

ステンレス鋼の加工誘起変態の計測手法の開発とインテリジェント材料としての応用

姫路工業大学 工学部 機械知能工学科

教授 石垣 博行

(平成8年度研究開発助成 AF-96012)

キーワード：加工誘起変態，ステンレス鋼，磁気メモリ，圧力センサ，磁場凍結，残留磁場，磁気スケール，摩擦摩耗

1. 研究の目的と背景

オーステナイト系ステンレス鋼はある一定値以上の応力を加えると、オーステナイト組織からマルテンサイト組織に変態を起こす。このときステンレス鋼は非磁性体から強磁性体に磁気的特性が大きく変化する。ステンレスの用途には耐食性のほか非磁性であることを利用している場合も多く、この変化は一般に好ましくない現象とされている。特にステンレスにプレス加工に代表される機械加工においてこのマルテンサイト変態，加工誘起変態とも言う，が問題になることが多い。この変態の検出方法としてはX線回折が最も確実であるが，局所的な，また，軽微な変態では検出が不可能である。しかも，装置が大掛かりで，機械加工現場での in-situ 計測などとても望むべくも無い。そこで，本研究では磁気力を検出することにより，簡便で，空間分解能や検出感度の高い計測手法を検討した。なお，この方式は通常，加工現場で経験的に行われている永久磁石を用いての相変態チェックを高精度化したものである。

その計測手法の開発を通じてステンレスのインテリジェント材料としての可能性が見えてきた。たとえば，この磁気的特性の変化を高い空間分解能で検出することができれば，応力に関連した各種センシングが可能になるはずである。そこで，第2ステージの研究として，以下の研究を行った。

高い空間分解能を有する磁気力分布測定装置を2種類開発し，各種の応力を受けたステンレス鋼の表面の磁気特性分布を測定した。その結果，きわめて軽微

で局所的な応力ですらステンレス表面は応力誘起変態を起こし，この際に生じる材料の磁気的特性の変化は外部磁場により大きな影響を受けることが明らかになった^{1) 2) 3)}。

これらの結果から，ステンレス鋼の相変態は塑性応力分布の測定，接触面応力分布の測定，摩擦・摩耗過程の表面状態の計測，位置決め用磁気スケール，トライボメモリ，磁場凍結等種々のセンシングやメモリに利用できる可能性のあることがわかった。さらに，これらの記録をレーザー照射により消去できることも明らかにした。

2. 測定装置と実験材料

磁気力の測定装置としては3種類用いた。まず，空間分解能は悪いが磁気力の平均値を高感度に求める

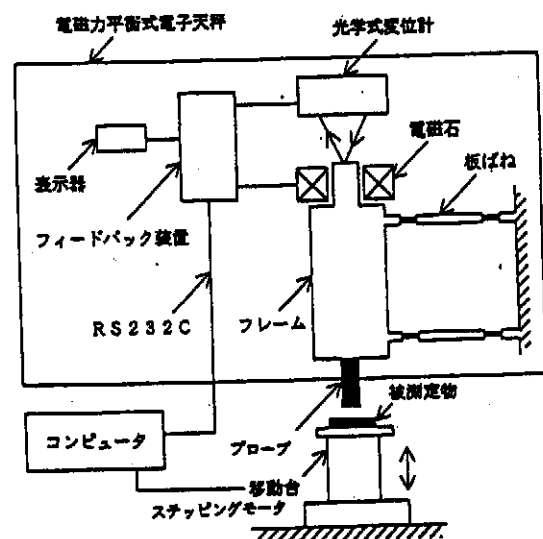


図1 簡易型磁気力検出器

ために、図1に示すような電子天秤を応用した磁気力測定機を開発した。構造は極めて簡単で、市販の電子天秤を改造し、電子天秤の下部に磁石（永久磁石や電磁石）を取りつけ、ステンレス試料との間に作用する磁気力を電子天秤で計測する。そのデータはリアルタイムでコンピュータに取りこまれる。試料と磁石のクリアランスは手動で調節する。

