

1. はじめに

我が国の交通事故死者数は、1970年をピークに年々減少し、1979年には1970年当時の半分になった。ところが、その後増加に転じ、1989年には11,000人を超え、1975年以降の15年間で最悪の状態となった。政府は非常事態宣言を出し、死亡事故防止のため、全省庁あげて取り組むことを決めた。しかし、事故はいっこうに減りそうにない。

警察庁が発表する事故の状態別死者数を見ると、過去20年余りの間にさまざまな変化が生じている。とりわけ特徴的であるのは、歩行中の死者が年々減少しているのに対し、自動車乗車中の死者が着実に増加していることであろう。

このようないわば「棺桶」型の事故は、特に米国で著しく、1986年の全死者数約46,000人のうち73%をも占めている¹⁾。このことは、自動車の安全性に対する法的規制が厳しい理由のひとつとも言えよう。

自動車の安全性を技術的にとらえると、予防安全 (Active Safety) と衝突安全 (Passive Safety) とに大別できる。予防安全とは、運転環境を改めたり車両性能を向上させたりすることにより、事故を未然に防ぐ技術である。一方、衝突安全とは、万が一事故に遭遇した場合に、乗員の傷害をできるだけ最小限に押さえようとする技術である。

衝突時に乗員を保護する手段としては、シートベルトやエアバッグなどの拘束装置が挙げられる。また、それ以外には、衝突エネルギーを効率よく吸収して乗員の生存空間を確保するクラッシュブル

・ボディがある。開発されたこれらの手段の有効性を確認する場合、人間の代用物として、衝突実験用のダミーが用いられている。一方、傷害のメカニズムを解明したり、耐性を究明したりする場合には、人間の死体や動物が用いられている。

人間の衝撃耐性の定量化に主眼が置かれているこの種の研究に関して、欧米ではすでに50年以上の蓄積がある。国際的な研究発表ならびに討議の場としては、Stapp Car Crash Conf., AAAM (Assoc. for the Advancement of Automotive Medicine), ESV (Int. Tech. Conf. on Experimental Safety Vehicles), IRCOBI (Int. Research Council on Biokinetics of Impacts) などがある。ここで得られた成果は、自動車の衝突時の乗員保護性能の向上や各国の自動車安全基準の制定などに寄与している。

本稿では、まず人体の衝撃耐性を確立する手法を簡単に説明し、衝突実験用のダミーについて触れる。さらに、実際の事故における顔面の傷害発生状況を知り、傷害耐性のうちの特に顔面骨の破壊荷重について述べ、ダミーを用いた顔面の衝突傷害の測定法に関して研究の経緯を紹介する。

2. 人体耐性値の確立方法

自動車の乗員保護性能を把握し、かつその向上を図るには、衝撃に対する人体の耐性を知ることがまず重要である。

人体の耐性値を確立する方法としては、志願者による人体実験、死体実験、動物実験、実際の事故における死傷者の臨床観察、数学モ

キーワード 自動車, 衝突安全, 人体, 傷害, 耐性, 顔面, ダミー, 荷重計, 交通事故

デル, などが挙げられる^{2, 3)}。以下, それぞれの特徴について簡単に説明する。

2.1 志願者による人体実験

志願者を被験者とした実験は, 人道上限られた範囲でしか実施できない。そのため, 被験者が痛みや不快感を感じるまで徐々に力を加えていく方法がとられている。したがって, 一般的には, かなり低いレベルの傷害値しか得られない。

2.2 死体実験

骨格損傷が生じるまで順次衝撃値をあげて実験することにより, 傷害しきい値 (耐性値) を得ることができる。しかし, 死体は生体組織でないため, 軟組織や臓器の傷害については推論によるしかない。

2.3 動物実験

脳や器官の生理的反応を含めて衝撃の影響を調べる場合には, 動物が用いられる。ただし, 脊椎骨の数や, 腰部, 胸部の曲がり方が人間と異なるため, 得られたデータが必ずしも適用できるとは限らない。

2.4 死傷者の臨床観察

発生した自動車事故において事故原因と乗員の傷害との関係が明確になれば, 耐性値を確立するうえで有益な情報となる。しかし, 衝突時の物理特性を有効に記録する方法がないため, 両者の相関を言及するには限界がある。

2.5 数学モデル

数学モデルによる乗員挙動のシミュレーション解析は, 特に拘束装置の性能を検討する上で有効な手段である。しかし, モデルの確認が人間ではなくてダミーによる実験に限定されているため, 人体の動的挙動をシミュレートするには限界がある。

米国運輸省の全米道路交通安全庁 (NHTSA; Natl. Highway Traffic Safety Administration) は, 上述の各実験で得られた耐性値をもとに連邦自動車安全基準 (FMVSS; Federal Motor Vehicle Safety Standard) を制定し, 販売されるすべての車種に衝突試験を義務づけている。その規定 (FMVSS208) は, 衝突速度30mile/h (50km/h) で正面バリア, 左右偏角バリア, ロールオーバ, および20mile/h (32km/h) で左右側面バリアの衝突

Table 1 Current FMVSS 208 injury criteria.

