

炭素繊維強化炭素複合材料の
衝撃損傷評価に関する研究

2013年6月

吉岡孝和

首都大学東京

目 次

| | |
|--|----|
| 第 1 章 緒論 | 1 |
| 1.1 本研究の背景 | 2 |
| 1.1.1 炭素繊維強化炭素複合材料 | 2 |
| 1.1.2 複合材料の衝撃試験 | 5 |
| 1.2 従来の研究と問題点 | 9 |
| 1.2.1 衝撃荷重のウェーブレット解析 | 9 |
| 1.2.2 UD-C/C 複合材料と 2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価および剛性低下 | 10 |
| 1.3 本論文の目的 | 10 |
| 1.4 本論文の構成 | 11 |
| 第 2 章 衝撃荷重のウェーブレット解析 | 13 |
| 2.1 緒言 | 14 |
| 2.2 実験方法 | 14 |
| 2.2.1 試験片 | 14 |
| 2.2.2 落錘式衝撃試験 | 14 |
| 2.3 離散ウェーブレット変換と多重解像度解析 | 16 |
| 2.4 衝撃荷重履歴の多重解像度解析 | 17 |
| 2.4.1 多重解像度解析 | 17 |
| 2.4.2 低周波（近似）成分の考察 | 20 |
| 2.4.3 高周波成分と分解レベル | 23 |
| 2.5 衝撃荷重－たわみ線図と衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出 | 25 |
| 2.6 結言 | 27 |
| 第 3 章 UD-C/C 複合材料の衝撃損傷評価 | 28 |
| 3.1 緒言 | 29 |
| 3.2 実験方法 | 29 |
| 3.2.1 試験片 | 29 |
| 3.2.2 落錘式衝撃試験 | 29 |
| 3.3 衝撃荷重履歴の多重解像度解析 | 31 |
| 3.3.1 衝撃荷重履歴・たわみ履歴 | 31 |
| 3.3.2 多重解像度解析 | 31 |
| 3.4 衝撃荷重－たわみ線図および吸収エネルギーによる損傷評価 | 35 |
| 3.4.1 衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出 | 35 |

| | | |
|------------|---------------------------------|-----------|
| 3.4.2 | 繰返し衝撃による損傷の評価 | 35 |
| 3.4.3 | 衝撃破壊 | 39 |
| 3.4.4 | 吸収エネルギーによる損傷評価 | 42 |
| 3.5 | 結言 | 44 |
| | | |
| 第4章 | 2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価 | 45 |
| 4.1 | 緒言 | 46 |
| 4.2 | 実験方法 | 46 |
| 4.2.1 | 試験片 | 46 |
| 4.2.2 | 落錘式衝撃試験 | 46 |
| 4.3 | 離散ウェーブレット変換による衝撃荷重履歴の多重解像度解析 | 47 |
| 4.3.1 | 衝撃荷重履歴 | 47 |
| 4.3.2 | 多重解像度解析 | 50 |
| 4.4 | 衝撃荷重-たわみ線図および吸収エネルギーによる損傷評価 | 52 |
| 4.4.1 | 衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出 | 52 |
| 4.4.2 | 低衝撃エネルギー時の衝撃特性 | 52 |
| 4.4.3 | 繰返し衝撃を受ける場合の衝撃角度の影響 | 55 |
| 4.4.4 | 衝撃破壊におけるの衝撃角度の影響 | 57 |
| 4.4.5 | 吸収エネルギーによる損傷評価 | 64 |
| 4.5 | 結言 | 65 |
| | | |
| 第5章 | C/C 複合材料の剛性低下 | 66 |
| 5.1 | 緒言 | 67 |
| 5.2 | 実験方法 | 67 |
| 5.2.1 | 試験片 | 67 |
| 5.2.2 | 落錘式衝撃試験 | 67 |
| 5.3 | 衝撃荷重履歴の多重解像度解析 | 68 |
| 5.3.1 | 多重解像度解析 | 68 |
| 5.3.2 | 衝撃荷重-たわみ線図と衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出 | 68 |
| 5.3.3 | 試験片の剛性履歴 | 70 |
| 5.4 | 衝撃荷重-たわみ線図および吸収エネルギーと剛性比による損傷評価 | 72 |
| 5.4.1 | 繰返し衝撃による損傷の評価 | 72 |
| 5.4.2 | 吸収エネルギーと剛性低下 | 76 |
| 5.4.2.1 | UD 丸棒試験片 | 76 |
| 5.4.2.2 | 2D 角棒試験片 | 79 |
| 5.4.2.3 | 2D 積層板試験片 | 80 |

| | |
|---------------------|-----------|
| 5.4.3 吸収エネルギーと損傷増加比 | 83 |
| 5.5 結言 | 85 |
| 第6章 結論 | 86 |
| 謝 辞 | 90 |
| 参考文献 | 91 |

本論文に用いる主な記号

- a : ウェーブレットの拡大縮小パラメータ
- $A5, A6$: ウェーブレット解析で得られる近似関数 , Approximation (低周波成分) ,
数字はウェーブレット解析の分解レベル
- A_i : 衝撃棒の断面積
- B : 試験片幅
- b : ウェーブレットのシフトパラメータ
- c : 試験片の粘性減衰係数
- c_i : 衝撃棒の応力波の伝播速度
- d : 試験片直径
- $D1, D2, D3, D4$: ウェーブレットの成分, Detail (高周波成分), 数字 はウェーブレット
解析の分解レベル
- E_{ab} : 試験片の吸収エネルギー
- E_i : 衝撃棒の縦弾性係数
- E_{ip} : 衝撃エネルギー
- E_p : 衝撃棒の位置エネルギー
- E_x : 試験片の X (軸) 方向の縦弾性係数
- $f_j(t)$: ウェーブレット解析で得られる近似関数 , Approximation (低周波成分)
- $f_j(t)$: ウェーブレット解析の分解レベル j の近似関数
- f_{ni1} : 衝撃棒の 1 次の縦振動の固有振動数
- f_{ns1}, f_{ns2} : 試験片の曲げ固有振動数, 数字は次数を示す.
- $f(n)$: 離散数列
- $F(t)$: 衝撃棒先端部, 衝撃点の荷重履歴
- $f(t)$: 時間 t の関数である信号
- $F'(w)$: 衝撃荷重
- g : 重力加速度
- $g_j(t)$: ウェーブレットの成分, Detail (高周波成分)
- G_{xy} : 試験片のせん断弾性係数
- H : 衝撃棒の落下高さ
- h : 試験片厚さ
- $H(t)$: ヘビサイドの単位ステップ関数
- I : 試験片の断面 2 次モーメント
- j : ウェーブレット解析の分解レベル
- k_p : Hertzの接触ばね定数
- k_s : 試験片梁のばね定数

k_t, k_{t0}, k_{tL} : 弾性支持の直線ばね定数
 $k_\theta, k_{\theta0}, k_{\theta L}$: 弾性支持の回転ばね定数
 L : 試験片スパン
 L_i : 衝撃棒の長さ
 m : 衝撃棒の質量 m_i , 試験片質量 m_s と試験片支持部上部の円柱梁の質量 m_b の等価質量で
 まる質量
 m_b : 試験片支持部上部の円柱梁の質量
 m_i : 衝撃棒の質量
 m_s : 試験片の質量
 N : 自然数でウェーブレット関数 Daubechies の数列番号
 n : 分割数
 r_i : 衝撃棒先端部球面半径
 r_s : 試験片半径
 $s_k^{(j)}$: ウェーブレットのスケーリング係数
 t : 時間
 u_y : はりの振幅変位
 V_0 : 衝撃速度
 V : 速度
 w : 試験片中央部 $L/2$ のたわみ
 α : 局所変形による衝撃棒と試験片の相対接近量
 Δt : 時間変化の微小幅
 δ : 微小長さ
 $\varepsilon(t)$: ひずみ応答
 ζ : 試験片の減衰比
 θ_I : 衝撃角度
 λ : r_i, r_s により決まる定数
 ν_i : 衝撃棒のポアソン比, ν_s : 試験片のポアソン比
 ρ_i : 衝撃棒の密度
 $\phi_{j,k}(t)$: ウェーブレットのスケーリング関数
 ψ : ウェーブレット
 $\psi_{a,b}(t)$: ウェーブレットの基底
 $\psi_{j,k}$: 離散化したウェーブレット
 ω : 試験片の固有角振動数

第 1 章

緒 論

1.1 本研究の背景

1.1.1 炭素繊維強化炭素複合材料

炭素繊維強化炭素(C/C)複合材料は、炭素を母材として炭素繊維で強化した複合材料である。無酸素雰囲気下では 2000℃以上の高耐熱性に加え、軽量で高強度を有している。また、耐摩耗性、耐食性、生体適合性、電気伝導性ならびに熱伝導性などにも優れた特長を持つため、航空宇宙分野を始めとしたさまざまな分野で耐熱材料、ブレーキ材料、生体用材料などとして利用されている^{(1)・(2)}。

具体的な利用例としては、スペースシャトルの翼前縁部の耐熱タイルやコンコルド、エアバスなどの航空機用のブレーキ材料から、

- (1) 熱処理用の炉材部品、トレーや治具類などの耐熱性の製品
- (2) 産業用、自動車用のクラッチ、ブレーキ、軸受や自動車用の LSD(差動制限デフレシヤルギヤ装置)、電車パンタグラフ用すり板材など摺動性を活かした製品
- (3) 腐食環境等での使用を目的とした耐食性のある電極材など

様々な開発がなされている⁽³⁾。

なお、C/C 複合材料の製造方法としては、製造期間が短期間で、大型部材も制作可能となったプリフォームド・ヤーン(PY)法がある。PY 法は炭素繊維束中にマトリックス用の炭素微粉末をあらかじめ分散させたものを素材とし、これを型内にセットしてホットプレス成形(600℃)したあとに 2000℃程度の本焼成を行うことにより C/C 複合材料を製造するプロセスである。Fig.1.1⁽⁴⁾に PY 法による C/C 複合材料の製造工程、Fig.1.2 に炭素繊維の配列方向、Fig.1.3 に PY 法の C/C 複合材料の写真を示す。炭素繊維束中にマトリックス素材を分散させて高分子フィルムで包んだもの(PY)を束ねて 1 方向に引きそろえシート状にした素材(プリプレグ)を出発原料としている。Fig.1.3(a), (b)に積層構成が 1 方向強化材(UD), 0°/90° 交互積層材(2D)を示すが、PY 法によって製造された C/C 複合材料の特徴として、微細組織の観点から見ると材料製造時の焼結過程および室温までの冷却過程における母材(マトリックス)の収縮によって高い成形残留応力が発生し、UD 材には存在しないが、2D 材では夥しい数の繊維軸に沿ったクラック(通常トランスバースクラック(TC)と呼ばれる)が発生する⁽⁴⁾。

このような特徴を有する C/C 複合材料であるが、衝撃負荷に対して脆弱であるという欠点が挙げられる。高耐熱性および軽量高強度のためスペースシャトルの翼前縁部の耐熱タイルとして採用されたが、2003 年 2 月スペースシャトル「コロンビア号」の事故は C/C 複合材料の耐衝撃性について大きな教訓となる出来事である。その概要の一部については Fig.1.4⁽⁵⁾に示す。コロンビア号打上げ時に外部燃料タンクから断熱材が脱落し、左翼前縁部 RCC パネルに衝突(Fig.1.4(a))、軌道周回時には RCC パネルの損傷状態を正確に確認できず、大気圏突入時において損傷した RCC パネルから高温ガスが流入し、爆発事故となってしまった。Fig.1.4(b),(c)は事故後の検証での衝撃実験結果である。

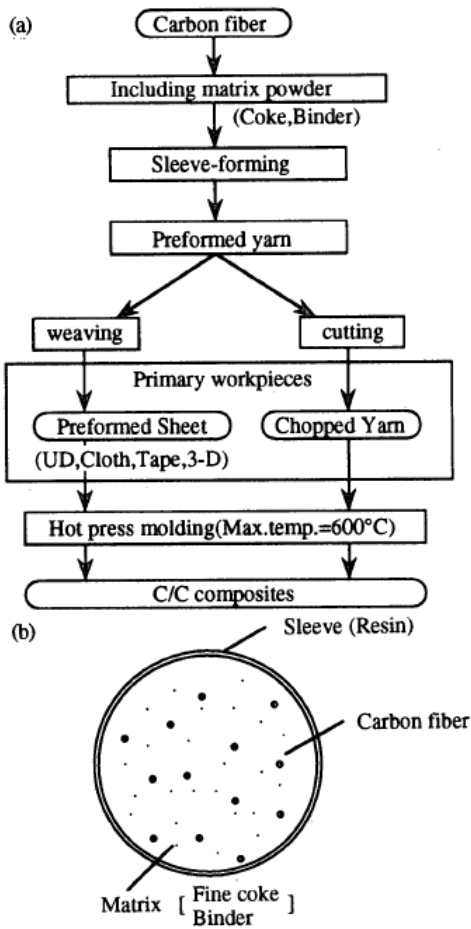
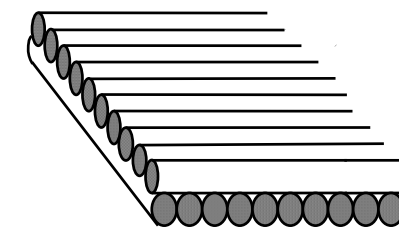
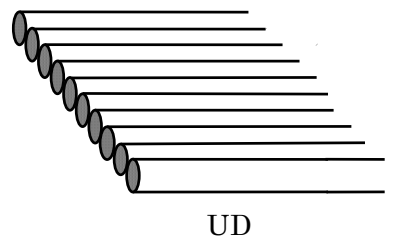
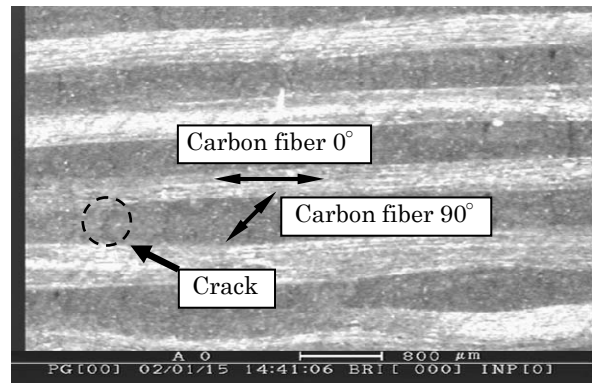
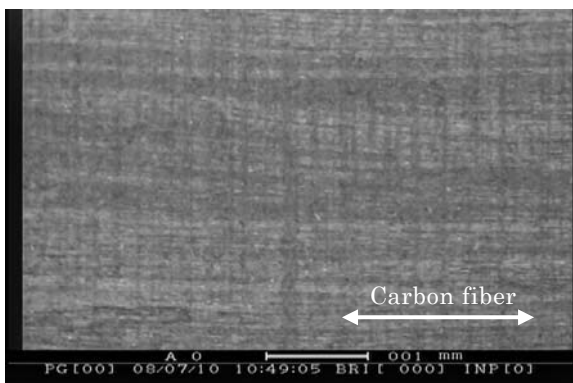


Fig.1.1 Manufacturing process of C/C composite by preformed yarn method (a), a model of preformed yarn (b) (4).



2D(0° /90° mutual lamination)

Fig.1.2 Carbon fiber orientations.



(a) UD

(b) 2D-C/C(0° /90° mutual lamination)

Fig.1.3 C/C composites by preformed yarn method.



(a) Columbia sitting at Launch Complex 39-A. The upper circle shows the left bipod (-Y) ramp on the forward attach point, while the lower circle is around RCC panel 8-left.



(b) The large impact hole in Panel 8 from the final test.



(c) Numerous cracks were also noted in RCC Panel 8.

Fig.1.4 Outline of space shuttle *Columbia* accident⁽⁵⁾.

C/C 複合材料は、このように耐熱性のみならず構造材としての特性も必要とされている材料でもあり、衝撃特性の向上も今後より重要となる。

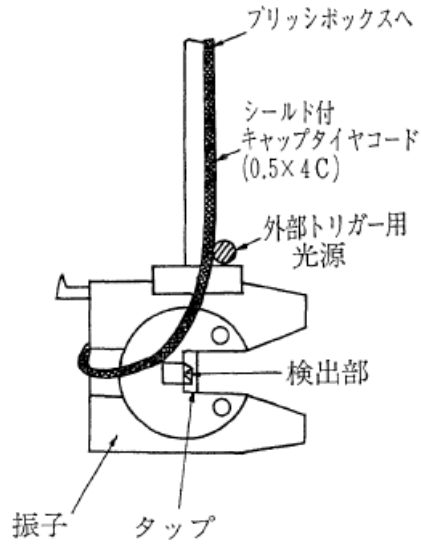
そして、CFRP などの他の多くの複合材料と同様に物体の衝突によって大きな強度低下を起こすことが懸念され、工具落下に代表されるような比較的エネルギーの低い衝撃でも損傷を受けることがあり、外部観察で損傷発生が確認できない場合でも、内部に損傷が生じている可能性があり、その損傷評価が重要となっている。衝撃損傷によって引き起こされる複合材の強度低下は、特に圧縮強度において大きいことが知られており、衝撃後圧縮強度(CAI: Compression after impact)が航空機構造用複合材においては、重要な材料評価項目になっているほどである^{(6)・(7)}。

1.1.2 複合材料の衝撃試験

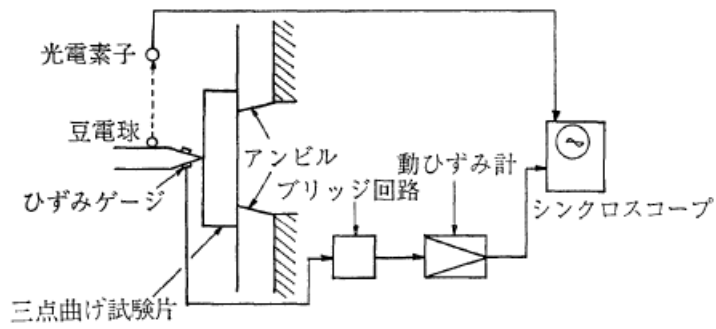
複合材料として幅広く使用されている繊維強化プラスチック(FRP)は、不均質、異方性などの性質を有しているために、衝撃を受けたときに発生する損傷形態も非常に複雑であり、軽微な損傷でも材料の残留強度を著しく低下させる問題を含んでいる。そのため、多角的な衝撃強度や損傷に対する評価などが非常に重要となっている⁽⁸⁾。

複合材料の衝撃実験としてシャルピー、アイゾット衝撃試験は、従来から金属材料などの衝撃試験方法として広く受け入れられており、材料の靱性が簡単に求められるという利点を持ち、複合材料の衝撃試験法として利用されることが多く、材料、積層構成、切欠きの有無、形状などさまざまなパラメータを変えた実験結果も数多い^{(9)・(12)}。両試験方法とも基本的には比較的短い梁状試験片に数 m/s 程度の速度で衝撃曲げ荷重を加え、破断までの吸収エネルギーを測定するものである⁽⁹⁾。また、測定した最大荷重値から動的破壊靱性を求め、設計にいかん利用するかも検討されている^{(10)・(11)}。これらの試験法の欠点は試験片寸法、形状やその他の試験条件が測定結果に影響を与えることにある。よって、測定量は物理的に意味のある材料固有の材料定数を与えず、ある測定条件下での相対的な比較しかできない。寸法の異なる実際の構造物に対しては直接設計データとして使えない。

また、Fig.1.5⁽¹¹⁾のように振り子に貼ったひずみゲージの出力より衝撃荷重-時間曲線を求めるが、その曲線に高周波成分が重畳されるため、フィルタリングして滑らかな荷重-時間曲線を求めることも多い。しかし、フィルタリングによる荷重測定誤差の問題は残されている⁽¹³⁾。衝撃荷重データの平滑化としては、Fig.1.6 に示すような Venzi の方法^{(10)・(11)}によって衝撃荷重を評価している場合もある。このような幾つかの欠点があるが、破面観察と合わせれば、衝撃破壊プロセス、エネルギー吸収メカニズムなどの情報を比較的簡単に与えてくれる⁽⁹⁾。



(a)



(b)

Fig.1.5 Measuring system of impact load (a) , measuring circuit (b) in Charpy impact test⁽¹¹⁾.

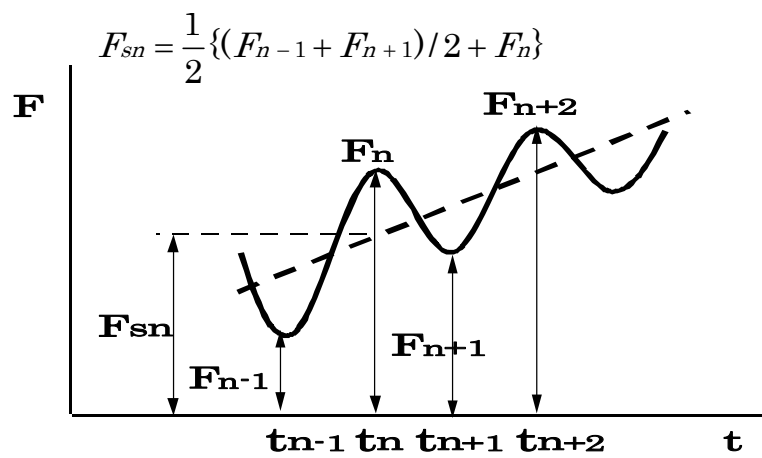


Fig.1.6 Venzi's metod⁽¹¹⁾.

また、より単純な応力状態の衝撃負荷下での力学特性を測定することにより、物理的に意味のある材料固有の定数を求めようとする努力もなされている。スプリットホプキンソン棒(SHPB)法は、比較的短い柱状の試験片に一軸衝撃圧縮応力を与える一軸圧縮応力衝撃試験を始めとして、一軸引張応力など単純応力、ひずみ状態での衝撃試験を中心に複合材料の試験法としても応用されている⁽⁹⁾⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。また、Fig.1.7のような動的破壊靱性の評価にも適用されている⁽¹⁶⁾⁻⁽²¹⁾。但し、立ち上りの緩やかなランプ状の入力波を用いる場合、入力荷重を適切に制御することが困難である場合も少なくない⁽¹⁷⁾。

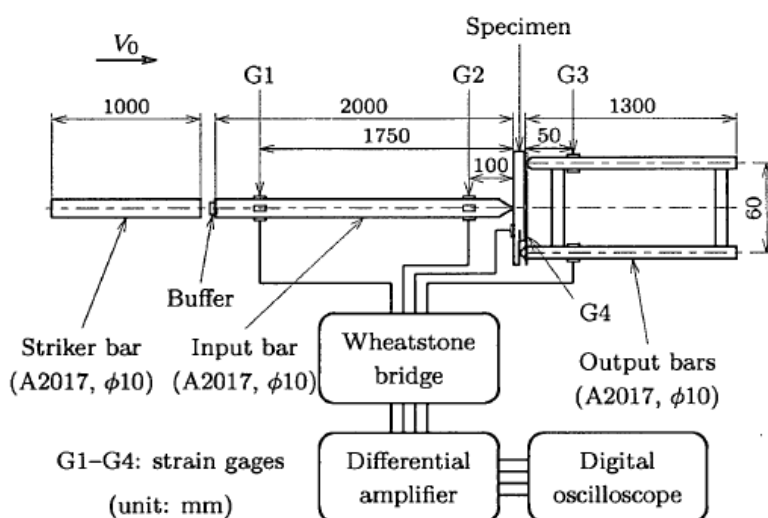


Fig.1.7 Schematic drawing of impact MMF test apparatus using SHPB technique⁽¹⁶⁾.

その他にシャルピー、アイゾット衝撃試験等のように質量の比較的大きな衝撃体を使用し、衝撃速度が比較的小さく応力波の影響の少ない範囲での衝撃試験に対して、小質量衝撃体による高速衝撃試験で衝撃体が貫通する場合の研究も行われている⁽²²⁾⁻⁽²⁶⁾。

CFRPなどの複合材料は、物体の衝突によって大きな強度低下を起こすことが懸念され、工具落下に代表されるような比較的小エネルギーの低い衝撃でも損傷を受けることがあり、外部観察で損傷発生が確認できない場合でも、内部に損傷が生じている可能性があり、その損傷評価が重要となっている⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾。このようなFRP積層板に対する衝撃試験方法として、落錘による曲げ試験がよく用いられている。シャルピーあるいはアイゾット衝撃試験などの振り子形試験法と比較して成形品をそのままの形で評価でき、破壊の方向を強制しないなどの利点がある⁽²⁷⁾⁻⁽²⁸⁾。

落錘試験は、自由落下のため衝撃速度は数 m/s 以下で、SHPB法に比べて低速であるが、構造物に物体が衝突することを想定した実用的な面をもち、多くのFRPの衝撃試験結果が報告されている⁽⁸⁾⁽²⁷⁾⁻⁽⁴⁶⁾。落錘衝撃時の貫通破壊までの損傷過程を考察するにあたり、貫通に至らない低エネルギー衝撃実験が有効であることも示されている⁽³²⁾。そして、FRP

の衝撃特性の評価基準として、衝撃荷重履歴、荷重-たわみ線図、衝撃エネルギーや損傷に有する衝撃吸収エネルギーおよび損傷観察などが採用されている。通常、計装化した落錘衝撃試験機では、荷重点変位は落錘の加速度の変化から間接的に求められるが、直接変位測定した方が精度よく変位の測定が行われていることが報告されている⁽⁴⁶⁾。FRPの落錘試験で直接たわみを測定して得られた荷重-たわみ線図の例を Fig.1.8⁽⁸⁾、Fig.1.9⁽³³⁾に示す。試験片がたわみ始める時点では、すでに荷重値が0でないことがわかる。

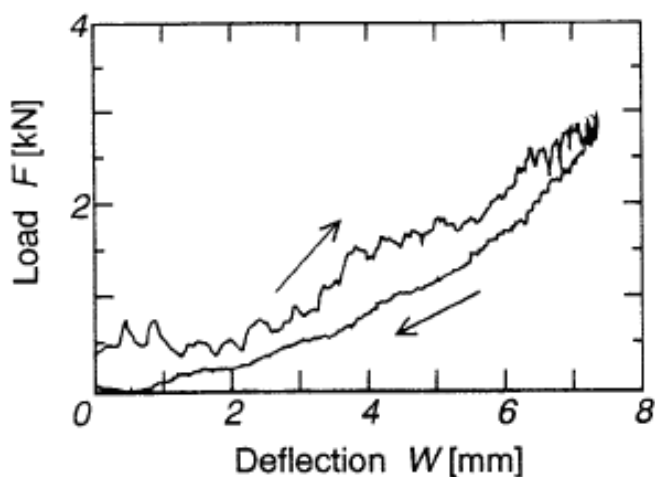


Fig.1.8 Result of impact test (CFRP)⁽⁸⁾.