2つめの測定装置は、空間分解能の高い磁気力測定装置で、材料表面近傍の磁気特性の分布測定に用いるために開発した。メカニズムの概略を図2に示すが、磁気力顕微鏡と似た構造の磁気力分布測定装置⁴⁾である。すなわち、磁化した針状磁性材料片がガラスファイバーでできた片持ちはりの先端に取り付けられており、この針の磁場と被測定物表面との磁氣的相互作用力に起因したレバーのたわみを光学式変位計で測定する。被測定物はX-Y微動テーブル上に置かれ、これらの制御、および、データ処理はコンピュータで行う。さらに、測定原理はこれと同じであるが、空間分解能を $0.01\mu\text{m}$ まで上げた磁気力分布測定装置(図3)を作成し、材料表面の変態の分布の精密計測に用いた。

実験に用いた材料は主として SUS304 の平板、および、薄膜（厚み 0.05mm ）で、溶体化処理、真空焼鈍、電解研磨などの処理を施し、加工変質層の除去を行っている。

3. 引っ張り応力と磁気力の関係

通常の引っ張り試験に見られるような均一な応力場に於ける変態と磁気力の関係を求めたところ図4に示すような結果が得られた。磁気力は明らかに塑性変形領域で起こるが、材料の研究で一般に問題にされているような数10%の永久歪みより遥かに小さい歪み(数%)でも磁気力は十分検出されることがわかる。次に、75%圧延加工した SUS304 試料を 700°C で熱処理を行い、熱処理時間と磁気力の関係を調べた。その結果、図5に示すように、熱処理時間の増加に伴い磁気力が減少する傾向が得られた。これは、熱処理による、マルテンサイト組織の減少が磁気力の減少として捉えられたことを意味する。これらの結果から、磁気力は相変態に対する簡便で高感度な測度となりうる

ことが明らかになった。

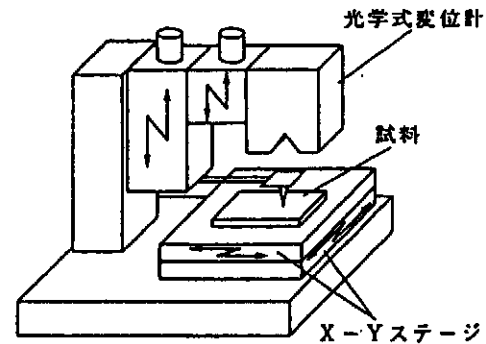
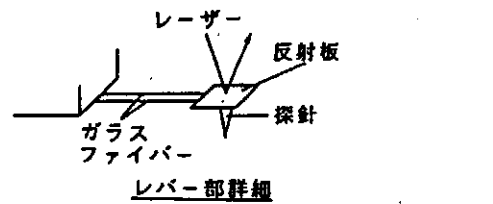


