

## (45) 高速地上乗り物とソフトな重量物の衝突(事前解析)

Collision of high-speed vehicles and soft bodies (Prenumerical simulation)

酒井 正嗣\*, 村上 智昭\*\*, 片山 秋男\*\*, 吉江 伸二\*\*\*  
Masatsugu Sakai, Tomoaki Murakami, Akio Katayama, Shinji Yoshie

- \* 修(工), (株)衝撃工学研究所 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3丁目18-12)  
 \*\* (株)衝撃工学研究所 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3丁目18-12)  
 \*\*\* 博(工), (株)衝撃工学研究所 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3丁目18-12)

キーワード: 衝突、応力波、ひずみ速度、動的破損、複合材料  
 (Collision, Stress wave, Strain rate, Dynamic failure, Composit materials)

## 1. はじめに

鳥などのソフトボディと航空機の衝突は、その衝突速度が大きいことをもって構造物の変形・損傷が問題となり、確率は低いが大ダメージは大きい。いわゆるバードインパクトは1980年代を中心に実験による実機評価、解析手法の開発及びこれらによる構造物の設計・製作方法の開発が旺盛に実施されてきた<sup>1), 2), 3), 4), 5), 6)</sup>。一方で地上を走る乗り物、中でも新幹線を初めとする高速車両は、航空機に比べると速度は小さいが、鳥だけではなく、より重量のある狸等獣の衝突を想定する必要がある。車両は近年富みに、高速輸送化および炭素繊維複合材等を使用する軽量化、経済性の追及に注力されている。構造の軽量化と運行速度の上昇は耐衝突性能に対して矛盾を来す問題となり想定された衝突に対して安全評価試験を実施しながら設計を実施して行く必要がある。更に自動車に目を向けると、高速道路走行中に前走のトラックから外れた100kg級のタイヤが後続の自動車のフロントガラスに衝突し、乗員の死傷事故につながった事故が現実になっている。今までに比較的重量の大きいソフトボ

ディが高速の地上乗り物に衝突することを想定した実験及び解析研究は発表例がほとんどない。本論文は500km/hまでの高速の地上乗り物に対して、鳥よりも重量のある場合の衝突による数種の材料の動的損傷挙動について解析アプローチにより調べた結果をまとめて述べる。これらの解析は、今後予定している特定構造物への衝突実験を実施するにあたり、事前解析の位置づけで実施した。解析による定性的な挙動を把握し、計測すべき位置や周波数特性などに反映する計画としている。解析ではソフトボディの重量、飛翔速度及び非衝突体(ターゲット)板材の材料をパラメータとし、運動エネルギーの時間的消費に着目し同じ運動エネルギーでも衝突速度が違えば破損の仕方が異なることを示す。

## 2. 実験の概要

実験ではソフトボディを工業ゼラチンで模擬し、密度は0.9~1.1g/ccの範囲で製作する。ゼラチンは発砲スチロールに収納してそのまま飛翔させる場合とサボー容器に入れる場合がある。図1に衝突試験装置を示す。駆動源は高圧ガスで、蓄積したガスを瞬時に膨張放出させて

