

工作機械用案内面の開発 —動圧，静圧，半浮上案内面—

Developing the Machine-Tool's Guideways

—Dynamically Pressurized, Statically Pressurized and Partially Floated Guideways—

齊藤利幸 T. SAITO

Three types of guideways were developed as those for machine tools;

- Dynamically pressurized guideway
- Statically pressurized guideway
- Partially floated guideway

The first guideway utilized a newly developed analysis program, and has features that it is of split type and its slideway shape goes gradually narrow across the center width. It restrains the guideway from floating and tilting. It also restrains friction force generated.

The second one has a newly developed feature of highly robust characteristics which enables a big-sized machine to be equipped with statically pressurized guideways by means of combined pockets of various characteristics. It eliminated scraping.

The third one is featured with our original mechanism which is of oil-lift style employing technologies of statically pressurized guideways. It leads to low-friction and high-accuracy feed.

Key Words: machine tool, guideway, dynamically pressurized, partially floated, and statically pressurized

1. はじめに

工作機械用案内面はワークテーブル，コラムなどの往復しゅう動部品を支持し，高精度，高速送りを実現する機構^{1) 2)}である。例えばマシニングセンタでは図1のように配置される。本報では特に特徴的な案内面として，動圧すべり案内面と静圧案内面，そして両者の技術を融合した半浮上案内面の3種の開発事例を紹介する。

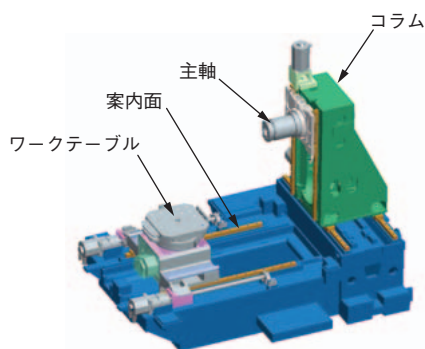


図1 マシニングセンタ全体図
General view of machining center

まず動圧すべり面では，特殊形状の案内面，新しゅう動材料，新潤滑油の採用により高速送りを高精度で実現³⁾した。また，静圧技術をさらに熟成したロバスト設計を採用した静圧案内面⁴⁾では，大型マシニングセンタへの低コストでの搭載を可能とした。半浮上案内は静圧案内面の技術を動圧すべり案内面に応用した特有のオイルリフト方式の案内面⁵⁾で，高剛性で低摩擦な送りを実現する。以下にその概要を述べる。

2. 各種新型案内面

2.1 動圧すべり案内面

動圧すべり案内面では高速送り時に，スライド下面に潤滑油のくさび効果により移動方向に垂直に高圧の押し上げ力が発生する。この圧力変動により上下動する移動体の動きを浮き上りと呼ぶ。マシニングセンタでは浮き上りにより加工精度が悪化するとともに，しゅう動面の片

当たりによって送り力が上昇する。浮き上りは高速送りほど増加するため、動圧すべり案内面の高速化の妨げ⁶⁾となっている。

上記の課題に対応するために、浮き上りの低減と送り摩擦抵抗の低減を両立し高速送りが可能な動圧すべり案内面を横型マシニングセンタへ搭載することをねらいとして開発した。開発に際しては、すべり案内面設計ツールを自主開発し、新型案内面の形状を決定した。以下にその概要を述べる。

図2は開発品であるすべり面形状を示すが、図2(a)の従来型案内面は長方形の平面に潤滑油供給用の油溝のみが施工されたシンプルな形状であるのに対して、図2(b)の新型案内面はしゅう動方向に分割され、中央部付近のしゅう動面幅が狭い特有のしゅう動面形状を持つ。

