

レーザー励起レイリー波の速度分散を用いた 耐摩耗Ni-Pめっき層特性の非接触評価

森川 靖之*・長 秀雄*・中山 武典*²・竹本 幹男*³

Non-contact Evaluation of Mechanical Properties of
Electroplated Wear Resistant Ni-P Layer from the Velocity Dispersion of Laser SAW

Yasuyuki MORIKAWA, Hideo CHO, Takenori NAKAYAMA and Mikio TAKEMOTO

Synopsis : We developed a new laser surface acoustic wave (SAW) system and applied this to estimate the mechanical properties of the wear-resistant Ni-P layer electroplated on a stainless steel. The velocity dispersions of Rayleigh wave of the as-plated and heat-treated Ni-P layer were obtained by the one point time domain signal processing. The Ni-P layers with excellent wear resistance produced by the heated treatment higher than 725K were found to show higher Rayleigh velocities than that of the substrate steel, while the Ni-P layer with poor wear resistance showed lower velocities. Young's moduli of the Ni-P layer, estimated so as the computed velocity dispersion agreed with the measured one, increased with the increase of wear resistance.

Key words : wear-resistant coating ; laser surface acoustic wave ; phase velocity dispersion ; non-destructive testing.

1. 緒言

Ni-Pめっき層は、723K以上の熱処理によって微細なNi₃Pを均一に分散させ、靱性と硬度のバランスを持たすことによって優れた耐摩耗性を発揮することが知られている^{1,2)}。熱処理や使用中におけるNi-P層の特性変化を非破壊的に評価することは、耐摩耗材の開発や健全性診断において大事である。そこで、レーザー表面弾性波(Surface Acoustic Wave, SAW)を用いてNi-Pめっき層の特性を非破壊的に評価することを試みた。

著者らは、低出力の線状QスイッチYAGレーザーを照射することによって高帯域のSAWが発生でき、適切な信号処理を用いればその速度分散が求まることを報告³⁾した。しかし、前報の方法ではSAWの検出に試作圧電素子を用いたため、解析可能な周波数帯域が狭い(<5MHz)と言う問題があった。そこで、ヘテロダイン型レーザー干渉計を用いる高帯域SAW検出システムに改造するとともに、位相速度分散を求める新しい信号処理法を構築した。この方法によって、100 μ m厚程度のめっき層の特性を非接触・非破壊的に推定することが可能になった。そこで、ステンレス鋼に電解めっきされたのち、各種熱処理を行ったNi-P層の力学特性をレイリー波の速度分散から推定し、耐摩耗性との関係につ

いて調べた。しかし、レーザー干渉計を用いてもその周波数帯域は約15MHzまでで、めっき層内の情報を得るには依然限界がある。そこで、山中ら^{4,5)}が開発したレーザー干渉縞の位相速度走査法(Scanning Interference Fringes, 以後SIF)、および塚原ら⁶⁾による超音波スペクトラム顕微鏡(Ultrasonic Micro-Spectrometer, 以後UMS)を用いて20~110MHz帯域のレイリー波速度分散を求め、現有システムとの比較も試みた。これらの方法で測定した熱処理Ni-Pの音波(あるいは力学)特性は、耐摩耗性の熱処理温度依存性と良い相関があることがわかったのでその結果を報告する。本論文ではレーザーレイリー波によるめっき層特性の評価法に主眼をおいて報告するので、耐摩耗性に関する詳細については論文²⁾を参照されたい。

2. 供試材

Table 1に示したワット浴系めっき液および電解条件を用いてSUS304にNi-Pめっきを施したのち、473, 573, 623, 723, 823, 973Kでそれぞれ1時間の熱処理(573K以上は真空熱処理)を行ったものを試験片とした。試験片は、西本らの研究²⁾で用いられたものと同じである。薄膜用微小ビッカース硬度計(負荷重25g)を用いて硬度分布と膜厚を測定し

平成8年5月15日受付 平成8年7月15日受理 (Received on May 15, 1996; Accepted on July 15, 1996)

* 青山学院大学理工学部大学院生 (Graduate Student, Faculty of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University)

* 2 (株)神戸製鋼所技術研究所 (Material Research Laboratory, Kobe Steel Ltd.)

