

報告日：2023年5月30日

報告者：神奈川大学工学部 特別助教 楠山純平

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

動圧軸受と転がり軸受を混成した自転車用軸受の開発

(2) 研究者氏名、職名

楠山純平, 神奈川大学 工学部 特別助教

(3) 研究概要

一般に、競技用自転車のホイールに用いられるハブ(以下:ハブ)の軸受には転がり軸受が用いられるが、その回転精度は転導体の精度等級に大きく依存する。また、路面状態などが直接軸受部に作用するため、瞬間的な転がり抵抗の増大や軸受の損傷などが生起する。一方で、流体潤滑方式の滑り軸受は転がり軸受に比して回転精度および減衰性に優れているが、単体でハブに用いることは現実的ではない。そこで、動圧軸受と転がり軸受を組み合わせることで、高い回転精度と減衰性を有する新しい混成ハブ構造を提案する。本研究では、理論計算およびモデル構築を行うとともに、数値解析を行い適切な動圧軸受の形状の検討を行う。

(4) キーワード

転がり軸受, 動圧軸受, ハイブリッド軸受, ハブ

(英文)

(1) Research title

Development of hybrid bearing of dynamic pressure bearing and ball bearing for bicycle

(2) Name of researcher with title of position

Jumpei Kusuyama, Assistant Professor, Kanagawa University

(3) Summary

Generally, rolling bearings are used in the hubs of competition bicycle wheels (hereafter referred to as "hubs"). In the case of such rolling bearings, the rotational accuracy is highly dependent on the accuracy grade of the rolling conductor. In addition, vibrations caused by uneven road surfaces and unbalanced loads caused by the rolling of the car body act directly on the bearings, resulting in an immediate increase in rolling resistance and bearing damage.

On the other hand, fluid-lubricated plain bearings offer superior rotational accuracy and damping compared to rolling bearings. However, hydrostatic bearings, which support loads by supplying pressurized fluid to the bearing portion, require a fluid pressurization

and supply mechanism, including a power unit, and are difficult to integrate into a bicycle hub. Hydrodynamic bearings, which support loads by dynamic pressure, require a significant initial torque to start rotating from a stationary state. Therefore, it is not practical to use only fluid-lubricated plain bearings for hubs.

Therefore, we propose an entirely new hybrid hub structure that combines hydrodynamic bearings and rolling bearings to achieve high rotational accuracy and damping performance while maintaining the same initial torque level as conventional hubs. In this study, theoretical calculations and model building are conducted as basic research for developing a hybrid hub, and appropriate hydrodynamic bearing geometry is investigated through numerical analysis.

(4) Key Words

rolling bearings, hydrodynamic bearings, hybrid bearings, hub

2. 本研究の意義、特色

本研究では、図1に示すような動圧軸受と転がり軸受を組み合わせて用いることで、高い回転精度と減衰性を有し、初動トルクが従来と同程度の全く新しい混成ハブ構造を提案する。この混成ハブの構成は、外側からアウトハブ、インナハブおよび軸の3部分に大別される。アウトハブとインナハブの支持は動圧軸受によって、インナハブと軸の支持は転がり軸受によって支持されており、アウトハブとインナハブは独立に回転する。動圧軸受は、いわゆる円錐ころ軸受のように、回転軸に対して任意の角度を与えて配置することで、スラスト方向とラジアル方向からの荷重を支持する。また、使用する作動流体は高剛性および高潤滑性能を有する油を用いる。混成ハブの動作原理について説明する。まず、外力が加わりホイールが回転し始めると、起動トルクの大きい動圧軸受は作動せず、転がり軸受のみが作動する。これにより、アウトハブとインナハブは同回転数で回転する。その後、ある一定の回転数に達し、十分なエネルギーが得られると動圧軸受が作動する。この時、アウトハブとインナハブは異なる回転数で回転し、アウトハブの回転数の方が大きくなる。これにより、高い回転精度を有し、減衰性に優れたハブが実現できると考える。

