

# レーザービーム溶接部の 粒子構造を調整する

クリスチャン・ハーゲンロッハー、ルドルフ・ウェーバー

加工パラメータを最適化することにより、高温割れの形成を減らすように、溶接部の粒子構造をデザインすることができる。

溶接部の粒子構造は、その強度または延性を改善したり、高温割れが形成される可能性を低減したりする上で、特に関係が深い要素である<sup>(1)~(4)</sup>。その効果を活用するための従来の戦略は、合金組成を最適化することによって凝固に影響を与えるというものだった。標準的でない合金を使用することに伴う、高いコストと柔軟性の制約を回避するために、最近では、加工パラメータの巧妙な最適化によって溶接部の粒子構造を改善する戦略が、考案されている。

レーザービーム溶接では、レーザー出力  $P$ 、溶接速度  $v$ 、焦点径  $df$  などの異なる加工パラメータを、ほぼ独立して適

応させることにより、エネルギー入力を調整することができる。これにより、全く異なる加工パラメータによって、幾何学的に同一の溶接シームを形成することが可能である。各パラメータ集合は、それぞれ異なる粒子構造を引き起こす凝固条件を表している。

図1は、ほぼ同じ形状の2つの溶接部の水平断面図を左側、垂直断面図を右側に示したものである。両者は、大きく異なる加工パラメータで生成されているため、全く異なる粒子構造を持つ。陽極エッチングと偏光照射により、溶接部の微細構造の個々の粒子を識別することができる。図1の(a)と(b)を比較すると、形状は一致しているにも

かわらず、微細構造には明らかな違いがあることがわかる。図1(a)の溶接部の粒子構造には、等軸樹状の粒子しか含まれておらず、その整った粒子サイズは、改善された等方性の機械的特性を表している。一方、図1(b)の溶接部には、等軸粒子は存在しない。

図1の断面図の金属組織解析は、合金組成を最適化することなく、加工パラメータを最適化することによって、レーザービーム溶接部の粒子構造を調整できる可能性を示している。独シュトゥットガルト大(University of Stuttgart)のレーザー加工研究所(IFSW)は、複数の公的助成プロジェクトの一環として、産業界の複数のパートナー企業の協力を得て、この可能性を活用することを目的に、この現象の調査を行った。

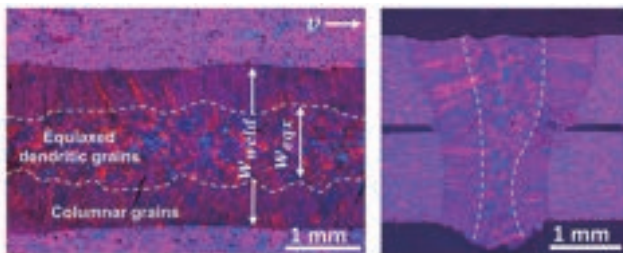
## 結果

1つの主要な結果は、整った等軸樹状の粒子構造が形成される、パラメータベースの条件が、解析によって導出されたことである<sup>(5)</sup>。その条件は、溶接深さあたりの最小出力として、次のように表される。

$$P_{Depth,eqs} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot (T_{Liquidus} - T_{solid})^3 \cdot \lambda_{eff} \cdot \rho \cdot c_p}{\eta_{eff} \cdot G/R_{sp}}}$$

