

二輪車衝突時の乗員負傷評価シミュレーション

A Computer Simulation for Motorcycle Rider Injury Evaluation in Collision

並木 秀夫*
Hideo NAMIKI

中村 豊一* 飯島 聡*
Toyokazu NAKAMURA Satoshi IJIMA

要 旨

Hondaは、衝突開始からダミーが路面に落下するまでのテストにおける負傷レベルの予測が可能なコンピュータシミュレーション技術を開発している。その中で、ISO/CD13232に規定されている実車衝突テストとコンピュータシミュレーションの相関性を検証した。その結果、コンピュータシミュレーションは衝突開始からダミー路面落下までの負傷レベルの予測が可能であると判断した。GL1800用エアバッグシステムの性能と効果は、ISO/CD13232に規定されている200形態400ケースのコンピュータシミュレーション結果により評価した。その結果、総合平均ベネフィットは0.048、総合平均リスクは0.004であった。最も高い効果が現れる相対衝突速度域は20-25 m/sであった。

ABSTRACT

Honda has been developing computer simulation technology, capable to predict the injury levels, in tests from the start of a collision until the point where the dummy strikes the ground. This research shows the correlation between the computer simulations and full scale impact tests as specified in ISO/CD 13232. The results validate that computer simulation can predict the injury levels, from the start of collision until the point where the dummy strikes the ground. The performance and effectiveness of the airbag system for the GL1800 were evaluated in 200 impact configurations using the computer simulation specified in ISO/CD 13232. The results showed that the total average benefit was 0.048 and the total average risk was 0.004. The relative impact speed which demonstrated the highest effectiveness was 20-25 m/s.

1. はじめに

Hondaは、1960年代から二輪車衝突時の乗員保護を研究している⁽¹⁾。近年、乗員保護手法として二輪車用エアバッグの可能性研究がおこなわれている。この研究の中で、エアバッグ展開センサを含むエアバッグシステムが試作され、Hondaの大型ツーリングモデルであるGL1500に搭載された。衝突テストはその二輪車を用いておこなわれた。その結果を1998年、2001年ESV(Enhanced Safety of Vehicles)会議^{(2),(3)}に報告した。この中でわかったことの一つは、エアバッグの影響によるダミーの負傷計測値の変化が路面落下時に発生するケースが多いことである。

二輪車に安全デバイスを搭載した場合の評価手法にISO13232⁽⁴⁾がある。この規定には、乗員保護デバイスの性

能評価は、実二輪車を使った衝突テスト(以下、実車衝突テストという)に加えてコンピュータシミュレーションによりおこなうこととされている。その際のコンピュータシミュレーションの計算時間は、衝突開始からダミーが相手車に打撃する0.5秒まで(以下、プライマリインパクトという)計算することが規定されている。しかし、我々は実車衝突テスト結果から、コンピュータシミュレーションによりエアバッグのライダー保護性能を評価する場合、ダミーの路面落下時までの負傷評価が必要であると考えた。

そこで、衝突開始から、ダミーが路面に落下するまで(以下、エンタイアインパクトという)の負傷評価予測が可能なコンピュータシミュレーション技術を構築することを目指した。解析に用いるソフトは、形状表現が簡単にでき、変形が再現しやすい、陽解法FEMソフトを選択した。

FEMソフトでは、計算時間と計算精度に大きな影響を及ぼすメッシュサイズを検討し、決定した。決定したメッシュサイズで、二輪車、エアバッグ、ダミー、衝突相手車のモデルを作成し、コンピュータシミュレーションの計算を実行した。これらの計算結果により、路面落下までのダミー挙動の整合度合を、ダミー頭部速度と胴体角度で評価した。その結果、高い精度でテスト結果を再現できるコンピュータシミュレーション手法が構築できた。同時に非常に有効な解析時間短縮手法を考案できた。この内容を 2003 年 SETC (Small Engine Technology Conference)⁽⁵⁾で報告した。

本研究では、前述のコンピュータシミュレーション手法を用い、ダミーの路面落下時までの負傷評価の可能化をめざして取り組んだ。実車衝突テストとコンピュータシミュレーションの相関性は、ISO/CD13232で規定されている 7 形態、12 ケースを対象におこなった。その結果、衝突開始からダミー路面落下までの負傷評価が可能なコンピュータシミュレーション手法であることが確認できた。

2. ダミー路面落下までの負傷評価

路面落下時までのダミー挙動を良好な精度で再現できるコンピュータシミュレーション手法をさらに発展させ、ダミーの路面落下時までの負傷評価に使用できるコンピュータシミュレーション手法の構築に取り組んだ。本取り組み、及び精度検証の対象としたテストは、ISO/CD13232で規定されている基本 7 衝突形態とした。これらの衝突形態を Fig. 1 に示す。

