

車両衝突を受けるクッションドラムの緩衝性能に関する数値解析的研究

Numerical analysis of shock absorbing cushion drum collided due to vehicles

池田 憲二* , 今野 久志** , 岸 徳光*** , 藤野戸 宏樹****

Kenji IKEDA, Hisashi KONNO, Norimitsu KISHI, Hiroki FUJINOTO

*北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 室長 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

**工修 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

***工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)

****北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

キーワード：車両衝突、緩衝体、道路端末、クッションドラム

(vehicle collision, shock absorbing materials, road-side terminal unit, cushion drum)

1. はじめに

我が国では、山間部の道路に設置されているガードレール端末支柱、トンネルの出入り口、さらに橋梁等の道路構造物近傍に車両衝突事故に対する安全対策として緩衝体が設置されている。

しかし、たとえ安全な道路を設計し緩衝体を設置している場合においても、誤って車両が道路構造物等に衝突した場合には、車のスピードによっては死に至るケースもある。このため、車両のスピードもさることながら、設置している緩衝体の緩衝特性についても十分に注意を払う必要がある。この課題に対し、米国では1966年の連邦ハイウェイ安全法案成立以降、ドライバーを衝突事故死から守るための安全基準が定められ、道路関連施設に対する緩衝体の開発が行われてきた。さらに、1993年には、米国運輸調査委員会によってNCHRP-350 (National Cooperative Highway Research Program) が勧告され、車両が緩衝体に衝突した際の乗員の安全評価基準値が取り決められている。しかしながら、日本では未だに米国のような乗員を死亡事故から守るための具体的な安全基準が作られていない。1998年11月に、「防護柵の設置基準」が改訂され、緩衝施設の重要性が認識され始めたばかりである。日本の各自動車メーカーは、独自に自動車の安全性を向上する

ための様々な研究を行っているが、高緩衝性能を有する緩衝体の開発がそれほど多く行われていないのが現状である¹⁾。

以上のことから、筆者らはより緩衝効果の高い緩衝体の開発を目的として、各種緩衝体に対する実車衝突実験を実施してきた^{1), 2), 3)}。しかしながら、様々な車種や衝突速度に対して緩衝体の緩衝特性を評価するための実車衝突実験を実施するためには多大な費用と時間が必要となる。一方、各自動車メーカーは車両の安全性を向上させるために人体模型を搭載した各種実車衝突実験を実施するとともに数値実験的な検討も行っており、各種車両や人体のFEM解析モデルが作成されている。このことから、今後は緩衝体を適切にモデル化することによって精度の高い緩衝性能評価解析が可能になるものと考えられる。

本論文では、過去に行われてきた車両衝突を受けるクッションドラムに関する実験研究を基に4種類の緩衝構造を考え、衝突速度60 km/hで車両が緩衝体へ衝突する場合の衝撃解析を行い、車両の減速度と変位に関する波形分布を用いて各ケースの緩衝性能に関する比較検討を行ったので報告する。なお、本数値解析は、陽解法非線形動的構造解析コードLS-DYNA(ver.940)を用いて行っている。

