

特殊レーザーピーニング処理における塑性変形現象の解明

名古屋産業科学技術研究所

所員 沓名 宗春

(平成20年度一般研究開発助成 AF-2008211)

キーワード：レーザーピーニング、プラズマ圧力、ディンプル形成、メタルシート、塑性変形現象

をモデル化し、有限要素法を用いてこの現象をシミュレーションした。

1. はしがき

ショットピーニング、ハンマーピーニング、レーザーピーニングなどにより金属表面に塑性加工を与え、残留応力を圧縮に分布される効果があり、疲労強度向上、応力腐食割れの防止などに応用されている。特殊レーザーピーニング技術^{1) 2)}では超短(8 ns ~ 12 ns)パルス幅で高出力密度(5 ~ 25 GW/cm²)のQスイッチYAGレーザー装置を用いて、部材表面に置いた数10 μmのメタルシートの上からレーザー照射することにより、メタルシート表面が約1万℃に加熱され、プラズマ化され、高圧が発生する。この高いプラズマ圧力により、衝撃波が部材表面にも伝わり、微細なディンプルが生じる。この現象は爆発成形に近い技術であるが、100 ~ 1000 μmと微小であるため、十分な解析がなされていない。特に、本技術で用いる10 ~ 45 μmの厚さのメタルシートの塑性変形挙動は世界的になされていない。また、メタルシートと部材表面の間に各種粉体の配置することにより、部材表面に粉体を打ち込むことができる。この技術で摺動面を持つ機械部品に摺動性の良いMoS₂などの粉体を打ち込むとその摺動性をも改善できる。現在、自動車用ピストンのスカート部へのMoS₂粉末の打ち込みによる摩擦エネルギー損失の15 ~ 20%低減が可能である。

そこで、本技術が今後、各種分野で応用されるためには、レーザー照射条件、メタルシートの材質・板厚と変形挙動、粉体の種類と塗布条件が正確に把握されることが重要であるので、本研究はこの加工プロセスを正確に制御することを目的とする。すなわち、次のような基礎データを利用して、現象の数値解析によりモデリングを行う。そして、微小な塑性加工現象をモデリングし、特殊レーザーピーニング技術の応用に際して、その信頼性の向上に役立てる。すなわち、次の2点を重点的に実施した。

- 1) ステンレス鋼およびアルミニウム合金のシートを用いた時の特殊レーザーピーニング時の発生プラズマ圧力の測定を大気中と水中で実施した。
- 2) 各種メタルシートを用いた時の変形挙動およびその結果できる微小ディンプルの形状の関係を把握する。
- 3) レーザーピーニング時のメタルシートの変形挙動

2. 特殊レーザーピーニング時のプラズマ圧力の測定

2・1 実験方法

本実験に用いた特殊レーザーピーニング処理装置の概略図を図1に示す。レーザー装置としては、タレスレーザー製QスイッチYAGレーザー装置で、平均出力は20 W、パルス幅は8 ns (ナノ秒)、パルス繰返し数は20 Hz、レーザー波長は532 nm、集光レンズの焦点距離は150 mmとした。ビームスポット径を400 μmとし、短時間、金属表面を5 ~ 25 GW/cm²の高出力密度のレーザービームを試験片に空気中または水中で照射した。試験片はA5052アルミニウム合金基板(10 mm x 60 mm x 0.2 mm)とSUS304ステンレス鋼基板(10 mm x 60 mm x 0.1 mm)の裏面にひずみゲージを貼り、照射時に試験片表面に発生するプラズマ反力を測定した。反力測定で用いる計測器はレーザー照射によっておこる金属材料のひずみ値をμSTという便宜上の単位で表しているため、μSTを重さに換算し求めた外力Pと加工溝直径dから「 $\sigma = P / (1/4\pi d^2)$ 」の式より1ショット当たり発生するプラズマの圧力を推定した。

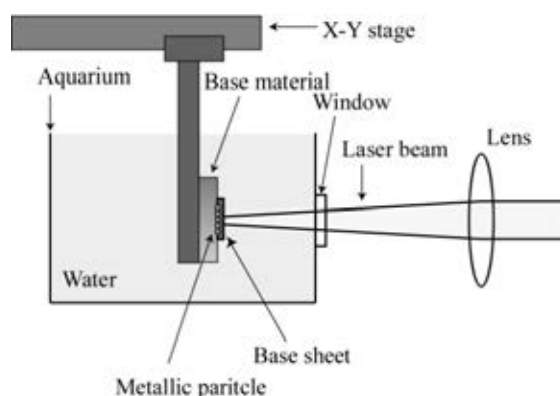


図1 特殊レーザーピーニング技術の概略図

次に、このプラズマ圧力により、MoS₂のような潤滑物質をアルミニウム合金シートに塗布し、部材表面への粉体の埋込み実験を行った。試験片にはA5052アルミニウム合金板の上にMoS₂粉末をエタノールでペースト状にして塗布した。その塗布厚さは

