

レーザー表面改質によるアルミ合金の 耐摩耗性表面の研究

Improvement of Wear Resistance of Al Alloys with Laser Surface Modification

渡部 直也*
Naoya Watanabe

岡部 伸治*
Shinji Okabe

岩佐 孝*
Takashi Iwasa

要 旨

自動車用のエンジン・車体材料は軽量化・低燃費化のために鉄系からアルミ合金への置換が進められて来ている。しかしアルミ合金は耐摩耗性が低く、有効な表面処理法もないため高負荷の摺動部位への適用には限界がある。我々は、このアルミ合金の表面をレーザー表面改質技術により改質することにより、高面圧・高速の過酷な摺動負荷にも耐えうる新しい耐摩耗性表面を得ることができた。

本研究により得られた表面層は金属間化合物 Al_3Ni と Al_3Ni_2 との複合マトリックス中に Al_3Ta 粒子が析出し分散した新規組成であり、ピッカース硬度 600 以上、厚さ 0.8mm 以上を示す。この表面層は既存技術では不可能な高負荷摺動部位へのアルミ合金の適用の可能性を示すものである。

ABSTRACT

Aluminum alloys have been used in a variety of automotive parts to replace steel and iron and have contributed to weight reduction of automobiles. However, its wear resistance is inferior to that of steel or iron, and there are no aluminum surface treatment processes to eliminate this problem. Thus the laser surface modification was applied to the aluminum alloys surface to enhance their characteristics, thereby achieving improved wear resistance for the materials that otherwise cannot withstand the sliding loads arising from high radial and sliding shear stresses.

It was found that the new surface microstructure, which has been produced by superficial melting of the aluminum alloys surface and alloying Ni and Ta, consisted of fine Al_3Ni and Al_3Ni_2 matrices in which Al_3Ta particles precipitated as the reaction products.

The new surfaces showed sufficient hardness and thickness, at Hv 600 and 0.8 mm respectively. The high wear resistance of this surface was demonstrated by a cam-rocker arm simulation test.

1. ま え が き

Al 合金は軽量構造材料として、多くの自動車部品で鉄鋼材料に代替され、エンジン・車体の軽量化に大きく寄与している。しかし、Al 合金の最大の欠点の一つは耐摩耗性が鉄鋼のそれと比べて著しく劣る点である。Al 合金に対しては鉄鋼材料における浸炭や窒化といった簡便で効果的な表面硬化法がなく、高面圧、高摺動速度、叩かれ等の過酷な摩擦摩耗を被る部位への適用には限界があるのが現状である。既に実用化されている Al 合金の表面硬化法にはアルマイト処理や各種のめっき法と厚膜タイプの溶射等が挙げられるが、前者の膜厚は数 μm から数十 μm 程度と薄く、後者は母材との密着力が低い。そのため上記のような高負荷に耐え得る厚膜の表面硬化技術はいまだに確立されていないと言ってよい。

* 和光基礎技術研究センター

本報では、既に本誌 vol.3⁽¹⁾にて報告した CO_2 レーザーによる Ti 合金の表面改質技術を、熱伝導性が良く低融点の Al 合金に応用した結果について報告する。Al 合金にレーザー表面改質技術を応用する上での問題は上記の熱的物性により表面局所に安定した溶融池を形成しづらい点と、合金化元素の固溶限が低く高硬度を狙って合金化量を増やすと金属間化合物の生成によって脆化しやすいという点である。

レーザーを用いた Al 合金の表面改質については既にいくつかの研究が行われており、G. Coquerelle ら⁽²⁾は Al-Si 合金の初晶 Si の再溶融微細化および Si の合金化を、F. Ferraro ら⁽³⁾はやはり Si のほか Ni, TiN, TiC 等の付与を試みている。この他にも種々の研究がなされているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、いずれも表面層のマトリッ

クスが α -Alであることには変わりなく、従ってその硬度も高々Hv400 までである。

本研究では従来にない Hv600 以上の高硬度と 0.5mm 以上の厚膜の表面硬化層を得ることを目的に、表面層の材料組成と特性との関係について調べた。その結果表面層への合金化元素の種類や量およびレーザープロセス条件を適切に制御することによって、鉄系摺動材に匹敵する高硬度で耐久性に優れ、しかも厚膜の Al 合金表面層の新組成を見い出すことができたので報告する。

