

座標測定機におけるクランプ力によるワークピースの変形*

和合 健**、浅沼 拓雄**

座標測定機 (CMM) を利用した適正な測定作業を実施するため、ここではクランプ力を取り上げ、物理現象を数値化して測定誤差に与える影響の大きさを求めた。その結果、熟練者でも手回しねじ締めでは 30N 程度のクランプ力になることから、過度なクランプ力には注意が必要であることが検証できた。

キーワード：座標測定機、測定戦略、クランプ力、変形、測定誤差

Workpiece Deformation due to Clamping Force in Coordinate-Measuring Machine

Takeshi Wago and Takuo Asanuma

When using a coordinate-measuring machine (CMM), measurement error may arise because of deformation of the workpiece due to clamping forces. We thus investigate the clamping force and its effect on dimensional measurements made with CMMs. The results show the necessity of avoiding excessive clamping force, which can easily reach 30 N, e.g., in the case of screw clamping.

key words : coordinate-measuring machine(CMM), measurement strategy, clamping force, deformation, deviation

1 緒言

座標測定機 (以下、CMM) は、X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 軸により構成された空間において、各軸に内蔵された目盛尺によりその軸における位置情報を得ることができるため空間点の (X、Y、Z) 座標値を得ることができる。また、プローブと呼ばれる機械的または電気的な機構を持つトリガスイッチと、スタイラスの先端に取り付けた球状のチップで構成されるプローブシステムが測定物と接触することで測定物形体の位置を高精度に検知できる。

CMM は目盛尺が各軸に並列に配置され、目盛尺と測定物を同一直線上に配置されない、所謂アップの原理に従わない構造であるため高精度測定が難しいことが指摘されていた¹⁾。しかしながら今日のパソコン支援による補正技術の革新的な進歩²⁾によりサブミクロン台の測定誤差を保証する高精度測定が実現されている。このように CMM は高精度測定が可能になってきているが、CMM の最大の利点である融通性の高さから作業者の測定戦略³⁾ 及び測定技能の違いにより同一の CMM で同一の測定物を測定した場合に測定誤差に違いが見られる。

ここでは、CMM を利用した適正な測定作業の実施を図るため、誤差要因の一つに着目して実験し、その物理現象を数値化して測定誤差に与える影響の大きさを求める。ここで取り上げた誤差要因は「クランプ力」である。物理的な力を加えると測定物は変形し、その物理的な力を解放すると弾性特性により変形が元に戻る。クランプ力を加えた時とクランプ力を解放した時で測定物の形状が

異なっていれば、正確な寸法測定を行ったとしても測定誤差が大きくなる。ここでは、クランプ力に着目してクランプ力が与える測定誤差の大きさ、及び適正なクランプ方法の獲得について取り組んだ。

2 実験方法

2-1 実験装置の構成

実験装置の構成を図 1～図 4 に示す。図 1 はデータ集録部でクランプ力は 3 成分動力計を使用して X、Y、Z 方向の 3 力を測定した。測定物の変形量は差動トランス式変位計を使用して測定し、合わせて 4 信号を A/D 変換器を経由してデータ集録パソコンに取り込んだ。各装置の設定では、3 成分動力計の表示単位は 0.0001 (N) に設定した。差動トランス式変位計の測定範囲は $\pm 0.2\text{mm}$ 、目量は $0.1\mu\text{m}$ 、校正時の入出力の相関係数は $R=0.9999985$ であった。図 2 はクランプ部でパラレルブロックの上に断面寸法 $50\text{mm}\times 10\text{mm}$ 、長さ 350mm の SUS440 のバー状ワークを置き、長さ 150mm のクランプバーでクランプ力を与える。パラレルブロックの位置はエアリー点とし、バーの全長を h 、パラレルブロックの間隔を q とするとエアリー点の位置は $q\approx 0.577h$ となる。図 3 は 3 成分動力計へのクランプねじの固定方法を示した。3 成分動力計本体に設置されたねじ穴の位置及び穴数がここでの実験で適さなかったため厚さ 5mm の SS 材鋼板を治具として利用した。図 4 は差動トランス式変位計の設置位置を示したもので、バー状ワークの測定者から向かって左側の端面の X 方向

* 平成 25～26 年度 共同研究・東北復興 CMM 事業

** 素形材技術部

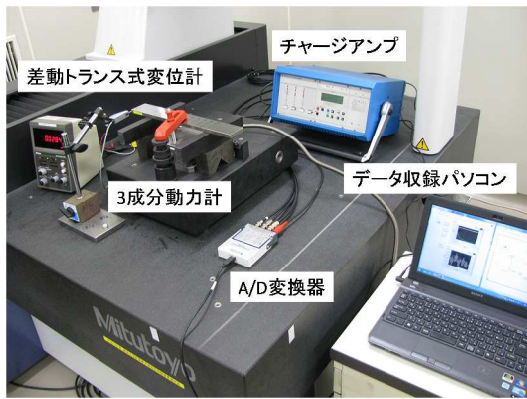


図1 実験装置の構成 (データ集録部)

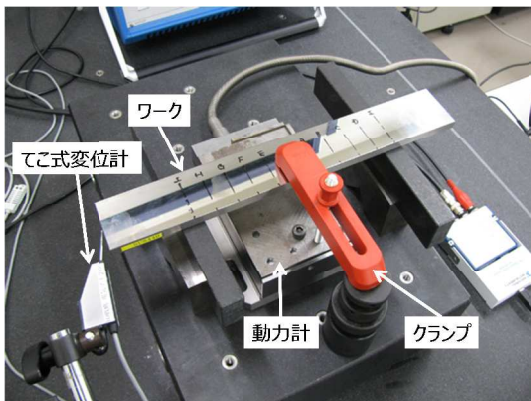


図2 実験装置の構成 (クランプ部)

