大型車両の通行を考慮したハンプ形状における車両の振動挙動分析

矢ヶ崎　力生[1]・遠藤　元喜[2]・Mahdi Nabizada[3]
小嶋　文[4]・山中　亮[5]・神谷　大介[6]・久保田　尚[7]

[1]埼玉大学大学院　理工学研究科（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255）
E-mail: r.yagasaki.090@ms.saitama-u.ac.jp
[2]埼玉大学大学院　理工学研究科（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255）
E-mail: g.endo.963@ms.saitama-u.ac.jp
[3](元)埼玉大学大学院　理工学研究科（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255）
E-mail: nabizada.m.080@ms.saitama-u.ac.jp
[4]正会員　埼玉大学大学院准教授　理工学研究科（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255）
E-mail: akojima@mail.saitama-u.ac.jp
[5]正会員　株式会社中央建設コンサルタント（〒901-2126 沖縄県浦添市宮城 5 丁目 12 番 11 号）
E-mail: yamanaka@cyuo.co.jp
[6]正会員　琉球大学准教授　工学部（〒903-0213 沖縄県那覇市沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地）
E-mail: d-kamiya@tec.u-ryukyu.ac.jp
[7]フェロー会員　埼玉大学大学院教授　理工学研究科（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255）
E-mail: hisashi@mail.saitama-u.ac.jp

これまで日本において，ハンプは主に規制速度 30km/h の生活道路に適用することを前提として開発が進められてきたが，大型車両が通行するような規制速度 40km/h の道路にも，速度抑制のために設置が求められる場合がある．こうした状況に適応したハンプ形状を探るため，サイン形状ハンプの平坦部長さを 2m から 12m まで変え，様々な速度で乗用車，および大型路線バスを通過させ，車内の鉛直加速度を計測する実験を行った．その結果，特定の平坦部長さで車内振動加速度が大きくなることが分かった．本研究では，画像解析とコンピューターシミュレーションを用いて，サスペンションの伸縮，車内振動，そして乗り心地の指標となると言われるジャークに関連する乗用車のハンプ通過時の挙動分析を行い，特定の平坦部長さで衝撃が伴う原因等について検討した．

Key Words: *speed hump, Simulink, jerk, vertical acceleration, public bus*

1. はじめに

これまで日本において，ハンプは歩行者の安全を守るために規制速度 30km/h の生活道路に適用することを前提として開発が進められてきた [1]．生活道路に適用するということは，生活道路に流入する乗用車や小型貨物車等を対象としており，現在では平坦部長さ 2mのサイン形状ハンプが全国に設置されている．ところが，近年では歩行者の安全だけではなく，環境保護等の観点から，規制速度 40km/h の道路にも，速度超過する自動車への速度抑制が求められる場合がある [2]．こうした道路には，小型の車両だけでなく，大型路線バスや大型トラック，トレーラー等，大型車両や構造が特殊な車両が通行する場合が多い．車両の通過速度が 40km/h となり，さらに車両の大きさや重量，構造が大きく異なる多種多様な車両が安全に通行することを想定しなければならないことから，こうした状況に適応したハンプ形状を探る必要がある．そこで，従来のハンプの平坦部長さを 2m から 12m まで 2m 刻みで変え，様々な速度で乗用車と 2t トラック，大型路線バスを通過させ，車内鉛直加速度を計測する実験を行った．

本研究では，動画解析ソフト Kinovea を用いて，ハンプ通過時におけるバスのサスペンションの動きに注目し，平坦部長さが異なることによる挙動の違いを把握した．そして，特定の平坦部長さで，大きな衝撃が発生してしまう原因について検討した．また，コンピューターシミ

ュレーションである MATLAB の Simulink を用いて実験を再現し．鉛直加速度や，乗り心地に関する指標と言われているジャークも同時に求め，ハンプ傾斜部や平坦部のどの位置について，より大きな衝撃が伴うのかについて検討を行った．

