

光線追跡法のガラスびん傷検査への応用

Application of Ray Tracing Algorithm to
Crack Detection in Glass Bottles

堀内 浩一

横井 茂樹

鳥脇 純一郎

Koichi HORIUCHI

Shigeki YOKOI

Jun-ichiro TORIWAKI

名古屋大学 工学部

(Faculty of Engineering Nagoya University)

ABSTRACT :

This paper describes application of the ray tracing algorithm to crack detection in glass bottles. Detection of abnormal beam reflected by cracks when laser beam is shot to bottles is an effective method to detect cracks. We simulated process of laser beam propagation by using the ray tracing algorithm to evaluate setting up of the crack detection system. Path and intensity of laser beam can be estimated precisely if shape and location of a bottle and cracks are given. Our system is expected to contribute to reduction of setting up time and improvement of reliability of the crack detection system.

(1) はじめに

筆者らは、光線追跡法による透明な回転体の表示について検討を行ってきた¹⁾。今回は、その応用としてガラスびんの傷検査のシミュレーションを行い、そのびん生産工程への利用について検討を行った。

ガラスびんの生産工程において、特に形状が複雑なびんの口部に傷(割れ傷)が発生し易い。これはびんの表面に対し垂直方向に入り、ほぼ平面状の形状を持つものが多い。傷のあるびんに中身、特に炭酸飲料などを詰めると、びんの破損にもつながり大変危険である。従って、傷検査には特に注意を要し、検査するびんの数の多大さからも、検査の自動化と精度向上が望まれる。

傷検査の一つの有効な方法として、びんにレーザー光を照射し傷による異常光を検出する方法がある。この方法で傷を正確に検出す

るためには、レーザー発振器、受光器、びんなどのセッティングが重要になってくる。セッティングはびんの種類や傷の位置などにより異なるため、その都度変えてやる必要がある。しかし、従来これは人手により試行錯誤的に行われており、正確さに欠けるばかりでなく大変手間のかかるものであった。

我々は、この部分を自動化する手始めとして、傷のある透明な回転体に対するレーザー光の照射をシミュレートし、光線の経路を表示する方法を開発した。また、傷にもとづく異常光の経路についても定量的に検討した。本文ではこれらの諸結果を報告する。

(2) びんの形状と傷の表示

まず始めに、対象とするびんの形状の特徴について述べ、それを光線追跡法により表示する方法について述べる。またそれに加え、

傷を表示する方法についても述べる。

2.1 びんの形状

びんの形状の代表的な種類として、図1の設計図に示すように、断面形状が線分と円弧により構成される回転体のものがある。本文ではこの形状のものを対象とした。このような形状を表示するには、線分及び円弧の回転面の表示が必要であるが、複数の線分よりなる断面形状を持つ透明な回転体を光線追跡法により表示する方法は、既に文献1で述べた。従って、ここでは円弧の部分についてのみ述べる。

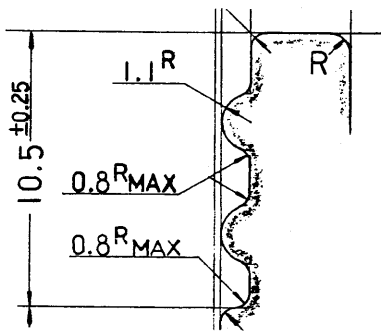


図1 びんの形状 (断面)

ところで、円弧を折れ線近似により与え、スムーズシェーディング技法を用いて滑らかに見せる方法も考えられるが¹⁾、ここでは形状を正確に表現するため、実際に円弧で与えることにする。

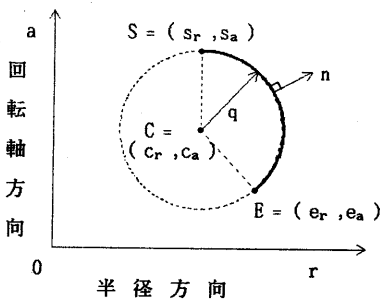


図2 断面形状の与え方 (円弧)

円弧の1つを図2のように定義する。r軸、a軸は、それぞれある断面を含む平面上の半径方向、回転軸方向を表す。r-a座標系の原点がx-y-z座標系の点 $(x_0, y_0, 0)$ に対応するように、これをx-y平面に垂直で点 $(x_0, y_0, 0)$ を通る直線の周りに回転させてできる回転体は、次の式で表される(図3)。

