

駆動輪の軸受回りにおける スティックスリップ音の研究

Research on Stick-Slip Noise around Hub Bearings in Driven Wheels

柏井 幹雄*
Mikio KASHIWA
山川 郁生**
Ikuo YAMAKAWA

篠原 治男*
Haruo SHINOHARA
大出 茂基**
Shigeki OIDE

丹羽 伸雄**
Nobuo NIWA
水野 邦生**
Kunio MIZUNO

要 旨

自動車で駆動トルクを加えた際に駆動輪の軸受回りにおいて金属接触面の微少な滑りが発生する。その滑りには、スティックスリップ音を伴う場合がある。スティックスリップ発生の要因を解析した結果、複数の要因が重なって発生していることが解明できた。今回新たに発見した要因は、過大な圧入荷重や過大軸力により軸受内輪に発生する不均一なひずみと、そのひずみが荷重開放後も蓄積する事と、軸受内輪のハブ圧入面の潤滑状態が圧入速度と湿度により変化し、過大な圧入荷重発生の要因となる事である。この解析を基にスティックスリップの効果的な防止手法を提案する。

ABSTRACT

Micro-slip motion occurs in the metal contact surfaces around the hub bearings of the driven wheels when automotive driving torque is applied. A stick-slip noise can accompany this slip motion. Analysis of the occurrence of stick-slip has shown that it is caused by a combination of factors. The research described in this paper has discovered previously unknown causes. Excess insertion load or axial force causes non-uniform strain in the bearing inner race; this strain builds up even after the load is released. Changes occur in the lubrication conditions of the press-fit face of the hub and the bearing inner race with varying insertion speed and humidity conditions, leading to the generation of excess insertion load. An effective method for prevention of stick-slip is proposed on the basis of this analysis.

1. まえがき

自動車の駆動輪の軸受回りにおける締結構造は、ハブユニット軸受と等速ジョイント(以下、CVJ=Constant Velocity Joint)をハブとスピンドルナットを用いて圧入及びセレーションかん合、ねじ締結とする構造が一般的である。

CVJ から駆動トルクを伝達する際に、そのトルクが大きいほど締結構造部にねじれや滑りを伴う。このねじれや滑りを無くすためには、極端に太いセレーション軸の選定とセレーションの完全なガタ詰めを行う必要がある。しかし、その手法はスペースレイアウト及び組立・分解作業性を考えた場合に限界がある。そこで、駆動トルクが加わった場合の締結部は、ねじれや滑りを肯定した構造とする必要がある。

具体的には、トルク伝達を行うセレーション歯部すき間及びセレーション軸のねじれにより、CVJ が軸受に対し駆動回転方向にずれようとする。このずれを金属接触面の滑りにより吸収しなければならない。滑りの発生しうる箇所

は複数存在し、その滑り面の潤滑状態もさまざまである。従来から、この滑り面の潤滑については特別な処置をしないことが一般的である。

しかしながら、近年の自動車のエンジン出力向上による駆動トルクの増加に比べ、セレーション軸のねじり剛性は増加しておらず滑りやすくなっている。その滑り面の潤滑状態をコントロール出来なければスティックスリップ音が発生する場合がある。このスティックスリップ音は、自動車の走行において、まれに異音(「バキ」音、「カッキン」音と呼ばれる)と見なされる場合がある。この異音の発生する状況を調査し、要因を解明する事ができた。その結果に基づいて効果的な異音防止手法の提案を行った。

2. 異音の発生状況

2.1. 異音とは

今回取上げる異音は金属接触面の微少な滑り発生時のス

*栃木研究所

**本田技研工業(株)

スティックスリップ音である。金属接触面での滑りはセレクション軸に駆動トルクを加えた時に発生する。発生状況を大別すると新車状態でスティックスリップが発生する初期型の異音と、金属接触面での滑りを繰返すことで滑り面の荒れにより発生するものや、潤滑状態が変化することで発生する耐久型の異音とがある。いずれの場合の異音も軸受回りの締結構造を損うものではない。

2.2. スティックスリップ発生箇所

以前よりスティックスリップ発生箇所を特定するための研究が行われていたが、軸受内輪と接する全ての箇所が発生することが確認されている。解析の結果、注目すべきスティックスリップ発生箇所は、Fig. 1 に示す CVJ と軸受内輪が接触する面であることが分かった。駆動トルクが加わるとハブとセレクションかん合した CVJ は、その駆動方向にねじれようとする。そのねじれにより発生するスティックスリップは二つに分けられる。第一は、CVJ が軸受内輪端面との接触面で微少に相対移動する場合にスティックスリップが発生する。第二は、CVJ と軸受内輪端面の接触面で静止摩擦力が大きい時に、CVJ と接触した軸受内輪端面が CVJ と一体で移動する場合にスティックスリップが発生する。第二の場合は、二つの軸受内輪同士の接触面と軸受内輪のハブとの圧入面で相対移動することとなり、この時にレベルの高いスティックスリップ音が発生する。

