

機械の直角度のキャリブレーション

著: M.A.V. Chapman

はじめに

本稿では、2012年版 ISO230-1 (工作機械の試験方法 - 第1部: 無負荷または準静止条件で運転している機械の幾何学的精度) に従って工作機械の直線動作軸間の直角度を評価する手法について解説する。各手法から求めた直角度誤差の比較および対比にはコンピュータによるシミュレーションを用い、機械の軸に含まれる直角度、真直度および角度 (ピッチとヨー) の誤差ならびに試験位置については複数のパターンを考慮した。空間精度補正プロセスの一環として機械の直角度誤差を評価および適用する方法に関する性能比較表と助言についても最後に提案する。

直線軸 2 軸間の直角度 - 定義

ISO230-1 のセクション 3.6.7 では、直線軸 2 軸間の直角度誤差について、「直進運動の基本軸に対応する直進運動部品の機能点の軌跡の基準直線の傾きと、直進運動の基本軸に対応する他の直進運動部品の機能点の軌跡の基準直線の傾きとの差」と定義されている。この基準直線は、測定された各軸上の機能点の軌跡を、以下のいずれかを使用して直線フィッティングすることによって得られると ISO230-1 では記載している。

- a) 最小領域平均基準直線
- b) 最小二乗法フィット基準直線
- c) エンドポイントフィット基準直線

図 1 に、それぞれのフィッティング法を示す。赤色の曲線は、軸の移動に伴って記録された真直度偏差 (つまり軌跡) のばらつきを示す。青色の点線は、最小領域法、最小二乗法、またはエンドポイント法のいずれかを用いたフィッティングによって得られた基準線を示す。基準線の傾き (勾配) が、エンドポイント法によってフィッティングされたトレース上に明示されている。なお、基準線の傾きは、使用するフィッティング法によって変化することが通常である。計算のしやすさから、エンドポイント法と最小二乗法がフィッティング法として最も広く用いられている。直角度誤差を求めるときには、両方の基準線に同じフィッティング法を用いることが推奨される。本稿ではすべての基準線のフィッティングに、最小二乗法を採用している。

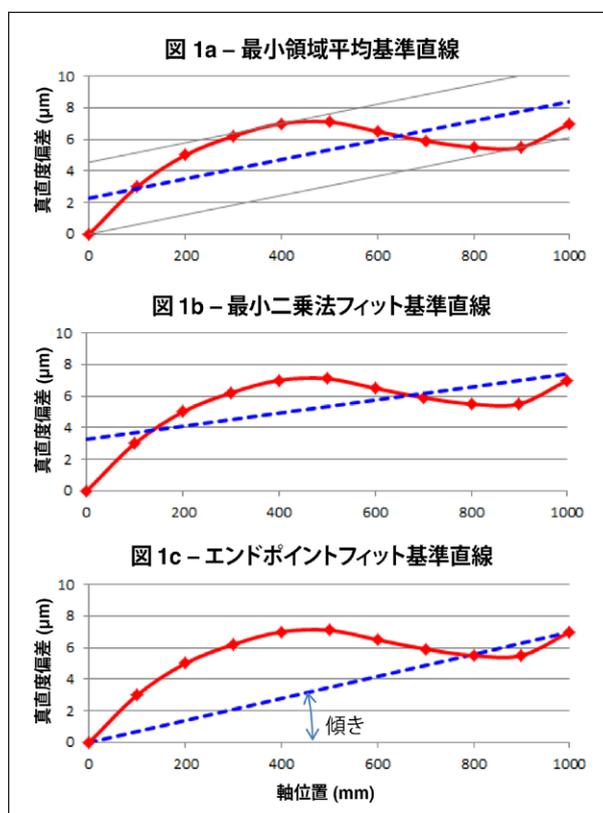


図 1

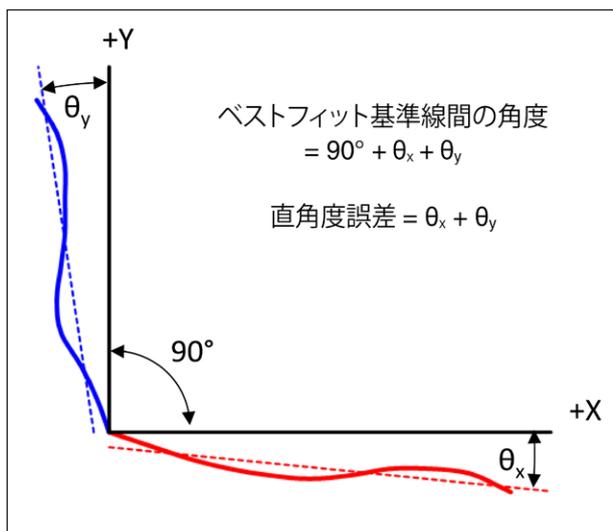


図 2

図 2 に、直線軸 2 軸間の直角度誤差の計算方法を示す。黒色の実線は機械の X 軸と Y 軸で、赤色と青色の実線は、軸の長さに沿って記録された X 軸と Y 軸の移動 (すなわち軌跡) における真直度偏差の変化を表す。なお、これらの偏差の縮尺は、明瞭化のために大幅に強調してある。赤色と青色の点線は、それぞれの軌跡にフィッティングさせた最小二乗基準線を示す。基準線の傾き (勾配) は、 θ_x および θ_y で示す。この例では、 θ_x と θ_y を加算することによって直角度誤差が求められる。なお他の代替記号を使用してもよい。レニショーのボールバーおよびレーザー直角度解析ソフトウェアでは、2 本の運動軸の正方向間の角度が 90° 超だと正の直角度として示す。本稿ではこの符号規則に準じる。

注:

1. ISO230-1 では、一方の機械軸を「データ軸」、他方の機械軸を「参照軸」とし、さらに右手の法則を用いて、直角度誤差の方向をデータ軸に対する参照軸の回転として定義し、異なる符号規則が推奨されている。上図 2 で、X をデータ軸とした場合 X に対する Y の直角度誤差はプラスになり、Y をデータ軸とした場合 Y に対する X の直角度誤差はマイナスになる。混同を避けるために、ISO230-1 では、軸間の角度が 90° 超か未満かを示す注記を追記してもよいとしている。直角度試験の結果を比較する際に、使用された符号規則を理解することが重要である。
2. ISO では各機械軸 (X、Y または Z) に対する基準線の傾きを定義しているが、直角度誤差の測定では、この傾きは、基準治具またはレーザービームによって定義される直角線を基準にして測定される。同じ結果に行きつくものの、治具、インデキサまたは光学プリズムの直角度に誤差がある場合もあり、この誤差を加味したうえで計算を行う必要がある。この誤差が不明な場合には、基準とする線を逆にし、測定を繰り返して、得られた直角度の平均値を用いる必要がある。
3. 機械の軸のフルストロークを用いた試験から測定した直角度は「全体的な」と称し、軸の一部を用いた試験から得た直角度は「局所的な」と称す。

直線軸 2 軸間の直角度 - 試験方法

現在、ISO230-1:2012 では、機械の直角度を評価する方法として以下の 5 種類の方法が記載されている。

- 1) 基準直角定規と変位計による方法 (セクション 10.3.2.2)
- 2) 基準直定規と基準割出テーブルによる方法 (セクション 10.3.2.3)
- 3) 光学スクウェアとレーザー干渉計による方法 (セクション 10.3.2.4)
- 4) 円運動精度試験 (セクション 10.3.2.6 および ISO230-4)
- 5) 対角位置決め精度試験 (セクション 10.3.2.6 および ISO230-6)

以下、それぞれの方法について詳述する。

方法 1 - 基準直角定規と変位計を使った 2 軸間真直度試験

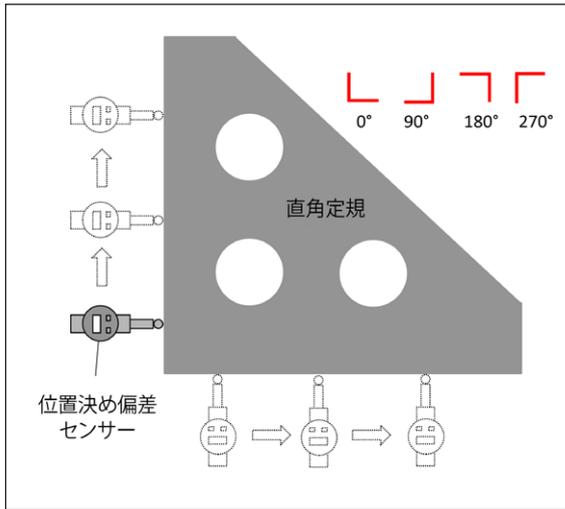


図 3

この方法では、対象となる機械軸に基準直角定規を規定どおりに合わせ、位置決め偏差センサー（デジタルゲージまたはクロックゲージなど）を用いて各軸の真直度偏差を順に測定する。図 3 にこの様子を示す。なお本稿では、この構成を「L」字形とする。両方の軸について真直度データを収集したら、それぞれのデータの傾き（勾配）を（最小二乗法、エンドポイントまたは最小領域フィッティングによって）計算し、傾き同士を比較して直角度誤差を求める。なお、試験を通して、定規の向き、変位計および軸の方向検出に応じた適切な符号規則を適用するよう気を配る必要がある。

基準直定規も利用できる場合には、図 4 のように「T」字形構成としてもよい。この構成には、反転技法を用いて反転させ（図 4 における左から右への鏡像）、定規に含まれる誤差を取り除けるといふ利点がある。また、機械の可動領域の中心に近い軸のうちの 1 軸を試験テストすることもできる。

なお、水平軸 2 軸の直角度の測定であれば、この測定器具を適宜回転させることにより、4 方向（0°、90°、180°または 270°）で「L」字形と「T」字形のいずれでも用いることができる。ただし、2 軸のうち 1 軸が垂直軸である場合には、「L」字形の場合は 2 方向（0°および 90°、反転「T」字形の場合は 1 方向（180°））以外は適用できない。ここでは、後述のシミュレーションで言及するその他の方向について触れる。

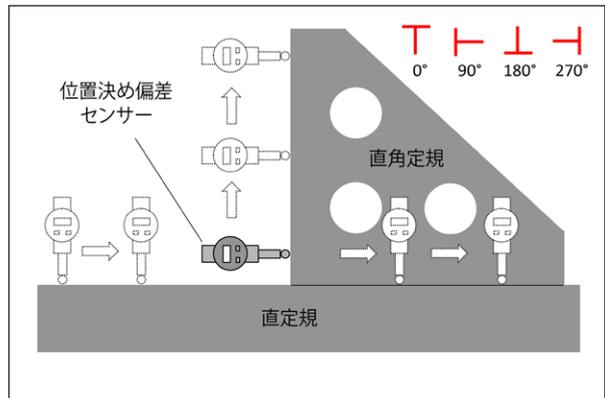


図 4

方法 2 - 基準直定規と変位計、基準割出テーブルを使った 2 軸間真直度試験

この方法は、角度インデキサに取り付けられた基準直定規を利用する方法である。まず最初の軸で真直度偏差を測定し、その後インデキサを用いて直定規を 90°回転させ、第 2 軸の真直度を測定する。図 5 にこの方法を示す。本稿ではこの構成を「+」形構成と称する。

直角度は方法 1 と同様の方法で算出する。

この方法の利点は、両方の機械軸を可動領域の中心付近に位置付けたまま試験できることが挙げられる。ただし、要求される直角度測定精度を上回る精密なインデキサが必要である。

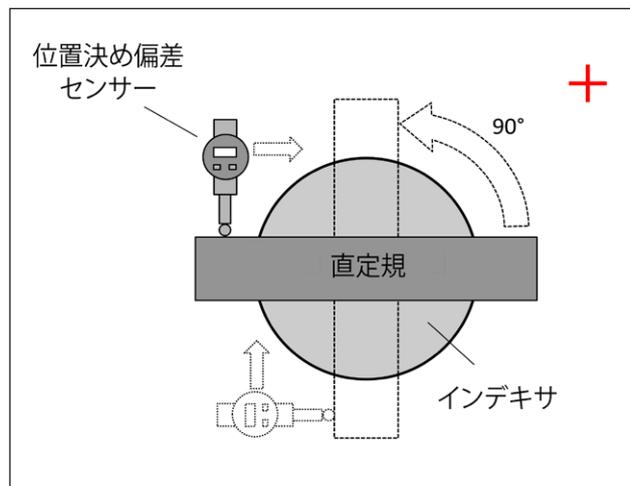


図 5

方法 3 - 光学スクウェアとレーザー干渉計を使った 2 軸間真直度試験

この方法では、レーザー干渉計システム（レニショーの XL-80 システムなど）、真直度測定用光学部品および光学スクウェアを使用する。測定装置は、(機械の構成に応じて)「L」字形と「T」字形のどちらにセットアップしてもよい。図 6 に、2 本の水平軸間の直角度試験に使用されることの多い「L」字形構成を示す。この構成では光学スクウェアがレーザービームを 90° 方向転換し、光学的な直定規を描写する。そして光学的な直定規の真直度偏差が、真直度干渉計によって測定 (明示) される。図 6 の真直度反射鏡と光学スクウェアの組合せと図 3 の基準直角定規はよく似ており、どちらも同じ「L」字形の基準線を提供する。