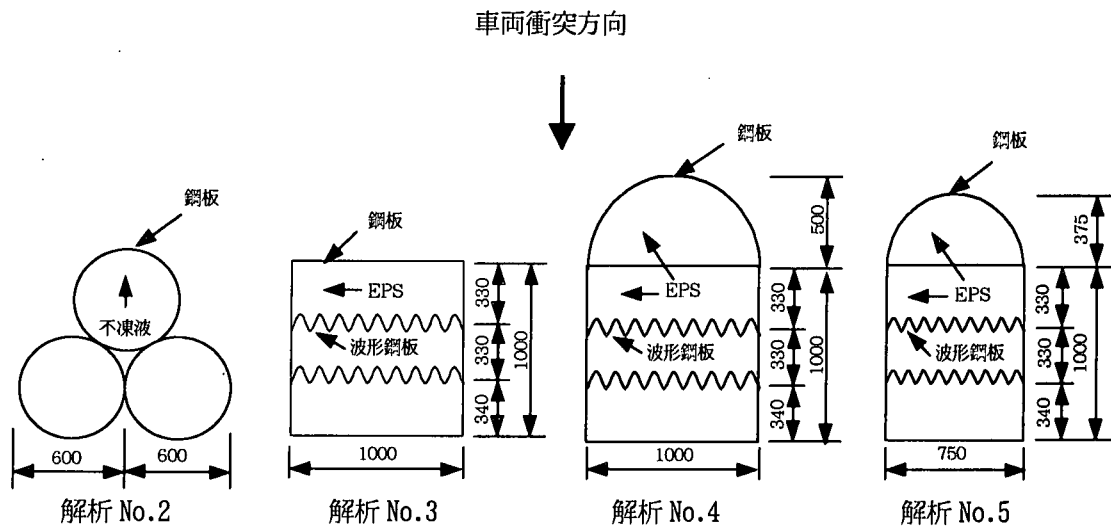


図-1 解析に用いた緩衝体の平面図

表-1 解析ケース一覧

解析 No.	緩衝体種類	衝突速度
1	緩衝体無し	60 km/h
2	クッションドラム3個	60 km/h
3	EPS①+波形鋼板+ウレタン	60 km/h
4	EPS②+波形鋼板+ウレタン	60 km/h
5	EPS③+波形鋼板+ウレタン	60 km/h

2. 数値解析

2.1 数値解析モデル

表-1に本数値解析の解析ケース一覧を、図-1に本数値解析で用いたクッションドラムと新型緩衝体の平面図を示す。

解析 No.1は緩衝体を設置しない場合で、幅、高さ、高さがそれぞれ400 cm、10 cm、300 cmのコンクリート製の反力壁に車両を直接衝突させたものであり、解析 No.2~5は、この反力壁の前面に緩衝体を設置したケースである。解析 No.2の緩衝体は現在日本で一般的に用いられているクッションドラム(φ600 mm×H840 mm)である。クッションドラムは、硬質ビニール性で平面的には円形で重量を大きくする目的と緩衝効果を得るためドラム内は不凍液で満たされネジ蓋で締め付ける構造となっている。解析モデル上では、硬質ビニールのモデル化が困難であったため、軸剛性が等しい厚さ0.2 mmの鋼板でモデル化している。解析 No.3はEPSブロック(高さ:1000 mm、幅:1000 mm、奥行き:1000 mm)の内部にEPSブロックの局所的な変形防止と衝撃力の吸収面積を大きくするために波型鋼板を挿入した場合である。解析 No.4は、解析 No.3に用いた緩衝体前面に衝突初期

の緩衝性能の向上を目的として、半円形のEPSブロックを付加した場合である。解析 No.5は、解析 No.4と同じタイプで緩衝体の幅を750 mmに縮小した場合である。なお、解析 No.3~5の解析モデルでは、数値解析の効率化を考慮して緩衝体表面のウレタン被膜を厚さ0.2 mmの鋼板でモデル化している。図-2.1、2.2に本数値解析で用いた車両のFEMモデルの断面図と外面図を示す。解析に用いた車両のFEモデルは、米国の研究機関であるNational Crash Analysis Center (NCAC)より取得したものである。車両の総接点数、総要素数はそれぞれ5300,4900程度で、車両モデルの長さ、幅、高さ、質量はそれぞれ360 cm、160 cm、150 cm、1.1 tonである。

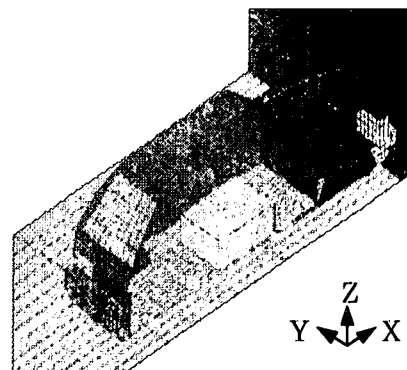


図-2.1 FEMモデル(断面図)

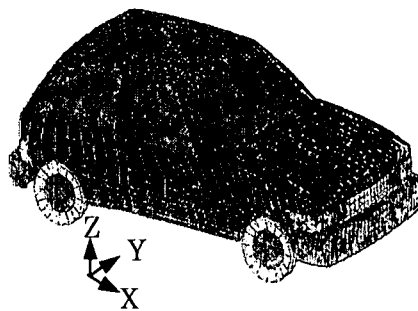


図-2.2 FEMモデル(外面図)

表-2 各種構成要素の物性値

材料	密度 (ton/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	備考
車両全パーツ	7.85	206.0	0.3	等方弾塑性体 降伏応力 20.3 MPa
コンクリート	2.3	—	—	剛体
不凍液 (水)	1.0	19.6	0.0	弾性体
EPS ブロック	0.02	1.96	0.0	等方クラッシュャブル モデル
波形鋼板	7.38	206.0	0.3	等方弾塑性体 降伏応力 28.9 MPa
鋼板 (外殻鋼板)	7.38	206.0	0.3	等方弾塑性体 降伏応力 392 MPa
路面	2.7	206.0	0.3	弾性体