2. 実験方法

2.1. 供試材

改質の対象とする基材には、A5052 合金を用いた。その化学成分を Table 1 に示す。実験用サンプルは上記合金の焼鈍材を 25×70×7 (mm) の短冊型に機械加工したものを用いた。

また合金化実験に用いた改質用粉末の一部を Table 2 に示す。粉末の粒径はいずれも粉末供給装置の供給量安定性を考慮して 10~149 μ m の範囲とした。

2.2. 装置および実験手法

本研究で用いたレーザー発振器は東芝製 5kW CO₂ レーザー加工機 (TOSLASER CO-50) である。実験には高次マルチモードビームを用い、外部光学系としては焦点距離 15inch の集光レンズとビームオシレータを使用してスポットサイズ ϕ 2.3 mm の集光ビームを振幅 5 mm で、揺動させつつ Al 合金基材に照射した。揺動幅を考慮したエネルギー密度は 4.8×10^4 W/cm² に相当する。Fig. 1 には実際のレーザー表面改質の実験手法を模式的に示した。レーザー照射により形成された局所熔融池に改質用粉末材料を供給し、溶融合金化させた後自己冷却による凝固で改質層を形成する。その際、熔融部には酸化を防止するため He ガスを 2×10^4 cm³/min の割合で吹きつけた。改質用の粉末材料はプラズマ溶射用定量粉末供給装置により、Ar 等の不活性ガスをキャリアガスとしてレーザー照射部に供給した。

2.3. 改質層のキャラクタリゼーション

上記のようにして得られた改質層に対して下記の 1)~7) の解析を加え、合金化元素およびレーザー処理条件の表面材料組成等への影響を調べた。

1) 光学顕微鏡によるミクロ組織観察

Table 1 Chemical composition of the A5052P substrate (mass %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
A5052P	0.08	0.3	.024	.002	2.78	.21	.003	bal.

Table 2 Alloying powders used in experiments

substrate	alloying powder										
A5052P	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	
	Zr	Nb	Mo	Ta	W	Sn	Pb	Bi			

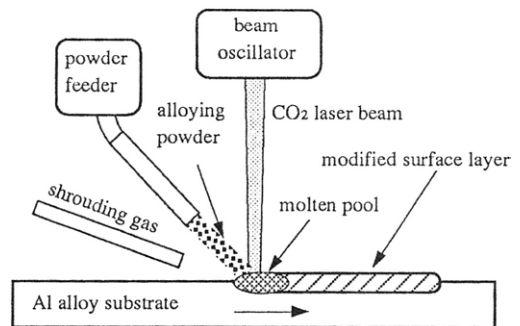


Fig. 1 Schematic diagram of the laser surface modification

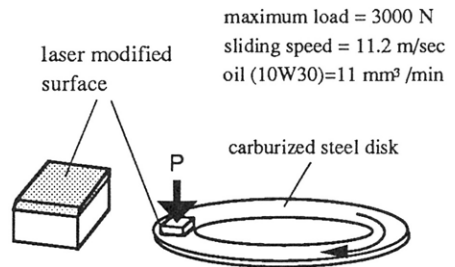


Fig. 2 Chip-on-disk type sliding test method

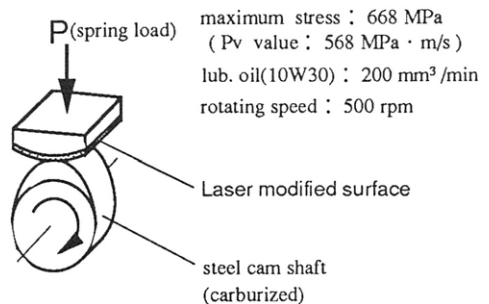


Fig. 3 Cam-rockerarm simulating test method

- 2) マイクロ・ビッカース硬度測定
- 3) ビッカース硬度測定用ダイヤモンド圧子による亀裂発生限界荷重の測定
- 4) 走査型電子顕微鏡 (SEM) による組織観察
- 5) 電子線マイクロアナライザー (EPMA) による定性・定量分析
- 6) X 線回折装置 (XRD) による状態分析
- 7) 画像解析装置による分散相体積率 (Vf) 測定