Criteria	Test device	
	Hybrid II	Hybrid III
Head : HIC* ≤1000	○	○
Chest : Accel. ≤60G	○	○
Femur : Force ≤2250lb.	○	○
Chest : Comp. ≤ 3 in.	—	○

*Head Injury Criterion

$$= \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \dots\dots\dots(1)$$

a = A resultant head acceleration

(t₂ - t₁) ≤ 36ms

t₂, t₁; Selected so as to maximize (1)

試験を行ったとき, ダミーに生じる傷害値が, Table 1に示す傷害基準値 (Injury Criteria) を満足することを要求している^{4, 5)}。さらに, NHTSAは, 消費者保護を目的として新型車が出るたびに上述の基準よりも5mile速い35mile/h (56km/h) で同じ衝突試験を行い, その結果をユーザーに公表している。この試験は, NCAP (New Car Assessment Program) という名称で知られている。

3. 衝突実験用ダミー

初期のダミーは, 1920年代から1940年代にかけて米国で航空機の非常脱出用シートやパラシュートの性能試験に用いられていた。ただし, 当時はSand-bagと呼ばれ, 人体の特性はほとんど模擬されていなかった⁶⁾。

ダミーが自動車の安全性を評価するために使われるようになったのは, 1950年代である。しかし, 各国が独自の人体計測データに基づいて作製していたため, 構造や諸元は統一されていなかった。その後, 商業ベースでの開発などさまざまな変遷を経て, 現在では, Hybrid IIとHybrid IIIとが正面衝突実験用ダミーとして定着している⁷⁾。Hybrid IIは, 前述のNHTSAにより, 1974年にその仕様と性能とが新しく49CFR-Part572の規格として明記されたダミーである。したがって, Hybrid IIダミーはPart572ダミーとも呼ばれている。このダミーの基本は, Sierra社製292-1050型ダミーの頭

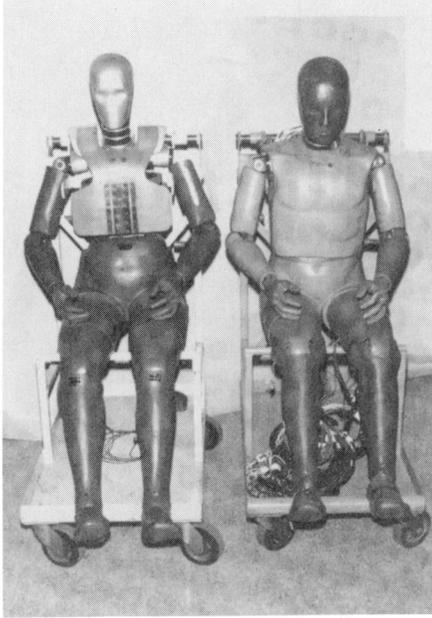


Fig. 1 The Hybrid III test dummy.

部とGM製ラバー頸部とARL社製胴体VIP50Aを合体させたものである⁶⁾。一方、Hybrid IIIは人体との類似性をより向上させるため、頸椎（リング形状）の前後傾特性やショルダー部の補強などに特徴があり、1986年に承認された。Hybrid IIIダミーの外観をFig. 1⁵⁾に示す。両ダミーの計測器としての相違をFig. 2⁴⁾に示す。Hybrid IIIダミーの頭部と胸部には、その重心位置に、3軸方向の加速度を測定する加速度計が取り付けられている。さらに、肋骨のたわみを求めるため、背骨と胸骨の間の変位を測定する変位計も埋め込まれている。また、大腿骨には、軸方向の荷重を測定する荷重計が埋め込まれている。衝突実験でダミーに発生した加速度などはデータ処理され、各部位の傷害値として算出される。

ダミーに対する要求特性としては、これを反復性（Repeatability）と再生産性（Reproducibility）とに分けて議論されることが多い。反復性とはダミー個体の繰り返し反復性であり、同一条件で試験すれば、いつでも、どこでも同じ結果が得られることを示す。再生産性とは、ダミー個体間の再

Hybrid II		Hybrid III	
① Head acceleration	3	① Head acceleration	3
② Chest acceleration	3	② Neck moment	3
③ Femur force	2	③ Chest acceleration	3
		④ Chest deflection	1
		⑤ Lumbar acceleration	3
		⑥ Femur force	2
		⑦ Knee force	4
		⑧ Knee deflection	2
		⑨ Upper leg force	4
		⑩ Lower leg force	6
Total	8	Total	31

Fig. 2 Measuring location and number of channel on dummy.

現性を意味しており、使用するダミーが替わっても同じ結果が得られることを示す⁶⁾。前述の米国の安全基準FMVSS208は、これまでのFMVSSの各要件が主に車両構成部品やシステムの性能を規定していたのに対し、ダミーの傷害値を規定したことに大きな特徴がある。このことは、ダミーが単なる計測器ではなくて、車両や拘束装置の評価のための計測器として使用されることを意味している。したがって、ダミー各部に生じる加速度や荷重の信頼性が車両の評価結果を大きく左右することになり、上述の反復性と再生産性とが極めて重要となっている。なお、FMVSS208の評価に用いるダミーとしては、Hybrid IIとHybrid IIIのどちらを使用してもよいことになっている。

4. 傷害尺度

負傷者の傷害程度を臨症的に診断・評価する場合、軽傷から重篤もしくは死亡までを何段階かにわけて記述できると便利である。特に衝突事故調

査データを集計して、事故の規模と傷害との相関をみる場合には不可欠である。

現在、世界的にも通用し実用性も高い尺度は、AIS (Abbreviated Injury Scale ; 略式傷害尺度) である⁸⁾。これは、1971年、米国医師会、米国自動車医学会、米国自動車技術会からなる人体傷害スケール研究連合協議会の主催により、初めて公開されたものである。このAIS-1971は、最初は極めて初歩的なスケールであったが、1974年、1975年と改正され、1976年には200余りの損傷を集録した辞書が加えられマニュアル化された。さらにその後も改訂が繰り返され、現在に至っている。

