レーザ拡散法によるアルミナセラミックスクラックの自動検出*

吉村剛治** 秋山伸幸*** 吉田昌弘*** 小林隆之†

Automatic Detection for Crack on Al_2O_3 Ceramics Using Diffusion of Laser Light

Takaharu YOSHIMURA, Nobuyuki AKIYAMA, Masahiro YOSHIDA and Takayuki KOBAYASHI

A non-contact technique to detect a narrow crack on a ceramic plate has been developed. When a laser spot with the diameter of about $15\ \mu\text{m}$ is illuminated on a ceramic plate, the laser is diffused within the ceramics and interrupted by the crack. The crack is detected automatically by detecting the difference of irradiances on each side of the crack. A TV-camera is used to detect the distribution of irradiance on the ceramics. Windows set on TV-image integrate output signals, and the difference of signals at two windows is obtained. The optimum position and size are discussed. Some cracks are tested using the experimental apparatus. Experimental results show that this crack detection technique detects the cracks of $0.5\ \mu\text{m}$ at an S/N ratio of 2.

Key words: crack, non-contact detection, non-destructive inspection, laser diffusion, ceramics

1. 緒 言

アルミナセラミックスはLSIやハイブリッドICなどの基板として広く使用されているが、基板上には矩形穴や円穴が多数あけられているため、焼結時に応力集中が起こりやすく、クラックが発生することがある。クラックが入った基板は強度が低下すると共に、水分などがたまり、絶縁不良となることがあるので、このような基板を除去する必要がある。

セラミックス基板の場合にはクラックが基板内部だけに生ずる場合は少ないので、表面に現れたクラックを検出すればよい。このようなクラックの非破壊検査法にはレーザ散乱光検出法、蛍光浸透法、超音波法、X線法、中性子ラジオグラフィ法、レーザ走査超音波法(SLAM)、光音響映像法(PAS)、アコースティックエミッション法(AE)など種々の方法がある¹⁾。

この内レーザ散乱光検出法²⁾はレーザスポットを基板表面に当てて、クラックで生じる回折光を検出するものである。また、スリット光を基板表面に当ててクラックを検出する方法も研究されている³⁾。いずれも比較的大きなクラックしか検出できない欠点がある。また赤外線を用いて欠陥を検出する方法も研究されているが⁴⁾、検査時間が長くかかる欠点がある。

微細なクラックを比較的短時間に検査する方法として工業的に最も多く使用されているものに蛍光浸透探傷法¹⁾がある。これは基板表面に蛍光浸透液を塗布または蛍光液中に浸漬して欠陥内に蛍光浸透液を浸み込ませ、その後基板を洗浄して基板に付着した蛍光浸透液を除去する。次に現像剤を塗布して、欠陥内部に残留した蛍光浸透液を吸い出し、近紫外線を当てて蛍光浸透液を検出するものである。

この方法の欠点は洗浄と現像剤の塗布に時間がかかることと、洗浄により欠陥内の蛍光浸透液が洗い流されることがあることである。

以上のようにクラック検出には種々の方法が開発されているが、量産ラインで使用可能な、高速、高感度な検出方法がなく、新しい検出方法の開発が望まれている。

本研究では基板に特別な薬品などを塗布することなく、非接触、オンライン検出可能で量産ラインにも適用可能な方法を開発したので、その原理と装置構成および検出性能を以下に報告する。

2. 検 出 原 理

アルミナセラミックスはアルミナの粉体を焼き固めたものである。粉体の単結晶は透明に近いが、焼き固めた場合には図1に示すように結晶の間に粒界や気孔が生じるため、外部から光を当てた場合には光の一部がここで反射する。そのため光はセラミックス内部で部分反射と部分透過を繰り返しながら、完全に減衰するまで拡散する。一方、セラミックスの中にクラックがある場合には、光は空気層と粒界との間を通過するため反射光が大きく、透過光は著しく低下する。

図2はセラミックス基板表面にレーザスポットを当てた時のレーザ光拡散の様子を模式的に描いたものである。セラミックスの中で拡散したレーザ光はクラック部分で著しく減衰し、クラックから先の拡散光は低下する。これを上方から観察すると α 部は暗く観察され、 β 部は明るく観察される。図4は比較的大きなクラックを有するセラミックス基板表面にレーザスポットを当てた時のレーザ光の拡散状態を撮った写真である。ク

