

© 1989 ISIJ

 ///////////////
 論文
 ///////////////

CO₂ レーザーによる Fe-3% C-2% Si 合金表面の急速溶解凝固

 黒部 淳*・佐久田博司*²・宮田 保教*³
 鈴木 俊夫*⁴・一ノ瀬幸雄*²

Rapid Melting and Solidification of Fe-3% C-2% Si Alloy Using cw CO₂ Laser

 Jun KUROBE, Hiroshi SAKUTA, Yasunori MIYATA
 Toshio SUZUKI and Yukio ICHINOSE

Synopsis:

The surface of Fe-3% C-2% Si alloy was rapidly melted and solidified using cw 250 W CO₂ laser. The absorptivity of the alloy was estimated by comparing the values of melt depth and width of spot-melted specimens to those by FEM analysis. The determined value of absorptivity was 50%. The relation between secondary arm spacing and average cooling rate calculated for spot-melted specimens was obtained. Using the relation, average cooling rates of scan-melted specimens were estimated to be $2 \times 10^5 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ at maximum.

Key words: rapid solidification; laser irradiation; dendrite arm spacing.

1. 緒 言

近年レーザーを用いた表面焼入れや表面の合金化など各種表面改質技術の研究が盛んである。しかし、急速な加熱による蒸発や熔融液相の飛散などが生じ、表面改質の目的に応じた最適条件を定めることが重要である。また、レーザーの照射領域が狭く温度変化も急激であることから、その過程を解析するにも熱電対や放射温度計などによる測定が困難で、数値解析に依存する部分が大きい^{1)~5)}。一般にレーザー表面改質過程の解析には3次元解析が必要となり、解析プログラム開発に多大な労力を要するほか、レーザー光吸収率など解析に必要な物性値⁶⁾⁷⁾が十分求められていないのが現状である。

そこで本研究では、レーザーによる材料表面の急速溶解・凝固法を対象として、マイクロ組織の特徴把握とともに、加熱冷却過程の解析法を検討した。まず、レーザーをスポット照射した試料の熔融深さ、熔融幅を測定し、

2次元熱解析による結果との比較により試料熔融表面のレーザー光吸収率を推定した。また、熱解析と急速凝固部の組織観察より冷却速度とデンドライト2次アーム間隔の関係を求めた。そして、これらの結果よりレーザー走査による表面急速凝固条件の検討を行った。

2. 実験および解析方法

2.1 実験方法

2.1.1 スポット照射実験

本実験の供試材には基礎共同研究会急速凝固部会の標準試料として提供された Fe-3 wt% C-2 wt% Si 合金を用いた。その化学組成を Table 1 に示す。試料は直径 5 mm、長さ約 4 mm の円柱形状で、レーザー照射面を 240 番の研磨紙で研磨し、照射初期の吸収率を高めるため⁸⁾塩酸で 10 min 腐食させた。

使用レーザーは定格連続最大出力 250 W の CO₂ レーザーである。実験では、ミラーベンダーで方向を変えた

昭和 63 年 4 月 本会講演大会にて発表 昭和 63 年 8 月 31 日受付 (Received Aug. 31, 1988)

* 長岡技術科学大学大学院 (現: 日新製鋼(株)) (Graduate Student, Nagaoka University of Technology, Now Nisshin Steel Co., Ltd.)

*² 長岡技術科学大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology)

*³ 長岡技術科学大学工学部 工博 理博 (Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology)

*⁴ 長岡技術科学大学工学部 (現: 東京大学工学部) 工博 (Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology, Now Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113)

Table 1. Chemical composition (wt%).

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	N	O	Fe
Content	3.02	2.03	0.002	0.004	0.005	<0.001	0.047	0.0008	0.0006	Bal.

TEM₀₀ モードの出力ビームを ZeSe レンズ (焦点距離 254 mm) により集光した。レーザーエネルギー強度がガウス分布であり、強度が $1/e$ に減衰する半径をビームスポット半径とすると、レンズ焦点距離より計算されるビームスポット半径は焦点位置で 0.3 mm となる。このレーザー光をバイスに固定した試料表面に一定時間照射し、試料表面を急速溶解・凝固させた。

スポット照射実験ではレーザーパワーを 100 W, 160 W と変えたほか、照射時間を 1~20 s と変化させた。さらに試料表面位置をレンズ焦点位置からずらすことにより、ビーム半径を 0.6 mm として照射レーザーエネルギー密度を減じた実験も行った。なお、照射レーザーパワーはビームベンダー通過後のビームをパワーメーターにより測定した。

