

CVT 搭載 4 輪駆動車の発進加速時の振動予測技術

Prediction Technology for Vibration at Takeoff and Acceleration in AWD Vehicle Fitted with CVT

宮 下 真 明¹

Masaaki MIYASHITA

山 本 京 平¹

Kyohei YAMAMOTO

佐 川 正 記¹

Masaki SAGAWA

福 留 弘 幸¹

Hiroyuki FUKUDOME

要 旨

試作車を製作する前段階で振動騒音性能を早期に検討するための振動予測技術を構築した。車両開発で活用している振動騒音性能設計を目的として機構解析モデルに、CVT のベルト共振とリヤデフクラッチの差回転および変動成分をモデル化して組み込んだ。車両の発進時や加速する走行シーンにおいて、CVT のベルトやリヤデフクラッチの振動伝達特性は走行条件に応じて変化する。そこで、車体に先行して開発する CVT、4 輪駆動システムの単体テストを用い、モデルに与えるパラメータ同定をおこなった。本技術は、試作車を製作する前段階での性能設計に有効であり、従来おこなっていた実車テストによる性能検証の手戻り工数を削減できる。

ABSTRACT

A vibration prediction technology for the early examination of noise and vibration performance at development stages prior to the manufacture of a prototype vehicle has been developed. CVT belt resonance and differential rotation and the fluctuation component in the rear differential clutch were modeled and incorporated in a multi-body analysis model for use in noise and vibration performance design in vehicle development. The torsional vibration transfer characteristic of the CVT belt and the rear differential clutch vary in response to driving conditions in driving scenarios involving vehicle takeoff and acceleration. Parameters to be applied in the model are therefore identified in unit tests of the CVT and all-wheel drive system, which are developed in advance of the vehicle body. The developed technology is effective in performance design at development stages prior to the manufacture of a prototype vehicle, and reduces the man-hours involved in repeating performance validation using actual vehicle tests.

1. ま え が き

近年、SUV の販売台数が世界各地で増加している。SUV には雪上等の低 μ 路や未舗装路でも高い走行性能を発揮させる 4 輪駆動 (All Wheel Drive: AWD) システムが搭載されることが多い。また、環境対応のため燃費性能の高い CVT を搭載した車両も増えている。

また、快適性向上のため、振動騒音 (Noise and Vibration: NV) 性能の向上ニーズが高まっている一方、燃費低減のための軽量化やコストダウンなどの要望も大きく、車両開発は益々複雑さが増している。同様に、開発期間短縮や試作車台数削減も求められており、これらへの対応として、車

を製作する前段階におけるシミュレーション技術は開発効率向上の有効な手法となっている。

昨今、走行性能向上のために車両の発進時や加速する走行シーンにおいて後輪へのトルク配分を増やす傾向にあるが、タイヤからの駆動反力に対してリヤデフアレナール (Rear Differential Unit: RDU) マウントの変位を抑制するためには、RDU マウントの支持剛性を高める必要がある。しかし RDU マウントの剛性を高めると RDU から車体への振動遮断量が減少するため NV 性能は低下する。一方、CVT を搭載した車両は、AT に対してトルクコンバータのロックアップ領域が広いことからロックアップダンパの振動遮断量が小さい。そのためにトルク変動入力と呼ばれる

¹ オートモービルセンター

エンジンからプロペラシャフトへの振動入力が大きくなる。プロペラシャフト、RDU マウントの仕様はレイアウトや支持方法に大きく依存することから試作車製作後の変更は容易ではない。

また車両発進時において、CVT ベルト、RDU クラッチの振動伝達特性は過渡的に変化し、定常状態を想定した従来のシミュレーションモデルでは再現が容易ではない。そこで、試作車製作前に AWD 走行性能向上による RDU マウントから車体へ入力される振動増加量を予測し、NV 性能を向上させるための仕様検討が可能な振動予測技術を構築した。Fig. 1 に示す直列 4 気筒エンジン搭載 FF ベースの AWD 車を検証対象として、CVT ベルト、RDU クラッチを含めた車両機構解析をモデル化した。

