

6.1 レーザ照射による過共晶Al-Si合金の表面改質

Surface Modification of Hypereutectic Aluminium Alloys by Laser Beam Remelting

柴田周治 樋尾勝也 金森陽一
Shuji Shibata Katsuya Hio Yoichi Kanamori

Abstract

CO₂ laser beam has been applied to modify the surfaces of hypereutectic aluminium cast alloys. The surfaces were remelted and quenched by laser treatment. The microstructures of the laser remelted layer consist of primary Si, α and Al-Si eutectic phase. The primary Si diameter was under 15 μ m. In dry sliding wear against a steel countersurface, the wear resistance was improved by surface modification. The tensile strength of the laser remelted was approximate 1.6 times that of the matrix.

Keyword surface modification, CO₂ laser, hypereutectic aluminium alloys, mechanical properties

1 緒言

アルミニウム合金鋳物の中で、けい素量を過共晶領域まで増した過共晶Al-Si合金(Si:12.6%以上)は、耐摩耗性、低熱膨張性を特徴とする材料である。この合金は、初晶けい素として晶出する角状の硬い粒子によって耐摩耗性を付与させている。

JISでは、AC9A、AC9Bがピストン用合金として、また、ダイカスト用としてADC14がシフトフォークなどの自動車部品などに使用されている。初晶けい素は、冷却速度が小さいと粗大成長するので、通常は、りん添加によりAIPを核生成させることで、けい素粒子の微細化を行う。また、ダイカスト法では、冷却速度が大きいため、初晶けい素の微細化が行われる¹⁾。しかし、重力鋳造などで製品肉厚の大きいものでは、冷却速度が小さく、りん添加による初晶けい素粒子の微細化には限界があり、平均粒径は30 μ m程度までとされている²⁾。また、初晶けい素粒子の分布は、不均一になりやすく、耐摩耗性を要求されるような部位において、使用中に異常摩耗を起こすなどの問題がある。さらに、この溶湯処理では、マトリックス組織を微細化することができない。

本研究では、鋳造によって粗大な初晶けい素が晶出した組織の表面層を、高エネルギー密度源であるレーザを用いて表面改質することを目的とした。

すなわち、CO₂レーザを過共晶Al-Si合金素材の表面に照射して、表面層だけを溶融し、その後の自己

冷却で急凝固することにより、初晶Siの微細化、マトリックス組織の微細化、組織の均一化を行った。得られた表面改質層について、摩耗特性、強度特性を評価し、母材との比較検討を行った。

2 実験方法

(1) 高圧鋳造による過共晶Al-Si合金の作製
レーザ照射用素材となる過共晶Al-Si合金は、AC9A(Si:23%)、AC9B(Si:18%)より、Si量を増大させ、Si:23%、30%を基本とし、高圧鋳造により表1に示す条件で溶製した。

表1 レーザ照射用素材製造条件

原 材 料	99.99%Al 98% < Si
化学組成	Al-23%Si Al-30%Si
溶 解 炉	12kW電気炉(大気中)
溶 解 量	1500g(黒鉛るつぼ#6)
高圧鋳造 金型	ϕ 80×90 円筒型
加圧力	50MPa
加圧保持時間	300s
金型予熱温度	473K(200°C)
熔融温度	23%Si:1146K(873°C) 30%Si:1236K(963°C)
溶解温度(熔融温度より)	+150K
りん添加	赤りん(99.999%) 粒径2-10mm 2.5g
脱ガス	六塩化エタン 6.0g

(2) レーザ照射条件の検討

レーザは、CO₂レーザ（波長10.6 μm）を使用した。図1にレーザ照射の模式図を、表2にレーザ照射条件を示す。

レーザ照射用の試験片は、高圧鋳造により製造した素材をφ80x10hの形状に切断し、＃80のペーパー仕上げしたものを用いた。試験片のレーザ熱吸収を良くするため、前処理として、黒鉛系吸収剤をスプレー塗布（膜厚約3 μm）した。

