

2. 歩行者事故におけるバンパー部分の安全性評価について

—欧州標準脚部ダミーとフレキシブル脚部ダミーの特性比較—

自動車安全研究領域

※松井 靖浩

高木 俊介 (現 自動車審査部)

田中 良知

細川 成之 米澤 英樹

1. はじめに

国内の年間の交通事故における負傷者数945,504人(2008年)の中で歩行者の占める割合は7%である¹⁾(図1左). 一方, 死亡者数5,155人(2008年)の中で歩行者の占める割合は, 約33%と最も高い状態にある¹⁾(図1右). 死傷者(軽傷・重傷・死亡)数の中で死亡者数の占める割合を死亡率と仮定すると, 歩行者は, 車両乗員を含む他の状態と比べ最も死亡率が高い¹⁾. 成人歩行者がボンネット型乗用車に衝突されると, 最初にバンパーが脚部に衝突し, 頭部がボンネットに衝突する. 歩行者事故の損傷主部位に着目すると, 頭部は死亡事故の中で最も頻度の高い受傷部位であり, 脚部は軽傷・重傷事故の中で最も頻度の高い受傷部位である¹⁾(図2). 歩行者事故は, 先進諸国や開発途上国においても高頻度で発生し, 歩行者保護は重要な課題の一つとなっている. 傷害程度を低減させるためには車両の安全性を高める方法も有効な手段の一つである. 特に, ボンネット(頭部保護)およびバンパー(脚部保護)は安全性を確保すべき対象部位である.

ボンネットについては, 頭部保護基準が日欧で定められ, 我が国では2005年9月より, 欧州では2005年10月より歩行者頭部保護規制が施行された. この評価試験では, 歩行者頭部を模擬した頭部ダミー(頭部インパクト)を乗用車のボンネット部分へ衝撃させ(図3), 歩行者頭部(脳震盪)の傷害程度を推計できる.

バンパーについては, 脚部保護基準が欧州²⁾において2005年10月より定められている(EC指令Phase 1). この評価試験では, 英国 Transportation Research Laboratory (TRL)が開発した欧州標準脚部ダミー³⁾(TRL脚部インパクトと呼称)を用い, 乗用車のバンパー部分に衝撃させることにより歩行者脚部(特に膝靭帯と脛骨)の傷害程度を推計できる. バンパー評価試験では車両の剛性の高い箇所に対して衝撃を加える

ことから, 脚部インパクトには耐久性や繰り返し性等が必要とされる. TRL脚部インパクトは, それら条件を満足するため, 大腿部, 下腿部は剛体(スチール製)で設計されている. 一方で, 大腿部や下腿部が多く節で構成され生体のように曲がる特性を有する(生体忠実性が高い)フレキシブル脚部ダミー(Flex脚部インパクトと呼称)⁴⁾が現在, 開発の最終段階にあり, 自動車アセスメント(JNCAP)において利用が検討されている.

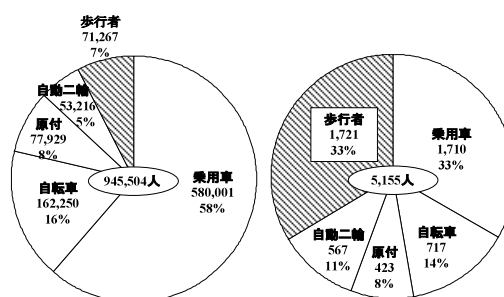


図1 交通事故による負傷者数(左), 死亡者数(右)

