



エアベアリング アプリケーションガイド

Rev D

December 2003

日本語 0.235 版

2005 年 9 月 7 日

NEW WAY PRECISION
Porous Media Air Bearing Solutions™

New Way Precision
50 McDonald Blvd.
Aston, PA 19014
(610) 494 6700
www.newwayprecision.com

目次

PART I: エアベアリングとは	4
1. はじめに	4
2. エアベアリングとは?	5
3. なぜエアベアリングを使うのか?	6
摩擦	7
磨耗	8
剛性	8
負荷容量	9
4. エアベアリング技術の種類	10
動圧ベアリング	10
静圧ベアリング	10
オリフィスと多孔質材技術	10
5. エアベアリング製品群	13
フラットベアリング(パック)	13
エアブッシュ	13
バキュームプリロードベアリング(VPL)	13
エアベアリング スライダ	13
ラジアルベアリング	13
6. エアベアリング アプリケーション	13
印刷産業用機械	14
座標測定器	14
試験装置	14
高速装置	14
超精密工作機械	14
リニアステージ	15
OEM	15
カスタム製品とテスト装置	15
PART II: エアベアリングの選び方	16
7. アプリケーションに適切なエアベアリングの選択	16
PART III: エアベアリングを使う為の設計	18
8. エアベアリング ガイド	18

ガイド表面の考慮事項	18
表面研磨	18
局部的平坦度	18
ガイド面の穴	18
ガイドウェイの継ぎ目	19
9. 剛性とプリロード	19
10. エアベアリングシステムにおける荷重の実演	22
重力負荷	22
荷重配分	22
他のベアリングを使った予圧	23
動的負荷	24
 PART IV: エアベアリングのセットアップと使い方	 25
11. フラットベアリング	25
清浄	25
取り付けと調整	25
主ベアリングの調整	27
予圧ベアリング調整	27
代表的配置	29
12. VPL (バキューム プリロード) エアベアリング	43
VPL エアベアリング技術	43
13. エアブッシュ	45
エアブッシュの組み付け	45
エアスライドの組み立て	46
典型的な構成	48
14. ロータリテーブル	52
 PART V: 追加情報	 53
 PART V: 追加情報	 54
15. エア供給	54
16. 流量測定	55
17. 流量	56
18. 配管	56
19. ベアリングギャップを通るエア流量	59
20. エア源要求	59

PART I: エアベアリングとは

1. はじめに

機械技術者にとってベアリング技術は大昔から代表的な悩みの種でした。前世紀に発明された転がりベアリングは、電気モータや自動車の車輪などに応用されて限界を引き上げられ、単純な滑り受けから画期的に進歩しました。今日では同様に、半導体製造装置や高分解能走査・高速機械装置等への応用に対する要求の中でその技術的限界を伸ばしています。

エアベアリングは、ベアリング設計の次の論理的一步を意味します。一般のエアベアリングは 20 年間に渡って座標測定機内に採用されて、その価値が証明されました。エアベアリングのほぼ無摩擦・無磨耗、高速・高精度特性、潤滑油不要といった多くの技術的利点は、今日の機械設計者にとって強力なアドバンテージとなります。しかしこれらの利点は十分には活かされてはきませんでした。何故ならエアベアリングは製造が難しく、最近まで商業的に入手困難だったからです。New Way 社は多孔質材利用技術のパイオニアとして 10 年前に創業し、丈夫で使い易く安価なエアベアリングを製造し、豊富に在庫しています。

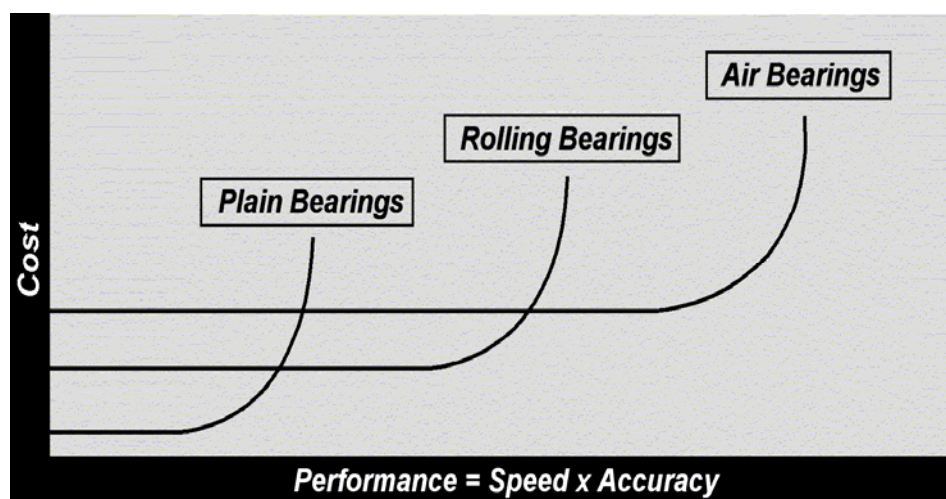


Figure 1 - Bearing Performance vs Cost

このガイドでは、エアベアリングを初めて使うエンジニアにとっての一般的な疑問点から、高度なアプリケーションへの応用に関する詳細な情報、エアベアリングの選定や実装方法まで、次章以降で解説して行きます。

2. エアベアリングとは？

転がりベアリングと違って、エアベアリングはガイド面との「無摩擦」を実現する為に加圧空気の薄膜を利用します(Figure 2)。非接触である事が、摩擦・磨耗・潤滑油の扱い等のベアリングに関わる伝統的な問題点を解決し、さらに精密位置決めや高速アプリケーションにおける利点をもたらしました。

ベアリングの流体膜は、ベアリング表面からベアリングギャップへ空気の流れを作る事によって得られます。空気はオリフィスや多孔質材を通り抜け、ギャップに流れ込む流量は適切に調整されます(Figure 2 の R1)。エアは絶えずギャップから逃げていきますが、流量制限を通過した加圧空気の流れがギャップを通過する流れと十分釣り合うように、流量制限は設計されています。ギャップによる制限は(R2)、ベアリング下の圧力を維持してワーク負荷を支持します。もしもエアがオリフィスによる流量制限(R1)無しでギャップへ導かれると、適切に制限された場合よりも浮上量は大きくなり、空気消費量も多くなり、剛性は低くなります。この流量制限はエアベアリング補正と呼ばれています。これは特定アプリケーション用に浮上・負荷・剛性に関してベアリングの最適化の為に使われます。更に詳細についてはこの後に討論します。

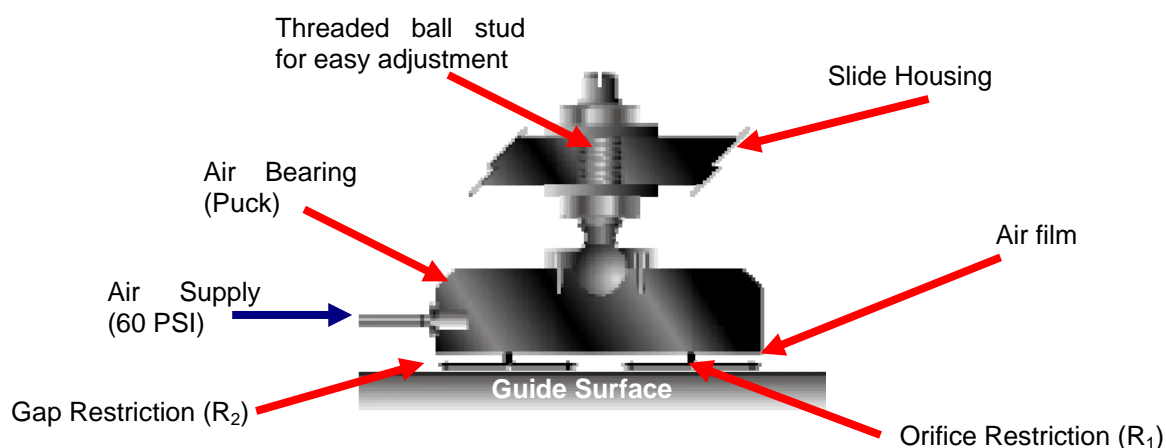


Figure 2 - Flat Air Bearing

3. なぜエアベアリングを使うのか？

転がりベアリングに対する利点を考慮すれば、座標測定機や精密工作機械・半導体ウエハ製造機などのアプリケーション・その他クリーンルーム用・高速・精密位置決めなどの条件で、エアベアリングを選択するのは自然な成り行きです。エアベアリングの主な利点は下記のとおりです。設計者にとって明らかな関心事(摩擦・磨耗・剛性・耐荷重)については後で詳しく述べます。

摩擦ゼロ...

静摩擦がゼロなので、無限の分解能と極めて高い繰り返し精度が可能です。

磨耗ゼロ...

非接触である事は事実上磨耗ゼロを意味し、マシン性能の維持と低発塵をもたらします。

真直性にすぐれた動き...

転がりベアリングは表面処理やガイドの凸凹の影響をダイレクトに受けます。非接触エアベアリングでは、これらのエラーは平均化されます。

静粛で滑らかな動作...

リサーキュレイト・ローラやボールは剛体なので、リターンチューブ内で荷重がかかったり抜けたり、また移動方向が変わる時に、ノイズや振動を発生します。これは走査の分解能に顕著に影響します。

高いダンピング性能...

エアベアリングによって押しつぶされた空気の流体膜がダンピング効果を持ち、高い動剛性と良好な制御性をもたらします。

オイルの排除...

エアベアリングはオイル潤滑剤を使わないので、オイルが引き起こす問題を排除します。粉塵環境下(ドライマツチング)においても、ガイドウェイはドライなまま、ベアリングはエア圧によって粉塵を吹き飛ばしながらセルフクリーニングします。対照的にオイル潤滑剤は濁っていく一方です。

高速...

高速 - 高加速。高加速時に滑ってしまうようなボールやローラがありません。

摩擦

動かしはじめや停止時の摩擦の変動は、常に精密位置決め問題の核心でありつづけています。静止摩擦係数は動摩擦係数よりも大きいのですが、これは転がりベアリングよりも滑りベアリングで健著です。別の言い方をすれば、動かし始めには動かし続ける時よりも大きな摩擦力が働いています。モータがネジを回してスライドを押そうとした時、スライドにかかる大きな静摩擦が原因でネジは捻じれてエネルギーを溜め込みます。スライドが動き始めた時、摩擦が減ってネジの捻じれは戻り、スライドは目的の位置を行き過ぎてしまいます。この現象は“スティック・スリップ”として知られ、滑りウェイのシステムで最も顕著です。しかし、転がりベアリングとクローズドループ・フィードバックをもつどんな機械においても、位置決めや帯域に問題を引き起こす原因になっています。

今日の重工作機械のスライドは、転がりベアリングを使って 0.0001 インチ(2.5 μ m)以内に位置決めされています。滑りベアリングと比較して、静止摩擦係数と動摩擦係数の差が桁単位で縮まったからです。しかし転がりベアリングも限界に達しました。例えば一部のエレクトロニクスの主要設備産業では、既に 0.00001 インチ(0.25 μ m)の位置決めが検討されています。転がりベアリングのメーカーは予圧を減らし始め(その結果剛性を失う)、これらの要求に応えようとする努力は“カリフォルニア フィット”として知られるようになりました。しかし出来る事にも限界があります。

エアベアリングでは静止摩擦係数と動摩擦係数の違いはありませんので、スティック・スリップ問題は完全に排除されます。エアベアリングの摩擦は動きによる空気抵抗なので、速度がゼロの場合には摩擦もゼロなので、理論上無限の動作分解能を可能にしました

摩擦は効率にもダイレクトに影響します。事実、ウェスティンハウスによる初期のエアベアリング特許は垂直蒸気発電タービンで使う為のものでした。ウェスティンハウスは空気の粘性が油よりも数百倍小さい事を知っていたので、油によるエネルギーロスが減らす事ができました。ウェスティンハウスにとって不幸にも、1890 年当時には、エアベアリングとして働く為に求められる高い精度に、大きなベアリング面を製造する事が極めて難しかったのです。今日でも大型タービンではオイル流体力学ベアリングが使われていますが、市場では多くの新しい小型タービンで能率改良の為に動圧エアベアリングシステムが採用されています。摩擦は精度にも影響します。古い言い伝えを思い出してください。精密機械で誤差の主要原因3つとは何でしょうか？1も2も熱、3も熱なのです！摩擦は熱を発生し、熱は技術者にとって最悪の敵なのです。例えばスピンドルが発熱すると軸へ伝わっていきます。熱はヘッドストックへ伝導して膨張させ、回転中心は基準からずれてしまいます。殆どの例でエアベアリングの発熱は、転がりベアリングや滑りベアリングよりも目に見えて少ないです。エアベアリングが発熱しないとは言えませんが、有意な発熱を観測するには毎秒 100 フィート(30m)以上が必要です。

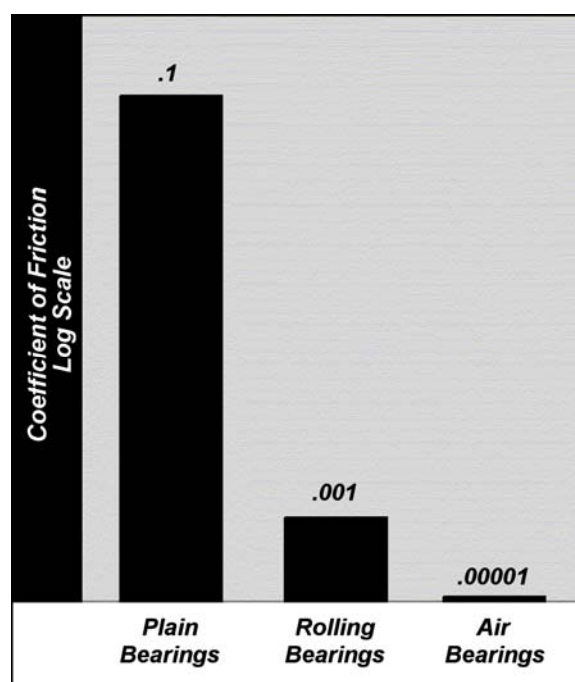


Figure 3 - Coefficients of Friction

磨耗

設計技術者にとってもう一方の悩みの種は、機械的磨耗です。高度な機械にはより高速かつ高信頼性が求められています。事実、毎年 10 億回も動作する機械が市場に出ています。そのような機械で加速度テストをするのは非現実的で、エンジニアはせいぜい、速度・加速度・負荷を計算してベアリング寿命を見積もらざるをえません。エアベアリングは非接触なので、この問題は避けられます。スピード・加速・負荷は磨耗要因にはならず、エアベアリングの寿命には何の影響もありません。

エアベアリングの場合の磨耗とは浸食ですので、エアの清潔さが大きく影響します。エアベアリングは、磨耗に関する伝統的な考えの影響を受けません。年間 10 億サイクルの 10 年後であっても、最初と同様に働いてでしょう。これは機械の信頼性の点から見て大きな利点です。装置メーカーは顧客に対して、統計的プロセス制御に悪影響しうる要素としての磨耗は除去されましたと言えるのです。装置メーカーは明確な競争力を持つでしょう。非接触というエアベアリングの本質は、磨耗による破片を無くし潤滑油を不要にしました。言い換えれば、クリーンルーム内や医療・医薬・食品加工の環境での使用にも理想的です。エアベアリングは塩や砂糖などの腐食性に富む製品の製造工場において、乾燥した埃っぽい環境での使用にも優れています。これら環境下では、どんなオイル潤滑剤でもたちまち濁ってしまいます。エアベアリングは自身の絶え間ないエアによって軽い乾燥した埃を吹き飛ばし続ける自浄効果を持ちます。

剛性

エアベアリングは精密アプリケーションに必要な剛性を持たない、などとよく誤解されます。しかし、60 psi(0.4MPa)をかけた直径6インチ(152.4mm)のベアリングは、実際に 1,000 ポンド (450kg) の負荷で 2,000,000 lb/in (3,000,000MPa)以上の剛性を持ちました。言い換えると、1ポンド(0.45kg)の外力あたり 1/500,000 インチ(0.05 μm)以下の振れでした。負荷を変えてエアギャップの変化を調べると、Figure 4 のような剛性のプロット結果が得られました。注目すべきは、結果が直線ではなく、また膜が薄くなればなるほど剛性が高くなる事です。圧力と表面積の両方が剛性に比例的に影響しますが、エアベアリング剛性における最も重要な要素はギャップ補正の考え方と使い方です。

ギャップ補正はギャップに流れ込むエア流量をどう制御するかで決まり、エアベアリングの剛性を決める一つの鍵です。ギャップ補正は、ギャップ自身による流量制限よりも手前で、ギャップへのエア流量そのものを制限する事で実現します。エアギャップは適正に制限されなければなりません。大きすぎるとベアリングの下の圧力が消失し、周囲の圧力と均一になってしまいます。しかし、エアギャップへの流量制限によって作られた圧力の蓄えが、どのよ

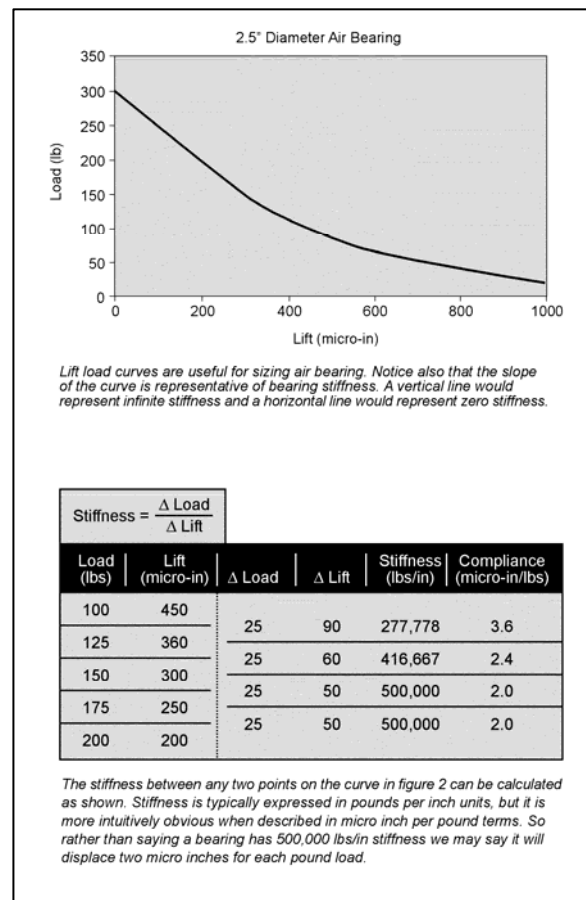


Figure 4 - Air Bearing Stiffness

うにして剛性を生むのでしょうか？ 60 psi(414kPa)でオリフィスを抜ける流れが、150 ポンド(68kg)の負荷が乗り 300 マイクロインチ(7.6 μ m)浮上するベアリングのギャップを抜ける流れと等しくなるケースを考えてみます。直径 2.5 インチ(63.5mm)のベアリングは約 5 平方インチ(0.003m²)の表面積を持つので、ベアリング面の下の平均圧力は 30 psi(207kPa)になります。今、負荷が 200 ポンド(90.7kg)に増えたと思像してください。この増加分はベアリング下の平均圧力を 40 psi(276kPa)に増やし、エアギャップを 200 マイクロインチ(5.1 μ m)に圧縮したとします。ギャップが潰れるとフロー抵抗が増えて流量が減ります。オリフィスによって抑えられていた予備の圧力はこの時、ギャップ内の圧力を増やし、エアギャップを復元する力として働き、エアベアリング剛性をもたらします。