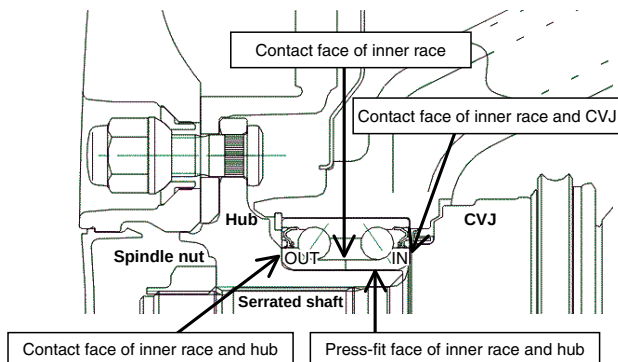


Fig. 1 Basic configuration around hub bearings in driven wheel

3. 異音発生の要因解析

3.1. 初期型スティックスリップ音の解析

初めに、新車組立状態で初期に発生するスティックスリップ音の要因解析を行った。その結果複数の要因が見出された。

3.1.1. 軸受接触面の仕上げ状態

(1) 旋削加工と研削加工

CVJ の軸受内輪との接触面の加工方法には、旋削加工と研削加工の二種類がある。一般的にこの接触面を CVJ の内部加工の基準面とする、その場合は旋削及び研削加工の仕

上げによる面粗さは 6.3S 以下としている。しかし一部には CVJ の加工基準面を別に設けて軸受内輪との接触面の粗さを 25S 程度まで荒くし、同心筋目 (Fig. 2) の旋削こんを残している CVJ がある事も知られている。

Fig. 3 で上記二種類の接触面仕上げ状態の違いによるスティックスリップへの影響を比較してみる。潤滑の影響を受けないように接触面を脱脂状態とし、駆動トルクに相当するトルクを CVJ から正/逆方向一回を一サイクルとし繰返しねじりを行った。その時発生する振動の加速度を計測し 1000 サイクルまで比較した結果、同心筋目の旋削こんがスティックスリップに対し有利であることが確認できた。この事より、研削加工品では潤滑状態が悪いと初期状態では異音レベルが高い事が分かった。

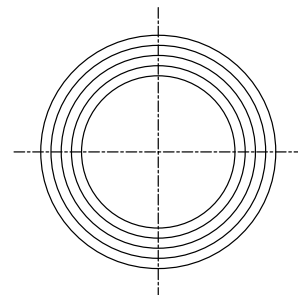


Fig. 2 Concentric finish line

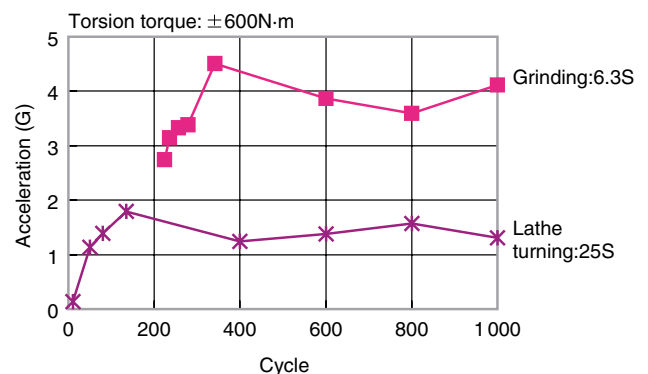


Fig. 3 Acceleration level for stick-slip and machining process of CVJ

(2) 研削加工のうねり

研削加工における注意点は研削機主軸の軸受ガタ、研削といしの送り速度の管理である。これらの管理状態により前述の CVJ 研削仕上げ加工面にうねりが発生し、うねりの数や高さが変化する。うねりの数、高さにより真の接触面積が変化し接触面の静止摩擦力が変化する。その結果、軸受内輪との接触面でのスティックスリップや CVJ と軸受内輪一体での滑りが発生する。CVJ と軸受内輪一体での滑りが発生すると軸受内輪はハブとの圧入面でスティックスリップが発生する。スティックスリップが発生する要因として CVJ のうねりと、軸受内輪が CVJ と一体での滑りだしを妨げるハブと軸受内輪の静止摩擦力であることが分かる。

Fig. 4 に研削条件の違いにより発生する CVJ の軸受内輪

接触面におけるうねりの数の一例を示す。平坦面を確保するためには研削機主軸の軸受ガタは少なくし研削の送り速度は遅くする必要がある。うねりの高さは、うねりの数7個の時の最も高い。

Fig. 5 に CVJ のうねりの数と軸受内輪とハブの圧入締代違いによる滑り発生箇所の変化を示す。うねりの数7個の場合に CVJ と軸受内輪の接触面における静止摩擦力が、軸受内輪とハブ間の $25\text{ }\mu\text{m}$ 以下の圧入締代による摩擦力を上回るため圧入面で滑りが発生する。圧入締代を $40\text{ }\mu\text{m}$ とした場合に圧入面の静止摩擦力が増加し CVJ と軸受内輪の接触面での滑りとなる。

