

湿式多板クラッチ実働時の自励振動挙動予測技術の構築

Creation of Technology for Prediction of Self-excited Vibration under Operating Conditions for Multiple-plate Clutches

星 崇 司*
Takashi HOSHI
田 伏 功*
Isao TABUSHI

南 中 道 隆*
Takashi MINAMINAKAMICHI
美 浦 一 葉*
Kazuha MIURA

東 上 圭 司*
Keiji TOJO
園 田 修 三*
Shuzo SONODA

要 旨

トランスミッションに採用されている湿式多板クラッチの自励振動を予測するためには、摩擦材の動摩擦特性とその使い方および駆動系の減衰特性の把握が重要である。摩擦面の温度、接触面圧の影響を受ける摩擦材の動摩擦特性について、面圧を均一化できる専用のトルク伝達特性試験装置を作成し、温度、面圧ごとにすべり速度依存性をとらえた。また、駆動系のフリクションによる損失トルクと振動発生時の実車挙動を計測し、実測値より減衰特性を求めた。得られた摩擦材の動摩擦特性とその使い方を定量的に把握するためのクラッチ FEM モデル、および駆動系の減衰特性を組み込んだトランスミッションから車体までのトルク伝達特性の挙動解析シミュレーションモデルを構築した。本手法の有用性を確認するため、自励振動を抑制するクラッチの構造をシミュレーションで検討し、実車にて振動の低減を確認した。

ABSTRACT

It is important to grasp the dynamic frictional characteristics of facing materials, their methods of use, and the damping characteristics of the drivetrain in order to predict self-excited vibration in multiple-plate clutches used in transmissions. A dedicated torque transmission characteristic test apparatus capable of equalizing the surface pressure was built to deal with the dynamic frictional characteristics of the facing materials, which are affected by the temperature and contact pressure of the friction surfaces. With this apparatus, the sliding velocity dependence was found for each temperature and surface pressure. The behavior of the actual vehicle was also measured when vibration occurs and loss torque is generated by friction in the drivetrain, and damping characteristics were determined from the measurement values. An FEM model of the clutch for the purpose of gaining a quantitative grasp of the dynamic frictional characteristics and methods of use of the facing materials obtained in this way was created, and a simulation model for dynamic behavior analysis of the characteristics of torque transmission from a transmission that incorporates drivetrain damping characteristics to the vehicle body was constructed. In order to confirm the usefulness of this method, the construction of a clutch that suppresses self-excited vibration was examined by simulation and the reduction of vibration in an actual vehicle was confirmed.

1. はじめに

燃費改善に対するユーザーニーズの高まりに伴い、軽量、コンパクトおよび低フリクションなトランスミッションが要求されている⁽¹⁾。軽量、コンパクト化への要求により、クラッチの大きさには制約があるが、一定の熱量を吸収するために耐久性も考慮しなくてはならない。この対応としては、ディスク摩擦面の内外径差を大きくとることで単位面積あたりの発熱量を抑える手法が知られている⁽²⁾。摩擦面内の面圧、温度、すべり速度は半径方向に不均一に分布しており、それらはクラッチ摩擦材の摩擦特性に大きく影響することが知られている⁽³⁾。そのため、クラッチの設計においてはクラッチ摩擦面の面圧、温度、すべり速度の分布を明らかにすることと、摩擦材そのものの摩擦特性を把

握することが重要となる。

また、低フリクションの要求に対しては駆動系のフリクションを低減することが考えられるが、このことは、一方で駆動系の減衰を減らすことになり、振動に対して不利な要因となる。駆動系で課題となる振動は、周波数が回転数に依存して変化する強制振動と、周波数が駆動系の固有値に依存し常に一定である自励振動がある。

強制振動に関しては構成部品の形状や精度を確認することで振動の発生原因や対策を検討できることが多い。自励振動においてはクラッチにすべりが発生している間は振動の振幅が増大し続ける傾向がある。自励振動はクラッチしゅう動面のすべり速度に対する摩擦係数の勾配と、駆動系の減衰特性の双方の影響を受けて発生の有無が決まるが⁽⁴⁾、クラッチの動摩擦特性の勾配および駆動系の減衰特

