

指導 小林 邦夫 教授 榎 徹雄 教授
 山崎 大生 准教授 堺 英男 講師
 萩原 雅之 院生 0511023 加藤 亮介

1. 緒言

サスペンションは車体重量を支持すると共に、路面の不備などによる車輪の上下運動を緩和、吸収し、振動が車体に直接伝達されることを防止する。また、タイヤと路面との接地性を確保して操安性の悪化を防ぐ役割を担っている⁽¹⁾。これらを満たすためにバネとダンパによるパッシブサスペンションや外力を使用したアクティブサスペンションが研究されてきた。しかし、パッシブは乗り心地と操縦安定性の両立に限界があり、アクティブは優れた制振性能があるが消費エネルギーという観点から問題があった。そこで省エネルギーに注目した制御手法⁽²⁾、振動エネルギーを回生するサスペンションの研究などが多く報告されている。これらの研究は、車体とタイヤ間のダンパを回生機構とし、制御を行っているが、タイヤの制振はあまり考慮されていない。

そこで本研究では、チューンドマスダンパ(以下 TMD) の概念を取り入れ、TMD によるエネルギー回生及びタイヤの制振を行う回生機構付きセミアクティブサスペンションを提案する。

2. 理論

2. 1. 主な記号

- B_{\perp} : 平均磁束密度 [T] $c(t)$: 可変減衰係数[Ns/m]
- c_1 : タイヤ部減衰係数[Ns/m] c_3 : TMD 部減衰係数[Ns/m]
- k_1 : タイヤ部ばね定数[N/m] k_2 : 車体部ばね定数[N/m]
- k_3 : TMD 部ばね定数[N/m] l : 回路の周長 [m]
- M_1 : タイヤ部質量[kg] M_2 : 車体部質量[kg]
- M_3 : TMD 部質量[kg] n : コイル巻数
- v : 磁石落下速度 [m/s] μ : 質量比 ϕ : 磁束 [Wb]
- ξ_2 : 車体部減衰比 ξ_3 : TMD 部減衰比($\xi_3 = c_3 / 2\sqrt{M_3 k_3}$)

2. 2. 力学モデル

本研究では、図 1 に示した回生機構付き 1/4 サスペンションモデルを使用した。本モデルにおける運動方程式は式(1)~(3)のように表される。

$$M_1 \ddot{y}_1 = -k_1(y_1 - y_0) - k_2(y_1 - y_2) - k_3(y_1 - y_3) - c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - c_3(\dot{y}_1 - \dot{y}_3) - c(t)(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad \dots(1)$$

$$M_2 \ddot{y}_2 = -k_2(y_2 - y_1) - c(t)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \quad \dots(2)$$

$$M_3 \ddot{y}_3 = -k_3(y_3 - y_1) - c_3(\dot{y}_3 - \dot{y}_1) \quad \dots(3)$$

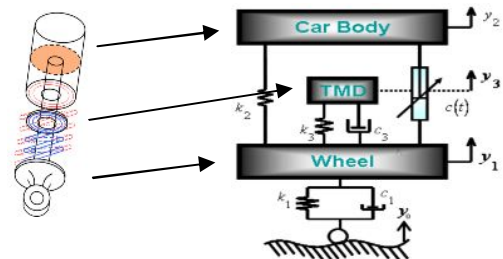


図 1 1/4 suspension model with regenerative mechanism

2. 3. 可変減衰器の制御則

図 1 における可変減衰器の制御則には、振動変数をフィードバックすることにより減衰係数を高速で切り換える方式を使用した。今回はオンオフの二値切換を行い、理想的な振動絶縁特性を持つスカイフックダンパ系を目標とする Karnopp 則⁽³⁾を採用した。以下にその制御則を示す。

$$c(t) = \begin{cases} 2\sqrt{M_2 k_2} & \text{if } \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \\ 0 & \text{if } \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \end{cases} \quad \dots(4)$$

2. 4. TMD(動吸振器)の設計法

TMD の設計には PQ 点理論を採用した。PQ 点理論とは、減衰を含む振動系のボード線図における減衰の大きさに関係なく定まる点(=PQ 点)を利用し、制振装置を設計する方法である。PQ 点理論より、TMD を式(5)~(7)のように設計した。

$$M_3 = \mu M_1 \quad \dots(5)$$

$$k_3 = M_3 \frac{k_1}{M_1} \left(\frac{1}{\mu + 1} \right)^2 \quad \dots(6)$$

$$c_3 = 2M_3 \sqrt{\frac{k_1}{M_1}} \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad \dots(7)$$

2. 5. 提案するエネルギー回生システム

本研究では、コイルと磁石を利用し誘導起電力を発生させる回生機構を考える。本機構における誘導起電力を定量的に把握するため、ソレノイドコイルにネオジウム磁石を落下させる基礎実験を行った。実験装置の概要図を図 2 に示す。ソレノイドコイルに発生する誘導起電力は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = nB_{\perp}lv \quad \dots(8)$$