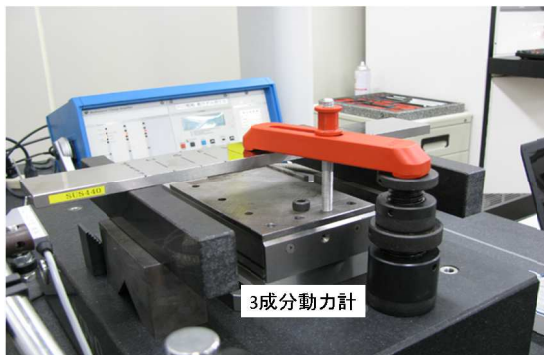


図3 実験装置の構成 (動力計)

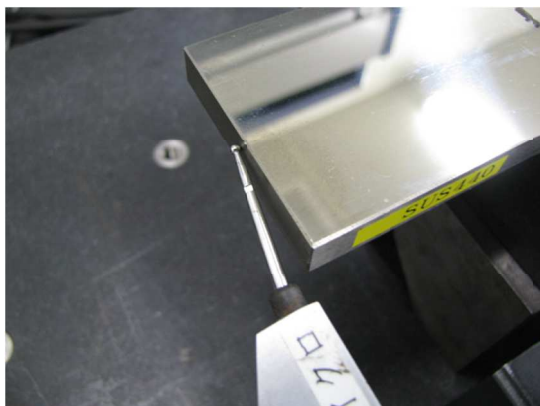


図4 実験装置の構成 (差動トランス式変位計のスタイラス部)

表1 主な仕様

バー状ワーク	
寸法	350×50×10mm (GBは35×9mm)
材質	SUS440
ヤング率	$21.6 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$

3成分動力計	
品名	圧電素子型動力計
型式	9257B
メーカー	Kistler
感度	$F_x, F_y -7.5 \text{ pC/N}, F_z -3.7 \text{ pC/N}$
測定範囲	$F_x, F_y, F_z -5 \sim 5 \text{ kN}$

変位計	
品名	ミューチェッカ
型式	M417
メーカー	ミツトヨ
原理	差動トランス式
目量	$0.1 \mu\text{m}$
Range	$\pm 0.2\text{mm}$

変位を測定した。バー状ワークの物性値と各装置の主な仕様を表1に示す。バー状ワークの材質はSUS440でヤング率は理科年表で示す鋼の値とした。3成分動力計は圧電素子型で高剛性かつ高速応答に対応する性能を持ち、差動トランス式変位計は $0.1\mu\text{m}$ の表示分解能を持つ。

2-2 クランプ力と変位の測定方法

クランプ力の測定は図5に示す方法で行った。点Kを支点とした時に、ボルトを締め込む力点にかかる力を F_1 、ワークの作用点にかかる力を F_2 とすると、2力の関係はモーメントの力の釣り合いから式(1)で示され、式(2)が求められる。

$$F_2 \times 2L = F_1 \times L \quad \dots \dots (1)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} F_1 \quad \dots \dots (2)$$

ここでは、クランプ力により生じるワークの変形量を簡易的に測定するため、図6のとおりてこ式変位計を利用して左端面の変位量を測定した。ワークは断面寸法 $50\text{mm} \times 10\text{mm}$ 、長さ 350mm のSUS440で、クランプバーの長さは 150mm とした。ワークの支持方法は、平行ブロックを使用した2点支持として、支持位置はエアリー点(端度器の両端面が平行になる位置)とした。2点支持間の距離は 202mm とした。

また、クランプ力に対するバー状ワークの変形量はバー状ワークの左端面の変位量と定義し、図6に示す位置を差動トランス式変位計で測定した。クランプ力を与えるバー状ワークの位置は図7及び図8に示すとおり、左右のエアリー点の midpoint から左側のエアリー点までを $1 \times P$ (約 101mm)として、その左隣の位置を $0.6P$ 、次を $0.4P$ 、 $0.2P$ とし、エアリー点上を $0P$ とした5か所にクランプ力を与えた。クランプ力を与えた5か所の位置でのクランプバーの形態を図7に示す。クランプねじを回してクラ

