

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01396

研究課題名(和文)革新的振動減衰装置の開発と自動車用ATへの応用

研究課題名(英文) Development of innovative vibration absorber and its application for automatic transmission for cars

研究代表者

劉 孝宏 (RYU, TAKAHIRO)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：60230877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、エンジンによる強制ねじり振動を低減するため、自動車用オートマチックトランスミッションに装着する新たな遠心振子式動吸振器を開発した。振子の軌道を回転角の多項式で仮定し、応答振幅が最も低減される最適軌道を数値計算により求めた。その結果、従来型より大きな制振効果が得られることがわかった。また、質量、イナーシャリング、スライダクランク連鎖からなるスライダクランク式動吸振器について、理論解析および数値計算を実施した。その結果、ねじり振動を最も低減可能な設計パラメータには最適値が存在すること、最適化したスライダクランク式動吸振器を用いることで飛躍的に大きな制振効果が実現できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、エンジンを搭載した自動車の低燃費化と高出力化の実現を目指して、新たに生じた振動問題を飛躍的に低減させるため、リンク機構を用いた遠心振子式動吸振器を開発した。スライダクランク式動吸振器により、復元項と慣性項をとともに調整可能であるとともに、最適なリンク長比を選択することで極めて振動低減に有効であることがわかったことは、学術的にも大きな意義がある。また、この設計法を用いることで、省気筒数化や高負荷低回転域でのロックアップ、さらには高出力化にも対応可能であり、低炭素社会をリードする先端技術開発として社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new centrifugal pendulum vibration absorber (CPVA) which is attached in the torque converter is developed to suppress the torsional forced vibration caused by the engine explosion. The path of the pendulum was assumed by a polynomial of the angle of rotation, and the optimal path to suppress torsional vibration for automatic transmissions was designed using a genetic algorithm by numerical calculation. It was found that the CPVA with the optimal path can more effectively reduce the torsional vibration than the CPVAs with the circular and epicycloidal paths. In addition, theoretical analysis and numerical calculation were performed for the slider crank type dynamic vibration absorber consisting of mass, inertia, and slider crank chain. As a result, it was found that there is an optimal link length ratio that can reduce the torsional vibration most, and that a greater suppressive effect can be realized by using an optimized slider crank type dynamic vibration absorber.

研究分野：機械力学

キーワード：回転体の振動 動吸振器 強制振動 非線形振動 オートマチックトランスミッション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

エネルギー問題の高まりから、自動車業界では、低燃費化への技術開発が急加速されている。低燃費化実現のため、4気筒から3気筒、2気筒化をも視野に入れた省気筒数化が進められている。また、自動車用オートマチックトランスミッション(以後ATと呼ぶ)には、入力トルクを流体継手で変速機へ伝達するトルクコンバータがあり、常に入出力軸間の滑りを伴う。そのため、近年、ある回転数域から入出力軸を直結するロックアップクラッチが多く採用されている。ロックアップクラッチでは、さらなる燃費向上のため高負荷低回転域でのロックアップを目指している。ところが、一方では、高級車志向によるエンジンの高出力化も求められている。

エンジンは、燃焼によるトルク変動のため、車軸系に強制ねじり振動をもたらす。そのため、省気筒数化は加振振動数低下による新たな共振問題を、高出力化や高負荷低回転域でのロックアップは加振振幅増大の問題を生じており、それらの問題をクリアするための新たな技術開発は急務となっている。

2. 研究の目的

自動車用エンジンの燃焼に伴う強制ねじり振動を効果的に低減するため、ATのトルクコンバータ内には、遠心振子式動吸振器(以後CPVAと呼ぶ)が装着されている。本研究では、さらなる振動低減を目指し、CPVAの最適軌道設計、イナーシャリングと呼ばれる慣性体を活用したリンク型動吸振器の最適設計法およびトルク伝達経路の見直しによる最適設計法を確立することにより、次世代ATの飛躍的燃費向上と乗り心地向上を実現することが目的である。

