

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「オンサイト形状計測機付き長尺鋼管の精密加工装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 5月

委託者 近畿経済産業局

委託先 関西ティー・エル・オー株式会社

# 目次

第1章 研究開発の概要.....	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	1
1-2 研究体制.....	1
1-2-1 研究組織・管理体制.....	1
1-2-2 研究者氏名.....	3
1-3 成果概要.....	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口.....	6
第2章 本論.....	7
2-1 エンドミルが折損しないための高速加工条件の検討（柏木鉄工株式会社）.....	7
2-2 パイプ内における小型三次元形状計測装置の開発.....	10
2-2-1 計測範囲と計測速度の両立.....	10
2-2-2 格子投影機構.....	12
2-2-3 計算部分のハードウェア化.....	14
2-2-4 小型化設計.....	16
2-2-5 計測装置の超小型化.....	18
2-3 内面切削加工装置への実装.....	20
2-3-1 小型計測装置の切削加工装置への実装.....	20
2-3-2 超小型計測装置の内面切削加工装置への実装.....	22
2-4 実装した加工機による加工精度の検証（柏木鉄工株式会社）.....	24
第3章 全体総括.....	27

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1) 研究の目的

原子力や石油プラントなどで使用される種々の材質、径、肉厚の高強度/高精度な長尺シームレスパイプでは安全性を重視され、パイプを供給している川下企業からその品質確保が求められている。とくに傷検査は重要であり、そのために共同研究体の柏木鉄工株式会社は、精密な微細溝を逐一加工したテストパイプを製作供給しているが、加工時間、精度、対象パイプ等に問題がある。本事業では溝形状を計測しながら加工可能な長尺鋼管用精密加工装置を開発し、それらの問題解決を図る。

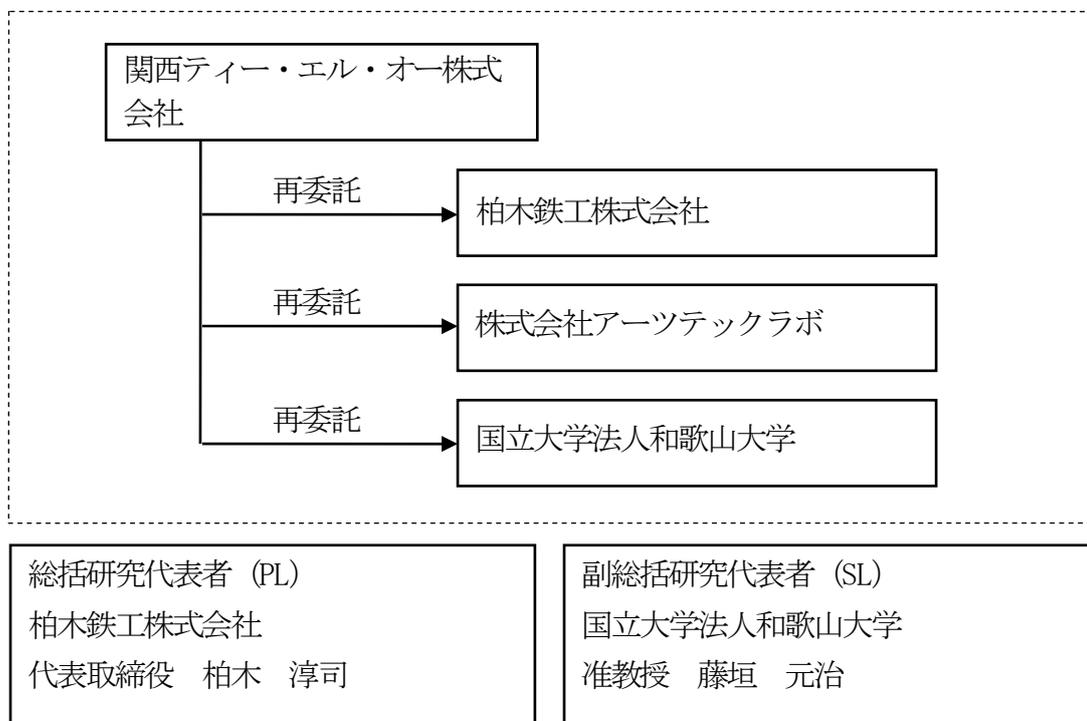
### 2) 研究の概要

原子力や石油プラントなどで使用される400種以上の材質、径、肉厚を持った長尺シームレスパイプでは安全性が重視され、パイプを供給している川下企業からは厳しく品質確保が求められている。とくに傷検査は重要であり、そのために精密な微細溝を加工したテストパイプが必要であるが、加工時間、精度、対象パイプ等に問題がある。本事業では溝形状を計測しながら加工可能な長尺鋼管用精密加工装置を開発し、問題解決を図る。

## 1-2 研究体制

### 1-2-1 研究組織・管理体制

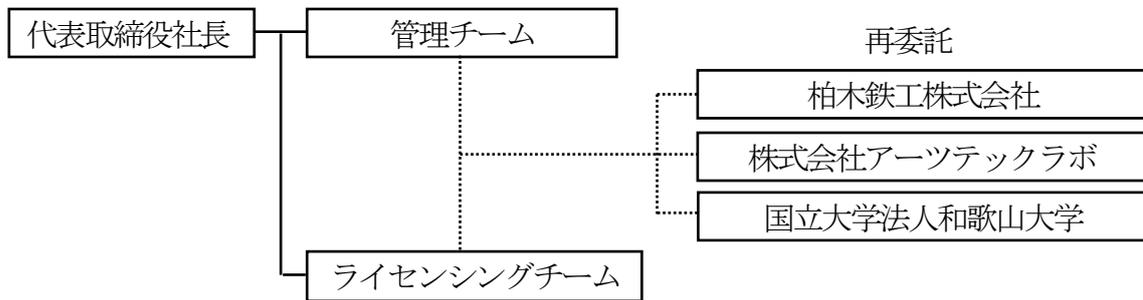
#### (1) 研究組織 (全体)



(2) 管理体制

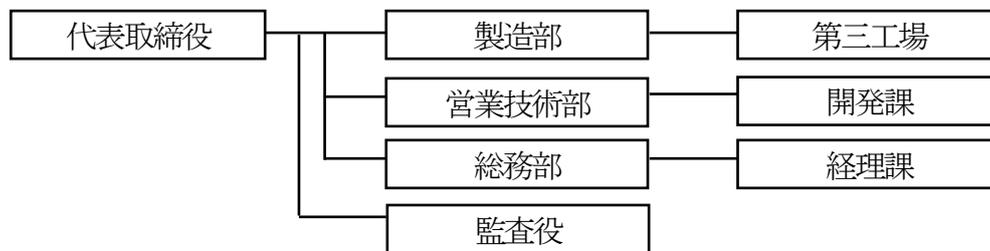
①事業管理者

関西ティー・エル・オー株式会社

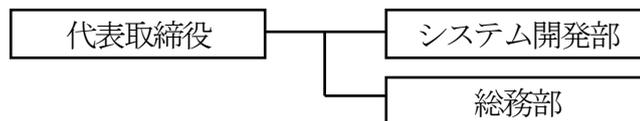


②再委託先

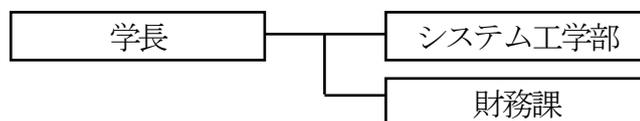
柏木鉄工株式会社



株式会社アーツテックラボ



国立大学法人和歌山大学



1-2-2 研究者氏名

(1) 事業管理者

関西ティー・エル・オー株式会社

氏名	所属・役職
広野 秀之	管理チーム・管理部長
高橋 好範	管理チーム・管理課長
岡田 裕子	管理チーム
山本 裕子	ライセンシングチーム・アソシエイト

(2) 研究者

柏木鉄工株式会社

氏名	所属・役職
柏木 淳司	代表取締役
松下 知之	製造部・製造部長
垣本 卓宏	製造部 第三工場・工場長
桑原 優樹	製造部 第三工場・研究員
浜田 雅三	製造部 第三工場・研究員
周 暁堯	営業技術部 開発課・研究員
有本 幸生	営業技術部 開発課・研究員
西川 英利	営業技術部 開発課・研究員

株式会社アーツテックラボ

氏名	所属・役職
南 潔	代表取締役
宮川 直人	システム開発部・研究員
坂口 弘一	システム開発部・研究員
宮本 瑠美子	システム開発部・主任補
大林 茂之	システム開発部・研究員

国立大学法人和歌山大学

氏名	所属・役職
藤垣 元治	システム工学部・准教授

(3) 経理担当者及び業務管理機関の所属、氏名

(事業管理者)

関西ティール・エル・オー株式会社

(経理担当者) 管理チーム

岡田 裕子

(業務管理者) 管理課長

高橋 好範

(再委託先)

柏木鉄工株式会社

(経理担当者) 監査役

中野 功

(業務管理者) 代表取締役

柏木 淳司

株式会社アーツテックラボ

(経理担当者) 総務部長

南 聖子

(業務管理者) 代表取締役

南 潔

国立大学法人 和歌山大学

(経理担当者) 財務課長

葛西 勇

(業務管理者) システム工学部長

瀧 寛和

(4) その他

アドバイザー

氏名	所属・役職	指導内容
森本 吉春	一般社団法人モアレ研究所・ 代表理事/所長	三次元形状計測法およびその実用化 に関する技術指導

1-3 成果概要

2-1 エンドミルが折損しないための高速加工条件の検討 (柏木鉄工株式会社)

品質工学の直交表を利用した実験を用いて、エンドミルが折損しないための高速加工条件を導いた。直交表を使った実験ではTP(テストピース)加工速度に関係する8つの加工要素を選定し、試験材も炭素鋼とスーパークロム鋼2種類を用意した。それぞれの試験材で加工条件を変更しながら18回の実験を行い、高速加工条件を求めた。直交表を使った実験で求めた高速加工条件は単なるチャンピオンデータではなく、汎用性を持った高速加工条件となる。高速加工条件を使用する事で、加工途中のエンドミル交換回数を減らす事ができ、それによって加工速度、加工精度が上昇する。さらに切削した溝の形状のバラツキが小さくなるので商品としての価値が上がる。加工精度が上昇すれば、エンドミルの破損でパイプを廃棄する事もなくなるので、TP加工のコストダウンにも繋がる。高速加工条件の検証実験をして、その適合性や汎用性を検証する。そこで高速加工条件を用いて様々なパイプを加工して、そのデータを基にTP加工データベースを構築する。加工データベースを柏木鉄工独自のノウハウとしてこれからのTP加工に応用する。さらに、応力計測装置を使用して、エンドミルにかかる負荷を調べ、最適の高速加工条件を導くことができた。

## 2-2 パイプ内における小型三次元形状計測装置の開発（φ200 およびφ70 のパイプ用）（柏木鉄工株式会社、株式会社アーツテックラボ、和歌山大学）

φ200 のパイプ用の小型三次元形状計測装置の開発を行った。カメラとプロジェクターのセットを2組使用し、左右の2方向から計測する方式とした。カメラには小型 CMOS センサを用い、格子投影機構としては、LED 光源を用いてガラス基板上の格子を結像させて投影する方式を用いることとした。投影格子側での位相シフトは行わず、サンプリングモアレ法による位相解析を行うようにした。超小型計測装置は直径 70mm のパイプである計測対象の中に入るため、現在の計測装置をさらに小型化する必要がある。そのために、格子を投影する部分を小型化しなければならない。

格子投影部分を小型化するため、まず、LED 光源、ガラス格子、レンズと基準面を準備した上で、確認実験を行った。約 20mm の範囲内でピッチが 0.25mm くらいの投影格子を得るため、ガラス格子をレンズの左右に置く場合によって、その原理図を書いて、レンズを用いて細かい格子を投影する原理を立てた。