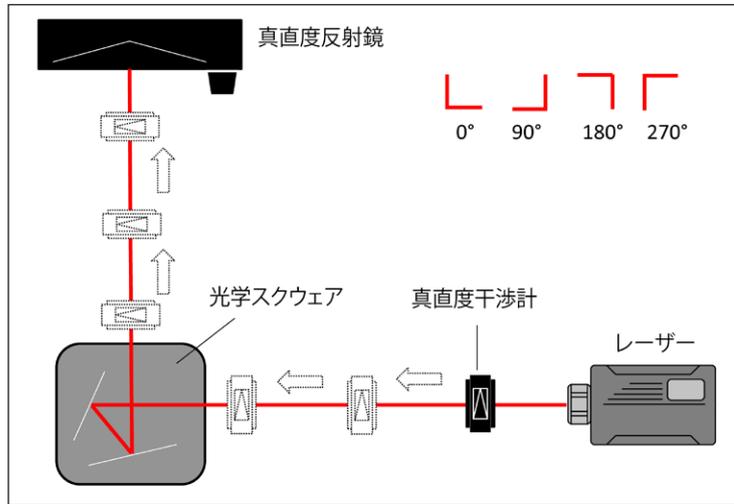


図 6

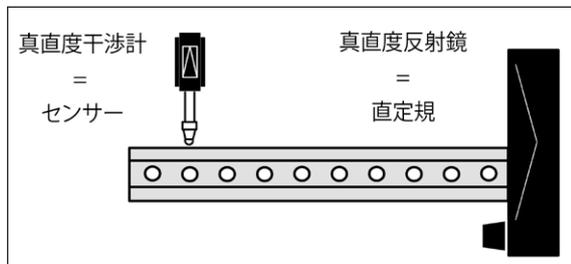


図 7

図 6 の光学的な直定規からの真直度偏差は真直度干渉計によって測定され、同様に図 3 の機械式直定規からの真直度偏差は、位置決め偏差センサーによって測定される。位置決め偏差センサーと機械式直定規の組合せと干渉計と真直度反射鏡の組合せの類比性については図 7 に示す。また、レニショーのホワイトペーパー「TE325 - Interferometric Straightness Measurement and Application to Moving Table Machines」にて詳述している。繰り返しになるが、水平軸の 2 軸の直角度を測定するときには、機械の構成に応じて適宜回転させることで 4 方向の「L」字形 (0°、90°、180°または 270°) に装置を構成することができる。いずれの方向についても、後述のシミュレーションで取り上げる。

図 6 の光学的な直定規からの真直度偏差は真直度干渉計によって測定され、同様に図 3 の機械式直定規からの真直度偏差は、位置決め偏差センサーによって測定される。位置決め偏差センサーと機械式直定規の組合せと干渉計と真直度反射鏡の組合せの類比性については図 7 に示す。また、レニショーのホワイトペーパー「TE325 - Interferometric Straightness Measurement and Application to Moving Table Machines」にて詳述している。繰り返しになるが、水平軸の 2 軸の直角度を測定するときには、機械の構成に

図 8a および図 8b に示すとおり、ターニングミラーおよび大型反射鏡を追加で用いることで、「T」字形構成を用いることもできる。この構成は、試験対象の軸のうちの 1 軸が縦軸である場合に使用されることが多い。水平軸の試験では、図 8a のようにレーザーユニットと真直度干渉計、反射鏡を使用する。垂直軸の場合は、図 8b に示すとおり、ターニングミラーと光学スクウェア、大型反射鏡も追加で使用する。

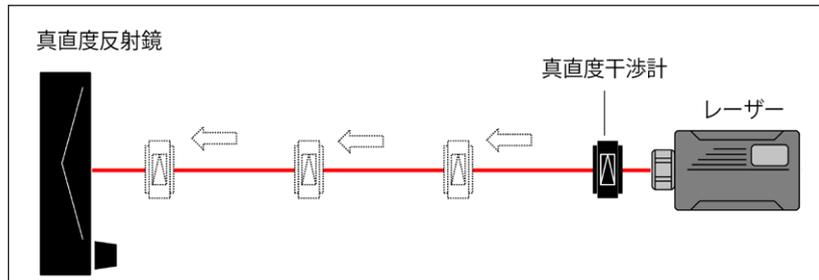


図 8a

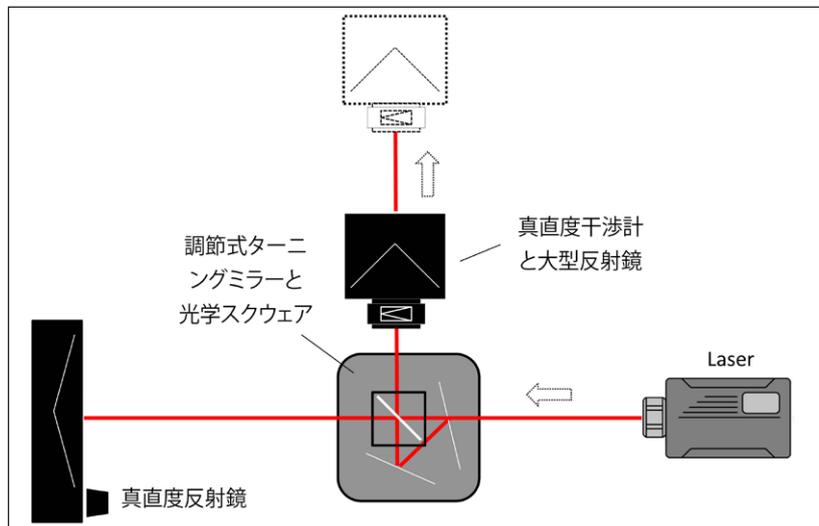


図 8b

なお、真直度反射鏡によって両試験の基準線ができるため、真直度反射鏡のアライメントを維持しておくことが重要である。図 8a および図 8b に示すレーザー干渉計による測定と、図 4 に示したような、基準直角定規を用いて得た測定もやはりよく似ている。

直角度誤差は、方法 1 および 2 と同様の方法で算出する。ただし、加工公差があることから、光学スクウェアの角度のわずかな誤差（「プリズムエラー」と呼ばれる）に対処するための若干の補正が必要となることが通例である。この補正は、解析ソフトウェアで「プリズムエラー」値を入力しておくことで自動的に適用される。

大型の機械では、対応する直定規や直角定規が高価すぎたり大きすぎたりして適切なものを用意できないこともある。用意できたとしても、定規の重量ゆえに機械にゆがみが生じるおそれもある。それに対しレーザーによる測定であれば、大型の機械であっても軸のフルストロークにわたる（グローバルな）直角度の測定に容易に適用することができる。

方法 4 - 円運動精度試験

CNC 制御下で正確な円弧補間を実行できる機械の場合には、図 9 に示すとおり、レニショーの QC20 などボールバーを用いた動的円運動精度試験によって機械の直角度を求めることができる。この試験方法は、ISO230-4 に記載されている。具体的には、低送り速度で 360°の円形のパスを時計回りに描かせ、次いで反時計回りに描かせる（赤色の点線）。円の中心にある機械テーブル上のピボットにボールバーの一端が取り付けられ、機械の主軸に装着されたピボットに他端が取り付けられる。機械が円形パスを描くと、ボールバー内のセンサーが半径のばらつきを測定し、誤差を含んだ軌跡を生成する（赤色の太線）。直角度誤差があると、たいていは、時計回りおよび反時計回りの軌跡が図示のような楕円形になる。直角度誤差は、45°の対角線（すなわち、楕円の長軸と短軸）の長さの比較から推定できる。レニショーのボールバー診断ソフトウェアでは、他の機械誤差（バックラッシュ、サーボ、スケールミスマッチ、周期誤差、真直度誤差など）の影響が取り除かれた直角度誤差を算出する。なお、このボールバー診断ソフトウェアでは、(220°までの) パーシャルアークテストから直角度を推定することも可能である。

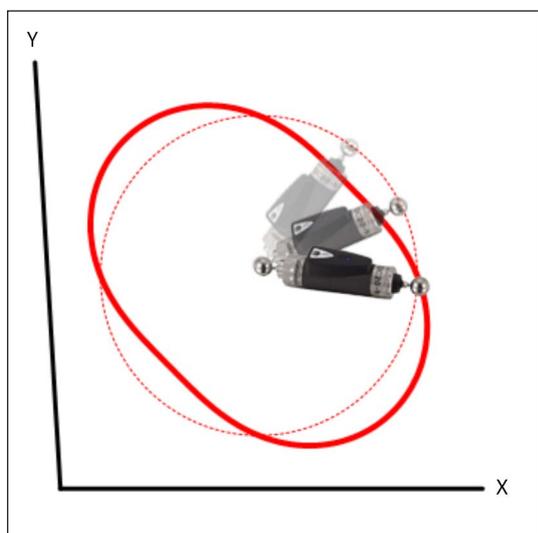


図 9

ボールバーテストの利点としては、短時間で簡単にできることがあげられる。短時間で行えるということは、直角度の結果が、他の方法に影響し得る環境変化（温度ドリフトなど）の影響をほとんど受けないということでもある。エクステンションバーを使えば、試験を半径 50mm~1000mm で調整でき、幅広い機械サイズに対応が可能である。軸の長さが大きく異なる機械では、複数の箇所試験を実施し、結果を平均化することで直角度を評価することができる（この手法については、本稿の最後にかけて詳しく説明する）。

ボールバーテストの利点としては、短時間で簡単にできることがあげられる。短時間で行えるということは、直角度の

結果が、他の方法に影響し得る環境変化（温度ドリフトなど）の影響をほとんど受けないということでもある。エクステンションバーを使えば、試験を半径 50mm~1000mm で調整でき、幅広い機械サイズに対応が可能である。軸の長さが大きく異なる機械では、複数の箇所試験を実施し、結果を平均化することで直角度を評価することができる（この手法については、本稿の最後にかけて詳しく説明する）。

円弧補間を実行できない機械（三次元測定機など）では、代わりにレニショーのマシンチェックゲージ (MCG) を用いることで試験を実施できる（図 10 参照）。小型の機械であれば、レニショーのプローブおよびリングゲージを用いて試験を実施することも可能である。

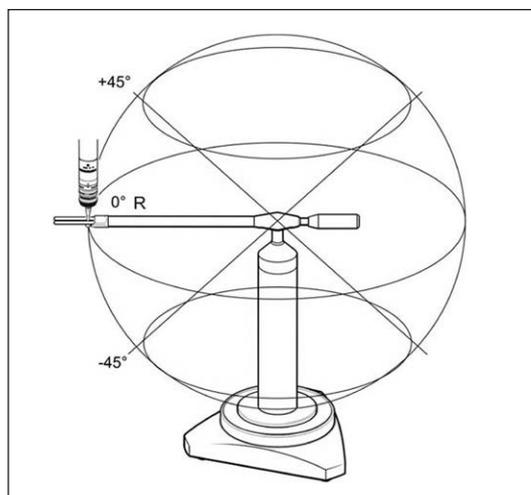


図 10

方法 5 - 対角位置決め精度試験

機械の直角度を評価する方法として、レーザー干渉計システム (レニショーの XL-80 システムなど) と測長オプチカルキットを使って 2 本の対角線の長さを測定する方法を紹介する (図 11)。この試験方法は、ISO230-6 に記載されている。通常は、まずレーザーのアライメントを行い、第 1 の対角線の長さを測定する。次に、レーザーをアライメントしなおし、第 2 の対角線を測定する。試験中に移動する各軸の部位が両対角線で同一であることと、バックラッシュの影響を排除すること (理想的には、各対角線の長さを両方向から測定し、平均をとる) が不可欠である。

また、2 本の対角線の長さを順にすばやく測定し、熱ドリフトの可能性を可能な限り抑えることも重要である。機械が小型の場合は、レーザーを正確に対角線にアライメントし、コサインエラーを最小限に抑えることにも注意が必要である。

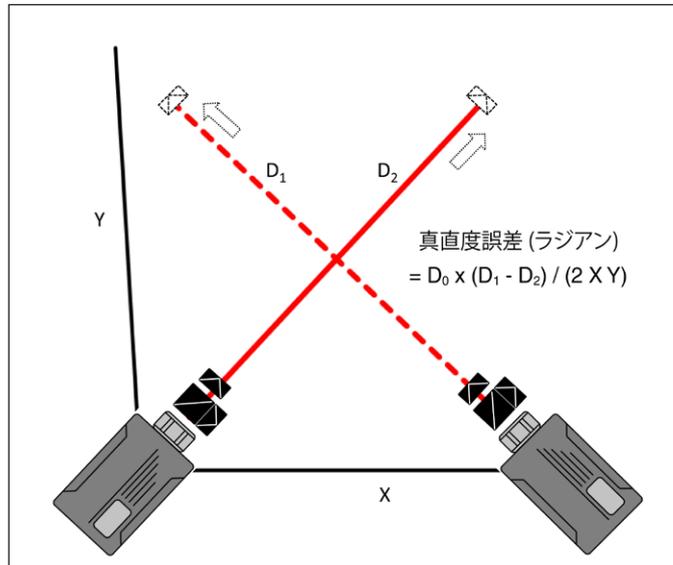


図 11

図 11 に示すような XY 平面での試験では、X を X 軸方向の移動距離、Y を Y 軸方向の移動距離とした場合、次式から直角度 (ラジアン) を求めることができる。

$$\text{直角度} = D_0 (D_1 - D_2) / (2XY)$$

記号の意味: D_0 = 公称の対角線長さ、 D_1 および D_2 = 対角線の実測長さ

X = Y の場合には、この式が次のように簡略化される。

$$\text{直角度} = (D_1 - D_2) / D_0$$

この試験は、短時間で簡単にでき、大型の機械とアスペクト比が異なる機械に非常に適している。軸のうち 1 軸が垂直だと、セットアップがやや複雑になり、場合によってはターニングミラーとスイベルジョイントが必要になる。直角度の算出結果は、レーザーの 2 回の測定結果に完全に依存するため、機械の繰り返し精度が低いと、場合によっては良好な平均値を得るために試験を繰り返す必要がある。または、各対角線に沿った複数の位置でデータが取得してもよい。測定された変位はその後、プログラム上の変位と比較され、最小二乗直線を各対角線の線形誤差データにフィッティングさせ、勾配を比較して直角度誤差を求める。本稿では ISO230-1 および ISO230-6 の勧奨に従い、全対角線長の差を用いて直角度誤差を求める。

