

平成 22 年 4 月 2 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560227

研究課題名（和文）低騒音ボールスプラインの開発

研究課題名（英文）Development of low-noise ball splines

研究代表者

太田 浩之（OHTA HIROYUKI）

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：30233141

研究成果の概要（和文）：

ボールスプラインは、高速で精密な位置決めができる長所を有する反面、ボールの循環に伴って騒音・振動を発生しやすいという短所がある。そこで、内部設計および材料の変更により現状に比べて 10dB 音圧レベルを低減した低騒音ボールスプラインを開発することにした。研究成果の概要は以下のとおりである。

- (1) 保持器の形状および材料、ボールの材料、およびスプライン軸の構造をかえて計 11 種類のボールスプラインを試作し、音の測定を実施した。その結果、ボールスプラインの音の低減には以下の方法が有効であることが判明した。
 - ①現状のポリアセタール製保持器を、黄銅、リン青銅、またはステンレス製保持器に変える。
 - ②保持器のタングを直線形状（直線タング）とし、タング角度をなるべく小さくする。
 - ③保持バーつき保持器を用いる。
 - ④鋼球を窒化けい素球に変える。
 - ⑤スプライン軸には、ダンパ軸を用いる。
- (2) 上の(1)で示した①から⑤の方法を組み合わせることで、現状品に比べて最大 13dB 音圧レベルが低下した低騒音ボールスプラインの開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Ball splines are convenient and efficient devices that allow nearly friction-free linear motion. Therefore, they are widely used in grinding machines, coil winding machines, and semiconductor manufacturing equipment. In recent years, as the speed of machines using ball splines has increased, the sound of ball splines has added to the serious problem of the noise of these machines. In this paper, as a first step toward reducing the noise of ball splines, the effects of retainer materials and shapes, ball materials, and spline shaft structures on ball spline sound are examined experimentally. Then, low-noise ball splines are developed.

The results of specific experiments and analyses has led to the following conclusions.

(1)The following noise reduction methods of ball splines are effective:

- ① Changing from conventional polyacetal retainers to retainers made by brass, phosphor bronze, or stainless steel.
- ② Adopting straight tongues with tongue angles less than 18.5 degrees.
- ③ Using retainers with retainer bars.
- ④ Changing from conventional steel balls to silicon nitride balls.
- ⑤ Changing from conventional solid shafts to damper shafts, as spline shafts.

(2) The presented low-noise ball spline (Type K) with all the noise reduction methods (i)-(v), overall sound pressure levels decrease by up to 13dB, compared to those of the conventional ball spline (Type A) without the noise reduction methods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：ボールスプライン，騒音

1. 研究開始当初の背景

ボールスプラインは、研削盤、高速巻線機、半導体製造装置等に広く用いられている。近年、ボールスプラインを使用した機械の高速化にともない、ボールスプラインの騒音の低減が望まれている。ボールスプラインの音については、すでに音の発生機構の研究(1)が行われているが、ボールスプラインの音の低減に関する研究はほとんど行われていない。ボールスプラインの音の低減に関連する技術としては、これまでに中空スプライン軸の中空部分に発泡材、制振材、あるいはセラミックス等を挿入することで、スプライン軸単体の振動減衰性能を向上する方法が提案されている。しかしながら、これまで提案された方法は、いずれも運転中のボールスプラインによる音の低減の検証がなされていない。そこで、運転中のボールスプラインの音の低減に取り組むことにした。

2. 研究の目的

本研究では、保持器の材料、保持器の形状、ボールの材料およびスプライン軸の構造とボールスプラインの音の関係を調べ、その結果に基づき、内部設計および材料の変更により現状に比べて10dB音圧レベルを低減した低騒音ボールスプラインを開発する

3. 研究の方法

(1)実験

①実験用ボールスプライン

実験用ボールスプラインの概略を図1に示す。1組の実験用ボールスプラインは、図1に示すように、1本のスプライン軸、1個の外筒（外筒本体、ボール、保持器、スペーサー、および側板からなっている）で構成されている。実験用ボールスプラインの基本諸元は、JIS B 1193 AI 4N 25×808-C1に準拠し

