

レーザー変位計を用いた鋼管状物体の形状の精密計測法の提案

A novel size measurement method for a column type specimen
using a CCD laser transducer

小畑 誠*, 馮 文**, 後藤 芳顯****
Makoto OBATA, Weng Fung, Yoshiaki GOTO

*Ph.D. 名古屋工業大学教授 大学院社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**名古屋工業大学大学院 (466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

***工博 名古屋工業大学教授 大学院社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Measurement of shape is a very fundamental step to experimental mechanics. For example, ultimate strength of shell structures is governed by initial imperfection and crack initiation often occurs at a geometrically irregular point. As numerical simulation get sophisticated, more detailed measurement of shape becomes necessary. In such cases, a traditional vernier or a micrometer is no longer an appropriate tool. On the other hand, the use of a highly accurate CMM is usually overkill for specimens of our interests. The objective of this manuscript is to propose a simple but acceptably accurate shape measurement method for column type specimens. In this method, coordinate measure is achieved without any precisely worked frame but by indirect method.

Keywords: accurate measurement method, initial imperfection

キーワード：精密計測，初期不整

1. はじめに

構造物の強度は材料特性だけでなく広くその形状に依存している。薄板・シェル構造においては初期たわみが終局挙動に大きな影響を持つし、塑性変形後のき裂発生は表面の微少な不整が起点となることが多い。また表面の不整は応力集中を生じさせ結果として疲労き裂の発生につながる可能性もある。したがって、構造物の強度特性を論じるにはその形状を正確に把握しておく必要がある。この点、薄板構造については製作時の初期不整の重要性は設計に取り入れられるにいたっている¹⁾。その一方で腐食等により時間をかけて断面が欠損していく場合のように供用時に生じる形状の不整の影響については、これまでも精力的に研究が続けられているが、いまだ必要とされる形状に関する情報の性質や精度についての一般的な合意はないと思われる^{2,3)}。したがって現状では可能な限り高い精度で形状を測定することが必要となる。また、構造物の局部座屈などの局所的な変形の計測も数値解析の高度化にともない数値

解析結果の検証のためにその必要性が高まってきている。

そこでこのような不規則な形状を持つ対象物の計測について考えると、計測点の密度が主要な要件となり、この点から手作業を基本とするノギスやマイクロメータの利用は現実的ではなくなる。また被測定物の大きさや表面の凹凸の形状によってはノギスやマイクロメータでは対応できない場合もある。現在適用可能な形状計測の手法について考えると、小さい被測定物であれば例えばゲージブロック、プローブおよび XY ステージ等を組み合わせれば、比較的容易かつ高精度に 3 次元の形状を計測することは可能である。しかしある程度の大きさを持つ被測定物に対して高精度の計測を行うことは、高価な 3 次元座標測定装置と自動計測機器が使用可能な場合を別にすれば通常は困難である。これらの計測装置が高価なのはプローブの位置や方向といった基本情報を計測するためのいわゆる 3 次元位置測定器 (CMM) が高精度かつ精緻に製作されているためである。例えば汎用性の高いアーム型のものでは操作

性を向上させるために 7 軸もの回転自由度を持つものもある。つまり、3 次元形状の計測ではプローブそのものよりプローブの位置や方向の計測がボトルネックとなっているのである。一方、土木構造部材を対象とした測定では精度の点で一定の譲歩をしても簡易な計測システムが望ましい。そこで本研究ではプローブの位置や方向といった基礎的な情報を CMM 等の外部装置によらず、いわば間接的に決定し単純な計測システムを使いながら比較的高精度の計測を実現する、ある程度一般性を持つ方法を提案するものである。具体例として構造用部材の一つである直径が 300mm 程度までの鋼管状の物を対象とする。これは鋼製の柱あるいはそのモデルを想定している。この程度の大きさに対してはノギスの適用もはや困難であり、現状では大型のアーム型治具とプローブからなる 3 次元形状計測装置のみが高精度計測法として考えられるものである。

2. 計測法

2.1 基本的な考え方

本研究ではプローブとして通常の CCD 式レーザー変位計を用いる。そして計測の対象として単に表面の凹凸といった相対的な形状だけでなくパイプの直径といった絶対的な寸法までを含む。直径 300mm 程度のパイプであればその大きさの精密な測定にはノギス等の利用も難しい。仮に使用できたとしても、すでに述べたように腐食等による比較的大きな表面不整を測定するときには多数点の計測が必要^{4,5)}であ

り、また表面の不整により高い精度の測定は難しい。

プローブとして CCD 式レーザー変位計を用いるのは、それが非接触式のセンサであり、入手および扱いが容易で粗い表面に対しても十分に高い密度で計測することができるからである。しかしレーザー変位計は 1 次元的な相対変位を求めることを目的に製作されており単独で対象物の寸法を求めることができない。通常はレーザー変位計の位置や光軸の方向といった基本要素を CMM 等の外部の治具を用いて測定することによって被測定物全体の形状を求めることになる。しかし被測定物の形状や大きさによっては精度良い治具を設定すること自体、大変費用のかかることになる。そこで本研究では CMM を代替するものとして解析的手法を併用することによりプローブの基本的要素を決定しこの困難を回避する。以下に鋼管を対象とした具体的な装置をもとに提案する手法を示す。