2.4. 摺動特性評価方法

レーザー改質により得られた表面の摺動特性については、チップ・オン・ディスク式摩擦摩耗試験により耐焼付き性および摩擦係数を、高面圧摩耗試験により高面圧条件下の耐摩耗性を評価した。それぞれの試験方法を模式的に Fig. 2, Fig. 3 に示す。

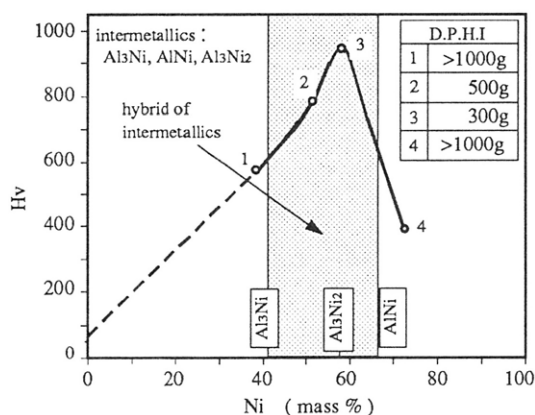


Fig. 4 Effect of the Ni concentration on the hardness and the obtained phases of the alloyed surface

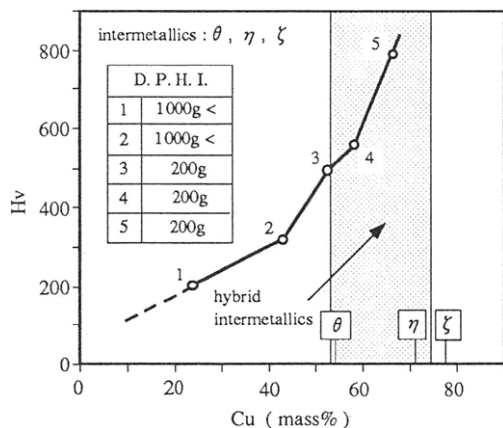


Fig. 5 Effect of the Cu concentration on the hardness and the obtained phases of the alloyed surface

3. 研究結果

3.1. 改質表面組成

まず添加によって表面硬化の効果がある元素を探す目的で、実用金属元素の範囲内で合金元素のスクリーニングを行った結果、Cr から Cu にいたる遷移金属群は合金化により著しい硬化を示すことが確認された。いずれも添加量を徐々に増していくと母材 Al と金属間化合物を形成し硬度を増していく。Fig. 4、Fig. 5 には Ni および Cu を合金化した場合の添加量と硬度の関係およびそのときに改質層内に生成される化合物相の関係を示す。

Ni の場合、層内の Ni 量が 40mass% 以下では α -Al マトリックス中に Al_3Ni の形の化合物が析出した形態をとり、添加量の増加とともにその体積比率は増加し硬度も上昇していく。さらに Ni 量を 40mass% 以上に上げていくと改質層は Al_3Ni と Al_3Ni_2 との化合物複合相に

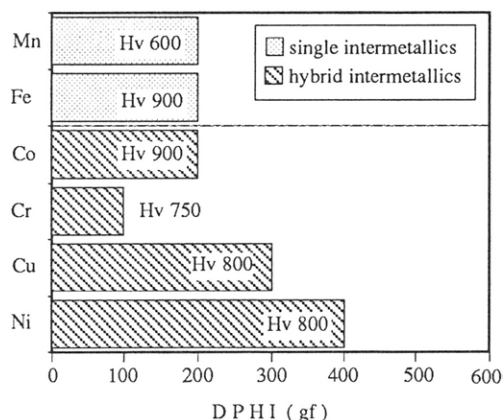


Fig. 6 Diamond pyramid hardness indentation (DPHI) value of the alloyed surfaces

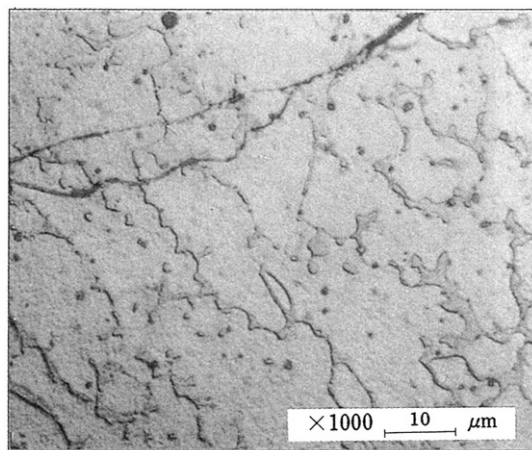


Fig. 7 Microstructure of Cr alloyed surface (OM)

