summation of AE energy also.

AE signal from weld specimen can be classified three types of AE signal from their shape and frequency spectra by using the AE monitoring system.

The frequency spectra of their AE signals were distinguished, especially, the different distribution of frequency band from DC to 400 kHz. It is considered that the source of A type AE signal was generated at hot cracking, the type B one was generated from sound of friction between weld specimen and jig, and the type C was generated from arc noise only during welding.

These classification of AE signals could be useful for the practical application of acoustic emission monitoring to welding situations.

1. 緒 言

前報¹⁾において、本研究で構成した AE 計測解析システムは DC~1 MHz の周波数帯域幅で、波形解析および、周波数解析が可能であることを示した。また、実際に溶接作業の監視に本システムを適用することを想定して、擬似 AE 音源を用いて、溶接時と同様の状態におかれた溶接試片からの AE 波の検出状況を調べ、その結果から本システムは十分な精度でもって解析していることを明らかにした。

そこで、本報は、まず自動 TIG 溶接により SUS 310 S ステンレス鋼にビードオンプレート溶接を行ない、人為的に高温割れを発生させ、その割れ長さと AE およびノイズの発生状況との関係、AE およびノイズ信号の発生回数、信号の振幅分布、および信号の有するエネルギー等について調べた。さらに、溶接中あるいは溶接後に発生する信号をランダムに波形解析および周波数解析し、溶接時に発生するノイズを含めた種々の音のスペクトラムを DC~1 MHz の周波数帯域幅で調べた。

2. 供試材料および実験方法

2.1 高温割れ実験

供試材料は人為的に高温割れを発生させるために高温割れ感受性の高い SUS 310 S ステンレス鋼を選択した。

試片形状は 200 mm 長さ、100 mm 幅および板厚 3 mm とした。TIG 溶接は定格出力電流 500 A の定電圧特性の直流アーク溶接電源を用い、1パスビードオンプレートで、裏波ビードを伴って行った。溶接条件は正極性、アーク長 3 mm で、溶接電流 210 A、溶接電圧 12 V、溶接速度 30 cm/min (溶接入熱 5 KJ/cm) を目標としてアルゴンガス 10 l/min でシールドして行った。

溶接試片は Fig. 1 に示すごとく治具に固定し、板の他端は高温割れを人為的に発生させるため固定しなかった。なお、溶接試片はアークが定常な状態で溶接が開始できるように、ランオフタブ板を設置した。

トランスデューサはグリスを介して Fig. 1 に示す位

*原稿受付 昭和58年3月3日 (昭和58年度溶接冶金研究委員会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正 員 大阪大学大学院 (現在日立造船(株)) Member, Graduate School, Osaka University (Present Address: Hitachi-Shipbuilding & Co., Ltd.)

****学 生 員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate School, Osaka University

Fig. 1 Appearance of specimen restricted by restraint plate, transducer and torch of automatic TIG welder.

置に取り付けた。トランスデューサによって検出された信号はプリアンプで 40 dB に増幅し、ディスクリミネータでさらに 10 dB 増幅し、しかる後に信号処理系へ入力した。

高温割れは拘束していない側の板端部から 40 mm までの種々の溶接線を溶接して大きな面内回転変形および溶接線方向のたわみにより発生させた。例えば、板端部から 20 mm の場合は Fig. 1 にて ① から ⑩ に向かって溶接した。割れ長さはその板端部から溶接線までの距離を種々変えて変化させた。なお、板端部から 40 mm の溶接線 (Fig. 1 にて ⑪ から ⑳ に向かって) を溶接した場合割れが生じなかった。

アークノイズの発生状況だけを検出する場合溶接試片はゴム板の上にグリスを塗布し、その上に載せて溶接に供した。これにより、溶接試片と治具との間に生じる摩擦音は発生しないようにした。