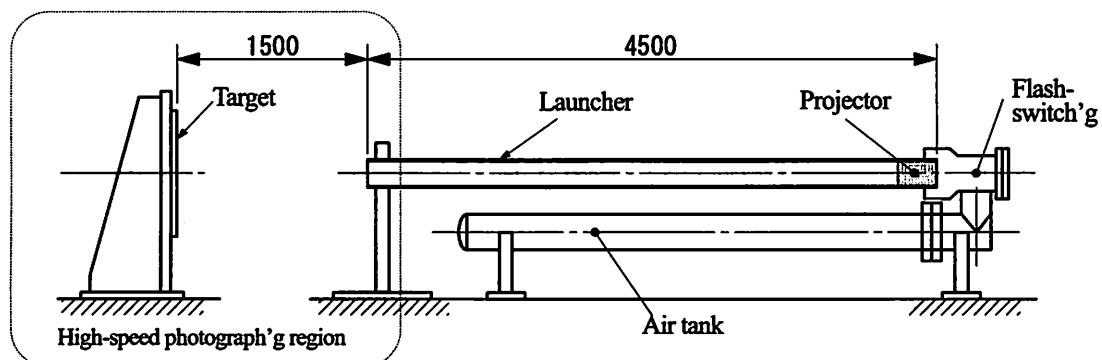


図1 ソフトボディ衝突試験装置

ソフトボディを加速させる手法(特許出願中)としている。本装置では砲内にピストンを挿入し、実物大のトラックタイヤを飛翔させることができる。タイヤ重量によって衝突速度は分布を持つが 100 kg のタイヤに対して約 100 km/h まで加速可能である。

砲から円柱状に成型されたゼラチンが放出されて飛翔し、ターゲット材に当たる実際の様子を図 2 に示す。

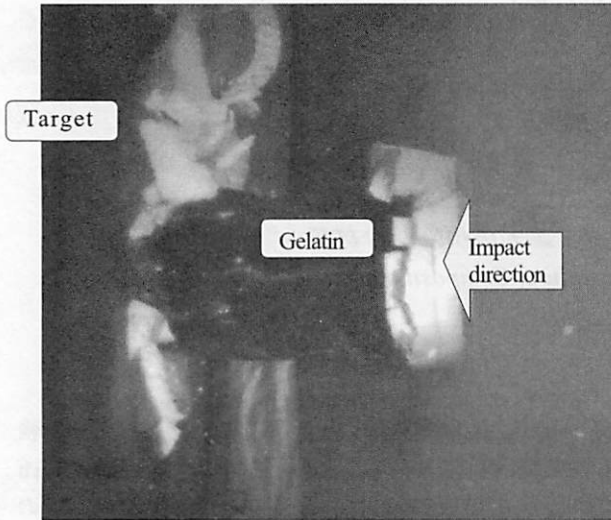


図 2 ソフトボディとターゲットの衝突  
(高速撮影 6600 fps)

400 km/h で右から飛翔したゼラチンがターゲット材に衝突し始めた時の様子

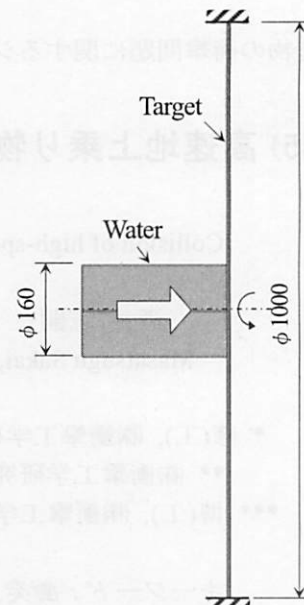


図 3 解析モデル

複合材料(CFRP)、炭素鋼およびポリカーボネート材を選択した。この 3 種で脆性、延性、粘弾性の領域をカバーできる対象と考えた。

### (1) CFRP

CFRP は進化が著しく、その金属級の初期剛性の一方で軽量化効果が顕著なため、航空機から車両、自動車にまで採用の検討がなされている。ただし延性的な性質はなく脆性的に破壊するので衝撃力に対する評価は積層設計等が終了した時点で個別に実施し、評価する必要がある。解析には、複合材料の利点を活かした擬似等方変積層板(トレカ T800H)<sup>7)</sup>の物性を基礎に定め、表 1 のように設定した。ターゲット材としての板厚は 5mm とした。現時点ではひずみ速度依存性について明確になっていないため、解析は静的値で実施した。

表 1 CFRP の主要物性値

構成則	線形
板厚 [ mm ]	5
密度 [ g/cm <sup>3</sup> ]	1.6
ヤング率 [ GPa ]	60
ポアソン比	0.32
引張強さ [ MPa ]	820
引張破断ひずみ [ % ]	1.51