Fig. 1 Reflected light at crack and grain boundary

Fig. 2 Region of diffused laser in ceramics

* 原稿受付 平成6年2月17日

** 正 会 員 日立金属(株)(熊谷市三ヶ尻6010)

*** 正 会 員 長岡技術科学大学(長岡市上富岡町1603-1)

† 長岡技術科学大学

Fig. 3 Configuration of experimental apparatus

ラックを境にして、 α 部が暗く、 β 部が明るくなっている。このようにレーザスポット周辺の明暗状態を検出すればクラックの存在を知ることができる。

3. 実験装置の構成と実験方法

実験装置の構成を図3に示す。金属顕微鏡の上部にある3眼鏡筒の写真撮影ポート上に偏光ビームスプリッタを設け、ここからレーザを照明し、セラミックス基板の像を偏光ビームスプリッタ上部から検出する。レーザにはS偏光 He-Ne レーザを使用し、直径1mmのビームを集光レンズ(対物レンズ Mplan 10 $\times$)に入れ、点Bに集光させる。S偏光レーザは偏光ビームスプリッタで反射し、4分の1波長板、3眼鏡筒、対物レンズを通してセラミックス基板上に集光する。ここで中間に存在する各種ガラスでの反射光は上方向に進み、再度4分の1波長板を通るためP偏光となり、偏光ビームスプリッタを通過するので、偏光板でこのP偏光成分を遮光し、TVカメラに到達しない。一方セラミックス基板で反射する光は偏光が解消しているため偏光ビームスプリッタおよび偏光板を通過して、TVカメラに到達する。このようにして途中の光学系で発生する迷光及び反射像を除去し、基板上の像のみを検出している。対物レンズの下にはXYステージを設け、この上にセラミックス基板を搭載して、XY方向に走査し、レーザスポットがクラック部分を通過した時の画像を検出している。

偏光ビームスプリッタ及び偏光板の上にレーザスポットAの共役像Cができるので、ここにこのレーザスポットを遮光するためのマスクを設けている。基板上のレーザスポット直径は計算上は約4 μ mであり、共役像Cの寸法は40 μ mであるが、実際にはセラミックス基板中で拡散されるため共役像Cの寸法は約0.15mmである。マスクの遮光部はこれより少し大きくし0.5mmにしている。共役像Cとマスクはリレーレンズを介してTVカメラの撮像面上に結像する。図4はTVカメラで検出した像の例であり、中央にマスクの円形遮光部、その周辺にレーザ拡散光が検出されている。また円形遮光部の左側にはクラックが存在するが、ここでレーザ拡散光が止まっていることがわかる。本実験装置で用いた部品の諸元を表1に示す。

次にクラック検出のための実験方法を述べる。クラック近傍でのレーザ拡散光強度を求めるために、図5においてTV画

Fig. 4 Image detected by TV-camera

Table 1 Specifications of parts in experiment

Parts	Specifications
Laser source	He-Ne 5mW
Focusing lens	Objective lens MPlan 10 $\times$
Objective lens	MPlan 10 $\times$
Relay lens	EL-Nikkor $f=50$ mm, F 2
Pixel size measured on ceramics	0.6 μ m $\times$ 0.6 μ m

Fig. 5 Windows set on TV image

Fig. 6 Distribution of irradiance at laser spot on ceramics plate

面上の円形遮光部中心から x_1 の箇所に $b \times b$ のウィンドウ①, ②, ③, ④を設け、このウィンドウ内の検出信号を積分する。この値をそれぞれ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 とする。実験ではクラック部分がレーザスポット部を通過する際の $Q_1 \sim Q_4$ の変化量が最大になる条件を求め、クラック検出可能寸法の限界を求める。

4. TVカメラでの検出実験

本章では、セラミックス基板上にレーザを照明した時の、レーザスポット直径及びレーザ拡散部直径をTVカメラを用いて実験的に測定し、最適マスク及びウィンドウ寸法を求める。

4.1 レーザスポット光の照度分布

図3に示した実験装置を用いて、セラミックス上のレーザスポットをTVカメラで検出し、レーザスポットの中心を通る走査線上の信号波形を求めたものを図6に示す。横軸は、TVカメラの画素数であり、中央を0番目としている。1画素は、基板面上換算で、0.6 μ mである。また縦軸は出力信号を正規

Fig. 7 Relation between peak in Gaussian distribution and radiant flux

Fig. 8 Calculated value of diameter at laser spot

化して表したものであり、基板上のレーザ放射束は、 $1\mu\text{W}$ である。

横軸を x とし、波形を次式で示すガウス分布と仮定して分散 σ^2 を求めると 14 になる。 σ^2 を 14 として式 (1) を用いて計算した結果を図 6 中に記入した。測定値と計算値はほぼ一致しているので、この波形はガウス分布と仮定できる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

