

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06148

研究課題名（和文）自動調整機構を有する空気ばねを用いた精密防振機構の開発

研究課題名（英文）Development of a high precision vibration isolator using air suspensions with auto tuning mechanism

研究代表者

山本 浩（Yamamoto, Hiroshi）

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20220494

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：自動調整機構を有する空気ばねを用いた精密防振機構の開発を目的として、まず複数の空気ばねで支持された防振機構の動特性を理論および実験により明らかにすることを通じて、空気ばね支持防振機構の共振倍率を最小化する設計指針を明らかにした。また積載荷重変動の影響を明らかにするべく、空気ばねで支持された防振機構の動特性に支持質量の大きさや重心位置が及ぼす影響を明らかにした。そして積載荷重変動時に共振倍率を最小化するには空気ばねの等価減衰係数の調整が必要なることを見出し、空気ばねにおいて最も調整すべき特性である減衰係数を簡便に調整する機構を提案し、その有用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空気の圧縮性（弾性）と粘性を用いた空気ばねを微小振動の絶縁に用いる場合、従来の構造では線形ばねおよび減衰を実現することが非常に困難であり、さらに特性の調整も容易では無かった。本研究により調整容易かつ線形性を有する防振機構に有用な空気ばねを実現できたことが学術的意義となる。また従来に比べ広い振動数、振幅領域で精密防振が可能であり、かつ実使用状況下にて多々ある積載荷重の変動に対しても優れた特性を維持できることから、機械工学全般、とりわけ精密工学分野の発展に寄与する点が社会的意義となる。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of developing a high precision vibration isolator using air suspensions with an automatic adjustment mechanism, we firstly clarify the dynamic characteristics of the vibration isolator supported by multiple air suspensions theoretically and experimentally. The design guideline for minimizing the resonance magnification of the vibration isolator is clarified. In addition, in order to clarify the effect of load fluctuation, the effect of the supporting mass and the position of the center of gravity on the dynamic characteristics of the vibration isolator supported by the air suspensions is clarified. We find that it is necessary to adjust the equivalent damping coefficient of the air suspension in order to minimize the resonance amplitude when the load changes, and proposed a mechanism that simply adjusts the damping coefficient, which is the most characteristic of the air suspension. The usefulness of the proposed adjustment mechanism is clarified.

研究分野：機械力学

キーワード：防振機構 空気ばね ばね定数 減衰係数

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空気ばねは鉄道車両における振動絶縁のための実用化から精密除振台への適用へと、その利用範囲は広がっていたが、振動振幅や積載荷重の変動に対しては必ずしもロバストでは無く、改善の余地が多くあった。

2. 研究の目的

研究代表者らが提案しその基本的特性を明らかにしているスリット絞りを有する空気ばね構造をさらに発展させ、防振機構における積載状態の変化を検出しばね定数および減衰係数を自動的に調整する機構を有する空気ばねを提案し、その空気ばね複数で支持された防振機構を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

まず複数の空気ばねで支持された防振機構の振動伝達特性を解析により明らかにするとともに、得られた結果に基づき防振機構を試作し、解析の妥当性を検証することを通して、防振機構の最適設計指針を提示する。また積載荷重変動時に、共振倍率を最小にするという観点での最適値が大きく変わる等価減衰係数に着目し、それを簡便に調整可能な機構を提案し、特性解析、設計、試作、特性測定を通してその有用性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) スリット絞りを有する空気ばねを用いた防振機構の動特性と最適設計指針