2. 実験概要

2022 年 6 月 20 日(月)～22 日(水)の 3 日間，国土技術政策総合研究所の敷地内にてハンプ走行実験を行った．平坦部の異なるハンプ(2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m)を準備し，それぞれの長さにおいて，乗用車，2t トラック，大型路線バスを通過させた．

乗用車には被験者として運転手と同乗者 3 名を乗車させ，2t トラックには運転者のみ乗車させ，各ハンプに 20, 30, 40, 50, 60km/h の指定速度で侵入させた．その間，加速度計を車内の助手席の足下に固定し，鉛直加速度を計測した．その後，被験者に対し不快感・危険感に関するアンケートを行った．路線バスについては，車両総重量が乗車率によって大きく異なるため，ハンプ通過時の挙動に違いが生じると考え，乗客の乗車率高を乗客 23 名，乗車率低を乗客 5 名として，2 パターンの乗車率に分けて行った．各ハンプに 20, 30, 40km/h の指定速度で侵入させ，乗客に対し，不快感・危険感のアンケートを行った．路線バスには加速度計を前輪車軸中心の車内床面に固定し，鉛直加速度を計測した．

3. 実験結果

図-1 及び図-2 は，30km/h，40km/h でハンプを通過した際の，鉛直加速度の最大値と，乗客の不快感に関するアンケートの回答平均値を示している．加速度は折れ線グラフで示され，不快感に関する回答平均値は棒グラフで示されており，0 が不快感がない，2 が少し不快，4 がかなり不快，6 が非常に不快という設定になっている．また，40km/h の平坦部 4m の乗車率低，平坦部 2m の実験は，平坦部 4m の乗車率高の走行実験における衝撃の大きさから，危険と判断されたため実施しなかった．

図-1 を見ると，30km/h 走行においては，加速度と不快感の結果が概ね一致している．平坦部 6m は乗客にとって不快感が小さく，実際の加速度も他の平坦部長さに比べて小さかった．平坦部 2m 及び 4m と短い場合は，乗り心地が悪化し，実際の加速度も大きくなっていた．次に図-2 の 40km/h 走行を見てみると，どの平坦部長さでも不快感が大きいことが目立つ．加速度に注目してみると，平坦部 6m, 8m が他の長さに比べて小さく，乗り心地も若干程度良くなっていた．また，30km/h 走行と同様に，平坦部長さが 4m より短くなると，大きな衝撃が伴うことも確認された．