照射後の試料を照射ビームの中心位置まで研磨、ニタール液により腐食し、試料縦断面の顕微鏡組織観察を行った。これらの組織観察により各試料溶融部の深さ、幅、初晶デンドライト 2 次アーム間隔を測定した。さらに、試料溶融凝固部および熱影響部の成分変化を X 線マイクロアナライザーにより定性分析した。

2.1.2 ビーム走査実験

ビーム走査実験にはスポット照射実験と同様の試料を用いた。試料表面がレンズ焦点位置高さになるように加工テーブル上に固定し、レーザー照射中に加工テーブルを一定速度で移動することにより、試料表面を急速溶解・凝固させた。

テーブル移動速度範囲は試料表面がほぼ一様に溶解される条件から決定し、照射パワーが 160 W の場合では $1.6\sim 5.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、照射パワーが 230 W, 250 W の場合では $3.3\sim 5.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ とした。

レーザー照射後の試料は、スポット照射実験の場合と同様に、ビーム走査方向と平行にビーム中心位置まで研磨し、その縦断面組織を観察した。また、X 線マイクロアナライザーにより溶融・凝固部の成分分析を行った。

2.2 解析方法

スポット照射試料の溶融凝固過程を汎用有限要素法プログラム MARC (ver. k2) により解析した。用いた解析モデルは Fig. 1 に模式的に示す軸対称モデルで、中央表面要素に照射レーザーパワーに対応した熱流束を階段状関数として与えた。熱流束を与えた部分以外の表面

Table 2. Physical constants used in FEM analysis.

	Temperature (K)	Properties
Thermal conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	273	25.1
	~473	30.1
	~673	30.9
	~1 073	25.1
	>1 473	29.3
Specific heat ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	273	0.502
	~473	0.527
	~673	0.602
	~1 073	1.364
	>1 473	0.669
Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		7 730
Liquidus temperature (K)		1 557.5
Solidus temperature (K)		1 355.6
Latent heat ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)		268.8
Boiling point (K)		3 160

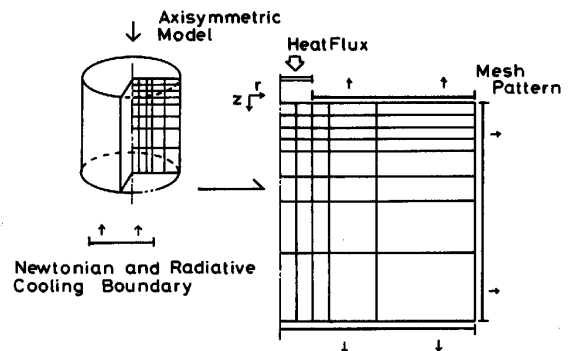


Fig. 1. Schematic drawing of a FEM model.

要素は熱伝達あるいはふく射により冷却される。また、レーザー照射後の冷却過程ではすべての表面要素で熱伝達あるいはふく射により冷却される。要素分割は熱流束を与えた中央付近および表面で細かくし、要素数は 136、節点数は 162 である。

熱伝達とふく射による単位面積当たりの抜熱量を比較すると約 793 K 以下でのふく射による抜熱量は急激に小さくなる。そこで 793 K より低い表面要素は熱伝達境界 (熱伝達率は $32.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)、793 K 以上の表面要素にはふく射境界とした。なお、ふく射冷却条件は次式の総括的熱伝達率を表面要素で与えるとした。

$$h = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_E^3 + T_E^2 T_O + T_E T_O^2 + T_O^3)$$

ただし、 h は総括熱伝達率 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)、 ε は放射率、 σ はボルツマン定数、 T_E は要素温度 (K)、 T_O は雰囲気温度である。なお、使用計算機は東京大学大型計算機センターの HITAC-682H であり、解析に用いた物性値

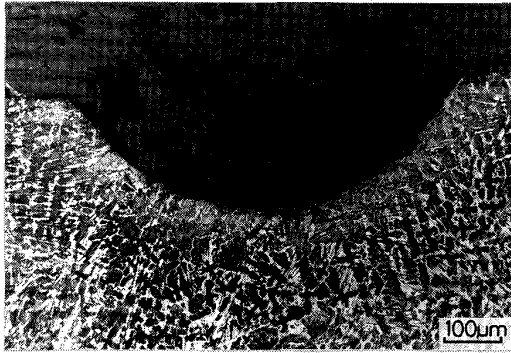
は Table 2 に示す⁹⁾.