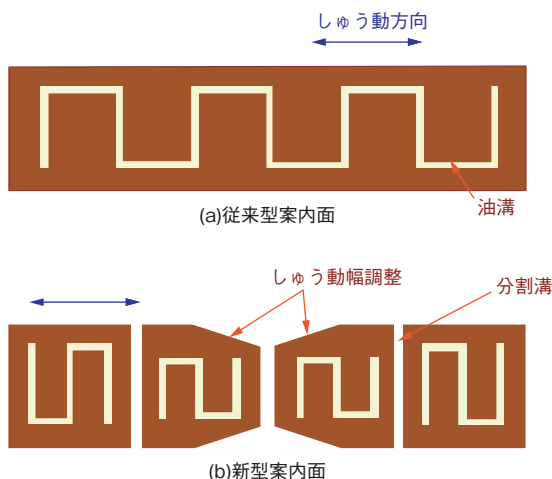


図2 しゅう動面形状
Slideway shape

しゅう動面を分割することによる最大の効果は、移動時のしゅう動面下面動圧の等分布化である。図3(a), (b)に従来の案内面と新型案内面のしゅう動面の動圧分布を示すが、図3(a)の従来の案内面では動圧分布に偏りがあり、移動体の傾きに起因する大きな回転モーメントが作用する。この偏りのある動圧分布は移動体の傾きや浮き上りを助長する。一方で図3(b)の新型案内面の動圧分布はしゅう動面の分割による効果で図3(a)より等分布に近い圧力分布を示す。この結果、移動体の傾きが抑制されるとともに、浮き上り自体も低減し、姿勢変動の小さい高精度送りを実現する。さらに移動体が傾くことによる片当たりなどの送り力の上昇もない。

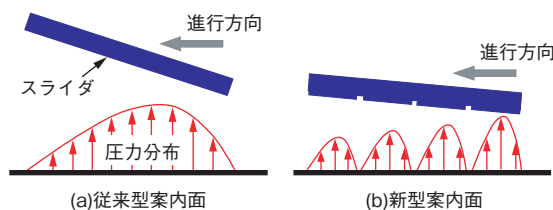


図3 しゅう動面動圧分布
Dynamic pressure distribution on slideway

ここでスライド下面の動圧分布は式(1)となる。

$$P_{X1} = \alpha_p \frac{\eta UB}{h_2^2} \cdot \frac{6(m-1)(1-X_1)X_1}{(m+1)(m-mX_1+X_1)^2} \quad (1)$$

式(1)中の η は潤滑油粘度、 U はしゅう動速度、 B はスライド面幅、 X_1 はしゅう動面下面位置、 h_1 はスライド前端面の浮き上り量、 h_2 は後端面の浮き上り量、 $m = h_2/h_1$ は傾きを示す。また α_p は漏洩係数であり、しゅう動面幅方向へのしゅう動面油の漏れを示す。式(1)から高速送りでは速度 U の増加により圧力が上昇し浮き上りも増加することが分かるが、一方で動圧低減には潤滑油粘度 η やスライド面幅 B の低減が有効であることも明らかである。さらに高速送りでの送り摩擦抵抗に支配的な流体摩擦抵抗は式(2)で示される。

$$F_L = \frac{\eta UB}{h_2} \cdot \frac{1}{m-1} \left[4 \ln m - \frac{6(m-1)}{m+1} \right] \quad (2)$$

式(2)から潤滑油粘度 η やスライド面幅 B の低減により流体摩擦抵抗を低減することが可能なことが明らかである。そこで浮き上りの半減をねらいとし、潤滑油粘度は従来のVG68を1/2以下のVG32に低減することとする。

ただし安易な潤滑油粘度 η の低減はしゅう動面の潤滑性の悪化⁶⁾という背反を伴うため、潤滑性の高いしゅう動面油⁷⁾の選定が必要となる。そこでリング・オン・プレート式試験機を用いた摩擦試験により、しゅう動面油の選定を行った。図4にVG32相当のしゅう動面油4種について摩擦係数の速度依存性を示す。しゅう動面油に必要な特性は低摩擦特性と耐スティック・スリップ性である。図4から低摩擦係数で $\mu - v$ 特性も正勾配に近く、耐スティック・スリップ性の優れた油剤Dを採用した。またこの油剤Dは耐摩耗性も十分に優れる。この低粘度VG32のしゅう動面油の採用により、浮き上りと流体抵抗を低減しつつ、潤滑性を確保することが可能となった。

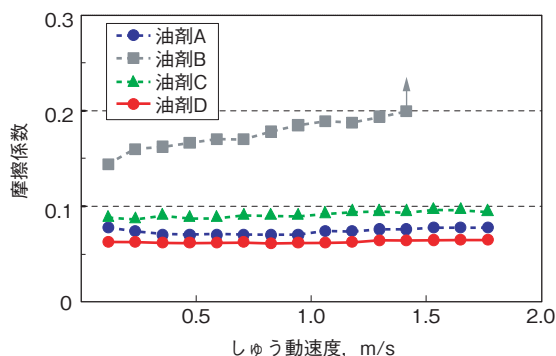


図4 しゅう動面油の摩擦係数
Coefficient of oil friction on slideway

また図5にすべり案内面の解析画面を示す。解析に際してはすべり面を図6でモデル化し、送り摩擦抵抗を簡易式(3)で表すこととした。式(3)において接触率 α の算出が重要であるが、しゅう動面の凹凸を正規分布粗さと仮定することで、接触率 α は式(4)の確率密度関数で示すことが可能となる。ここで H_f は移動体の浮き上り量であり、式(1)の動圧分布から案内面設計ツールにより導出される。