製作した実験装置を用いて、立てた原理の有効性を実験的に実証した。次には、立てた原理を用いて設計した LED 光源、ガラス格子、レンズと基準面とのそれぞれの位置関係で、格子投影部分を小型化する目標を達成することができることが分かった。これによりガラス格子をレンズの右に置く場合でより鮮明な投影格子が得ることができた。

## 2-3 内面切削加工装置への実装（柏木鉄工株式会社）

小型計測装置が完成したので、TP の内面切削加工機に取り付けた。実際取り付けするに当たって様々な問題が生じた。取り付け場所や防塵ガラスが温度差によって曇るなど予想しない問題が生じた。これらの問題を2年度目で解決した。そのノウハウは超小型計測装置の開発に大いに役立った。超小型計測装置を2年度で設計製作して、同じように実装をした。検証実験では、切削時の切り粉によるノイズや投影機構の性能などさまざまな問題が生じた。その都度プロジェクトメンバーと相談し合って、問題を一つずつ解決した。改良した超小型計測装置を再度実装して、精度検証などの検証実験を行った。

## 2-4 実装した加工機による加工精度の検証（柏木鉄工株式会社）

超小型計測装置を実装して、計測しながら溝加工を行った。当初、溝の形状計測ができなかった。その原因は光源 LED の光量が足りないと分かった。それから、超小型計測装置を改良して、新しい光源に変更した。改良した超小型計測装置を使用して、再度計測精度の検証をした。その結果：計測誤差は 0.12mm～0.008mm とバラツキがあった。その原因を探求して、計測用のソフトウェアと計測方法を改良した。改良した内容は計測エリア内の溝が画像に対して垂直であるように画像を回転させることである。さらに、切り粉などによるノイズの原因を集塵機で除去し、さらに画像処理で撮影画像から除去した。以上の改良を含めて、再度実験を行った結果、チャンピンデータではあるものの、計測誤差は 0.012mm～0.005mm までとサポイン開始当初の計測精度目標である 0.02mm 以下をクリアできた。今後はさらに計測精度を上げることを目標にして、計測装置としての完成度を高めていく。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

関西ティー・エル・オー株式会社  
管理課長 高橋 好範

〒600-8216  
京都市下京区西洞院通塩小路下がる東塩小路町939番地  
キャンパスプラザ京都 6F

Tel:075-353-5890

Fax:075-353-5891

E-mail: takahashi@kansai-tlo.co.jp

## 第2章 本論

### 2-1 エンドミルが折損しないための高速加工条件の検討 (柏木鉄工株式会社)

エンドミルが折損しない高速加工条件の検討は今回のプロジェクトにおいて重要な項目の一つである。TP加工にはエンドミルを使用する必要がある。図1にその写イメージ図を示す。エンドミルが折損すると交換時間がかかるだけでなく、溝の精度にも影響する。最悪の場合ワーク材を廃棄して最初から加工し直すこともある。そこで検討において品質工学の直交表を利用して実験する事に決定した。実際に直交表を使用して、実験を行った。その実験結果と考察を以下に示す。

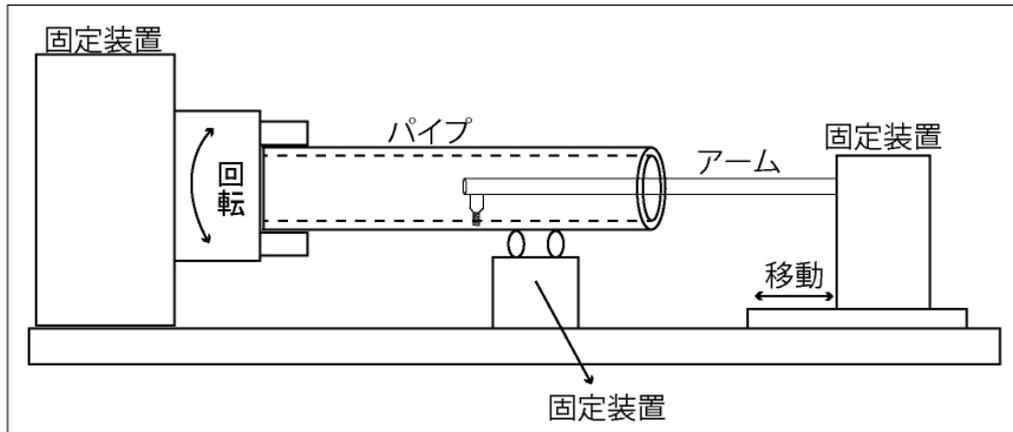
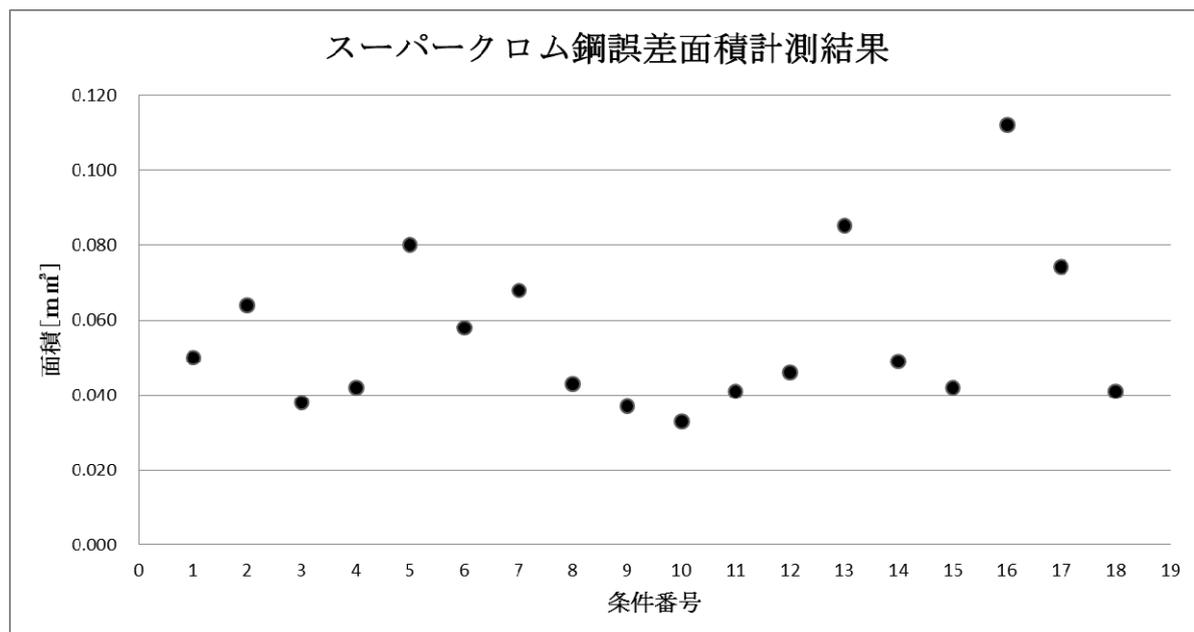
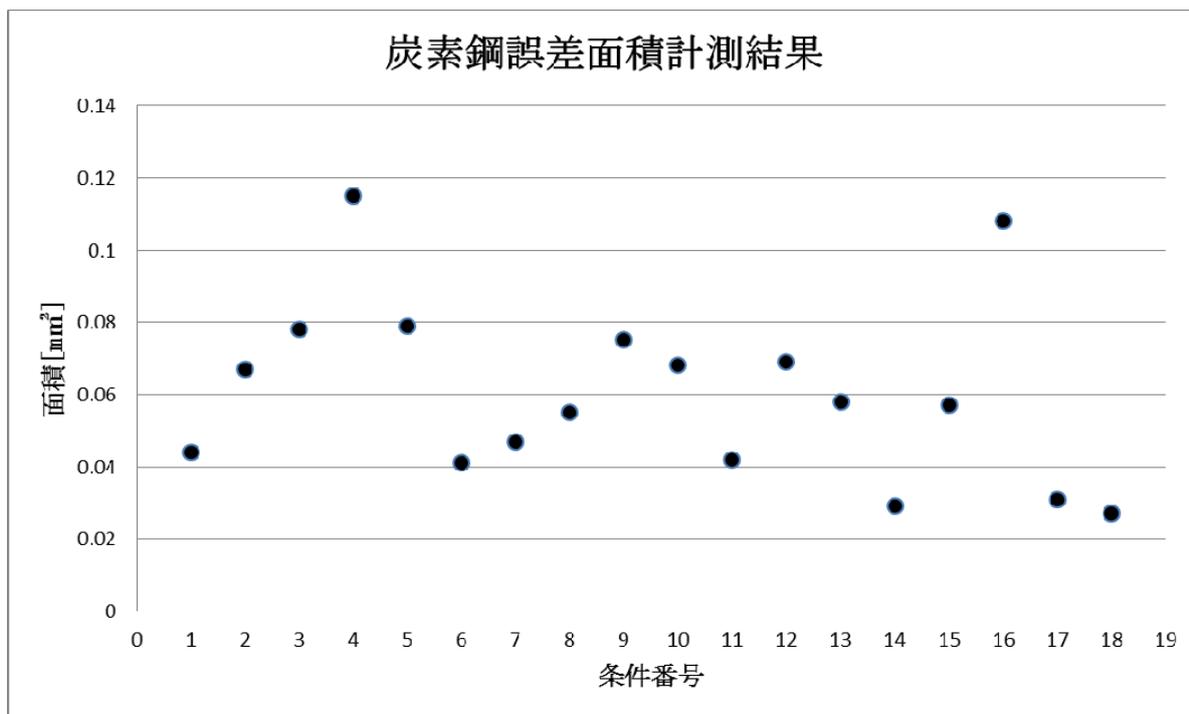


図1 テストピース加工装置イメージ図



(a)直交表の実験結果(スーパークロム鋼の場合)



(b)直交表の実験結果(炭素鋼の場合)

図2 直交表の実験結果

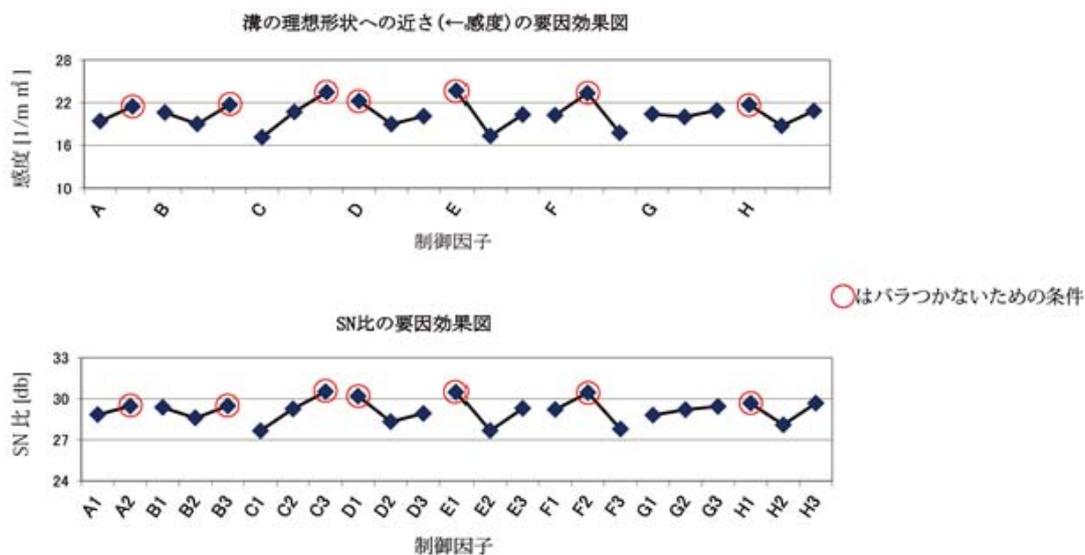


図3 直交表の実験結果

考察：

実際 TP 加工をするとき、工場の温度やエンドミルの温度を一定に管理するのは難しいので、今回の実験では刃物の環境温度を一定とした。温度による影響はないはずだが、実験の結果、刃物の環境温度の変化があった。その変化を実験の誤差と判断する。(データ G1, G2, G3 より)