なり、硬度も Hv800 を超えることが分かった。そして 60 mass% を超えると低硬度の AlNi 相が晶出し硬度は逆に低下していく。Fig. 5 に示した Cu をはじめ他の遷移金属でも概ね似たような傾向を示し、添加量の多い領域で上記のような極めて硬度の高い化合物複合層を形成することが確認された。

しかしこのような化合物複合相は高硬度を示すかわりに、Fig. 6 に示すダイヤモンド圧子による亀裂発生限界荷重から分かるように極めて脆く、合金化処理のままですでに割れを示しているものもあった。これは Fig. 7 に示すように層内に脆い金属間化合物相が粗大に晶出するためであり、従来はこの点で合金化元素の高濃度添加は好ましくないとされ、結果として Hv600 を越えるような高硬度表面は得られていない。そこで我々は上記の高硬度を維持しつつ、改質層の靱性向上を目指して第 2 元

素の添加を試みた。第一添加元素である遷移金属としては単独添加のなかで最も亀裂発生荷重の高かった Ni を選び、Ni 粉末と同時に第 2 元素の粉末を供給するという方法で実用金属元素のスクリーニングを行った。

Fig. 8 にその結果の一部を示す。横軸に元素の融点を縦軸に添加した改質層の亀裂発生限界荷重を示す。図から明らかなように Nb, Ta, W, Mo といった高融点金属の同時添加により改質層の亀裂発生限界荷重が向上することがわかった。この効果はとくに Ta, Nb で顕著であった。Fig. 9 は Ni の単独添加 (a) と Ni, Ta 同時添加 (b) により得られた合金化層断面の、SEM による反射電子 (BSE) 像を示したものである。Ta を同時添加した場合の組織は Ni 単独添加のそれに比べて明かに微細であり、(b) の BSE 像で明るい灰色に見える Al_3Ni とやや暗い灰色の Al_3Ni_2 とから構成されるマト

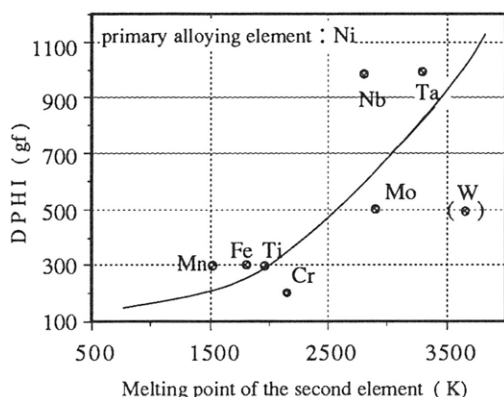


Fig. 8 Effect of the secondary alloying elements on the DPHI value of the modified surface

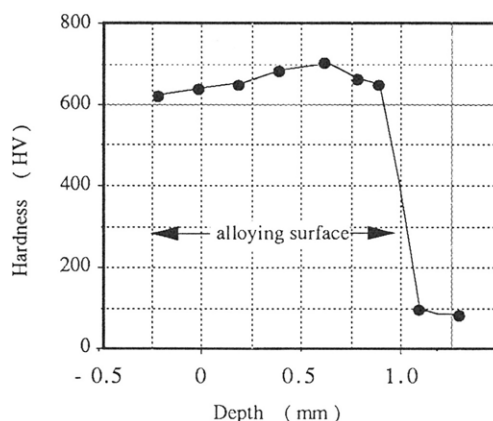


Fig. 10 The microhardness depth profile in a cross-section of the Ni-Ta alloyed surface

