ハニカムサンドイッチパネルの衝撃特性に関する研究*

渡 邊 正 憲^{*1}, 大 塚 年 久^{*2}
田 村 宏^{*2}, 小 林 志 好^{*2}

Study on the Impact Property of the Honeycomb Sandwich Panel

Masanori WATANABE, Toshihisa OHTSUKA^{*3},
Hiroshi TAMURA and Yukiyo KOBAYASHI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Musashi Institute of Technology,
1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557 Japan

In order to study impact properties of the honeycomb sandwich panel (hereafter, HSP for brevity), drop weight impact tests were carried out using 4 kinds of HSP at several drop velocities. Where, an aramid was used as cores and its core heights were 22.5 mm and 6.3 mm. Surface boards of HSP were made on the aluminum alloy (A 1 100 P) and the fiber reinforced plastic (hereafter, FRP for brevity). Based on the variation of observed deceleration to time of the weight after the impact, absorption energies were calculated. When the energy absorption abilities were compared, HSP with flat plates of the aluminum alloy was superior to that with FRP. This was attributed to the fracture patterns at impact point.

Key Words: Impact Strength, Buckling, Material Testing, Honeycomb Sandwich Panel

1. 緒 言

ハニカムサンドイッチパネル(Honeycomb Sandwich Panel: HSP)は, 複合構造をもつ, 強度的に金属材料に代わり得る構造部材の一つである⁽¹⁾⁽²⁾. その構造は, 六角柱を蜂の巣状に並べたコア材の上下面を平板で接着し一つにしたものである. したがって, コア材のセルサイズ, コア高さ, コア材と表面板の材質, これらの組合せを任意に設計することにより, 使用用途に応じた理想的な性能をもつパネルが得られる. 近年においては, 軽量かつ高強度という点で航空機などの内外装で多用され, 吸音性という点で壁や床等の住宅材として注目されている.

その他にも, HSP は, 安定した衝撃吸収特性を示す. これは, セル軸方向に圧縮すると, コアが厚さ方向にすべて潰れ, 底づき現象を起こすまでほぼ一定の荷重で座屈してゆくためである. この特徴を利用して, 例えば, アルミハニカムは原子力発電所の配管保

護材や自動車の衝撃緩衝用材料に, また, ペーパーハニカムは航空機からの物質投下時のパッドなどに使用されている.

このような利用に合わせて, ハニカムサンドイッチパネルの衝撃特性に関する研究は, そのエネルギー吸収特性を調べることを目的としたものが多い. 例えば, Goldsmith や Moriarty らは, 比較的大きいパネルやコアに小さい飛翔体を衝突させるインパクト試験を実施している⁽³⁾⁽⁴⁾. また, 康井らは多層積層ハニカムパネルの緩衝特性に関して報告している⁽⁵⁾. 小笠原と白鳥らは, コアの衝撃圧潰に関して, 系統的な研究を進めており, 逐次座屈現象の解明と圧潰応力の評価を行っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾. 同様に, 小林ら⁽⁸⁾は圧縮試験を, 河野ら⁽⁹⁾は座屈試験を実施し, 吸収エネルギーに及ぼす衝撃速度の影響を調べている. 最近では, 峯岸らによって, 構造要素が実際に受ける衝撃エネルギーに対応した高速の落下式衝撃試験装置の開発がなされている⁽¹⁰⁾.

ところが, 実際に使用される現場では, 使用条件と同じ状況下での実験を繰返し行うことによって衝撃特性を確認しているのが現状である. これは, 衝撃特性に関する研究が非常に少なく, 設計における信頼性が低いためである.

* 原稿受付 2002 年 5 月 27 日.

^{*1} 武蔵工業大学大学院(☎ 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1).^{*2} 正員, 武蔵工業大学工学部(☎ 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1).

