

# 低速追突時の後突評価用ダミーの人体忠実性評価<sup>\*1</sup>

—剛体シートと量産車シートによる志願者との比較—

Biofidelity of Rear-Impact Dummies in Low-Speed Rear-End Impact

—Comparison of Rigid Seat and Mass-Production Car Seat with Human Volunteers—

山崎 邦夫<sup>\*2</sup>  
Kunio YAMAZAKI

小野 古志郎<sup>\*3</sup>  
Koshiro ONO

石井 充<sup>\*2</sup>  
Mitsuru ISHII

## 1. はじめに

追突事故により被追突車の乗員に発生する頸部傷害は、発生頻度と後遺障害等の社会的損失の観点から、世界的に重要な問題となっており、被追突車乗員の頸部傷害低減に向けた検討が国際的に進められている<sup>1), 2)</sup>。これらの検討の中で、自動車の頭部後傾抑止装置（以下、「ヘッドレスト」という）の頸部傷害低減性能を評価する方法として、ダミーを用いた動的な試験方法が提案されており<sup>3), 4)</sup>、使用するダミーとしては、後面衝突用ダミーとして開発されたBioRID-II<sup>5)</sup>、RID3D<sup>6)</sup>に加え、前面衝突用ダミーHybrid-III<sup>7)</sup>の利用が検討されている<sup>1)</sup>。これらのダミーのうち、BioRID-II、RID3Dについては、開発段階からさまざまな条件のもとで検証、調査が行われ改良が継続されている状況であるが、それぞれの最新版ダミーの人体忠実性について、同一衝撃条件下での比較に基づく客観的な評価は十分には行われていない。このような現状を踏まえ、本研究では、後面衝突評価への利用が検討されているBioRID-II（version g）、RID3D（version of Dec.2006）、Hybrid-IIIの3種類のダミーについて、志願者実験<sup>8), 9)</sup>と同様のミニスレッド試験を実施し、各ダミーの人体忠実性を評価することを目的とした。

## 2. 試験方法

3種類のダミーの人体忠実性を評価および比較

するため、志願者実験と同様な衝撃条件で、各ダミーに対して以下の2種類の試験を実施した。それぞれの試験で、各ダミーに対して計5回の試験を行った。

### 2.1 減速式スレッド試験

減速式スレッド試験は、傾斜角10度のスロープを持つ長さ4mのレール上を自由滑走する台車にヘッドレストの無い木製リジッドシート（以下、「リジッドシート」という）を固定し、目標速度8km/hで後方に滑走させた台車をダンパで急減速させ、シートに着座させたダミーに衝撃を与えるものである。試験装置の概要をFig. 1に示す。

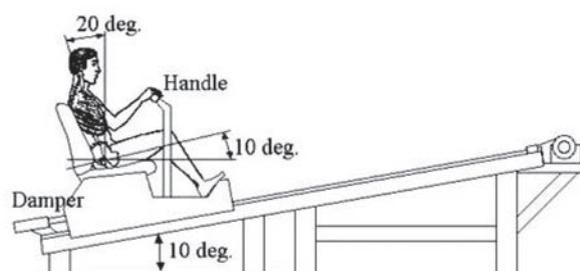


Fig. 1 Ramp type sled

### 2.2 加速式スレッド試験

加速式スレッド試験は、水平なレール上に設置された台車に通常のヘッドレストを装備した量産車シート（以下、「ソフトシート」という）を固定し、台車をカムに連結されたシャフトにより前方に引きつけることにより、シートに着座させたダミーに後突現象と同等の衝撃を与えるものである。試験装置の外観をFig. 2に示す。

\*1 原稿受理 2009年3月16日

\*2 (財)日本自動車研究所 安全研究部

\*3 (財)日本自動車研究所 企画・管理部 博士(工学)