2.2 測定装置

測定装置の概要は図 1 に示すとおりである。サーボモーターのついた回転台、回転台の外部に設置したプローブとしてのレーザー変位計、ロータリーエンコーダ、データロガーおよびパーソナルコンピュータによって構成される。基本となる計測は、被測定物を回転台上に設置し回転台を回転させて外部のレーザー変位計の設置位置から被測定物までの距離を回転角と同期させながら行う。そしてこれらの計測値はデータロガーを通してパーソナルコンピュータに記録される。このとき被測定物の回転台上の位

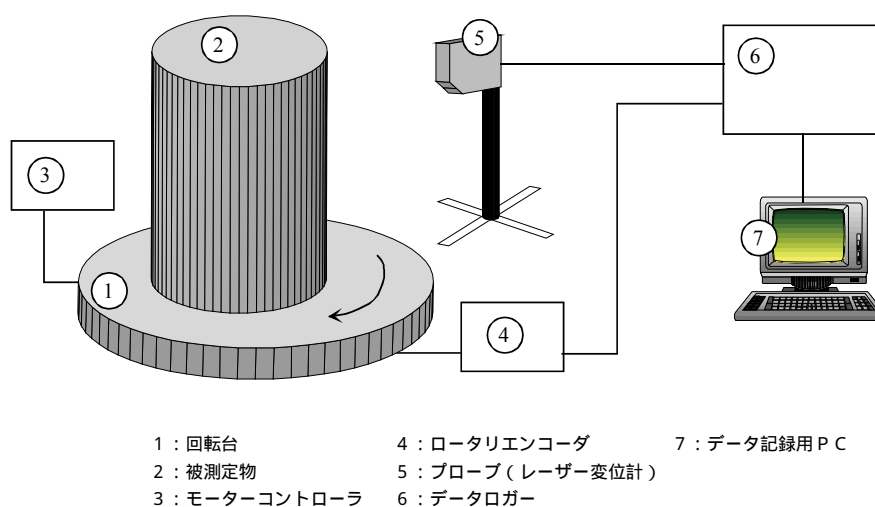


図1 提案する測定システムの基本的設定

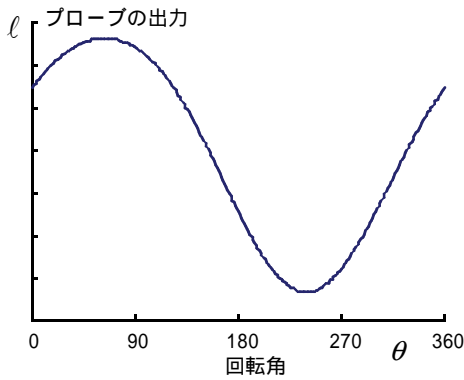


図 2 プローブの出力例

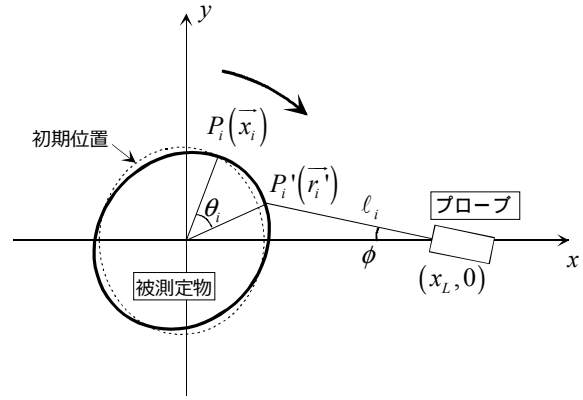


図3 測定値からの形状の再現

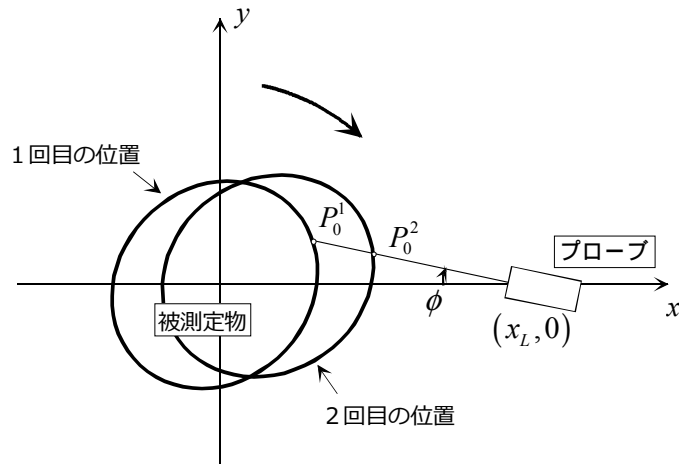


図4 位置を変えての測定

置およびレーザー変位計の位置および光軸の向きは任意でありかつ未知でよい，また別途それらを測定する必要もない．ただし光軸は回転台平面と平行でなければならない．また，サーボコントロールにより回転台の回転速度を十分な精度で一定に制御でき，測定開始点を特定できるのであれば回転角は計測時刻で置き換えることができるのでロータリーエンコーダによる計測は不要となる．計測点の数は一定のサンプリング周波数のもとでは回転速度に反比例するので原理的には任意の密度の計測が可能である．そしてレーザー変位計を回転軸に鉛直に移動させれば被測定物の3次元的な形状を求めることが可能である．