3. 実験結果および考察

3.1 スポット照射試料のミクロ組織

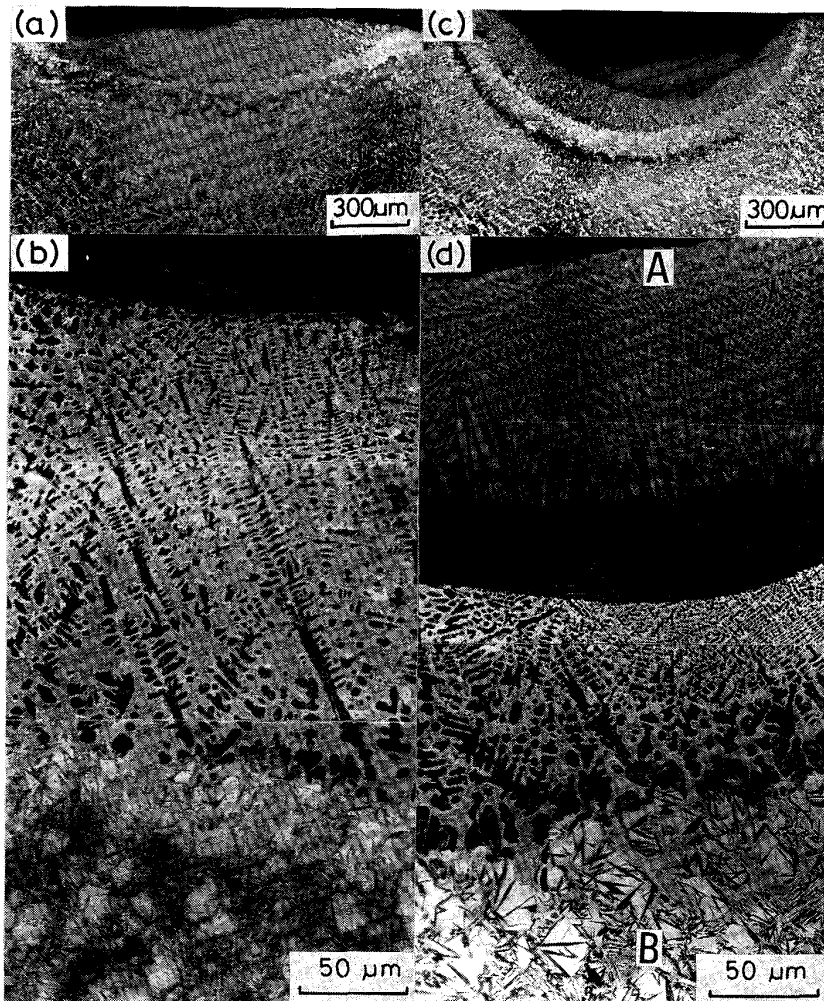
スポット照射した試料は、溶融部が飛散したもの、溶融部がそのまま再凝固したもの、および溶融部の一部が飛散し残部が再凝固したものに大別できる。入射パワー 100 W、ビーム半径 0.3 mm で 20 s 照射し、溶融部が飛散した試料を Photo. 1 に示す。溶融飛散部直下の母材は加熱時にオーステナイト化し、冷却時の急冷によりマルテンサイト変態している。

溶融部分が再凝固した試料を Photo. 2 (a)(b) に示す。この試料の照射条件は照射パワー 160 W、照射時間 5 s、ビーム半径 0.6 mm である。Photo. 2 (a) では再凝固部の明瞭なデンドライトとともにその直下に白いバンド状の変態層が観察できる。Photo. 2 (b) はこれを拡大したもので、再凝固部では変態層の残留オーステナ



$P=160\text{ W}$ $r=0.3\text{ mm}$ $t=20\text{ s}$

Photo. 1. Microphotograph of a spot-melted specimen.



(a)(b) $P=160\text{ W}$ $r=0.6\text{ mm}$ $t=5\text{ s}$

(c)(d) $P=160\text{ W}$ $r=0.3\text{ mm}$ $t=5\text{ s}$

Photo. 2. Microphotographs of spot-melted specimen.

イトに連続してデンドライトが表面まで連続的に成長している。凝固時の冷却速度は試料表面からの深さにつれ減少するので、デンドライトは表面に近づくにつれ微細になる。再凝固部に続く変態層では、Photo. 1 と同様に針状のマルテンサイトと残留オーステナイトが観察できる。

Photo. 2 (c)(d) は溶融部の一部が飛散した試料の例である。照射条件は Photo. 2 (a) の試料とスポット半径のみが 0.3 mm と異なっている。この試料の再凝固部には、円弧状に変態層と接する粗いデンドライト部分と微細なデンドライトからなる非対称形状の部分が存在し、その成分も大きく異なっている。Photo. 2 (d) の記号 A から B に沿ってこの試料を X 線マイクロアナライザーにより線分析した結果を Fig. 2 に示す。変態層に接した粗いデンドライトの再凝固部分の組成は母材に等しい。これに対し、微細なデンドライトからなる部分の組成は、母材に比べけい素と酸素が増大し鉄が減少している。この成分変化は、鉄の蒸発が酸素の存在により促進されること¹⁰⁾、溶融鉄中でけい素の活性が低下し、蒸発が抑制されること¹¹⁾¹²⁾から理解できる。

