

ヘッドレスト評価試験における頸部傷害低減性能基準の検討

Consideration of Neck Injury Protection Performance Criterion for Head Restraint Evaluation Testing

中嶋 太一 *1
Taichi NAKAJIMA

佐藤 房子 *1
Fusako SATO

張 替 毅 *1
Takeshi HARIGAE

Abstract

The dynamic sled test procedure using a rear-impact dummy "BioRID-II" has been discussed in the phase 2 activity of the UN ECE/WP29/GRSP/GTR7 to develop the global technical regulations (GTR) for vehicle head restraints. In this study, to establish criterion for evaluating whiplash protection performance of head restraints in the dynamic tests of the GTR-Phase 2, the results of the accident reconstruction simulations using human FE models were reanalyzed by associating the responses of the human FE models with those of the dummies and cadavers in the sled test series conducted by United States.

1. はじめに

追突事故による頸部傷害低減に向けた国際的な活動として、国連の世界基準調和フォーラムでは、衝突安全専門分科会 GRSP (Working Party on Passive Safety) の下に、ヘッドレストに関する世界統一基準 (GTR: Global Technical Regulation) について議論するヘッドレスト GTR インフォーマル会議 (以下、GTR7 という) が設置され、同会議の設置を提唱した米国を議長国として 2005 年 2 月より活動が開始された。

GTR7 では、ヘッドレスト、ならびにシートに関する既存の規則や 2004 年 12 月に改訂された米国の安全基準のほか、各国で導入され始めた後面衝突アセスメント試験に関する情報も含めて議論が行われた。その結果、2008 年 3 月に Phase1 の基準として、「静的バックセット (人体模型をシートに着座させた場合の後頭部とヘッドレストとの水平距離)」についての規制が成立した。その後、2009 年 12 月からは、英国が議長国となって Phase2 の活動 (テクニカルスポンサー: 日本) が開始され、ヘッドレストの頸部保護性能を動的試験によるダミーで評価することを目指して、動的試験方法・試験条件、ならびに頸部傷害を評価

するための傷害指標とその基準値などについて活発な議論が行われてきた。

GTR7-Phase2 におけるヘッドレストの動的評価試験に採用すべき頸部傷害指標とその基準値については、日本から、倫理的配慮に基づき過去に実施された志願者実験の結果や人体有限要素モデルによる事故再現シミュレーションの結果から導出された傷害指標と基準値が提案され、一方で、米国からは、供試体実験などの結果に基づいて導出された傷害指標と基準値が提案されている。しかし、日本の提案と米国の提案を比較すると、傷害指標検討の基礎としたデータのみならず、頸部傷害の評価方法や基準値の導出方法など、非常に多くの点で異なっている。そこで、本報では日本と米国の傷害指標に関する提案について整理し、それらの提案を基に、GTR7-Phase2 におけるヘッドレストの動的評価試験に採用すべき頸部傷害指標、ならびにその基準値について検討した結果を紹介する。

2. GTR7-Phase2における動的試験の概要

GTR7-Phase2 において検討されているヘッドレストの動的試験方法は、スレッドと呼ばれる台車上に固定したシートに後面衝突試験用を開発さ

*1 一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部

*本速報はJSAE著作権規則に基づくJSAE20174214の転載である

れた BioRID-II と呼ばれるダミーを搭載し、17.6 km/h の三角波形の加速度を前方に与えた際のダミーの傷害値によって、ヘッドレストの頸部保護性能を評価するものである。GTR7-Phase2 におけるヘッドレストの動的試験の実施状況の例と試験に使用される BioRID-II ダミーの外観を Fig. 1 に示す。

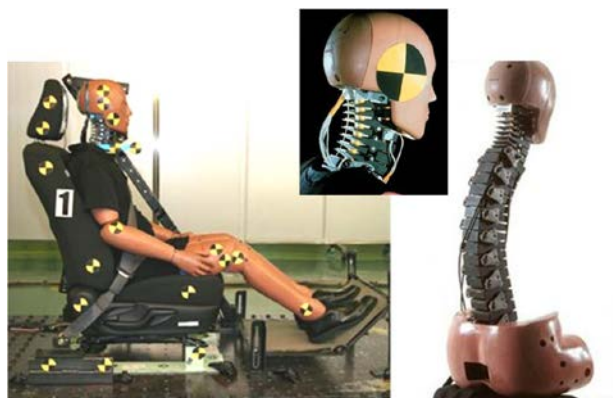


Fig. 1 Test Configuration and Rear Impact Dummy for GTR7-Phase2 Dynamic Sled Test