基本的には、エアバッグ有り/Aエアバッグ無しの両方のシミュレーションをおこなうものである。しかし、Fig. 1 に示す No.1 と No.4 のエアバッグ有りのケースは、実車衝突テストでエアバッグが展開しなかったため相関対象から外した。したがって、コンピュータシミュレーションの相関対象としたのは、7 形態、12 ケースである。

実車衝突テストの衝突速度は、ISO/CD13232に規定されている速度よりやや高めの設定でおこない、より厳しい条件で評価した。コンピュータシミュレーションの衝突速度もテストと同じ速度でおこなった。

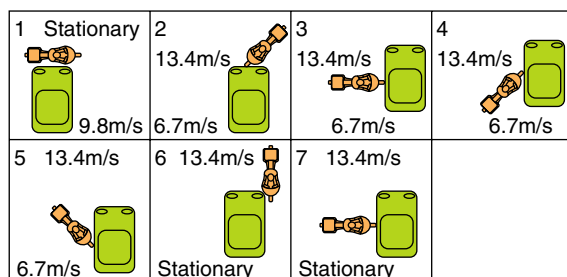


Fig. 1 Full scale impact test configurations

3. モデル作成手法

3.1. 二輪車モデル

ダミー路面落下挙動確認に使用した二輪車モデルは、大型ツーリング二輪車 GL1500 であった。その後のエアバッグの研究において、二輪車モデルは GL1500 から GL1800 に変更した。したがって、コンピュータシミュレーションにおいても GL1800 の二輪車モデルを作成した。モデルの作成手法は、2003 年 SETC に発表した手法⁽⁵⁾を用いて作成した。二輪車モデルは、計算精度を高めるためにモデル全体を変形体として作成した。二輪車モデルを Fig. 2 に示す。

3.2. 衝突相手車モデル

衝突相手車モデルは、衝突形態の多様化にともない追加作成した。衝突相手車モデルの部分的剛体化は計算時間短縮効果が大きいので、二輪車やダミーと接触せず変形も発生しない部分に剛体化を取り入れた。その結果、剛体部分を変えた 4 種類の衝突相手車モデルを作成した。それらのモデルは、衝突形態によって使いわけた。Fig. 3 - 6 に作成した衝突相手車モデルを示す。衝突相手車モデルは、1998-2001年の日本仕様Honda Accord 4ドアサルーンを使用し、その仕様を Table 1 に示す。

