

超音波顕微鏡による加工変質の評価

Evaluation of Subsurface Damage by Using Acoustic Microscopy

谷 泰 弘*・仙 波 卓 弥**・佐 藤 壽 芳***
Yasuhiro TANI, Takuya SEMBA and Hisayoshi SATO

機械加工により加工変質を受けた部材の機械的特性は劣化することが知られている。著者らは超音波顕微鏡を用いてこの加工変質の程度と加工変質層の深さを評価することを試みてきた。本稿では、反射パワーおよび弾性表面波速度を用いて加工変質度を定量化する手法について解説するとともに、異方性検出のために開発したレンズの検出特性について述べる。

1. は じ め に

最近光学部品や電子機器部品等の機械加工においては、幾何学的に高精度であるばかりでなく、スクラッチやクラック、ダメージなどの加工品質の点においても優れていることが要求されるようになってきている。このため、こうした加工品質を評価する方法の確立が重要な課題となってきた。

こうした社会的背景のもとに、著者らは超音波顕微鏡を用いて加工変質を定量化することを試みている。加工変質を受けた部材は、その母材とは異なった音響特性を持つことが知られており、また超音波は超音波探傷などで現場にとってなじみの深いセンシング媒体である。この超音波を集束して垂直および水平分解能の高い情報を検出できる超音波顕微鏡は、加工表面で急速に変化する加工変質の評価には最適であると考えられた。

本報では、超音波顕微鏡による加工変質の評価を、研削加工により生じた熱影響層、切削加工により生じた塑性流動層に対して試みた結果について説明する。また、軽微な加工変質の評価を念頭において検討を行った、異方性の検出方法について述べる。

2. 加工変質の評価法

2.1 画像による観察

研削加工により加工物 (S50C) に生じた熱損傷領域は、図 1 の超音波顕微鏡¹⁾を用いて加工物の側面から観察すると、図 2 (a) のような超音波画像として捉えることができる。加工面とその近傍ではホワイトマルテンサイトが生成され、結晶が微細化したことを示すコントラ

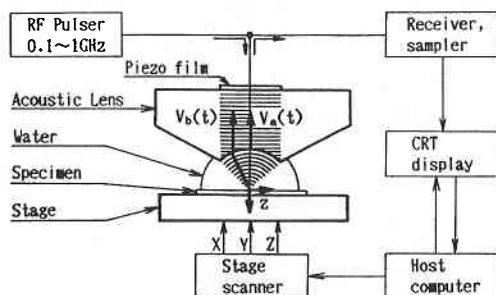
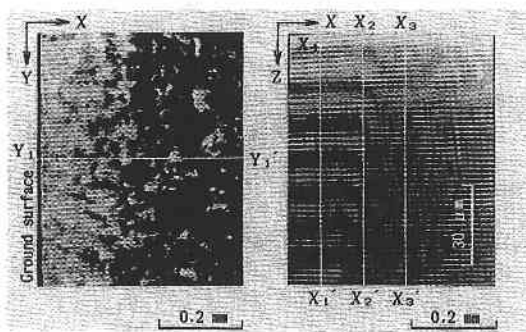


図 1 反射型超音波顕微鏡の構成



(a) 超音波画像 (b) 二次元 V(z) 曲線

図 2 加工物側面からの超音波画像(400MHz)

ストが得られている。図 2 (a) の Y₁-Y₁' の位置で二次元 V(z) 曲線 (XZ 画像) を求めると、図 2 (b) が得られる。

図 2 (b) の結果によれば、音響レンズと水との界面からの反射波と試料表面からの反射波の干渉による短周期の波 (周期は約 2μm) は Z 方向に一樣に生じているが²⁾、弾性表面波の励起・漏洩に基づく長周期の波 (周期は約 14μm)³⁾ は加工面とその近傍でしか生じておらず、