3. 研究の方法

ATのトルクコンバータ内に装着するCPVAは、円軌道、サイクロイド軌道、エピサイクロイド軌道などの軌道の変化により、動吸振器としての効果が変化する。そこで、遠心振子の半径を回転角に応じて多項式近似し、周波数応答が最も低減される最適軌道を数値計算により求める。また、より制振効果を高めるために、遠心振子の揺動運動に対してリンク機構を備えることで、揺動運動に同期して慣性体を回転運動できるようにしたリンク型動吸振器の最適設計法を理論的に明らかにする。本研究では、特に、スライダクランク連鎖を伴うリンク機構を採用する。また、トルク伝達経路の最適化に関する基礎的な研究も実施する。

4. 研究成果

(1) 駆動系の構造とモデル化

図1は駆動系の概略図を示す。図中、青い破線内部がATに相当する。ロックアップしていない場合、エンジンから入力されたトルクは、ポンプインペラーを回転させ、トルクコンバータ内部の流体力によりタービンランナーが回転し、ギアトレイン、タイヤへと伝達される。このとき、ポンプインペラーとタービンランナーの間で滑りが生じるため、燃費の低下につながる。そのため、ポンプインペラーとタービンランナーの回転速度が近くなると、ロックアップクラッチが作動し、トルクコンバータ内で入出力軸が直結される。図中の赤い破線がロックアップ時のトルクの伝達経路を示す。

ロックアップクラッチ作動時には、エンジンの燃焼に起因したトルク変動によるねじり振動が直接パワートレインに伝達されるため、車体全体に大きな振動を引き起こす。振動低減のため、ロックアップダンパと呼ばれるばねが組み込まれているが、十分な制振効果が得られていない。そこで本研究では、エンジンの燃焼に起因したねじり振動を効果的に低減するため、単振り子型CPVAおよびスライダクランク式動吸振器の最適設計法について理論的に検討を行う。図1の駆動系を4自由度でモデル化し、動吸振器取り付け位置で正規化したモード行列を用いたモード解析後の1自由度モデルを用いて、CPVAの最適設計を図った。

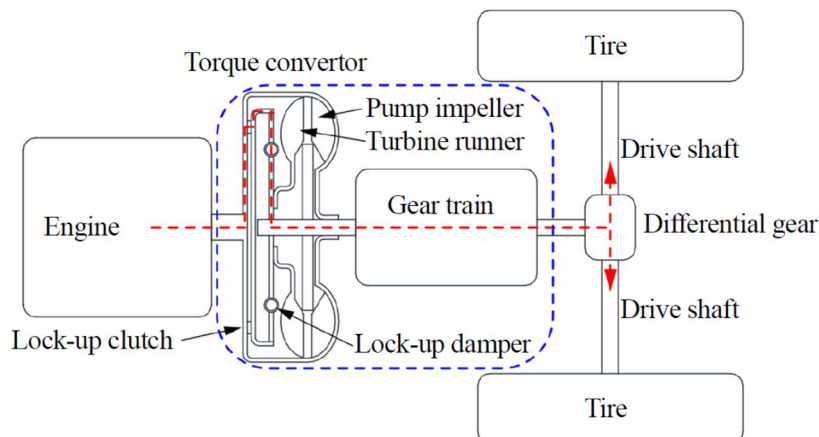


図1 自動車駆動系の概略図

(2) 遠心振子式動吸振器の最適設計

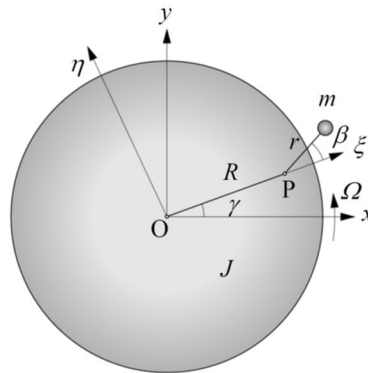


図2 CPVA のモデル図

図2は、主系(制振対象)にCPVAを取り付けた場合のモデル図である。慣性モーメント J の円板が主系である。一般的に、CPVAは、質点の軌道が円軌道 ($r=r_p = \text{一定}$)、サイクロイド軌道、エピサイクロイド軌道等があり、遠心力場における遠心振子単体の運動方程式が線形となるエピサイクロイド軌道型遠心振子が広く用いられている。しかしながら、これらのCPVAを用いても、要求されたレベルの振動低減は実現できていない。そこで、CPVAの軌道を $r(\beta) = r_p(1 + r_2\beta^2 + r_4\beta^4 + r_6\beta^6 + r_8\beta^8)$ のように、遠心振子の回転角 β の多項式で仮定した。遠心振子単体の運動方程式は、