これだけの出力が、溶接時に吸収される必要がある。ここは、液相温度

(a) 出力:4300W、速度:6m/min、焦点径:600 $\mu$ m



(b) 出力:835W、速度:1m/min、焦点径:50 $\mu$ m

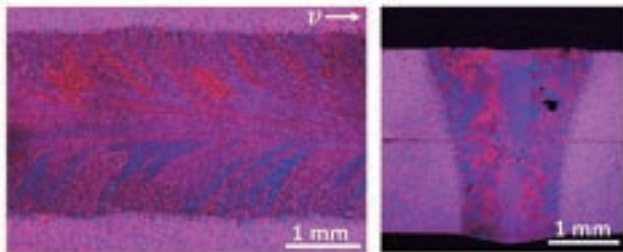


図1 レーザービーム溶接部の金属組織断面。両者は、形状はほぼ同一だが、微細構造は明らかに異なる。

$T_{Liquidus}$ 、熱伝導率 $\lambda_{th}$ 、密度 $\rho$ 、熱容量 $c_p$ は、材料に固有の特性で、 $T_{amb}$ は、周辺温度である<sup>(5)</sup>。合金に固有となる温度勾配 $G$ と凝固速度 $R$ の比率である $G/R_{eqx} \approx 3Ks/mm^2$ は、調査したアルミ合金AA6016の凝固時の等軸粒子成長の必要条件を表す。この値は、合金組成と溶接パラメータに依存する<sup>(6)</sup>。

図2は、導出されたこの条件を実験結果と比較したものである。緑色の垂直線は、AA6016合金の溶接を対象に上記の式から計算した、深さあたりの臨界出力 $P_{Depth,eqx} \approx 677W/mm$  (精度は約 $\pm 10\%$ )を表している。データ点とエラーバー (誤差範囲)は、図1(a)に示した等軸領域の幅と溶接部の全体幅の比として求められる、等軸粒子の割合 $\eta_{eqx} = w_{eqx}/w_{weld}$ を表す。幅 $w_{eqx}$ と $w_{weld}$ は、AA6016の薄板を重ねて、溶接深さ1.2~2.9mm、溶接速度毎分0.25~30m、レーザー出力0.38~16kW、サンプル表面上のレーザービーム径50~630 $\mu m$ で溶接したものを、金属組織解析して測定した。橙色の四角は、溶接時にビーム発振(ウォブル手法)を適用した場合の測定結果を表している<sup>(7)</sup>。

図2の実験結果と計算しきい値の比較は、理論的に導出した条件の正当性を証明している。溶接部の等軸粒子の

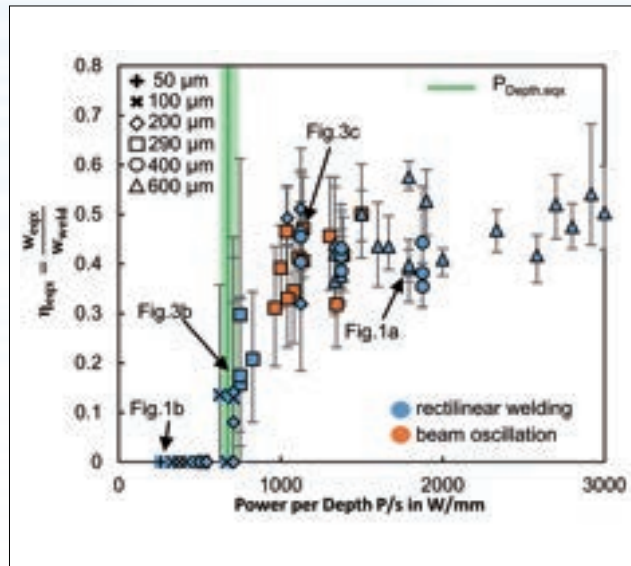


図2 直線溶接による溶接部(青色)とビーム発振による溶接部(橙色)の等軸粒子の割合を、深さあたり出力の関数として表したグラフ<sup>(6)</sup>。(画像出典: C・ハーゲンロッハー他著のMaterials&Design誌 Volume 174[2019年]掲載文献: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107791>)

割合は、深さあたり出力がしきい値 $P_{Depth,eqx}$ を超えると、大きく増加する。深さあたり出力がしきい値を下回る場合は、金属組織断面に等軸樹状の粒子は確認できず、つまり、 $\eta (P/s < P_{Depth,eqx}) = 0$ となる。

深さあたり出力がしきい値を大きく上回る場合は、等軸粒子の割合は、 $\eta (P/s > P_{Depth,eqx}) \approx 0.5$ の値に向かって収束していく。