機械誤差のシミュレーション

直角度の試験方法を評価するために、直角度、真直度およびヨ一の誤差がそれぞれ異なる機械 5 台をシミュレーションした (図 12)。5 台の機械すべての X 軸と Y 軸が長さ 800mm で、シミュレーションでは XY 平面の歪みだけを考慮する (ただし、他の軸の組合せでも概ね同様になる)。図 12 では、青色の線が各機械の XY 平面に生じた歪みを示し (2000 倍に拡大)、背面の 100mm 方眼が歪みのない平面を示す。

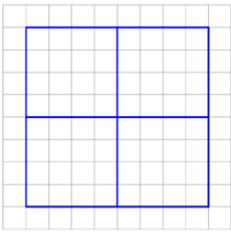
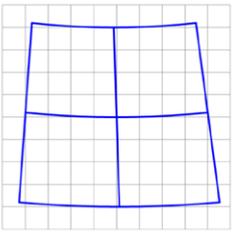
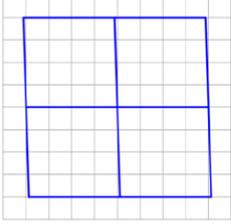
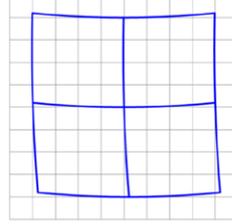
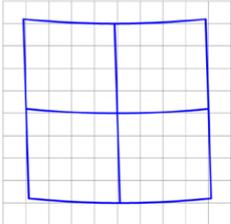
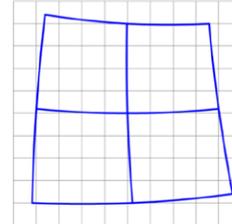
誤差の組合せが異なる機械 5 台のシミュレーション	
 <p>誤差なし</p>	 <p>機械 3</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ XY 軸直角度誤差 15μm/m ✓ X 軸真直度誤差 10μm ✓ 付随する X 軸のヨ一誤差 × Y 軸真直度誤差 5μm × 付随する Y 軸のヨ一誤差
 <p>機械 1</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ XY 軸直角度誤差 15μm/m × X 軸真直度誤差 10μm × 付随する X 軸のヨ一誤差 × Y 軸真直度誤差 5μm × 付随する Y 軸のヨ一誤差 	 <p>機械 4</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ XY 軸直角度誤差 15μm/m ✓ X 軸真直度誤差 10μm × 付随する X 軸のヨ一誤差 ✓ Y 軸真直度誤差 5μm × 付随する Y 軸のヨ一誤差
 <p>機械 2</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ XY 軸直角度誤差 15μm/m ✓ X 軸真直度誤差 10μm × 付随する X 軸のヨ一誤差 × Y 軸真直度誤差 5μm × 付随する Y 軸のヨ一誤差 	 <p>機械 5</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ XY 軸直角度誤差 15μm/m ✓ X 軸真直度誤差 10μm ✓ 付随する X 軸のヨ一誤差 ✓ Y 軸真直度誤差 5μm ✓ 付随する Y 軸のヨ一誤差

図 12

5 台の機械はすべて「全体的な」直角度誤差として +15 μ m/m を内在している。これに、X 軸および Y 軸の真直度およびヨ一の誤差がさまざまな組合せで重ね合わさっている。なお、ヨ一の誤差が含まれる場合のその大きさは、その軸における真直度誤差と関連していることが典型的である (剛体運動を想定 - 詳細は付録 1 を参照)。ただし、真直度誤差によって機械の XY 平面の角度誤差が必ずしも発生するわけではなく、機械の運動学的構造 (キネマティックチェーン) に依存する。本シミュレーションでは、関連するヨ一由来の歪みの有無に関係なく、真直度誤差の複数の組合せを含めている。真直度誤差のある軸がワークホルダを支持していると、その軸で生じたヨ一により、機械 3 および 5 が示すような測定領域の歪みが高確率で生じる。しかし、真直度誤差のある軸が工具だけを支持している場合には、ヨ一の誤差があっても、機械の XY 平面の角度歪みは発生しない。これらの誤差の組合せは、(直角度の「局所的な」ばらつきをもたらす可能性のある) 角度誤差および真直度誤差を「全体的な」直角度誤差の上に重ね合わせた場合の各試験方法の反応の違いを強調するために意図的に選択した。機械 3 および 5 に関して特に興味深いのは、ヨ一による歪みの度合いが異なるにもかかわらず、「局所的」および「全体的な」直角度歪みが 15 μ m/m で均一であるということである。

シミュレーションモード

位置決め偏差センサーと直定規を使う方法と、干渉計と真直度反射鏡を使う方法はよく似ていることから、「L」字形および「T」字形の構成でのシミュレーション結果は同じになる。そのため、5種類のシミュレーションモードを用いて、先述の試験方法および装置の組合せをすべて網羅する。5種類のシミュレーションモード (a~e) と、各モードが適用される試験方法/装置について以下に列記する。

- a. ボールバーを用いた円運動精度試験
- b. レーザー干渉計と位置決め光学部品を用いたレーザー対角線試験
- c. 以下を用いた「+」形構成の2軸真直度試験:
 - 直定規、位置決め偏差センサーおよび90°インデキサ
- d. 以下を用いた「T」字形構成における2軸真直度試験:
 - 直定規、直角定規および位置決め偏差センサー、または
 - レーザー真直度干渉計、光学スクウェア、大型反射鏡およびターニングミラー
- e. 以下を用いた「L」字形構成における2軸真直度試験:
 - 直角定規および位置決め偏差センサー、または
 - レーザー真直度干渉計および光学スクウェア

図13に、この5種類のシミュレーションモードを表す。先ほどと同じく、青色の線は、シミュレーションされた機械のXY平面の歪みを示し、背面の100mm方眼は歪みのない平面を示している。試験中の機械の動きは赤色で示す。機械の動きの歪みも2000倍に拡大してある(なお、ボールバー用のソフトウェアでは、この赤色の線が自動的にスケーリングされ、ボールバーテストの解析で一般的な軌跡のスケーリングに一致するように中央に配置される)。

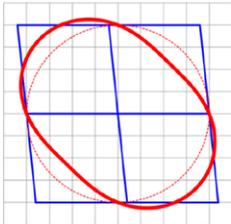
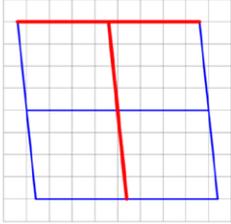
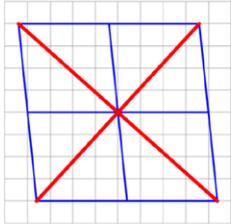
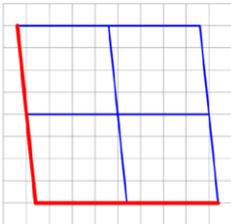
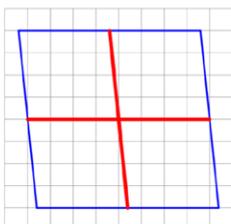
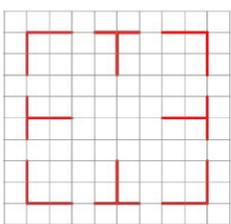
5種類のシミュレーションモード (a~e)	
 <p>a) ボールバーテスト 複数の半径と位置で実施。ボールバーの誤差プロットは自動的にスケーリングされ、自動的に中央に配置。</p>	 <p>d) 2軸真直度 (T字形) T字形に配置した定規と変位センサーまたはレーザー、光学スクウェア、大型反射鏡と真直度用光学部品を使用。複数の向き、長さ、位置で実施。</p>
 <p>b) レーザーによる対角線試験 レーザーと測長光学部品を使用。複数の対角線の長さ、位置で実施。</p>	 <p>e) 2軸真直度 (L字形) 直角定規と変位センサーまたはレーザー、光学スクウェア、真直度用光学部品を使用。複数の向き、長さ、位置で実施。</p>
 <p>c) 2軸真直度 (+字形) 直定規、変位センサー、90°インデキサを使用。複数の基準長、位置で実施。</p>	<p>注 L字形およびT字形の構成は、左図のように4通りにセットアップできる。</p> 

図13

シミュレーションモード d および e は、異なる4方向(0°、90°、180°、270°)の試験構成で実行可能である。シミュレーションのパラメータを調整して、機械の800mm×800mmのXY平面内における試験構成のサイズおよび位置を変えることもできる。例えば、「全体的な」直角度試験をシミュレーションするには、ボールバーの半径を400mmに設定し、試験位置をXY平面の中心とする。「局所的な」直角度試験の場合は、ボールバーの半径を小さくし、試験位置を変更する。

「全体的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 1

図 14 に、各シミュレーションモードで実施した機械 1 の「全体的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

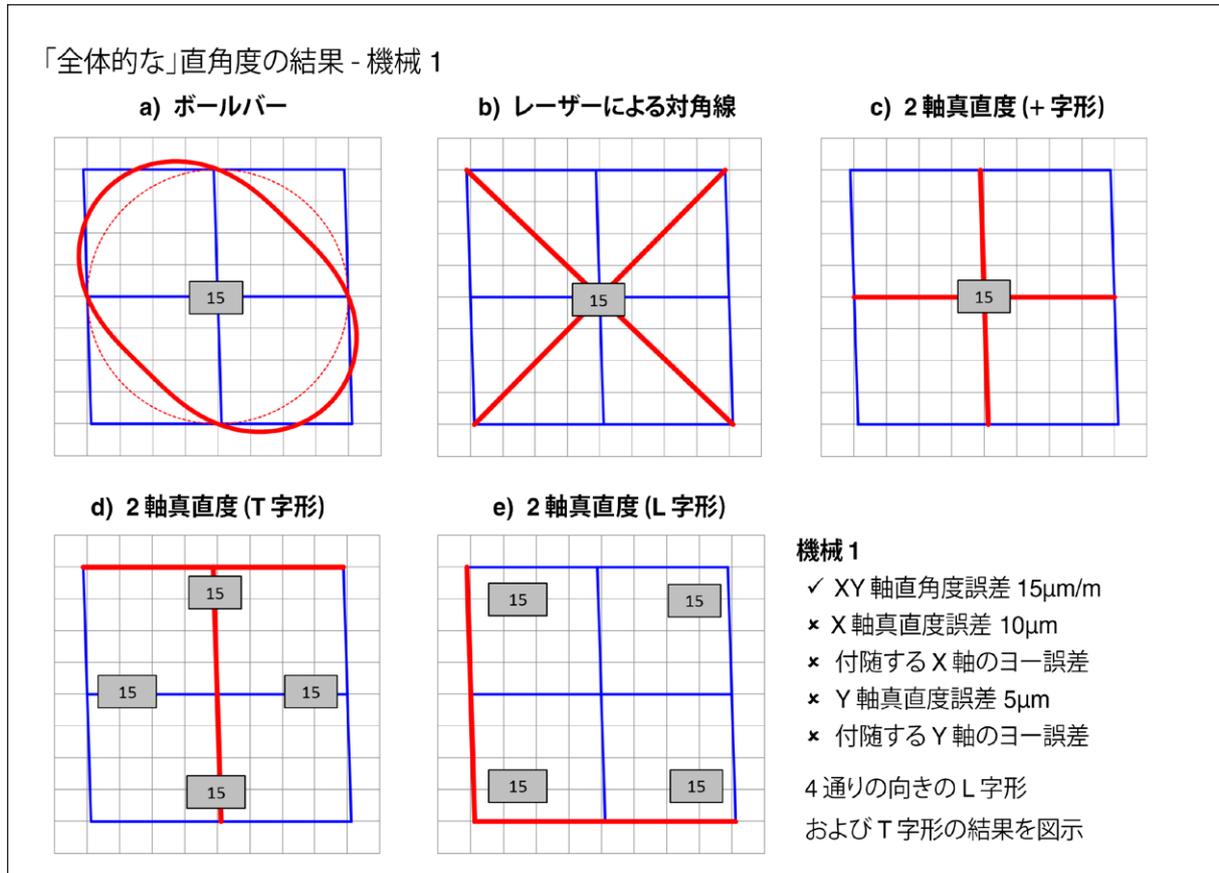


図 14

図内の長方形に、各シミュレーションから算出した直角度の結果を $\mu\text{m}/\text{m}$ で示した。「T」字形および「L」字形の構成の場合には 4 点の結果がある (試験構成の向きごとに 1 点)。これらの結果は各向きにおける軸の移動パスの交点付近に示しているが、わかりやすくするために、ひとつの向きに相当する軸の移動パスのみを赤色としてある。例えば図 14 の d) では、一番上の結果が、赤色の向きの「T」字形構成に関するものである。その右側の結果は、時計回りに 90° 回転させた「T」字形の配置に関する。

機械 1 の結果からは、「全体的な」直角度の結果が、試験方法および構成の向きに関係なく常に $15\mu\text{m}/\text{m}$ であることがわかる。シミュレーション対象の機械には、「全体的な」直角度誤差の $15\mu\text{m}/\text{m}$ 以外に誤差がないことから、まさに予想どおりの結果といえる。

「全体的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 2

図 15 に、各シミュレーションモードで実施した機械 2 の「全体的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