以上の装置によれば典型的な1回の計測から図2のような回転台の回転角とプローブと被測定物の距離の関係を得ることができる．そこでこの計測値から被測定物の形状を再現するには次のように考えればよい．今，座標系を図3のように回転台の中心に原点をとりレーザー変位計の位置を $(x_L, 0)$ ，レーザー変位計の光軸と x 軸のなす角度を ϕ とする（符号

の取り方は図3に従う）．そうするとレーザー変位計が被測定点を観測したときの位置を \vec{r}_i ，それに対応する計測開始点からの回転台の回転量を θ_i として \vec{r}_i と \vec{x}_i は次のように与えることができる（図3）．

$$\vec{r}_i = (x_L - l_i \cos \phi, l_i \sin \phi) \quad (1)$$

$$\vec{x}_i = R(\theta_i) \vec{r}_i \quad (2)$$

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここに添え字 i は i 番目の測定値を示す．被測定物の外形形状は離散的な観測点の位置 \vec{x}_i の集合として表すものとして，形式的に次のように表す．

$$S_j(\vec{x}; x_L, \phi) \quad (4)$$

しかし上述したようにこの段階ではプローブであるレーザー変位計の変位測定用の参照点の位置 $(x_L, 0)$ やその光軸の方向をあらわす角度 ϕ は未知のままなので被測定点の位置を具体的には求めることはできない．そのため従来の手法ではこれらの値をCMM等により求めているが，ここでは次のように考える．

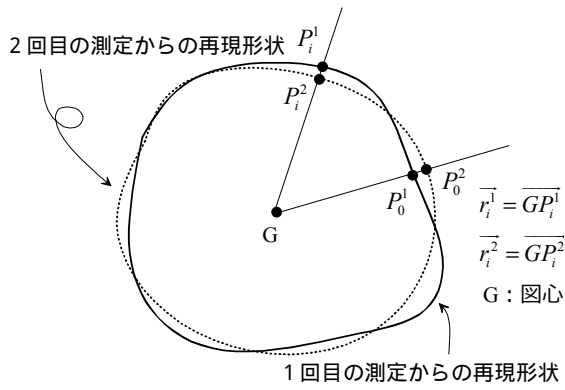


図5 形状の比較の手法

まず図4のように被測定物の回転台上の位置を変えて n 回測定し、それぞれに対して $S_j (j=1,2,\dots,n)$ を得る。同じ被対象物を測定しているのであるからすべての測定に対して結果として得られる形状 $S_j (j=1,2,\dots,n)$ は等しくなければならない。そしてこの条件から未知数である x_L と ϕ を決定する。 x_L と ϕ の2つが未知数なので最低でも2つの条件式が得られればよい。もっとも、計測値に含まれる誤差を考えると一般的には観測により過剰に条件式を得て、最小二乗法の意味で決定するとよい。ここでは図5に示すような方法により次式で定義される W を $S_j (j=1,2,\dots,n)$ 相互間の差を表す指標として用いる。

$$W(x_L, \phi) = \sum_j \sum_i \left| \vec{r}_i^j - \vec{r}_i^{j+1} \right|^2 \quad (5)$$

ここに \vec{r}_i^j は S_j の図心から i 番目の比較点への位置ベクトルである。ただし同じ計測点の数を測定したとしても対象物の回転台上の位置が異なるので計測毎に同一の点を複数回計測することにはならないので形状の比較は測定点をベースに行うことはできない。そこで図5の \vec{r}_i^j は何らかの補間法、例えば線形補間法を用いて決定する。そして適当な最適化手法によって W を最小化するような x_L と ϕ を求める。このようにして x_L と ϕ が求まれば被測定物の形状は式(1)~(3)により決定することができる。

なお、被測定物の回転台上での移動距離 d も未知数ではあるが、計測毎に計測開始点を一致させているのでその大きさを知る必要はない。また本研究では採用していないが、プローブの基本情報 x_L と ϕ を求めるという視点からは、まず被測定物として形状のわかっている参照用供試体を用いれば1回の測定で x_L と ϕ を決定することができる。このようにして