得られた最適条件と現状の条件を比較すると感度の利得(推定値)、溝形状が 2.9 倍精度良くなる見込み。SN 比の利得(推定値)10.1db , 標準偏差にすると約 1/3 でバラツキが約 1/3 になると予想される。さらに加工速度も 5 倍上昇する見込みである。これはあくまで直交表を用いた小数の実験結果なので、実際の加工による確認実験の実施が必要である。

2年目は確認実験を実施して目標数字と実際加工の差を調べる。さらに高速加工条件の汎用性も確かめる必要があるため、ワークの材質の変更や溝のサイズを変更するなど加工条件を変更して確認実験をする必要がある。

最適高速加工条件で加工するとき、機械やエンドミルにかかる負担を調べる為に応力計測装置を使用して、実際にかかる応力を計測した。

振動数を計測した結果高速加工条件のほうが従来の加工方法と比べ、振動のピークが小さくなっていることがわかった。さらに通常の加工条件のほうが同じ周波数でピークが発生しているため、共振していることがわかる。最適条件では、同じ周波数でピークが出ず、共振していないことがわかる。実際の計測結果から判断しでも、最適加工条件で加工したほうは誤差が少ないのはわかっているので、条件1の最適加工条件がTP加工に適していることになる。

表1 最適加工条件と現在の加工条件

潤滑種類	送り速度	切り込み速度	回転数	潤滑剤の使用量	切り込み量	エア掃除
潤滑水	15mm/min	0.05mm/min	6000rpm	0.25cc	0.2mm	1工程に1回
潤滑油	15mm/min	0.01mm/min	5000rpm	0.5cc	0.1mm	1工程に1回

## 2-2 パイプ内における小型三次元形状計測装置の開発

### 2-2-1 計測範囲と計測速度の両立

サンプリングモアレ法の計算時間の短縮化 (パソコンによる解析でFPGA 不使用)

線形補間のテーブル化と三角関数のテーブル化を行い、計算の高速化を行うアルゴリズムについて検討した。

以下に確認実験を示す。周期が8~15画素の二次元の余弦波格子画像を作成し、線形補間のテーブル化と三角関数のテーブル化を行わない従来の手法とテーブル化を用いた提案手法との計算時間の比較実験を行った。格子画像のサイズは、1024×768 (pixel) である。実験条件を表1に示す。解析は横方向のみである。

実験結果を表2に示す。実験結果から、従来手法に比べ、テーブルを用いた場合、約65%の時間短縮が実現できた。この手法はFPGA を使う場合でも適用が可能である。

表2 実験条件

格子のピッチ	8~15 (pixel)
格子の波形	余弦波 二次元格子
間引き間隔	8~15 (pixel)
画像サイズ	1024×768 (pixel)

表3 実験結果

周期	処理時間 (ms)		(提案手法)/(従来手法)
	従来手法	提案手法	
8	2036	594	0.292
9	1964	688	0.350
10	2192	735	0.335
11	2224	781	0.351
12	2349	818	0.348
13	2526	870	0.344
14	2927	901	0.308
15	3292	953	0.290

サンプリングモアレ法の計算時間の短縮化 (FPGA 使用)

既存のFPGA 搭載のサンプリングモアレカメラをEpson 製PC に接続し、計測時間を求めた。実験の結果、解析領域を1280 x 1024画素とした場合で7 fps, 320 x 256画素で28 fps, 128x128画素で71 fpsであった。前期のFPGA を使用しない場合と比較して、ほぼ2倍から3倍程度の解析速度となった。

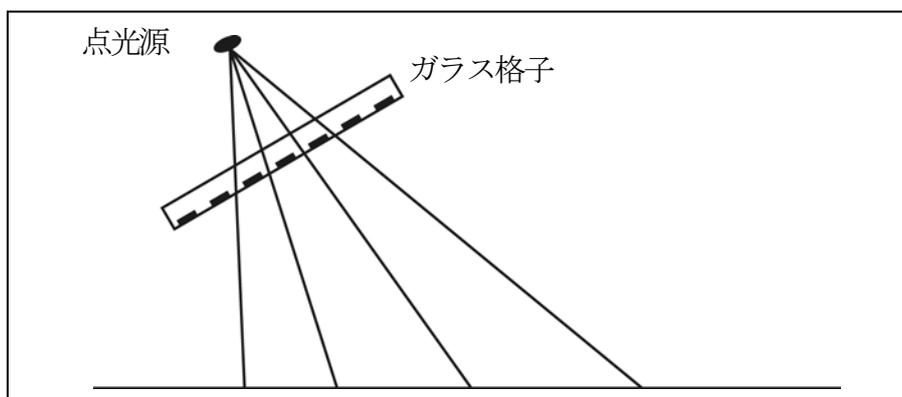
なお、この処理時間は、サンプリングモアレ法による位相解析部分であり、全空間テーブル化手法による座標算出時間は含まない。それを加えると、FPGA 利用の方が有利であると言える。

### 点光源格子投影法

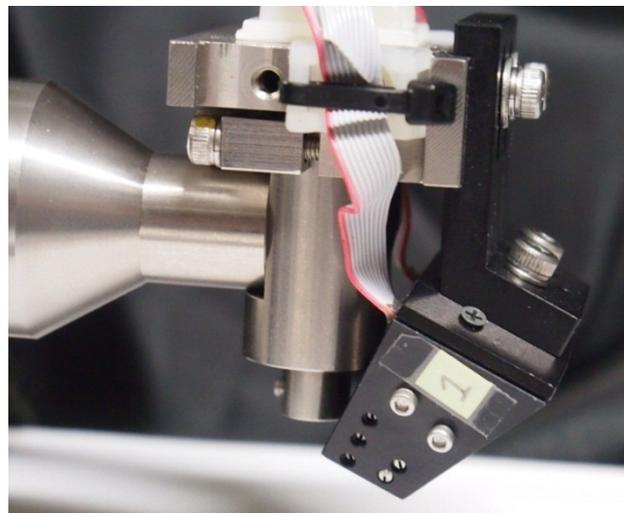
装置を小型化するための一番重要な問題点が格子の投影機構の小型化である。従来手法では一般的に液晶プロジェクターやDLP プロジェクターを利用し格子投影を行う。また、格子ガラスと結像レンズにより格子投影を行う手法の研究もされている。しかし、市販されて

いるプロジェクターや結像レンズによる格子投影では、大きさの問題から内径が 70mm のパイプに適応することが困難である。また本装置は斜めから格子を投影するため、格子投影すると部分的にピントが合わない領域が発生することから本装置に適用することができない。

従来手法の問題点を解決する手法として、本装置は点光源格子投影方式を採用する。これは、光源が格子のピッチに比べて十分小さいと、図 4(a)に示すように格子の影が投影できることを利用した格子投影手法である。この方式は、レンズによって結像させる必要はない。影の投影のため、ガラス格子からの距離に関わらず格子が投影できる。すなわち、図 4 に示すように斜めからの投影であっても格子を投影することができる。さらに光路中にレンズを設置することで、容易に投影される格子のピッチを変えることができる。投影格子のピッチの目標は、前述のように計測対象上で 1mm 以下である。本研究では、この手法を利用し、前述の形状計測ヘッドに求められる条件を満たす形状計測ヘッドを試作した。形状計測ヘッドの写真は図 4(b)にて示す。



(a)点光源格子投影の模式図



(b)形状計測ヘッドの写真

図 4 点光源格子投影の模式図と形状計測ヘッドの写真

### 2-2-2 格子投影機構

点光源投影手法に対して、レンズを用いることで短い距離で格子のピッチを縮小して投影することで、目標とするピッチの格子投影を小型の形状計測ヘッドで行えるようにする。本研究では、用いるレンズの焦点距離と光源やレンズ、格子の位置から投影される格子のピッチを求める計算手法を構築した。図 5 にレンズを用いた格子のピッチ変更の原理図を示す。

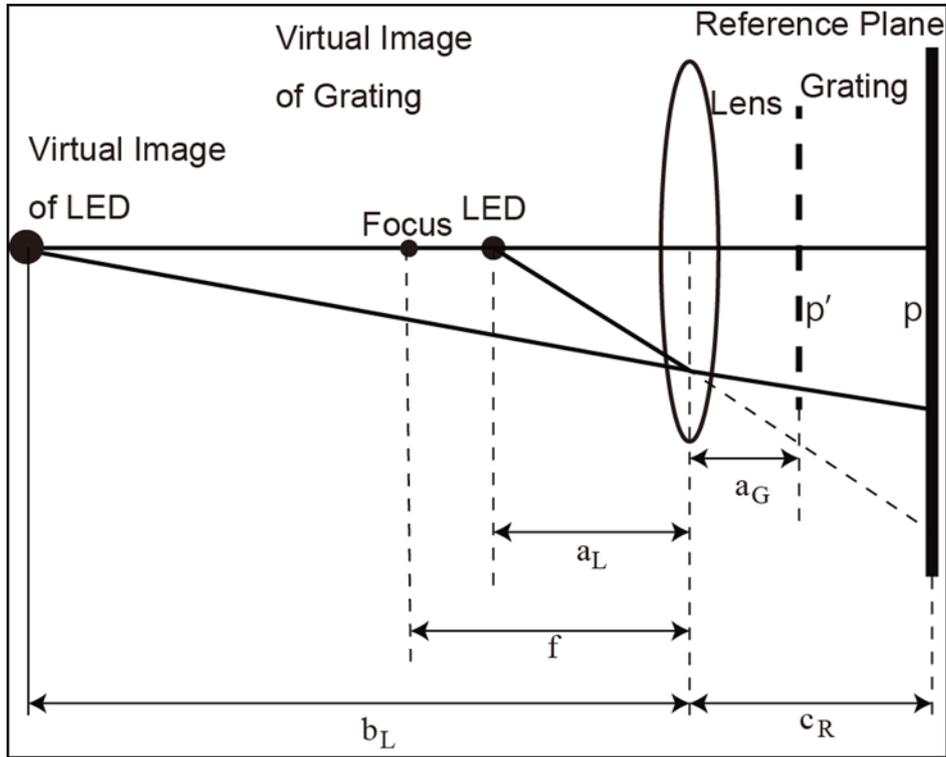


図 5 レンズを用いた格子のピッチ変更の原理図

実験条件：

レンズの焦点距離：	$f=40\text{mm}$
レンズと LED の距離：	$a_L=30\text{mm}$
レンズとガラス格子の距離：	$a_G=10\text{mm}$
レンズと基準面の距離：	$c_R=20\text{mm}$
ガラス格子のピッチ：	$p'=0.2\text{mm}$

以上の実験条件から得られた投影格子のピッチは  $p=0.22\text{mm}$  となった。

図 6 に原理の実証実験の様子を示す。レンズと LED、レンズとガラス格子、レンズと基準面、それぞれの距離は実験条件の位置に設置した。図 7 には投影した格子の様子を示す。図 8 は投影した格子部分の拡大図である。投影した格子のピッチを調べるため、定規の目盛りを利用する。図 8 の中に示しているように赤い線の間隔は  $15\text{mm}$  であり、赤い線の中に投影格子が 68 本入っていることから、投影格子のピッチは： $15/68=0.22\text{mm}$  となった。実験結果からみると、理論値と実験から得られた値の差が  $0.00\text{mm}$  である。