図2 磁気力分布測定装置

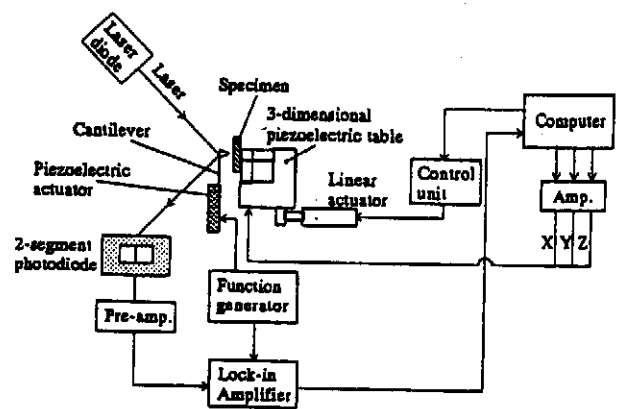


図3 高い空間分解能を有する磁気力分布測定装置

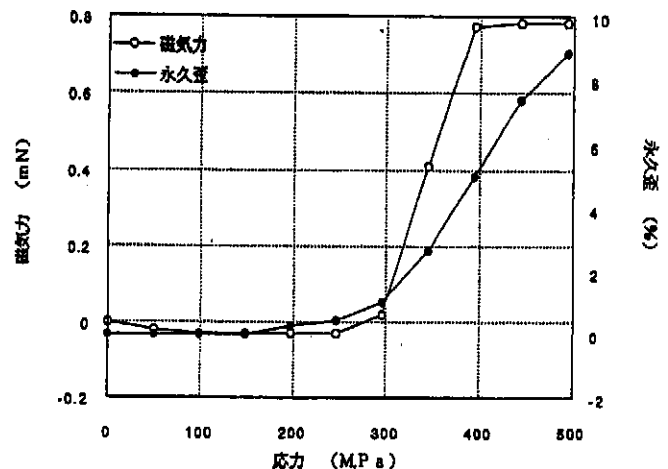


図4 塑性歪と磁気力の関係

4. 塑性応力分布の測定

以上のように、磁気力と相変態の進行度の間には相関があることが分かったので、この結果をもとに、二次元応力場の相変態の分布の計測を試みる。一例として、切り欠きを有する引っ張り試験片を用いて、引っ張り試験（引っ張り荷重 1200N）を行った。図 6 は試験後の試験片表面の磁気力分布で、切り欠き先端の応力集中部に高い磁気力が観察される。この磁気力分布から塑性変形の進行の範囲が推定できるが、塑性変形分布や応力分布も推定できる可能性がある。

一般に、2次元応力分布の計測には光弾性法が用いられる。しかし、この相変態の分布を用いることにより、高分子材料である光弾性材料より現実の構造材料に近い鉄鋼材料で応力分布（塑性域でしか使えないが）が測定できる利点は大きいものと思われる。

5. 接触面のセンシング

接触面の応力分布や接触面下の内部の応力分布のセンシングに変態の計測が有効である。その一例として球と平板の接触部の変態の計測結果を示す。

直径 4.76mm の窒化けい素球をステンレス平板に低速 (0.01mm/秒) で押し込み、所定の接触荷重に達したところで除荷を行った。押し付け痕について磁気力分布測定装置で測定を行ったところ、図 7 に見られるような磁気力分布が得られる。

ステンレス平板の代わりに薄膜を用いても同様な磁気力分布が得られる。この現象を利用すると、接合部界面に、ステンレス薄膜を挿入し加圧後の薄膜の磁気力分布の測定から接触部の圧力分布を推定することが考えられる。この可能性はすでに林ら⁵⁾によって提案されている。しかし、当時は磁場に対する測定器の感度や空間分解能が低く、極低温下で高荷重の押し付けという限られた条件下での測定しかできなかった。現在では、磁気力分布測定装置を用いると、室温でかつ低負荷でも測定が可能であり、圧力センサとしての有効性が格段に高まっている。