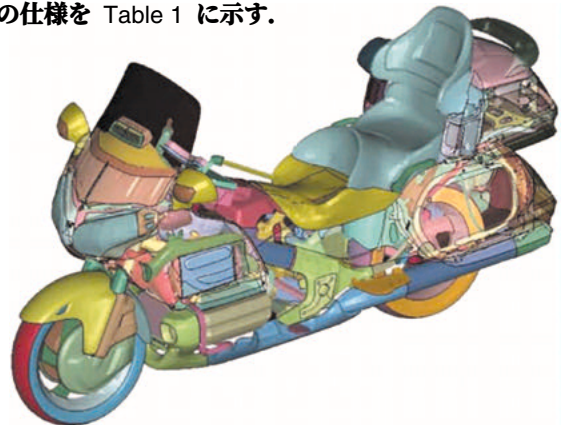


Fig. 2 Motorcycle model

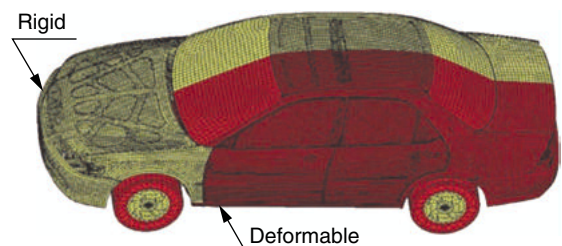


Fig. 3 Opposing vehicle model for side impact case

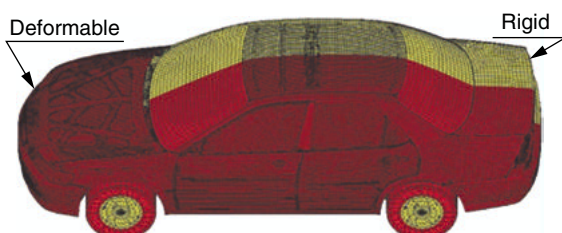


Fig. 4 Opposing vehicle model for front-side impact case

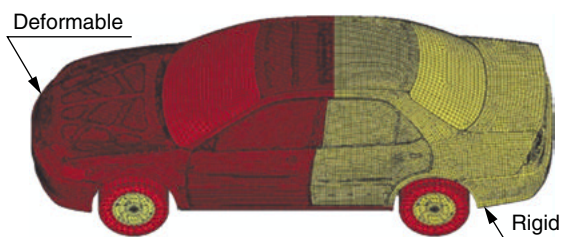


Fig. 5 Opposing vehicle model for front impact case

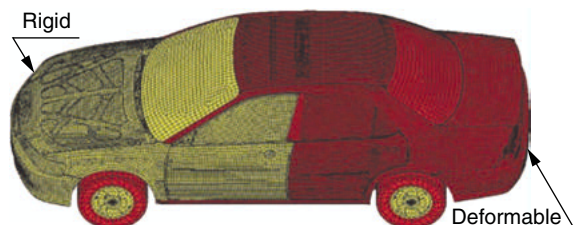


Fig. 6 Opposing vehicle model for rear impact case

Table 1 Specifications of opposing vehicle

Manufacturer	Honda
Model	Accord, Japan
Year	1998-2001
Mass (average)	(kg) 1300
Overall length	(mm) 4635
Overall width	(mm) 1695
Overall height	(mm) 1420
Wheelbase	(mm) 2665
Engine displacement	(cm ³) 1997

3.3. ダミーモデル

ダミーモデルは、LS-DYNA⁽⁶⁾用ハイブリッド III 50 パーセンタイルモデルをベースとし、ISO 13232 に規定される MATD ダミーと合致させた。ISO 13232 では規定されなかった頸部の負傷評価手法が ISO/CD13232 で規定されたため、ISO/CD13232 に準拠してモデル化した。作成したモデルを Fig. 7 に示す。首モデルの曲げ特性は、ISO/CD13232 に規定されている静的と動的の両特性に合致させた。静的相関結果を Table 2 に示す。動的特性である、Extension, Flexion, Lateral, Torsion のそれぞれの相関結果を Fig. 8 - 18 に示す。これらの結果から、今回作成したコンピュータシミュレーション用首モデルはダミーの路面落下時までの負傷評価に使用可能であると判断した。

3.4. エアバッグモデル

エアバッグについては、GL1800 用に再設計されたものをモデル化した。ライダを受け止めるエアバッグ後面の V 字形状や、エアバッグ後面から二輪車体への連結支持ベルトなどを忠実にモデル化した。エアバッグを GL1800 に搭載した状態のコンピュータシミュレーションモデルを Fig. 19 に示す。

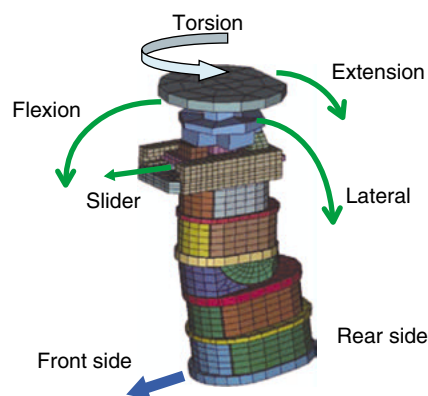


Fig. 7 Neck model of MATD (ISO/CD13232)

Table 2 Neck static characteristics of MATD model

Characteristics	Load	Required value	CAE model
Flexion angle	20 kgf	17.6 ± 2.6 deg	15.9 deg
Slider displacement	20 kgf	14.0 ± 3.0 mm	13.8 deg
Extension angle	20 kgf	30.9 ± 4.6 deg	27.7 deg
Lateral angle	20 kgf	28.7 ± 4.3 deg	25.8 deg
Torsion angle	3.2 kgf	41.5 ± 6.2 deg	43.6 deg