100 μmとし、その上から板厚100 μmのステンレス鋼シートを保護フィルムとして貼った。レーザー出力密度を10 GW/cm²として実験した。照射パターンとしては図2に示すように3種類を用いた。(1)はビーム重なり率0%、(2)はビーム重なり率70%、(3)及び(4)は1点のみ。ただ(3)は1ショット、(4)は2ショットの試料とした。

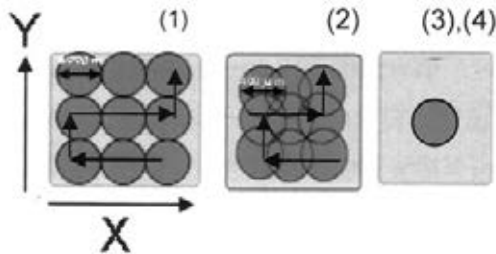


図2 粉体埋込み実験におけるレーザー照射パターン

2・2 実験結果

測定されたプラズマ圧力とレーザー出力密度の関係を図3に示す。

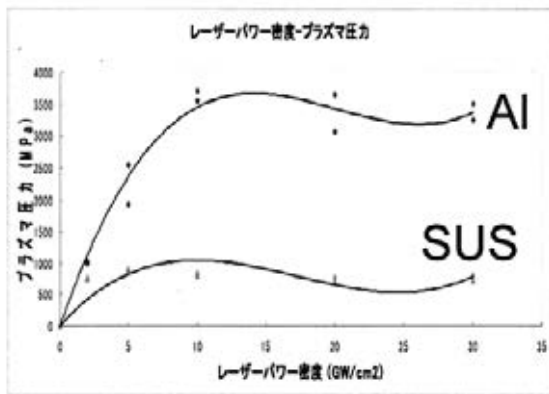


図3 プラズマ圧力とレーザー出力密度の関係(水中)

アルミニウムの結果は10 GW/cm²のときに約3.713 GPa(約3.7万気圧)と高い値を示した。10 GW/cm²以上の出力密度ではほぼ同じ圧力を示した。また、ステンレス鋼ではプラズマ化しにくいいためか、最大0.908 GPa(約0.9万気圧)のプラズマ圧力であった。アルミニウムとステンレス鋼では大きな差が見られた。これは材料の蒸発までエネルギー、イオン化エネルギー、原子の結合エネルギーなど物理的、化学的性質が異なるためと思われる³⁾。

空気中および水中でピーニングを行ない、どのような差があるか確認した結果、水中で行う方が遙かに高いプラズマ圧力が発生することが確認できた。なお、このレーザーピーニング現象の究明として、高速度ビデオによるレーザーピーニング現象(10~100 ns)の映像を捕らえた。その結果、図4aに示すように、高出力密度のナノ秒パルスレーザーをアルミニウム合金に照射すると、約20 nsでアルミニウム表

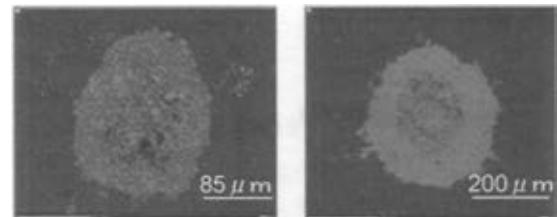
面が1000数百℃に加熱溶融される状態が映像化できた。さらに約20 ns経過するとさらにアルミニウムが高温に加熱され、約10,000℃になりプラズマ化することが図4bに示すように確認された。さらに、50~60 nsを経るとこれらプラズマはイオンと電子が再結合し、粒子となって飛散している状況が図4cのように確認された。



(a) 10~20 ns 後 (b) 20~30 ns 後 (c) 50~100 ns 後

図4 レーザピーニング時的高速ビデオ写真

微粉末の埋込み実験の結果、試料(1)と(2)は連続的に照射した結果、フィルムが破壊し、粉末が水中に流れ出し、埋め込むことができなかった。そこで、試料(3)と(4)はフィルムが破壊しないように、点と点の間隔を30 mm空けて照射した。図5にこれら試料のEDS分析結果を示す。EDS分析より白く見える部分からMoとSが検出された。1ショットの場合も2ショットの場合も、白くなっている部分が多く、潤滑物質のMoS₂粉末が埋込まれたことが確認できた。1ショットに比べ、2ショットの方が広い範囲でSとMoが検出されている。形状観察の結果から、1ショットで形成されたディンプルの直径は190 μm、2ショットでは400 μmとなった。約2倍の大きさとなった。