*東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

**東京大学生産技術研究所 第 2 部

***工業技術院機械技術研究所

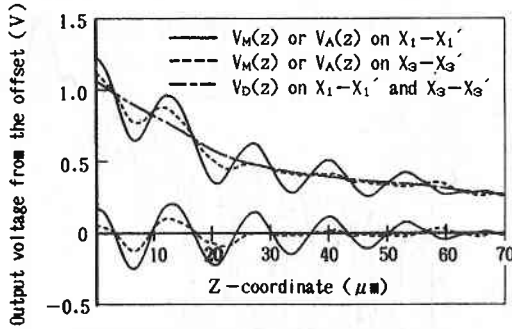


図3 加工変質による V(z) 曲線の変化

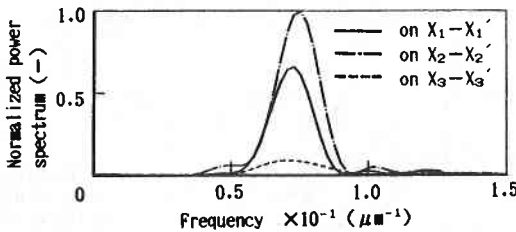


図4 V(z) 曲線のパワースペクトル

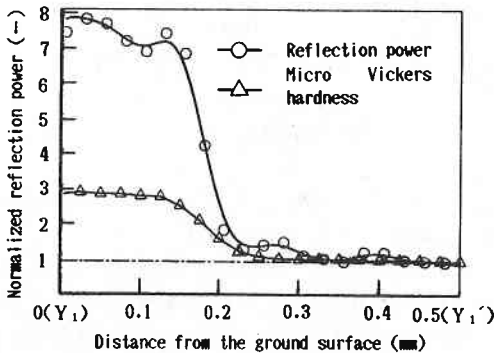


図5 加工変質による空間反射パワーの変化

これは S50C の母材では弾性表面波の散乱減衰^{4), 5)}が大きいことを示している。また、その長周期の波の周期は加工変質を受けた領域内で必ずしも一様ではなく、変質層と母材との境界付近で急激に変化している。

これらの相違は、図 2 (b) の X₃-X₃' で示した母材と X₁-X₁' で示した加工面近傍とで計測された図 3 の V(z) 曲線を比較すれば、明確となる。ここで、計測結果から干渉波を除去した成分を V_M(z)、V_M(z) の直流成分を V_D(z)、交流成分を V_A(z) と表している。なお、縦軸はオフセット電圧からの出力電圧、横軸は正焦点からの音響レンズの移動量を示している。

このように、加工変質に伴う試料の弾性率や超音波の減衰定数の変化は、音響レンズと水の界面における反射

波の干渉による影響を除去した V(z) 曲線 (V_M(z)) の周期や振幅に敏感に反映される。

2.2 散乱減衰の定量化

図 2 (b) に X_i-X_i' (i=1~3) の位置における図 3 の V_A(z) の波形に対して図 4 のようにフーリエ解析を行うと、その特徴は顕著となる。ここでは、縦軸に X₂-X₂' の位置で得られたパワースペクトルの最大値で無次元化した値を、横軸に空間周波数を示した。この図の結果で卓越する空間周波数の近傍で得られたパワースペクトルの面積の総和は、V_A(z) の減衰に対応した値となる。そこで、反射波の全パワーを表す⁶⁾、

$$\Pi = \int_0^{S_{N/2}} G(s) ds \quad (1)$$

を超音波の空間反射パワーと定義し、これにより減衰の度合を表示することにした。ここで、G(s) はスペクトル密度関数、s は空間周波数、S_{N/2} は折曲げ空間周波数、N は離散点の個数である。

図 2 (a) の Y₁-Y₁' の線上で Π を算出すれば、図 5 の \circ 印のようになる。この Π の値は測定系の増幅率により変化するため、縦軸は各測定値を母材にて得られた値の平均値で除した無次元量で表した。また、比較のため、同一線上で計測されたマイクロビッカース硬度 MH_V の値を、同様の無次元化の後 \triangle 印で示した。図 5 によれば、母材に対する加工面近傍での MH_V の増加割合は 3 倍程度であるのに対し、 Π は 8 倍近く変化している。しかし、研削面から 0.2mm 以上離れた領域では、 Π および MH_V はともに母材の値に収束している。このように、加工変質に伴う硬度の変化と、式 (1) で定義される超音波の空間反射パワーとはよく対応し、さらに後者は前者よりはるかに感度よく変質度を計測できる。また、式 (1) により V(z) 曲線の減衰を定量化する本手法は、V(z) 曲線の基礎式を直接解くことにより超音波の減衰定数を求める従来の手法^{4), 5)}より簡便で実用的である。

2.3 弾性表面波の伝播速度

図 4 によれば、図 2 (b) の X₁-X₁' ならびに X₃-X₃' の線上における V(z) の卓越空間周波数の値は、わずかに異なっている。この卓越空間周波数の違いは、それぞれの位置で得られた V_A(z) の周期の違いを反映しており、これは弾性表面波の伝播速度の違いを表している⁷⁾。

そこで、この卓越空間周波数 s_n をもとに、弾性表面波の伝播速度 V_R を、

$$V_R = (f \cdot V_w / s_n)^{1/2} \quad (2)$$

により算出した。ここで、f は超音波の周波数、V_w は音響媒体である水の音速である。その結果、X₁-X₁' (i=1, 2) の線上における V_R の値は、それぞれ 2.86km/s、2.97km/s と求められた。このように、変質層と母材と