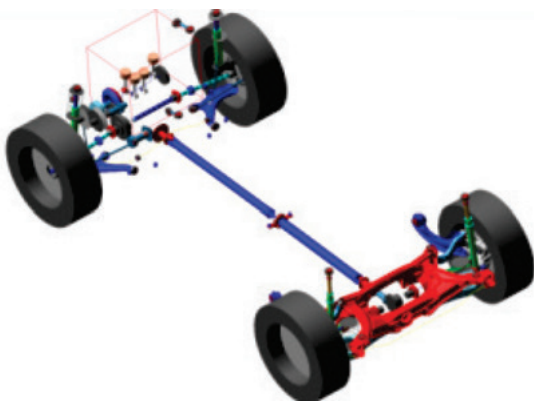


Fig. 1 Vehicle multi-body simulation model

2. 研究課題とねらい

CVT を搭載した AWD 車両の発進加速時の振動予測技術の課題について述べる。

車両開発で活用している従来の AWD-NV 性能設計シミュレーションモデルにおいて、CVT は剛体要素でモデル化している。また RDU クラッチに関しては差回転や変動成分を含まない静摩擦特性にてモデル化している。

本研究で対象とするベルト式 CVT において、CVT ベルトの加振力と共振周波数は、発進加速時に変速レシオやエンジンからの入力トルク等の走行条件により変化する。これまでの CVT ベルトのシミュレーション事例では⁽¹⁾⁻⁽³⁾、摩擦によるエネルギー損失を考慮しておらず、変速レシオや入力トルク等の走行条件の変化に対する減衰係数や加振力を再現できない。

また、本研究で対象とする電子制御油圧式の RDU クラッチは、発進加速時に前／後輪回転数差が発生し、差回転が生じる。RDU クラッチの振動伝達特性は差回転や変動成分に応じて変化する。これまでの RDU クラッチのシ

ミュレーション事例では⁽⁴⁾、変動成分が無い条件下で計測した動摩擦特性をモデルに反映しているため、発進加速時の RDU クラッチの振動伝達特性を再現できない。摩擦特性の計測方法については、実車走行状態で生じる差回転や変動成分がある状態でのクラッチの摩擦特性を計測できない。そのため、従来のシミュレーション技術ではプロペラシャフトを含む AWD システムの振動伝達特性を正確に表現できない。

これらのシミュレーション技術事例に関しては、CVT やクラッチといった単体での報告事例がほとんどであり、複数のシステムを組み合わせることで車体への入力振動を予測した研究事例はこれまでになかった。

本研究では、実車に対して先行して開発する各システム単体テスト結果から、変速レシオ等で変化する CVT ベルトの減衰係数、差回転や変動成分に応じて変化する RDU クラッチの動摩擦係数を同定する手法を構築し、Fig. 2 で示す CVT 搭載 AWD 車の RDU マウント振動を予測する技術を構築した。

本研究において、対象とする振動周波数は、車両発進時の NV 成立性の課題が大きい CVT ベルト、プロペラシャフト、RDU マウントの共振周波数が存在する 90 Hz から 120 Hz とした。対象とする走行条件は、車両の発進加速時とした。エンジンのトルク変動に加えて、CVT のベルト回転変動を入力として、試作車を製作する前段階に入手可能な情報のみでモデル化をおこない、車両応答モデルと組み合わせることで RDU マウントの振動レベルを予測できることをねらいとした。

