

球面軸受・球継手の衝撃緩衝設計

その他（別言語等） のタイトル	Shock Absorbing Design of Spherical Bearings and Ball Joints
著者	風間 俊治, 藤原 満, 平田 瑞恵
雑誌名	設計工学
巻	37
号	12
ページ	649-654
発行年	2002-12-05
URL	http://hdl.handle.net/10258/949

球面軸受・球継手の衝撃緩衝設計*

Shock Absorbing Design of Spherical Bearings and Ball Joints

風間 俊治*¹ 藤原 満*¹ 平田 瑞恵*²
 (Toshiharu KAZAMA) (Mitsuru FUJIWARA) (Mizue HIRATA)

Shock absorbing characteristics of spherical liquid bearings/ball joints were examined experimentally. The experimental apparatus consisted of the test bearing, its mount, a hummer and a base. Piston assemblies of hydraulic piston pumps were utilized as the test bearings. The spheres of the bearings were made of bearing steel, brass, ceramics and nylons, while the nominal diameters were equal to 8, 10, 13 and 16 mm. Mineral oils with the viscosity grades of ISO VG 32, 68, 100 and 150 were used. Using a specific screw, the recess was formed in the piston. The impacting load was acted by the hummer with an acceleration sensor. The shock absorption was evaluated by the maxima of the acceleration measured. As the elastic moduli of the spheres decreased or as the volume of the recess increased, the acceleration reduced. When miniature bladders were contained in the recess, the acceleration became small. A design concept of the bearings/joints with highly buffering function was presented.

Keywords: spherical bearings, ball joints, design, tribology, shock absorption, buffer, recess, bulk modulus

1. はじめに

球面軸受や球継手（以下、軸受）^{1),2)}は、アキシアル荷重とラジアル荷重を小さなスペースで同時に支持できること、自己調心作用を有すること、可動範囲が広いことなどの特長を持つ。これらの特長を生かして、液体の介在するタイプを例に採れば、機械要素分野では、ピストンポンプ・モータのピストン端部³⁾などに用いられており、医療工学分野では、人工股関節⁴⁾などにその機構を見ることができ

これらの軸受には、静的荷重や緩慢な動的荷重のみならず、衝撃的な荷重も作用する。いずれの荷重に対しても、しゅう動面の損傷や部材の破壊などを回避して良好な潤滑状態を維持することで、軸受の高い信頼性や永い寿命は達成される。したがって、特に小型化を念頭に置けば、直接その軸受部に効果的な緩衝要素を付与することで、機能の拡充を図ることが可能となる。

液体軸受に関する研究は、一般に、定常状態における、あるいは周期的変動荷重（静的平衡点周りの微小振動）に基づく非定常状態における摩擦特性の把握や安定性の向上など^{1),5)}に重点が置かれている。一方で、液体膜を介した2物体の接近・衝突問題^{6),7)}に関しては、EHL（弾性流体潤滑）理論⁸⁾を適用した研究がある。最近では、人の歩行をシミュレートした人工関節に関する数値解析結果⁹⁾なども発表されてきた。しかしながら、衝撃力を受ける軸受の設計法に関して、その緩衝作用に焦点を絞った研究は十分でないと思われる。

本研究では、ポケット（凹面状の窪み/液溜）を有する球面軸受に、衝撃荷重が作用した場合の緩衝能力を、寸法、材質、液体物性などをパラメータとして、実験的に評価する。そこで得られた結果に基づき、効果的な緩衝機能をもつ軸受の一設計法を提示する。

2. 実験装置および方法

本研究では、図1に示す実験装置を試作した。図1aは装置全体の、図1bは供試軸受部の模式図である。

本装置は、供試球面軸受（球、ピストン、マウン

* 原稿受付 2002年3月13日
 *1 正会員 室蘭工業大学工学部機械システム工学科
 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)
 *2 室蘭工業大学工学部機械システム工学科
 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

