自由落下式救命艇の座席にクッション材を使った場合の 人体に対する衝撃緩和効果について

原野 勝博*・今里 元信*

Shock Absorbing Effect for Human Body of Seat with Cushion Sheets in Free Fall Lifeboat

Katsuhiro HARANO and Motonobu IMASATO

Abstract

The shock absorbing effects and the evaluating methods by using cushion sheets on a seat in a free fall life-boat were investigated experimentally. The following results are obtained.

- (1) The shock absorbing effects on an actual free fall life-boat is estimated by the performances of the absorbing material and the profiles of shock waves acting on the boat.
- (2) The effects of shock absorbing material is depend on the spectra of the shock wave profiles. In the case of 20 to 30mm thick soft cushion sheets, the shock absorbing effects is observed when the frequency is higher than 10 Hz, and it is estimated that the peak values of a shock wave measured in an actual boat will be reduced by 20%.
- (3) The shock absorbing characteristics of a dummy and the cushion sheets are remarkably depend on the magnitude of the shock, so that the tests should be performed on around the actual shock level acting on boats.

1. はじめに

自由落下式救命艇(以下FFLBと略)は乗員の避難・脱出を安全かつ短時間に行うために北欧で開発された優れた救命システムであるが、定期的落下訓練による繰り返し衝撃荷重に対する艇体の強度の検討、落下訓練後の回収方法の改善等の課題も尚残っている。我が国でも日本造船研究協会を中心に、残された課題の改善・克服のため「新自由降下式救命システムの研究」が実施されている。標記の課題はその研究の一環として行ったものである。FFLBが海面に突入する時、艇体は時には10Gを超える衝撃加速度を受ける。この衝撃加速度の作用時間は0.1秒程度で人体に傷害を与える程度ではないが、座席で衝撃を緩和できれば、不測の事態、例えば突入時の姿勢が乱され腹打状態で着水した場合にも安全を確保できるし、艇体の許容加速度を大きくとれるから経済的な艇体の設計等の自由度が増すメリットが考えられる。現在FFLBの座席は硬質ウレタンなどの硬い材質で作られ艇体に強固に固定されており、緩衝装置や緩衝材等は使われていない。またFFLBの座席での緩衝対策に関する研究は殆ど見当たらない。本調査研究では、座席での人体の緩衝対策のうち、経済性の面からも最も実用性がありそうなスポンジシート等の緩衝材を使った場合、人体の緩衝効果がどれ位見込めるのか、又人体の緩衝効果をどの様に評価するかについて実験により検討したので、その概要を報告する。

2. 実 験

2.1 基本方針

* 正会員 船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1)

基本的方針は、実艇の水面突入時の衝撃波形を調査し、その波形に似せた衝撃加速度を衝撃試験機で再現する。試験機台上に緩衝対策をした座席に人体ダミーを座らせて台に衝撃を加え、台とダミー内部に取り付けたセンサーの加速度を計測し、緩衝材を用いた場合と用いなかった場合の比較により緩衝効果の有無を評価することとした。人体ダミーを使った理由は、数Gの加速度を加える実験では、安全性が保証されない限り人体実験は行い難いこと、及び人体表面に加速度計を取り付ける方法では、皮膚の弾性のため正確な大振幅の加速度の計測が難しいからである。

2.2 実験方法

衝撃試験機台上に、FRP製の救命艇用座席を図1に示すように取付台を介して固定した。座席の取付角度は変更できるようになっている。緩衝材は同図に示すように、取付台と座席間及び座席とダミー間に入れた場合についてクッション材の材質、厚さを変化した場合の効果の違いを調べた。小型モデルの落下実験結果⁽¹⁾では、ほとんどの滑走角度で、艇体の前後(X)方向と上下(Z)方向の衝撃加速度のピーク値の比が約1:2であったので、その合成加速度の方向が試験機の鉛直方向になるように座席をセットした。これは、座席が救命艇内で着座面が艇体のX方向と平行に取り付けられた状態に相当する。試験機で発生できる衝撃波形は、パルス幅が約10ms~50msであり、実艇の計測例⁽²⁾⁽³⁾(約50ms~100ms)ほどパルス幅を長くできなかったが、取り敢えず最も軟らかいパッドを使って実験をした。実験に用いたダミー(ハイブリッドII 座位型)を、試験機上にセットした状態を写真1に示す。シートベルトは3点式、ヘッドベルトは鉢巻タイプで両端がマジックテープになっており、実験は両者を装着した状態で行った。