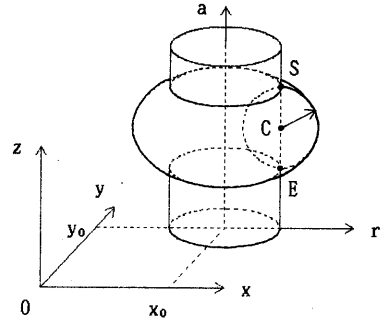


図3 回転体の表現

$$\left\{ \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} - c_r \right\}^2 + \{z - c_a\}^2 = q^2 \quad (1)$$

但し、このうちS-E間の実線で示した部分のみである。

2.2 びんの表示

光線追跡法における交点計算は次のように行われる。追跡光線は、 (x_d, y_d, z_d) を始点、 (x_v, y_v, z_v) を方向ベクトルとして次の式で表される。

$$\begin{aligned} x &= x_d + s x_v \\ y &= y_d + s y_v \\ z &= z_d + s z_v \end{aligned} \quad , \quad s > 0 \quad (2)$$

(1)式に(2)式を代入して変形すると、sに関する4次方程式を得る。この方程式を解析的に解き(フェラリの方法²⁾)、 $s > 0$ なる実数解sを求める。

その s の 1 つを (2) 式に代入し、交点候補点とする。この点を断面座標系 $r-a$ に写像し、 $S-E$ 間にあるか否かを調べる。これらの計算を各円弧毎に行い、最も小さな s を求め、始点に最も近い交点とする。

こうして求められた交点を (x^*, y^*, z^*) とすれば、この交点における図 2 に示す方向の法線ベクトル $\mathbf{n} = (x_n, y_n, z_n)$ は次の式で表される。

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{B - c_r}{B} (x^* - x_0) \\ y_n &= \frac{B - c_r}{B} (y^* - y_0) \\ z_n &= z^* - c_a \end{aligned} \quad (3)$$

$$B = \sqrt{(x^* - x_0)^2 + (y^* - y_0)^2}$$

円弧の部分との交点を上述の方法で計算し、線分の部分との交点を文献 1 で述べた方法で求めることによって、始点に最も近い交点とその点における法線ベクトルを知れば、光線追跡法によりびんを表示できる。

2.3 傷の表示

次に、傷を光線追跡法により表示する方法を検討する。傷における光の反射、屈折は次のように考えられる。傷を一定の幅 ℓ を持つ非常に薄い空気の層と考えると、屈折率 n の物体での傷における光の反射、屈折の様子は図 4 に示すようになる。ここで、

$$c_i = \cos \theta$$

$$c_r = \cos \phi$$

とすると、点 p_1 での反射率は³⁾、

$$\begin{aligned} k_{s1} &= \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{c_i - \frac{1}{n} c_r}{c_i + \frac{1}{n} c_r} \right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{n} c_i - c_r}{\frac{1}{n} c_i + c_r} \right)^2 \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{n c_i - c_r}{n c_i + c_r} \right)^2 + \left(\frac{c_i - n c_r}{c_i + n c_r} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

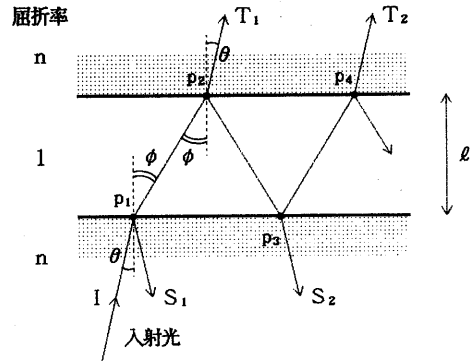


図 4 傷における光の反射、屈折 I

点 p_2 での反射率は、

$$k_{s2} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{c_r - n c_i}{c_r + n c_i} \right)^2 + \left(\frac{n c_r - c_i}{n c_r + c_i} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