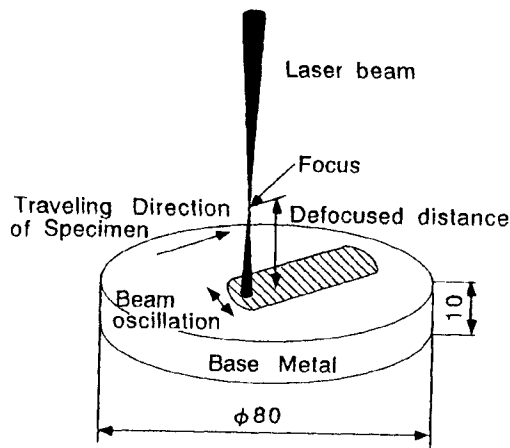


図1 レーザ照射の模式図

表2 レーザ照射条件

出力 (マルチモード)	kW	2.3 (実測)
試験片移動速度	mm/min	2.3 3.0 4.0*1
焦点はずし距離*2	mm	50 ~ 1500
ビームスキャニング		20 ~ 60
幅	mm	5
周波数	Hz	100
シールドガス Ar	kgf/cm ²	0.4
Ar量	l/min	16
ビード長さ	mm	60

*1 高出力型レーザ（設定値）

*2 焦点位置は試験片より上側

レーザ照射条件のうち、焦点はずし距離、試験片移動速度及び出力を変化させ、1mm以上の表面改質層の厚さを得る条件を求めた。なお、ここでの表面改質層とは、初晶けい素、マトリックスのいずれかがレーザ照射により溶解した範囲とした。

表面改質層の幅及び厚さは、ビードの始端より40mmの断面を工具顕微鏡で0.01mm単位で測定した。

また、レーザ照射により投入された熱量（入熱）と試験片に吸収された熱量（吸収熱）をカロリーメトリック法により求めた。すなわち、レーザ照射した直後の試験片を断熱したステンレス容器の水中（500ml）に投入し、最高水温を測定することにより、試験片の吸収熱量を測定した。

(3) 表面改質層組織解析

レーザ照射した表面改質層の組織を顕微鏡観察するとともに、画像解析装置を用い、初晶Siの水平方向のフィレ径（投影の平均径）を求め、初晶けい素の平均粒径とした。さらに、X線回折装置により、レーザ表面改質層および母材組織の結晶構造を調べた。いずれも、観察位置は、ビードの始端より40mmの断面とした。

(4) 機械的性質の評価

レーザ照射した表面改質層と母材の強度との比較を行うため、幅4mm、厚さ0.7mmの薄板状試験片を作製した。引張試験は、クロスヘッド速度1mm/minで行った。

摩耗試験は、ピン-ディスク式（ピン：固定）のすべり摩耗試験機を使用した。ピンを過共晶Al-Si合金の母材及びレーザ表面改質材とし、表3に示す条件で、乾式状態で行った。摩耗量は、試験前後の摩耗減量で表した。図2に試験片採取位置を示す。

表3 摩耗試験条件

ピン（母材、レーザ改質材）		
円柱形状	mm	φ5×20
ディスク（SNM420 HRC30）		
回転円板形状	mm	φ80×5
加圧力	MPa	1
すべり速度	m/s	0.5
距離	m	1500
条件		乾式

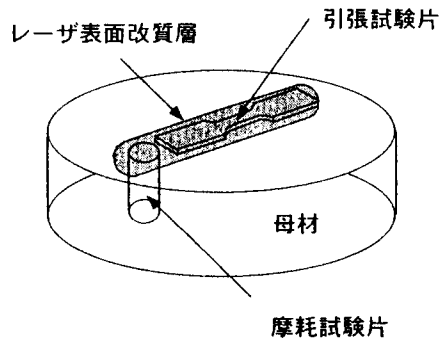


図2 試験片採取位置

また、ピンをレーザー表面改質材と母材とした時に、相手材の回転円板に及ぼす影響を調べるため、表面あらさ計により、摩耗試験後の相手材(回転円板)の粗さ曲線を求めた。表4にその条件を示す。