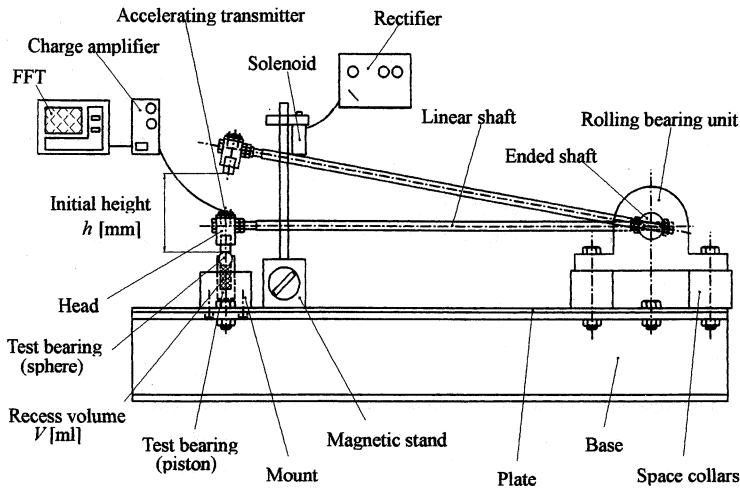


Fig.1a Experimental apparatus

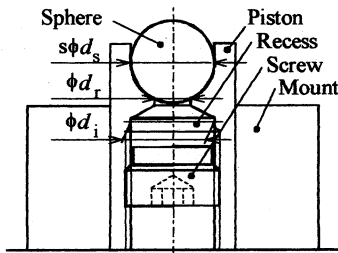


Fig.1b Test bearings

落下システム（電磁ホルダ、整流器、マグネットスタンド）および計測システム（加速度変換器、チャージアンプ、FFT レコーダ）で構成した。

実験緒言を表 1a~1d にまとめる。供試球面軸受は、4 種類の材質（セラミックス、軸受鋼、黄銅、ナイロン）および 4 種類の直径（呼び： $s\phi 8$, $s\phi 10$, $s\phi 13$, $s\phi 16$ ）で製作された計 16 種類の球と、球面座として各径に対応するピストンポンプ用ピストンを組合せた [表 1a, 1b. ただし、 E は弾性係数（参考値）]。供試液体には、粘度の異なる 4 種類の油圧作動油（ISO VG32, 68, 100, 150）を用いた [表 1c. ただし、 ν は動粘度（40, 100 °C のカタログ値より換算）]。

中空ピストンの内部にめねじ加工を施し、先端部を凸状に加工したねじを装着して、ポケットを形成させた（図 1b）。ポケット容積 V （表 1d）は、任意の位置にねじを設定した上で、液体を注入して測定した。なお、このねじを取り外し、ポケットを形成させない場合（ $V=0$ ml と表記）にも、球面座には供試液体を塗布した。

Table 1a Materials of spheres

	Materials	E [GPa]
Ceramics	Al_2O_3	360
Steel	SUJ	200
Brass	C2700	108
Nylons	Nylon-66	< 1

Table 1b Dimensions of test bearings

	$s\phi d_s$ [mm]	ϕd_r [mm]	ϕd_i [mm]
$s\phi 8$	7.9	5.0	5.0
$s\phi 10$	9.5	6.5	6.5
$s\phi 13$	13	9.4	11
$s\phi 16$	16	9.9	14

Table 1c Kinematic viscosity ν of test lubricants

	ν [mm ² /s] at 20±4 °C
VG32	66 ~ 52
VG68	155 ~ 118
VG100	252 ~ 189
VG150	396 ~ 291

Table 1d Volume V of recesses

	V [ml]
$\phi 8$	0, 0.16, 0.25
$\phi 10$	0, 0.19, 0.59
$\phi 13$	0, 0.46, 2.1
$\phi 16$	0, 1.2, 1.8, 3.2

