

### 超音波顕微鏡による加工変質層の定量評価

Quantitative Evaluation of Damaged Layer of Ground Surface by Scanning Acoustic Microscopy

仙波卓弥\*・谷泰弘\*・佐藤壽芳\*  
Takuya SEMBA, Yasuhiro TANI and Hisayoshi SATO

#### 1. 緒言

機械加工に伴い加工面表層に生成される加工変質層は、加工物の耐摩耗性や耐腐食性などに悪影響を与えるため、その加工面の変質の度合い（以下変質度と称する）を定量的に評価しうる方法の確立は重要である。このような面の非破壊の品質評価の方法としては、X線回折法<sup>1)</sup>、電磁誘導法や超音波探傷法などの手法<sup>2)</sup>が知られている。

しかし、これらの方法を表層で変質度が急激に変化する加工変質層の定量評価に対して適用すると、分解能の点で問題があった。これに対し、約10年前に開発された超音波顕微鏡は、超音波を試料表面に集束するため分解能が高く、加工変質層の計測に可能性を投げかけた<sup>3)</sup>。

そこで、本報告ではこの超音波顕微鏡を用いて、研削加工により生成された熱損傷領域の変質度を定量評価することを試みた。その結果、超音波の減衰の小さい試料に対しては表面波の音速により、また減衰の大きい試料に対しては本論文で定義した空間反射パワーにより、それぞれ評価しうることを見出したので報告する。

#### 2. 測定方法

使用した超音波顕微鏡（日立製作所製 HSAM-1000型<sup>4)</sup>の主要部分を図1に示す。超音波顕微鏡では、一般に図1で試料面に沿ったX-Y方向の二次元走査と同期して超音波の送受波を行い、その面内の音響的性質の違いを画像化する。また、使用した装置では、図1のX-Y方向に音響レンズを二次元走査させることにより、X軸上の各点にて計測されるV(z)曲線<sup>5)</sup>を、二次元画像（以下V(z)画像と称する）として観察できる<sup>4)</sup>。

測定に用いた試料は、表1に示す加工条件のもとで、研削焼けを生じさせたS50Cである。S50Cを対象としたのは、焼鈍後の結晶の平均粒径が120 MHzの弾性表面波の波長（約25 μm）にほぼ等しく、この周波数を使用すると最も表面波の散乱減衰が生じやすい<sup>6)</sup>ためである。研削後の加工物の表面には凹凸が生じているので、これ

表1 試料の研削条件

Wheel	PA80J9V-10 (200×19×127 mm)
Workpiece	S50C (50×100×15 mm)
Revolution	3000 min <sup>-1</sup>
Feed	10 mm/min
Cutting depth	100 μm
Dressing	Feed : 100 mm/min Depth : 10 μm×5 times 5 μm×4 times, 0 μm×2 times
Style	Dry, Upcut, One-path

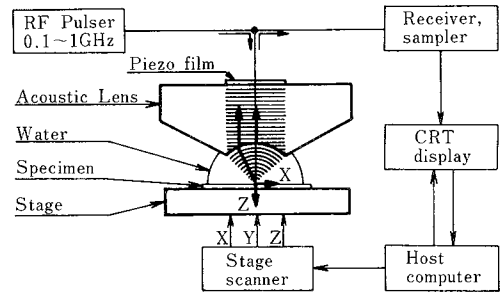


図1 反射型超音波顕微鏡の構成

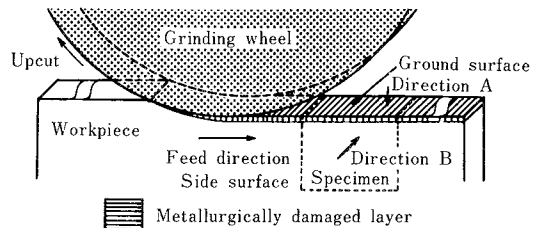


図2 試料の観察方向

が測定結果に影響を及ぼさないように約10 μm程度研磨し鏡面に仕上げた後、図2に示される加工面の真上(A方向)あるいは横(B方向)の二方向から観察を行った。なお、測定時には音響媒体である水の温度を20±1℃に

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報 保った。

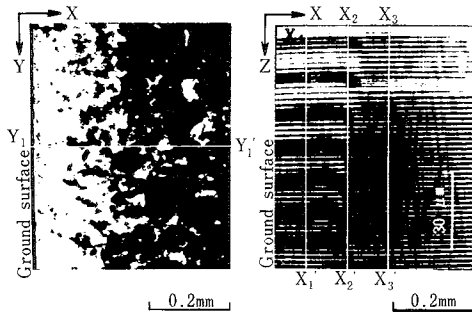
3. 加工変質層の評価法

3.1 画像による観察

加工物に生じた熱損傷の領域は、図2のB方向から観察すれば、図3(a)のような超音波画像として捉えられる。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、結晶が微細化している。図3(a)のY<sub>1</sub>-Y'<sub>1</sub>でV(z)画像を求めると、図3(b)が得られる。