* 3 青山学院大学理工学部 (Faculty of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, 6-16-1 Chitosedai Setagaya-ku Tokyo 157)

Table 1. Condition for electroplating Ni-P layer.

Bath composition	g/l	Plating	
NiSO ₄ ·6H ₂ O	150	Temp.	323=5 K
NiCl ₂ ·6H ₂ O	150	pH	0.5~1.5
H ₃ PO ₃	2.5~16	Current Density	15 A/dm ²
H ₃ PO ₄	20~130	Anode	Ni plate

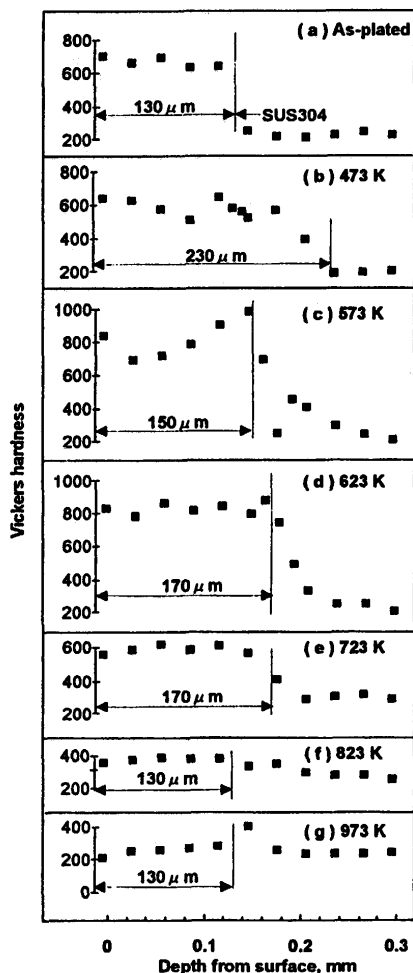


Fig. 1. Transverse micro-Vickers hardness profile of as-plated and heat-treated Ni-P layers.

た。Fig. 1 は断面硬度分布で、573K以下の熱処理材の硬度は高く、ばらつきも大きい。723K熱処理材の硬度は約600でかなり高いが、823K以上では基材ステンレス鋼と同じレベルまで低下する。屋敷ら¹⁾によると、573K以下の熱処理材ではPはNi中に固溶し柱状組織となっているが、高温熱処理では高硬度のNi₃P(Hv: 900~1000)粒子が析出し等軸組織になる。723K以上の熱処理では、Ni₃P粒子の凝集・成長によって柔らかいNiマトリクスが分離するため硬度は減少し靱性が上がる。573K以下の熱処理めっき層では摩耗中に割れが発生し摩耗量は大きい²⁾が、723K以上の熱処理材では割れは発生せず摩耗量も極めて小さい。めっき層の破壊靱性や強さをSAWの解析から推定することはできない³⁾が、これらと相関を持つ力学特性を評価することにした。

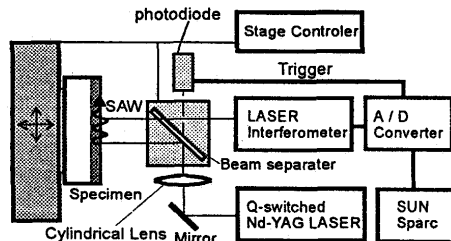


Fig. 2. Experimental setup for SAW generation and monitoring system.

3. 実験方法および位相速度計測法

Fig. 2 は、単一パルスレーザー (Single Pulse Laser, 以後SPLと言う) によるSAW発生・検出システムである。QスイッチYAGレーザー (半値持続時間5nsec.) をシリンドリカルレンズで長さ4mm、幅0.05mmの線状に集光照射してSAWを発生させた。レーザー出力はめっき層表面に断熱膨張を起す程度の弱い (エネルギー: 0.8mJ) もので、めっき層には熱損傷を与えない。線状レーザーの法線方向に伝播するSAW (めっき層ではレイリー波) を、ヘテロダイン型レーザー干渉計 (B.M. Industries社, HETERODYNE PROBE, SH-120, 周波数帯域: 20MHz) で検出し、その出力は高速デジタルサイザー (TEKTRONIX, RTD720A, サンプリング時間: 1 nsec., 分解能: 10bit, 点数: 2048点) でデジタル信号にしたのち、32ビットパーソナルコンピュータを介してハードディスクにストックした。また、照射レーザーをホトダイオードで検出し、その出力を干渉計のトリガーとして用いた。SAW伝播距離はコンピュータ制御高精度3軸ステージを用いて2/100mmの精度で決定した。純アルミニウム (位相速度=2908m/s) を用いた較正実験では、位相速度誤差は2%以内であった。

