

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05877

研究課題名(和文)粘弾性体を含むマルチボディシステムの効率的な解析手法の検討

研究課題名(英文)Efficient analysis of multibody system with viscoelastic elements

研究代表者

椎葉 太一 (Shiiba, Taichi)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：10349839

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)：本研究は、自動車のサスペンションに用いられるラバーブッシュなどの粘弾性体を対象としており、粘弾性体要素の単体でのモデル化手法と、粘弾性体を含むマルチボディシステムの効率的な解析手法を検討したものである。機械システムに用いられる粘弾性体は高い剛性を有するものが多く、安定した解析を実現することは容易ではない。本研究では、一般化Maxwellモデルによる表現された粘弾性体要素を含むマルチボディシステムを対象として、効率の良い解析手法を検討した。

研究成果の概要(英文)：The modeling of viscoelastic elements such as rubber bushes and the efficient analysis methods of multibody system including viscoelastic elements are discussed. The analysis of multibody system with viscoelastic elements tends to be unstable because those systems contain high eigenfrequency. In this study, the efficiency of multibody system analysis with viscoelastic elements described with the generalized Maxwell model are investigated.

研究分野：車両運動学

キーワード：マルチボディダイナミクス 粘弾性体 リアルタイム解析

1. 研究開始当初の背景

自動車のサスペンションには、サスペンションリンクと車体およびハブキャリアを結合する箇所などに、ラバースッショが用いられている。ラバースッショを利用する第一の目的は、路面からの振動を低減させることである。また、加減速時や旋回中にタイヤに発生する力に応じてラバースッショは変形し、その結果トー角やキャンバ角といったホイールアライメントが変化する。従って、ラバースッショの特性は、振動絶縁のみならず、操縦安定性にも大きな影響を及ぼす。ラバースッショの材料であるゴムは、粘性体と弾性体の両方の性質を有する粘弾性体であり、その力学的特性は、ヒステリシス特性や周波数依存性などを伴う強い非線形性を有している。さらに、すぐり入りスッショやインターリング入りのスッショなど、荷重方向に対して積極的に特性を変化させたスッショも多く実用化されている。

ラバースッショが自動車の運動特性に及ぼす影響を評価する際には、マルチボディダイナミクスが一般的に利用されている。マルチボディダイナミクスは、ジョイントやばね・ダンパなどにより結合された複数の部品によって構成されるシステム(マルチボディシステム)を解析する手法であり、個々の部品要素の特性や幾何学的配置などを考慮して、精度のよい解析を実現することが可能である。

近年、マルチボディダイナミクスのリアルタイム解析に基づく HILS (Hardware-in-the-loop Simulation) システムが提案されている。HILS は実際のハードウェアと数値シミュレーションを融合させたものであり、解析モデルに基づく数値シミュレーションにより様々な状況を再現し、その状況をハードウェアに試験条件として与えることで、ハードウェアの動作を評価するものである。しかしながら、ラバースッショのような粘弾性体の特性を考慮した HILS システムは、まだ実用化されていない。これは、ラバースッショはスプリングと比較して高い剛性を有しているため、ラバースッショを含むシステムのシミュレーションを行う際には数値積分の時間刻み幅を小さく設定する必要があるのに対し、HILS システムにおいて必要とされるリアルタイム解析を実現するためには、数値積分の時間刻み幅を小さくすることには限界があるためである。すなわち、通常の粘弾性体のモデリング手法では、粘弾性体を含むマルチボディシステムの安定したリアルタイム解析を実現することは困難であるといえる。そこで、リアルタイム解析に適した粘弾性体のモデル化手法と、粘弾性体を含むマルチボディシステムを安定に解析する手法の実現が必要となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、粘弾性体を含むマルチボディシステムを対象に、リアルタイム解析に適したモデリング手法、および解析手法を明らかにすることを目的としている。

