複数 AE センサを用いたレーザ肉盛形成時に発生するき裂の評価

福井大学　学術研究院　工学系部門
准教授　山下　順広
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022231-B3）

キーワード：レーザ粉体肉盛法，き裂，アコースティック・エミッション

１．研究の目的と背景

金属積層造形技術の一手法であるレーザ粉体肉盛法(Laser Metal Deposition：LMD)は、レーザにより供給粉末を局所的に溶融・凝固させることで、必要な箇所に金属材料を付加できる加工技術である。LMD は、既存部品の表面改質や補修、機能性材料の局所形成に適しており、金型や治工具に対する耐摩耗性向上などを目的とした補強技術として、その実用化が期待されている [1-3]。特に、耐摩耗性に優れる超硬合金を鉄系基材上に形成する技術は、部材の長寿命化や高機能化に寄与することから、産業的にも高い需要がある。

しかし、LMD により鉄系基材上に超硬合金層を形成する場合、レーザ加工に伴う急熱・急冷、凝固時の収縮、さらに基材と超硬合金との材料特性の違いなどにより、肉盛層内部や界面近傍にき裂が発生しやすいことが課題となっている [4, 5]。超硬合金は高硬度で耐摩耗性に優れる一方で、脆性的な性質を有するため、LMD 中に生じる熱応力や残留応力の影響を受けやすい。そのため、超硬合金層を実用的に形成するためには、LMD 条件とき裂発生挙動との関係を明らかにし、き裂を抑制できるプロセス条件を確立することが重要である。

現在、き裂の発生確認は、主に肉盛後の顕微鏡などによる外観観察によって行われている。しかし、LMD ではレーザ出力、走査速度、粉末供給量、肉盛パスなど多くのプロセス因子が存在するため、各条件におけるき裂の有無や形態を確認するには多くの時間を要する。また、き裂は必ずしも溶融凝固の直後に発生するとは限らず、過去の実験では、一定時間経過後に遅れ割れとして発生する場合があることが確認されている。そのため、どのような LMD 条件において、いつき裂が発生し、さらに縦割れや横割れなどのどのような発生形態を示すのかについては、十分に明らかになっていない。このことが、き裂を抑制した超硬合金形成プロセスの実現を困難にしている要因の一つである。したがって、LMD 中または肉盛直後にき裂の発生をその場で検出し、さらにその発生形態を簡易的に特定できる評価手法の確立が求められている。

そこで本研究では、AE(Acoustic Emission)センサを複数用いて、LMD による肉盛形成時に発生するき裂の発生形態を特定することを目的とした。AE 法は、材料内部で発生する微小破壊やき裂進展に伴って放出される弾性波を検出する手法であり、加工中の損傷発生をその場で評価できる。レーザ肉盛では、LMD 条件によって横割れのみが発生する場合や、横割れと縦割れが混在して発生する場合がある。これらのき裂は主な進展方向が異なるため、AE 信号にもセンサの設置方向による違いが現れる可能性がある。そこで本研究では、AE センサを肉盛ビードに対して直交する 2 方向に配置し、各センサで取得される AE 信号の特徴を比較することで、き裂の進展方向を分別できるか検討した。本報告では、肉盛ビードに横割れが発生する条件を対象とし、直交配置した AE センサにより取得した AE 波形について、振幅、立ち上がり時間、持続時間、RA 値、平均周波数および周波数成分の時間的変化を解析した。これにより、き裂発生時の AE 信号にセンサ配置方向による特徴の違いが現れるかを検証し、AE 信号を用いたき裂形態の分別可能性について検討した。

２．実験方法

2・1　肉盛ビード形成

マルチビーム式レーザ粉体肉盛装置を用いて、超硬合金の肉盛ビード形成を行った。マルチビーム式レーザ粉体肉盛の概略図を図 1 に示す。レーザには、波長 975nm、最大出力 50W の半導体レーザを 6 本用いた。金属粉末は、加工ヘッド中央から粉末供給ノズルを通じて供給される。基材には SKH51、肉盛材料には WC–Co 粉末を用いた。肉盛条件は、レーザ出力 100 W、走査速度 10 mm/s、粉末供給量 20 mg/s とした。肉盛ビード長さは 3mm とし、基材に