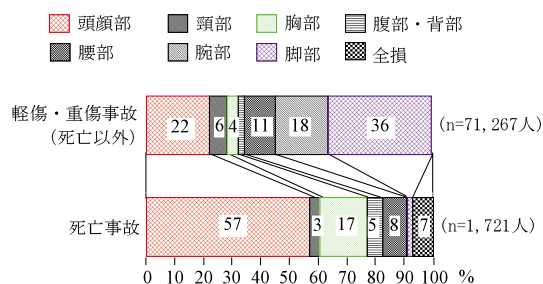


図2 歩行者事故における損傷主部位

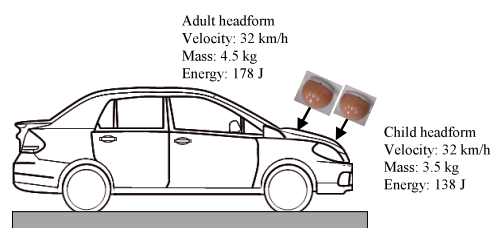


図3 国内技術基準のボンネット評価試験

現在、世界基準の制定と相互承認協定の両立を目的とし国連の場で審議されている Global Technical Regulation (GTR: 世界統一基準) では、TRL 脚部インパクトを使った試験法が策定されているが、Flex 脚部インパクトが試験ツールとして完成した場合、両方式の脚部インパクト (表 1) が使用される可能性が考えられる。この場合、車両を対象としたバンパー評価試験において、膝靭帯損傷や脛骨骨折についてバンパーの安全性に関する判断の一致度合いを明らかにする必要がある。そこで、本研究では、TRL および Flex 脚部インパクトを用い、8つの車両に対する衝撃試験を遂行し、両脚部インパクトより計測される傷害値評価における等価性について調査することでGTRの策定作業における基礎資料を整備することを目的とする。

表 1 脚部インパクトの特徴

脚部インパクト				評価対象となる傷害
名称	大腿部	靭帯	下腿部	
TRL	一体型 (剛体)	膝部材 (弾塑性)	一体型 (剛体)	<ul style="list-style-type: none"> 脛骨骨折 (主に直接衝撃) 十字靭帯損傷 側副靭帯損傷
Flex	多関節 (弾性)	ワイヤー (弾性)	多関節 (弾性)	<ul style="list-style-type: none"> 脛骨骨折 (主に曲げ) 十字靭帯損傷 側副靭帯損傷

2. 方法

2.1 試験方法

脚部インパクトをフリーフライトによりバンパーへ打撃させる試験状況を図 4 に示す。車両に対する脚部インパクトの衝突速度は 40 ± 0.5 km/h とし、室温は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ とした。車両接触時の TRL 脚部インパクトの下端位置は欧州の当時の指令 Phase1 に則し車両を設置した地表面と一致させている。一方、車両接触時

の Flex 脚部インパクトについては、文献⁴⁾で提案されている地上高より 75 mm 上方を車両接触時のインパクト下端高さとした。

TRL 脚部インパクトは、EC 指令で規定され、TRL が 2000 年に販売を開始したモデル³⁾である。計測項目は、下腿部の加速度 (脛骨骨折評価)、膝の剪断変位量 (十字靭帯損傷評価) および曲げ角度 (側副靭帯損傷評価) である。

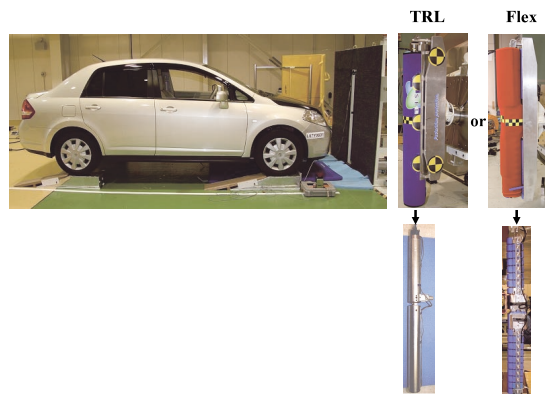


図 4 試験セットアップおよび各インパクト構造

Flex 脚部インパクトは、2007 年に製造された type GT と呼称されるモデル⁴⁾である。計測項目は、下腿部のモーメント (脛骨骨折評価)、膝靭帯の伸び量 (前十字靭帯、後十字靭帯、側副靭帯の損傷評価) である。

2.2 供試車両および打撃位置

供試車両は、樹脂製バンパーを備えたセダン 3 車種、SUV (Sport Utility Vehicle) 2 車種、ハイトワゴン (全高 1550 mm 以上の軽乗用車) 1 車種、1Box 2 車種の計 8 車種とした。

