# 緩衝材用木材の圧潰特性に及ぼす温度(80°C以下)と

# ひずみ速度の影響評価

Evaluation of influence of temperature below 80°C and strain rate on compressive property of wood for shock absorber

> 白井孝治\*,南波宏介\*\*,藤田佳之\*\*\* Koji Shirai, Kosuke Namba, Yoshiyuki Fujita

\*工博,上席研究員(財)電力中央研究所 地球工学研究所(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
\*\*工修,(株)ドーコン 交通事業本部(〒004-8585 北海道札幌市厚別区厚別中央1条 5-4-1)
\*\*\*工修,原燃輸送(株)技術部(〒105-0012 東京都港区芝大門 1-1-3)

Generally, the mechanical properties of the shock absorbing materials at the normal temperature were used for the impact analysis to evaluate the safety of a cask at the accidental condition. However, there is a possibility that the impact acceleration increases because the shock absorbing wood materials become soft and contact with a hard material at the high temperature. In this study, three wood materials (Oak, Fir-ply, Balsa) were selected, and data concerning the temperature dependence and strain rate effect on the compressive property were acquired by the static and impact compression tests. As a result, it was clarified the necessity for considering these influences on the cask design because the impact energy absorption performance decreased exceeding 50 degree C.

Key Words: Transport cask, Shock absorber, Wood, Temperature dependence, Strain rate effect キーワード:輸送容器,緩衝体,木材,温度依存性,ひずみ速度依存性

#### 1. はじめに

放射性物質輸送容器(以下,キャスク)は, IAEA 放 射性物質安全輸送規則ならびに国内法令<sup>1)</sup>により, B 型 輸送物の場合には 9m の高さから落下してもキャスクの 安全性能が損なわれないことが要求されている.図-1 にキャスクの例として使用済燃料輸送容器の鳥瞰図<sup>2)</sup>を 示す.緩衝体は、キャスクの上下両端部に取付けられて おり、9m 高さからの落下において衝撃力を吸収する働 きがある.緩衝体の内部の緩衝材には、表-1 に示すよう に多くのキャスクで木材が採用されている.既存のキャ スクの安全解析書では、落下事故時の衝撃力評価におい て常温の緩衝材物性値<sup>3),4)</sup>を使用しているものが多い.一 方、キャスクに緩衝体を取り付けた状態での輸送では、 キャスク内部に収納した収納物の発熱により、当該緩衝 体が暖められ、キャスク表面温度と同程度の80℃まで上 昇する可能性がある<sup>5</sup>. 緩衝体の緩衝材として使用される木材については、図 -2 に示すように、圧潰強度に温度依存性があり、高温 になると強度が低下することが知られている<sup>6,7)</sup>.したが って、緩衝体の高温下に伴う緩衝材の強度低下を考慮し た場合、衝撃荷重による変形量が大きくなり、キャスク 本体胴部やトラニオン等の部材と衝突床面が接触して、 キャスクの安全機能に影響を及ぼす可能性がある.これ まで、我が国の法令で定められている輸送規則で規定さ れる落下要件に対し、輸送容器の構造強度健全性を確認 するために種々の解析および実験が行われているが、緩 衝材の高温時の材料強度低下を考慮した評価例<sup>n</sup>は少な い.また、高温時の緩衝材の物性値についても、米国農 務省のデータブック<sup>6</sup>があるものの、木材の種類や応力 ーひずみ関係が明確でなく、設計に用いる根拠となるデ ータが十分ではない.

本研究では、我が国で実績のあるキャスクに主に使用 されている緩衝材の種類を調査し、3種類の緩衝材(オ ーク,ファープライウッド,バルサ)を選定し,温度や 変形速度をパラメータとした1軸圧縮試験<sup>3),4),8)</sup>を実施し, 木材の圧潰特性の温度依存性ならびにひずみ速度依存性 を明らかにした.さらに,これら材料試験に基づき材料 モデルを定式化し,既存のキャスクに対する落下試験に 対して衝撃解析を行い,高温時の材料強度低下がキャス クの衝撃応答特性に及ぼす影響を評価した.







(節無し天然木材の圧縮強度の温度依存性)

圧縮強さ	含水率	20℃に対する比 [%]				
	[%]	-50°C	50°C			
繊維	0	+20	-10			
方向	12-45	+50	-25			
繊維直角	0-6	-	-20			
方向	≧10	-	-35			

図-2 温度や含水率が木材強度に及ぼす影響の

表-1 実用キャスクに使用されている緩衝材

材種	密度 [g/cm <sup>3</sup> ](例)
オーク	約 0.7~0.9
ファープライウッド	約 0.5~0.6
バルサ	約 0.1~0.3
ビーチウッド	約 0.6~0.7
イエローパイン	約 0.4~0.5
レッドウッド	約 0.3~0.5

# 2. 木材圧潰特性試験

# 2.1 試験方法

#### (1) 試験条件

表-2 に、試験条件を示す. 主な試験パラメータは、 材種、繊維方向、載荷速度、試験温度である.

