

工作機械だけで大型部品の加工と計測を実現
高精度加工と機上計測の信頼性が向上するエタロン社
のレーザ技術

1. はじめに

いまや精密大型部品は産業界で重要な地位を占め、高付加価値の創出においてもその果たす役割は大きい。厳しい公差をクリアした部品によって、タービンは高いエネルギー効率を、発電用風車のベアリングやギアは長寿命化を、そして自動車部品製造では優れた品質を実現することができる。

これらの精密部品の加工において、日本の工作機械メーカーは能力の優れた機械を生み出してきた。この高い加工精度は以前より世界中で認められていることだが、いわゆる幾何学（空間的）偏差を最小値化させるエタロン社の「三次元空間補正」を行うことで、その静的精度をさらに改善することができる。レーザを用いて機械の空間誤差をミクロン単位で特定し、その誤差に対する補正値を加工機に展開させて、機械における空間的精度を向上させるというものである。

しかしながら精度というものは恒久的ではない。確かに高精度三次元測定機で多く採用されているエタロンの空間補正を行った直後は、工作機械も測定機のような静的精度をみせることができるが、それほど精密な空間補正でさえ時がたてばその精度を保つことは難しい。温度変化や基礎沈下、摩耗や衝突などにより機械の精度は徐々に劣化する。この点に関して言えば、工場の工作機械の設置環境に対する整備は不十分なことが多い。

このような背景からエタロン社が提案できるソリューションについて議論が重ねられた。「工作機械自らその幾何学的な偏差を特定し補正できないか」。もしそれが可能になれば、様々な環境下において、より高精度な加工が可能になるだけでなく、ほんの僅かな偏差や測定が極めて難しい非常に緩やかな機械の熱変位も正確にとらえて補正することができるようになる。

そこでエタロン社は上記のテーマに対して二つのレーザ測定技術を用いたシステムを提案している。三次元測定機並びに工作機メーカーに広く導入されている空間誤差補正システム“レーザートレーサ”と、加速器のビーム方向調整用クラブ空洞内の計測や巨大望遠鏡のレンズ調整といった大きな研究プロジェクトで実用化の進む絶対測長システム“アブソリュートマルチライン”を用いたセルフモニタリングシステムである。

2. 大型部品加工における空間補正の有用性

2-1. 大型部品加工の課題

スチームやガスタービンをはじめ、核融合エネルギー部品や自動車の金型、風力発電機のギヤボックス、航空機のタービンといった大型部品には厳しい公差が求められる。しかしながら大物部品の精度を確保することも、品質を顧客に対して保証することも容易ではない。大物部品の多くは大型工作機械によって加工されるが、大型工作機械の加工精度は小中型機に比べてその精度確保が難しい。またこれらの加工機が設置されている環境は精度の維持の為に十分に整っているとはいえない。季節のみならず日ごとに変化する工場内の温度はもちろん、部品の搬出入で扉を開閉させることもその一因となることは言うまでもない。また加工物が大きければ大きいほど加工時間は長くなるため、変化する環境温度が精度に影響を及ぼすことになる。つまり温度変化による部品と機械の熱変位は高精度加工を行う上で大きな課題となっている。最近では熱変位の対策として空調設備を整え温度を一定に保つ工場も出てきてはいるが、天井の高い工場全体を空調管理することはコスト面からみて簡単なことではない。また、空調管理をしても、扉の開閉により外気が流れ込み、温度変化ができてしまうのを防ぐのにはまた別の対策が必要になってくる。

このような課題に対してエタロン社は、環境温度による機械変位を任意のタイミングでモニタリングし、加工や計測にフィードバックするシステムを発表した。本システムで特定された機械変位をワークの物体温度基準で必要に応じて補正することで、環境変化による加工誤差の影響を抑制し、オンマシン計測の精度を高める。これまで不可能とされた精度管理の運用が、現実のものとしてすでに欧州の先進製造研究センター、さらに大手重電メーカーで開始され、ドイツの自動車メーカーにおいても導入が予定されている。本システムを工場に一台設備し、数キロの距離に対応した光ファイバケーブルで工場にある100台規模の工作機械および測定機に接続する（図1）。ただし、このモニタリングシステムの使用前提として機械の静的精度を良い状態にしておく必要がある。それにはエタロン社が開発した空間補正システム“レーザートレーサ”が有効である。