*四輪 R&D センター

性の定量化には不明点が多い。また、現状の車両振動シミュレーション技術は、クラッチに関しては単一の摩擦係数で表現したものが主であり、設計段階においてクラッチの構造で振動の対策を検討するには至っていない。そのため、これまでの自励振動の対策は摩擦特性に影響の大きいオイルや摩擦材の劣化を抑制する観点でおこなわれてきた^{(5), (6)}。そこで、本稿ではクラッチ摩擦材が持つ動摩擦特性とその使い方に着目した。クラッチを Finite Element Method (FEM) モデルで作成し、駆動系の減衰特性を含むプラントモデルにより自励振動発生時のトルク伝達特性がシミュレートできる挙動解析技術を開発した。これにより駆動系のトルク伝達特性が決まるメカニズムを明らかにし、自励振動の定量的な予測を可能とした。

2. 振動事象の把握

解析に用いたトランスミッションの主断面を Fig. 1 に示す。ドリブンプーリシャフト上に発進用の湿式クラッチが配置され、回転軸内部に設けられた油圧回路の圧力をコントロールすることでなめらかな発進を可能としている。

摩擦調整剤を配合していないオイルを使用することにより、実車にて振動を再現させた結果を Fig. 2 に示す。発進加速時の出力回転を高速フーリエ変換 (FFT) にて周波数分析した結果、回転数に比例して周波数が上昇する強制振動の他に、クラッチに振動が発生している領域においては、回転数に依存せずに一定の周波数でピークが現れる自励振動が確認できた (Fig. 3)。また、実車計測トルクとクラッチ差回転からトルク伝達特性を検証したところ、振動が発生している差回転領域で負勾配となっており、振動には差回転に対して負勾配のトルク伝達特性が寄与していると考えられる (Fig. 4)。

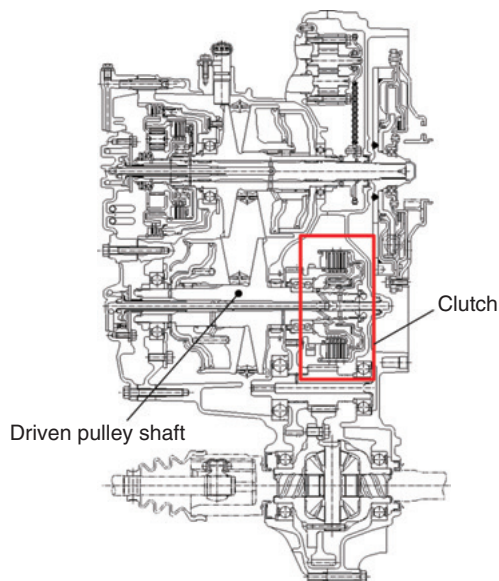


Fig. 1 Main section of transmission

次に、実車での振動発生時の摩擦面の状態を把握するために表面温度と面圧分布を調査した。係合過程の摩擦面温度を計測するために、プレートへ熱電対を埋め込んだ (Fig. 5)。内径側 A, C のプレート温度と外径側 B, D のプレート温度は上昇速度が異なり、半径方向への分布を持っていると考えられる (Fig. 6)。