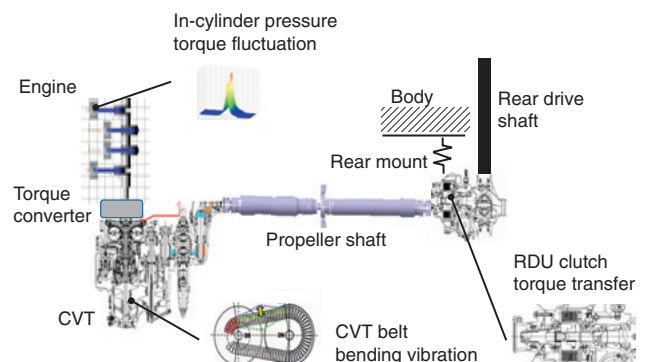


Fig. 2 Transfer mechanism

3. モデル化の全体像と考え方

シミュレーションモデルは、エンジン、CVT、プロペラシャフト、リヤドライブシャフト、RDU クラッチ、RDU マウント、ボデーで構成された機構解析モデルとした。本研究で技術構築した CVT ベルトと RDU クラッチのモデル化の考え方について説明する。

3.1. CVT ベルトのモデル化

CVT ベルトは、対象とする周波数で、弾性変形するので質量要素、バネ要素、減衰要素で表した。CVT ベルトモデルの模式図を Fig. 3 に示す。CVT ベルトは、100 Hz 帯で発生するベルト弦振動を再現しつつ計算負荷を低減する観点から、有限要素モデルではなく、ベルトを一つのパネ要素と減衰要素で表現した。またプライマリプーリとセカンダリプーリは、質量要素としてモデル化した。CVT ベルトは回転状態におけるエレメント、リング等の金属部品の接触によりエネルギーを損失する。式 (1) に、質量要素間における等価粘性減衰係数とエネルギー損失との関係式を示す⁽⁵⁾。 C' は等価粘性減衰係数、 E は一周あたりエネルギー損失、 ω は角速度、 A は振幅を表す。

$$C' = \frac{E}{\pi\omega A^2} \quad (1)$$

式 (1) に示す通り、理論上粘性減衰係数は実測したエネルギー損失と振幅より算出することが可能であるが、回転状態のベルトの共振状態における各エレメントやリング等の振幅を直接計測することは容易ではない。本研究では、実車走行を模擬した条件にて CVT 単体を対象としたねじり加振テストをおこない、計測したプーリ回転変動量から減衰係数を同定することとした。設計諸元で定まる質量、バネ特性と組み合わせることで、変速レシオ等の条件が違う CVT ベルトの弾性変形を再現可能なモデルとした。

3.2. RDU クラッチのモデル化

RDU クラッチは、プロペラシャフトに直結する入力側シャフトとハイポイドギヤに直結する出力側シャフトの間を湿式多板クラッチで結合しており、対象とする周波数で、弾性変形せず、質量要素、摩擦要素で表すことができる。RDU クラッチを含む AWD システムモデルの模式図を Fig. 4 に示す。クラッチの摩擦特性は、差回転や押し付け荷重によって潤滑状態が変化するため、その摩擦特性を数値解析的に算出するのは容易ではない。そこで、本研究では実験的に求めることとした。クラッチの摩擦特性は低速滑り摩擦試験機 (以下、LVFA 試験機) によって計測される。LVFA 試験機では、クラッチ単体に対してスラスト荷

重を加え、変動成分を含まない強制回転を与えることで動摩擦特性の計測をおこなう。Fig. 5 に LVFA 試験機で計測した差回転に対する動摩擦特性を示す。式 (2) に、クラッチ押し付け力と伝達トルクの関係式を示す。 T は伝達トルク、 μ_d は動摩擦係数、 n はクラッチ枚数、 R はクラッチ動半径、 F はクラッチ押し付け力を表す。

$$T = \mu_d n R F \quad (2)$$

車両発進加速時において、RDU クラッチは差回転を有し、また入力側であるエンジンや CVT からのトルク変動を受ける。本研究で対象とするねじり振動に対して、動摩擦特性は変動成分を含まない状態とは異なることが過去に報告されている⁽⁶⁾。変動成分を考慮していない LVFA 試験機で計測した動摩擦係数 μ_d を用いた従来のモデル表現では、車両発進加速時の RDU クラッチの振動伝達特性を正確に表現できない。そのため、変動成分を含んだ状態の動的なクラッチ摩擦特性を考慮する必要がある。