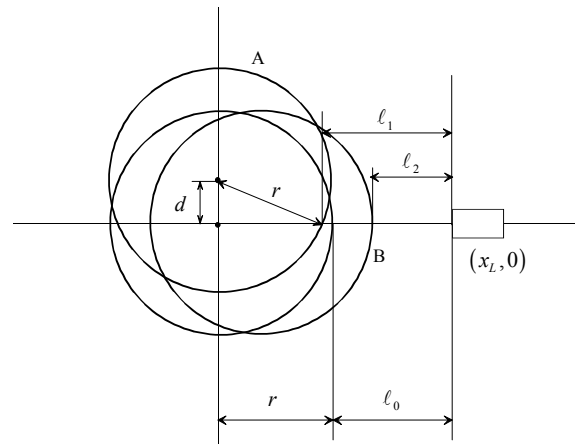


図6 精度の検討

プローブの基本情報の決定だけを別個の手順とすることも考えられる。

2.3 予想される誤差特性

このような手法によって得られる測定値の精度はどの程度のものかについて大まかに検討する。実際に想定しているのは鋼管状の対象物であり真円に近いので、真円の場合を例として考察する。測定精度に影響する因子としては、レーザー変位計およびロータリーエンコーダ自体の測定精度のほか、1回目と2回目の被測定物の位置関係、観測点の密度等が考えられる。提案する計測法に特有な物理量は複数回測定時の被測定物の位置関係である。そこで議論を簡単にするためにレーザー光軸と x 軸のなす角度 ϕ を0とし決定すべき未知量が x_L のみの場合について考え、図6に示すように1回目の測定では回転中心と円の中心とが一致し、2回目の測定では被測定物を d だけ移動させるものとする。変位計の位置を $(x_L, 0)$ 、半径を r 、1回目の測定でのレーザー変位計の読みを ℓ_0 、2回目の測定での図6の状態Aでの読みを ℓ_1 、状態Bでの読みを ℓ_2 とすると以下の関係が得られる。

$$x_L = \ell_0 + r \quad (7a)$$

$$x_L = \sqrt{r^2 - d^2} + \ell_1 \quad (7b)$$

$$x_L = r + d + \ell_2 \quad (7c)$$

x_L を消去してこれを d と r について解けば

$$d = \ell_0 - \ell_2 \quad (8a)$$

$$r = -\frac{1}{2} \frac{1}{\ell_0 - \ell_1} \left((\ell_0 - \ell_2)^2 + (\ell_0 - \ell_1)^2 \right) \quad (8b)$$

となる。ここでたとえば観測値 ℓ_1 に対する半径 r の

$$\frac{\partial r}{\partial \ell_1} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{\ell_0 - \ell_2}{\ell_0 - \ell_1} \right)^2 \right) \approx \frac{1}{2} \left(1 - 4 \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right) \quad (9)$$
$$\Delta r \approx \frac{1}{2} \left(1 - 4 \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right) \Delta \ell \quad (10)$$

2.4 手法2

図 7 に提案する手法のための測定装置の設置の概要を示す。回転台を回転させてレーザー変位計と被測定物の表面までの距離を測定する手順は手法 1 と

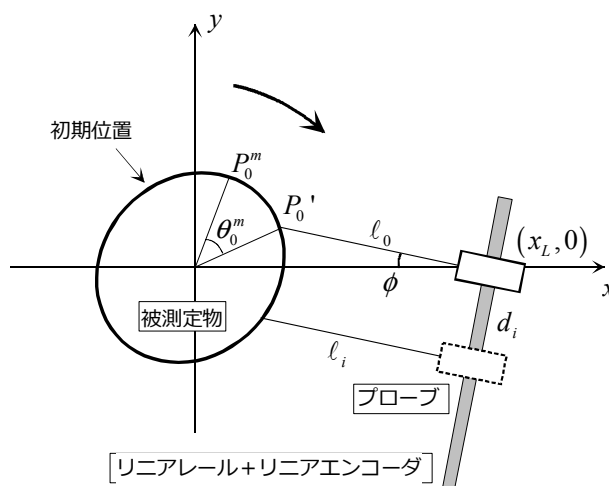


図7 被測定物を固定した測定

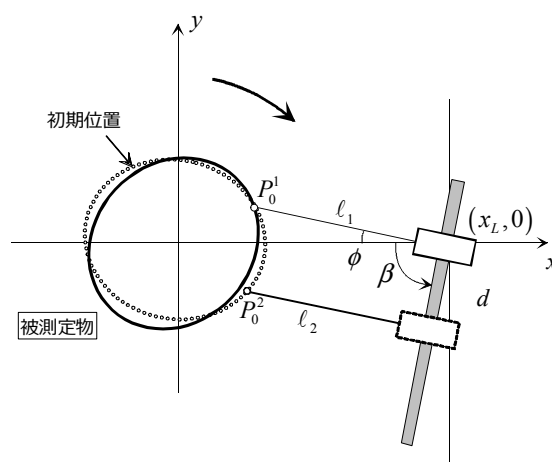


図8 位置関係

$$\cos(\beta + \gamma) = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad , \quad \tan \gamma = \frac{b}{a}$$

$$a = 2(x_L - \ell_2 \cos \phi)d \quad , \quad b = 2\ell_2 d \sin \phi, \quad (11a-e)$$