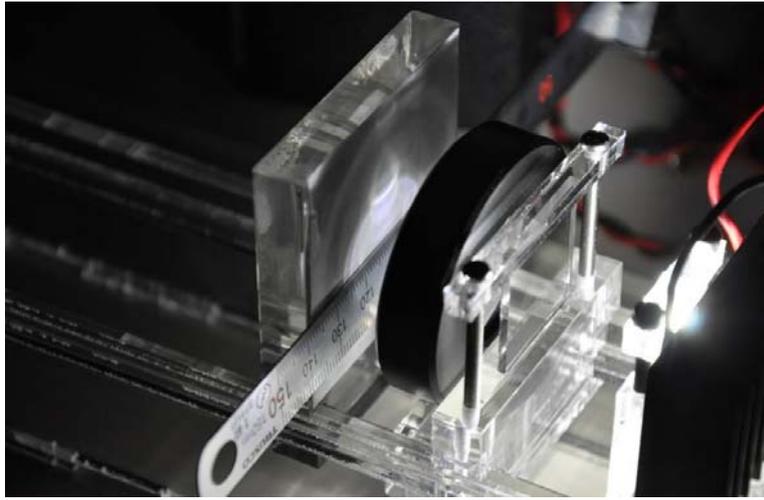


図6 実験の様子



図7 投影した格子の様子



図8 投影した格子部分の拡大図

### 2-2-3 計算部分のハードウェア化

図9に前回(2年度目)の RBF(FPGA 設定ファイル)の模式図を示す。サンプリング間引数による RBF の選択しかできなかった。予め、間引数を定数として、間引数の種類分、RBF を作成しておいて、間引数が変わった場合は、再度 RBF を設定し直すことで、間引数の変化に対応していた。

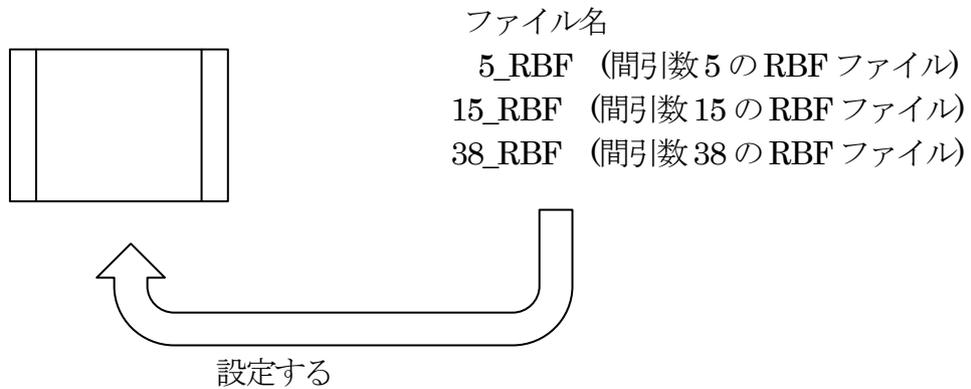


図9 前回のRBF

#### ○Ver4.0(今回)

図10には今回(3年度目)に改良した RBF の模式図を示す。3年度目にはサンプリング間引数をパラメータ化した。これによって、RBF の作成時間の短縮、及びデバッグのし易さ、パラメータ化による動的対応をできるようにした。

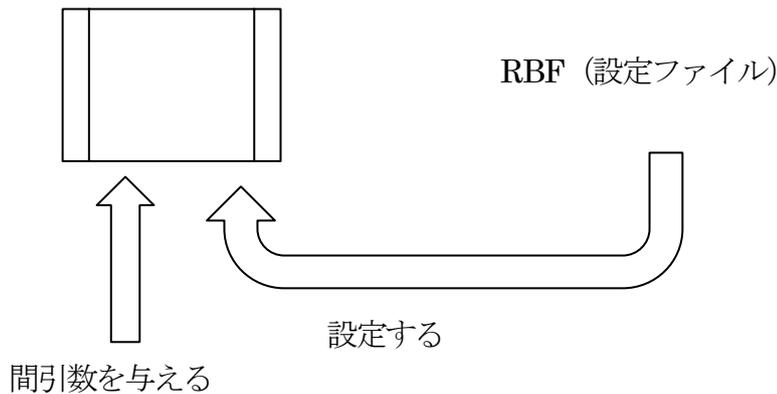


図10 今回改良したRBF

次にサンプル画像(図④ 400×400ピルセル)を間引数83で実行した速度比較を行った。表4にCPUによる実行時間を示し、表5にFPGAによる実行時間を示す。これより分かるようにFPGAを導入することで計測時間は約15倍のスピード化を達成した。

表4 CPUによる実行時間(msec)

回数	実行時間	読込時間	書込時間	計算時間
1	83.261	-	-	-
2	83.512	-	-	-
3	82.107	-	-	-
4	82.026	-	-	-
5	82.204	-	-	-
6	82.184	-	-	-
7	82.042	-	-	-
8	81.998	-	-	-
9	82.078	-	-	-
10	82.044	-	-	-
11	82.058	-	-	-
12	82.074	-	-	-
13	82.020	-	-	-
14	82.568	-	-	-
15	82.431	-	-	-
16	82.359	-	-	-
17	82.444	-	-	-
18	82.363	-	-	-
19	81.994	-	-	-
20	82.061	-	-	-
平均	82.288			

表5 FPGAによる実行時間(msec)

回数	実行時間	読込時間	書込時間	計算時間
1	4.951	0.653	0.493	3.804
2	5.855	1.570	0.482	3.803
3	5.209	0.916	0.488	3.805
4	5.288	0.981	0.504	3.803
5	5.122	0.798	0.521	3.804
6	5.144	0.843	0.497	3.805
7	5.175	0.851	0.521	3.804
8	4.991	0.670	0.516	3.805
9	5.265	0.963	0.498	3.804
10	5.267	0.962	0.501	3.804
11	5.207	0.866	0.538	3.804
12	5.219	0.915	0.500	3.804
13	5.229	0.935	0.490	3.804
14	5.341	1.052	0.486	3.803
15	5.147	0.836	0.507	3.804
16	5.178	0.889	0.485	3.805
17	5.294	1.006	0.483	3.805
18	5.199	0.897	0.499	3.803
19	5.186	0.904	0.479	3.804
20	5.319	1.028	0.488	3.803
平均	5.229	0.927	0.499	3.804

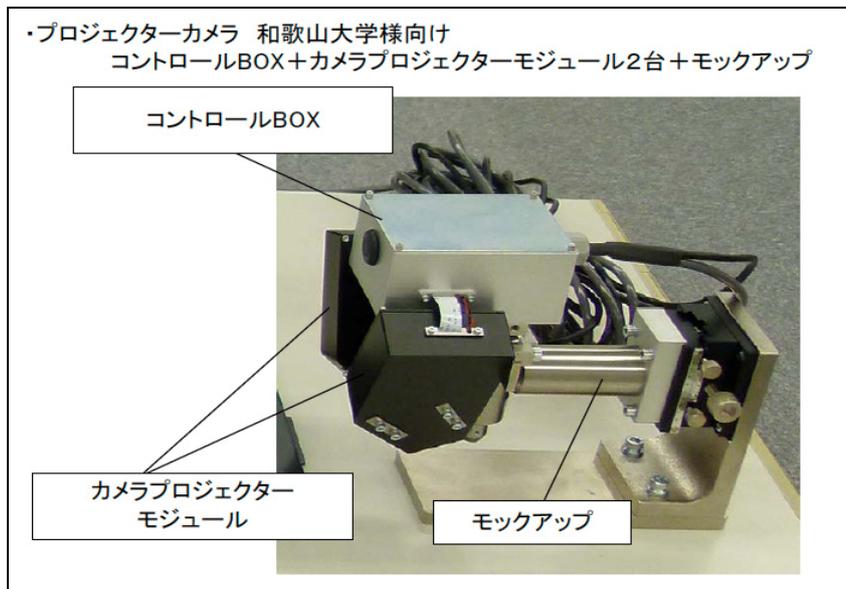
- ※ 読込時間=FPGAにカメラ画像を転送する時間  
 書込時間=FPGAから結果情報を転送する時間  
 計算時間=FPGAの内部計算時間

#### 2-2-4 小型化設計

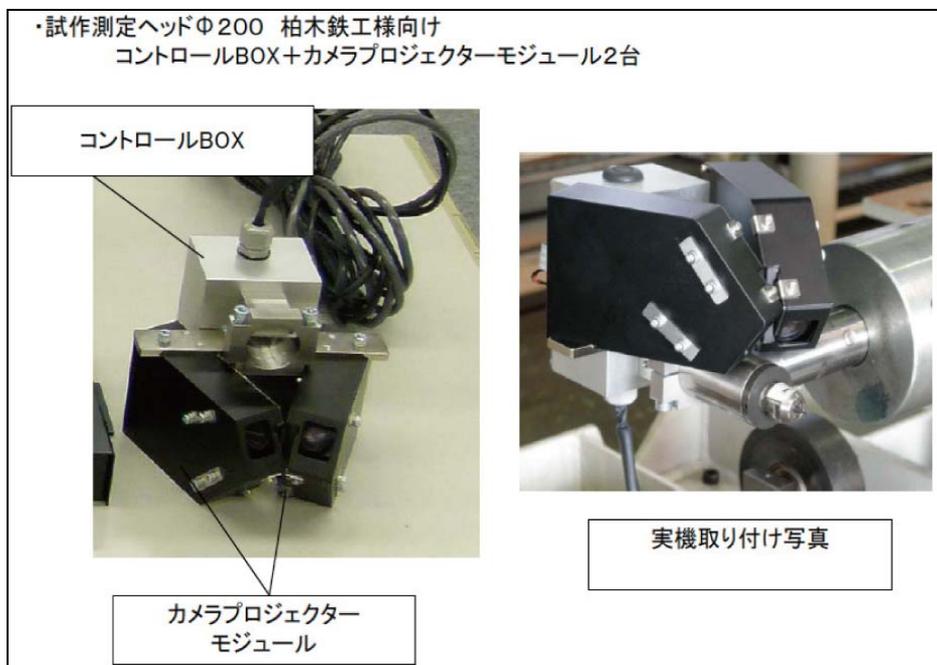
φ200のパイプ用の小型三次元形状計測装置の開発を行った。カメラとプロジェクターのセットを2組使用し、左右の2方向から計測する方式とした。カメラには小型CMOSセンサを用い、格子投影機構としては、LED光源を用いてガラス基板上の格子を結像させて投影する方式を用いることとした。投影格子側での位相シフトは行わず、サンプリングモアレ法による位相解析を行うようにした。

#### 装置写真

計測装置の写真を図11(a)と図11(b)に示す。その撮影画像を図12(a)と図12(b)に示す。



(a)計測装置の写真

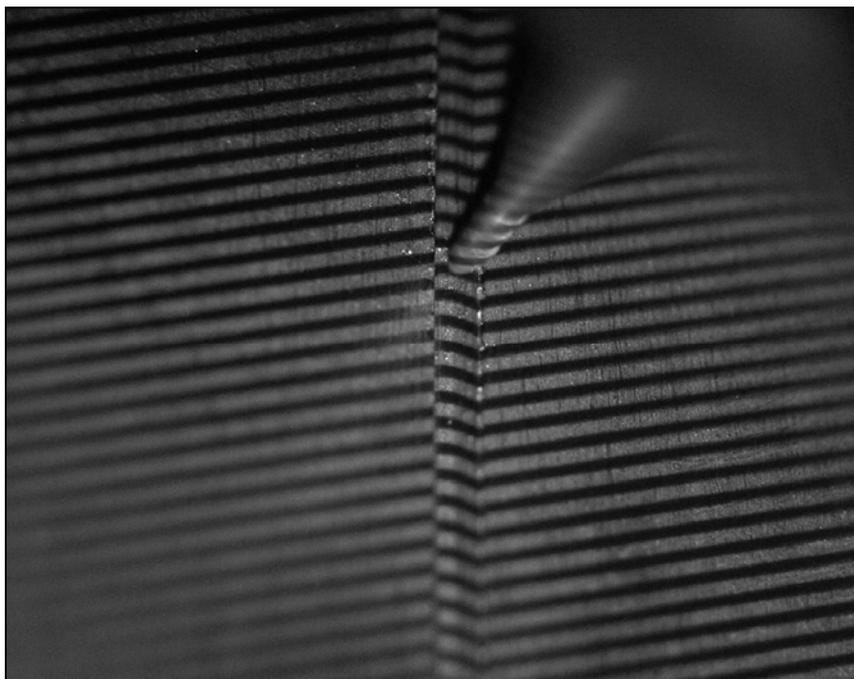


(b)計測装置の写真2

図11 小型計測装置の写真



(a)小型計測装置のカメラ1の撮影画像



(b)小型計測装置のカメラ2の撮影画像

図12 小型計測装置の撮影画像

### 2-2-5 計測装置の超小型化

形状計測装置(以下,  $\phi 70$  用と記載)と格子投影状態での撮影を行った. 図 13 に超小型計測装置の写真を示す. そのサイズの比較を図 14 に示す. 2-2-2 格子投影機構, 点光源投影手法により, 計測装置本体を大幅に小さくすることができた.