図-3 に、圧潰試験用試験体の概要を示す.木材の圧 潰強度は含水率に大きく依存するため、キャスク用木材 の含水率は厳密な管理が要求される.このため、木材は 鋼製シェルで覆われ、かつ拘束状態での緩衝性能が発揮 できるように緩衝体内部には木材拘束用の仕切板が装着 されている.本試験では、JIS Z 2101 で規定される木材 の試験方法<sup>8)</sup>および輸送容器に使用される木材の圧縮試 験方法<sup>3)</sup>を参照して、同材種の拘束用円筒木材の中に設 置した円柱試験体に圧縮荷重を加えた.

#### (a) 材種

表-3 に、試験体の材料仕様を示す. 材種として、我 が国における放射性物質の輸送容器用緩衝体の製作で実 績の多い材種として、オーク材、ファープライウッド材、 バルサ材を選定した.

オーク材は、ブナ科コナラ属の広葉樹に属し、非常に 硬い.ファープライウッド材は、マツ科の針葉樹に属す るダグラスファー(ベイマツ)の単板を熱硬化性の接着 剤を用いて貼り合わせた積層材である.単板は、繊維方 向に沿って加工し、繊維方向が交互に直交するように重 ねている.バルサは、アオイ目パンヤ科に属する広葉樹 であり、木材繊維は粗く、木材の中で最も軽くて柔らか いことで知られている.

#### (b) 試験体の木取り

木材強度は繊維方向に大きく依存するため,測定時の 荷重方向の名称は、図-4 に示す定義に従うものとした <sup>3,4)</sup>.

繊 維 方 向:荷重方向が木材の繊維方向あるいは 合板の長軸方向に並行な場合

繊維直角方向:荷重方向が木材の繊維方向あるいは合 板の長軸方向に直角な場合

試験では、1 材種ごとに圧縮面が繊維方向と繊維直角 方向の2 種類の試験片を用いた.

#### (c) 試験体サイズ

木材試験体の外形・寸法を以下に示す.

試験体の寸法は、使用する試験装置の荷重容量(最大 500kN)、および使用する材種のうち、最も硬いオーク材 のボトミングアップ(圧縮されると空隙がなくなり圧壊 荷重が急上昇する変形限界に達する状態)後の強度(最 大100MPa)を考慮し、直径60mm×高さ80mmとした.

材 種	オーク材バルサ材 ファープライウッド材
繊維方向	繊維方向(拘束条件) 繊維直角方向(拘束条件)
試験片サイズ	φ60mm×80mm
含水率	10%以下(目標 7~8%)
載荷速度	0.1mm/sec(静的載荷) 10 mm/sec(動的載荷) 1000mm/sec(衝撃載荷)
試験温度	20°C, 50°C, 80°C
試験片数	54 条件×3 体

表--2 試験条件

#### 表-3 木材の材料仕様

材種	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	含水率
オーク	$0.82 \pm 0.05$	10%以下
ファープライウッド	0.56±0.04	10%以下
バルサ	0.14±0.02	10%以下

※円柱試験体は節なし材料とし、拘束用円筒 木材は極力節なし材料とした.



図-3 圧潰試験用試験体の概要



#### (d) 密度および含水率

木材の強度は、密度および含水率によって変化するが、 密度および含水率は、実用キャスク仕様相当(10%以下) とした.含水率の測定については、JIS Z 2102-1994 に定 められた全乾法による含水率の測定方法に従い、式(1)で 算出した.

$$u = \frac{m - m_2}{m_2} \times 100 \tag{1}$$

ここで、uは含水率 [%], m<sub>2</sub>は全乾質量 [g], m は質 量 [g] である.本研究では、恒温槽内に円柱試験体を設 置し、105℃で168時間保持し、全乾質量を測定した.全 乾質量測定後,所定の目標温度(20,50,80℃)でかつ相 対湿度が一定(50%)の恒温槽内に試験片を設置して168 時間保持し,所定の含水率となるまで養生し,圧潰特性 試験に供した.

#### (e) 拘束条件

通常,実機の緩衝体の木材は,ステンレス製鋼板で構成される缶体の中に充填されるので,圧壊試験においても円柱試験体の側方を拘束する条件とし,試験片と同材種の拘束用リングと一般構造用炭素鋼管 STK400 パイプの拘束管(図-3 参照)を用いることとした.