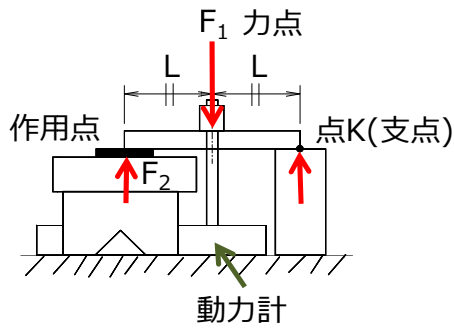


図5 クランプ力の測定方法

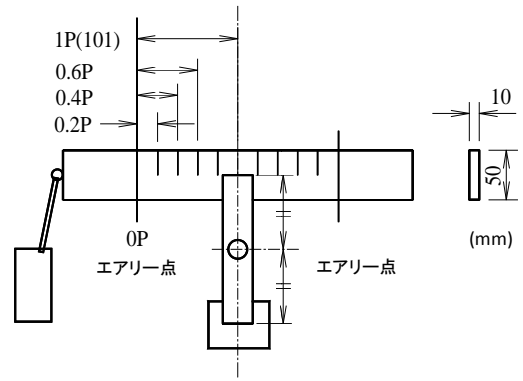


図8 クランプ位置の説明

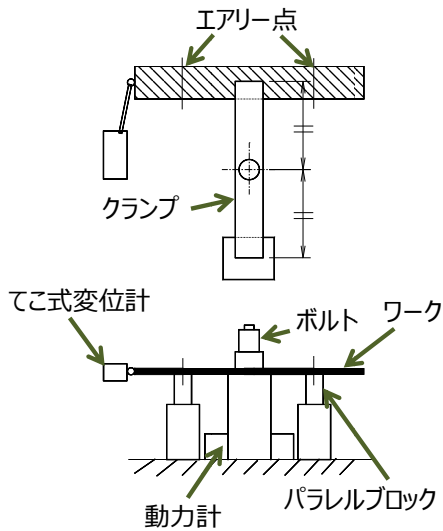


図6 ワークとクランプの配置

クランプ力を増す動作はスパナを利用して連続動作として作業者が手動で行い、Z方向のクランプ力が500Nを超えた時点で、クランプ力の増加を中断し、そこからねじを逆に回して力を減少させ、クランプ力が解放した時点でクランプ力の3信号と変位計の1信号のデータ集録を停止する一連の流れとした。ここで、データ集録のサンプリング周期は、10 ms/Samplingとした。

3 実験結果及び考察

3-1 クランプ力と端面変位の関係

(1) 樹脂クランプの場合

図9に樹脂クランプの場合のクランプ力と端面変位の関係を示す。位置の5水準のすべてでほぼ線形の関係が見られ、予想どおり1Pで傾きが最も大きく、OPのエアリー点のクランプ位置に近づく方向で傾きが小さくなっている。端面変位の大きさは250.0N時に1Pで27.6 μ m、0.6Pで22.3 μ m、0.4Pで19.7 μ m、0.2Pで13.2 μ m、OPで1.6 μ mとなった。OPでの端面変位が他のクランプ位置と比較して特筆して小さく測定された。このことから測定物をクランプする場合は下当て治具のある位置でクランプすることで測定物の変形が防げる。すべての水準で戻り誤差、通称ヒステリシスが見られ、これはクランプねじの締め込み時にワークからの反力でクランプが押し返される現象と時計回り方向(CW)にクランプねじを回す回転力の二つの力の影響によりクランプバーが横方向(X方向)にズれるために起こったものと思われる。最終的なONの着地では変位も0 μ mに収束していることから、反時計回り方向(CCW)のねじ回転によりズレが戻る作用と反力の終息により最初の位置に復帰したと考えられた。また、5水準のすべてで線形性が見られる理由は、樹脂クランプの特性からある程度のワークからの反力を吸収するため、X方向へのズレ量が抑えられたため戻り誤差が小さいと思われる。

(2) アルミクランプの場合

図10にアルミクランプの場合のクランプ力と端面変位の関係を示す。アルミクランプでも樹脂クランプと同様に1Pで最も傾きが大きくOPへ向かう方向で傾きが小さくなっている。250.0N時の端面変位は1Pで19.1 μ m、0.6P

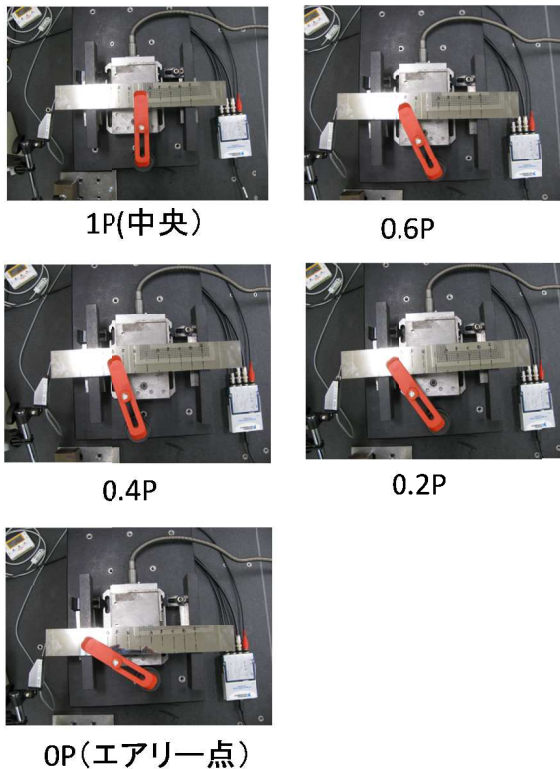


図7 バー状ワークに対しクランプ力を与える位置

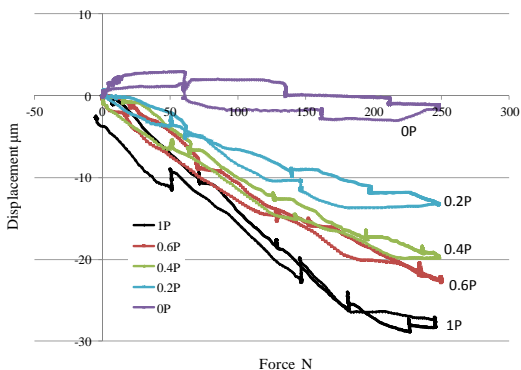


図9 クランプ力対端面変位の関係 (樹脂クランプの場合)

