安全なスポーツ環境の構築に向けて

Safety of Sports Equipment

宇治橋 貞幸

最近のスポーツ用具の性能向上には目を見張るものがあるが、そのおもな要因は材料の進歩に負うところが大きい。また同時に、快適なスポーツ環境を確保するうえで欠かすことのできない安全性向上もその恩恵を受けている。ここでは、スポーツにおけるハード・ウェアの性能向上とともに安全性がいかにして追及されているかについて紹介する。

1. スポーツ用具における素材の変遷

スポーツにおけるハード・ウェアの中でもとくに用具では、1970年代以降急速にプラスチック化が進行してきた。表1は、用具における素材の変化とその結果として性能がいかに進化してきたかを示したものである。ほとんどすべての例において木材に代表される天然素材から（あるものについては短い金属の時代を経て）FRP（繊維強化プラスチック：Fiber Reinforced Plastics）さらにはACM（Advanced Composite Materials）を含む高分子材料へと変遷してきた経過を示している。これには、大量生産の時代を迎え天然素材の安定的な供給が困難となってきたことが背景としてあげられる。

身近で代表的な例は、図1に示すテニス・ラケットであろう。1970年頃までは木製以外のラケットは存在していなかったが、その後ジュラルミン製が現れ新鮮な印象を与えた。しかし、金属の時代は長く続かず、1970年代後半にはFRP製ラケットが出現したたぐいに他の素材を圧倒するようになった。現在のラケットに使用されているFRPの繊維はCF（Carbon Fiber）で、表2に示すように軽くて強いのが最大の特徴である。この特徴を巧みに活かすことにより、各種スポーツ用具に要求される固有の性能をより高い次元で満足させる用具が出現してきた。

テニス・ラケットでは、軽量でありながらフレームの高剛性化と打球面拡大を同時に達成し、プレーに大きな影響

をもたらした。世界一流レベルのプレーヤーによるプレーにおいては、ラケットの性能向上が、プレーヤーの追従能力を超えてしまうことによる負の効果も出ているが、一般のテニス愛好者が享受している恩恵には、計り知れないものがある。ゴルフ・スキー・陸上競技などにおける用具においても同様であり、ハード・ウェアへのプラスチック導入が記録向上の主たる原動力となってきた。

FRPを主としたプラスチックのスポーツ用具への適応は、ガラス・ファイバー（GF）やCFの強度と軽さが際立っていることと、機能性材料としてのFRPが高い設計自由度をもっている点が大きな推進力となっている。たとえば、強度に比べて弾性率の低いCFでは、その特徴を引き出すように設計すればフレキシブルでありながら高強度な用具を実現させることができる。棒高跳のポールや釣竿あるいはゴルフのクラブ・シャフト（図2参照）などはその良い例であろう。逆に高剛性が求められるテニス・ラケットや自転車のフレームなどでは、CFの軽さと成形性を利用した高剛性断面形状の採用により、要求性能を高度に満たすことができる。またプラスチックは低い熱伝導特性からくる温かみがあり、これもヒトが直接手にするスポーツ用具の親和性を高めている。用具の高性能化に伴って確保されてきた高いパフォーマンスに対しては、より高い安全性が求められてくる。

2. スポーツ用具の安全基準

プラスチック製品は、鉄やアルミニウムなどの金属材料と異なりまだ歴史が浅く、とくにスポーツ用品においては、本格的な製品化が始まってからやっと20数年を経たにすぎない。また、プラスチックやFRPは破壊のクライテリオンが十分に明らかになっておらず、とくに油や紫外線による劣化・低温脆性など、化学的および理学的環境下

Sadayuki UJIHASHI

東京工業大学情報理工学研究科（152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）・教授、工学博士。

1971年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。専門は安全工学、スポーツ工学、バイオメカニクス、衝撃工学
〈趣味〉ランニング、登山