波形解析は、ネットワークファイルシステムを用いてワークステーション (SUN Sparc) にデータを転送して行った。速度分散は、J. D. Auzuel⁷⁾が提唱した方法を改善した1点計測時間領域探索点制限法 (One-point Time Domain, 以後One-point TD法⁸⁾) を用いた。この方法については検出波形を具体例にあげて後述する。

SIF法の詳細については文献^{4,5)}を参照されたいが、2本のレーザービーム (QスイッチYAGレーザーの第2高周波) を角度2θで交差させて入射させ、そのうちの一方はBragg Cellにより角周波数をΔω=ω₂-ω₁だけ変移させる。2本のレーザーによる干渉縞の走査速度がSAWの伝播速度と一致するように調整してSAWを発生させる。この方法では、SIFとSAWの波数Kは等しく周波数ωのSAW速度は(1)式で与えられる。

$$V_{SAW} = \omega / 2K \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

伝播SAWは光学的ナイフエッジ法で検出し、そのFFTによ

る最大ピーク周波数から ω を求め(1)式から位相速度を求めた。純アルミを用いた較正試験では、SAW速度誤差は最大で1%という高精度を有している。SIF法では、20-110MHz域のレイリー波速度を測定した。めっき層のレイリー波速度が2500m/sならば、100MHzのレイリー波の浸透深さは約25 μ mとなり、めっき層厚さの1/3から1/6である。すなわち、この方法の高周波域で求められる位相速度はめっき表層の特性を反映したものである。

UMSによる音速測定では、カップラント(水)を介して特定入射角の平面波を試料に照射し、球面ZnOレンズで反射波を測定した。入射角 θ で励起されたSAWの位相速度は(2)式を用いて求めた。

$$V = V_w / \sin \theta \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V_w は水の音速である。実験では周波数150MHzを用い、めっき表層(推定浸透深さは15~20 μ m)のレイリー波速度を求めた。

後述するように、SIFやUMSで求めるレイリー波は、非分散でその速度は正確に求まるが、弾性特性としては2つの定数(ヤング率とポアソン比、あるいはラーメの定数 λ , μ)を一つの式(レイリーの方程式)から決めなければならない。2つの未知数を一つの式から決めることはover estimateで、求めた解の一意性が保証されない。めっき層の物性が正しく求められているか、あるいは熱処理めっき層内に物性分布があるか否かを調べるためにはSPLで求まる低周波域の分散性レイリー速度の解析が必要となる。

4. 実験結果および考察

Fig. 2のSPL法を用いて、伝播距離 $L=7.93$ mmで検出したSAWをFig. 3に示す。これらの波はホットダイオードのトリガー信号で頭出ししている。基材SUS304では約2.7 μ sに非分散性レイリー波が見られるが、as-plated(a)や低温度(<623K)熱処理材(b, c, d)では高周波成分が遅れて到達している。すなわち、これらのめっき層のレイリー波速度は基板のそれ(約2780m/s)よりも遅い低速度層である。一方、耐摩耗性が改善されるめっき層(e, f, g)では高周波成分が早く到達し高速度層になっている。これらの波からOne-point TD法によって位相速度分散を求めた。その手順をas-plated材の検出波について示すとFig. 4の様になる。検出波からレーザーイグニッションノイズやトリガー信号を除去した後の波(A)のFFTは(B)になる。解析可能周波数帯域は約15MHzまでである。次に ω_0 を中心周波数とする狭帯域のGaussian filterを用いて、 ω_0 成分を抽出した後逆フーリエ変換(IFFT)することによって(C)を得る。(C)は $\omega_0=5 \pm 0.02$ MHzの例で、最大値時刻を t_d とすると、周波数 ω_0 における位相速度は L/t_d で与えられる。全域の位相速度(D)は ω_0 を変えながらこの操作を繰り返せば求まるが、ノイズが存