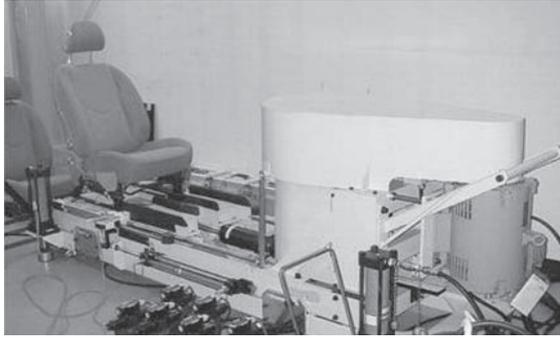


Fig. 2 Horizontal type sled

### 3. 評価方法

ダミーの人体忠実性は、高速度ビデオ解析による外観挙動に関する項目、ならびに、ダミーに搭載されたセンサにより計測される衝撃応答に関する項目で評価した。評価項目の一覧をTable 1に示す。また、外観挙動の評価項目に関しての概念図をFig. 3に、試験における衝撃応答の極性（正出力の方向）をFig. 4に示す。

Table 1 Evaluated parameters

Behavior	HA-NA	Change of head angle with respect to neck angle
	NA-TA	Change of neck angle with respect to T1 angle
	HA-TA	Change of head angle with respect to T1 angle
	T1-X-disp	Change of T1 X coordinate relative to sled
	T1-Z-disp	Change of T1 Z coordinate relative to sled
	Sled-TA	Change of T1 angle with respect to sled plane
Impact response	Head Ax	Head center of gravity acceleration in x direction
	T1 Ax	T1 (First thoracic vertebra) acceleration in x direction
	Upper Neck Fx	Upper neck shear force in x direction (Fx)
	Upper Neck Fz	Upper neck axial force in z direction (Fz)
	Upper Neck My	Upper neck moment about y axis (My)

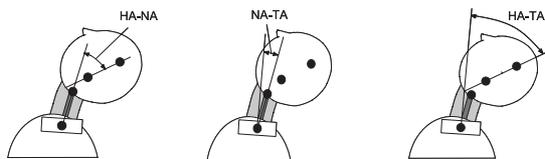


Fig. 3 Evaluated parameters for behavior

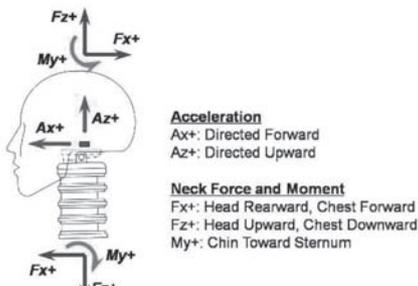


Fig. 4 Polarities of responses

志願者実験について、減速式スレッド試験では同程度の体格の志願者7名による9回の試験結果から<sup>8)</sup>、また、水平式スレッド試験では同程度の体格の志願者6名の試験結果から<sup>9)</sup>、外観挙動および衝撃応答について、平均 (Ave; Average) および標準偏差 (SD; Standard Deviation) が求められている。人体忠実性の評価方法としては、各ダミーの試験結果を志願者の平均応答範囲 (Ave.±SD, 以下、「志願者の応答」という) と比較し、後面衝突用ダミーの特性として重要視される「頭部の胸部に対する相対角度変化」に関して定性的に評価した。また、定量的な評価を行うため下式に示すCVR (Cumulative Variance Ratio) を用い<sup>10)</sup>、志願者の平均応答に対するダミー応答の累積変化量を求めた。

$$CVR = \frac{\sum_{t=Tstart}^{t=Tend} (dummy(t) - volunteer\_ave(t))^2}{\sum_{t=Tstart}^{t=Tend} \max(cor(t) - volunteer\_ave(t))^2}$$

ここで、 $dummy(t)$ ：ダミーの応答、 $volunteer\_ave(t)$ ：志願者の平均応答、 $cor(t)$ ：志願者のコリドーであり、CVRの値が低いほど、人体忠実性が高くなる。CVRの値が5を超える場合は、「相関無し」あるいは「わずかな相関」と判定される。また、複数の評価項目によるCVR値の総合スコア（平均値）を求める際に、一部の評価項目による5以上のスコアが過大評価されないように、CVRの上限値は5に固定される。

