セラミックスの研削加工面の評価*
(第1報, 超音波探傷法による表面傷の検出)本間 恭二^{*1}, 吉澤 俊司^{*2}, 岸和田 威^{*3}Evaluations of Grinding Surface in Ceramics
(1st Report, Flaw Characterization using Ultrasonic Detector)

Kyoji HOMMA, Shunji YOSHIZAWA and Takeshi KISHIWADA

Nondestructive inspections of surface flaws of zirconia in grinding were investigated by using the available method submerged Rayleigh Wave detection. Shockwave transducers with two different characteristics of resonance frequency (15 MHz, 25 MHz) and focusing diameter (1 mm, 0.4 mm) were selected. Flaw calibrations of the system have been carried out for artificial flaws instead of real grinding flaws. The results obtained are itemized as follows. (1) The depth of the flaw represented by a scratch could be estimated quantitatively, and the detectable limited depth would be 2.5 μm . (2) For small defects inspected by means of Vickers indentation, smaller focusing diameter of the transducer made for higher inspection sensitivity, still inspectability was explicitly decreased in comparison to the case of the scratch. (3) Compressive residual stresses remaining on the surface made for lower estimations of length. (4) Real surface flaws caused by heavy grindings, as a factor of strength degradation, could easily be detected.

Key Words: Nondestructive Inspection, Grinding Surface, Flaw Detection, Transducer Characteristics, Residual Stress

1. はじめに

ファインセラミックスを研削加工したとき, 表面に生じた微細な傷が強度に影響するといわれ⁽¹⁾, 曲げ試験の結果でも, 研削方向によって強度は異なることが報告されている⁽²⁾. このように粗研削のままでは強度低下が起こるため, 加工条件に注意することはもちろんであるが, セラミックスの場合ワークを取外した後に傷を発見しても再加工が難しいため, インプロセスで探傷できる装置の開発が望まれる.

セラミックスの非破壊検査法⁽³⁾の中では, 超音波法⁽⁴⁾が最も広く利用されている. 中でも最近超音波顕微鏡⁽⁵⁾⁽⁶⁾が表面欠陥の検出能力の高さで注目されているが, インプロセスでの探傷には不向きである. そこで本研究では将来の自動探傷システムの開発を目指して, 水浸表面波探傷法を採用した.

セラミックスに生ずる実際の加工傷はさまざまで, 研削方向についた砥粒による条こんや砥粒の押込みの際にできた傷などが多い⁽⁷⁾. 線形破壊力学による強度

評価を行うとき, 条こん状の傷の場合は二次元形状と考えることができるため, 傷の深さ方向の寸法の検出が望まれ, 押込みによる傷の場合はその形状と寸法の検出が必要となる.

Rayleighの散乱理論⁽⁸⁾に基づく, 傷の検出限界寸法は $\lambda/2 \sim \lambda$ (λ : 波長)と言われる. しかし, $\lambda/10$ 程度の欠陥を検出している例⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾もあり, 欠陥による散乱のメカニズムが解明されていない点が多いため, 波長のみで検出限界を決めることはできない. そこでここでは微小な傷を特定するために, 想定される傷とほぼ同じ寸法形態の人工傷を作製して探傷し, これをもとに実際の研削面を評価検討した. なお, 第1報ではジルコニアの加工面を探傷し, その表面性状について考察し, 第2報では表面性状が強度の信頼性に及ぼす影響について調べている.

2. 実験方法

2.1 水浸表面波法 探傷すべき加工表面にセンサを直接接触させる方法は, 試料寸法に制約を受けるほか, 表面の粗さやうねりおよびセンサとの接触状態などに著しく影響されて再現性が良くないため, ここでは超音波の安定した送受信に優れた非接触による水浸表面波探傷法を利用している. 超音波の伝ば媒体は

* 平成2年10月27日 日本機械学会山梨地方講演会において講演, 原稿受付 平成4年3月24日.

*¹ 正員, 電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1).

*² 川崎重工業(株) (〒136 江東区南砂2-4-25).

*³ 三菱重工業(株) (〒231 横浜市中区錦町12).