そこで、本研究では、HSPを移動体を利用した場合の異物衝突による衝撃負荷や、重量物運搬時の衝撃緩和装置として用いる場合の衝撃緩和等を想定した落錘衝撃試験を実施し、エネルギー吸収特性について調べた。特に、HSPの力学特性を支配するパラメータとして、コア高さ(h)と表面板の材質⁽¹⁾の影響に関して検討を加えた。また、衝撃特性などの動的特性を知る前に、静的特性を理解することが重要である。さらに、後述するシミュレーションにおいては、静的圧縮試験結果よりシミュレーションで用いる各種の係数を決定するため、静的特性を知ることが理論的に解析する上でも必要である。そこで、静的圧縮試験を実施し、HSPの機械的特性と変形挙動に関して考察を行った。また、HSPの利用範囲を広げるための衝撃特性に関する基礎研究を理論的な観点からも試み、質量-バネ-ダンパ系の力学的モデルによるシミュレーションを行った。

2. 試験片

コア材には、セルサイズ(s) 2.8 mmで、コア高さ(h) 6.3 mmと22.5 mmのアラミドハニカムを使用した。また、表面板には、アルミ表面板(A1100)とFRP表面板の二種類を採用した。これらの組合せにより四種類のハニカムパネルを製作した。図1に試験

Table 1 Specimen constituent material and size

	Material
Core	Aramid honeycomb
	Cell size : $s = 2.8$ [mm]
	Core height : $h = 6.3$ [mm] $h = 22.5$ [mm]
Surface board	Aluminum A1100
	Thickness $t = 0.3$ [mm]
	FRP prepreg (Reinforcement : KS1633) Thickness : $t = 0.3$ [mm]
Adhesive sheet	Made by NewPort NB-101, 102

Fig. 1 Shape of specimen

片形状寸法、表1に試験片構成材料を示す、なお、アルミ表面板の接着にはエポキシ接着シートを使用した。FRP表面板の場合は、平織ガラスプリプレグを二層に積層したものをコア材に直接貼り付けて炉に入れ、180 minの加熱成形を行い製作した。

3. 実験方法

3.1 静的圧縮試験 静的圧縮試験は、落錘衝撃試験で用いる錘の先端部と、同形状の半径30 mmの半球形をしたポンチを用いて、変位速度1 mm/minで、図1に示した試験片の外周から30 mmを金属枠を用いて周辺固定した上で、その中央140×140 mmの試験部を局部圧縮した。実験に際しては、クロスヘッド部の変位と荷重を測定した。

3.2 落錘衝撃試験 落錘衝撃試験は、錘を静的圧縮試験のときと同様に周辺固定した試験片に初速を加えず自由落下させ、衝撃負荷を加える落錘試験法を用いて実施した。衝突速度の調節は、錘の落下高さを変化させることで行い、試験片のほぼ中央部に錘が落下するように位置を設定し、衝撃荷重を加えた。なお、錘の形状はJIS K 7211(硬質プラスチックの落錘衝撃試験方法通則)を参照し、先端部を半径30 mmの半球形とした。なお、重さは約2.1 kgであった。実験に際しては、錘の上端に加速度ピックアップを取付け、減加速度を測定した。衝突速度は、速度センサーにより測定した。

3.3 高速度ビデオカメラ撮影 高速度ビデオカメラ(FASTCAM Rabbit-mini)を用いて、落錘衝撃試験中の変形過程を連続観察した。その際、図1に示す試験片を半分にしたものを用い、切り出した端面におけるコアの座屈と上下表面板のたわみと破壊過程を撮影した。

4. 静的圧縮試験

図2に、4種類の試験片について行われた局部圧縮

Fig. 2 Relationships between load and displacement of static compression test

試験から得られた結果を示す。全ての試験片において、荷重-変位曲線には明確な最大荷重点があり、この点で上面表面板の破断が認められた。また、この点までは、すべての条件において、ほぼ直線的に変化していることが見られる。

次に、表面板の違いによる影響について見てみると、両コア高さの結果とも、負荷初期段階では表面板の違いによる影響は認められない。しかし、FRP表面板をもつ試験片の傾きは、コア高さ 22.5 mm の場合には荷重 0.5 kN 付近、コア高さ 6.3 mm の場合には荷重 1.3 kN 付近を境にして、アルミ表面板をもつそれより幾分大きくなることがわかる。このことは、図 3 に示すように、材質に依存した表面板の変形形態の違いから説明できる。すなわち、アルミ表面板をもつ試験片は、局部荷重が加わると、図 3(a) に示すように、表面板がしぼられ、コア部が座屈を始める。一方、FRP 表面板をもつ試験片は、変局点までの範囲では図 3(b) に示すように、コア部に座屈を生じないで表面板がたわんでいく弾性変形域がある。このことは、弾性変形域で実験を終了し、荷重を除荷した試験片が元の形状にもどり、表面板に損傷を見ることができなかったことから確認できた。その後、変局点を越えると、表面板がしぼられないまま、コアが座屈を始める。そのため、表面板がコアの座屈を抑制することに