の境界付近で計測された V_R は、変質層の内部で得られた V_R に比べて早くなっている。しかし、母材では散乱減衰が大きいために、図 4 の X_3-X_3' での結果のようにそのスペクトル密度関数は非常になだらかで、卓越空間周波数を精度よく求めることは困難である。

以上のように、超音波の伝播減衰や散乱減衰の小さい試料の変質度は、弾性表面波の伝播速度により定量評価することが可能である。逆に超音波の減衰が大きい試料の変質度は、式 (1) で定義した空間反射パワーで定量評価することが好ましい。

3. 加工変質層の厚み計測法

3.1 熱影響層の残留に伴う $V(z)$ 曲線の変化

図 1 のように研削加工等で熱変質を受けた層は、母材とは明確に異なる音響特性を有している。そこで、図 6 のような二層媒質として、加工物に熱影響層が残留している状態をモデル化する。このモデルにおいて反射波の入射波に対する比である反射関数³⁾は、超音波の波動を表すポテンシャルに関する構成方程式を、液 (f)/層 (o) ならびに層 (o)/母材 (s) での境界条件を満足するように解くことにより求められる。

この反射関数をもとに $V(z)$ 曲線の解析³⁾を行うと、超音波の反射強度 V とセンサ移動量 z との関係は図 7 のように求められる。これは熱影響層の深さ d が母材を伝播する弾性表面波の波長に等しくなるように設定した場合の結果であり、使用周波数は 120MHz である。なお、太線は母材と熱影響層とで弾性定数に差がある場合、破線は減衰定数に差がある場合、細線はそれらが同一の場合の条件下で得られた結果である。

3.2 V_R を用いた熱影響層の厚み計測

2. 3 節と同様に図 7 の $V(z)$ 曲線を波形解析し、加工物表面を伝播する弾性表面波速度 V_R を求めると、 V_R と d の関係は図 8 のようになる。縦軸には V_R 、横軸には解析により求められた弾性表面波の波長 λ_R で無次元

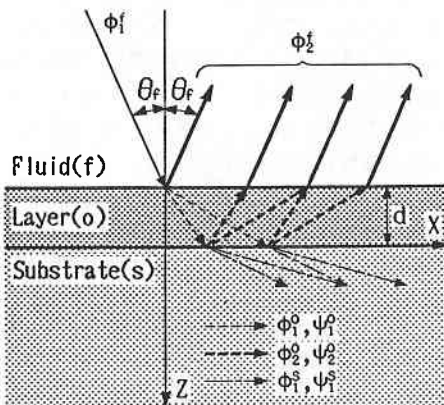


図 6 熱影響を受けた加工物表面のモデル化

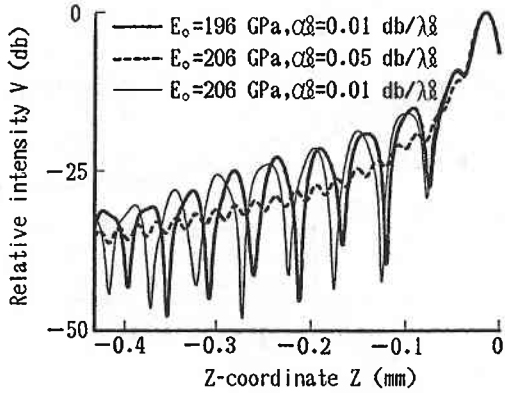


図 7 熱影響層の残留を伴う $V(z)$ 曲線の変化

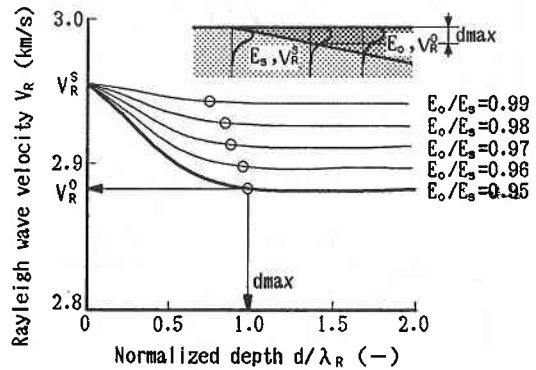


図 8 弾性表面波速度と熱影響深さとの関係

化した d の値、パラメータは母材と熱影響層に関する弾性定数の比 E_o/E_s を用いている。

図 8 に太線で示した結果に着目すると、 V_R は $d < \lambda_R$ の範囲で非線形に減少した後、熱影響層を伝播する弾性表面波の速度 V_R^o に収束している。これは弾性表面波の波動が球面波であるため、 d が薄いほど母材の影響を、厚いほど熱影響層の影響を強く受けるためである。また、図 8 に○印で示されるように、 V_R の収束点は E_o/E_s に依存して変化している。

