令和４年度　研究助成対象・成果報告

超精密ガラス成形用金型製造技術における研磨加工効率の向上と超音波測定を用いた穴加工精度測定技術の開発

研究報告者　**篠﨑　烈**

プロフィール

最終学歴	2007年9月 熊本大学大学院　自然科学研究科 博士後期課程　修了
専門分野	超精密加工, 精密計測, ものづくり教育
学　位	博士(工学)
所属団体	有明工業高等専門学校 創造工学科　人間福祉工学系　メカニクスコース
役 職 名	准教授

今後の抱負

三井金型振興財団様より研究助成をいただき，飛躍的に研究を推進することができました．心から感謝，御礼申し上げます．

高専教員として技術者教育・研究活動に取り組み始めて20年を迎え，やっと自分自身で一連の取り組みを実践できるようになりました．研究面では，産業界のニーズに対してどのように対応し，また，時には一緒に考えて結果を導き，それに貢献することができるかを考える機会が増えたように思います．教育面では，これからの「ものづくり産業界」を支えるエンジニアの卵を育てるための教育者として，教育内容の企画，実践，改善を日々考えて，高専らしい教育を実践していきたいと考えています．

研究や教育に偏ることなく柔軟に対応できる人間として，これからも学生と共に成長していきたいと思います．皆様と一緒に何事にも興味を持って取り組んでいきたいと思いますので，今後とも叱咤激励をいただければ幸いです．

超精密ガラス成形用金型製造技術における研磨加工効率の向上と超音波測定を用いた穴加工精度測定技術の開発

Improvement of polishing efficiency in the process of ultra-precision glass forming molding die manufacturing technology and development of ultra-sonic wave measurement system for drilled hole accuracy

主担当者：篠﨑　烈（有明工業高等専門学校）

共同研究者：坂本武司，明石剛二（有明高専），難波義治（中部大学　名誉教授）

推薦者・研究支援者：仙波卓弥（福岡工業大学）

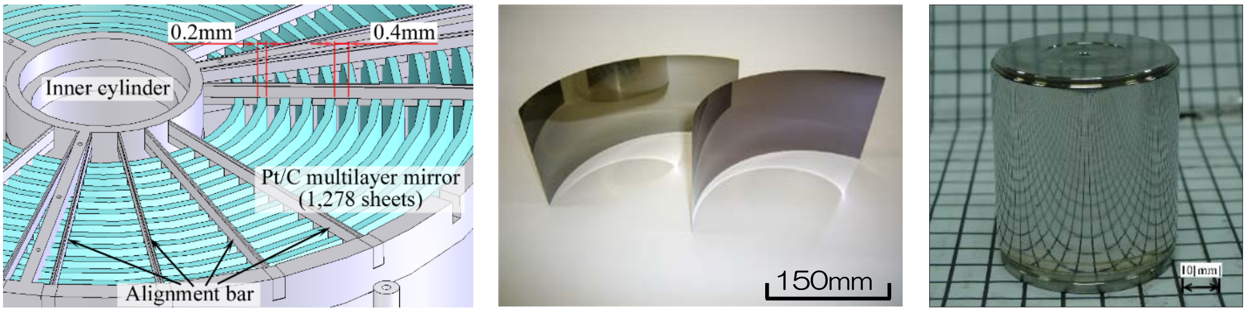
Key Words : molding die, glass forming, precision polishing, surface roughness, ultra-sonic wave measurement

1. 緒　言

本研究は，2025 年以降に打ち上げられる計画である X 線望遠鏡に用いられるスーパーミラーや同じ加工原理で製造するガラス製光学部品を作るための「精密金型」を約半分の時間で効率よく，数十ナノメートルのオーダーで精度よく，加工中に精度測定をして精度誤差を小さくするような製造技術を開発することを目的として実施した取り組みである．

本研究のターゲットの一つである宇宙望遠鏡では，図 1(a)に示されるように直径 600 mm の望遠鏡鏡筒に厚さ 0.2 mm のスーパーミラーが約 1200 枚配置されている．図 1(b)に示すような薄アルミ板製のミラーとジュラルミンに無電解ニッケルを被膜した金型を製造するために数週間を要する．これは，金型の切削加工と研磨加工に時間を要すること，アルミ板の塑性成形に時間を要することによるものである．その結果，ミラー素材を成形しやすく，表面精度を維持できるガラスに置き換え，それに合わせて金型素材を温度成形に耐えることができるステンレス鋼に変更することができれば加工時間とコストを低減できると考えて，従来からガラス板の熱変形による「スランピング法」を提案している．また，これらの金型には多くの穴が加工されており，その加工精度を加工中に知ることができれば，非常に高価な型の不良を減らすことができると考えられる．

このようなことから，本報告では，宇宙望遠鏡に用いられるスーパーミラーをはじめとする薄板ガラス部品を製作するために必要な，[1]金型研磨およびガラス成形の技術，[2]加工穴を工作物表面から測定する技術を開発することを目標とした取り組みを実施した結果について報告する．



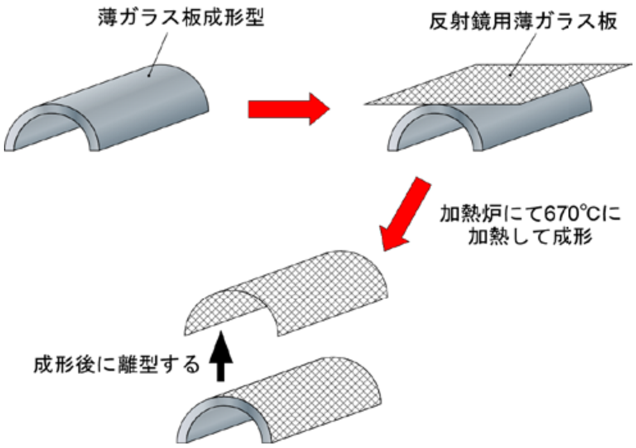
(a) Overview of X-ray telescope mirror　(b) Super-mirror　(c) Molding die

Fig. 1　Components of X-ray telescope “Hitomi” launched in 2018

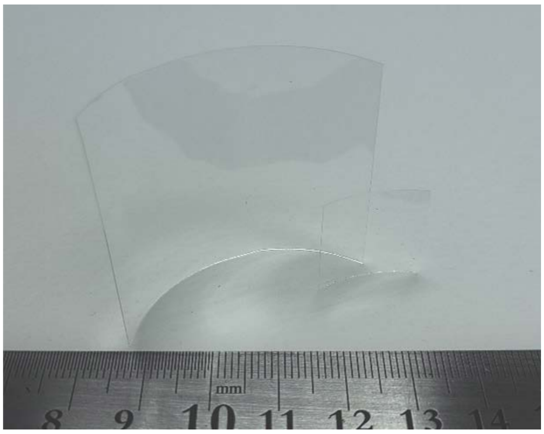
2. ガラス成形技術「スランピング法」

先の研究で提案しているガラス成形技術スランピング法は，ガラス素材の熱変形を利用した成形加工技術であり，その工程および実際に成形されたガラスの外観は図 2 にそれぞれ示される．スランピング法は，図 2(a)に示されるように，円筒や半円状の型となる素材を製作し，その上にミラーのベースとなる薄いガラス板を載せてガラスの軟化温度である 680 ℃付近で加熱する．それにより，型形状に沿って変形したガラスがミラーや光学部品の素材になる加工法である．成形されたガラス部品は図 2(b)に示されるように金型素材に沿った円弧形状に成形

されており，その表面粗さは *Rz*=4 nm，*Ra*=0.5 nm 程度のミラーとしての要求レベルを満たすものが完成する．このようなことから，ガラス素材によるミラーの製作技術は，適用可能なものであると言える．