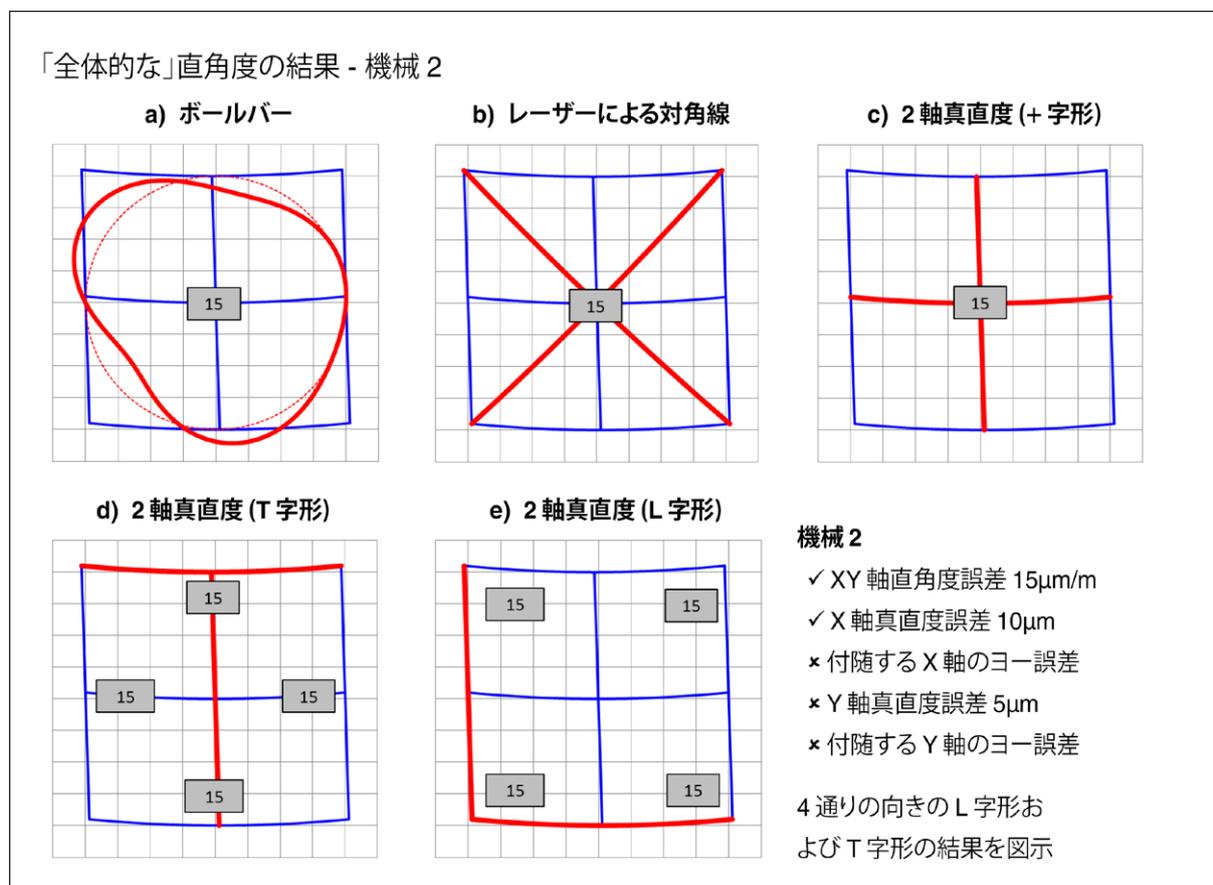


図 15

機械 2 の結果からもやはり、「全体的な」直角度の結果が、試験方法および構成の向きに関係なく常に 15 μ m/m であることがわかる。すなわち、X 軸に真直度誤差があったところで、影響を受けた「全体的な」直角度の試験方法がないといえる。

「全体的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 3

図 16 に、各シミュレーションモードで実施した機械 3 の「全体的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

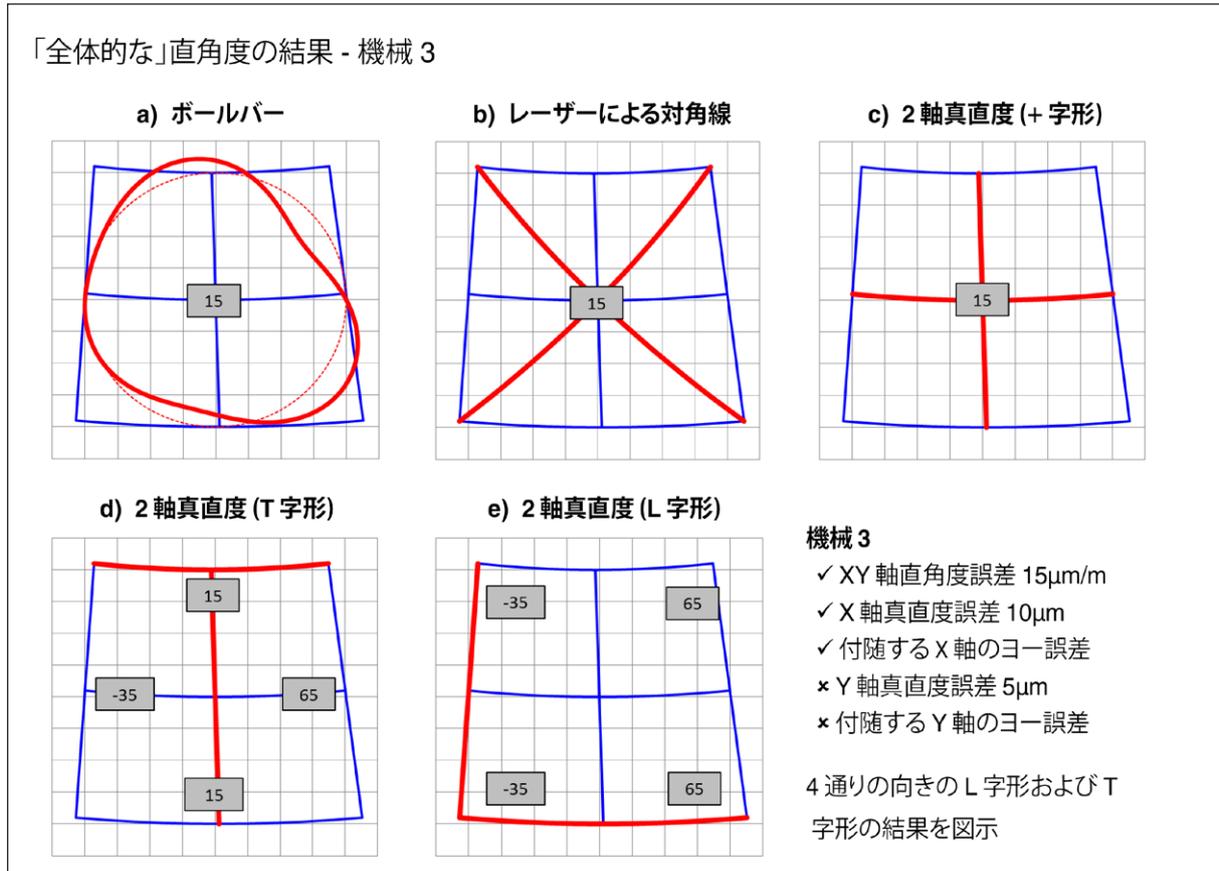


図 16

機械 3 の結果からは、ボールバー、レーザー対角線、および「+」形構成の 2 軸真直度試験の「全体的な」直角度誤差が同様に 15 μ m/m であることがわかる。ただし、「T」字形および「L」字形構成の試験結果には変化が生じており、X 軸のヨーの影響を受けやすいと言える。これらの結果は「間違っている」わけではなく、Y 軸が X 軸の左端から右端に移動するのに合わせて X 軸と Y 軸の間の角度が -35 μ m/m から +65 μ m/m に変化することが強調されているにすぎない。「T」字形および「L」字形の直角度試験では、両軸をフルストロークで移動させているが（そのために、「全体的な」直角度試験として分類されるが）、実際には、特定の位置での 2 本の軸間の直角度を示すにすぎない。「+」形の構成にも同じことが言える。ただしこの例では、シミュレーションした歪みが対称的であるため、「+」形構成から得た直角度が、ボールバー測定およびレーザーによる対角線測定によって得られた値と一致している。なお、対向する角または辺から得た「L」字形または「T」字形の直角度を平均化すると、他の方法から得た値と一致する。

注: ISO230-1 には、機械の直角度は、機械の可動領域の中心を通る線に沿って評価されるのが理想的であると記載されており、上記の結果からもその理由がわかる。「L」字形の試験時の線はいずれも、通常は機械の可動領域の縁に沿うことから、中心ではなく縁における機械の直角度が反映される。

「全体的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 4

図 17 に、各シミュレーションモードで実施した機械 4 の「全体的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

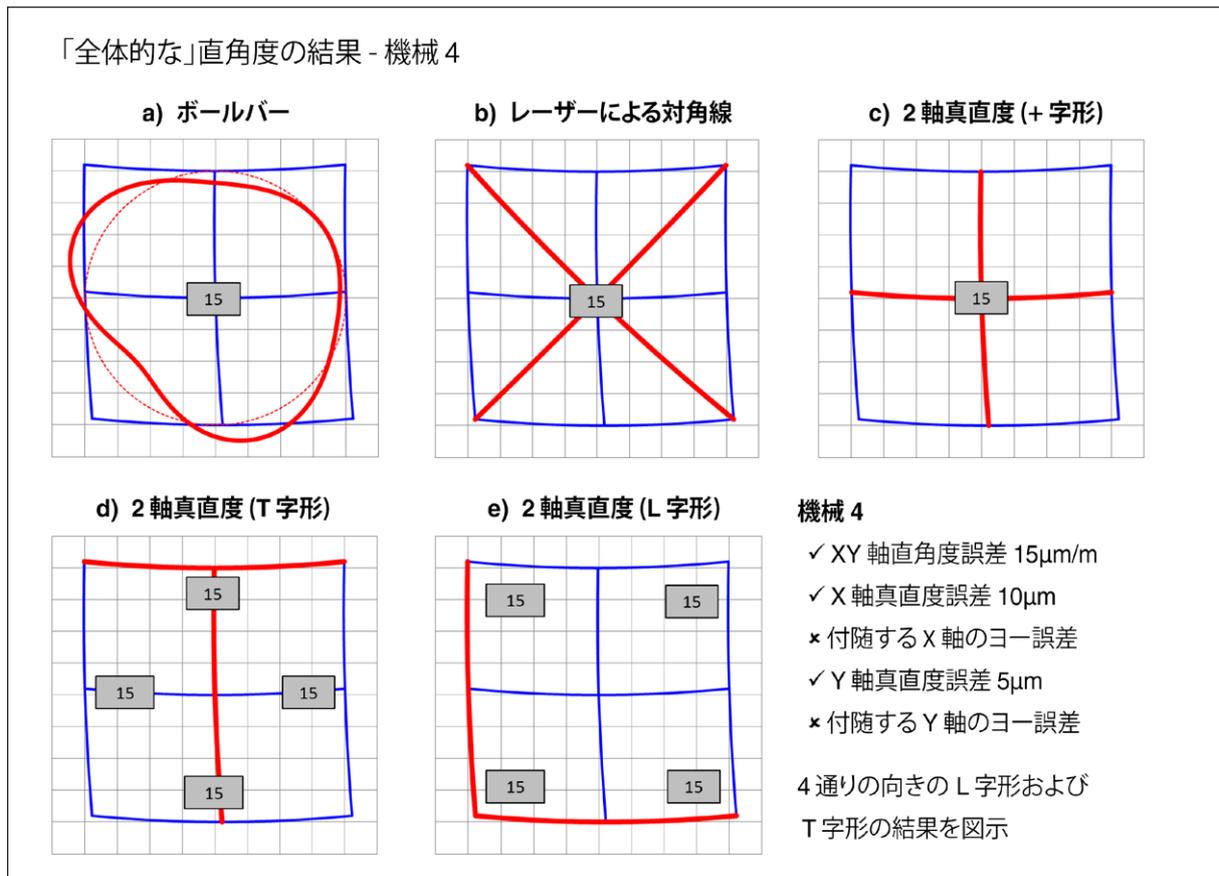


図 17

機械 4 の結果からもやはり、「全体的な」直角度の結果が、試験方法および構成の向きに関係なく常に 15 μ m/m であることがわかる。ヨ一誤差がないため、X 軸と Y 軸の両方に真直度誤差があっても、方法を問わず結果はすべて同じである。

「全体的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 5

図 18 に、各シミュレーションモードで実施した機械 5 の「全体的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

