



## 技術情報

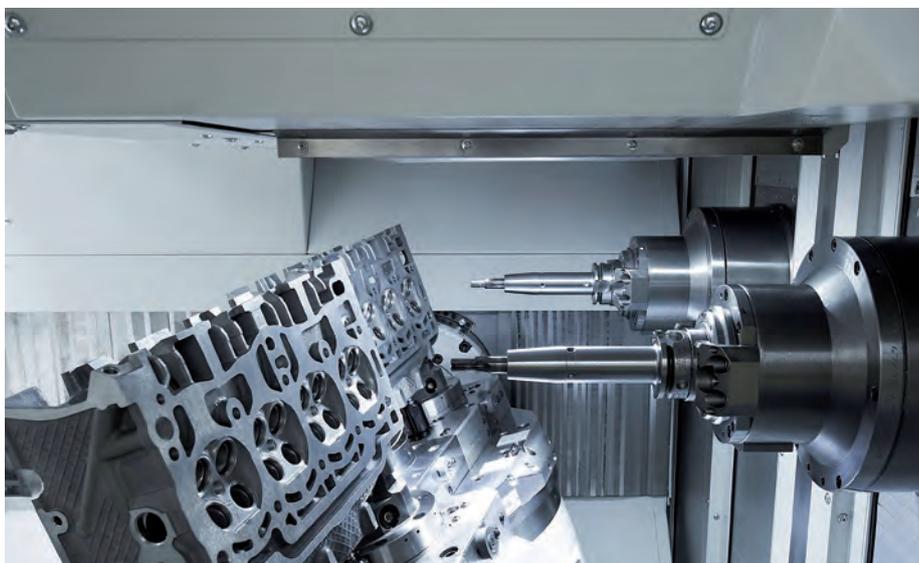
# 大規模自動生産設備におけるマシニングセンタの精度向上

自動車の消費者は、燃料費や排出基準そして税制措置に左右される各市場において、車体サイズ、エンジンの種類や出力等、多様な制約に合わせて、さまざまな車種やエンジンを要求します。このような要求は、自動車製造業にとって、生産進捗や生産能力の推定、そして生産ラインの設計を難しくします。

消費者のニーズに応えるため、自動車メーカーは同じシリンダー数で性能クラスの異なるエンジンを提供するなど、その多様性はさらに増えています。したがって、変動しやすい市場とあわせて、自動車のライフサイクルがさらに短くなっていることが自動車メーカーにとっての課題になっています [1]。そのような課題を解決するため、品質、時間、コストといった従来の生産に関するパラメータに、柔軟性という側面を加える必要があります。

これは、自動車のパワートレイン部品（エンジン、駆動装置、シャフト）を機械加工する生産ラインにおいて、一定の時間間隔で生産性の高い、従来のトランスファーラインを改め、マシニングセンタを多数並べ、高い柔軟性を持つ生産ラインを導入することを意味します。自動車販売市場における要求の変動に応えることに加え、将来、汚染物質の排出や自動車の燃費に関して、行政やエンドユーザーの要請が高まることが予想されます。その解決策の一つはパワートレイン部品における摩擦の発生を減らすことで、多くの場合、生産部品の品質向上が要求されます。生産ラインで使用しているライン化したマシニングセンタは、自動車の量産工程において、高い安全性を保つという自動車メーカー側の要求に応えることも必要です（図 1）。

マシニングセンタの送り軸においてリニアエンコーダを用いた Closed Loop 制御を行うことで、このような多様化する要求を満たすことができます。



# トランスファーラインからマシニングセンタのライン化へ 多品種、機械、生産能力と柔軟性の向上

## 柔軟性を欠いたトランスファーライン

トランスファーライン内の各ステーションは特定のワーク加工用に設計されているため、ステーションを追加するだけでは、これら既存のラインを拡張することはできません。したがって、計画した能力所要量を最大限にするためには、量産開始 (SOP) 時の生産ライン主要部に投資することが重要です。なぜなら、生産量は生産開始時に緩やかに上昇するか (増産時)、または生産停止時に下降するため (減産時)、生産能力の超過が発生し (図 2)、結果として設備能力を十分に活用していません。

トランスファーラインの通常運転中に能力所要量が当初の計画値を超える場合には、さらに問題が生じ、もはや既存ラインの生産能力では市場が要求するワークを生産することは不可能です。しかしながら、そのような生産量のピークを緩和させる目的でトランスファーラインをもう 1 つ構築したとしても、生産能力が著しく過剰になってしまいます。

## マシニングセンタのライン化による柔軟性

生産能力の小さいラインはマシニングセンタ (MC) をライン化させることができ、より広範囲の生産作業、より柔軟性の高い生産が可能になります。したがって、既存の生産ラインにマシニングセンタを追加する、または生産ラインそのものを倍増することで、図 2 の増産時における実際の生産量のニーズに応えることができます。

生産能力を能力所要量に近づけるこの手法は、コスト効率を可能な限り高めることにより生産システムの拡張を目指しています [2]。結果として、現在、自動車のパワートレイン部品の大量生産には従来のトランスファーラインの使用が減り、マシニングセンタやトランスファーセンタの採用が増えています [3]。

マシニングセンタのライン化による柔軟性の向上は、需要変動に対して迅速かつ低コストで要求に応えることと直接関係しています。例として、種類の異なるワークを設定変更をせず、同じ生産ラインで加工しなければならない場合が挙げられます (多品種に関する柔軟性)。

他には、単に生産ラインを拡大するため、機械を追加使用する方法があります。この手法は、標準機械とその同等機械を連結して用いることで簡単に統合でき、他の生産ラインでも使用が可能になるため、**再使用に関する柔軟性**と呼ぶことができます。

ラインの生産能力をワークの寿命と関連して考える場合も、上述のような需要変動が、生産ラインの能力所要量と生産能力との差になります。トランスファーラインでは、生産能力が比較的大きく変化するのに対し、マシニングセンタをライン化した場合は、増産時においてより小刻みにその生産能力を増やすことができます。そのような生産ラインは減産時の柔軟性が高いため、再停止することも可能です [4]。図 2 は、ワーク増産時における段階的な投資と、減産時における投資の減少を示しています (**生産量に関する柔軟性**)。

図 3 はパワートレイン部品の機械加工ラインのレイアウト例です。マシニングセンタのライン化がガントリーローダで確認でき、それぞれの加工作業に分類されています。したがって加工作業は、同様の加工内容を並行して手がける複数のマシニングセンタで行われます。

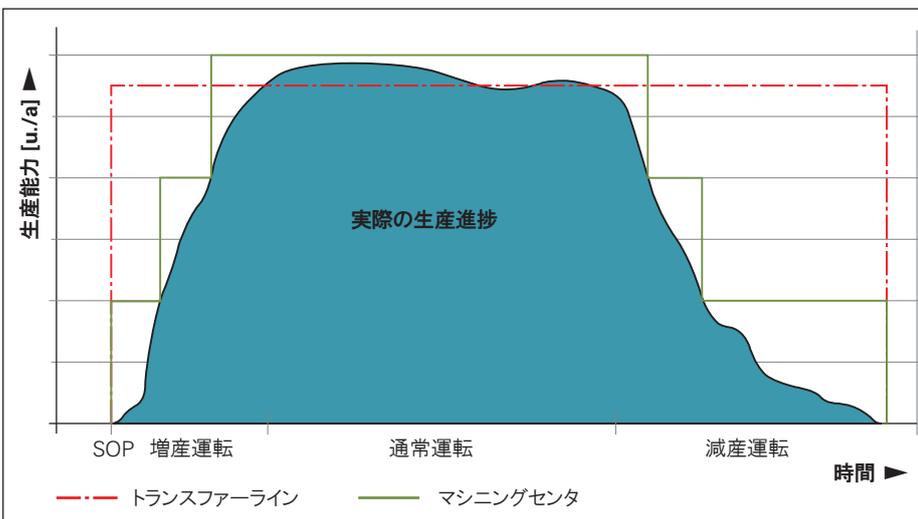


図 2: 生産量に関する柔軟性—生産能力と能力所要量の比較 [4]