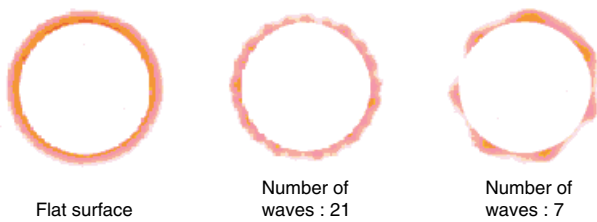


Fig. 4 Surface condition of CVJ

H : Slip at inner race and hub
C : Slip at inner race and CVJ

Interference of hub/bearings	Number of waves		
	Flat	21	7
$10\text{ }\mu\text{m}$	C	H	H
$25\text{ }\mu\text{m}$	C	C	H
$40\text{ }\mu\text{m}$	C	C	C

Fig. 5 Waves and interference for various fitting dimension of hub/bearings

3.1.2. 潤滑剤による動摩擦力の変化

一般的にFig. 1 に示す駆動輪の軸受回りの締結構造では、金属接触面に潤滑剤は使用せず切削油や防せい油が塗布されたのみの状態で組立られる。しかし、下記の試験結果より塗布する油の中には、金属接触面の滑りにおいてスティックスリップ防止効果が期待できないものがあることが分かった。

高面圧下での動摩擦係数を計測するために試験片に $\phi 10$ の鋼球 (Fig. 6) を用いた往復型摩擦試験機 (Fig. 7) を使用した。

試験潤滑剤

防せい油A：精製灯油を基油とする

防せい油B：潤滑油を基油とする

脱脂状態 (Fig. 8) では接触面荷重が 300N の場合に動摩擦係数が時間経過と共に増加することが確認できた。潤滑油を含まない防せい油A (Fig. 9) では、防せい油B (Fig. 10) と比べ時間経過と共に動摩擦係数が増加し脱脂状態 (Fig. 8) に近い動摩擦力が発生する不安定な潤滑状態となっている。