AE 計測時間は TIG 溶接トーチのタングステン電極がタブ板から溶接試片上に移行した時点から、溶接終了後、SUS 310 S の脆性温度領域が 1430℃～1360℃²⁾ であるため、クレータ部の温度が 1000℃ となる約 10 秒後までとした。

2.2 検出された信号の波形および周波数解析法

溶接中および溶接後約 10 秒までに、発生する高温割れからの AE 信号およびノイズ信号をランダムにトランジェントレコーダに記憶させ、その出力をシンクロス

コープおよびスペクトラムアナライザに入力し、波形および周波数解析を行った。この際、ディスクリミネータから得られる平均値出力とトランジェントレコーダの READ 出力とを同時に電磁オシロスコープで記録して、どの信号がトランジェントレコーダに入力されたかを明確にした。

3. 実験結果および考察

3.1 高温割れからの AE およびノイズの発生状況

Fig. 2 はディスクリミネータの平均値出力と電磁オシロスコープによって記録した AE およびノイズの発生状況のオシログラムを示す。まず (a) はアークノイズのみを検出した状況を示す。(b) は板端から 40 mm の位置を溶接して高温割れが生じなかった正常な溶接時に発生する信号の検出結果を示す。(c) および (d) は高温割れが 113 mm および 176 mm 生じた時の AE およびノイズ信号の発生状況を示す。

Fig. 3 は一例として高温割れの観察結果を示す。高温割れは溶接開始部から生じ、アーク直下の約 10～20mm 後方の位置を追従し、肉眼的にはほぼ連続して観察された。

これらのオシログラムを比較すると、Fig. 2(a) では

Fig. 2 AE and some noises from four different quality welds recorded by oscilloscope, (Total gain 50 dB).

Fig. 3 Appearance of the bead with hot crack, welding condition; $I=220$ A, $V=12.2$ V and $v=30$ cm/min.

溶接終了後、全く信号が出ていない。これらは溶接中に発生している信号はアークノイズと考えられ、このノイズのレベルは低いことが知られる。また、Fig. 2(c) および (d) では、高温割れが生じると、AE 信号の発生回数が多く、振幅の大きな信号が検出された。

3.2 割れ長さ と AE 発生状況

Fig. 4 は Fig. 2 のそれぞれの条件でのイベント数および振幅を測定し、振幅分布を示す。なお、この時、オシログラム上の平均値振幅は、 0.04 V をスレッシュホルドレベルとして、イベント数に数えた。Fig. 4(a) および (b) において振幅分布およびイベント数はほとんど差異がないが、Fig. 4(b) の割れの無い正常な溶接の場

合の方が若干、振幅分布が広がり、イベント数も増加していた。このことは Fig. 4(a) にて、溶接試片をグリスを塗布したゴム板上に設置し、アークノイズのみを検出したのに対して Fig. 4(b) では割れは生じないが、試片と治具間にすべり摩擦が生じ、その摩擦音による分だけ、振幅分布の広がりおよびイベント数が若干増加したものと考えられる。

この正常な溶接に対して、Fig. 4(c) および (d) の高温割れが生じた場合、AE およびノイズ信号の発生回数は多く、振幅分布も大きく布がり、割れ長さが長くなるほどこの傾向が顕著に観察された。このことから、正常な溶接の場合の結果 (Fig. 4(b)) と高温割れが生じた溶接の場合の結果 (Fig. 4(c) および (d)) について、発生回数および振幅分布の差は高温割れから生じた AE 信号によるものと推察された。

Fig. 5 は割れ長さとおシログラムからノイズ信号をも含めた AE 信号の総イベント数との関係を示す。図中△印は、アークノイズのイベント数を示し、割れ長さが増加してもアークノイズのイベント数がほぼ一定とすると割れ長さが増加するにしたがって割れの発生に伴う AE 信号および試片と治具との摩擦音からの AE 信号のイベント数が増加する。

Fig. 6 は計測期間中に発生した AE およびノイズのも

Fig. 4 Amplitude distribution of AE and noise signals illustration in Figure 2 (a), (b), (c) and (d), (Threshold; 0.04 V at averaged amplitude).