実験は以下の手順で行った。ピストンにねじを装着し、ポケット容積 V を設定する。ピストンをマウントで支持し、ポケット部に供試液体をゆっくりと注入する。ピストン上部の球面座に球を静かに置き、ハンマ（腕の長さ：500 mm）を電磁ホルダ（最大吸着力：28 N）で保持する。一定時間経過後、電磁ホルダ用整流器の電源を切断し、ハンマを自由落下させて、球部に衝撃力を与える。ヘッドに取付けられた加速度変換器（測定範囲：最大 1000G、応答周波数：1~10 kHz）の出力を、チャージアンプ（周波数特性：1~50 kHz で ± 1 db）を介して、FFT レコーダ（周波数特性：最高 200 kHz）に取込む。なお、衝突面は、ヘッドに埋め込まれた転がり軸受用円筒ころ（直径：12 mm）の端面であり、落下高さ h は 10 mm で一定とした。また、実験中の供試液体の温度は、室温(20 ± 4 °C)とした。

ハンマは球に衝突後、複数回のリバウンドを繰り返した。そこで、衝突直後に記録された加速度（最大値）を用いて、各実験条件に対する相対的な衝撃緩衝能力を評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 ポケットの容積と球の弾性係数の影響

図 2 は、衝撃力を与えて測定された加速度（以下、重力加速度で除して Γ で記す）に及ぼすポケット容積 V の影響を示す。図中のプロットは、同一条件で連続 10 回の実験を 3 回繰返して得られたデータの平均値である。その平均値に対する標準偏差は、図 2 に示す軸受鋼の場合で最大 5 % であり、再現性を確認した。

いずれの球寸法においても、 V が零のときに Γ は最も大きく、ポケットを設ける ($V > 0$ ml) と Γ は減少した。本実験では、 $\phi 13$ 軸受で Γ は最も小さくなった。ただし、これは球面座の形状差によるものと考えられる（実機ポンプのピストンを活用したため、球面座形状は相似ではなかった）。

図 3 には、球材料の影響を示す。 Γ は、セラミックス、軸受鋼、黄銅、ナイロンの順に小さくなった。

いずれの材料においても、 V が零のときに Γ は最も大きかった。セラミックス、軸受鋼、黄銅では、 V を 0 ml から 1.2 ml としたときに、 Γ は急激に小さくなった。さらに V を大きくしても、 Γ はほとんど変化しなかった。対照的に、ナイロンでは、 V が 0 ml から 1.8 ml にかけて Γ はほぼ一定であり、1.8 ml から 3.2 ml にかけて Γ は減少した。この理由は、ナイロンの弾性係数が他の材料の値よりも 2 桁程度小さいために、球部の弾性変形により衝撃エネルギーが吸収されたものと判断できる。

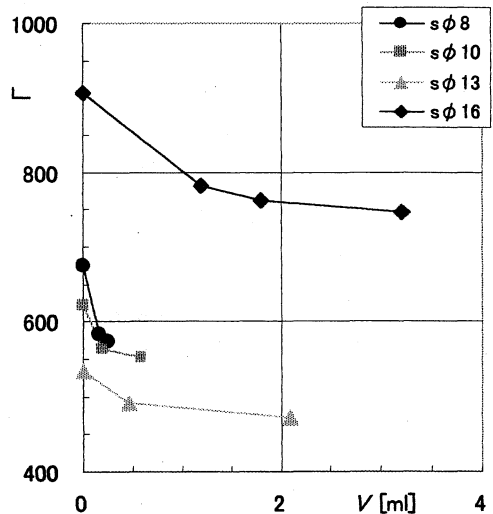


Fig.2 Effect of recess volume V on acceleration Γ (Bearing steel, VG32)