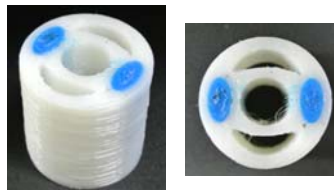
3. 研究の方法

3.1 試験体の作成

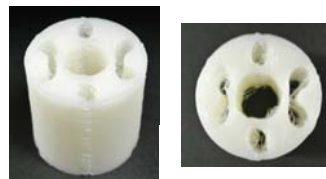
軸方向依存性を有する粘弾性体を表現するため、ポリエステルエラストマーを用いて、3D プリンタにより試験体を作成した。作成した試験体の例を図 1 に示す。



(i) 試験体 A



(ii) 試験体 B



(iii) 試験体 C

図 1 試験体

3.2 粘弾性体の力学特性を評価する試験装置の開発

本研究で対象とするラバースッショなどの粘弾性体は、ヒステリシス特性や周波数依存性などの非線形特性を有している。粘弾性体のモデリングを検討するにあたり、粘弾性体の動特性を評価する試験装置の開発を行い、粘弾性体の基礎的特性を評価した。

図 2 に軸直方向の荷重たわみ特性を評価した試験結果の一例を示す。ここでは、図 1 に示した試験体 A に対し、荷重方向と加振周波数を変化させて特性を評価したものを示している。荷重方向に応じて力学的特性が変化すること、加振周波数に応じてヒステリシス特性などが異なることが示されている。

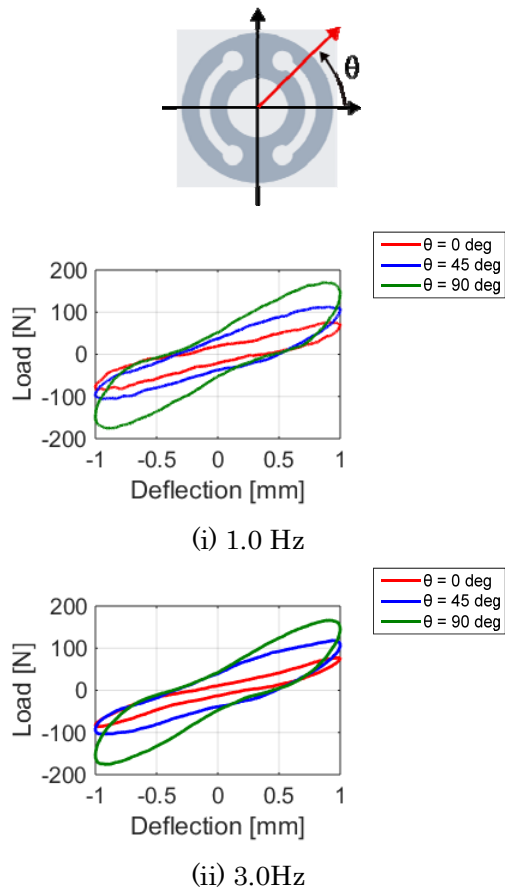


図2 荷重たわみ特性試験結果

3.3 粘弾性体単体のモデル化手法の検討
 粘弾性体のモデル化手法としては、複数のばねおよびダッシュポットモデルを組み合わせた Voigt モデルや一般化 Maxwell モデル、先行すべりを考慮した LuGre モデルなど既に様々なモデルが提案されているが、リアルタイム解析を実現するに当たっては、実行速度と解析精度をバランスさせる必要がある。本研究では、図3に示されるような10要素一般化 Maxwell モデルを放射状に配置することにより、荷重-たわみ特性の軸方向依存性を表現することを検討した。併せて、パーティクルフィルタを用いることにより一般化 Maxwell モデルのパラメータを自動的に同定する手法を検討した。