(a) 1ショットの場合 (b) 2ショットの場合

図5 特殊レーザーピーニングで形成されたディンプル内のEDS分析結果

3. 特殊レーザーピーニングによるディンプル形成とメタルシートの種類

3・1 実験方法

特殊レーザーピーニング処理で用いるメタルシートの種類はディンプル形成および粉体の埋込み挙動に大きく影響する。そこで、表1に示すような5種類のメタルシートを用いて、表2に示すレーザーピーニング条件で照射実験を行った。すなわち、レーザー出力50mJ、パワー密度4.9GW/cm²のレーザーを35 μmの

メタルシートに照射した場合 MoS₂ の埋込みへのメタルシートの材質の影響を調査した。用いたレーザ装置は2章で用いた装置である。

表1 メタルシートの材質とそれぞれの厚さ

Material of sheet	Ti	SUS304	SS400	SUS410	SK85
Thickness of metal sheet (μm)	35	35	35	35	35
Hardness of metal sheet (Hv)	165	170	180	200	480

表2 レーザピーニング条件

Pulse energy (mJ)	50
Spot diameter (μm)	400
Power density (GW/cm ²)	4.9
Number of shot	1

3・2 実験結果

それぞれのメタルシートで MoS₂ を埋込んだときのディンプルの外観とその表面の凹凸を図6にまとめた。粉体の埋込み状況を観察した結果、Ti と SK85 を用いた場合が一番多く埋込まれていた。ディンプルの深さは Ti シートの時にもっとも深かった。粉体の埋込み状況では SUS304 のメタルシートは悪かったが、それぞれのシートの差異はあまりみられなかった。なお、図6の各ディンプルの外観写真の下に、レーザ顕微鏡で観察したディンプルの断面形状を示す。いずれも中心部でギザギザの形状を示しているが、これは表面がプラズマ化した際に金属がイオン化して飛散したためと考える。また、チタンの場合は中央部に大きな隆起が観察された。これはプラズマ圧による大きな衝撃波の影響で、反力により中央部が隆起したものと思われる。このようにメタルシートの中央部が隆起する現象はレーザピーニング実験において時々観察された。

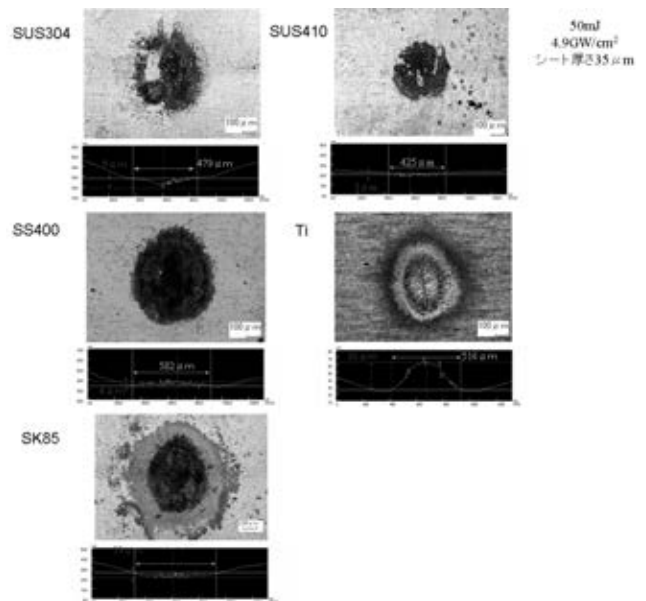


図6 メタルシートの材質を変えた場合のディンプルの観察結果

4. 有限要素法を用いたシミュレーション

レーザピーニングはレーザのビーム径、パルス幅、イオン化過程、プラズマ加熱およびプラズマ周波数など複数の関係がバランスするため非常に複雑なプロセスである。また、特殊レーザピーニングにおいてはシート厚さや照射パターン等、より考慮すべきパラメータが増えその理解を妨げており、その動的な機構・仕組みがほとんど解明されていないのが現状である。そこで本研究では有限要素法シミュレーションソフトを使用し特殊レーザピーニングシミュレーションを行い、特殊レーザピーニング時にシートおよび材料表面で起きている現象の解明、適正特殊レーザピーニング条件の同定、効率の良い特殊レーザピーニング条件の予測などを行ない、実際の特殊レーザピーニング処理の応用に役立てることを目的としてシミュレーションを行った。