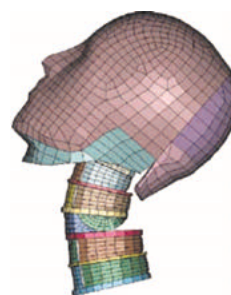


Fig. 8 Dynamic extension position

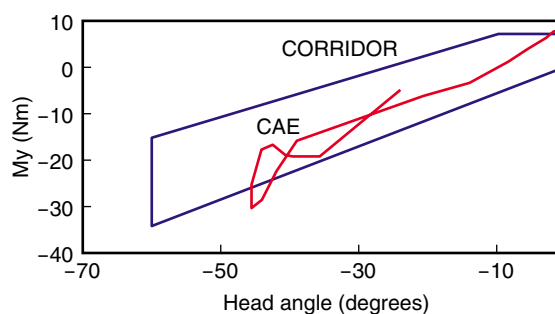


Fig. 9 Dynamic extension moment vs. head angle

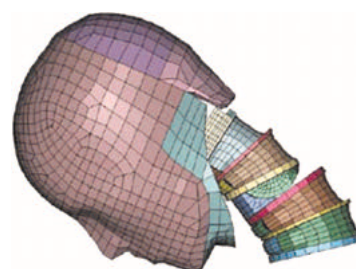


Fig. 10 Dynamic flexion position

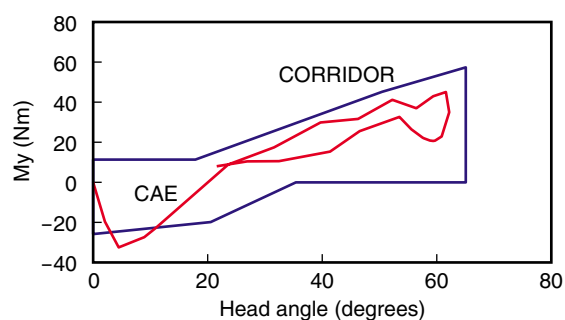


Fig. 11 Dynamic flexion bending moment vs. head angle

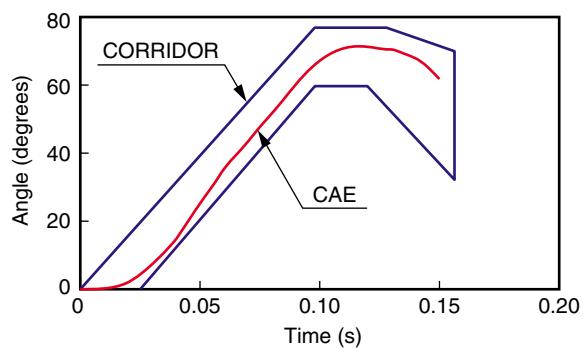


Fig. 15 Dynamic lateral head angle vs. time

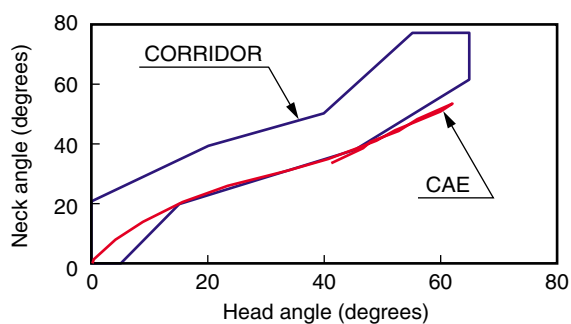


Fig. 12 Dynamic flexion neck angle vs. head angle

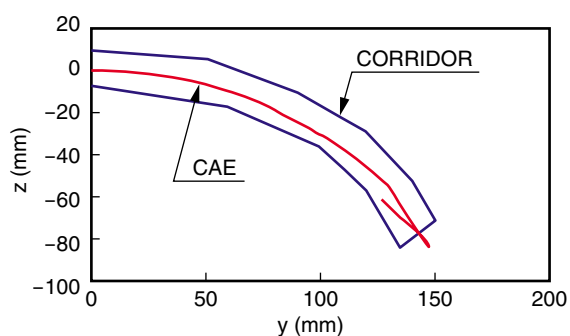


Fig. 16 Dynamic lateral head center of gravity position

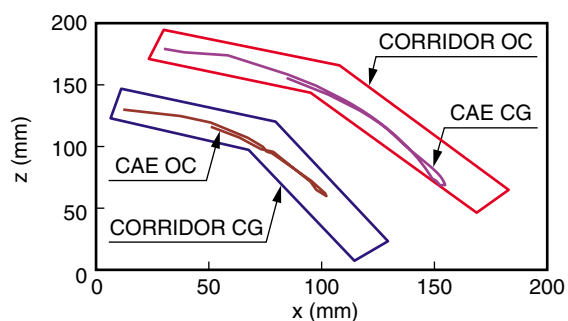


Fig. 13 Dynamic flexion occipital condyle and head center of gravity position



Fig. 17 Dynamic torsion position

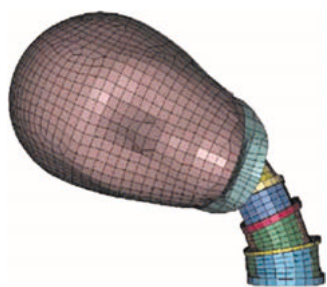


Fig. 14 Dynamic lateral position

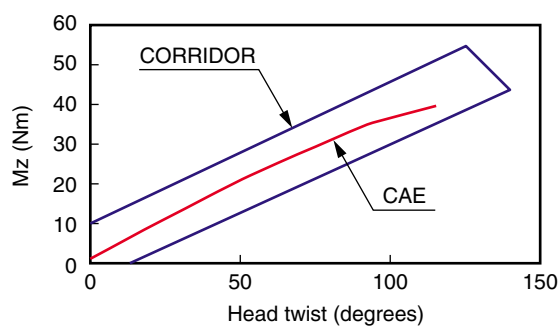


Fig. 18 Dynamic torsion stiffness

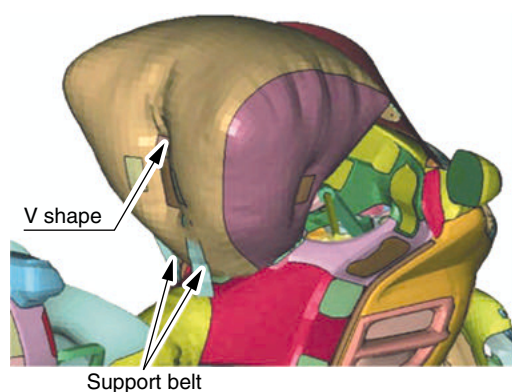


Fig. 19 Airbag model

4. モデル精度向上手法

今回作成した各モデルは、ダミーが路面に落下するまでの負傷評価が可能な、高い精度が要求される。モデル精度向上のための最初の段階として、衝突時に変形が予想できるパーツは、できる限り忠実にモデル化した。第二段階として、ISO/CD13232に規定されている単体テストや二輪車と四輪車の壁衝突テストなどのシンプルな条件の特性把握テストがおこなわれ、モデルやいくつかの計算因子を調整し、シミュレーションが高い精度でテスト結果と合致するようにした。最終段階では、ISO/CD13232に規定されている7形態、12ケースのテスト結果に対する相関性確認の中でモデルの精度といくつかの計算因子を改良した。複雑な衝突挙動を示す実車衝突現象においては、単体テストや壁衝突などのシンプルな現象に含まれない要素が加わってくる。それらの要素は、摩擦や計算所要時間の短縮考慮のために省略してあった二輪車や相手四輪車のパーツなどである。これらの要素について、7衝突形態への相関性確認の中で精度向上をおこなった。