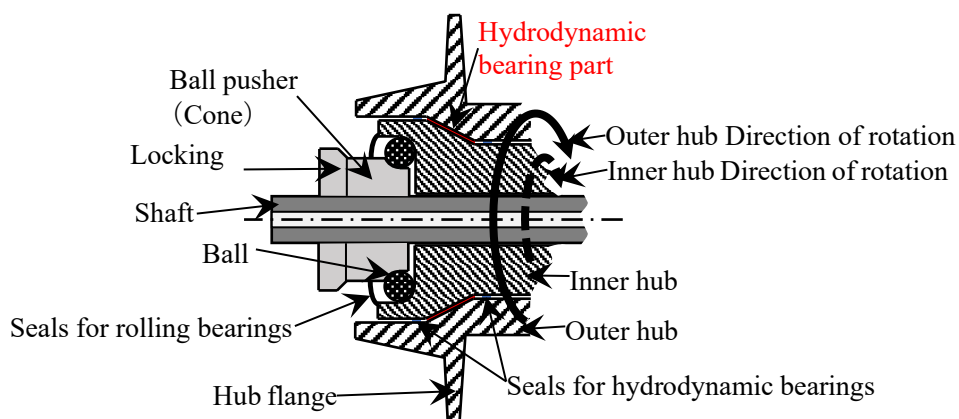


図1 ハイブリッド軸受のイメージ

3. 実施した研究の具体的内容、結果

3.1 市販ハブの初動トルク測定

アナログ式トルクメータ(東日製作所, 5TM1.5MN, 5TM7.5MN)を使用し, 4種類の市販されているハブの初動トルクを測定した. なお, 正転および逆転方向に各5回測定し, これらの平均値を求めた.

表1に測定したハブの種類および測定結果を示す. 競技によって求められる性能が異なり, ロード競技向けに比べてトラック競技向けの方が初動トルクが低いことがわかる. これは, 路面凹凸がなく競技者の姿勢が大きく変化しないトラック競技においては, 耐衝撃性や全天候への対処などをする必要がなく, 低転がり抵抗で軽量なハブで良いこと示している. そこで, 本研究ではトラック競技向けのハブの軸受としてハイブリッド軸受を開発を目指す.

表1 市販ハブの初動トルク

用途	製造元	型式	初動トルク [mN*m]
トラック競技	Shimano	HB-7600	1.21
ロード競技	Shimano	HB-RS400	6.64
	DT Swiss	350	4.07
	HOPE	RS4	3.94

3.2 数値計算による転がり軸受および動圧軸受の動摩擦係数の導出

トラック競技向けハブに用いられている転がり軸受に近い背面組合せ型アンギュラ玉軸受 (NTN, 7203B, 接触角 40°) と任意の大きさの真円動圧軸受の動摩擦係数を比較する. 真円動圧軸受の動摩擦係数 μ は次式で示すペトロフの式より導出される.

$$\mu = \frac{\eta N \pi^2 D}{P_m c}$$

ここで, 粘性係数 η , 回転数 N , 軸径 D , 平均軸受圧力 P_m , 半径すきま c とする.

表2に数値計算に用いた動圧軸受の諸元を示す. なお, 動圧軸受は転がり軸受の外側に配置すると仮定しているため, 軸受直径 40 mm としている. また, 使用する潤滑油は低粘度特殊潤滑油(昭和シェル石油, TETRA-2SP)とし, 温度 22.5 度 , 3 気圧 で封入する.