(a) Slumping process of glass forming



(b) Formed glass plate (*t* = 0.2 mm)

Fig. 2 Glass forming technology with thermal deformation “Slumping method”

前述したスランピング法の円筒金型素材としてステンレス鋼 SUS310S を用いる．SUS310S は難削材であり，ダイヤモンドを用いた超精密切削による前加工が難しいことから，後工程として研削や研磨加工をしなければならない．また，ステンレス鋼金型はアルミニウム素材の場合と比較して約 3 倍の重量になり，本来の直径 300 mm，長さ 400 mm を超える大型金型では 220 kg にもなる．軽量化を考えるとバランスを考慮した中ぐり加工や固定のための穴加工が必要で，高価な金型として不良品を減らしたいという要望があり，このようなことから，金型製作に関する本取り組みを実施する．

3. ステンレス鋼 SUS310S の精密円筒金型研磨加工

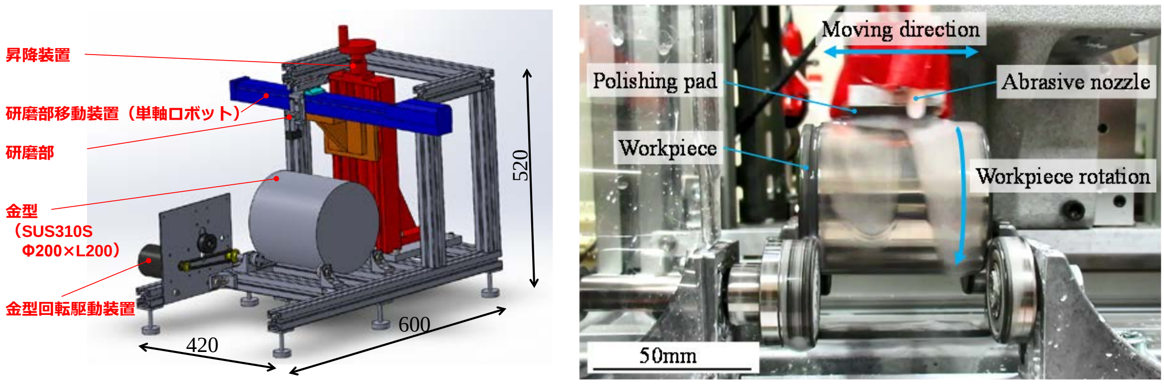
3.1 横型センタレス研磨加工機による円筒金型加工の概要

先の研究では，「研究の目的」の項目にある図 3(a)に示す「横型センタレス研磨加工機」を製作して金型円筒面の超精密研磨加工に挑戦している．本加工機は，縦 700 mm，横 450 mm，高さ 500 mm であり，工作物を支持して回転させるモーターユニット，工作物の軸方向に研磨棒を動かして研磨を行なう単軸ロボット，工作物の大きさに合わせて単軸ロボットを上下させる昇降機構の 3 つの要素から構成されている．

モーターユニットでの工作物の支持は，重量 25 kg 程度大型金型にも対応できるように，センタレスの 4 点支持を採用している．そのため，工作物を回転させる動力は，モーターの回転をベルト伝動で駆動輪に伝え，駆動輪から摩擦力を利用して工作物に伝達される．従動輪と工作物支持フレームは摺動が可能となっており，工作物の大きさに合わせて位置を調整できるようになっている．

単軸ロボットには治具を用いて研磨部を取り付けている．研磨部は直動スライダに取り付けることで，工作物の表面形状に沿って上下できるようになり，全面に渡って一定の圧力で研磨加工することができる．また，治具上に取り付けたデッドウェイト負荷機構に積載する錘の重さによって，研磨圧力を調整できるようになっている．工作物は，図 2 に示すように工作物自体の回転により円周方向に，研磨パッドの摺動により軸方向に研磨され，その複合的な動きによって円筒面全体が研磨される仕組みである．

この横型センタレス研磨加工機を用いて研磨加工を実施した結果，直径 50mm，長さ 60 ㎜のステンレス金型に対して，図 3(b)のような加工方法で約 80 時間をかけて研磨加工することで，仕上げ面粗さ約 10nm の円筒面の製作に成功している．本研究では，研磨部を改良して約 10000 Hz の振動発生装置を設置し，仕上げ面粗さ 10nm 程度の表面粗さになる円筒面研磨の時間短縮を試みる．また，製作した金型を用いたガラス成形法「スランピング法」を試行し，金型と成形されたガラスの形状誤差が小さくなるような実験条件の検討を行なうことを本研究の目的とする．



(a) Overview of centerless polishing machine　　(b) Stainless steel modling die polishing process

Fig. 3　Molding die polishing process with centerless polishing machine

3.2　スランピング法に用いる金型の検討

本研究で使用した金型工作物は，図 4 に示されるようにステンレス鋼 SUS310S で，直径 49 mm，幅 60 mm の円柱型である．「スランピング法」でガラスを成形する際には，金型が転がらないように半円筒型の金型を使用する．そのため，円柱型の金型を二つに切断し，半円筒型ものを製造した上で，側面を座金とボルトで固定している．金型に載せるガラスは縦 20 mm，横 20 mm，厚さ 0.2 mm を想定しており，その形状に合わせて，金型のガラスを乗せる部分を直径 45 mm，余裕を考えて幅 20.5 mm に段付き加工している．

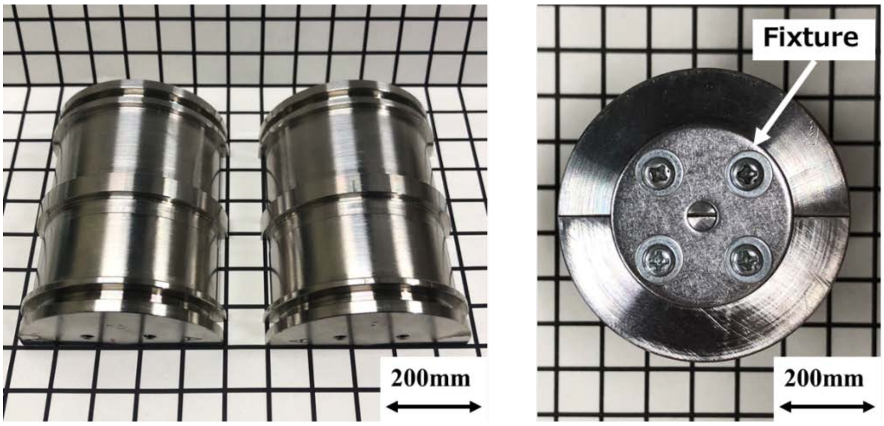


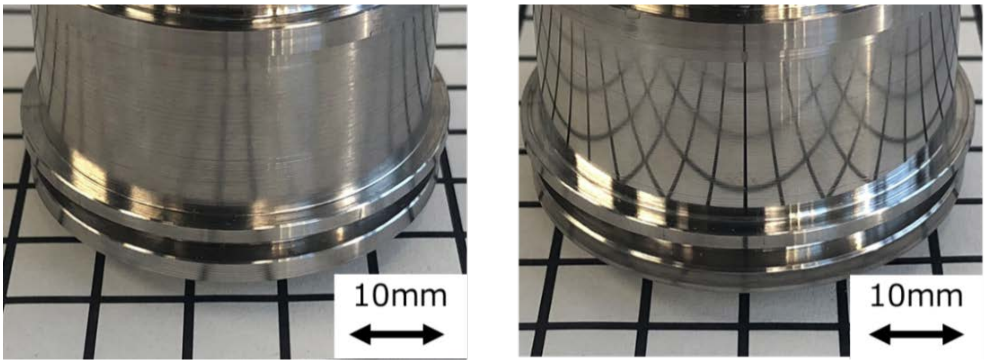
Fig. 4　Overview of stainless steel SUS310S molding die