本研究では、AWD システム単体を対象としたねじり加振テストをおこない、計測した回転変動量から差回転違いの変動成分を考慮した動摩擦係数を同定することとする。式 (3) に本研究で提案する関係式を示す。 $d\mu_d/dV$ は変動成分から同定される動摩擦係数変動特性を表す。平均トルクおよび変動成分を考慮したクラッチ押し付け力と伝達トルクの関係を表現することで、RDU クラッチの振動伝達特性を表現する。

$$T = \left(\mu_d + \frac{d\mu_d}{dV} \cdot dV \right) n R F \quad (3)$$

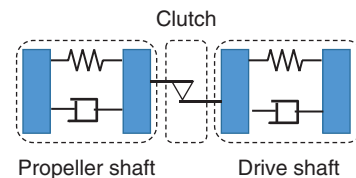


Fig. 4 Modeling of AWD unit

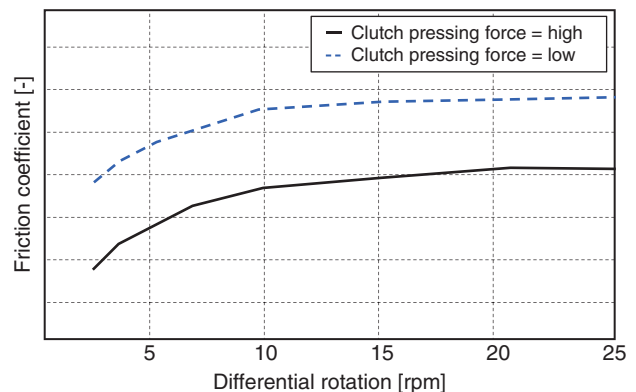


Fig. 5 Clutch friction coefficient in response to differential rotation

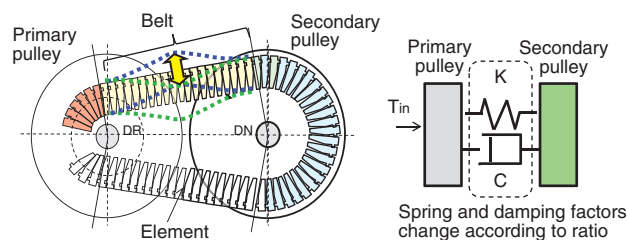


Fig. 3 Modeling of CVT belt

4. 同定手法と検証結果

4.1. CVT パラメータ同定手法

CVT ベルトのパラメータ同定は、質量を定数、目的関数を単体試験設備にて計測したプーリの回転速度変動として、バネ係数と減衰係数の同定をおこなった。

Fig. 6 に CVT 単体試験設備の模式図を示す。CVT を駆動ダイナモメータに取り付け、左右のドライブシャフトを介して、吸収ダイナモメータに取り付ける構成とした。テスト条件の各パラメータは、実車の使用領域と CVT ベルト共振の発生領域から Table 1 の範囲とした。また Table 1 の条件ごとに定常運転をおこないプーリの回転速度変動を計測した。

代表条件として Low レシオ時の回転数、入力トルクに対する減衰係数の同定をおこなった結果を Fig. 7 に示す。同定したパラメータの再現性の検証結果として車両発進加速時のセカンダリプーリの回転速度のシミュレーション結果を Fig. 8 に示す。弦振動の共振周波数変化とセカンダリプーリの回転速度変動量を再現できていることから十分な精度を有していると判断した。

4.2. RDU クラッチパラメータ同定手法

RDU クラッチのパラメータ同定は、質量を定数、目的関数を単体試験設備にて各条件ごとに計測したプロペラシャフトの回転速度変動として、摩擦係数の同定をおこなった。

Fig. 9 に AWD システムの試験設備の模式図を示す。プロペラシャフト先端部に駆動ダイナモメータを取り付け、RDU を介して、左右のドライブシャフトに吸収ダイナモメータを取り付ける構成とした。プロペラシャフトねじり共振時における RDU クラッチの振動伝達特性を計測するために、駆動ダイナモメータは CVT のベルト振動を模擬した 100 Hz 帯の変動入力可能な低慣性ダイナモメータ