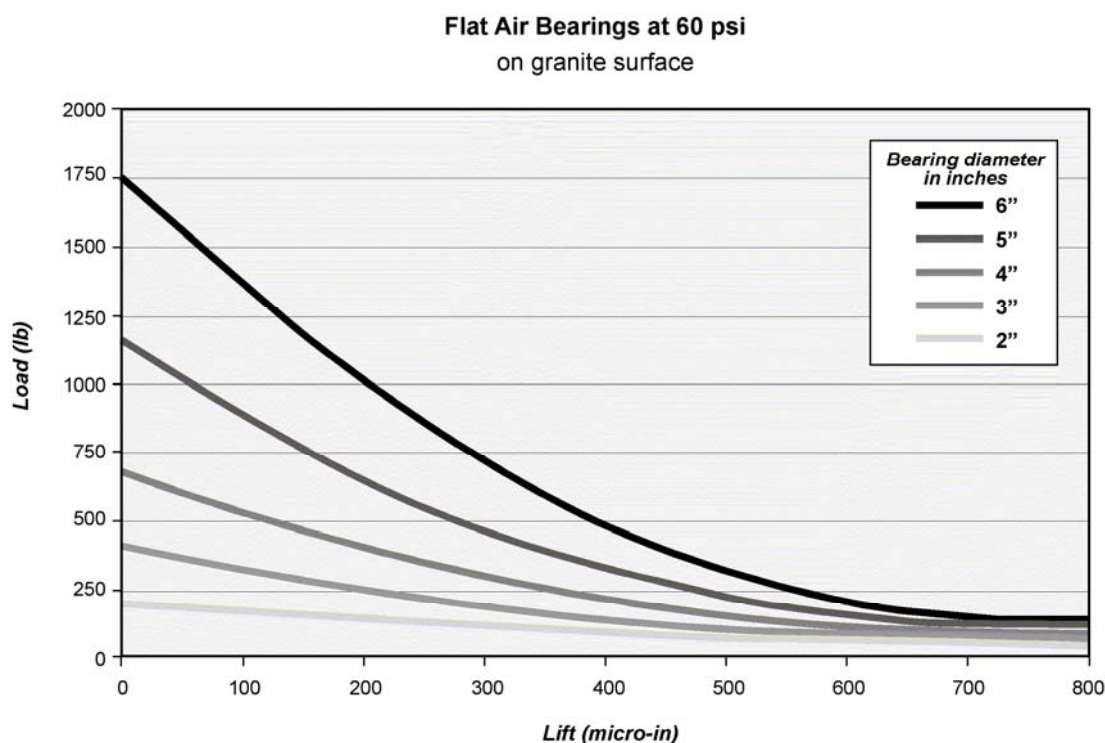


Figure 5 - Lift-Load Curves

負荷容量

上からも分かるように、ギャップ補正による剛性と静定性は、負荷量と密接係関係しています。ギャップ補正無しでは、ベアリングの理論上の最大負荷容量(ベアリングを接地させる荷重)は入力圧の表面積倍であると説明できません。

実際には、エアベアリングは論理的負荷を完全には支えていません。なぜならベアリング端からの漏れがあるからで、これはベアリング全面にわたって圧力が等しくなるのを妨げます。エアはオリフィスから出る時にギャップを通して拡散し、オリフィスから遠ざかりながらギャップ内に圧力勾配を作ります。圧力プロファイルのとおりマップされています(Figure 7 - Air Bearing Pressure Profiles)。これらの圧力プロファイルはオリフィスと溝の数や場所、特にどのタイプのギャップ補正が使われているかに左右されます。多孔質のギャップ補正は最も均一な圧力をベアリング下に作ります。

ギャップ補正がベアリング剛性を増加させている時、ベアリング下の平均圧力は入力圧力の約 50 パーセントです。従ってエアベアリングは一般的に入力圧に関しては 50 パーセントの効率と考えられています。この経験則はベアリングの形や大きさによって変わります。ベアリングの「ふち」が面

積の大半を占めるような小さい、あるいは幅の狭いベアリングは効率が小さく、大きなベアリングは高効率です。これは大きなベアリングを作るよりも、小さく作る方が難しい理由の1つです。

エアベアリングの負荷容量は転がりベアリングと比較すれば限定的ですが、伝統的な工作機械用平面ベアリングと、単位面積あたりではほぼ同等の負荷を支える事ができます。これは今日の高速軽量マシンアプリケーションにとって通常では十分以上です。

$$\text{表面積} \times \text{入力圧} = \text{接地荷重}$$

$$\text{表面積} \times \text{入力圧} \times \text{効率} = \text{負荷容量}$$

4. エアベアリング技術の種類

精密エアベアリングは基本的に2種類あります。動圧ベアリングと静圧ベアリングです。

動圧ベアリング

動圧ベアリングは、ベアリング表面と通常渦巻状の空気引き込み用の溝との間の相対的な動きに依存しています。このベアリングの動作は、自動車が高速で水溜りに乗った時のハイドロプレーニング現象ととても似ています。低速では、タイヤは水を切り裂いて路面まで届くでしょう。まさにこの点で、動圧ベアリングは表面との間で相対的な動きを要求します。動きが無いときやエア膜形成に不十分なほど遅いときには、ベアリング面は接触してしまいます。動圧エアベアリングはしばしば箔ベアリングや自動ベアリングとして言及されます。このタイプのベアリングの例としては、回転するディスク上に浮く読み書きヘッドや、クランクシャフトジャーナル・カムシャフトジャーナル・発電機タービンのスラストベアリング等が含まれます。

静圧ベアリング

静圧エアベアリングには外部に圧縮空気源が必要です。この圧縮空気は精密な孔・溝・段差や多孔質などによる流量制限手法によってベアリング表面に導かれます。静圧エアベアリングは圧縮空気源を持つので、ベアリング面に相対的な空気の動きが無くてもエアギャップを維持できます。

オリフィスと多孔質材技術

エアベアリングは通常“オリフィス”と“多孔質材”とに分類されます。オリフィスベアリングでは、圧縮空気は少数の細い穴を通してベアリング面に供給されます。発想はエアホッケーゲームと似ています。しかし穴はテーブルではなくパックに開いています。多孔質材エアベアリングは空気がベアリング表面全体を通して供給される点で全く違います(Figure 6)。表面に無数の微細な穴の開いたオリフィスベアリングがあったとしたら、それと同じ方法で多孔質材は空気流量を制御します。

エアベアリング内での補正効果を可能にするには2つの技術があると、広く言われています。オリフィス補正は最も幅広く使われる伝統的な方法です。一方、多孔質面補正は、そのアドバンテージと入手性の向上により選択肢としてたちまち台頭してきました。

伝統的なオリフィス補正では、精密な大きさのオリフィスがベアリングに並べられ、おおくは圧縮空気をベアリング面に均等分配する為の溝と組み合わされます。しかしもしベアリング面に、溝と交差する傷やオリフィス付近に傷が付くと、オリフィスが供給できる以上の量の空気が逃げてしまい、エア供給圧が正常であってもベアリングを壊してしまいます。従来型エアベアリングの僅かなオリフィスと比べて、多孔質エアベアリングは、多孔質材内の無数の穴を通してベアリング面全体に出てくる空気の流れを制御しています。これにより、クロギングを起こし難く、酷く傷付けられた後でさえも浮き続けます。



Figure 6 - Porous Media

通常操作の元でも、オリフィスエアベアリング内の空気は、オリフィスや溝から遠ざかるにつれて圧力低下してエアギャップ内に圧力勾配を作ります。多孔質エアベアリングにとっては、圧力はベアリング全面に渡ってほぼ均一なので、問題にはなりません。(Figure 7 参照)。

多孔質カーボンは、空気の流れを自動的に制限し振動を止めると同時に、ベアリング表面に理想的な均一な空気圧を供給するという用途に最適な材質の一つと見られています。カーボン表面は、仮に空気の供給が止まった場合における高いベアリング保護をもたらすだけでなく、空気が止まっている間にもサポート面にダメージ無く動く事を可能にします。

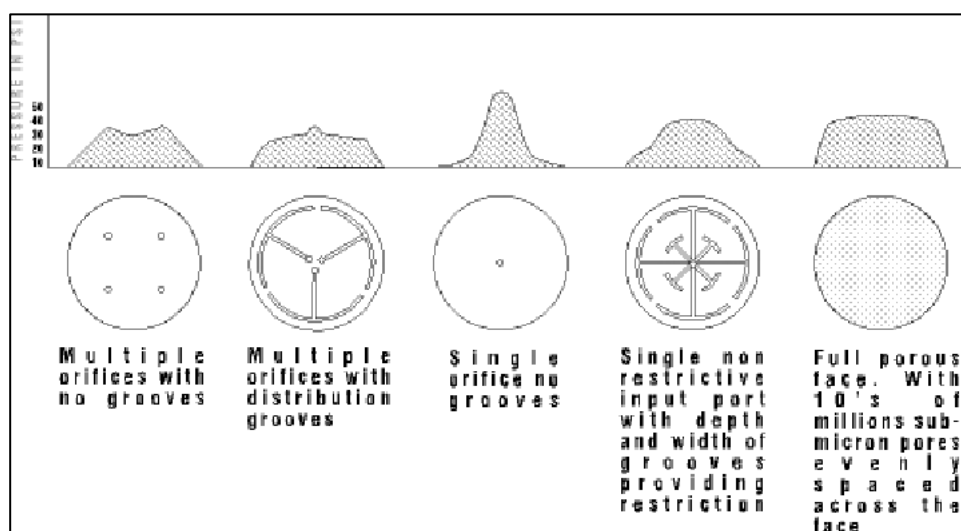


Figure 7 - Air Bearing Pressure Profiles

浮上と接触

接地している時、フラット型オリフィスベアリングは、初期揚力を作るだけのオリフィス領域(および空気分配用の溝)しか持っていません。これは予圧オリフィス型エアベアリングの能力を規制します。多孔質エアベアリングは、たとえ接地していても表面全体からエア圧を供給します。

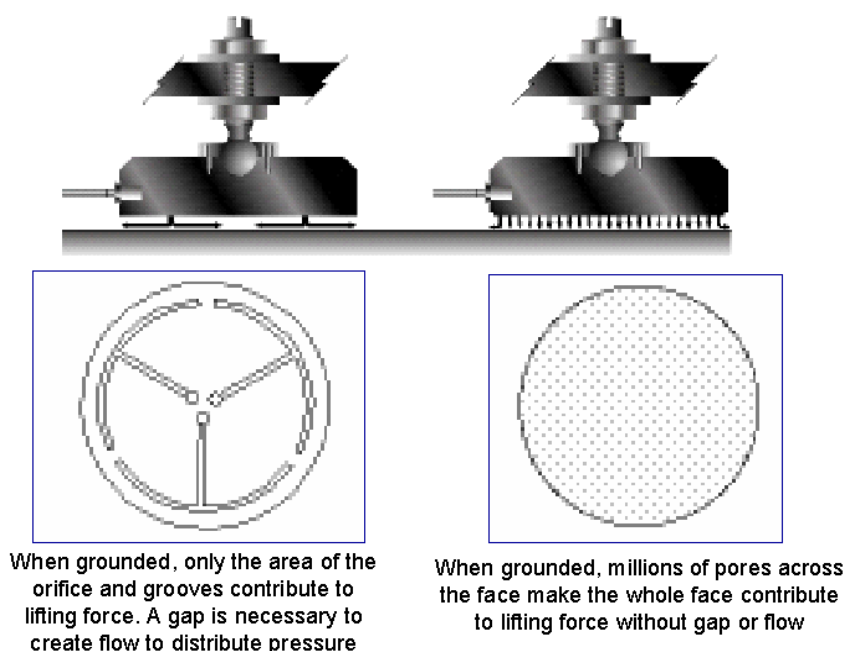


Figure 8 - Orifice vs. Porous Media

ピッチ モーメント剛性

特筆すべきなのは、個々のベアリングのピッチモーメント剛性を比較した時、その結果が多孔質とオリフィスエアベアリングのタイプによって大きく違うことです。オリフィスベアリングはベアリング表面からの流れに依存しているので、ギャップ内の角度の変化、例えば片側のギャップが大きくなり反対側が小さくなった時、不安定な状態が作られます。そこでは得られた流れが抵抗の少ない経路(大きなギャップ)にそってすぐにその圧力を失い、最も必要としている領域(小さいギャップ)からは逃げて行きます。対照的に、多孔質ベアリングは小さいギャップ領域からも噴出す圧力を維持しています。これは多孔質ベアリングに、より高い傾斜モーメント容量と剛性を与えます。

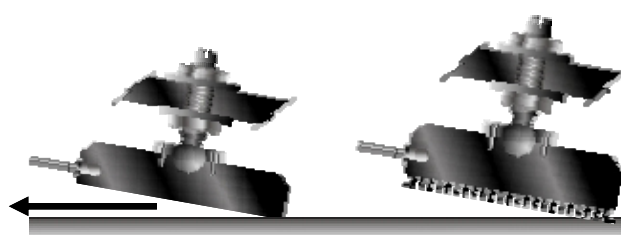


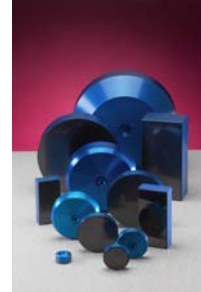
Figure 9 - Pitch Moment Stiffness

5. エアベアリング製品群

おおむね 5 種類に分類できます。それぞれの詳細・選定・マウント・設定・取り扱い方法については、このアプリケーションガイドの後章でカバーします。

フラットベアリング (パック)

フラットベアリングは円形もしくは長方形で、一般には細かいボール付きネジでマウントされます。特許をうけた負圧複製手法を使って接着する事もできます。



エアブッシュ

エアブッシュは、エアベアリング技術を利用する最も安価な方法です。標準シャフトサイズに合うように設計されており、現行のブッシュと置き換えて使用されることも度々あります。



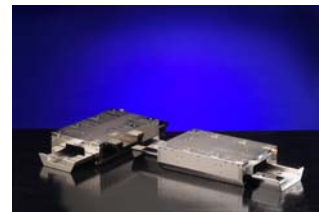
バキュームプリロードベアリング (VPL)

VPL はフラットエアベアリングに似ていますが、ガイド面との間のプリロードを作る為に負圧空気を使っています。



エアベアリング スライダ

エアベアリングスライダは、フラットパッドエアベアリングを使用した組み立て済み小型スライダです。



ラジアルベアリング

大型の回転アプリケーションに最適で、無摩擦・無磨耗・潤滑油不要・無音といったエアベアリングの利点の全てを提供します。



6. エアベアリング アプリケーション

New Way® エアベアリングは、座標計測器・精密加工機・半導体ウェハ加工・医療機器・光学レンズ製造装置・デジタル印刷機・リトグラフィ・精密ゲージ・ダイヤモンド旋盤・材料試験機・結晶引き上げ・回転テーブル・スピンドル・摩擦試験機など、さまざまなアプリケーションで使われています。

New Way® エアベアリングは異なる産業と市場に向けて、次のような他と全く異なるアドバンテージを提供します。

印刷産業用機械

プリプレス産業にはコンピュータ製版機(CTP)や高分解能スキャナを含みます。これらの機械は、内蔵ドラムの中心に沿って移動する高速回転オプティクスを持っています。レーザー光線はオプティクスで反射し、ドラム内径へと向かいます。エアベアリングはガイドに沿ってスピンドルを回転させたり平行移動させるために重要です。ピッチとヨーのエラーは Abbe の法則により、オプティックから内部ドラム表面までの距離に従って拡大します。エアベアリングは、画像の帯状誤差に帰着するピッチエラーやヨーエラーを減少させる為に使われます。

座標測定器

ほとんどの座標測定器(CMM)は無限の分解能を考慮してエアベアリングを内蔵しています。エアベアリングは加圧された空気膜の上に実際に浮いているので、物理的な接触はありません。これは分子のズレだけが摩擦に寄与する事を意味します。初動時の静的および動的摩擦係数は全く同一で、スティックスリップ現象はありません。プローブを引く前後でのロストモーションやリバーサルエラーは減ります。エアベアリングは転がりベアリングに比べて、再現性に優れ、滑らかで、エラー訂正も効果的です。機械的には、無限の運動分解能を可能にします(制御技術者を危機から戻します)。

試験装置

多くの引っ張り試験機や摩擦試験機は転がりベアリングの摩擦の影響を受けます。ベアリングの磨耗もテスト工程において矛盾する結果を生みます。この理由により、大多数の精密摩擦試験装置は機械的接触摩擦を排除する為にエアベアリングを使っています。多くの試験機は極めて精密な力加減が求められています。摩擦の排除は、装置の分解能を劇的に向上させます。疲労試験(その他の振動型試験機)はしばしば転がりベアリングに「フレッチング」を引き起こします。エアベアリングは非接触なので、高速・短ストロークのアプリケーションでも気を使いません。

高速装置

今日設計される機械は、毎年 10 億回以上も動作を繰り返すような可動部分を持っています。このような機械で加速寿命試験を試すのは合理的ではありません。もう一方の選択肢は、ベアリング技術を転がりベアリングからエアベアリングに替えて、磨耗形態を切り替える事です。エアベアリングでは、速度やベアリングストロークは磨耗に影響しません。エアベアリングにとっての磨耗形態は侵食なので、供給される空気に含まれる粒子の量は、ベアリング寿命の決定要因です。比較的汚い空気が使われたとしても、エアベアリングの計算上の寿命は、毎年 10 億回動こうが静止したままだろうが変わらず、数世紀にもなります。動摩擦係数は速度に合わせて増え、毎秒 20m 以上場合に発熱問題にのみ寄与しますが、それは限られた回転アプリケーションの場合のみです。

超精密工作機械

世界中の高精度工作機械の多くがエアベアリング技術を採用しています。静摩擦係数がゼロなので、輪郭描画アプリケーションのステージ反転中も無比のパフォーマンスを可能にします。極めて正確な速度制御とステージ移動中の動揺の排除により、オンストローク・レベルで測定される光

学品質の表面処理加工が可能になりました。製造部品の幾何学エラーは、しばしば数百万分の 1 インチの桁になります。

リニアステージ

エアベアリング、特に多孔質材エアベアリング技術の利点は、しばしば高性能リニアステージ内部に組み込まれます。New Way® エアベアリングモジュールは超精度・無摩擦のステージを可能にします。そのステージは、規格化されて在庫があっていつでも買える安価で使い易いコンポーネントを使って設計・製造されています。

OEM

エアベアリングは、OEM の精密機械アプリケーションでも見られます。OEM 生産者は完全なリニアステージを彼らの機械内に組み込む事も出来るし、また、彼ら自身のステージをエアベアリングモジュール製品を使って統合する事も出来ます。

カスタム製品とテスト装置

1台限りのカスタム製品であっても、New Way が標準品としてラインナップするモジュラー型エアベアリングなら、カスタムマシンやテスト装置・測定アプリケーションに容易に組み込んでお使いいただけます。どんな小さなプロジェクトであっても、フラットエアベアリングやエアブッシュ・真空予圧ベアリング・エアベアリングスライドの幅広い選択肢の中からぴったりの多孔質材エアベアリング技術がご利用可能です。摩擦が無いというエアベアリングの特性は、転がりベアリングが成し遂げていたよりも高い分解能と極めて微少な出力での動作を可能にします。

PART II: エアベアリングの選び方

7. アプリケーションに適切なエアベアリングの選択

続く 2 ページの表は、あなたのアプリケーションに最適なエアベアリング製品を選ぶために使えます。操作環境がエアベアリング性能に与える影響について述べます。

エアベアリング選択表

	フラットパッド	ブッシュ	VPL	ステージ
コスト	エアベアリングステージで使われる最も一般的なタイプ。パッドは安価。ステージ構造も安価。ガイドウェイが最も高価なコンポーネントになるケースが多い。大きく複雑なアプリケーションではベアリング数を増やせる。	最も安価なエアベアリングシステム。丸シャフトは入手容易。単軸動作ステージに必要なブッシュはわずか3つ。	VPL を単平面で使えば X-Y 動作が安価に可能。しかし VPL はフラットパッドよりも複雑で大きいので、高価。VPL はしばしばフレクシャ・マウントされるので、コスト増に。マウントコストを減らす為に、VPL を特許取得済みの手法で貼り付ける事も可能。	お客様による組み付け・在庫・発注部品リストの手間を削減しますが、たいがい最も高価。
組み付け	最も容易。マウント部品も安価。ねじ切りスタッドで柔軟な位置合わせが可能。	容易。O リングでセルフ調芯。マウント部品を New Way から購入する事も、お客様自身で製作する事も容易。	VPL システムの組み付けには注意が必要。フレクシャ設計は壊れやすくデリケート。強固かつ安価にマウントする為に、特許取得済みの真空レプリケーション手法を採用(ライセンス契約)。	お客様による組み付け不要。
精度	真直性は使用しているガイドウェイの精度に依存。対向パッドによる予圧により、ステージは高剛性になる。いくつかの例では、ガイドウェイの誤差は平均化が可能。	特にストロークを6インチ未満に限定すれば、丸シャフトウェイのステージは高精度を得られる。滑らかさ・スピード・低摩擦のみが求められる場所では、殆どのブッシュステージを採用。	VPL は運動力学的に正しく配置できるので、最高の精度が可能。もちろん高精度を得るためには、システム全体が高精度に構築されている必要がある。	エアベアリング表面積を広く、重心を低く抑えられるので、剛性をより高く、駆動軸の外側の質量によって生じる角度エラーをより小さくできる。

続く…

	フラットパッド	ブッシュ	VPL	ステージ
剛性	予圧のかけられたフラットパッドは高剛性。	ブッシュは両端を支持されたシャフトでガイドされるので、シャフトの曲がりシステム剛性の制限要因となる。Oリングマウントも剛性を制約。単純な手順でこの柔軟性を硬く固められる。高剛性ステージは短ストロークなら製造可能。ギャップがどのように性能に影響するかの詳細は、ブッシュの章を参照。	VPLの剛性は可変。システム剛性はマウントフレクチャにより制約。標準VPLは、その厳密な束縛が有利となる軽負荷・軽加速・超精密アプリケーションに最適。より強固で高負荷・高剛性なシステムは大型VPLと(特注)New Wayの複製手法(特許)で製造可能。	New Way エアステージは与えられたスペースで最高の剛性を発揮する為の、特許取得済みの複製手法で作られています。
負荷容量	フラットベアリングは最も高い負荷容量を持つ。カスタムベアリングは10,000ポンド(4,500kg)以上を持てる。	エアブッシュの負荷容量は有限。Oリングでマウントされていれば、負荷容量を増す為にOリングを増加可能。	フレクチャでマウントされたVPLモジュールの負荷容量は非常に限定的。より大きな、特注VPLはそれ以上の負荷容量を持てる。	ステージは高い負荷容量を持てる。
配管	配管は単純。1本のエア管を各軸のマニホルドに入れ、ベアリングにはそれぞれの軸から分配。	エアブッシュステージはより少ないベアリングで作られているので、配管もより単純。	真空/圧空用に2本目のエアチューブが必要。真空エアチューブは、低損失の為に大口径が良い。	エアステージの配管は最も容易。必要なのはわずか1本の加圧エア管のみ。