Fig. 5 Influence of crack length on AE counts, (Threshold; 0.04 V at averaged amplitude).

Fig. 6 Influence of crack length on AE energy, (Threshold; 0.04 V at averaged amplitude).

つエネルギーと割れ長さの関係を示す。AE のエネルギーは AE の振幅の二乗に比例するものとして表わされるため^{3,4)}、縦軸は平均値出力電圧を二乗し、それにイベント数を乗しその総和を示す。AE 波のエネルギー総和は高温割れが発生すると直線的に増加した。したがって計測した AE 信号はアークノイズの信号および摩擦音の信号も含まれているものの、高温割れからも AE が生じるものと判断される。

3.3 検出された信号の波形および周波数解析

Fig. 7 は前述のごとく溶接中および溶接後に発生する信号を周波数解析した結果の典型例を示す。Fig. 7(a) は割れ長さ 151 mm の時に発生した信号のうち2つを、Fig. 7(b) は割れ長さ 50 mm の時に発生した信号のうち3つを周波数解析した結果をそれぞれ示す。また Fig. 7(c) は割れ長さ 28 mm の時の結果であり、溶接終了後

Fig. 7 Examples of frequency analysis, (Total gain 50 dB).

長時間経過して発生する信号、とくに溶接終了後長時間経過して発生する信号の音源が溶接試片と治具との摩擦音についても解析した。

このようにランダムに信号を周波数解析した結果、これらのパターンを分類すると Fig. 8 に示すとき Type A, Type B, Type C およびその他の 4 種類に分類される。周波数スペクトラムは横軸を DC~1 MHz(100KHz/Div)、縦軸を 10 dB/Div として示した。

Type A の波形は立上りの非常にはやい突発型の AE 信号にみられる波形を示しており、その振幅は大きい。また、周波数スペクトラムは、100 KHz から 400 KHz の間に 2 ないし 3 個のピークをもち、そのピークを示す周波数成分が主となっているものと考えられる。

Type B は立下りのゆるやかな波形を呈し、振幅は Type A に比して小さい。その周波数スペクトラムは 50 KHz から 300 KHz あたりまで比較的平坦なパターンを呈するのが特徴として認められた。

Fig. 8 Classification of frequency spectra and signal shapes, (Total gain 50 dB).

Type C の波形は正弦波のような様相を示しており、波形から単一の周波数成分のみと思われる。周波数スペクトラムは約 100 KHz 付近に 1 つのピークを有していた。

なお、Fig. 8 の Others は上記のいずれにも属さない波形をその他としたが、全周波数成分に渡ってほぼ一定値を示す波形が認められた。この波形はわずかしら認められなかった。

また、これらの周波数スペクトラムは、とくに DC～400 KHz の周波数帯域幅で大きくそれぞれのパターンの差異が認められた。

さてこのように 4 種類の周波数スペクトラムのパターンが認められたが、そこで、前出の Fig. 8 におけるオシログラムと対応して上記の 4 つの周波数スペクトラムおよび波形を呈する音源を検討した。

Fig. 7(a) のオシログラム上に示された周波数スペクトラムのうち、最初の信号は Type B、後の信号は Type A であった。この溶接試片では高温割れが 151 mm 生じていたが、Type A はこのような割れが生じた場合に認められ、割れが生じない溶接では見られなかった。こ

のため、Type A は高温割れが音源となったものと考えられる。

Type B は Fig. 7(a) (b) および (c) を含めてすべての溶接時に認められ、さらに Fig. 7(c) に示した d のごとく溶接終了後アークを消弧した静かな環境下で認められた。したがって、Type B は溶接試片が溶接熱によりたわみ変形を伴う場合の治具間にて生じるすべり摩擦音が音源となっているものと考えられる。