2.3 衝撃試験機の概要

実験に用いた試験機の概要を図2に示す。試験機は80cm×80cmの試験台の4隅が空気バネで支持されており、最大搭載重量は120kgである。衝撃試験を行う時は2本の空気圧シリンダー③(図では略しているが③は基礎に固定されている)を立て空気圧で台を持ち上げ、空気を抜いて衝突部④をパッド⑤の上に落下させる。落下高さは⑥で調整し、衝撃加速度の振幅と波形は、落下高さと②の残存空気圧と⑤のパッドの硬度で調整する。

2.4 データ計測・解析手順

図1 実験装置と加速度計測点

写真1 ダミーセットアップ状態

図3に計測と解析手順を示す。台上の加速度は圧電式センサーを電荷増幅器で増幅し、ダミー本体の加速度は3軸の歪式加速度センサー出力を動歪計で増幅して、8チャンネルのPCM型データレコーダー(SN比72dB、周波数0～5kHz)に記録した。台上は圧電式にした理由は、振幅調整時に金属接触などにより大きな加速度が生じることがあるが、圧電式は歪式と異なり耐衝撃性が高いためである。解析はレコーダーの再生信号をデータ取込ソフト(Quick VuⅡ)によりパソコン上に取り込み、それをデータ解析ソフト(DADiSP; ASTRO社製)によりピーク波形やそのフーリエ変換によるスペクトル及びスペクトル間の比(伝達関数)等を求めた。2チャンネルFFTアナライザーは、衝撃波形や伝達関数のモニター用として使った。パソコンへのデータ取込速度はピーク波形を求める時は2,000Hz、スペクトルを求める時は200Hzのクロックスピードで行った。実験に用いたクッションシートの種類と減衰波形法で求めたそれらの単位面積当たりのバネ定数、損失係数を表1に示す。

- ① 試験機台
- ② 空気バネ
- ③ 空圧シリンダー
- ④ 衝突部
- ⑤ パッド
- ⑥ パッド昇降用ネジ

図2 衝撃試験機の概要

図3 データ計測・解析手順

表1 実験したクッションシートの緩衝特性

シート記号	材質	シート厚(mm)	Kd(N/m ³)	損失係数
A	ポリエチレン	10	1.44×10^8	0.248
B	ポロン	10	1.25×10^8	0.272
C	ハネナイトスポンジ	10	4.88×10^8	0.128
D	ポリエチレンフォーム(軟)	25	1.01×10^8	0.252
E	ポリエチレンフォーム(硬)	25	1.20×10^8	0.211
F	ゴムスポンジ	10	4.82×10^7	0.110

3. 実験結果と評価方法

3.1 衝撃波形の計測例

クッション材 2 枚を座席下に入れた時の台と、ダミー各部のそれぞれ X, Z 方向の衝撃波形の計測例を図 4 に示す。ダミーの加速度は台に比べパルスの幅が広がりピーク値が低下しており一見して緩衝効果が認められる。ダミーの X 方向は腰が最も小さく、頭部は前後方向に振動している。台とダミーのピーク値の時間差は Z 方向はほぼ一定であるが、X 方向は腰から上方に向かうにつれて大きくなっていることから、Z 方向の衝撃は腰から縦波で背骨を伝搬し、X 方向は速度の遅い曲げ波で伝搬しているのではないかと推測される。

3.2 緩衝効果の評価法

3.2.1 衝撃波形のピーク値による検討

(1) 台とダミー加速度のピーク値との比；
評価法(1)

(1)式に示すようにダミー各点の X, Z 方向のピーク値を合成した加速度を台の加速度で除した値を緩衝効果(1)と定義して、クッション材(B)を座席の上側又は下側(座席と取付台の間)に挿入した時の緩衝効果を図 5 に示す。

図中の上 1 とは、座席面に 10mm 厚のシートを 1 枚入れた場合を示す。

$$\tau^{(1)} = \sqrt{X_i^2 + Z_i^2} / Z_t \dots \dots \dots (1)$$

ここで $\tau^{(1)}$: 緩衝効果(1)

Z_t : 台の加速度

i : ダミーの部位 (l : 腰、 b : 胸、 h : 頭)