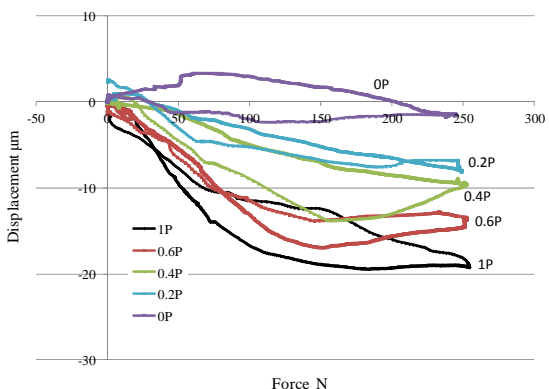


図10 クランプ力対端面変位の関係 (アルミクランプの場合)

で14.4μm、0.4Pで9.4μm、0.2Pで8.0μm、0Pで1.5μmであった。樹脂クランプと比較して1Pでは8.5μm小さく、0Pではほぼ同等であった。このことから樹脂クランプ及びアルミクランプの双方の場合で、下当て治具上でクランプすることがワークを変形させないクランプ方法として非常に有効であることがわかった。

アルミクランプでは樹脂クランプと比較して、各水準の波形が非線形を示し、戻り誤差の幅も大きい。これは、アルミクランプはクランプバーの剛性が高いためクランプねじの締め込み時にかかる力をクランプバーが吸収できず、クランプねじの回転力が直接的に作用してクランプバーのX方向へのズレになり戻り誤差を増幅させたと考えられる。一方で、クランプねじをCCW方向に回転させてクランプ力を解放させる場合では、ねじ回転による戻る方向へのズレとバー形状ワークの弾性特性により開始位置に戻った。このことからアルミクランプを使用する場合にはクランプバーの高い剛性の影響により下当て治具からズレて加力される懸念があるので注意が必要である。

3-2 梁の撓みの理論式

細長い棒が適当な方法で支えられ、その棒に曲げモーメントやせん断力が加わると曲がりが生じる。特に細長い棒の場合は、曲げモーメントの影響が大きく曲がりに

作用する。ここでの曲げは2点の自由支持に該当し、その理論式を以下に示す。

図11の点Cでの撓み y_c は式(3)、式(4)を使用して求められる。

$$y_c = \frac{Wl^3}{3EI_x} \cdot \frac{a^2}{l^2} \cdot \frac{b^2}{l^2} (m) \quad \dots \dots (3)$$

$$I_x = \frac{ed^3}{12} \quad \dots \dots (4)$$

ここで、 W は荷重(N)、 l 、 a 、 b は各長さ(m)、 E はヤング率 ($N \cdot m^{-2}$)、 I_x は断面二次モーメント、 d 、 e は断面の各辺の長さ(m)で d が垂直方向、 e が水平方向である。ここで使用したバー状ワークに1Pの位置で荷重250Nを与えた場合の鉛直方向の撓み量 y_c を求める。各変数に代入する数値は、 $W=250$ (N)、 $l=0.202$ (m)、 $a=0.101$ (m)、 $b=0.101$ (m)、 $E=21.6 \times 10^{10}$ (Nm^{-2})、 $d=0.01$ (m)、 $e=0.05$ (m) とすると、鉛直方向の撓み量 $y_c=47.7 \mu m$ が算出された。ここでのバー状ワークの場合に各クランプ位置に250Nを与えた場合の鉛直方向の撓み量 y_c を式(3)により算出すると、図12のとおり1Pでは47.7μm、0.6Pでは33.6μm、0.4Pでは19.5μm、0.2Pでは6.2μm、0Pでは0μmであった。また、式(3)のとおり荷重 W と鉛直方向の撓み量 y_c は比例関係による線形式になることがわかる。ここでの実験で測定した変位は図6に示すとおりバー状ワークの左側端面であるから、式(3)で求めた鉛直方向の撓み量 y_c と異なる。クランプ力による左端面変位は図13に示すメカニズムで生じることが予想され、力点の鉛直方向の撓み y_c を

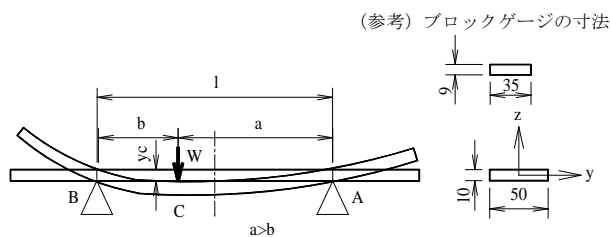


図11 2点の自由支持の場合の撓み曲げ
モーメントによる撓み

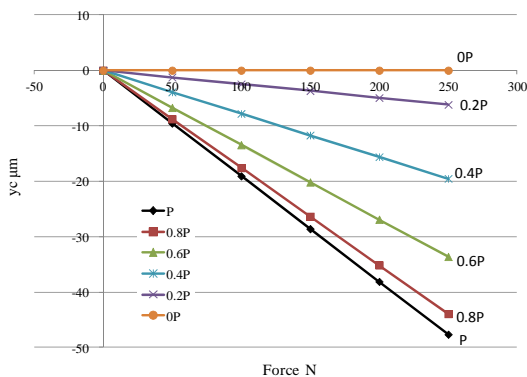


図12 梁の撓みの理論値

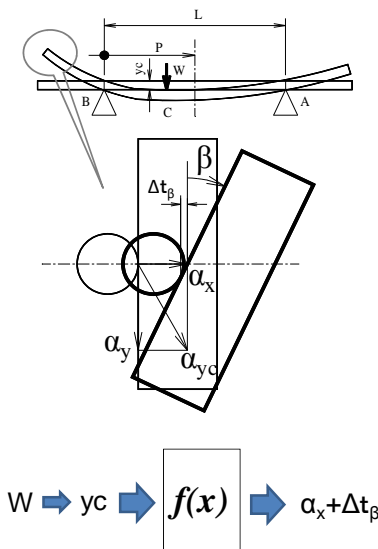


図13 端面の横方向変位が発生するメカニズム

入力として、端面に平行移動と回転により $\alpha_x + \Delta t_\beta$ の変位が生じた。ここで、 W は力点への荷重(N)、 y_c は力点での鉛直下方向への変位(μm)、 $\alpha_x + \Delta t_\beta$ は端面の横方向への変位(μm)、 $f(x)$ は平行移動と回転による変位の関数である。

