

ビーム回転光学系を用いたレーザーによる金属加工法の研究

沓名 宗春*

1. 緒言

1970年代にレーザー応用技術としてのレーザー加工の研究開発が米国、英国、ドイツ、日本で急速に進み、表1に示すようにすでに電子・電気産業、自動車産業、鉄鋼業、機械産業を中心に生産ラインに数多く導入されている。現在、わが国には約7000台余のCO₂レーザーおよびYAGレーザー加工機が稼働している現状にある。

その主な用途は切断、穴明け、マーキングなどであり、溶接や表面加工への応用も進みつつある。レーザー加工機はそれぞれ特性が異なるばかりでなく、多種類の加工を1台のレーザー装置で行うことは容易ではない。

著者は、炭酸ガスレーザー加工機の加工光学系を工夫することにより、よりレーザー加工の特性を高めるとともに、多種類の加工にも利用できるようにするため、ビーム回転光学系の試作とその応用について研究を進めてきた。すな

表1 レーザ加工法の種類とその用途

加工の種類		主な適用分野・目的	
溶接・接合	溶接	溶鋼製品加工ラインでの板継ぎ、電子部品、自動車部品（モータコア、プーリ等）、機械部品、航空機部品等の溶接	
	ろう付	電気・電子部品のろう付	
除去加工	切断	鉄鋼材料、非鉄材料、非金属材料の切断、形切断	
	穴あけ	たばこ紙の穴あけ、パネルの穴あけ、ダイヤモンドダイス・工具の穴あけ	
	微細除去加工	セラミックス基板のスクライビング、抵抗トリミング、マスクのリベアリング、セラミックス基板やSiのレーザー励起エッチング	
	マーキング・彫刻	ICのパッケージ、機械部品の刻印、木材・プラスチックの彫刻	
	溶融切削成形	ネジ切り、ターニング、ミリング、金型切削成形	
表面加工	クリーニング	酸化被膜の除去	
	加熱プロセス	変態焼入れ	エンジンシリンダライナ、ピストンリングの焼入れ、クランクシャフトの焼入れ
		アニーリング	残留応力の低下、ポリシリコンの単結晶化、同配線抵抗の低減
		溶体化処理	ステンレス鋼溶接継手の脱鋭敏化、耐食性の向上
	溶融プロセス	合金化	高Si化、高Cr化、高Hf化、炭化、窒化、新合金の生成、チタン表面の窒化処理
		肉盛・クラディング	タービンブレード、エンジンバルブ等の耐摩耗性・耐食性の向上
		再溶融処理	ステンレス鋼の耐酸化性向上、溶射層の気孔率低下、均質化（コンソリデーション）
		溶接継手止端部処理	鋼材、アルミ合金溶接継手の疲労強度の向上
	表面溶融	ダル加工	鮮映性鋼板の生産
		チル処理	鋳鉄の耐摩耗性の向上、ステンレスの耐孔食性向上、均質化、工具鋼の炭化物均一化
クレージング		非晶質化、耐食性・電磁特性の向上、組織の微細化、Fe-Si-B合金のアモルファス化	
蒸発プロセス		レーザーPVD	セラミックスのコーティング、酸化物薄膜の形成
蒸発プロセス	磁区細分化処理	ケイ素鋼板の鉄損の改善	
	衝撃軟化	アルミニウム、鋼の強度改善	
	乾燥処理	印刷紙のインク乾燥	
	化学反応	レーザーCVD	半導体薄膜、ダイヤモンド薄膜、金属膜、SiO ₂ 膜の生成、Siのレーザー酸化、Si、GaAsのエピタキシャル成長
レーザー光化学		レーザー光分解（有機物の切断・穴あけ）、熱分解	
レーザーソグラフィ		基板上への薄膜形成、高分子膜の形成	
メッキ加速処理		メッキの反応速度の向上	
その他	新材料の製造	セラミックスの合成（Si ₃ N ₄ 、SiC、SiAlON）、微粒子生成、超電導体、FRP、FRMの製造	
	レーザー援用切断	超合金やチタンの加熱切削、切削速度の向上	
	曲げ加工	鋼板、薄板の曲げ加工	
	割断、破砕	ガラス板の割断や岩石の破砕	