松縄ら¹³⁾はレーザー照射時のチタン溶融部の飛散を高速写真により観察している。その結果、照射初期の

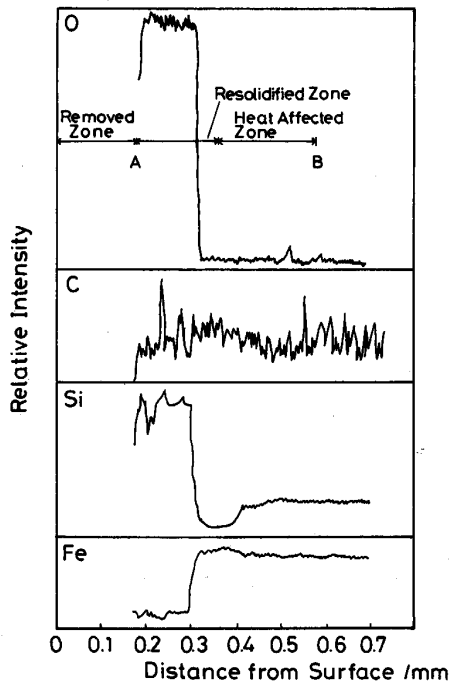


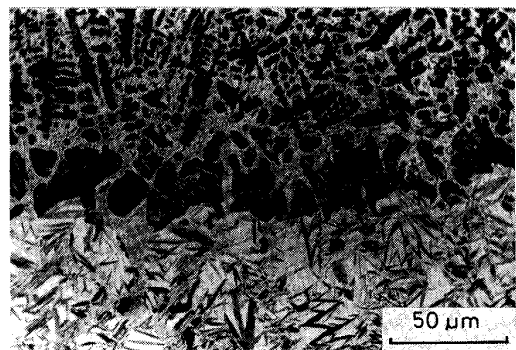
Fig. 2. Variation of oxygen, carbon, silicon and iron with distance from the surface of the spot-melted specimen shown in Photo. 2 (c)(d). The positions of symbols A and B in the figure correspond to those in Photo. 2(d).

蒸気流発生後に溶融池より液柱が噴出し、この液柱より液相が分離・飛散することを報告している。本実験の条件はこの例とはエネルギー密度も大きく異なるので直接的な比較はできない。しかし、本実験でもスパッタが観察されたことから、Photo. 2 (c) の微細デンドライトの再凝固部は、似たような突沸現象が生じる可能性もありこれにより液相の一部がもり上がるとともに大気に接し落下したものと考えられる。この液相は酸素雰囲気下で溶融鉄の蒸発が促進され、母材とは成分が大きく変化する。これらの考察から溶融部の消失は表面からの蒸発でなく、主として液相粒子の飛散によるものと考えられる。

3.2 スポット照射による溶融深さと溶融幅

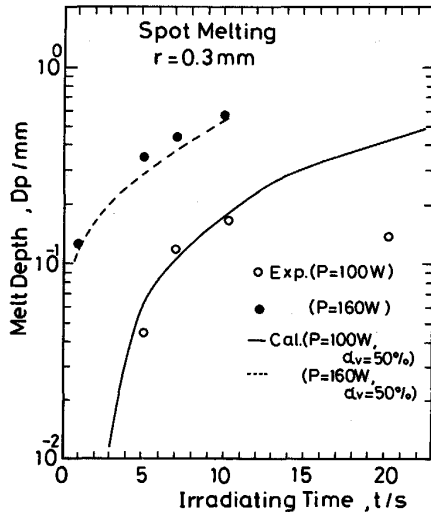
各試料の完全溶融部を推定するには、マイクロ組織観察が必要であった。再凝固部と熱影響部の境界付近のマイクロ組織の例を Photo. 3 に示す。写真下部の熱影響部では針状マルテンサイトと白いオーステナイト、また、これに接して黒く腐食された塊状部分が観察できる。この塊状部分はオーステナイトと形状的に連続しているのでやはりオーステナイトと考えられる。デンドライトはこの塊状オーステナイトから分岐成長している。また、塊状オーステナイトの領域にマルテンサイトが観察されず、冷却速度が小さいことがわかる。したがって、完全溶融部は塊状オーステナイトの分岐位置から表面に至る領域、黒い塊状オーステナイトと白いオーステナイトの境界が固相線位置に対応すると考えられる。