打撃位置はバンパー中央部 (センター) およびサイドメンバ部 (サイド) とした (図 5)。サイドメンバ部は、バンパーを取り付けるために車体前部に据え付

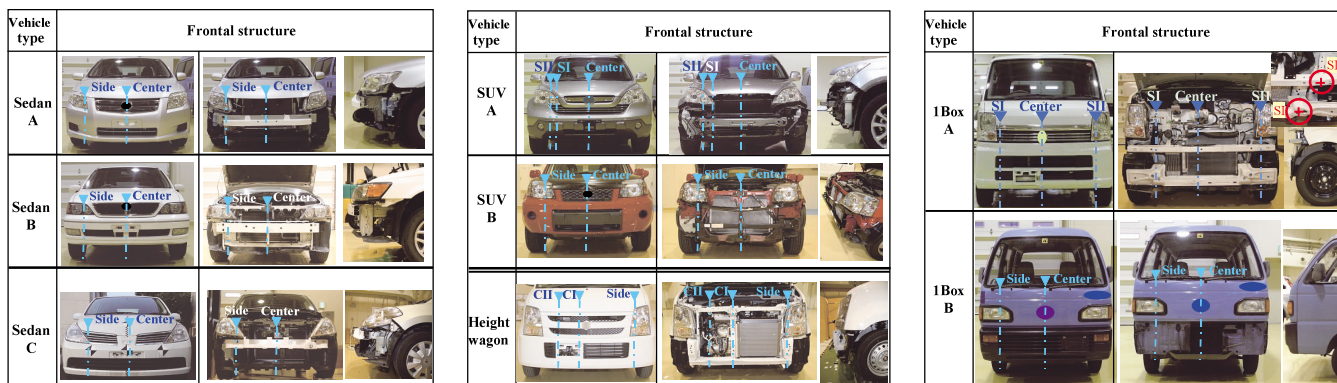


図 5 各供試車両における打撃位置

けられたマウント部の中心に相当する。SUV A については、サイドメンバ部に加えて EC 指令²⁾試験エリアの最も外側に相当する箇所も打撃位置とした。また、ハイトワゴンでは、n 数を増加させるため、高剛性と推察されるオルタネータ位置も打撃位置とした。1Box A については、上下2つのサイドメンバ部を打撃位置とした。

本研究では、計8車種の車両を対象とし、計19ヶ所の打撃位置に対し両脚部インパクトをそれぞれ1回衝撃させ試験を遂行した。

2.3 傷害基準値

両脚部インパクトより取得された傷害値は、傷害基準値(表2)と比較した。TRL 脚部インパクトの傷害基準値は EC 指令 Phase 2 (2013 年より施行)として提案されている基準値²⁾とした。

Flex 脚部インパクトにおける傷害基準値は、現在定められていない。Flex 脚部インパクトの技術的な評価を実施する会議体 (Flex-TEG) では、傷害基準値に関する参考資料⁵⁾が提供されている。また、文献⁶⁾においても、今日まで傷害基準値が存在しない状況から、同参考資料を引用し解析が進められている。そこで、本研究においても、同参考資料において記載されてい

表2 脚部傷害基準値

	Tibia	Knee ligament		
		ACL	PCL	MCL
TRL	Acceleration	Shear displacement		Bending angle
	170 G ²⁾	6 mm ²⁾		19 degrees ²⁾
Flex	Bending moment	Elongation		
	312 Nm (312-350) ⁵⁾	11.2 mm (11.2 mm) ⁵⁾	11.2 mm (11.2 mm) ⁵⁾	19.5 mm (19.5-21.6 mm) ⁵⁾

る値を引用することとした。ただし、同参考資料における傷害基準値は幅を持たせてあるため、ここではその幅の中から最も低い値(最も厳しい値)を使用することとした。便宜上、それらの値を Flex 脚部インパクトの傷害基準値と呼ぶ。

3. 結果

8 供試車両に対し TRL 脚部インパクトおよび Flex 脚部インパクトを打撃した際の傷害値をまとめて表3に示す。サイドメンバに対する打撃では、傷害基準値を超える傾向にある。ただし、両脚部インパクトにおいて傷害基準値に対する評価は必ずしも一致していない。以下、傷害基準値に対する評価の結果について詳細に述べる。