4・1 実験方法

そこでまず、静的荷重による圧子の押し込みシミュレーションを行ない、形成されるディンプル観察や、実際に押し込み実験を行なった時のディンプル形状・必要荷重等の比較・検討を行なった。

(1) 装置の構成

用いた装置の構成としては ANSYS 社製 FEM ソフトウェアである、Workbench を使用した。このソフトウェアは線形構造解析、非線形構造解析、構造動解析、電熱解析、音響解析、圧電解析、電磁場解析、流体解析まで幅広い解析を行う事のできるソフトウェアである。本研究では ANSYS Workbench の ver. 12.0 を使用した。このソフトウェアをインストールするハードウェアは PC/AT 互換機である、

Hewlett Packard 社製ワークステーション xw4600、Z200 を使用した。

(2) 押し込み実験装置および試験片

有限要素法シミュレーションとの比較のために押し込み実験についても実際に行なった。供試材にはレーザピーニング実験と同様に SUS304 を使用した。試験片を図 7 に示す。板厚 1.0mm の SUS304 鋼板を 40×50mm に切断し押し込み実験に使用した。特殊レーザピーニングと同様に、試験片上にあらかじめシートを貼り付けて押し込みを行なった。シート厚さは 10 μ m、シートサイズは 20×30mm、材質は試験片と同様 SUS304 とした。試験片上のシート貼り付け領域に真空グリスを塗り、その上にシートを貼り合わせる。シートは 4 辺を絶縁テープで固定され、貼りしろは各辺 5mm とした。

使用した押し込み装置を図 8 に示す。押し込み動力には油圧ポンプ (TAIYO 製 HYDRAULIC UNIT -MAX 3.5MPa) により発生している。押し込みを使用する圧子の形状を図 9 に示す。圧子は先端がダイヤモンド製で円錐状になっている。圧子は油圧シリンダーより伸びるロッドにアダプタで固定される。アダプタ部にはロードセル (KYOWA 製 LUX-A-500N) および CMOS イメージセンサ投影方式の変位計 (KEYENCE 製 GT2-H12K) が備え付けられており、荷重および変位はロガーソフトウェア (EDS400A 制御ソフトウェア) により同期してサンプリングされる。変位計とロガーソフトの間には専用の制御器 (KEYENCE 社製 GT2-71MCN) が設置され、これにより任意の変位量で

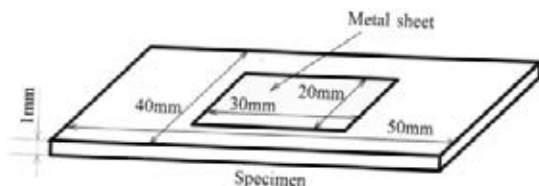


図 7 押し込み実験の試験片

油圧ポンプの動作を停止する仕組みになっている。ロガー装置へアナログ信号を送るためのアンプは ASAHI KEIKI 社製 TZ-5XA-A3H、直流電流供給装置は OMRON 社製 S82K-10024、ソリッドステートリレー (SOLID STATE RELAY) は OMRON 社製 G3B-205S 使用した。

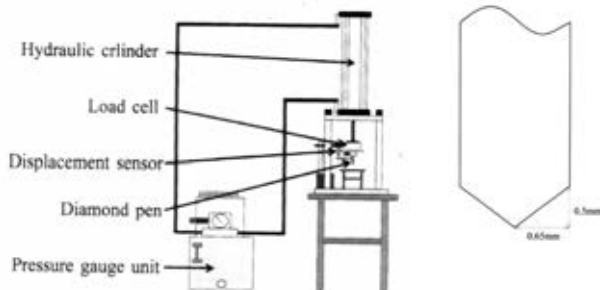


図 8 押し込み実験装置 図 9 押し込み圧子の形状

(3) 押し込み実験方法

押し込み量を正確に測定するためには試験片表面上でのゼロ点の決定が重要になる。本実験では押し込み実験前にゼロ点決定するために図 10 に示す 8 点に 50N 程度の荷重で押し込みを行なった。その際に得た荷重—変位曲線より 4N を記録した変位の平均値をゼロ点と決定した。

圧子の押し込みには油圧シリンダーを使用している。油圧バルブの開閉にはソリッドステートリレーを使用しているが、これは 60Hz 交流により動作しているために発生するリレーの動作タイミングのずれが発生する。また、油圧シリンダーは油圧のみでロッドを制御し機械的機構が無いため指定の位置を超えて空走してしまう。これらの影響により押し込み指定量と実際にロッドが停止した位置に誤差が生じてしまう。本実験ではあらかじめその誤差を計測しておき、以下の式(1)より押し込み設定量の決定に利用した。

$$\text{押し込み設定量} = \text{ゼロ点} + \text{押し込み量} - \text{空走距離} \dots (1)$$

ここで空走距離は 30 μ m とした。試験片への押し込み量は 20 μ m、押し込み速度 350 μ m/s で押し込み実験を行なった。生成されたディンプルはレーザ顕微鏡 (KEYENCE 製, VK-9700) および VK Analyzer を使用し計測した。