AISでは、損傷程度が1から6までのポイントに区分されている。すなわち、1 ; Minor (軽傷)、2 ; Moderate (中等傷)、3 ; Serious (重傷)、4 ; Severe (重篤)、5 ; Critical (瀕死)、6 ; Maximum injury virtually unsurvivable (最も重い場合で、実質的に救命しえない場合) である。また、身体は、頭部、顔面、頸部、胸部、腹部、脊柱、上肢、下肢、外皮に区分され、それぞれについて上述の傷害程度が定義されている。例えば、顔面傷害に関するAISでは、眼瞼、角膜などの表圧性損傷、変位のない鼻骨折、歯牙の骨折がAIS - 1、角膜虹彩の通挫創、変位のない顔面骨骨折、変位のある鼻骨折がAIS - 2、さらに、眼球または視神経の剥離損傷、開放性または変位のある顔面骨骨折あるいは眼窩部骨折がAIS - 3で、それ以上のスケールに該当する傷害はない。

5. 顔面傷害発生状況

実際の衝突事故における顔面での傷害発生状況はどうであろうか。ここでは、拘束ドライバーがステアリング・ホイールから受けた顔面傷害を例に概観を試みる。

Zubyら⁹⁾は、全米事故抽出調査 (NASS ; Natl. Accident Sampling System) が1981年から1985年にかけて集録した56,800件の事故を解析した。その結果、傷害発生部位の内訳は、26%が下顎、21%が鼻、17%が前頭、12%が眼、11%が上顎、7%が口、6%が頬骨および頬骨弓である、被衝撃部位は、48%がリム部、19%がハブ・スポーク部、6%がリムとスポークとの結合部、残り27

%が不明である、傷害タイプのうち、35%が裂傷、34%が挫傷、20%が骨折、7%が擦過傷、3%が脱臼、1%が裂離である、AIS値は、92%が1、5%が2、3%が3のレベルであることがわかった。

以上の解析結果から、顔面における傷害が致命的となるケ - スは非常に少ないことが推察される。しかし、顔面は人体のうちでも特に外観上重要な部位と考えられる。そのため、顔面の衝撃傷害耐性に関する研究も重要であるとされている。

6. 顔面の衝撃傷害耐性

顔面の衝撃傷害は、軟組織の傷害と顔面骨の損傷とに分類できる。

本章では、傷害に関するこれまでの主な研究例を紹介する。特に、顔面骨については各部の骨折荷重に重点を置く。

6.1 軟組織傷害

顔の軟組織傷害は、通常は皮膚の裂傷である。軟組織傷害に関する大部分の研究は、自動車のウインドシールドと関係が深い。

Patrickら¹⁰⁾は、事故の際の乗員と室内部品との関係について具体例を挙げ、顔面傷害の原因と予防について述べている。そのなかで、車両側の一対策として、フロントガラスの貫通抵抗を増加させることを提案している。さらに、彼ら¹¹⁾は、合わせガラスの中間層であるポリビニルブチラルの厚さを標準 (15mil 0.4mm) の2倍にするなどの改良を加え、その効果を死体実験により確認している。

人体各部の皮膚の静的な応力 - ひずみ関係、ヤング率、引張り強さなどの機械的性質に関しては、「Handbook of Human Tolerance」¹²⁾に多数記述されている。一方、衝撃傷害は、動的な現象であり、しかも皮膚のような粘弾性材料は負荷速度に敏感である。そのため、静的な試験に加えて動的な試験も試みられている。

Rieserら¹³⁾は、人工皮膚の開発を目標に、各種材料の静的および動的切断能力を比較した。切断力が大きすぎるシャモア (セーム皮) やポリビニルクロライドよりも、RTVシリコン・ゴムの方がより人体の皮膚に近いことを報告している。なお、

Table 2 Summary of tolerance data for facial bones.

Facial bone	Impact surface	Fracture force (lb.)
Frontal bone	Flat	1,338
Frontal bone	8 in. radius hemisphere	1,390
Frontal bone	3 in. radius hemisphere	1,035
Frontal bone	1 in. radius cyl.-saggital plane	1,960
Frontal bone	1 in. radius cyl.-perp. to saggital plane	1,265
Frontal bone	5/16 in. radius cyl.-perp. to saggital plane	1,250
Frontal bone	Flat-supraorbital ridge	1,410
Zygoma	Flat-1 in. square	392
Zygoma	Flat-5.2 in. square	505
Zygomatic arch	Flat	320
Maxilla	Flat	245
Mandible	Flat-chin	620
Mandible	Flat-lateral	431

ここで試験された1/16in. (1.6mm) 厚のシリコン・ゴムには、切り欠き感受性を向上させるため、0.5重量%の人毛が混合されている。

Gaddら¹⁴⁾は、未防腐処理死体の前額皮と頭皮を用いて、重錘落下試験を実施し、ガラスと金属のインパクトによる衝撃力、エッジ径、衝撃の方向を変えて、裂傷の長さや深さを調べた。また、一連の動的圧縮試験を実施し、皮膚の中で頭皮が最も衝突に対して抵抗力があることを確認した。