この V_R が収束する d の値を、測定可能深度 d_{max} と定義すると、母材と熱影響層との機械的性質の違いに基づく d_{max} の変化は図 9 のように解析される。ここで縦軸には d_{max}/λ_R 、横軸には、

$$\gamma = \rho_o V_R^o / \rho_s V_R^s \tag{3}$$

で定義される音響インピーダンスの比 γ 、パラメータには弾性表面波の速度比 β 、

$$\beta = V_R^o / V_R^s \tag{4}$$

を用いている。式 (3), (4) において、 $V_R^i (i=s, o)$ は弾性表面波速度、 $\rho_i (i=s, o)$ は密度である。このように、

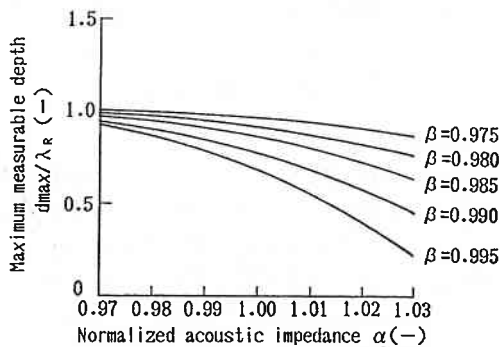


図9 V_R を用いた計測の測定可能深度 d_{max}

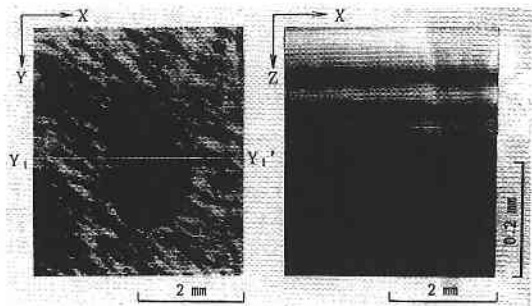


図10 SUJ2 に残留する熱影響層の観察例

$d \leq d_{max}$ の範囲で得られる V_R と d の関係は、 γ と β とを用いて一義的に決定される。

SUJ2 に残留する熱影響層の超音波顕微鏡画像を、図10(a)に示す。図10(a)の $Y_1 - Y_1'$ の線上で得られた二次元 $V(z)$ 曲線を図10(b)に示す。 $V(z)$ 曲線の周期は上記の線上で様ではなく、熱影響層が残留している領域で短く変化している。したがって、図10(a)のコントラストは、母材と熱影響層とで V_R が異なっていることを示している。

以上のように観察された表面形状の変化を V_R を用いて定量化すると、図10(a)の $Y_1 - Y_1'$ の線上において V_R は図11のようになる。母材ならびに熱影響層が残留する領域では、 V_R はほぼ一定の値に収束している。また、母材と熱影響層との境界近傍において V_R は非線形に変化している。

このように計測された V_R の非線形な変化は、前述のように熱影響層の深さが変化していることを表している。そこで、図11のように計測された V_R をもとに、式(3)、(4)のように定義した γ および β を定め、 V_R を d に変換した。その結果、 d_{max} は $23 \mu m$ であると推定された。ここで、母材の密度 ρ_0 は $7.83 g/cm^3$ 、熱影響層の密度 ρ_1 は $7.77 g/cm^3$ である。同様の計測を熱影響領域を含む $3.9 mm^2$ の領域に対して行くと、 $0 \leq d \leq 23 \mu m$ の範囲で

は図12に示される熱影響層の深さ分布が得られる。図10(a)は V_R に関する等高線分布であるが、図12に示された変質層深さ $7.5 \mu m$ の等高線分布とよく一致している。

3.3 Π を用いた熱影響層の厚み計測

3. 2節と同様に $V(z)$ 曲線を波形解析して、弾性表面波の減衰を表わす超音波の空間反射パワー Π を求めると、 Π と d の関係は図13のようになる。ここでは、熱影響層を伝播する縦波の減衰定数 α_l をパラメータに用いている。 Π が収束する点での d の値をこの場合も d_{max} と定義すると、 Π は $d \leq d_{max}$ の範囲で非線形に増加した後一定値に収束している。また、図13に○印で示したように、 d_{max} は α_l が減少するにしたがい、増加している。

ここで、図13のように得られた Π と d の関係は、弾性表面波が励起される熱影響層の機械的性質に依存し変化する。そこで、実際に測定が可能な熱影響層を伝播する弾性表面波速度 V_R を変数にとると、 α_l の変化に伴う d_{max} の変化は図14のようになる。ここで、縦軸には d_{max}/λ_R 、横軸には V_R 、パラメータには α_l を用いている。以上のように、熱影響層でのみ弾性表面波が励起されるような場合には、 V_R と Π の計測を行えば、 Π を d に変換することが可能となる。