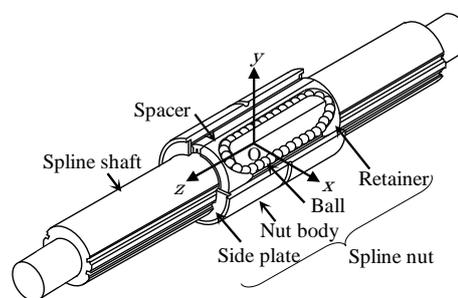


Fig. 1 Overview of test ball spline

Table 1 Types of test ball splines

Types	Retainer			Ball		Spline shaft			
	Materials	Tongue shapes	Retainer bar	Mass	Materials	Mass of a ball	Material	Types	Mass
A	Polycetal (POM)	Circular arc	without	7.7 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
B	Brass (C3602)	Circular arc	without	60.2 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
C	Phosphor bronze (C5191B)	Circular arc	without	63.7 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
D	Stainless steel (SUS303)	Circular arc	without	56.8 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
E	Brass (C3602)	Straight, $\phi = 40^\circ$	without	59.0 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
F	Brass (C3602)	Straight, $\phi = 31.8^\circ$	without	58.0 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
G	Brass (C3602)	Straight, $\phi = 18.5^\circ$	without	57.6 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
H	Brass (C3602)	Straight, $\phi = 10^\circ$	without	57.3 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
I	Brass (C3602)	Straight, $\phi = 10^\circ$	with	60.8 g	SUJ2	0.25 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
J	Brass (C3602)	Straight, $\phi = 10^\circ$	with	60.8 g	Si ₃ N ₄	0.10 g	SUJ2	Solid	3.18 kg
K	Brass (C3602)	Straight, $\phi = 10^\circ$	with	60.8 g	Si ₃ N ₄	0.10 g	SUJ2	Damper	3.22 kg

ている。実験用ボールスプラインとして、表1に示すタイプA~Kの11タイプを用意した。タイプAは現在市販されている標準的なボールスプラインであり、タイプB~Kは本研究で試作したボールスプラインである。実験用ボールスプラインの保持器の材料は、表1に示すように、ポリアセタール、黄銅、リン青銅、およびステンレス鋼の4種類とした。また、保持器の形状は、図2に示す3種類とした。すなわち、タイプA~Dは、保持器のタ

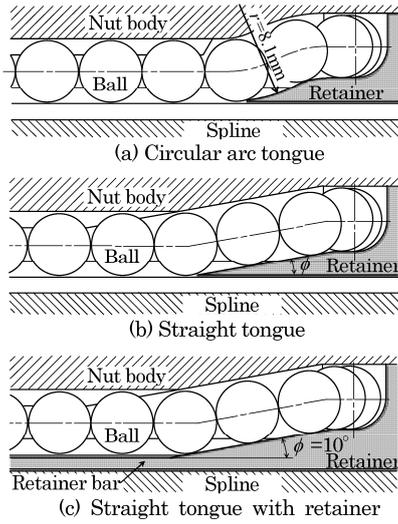


Fig. 2 Tongue shapes

ングが半径 $r=8.1\text{mm}$ の円弧形状 (以下, 円弧タンクと呼ぶ), タイプ E~H は, 保持器のタンクが直線形状 (以下, 直線タンクと呼ぶ), タイプ I~K は, 直線タンクで保持バーが付いた形状となっている. なお, タイプ A~I には鋼球 (SUJ2), タイプ J および K には窒化けい素球 (Si_3N_4) が組み込まれている. また, タイプ A~J のスプライン軸は中実軸, タイプ K のスプライン軸はダンパ軸 (中空スプライン軸の内部に黄銅製 (C3602) 軸体を中間ばめで嵌合したもの) となっている.

②実験方法

音の測定は, ボールスプラインを鉛直に立て, スプライン軸の長手方向中央を外筒が一定の速度で上昇通過するときに行った. そして, このときにボールスプラインから発生する音をコンデンサマイクロホンによって検出し, 100Hz~20kHz のオーバーオール音圧レベル, 音の時間波形の測定を行った. なお, スプライン軸の中心からコンデンサマイクロホンまでの距離は 0.3m とした. また, 外筒の直線速度 V は, 0.3~1.0m/s の範囲で数段階に変化させた.