#### (f) 載荷速度

木材のひずみ速度依存性を評価するため、載荷速度を パラメータとした.過去に実施した緩衝体を用いたキャ スクの水平落下試験では、緩衝体の初期形状の約30%の 変形が発生するまでの時間が約20msecであること<sup>99</sup>から、 木材のひずみ速度は約15/secとなり、試験片寸法80mm の場合には、1200mm/sの変形速度が必要となる.そこで、 静的試験における載荷速度は0.1mm/secとし、9m 落下試 験時のひずみ速度(目標10<sup>1</sup>/secレベル)を考慮した衝撃 試験では1000mm/sec(試験装置の最大性能)とした.ま た、静的試験と衝撃試験の中間の速度として載荷速度 10mm/secによる動的試験を実施した.

# (g) 試験体温度

IAEA 輸送規則および国内法令において, B 型輸送物 の場合,人が容易に近づくことができる表面の温度は 85℃以下であることが要求されており,緩衝体が圧潰す る外表面の温度もこの程度と考えられる.したがって, 本試験では、試験体温度の最高を80℃とし、基準となる 常温の試験は過去の試験と同じ20℃とし、その中間の試 験体温度は50℃とした.

試験体の温度は、同一条件で行う3体の試験体のうち 1体の拘束木材に熱電対を挿入し、試験時に測定を行い、 これを試験体の代表温度とした.

#### (2) 試験装置

試験装置は,静的・動的載荷装置(載荷最大荷重: 500kN,・ストローク:100mm,制御速度:0.01~10mm/sec) と衝撃載荷装置(載荷最大荷重:490kN,・ストローク: 100mm,制御速度:1000mm/sec)を用いた.図-5に,載 荷治具の概要を示す.載荷装置により発生する荷重を鉛 直方向に試験体に伝達させるため,内面にベアリングを 取り付けたガイドチューブより支持された鋼製押しポン チで試験体を圧縮する構造とした.また,載荷治具の変 位を測定するため,レーザー変位計(キーエンス製 LK-G1552体)をガイドチューブに取り付けた.なお, 試験では,恒温槽から取り出した後の試験片の温度を一 定に保つため,試験治具の拘束用鋼製シリンダの周囲に ラバーヒータと断熱材を装着した.



図-5 木材圧潰試験用載荷治具の概要

#### (3) 測定方法

載荷荷重は,静的・動的試験,衝撃試験のいずれにおいても,試験装置の載荷部に組み込まれているロードセルによって測定した.試験体の変位の測定においては,

非接触式の高精度 CCD レーザーセンサー (2 台) を使用 した. 鋼製押しポンチの載荷面側に円板を取付け, レー ザーセンサー測定用のターゲットとした. 記録装置には, 共和電業製データロガーEDX-2000A を使用し,サンプリ ングレートは,静的・動的試験で 100Hz, 衝撃試験では 50kHz とした.

#### 2.2 試験結果

緩衝材に求められる機能は、落下時の衝突エネルギー を、緩衝材の圧潰変形により吸収することである.した がって、緩衝材のエネルギー吸収性能を表す物理指標と して、ある一定のひずみレベルまでの荷重-変形曲線を 積分することによって得られる吸収エネルギーに着目し て、高温時の木材の性能の比較を行った.なお、表-3に、 試験体の含水率の測定結果を示す.試験体質量のばらつ きが大きいため、単位質量当たりの吸収エネルギーを評 価に用いた.

表-4に、試験時の試験体の含水率を示す.

図-6 に、静的試験および衝撃試験後の試験体の圧潰 状況を示す.また、図-7~図-9 に、各試験で得られた 荷重-変形曲線を多直線近似で回帰して公称応カー公称 ひずみ曲線に換算したカーブと、積分して得られる単位 質量当たりの吸収エネルギーを示す.

表-4 試験体の含水率(単位:%)

材種	20°C	50°C	80°C
オーク	5.7-6.3	5.7-5.9	4.7-4.9
ファープライウッド	5.0-7.0	5.8-6.1	4.7-4.8
バルサ	5.5-7.1	5.2-5.7	4.6-6.9

# (1) 破壊性状

オークは、今回使用した材料の中で最も硬く、繊維方 向および繊維直角方向のいずれにおいても、20℃の静的 試験ではひずみが50%を超えると圧潰応力が100MPaに 達している.また、繊維方向の載荷では、樽状に膨らむ ため側方拘束の影響が大きく、低ひずみの領域から応力 が高い特徴がある.一方、繊維直角方向の載荷では、木 材内の空隙が減少して強度が上昇するボトミングアップ が発生し、斜めひび割れを伴うせん断破壊を起こして耐 力を喪失する結果となっている.