### (2) 炭素鋼

炭素鋼は高速引張試験でひずみ速度依存性が明らかになっている一般構造用圧延鋼材 SS400 とした。破損限界はそれぞれのひずみ速度毎の一樣伸びまでとし、高速引張試験結果を元にしたひずみ速度に対する流動応力及びひずみを対数補間して定める YS モデル<sup>8)</sup>を使用した。SS400 材の高速引張試験結果<sup>9)</sup>を図 4 に示す。板厚は、前述のように自動車ボディを想定し、0.7mm とした。

## 3. 数値解析

### 3.1 解析モデル

実験ではソフトボディとして工業ゼラチンを用いるが鳥をよく模擬し得る。また、その物性が水として近似できることが確認されており<sup>3)</sup>、本解析では水として扱う。また、実験ではゼラチンを直径 160 mm に成型する予定で、解析でもこの実験形状を採用し、衝突時の平頭弾着面積を固定して、解析した。ソフトはハイドロコード AUTODYN v.11 で二次元軸対称とした。基本的な解析モデルを図 3 に示す。ターゲットは直径 1m の板とし、材料が炭素鋼の場合、自動車ボディを想定して 0.7mm 厚に設定するなど、なるべく実際の共用に近い値を設定した。板の周囲は固定し、拘束した。

座標系は、ターゲット板、ソフトボディである水ともにラグランジュ座標を用いた。一部の解析ではソフトボディおよび環境をオイラー座標でも実施した。

### 3.2 ターゲット材料と構成則

高速地上乗り物として、車両、自動車、陸上滑走中の航空機を想定し、ターゲット材料を炭素繊維強化樹脂系

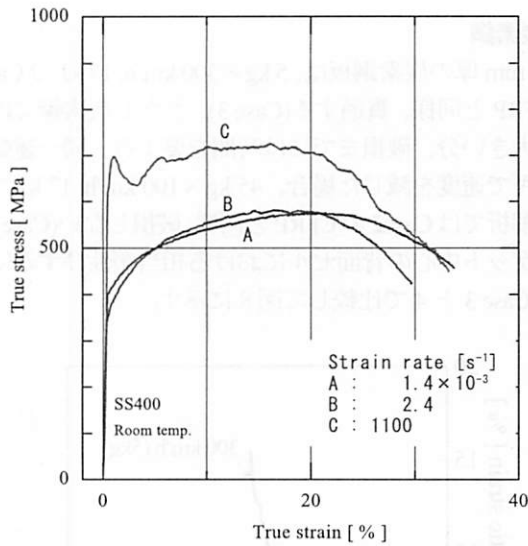


図1 炭素鋼の応力-ひずみひずみ速度線図

### (3) ポリカーボネート

ポリカーボネートは透明性の点で車両や航空機の可視部分に使用され、伸びがある点で衝突吸収性に優れる。解析では、ひずみ速度依存性指数 0.04 とした Johnson-Cook を用い、その他の主要な物性を表 2 に示す<sup>10)</sup>。ターゲット板厚は、CFRP 同様 5 mm に設定した。

表 2 ポリカーボネートの主要物性値

状態方程式	Shock
構成則	Johnson-Cook
板厚 [mm]	5
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.2
せん断弾性率 [GPa]	1.0
降伏点 [MPa]	80.6
引張強さ [MPa]	187
引張破断ひずみ [%]	200

### 3.3 解析結果

3種のターゲット材に対してソフトボディの重量と衝突速度に対する衝突解析結果を一覧にして表 3 に示す。

表 3 衝突解析結果

プレート の材質	飛翔体の重量と衝突速度			
	重量 [kg]	100 [km/h]	300 [km/h]	500 [km/h]
CFRP (t=5 mm)	5		(1) ×	
	45	(2) ○		
炭素鋼 (t=0.7 mm)	5		(3) ×	
	45	(4) △		
ポリカー ボネート (t=5 mm)	5		(5) ○	(6) ×
	14		(7) ×	
	125	(8) ○		