クッション材のない場合、ダミー各部位の加速度は台より増幅しており、その理由はダミーの表皮部の弾性により、ある周波数で共振するためと考えられる。頭の X 方向が特に増幅度の大きい理由は、後頭部が無理に座席面にヘッドベルトで押しつけているがヘッドベルトの保持力が十分ではないため頭部が前後方向に振動するためである。クッションシート 1 枚(10mm 厚)で約 2 割、2 枚で約 3 割の緩衝効果が認められる。このケースではクッション材を座席の下側に入れた方が上側に入れた場合より効果がやや良かった。

(2) クッション材無しの時との比；評価法(2)

クッション材がない場合のダミーの腰・胸・頭の X・Z 方向の加速度のピーク値をそれぞれ基準値とし、クッション材を用いたときのダミーの加速度ピーク値をそれに対応する基準値で除した値を、台の振幅が同一となるように(2)式に示すように補正した量である。

$$\tau^{(2)}_x = \frac{X_i}{X_{i0}} \cdot \frac{Z_{t0}}{Z_t}, \quad \tau^{(2)}_z = \frac{Z_i}{Z_{i0}} \cdot \frac{Z_{t0}}{Z_t} \dots \dots \dots (2)$$

ここで： X_{i0} , Z_{i0} , Z_{t0} : クッション材無しの時のダミー各部位と台の加速度

X_i , Z_i , Z_t : クッション材使用時のダミー各部位と台の加速度

図 6 にこの評価法による緩衝効果の比較を示す。図 5 とほぼ同様の効果が見られ、評価法(1)と(2)とで大

図 4 時系列データの計測例

図5 クッションシート(B)の緩衝効果(1)
ダミー各部の合成加速度と台の加速度との比

図6 クッションシート(B)の緩衝効果(2)
クッション材の有／無によるダミー各部の加速度の比

図7 クッション材(F)の緩衝効果(1)
軟パッドの場合

図8 クッション材(F)の緩衝効果(1)
硬パッドの場合

きな差はないことがわかった。

前回 とほぼ同じパッドを用い(B)より軟らかいクッション材(F)を用いて座席の上下それぞれに1,2,3枚と厚さを変更した場合の実験結果を図7に示す。本結果は緩衝効果が予想に反して図6に示す前回時に比べ約3割も低下しており殆ど効果がないに等しい。また、クッション材が軟らかい方が効果が悪く、かつバラツキが大きい。この原因の一つは軟パッドの場合、衝撃回数が増えるとパッドの硬度が変化(軟化)することがわかったので、以後の実験は硬パッドで行った。その結果の一例を図8に示すが、クッション材2枚で約6割も衝撃が低減し、パッドの硬さにより緩衝効果が大幅に変化することがわかる。

3.2.2 衝撃波形のスペクトルによる検討

3.2.1で述べた衝撃波形のピーク値による比較では、パッドの硬さによる衝撃効果の違いが大きく、試験機と実艇の衝撃波形が異なることからクッション材が実艇で有効か否かの判断ができない。そこで、衝撃波形の周波数成分(スペクトル)による検討をした。

(1) 台の衝撃波形のスペクトル

図9に加速度が3~4Gで、パッドの硬度を変えたときの台の衝撃波形のスペクトルの比較を示す。軟パッドの場合はピークの周波数は約6Hzと低いが、硬パッドの場合はそれが約40Hzと大幅に高くなっている。図10に同一の硬パッドで加速度の振幅を変えた場合の台の波形のスペクトルの変化を示す。振幅が大きくなるとピーク周波数は低い方にシフトし、スペ

図9 パッドの違いによる台の加速度スペクトルの差違

図10 加速度振幅による台のスペクトルの変化
パッド硬の場合

クトルの形状は大きく変化しており大きな振幅依存性があることがわかる。これらはこの種の実験に際しては注意すべきことである。

(2) 伝達関数

ダミーと台の加速度の伝達関数(スペクトル同志の比)は台の振幅やスペクトルに独立で、台とダミー間の振動伝達特性のみで決まる量であるから、緩衝効果の評価量として適切なものと考えられる。しかし、実際にFFTアナライザで伝達関数を測定してみると、同一であるべき伝達関数がかかなりばらつくことがわかった。その原因は幾つか考えられるが、実験的検討によると、最も大きな原因はダミーを座席から外して再びセットしたときの姿勢、つまり座席面との接触部の角度や受圧面が微妙に変化するためと考えられる。数回の実験における姿勢によるバラツキは、伝達