6. トライボメモリ

押し付けよりもすべり摩擦の場合の方が遥かに顕著な相変態を起こす。しゅう動面の磁気力分布の変化

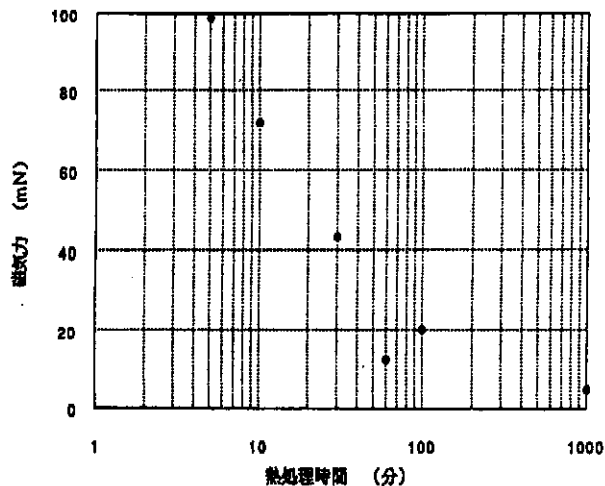


図 5 熱処理時間と磁気力の関係

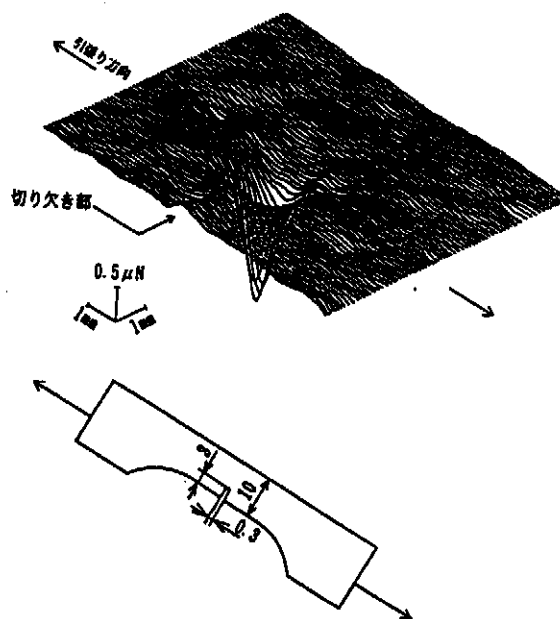


図 6 切り欠き部の磁気力分布

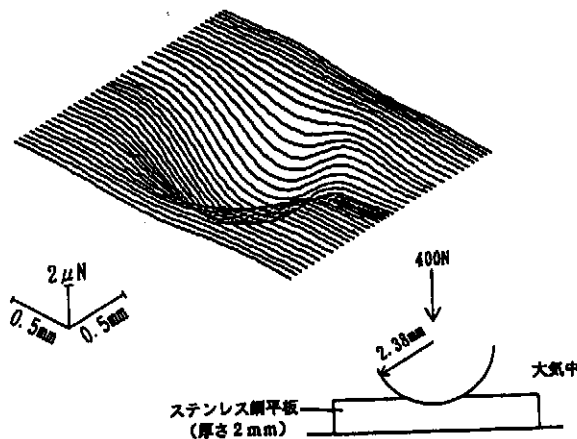


図 7 接触面磁気力分布

を観察することにより、摩擦過程における相変態の進行のモニターができ、これらの観察には、摩擦係数、比摩擦量、摩擦面顕微鏡観察等の従来の測定には含まれない新たな情報が含まれている⁴⁾。すなわち、摩擦面の磁気特性変化の観察はトライボロジーの研究や摩擦過程のモニターの一つになりうる。

ところで、摩擦中の相変態はかなり軽微な荷重でも発生する。例えば、ステンレスの薄板にボールペンを用いて普通の筆圧で文字“HIT”を書いてみたところ、図8に示すように磁気力分布による文字の認識が可能であった。この場合、外部磁場がない状態で文字を書いたため、筆跡には残留磁場は存在しなく、読みとりにはセンサによる外部磁場を与える必要があった。しかし、外部磁場中で同様の操作を行うと筆跡には大きな残留磁場が得られるため、読みとりは容易になる。このような現象は、サインの磁気記録に使える。クレジットカードのような秘密保持を要求されるようなサインには有効であろう。

筆記では定量性に問題があるので、同様な文字をX-Yレコーダ (Roland DXY-980A) で書いてみた。図9がその結果の一例である。ただし、ペンの代わりに先端曲率半径 0.01mmのダイヤモンド圧子を用いており、接触荷重は 0.23Nである。手で書いた場合に比べ、磁気力が極端に高いところが見受けられるが、そこは、ペンが落下したときの衝撃圧力によるものである。また、ペンが2度通った所はその分高い磁気力を示している。このことから、本方式による磁気的サインは筆圧の情報までも読み取れることが分かる。

ところで、このような情報の記録が高密度に行えるなら、将来の磁気記録としての可能性も出てくる。そこで、材料を SUS301 に変え、荷重 0.4mN で引っ掻き実験を行い、その面をさらに空間分解能の高い磁気センサで測定したところ、サブミクロンの幅の磁気力分布が確認された (図10)。このことから、ステンレスの相変態は少なくとも、現有の磁気ディスク程度の密度の情報量は蓄える能力を有していることが分かる。将来、マイクロアプリケーションの技術が進み、プローブメモリが現実化することがあれば、その記録方式の候補の一つとして本方式も検討されるべきポテンシャルを有していると思われる。