なり、後半部の傾きが大きくなると考えられる。

また、コアの座屈域における勾配に着目すると、両材料とも、コア高さ 22.5 mm のもののほうがコア高さ 6.3 mm のものより大きい。このことから、高いコア高さと FRP 表面板を利用することは HSP の曲げ剛性を高くすることがわかる。

最大荷重点は、FRP 表面板をもつコア高さ 6.3 mm の試験片で最大値を、アルミ表面板をもつコア高さ 6.3 mm の試験片で最低値を示す。コア高さ 22.5 mm のときには、その差がほとんど認められない。これらの現象は、載下点直下のコアの降伏座屈強度と HSP の剛性と表面板のしぼりにくさから説明される。すなわち、コア高さ 22.5 mm の場合には、図 4(a) に示すように、HSP の剛性が高くなり、表面板を含むそれ自体がたわみにくい状態になる。このことより、最大荷重点は、下側表面板の強度や剛性の影響をほとんど受けなくなり、コアの降伏座屈に近い値を示すようになったと考えられる。一方、図 4(b) に示すように、コア高さが 6.3 mm の場合には、HSP の剛性が低くなり、HSP はたわみやすくなる。その結果、コアが座屈し始めてからの表面板におけるしぼりは小さくなる。したがって、その分だけコアの厚さ方向における座屈が抑制されるため、最大荷重点が大きくなると考えられる。

以上に述べた、静的特性を考慮した上で、落錘衝撃試験を行い、HSP の衝撃特性について調べた。

5. 落 錘 衝 撃 試 験

5.1 減加速度線図 図 5 に落錘衝撃試験から得られた減加速度線図の一例を示す。図は、アルミ表面板をもつコア高さ 22.5 mm の試験片における衝突速度 4.36 m/s のときのものであり、縦軸は減加速度 [G]、横軸は時間 [s] である。なお、図中 A 点が衝突

Fig. 3 Difference in deformation process depended on surface board

Fig. 4 Difference in deformation process depended on core height

Fig. 5 Example of typical deceleration curve of HSP with aluminum surface board and core of 22.5 mm in height (4.39 m/s)

開始点であり、B 点が最大減加速度発生点、C 点が衝突終了点である。

5.2 最大減加速度-衝突速度の関係 エネルギー吸収量が同一のパネルであれば、最大減加速度の小さいものの方が乗員保護などの観点から衝撃吸収体として好ましい。そこで、減加速度線図のピーク値である最大減加速度を抽出し、衝突速度との関係を調べた。図 6 はアルミ表面板をもつ試験片の実験結果を、図 7 は FRP 表面板をもつ試験片の実験結果をそれぞれ示す。それぞれの図中の近似線は、最小二乗法で近似したものである。両図から得られた近似線をまとめて図 8 に示す。

図 8 より、最大減加速度と衝突速度の関係において、試験片の種類によって明確な差を見ることができなかった。しかし、図 6 と図 7 を比較してわかるように、FRP 表面板の実験結果は、アルミ表面板の場合と比べてばらつきが大きく、特に高速度域において顕著である。このことは、アルミ表面板と FRP 表面板の衝撃エネルギー吸収形態の違いにあると考えられる。アルミ表面板は大きく塑性変形し、コア部とともにエネルギーを吸収していた。したがって、このような変形形態が、どの速度域においても比較的安定した吸収性能を示すものと考えられる。それに対し、FRP 表面板をもつ試験片は、表面板の破壊が始まってもしぼられにくい、コアはすぐに座屈を始めずに最大荷重点に達して一気に破断に至る傾向がある。このとき、FRP は樹脂の白化や、その強化繊維の引き抜けや破断によりエネルギーを吸収する。これらの中で、架橋効果を伴う強化繊維の引き抜けによるエネルギー吸収量は、繊維の引き抜け長さによって変化する。繊維の引き抜け長さはその時々で変化するため、高速度域における不安定なエネルギー吸収量を示したと考えられる。