表4 粗さ曲線測定条件

触針	R2 μm
縦倍率	2000
横倍率	40
送り速度	0.05mm/s
基準長さ	8mm
測定項目	最大高さ Ry

3 実験結果及び考察

(1) レーザ照射条件

① 焦点はずし距離

図3にレーザー出力2.3W、試験片移動速度200mm/minの時、焦点はずし距離が表面改質層に及ぼす影響を示す。Si:15%, 23%, 30%のいずれも焦点はずし距離が増加するとともに、表面改質層は増大し、50mmで最も高い値を示した。

② 試験片移動速度

図4にレーザー出力を2.3W、焦点はずし距離50mmとし、Al-30%Siについて、表面改質層の幅、厚さに及ぼす試験片移動速度の影響を示す。また、比較として、同様の条件でレーザー照射したAl-7%Siの亜共晶組成の試験片についての結果も示す。

いずれの場合も表面改質層の厚さは、試験片移動速度200~500mm/minで最大となった。また、過共晶組成(Si:30%)のほうが亜共晶組成(Si:7%)に比べ、表面改質層の厚さは大きかった。

レーザー照射した熱量(入熱)と試験片が吸収した熱量(吸収熱)及びその比を表5に示す。吸収された熱量は、Al-23%, 30%Siのいずれもほぼ同じであった。レーザーにより照射した熱量(入熱)に比例して、試験片に吸収された熱量は大きくなった。しかしながら、表面改質厚さは、試験片移動速度300mm/minの時に最大となった。このことは、試験片に吸収された熱量が最大になる試験片移動速度と表面改質厚さが最大になる試験片移動速度は、一致しないことを示している。

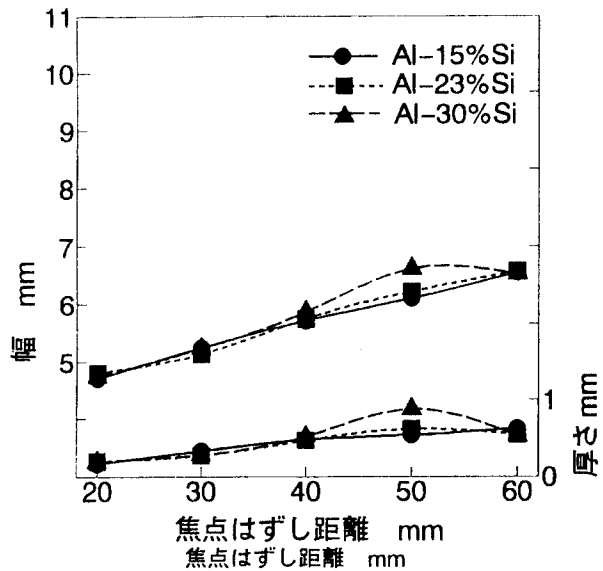


図3 焦点はずし距離が表面改質幅、厚さに及ぼす影響

出力: 2.3kW 試験片移動速度: 200mm/min

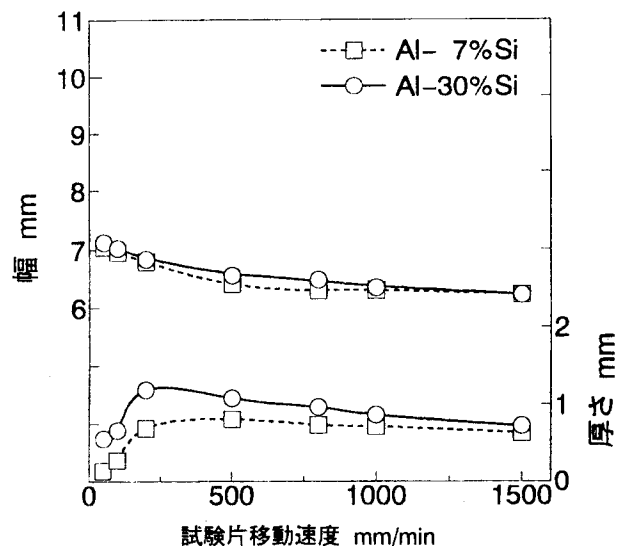


図4 試験片移動速度が表面改質幅、厚さに及ぼす影響

出力: 2.3kW 焦点はずし距離: 50mm

表5 レーザ照射により試験片が吸収した熱量

試験片	試験片移動速度	100 mm/min	300 mm/min	500 mm/min
30%Si	入熱 J	82800	27600	16600
	吸収熱 J	24700	11500	6700
	吸収熱/入熱	0.3	0.4	0.4
23%Si	吸収熱 J	25100	11700	—
	吸収熱/入熱	0.3	0.4	—