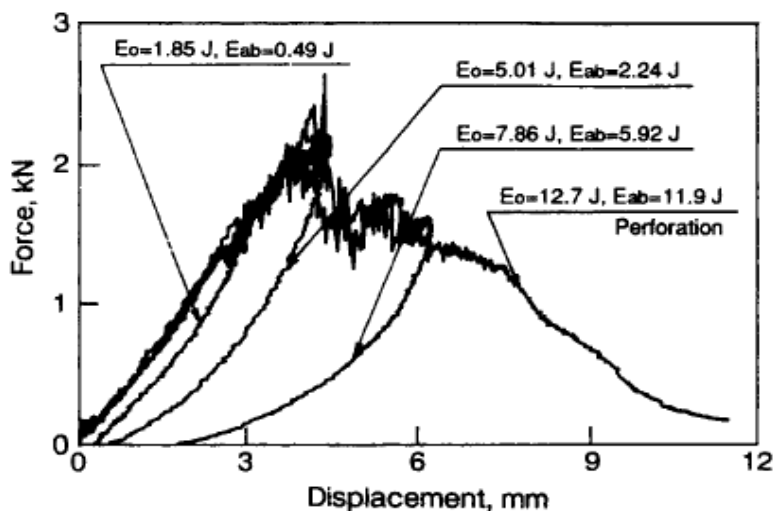


Fig.1.9 Typical force-displacement curves in low energy impact and perforation impact (CFRP)⁽³³⁾.

このように FRP の衝撃特性に関する試験は数多くなされ、研究成果が報告されている。しかし、C/C 複合材料の衝撃特性に関する研究では SHPB 法や高速鋼球による高速衝撃を対象とした研究⁽⁴⁷⁾⁻⁽⁵⁰⁾がいくつか行われているが、落錘試験による研究報告⁽⁶⁾も少なく、耐衝撃性ならびに衝撃に伴う損傷機構の詳細については、限られた研究で公表されず十分に明らかにされているとは言えない。また、衝撃による損傷を評価するには、先ず材料に負荷される衝撃荷重を正確に求めることが重要となる。

1.2 従来の研究と問題点

1.2.1 衝撃荷重のウェーブレット解析

シャルピー衝撃試験では、フィルタリングして滑らかな荷重-時間曲線を求めることも多いが、フィルタリングによる荷重測定誤差の問題は残されている⁽¹³⁾。衝撃荷重データの平滑化としては、Fig.1.6 に示すような Venzi の方法⁽¹⁰⁾⁻⁽¹¹⁾ によって衝撃荷重を評価している場合もあるが、幾つもの高周波成分が存在する場合、各周波数を明らかにして計算を繰り返すことが必要となる。

SHPB 法による積層複合材料の動的破壊靱性試験などでは、衝撃荷重によって励起される高次の曲げ振動を抑制するために衝撃棒と入力棒の間に錫⁽¹⁶⁾、鉛⁽¹⁷⁾、アルミ材⁽⁵¹⁾などを緩衝材として設置して評価を行っている。高速衝撃試験を行える反面、立ち上りの緩やかなランプ状の入力波を用いる場合、緩衝材の条件設定などが難しく、入力荷重を適切に制御することが困難である場合も少なくない⁽¹⁷⁾。

落錘式衝撃試験では、Fig.1.10 のように試験片衝撃荷重点に薄い粘弾性シートを置くことで、ある程度曲げ振動発生を減少させる方法⁽⁴⁶⁾があるが、完全に取り除くことは難しい。

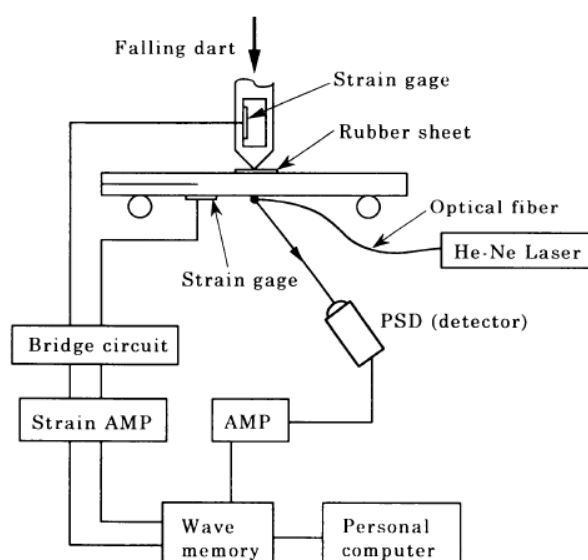


Fig.1.10 Dynamic testing system consisting of drop weight impact tester and dynamic displacement measuring apparatus⁽⁴⁶⁾.

ウェーブレット解析は波形データ処理、信号処理において有効な解析方法として、はりの衝撃応答の時間一周波数解析や材料中を伝播する超音波のエコー波形に対して適用することで材料損傷の非破壊評価の手法としての可能性について検討されている⁽⁵²⁾。その他、アコースティック・エミッション(AE)信号のウェーブレット解析によるノッチ付きのUD-GFRPやUD-C/Cコンポジットの破壊タイプの分類⁽⁵³⁾、FRP積層板の疲労損傷評価⁽⁵⁴⁾などに適用されている。衝撃吸収エネルギーの測定においてウェーブレット解析を適用すれば、衝撃荷重信号などに混在するノイズを効率的に処理することができることが報告されている⁽⁵⁵⁾。しかし、ゲル状の粘弾性体での適用報告であり、衝撃荷重によって励起される曲げ振動に関する検討はほとんどなされていない。

1.2.2 UD-C/C 複合材料と 2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価および剛性低下

C/C 複合材料は、アメリカならびにフランスでは軍需に用いられ、研究発表などが限られた者しか公表されていない経緯があり、入手できる情報が限られている⁽¹⁾。C/C 複合材料の衝撃特性に関する研究では SHPB 法や高速鋼球による高速衝撃を対象とした研究⁽⁴⁷⁾⁻⁽⁵⁰⁾がいくつか行われているが、耐衝撃性ならびに衝撃に伴う損傷機構の詳細については十分に明らかにされているとは言えない。

特に、わずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の衝撃における特性、損傷評価についてはほとんど明らかにされていない。

1.3 本論文の目的

本論文は上記の問題点を考慮して、PY 法で製造された C/C 複合材料の今まであまり明らかにされていなかったわずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の衝撃における特性、損傷評価に重点を置いて実験および数値解析により検討や考察を行うものである。なお、今回の研究対象である C/C 複合材料は、アクロス社製の PY 法による UD 材と直交積層(0°/90°交互積層)の 2D 材で焼成温度 2000°C、強化繊維 T300、炭素繊維含有率 40%、密度 1.7g/cm³である⁽⁵⁶⁾。本論文の主たる目的は、以下に示す通りである。

(1) 衝撃荷重のウェーブレット解析

計測した衝撃荷重信号の処理にウェーブレット解析による離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により信号の分解、衝撃時に励起される曲げ振動の影響および除去について検討を行い、C/C 複合材料の衝撃損傷評価において衝撃荷重のウェーブレット解析が有効であることを確認する⁽⁵⁷⁾⁻⁽⁵⁸⁾。

(2) UD-C/C 複合材料, 2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価および剛性低下

落錘式衝撃試験での計測した衝撃荷重信号の処理において、離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により信号の分解および衝撃時に励起される曲げ振動の影響除去を効率的に行うことにより、今まであまり明らかにされていなかったわずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の衝撃における特性、損傷評価に重点を置く。各種実験条件下での PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程を荷重-たわみ線図および吸収エネルギーなどによって検討し、損傷の発生状況などを考察し、C/C 複合材料の衝撃損傷評価を行う⁽⁵⁹⁾⁻⁽⁶⁰⁾。

そして、主に繰返し衝撃を受ける C/C 複合材料の衝撃損傷評価において、衝撃荷重履歴およびたわみ履歴から得られる試験片の剛性に相当するばね定数の履歴より、衝撃による試験片の剛性の低下と吸収エネルギーの関係について検討し、試験片の剛性低下率と吸収エネルギーの関係によって、各種の PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃特性を評価し、衝撃損傷評価法として確立することを目的とする⁽⁶¹⁾。

1.4 本論文の構成

本論文は全 6 章によって構成されており、以下に各章の概要について述べる。

Fig.1.11 に本論文の構成を図として示す。

第 1 章は緒論である。研究の背景、本研究の目的、意義や特徴を従来の研究の問題点や解明されていない内容を踏まえて、本論文の構成と共に記載している。

第 2 章は、落錘式衝撃試験における計測した衝撃荷重信号の処理において、離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により信号の分解、衝撃時に励起される曲げ振動の影響および除去について検討を行っている。衝撃荷重評価にウェーブレット解析を適用することで、試験片の曲げ振動の影響を除去することが可能となることを確認し、C/C 複合材料の衝撃損傷評価や動的破壊靱性の評価法の基盤となる衝撃荷重の評価について述べている。

第 3 章と第 4 章は、各種実験条件下での UD-C/C 複合材料、2D-C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程を荷重-たわみ線図や吸収エネルギーによる評価などの方法によって検討し、わずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃損傷評価について述べている。

第 5 章は第 3 章と第 4 章で得られた結果の上に、主に繰返し衝撃を受ける PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃損傷評価において、衝撃荷重履歴およびたわみ履歴から得られる試験片の剛性より、衝撃による試験片の剛性低下率と吸収エネルギーの関係について検討している。試験片の剛性低下率と吸収エネルギーの関係による評価法によって、各種の C/C 複合材料の衝撃特性を確認できたことを示している。

第6章は本論文の結論であり、第2章から第5章までに得られた本研究の成果をまとめて述べ、これまであまり明確にされてこなかった低速域でのPY法で製造されたC/C複合材料の衝撃特性、衝撃損傷評価やその評価法が、今後の新たなC/C複合材料の開発とC/C複合材料だけでなく他の材料特性の評価などにも寄与することを述べている。また、今後の研究指針の一つとしてC/C複合材料の動的破壊靱性評価法⁽⁶²⁾に関する取り組みについても触れている。最後に本論文で参照している参考文献を記載する。

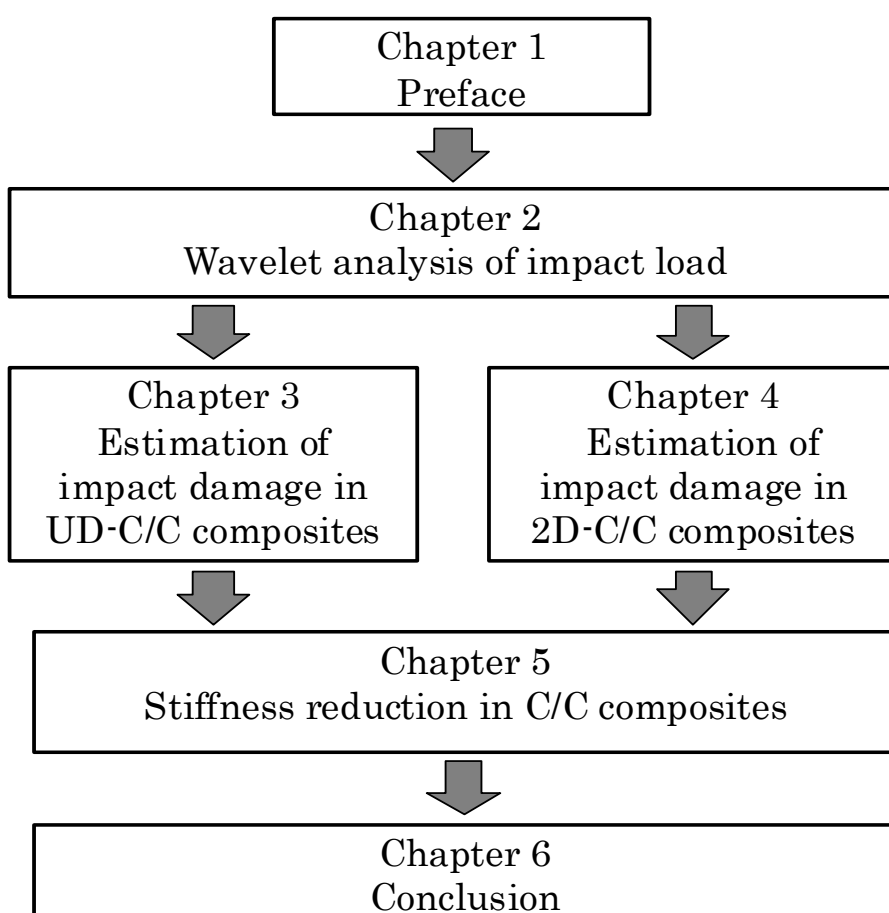


Fig.1.11 Composition of this paper.

第 2 章

衝撃荷重のウェーブレット解析

2.1 緒言

C/C 複合材料は衝撃負荷に対して脆弱であるという欠点がある。C/C 複合材料の衝撃特性に関する研究では SHPB 法や高速鋼球による高速衝撃を対象とした研究⁽⁴⁷⁾⁻⁽⁵⁰⁾がいくつか行われているが、耐衝撃性ならびに衝撃に伴う損傷機構の詳細については十分に明らかにされているとは言えない。

また、SHPB 法による積層複合材料の衝撃実験などでは、衝撃荷重によって励起される高次の曲げ振動を抑制するために衝撃棒と入力棒の間に錫⁽¹⁶⁾、鉛⁽¹⁷⁾、アルミ材⁽⁵¹⁾などを緩衝材として設置して評価を行っている。また、高周波成分の影響を除くために、Venzi の方法⁽¹⁰⁾⁻⁽¹¹⁾などによって衝撃荷重データの平滑化を行って評価している場合もある。落錘式衝撃試験では、試験片衝撃荷重点に薄い粘弾性シートを置くことで、ある程度曲げ振動発生を減少させる方法⁽⁴⁶⁾であるが、完全に取り除くことは難しい。

ウェーブレット解析は、波形データ処理、信号処理において有効な解析方法として検討されている⁽⁵²⁾。衝撃吸収エネルギーの測定においてウェーブレット解析を適用すれば、衝撃荷重信号などに混在するノイズを効率的に処理することができることが報告⁽⁵⁵⁾されている。しかし、ゲル状の粘弾性体での適用報告であり、衝撃荷重によって励起される曲げ振動に関する検討はほとんどなされていない。

本研究の目的は、計測した衝撃荷重信号の処理において、ウェーブレット解析による離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により信号を分解し、衝撃時に励起される曲げ振動の影響について主に検討を行うことである。そして、C/C 複合材料の衝撃損傷評価において衝撃荷重のウェーブレット解析が有効であることを検証する。

2.2 実験方法

2.2.1 試験片

今回使用した C/C 複合材料はアクロス社製の PY 法による直交積層(0° /90° 交互積層)の 2D 丸棒材(型名 : AC200-R10-2001)と 2D 角棒材(型名 : AC200-B03-2001)で、焼成温度 2000°C、強化繊維 T300、炭素繊維含有率 40%、密度 1.7g/cm³である。丸棒材は直径 d 10mm、角棒材は幅 B 10mm、板厚 h 3mm である。

2.2.2 落錘式衝撃試験

Fig. 2.1 に落錘式衝撃試験装置の概略を示す。試験は先端を球面加工した金属棒(衝撃棒)を両端支持された試験片の中央に自由落下させる 3 点曲げ落錘式衝撃試験である。衝撃荷重の測定には、衝撃棒の長さの 1/2 の位置に衝撃棒の断面に対し対称になるように半導体ひずみゲージ(共和電業 : KSN-2-120-E3-16)を 2 枚貼り、ガイドローラによる変形の拘束を受けない部分の衝撃棒の曲げ変形の影響を除去するように、ブリッジボックスの回路構成を行った。測定されたひずみ応答 $\varepsilon(t)$ を動ひずみアンプからデジタルスコープ(横河電機 : DL708)においてサンプリングタイム 10 μ s で計測し、衝撃棒先端部、衝撃点の荷重履

歴 $F(t)$ を一次元波動伝ば理論より次式から求めた⁽⁸⁾⁽²⁷⁾.

$$F(t) = -A_i E_i \left\{ \varepsilon_i \left(t + \frac{L_i}{2c_i} \right) H \left(t + \frac{L_i}{2c_i} \right) + \varepsilon_i \left(t - \frac{L_i}{2c_i} \right) H \left(t - \frac{L_i}{2c_i} \right) \right\} \quad (2.1)$$

ここで,

$$c_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}} \quad (2.2)$$

衝撃棒の長さ、断面積、縦弾性係数および密度をそれぞれ L_i , A_i , E_i および ρ_i とし, c_i は衝撃棒の応力波の伝播速度である. また, $H(t)$ はヘビサイドの単位ステップ関数である. なお, 衝撃棒はすべて長さ 1m, 先端部は棒半径の寸法で球面加工され, 黄銅 $\phi 7$ (質量 $m_i:0.34\text{kg}$), 黄銅 $\phi 8$ ($m_i:0.43\text{kg}$) の 2 種類を使用した. 試験片中央部のたわみ測定には, 渦電流式非接触変位計(電子応用:プローブ PU-20, 変換器 AEC-5520, 周波数帯域: $\sim 30\text{kHz}$)を使用した. また, 丸棒材には, 中央部から 15mm の位置には衝撃荷重点側とその 180° 反対側の軸方向にひずみゲージを貼り付け, その出力信号によっても試験片の変形過程を測定した. また, 衝撃角度 θ_I は Fig. 2.2 に示すように, 衝撃荷重方向に対する試験片の積層面の角度を表し, 衝撃棒に対して試験片の積層面が垂直になる場合を $\theta_I=0^\circ$ として実験を行った. 実験は, 丸棒材の試験片スパン $L 145\text{mm}$, 衝撃棒の落下高さ $H 0.130\text{m}$, θ_I は 0° , 90° の 2 種類, 角棒材は, $L 80\text{mm}$, $H 0.04\text{m}$ で行った. 丸棒試験片の質量 m_s は 0.021 kg , 角棒試験片の質量 m_s は 0.0048kg であり, 衝撃棒の質量 m_i は試験片質量 m_s の 16 倍以上である. なお, 試験片両端支持部は試験片の跳上がりや転がりを防ぐため, 治具により一定の締付け力で支持した. また, 実験条件では衝撃棒の位置エネルギーを E_p とし, 衝撃速度 V_0 は $\sqrt{2gH}$ で算出した.

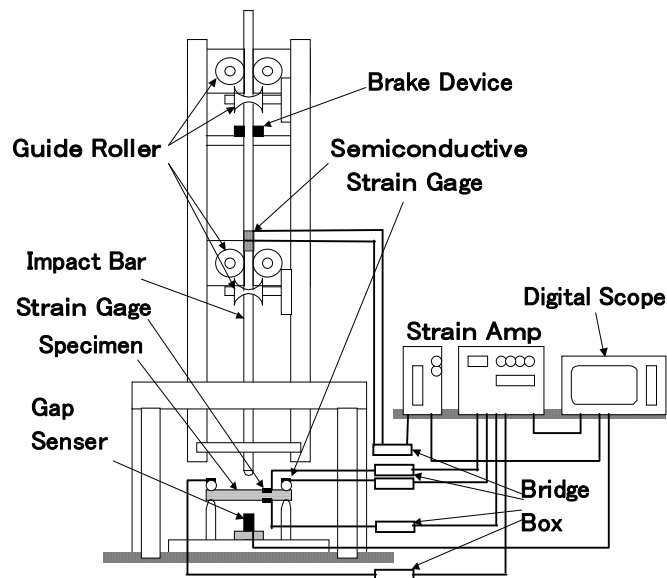


Fig.2.1 Apparatus of the drop weight test.

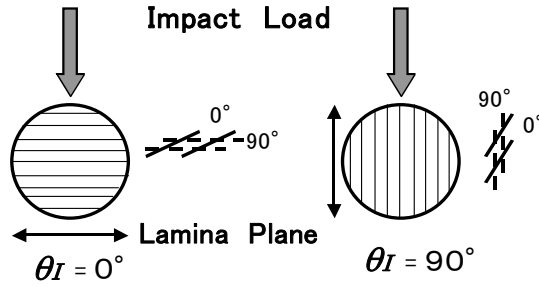


Fig.2.2 Impact angle θ_I .

2.3 離散ウェーブレット変換と多重解像度解析

平均値が0で、時間 $t=0$ の原点周りに局在する関数 ψ をウェーブレットと呼び、この $\psi(t)$ を時間軸上でシフトあるいは、拡大縮小して基底 $\psi_{a,b}(t)$ を生成する。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.3)$$

b はシフト、 $a > 0$ は拡大縮小のパラメータであり、スケールと呼ばれ、 $1/\sqrt{a}$ は正規化のための係数である。この $\psi_{a,b}(t)$ と時間 t の関数である信号 $f(t)$ との内積がウェーブレット変換である⁽⁵²⁾。

$$(W_\psi f)(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2.4)$$

ここで $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ は $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ の複素共役である。

ここで離散化にあたり2進分割をとり $a=2^j$ 、 $b=2^j k$ とすると式(2.3)は次のように離散化され、これを $\psi_{j,k}$ とすると

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j} t - k) \quad (2.5)$$

t の前にある 2^{-j} はフーリエ変換の角振動数に相当するので、 j の値の小さいものは高周波になり、この j をレベルと呼ぶ。

連続信号 $f(t)$ をある一定時間間隔でサンプリングされた離散数列 $f(n)$ を用いて考えるとスケール関数 $\phi_{j,k}(t)$ としてウェーブレットと同様に定義すると

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) \quad (2.6)$$

この $\phi_{j,k}(t)$ を使用してレベル j の近似関数 $f_j(t)$ を

$$f_j(t) = \sum_k s_k^{(j)} \phi_{j,k}(t) \quad (2.7)$$

$$s_k^{(j)} = \int_{-\infty}^{\infty} f_j(t) \overline{\phi_{j,k}(t)} dt \quad (2.8)$$

スケーリング係数 $s_k^{(j)}$ はレベル j の近似関数 $f_j(t)$ とスケーリング関数 $\phi_{j,k}(t)$ の内積で求められる。また、レベル j のときウェーブレット成分 $g_j(t)$ は

$$g_j(t) = \sum_k w_k^{(j)} \psi_{j,k}(t) \quad (2.9)$$

$w_k^{(j)}$ はレベル j のときのウェーブレット展開係数であり、レベル $j-1$ の近似関数 $f_{j-1}(t)$ は

$$f_{j-1}(t) = f_j(t) + g_j(t) \quad (2.10)$$

となる。レベル 0 の近似関数 $f_0(t)$ は式(2.10)に $j=1, 2, \dots, J$ を代入すると

$$f_0(t) = \sum_{j=1}^J g_j(t) + f_J(t) \quad (2.11)$$

よって、信号 $f(t)$ はレベル J の近似関数 $f_J(t)$ とレベル 1 からレベル J に至るまでのウェーブレット成分 $g_j(t)$ の和で表される。このことにより信号 $f(t)$ はレベル 1 からレベル J までの J 個の解像度、つまり多重の解像度をもつウェーブレットを用いて表すことができ、ウェーブレット成分 $g_j(t)$ を高周波成分、近似関数 $f_J(t)$ を低周波成分として分解することができる⁽⁶³⁾。

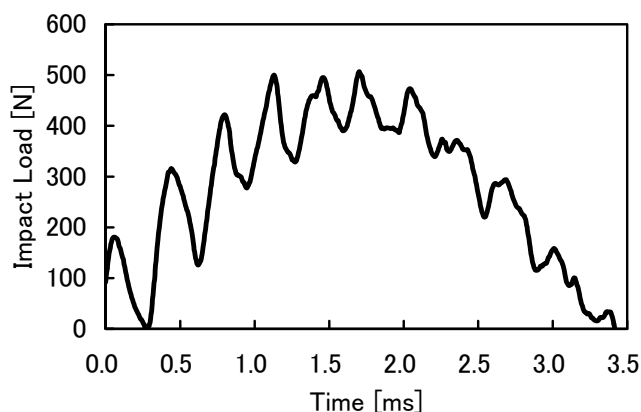
2.4 衝撃荷重履歴の多重解像度解析

2.4.1 多重解像度解析

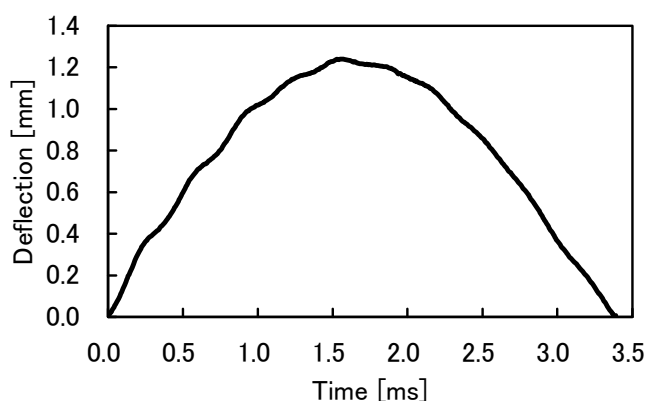
本研究では衝撃荷重一たわみ線図と損傷発生などにより試験片に吸収されたと考えられる吸収エネルギー E_{ab} による試験片の損傷および強度評価を行う。そこで、衝撃荷重履歴における高周波成分の影響と衝撃荷重の信号情報からの損傷評価を試みるためにウェーブレット解析を適用し検討する。

Fig.2.3 に 2D 丸棒材の荷重履歴とたわみ履歴の測定結果を示す. たわみ履歴には衝撃荷重履歴と比較して, 高周波成分の影響はほとんど見られないが, 衝撃荷重履歴に複雑な高周波成分が表れていることから, 衝撃棒と試験片の接触状態の影響と考えられ, 試験片全体の变形挙動に対する衝撃荷重の履歴としては高周波成分の影響を考慮する必要が生じる.