① 防振機構および空気ばねの構造概略

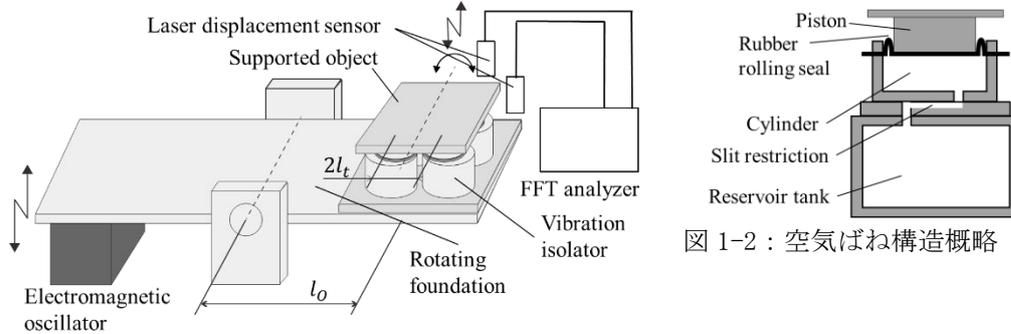


図 1-1：空気ばねを用いた防振機構および測定系

図 1-1 に空気ばねを用いた防振機構および伝達特性の測定系を示す。また図 1-2 にスリット絞りを有する空気ばねの構造概略を示す。防振機構は 4 つの空気ばねで物体を支持し、剛体である支持物体の各点が鉛直方向に振動する、鉛直方向並進自由度および直交する 2 つの水平軸回りの回転自由度の計 3 自由度を有する。防振機構の基礎は対応する 3 自由度が重畳されたモードで加振されるので、実験においても回転基礎上に設置した防振機構の位置及び姿勢を変えることにより、並進および回転モードが重畳されたモードでの加振が可能である。シリンダおよび補助タンクと両者を結合する流路からなる空気ばねは、流路をスリットにすることにより減衰能が発現し、スリットすきまが狭く長くなるほど等価減衰係数は大きくなる。

② 伝達特性

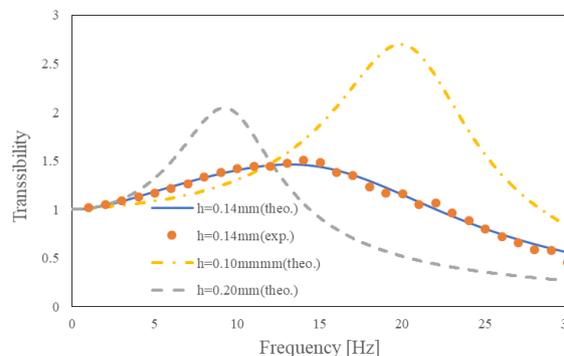


図 1-3：スリットすきま寸法の影響

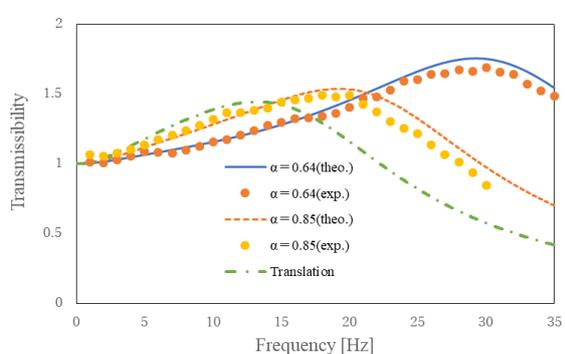


図 1-4：積載物の回転半径の影響

一例として、図 1-3 に回転振動モードのみ加振した場合の、スリットすきまをパラメータとした加振振動数と伝達率の関係を示す。ここで質量中心から空気ばね設置位置までの距離に対する支持物体の回転半径の比 α は 1.0 としている。なお回転半径は質量に対する慣性モーメントの

比の平方根に対応しており、 α が1.0のときに並進振動モードと回転振動モードの固有振動数が一致する。図よりスリットすきまが0.14mmのとき共振倍率が最小となり1.5程度を実現できている。また線で示す解析結果と記号で示す実験結果は良く一致しており解析手法は妥当であると言える。図1-4に α をパラメータとした結果を示す。図に示すように、 α が1より小さくなるほど固有振動数は高くなり共振倍率は大きくなるのがわかる。

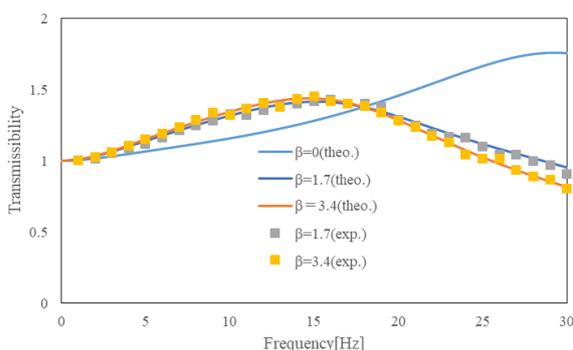


図 1-5：加振モードの影響 ($\alpha=0.64$)

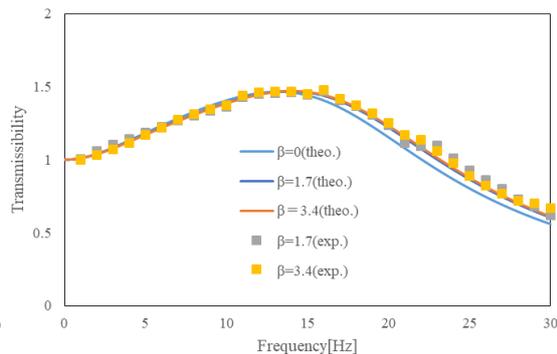


図 1-6：加振モードの影響 ($\alpha=1.0$)