関数のピーク値及びピーク周波数でそれぞれ最大で22%、18%であった。この他、気温の変化によるダミー表皮材やクッション材のバネ定数、減衰係数の変化及び試験機の性能に起因する要因が考えられる。台の加速度を調べたところ、場所によりスペクトルのピーク値が約2割異なることがわかったので、以後台の加速度スペクトルは前・中・後脚の近傍3点の平均値をとった。

(3) ダミー本体の緩衝特性

クッション材を用いず、ダミーのみを着座させシートベルト・ヘッドベルトで身体・頭を固定した状態での伝達関数を図11(a)(b)に示す。尚伝達関数の分母は式(3)に示す例の様に、台の加速度のダミー加速度方向への分力としている。図11より、計測周波数範囲ではダミーは胸と頭部のX方向を除き、単一共振峰の1自由度振動系とみなせ、その固有振動数は約12Hzで台に比べZ方向で2.5~4.5倍に増幅している。伝達関数の左端が大きな値になっているのは、電荷増幅器内蔵のハイパスフィルターのカットオフ周波数が2Hzで、台の加速度信号の0Hz近傍のレベルがゼロに近いためである。

図11 ダミー自体の緩衝特性

$$\tau_{(3)x} = \frac{X_l(\omega)}{\bar{Z}_l(\omega) \cdot \sin \theta_2} \quad \tau_{(3)z} = \frac{Z_l(\omega)}{\bar{Z}_l(\omega) \cdot \cos \theta_2}$$

.....腰部の伝達関数(3)

ただし、 $X_l(\omega)$ ：腰X方向の加速度のスペクトル

$\bar{Z}_l(\omega)$ ：台の3点の加速度の平均スペクトル

θ_2 ：着座面と水平面とのなす角

(4) クッション材使用時の伝達関数

クッション材(B：2枚)使用時の伝達関数の計測例を図12(a),(b)に示す。Z方向の伝達関数の形状は、ダミー本体のときと似ているが、ピーク周波数が12.3Hzから10.7Hzへと低下し、ピーク値も2~3割低くな

っており、緩衝効果が認められる。しかし、X方向は腰を除き振幅は増大しており、頭部はクッション材無しの時とは形状が大きく異なっている。頭部のX方向の運動は後頭部の座席面との接触状態やヘッドベルトの保持力が関係してクッション効果以外の要素が入るためと考えられる。クッション材使用時の台とダミーの伝達関数を加速度振幅を変えて測定した処、図13に示す様にスペクトルのピーク値が変化した。これより、試験機による実験は実際に受ける加速度に近いレベルで行う必要があることがわかった。

(5) クッション材自体の緩衝効果

(4)で検討したのは、ダミー+クッション材の効果であるから、ダミーの影響を除くために、クッション材使用時の伝達関数をダミー自体の伝達関数で除する必要がある。こうして求めたクッション材自体の緩衝効果が、その厚さでどう変化するかの比較を図14(a)、(b)に示す。縦軸は、伝達関数の比つまりダミーと試験台との振幅比で、それが1以下の場合が緩衝効果があることを意味する。Z方向は、クッション材1枚時は10Hz以下の帯域で緩衝効果はないが、2～3枚時は、5Hz以下で効果のある帯域がある。12Hz以上の帯域では1枚～3

枚時でそれ程大きな差はないが、やはり3枚時が最も緩衝効果が高い。X方向はZ方向に比べ緩衝効果が小さく、7Hz以下の帯域を除き3枚時が最も効果が低い。この理由は、座席は着座面、背もたれ部とも人体を包み込む様に湾曲しており、座席上に3枚のクッション材を置くと、クッション表面の曲率が小さくなって、ダミーがクッション材に周囲から強く圧迫されるため結果としてX方向のばねが硬くなるためと考えられる。図15にクッション材の取付位置を変えた場合の緩衝効果の比較を示すが両者に余り差はない。座席の質量が大きければ、クッション材を座席の下側に入れた方が、2自由度の振動系(2段の防振機構)となるから緩衝効果が大となるはずであるが、その質量がダミーに比べ小さい為に、上側に入れた場合との差が現れないと考えられる。周波数領域でみた緩衝効果は複雑な特性をもつが、実際に重要なこと