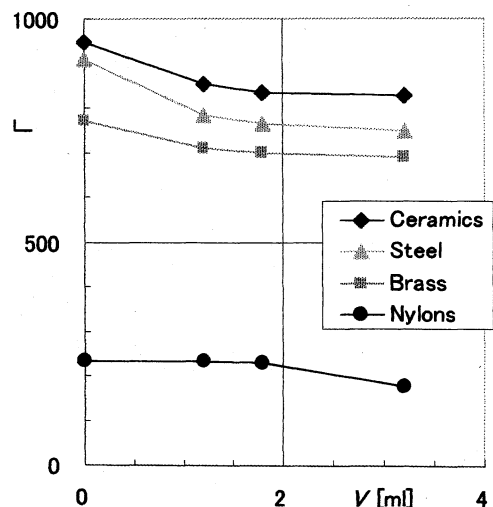


Fig.3 Effect of materials on acceleration Γ ($\phi 16$, VG32)

図3の結果を、球の弾性係数(参考値) E で整理して図4に示す。 Γ は、 E の対数にほぼ比例した。この関係から、部材の弾性係数を用いて、近似的に衝撃緩衝能力を予測できるといえる。

衝撃時に測定された Γ の最大値が小さいほど、軸受の緩衝能力は高いといえる。よって、部材に弾性係数の小さい材料を用い、しゅう動面にポケットを設けることが、小型化と耐衝撃性を狙ったひとつの設計指針となる。しかし、軸受が構造部材となる場合や特殊な環境に置かれる場合、その材料が必ずしも使用できるとは限らない。また、球面座の寸法が厳しく制限される場合や荷重方向が大きく変化する場合、ポケットの形状を任意に与えることは困難である。すなわち、材料を自由に選択できる場合には弾性係数の低い材料を選び、寸法に余裕のある場合にはポケット容積を大きく採ることで、衝撃緩衝性の高い軸受を実現できることになる。

3.2 スクイズ膜効果の検証

供試軸受のポケット部が液体で満たされる場合、球と球面座とのすきまにも液体が存在する。そこで、すきまで生じるスクイズ膜による減衰(緩衝)効果の程度をチェックした。各球材料に対する実験結果を図5に示す。図中、球面座に液体を十分に塗布した状態をWet、拭取った状態をDryと表記する。

ナイロンでは、Wet/Dryによる有意さは現れなかった。他の材料では、Wetの方が、 Γ はわずかに減少した。しかしながら、図3に示した結果と比較すると、本実験に用いた供試軸受の形状や条件の範囲においては、スクイズ膜に基づく緩衝効果は無視できる程度であったと判断できる。

3.3 供試液体の粘度の影響

図6は粘度(動粘度)の異なる4種類の供試液体を用いて行った実験結果を示す。粘度の高い供試液体の場合ほど、 V の全域にわたって、 Γ は小さくなった。特に、 $V > 0$ mlにおける高粘度液体(VG100, VG150)の場合に Γ の減少割合が大きく、VG68とVG100の間で Γ の差異が顕著となった。

ところで、基本的に、粘度はスクイズ膜効果に、体積弾性係数は圧縮性に関与する。前者については、3.2節において、本実験条件下では、スクイズ膜効果は小さいことを確認した。後者については、液体の体積弾性係数は含有空気量の関数²⁾となることが知られている。これらのことから、図6に見られる、高粘度液体における Γ の著しい減少は、ポケット内部や供試液体中に残存した気泡により、見掛けの体積弾性係数が減少したことが原因のひとつではないかと推論した。以下の実験でこれを検証した。

3.4 供試液体の体積弾性係数に関する考察

ポリエチレン製気泡シート緩衝材(扁平球状、約0.30 ml.以下、ミニチュア・ブラダ)を、大きな残留気泡のモデルとして用いた。このミニチュア・ブラダを、細い針金を用いてポケットを形成させたピストン中空部の中央部に固定し、その後、供試液体を注入して実験を行った。