四輪車の側面及び二輪車の正面周りのパーツの精度向上は、Fig. 1 の No.3, 5, 7 に示す二輪車が四輪車の側面に衝突する衝突形態でおこなった。次に、四輪車の正面に二輪車が衝突する Fig. 1 の No.2 形態をおこない、四輪車の正面周りの精度向上をおこなった。さらに、Fig. 1 の No.4, 6 で二輪車、四輪車の前側面周り、Fig. 1 の No.1 で二輪車の側面の精度向上をおこなった。

5. 負傷評価の相関性

相関性は、7形態 12 ケースの実車衝突テストのダミーの傷害値を用いて検証した。頭の傷害値について、Fig. 20 にプライマリインパクトにおける HIC の値、Fig. 21 に衝突開始後 0.5s 以降よりダミーが路面に落下するまで(以下、セカンダリインパクトという)における HIC の値を示す。プライマリインパクトにおける相関係数は $r^2=0.94$ であり、セカンダリインパクトにおける相関係数は $r^2=0.77$ であった。

Fig. 22 にプライマリインパクトにおける胸部最大圧迫率を示す。なぜなら、エアバッグはプライマリインパクトを受けとめるので重要な要素である。相関係数は $r^2=0.62$ であった。

脚の骨折についてテスト結果とシミュレーション結果の比較を Table 3 に示す。テスト結果とシミュレーション結果の合致率は、Femur が 96%, Knee と Tibia が 100% であった。

以上の結果から、本コンピュータシミュレーション手法は、衝突開始から路面落下までのダミーの負傷評価が可能であると判断した。そこで我々は、ISO/CD13232に規定されている200衝突形態について、本コンピュータシミュレーション手法によるエアバッグシステムのベネフィットとリスクの評価が可能であると考えた。

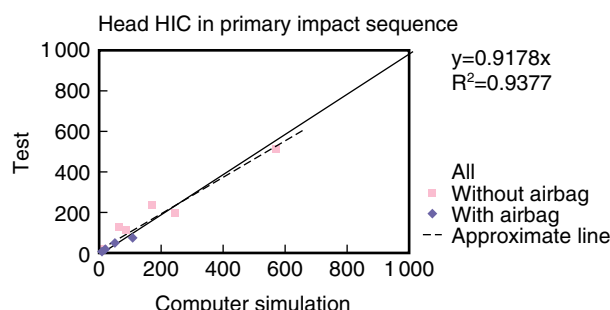


Fig. 20 Correlation of HIC at primary impact sequence

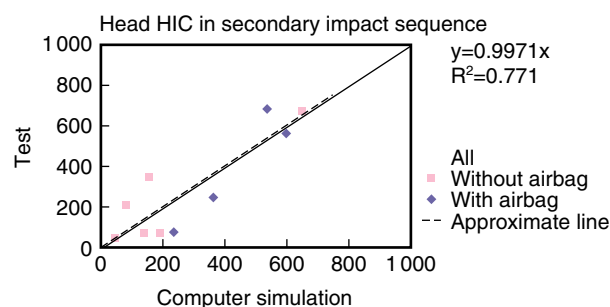


Fig. 21 Correlation of HIC at secondary impact sequence

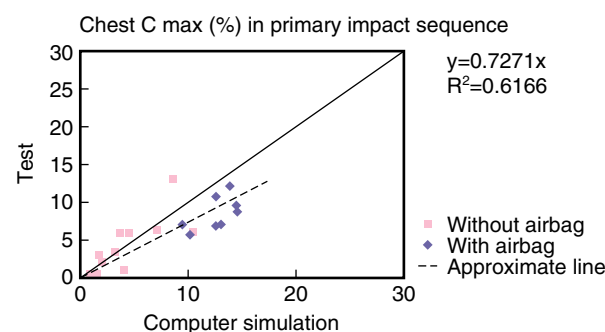


Fig. 22 Correlation of chest sternum compression at primary impact sequence

Table 3 Correlation of leg injury for entire impact sequence

Femurs		Full scale tests		Corrected percentage
		Fracture	No fracture	
Simulations	Fracture	0	1	96%
	No fracture	0	23	