③ 出力

図5に高出力型レーザを用い、Al-30%Siについて、出力を2.3、3.0、4.0kWと変化させた時の表面改質層に及ぼす影響を示す。レーザ出力の増加とともに表面改質幅、厚さとも増大した。また、レーザ装置、出力を変化させても、表面改質層は試験片移動速度300mm/minで最大となり、図4と同様な傾向を示した。

以上より、表面改質層の厚さを増大するには、エネルギー密度の適正な範囲が存在することがわかった。その理由として、試験片及びシールドガス(Ar)によるプラズマの発生などの理由が考えられるが、本報告では、このことは論ぜず、今後の検討課題としたい。

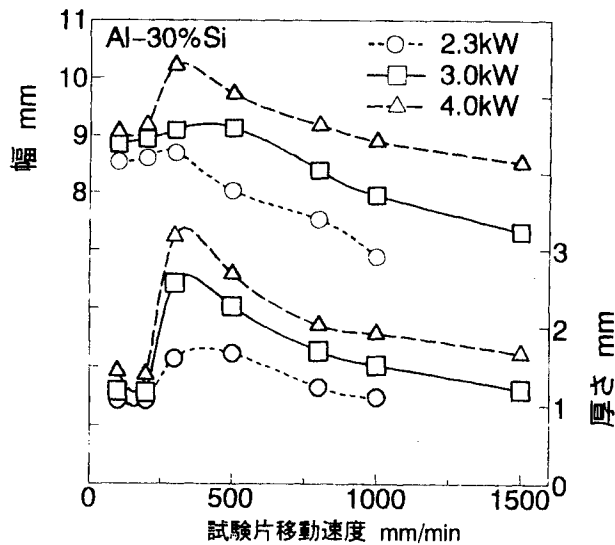


図5 出力、試験片移動速度が表面改質幅、厚さに及ぼす影響
焦点はずし距離：50mm

以上より、レーザ照射して1mm以上の厚さの表面改質層を小さい投入エネルギーで得る条件は、出力：2.3kWで、焦点はずし距離：50mm、試験片移動速度：300mm/minである。よって、以後この条件のもとで、組織及び機械的性質の検討を行った。

(2) 表面改質層組織解析

図6にレーザ照射したAl-30%Siの断面のマクロ及び顕微鏡組織を示す。レーザ照射により、試験片表面は、初晶けい素及び共晶組織のいずれも熔融し、その後、自己冷却により急冷された組織となった。まず、試験片表面に被覆した黒鉛系吸収剤に熱エネルギーが吸収され、次に、熱伝導により試験片表面から内部に熱が移動したものと考えられる。また、本実験では、ビームを5mm幅でスキャンニングしているため、キーホール型ではなく、熱伝導型で試験片表面が熔融したと思われる。

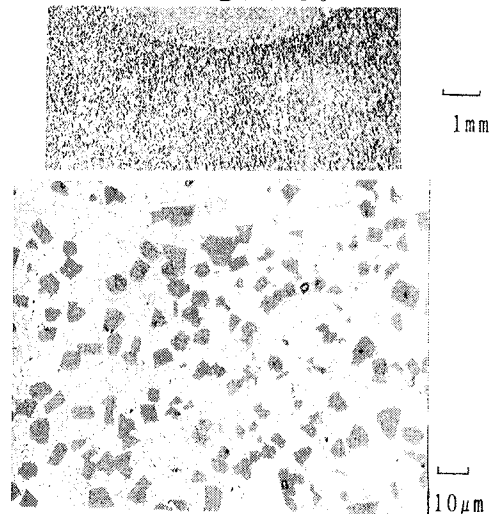


図6 レーザ照射したAl-30%Siの断面組織
(上：マクロ 下：顕微鏡)