3.3　円筒金型研磨加工実験の条件および概要

本研究における加工条件を表 1 に示す．円筒面研磨加工は上記の工作物に対して，横型センタレス円筒研磨加工機を用いて行った. 研磨パッドはスウェードタイプの物を使用し，研磨液はアルミナ砥粒（# 3000）を質量濃度 0.5%で混合したものを，チューブポンプ（PST110，IWAKI）を用いて 100 ml/h 程度で供給した. 工作物の回転数は 250 rpm，単軸ロボットによる研磨パッドの往復速度は 50 mm/sec とした．デッドウェイトを調節して，研磨面に加わる圧力を 0.8 kPa とした．これは，過去に行われた超精密平面研磨加工実験と条件を揃えるためである．研磨面の最大高さ粗さの変化を調査した．研磨時間は特に設けず，最大高さ粗さが

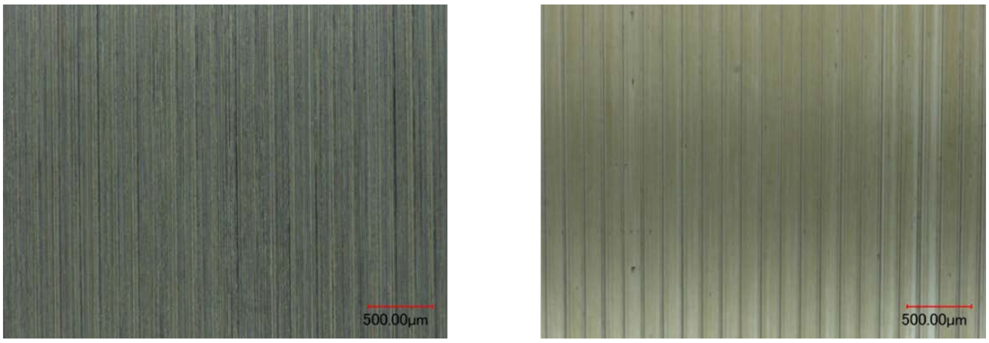
Table 1　Molding die polishing conditions

Workpiece	Stainless steel SUS310S in JIS
(Polishing section)	φ45 mm×L 20.5 mm
Polishing pad	Suede type
Polishing liquid	0.5% - alumina polishing liquid
Rotation speed	250 [rpm]
Reciprocating speed	50 [mm/sec]
Polishing condition	Polishing pressure 0.8[kPa]



(a) Before polishing　　　　(b) After 72hr polishing

Fig. 5　Overview of workpiece before and after polishing



(a) Before polishing　　　　(b) After 72hr polishing

Fig. 6　Microphotographs of before and after polishing

変化しなくなるまでとした．表面粗さの測定は，触針式の小型表面粗さ測定機（SJ-201，Mitutoyo）により行った．測定箇所は工作物の上端から 0.5 mm 付近を「A」，10 mm 付近を「B」，20 mm 付近を「C」と定義して，円周上の 2 つの位置でそれぞれの領域を測定し，軸方向による表面粗さの平均値の変化を調査した．

3.4　円筒金型研磨加工実験の結果

従来の研究において，横型センタレス円筒研磨加工機を用いて分割式金型を研磨加工した結果を示す．図 5 に円筒面研磨加工実験で検討した工作物の実験前後の外観を，図 6 にデジタルマイクロスコープ（VHX-1000，キーエンス）で撮影した金型表面を示す．加工後の表面は，くもりが取れて下の格子模様がはっきりと映っているのがわかる．デジタルマイクロスコープで 100 倍に拡大して撮影した画像では，研磨加工前は大小様々な切削条痕が全体に見られるが，加工後は細かい傷はほとんど見られず研磨しきれていない大きな傷のみが確認できる．

図 7 に円筒面研磨を行った工作物上に定義した測定領域 A，B，C での算術平均

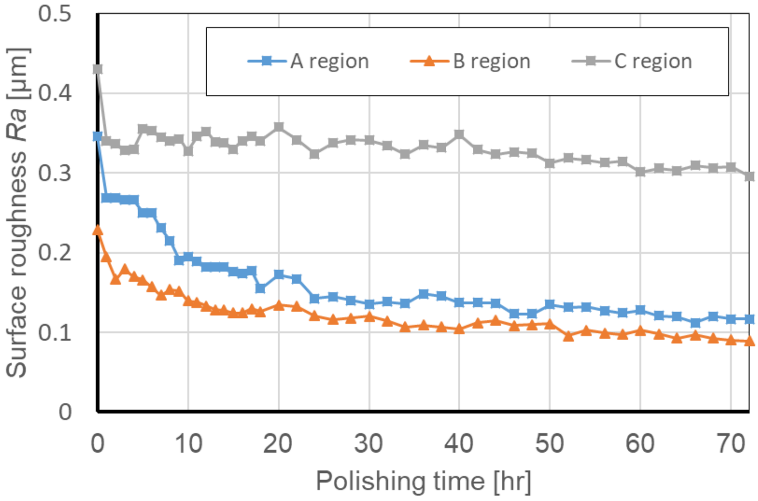
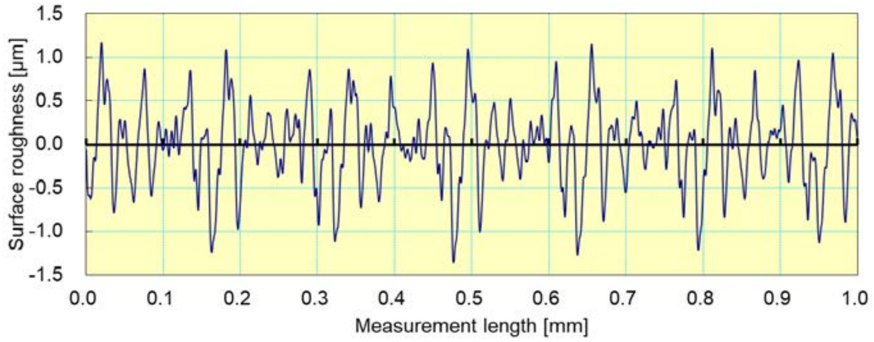


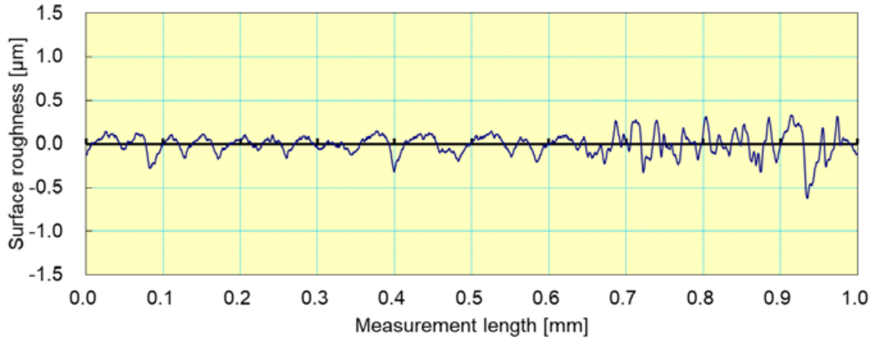
Fig. 7　Surface roughness of split molding die at each region