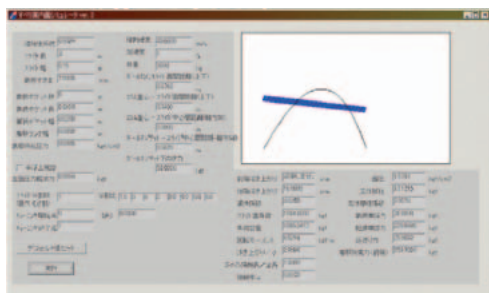


図5 すべり案内面の解析
Analysis of sliding guideway

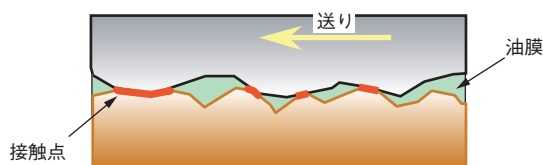


図6 すべり面モデル
Model of slideway

$$F = \alpha F_s + (1 - \alpha) F_L \quad (3)$$

$$\alpha = \int_{-\infty}^{H_f} \frac{\exp(-u^2/2)}{\sqrt{2\pi}} du \quad (4)$$

式(1)の動圧分布と移動体の傾きと浮き上りは双方のつりあいによって決定されるため、動圧分布、傾き、浮き上りに関しては反復計算により導出する必要がある。そこでこれらについては解析プログラムを作成し、解析により導出する。解析の流れ図は図7に示す反復解析に

よる移動体姿勢の解析ルーティンを主とし、式(3)に基づく送り摩擦抵抗の算出も行う。

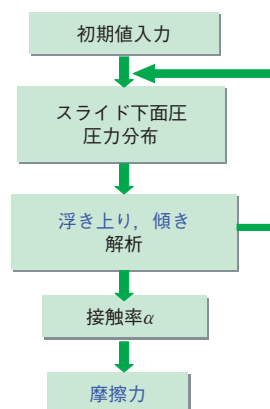


図7 解析流れ図
Flowchart of analysis method

スライド幅 B の縮小は浮き上り、送り摩擦力の低減に有効ではあるが、任意に幅 B を縮小するのみでは角剛性の低下、摩擦力の増加等の弊害が発生する。そこで角剛性に影響のない箇所に対して最適な幅 B を案内面設計ツールにより決定し、図2(b)のしゅう動面形状を得た。このしゅう動面形状では移動体の浮き上り、傾きを抑えるとともに、送り摩擦抵抗を低減することが可能である。

解析により算出される送り抵抗、移動体の浮き上りおよび傾きを図8(a)～(c)に示す。しゅう動面形状としては分割方式による諸特性への影響が大きく、しゅう動面幅の調整との相乗効果によりさらに低摩擦、高精度となることが分かる。

図9に本動圧すべり案内面を搭載したマシニングセンタ用コラムの浮き上り測定結果を示す。従来型の案内面に対して浮き上り量1/2以下の高精度送りを、送り速度40m/minまでの高速送りで実現することが確認され、本開発の案内面の有効性が確認された。

また移動後、停止した直後にコラムは沈み込みと呼ばれる図10の整定挙動を示す。通常案内面では浮き上りが $1\mu\text{m}$ 以下となりコラム姿勢が安定したとみなせるまでコラム停止後4秒必要であるのに対して、新型案内面では2秒でほぼ安定する。そのため加工時間の短縮と加工精度の向上が可能となる。