$$(r^2 + r_\beta^2)\ddot{\beta} + r_\beta r_{\beta 2}\dot{\beta}^2 + r r_\beta(\dot{\beta}^2 - \Omega^2) + R\Omega^2(r \sin \beta - r_\beta \cos \beta) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $r_\beta = dr/d\beta$, $r_{\beta 2} = d^2r/d\beta^2$ である。

遠心振子単体の固有振動数 ω_p と主系の回転数 Ω の関係は、系を線形化することにより、次式で得られる。

$$\omega_p = n\Omega = \sqrt{\frac{R - 2r_2(R + r_p)}{r_p}} \Omega \dots\dots\dots (2)$$

n は気筒数により決まる値であり、次数と呼ぶ。 r_2 は線形の固有振動数に影響を及ぼすため、本数値計算では $r_2 = 0$ とした。従って、遠心振子の線形固有振動数は、円軌道の遠心振子と同じになる。数値計算では、遺伝的アルゴリズムを用いて、評価回転数範囲 (900 ~ 2000 rpm) で最も強制振動の応答振幅が低減可能なCPVA (以後最適CPVAと呼ぶ) の最適軌道設計を行った。

図3は、動吸振器を装着していない場合と、円軌道、エピサイクロイド軌道および最適CPVAを取り付けた場合の周波数応答曲線である。本解析では、3気筒モデル ($n=1.5$) を用いた。図から軌道を最適化することにより、応答振幅を効果的に下げることが可能であることがわかる。

図4は、遠心振子の質点の座標 ξ, η について、それぞれの軌道について図示したものである。各軌道は図3の色に対応している。特に振幅が大きな領域でのわずかな軌道の差が、応答振幅に影響していることがわかる。

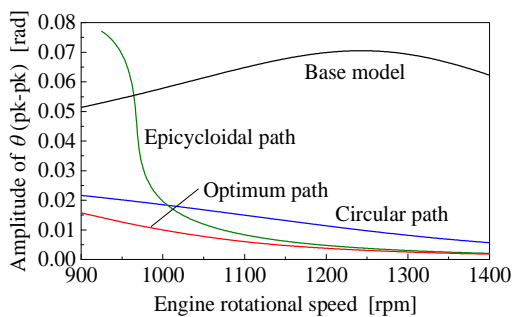


図3 CPVA の周波数応答曲線

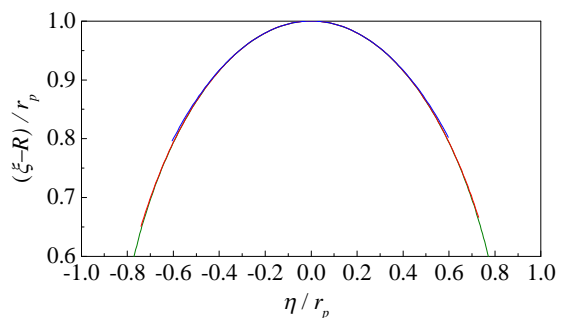


図4 CPVA の軌道比較

(3) スライダクランク式動吸振器

図5は、スライダクランク式動吸振器のモデル図である。スライダクランク式動吸振器は、慣性モーメント J の主系と同心円上に、主系に対し回り対偶で拘束された慣性モーメント J_p のイナーシャリングが配置されており、主系上に質量 m のスライダが設置されている。スライダクランク式動吸振器の運動方程式は、次式となる。

$$(J_p\theta_\beta^2 + mr_\beta^2)\ddot{\beta} + (J_p\theta_\beta\theta_{\beta 2} + mr_\beta r_{\beta 2})\dot{\beta}^2 - mrr_\beta\Omega^2 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