粗さ *Ra* の変化を示す．A，B 領域ほぼ同様に減少しており，最も粗さの小さくなった B 領域では，72 時間研磨後には *Ra* = 0.09 μm 程度になっているとことが分かる．C 領域について，最初の 1 時間以降はほとんど粗さが変化していない．これは，研磨ブロック自体が削れてしまったことや，金型製作の仕上げ加工時に用いる突っ切りバイトに構成刃先が生じ，C 領域は端部であるためバイトの送り速度が 0 になる時に構成刃先の表面性状に依存した結果，凹部になったため，研磨パッドが工作物に接触せず粗さが小さくならなかったと考えられる．

図 8 に加工前後の粗さ曲線を示す．0.15 mm 程度の間隔で刻まれた切削条痕が確認でき，加工後は最大 *Rz* = 0.78 μm である．現段階では切削条痕の一番高い所を研磨しているため，谷の方を研磨できていないと推測でき，研磨加工を続けることで解消できるが，非常に研磨効率が悪いことが確認できた．



(a) Before polishing [*Ra* = 0.359 μm，*Rz* = 2.520 μm]



(b) After 72 hours polishing [*Ra* = 0.093 μm，*Rz* = 0.962 μm]

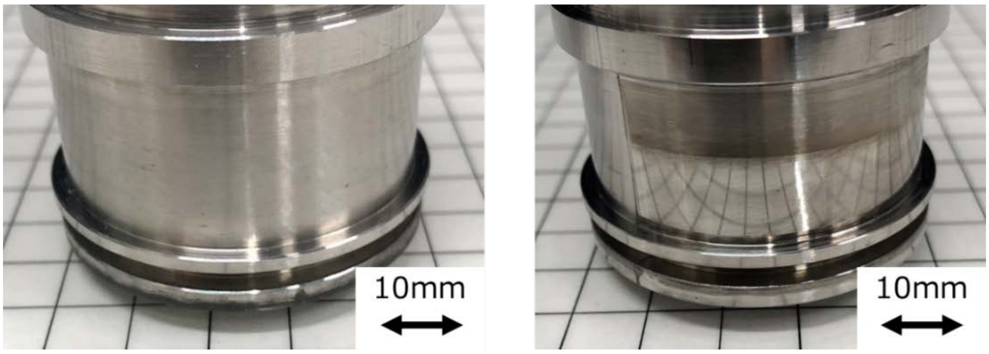
Fig. 8　Surface roughness of before and after polishing

次に，横型センタレス円筒研磨加工機に V 字研磨ブロックを取付けて，分割式金型を研磨加工した結果を示す．図 9 に円筒面研磨加工実験で検討した工作物の実験前後の外観を，図 10 にデジタルマイクロスコープで撮影した金型表面を示す．図 9 では，40 時間研磨後の円筒面は加工前と比べて下半分は格子模様が見えるようになり粗さが取れていると分かるが，上半分は黒く変色し格子模様が見えないことから粗さが変化していないと考えられる．図 10 では，加工前は金型製時の切削加工により生じた切削条痕が確認できる．加工後は研磨加工により粗さが取れた箇所と，粗さが取れずに変色した箇所が混在しているのが確認できる．

図 11 に円筒面研磨を行った工作物上に定義した測定領域 A，B，C での算術平均粗さ *Ra* の変化を示す．加工前の円筒面の表面粗さは各領域においてほとんど一様であるが，加工後は A，B 領域と C 領域で違いが生じた．A，B 領域では 40 時間の研磨加工で表面粗さが非常に小さくなり，最も小さくなった B 領域では算術平均粗さ *Ra* = 0.063 μm となった．V 字研磨ブロックに変更前と比べて，30 時間以上短時間での研磨加工にも関わらず *Ra* は約 0.03 μm 小さくなったことから，研磨面の増加が研磨効率に及ぼす影響は顕著である．一方，C 領域は *Ra* = 0.128 μm であり，他の領域と比べて非常に大きくなっている．原因として，V 字研磨ブロックが単軸ロボットに対して垂直に取り付けられていないことや，V 字研磨ブロックを取付ける前の研磨実験でも同様に C 領域が研磨

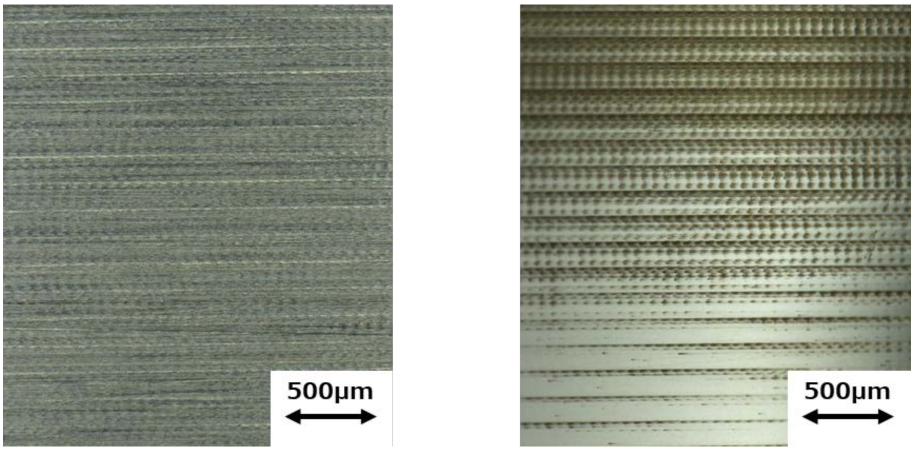
できていないことから，工作物支持部が摩耗しており，それによって工作物が傾いていたため研磨できていないなどが考えられる。

図 12 に加工前後の粗さ曲線を示す．研磨加工前は金型製造時の切削条痕とみられる凹凸部が見られ，その表面粗さは *Ra* = 0.216 μm，*Rz* = 1.461 μm である．研磨加工後は図 12(b)のように切削条痕が小さくなり，さらにその表面粗さは *Ra* = 0.015 μm，*Rz* = 0.179 μm である．



(a) Before polishing (b) After 40 hours polishing

Fig. 9 Overview of workpiece before and after polishing with V-shape block



(a) Before polishing (b) After 40 hours polishing

Fig. 10 Microphotographs of before and after polishing with V-shape block

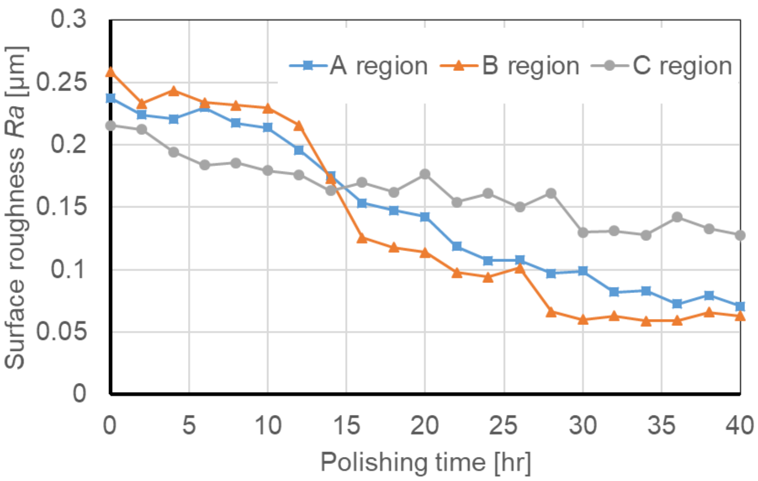
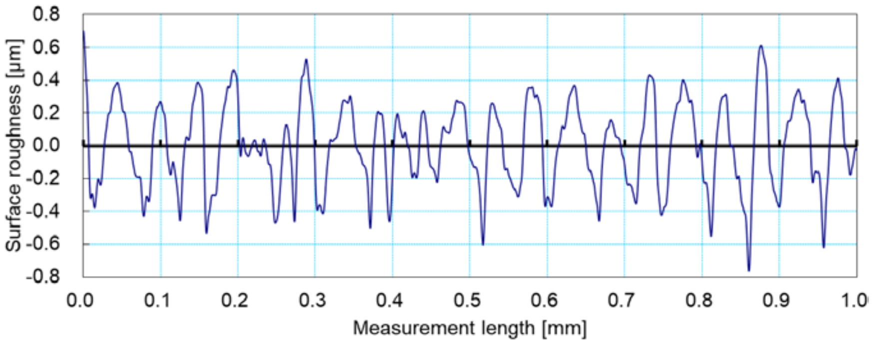
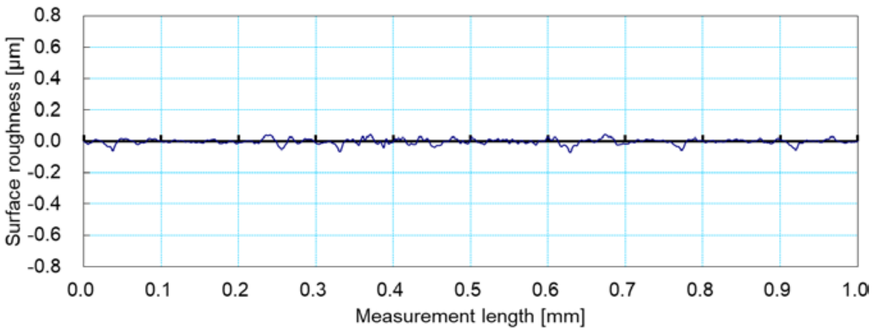