(注) 括弧内は解析ケース番号を示す

ここでターゲット破損の表示を以下のように定めた；

- ×：貫通して水がターゲット背面から吐出する
- △：貫通はしないがターゲットが薄肉化する
- ：非破損

衝突速度は自動車、新幹線およびその他の加速した速度レベルとしてそれぞれ、100~500 km/h を選択し、重量は鳥獣衝突で常用される 2 lb (0.9 kg) に対して 5 kg 以上を調査対象とした。基準の解析ケースはそれぞれの材料に対して共通して重量 5 kg、衝突速度 300 km/h とした。本表のマトリクスの中で運動エネルギー値を合わせて比較するため重量が選択されている。それぞれの対象材料毎の衝突解析結果について以下に述べる。

#### (1) CFRP

5mm 厚、擬似等方 CFRP 板は、5 kg×300 km/h で貫通する(Case 1)。図 5 左部に物質状況を示す。約 0.1 ms で貫通し、板は衝突背面要素から破損限界に達して行く(同図中央部)。図では 0.5 ms 時点の解析結果を示す。

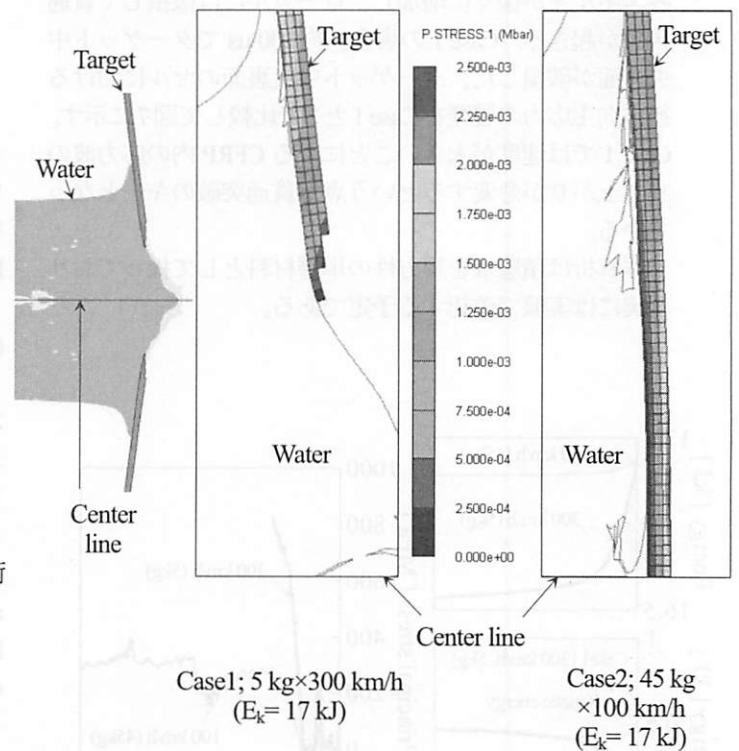


図 5 水と CFRP の衝突解析結果

Case 2 は、Case 1 と同じ水の運動エネルギー 17.4 kJ に一致させ、衝突速度を 100 km/h に、重量は 45kg に上昇させた場合である。速度 300 km/h が CFRP 板に対して貫通しきい値近くに存在する場合は、CFRP のインピーダンス(密度×音速)を乗じた衝突時の応力波頭値は速度減少

分である 1/3 となるため、Case 2 では同一運動エネルギーであっても破損しないことが予測される。結果は、図 5、最右部において、要素ひずみが飽和に達した約 4ms 時点での物質状況を示すように破損に至らない。すなわち、本衝突解析条件下で、この 2 つのケースで比較すると少なくとも運動エネルギーを合わせることで破損/非破損の結果を議論することはできないことが確認できる。