Knees		Full scale tests		Corrected percentage
		Fracture	No fracture	
Simulations	Fracture	0	0	100%
	No fracture	0	24	

Tibias		Full scale tests		Corrected percentage
		Fracture	No fracture	
Simulations	Fracture	1	0	100%
	No fracture	0	23	

6. GL1800 用エアバッグの負傷低減性能評価

ISO/CD13232では、コンピュータシミュレーションにより、ライダープロテクションの効果とリスクの判断をおこなうように規定されている。コンピュータシミュレーションの計算は 200 形態について、ライダープロテクションの有無で 400 ケースの計算をおこなうことになっている。

衝突角度と衝突部位の組み合わせによる 25 衝突形態を Fig. 23 に示す。さらに衝突速度違いが規定されている。こ

の組み合わせにより衝突形態は 200 になる。

これらの 25 形態において、X を記した形態は、エアバッグが作動しない、あるいは作動してもライダーの挙動や負傷に影響を与えないので計算対象から外した。△ を記した形態は、衝突速度によりエアバッグが作動しないと判断されたので、それらを計算対象から外した。これらの計算対象から外した形態では、エアバッグ有無によるライダーの負傷値変化をゼロとした。以上の結果、最終的な計算対象は、121 形態 242 ケースであった。

7. コンピュータシミュレーションによるエアバッグシステムの評価結果

121 形態 242 ケースのコンピュータシミュレーションを計算して、ISO/CD13232の規定に基づきエアバッグによる負傷低減効果を評価した。その結果、種々の衝突形態に対する本エアバッグシステムのライダー負傷低減性能と、その特徴が把握できた。