図7にレーザ照射した試験片断面において、画像解析によって、初晶けい素の平均粒径を表面からの距離で示した。

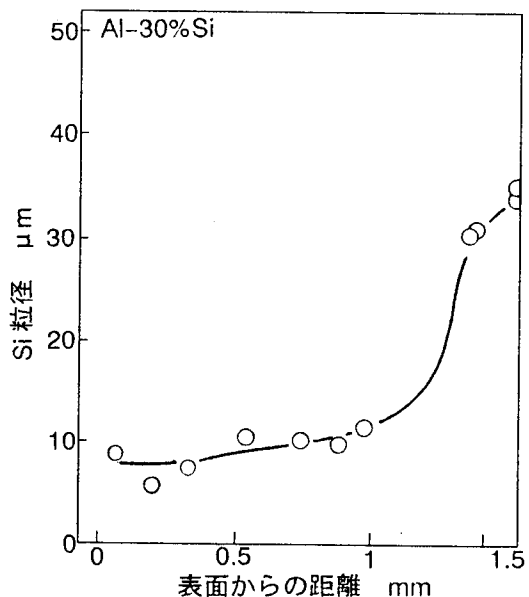


図7 レーザ表面改質層のSi粒径

初晶けい素の平均粒径は、母材で約35 μm であるのに対し、レーザ照射により15 μm 以下まで微細化した。1 mm^2 当たりの初晶けい素粒子数も表6に示すように著しく増加した。

表6 初晶Siに及ぼすレーザ照射の影響

	粒径 μm	粒子数(1 mm^2)
母材	約35	約300
改質層	約10	約400

試験片：Al-30%Si

また、顕微鏡組織観察により、全体に初晶けい素が、均一に分布した組織となっていた。顕微鏡組織では、初晶けい素、 α 相及び共晶Al-Si相が観察された。さらに、試験片内部へ向かうと、レーザ照射によっても母材の初晶けい素は溶解せず、共晶組織のみが溶解、急冷された微細組織が観察された。これは、この領域では、初晶けい素が溶解する温度まで到達しなかったことを示している。

さらに、図8に表面改質層及び母材の微小領域をX線回折した結果を示す。いずれもAlとSiの結晶のみが検出され、レーザによる急速加熱、溶解後の急冷によっても、非晶質になっていないことを表している。

同条件でレーザ照射したAl-7%Siについて、DAS(デンドライトアームスペーシング)から冷却速度を次式³⁾によって求めると、1000~2500K/sとなり、Al-23%Si、Al-30%Siにおいても同様な冷却速度で急冷されたものと推察される。

$$d = 62 \cdot C^{-0.337} \mu\text{m}$$

d : DAS

C : 冷却速度 K/s

(3) 機械的性質の評価

図9に引張試験の結果を示す。レーザ照射した試験片の引張強さは、Al-23%Si、Al-30%Siのいずれにおいても、母材に比べて大幅に向上した。

Al-23%Siにおいては、母材の引張強さは、約150MPaであるが、レーザ改質層で、250MPa以上とな

った。

図10にピンディスク式による摩耗試験の結果を示す。Al-23%Si、Al-30%Siいずれにおいてもレーザ照射した試験片の摩耗量は、母材に比べて大幅に低下した。いずれにおいても、レーザ照射による急冷効果で組織が微細化され、機械的性質が改善されたものと考えられる。