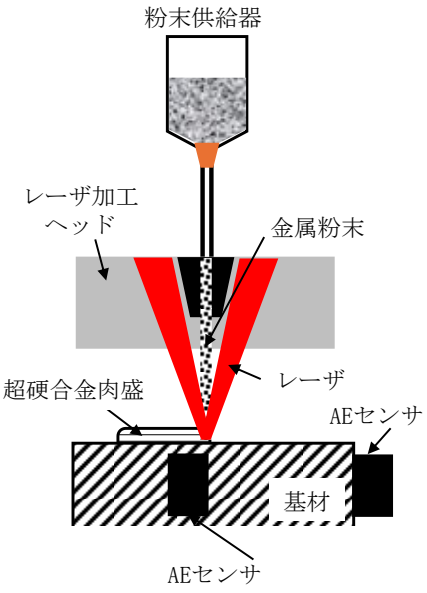


図 1　マルチビーム式レーザ粉体肉盛の概略図

おいて図 2 に示す位置に形成した。肉盛中に発生するき裂を評価するため、2 つの AE センサを用いた。AE センサは、図 2 に示すように、肉盛ビードに対して直交する 2 方向に配置した。これにより、き裂発生時に各方向で検出される AE 信号の特徴を比較した。また、肉盛ビード形成後には、デジタルマイクロスコープを用いてビード表面を観察し、き裂の発生状態を確認した。

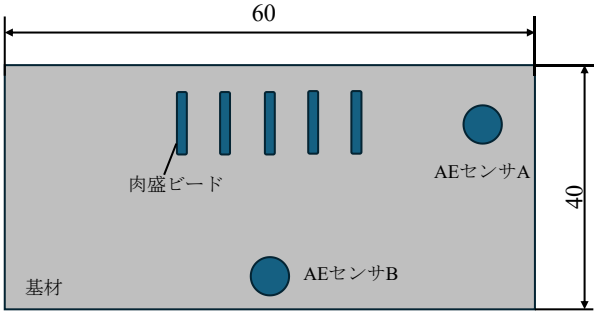


図 2　肉盛ビードに対する AE センサ設置位置

2・2　AE 信号の解析方法

肉盛ビード形成中に取得した AE 信号に対して、波形解析を行った。本実験では 2 個の AE センサを用いて計測を行ったが、各センサで取得される信号強度は、センサの個体差や基材表面への接触状態の違いに起因して異なる可能性がある。そのため、各センサ間の感度差を低減し、2 つの AE センサで取得された AE 信号を比較可能にするために、取得波形に対して感度補正を行った。感度補正には、シャープペンシル芯圧折法を用いた [6]。

AE 波形解析では、まず取得した AE 信号から、立ち上がり時間、持続時間、最大振幅およびカウント数を算出した。立ち上がり時間は、AE 信号が設定したしきい値を超えてから最大振幅に達するまでの時間とした。また、持続時間は、AE 信号が最初にしきい値を超えてから、最後にしきい値を下回るまでの時間とした。カウント数は、AE 信号がしきい値を超えた回数として評価した。これらの評価値を用いて、RA 値および平均周波数を算出した [7]。RA 値は、次式に示す立ち上がり時間を最大振幅で除した値として算出した。

$$\text{RA values} = \text{Rise time} / \text{Amplitude} \quad (1)$$

また、平均周波数は、次式のカウント数を持続時間で除した値とした。

$$\text{Average frequency} = \text{Counts} / \text{Duration} \quad (2)$$

これらの AE パラメータを比較することで、き裂発生時における信号特性の違いを評価した。

さらに、AE 信号に含まれる周波数成分の時間的変化を評価するため、短時間フーリエ変換(Short-Time Fourier Transform : STFT)を用いた解析を行った。STFT 解析により、き裂発生時に現れる周波数成分の時間的な持続性や、センサ配置方向による信号特性の違いを評価した。