環境がエアベアリング性能へおよぼす影響

環境	エアベアリング性能への影響
埃	乾燥した埃に対しては強い耐性があります。
油	油分がガイドに落ちる事は避けてください！オイルがエアギャップを満たしてしまい、引き摺りを生みます。分解や洗浄、最悪はベアリングの取替えが必要になります。洗浄にはIPA(イソプロピルアルコール)を使用してください。
水	ガイド上の水滴は避けてください！水分がエアギャップを埋めてしまい、引き摺りを生じます。ガイドウェイは乾燥させ、清潔で乾いた空気をベアリングに供給すれば、初期の性能を維持できます。ガイド表面の錆や水による腐食性反応に対して注意してください。
温度	標準エアベアリングは室温で使うために設計されています。使用環境の温度変化が±15°C以下を目安にしてください。

PART III: エアベアリングを使う為の設計

8. エアベアリングガイド

エアベアリングは様々な材質のガイド上で使用できます。一般的にはグラナイト・ハードコートしたアルミ・セラミクス・ガラス・ステンレス・ハードクロム処理したスチール等がガイド材として使われます。

ガイド表面の考慮事項

表面研磨や局部的平坦度の問題あるいはガイド面に穴が開いている場合等、考慮する必要があります。

表面研磨

16 rms 以上の研磨を推奨します。より荒い表面でも使うことは出来ます。表面の粗さはギャップの一部として考える必要があります。ギャップを小さく設計すれば、この影響はさらに大きくなります。ベアリング面へのダメージは移動中の接触によって起こりがちです。

局部的平坦度

局部的平坦度、つまりある瞬間のベアリング下の平坦度はエアギャップの 50%未満にすべきです。これは最悪値であって、現実的には 10%未満に抑える事は比較的容易です。

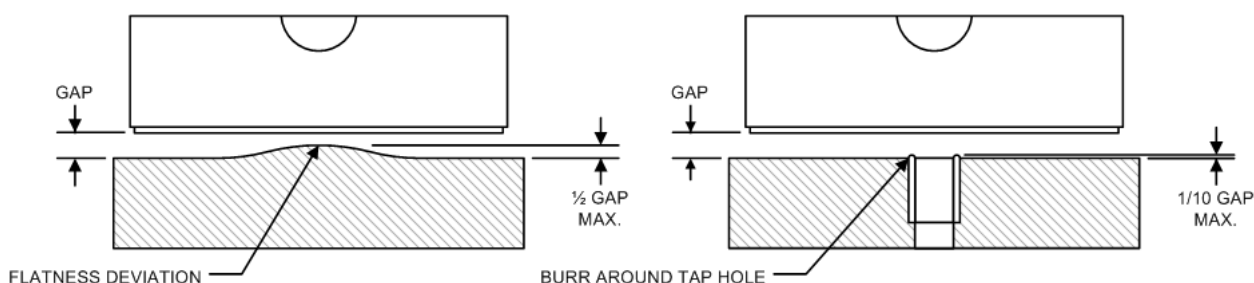


Figure 10 - Surface Flatness

ガイド面の穴

ガイド面の穴に関して特筆すべきは、オリフィスベアリングは基本的に穴の上では使えませんが、多孔質材ベアリングは穴の開いたガイド面上でも使えるので非常に便利という事です。ただし必要な負荷を支える為に、定格よりも浮上量が減少するという代償を払わなければなりません。どれくらい減少するのでしょうか？例えば、1/4-20 (M6.5 相当)のネジ穴が1インチ (25.4mm)ピッチであった光学テーブルの上に 80mm ベアリングを浮かせた場合、10 μ m ギャップ時の負荷能力は標準負荷容量の 50%になります。ギャップが狭くなりエア圧が上がれば、穴による能力ロスも増加します。

ガイドウェイの継ぎ目

ガイドは継ぐべきでは有りません。5 μm のエアギャップがあるとしても、10 μm の継ぎ目にさしかかれば、それはベアリングにとって壁にぶち当たるようなものです。

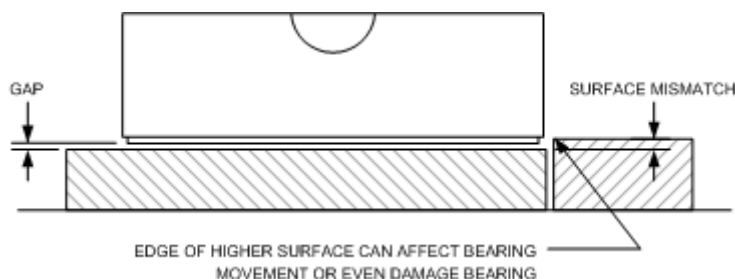


Figure 11 - Seams in the guide way

9. 剛性とプリロード

精密モーションシステムを設計する時に剛性は重要な要素であり、ベアリングの剛性は全ての性能における重要な要因になります。剛性を上げると荷重変化への耐性が高くなります。プリロードをかける手法は全てのタイプのベアリングで用いられ、剛性を上げる方法の1つです。

転がりベアリングの予圧は Hertz 応力の法則に従います。基本的にボールベアリングはレースに押し付けられるので、負荷が重くなるにつれて接触点や接触線は大きくなります。大きな接触面は高い剛性をもたらします。転がりベアリングでは予圧による摩擦や磨耗の増加が、この剛性を増やす要求にとって不利にはたります。

エアベアリングの予圧は流体力学の法則に従います。エアベアリングに負荷がかかると、エアギャップが少なくなり、空気薄膜の圧力が上がります。なぜなら空気は圧縮可能な、ばね係数や剛性を持つ流体だからです。本質的に高圧は空気ばねへの予圧です。エアギャップを一定のばね係数を持つ円柱と考えるなら、円柱が短くなるにつれて剛性が増すのは明らかです。エアベアリングの剛性を決定する要因はエアギャップの圧力と厚さ、投影されたベアリング表面積です。

エアベアリングがどのようにして、物理的に接触している転がりベアリングに匹敵する剛性を持つのか、直感的には理解しにくいでしょう。接触点や接触線には理論的には面積が無い事を思い出してください。そのような極小な接触面積は局部的に高圧になり、変形を避けるためには非常に硬い材質が要求されます。エアベアリングでは負荷はエアギャップを通して伝達され、転がりベアリングよりも数桁も巨大な面積全体に投影されます。この広いエアギャップは膜を押し潰す機能としても重要で、精密システムにとっても好都合なのです。

質量・磁力・真空を加えたり、ガイドレールの向かい合う面にエアベアリングを2つ取り付けることにより、エアベアリングにプリロードをかけられます。質量の増加は、高加速度や素早い静定時間の要求に逆行します。磁気予圧の場合は、全軸下のガイド表面が金属でなければならず、金属の帯をグラナイトベースの上に挿入する必要があり、構造に複雑さとコストが追加されます。エアベアリングはしばしば、Figure 12 - New Way® Air Bearings on a Coordinate Measuring Machineに見られるように向かい合わせのエアベアリングで予圧されます。この場合はかなりのスペースと、平行した面、合計2倍のベアリングが必要になります。真空予圧は、ベアリング数や高さを減らせる洗練された解決策で、金属製ガイド面と同様にグラナイトの上でも使えます。

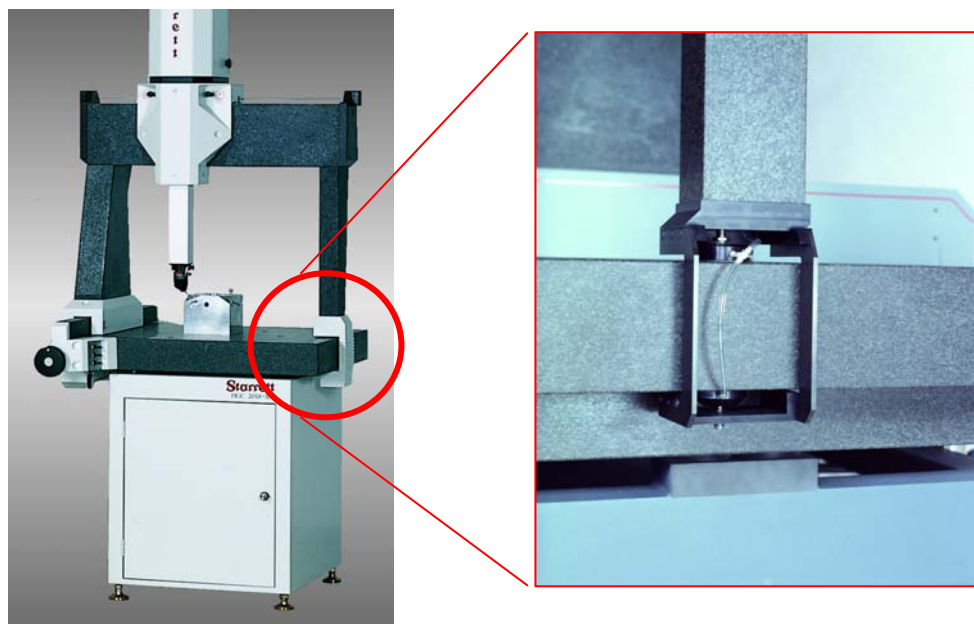


Figure 12 - New Way® Air Bearings on a Coordinate Measuring Machine

Courtesy L.S. Starrett

以下はエアベアリングの予圧方法です：

1. エアベアリングは負荷の質量で予圧できます。大きな物体を、精密グラナイト表面や光学テーブル上のあちこちへ動かす事ができます。単に平面を2次元的に移動させる場合は(平面を3点で定義するように)3つのベアリングの上に載せるのが一般的には最良です。個々にかかる荷重を支えるのに十分な負荷能力のエアベアリングを、負荷－浮上量－剛性曲線グラフから選定してください。負荷が変わらないような例では、剛性が重要でない場合もあります。もしくは平坦ではない面上でベアリングを使う要望があるかもしれません。たとえば 1/4-20(M6.5 相当)の穴が1インチ毎にあいたアルミ製光学テーブルでも浮上する事ができるでしょう。この場合、大きめのベアリングを選ぶのが賢明です。浮上量が大きくなり外乱に強くなるからです。

2. エアベアリングは真空予圧も出来ます。エアベアリング領域や、ベアリング面と同一面で処理された非エアベアリング面が、真空シールとして使えます。空気で加圧されたエアギャップが真空シールになるというのは直感的ではありませんが、しかし極めて上手く働きます。バキュームプリロード・エアベアリングが毎時5立方フィート(0.14m³)未満の圧縮空気を消費できて、そのたった半分が真空チェンバーへ流れ込む事を考えれば、分かり易いです。エアベアリング面とガイド面で構成されたシール領域(エアギャップ領域)と外気圧力溝との組み合わせにより、真空ポケットへの空気の流入を劇的に減らせます。真空負荷は真空が引き込まれた中心部で作られます。この領域に真

空を引き込むことで、真空ポケットの投影面積×圧力差と等しい予圧を作っているベアリングの上から、実際には外気が押し潰します。この圧力差は容易に完全真空の 2/3、つまり 20 inchHg (68kPa) または 10 PSI になります。真空予圧の利点は、質量を増加させずに予圧をかけられる事です。さらに、磁気予圧のようにガイド表面が金属である必要も無く、全 XY 平面にわたって予圧可能です。大きな一体型真空予圧ベアリングは、例えば 12 インチ(30cm)四方のたった1ポンド(0.45kg)の自重で 800 ポンド(363kg)の予圧を作れ、剛性はインチあたり 200 万ポンド(900 トン)を超えます。この技術は高加速度ステージなど早い静定時間を必要とするアプリケーションにとって大きな利点となります。精密平面な XY 軸をガイドすることで、リニア軸の積み重ねで生じる Abby エラーと公差の増加を抑え、優れた動作平坦度を提供します。

3. 磁気は真空同様に質量の増加を伴わずに予圧をかけられます。予圧したいリニア軸のガイド面に金属帯を配置します。しかし X 軸と Y 軸に予圧するためには、全ガイド面が金属で無ければなりません。磁石は大抵2つのエアベアリングの間で使用され、金属帯に対する磁石の位置調整機構を設けます。を可能にするある種の細いホルダ内に取り付けられます。隙間を調整する事で、予圧の最適化が可能です。

4. 最もポピュラーな方法は、2つのエアベアリングを対向に配置して予圧をかける手法です。この場合には2つのベアリングの剛性は加算されるので、システムの剛性は2倍になります。予圧ベアリングの挿入位置は、構造的歪を避けるために真向かいの位置が一般的には最適です。

10. エアベアリングシステムにおける荷重の実演

重力負荷

構造的考察

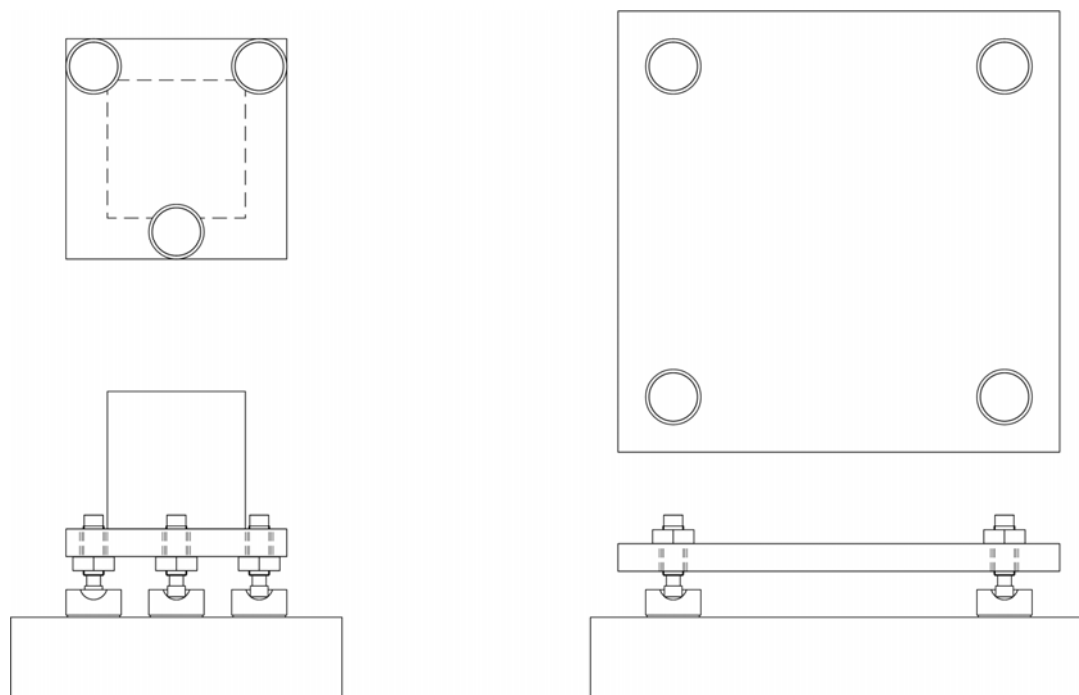


Figure 13 - Supporting a load on a flat plate

平面上で単純な負荷を支える場合、3点支持のために3つのベアリングを使う事が一般には最適です。4本足の椅子ががたつく問題を避けます(運動学の章を参照)。この3本足姿勢はそれを支える構造が非常に堅い(背の高い断面を持つ)場合や、支持平面があまり平坦で無い場合に特に有効です。あまり剛性が不高くない(ベアリング間隔が広く開いた)構造の場合、4本足姿勢の方がフットプリントを大きくした効果により、より安定するかもしれません。平坦な板状の躯体はより弾性があるとみなせるでしょう。

荷重配分

ここでは負荷がベアリングに均等に配分されているかどうか考えてみます。モーメントや加工荷重等の荷重変動を含め、ベアリングにかかる最大負荷がエアギャップの期待値(経験則では $3\sim 5\mu\text{m}$ が良い)を下回る結果にならないように、浮上量・荷重グラフを調べてベアリングの大きさを見積もって下さい。エアベアリングの能力限界付近でエア圧を相対的に高目に設定して使用するより、1サイズ大きいエアベアリングを低いエア圧で使用する方が、空気流量を減らし、ダンピング性や剛性を増加させ、安全性要素をさらに高める事が可能です。

他のベアリングを使った予圧

他のエアベアリングによって予圧する時は、予圧力を負荷として考慮してベアリングの選定を行ってください。一般的には、双方向負荷を可能にしたエアフィルムの剛性を増やすために、他のエアベアリングによる予圧を採用します。予圧と予想負荷変動とが強く関連するとき、剛性は高められます。言い換えれば、予圧しあう大きなベアリングは高い剛性を生みます。実際には、向かい合う2つのベアリングの剛性は加算されます。それぞれ 500,000 ポンド/インチの剛性のベアリングで互いに予圧しあうと、システム剛性は 1,000,000 ポンド/インチになります。予圧は負荷として計上する必要があります。

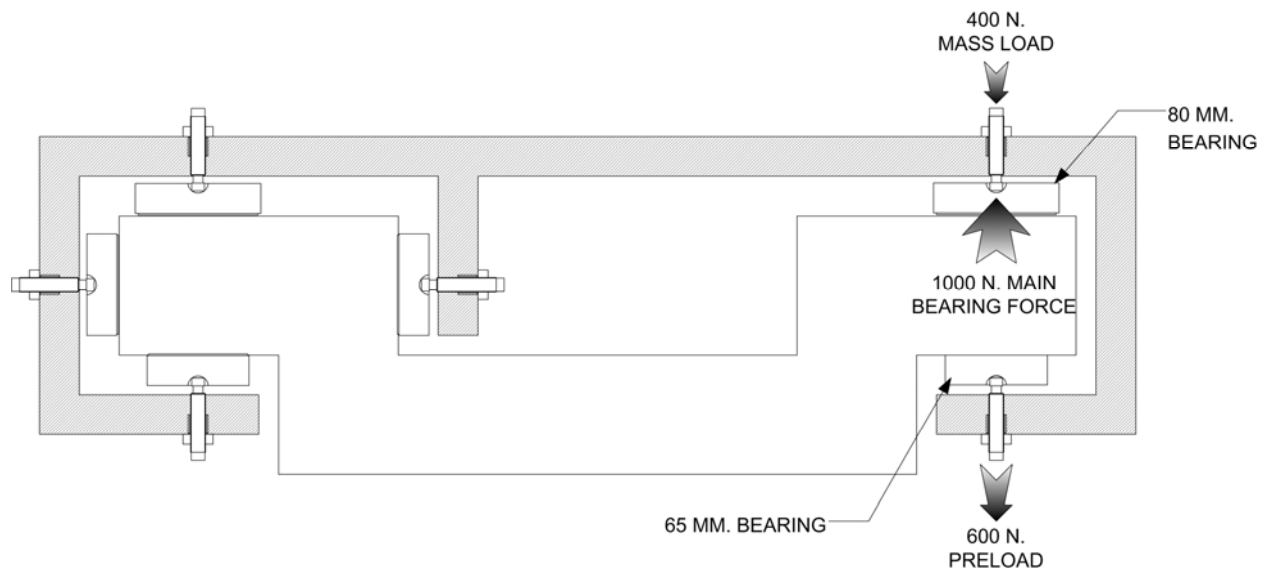


Figure 14 - Preloading with other air bearings

動的負荷

高加速や静定時間の短い高性能ステージを設計するとき、ステージの重心と力点を一致させる事が重要です！他の設計上の理由により、しばしばこの事が不可能になります。動作軸を外れた質量はモーメントを発生させ、その力は加速や減速中のエアベアリングに負荷として作用します。そこで、エアベアリングの選択時にこれら動的負荷を考慮する必要があります。