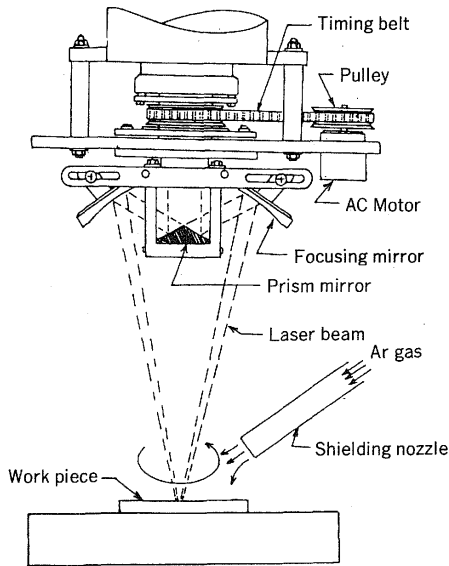


図1 最初に試作したビーム回転光学系の模式図

わち、すでに図1に示す球面鏡を用いた2ビーム交差回転光学系を開発し、国内特許をとるとともに、その特性を調べ¹⁾²⁾、その応用として、鋼の焼入れ²⁾、ステライト材のレーザ肉盛³⁾、アーク溶接継手の疲労強度改善⁴⁾⁵⁾、切削工具チップのレーザ肉盛⁶⁾、レーザ浸炭等の研究に応用してきた。

2. 研究の目標

本研究ではさらに上述の装置を根本的に改良し、回転数、集光性、ビームの可動性、ビーム分割の点で図2の試作装置に改良を加え、一層、工業的に応用できるように工夫をこらした。すなわち、図2に示すようにプリズムミラーでオリジナルビーム(発振器からでた1本のレーザビーム)を2本に分割し、水平なビームとした後これを放物面鏡で集光し、被加工物に照射する。この放物面鏡は小型モータで稼働できる。これらの光学系はACモータで高速に最大回転数1500rpmまで回転できるように設計・試作することを目標とした。分割された後もそれぞれのビームは高エネルギー密度であるため、多点の熱源が得られ切断や溶接に利用できる。これを高速回転すると材料は高速繰り返しの熱サイクルを受けることになり、加熱・溶融-冷却が従来の熱源に比べて、数倍速く起こる。その結果、金属材料は元素分布の均一化、組織の微細化、均質化、非晶質化されることが期待される。

本研究では、このような装置が実際の材料加工においても、十分組織制御に有用であるか否かを確認するため、鑄造アルミニウム合金(AI-Si系)の表面硬化処理として、鉄粉およびニッケル粉を用いたレーザ合金化処理を試み、高速回転光学系による材料の急熱・急冷処理が均質な合金層(表面処理層)を得るのに有効であるか検討した。

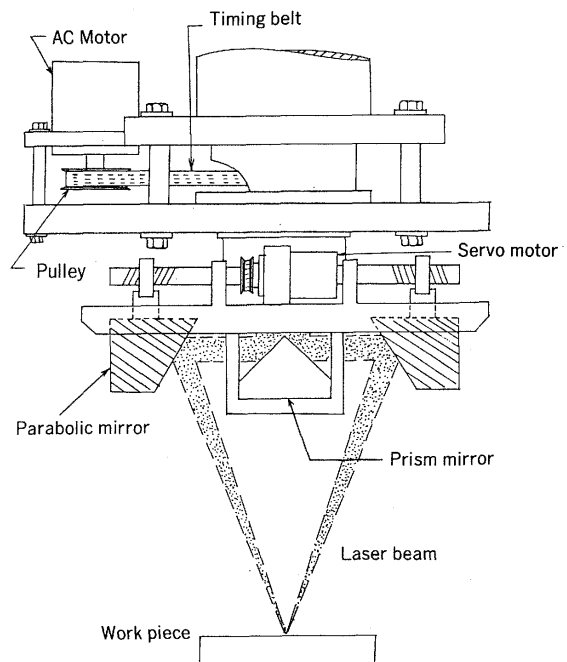


図2 本研究で試作したビーム回転光学系の模式図

3. 研究成果

3.1 ビーム回転光学系の試作

レーザ加工中の一つまたは2対のレーザビームを往復運動および回転運動させることにより、エネルギー分布を加工目的に応じて変化できれば、複雑かつ高品質の製品を生産する技術手段として有用である。本研究では2kWのCO₂レーザ発振器より発振されたオリジナルビームの光軸の中心に図3に示すビーム分割用のプリズムミラー(2面