### プロセス最適化のアプローチ

等軸樹状の粒子構造は、より小さな粒子サイズと等方性の機械的特性に関連するため、深さあたり出力を、導出

された臨界値よりも高くすることは望ましい。しかし、深さあたり出力を増加させるには、キャピラリの侵入深さを増加させることなく、吸収されるレーザー出力を増加させなければならない。この目標は、次の2つの基本戦略によって達成可能である。

**溶接幅を大きくする。**これによって、同時に溶融しなければならない体積が増加する。単位時間あたりのエネルギーを高くする必要があるため、深さあたり出力の増加が必要となる。

**溶接速度を高くする。**より高い速度で同じ深さと幅の溶接シームを生成するには、より短い時間で同じ体積を溶融

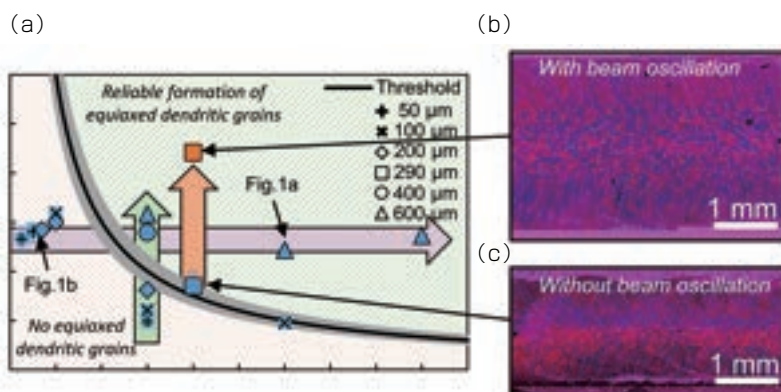


図3 (a)は、等軸樹状粒子構造のしきい値を超えるためのプロセス戦略。(b)と(c)はそれぞれ、横方向のビーム発振ありとなしで溶接した場合の結果の水平断面図<sup>(5), (7)</sup>。(画像出典: C・ハーゲンロッハー他著のMaterials&Design誌 Volume 174[2019年]掲載文献: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107791>と、同Volume 160[2018年]掲載文献: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.009>)

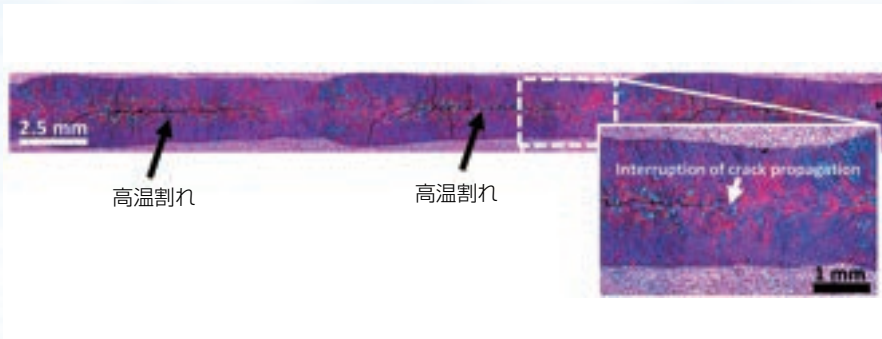


図4 レーザパラメータに基づく粒子構造の能動的な局所変調による、高温割れの伝播の阻止<sup>(8)</sup>。(画像出典：C・ハーゲンロッハー他著のProcedia CIRP Volume 74[2018年]掲載文献：<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.164>)

する必要がある。より短い時間で同じエネルギーを供給する必要があるため、深さあたり出力の増加が必要となる。

図3は、深さあたり出力を一定とした場合の溶接幅と溶接速度の間の双曲線関係で表される、これら2つの基本戦略の結果を示したものである<sup>(5)</sup>。図3(a)の黒い実線は、臨界値 $P_{Depth,eqx} \approx 677\text{W/mm}$ の双曲線関係を表している。データ点は、上と同じ実験結果のものである。