$$c^2 = \ell_1^2 - (x_l - \ell_2 \cos \phi)^2 - \ell_2^2 \sin^2 \phi - d^2$$

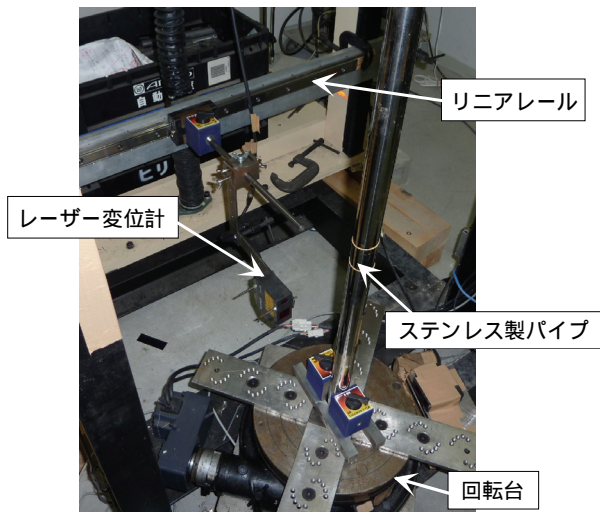


図 9 ステンレス製パイプと実験装置

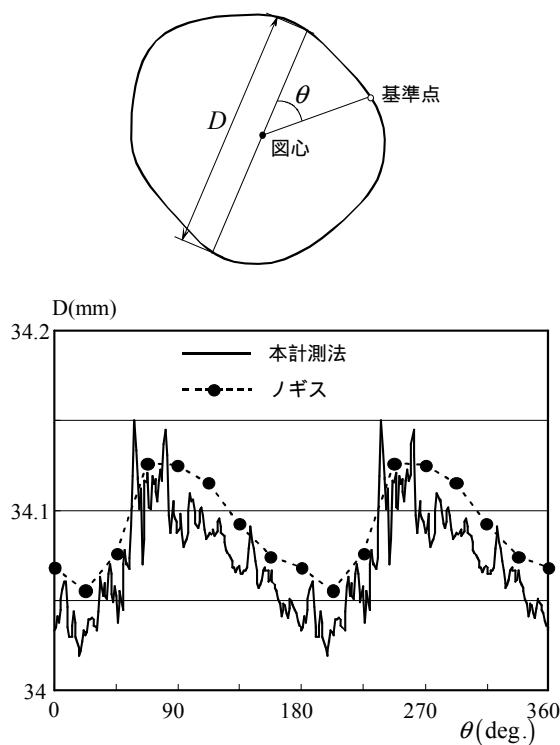
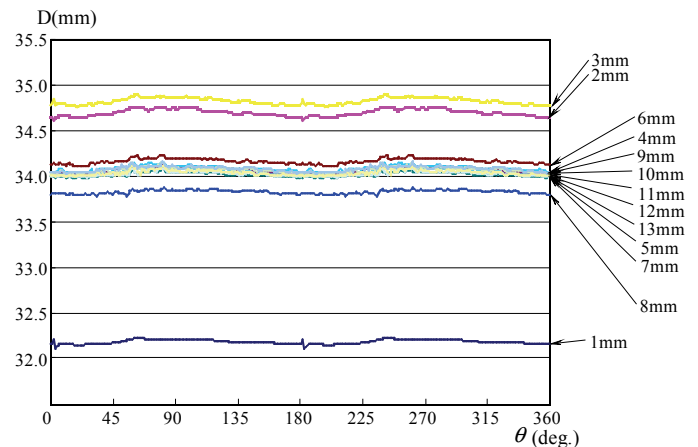


図 10 測定結果(移動距離約 11mm)

したがって決定すべき未知量は結局手法 1 と同様に x_L と ϕ でありこれらを式(5)によって求めれば良いことになる．この方法では同じ回転角に対する観測点はレーザー変位計の位置のよらず同一となるので式(5)の計算に伴う内挿誤差はロータリーエンコーダの測定誤差の範囲内に収まる．また，この手法では被測定物を回転台上で移動させる必要のないように，プローブの測定範囲が同じであれば手法 1 より大きな径の被測定物に対応できる長所がある．

なお，原理上は各測定において測定開始点を一致させる必要はなく移動距離 d や角度 β および各測定



ノギスとの差(mm)

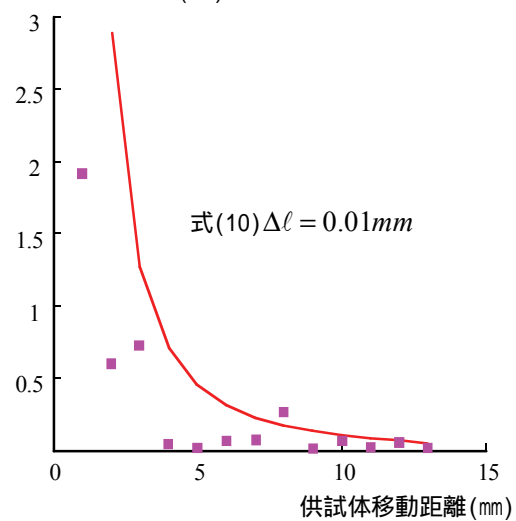


図 12 移動量とノギスとの差

における被測定物の初期位置も未知量として x_L および ϕ と同じように決定することは可能である．しかし，そうするとほぼ円に近い被測定物に対しては収束性がきわめて悪く実際の適用には不向きである．