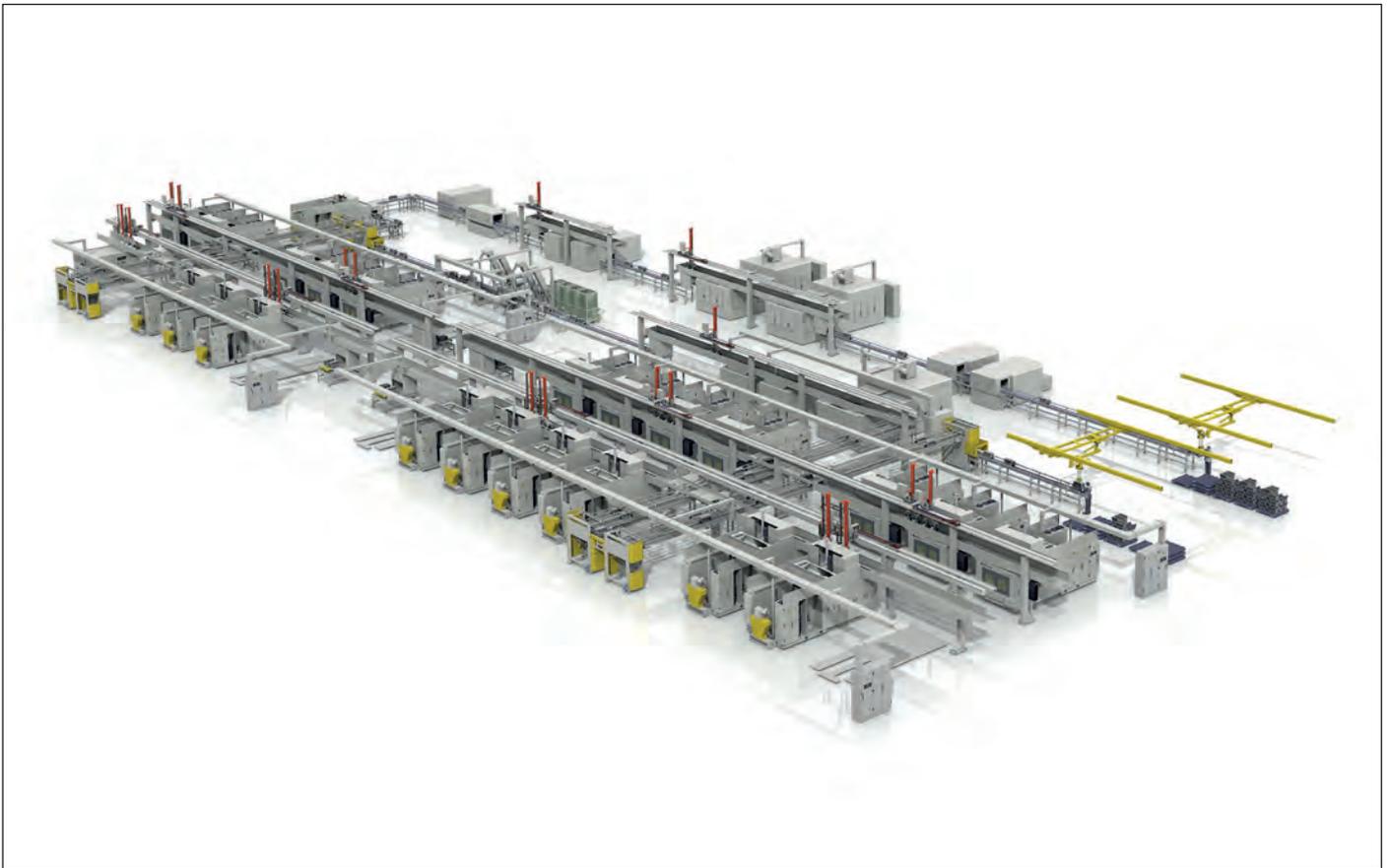


図 3: 大量生産ラインの構築例 (写真提供: MAG IAS GmbH)

#### 横形マシニングセンタの長所

横形マシニングセンタは、よく生産現場で使用されていますが、切りくずの排出に強みがあるため、冷却潤滑剤の使用量削減、または最低限の量での切りくず除去が可能です。さらに横形マシニングセンタは、ワークの供給を簡単に正面や上面から行うことができるため、変化に応じた自動化も可能です。よって、搬送システムが異なる生産ラインでも、同じ機械モデルを使用することができます。設置面積が少し大きいもののダブルスピンドルマシニングセンタは、生産性が高いためによく使用されます。(1 頁の図 1 参照)

#### 自動車における大量生産の特徴

要約すると、自動車産業の大量生産における直方体ワークの加工には、以下のような特徴があります。

- 横形マシニングセンタをライン化した自動生産
- 作業員 1 人あたり 8 ～ 15 台の機械を管理
- 加工作業は通常、同様の加工内容を並行して行う複数のマシニングセンタで実施
- ワークは複数の工程にわたり連続的に加工される
- 複数のマシニングセンタを用いて 1 つのワークを生産する。つまり、複数のマシニングセンタでワークの公差を一致させている。

最後に、特に明確にしなくてはならないことは、ワークの公差は全体の生産システムにおける個々の機械またはサブプロセスによって決まるということです。1 台の機械で 1 人の作業員が管理を行いワークを生産する工具や金型製作とは対照的に、大量生産ではプロセスチェーンの各加工工程間で依存関係が生じます。このことを加工工程と生産ラインを設計する際に考慮しなければなりません。

# 直方体形状のパートレイン部品 加工工程と公差

自動車のパートレインは、エンジン、トランスミッション、シャフトモジュールに分けられ [1]、これらモジュールは、さらにバルブトレインやその部品といった、さらに細かく分類された部品群で構成されています。シリンダーヘッド、クランクケース、トランスミッションハウジングは、パートレイン生産における典型的な直方体部品です。

大量生産とコスト効率化のため、ワークは通常、機械加工前に仕上げに近い輪郭で製造されます。つまり、コネクティングロッドやクランクシャフトのような部品の場合、ワークの基本形状は鋳造・鍛造工程ですでに決まっており、これは直方体形状のワーク加工時の工程分析にも反映されています。([5]、[6])

## ドリル加工に集中

図4はシリンダーヘッドの生産工程の分析です。ミーリング加工の割合が、ドリル加工や類似の加工に比べて低くなっています。これはごく一部の領域を除いて、ワークの基本形状はすでに成型されているためです。

しかしながら、サイズが指定されている穴の成型は不可能、または加工するとしても成型工程が非常に複雑となります。よってドリル加工作業を伴う機械生産ラインに組み込まなければならず、加工工程におけるドリル加工の割合が明らかに高くなるのです。

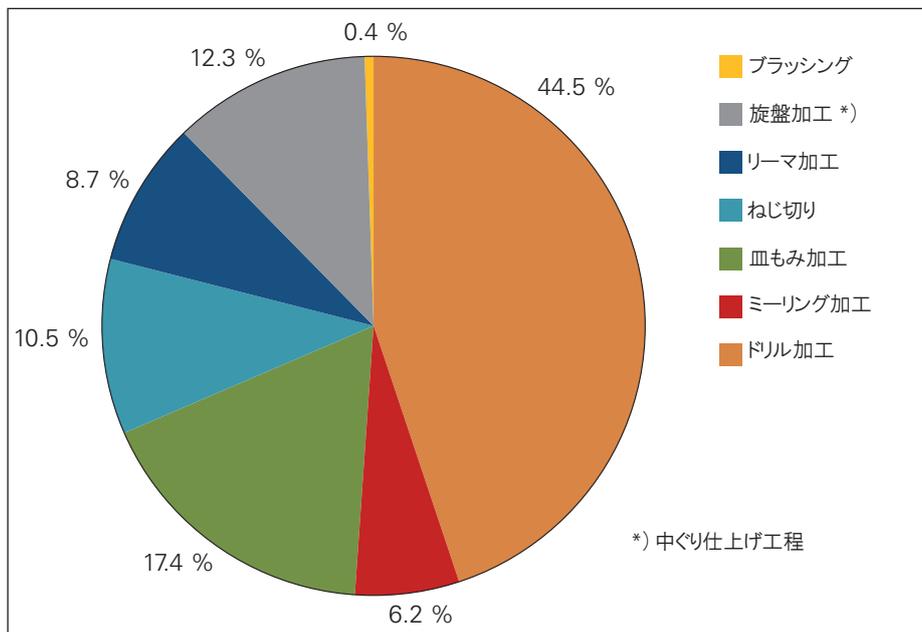


図 4: シリンダーヘッド製造に含まれる生産工程とその割合 [5]

生産工程を分析することにより、加工に必要な軸の動きを決定することもできます。ドリル加工であるため、動きの大半はワークに対する工具の位置決め、送り、そして工具を引き込む動作です。さらに通常、ワークは自由曲面でないため、ミーリング加工中のワーク面(2本の直線軸間を横切る)での動作は、位置決め動作に加えて十分であると言えます。

したがって、ワークに生じる形状公差の値はほぼ、工程の大半を占めるドリル加工作業の割合で決まります。リーマのような工具寸法の影響を受ける直径公差に加え、部品図面は位置、間隔、そして穴の深さの公差についても示しています。