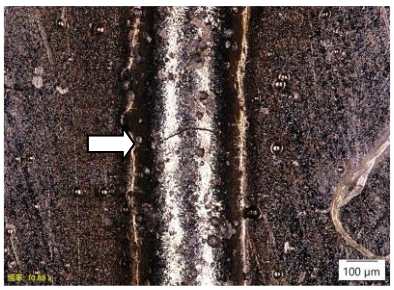
3．実験結果

3・1　肉盛ビードのき裂観察

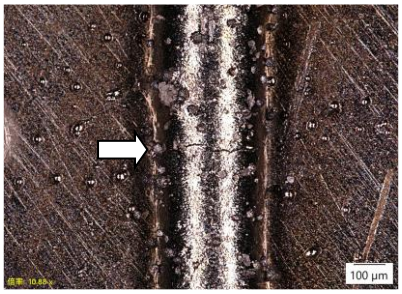
肉盛ビード形成後、デジタルマイクロスコープを用いてビード表面を観察し、き裂の発生状態を確認した。観察結果を図 3 に示す。いずれのビードにおいても、主に肉盛ビードを横切る方向に進展する横割れが観察された。横割れの形態は一様ではなく、図 3(a)に示すような直線状のき裂、図 3(b)に示すような曲線状のき裂、および図 3(c)に示すような断続的なき裂が認められた。これらの結果から、本実験条件では横割れが発生するものの、その進展形態には複数の特徴があることが確認された。



(a)　直線状



(b)　曲線状



(c)　断続的

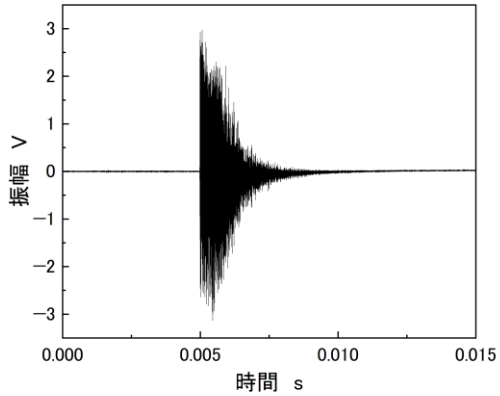
図 3　肉盛ビードに発生したき裂の形態

3・2　AE 信号の解析結果

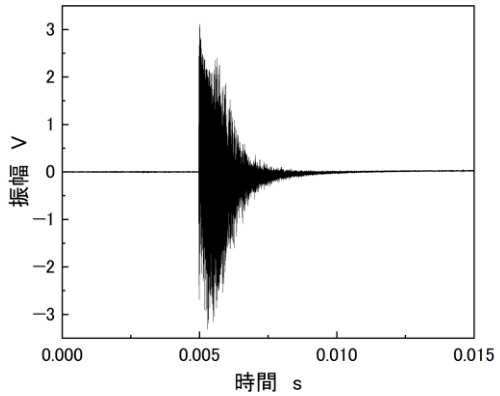
肉盛ビード形成中に基材表面へ設置した AE センサにより取得した AE 波形の一例を図 4 に示す。図 4(a)は AE センサ A、図 4(b)は AE センサ B で取得された AE 波形である。いずれの設置位置においても、き裂発生に起因すると考えられる突発型波形が確認された。波形の最大振幅に着目すると、AE センサ A と AE センサ B の間に明瞭な差は認められなかった。このことから、単純な振幅比較のみでは、センサ設置方向の違いに起因する AE 信号の特徴を明確に評価することは困難であると考えられる。

次に、各肉盛ビード形成時に取得した AE 信号について、RA 値と平均周波数の関係を整理した結果を図 5 に示す。RA 値は立ち上がり時間を最大振幅で除した値、平均周波数はカウント数を持続時間で除した値である。AE センサ A および AE センサ B のいずれにおいても、RA 値はおおむね 50 以下、平均周波数は 300 kHz 付近に分布した。両設置位置のデータ分布に特徴的な違いは認められず、RA 値および平均周波数を用いたパラメータ解析のみでは、き裂発生時の AE 信号における方向依存性を明確に識別することは困難であった。