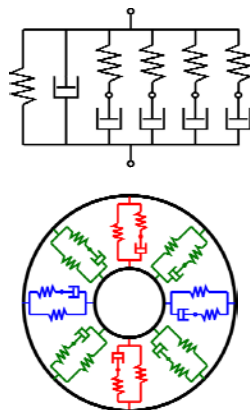


図3 モデル化手法の検討

図4に、提案するモデル化手法による解析結果と試験結果との比較を示す。提案するモデル化手法により、ヒステリシス特性の周波数依存性を含め、良好な解析結果が得られていることが示されている。

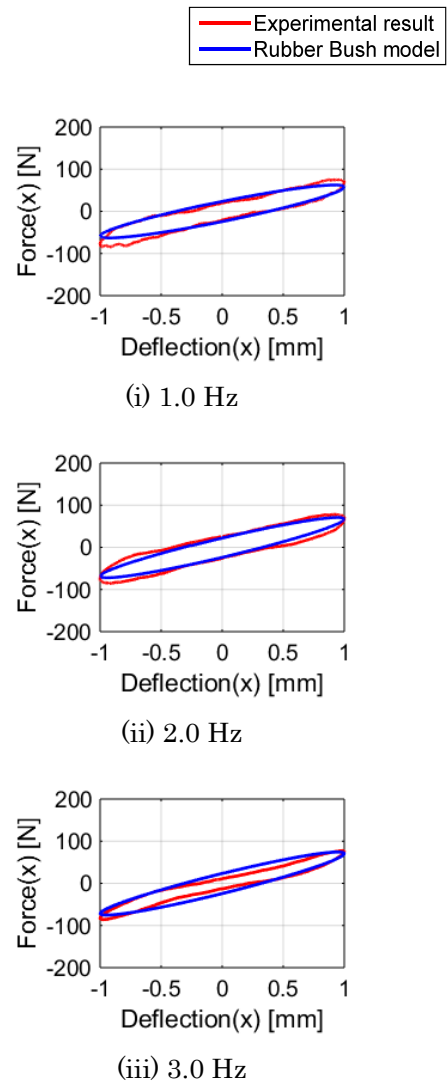


図4 試験結果との比較 (試験体 A, 0 deg)

3.4 リアルタイム解析に適した数値積分法の検討

粘弾性体要素を含むシステムは、高い固有値を含むことが多く、安定した解析を実現することが困難である。本研究では、マルチボディダイナミクス解析における数値積分法として、一般化 α 法の適用を試みた。一般化 α 法は陰解法の数値積分アルゴリズムの一種であり、高い周波数の現象に対しては数値減衰を利かせて高次モードによる解析の不安定性を抑制しつつ、低い周波数の現象に対しては数値減衰を抑えて解析精度を向上する手法である。剛性の高いブッシュ要素を含むマルチボディ車両モデル(図5)に対してこの一般化 α 法を適用し、解析のリアルタイム性を評価した。

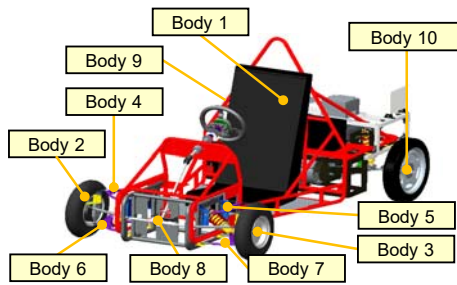
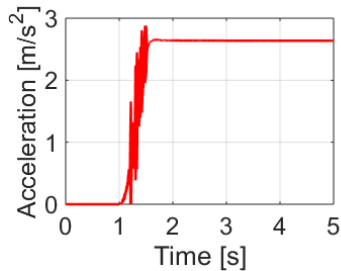
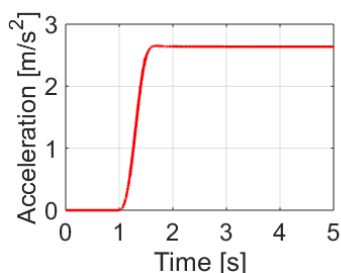