### 4. 試験結果

#### 4.1 減速式スレッド試験

##### 1) スレッド加速度

減速式スレッド試験におけるスレッドの加速度波形をFig. 5に示す。同図では各ダミーに対して実施した5回の試験の平均応答を示している。スレッド加速度は搭載したダミーによって、ピーク加速度に若干の差異はあるものの、全体的な波形の形状および持続時間は、志願者とはほぼ同様の応答を示しており、今回のダミーに対する試験は、志願者実験とおおむね同様の衝撃で実施されたことが確認できた。

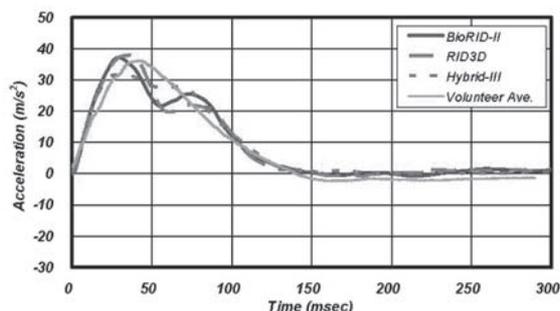


Fig. 5 Sled acceleration (Deceleration sled tests)

## 2) ダミー各部の外観挙動

減速式スレッド試験でのダミー各部の外観挙動（5回の試験の平均応答）をFig. 6～Fig. 8に示す。これら外観挙動においては、HA-NA、NA-TA、HA-TAともに前屈状態を正（+；プラス）、伸展状態を負（-；マイナス）として示している。また、志願者の平均応答範囲を点線で示した。

HA-NA（頭部の頸部に対する相対角度変化）に関しては、志願者の応答が前屈側で約5°～伸展側で-20°と比較的小さい角度変化を示す挙動を示しているが、これに対して、BioRID-IIは前屈挙動のみを示し、RID3Dは前屈後に急激に伸展に転じる挙動を示した。一方、Hybrid-IIIは伸展挙動のみを生じており、志願者とは異なる挙動を示している。

NA-TA（頸部の第一胸椎に対する相対角度変化）については、志願者の応答はわずかな前屈挙動の後、50msec程度から250msec程度で-25°～-45°に達するまで緩やかな伸展挙動を示しているのに対して、3種類のダミーとも伸展挙動を示す点では一致しているものの、その発生状況には差異がある。BioRID-IIは初期に7～8°程度の前屈挙動を示し、100msec程度から伸展に転じているが、伸展状態の挙動は志願者の応答の下限に近い挙動を示している。RID3Dは50msec程度から伸展挙動を示し、140～200msec程度にかけての時間帯はBioRID-IIと同様の挙動を示している。一方、Hybrid-IIIに関しては、50msec程度から伸展挙動を示し、130msec程度でピークに達した後、速やかに前方に戻る挙動を示しており、明らかに志願者の応答と異なる伸展挙動を示している。

HA-TA（頭部の第一胸椎に対する相対角度変化）は、HA-NA、NA-TAを総合した挙動となるが、志願者の応答は初期にわずかな前屈挙動を示した後、250～300msecで-35°～-45°のピークに達す

る緩やかな伸展挙動を示している。これに対し、BioRID-IIは、初期の前屈挙動および250msec程度までの伸展挙動に関して、志願者の応答に良く一致している。RID3DとHybrid-IIIでは、初期の前屈挙動がほとんど無い上、Hybrid-IIIでは伸展が-30°程度までしか達しないため、志願者の応答とは明らかに異なっている。