ファープライウッドは単板を接着剤で貼り合わせた 合板構造であるため、繊維方向の載荷では、載荷直後に 単板の座屈変形が発生し、座屈荷重の発生に伴うピーク が発生している.この座屈変形によるピーク応力は、試 験片寸法に依存するものと考えられ、実機緩衝体のよう な大きなブロック状の木材の評価の際には吸収エネルギ ーとしては無視し得るピークである.一方、繊維直角方 向では、一様な圧縮変形モードとなっており、ボトミン

グアップにより強度が上昇し、20℃の静的試験ではひず みが 50%を超えると圧潰応力が 50MPa に達している.

バルサは密度が小さく空隙が大きい特徴を有してい るため、繊維方向の載荷では、50%以上のひずみが発生し てもボトミングアップを生じず、また側方拘束の影響が 小さい結果となっている.一方,繊維直角方向について は、圧潰強度が極めて小さく、ひずみ 50%レベルではオ ーク材の1/50程度の耐力しか発生していない.

# (2) 木材圧潰特性の温度・ひずみ速度依存性

木材の応力-ひずみ曲線は、材種により差はあるものの、 繊維方向では、繊維の座屈変形に伴うピークが発生した 後はほぼ横ばいであり、繊維直角方向ではひずみ数%で は弾性的な挙動を取り,ボトミングアップによる変曲点 を通過後、いずれの場合も徐々に増大していく傾向とな った. また, 高温の領域でも, 載荷速度が上昇するに従 い強度上昇がみられており、ひずみ速度の影響が大きい.

また, 図-10 および図-11 に, ひずみ 40%までの吸 収エネルギーJ40を基準に、各材種の温度とひずみ速度依 存性を示す.なお、図中には80℃におけるひずみ速度依 存性の回帰式を示した.静的載荷の場合,いずれの材料 においても、温度上昇に伴い吸収エネルギー性能が低下 し、50℃では80~90%、80℃では70%~80%の値となっ ており、図-2 で示した米国農務省データブックで示さ れる値とほぼ同等である.しかしながら、衝撃載荷時に は高温でもひずみ速度効果による強度上昇に伴い吸収エ ネルギーが増大しており、常温の静的載荷における吸収 エネルギーとほぼ等価であることがわかる. 例えば、図 -10 で示したように、ファープライウッド(繊維方向) の場合,ひずみ速度10<sup>1</sup>/sでは約1.3倍以上の強度上昇が みられる. これは、既存のキャスクが静的な常温の材料 データに基づいて設計されている場合でも、そのエネル ギー吸収性能は、動的荷重を受ける高温の緩衝体でも期 待できることになり、落下時の衝撃応答評価に大きな影 響を与えないことが示唆される.

次章では、本章で得られた応力--ひずみ曲線を用いて、 高温時の緩衝材物性が既往のキャスクの落下衝撃応答へ 及ぼす影響を評価する.



(静的載荷)





図-7 静的試験で得られた試験体の応力-ひずみ曲線と吸収エネルギー



図-8 動的試験で得られた試験体の応力-ひずみ曲線と吸収エネルギー



図-9 衝撃試験で得られた試験体の応力-ひずみ曲線と吸収エネルギー



図-10 40%ひずみの吸収エネルギーの温度とひずみ速度依存性(繊維方向)



図-11 40%ひずみの吸収エネルギーの温度とひずみ速度依存性(繊維直角方向)

#### 3. 輸送容器落下衝撃応答解析への影響評価

#### 3.1 概 要

1章で述べたように、輸送容器に緩衝体を取り付けた 状態での輸送では、容器内部に収納した収納物の発熱に より、当該緩衝体が暖められ、キャスク表面温度と同程 度の80℃まで上昇することになる.2章で実施した材料 試験結果より、緩衝材に使用する木材の種類によっては、 80℃における木材の圧潰時の吸収エネルギーは、常温の 値のおよそ70%程度まで下がることになる.

一般に、緩衝材の内部に収納する木材については、その組み方(繊維方向や材種等)が複雑であり、水平落下や傾斜落下のように落下面との接触面積が小さいと木材の挙動が複雑となる.さらに、前節で示したように、緩衝体に使用される木材については、高温で吸収エネルギー性能が低下し、かつひずみ速度の影響を受けるため、

これらの影響が輸送容器の落下衝突時の衝撃応答に及ぼ す影響を把握し,適切な安全裕度を確保することが重要 である.