上記の新型の動圧すべり案内面により、高速度での高精度、低摩擦送りを実現し、動圧すべり案内方式では国内最高速レベルの早送りを可能とした。

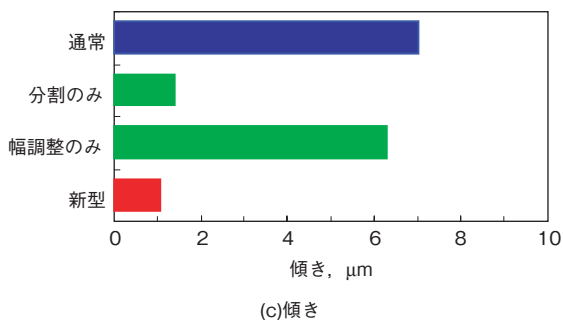
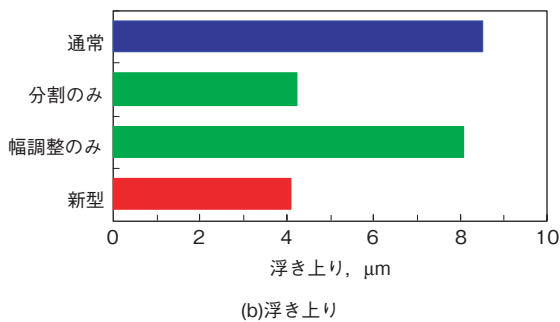
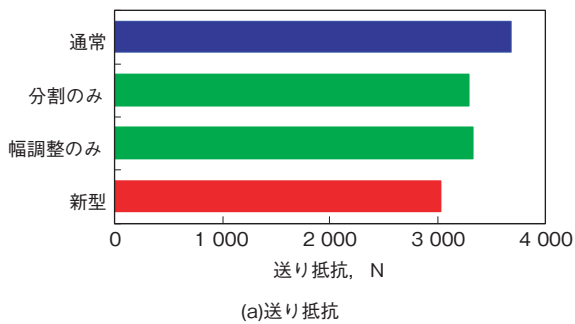


図8 しゅう動面形状の効果
Effect of slideway shape

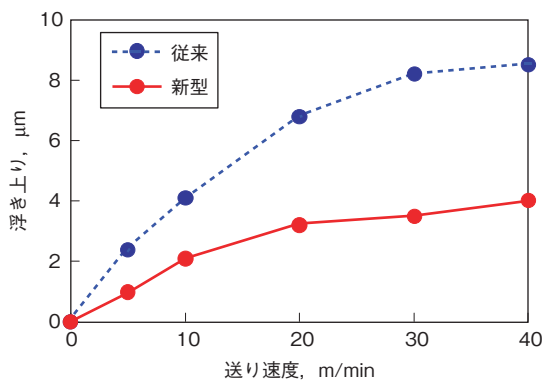


図9 マシニングセンタ浮き上り測定結果
Measurement result of machining-center floating

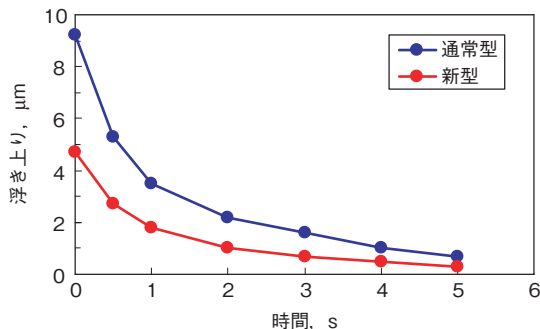


図10 コラム沈み込み挙動
Sinking movement of column

2.2 静圧案内面

2.2.1 ロバスト設計

静圧案内方式はしゅう動面に加圧した潤滑油を供給することで、完全非接触のしゅう動面による送りを実現する機構⁸⁾である。高精度、低摩擦送りが可能な反面で、高精度の機械加工、組付けが必要となり、大型のマシニングセンタに対しては部品加工精度の確保が困難なため採用例が少ない。さらに大型の加工物を積載するワーク軸では案内面のクリアランスが工作物の積載と除荷により大きく変動する。そのため静圧案内面の剛性等の性能を一定に保つことも困難となる。

さらに大型のマシニングセンタでは案内面の全長が数メートルとなることから、しゅう動面の平坦度などの静圧案内面に必要な部品精度の確保が困難である。そこで通常は部品精度を確保するためにしゅう動面の擦り合わせを実施して、しゅう動面全面でのクリアランスを均等に確保するなどの手法を採用する。しかし擦り合わせは手作業でのきさげ作業による長時間作業であり、コストアップとなる。また大型の案内面では擦り合わせによっても部品精度の確保が困難で、設計どおりの性能を持つ静圧案内面が実現しにくい。

そこで静圧案内技術の追究により、部品精度の確保が困難な大型機への搭載が可能な静圧案内面を開発した。本案案内は部品精度に寛容なロバスト設計が必要なことから、ロバスト静圧案内面と称する。ロバスト静圧案内面の開発に際しては、下記の点に配慮する。