Leungら¹⁵⁾も、ダミー顔面の模擬皮膚の開発に役立っているため、4人の生体および未防腐処理死体の乳房や腹部から皮膚試験片を取り出し、衝撃時における裂傷特性に及ぼす諸因子の影響を把握しようとした。彼らは、裂傷抵抗というパラメータを導入し、衝撃速度の減少、および年齢の増加に伴って裂傷抵抗が増加することを見いだした。また、皮膚のランゲル線*1に平行な方向の裂傷抵抗は、常に垂直な方向の値より小さいことも見いだした。そして、このことから、模擬皮膚の裂傷抵抗は、ランゲル線に平行な方向の人体皮膚に関する実験結果や統計結果に基づいて研究されるべきであると主張している。

6.2 顔面骨の耐性

顔面骨の衝撃耐性は、Hodgsonら¹⁶⁻¹⁹⁾、Nahum

* 1 ; 皮膚の正常割線

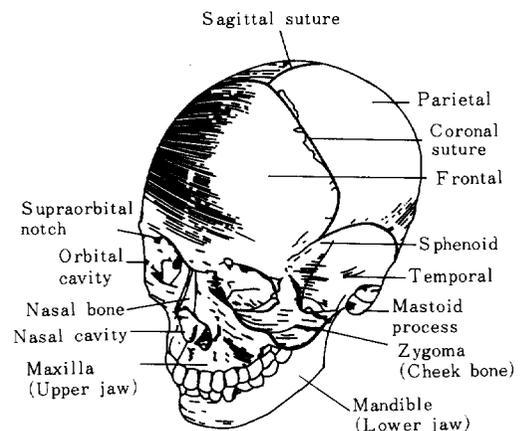


Fig. 3 The skull-oblique view.

ら²⁰⁾、Schneiderら²¹⁾により調査された。彼らのデータは、「Handbook of Human Tolerance」¹²⁾に各部位別に収録されている。ここでは、それぞれの顔面骨の平均破壊荷重を引用し、概説する (Table 2)。衝撃試験は、いずれの場合も、インパクトを死体顔面に当てる方法である。一方、死体の死因、年齢、性別、頭皮の有無などはそろっておらず、まちまちである。参考のため、頭蓋骨各部の名称をFig. 3⁵⁾に示す。

平面インパクトを用いた衝突で前頭骨が骨折する平均荷重は、1338lb.(607kg)となる。これは、

Nahumらによって示された臨床的に意味のある1100lb. (499kg)および最小耐性限界である900lb. (408kg)とよく一致している。

半径8in. (203mm)の半球による前頭骨の平均骨折荷重は、1390lb. (631kg)で、平面インパクトによる結果とあまり変わらない。半径3in. (76.2mm)の半球では、骨折荷重は1035lb. (469kg)となって減少する。

半径1in. (25.4mm)の円柱を用い、前頭の中心で矢状 (Sagittal^{*2}) 面に平行に衝突させた場合は1960lb. (889kg)となり、平均骨折荷重は最高値を示す。これは、前頭骨での接触が矢状方向に沿って比較的平らであることから説明できる。円柱の衝突面を矢状面に垂直、すなわち眉毛に平行な方向とした場合は、骨折荷重は1265lb. (574kg)となって減少する。

インパクトの曲率半径をステアリングホイールの半径にほぼ近い5/16in. (7.94mm)とし、矢状面に垂直に衝突させた場合は、平均骨折荷重は1250 lb. (567kg)であった。衝突面が狭くても、骨折荷重は影響を受けなかった。しかし、頭蓋骨の骨折様式は影響を受け、衝突面が広い場合は線状であったのが、狭い場合は60%の発生率で楕円状 (陥没) であった。

頬骨の平均骨折荷重は392lb. (178kg)となる。この値は、Gaddらが、臨床上意味があるとしている225lb. (102kg)よりかなり上である。作用面積が1in.² (6.45cm²)から5.2in.² (33.6cm²)に増加すると、平均骨折荷重は505lb. (229kg)となった。

上顎骨は顔面骨の中で最も弱い骨で、平均骨折荷重は245lb. (111kg)である。

下顎骨を前後衝突させた時の平均骨折荷重は620lb. (281kg)である。しかし、打撃部位が側面に移されると、平均骨折荷重は431lb. (196kg)と低下する。この変化は、衝突限界耐性において、骨の構造が主要な役割を果たすことを示している。

本節では、各研究者が部位別に得た骨折荷重について、それらを単純に算術平均した値を示した。しかし、個々の値はかなりばらばらついているのが実状である。現在では、研究結果を考慮し、顔面骨

Table 3 Facial impact tolerance of cadaver heads (Minimum value).

Bone	Force (lb.)	Force (kN)	Force (kg)
Mandible (A-P)	400	1.78	181
Mandible (Lateral)	200	0.89	91
Maxilla	150	0.66	68
Zygomatic arch	200	0.89	91
Frontal	900	4.00	408
Zygomatic areas	200	0.89	91

各部の最小耐性値はTable 3のように考えられている^{2,2)}。

7. 顔面の衝撃傷害応答

顔面衝撃に関するこれまでの生体工学的研究では、前章で述べたように、主に個々の骨の耐性値 (破壊荷重) が取り上げられてきた。同じ衝突実験であっても、顔全体としての生体力学的応答、すなわち力 - 変形挙動や力 - 時間挙動が着目され始めたのは、ごく最近である。

Nyquistら^{2,3)}は、直径25mmのバーをインパクトに取り付け、11体の未防腐処理死体の鼻を衝撃した。全死体で鼻骨の破壊が生じ、さらに、頬骨、上顎骨などへ移行している場合もあった。なお、その場合の最大荷重のしきい値は約3kN (306kg)であった。また、インパクトおよび死体後頭部で計測された最大加速度とそれぞれの質量とが比較・検討された。その結果、死体頭部の加速度が小さすぎることから、死体頭部を剛体力学的に取り扱うことには無理があると判断された。さらにこのことをもとに、彼らは、現在用いているダミーの顔面をもっと変形しやすいものとする必要があると主張している。