2.2 接触条件および境界条件

実際の道路でクッションドラムを3個設置する場合にはクッションドラムをロープで拘束しているのみであるが、解析においては反力壁側2個のクッションドラムが側方に移動しないように拘束条件を設定している。車両が緩衝体に衝突するため、両者の要素間には実現現象に即して接触・剥離が再現可能である接触面を定義している。車両と路面の要素間に対しては、接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を考慮し、摩擦などによるエネルギー損失は考慮しないものとした。また、反力壁であるコンクリートの要素底部と路面要素は、完全固定としている。

2.3 物性モデル

本数値解析では各種構成要素に対し LS-DYNA にあらかじめ組み込まれている物性モデルを用いている。表-2 に本数値解析に用いた各種構成要素の物性値を示す。車両モデルの各パーツに対しては、多直線近似による等方弾塑性体モデルを用いている。なお、本数値解析では単純な材料構成則を用いることを前提としているため、鋼およびコンクリートの歪速度効果は考慮しないものとした。また、タイヤは実際にはゴム製であるが、車両の衝突解析では鋼製の物性値を用いてモデル化を行うことが一般的であるため、本数値解析でも同様にモデル化した。

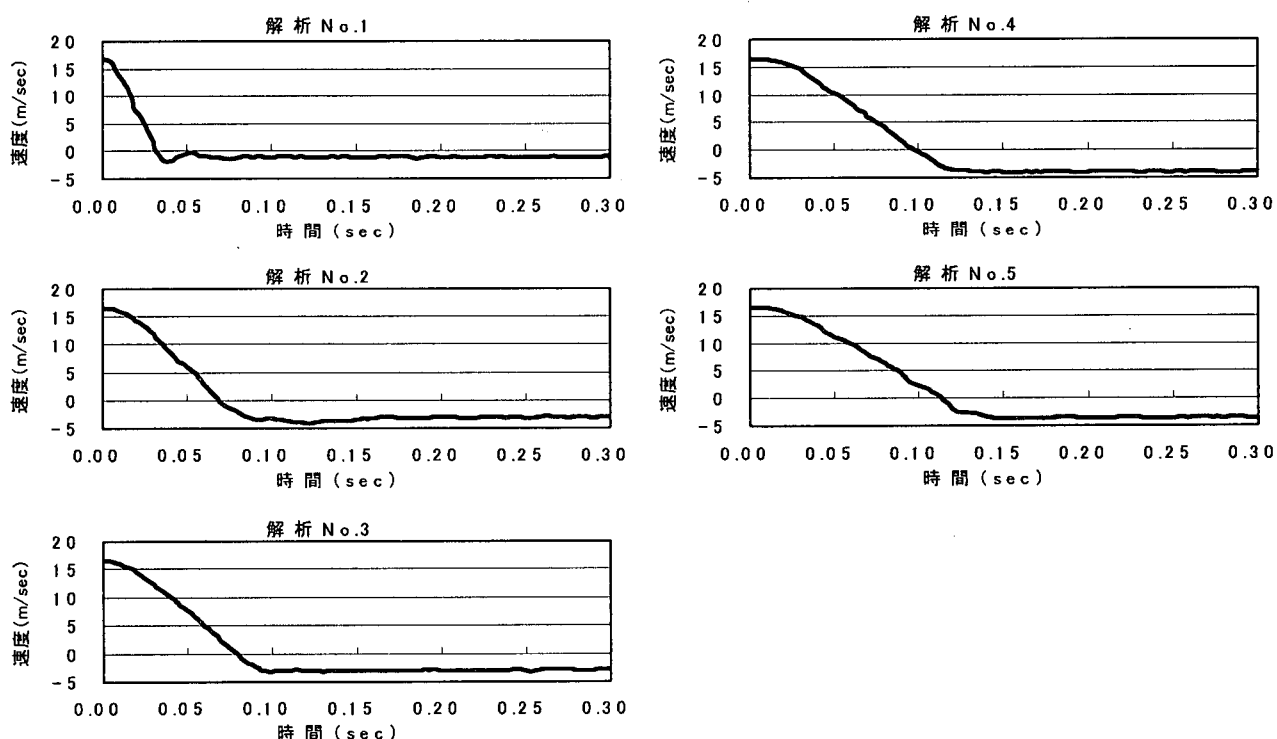


図-3 衝突時の車両の速度変化波形

表-3 計測結果一覧

解析No.	緩衝体名	衝突速度 (m/sec)	速度零に至る までの継続時間 (sec)	平均減速度 (m/sec ²)	最大変形量 (cm)
1	緩衝体無し	16.67	0.034	490	32.2
2	クッションドラム3個	16.67	0.070	238	32.9
3	EPS①+波形鋼板+ウレタン	16.67	0.082	203	21.0
4	EPS②+波形鋼板+ウレタン	16.67	0.108	154	27.1
5	EPS③+波形鋼板+ウレタン	16.67	0.116	144	28.1

3. 解析結果