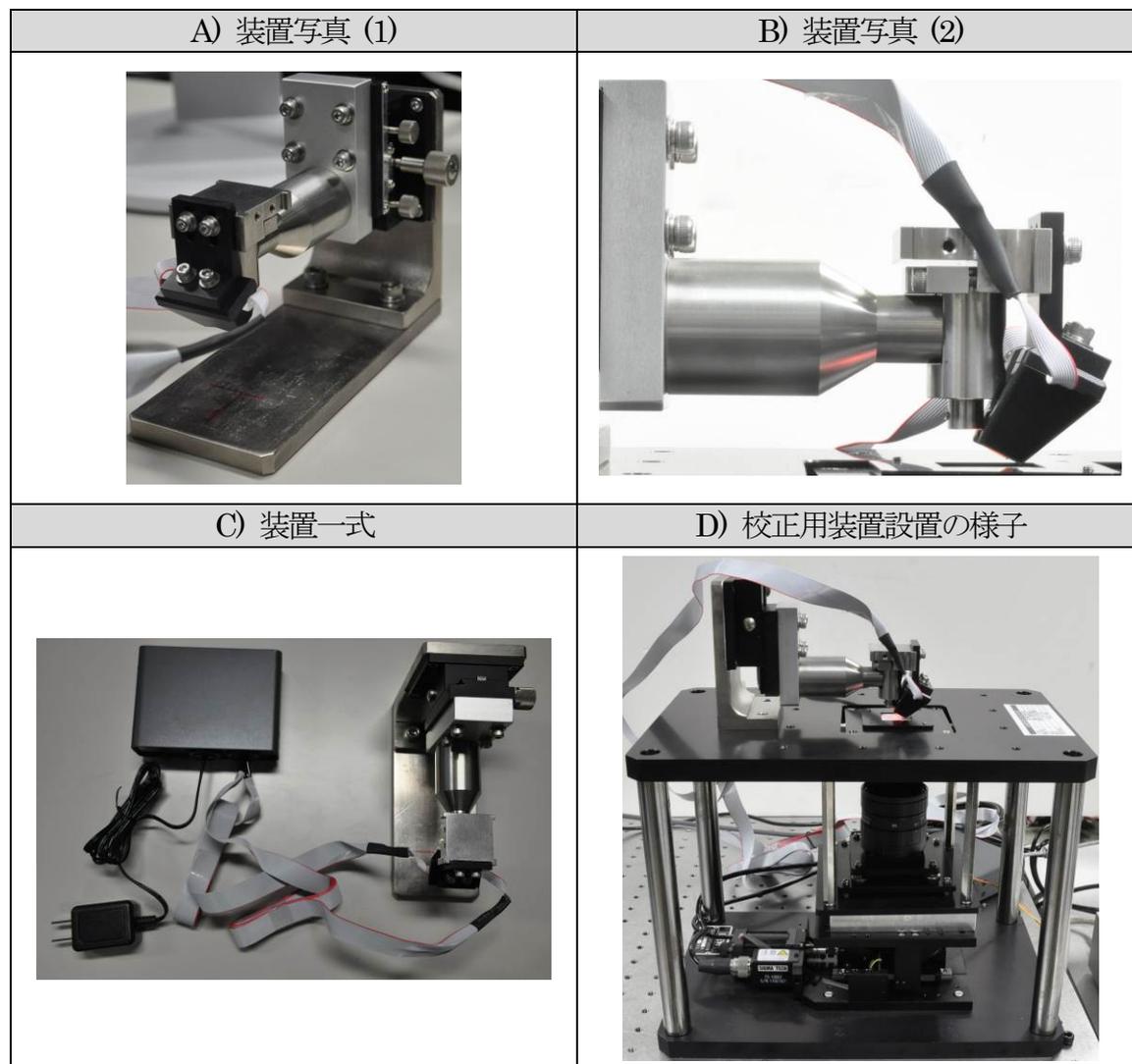


図 13 超小型計測装置の写真

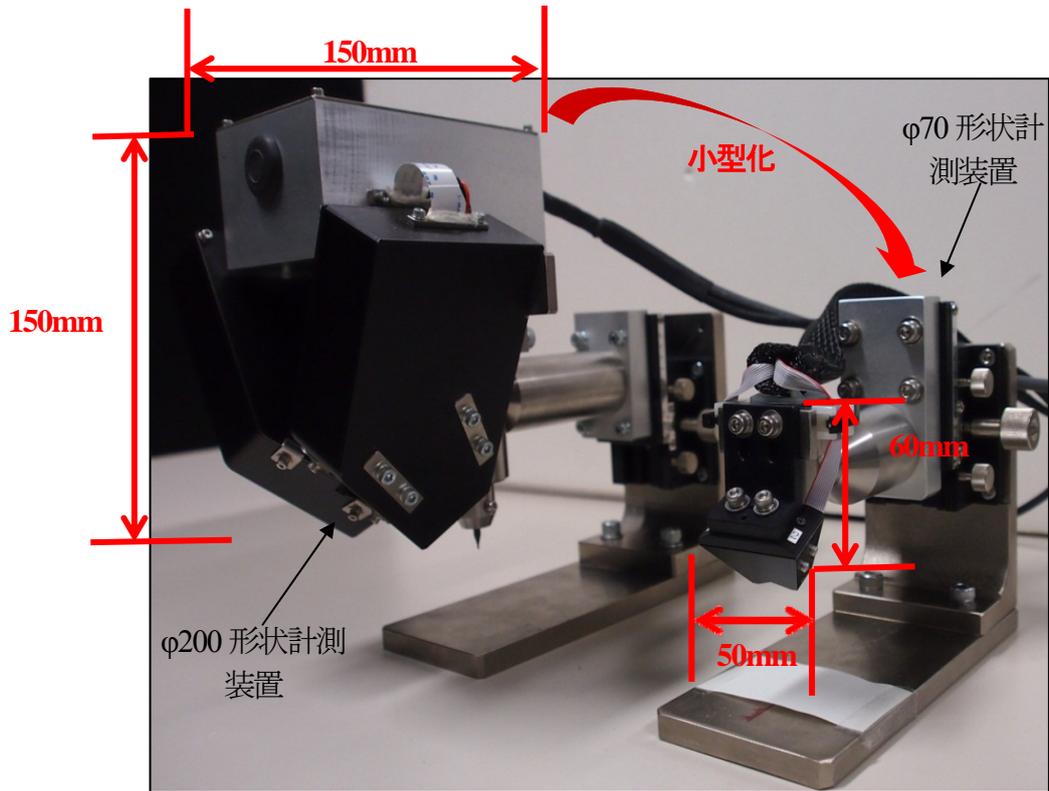


図 14 形状計測装置のサイズの比較

形状計測ヘッドのカメラ1の投影した格子が垂直なるように固定し、基準面である拡散シートに投影した格子のピッチを調べる。図 15 にはカメラ1の方に付けているガラス格子から基準面までの距離を測る時の画像である。ここでは、レンズを用いた縮小投影の計算方法を利用する。今回の実験条件は設計した通りである。

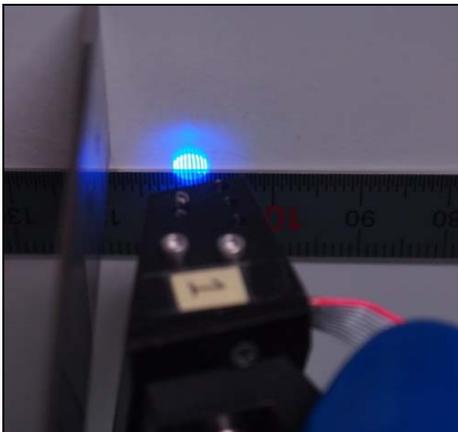


図 15 格子投影の様子

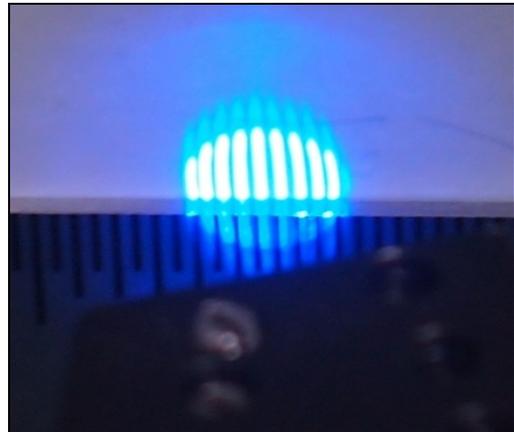
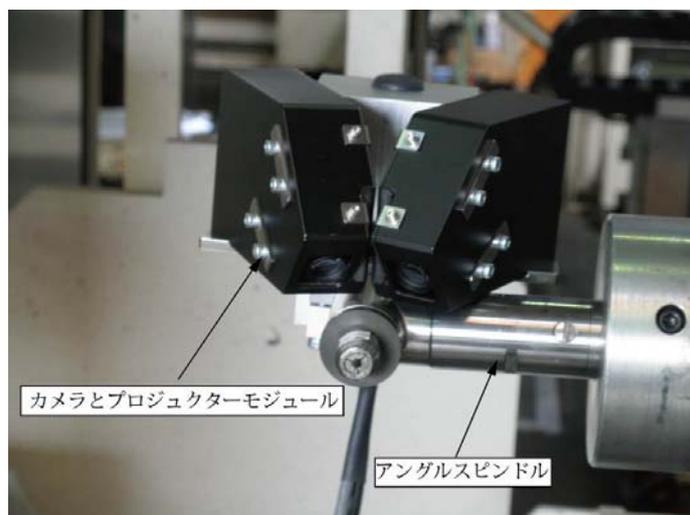


図 16 投影した格子部分の拡大図

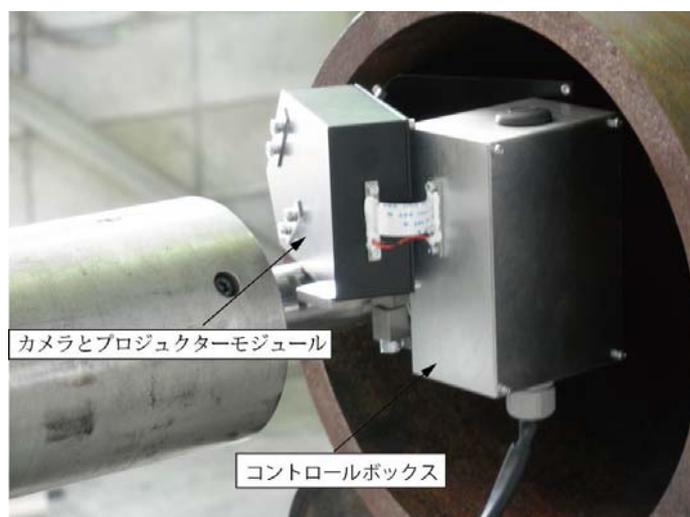
## 2-3 内面切削加工装置への実装

### 2-3-1 小型計測装置の切削加工装置への実装

小型計測装置を機械に取り付けたので、そのときの様子を図17(a), 図18(b)に示す。図18に制御部分の写真を示す。図19(a)と図19(b)に装置の撮影画像を示す。試作機でテストした結果、計測範囲が小さいと温度差によって防塵ガラスが曇るなど、様々な問題があることが分かった。これらの問題を解決して、その解決法を超小型計測装置の開発に応用することができた。