表3 計測された傷害基準の一覧

Vehicle type	Impact location	Impact test result using TRL					Impact test result using Flex				
		Velocity (km/h)	Tibia fracture assessment	Knee ligament injury assessment		Velocity (km/h)	Tibia fracture assessment	Knee ligament injury assessment			
			Acceleration (G)	Shear displacement (mm)	Bending angle (deg)		Bending moment (Nm)	ACL	PCL	MCL	
		Elongation (mm)		Elongation (mm)							
Sedan	A	Center	39.7	138	2.8	4.8	40.7	232	4.2	4.0	11.3
		Side	39.7	291	2.0	20.3	40.5	311	7.7	13.0	25.0
	B	Center	39.8	224	3.7	28.9	39.4	349	9.7	8.5	31.0
		Side	39.9	371	3.9	25.6	40.2	339	17.2	10.2	31.0
	C	Center	40.1	198	1.7	12.6	40.2	178	6.2	4.1	15.4
		Side	39.8	307	3.0	24.3	39.9	307	7.3	8.8	23.2
SUV	A	Center	40.0	81	2.0	2.8	40.1	221	3.7	0.6	9.5
		Side I	40.1	97	2.6	12.6	40.5	238	6.0	5.4	18.1
		Side II	39.9	383	7.5	25.3	40.2	433	13.8	8.7	31.0
	B	Center	40.0	126	1.1	16.5	40.0	356	10.5	6.0	23.5
		Side	40.5	342	6.8	25.3	40.0	435	20.8	9.5	31.1
		Center	40.0	126	1.1	16.5	40.0	356	10.5	6.0	23.5
Height Wagon	A	Center I	40.3	129	1.3	4.0	40.0	279	2.6	1.9	5.6
		Center II	40.3	142	1.7	3.0	40.1	321	2.7	4.1	4.2
		Side	40.4	545	7.8	24.0	40.4	377	10.0	6.7	13.9
1Box	A	Center	39.7	178	2.0	1.6	40.4	236	2.6	5.0	1.4
		Side I	40.1	453	4.0	19.3	40.2	329	9.5	8.3	15.4
		Side II	40.0	399	7.6	24.4	40.3	286	7.2	17.9	27.5
	B	Center	40.3	97	1.8	4.7	39.9	268	4.1	2.7	13.1
		Side	39.9	159	3.0	10.9	39.9	267	6.2	3.8	17.8
		Center	40.3	97	1.8	4.7	39.9	268	4.1	2.7	13.1

Over injury assessment reference value (IARV)