S50C に残留する熱影響層の超音波顕微鏡画像および二次元 $V(z)$ 曲線を図15に示す。図15(b)の熱影響領域

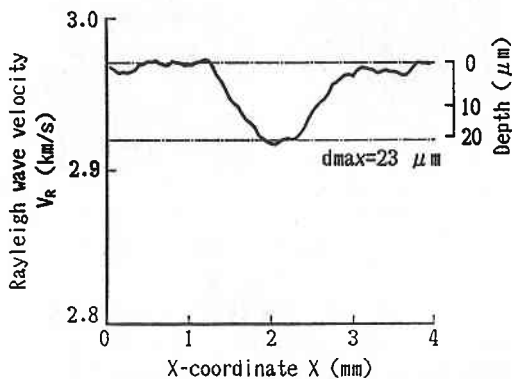


図11 熱影響層の残留に伴う弾性表面波速度の変化

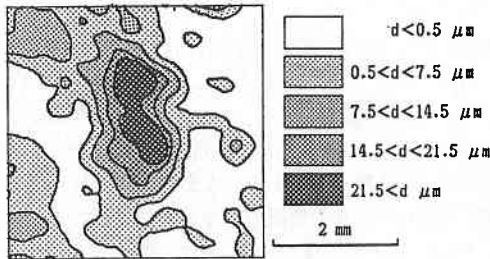


図12 SUJ2 に残留する熱影響層の厚み分布

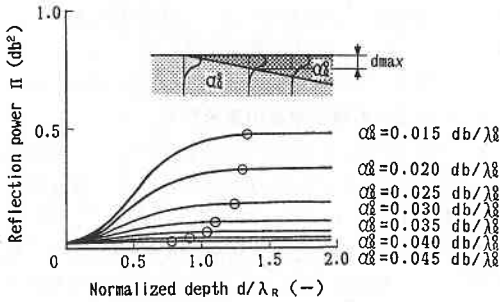


図13 超音波の空間反射パワーと熱影響深さとの関係

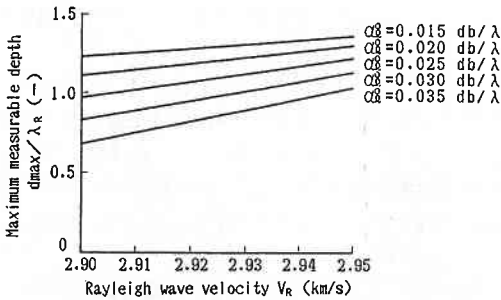


図14 Πを用いた計測の測定可能深度 d_max

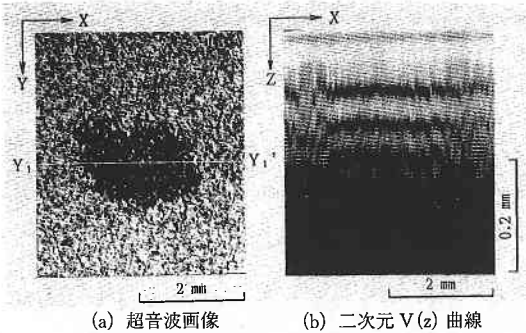


図15 S50Cに残留する熱影響層の観察例

からは弾性表面波の励起・漏洩に基づく長周期の波が得られているが、母材中では観察されない。したがって、図15(a)の結果は、弾性表面波が完全に減衰してしまう母材の上に、熱影響層が残留している状態を表している。

図16は、図15(a)の Y₁-Y₁' の線上で計測された、Πの分布を示している。SUJ2の場合と同様に、母材と熱影響領域との境界近傍において、Πは非線形に変化している。また、計測されたΠおよびV_Rの値を図14に適用して測定可能深度 d_{max} は 34μm であると推定された。ここで、α_i² = 0.05dB/wavelength, α_i² = 0.01dB/wavelength である。同様の計測を二次元的に行うと、S50Cに残留する熱影響層の厚み分布は図17のようになる。図12の結果と同様に、等高線の谷底ではdの値が一定になっている。これは、この領域で残留する熱影響層

の厚みが測定可能深度を越えているためであり、dが一定であることを表してはしない。

4. 異方性の検出方法

4.1 異方性の測定原理

図18の模式図のように、切削方向Lと工具の送り方向Tとは機械加工によって金属組織に異方性を生じ、その結果として弾性定数は加工面内で変化している。この弾性定数の変化を直交異方性と考えれば、L軸からθ回転したX軸方向の弾性定数 E_X は、

$$1/E_X(\theta) = l^4/E_L + m^4/E_T + l^2m^2(1/G_{LT} - 2\nu_{LT}/E_L) \quad (5)$$