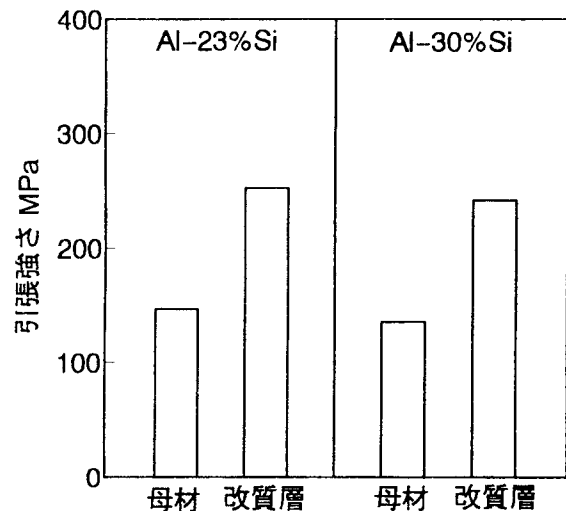


図9 レーザ表面改質層の引張強さ

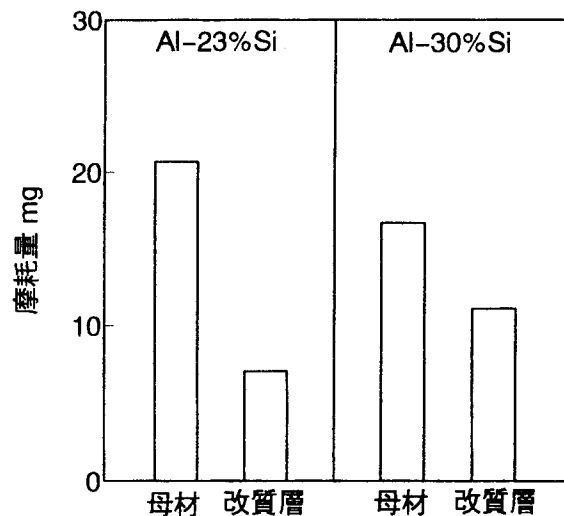


図10 レーザ表面改質層の摩耗特性

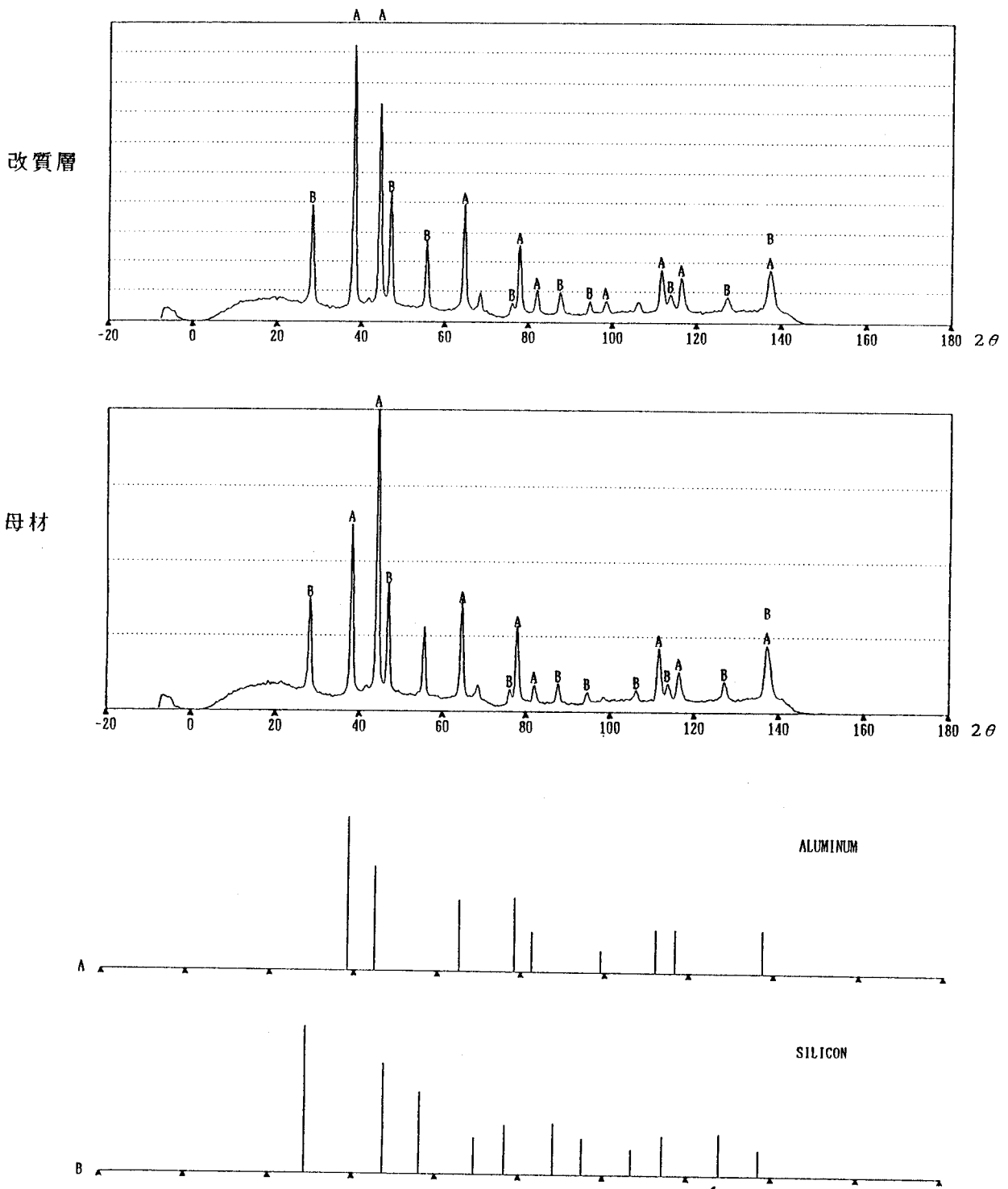


図8 レーザ表面改質層及び母材の微小X線回折結果

試験片 Al-30% Si

測定条件 電圧 40kV 電流 30mA

管球 Cu コリメータ直径 $\phi 100 \mu\text{m}$

揺動 $\omega : 10 \sim 15^\circ$ $\chi : -20 \sim 20^\circ$ $\phi : -45 \sim 45^\circ$

表7に摩耗試験後の相手材（回転円板）の粗さ曲線から求めた最大高さ R_y を示す。レーザにより表面改質した層をピンとした時の回転円板は、母材をピンとしたときの回転円板に比べて、 R_y が小さく、相手材を傷つけにくい。これは、主に母材では、大きい初晶けい素が、摩耗試験中に脱落して相手材を損傷させていたものが、初晶けい素を微細化することにより改善されたものと考えられる。

表7 摩耗試験後の相手材の表面粗さ

	最大高さ R_y μm	
摩耗試験前	2.0	
摩耗試験後	Al-23%Si	Al-30%Si
母材	28.0	39.0
改質層	11.2	9.0

4 結 言