図 5: ハイデンハインのリニアエンコーダを搭載した横形マシニングセンター (写真提供: GROB-WERKE GmbH & Co. KG)

### 寸法精度を決める直線軸

指定された公差を満たすためには、特に工作機械の直線軸が高精度位置決めを実現できるかが重要です(図5)。ワークや図面によって異なりますが、製品の特徴に合わせて公差値と公差区分に違いがあります。

図6はクランクケースの公差分布(位置、間隔、深さ)を示しています。

この例では公差が $\pm 0.1$  mm以下の割合が30%以上を占めていますが、シリンダーヘッドやトランスミッションハウジングの製品特徴でも同様に、公差 $\pm 0.1$  mm以下が要求されます。例として、異なるハウジングにおけるベアリングの主軸受とカラーの間のボア軸間隔や、シリンダーヘッドのバルブトレインにおけるドリル穴の位置と深さの公差値などが挙げられます。

### 厳しい公差値を確実に満たす

柔軟性の向上として上述のような要求を達成するため、メーカーは標準的な工作機械を使用し、個々の製品寸法に合わせた特別仕様の機械を不要にすることを目標としています。これはつまり、たとえ公差値が $\pm 0.1$  mm以下であっても、生産ラインに設置したマシニングセンタは安全かつ信頼できる方法で操作しなければならぬということを意味します。

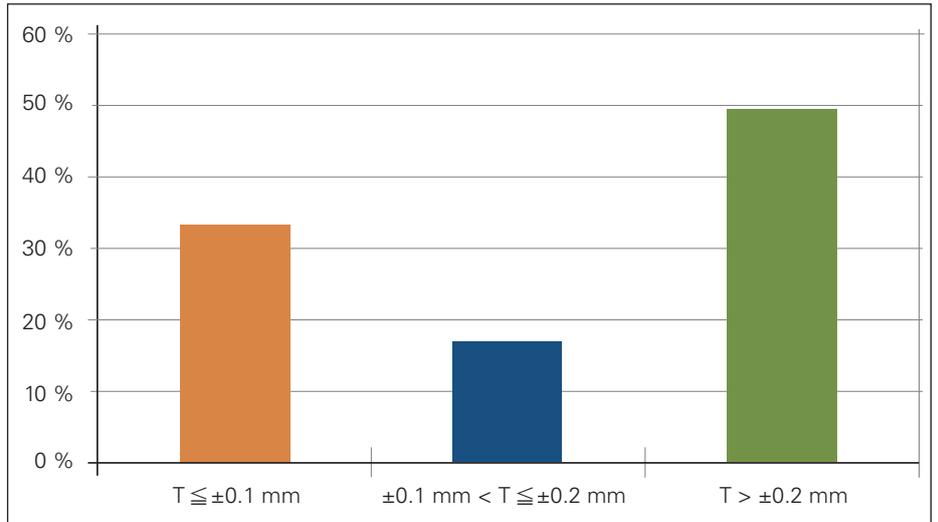


図6: クランクケースにおける位置、間隔、深さの公差分布

# 直方体形状のパートレイン部品

## 能力分析による機械能力および工程能力の決定

前章で述べた公差の値は、工具や金型の生産部門における要求値と比較した場合、大きいように思われます。しかしながら、自動車のワークにおける公差値がまず始めに設計者の図面仕様に一致するということを考慮しなければなりません。

自動車メーカーは、工作機械および導入した生産工程が、許容限界に対して定義した安全マージンで長期間にわたり必要条件である図面公差を満たすことが可能であるかを確認するために、マシニングセンタの統計的な能力分析を行います [7]。

### 機械と工程の能力試験

工作機械の受け入れ試験のために、例えば、システムまたは機械単体にて、ワークを 50 個製作し、その公差分布を統計的手法を用いて評価しました。能力試験では能力仕様や能力指数が定義されます。

**機械能力**の決定には指数  $C_m$  または  $C_{mk}$ 、**工程能力**には指数  $C_p$  または  $C_{pk}$  をそれぞれ定義します。指数  $C_{mk}$  および  $C_{pk}$  は複数部品に関して測定した公差値の非心分布を考慮しています。

機械能力の決定は、公差は可能な限り一定でなければならないという制約を受ける工作機械によって加工されたワークの瞬間的な公差のばらつき具合の理解を目的としています。(三短期試験)

工程能力は、工程の制約を受ける機械の長期的なばらつき具合の決定を意図しています。(三長期試験)

測定したワークの公差値をもとにした指数を算出する式、その他に関しては、[7]を参照してください。

数式 1により変数  $C_m$  および  $C_p$  を決定します:

$$C_m, C_p = T / (6 \cdot s) \quad (\text{数式 1})$$

$T$  = 図面寸法に従った公差範囲

$s$  = 標準偏差

自動車メーカーは品質に関連する公差に関して能力指数を指定し、工作機械メーカーが納品した生産機械は受け入れ試験時に、少なくともこの値を達成していなければなりません。受け入れ工程に関して、指数の決定がワーク図面に明記された公差値をさらに制限します。これを説明しているのが図 7 で、機械能力指数  $C_m$  を考慮し、公差  $T = \pm 0.1 \text{ mm}$  の値を例として用いています。自動車メーカーは、部品機能に関して、公差における特徴のクラス分けも行い、重大 ( $C_m = 2.00$ )、重要 ( $C_m = 1.67$ )、重要性は低い ( $C_m = 1.33$ ) に分類しています。

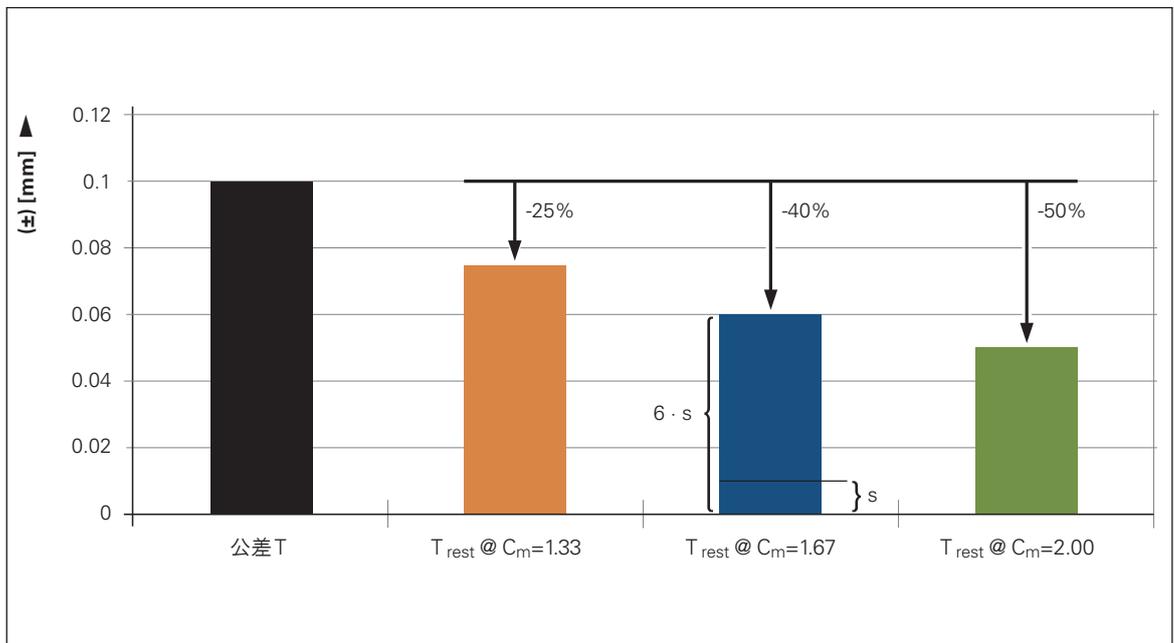


図 7: 図面公差と能力指数  $C_m$  の相関関係

### 目標：ばらつきを最小にする

均一で高品質のワークを生産しスクラップ率を最小限にするためには、公差のばらつきを最小レベルに抑えること、つまり標準からの偏差を小さくすることを目標としなければなりません。したがって数式 1 は下記のようにみなせます。

$$C_{m,measured} = T / (6 \cdot s) \geq C_m \quad (\text{数式 2})$$

または

$$6 \cdot s \leq T / C_m \quad (\text{数式 3})$$

$C_{m,measured}$  は、機械の受け入れ試験時に加工した、例えばワーク 50 個の公差寸法と、上記で算出した標準偏差を元にした指数に該当します。

### ばらつきの最大許容を確認するための能力試験

数式 2 は、測定で得た能力指数が大きくなると、標準偏差が小さくなることを示します。ワークの測定で得た値 ( $C_{m,measured}$ ) は、メーカーが指定した  $C_m$  の値より大きい、または等しくなければなりません。このことを考慮すると、能力指数の決定は、メーカーが公差寸法に関して最大許容標準偏差の決定に対応します。(数式 3 および図 7)