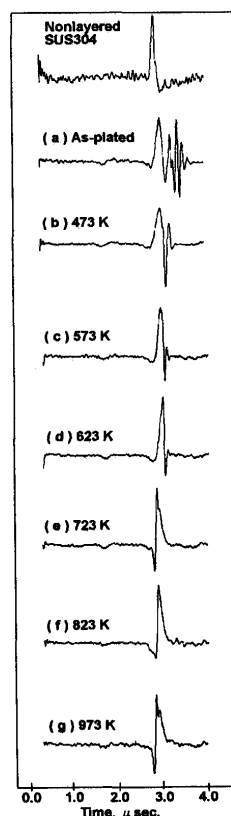


Fig. 3. Detected surface acoustic waves.

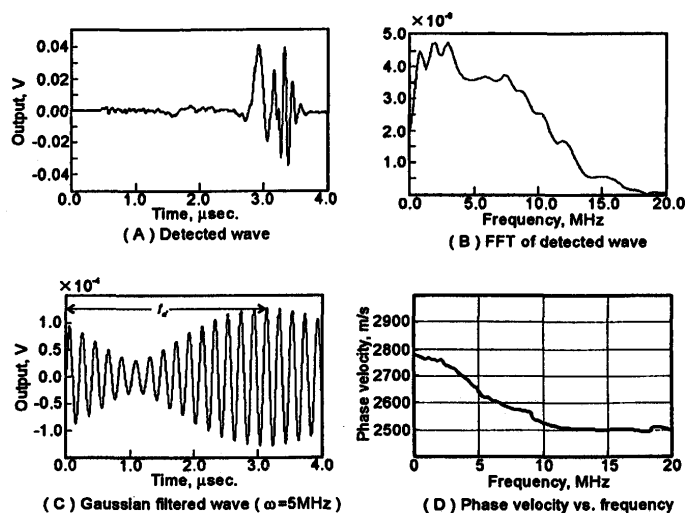


Fig. 4. Procedure for estimating the velocity dispersion of the SAW for as-sprayed Ni-P layer.

在すると異常な到達時間を読みとることがある。そこで、前の中心周波数のとき求めた到達時間から大きく離れない範囲で最大値時刻を探索する探索点制限付きアルゴリズムを用いた。

Fig. 5には各試験片の位相速度分散を示す。太い実線が実測分散を、細い実線は計算分散であるが後者については次節で議論する。低周波の位相速度は基材のレイリー波速度

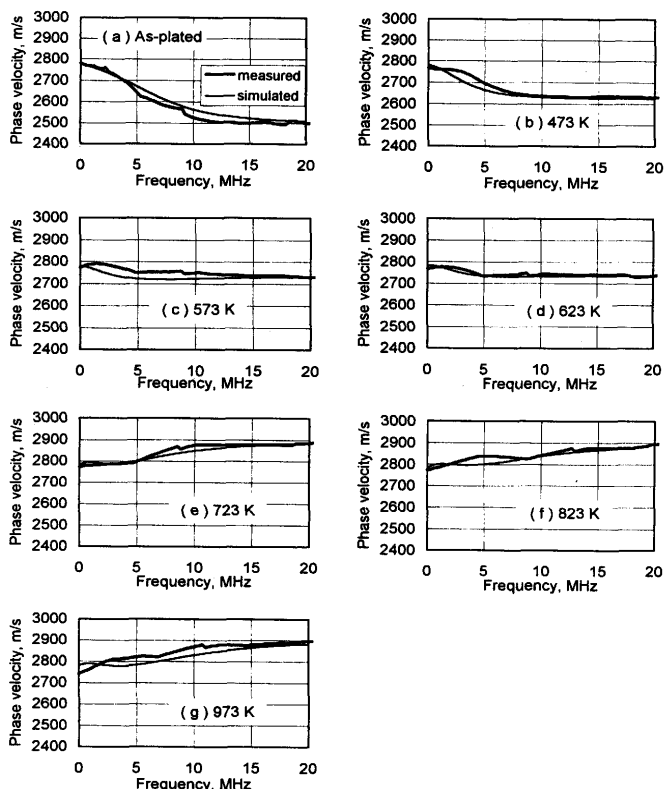


Fig. 5. Comparison of the measured and simulated velocity dispersion of the Rayleigh wave.