3. GTR7-Phase2に提案された頸部傷害指標と基準値

3.1 日本が過去に提案した頸部傷害指標

日本では、佐藤ら¹⁾、小野ら²⁾が、志願者によるスレッド実験の結果や人体有限要素モデルを用いた事故再現シミュレーション（実際の事故から得られたクラッシュパルスを入力条件としたコンピュータシミュレーション）の結果を基に、頸部傷害を議論する上で着目すべき重要な指標について検討している。その結果として、「衝撃時における隣接した頸椎間の相対運動により頸椎間の軟組織が局所的に過度な変形を呈することで頸部に傷害が発生する可能性がある」との考えから、「頸椎間軟組織のひずみ・ひずみ速度（以下、頸椎ひずみ・ひずみ速度）」を重要な指標として提唱している。この考えに基づき、日本としては、志願者実験ならびに事故再現シミュレーションにおける「頸椎ひずみ・ひずみ速度」と相関性のある BioRID-II ダミーで計測可能な頸部傷害指標として、第一胸椎と頭部重心の相対加速度、相対速度によって算出される NIC（Neck Injury Criterion）³⁾のほか、頸部の上部、下部の荷重計で計測される頸部力、ならびにモーメント

（UpperNeck-FX, FZ, MY (Flexion / Extension), LowerNeck-FX, FZ, MY (Flexion / Extension)) を動的試験における頸部傷害指標として提案している⁴⁾。

事故再現シミュレーションで使用した事故データでは、乗員の頸部傷害について、1995年にケベックむち打ち症関連障害特別調査団が作成した「外傷性頸部症候群（Whiplash - associated disorders, 以下、WAD という）の重症度分類（Table 1）⁵⁾」によって評価している。日本では、事故再現シミュレーションの結果から、WAD の重症度分類における Grade 2 以上（以下、WAD2+ という）の傷害発生確率に関して、上記に示した傷害指標のリスクカーブを作成し、これを基にして動的試験の基準値を設定することを提案している。

Table 1 Quebec classification of WAD (Whiplash-associated disorders)

Grade	Clinical presentation
0	No complaint about neck pain No physical signs
I	Neck complaint of pain, stiffness or tenderness only No physical signs
II	Neck complaint Musculoskeletal signs including: • Decreased range of movement • Point tenderness
III	Neck complaint Musculoskeletal signs Neurological signs including: • Decreased or absent deep tendon reflexes • Muscle weakness • Sensory deficits
IV	Neck complaint and fracture or dislocation

2009年に開始された日本の自動車アセスメントにおける後面衝突頸部保護性能試験⁶⁾では、事故再現シミュレーションから得られた傷害指標のリスクカーブにおいて、WAD2+の発生確率が5%、95%に相当する値がレーティングの評価値として採用されている。日本が提案している NIC, ならびに頸部力・モーメントのリスクカーブから算出した WAD2 + 5 %ile 値, ならびに WAD2 + 95 %ile 値を Table 2 に示す。

Table 2 The 5% and 95% values in the risk curves (WAD2+)

Injury Criteria				WAD2+	
				5% Value	95% Value
NIC	Max	m ² /s ²		8	30
Upper Neck	FX	HeadRearward	N	340	730
	FZ	Tension	N	475	1130
	MY	Flexion	Nm	12	40
		Extension	Nm	12	40
Lower Neck	FX	HeadRearward	N	340	730
	FZ	Tension	N	257	1480
	MY	Flexion	Nm	12	40
		Extension	Nm	12	40