そこで, ウェーブレット解析の多重解像度解析を衝撃荷重履歴に適用した. Fig.2.3 の衝撃荷重履歴の多重解像度解析結果を Fig.2.4 に示す. ウェーブレットとして Daubechies の $N=5$ を使用し, 衝撃荷重信号を 5 段階にわたって低周波成分と高周波成分に分解し, レベル 1~5 の高周波成分とレベル 5 の低周波成分を示す. ここで, レベル 1~5 の高周波成分とレベル 5 の低周波成分を足し合わせた波形が Fig.2.3 の衝撃荷重履歴となる. なお, Daubechies のウェーブレットおよびそのスケーリング関数は形が複雑で既知の関数では表現できないため, 自然数 N を用いてウェーブレットの特徴づけを行っている⁽⁶³⁾.



(a) Impact load variation in time



(b) Deflection variation in time

Fig.2.3 Results of the impact test.

(Brass $\phi 7(m_i:0.34\text{kg}), E_p=0.43\text{J}, L=145\text{mm}, \theta_I=0^\circ, V_0=1.6\text{m/s}$)

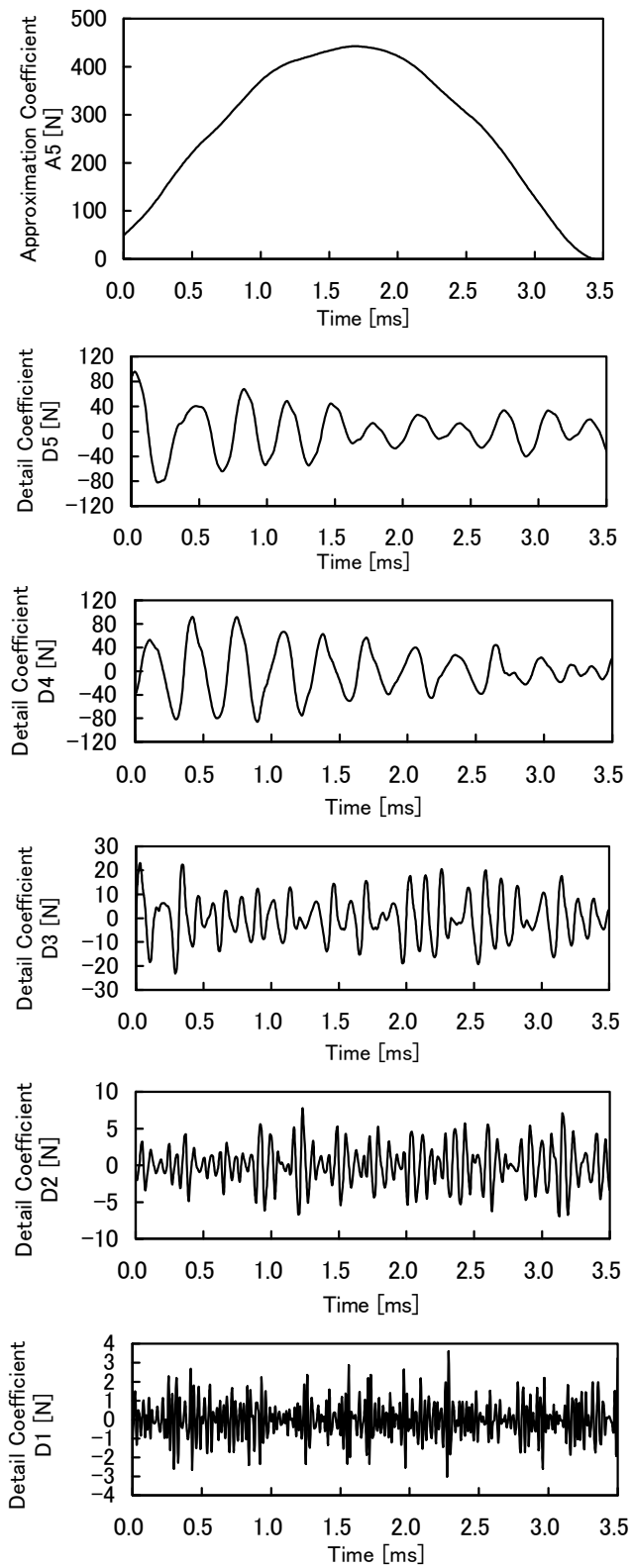


Fig.2.4 Multiple resolution analysis of impact load variation in time by wavelet transform. (Wavelet : db 5, Level 5)

2.4.2 低周波（近似）成分の考察

Fig.2.4における衝撃荷重履歴の多重解像度解析結果の低周波成分 $A5$ について考察を行う。この成分は試験片の自由振動成分を分離した場合の衝撃棒の自由落下による試験片のたわみを示す時刻歴応答の結果と関係していると考えられる。

ここで、衝撃棒をある高さ H から自由落下させ、試験片に衝撃を加えたときの運動方程式を考える。衝撃棒の質量 m_i は試験片質量 m_s の 5 倍以上である。Fig.2.3 のたわみの結果と Fig.2.4 の多重解像度解析の $A5$ の結果よりたわみが 0 の時点で既に衝撃荷重値が約 60N になっていることから、2 要素模型として取り扱う。2 要素模型はばね要素と粘性減衰要素を並列にしたフォークト模型を仮定する。なお、たわみが 0 の時点で既に衝撃荷重値が 0 でない場合は、第 1 章の CFRP の試験結果例の Fig.1.8⁽⁸⁾、Fig.1.9⁽³³⁾ でも見られる現象である。

また、両端支持条件下を想定して実験を行っているが、実際には試験片の跳ね上りを防ぐために、支持部上部を円柱梁で締め付けている影響などを考慮するために、Fig.2.5 のような弾性支持条件で解析する。運動方程式は、

$$m \frac{d^2 w}{dt^2} = mg - k_s w - c \frac{dw}{dt} \quad (2.12)$$

ここで、 w は試験片中央部 $L/2$ のたわみであり、 m は衝撃棒の質量 m_i に試験片質量 m_s と支持部上部の円柱梁の質量 m_b の等価質量を加えた値である⁽⁶⁴⁾。

$$m = m_i + \frac{17}{35}(m_s + 2m_b) \quad (2.13)$$

k_s は試験片梁のばね定数であり、試験片のせん断変形を考慮し、弾性支持の直線ばねを $k_t = k_{t0} = k_{tL}$ 、回転ばね $k_{\theta 0} = k_{\theta L} = 0$ として求めた。

$$k_s = \frac{48 E_x I}{\left(L^3 + \frac{5 E_x d^2 L}{6 G_{xy}} + \frac{24 E_x I}{k_t} \right)} \quad (2.14)$$

E_x : 試験片の X 方向の縦弾性係数、 G_{xy} : せん断弾性係数、 I : 断面 2 次モーメント、 L : 試験片スパン、 d : 試験片直径である。

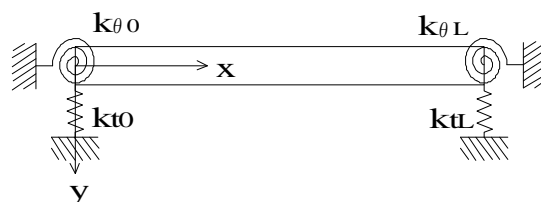


Fig.2.5 Elastic supported beam.

c は試験片の粘性減衰係数であり、減衰比 ζ と固有角振動数 ω から式(2.15)で表される。

$$c = \frac{2\zeta k_s}{\omega} \quad (2.15)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_s}{m}} \quad (2.16)$$

運動方程式(2.12)は、初期条件として衝撃棒衝突の瞬間、つまり試験片変形開始時点を $t=0$ とし、試験片などの等価質量を考慮すると

$$t=0: w=0 \quad \frac{dw}{dt} = \frac{m_i V_0}{m} = \frac{m_i \sqrt{2gH}}{m}$$

とし、両辺に $\frac{dw}{dt}$ を乗じて積分し、 $\frac{dw}{dt} = V$ とおいて解くと

$$w = \frac{(mg - cV)}{k_s} + \sqrt{\frac{(mg - cV)^2}{k_s^2} - \frac{m}{k_s} \left(V^2 - \frac{m_i^2 V_0^2}{m^2} \right)} \quad (2.17)$$

$$F'(w) = k_s w + cV \quad (2.18)$$

また、運動量の変化は力積に等しいことから

$$m\Delta V = F'(w)\Delta t \quad (2.19)$$

$$\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{2\pi}{n\omega} \quad (2.20)$$

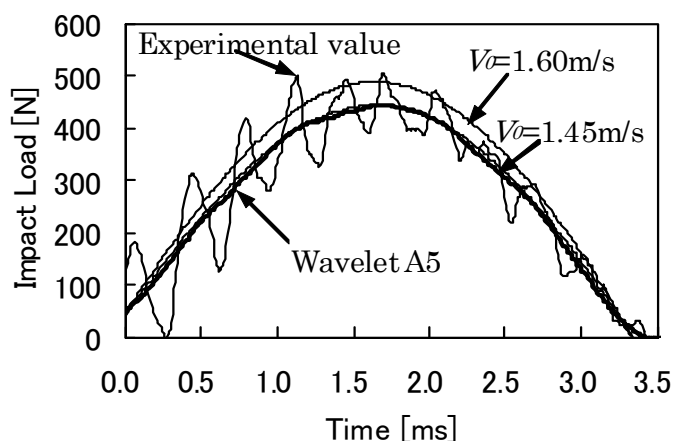
たわみ w ，衝撃荷重 $F'(w)$ ，速度 V を時間の変化を微小幅 Δt に細分して数値計算によって求める。 n は分割数である。

今回の実験条件下では $m_s=0.021\text{kg}$ ， $m_b=0.104\text{kg}$ ， $E_x=58\text{GPa}$ ， $G_{xy}=1.8\text{GPa}$ ， $\zeta=0.05$ ， $k_t=2\text{MN/m}$ ， $n=720$ である。Fig.2.4 の多重解像度解析の A5 の結果および Fig.2.3 の衝撃荷重履歴，たわみ履歴と数値計算結果を比較したものを Fig.2.6 に示す。

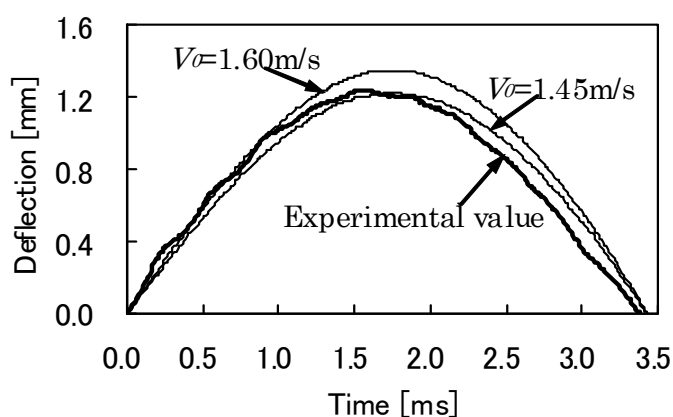
実験条件の $V_0=1.60\text{m/s}$ で解析した場合，衝撃荷重履歴およびたわみ履歴とも数値計算結果の方がやや高めの値を示したが，衝撃速度は落下高さから算出した値で示しており，衝撃棒はガイドローラの接触などにより抵抗を受けていることから，実際の衝撃速度の値は

減少すると仮定する． $V_0=1.45\text{m/s}$ として計算すると衝撃荷重履歴は一致し，たわみ履歴も最大値が一致した値で求められる．よって，多重解像度解析の低周波成分 $A5$ は，試験片や衝撃棒などの自由振動成分を分離した形で衝撃荷重履歴を示す近似成分であることが数値計算結果からもわかる．また，測定した衝撃荷重履歴および低周波成分 $A5$ の力積の大きさがほとんど変わらないことも確認できる．

また，Fig.2.7 は衝撃荷重履歴の実験結果，多重解像度解析の低周波成分 $A5$ ，第 1 章の Fig.1.6 で説明した Venzi の方法による計算結果および実験結果を単純に平均化した結果を比較したものである．Venzi の方法による結果は，主な高周波成分に基づいた計算条件により繰返し計算した結果であるが，多重解像度解析の低周波成分 $A5$ とよく一致しており，どちらも実験結果の平滑化には妥当であることがわかる．しかし，実験結果を単純に平均した結果では，実験結果の平滑化には不十分であることがわかる．



(a) The wavelet –smoothed impact load variation in time



(b) Deflection variation in time

Fig.2.6 Results of numerical calculation in the impact test.
 (Brass $\phi 7(m_i:0.34\text{kg}), E_p=0.43\text{J}, L=145\text{mm}, \theta_I=0^\circ, V_0=1.6\text{m/s}$)

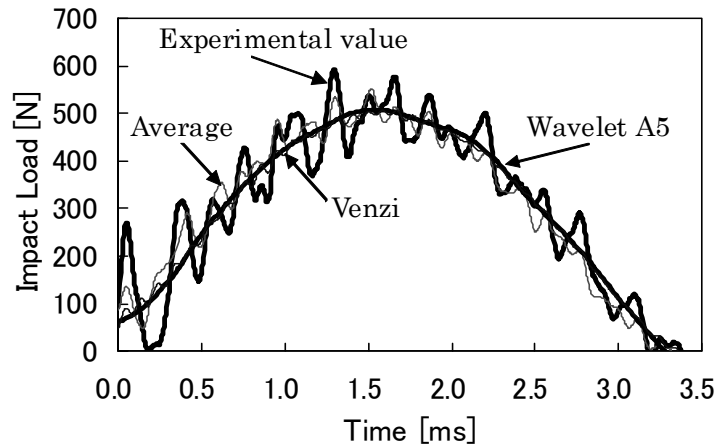


Fig.2.7 Comparison impact load variation in time.
 (Brass ϕ 7(m_i :0.34kg) $E_p=0.43$ J $L=145$ mm $\theta_I=90^\circ$ $V_0=1.6$ m/s)

2.4.3 高周波成分と分解レベル

前項では、衝撃荷重履歴の近似成分である低周波成分について考察したが、ここでは多重解像度解析により分解された高周波成分について考察する。Fig.2.8はFig.2.4の多重解像度解析結果における分解レベル4の高周波成分 $D4$ と分解レベル5の高周波成分 $D5$ の周波数分析結果を示している。

Fig.2.4の多重解像度解析結果の $D4$ の波形からも自由振動の減衰の様子が見られ、 $D4$ では試験片の2次の曲げ固有振動数 fns_2 に相当する振動数成分が支配的であることがわかり、分解レベル4で低周波成分から分離されたことが言える。

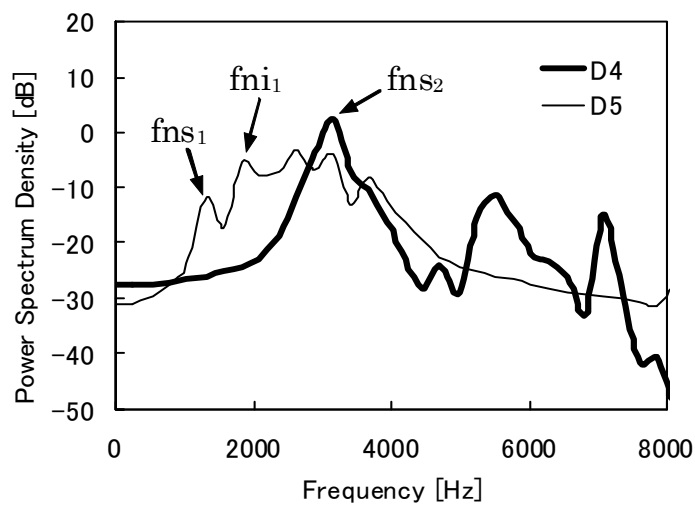


Fig.2.8 Power spectrum density of detail coefficients.

両端支持条件下では試験片の2次の曲げ固有振動数のモードはスパン中央部 $L/2$ ではモードの節にあたり、スパン中央部のたわみには影響しない。しかし、衝撃棒と試験片の接触状態からその荷重成分が検出されるが、衝撃荷重-たわみ線図から衝撃エネルギーや吸収エネルギーを計算する上では誤差の要因となり、その衝撃荷重の成分は取り除くこととする。

Fig.2.4の分解レベル5の高周波成分D5の周波数分析結果では試験片の1次の曲げ固有振動数 fns_1 や衝撃棒の1次の縦振動の固有振動数 fni_1 に相当する振動数成分などが見られる。ここで、試験片の1次の曲げ固有振動数のモードではスパン中央部 $L/2$ で腹となり、たわみに対する影響を検討する。境界条件を両端支持条件と近似的に仮定し、スパン中央部 $L/2$ に微小長さ δ に衝撃速度 V_0 を加えたときのはりの振幅変位を u_y は、1次の曲げ固有振動数のモードのみを考慮した場合、式(2.21)で求められる⁽⁶⁵⁾。

$$u_y = \frac{2V_0\delta L}{\pi^2} \sqrt{\frac{\rho A}{E_x I}} \left(\sin\left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{E_x I}{\rho A}}\right) \right) \quad (2.21)$$

V_0 は 2.4.2.1 項より $V_0=1.45\text{m/s}$ とし、 $\delta=7\text{mm}$ (衝撃棒直径)と仮定して計算すると、 $u_y=-0.012\text{mm}$ となる。また、この際生じる衝撃荷重を計算する。衝撃棒と試験片の接触近傍の局所変形に対して Hertz の接触理論を利用した近似解法によって式(2.22)~(2.25)から求めることにする⁽⁶⁶⁾。

$$F = k_p \alpha^{\frac{3}{2}} \quad (2.22)$$

$$k_p = \frac{4RC}{3 \left(\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \right)} \quad (2.23)$$

$$R = \sqrt{\frac{r_i r_s}{2r_s + r_i}} \quad (2.24)$$

$$C = 4\lambda^{\frac{3}{2}} \quad (2.25)$$

k_p : Hertz の接触ばね定数

α : 局所変形による衝撃棒と試験片の相対接近量

ν_i : 衝撃棒のポアソン比, ν_s : 試験片のポアソン比

r_i : 衝撃棒先端部球面半径, r_s : 試験片半径

λ : r_i, r_s により決まる定数⁽⁶⁷⁾

ここで、 $v_i=0.3$ 、 $v_s=0.3$ 、局所変形による衝撃棒と試験片の相対接近量 α を先ほど計算した $u_v=-0.012\text{mm}$ の絶対値として衝撃荷重を求めると、 $F=116\text{N}$ となる。Fig.2.4 の高周波成分 $D5$ の波形において、最初のピーク値は 93N であり、計算結果はやや高めになっている。これは α や δ の値を高めに見積もっている可能性、試験片の 3 次以降の奇数次の固有振動数による曲げ変形の影響および衝撃棒の縦振動による先端部の変形を考慮していないためなどであるが、比較的近い値となった。このことより、衝撃棒と試験片の接触近傍の局所変形による荷重成分が生じるが、荷重値に対して変形量は、はりの最大たわみ量と比較して 1% 以下であることがわかる。よって、この荷重成分を分離して衝撃エネルギーや吸収エネルギーを計算する。

以上のことより、ウェーブレット解析を適用することで、効率的に波形を分解処理でき、高周波成分を損なうことなく信号波形を評価できる。多重解像度解析においては適切なウェーブレット関数を選択し、分解された高周波成分を周波数分析することにより適切な分解レベルで解析、評価することができる。また、試験片などの自由振動の成分を効率よく計測した波形から分離することができ、低衝撃速度時では動的な問題も静的な問題として取り扱う可能性が考えられる。以後、この多重解像度解析を用いて衝撃荷重履歴を解析し、衝撃荷重として取り扱うこととする。

2.5 衝撃荷重—たわみ線図と衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出

Fig.2.3 の衝撃荷重履歴とたわみ履歴から時間軸を消去して得られた衝撃荷重—たわみ線図と衝撃荷重履歴を Fig.2.4 の多重解析後の低周波成分 $A5$ に置き換えて求めた衝撃荷重—たわみ線図を Fig.2.9 に示す。実験結果より得られた衝撃荷重—たわみ線図は、衝撃によって励起された試験片の曲げ自由振動による高周波成分の影響により、複雑な過程を示している。それに対して、ウェーブレット解析後の衝撃荷重履歴である低周波成分 $A5$ により求めた衝撃荷重—たわみ線図は、比較的単純な形状となり、損傷などにより試験片に吸収されたと考えられる吸収エネルギーがグラフ上でも評価しやすくなる。Fig.2.10 に 2D 角棒材の多重解析分解レベル 6 で解析後の衝撃荷重履歴である低周波成分 $A6$ により求めた衝撃荷重—たわみ線図を示す。Fig.2.9 の丸棒材の結果と比べて、 V_0 と k_s が小さいためにたわみが 0 の時点での衝撃荷重値は 4.4N である。このことより式(2.18)の右辺第 2 項の減衰力の影響が小さく、粘性減衰係数 c と衝撃速度の値が小さければ減衰力は 0 に近づき、たわみが 0 の時点で荷重値も 0 に近づくことが確認できる。

多重解像度解析後の衝撃荷重履歴とたわみ履歴から時間軸を消去して得られた衝撃荷重—たわみ線図より数値積分を行い、吸収エネルギー E_{ab} と負荷された衝撃エネルギー E_{ip} を算出する。Fig.2.11 に示すそれぞれの該当する面積がエネルギーとなる。なお、吸収エネルギー算出に際しては 4% の誤差を有している。

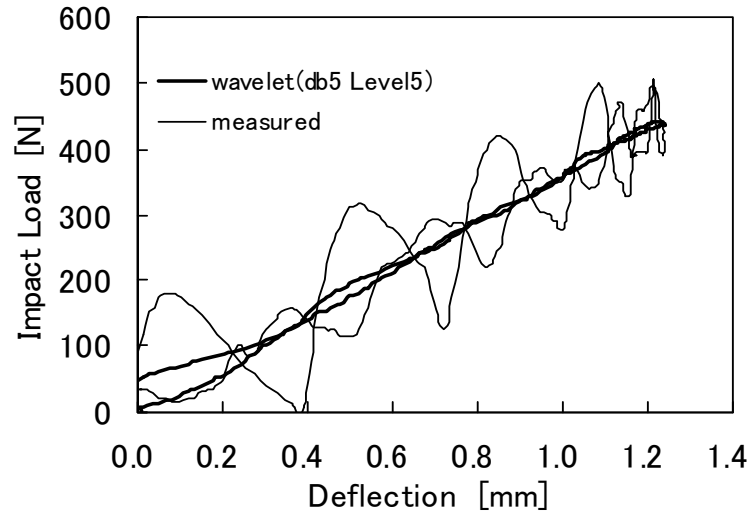


Fig.2.9 Impact load – deflection relationship. (2D Round bar)
 (Brass ϕ 7(m_i :0.34kg), E_p =0.43J, L =145mm, θ_I =0°, V_0 =1.6m/s)

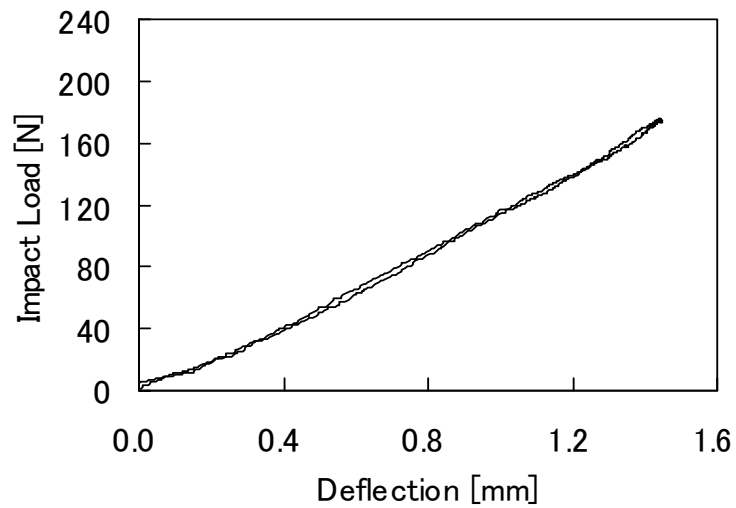


Fig.2.10 Impact load – deflection relationship. (2D Square bar)
 (Brass ϕ 8(m_i :0.43kg) , E_p =0.17J, b =10mm, h =3mm, L =80mm, θ_I =0°, V_0 =0.89m/s)
 (Wavelet: db 5 Level 6)

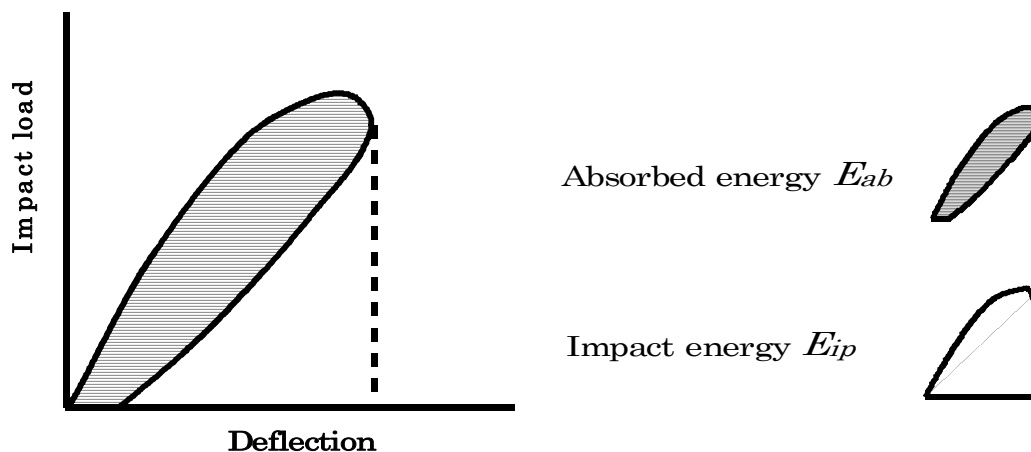


Fig.2.11 Absorbed energy and impact energy.