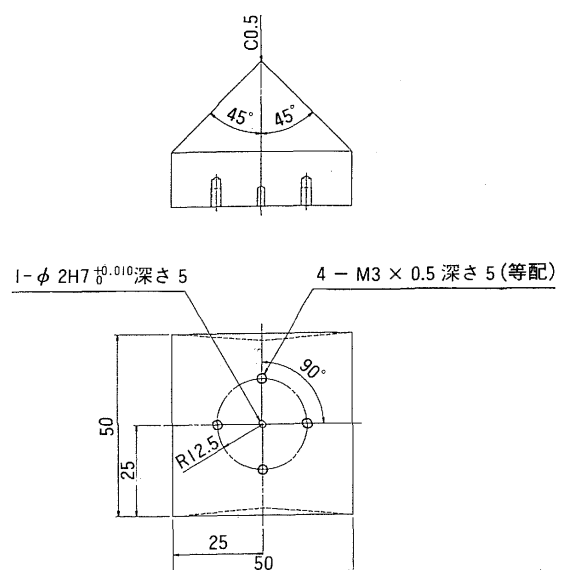


図3 ビーム分割用2面プリズムミラー

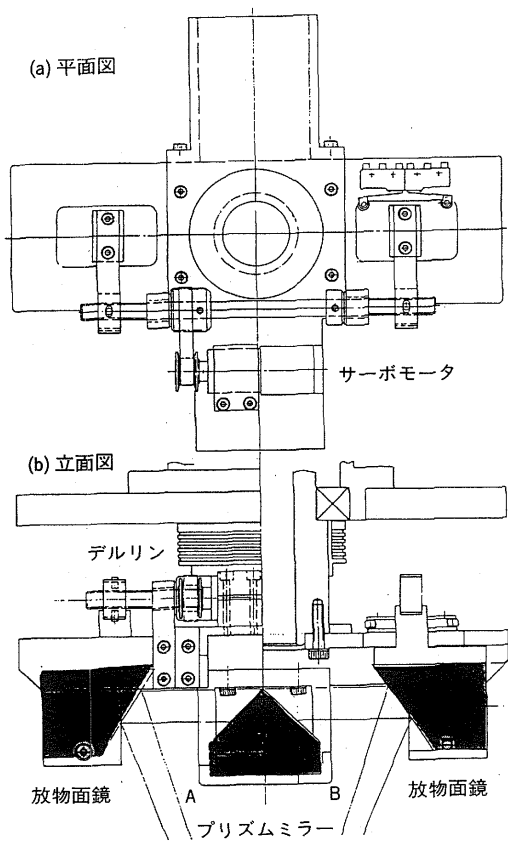


図4 ビーム回転光学系でのビーム行路

面鏡および4面鏡をともに製作)を図4に示すように配置し、垂直方向から入射したレーザービームを水平方向に分割した。これをビーム集光用放物面鏡(銅製モリブデンコート材)とで集光した。このミラーはボールギヤシャフトをガイドとするテーブルに付けられており、サーボモータでタイミングベルトなどの駆動伝達系を介して、ボールギヤシャフトを回転することにより1対の放物面鏡を機械的方法により自動的直線往復運動として駆動させた。これらの光学系をACモータで高速回転させた。サーボモータへの通電は図5に示す接点方式で行い、5枚のディスクをもつデルリン(銅製金コート材)へ直流の2端子を当てて通電した。1枚のデルリンに明けた穴をフォトマイクロセンサで検出し回転数を測定・表示できるようにした。また、