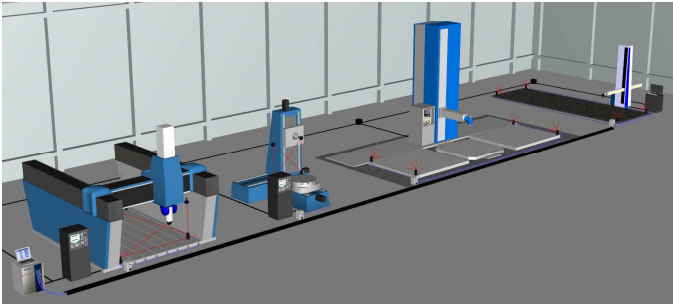


図1 エタロンシステムの工場の精度一元管理

2-2：空間補正とは

エタロン社が開発したこの空間補正システムは、自動追従式レーザ干渉計“レーザートレーサ”と空間補正用ソフト“トラックル”を用いて空間的な誤差を特定し、補正值の算出を行う（図2）。

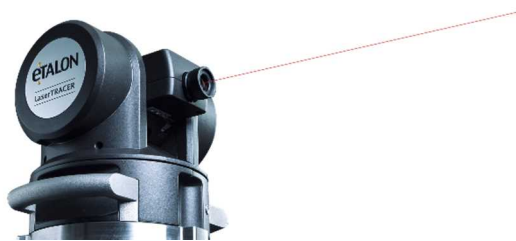


図2 空間補正システム レーザートレーサ

多くの工作機械で施されるピッチ補正は機械座標の中央付近でワークが加工される場合に有効である。機械座標の中央から外れていくと、図3のEBX、ECXのように新たに生まれる誤差に対しては効果がない。

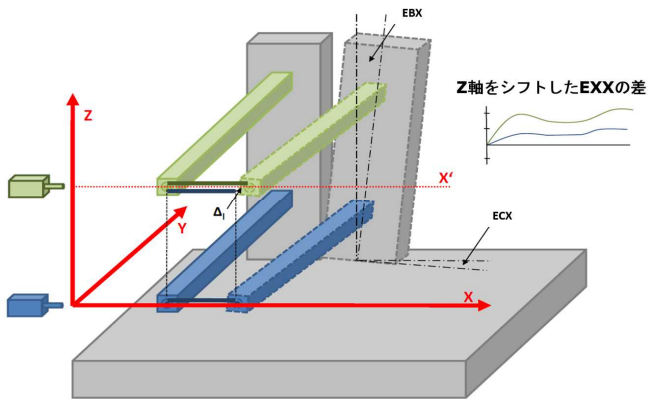
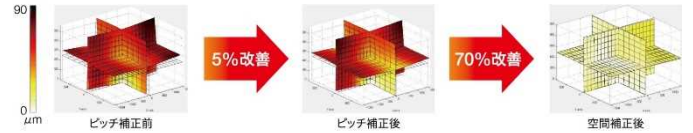


図3 ピッチ補正の課題

空間補正は従来のピッチ補正とは異なり、工作機械に存在する6自由度すべての誤差に対応するため、ピッチ補正で仕上げられた出荷前の工作機械でも、エタロンの空間補正で静的精度は大幅に改善されることがある（図4）。

図4 ピッチ補正無効、有効、空間補正の比較



三次元空間にある直動軸には、位置決め（ピッチ）、2方向の真直度、軸回りの縦揺れのピッチング、水平揺れのヨーイング、旋回方向の揺れローリングの合計6つの自由度がある（誤差運動）。3軸の機械であれば、18要素の誤差に重なり合った3軸の直角度加わり21要素の誤差が存在する。直動軸に留まらず、回転軸の6自由度の運動誤差も特定し、これを補正することもできるのが本システムの特長でもある。

これまで空間的偏差を特定することは非常に困難であったが、ヘリウムネオンレーザーで相対的な長さ情報の差を計測し、多辺測量の原理で座標を計算（GPS測定原理）する技術を用いることで、より短時間且つ簡単にミクロン単位での特定が可能になった（不確かさ(k=2): $0.2\mu\text{m}+0.3\mu\text{m}/\text{m}$ ）。しかも、その測定は測定範囲にもよるが、僅か1~4時間で完了する。測定後は補正值をコントローラに展開することができ、主要コントローラメーカーはこれら算出された補正值を読み込むオプションを取り揃えている。