と計算される。ここで、E_i (i=L, T) は異方性の主軸方向の弾性定数、G_{LT} は剪断弾性定数、ν_{LT} はポアソン比、l および m は X 軸あるいは Y 軸の L 軸に対する方向余弦である。

図18(a)の円で囲った領域は、点集束型の音響レンズにより集束された超音波が試料表面に照射される領域を示したものである。音響レンズと試料との相対的な位置関係は図18(b)に示されるとおりである。図18(a)に斜線で示したくさびの領域で得られる平均的な弾性定数を E_w とすれば、

$$E_w(\theta, \theta_s) = 1/(2\theta) \int_{\theta-\theta_s}^{\theta+\theta_s} E_x(\theta') d\theta' \quad (6)$$

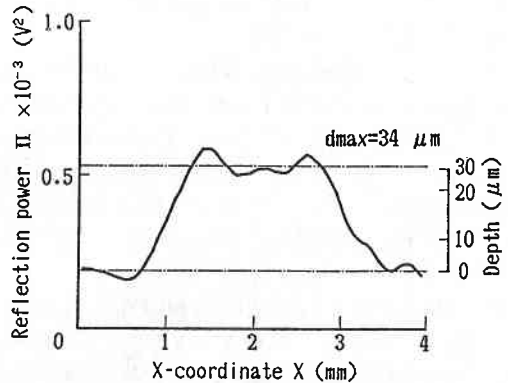


図16 熱影響層の残留に伴う空間反射パワーの変化

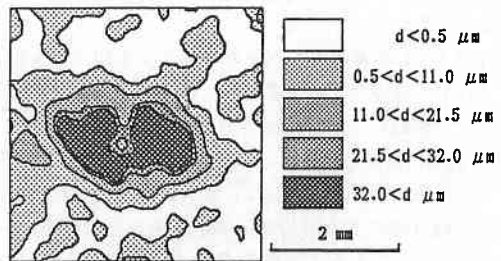


図17 S50Cに残留する熱影響層の厚み分布

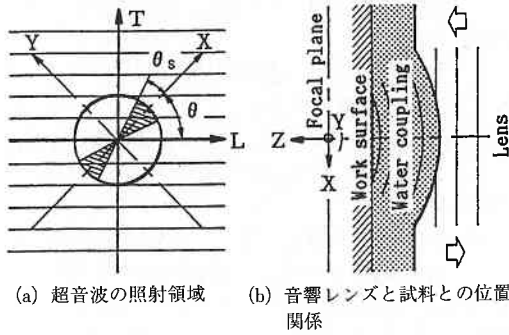


図18 超音波が加工表面に照射される領域

と求められる。ここで、 $2\theta_s$ はくさびの開口角である。式(5)のように計算される E_x は E_L と E_T との差が微小な場合には余弦曲線と類似の変化をする。そこで、 E_x を

$$E_x(\theta) = (E_L + E_T)/2 + (E_L - E_T) \cos(2\theta)/2 \quad (7)$$

と近似し、式(7)を式(6)に代入すると、

$$E_w(\theta, \theta_s) = (E_L + E_T)/2 + (E_L - E_T) / (8\theta_s) \cdot \{\sin^2(\theta + \theta_s) - \sin^2(\theta - \theta_s)\} \quad (8)$$

と表すことができる。

式(8)で E_L を 210GPa, E_T/E_L を 0.95 とした場合に解析された E_w と θ との関係を図19に示す。縦軸には E_L で無次元化した E_w , パラメータには θ_s を用いた。比較のため式(7)のように近似した E_x の変化を同図に破線で示した。 θ_s が 90度の点集束型の音響レンズでは、 $E_w = (E_L + E_T)/2$ と表される E_w を測定することになる。一方、くさびの領域で得られる E_w は余弦状の変化をし、 θ_s が減少するにしたがい E_x の変化に近接している。この θ_s を 30度として E_T/E_L を変化させると、図20の結果を得る。 E_T/E_L の値が減少するにしたがい、すなわち異方性の度合いが増すにつれて E_w の振幅は増加している。

このようにくさびの領域で得られる平均弾性率 E_w は、くさびの開口角 θ_s や異方性の度合い E_T/E_L により変化する。そこで、 E_w の値が最も大きく変化している θ が 90度での値に着目し、 E_w と θ_s ならびに E_T/E_L との関係を整理すると、図21の結果を得る。縦軸には $\Delta E_w(90, \theta_s) = |E_L - E_w(90, \theta_s)| / E_L$, 横軸には $\Delta E_T = (E_L - E_T) / E_L$ と定義した E_w と E_T の変化率, パラメータには θ_s を用いた。 θ_s が 0 であるような直線集束型の音響レンズを用いた場合に得られる ΔE_w と ΔE_T との関係を同図に破線で付記した。

