

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05866

研究課題名(和文)自動車用オートマチックトランスミッションにおける飛躍的振動低減技術の確立

研究課題名(英文) Development of effective vibration reduction technology for automotive automatic transmissions

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：自動車のさらなる燃費向上の実現に伴い、ATでは様々な振動問題が新たに発生している。本研究では、振動問題の発生メカニズム解明および防止対策を検討することを目的としている。トルクコンバータ内のダンパ部におけるばねの断片線形特性により、 $1/2$ 次分数調波振動が発生する。基礎となる1自由度系モデルに対して、理論および実験の両面から各パラメータの影響を調査することにより、発生メカニズムおよび防止対策を確立することができた。また、振り子型動吸振器の非線形振動についても実車モデルにおいてメカニズム解明を完了した。また、遺伝的アルゴリズムを活用した、新たな振動低減手法を提案できた。

研究成果の概要(英文)：According to realize the fuel economy for cars, various vibration problems newly occur in automatic transmissions. The purpose of this study is to clarify the mechanism of the vibration problem at the lock-up damper spring and to suppress the vibration in automatic transmissions. The subharmonic vibration of order $1/2$ occurs due to the piecewise-linear spring characteristics at the lock-up damper in the torque converter. The theoretical analysis and the experiments were conducted to clarify the generation mechanism and the countermeasure by using the fundamental one degree-of-freedom system. The mechanism of the nonlinear vibration of the centrifugal pendulum absorber for the actual vehicle was also clarified theoretically. Moreover, the genetic algorithm was developed and the new vibration reduction mechanisms and its optimum design were proposed.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：回転体の振動 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

1. 研究開始当初の背景

中国やインドをはじめとした BRICS やアジア諸国の台頭で、技術立国日本の地位が危ぶまれるなか、日本の基幹である自動車産業も付加価値を備えた独自技術の開発に追われている。中でも、震災を契機としたエネルギー問題の高まりから、近年の自動車の燃費向上は必須の課題となっている。そのため、自動車業界では、ディーゼル化、4 気筒から 3 気筒への省気筒数化が進められている。一方、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)は、入力トルクを流体継手で伝達するトルクコンバータ(以後 TC と呼ぶ)と変速機から構成されるが、TC が滑りを伴うため、入出力軸を直結するロックアップ(以後 L-up と呼ぶ)クラッチが採用されている。L-up 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 L-up を目指している。しかしながら、他方では、相反するエンジンの高出力化も求められているのが現状である。現在の自動車業界では、このようなエンジンの爆発振動を低減させる最適設計法の確立が急務となっているとともに、加振力の増大に起因した分数調波振動や結合共振等の非線形振動が発生し、非常に大きな問題となっている。しかしながら、対象とするシステムのパラメータは非常に多岐にわたるとともに、非線形振動については、原因すら解明されていない。

2. 研究の目的

本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いることにより、自動車用 AT の有害な振動を飛躍的に低減させるための最適な設計手法を確立することを第一の目的としている。また、自動車用 AT で発生する非線形振動の発生メカニズムを解明し、防止対策を確立することを第二の目的としている。

3. 研究の方法

(1)非線形振動のメカニズム解明と防止対策

分数調波振動や結合共振の発生メカニズム解明と防止対策
L-up ダンパは、静的高トルクに対応するため、復元力特性が「く」の字に折れ曲がった断片線形ばねで構成されている。その切り替え点付近で、分数調波振動や結合共振等の非線形振動が発生する。自動車用 AT の解析モデルの構築、復元力特性の切り替え点を高精度に計算する Shooting 法を用いた数値計算による発生メカニズムの解明と剛性比調整や動吸振器の適用による防止対策の検討、および基礎実験によるメカニズムおよび防止対策の検証を実施する。

振り子型動吸振器の非線形振動

振り子型動吸振器は、固有振動数が回転数に追従して変化する特長があり、現在すでに一部で実用化されているが、振り子型動吸振器の振幅が大きくなるにつれて、その非線形

性が原因で振幅が増加する現象が確認されている。この現象は、石田ら(機論, 2005)により、基礎的な実験と低次元モデルによる解析がなされているが、実機のような複雑化されたシステム構成には適用できない。そこで、本研究では、時変の質量行列に対応できる独自の Shooting 法を開発して数値解析を実施し、自動車用 AT 実車モデルによる現象の完全解明と防止対策を検討する。