2.6 結言

本研究では、低速域に重点を置いた落錘式衝撃試験による3点曲げ試験方法によって、C/C複合材料の衝撃損傷評価を行う。その際、ウェーブレット解析を適用し、衝撃荷重履歴の多重解像度解析により衝撃荷重評価について検討を行った。

その結果、衝撃荷重履歴の多重解像度解析により、衝撃によって励起される試験片の曲げ振動や衝撃棒と試験片の接触部での局所変形による衝撃荷重とたわみの評価への影響を考察し、その影響を衝撃荷重履歴から分離して衝撃荷重評価ができることを確認した。そして、ウェーブレット解析を適用することで、効率的に波形を分解処理でき、高周波成分を損なうことなく信号波形を評価できる。多重解像度解析においては適切なウェーブレット関数を選択し、分解された高周波成分を周波数分析することにより適切な分解レベルで解析、評価することができる。

また、計測時のフィルターの使用は、計測装置によっては周波数の設定値が粗く、測定時の設定条件によっては波形の最大値を低くして取り込んでしまう可能性があり、測定の誤差要因となる。多重解像度解析は波形情報を損なうことなく測定し、波形分解などの処理ができるため、フィルターの使用に比べて誤差要因が少なくなることがウェーブレット解析の大きな利点である。

第 3 章

UD-C/C 複合材料の衝撃損傷評価

3.1 緒言

本研究では、落錘式衝撃試験により、わずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の衝撃における特性、損傷評価に重点を置いた。また、計測した衝撃荷重信号処理において、ウェーブレット解析による離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により衝撃荷重信号の分解、衝撃時に励起される曲げ振動の影響について検討を行い、多重解像度解析が衝撃荷重評価に有効であることを確認している^{(57)・(58)}。

今回は衝撃荷重評価においてウェーブレット解析を適用し、各種実験条件下での PY 法で製造された UD-C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷、破壊の過程を荷重-たわみ線図および吸収エネルギーなどの方法によって評価し、衝撃損傷評価法として確立することを目的とする。

3.2 実験方法

3.2.1 試験片

今回使用した C/C 複合材料はアクロス社製の PY 法による UD 材の丸棒(型名: AC200-R10-2000)で、焼成温度 2000°C, 強化繊維 T300, 炭素繊維含有率 40%, 密度 1.7g/cm³, 直径 d 10mm である。

3.2.2 落錘式衝撃試験

Fig.3.1 に落錘式衝撃試験装置の概略を示す。第 2 章の 2.2.2 項の Fig.2.1 で示した落錘式衝撃試験装置の両端支持部下部の治具をロードセル(共和電業: LU-200KSB34D)に変更し、衝撃時の支持部反力の測定も行えるように改良した。試験は先端を球面加工した金属棒(衝撃棒)を両端支持された試験片の中央に自由落下させる 3 点曲げ落錘式衝撃試験である。衝撃荷重の測定には、衝撃棒の曲げ変形の影響を除去するために、衝撃棒の長さの 1/2 の位置に衝撃棒の断面に対し対称になるように半導体ひずみゲージを 2 枚貼った。測定されたひずみ応答 $\epsilon(t)$ から、衝撃棒先端部、衝撃点の荷重履歴 $F(t)$ を第 2 章の(2.1), (2.2) 式から求めた。なお、衝撃棒はすべて長さ 1m, 先端部は棒半径の寸法で球面加工され、黄銅 ϕ 10 (m_i :0.68kg), 黄銅 ϕ 14 (m_i :1.33kg) の 2 種類を使用した。

試験片中央部のたわみ測定には、渦電流式非接触変位計を使用した。また、中央部から 15mm の位置には衝撃荷重点側とその 180° 反対側の軸方向にひずみゲージを貼り付け、その出力信号によっても試験片の変形過程を測定した。

実験は、試験片スパン L 65mm, 145mm, 205mm の 3 種類、衝撃棒の落下高さ H は 0.115m~0.400m で設定し、2 種類の衝撃棒の組合せで行った。試験片の質量 m_s は $L=65$ mm の場合 m_s 0.011 kg, $L=145$ mm では m_s 0.021kg, $L=205$ mm では m_s 0.030 kg であり、衝撃棒の質量 m_i は試験片質量 m_s の 23 倍以上である。なお、試験片両端支持部は試験片の跳上がりや転がりを防ぐため、治具により一定の締付け力で支持した。

また、実験条件では衝撃棒の位置エネルギーを E_p とし、衝撃速度 V_0 は $\sqrt{2gH}$ で算出した。Fig.3.2 に衝撃試験結果の一例を示す。今回から設置した試験片支持部のロードセルで

計測した荷重履歴と衝撃棒で求めた荷重履歴を比較しているが、その結果はほぼ一致しており、2つの結果の比較は衝撃荷重履歴の確認にも効果的であると言える。

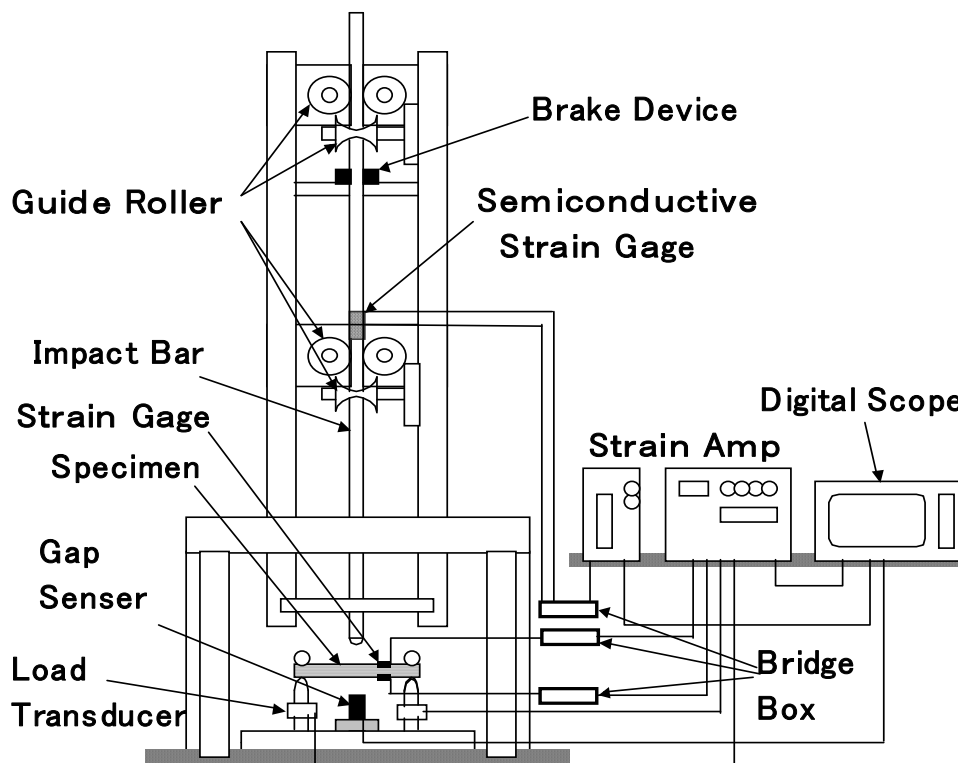


Fig.3.1 Apparatus of the drop weight test.

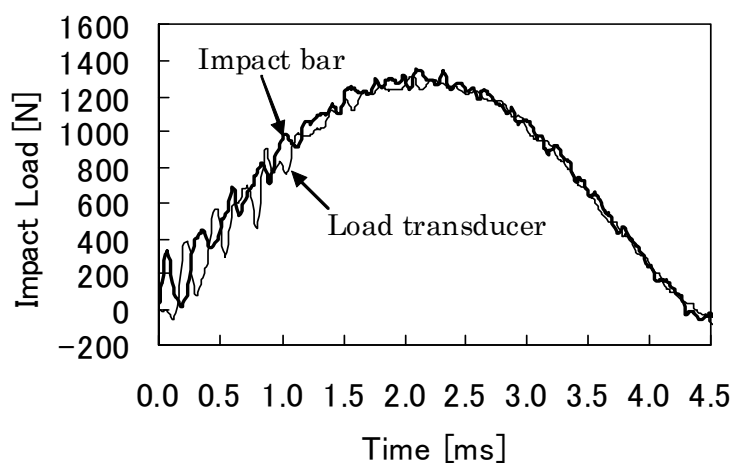


Fig.3.2 Comparison of impact load variation in time.
 (UD, Brass $\phi 14$ ($m_i:1.33\text{kg}$), $E_p=1.5\text{J}$, $L=145\text{mm}$, $V_0=1.5\text{m/s}$)

3.3 衝撃荷重履歴の多重解像度解析

3.3.1 衝撃荷重履歴・たわみ履歴

衝撃荷重履歴とたわみ履歴の低衝撃エネルギー時の測定結果の一部を Fig.3.3 から Fig.3.5 に示す．実験条件は衝撃棒：黄銅 $\phi 14(m_i : 1.33\text{kg})$ で，Fig.3.3 は $E_p = 1.71\text{J}$ ， $L = 205\text{mm}(L/d = 20.5)$ ， $V_0 = 1.6\text{ m/s}$ ，Fig.3.4 は $E_p = 1.50\text{J}$ ， $L = 145\text{mm}(L/d = 14.5)$ ， $V_0 = 1.5\text{ m/s}$ ，Fig.3.5 は $E_p = 1.50\text{J}$ ， $L = 65\text{mm}(L/d = 6.5)$ ， $V_0 = 1.5\text{ m/s}$ の場合である．スパンが長いほど励起された高周波成分の影響が衝撃荷重履歴には見られるが，たわみ履歴には高周波成分は見られない．

3.3.2 多重解像度解析

衝撃荷重履歴に複雑な高周波成分が表れていることから，衝撃棒と試験片の接触状態の影響と考えられる．試験片全体の变形挙動に対する衝撃荷重の履歴としては高周波成分の影響を考慮する必要が生じることを確認した⁽⁵⁷⁾⁻⁽⁵⁸⁾．そこでウェーブレット解析の多重解像度解析を衝撃荷重履歴に適用し，高周波成分を分離して衝撃荷重履歴を評価する．

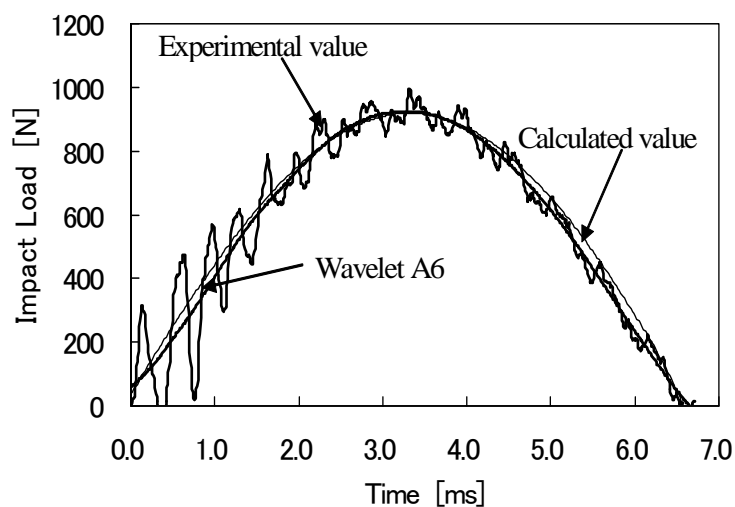
Fig.3.3～Fig.3.5 の衝撃荷重履歴に多重解像度解析結果を示す．ウェーブレットとして Daubechies の $N = 5$ を使用し，衝撃荷重信号を 5～6 段階にわたって低周波成分と高周波成分に分解した低周波成分を示す．なお，Daubechies のウェーブレットおよびそのスケール関数は形が複雑で既知の関数では表現できないため，自然数 N を用いてウェーブレットの特徴づけを行っている． $L = 205\text{mm}$ では，分解レベル 6 の低周波成分 $A6$ ， $L = 145\text{mm}$ と $L = 65\text{mm}$ は分解レベル 5 の低周波成分 $A5$ の解析結果である．2.4.2 項で示した数値計算によって解析した結果も Fig.3.3～Fig.3.5 に衝撃荷重履歴およびたわみ履歴の併せて示している．

今回の実験条件下では $m_b = 0.104\text{kg}$ ， $E_x = 120\text{GPa}$ ， $G_{xy} = 5\text{GPa}$ ， $\zeta = 0.02$ ， $k_t = 2.7 \sim 5.3\text{MN/m}$ ， $n = 720$ である．また，実験条件の衝撃速度 V_0 は落下高さから算出した値 $\sqrt{2gH}$ で示しているが，実際の実験では衝撃棒はガイドローラの接触などにより抵抗を受けていることから，実際の衝撃速度の値は減少する．計算上 V_0 は実験結果から $\sqrt{2gH}$ に約 0.9 を掛けた値を用いている．

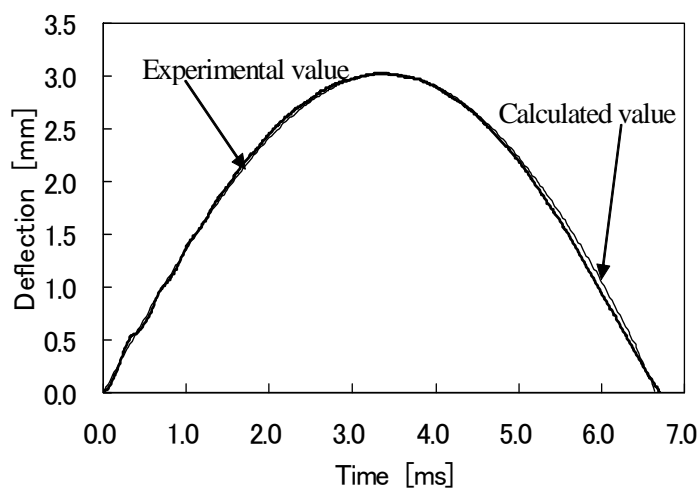
$L = 205\text{mm}$ と $L = 145\text{mm}$ では，衝撃荷重履歴の数値計算結果は多重解像度解析の低周波成分とたわみ履歴の数値計算結果は実験結果とよく一致している．多重解像度解析より得られた低周波成分は，試験片や衝撃棒などの自由振動成分を分離した形で衝撃荷重履歴を示す近似成分であることが数値計算結果からわかる．そして，測定した衝撃荷重履歴および多重解像度解析で得られた低周波成分の力積の大きさは，ほとんど変わらないことがわかる．

また， $L = 65\text{mm}$ の場合では衝撃荷重履歴において数値計算結果は多重解像度解析の低周波成分と一致せず，たわみ履歴では数値計算結果と実験結果が必ずしも一致していない．試験片のたわみが 0.18mm になるまでは数値計算結果はたわみの実験結果と一致している

が、この時点で衝撃棒と試験片の接触部に微小な割れが生じ、試験片の剛性の変化による影響で一致しなくなっている。但し、衝撃棒と試験片の接触部の微小な割れは衝撃エネルギーが増加し、試験片が破断に至る実験条件下でもこの箇所から破断に至るものではなかった。以後、この多重解像度解析を用いて衝撃荷重履歴を解析し、衝撃荷重として取り扱うこととする。

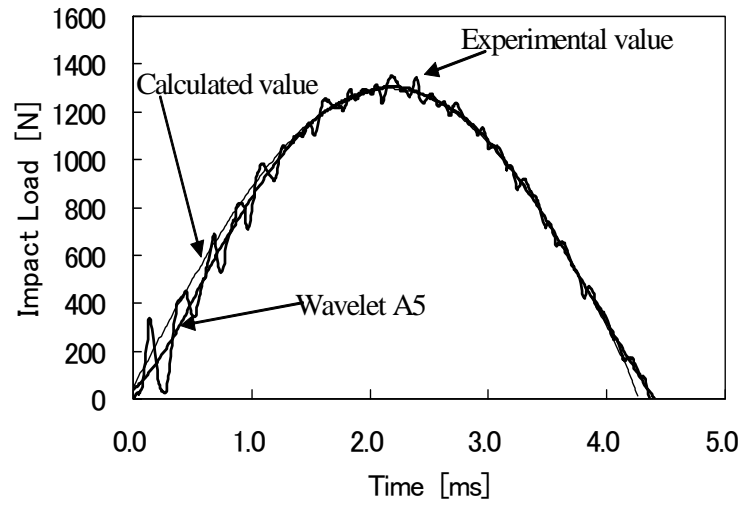


(a) The wavelet –smoothed impact load variation in time

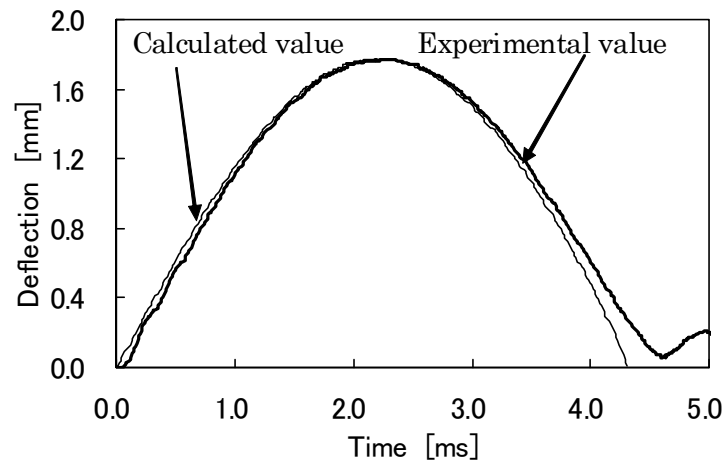


(b) Deflection variation in time

Fig.3.3 Results of the impact test. ($L=205\text{mm}$, $L/d=20.5$)

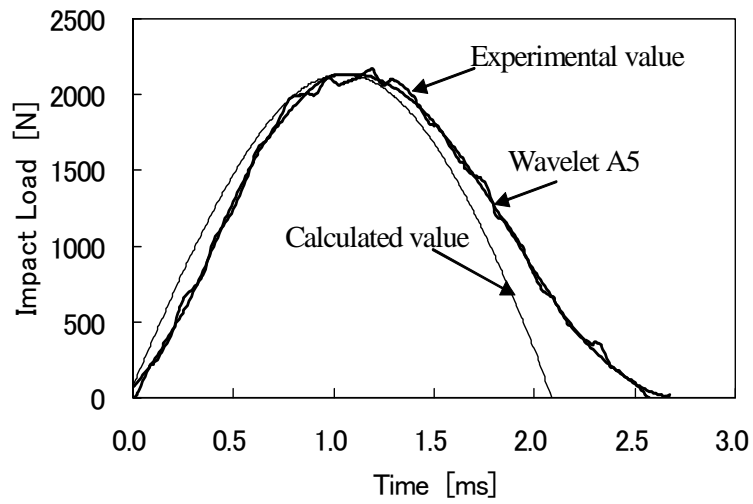


(a) The wavelet –smoothed impact load variation in time

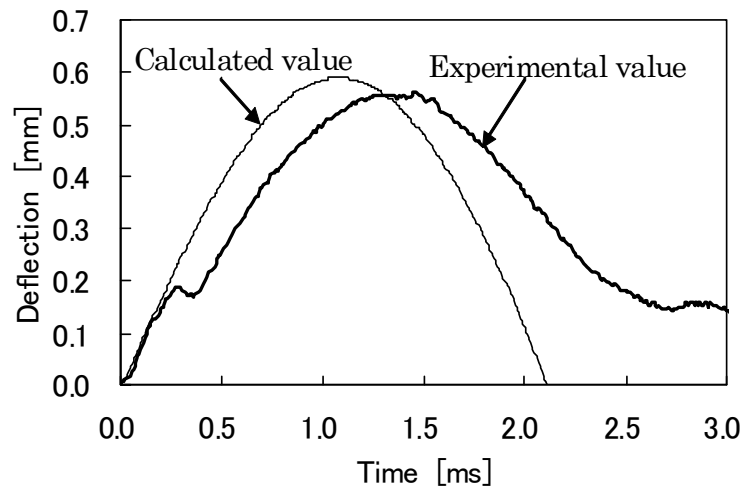


(b) Deflection variation in time

Fig.3.4 Results of the impact test. ($L=145\text{mm}$, $L/d=14.5$)



(a) The wavelet –smoothed impact load variation in time



(b) Deflection variation in time

Fig.3.5 Results of the impact test. ($L=65\text{mm}$, $L/d=6.5$)

3.4 衝撃荷重－たわみ線図および吸収エネルギーによる損傷評価

3.4.1 衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出

第2章の2.5項より、多重解像度解析後の衝撃荷重履歴とたわみ履歴から時間軸を消去して得られた衝撃荷重－たわみ線図より数値積分を行い、吸収エネルギー E_{ab} と負荷された衝撃エネルギー E_{ip} を算出する。Fig.2.11 に示すそれぞれの該当する面積がエネルギーとなる。

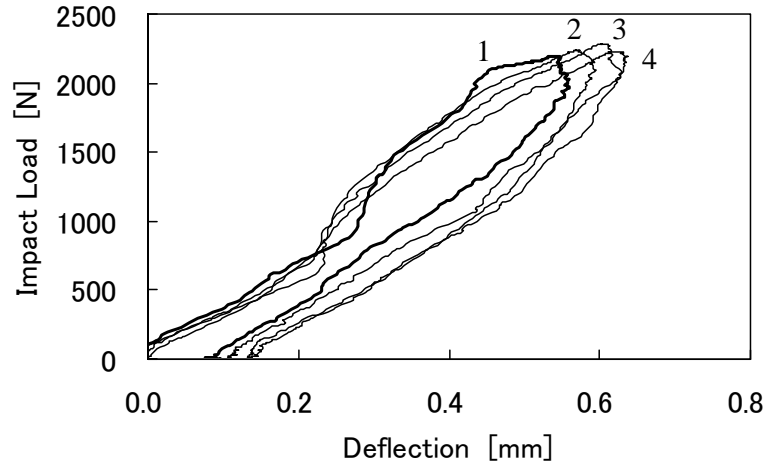
3.4.2 繰返し衝撃による損傷の評価

同一条件下で衝撃を繰返し試験片に加えた場合の衝撃点の荷重とたわみの関係を Fig.3.6～Fig.3.8 に示す。但し、今回の実験では $L=65\text{mm}$ 、 145mm では最大繰返し数を4回、 $L=205\text{mm}$ では最大繰返し数を6回とした。ウェーブレットとして Daubechies の $N=5$ を使用し、衝撃荷重信号を5～6段階にわたって分解した。 $L=205\text{mm}$ では、分解レベル6の低周波成分 $A6$ 、 $L=145\text{mm}$ と $L=65\text{mm}$ は分解レベル5の低周波成分 $A5$ の解析結果を衝撃荷重として適用した。

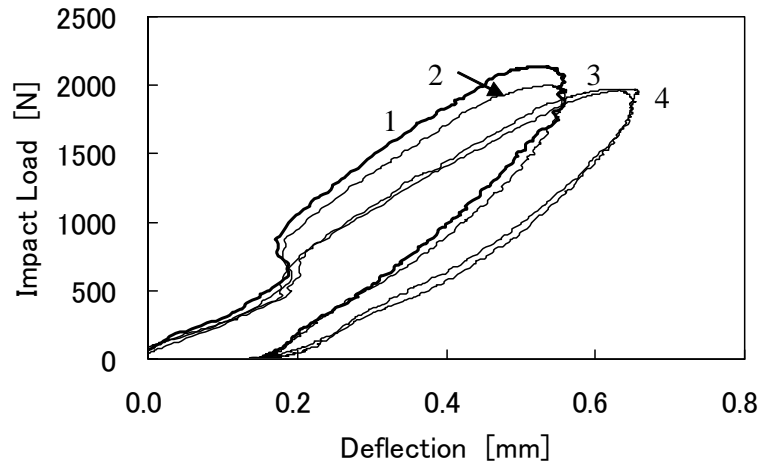
Fig.3.6 は $L=65\text{mm}$ ($L/d=6.5$) の結果である。Fig.3.6(a)、(b) は繰返し衝撃4回では破断が生じなかった場合である。それぞれの実験において最大衝撃荷重値は変化せず最大たわみ量だけが増加し、衝撃回数が増えるごとに荷重－たわみ線図の傾きが減少する傾向が現れており、試験片の剛性が低下していることがわかる。Fig.3.6(c) の衝撃条件では繰返し衝撃3回目に破断が生じた。衝撃1、2回目では最大衝撃荷重値は変化していないが衝撃3回目では最大衝撃荷重値が低下し、破断が生じたことを確認した。