3.2 米国がGTR7に提案した頸部傷害指標

米国では、供試体（Post-Mortem Human Subjects, 以下、PMHS という）によるスレッド実験の結果より、Panjabi らが提唱した IV-NIC（Intervertebral Neck Injury Criterion）⁷⁾が、頸部傷害と最も相関のある評価指標であるとしている⁸⁾。IV-NIC とは、「頸部傷害は衝撃時の各頸椎間の相対運動が生理的限度を超えた場合に発生する」という仮説を基に提案された頸部傷害指標である。これは、生理的可動域に対する衝撃時の相対椎体間の動きの比率で定義され、IV-NIC が「1」を超える場合、頸部には何らかの傷害が発生することを意味している。米国では、IV-NIC の中でも回転角（Rotation）における屈曲挙動（下位椎体に対する上位椎体の前方回転：以下、Flexion という）で、実験時に発生した頸部傷害との相関が確認できるとしている。この考えに基づき、PMHS の実験結果から得られた IV-NIC（Rotation）（以下、IV-NIC（R）という）に相関のある BioRID-II ダミーで計測可能な頸部傷害指標として、NIC, NDCx, ならびに NDCr を動的試験の頸部傷害指標に提案している⁸⁾。なお、NDC（Neck Displacement Criterion）は、T1 を基準にした「頭部と頸部との相対変位」によって算出され、NDCr は回転角、NDCx は水平変位に着目した指標となっている⁹⁾。

米国は、PMHS の実験で発生した傷害を外傷スケールである AIS（Abbreviated Injury Scale）によって評価しており、AIS コードの 1（軽傷）以上（以下、AIS1+という）の傷害発生確率に関する IV-NIC（R）のリスクカーブを作成している（Fig. 2）。基準値については、PMHS 実験における IV-NIC（R）と NIC, NDCx, ならびに NDCr

との相関関係から、Fig. 2 に示すリスクカーブにおいて AIS1+が 50 %に相当する「IV-NIC（R）=1.1」に対応する各傷害指標の基準値を算出している。なお、PMHS 実験結果からは NIC, NDCx, ならびに NDCr のリスクカーブが得られていない。そこで、米国では同一条件で実施した BioRID-II ダミーの実験における計測結果と PMHS 実験の計測結果との比率を算出し、BioRID-II ダミーの計測結果をスケーリングして、基準値を提案している。PMHS 実験結果で得られた NIC, NDCx, ならびに NDCr の値と BioRID-II ダミーの計測結果に対応するようにスケーリングした NIC, NDCx, ならびに NDCr の値を Table 3 に示す。

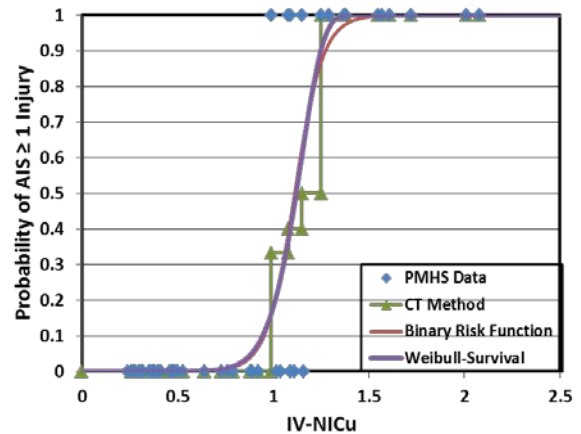


Fig. 2 Risk curves of IV-NIC Rotation from PMHS Test in U.S.⁸⁾

Table 3 Injury Criteria from PMHS Test in U.S.

		PMHS	BioRID-II
NIC	m ² /s ²	39.6	29.7
NDCx	mm	75.1	117.8
NDCr	deg	32.5	12.2

4. 頸部傷害指標とその基準値の設定方法の検討

4.1 日本と米国との頸部傷害指標の比較

Table 4 は、日本と米国が提案している頸部傷害指標に関して、その導出手法（頸部傷害指標の傷害スケールや実験データ等）の概要を比較したもので、両者の考え方の違いにより、ほとんどの項目で異なっていることがわかる。しかしながら、日本が提案している「頸椎ひずみ・ひずみ速度」と、米国が提案している「IV-NIC（R）」とは、

評価手法としての考え方が異なっているものの、追突時における人体の頸椎間の相対的な挙動に着目しているという点は共通である。このことは、日本が提案している「頸椎ひずみ・ひずみ速度」と米国が提案している「IV-NIC (R)」との間に相関関係を見出すことができれば、日本から提案している頸部傷害指標を裏付けるデータとなり得ることを示唆している。