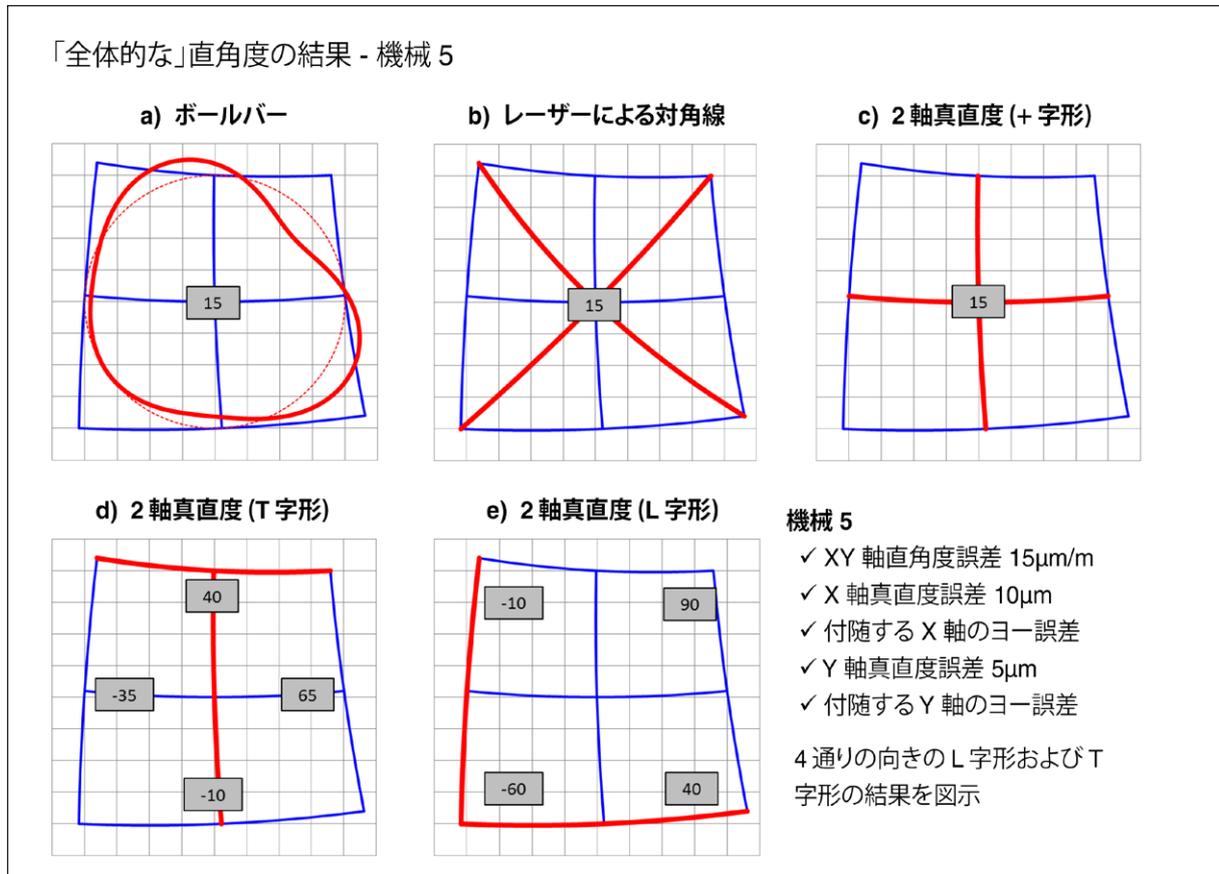


図 18

機械 5 の結果からは、ボールバー、レーザー対角線、および「+」形構成の 2 軸真直度試験の「全体的な」直角度誤差が同様に 15 μ m/m であることがわかる。ただし、「T」字形および「L」字形試験の結果は、X 軸および Y 軸のヨーに対する感度のために再び変化した。これらの結果もやはり「間違っている」わけではなく、Y 軸が X 軸の一端から他端に移動したとき、または X 軸が Y 軸の一端から他端に移動したときの X 軸と Y 軸の角度の変化を反映しているにすぎない。なお、対向する角または辺から得た「L」字形または「T」字形の直角度を平均化すると、他の方法から得た値と一致する。

「全体的な」直角度の結果 - まとめ

ヨーの誤差の変化によって機械の XY 平面が歪んでいなければ、「全体的な」直角度の結果は、どの試験方法でも、向きを問わず同じ (15 μ m/m) である。

しかし、対称的に変化するヨー誤差が機械の XY 平面にある場合、以下のことが言える。

- ボールバー、レーザー対角線、および「+」形の 2 軸真直度試験によって得られる「全体的な」直角度の結果は影響を受けず、変わらない (15 μ m/m のまま)。
- 「T」字形および「L」字形の 2 軸真直度試験では、構成の向きによって結果が変動する。

「局所的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 1

各試験方法を用いて、機械の XY 平面内の 5 箇所で「局所的な」直角度の試験をシミュレーションした。図 19 に、各シミュレーションモードで実施した機械 1 の「局所的な」直角度のシミュレーション結果を示す。「局所的な」直角度については、図で示したような位置で、各軸 200mm ほどの長さにわたって評価している。

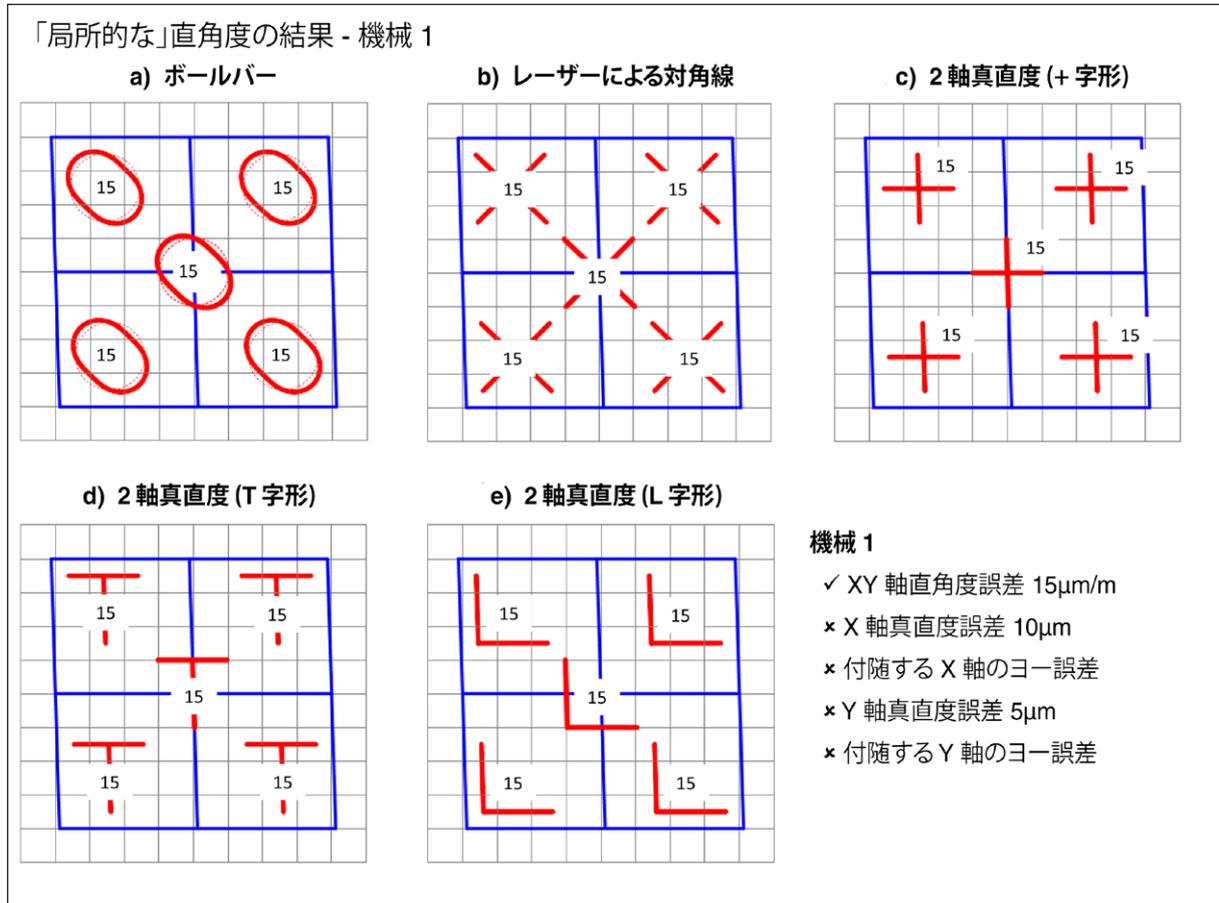


図 19

機械 1 の「局所的な」直角度誤差は、テストの位置および方法に関係なく 15 μ m/m となっている。シミュレーション対象の機械には、「全体的な」直角度誤差の 15 μ m/m 以外に誤差がないことから、まさに予想通りの結果といえる。

「局所的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 2

図 20 に、各シミュレーションモードで実施した機械 2 の「局所的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

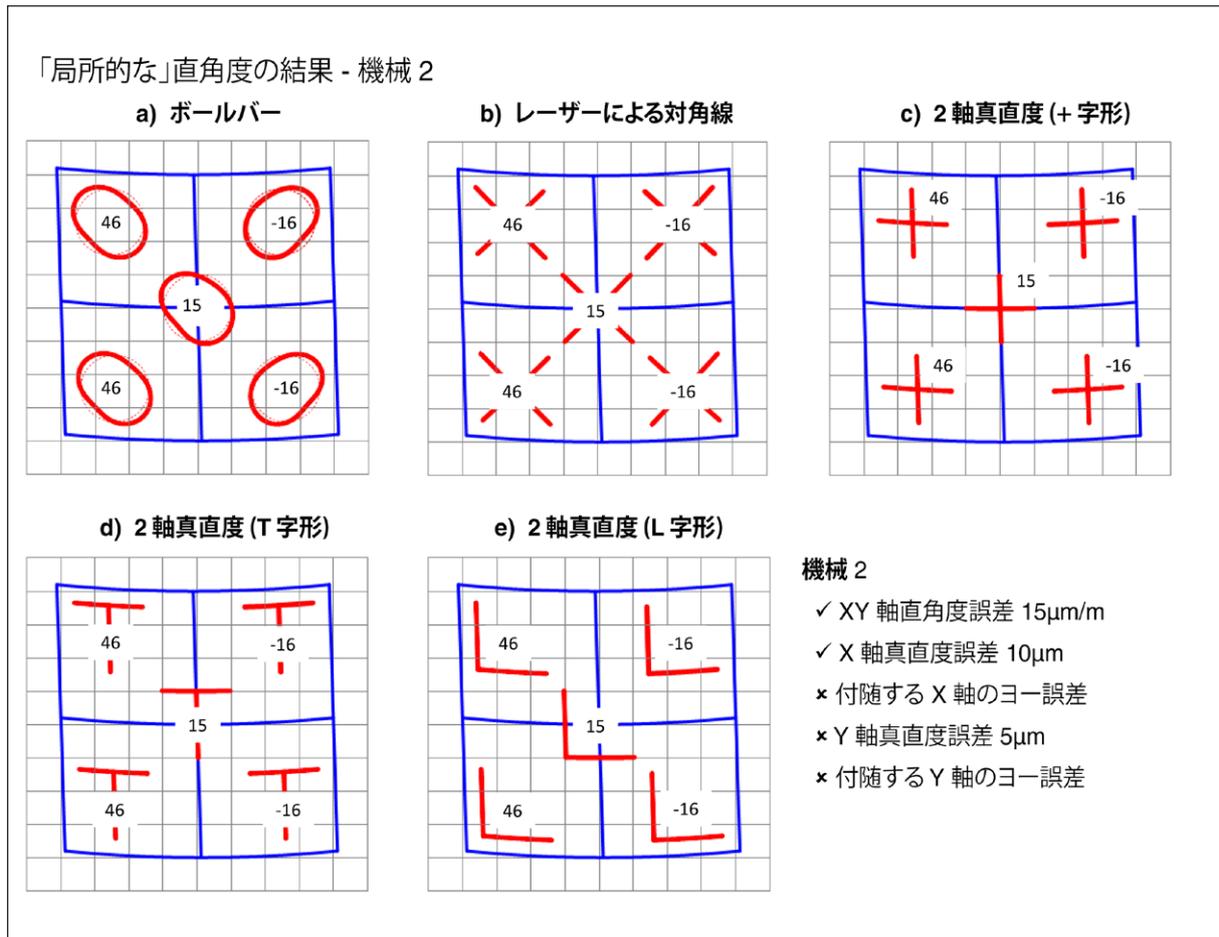


図 20

機械 2 では、試験の位置によって「局所的な」直角度は異なるが、試験方法によつての差異は見られない。X 軸に真直度誤差があることで、「局所的な」直角度に変化が生じたということが示されている。このような機械において、試験の位置を慎重に選ぶことが重要であるということは明らかである。機械 2 ではヨ一誤差がないため、いずれの試験方法でも同じ結果になった。

「局所的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 3

図 21 に、各シミュレーションモードで実施した機械 3 の「局所的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