図2に数値計算結果を示す. 100 min^{-1} 以下の低回転領域では動圧軸受の方が動摩擦係数が低い. そのため, 当初, 想定していた転がり軸受と動圧軸受の回転原理が成立し得ないことを示唆

表2 動圧軸受の諸元

軸受負荷	[N]	441.3
角速度	[rad/s]	57.614
許容偏心率	[-]	0.07
軸受直径	[mm]	40
軸受長さ	[mm]	40
半径すきま	[mm]	0.5
平均軸受圧力	[MPa]	0.827
粘性係数	[mPa*s]	6.11

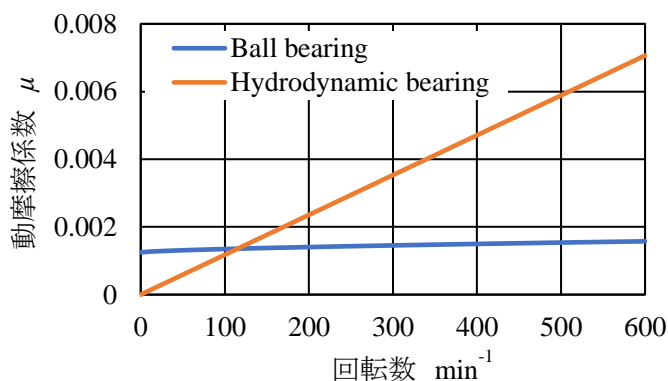


図2 転がり軸受および動圧軸受の動摩擦係数

している。しかし、実際の回転では静摩擦係数(初動トルク)が作用するとともに、動圧軸受の潤滑方式が回転状態によって異なるため、より複雑になることが予想される。

3.3 流体解析による摩擦トルクの導出

流体解析によって円錐台形動圧軸受の性能を検討する。図3にハブを模した解析モデルを、表3に解析条件を示す。また、背面組合せ型アンギュラ玉軸受(NTN, 7203B, 接触角 40°)についても解析的に摩擦トルクを導出する。なお、円錐台形型としたのはアキシャル方向およびジャーナル方向のいずれに対しても支持力を得るためである。

表4に解析結果を示す。これは数値計算と同様に、動圧軸受の方が転がり抵抗が小さく、当初の仮定と矛盾していることが分かる。

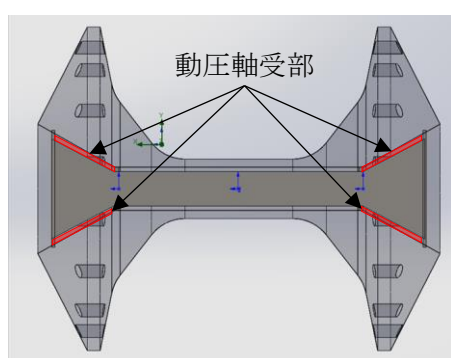


図3 解析モデル

表3 動圧軸受の諸元

小径部外径	[mm]	8.00
大径部外径	[mm]	23.22
円錐台形高さ	[mm]	14.55
軸受すきま	[mm]	1.00
偏心率	[-]	0
回転数	[min ⁻¹]	60
平均軸受圧力	[MPa]	0.304
粘性係数	[mPa*s]	6.11

表4 摩擦トルクの解析結果

転がり軸受	[N・m]	9.73×10^{-4}
動圧軸受	[N・m]	5.54×10^{-6}

3.4 動圧軸受の動摩擦係数および静摩擦係数の理論計算に関する課題

これまで述べたように、動摩擦係数(摩擦トルク)は 100 min⁻¹ 以下の領域において、動圧軸受の方が低くなる。しかし、転がり始めるために必要な静摩擦係数(初動トルク)については、一般に転がり軸受の方が低くなる。これは、動圧軸受が非回転時には境界潤滑であるのに対し、回転開始直後には混合潤滑、回転数が十分な場合には流体潤滑となるためである。境界潤滑や混合潤滑においては、真実接触面積が大きく影響するため、寸法精度や表面粗さが重要になる。動圧軸受の動摩擦係数の理論計算には潤滑方式による場合分けや真実接触面積に関する考慮がなされていない。そのため、これらの要素を組み込んだ理論の構築が必要である。