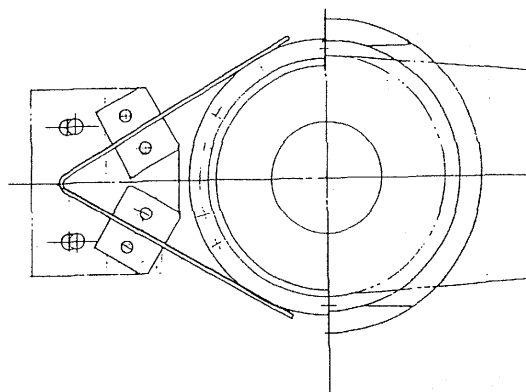


図5 サーボモータへの通電用ディスク接点

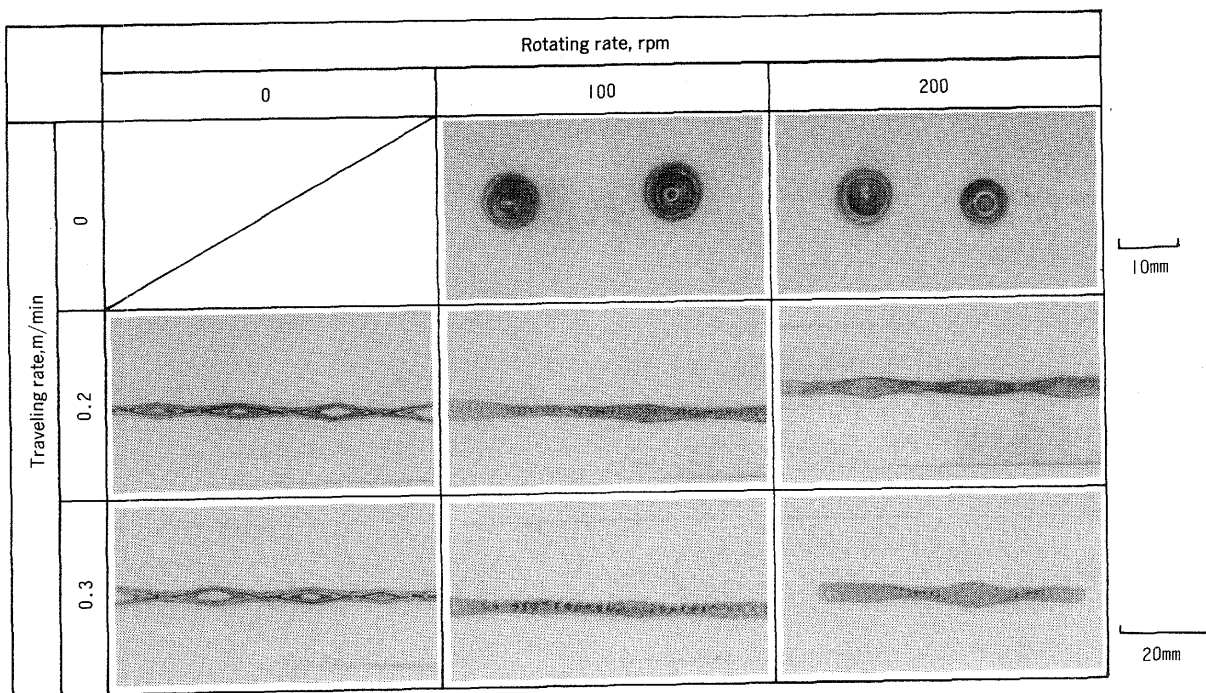


図6 溶接加工中にビーム間隔を変動したときの溶融パターン

放物面鏡の曲率は

$$y = 1/48 x^2$$

で示され、その焦点距離は、12mmである。二つの放物面鏡は対向しており、y軸上の焦点の間隔を0mmから20mmの範囲で移動できるようにした。また、この移動速度は20mm/分である。2ビームを用いたビーム回転光学系のビーム駆動状況と金属加熱・溶融パターンを図6に示す。2ビームによる2つの点熱源は100rpmおよび200rpmで回転すると円形の熱源となる。二つの放物面鏡の間隔をサーボモータで変動させることにより円の径が変わる。レーザー加工ヘッドを0.2および0.3/minと変動させるとビーム回転がない時には図中に示すように制御したままのひし形のパターンを描く。よって、レーザー切断時や溶接時の加工幅を任意にコントロールすることができる。ビームを高速で回転すれば、図に示すように加工幅を同様に変動させることができた。

