インプロセスモニタリングを用いたＹＡＧレーザー溶接による高信頼性溶接部品生産法

中村　奨*　　廣井　晃**　　田中　栄策**　　伊藤　義郎***

Production of welding parts with high reliability by YAG laser welding using in-process monitoring

NAKAMURA Susumu,　HIROI Akira,　TANAKA Eisaku　and　ITO Yoshiro

抄録

健全性の高い，軽量化された溶接部を得ることを目的として，ＹＡＧレーザーによるビードオンプレート溶接並びに突き合わせ溶接を実施した。さらに溶接品質の保証技術を確立するために，発光・音響信号による溶接性状のモニタリングを行ったので報告する。

1　緒言

自動車用部品であるオイルパンのプラグシール部など溶接を伴う密閉製品の加工においては，リークタイトな溶接部を得るために，従来はＭＩＧ溶接により過剰量の溶融金属を接合部に付与することで，安全率を見込んだ生産が行われてきた。しかし，材質の違いや熱膨張係数の差による残留応力などのために，溶接材と本体材料との界面などに割れが入りやすく，加工後の全数検査を必要としていた。

本研究の目的は，局部的に高い熱入力が得られ，溶け込みの深いビードを形成することが可能なＹＡＧレーザー溶接を加工に適用することで，健全性の高い，軽量化された溶接部を得ようとするものである。ＹＡＧレーザーは光ファイバー伝送が可能であるためフレキシブルな生産ラインを組むことができる。さらに溶接品質の保証技術を確立するために，筆者らがCO_2レーザー溶接において培ってきたプロセスモニタリングの技術[1－4]をＹＡＧレーザー溶接にも適用し，溶け込み深さなどの溶接性状の評価・判定を試みた[5]。

*　長岡工業高等専門学校 電気工学科
**　長岡レーザー技術研究会
***　長岡技術科学大学 工学部 機械系

2　実験

実験装置の概略を図１に示す。実験に使用したレーザーは，新潟県工業技術総合研究所レーザー応用研究室に設置されている出力４kWの連続発振ＹＡＧレーザー（IHI iLS-YC-40A）である。レーザービームはコア径１mmの光ファイバー伝送によりノズル先端から出射する。焦点でのビーム直径は0.7mmであった。レーザー出力，ビームノズル移動速度を変えることにより，異なった溶接性状，即ち溶け込みの浅い熱伝導型溶接から溶け込みの深いキーホール型溶接までを作り出した。ビーム照射時には，シールドガスとしてアルゴンガスを30l/minの流量

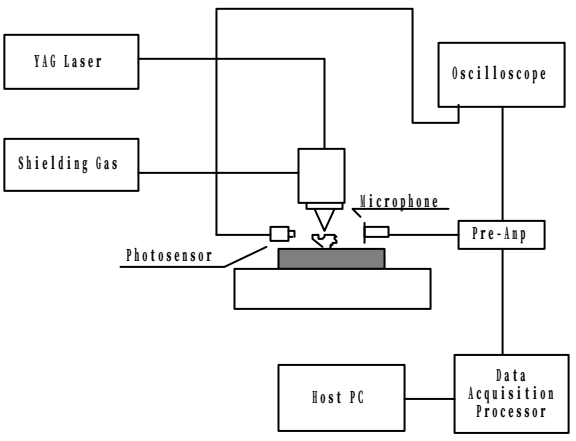

図１　実験装置の概略

で流した。試料には板厚６㎜のSS400とSUS304を使用した。それぞれの材料に対してビードオンプレート溶接と突き合わせ溶接を実施した。溶け込み深さ，ビード幅は，ビード断面の顕微鏡観察により評価した。

溶接性状をモニタリングするために，レーザービーム照射時，加工部から発せられる発光・音響信号を計測した。発光信号は 190－1100nm まで波長感度のある Si フォトダイオード（浜松ホトニクス S2281）を使用した。音響信号は 3-40kHz まで計測可能なコンデンサマイクロフォン（Bruel & Kjaer Type 4191）を使用した。センサーからのアナログ出力は，デジタルオシロスコープ（LeCroy LT-264M）によりデジタル化した後，コンピューターに取り込んだ。周波数解析などの信号処理は，解析ソフト Lab View を使用してコンピューター上で行った。