面圧分布は感圧紙により測定した。その結果、表面温度と同様に半径方向へ分布をもっていることを確認した (Fig. 7)。

以上のことからクラッチ摩擦面の表面温度と面圧分布はそれぞれ半径方向に不均一であることがわかった。

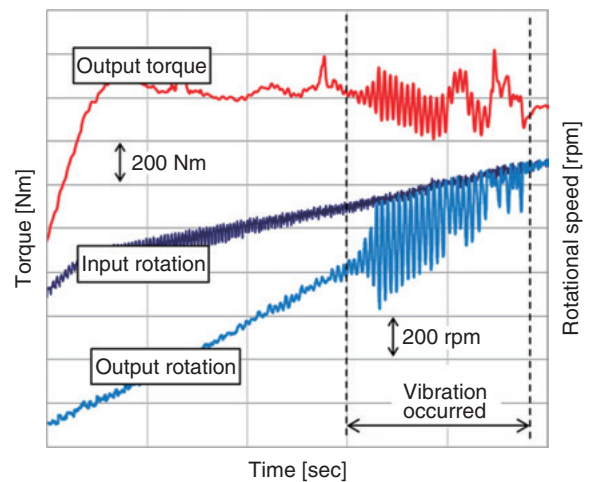


Fig. 2 Self-excited vibration measurement results

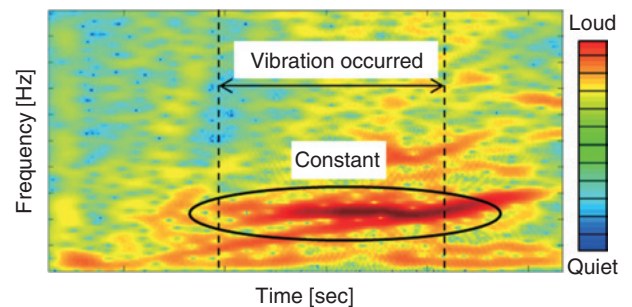


Fig. 3 Frequency analysis of vibration at starting acceleration

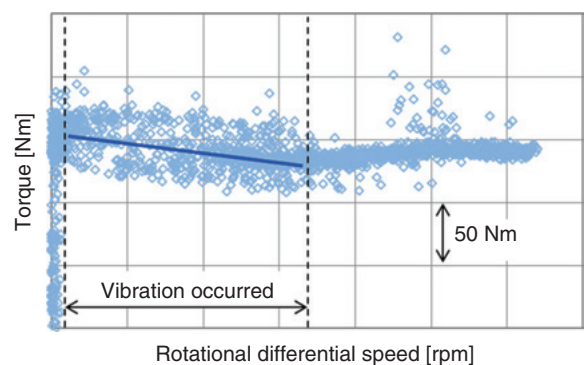


Fig. 4 Torque transmission characteristics

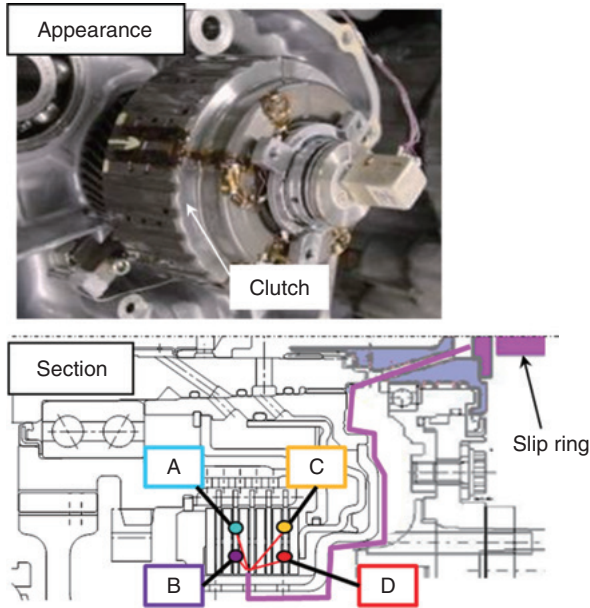


Fig. 5 Measurement points

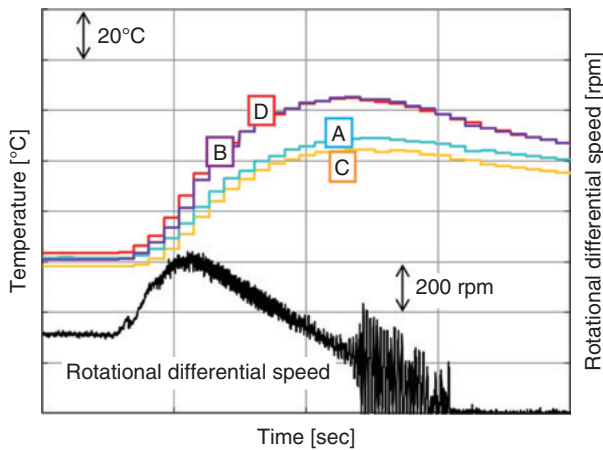


Fig. 6 Plate temperature measurement results

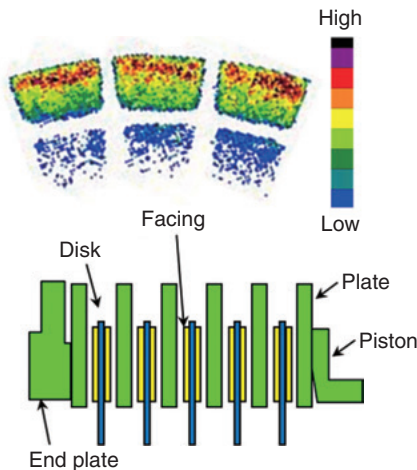


Fig. 7 Facing contact pressure distribution

3. 自励振動解析モデルの構築

クラッチの自励振動は駆動系全体のバネマス系の運動方程式で記述できる (Fig. 8). ここで I はクラッチ以降の車体のイナーシャ, K はドライブシャフトのねじり剛性, T はクラッチの伝達トルク, T_0 は静摩擦係数におけるクラッチの伝達トルク, θ_1 および θ_2 はそれぞれクラッチ駆動側および従動側の回転数を示す. このとき, 摩擦材によるトルク伝達特性 (Fig. 8 中の勾配 a) と駆動系減衰によるトルク伝達特性 (Fig. 8 中の勾配 c) を考慮する必要がある, これらの特性が振動の収束あるいは発散に影響する.