また、アクリルブロックにこれら回転ビームを照射したときのバーンパターンを図7に示す。ここで、vは走行速度(mm/min)、Rは回転速度(rpm)、D_{FS}は試験片表面からビーム交差点までの距離(=焦点はずし距離、mm)である。V=0のとき、すなわち、回転しないときはビームの交差状況および交差点がよく分かる。それを走行させるとルート部にスパイクが現われ、その間隔が走行速度に依存していることも分かる。このバーンパターンにより、目でみえないレーザービームの形、姿が分かる。

3.2 アルミ合金のレーザー肉盛

この試作開発したこの光学系を用いて、表面硬化処理として鋼材のような焼入れによる変態を利用した硬化が不可能であり、かつ通常のレーザー肉盛が困難とされるアルミ

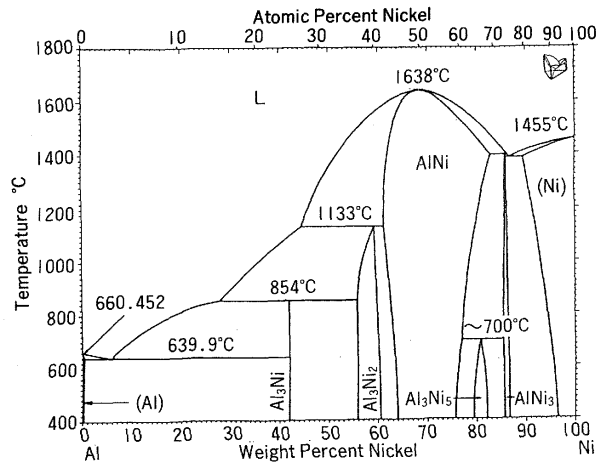


図8 Al-Ni 2元系平衡状態図⁷⁾

鋳造合金 (Al-Si 系) のレーザー肉盛実験を試みた。近年、車両の軽量化のため、多くのアルミニウム合金が使用されるようになってきた。しかし、材料が軟らかいため、表面が摩耗しやすい。ここではニッケルおよび鉄を合金化することにより、図8に示すように⁷⁾、Al₃NiまたはAl₃Ni₂の金属間化合物を表面層につくり、母材硬さの5ないし8倍の硬さを得て、耐摩耗性を改善することを目的として行った。3種類のアルミニウム鋳造合金 (Al-7%Si, Al-12%Si, Al-19%Si, 50×33×12mm) の表面にニッケル粉末と鉄粉を塗布した後、2kW炭酸ガスレーザー装置を用いて、レーザー出力を1.7kW、走行速度を0.2および0.3m/min、アルゴシールドで、ビーム回転速度を300、500、

v \ D _{FS} R	0		500		1000	
	300	300	300	500	300	500
-20						
-10						
-5						
0						
+5						
+10						
+20						