直線集束型の音響レンズでは ΔE_w と ΔE_T とは完全に一致しているが、 θ_s が 90度であるような点集束型の音

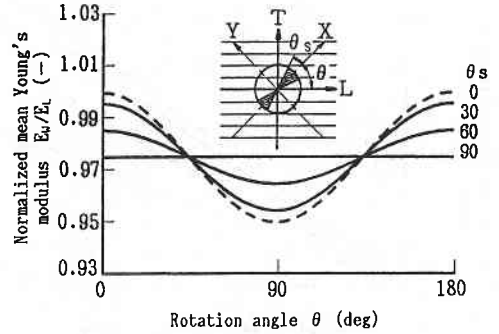


図19 平均弾性率 E_w の変化と θ_s との関係

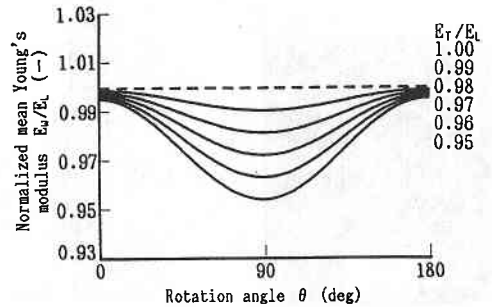


図20 平均弾性率 E_w の変化と E_T/E_L との関係

響レンズでは E_T が 5% 変化しても E_w は 2.75% しか変化しない。一方、くさびの領域で測定される E_w の変化率 ΔE_w は、 θ_s が減少するにしたがい ΔE_T に近接している。この結果は θ_s を小さくするほど、加工面内に生成された材料異方性を高感度に検出することが可能となることを示している。

4.2 試作した異方性音響レンズの特性

図21のように得られた解析結果を踏まえ、超音波を点集束させることが可能な図22(a)に示される異方性音響レンズを試作した。図22(b)に示す音響レンズの凹面に吸音材であるワックスを流し込んだ後、それをくさび状に成形したものである。この音響レンズを使用すれば材料異方性の計測だけでなく、画像観察も同時に行うことができる。この試作した音響レンズの性能を把握する目的で、レンズの遮蔽角 θ_w を変化させた時に得られる音圧レベルとノイズレベルとの関係を調べた。

試料表面からの音の反射強度が最大となる、正焦点で測定された音の反射強度を音圧レベルに変換すると、図23に示す結果を得る。図中○印は音圧レベル、△印はノイズレベルを表している。いずれも場合にも θ_w を零とした場合に得られた音の反射強度を基準に表している。なお、同図に破線で示した曲線は幾何学的に求められるレンズ面積の減少率、太線は最小二乗法を用いて近似した正焦点の音圧レベルである。

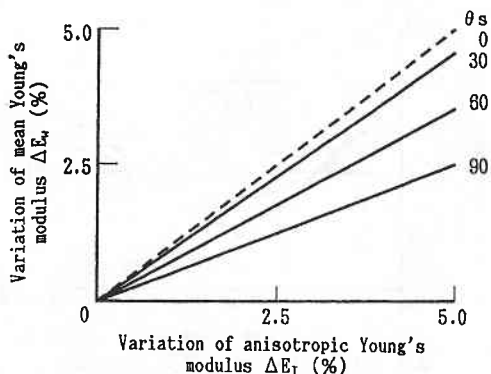
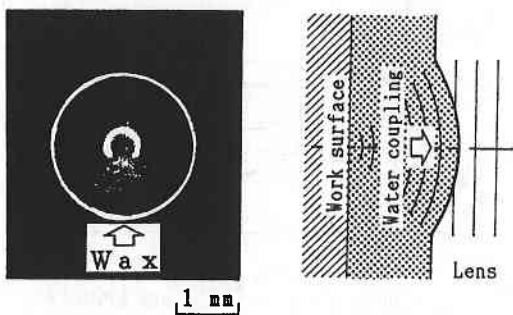


図21 平均弾性率 E_w の変化に及ぼす θ_s , E_T/E_L の影響



(a) 音響レンズ凹面 (b) 音響レンズと試料との位置関係
図22 試作した異方性音響レンズ

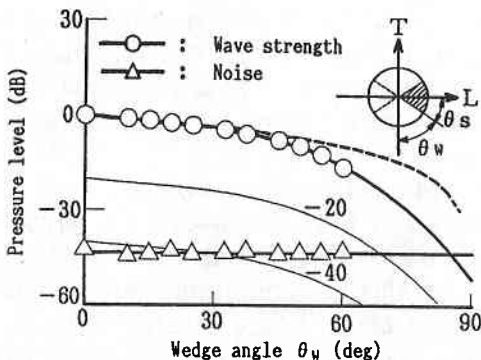


図23 音圧レベルとレンズ遮蔽角 θ_w との関係

このように、図22に示した点集束型の音響レンズでは θ_s を小さくするほど異方性の検出感度は上がるが、そのことによる S/N 比の低下は避けられない。そこで、本研究では θ_w を45度に決定した。この場合、正焦点で測定される音の反射強度の2%以内の精度でセンサからの出力電圧を測定することができる。