- (1) 大型スライドを構成する部品の要求精度を低減
- (2) 数トンの工作物重量の積載による変動に対して案内面性能の劣化を抑制
- (3) スライド面のきさげレス化

上記指針に基づいた開発の詳細を以下に述べる。

2.2.2 ロバスト静圧案内面の概要

本開発ではクリアランス変動に対して性能変化が小さいロバスト設計手法を採用する。ロバスト設計ではピーク剛性の向上を重視する従来の設計とは異なり、クリアランス変動に対する案内面性能の安定性を重視する。きさげレスの大型案内面ではしゅう動面全面でのクリアランス変動が大きいため、クリアランス変動に対する安定性が重要となる。

図11(a)はピーク剛性が極大となるように設計した通常の静圧案内面であり、図11(b)はロバスト設計手法による本開発の静圧案内面である。従来のような図11(a)の最大剛性を追求した設計では、わずかな静受クリアランスの変動に対しても著しく大きな剛性の低下を示す。そのため大型のマシニングセンタでは、部品クリアランス変化による剛性低下を招く。それに対し、図11(b)のロバスト案内面では広範囲の案内面クリアランスに対して高剛性を維持し、部品加工および組付けの要求精度を下げる事が可能である。

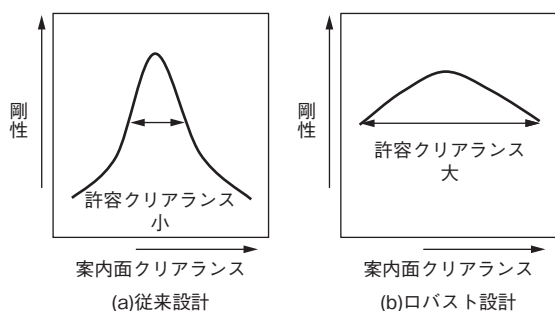


図11 ロバスト設計の概念
Concept of Robust design

2.2.3 ロバスト案内面の改良手法

ロバスト案内面の設計に際しては下記の工夫を行う。

①ポケット形状によるロバスト化

ポケット緒言の最適化により、静圧案内面にロバスト性を付与する。ポケットランド、クリアランス、面積等のポケット形状の最適化により、クリアランス変動に対してピーク剛性の低下が小さい静圧案内面の設計が可能である。

図11にランド幅を従来の2倍とすることで静圧案内面のロバスト化を図った例を示す。図12では基準剛性となるピーク剛性の70%の値を、通常の約2倍のクリアランス変動に対して確保することが可能であった。

本開発品ではポケット形状に加えてさらに下記に示す

複数の項目に対してロバスト設計の手法を導入し、クリアランス変動に対して信頼性の高い静圧案内面を提供している。

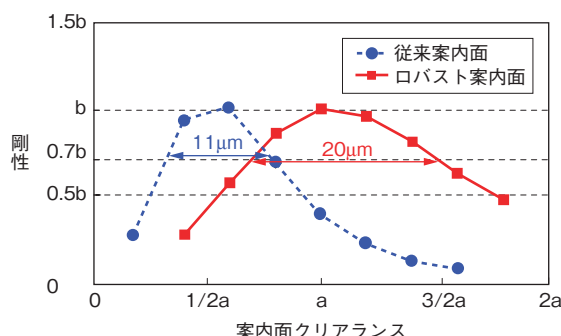


図12 ロバスト設計
Robust design

②異種ポケットの組合せによるロバスト化

ポケット形状、しぼり比などを変更して異なるクリアランスでピーク剛性を示すポケットを組み合わせることにより、単一のポケット式案内面に比べロバスト性の高い案内面が実現可能である。図13に2種類の特性を持つポケットを組み合わせさせた案内面の剛性を示す。異種ポケットの組み合わせさせた案内面のクリアランス変動に対するロバスト性は、単一ポケットで構成した案内面よりも向上する。また3種類以上のポケットの組合せでも本手法によるロバスト化は有効である。さらに本設計手法では偏荷重が大きい箇所に支持力の大きなポケットを配置することで、後述の偏荷重補正機能も付加できる。