研削液でも可能である。

探傷器の構成を図1に示す。水浸表面波法では音響レンズによって焦点の絞られた超音波パルスが傷に当たって散乱したエコーを受信するため、小さな傷を測定するにはセンサの集束ビーム幅（以後これを焦点径と称す）をなるべく小さくする必要がある。しかし焦点径は共振周波数とも関係するため、焦点径を小さくしたことによって減衰が大きくなってかえって探傷能力が落ちてしまうこともある。そこでセンサの特性の違いによる探傷能力を比較するために、共振周波数15 MHz、焦点径1 mmのセンサ（以後センサAと呼ぶ）と、同じく25 MHz、0.3 mmのセンサ（以後センサBと呼ぶ）の2種類の広帯域ショックウェーブ型水浸集束セラミック探触子 [KB-AEROTECH 社製] を用いた。ここでは一つのセンサで送受信を行った。探傷器本体 [クラウトクレマー社製 USIP-12] とセンサ駆動部はトヨタ中央研究所(株)とマルトー(株)とが共同で開発したものを利用した。

2.2 人工傷 材料は部分安定化ジルコニア(東ソー(株)製)を用いた。研削条こんに代表される線状傷の位置と傷の深さを校正するために、図2に示すような板状試験片(7 mm×6 mm×70 mm)に、15 μm と40 μm 幅の電着ダイヤモンドブレードを用いて深さ1 μm ~288 μm の範囲にある16段階の浅い切欠き(スロット)を作成した。砥粒の押込みによってできる小さい表面傷に対応するものとしてビッカース圧子を用いて押込み荷重を変えることにより種々の大きさの傷を作製した。さらに、傷の大きさに対する探傷能力を調べるため、図3(b)に示すようにビッカース圧子を用いて表面傷同士がつながるよう圧子を連続的に押込んだものを用意した。

図1 超音波探傷システムのブロック図

3. 実験結果と考察

3.1 線状傷深さとエコー高さとの関係 図1中に示したように試験片長手方向へ斜めにショックウェーブを入射してレイリー波を励起させた。入射角 θ は、使用したジルコニアの物性の測定(ヤング率196 GPa, ポアソン比0.28, 密度 $6.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)から、レイリー波の臨界角26.0 degに設定した。また、焦点距離は最大エコー高さの得られた25 mmに設定した。なお、計算によればレイリー波の音速が3290 m/sとなるこ

図2 ジルコニア試験片に設けた人工溝

図3 圧子の押込みによる傷

とから、波長 λ はセンサAでは219 μm 、センサBでは132 μm となる。以後、傷の寸法は実際の寸法をこれらのセンサの λ で除して無次元化したもの、エコー高さは傷によるエコーを端面でのエコー高さで基準化してデシベル表示したものを表す。

スロット深さとエコー高さとの関係をA、B両センサについて示す。センサAでは図4に示すようにスロット深さが0.25以上では一定のエコー高さになるのに対し、0.25以下ではスロット深さとエコー高さとは比例することがわかる。スロット幅の影響はほとんどないといえる。同様な傾向はソーダライムガラスについても認められている⁽¹¹⁾。このように条こんのような長い傷に対しては、エコー高さから傷の深さを推定することが可能で、スロットでは最小深さ5 μm まではっきり識別できた。

センサBではスロット深さが0.25以上ではセンサAと変わらないが、0.25以下になるとエコーの形態がやや複雑になり、最大エコーの生ずる空間的位置が移動する。図5は最初のエコーの最大値をとって表示したもので、図4に比べエコー高さが大きいほかは定性的な傾向は一致している。ここでは最小深さ2.5 μm まで識別できた。

3.2 ビッカース圧子による傷の検出 条こんの場合、浅い傷でも探傷可能であったが、表面傷の寸法や形状によってレイリー波の散乱状況は変わる。ビッカース圧子による傷を実測した結果、傷の形状は押し込み荷重によって異なり、荷重の低いときはパームクビスト型 (Palmqvist Crack)⁽¹²⁾、高いときはメディアン型 (Median Crack)⁽¹³⁾、中間の荷重 (98N) では形状も二つの型の中間になることがわかった (図6)。

まず1か所の傷に対し、押し込み荷重を9.8N、49N、98N、196Nの4種類変えることで表面傷の長さを変化させた。センサAでは荷重49Nのときの傷の長さ104 μm より長い場合にはじめてエコーが観察された

図4 相対スロット深さと相対エコー高さとの関係 (共振周波数15 MHz)