図-3 に時速 60 km/h (16.67 m/s) で車両が緩衝体に衝突した瞬間からの車両の速度波形を示す。図より、各解析ケースとも衝突後の車両速度は、時間の経過とともに直線的に減速し、零に至った後も緩衝体から跳ね返ることによりさらに減速し負の速度となっている。緩衝体を設置しない場合の解析 No.1 は、車両の変形のみでエネルギーを吸収し減速しているため、車両速度が零になるまでの時間が短くなっている。また、反力壁から跳ね返った後の車両速度は、ほぼ零を示している。それに対して、解析 No.2 ~No.5 は、緩衝体の効果により車両速度が零になるまでの継続時間が解析 No.1 よりも延長している。また、緩衝体から跳ね返った後の車両速度は、緩衝体の復元力のため、解析 No.1 に比較し大きくなっており、その後一定値を示している。

次に、緩衝体の緩衝能力が高いほど速度がゆるやかに減衰することに着目し、その性能を車両が緩衝体に衝突した瞬間から速度がほぼ零になるまでの継続時間で除した平均減速度 (m/sec²) を用いて評価することとした。

表-3 には、計測結果として、衝突時の車両の速度 (m/sec)、衝突速度がほぼ零になるまでの継続時間 (sec)、平均減速度 (m/sec²)、衝突時の車両の最大変形量 (cm) を整理している。平均減速度については、緩衝体を設置していない場合の解析 No.1 が、490 m/sec² と最も大きい値を示している。また、解析 No.2、3 が 220 m/sec² 前後であるのに対して、解析 No.4、5 は車両衝突時から速度が零になるまでの継続時間が長いこと 150 m/sec² 前後となっている。従来型のクッションドラムを用いた解析 No.2 と解析 No.4、5 の新型緩衝体を比較すると、平均減速度が 30%以上小さな値を示している。これより、解析 No.4、5 は優れた緩衝性能を有していることがわかる。

図-4 には各解析ケースにおける車両先端の相対

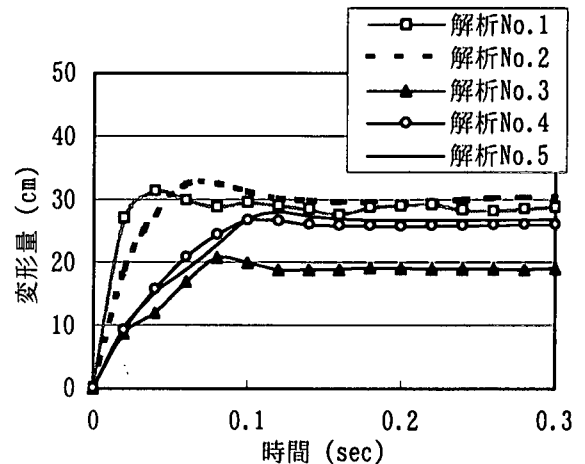
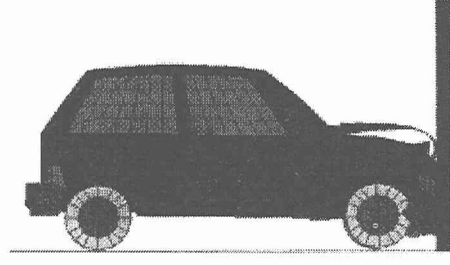
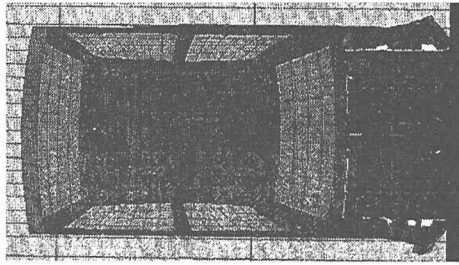