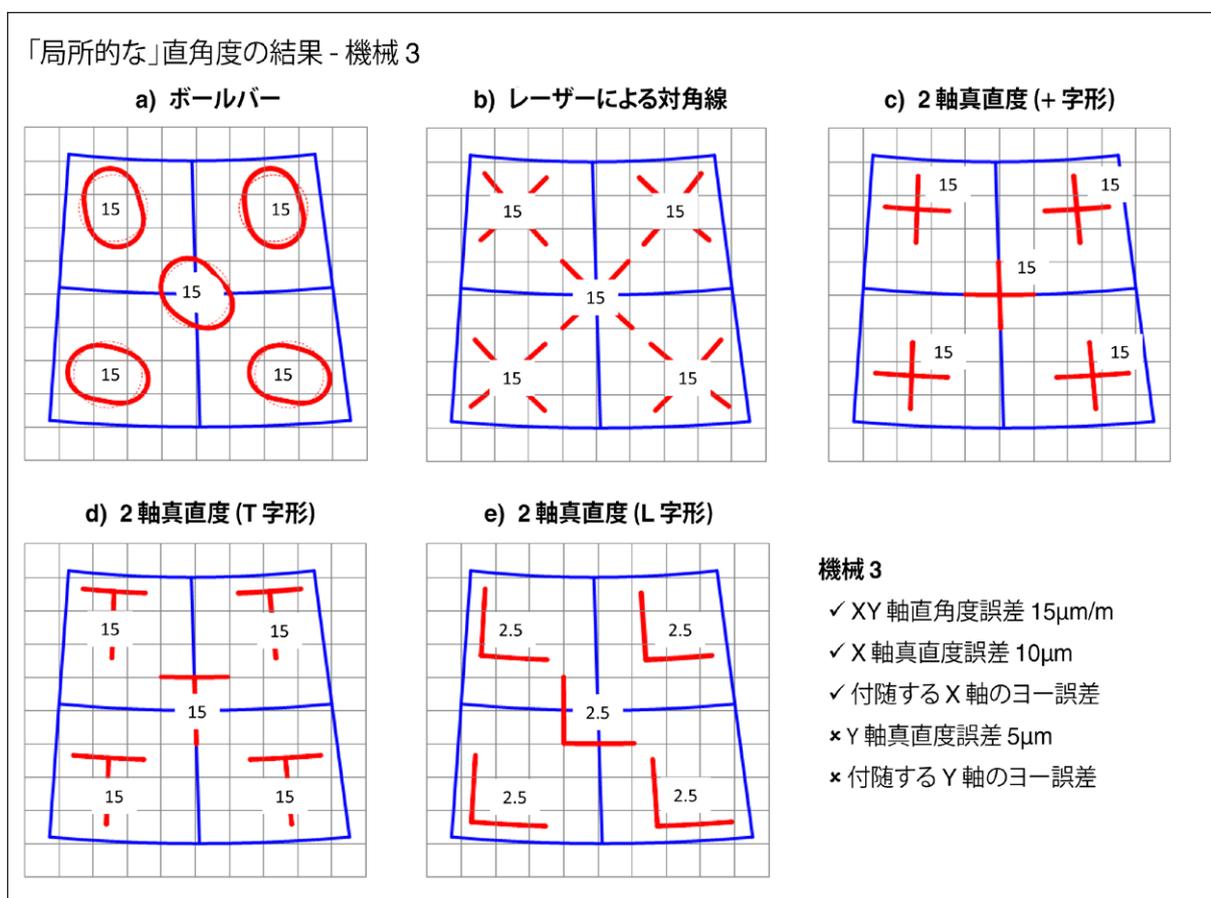


図 21

機械 3 の「局所的」な直角度は、試験方法によって異なるものの、試験位置による差異は見られない。ボールバー、レーザー対角線、「+」字形および「T」字形の 2 軸真直度試験では結果が同じだが、「L」字形の試験で結果が異なる。試験位置に関係なく直角度の測定結果が同じであることは注目に値する。すなわち、ヨーの歪み (剛体モデル) の原因となる真直度誤差を含む 1 軸が機械にあり、機械が明らかに「曲がって」いても、「局所的」および「全体的な」直角度には影響しないことを示していると言える。

「局所的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 4

図 22 に、各シミュレーションモードで実施した機械 4 の「局所的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

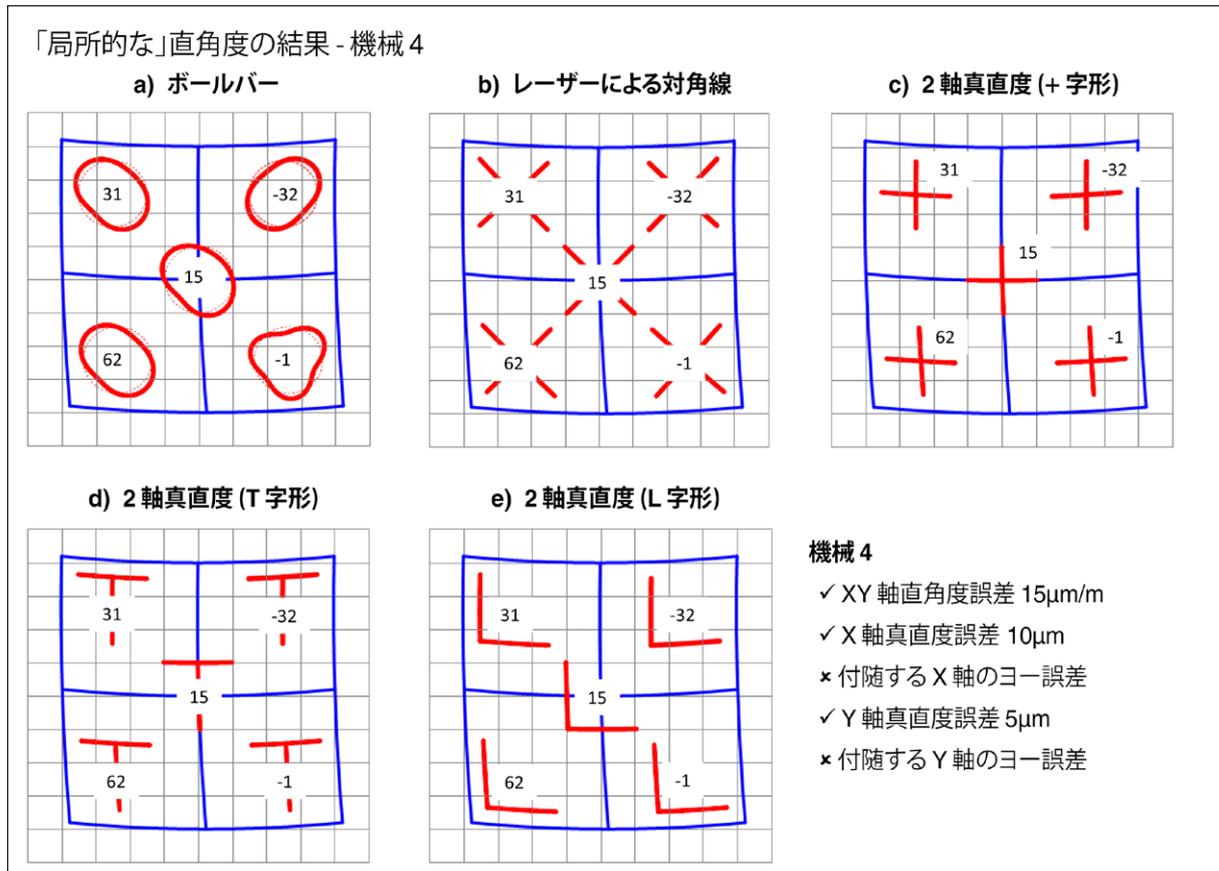


図 22

機械 4 では、試験の位置によって「局所的な」直角度は異なるが、試験方法によつての差異は見られない。X 軸と Y 軸に真直度誤差があることで、「局所的な」直角度に変化が生じたということが示されている。このような機械において、試験の位置を慎重に選ぶことが重要であるということは明らかである。機械 4 ではヨ一誤差がないため、いずれの試験方法でも同じ結果になった。

「局所的な」直角度のシミュレーション結果 - 機械 5

図 23 に、各シミュレーションモードで実施した機械 5 の「局所的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

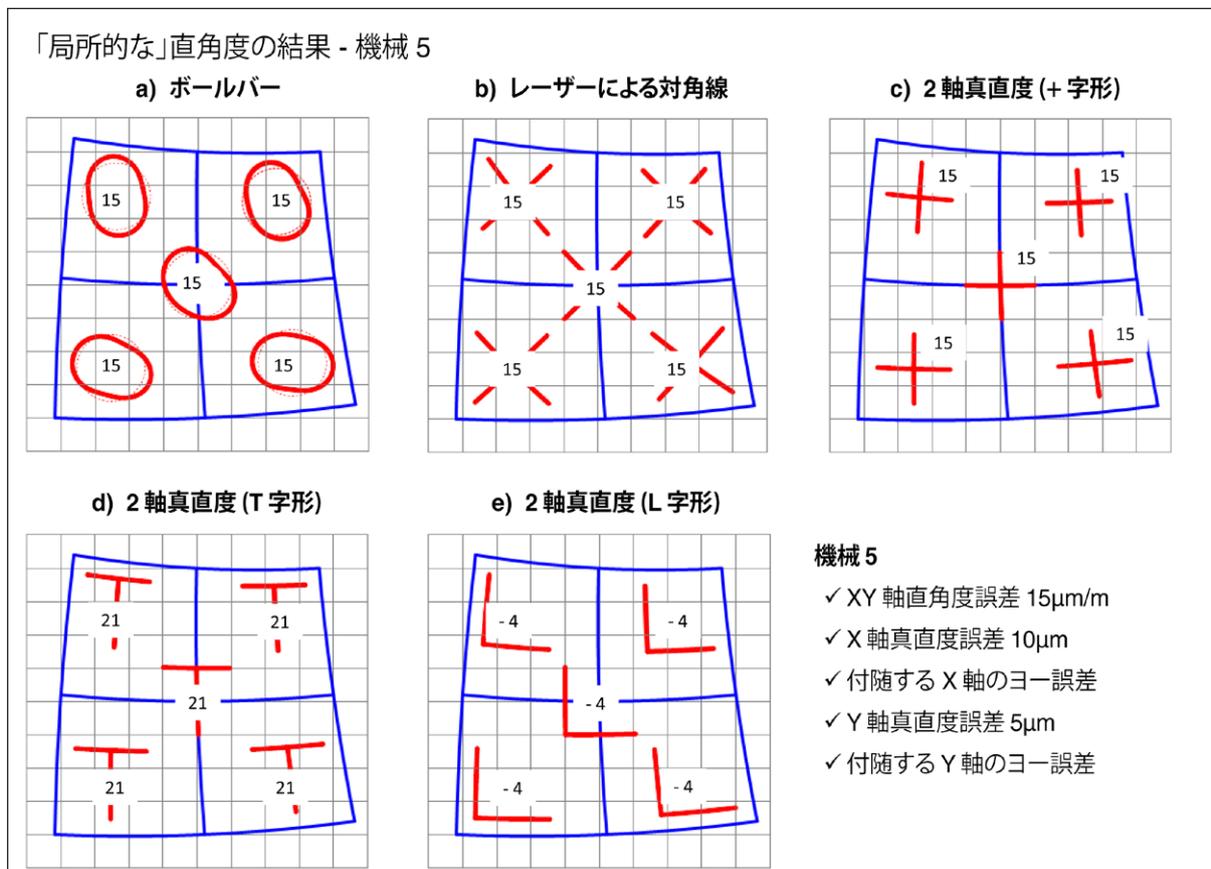


図 23

機械 5 の「局所的」な直角度は、試験方法によって異なるものの、試験位置による差異は見られない。一方、試験方法によって結果が異なる。ボールバー、レーザー対角線、「+」字形の 2 軸真直度試験では同じだが、「T」字形および「L」字形の試験は結果が異なる。ここでも、試験位置に関係なく直角度の測定結果が同じであることは注目に値する。すなわち、ヨ一の歪み (単純な剛体モデル) の原因となる真直度誤差を含む 2 軸が機械にあり、機械が明らかに「曲がって」いても、「局所的」および「全体的な」直角度には影響しないことを示していると言える。

「局所的な」直角度の結果 - まとめ

軸または複数の軸に真直度誤差があっても、その真直度誤差に対応するヨ一誤差がなければ、「局所的な」直角度は試験位置によって変わるものの、いずれの試験方法でも同じ直角度が得られる。

真直度誤差があり、さらにその真直度誤差によって角度誤差 (ピッチまたはヨ一) が生じている場合、直角度は「局所的」には変動しないため、「局所的な」直角度の試験結果は試験位置による差異は見られなくなる。ただし、「T」字形および「L」字形試験によって得た「局所的な」直角度は、ボールバー、レーザー対角線および「+」字形の試験結果とは異なる。なお、他のシミュレーション (非図示) でも、「T」字形および「L」字形試験から得た「局所的な」直角度も、同じ条件下での「全体的な」直角度の試験の結果と同様、試験構成の向きによって変わることが実証された。

XY 軸の長さ比が異なる機械での「全体的な」直角度誤差

ここまでシミュレーションした機械は、X 軸と Y 軸の長さが同じだったが、実際の機械は、X 軸が Y 軸よりも長く、Z 軸は Y 軸よりも短いことがほとんどである。軸長の差が大きい機械の「全体的な」直角度は、この点を考慮できるテスト装置でなければ測定できない。2 軸真直度の方法およびレーザー対角線の方法なら、この違いに容易に対処できる。他方、ボールバーテストは、360°の円運動精度試験に依存することが通常であることから、同程度の軸長を有する機械に最適である。また、レニショーのボールバー用診断ソフトウェアなら 220°の円弧から解析できるため、XY 軸の長さ比が 1.5 : 1 に近い機械であれば「全体的な」直角度の試験が可能である。

XY 軸の長さ比の大きな機械の場合、長い方の軸に沿って複数回のボールバーテストを実行し、算出した直角度を平均化することで「全体的な」直角度を求めることができる。この方法を他の試験方法と比較するために、長さ 750mm の X 軸と 250mm の Y 軸を有する機械（機械 6）をシミュレーションした。この機械の「全体的な」直角度誤差は 15 μ m/m で、X 軸の真直度誤差が 10 μ m、Y 軸の真直度誤差が 5 μ m である。図 24 に、各シミュレーションモードで実施した機械 6 の「全体的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