一例として、試験装置の限界により発射速度が所定値に到達しない場合の代替として、運動エネルギーを合わせて重量を増やしても衝突挙動を再現できない。逆に試験装置で重量制限がある場合、その分、速度を増加させることも正しいとは言えないことが解析結果から示された。

図 6 上部は、飛翔体の運動エネルギー履歴について Case 1 と 2 で比較した。同図下部には Case 1 におけるターゲットが得た運動エネルギーとひずみエネルギーの履歴を示す。これより、同一運動エネルギーでも速度の大きい方が衝突直後の運動エネルギー消費率が格段に大きい。水の運動エネルギー消費が大きい時間帯あるいはターゲットの運動エネルギーが飽和するまでの時間帯は、周辺固定の円板の中央が山なりに変形する時間帯を含み経過時間約 20  $\mu$ s で運動エネルギーの受け渡しの大半が終了し、一方で、ひずみエネルギーが徐々に増加し、ローカルには破損して貫通現象が起きる。Case 1 の場合、約 100  $\mu$ s でターゲット中央裏面が破損した。ターゲット中央裏面のセルにおける径方向主応力の履歴を Case 1 と 2 で比較して図 7 に示す。Case 1 では速度が大きいことによる CFRP 内の応力波の立ち上がり急変するという点が貫通突破のキーとなっている。

本解析は積層板を等方性の単層材料として扱っており現実には実験で確認する予定である。

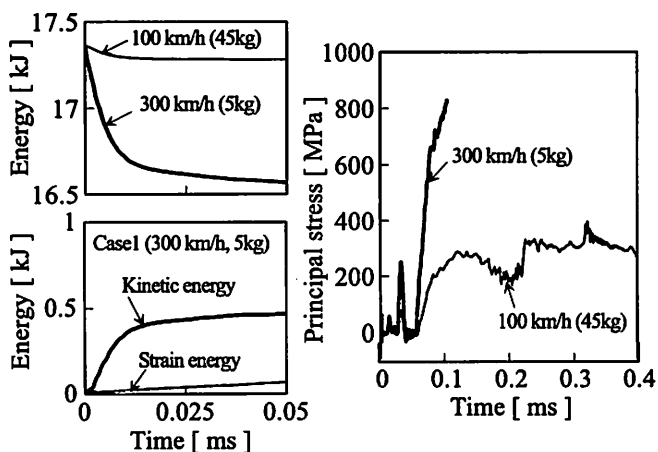


図 6 飛翔体とターゲットのエネルギーの比較 (Case 1 & 2)

図 7 ターゲットの径方向主応力の比較 (Case 1 & 2)

## (2) 炭素鋼

0.7 mm 厚の炭素鋼板は、5 kg  $\times$  300 km/h, 17 kJ で Case 1 の CFRP と同様、貫通する (Case 3)。ただし炭素鋼では伸びが大きい分、破損までには時間を要する。同一運動エネルギーで速度を減じた場合、45 kg  $\times$  100 km/h, 17 kJ での衝突解析では Case 2 の CFRP と同様、破損しない (Case 4)。ターゲット中心の背面セルにおける相当塑性ひずみについて Case 3 と 4 で比較して図 8 に示す。

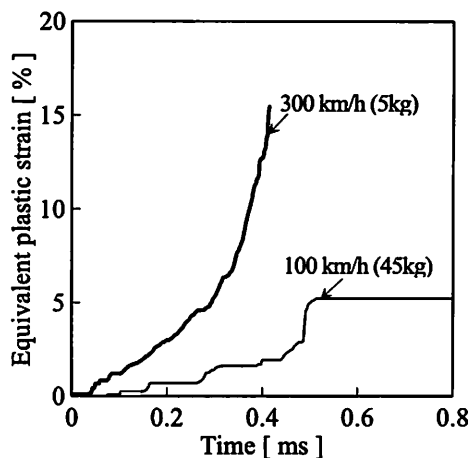


図 8 相当塑性ひずみの比較 (Case 3 & 4)