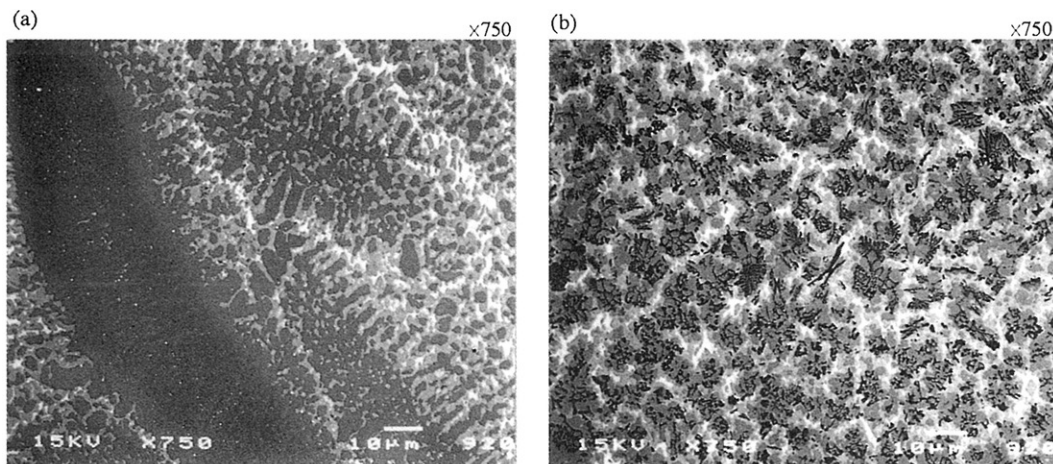


Fig. 9 BSE image of Ni alloyed surface(a) and Ni-Ta alloyed surface(b)

リックス中に、黒く見える粒径 $3\ \mu\text{m}$ 以下の Al_3Ta 粒子が均一に分散した組織になっている。Ta 添加によってこのような微細組織が得られた原因は、溶融池の凝固過程で高融点の Al_3Ta が最初に晶出して核を生成することにより、遅れて晶出する Al_3Ni と Al_3Ni_2 相の粗大化を妨げたためと推定される。上記の靱性向上効果はこの組織の微細化によって得られたものと考えられる。

この遷移金属+高融点金属の組合わせのなかで最も靱性向上効果の大きかった Ni-Ta 合金化表面について、その総添加量、量比およびレーザープロセス条件を振り、層内硬度、均一性そしてその摺動特性を最適化して得られた表面の化学組成および各化合物の体積率を Table 3 に、その際のレーザープロセス条件を Table 4 に示す。

Table 3 Chemical composition of the Ni-Ta alloyed surface

elements	Ni	Ta	Mg	Al
mass%	39.5	11.5	< 1.0	bal.
phases	Al_3Ni_2	Al_3Ta		Al_3Ni
vol.%	45 ± 10	20 ± 5		Bal.

Table 4 Typical laser processing parameters

laser power : 5kW (CW)	alloying powder : Ni, Ta
beam diameter : $\phi 2.0\text{-}2.5\ \text{mm}$	powder feed rate : Ni = 15.0 g/min Ta = 5.0 g/min
beam oscillate width : 5 mm	
travers speed: 250 mm/min	shrouding gas : $\text{He } 2 \times 10^4\ \text{cm}^3/\text{min}$