駆動系減衰によるトルク伝達特性は常に正勾配と考えられる. しかし, 摩擦材によるトルク伝達特性は摩擦特性の変化やクラッチの構造によっては摩擦面各部で摩擦係数がすべり速度に対して負勾配になる場合がある. その合計のトルク伝達特性が負勾配となった時に振動が発生すると推定した.

そこで, 実働時のクラッチ摩擦面状態を再現し, 駆動系の減衰特性を考慮可能な計算モデルを構築した (Fig. 9). クラッチ部分は FEM モデルで作成しており, クラッチ摩擦面の面圧, 温度, すべり速度の分布を考慮した. またクラッチ前後のドライブトレイン要素を 1 次元のねじり振動系モデルで結ぶことで, 実際の車両の振動を予測することが可能な挙動解析モデルとした.

3.1. クラッチ摩擦材の動摩擦特性

クラッチ摩擦材の摩擦特性を計測する試験装置として SAE#2 試験機や LVFA 試験機が知られている. しかし,

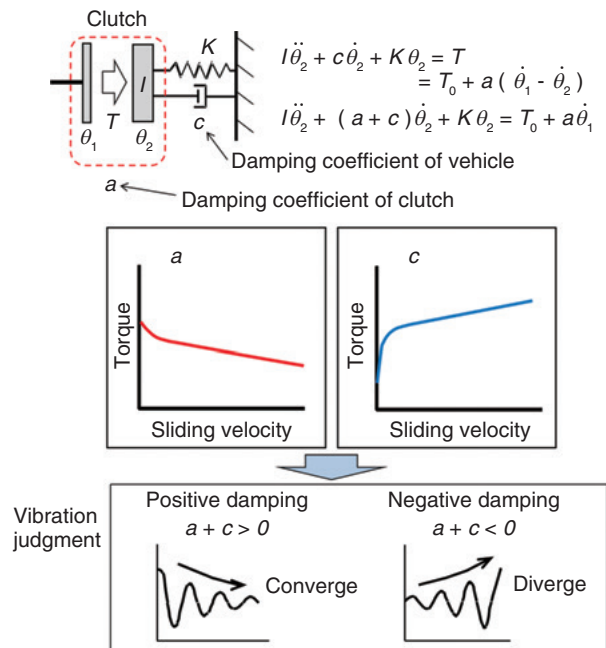


Fig. 8 Hypothesized mechanism of self-excited vibration

Table 1 Conditions of torque characteristics measurement

Contact pressure	0.5 – 6.0 [MPa]
Plate temperature	40 – 180 [°C]
Rotational speed differential	0.5 – 600 [rpm]

これらの試験機では実機相当の面圧状態での摩擦特性の計測が困難である。また、摩擦材全体を一定の温度に保持することが難しい。そこで専用のトルク伝達特性試験装置を作成した (Fig. 10)。これにより、実機相当の高面圧領域で面圧を均一に保持でき、摩擦面全体を均一な温度にコントロールすることが可能となった。本装置にてすべり速度を変化させてトルク伝達特性試験をおこなった。試験条件を Table 1 に示す。

トルク測定結果の一例を Fig. 11 に示す。まず油圧を付加し、その後回転数を目標値まで上昇させた。油圧と回転数が定常状態になったときの伝達トルクおよび摩擦面各部の温度を測定した。この試験を Table 1 に示す面圧、温度、回転数の条件下で複数回おこなった。