(2780m/s)に、高周波数のそれはめっき層自身のレイリー波速度に近づく。as-plated層の高周波の位相速度は約2500 m/sで、約300m/sもの速度分散がある。低温熱処理めっき層の高周波数における位相速度は、温度が上がるにつれて2632m/s(473K)→2730m/s(573K)→2740m/s(623K)と速くなるが、位相速度は周波数とともに減少し低速度層である。一方、723K以上の高温熱処理では、高速度層に変わっているが、分散は約100m/s程度でかなり小さい。なお、実験分散曲線にはいくつかの不連続点が存在するが、ノイズなどによるピークを探索したものと考えられる。この問題を回避するアルゴリズム(探索点制限)を用いたが、それでもOne-point TD法はS/N比に弱いという問題がある。

次に、SPL法で測定した位相速度がSIF法やUMS法で求めた位相速度とどの程度異なるかを検討した。SIFでは20~120MHz域の速度分散を求めたが、この周波数域における分散はFig. 6に示す様に極めて小さかった。最も大きな分散は973K熱処理材でみられ、100MHz以上で20m/s程度遅くなったが、その他のめっき層の分散は無視できるほどであった。ここでは便宜的に110MHzの値を採用したが、20MHzでの位相速度と同じと考えて良い。3種類の測定法による位相速度を熱処理温度をパラメーターにFig. 7に示す。SPLおよびUMS法によって得られた位相速度はほぼ同じ値となったが、SIFによる速度は約100m/s低い値となった。耐摩耗性に劣るめっき層では位相速度は熱処理温度とともに増

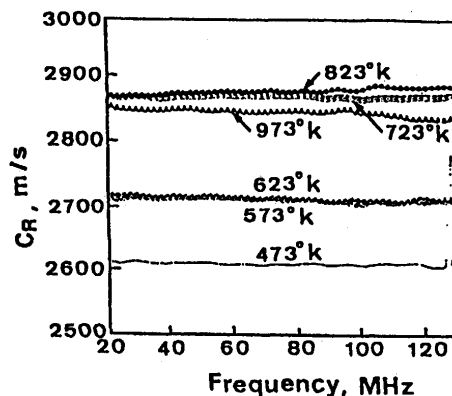


Fig. 6. Phase velocity of the Rayleigh wave for heat-treated Ni-P layer.

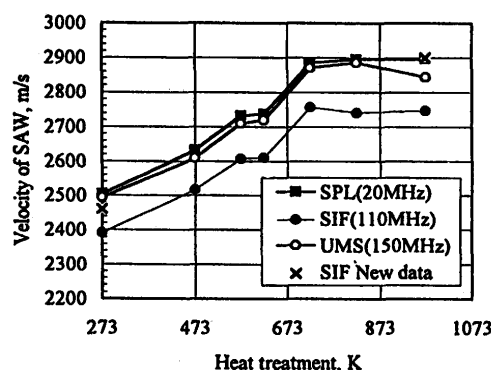


Fig. 7. Change of SAW velocity with the heat-treatment temperature.

大しているが、723K以上の熱処理めっき層の位相速度は高速度の一定値に落ち着く。

ところで、SIF法では1%以内の誤差で速度分散を測ることができ、周波数を変える毎にミラーやブラックセル、試験片の位置決めが必要である。位置決めは現在ではコンピュータ制御の回転・並進テーブルを用いて再現性よく行っているが、本研究を行った時点では手動操作を行っていたため、相対値精度は問題ないものの絶対値にやや問題があった。SIFにおける精度は式(1)の θ に左右される。例えば80MHzで2500m/sのレイリー波を発生させる時の θ は0.485度であるが、 θ が0.019度変わると約100m/sの速度差を生じる。当初は移動ステージのみでこの角度調整を行っていたが、改造装置では、高精度回転・並進ステージによって0.005度(速度誤差で1%)の精度で制御可能である。そこで、改良装置を用いて位相速度の絶対値を測定しなおした。試験片にはas-platedと923K熱処理材のみを用いたが、110MHzにおける位相速度はFig. 7の×に示すようにそれぞれ2460と2900m/sであった。すなわち、SIFの曲線は約60-150m/s程度高速側にシフトすると考えてよく、3つの測定法による結果は極めて良い一致を示す。