5.3 荷重-変位線図 初速度 V_0 で落下してきた錘の時刻 t_n 後の速度は、初速度に加速度を時間で積分したものの和で求められる。

$$V_n = V_0 + \int_0^{t_n} a(t) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、(1)式右辺の第二項は、微小時間 Δt に分割したものに、そのときの加速度 a_i をかけた面積の総和に近似できる。よって、時刻 t_n における速度 V_n は、

$$V_n = V_0 + \sum_{i=0}^n a_i \Delta t \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。さらに、 V_n を同様に積分すると、錘の変位が算出できる。したがって、変位は減加速度線

Fig. 6 Relationships between velocity of weight and maximum deceleration of weight for specimen with aluminum surface board

Fig. 7 Relationships between velocity of weight and maximum deceleration of weight for specimen with FRP surface board

Fig. 8 Relationships between velocity of weight and maximum deceleration of weight for all types of specimen

図の減加速度を時間で 2 階積分して求める。

$$S_n = \int V_n dt = \int \left\{ V_0 + \int a(t) dt \right\} dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、荷重は減加速度に錘の質量をかけて求める。

図 5 からこのようにして求めた荷重-変位線図を、

縦軸に荷重 P [kN], 横軸に変位 δ [mm] をとって図9に示す。この図の囲まれた部分の面積は、錘が失った運動エネルギー量となる。本研究では、この損失エネルギーを試験片が吸収したエネルギーと考えた。つまり、この面積が大きいほどエネルギー吸収量が多いことになる。

5.4 吸収エネルギー量-衝突速度の関係 減加速度線図より算出した荷重-変位線図で囲まれた部分の面積、つまり試験片が吸収したエネルギー量を求め、衝突速度との関係を調べた。図10はアルミ表面板をもつ試験片の実験結果を示す。5.3節と同様に、近似線は最小二乗法で近似したものであり、図12は、すべての種類の近似線をまとめて示したものである。また、実験結果と併せて示す太い実線は、衝突速度より算出した衝突直前に錘がもつ運動エネルギー量を示したものであり、実験結果とこの線との差が小さい程、その試験片のエネルギー吸収量が優れているということである。

Fig. 9 Example of typical load-displacement curve of HSP with aluminum surface board and core of 22.5 mm in height (4.39 m/s)

Fig. 10 Relationships between velocity of weight and energy absorption of specimen with aluminum surface board

図12より、FRP表面板をもつ試験片に比べ、アルミ表面板をもつ試験片のほうが、より多くの衝撃エネルギーを吸収していることがわかる。運動エネルギーを示した線と比較してみると、アルミ表面板をもつ試験片はおよそ1/2を吸収しており、コア高さの影響がほとんどないこともわかる。しかし、FRP表面板をもつ試験片は1/5~1/3しか吸収しておらず、コア高さが高いほうがエネルギー吸収特性に優れていた。このように、表面板とコア高さの違いによって、エネルギーの吸収形態が異なるため、材料のエネルギー吸収量が同じでも、それらを変化させることにより、異なった吸収特性をもつハニカムサンドイッチパネルを得ることができることがわかった。

6. 高速度ビデオカメラ撮影

落錘衝撃試験結果より、HSPは、表面板とコア材それぞれの変形形態の違いによってさまざまな衝撃吸収特性を示すことがわかった。しかし、衝突時間が一瞬

Fig. 11 Relationships between velocity of weight and energy absorption of specimen with FRP surface board

Fig. 12 Relationships between velocity of weight and energy absorption for all types of specimen

であるため、5章では各試験片の変形量を計算から求めた。それゆえ、変形過程を肉眼で観察することができれば、5章で述べた考察の確認ができる。そこで、高速度ビデオカメラを用いて、衝突の瞬間を撮影し、変形過程を連続観察することにより、各試験片の変形形態の違いを明確にした。

図13はアルミ表面板をもつコア高さ22.5mmの試験片の衝突速度4.59 m/sのときの撮影結果で、図14はFRP表面板をもつコア高さ22.5mmの試験片の衝突速度4.64 m/sのときの撮影結果である。

両図ともに、錘の落下によって、上部表面板がしぼられ、コアが座屈していることがわかるが、アルミ表面板をもつものの方は表面板が大きくしぼられている。それに対し、FRP表面板をもつものの方は除荷後、変形が目で見えてわかる程度回復している。

7. シミュレーション

7.1 力学的モデル アルミ表面板とFRP表面板をもつHSPのそれぞれについて、その変形形態の特徴を考慮した質量-バネ-ダンパ系の力学的モデルを考え、減加速度線図のシミュレーションを行った。