(2)振動低減の最適化

エンジン爆発振動を低減するための TC 内におけるエンジンの爆発振動を緩和するための L-up ダンパと呼ばれるばね要素の最適設計および動吸振器の最適配置について検討する。具体的には、自動車用 AT の基本性能を考慮した上で、遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計手法を確立する。

4. 研究成果

(1)非線形振動のメカニズム解明と防止対策

分数調波振動や結合共振の発生メカニズム解明と防止対策
自動車用 AT の L-up ダンパは、省スペースを図るため、断片線形ばねが使用されている。そのばねの剛性係数が切り替わる切り替え点において、1/2 次分数調波振動と呼ばれる非線形振動が発生し問題となっている。図 1 は、実車において 1/2 次分数調波振動が発生したときの、エンジン側であるポンプインペラーの回転数変動(上図)、および出力側であるタービンランナーの回転数変動(下図)を示している。タービンランナーが加振側であるポンプインペラーの 2 倍の周期で振動していることがわかる。

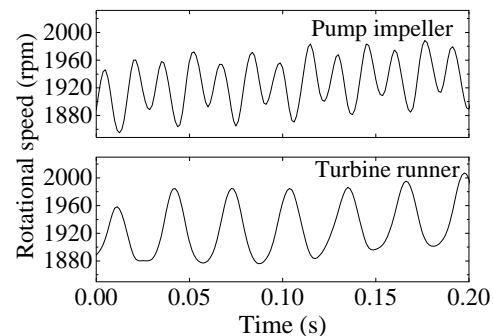
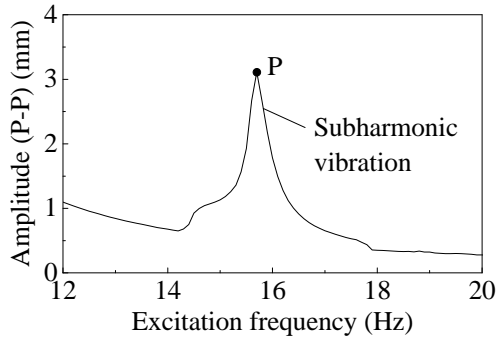
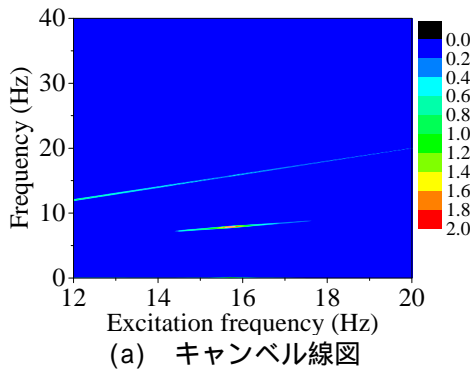


図 1 分数調波振動の振動波形(実機)

分数調波振動の発生メカニズムを解明するため、断片線形ばねを有する 1 自由度基礎実験装置を設計・製作した。図 2(a)は、実機において加振実験を行ったときのキャンベル線図である。横軸は、加振振動数、縦軸は発生振動数である。図から、加振振動数の半分の振動数成分が大きく発生しており、1/2 次分数調波振動が再現できたことがわかる。図 2(b)は周波数応答曲線を示す。このシステムの固有振動数は、断片線形ばねの 1 段



(b) 周波数応答曲線

図2 実験機における分数調波振動

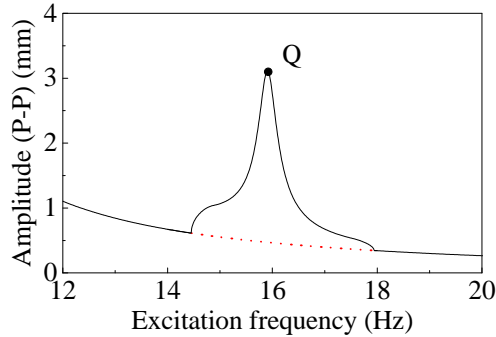


図3 周波数応答曲線（理論解析）

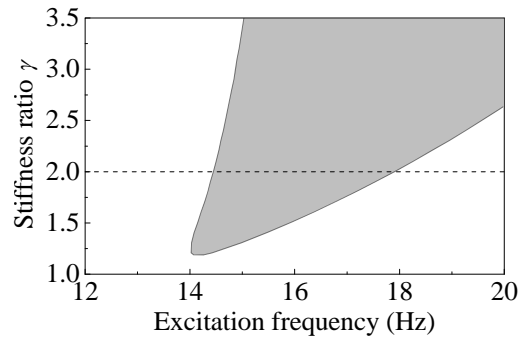
目および2段目でそれぞれ6.8 Hz および9.6 Hz であり、周波数応答曲線から、分数調波振動が発生した場合、線形には共振しない周波数範囲(固有振動数の約2倍の周波数範囲)で、大きな振動が発生していることがわかる。