照明するレーザの放射束を大にすると TV カメラが飽和して、レーザスポットの測定が困難になる。そこで図 3 で TV カメラの直前に連続可変形 ND フィルタを設け、出力信号の最大値が常に飽和直前になるようにして、基板面上でのレーザ放射束を 1 から $300\mu\text{W}$ まで変化させて信号波形を求めた。その結果、常に図 6 に示す波形となり、 σ^2 は一定 ($=14$) であった。

次にレーザスポットの照度分布を回転対称と仮定して、図 7 に示すように r - z 座標で表す。ガウス分布を $f(r)$ とすると、レーザ放射束 Φ は次式で表される。

$$\Phi = 2\pi \int_0^\infty r f(r) dr \quad (2)$$

$$f(r) = a e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

ここで a は、レーザスポット照度の最大値である。式 (2), (3) から次式が得られる。

$$\Phi = 2\pi a \sigma^2 \quad (4)$$

式 (4) からレーザ放射束と照度分布の最大値 a は、比例することがわかる。

図 8 において $f_0(r)$ は、レーザ放射束 $1\mu\text{W}$ の時の照度分布であり、 $f_n(r)$ はレーザ放射束 $n(\mu\text{W})$ の時の照度分布である。 $f_0(r)$ の最大照度は I_0 (飽和値) であり、 $f_n(r)$ の最大照度は nI_0 である。照度が I_0 以上になると TV カメラが飽和するため、図 3 における点 C に円形遮光部を設けて、強い光が TV カメラに到達するのを防いでいる。次に円形遮光部の直径の求め方を述べる。

いま、図 8 において、次式で定義される I_t を用いて $f_0(r) \geq I_t$ の部分に円形遮光部を設けることにより、TV 画面全体を飽和電圧の $2/3$ 以下にすることができる。

$$I_t = \frac{2}{3} I_0 \quad (5)$$

一方、レーザ放射束が $n(\mu\text{W})$ の時には照度分布は $f_n(r)$ となる。この照度分布を I_t 以下にするためには次式を満足する直径 d_n の円形遮光部を設ければ良い。

$$I_t = f_n(r) \quad (6)$$

以下に d_n の求め方を示す。 $f_0(r)$ はガウス分布であり、次式で表される。

$$f_0(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

また、 $f_n(r) = n f_0(r)$ だから次式となる。

$$f_n(r) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

I_0, I_t は、式 (9), (10) で表される。

$$I_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (9)$$

$$I_t = \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (10)$$

式 (8), (10) から式 (6) を満足する r_n を求めると式 (11) が得られる。

$$r_n = \sqrt{2 \ln\left(\frac{3n}{2}\right)} \sigma \quad (11)$$

$$d_n = 2r_n \quad (12)$$

d_n は、 $n=1$ の時 1.80σ 、 $n=150$ の時 6.58σ となる。また $\sigma=3.7$ 画素 (1 画素 $=0.6\mu\text{m}$ (基板面上換算)) だから、 d_n は $n=1$ の時 $4\mu\text{m}$ 、 $n=150$ の時 $14.6\mu\text{m}$ となる。

4.2 レーザ拡散距離の測定

図 4 に示したように、レーザスポットの周辺にはレーザ拡散領域が存在するのでこの拡散距離を求める。4.1 節で述べたように $n=150$ 、すなわちレーザ放射束が $150\mu\text{W}$ の時には直径 $14.6\mu\text{m}$ の円形遮光部を設ける必要がある。ここでは遮光マスクの設置を容易にするために円形遮光部の直径を $50\mu\text{m}$ として以下の実験を行った。

実験装置は図 3 に示すものを用い、点 C に 0.5mm の円形遮光部を設け TV カメラで検出している。検出結果の例を図 9 (a) に示し、TV 走査線信号を同図 (b) に示す。基板面上のレーザ放射束は $150\mu\text{W}$ 、1 画素は $0.6\mu\text{m}$ である。同図 (a) から信号の微小凹凸量は、約 20 階調あることがわかる。そこで 0 階調を基準とし、20 階調をしきい値にして、20 階調以上の領域が作る円の直径をレーザ拡散直径 d_d と定義してこれを求めた。なお、レーザスポット部周辺に広がっている拡散光部分 (図 9 (a) における D 部) は、レーザスポット部に比べて照度が $1/150$ 以下になっているので、この部分ではガウス分布の仮定が成立せず、拡散光部分はガウス分布として求めた場合より、かなり大きくなっている。

