

光切断法による細管内面の損傷計測 (第3報, 損傷寸法計測プログラムの開発)

田中 秀樹

Damage Measurement on Inside of Thin Tube Using Light Section Method

(3rd report, Development of the Program which can be Measured
the Size of Damage)

Hideki TANAKA

It is difficult to measure the damage on inside of thin tubes without breaking them, because there are any obstacles around them. We developed the measuring system using the light section method without damaging tubes and the preciseness of the measurements in the system was evaluated. In this paper, we developed the application the size of damages of the circumference and the axis direction and the position are measured by means of light section images, and evaluated it. The result of measurement for hole on the tube, the fine data within 0.2mm error of the circumference was obtained. It was shown that the measurement of the damage is possible using this program.

Keywords: Non-Destructive Measurement, Light Section Method, Damage on Inside of Tube, Circle Line Laser, Image Processing

周囲に障害物のある細管内面の損傷を非破壊で正確に計測することは困難であるため、計測手法はほとんど存在しない。そこで、レーザ光切断法を用いた細管内面の損傷に対する非破壊計測手法を提案し、システム構築、計測精度の検証を行ってきた。本報では、構築したシステムより得られる光切断画像を基に、円周上と管の軸方向の損傷寸法ならびにその位置を計測するプログラムを開発してその評価を行った。側面に穴をあけた管に対する計測を実施し、円周上の計測誤差が0.2mmと良好な結果を得た。これにより、本プログラムを用いることで損傷の計測が可能であることが示された。

キーワード: 非破壊計測、光切断、管内面損傷、サークルライン・レーザ、画像処理

1 まえがき

石油プラントや化学プラントなどでは、さまざまな配管が利用されている。これら配管は使用するうちに、管の減肉や管内面の孔食、傷、割れなどの損傷が起こる^{(1),(2)}。もし、損傷をそのまま放置すると配管に穴があく、亀裂が生じるなど症状が悪化して装置が停止したり、最悪の場合には事故が発生する可能性がある。このため、保守点検において配管類をモニタリングし、損傷程度のひどい場合には補修を行う必要がある。

保守点検における損傷の計測では、次に示すような問題が指摘されている。熱交換器チューブ⁽³⁾などのように多くの細管が束となっているものに対し、管外面から計測を行おうとすると、チューブを取り囲むことのできる大型の計測装置と、専門の作業員が必要となる。逆に、管内面から計測を行おうとすると、検査管数が多く検査作業に時間がかかる。

このような理由から、細管の損傷計測には作業効率のよい渦流探傷⁽⁴⁾が用いられる。しかし、渦流探傷法では渦流センサを手で手繰り寄せる方法が一般

的であり、その原理上、管軸方向に対する損傷位置および円周上の損傷位置を特定できないという課題が残っている。配管の余寿命予測のためには、損傷寸法およびその位置の計測が望ましいことは明らかである。

そこで、損傷の寸法ならびに位置の計測を可能とする非破壊計測手法として光切断法^{(5),(6)}を提案し、そのシステムを構築する。本光切断法を実現するシステムは、レーザ発振器と小形 CCD カメラとを対向させ配置したプローブと、カメラ出力を保存する画像蓄積解析装置で構成する。前報^{(7),(8)}では構築したシステムで擬似損傷穴の寸法を計測し、計測精度の検証を行った。

本報では、損傷計測を行う光切断線抽出アルゴリズムならびに寸法計測アルゴリズムを開発し、開発したアルゴリズムの検証のため、擬似損傷に対する計測実験を行う。

2 システムの概要

2.1 原理

円形照射するレーザ発振器と小型 CCD カメラを、同一軸上で向かい合わせて配置する。レーザ発振器と CCD カメラから構成されるプローブを管内に挿入すると、図 1 のように管内面にレーザ光切断線が現われる。

この状態を CCD カメラで撮影すると光切断画像として確認できる。光切断画像において、管内面に損傷のない場合には光切断線が真円となる。管内面に損傷のある場合にはこの円がひずむ、減肉の場合には円の径が大きくなるという現象が現われる。光切断画像を用いた計測では、損傷の大きさに応じて変化する光切断線の円のひずみ量を利用し、ひずみ量と損傷寸法との相関関係を明らかにすることで損傷計測が可能となる。