3. 計測例

3.1 測定条件

前章で示した手法の適用性を実際に検証する．対象としては直径約 34mm のステンレス製のパイプ（図 9）を選んだ．実験装置も同じ図 9 に示す．レーザー変位計はキーエンス社製 LK-80（測定範囲 80 ± 15 mm），ロータリーエンコーダを含む回転制御部はオリエンタルモーター社製 BLFD60A である．計測では回転台の回転速度を約 1 回転 / 分としてサン

プリング周波数 10Hz とした。なお、計測においては各位置でそれぞれ 5 回行い、計測の開始点は各計測ですべて一致させた。

3.2 手法 1 について

計測結果の一例を図 10 に示す。図 10 は横軸を圆心と観測点を結ぶ動径の観測開始点からの回転角を、縦軸はその角度における供試体断面の幅を表している。同じ図にはノギスでの測定結果も示している。計算は被測定物の位置毎の 5 回の計測を組み合わせ 25 通りについて行った。図示した測定結果はこれら 25 通りの計算結果の次式で表される重み付き平均を取ったものである。

$$\bar{x} = \sum_i \frac{x_i}{w_i} / \sum_i \frac{1}{w_i} \quad (12)$$

ここに x_i および w_i は i 回目の計算による収束値とそのときの残差（式(5)）である。最適化のための収束計算は Powell 法にもとづく自作プログラムあるいは Matlab[®] に組み込まれている最適化関数によって行った。

この図から移動距離が約 11mm の場合にはレーザー変位計による測定値はほぼノギスと一致していることがわかる。差は大きくても 0.05mm 程度である。しかし被測定物の移動距離が小さく 3mm 程度のものでは他の測定値と比較して大きな差が生じている。これは式(10)から容易に予想できるものではある。なお、以下ではノギスによる測定値をベンチマークとし便宜的にノギスによる測定値との差を「誤差」と表記する。

次に図 11 および 12 に供試体の移動距離とノギス等との差の関係を示す。なお、移動距離に対して厳密な計測をしていないのでおよその値である。図 12 の誤差の指標としてはノギス測定点における直径の測定値と手法 1 の計測値との差の 2 乗和の平均値の平方根を用いている。図には参考のために式(10)でレーザー変位計による計測誤差を 0.01mm とした場合の予想も示しているが、ほとんどの場合、誤差は予想式を上回ることはない。なお図 10~12 の例は手法 1 の 2 回 1 組の測定のうち一つの計測での供試体の偏心量をほぼ 0 にした場合のものであるが、0 でない偏心量と組み合わせても支配的な要因は最大偏心量ではなく移動量であった。なおロータリーエンコーダの精度の最終結果への影響が問題になるが、実測値にランダムに誤差を付加する手法で数値

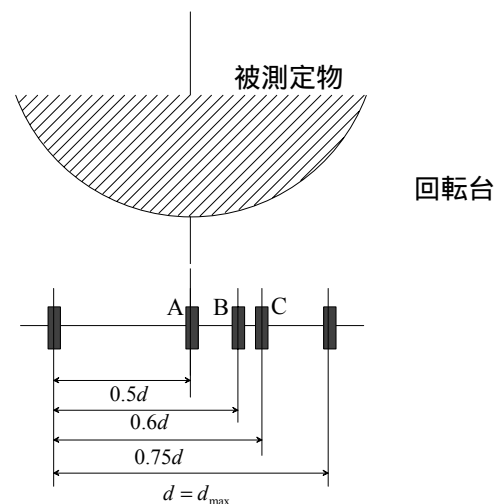


図 13 プローブの位置

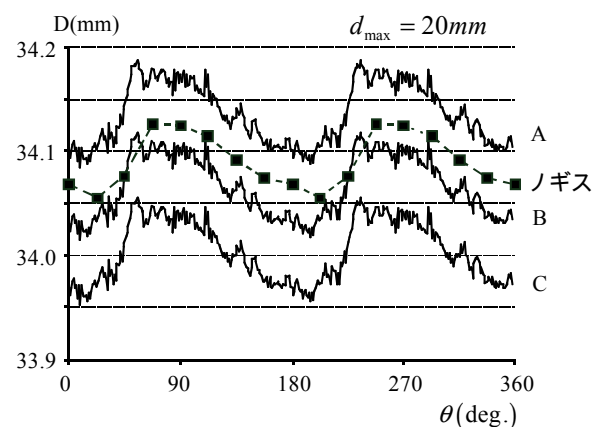


図 14 測定結果 ($d_{\max} = 20\text{mm}$)