(図7)。これに対しセンサBでは9.8Nのときの傷の長さ37 μm でエコーが観察された (図8)。

次に、図3(b)のように走査方向に直角に圧子を押込んで表面傷長さを変えたものについて、エコー高さと傷の長さとの関係を各荷重レベルをパラメータとして表示した。図7においてセンサAでは傷の長さとはほぼ比例関係にある。図8のセンサBでは荷重レベルの低いものは明瞭な比例関係を示し、荷重レベルの高いものもエコー高さと傷の長さとは相関があることがわかった。しかし、条こんに比べると傷の検出能はかなり低い。

3.3 残留応力下での探傷 セラミックスの研削

図5 相対スロット深さと相対エコー高さとの関係 (共振周波数25 MHz)

図6 ビッカース傷の破断面写真

図7 相対圧こん長さと相対エコー高さとの関係 (共振周波数15 MHz)

面には加工時に入る残留応力が存在することが知られている。田中ら⁽¹⁴⁾はアルミナおよび窒化けい素のX線応力測定の結果、研削方向の応力成分はいずれも圧縮応力になり、使用した砥石の粒度が粗いほどその値は大きくなることを報告している。また最大圧縮応力は表面より5 μm の深さの部分に発生し、残留応力層は表面下35 μm まで達している。愛⁽¹⁵⁾もジルコニアのX線応力測定によって、研削方向、深さ方向いずれも30~40 μm の深さまで圧縮残留応力が生じていることを明らかにしている。これら3種類の材料の研削方向の残留応力の大きさは研削条件によって異なり、80~500 MPaの範囲にある。

こうした圧縮残留応力がレイリー波の散乱に及ぼす影響を調べるために、ラップ仕上げした試験片(10 mm×10 mm×70 mm)の表面に予き製作製ジグを用いて表面に垂直に深さ4 mmの2次元人工き裂を入れた試験片と、前項に示したビッカース圧子列を持つ試験片に、ねじ駆動式のジグによりき裂を閉じる方向に圧縮負荷を加え、エコー高さと負荷応力との関係を求めた。応力はき裂近傍に貼ったひずみゲージから読取り、エコー高さは無負荷状態のときのエコー高さで基準化した。

人工き裂の試験片の結果は図9に示すようにセンサA、Bとも圧縮応力の大きさの影響が顕著に現れ、明らかにエコー高きの減少がみられる。これは圧縮応力によりき裂面が閉じて散乱が少なくなるためとみられる。センサAでは圧縮応力の増大とともにエコー高きは減少しているのに対し、センサBではあるレベル以上で一定となる傾向がみられた。

ビッカース圧子による結果は図10に示すように圧縮応力の影響をあまり受けていない。これは圧こん周辺に既に圧縮残留応力が存在していることとも関連すると思われるが、傷による超音波散乱が複雑であるため詳細は明らかでない。

図8 相対圧こん長さと相対エコー高きとの関係 (共振周波数 25 MHz)

以上のことから表面下に向かうき裂状の傷の場合、圧縮の残留応力が存在すると閉口き裂の場合と同様に⁽¹⁶⁾エコー高きを減少させ、傷の寸法を見かけ上少なめに評価することになる。しかし表面の圧縮残留応力はぜい性材料の曲げ強度を増大させる安全側に作用するので、探傷能力が極端に低下しない限りあまり問題にする必要はないであろう。

3.4 クリープフィード研削面の探傷 実際の研削傷を探傷するために、試験片長手方向に研削したものと、これに直角方向に研削したものとを比較した。研削条件は、SD120-N-M-30 砥石を使用し、砥石周速1500 m/min、切込み深さ2 mm、送り速度30 mm/minとした。センサはこれまでと同じく試験片長手方向に走査し、送りピッチは0.1 mmとしている。

図11は試験片長手方向に直角に研削したときのセンサBによる探傷結果で、条こんを横切るときに大きなエコーが現れている。前項に述べた圧縮残留応力を考慮しても、エコー高きで換算して、条こんの深さは20 μm を越えるものが現れており、最少5 μm のものまで観察される。条こんの存在は目視によっても確かめられた。一方、長手方向に研削したものは図12に示すようにセンサBを用いてもエコーがほとんど現れない。重研削の場合、条こんに直角方向にもき裂が生ずるといわれるが⁽¹⁷⁾、き裂長さが短いためにエコーがほ