次に測定結果から Fig. 12 に示すような差回転ごとの動

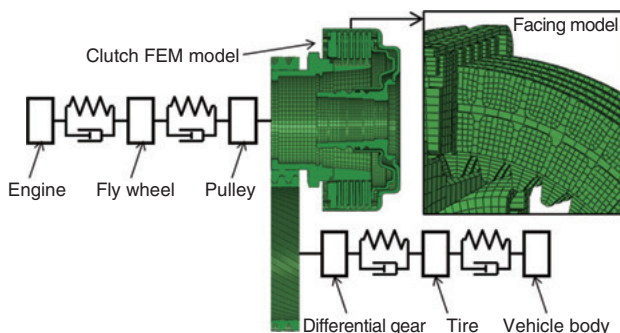


Fig. 9 Self-excited vibration prediction model

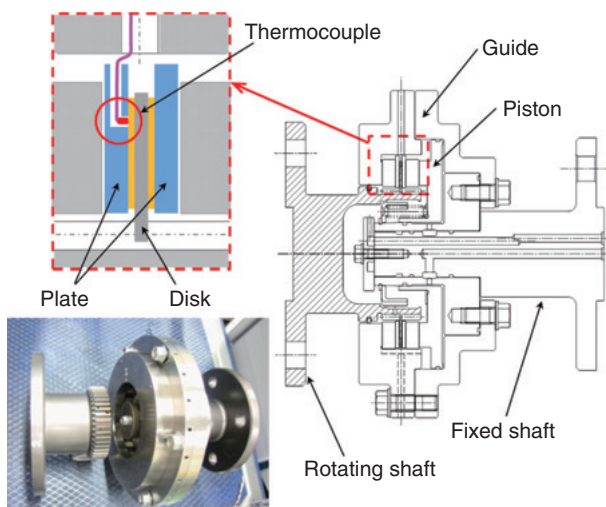


Fig. 10 Test apparatus for torque transmission characteristics

摩擦係数と温度の関係を各面圧で整理した。さらにこれを温度ごとの動摩擦係数と差回転の係に各面圧でまとめた。

得られたクラッチ摩擦材の動摩擦特性の差回転との関係を面圧別 (Fig. 13)、温度別 (Fig. 14) にそれぞれ整理した。動摩擦特性は面圧および差回転に対して依存性を示し、面圧については低面圧側が、温度については高温側がそれぞれ正勾配傾向を示した。

3.2. 駆動系減衰特性の把握

エンジンからタイヤまでの駆動系全体の減衰を考えると、エンジンからクラッチの間の減衰は振動に影響を与え

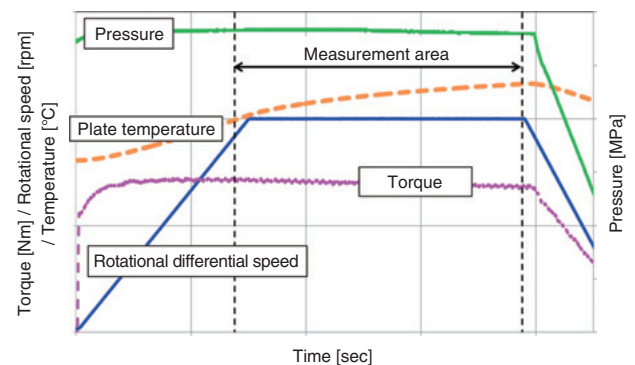


Fig. 11 Results of measurement

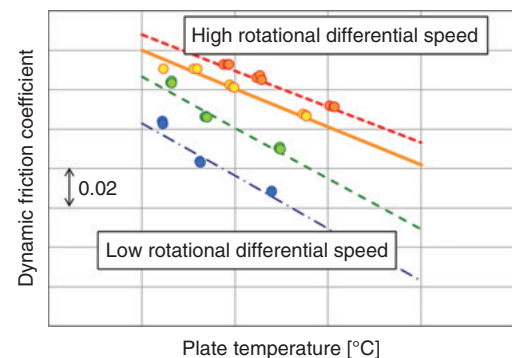


Fig. 12 Friction characteristics

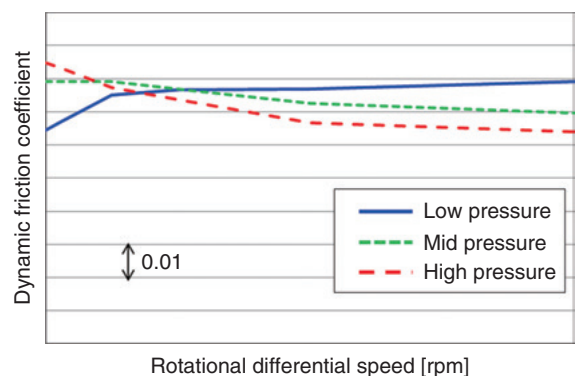


Fig. 13 Influence of pressure in dynamic friction coefficient

ないため、クラッチからタイヤの間の減衰に着目した。

クラッチからタイヤの間の減衰にはトランスミッション内部のフリクションとディファレンシャルギヤの差動が挙げられる。内部フリクションについては、クラッチディスクとプレートを取り外してディファレンシャルギヤをロックした状態で損失トルクを計測し、回転速度に対する損失トルクの関係から減衰係数を求めた (Fig. 15)。

ディファレンシャルギヤの差動に伴う減衰については測定と解析の双方から同定した。Fig. 16 に左右ドライブシャフト回転数の振動挙動の計算結果を示す。ドライブシャ