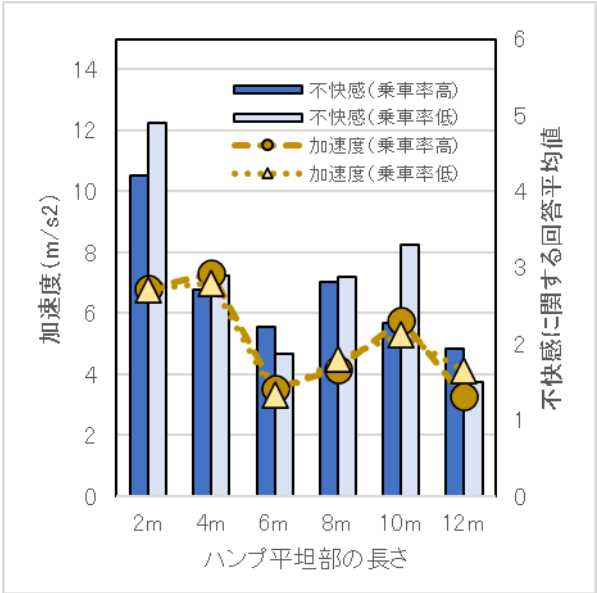


図-1 30km/h でのハンプ通過時のバス床面における鉛直加速度最大値と乗客の不快感

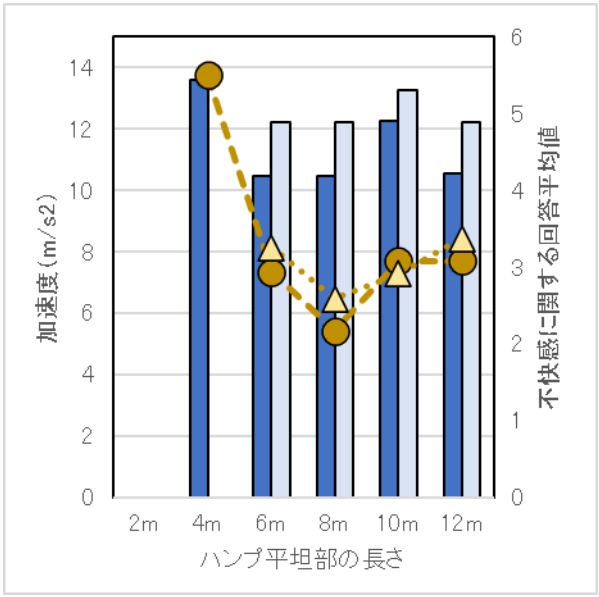


図-2 40km/h でのハンプ通過時のバス床面における鉛直加速度最大値と乗客の不快感

4. 映像分析によるバスの挙動分析

大型路線バスにおいて，主に平坦部 6m, 8m では衝撃が和らぎ，2m, 4m, 10m, 12m では大きな衝撃が発生してしまう原因を探るために，動画解析ソフトである Kinovea を用いて映像分析を行った．図-3 のように，Kinovea のトラッキング機能を用いて，前後の車輪中心と，フェンダー部分の軌跡を描くことができる．この車

輪の軌跡と，フェンダーの軌跡の間の長さが，どのように変化するのかを見ることで，サスペンションの伸びたり縮んだりするような動きを判断できると考えた．

図-3 のように，右側を上流側，左側を下流側として，動画を撮影している．この軌跡データは，座標データとして出力することで，グラフ化したり，軌跡間の計算を容易にすることが可能となる．図-3 の上流側と下流側の車輪とフェンダーの軌跡間を見てわかるように，バスが下流側に向かうにつれてカメラから遠ざかることから，軌跡間の長さを計算すると値が小さくなってしまう．それを解消するために，位置関係がずれることのないバスのフェンダー部分と，その真上にある窓枠部分にも軌跡を追加し，下流側に行くにつれて，軌跡間が小さくならないような補正値を求めた．そうすることで，より正確にサスペンションの伸び縮みを判断することができた．それらをグラフ化したものを以下に示す．



図-3　トラッキング機能を使って描いた軌跡

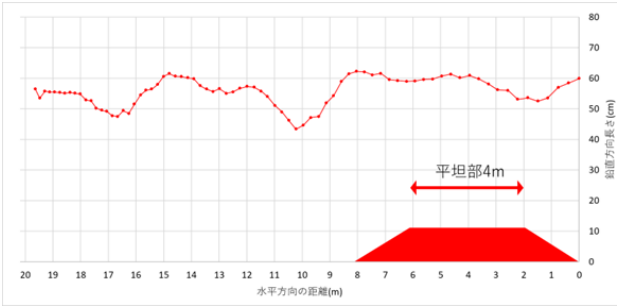


図-4　平坦部 4m における 40km/h 走行時の
フロントサスペンションの動き

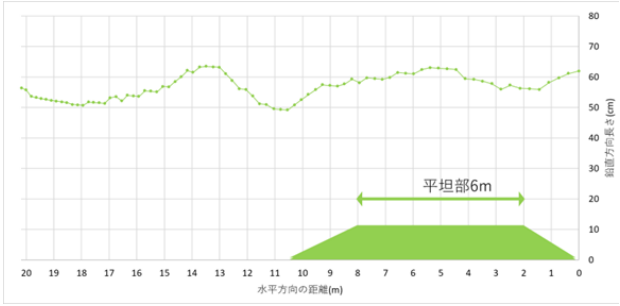


図-5　平坦部 6m における 40km/h 走行時の
フロントサスペンションの動き

これらのグラフは，横軸が水平距離(m)で，図-3 のようにバスは右側の上流から左側の下流に向かって走行する．縦軸は鉛直方向の長さ(cm)である．サスペンションの位置関係として，約 60cm の高さをハンプ通過前の通常状態の基準とし，この基準よりも高い位置にあるか，低い位置にあるかによって，サスペンションが伸びているか，縮んでいるのかを判断することにした．