3-3 ねじの回し角度とクランプ力の関係

(1) 樹脂クランプの場合

樹脂クランプとアルミクランプでクランプねじの回し角度とクランプ力とクランプ力との関係を測定した。クランプねじは樹脂クランプ及びアルミクランプとも M8 並目で、樹脂クランプのクランプねじは樹脂製の六角外周の内側部に金属製ねじを圧入した構造である。樹脂クランプではクランプ位置が 1P と OP ともクランプねじを $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 360^\circ$ の 90° ステップで回した後に一旦回転を停止させる手順でクランプ力と端面変位の関係を測定した。 0° から 360° まで CW 方向にねじを回した後、CCW 方向に 360° から 0° までねじを戻してクランプ力を解放した。

図 14 に樹脂クランプの場合を示す。クランプ位置が 1P では、クランプねじの回し角度 90° でクランプ力 50.5N → 端面変位 $2.6\mu\text{m}$ 、回し角度 180° でクランプ力 105.3N → 端面変位 $8.7\mu\text{m}$ 、回し角度 270° でクランプ力 171.0N → 端面変位 $17.1\mu\text{m}$ 、回し角度 360° でクランプ力 243.5N → 端面変位 $20.0\mu\text{m}$ であった。樹脂クランプのクランプ位置が OP では、クランプねじの回し角度 90° でクランプ力 49.5N → 端面変位 $5.1\mu\text{m}$ 、回し角度 180° でクランプ力 110.1N → 端面変位 $5.9\mu\text{m}$ 、回し角度 270° でクランプ力 170.8N → 端面変位 $6.5\mu\text{m}$ 、回し角度 360° でクランプ力 246.8N → 端面変位 $5.9\mu\text{m}$ であった。

樹脂クランプでは戻り誤差が小さいため、行きと帰りではほぼ軌跡が一致している。これは樹脂クランプはクランプバーでワークからの反力を吸収できるためクランプバーの X 方向へのズレが小さく、このことからクランプ力が直接的にワークに作用し、反力吸収の役割を担っている。その半面、ねじ回転の限界が無いのでねじの回し

過ぎに注意が必要である。

(2) アルミクランプの場合

アルミクランプでは、クランプ位置が 1P では $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ$ の 45° ステップ、クランプ位置が OP では $0^\circ \rightarrow 22.5^\circ \rightarrow 45^\circ$ の 22.5° ステップでクランプねじを CW 方向に回し、その後 CCW 方向にねじを戻してクランプ力を解放する手順で行った。図 15 にアルミクランプの場合を示す。クランプ位置が 1P では、クランプねじの回し角度 45° でクランプ力 98.8N → 端面変位 $11.7\mu\text{m}$ 、回し角度 90° でクランプ力 256.4N → 端面変位 $15.2\mu\text{m}$ であった。クランプ位置が OP では、クランプねじの回し角度 22.5° で