(a)計測装置正面の写真



(b)計測装置背面の写真

図17 小型計測装置の写真

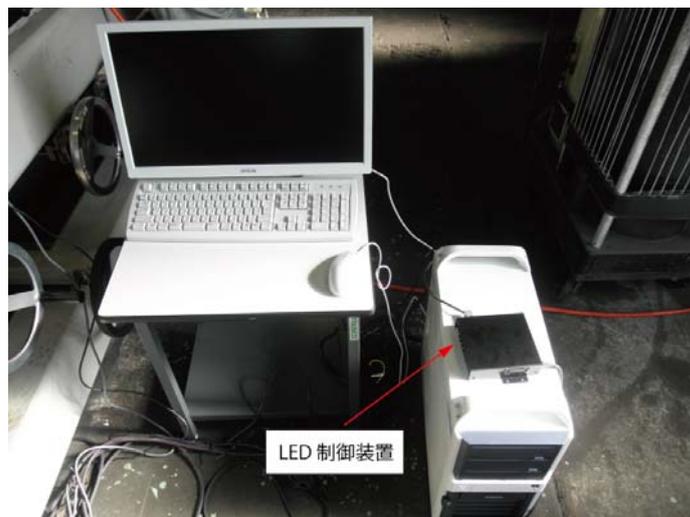
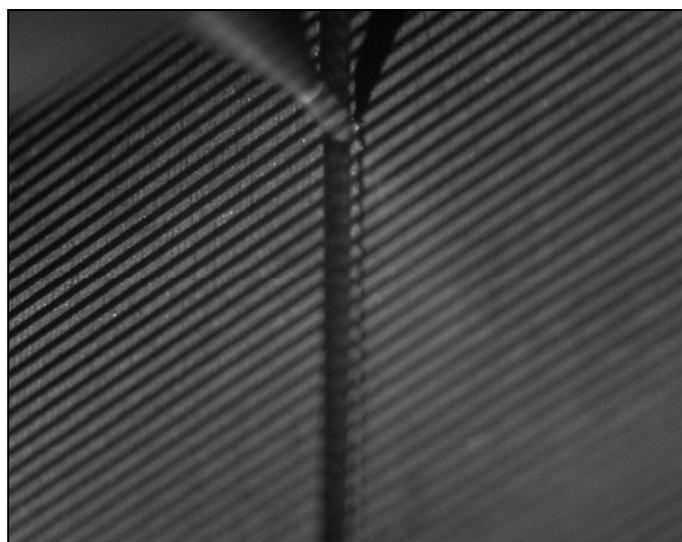
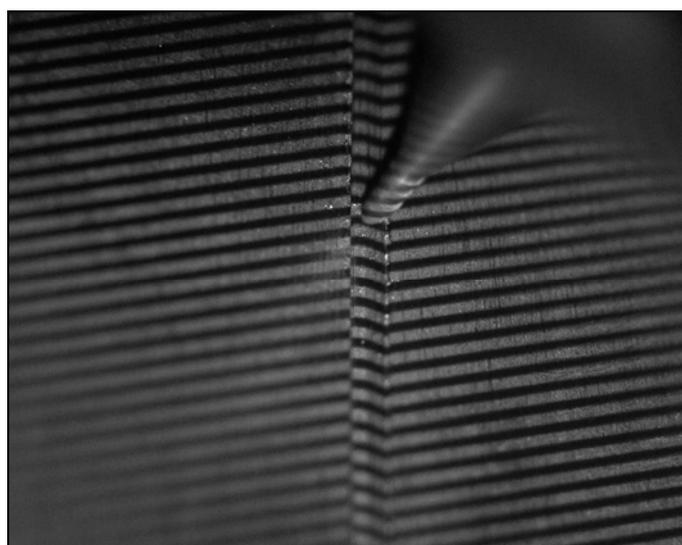


図 18 制御部分の写真



(a)小型計測装置のカメラ 1 の撮影画像



(b)小型計測装置のカメラ 2 の撮影画像

図 19 小型計測装置の撮影画像

### 2-3-2 超小型計測装置の内面切削加工装置への実装

超小型計測装置は設計通りに計測できるかを検証するため、実際に内径φ70のパイプを使用して、ハードウェアの設計や計測カメラの性能テストを行った。図20に実装時に使用したパイプを示す。図21、図22に超小型計測装置の装入の様子を示す。

試作段階では、計測装置の投影機構の光量が足りなかったため、投影格子がほとんど写らなかった。この状態では形状計測ができないので、最終年度では、投影機構の改良を行った。まず、LEDを交換したことで、光源の光量をアップさせた。さらに、投影機構の見直しや新しいスリットに変更したことで、光量が大幅にアップすることができた。この改良により、投影格子が試作時よりはっきり写るようになった。TP加工機に実装して、溝の形状計測ができるようになった。計測ソフトも試作機段階と比べると大幅に改良した。録画機能の追加や計測精度を上げるための機能を幾つ追加した。最終版では計測データの録画からノイズ除去などの処理をして、3D表示や断面グラフ、溝の深さ表示、断面データの出力まで同じソフトでできるようになった。



図20 実験に使用したパイプ

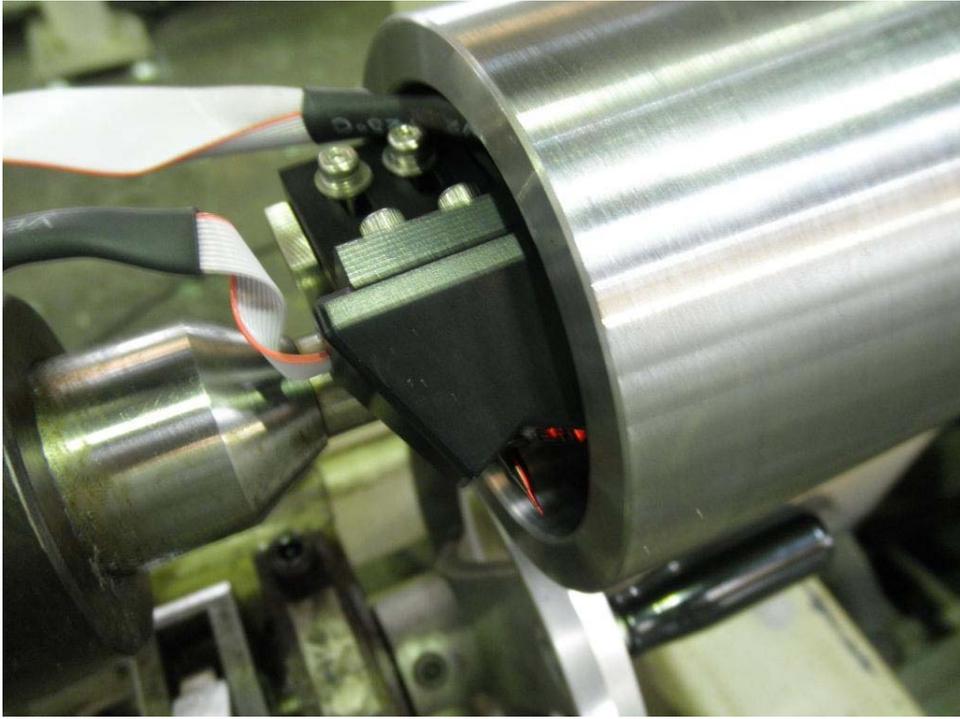


図 21 パイプ装入の写真(1)

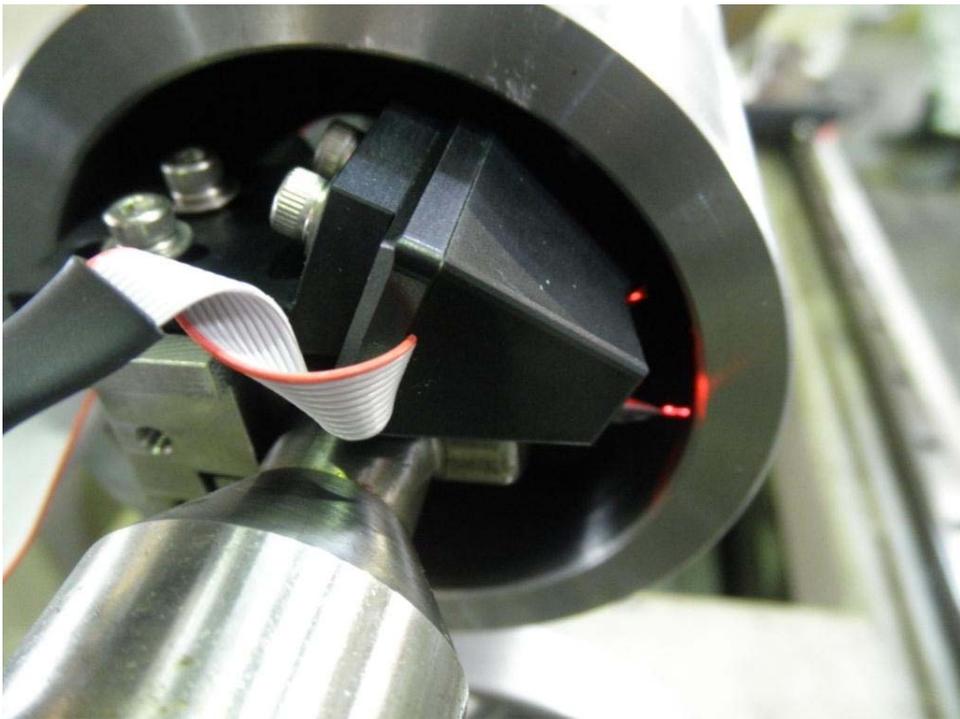


図 22 パイプ装入の写真(2)

## 2-4 実装した加工機による加工精度の検証（柏木鉄工株式会社）

ソフトとハードが完成したので、最終確認実験とその結果を示す。投影機構を改良したことで格子がはっきり写るようになった。実験は計測ソフトの最新版を使用して、録画した実際の加工データを再生し、計測を行った。計測結果は目標の計測精度に達した。ソフトも初期より大幅に改良して、インターフェースも使いやすくなった。図 23 に改良したソフトウェアの画面例を示す。さらに、計測結果の 3D 表示や断面グラフ表示、溝の深さ表示を同時にできるようになったため、計測結果を一目で分かるようになった。ほかにも、ノイズ除去など計測精度上げるための機能を追加したことにより、録画から計測、さらにデータ出力まで同じソフトでできるようになった。