図 7 の例で  $C_m = 1.67$  という値は、元の公差が  $\pm 0.1$  mm で複数のワークを測定した際、全ての公差寸法値の内 99.73% が  $\pm 0.06$  mm の範囲内でなければならないことを意味します。よって許容標準偏差は最大でわずか  $\pm 10$   $\mu$ m でなければなりません。量産時にこれらの値を達成するのは、マシンングセンタにとっては大きな挑戦です。



# 加工の誤差限界

## 工程における誤差変数とその影響

前ページでは、自動車パワートレインのワークにおける公差値の大きさについて説明しました。工程に生じる誤差変数が激減する特性を持つ製造工程では、適用される公差の割合に関して、疑問が生じます。誤差の合計値が適用される公差より大きくなる場合、工作機械やその製造工程では指定された加工作業を遂行することはできません。以下では、例えばワーク固定時や軸での温度ドリフトが原因となって起こりうる工作機械の誤差限界を評価しています。適用される公差を既存の誤差限界と比較し、残りの公差余裕を評価することが目的です。こうした準備により、工作機械や製造工程は生産時に発生する予期しない、または制御が難しい影響を補正することができます。

### ワーク固定時における公差指数

ガントリーローダのような特別モジュールを用い、通常自動でワークが工作機械に運び込まれます。ワークの加工を始める前に、ワークを位置決めし機械の取付具に固定する必要があります。この作業は作業員が介入しないで行わなければならないため、位置決めは通常取付具のインデックスピンを用います。これはつまり、生産ラインにおいてワークのインデックスホールと取付具のインデックスピン間の機械的な組立て公差を考慮しなければならないということを意味します。

インデックスホールに関しては、図面仕様に従って、生産ラインで製造した各ワークに同一の公差を持たせることが可能ですが、実際の寸法はワークごとで異なります。これは取付具の各インデックスピンに関しても当てはまります。結論として、常に同一の誤差値を予期することは不可能です。しかしながら、インデックスホールおよびインデックスピンに指定された最大許容寸法を、各場合において満たす必要があり、満たせない場合、不良品が発生してしまいます。これにより誤差限界を評価することができます。

上述の直方体自動車パワートレイン部品（シリンダーヘッド、クランクケース、トランスミッションハウジング）は、多くの場合  $\varnothing 12 \text{ mm}$  のインデックスホールがドリル加工されます。取付具へのワークの固定はローダへの過剰負荷やワークの固定ミスにつながり、結果として生産ラインにアイドリングタイムが生じる可能性があるため、望ましくありません。

これを防ぐために、中間ばめ  $\varnothing 12 \text{ H7/js6}$  が以下のように推測されます。この仕様値は、取付部において下記に示すワークの最大誤差限界を満たしています。

インデックスホール  
 $\varnothing 12 \text{ H7} = \varnothing 12 \begin{matrix} +0.018 \\ 0 \end{matrix} \text{ mm}$  (数式 4)

インデックスピン  
 $\varnothing 12 \text{ js6} = \varnothing 12 \begin{matrix} +0.0055 \\ -0.0055 \end{matrix} \text{ mm}$  (数式 5)

$\varnothing (12.018 - 11.9945) \text{ mm}$   
 $\equiv \pm 11.75 \text{ } \mu\text{m}$  (半径方向) (数式 6)

厳しい公差をもつワークを生産するために、ワークを固定するより先に、取付具側のシリンダー押し出し方向と交差する方向へ移動させることがあります。これはワークがインデックスピンに対して半径方向に押しつけられることを意味し、結果としてドリル軸中心からの誤差限界値は最大値の半分となります ( $\equiv \pm 5.88 \text{ } \mu\text{m}$ )。スライドユニットは取付具の構造を複雑化し、それに伴いコストも高くなるため、全加工ステーションへの導入を計画することはできません。

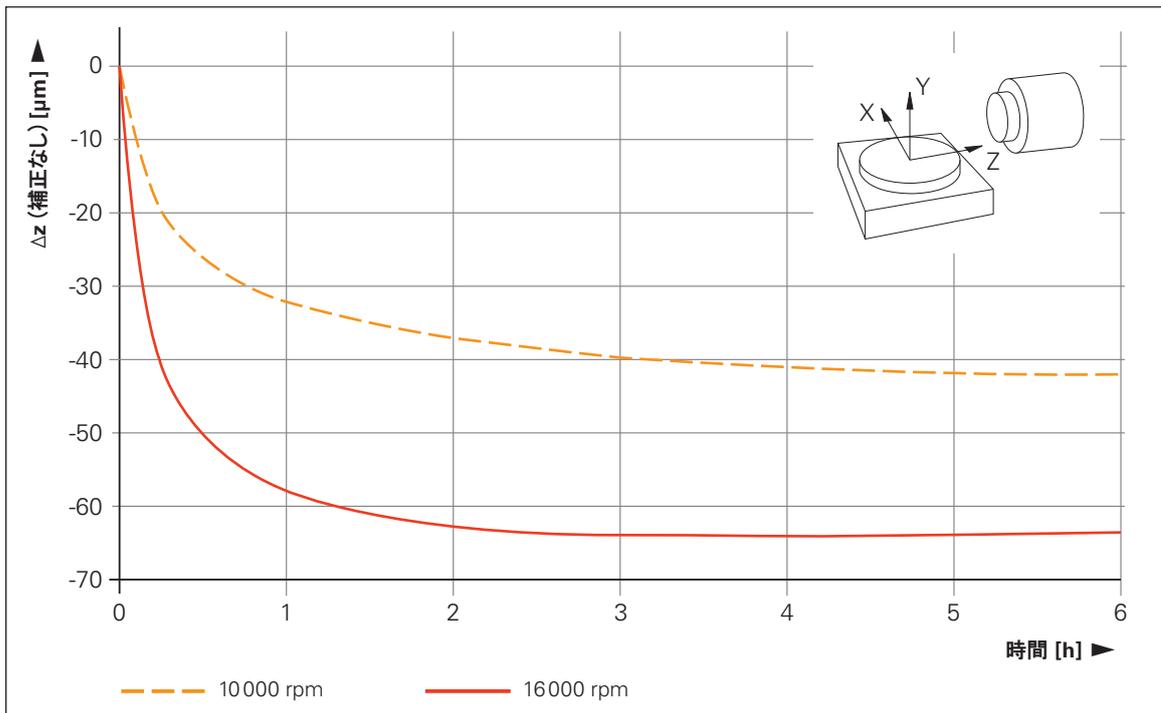


図 8: 主軸発熱の影響によるZ軸ドリフト測定結果 (補正なし)

### 工具交換における公差

工具に関しても、工具の交換時や使用しているツーリングシステム次第で精度が悪くなります。上述の生産ラインのマシニングセンタでは通常、ボールねじと中空テーパシャク付の工具を使用しています。[8]では、中空テーパシャク接続の繰返し性は、軸方向で $1\ \mu\text{m}$ 以下、半径方向で $3\ \mu\text{m}$ 以下（三軸方向で $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ ; 半径方向で $\pm 1.5\ \mu\text{m}$ ）です。

### 主軸端での温度ドリフト

加工時の主軸端における軸方向ドリフトは、例えばシリンダーヘッドのキャップや燃焼室面のように、2つの平行した面を決まった間隔で加工しなければならぬ正面フライス削りはもちろん、深さ寸法が規定された穴加工にも影響を及ぼします。加工中、ボールねじの発熱は、主軸と軸構造の膨張に多大な影響を及ぼします。上述のような生産に用いる工作機械は、一般的にスピンドルモータを実装しています。さまざまな加工条件により動作が変動し、スピンドルモータと軸受への熱負荷が変動しやすくなります。スピンドルモータは機械の軸構造に高度に組み込まれているため、スピンドルモータのハウジングや機械軸の取付面を介して放熱するので、通常、スピンドルモータは冷却装置に接続されています。

図8は、スピンドルモータを搭載したマシニングセンタの暖気運転中におけるZ軸のドリフトの測定値を表しています。工作機械のテーブルに対するツールセンターポイントのドリフトを示し、主軸のアイドリング回転数は10000 rpmまたは16000 rpmです。測定値には、切削時に生じる主軸への負荷が原因で加わる熱負荷や、その結果で生じるドリフトを含みません。しかしながら主軸の負荷や速度に応じて、アイドリング回転数と比較して著しく増加したドリフト値が予想されます。