Type C は Fig. 7(b) の最初の信号、a、および Fig. 7(c) の第二番目の信号、b、に認められ、溶接中に発生し、溶接後では全く認められなかった。また Type C を呈する信号は振幅がいずれも小さく Fig. 4(a) の実験結果からも、アークノイズが音源であると考えられる。

4. 結 論

本報では、TIG 溶接により SUS 310 S ステンレス鋼を溶接し、人為的な高温割れの再現試験を行った。溶接中および溶接後の AE およびノイズの発生状況は AE 計測解析システムによりモニターし、割れ長さとも AE およびノイズの信号の発生回数、振幅分布およびエネルギー

ギーとの関係を調べた。得られた結果を要約すると以下のごとくであった。

(1) 高温割れが生じると AE 信号の発生回数は多くなり、小振幅の AE だけでなく、大きな振幅の信号も発生する。

(2) 発生する信号の周波数および波形を解析すると周波数スペクトラム、波形のパターンに差異が認められ、それらを Type A、Type B および Type C の三種におおむね分類することができた。

(3) それらのパターンとオシログラムにおける AE 発生状況と対応させると、それぞれの音源は Type A が高温割れ、Type B が摩擦音および Type C がアークノイズであることが知られた。

(4) これらの周波数スペクトラムのパターンは特に、

DC から 400 KHz の周波数帯域幅で顕著な差異が認められ、AE とノイズ信号の識別が周波数および波形解析により識別しうようになった。

本研究の一部は、昭和57年文部省科学研究費、一般研究 (A) (代表、菊田米男) として実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 菊田米男, 他; 溶接施工管理への AE 法の適用に関する研究 (第 1 報), 溶接学会論文集, 1, No. 3, (1983), 139
- 2) 松田福久, 他; Trans-Verestrain 試験法による溶接金属凝固割れ感受性の研究, (1), 溶接学会誌, 41, No. 6, 1972.
- 3) 入江隆博; 鋼の遅れ破壊伝播現象へのアコースティック・エミッション法の適用, 49年, 大阪大学修士論文
- 4) 岸輝雄, 他; 破壊靱性試験における AE "Acoustic Emission の金属学 (10) 金属, Vol. 48, No. 1, Jan., 1978

溶接施工管理への AE 法の適用に関する研究(第3報)*

—高温割れにおける AE 信号とノイズ信号の識別方法—

菊田 米男**, 荒木 孝雄**, 千原 啓生***, 岩本 博之****

Practical Application of Acoustic Emission Detection for Welding Process (Report 3)*

—Classification of AE Signal from Hot Cracking and Others Noise Signal—

by Yoneo Kikuta**, Takao Araki**, Hiroo Chihara*** and Hiroyuki Iwamoto****

In previous work, the detected shapes and frequency spectra of AE signals were distinguished from AE signal of hot cracking and arc noise in the frequency band of DC to 400 kHz. This work was carried out to distinguish the all of these AE signals from hot cracking test during TIG welding for SUS 310S stainless steel with the AE monitoring system added data recorder and analyzed fully the AE signals in the frequency band from 290 Hz to 320 kHz.

The shape of AE signal from hot cracking had a larger amplitude than the sound of friction and the one of arc noise, and its frequency spectra had the A type shape which had 2 or 3 peaks in the frequency band from 290 Hz to 320 kHz. Fracture surface of hot cracking consist of dendritic boundaries and divided into two region of liquidus phase and solidus phase in just welding. The fractographic observation confirmed that the histogram of the A type of AE signal correspond closely to the area of solidus phase region. Therefore, the A type of AE signal generated at hot cracking.

*原稿受付 昭和58年3月3日 (昭和58年度溶接冶金研究委員会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正 員 大阪大学大学院 (現在日立造船(株)) Member, Graduate School, Osaka University (Present Address: Hitachi-Shipbuilding & Co., Ltd.)

****学 生 員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate School, Osaka University