Fig. 6 Test piece for dynamic friction

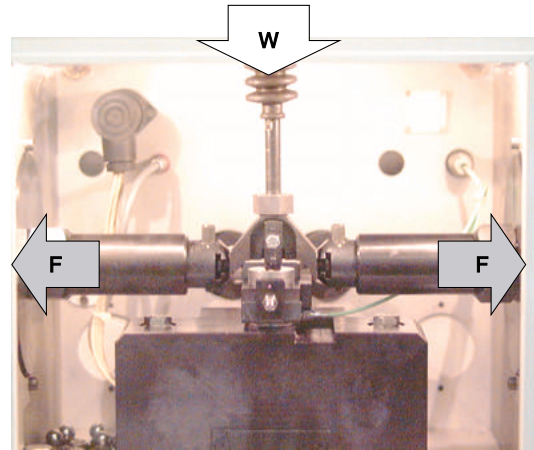


Fig. 7 Coefficient of dynamic friction

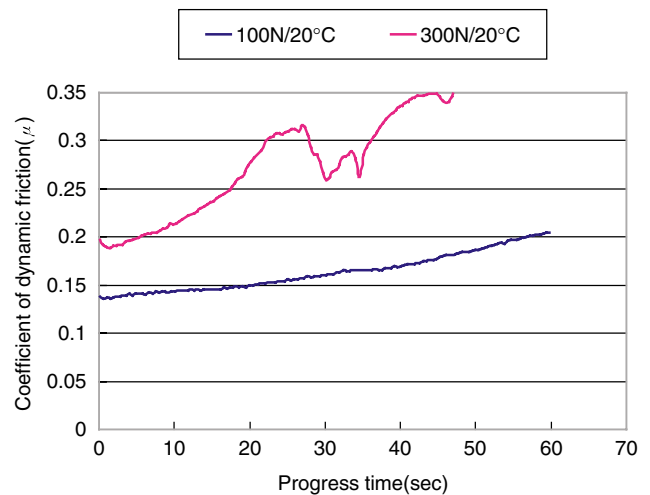


Fig. 8 Coefficient of dynamic friction when degraded

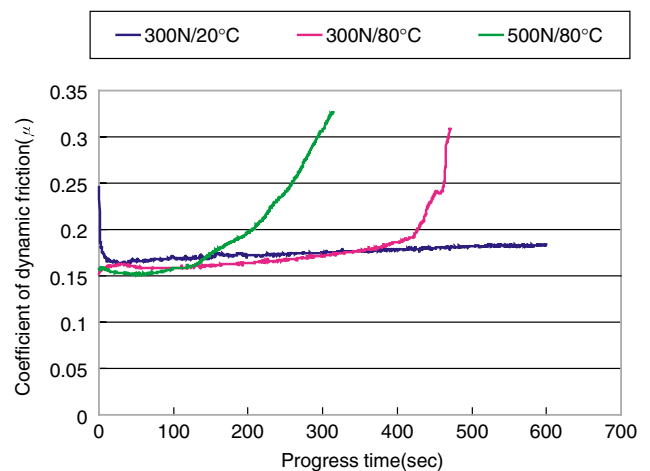


Fig. 9 Coefficient of dynamic friction with rust-proof lubricant type A

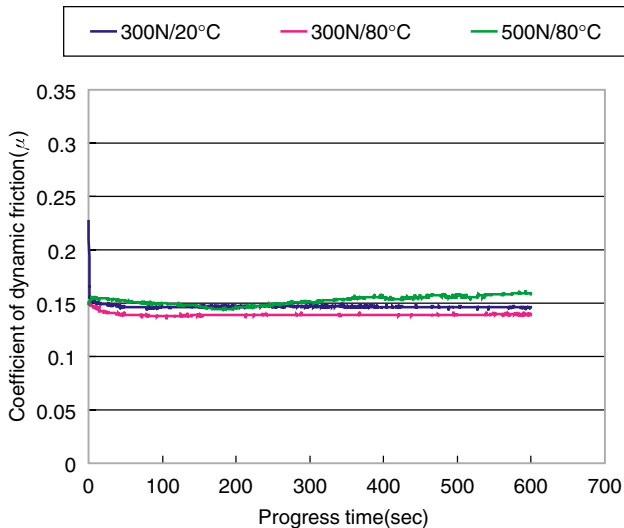


Fig. 10 Coefficient of dynamic friction with rust-proof lubricant type B

3.1.3. 軸受内輪の不均一なひずみ

Fig. 11は軸受内輪にハブを圧入後、軸力相当の荷重負荷後に無負荷にした時の内輪の長さ (Fig. 12のL)を測定した結果である。Fig. 11の内輪長さ40.96が上下二つの内輪の密着長であり40.96より短い状態は無負荷でのひずみの蓄積を現している。またFig. 12, 13は軸受内輪にひずみゲージを張り付け、軸力に相当する荷重を負荷し軸受内輪のひずみを計測したものである。Fig. 13では荷重を負荷しているにも関わらずゲージ3は引張り側に変化している。また荷重を取り除いた状態でもひずみが変わらない様子が確認できた。このような軸受内輪の不均一なひずみが発生した場合に、内輪とハブとの接触面における真の接触面積が減少し静止摩擦力が低下し滑りやすい状況が発生していると考えられる。軸受内輪の不均一なひずみをCAEで再現した図を Fig. 14 に示す。軸受内輪は通常不均一な肉厚となっており、ここに過大荷重が加わると発生するひずみも不均一となりやすい。

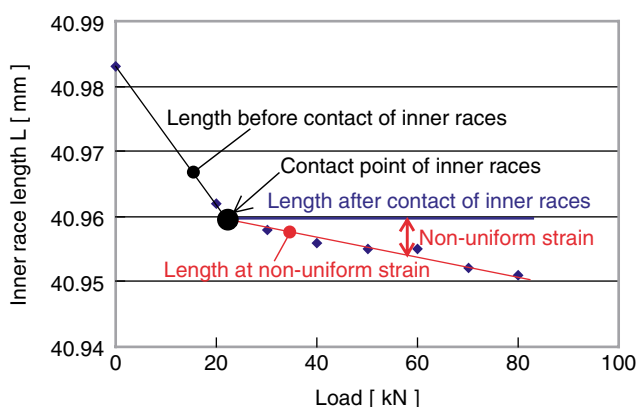


Fig. 11 Insertion load and inner race length

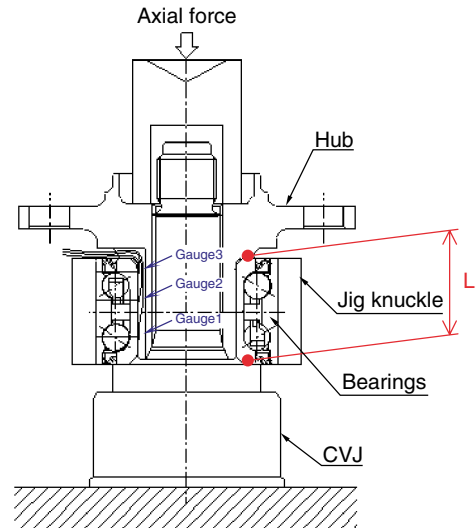


Fig. 12 Measuring strain of inner race of bearings

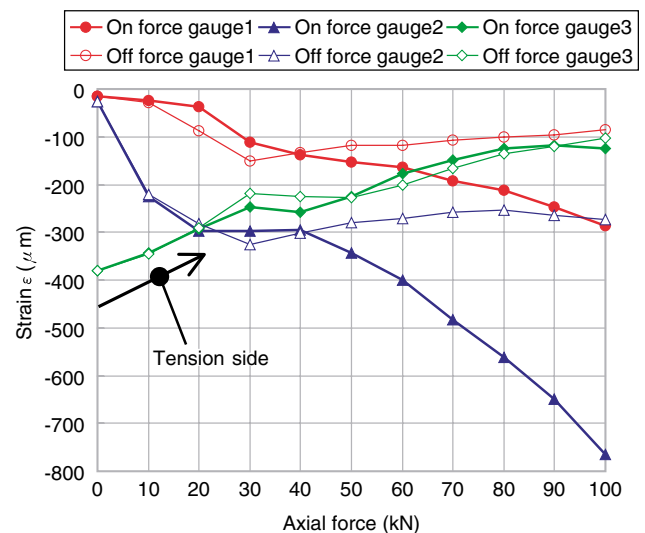


Fig. 13 Axial force and strain

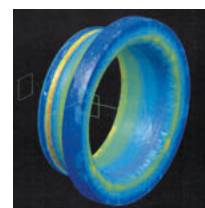


Fig. 14 Non-uniform strain of inner race

3.1.4. 湿度の影響

(1) 湿度とトルク係数

雨天時にこの締結構造を製作するとスティックスリップ音が発生するという事象があった。事象発生車両を調査するとスピンドルナットの締付けトルクが変化していたため、その要因解析を行った。