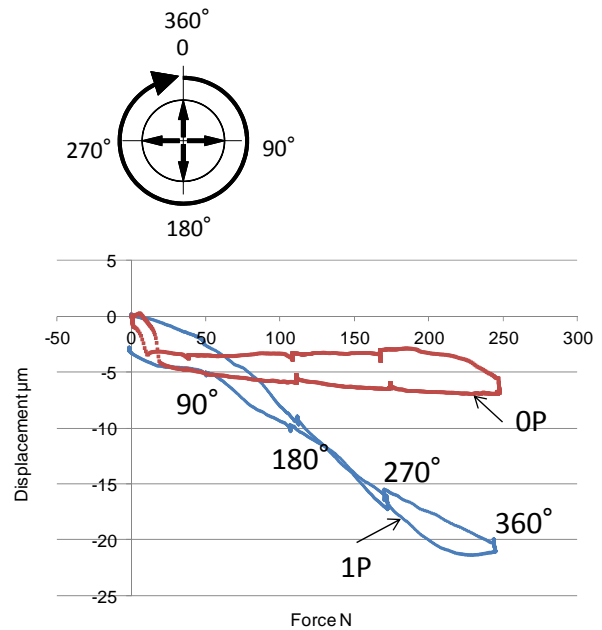


図14 樹脂クランプ (L=150mm) での回し角度とクランプ力

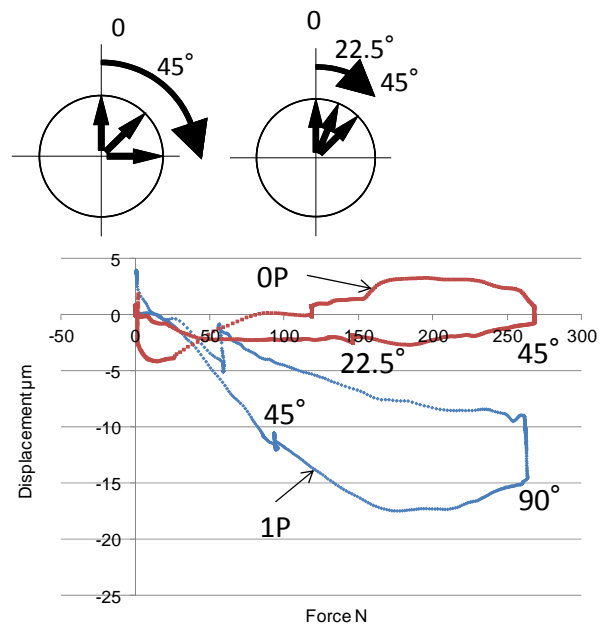


図15 アルミクランプ (L=150mm) での回し角度とクランプ力

クランプ力 120.6N→端面変位 2.2 μ m、回し角度 45°でクランプ力 267.9N→端面変位 0.3 μ mであった。アルミクランプでは戻り誤差が大きくみられ、これはアルミクランプでは戻り誤差が大きくみられ、これはアルミクランプクランプバーがねじ回しによるクランプ力の増加で生じるワークからの反力を吸収できないために、その反力を解放するためにクランプバーが X 方向にズレたために生じたと思われる。また、アルミクランプではクランプ位置が OP でクランプねじの回し角度が最大で 45°で限界であった。このことからアルミクランプの場合はクランプ力が直接的にワークに伝達されるため、作業者の技能感覚によるクランプ力の精細な調整が必要となる。

3-4 個人差によるクランプ力の相違

(1) 樹脂クランプの場合

図16に樹脂クランプの場合の個人差によるクランプ力の比較を示す。個人差の比較対象は熟練者、初心者の男性、初心者の女性とした。図中の手回しとは工具を使わずに指でねじを締めた場合で、スパナとはスパナ工具を使用してねじを締めた場合である。その結果、熟練者は手回しとスパナを使った場合で締め付け力の差異が小さい。一方で、初心者の男性と初心者の女性で過度な締め付け力を与える傾向が見られた。これは、熟練者は樹脂クランプは大きな弾性特性を有しているためねじの回し過ぎに注意が必要であることを理解しているのに対し、初心者はその特性を理解していないため、ねじの締め付け限界までねじを回したためと思われる。また、初心者の女性では女性の非力さから手回しでは締め付け力が適

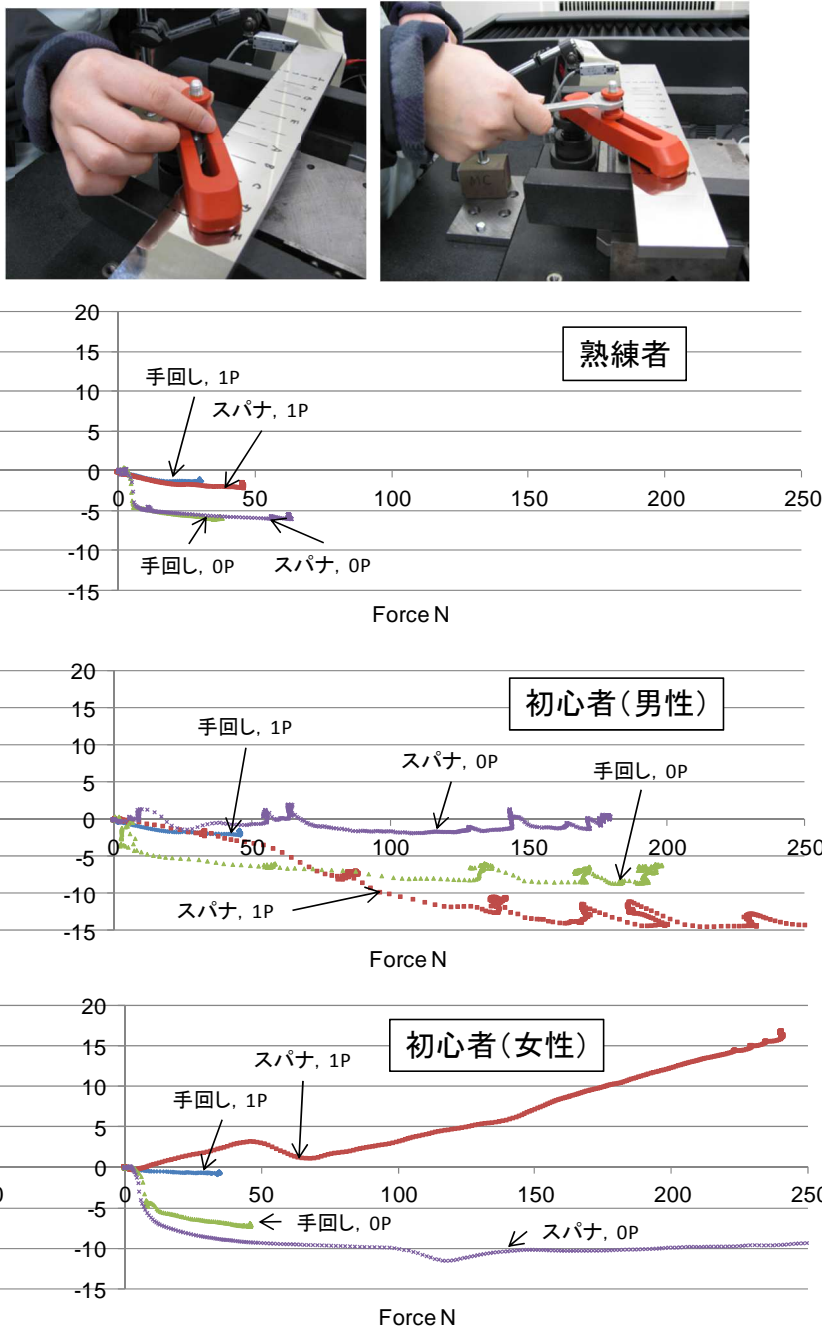


図 16 個人差による締め付け力の比較 (樹脂クランプの場合)