図2で発生した分数調波振動を理論的に再現するため、実験装置を模擬した1自由度モデルによる解析を行った。数値計算には、断片線形特性の切り替え点をNewton法により精度良く求めるShooting法を用いた。図3に、理論解析により求めた周波数応答曲線を示す。図2(b)と比較すると、両者のきわめて良い一致を示していることがわかる。

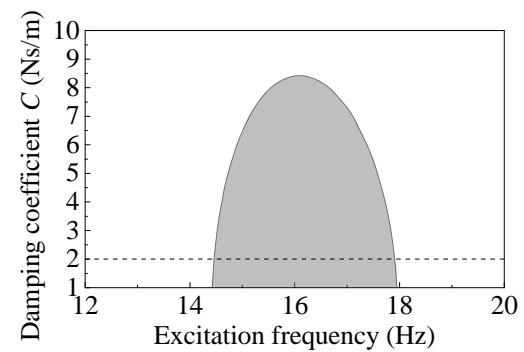
分数調波振動の特徴とその防止対策を検討するため、システムのパラメータが分数調波振動に及ぼす影響を理論的に検討した。その結果を図4(a)~(c)に示す。図4(a)~(c)はそれぞれ、断片線形特性における隣り合う

剛性比の影響、付加減衰の影響および断片線形特性の切り替え点からの初期位置の影響を示している。網掛け部の内部が分数調波振動が発生する領域である。以上の結果から、隣り合う剛性比をできるだけ小さくすること、および付加減衰を大きくすることにより分数調波振動を抑制することが可能であることがわかった。また、図4(c)から、断片線形特性の切り替え点から、わずかに初期位置が離れるだけで、分数調波振動が発生しなくなることがわかった。実験では、一般に複数のばねを同時に接触させることで、一つの合成ばねとして使用しているが、これらのばねの初期位置をわずかにずらすことで、分数調波振動を抑制できる可能性がある。

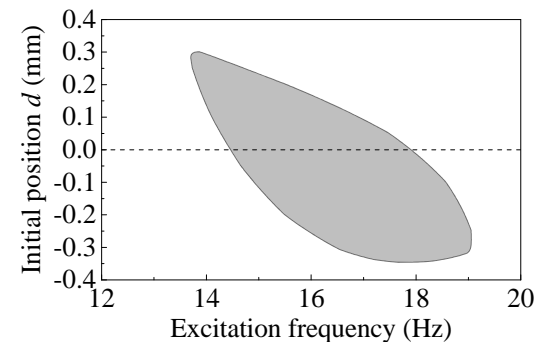
図4に示す各パラメータの影響について、実験的にも確認を行った。その結果、実験結果と理論解析結果は非常に良い一致を示した。



(a) 剛性比の影響



(b) 減衰の影響



(c) 初期位置の影響

図4 各パラメータの影響（理論解析）

分数調波振動の抑制対策として、図 4(c)の結果を応用した多段の断片線形ばねを用いる手法を実機モデルを対象として理論的に検証した。大きな剛性比を有する断片線形ばねを、細かな複数の段に分割し、分数調波振動を抑制する対策である。その結果、断片線形ばねの段数を局所的に増やし、その間隔を広げることで、分数調波振動を抑制できることがわかった。

また、分数調波振動に対する抑制手法として、動吸振器を用いた場合の理論解析も実施した。その結果、動吸振器の設計として、加振振動数にチューニングした場合には、分数調波振動の抑制効果はほとんど得られず、分数調波振動を抑制する場合の設計法は、線形の強制振動における設計法と異なることがわかった。1/2 次分数調波振動を抑制するためには、加振振動数の 1/2 成分、つまり、発生振動数付近にチューニングする必要があること、また、動吸振器に適度な減衰を付与する必要があることがわかった。