Fig. 11 Surface roughness of split molding die polishing with V-shape block at each region



(a) Before polishing [Ra = 0.216 µm, Rz = 1.461 µm]



(b) After 40 hours polishing [Ra = 0.015 µm, Rz = 0.179 µm]

Fig. 12　Surface roughness of before and after polishing with V-shape block

4. ステンレス鋼金型を用いたガラス成形技術の検討

4.1　スランピング法によるガラス成形の概要

横型センタレス円筒研磨加工機を使用して研磨加工を行った円筒金型を用いて，ソーダ石灰ガラス（18×18×t 0.2 mm）を積載後に，図 13 に示す小型電気炉（NHK120-H，日陶科学）を用いて「スランピング法」によるガラスの熱成形加工を行った．従来の研究より加熱条件は，30 分かけて 650 ℃まで加熱後，15 分かけて 690 ℃まで加熱し，690 ℃を 15 分間保持した後，炉冷した．また，ガラスは 4 枚同時に成形するものとした．成形前後のガラスと金型の表面粗さの変化および，ガラスと金型との形状精度を触針式小型表面粗さ測定機で測定した．

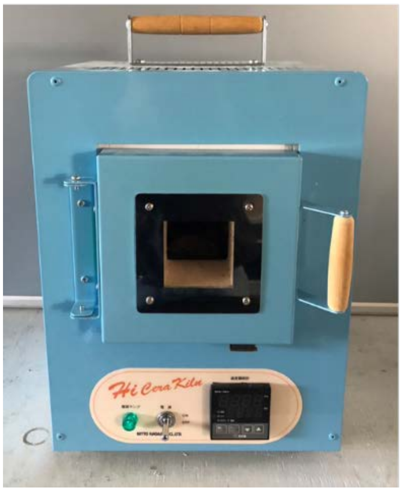
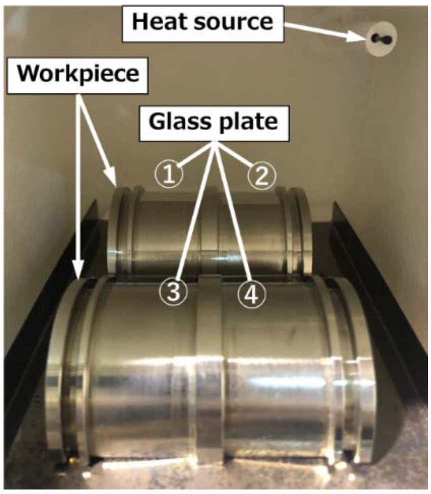
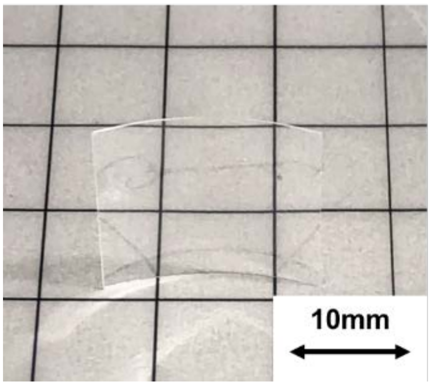



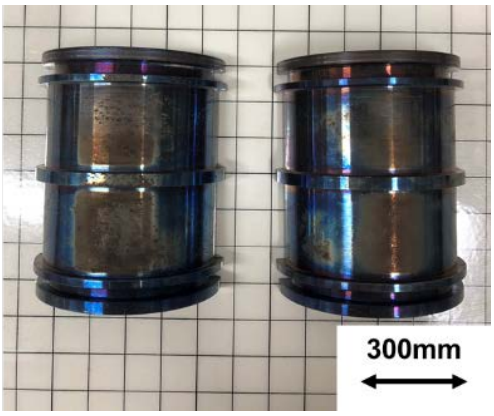
Fig. 13　Small electric furnace (NHK120-H, NITTO KAGAKU Co.,Ltd)

4.2　スランピング法によるガラス成形実験の結果

図 14 に成形実験後のガラスと金型を示す．ガラスは金型形状に沿ってしっかりと曲がって成形されていることが確認できる．金型表面においては，ガラスを載せていた部分は茶色に変色していたが，それ以外の部分は青白く変色している．このことから，熱成形加工時にガラス成形の温度によって金型が変色したと考えられ，この熱影響領域が，次のスランピング法や金型に及ぼす影響については，今後，改めて調査する必要がある．

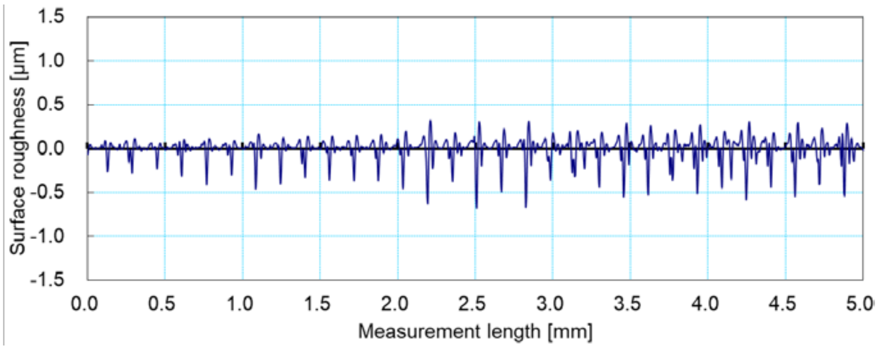


(a) After processing glass plate

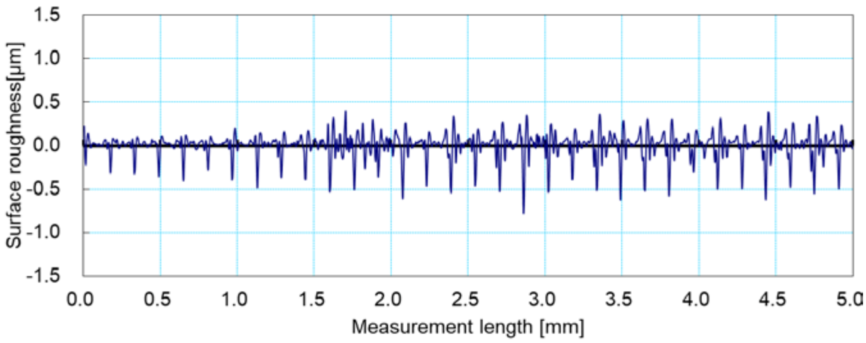


(b) After processing molding die

Fig. 14　Glass plate and molding die after slumping method



(a) Before experiment [*Ra* = 0.081 μm,　*Rz* = 0.993 μm]