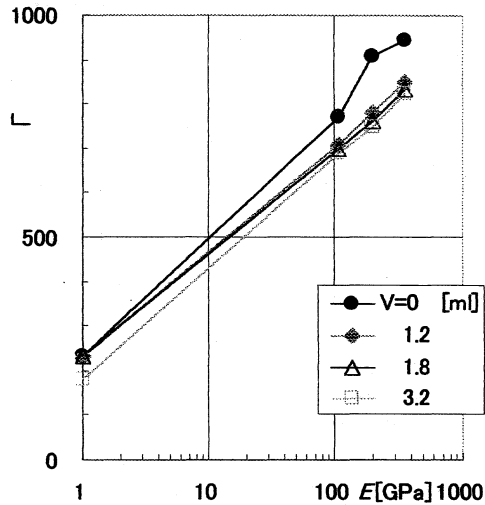


Fig.4 Reference elastic modulus E vs. acceleration Γ (sφ16, VG32)

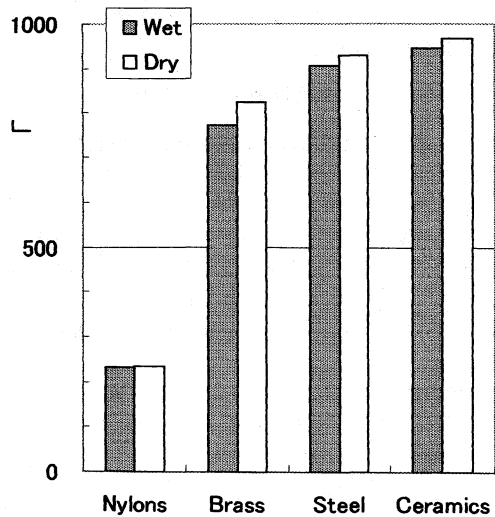


Fig.5 Assessment of squeeze film effect (sφ16, VG32, $V=0$ ml)

図7には、ミニチュア・ブラダの容積 V_b が Γ に及ぼす影響を示す。 $V_b=0$ ml で Γ は最も大きく、 V_b を増すと Γ は減少した。その減少割合は、 $V_b=0$ ml から 0.3 ml において顕著であった。

平行して、液体中の残留気泡を取り除く実験を行った。供試液体をポケット部へ注入した後、ここを密封し、手動式真空ポンプを用いて -100 mmHg まで減圧した。その後、球をセットして衝撃荷重を加えた。実験時の平均温度から動粘度 ν を算出して、整理した結果を図8に示す。 ν が大きな液体ほど、 Γ の増加の割合が大きかった。

以上のモデル実験から、高粘度液体での著しい加速度減少の一因は、供試液体中の残留空気により見掛けの体積弾性係数が低下したためと判断できる。

4. おわりに

ポケットを有する球面軸受に対して、衝撃力を受けた場合の緩衝作用に関する実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) ポケット容積を大きくすると、衝撃加速度は小さくなった。
- 2) 球の材質を変えると、加速度は変化した。その加速度は、降順に、セラミックス、軸受鋼、黄銅、ナイロンとなった。これを整理したところ、加速度は弾性係数の対数にほぼ比例した。
- 3) 供試液体を脱気すると加速度は大きくなり、ミニチュア・ブラダ（気泡モデル）を入れると加速度は小さくなった。これを見掛けの体積弾性係数と関連付けることができた。

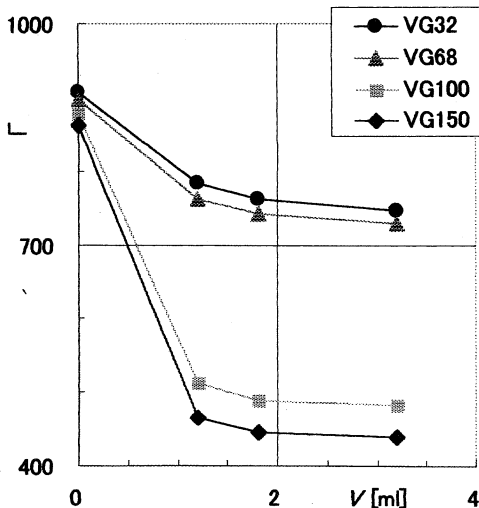


Fig.6 Effect of lubricant viscosity on acceleration Γ (Bearing steel, sφ16)