さらに、L-up クラッチすべり制御時に発生する非線形振動現象の発生メカニズムについても数値解析により検討した。その結果、L-up クラッチの標準摩擦特性を使用した場合、すべて安定解となったが、L-up クラッチの負勾配を強めた摩擦特性を使用した場合、概周期振動が現れ、実車の振動現象と類似した解析結果が示された。複素固有値解析の結果では、概周期振動の発生範囲において摩擦自励振動が不安定化しており、これが L-up クラッチすべり制御時に発生する振動現象の主な原因であることがわかった。

振り子型動吸振器の非線形振動

振り子型動吸振器は、エンジンの爆発によるねじり振動を低減するため、自動車用 AT で広く使用されるようになってきたが、振り子の非線形性により、振動振幅が大きくなる現象が問題となっている。この現象を解明するため、振り子の非線形性を考慮した実機モデルによる理論解析を実施した。図 5 は、横軸がエンジン回転数、縦軸が出力トルクである。1500rpm 付近に振幅が大きくなる領域が確認できる。これは、系の減衰の影響および振り子の固有振動数の影響から、振り子の振動振幅が大きくなったために発生した非線形振動であることがわかった。

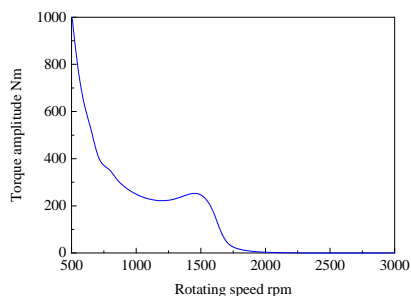


図 5 振り子による非線形振動

(2) 振動低減の最適化

自動車用 AT の振動を低減させるため、トルクコンバータ内の L-up ダンパの設計法および動吸振器の最適配置や設計法について、モード解析および遺伝的アルゴリズムを用いて、理論的に最適化を行った。その結果、動吸振器の最適配置位置やダンパ特性の検討を完了した。その過程で、さらなる振動低減を図ることができる新たな機構を考案するに至った。その機構について、遺伝的アルゴリズムを用いて、最適化できることがわかり、きわめて優れた振動減衰効果があることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Takashi Nakae, Takahiro Ryu and Kenichiro Matsuzaki, Torsional Vibration Suppression in Automatic Transmission Powertrain Using Centrifugal Pendulum Vibration Absorber, Proceedings of 24th international congress on sound and vibration, Vol.1, 2017, pp.1-8, 査読有。

Takashi Nakae, Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, et al., Optimal Design of Spring Characteristics of Damper for Subharmonic Vibration in Automatic Transmission Powertrain, Journal of Physics: Conference Series, Vol.744, 2016, pp.1-11, 査読有。

DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/01220

Takahiro Ryu, Takashi Nakae, Kenichiro Matsuzaki et al., Fundamental Study of Subharmonic Vibration of Order 1/2 in Automatic Transmissions for Cars, Journal of Physics: Conference Series, Vol.744, 2016, pp.1-11, 査読有。

DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/012206

Takashi Nakae, Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, Sofian Rosbi, et al., Optimal Design of Dynamic Absorber for Subharmonic Nonlinear Vibration in Automatic Transmission Powertrain, Proc. of APVC 2015, 2015, pp.614-622, 査読有。

Akihiro Nanba, Takashi Nakae, Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, et al., Fundamental Study of Subharmonic Vibration in Automatic Transmissions, Proc. of APVC 2015, 2015, pp.425-482, 査読有。

[学会発表](計 4 件)

難波陽大,自動車用 AT における分数調波振動に関する基礎実験および理論解析, Dynamics and Design Conference, 2016.

難波陽大,自動車用 AT における分数調波振動の発生傾向に関する理論解析および基礎実験,自動車技術会秋季大会, 2016.

上笹貫滉大,自動車用 AT のL-up クラッチすべり制御時における振動現象の数値解析,日本機械学会年次大会, 2016.

上笹貫滉大,自動車用 AT のロックアップクラッチすべり制御時における振動現象の防止対策,自動車技術会秋季大会, 2016.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称:振動減衰装置
発明者:劉孝宏,中江貴志,松崎健一郎,滝川由浩ほか3名
権利者:鹿児島大学,アイシン・エイ・ダブリュ株式会社,大分大学
種類:特許
番号:特願 2015-226653
出願年月日:2015年11月19日
国内外の別:国内

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

松崎 健一郎 (Matsuzaki, Kenichiro)
鹿児島大学・理工学域工学系・教授
研究者番号:80264068

(3)連携研究者

()

研究者番号:

(4)研究協力者

()