３　実験結果

３.１　ビードオンプレート溶接

３.１.１　SS400

図２は SS400 における各レーザー出力での溶接速度対溶け込み深さの関係を示す。溶接速度の増加に伴い溶け込み深さはスムーズに減少していることがわかる。図３は規格化した溶接性状，即ちアスペクト比（溶け込み深さ/ビード幅）で溶接結果を整理したグラフである。ビード断面の観察より，熱伝導型から深溶け込み型への溶接性状の遷移は，アペクト比 0.4 を境に行われていることを確認した。レーザー出力１kW では溶接速度 1-2m/min の領域で，1.5kW，2kW では 4-6m/min の領域で，2.5kW では 6-8m/min の領域で，そして 3kW，3.5kW では 8-10m/min の領域で溶接性状が遷移していた。

図４は，レーザー出力２kW，溶接速度１m/min の条件下で計測された発光・音響信号の時間変動である。発光信号には周期的に強いピークが現れている。また音響信号の変動周期は発光信号のそれよりも非常に早い。

図２，図３に示した溶接性状と発光・音響信号との相関について検討した。図５上図は溶け込み深さと発光強度との関係を示す。ここで発光強度とは，ピーク最大値を意味している。レーザー出力 3.5kW，3kW および 2.5kW の場合，発光強度は溶け込み深さとは無関係におよそ 0.6V と一定である。しかし出力が 2kW 以下になると，溶け込み深さ 0.4mm を境に発光強度は急激に低下している。これは出力が低下