Allsopら^{2,4)}は、15死体の前頭骨、頬骨あるいは上顎骨の力 - 変形履歴を求め、Hybrid IIIダミー顔面の場合と比較した。インパクトの外観をFig. 4に示す。本インパクトは、18個の小型の荷重計から成りたっている。所定の高さから落下させることにより得られる衝撃荷重は、直径20mmの半円柱状のディスクと接合した鋼製棒を介して計測され

*2 ; Fig. 3を参照のこと

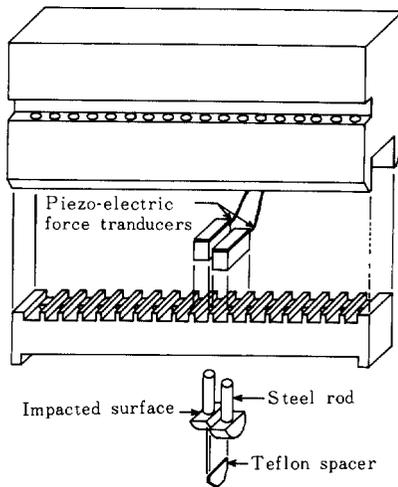


Fig. 4 Impactor design.

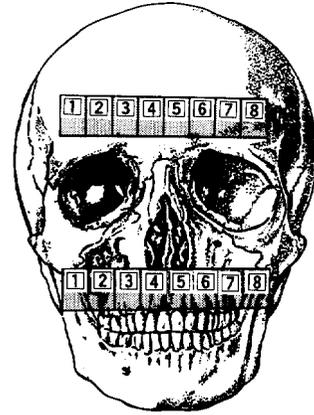


Fig. 5 Frontal / maxilla impact location (Numbers identify the different force transducers on the impactor.)

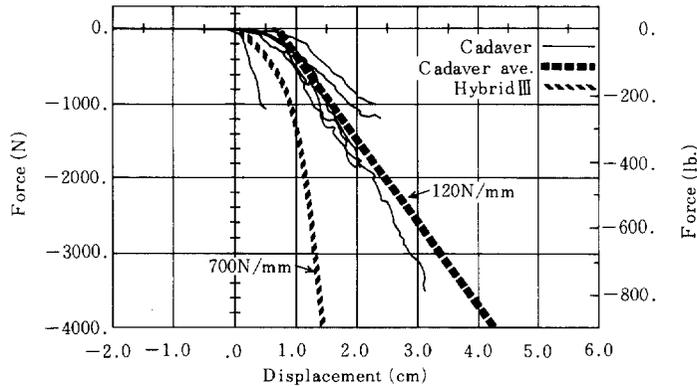


Fig. 6 Comparison of Hybrid III and cadaver maxillary compliance.

る。前頭骨および上顎骨における衝撃部位をFig. 5に示す。さらに、得られた結果の一部をFig. 6に示す。死体の剛性は、前頭骨で1000N/mm(102kg/mm)、頬骨で150N/mm(15.3kg/mm)、上顎骨で120N/mm(12.2kg/mm)であった。一方、ダミーの剛性は、前頭骨ではほぼ同じであったが、頬骨、上顎骨では1000N/mm(102kg/mm)と700N/mm(71.4kg/mm)で、それぞれ死体の約7倍と6倍であった。このことから、彼らは、より正確な傷害値を必要とする場合は、ダミーの再設計が必要であると述べている。

8. 顔面の衝撃傷害評価方法

人間の死体を用いて軟組織や顔面骨の耐性を明確にする研究とは別に、受けた衝撃をダミーの顔面そのもので評価しようとする研究も進められている。これには二つの方向があるように思われる。一つは、人間の応答にできるだけ近くなるようダミー顔面を改造しようとする方向であり、もう一つは荷重などが計れるようダミー顔面を改良しようとする方向である。前者は、Frangible(Deformable) Head FormあるいはFace Formと呼ばれ、

後者はLord Sensing Face Form (顔面荷重計) と呼ばれている。

8.1 Frangible Head(Face) Form

これまでに行われてきた試みを材質と形態とで分類すると、樹脂製または金属製で半球状シェル構造のもの (Head Form)、樹脂製で頭蓋骨形状、既製ダミー頭部 (アルミニウム合金製) に樹脂やハニカムを挿入したもの (Face Form)、アルミニウム・ハニカム製円柱、となる。以下に年代順に紹介する。

Melvinら²⁵⁾が提案したモデルは、Head Formと呼ばれ、半球状の頭蓋骨シェルに擬似軟組織と擬似皮膚とを被せたものである。実際の前頭骨や頭頂骨による衝撃試験結果に基づき、シェルの材質としてABS樹脂が選ばれた。

Brinn²⁶⁾やHodgsonら¹⁸⁾も、同様の半球状のモデルについて検討した。特に、Brinnは、Head Formをドリルで穴あけして必要破壊荷重を低下させ、Face Formとして転用することを提案した。

McLeodら²⁷⁾は、ポリエステル樹脂をガラス短繊維で強化して頭部を作製し、シリコンゴムを被せてモデルとした。前頭骨と頬骨に局部衝撃を与えた結果、破壊荷重はそれぞれ、1400~1900lb. (635~862kg)、160~380lb. (72.6~172kg)であった。