Table 1 CVT unit test parameters

Rotational speed	1000 to 4000 rpm
Input torque	0 to 200 Nm
CVT pulley ratio	0.5 to 2.65

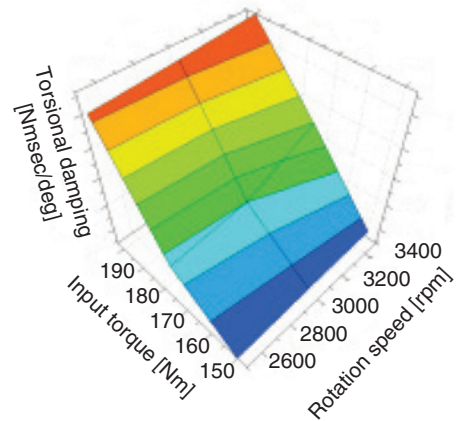


Fig. 7 Verified belt damping parameters at low pulley ratio

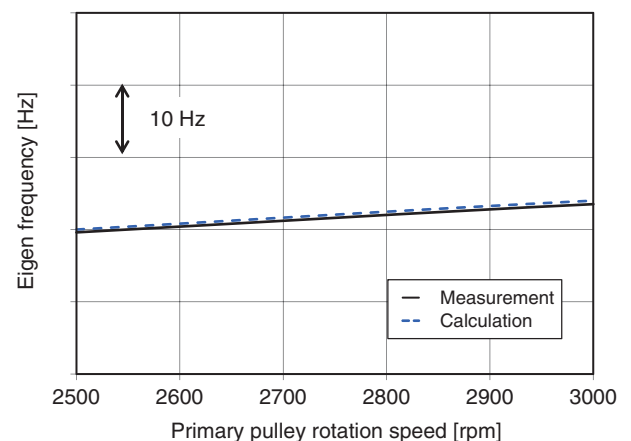
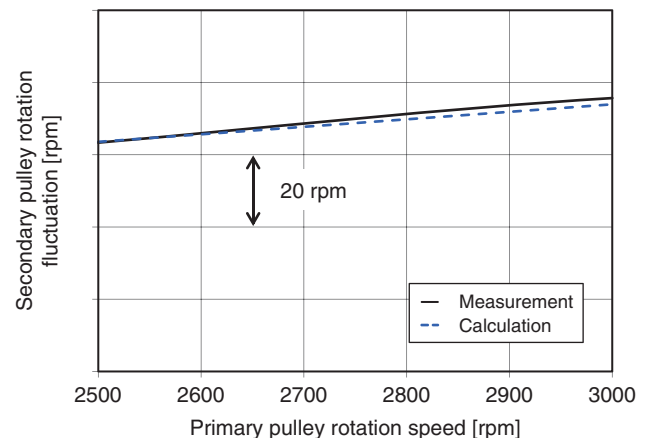