また、Fig.3.6(b) の衝撃1、2回目に顕著に見られる荷重－たわみ線図の立ち上がり部における傾きの急激な変化は、衝撃棒と試験片の接触部に微小な亀裂が生じた影響によるものである。しかし、試験片が破断に至る実験条件下でもこの箇所から亀裂が進展し、破断に至るものではなかったことを確認している。

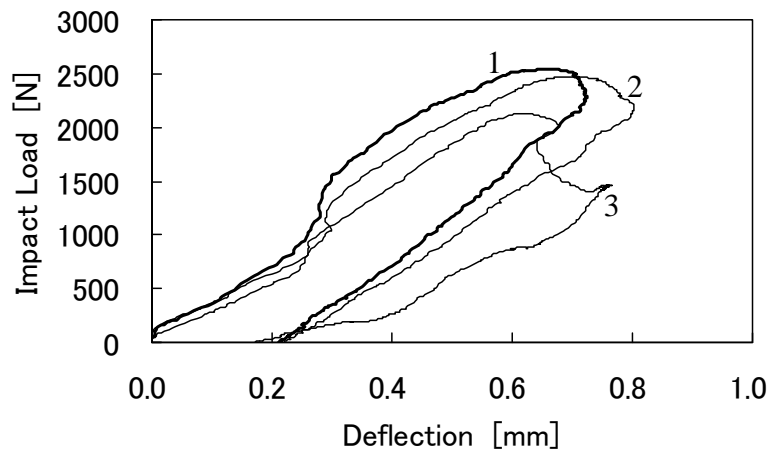
同様に $L=145\text{mm}$ ($L/d=14.5$) と $L=205\text{mm}$ ($L/d=20.5$) の結果を Fig.3.7, Fig.3.8 に示す。Fig.3.7(a) では繰返し衝撃4回では破断が生じなかった場合であるが、衝撃回数が増えると共に最大衝撃荷重値は変化せず、剛性の低下が見られる。それに対し Fig.3.8(a) の実験条件では、衝撃回数が増加しても荷重－たわみ線図はほとんど重なり、繰返し衝撃6回でも剛性低下が生じない衝撃条件であることが言える。Fig.3.7(b) は繰返し衝撃2回目に、Fig.3.8(b) は繰返し衝撃3回目に破断が生じた場合である。外部損傷の程度、破断の大きさの違いによって荷重－たわみ線図の傾向が異なるが衝撃回数が増えるごとに試験片の剛性低下の過程がわかる。



(a) $m_i=0.68\text{kg}$, $E_p=1.64\text{J}$, $V_0=2.2\text{ m/s}$

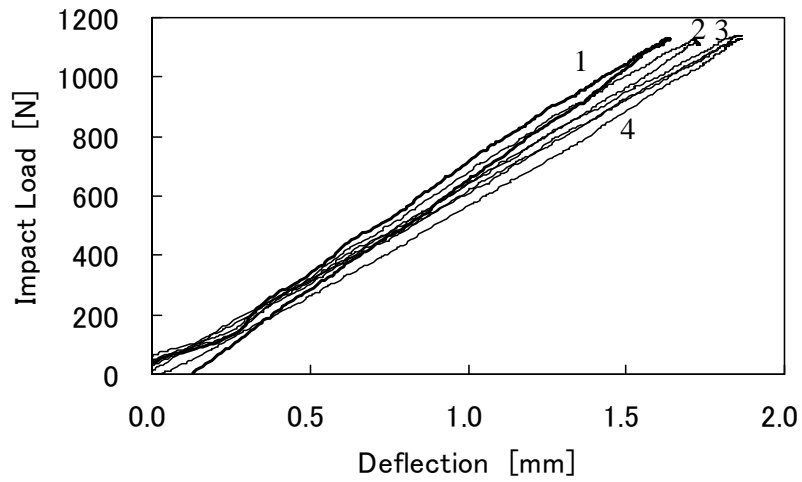


(b) $m_i=1.33\text{kg}$, $E_p=1.50\text{J}$, $V_0=1.5\text{ m/s}$

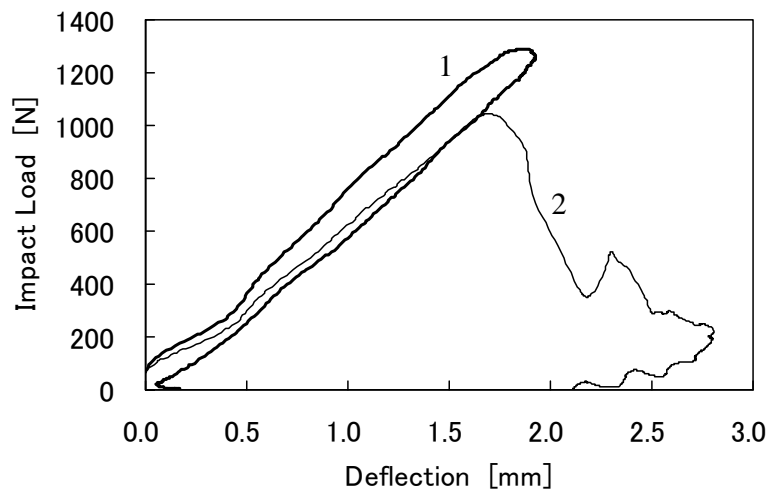


(c) $m_i=1.33\text{kg}$, $E_p=2.15\text{J}$, $V_0=1.8\text{ m/s}$

Fig.3.6 Results of iterative impact test. ($L=65\text{mm}$, $L/d=6.5$)

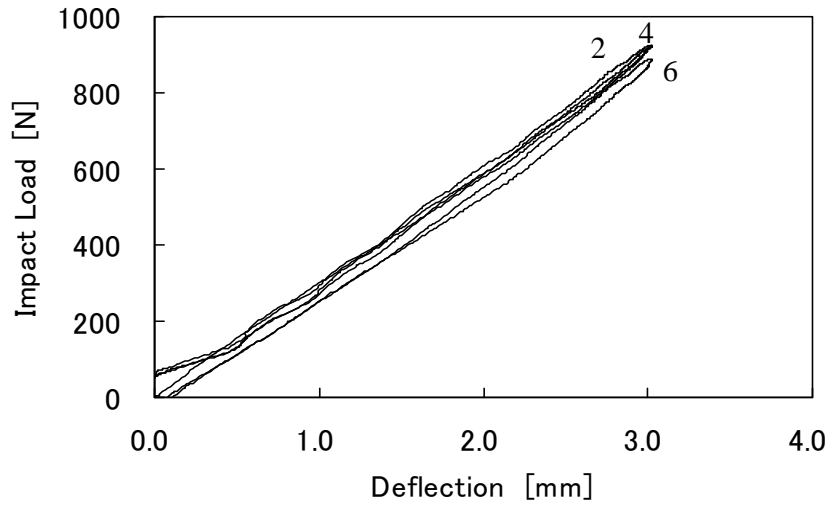


(a) $m_i=1.33\text{kg}$, $E_p=1.50\text{J}$, $V_0=1.5\text{ m/s}$

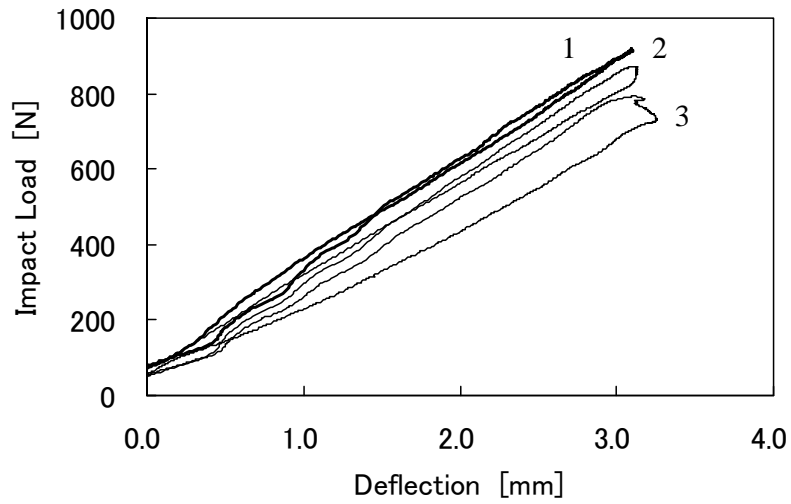


(b) $m_i=0.68\text{kg}$, $E_p=1.80\text{J}$, $V_0=2.3\text{ m/s}$

Fig.3.7 Results of iterative impact test. ($L=145\text{mm}$, $L/d=14.5$)



(a) $m_i = 1.33\text{kg}$, $E_p = 1.71\text{J}$, $V_0 = 1.6\text{ m/s}$



(b) $m_i = 1.33\text{kg}$, $E_p = 1.81\text{J}$, $V_0 = 1.65\text{ m/s}$

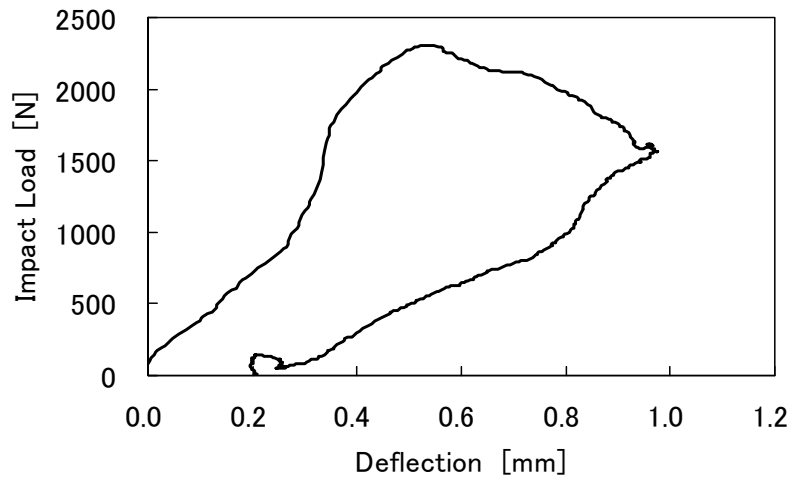
Fig.3.8 Results of iterative impact test. ($L = 205\text{mm}$, $L/d = 20.5$)

3.4.3 衝撃破壊

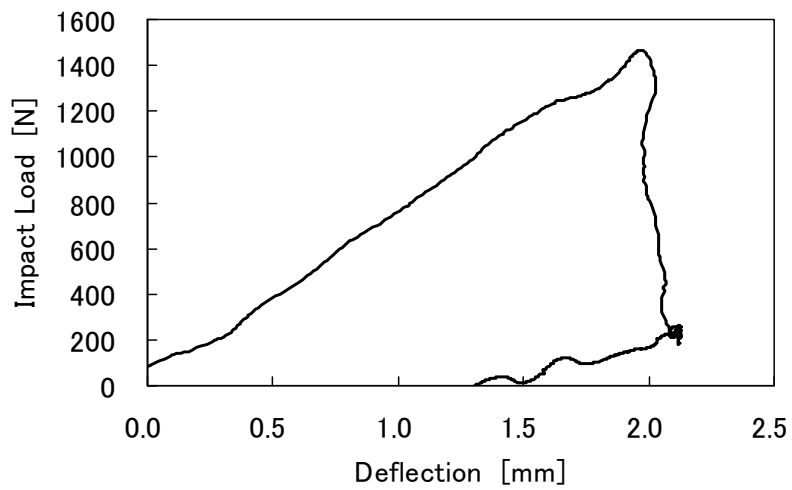
1回の衝撃で試験片に破断部分が生じる場合の荷重-たわみ線図を Fig.3.9 に示す。Fig.3.9(b) の $L=145\text{mm}(L/d=14.5)$ 、Fig.3.9(c) $L=205\text{mm}(L/d=20.5)$ は荷重-たわみ線図の傾向が似ており、最大荷重値後の損傷進展段階では、たわみ値が変化せず荷重が減少する傾向が現れている。Fig.3.9(a) の $L=65\text{mm}(L/d=6.5)$ では破断の程度が他のスパンの場合より小さかったが、 $L=145\text{mm}(L/d=14.5)$ 、 $L=205\text{mm}(L/d=20.5)$ の場合と比べて異なる損傷進展傾向を示し、最大荷重値後の損傷進展段階ではたわみ値が増加しながら荷重値が減少している。

代表的な損傷様式の模式図を Fig.3.10～Fig.3.12 に示す。図中の(a)は荷重点に対して試験片の側面を観察した場合であり、(b)は荷重点と 180° 反対側になる試験片の曲げ変形での引張変形側から観察した模式図である。Fig.3.10(a) $L=65\text{mm}(L/d=6.5)$ では荷重点直下よりき裂が中立面近くまで試験片の外周に沿って進展している部分と引張側では試験片軸方向にもき裂が生じていることがわかる。Fig.3.11(a) $L=145\text{mm}(L/d=14.5)$ 、Fig.3.12(a) $L=205\text{mm}(L/d=20.5)$ よりスパンが大きくなるほど軸方向のき裂が多く見られるようになる。軸方向は繊維方向であり、そのき裂は繊維とマトリックスの層間はく離である。同様に Fig.3.10(b)、Fig.3.11(b)、Fig.3.12(b) を比較しても破壊様式の変化がわかる。

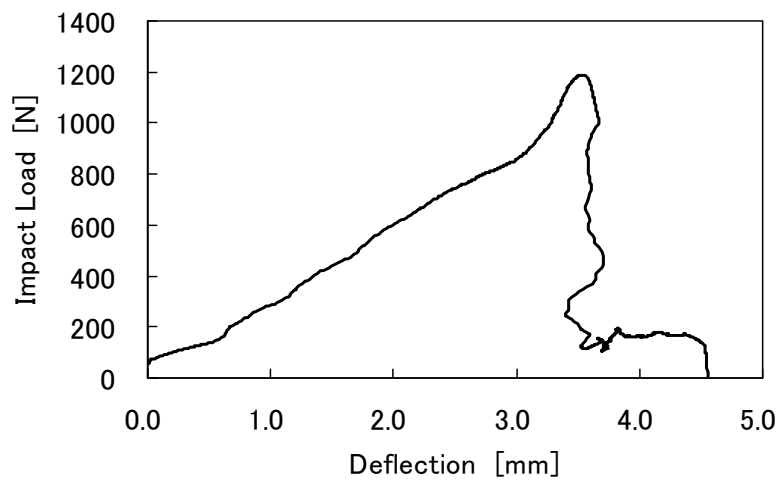
今回の実験条件である $L=65\text{mm}(L/d=6.5)$ から $L=205\text{mm}(L/d=20.5)$ までの範囲では、層間せん断破壊のみ、曲げ破壊のみでの破壊様式ではなく、せん断破壊と曲げ破壊が合わさった中央分断破壊であり、このことは一方向 CFRP の静的三点曲げ試験の破面観察報告⁽⁶⁸⁾ と類似している。なお、スパンと試験片直径の比が $L/d=6.5$ の場合でせん断変形の影響が大きく、 $L/d=14.5$ から $L/d=20.5$ になるにつれてせん断変形の影響が小さく、曲げ変形が主体となるためスパンの違いによって異なる傾向を示すと考えられる。



(a) $L=65\text{mm}$, $L/d=6.5$, $m_i=1.33\text{kg}$, $E_p=2.66\text{J}$, $V_0=2.0\text{ m/s}$

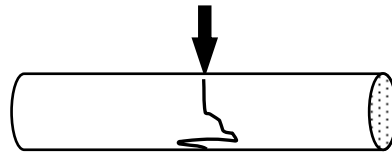
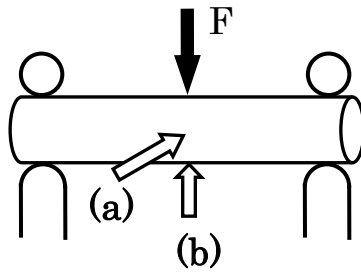


(b) $L=145\text{mm}$, $L/d=14.5$, $m_i=1.33\text{kg}$, $E_p=2.15\text{J}$, $V_0=1.8\text{ m/s}$

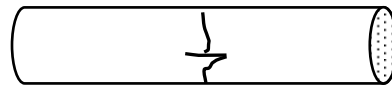


(c) $L=205\text{mm}$, $L/d=20.5$, $m_i=1.33\text{kg}$, $E_p=2.66\text{J}$, $V_0=2.0\text{ m/s}$

Fig.3.9 Results of impact test.

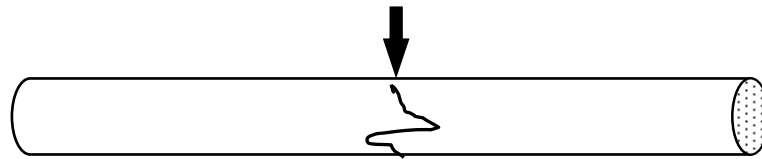


(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point



(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.3.10 Damage form (UD $L=65\text{mm}$)

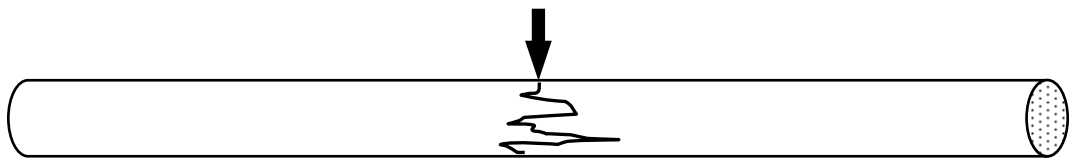


(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point



(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.3.11 Damage form (UD $L=145\text{mm}$)



(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point



(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

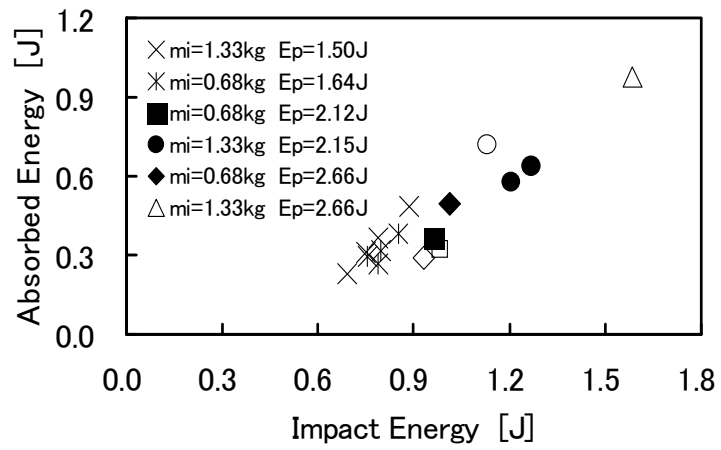
Fig.3.12 Damage form (UD $L=205\text{mm}$)

3.4.4 吸収エネルギーによる損傷評価

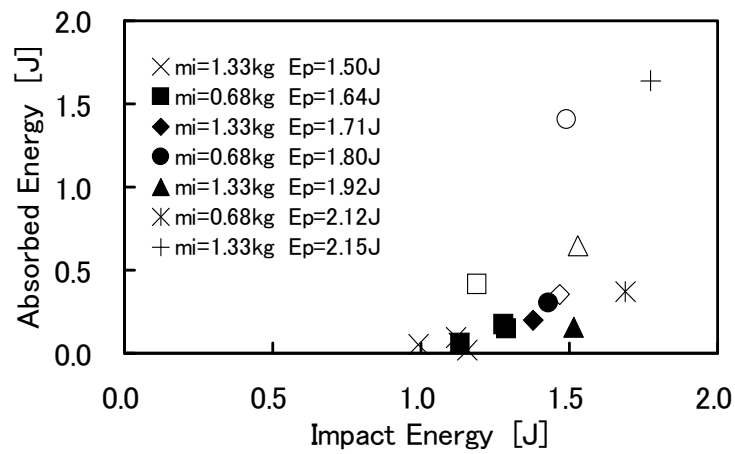
損傷が発生しない、または損傷が発生しても拡大しないと考えられる低衝撃エネルギーから1回の衝撃で破断に至るまでの実験結果より、衝撃荷重-たわみ線図より算出された衝撃エネルギーと吸収エネルギーの関係を Fig.3.13 に示す。Fig.3.13(a), (b), (c)各図において同一マークで白抜きの記号は繰り返し衝撃で破断傷が生じた場合を表している。

UD-C/C 複合材料丸棒材(直径 10mm)において Fig.3.13(a) の $L=65\text{mm}(L/d=6.5)$ では、衝撃エネルギーが 0.9J 以上で繰り返し衝撃を受けると試験片は破断に至ることがわかる。しかし、吸収エネルギーの大きさで破断に至るかどうかの区別はできない。これは、低衝撃エネルギー時から衝撃棒と試験片の接触部に微小な亀裂が生じ、その影響が吸収エネルギーの値に及ぼしていることも一因と考えられる。

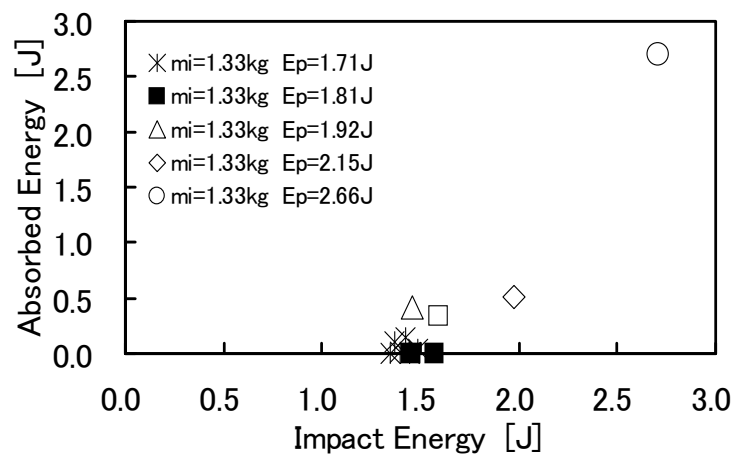
また、Fig.3.13(b) の $L=145\text{mm}(L/d=14.5)$, Fig.3.13(c) の $L=205\text{mm}(L/d=20.5)$ の結果より、スパンに関係なく吸収エネルギーが約 0.35J 以上になると破断に至る。今回の実験条件では、スパンと試験片直径の比が $L/d=6.5$ の場合ではせん断変形の影響が大きく、 $L/d=14.5, 20.5$ ではせん断変形の影響が小さく、曲げ変形が主体となるためスパンの違いによって、衝撃特性の異なる傾向を示すと考えられる。



(a) $L=65\text{mm}$, $L/d=6.5$



(b) $L=145\text{mm}$, $L/d=14.5$



(c) $L=205\text{mm}$, $L/d=20.5$

Fig.3.13 Absorbed energy versus impact energy

3.5 結言

本研究では、低速域に重点を置いた落錘式衝撃試験による 3 点曲げ試験方法によって、PY 法で製造された UD-C/C 複合材料の衝撃損傷評価を行った。その評価においてウェーブレット解析を適用し、衝撃荷重履歴の多重解像度解析を行い、衝撃荷重 - たわみ線図および衝撃エネルギーと吸収エネルギーの関係による損傷の評価などについて検討を行った。

その結果、ウェーブレット解析による衝撃荷重信号の多重解像度解析が有効であることを確認すると共に、衝撃荷重 - たわみ線図や吸収エネルギーなどによって、

- (1) 繰り返し衝撃による損傷の評価
- (2) 衝撃破壊
- (3) 吸収エネルギーによる損傷評価

について PY 法で製造された UD-C/C 複合材料の丸棒材で、低衝撃エネルギーから破壊に至るまでの試験片の挙動と損傷を評価し、衝撃損傷評価法として有効であることを検証ができた。

第 4 章

2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価

4.1 緒言

C/C 複合材料は衝撃負荷に対して脆弱であるという欠点がある。C/C 複合材料の衝撃特性に関する研究では SHPB 法や高速鋼球による高速衝撃を対象とした研究⁽⁴⁷⁾⁻⁽⁵⁰⁾がいくつか行われているが、耐衝撃性ならびに衝撃に伴う損傷機構の詳細については十分に明らかにされているとは言えない。

本研究では、落錘式衝撃試験により、わずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の衝撃における特性、損傷評価に重点を置いた。また、計測した衝撃荷重信号処理において、離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により衝撃荷重信号の分解および試験片の曲げ振動の影響除去を効率的に行えることを第 2 章で検討した。その結果を踏まえて、衝撃荷重評価にウェーブレット解析を適用し、各種実験条件下での 2D-C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷、破壊の過程を荷重-たわみ線図および吸収エネルギーなどによって評価し、衝撃損傷評価法として確立することを目的とする。

4.2 実験方法

4.2.1 試験片

今回使用した 2D-C/C 複合材料はアクロス社製の PY 法による直交積層($0^\circ/90^\circ$ 交互積層)の 2 方向丸棒材(型名: AC200-R10-2001)で、焼成温度 2000°C 、強化繊維 T300、炭素繊維含有率 40%、密度 1.7g/cm^3 、直径 d 10mm である。