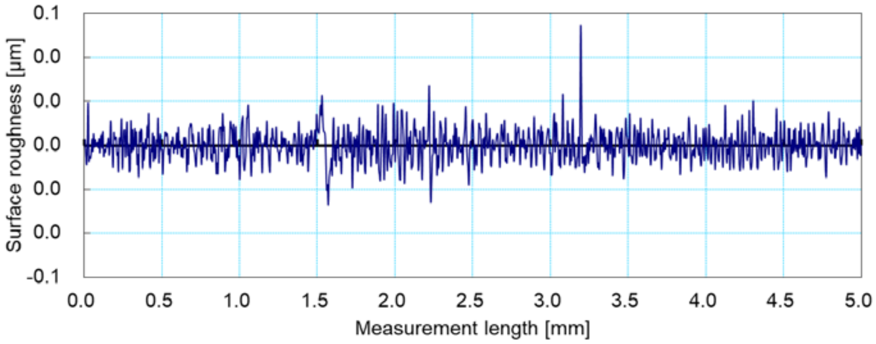


(b) After experiment [*Ra* = 0.093 μm,　*Rz* = 1.158 μm]

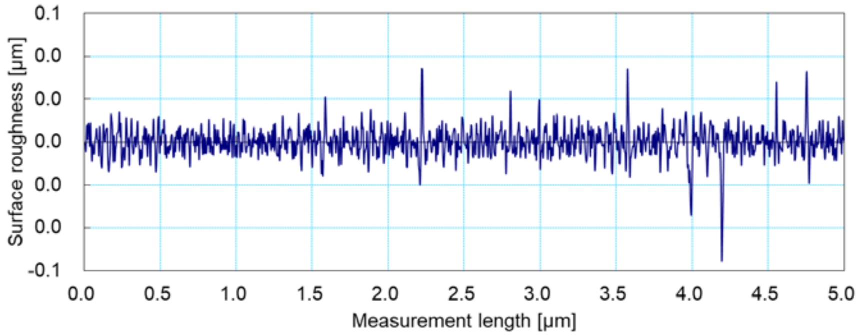
Fig. 15　Molding die Surface roughness of before and after experiment

図 15 に触針式小型粗さ測定機で測定した実験前後の金型の表面粗さ，図 16 にガラスの表面粗さの測定結果を示す．金型の表面粗さは，実験前は *Ra* = 0.081 μm，実験後は *Ra* = 0.093 μm であり，実験前後における金型の表面粗さはほとんど変化しなかった．しかし，金型表面が変色していることから，スランピング法による繰り返し

の熱影響や，ガラスの成分により表面性状が悪化することも考えられる．ガラスの表面粗さは，実験前は Ra = 0.006 µm，実験後は Ra = 0.005 µm であり，実験前後におけるガラスの表面粗さはほとんど変化していない．このことから，スランピング法における金型の表面粗さが，ガラスの表面粗さに及ぼす影響が小さいことを確認することができた．



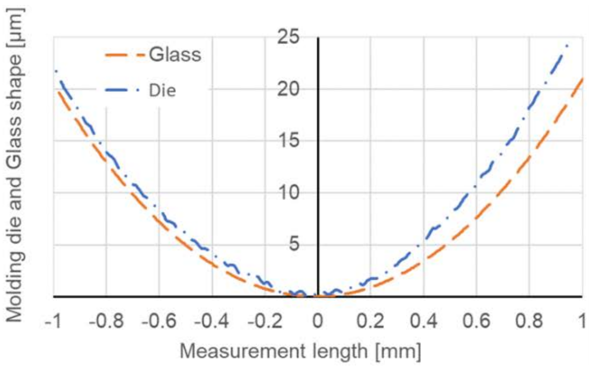
(a) Before experiment [Ra = 0.006 µm，Rz = 0.082 µm]



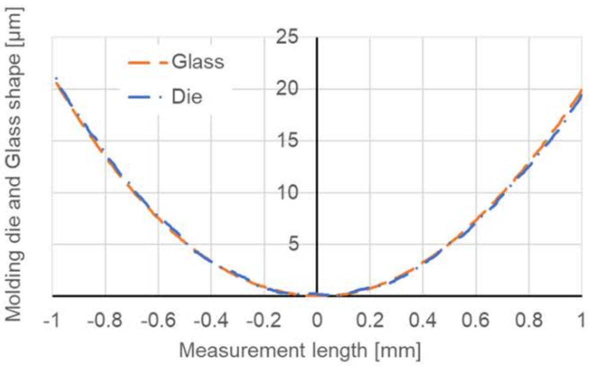
(b) After experiment [Ra = 0.005，Rz = 0.089 µm]

Fig. 16　Glass plate Surface roughness of before and after experiment

図 17 に成形後の金型とガラスの形状精度を示す．ガラスは金型の形状に沿って曲がっているが，全体的に金型とガラスの隙間が確認できる．原因として，加熱時間が足りずガラスが曲がりきらなかったことや，電気炉内の熱源の位置が偏っておりガラスの温度上昇にムラが生じたこと，ガラスが金型上中央に位置しておらず偏っていたため自重で曲がりきらない部分が生じたことが考えられる．最も熱源に近かった図 17(b)が最も精度が良いことから，炉内の熱源の位置によるスランピング法への影響については検討する必要があると考えられる．



(a) Form accuracy ①



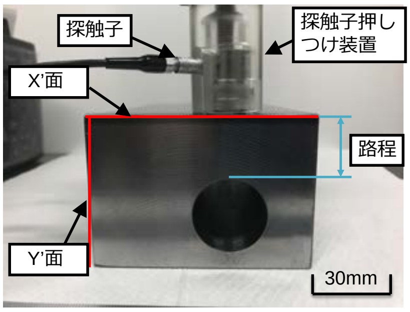
(b) Form accuracy ②

Fig. 17　Form accuracy of molding die and glass plate

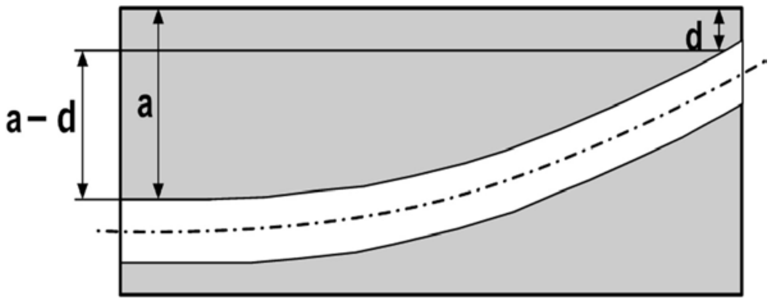
5. 超音波測定法を用いた金型に加工する穴の位置，真直度測定の試み

5.1　超音波測定法を用いた穴の位置，真直度測定の概要

金型には多くの穴が加工されており，その位置精度を知ることは加工後に限らず，加工中においても求められる技術である．最終的には加工中の穴精度を検討することを目的として，本研究では，立方体工作物に穴加工した際の穴の位置精度，真直度を，「研究の目的」の項目にある図 18(a)に示すように超音波測定を用いて，工作物外面からの測定に挑戦している．この方法により，加工後の「ノギス」や「マイクロメータ」による測定が不要になり，うまく運用できれば，未貫通穴の位置測定，加工中の穴の位置を知ることができると考えられる．ステンレス鋼金型の軸方向穴位置を，円筒面からの測定によって測定する試みを行う．円筒面からの超音波の広がりを見ることはできないが，円筒面の半径や曲率が大きくなることで超音波における「エコー高さ」を観察しながら「路程＝距離」を知ることができる．これまでの試みでは，図 18(b)に示すように平面からの路程により，真直度を 0.1mm 単位で測定することに成功した．本研究では，測定の自動化にも挑戦している．