実験の結果，30km/h 走行よりも 40km/h 走行の方が，乗客の不快感が大きく，実際の鉛直加速度も高い値を示していたこと，そして今回は規制速度 40km/h の道路に設置することを想定することから，40km/h 走行時の分析結果について述べる．また，加速度計をバス床面の前輪車軸付近に設置したことから，主にフロントサスペンションの動きについて述べる．

ハンプ通過後の沈み込みに注目して見てみると，衝撃の小さかった平坦部 6m, 8m は縦軸の基準値である 60cm から 50cm までの範囲に収まっているが，衝撃の大きか

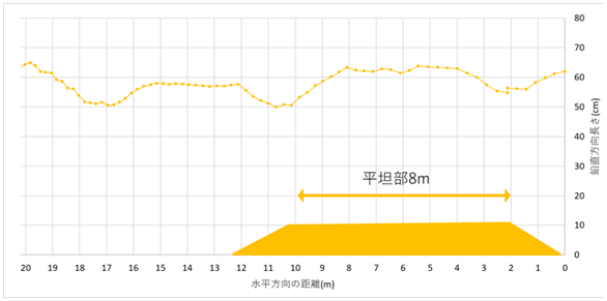


図-6　平坦部 8m における 40km/h 走行時の
フロントサスペンションの動き

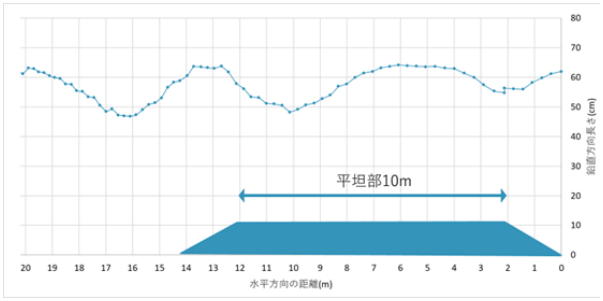


図-7　平坦部 10m における 40km/h 走行時の
フロントサスペンションの動き

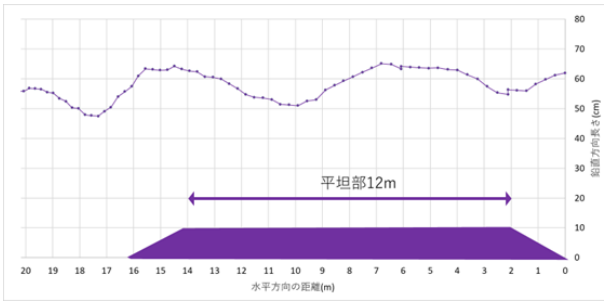


図-8　平坦部 12m における 40km/h 走行時の
フロントサスペンションの動き

った平坦部 4m, 10m, 12m に関しては 50cm よりも下へ沈み込んでいることがわかる．特に衝撃の大きかった平坦部 4mに関しては，特に沈み込みが激しかった．次にハンプ内でのサスペンションの動きに注目してみる．平坦部 4m(図-4)を見てみると，ハンプ登り傾斜部でサスペンションが縮み，平坦部に差し掛かったところで開放され伸び始める．平坦部 4m では，サスペンションが伸びきる段階でハンプ下り傾斜部に差し掛かり，勢いが付いた状態でハンプを下っていったために，大きな衝撃が伴ったと考えられる．平坦部 6m(図-5)を見てみると，平坦部が少し長くなったことで，サスペンションが縮んでいる段階でハンプ下り傾斜部に差し掛かるため，なめらかに下っていき，衝撃が抑えられた．平坦部 8m(図-6)を見てみると，こちらも平坦部 6m と同様にサスペンションが平坦部内で縮んでいる段階で，ハンプ下り傾斜部に差し掛かかるため，衝撃が抑えられた．次に平坦部 10m(図-7)を見てみると，平坦部が長くなったことで，平坦部内でバウンドし，再びサスペンションが伸びたところで，ハンプ下り傾斜部に差し掛かっている．平坦部 12m(図-8)も同様で，平坦部内でバウンドし，再びサスペンションが伸びてしまうことで，平坦部 4m と同じような状況を作り出すため，大きな衝撃がハンプ通過後に発生してしまった．従って，ハンプ下り傾斜部に差し掛かる際に，サスペンションがどの状態にあるのかが，衝撃の発生を左右させる重要な鍵であり，サスペンションの状態が，ハンプ平坦部の長さの違いによって変化することが，衝撃が大きく異なる原因となっている．