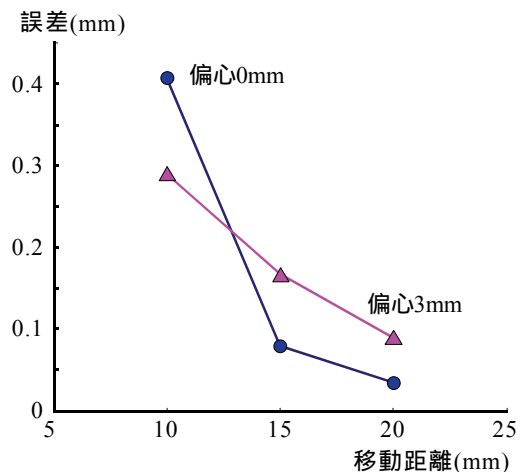


図 15 移動距離の影響

表 1 計測パターン

偏心距離 (mm)	最大移動距離 d_{\max} (mm)
0	10, 15, 20
3	10, 15, 20
6	10, 15
9	10

的に検討したが最終結果に与える影響はほぼレーザー変位計の精度よりも小さく無視できるものであった。

以上から前章で示した測定理論は適切でありかつ十分な移動距離 d さえ確保できればレーザー変位計の精度を生かしながら簡易に絶対寸法と形状を測定できることがわかった。

3.3 手法2について

次にレーザー変位計を移動させる方法で上述の例と同じステンレスパイプを測定した。設定した測定装置ではレーザー変位計をリニアール上に設置し平行移動させることができ、移動距離はリニアールに付随させたりニアエンコーダで測定する(図7)。この測定法では被測定物の回転中心に対する位置、レーザー変位計の測定位置数、レーザー変位計の移動量、移動パターン等が測定精度に影響することが考えられる。そこで表1に示す場合について具体的に検討した。いずれの例でも計算に用いたレーザー変位計測定位置数は3とし、かつどの計測においても被測定物上の測定開始点を一致させた。移動パターンとしては図13に示すように最大移動距離 $d = d_{\max}$ を固定し中間点の位置を変化させた。なお両端の点はレーザー変位計の光軸が回転中心を通るときの位置に対してほぼ対称の位置になるようにしている。

計測結果の一例を図14に示す。これからあきらかなように基本的にはこの手法でも手法1と同等の精度での計測が可能である。計測パターンと誤差との関係は図14ではパターンBおよびAがCに比べて若干小さい。しかしここには示さないが他の計算結果をみるとパターンAとBはほぼ同等であり、Cはノギスの結果と大きくずれることが多いことがわかった。そこでこれ以降はパターンAのみの結果について述べる。図15に見るように誤差は主としてレーザー変位計の最大移動距離 d_{\max} に依存しており、移動距離が大きいほどよい結果が得られている。一方図16にあるように、被測定物の回転中心からの偏心量との関係を見ると誤差は偏心量とも関係があり、最大移動距離が大きくとれない場合には被測定物の回転台上での偏心が大きいに精度がよくなっていることがわかる。しかし絶対的な精度が良いのは、被測定物の偏心量を小さくし、レーザー変位計の最大移動量を大きくとったパターンAまたはBで測定