このモデルでは、エア膜の剛性が不変で構造全体が完全剛体だと仮定しています。

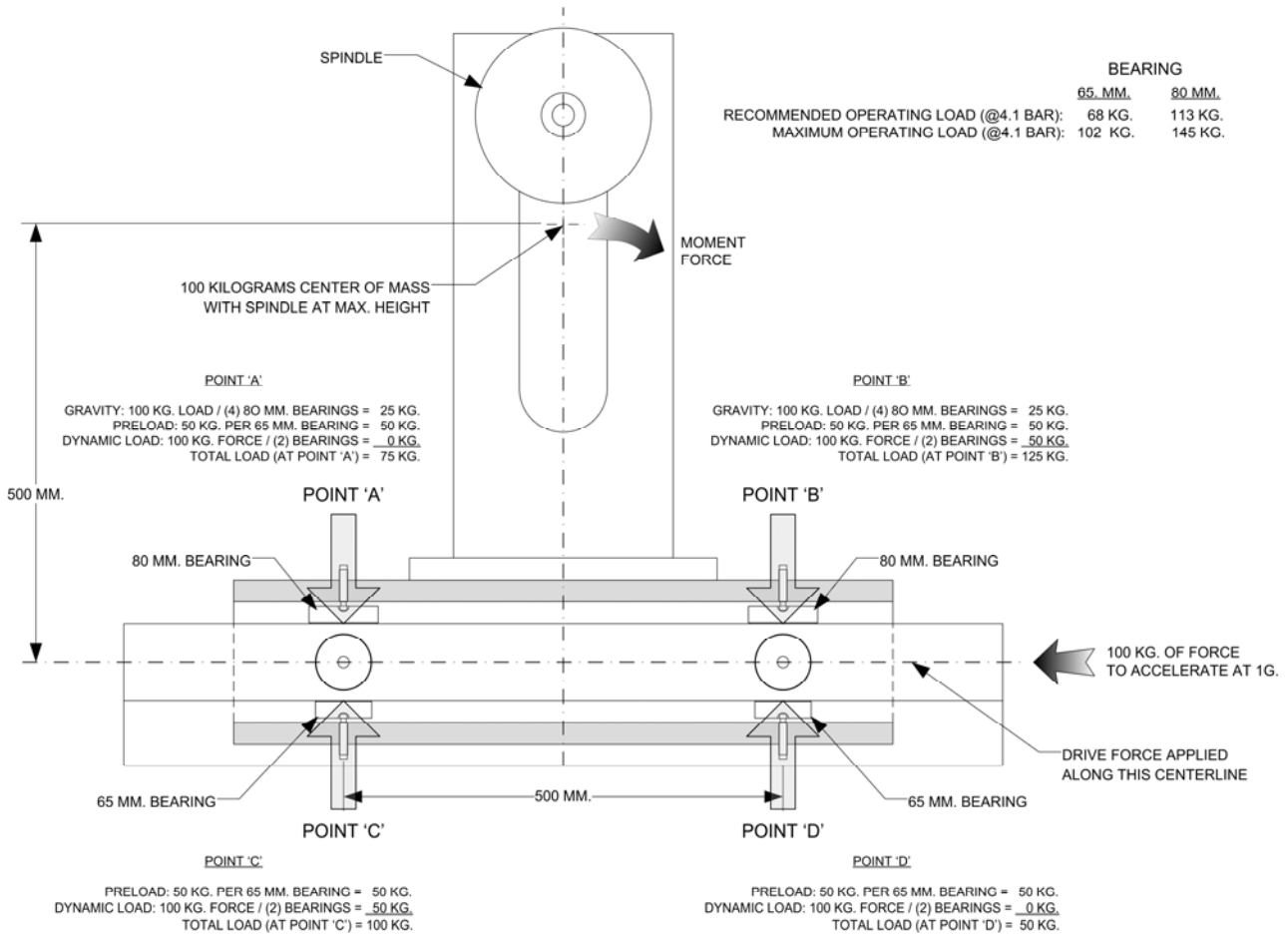


Figure 15 - Dynamic Loading

PART IV: エアベアリングのセットアップと使い方

11. フラットベアリング

清浄

エアベアリングの清浄には IPA(イソプロピルアルコール)のみ使用可能です。アセトン等の溶剤は絶対に使用しないで下さい。

取り付けと調整

何故フラットパッドエアベアリングの取り付けにボールスタッドを使うのでしょうか？ベアリングの取り付けにあたり、ベアリング表面がガイド面と平行であることは重要です。75mm エアベアリングが数 μm 傾いただけで、その性能ははっきりと落ちます。よってベアリングをボルト直止めで正しく取り付けるのは非常に困難です。球面ソケットとボールスタッドは、ベアリングの直付けに必要な精密機械加工をするよりも、良く働き安上がりです。加えてネジの切られたボールスタッドはベアリングのアライメントと予圧の調整を容易にし、装置の組立てをスピーディーにします。それらモジュール方式は変更や交換を容易にします。



Figure 16 - Ball stud options for flat air bearings

New Way では2種類のボールスタッドをご用意しています：

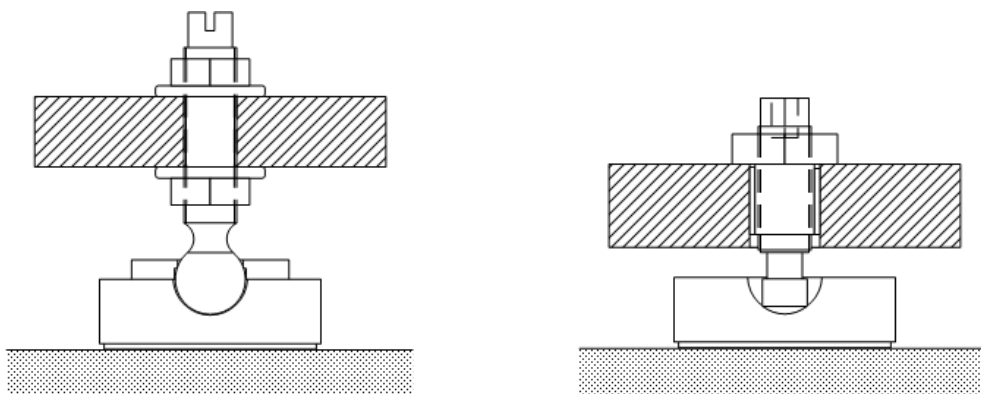


Figure 17 - Old and New Ball Stud Designs

New Way のメトリックサイズのベアリングには、ボールスタッドをベアリングに取り付ける為のリテーナクリップ用に3つのネジ穴があいています。ボールスタッドは普通ピッチかファインピッチのネジが利用可能です。スタッドには2組のナットとワッシャが付いてきますので、装置にタップを立てる必要はありません。New Way はドリル・リーマー・タップの情報や、最も簡単にベアリング調整する為の推奨タッピングを Web サイト上で提供しています。ベアリングで支持されている構造部分を持ち上げて他のテストスタンドへ移動する時や、ベアリング面を上にして取り付けたり、ある種の取り外し可能な平面圧盤がその上にセットされているような場合に、リテーナスタッドは便利です。またはベアリングが垂直ピストンをガイドしている場合、ピストンが挿入されている時にはベアリングはその場を保持する事が望まれます。ボール径はネジ径よりも大きくて片側からしかねじ込めず、しかも一度ボールスタッドを取り付けるとリテーナクリップをネジ止めしたり外したりするのは困難であるため、ボールスタッドを装置に取り付ける前に、ボールスタッドとクリップをベアリングに組み付けねばなりません。この形のスタッドやリテーナはベアリングの交換等には不便な場合があります。このボールスタッドはメトリックサイズとインチサイズの両方のベアリングで利用可能ですが、リテーナクリップ用のネジ穴はメトリックサイズのベアリングのみで利用可能です。スタッド・リテーナクリップ・ベアリングの完全な図面が Web サイト上にあります。

New Way インサート球面スタッドはとても使いやすいです。外径に粗いネジを切った真ちゅう製のインサートを装置にねじ込みます。インサートには予圧と位置調整用の精密ネジも切っています。ステンレス製スタッドの球面軸端はネジ径よりも細いので、スタッドをどちら側からも抜けるようになりました。ベアリング側からも位置調整できるように、球面軸端のすぐ上にレンチ用つかみ部を用意しました。ブロンズ製のインサートは、スタッドを調整位置でロックする為のセットネジを持っています。最小クリアランス要求は装置からベアリング背面までの最低限になりました。もし必要であればベアリングの交換や置き換えも、ボールスタッドを引っ込めてベアリングを滑らせれば簡単にできます。このスタイルのボールスタッドはメトリックサイズとインチサイズのベアリングで利用可能です。完全な図面が Web サイトから利用可能です。

取り付け部品を New Way から購入する必要はありません。お客様自身で製作や設計する為に New Way の図面を使えます。まったく独自で設計・製作もできます。多くのお客様がネジやボルトを変更しています。ボールをネジに付けたら、ベアリングに付けたら、それらを変更したボルトで固定したりしています。

主ベアリングの調整

主負荷用のベアリングパッドは、ステージの高さとアライメントを設定する為に使われます。ネジ山が切られたマウントスタッドを調節して合わせます。エア圧を切り、望ましいステージの高さと角度に調整します。マウントスタッド調整中に、スタッドと一緒に回ってしまわないようにベアリングを指で抑える必要があるかもしれません。その後エアを供給し、2列のサイドベアリングの位置とヨー・アライメントを調整します。エア圧をかけながら、目に見える隙間が無くなるまで予圧ベアリングを締め込みます。

予圧ベアリング調整

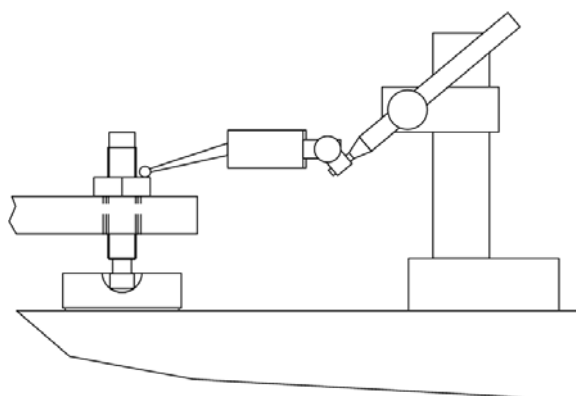
予圧ベアリングの調整には数通りの方法があります。ここでは、精密測定によりエアギャップの結果を物理的に確かめる方法を含む、4つの方法を説明します。

1. 引き摺りによる調整:

エア圧力を加えた状態で、軸の動きに引き摺りを感じるまで予圧ベアリングを締め込みます。そこから引き摺りを感じなくなるまで少し戻します。80 ピッチのネジは微妙な調整を可能にし、柄の長いレンチを使えばさらに敏感になります。より高い剛性やより小さなベアリングでは、より敏感な調整になります。

2. 圧力による調整:

他の全てのベアリングにはエア圧をかけた状態で、調整するベアリングには $\frac{2}{3}$ のエア圧を加えます。引き摺り始めるまでベアリングを締め込み、それから完全なエア圧をベアリングに加えます。この手順を他の予圧ベアリングでも繰り返します。



3. 流量による調整:

調整するベアリングのエアラインに流量計を設けて、無負荷時(調整ネジが緩い状態)の流量を測ります。それから流量が 60%に減少するまでベアリングを締め込みます。

上記手順2と3はエア圧や流量をベアリング調整に利用する例ですが、ステージに設けたマニホールドにワンタッチ継手で並列に各ベアリングを接続しておく、作業の効率化が図れます (Figure 30 - Options for connecting air supply to air bearings を参照)。

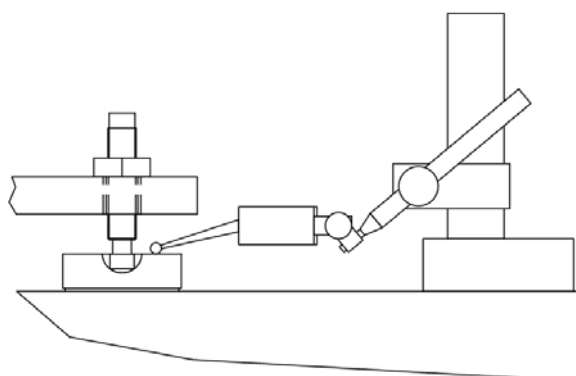


Figure 18 - Adjusting using dial indicator

予圧ベアリングを調整する第4の方法は、ベアリングの実浮上量を測る方法です(Figure 18)。この手順は最初の数台用については手順を改良する手助けになるので、前記3つの測定方法と同様に推奨します。

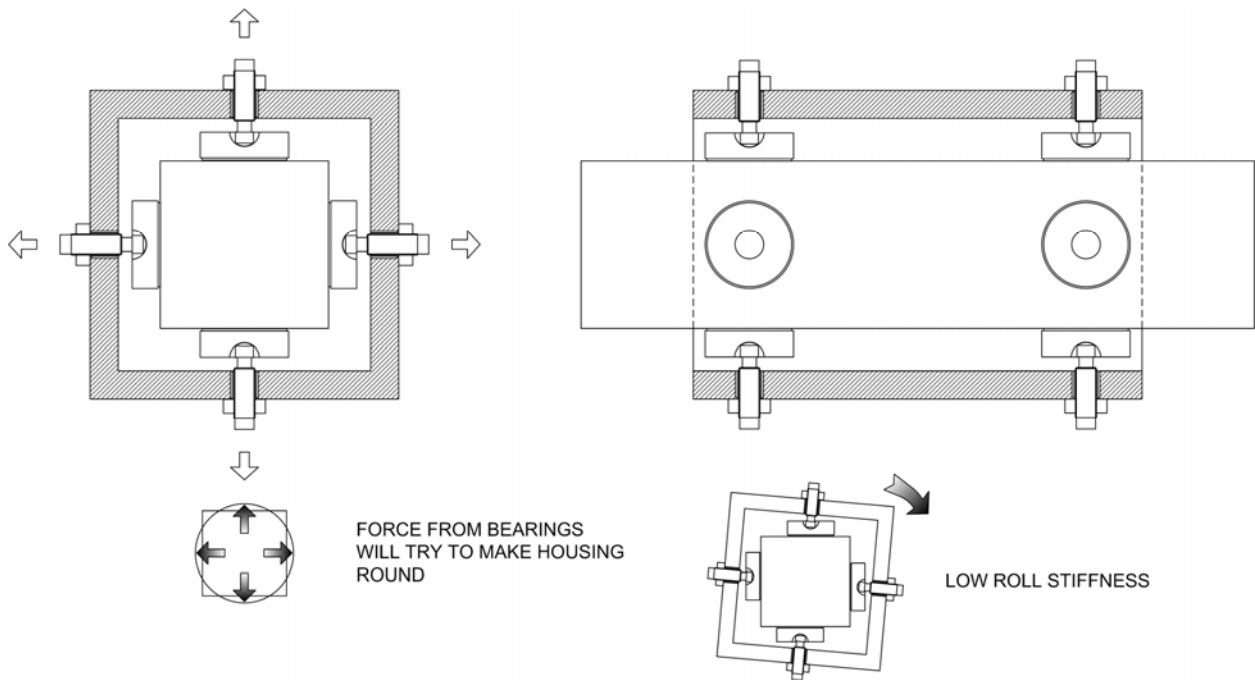
測ろうとするベアリングの背面に先端を当てられるインジケータとスタンドを選びます。インジケータは最低でも $1\mu\text{m}$ (50 マイクロインチ)の分解能を持つ必要があります。機械式インジケータはこの分解能でも容易に入手可能です。電子式インジケータは $0.1\mu\text{m}$ (5 マイクロインチ)の分解能を持つ製品が選択可能で、 $0.01\mu\text{m}$ (0.5 マイクロインチ)分解能の静電容量プローブも採用できます。機械式インジケータは浮上量のテストや予圧の調整にとても適しています。電子式インジケータは、高分解能で遠隔地からも読み取れるので好まれますが、必須ではありません。静電容量プローブは、エアベアリングを優れた選択肢とさせる非接触特性を動的調査するのでない限り、この種類のアプリケーションには過剰です。

4. 浮上量測定による調整:

予圧ベアリングを絞り込み、ベアリング背面のボールソケット端から約5mm の場所にインジケータの先端を当てます。エアを切り、インジケータをゼロに合わせます。そしてエア圧を加えてインジケータを読みます。次に、エアを切りインジケータがゼロに戻る事を確認します。もしもゼロに戻らない場合は、再現性が得られるまで手順を繰り返します。一般的ではありませんが、ボールスタッドをより強固にソケットに嵌合させるため、エアを切った状態でプリロードエアベアリングを強めに締め込む事により、より安定した再現性とシステム剛性のマージナルゲインを得られます。最終的に移動量測定値と設計時浮上量を比較して、適宜予圧ベアリングを調整します。

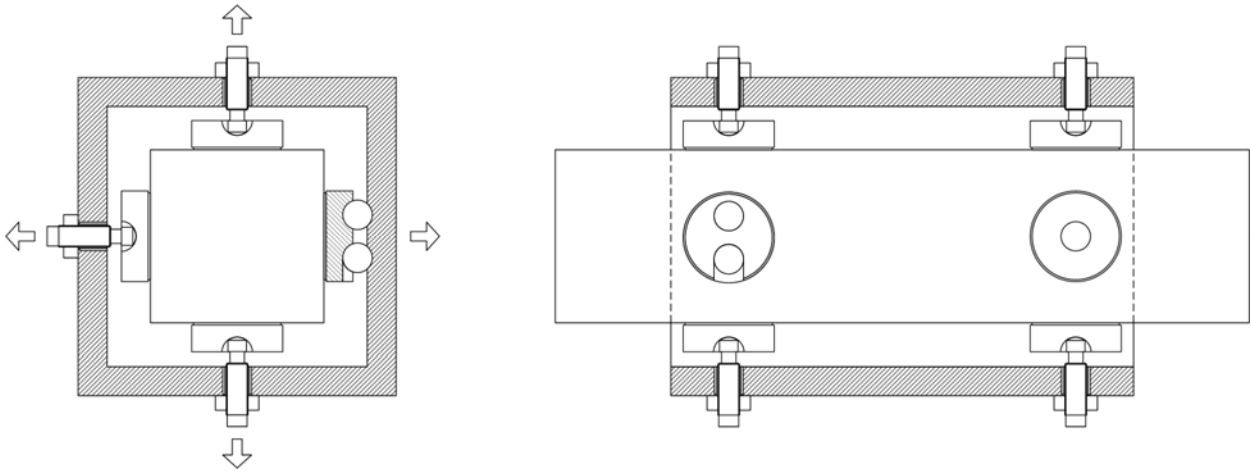
代表的配置

このページからは、フラットエアベアリングの代表的な配置例をあげて、その利点や欠点を交えながら説明します。

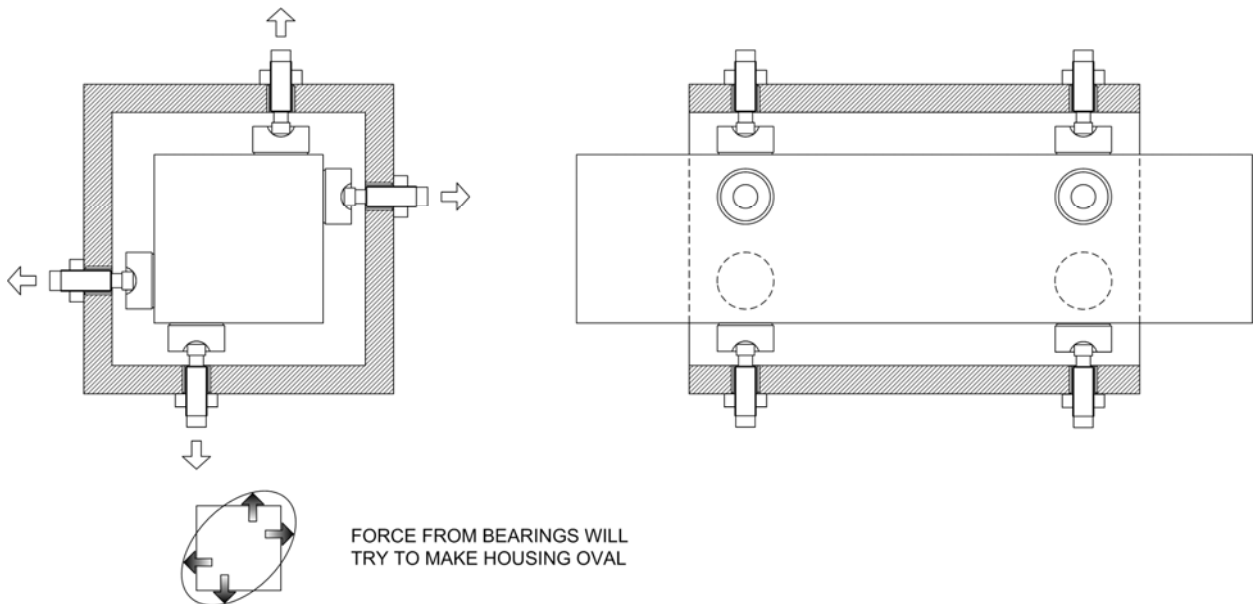


この設計はロール剛性に乏しいですが、アライメントやセットアップが容易です。

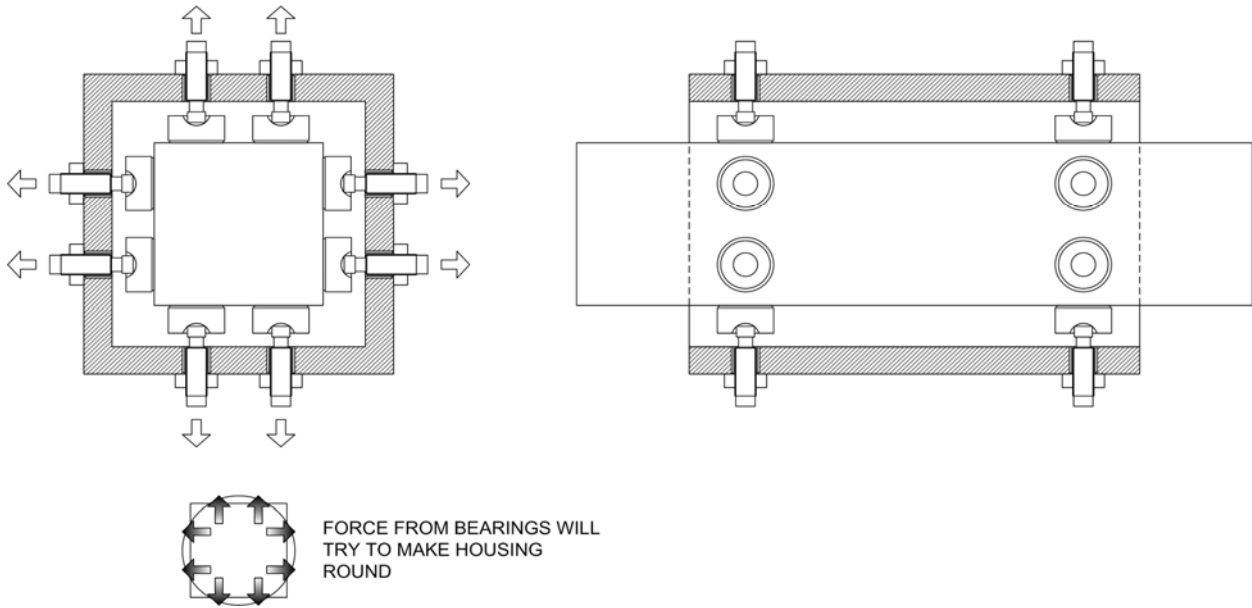
1ヶ所のベアリングを2個のボールで支持することで、ローリングを抑制する事ができます。ただし、剛性とロール負荷容量に変更は無く、1個のベアリングのピッチ剛性とロール負荷容量に制限されます。