図7 回転ビームのアクリルへのバーンパターン

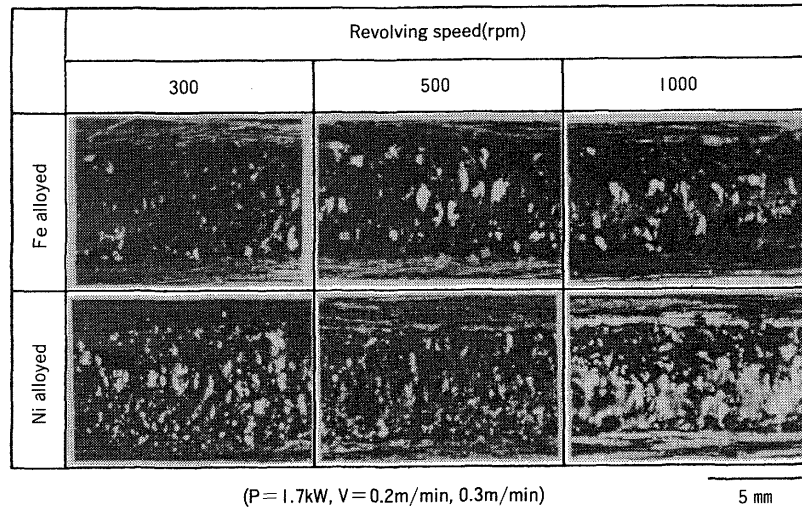


図9 回転ビーム装置を用いたレーザー肉盛部のビード外観

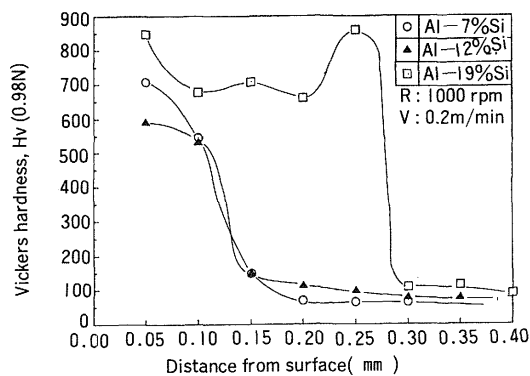


図10 レーザ合金層の硬さ分布 (鉄添加)

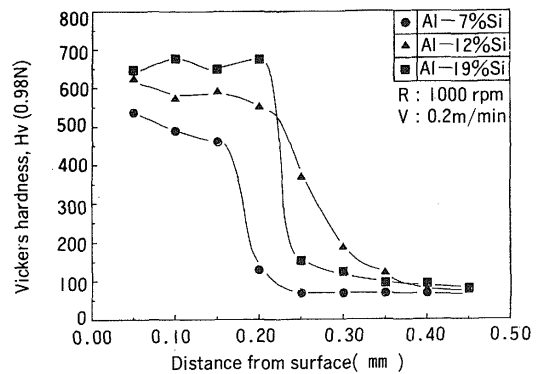


図11 レーザ合金層の硬さ分布 (ニッケル添加)

1000rpmで合金化した。図9はそのビード外観を示す。回転数の増加により滑らかなビードが得られた。得られた合金層のビッカース硬さ分布を図10および図11に示す。母材の硬さが約90Hvであるのに対し、合金層では600から800Hvの高い硬さを得ることができた。とくに、母材が19%のSiを含有するものがより高い硬さを示した。この合金層の耐摩耗性を評価するため、図12に示す大越式摩耗試験を実施した。SKH3鋼焼入れ材を相手材として、荷重62N、すべり距離100m、すべり速度0.25m/sの試験条件で試し、その時の比摩耗量を測定することにより耐摩耗性を評価した。

比摩耗量 W_s は次の式で求めた。

$$W_s = \frac{B \cdot b^3}{8r \cdot P_o \cdot l_o}$$

ここで、 B は相手材のディスク幅、 b は測定した摩耗部の長さ、 r は相手材のディスク半径、 P_o は負荷荷重、 l_o は摩耗距離 (ここでは100m) である。

摩耗試験の結果を図13および図14に示す。铸造のままのアルミ合金の比摩耗量はいずれも大きい、ニッケルをレー

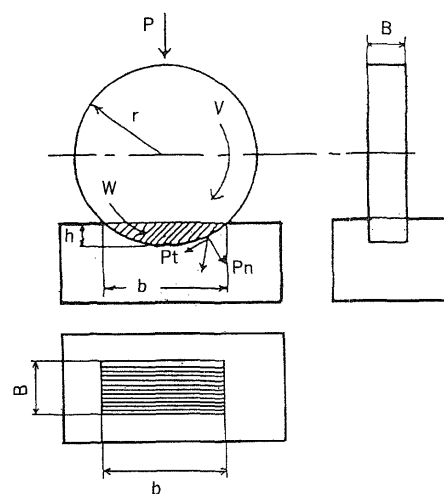


図12 大越式摩耗試験の概要

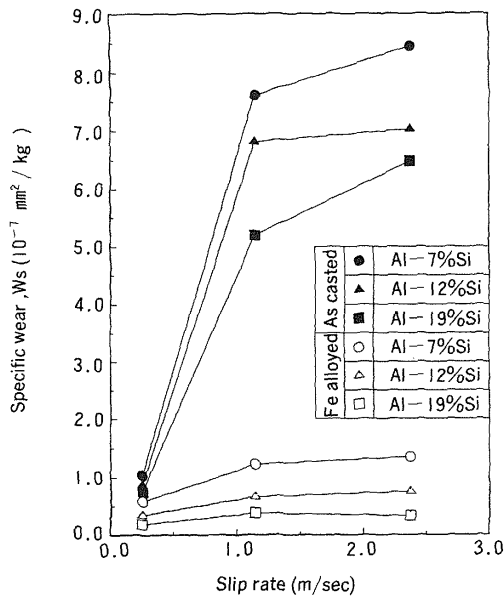


図13 摩耗試験結果 (鉄添加)