まず、湿度に対するトルク係数の変化を検証してみると Fig. 15に示すようにスピンドルナットの座面テーパ形状と加湿によるトルク係数の変化は確認できたが、加湿状態ではトルク係数が高くなり軸力が低くなる傾向となった。

ところが Fig. 16 のように、天候とスピンドルナットの着座後回転角度には明らかな相関が確認できた。この事象が発生する工場では圧入機は油圧制御で最大荷重を設定する構造のものを使用している。前述の圧入荷重と軸受内輪のひずみに相関があったように、軸受内輪へのハブ圧入工程が湿度に影響することで荷重過大となり、軸受内輪の不均一なひずみが発生するという仮説が立てられた。

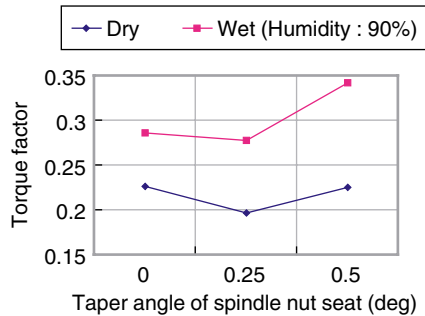


Fig. 15 Torque factor with variation in nut seat angle

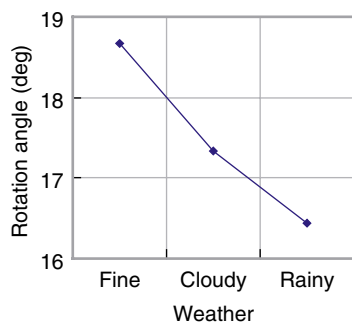


Fig. 16 Change of spindle nut rotation angle with change in weather

(2)湿度と潤滑状態

仮説を基に、湿度と圧入荷重を計測した。計測は量産の圧入機を用い Fig. 17 に示すように圧入時間毎の荷重の変化を記録する。軸受内輪にハブを圧入し内輪とハブが密着した時に荷重が立上る点の荷重(着座荷重)と、最大圧入荷重に着目し、湿度によるこれらの荷重の変化を比較した。

計測結果、雨天時の圧入機周りの湿度は60%程度であり、Fig. 18 に示すように着座荷重と最大圧入荷重の相関(相関係数: -0.912)が高いことが確認できた。着座荷重が低下すると最大圧入荷重が増加する。晴れた日の圧入機周りの湿度は20%程度であり、Fig. 19 に示すようにこの時の相関係数は低下し(相関係数: -0.280)相関は顕著ではない。

以上により湿度が高い場合は動摩擦力が低くなり、小さな圧入荷重で軸受内輪は着座することが分かる。これはハブを加工する時の水溶性の切削油が湿度により潤滑性能を変えることが原因と考えられる。着座荷重は小さいが圧入荷重制御の時間的遅れのため最大荷重が大きくなる。動摩擦力が低下していることから軸受内輪に加わる実荷重は大きくなっている。そのため、軸受内輪のひずみは大きくな

り、そのひずみは無負荷状態になっても蓄積されたまま次のスピンドルナット締付け工程に入る。締付けは基準トルクで行われるが、締付けで挟まれる軸受内輪は既に過大な圧入荷重によりひずんでいることから小さな回転角度で規定トルクに達する。その締結状態は、スピンドルナットの締付け過多と同じ状態となっていると考えられる。その締結状態のままで自動車に組付けられ、CVJ より駆動トルクを負荷すると軸受内輪はCVJ と一体で動くため軸受内輪とハブ圧入面において滑りが発生する。その滑りがスティックスリップ音の発生となる。

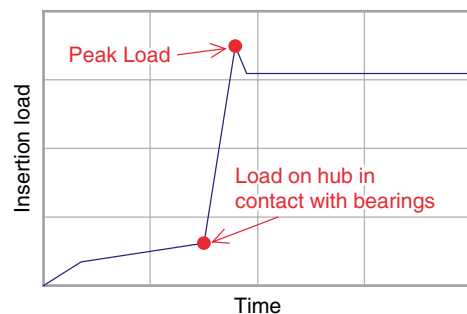


Fig. 17 Insertion load with time

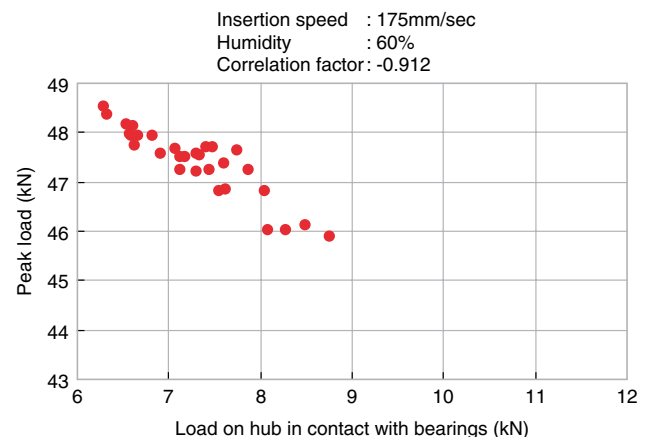


Fig. 18 Peak load and load on hub in contact with bearings in the case of a rainy day