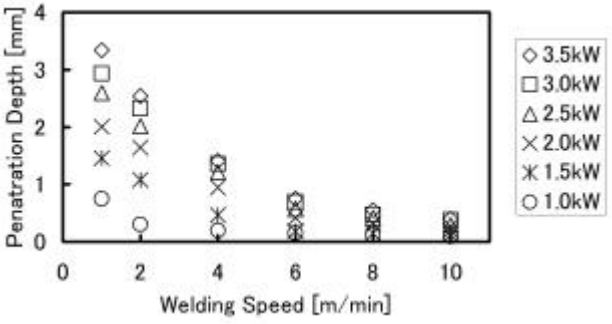

図２　溶接速度と溶け込み深さの関係：SS400

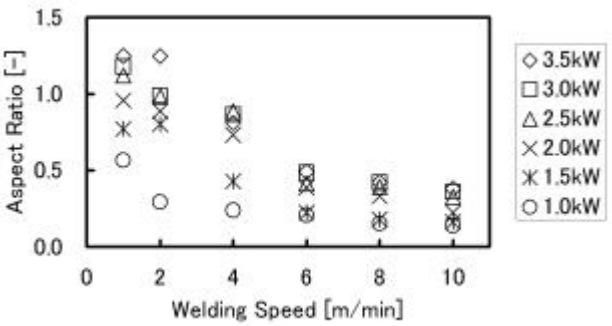

図３　溶接速度とアスペクト比の関係：SS400

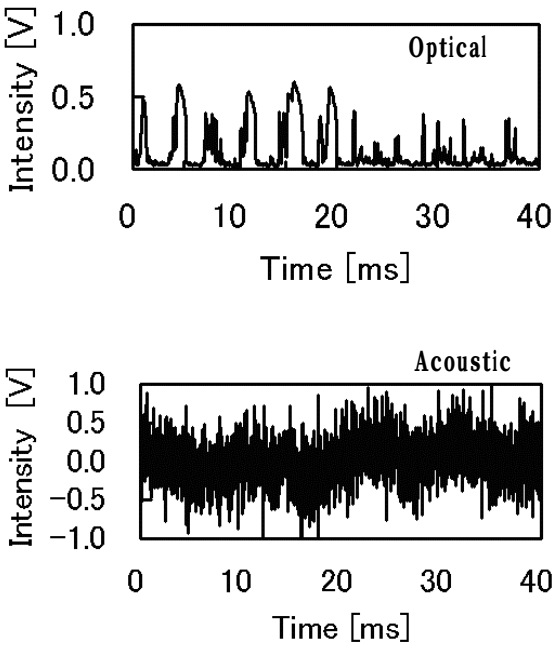

図４　発光信号と音響信号の時間変動：SS400
レーザー出力：２kW　溶接速度：1m/min

することにより，加工部表面に発生するレーザー誘起プラズマが収縮することを意味している。この溶け込み深さ0.4㎜はアスペクト比で表せば0.4となる。前述したようにアスペクト比 0.4 は，溶接の遷移点に対応している。したがって，発光強度の変化から溶接の遷移点を評価することが可能であることがわかる。

図５下図は溶け込み深さと音響強度との関係を表している。音響強度は信号の最大振幅を意味している。各出力において音響強度は溶け込み深さに対して非常に緩やかに変化している。したがって音響強度の変化から，溶接の遷移点を明確に見出すことはできない。

レーザー出力２kW，溶接速度１m/min の条件下で計測された発光・音響信号の周波数スペクトルを図６に示す。この条件では溶け込みの深い溶接が得られている。発光スペクトルの主立ったピークは５kHz 以下に現れている。これに対して音響スペクトルにはよりはっきりとしたピーク群が現れている。発光強度と異なり１kHz 以下の領域のスペクトルは比較的小さく，2-4，6，10，12kHz 領域に大きなピークが現れている。

このような発光・音響信号のスペクトル解析から以下のことが明らかになった。

① 深溶け込み型溶接の場合には，音響スペクトルにおいて2-4kHz帯の周波数成分が大きく現れる.

② 熱伝導型溶接の場合には，発光・音響スペクトルともに平坦なスペクトルになる.

したがって，周波数変動に注目することで，溶接性状との相関が取れるものと予想される。

この結果に基づき，周波数スペクトルの低周波数帯と高周波数帯との信号強度の比を取り，アスペクト比との相関について検討した。図７は発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係を示す。信号強度比を求めるにあたって低周波数帯には，深溶け込み型で音響スペクトルに必ず大きなピークが現れる 2-4kHz 帯を採用し，高周波数帯には発光信号では 22-25kHz 帯，音響信号では 32-35 kHz 帯を採用した。即ち発光信号の強度比は 22-25 kHz 帯/2-4kHz 帯であり，音響信号の強度比は 32-35kHz 帯/2-4kHz 帯である。図に示されているように，発光・音響信号のどちらにおいてもアスペクト比の増加とともに信号強度比は急激に減少し，その後一定の値をとることがわかる。発光信号はアスペクト比 0.4 付近を境にプロットの勾配が急激に変