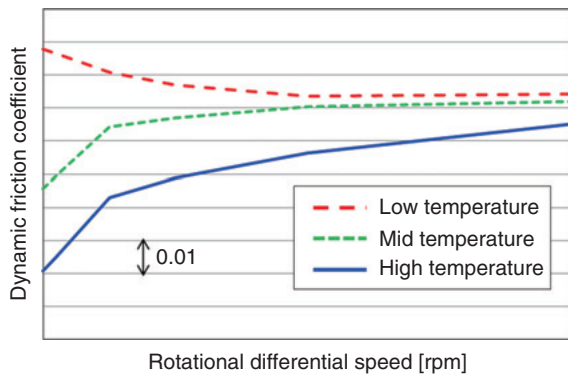


Fig. 14 Influence of temperature in dynamic friction coefficient

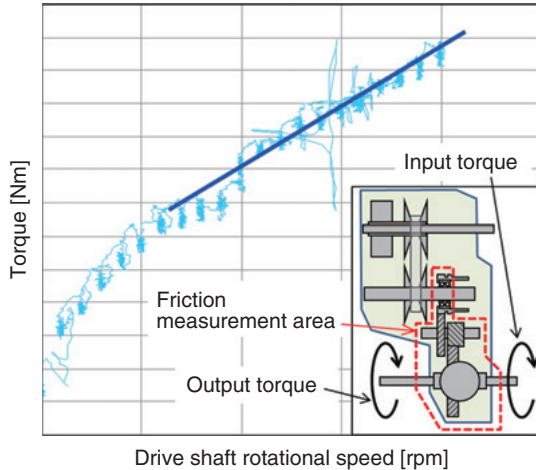


Fig. 15 Measurement of friction loss in transmission

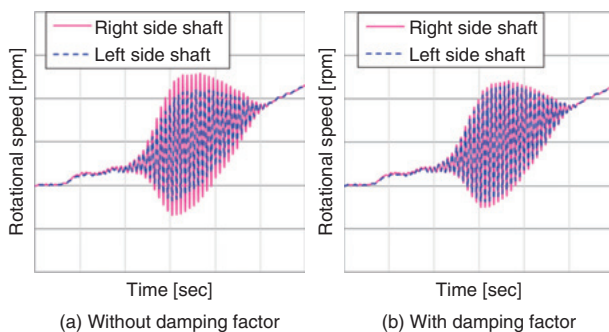


Fig. 16 Effect of differential gear damping factor

フトは左右で不等長であるため剛性差がある。そのため、ディファレンシャルギヤにフリクションがない場合は、振動発生時に左右ドライブシャフトに配分される回転数とトルクは、直進走行時であっても左右の剛性差の影響を受けて振動挙動に差が出る。一方、ディファレンシャルギヤがフリクションをもち減衰作用がある場合は、左右の振動挙動の差が低減されドライブシャフトの左右剛性差の影響を低減する効果がある。

そこで、振動を再現した実車にて、直進時の左右ドライブシャフトインボード側の回転挙動を計測した。その結果、左右の振動挙動の差は微小でありフリクションの影響が確認された (Fig. 17)。これを踏まえ、減衰パラメータを含むディファレンシャルギヤ周辺の理論計算モデルを作成し、回転挙動が実車と同等になるよう減衰パラメータを同定した (Fig. 18)。

3.3. 実現象との適合性確認

先述の摩擦特性と減衰特性を用いた自励振動解析モデルによるシミュレーション結果と、実車計測結果との比較を Fig. 19 と Fig. 20 に示す。摩擦調整剤を配合したものと配合していない2種類のオイルによる検証をおこない、実車同等の振動発生の有無を再現した。また、振動が発生した摩擦調整剤を配合していないオイルでの検証では、周波数、振幅および振動の開始時期も実測との適合性がとれた。