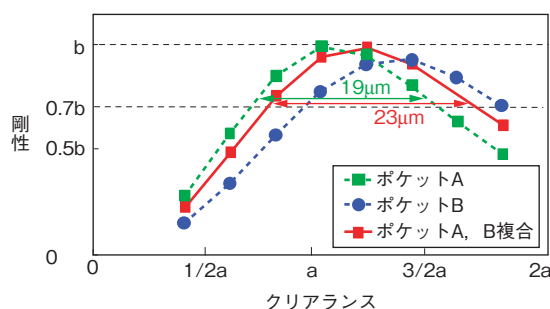


図13 組合せの効果
Combination effect

2.2.4 ロバスト設計の活用

上記のロバスト設計により、①大型案内面の実現、②きさげレス、③負荷変動により発生するクリアランス変化への対応が可能となる。特に本手法の導入により5軸加工機のチルトテーブルなど、工作物姿勢や積載重量の変化が著しく、クリアランスの変動が発生しやすい機械に対しても静圧案内面の搭載が可能となった。またスライド面のきさげレスによる低コスト化の効果も大きく、高精度大型機にロバスト静圧案内面を採用した。

2.3 半浮上案内面

2.3.1 オイルリフト案内面

動圧すべり案内面は高剛性、高減衰性であるものの摩擦抵抗が大きく、静圧案内面は摩擦抵抗は小さいものの特に送り軸方向に関して動圧すべり案内面ほどの減衰性は確保し難い。静圧案内面の非接触送りの良さはあるが、送り方向の剛性、減衰性の向上にはしゅう動面に適度な接触を与えて混合潤滑域で使用する方策が有効である。その方式の案内面としては半浮上案内面がある。

半浮上案内面とはスライド面にエアなどの流体を加圧供給することでスライド面の負荷重量を軽減し、大重量の搬送物に対しても摩擦損失の小さい送りを実現する機構である。半浮上の呼称は、スライド面の一部が浮上、残りの部分が接触した混合潤滑状態を実現する機構としての特徴から与えられている。自重の軽減にエア圧を用いる場合には潤滑油の循環、再利用が不要であり、循環機構レスな点から従来はエア圧による自重軽減方式が一般的であった。トライボロジーハンドブックにも「半浮上案内面とはエアを用いてスライド面圧を軽減する機構」として定義²⁾されている。以降、エアを用いた自重軽減方式の半浮上案内面をエアリフト案内面と呼ぶ。

しかしエアリフト案内面ではエア圧による自重軽減を得るために、圧力逃げを防止するための部品精度管理が厳しいなどの課題がある。またスライド面圧の軽減により浮き上りの増加などの弊害が発生する。それに対して、本開発では負荷重量の軽減のために、エアではなく油圧による圧力軽減を利用したオイルリフト式の案内面を開発した。表1にエアリフト案内面とオイルリフト案内面の比較表を示す。非圧縮性の潤滑油を用いた半浮上方式ではエア方式に比べ潤滑性を損なうことなく、さらに当社に技術蓄積のある油静圧案内面の技術を応用した高剛性支持を得ることができるなどのメリットがある。また

潤滑油による静圧効果はエアより部品精度が低くても得られる点で有利であり、特に大型しゅう動面に対しては効果が高い。

表1 半浮上案内面の比較

Comparison between oil-lift guideway and air-lift guideway

	エアリフト	オイルリフト
剛性	×	○
減衰性	×	○
浮き上り	×	○
傾き	×	○
送り力	○	○
潤滑油回収	○	×
付加機能	○	○

この潤滑油を負荷重量の軽減に用いる半浮上案内面を、従来のエアリフト案内面と区別する点からオイルリフト案内面と称する。図14にオイルリフト式案内面の断面図を示す。オイルリフト案内面は下記に示す幾つかの重要な工夫により、従来の半浮上案内面にはない高精度送りを実現する。

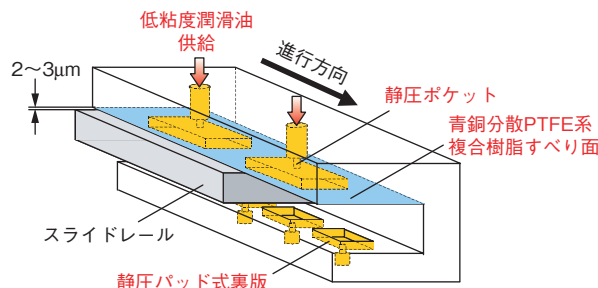


図14 オイルリフト案内面
Oil-lift guideway

2.3.2 オイルリフト案内面の特徴

オイルリフト案内面は機構として下記の特徴を持つ。

①油圧による負荷重量軽減方式の採用

当社の半浮上案内面では、油圧により自重軽減を行う。潤滑油はエアに比べて非圧縮性であるために、案内面の減衰性、潤滑性が確保される。また半浮上案内面では動圧効果の影響が大きく浮き上りが過大となるため、低潤滑油粘度を採用することで動圧を低減した。