表1 スポーツ用具における天然素材から高分子素材への変遷

種 目	用 具 材 料 の 変 遷		効 果
ゴルフ	(ボール)	フェザリー→ガットパーチャ→糸巻き・ツーピース	飛距離・強度向上
	(クラブシャフト)	木材→スチール→FRP→ACM	剛性・質量・慣性力配分変化
テニス	(ラケット)	木材→スチール・アルミニウム→FRP→ACM	打球面拡大, 強度・剛性・空力特性向上
スキー	(板)	木材→アルミニウム→FRP→ACM	軽量化, 高剛性化
棒高跳	(ポール)	竹→アルミニウム→FRP→ACM	軽量化, 記録向上 (4.80→6.14 m)
釣	(竿)	竹→CFRP	軽量化, 強度・振動特性向上
野球	(バット)	木材→アルミニウム→CFRP	軽量化, 強度向上
マラソン	(シューズソール)	天然ゴム→合成ゴム→樹脂 (EVA)	軽量化, 強度・衝撃吸収性向上
剣道	(竹刀)	竹→ACM	軽量化, 強度向上
自動車レース	(ヘルメット)	スチール・アルミニウム→FRP	軽量化, 衝撃吸収性向上
自転車	(フレーム)	スチール→アルミニウム→FRP→ACM	軽量化
陸上競技	(サーフェス)	シンダー→アンツーカー→ポリウレタン	日程確保, 記録向上, 省メンテナンス

表2 各種 FRP 繊維の性質

種 類	タイプ		密 度	引張強さ [GPa]	引張弾性率 [GPa]	引張破弾伸び
炭素繊維	標準弾性率タイプ	PAN系	1.76-1.82	2.8-5.0	2.5-235	1.3-2.1
	中間弾性率タイプ	PAN系	1.70-1.82	4.3-6.9	280-300	1.3-2.4
	高弾性率タイプ	PAN系	1.76-1.97	2.5-4.9	345/640	0.5-1.4
	汎用タイプ	ピッチ系	1.5 -1.7	0.5-1.0	30- 60	0.9-2.0
	超高弾性率タイプ	ピッチ系	2.10-2.19	2.4-4.0	700-900	0.3-0.5
ガラス繊維	E ガラス		2.54	3.5	73	4.8
	T ガラス		2.48	4.6	87	5.7
アラミド繊維	ケブラー 49		1.44	3.62	83	4.4
	ケブラー 149		1.45	3.62	124	2.9
			1.47	3.44	175	1.9

である。

[JIS 規格]

乗車用ヘルメット,
つり針, 卓球台, ス
キー用具, ダイビン
グ用具

[SG 基準]

金属製および FRP
製バット, スキー
板/靴/締具, ロー
ラ・スケート, 野球
用およびソフトボー

ル用ヘルメット, 水中マスク/フィン, 野球用およびソフト
ボール捕手用ヘルメット, ハンドボール・ゴール, エ
キスパンダ, サッカー・ゴール, カラビナ, 運動用マット,
登山用ヘルメット/ロープ/ヘルメット/ベルト, 跳箱/踏
切板, ハーケン, バレー・ボール器具, シュタイクアイ
ゼン, ゴルフ・クラブ, アイスピッケルおよびアイスハ
ンマ, スケート・ボード, バドミントン・ラケット, 乗車
用ヘルメット, とびなわ, 自転車用ヘルメット, 自転車

図1 テニス・ラケットにおける素材の変遷

図2 FRP によるクラブ・シャフトの作成例

での性質変化により強度が著しく低下する特性をもっており, 用具の破壊に対する安全性とその経時変化に関して多くの問題を含んでいる。

スポーツ用具の安全性を規定する基準には, 日本工業規格 (JIS) と製品安全協会による (SG) 基準があり, スポーツ・レジャー用品のうちで, とくに安全性の確保が重要な用具について安全基準が制定されている。消費者はこれに合格した製品を購入できるようになっており, 安心してスポーツを楽しむことのできる環境を提供するためのひとつの制度となっている。現在, スポーツ・レジャー用品のうちで, 安全基準が制定されている主なものは以下のとおり

3. ヘルメットによる頭部保護

スポーツ障害を身体部位別にみると, 上下肢が圧倒的に多いが, 症状の深刻さでは頭部がもっとも重大である。スキーやスノー・ボードなどウィンタースポーツ, 登山, 自転車, 野球やホッケーなどの球技, アメリカンフットボール, ローラ・スケートなど頭部が衝撃にさらされる可能性の高いスポーツ種目はきわめて多い。しかし, 競技規則の適用を受けない一般のスポーツの場面では, ヘルメットの着用率はきわめて低く, また頭部を衝撃から保護する性能がきわめて不十分なヘルメットが多く販売されているのが現状である。そこで, その保護用品としての重要性の認識を高めるためにヘルメットの頭部保護のメカニズムを紹介したい^{1), 2)}。