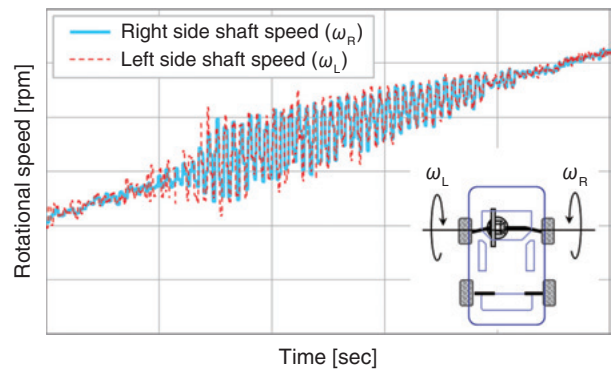


Fig. 17 Measurement of drive shaft speed

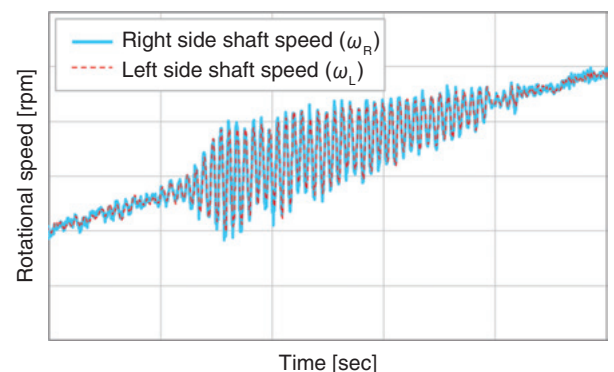


Fig. 18 Identification of damping factor

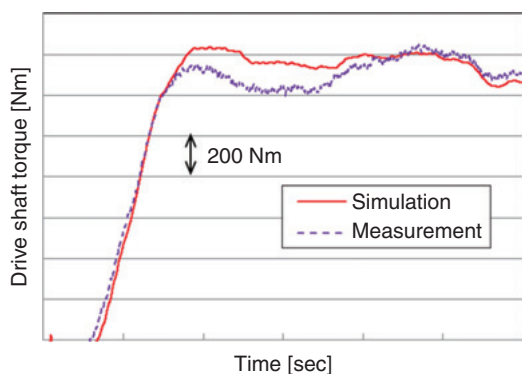


Fig. 19 Torque characteristics (oil with friction modifiers)

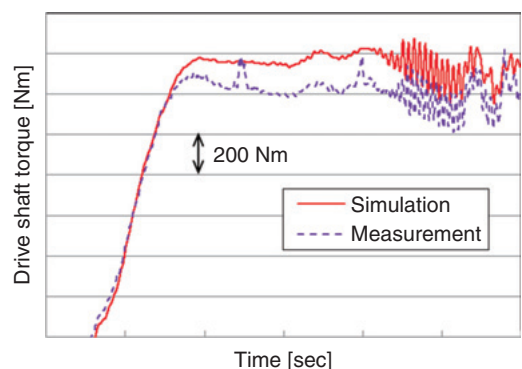


Fig. 20 Torque characteristics (oil without friction modifiers)

4. 構築技術の検証

動摩擦特性の温度、面圧、すべり速度による変化の中から可能な限り正勾配の領域を使う考え方による振動抑制を構造の観点で検討した。

測定により得た動摩擦特性において、自励振動の抑制には面圧は低い領域を使うことが効果的であり、温度は高い領域を使うことが効果的である。しかし高温領域での使用については耐久性能への影響が大きいことから低面圧化に着目した。

クラッチの基本的な性能であるトルク容量を減らさずに面圧を下げるためには摩擦面数を増やす構造が考えられる。ただしディスク、プレートをそのまま追加することや、半径方向への拡張はコンパクト化と相反する。そこで、クラッチ全体の寸法拡大を伴わず、冷却性や耐久性を維持できる手法として、ディスク芯金と薄肉化したプレート双方に摩擦材を片面貼りにするとともに、ディスク枚数を5枚から7枚へ増やす構造を検討した (Fig. 21)。

効果検証は摩擦調整剤を配合していないオイルを使用することにより自励振動を発生させやすい状況でおこなった。まず、対策仕様の自励振動の抑制効果をシミュレーションにて検証した。その結果、対策仕様では振動が低減

されることを机上にて確認した (Fig. 22)。

次に、この仕様を用いて実車にて確認をおこなった。その結果、シミュレーションと同様に振動が減少した (Fig. 23)。また、この振動波形を周波数分析した結果、自励振動が発生する周波数帯でのピークが低減していることから、本対策手法の有用性が確認できた (Fig. 24)。