図8で示したアイドリング回転数が16000 rpmの負荷の測定曲線によると、工作機械のテーブルに対して主軸端ではZ軸方向に約 $64\ \mu\text{m}$ の温度ドリフトが発生しています。温度ドリフトは制御装置に保存されている補正モデルを使用することでさらに減少するケースが多く、図で示したドリフトを80%近く減らすことが期待できます。したがってこの測定曲線を用いた場合、ドリフトによる誤差値は $12\ \mu\text{m}$ （ $\pm 6\ \mu\text{m}$ ）ということになります。

# 加工の誤差限界

## 位置検出での誤差変数

さらに考慮しなければならないことは、ボールねじを使用した送り軸の実際の位置値の決定に関して違いを認識することです。この場合、エンコーダ取付位置と送り軸の制御ループへの組み込み方によって大きな違いが発生します。図 9 では Semi-Closed Loop 制御の送り軸と Closed Loop 制御の軸を比較しています。

### Semi-Closed Loop と Closed Loop

Semi-Closed Loop では、送りモータのエンコーダのみで送り軸の位置制御ループが閉じています。ここではエンコーダは送りモータシャフトの角度位置を測定しており、スライドする軸の位置を測定していません。スライド位置はボールねじのリードから角度位置を計算して決定します。送り軸または工作機械の動作中は、角度位置、ねじのリード、そしてスライド位置の相関関係は一定であると想定しています。例えばボールねじの熱膨張や摩耗により、この相関関係に変化した場合、算出した位置値には誤差が発生します。制御装置やエンコーダは送り軸の伝達要素における変化を ' 検知することができません '。

送り軸が Closed Loop 運転の場合、送り軸のスライド位置はリニアエンコーダで測定され、実際の位置値として軸の位置制御ループにフィードバックします。運転中に生じるボールねじの温度ドリフトのような偏差は、スライド位置を記憶し、軸制御により調整されます。

### 系統的な位置偏差と偶発的な位置偏差

位置決めの不正確さは、送り軸の位置決めの際に生じます [9]、[10]。系統的な偏差は同一の構成条件において再現性があるため補正が可能です。偶発的な偏差（ばらつきがある）は再現性はありませんが、少なくとも統計的ふるまいをします。機械軸の位置決めにおける偶発的な偏差の影響により、位置値のばらつきが生じます。

機械を使用し位置公差でワークに穴をドリル加工する際には、再現性のない誤差要因となる、位置のばらつきを考慮しなければなりません。

実際の測定で、軸を Semi-Closed Loop で運転した場合、送り軸の長さ 500 mm ~ 800 mm における位置のばらつきに関する標準値は約 2  $\mu\text{m}$  (  $\pm 1 \mu\text{m}$  ) であることを示しました。

軸スライドにリニアエンコーダを接続し、実際の位置値を位置制御ループにフィードバックすることで、位置決めの際の伝達要素やリニアガイドの摩擦による影響が低減します。Closed Loop 制御での位置のばらつきは、一般的に Semi-Closed Loop と比較して 40% ~ 50% 減らすことが可能であることが測定結果からわかります (  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  )。

### 温度ドリフトの削減

技術情報 " 送り軸の精度 " および " 工作機械の加工精度 " に明記した測定では、ボールねじ駆動でストロークが 800 mm の送り軸を Semi-Closed Loop で運転した場合、温度ドリフトは 40  $\mu\text{m}$  以上 (  $\pm 20 \mu\text{m}$  ) でした [11]、[12]。

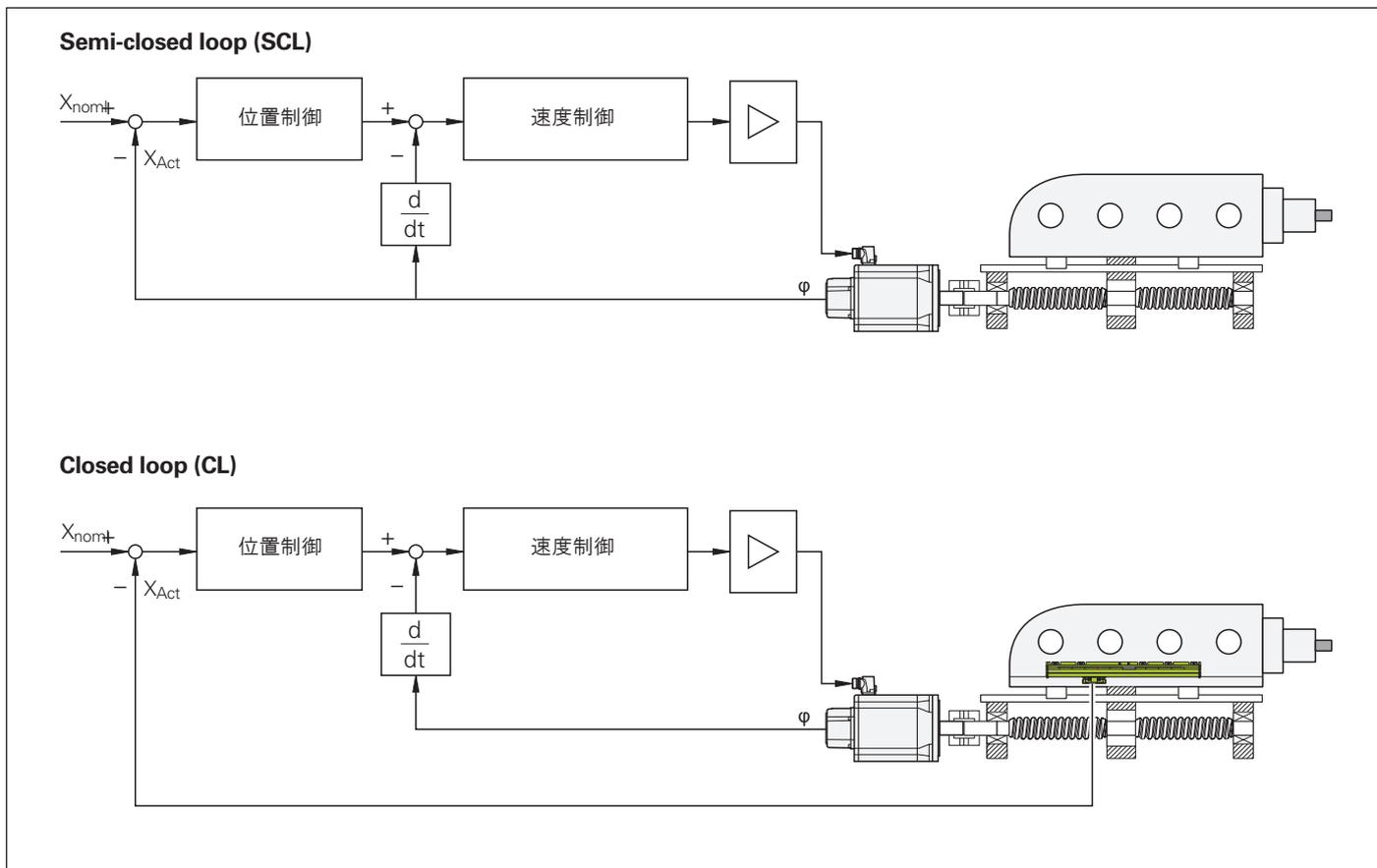


図 9: Semi-Closed Loop と Closed Loop の原理

	誤差限界推定値 [μm]	
	Semi-Closed Loop	Closed Loop
ワーク固定割り出し	±11.75 ±5.88 (スライド部において)	
工具交換時の誤差(中空テーパシャック)	±0.5 (軸方向) ±1.5 (半径方向)	
主軸の温度ドリフト(補正あり)	±6	
位置のばらつき (500 mm < X ≤ 800 mm)	±1	±0.5
ボールねじ発熱による温度ドリフト	±20 ±10 (ボールねじ冷却時)	±1
座標測定エンコーダの長さ測定偏差	±1.5	

表 1: Semi-Closed LoopおよびClosed Loopにおける誤差限界推定値

ボールねじを冷却する場合、高品質の冷却ユニット(温度の安定度が1 K以下)を用いることでドリフトを50%削減することが可能になります。冷却ユニットの搭載だけでなく、冷却剤を回転するボールねじの軸に送る機能をもつ回転ジョイントと共に、個々の送り軸に対して冷却剤の供給および回収ができるラインを別途設置しなければなりません。

しかしながら、Closed Loop 制御を採用することで、ボールねじの温度ドリフトを著しく減少させることが可能です。リニアエンコーダはボールねじのドリフトを測定し、それを軸の制御で調整することにより、温度ドリフトの誤差は2 μm以下(≒ ±1 μm)になります[11]。

表 1 は事前に推定した誤差限界をリスト化し、送り軸の Semi-Closed Loop と Closed Loop で比較したものです。表 1 のどの公差の割合が誤差限界を減少させるかを推定する際には、ワークの位置と加工スペースで許容された加工内容を考慮しなければなりません。したがって、示された公差方向における誤差のみ、適用される公差の割合を必要とします。

#### ワークテストの影響

ワークの寸法精度の評価は、通常、適切な測定室で座標測定エンコーダを用いて実施します。その幾何学的構造において座標測定エンコーダは工作機械と似ており、ワーク寸法評価時に生じる測定偏差による誤差の影響を受けます。測定偏差の大きさは以下の影響を受けます。

- 測定室の温度変化
- 座標測定エンコーダの幾何誤差
- 測定誤差
- 選択した測定方法
- ワーク固定時および作業者による誤差
- ...