CFRP と炭素鋼の比較は、結論として、伸びがない場合とある場合との比較となる。重量が 5 kg と比較的小さい場合で、かつ単位体積あたりの伸びが CFRP に比べて格段に大きい炭素鋼であっても 0.7 mm 肉厚の時に、300 km/h の衝突速度では容易に穴が開くと解析で示された。

## (3) ポリカーボネート

ポリカーボネートの構成則における破断は非線形に 200%ひずみまで設定されているため、基本ケースの 5 kg, 300 km/h の運動エネルギーでは、破断までのひずみエネルギーを消費できない (Case 5)。実際、解析すると図 9、a に示すように相当塑性ひずみは破断に到達しない。到達しないことは、ターゲットの衝突方向の変位履歴、図 10、a がピークを超えて戻ることによって確認される。そこで重量 5 kg を固定して衝突速度を 500 km/h に増加した場合 (Case 6) は、図 9、b に示すようにターゲットの局所ひずみエネルギーを消費し切って破損に到達する。5 kg  $\times$  500 km/h の運動エネルギー、約 48 kJ を固定して 14 kg  $\times$  300 km/h の場合 (Case 7)、図 9、c に示すように時間を要すが応力波頭値、運動エネルギーとも破損に至るレベルに到達する。

それでは応力波頭値レベルの中では少ない 100 km/h において、約 48 kJ となる水の重量 125 kg の条件で解析してみた (Case 8)。その結果は、図 9、d で示すように相当塑性ひずみの積み上げに時間を要し、応力波頭値が小さいため、急変せずに、変位は図 10、d で示されるように 8 ms 付近から戻り始めて非破損で終わる。

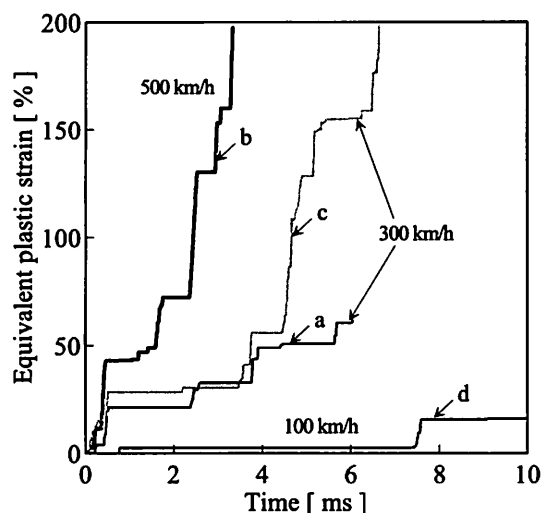


図9 相当塑性ひずみの比較 (Case5-8)

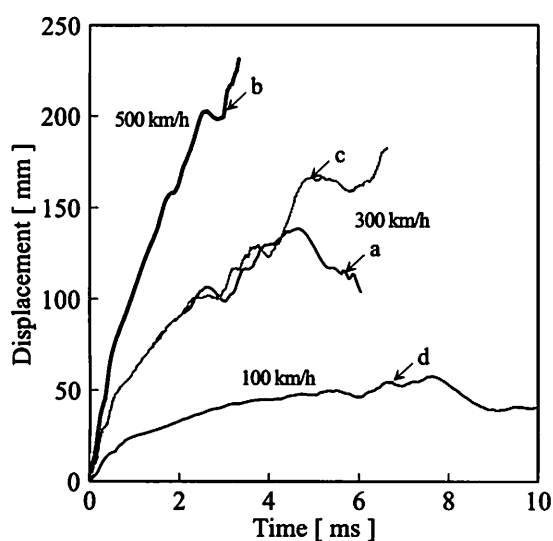


図10 衝突方向の変位の比較 (Case5-8)