またマーケットをリードする著名な三次元測定機メーカーにも導入されている本システムを用いれば、機械精度の向上だけでなく、オンマシン計測の信頼性も高まる。工具先端にプローブを付け替えるだけで、工作機械は測定機の役割を担い、他の三次元測定機に部品を移動させ、その環境温度になじませる必要もない。加工後にその場で寸法測定が行えれば機械側への追加加工のためのフィードバックも即座にできるため、生産効率は大きく改善される。

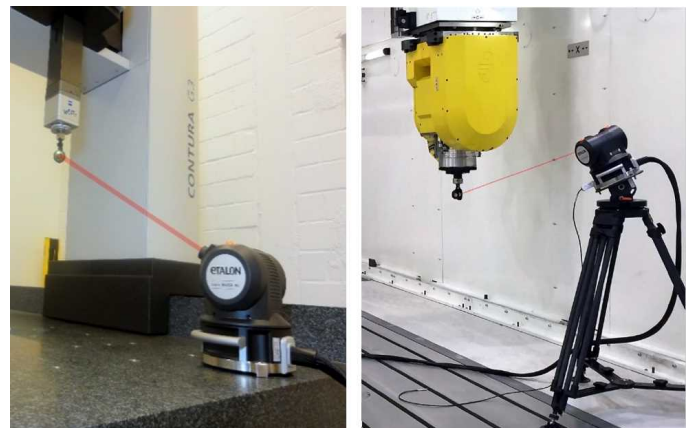


図5 三次元測定機（左）、工作機械（右）の計測

ただし工作機械の精度において、その後の劣化は避け

られない。たとえ空間補正を経て得られた高い精度であっても同様に起こりうる。ではこの精度を保ち、かつオンマシン計測のトレサビリティを確保するためにはどうしたらよいか。

エタロン社は、機械自身に精度を管理させるセルフモニタリングシステム、絶対測長システム“アブソリュートマルチライン”を開発した。

3. セルフモニタリングシステム

3-1:絶対測長システムを活用したセルフモニタリングシステム

“アブソリュートマルチライン”は、装置本体に接続された光ファイバケーブル（最長 5km）の先にコリメータを付け、リフレクタとの距離を測長するものである。絶対測長干渉計を内蔵しており、その不確かさは最長 30m で $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ と優れ、一般的な干渉計が相対距離で計測するのに対し、本システムは干渉計の精度で 30m までの距離を絶対測長できる革新的な技術を有している。また光ファイバーを通じて干渉計測定ラインを様々な場所へと繋げることで、要望に応じて数キロメートル先にコリメータとリフレクタ（図 6）を取り付けることが可能だ（最大 124 チャンネル）（図 7）。

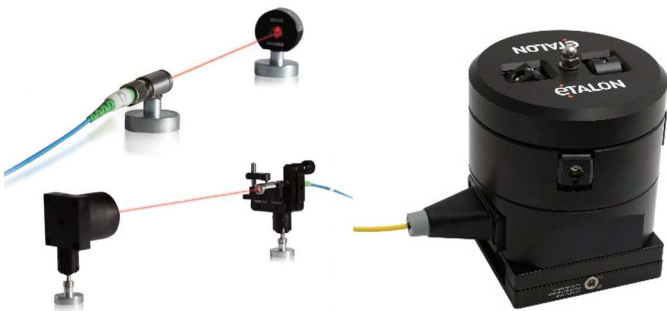


図 6 コリメータとリフレクタ（左）、サテライト（右）

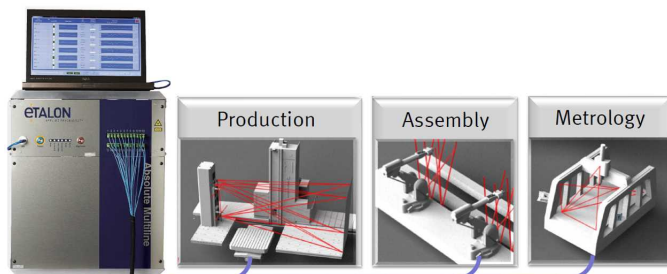


図 7 アプリケーションイメージ

まずコリメータが内蔵されたサテライト（図 6）を工作機械のテーブル及びコラムに直接設置、または機械周辺に取り付ける。各サテライトからは複数の測定レーザーが加工範囲を網羅するように発せられる（図 8）。