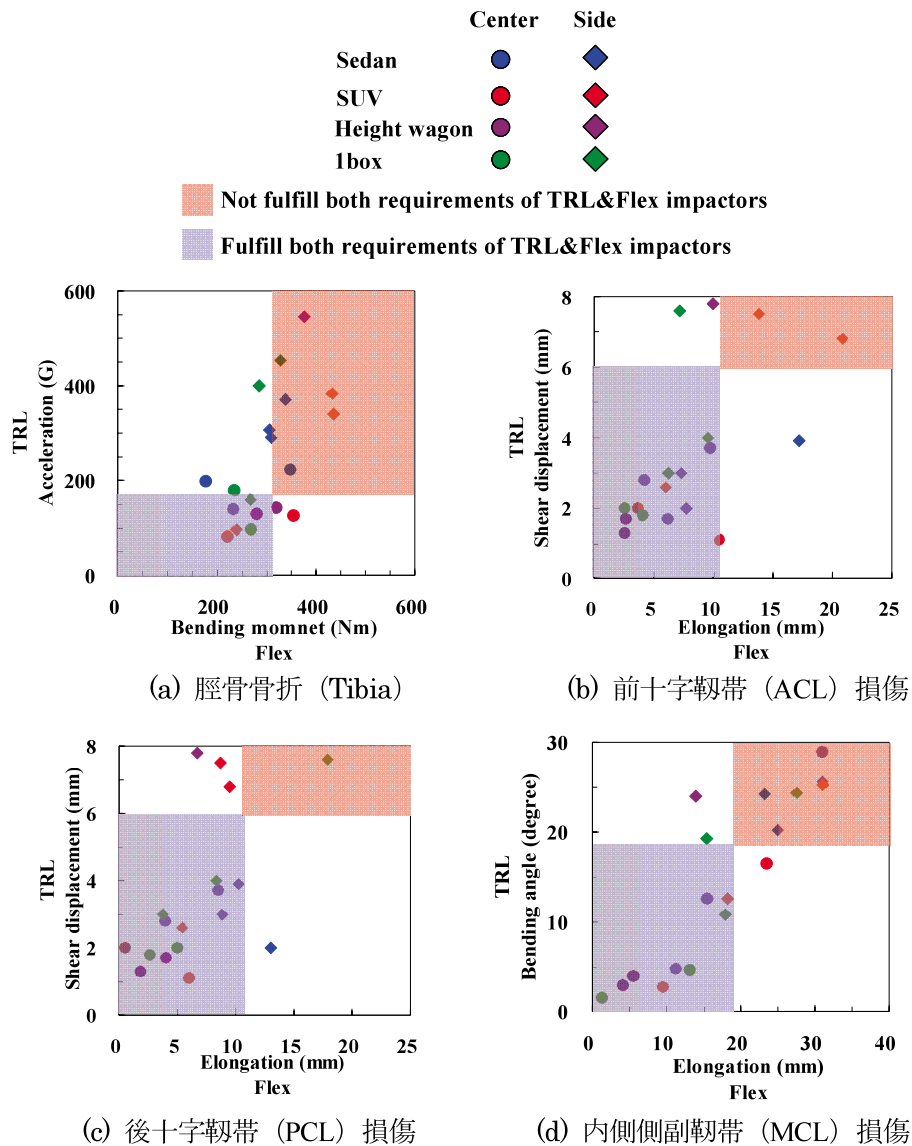


図6 両脚部インパクトの傷害値

同一車両，同一箇所に対して，両脚部インパクトを用いて打撃した際に計測された傷害値の関係（n=19）を図6に示す。例えば，TRL脚部インパクトおよびFlex脚部インパクトの性能が等しく，両インパクトの基準値が同等な場合には，試験結果は図6の四分割左下の領域（両インパクトの傷害値は共に傷害基準値以下）または右上の領域（両インパクトの傷害値は共に傷害基準値以上）のみに存在するものと考えられる（図6の斜線で示す領域）。

四分割左下の領域と右上の領域にある事例数を全体の事例数で割ったものを適合率と仮定し，傷害別に表4に示す。脛骨骨折（Tibia）評価では適合率は63%

であった。一方，靭帯損傷では適合率は79%以上となり，前十字靭帯（ACL）および内側側副靭帯（MCL）評価について最も高かった（84%）。

表4 適合率

Injury type	(a) Tibia	(b) ACL	(c) PCL	(d) MCL
	12/19	16/19	15/19	16/19
Fitting ratio	63%	84%	79%	84%

4. 考察

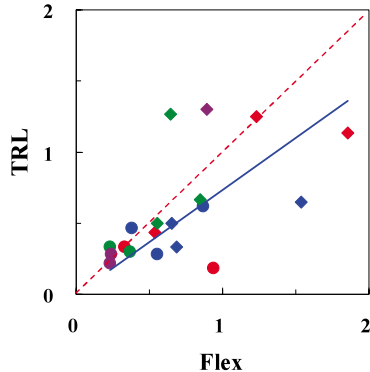
本研究では、傷害基準値に対する評価の結果を適合率として示した。脛骨骨折評価の適合率は63%であるが、靭帯損傷の適合率は79%以上であった。これより、いずれの脚部インパクトを用いた場合でも、靭帯傷害に関する傷害評価は近似する可能性のあることが推察できる。一方、骨折については、靭帯傷害と比べ適合率が低いため、評価結果は異なっている。