7.1. ライダー負傷の低減性能

Fig. 24 に相手車に衝突するプライマリインパクトとセカンダリインパクトのエアバッグによる負傷の影響を示す。

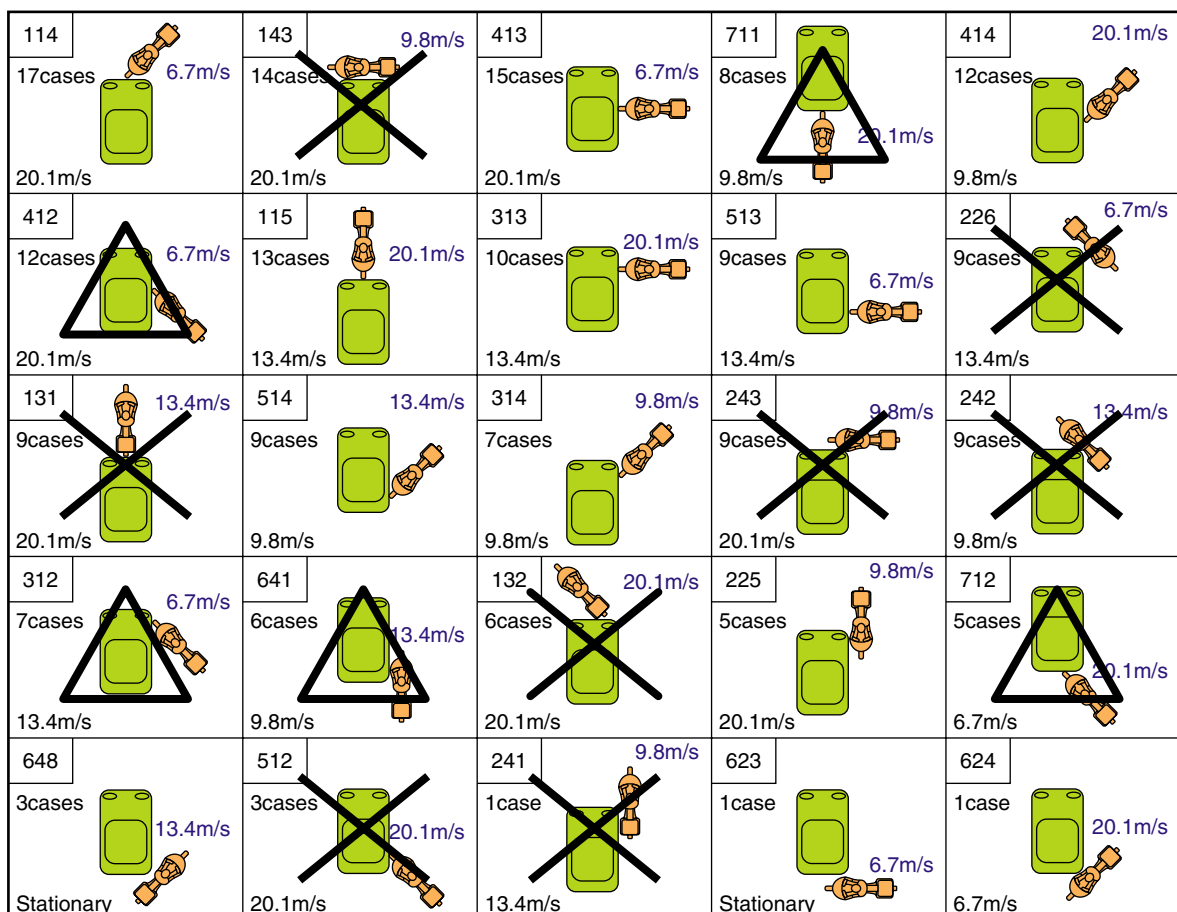


Fig. 23 Impact configurations for computer simulation

縦軸はNIC値であり、NIC=0は負傷無しレベル、NIC=1は1名死亡相当を表す。

Fig. 24 にプライマリインパクトの総合平均ベネフィットと総合平均リスクを示す。総合平均ベネフィットは0.038で総合平均リスクは0.001である。リスク／ベネフィットの比率は 0.026 である。ネットベネフィット値は 0.037 である。

Fig. 24 にセカンダリインパクトの総合平均ベネフィットと総合平均リスクを示す。総合平均ベネフィットは0.022で総合平均リスクは0.011である。リスク／ベネフィットの比率は 0.500 である。ネットベネフィット値は 0.011 である。

したがって、本エアバッグシステムのベネフィットは、ダミーの路面落下における負傷よりも、相手車への打撃負傷に対する低減効果大きい。

Fig. 25にプライマリインパクトとセカンダリインパクトを総合したエンタライインパクト(衝突開始からダミー路面落下まで全て)の総合平均ベネフィットと総合平均リスクを示す。総合平均ベネフィットは 0.048 で総合平均リスクは 0.004 である。リスク／ベネフィットの比率は 0.083 である。ネットベネフィット値は 0.044 である。

これらの結果から、本エアバッグシステムは、適切なライダー負傷低減性能を有すると判断される。

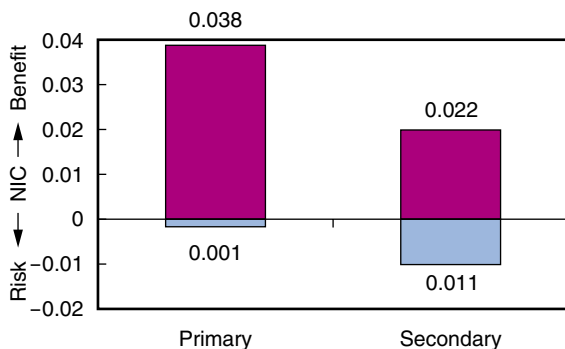


Fig. 24 Total average benefits and risks, primary and secondary impact sequence

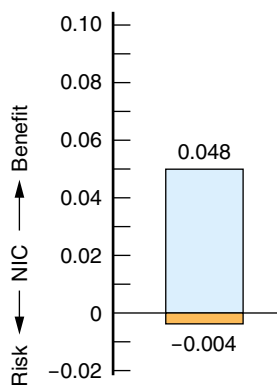


Fig. 25 Total average benefits and risks in the entire impact sequence

7.2. 衝突速度の影響

ネットベネフィット値を衝突速度によって比較したものを Fig. 26 に示す。この場合の衝突速度は、相対速度を表している。相対速度は、四輪車の側面に衝突している場合は二輪車の使用速度、四輪車の正面に衝突している場合は、両車の速度を足し相対速度として用いている。四輪車後面に衝突している場合は四輪車の速度を二輪車の速度から引き相対速度として用いている。四輪車正面及び後面に衝突している場合で衝突に角度がついている場合は、四輪車の衝突速度を衝突角度分減らしている。一例を挙げると Fig. 1 の No.2 の衝突形態では、四輪車の正面に二輪車が45度の角度で衝突している。この場合の相対衝突速度は、二輪車の 13.4 m/s と四輪車の $6.7 \text{ m/s} \cdot \cos 45^\circ$ を足した速度とした。

Fig. 26 から、GL1800 用エアバッグは低速域から高速域まで幅広くベネフィットが確認でき非常に効果的であることがわかる。その中でも最も多くのベネフィットが現れているのは 20-25 m/s 付近で、高速域での効果が大きいことがわかる。

上記の結果から、高速域でのエアバッグの効果がはっきりと現れる衝突形態の一例を Fig. 27 に示す。衝突時のベース車のダミー挙動を Fig. 28 にエアバッグ搭載車のダミー挙動を Fig. 29 に示す。ベース車ではダミーが頭部を四輪車のルーフに強打している。対照的に、エアバッグ搭載車はダミー頭部の四輪車への打撃は、軽打ですんでいる。このときの傷害値を Table 4 に示す。AIS はダミーの傷害値を表すもので、AIS1 は軽傷レベル、AIS6 は死亡レベルを表す6段階の負傷指標値である。頭において、ベース車はAIS6で死亡しているがエアバッグ車は負傷していない。また首においても、ベース車では AIS4 に対してエアバッグ車では負傷なしを表わしている。