4.2.2 落錘式衝撃試験

第 2 章の 2.2.2 項に落錘式衝撃試験の概要と Fig.2.1 に落錘式衝撃試験装置の概略を示す。衝撃棒先端部、衝撃点の荷重履歴 $F(t)$ は第 2 章と同様に式(2.1), (2.2)より算出している。なお、衝撃棒はすべて長さ 1m, 先端部は棒半径の寸法で球面加工され、黄銅 $\phi 7(m_i:0.34\text{kg})$, 黄銅 $\phi 8(m_i:0.43\text{kg})$, 黄銅 $\phi 10(m_i:0.68\text{kg})$ の 3 種類とアルミニウム $\phi 7(m_i:0.11\text{kg})$, アルミニウム $\phi 10(m_i:0.22\text{kg})$ の 2 種類の計 5 種類を使用した。

試験片中央部のたわみ測定には、渦電流式非接触変位計を使用した。また、中央部から 15mm の位置には衝撃荷重点側とその 180° 反対側の軸方向にひずみゲージを貼り付け、その出力信号によっても試験片の変形過程を測定した。

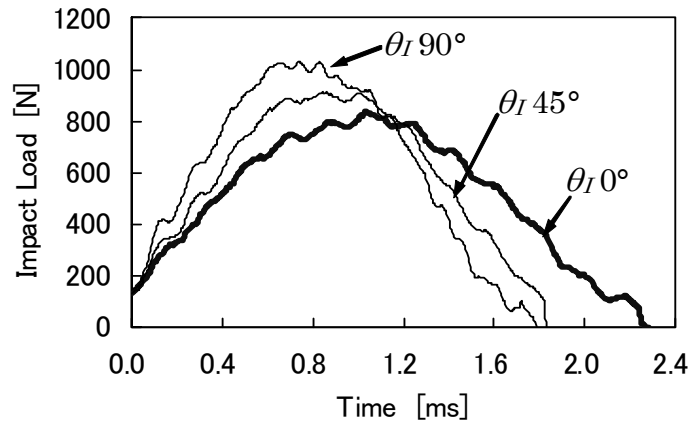
また、衝撃角度 θ_I は Fig.2.2 に示すように、衝撃荷重方向に対する試験片の積層面の角度を表し、衝撃棒に対して試験片の積層面が垂直になる場合を $\theta_I=0^\circ$ とする。

実験は、試験片スパン L 65mm, 145mm の 2 種類, θ_I $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の 3 種類, 衝撃棒の落下高さ H 0.041m, 0.130m, 0.184m の 3 種類と 5 種類の衝撃棒の組合せで行った。なお、試験片両端支持部は試験片の跳上がりや転がりを防ぐため、治具により一定の締付け力で支持した。また、実験条件では衝撃棒の位置エネルギーを E_p とし、衝撃速度 V_0 は $\sqrt{2gH}$ で算出した。

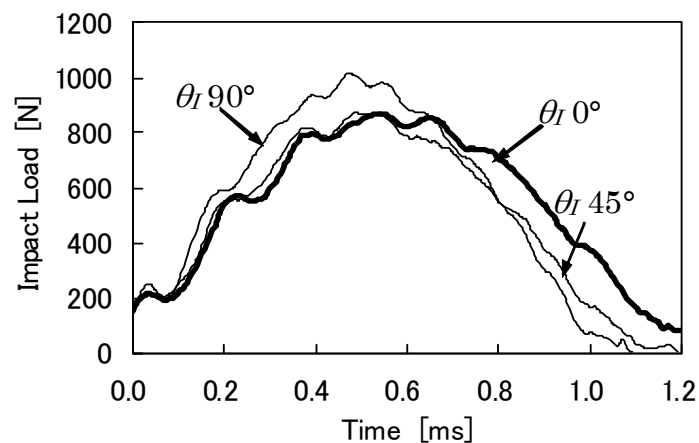
4.3 離散ウェーブレット変換による衝撃荷重履歴の多重解像度解析

4.3.1 衝撃荷重履歴

Fig.4.1 から Fig.4.3 は衝撃荷重履歴の測定結果の一部を示す. Fig.4.1 は, 実験条件が $E_p=0.28\text{J}$, $L=65\text{mm}$ で V_0 が 0.9 m/s と 1.6m/s の場合の $\theta_I=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ を比較した結果である. 低衝撃エネルギー下において, θ_I に対して衝撃荷重履歴の傾向の違いがはっきりと表れている. Fig.4.2 は, Fig.4.1 と同様な実験条件で $L=145\text{mm}$ の場合の結果である. $L=65\text{mm}$ の結果に比べて, θ_I に対する衝撃荷重履歴の傾向にほとんど違いが見られない. また, 励起された高周波成分の影響が見られ, V_0 が 0.9 m/s より 1.6m/s の場合の方がより顕著に表れている. Fig.4.3 は, (a) $L=65\text{mm}$, (b) $L=145\text{mm}$ の試験片に破断が生じた時の衝撃荷重履歴である. $L=145\text{mm}$ に比べて $L=65\text{mm}$ の場合の方が θ_I に対する傾向の違いがはっきりと表れていることがわかる.

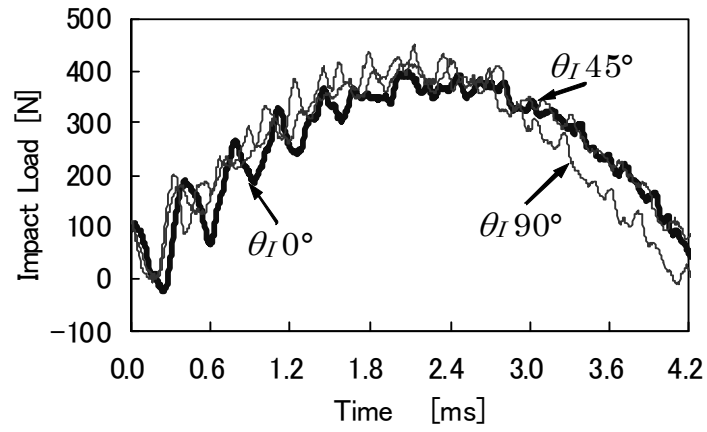


(a) Brass $\phi 10(m_i:0.68\text{kg})$, $E_p=0.28\text{J}$, $L=65\text{mm}$, $V_0=0.9\text{ m/s}$

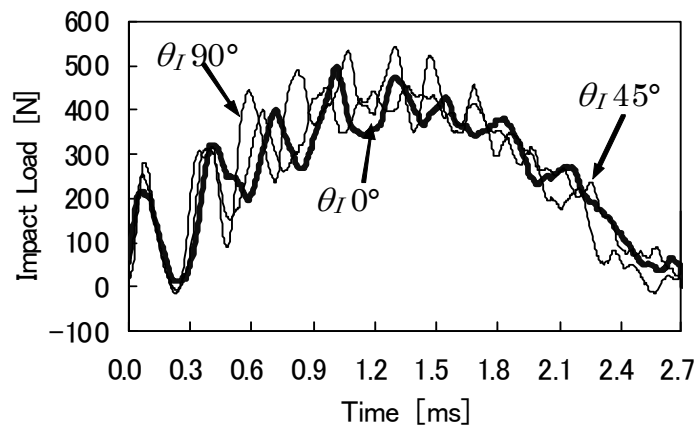


(b) Al $\phi 10(m_i:0.22\text{kg})$, $E_p=0.28\text{J}$, $L=65\text{mm}$, $V_0=1.6\text{m/s}$

Fig.4.1 Load variation in time on the results of the impact test. ($L=65\text{mm}$)

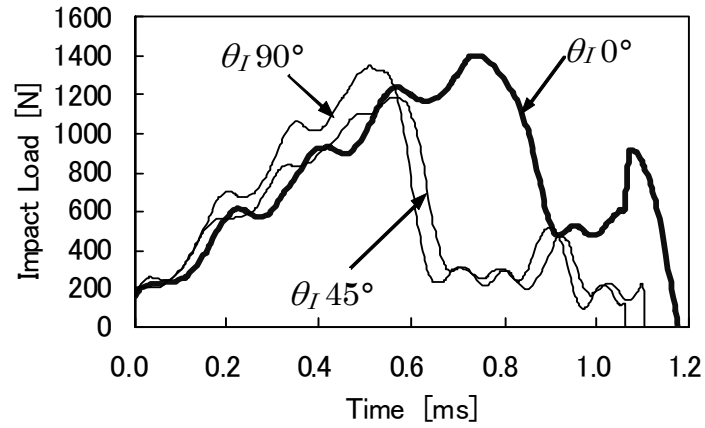


(a) Brass $\phi 10$ ($m_i:0.68\text{kg}$), $E_p=0.28\text{J}$, $L=145\text{mm}$, $V_0=0.9\text{m/s}$

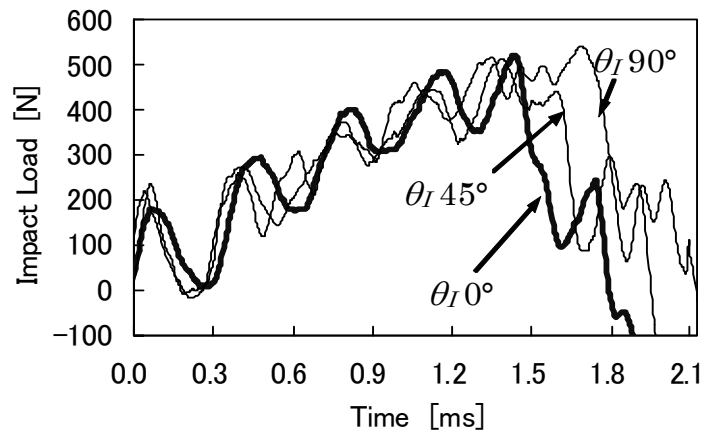


(b) Al $\phi 10$ ($m_i:0.22\text{kg}$), $E_p=0.28\text{J}$, $L=145\text{mm}$, $V_0=1.6\text{m/s}$

Fig.4.2 Load variation in time on the results of the impact test. ($L=145\text{mm}$)



(a) Brass $\phi 10$ ($m_i:0.68\text{kg}$), $E_p=0.87\text{J}$, $L=65\text{mm}$, $V_o=1.6\text{m/s}$



(b) Brass $\phi 8$ ($m_i:0.43\text{kg}$), $E_p=0.56\text{J}$, $L=145\text{mm}$, $V_o=1.6\text{m/s}$

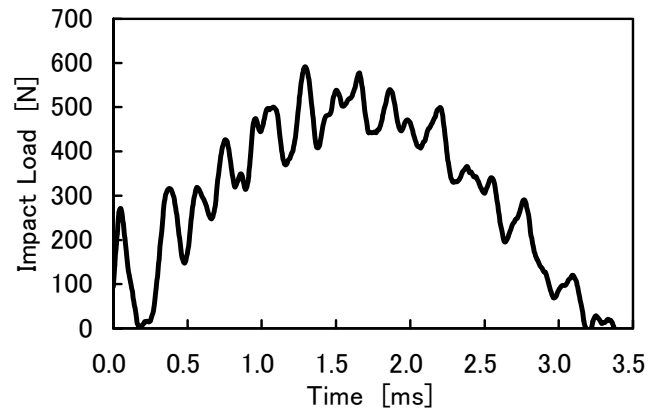
Fig.4.3 Load variation in time on the results of the impact test.

4.3.2 多重解像度解析

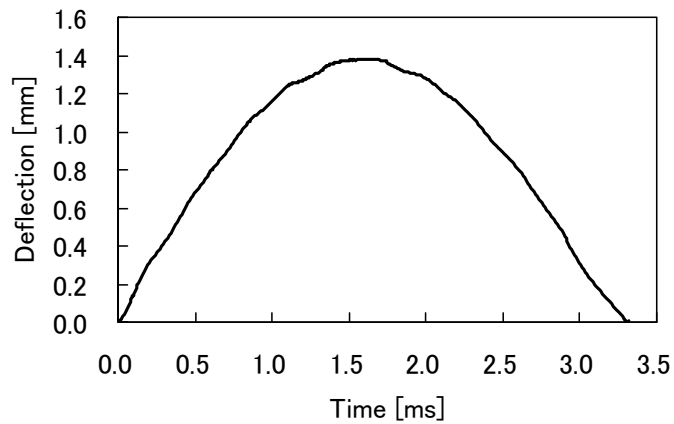
本研究では衝撃荷重-たわみ線図と損傷発生などにより試験片に吸収されたと考えられる吸収エネルギー E_{ab} による試験片の損傷評価を行う。そこで、衝撃荷重履歴における高周波成分の処理と衝撃荷重の信号情報からの損傷評価を試みるため、第2章で検証したウェーブレット解析の多重解像度解析を衝撃荷重履歴に適用した。

Fig.4.4に一例として、実験条件が衝撃棒:黄銅 $\phi 7(m_i :0.34\text{kg})$, $E_p=0.43\text{J}$, $L=145\text{mm}$, $\theta_I=90^\circ$, $V_0=1.6\text{m/s}$ の場合の荷重履歴およびたわみ履歴の測定結果を示す。たわみ履歴には高周波成分は見られないが、衝撃荷重履歴のみに複雑な高周波成分が表れていることから、衝撃棒と試験片の接触状態やノイズなどの影響と考えられ、試験片全体の変形挙動に対する衝撃荷重の履歴としては高周波成分を処理する必要があるが生じる。

Fig.4.5はFig.4.4の測定した衝撃荷重履歴と多重解像度解析のレベル5の低周波成分を重ね合わせたものであり、力積の大きさがほとんど変わることなく近似できている。ウェーブレットとして Daubechies の $N=5$ を使用し、衝撃荷重信号を5段階にわたって低周波成分と高周波成分に分解している。その結果、効率的に波形を分解処理でき、高周波成分を損なうことなく信号波形を評価できる。以後、この多重解像度解析を用いて衝撃荷重履歴を解析し、衝撃荷重として取り扱うこととする。



(a) Impact load variation in time



(b) Deflection variation in time

Fig.4.4 Results of the impact test.

(Brass $\phi 7(m_i:0.34\text{kg}), E_p=0.43\text{J}, L=145\text{mm}, \theta_I=90^\circ, V_0=1.6\text{m/s}$)

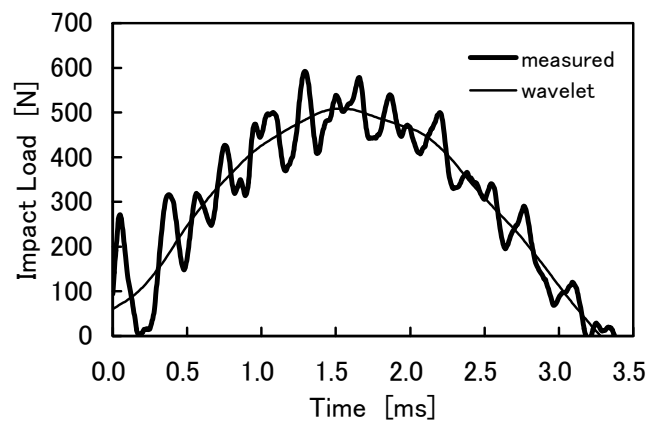


Fig.4.5 The wavelet –smoothed impact load variation in time.

(Brass $\phi 7(m_i:0.34\text{kg}), E_p=0.43\text{J}, L=145\text{mm}, \theta_I=90^\circ, V_0=1.6\text{m/s}$)

(Wavelet:db5 Level 5)

4.4 衝撃荷重-たわみ線図および吸収エネルギーによる損傷評価

4.4.1 衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出

第2章の2.5項より、多重解像度解析後の衝撃荷重履歴とたわみ履歴から時間軸を消去して得られた衝撃荷重-たわみ線図より数値積分を行い、吸収エネルギー E_{ab} と負荷された衝撃エネルギー E_{ip} を算出する。Fig.2.11に示すそれぞれの該当する面積がエネルギーとなる。

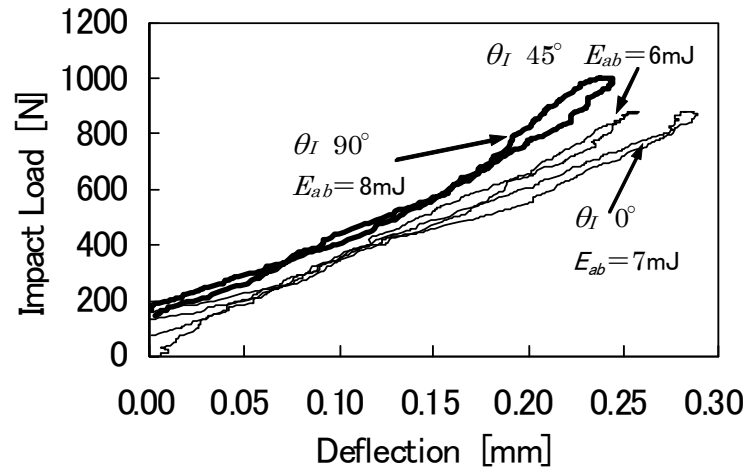
4.4.2 低衝撃エネルギー時の衝撃特性

Fig.4.6は衝撃棒の $E_p=0.28\text{J}$ 、 $L=65\text{mm}$ の条件下で m_i 、 V_0 および θ_I を変化させた場合の低衝撃エネルギー時の衝撃荷重-たわみ線図であり、Fig.4.7はFig.4.6から得られた最大衝撃荷重、最大たわみ量および吸収エネルギーと θ_I の関係をグラフ化したものである。 $V_0=1.6\text{m/s}$ の場合、 $V_0=0.9\text{m/s}$ に比べて吸収エネルギーは小さく、 θ_I に関係なくこの程度の V_0 の違いにおいても吸収エネルギーに差が表れている。

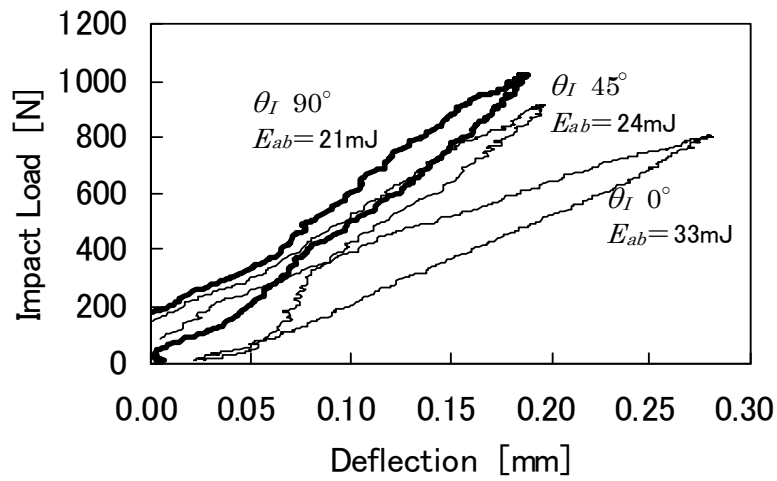
$\theta_I=0^\circ$ では、最大荷重は 806N ($V_0=0.9\text{m/s}$)、 877N ($V_0=1.6\text{m/s}$)で V_0 による変化が見られるが、最大たわみ量は 0.28mm ($V_0=0.9\text{m/s}$)、 0.29mm ($V_0=1.6\text{m/s}$)であり V_0 に関係なくほぼ一定である。 $\theta_I=45^\circ$ では最大荷重は 889N ($V_0=0.9\text{m/s}$)、 876N ($V_0=1.6\text{m/s}$)で大きな差はないが、最大たわみ量は 0.20mm ($V_0=0.9\text{m/s}$)、 0.26mm ($V_0=1.6\text{m/s}$)であり、 $V_0=1.6\text{m/s}$ に比べ $V_0=0.9\text{m/s}$ になると減少している。 $\theta_I=90^\circ$ では、最大荷重は 1014N ($V_0=0.9\text{m/s}$)、 1000N ($V_0=1.6\text{m/s}$)、最大たわみ量は 0.19mm ($V_0=0.9\text{m/s}$)、 0.25mm ($V_0=1.6\text{m/s}$)で $\theta_I=45^\circ$ の場合と同様に最大荷重はほぼ一定であるのに対し、最大たわみ量は $V_0=1.6\text{m/s}$ に比べ $V_0=0.9\text{m/s}$ になると減少している。

また、吸収エネルギーの値は、 $V_0=0.9\text{m/s}$ に比べ $V_0=1.6\text{m/s}$ では、 θ_I の変化による大きな違いは見られない。ただし、衝撃挙動において $\theta_I=0^\circ$ に比べ $\theta_I=90^\circ$ の方が最大荷重値を比較した場合大きく、逆に最大たわみ量の値は小さくその差は $V_0=1.6\text{m/s}$ に比べ $V_0=0.9\text{m/s}$ の方が大きいことがわかる。

なお、 $E_p=0.28\text{J}$ で $L=145\text{mm}$ とした場合は $L=65\text{mm}$ のような衝撃速度および衝撃角度による最大荷重値、最大たわみ量、吸収エネルギーの値の違いはほとんど見られなかった。今回の実験では試験片直径 $d=10\text{mm}$ であり、 $L=65\text{mm}$ の場合は、スパンと直径の比 $L/d=6.5$ でせん断変形の影響が大きく、衝撃荷重を受ける角度によってせん断剛性が変化する。 $L=145\text{mm}$ ($L/d=14.5$)の場合は、せん断変形の影響が小さく曲げ変形が主体となるため、スパンの違いによって衝撃特性も異なる傾向を示すと考えられる。

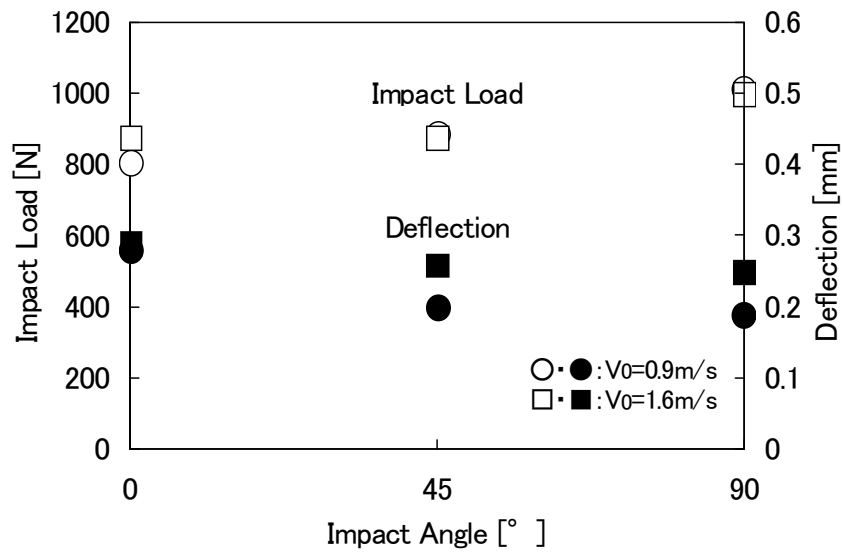


(a) Al ϕ 10 (m_i :0.22kg), $V_0=1.6$ m/s

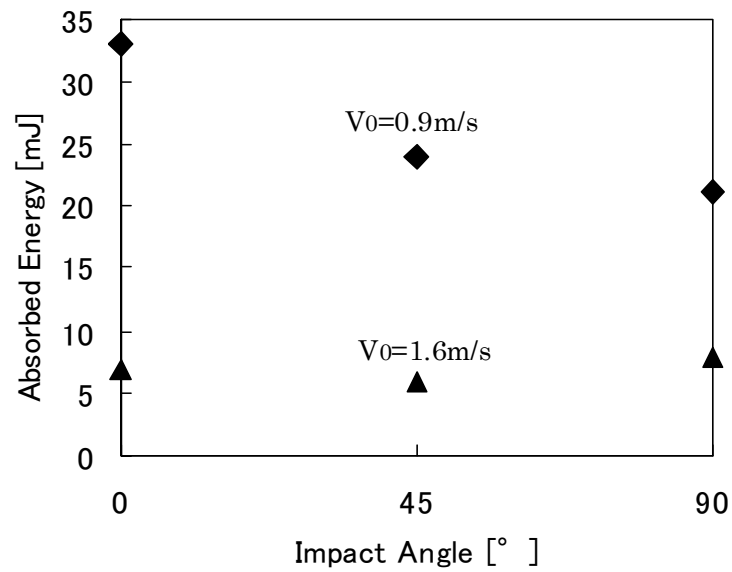


(b) Brass ϕ 10 (m_i :0.68kg), $V_0=0.9$ m/s

Fig.4.6 The effect of impact velocity (the drop weight mass) on the results of the impact test. ($E_p=0.28$ J, $L=65$ mm) (Wavelet: db 5 Level 5)



(a) Impact load(max), Deflection(max)

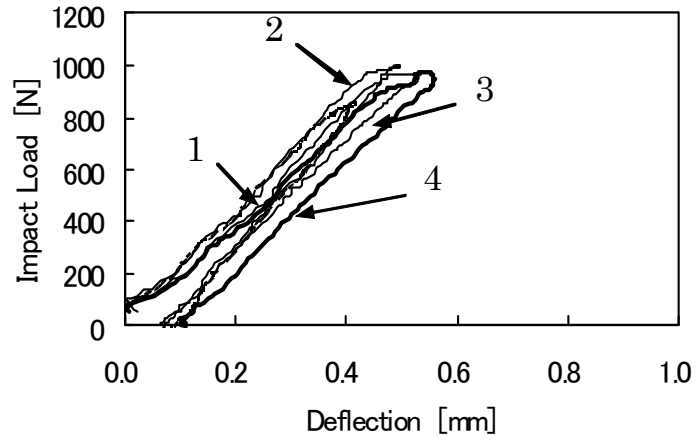


(b) Absorbed energy

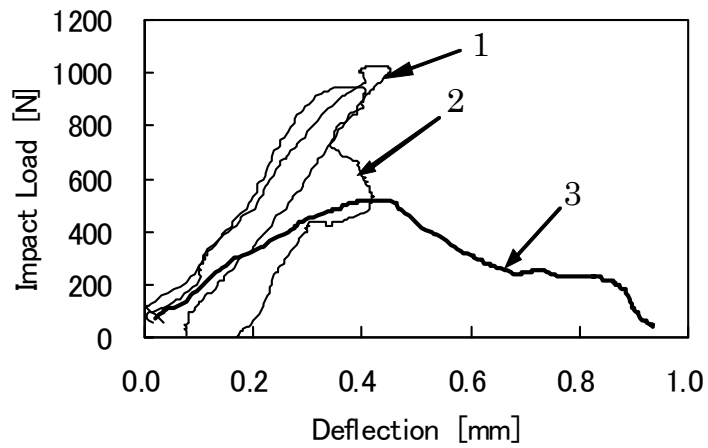
Fig.4.7 The effect of impact velocity (the drop weight mass) on the results of the impact test. ($E_p=0.28\text{J}$, $L=65\text{mm}$)