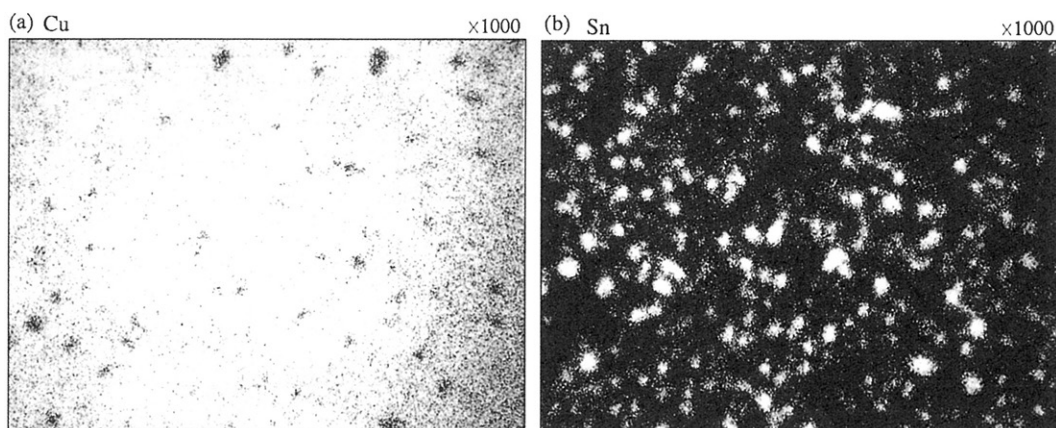


Fig. 11 Qualitative analysis map of the Cu-Sn alloyed surface by EPMA

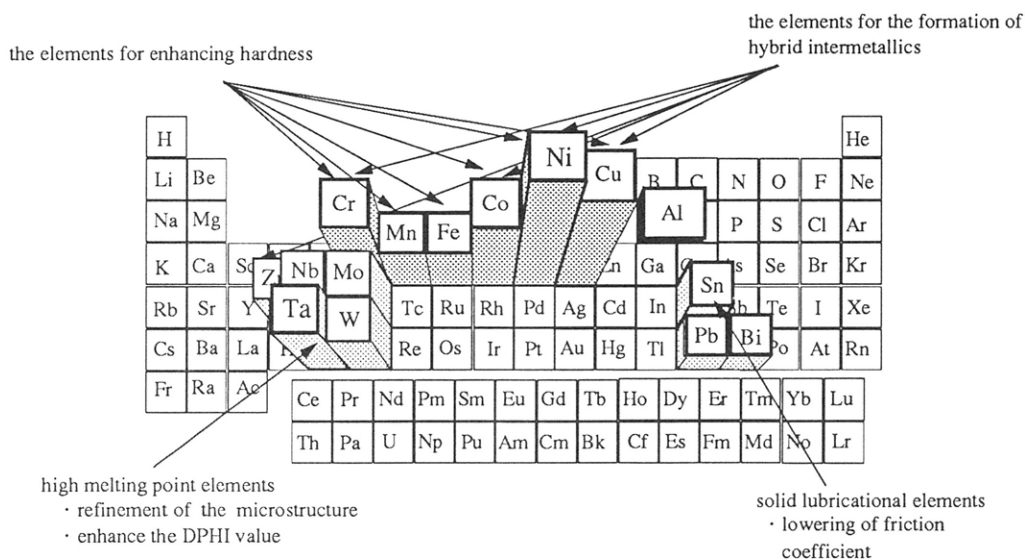


Fig. 12 The effect of the alloying elements on the laser modified surface

Fig. 10 には Ni+Ta 合金化表面層の断面硬度分布測定結果を示す。合金化層 0.8mm の深さと Hv600 以上の高硬度を示している。

以上のように本研究で得られた金属間化合物複合組織は、合金添加量の少ない場合に得られる α -Al 固溶体中に硬質な化合物粒子が分散した表面層では不可能な高硬度表面をミリオオーダーで可能にするものである。また表面を溶融させて形成したものであるために基材との結合も強固な金属結合であると考えられ、従来鉄基材料しか使えなかった高面圧・高速度の耐摩耗用途への Al 合金適用の可能性を示すものである。

上記とは別に第 2 元素の添加実験を通して Sn, Pb, Bi 等の固体潤滑性金属を用いると極めて低摩擦係数の硬質表面が得られることも確認された。Fig. 11 は第一添加元素を Cu とし第 2 元素に Sn を用いて得られた表面層の EPMA による面分析結果を示すものであり、それぞれ (a) は Cu、(b) は Sn の分布を示している。Al-Cu 系金属間化合物のマトリックス中に微細な Sn 粒子が均一分散していることが分かる。尚この場合の Sn の分散体積率は 8~12% であり、その摩擦係数は無添加のそれに比べて 1/3 に低下した。

以上の Al 合金のレーザー表面改質研究を通じて得られた各元素の合金化表面への添加効果をまとめたのが Fig. 12 である。図に示された各元素の高さは高いほどその効果が顕著であることを示す。

3.2. 摺動特性評価結果

Fig. 13 に Ni-Ta 合金化表面のチップ・オン・ディスク試験による耐焼付き性の評価結果を示す。同時に示した摩擦係数 μ は焼付き前の値である。Al 合金は素材ままの表面では高々 1000N (接触面積 1 cm^2) 以下の焼付き荷重であり、既存の各種の表面処理 (基材: A5052) を施してもそれほどの向上は見られない。それに対してレーザー表面改質を施した Ni-Ta 合金化表面は鉄系摺動材と同等の 1500N 以上の焼付き限界と 0.01 以下の低摩擦係数を示した。