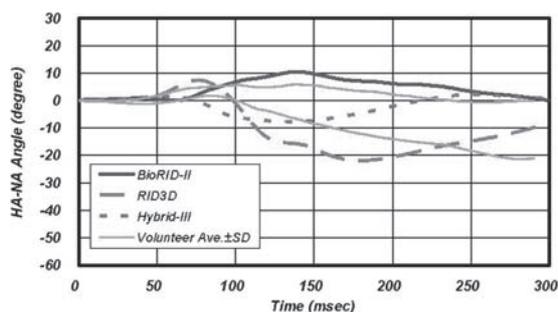


Fig. 6 Change of head angle with respect to neck angle (Deceleration sled tests) : HA-NA

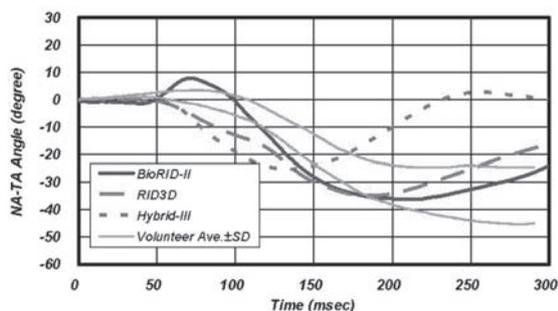


Fig. 7 Change of neck angle with respect to T1 angle (Deceleration sled tests) : NA-TA

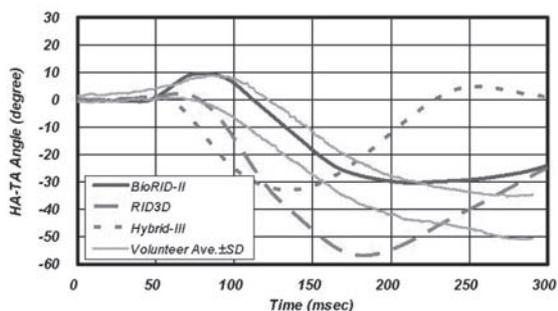


Fig. 8 Change of head angle with respect to T1 angle (Deceleration sled tests) : HA-TA

## 4.2 加速式スレッド試験

### 1) スレッド加速度

加速式スレッド試験におけるスレッド加速度をFig. 9に示す。同図は各ダミーとも5回の試験の平均応答を示している。スレッド加速度は、スレ

ドが加速から減速に転じる120msec付近以降で、搭載したダミーにより差異が生じているものの、それ以前の波形は志願者試験と良く一致しており、ダミーに対する試験が、志願者実験とおおむね同様の衝撃で実施されたことが確認できた。

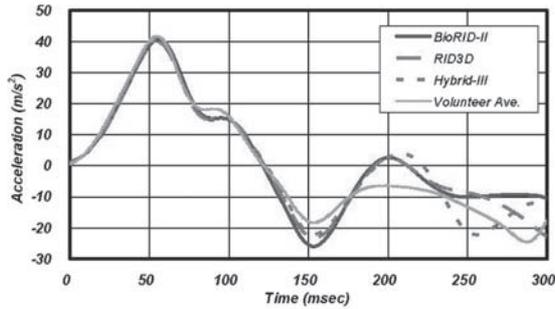


Fig. 9 Sled acceleration (Acceleration sled tests)

2) ダミー各部の外観挙動

加速式スレッド試験での頭部後面とヘッドレスト前面との接触時間について整理した結果をTable 2に示す。また、ダミー各部の外観挙動(5回の試験の平均応答)をFig. 10~Fig. 12に示す。

HA-NAについては、志願者の挙動が100~150msec程度で前屈挙動を示した後、伸展に転じているのに対して、BioRID-IIとRID3Dはピーク値の発生タイミングが志願者に比べて20~30msec程度遅いものの、志願者の応答の下限に相当する前屈挙動の後、伸展に転じている。頭部とヘッドレストの接触時間が志願者より20msec程度遅れていることを考慮すれば、HA-NAに関する両ダミーの挙動は志願者の挙動に非常に近いものと思われる。一方、Hybrid-IIIについては、他のダミーと異なり、全く前屈挙動を示さない結果となっている。

