# 携行可能な細管内面損傷測定装置の開発

田中 秀樹 長谷川 尚哉†

# Development of Portable Damage Measurement Device for Inside of Thin Tube

Hideki TANAKA Naoya HASEGAWA

We developed the mesuring system using the light section method for the purpose of measure the inside damage of thin tubes. We developed the mesuring system used it. Also, we inspected about the preciseness of the measurements. The system we constructed has two problems. The one problem is that the device is too large to carry. The other problem is that the system takes much of time in shooting and saving images. So we made the device smaller and lighter as keeping up mesuring function. And we improved measuring program to quicker the process for shooting and saving images.

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

細管内面に発生する損傷に対する非破壊計測法として、レーザ光切断法を用いた手法を提案 した。これまで、提案手法を用いたシステムを構築するとともに、計測精度についての検証を 行ってきた。構築したシステムについては、現場への運搬を考えた場合に寸法と重量に問題が あり、さらに画像撮影・保存の処理時間に課題を残していた。そこで、計測機能を維持したま ま装置を小さく、軽くする製作に取り掛かり、これを実現した。さらに、計測プログラムを改 良して計測結果に影響を及ぼしていた画像撮影・保存処理の高速化を図った。

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

発電所、化学プラントなどの施設においては様々 な管が用いられている。特に熱交換器のチューブに ついては使用時の温度条件が厳しく、またチューブ の寿命に影響のある流体が用いられるなど、過酷な 条件で使用される。実際に熱交換器のチューブには、 減肉、内面の孔食、割れなどの損傷の発生が報告さ れている<sup>(1),(2)</sup>。損傷を放置すると事故の発生につな がるため損傷計測の実施が必要である。しかし、熱 交換器のチューブは管の内径が細いうえに長く、複 数の管が束となっているため、チューブ内面の損傷 計測には次にあげる問題が存在する。管の外側へ計 測器を配置して計測する場合には、・大型の装置が

†日本システムデザイン(株),広島市

必要である。逆に管の内側から計測する場合には・ 使用できる計測器がほとんど存在しない。・管1本 ごとに計測することになり作業時間がかかる。これ らの問題を満足する手法として、渦流探傷法が一般 的に用いられている。

一方、検査コストの低減のためには検査の実施間 隔の検討が必要であり、実際に損傷発生予測に対す る研究<sup>(3)-(5)</sup>が行われ、検査の効率化が図られてい る。管の余寿命予測のためには、損傷寸法および管 上における損傷の位置情報の把握が必要不可欠であ る。しかし、渦流探傷法では原理上、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。そこで、渦流探傷法を 補完する計測手法として光切断による損傷計測法を 提案し<sup>(6)-(8)</sup>、計測システムを構築した。構築したシ ステムは研究開発用としての利用も考えているため、 装置が大きく重い。そのうえ、装置を持ち運ぼうと すると複数のケースに格納することになるので、現 場への運搬には労力を要する。

そこで、持ち運びを容易にするため計測機能を維 持したまま、小型軽量化した装置を製作した。さら に、計測結果に影響を及ぼしていた画像撮影・保存 の処理時間を改善した。

## 2 システムの概要

今回製作した装置の原理は前報<sup>(6)-(8)</sup>に詳述して いるが、原理とシステム構成を簡単に記述する。

### 2.1 原 理

光学的に円形照射するレーザ発振器と小型 CCD カメラとを同一軸上で対向して配置する。レーザ発 振器と CCD カメラを1つのユニットに納め (プロー ブ)、これを管内に挿入すると管内面にレーザによる 光切断線が現われる。損傷のない場合には CCD カ メラで撮影した光切断線 (光切断画像) が円として確 認できる。プローブを管に挿入した時の様子を図 1 に示す。ここで、図ではレーザ発振器と CCD カメ ラを納めるユニットを省略している。

光切断画像では管内面の損傷に応じた光切断線の ひずみが生じるので、この損傷とひずみ量との相関 関係から損傷が推定できる。

## 2.2 システム構成

本システムはプローブ、レーザ発振器用電源、CCD カメラのコントロールユニットである CCU、プロー ブの管内移動量を求める距離測定ユニット、光切断 線から損傷を計測する機能を持つ画像解析装置から 構成される。画像解析装置には CCD カメラ画像を 入力するためのキャプチャボード、距離測定ユニッ トからのエンコーダ信号を取り込むためのエンコー ダカウンタボードを有する。製作したシステム構成 を図 2 に示す。

次に部品の主な仕様を説明する。プローブは管内 面観測用の窓を開けた、直径 19mm × 330mm の 円筒形状である。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、 外径 12mm、有効画素数 768(H) × 494(V)、走査線