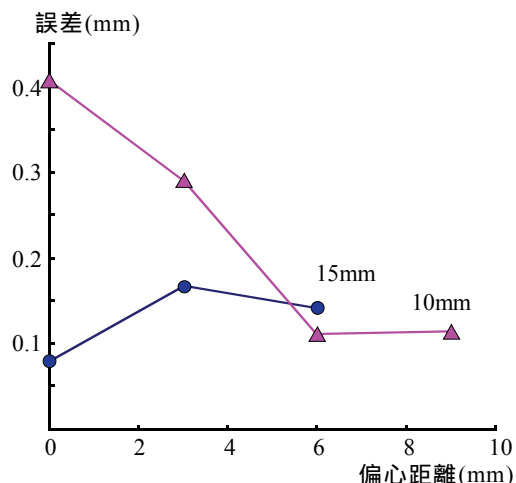


図16 偏心量の影響

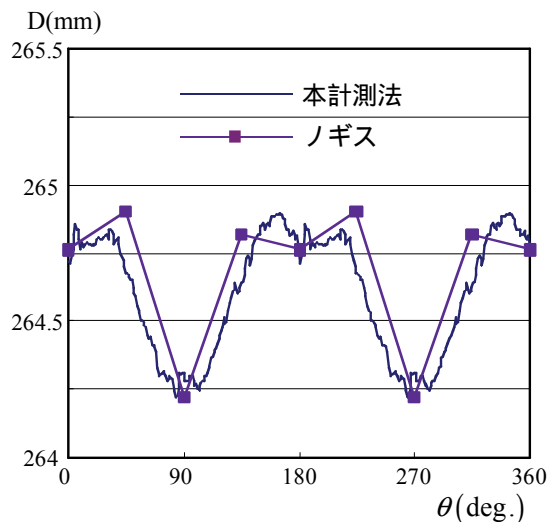


図17 太径鋼管に対する計測例

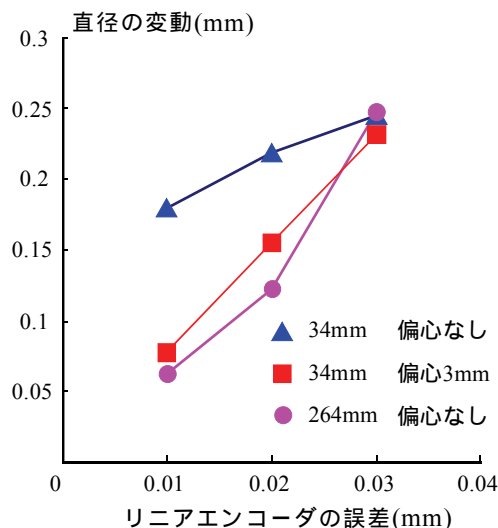


図18 リニアエンコーダの誤差の影響

する場合である。偏心量の少ない設定の方が、被測定物が回転しても被測定物とレーザー変位計間の距離の変化が小さく、レーザー変位計の測定範囲が同じでも最大移動量を大きくとれるので実際の適用上有利である。またパターンA、Bの結果がほとんど

変わらないことはレーザー変位計の位置について、レーザー変位計の中間点位置がほぼ中央にあればよいことになり計測において位置を厳密に管理する必要はなくこれもまた実際の適用上有利である。

測定手法 2 はそもそも径の大きい鋼管への適用を想定しているので、直径約 264mm の鋼管の測定を行った。上述した誤差性状に関する結果をもとに鋼管の図心と回転台の中心をほぼ一致させレーザー変位計の移動は等間隔で最大移動距離 d_{\max} は約 160mm とした。これは使用したレーザー変位計の測定範囲により制限される。測定結果をノギスの測定結果にあわせて図 17 に示す。ノギスとの差は最大で 0.15mm 程度であった。仮にこれを誤差と見なすと同程度の精度を得るためには被測定物の移動距離は 60mm 以上とらなければならず、必要とされる回転台の大きさおよびレーザー変位計の測定範囲を考えると適用は困難である。その意味で手法 2 は実用性の高い方法であるといえる。

手法 2 では測定値がレーザー変位計とロータリーエンコーダの出力だけでなく、レーザー変位計の位置を示すリニアエンコーダのものも含まれる。この影響については数値シミュレーションで考察した。すなわち実測値に対して人為的に誤差を付加し、最終結果に最大でどの程度の差が生じるかを検討した。結果を図 18 に示すが、リニアエンコーダの誤差は被測定物の径が大きくても最終結果に与える影響はあまり変わらない。その意味でも手法 2 は大きい被測定物に適しているといえよう。またある程度偏心のある方がリニアエンコーダの誤差の最終結果への影響が小さいこともわかる。次に、ロータリーエンコーダに含まれる測定誤差が最終結果に与える影響は実測値にランダムに付加し、最終結果に及ぼす影響をみた。測定点が多くランダムな誤差であることから最終結果への変動幅は非常に小さく無視できる物であった。ここでも外径が大きい方が影響は少なかった。

4. まとめ

鋼管状対象物のレーザー変位計を用いた簡易ではあるが高精度の形状および寸法の計測法を提案した。この手法は形状計測においてレーザー変位計の位置や光軸の方向など本来は計測システムが校正された量として持つべき基本パラメータを未知量とす

ることにより使用機器構成を簡易なものにしている。したがって計測データ量が多いが単位となる計測は単純なものであり、またデータ処理もパーソナルコンピュータで十分に扱える程度のものである。また、原理的には選択する未知量は任意なので計測スキームもまた任意に設定できる。ここでは 2 種類の方法について具体的に検討した。

第 1 の方法で原理通りほぼレーザー変位計の精度で鋼管表面の形状を測定することができることを示し、かつその精度特性について検討した。次により太径の鋼管に対応できるように第 2 の方法を示し、第 1 の方法と同様に高い精度での測定を実施することができることを示した。実際には第 2 の方法の方が実用性は高いと思われる。なお、未知量の選択は任意なので他の計測スキームもありうるが、精度特性は一樣ではないので実際の適用にあたっては計測の容易さと精度特性を考慮して決定しなければならない。

謝辞

本研究は科学研究費基盤研究 C「大気環境予測プログラムと連携した鋼橋への付着塩分予測法の開発」（代表：小畑誠）の援助を受けて実施しました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説，鋼橋編，日本道路協会，2002.
- 2) 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，土木学会，2009
- 3) 森猛，橋敦志，野上邦栄，山沢哲也，腐食鋼板の引張・降伏応力評価法の検討：土木学会論文集 A，Vol.64, No.1, pp.38-47,2008.
- 4) 藤井堅，海田辰将，平井勝志，奥村誠：腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性，構造工学論文集，Vol. 48A, pp.1031-1038, 2002.
- 5) 山沢哲也，野上邦栄，園部裕也，片倉健太郎：厳しい塩害腐食環境下にあった鋼圧縮部材の残存耐荷力実験，構造工学論文集，Vol. 55A, pp. 52-60, 2009.
- 6) <http://www.mathworks.co.jp/products/matlab/>

(2009 年 9 月 24 日受付)