過共晶Al-Si合金素材の表面にCO₂レーザを照射し、表面層だけを溶融、急冷凝固することによる表面改質を行い、摩耗特性、強度特性を検討した。

その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) CO₂ガスレーザを過共晶Al-Si合金素材に照射することにより、素材表面は部分的に溶融、急冷され、その結果、微細な表面改質層を形成する。
 - (2) レーザ照射により1mm以上の表面改質層の厚さを得る効率よく得る条件は、出力:2.3kW、焦点はずし距離:50mm、試験片移動速度:300mm/minである。
 - (3) 表面改質層のマイクロ組織は、微細な初晶けい素、Al-Si共晶相及び α 相から構成される。
 - (4) レーザ照射に表面改質された組織の引張強さ及び摩耗特性は、母材に比べて著しく向上する。
- また、表面改質された組織は、摩耗試験において、相手材を傷つけにくい。

本研究は、平成7年度中小企業庁技術開発研究費補助金事業として実施したもので、ご指導、ご協力いただきました工業技術院名古屋工業技術研究所

材料プロセス部 長沼勝義氏、大阪大学溶接工学研究所 中田一博助教授をはじめ、中小企業庁、中部通商産業局ならびに共同研究機関の方々に深く感謝の意を表します。

5 参考文献

- (1) 駒崎他：鋳物67(1995)638
- (2) 日本規格協会：非鉄金属材料選択のポイント P.80
- (3) R.E.Spear and G.R.Gardner:Modern Castings, 43(1963)209