図2 システムブロック図

525 本、アスペクト比 4:3 である。画像解析装置の 入力可能な画像サイズは 640 × 480 画素で、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。また、使用す るコンピュータは MPU Celeron 1GHz、メインメモ リ 128MB である。

### 3 従来型の課題と対策

#### 3.1 課 題

前報で製作した管内損傷計測装置(従来型)<sup>(6)-(8)</sup>に は取り扱いに課題が残された。その課題を次に示す。

- 装置の寸法が大きく、重い。
- 画像撮影後に光切断線の輪郭の抽出処理を行い、
   その後画像を保存するため画像の取りこぼしが
   多い。

前者の課題について、従来型には運搬用のケース があるが全ての機器を収納するとケースが3つとな り、作業現場への持ち運びを考えた場合には現実的 ではない。後者の課題について、計測用の画像撮影 はプローブの移動距離に同期させることができ、そ の値は任意に設定可能であるが、プローブの移動速 度の速い場合には処理が追いつかずに画像を取りこ ぼすことがある。移動距離の設定間隔が数 mm と短 い時には画像の取りこぼしを防ぐためにプローブの 移動速度を遅くしなければならず、現在行っている 人手による操作では 1mm 間隔の設定でも難しい。



(a) 外観



(b) 内部配置図 3 装置の外観

## 3.2 対 策

3.1 の課題を解決するため、装置の小型化ならびに 画像保存プログラムの改良を行った。

(1) 装置の小型化、軽量化

現在使用している機器のうち体積の大きいものを 小さくすることが、装置の小型化に大きく影響する ことは明らかである。このため、従来型を構成する機 器のうち体積の大きいものを調べると、コントロー ルユニットと画像蓄積解析装置<sup>(6)</sup>であり、したがっ てこれを運搬するためのケースも大きなものが必要 となっている。

そこで、2つの装置の機能を1つのケースの中に 構築することで、携行を可能とする装置の製作を目 指した。コントロールユニットはプローブ・距離測定 ユニットと画像蓄積解析装置とのインターフェース を担う機器である。プローブと距離測定ユニットの インターフェース部をそれぞれ分離して再配置が可 能であることから小型化が可能である。画像蓄積解 析装置はパーソナルコンピュータ (PC) 上に画像の

表1 寸法と重量の比較

装置		寸法 (mm)	重量 (kg)	
	1	$680 \times 500 \times 575$	32	
従来型	2	$1075 \times 380 \times 170$	15	
	3	$530 \times 280 \times 530$	16	
新 型	1	$640 \times 420 \times 255$	22	
	2	$1075 \times 380 \times 170$	15	

撮影、表示、保存、さらに損傷計測の機能を構築し ており、画像入力ボード、エンコーダカウンタボー ドの接続が必要という制約がある。このためなるべ く体積の小さい PC を選択することで対応した。以 上のような変更とケースへの機器のレイアウトを検 討することで、図 3 の外観のように体積を小さくす ることができた。

従来型と今回製作した装置(新型)との寸法および 重量の比較を表1に示す。表の装置列の数字は任意 に付けたケース番号であり、番号2は従来型、新型 とも同じケースであり、プローブ、距離測定ユニッ トならびにプローブを管内に挿入するための挿入棒 を収納する。特に挿入棒は長いためケース寸法も大 きい。従来型の番号1、3はそれぞれ画像解析蓄積装 置、コントロールユニットのケースであり、これを 新型では番号1の寸法のケースに収まるようにまと めた。従来型と新型の体積および重量の合計は、そ れぞれ0.34m<sup>3</sup>、0.14m<sup>3</sup>、63kg、37kgであり、体積 比(新型/従来型)は41%、重量比は59%と体積比、 重量比とも大幅に低減することができた。

(2) 画像保存プログラムの改良

管内面の損傷計測ではプローブの移動距離に同期 した画像より、光切断線のひずみから損傷を計測す る。計測においては画像を撮影する間隔が狭いほど 管軸方向の分解能が高くなるため、文献<sup>(8)</sup>では画像 撮影と損傷計測処理とを分離させた。従来型では画 像撮影時において、・画像撮影、・光切断線のエッ ジ抽出、・画像・エッジ座標の保存という処理を行っ ており、プローブの移動速度が速い場合には距離測 定位置と画像撮影位置とが同期しないことがある。 しかし、プローブの移動は人手で行っているため極 端に細かい間隔の操作は難しい。距離測定位置と画

表 2 画像撮影処理時間の比較

装置	処理時間 (ms)	誤り割合 (%)		
従来型	0.243			
新 型	0.134	37		

像撮影位置とを同期させるため、ならびに計測処理 の迅速化のためには画像関連処理の高速化が適して おり、画像撮影処理では単に画像撮影、保存のみを 行うプログラムとした。プログラムの開発言語とし ては Visual C++ 6.0 を用いた。なお、従来型のプ ログラムは Visual Basic で開発した。