同一照射条件試料の平均溶融深さおよび平均溶融幅の照射時間に対する変化をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に記号として示す。各試料の照射条件はビーム半径を 0.3 mm 一定とし、照射パワーを 160 W, 100 W とした結果が示されている。また、溶融深さは試料上面から最大距離、溶融幅は試料上面位置での幅とした。溶融深さは照射時



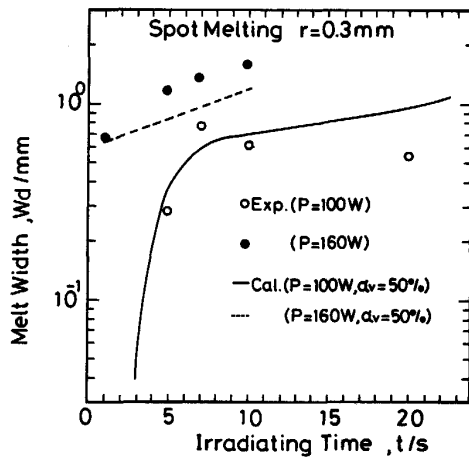
$P=160\text{W}$ $r=0.3\text{mm}$ $t=5\text{s}$

Photo. 3. Micrograph of a spot-melted specimen. Resolidified dendrites, residual austenite in mushy zone and martensite in heat affected zone are observed.



$P=100\text{ W or }160\text{ W}$ $r=0.3\text{ mm}$ $t=1\sim 20\text{ s}$

Fig. 3. Melt depth vs. irradiating time in spot melting. Solid and broken curves show the results by FEM analysis.



$P=100\text{ W or }160\text{ W}$ $r=0.3\text{ mm}$ $t=1\sim 20\text{ s}$

Fig. 4. Melt width vs. irradiating time in spot melting. Solid and broken curves show the results by FEM analysis.

間とともに増加しているが、照射時間 10 s を超えると増加は止まる。これは溶融部の飛散量が照射時間につれ増大することに対応している。すなわち、照射初期には蒸発・飛散の生じる領域が小さく、照射エネルギーの大半は試料の加熱・溶解に費やされる。照射時間の増加につれ溶融部や試料母材の温度は上昇し、蒸発・飛散の生じる領域が広がる。この結果、照射エネルギーの多くが蒸発・飛散に消費され、試料に残る溶融部が減少するとともに穴のみが加工されるようになる。この段階では溶融深さの増加率は減少する。

溶融幅についても同様の傾向が観察される。ただ、そ

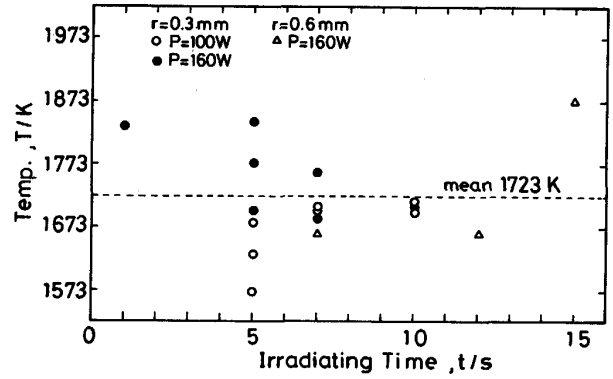


Fig. 5. Estimated temperature at the onset of vaporization or spattering vs. irradiating time in spot melting.

の値は溶融深さにくらべらつきが大きい。これは、出力ビームのエネルギー分布が正確に軸対称でないことにもよる。この結果、測定される溶融幅は観察面により異なる。

3.3 レーザー光平均吸収率の推定

3.3.1 熱解析における蒸発・飛散の影響

マイクロ組織観察結果で述べたように、スポット照射試料の多くで溶融部の飛散が生じた。熱解析では蒸発・飛散に伴う熱収支を与えることが簡明である。しかし、本実験では飛散部の少ない試料が得られていることや、溶融部の消失が主として液相の飛散によるものであることから、蒸発の影響はさほど大きくない。したがって、熱解析において考慮すべきものは液相の飛散に伴う質量損失の影響となる。これは飛散領域での質量減少あるいは熱抵抗減少として取り扱うことができる。