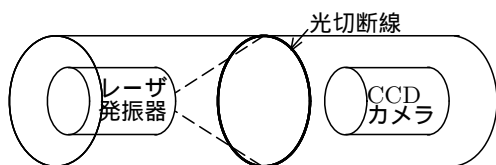


図 1 プローブの原理図

2.2 システム構成

本センシングシステムは、レーザ発振器および小型 CCD カメラから構成されるプローブ、プローブの移動量を求める距離測定ユニット、プローブと距離計測ユニットとのインターフェースを担うコントロールユニット、光切断線を蓄積し損傷解析を行う画像蓄積解析装置から構成される。

プローブは、管内面観測用の窓を開けた、直径 19mm × 330mm の金属製円筒内に、レーザ発振器と CCD カメラを配置した構造である。レーザ発振器の仕様は、出力波長 635nm、最大定格出力 5mW、ビーム径 0.8mm、放射角 20 °(初期設定) である。CCD カメラの仕様は、直径 12mm、有効画素数 768(H) × 494(V)、走査線 525 本、アスペクト比 4:3 である。

画像蓄積解析装置の入力可能な画像サイズは 640 × 480 画素である。管内径 21mm に対する画像の分解能は、プローブの初期設定では 1 画素当たり 0.05mm である。

3 損傷計測プログラム

3.1 計測内容

プローブを管内に挿入して撮影できる光切断画像より光切断線を抽出し、それを基に管内損傷計測を行うプログラムを作成した。計測作業は画像データ収集と損傷計測の 2 段階で行った。データ収集作業では、計測対象物である全ての管に対し光切断画像を撮影し、画像蓄積解析装置に保存した。次に損傷計測作業において保存した画像データより、損傷位置を計測した。

損傷計測プログラムの計測項目は次のとおりである(図 2)。

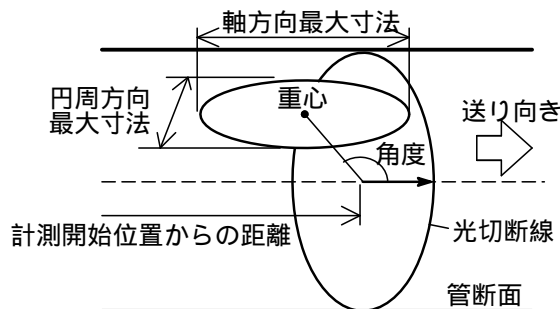


図 2 計測項目説明図

- 円周方向の最大損傷寸法
- 管軸方向の最大損傷寸法
- 損傷の角度
- 損傷の計測開始点からの距離

3.2 計測処理手順

光切断画像には、中央にレーザー発振器の照射口が撮影される。またレーザー発振器と CCD カメラとを固定する支持棒の光切断線、およびレーザー散乱が原因と思われる光帯が光切断線の周囲に外乱として存在した。これらの外乱を取り除くため、最初にマスク処理を行った。マスク領域は 1 画像フレームの光切断画像を参照して設定し、その領域の座標を保存した。本手法では画像処理の負担を軽減するために 2 値化を行ったが、しきい値決めの際には 2 値化後の様子を画面で確認しながら任意に設定可能である。上記の設定値でマスク処理後、管内面状態による光切断線の途切れ、レーザー光の全反射によるサチレーションなどの外乱を改善するため、平滑化処理に引き続き 2 値化処理を行った。2 値化した画像よりその光切断線に円をあてはめ近似円を求めた。近似円の中心から時計回りに任意の角度で放射状の線を引き、光切断線との交点をエッジとしてその座標を抽出した。

次に、このエッジ座標より損傷端を探索し、これより損傷寸法を求めた。損傷端の座標をそれぞれ (x_1, y_1) , (x_2, y_2) とすると円周方向の寸法 l は次式で表わせる。

$$l = |\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}| \quad (1)$$

一方、角度 θ は損傷端を結ぶ直線の midpoint 座標 (x_m, y_m) と光切断線より求めた円の中心座標 (x_c, y_c) から次式で求める。

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x_m - x_c}{|\sqrt{(x_m - x_c)^2 + (y_m - y_c)^2}|} \quad (2)$$

1 本の管を撮影した画像についてこの処理を実行し、損傷端の座標をもとに複数画像フレームにわたる損傷をそれぞれ関連づけた。この関連づけた結果より、軸方向の最大損傷寸法および損傷の重心を求めた。