図15に示すものはアルミ表面板をもつ試験片の力学的モデルであり、運動方程式を考えると、

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 & \cdots \cdots (4) \\ kx_2 = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) & \cdots \cdots (5) \end{cases}$$

となる。ここで、 k はバネ定数、 c はダンパ定数であ

る。(4)、(5)式より、 x_1 についてまとめると、

$$\frac{cm}{k}\ddot{x}_1 + m\dot{x}_1 + cx_1 = 0 \quad \cdots \cdots (6)$$

となるので、(6)式のような三階の同次微分方程式を立て、 x_1 について解くことにより、減加速度方程式を導いた。

図16にはFRP表面板をもつ試験片の力学的モデルを示し、同様に運動方程式を考えると、

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 & \cdots \cdots (7) \\ k_2x_2 = k_1(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) & \cdots \cdots (8) \end{cases}$$

となる。ここで、 k_1 、 k_2 はバネ定数、 c はダンパ定数である。(7)、(8)式より、 x_1 についてまとめると、

$$m\frac{c}{k_2}\ddot{x}_1 + m\left(1 + \frac{k_1}{k_2}\right)\dot{x}_1 + cx_1 + k_1x_1 = 0 \quad \cdots (9)$$

となるので、式(9)のような三階の同次微分方程式を立て、同様に減加速度方程式を導いた。

7.2 バネ定数とダンパ定数の決定方法 減加速度方程式に代入するバネ定数とダンパ定数は、減加速度線図から得られた荷重-変位線図と、静的圧縮試験から得られた荷重-変位線図の勾配を比較検討し、決定した。図17にその一例を示す。図はFRP表面板をもつコア高さ22.5mmの試験片のものである。

バネ定数 k と k_2 は、衝撃負荷時の塑性変形域「B」部における荷重-変位線図の傾きに相当する。しかし、落錘衝撃試験結果の塑性変形域「B」部の傾きは、減加速度線図を時間で2階積分して求めているため、取得が難しい。そこで、実測値でもあり、比較的簡単に取得できる静的圧縮試験結果の塑性変形域

Fig. 13 HSP with aluminum surface board of core height 22.5 mm ($V=4.59$ m/s)

Fig. 14 HSP with FRP surface board of core height 22.5 mm ($V=4.64$ m/s)

Fig. 15 Mechanical model of HSP with aluminum surface board

Fig. 16 Mechanical model of HSP with FRP surface board

「D」部の傾きが「B」部の傾きとほぼ同程度であることに着目して、「D」部の傾きを k_1 および k_2 とした。弾性変形域において支配的である k_1 は、落錘衝撃試験結果の弾性変形域「A」部の傾きが、静的圧縮試験結果の弾性変形域「C」部の傾きのおよそ半分であるので、「C」部の傾きの半分とした。また、ダンパ定数 c はおもに衝突時間に影響するので、高速度のときの減加速度線図との誤差が最小になるように求めた。その結果、表2、3に示す定数が求まった。

7.3 シミュレーション結果 4種類の試験片それぞれにおいて、衝突速度を0.5 m/sから0.1 m/sごとに变化させて減加速度線図をシミュレートし、その最大減加速度を求めた。得られた最大減加速度と衝突速度との関係をまとめ、比較のため落錘衝撃試験の結果と併せて図18～21に示す。図18、19は、アルミ表面板をもつ試験片のコア高さが6.3と22.5 mmのもの、図20、21はFRP表面板をもつ試験片のコア高さが6.3と22.5 mmのものを示す。なお、落錘衝撃試験装置の性能上、衝突速度2 m/s以下での実験が不可能であったため、0～約2 m/sまでの実験データを得ることができなかった。すべての図より、シミュレーション結果は、実験結果と同じ傾向を示した。したがっ

Table 2 Coefficients for aluminum surface board type

Core height [mm]	k_1 [kN/m]	k_2 [kN/m]	c [kN·s/m]
6.3	91	285	1.25
22.5	142	374	5.2

Table 3 Coefficients for FRP surface board type

Core height [mm]	k [kN/m]	c [kN·s/m]
6.3	219	2.25
22.5	313	12.50

Fig. 17 Results of drop weight impact test and static compression test of FRP surface board and core of 22.5 mm in height