さらに、き裂発生時に観察された突発型波形を対象として、短時間フーリエ変換(Short-Time Fourier Transform : STFT)による解析を行った。STFT 解析結果を図 6 に示す。図 6(a)、図 6(b)および図 6(c)は、それぞれ図 3(a)、図 3(b)および図 3(c)に示したき裂に対応する AE 波形の解析結果である。200- 250 kHz 帯の周波数成分に着目すると、肉盛ビード方向に垂直な方向に設置した AE センサ A に比べて、肉盛ビード方向に平行な方向に設置した AE センサ B の方が、当該周波数成分の信号強度が時間方向に広く分布する傾向が認められた。この結果は、き裂発生時に生じる AE 信号の周波数成分が、センサの設置方向によって異なる可能性を示している。したがって、振幅や RA 値、平均周波数といった代表的な AE パラメータのみでは識別が困難であった信号特性の違いを、STFT 解析により評価できる可能性が示された。

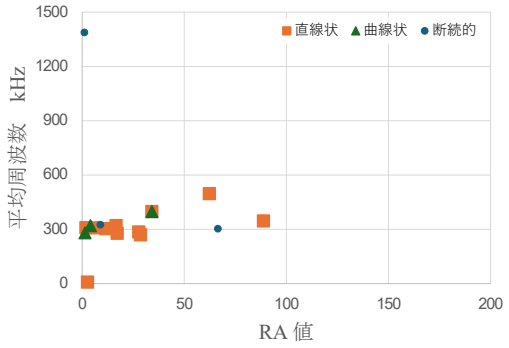


(a)　AE センサ A

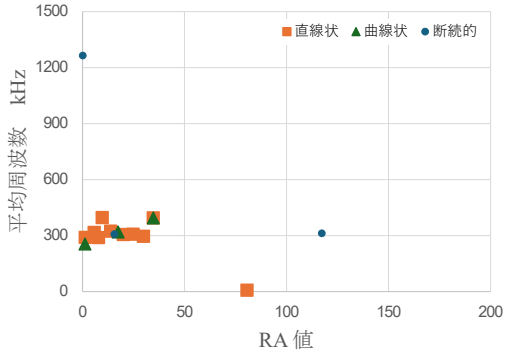


(b)　AE センサ B

図 4　各 AE センサの波形

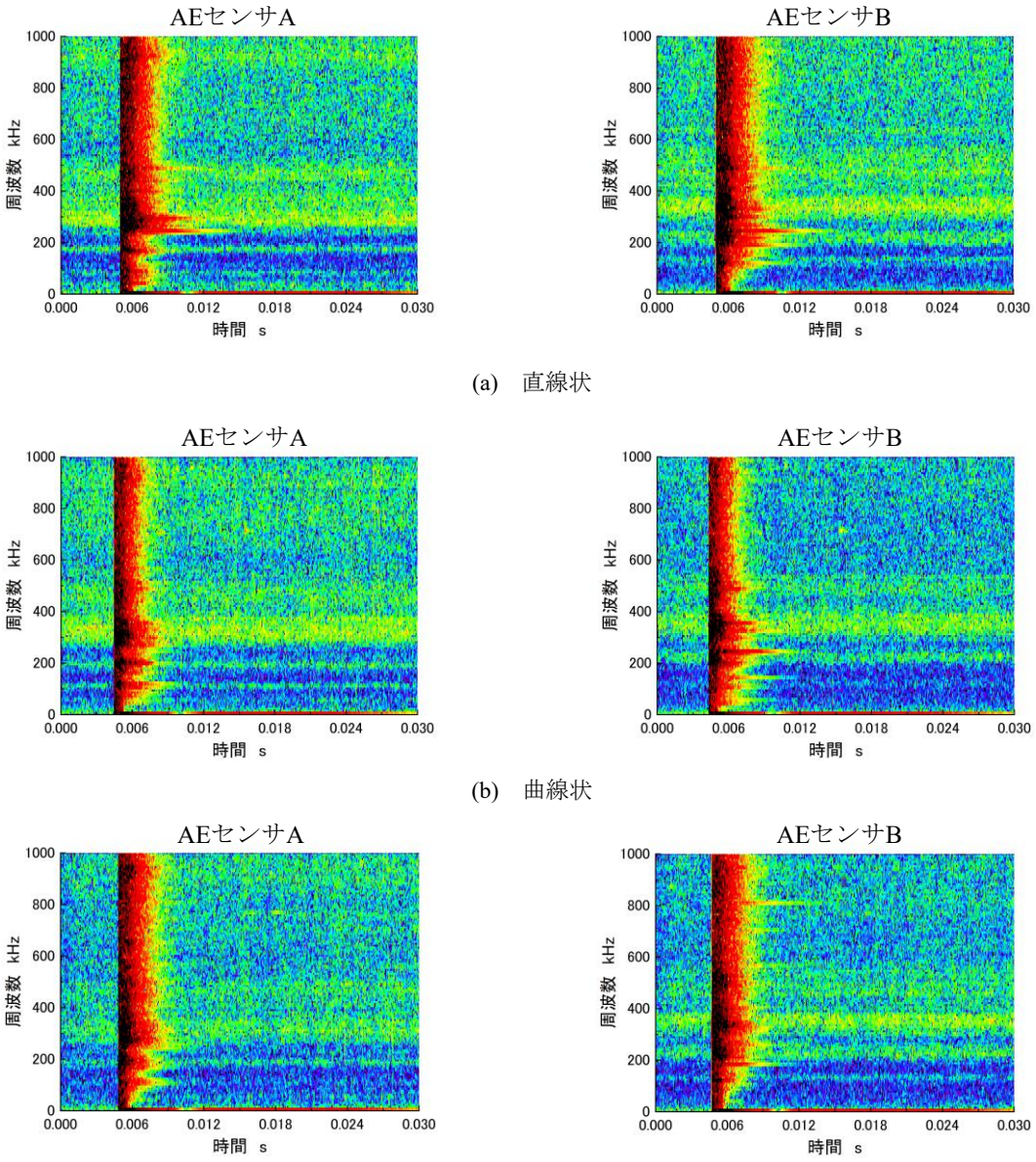


(a)　AE センサ A



(b)　AE センサ B

図 5　RA 値と平均周波数の関係



(a)　直線状

(b)　曲線状

(c)　断続的

図 6　各き裂形態における AE 波形の STFT 解析結果

４．結言

本研究では、マルチビーム式レーザ粉体肉盛法(LMD)により SKH51 基材上に WC-Co の超硬合金の肉盛ビードを形成した。形成過程において発生したき裂の情報を、肉盛ビードの進行方向に対して直交するように 2 つの AE センサを配置し、評価および解析を行った。得られた結果を以下に示す。

(1)肉盛ビードを形成後、マイクロスコープでき裂を観察した結果、き裂の形態としては、横割れが観察された。

(2)直交する 2 つの AE センサから得られた立ち上がり時間、持続時間、最大振幅およびカウント数により、RA 値および平均周波数を評価したところ、いずれの AE センサにおいても RA 値 50 以下、平均周波数 300 kHz の狭い範囲に集中する傾向の結果となった。