図9 人工き裂に対する負荷圧縮応力の大きさと相対エコー高きとの関係

図10 ビッカース傷に対する負荷圧縮応力の大きさと相対エコー高きとの関係

図 11 研削方向と直角に探傷したクリープフィード加工面

図 12 研削方向と平行に探傷したクリープフィード加工面

とんど現れなかったと考えられる。

さらに長手方向に直角に研削した試験片に対し、残留応力のため閉じていると考えられるき裂を開口させるため、4点曲げにより破断荷重の90%までの負荷をかけた引張側の表面を探索してみた。しかし図13に示すようにエコーの変化はみられなかった。これは研削条こんが圧縮残留応力下でも常に開口したエッジ部分を持っているためと思われる。

以上のことより、探索すべき表面傷が条こん状のものであれば本装置が有効で、インプロセスでの探索に利用できると思われる。ただし、長さの短い傷に対してはさらに周波数の高い装置を利用して確かめる必要がある。

4. おわりに

水浸表面波法によってジルコニアの表面傷を探索した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 条こんのような傷は比較的容易に探索でき、材料中を伝ばするレイリー波の波長以下の小さいスロット状の人工傷では、深さ約2.5 μm 程度まで特定できる。

(2) ビッカース圧子を用いて傷の長さを変えて探索した結果、単一き裂については焦点径の長いもので表面傷長さ104 μm 、短いもので37 μm の傷が検出でき、複数き裂では表面き裂長さとエコー高さに相関がある。

(3) 表面の圧縮残留応力がレイリー波の散乱に及ぼす影響を調べた結果、表面傷の形態により異なり、

図 13 3段階の応力レベルに対する同一研削傷のエコー形状の変化

また理想的なき裂の場合その影響が大きい。

(4) 実際に研削した試料では、研削方向に平行な走査でエコーが現れないことから、条こんに直角な傷は極めて小さい。

なお、超音波探傷器はマルトー(株)のご厚意でこれを利用して頂いた。また、試験片材料はトーソー(株)新材料研究所、研削加工は日産自動車中央研究所および神奈川工業試験所、スロットの加工は三菱金属中央研究所にそれぞれご協力頂いた。各社に深甚の謝意を表する。

文 献

- (1) Rice, R. W., ほか1名, The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II, NBS Spec. Publ., No 562(1979), 351.
- (2) 本間・ほか2名, 超音波によるセラミックス加工面の探傷, 日本機械学会山梨地方講演会講演集, (1990), 67.
- (3) 日本非破壊検査協会編, 非破壊検査便覧, (1978), 1, 日刊工業新聞.
- (4) Krautkrämer, J., ほか1名, 超音波試験技術, (1980), 151, 日本能率協会.
- (5) 菅沼, 超音波顕微鏡によるセラミックスの欠陥評価, セラミックス, 24-3(1989), 213.
- (6) Clark, L. R., ほか2名, Ultrasonic Measurement of Machining - Damage - Induced Surface Defects in Ceramics, ASME Production Eng., 17-17(1987), 63.
- (7) Marshall, A. G., ほか4名, The Nature of Machining Damage in Brittle Materials, Proc. Royal Soc. London, A 385(1983), 461.
- (8) Rayleigh, L., Theory of Sound, (1926), 1, London.
- (9) 野中, 超音波探査映像装置による欠陥検出, セラミックス, 24-3(1989), 208.
- (10) 小倉, セラミックスの超音波探傷技術の動向と課題, 工業材料34-12(1989), 49.
- (11) 本間・西村, 超音波を利用したセラミックスの探傷, 機論, 55-510, C(1989), 498.
- (12) Palmqvist, S., Archiv. Eisenhüttenwesen, 33, (1962), 629.
- (13) Lawn, B. R. and Fuller, E. R., J. Mater. Sci., 10(1975), 2016.
- (14) 田中・ほか2名, 第53回破壊力学部門委員会講演会資料, (1989), 48.
- (15) 愛・ほか2名, 17回セラミックス加工研究会(1988), 7.
- (16) 坂, 閉口き裂超音波探傷の問題点とその対策, 機誌, 92-843(1989), 130.
- (17) 高木, ファインセラミックス, (1984), 82, マシニスト社.