図3(b)では、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と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<sup>4)</sup>。一方、弾性表面波の励起・漏洩に基づく長周期の波(周期は約14μm)<sup>5)</sup>は加工面とその近傍でしか生じておらず、これはS50Cの母材では弾性表面波の散乱減衰<sup>7,8)</sup>が大きいのである。また、その長周期の波の周期も加工変質を受けた領域内で一樣ではなく、変質層と母材との境界付近にて急激に変化している。

これらのことは、図3(b)のX<sub>3</sub>-X'<sub>3</sub>'での母材と、X<sub>1</sub>-



(a) 超音波画像 (b) V(z) 画像

図3 超音波顕微鏡による側面からの観察画像 (使用周波数: 400 MHz)

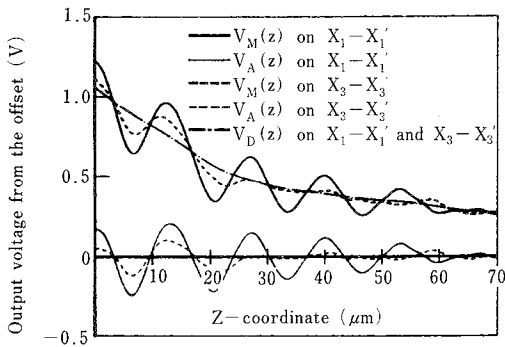


図4 加工変質によるV(z)曲線の変化

X'<sub>1</sub>での加工面近傍とで計測された図4のV(z)曲線を比較すれば、明確となる。ここで、測定結果から干渉波を除去した成分をV<sub>M</sub>(z)、その直流成分をV<sub>D</sub>(z)、交流成分をV<sub>A</sub>(z)と表している。なお、縦軸はオフセット電圧からの電圧、横軸はレンズの移動距離である。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、レンズと水との界面からの反射波影響を除去したV(z)曲線(V<sub>M</sub>(z))の周期や振幅に敏感に反映される。

3.2 散乱減衰の定量化

図4のV<sub>A</sub>(z)の波形を図5のようにフーリエ解析すると、その特徴は顕著となる。ここでは、X<sub>2</sub>-X'<sub>2</sub>'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縦軸に、空間周波数を横軸に示した。この図5で卓越する空間周波数近傍で得られたパワースペクトルの面積は、V<sub>A</sub>(z)の減衰に対応して変化する。そこで、波の全パワーを表す<sup>9)</sup>、

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

を超音波の空間反射パワーと定義し、以下この値で減衰の度合いを表示する。ここで、G(s)はスペクトル密度関数、sは空間周波数、s<sub>N/2</sub>は折曲げ空間周波数、Nは離散点の個数である。

式(1)によれば、図3(a)のY<sub>1</sub>-Y'<sub>1</sub>でのμ値は、図6

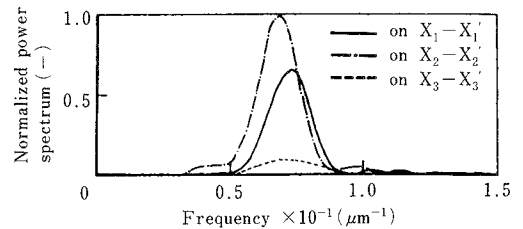


図5 V(z)曲線のパワースペクトル

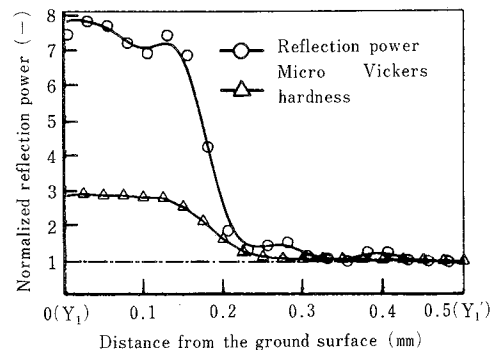


図6 加工変質による空間反射パワーの変化

の○印となる。この $\mu$ 値は測定系の増幅率により変化するため、縦軸には各測定値を母材での値の平均値で除した無次元量を用いた。また、比較のため、同一線上で計測されたマイクロピカース硬度MHvの値を、同様の無次元化の後△印で示した。この結果では、母材に対する加工面近傍におけるMHvの増加割合は3倍程度であるが、 $\mu$ は8倍近く変化している。このように、加工変質に伴う硬度の変化は、式(1)で定義した超音波の空間反射パワーとよく対応し、後者は前者より感度よく変質度を計測できる。