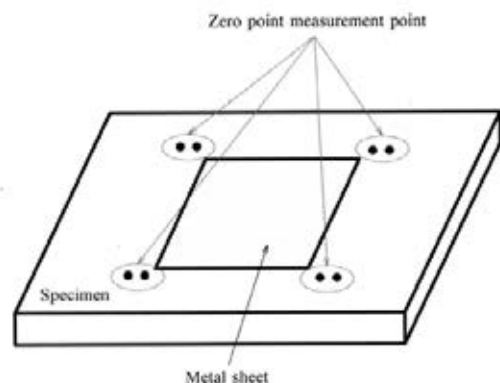


図 10 ゼロ点測定的位置

(4) ダイヤモンド圧子実験のシミュレーションモデルおよび解析設定

さらに、静的荷重による圧子押し込みを利用したディンプル生成実験のシミュレーションを行なった。圧子、試験片およびシート厚さは前項で使用した物と同じ寸法の物についてシミュレーションを行なった。そこで、図 11 および 12 に示す有限要素モデル作製した。2 次元シミュレーションによる軸対称プログラムを使用することにより、一様な平面を再現した。シミュレーションモデルではシミュレーション中のエラーを回避するために試験片・シート間に 10 μ m の隙間を設けた。シミュレーション開始直後にシートは試験片に密着し、実際の押し込み試験

と同じ密着した状態になるように解析設定した。シミュレーションでは圧子の変位を制御した。押し込み量を 1step、1s 毎に 1 μ m ずつ押し込み、30 μ m (試験片表面より 20 μ m) 押し込んだ後に初期位置まで圧子を戻す設定とした。

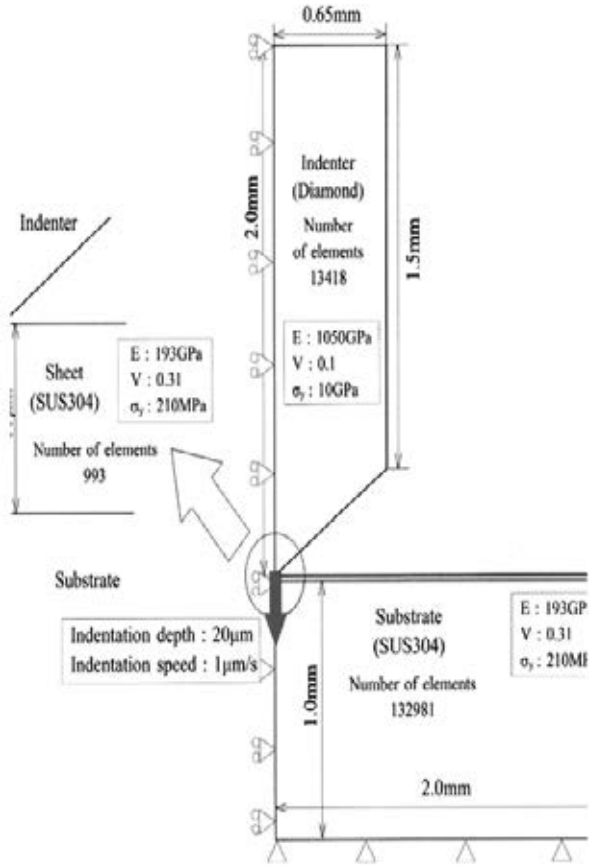


図 1.1 ダイヤモンド圧子実験の有限要素法の概略図

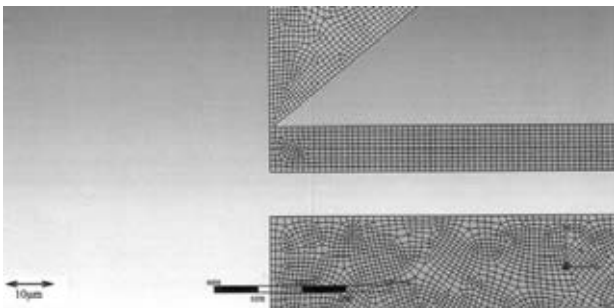


図 1.2 有限要素法におけるメッシュ

解析設定を表 3 および表 4 に示す。この設定によりメッシュされた有限要素モデルを図 1.2 に示す。ダイヤモンドの物性は文献値より密度：3.515 $\times 10^{-6}$ kg/mm³、ヤング率：1050GPa、ポアソン比：0.1 とした。メッシュングはシート全体のメッシュサイズを 0.01mm、試験片全体のメッシュサイズを 0.1mm、圧子先端部より半径 0.1mm の範囲、シート左下端より半径 0.1mm の範囲、試験片左上端より半径