ところで、973K熱処理材のUMSによる速度は他の方法よりやや低く、SIFでも80MHz以上で20m/s程度遅くなってい

たが、これは理由がありそうである。すなわち、めっき層には200MPa程度の引張り残留応力が存在することがわかっているが²⁾、引張り応力は位相速度を遅くする。レイリー波速度と応力との関係についての報告はないが、例えば、アルミニウムのSH(Horizontally Polarized Shear Wave)波は200MPaの引張り応力で約10m/s程度遅くなることが報告されている。高温熱処理材の表面に存在する引張り残留応力は、めっき表層の位相速度(SIFやUMS法)を遅くした可能性がある。めっき層は、拡散浸透処理などに比べれば、特性が界面でステップ状に変化しているが、それでも層内の組織・構造変化に対応する力学定数や残留応力分布を反映した速度分散を測っているものと考えられる。特に高温熱処理めっき層では、元素拡散による基材界面近傍の特性変化を反映している可能性もあることから、SPL法で求めた位相速度分散についてさらに検討した。

5. 速度分散の順解析によるめっき層の力学特性

前述したように、Ni-Pめっき層の耐摩耗性では、靱性と硬度のバランスが大事である。破壊靱性を非破壊的に求めることは不可能であるが、例えば平面歪状態における脆性材料の応力拡大係数は、表面エネルギー、弾性テンソルとポアソン比によって左右される。表面エネルギーを求めることは本研究の目的外であるが、弾性テンソルとポアソン比は速度分散の順解析から推定可能である。また、弾性テンソルを求めることは転動摩耗におけるHertz接触圧の推定においても大事である。そこで、位相速度分散からめっき層の弾性テンソルとポアソン比を推定することを試みた。

めっき層を十分な密着力を持った均質単層とみなせば、基板およびめっき層の2個の弾性テンソルおよび密度から速度分散を計算できる。速度分散の計算には、C.K.Jenら⁹⁾によるProgram for Multilayer Acoustic Surface Wave Calculationを使用した。この計算では、境界面が力学的に連続であるとし、各層(基材を含む)の弾性的性質：密度×音速²に特徴付けられる変換行列の積の行列式の絶対値が零に収束する様に位相速度を決定する⁹⁾。なお、摩耗試験後もめっき層には剥離が観察されなかったことから、境界面での応力と変位は連続であるとした。基材SUS304については、ヤング率E、ポアソン比ν、密度ρをそれぞれ212GPa、0.26、7.59Mg/m³(いずれも実測値)とした。なお、Ni-Pめっき層の密度は8.85Mg/m³とし、熱処理による変化はないと考えた。計算では、まずめっき層のラーメの定数μ=E/2(1+ν)を仮定して(3)式から横波速度：C_Tを求め、Fig. 6のレイリー速度：C_Rをレイリーの方程式：(5)式に代入して縦波速度：C_Lを計算する。次に(4)式から得られるλを第一シミュレーションの近似物性とし、計算分散曲線がSPL法で求めた分散曲線と一致するまでλとμを変えた。