本章では、(財)電力中央研究所が実施した9m落下試験<sup>9</sup>(試験温度-40°C,緩衝体材料:ファープライウッド: 図-12参照)に供した球状黒鉛製鋳鉄キャスクの基本構造を用いて、解析コードLS-DYNAに2章で取得した緩 衝材の高温時の材料強度データを適用し、高温時の吸収 エネルギー性能の低下やひずみ速度の影響がキャスクの 衝撃応答に及ぼす影響を数値解析的に評価する.

# 3.2 落下解析

# (1) キャスクの基本構造

図-13に、対象としたキャスクの形状・寸法を示す. キャスクは、球状黒鉛鋳鉄製の本体(全長 4700mm×外径 2350mm×内径 1500mm), ステンレス鋼製の一次蓋(外 径 1747mm×厚さ 163mm) と二次蓋(外径 1942mm×厚さ 170mm),炭素鋼製のダミーウエイト(全長 4109mm×外 径 1480mm), 緩衝体 (外径 2900mm×軸方向厚さ 900mm) から構成される.本体は、円筒形状に胴部および底部が 一体として鋳造され、肉厚は本体胴部で425mm、本体底 部で210mmである.本体胴部には、中性子遮へい材充 垣用の直径80mmの長孔が円周方向に2列(内側36本、 外側 38 本) に配列されている. ダミーウエイトは, 実機 キャスクの内部収納物の重量の総和に等しい代替物であ り、その形状および重量分布はできるだけ実物に近いも のとし、かつ解析モデル化しやすい対称性を有した単純 な形状を有する構造とした. 緩衝体は、ファープライウ ッド材を炭素鋼板で被覆したものであり、落下衝突時に 発生する衝撃力を緩和する機能を有し、本体の頭部およ び底部に取り付けられる. なお, 頭部緩衝体と底部緩衝 体は同一形状である.

#### (2) 使用解析コード

使用した3次元解析コードは,有限要素解析コード LS-DYNA Ver.970 (PC 版,倍精度実数版)<sup>10)</sup>である.

#### (3) 解析ケース

表-5 に、解析ケースを示す.ケース1は、解析手法

の適用性を評価するための落下試験に対する試験解析用 評価ケースであり,-40℃で測定された材料試験データ<sup>9</sup> を用いた.ケース2は,落下試験既往の輸送容器の落下 衝撃時の評価において,常温の環境下で測定された静的 な応力-ひずみ曲線を考慮した材料データを用いた評価 がなされている事例を考慮して設定した.また,80℃の 高温の評価ケース(ケース4)では,ひずみ速度依存性 を考慮するために衝撃試験で得られた応力-ひずみ曲線 を用いた.

# (4) 解析モデル

図-14に、落下解析モデルを示す.解析モデルは、構造の対称性を考慮して 1/2 面対称モデルとし、本体胴部、 ダミーウエイト、および緩衝体の木材は8節点ソリッド 要素素を用いてモデル化した.また、緩衝体の鋼板は、 シェル要素を用いてモデル化した.なお、本研究で行う 解析の目的が緩衝体材料モデルの感度解析であることか ら、緩衝体の変形に影響しない箇所(本体胴部の長孔や 蓋締付けボルト等)については、モデル化を省略し、密 度調整のみを行った.

表-6に、本解析モデルの節点数と要素数を示す.

#### (5) 解析条件

#### (a) 接触条件

本体胴部とダミーウエイトとの接触面,および本体側 面と緩衝体との間には,滑り・剥離を考慮した接触条件 を設定し,摩擦係数を 0.14 とした.

#### (b) 材料モデル

#### ・金属材料

本体,蓋,ダミーウエイトは多直線近似等方弾塑性体 (物性タイプ 24<sup>11)</sup>)として,緩衝体鋼板は移動硬化を 考慮した等方弾塑性体(物性タイプ 3<sup>11)</sup>)としてモデル 化し,ひずみ速度を考慮した.表-7に,解析モデルに 使用した材料物性値を示す.

#### ・緩衝材材料

緩衝体材料は、等方クラッシャブルフォーム (物性タ

イプ 63<sup>11</sup>) でモデル化した. 表-8 に, 解析モデルに使 用した材料物性値を示す.表中の相当応力と体積ひずみ は,2章で実施した材料試験より得られた応力--ひずみ 関係を多直線近似して定義したものを用いている.また,



図-12 鋳鉄キャスクの9m 落下試験<sup>9)</sup>

表-5 解析ケース

解析ケース	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4					
対 象 キャスク	球状黒鉛製鋳鉄キャスク (質量 107ton)								
落下条件	非降伏面上への 9m 自由落下								
緩衝体材料	7	ファープライウッド							
緩衝体温度	-40°C	20°C	80°C	80°C					
使用データ	静的(試験時 <i>データ <sup>9</sup></i> )	静的 (図-7)	静的 (図-7)	衝撃 (図-9)					