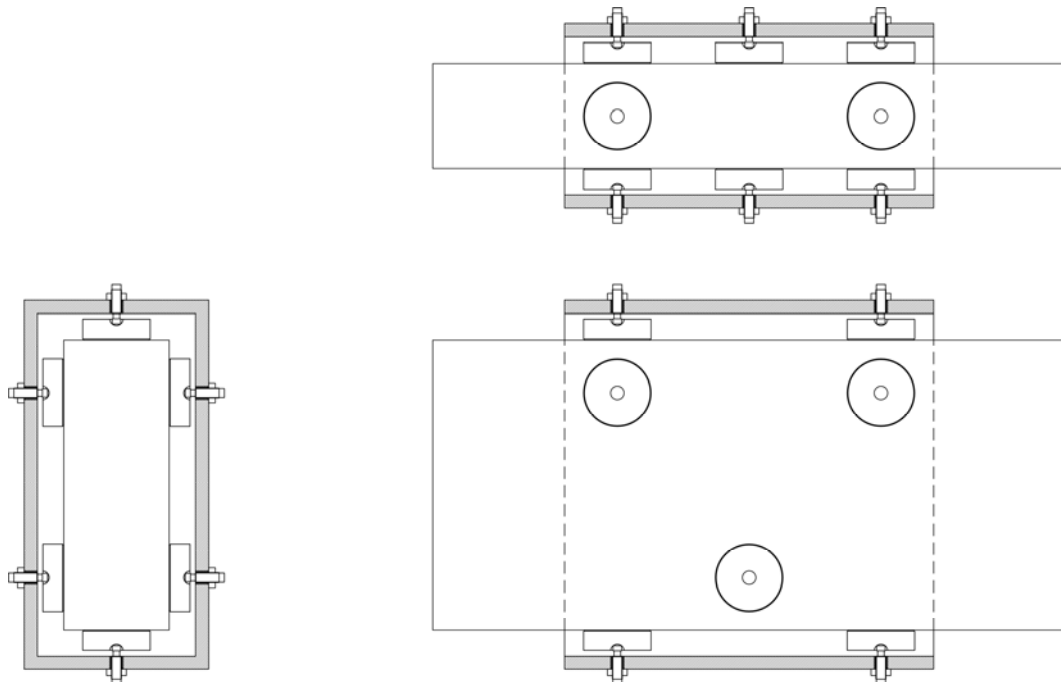
この設計は対向するベアリングが一直線上に位置していないので、ベアリング支持部が傾き難く、そのため高いロール剛性を得られます。



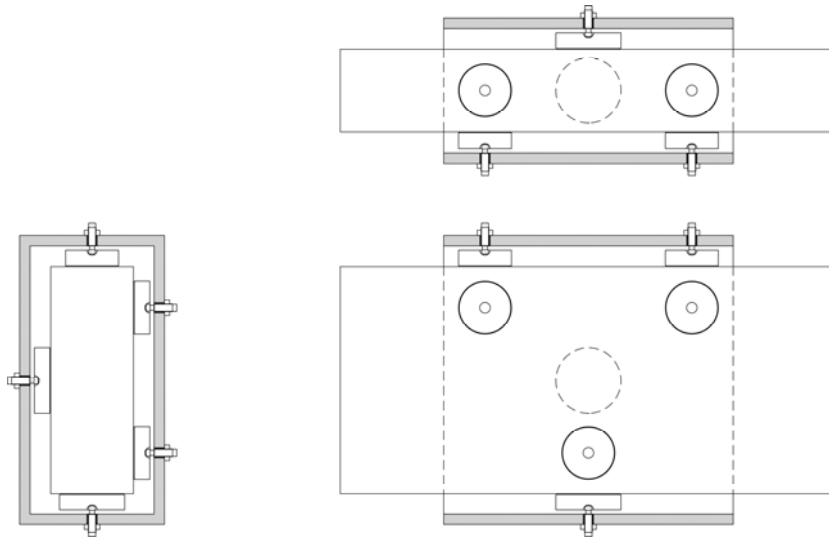
この設計は2倍のロール剛性とピッチ剛性を得られ、負荷容量も2倍となります。ただし、セットアップと調整の難易度が高くなります。また、ハウジングの剛性が相対的に高い場合は難易度が高くなり、ハウジングの剛性が低い場合は弾性変形することにより、難易度が下がる傾向があります。



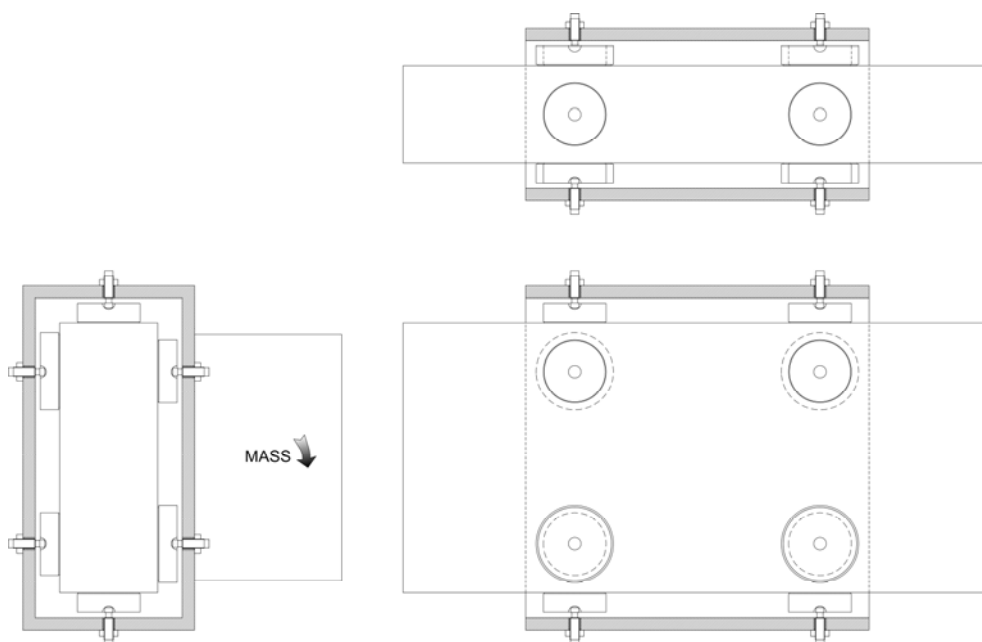
対向するベアリングが互いに直接予圧を掛け合う配置です。3組で平面（側面）を支持し、2組で真直ライン（上下面）を支持しています。このレイアウトでは 10 個のベアリングが使われています。



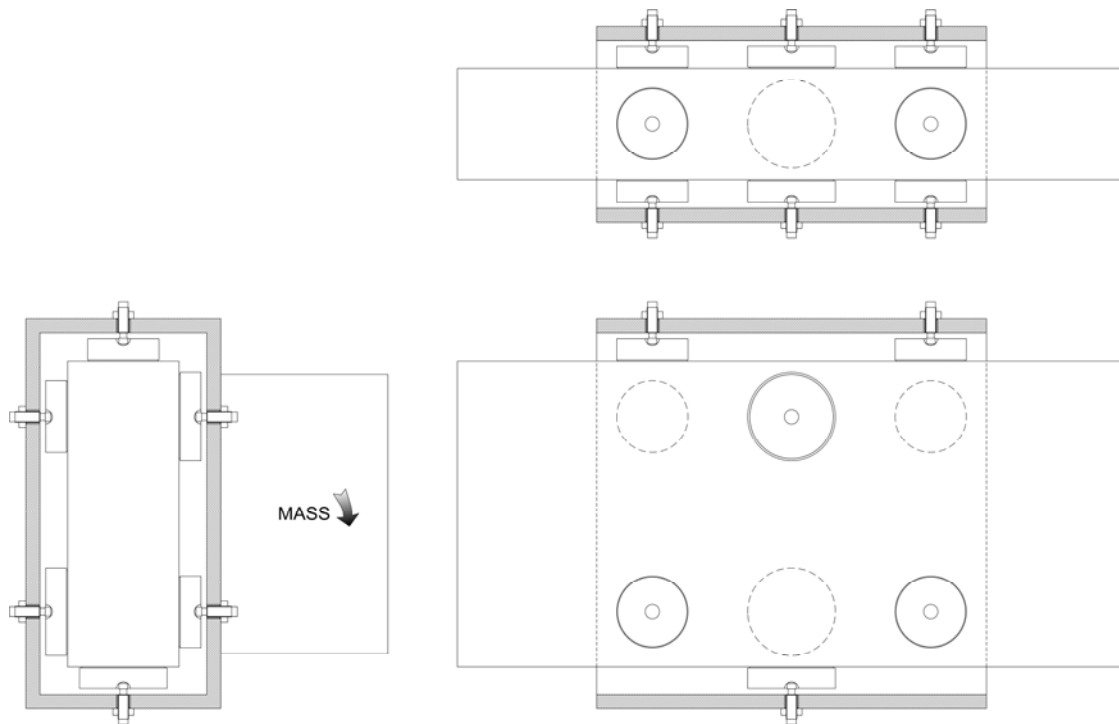
3個+1個のベアリングで平面(側面)を支持し、2組で真直ライン(上下面)を支持することで、アライメントがとても容易でベアリング個数も少なく、効率よく予圧をかけられる構成ですが、剛性は低くなります。このレイアウトでは7個のベアリングが使われています。



大きなオフセット荷重のかかるアプリケーションでは、荷重のかかるベアリングを大きくするか、ベアリングの数を増やします。ベアリングの数やサイズに大きな差を必要とするぐらいオフセット荷重が大きい場合、この質量無しではスライドを動かさない事に注意してください。

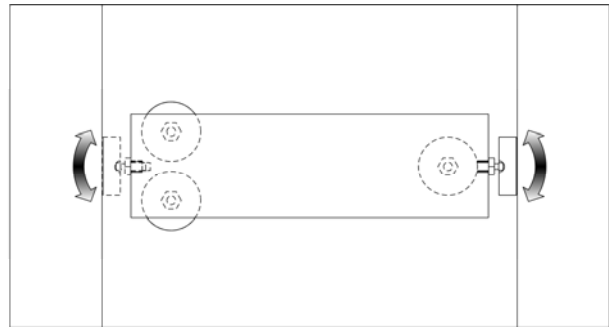


対向するベアリングのサイズを変えて、オフセット荷重を相殺。合計 12 個。

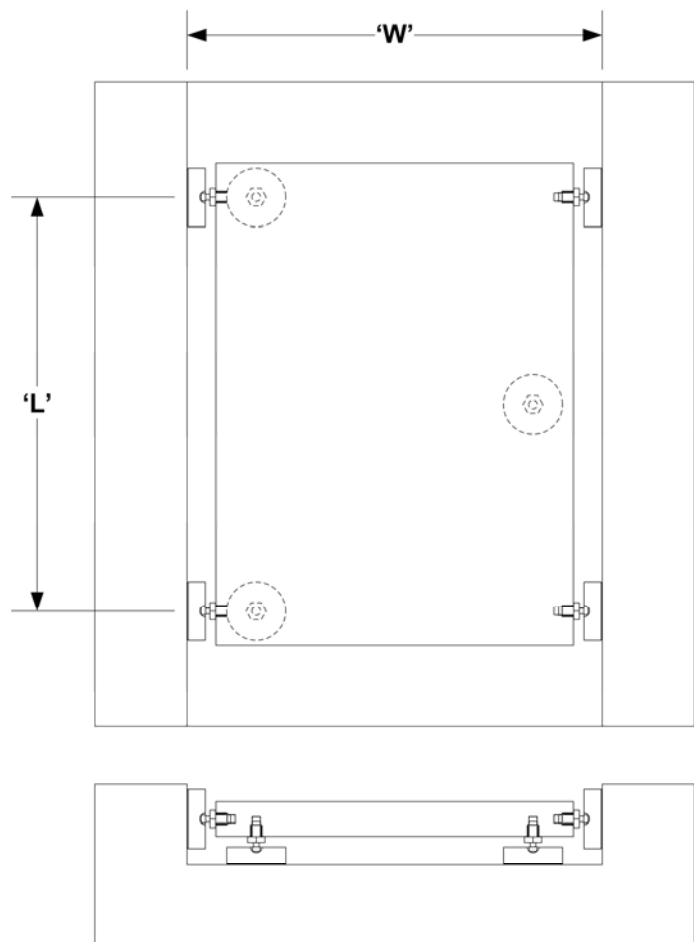


千鳥配置にして、対向面のベアリング数を変えてオフセット荷重を相殺。合計9個。

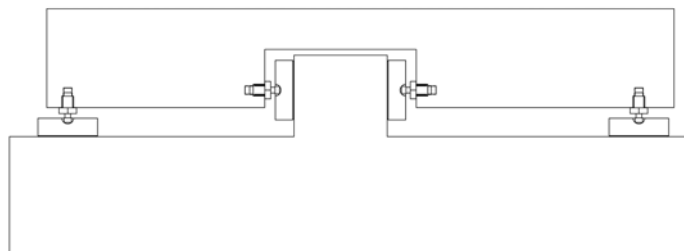
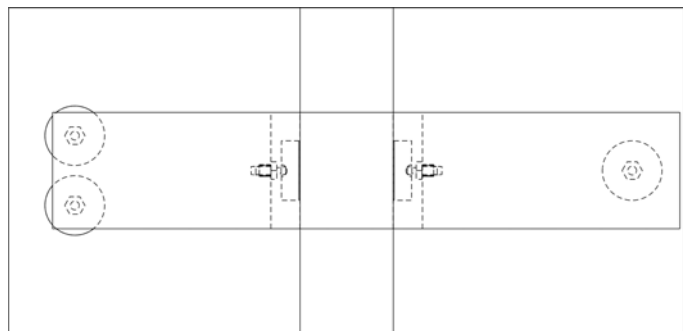
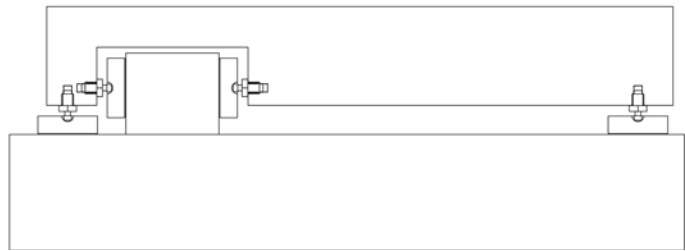
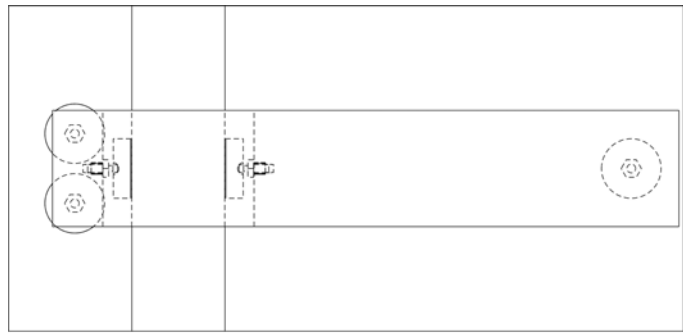
この設計例はとても不安定です。両サイド間の送り/遅れ誤差がヨーイングの原因になります。予圧をあげればヨーイングを生む力も大きくなります。この配置の両サイドにリニアモータとエンコーダを使用した高度な制御システムもありますが、しかし、この配置はお勧めできません。



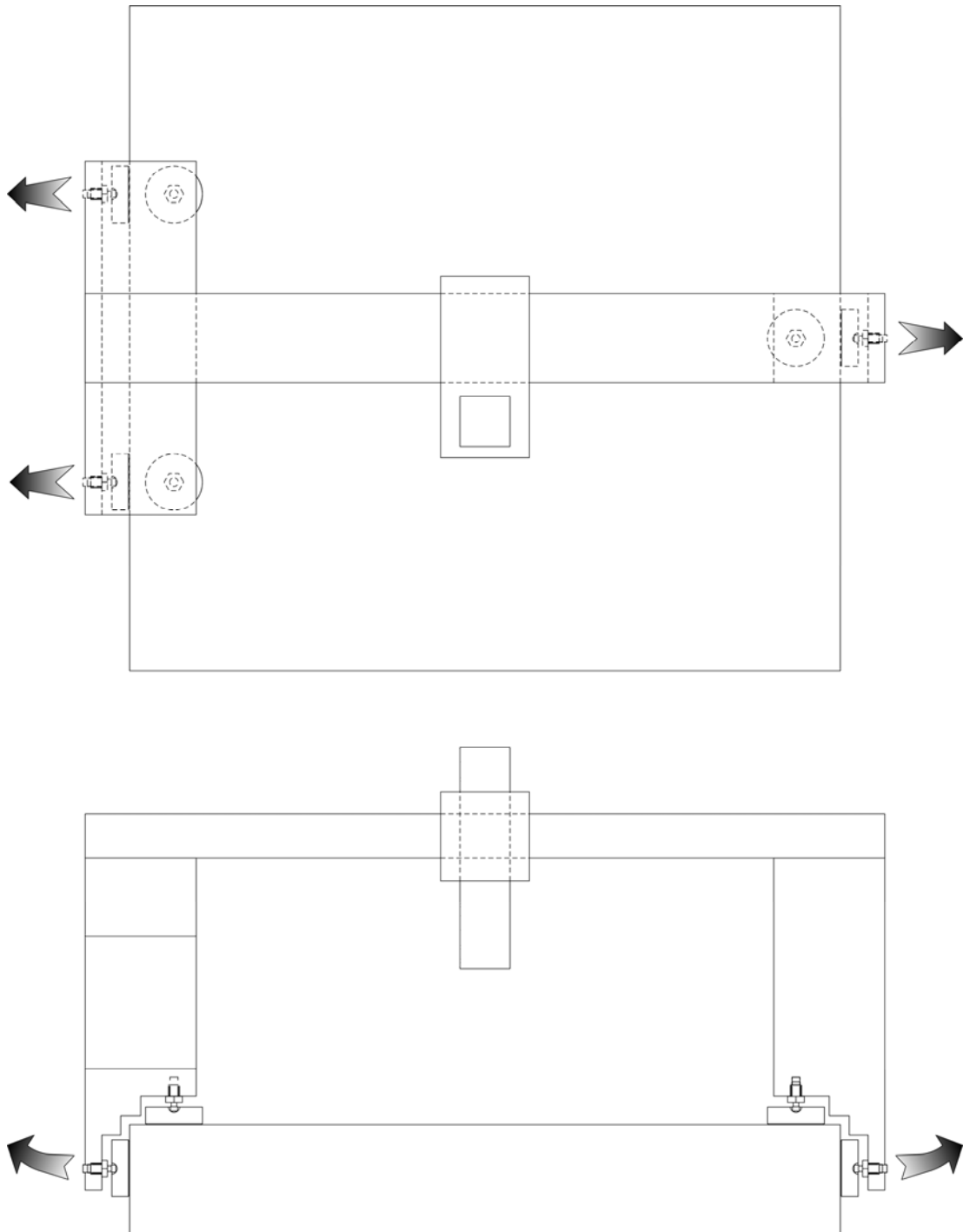
ベアリングを4つ使えば改善されますが、LがW以上でなければシステムは相対的に不安定です。