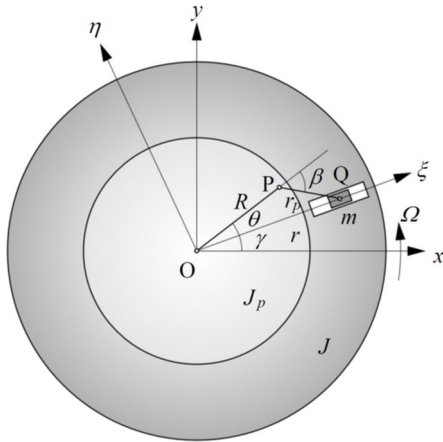


図5 スライダクランク式動吸振器のモデル図

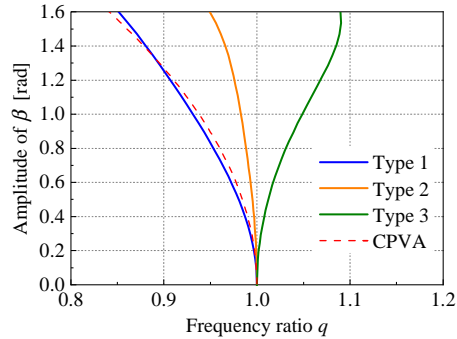


図6 自由振動特性

ここに、 $\theta_\beta = d\theta/d\beta$, $\theta_{\beta 2} = d^2\theta/d\beta^2$ である。

スライダクランク式動吸振器単体の固有振動数 ω_p と主系の回転数 Ω の関係は、系を線形化することにより、次式で得られる。

$$\omega_p = n\Omega = \sqrt{\frac{mR(R+r_p)^2}{J_p r_p}} \Omega \dots\dots\dots(4)$$

動吸振器の慣性項としてイナーシャリングの慣性モーメントが作用し、復元力項としてスライダの質量が作用している。遠心振子式動吸振器と比較すると制振メカニズムが異なっており、制振効果が期待できる。また、式(2)と比較すると、線形の固有振動数は、スライダの質量やイナーシャリングの慣性モーメントでも調整可能であることがわかる。これらが、スライダクランク式動吸振器の大きな特徴である。

スライダクランク式動吸振器は、リンク長、スライダの質量およびイナーシャリングの慣性モーメントなど、遠心振子式動吸振器と比較して、振動特性を決定するためのパラメータが多い。そこで、パラメータを決定するために、まず、自由振動特性を調査した。リンクの全長およびスライダの質量は、遠心振子式動吸振器と同一とした。数値計算では、4気筒エンジンを対象とした。リンク長比 $p = r_p / R$ をパラメータとし、式(4)から $n = 2$ を満たすイナーシャリングの慣性モーメント J_p を決定した。図6は、3種類の異なるリンクパラメータ値 (Type 1~3) における自由振動特性である。横軸は、非線形固有振動数と線形固有振動数との比 q 、縦軸は、遠心振子の振幅である。図からリンク長比を調整することにより、固有振動数の振幅依存性が変わっており、Type 2の固有振動数の振幅依存性が最も小さい。

非線形固有振動数と線形固有振動数とのずれは振幅に依存するため、設定したずれの割合の振幅に対する平均値をあらかじめ定め、チューニングのずれ量の平均値が設定した平均値以下となる最大振幅を評価基準とする。図7は、Type 2近傍のリンク長比 p において、線形固有振動数とのずれの平均値をそれぞれ 0.02%、0.06% および 0.10% と設定したときの最大振れ角 β_0 の値を求めた結果である。図中、横軸はリンク長比 p 、縦軸は最大振れ角である。図7から、 $p = 0.137$ 付近で、最大振れ角 β_0 が大きな値をとっており、リンク長比には最適値があることがわかる。そこで、基準パラメータとして $p = 0.137$ を採用した。図8は、最適化されたパラメータを用いた場合の自由振動特性を示す。図から、固有振動数比がほぼ線形に保たれており、大きな制振効果が期待できる。リンク長比の調整により、非線形固有振動数を調整可能など、スライダクランク式動吸振器の特徴の一つである。

図9はスライダクランク式動吸振器を取り付けた場合の主系の周波数応答曲線を示す。図10から、最適値における応答振幅が最も小さくなっており、制振効果が高いことがわかる。また、数値計算から遠心振子の角変位を調べたところ、その最大値は 0.8rad 程度であり、その角変位における線形固有振動数からの誤差は図7より 0.02%未満であるため、評価回転数域においておよそ誤差なく運用できることがわかる。