図 3 に損傷計測プログラムの流れを示す。また、図 4 に各処理過程における出力画像を示す。図

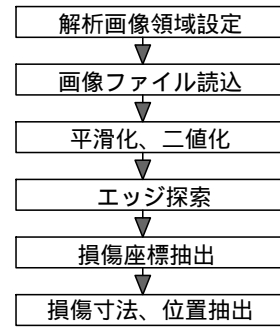
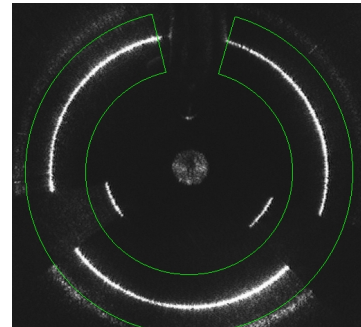


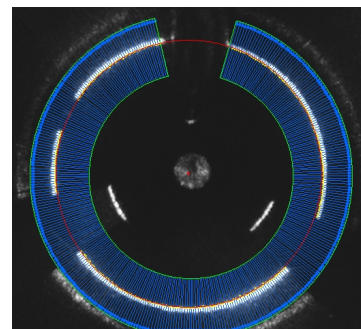
図 3 損傷計測処理フロー



(a) マスク領域設定



(b) 2 値化後



(c) エッジ検出

図 4 損傷計測処理の様子

(a),(b),(c) はそれぞれマスク領域設定、しきい値 96 としたときの 2 値、エッジ検出結果表示画像である。

4 計測実験

4.1 実験方法

擬似損傷として管側面に丸穴を開けた試料に対し、作成した損傷計測プログラムでその損傷を計測した。実験に用いる管は、内径 $\phi 21\text{mm}$, $\phi 24\text{mm}$, $\phi 26\text{mm}$ の3種類とした。損傷直径は 0.5mm ごとに直径 2.0mm から 5.5mm までとした。解析処理は、プローブが管軸方向の計測範囲を移動後にまとめて実施した。ここで、プローブの移動量 0.5mm おきに CCD カメラのシャッタをきる。

4.2 実験結果

管内径 $\phi 21\text{mm}$, $\phi 24\text{mm}$, $\phi 26\text{mm}$ に対する計測結果をそれぞれ表 1, 表 2, 表 3 に示す。表中の数値は損傷計測プログラムで求めた損傷最大寸法である。ここで、表中の円周、管軸、角度はそれぞれ、円周方向の損傷寸法、管軸方向の損傷寸法、管断面の平面上にある管軸から損傷中心におろした垂線のなす角を表わす。

表 1 より管内径 $\phi 21\text{mm}$ のときの損傷の直径と計測結果との最大誤差は、円周方向、管軸方向でそれぞれ、 0.2mm 、 2.0mm であった。 $\phi 24\text{mm}$ のとき 0.5mm 、 1.5mm であり、 $\phi 26\text{mm}$ のとき 0.6mm 、 1.0mm であった。

円周方向の損傷寸法について詳しく検証すると、管内径 $\phi 21\text{mm}$ の誤差の最大は 5.0% 、平均は 2.5%

表 1 管内径 $\phi 21\text{mm}$ に対する損傷計測結果

項目	損傷穴径 (mm)							
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
円周	2.0	2.4	2.9	3.5	3.8	4.4	5.1	5.3
管軸	1.5	2.0	2.0	2.5	3.5	4.0	3.0	5.0
角度	145	149	149	155	150	149	153	146

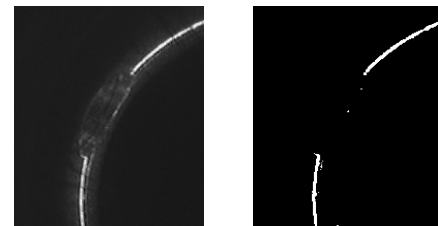
表 2 管内径 $\phi 24\text{mm}$ に対する損傷計測結果

項目	損傷穴径 (mm)							
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
円周	1.9	2.5	3.1	3.3	4.2	5.0	5.2	5.0
管軸	1.0	2.0	2.5	2.0	4.0	3.5	3.5	5.0
角度	145	156	154	147	163	162	151	157

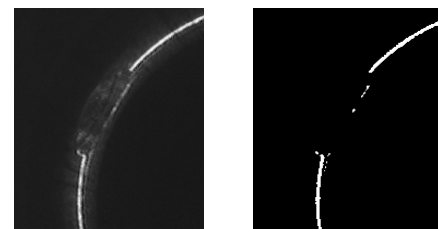
表 3 管内径 $\phi 26\text{mm}$ に対する損傷計測結果

項目	損傷穴径 (mm)							
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
円周	1.4	2.0	2.7	3.2	3.8	4.7	5.2	5.6
管軸	1.0	1.5	2.5	3.5	3.0	4.5	5.0	5.0
角度	147	148	152	154	153	168	157	154