Fig. 18 Comparison of maximum deceleration obtained from simulation and drop weight impact test against velocity of weight for the specimen with FRP surface board and core of 22.5 mm in height

Fig. 19 Comparison of maximum deceleration obtained from simulation and drop weight impact test against velocity of weight for the specimen with aluminum surface board and core of 22.5 mm in height

Fig. 20 Comparison of maximum deceleration obtained from simulation and drop weight impact test against velocity of weight for the specimen with FRP surface board and core of 6.3 mm in height

Fig. 21 Comparison of maximum deceleration obtained from simulation and drop weight impact test against velocity of weight for the specimen with Aluminum surface board and core of 6.3 mm in height

て、本シミュレーションは妥当であり、FRP 表面板が破断するまでのシミュレーションが、ほぼ可能であると判断できる。ただし、FRP 表面板の実験結果のプロットは、シミュレーション結果の上下に分散しているが、このような差が現れた原因は、FRP 表面板における強化繊維の引き抜けによる影響だということは前述した通りである。

8. 結 言

静的圧縮試験と落錐衝撃試験を実施した結果と質量-バネ-ダンパ系の力学モデル解析の結果から以下の知見が得られた。

(1) FRP 表面板をもつ試験片には、圧縮初期段階においてハニカムサンドイッチパネル全体がたわむ弾性変形域が存在した。

(2) FRP 表面板をもつ試験片の最大荷重点は、弾性変形する分だけ、アルミ表面板をもつ試験片のそれより大きかった。

(3) コアが降伏座屈を開始しはじめてからの曲げ抵抗は、FRP 表面板をもつ試験片のほうがアルミ表面板をもつものより大きかった。

(4) 本実験の範囲内においては、最大減加速度は試験片の種類によらず、重錐の落下時の衝突速度に依存していた。

(5) アルミ表面板をもつ試験片のほうがFRP 表面板をもつ試験片より衝撃エネルギーをより多く吸収する。

(6) 本実験で用いたFRP 表面板をもつ試験片は、表面板が破壊するまでは、ハニカムサンドイッチパネル全体が大きいたわむことによって衝撃エネルギーを吸収した。

(7) ハニカムサンドイッチパネルが衝撃エネルギーを吸収する際に、コア高さが高い試験片は局部的な変形形態を示し、コア高さが低い試験片はパネル全体で大きいたわむ変形形態を示した。

(8) 以上のことから、ハニカムサンドイッチパネルは表面板、コア高さの違いにより異なった衝撃吸収特性を示すため、予想される衝突速度や緩衝材として求める特性を考慮して衝突速度や落錐重量に対応した寸法・材質のハニカムサンドイッチパネルを使用する必要があることが分かった。

(9) 質量-バネ-ダンパ系の力学的モデルを用いた解析より、本実験の範囲内においては、表面板破断直前までの減加速度のシミュレーションを精度よく実施することができた。

おわりに、本実験の遂行にあたりコア材を提供して頂いた(株)ジャムコの尾崎正路氏に記して謝意を表する次第である。

文 献

- (1) 大塚正久訳, セル構造体, (1993), 4-12, 内田老鶴園.
- (2) 宮入裕夫, サンドイッチ構造の基礎, (1999), 17-28, 日刊工業新聞社.
- (3) Goldsmith, W. and Sackman, J.L. *Int. J. Impact Engng.*, **12** (1992), 241-262.
- (4) Moriarty, K. and Goldsmith, W., *Int. J. Impact Engng.*, **12** (1993), 293-317.
- (5) 康井義明・粕谷平和・森山裕幸・國本隆・馬場武明・奥戸行一郎, 機論, **61**-589, A (1995), 1979-1985.
- (6) 小笠原永久・白鳥正樹・宮原進・干強, 機論, **63**-608, A (1997), 774-779.
- (7) 小笠原永久・白鳥正樹・宮原進・干強, 機論, **63**-616, A (1997), 2575-2579.
- (8) 小林秀敏・臺丸谷政志・小林民巨, 機論, **63**-616, A (1997), 2580-2585.
- (9) 河野俊一・周弘・柊軍・斎藤俊, 機論, **64**-627, A (1998), 2813-2818.
- (10) 峯岸正勝・熊倉郁夫・岩崎和夫, 航空宇宙技術研究所資料, TM-754 (2000).
- (11) 西崎到, 日本複合材料学会誌, **26**-2 (2000), 37-42.