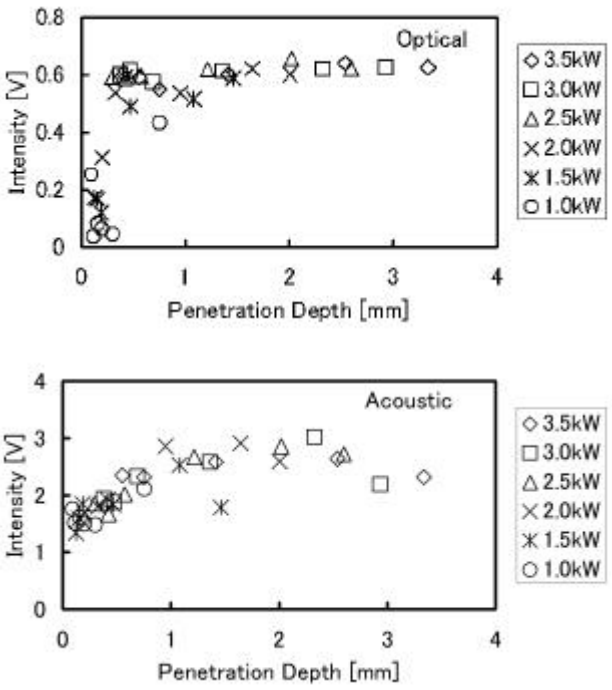

図５　溶け込み深さと発光・音響強度の関係：SS400

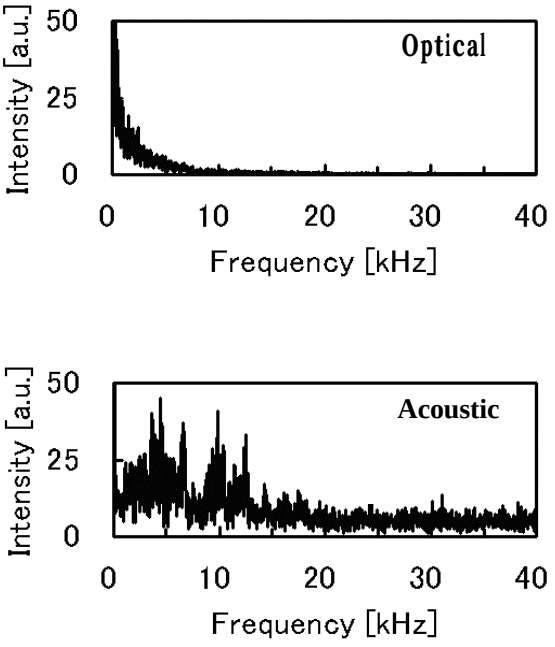

図６　発光・音響信号の周波数スペクトル：SS400
レーザー出力：２kW　溶接速度：１m/min

化している。またその時の信号強度比はおよそ 0.1 である。音響信号でも同様に，信号強度比はアスペクト比 0.4 付近まではその増加に逆比例して減少するが，その後プロットの勾配は一定となる。また，その時の信号強度比はおよそ 0.4 である。前述したようにアスペクト比 0.4 は溶接性状が熱伝導型から深溶け込み型に変化する遷移点である。したがって，信号強度比をモニタリングすることで，熱伝導型か深溶け込み型かの溶接性状を評価することが可能であると言える。溶接性状の遷移点付近で信号強度比が大きく変化するのは，キーホール内部でプラズマの挙動が乱れ，それが発光信号と音響信号に影響を及ぼすためであると考える。

３.１.２　SUS304

図８に発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係を示す。発光信号の強度比は 22-25kHz 帯/2-4kHz 帯であり，音響信号の強度比は 32-35kHz 帯/2-4kHz 帯である。図に示されているように，発光・音響信号のどちらにおいてもアスペクト比の増加とともに信号強度比は急激に減少し，その後一定の値をとることがわかる。発光信号は，溶接性状が熱伝導型から深溶け込み型に変化するアスペクト比 0.4 付近を境に，プロットの勾配が一定となる。またその時の信号強度比はおよそ 0.1 である。音響信号でも同様に，信号強度比はアスペクト比 0.4 付近まではその増加に逆比例して減少するが，その後プロットの勾配は一定となる。また，その時の信号強度比はおよそ 0.3 である。したがって SUS304 においても SS400 と同様に，信号強度比をモニタリングすることで，熱伝導型か深溶け込み型かの溶接性状を評価することが可能であると言える。

３.２　突き合わせ溶接

３.２.１　SS400

図 9 は SS400 における各レーザー出力での溶接速度対溶け込み深さの関係を示す。溶け込み深さは溶接速度の増加に伴いスムーズに減少しているが，6 m/min 以上の速度ではほぼ一定の値となり，ビードオンプレート溶接に比べれば高速度域でもある程度の溶け込みが得られている。図 10 は溶接速度対アスペクト比の関係を表している。前述したように，高速度域でもある程度の溶け込みが得られているため，溶接速度に対するアスペクト比の減少傾向は小さい。