以下同様にして、これを k_s と置く。

$$k_{s1} = k_{s2} = k_{s3} = \dots = k_s$$

実際の傷では $\ell \rightarrow 0$ と考えられるので、この傷での反射光 S は S_1, S_2, \dots を加えたもの、透過光 T は T_1, T_2, \dots を加えたものである。従って、傷における反射率 K_s と透過率 K_T は次のようになる。

$$\begin{aligned} K_s &= k_s + (1 - k_s)^2 k_s + (1 - k_s)^2 k_s^2 + \dots \\ &= k_s + (1 - k_s)^2 \frac{k_s}{1 - k_s^2} \\ &= \frac{2 k_s}{1 + k_s} \end{aligned} \quad (6)$$

$$K_T = 1 - K_s = \frac{1 - k_s}{1 + k_s} \quad (7)$$

以上のことから、光線追跡においてある光線が傷に当たったとき、図 5 のような反射、屈折が起こるとすればよい。

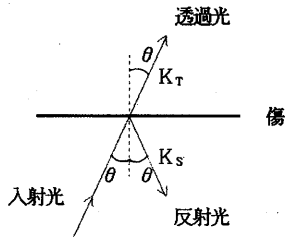


図5 傷における光の反射，屈折Ⅱ

2.4 表示例

以上の方法により傷のあるガラスびんを表示した例を次に示す。計算には名古屋大学大型計算機センターのFACOM M-382を用い、計算誤差によるノイズの発生を防ぐため全て倍精度で、一部は4倍精度で行った。

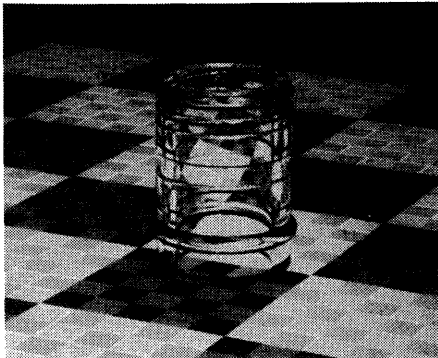


図6 ガラスびんの口部の表示例

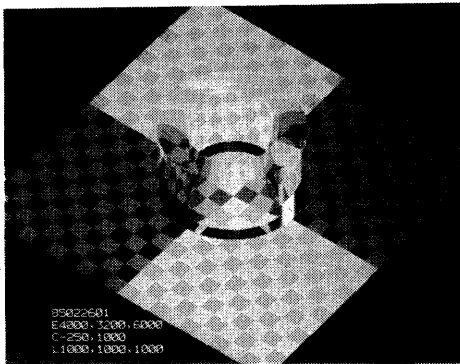


図7 傷の表示例

図6はびんの口部の表示例である。計算時間は約10分であった。図7は傷のある回転体を表示した例である。物体の形状は軸方向に穴のある円柱であり、傷は右前部に垂直に入っている。この表示例より傷の部分が鏡のようになり、その手前の床が映っているのが分る。

(3) レーザー光の照射シミュレーション

ガラスびんにレーザー光を照射したときの光線の経路は、光線追跡法における一本の経路と全く同じように追跡される。また、文献3に述べられている積算減衰率を計算すれば、各分岐光線の光線強度が分る。そこで、レーザー光の照射点と方向を与えれば、これを初期光線として光線追跡法と同様の追跡手順により、傷による反射，屈折光が求められる。厳密に言えば、実際のレーザー光は一本の直線としては扱えないが、ここでは簡単のため一本の直線で近似している。

3.1 3次元表示

レーザー光の振る舞いを認識し易くするため、3次元表示を行った。これは、追跡された経路を先に述べたびんの口部に重ねて表示したものである。実際は、透明物体の中を通る光線が外から観察すると歪んで見えたり、表面に映り込んだりするが、ここでは分かり易くするために、求めた経路をそのまま直線として表示する。同時に光線強度を示すため、強度に応じその小さいものは黒く、その大きいものは赤くなるよう変化させて表示する。

この表示例を図8に示す。レーザー光は下方から照射しており、レーザー光を左右に振らせたところを表示している。これを見ると、レーザー光を振らせた場合傷に当たった光線は連続的に変化するのではなく、あるところで急激にその方向が変化しているのが分る。また、レーザー光の照射側に異常光が多く反