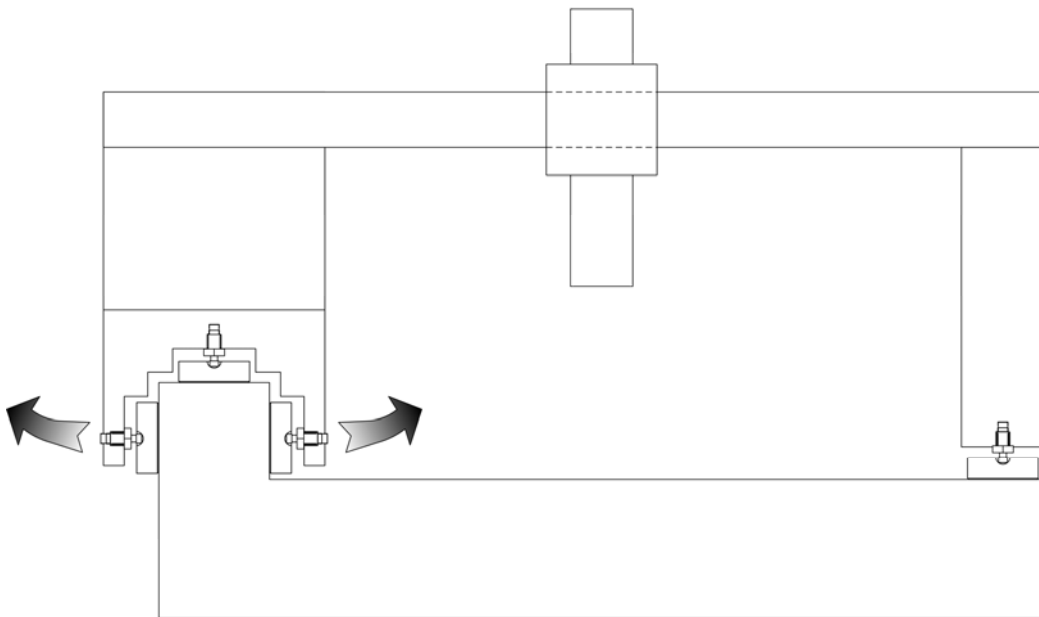
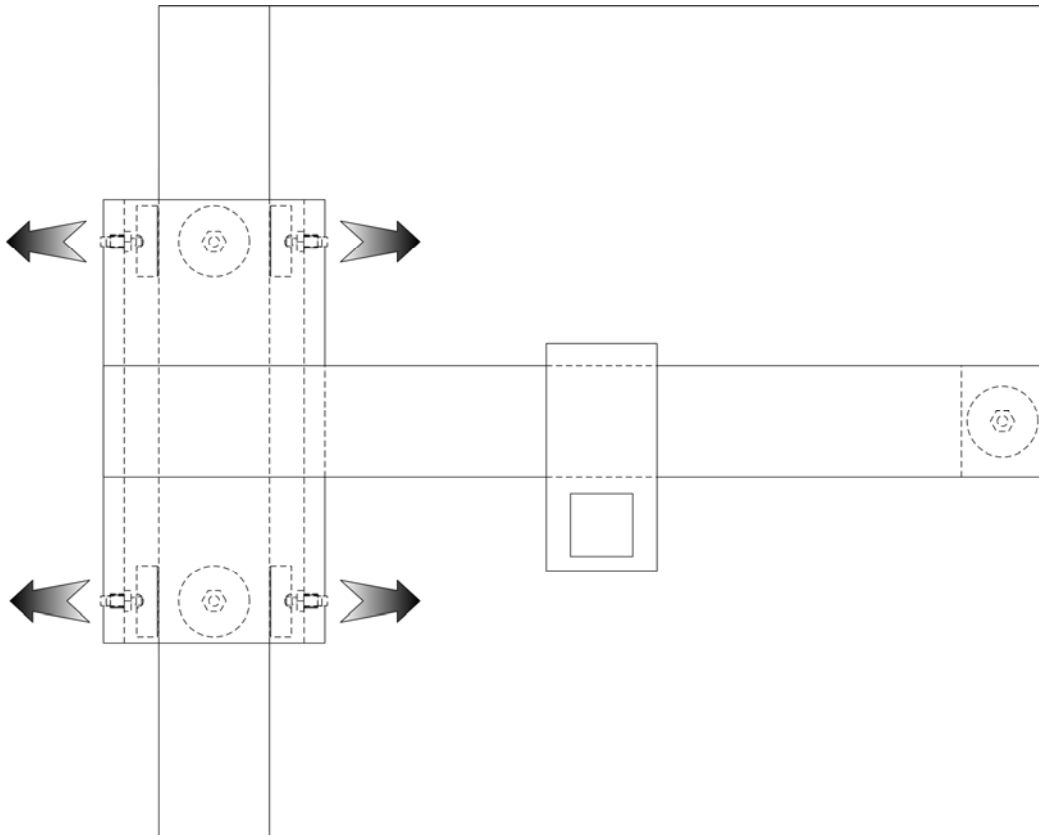
このガイド設計例は本質的に安定しており、2つのベアリングがガイドウェイを挟んで常に最短距離になるように働きます。予圧を増すほど、直交力も増します。



この設計例では、ガントリが弾性変形して広がってしまいます。

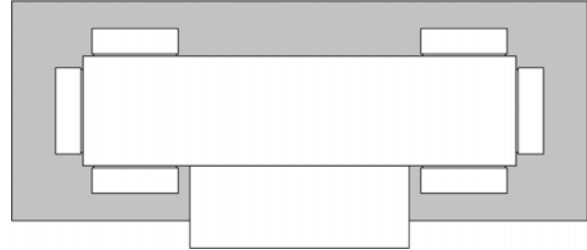


この設計ならば、ガントリの変形がかなり抑えられます。



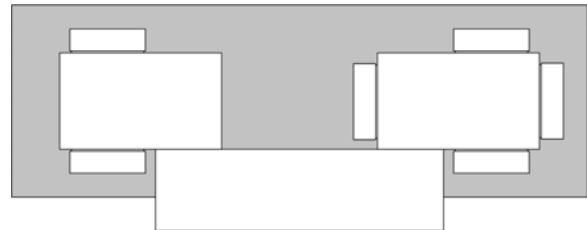
シングルレール 連続支持

- 利点：組み立て・アライメントが容易
 欠点：水平真直ラインを支持しているベアリング同士の距離が長くなる



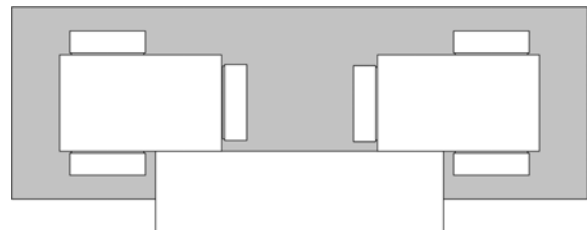
ダブルレール 連続支持 - シングルレールガイド

- 利点：水平真直ラインを支持するベアリングの距離が短くなる
 欠点：垂直真直ガイドのレベル調整が必要



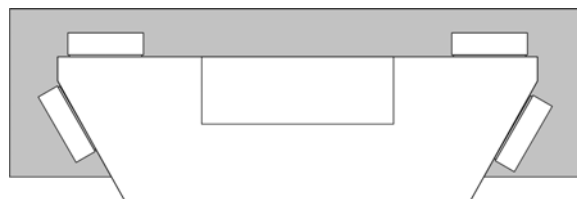
ダブルレール 内壁ガイド

- 利点：ガイドの中央に重心がくる
 欠点：2本のレールの平行出しが必要



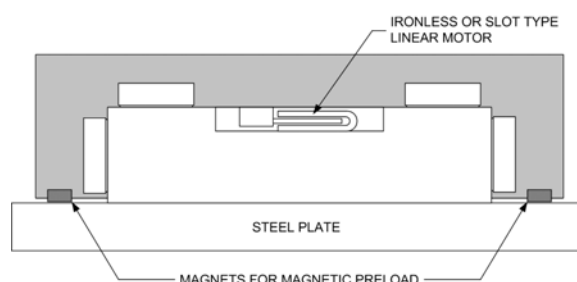
ドブテイル（あり継ぎ） 連続支持

- 利点：ベアリング数が少なくすむ
 欠点：シングルレール構成と同じ予圧を得るためには、下側ベアリングが相対的に大きくなければならない。ガイドバーの形状難易度が高い



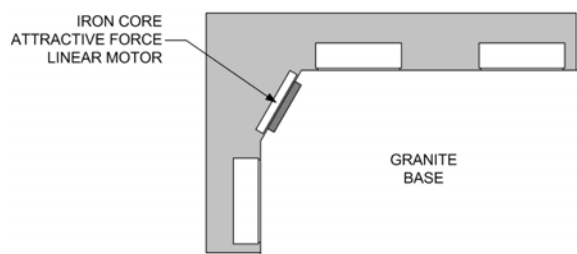
磁力予圧 1本ガイド

- 利点：サーフェスプレート上にマグネットをマウントする必要がない
 欠点：ガイドの素材が磁性と非磁性の2種類で構成される場合が多い



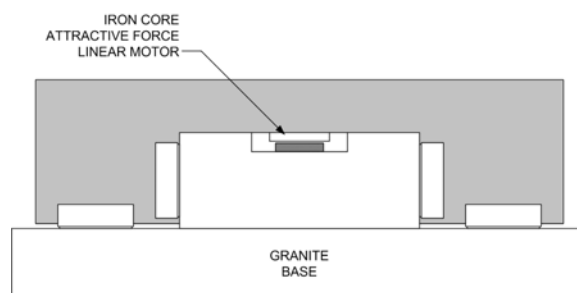
磁力予圧 Axtrusion ガイド

- 利点：精密ガイド平面が2面でよい。リニアモータの引き付け磁力が平行ベアリングと真直ベアリングの予圧になる
 欠点：ユーザライセンスが必要



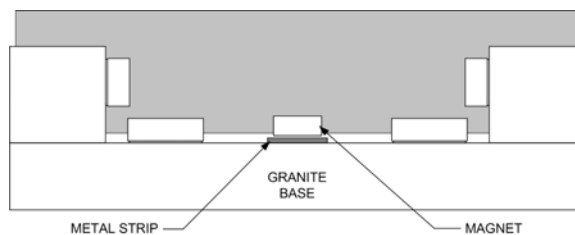
磁力予圧 1本ガイド

- 利点：負荷を支えるベアリングの間隔が離れている。磁力予圧用の金属帯が不要
 欠点：グラナイトベース上にマウントする必要あり。鉄コア付きモータを予圧用に使わなければならない、コギングを生じる



磁力予圧 内側ガイド

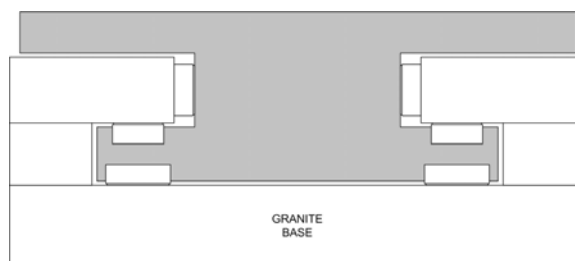
- 利点：負荷を支えるベアリングの間隔が広い
 欠点：垂直方向の位置調整が難しい。水平真直ラインを支持するベアリングの間隔が離れる



2本レール支持

内側ガイド

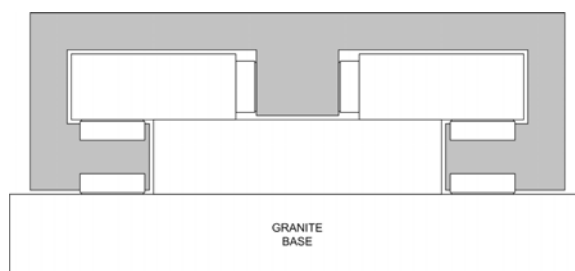
- 利点：垂直真直度はベースグラナイト次第
 欠点：水平真直ガイドレールの位置調整が必要。保持の歪みが大きい



2本レール支持

外側ガイド

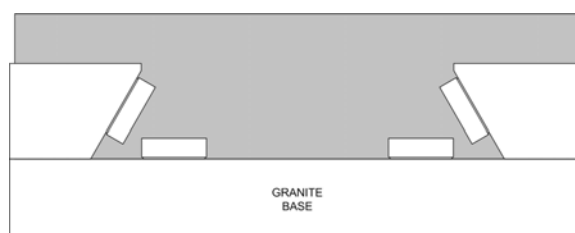
- 利点：垂直真直度はベースグラナイト次第。
 支持の歪みが少ない
 欠点：水平真直ガイドレールの位置調整が必要



2本レール支持

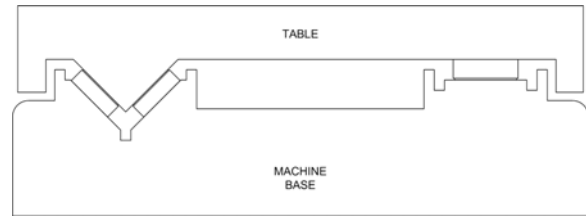
内側ダブルテイルガイド

- 利点：精密平面が少なくすむ。幅広ステージ向き
 欠点：位置調整の難易度が非常に高い。予圧容量が極小



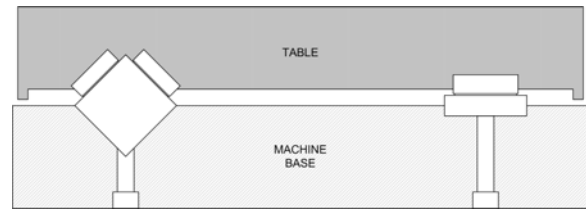
凹型V溝とフラット

- 利点：キネマティック デザイン
 欠点：重力予圧が必要。ガイドウェイがベースの一部になっている



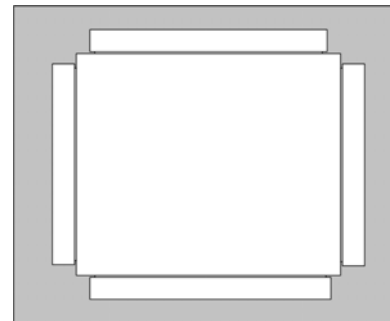
凸型V溝とフラット

- 利点：キネマティック デザイン。ガイド面
 が取り外し可能
 欠点：重力予圧が必要



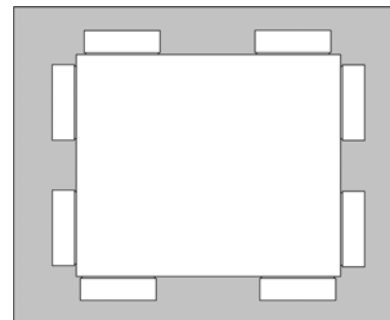
方形ガイド 全面ベアリング

- 利点：負荷容量が大きい
 欠点：ハウジングの歪み



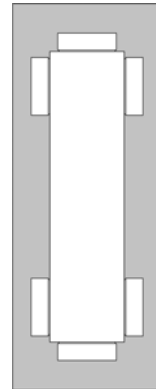
方形ガイド 分割ベアリング

- 利点：ロール容量が大きい
 欠点：ベアリング数が多く必要

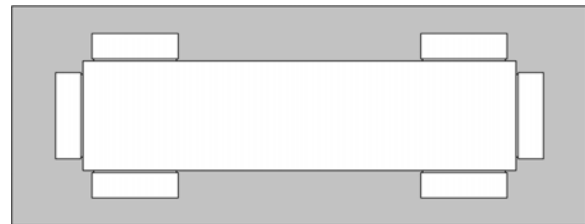


矩形ガイド

- 利点：ビーム(梁)の歪みが少ない
欠点：垂直方向にかさばる

シングルレール
端点支持

- 利点：組立と位置合わせが容易
欠点：水平真直ラインを支持するベアリング
が相対的に離れて配置



12. VPL (バキューム プリロード) エアベアリング

VPL エアベアリング技術

VPL (バキュームプリロード) は、ガイド面に対するベアリングの予圧を効果的に作る為にベアリング下に真空を作り、それと同時に、物理的に接触しないようにベアリング面へ圧縮空気を送るという基本原理に基づく技術です。このトリックは、エアベアリング面やベアリング面と同一平面にある未使用部分が、真空シールとして使えるという事です。加圧されたエアギャップが真空をシール出来るというのは直感的ではありませんが、しかし実際には極めて効果的に働きます。VPL が毎時5立方フィート(141.6 リットル)未満を消費する事、そのわずか半分が真空側へ流れる事を考慮すれば、より理解しやすいです。加えて、アクティブなエアベアリング領域を取り巻くエア圧の溝がシール領域と結合したとき、真空へのわずかな流れを劇的に減らせます。真空に引かれた時、予圧力は中央部で作られます。外部の大気はベアリングを効果的に押し潰し、真空ポケットの投影面積と圧力差の積に等しい予圧力を生みます。20[inchHg](-10psi)、完全真空の約 2/3 の真空を作るのは比較的容易です。大きな一体型、例えば 12 インチ角 VPL はたった1ポンド(0.45 kg)の有効荷重で、800 ポンド(363 kg)以上の予圧力を生み、その剛性は1インチ当たり 200 万ポンド(907,000 kg)超になります。VPL の利点は、ベアリングに追加質量無く予圧力を生む事です。このテクニックは、高加速ステージなど短い静定時間を必要とするアプリケーションに有利です。また、スタック式 X-Y ステージに比べて Abby エラーや公差が小さく高精度な垂直真直度を得られるシングルプレーン構造の X-Y ステージの製作に役立ちます。最後に VPL は、磁力予圧で求められるような金属製ガイド持たなくても、X 軸と Y 軸平面の全域で同時に予圧をかけられます。

一般的な VPL エアベアリングの設計では、エアベアリング領域は中央に、真空は周囲に持ちます。この配置の欠点は、まるで掃除機のようにベアリング周囲の環境から空気やゴミを引き込む事です。よりよい VPL 設計では、エアベアリング領域がベアリング周囲全体を取り囲み、ベアリング中央にある真空域を含めてシールを作ります (Figure 19)。エアベアリング領域を周囲に持つさらなる利点は、エアベアリングから周辺へ出て行く連続したエアの流れが、埃や汚染物質を積極的にベアリング面から取り除きます。

VPL ベアリングは、オリフィスと多孔質材技術のどちらを使っても設計できます。しかし多孔質材ベアリングはオリフィスに対して、意図せずエアが低下してもガイド面にダメージを与えないという重要な長所を持っています。多孔質材はそれ自身が平坦なベアリング面として振舞います。この理由により、多孔質 VPL はオリフィスよりも使いやすく強固です。

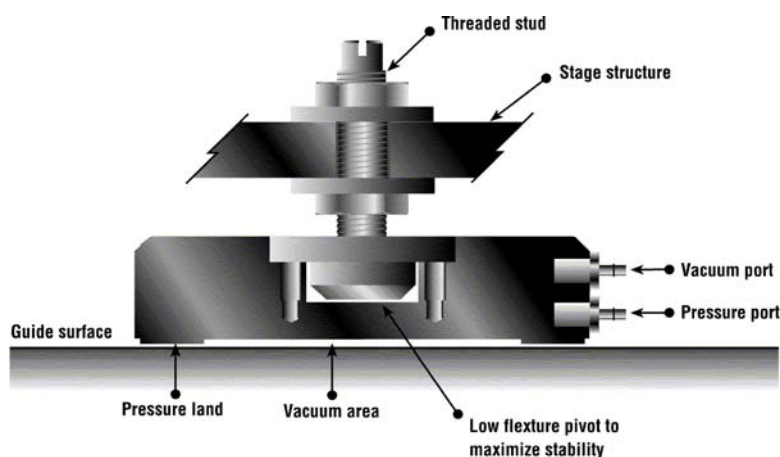


Figure 19 - Vacuum Preloaded Air Bearing

多孔質材 VPL は、標準モジュール製品のほかに、(例えば Z ステージなど)他製品内に組み込むカスタム設計品の供給にも対応します。標準 VPL モジュールは、摩擦やヒステリシス無しにベアリング面の自己位置合わせや高さ調整ができるフレクシャマウントで取り付けます。カスタム VPL も、New Way が特許を持つ手順で接着でき、高価な精密機械加工無しに精密ステージを作れます。この手法は、electroglas 社の 300mm ウェハプローバ XY ステージでとても有効に使われています (Figure 20)。大きな四角い VPL は、グラナイトベースの上で Z ステージを浮かす為にステージ下に採用されました。真空圧とエア圧を調整して、浮上量と剛性を厳密に最適化できます。エアフィルム厚が調整でき、20 ミクロンの範囲にわたってサブミクロン単位で垂直方向位置決めが可能ですので、フォーカシングやヨーイング補正などで威力を発揮します。