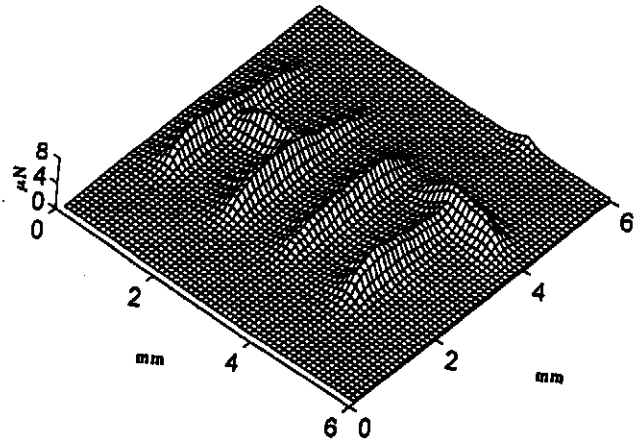


図8 手書き文字“HIT”の磁気力分布

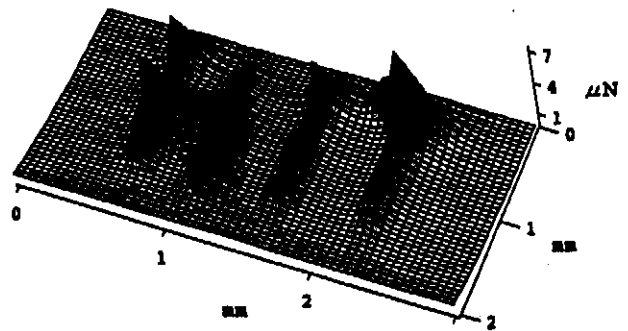


図9 X-Y レコーダによる磁気力分布

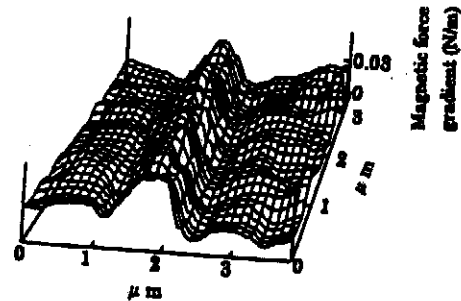


図10 極微小荷重引っ掻き痕の磁気力分布

7. その他の応用

7-1 位置決めセンサ

強加工により全面に相変態した材料に炭酸ガスレーザーを照射し、材料の一部を非磁性材料にすることにより、磁気スケールが構成されることはすでに報告されている。基本的にはこれと同様の発想ではあるが、逆に、非磁性材料に単純な線引きで、強磁性のスケールを付けることもできる。また、その際、高い磁場中で線引きを行うと、残留磁場が形成され、一種の着磁スケールとして利用できる。これらは位置決めシステム等への応用が考えられる。これらのスケールは構造材

がそのままスケールになり、簡易で省スペースな位置決めシステムが構築できるものと思われる。

7-2 任意の磁場分布を有する永久磁石

磁場中で応力誘起変態を起こすと相変態後に磁化させる場合に比べるとはるかに強い残留磁化を生じる。この残留磁化は均一な磁場中で相変態を起こした場合には応力分布に応じた磁気力の分布を有することを示したが、この分布は一般に相変態を起こす時の応力の分布と外部磁場の分布との相互作用により形成される。すなわち、磁場中相変態の現象を利用すると応力分布と外部磁場分布の組み合わせでかなり任意な磁場分布を有する永久磁石が作製できることになる。この有効性を探るため残留磁場の経時変化を調べたところ、4カ月後でもほとんど磁気特性の劣化は認められず、安定な磁石が作れることが分かった。

7-3 磁場凍結

この磁場中相変態現象を均一な応力分布下で行えば、残留磁場の分布は外部磁場の分布で決まることになる。SUS304 で平板の引っ張り試験片を作り、直流電流を流した励磁コイル上で引っ張り試験を行った。その後電流を切り、引っ張り荷重を除去し、試験片表面の残留磁気の分布を調べたところ、図 11 (a) に示すような磁気力の分布が得られた。一方、励磁コイル上で磁気力分布測定装置を走査し、励磁コイルのみによる磁気力分布を測定したところ図 11 (b) に示すような分布が得られた。両者を比較すると、磁気力の大きさは引っ張り試験片による物は、励磁コイルによるものの 1/20 程度にすぎないが、分布形は両者でかなりの一致を見ている。すなわち、外部磁場の分布の情報が引っ張り試験片に凍結されていることが分かる。

この磁場凍結を利用すると、オーステナイト系ステンレス箔という写真フィルムを用い、シャッターとして引っ張り応力を作用させれば、磁場分布の情報に対する写真機が構築できることになる。一般の磁場測定装置が挿入できないような狭い空間でも、ステンレス箔の挿入と、引っ張り応力の印加ができさえすれば、磁場分布測定が可能になる。また、任意の時間の情報が凍結できるため、時間的に変動する磁場の把握にも