発光・音響信号の信号強度と溶接性状との相関に

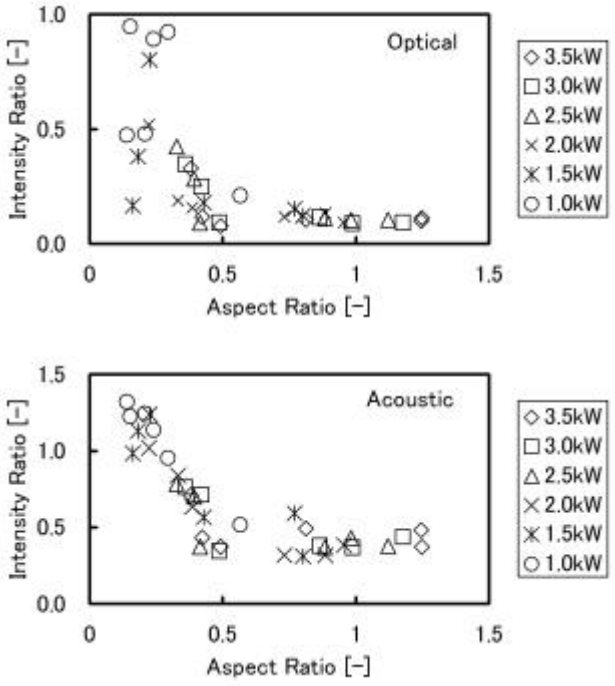

図７　発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係：SS400

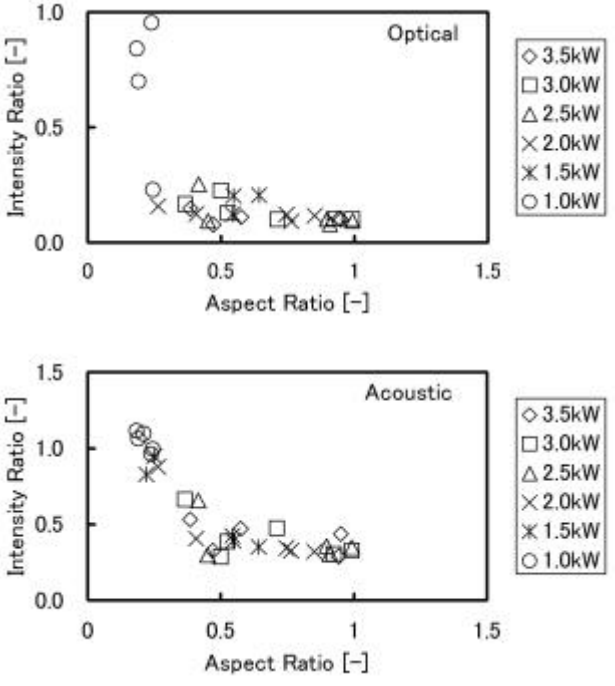

図８　発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係：SUS304

ついて検討した。その結果を図 11 に示す。出力 1 kW の場合を除いて，発光強度は溶け込み深さとは無関係にほぼ一定の値を示す。したがって発光信号の強度変化から，溶接性状を評価することは難しいことがわかる。音響信号についても，各出力において，その強度は溶け込み深さに対して非常に緩やかに変化しており，溶接性状を評価することはできない。