スポーツにおける頭部衝撃は, 次の2つに大別される。

図3 ヘルメットの断面概略図

図4 衝撃を受ける頭部の耐性曲線

図5 脳の力学モデル

- (1) ボールのような比較的軽い物体(野球)による高速衝突
- (2) 疾走中の固定物への衝突や転倒によるサーフェイスへの低速衝突

前者では、衝撃のパルスは高く短い傾向があり、後者では逆に低く長い傾向がある。したがって、前者では図3に示すようにおもにシェルによるエネルギー吸収が期待され、残存衝撃エネルギーが大きい状態でのシェルの破壊は避けなければならない。後者はライナーによるエネルギー吸収が重要になる。ライナーの圧縮限界である底付き現象ライナーの含まれる空孔が潰れきってしまいエネルギー吸収の限界に達した状態を避けなければならない。

頭部に加えられた衝撃が許容範囲内であるか否かの評価手法には、頭部に生ずる加速度応答を積分し、その数値の大小によって評価する方法(積分型指標)と加速度応答を脳の力学モデルへ入力し、その変位の大小によって評価する方法(力学モデル型指標)が提案されている。これらの方法は、いずれも図4に示す衝撃を受ける頭部の耐性曲線(WSTC: Wayne State Tolerance Curve)に基づいて求められており、概略を示すと以下のとおりである。

[1] 積分型指標 (SI, HIC)

この指標は、計測された加速度波形がWSTCに当てはまるか否かを判定するための実験式である。これらの積分式によって求められた数値は、1,000のときにWSTCをほぼ近似していることがわかっている。したがって、SIあるいはHICの値が1,000以下であれば、図4の安全域(曲線の下側)と同等であると判定している。なおHICは、SIに比べて積分の中に積分区間(式(2)右辺の $(t_2 - t_1)$ を示す)が入っているのが特徴である。

(a) SI (Severity Index)

$$SI = \int_{t_a}^{t_b} a(t)^{2.5} dt \quad (1)$$

ここで、 $a(t)$: 頭部の加速度応答 [G]

t_a : 加速度の立ち上がり時刻 [s]

t_b : 加速度の零への復帰時刻 [s]

(b) HIC (Head Injury Criterion)

$$HIC = (t_2 - t_1) \left\{ \frac{\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt}{t_2 - t_1} \right\}_{\max}^{2.5} \quad (2)$$

ここで、 $a(t)$: 頭部の加速度応答 [G]

$t_{1,2}$: 右辺が最大となる時刻 ($t_1 < t_2$) [s]

[2] 力学モデル型指標

この指標は、図5のような脳の力学モデルへ計測された加速度波形を入力した場合の変位量が、臨界値を超えているか否かにより安全性を判定する方法である。

JTIの指標では、力学モデルのパラメーターおよびWSTCに相当する安全域と危険域の境界である臨界値を以下のように定義している。

JTI (Jienne Institute Index) 指標

モデルの諸元を $\omega = \sqrt{k/m} = 635$ [rad s⁻¹],

$$\beta = c/2\sqrt{mk} = 1$$

とした場合で、臨界値は2.35 mmとされている。

4. ヘルメットの安全基準と試験法

現在までにヘルメットのSG基準として制定されてきたものについて、その衝撃吸収性に関する規定内容を比較してみると以下ようになる。なお、いずれもJISで規定されている人頭模型(5 kg)にヘルメットを被せて試験を行うことが定められている。衝撃試験法には、図6のように垂直に落下させる試験法とボールやストライカを衝突させる試験法とがある。

- (1) 乗車用ヘルメット <CPSA 0004/1974年制定・1996年改正>
→落下衝撃試験(1.7 m)による加速度: 300G以下
および150 G以上の加速度: 4 m s⁻¹以下[以上B種]
- (2) 野球用ヘルメット <CPSA 0005/1974年制定・1996年改正>
→硬式ボールの衝突(145 g, 30 m s⁻¹)による加速度: 250 G以下
- (3) 自転車用ヘルメット <CPSA 0056/1983年制定・1997年改正>
→落下衝撃試験(1.0 m)による加速度: 300G以下
- (4) 登山用ヘルメット <CPSA 0064/1984年制定>
→ストライカの落下衝撃(5 kg, 2 m)による衝撃力: 10 kN以下
- (5) 軟式野球用/ソフトボール用ヘルメット <CPSA

図6 ヘルメットの落下衝撃試験機

図7 サーフェイスの試験機

0072/1986年制定)

→ストライカの衝突による加速度: 150 G 以下
(600 g; 軟式: 7 m s^{-1} , ソフト 1 種: 10 m s^{-1})

(6) 野球用/ソフトボール用捕手ヘルメット <CPSA 0088/1990年制定>

→ストライカの衝突 (600 g, 10 m s^{-1}) による加速度: 250 G 以下

(7) 野球投手用ヘッドギア <CPSA0112/1998年制定>

→硬式ボールの衝突 (145 g, 40 m s^{-1}) による加速度: 250 G 以下, SI 指標 1,000 以下

(8) 雪上レジャー用ヘルメット <CPSA0118/2000年制定>

→落下衝撃 (1.5 m) による加速度: 250 G 以下

(9) 雪上レジャー用ヘッドギア <CPSA0119/2000年制定>

→落下衝撃 (2.5 m) による加速度: HIC 指標 1,000 以下 (緩衝面衝突)

これらを概観してみると、最近制定された基準以外人頭模型内は生ずる衝撃加速度応答の主に大きさの上限だけを抑える方法で規定されている。しかし、GPSA0112 野球投手用ヘッドギアでははじめて SI 指標が併用の形で採用され、雪上レジャー用ヘッドギアでははじめて HIC 指標だけで安全基準が記述されている。

5. ハード・ウェアと傷害防止の取り組み

前述の用具の他にも怪我や傷害を防止する上で取組まなければならない課題は多く、活発な研究活動とその成果を安全基準へと結びつける努力が望まれている。たとえば、剣道における竹刀の FRP 化には竹製のものと異なった危険性があり、良質な竹の入手が困難となった現在、安全性の確保が普及を図るうえで重要な課題となっている。

陸上競技場のサーフェイスには、1968 年のオリンピック・メキシコ大会からポリウレタンが採用になり、その後より記録の出る素材と構造の開発が盛んになった。しかし一方で、脚筋力への負担が増大し傷害に至る例が多く報告

されるようになった。サーフェイスの弾力性に対する評価法として、たとえば図7のような人間の足による着地衝撃を再現できるとした試験装置が考案されている。競技者への負担軽減を実現しかつ記録が出やすいサーフェイスとするにはどのような物理特性が必要なのかについては、研究課題となっている。また、世界一流の競技者と一般のスポーツ愛好者とは最適性能は異なるので、そのガイドラインとしての安全基準が必要であろう。

スキーでは、新品ではないが使用履歴のほとんどないプラスチック・ブーツが滑走中に突然破壊し、スキーヤーが大怪我をした事例が続出

したことがあった。原因はプラスチックの劣化であり、直ちに対策がとられた。この事故は、スポーツ用具へのプラスチックの使用に歴史が浅かったことによる典型的な事例であった。

また、新しいスポーツにおいても安全性に対する対策が十分でない例が多く見られる。たとえば、スノー・ボードではおもに初心者が転倒し、手を雪面に着いたために手首や腕に重度の怪我を負ったり、雪面に後頭部を打ち付け死亡に至る例が続出している。これらの事故も手袋の工夫や新しいヘッドギアの開発によりその傷害を防止しようという試みが続けられている。

6. あとがき

スポーツのハード・ウェアにプラスチックが広範囲に進出し、その結果パフォーマンスが向上し、あるいはスポーツがより多彩でより身近なものになってきた。その中心となっているのは、ガラス繊維や炭素繊維を用いた FRP であり、高機能で魅力にあふれる用具の設計が可能になってきた。今後もさらに新素材の開発とスポーツ用具への適用が試みられるであろう。

しかし FRP は環境問題を考えるとき、問題のある材料である。現在の FRP は、まったく性質の異なる素材の繊維とプラスチックを組み合わせているため、廃棄の際の分別がほとんど不可能であり焼却もままならない。FRP の今後の課題は廃棄あるいはリサイクルに適した基材の開発あるいは成形法の研究であろう。この点での研究が大いに進展することを大いに期待したい。

文 献

- 1) 製品安全協会 (製品と安全), 第 78 号, 2000, pp. 13-20
- 2) 日本機械学会論文集 (A 編), 67 158 (2001)