図5 マルチボディ車両モデル

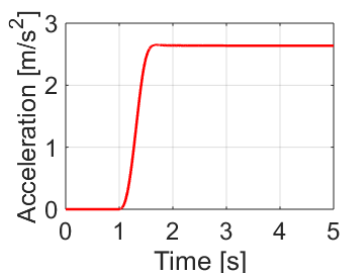
ステップ状の操舵角入力を与えた時の車両の横加速度の応答を図6に示す。一般化 α 法では、数値積分のステップ幅(h)とスペクトル半径(ρ_∞)と呼ばれるパラメータにより、数値減衰を調整することが可能である。これらを適宜調整することにより、ステップ幅を大きくとった場合でも、安定した車両運動解析が実現することが可能である。図7には、この解析の実行時間と反復計算回数を示す。時間刻み幅が大きいほど反復計算回数は増加するが、解析全体のステップ数は少なくなり、実行時間の短縮を図ることができたこと、特に時間刻み幅を 10 ms としたときには計算時間はシミュレーション時間を下回り、リアルタイム解析が実現できていることが示されている。



(i) $h = 1\text{ ms}$, $\rho_\infty = 0.8$

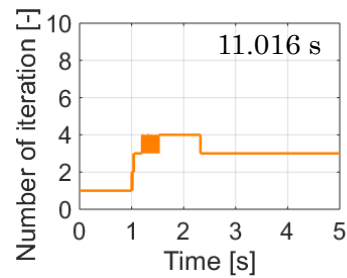


(ii) $h = 1\text{ ms}$, $\rho_\infty = 0.2$

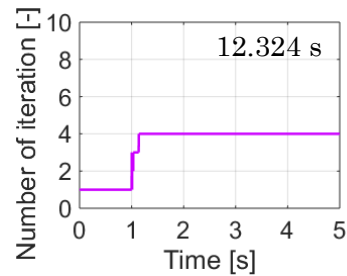


(iii) $h = 10\text{ ms}$, $\rho_\infty = 0.8$

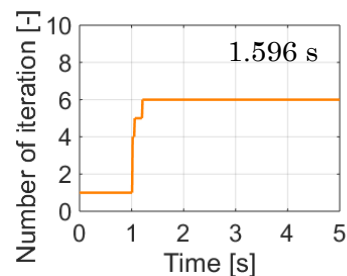
図6 一般化 α 法による車両運動解析



(i) $h = 1\text{ ms}$, $\rho_\infty = 0.8$



(ii) $h = 1\text{ ms}$, $\rho_\infty = 0.2$



(iii) $h = 10\text{ ms}$, $\rho_\infty = 0.8$

図7 実行時間と反復計算回数

4. 研究成果

自動車のサスペンションに用いられるラバーブッシュなどの粘弾性体を対象として、粘弾性体要素の単体でのモデル化手法と、粘弾性体を含むマルチボディシステムの効率的な解析手法を検討した。粘弾性体要素のモデル化手法として、一般化 Maxwell モデルを複数用いることにより、周波数依存性や荷重方向依存性などを表現できることを確認した。併せて、剛性の高いブッシュ要素を含むマルチボディ車両モデルを用い、一般化 α 法により効率の良い解析が実現できることを示した。

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)

[学会発表] (計2件)

幡多 秀駿, 島田 康平, 中村 健人, 椎葉太二, 特性評価試験に基づいたラバーブッシュのモデル化手法の検討, 日本機械学会第26回交通・物流部門大会 講演論文集, No. 17-53, 1005, 2017. 12

田村 康平, 椎葉 太一, ラバースッシュを考慮した車両モデルにおける効率的な解析手法の検討, 日本機械学会 第26回交通・物流部門大会 講演論文集, No.17-53, 1009, 2017.12

6. 研究組織

(1) 研究代表者

椎葉 太一 (Taichi Shiiba)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号: 10349839

(2) 研究分担者

岩村 誠人 (Makoto Iwamura)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号: 90341411