図 10 はレーザ拡散直径 d_d とレーザ放射束 Φ との関係を示したものである。 $\Phi \leq 100\mu\text{W}$ の時には Φ と d_d はほぼ比例するが、 $100\mu\text{W}$ 以上では d_d の増加率が小さくなっている。 d_d は大きい方がウインドウを広くできるので望ましいが、強いレーザが必要となる欠点がある。ここでは $\Phi \approx 150\mu\text{W}$ が最適であり、この時 $d_d \approx 300\mu\text{m}$ となる。

4.3 検出ウインドウの設定

Fig. 9 Definition of region of diffused laser

Fig. 10 Influence of radiant flux of laser on diameter of diffused laser

検出ウィンドウは、レーザ拡散領域内に設定して、その中の検出力を積分することによってクラックを検出する。この際、検出感度と4.5節で述べているSN比を向上させるためにはウィンドウは大きい方が望ましい。ウィンドウはTVカメラの場合には検出した画像内に設定すれば良いが、実用機では図3の点Cにウィンドウ付きマスクを設けることになる。ウィンドウを大きくするためには図11(a)に示すように検出光路をハーフミラーで光路1,2に分け、それぞれの結像面 C_1, C_2

Fig. 11 Setting configuration of masks

Fig. 12 Position and size of optimum windows

にマスク1,2を設け、この像をレンズ1,2で更に後方に作り、4分割センサ1,2で検出する。この方法によりマスク1,2内のウィンドウを大きくすることができる。図11(b)は、光路1のマスク内ウィンドウを表したものである。

一方、クラックは 360° の任意の方向を向いているので、これに対応可能なマスク内の最適ウィンドウ形状を光路1に関して求める。ウィンドウは合計8個設けているので、1個のウィンドウが受け持つクラックの方向変化は $\pm 22.5^\circ$ で良い。図12でウィンドウ①に着目し、これがクラックEFとGH間に存在するクラックを検出するものとする。ただし $\delta = 22.5^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ$ である。

ここで例えばクラックEFが右に移動し、レーザスポット部分に接すると、レーザ光はEFの左側にも拡散するためクラックの検出が不能になる。レーザスポット部分はスポット境界の定義が困難であると共にドリフトもあるので、ここではレーザスポット部分を円形遮光部で代用する。従ってEF, GHは円形遮光部に接するように設ける。またウィンドウ①はOJとOKの間の 90° の間に設ける必要がある。拡散領域半径を r_d とし、上記の条件を満足する最大の正方形を求めると、詳細な計算は省略するが、 $x_1 = r_d/3$ となりウィンドウの一边 b は $2r_d/3$ となる。円形遮光部の半径は 0.025 mm , $r_d = 0.15\text{ mm}$ だから $x_1 = 0.05\text{ mm}$, $b = 0.1\text{ mm}$ となる。

以上はウィンドウ①について述べたが、EF~GHの間のクラック以外は図11(a)で述べた他のウィンドウが検出する。

4.4 クラック検出結果

ウィンドウは図12に示すものを使用するが、レーザ放射束の変化やセラミックス基板の透過率変化の影響を低減するために、 y 軸に関して対称の位置にウィンドウ①, ③を設けて、両者の差を取ることにした。検出に当たっては、図3の装置を使用し、TVカメラで検出した画像にウィンドウ①, ③を設け、ウィンドウ内のTV信号を積分した。

図13は、約 $1\text{ }\mu\text{m}$ の幅を有するクラック部分のTV信号測定結果である。(a)はウィンドウの設定位置である。(b)の $S_1(x), S_3(x)$ はウィンドウ①, ③内のTV信号積分値をそれぞれの平均値で割って正規化したものであり、横軸 x はクラックの位置を表す。クラックがウィンドウ①, ③内を通過するときに S_1, S_3 が大きく変化している。(c)は $S_3(x) - S_1(x)$ である。(d)は次式で表される差分正規化信号 $\Delta S(x)$ であり Δx は 0.025 mm としている。

Fig. 13 Experimental results of crack detection

Fig. 14 Photograph of narrow crack

$$\Delta S(x) = |S(x + \Delta x) - S(x)| \quad (13)$$

(d) では、クラックがレーザスポット部を通過するときに $\Delta S(x)$ が大きく変化しており、クラックの検出が可能であることがわかる。

4.5 微細クラックの検出

図14は基板中に発生したクラック部分に染料を浸透させて、金属顕微鏡で観察したものである。染料は点Uまでしか浸透していないが、レーザスポットを照明して目視観察するとこの下の点Vまでクラックが存在することがわかる。図15は点Uと点Vのほぼ中間の部分を4.4節で述べた方法で検出した結果であり、 ΔS_s , ΔS_n はそれぞれクラックと基板部分の差分正規化信号である。この部分のクラック幅は図14から推定すると約0.5 μmになっている。SN比を $\Delta S_s / \Delta S_n$ で定義すると、この部分では約2になっている。一般にノイズ中の信号を検出する際にはSN比2以上が一つの目安になっているので、この場合には0.5 μm以上のクラック検出が可能である。0.5 μm以下のクラックの場合にはクラック周辺の基板部分との区別が付かないことがあり、クラックだけを検出することは困難である。他のいくつかのクラックについても同様な実験を行った