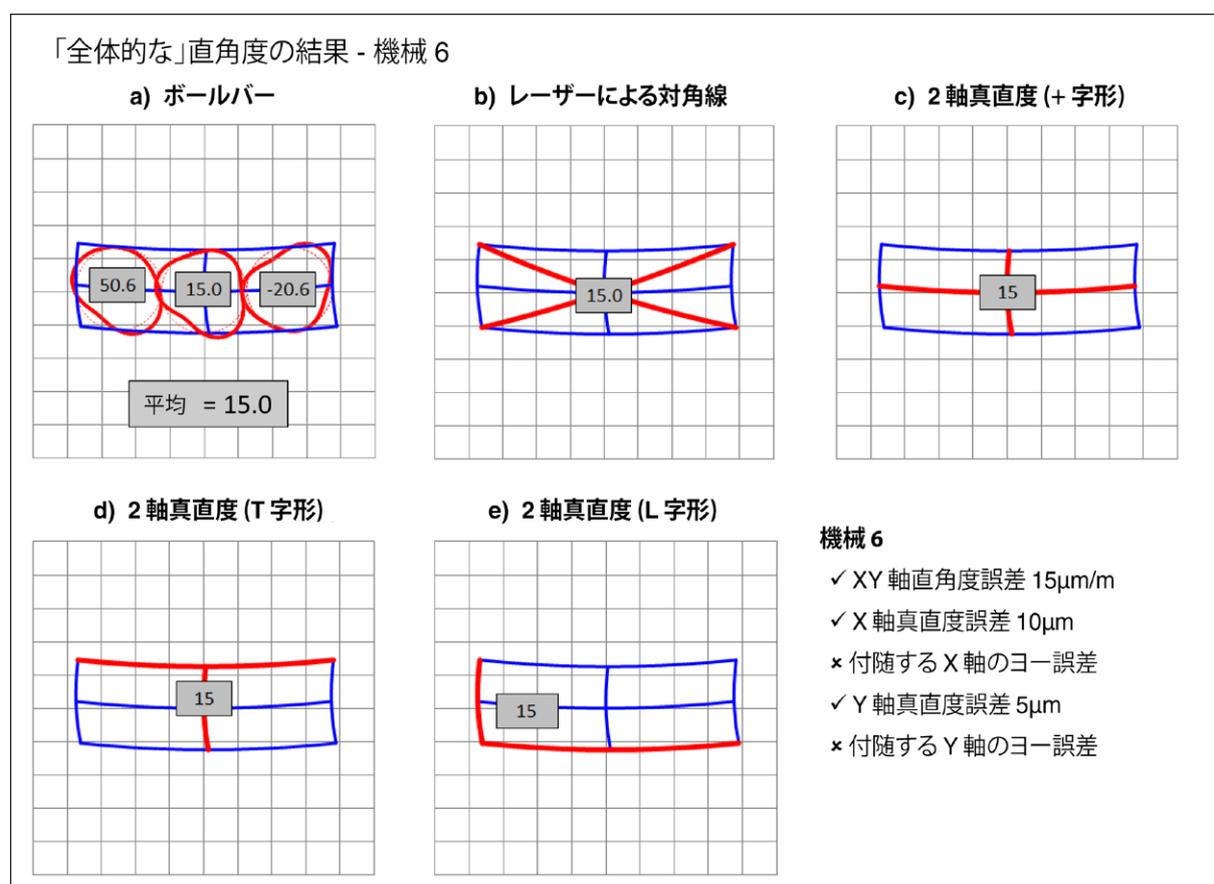


図 24

なお、ボールバーを用いて取得した 3 回分の直角度の平均は、他の試験方法によって得られた「全体的な」直角度誤差である 15 μ m/m と一致する。

機械 1~6 でシミュレーションされた真直度誤差は、単純な曲線を描いている。機械の軸が細長いと、真直度誤差が複雑な形状になることが少なくない。このような条件下での各試験方法を評価するために、別の機械でシミュレーションを行った。機械 7 は機械 6 と同じだが、エアリー点で支持されている軸があるなど、X 軸が示す真直度誤差の形が複雑になっている。図 25 に、各シミュレーションモードで実施した機械 7 の「全体的な」直角度のシミュレーション結果を示す。

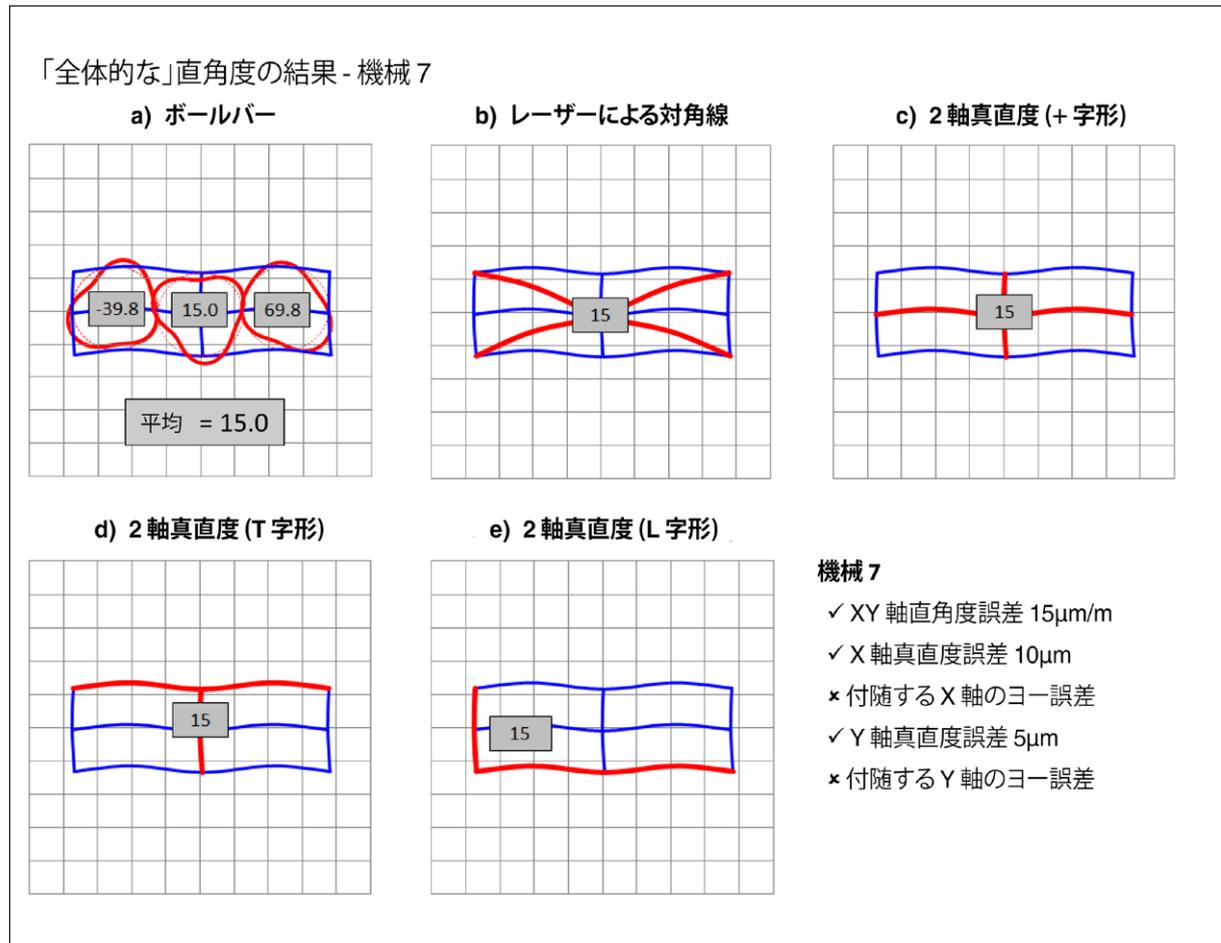


図 25

ボールバーを用いて取得した 3 点の直角度の平均は、他の試験方法から得られた「全体的な」直角度とやはり一致する。なお、X 軸および Y 軸に付随するヨ一誤差を加えると、「T」字形および「L」字形の 2 軸真直度測定で得られた「全体的な」直角度はそれぞれ 95 μ m/m および 39 μ m/m となり、大きく異なってくる。ただし、ボールバーテストから得た直角度の平均と、「+」字形の 2 軸真直度測定およびレーザー対角線試験で得られた「全体的な」直角度の平均は、15arc 秒のままである。

上記シミュレーション試験では、機械の 750mm \times 250mm 領域に半径 125mm のボールバーテストがうまくフィットしているが、複数のボールバーテスト円が可動領域に正確にフィットしない機械のほうが多い。そのような場合は、等間隔で配置し互いに重なり合う円を使用してもよい。この方法を評価するために、重なり合う 4 回のボールバーテストを機械 6 および 7 でシミュレーションした (図 26)。

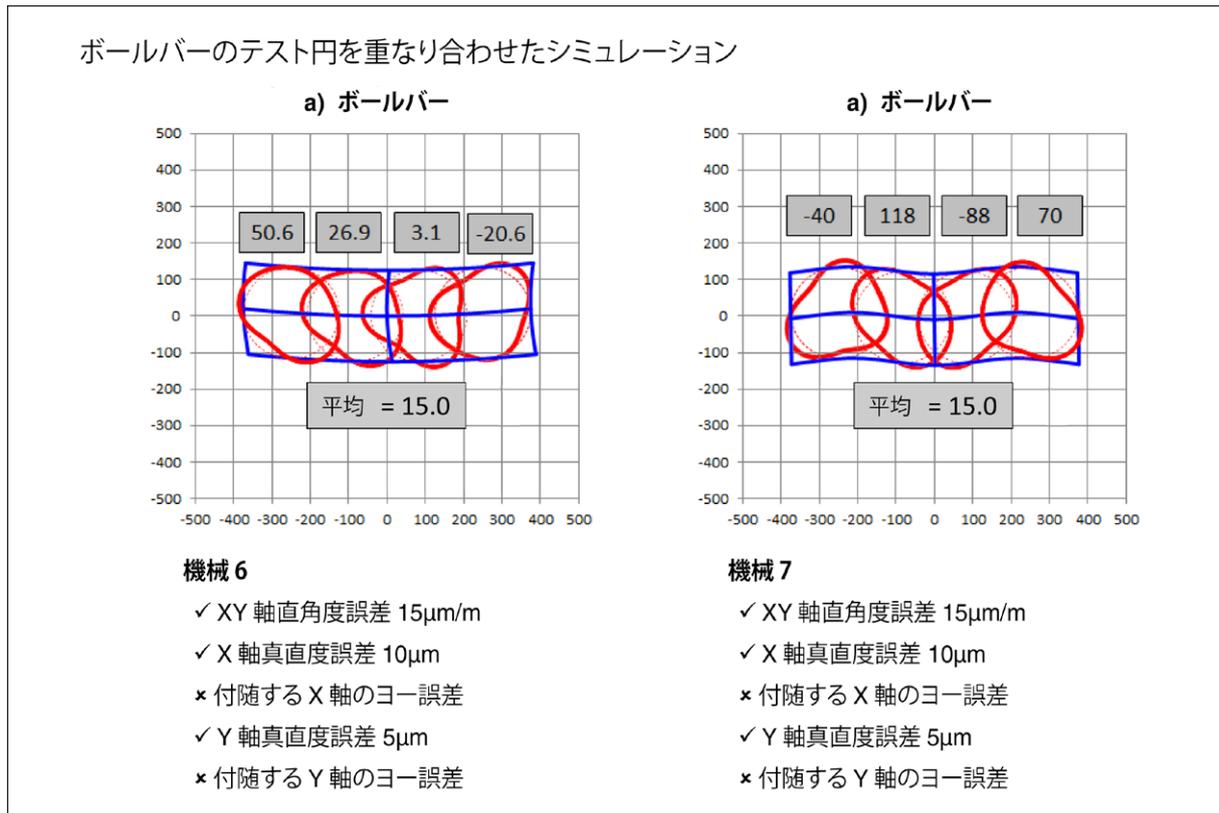


図 26

これらのシミュレーションでは、重なり合った 4 回のボールバーテストからの平均直角度が、重ならずフィットした 3 回分のボールバーテストから得られた平均直角度である 15 μ m/m と一致することが示されている。あらゆる条件下で正確に一致することは期待できないものの、この方法がある程度の重複を許容し得ることはわかる。3 回以上のテスト円を重複させる場合は、重複量が等しくなるように調整することが推奨される。

上記の結果から、複数回のボールバーテストによる平均を使用することが、軸の長さが異なる機械の「全体的な」直角度を推定する方法として有用であることがわかる。

最後に

本稿では、直線軸 2 軸間の直角度に関する ISO230-1 の定義と、その直角度を測定するための試験方法について紹介した。また、それらの方法をモデル化し、機械の軸の真直度とヨー誤差をさまざまに組み合わせて比較評価した。

シミュレーションからは、以下のことが明らかとなった。

- ISO230-1 に記載されている各直角度試験方法によって得られた結果は、用いる試験方法、機械の可動領域内における試験位置および試験構成の向きによって異なる可能性がある。
- ボールバー、レーザー対角線、および「+」字形の 2 軸真直度試験から得られた結果は、すべての条件下で同一であった。一方、機械の可動領域内にピッチまたはヨーによる角度の歪みが存在する場合には、「L」字形および「T」字形の 2 軸真直度試験で結果に違いが生じ、試験構成の向きによっても変動した。
- 使用する基準のフレームが異なるだけであり、いずれの結果も「間違っている」わけではない。そのため、直角度をシステム間で比較する際には相当の注意が必要である。試験位置または試験方法が同一でなければ、結果が異なる可能性が高い。また、符号規則と基準線フィッティング方法の違いも考慮する必要がある。

- 「L」字形または「T」字形の2軸真直度試験を機械の可動領域の対向角または対向辺で繰り返し、得られた「全体的な」直角度の結果を平均すると、ボールバー、レーザー対角線または「+」字形の2軸真直度構成からの結果にさらに近づく。
- 軸の長さが異なる機械の「全体的な」直角度は、複数回のボールバーテストによる直角度の平均を取ることによって推定できる。
- ピッチおよびヨ一の誤差があることで、試験方法、位置および向きに応じて直角度の測定結果にばらつきが生じ得ることから、直角度を含む空間精度補正は慎重に行う必要がある。このトピックについては、付録IIで詳しく説明している。

脚注として、ISO230-1に記載されている「全体的な」直角度の各試験方法についての大まかな「評価表」を図27に記載する。上述のシミュレーションの結果と、各方法の主な特徴および制約事項とを加味した。

「全体的な」直角度の試験方法の評価表	直角定規と変位計 (「L」字形)	直定規と直角定規、変位計 (「T」字形)	直定規と90°インデキサ (「+」形)	レーザー真直度干渉計と光学スクウェア (「L」字形)	レーザー真直度干渉計と光学スクウェア (「T」字形)	ボールバー、リングゲージまたはMCGによる円運動精度試験	レーザーによる対角線試験
操作性	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
大型機械への適正	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
XY軸の長さ比が異なる機械への適正	☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
ヨ一誤差に対する耐性	☆	☆☆	☆☆☆	☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
環境の変化に対する耐性	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆	☆☆☆☆	☆☆