NA-TAについては、志願者の挙動は頭部とヘッドレストの接触以降、時間の経過とともに角度が大きくなる前屈挙動を示している。これに対して、BioRID-IIは160msec程度でわずかな伸展を生じるものの、おおむね前屈挙動を示し、頭部とヘッドレストの接触時間の遅れを考慮すれば、HA-NAの場合と同様に志願者に近い挙動になるものと思われる。RID3Dは頭部とヘッドレストが接触する前の90msec程度から伸展挙動を見せ、160msec程度で前屈挙動に転じるものの再び伸展挙動を生じている。また、Hybrid-IIIは、RID3Dと同様に頭部がヘッドレストと接触する前から伸展挙動を示して

おり、ダミー背面がシートバックから完全に離れた240msec以降に前屈挙動に転じている。

HA-TAについては、志願者は頭部とヘッドレストの接触直後に屈曲挙動を示した後、おおむね一定の屈曲状態を維持している。これに対し、BioRID-IIは、角度自体は志願者より小さいものの、屈曲状態を維持する点で志願者に近い傾向を示し、頭部とヘッドレストの接触時間の遅れを考慮すれば、HA-NA、NA-TAと同様に志願者に近い挙動になる。RID3Dについては、NA-TAが伸展挙動を示していることによる影響で、BioRID-IIに比べて若干遅れて前屈挙動が生じ、その後、伸展に転じる挙動を示している。Hybrid-IIIは、頭部がヘッドレストと接触する前から伸展挙動のみを示しており、志願者と正反対の挙動を示している。

Table 2 Head restraint contact time

	Unit : msec			
	Volunteer n=6	BioRID-II n=5	RID3D n=5	Hybrid-III n=5
Earliest	74	112	114	124
Latest	112	116	120	128
Average	94	114	117	126
S.D.	14.2	1.7	2.3	2.0

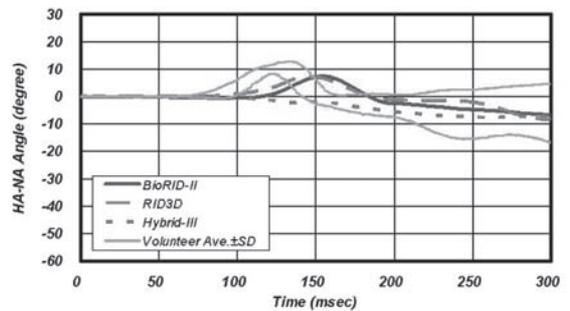


Fig. 10 Change of head angle with respect to neck angle (Acceleration sled tests) : HA-NA

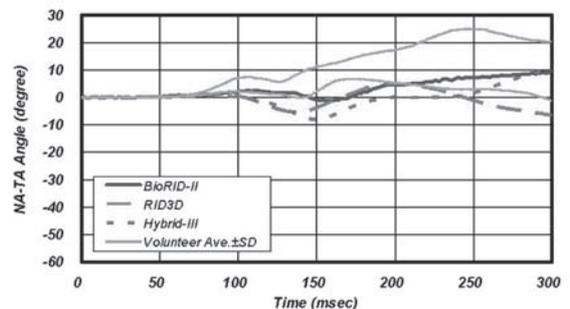


Fig. 11 Change of neck angle with respect to T1 angle (Acceleration sled tests) : NA-TA

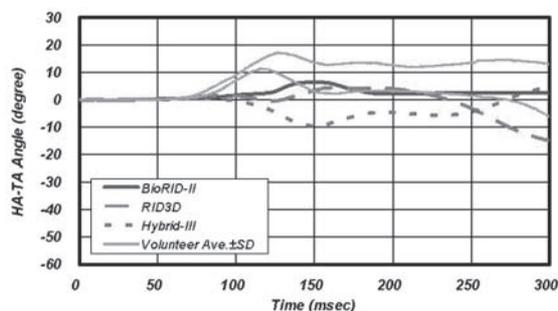


Fig. 12 Change of head angle with respect to T1 angle (Acceleration sled tests) : HA-TA