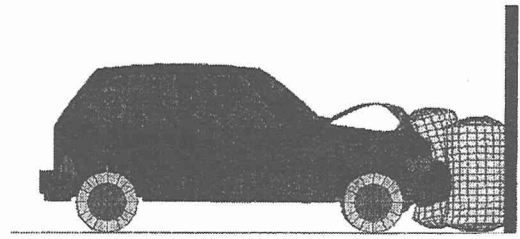
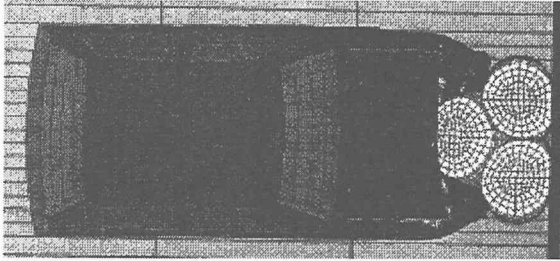
図-4 車両先端の相対変位波形

変位波形を示している。車両の相対変形量 (以後、単に変形量) が最大値を示す時間は、表-3 に示した車両速度が零になる時間と一致している。緩衝体を設置していない場合の解析 No.1 は、時間の経過とともに車両変形量が急激に増加し、最大変位に至っている。クッションドラム3個から構成される解析 No.2 の場合は、変形量が 15 cm 程度まで解析 No.1 と同様な増加傾向を示し、それ以降は変形量の増加率が減少するものの最も大きな変形量を示している。解析 No.3~5 と解析 No.1、2 を比較すると、解析 No.3~5 の場合は変形量の時間経過の傾きが緩やかであり、最大変形量も小さな値を示している。新型緩衝体を用いた解析 No.5 は、変形量が最も緩やかに増加し、最大変形量は最小値を示している。

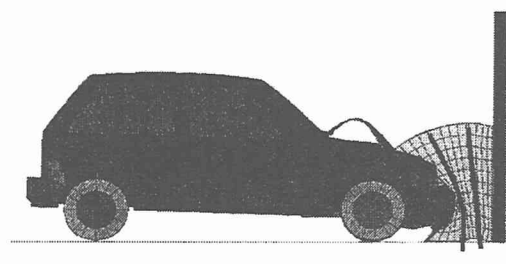
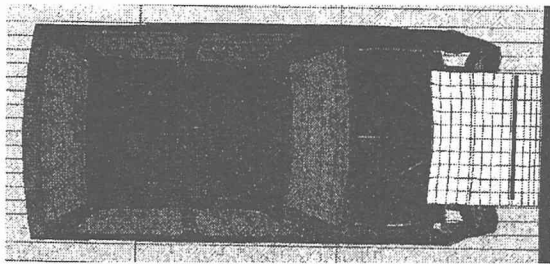
図-5 には衝突後に車両の最大変形量を記録した時点における車両の変形状態に関する平面図と側面図を示している。緩衝体の変形状態は、いずれの緩衝体も車両にめり込む状態となっている。解析 No.1 は、車両のバンパー部分全体が変形している。解析 No.2 は、車両に接触する部分の緩衝体の幅が狭いため緩衝体が車両にめり込んでいる。また、車両に



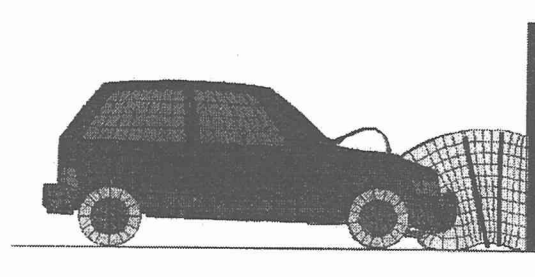
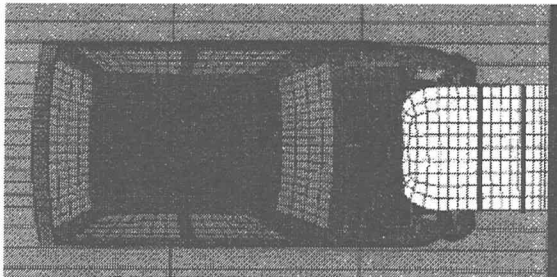
解析 No.1 最大変位 32.2cm (t=0.034sec)