作成したプログラムの画像撮影処理の評価のため に、従来型と新型のそれぞれについて、1 画像を撮影 して保存するまでの処理時間を測定した。また、新 型についてはプロープの移動距離100mm、移動速度 3.3mm/s、撮影間隔1.0mmの条件のもとで、距離測 定位置と画像撮影位置とが一致しない割合について 調べた。この結果を表2に示す。

結果より1画像に対する処理時間は新型が従来型 よりも約2倍早く処理できることが分かる。距離測 定位置と画像撮影位置とが一致しない割合は、新型 のみについて調べ37%であった。処理時間から考え て従来型では約2倍の割合となると推測できる。以 上結果からプログラムの改良により画像撮影処理が 向上したことが示された。

## 4 損傷計測実験

## 4.1 計測項目

撮影された画像より損傷の検出と計測を行うプロ グラムを従来型より移植した。プログラム開発には LabVIEW を用いており、LabVIEW をインストー ルしていない新型装置に移植するために単独実行形 式で作成した。損傷の計測項目は図4に示すように、 損傷の重心を基準とした、・円周方向の最大寸法、 ・管軸方向の最大寸法、・損傷の角度、・計測開始 位置からの距離である。

### 4.2 実験結果

側面に丸穴を開けた管の損傷を計測した。実験に
用いる管は内径 φ21mm で、穴の直径は2.0, 2.5, 3.0,
3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5mm の8つの大きさである。画
像撮影はプローブの移動量の0.5mm ごととした。



## 図 4 計測項目内容

表 3 管内径 φ21mm に対する計測結果

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	1.8	2.4	2.7	3.3	4.0	4.7	4.9	5.6		
管軸	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	3.5	4.5	5.0		
角度	143	159	150	140	147	154	155	153		
位置	1.5	2.0	2.0	2.5	3.0	3.5	3.0	4.0		

解析結果を表 3 に示す。表の円周、管軸、角度、 位置はそれぞれ、円周方向の損傷最大寸法、管軸方 向の損傷最大寸法、損傷の重心点を通る管断面上の 角度、管軸方向の重心点位置を表わす。プローブ移 動開始位置は各穴とも穴の端より 1.0mm 程度外側か らとした。

結果より円周方向、管軸方向、重心点の位置の誤 差はそれぞれ最大0.3mm、1.0mm、0.75mmである。 円周方向の誤差は従来型で計測した時より0.1mm 誤 差が増加しているが、測定誤差の範囲と思われる。 管軸方向の誤差については従来型と比較して1.0mm 誤差が低下した。位置については従来型での計測は 行っておらず新型のみの判断となるが、管軸方向の 分解能が0.5mmであることを考えると、最大誤差 の0.75mmは誤差範囲内と考えられる。以上の実験 結果から損傷計測が正しく行えることが確認できた。 特に管軸方向に対する計測精度が向上した。

#### 5 むすび

前報で構築した計測装置の課題を解決するために、 小型化と軽量化を行った装置をあらたに構築した。 従来の装置より体積比41%、重量比59%と大幅に小 型化、軽量化が実現できた。このことにより、本装 置による現場での損傷計測が促進されるものと思わ れる。また、画像撮影・保存の処理時間を改良する ことで、管軸方向の計測精度を高めることと、作業 性の向上に成功した。

今後は現在人手で挿入しているプローブに対して、 作業者の負担の軽減ならびに軸方向の計測精度のさ らなる向上のため、機械的な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) 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.
- (2) 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.
- (3)藤山一成,井関崇司,中谷祐二郎,竹村信一,"蒸 気管熱衝撃割れの計測に基づく熱応力および熱 疲労寿命評価システム,"日本機械学会計算力学 講演会講演論文集, vol.12, pp.369–370, 1999.
- (4) 佐藤武司, 渡辺豊, 庄子哲雄, 加藤靖, 中里俊晴, 東正樹, 中原正大, "遺伝的アルゴリズムによる 熱交換器腐食寿命支配因子の評価,"材料と環境 討論会講演集, vol.1997, pp.213–216, 1997.
- (5) 中原正大,新崎雅人,"極値統計データ(λ,α)を基 にした冷却水環境における炭素鋼熱交換器の寿 命予測,"腐食防食討論会講演集, vol.40, pp.441– 444, 1993.
- (6)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.
- (7)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.
- (8) 田中秀樹, "光切断法による細管内面の損傷計測 (第3報),"広島市工業技術センター年報, vol.15, pp.55–59, 2001.