以上の結果より、材料の選択肢が多い場合には弾性係数の低い材料を、寸法の制約が緩い場合にはポケット容積を増加させることで、高い衝撃緩衝特性を発揮する軸受の一設計法を提案した。

なお、本実験には、当時の本学卒研究生 石濱渉君の助力を得た。また、本研究の一部には、稲盛財団の助成を受けた。記して謝意を表す。

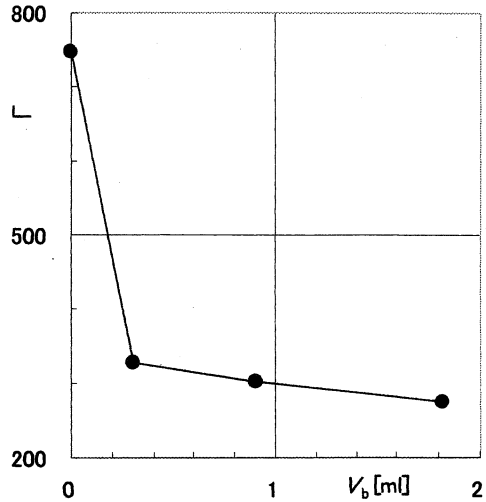


Fig.7 Effect of volume V_b of miniature bladders in recess on acceleration Γ (Bearing steel, sφ16, VG32, $V=3.2$ ml)

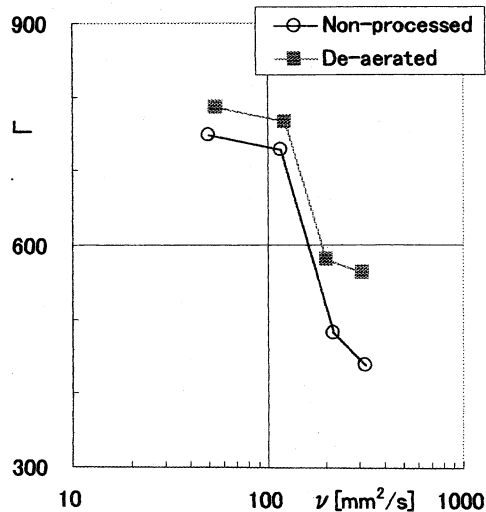


Fig.8 Effect of de-aeration of lubricants on acceleration Γ (Bearing steel, sφ16, $V=3.2$ ml)

参考文献

- 1) 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 (2001), 養賢堂.
- 2) 日本油空圧学会 (編) : 新版 油空圧便覧 (1989), オーム社.
- 3) 風間俊治 : 静圧球面軸受の混合潤滑特性—ピストンポンプ・モータへの適用を踏まえて, 日本機械学会論文集 C, 67, 658 (2001), 2014.
- 4) 笹田直・塚本行男・馬淵清資 : バイオトライボロジー (1988), 産業図書.
- 5) 日本機械学会 : すべり軸受の静特性および動特性資料集 (1984), 日本工業出版.
- 6) パウデン・テイパー : 固体の摩擦と潤滑 (1961), 丸善.
- 7) 山口惇・風間俊治 : 流体膜の緩衝作用 (第2報, 実験), 油圧と空気圧, 22, 4 (1991), 447.
- 8) Christensen, H.: Elastohydrodynamic Theory of Spherical Bodies in Normal Approach, *J. Lubrication Technology, Trans. ASME*, 92 (1970), 145.
- 9) Jin, Z. M. and Dowson, D.: A Full Numerical Analysis of Hydrodynamic Lubrication in Artificial Hip Joint Replacements Constructed from Hard Materials, *Proc Instn Mech Engrs, Pt. C*, 213 (1999), 355.