Table 4 Comparison of Neck Evaluation Parameters

	Japan	U.S.
Reference Data	•Volunteer Test (Velocity: 8km/h) •Accident Reconstruction Simulation (Velocity: 8~28km/h)	PMHS Test (Velocity: 16・17.3・17.6・24km/h)
Injury Scale	WAD	AIS
Injury Criteria	Strain・Strain Rate	IV-NIC (R)
Proposal of Injury Evaluation Parameters	NIC UpperNeck-FX・FZ・MY LowerNeck-FX・FZ・MY	NIC NDCx NDCr

4.2 日本の事故再現シミュレーションにおけるIV-NIC (R) と頸椎ひずみ・ひずみ速度との相関性検討

4.1 節に示す日本と米国が提案している頸部傷害指標に関する比較を踏まえ、日本の事故再現シミュレーションでも、米国が提唱する IV-NIC (R) を算出して、IV-NIC (R) と頸椎ひずみ・ひずみ速度との相関性を検討することとした。

具体的には、佐藤ら⁹⁾が実施した事故再現シミュレーションにおいて、米国の算出方法と同様の方法により、IV-NIC (R) を算出した。なお、IV-NIC (R) の算出には、頸部の各椎体間の生理的可動域の値が必要となるが、これについては、米国と同様に、Panjabi らが公表した値¹⁰⁾と Ivancic らが公表した値¹¹⁾の平均値 (Table 5) を閾値として使用した。

Table 5 Physiological range of motion of average values by Panjabi and Ivancic

IV-NIC	Mean and SD			
	Extension		Flexion	
	Mean	SD	Mean	SD
C0/C1	13.35	3.95	12.60	4.10
C1/C2	6.55	2.80	9.60	1.50
C2/C3	4.40	1.65	4.90	2.15
C3/C4	4.60	2.00	5.90	2.35
C4/C5	6.40	2.85	6.55	2.70
C5/C6	6.50	3.55	6.50	4.15
C6/C7	7.45	1.65	6.75	2.50
C7/T1	3.70	2.00	3.35	1.35

Fig. 3, Fig. 4 は、事故再現シミュレーションから算出した IV-NIC (R) と頸椎ひずみとの関係を示したもので、同様に、IV-NIC (R) とひずみ速度との関係を Fig. 5, Fig. 6 に示す。Fig. 3~Fig. 6 には相関係数 (R^2) も合わせて示している。いずれの項目においても、Extension (下位椎体に対する上位椎体の後方回転) より Flexion において、IV-NIC (R) と頸椎ひずみ・ひずみ速度との相関関係が見出すことができている。この傾向は、米国の PMHS 実験でも IV-NIC (R) ・Flexion で傷害との相関が高いことが確認されていることと一致している。

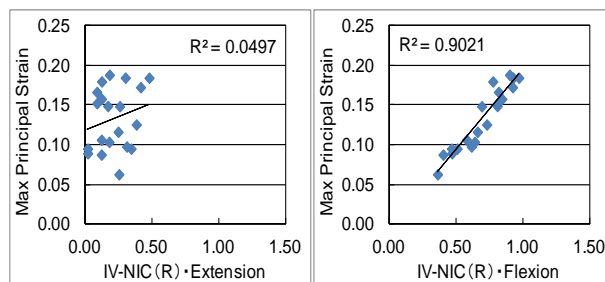


Fig. 3 Relationship between IV-NIC(R) and maximum value of the maximum principal strain

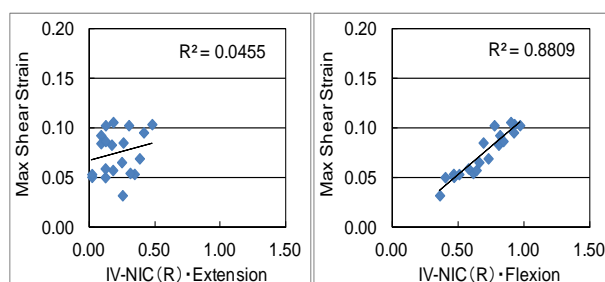


Fig. 4 Relationship between IV-NIC(R) and maximum value of the maximum shear strain