Fig. 15 Detected signal obtained on narrow crack (Crack width ≈ 0.5 μm)

Fig. 16 Experimental apparatus using 4-divided photodiode

が、0.5 μm以上のクラックの場合にはSN比は2以上が得られたので、本方式による検出可能最小クラック幅は0.5 μmである。

5. 4分割フォトダイオード使用検出実験

これまでの実験で最適ウインドウ位置と寸法が求められたので、検出センサとして4分割フォトダイオードを用いた実験を行った。このセンサは安価で応答速度が速いので量産ライン向け検査装置に使用することができる。実験装置は図16に示すように、図3でTVカメラを使用していた位置に4分割フォトダイオードを設けたものである。図16でマスク上に前章までに述べた寸法のウインドウ付きマスクを設け、このウインドウを通過した光だけを検出する。センサには4分割フォトダイオード（浜松ホトニクス社製S4521）を使用した。これは直径12 mmの円形フォトダイオードを溝0.03 mmで4分割し、4個の独立のフォトダイオードとしたもので、各フォトダイオードがマスク上の1個のウインドウからの光を検出する。この時のセンサ関連の実測値を表2に示す。センサの負荷抵抗は100 kΩであり、検出力は17 mVである。

図17はセラミックス基板上のクラックを検出したものであり、図13(c)に相当する結果である。センサ自体の電気的ノイズは十分に小さく、4分割フォトダイオードを用いて検出した結果は、TVカメラを用いて検出した結果とほぼ同じになった。

6. 結 言

アルミナセラミックス基板上の微細クラック自動検出を目的として、上方からレーザスポットを照明し、基板中のレーザ拡散光の照度分布を測定する方法を開発して、その原理と装置構成を述べ、検出性能を求めた。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 基板上にHe-Neレーザスポット（直径約15 μm）を

Table 2 Measured results using 4-divided photodiode

Items	Measured value
Radiant sensitivity of sensor	0.43 A/W
Radiant flux	0.4×10^{-6} W
Output current	0.17×10^{-6} A
Loaded resistance	100 k Ω
Output voltage	17 mV

Fig. 17 Experimental results detected by 4-divided photodiode

照明するとレーザがセラミックス内を拡散するが、クラックが存在すると、拡散がここで止まる。この現象を利用してクラックが検出できる。

- (2) 基板上的レーザ放射束と拡散直径は 100 μ W 以下の時は比例するが、それ以上では拡散直径の増加率が小さくなる。本研究ではレーザ放射束 150 μ W の時、拡散直径 0.3 mm となり、ほぼ最適値である。

- (3) 検出画像において、レーザスポット周辺にウインドウを設け、この中の照度を検出することによってセラミックスクラックの検出が可能である。ウインドウは試料面上換算で $b=0.1$ mm のものを $x_1=0.05$ mm の位置(図5参照)に設けることが望ましい。

- (4) 以上の方法により 0.5 μ m 以上のクラックが検出可能である。

- (5) セラミックス基板量産ライン用検査機のセンサには4分割フォトダイオードが適当である。クラックの検出性能は上記したTVカメラで検出したものと同じである。

本報告ではクラック検出原理と検出性能を中心に論じたが、レーザ走査機構とセンシング機構を有した実用機の構造及び、セラミックス基板上的異物やメタルインクルージョンへの対応策は別途報告する。

最後に本研究の推進にご協力いただいた日立金属(株)生産システム研究所三上正樹氏、有年弘幸氏、長岡技術科学大学大学院学生中村篤史氏、松添雄二氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 奥田 博：ファインセラミックス，日本規格協会，(1989. 10) 83.
- 2) P. T. Chang, I. Kaufman and D. Y. Shyong：Detection and Imaging of Surface Cracks by Optical Scanning, Mat. Evaluation, 45, Aug. (1987) 943.
- 3) 石井 明ほか：スリット光を利用した透光性を有する材料中のき裂欠陥の検出，非破壊検査，38, 9 (1989) 869.
- 4) 岡本芳三ほか：赤外線放射温度計による欠陥の検出(2)，表面線状欠陥，非破壊検査，38, 6 (1989) 525.