残りの測定偏差は評価される寸法公差よりも著しく低くなければならないため、座標測定エンコーダは通常温度制御された測定室で使用します。座標測定エンコーダの製造および組立時には高精度が求められ、リニアエンコーダを Closed Loop 制御で使用します。

(例えば、計測中にプローブを曲げるなどによって)残りの偏差をコンピュータによる補正によってさらに減らすことが可能です。許容長さ寸法内で信頼性のある測定をするためには、座標測定エンコーダの長さ測定偏差は、評価される公差値の約10分の1である必要があります。したがって、ワーク図面に明記された公差値が±0.1 mmであるので、測定偏差は±10 μmもしくはそれ以下でなければなりません。しかしながら、より小さな公差を確実に測定するため、さらに、例えば測定室中央において汎用的に使用可能になるように、実際には長さ測定偏差が±1.5 μmの座標測定エンコーダを使用します。

# 工具公差と誤差限界

## 公差余裕を大きくする Closed Loop

前ページで述べたワークに必要な公差と誤差限界推定値の比較を、以下に幾何形状の例を用いて説明します。図 10 は、トランスミッションハウジングにおけるシャフトのベアリング組立てに使用する穴を示しています。

非加工時間、つまりサイクル時間そのものを削減するために、2つの穴の径は複合工具を使用して製造することができます。このため、直径やZ寸法を加工する工具の刃先は1つの工具に搭載されています。ワークを並べるために必要なインデックスホルの1つも図中に示しています。インデックスホルの公差方向は、許容製品寸法  $Z_1$  および  $Z_2$  と同じ方向です。これはY寸法には適用されません。

### 考慮すべき誤差

したがって、 $Z_1$  および  $Z_2$  の加工時には、取付具にワークを割出しする際に生じる誤差を考慮しなければなりません。この加工作業中、機械ではワークの他の箇所では別の工具を使用しているため、工具交換時の誤差も全体誤差の要因として考える必要があります。さらに、主轴の温度ドリフトによる  $Z_1$  および  $Z_2$  方向の誤差、Z軸の加工方向位置決め時に発生する位置のばらつき、そしてボールねじの加熱の結果生じるZ軸方向の温度ドリフトも考慮することが必要です。座標測定エンコーダの長さ測定偏差は、工作機械のワーク固定方向とは別に誤差分析の計算に組み込まれています。

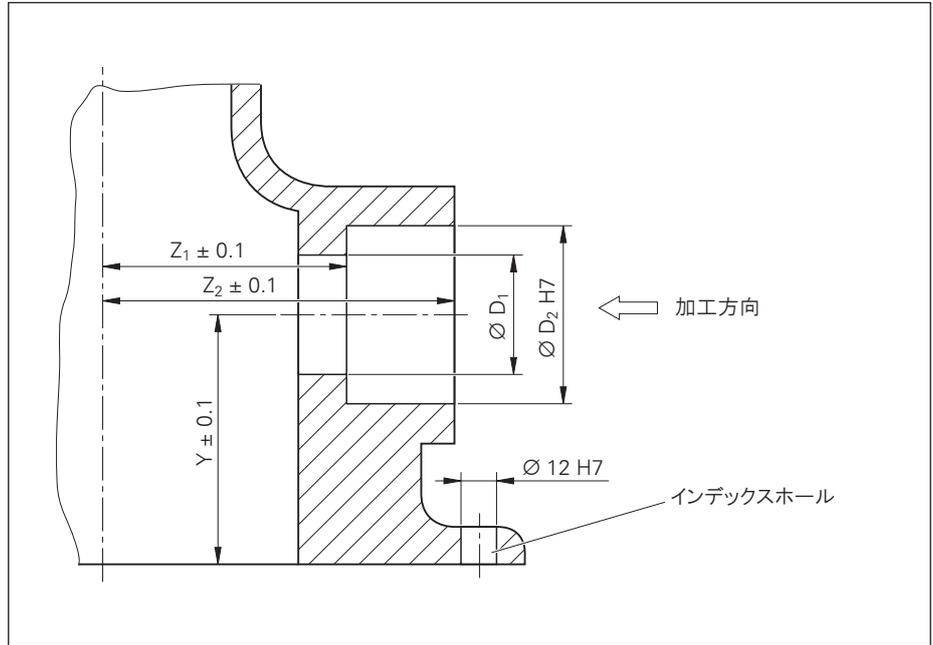


図 10: トランスミッションハウジングのベアリング穴 (幾何形状例)

許容製品寸法の平均機械能力値を  $C_m = 1.67$  と仮定した場合、推定した誤差が最悪の場合でどれほど適用される公差を減らしてしまうかを確認することができます。これを説明しているのが図 11 で、Semi-Closed Loop 制御における  $Z_1$  および  $Z_2$  寸法の公差を表しています。

適用される公差の割合を最も消費しているのが、制御することのできないボールねじの温度ドリフトであることがわかります。分析の結果、残りの適用される公差 (公差余裕) 値はわずか  $\pm 19 \mu\text{m}$  です。

### 誤差が小さくなると公差余裕が大きく

誤差変数を減らすことが直接的に公差が大きくなることは明らかです。直線軸でリニアエンコーダを使用することは Closed Loop での運転を意味し、とりわけボールねじの温度ドリフトを減らすことができます (図 12)。結果として公差は著しく大きくなり、その値は  $\pm 39 \mu\text{m}$  に至ります。

上記で述べたように、大規模量産設備では各生産工程間で依存関係が生じます。表 1 でリスト化した誤差限界は全体の部品生産工程で生じ得る、潜在的な誤差の内のいくつかを示しただけにすぎません。よって、工程内で誤差の影響を受けにくくするために公差余裕が最大限になるよう、各工作機械で誤差変数を最小限にすることが目的となります。