### 4.3 CVRによるダミーの人体忠実性の評価

ダミーの人体忠実性を定量的に評価するため、評価項目ごとにCVRの値を求めた。なお、CVRは時間に対する積分値となるため、計算区間に依存する。そこで、計算終了時間は150msec（志願者実験における加速度、荷重のピーク後まで）ならびに250msec（外観挙動のピーク後まで）の2通りとした。計算結果をTable 3およびTable 4に示す。

Table 3 CVR (Deceleration sled tests)

[150msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III	[250msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III
HA-NA	2.8	5	2.8	HA-NA	2.4	3.7	1.0
NA-TA	2.9	5	5	NA-TA	1.1	2.0	5
HA-TA	0.4	5	5	HA-TA	0.6	5	5
T1-X-disp	1.5	0.8	5	T1-X-disp	1.2	0.8	5
T1-Z-disp	1.2	1.7	5	T1-Z-disp	1.1	1.5	4.3
Sled-TA	3.0	4.8	5	Sled-TA	1.8	3.1	5
Average	2.0	3.7	4.6	Average	1.4	2.7	4.2

[150msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III	[250msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III
HeadAx	0.4	0.8	3.2	HeadAx	5	4.6	2.4
T1Ax	5	5	5	T1Ax	5	4.1	5
Upper neck Fx	5	5	5	Upper neck Fx	4.6	3.4	5
Upper neck Fz	2.8	2.7	4.0	Upper neck Fz	2.5	2.5	3.3
Upper neck My	5	5	5	Upper neck My	5	5	5
Average	3.6	3.7	4.4	Average	4.4	3.9	4.1

Table 4 CVR (Acceleration sled tests)

[150msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III	[250msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III
HA-NA	2.8	1.5	5	HA-NA	1.0	0.8	1.1
NA-TA	1.0	5	5	NA-TA	1.2	2.1	3.6
HA-TA	5	5	5	HA-TA	1.8	2.8	5
T1-X-disp	1.2	3.1	1.0	T1-X-disp	1.0	0.3	0.1
T1-Z-disp	0.3	1.0	3.0	T1-Z-disp	3.1	4.3	5
Sled-TA	1.6	5	5	Sled-TA	0.2	0.8	1.4
Average	2.0	3.4	4.0	Average	1.4	1.9	2.7

[150msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III	[250msec]	BioRID-II	RID3D	Hybrid-III
HeadAx	5	5	4.0	HeadAx	5	4.1	5
T1Ax	1.8	0.5	1.7	T1Ax	2.1	1.7	3.1
Upper neck Fx	0.7	1.2	2.8	Upper neck Fx	0.7	1.3	3.0
Upper neck Fz	4.6	0.6	2.2	Upper neck Fz	3.3	0.9	2.9
Upper neck My	1.7	1.7	2.6	Upper neck My	1.8	1.7	2.6
Average	2.8	1.8	2.6	Average	2.6	1.9	3.3

外観挙動の評価に関しては、試験の種類や積分区間にかかわらず、BioRID-IIが最も良好な値を示

した。一方、衝撃応答の評価に関しては、減速式スレッドテストで積分区間が150msecの場合のみBioRID-IIが最も良好で、他はRID3Dが最も良好であった。

以上の結果から、外観挙動ならびに衝撃応答の点でダミーの人体忠実度を比較すると、BioRID-IIがRID3Dよりもわずかに良いことが分かった。Hybrid-IIIについては、特に外観挙動について志願者と異なる応答を示していた。

### 5. 考察

BioRID-IIとRID3Dは共に後面衝突用ダミーとして開発されたものであるが、外観挙動に関しては二つのダミーで差が見られた。BioRID-IIではHA-NAならびにNA-TAの両方で志願者に見られる衝突初期の屈曲挙動が観察されたのに対し、RID3DではNA-TAにおいて衝突初期の屈曲挙動が見られなかった。