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (3)$$

$$C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left(\frac{C_R}{C_T}\right)^6 - 8\left(\frac{C_R}{C_T}\right)^4 + 8\left(\frac{C_R}{C_T}\right)^2 \left[3 - 2\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2\right] - 16\left[1 - \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2\right] = 0 \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 7のデータは波長がめっき層厚さよりも小さい時の“めっき層”のC_Rで、式(5)から2つの音速：C_L、C_T(またはヤング率とポアソン比)を求めることはできない。すなわち、所定のC_Rを与えるC_LとC_Tは一組だけでなく、local minimumを与えるいくつかの組が存在するからである。仮定した弾性定数が正しいか否か(解の一意性)を検証するためには、PSLで求めた速度分散がどこまで計算値と一致するかを調べる必要がある。計算分散曲線をFig. 5に細い実線として示した。また、計算に使用しためっき層の物性値をTable 2に示す。計算分散曲線は、高周波数で実測分散と良い一致を示すが、低周波(<10MHz)、すなわち基材/めっき界面近傍あるいは基材に該当する領域で不一致がみられ、それは特に高温熱処理をした(f)や(g)で大きい。Table 2に示す様に、as-platedや623K以下の熱処理めっき層のヤング率は、純ニッケル(Ni-solid)より小さいが、723K以上の熱処理めっき層では100%以上になる。推定Eとν(=λ/[2(λ+μ)])から破壊靱性に関与すると思われるパラメーター： $\sqrt{E/(1-\nu^2)}$ を熱処理温度の関数として整理するとFig. 8になる。このパラメーターを、靱性を回復した高温熱処理めっき層に適用するには問題もあるが、傾向としては耐摩耗性の温度依存性をよく説明できる。

ところで、Fig. 5に示した解析的分散曲線は、めっき層を均質単層(特性勾配がない)として計算されているので、実測値との不一致は特性勾配が存在することを意味している。高温熱処理材では元素拡散によると思われる硬度変化も見られることから特性勾配を推定した。特性勾配関数：F(z)の推定は、レイリー波速度分散を逆ラプラス変換することによって求められるが、その詳細については文献^{9,10)}を参照されたい。ここでは、紙面の都合で結果のみを述べる。Fig. 9は、ラーメの定数μの深さ方向分布を示すもので、823K熱

Table 2. Estimated Young's moduli, Poisson's ratio and $\sqrt{E/(1-\nu^2)}$.

No.	Heat treated	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio, ν	$\sqrt{E/(1-\nu^2)}, \times 10^5 \sqrt{Pa}$
Ni-solid	No	214	0.34	4.92
a	As-plated	174	0.39	4.53
b	473 K×1hr.	191	0.39	4.75
c	573 K×1hr.	198	0.32	4.70
d	623 K×1hr.	207	0.37	4.90
e	723 K×1hr.	231	0.39	5.22
f	823 K×1hr.	235	0.41	5.31
g	973 K×1hr.	240	0.41	5.37

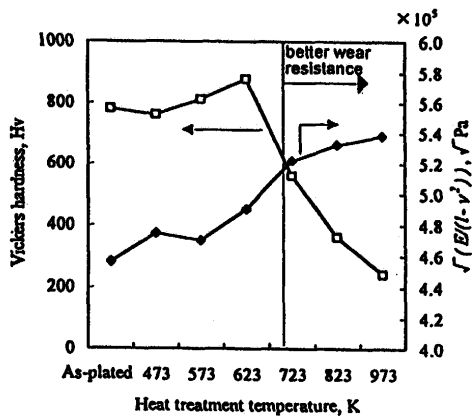


Fig. 8. Relationship between the Vickers hardness, $\sqrt{E/(1-\nu^2)}$ and heat treatment temperature.

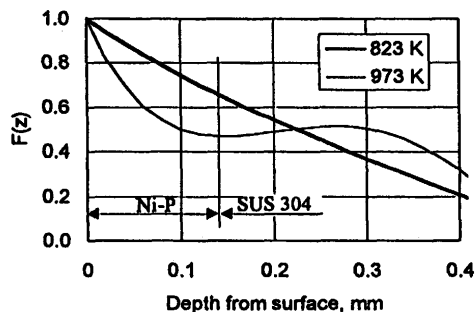


Fig. 9. Distribution of the gradient function $F(z)$ for the Ni-P layer heat-treated at 723 and 973 K.