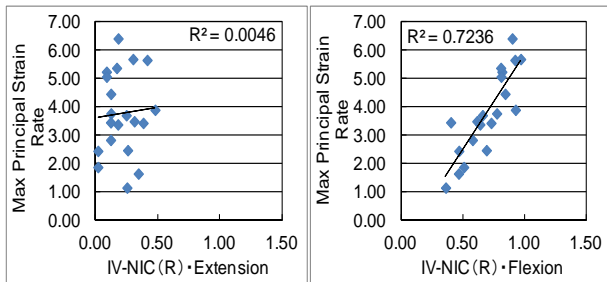


Fig. 5 Relationship between IV-NIC(R) and maximum value of the maximum principal strain rate

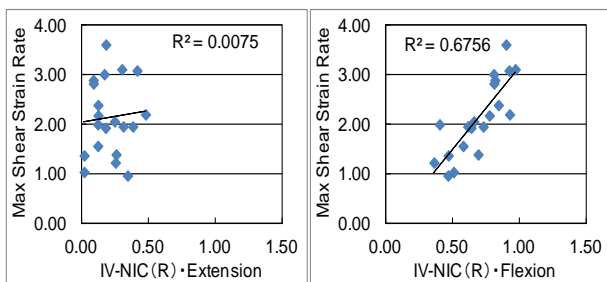
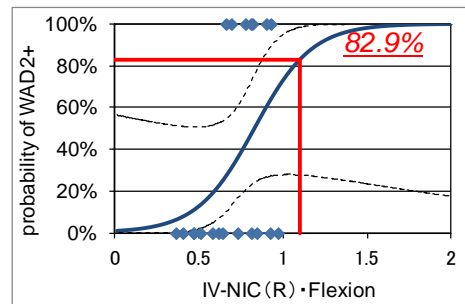


Fig. 6 Relationship between IV-NIC(R) and maximum value of the maximum shear strain rate

4.3 頸部傷害指標における基準値の検討

4.2 節に示した事故再現シミュレーションにおける IV-NIC (R) と頸椎ひずみ・ひずみ速度との相関性の検討結果を踏まえ、動的試験における頸部傷害指標として日本が提案している NIC, ならびに頸部力・モーメントについて、GTR7 として採用すべき基準値の設定について検討した。米国では、AIS1+が発生する 50%の確率において基準値を設定しており、PMHS 実験から得られたリスクカーブでは、AIS1+50%における IV-NIC (R) ・ Flexion の値は「1.1」となっている。そこで、「IV-NIC (R) ・ Flexion = 1.1」に相当する WAD2+の発生確率を算出し、その発生確率を基に、NIC, ならびに頸部力・モーメントの基準値を設定することとした。

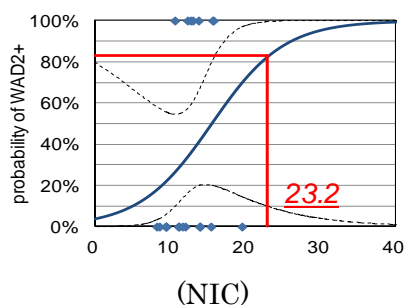
Fig. 7 は、4.2 節の IV-NIC (R) の算出結果を基に作成した WAD2+に関する IV-NIC (R) ・ Flexion のリスクカーブを示したものである。同図より「IV-NIC (R) ・ Flexion = 1.1」、すなわち AIS1+50%に相当する WAD2+の発生確率を求めると「82.9%」となる。この結果を基に、佐藤ら¹⁾が実施した事故再現シミュレーションから導出した各傷害指標に関するリスクカーブにおいて、WAD2+82.9%に相当する傷害値を求めた。



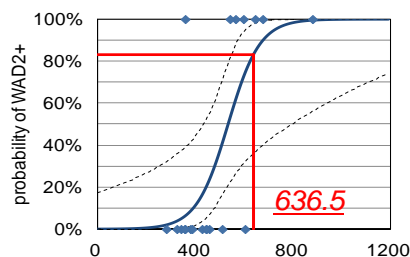
(Flexion)