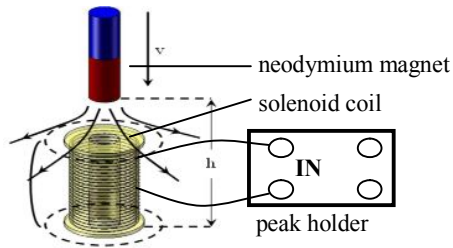


図2 Test equipment for regenerative mechanism

3. 結果

3.1. シミュレーション結果

図3は路面がステップ状変化をした際の車体変位及び車体加速度における時系列応答を示している。変位を比較すると、パッシブはオーバーシュート後に定常値に収束しているのに対し、セミアクティブではオーバーシュートせずに定常値に収束している。これはダンパが車体に加振力として作用する際、セミアクティブでは減衰係数を0に切り換えることで加振力をなくしているため良好な制振効果が得られたと考えられる。また加速度を比較しても、セミアクティブで最大ピーク値が低いことから、ステップ状の段差を乗り越える際、パッシブよりも良好な乗り心地が得られると考えられる。

図4は路面変位に対する車体変位のボード線図を示している。セミアクティブでは、2~10Hz付近において、Karnopp則に基づく二値切換を行うことで、パッシブよりも良好なゲイン抑制が得られている。約15Hz以上でパッシブと同等の性能となっているが、今後制御を二値切換ではなく、多段化切換等の細かい設定をすることにより改善されると考えられる。

図5は路面変位に対するTMD変位のボード線図を示している。PQ点理論に基づき設計したパラメータの方が他のパラメータに比べ幅広くゲインが増加していることが確認できる。本研究ではTMDに回生機構を取り付けるため、PQ点理論により適切なパラメータを設計することで多くの振動エネルギーが得られ、多くの回生エネルギーが得られると考えられる。

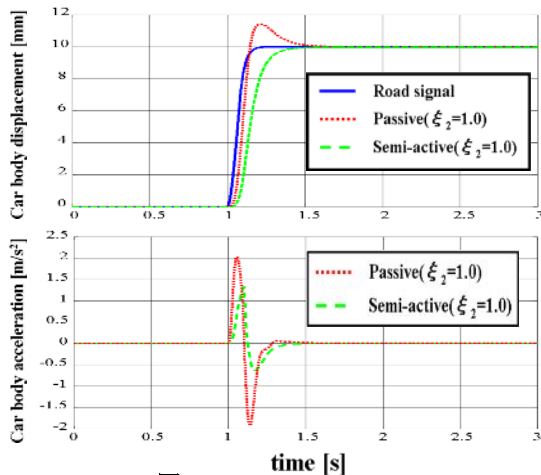


図3 Time series response

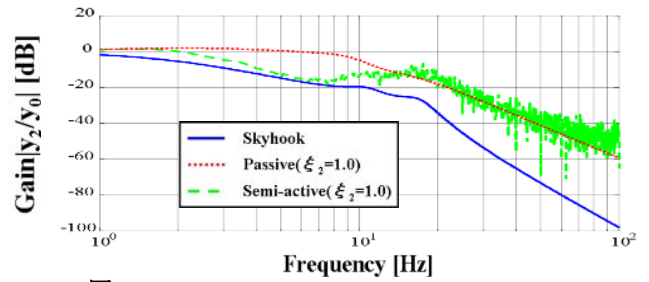


図4 Bode diagram of car body displacement

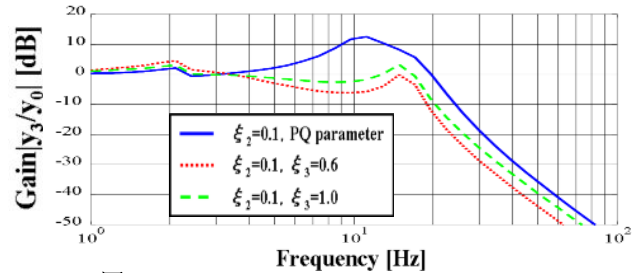


図5 Bode diagram of TMD displacement

3.2. エネルギー回生の基礎実験結果

図6はネオジウム磁石の落下速度に対する誘導起電力の特性を示している。図より速度の増加に伴い比例的に誘導起電力も増加している。よってTMDに回生機構を適用することにより、セミアクティブサスペンションに用いる制御エネルギーを確保できると考えられる。

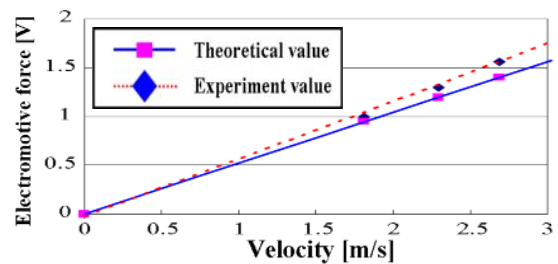


図6 Electrical generation data

4. 結言

- 1)Karnopp 則に基づいたセミアクティブサスペンションの有用性を確認した。
- 2)PQ 点理論に基づき TMD を設計し、タイヤ制振を行い、多くの回生エネルギーが得られる可能性を示した。
- 3)磁石とコイルを用いた回生機構を提案し、運動エネルギーを回生できることを確認した。

参考文献

- (1)永井正夫：アクティブサスペンションの振動制御の基礎，自動車研究,第12巻 第2号，(1990)，pp41-45
- (2) 福島直人：制御対象のエネルギー収支に着目した機械力学系の最適制御，日本機械学会論文集(C編)，Vol. 72，No. 722(2006)，pp36-44
- (3)karnopp,D. et al,Vibration Control Using Semi-Active Force Generators, Trans. ASME, J. Eng. for Industry, 96, Ser. B(1974), 619.