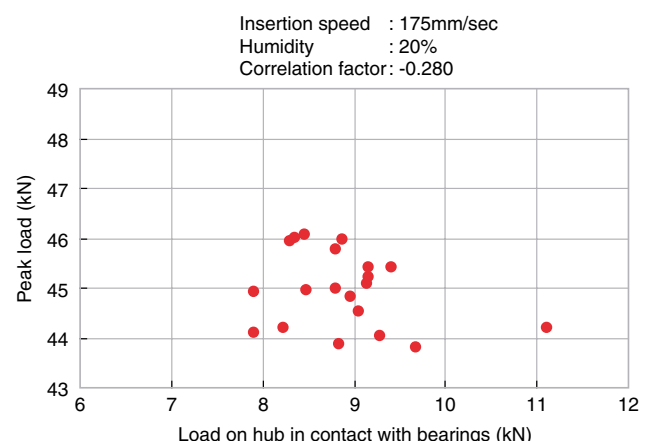


Fig. 19 Peak load and load on hub in contact with bearings in the case of a fine day

(3) 設定最大圧入荷重と圧入速度

前述の圧入機は最大荷重を設定するが、ライン流動する軸受サイズが変わっても通常はその設定を変えない。そのため小さなサイズの軸受ほど必要圧入荷重に対する設定荷重が大きくなり、その場合の圧入速度も速くなる。

Fig. 20 に示す今回の実験では、圧入速度が 175mm/sec と 80mm/sec での湿度に対する着座荷重と最大圧入荷重の相関係数を比較した。圧入速度 80mm/sec の場合は、どの湿度領域においても安定した圧入状態が得られた。それに対し圧入速度 175mm/sec では湿度により相関の変化が大きい事が確認できた。速度 175mm/sec の場合、圧入面に潤滑剤の巻き込み現象が生じたため潤滑状態が変化したものと考えられる。

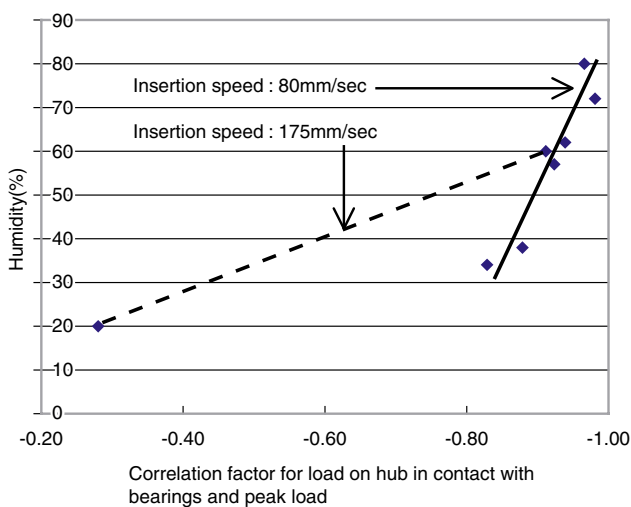


Fig. 20 Humidity and correlation factor

3.2. 耐久型スティックスリップ音

3.2.1. 面の荒れ

スティックスリップ音にはCVJと軸受内輪との接触面の滑りにより、接触面が長い間の走行により荒れることで発生する異音がある。Fig. 21に実際の走行で荒れが発生した接触面を示す。接触面が荒れることでこの面自身がスティックスリップを発生する場合と、荒れによりこの面の静止摩擦力が増加することで CVJ と軸受内輪が一体移動し、軸受内輪とハブとの圧入面で滑りが発生しスティックスリップとなる場合とがある。

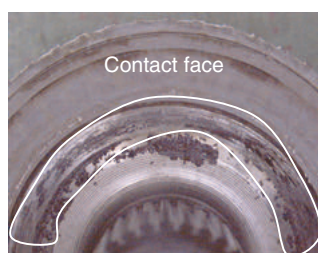


Fig. 21 Rough face of CVJ

3.2.2. 接触面の潤滑

摩擦の凝着理論に基づきスティックスリップ防止手法の検討を行った。CVJ と軸受内輪の接触面における潤滑手法選択のための条件として下記がある。

選択のための条件

- ・軸受シールなどのゴム材料への攻撃性がないこと
- ・接触面の保護環境が悪い状況下でも性能が出ること
- ・入手性が良く耐久後の補充が可能であること

以上の条件を考慮すると二硫化モリブデンを接触面に介在させ、その分子レベルでのせん断を利用した固体潤滑が適していると考えられる。

Fig. 22⁽¹⁾は、二硫化モリブデンを600万倍で見た結晶配向断面写真である。金属同士が相対移動する場合、金属接触面に存在する雲母状の分子構造を持つ二硫化モリブデンは自らがせん断することで金属間の凝着力を減少させる。