5. 交通シミュレーションによるジャークの検討

ジャークとは，加速度を時間微分した値であり，加速度の時間に対する変化の割合である．ジャークは，加速度に比べると，一般的には浸透していない物理量であり，近年様々なジャークの測定法に関する研究が進められている [3]．走行時に車内で発生する鉛直加速度やジャークには，乗り心地を評価する重要な指標となると考えられており，実際に自動車の走行で生じる速度変動による乗り心地は，加速度とジャークの両方の要因に影響を受けることが確認されている [4]．本研究においても，ハンプ通過に伴う衝撃と，鉛直加速度，鉛直ジャーク，そして搭乗者の乗り心地には大きな関係があると考えた．そこで，実験の様子をコンピューターシミュレーション MATLAB の Simulink を用いて再現し，加速度とジャークを計算して，より詳細な原因の解明に繋げようとした．

シミュレーションには，一般社団法人 MBD 推進センター（JAMBE）が提供するガイドライン準拠モデルを利用した [5]．走行する路面データを，実験で使った様々な平坦部長さのサイン形状ハンプに変更し，速度も実験に合わせて適用させ，鉛直加速度を求めた．得られた加速度データを Excel ファイルに出力し，ジャークの計算をした後にグラフ化した．Simulink を用いた先行研究によると，今回実施した実験結果から得られた最大鉛直加速度の平均値と，シミュレーションにより得られた最大鉛直加速度の平均値は，似たような傾向を示していた．また，加速度に関する RMS 値については，概ね一致しており，Simulink を用いたシミュレーション結果には妥当性があることが示されていた [6]．今回は，図-9 のモデルを用いたシミュレーションより得られたジャークのデータから，ハンプのどの地点において，急に突き上げられるような挙動を示すのかを検討した．

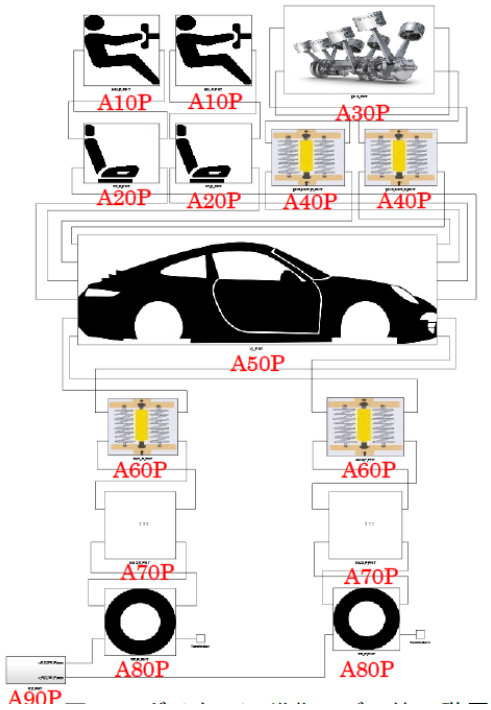


図-9　シミュレーションで使用した JAMBE が提供する乗用車のモデルの概要 [5]