#### 4. まとめ

地上高速乗り物とソフトボディの衝突試験を実施する前に種々の材料を対象に衝突速度の概略のしきい値と破損挙動を把握するために事前解析を実施した。衝突対象は延性材である炭素鋼を中心に脆性材の炭素繊維複合材 CFRP と粘弾性材のポリカーボネートを選択し、特にひずみ吸収エネルギーの差異に対する衝突効果を調べた。非衝突体は板とし、肉厚は炭素鋼については、自動車ボディを想定した 0.7 mm を、他の材料は 5 mm を設定した。衝突速度として、高速乗り物のうち、自動車クラスの 100 km/h から車両の 500 km/h の範囲を想定し、中間値として 300 km/h を置いた。また、飛翔体としてのソフトボディは解析では水として扱い、重量は獣類を想定して 5 kg から計算上の加速重量である 125 kg までを範囲とした。これらのパラメータを基に解析し、本調査範囲で得られた結果を以下にまとめる。

(1) ソフトボディ重量 5 kg の場合、ポリカーボネート

材を除いてどの非衝突対象材料も衝突速度 300 km/h オーダーが貫通破損しきい値を示すことが予測された。貫通に必要な力として着目すれば、衝突速度 100 km/h のオーダーは、必要な応力波頭値(速度と材料インピーダンスの積)には到達しないことがわかった。

(2) ポリカーボネート板はソフトボディ重量 5 kg の場合、500 km/h オーダーで貫通し、この運動エネルギーと等しくした、貫通破損しきい値オーダーの 300 km/h の場合の重量は、14 kg である。この場合もポリカーボネートの比較的大きい吸収ひずみエネルギーを突破し、貫通した。同じ運動エネルギーでも 100 km/h × 125 kg では貫通に至らない。衝突時の応力波頭値が結果指標の重要な因子になることが確認された。

(3) 飛翔体であるソフトボディが同じ運動エネルギーでも対象材を破損する/しないの差が生ずるのは、衝突速度すなわち初期の応力波頭値が大きく、時間的に早いうちに対象材の運動エネルギーとして伝達し、ひずみエネルギーに転換させ得るか否かの差と考えられた。対象材のインピーダンスも重要で CFRP よりも約 6 倍大きい炭素鋼は、今回の比較において、破損しやすい傾向にあった。

今後の衝突実験ではこれらの基本的な知見を基に試験計画を立案し、個々の対象材に特化して定量的な破損挙動を把握する予定である。

#### 参考文献

- 1) Ake Samuelson and Lennart Sörnäs: Failure analysis of aircraft windshields subjected to bird impact, ICAS pp.724-729, 1986.
- 2) 佐野 淳 他: 小型民間輸送機の構造前方圧力隔壁への鳥衝突試験・解析: 日本航空宇宙学会, 第37回飛行機シンポジウム, pp.89-92, 1999.
- 3) 島村 和夫, 渋谷 唯司: バードストライク問題の数値シミュレーション, 日本機械学会, 春のシンポジウム, pp.21-24, 2001.
- 4) 越智 淳 他: 金属性翼前縁の新構造様式の開発と鳥衝突試験, 日本航空宇宙学会, 第44構造強度に関する講演会, pp.19-21, 2002.
- 5) 橋 敏雄: 航空機と鳥の衝突, 航空環境研究 No.10, pp.22-27, 2006.
- 6) N.Petricin, R.Duffin: Discrete element modeling of soft body impact against rigid targets, University of Oxford.
- 7) 日本航空宇宙学会編: 第2版 航空宇宙工学便覧, 丸善, 1995.
- 8) 吉江 伸二, 酒井 正嗣, 臼井 俊央: 動的破損伸びを考慮した衝突解析と実験検証, 日本機械学会, 第17回計算力学講演会, 2004.
- 9) Shinji Yoshie, Kazuo Fujimoto, Masatsugu Sakai: Impact behavior of building subjected to blast loading, Int. national symposium on structures under impulsive loading transient phenomena due to impact and blast loading (IB'05), 2005.
- 10) S.M.Walley et al.: Strain rate sensitivity of polymers, DYMAT Journal, Vol.1, 1994.