溶接幅は、レーザービーム径の増加(緑色の矢印)、または、横方向のビーム発振の追加(橙色の矢印)によって、体系的に増加させることができる。図3(b)と(c)の水平断面図を比較すると、振幅0.75mm、周波数100Hzの正弦波状の横方向ビーム発振を適用した場合は、等軸樹状粒子の存在領域が拡大することがわかる。

図3(a)の紫色の横向き矢印は、速度の増加とともに、深さあたり出力が臨界値を超える様子を表している。より高い速度で同等の幅を達成するには、速度の増加に伴って焦点径を増加させる必要がある。そのためには、深さあたり出力をさらに増加させることが必要になる。

溶接幅の増加と速度の増加という戦略はどちらも、利用可能なレーザー出力

によって基本的に制限される。このような戦略を実装するには、高出力のレーザービーム源が必須である。

加工パラメータが粒子構造に与える影響を理解すれば、レーザー溶接部の粒子構造を変調することも可能である<sup>(8)</sup>。図4は、吸収される深さあたり出力を550~2500W/mmの間で周期的に変調して生成した、溶接シームの水平断面面である。

この変調戦略(図4)を適用して、粒子構造を白色矢印の位置で局所的に変更することにより、中心線に沿った割れ目の伝播を阻止することができた。

導出式にRDGモデルを組み合わせ

ることにより、レーザー溶接パラメータが、レーザービーム溶接部の高温割れ感度に与える影響が表される<sup>(9)、(10)</sup>。その結果から、深さあたりのラインエネルギー $P/(v \cdot s)$ が、溶接部が凝固時に中心線の高温割れを生じることなく耐えることのできる、臨界最大歪み速度に最も大きな影響を与えるパラメータであることが判明している<sup>(10)</sup>。深さあたりのラインエネルギーの関数として計算された臨界歪み速度は、実験結果によって正当性が実証されている<sup>(3)、(11)</sup>。実験結果は、デジタル画像相関を使用して測定されたもので、その方法はOptics and Lasers in Engineering誌に掲載されている<sup>(12)</sup>。

これらの結果は、深さあたりのラインエネルギーを増加させると、粒子構造が最適化されて、高温割れが生じる臨界歪み速度が増加することを証明している<sup>(3)、(10)</sup>。

導出したモデルと条件は、溶接プロセスを最適化するための優れたツールであり、粒子構造に対する確定的影響を持ち、高温割れの形成を確実に減少させる、プロセス戦略を設計する方法を説明するものである<sup>(3)、(5)、(7)、(8)、(10)</sup>。

#### 参考文献

- (1) H. Fujita and T. Tabata, Acta Metall., 21 (1973).
- (2) J. W. Wyrzykowski and M. W. Grabski, Philosophical Magazine A, 53 (1986).
- (3) C. Hagenlocher et al., Sci. Technol. Weld. Join., 24 (2019).
- (4) Z. Tang and F. Vollertsen, Weld. World, 58 (2014).
- (5) C. Hagenlocher et al., Mater. Des., 174 (2019).
- (6) C. Böhm et al., Metall. Mater. Trans. A (2021).
- (7) C. Hagenlocher et al., Mater. Des., 160 (2018).
- (8) C. Hagenlocher et al., Proc. CIRP, 74 (2018).
- (9) M. Rappaz et al., Metall. Mater. Trans. A, 30 (1999).
- (10) C. Hagenlocher et al., Metall. Mater. Trans. A, 50 (2019).
- (11) D. Weller et al., Proc. CIRP, 74 (2018).
- (12) C. Hagenlocher et al., Opt. Lasers Eng., 100 (2018).

#### 著者紹介

クリスチャン・ハーゲンロッハー(Christian Hagenlocher)とルドルフ・ウェーバー(Rudolf Weber)は、独シュトゥットガルト大(University of Stuttgart)のレーザー加工研究所(Institut für Strahlwerkzeuge:IFSW)のプロセス開発部門責任者。

e-mail: christian.hagenlocher@ifsw.uni-stuttgart.de URL: www.ifsw.uni-stuttgart.de/en