処理材の μ は連続的に減少し、層内変化量は973Kのそれに比べて小さい。一方、973K熱処理材では、深さ0.1mmまでに特性が大きく変化し、界面からややはずれてはいるが基材内にピークを示すような複雑な分布を示す。このピークはFig. 1 (g)の界面近傍での硬度の上昇、すなわち拡散による化合物の生成と対応している可能性がある。推定した特性勾配関数の一意性について議論できるデータはないが、高温熱処理めっき層の高周波域の位相速度が遅くなるのは、引張り残留応力の他、層内の力学特性勾配が関係している可能性が大きい。なお、今回用いた試験片は特性勾配関数推定のかかなり難しい改質層にあたることから、今後拡散浸透などモデル的なサンプルを用いた妥当性の検証を行う予定である。

6. 結言

レーザー弾性表面波(レイリー波)の位相速度分散から、電解Ni-Pめっき層の特性を評価し、耐摩耗性との相関を調べた。得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1)線状QスイッチNd-YAGレーザーが発生するSAWをレーザー干渉計を用いて計測し、一点計測探索点制限付き時間領域法(One-point TD method)を用いて速度分散を求めた。この方法で求めた位相速度は、レーザー干渉縞位相速度走査法(SIF)および超音波スペクトラム顕微鏡(UMS)で求めたものと良く一致し、十分な精度でめっき層のレイリー波速度分散を計測できる。

(2)Ni-Pめっき層の位相速度は熱処理温度が高くなるとともに高速になるが、低温熱処理めっき層(<623K)は低速度層、723K以上の熱処理材では高速度層である。耐摩耗性に優れた723K以上の熱処理めっき層の位相速度は2900m/sで一定となった。熱処理Ni-Pめっき層の位相速度の温度依存性は、耐摩耗性の熱処理温度依存性と良い相関を示す。

(3)位相速度分散から推定したNi-P層のヤング率は熱処理温度とともに増加し、723K以上の熱処理層のそれは純ニッケルよりも大きい値となる。すなわち、Ni-Pめっき層の耐摩耗性の優劣は、位相速度分散から推定された力学特性と良い相関がある。

(4)速度分散を逆ラプラス変換することによって、高温熱処理めっき層の特性勾配関数の推定を試みた。推定結果の一意性については今後検討する必要があるが、973K熱処理めっき層内には大きな特性勾配が深さ方向に存在し、高周波域の位相速度を遅くしている可能性がある。

本研究を行うにあたり熱心に協力した卒業研究生久保木治君、水谷義弘君に感謝する。SIFおよびSAW位相速度計算プログラムの使用に便宜を頂いた通産省工業技術院機械技術研究所極限技術部量子技術研究室長山中一司博士、超音波スペクトラム顕微鏡をお貸し下さった凸版印刷(株)研究所塚原祐輔博士に深く感謝する。各種信号処理法の開発に協力を得た静岡大学工学部知能情報工学科林泰久博士に感謝する。

文 献

- 1) 屋敷貴司, 中山武典, 加藤 淳: 鉄と鋼, 81 (1995), 48.
- 2) 西本英敏, 杉崎康昭, 佐藤廣士: 材料とプロセス, 3 (1990), 1565.
- 3) 長 秀雄, 森川靖之, 竹本幹男: 材料科学, 31 (1994), 304.
- 4) 山中一司, 西野秀郎, 塚原祐輔, 長田可彦, 甲田寿男: 信学技報, US92-94 (1993).
- 5) H.Cho, H.Sato, H.Nishino, Y.Tsukahara, M.Inaba, A.Sato, M.Takemoto, S.Nakaso, and Y.Yamanaka: Proc. 1995 IEEE Ultrasonic Symposium, Seattle, (1995), 757.
- 6) K.Yamanaka, O.Kolosov, H.Nishino, Y.Tsukahara, Y. Nagata and T.Koda: J.Appl. Phys., 74 (1993), 6511.
- 7) J.D.Aussel and J.P.Monchalain: Nondestructive Evaluation, 8A (1989), 535.
- 8) 林 泰久, 長 秀雄, 竹本幹男: 非破壊検査, 45 (1996), 40.
- 9) A.H.Farmy and E.L.Adler: J. Appl. Phys. Letter, 22 (1973), 495.
- 10) 平尾雅彦, 矢田高広, 谷元伸孝, 福岡秀和: 非破壊検査, 38 (1989), 99.