図15にオイルリフト方式によりしゅう動面面圧を軽減した場合の一軸送り試験機での送りモータトルクを示す。送りモータトルクはしゅう動面の面圧に依存し、軽面圧とするほど小さな送り力で駆動可能となる。

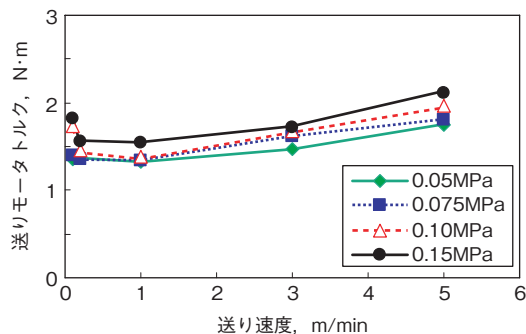


図15 送りモータトルクの面圧依存性
Dependency of feed-motor torque on slideway surface pressure

②静圧式自重軽減ポケット

自重軽減ポケットは単純な圧力ポケットではなく、油圧絞り部を配した静圧ポケットとした。静圧ポケットの採用により高速送り時の浮き上りを抑制する静圧効果を楽しむことができる。そのため半浮上案内面で最大の問題となる高速送り時の過大な浮き上りを抑制することができる。

図16に自重軽減ポケットを静圧式とした場合と、静圧効果のない油圧供給式とした場合の浮き上りを示す。静圧効果のない案内面では最大10 μ m浮き上がるのに対して、静圧効果がある案内面では7.5 μ mと25%浮き上りを低減できる。停止状態から高速送りへの切替で発生する大きな動圧変化に対しても、静圧効果の得られるオイルリフト式案内面は安定した姿勢での送り動作が可能となる。

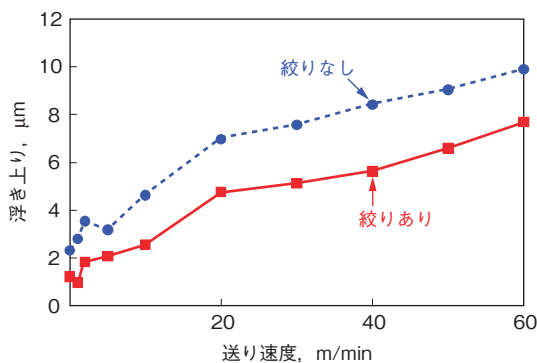


図16 静圧ポケットの効果
Effect of static-pressure pocket

③静圧パッド式裏板の採用

オイルリフト式案内面の裏板には静圧パッド方式の裏板を採用し、静圧効果のある裏板で拘束することにより、半浮上案内方式の短所である浮き上りを防止する。静圧パッドと呼ぶのは通常のすべり式裏板と同様に混合潤滑域での使用を前提とするためである。そのため静圧パ

ッド式裏板ではしゅう動面にふっ素樹脂を採用し、耐焼付き性も確保している。図17に静圧パッド式裏板の有無による移動体姿勢の比較結果を示す。通常のすべり式裏板搭載時は9 μ mの傾きが発生するのに対して、静圧パッド式裏板搭載時の傾きは3.5 μ mと約60%の低減が可能となる。このことから静圧パッド式裏板は、移動体の浮き上りのみでなく傾きも効果的に抑制することが分かる。

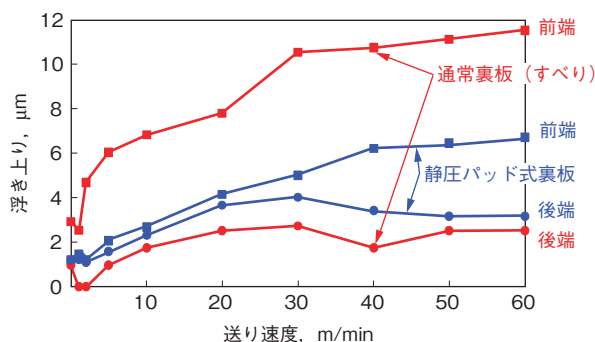


図17 静圧式裏板の効果
Effect of holding plate with static-pressure

2.3.3 オイルリフト案内面の付加機能

①アクティブ面圧補正機能

半浮上案内面は部品形状を大きく変更することなく、供給油圧の変化のみで任意にしゅう動面の面圧を設定可能な特長がある。しゅう動面の面圧は半浮上案内面のスライド面に設けた自重軽減ポケットへの供給油圧を変更することで可変する。