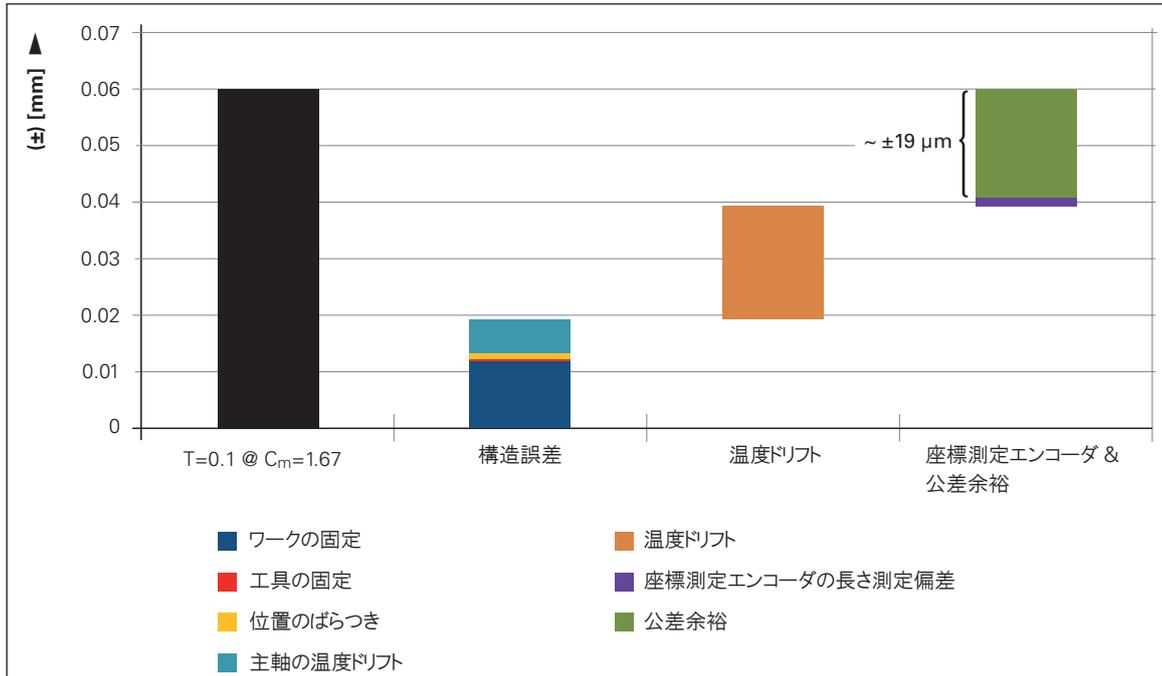


図 11:  
 $C_m = 1.67$ の時に適用される公差( $\pm 0.1$  mm)とSemi-Closed Loopにおける誤差限界

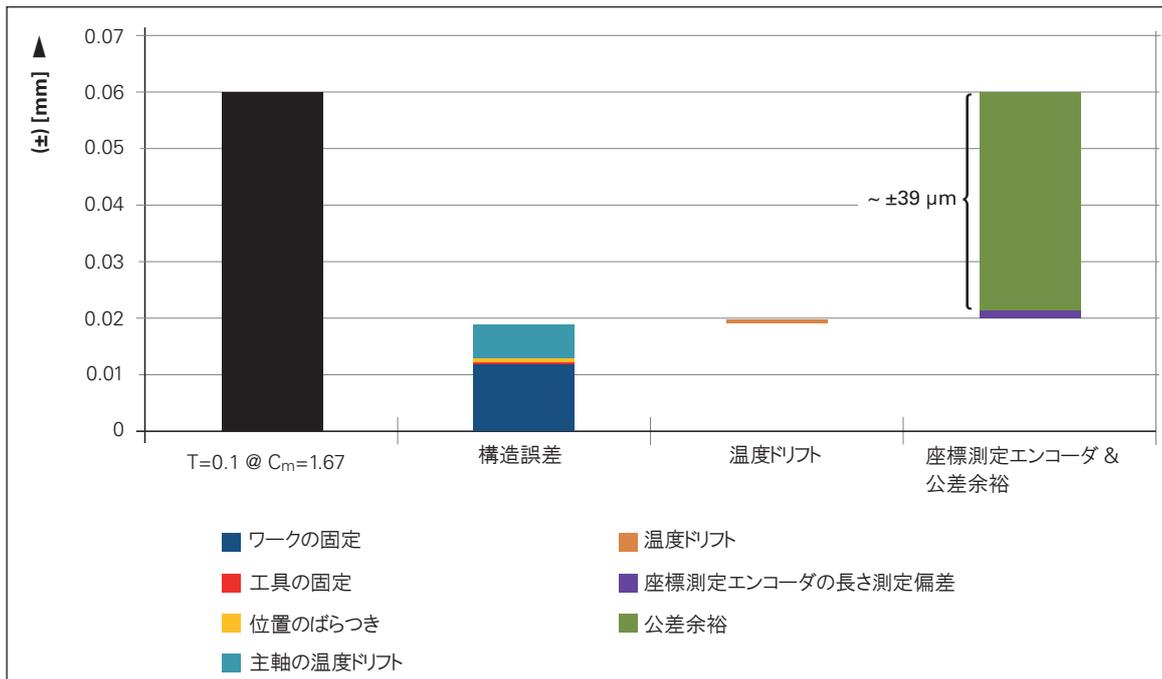


図 12:  
 $C_m = 1.67$ の時に適用される公差( $\pm 0.1$  mm)とClosed Loopにおける誤差限界

生産工程において制御が難しい影響要因は以下の通りです。

- 室内の温度変動
- 冷却剤の温度変動
- ワークの温度変動、つまり機械間の搬送時に起こるワークの熱膨張
- 製造ラインにおける各取付具の締付け力と締付け公差の変化が原因で生じるワークの静的なひずみ

- 各機械毎に（生産工程における公差寸法）そして各測定室毎に（評価工程における公差寸法）ワークの温度が異なることによって生じる公差寸法の熱変形
- 不正確な下加工が要因で起こる工具のたわみ（例、パイロットドリルの公差偏差が原因で生じるリーマのたわみ）
- 切りくず（例、纏わりくず、パイロットドリルで出るくずなど）
- 工具の摩耗（例、切削力の変化、工具のたわみなどが原因）
- ...

これらは全てを網羅はしていませんが、製造工程の設計が自動車のパワートレイン部品の自動機械加工において些細なことではないことは明らかです。製造品質、製造期間、そして製造コストに影響を与える多くの誤差要因が存在しています。

# 工具公差と誤差限界

## 公差余裕による生産性の向上

Semi-Closed Loopにおける公差余裕  $\pm 19 \mu\text{m}$  や Closed Loopにおける公差余裕  $\pm 39 \mu\text{m}$  がどの程度であるかを知るために、以下に工具の摩耗について考察します。

アルミ製のワークでは切削端の見た目が極めて鋭利であるにもかかわらず、ワークのバリが原因で頻りに工具交換をしなければなりません。一方、鋳鉄製のワーク（例、クランクケース）や高温耐熱性のある鋳鋼製ワーク（例、ターボチャージャー）の加工は工具が激しく摩耗を起こします。この摩耗は通常、時間の経過とともに摩耗痕（VB）の幅の広がりがとして現れます（図 13）。

### 許容しなければならない工具の摩耗

工具の刃先形状により（逃げ角  $\alpha$ 、すくい角  $\gamma$ ）、対応する切削端のオフセット（SV）が摩耗痕の幅が広がりを伴って生じ、そして直ちに公差余裕が小さくなります。切削端のオフセットは  $\alpha$  ならびに  $\gamma$ 、そして摩耗痕の幅 VB により、[13] にしたがって、以下計算式で求めることができます。

$$SV = \frac{VB \cdot \tan \alpha}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \gamma} \quad (\text{数式 7})$$

最新の生産工程ラインが複数のマシニングセンタを組み入れていると仮定した場合、シリンダーヘッド、クランクケース、トランスミッションハウジングの機械加工に用いる工具のコストは 8% ~ 12% を占め、それはシステム全体の投資額の中で大きな割合となります。

この工具には摩耗しないもの（例、ツールホルダーやボーリングバー）および摩耗するもの（例、チップやドリルなど）両方が含まれます。とりわけ、交換した工具の数（場合により最大で 3 セット）と切削工具（例、アルミ加工用の PCD ブレード）がその割合を左右します。

工具のランニングコストを抑えるためには工具の寿命をできるだけ長くしなければならず、よって工具交換や変更を行う前に、ある程度の摩耗を容認する必要があります。

超硬バイトおよび公差の生成に関連する仕上げのベンチマークとして、 $200 \mu\text{m} \sim 400 \mu\text{m}$  幅の摩耗痕 VB が現れます [14]。切削端のオフセット値を得るために、標準的な切削端の角度  $\alpha = 5^\circ$ 、 $\gamma = 4^\circ$  を適用しています。そして数式 7 による切削端のオフセット値は  $18 \mu\text{m} \sim 35 \mu\text{m}$  となります。

公差範囲の中心に非常に鋭いエッジがあると想定すると、Semi-Closed Loop では工具の摩耗を最小限に抑えるため、すでに残りの公差余裕の大部分を要しています。リニアエンコーダを使用して公差余裕が大きくなった場合、工具の摩耗補正が必要となる前により多くのワークを加工することができます。つまり、工具の交換や補正を行う適正時期を検知する際に、ワークを調べる手間が減るとのことです。

### 生産を妨げる工具交換

厳しい公差を加工するのに使用していた工具を交換する際には、直接検査でき、適切と判定されるワーク（合格品）が必要となります。不良品の発生を防ぐため、初めて新しい工具で加工したワークを測定する時は機械が休止状態になります。そして、生産・測定したワークが合格品に合致してようやく工作機械が認可されます。機械の生産時間を失うため、認可までのこの待機時間は部品ロスに等しいと考えることができます。

検査や補正などの煩雑さを減らし機械の稼働時間を増やすことができるため、量産において公差が大きいことは生産性の向上につながります。これは自動車の運転と同じで、広い車線を運転する場合はドライバーは車線からはみ出さないように運転するのに苦労はしませんが、狭い車線ではそうはいきません。