3.3 弾性表面波の伝播速度

図5の結果では、図3(b)の $X_1-X'_1$ ならびに $X_3-X'_3$ での $V(z)$ 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、弾性表面波の伝播速度の違いを表している<sup>10)</sup>。

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(水)の音速である。その結果、 $X_1-X'_1$ ( $i=1, 2$ )での $V_R$ の値は、それぞれ2.86 km/s、2.97 km/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の $V_R$ は、変質層の内部での $V_R$ に比べて早くなっている。

4. 熱影響層の変質度の定量評価

4.1 弾性表面波の伝播速度による定量化

図7(a)は、研削面を図2のA方向から観察した超音波画像である。試料は研削焼けによる酸化皮膜を除去し、幾何学的に高精度な面を得ているが、その材質は面内で不均一であり、それが濃淡像として捉えられる。すなわ

ち、同図の亀甲模様は、研磨の前の加工面の微小なうねりに対応しており、研削時に生じた不均一な熱損傷の痕跡を表している。

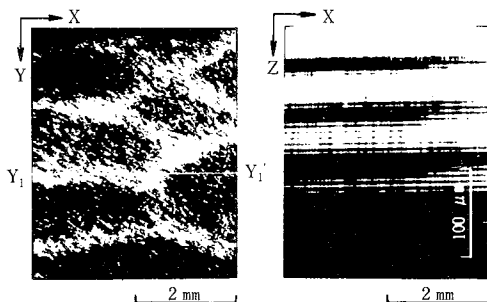
図7(a)の $Y_1-Y'_1$ で計測した $V(z)$ 画像を、図7(b)に示す。 $V(z)$ 曲線の周期はこの線上で一様ではなく、図7(a)の右の暗い領域で短くなっている。また、この $V(z)$ 画像は、周期や減衰の点で図3(b)に示した母材のものとは明らかに異なっている。したがって、この $V(z)$ 画像の周期の違いは、加工により母材とは異なる金属組織が生成されていることを表している。

以上のように観察された表面性状の変化を、式(2)で定義した $V_R$ により定量化を行った。その結果、図7(a)の $Y_1-Y'_1$ での $V_R$ の値は、変質層を0.1 mm刻みで除去するにしたがい、図8のように一様に増加した。すなわち、変質を受けた加工物の表面とその0.2 mm内部とは、 $V_R$ に約50 m/sの差が生じた。

4.2 空間反射パワーによる定量化

強度に変質を受け結晶粒が微細化した領域の変質度は、弾性表面波の伝播速度を用いて定量化できた。しかし、散乱減衰や伝播減衰の大きい材料に対しては、図3(b)の $X_3-X'_3$ での $V(z)$ 曲線のようにその周期は明確でなくなり、弾性表面波の伝播速度を用いた定量化は難しい。こうした場合には、前章の空間反射パワーにより定量化を行えばよい。このことは、変質度が小さい領域についても同様である。

そこで、図7に示された加工物表面を再度0.25 mm研磨し、変質度が小さい状態を製作した。この試料を、図7と同様周波数120 MHzで観察して得られた超音波画像および $V(z)$ 画像が、図9である。このように、軽度に変質を受けた領域では、明確な濃淡が得られない。そこで、超音波の周波数を400 MHzに上げて、表面波の伝播深度を浅くすると同時に伝播減衰を大きくすれば<sup>9)</sup>、図10のように高精度な計測が可能となる。



(a) 超音波画像 (b)  $V(z)$ 画像  
 図7 超音波顕微鏡による研削面の観察画像  
 (使用周波数: 120 MHz)

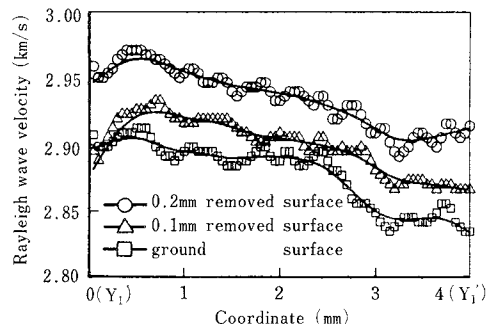
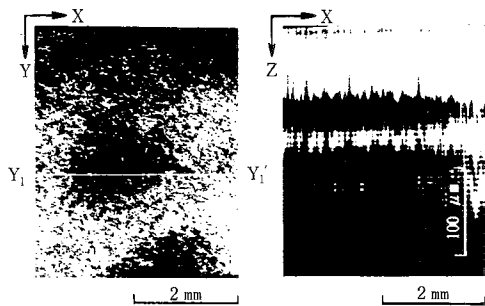