図12 クッション材 (B; 2枚) 使用時の伝達関数

図13 ダミーの伝達関数の衝撃振幅による特性変化

は、艇体の衝撃ピーク値がどれ位低減できるかである。艇体に作用する衝撃波形のピーク周波数を f_p (Hz)、ピーク値が α の場合、ピーク値を $1/n$ にするためには、緩衝材を含めたダミーの固有振動数は $f_p/2$ 以下とし、その必要撓み量 d は周知の変位と加速度の関係から

$$d = \alpha \cdot \frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{(2\pi f_p)^2}$$

で求められる。

例として、艇体に作用する衝撃のピーク周波数を5 Hz、ピーク値10Gを1/2に低減するのに必要な撓みは、約5 cmとなる。

(6) 実艇での効果の予測

実艇の衝撃波形を調和解析によりフーリエ変換し、これに図15に示すクッション材(B) 2枚(上側)を使用した場合の緩衝効果に乗じた後、逆フーリエ変換により時間波形に戻して原波形と比較した例を図16に示す。この際、原波形スペクトルは50Hz以上あるが緩衝効果は50Hzまでのデータしかないので、50Hz以上の帯域では緩衝効果は100% (伝達関数=0) としている。ピーク値は約20%減少しており、一応の効果が予想される。

4. まとめ

自由落下式救命艇の座席にクッション材を使用した場合の緩衝効果とその評価法について実験的に検討し以下の結果を得た。

- ①実艇での緩衝効果は、緩衝材の周波数領域での緩衝効果と実艇の衝撃波形から推定できる。
- ②クッション材が有効か否かは、実艇の受ける衝撃波形のスペクトルに拠っている。厚さ20mm～30mmのクッション材で緩衝効果が現れる周波数は10Hz以上で、実艇の計測波形に適用した例では、ピーク値が約20%減少する結果を得た。
- ③ダミーの表皮部やクッション材は加速度振幅によりその特性がかなり変化するので実験は実際に艇にかかる衝撃に近いレベルで行う必要がある。
- ④本実験を通じ、ハイブリッドⅡ型人体ダミーの衝撃緩衝特性を把握できた。ダミー自体は、座位状態で

図14 クッション材自体の緩衝特性

図15 クッション材取付位置による緩衝効果の差違

は、腰一頭方向は1自由度の振動系と見なせ、そのばね定数は $4.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ と比較的小さいから挿入する緩衝材もそれ以下の柔らかい材質を選ぶ必要がある。

謝 辞

この研究は、財団法人日本造船研究協会との共同研究の一環として実施したものであり、ご協力頂いた関係者各位に感謝致します。

図16 クッション材 (B ; 2 枚) 使用による予想緩衝波形と原波形の比較

参 考 文 献

- (1) 原野他 8 名：「自由落下式救命艇模型の落下試験」，日本船用機関学会第59回学術講演会予稿集，pp. 131-137, H9.10.
- (2) J.K.Nelson, T.J.Hirsch, J.M.Magill: "Measured Acceleration on Free-Fall Lifeboats", Transaction of ASME, Vol.110, AUGUST, pp.226-231, 1988.
- (3) Surg Cdr PJ Waugh, D H Glaister and L P Neil. : "The use of an instrumented Hybrid III dummy to assess the ride characteristics of free-fall life boats", Offshore Safety: Protection of Life and the Environment, pp.121-127, May 1992.

質 疑 応 答

久保雅義 (神戸商船大学) :

- (1) ゴムやウレタンの緩衝性能は経年変化を生じます。救命艇はかなり長期間を対象とします。経年変化は問題にならないでしょうか。
- (2) 座席を使用する人の体重により振動系の固有周期が変わると考えられます。その変化を座席設計にどのように組み込まれるのでしょうか。

原野勝博 :

- (1) 経年変化はあると思いますが、そこまでは検討しておりません。本報告は、通常のクッションシートがどれくらいの衝撃緩和力があるのか、又その効果の計測法について検討した第1報的なものです。もう少し実用化への検討が進展した場合は、当然考慮すべきことと思います。ただ主機関を防振支持した防振ゴムを調査した例では10年間以上にわたって大きな特性の変化はなかったです。
- (2) 実際にクッション材を使う場合は、経済上の観点から座席の上側になる公算が大きいと思いますが、クッションシートを座席面に取り付けた場合は、人体がクッション材に接します。その場合クッション材のバネ定数(K)は受圧面積に比例し、体重の重い人は受圧面も大きくなりますので、K/mの比は体重の大小で余り変わらないと思います。