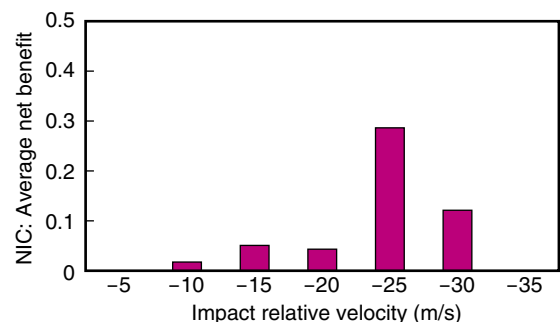


Fig. 26 Total average net benefits, by relative impact speed

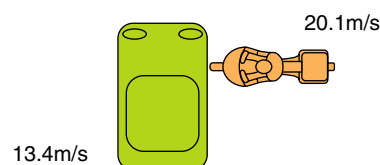


Fig. 27 Benefit impact configuration

参考文献

- (1) Inoue, T., Miura, K., et al.: Experimental Collision Test on Motorcycles with Passenger Car, Paper No.15 of the Safety Research Tour in the USA from the Viewpoint of the Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers of Japan(1969)
- (2) Iijima, S., et al.: Exploratory Study of an Airbag Concept for a Large Touring Motorcycle, Paper No. 98-S10-O-14, Sixteenth International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Windsor, Canada(1998)
- (3) Yamazaki, T., et al.: Exploratory Study of an Airbag Concept for a Large Touring Motorcycle, further research, Paper No. 01-S9-O-240, Seventeenth International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Amsterdam, Netherlands(2001)
- (4) ISO 13232 Motorcycles Test and Analysis Procedures for Research Evaluation of Rider Crash Protective Devices Fitted to Motorcycles, 1996-12-15
- (5) Namiki, H., et al.: A Computer Simulation for Motorcycle Rider-Motion in Collision, Paper No.2003-32-0044, Small Engine Technology Conference & Exhibition, Madison, Wisconsin, USA(2003)
- (6) LS-DYNA User's Manual: Livermore Software Technology Corporation

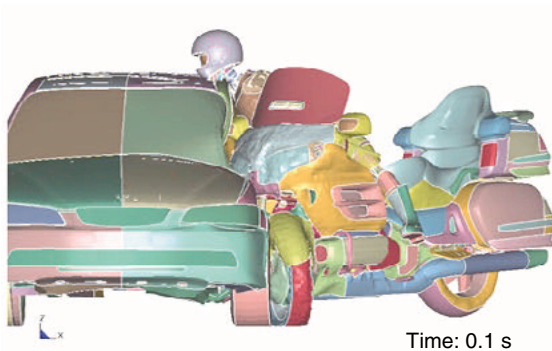


Fig. 28 Baseline impact case

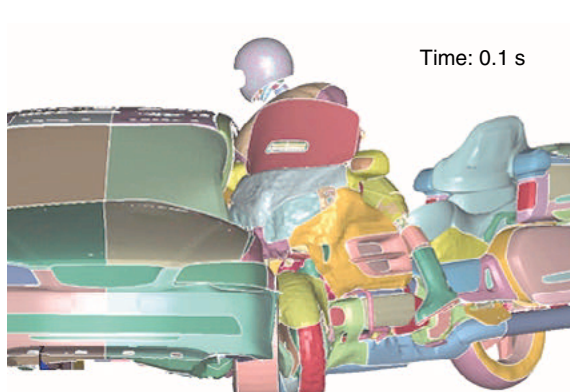


Fig. 29 With airbag impact case

Table 4 Comparison of AIS between baseline and with airbag

	Base line	Airbag
Head	6	0
Neck	4	0
Chest	1	1
Abdomen	0	0
Leg	3	3

8. 結論

(1) 二輪車衝突時の乗員路面落下までの負傷評価が、陽解法 FEM ソフトを使ったコンピュータシミュレーションで可能になった。

(2) このコンピュータシミュレーション手法を用いて、GL1800 用エアバッグの負傷低減効果を ISO/CD13232 に基づいて評価した。

この研究により負傷低減に関して以下のことがわかった。

- ・ エンタイアインパクトの総合平均ベネフィットは0.048であり、総合平均リスクは 0.004 である。
- ・ 最も効果のあった相対衝突速度域は 20-25 m/s(72-90 km/h)であった。
- ・ 負傷低減効果は、路面落下時より、衝突相手車打撃時の方が大きかった。

■ 著 者 ■



並木 秀夫



中村 豊一



飯島 聡