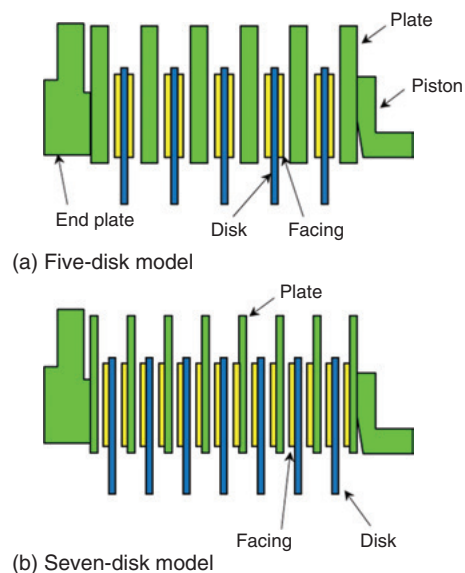


Fig. 21 Section of current and review specifications

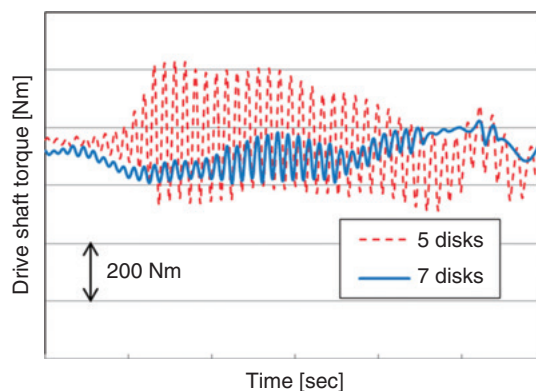


Fig. 22 Calculation results of torque characteristics

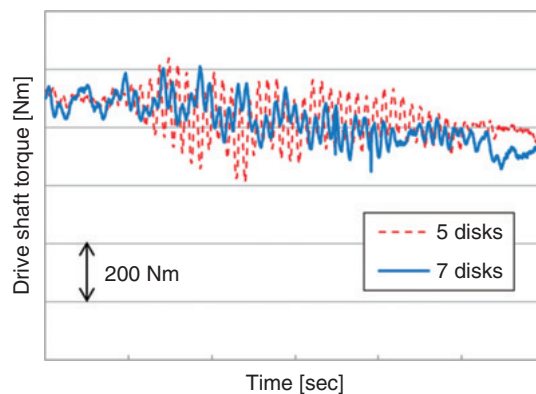


Fig. 23 Measurement results of torque characteristics

寿命化技術, トライボロジスト, 第 53 巻, 第 4 号,
 p.236-241(2008)

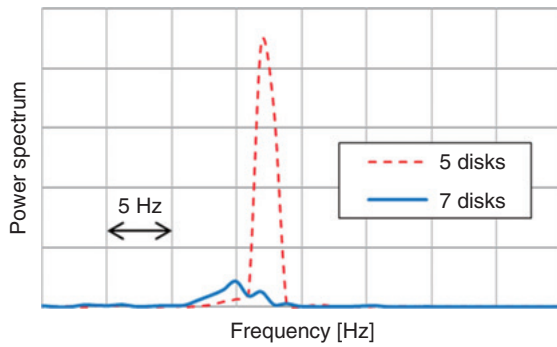


Fig. 24 Power spectrum of measurement results

5. まとめ

湿式多板クラッチ実働時の自励振動挙動予測技術について、以下の結論を得た。

- (1) クラッチ摩擦面のトルク伝達特性と駆動系の減衰値を用いて駆動系全体のトルク伝達特性が計算可能な挙動解析モデルを開発し、実車の定量的な自励振動予測が可能となった。
- (2) 振動抑制手法として、ディスク枚数を増やして摩擦材を片面貼りにした構造のクラッチを検討した。その振動抑制効果を、構築した挙動解析モデルと実車検証の双方で確認した。

参考文献

- (1) 山口正明, 大瀧光郎, 伊藤敬介, 菰澤英夫, 戸塚博彦: 新型 FIT 用トルクコンバータ付き CVT の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.2, p.11-16
- (2) 齋藤俊博, 古手川保, 松浦吉輝, 田中征一, 大槻王一: 湿式多板クラッチの摩擦特性を考慮した耐久性予測技術の研究, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.155-162
- (3) Saito, T., Yamaoka, T., Kato, M., Minaminakamichi, T., Hoshi, T., Miyamoto, K.: Technology for Prediction of Torque Capacity during Operation of AT with Focus on Friction Properties of Facing Materials in Multiple Plate Clutches, SAE Technical Paper 2009-01-1255(2009)
- (4) 太斎正志: 湿式クラッチおよび湿式ブレーキにおける音響・振動, トライボロジスト, 第 35 巻, 第 5 号, p.326-330(1990)
- (5) 遠山護, 大森俊英, 三田修三: ATF 添加剤のシャダー防止作用機構解析, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.35, No.3, p.43-50(2000)
- (6) 八並憲治, サムエル ターシグニ, リー サーソフ, クリストファー クリーブランド: 自動変速機油の長

■著 者■



星 崇 司



南中道 隆



東上 圭 司



田 伏 功



美 浦 一 葉



園 田 修 三