図10は、リンク長比を変化させた場合の評価回転域 (900~2000 rpm) における応答振幅の最大値の関係を示す。黒色実線はスライダの質量 m を固定しイナーシャリングの慣性モーメント J_p を次数に合わせて調節した場合、赤色実線は J_p を固定し m を次数に合わせて調整した結果である。また青色破線は p の最適値である。図10から、両者ともに、本解析で得られたパラメータ値付近で最小値を示しており、主系の応答振幅に対しても、ほぼ最適値化を図ることができる。以上から、スライダクランク式動吸振器の最適設計は、非線形固有振動数と次数とのずれを最小化するように設計すれば、効果的な振動低減が図れることがわかった。

スライダクランク式動吸振器の制振効果を確認するための基礎実験装置を製作し、加振実験を行った。その結果、制振効果は得られたものの、想定した制振レベルには至らなかった。原因としては、図7に示すように、スライダクランク式動吸振器のリンク長の調整が非常に敏感であることが考えられる。今後、装置を改良して、制振効果の再検証を実施する予定である。

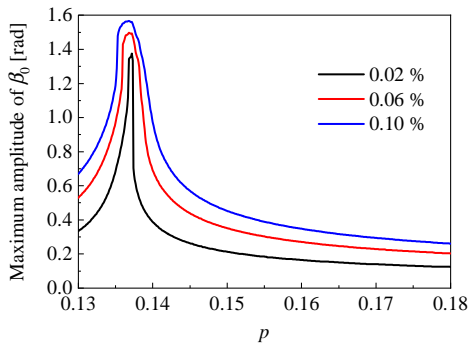


図7 リンク長比と非線形固有振動のずれ量

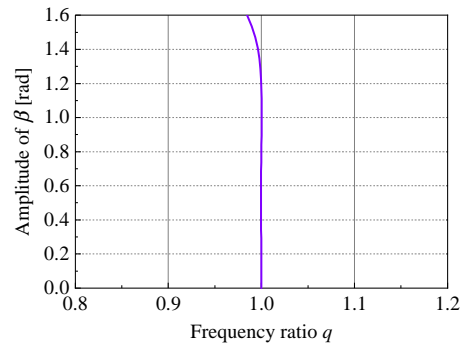


図8 最適化された自由振動特性

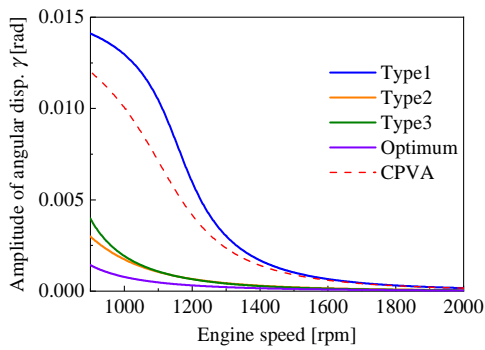


図9 スライダクランク式動吸振器の周波数応答曲線

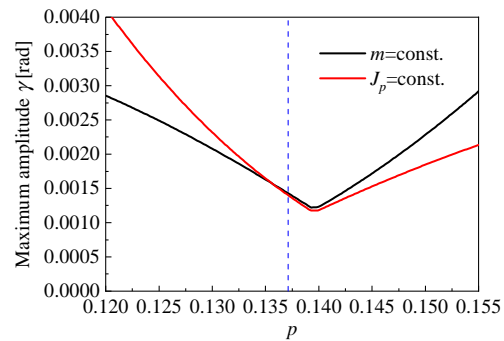


図10 リンク長比と最大応答振幅の関係

(4) その他の制振手法の検討

本研究では、4 節回転連鎖を伴うリンクを用いた動吸振器の最適設計法についても、理論解析および数値計算を実施した。4 節回転連鎖では、回転中心、イナーシャリング、制振対象上にそれぞれ回り対偶を配置し、もう一つの回り対偶の位置に質点を配置する構造である。数値計算の結果、この機構を使用してもスライダクランク式動吸振器と同等の制振効果が得られることがわかった。