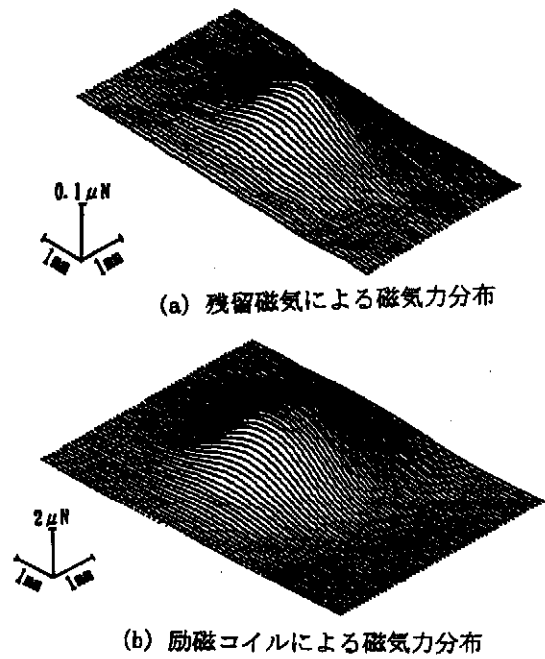


図 11 磁場凍結

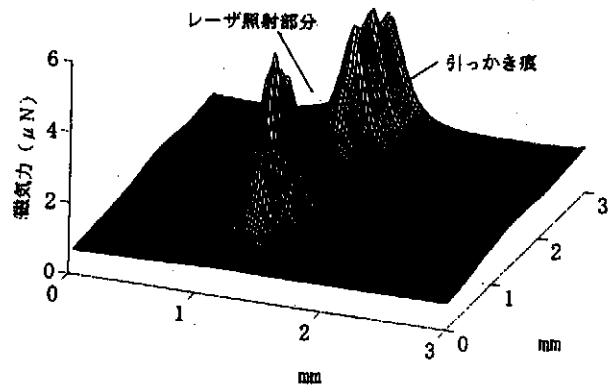


図 12 レーザ照射による記録の消去

有効である。

8. 磁場の消去

ステンレスの相変態を磁場中で生じさせると磁場情報が保持されること。また、これを利用すると磁場カメラ、磁気記録、各種計測への応用が可能であることを示してきた。これらの応用が意味を持つためには、磁場の記録と同時に磁場の消去方法も検討しておく必要がある。そこで、レーザー照射による磁場消去の可能性を実験した。その結果、図 12 に示すように、照射した部分だけが磁場が消えていることが確認できた。すなわち、レーザー照射により、空間分解能の高い消去が可能である。なお、照射条件によっては、照射

により逆に変態が進行することもある。すなわち、照射による磁場の焼付けも可能である。

9. おわりに

ステンレス鋼の応力誘起相変態は材料の耐食性を低下させ、透磁率を増加させるため、工業的にはネガティブな現象である。そのため、ステンレス加工業会では、相変態の進行状態を計測する簡便な手法に対し強い要望がある。本研究では、従来のX線分析よりはるかに簡便で、しかも感度の優れた計測方式として磁気力測定が有効であることを明らかにした。

また、この相変態は見方を変えると、応力を磁気力に変換する変換器の機能があるものと考えられる。すなわち、高感度で高い空間分解能を有する測定手段が得られる現在では、この相変態を現象を各種センシングやマイクロトライボメモリとして利用できる可能性が高い。本研究の成果の範囲でも、サブミクロンの空間分解能で相変態の発生と消去が制御でき、さらに、その結果の検出が可能であることが明らかにできた。この特性を利用すれば、ステンレス鋼の知能材料としての優れた潜在能力を各種センシングに応用できる。例として、塑性域における応力分布計測、接触面圧力センサ、トライボ現象のモニタリング、磁場分布計測、磁気メモリ、等々が挙げられる。また、今回は材料として主にSUS304を用いたが、SUS301を用

いると室温では相変態が応力に対しさらに高感度になる。また、オーステナイト系ステンレス材料の他にもTRIP鋼のように相変態により磁気的特性の変化する材料はすべてセンシングやメモリ用の材料の候補になりうる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なるご援助をいただいた天田金属加工機械技術振興財団に深甚の感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 石垣博行ほか：日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集、(1998)295.
- 2) 石垣博行ほか：日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集、(1992)483.
- 3) H. Ishigaki et al. :Intern. Progress in Prec. Engr., Butterworth, (1993)1019.
- 4) H. Ishigaki et al. :Rev. Sci. Instrum. ,64, 4(1993)1049.
- 5) 林輝ほか：精密工学、52,10(1986)41.
- 6) 浅川基男ほか：第22回レーザー熱加工研究会論文集(1989)41.