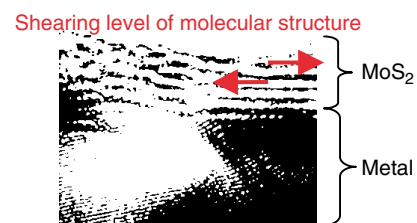


Fig. 22 Crystal structure orientation

前述の 3.1.2. の手法により二硫化モリブデングリースの動摩擦係数を計測した結果、高面圧において温度が変化しても安定した動摩擦係数を得る事が確認できた。

Fig. 23 に示すように 20℃の温度条件において接触面荷重を 100 ~ 300N まで上げていった場合に動摩擦係数はわずかながら低下することが確認できた。また、80℃の温度条件において接触面荷重を 300N の状態で 20℃の温度条件に対し動摩擦係数の低下が確認できた。同じく 80℃の温度条件において接触面荷重を 500N に上げると動摩擦係数は更に低下し 200 秒後には 0.05 で安定する事が確認できた。高面圧及び温度の

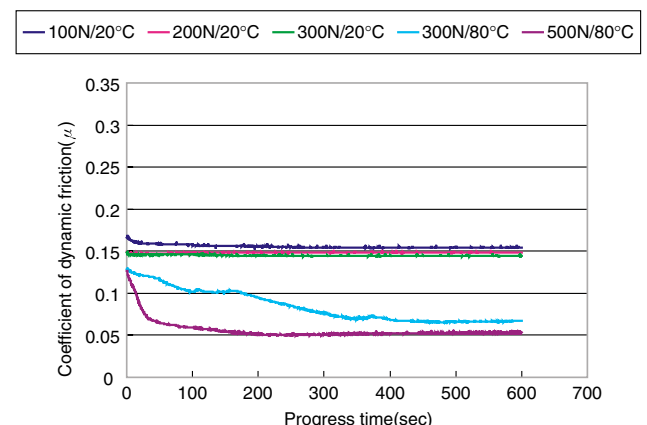


Fig. 23 Coefficient of dynamic friction with MoS₂ grease

上昇によりグリースの流動性が向上することで二硫化モリブデンが広く行き渡り動摩擦係数が低下したと考える。

以上の結果をまとめると、二硫化モリブデングリースは金属接触面に二硫化モリブデンが行き渡ることによって二硫化モリブデンの持つせん断しやすい特性が強く得られる。そのせん断しやすい特性を利用することで駆動輪の軸受回りのスリップスティックを防止することができる。