図 1-5 および 1-6 に、加振モードに対応するパラメータ β を変化させたときの、伝達率を示す。 $\alpha=0.64$ のときは回転加振のみの場合に対応する $\beta=0$ の場合の共振振動数および共振倍率が高くなるが、 β が大きくなり並進加振の影響が大きくなるほど共振倍率は小さくなる。また $\alpha=1.0$ としたときは加振モードによらず共振倍率が前述の 1.5 程度に抑えられていることから、 $\alpha=1.0$ とすれば加振モードによらず共振倍率を低減できることがわかる。

③まとめ

支持物体の慣性モーメントから求まる回転半径と重心から空気ばねの距離を一致させ、並進振動モードの共振倍率を最小とする等価減衰比に設定することにより、並進振動モードのみが励振される場合だけでなく、回転振動モードのみが励振される場合や、両者がともに励振される場合においても共振倍率を 1.5 程度に除振できる。

(2) 積載荷重変動が防振機構の特性に及ぼす影響

①積載物の質量ならびに積載物の重心と空気ばね設置中心のずれの影響

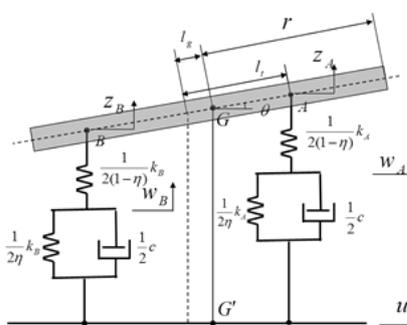


図 2-1：解析モデル

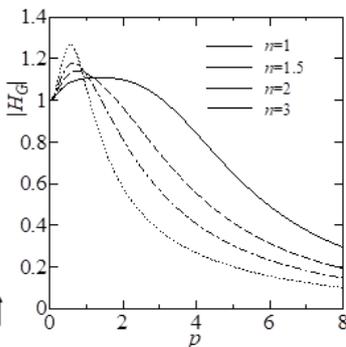


図 2-2：積載質量の影響

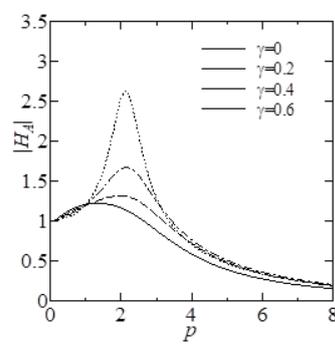


図 2-3：重心位置ずれの影響

図 2-1 に、同一の特性の空気ばねが対称配置された防振機構の、積載物の重心位置のずれを考慮した解析モデルを示す。図 2-2 に基準となる質量に比べ n 倍の質量を支持した場合の伝達特性を示す。積載物の質量が大きくなった場合、定常状態における空気ばねの内圧も高くなるのでばね定数も高くなるが、スリット寸法によって決まる等価減衰係数は変わらないため、結果として等価減衰比は低くなり共振倍率は高くなる。このことから支持質量の変化に応じて減衰係数を調整する必要があることが示唆される。図 2-3 に空気ばねの設置位置に対する重心位置のずれに対応する無次元量 γ をパラメータとして伝達特性を示す。重心位置がずれるほど共振倍率は高くなるのがわかる。

②まとめ

(a) ある支持質量について共振倍率を最小とする等価減衰比に対応する減衰係数に調整した場合、支持質量が大きくなるほど共振倍率は高くなるので、支持質量の増大に対応し等価減衰係数をより大きくする必要がある。