(2)実験結果および考察

①保持器の材料の影響

はじめに, タイプ A~D のボールスプラインを用い, 保持器の材料と音の関係を調べる実験を行った. 図 3 に保持器の材料とボールスプラインのオーバーオール音圧レベルの関係を調べた結果を示す. 図 3 より, 各直線速度において, ポリアセタール保持器を用いた場合に比べて, 黄銅, リン青銅, およびステンレス製保持器を用いた場合にオーバーオール音圧レベルが減少することがわかる. 図 4 に保持器の材料とボールスプラインの音の時間波形の関係を調べた結果の例を示す. 図 4 より, ポリアセタール製保持器を用いた場合に比べて, 黄銅, リン青銅, およびステンレス製保持器を用いた場合には, ボール通過

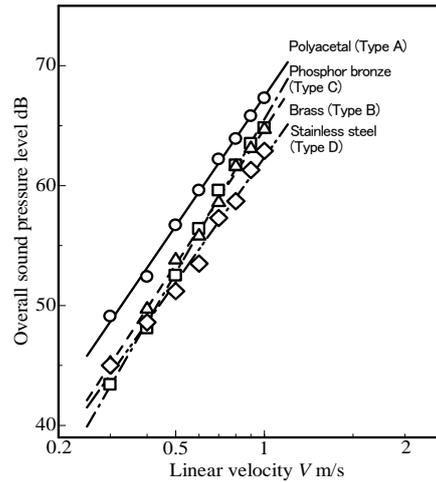


Fig. 3 Effects of retainer materials on overall sound pressure levels

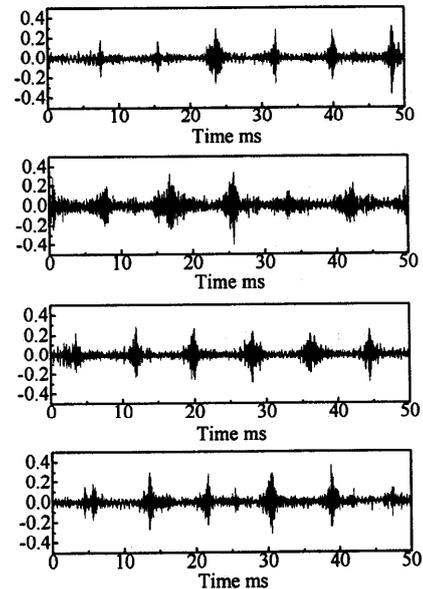


Fig. 4 Effects of retainer materials on sound waveforms ($V=1.0\text{m/s}$)

周期 T_p で生ずるパルスの音の減衰が大きいことがわかる. この原因は, ポリアセタール製保持器を用いた場合に比べて, 黄銅, リン青銅, およびステンレス製保持器を用いた場合に, 保持器と外筒の嵌合部で生ずる構造減衰が大きくなるためと考えられる.

②保持器の形状の影響

次に, タイプ B および E~I のボールスプラインを用い, 保持器の形状と音の関係を調べる実験を行った. 図 5 に保持器の形状とボールスプラインのオーバーオール音圧レベルの関係を調べた結果を示す. 図 5 より, 直線タンクの場合, タング角 ϕ が小さくなるほどオーバーオール音圧レベルが低下することがわかる. そして, 直線速度 V が 0.5m/s 以上の高速領域では, $\phi \leq 18.5^\circ$ の直線タンクを用いた場合の方が, 従来の円弧タンクを用いた場合よりもオーバーオール音圧レベルが低