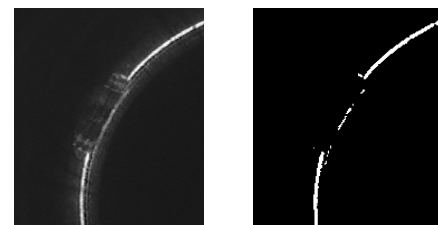
であったが、管内径 $\phi 24\text{mm}$, $\phi 26\text{mm}$ の誤差は、それぞれ最大 11.1% , 30.0% 、平均 5.4% , 10.6% であった。このように管内径 $\phi 21\text{mm}$ に比較して $\phi 24\text{mm}$, $\phi 26\text{mm}$ の誤差は大きい。この測定誤差の要因は光切断線の抽出法などや損傷自体の寸法誤差である。光切断線の抽出法は光切断線に対する近似円を求め、その円の中心から任意の角度ごとに垂線を下ろし、これと光切断線との交点をエッジとして抽出したものである。本実験ではこの角度を 1 度とした。角度 θ と半径 r から切片を求める公式 $2r \sin(\theta/2)$ より、管内径 $\phi 24\text{mm}$, $\phi 26\text{mm}$ の計測可能最小寸法はそれぞれ、 0.209mm , 0.227mm となり、光切断線抽出法による誤差は 0.418mm , 0.454mm であった。これより、円周方向の損傷寸法における計測結果と損傷直径との誤差は、理論値と適合し、計測に十分な値と考えられる。



原画像 2値画像
(a) 軸方向位置 6.5mm



原画像 2値画像
(b) 軸方向位置 7.0mm



原画像 2値画像
(c) 軸方向位置 7.5mm

図 5 誤認識となる画像例

一方、管軸方向の損傷寸法については最大誤差が1.5mmであり、全般的に誤差が大きい。このような誤差が生じる原因は次のように考えられる。(1) 管軸方向の解像度はプローブ挿入ピッチの0.5mmであること。(2) 損傷のバリによる散乱光や損傷内部のレーザー光散乱が原因で、2値化後に損傷上に現われた線を解析処理プログラムが損傷と誤認識し、連続する画像フレーム間の損傷を不連続と認識したこと。

画像フレーム間で連続する損傷を不連続と誤認識した画像の例を図5に示す。この図は管内径 $\phi 21\text{mm}$ において、軸方向の位置が(a)6.5mm, (b)7.0mm, (c)7.5mmにおける原画像とこれをしきい値120で2値化した画像である。(b),(c)の原画像では損傷のエッジ部の画像輝度が高く、2値化後にエッジ部が抽出されていることが確認された。

5 むすび

本研究では、光切断法による非破壊計測手法を提案し、レーザー発振器と小型CCDカメラを検出器とする装置を構築した。本システムにおいて非破壊で損傷計測を可能とする機能の追加を目的に、光切断線抽出アルゴリズムならびに寸法計測アルゴリズムを開発した。そして、擬似損傷に対する計測実験を行い、開発したシステムの精度を検証した。その結果、円周上の損傷寸法の計測に対しては十分な精度を得た。しかし、管軸方向の損傷寸法については、損傷のバリや散乱光により画像フレーム間で連続する損傷を捉えられず、大きな誤差が発生した。

今後は画像フレーム間にわたる損傷を正確に分類する方法や散乱光に対するロバスト性を向上させる処理方法について検討を行う予定である。

謝辞 本研究は、中小企業技術開発産学官連携促進事業(中小企業庁補助金)の一環として実施した。記して関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 日本材料学会, 熱交換器の管理と余寿命予測, 日本材料学会, 1996.
- (2) 溝口茂, 矢野清之助, 山本一雄, 緒方良昭, “ボイラー節炭器管の内面腐食事例,” 腐食防食講演集, vol.1987, pp.205-208, 1986.

- (3) 化学工学協会編, 化学装置便覧, 丸善, 1989.
- (4) 日本非破壊検査協会, 非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, 1978.
- (5) 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- (6) (社)計量管理協会編, 光計測のニーズとシーズ, コロナ社, 1987.
- (7) 田中秀樹, 世良英美, “光切断法による細管内面の損傷計測(第1報),” 広島市工業技術センター年報, vol.13, pp.61-66, 1999.
- (8) 田中秀樹, “光切断法による細管内面の損傷計測(第2報),” 広島市工業技術センター年報, vol.14, pp.64-70, 2000.