Terriereら²⁸⁾は、Hybrid IIダミーの顔面にアルミニウムハニカムを挿入して、Face Formとした。衝撃試験の結果、吸収エネルギーが死体の場合より小さいことから、大きな傷害評価には使えないことがわかった。

Newmanら²⁹⁾は、Hybrid IIIダミーの顔面部を除去し、空洞にアルミニウム板を当て、その上にメチルエステル樹脂製のインサートをつけた。データの記載はないが、Face Formの特性は人間の骨折特性に類似していると述べられている。

Pettyら³⁰⁾は、直径150mmの円柱形のアルミニウム・ハニカム (圧壊力; 200lb/in² 14.1kg/cm²) そのものをFace Formとした。これにステアリング・ホイールを衝突させ、ハニカムの変形深さを測定し、その量を比較して各車両の安全性を評価した。

Zuby³¹⁾は、Newmanら²⁹⁾のFrangible Face Formと、Pettyら³⁰⁾のアルミニウム・ハニカムとに、

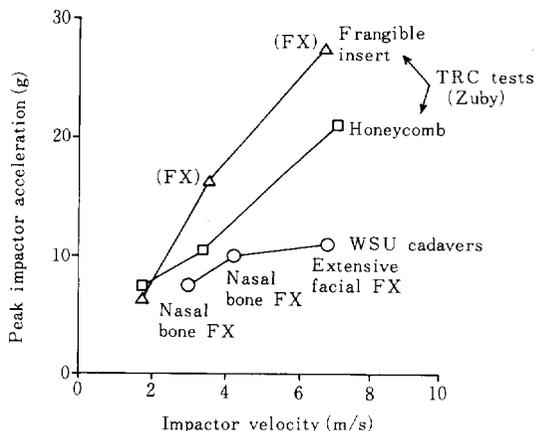


Fig. 7 Comparison of the rigid bar impact responses of two fracture-indicating faceforms with the average responses of cadavers under similar test conditions.

それぞれ直径1in. (25.4mm)のバーを衝突させた。結果をFig. 7に示す。なお、同図には、Nyquistらによる死体の結果も併記してある。死体の場合と比較して、どちらのFace Formにも、高衝撃傷害域で非現実的な高い加速度が生じていた。このことから、両Face Formとも人体をあまり忠実に模擬していないことが判明した。

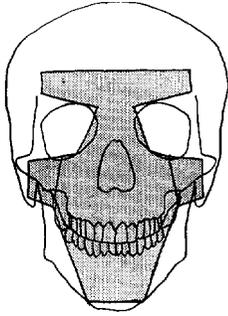
Melvinら³²⁾は、Hybrid IIIダミーの顔面部を除去してアルミニウム板を溶接し、その前にゴムとスチレンフォームを設置してFace Formとした (Fig. 8)。直径152mmの平坦円盤を衝突させた結果、Fig. 9に示すように、荷重 - 時間特性が同様の条件で求めた死体の特性範囲に入っていた。このことから、本Face Formの有用性が確認された。

Clemoら³³⁾も、前述のPettyらと同様に、アルミニウム・ハニカムを用い、ステアリング・ホイールによる衝撃試験を実施した。その結果、本試験法が有用、簡便でかつ低コストであることが強調された。さらに、彼らが開発した安全ホイールが他のホイールに比較して極めて優位であることも実証された。

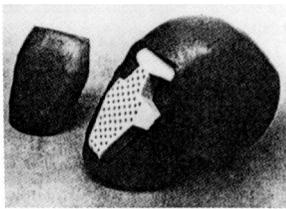
8.2 顔面荷重計

ダミーの顔面に最初にセンサを取り付け、荷重の計測を試みたのはWarnerら³⁴⁾であろう。

彼らは、Hybrid IIダミーの頭部空洞に片持ち梁



(a) Replaceable face geometry compared to the human facial skeleton.



(b) Head showing the deformable facial element in place. A featureless facial covering is shown.

Fig.8 Revised Hybrid III face form.

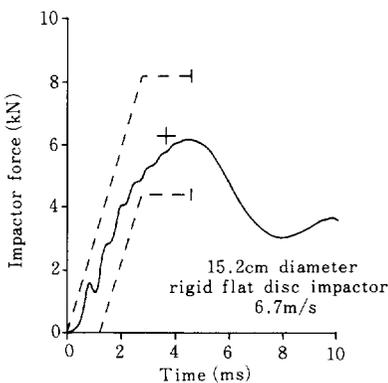


Fig. 9 Full-face impact response of the prototype 2 face structure compared to the response corridor at 6.7m/s.

を内臓させ、貼りつけたひずみゲージにより、鼻、上顎、下顎、頬での局部荷重を測定しようとした。実験室内試験では、 $\pm 50\text{lb}(22.7\text{kg})$ 範囲内で再現性が得られたとしている。彼らの手法は、その後、Moultonら³⁵⁾により検討された。Moultonらは、

死体による文献値に近い値が得られたとしながらも、本方法では計測可能な部位が限定されることを指摘した。また、このことから、軽量でしかも顔面の広い領域をカバーできるロードセルの設計が望まれるとしている。

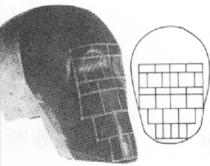
Groschら³⁶⁾は、Hybrid ダミーの顔面表面に88枚のマイクロカプセル型感圧紙を貼り、顔面に働く圧力を検出しようとした。しかし、この荷重計では、圧力の値および分布が定量的に求まらず、時間履歴も計測することができないと言える。