図 27

付録 I - 真直度および付随するヨー誤差のモデル化

真直度誤差および付随するヨー誤差は、以下のようにモデル化することができる。機械の X 軸 (長さ L、単純な湾曲または曲線により真直度誤差 S を生じている) について検討してみる。この状況を表したのが図 28 で、歪みを青色で示した (わかりやすくするために大幅に強調してある)。

この単純な真直度誤差は、 $\delta y = Kx^2$ という形の二次方程式によってモデル化することができる。式中の δy は、X 軸沿いの位置 x における Y 方向の真直度偏差であり、K は定数である。 $\delta y = S$ 、 $x = L/2$ として変形すると、 $K = 4S/L^2$ となる。したがって、X 軸の Y 方向真直度誤差と X 軸位置との関係を表す式は次のようになる。

$$\delta y = 4Sx^2/L^2 \dots\dots\dots \text{式 1}$$

次に、図 29 の赤線に示すとおり、真直度誤差を含む X 軸の上に真直度誤差のない Y 軸を載せた場合を検討する。他に制約がなければ、X 軸の移動に伴い、Y 軸の角度が X 軸の局所的なヨー角に従って変化する。この「付随するヨー角」 θ は、式 1 を x に関して微分することによって求めることができ、 $\theta = 8Sx/L^2$ となる。付随するヨー誤差により、Y 軸方向の位置に応じて変化する X 方向の小さな変位 δx が生じる。 θ をラジアンで表し、二次の項を無視すると、この変位は $\delta x = -y\theta$ で近似できる。なお、機械が「全体的な」直角度誤差 θ_0 も有する場合には、 θ に加算した後に δx を計算するため、 $\delta x = -y(\theta_0 + \theta)$ となる。 θ を代入すると、次のようになる。

$$\delta x = -y(\theta_0 + 8Sx/L^2) \dots\dots\dots \text{式 2}$$

式 1 および 2 により、任意の一般的な xy 位置における機械位置の小さな誤差 δx および δy を求めることができる。機械が位置 [x,y] に移動するように命令された場合に達成される実際の位置は [(x+ δx),(y+ δy)] となる。 δx と δy を代入すると、次のようになる。

$$\text{実際の位置} = [(x - y(\theta_0 + 8Sx/L^2)), (y + 4Sx^2/L^2)] \dots\dots\dots \text{式 3}$$

式 3 は、XY 直角度誤差と、X 軸に真直度誤差がありその真直度誤差に付随してヨー角に歪みがある機械の任意の位置 [x, y] における位置決め誤差を求めるのに用いられる一般的な式である。真直度誤差によって付随するヨー誤差が必ずしも生じるとは限らない (機械の構造とキネマティックチェーンに依存する) たため、 $8Sx/L^2$ は 0 になることもある。その場合、式 3 が以下のようにになる。

$$\text{実際の位置} = [(x - y\theta_0), (y + 4Sx^2/L^2)] \dots\dots\dots \text{式 4}$$

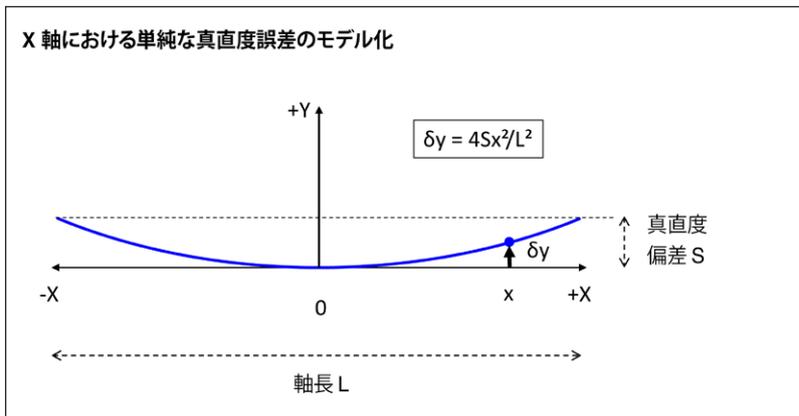


図 28

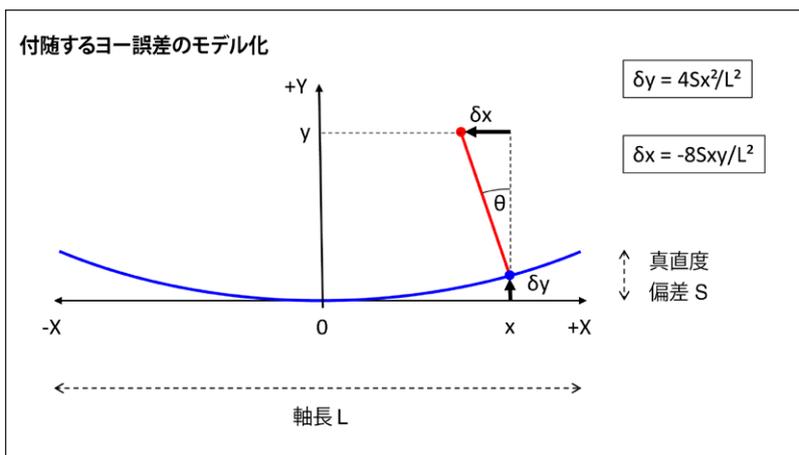


図 29

Y 軸の真直度誤差および付随するヨー誤差の影響をモデル化するための式も、同様に導出される(なお、この場合に、直角度誤差を改めて考慮する必要はない)。これらの式を組み合わせることで、本稿でモデル化したすべての機械の位置決め誤差を計算することができる。

各直角度試験方法のシミュレーションでは、(試験方法に従って) 適切なコマンド位置シーケンスを生成し、それぞれの位置で機械の位置決め誤差を求めた後に、適切なアルゴリズムを適用して直角度を求める。

付録 II - 機械の直角度誤差の空間補正

直角度を補正または調整するにあたっては、次の点に留意する必要がある。

真直度、ピッチおよびヨーの誤差が原因で、試験方法、位置および向きに応じて直角度がばらつくことがある。そのため、最初に真直度、ピッチおよびヨーの誤差を測定し、補正することが推奨される。これらの誤差を最小に抑えることで、直角度誤差(および場合により線形の誤差)の測定が、試験位置および試験方法からの影響を概ね受けなくなるため、算出した直角度の信頼性が上がり、適用しやすくなる。

測定した直角度誤差を補正する際には、補正が確実に適用され、機械上の他の基準線形状とのアライメントが維持または改善されるように相当の注意が必要である。考慮すべきアライメントの例を以下に示す。

- 主軸の回転軸に対する補正した軸移動の平行度または直角度
- テーブル表面に対する補正した直線軸移動の平行度または直角度
- 第 4 軸および第 5 軸の基準点に対する補正した軸移動のアライメント

生じ得る問題は、単純な例を考えてみるだけでよくわかるであろう。例えば、本稿に記載した試験方法のいずれかを用いて旋盤の X 軸と Z 軸の間の直角度を測定し、直角度誤差が $40\mu\text{m}/\text{m}$ であったと仮定する。図 3 にこの様子を示す。この図では、Z 軸は正しくアライメントされ、主軸の回転軸と平行になっている。一方、X 軸はアライメントされていない。XZ 直角度を測定するだけでは、X 軸と Z 軸のどちらが主軸に対して適切にアライメントされているか(またはどちらもアライメントされていないか)を判断できないため、直角度補正が誤って適用されるおそれがある。そこで、X 軸または Z 軸(または 2 軸の任意の組み合わせ)に直交軸補正を適用することによって、直角度誤差を補正するという選択肢がある。

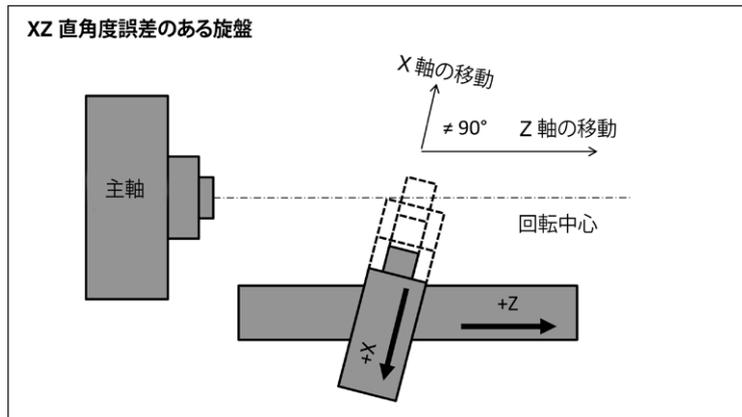


図 30a

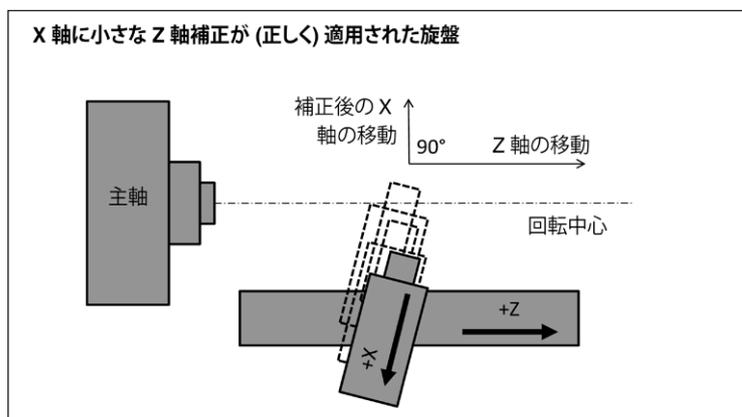


図 30b

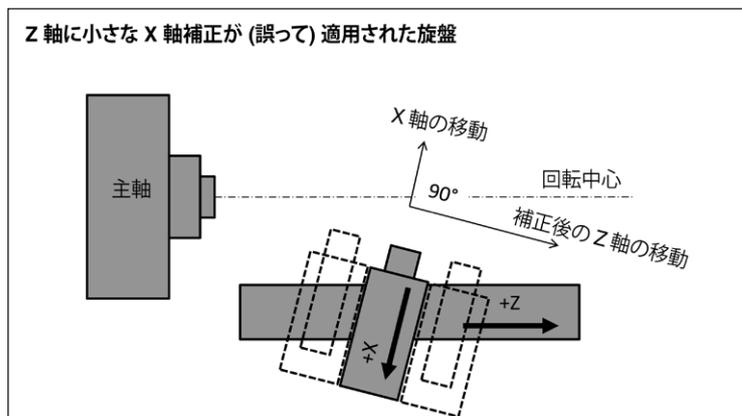


図 30c

図 30b は、Z 軸を (正しく) 使用して、X 軸に小さな δz 補正 (40 $\mu\text{m}/\text{m}$) を適用した場合を示している。補正したことで X 軸方向の工具移動が Z 軸に対して 90°になり (X 軸と Z 軸が「直角に」なり)、一方で Z 軸は主軸の回転軸に対して平行が保たれている。

図 30c は、X 軸を (誤って) 使用して、Z 軸に小さな δx 補正 (40 $\mu\text{m}/\text{m}$) を適用した場合を示している。補正したことで Z 軸方向の工具移動が X 軸に対して 90°になっているが (X 軸と Z 軸は依然として「直角」に見えるが)、補正後の Z 軸は主軸の回転軸に対して平行になっていない。

図 30b および図 30c の両方で、補正後の X 軸および Z 軸は互いに直角だが、図 30c では、補正により、主軸の回転軸に対してこれらの軸がずれている。この例からは、機械の直角度をソフトウェア補正する前に、機械の他のアラインメントを考慮することが重要である理由がよくわかる。大きな XZ または YZ 直角度誤差を補正する際に特に重要である。そのような場合にはまず、X 軸、Y 軸、Z 軸、主軸の回転軸および機械テーブル間それぞれの直角度および平行度のずれの大部分を機械的な調整によって取り除いておくことが推奨される。空間補正はその後に適用し最終調整とするのがよい。

参考文献

1. ISO230-1:2012 工作機械試験方法通則 - 第 1 部: 幾何学的精度試験
2. レニショーホワイトペーパー「TE325: Interferometric straightness measurement and application to moving table machines」
3. ISO230-4:2005 工作機械試験方法通則 - 第 4 部: 数値制御による円運動精度試験
4. ISO230-6:2002 工作機械試験方法通則 - 第 6 部: 対角位置決め精度試験方法通則

www.renishaw.jp/contact

 #renishaw

 03-5366-5315

 japan@renishaw.com

© 2013–2023 Renishaw plc. 無断転用禁止。レニショーの書面による許可を事前に受けずに、本文書の全部または一部をコピー、複製、その他のいかなるメディアへの変換、その他の言語への翻訳をすることを禁止します。
RENISHAW® およびプローブシンボルは、Renishaw plc の登録商標です。レニショー製品の名称および呼称ならびに「apply innovation」マークは、Renishaw plc およびその子会社の商標です。その他のブランド名、製品名または会社名は、各々の所有者の商標です。
本書作成にあたり細心の注意を払っておりますが、レニショーは、法律により認められる範囲で、いかなる保証、条件提示、表明、損害賠償も行いません。
レニショーは、本文書ならびに、本書記載の本装置、および/またはソフトウェアおよび仕様に、事前通知の義務なく、変更を加える権利を有します。
Renishaw plc. イングランドおよびウェールズにおいて登録。会社登録番号: 1106260. 登録事務所: New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK

パーツ No.: H-5650-2063-01-A

発行: 2023 年 04 月