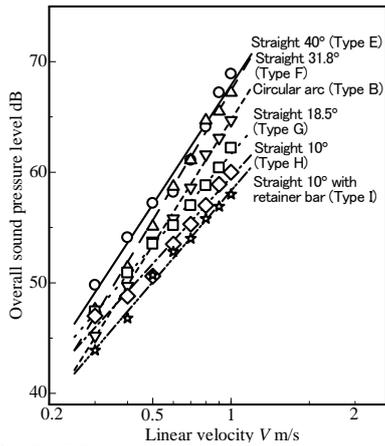


Fig. 5 Effects of retainer tongue shapes on overall sound pressure levels

くなっていることがわかる。さらに、保持バーを付けた場合の方が、保持バーを付けない場合よりもオーバーオール音圧レベルが減少することもわかる。図6に保持器の形状とボールスプラインの音の時間波形の関係を調べた結果の例を示す。図6より、 $V=1\text{m/s}$ では、タンク角 ϕ が小さくなるほどパルスの音圧レベルが低下することがわかる。そして、 $\phi \leq 18.5^\circ$ の直線タンクでは、円弧タンクを用いた場合よりもパルスの音圧レベルが減少することがわかる。タンク角が小さい場合にパルスの音圧が減少するのは、ボールとスプライン軸または外筒との衝突力の減少によると考えられる。なお、図6は $V=1\text{m/s}$ の場合の結果であるが、 $V=0.5\text{m/s}$ 以上の場合、図6と同様の傾向があることを確認している。

③ボールの材料の影響

つづいて、タイプIおよびJのボールスプラインを用い、ボールの材料と音の関係を調べる実験を行った。図7にボールの材料とボールスプラインのオーバーオール音圧レベルの関係を調べた結果を示す。図7より、各直線速度において、鋼球(SUJ2)を用いた場合に比べて、窒化けい素球(Si_3N_4)を用いた場合にオーバーオール音圧レベルが減少することがわかる。図8にボールの材料とボールスプ

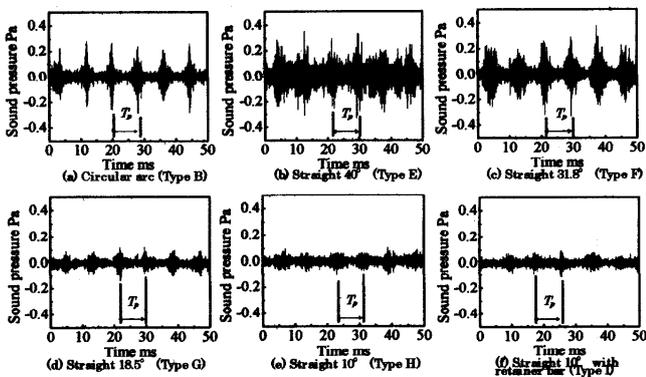


Fig. 6 Effects of retainer tongue shapes on sound waveforms($V=1.0\text{m/s}$)

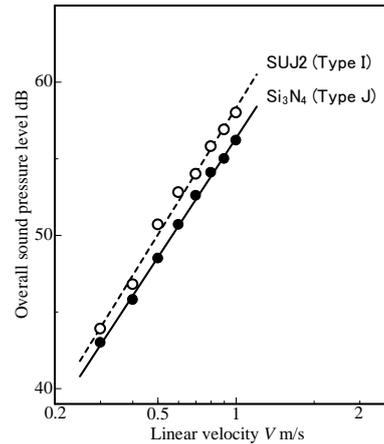


Fig. 7 Effects of ball materials on overall sound pressure levels

ラインの音の時間波形の関係を調べた結果の例を示す。図8より、鋼球(SUJ2)を用いた場合に比べて、窒化けい素球(Si_3N_4)を用いた場合には、パルスの音の振幅が小さいことがわかる。これは、窒化けい素球の質量が鋼球の40%と小さく、ボールとスプライン軸および外筒の衝突力が減少するためと考えられる。

④スプライン軸の構造の影響

さらに続いて、タイプJおよびKのボールスプラインを用い、スプライン軸の構造とボールスプラインの音の関係を調べる実験を行った。図9にスプライン軸の構造とオーバーオール音圧レベルの関係を調べた結果を示す。図9より、ダンパ軸を用いた場合に、 $V=0.4\text{m/s}$ 以上で、中実軸を用いた場合に比べて、オーバーオール音圧レベルが減少することがわかる。図10にスプライン軸の構造と音の時間波形の関係を調べた結果の例を示す。図10より、ダンパ軸を用いた場合には、パルスの音の減衰がわずかに大きい傾向となることがわかる。これは、ダンパ軸の構造減衰が中実軸に比べて大きいためと考えられる。