4.4.3 繰返し衝撃を受ける場合の衝撃角度の影響

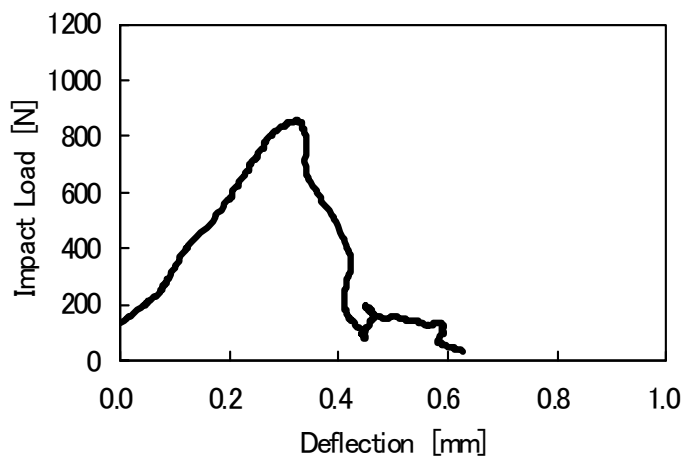
Fig.4.8 は、繰返し衝撃を試験片に加えた場合の衝撃点の荷重とたわみの関係を衝撃角度ごとに示す。実験条件は $L=65\text{mm}$, $E_p=0.56\text{J}$, $V_0=1.6\text{m/s}$ ($m_i=0.43\text{kg}$, $H=130\text{mm}$) として同一条件下で衝撃を繰返し試験片に加える。但し、今回の実験では最大繰返し数を 4 回とした。Fig.4.8(a)の $\theta_I=0^\circ$ では衝撃を 4 回繰返したが、衝撃荷重-たわみ線図の傾きの減少傾向と吸収エネルギーの増加傾向がわずかに確認できる程度の損傷発生であり、試験片外観の目視検査では損傷の発生を識別できなかった。Fig.4.8(b)の $\theta_I=45^\circ$ の場合では、衝撃ごとに吸収エネルギーは増加し、3 回目の衝撃では最大衝撃荷重値が約 1/2 となり、破断に至った。1 回目と 2 回目の衝撃後の外観目視検査では試験片の損傷はわからなかった。衝撃荷重-たわみ線図より、特に 2 回目の衝撃時では衝撃荷重の最大値がほとんど変化せず継続し、たわみ量だけが増加する傾向が顕著に見られ、試験片の剛性が低下したことがわかる。Fig.4.8(c)に示す $\theta_I=90^\circ$ の場合では、繰返し衝撃を加えることなく、1 回目の衝撃で破断した。積層面に対する衝撃角度によって損傷発生や強度の違いが衝撃荷重-たわみ線図より明らかである。



(a) $\theta_I=0^\circ$,Iterative impact:4



(b) $\theta_I=45^\circ$,Iterative impact:3



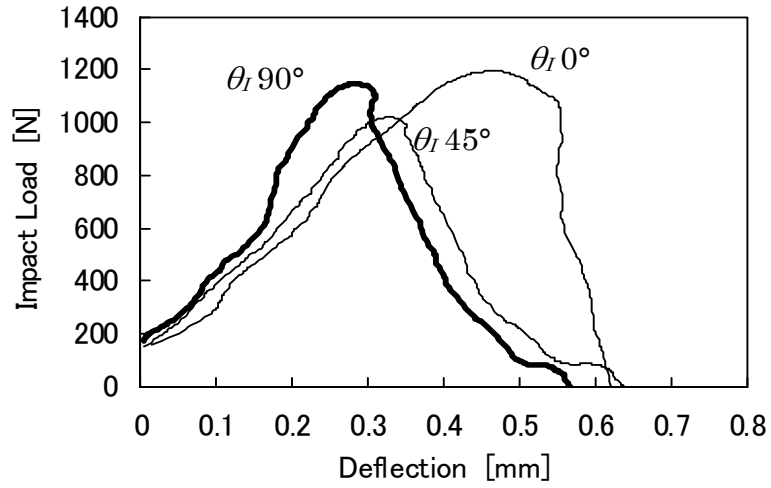
(c) $\theta_I=90^\circ$,Iterative impact:1

Fig.4.8 The effect of impact angle on the iterative impact test.
 (Brass $\phi 8(m_i:0.43\text{kg}), E_p=0.56\text{J}, L=65\text{mm}, V_0=1.6\text{m/s}$) (Wavelet: db 5 Level 5)

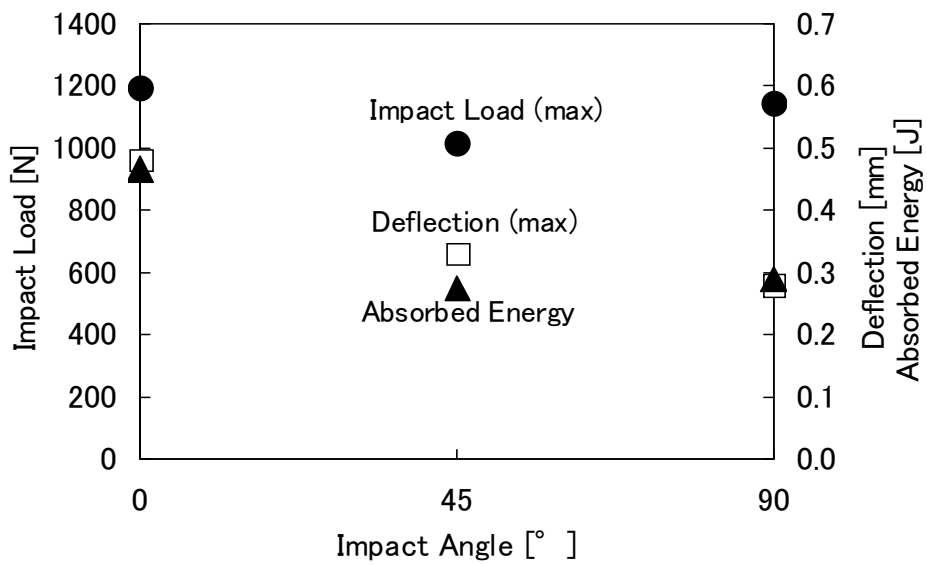
4.4.4 衝撃破壊における衝撃角度の影響

4.4.2 および 4.4.3 項の実験条件より衝撃エネルギーを大きくし、1回の衝撃で試験片の外観に損傷が生じたり、部分破断に至る場合について検討する。Fig.4.9(a)は $L=65\text{mm}$, $E_p=0.87\text{J}$, $V_0=1.6\text{m/s}$ ($m_i=0.68\text{kg}$, $H=130\text{mm}$)の衝撃荷重-たわみ線図であり、 $\theta_I=45^\circ$ と $\theta_I=90^\circ$ の場合は最大荷重後の損傷進展傾向が似ており、たわみ量の増加に伴い荷重は減少している。それに対し $\theta_I=0^\circ$ では最大荷重後荷重減少しながらたわみ量は増加するが、荷重が 1000N まで減少した後、たわみ量はほとんど変化せず荷重値が減少している。Fig.4.9(b)は、Fig.4.10(a)から得られた最大衝撃荷重、最大荷重時のたわみ量および吸収エネルギーと θ_I の関係をグラフ化したものである。 $\theta_I=45^\circ$ と $\theta_I=90^\circ$ の場合はほぼ吸収エネルギーが同じであるが $\theta_I=0^\circ$ は $\theta_I=45^\circ$ と $\theta_I=90^\circ$ の 1.5 倍以上の吸収エネルギーであり、 $L=65\text{mm}$ の場合では衝撃角度による特徴の違いが表れている。

また、 $L=65\text{mm}$ の代表的な損傷様式の模式図を Fig.4.10 から Fig.4.12 に示す。図中の (a)は荷重点に対して試験片の側面を観察した場合であり、(b)は荷重点と 180° 反対側になる試験片の曲げ変形での引張変形側から観察した模式図である。第 3 章の UD 材と同様に中央分断破壊であることがわかる。Fig.4.10(a)は $\theta_I=0^\circ$ で積層面外の損傷状態であるが、 90° 層のトランスバースクラックが大きくなり、 0° 層と 90° 層の層間はく離や 0° 層の繊維破断などが複雑に発生し、積層面外では試験片の外周に沿ってジグザグに損傷が生じている。Fig.4.10(b)は積層面内の損傷状態を示しているが、 90° 層のトランスバースクラックが 0° 層に沿って幅が大きくなり、積層面外と異なり直線的な損傷であるが、 0° 層の繊維破断部分では非直線的になっている。Fig.4.11 は $\theta_I=45^\circ$, Fig.4.12 は $\theta_I=90^\circ$ の場合であるが、衝撃荷重方向は $\theta_I=0^\circ$ と異なるが積層面外、積層面内共に損傷様式は $\theta_I=0^\circ$ と同様である。

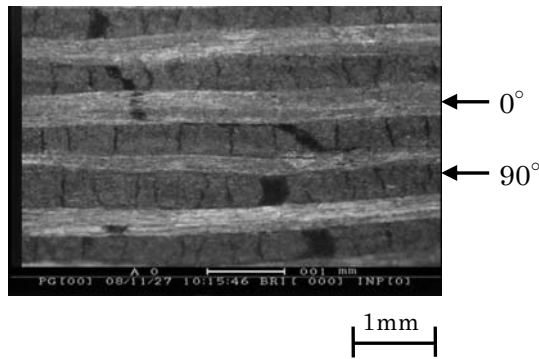
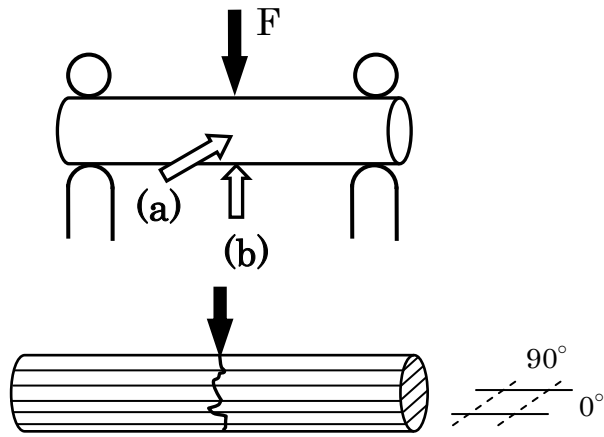


(a) Load-deflection relationship

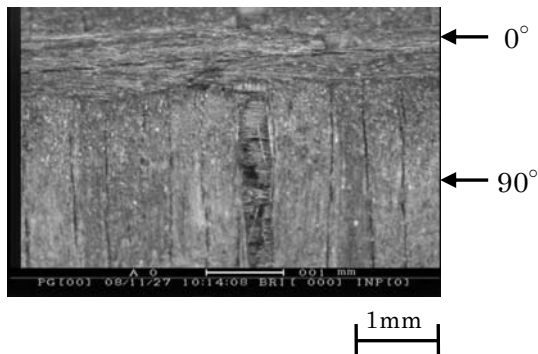
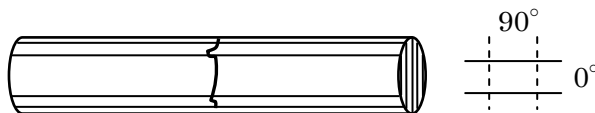


(b) The effect of impact angle

Fig.4.9 The effect of impact angle on impact load-deflection relationship. ($L=65\text{mm}$)
(Brass $\phi 10(m_i:0.68\text{kg})$, $E_p=0.87\text{J}$, $V_0=1.6\text{m/s}$) (Wavelet: db 5 Level 5)

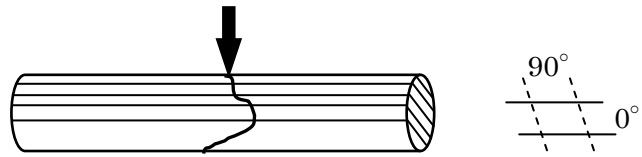


(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point

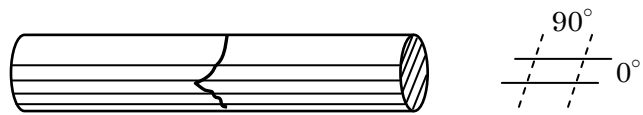


(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.4.10 Damage form. (2D $\theta_I=0^\circ$ $L=65\text{mm}$)

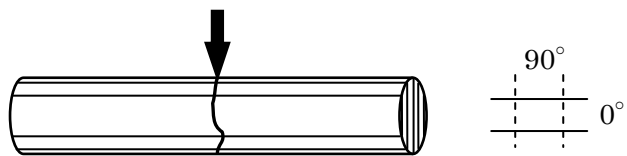


(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point

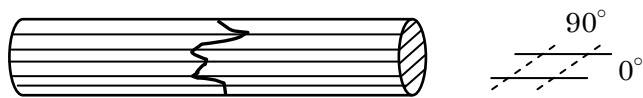


(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.4.11 Damage form. (2D $\theta_I=45^\circ$ $L=65\text{mm}$)



(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point



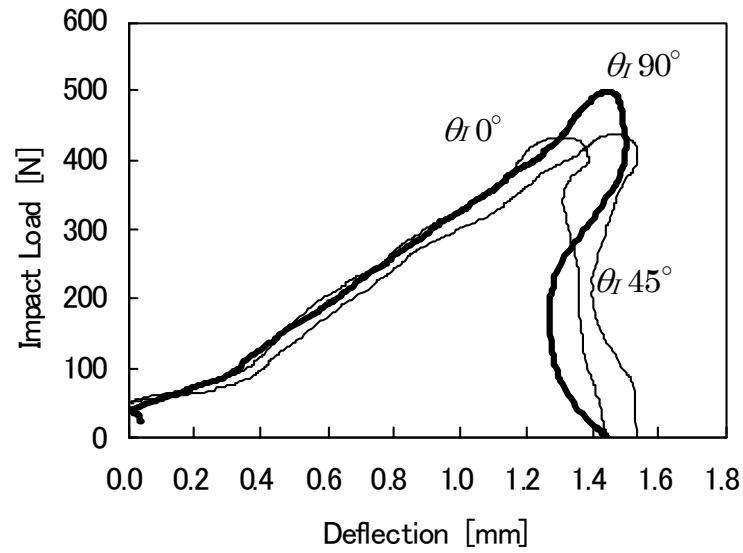
(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.4.12 Damage form. (2D $\theta_I=90^\circ$ $L=65\text{mm}$)

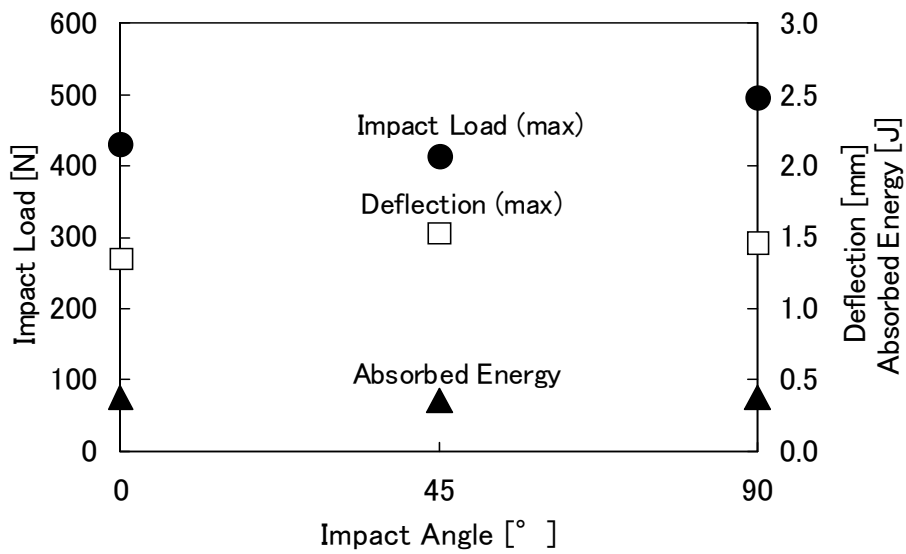
Fig.4.13(a)は $L=145\text{mm}$, $E_p=0.56\text{J}$, $V_0=1.6\text{m/s}$ ($m_f=0.43\text{kg}$, $H=130\text{mm}$)の場合の衝撃荷重-たわみ線図で、衝撃角度の違いを比較したものである。4.4.2の低衝撃エネルギー時の挙動と同じく、 $L=145\text{mm}$ では衝撃角度による違いは $L=65\text{mm}$ と比較して大きくないが、最大荷重後の損傷進展傾向が衝撃角度によって異なり。 $\theta_I=45^\circ$ と $\theta_I=90^\circ$ の場合はFig.4.9の $L=65\text{mm}$ とは損傷進展傾向が明らかに変化している。

Fig.4.13(b)は、Fig.4.13(a)から得られた最大衝撃荷重、最大荷重時のたわみ量および吸収エネルギーと θ_I の関係をグラフ化したものであるが、特に吸収エネルギーは衝撃角度に関係なくほぼ同じ値であり、衝撃角度による違いは $L=65\text{mm}$ と比較して小さい。

また、 $L=145\text{mm}$ の代表的な損傷様式の模式図をFig.4.14からFig.4.16に示す。図中の(a)は荷重点に対して試験片の側面を観察した場合であり、(b)は荷重点と 180° 反対側になる試験片の曲げ変形での引張変形側から観察した模式図である。Fig.4.14(a)は $\theta_I=0^\circ$ で積層面外の損傷状態であるが、 90° 層のトランスバースクラックが大きくなり、 0° 層と 90° 層の層間はいく離や 0° 層の繊維破断などが複雑に発生し、積層面外では試験片の外周に沿ってジグザグに損傷が生じているが、 $L=65\text{mm}$ の場合と比較してその度合いが大きくなっている。Fig.4.14(b)は積層面内の損傷状態を示しているが、 90° 層のトランスバースクラックが 0° 層に沿って幅が大きくなり、積層面外と異なり直線的な損傷であるが、 0° 層の繊維破断部分では非直線的になっている。Fig.4.15は $\theta_I=45^\circ$ 、Fig.4.16は $\theta_I=90^\circ$ の場合であるが、衝撃荷重方向は $\theta_I=0^\circ$ と異なるが積層面外、積層面内共に損傷様式は $\theta_I=0^\circ$ と同様である。なお、第3章のUD材と同様に中央分断破壊であるが、 $L=65\text{mm}$ の場合と比較して試験片軸方向に損傷が広がる傾向が見られる。

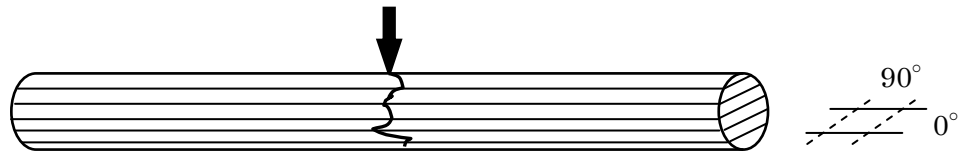
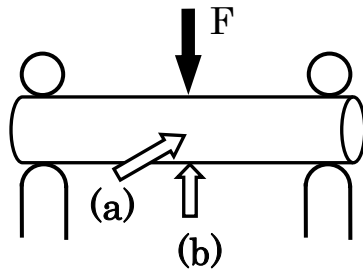


(a) Load-deflection relationship

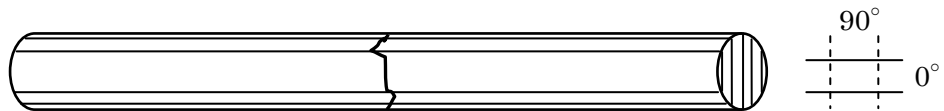


(b) The effect of impact angle

Fig.4.13 The effect of impact angle on impact load-deflection relationship. ($L=145\text{mm}$)
 (Brass $\phi 8(m_i:0.43\text{kg})$, $E_p=0.56\text{J}$, $V_0=1.6\text{m/s}$) (Wavelet: db 5 Level 5)

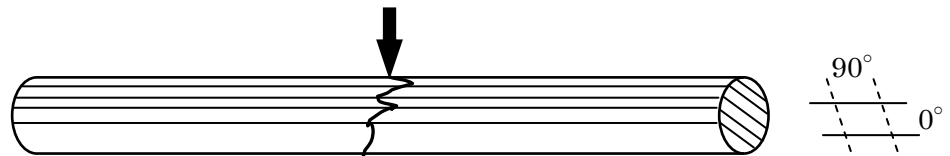


(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point

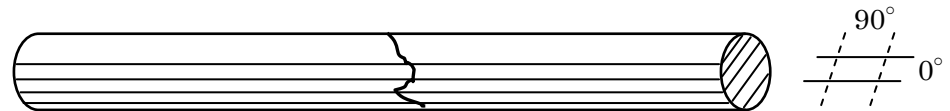


(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.4.14 Damage form. (2D $\theta_I=0^\circ$ $L=145\text{mm}$)



(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point

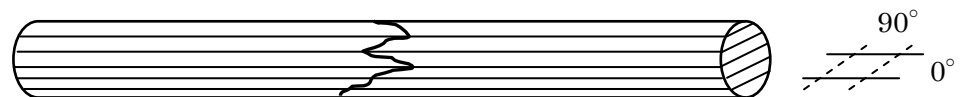


(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.4.15 Damage form. (2D $\theta_I=45^\circ$ $L=145\text{mm}$)



(a) Side view of opposite side 90° away of impact load point



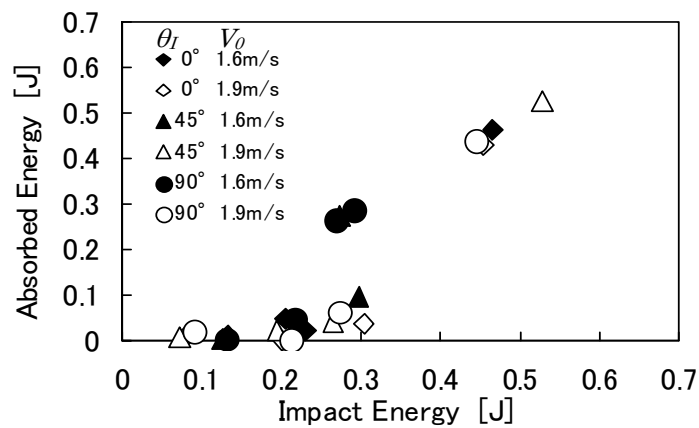
(b) Side view of opposite side 180° away of impact load point

Fig.4.16 Damage form. (2D $\theta_I=90^\circ$ $L=145\text{mm}$)

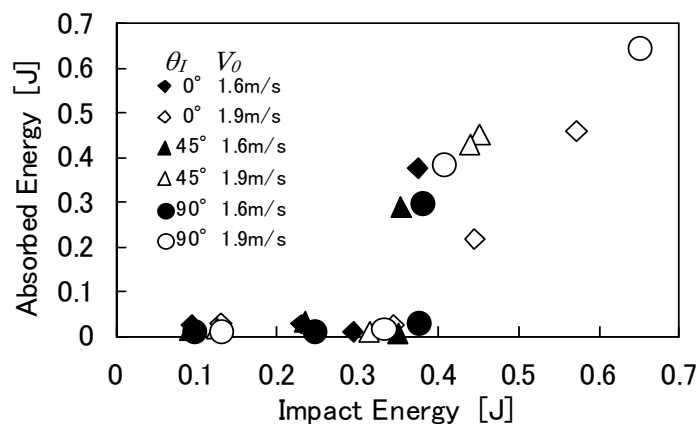
4.4.5 吸収エネルギーによる損傷評価

損傷が発生していないと考えられる低衝撃エネルギーから1回の衝撃で破断に至るまでの衝撃実験結果より、衝撃荷重-たわみ線図において算出された衝撃エネルギーと吸収エネルギーの関係を Fig.4.17 に示す。

$L=65\text{mm}$ の場合では、衝撃エネルギーが増加すると徐々に吸収エネルギーも増加する傾向が見られ、衝撃エネルギー0.27J 付近で急激に吸収エネルギーが増加し破断に至る点が見られる。衝撃エネルギー0.2~0.3J では吸収エネルギーも徐々に増加し、試験片内部で損傷が発生、広がっていると考えられるが外観目視検査では損傷は確認できない範囲である。よって、 $L=65\text{mm}$ では吸収エネルギー0.05J 以下の繰返し衝撃を受けても損傷が広がらない領域、吸収エネルギー0.05~0.1J の繰返し衝撃を受けると損傷が広がり破断する領域、1回の衝撃で破断に至る領域の3領域に分類できる。それに対して $L=145\text{mm}$ では、吸収エネルギーが徐々に増加する傾向は見られず、繰返し衝撃を受けても吸収エネルギー0.05J 以下の損傷が拡大しない領域と1回の衝撃で破断に至る領域に分けられる。