射しているのが分る。

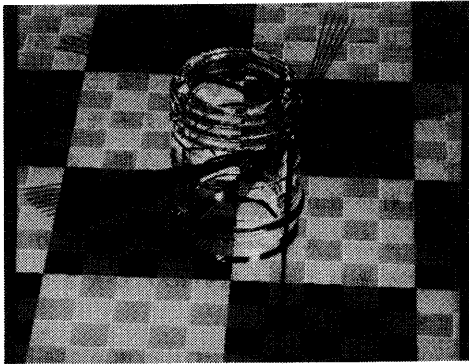


図8 光線の経路の表示例

3.2 2次元断面における定量的考察

上述の方法では、特定のセッティング条件については良く把握できるが、一般的条件でのレーザー光の振る舞いの定量的把握は難しい。そこで、実際に多く発生する2種類の傷に対し定量的な考察を行った。傷の大部分は図9に示すような①、②の位置にそれぞれ垂直方向、水平方向に発生し易い。従って、この2種類の傷に対して考えることにする。

垂直方向の傷に対しては、図10(a)に示すようなびんに対し水平な平面上でレーザー光を照射すれば、全ての分岐光線がその平面上に乗るため、光線の振る舞いはその2次元平面上だけで考えることができる。同様に、水平方向の傷に対しても、図10(b)に示すびんに対し垂直な平面上だけで考えることができる。

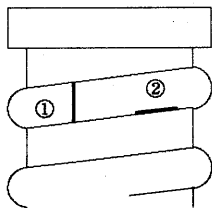
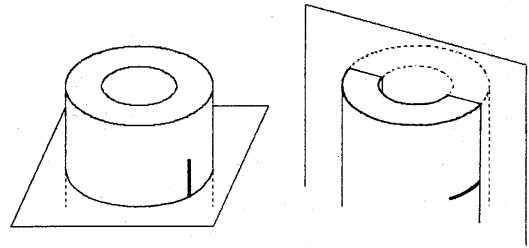


図9 ガラスびんの傷



(a) 垂直方向の傷 (b) 水平方向の傷

図10 考慮する2次元平面

(1) 垂直方向の傷の場合

傷の検査はびんを回転させながら行う。従って、びんの位置と照射するレーザー光を固定し傷の位置のみを変化させ調べればよい。レーザー光は一本だけではなく、考慮する平面に対しある程度の幅を持つ平行光とする。

まず、3.1と同様にレーザー光の経路を表示する。初期光線の強度を1として、0.5～1の光線は実線で、0.1～0.5の光線は破線で示す。図11に表示例を示すが、水平方向を0度として(a)は110度方向の傷、(b)は150度方向に入る傷の例である。太線の二重の円がびんの水平断面を表し、左上部に入った太線は傷を示す。レーザー光は上方向から照射している。これを見ると、異常光は傷による反射光であることが分り、またある決まった方向のみに出ることが分る。

次に、同様の状態でびんの周り360度におけるレーザー光の強度分布を求める。これは光線を多数発射し、各角度で入射してくる光線の積算減衰率をカウントすることにより求める。ここでは光線を位置を順次変えて1万本発射し、また各光線追跡は積算減衰率が0.001になるまで行った。

この結果を図12に示す。(a)、(b)はそれぞれ図11の(a)、(b)に対応している。縦軸は照射光に対する相対的強度を示す。また、破線は傷のない正常なびんの場合で、実線は傷のある

びんの場合を示す。

図11では(b)の方が光線が多く異常光の強度が強いようにとれるが、図12からは(b)はその範囲が広いだけで、実際は(a)の方が強度が強いことが分る。異常光の検出には(a)のタイプの強度分布の方が検出し易いので、これより(a)が適しているのが分る。実際の検査でも、(a)の異常光の出る方向の辺りに検出器を置いている。