溶融部の飛散が生じる深さや体積はレーザー照射条件により異なり、照射エネルギー密度や照射時間の増加とともに急激に増加する。そこで、各試料で飛散が生じる深さの温度を解析により求めると Fig. 5 になる。蒸発・飛散部の形状が一様でないため、算出された飛散位置温度のばらつきも大きい。しかし、その値は 1650 K から 1750 K の範囲に集中し、平均値は 1723 K となる。これらの結果より、スポット照射による飛散は一定温度以上の溶融部領域で生じると考えられる。そこで、1723 K 以上で質量損失による熱抵抗減少が生じるとし、この温度以上で液相の熱伝導率を 8 倍に設定した解析を行った。この解析結果を熱伝導率変化のない場合と比較すると、質量損失による熱抵抗減少を考慮しても、算出される溶融深さの差は高々 10% 程度である。この値は、溶融深さや溶融幅のばらつきや測定誤差を考えるとさほど大きなものではない。したがって、本実験のように比

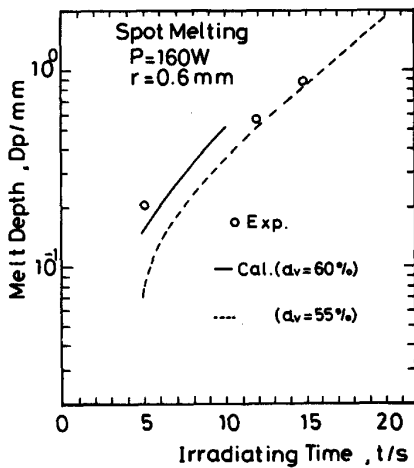
較的飛散の少ない試料の熱解析では、飛散を考慮する必要性は少ないことになる。

3.3.2 レーザー光の平均吸収率

平均吸収率を変えた解析を行い、溶融深さの測定結果と比較することにより平均吸収率を推定した。この結果を Fig. 3 の実線および破線に示す。図示されたように、照射パワー 100 W, 160 W のいずれの場合も平均吸収率の値として 50% が実験値に最も良く一致していた。ただ、前述のように照射時間が 10 s を超える場合には、溶融部の飛散によりその一致は悪い。

溶融幅についても同様の解析を行った結果を Fig. 4 に示す。図中の実線、破線が平均吸収率を 50% とした解析結果であるが、測定結果との一致は溶融深さに比べさほど良くない。これは前述のように、溶融部形状のばらつきや解析における入熱流束形状が実際と異なることなどによる。このため、溶融幅を基準とした吸収率推定の誤差は大きい。

次に、ビーム半径を 0.6 mm とした試料に対する溶融



$P=160\text{ W}$ $r=0.6\text{ mm}$ $t=1\sim 20\text{ s}$

Fig. 6. Melt depth vs. irradiating time in spot melting. Solid and broken curves show the results by FEM analysis.

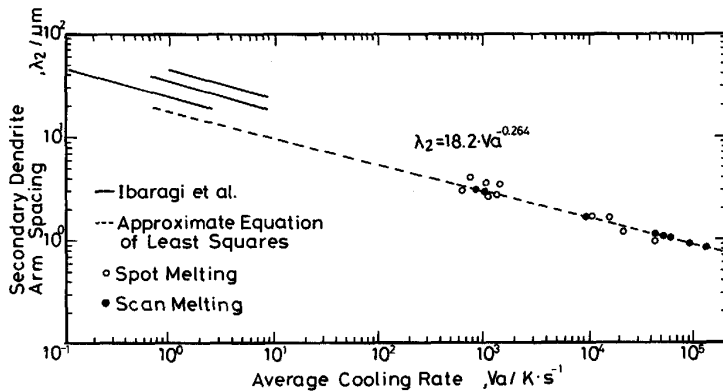


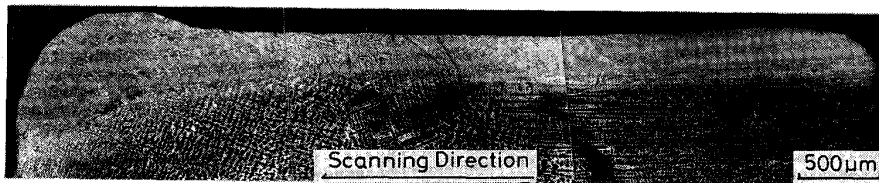
Fig. 7. Secondary dendrite arm spacing vs. average cooling rate. Open circles show the results in spot melting where cooling rate of each specimen was estimated by FEM analysis. Broken line shows the approximation line of least mean square for these data. The secondary arm spacings measured in scan-melted specimens were plotted on the broken line as solid circles.