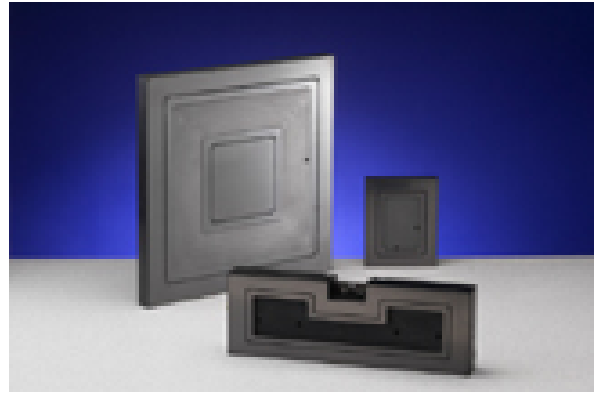


Figure 20 - Custom VPLs used on Electroglas' 300mm Wafer Prober

13. エアブッシュ

エアブッシュの組み付け

ご使用になる取り付け穴にバリや鋭利なエッジが無いか確認してください。O リングがエアブッシュのリング溝に正しく装着されているか確認してください。ブッシュをピローブロックに挿入する前に、O リングと取り付け穴に IPA(イソプロピルアルコール)を塗布すると組み付け易くなります。

ブッシュに 0.28~0.69 MPa のクリーン・ドライエアを供給してください。IPA を含ませた無塵布や清潔な布でシャフトを清浄し、ブッシュにエアを供給しながらシャフトを挿入してください。

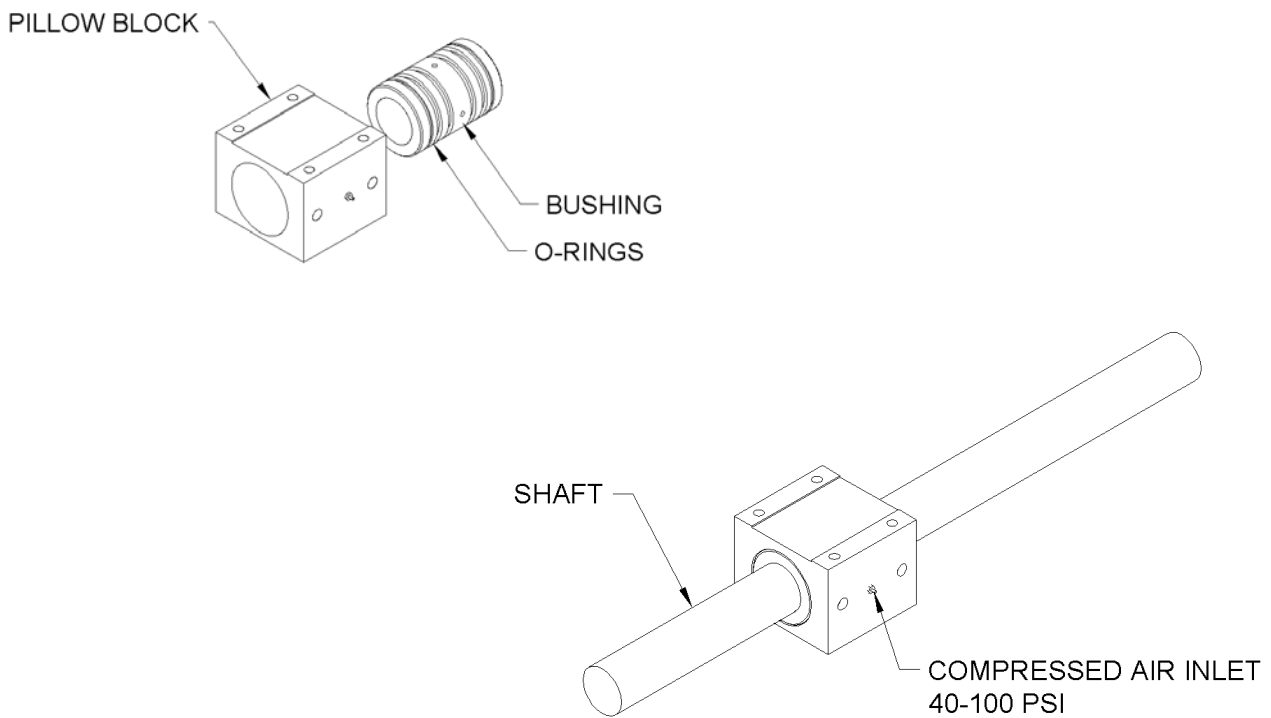


Figure 21 - Mounting Air Bushings

エアスライドの組み立て

エアブッシュの付いたシャフトをエンドマウントに軽く仮止めしてください。ゲージブロックを使ってシャフトの平行を調整・確認してください。

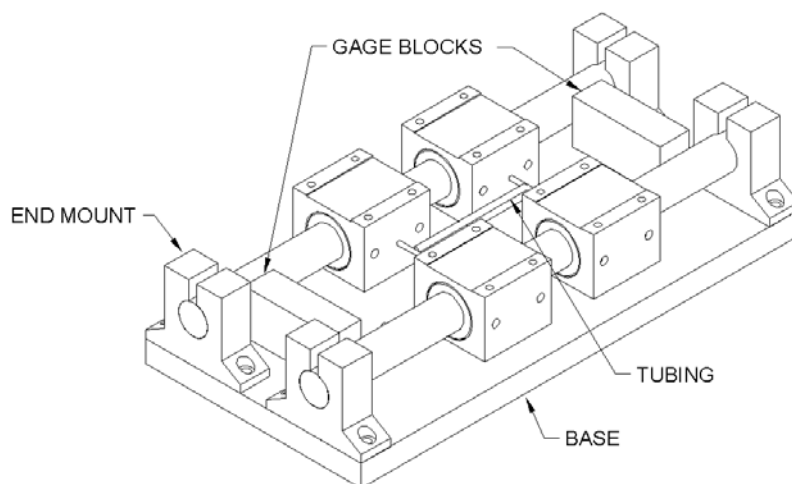


Figure 22 - Using Gauge Blocks to establish parallelism

エアを供給しながらトッププレートにピローブロックにボルト止めしてください。ストローク全体でステージが自由に移動するか確認してください。シャフト平行度のミスアライメントやトッププレートの平行度に関わらず、Oリングの弾性変形がアライメントを自動補正しますので、ストローク中の変位にも十分追従できるはずですが、これは組み立て手順の一例で、もちろん他にも色々な組み立て手順があります。

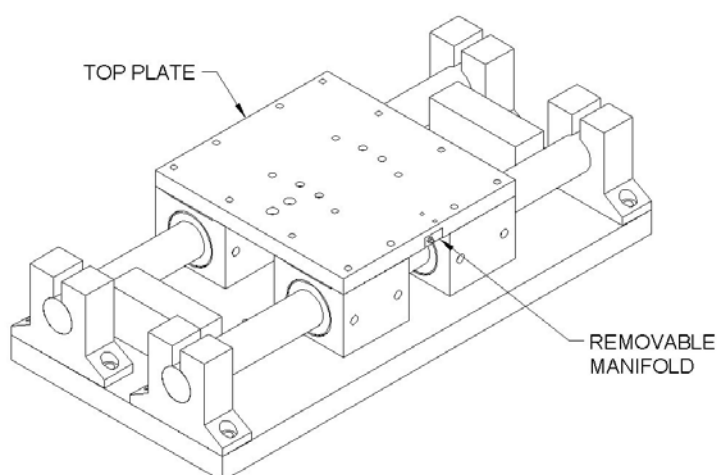


Figure 23 - Top Plate Attached

Oリングの弾性による変位が問題となる場合は、ブッシュをピローブロックに固定する事も可能です。エアブッシュ専用ピローブロックには、ブッシュ外形の軸方向に並んだ2組のOリングの位置に、180度対向する2箇所の穴があります。この穴の片方からエポキシを、もう片方へ出るまで注入します。注入穴と排出穴を塞いでエポキシを硬化させます。硬化したエポキシがOリングの変位を抑えます。これは高剛性が必要でかつシャフトが精密に調整された場合に効果的です。

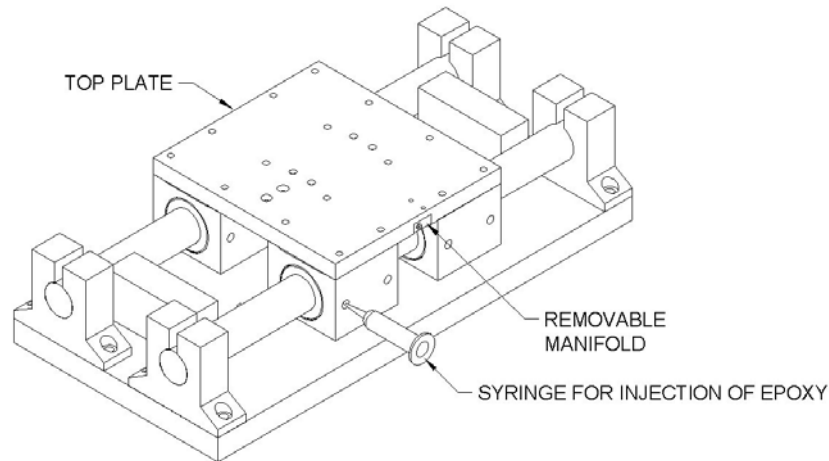
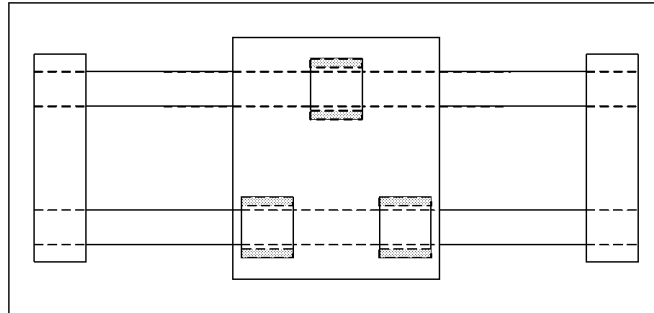
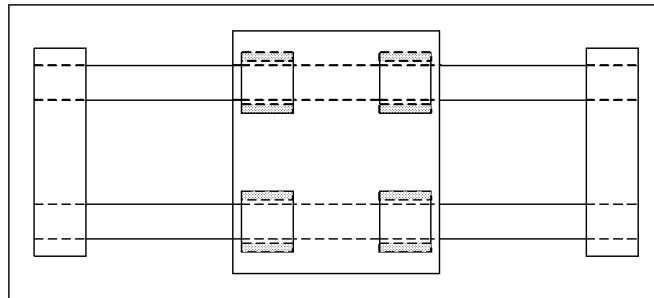


Figure 24 - Bonding the Air Bushings in place

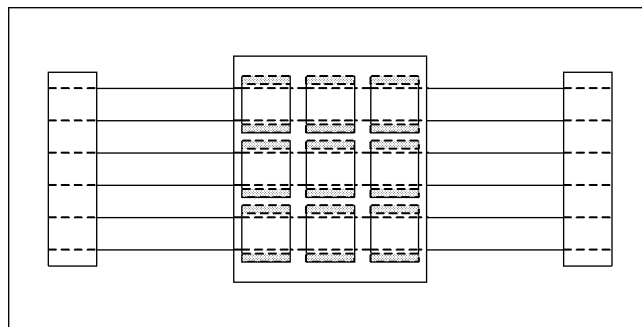
典型的な構成



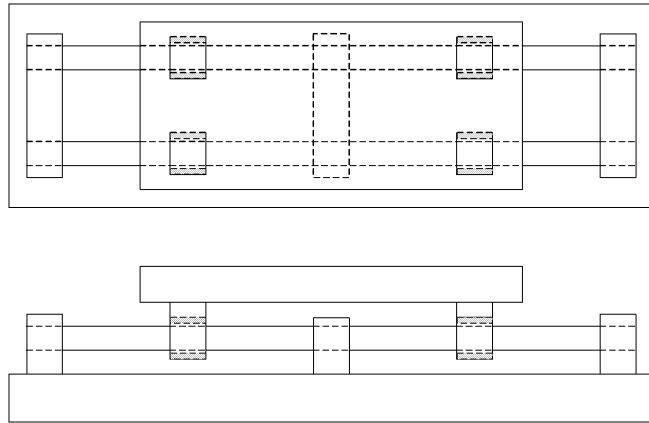
3つのエアブッシュがあれば、5方向の荷重を受けられます。



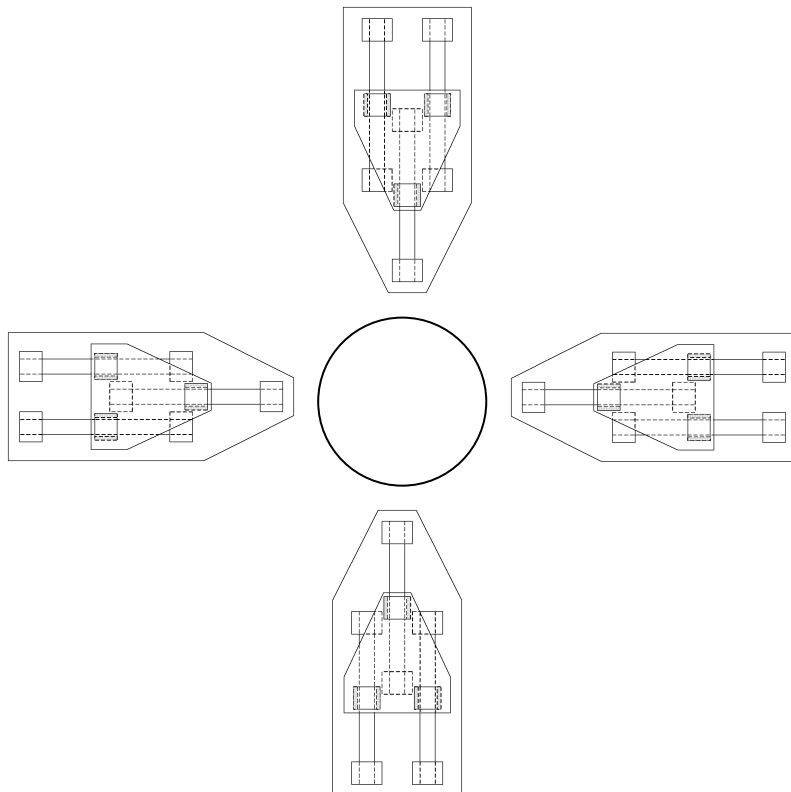
上図がリニアスライドを作る場合の最も典型的な構成です。



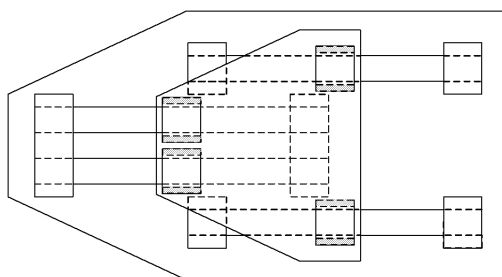
高耐荷重が必要であれば、上図のように複数のブッシュを使用する事ができます。.



ストロークの長いステージではシャフトのたわみが問題となります。シャフトがたわんでいる場合には、上図の方法で中央を支持してください。

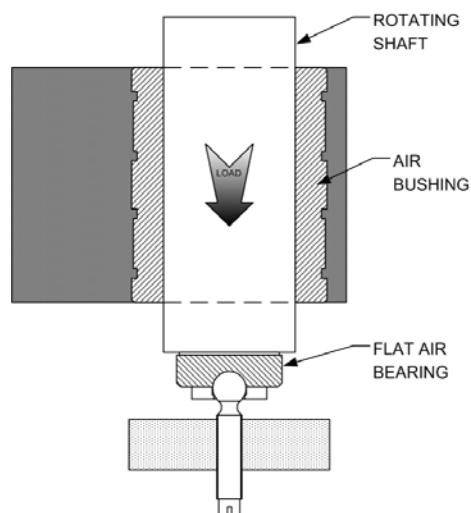
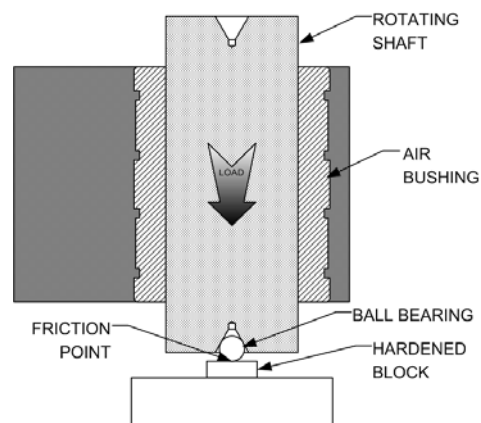


エアブッシュステージをロータリテーブルの周囲に並べた例です。

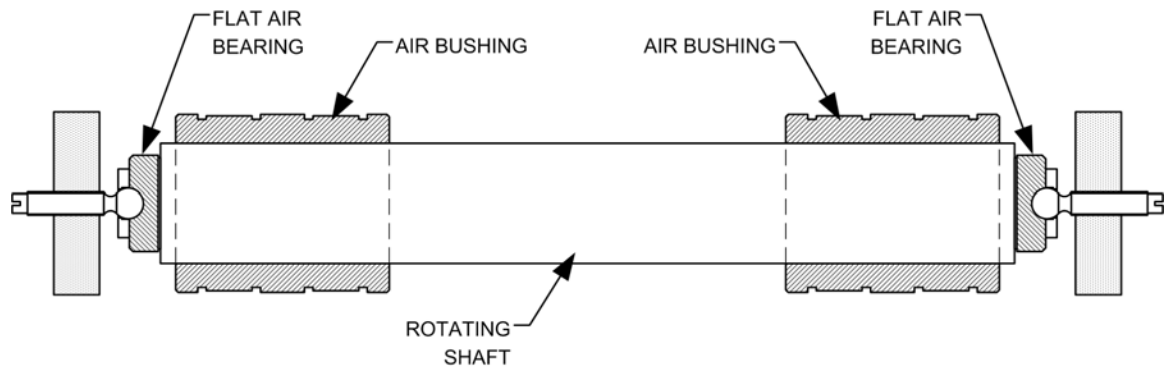


ブッシュを使うと、極めて高剛性かつ薄型のステージを作る事ができます。沢山のベアリングとシャフトを組み立てるのは困難ですが、複製技術によってこの問題を最小化できます。

これは回転シャフトが OD 研磨機で使われている例です。シャフト中央に精密な円錐があり、この円錐台座にはめ込まれたボールベアリングが、マイクロ鉄床のような硬質面に押し当てられて回転します。ここでクーロン摩擦が発生しますが、この摩擦は極めて微小です。



別の事例では、固定したエアベアリングで平坦なシャフト端を支える方法が、さらに望ましいかもしれません。



カウンターバランスや巻物送り用の「ゼロ摩擦プーリー」として一般的な、アプリケーション事例です。

14. ロータリテーブル

スピニングあるいはスピンドル加工部品は、極限まで動作誤差を減らす際に最も重要なコンポーネントです。超精密機械加工を推奨しますが、一般的にはラジアル面とスラスト面をワンチャックで加工する事で、旧来の精密旋盤と研磨で十分な成果が得られます。また New Way から超精密ダイヤモンド旋盤加工した製品をお客様に供給することも可能です。

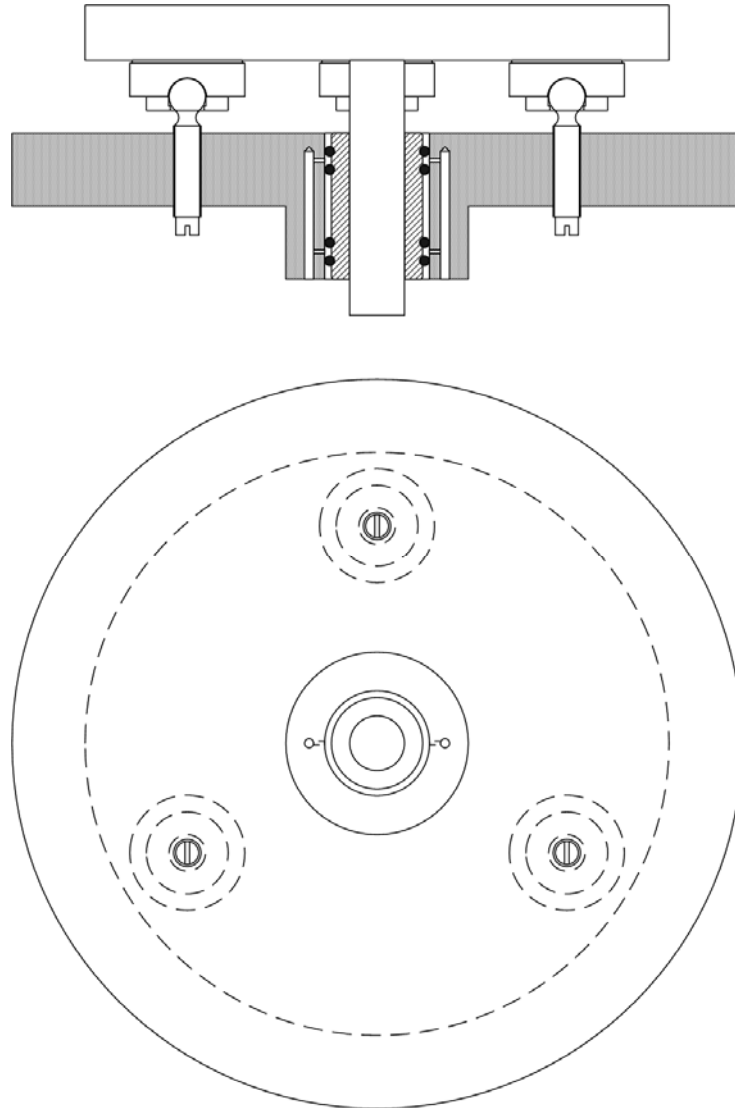


Figure 25 - Rotary Table

回転軸全体の高さや角度を調整するためには、プレート上の3つの円錐台座の代わりにボールスタッドを使います。ブッシュはOリングによってブッシュ自身を回転軸に位置あわせしますが、一度セットすれば、ラジアル剛性を増やす為にブッシュをエポキシで固めることも可能です。