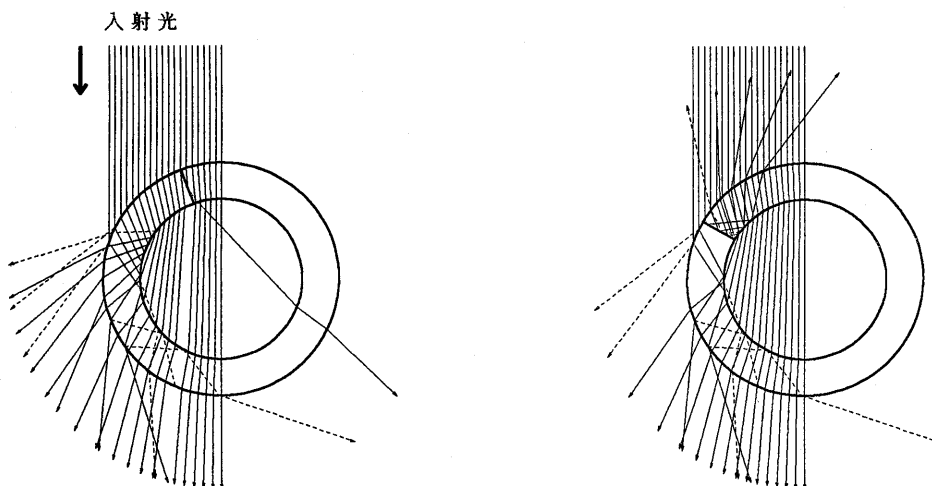
(2) 水平方向の傷の場合

今度は、びんの位置と検出したい傷を固定

し、照射するレーザー光を変化させれば十分である。(1)と同様に調べる。

図13はレーザー光の経路の表示例である。太線はびんの垂直断面を表し、右上部の水平方向の太線は傷を示す。レーザー光は右上部方向から照射され、(a)は42度方向、(b)は52度方向に照射位置がある。びんの垂直断面は形状が複雑なため光線の経路も複雑となり、びんの形状が光線の振る舞いに大変大きな影響を及ぼすことが分る。

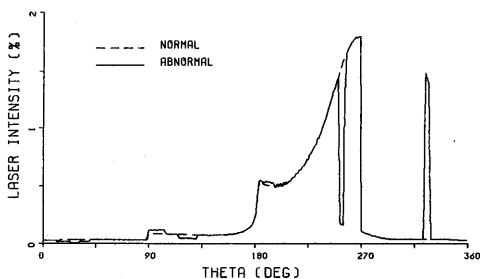
図14は同様の状態で、びんの周り360度におけるレーザー光の強度分布を示したグラフ



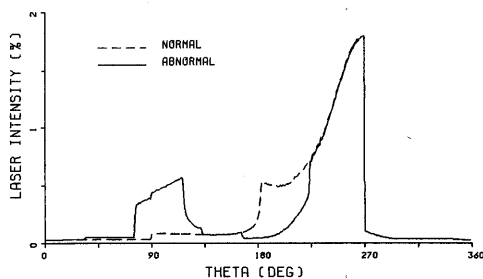
(a) 傷の位置 110度

(b) 傷の位置 150度

図11 光線の経路 (垂直方向の傷)



(a) 傷の位置 110度



(b) 傷の位置 150度

図12 強度分布 (垂直方向の傷)

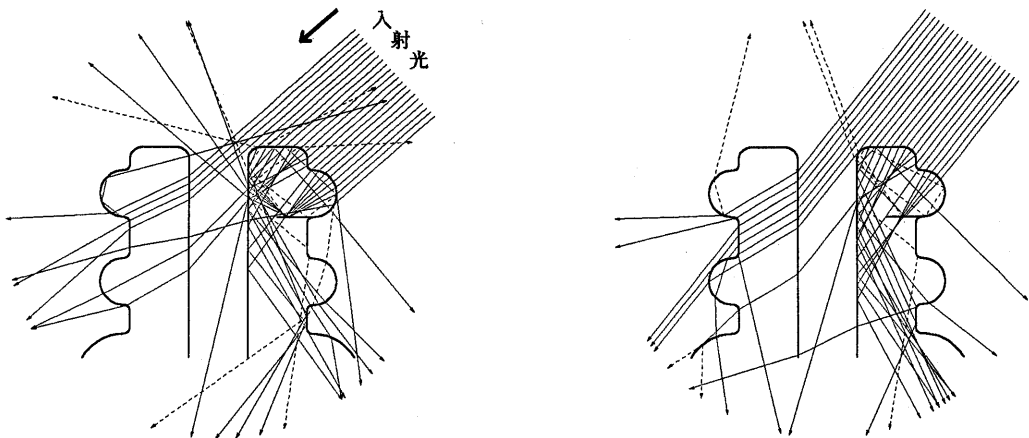
である。(a), (b)はそれぞれ図13の(a), (b)に対応している。図13と同様に強度分布も複雑になっている。