図-10，図-11 は図-9 の乗用車のモデルを用いて，平坦部 2m のサイン形状ハンプを 40km/h，60km/h で通過した際の，加速度及び，ジャークを示したグラフである．左側を上流側，右側を下流側としており，ハンプは横軸の距離 0m 地点から下流側に 5m 離れた地点に設置した．また，鉛直方向について，上向きを正としている．図-10 の加速度を見てみると，ハンプ登り傾斜部で正の値になり，平坦部に差し掛かってから，ハンプを下り終えるまで負の値となっていた．ハンプを下り終えた後，衝撃が正の方向に発生し徐々に減衰していく様子がわかる．ニュートンの運動方程式より，力の向きは，加速度の向きであることがわかっているので，衝撃の加わる向きが，加速度のグラフから判断できる．次に図-10 のジャーク

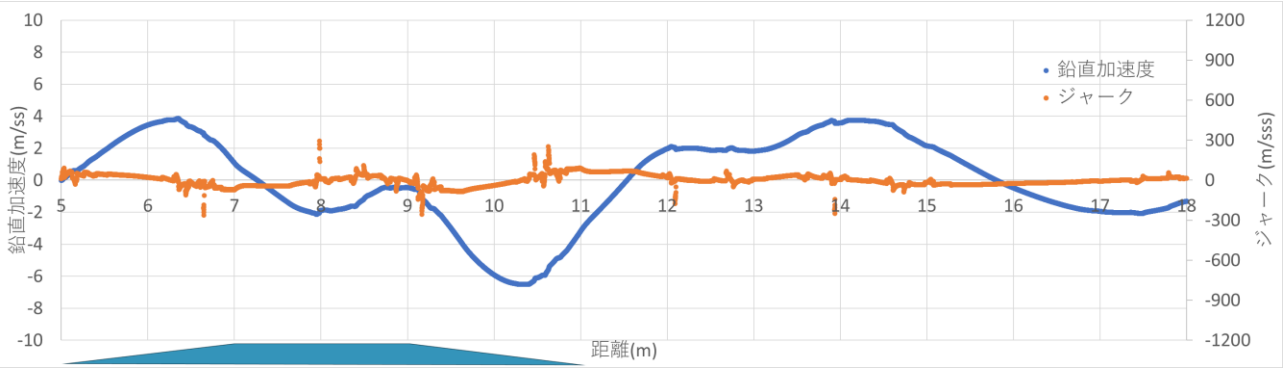


図-10　サイン形状ハンプにおける加速度とジャークの関係（乗用車 40km/h 走行時）

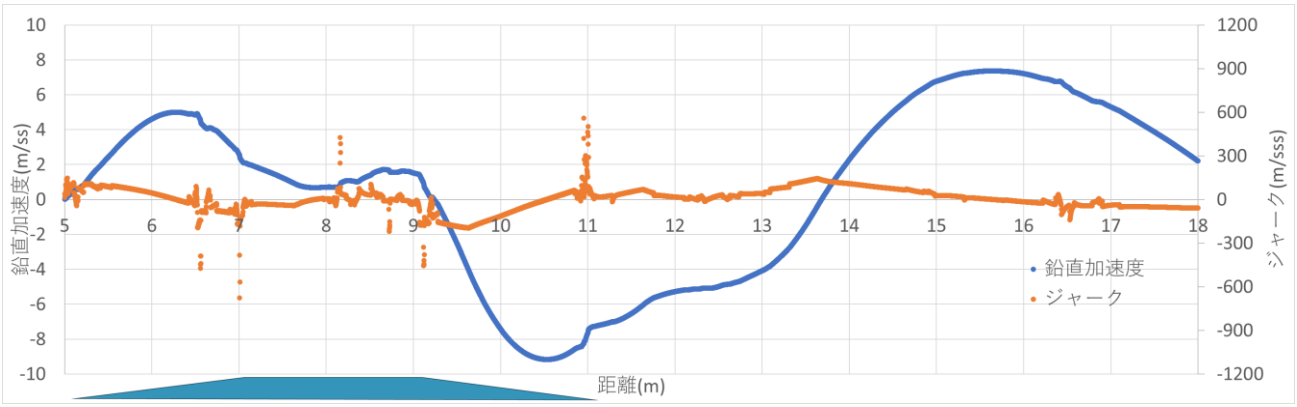


図-11　サイン形状ハンプにおける加速度とジャークの関係（乗用車 60km/h 走行時）

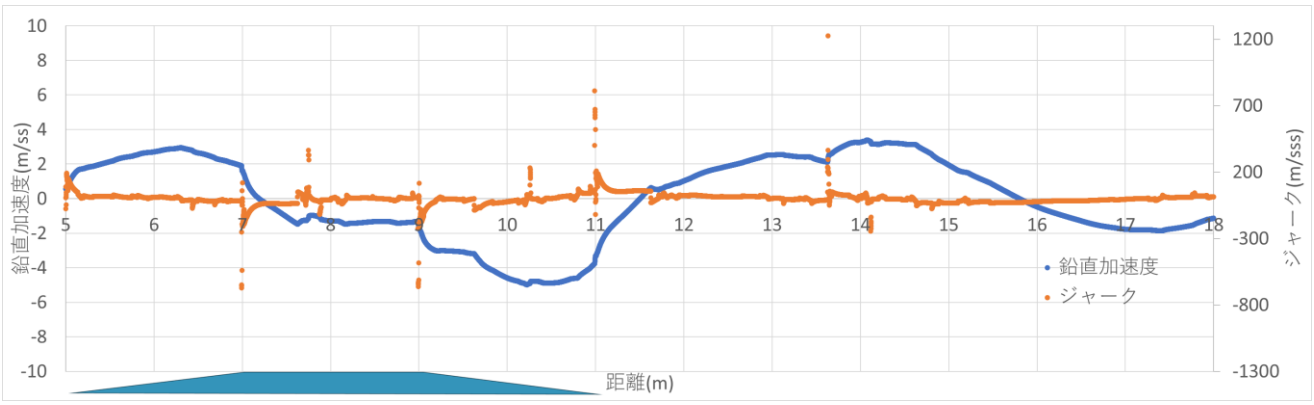


図-12　台形ハンプにおける加速度とジャークの関係（乗用車 40km/h 走行時）

の値を見てみると，局所的にジャークが増大していることがわかる．ジャークが突出して増加している点と，加速度の波形を見比べてみると，加速度の波形が乱れている区間で，ジャークが瞬間的に増加していることがわかる．加速度が乱れるような箇所で，ジャークが突出して増大し，突き上げられたりするような衝撃が発生していると考えられる．次に図-11 の 60km/h 走行時のグラフを見てみると，図-10 の 40km/h 走行時と同様に，加速度が乱れている点で，ジャークが突出して増大している．