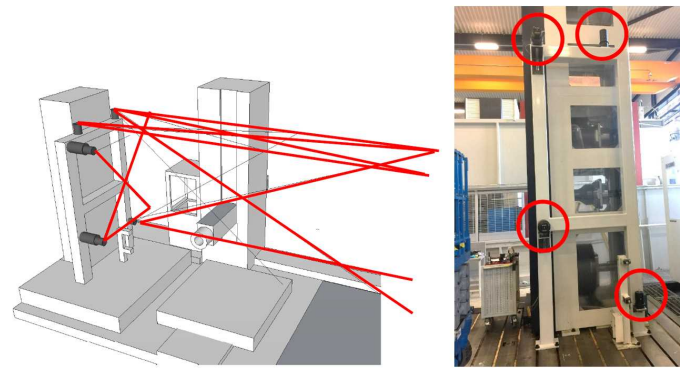


図 8 サテライトから伸びる絶対測長用レーザー

現段階では SIEMENS 社製コントローラに対応しており、工作機械のコントローラにエタロンの位置決め計測ソフト“トラックチェック”をインストールする。作業者がコントローラの画面に表示されるエタロンボタンから測定内容を選択すると、測定が自動で開始される（図 9）。

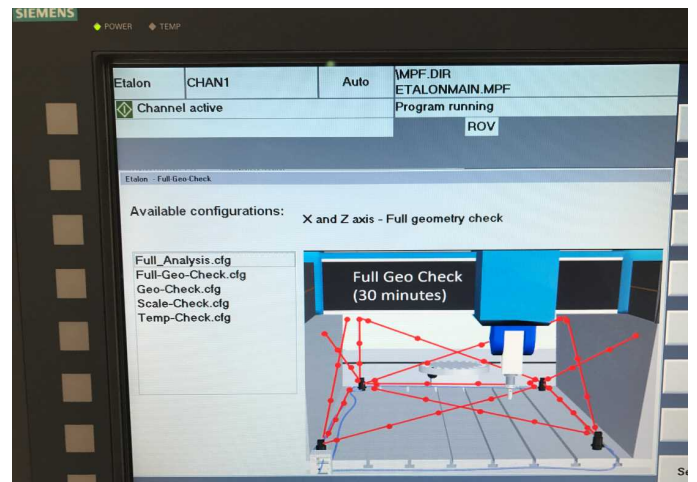


図 9 コントローラに表示される測定項目

機械は測定リフレクタの取り付けられた特殊工具を工具自動交換システムから主軸に固定し、三次元測定機の位置決め計測の ISO10360 に沿って測定を開始する。コントローラの指令数値と光学的な測定シグナルを比較し、ミクロン単位で偏差を特定する。決められた数の測定ライン上での測定が終了すると、スケール誤差、直角度の補正値が自動で算出され、作業者による確認作業を経てコントローラへと展開される。また、補正をした場合、位置決め精度の改善具合についてもシミュレーションで表示することができる（図 10）。コントローラで測定を開始すれば後は機械がすべて自動処理するため、作業者は測定の間、機械についている必要がない。機械サイズにもよるが、僅か 30 分の短時間計測で済み、毎シフト、加工するワークの要求精度に応じてオンマシン計測の前に実施することも可能である。このように機械偏差を継続的に管理することで、

空間補正で得られた高い精度を長期に渡り維持でき、これまで半年か1年に一度、機械を1~2日止めて行っていた校正作業の頻度を抑えることにもつながる。

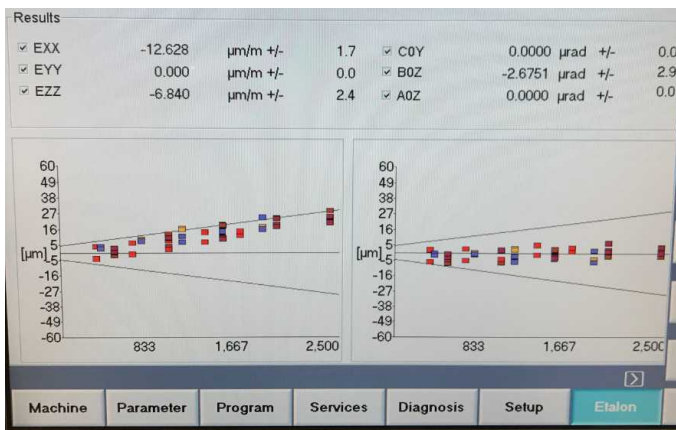


図10 結果の表示(左)、補正後の改善(右の分布)