実際の脛骨が骨折するモードとして、直接衝撃により生じる骨折（横骨折）や曲げやねじりなどの外力により生じる骨折（斜め骨折等）がある⁷⁾。TRL脚部インパクトの骨格部はスチール製の剛体であり、他方、Flex脚部インパクトの骨格部は多関節構造により曲がる構造となっている。そのため、TRL脚部インパクトは、加速度を用いて脛骨骨折を評価していることから、主に直接衝撃により生じる骨折の評価が可能であるものとする。他方、Flex脚部インパクトは、歪みゲージによる曲げモーメント計測を可能としており、主に曲げなどの外力により生じる骨折の評価が可能とする。このことから、対象とする骨折のモードが両脚部インパクトでは異なることが推察される。

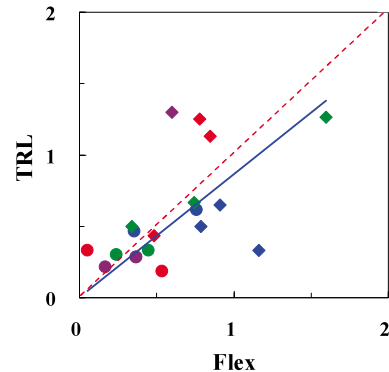
一方、膝靭帯の損傷については、両脚部インパクトでは評価対象となる傷害（十字靭帯損傷および側副靭帯損傷）は一致している。本考察では、基準値に対する感度の大きさを調査するため膝靭帯の損傷について両脚部インパクトの傷害基準値に対する傷害値の割合を比較することを試みる。両脚部インパクトの傷害基準値に対する傷害値の比の関係を図7に示す。同図では、切片を0とした近似直線を実線で示した。近似直線の傾きおよび相関係数をまとめて表5に示す。ここで、直線の傾きが1を下回るということは、Flex脚部インパクトの傷害値が傷害基準値を超える割合が、TRL脚部インパクトの傷害値が傷害基準値を超える割合より高いことを表している。また、相関係数は

表5 最小二乗法により求めた傾きおよび相関係数

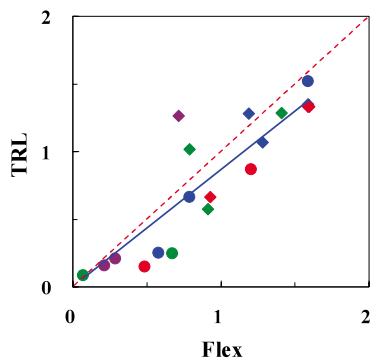
Injury type	(a) ACL	(b) PCL	(c) MCL
Coefficient of linear regression	0.73	0.87	0.87
Correlation coefficient	0.52	0.51	0.89



(a) 前十字靭帯 (ACL) 損傷



(b) 後十字靭帯 (PCL) 損傷



(c) 内側側副靭帯 (MCL) 損傷

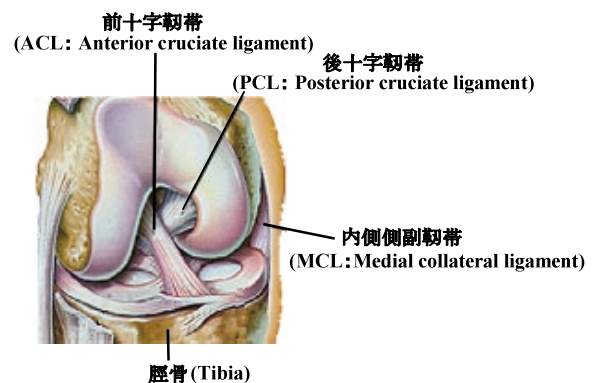


図7 両脚部インパクトの傷害基準値に対する傷害値の割合の比較

相関性を示す指標で、1に近いと両脚部インパクトの傷害評価における相関性は強い傾向にあることを示し、0に近いと相関性が弱いことを示す。

前十字靭帯 (ACL) の損傷評価では、直線の傾きは 0.73 となり、Flex 脚部インパクトの有する性質は、TRL 脚部インパクトの有する性質より前十字靭帯が損傷する評価が高い傾向にあった (表 5 (a))。その際の相関係数は 0.52 となり、相関性のある結果となった。