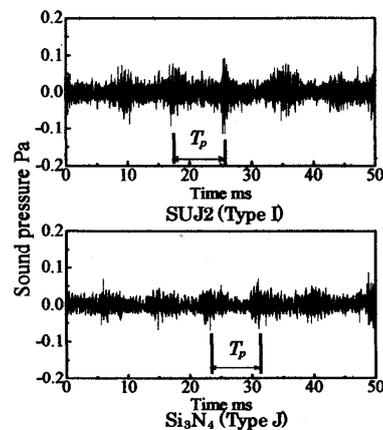


Fig. 8 Effects of ball materials on sound waveforms($V=1.0\text{m/s}$)

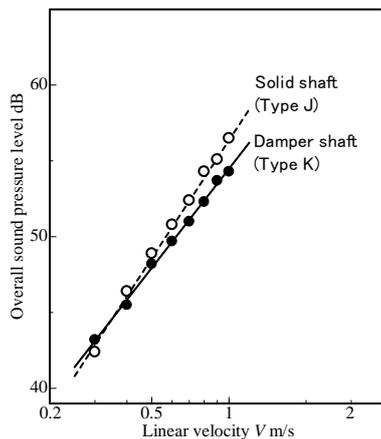


Fig. 9 Effects of shaft structures on overall sound pressure levels

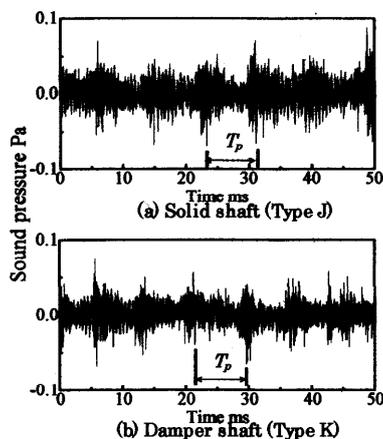


Fig. 10 Effects of shaft structures on sound waveforms ($V=1.0\text{m/s}$)

⑤低騒音ボールスプライン

以上の実験結果より、ボールスプラインの音の低減には以下の方法が有効であることが判明した。

(i) 現状のポリアセタル製保持器を、黄銅、リン青銅、またはステンレス製保持器に変える。

(ii) 保持器のタングを直線形状（直線タング）とし、タング角度をなるべく小さくする。

(iii) 保持バーつき保持器を用いる。

(iv) 鋼球を窒化けい素球に変える。

(v) スプライン軸には、ダンパ軸を用いる。

図5と7より、これら(i)～(v)の方法を組み合わせたタイプKは、現状品のタイプAに比べて、最大13db音圧レベルの低減が確認できた。すなわち、当初の期待以上の低騒音化が図られたボールスプラインを開発することができた。

4. 研究成果

以上より、以下の成果が得られた。

(1) ボールスプラインの音の低減には以下の方法が有効であることが判明した。

①現状のポリアセタル製保持器を、黄銅、

リン青銅、またはステンレス製保持器に変える。

②保持器のタングを直線形状（直線タング）とし、タング角度をなるべく小さくする。

③保持バーつき保持器を用いる。

④鋼球を窒化けい素球に変える。

⑤スプライン軸には、ダンパ軸を用いる。

(2)上の(1)で示した①から⑤の方法を組み合わせることで、現状品に比べて最大13dB音圧レベルが低下した低騒音ボールスプラインの開発に成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

(1) Hiroyuki Ohta, Shunji Iwasaki, Toyoshi Kazama, Kazuei Hoshino, Sound of a ball splin operated at a certain linear velocity, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 査読あり, 223(2009), 17-25.

(2) 太田浩之, 岩崎俊二, 風間豊治, 星野和栄, ボールスプラインの音の発生機構, 日本機械学会論文集C編, 査読あり, 74(2008), 2300-2307.

〔学会発表〕(計1件)

太田浩之, ボールスプラインの騒音低減, 日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会講演論文集, 査読なし, (2008年3月8日), 2300-2307.

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 直動装置

発明者: 太田浩之, 山崎充

権利者: 国立大学法人長岡技術科学大学, 日本ベアリング株式会社

種類: 特許

番号: 特願2007-311595

出願年月日: 2007年11月30日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/ohta/publications_jp.html ~

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 浩之 (OHTA HIROYUKI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 30233141

(2) 研究分担者 ()

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :