

A9 硬式野球用ヘルメットの緩衝性能に及ぼすシェル材料の曲げ特性の影響(外傷バイオメカニクス)

新井, 和吉 / 岩原, 光男 / GOTO, Yuta / HASHIMOTO, Keisuke / TOMIOKA, Ryohei / ARAI, Kazuyoshi / IWAHARA, Mitsuo / 富岡, 良平 / NAGAMATSU, Akio / 橋本, 圭輔 / 長松, 昭男 / 後藤, 祐太

(出版者 / Publisher)

日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集

(巻 / Volume)

2007

(開始ページ / Start Page)

47

(終了ページ / End Page)

50

(発行年 / Year)

2007-11-13

A9 硬式野球用ヘルメットの緩衝性能に及ぼすシェル材料の曲げ特性の影響

Effect of flexural properties of shell material on shock absorption performance of helmet for baseball

○学 富岡 良平 (法政大) 橋本 圭輔 (法政大)
後藤 祐太 (法政大) 正 新井 和吉 (法政大)
正 岩原 光男 (法政大) 正 長松 昭男 (法政大)

Ryohei TOMIOKA, Keisuke HASHIMOTO, Yuta GOTO, Kazuyoshi ARAI,
Mitsuo IWAHARA and Akio NAGAMATSU, Hosei University, Kajino3-7-2, Koganei-shi, Tokyo

A serious injury on being struck by a baseball pitch was reported recently. A baseball helmet is an integral part of the protective gear that prevents any head injuries upon being struck by a baseball. To improve the safety offered by the helmet, it is necessary to minimize the acceleration of the head. An appropriate choice of shell and liner materials would enhance the shock absorption capabilities of the helmet. In this study, the materials and thickness of the shell were varied, and an impact test was performed using a baseball launcher. The effect of the flexural properties of the shell materials on the acceleration of the dummy head, the pressure on its surface, and the energy absorbed by the shell were considered. Shell materials with high flexural modulus distributed the impact load, and reduced the acceleration and pressure that acted on the dummy head.

Key Words : Helmet, Baseball, Hit by pitch, Shell material, Acceleration, Pressure

1. 緒言

野球の競技中に投手の失投による死球によって、打者が怪我をするケースが多く見受けられる。特に頭部への死球は他の部位に比べて深刻な症状になる恐れがある。ヘルメットは死球の衝撃を軽減させる重要な用具であり、ヘルメットの耐衝撃性能の評価に関する研究が行われている^{1)~3)}。著者は先に、ヘルメットとボールの繰り返し衝突によるヘルメットの耐衝撃性能の変化に関する研究を行い、一度衝撃を受けたヘルメットの危険性を示した⁴⁾。ライナーの破損による緩衝機能は一度目の衝撃に対してのみ有効であり、一度目の衝撃をいかに軽減するかが重要となる。シェルとライナーを適切に選定することでヘルメットの緩衝性能が向上することが報告されている⁵⁾。本研究では、硬式野球ボール発射装置を用いて、材質を変化させたシェルの衝突実験を行い、シェルが緩衝性能に及ぼす影響について検討した。実験を簡素化して行うために JIS 規格及び製品安全協会の基準を参考に 6 面体の模擬人頭模型を作製し、板状のシェルとライナーを使用した。シェルの持つ曲げ特性が人頭内部に発生する加速度、人頭表面に加わる圧力、衝突前後のボールのエネルギー変化に与える影響について検討した。

2. 実験

2.1 硬式ボールおよび人頭模型

硬式野球ボールには、07 年シーズンからアマチュアでも使用が義務づけられた低反発球を用いた(ミズノ製)。切断面を図 1 に示す。質量は約 147g、外径 72.6~74.8mm、材質はボールの中心から、コルク、ゴム(二層)、毛糸、牛皮の順に層状となっている。低反発球はコルク芯を覆うゴムの素材を衝撃吸収性の高いものにする事で反発力を弱めている。

一般にヘルメットを装着する人頭模型には、JIS T8133 と製品安全協会 CPSA 0005 に基づき 3000Hz 未満の固有周波数を示さない質量 5kg の Mg 合金製の人頭形状を模擬したものを用いるが⁶⁾⁷⁾、形状が曲率を有するなど複雑であるため、今回の様に各種シェル材の影響を検討するための実験には不向きである。そこで、板状のシェルとライナーを

用いて衝突実験を行うため、図 2 のように 6 面体の人頭模型を JIS 規格、および製品安全協会の検査マニュアルを参考に作製した。その質量は 5.05kg、材質は Mg 合金製であり、加速度計を重心付近に装着できるものとし、衝突面は 6° 傾斜させた。

2.2 シェルおよびライナー

ヘルメットの断面構造を図 3 に示す。主にシェルに変性 ABS 樹脂を、ライナーとして頭部全体にポリスチレン発泡体を使用し、さらに側頭部とイヤーフラップ部がポリスチレン発泡体と他の高分子系緩衝材料を組み合わせた 2 層構造となっている。本実験のシェルには超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)、ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、ABS 樹脂(ABS)、ポリエチレンテレフタレート(PET)、ポリカーボネート(PC)、ポリ塩化ビニル(PVC)を使用し、それぞれ板厚 1mm、2mm と変化させた。ライナーには発泡倍率 28 倍、板厚 20mm のポリスチレン発泡体を使用した。試験片の寸法は 110mm×110mm とした。

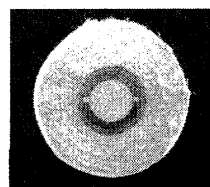
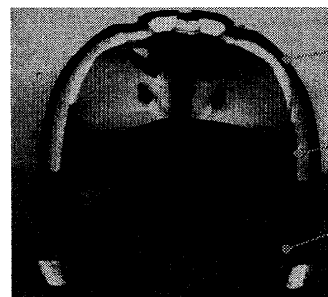


Fig.1 Structure of a ball



Fig.2 Head model



Shell : ABS

Liner :
Expanded polystyrene
Vinyl isoprene

Ear flap :
Expanded Polystyrene
Expanded Polyurethane

Fig.3 Structure of a helmet

2.3 実験装置および条件

野球用ボールの発射装置には、ピッチングマシンがあるが、ヘルメットへのボール衝突位置や衝突速度を詳細に制御することを目的に、エアガン方式の野球用ボール発射装置(高圧システム(株)製)を用いた⁸⁾。図4に装置の概略図を示す。本装置は作動力に加圧が容易な液化二酸化炭素を用いてボールを加速するものであり、ポンプ、蓄圧器、バルブ、発射管および試料室から構成される。この装置で人間が投球できる速度域を十分に再現可能である。発射されたボールの速度測定には2対のレーザー速度センサ(株)KEYENCE 製)および高速度ビデオカメラ(株)フォトロン,FASTCAM-APX RS)を用いた。図5には、衝突実験を行う衝突資料室内の写真を示す。試料室内に人頭模型を紐で吊り下げ、衝突面にライナー、シェルの順に貼り付け、中心にボールを衝突させた。実物のヘルメットには頭部とライナーの間にわずかに隙間があるが、ここでは頭部とライナーを密着させた。人頭模型の内部には三軸の圧電式加速度計(PCB PIEZOTRONICS 製)を設置し、衝撃によって発生する加速度を測定した。加速度計は一軸(z)がボールの発射方向の軸となるように、他の二軸(x,y)がそれぞれz軸に対して垂直な鉛直および水平方向となるように設置した。加速度の応答は分析処理器(CAT SYSTEM SA-01, リオン(株)製)を用いて出力した。加速度は、3軸加速度の合成を求め、その最大値で評価するものとした。また、人頭模型の表面に加わる衝撃圧力の測定には、圧力測定フィルム(富士写真フィルム(株)製)を人頭模型とライナーの間に設置し圧力分布状態を調べた。

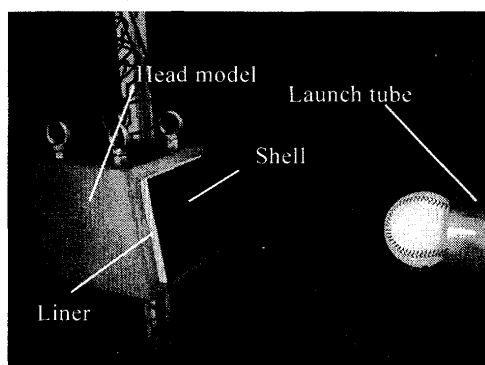


Fig.5 Test chamber

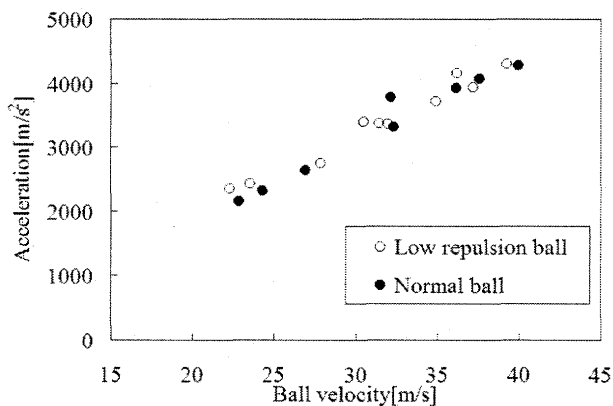


Fig.6 Relation between acceleration and impact velocity

3. 実験結果および考察

3.1 低反発球と従来使用球の比較

低反発球と従来使用球の反発特性が頭部に及ぼす影響について検討した。人頭模型のみにボールを衝突させ、その時の人頭内部の加速度を計測した。加速度は、ボール発射方向(衝突方向)が主となるが、次式により3軸を合成させた合成加速度 a を求め、その最大値で評価するものとした。

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \cdots \cdots (1)$$

高速度ビデオカメラによる人頭模型とボールの衝突前後のボールの速度を求め、次式により速度比を求めた。

$$\text{速度比} = \frac{v_2}{v_1} \cdots \cdots (2)$$

ここで、 v_1 はボールの衝突速度、 v_2 は衝突後速度である。衝突速度と加速度の関係を図6に、衝突速度と速度比の関係を図7に示す。低反発球と従来球ともに加速度の最大値にほとんど差異はない。一方、速度比は低反発球がわずかに低くなっていることから、低反発球は人頭内部の加速度には影響を与えずに、ボールの内部でエネルギー吸収し、反発速度を抑えていることがわかる。

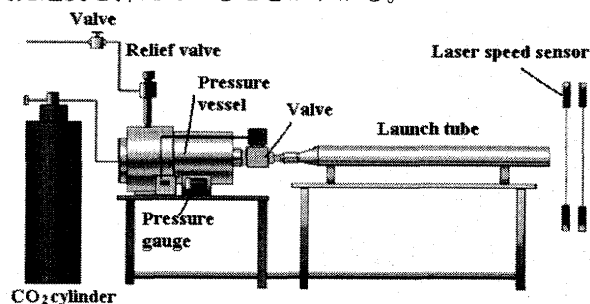


Fig.4 Schematic diagram of baseball ball launcher

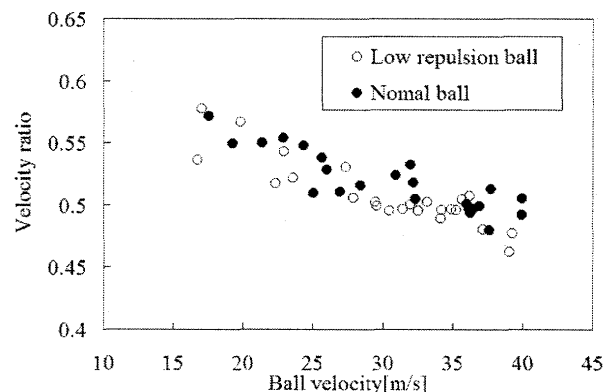


Fig.7 Relation between velocity ratio and impact velocity

3.2 シェルによる発生加速度と試験片の破損の様子

各種試験片にボールをほぼ同一速度(40m/s)で衝突させた。シェル厚さ t を1mmと2mmと変化させ実験を行った。人頭模型内部に作用する加速度の波形を図8に示す。衝突直後の加速度の立ち上がる時刻、持続時間、加速度応答の全体的な波形はほぼ同じであるが、衝突後約0.5msよりシェルごとの波形に変化が現れており、加速度の最大値に差がでた。ライナーの破損状況を確認すると、1mmのライナーには深い損傷がみられるため、衝撃を十分に分散しきれていないことがわかる。したがって、ライナーが底付きに近い状態になり、加速度が上昇したものと考えられる。また、シェルには破片が飛び散らない材料を使用しなければならないが、PETとPVCは脆性破壊をして破片を生成した。その破片の一部がライナーに大きな損傷を与え、加速度に影響を及ぼしたものと考えられる。

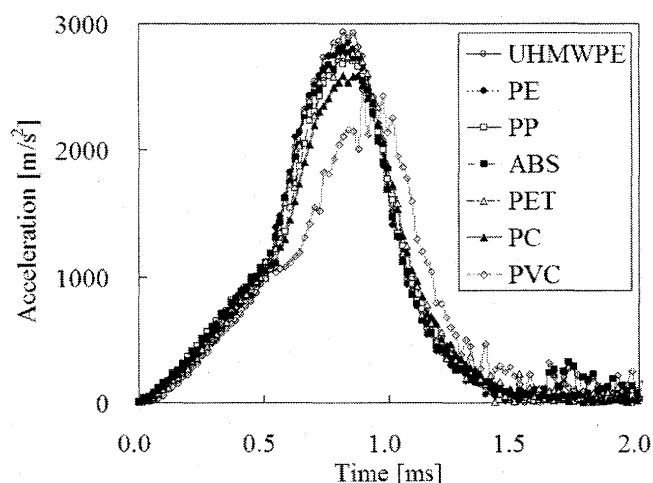
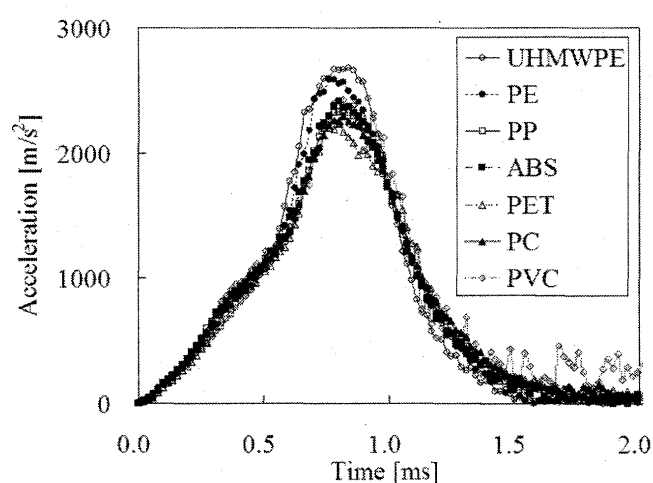

(a) $t=1\text{mm}$

(b) $t=2\text{mm}$

Fig.8 Acceleration responses of various shell materials

3.3 シェルによる圧力分布の影響

野球用ヘルメットの評価は加速度の最大値で行われており、頭部に大きな加速度が加わったとき重い外傷が起こると予測されている。しかし、加速度の最大値が低くても局所的に圧力が集中したケースでは、頭蓋骨の骨折等の頭部外傷の危険性がある⁹⁾。そこで、本研究では頭部表面に加わる圧力を測定し、シェルごとの圧力分布の様子を調べた。圧力測定には圧力の大きさに応じて発色濃度が変化するフィルムを使用した。衝突後のフィルムの様子を図9に示す。衝撃圧力が最大を示すのはボールの衝突箇所直下ではなく、縫い目に集中する傾向がみられる。衝突後の発色したフィルムを、色の濃度値ごとに画像処理し、面積を測定して圧力分布状態を調べた。その結果を図10に示す。2mmに比べ1mmのシェルは広範囲に圧力分布が観察され、最大圧力も大きい。衝撃荷重を十分に分散しきれていないことが明らかである。2mmのPVCは破片の一部がライナーに刺さり局所的に圧力が集中したと考えられる。また、必ずしも加速度の最大値と圧力が比例関係にあるとは言えない。したがって、頭部外傷の予測を詳しく行うために、加速度の評価とともに圧力による評価を行うことも重要である。

3.4 シェルの曲げ特性の影響

シェルには曲げ変形により衝撃エネルギーの吸収を行うとともに、面内応力として衝撃荷重を分散する効果がある。そこで、シェルの静的曲げ特性が加速度と圧力に及ぼす影

響について検討した。表1にシェルの静的曲げ試験の結果を示す。図11に、シェルの曲げ弾性率と加速度の関係を、図12に、シェルの曲げ弾性率と圧力の関係を示す。曲げ弾性率の高いシェルは加速度と圧力を抑える傾向にあり、加速度、圧力ともに2mmのシェルにその傾向が強く現れている。剛性の高いシェルは衝撃荷重の分散に効果を発揮し、広範囲にライナーを圧壊させるため、加速度と頭部表面に加わる圧力を低減したものと考えられる。一方、曲げ弾性率の低いシェルでは衝撃荷重の分散が十分にされず、ライナーの底付きを起こしやすくなる。したがって、剛性の高いシェルを用いることで局所的な圧力の集中と加速度の上昇を防ぐことができると考えられる。

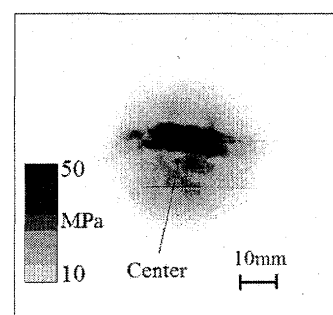


Fig.9 Pressure indicating film

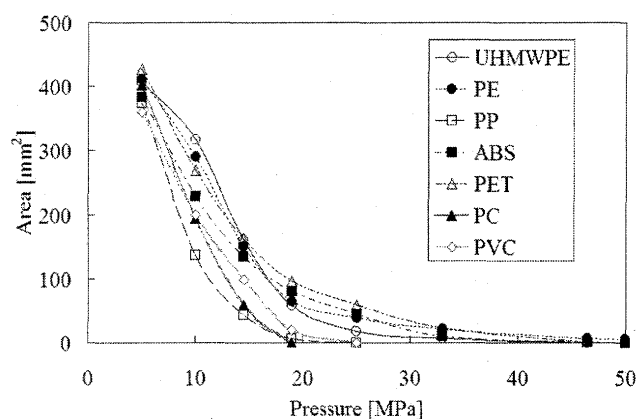
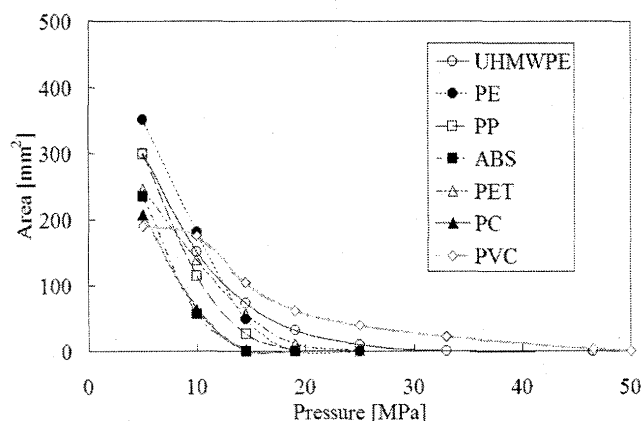

(a) $t=1\text{mm}$

(b) $t=2\text{mm}$

Fig.10 Pressure distribution

Table 1 Flexural properties in static test (t=2mm)

Shell material	Flexural strength σ_b [MPa]	Flexural modulus E [GPa]
UHMWPE	20.04	0.45
PE	27.06	1.15
PP	54.76	1.74
ABS	62.44	2.04
PET	75.68	2.23
PC	95.27	2.29
PVC	94.28	3.41

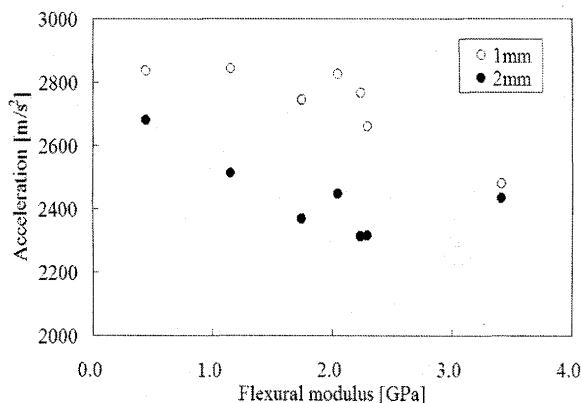
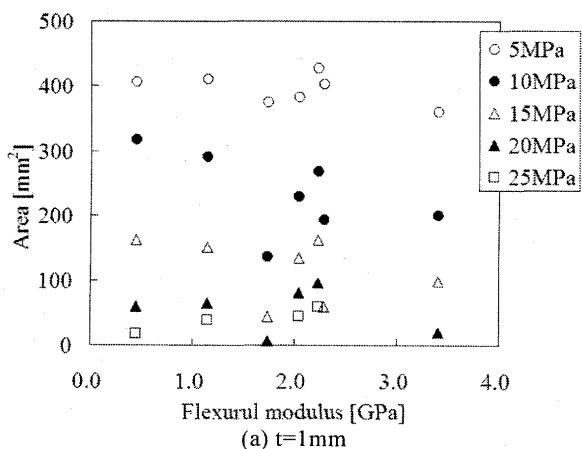
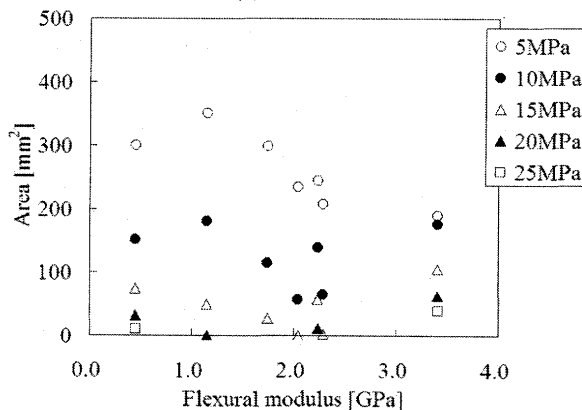


Fig.11 Relation between acceleration and flexural modulus



(a) t=1mm



(b) t=2mm

Fig.12 Relation between pressure distribution and flexural modulus

3.5 エネルギー損失

衝突前後のボールの速度からエネルギー差(損失エネルギー E)を求め検討を行った。

$$E = \frac{m}{2}(v_1^2 - v_2^2) \cdots \cdots (3)$$

ここで、 m は硬式ボールの質量、 v_1 はボールの衝突速度、 v_2 は衝突後速度である。

図 13 に衝突前後の損失エネルギーの関係を示す。1mmのシェルの損失エネルギーがわずかに高い。これは、ライナーの損傷が大きくエネルギーが吸収されたため、反発速度が低下したと思われる。PETとPVCがわずかではあるが損失エネルギーが高くなったが、その他のシェルにはさほどの差異がない。約 80~90%と高い割合で、試験片を含めた人頭模型およびボール内部にエネルギーが吸収されている。

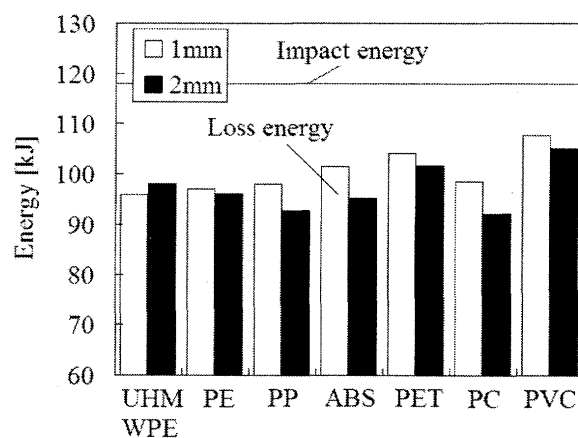


Fig.13 Loss energy

4. 結言

曲げ弾性率の高いシェルが衝撃荷重の分散に効果を発揮し、広範囲にライナーを圧壊させるため、加速度と圧力を低減したと考えられる。したがって、剛性の高いシェルと適切なライナーを選定することで野球用ヘルメットの緩衝効果が高まるものと思われる。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご協力いただいたミズノ(株)、寺西幸弘氏、長尾裕史氏に厚く感謝の辞を表す。また、本研究の一部は(財)ミズノスポーツ振興会研究助成によって遂行されたものであり、ここに感謝の辞を表す。

参考文献

- 1) 小林肇、益澤秀明、越山健彦、横山博、日本機械学会スポーツ工学シンポジウム, No.00-38, 2000, pp.26-29.
- 2) 小林肇、江崎久男、日本機械学会スポーツ工学シンポジウム, No.97-34, 1997, pp.145-148.
- 3) 宇治橋貞幸、伊能教夫、土井一素、高鐵雄、日本機械学会 機械力学・計測制御講演論文集(Vol.B), No.98-8, 1998, pp.152-155.
- 4) 関将見、森田敏則、渡邊敬人、新井和吉、岩原光男、長松昭男、寺西幸弘、長尾祐史、ジョイント・シンポジウム 2006(スポーツ工学シンポジウム/シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス)講演論文集, 2006, pp.116-119.
- 5) 秋山真一郎、宮崎祐介、神智彦、高鐵雄、宇治橋貞幸、計算工学講演会論文集, 9-1, 2004, pp.367-368.
- 6) 日本工業規格、乗車用安全帽 JIS T 8133:2000, 2000.
- 7) 製品安全協会、CPSA0005, 2000.
- 8) 新井和吉、増田望、福島恵太、吉良知弘、第 47 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2003, pp.288-291.
- 9) James A. Newman, Society of Automotive engineers 821088, 1983, pp.3424-3430.