Warnerら³⁷⁾は、Hybrid IIダミーの顔面表面にエポキシ樹脂で52個のピエゾ・プラスチック・フィルムを貼りつけ、顔面に働く衝撃圧力を計測しようとした。センサからの電圧信号は、導電性接着剤を用いてシールド・ケーブルで取り出された。また、センサ表面は、ガラス繊維入りの補強エポキシ樹脂で被覆された。なお、本文献では、作製法や校正法は詳細に述べられているが、衝撃試験結果については報告されていない。

Planathら³⁸⁾は、 $1.0\text{in.}^2(6.45\text{cm}^2)$ あるいは $0.5\text{in.}^2(3.23\text{cm}^2)$ の大きさのピエゾエレキ型圧電素子25個をHybrid IIIダミーに貼りつけた。荷重変形特性が人間と異なるので、この差を埋めるためには、人体耐性を求める場合の条件と同条件での実験が必要であると述べている。そこで、人体耐性データによる鼻骨の骨折限界(可能性50%)が53J(5.41kg)であることから、圧力データを読み取り、 $25.5\text{kg}/\text{cm}^2$ で骨折が発生することを見いだした。しかし、このタイプの素子は、温度および湿度の影響を受けやすく、速度依存性が大きいなどの欠点あげられる。

Perlら³⁹⁾は、Hybrid IIIダミーの顔面部を厚さ48.3mmだけ除去し、25.4mm厚のアルミニウム板を溶接して、その上に荷重計(6チャンネル)とウレタンフォーム製のインサートをのせた。頬部および上顎部のインサートの荷重-変形特性を測定し、各々の剛性は死体とほぼ同じであることを確認している。なお、荷重は、水晶発振器を利用したキスラ社製ロードワッシャにより検出している。この方法では静的荷重が計測できず、荷重検定もむずかしいため、使いにくいなどの欠点がある。

Table 4 Load sensing face form.

Reported date	1987	1986—1989	1989	1989
Reported company	Daimler-Benz AG ³⁸⁾	Volvo Car Corp. ³⁸⁾	General Motors Corp. ³²⁾	<ul style="list-style-type: none"> Collision Safety Engineering Inc.³⁹⁾ Volvo Car Corp.³⁹⁾
Appearance	 Revised Hybrid II Face	 Revised Hybrid III Face	 Revised Hybrid III Face	 Revised Hybrid III Face
Detecting method	<ul style="list-style-type: none"> Pressure sensitive foils 	<ul style="list-style-type: none"> Piezoelectric sensors 	<ul style="list-style-type: none"> Deformation of insert 	<ul style="list-style-type: none"> Simultaneous use of load washer and deformable insert
Advantage	<ul style="list-style-type: none"> Easy handling Low cost 	<ul style="list-style-type: none"> Pressure-time curves are available 	<ul style="list-style-type: none"> Good biofidelity 	<ul style="list-style-type: none"> Pressure-time curves are available Good biofidelity
Disadvantage	<ul style="list-style-type: none"> Pressure-time curves are unavailable Pressure quantification is difficult 	<ul style="list-style-type: none"> Too sensitive to temperature, humidity and acceleration Insufficient detecting precision 	<ul style="list-style-type: none"> Insert exchange is necessary Pressure-time curves and load values are unavailable 	<ul style="list-style-type: none"> Insert exchanger is necessary Difficult calibration

以上に説明したFrangible Face Formおよび顔面荷重計の中から、その主要なものを選び、その方式、構造および使用上の問題点をまとめてTable 4に示す。この表から、人体特性忠実度と評価基準の両方を備えており、かつダミーアッシュとして使用できる性能を持つデバイスはまだ開発されていないことが分かる。

9. おわりに

交通事故死者数の急増に伴い、自動車の安全性が大きくクローズアップされている。衝突安全、とりわけ人体衝突傷害耐性に関する研究については、従来、ごく限られた専門家間で議論されてきたため、一般にはあまり知られていないように思われる。

本稿では、まず基礎知識として、耐性値の確立方法、米国での安全基準のしくみ、衝突実験用ダミー、傷害尺度について述べた。さらに、人体のうち、顔面に着目して、実際の事故での傷害発生

状況、衝撃傷害耐性ならびに応答、Face Formや顔面荷重計による衝撃の測定と傷害の評価について述べた。研究の経緯をつかんでいただけたと思う。ただ、流れを重視するあまり、やや雑ばくとなり、専門家の方には物足りない内容になったとも思われる。ご容赦いただきたい。

本分野での研究の特徴としては、なんとといっても、試験に生身の人間を使うわけにはゆかないということであろう。そのため、ダミーの信頼性や人体忠実度が絶えず議論されてきたし、これからも続けられるであろう。ダミーに対して人間との類似性をどこまで追求するかによって、研究の方向は大きく違ってくるように思われる。

本稿で述べた文献調査結果をもとに、当所では、トヨタ式Hybrid IIIダミー用顔面荷重計が開発され、衝突試験に供されている。その概要については、本誌トピックスを参照していただきたい。