深さ-照射時間の関係を Fig. 6 に示す。図中の記号は同一照射条件試料の測定値の平均を、実線、破線はそれぞれ解析による結果を示す。この場合には、照射時間 5 s での溶融深さは平均吸収率 60% の計算値に、12 s, 15 s では平均吸収率 55% の計算値にほぼ一致し、照射時間の増加につれ吸収率が減少している。これは、試料表面を腐食していることから、照射初期には試料の吸収率が 90% 程度まで大きくなっていることも一因である。エネルギー密度が小さい場合には照射時間内の全エネルギー吸収量に対する溶融開始以前のエネルギー吸収量の寄与が大きい。したがって、腐食により固体表面の吸収率が溶融表面の吸収率より大きい場合には推定される平均吸収率も高くなることになる。これらの結果から、試料溶融表面のレーザー光平均吸収率としては従来の解析でも用いられてきた 50% 程度¹⁴⁾¹⁵⁾の値が妥当と考えられる。

3.4 2次デンドライトアーム間隔

スポット照射した各試料の再凝固部のデンドライト 2 次アーム間隔を測定した。前述のように再凝固部の 2 次アーム間隔は場所により異なる。このため、再凝固部中心付近の 2 次アーム間隔を測定した。また、推定平均吸収率 50% を用いた熱解析により、各試料のデンドライト 2 次アーム間隔測定位置の平均冷却速度を求めた。両者の関係を Fig. 7 に示す。図中の○記号はスポット照射試料の実験結果を示し、●記号は後述の走査照射試料の結果を示す。破線は平均冷却速度と 2 次デンドライトアーム間隔の関係に対する最小 2 乗法近似直線であり、実線は茨木ら¹⁶⁾により鉄で求められた関係を示す。

デンドライト 2 次アーム間隔は平均冷却速度のべき乗に比例して減少する。その指数は -0.26 で、各種鉄合金で求められている値にほぼ等しい。また、低冷却速度側への外挿線は茨木らの結果に近い。測定されたデンドライト 2 次アーム間隔 $3.0\sim 0.9\ \mu\text{m}$ に対応する平均冷却速度範囲は $1.0 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^4\ \text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ となる。



$P=160\text{ W}$
 $r=0.3\text{ mm}$
 $v=2.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Photo. 4. Microstructure of a scan-melted specimen.

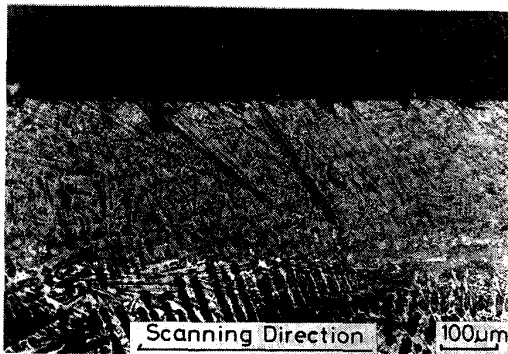


Photo. 5. Microphotograph of a scan-melted specimen, which is the same one shown in Photo. 4.

この冷却速度範囲が双ロール法などによる急速凝固材の冷却速度と同程度であることから、Fig. 7 の関係を急速凝固材の冷却速度推定に用いることができる。

3.5 レーザー走査照射試料のミクロ組織

レーザー走査照射した試料はその終端部を除き、ほぼ一様な深さで溶解凝固している。典型的な走査照射試料の例を Photo. 4 に示す。スポット照射試料のような熔融部の飛散は観察されず、試料中央部ではわずかに表面の位置が低下している。X線アナライザーによる分析結果では再凝固部の成分は母材のそれにほぼ等しく、熔融部の蒸発の少ないことが確認できる。試料終端部では熔融深さが大きくなるとともに再凝固部に盛り上がりが見られる。これはレーザービームとともに表面張力流により熔融した試料が終端に押しやられるためである。また、本実験の走査速度が遅いためか、大出力レーザーによる表面溶解で報告される波状表面は生じていない。

Photo. 5 は上記試料中央部の拡大写真を示す。スポット照射試料で見られた熔融部直下の熱影響部の存在は明瞭でない。再凝固部のデンドライトはビームの走査方向に傾き成長している。この試料のデンドライト2次アーム間隔は母材に近い部分で約 $4\text{ }\mu\text{m}$ であるが、表面近傍では約 $2\text{ }\mu\text{m}$ に減少している。Fig. 7 のスポット照射試料の2次アーム間隔と平均冷却速度の関係から、この試料の平均冷却速度を求めると、母材に近い部分で $2 \times 10^2\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度、表面近傍では $3 \times 10^3\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度となる。このように同一試料でも位置により冷却速度が1

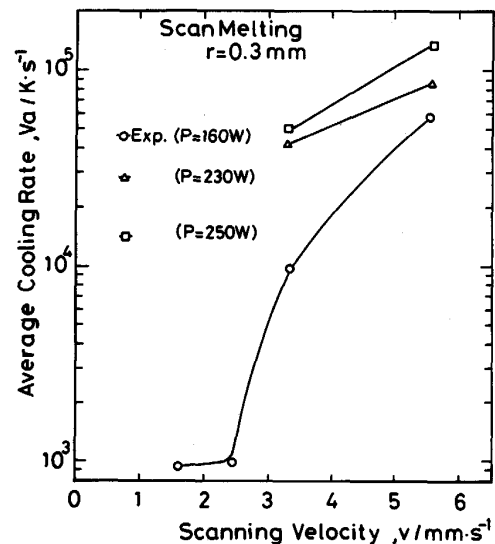


Fig. 8. Estimated cooling rates in scan melting vs. scanning velocity.