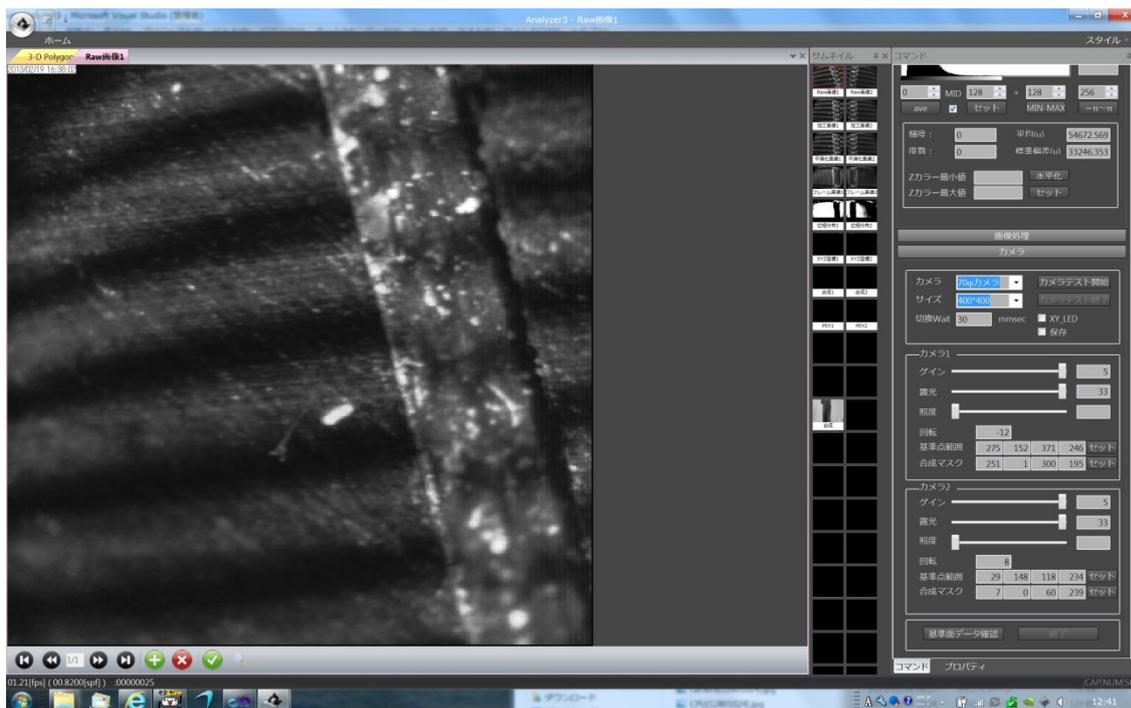


図 23 計測ソフトの操作画面

実際の計測例として、 $\phi 70\text{mm}$  のパイプに装入し、 $0.500\text{mm}$  の設定値で溝加工を行った後、本計測装置で計測と行った例と示す。図 24 と図 25 にカメラ 1 とカメラ 2 で撮影した画像をそれぞれ示す。図 26 と図 27 に計測結果として得られた溝の断面の形状と 3D 表示をそれぞれ示す。この計測実験の場合、溝の深さとして  $0.475\text{mm}$  という結果が得られた。

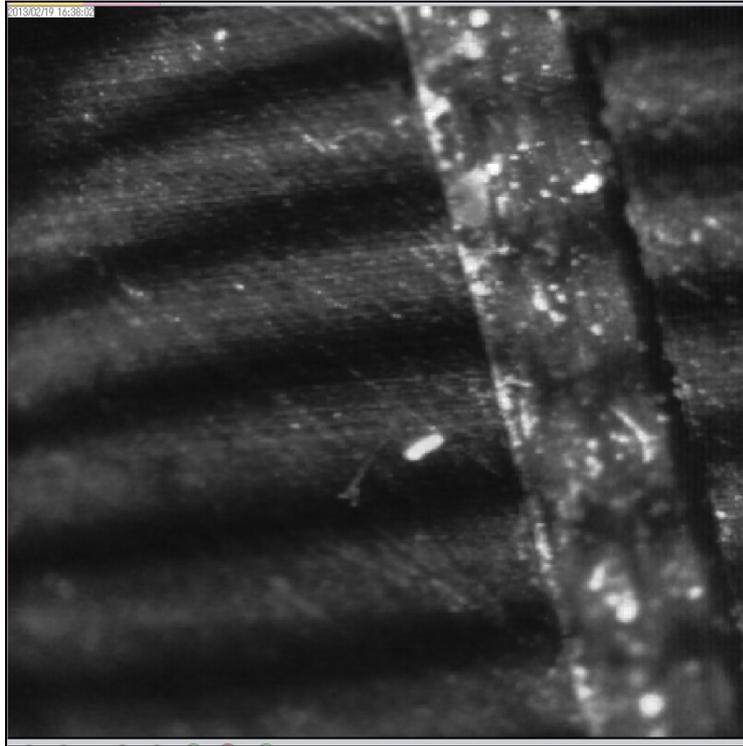


図24 カメラ1の画像

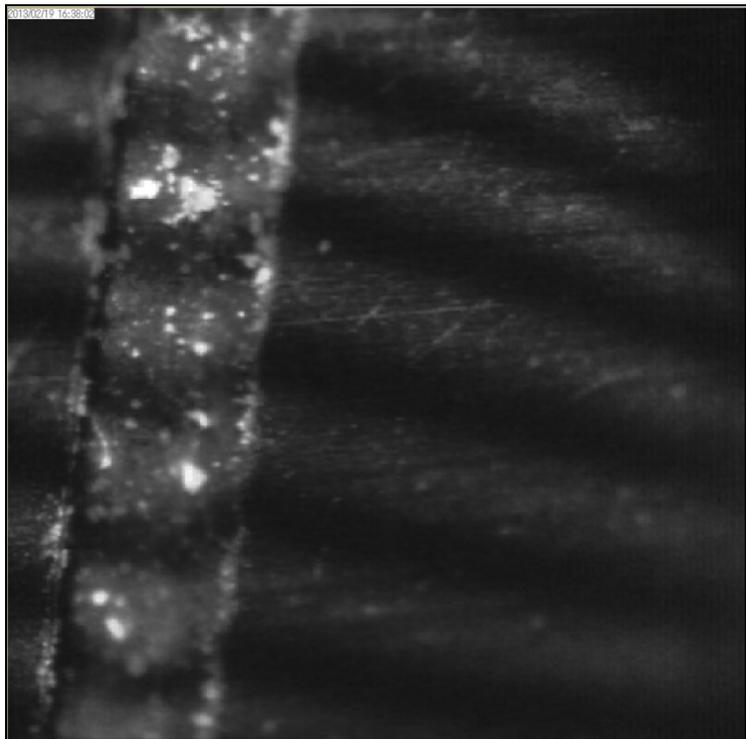


図25 カメラ2の画像

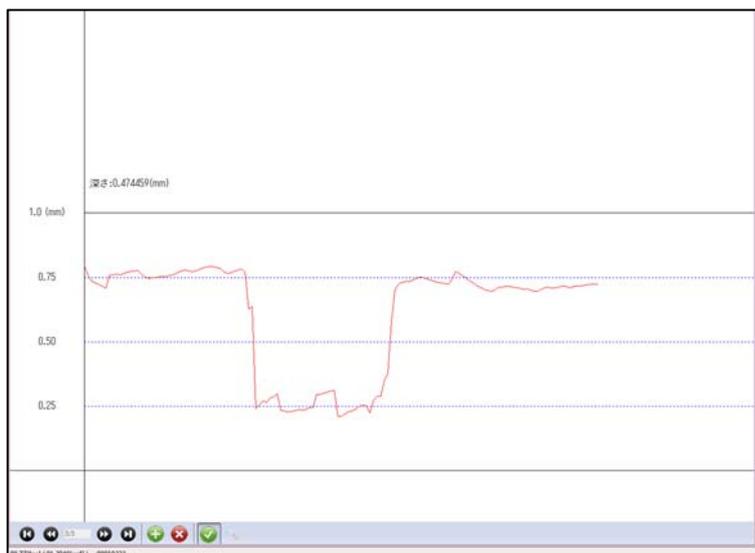


図 26 溝の高さグラフ

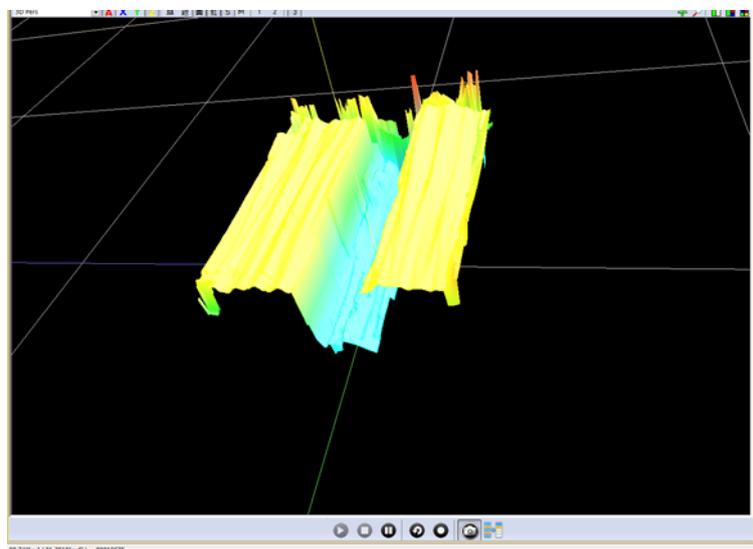


図 27 溝の 3D 表示

### 第3章 全体総括

今回のサポインの目的はパイプのテストピースの微細溝加工をするときに、形状計測しながら加工を行うことによって、加工精度を高めることである。三年間の研究で溝の加工方法、加工時間、加工精度を改良しながら、さらに、形状計測装置を開発して、その計測精度などの検証も行った。

初年度はエンドミルが折損しないための高速加工条件や小型計測装置の開発及び実装を目標として実行した。その結果、品質工学を利用してTP加工における高速加工条件を導くことができた。小型計測装置についても、投影機構の設計やカメラの選定を行い、試作機を完成させた。小型計測装置をTP加工機へ実装して、検証実験を行った。試作段階や検証実験時に出た問題は2年目で解決して、そのノウハウを超小型計測装置の開発に適用した。

2年度はエンドミルが折損しないための高速加工条件の決定、小型計測装置の精度検証と改良、超小型計測装置の開発及び実装を目標としてプロジェクトを進めた。その結果、昨年度導き出した高速加工条件での切削時の応力を応力計測装置で測定して、再度検証した。エンドミルに負荷かからないように加工条件を一部変更した。これによって、汎用性を持った高速加工条件を導くことができた。小型計測装置の精度検証を行い、計測精度に影響する問題点を一つずつ洗い出し解決していった。ここで蓄積できたノウハウを活用して、超小型計測装置の試作機を設計製作した。その超小型計測装置をTP加工機に実装して、そこで新たに発生した問題は3年度で解決した。

3年度は超小型計測装置の改良及び精度検証、開発した超小型計測装置の商品化を目標にプロジェクトを進めた。最終年度なので、問題を残さないように行った。超小型計測装置を改良して、パイプ内でも投影格子がはっきり写るようになった。この改良により形状計測ができるようになったので装置として完成した。精度検証実験ではノイズ除去などにより目標の計測精度に達することができた。プロジェクトの目的であるパイプ内の微細溝の形状を計測することができたといえる。しかし、実用化までにはまだ以下の問題が残っている。また、今後、試作機の小型計測装置を改良することで、計測対象物を一般金属加工部品の形状計測まで汎用できるようにしていく。

①：パイプ内の微細溝を対象に計測装置を開発したが、現状ではそのマーケットが小さいため、計測装置を量産化して売ることができない。そのため、計測対象を微細溝から金属加工品に広げる必要がある。汎用性を持たすためにまずソフトウェアの機能充実、使いやすさや計測エリアを大きくすること、さらに、対象物を金属から樹脂などに広げるなどさまざまな工夫が必要である。

②：この超小型計測装置を量産化できる体制、販売ルートの開拓という問題がまだ残っている。現在の装置の投影機構とカメラは専用で作っているため、汎用性をもっていない。さらに、重要な光学系の部分は手作りなので、量産化が困難である。

③：超小型計測装置の計測精度、計測速度、計測対象などの条件は今回のプロジェクトの目標には達したが、今後は計測精度や計測速度をさらにアップさせることで、計測装置としての完成度を上げる。新しいニーズに対しても、装置の完成度を高める必要がある。

④：試作機の小型計測装置を改良する。プロジェクトが開始の時、LEDのサイズが大きく、光量も足りなかったため、LEDによる光源切替位相シフト法が今回の装置に適用させることをできなかった。近年、LEDの技術が向上して、サイズが小さくなり、光量も上がった。新しいLEDを使用した光源切替位相シフト法は金属の反射によるノイズに影響さ

れにくいので、計測精度がさらに上がると予想できる。今後小型計測装置を改良して、計測精度を上げると同時により汎用性を持つために本体も改造する。

以上の問題を解決や本体を改造するため、これから引き続き和歌山大学と協力しながら研究を続けて行く予定である。

## 研究業績

### 国内会議

1. 李佳旭, 藤垣元治, 宮川直人, 南潔, 周曉堯, 柏木淳司, 加工機器搭載型形状計測ヘッドのための三次元形状計測手法, 精密工学会, 第 16 回知能メカトロニクスワークショップ.
2. 李佳旭, 藤垣元治, 宮川直人, 南潔, 周曉堯, 柏木淳司, 加工溝の深さ計測のための三次元形状計測手法の提案, 日本非破壊検査協会 応力・ひずみ測定部門, 第 43 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, 225-230 (2012).

### 受賞

1. 2012 年 1 月 24 日 (火), 日本非破壊検査協会, 第 43 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 新進賞
2. 2012 年 4 月 19 日 (木), 和歌山大学システム工学研究科, 研究科長表彰

### 特許出願

1. 藤垣元治, 李佳旭, 松本真吾, 柏木淳司, 周曉堯, 南潔, 宮川直人, 坂口弘一, 森本吉春, 加工機器搭載型形状計測ヘッドの開発, 特願 2013-25042(2013.2.12).

## 付録A1 光源切替位相シフト法

### 光源切替位相シフト法

光源切替位相シフト法とは、格子投影法の一つである。他の格子投影装置と違い、光源の点灯位置を切り替えることで、位相シフトを行い、位相を得る。その様子を図 A1-1 に示す。また図 A1-2 に示した通り、本手法は、格子ガラスの影で格子投影を行うため、z 方向においてはどの場所でも投影が可能である。

本手法は、光源の幅が十分小さくそれぞれが点光源と考えることができるため、投影格子が余弦波状と考えることができる。その様子を図 A1-3 に示す。よって、任意の点  $P(x_P, z_P)$  において以下のような式が成り立つ。2 値の格子模様の分布である  $G(x_G, 0)$  において、投影格子が余弦波状に近づくことから余弦波状の分布と考えることができる。そのため  $G(x_G, 0)$  における位相  $\phi_G(x)$  は式(A1.1)のようにあらわされる。

$$\phi_G(x) = \frac{2\pi}{p}x \quad (\text{A1.1})$$

光源  $L(x_L, z_L)$  と任意の点  $P(x_P, z_P)$  を直線で結んだ時の直線 PL は、式(A1.2)のようにあらわされる。

$$x = \frac{x_P - x_L}{z_P - z_L}(z - z_P) + x_P \quad (\text{A1.2})$$

点  $G(x_G, 0)$  は、式(A1.3)のようにあらわされる。

$$x_G = -z_P \frac{x_P - x_L}{z_P - z_L} + x_P \quad (\text{A1.3})$$

式(A1.2)、式(A1.3)より点  $G(x_G, 0)$  における  $\phi_G(x)$  は、式(A1.4)のようにあらわされる。

$$\phi_G(x_G) = \frac{2\pi}{p} \left( -z_P \frac{x_P - x_L}{z_P - z_L} + x_P \right) \quad (\text{A1.4})$$

点  $G(x_G, 0)$  における  $\phi_G(x)$  は、点  $P(x_P, z_P)$  における位相値  $\phi(x_P, z_P)$  に等しい。そのため、点  $P(x_P, z_P)$  における位相値  $\phi(x_P, z_P)$  は式(A1.5)のようにあらわされる。図 A1-2 にその原理図を示す。

$$\phi(x_P, z_P) = \frac{2\pi}{p} \left( -z_P \frac{x_P - x_L}{z_P - z_L} + x_P \right) \quad (\text{A1.5})$$

一つの光源における位相値を求めた後、コサインでラッピングを行う。そうすると、任意の点における輝度値  $I(x_p, z_p)$  は式(A1.6)となる。

$$I(x_p, z_p) = \cos \phi(x_p, z_p) \quad (\text{A1.6})$$

各光源ごとにこれらの計算を行い、式(A1.7)で示す位相シフトの基礎式に代入することで本手法を用いて計算できる位相値  $\theta(x_p, z_p)$  を求めることができる。

$$\tan \theta(x_p, z_p) = -\frac{\sum_k^n I_k \sin(2\pi \frac{k}{n})}{\sum_k^n I_k \cos(2\pi \frac{k}{n})} \quad (\text{A1.7})$$

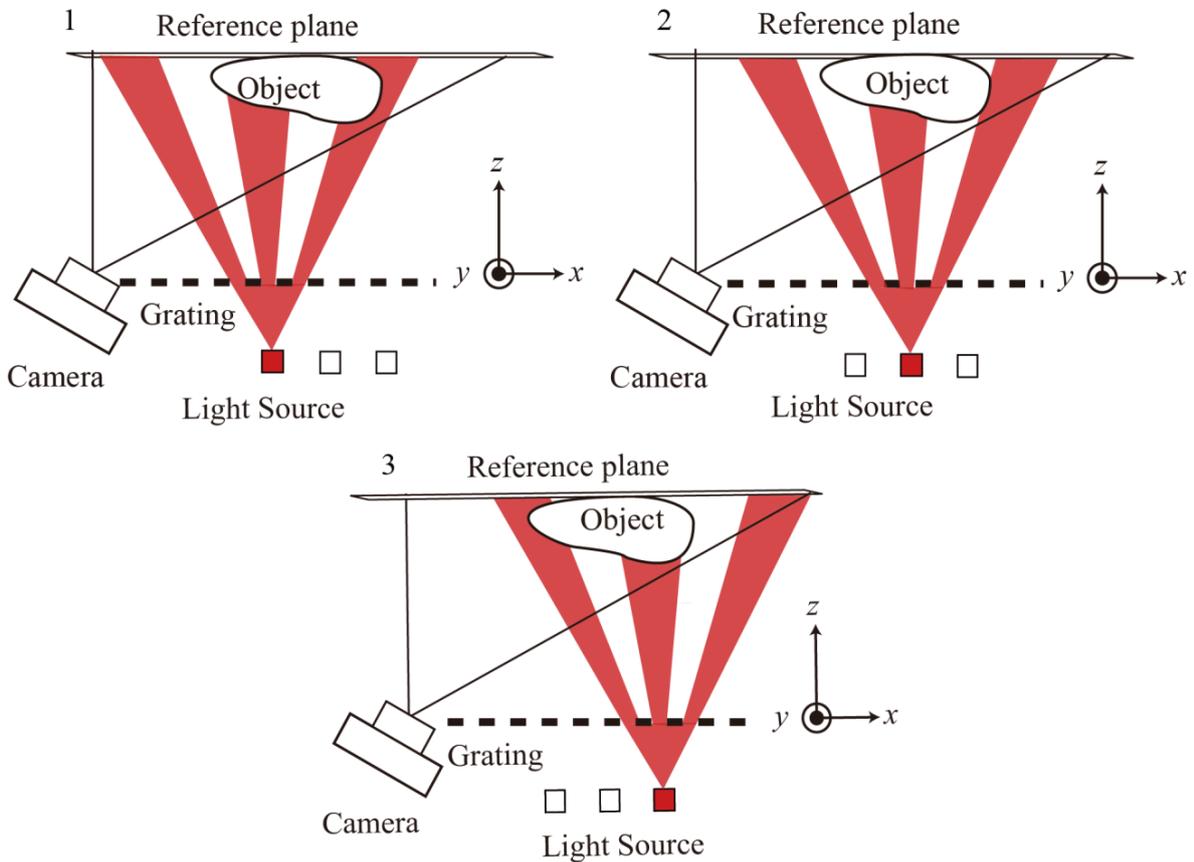


図 A1-1 光源切替位相シフト法の計測原理図

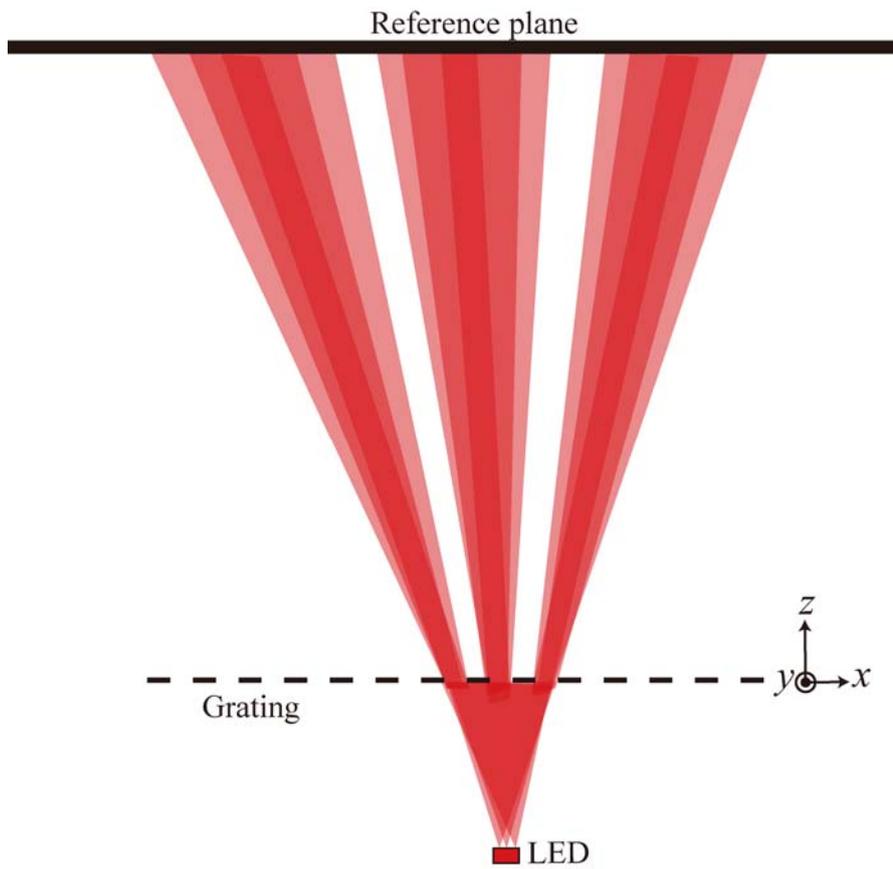


図 A1-2 光源切替位相シフト法における光の広がりの様子

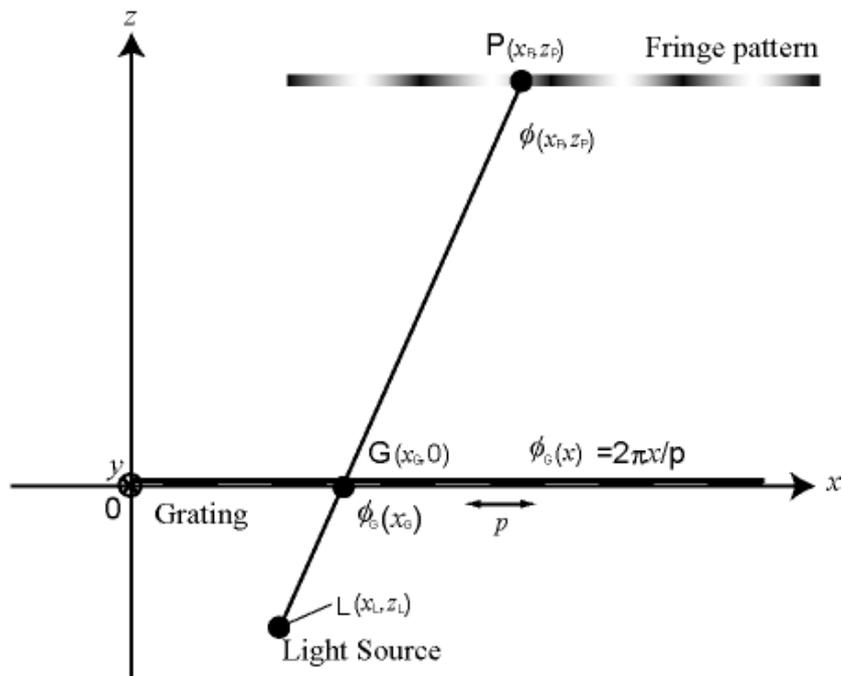


図 A1-3 光源から任意の点  $P(x_P, z_P)$  における位相