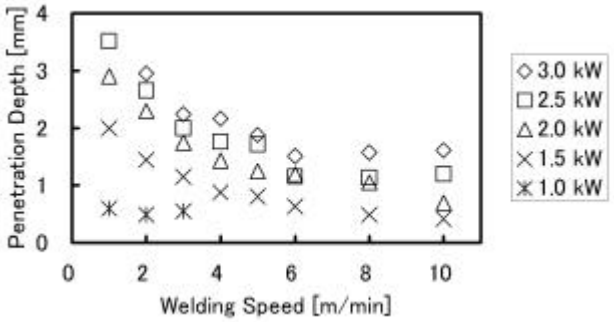

図９　溶接速度と溶け込み深さの関係：SS400

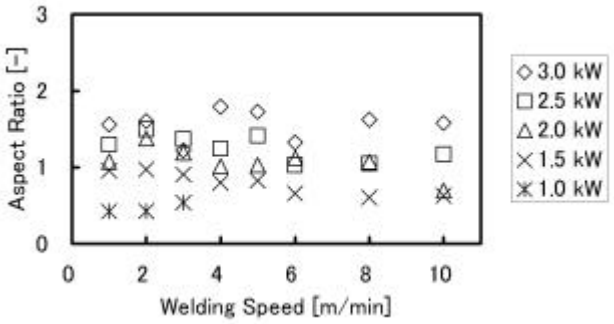

図 10　溶接速度とアスペクト比の関係：SS400

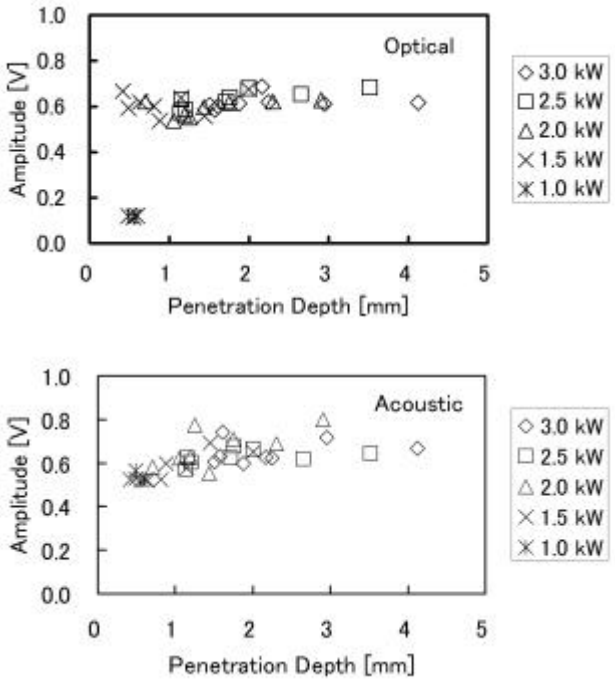

図 11　溶け込み深さと発光・音響強度の関係：SS400

そこでビードオンプレート溶接と同様に，周波数スペクトルの低周波数帯と高周波数帯でその信号強度比を取り，アスペクト比との相関について検討した。図 12 は発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係を示す。信号強度比を求めるにあたっては，低周波数帯には深溶け込み型溶接の場合に音響スペクトルに必ず大きなピークが現れる 1-4kHz 帯を採用し，高周波数帯は発光・音響信号ともに 32-35kHz とした。発光信号のグラフはばらつきが大きいため正しい評価を下すことができない。それに対して音響信号においては，信号強度比はアスペクト比 1 まではその増加に反比例して減少し，アスペクト比 1 以上になるとほぼ一定値をとる。したがって信号強度比，特に音響信号のそれに注目することで，溶接性状を評価することが可能であると言える。