Fig. 8 Simulation results for CVT belt at vehicle takeoff and acceleration

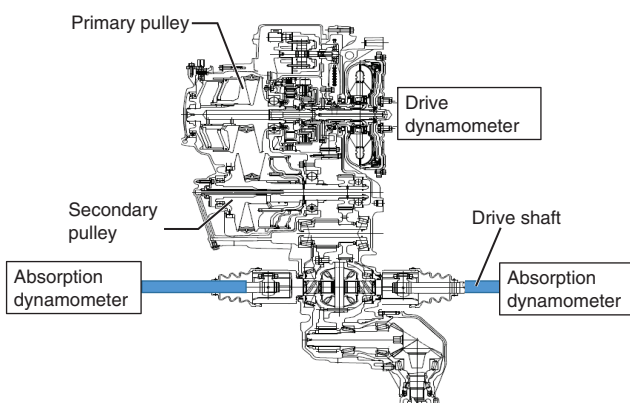


Fig. 6 CVT unit test

を用いた。テスト条件のパラメータは、実車の使用領域から Table 2 の範囲とした。

次に、パラメータ同定手法と結果について説明する。

先行テスト結果より回転状態のプロペラシャフトは、ねじり角度と入力トルクの特性に関してヒステリシスを持つ。ヒステリシスによって生じるエネルギー損失は、ジョイント部やベアリングのしゅう動抵抗やガタ等の影響と考えられ、減衰特性を数値解析的に算出するのは容易ではない。そこで、プロペラシャフトの減衰係数同定を目的として、クラッチの差回転無し状態での計測を Fig. 9 の試験設備にておこなった。質量とバネを定数、目的関数をテストにて計測したプロペラシャフトの回転速度として、減衰係数の同定をおこなった。減衰係数の同定結果を Fig. 10 に示す。なお、RDU クラッチ部のモデル化は、式 (2) でおこない、変動成分を含まない動摩擦係数 μ_d を反映している。

次に、RDU の摩擦係数同定を目的としてクラッチの差回転有り状態での計測を Fig. 9 の試験設備にておこなった。

平均トルクの伝達は、LVFA 試験機で計測した従来の動摩擦係数 μ_d にて表現し、トルク変動の伝達は差回転数によって変化する動摩擦係数変動特性 $d\mu_d/dV$ を定義した。実測のプロペラシャフト回転速度変動を目的関数として変動成分に対する動摩擦係数変動特性 $d\mu_d/dV$ をパラメータ

Table 2 AWD unit test parameters

Input rotation speed	500 to 2000 rpm
Input torque	50 to 150 Nm
Torque fluctuation amplitude	10 to 80 Nm
Differential rotation speed of clutch	0 to 20 rpm

同定した結果を Fig. 11 に示し、トルク変動伝達特性のシミュレーション結果を Fig. 12 に示す。動摩擦係数変動特性を考慮しないシミュレーション結果 (破線) に対して、動摩擦係数変動特性を考慮することでクラッチの差回転有り状態でも対象とする周波数帯でねじり振動伝達特性を十分な精度で再現できている (実線)。

4.3. RDU マウント振動予測検証結果

単体テスト結果を元にパラメータ同定をおこなった CVT ベルトモデルおよび RDU クラッチモデルを車両モデルに組み込み、車両の発進加速時の RDU マウント振動の予測をおこなった。本予測技術の目標精度に関しては、対象周波数領域において、試作車を製作する前段階に検討するのに支障のない ± 3 dB の精度で振動のピークレベ

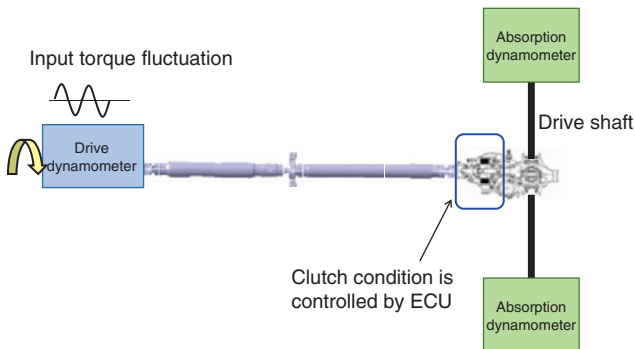


Fig. 9 AWD unit test of torsional vibration

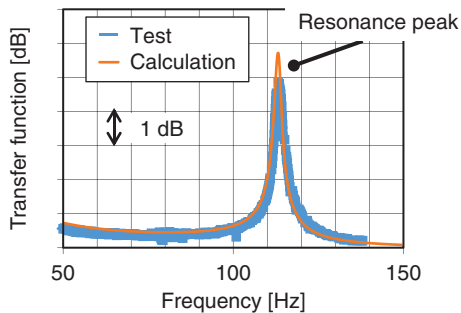


Fig. 10 Simulation results for transfer function of torque fluctuation without clutch differential rotation