4.3 切削加工面の品質評価

エンドミルをドウエルさせた後の SUJ2 の加工表面より得られた超音波顕微鏡画像を図24 (a)、図24 (a) の Y_1-Y_1' の線上で測定された二次元 $V(z)$ 曲線を、図24

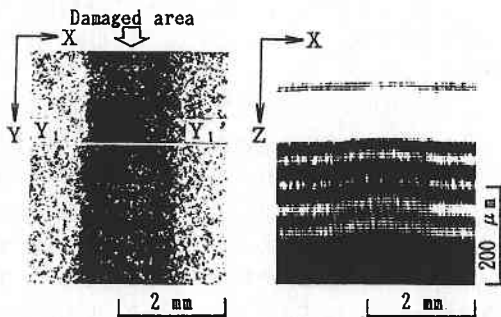
(b) に示す。これは凹凸を除去した後の加工面に対して測定を行った結果である。ここで、図24 (a) で白いコントラストが得られている部分が母材、黒い部分はドウエルにより金属組織が変化した領域を表している。図24 (b) に示した結果によれば、弾性表面波が励起・漏洩されることにより生じた長周期の波の間隔は、ドウエルを受けた領域の内部で短く変化していることがわかる。

図24 (b) と同様の測定を音響レンズを15度刻みで回転させた各場合について行い、上記の線上で測定される V_R とレンズ回転角 θ との関係を求めると、図25の結果を得る。縦軸は V_R 、横軸は X 座標、斜交軸は θ を表している。母材の部分で測定された V_R の値は θ には依存せずほぼ一定であるのに対して、ドウエルを受けた領域で得られた V_R の値は θ と共に変化している。このように、異方性の変化を検出することによって加工変質を評価することが可能となる。

5. おわりに

機械加工に伴い加工表面に生成される加工変質の度合いや深さを、超音波顕微鏡を用いて定量評価する方法について検討を行った。本研究においてこれまで得られた成果は、次のようにまとめられる。

- 1) 加工変質の度合いおよび変質層の厚みは、弾性表面



(a) 超音波画像 (b) 二次元 $V(z)$ 曲線

図24 ドウエルを受けた領域の観察例

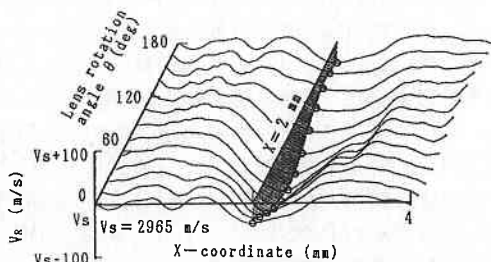


図25 レンズの回転に伴う V_R の変化

波速度あるいは空間反射パワーを計測することによって評価することができる。

- 2) その加工変質が熱的なものであるか機械的なものであるかによって校正曲線を作成することにより, 加工変質層の厚みを定量評価することが可能になる。
- 3) 新しく開発した点集束型の音響レンズを使用すれば, 画像観察と共に高感度の異方性検出が可能になり, 軽微な加工変質の評価が可能となる。

(1993年8月30日受理)

参 考 文 献

- 1) C. F.クエート：超音波顕微鏡, 日経エレクトロニクス, No. 206 (1979) 116.
- 2) 石川・神田・片倉：超音波顕微鏡による欠陥評価の試み, 第21回半導体専門講習会予稿集, (1983-11) 171.
- 3) A. J. Atalar : An Angular-Spectrum Approach to Contrast in Reflection Acoustic Microscopy, J. Appl. Phys., 49 (1978) 5130.
- 4) K. Yamanaka, Y. Enomoto, Y. Tsuya : Application of Scanning Acoustic Microscope to the Study of Fracture and Wear, Acoustical Imaging, 12 (1983) 79, Prentice Hall Press.
- 5) J. Kushibiki, A. Ohkubo, N. Chubachi : Material Characterization by Acoustic Microscope with Line-Focus Beam, Acoustical Imaging, 12 (1983) 101, Prentice Hall Press.
- 6) 大崎：地震動のスペクトル解析入門, (1983) 116, 鹿島出版会.
- 7) R. D. Weglein : A Model for Predicting Acoustic Material Signatures, Appl. Phys. Lett., 34 (1979) 179.