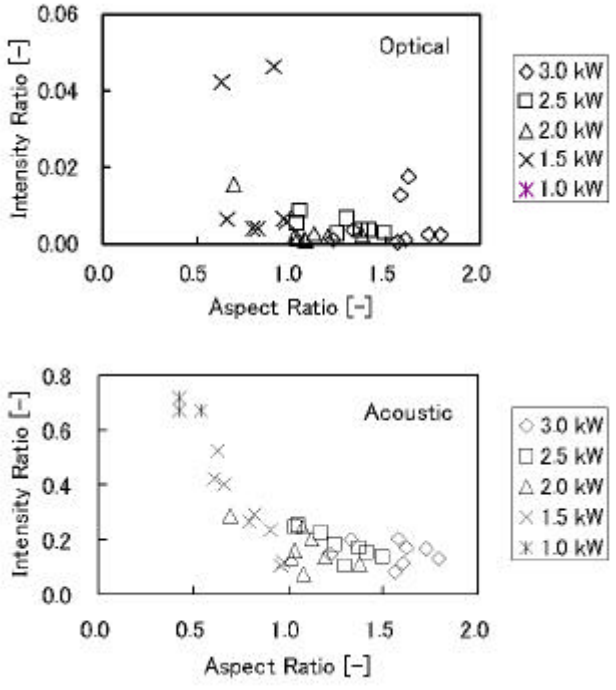

図 12　発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係：SS400

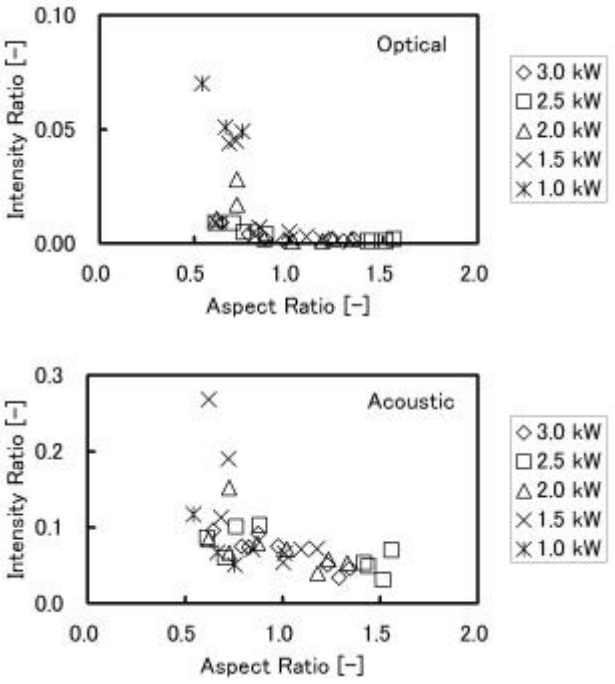

図 13　発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係：SUS304

３.２.２　SUS304

図 13 に発光・音響信号におけるアスペクト比と信号強度比との関係を示す。発光・音響信号の強度比はともに 32-35kHz 帯/2-4kHz 帯である。図に示されているように，発光・音響信号のどちらにおいてもアスペクト比の増加とともに信号強度比は急激に減少し, その後ほぼ一定の値をとることがわかる。発光信号は，アスペクト比 0.8 付近を境にプロットの勾配が急激に変化している。音響信号でも同様に, 信号強度比はアスペクト比 0.8 付近まではその増加に逆比例して減少するが, その後プロットの勾配は一定となる。したがって SUS304 においても SS400 と同様に，信号強度比をモニタリングすることで, 熱伝導型か深溶け込み型かの溶接性状を評価することが可能であるといえる。

４　まとめ

本研究では，健全性の高い，軽量化された溶接部を得ることを目的として，ＹＡＧレーザーによるビードオンプレート溶接並びに突き合わせ溶接を実施した。さらに溶接品質の保証技術を確立するために，発光・音響信号による溶接性状のモニタリングを行った。

発光・音響信号の周波数スペクトルを解析することにより,

① 深溶け込み型溶接の場合には，音響スペクトルにおいて，1-4kHz帯の周波数成分が大きく現れる.

② 熱伝導型溶接の場合には，発光・音響スペクトルともに平坦になる.

ことを明らかにした。

この結果に基づき, 周波数スペクトルの低周波数帯と高周波数帯との信号強度比を取り, この比とアスペクト比との関係について整理した。その結果, 特定のアスペクト比を境にして信号強度比が大きく変化することを明らかにし, 信号強度比に基づいて深溶け込み型か熱伝導型かの溶接判定を行えることを示した。

ここで提案したプロセスモニタリングは，測定システムの簡便さと，外乱に対して強い安定性を有しているため，生産現場への適応はとても容易であると考える。計測システムに必要となる機器は，フォトセンサ，マイクロフォン，バンドパスフィルタそしてコンピューターである。これらの機器は，レーザー装置本体に比べれば極めて低コストで導入可能なものであるため，加工費アップに占める割合は小さい。

レーザー溶接機は従来の溶接機より高価であり, 初期投資が非常に大きい。しかしながら，溶接歪みの少なさ，生産性の高さなど，レーザー加工の特徴を生かして, 従来の加工機では加工することのできない製品を作り出すことが可能となれば, 生産技術面での差別化を図ることが可能となり, 投資費用を製品価格に上乗せしていくことができるものと考えられる。

５　参考文献

(1) M.Watanabe et al, Proceedings of ICALEO'95, LIA Vol.80, pp.553-562 (1995).
(2) S.Nakamura et al., Proceedings of ICALEO'97, LIA Vol.83 Part2 Section G, pp.256-262 (1997).
(3) S.Nakamura et al., Proceedings of ICALEO'99, LIA Vol.87 Part2 Section E, pp.28-33 (1999).
(4) S.Nakamura et al., J. Physics D: Applied Physics, Vol.33, No.22, pp.2941-2948 (2000).
(5) S.Nakamura et al., Proceedings of ICALEO2001, LIA Vol.90, E802 (2001).