(a)では傷においては反射光が多いが、(b)になると反射光よりも透過光の方が多い。これは、傷に対してレーザー光が水平方向に近い角度で入射した方が、傷の反射による異常光が出やすいことを示している。従って、(a)の状態の方が傷を検出し易く、図13(a)に示すような異常光の方向に検出器を置いてやればよいことが分る。また、傷がびんの下の方にあるときは、傷で反射した異常光が再びその反

対側のびんを通過しなくてはいけないので、傷の検出が難しくなる。以上のことは、実際にも経験的に知られているが、このように明白には示されていない。

(4) まとめ

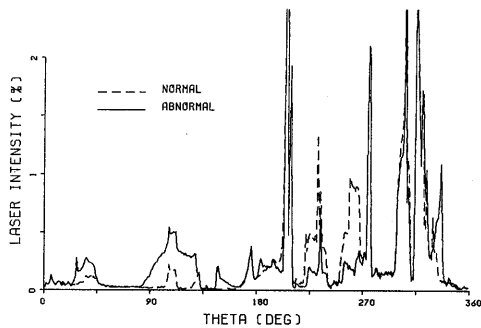
ガラスびんの傷検査に関して、傷における光の反射、屈折について考え、びんの口部の表示及び傷のある物体の表示を行った。また、傷のあるびんにレーザー光を照射したときの光線の経路の3次元表示を行い、その振る舞いを明らかにした。そして最後に、実際の傷



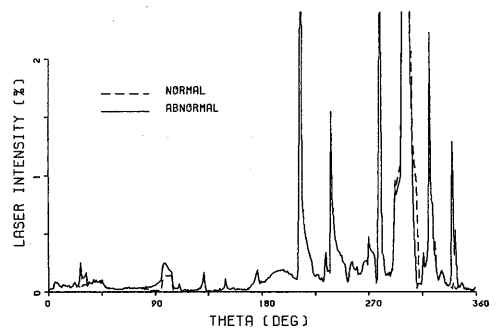
(a) レーザー光の照射位置 42度

(b) レーザー光の照射位置 52度

図13 光線の経路 (水平方向の傷)



(a) レーザー光の照射位置 42度



(b) レーザー光の照射位置 52度

図14 強度分布 (水平方向の傷)

検査に準じてシミュレーションを行い、定量的な考察を行った。

これにより、びんの形状や傷の入り方及びレーザー光の照射の変化によって、レーザー光の経路及び強度分布が明瞭に示されるので、傷検査システムのセッティングを評価するのに有効である。発生し易い傷の位置をあらかじめ複数指定すれば、レーザー光の経路や強度分布から異常光の方向や強度が分るため、その全てを検出できるようなセッティングを簡単に決定することができる。また、びんの形状の変化にも柔軟に対応できる。

今回は、びんの形状は完全な線分と円弧よりなる断面形状を持つ回転体と考え、またレーザー光も理想的に扱っている。しかし、実際のびんの形状は設計図の通りではなく、表面は歪んでおり凹凸もあり、また内部も不均一である。さらに、レーザー光の減衰や分散も起こる。これらに関する経験的知識をどのようにシステムに組み込んでいくかが、今後の課題である。

謝辞

日頃大変熱心な御指導、御討論を頂く名古屋大学鳥脇研究室の皆様へ感謝致します。また、ガラスびんの傷検査に関して貴重な御助言を頂いた礪石塚ガラスの野口勝正氏及び広瀬健二氏に感謝致します。なお、本研究の一部は文部省科研費（多元知識情報）による。

文献

- (1) 堀内、横井、鳥脇：“透明な回転体の表示法の検討とその応用”，第一回N I C O G R A P H論文コンテスト論文集，pp.115-123 (1985,11).
- (2) 名大大型計算機センター：ライブラリー・プログラム利用の手引（数値計算編），p87 (1982).
- (3) 安田、横井、鳥脇、鶴岡、三宅：“透明

物体表示のための改良光線追跡法”，情報処理学会論文誌，25,6, pp.953-959 (1984,11).