後十字靭帯 (PCL)、内側側副靭帯 (MCL) の損傷評価では、直線の傾きは共に 0.87 となり、両脚部インパクトの有する性質は側副靭帯が損傷する評価においてほぼ等しい傾向にあった (表 5 (b), (c))。この場合、相関係数はそれぞれ 0.51, 0.89 となり、相関性は特に MCL 損傷評価において強い傾向にあった。

GTR 試験法は、TRL 脚部インパクトを使用することを基本として策定されている⁸⁾。現在開発中の Flex 脚部インパクトが完成した場合、その使用も選択肢として候補に挙がっている。本研究では、8車種を対象としたが、今後、人気の高いミニバンも含め n 数を増加させ、二つの脚部インパクトにおける傷害評価の互換の可能性をより精度良く検討していく必要がある。

5. お わ り に

TRL 脚部インパクトと Flex 脚部インパクトを用いた実車試験により得られた傷害値を比較することで両脚部インパクトの特性を取得した。セダン、SUV、ハイトワゴン、1Box 計 8 車種の車両を用いて、計 19ヶ所に対する衝撃試験結果を対象とした。両脚部インパクトが共に傷害基準値内の領域、または、共に傷害基準値外の領域にあるか否かを適合率により調査した。脛骨骨折評価についての適合率は 63%であった。一方、靭帯損傷では適合率は 79%以上となり、前十字靭帯 (ACL) および内側側副靭帯 (MCL) 評価について最も高かった (84%)。これより、いずれの脚部インパクトを用いた場合でも、靭帯傷害に関する傷害評価は近似する可能性のあることが推察できる。一方、骨折については、靭帯傷害と比べ適合率が低いため、骨折の評価は異なる可能性がある。

膝靭帯の損傷について、両脚部インパクトの傷害基準値に対する傷害値の割合の比較を試みた。内側側副靭帯 (MCL)、後十字靭帯 (PCL) の損傷評価については、Flex 脚部インパクトと TRL 脚部インパクトの有する性質はほぼ等しい傾向にあることが判明した。この

ように、本研究では二つの脚部インパクトにおける安全性評価について調査してきたが、いずれの脚部インパクトを選択してもバンパーの膝靭帯保護に関する安全性は同等に評価することが可能と考えられる。

我が国の年間の交通事故における歩行者の負傷者数は 71,267 人 (2008 年) であり、脚部が損傷主部位となる負傷者は 25,629 人、その内、重傷者は 4,423 人である¹⁾。本研究で対象とする脚部インパクトを用いたバンパー評価試験を導入した場合 (試験衝突速度 40 km/h に相当する交通事故の累積構成率を 0.85 と仮定し、車種を乗用車に限定)、基準適合車が市場に普及すると重傷者の内約 2 千人が救済されることが期待される。我が国では、2013 年以降、歩行者脚部保護試験の導入を予定しており、今後、益々、安全性の高い車両が普及するものと思われる。

参考文献

1. 交通事故総合分析センター, 2008 年版交通統計, 2009
2. Commission of the European Communities, 'Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the Protection of Pedestrians and other vulnerable road users Protection', 2007
3. Transport Research Laboratory, 'TRL Pedestrian Legform Impactor User Manual. version 2.0', 2000
4. A Konosu et al., 'Development of a biofidelic flexible pedestrian legform impactor type GT (Flex-GT)', 20th ESV (CD), 2007
5. A Konosu, 'Evaluation Activities on Injury Assessment Ability of Flexible Pedestrian Legform Impactor GT Alpha' 3rd Flex-TEG meeting, 2006
6. O Zander et al., 'Prediction of Lower Extremity Injury Risks During an Impact on Modern Car Fronts with a Flexible Pedestrian Legform Impactor and the Pedestrian Legform Impactor According to EEVC WG17', 20th ESV (CD), 2007
7. A Nahum, 'Accidental Injury, Biomechanics and Prevention', Springer Verlag, 2nd edition, 2001
8. Economic and Social Council, United Nations, 'Proposal for a draft global technical regulation on pedestrian safety Transmitted by the Working Party on Passive Safety (GRSP)', 2007