0.1mm の範囲内のメッシュサイズをそれぞれ 0.001mm とし、押し込み部周辺のメッシュを重点的に細かくしその他の部分を荒くすることにより、要素数を削減し計算コストを下げつつ精度の高い計算を目指した。要素数はそれぞれ、圧子：13418、シート：993、試験片：132981 となった。接触面定義では、圧子—シート上部およびシート下部—試験片上部をそれぞれコンタクト面—ターゲット面に指定し、摩擦係数 0.15 の接触とし、ペナルティ法により定式化し、垂直剛性係数はサブステップ毎に更新し 0.1 とした。拘束条件として、軸対称部分の辺を垂直軸のみ自由度を与えて拘束、試験片底辺を拘束し、圧子上辺に変位を与えた。シートと試験片の間に 10 μ m の隙間を設けたモデルを使用するため、変位設定は表 5 のように最初のステップで圧子・シートを同時に 10 μ m 変位させ、その後 1 μ m ずつ押し込みを行なった。

表 3 有限要素法によるシミュレーションの条件設定 (材料の物性値)

ステンレス鋼 NL > Constants		
Density	7.75e-006 kg mm ⁻³	
Specific Heat	4.8e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹	
ステンレス鋼 NL > Isotropic Elasticity		
Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio
	1.93e+005	0.31
ステンレス鋼 NL > Bilinear Isotropic Hardening		
Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	
210	1800	
ダイヤモンド > Constants		
Density	3.515e-006 kg mm ⁻³	
Specific Heat	4.8e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹	
ダイヤモンド > Isotropic Elasticity		
Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio
	1.05e+006	0.1
ダイヤモンド > Bilinear Isotropic Hardening		
Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	
10000	1800	

表 4 シミュレーションにおける荷重の設定

モデル (A4) > 静的構造 (A5) > 荷重			
オブジェクト名	変位	固定/摩擦なし支持	変位?
状態		すべて定義済み	
スコープ			
スコープ方法	ジオメトリ選択		
ジオメトリ	1 辺	3 辺	1 辺
定義			
タイプ	変位	固定/摩擦なし支持	変位
定義方法	成分		成分
座標系	全体座標系		全体座標系
X 成分	0 mm (ランプ状で適用)		0 mm (ランプ状で適用)
Y 成分	テーブルデータ		テーブルデータ
抑制	No		
テーブルデータ			
独立変数	時間		時間

4・2 実験結果およびシミュレーション結果と比較・検討

図13に30 μm 時点でのシミュレーション結果を示す。圧子がシートおよび試験片をすり抜けるエラーが多発したが、2Dモデル化によるメッシュの細分化、圧子モデル先端部をR2 μm で丸め、垂直剛性をはじめとする接触面定義の見直しにより、最終的には上記境界条件により圧子、シート、試験片が互いにすり抜けない押し込みシミュレーションに成功した。図14(a)にシミュレーションにより生成されたディンプル形状を、図14(b)に実際の実験により生成されたディンプル形状を示す。シミュレーションではディンプル深さが21 μm 、ディンプル径が150 μm のディンプルが得られ、実験ではディンプル深さが22 μm 、ディンプル径が128 μm のディンプルが得られる結果となった。ディンプル深さについては実験値と非常に近いシミュレーション結果が得られたが、直径に関しては約20 μm の誤差が出た。また、押し込み時荷重は実験値が26.3Nに対しシミュレーションでは31.5Nとなり誤差が生じているため、今後の課題となる。