これにより、転がり軸受の理論計算と合わせることで図4のような回転数とトルクの関係を示すことができる。ここで、摩擦係数を縦軸に用いないのは軸受の大きさにより初動トルクおよび摩擦トルクが線形に変化するためである。

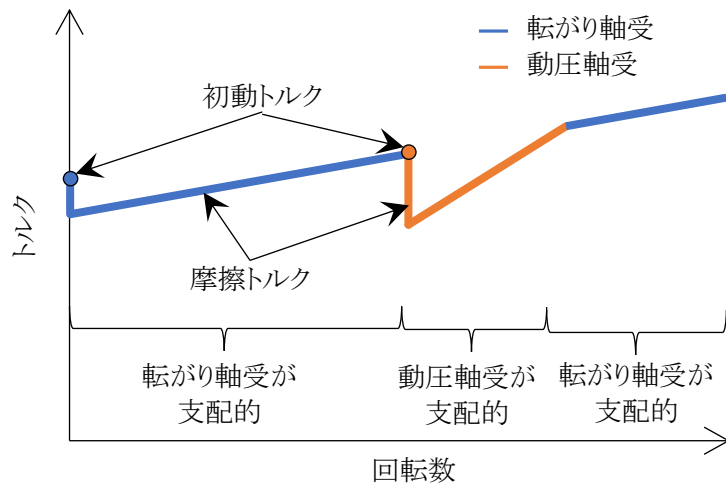


図4 ハイブリッド軸受における回転数とトルクの関係

3. 5 装置開発に関する課題および今後の予定

今後は実際に動圧軸受を設計し、初動トルクの測定を行う。さらに、回転時の摩擦トルク（動摩擦係数）を実験的に求めるために図5に示す実験装置を製作する。これらの結果から最適なハイブリッド軸受の設計値を求め、実際に制作する。

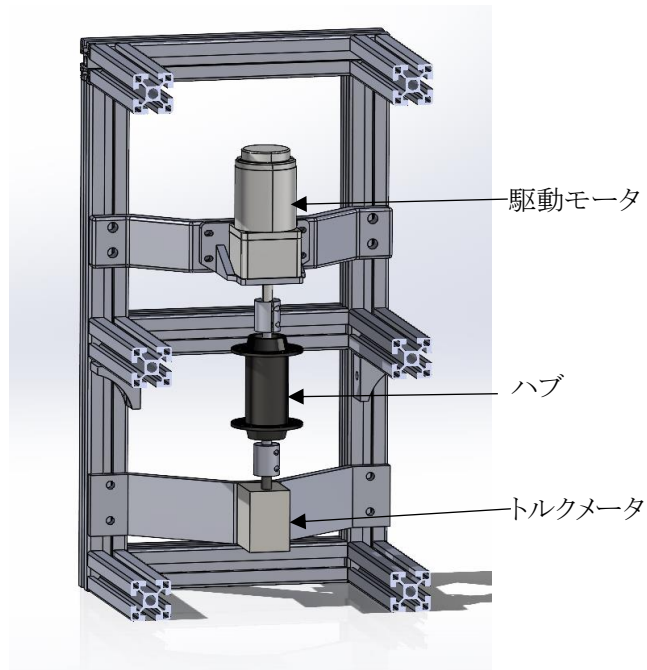


図5 摩擦トルク測定装置

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

楠山 純平，神奈川大学 工学部 特別助教
 中尾 陽一，神奈川大学 工学部 教授

5. 研究実施時期

2021年 4月 1日から 2023年 3月 31日まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

なし

7. 内外における関連研究の状況

なし

8. 今後の発展に対する希望

本研究では、最終的なハイブリッド軸受の開発に至らなかったが、転がり軸受と動圧軸受を組み合わせることで、任意の回転数領域において摩擦トルクを小さくできることを示唆した。そのため、動圧軸受による偏心率の変化を除けば、回転と停止、加減速を頻繁に行うスピンドルに対して、消費電力を小さくする有用な手法であると言える。