(a) Ultra-sonic wave measurement



(b) Schema of drilled hole straightness

Fig. 18　Ultra-sonic wave measurement of straightness from workpiece surface

5.2　超音波測定器による半自動および手動での真直度測定

5.2.1　半自動および手動での穴真直度測定の概要

超音波測定器を使い，材質 SCM435 の工作物に穴径 10 mm，30 mm で加工した穴の真直度を測定した．その後，マシニングセンタとダイヤルゲージを用いて測定した真値と比較をしている．穴の 3 次元的な変形を調べるために，ワークの上面（X’面）と右側面（Y’面）を測定し，それぞれの面の穴の始点から終点までを 4 分割して，それぞれを a 点，b 点，c 点，d 点とした．

5.2.2　測定実験の概要

探触子は，振動子直径 10 mm，周波数 5 MHz の物を使用した．加工穴径 10 mm では，音速 5900 m/s，ゲイン 30，加工穴径 30 mm では，音速 5900 m/s，ゲイン 26 の条件で測定した．製作した半自動測定装置は，X，Y，Z 軸と探触子押し付け装置，測定用工作物を置くためのステージから構成されている．Z 軸は昇降台，Y 軸は単軸ロボット，X 軸は，ステッピングモータで制御されている．Z 軸は手動で動かすため，半自動測定器と定義した．これを用いて，手動測定と同様，工作物の a 点，b 点，c 点，d 点で 3 回ずつ測定している．

5.2.3　超音波測定器による半自動および手動測定結果の比較

図 19 に，真直度測定用工作物の穴位置測定結果を示す．グラフ横軸が，探触子の測定位置（測定用工作物の a，b，c，d 点），縦軸が路程を示している．穴の曲がりの傾向を見ると，真値と同じ傾向で曲がっていることが分かる．次に真直度を調べるために，a 点と d 点の差を見る．加工穴径 10 mm の場合，手動測定では，マシニングセンタで測定した真値から誤差 0.08 mm 以内で測定できている．一方半自動測定の場合，誤差 0.17 mm 以内となり，手動測定時よりも大きな値になった．これは，測定器のバックラッシやモータのノイズが原因だと考えられる．加工穴径 30 mm では，Y’面手動測定時に路程がばらつく現象が見られた．データロガーで測定した路程を観察すると，一定の振れ幅で振動していることが分かった．受信用振動子が共振しているためだと考えられる．X’面の場合，手動測定では，マシニングセンタで測定した真値から誤差 0.02 mm 以内で，測定できている．

半自動測定でも 3 回目を除いて，誤差 0.02 mm 以内で測定できている．3 回目は，半自動測定器の送りねじのバックラッシにより探触子がずれたため，誤差 0.29 mm と大きな値になったと考えられる．

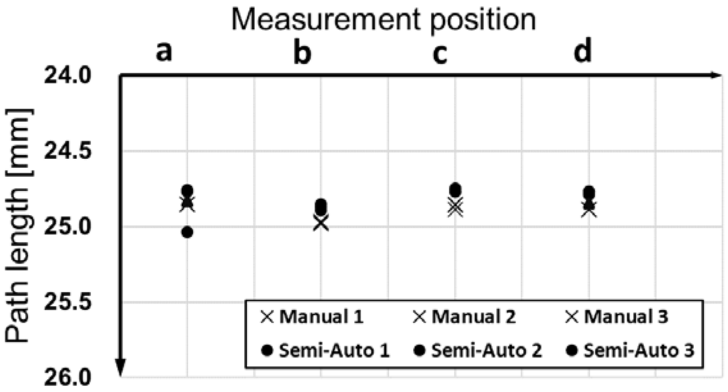


Fig. 19 Hole straightness measurement results with semi-automatic system ($\phi = 30$mm)

5.3 超音波測定器による自動測定器での真直度測定

5.3.1 真直度自動測定器の概要

本研究では加工機上で測定する自動測定器を製作しており，その外観を図 20 に示す．この装置は，X，Y 軸と探触子押し付け装置，測定用工作物を固定するための口金から構成されている．測定する際は，測定する工作物と自動測定器をバイスに挟み測定する．このようにすることで, 加工中に工作物の真直度を測定することを可能にした. 先に製作した半自動測定器では, 送りねじのバックラッシやリンク機構のガタが大きく, 探触子のずれによる誤差が発生した．本装置では，X，Y 軸駆動部にボールねじとリニアレールを用いることでバックラッシやガタを小さくした. 探触子押し付け装置でも，ガタの原因になるリンク機構は設けず，ピストンとシリンダー，バネにより探触子を押し付ける構造としている．また，探触子押し付け装置とステッピングモータを両持ち構造とすることで，剛性を高くし，測定時のたわみを少なくした． Z 軸はピンを 4 点使用し，位置決めをおこなった．X，Y 軸のステッピングモータは Arduino を用いて制御した．測定手順は，まず自動測定器を測定用工作物とともにバイスに取り付け, 次に測定開始ボタンを押すと探触子が走査される. 測定点 a,b,c,d では，0.5ｍｍピッチで 30 地点穴深さを測定し，路程が PC の Excel に記録される．Excel では探触子を走査し，得た値から 2 次近似をおこない, 2 次近似曲線の頂点を路程とし記録した. これを測定用工作物の X'面，Y'面の a 点，b 点，c 点，d 点で 3 回ずつ実施した．探触子は振動子直径 10 mm，周波数 5 MHz の物を使用し,加工穴径 10 mm では音速 5900 m/s，ゲイン 35，加工穴径 30 mm では音速 5900 m/s，ゲイン 40 の条件で測定した．手動測定では，加工穴径 30 mm のとき，エコー高さが大きくなり，測定できないためゲインを 30 として測定を行った．

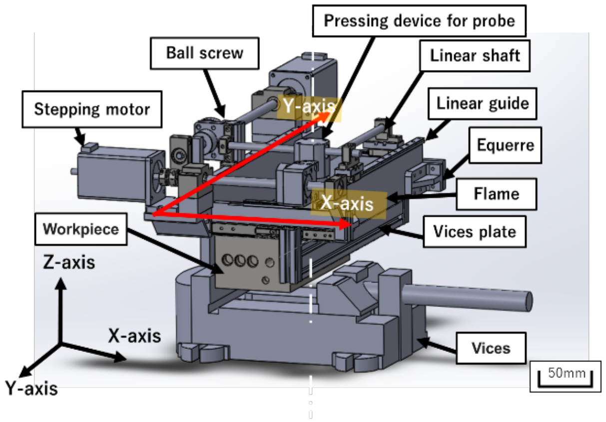


Fig. 20 Overview of automatic straightness measuring instrument

5.3.2 超音波測定器による自動および手動測定結果の比較

図 21 に，真直度測定用工作物の穴位置測定結果を示す．手動測定，自動測定ともに真値と近い値で，穴位置が測定できている．次に真直度を調べるために a 点と d 点の差を求める．加工穴径 10 mm の場合，手動測定では，マシニングセンタで測定した真値から誤差 0.14mm 以内で測定できている．一方半自動測定の場合，誤差 0.11 mm 以内と，手動測定時よりも小さな値になった．加工穴径 30 mm では，X'面測定時の場合，手動，自動測定ともに