40km/h 走行時に比べて，加速度が増大しているだけでなく，波形の乱れの程度も拡大していることから，ジャークも同時に増大している．また，図-10 とジャークの位置関係について比べてみると，ハンプ内におけるジャークの増大箇所は類似した傾向を示していた．

図-12 は 40km/h 走行時の台形ハンプのグラフである．先行研究より，台形ハンプはサイン形状ハンプに比べて，加速度は小さいが，ジャークの値は増大することがわかっている [6]．図-12 を見ると，台形の頂点でジャークが増大する傾向にあることがわかる．そのため，サイン形状ハンプにおいても，ノイズの影響はなく，正しい波形が描かれていることがわかる．従って，このシミュレーション結果から，ジャークが突出している点の正確な位置を特定できることがわかる．

このジャークが突出している点を見れば，どの位置で大きな衝撃が発生しているのかがわかり，そこの加速度が正か負のどちらであるかによって，衝撃の発生し

ている向きを特定することができる．これに習って 40km/h 走行時の平坦部 2m のハンプについて考えてみると，ハンプ登り傾斜部で 2 回大きく突き上げられるような力が発生した後，平坦部内で 1 回，下り傾斜部で 3 回，突き落とされるような力が発生する．地面に到達してからは，2,3 回再び突き上げられるような力が発生し，最後に突き落とされる力を感じた後に車両は安定する．また，60km/h 走行においては，勢い良く上り傾斜部で跳ね上がるため，下り傾斜部まで上向きの力が働き，その後急激に突き落とされるような衝撃が発生していることがわかる．このようにして，衝撃が発生する位置の詳細を知ることができ，トラックやバスにおいても，シミュレーションモデルを使えれば 40km/h 走行時に発生する衝撃の原因や安全性を検討することができる．