(3)STFT 解析の結果、200–250 kHz 帯の周波数成分に着目すると、肉盛ビード方向に垂直な方向に設置した AE センサに比べて、肉盛ビード方向に平行な方向に設置した AE センサでは、信号強度が時間方向に広く分布する傾向が認められた。

以上より、センサ配置による信号特性の差を利用することで、発生したき裂の進展方向を推定できる可能性が示唆された。

謝　辞

本研究は公益財団法人天田財団 2022 年度一般研究開発助成(AF-2022231-B3)により実施した。ご支援頂いた同財団および関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

1) Hajideh, M. R. and Farahani, M.: Journal of Materials Research and Technology, 23 (2023), 2020–2030.
2) Wang, G., Zhang, J., Shu, R. and Yang, S.: International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 81 (2019), 63–70.
3) Karmakar, D. P., Muvvala, G. and Nath, A. K.: Surface & Coatings Technology, 422 (2021), 127498.
4) Yamashita, Y., Nakamura, M., Kunimine, T., Sato, Y., Funada, Y. and Tsukamoto, M.: Journal of Laser Applications, 35 (2023), 042010, 1–7.
5) Yamashita, Y., Kamo, S., Sato, Y., Takenaka, K., Ohkubo, T. and Tsukamoto, M.: Applied Physics A, 131 (2025), 991.
6) Sause, M. G. R.: Journal of Acoustic Emission, 29 (2011), 184–196.
7) Mohamad, M. Z., Md Noor, N. and Wan Ahmad, W. N. A.: MATEC Web of Conferences, 47 (2016), 02010.