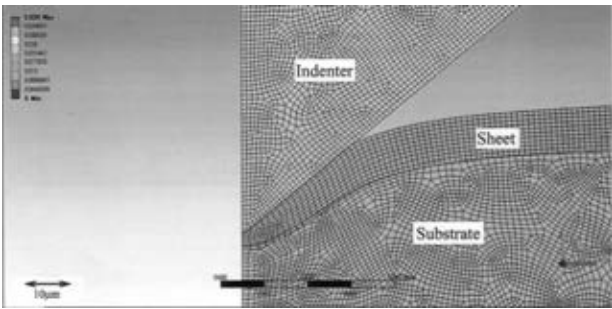


図13 30 μm 時点でのシミュレーション結果

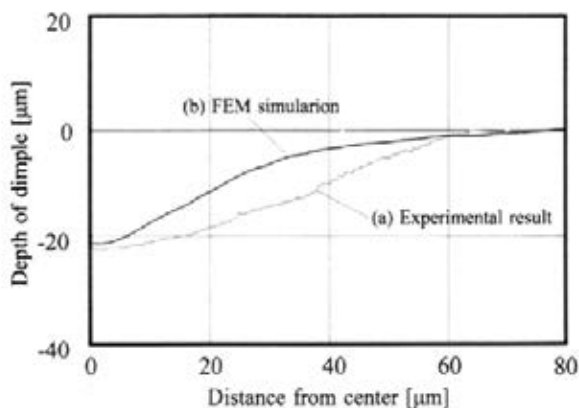


図14 シミュレーションおよび実験により生成されたディンプル形状

図15はシミュレーションにより得られたディンプル部近傍の接点の変位を示す。各接点を図中に書き込まれた矢印の方向にして移動しているのが分かった。すなわち、表面近傍ではディンプルの中心方向に引きず

られるように押し込まれている様子が観察される。ディンプル中心部では真下に圧縮される。ディンプル中心が離れていくに従い引きずり量は増えていき、ディンプルの縁の部分で最も大きくなった。その後、次第に引きずり量は少なくなっていった。しかし、ディンプル中心から離れて行くにしたがい押し込み量も少なくなるために変位の方向は材料表面に鉛直な方向ではなく水平な方向に変化していった。

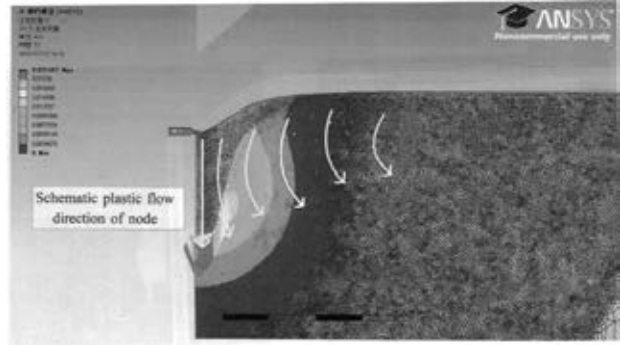


図15 シミュレーションにより得られたディンプル部近傍の接点の変位

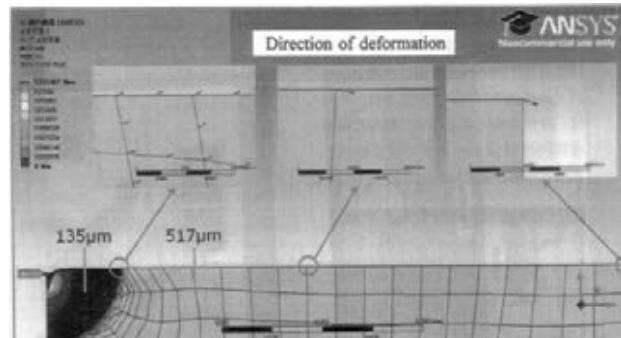


図16 ディンプル中心から離れた場所の表面における接点の変位

図16にディンプルから離れた場所の表面における接点の変位の方向について示した。ディンプル中心から135 μm の位置まではディンプル中心へ向かう方向に接点の変位しているのが分かる。しかし135 μm を超えて離れていくと変位は右上の方に方向が変わり微量ながら盛り上がるのが分かった。これはディンプル形成により押しやられた金属部分が寄ってきている為だと考えられる。ディンプルからの距離が520 μm を超えると変位は右下の方向へと徐々に変化していく結果が得られた。

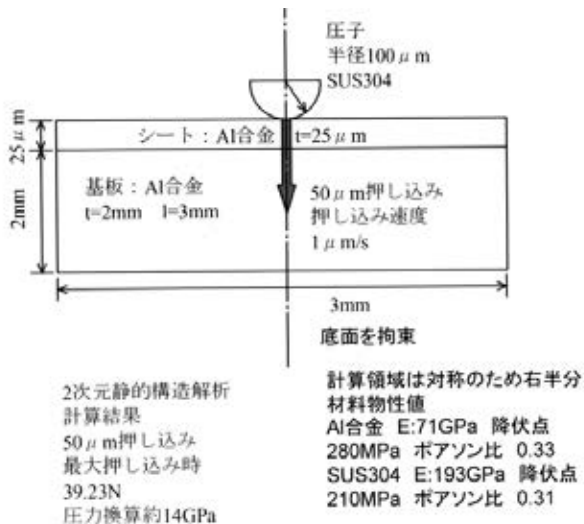


図 17 レーザピーニングの基本モデリングの計算概要

5. 特殊レーザピーニングの基本モデリングの構築

市販FEMソフト「ANSYS」を用いて、アルミニウム合金シート（板厚：25 μ m）を用いて、アルミニウム合金基板に特殊レーザピーニング時の塑性変形のシュレーションを行った。ミこの計算概