(b) 空気ばね支持部の中心と支持物体の重心が一致するときに共振倍率を最小とする等価減衰比に対応する減衰係数に調整した場合、重心がずれるほど共振倍率は高くなる。

(3)減衰調整機構を有する空気ばねの動特性

①スリット絞りを有する空気ばねの減衰係数調整機構

図 3-1 に提案する空気ばねの構造概略および伝達特性測定系を示す。空気ばねの構造は前述のものと同様であるが、減衰性を与えるシリンダと補助タンクを連結する流路部の構造が大きく異なる。伝達率は空気ばね設置基礎を電磁式加振器で加振し、ピストンと連結された錘を合わせた支持物体と基礎の振動をレーザ変位計で測定し、FFT アナライザを用いて伝達率を得る。図 3-2 に減衰係数調整機構の概略を示す。部分円弧上の溝が設けられた、空気ばねに固定された溝付き円板の対向部に、円弧の中心を通り溝付き円板に直交する軸回りに回転可能な調整用円板が取り付けられた構造となっている。溝付き円板の円弧溝の片端には溝幅に比べ十分径が大きいシリンダに導通する貫通孔が空いている。また調整用円板には溝に対向する部分に十分径が大きい補助タンクに導通する貫通孔が空いている。シリンダに貫通する孔と補助タンクに貫通する孔の間には溝付き円板に設けられた部分円弧溝と調整用円板表面の平面によりスリットが形成され、この部分を空気が通るときの流体抵抗により減衰力を生じる。また調整用円板の回転角を変化させることにより、スリット長さを広範囲に変えることができるので、等価減衰係数の調整が可能となる。

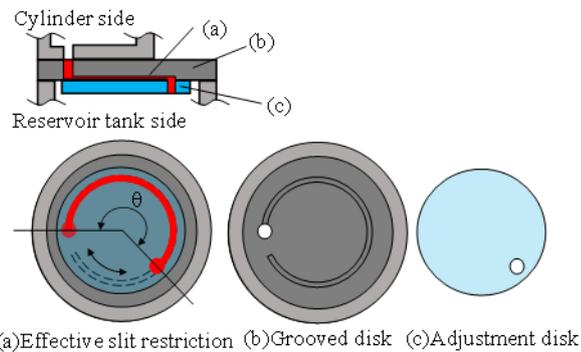
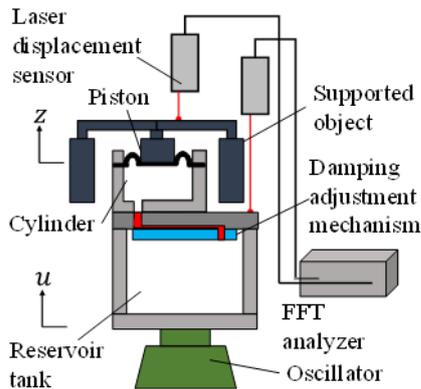


図 3-1：空気ばね構造概略および測定系 図 3-2：減衰係数調整機構構造概略

②減衰係数調整円板の回転角が伝達特性に及ぼす影響

図 3-3 に、減衰係数調整円板の回転角（以下調整角と呼ぶ）と減衰係数の関係を示す。調整角が小さい場合は溝付き円板に設けた孔と調整円板に設けた孔が導通するため、空気はスリットを流れないので減衰係数はゼロになるが、調整角がある程度の大きさ以上の領域に着目すると、減衰係数は調整角に比例することがわかる。

図 3-4 に調整角をパラメータとして伝達特性を示す。図に示す支持質量が 1.31kg の場合は調整角が 41 度の場合に共振倍率を最小とする等価減衰比に対応する減衰係数となることに対応し、実験においても計算においてもこのとき共振倍率が最小になっている。またこの場合はスリットが円弧形状となっているが、計算結果は実験結果に良く一致していることから、円弧溝においても解析結果は妥当であると言える。

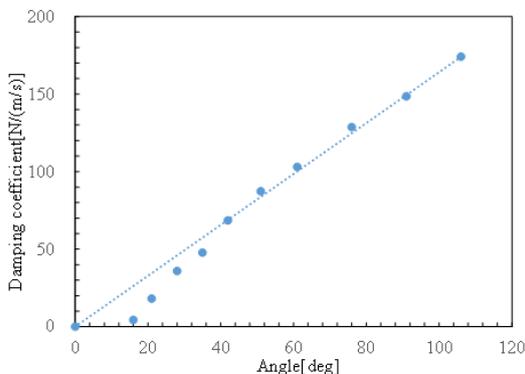


図 3-3：調整円板回転角と減衰係数

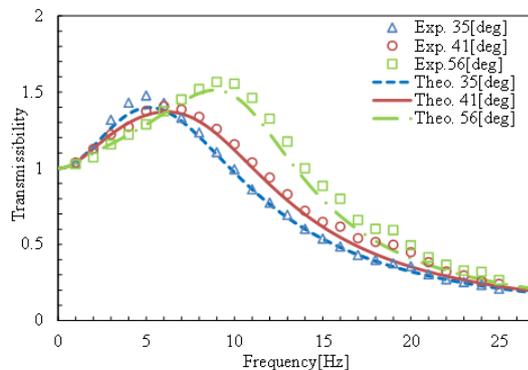


図 3-4：調整円板回転角の影響

③支持質量変化への対応と減衰特性の線形性

図 3-5 に支持質量と共振倍率の最小値および調整角の関係を示す。支持質量が基準値である 0.86kg の約 2 倍になっても共振倍率の最小値はさほど変化しないこと、また支持質量の変化に伴い調整角を大きくしスリット長さを長くすることにより共振倍率を最小化できていることがわかる。