表-6 解析モデルの節点数と要素数

部 位	要素数	節点数
本体胴部・底部	24,528	29,141
一次蓋, 二次蓋	4,200	6,160
ダミーウエイト	26,712	29,326
緩衝体 木材	14,280	17,690
鋼板	6,740	6,822



7 緩衝体 6 ダミーウュイト SS 41 5 底板 SUS 304 1 4 二次蓋 SUSF 6NM I 3 一次蓋 SUSF 6NM 2 トラニオン
1 本体 SUSE 6NM 4 FCD相当 MATEMIAL 材 質 No. 品 名

図-13 対象としたキャスクの形状・寸法<sup>8)</sup>



図-14 落下解析モデル

表-7	/ 金/	禹材料	の材	料物	性値

材料名	部位	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン 比	降伏 応力	硬化 係数	ひずみ速度 パラメータ <sup>*</sup>	
		(Kg/III )	(10/11111)	(-)	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	С	Р
FCD300LT 球状黒鉛鋳鉄	本体胴部	6.09×10 <sup>3</sup>	135471	0.27	235	3783	200	5
SUSF6NM	蓋	$7.80 \times 10^{3}$	206000	0.3	764	2057	10000	7.5
	ダミーウエイト	$3.55 \times 10^{3}$	78890	0.27	118	1949	_	—
SS400	緩衝体鋼板	$7.84 \times 10^{3}$	192080	0.3	352	1920	200	5

\* ひずみ速度を $\varepsilon$ とした時の降伏応力上昇倍率 $1+(\dot{\varepsilon}/C)^{V_p}$ 

FCD300LT	相当応力 (MPa)	235	343	343
球状黒鉛鋳鉄 相当 41当	相当塑性ひずみ (-)	0	0.0278	0.1000
SUSEANM	相当応力 (MPa)	764	931	931
SUSPONM	相当塑性ひずみ (-)00.02780.1000相当応力 (MPa)764931931相当塑性ひずみ (-)00.08020.1000相当応力 (MPa)118173173			
ダミーウェイト	相当応力 (MPa)	118	173	173
9 C 9 4 1	相当塑性ひずみ (-)	0	0.0278	0.1000

(移動硬化を考慮した等方弾塑性体)

# 表-8 緩衝材材料の材料物性値

	材料名 部位   ファープライウッド (繊維方向) 緩衝材木材		部位    密度 (kg/m <sup>3</sup> )			ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )		オ	ポアソン比 (-)					
			常温:0.56×10 <sup>3</sup> 高温:0.54×10 <sup>3</sup>		常温: 706 80℃: 498			0.0						
ケー	ス1	-40°C	相当応	ぶカ (MPa)	0	31.3	28.8	25.	5 25.	7 38	3.7	51.3	74.7	149.3
(試験時)	データ <sup>9)</sup> )	静的	体積ひ	ヽずみ (-)	0	0.04	0.10	0.2	0 0.3	0 0.	40	0.50	0.60	0.70
ケー	ス2	常温	相当応	示力 (MPa)	0	28.2	26.0	23.	1 23.	2 35	5.0	46.3	67.5	134.9
(図	-7)	静的	体積ひ	ずみ (-)	0	0.04	0.10	0.2	0 0.3	0 0.	40	0.50	0.60	0.70
ケー	ス3	80°C	相当応	示力 (MPa)	0	19.9	20.0	21.	7 25.	6 29	9.9	36.2	48.0	89.1
(図	-7)	静的	体積び	ずみ (-)	0	0.04	0.10	0.2	0 0.3	0 0.	40	0.50	0.60	0.70
ケー	ス4	80°C	相当応	5力 (MPa)	0	23.7	24.2	28.	4 28.	5 34	.35	40.6	55.3	95.2
(叉	-9)	衝撃	体積び	ヽずみ (-)	0	0.04	0.10	0.2	0 0.3	0 0.	40	0.50	0.60	0.70

(等方クラッシャブルフォーム:物性タイプ 63<sup>11)</sup>を使用)

拘束条件で得られた材料データを用いることから、 ポア ソン比を0とした.

#### (c) 初期条件

落下高さが9mであることから、解析では9mの自由 落下に相当する初速度13.3m/sを全節点に対して与えた. また, 落下方向重力加速度として, 9.8m/s<sup>2</sup>を考慮した.

#### 3.3 落下試験結果<sup>9)</sup>

図-15に、落下試験後に発生した緩衝体の変形状態を 示す. 緩衝体の変形量は蓋側で 172mm, 底側で 184mm であり、平均的な変形ひずみは約27%(平均変形量176/ 緩衝体厚さ 650mm) である. また, 図-16 に, 落下試 験で測定された本体中央断面の加速度とひずみの応答波 形を示す. なお、これらの応答波形は、320Hz のローパ スフィルターにより処理した後の波形である.