誤差 0.02mm 以内で測定できている．Y’面では手動測定では，探触子の共振の影響で，誤差 0.22mm 以内と大きな値になっている．自動測定では，加工穴の頂点を 2 次近似曲線より計算したため，誤差 0.03mm 以内と小さな値で測定を行うことができた．

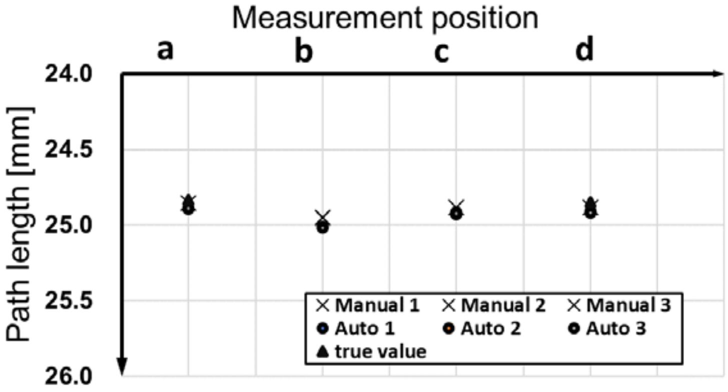


Fig. 21　Hole position measurement results with automatic ($\phi = 30$mm)

5.3.3　穴加工中の機上真直度測定

図 22 に BTA 機上測定の概要を示す．製作した真直度自動測定器を BTA マシンのバイスに取り付け，穴加工中に穴位置の測定を行った．その後，加工後も同様の条件で測定し，比較を行った．測定条件は振動子直径 10 mm，周波数 5 MHz の探触子を使用し,音速 5900 m/s，ゲイン 55 とした．加工条件は直径 34 mm のドリルを使用し，送り速度 18 mm/min，切削速度 500 rpm で加工をしている．

図 23 に，測定した加工穴位置を示す．加工後の測定では，真値に近い値で測定できている．一方加工中の測定では，真値から 1.5 mm 程度深い位置で測定されている．これは，ドリルの切削熱により，工作物の弾性率が小さくなり，音速が遅くなったからだと考える．今後の課題として，加工中での真直度測定をおこなう際，温度変化による路程の誤差を，補正しなければならないと考えられる．

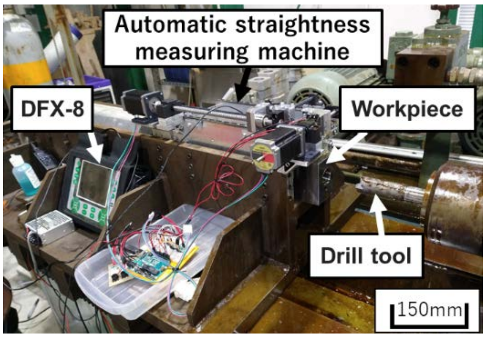


Fig. 22　Overview of BTA on-machine measurements

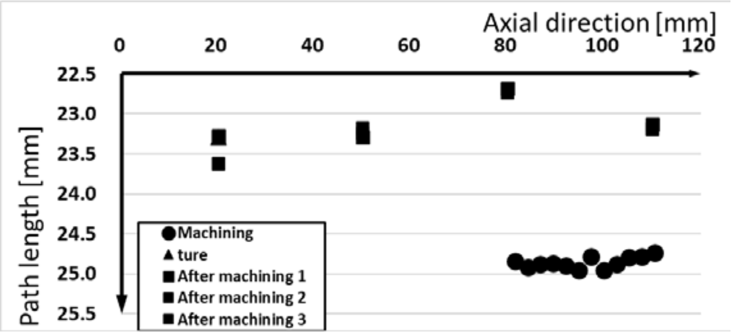


Fig. 23　BTA on-machine measurement results

5. 結　言

本研究では，スーパーミラーや同じ加工原理で製造するガラス製光学部品を作るための「精密金型」を約半分の時間で効率を上げ，数十ナノメートルのオーダーで精度よく，加工中に精度測定をして精度誤差を小さくするような製造技術を開発することを目的として各種加工，計測実験を行ない，以下の結果が得られた.

【研磨加工およびガラス成形に関する研究】

(1) ステンレス鋼 SUS310 に対して，横型センタレス円筒研磨加工機を用いて研磨加工を行うことができることを確認した.

(2) 半円筒を組み合わせて円柱型にした金型を製作し，研磨加工を行えることを確認した.

(3) 研磨加工を行えなかった部分も存在するため，細かな改良を行う必要がある.

【穴加工精度測定に関する研究】

(1) 半自動測定の場合，加工穴径 10 mm では誤差 0.17 mm 以内で，加工穴径 30 mm では，誤差 0.29 mm 以内で真直度を測定することができた.

(2) 路程 42 mm 付近では，受信用振動子の共振がみられた.

(3) 自動測定器では，バックラッシやがたつき，測定器の剛性を改善し，加工機上で測定できる構造とした.
加工穴径 10 mm では誤差 0.11 mm 以内で，加工穴径 30 mm では，誤差 0.03 mm 以内で真直度を測定することができた.

(4) BTA マシンに測定器を取り付け，加工中に穴位置を測定した結果，加工熱により音速が変化し，穴位置が深い位置で測定されることが分かった.

謝　　辞

本研究は，公益財団法人三井金型振興財団令和 4 年度研究助成を受けて遂行することができました．申請から，研究助成，各種手続き，研究遂行に対して温かいご助言をいただきました．全てに対して心から感謝，御礼申し上げます.

研究成果の発表

(1) 篠﨑烈，田中陽彩，坂本武司，石橋大作，明石剛二 : ステンレス鋼の振動研磨における表面粗さ向上の効果，2022 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2022)，pp. 400.

(2) 篠﨑烈，竹下旺希，中村智希，石橋大作，明石剛二 : 超音波測定を用いた加工穴の測定技術，第 14 回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会，（2022），pp. 382.

(3) 竹下旺希，篠﨑烈 : 超音波測定技術を用いた加工穴位置測定に関する研究，2022 年度精密工学会久留米地方講演会／第 23 回学生研究発表会講演論文集，（2022），pp. 131.　　企業特別賞受賞

(4) 武田泰征，篠﨑烈 : 超音波計測における数値計算を用いた穴位置推定方法の検討，2022 年度　精密工学会久留米地方講演会／第 23 回学生研究発表会講演論文集，（2022），pp. 132.　　企業特別賞受賞

(5) 熊谷丈一郎，篠﨑烈，岩本達也 : 深穴加工における超音波を用いた穴深さ測定の検討～反射波到達時刻判定方法の比較～, 日本機械学会講演論文集　九州学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2023), pp. 418.

(6) 坂口拓斗，篠﨑烈 : ガラス成形「スランピング法」に用いる円筒金型研磨技術の開発，2023 年度精密工学会秋季大会学生研究発表会論文集，（2023），pp. 31-32.

(7) 宮﨑翔，篠﨑烈 : ガラス成形技術「スランピング法」による成形ガラス精度の検証，2023 年度精密工学会九州支部第 24 回学生研究発表会，（2023），B6.

(8) 坂口拓斗，篠﨑烈 : ガラス成形「スランピング法」に用いるステンレス鋼円筒金型の開発，2023 年度精密工学会九州支部第 24 回学生研究発表会，（2023），A6.

(9) 篠﨑烈，村田稔，竹下旺希，石橋大作，明石剛二 : 超音波測定による穴位置測定技術の検討，2023 年度精密工学会中国四国支部・九州支部共催広島地方講演会講演論文集，（2023），pp. 67-68.