Fig. 14 には高面圧摩耗試験による耐摩耗性評価結果を示す。ただし本試験では、面圧は 688MPa と高いものの装置の最高回転数が低いため Pv 値としては 568MPa $\cdot$ m/sec までしか評価できない。従って、本試験では高面圧下の初期異常摩耗の有無のみを 3 時間のテスト時間で比較評価した。この試験でも、基材ままでは瞬時

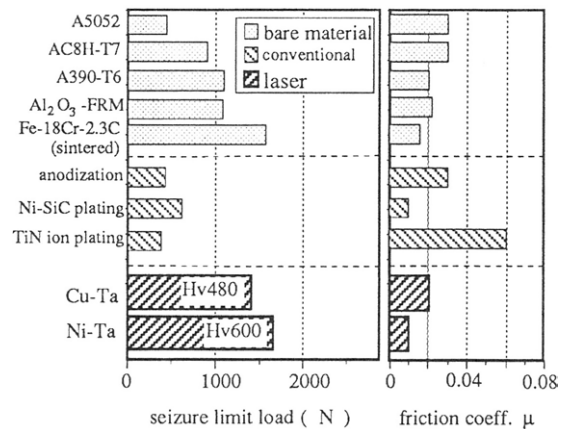


Fig. 13 Results of chip on disk sliding tests for Ni-Ta alloyed surface

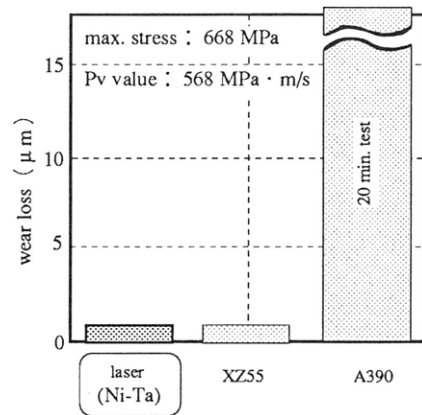


Fig. 14 Results of cam-rockerarm simulation tests for Ni-Ta alloyed surface

に著しい摩耗を生じていたのに対し、改質表面は 3 時間経過後も測定可能な摩耗は認められず、鉄系高 Cr 高 C 摺動材と同等の結果であり、カムノーズ、ロッカーアームスリッパ面等への応用が期待できる。

4. 結 論

耐摩耗性に欠点を持つ Al 合金の表面に、既存技術で、は不可能な高硬度・厚膜の新しい組成の耐摩耗性表面を、レーザー表面改質により得ることができた。本表面は Al 合金の高面圧・高速摺動部材への応用の可能性を示すものである。

- 1) この耐摩耗性表面は、Al 合金上に CO_2 レーザーを照射して局所的に形成した溶融池内に、Ni と Ta または Ni-Ta 合金粉末を供給して表面層のみを合

金化させることにより得られる。

- 2) 表面層の組織は、基材の Al と付与した Ni とが反応して形成される微細な Al_3Ni と Al_3Ni_2 との Al-Ni 系化合物の複合マトリックス中に、やはり基材 Al と付与した Ta とが反応して晶出した Al_3Ta が微細に分散した化合物複合組織である。
- 3) 表面層は Hv600~800 の高硬度と 0.8mm という十分な膜厚を有しているため、高面圧・高速摺動条件下の耐摩耗性が極めて高く、従来鉄系材料しか使えなかった高負荷の耐摩耗性用途への Al 合金の適用の可能性を示すものである。

5. 参考文献

- (1) 渡部、宝田、輪嶋、徳根、岡部：レーザー表面改質によるチタン合金の耐摩耗性表面の研究、HONDA R&D Technical Review vol.3 (1991) 208-216.
- (2) G. Coquerelle, M. Collin and J. L. Fachinetti: "Laser Cladding and Alloying", 3rd I. C. L. M. (1986) 197-205.
- (3) F. Ferraro, C. A. Nannetti and M. Campello: "Aluminum alloy surface hardening by laser treatment", 3rd I. C. L. M. (1986) 233-243.
- (4) J. M. Pelletier, L. Renaud and F. Fouquet: Materials Science and Engineering, A134 (1991) 283-287.
- (5) 松田福久、中田一博：溶接学会全国大会公演概要第44集 (1989) 174-177.
- (6) 松山秀信、柴田公博：溶接学会全国大会公演概要第44集 (1989) 180-181.

■著 者■



渡 部 直 也



岡 部 伸 治



岩 佐 孝