緩衝体の変形が一様であると仮定すると、それぞれの 緩衝体の設置面積は, 1400mm×900mm, 1350mm×900mm となる. 表-8 で示した落下試験で用いた木材の応力-ひずみ曲線(ケース1)の20~30%ひずみにおける応力 が約26MPaであるので、緩衝体の受ける反力はそれぞれ、 32.8MN, 31.6MN となる. キャスクの重量が 1.07MN で あるので、衝撃加速度は約60Gとなり、図-16で示され る平均的な加速度とほぼ一致している.また、本体中央 断面に発生する軸ひずみの最大応答値は約500μである.

# 3.4 解析結果

#### (1) 衝撃力

図-17に、各ケースにおいて衝突時に緩衝体と剛体床 面間で発生する衝撃力の時刻歴を示す.

落下試験に対するケース1では,最大衝撃反力は 105MN であり、キャスクの重量が 1.07MN であるので、 最大衝撃加速度は約100Gとなり、図-16で示される加 速度応答波形のピーク値とほぼ一致している.

常温の物性を使用したケース2では、キャスクが剛体 床上面に衝突後約 24.9msec で最大衝撃反力 (103MN) が 発生している.一方,高温の物性を使用したケース3お よび4では、最大衝撃反力は96MNであり、ケース2と 比較して約7%低減している.

なお,ここに示した時刻歴は,緩衝体が剛体床上面に 衝突する瞬間を時刻0とし、30msec後までの結果(計算 結果出力間隔 10µsec) である. また, 計算値は, 1kHz のローパスフィルターにより処理した後の値である.





図-16 落下試験で得られた加速度とひずみ応答波形<sup>9</sup>



# (2) 緩衝体の変形

既存の輸送容器の落下時の衝撃評価においては、単軸 変形法<sup>12</sup>(UDM: Uni-axial Displacement Method)と呼ば れる解析法が用いられる.この手法では、緩衝材を互い に緩衝しない1次元棒の集合(すなわち、側方拘束の影 響を無視)とみなし、1次元棒塑性変形によって落下時 の衝突エネルギーを吸収すると仮定する簡易評価手法で ある.緩衝体の変形、荷重および加速度を求める際には、

鉛直方向への力の伝達のみを考慮し、衝突面に平行な面につぶれ面が生じ、衝突面に接触しない面は元の位置にとどまることを前提とする.したがって、この手法に基づけば、緩衝体の変形量と衝撃力が比例関係にあり<sup>5),12)</sup> 緩衝材の高温における吸収エネルギーが 70%まで低下すると仮定した場合、UDM に基づけば、緩衝体の変形 量は約1.2 倍(=(1/0.7)<sup>05</sup>)となる.

図-18 に、ケース4における緩衝体の変形状態を示す. また、図-19 に、各ケースにおいて衝突時に本体胴



図-18 緩衝体の変形状態 (ケース4)



図-19 本体胴部中央断面における変位・速度・加速度 応答波形の比較

部中央断面の衝突面側表面で発生する変位・速度・加速 度応答の時刻歴を示す.

落下試験に対する解析ケース1においても、緩衝体の 変形量は175mmとなっており、ほぼ試験結果と同等の 結果となっている.一方、常温の物性を用いたケース2 での緩衝体の最大変形は214mm、ひずみ速度を考慮した 高温の物性を用いたケース4では216mmであり、変位 の増加量は約2mmである.したがって、ケース2とケ ース4における両者の差は1%以下であり、高温時の緩 衝体の強度低下とひずみ速度による強度上昇の相殺効果 によりほぼ同程度となっている.

また、図-13から、衝突面側の本体胴部最下面と衝突 面との初期クリアランスは275mm であり、9m 落下後も クリアランスが確保される設計となっている. したがっ て、UDM による衝撃加速度の評価においても、温度と ひずみ速度効果の影響を加味した吸収エネルギーと等価 となる材料物性を使用することにより、実用的な評価が 可能となる.

# (3) キャスクの変形

図-20 に、衝突時に本体胴部中央断面の衝突面側表面 で発生する軸方向応力の時刻歴を示す.

緩衝体の材料変化をパラメータとしたケース2からケース4においては、本体胴部に発生する最大応力については大きな変動はない.一方,落下試験に対するケース1においては、本体胴部の長孔や蓋締付けボルト等のモデル化を省略したため、オーバリングの発生モードに相違が発生し、解析で得られた最大軸方向応力53.4MPaに対し試験で発生した応力67.5MPa(=500µ×135GPa)よりやや低めの値となっている.