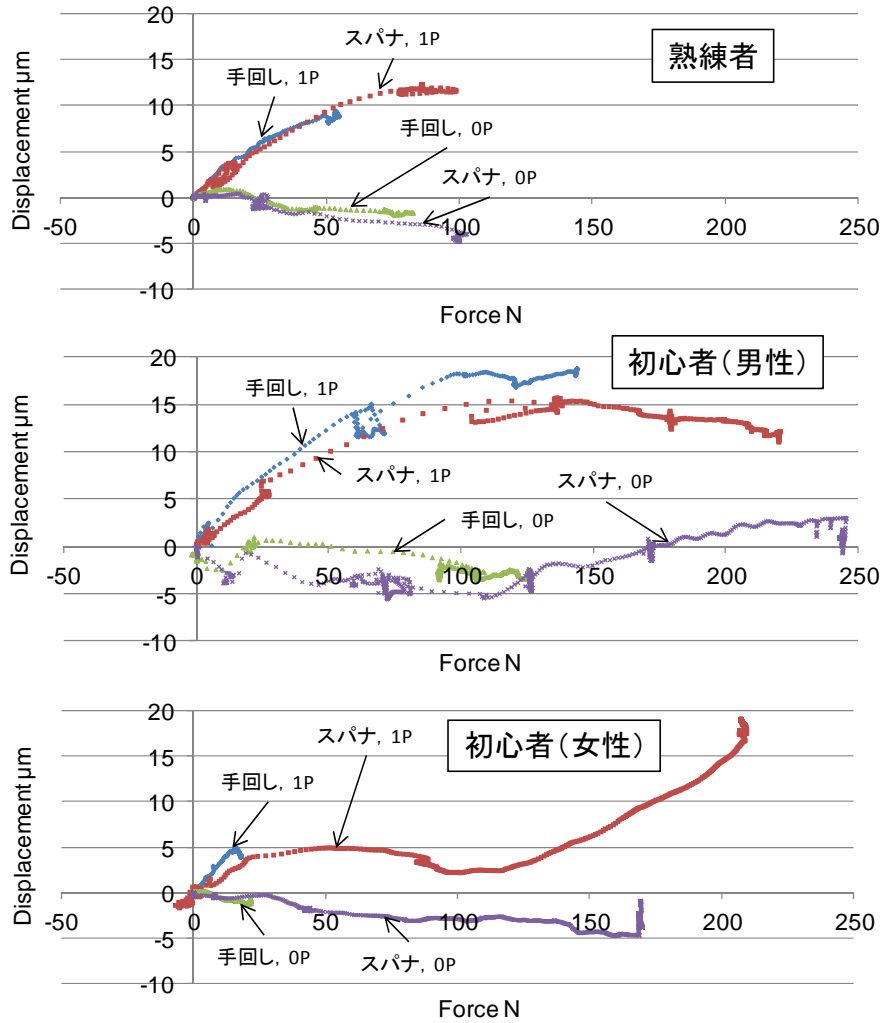


図 17 個人差による締め付け力の比較（アルミクランプの場合）

切であるが、スパナの場合で必要以上の締め付け力が見られた。

(2) アルミクランプの場合

図17にアルミクランプの場合の個人差によるクランプ力の比較を示す。アルミクランプでは熟練者でも100N程度の大きな締め付け力が見られた。これはアルミクランプバーの剛性が大きいためねじの回し角度が直接的にクランプ力として作用したためと考えられる。しかしながら、熟練者の場合ではエアリー点の0Pの位置ではクランプ力は100Nと大きいですが、端面変位は5µm以下であることから下当て治具上でクランプすることで過度なクランプ力でもワーク変形が回避されている。一方、初心者は

必要以上の締め付け力が見られ、その締め付け力は樹脂クランプとアルミクランプで同じ程度であった。

4 静止摩擦係数の測定

4-1 目的

CMMの測定でクランプをする理由は、CMMのプロービング力によりワークが動くのを防止するためであり、ワークを動かす力の大きさは式(5)に示す静止摩擦力 F_0 で説明できる。