オーダー程度は異なる。しかし、走査速度が大きくなると熔融深さは減少するため、再凝固部の2次アーム間隔分布を測定することが困難になる。そこで、再凝固部のほぼ中心位置でのデンドライト2次アーム間隔を測定し、その試料の代表値とした。

各試料で測定したデンドライト2次アーム間隔をスポット照射試料で求めた Fig. 7 の近似直線上に●記号として示す。レーザー走査照射試料のデンドライト2次アーム間隔は $3.0\text{ }\mu\text{m}$ から $0.85\text{ }\mu\text{m}$ の範囲であり、平均冷却速度に換算すると $9 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲となる。求めた冷却速度を照射パワー、走査速度について整理すると Fig. 8 となる。

レーザー走査照射により得られる試料の冷却速度は走査速度の増加とともに増加する。これにつれ熔融深さも減少するので、ある走査速度以上では表面を溶解することができない。すなわち、一定の照射パワーで得られる試料の冷却速度には限界があり、さらに大きな冷却速度を得るには照射パワーと走査速度を増す必要がある。このような理由から、本実験で得られた最大平均冷却速度は $2 \times 10^5\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度に留まる。

4. 結 言

連続出力 250 W の CO₂ レーザーにより Fe-3% C-2% Si 合金表面を急速溶解凝固させ、その組織観察とレーザー照射時の加熱冷却過程の有限要素法解析により表面改質法の特徴を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 供試材のレーザー光吸収率はほぼ 50% である。
- 2) レーザーのスポット照射試料で得られた最大の平均冷却速度は $4.5 \times 10^4 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。
- 3) スポット照射試料の熱解析とデンドライト 2 次アーム間隔測定の結果より、レーザー走査試料の平均冷却速度を推定した。本実験の範囲で得られた最大の平均冷却速度は $2 \times 10^5 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。

本研究の実施にあたり、(財)日産科学振興財団および文部省科学振興研究費 (No. 63550504) の補助を得たことを付記し謝意を表する。

文 献

- 1) S. KOU, S. C. HSU and R. MEHRABIAN: Metall. Trans. B, 12 (1981), p. 33
- 2) H. E. CLINE and T. R. ANTHONY: J. Appl. Phys., 48 (1977), p. 3895
- 3) J. MAZUMDER and W. M. STEEN: J. Appl. Phys., 51 (1980), p. 941
- 4) T. C. PENG: LASER PROCESSING OF MATERIALS (1985), p. 51 [The Metallurgical Society of AIME]
- 5) C. CHAN, J. MAZUMDER and M. M. CHEN: 同上, p. 3
- 6) 安永暢男, 峰田進栄, 樽田 昇, 藤野誠二, 池田正幸: 精機学会誌, 51 (1985), p. 91
- 7) 荒田吉明, 宮本 勇, 山田 猛: 溶接学会誌, 40 (1971), p. 63
- 8) エネルギービーム加工 (精機学会エネルギービーム分科会編) (1985), p. 56 [リアライズ社]
- 9) 大中逸雄: 伝熱・凝固解析入門 (1985), p. 326 [丸善]
- 10) T. TURKDOGAN, R. GRIEVESUN and L. S. DARKEN: J. Phys. Chem., 67 (1963), p. 1647
- 11) F. KOERBER and W. OELSEN: Mitt. K. Wilhelm Inst. Eisenforsch., 18 (1936), p. 109
- 12) J. CHIPMAN, J. C. FULTON, N. A. GOKCEN and G. R. CASKEY: Acta Metall., 2 (1954), p. 439
- 13) 松 繩朗, 片山聖二: 溶接学会全国大会講演概要集, 37 (1985), p. 280
- 14) 神保龍太郎, 志田朝彦: 日本金属学会会報, 18 (1979), p. 495
- 15) D. T. SWIFTHOOK and A. E. F. GICK: Weld. J., 25 (1973), p. 492
- 16) 茨木正雄, 岡本 平, 松本弘司: 日本金属学会誌, 32 (1968), p. 396