今後,解析結果の精度向上を図るためには,これら解 析モデルの忠実な再現に加え,木材の異方性が及ぼす影 響についても考慮する必要がある.



#### 4. 結論

キャスクに用いられる代表的な緩衝材用木材試験体を 用いて,温度や変形速度をパラメータとした1軸圧縮試 験,および解析コード LS-DYNA による高温時の木材の 材料強度の低下を考慮した落下解析を行い,以下の成果 を得た.

#### (1) 緩衝体の圧縮試験

我が国で実績のあるキャスクに使用されている3種 類の緩衝材(オーク材,ファープライウッド材,バルサ 材)を対象として,円柱試験体(直径 60mm,高さ 80mm) を恒温槽内において,一定温度(20,50,80℃)で所定 の含水率(一般的なキャスク仕様である 10%以下)と なるまで養生した後,変形速度をパラメータ(0.1,10, 1000mm/sec)とした材料試験に供し,圧縮時の応力-ひ ずみ曲線を取得した.

#### (2) 緩衝材のひずみ速度依存性

材料試験によって得られた応力-ひずみ曲線から,高 温(80℃)においてもひずみ速度依存性があり,10<sup>1</sup>/sec で約1.2倍の強度上昇が見られた.また,衝撃解析に適 用するため,木材毎に多直線近似の応力-ひずみ関係, および圧潰強度上昇倍率の定量化を行い,解析コード入 力用データとして明示した.

#### (3) 緩衝材の吸収エネルギーの温度依存性

材料試験によって得られた応力-ひずみ曲線から, 40%ひずみまでの木材の変形による吸収エネルギーを 求めた.その結果,変形による吸収エネルギーは,常温 (20℃)の場合に比べ,材種や繊維方向,試験体の変形 速度によらず,50℃では80~90%まで,80℃では70~ 80%まで低下することが判明した.

#### (4) 既存のキャスクへの影響評価

緩衝材の材料としてファープライウッドを適用した 既存のキャスクについて、(3)で明示した入力用データ を解析コード LS-DYNA に適用して、緩衝体の温度をパ ラメータとした 9m落下衝撃解析を実施した.その結果、 ひずみ速度を考慮しない常温の材料特性を用いた解析 結果に比べ、高温による強度低下とひずみ速度依存性を 考慮した材料モデルを用いた場合には、緩衝体の変形や 輸送容器の衝撃応答加速度に及ぼす影響は小さく、安全 設計に及ぼす影響は小さいことが判明した.なお、バル サやオーク材を適用した緩衝体についても、高温時の材 料強度低下とひずみ速度依存性による強度上昇の相殺 効果を考慮した設計が望まれる.

#### 謝辞

緩衝材の圧潰試験の試験準備・計測にあたっては, (株)エンター電子工業の加藤 政志氏の多大なご協力が あったことを記し,ここに,感謝の意を表します.

# 参考文献

- 「放射性物質等の輸送法令集」2007 年版,(社)日本原 子力産業協会
- 2) 原燃輸送株式会社 Web サイト http://www.nft.co.jp/equipment/equipment4.html
- 3) 使用済燃料輸送容器の構造解析プログラムの開発・ 整備に関する調査報告(II),(社)日本機械学会,1983
- 4) 使用済燃料輸送容器の構造解析プログラムの開発・ 整備に関する調査報告(III),(社)日本機械学会,1983
- 5) 原燃輸送株式会社:NFT14P型核燃料輸送物設計変更 承認申請書, 平成 11 年 2 月
- Forest Products Labo. : Wood Handbook wood as an engineering material, U.S. Dept. of Agriculture, FPL-GTR-113, p.4-4~4-45, 2003

- H. Akamatsu et al.: Dynamic Shock Absorbing Property of Redwood for Transport/Storage Casks, PATRAM 2007.
- 8) 日本工業規格:木材の試験方法, JIS Z 2101-1994
- 9) 白井 孝治他: 鋳鉄キャスクの落下衝撃に対する健 全性評価(その3) 脆性破壊防止基準の検証, 電力中 央研究所報告, U90001, 平成2年4月
- 10) Livermore Software Technology Corpora- tion : LS-DYNA Ver.970 (PC 版, 倍精度実数版)
- 11) (株) 日本総研: LS-DYNA Ver.970, ユーザーマニュ アル, Vol.2, 2003.12.
- 12) 幾島毅,浅田和雄,"放射性物質輸送容器の衝突解析 用簡易計算コードの開発(I)緩衝体付き輸送容器衝 突計算コード CRUSH",日本原子力学会誌,33[4], 381-390 (1991).

(2009年9月24日受付)