この差の理由としては、二つのダミー構造上の違いが考えられる。Fig. 13 (a) に示すように、BioRID-IIは人体と同じ数の椎体（頸椎7個、胸椎12個、腰椎5個）を持つ脊椎構造を有しており、脊椎全体にわたり柔軟性を持っている。一方、RID3Dは頸部と腰部のみに柔軟性を有しており、胸部および下頸部と胸部との結合部には柔軟性は無い。

したがって、RID3DにおけるNA-TAの応答の人体忠実度を向上させるためには下頸部と胸部との接合部付近における柔軟性を向上させる必要があると考えられる。



(a) BioRID-II (b) RID3D

Fig. 13 Spine structure of dummies

### 6. まとめ

BioRID-IIは、後面衝突用ダミーの特性として重要視される「頭部の胸部に対する相対角度変化」

に関して、減速式スレッド試験においては志願者の応答にほぼ一致する挙動を示し、加速式スレッド試験においても、頭部とヘッドレストの接触時間の遅れを考慮すると、志願者と非常に近い応答を示すことが分かった。また、他の外観挙動に関する評価項目に関しても、RID3DやHybrid-IIIよりも志願者に近い応答を示すことが分かった。この要因は、BioRID-IIの多数の椎体をピンジョイントで結合する柔軟な脊椎構造による結果と考えられる。RID3Dに関しては、減速式スレッド試験における各部の相対角度変化などから、頸部の柔軟性は認められた。しかしながら、頸部下部和上胸部での柔軟性に欠けるため、変形が上頸部に集中する傾向が見られた。Hybrid-IIIに関しては、志願者で観察される衝突初期の屈曲挙動が全く見られない上、加速式スレッド試験のHA-TAでは志願者と反対の挙動を示すなど、他のダミーに比べて人体忠実性に劣ることが明らかとなった。

#### 謝 辞

本研究は国土交通省自動車交通局技術企画課からの受託研究事業として実施されたものであり、関係者に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) ISO : International Standard-ISO 17373 ; Road Vehicles-Sled Test Procedure for Evaluating Occupant Head and Neck Interactions with Seat/Head Restraint Designs in Low-Speed Rear-End Impact, (2005)
- 2) D Hynd et al. : Challenges in the Development of a Regulatory Test Procedure for Neck Protection in Rear Impacts : Status of the EEVC WG20 and WG12 Joint Activity, 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), (2005)
- 3) M Avery et al. : Dynamic testing of vehicles seats to reduce whiplash injury risk : an international protocol, International Conference of Crashworthiness (ICRASH), (2006)
- 4) Klaus Bortenschlager et al. : Review of Existing Injury Criteria and Their Tolerance Limits for Whiplash Injuries with Respect to Testing Experience and Rating Systems, 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), (2007)
- 5) Johan Davidsson : BioRID-II Final Report, Chalmers University of Technology, (1999)
- 6) Hans Cappon et al. : Whiplash Injuries, Not Only a Problem in Rear-End Impact, 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), (2003)
- 7) J. King Foster et al. : Hybrid III-a biomechanically-based crash test dummy, 21st Stapp Car Crash Conference, (1977)
- 8) Johan Davidsson et al. : A comparison between volunteer, BioRID P3 and Hybrid III performance in rear impacts, International Research Council On the Biomechanics of Impact (IRCOBI), (1999)
- 9) Jonas A. Pramudita et al. : Head/Neck/Torso Behavior and Cervical Vertebral Motion of Human Volunteer during Low Speed Rear Impact : Mini-sled Tests with Mass Production Car Seat, International Research Council On the Biomechanics of Impact (IRCOBI), (2007)
- 10) Philippens, M. et al. : Comparison of the Rear Impact Biofidelity of BioRID II and RID2 : 46th Stapp Car Crash Conference, (2002)