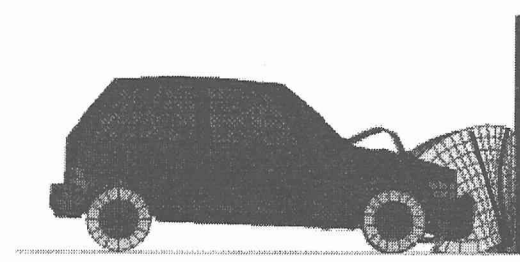
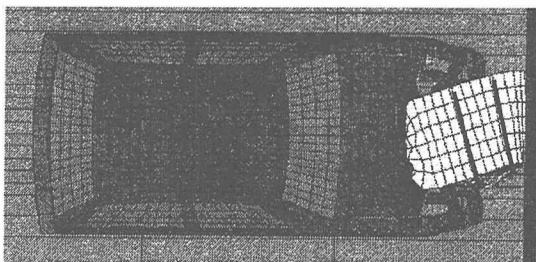
解析 No.2 最大変位 32.9cm (t=0.070sec)



解析 No.3 最大変位 21.0cm (t=0.082sec)



解析 No.4 最大変位 27.1cm (t=0.108sec)



解析 No.5 最大変位 28.1cm (t=0.116sec)

平面図

側面図

図-5 最大変形時の車両の変形状態

よって大きく破壊されている部分は、手前のクッションドラム1個だけであり、後のクッションドラム2個は、著しく変形していない。解析 No.3 は、車両が波形鋼板の位置までめり込んでいるため、波形鋼板の効果が発揮され車両の変形も小さくなっている。解析 No.4 は、半円形部の EPS ブロックの変形によって衝突時のエネルギーの大部分が吸収され、車両が波形鋼板の位置までめり込まず、波形鋼板の効果が発揮される状態に到っていない。このことより、車両の変形量が大きくなっているものの緩衝体後部は未だに変形していないことより、衝撃吸収能力は十分に残存し、60 km/h 以上の衝突速度に対しても緩衝効果が期待できるものと考えられる。次に、解析 No.5 は、車両に接触する部分の緩衝体の幅が狭い上に、緩衝体自体の幅も狭いために緩衝体が Y 方向に偏心変形したのと考えられる。しかしながら、平均減速度がもっとも小さく、検証した解析ケースでは、最も効果的な緩衝構造であると判断される。

3. 結論

本研究では、山間部の道路端末に設置されているガードレール端末支柱、トンネルの出入り口等に設置されている衝撃用緩衝ドラムに関し、緩衝性能に優れた構造型式を開発することを目的として、在来型式を含め4ケースを設定して数値解析的に検討を行った。

本数値解析により得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 解析 No.3~5 (EPS ブロック①~③+波形鋼板+ウレタン) は、従来型のクッションドラム3個を設置する場合より、衝突時の平均減速度が小さく、緩衝効果が高いと考えられる。
- (2) 車両の最大変形量は、解析 No.2 のクッションドラム3個の場合が、解析 No.1 の緩衝体を設置していない場合より大きくなっている。

一方、解析 No.3~5 の新型緩衝体は、緩衝体の効果により緩衝体を設置しない場合より減少している。

- (3) 本解析ケースにおいては、解析 No.5 の緩衝体がもっとも緩衝効果に優れていると考えられる。

今後、対象となる車両の形状、様々な速度に対して解析を行い、実験結果と比較検討をすることによって数値解析手法を確立したいと考えている。建設省土木研究所道路部交通安全研究室、米国運輸調査委員会の勧告 NCHRP-350 (National Cooperative Highway Research Program) において、運転者の障害判定基準は、最大加速度を用いている。しかしながら、本論文では、加速度波形は多くの高周波成分を含むことにより、最大加速度を用いずに敢えて平均減速度を用いて評価を行った。最適な評価法に関しては、今後の課題としたい。

4. 参考文献

- 1) 佐藤 昌志、小林 将、三好 章仁、高畑 智孝：セーフティドラムの試作と緩衝性能に関する実験的研究、第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、pp51~55、1998.6
- 2) 佐藤 昌志、小林 将、三好 章仁、高畑 智孝：自動車走行実験による自動車用緩衝ドラムの緩衝特性、土木学会第53回年次学術講演会、I-B175、pp350~351、1998.10
- 3) 佐藤 昌志、小林 将、三好 章仁、高畑 智孝：自動車用緩衝ドラムの緩衝特性に関する一実験 平成9年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会 I-12、pp54~59、1998.2
- 4) 安藤 和彦、仲矢 忠士：クッションドラムの緩衝効果、第17回日本道路会議論文集、