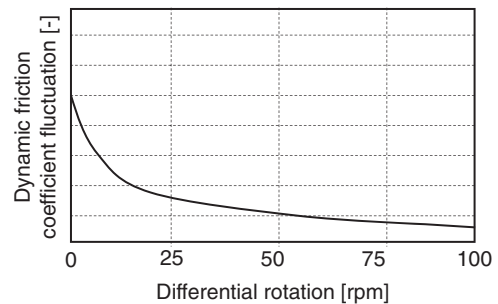


Fig. 11 Verified dynamic friction coefficient fluctuation parameters $d\mu_d/dV$

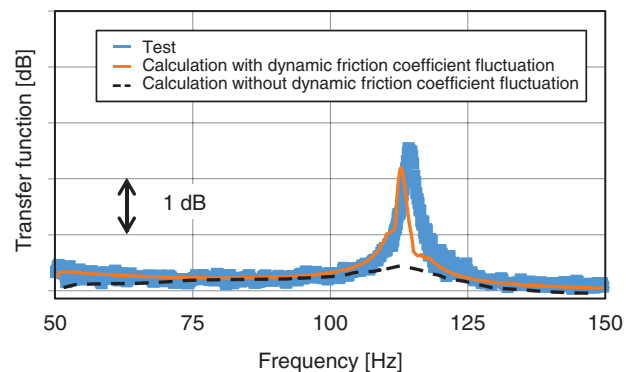


Fig. 12 Simulation results for transfer function of torque fluctuation with clutch differential of 10 rpm

ルを算出することと定めた。車両停止状態から全開加速時のRDUマウント振動の実車実験結果とシミュレーション結果をFig. 13に示す。解析対象周波数である90 Hzから120 HzにおけるRDUマウント振動において目標精度を満足する計算結果が得られており、開発に適用できる十分な精度を有している。

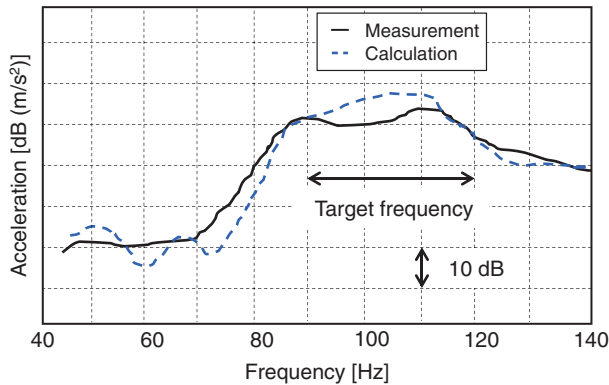


Fig. 13 Spectrum accuracy of rear differential mount vibration

5. 適用事例

本研究にて構築したモデル化技術を用いて開発を想定した試作車におけるNV性能の検討事例について述べる。

雪上走破性能や登坂性能を向上させるため、後輪へ配分される駆動力を向上させる条件を設定し、NV性能の検討をおこなった。

本研究にて構築した予測技術を用いて、AWD走行性能向上、すなわち後輪の駆動力配分を増加することによるRDUからボデーへの入力伝達荷重のシミュレーション結果をFig. 14に示す。ボデーへの入力伝達荷重が、現行モデル(破線)に対して、増加する計算結果が得られた(点線)。起振源側に対応する手法もあるが、今回はRDUマウント