6. 終わりに

路線バスの映像分析によって，ハンプ下り傾斜部に差し掛かる際に，サスペンションが大きく伸びていることで，落下するような大きな衝撃が発生するのが平坦部長さ 2m, 4m, 10m, 12m であり，サスペンションが縮んでいることで，なめらかに下っていき衝撃が和らぐのが平坦部長さ 6m, 8m であることがわかった．また，Simulink によるシミュレーションによって，ジャークと加速度の関係から，衝撃の発生する箇所や，発生する力の向きが判断できることがわかった．

今回のシミュレーションでは乗用車を対象としていたが，今後は路線バスについてのモデルを再現し，乗用車と同様の加速度やジャークに関する詳細なデータを得られるようにしたい．特定の平坦部長さで複雑に発生してしまう衝撃の原因解明に向けて，そして最終的には，規制速度 40km/h の道路でもバスやトラックなどの大型車両が安全に通行できるようなハンプの実現に向けて，研究を進めていきたい．

REFERENCES

1) 国土交通省：凸部、狭窄部及び屈曲部の設置に関する技術基準，国土交通省，2016 年 3 月 31 日 https://www.mlit.go.jp/road/sign/kijyun/pdf/20160331totubukyousakukukkyoku.pdf（2022/6/18 閲覧）
2) 田口麻子：イリオモテヤマネコの交通事故, https://www.biodic.go.jp/relatedinst/18th/P-6.pdf（2022 年 10 月 1 日閲覧）
3) 辺見信彦：ジャーク（加加速度，躍度）の測定法，精密工学会誌，Vol.80，No.11，pp.995-998，2014
4) 王鋒，佐川貢一，猪岡光：自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究，人間工学，Vol.36，No.4，pp.191-200，2000
5) JAMBE ガイドライン構築委員会：自動車開発におけるプラントモデル I/F ガイドライン準拠モデル（車両振動モデル）解説書(ver.1.0)，2019 年 3 月 https://epc.or.jp/wpctent/uploads/2019/03/NVH_IFguideline_manual_ver1.0.pdf（2023 年 6 月 6 日閲覧）
6) Mahdi Nabizada，Aya KOJIMA，Hisashi KUBOTA：Assessment of effectiveness of different speed hump shapes on the car vibration using computer simulation, EASTS conference 2023, 2023.

(Received July 20, 2023)
(Accepted ?, 2023)

ANALYSIS OF VEHICLE VIBRATION BEHAVIOR IN SPEED HUMP SHAPES CONSIDERING LARGE VEHICLE PASSAGE

Riki YAGASAKI, Genki ENDO, Mahdi Nabizada,
Aya KOJIMA, Ryo YAMANAKA, Daisuke Kamiya Hisashi KUBOTA

In Japan, speed humps have primarily been developed with the assumption of being applied to residential roads with a speed limit of 30 km/h. However, there are situations where installation is required on roads with a speed limit of 40 km/h, where large vehicles also pass, in order to control speed effectively. To explore speed hump shapes suitable for such situation, experiments were conducted by changing the flat length of sinusoidal speed humps from 2 meters to 12 meters and passing passenger cars and large buses at various speeds, measuring vertical acceleration inside the vehicles. As a result, it was found that vehicle interior vibration acceleration increased significantly at specific flat lengths. In this study, computer simulations were used to analyze the behavior of passenger cars and large buses during speed hump passage, related to suspension expansion and contraction, vehicle interior vibration, and jerk, which is an important indicator of ride comfort. The study investigated the causes of impact associated with specific flat lengths.