3-2: 工作機械が測定機の役割を担う時代

このシステムを活用することで、機械の加工精度が向上するだけでなく、工作機械を測定機として運用でき、部品の品質保証を直接機上で実現できるようになる。本システムとエタロンの位置決め計測ソフト“トラックチェック”を用いて、三次元測定機のISO規格として存在するISO 10360-2 (JIS7440-2: 製品の幾何特性仕様座標測定機の受入検査及び定期検査) に沿った測定が可能のため、その後のオンマシン計測のトレサビリティが確保される。精密大型部品の生産現場での加工と測定を同一の機械で完了させれば、工程全体の生産効率は向上する。ただし、図面に表記される部品の寸法が20℃を基準にしているのに対し、工作機械の設置環境が20℃で維持されることは非現実的であり、オンマシン計測の測定結果を懐疑的にさせる。

そこでエタロンの技術がこの課題を解決する。現状の部品の物体温度を計測し、その線膨張係数に応じて、補正された工作機械でオンマシン計測することで、測定結果の信頼性を高める。部品に電波式温度センサを複数取り付け、位置決め計測用ソフトのトラックチェックに線膨張係数を入力し、アブソリュートマルチラインで工作機械を測定する。エタロンのソリューションを用いて、下記の手順で環境温度による熱変位を補正した加工、そしてワーク温度を基準にしたオンマシン計測が可能になる(図11)。

1. 工作機械の空間補正
2. 加工機で粗加工
3. アブソリュートマルチラインとトラックチェックでISO10360の位置決め測定
4. スケール補正、直角度補正

5. 仕上げ加工
6. アブソリュートマルチラインとトラックチェックでISO10360の位置決め測定
7. スケール補正、直角度補正(真直度)
8. オンマシン計測
9. アブソリュートマルチラインとトラックチェックでISO10360の位置決め測定

(測定8の前後における機械変位を証明するためのもの)

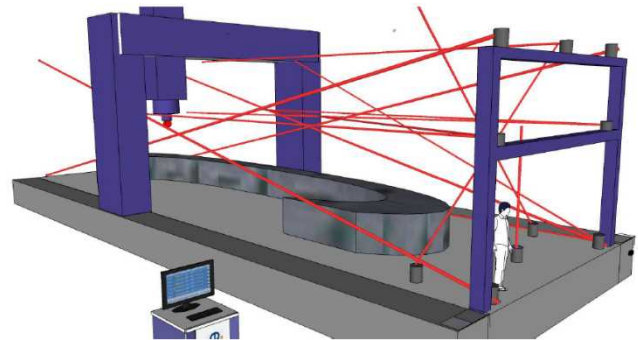


図11 オンマシン計測のイメージ

4. まとめ

約25年前に空間誤差という概念が登場した当時、空間補正の運用は研究機関や三次元測定機メーカーの間でとどまっていた。その空間補正の有用性が、徐々に工作機械メーカーへと広がり、いまでは工作機械のユーザにまで同システムが導入される時代となった。エタロン社の提案するこれら空間補正システムやセルフモニタリングシステムは、大型部品の加工における高効率化、高精度化とオンマシン計測による加工と計測工程の合理化を大きく後押しする。今後、幅広い分野にわたる大型部品メーカーでの採用が期待される。

1. 高精度三次元測定機にも採用されているエタロン社の空間補正システムを工作機械に活用し、加工精度を改善
2. 絶対測長システムを活かした工作機械のセルフモニタリングにより、空間補正で得られた高い精度を長期に渡って維持
3. 三次元測定機用位置決め計測ソフトを用いた工作機械のオンマシン計測のトレサビリティの確立と精密な計測の実現