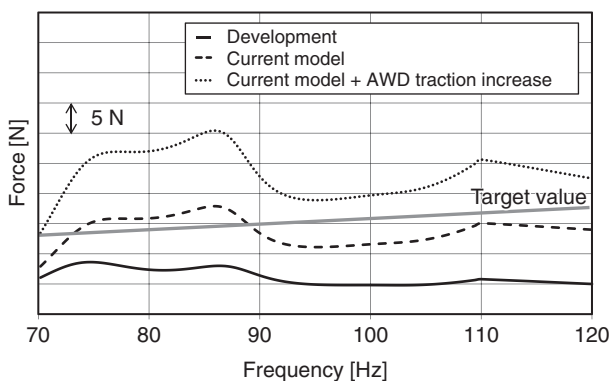


Fig. 14 Simulation results for input force from RDU to vehicle body at vehicle takeoff and acceleration

を変更可能部品として車室内音圧低減検討をおこなう。駆動反力に対する支持剛性を上げるため支持スパンを増やし、駆動力負荷状態でのRDUマウントバネ特性を低減することでFig. 14に示すボデーへの入力伝達荷重目標(実線)を満足できた。

検討した仕様にて試作部品を製作し、車両に反映して検証をおこなった結果をFig. 15に示す。車室内音に関して性能目標を満足することができた。

以上により、開発を想定したAWD走行性能目標およびNV性能を満足するシステム特性を検討可能な予測技術を構築できた。

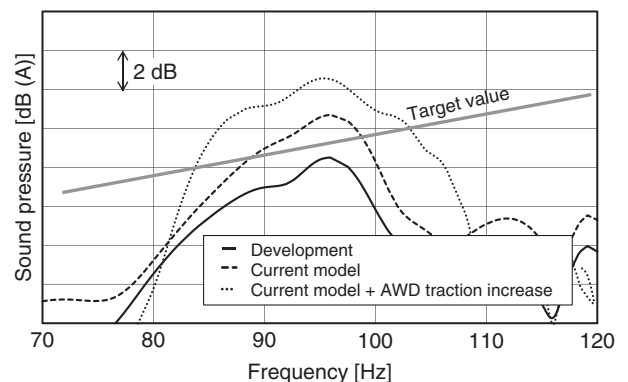


Fig. 15 Vehicle test results for in-cabin sound pressure

6. まとめ

従来のAWD-NV性能設計シミュレーションモデルをベースに、対象とする解析周波数や走行条件を拡大し、CVTとAWDを組み合わせたシステムのNVと走行性能を両立するためのNV検討可能なシミュレーションモデルを構築した。

- (1) CVTベルトにおいて、変速レシオや入力トルク等の走行条件によって変化する減衰係数をCVT単体テストで実験的に同定し、モデル化する手法を構築した。
- (2) RDUクラッチにおいて、差回転数や変動成分によって変化する動摩擦係数変動特性をAWDシステムテストで実験的に同定し、モデル化する手法を構築した。

この結果を反映したシミュレーションモデルにより、試作車を製作する前段階においてRDUマウントの振動を予測でき、開発初期にNVとAWD走行性能の仕様を検討することができるようになった。

参考文献

- (1) 坂上恭平: 金属Vベルト式CVTの滑り発生メカニズム

- ム, 自動車技術会論文集, Vol. 49, No. 2, p.290-295, (2018)
- (2) Saito, T., Miyamoto, K.: Study of Self-induced Vibration in an Operating Metal Pushing V-belt CVT, SAE Technical Paper, 2012-01-0309, (2012)
- (3) 樽谷一郎, 長沢裕二, 播磨和典, 土屋慎治: CVT 用金属ベルトのリング挙動解析, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 1-16, p.5-9, (2016)
- (4) 小泉陽, 藤川智士, 森田賢二, 丸谷哲史, 西川啓, 中島宏幸: 駆動系の非線形特性を利用した 4WD 車の燃費と NV の最適化, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 44-12, p. 5-8, (2012)
- (5) 岡本純三, 中山景次, 佐藤昌夫: トライボロジー入門 摩擦・摩耗・潤滑の基礎, 幸書房, p. 112-116, (2014)
- (6) 長沢裕二: 速度変動方式による新しい摩擦特性の測定, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 33, No. 2, p.74, (1998)

■ 著 者 ■



宮下 真明



佐川 正記



山本 京平



福留 弘幸