Fig. 7 Risk curve of IV-NIC Rotation for WAD 2+ probability

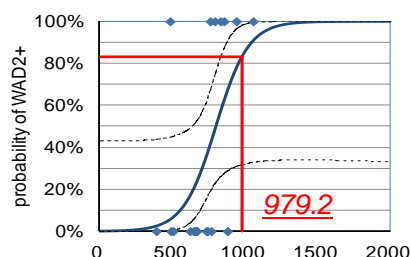
Fig. 8 は動的試験における頸部傷害指標として日本が提案している NIC, ならびに頸部力・モーメントの WAD2+に関するリスクカーブを示したもので、同図に示したリスクカーブから求めた WAD2+82.9%に相当する傷害値を一覧にして Table 7 に示す。これらのリスクカーブと基準値は GTR7 への日本からの提案に活用されている¹²⁾。同表に示すように、UpperNeck-FX と LowerNeck-FX は、同一のリスクカーブを用いて算出しているため、同一の基準値となっている。同様の理由により、UpperNeck-MY と LowerNeck-MY についても、Flexion, Extension とも同一の基準値となっている。また、日本と米国で共通して提案している傷害指標である NIC について、Table 7 に示す事故再現シミュレーションに基づいて算出された基準値 23.2 は、Table 3 に示す PMHS 実験に基づいて算出された基準値 29.7 に対して、やや厳しい基準値となっていることを示している。そのため、本提案を採用することで、日本と米国の両方の頸部傷害指標に関する考え方を踏襲することができ、GTR7 として採用すべき頸部傷害指標とその基準値になり得ると考えられる。



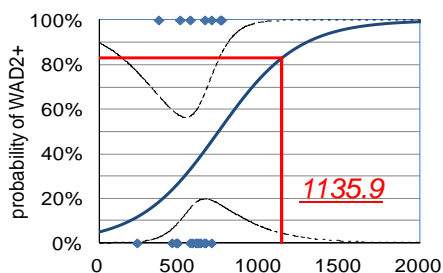
(NIC)



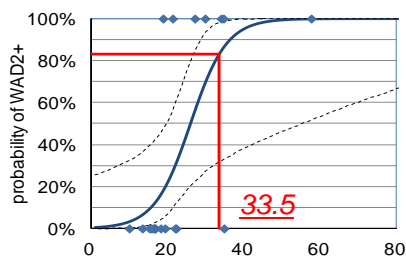
(UpperNeck-FX and LowerNeck -FX - HeadRearward)



(UpperNeck-FZ - Tension)



(LowerNeck-FZ - Tension)



(UpperNeck-MY and LowerNeck-MY - Flexion and Extension)

Fig. 8 Risk curves of Japan Proposal

Table 7 Injury Criteria of WAD2+82.9% Risk

Injury Criteria			WAD2+	
			82.9% Value	(IV-NIC=1.1)
NIC	Max	m^2/s^2	23.2	
Upper Neck	FX	HeadRearward	N	636.5
	FZ	Tension	N	979.2
	MY	Flexion	Nm	33.5
Extension		Nm	33.5	
Lower Neck	FX	HeadRearward	N	636.5
	FZ	Tension	N	1135.9
	MY	Flexion	Nm	33.5
Extension		Nm	33.5	

5. まとめ

本報では、GTR7-Phase2におけるヘッドレストの動的評価試験に採用すべき頸部傷害指標とその基準値について、日本における倫理的配慮に基づき過去に実施された志願者実験の結果や人体有限要素モデルによる事故再現シミュレーションの結果、さらには米国における供試体実験等の結果に基づいた検討によって得られた主な結果は以下の通りである。

- 日本と米国における、頸部傷害評価手法を比較したところ、日本が提案している「頸椎ひずみ・ひずみ速度」と、米国が提案している「IV-NIC (R)」とは、評価指標としての考え方が異なっているものの、追突時の人体頸部の挙動を詳細に解析した結果に基づいているという点は共通であると考えられる。
- 米国が主張している「IV-NIC (R)」について、日本の事故再現シミュレーションの結果からもIV-NIC (R)を算出したところ、米国の提案と同様にFlexion側において、頸椎ひずみ・ひずみ速度との相関関係を見出すことができた。