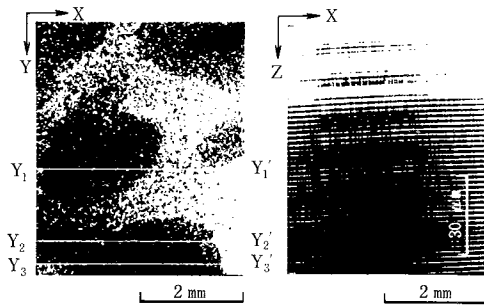
図8 研削面での弾性表面波の伝播速度の変化

研 究 速 報



(a) 超音波画像 (b) V(z) 画像

図 9 超音波顕微鏡による 0.25 mm 除去した研削面の観察画像 (使用周波数: 120 MHz)



(a) 超音波画像 (b) V(z) 画像

図 10 超音波顕微鏡による 0.25 mm 除去した研削面の観察画像 (使用周波数: 400 MHz)

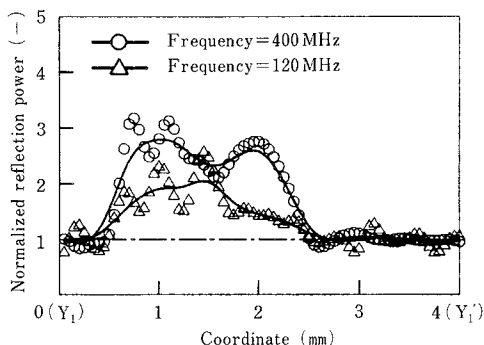


図 11 超音波の周波数による空間反射パワー分布の変化

この図 9 と図 10 の  $Y_1 - Y_1'$  での空間反射パワーを比較すれば、図 11 のように周波数を上げた効果は明白である。すなわち、400 MHz での母材の値で無次元化した空間反射パワーは、120 MHz のものに比較して高い値を示す。ここで、周波数により空間反射パワーの分布形状が異なるのは、超音波の方位分解能、伝播深度および伝播減衰の相違による。以上のように、軽度に変質を受けた領域についても、ここで定義した空間反射パワーを用いて、変質度を定量化できた。なお、この方法は、弾性表面波の散乱減衰が多い金属材料に対しても適用できる。

5. 結 言

研削加工による熱損傷領域を例にして、超音波顕微鏡で加工変質層の変質度の定量評価を試みた。その結果、(1) 変質度は、V(z) 曲線から求められる弾性表面波の伝

- 播速度が空間反射パワーにより、定量評価できる。
- (2) 超音波の伝播減衰や散乱減衰の小さい試料は、弾性表面波の伝播速度により定量評価できる。
- (3) 逆に超音波の減衰が大きい試料は、空間反射パワーにより定量評価でき、この空間反射パワーはその点でのマイクロビッカース硬度と強い相関がある。
- (4) 空間反射パワーで定量評価する場合には、周波数を上げると、より敏感な計測が可能となる。

などの結論を得た。なお、本研究に対して、日立製作所中央研究所石川 潔氏から有益な助言を頂き、岡本工作機械製作所には試料製作時に御協力頂いた。また、本研究は、一部科学研究費 60460088 により行われた。関係各位に深謝する。  
(1987 年 1 月 28 日受理)

参 考 文 献

- 1) 若林ほか 2 名: 精密機械, 49, 9 (1983) 1202
- 2) 日本非破壊検査協会編: 非破壊検査便覧[新版], 日刊工業, (1978), 350
- 3) 石川ほか 2 名: 精機学会講演論文集, 338 (1985) 735
- 4) 石川ほか 2 名: 第 21 回 半導体専門講習会予稿集, (1983) 171
- 5) A. Atalar: J. Appl. Phys., 49 (1978) 5130
- 6) 実吉ほか 2 名監修: 超音波技術便覧, 日刊工業, (1980) 945
- 7) J. Kushibiki et al.: Acoustical Imaging, Prenum Press., 12 (1983) 193
- 8) K. Yamanaka et al.: Acoustical Imaging, Prenum Press., 12 (1982) 79
- 9) 大崎: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, (1983) 116
- 10) R.D. Weglein: Appl. Phys. Lett., 34, 3 (1979) 179