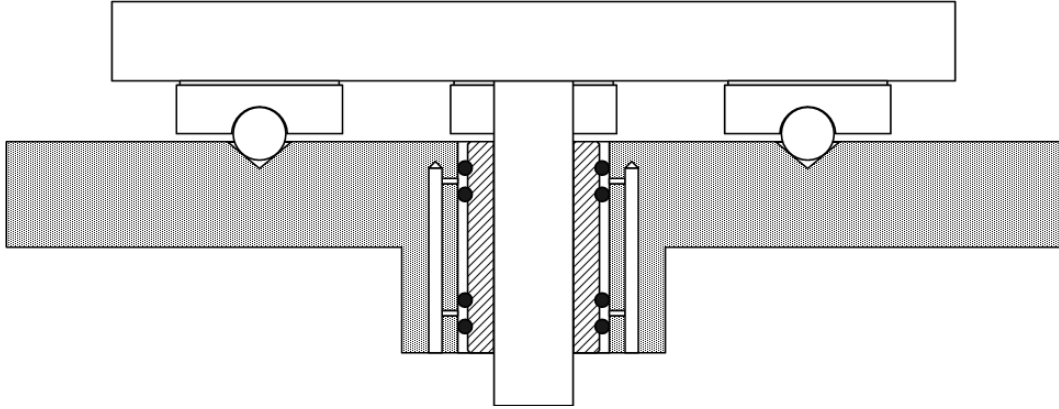


Figure 26 - Rotary Table Air Bearings

PART V: 追加情報

15. エア供給

エアベアリングは、大気という便利な再循環タンクをもった潤滑部品とみなせます。真空や超クリーン環境下の場合、VPL エアベアリングの多孔質領域とバキューム溝の組み合わせによって、真空やクリーン環境へのエアや粒子の漏れを防ぐことができます。

エアベアリングには粒子や水分・油分を含まないクラス4以上のクリーンエアを供給してください。クリーン度を規定してある ISO 空気品質クラスの表をご参照下さい。

	品質クラス	粒子の大きさ (μm)	水 Pressure Dew point > F (ppm. vol.) at 100psi g	油 (蒸気を含む mg/m^3)
	1	0.1	-94 (0.3)	0.01
	2	1	-40 (16)	0.1
推奨	3	5	-4 (128)	1.0
最低仕様	4	15	+37.4 (940)	5
	5	40	+44.6 (1240)	25
	6	-	+50 (1500)	-

ベアリングのタイプによって、それぞれ違う種類の不純物に敏感なことにご注意下さい。例えば、多孔質ベアリングはテフロンテープや封入材、疲労したエアチューブから剥離した内壁のような粒子には敏感ではありません。実際、多孔質材の粒子が多孔質ベアリングのエア供給口に直接入ったとしても大きな影響はありませんが、これはオリフィスベアリングや自成絞りベアリングにとっては致命的です。油分が混入した場合は、多孔質ベアリングよりもオリフィスベアリングの方がより簡単に洗浄できます。水分混入に関しては、通常はクリーン・ドライエアが供給されるはずですので、コンポーネントは酸化を想定していません。

16. 流量測定

空気は圧縮性の流体です。大気圧で1立方フィート(28.3 L)の空気を 60psi(413 kPa)、つまり大気圧の約4倍にまで圧縮したとき、体積は 1/2 立方フィート未満になります。この非線形性により、ベンチュリ式流量計 (Visi-float) を加圧エアに応用するには圧力に応じた補正が必要になることがあります。NL/min 用の目盛りが表面にあります。出口側が大気圧という設定のものがあります。マスフローメータは例外で、実際には分子数を数えているので補正の必要はありません。ただし従来の流量計の約 10 倍高価です。流量計は、読みが落ち着くまでしばらくかかります。



Figure 28 - Mass Flow Meter



Figure 27 - Visi-float flow meter

エアベアリングアプリケーションでは、流量計はエア供給源からエアベアリングへの経路の途中に採用されるので、ゲージから排出されるエア圧は周辺気圧の約4~6倍になります。この場合、流量は CFHG (Cubic feet per hour gauge) で測定されます。

17. 流量

$$Q_2 = Q_1 * \text{SQRT} (P_2/P_1)$$

Q_1 = Observed flow meter reading (CFHG)

Q_2 = Actual flow corrected for pressure (SCFH)

P_1 = Standard atmospheric pressure, 14.7 PSI

P_2 = Actual pressure, 14.7 PSI + pressure in PSI inside flow meter.

CFHG = Cubic Feet per Hour Gage

SCFH = Standard Cubic Feet per Hour

SCFM = Standard Cubic Feet per Minute

@60 PSI multiply CFHG by 2.25 to get SCFH

@80 PSI multiply CFHG by 2.53 to get SCFH

@120 PSI multiply CFHG by 3.027 to get SCFH

18. 配管

複数のベアリングへのエア配管は比較的単純です。供給ラインは連続にでも個別にでも可能です。最も一般的には、各軸にマニホールドを設けて、その軸の個別のベアリングに連続配管します。マニホールドには太いチューブを使い、個別のベアリングへの分岐には細いチューブを使います。

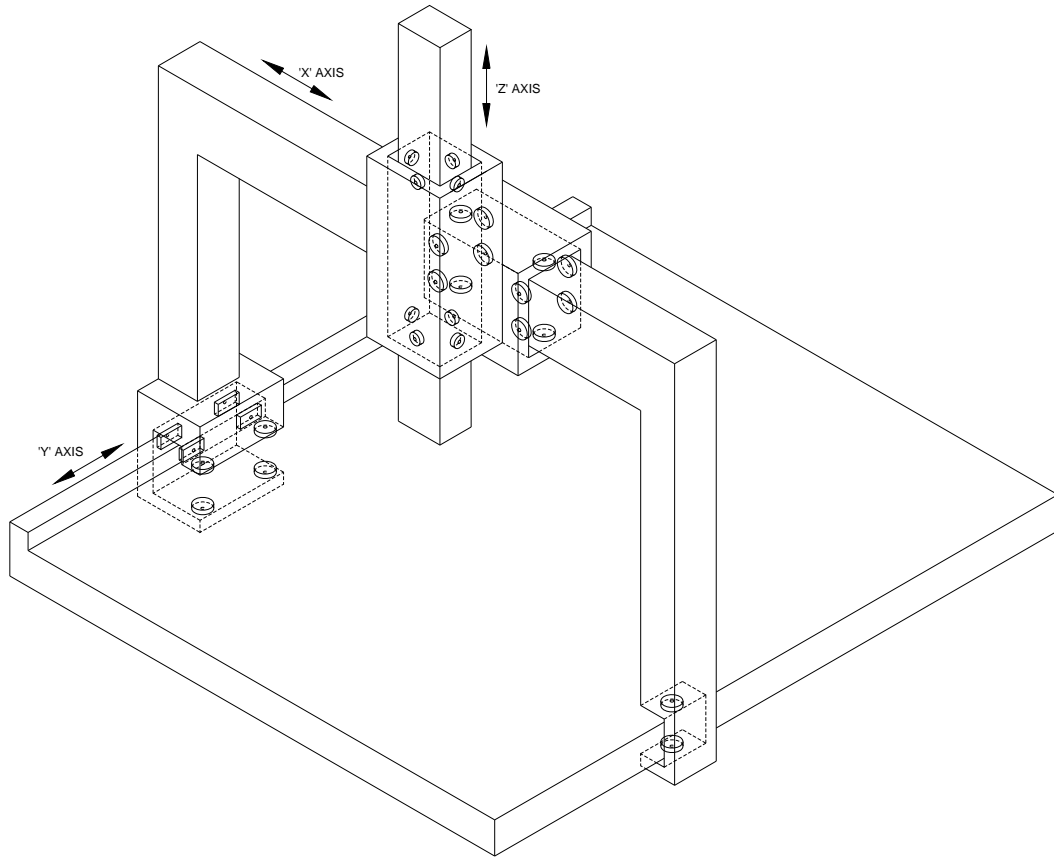


Figure 29 - Typical bearing layout for a CMM

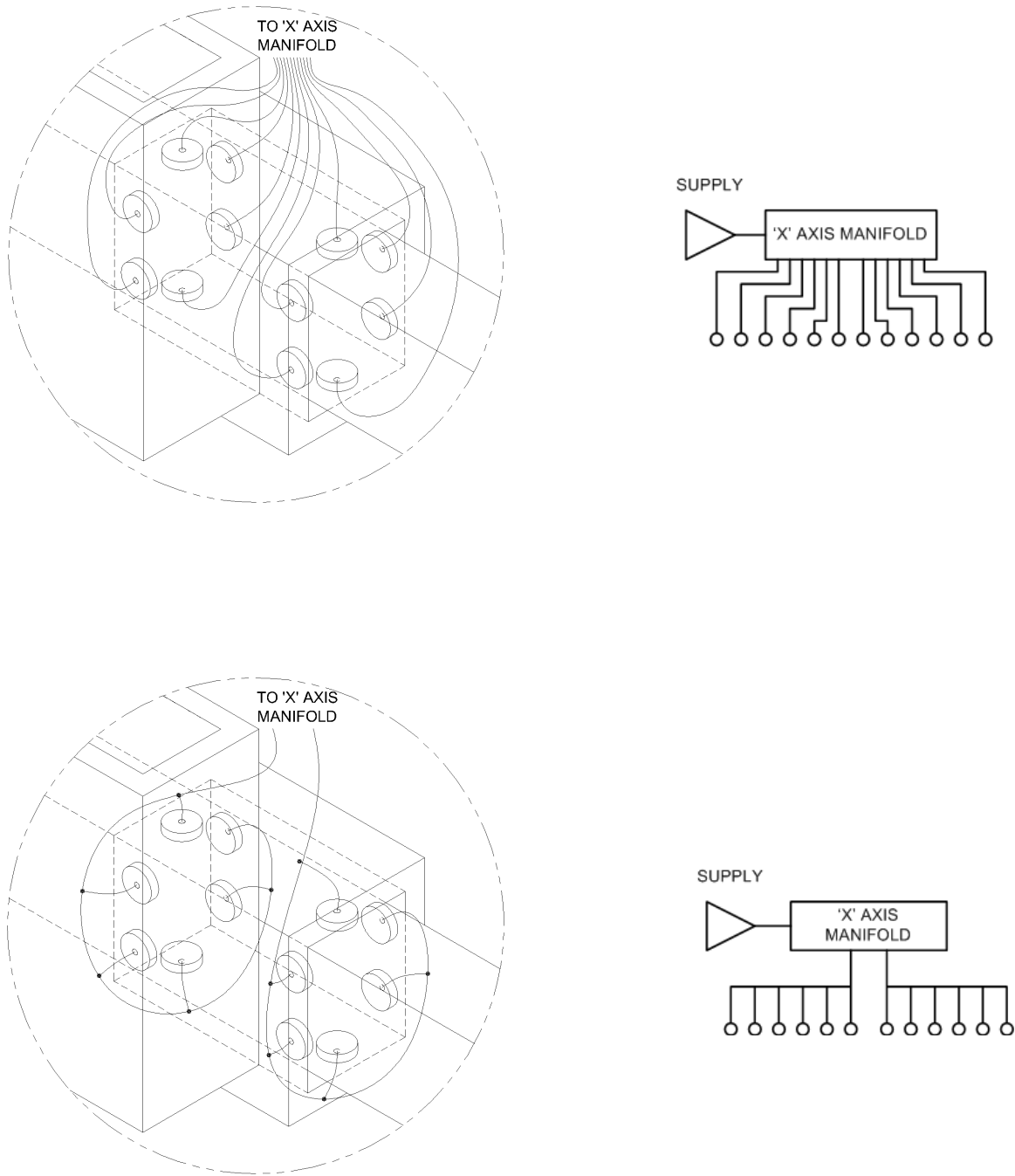


Figure 30 - Options for connecting air supply to air bearings

19. ベアリングギャップを通るエア流量

ベアリングギャップを通りぬけるエアの流量は、ギャップに対して極めて敏感です。事実、それはギャップの3次関数です。直径2インチのベアリングに 75 ポンドの負荷をかけた例では、200 マイクロインチ浮上する時に4SCFH を消費します(直径 51mm のベアリングに負荷 34kg をかけて 5.1 μ m 浮上させれば、113 リットル/時を消費する)。このベアリングで同じ負荷を 400 マイクロインチ浮上させるには、64 SCFH(1810 リットル/時)のエアが必要です。小さなギャップが制限を高く保ち、それゆえに流量と出力の要求を減少させている事は、容易に理解できます。流量が少なければ、エアの圧縮や清浄・乾燥に必要な所有コスト問題も減少します。

興味深いのは、多孔質エアベアリングとオリフィスエアベアリングのピッチモーメント剛性を比較する時に、それぞれの形式がどのように特徴づけられるかです。オリフィスベアリングは、ベアリング面から吹き出る流れに依存しています。例えば、ギャップ内での角度変化です。ギャップの片方が大きくなってもう片方が小さくなった時に、直ちにその圧力を失う流れができそうな場所で、不安定な状態が作られます。抵抗の最も大きい(ギャップが小さい)場所から抵抗の小さい(ギャップが大きい)経路に沿った流れです。それとは対照的に多孔質ベアリングは、ギャップの小さな場所で発生した圧力を持ち続けます。よって多孔質ベアリングは高いチルトモーメント容量と剛性を得るのです。

20. エア源要求

エア品質

エアベアリングに供給される圧縮エアは、清潔かつ乾燥していなければなりません。エアベアリング能力と寿命は、圧縮エアの品質に大きく依存します。粒子は New Way® 多孔質エアベアリングの性能や寿命に悪影響を及ぼしませんが、油や水は影響します。確実にベアリングの性能と寿命を保証するには、下記の最低減の評価基準を満たすことをお勧めします。

ISO 8573.1 Quality Classes

品質クラス	埃の大きさ (μ m)	水 Pressure Dew Point ° F @ 100 PSIG	油 (蒸気を含む mg/m ³)
1	0.1	-94	0.01
2	1	-40	0.1
推奨 >	3	-4	1.0
最低仕様 >	4	+37	5
5	40	+45	25
6	-	+50	-

エアベアリング用圧縮エアのフィルタと乾燥

汎用フィルタは、粒子が下流へ流れて Coalescing フィルタにダメージを与えないように、その大部分を除去する為に使われます。Coalescing フィルタは、油や水分、汎用フィルタを通り抜けた全ての粒子を除去する為に使われます。ドライヤは、水蒸気が凝縮する前にそれを除去します。

コンポーネント	埃の大きさ μm	水蒸気 Dew Point ° F @ 100 PSIG	油と水 mg/m
汎用フィルタ	25	N/A	N/A
Coalescing フィルタ	0.1	N/A	0.5
乾燥剤式ドライヤ	N/A	-40	N/A

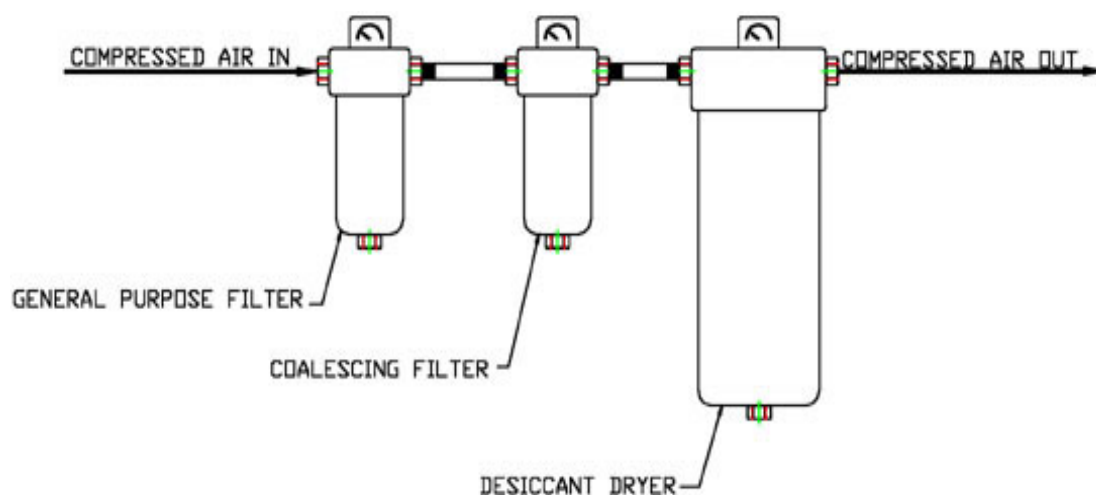


Figure 31 - Filtering and Drying Compressed Air

流量換算式

<u>1 Cu. Ft. / Hr.</u>		<u>1 Cu. Ft. / Min.</u>	
.0166	Cu. Ft. / Min.	60	Cu Ft. / Hr.
.4719	LPM	28.316	LPM
28.316	LPH	1699	LPH
471.947	CC / Min.	28317	CC / Min.
28317	CC / Hr.	1,699,011	CC / Hr.
.1247	Gal. / Min.	7.481	Gal. / Min.
7.481	Gal. / Hr.	448.831	Gal./ Hr.
<u>1 CC / Min.</u>		<u>1 CC / Hr.</u>	
60	CC / Hr.	.0167	CC / Min.
.000035	Cu. Ft. / Min.	.0000005	Cu. Ft. / Min.
.0021	Cu. Ft. / Hr.	.00003	Cu. Ft. / Hr.
.001	LPM	.000017	LPM
.06	LPH	.001	LPH
.00026	Gal. / Min	.000004	Gal. / Min.
.0159	Gal. / Hr.	.00026	Gal. / Hr.
<u>1 LPM.</u>		<u>1 LPH.</u>	
60	LPH	.0166	LPM
.035	Cu. Ft. / Min.	.00059	Cu. Ft. / Min.
2.1189	Cu. Ft. / Hr.	.035	Cu. Ft. / Hr.
1000	CC / Min.	16.667	CC / Min.
60,002	CC / Hr.	1000	CC / Hr.
.264	Gal. / Min.	.004	Gal. / Min.
15.851	Gal. / Hr.	.264	Gal. / Hr.
<u>1 Gal. / Min.</u>		<u>1 Gal. / Hr.</u>	
0	Gal. / Hr.	.0167	Gal. / Min.
.1337	Cu. Ft. / Min.	.002	Cu. Ft./Min.
8.021	Cu. Ft. / Hr.	.1337	Cu. Ft. / Hr.
3.785	LPM	.063	LPM
227.118	LPH	3.785	LPH
3,785.415	CC / Min.	63.069	CC / Min.
227,125	CC / Hr.	3785	CC / Hr.

New Way Precision

50 McDonald Blvd.
Aston, PA 19014

(610) 494 6700

www.newwayprecision.com

Copyright © 2003 by New Way Precision

All rights reserved.

■内容は予告無く変更することがあります。

福田交易株式会社

本社	〒104-0044	東京都中央区明石町 11-2	TEL03-5565-6811	FAX03-5565-6816
大阪営業所	〒540-0012	大阪府大阪市中央区谷町 4-3-1	TEL06-6941-8421	FAX06-6944-0241
名古屋営業所	〒460-0013	愛知県名古屋市中区上前津 2-14-17	TEL052-322-6421	FAX052-322-2384
広島営業所	〒733-0842	広島県広島市西区井口 5-20-7	TEL082-277-6341	FAX082-277-8199
厚木営業所	〒243-0024	神奈川県厚木市長沼 245-7	TEL046-227-5011	FAX046-228-6612
北陸営業所	〒921-8005	石川県金沢市間明町 1-198	TEL076-292-2811	FAX076-292-2510
九州出張所	〒816-0981	福岡県大野城市若草 3-5-6	TEL092-595-4590	FAX092-595-4591

お問い合わせは
精機技術課へ

TEL 03 (5565) 6838
FAX 03 (5565) 6839