米国が提案しているAIS1+50%の発生確率における「IV-NIC (R) =1.1」について、日本の事故再現シミュレーションから「IV-NIC (R) =1.1」に相当するWAD2+の発生確率を算出したところ、「82.9%」となっていた。これを基に、動的試験における頸部傷害指標として日本が提案しているNIC、ならびに頸部力・モーメントの基準値について、「WAD2+=82.9%」に相当する値を求めた。

6. おわりに

本報に示した検討結果は、GTR7-Phase2における頸部傷害指標とその基準値に関する議論において、日本からの提案として活用されている。GTR7-Phase2における世界統一基準策定活動は、活動開始から6年以上に渡る期間を経て、ようやく終着点に到達しようとしている。本報における検討結果が基準作成の基礎資料として活用されることにより、将来的に、追突事故における頸部傷害の低減に貢献することができれば幸いである。

7. 謝辞

本研究の推進に際しご協力を頂いた、公益財団法人日本輸送技術協会/自動車基準認証国際化研究センター/ヘッドレストGTR国内対応ワーキンググループ委員、ならびに一般社団法人日本自動車工業会/安全部会/保護装置分科会/後突頸部傷害ワーキンググループ委員の方々に対し、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤房子ほか：被追突時の頸部傷害軽減のための傷害指標と評価基準の提案-志願者実験と事故再現シミュレーションによる解析-, 自動車技術会 2009年秋大会学術講演会前刷集, No137-09, 20095641
- 2) K.Ono et.al: Evaluation Criteria for the Reduction of Minor Neck Injuries during Rear-end Impacts Based on Human Volunteer Experiments and Accident Reconstruction Using Human FE Model Simulations, IRCOBI Conference,(2009)
- 3) Bostrom, et al. : A New Neck Injury Criterion Candidate-Based on Injury Findings in the Cervical Spinal After Experimental Neck Extension Trauma, IRCOBI Conference,(1996)
- 4) J-MLIT/JARI/JAPAN : Proposal for an Injury Parameters / Criteria on the reduction of neck injury from rear-end crashes for the GTR7 (Informal HR-GTR), Informal Group on UN GTR7-11th Meeting in Geneve, GTR7-11-02, (2012)
<https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/5802542/GTR7-11-02.pdf?api=v2>
- 5) Spitzer W.O. et al., Scientific Monograph of Quebec Task Force on Whiplash-Associated Disorder: Redefining "Whiplash" and Its Management, Spine, Vol.20-8S, April 15, p34s-39s (1995)
- 6) T.Ikari et.al : JAPAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM FOR MINOR NECK INJURY PROTECTION IN REAR-ENDCOLLISIONS, 21st ESV Conference, Paper Number 09-0364, (2009)
- 7) Panjabi M. et al. : Neck Injury Criterion Based on Intervertebral Motion and its Evaluation using an Instrumented Neck Dummy, IRCOBI, 1999-13-0012, (1999)
- 8) Yun-S.K et.al : Preliminary PMHS Injury Risk Curves & Potential IARVs in Rear Impact, Informal Group on UN GTR7-9th Meeting in London UK, GTR7-09-06, (2012)
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2012/wp29grsp/GTR7-09-06e.pdf>
- 9) Viano, et al. : Neck Displacements of volunteers, BioRID P3 and Hybrid III in Rear Impacts: Implications to Whiplash Assessment by a Neck Displacement Criterion (NDC), Traffic Injury Prevention, 3:105-116, (2002)
- 10) Panjabi et al. : Evaluation of the intervertebral neck injury criterion using simulated rear impacts, Journal of Biomechanics, 38, 1694-1701, (2005)
- 11) Ivancic et al. : Predicting multiplanar cervical spine injury due to head-turned rear impacts using IV-NIC, Traffic Injury Prevention, 7:264-275, 2006
- 12) JAPAN - JMLIT/JASIC/JARI : Tentative Draft Proposal on Evaluation of Injury Parameters and Injury Risk Curve, a collaborative undertaking between NHTSA and Japan, Part II, Informal Group on UN GTR7-14th Meeting in Geneve, GTR7-14-05, (2013)
<https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/14320309/GTR7-14-05.pdf?api=v2>