特にこの特長はワークテーブルに対してこの機能を採用した場合には、重量の異なる工作物に対しても容易に一定のスライド面圧を保つことが可能となる。その結果、工作物重量によらず常に一定の送り抵抗、送り精度を維持することが可能となる。アクティブ荷重補正機構では工作物重量の自動検知により、作業者は工作物重量を意識することなく最適な送り特性を得ることが可能である。

②偏荷重補正機能

マシニングセンタコラム軸のように数トンの偏荷重がしゅう動面に加わる機械では、高精度の送りを確保することは容易ではない。このような偏荷重に対しては、図18の様に変荷重側に補正力の高い自重軽減力により補正可能である。自重軽減ポケットはCAEを用いた構造解析により、スライドなどの変形がないポケット形状や配置としている。この偏荷重補正機能によりスライド

偏摩耗の防止も図られ、一層信頼性の高い案内面となっている。

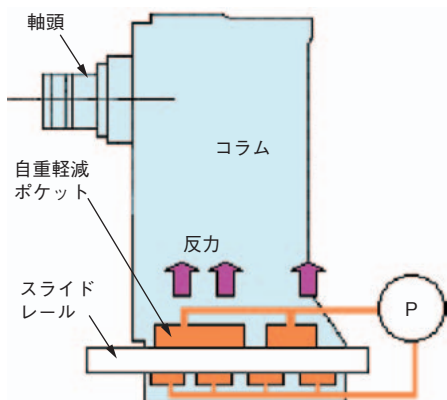


図18 偏荷重補正
Compensation of uneven load

3. 案内面の用途区分

すべり案内面、ロバスト静圧案内面、オイルリフト式半浮上案内面は、これらの案内面の特性に合わせて使い分けて製品化している。高速・軽量の機種には動圧すべり案内面を搭載し、高速送りと高精度の両立を図った。ロバスト静圧案内面は大剛性の必要な高精度大型機種に搭載し、非接触送りを生かした低摩擦送りを低コストで実現している。オイルリフト式半浮上案内面は大荷重ないしは荷重変動の大きい大型機に採用し、アクティブ荷重補正、偏荷重補正などの付加機能を活用している。今後はさらなるコスト改善により搭載機種の展開を図る予定である。

4. まとめ

- (1) 高速すべり案内面を設計ツールの活用により開発し、分割+中央幅徐変型のすべり案内面で高精度、高速送りを実現した。
- (2) ロバスト設計手法を用いた大型、キサゲレスの静圧案内面を実現した。
- (3) 静圧効果を生かしたオイルリフト式の半浮上案内面を開発し、アクティブ面圧補正機能、偏荷重補正機能を付加した。

5. おわりに

新開発の案内面に関して信頼性の向上のための評価試験では、設計部署、評価部署、品質管理部署、製造現場などの御理解と御協力を頂きました。また前記技術の製品化にあたっては多大な御協力を頂いております。トライボロジー技術の活用により、今後もお客様満足度が高く競争力のある技術開発ができればと思います。

参考文献

- 1) (社)日本工作機械工業会編, 工作機械の設計学(応用編)(2003)92
- 2) (社)日本トライボロジー学会編, トライボロジーハンドブック, 第7章 案内要素・固定要素(1995)343
- 3) 齊藤利幸, 藤井達哉, 深見 肇: 日本トライボロジー学会秋季予稿集(2005年11月), 447
- 4) 齊藤利幸, 鈴木道博, 深見 肇: 精密工学会秋季大会講演文集(2004年9月), 339
- 5) 齊藤利幸, 渋谷哲郎, 寺村哲夫, 深見 肇: 日本トライボロジー学会春季予稿集(2002年5月), 141
- 6) 橋本勝美: トライボロジスト, 第38巻, 2号(1993)148
- 7) 星野通男: 潤滑, 第29巻, 2号(1984)91
- 8) 杉田和彦, 鈴木 弘: 潤滑, 第26巻, 3号(1981)195

筆者



齊藤利幸*
T. SAITO

* 研究開発センター 材料技術研究部 工学博士