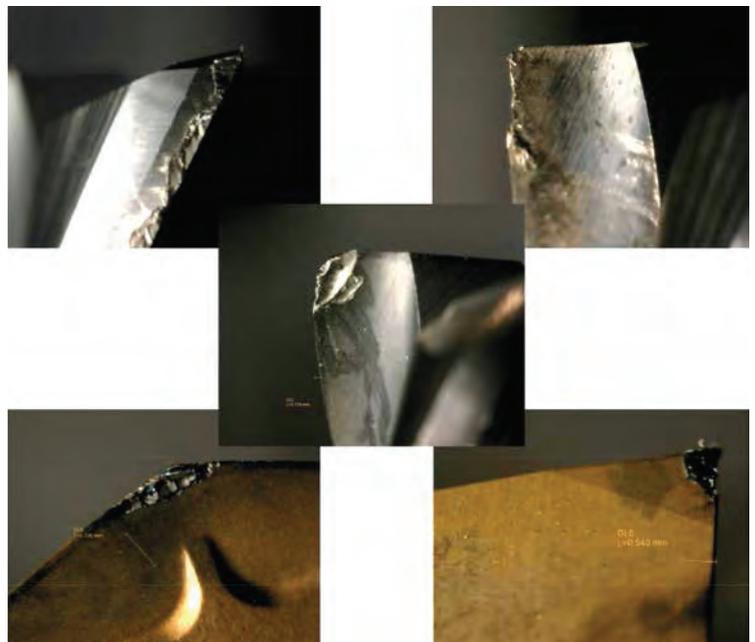
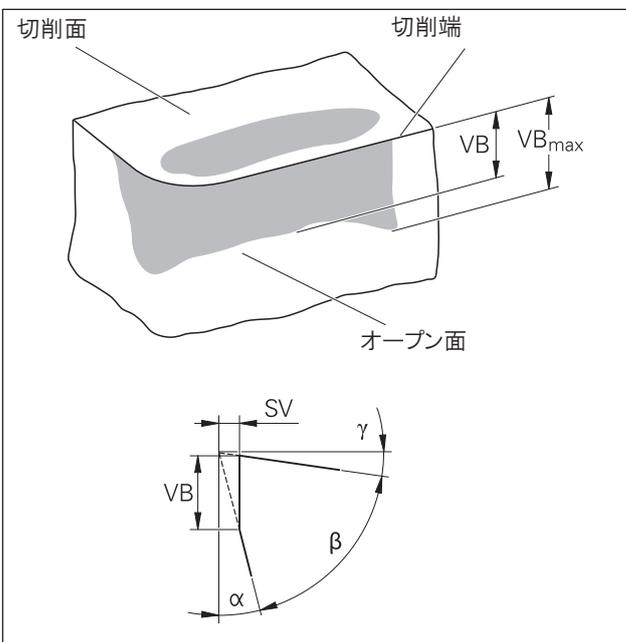


図 13: 摩耗痕の幅 (VB) および切削端のオフセット (SV) - [13]、[14] の図

# まとめ

自動車販売市場の需要変動に応えることに加え、将来、汚染物質の排出や自動車の燃費に関して、行政やエンドユーザーの要請が高まることが予想されます。そのような状況の対応策の一つとしてパワートレインでの摩擦を減らすことが挙げられますが、そのためには高品質の表面だけでなくワークの公差が必要です。

大規模自動生産設備で行われるワークの連続加工が原因で、個々の製造工程間で依存関係が生じます。工程全体でワークの公差を確実に保つためには、個々の工作機械による公差の消費を最小限に抑え、残りの公差余裕を可能な限り大きくし、工程における影響要因の中で制御が難しいものために温存しておくことが大切です。

マシニングセンタの送り軸でリニアエンコーダを使用することで機械の精度が向上し、結果として公差が大きくなります。煩雑な検査と部品ロスを減らすことが可能なため、最終的に生産性の向上につながります。

## 文献

- [1] Kasper, G.:Challenges for Future Powertrain Production – Insights to Global Manufacturing.12th Powertrain Manufacturing Conference, Darmstadt, September 26th – 27th, 2013.
- [2] Abele, E.; Hueske, B. and Kuhn, S.:Overall Equipment Flexibility – Entwicklung einer Methodik zur Messung der Gesamtanlagenflexibilität für die spanende Fertigung.ZWF 103 No. 5, 2008.
- [3] Dörr, J.:Powertrain Machine Tool Concepts:Comparison from an Economic Point of View.10th Powertrain Machining Conference, Fellbach, November 11th – 12th, 2009.
- [4] Abele, E.; Wiegel, F.; Kuske, P. and Hueske, B.:Kleine Schritte für große Flexibilität – Eine Methodik zur monetären Beurteilung der Expansionsflexibilität von Fertigungssystemen. wt Werkstattstechnik online year 100, 2010.
- [5] Stürenburg, B.:Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen. Production reports from the FBK, Volume 02/2009.
- [6] Abele, E.; Ellermeier, A.; Hohenstein, J. and Tschannerl, M.:Untersuchungen an langen VHM-Spiralbohrern – Einfluss der Werkzeuglänge auf das dynamische Verhalten von Vollhartmetallschneidbohrern. wt Werkstattstechnik online year 97, 2007.
- [7] VDMA 8669 : 1999-01: Fähigkeitenuntersuchungen zur Abnahme spanender Werkzeugmaschinen. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), 1999.
- [8] MAPAL:MAPAL Kompetenz – Spanntechnik. Corporate publication MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG, Order No. 10138532 | V2.1.0, 2015.
- [9] DIN ISO 230-2 :2000-05:Testing Rules for Machine Tools – Part 2: Determination of Positioning Uncertainty and Repeat Accuracy of Positioning with Numerically Controlled Axes.DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2000.
- [10]VDI/DGQ 3441:Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen - Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure / Deutsche Gesellschaft für Qualität, March 1977.
- [11]HEIDENHAIN:Technical Information – Accuracy of Feed Axes.March 2006.
- [12]HEIDENHAIN:Technical Information – Machining Accuracy of Machine Tools. September 2011.
- [13]Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M. and Tikal, F.:Zerspantechnik – Prozesse, Werkzeuge, Technologien. Vieweg + Teubner Verlag, 12th edition, 2008.
- [14]GARANT:GARANT ToolScout – Zerspanungshandbuch. ISBN 3-00-016882-6, modified ND 04/2013.

# 工作機械用リニアエンコーダ

位置フィードバック用リニアエンコーダは工作機械の高精度位置決めにとって欠くことができません。これらのエンコーダは送り軸の実際の位置を検出しますので、機械の伝達要素は位置検出に影響を及ぼしません。ここでは、運動誤差および熱の影響あるいは他の力による偏差はリニアエンコーダにより検出され、位置制御ループにより考慮・補正されます。したがって、下記の種々の誤差を除去することができます。

- ボールねじの温度特性による位置決め誤差
- 方向反転誤差
- 加工反力に基づく駆動機構の変形による誤差
- ボールねじのリード誤差による運動誤差

以上のように、リニアエンコーダは**高精度位置決め**と**高速加工**を必要とする工作機械にとって不可欠です。

NC 工作機械用のハイデンハインリニアエンコーダは多くの場所で使用されています。これらのエンコーダは送り軸がサーボループ構成である機械や装置、例えばミーリング加工機、マシニングセンタ、中ぐり盤、旋盤およびグライディングセンタなどにとって理想的です。

これらのリニアエンコーダの優れたダイナミック特性（高速送りと高加速度性能）はリニアモータと同様に高応答の従来型送り機構への使用においても重要な役割を果たします。



LC 485 測定長2040 mmまで



LC 185 測定長4240 mmまで



LC 211 測定長28,040 mmまで

## 参考情報

- カタログ: NC工作機械向けリニアエンコーダ
- 技術情報: 送り軸の精度
- カタログ: 工作機械精度評価用計測装置

## ハイデンハイン株式会社

<http://www.heidenhain.co.jp>

### 本社

〒102-0083  
東京都千代田区麹町3-2  
ヒューリック麹町ビル9F  
☎ (03) 3234-7781  
FAX (03) 3262-2539

### 名古屋営業所

〒460-0002  
名古屋市中区丸の内3-23-20  
HF楼通ビルディング10F  
☎ (052) 959-4677  
FAX (052) 962-1381

### 大阪営業所

〒532-0011  
大阪市淀川区西中島6-1-1  
新大阪プライムタワー16F  
☎ (06) 6885-3501  
FAX (06) 6885-3502

### 九州営業所

〒802-0005  
北九州市小倉北区堺町1-2-16  
十八銀行第一生命共同ビルディング6F  
☎ (093) 511-6696  
FAX (093) 551-1617