また、伝達トルクの経路を複数に分割し、それらの位相を調整することにより伝達トルクを軽減する手法について検討した。図 11 が解析モデルであり、赤い網掛け部が制振対象である。図 12 は基礎実験装置である。数値計算の結果から、ばねや質量を調整することで、ターゲットとした加振周波数範囲で振幅を低減可能であることがわかった。図 13 は実験結果であり、青および赤色の曲線がばね定数を最適値から外した場合および最適値に調整した場合の結果である。本構造を用いることで、振幅を低減できることがわかった。

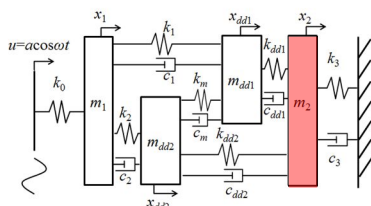


図11 解析モデル



図12 実験装置

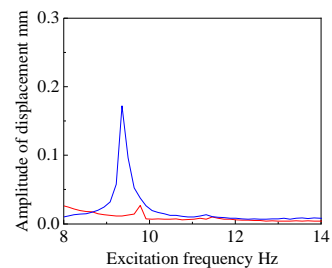


図13 周波数応答曲線

< 引用文献 >

劉孝宏, 松崎健一郎, 中江貴志, 尾崎純也, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.896, 2021, pp.1-13.

T.Ryu, T.Nakae, K.Matsuzaki and J.Ozaki, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 670, 2019, pp.1-5.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 劉 孝宏, 松崎 健一郎, 中江 貴志, 尾崎 純也	4. 巻 87-896
2. 論文標題 スライダクランク連鎖を有する遠心振子式動吸振器によるねじり振動の抑制に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00431	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takahiro Ryu, Atsushi Kodama, Takashi Nakae and Kenichiro Matsuzaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Fundamental study on suppressive effect of dynamic absorber to subharmonic vibration of order 1/2 in an automatic transmission for cars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of ICSV27	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Risa Ueno, Takahiro Ryu, Takashi Nakae and Kenichiro Matsuzaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Fundamental study on optimal desing of dynamic absorber to suppress subharmonic vibration of order 1/2 in automatic transmission for cars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of ICSV26	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takahiro Ryu, Takashi Nakae, Kenichiro Matsuzaki and Junya Ozaki	4. 巻 670
2. 論文標題 Fundamental study on the optimal path of centrifugal pendulum vibration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series, Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/670/1/012004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Funiya Takino, Takahiro Ryu, Takashi Nakae, Kenichiro Matsuzaki and Risa Ueno	4. 巻 211
2. 論文標題 Fundamental study on countermeasures against subharmonic vibration of order 1/2 in automatic transmissions for cars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 MATEC Web Conf.	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/201821113004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 尾崎純也
2. 発表標題 自動車用 ATで発生するねじり振動を抑制するスライダクランク機構の遠心振子式動吸振器に関する基礎的研究
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野充
2. 発表標題 自動車用ATのねじり振動を抑制する4回転連鎖型遠心振子動吸振器に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会交通・物流部門大会 (TRANSLOG2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原嵩也
2. 発表標題 自動車用ATで発生する1/2次分数調波振動の動吸振器による制振に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会交通・物流部門大会 (TRANSLOG2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 兒玉篤志
2. 発表標題 自動車用ATで発生する1/2次分数調波振動に対する動吸振器の最適設計に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部沖縄講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野湧亮
2. 発表標題 楕円軌道を用いた遠心振子式動吸振器の振動特性と自動車用ATへの適用
3. 学会等名 日本機械学会九州支部沖縄講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤明
2. 発表標題 自動車用ATにおける遠心振子式動吸振器の最適軌道に関する基礎的研究
3. 学会等名 Dynamics and design conference
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝野文弥
2. 発表標題 自動車用ATで発生する1/2次分数調波振動を抑制するダンパ特性の検討
3. 学会等名 日本機械学会九州支部北九州講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤明
2. 発表標題 自動車用ATで発生するねじり振動を抑制する遠心振子式動吸振器の軌道に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部北九州講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松崎 健一郎 (Matsuzaki Kenichiro) (80264068)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授 (17701)	
研究分担者	中江 貴志 (Nakae Takashi) (80579730)	大分大学・理工学部・准教授 (17501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------