3.2.3. 潤滑と面の荒れ

締結部で滑りを繰り返すことで接触面が荒れるが、その限界状態と潤滑剤の効果をねじり試験機を用い確認する。

ねじり試験の条件

・接触面に塗布する潤滑材

①二硫化モリブデングリース

②防せい油

③脱脂

・ねじりトルク : $\pm 1300\text{N}\cdot\text{m}$

・繰返しサイクル数 : 8000 サイクル

結果を Fig. 24, 25, 26 に示す

①二硫化モリブデングリース：荒れの発生無し

②防せい油：荒れが発生

③脱脂状態：②に比べて程度の悪い面の荒れが発生

耐久的使用条件においても潤滑剤の使用が有効であることが確認できた。

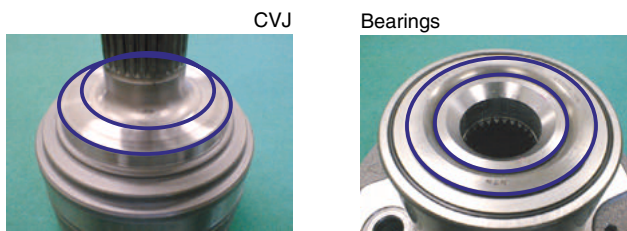


Fig. 24 Damage of contact face with MoS_2 grease

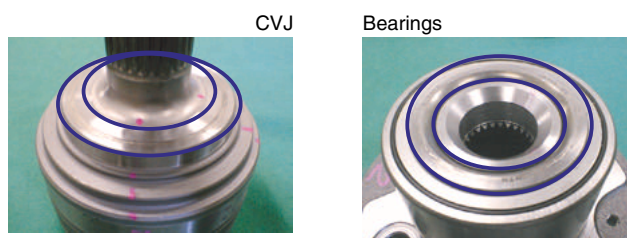


Fig. 25 Damage of contact face with rust-proof lubricant

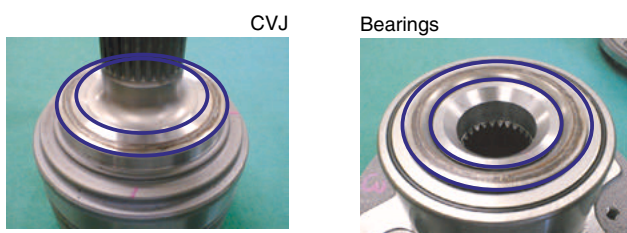


Fig. 26 Damage of contact face when degreased

4. スティックスリップ防止手法

駆動輪の軸受回りにおけるスティックスリップは、CVJ と軸受内輪との接触面の静止摩擦力増加、または軸受内輪とハブとの圧入面の静止摩擦力低減により発生する。スティックスリップの防止手法は、CVJ と軸受内輪との接触面の静止摩擦力を低減させ滑りを確保し、接触面の静止摩擦力を上回る軸受内輪とハブとの圧入面の静止摩擦力を確保することである。

4.1. CVJ と軸受内輪との接触面の滑り確保

CVJ の軸受内輪接触面の仕上げ工程を管理し、うねりの発生を防止することや同心筋目の旋削こんを残すことで静止摩擦力が低減出来る。また、CVJ の軸受内輪接触面に防せい油を塗布する場合は潤滑油を基油としたものを選択することで良好な潤滑状態が得られる。更に積極的な処置として、二硫化モリブデングリースを塗布することで CVJ と軸受内輪との接触面の滑りが確保できる。長期間の使用で潤滑状態が悪くなった場合には、二硫化モリブデングリースの補充で潤滑状態の改善が可能である。

4.2. 軸受内輪とハブとの圧入面の静止摩擦力確保

軸受内輪とハブとの圧入締結を大きくすることで圧入面の静止摩擦力を増すことができる。また、軸受内輪の剛性を上げることで締結に対し得られる圧入面の静止摩擦力が増加する。軸受内輪にハブを圧入する荷重が過大である場合や、スピンドルナットの締付けによる発生軸力が過大である場合に軸受内輪には不均一なひずみが生じる。不均一なひずみが生じた軸受内輪とハブとの圧入面における真の接触面積は減少し、静止摩擦力も減少する。軸受内輪の剛性を上げることで、不均一なひずみの発生を抑制し、軸受内輪とハブとの圧入面における静止摩擦力の確保ができる。

5. まとめ

駆動輪の軸受回りにおけるスティックスリップ音の要因解析を行うことで、複数の発生要因を発見する事ができ、従来は知られていなかった特殊な要因として以下のことが明らかとなった。

- (1) スピンドルナットの締付けによる軸力過大や過大圧入荷重で軸受内輪に不均一なひずみが発生し、荷重を取去ってもそのひずみは蓄積する。不均一なひずみが発生した状態の軸受内輪はハブとの圧入面においてスティックスリップ発生の要因となる。
- (2) 軸受内輪にハブを圧入する場合の圧入速度が速くなると、圧入面(摩擦面)の動摩擦係数は圧入時の湿度上昇の影響を受けやすくなる。湿度が上昇すると動摩擦係数が低くなる。湿度の高い環境で速い圧入を行うと動摩

擦力が減少し小さな荷重で圧入が可能となる。この結果、上記(1)と同じ圧入荷重過大の状態となりスティックスリップ発生の要因となる。

以上の特殊なスティックスリップの発生要因の排除と、CVJの軸受内輪との接触面の仕上げ工程管理、及び軸受内輪の剛性を確保した上でのハブとの圧入締代増加を行うことでスティックスリップ音の防止ができる。しかし、今回提案する最も効果的なスティックスリップ防止手法は、CVJと軸受内輪の接触面における良好な潤滑状態の確保である。具体的な手法としては、CVJと軸受内輪の接触面に二硫化モリブデングリースを塗布することで良好な滑り状態が維持でき、スティックスリップ音の発生が防止できる。

おわりに

今回研究した駆動輪の軸受回りにおけるスティックスリップにおいて、音のレベルとは別に、自動車の遮音性能の違いにより音の認識レベルが変化する。異音として認識しない状態においても、駆動トルクを加えた時に構造上CVJと軸受内輪との接触面において滑りを伴うのであれば、その接触面に二硫化モリブデングリースを塗布することにより良好な潤滑状態を維持し、スティックスリップ音のレベル変化を防止することが望ましいと考える。

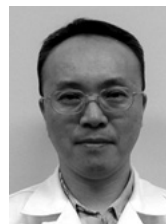
謝 辞

ご協力を頂いた柳河精機(株)、NTN(株)、(株)フセラシ、住鉱潤滑剤(株)の皆様に、この場をお借りしお礼申し上げます。

参考文献

- (1) Takahashi, N., Kashiwaya, S.: High resolution transmission electron microscopy observation of the MoS_2 -Au interface formed due to Stick-Slip of MoS_2 sliding on au in relation to the friction trace, Wear, 206, p. 8-14 (1997)

■ 著 者 ■



柏井 幹雄



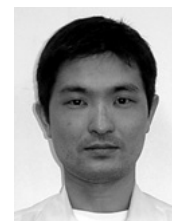
篠原 治男



丹羽 伸雄



山川 郁生



大出 茂基



水野 邦生