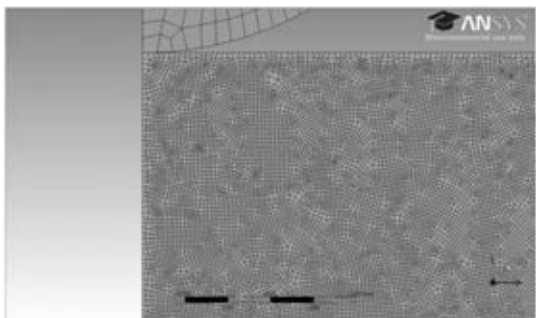


図 18 モデリング時のメッシュの画像

要を図 17 に示す。この時に用いたメッシュ画像を図 18 に示す。構築した基本モデリングによるレーザピーニング時の塑性変形の画像（動画）を図 19 に示す。このようにレーザピーニング時の塑性変形の動画ファイルとして構築できた。

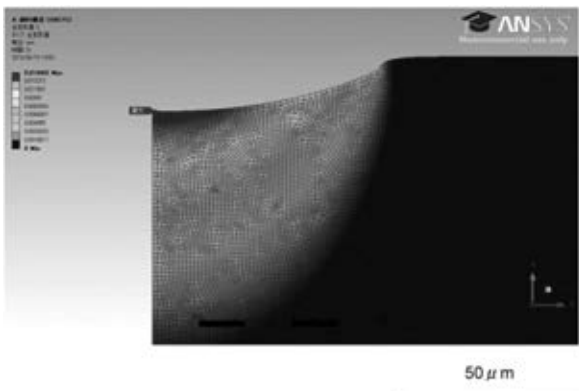


図 19 レーザピーニング時の塑性変形画像（動画）

6. 研究成果のまとめ

平成 20 年度から 22 年度まで、3 年間に行ってきた特殊レーザピーニング技術の基礎研究の研究成果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 現象の究明として、高速度ビデオによるレーザピーニング現象（10～100 ns）の映像を捕らえた。その結果、高出力密度のナノ秒パルスレーザをアルミニウム合金に照射すると、約 20 ns でアルミニウム表面が約 2000 $^{\circ}$ C に加熱溶融される状態が映像化できた。約 40 ns 経過するとさらにアルミニウムが高温に加熱され、約 10,000 $^{\circ}$ C になりプラズマ化することが確認された。50～100 ns 経るとこれらプラズマはイオンと電子が再結合し、粒子となって飛散している状況が確認された。
- 2) レーザピーニング処理時のプラズマ圧力をひずみゲージを用いて測定した。その結果、水中ではアルミニウムシートを用いた場合、最大で 3.7 GPa（約 3.7 万気圧）のプラズマ圧力が検出された。ステンレス鋼シートでは 0.9 GPa（約 0.9 万気圧）と低い値が検出された。炭素鋼およびアルミニウムを用いて、レーザ出力密度とその時発生する実際のプラズマ圧力を測定した結果、水中で行う方が遙かに高いプラズマ圧力が発生することが確認できた。
- 3) 特殊レーザピーニングに使用する各種メタルシートの影響についても検討した結果、粉体の埋込み状況に大きな差は認められなかった。
- 4) 基本モデリングの構築を市販 FEM ソフト「ANSYS」を用いて行った。構築した基本モデリングによるレーザピーニング時の塑性変形画像を動画ファイルとして構築できた。

謝 辞

本研究は経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業に採択された「特殊レーザピーニング技術の開発」研究の基礎的データを得るために、仙台高専の柴田公博教授および阿部翼君、並びに三重大学機械工学科の川上博士准教授および園田泰章君のご協力を得て行ったものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 特許第 4058448 号「レーザピーニング処理方法及びレーザ吸収粉体層シート」（発明者：杓名宗春、斉藤清隆）
- 2) 杓名宗春：特殊レーザピーニング処理とその応用：溶接技術、2007 年 8 月号、p.63-
- 3) 杓名、池田、坪井：各種金属の除去加工における蒸発しきい値の検討—エキシマレーザによる金属材料の表面除去加工に関する研究（第 3 報）、溶接学会全国大会講演概要、第 63 集、1998 年 10 月 新潟、p.302-303