図 3-6 に基礎の加振振幅と共振倍率の関係を、調整角をパラメータとして示す。加振振幅を変化させても共振倍率はさほど変化していないことから、試作した空気ばねの等価減衰係数は振幅について概ね線形性を有していることがわかる。また調整角が大きくなりスリット長さが長くなるほど振幅依存性は小さくなることがわかる。

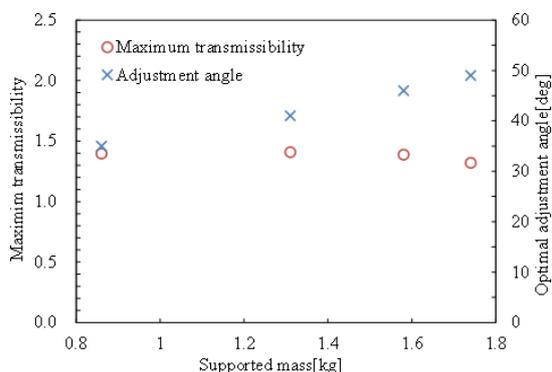


図 3-5：支持質量の影響

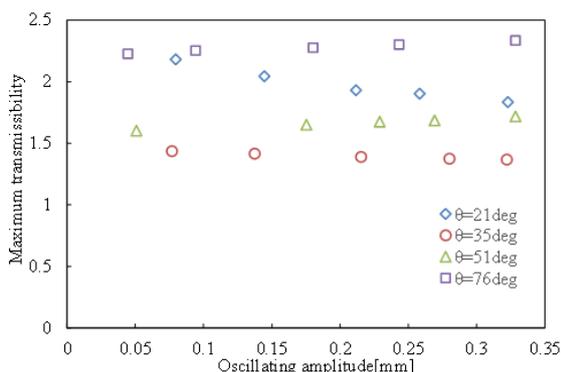


図 3-6：減衰特性の線形性

④まとめ

- (a) 提案する減衰調整機構の減衰係数は調整円板の回転角と線形性を有する。
- (b) 質量が基準値の 2 倍まで増加した場合でも、最適な調整角を選び等価減衰比を最適化することにより、共振倍率を最小化することが可能であり、1.5 程度の共振倍率を実現可能である。
- (c) 試作した空気ばねの等価減衰係数は振幅について概ね線形性を有している。また調整角が大きくなりスリット長さが長くなり等価減衰係数が大きくなるほど、減衰係数の振幅依存性は小さくなる。

(4) 今後の展望

本研究では複数の空気ばねで支持された防振機構の特性の向上を目指して、積載荷重の特徴（支持物体の質量、慣性モーメント、重心位置）が動特性に及ぼす影響を明らかにし、設計指針を提示するとともに、積載荷重変動への対応の第一ステップとして減衰係数の調整機構を有する空気ばねを提案し、その有効性を明らかにした。今後は積載荷重変動を検出し、それに応じて防振機構全体の特性を高速に調整するシステムの開発が望まれ、その実現のために研究を継続する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山本浩, 成川輝真	4. 巻 17-1
2. 論文標題 空気ばねを用いた防振機構の動特性に積載荷重条件が及ぼす影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会2017年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 J1010106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2017.J1010106	査読の有無 無
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 山本浩, 根本英男, 成川輝真	4. 巻 19-1
2. 論文標題 減衰調整機構を有する空気ばねの動特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会2019年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 J10313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2019.J10313	査読の有無 無
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 Hiroshi YAMAMOTO, Haruki NAKAZONO and Terumasa NARUKAWA	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of a vibration isolator using air suspensions with slit restrictions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vibration Engineering for a Sustainable Future (Active and Passive Noise and Vibration Control, VCお1. 1)	6. 最初と最後の頁 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-47618-2	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本浩, 成川輝真
2. 発表標題 空気ばねを用いた防振機構の動特性に積載荷重条件が及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本浩, 根本英男, 成川輝真
2. 発表標題 減衰調整機構を有する空気ばねの動特性
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi YAMAMOTO, Haruki NAKAZONO and Terumasa NARUKAWA
2. 発表標題 Development of a vibration isolator using air suspensions with slit restrictions
3. 学会等名 The 18th Asia-Pacific Vibration Conference (国際学会)
4. 発表年 2019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	成川 輝真 (Narukawa Terumasa) (50424205)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	