$$F_0 = \mu N \quad \dots \dots (5)$$

ここで、 μ は静止摩擦係数、 N は垂直抗力(N)である。垂

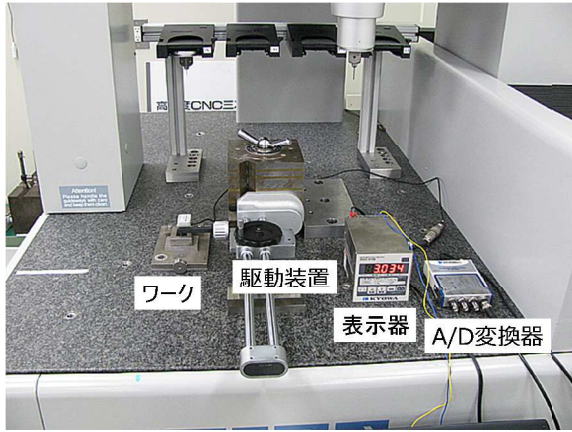


図18 装置の全体図

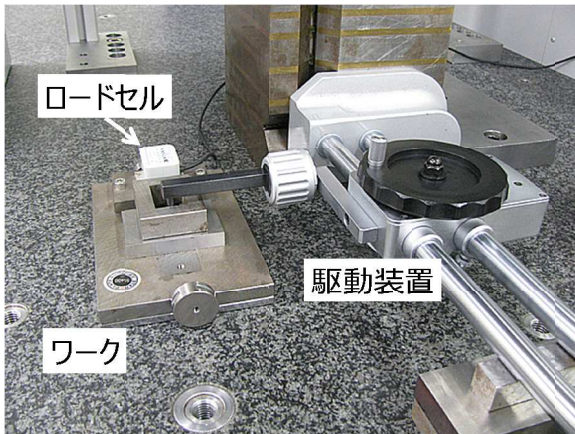


図19 ワークと駆動装置

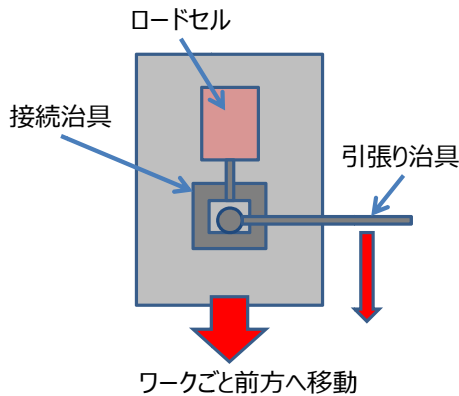


図20 ワーク部の詳細

直抗力は面に垂直に働く力であり、水平面上の場合はワークの重力になる。パラレルツインプローブ式CMM、例えばCarl Zeiss社製UPMC550-CARATのプロービング力は標準設定が0.2Nであるので、ワークと石定盤の組み合わせによる静止摩擦係数が分かれば0.2Nのプロービング力で静止状態を保つ垂直抗力の限界を求めることができる。以下に、静止摩擦係数を求める実験を示す。

4-2 実験装置及び実験方法

実験装置は図18、19及び図20で示すとおり、ロードセルを載せた鋼板を作業者がハンドルを手動で回して引張る方式である。ロードセルに与えられた力を表示器

に表示すると共に、A/D変換器を通して連続データとしてパソコンに保存した。パソコンに連続データとして取り込むことにより、瞬間的な最大値から求める必要がある静止摩擦係数が測定できた。CMM定盤と接する鋼板の材質はSK3、その表面の除去加工方法は正面フライス仕上げ、その表面粗さはRa1.48 μ m、Rz15.62 μ mであった。CMM定盤と鋼板の接触面は乾燥状態であった。

4-3 実験結果及び考察

ロードセルや接続治具を含めたワークの重量を電子天秤で測定したところ2.4810kgfであった。これに9.8を掛けてニュートン表記にすると24.31Nとなった。繰り返し5回で測定した静止摩擦力の平均値は4.93Nであった。式(5)により静止摩擦係数 μ を算出すると0.2028となり、UPMC550-CARATのプロービング力は0.2Nであるからワークが静止してられる最大の垂直抗力は0.987Nが算出された。この結果、クランプ力はわずか1N程度の力を加えるだけでワークは静止できるようだ。図16の熟練者が樹脂クランプを手回して締め付けた場合のクランプ力が30N程度であることから、手回しねじ締めで十分にワークが固定できることが分かった。

5 結 言

- (1) クランプ力の個人差を調べた結果、樹脂クランプの締め付け力は、熟練者の手回しで30N程度、熟練者のスパナ使用では45N程度であり、手回しとスパナを使った場合に締め付け力の差異が小さいが、初心者では過度な締め付け力の傾向が見られた。
- (2) アルミクランプでは、熟練者の手回しにおいても80N程度の大きな締め付け力が見られた。初心者では樹脂クランプの場合と同様に過度な締め付け力が見られた。アルミクランプではクランプバーの剛性が大きいと直接的にねじの締め付け力がクランプ力としてワークに働く傾向が見られたので締め付け時に注意が必要である。
- (3) ワークを正面フライス仕上げの鋼板として、CMM定盤面に設置した場合の静止摩擦係数を測定したところ0.2028となった。プロービング力が0.2NのCMMのプロービング時にワークが静止してられる最大の垂直抗力は0.987Nとなった。熟練者の樹脂クランプを使用した場合の手回しねじ締め時のクランプ力が30N程度であったことから、ワーク固定は手回しねじ締め程度のクランプ力で十分であることが分かった。

以上を総括すると、作業者の熟練度の違いによりクランプ力の個人差が見られ、初心者は必要以上のクランプ力で締め付ける傾向があるのでワーク変形の注意が必要である。また、熟練者でもアルミクランプの場合では過度なクランプ力が見られたことから、クランプ位置は常に下当て治具の位置でクランプすることが肝要である。また、0.2Nのプロービング力に打ち勝ってワークが静止してられるクランプ力の最大値は1N程度だった。熟練

者でも手回しねじ締めでは 30N 程度のクランプ力になることから、過度なクランプ力には注意が必要であることが検証できた。

文 献

- 1) ミットヨ : CNC 三次元測定機マイクロコード CRYSTA-Apex S シリーズ、Catalog No.16004(7)
- 2) 高増潔 : 知的計測技術によるメソスケール形状測定、精密工学会誌、74、3、p213 (2008)

- 3) 高増潔 : GPS に基づいた検証方法、第 9 回設計フォーラム、p20 (2004)

謝 辞

本研究は、東北復興 CMM 事業において独立行政法人産業技術総合研究所をパイロットラボとして東北 6 県公設試の共同研究として実施された。本実験に関わられた NMIJ/AIST 並びに東北 6 県公設試の연구원の方々には貴重なお指導を頂き、この場を借りて感謝を表す。