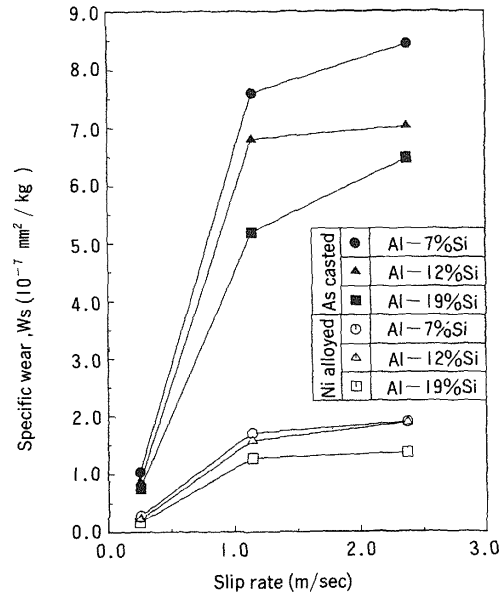


図14 摩耗試験結果 (ニッケル添加)

ザ合金化したものは母材の6分の1あるいは8分の1に比摩耗量が低下した。また鉄をレーザ合金化したものは8分の1から20分の1にまで比摩耗量が低下した。レーザ合金化がこのような軟らかい合金の耐摩耗性向上に非常に有効であることが確認できた。このレーザ合金化をより均一に行うため、試作したビーム回転光学系が有用であることも同時に確認できた。

4. まとめ

レーザ熱源の材料加工への応用はまだ20年の歴史しか持たず、他の加工技術に比べて、未熟ではあるが、それが持つ特性のすばらしさから、従来法にはない加工特性を示し、その応用が広がっている。ここでは、高速ビーム回転装置を試作開発し、その材料加工への応用について、基礎的なデータを得ることができた。

5. 参考文献

- 1) I.Masumoto, M.Kutsuna: Study on Intersect and Rotate Optical System of Divided Laser Beam, Proc. of 2nd JOM, (1984-4), Helsingør (Denmark), p.91-97

- 2) I.Masumoto, M.Kutsuna: Entwicklung und Anwendung der Kreuzungs-Rotations-Optik für geteilten Laserstrahl, ZIS Mitteilungen Vol.27(1985-3), p.239-254
- 3) 益本功、沓名宗春、宮本典孝: 金属粉末を用いたレーザ肉盛溶接に関する研究(第2報)、溶接学会全国大会講演概要、34集 p.205
- 4) 益本功、沓名宗春、長谷川正義: アルミニウム合金 A5083P-0 溶接継手の疲れ強さに及ぼす余盛止端部レーザ処理の効果、溶接学会論文集、6巻(1983-3), p.420-425
- 5) I.Masumoto, M.Kutsuna: Improvement of Fatigue Strength of Welded Joints by Laser, Proc. of 4th CISFFEL, Cannes, (1988-9) p.26-30
- 6) I.Masumoto, M.Kutsuna, H.Iwata, T.Kawai: Study on Hardfacing of Cutting Tips with Laser Beam, Proc. Int. Conf. on Quality and Reliability in Welding, Hanzhou (China), (1984-9), p.A-20-1

6. 発表論文

- 1) Muneharu Kutsuna and Takeji Arai: Development of Beam Rotaing Device for CO₂ Laser Using Two Mobile Parabolic Mirrors, Proc. of LAMP'92, Nagaoka, (1992-6), p.679-684
- 2) Muneharu Kutsuna and Takeji Arai: Development of Beam Rotaing Device for CO₂ Laser Using Two Mobile Parabolic Mirrors, IIW Doc.No.IV-588-92, Madrid, (1992-9), Distributed