なお、本稿は、当所の人体耐性調査グループのメンバー（安藤恭子、池田泰明、石山慎一、塚田

厚志，古川一憲，森本一史)による文献調査結果などをもとに，森本がまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) 自動車技術会編：自動車技術ハンドブック 基礎・理論編，(1990)，340
- 2) 佐藤武：自動車技術，29(1975)，83
- 3) 松野正徳，ほか訳：日本自動車研究所技術調査資料，No.11「人間の衝撃耐性」，(1977)，10
- 4) 於保鴻一，内山次男，山崎和久，田中重夫：自動車技術，40(1986)，1448
- 5) Pike, J. A. : Automotive Safety Anatomy, Injury, Testing and Regulation, (1990), 11, 65, SAE
- 6) 自動車技術会：自動車事故防止事業報告書，(1980)，1～54
- 7) 松岡章雄，高橋浩幸：技術の友，41-3(1990)，26
- 8) Ed. by Assoc. for the Advancement of Automotive Medicine : The Abbreviated Injury Scale 1990 Revision, (1990), 1
- 9) Zuby, D. S. and Saul, R. A. : 12th Int. Technical Conf. on Experimental Safety Vehicles, (1989), 597
- 10) Patrick, L.M., Lange, W.A. and Hodgson V. R. : Proc. 7th Stapp Car Crash Conf., (1967), 541
- 11) Patrick, L.M. and Daniel, R.P. : Proc. 8th Stapp Car Crash and Field Demonstration Conf., (1966), 147
- 12) McElhaney, J. H., Roberts, V.L. and Hilyard, J.F. : Handbook of Human Tolerance (1976), 337, Jpn. Automobile Research Inst.
- 13) Rieser, R. B. and Chabal, J. : Proc. 11th Stapp Car Crash Conf., (1967), 138
- 14) Gadd, C.W., Nahum, A.M., Schneider, D. C. and Madeira, R. G. : Proc. 14th Stapp Car Crash Conf., (1970), 356
- 15) Leung, Y. C., Lopat, E., Fayon, A., Banzet, P. and Tariere, C. : Proc. 3rd Int. Conf. on Impact Trauma, (1977), 399, IRCOBI
- 16) Hodgson, V. R., Lange, W.A. and Talwalker, R. K. : Proc. 9th Stapp Car Crash Conf., (1965), 145
- 17) Hodgson, V. R. : Am. J. Anatomy, 120 (1967), 113
- 18) Hodgson, V. R., Brinn, J., Thomas, L. M. and Greenberg, S. W. : Proc. 14th Stapp Car Crash Conf., (1970), 341
- 19) Hodgson, V. R. and Thomas, L. M. : Proc. 15th Stapp Car Crash Conf., (1971), 190
- 20) Nahum, A. M., Gatts, J. D., Gadd, C. W., and Danforth, J. : Proc. 12th Stapp Car Crash Conf., (1968), 302
- 21) Schneider, D. C. and Nahum, A. M. : Proc. 16th Stapp Car Crash Conf., (1972), 186
- 22) Prasad, P., et al. : Advanced Anthropomorphic Test Device (AATD) Development Program, Phase 1 Reports : Concept Definition, TASK B, Ed. by Melvin, J. W. and Weber, K., PB 88-174495 (1988), 30
- 23) Nyquist, G. W., Cavanaugh, J. M., Goldberg, S. J. and King, A. I. : Proc. 30th Stapp Car Crash Conf., (1986), 379, SAE
- 24) Allsop, D. "L", Warner, C. Y., Wille, M. G., Schneider, D. C. and Nahum, A. M. : Proc. 32th Stapp Car Crash Conf., (1988), 139, SAE
- 25) Melvin, J. W., Fuller, P. M., Daniel, R. P. and Pavliscak, G. M. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 690477, (1969)
- 26) Brinn, J. : Proc. 13th Stapp Car Crash Conf., (1969), 381
- 27) McLeod, D. G. and Gadd, C. W. : Human Impact Response, Ed. by King, W. F. and Merz, H. J., (1973), 153, Plenum Press, New York
- 28) Tariere, C., Leung, Y. C., Fayton, A., Got, C., Patel, A. and Banzet, P. : Proc. 25th Stapp Car Crash Conf., (1981), 435, SAE
- 29) Newman, J. M. and Gallup, B. M. : Proc. 28th Stapp Car Crash Conf., (1984), 87, SAE
- 30) Petty, S. P. F. and Fenn, M. A. : 10th Int. Technical Conf. on Experimental Safety Vehicles, (1985), 342
- 31) Zuby, D. : ASME Paper No. 87-WA/SAF-3, (1987)
- 32) Melvin, J. W. and Shee, T. R. : 12th Int. Technical Conf. on Experimental Safety Vehicles, (1989), 608
- 33) Clemo, K. C., Penoyre, S. and White, M. J. : 12th Int. Technical Conf. on Experimental Safety Vehicles, (1989), 275
- 34) Warner, C. Y. and Niven, J. : Proc. 23rd Annual Conf., (1979), AAAM
- 35) Moulton, J. R., Warner, C. Y., and Mellander, H. : SAE Tech. Pap. Ser., No.840397, (1984)
- 36) Grosch, L., Katz, E., Kassing, L., Marwitz, H. and Zeidler, F. : SAE Tech. Pap. Ser., No.870333, (1987)
- 37) Warner, C. Y., Wille, M. G., Brown, S. R., Nilsson, S., Mellander, H. and Koch, M. : SAE Tech. Pap. Ser., No.860197, (1086)
- 38) Planath, I., Cesari, D., and Nilsson, S. : Proc. 33rd Annual Conf., (1989), 383, AAAM
- 39) Perl, T. R., Nilsson, S., Planath, I. and Wille, M. G. : Proc. 33rd Stapp Car Crash Conf., (1989), 29, SAE

著 者 紹 介



森本 一史 Kazufumi Morimoto

生年：1946年。

所属：情報特許部 調査課。

分野：技術動向の調査研究。

学会等：自動車技術会，日本鋳物協会
会員。