(a) $L=65\text{mm}$



(b) $L=145\text{mm}$

Fig.4.17 Absorbed energy versus impact energy

4.5 結言

本研究では、低速域に重点を置いた落錘式衝撃試験方法による 3 点曲げ試験によって、PY 法で製造された 2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価を行った。その評価においてウェーブレット解析を適用し、衝撃荷重信号の多重解像度解析、衝撃荷重-たわみ線図および衝撃エネルギーと吸収エネルギーの関係などによって衝撃損傷評価を行った。

その結果、ウェーブレット解析による衝撃荷重信号の多重解像度解析が衝撃荷重評価に有効であり、衝撃荷重-たわみ線図および吸収エネルギーなどによって、

- (1)低衝撃エネルギー時の衝撃特性
- (2)繰返し衝撃を受ける場合の衝撃角度の影響
- (3)衝撃破壊における衝撃角度の影響
- (4)吸収エネルギーによる損傷評価

について PY 法で製造された 2D-C/C 複合材料の丸棒材における損傷発生時の試験片の挙動、損傷を評価し、衝撃損傷評価法が有効であることを検証できた。

第 5 章

C/C 複合材料の剛性低下

5.1 緒言

本研究では、落錘式衝撃試験により、わずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の衝撃における特性、損傷評価に重点を置いた。そして、第3章、第4章においてUDおよび2D-C/C複合材料での研究結果を報告し、同一実験条件で繰返し衝撃を主とした各種実験条件下での衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程を荷重-たわみ線図および衝撃エネルギーと吸収エネルギーの関係による評価方法によって検討を行った。

今回、主に繰返し衝撃を受けるC/C複合材料の衝撃損傷評価において、衝撃荷重履歴およびたわみ履歴から得られる試験片の剛性により、衝撃による試験片の剛性の低下と吸収エネルギーの関係について検討し、衝撃損傷評価法の確立をすることを目的とする。

5.2 実験方法

5.2.1 試験片

今回使用したC/C複合材料はアクロス社製のPY法によるUD材の直径 d 10mmの丸棒(型名:AC200-R10-2000)、直交積層(0°/90°交互積層)の2D材で幅 B 10mm、厚さ h 10mmの角棒(型名:AC200-B10-2001)と幅 B 40mm、板厚 h 5mmの積層板(型名:AC200-B05-2001)で、焼成温度2000°C、強化繊維T300、炭素繊維含有率40%、密度1.7g/cm³である。

5.2.2 落錘式衝撃試験

第3章の3.2.2項で述べた落錘式衝撃試験の概要とFig.3.1に落錘式衝撃試験装置の概略を示す。衝撃棒先端部、衝撃点の荷重履歴 $F(t)$ は第2章と同様に式(2.1)、(2.2)より算出している。なお、衝撃棒はすべて長さ1m、先端部は棒半径の寸法で球面加工され、黄銅 ϕ 8(m_i :0.43kg)、黄銅 ϕ 10(m_i :0.68kg)、黄銅 ϕ 14(m_i :1.33kg)の3種類、試験片中央部のたわみ測定には、渦電流式非接触変位計を使用した。

実験は、UD丸棒材は試験片スパン L 65mm、145mm、205mmの3種類、衝撃棒の落下高さ H は0.115m~0.400mで設定し、2種類(ϕ 10, ϕ 14)の衝撃棒で行った。試験片の質量 m_s は L 65mmの場合 m_s 0.011kg、 L 145mmでは m_s 0.021kg、 L 205mmでは m_s 0.030kgであり、衝撃棒の質量 m_i は試験片質量 m_s の23倍以上である。なお、試験片両端支持部は試験片の跳上がりや転がりを防ぐため、治具により一定の締付け力で支持した。2D角棒材は試験片スパン L 65mm、145mmの2種類、衝撃棒の落下高さ H は0.086m~0.135mで設定し、3種類(ϕ 8, ϕ 10, ϕ 14)の衝撃棒で行った。2D積層板は試験片スパン L 80mm、幅 b 40mm、板厚 h 5mmで、衝撃棒の落下高さ H は0.15m~0.25mで設定し、2種類(ϕ 8, ϕ 10)の衝撃棒で実験した。

また、両端支持部下部の治具にロードセルを使用し、衝撃時の支持部反力の測定も行えるようになっている。実験条件では衝撃棒の位置エネルギーを E_p とし、衝撃速度 V_0 は $\sqrt{2gH}$ で算出した。

5.3 衝撃荷重履歴の多重解像度解析

本研究では衝撃荷重－たわみ線図から得られる損傷発生などにより試験片に吸収されたと考えられる吸収エネルギー E_{ab} と衝撃荷重－たわみ線図の傾きが示す試験片の剛性との関係によって、試験片の損傷および強度評価を行う。そこで、衝撃荷重履歴における高周波成分の処理と衝撃荷重の信号情報からの損傷評価を試みるためウェーブレット解析を適用した。

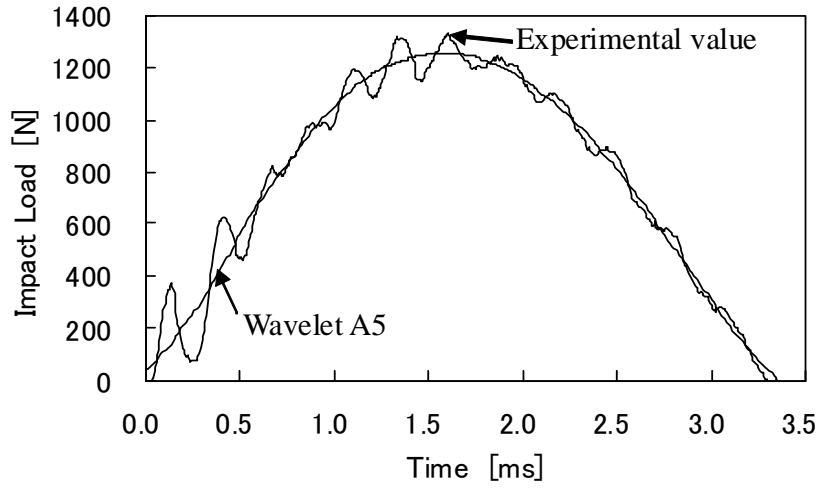
5.3.1 多重解像度解析

衝撃荷重履歴とたわみ履歴の低衝撃エネルギー時の測定結果の一部を Fig.5.1 に示す。実験条件は UD 材，衝撃棒：黄銅 $\phi 10(m_i : 0.68\text{kg})$ ， $E_p = 1.64\text{J}$ ， $L = 145\text{mm}(L/d = 14.5)$ ， $V_0 = 2.2\text{m/s}$ である。励起された高周波成分の影響が衝撃荷重履歴には見られるが，たわみ履歴には高周波成分は見られない。衝撃荷重履歴に複雑な高周波成分が表れていることから，衝撃棒と試験片の接触状態の影響と考えられる。試験片全体の变形挙動に対する衝撃荷重の履歴としては高周波成分の影響を考慮する必要が生じることを前報⁽⁵⁷⁾⁻⁽⁵⁸⁾において確認した。そこでウェーブレット解析の多重解像度解析を衝撃荷重履歴に適用し，高周波成分を分離して衝撃荷重履歴を評価する。

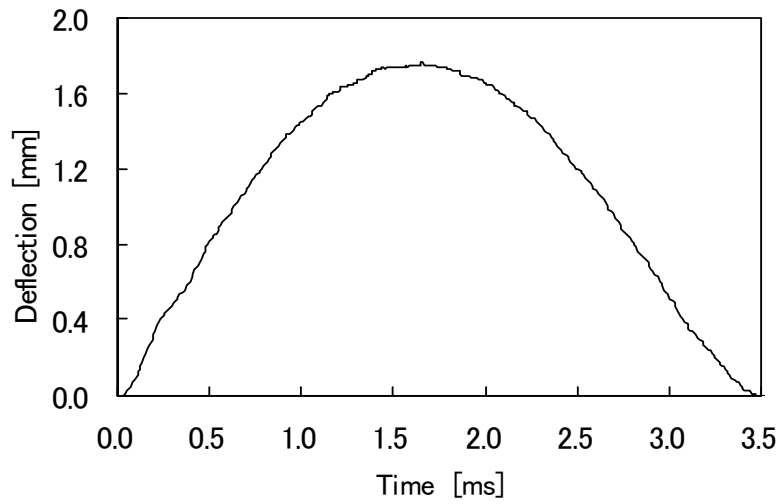
Fig.5.1(a)の衝撃荷重履歴に実験結果と併せて多重解像度解析結果を示す。ウェーブレットとして Daubechies の $N = 5$ を使用し，衝撃荷重信号を 5 段階にわたって低周波成分と高周波成分に分解した低周波成分 $A5$ を示す。なお，Daubechies のウェーブレットおよびそのスケーリング関数は形が複雑で既知の関数では表現できないため，自然数 N を用いてウェーブレットの特徴づけを行っている⁽⁶¹⁾。

5.3.2 衝撃荷重－たわみ線図と衝撃エネルギーおよび吸収エネルギーの算出

第 2 章の 2.5 項より，多重解像度解析後の衝撃荷重履歴とたわみ履歴から時間軸を消去して得られた衝撃荷重－たわみ線図より数値積分を行い，吸収エネルギー E_{ab} と負荷された衝撃エネルギー E_{ip} を算出する。Fig.2.11 に示すそれぞれの該当する面積がエネルギーとなる。



(a) The wavelet –smoothed impact load variation in time



(b) Deflection variation in time

Fig.5.1 Results of the impact test. (UD : $L=145\text{mm}$, $L/d=14.5$)

5.3.3 試験片の剛性履歴

ここで第2章2.4.2項の数値計算式を応用して、試験片の剛性履歴を衝撃荷重履歴 $F(t)$ とたわみ履歴 $w(t)$ の実験結果から算出する。

衝撃棒をある高さ H から自由落下させ、両端支持された試験片の中央部に衝撃を加えたときの運動方程式を考える。2要素模型として取り扱い、ばね要素と粘性減衰要素を並列にしたフォークト模型を仮定する。

運動方程式は、

$$m \frac{d^2 w}{dt^2} = mg - k_s w - c \frac{dw}{dt} \quad (5.1)$$

ここで、 w は試験片中央部 $L/2$ のたわみであり、 m は衝撃棒の質量 m_i に試験片質量 m_s と支持部上部の円柱の等価質量を加えた値である。 k_s は試験片梁のばね定数である。 c は試験片の粘性減衰係数であり、減衰比 ζ と固有角振動数 ω から式(5.2)で表される。

$$c = \frac{2\zeta k_s}{\omega} \quad (5.2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_s}{m}} \quad (5.3)$$

衝撃荷重履歴 $F(t)$ とたわみ履歴 $w(t)$ の実験結果から求められる損傷発生で変化する k_s の履歴は式(5.2)、(5.3)を時間履歴で表すと以下のようなになる。

$$c(t) = 2\zeta \sqrt{m} \sqrt{k_s(t)} \quad (5.4)$$

$$F(t) = k_s(t)w(t) + c(t)V(t) \quad (5.5)$$

$$k_s(t) = \left(\frac{-\zeta \sqrt{m} V(t)}{w(t)} + \sqrt{\frac{\zeta^2 m V^2(t)}{w^2(t)} + \frac{F(t)}{w(t)}} \right)^2 \quad (5.6)$$

また、運動量の変化は力積に等しいことから

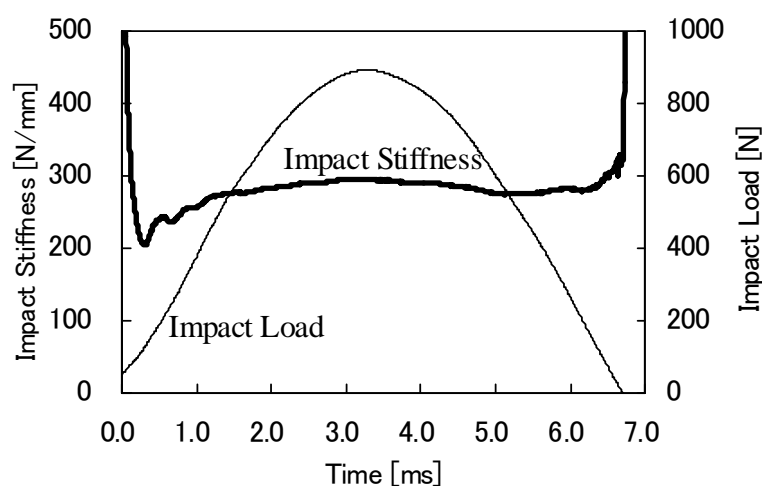
$$m\Delta V = F(t)\Delta t \quad (5.7)$$

$$\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{2\pi}{n\omega} \quad (5.8)$$

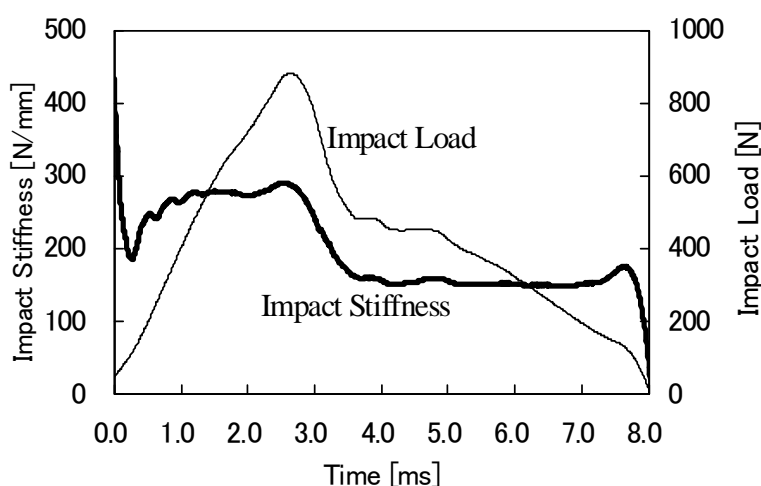
$$V(t) = V(t - \Delta t) - \frac{(F(t - \Delta t) + F(t - 2\Delta t))\Delta t}{2m} \quad (5.9)$$

n は分割数である。但し、速度 V は時間の変化を微小幅 Δt に細分して式(5.9)によって求めている。今回の実験条件下ではUD材は $\zeta=0.02$, 2D材は $\zeta=0.05$, 分割数は $n=720$ である。また、実験条件の衝撃速度 V_0 は $\sqrt{2gH}$ から算出した値で示している。但し、実際の実験では衝撃棒はガイドローラの接触などにより抵抗を受けていることから、 $V(t)$ の初期値となる衝撃速度 V_0 は $\sqrt{2gH}$ から算出した値に0.9をかけた値をそれぞれ代入している。

衝撃荷重履歴 $F(t)$ とたわみ履歴 $w(t)$ の実験結果から式(5.6), (5.9)で得られた $k_s(t)$ の履歴の一例を Fig.5.2 に示す。但し、衝撃荷重履歴は多重解析後の低周波成分に置き換えて求めた履歴とする。



(a) $E_p=1.71\text{J}$, $V_0=1.6\text{m/s}$



(b) $E_p=1.92\text{J}$, $V_0=1.7\text{m/s}$

Fig.5.2 Impact stiffness variation in time. (UD : $L=205\text{mm}$, $L/d=20.5$, $m_i=1.33\text{kg}$)

5.4 衝撃荷重－たわみ線図および吸収エネルギーと剛性比による損傷評価

5.4.1 繰返し衝撃による損傷の評価

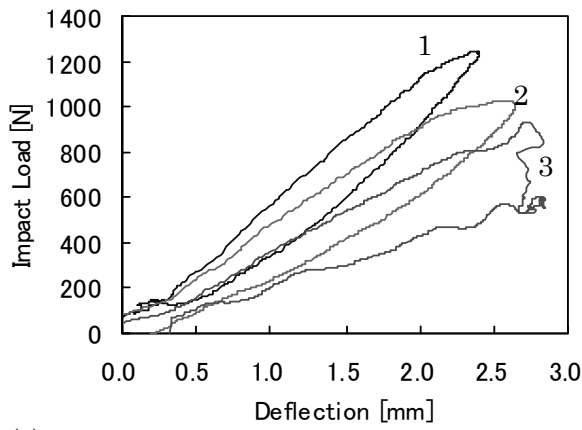
Fig.5.3 は UD 丸棒材の同一条件下で衝撃を繰返し試験片に加えた場合の $L=145\text{mm}(L/d=14.5)$ の結果の一例である。Fig.5.3(a)は衝撃点の荷重とたわみの関係を示し、ウェーブレットとして Daubechies の $N=5$ を使用し、衝撃荷重信号を 5 段階にわたって分解し、分解レベル 5 の低周波成分 A5 の解析結果を衝撃荷重として適用した。試験片表面の顕微鏡写真を Fig.5.3(b)・(c)・(d)・(e)に示す。

Fig.5.3(a)の荷重－たわみ線図より衝撃回数が増えるごとに最大荷重値は低下し、最大たわみ量は増加しており、試験片の剛性が低下していることがわかる。今回の実験条件下では、繰返し衝撃 1 回目に衝撃棒と試験片の接触部の衝撃点に圧痕が生じていることが Fig.5.3(b)でわかる。Fig.5.3(c)で衝撃 2 回目で衝撃点の圧痕の横に円周方向に微小なき裂が生じていることを確認した。衝撃 3 回目には試験片側面と衝撃点に対し約 180 度反対側のたわみ測定面にいくつかのき裂が顕著に見られたことが Fig.5.3(d),(e)で確認できた。外部損傷の程度、破断の大きさの違いによって荷重－たわみ線図の傾向が異なるが衝撃回数が増えるごとに試験片の剛性低下の過程がわかる。

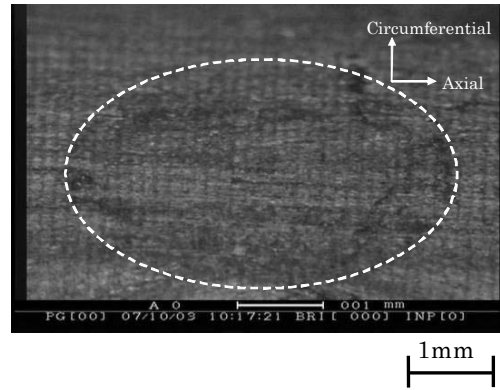
同様に 2D 角棒材の同一条件下で衝撃を繰返し試験片に加えた場合の一例($L=65\text{mm}$, $L/h=6.5$)を Fig.5.4 に示す。Fig.5.4(a)の荷重－たわみ線図より衝撃回数が増えるごとに最大荷重値は低下し、最大たわみ量は増加しており、試験片の剛性が低下していることがわかる。なお、Fig.5.4(b),(c),(d),(e)は試験片中心部のたわみ量測定部の側面の写真である。2D 材はトランスバースクラックが幾つも存在しており、衝撃前の状態が Fig.5.4(b)でわかる。Fig.5.4(c)の衝撃 1 回目ではトランスバースクラックがわずかながら大きくなり、Fig.5.4(d)の衝撃 2 回目になるとトランスバースクラックが大きくなるとともに、 0° 層と 90° 層の層間に剥離が生じているのがわかる。Fig.5.4(e)の衝撃 3 回目ではよりクラック、剥離とも大きくなっていることが確認できる。

そして、試験片中心部側面を衝撃点付近、中央部とたわみ量測定部に 3 分割してクラックや剥離の面積を衝撃前と衝撃試験ごとに顕微鏡写真をもとに計測し、クラックや剥離による損傷部の増加比を算出した。その結果と累計単位体積当たりの吸収エネルギーとの関係をグラフ化したものを Fig.5.5(a), (b), (c), (d)に示す。Fig.5.5(a)は試験片中心部全体を示し、Fig.5.5(b)は衝撃点付近、Fig.5.5(c)は中央部で Fig.5.5(d)はたわみ量測定部付近の結果である。

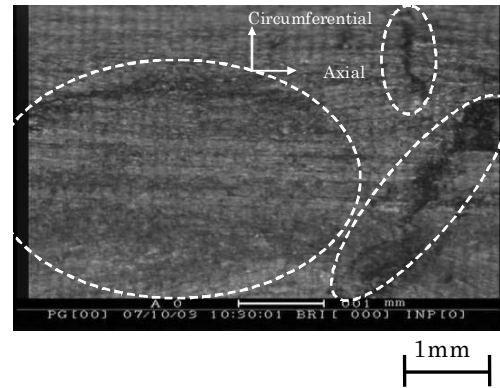
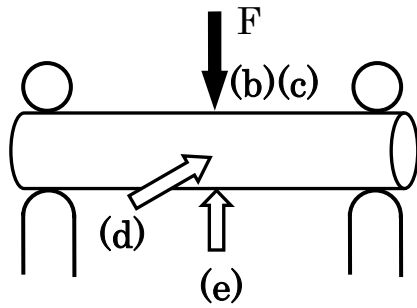
Fig.5.5(b)の衝撃点付近の側面は衝撃 2 回目までに損傷が急激に増加した後、衝撃 3 回目では損傷の増加がほとんど見られない。Fig.5.5(c)の試験片中央部の側面も衝撃点付近と同様な傾向を示しているが損傷の増加比は小さく、3 点曲げの試験片の中立軸付近では他の箇所よりも損傷の増加比が小さいことがわかる。Fig.5.5(d)のたわみ量測定部付近の側面では、衝撃を受けるごとに損傷が増加しており、それぞれ衝撃ごとの損傷部の増加傾向と損傷増加比が異なり、試験片内の衝撃ごとの損傷状態が Fig.5.5 から読み取ることができる。



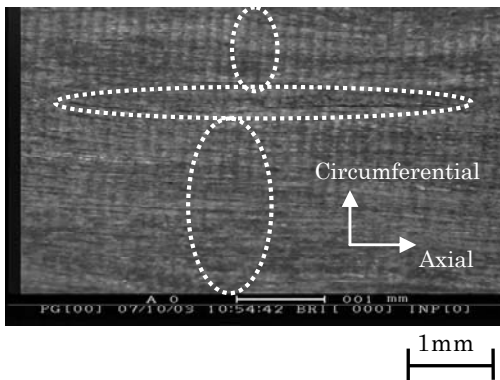
(a) Impact load – deflection relationship



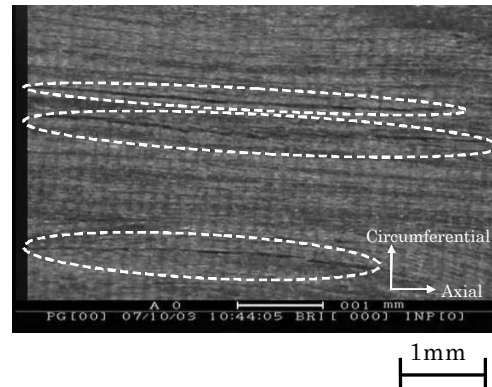
(b) Impact load point (iterative impact: 1st)



(c) Impact load point (iterative impact: 2nd)

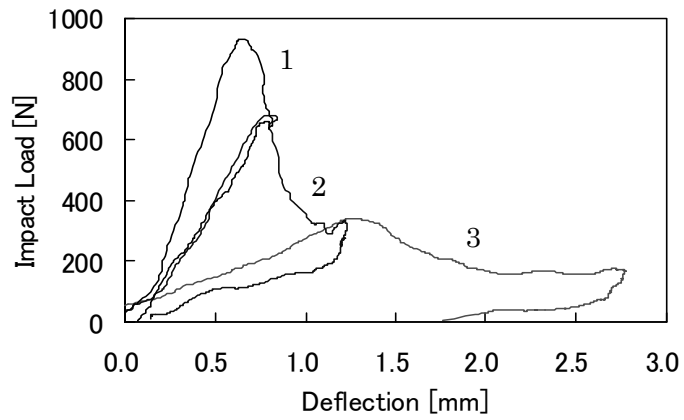


(d) Opposite side 90° away of impact load point (iterative impact: 3rd)

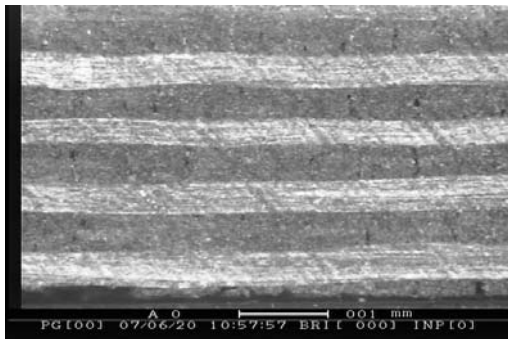


(e) Opposite side 180° away of impact load point (iterative impact: 3rd)

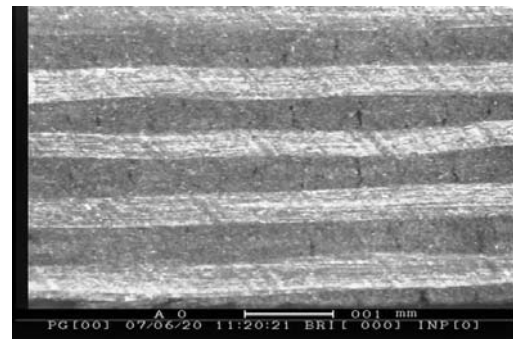
Fig.5.3 Results of the iterative impact test.
 (UD : $L=145\text{mm}$, $L/d=14.5$, $m_i=1.33\text{kg}$, $E_p=1.9\text{ J}$, $V_0=1.7\text{m/s}$)



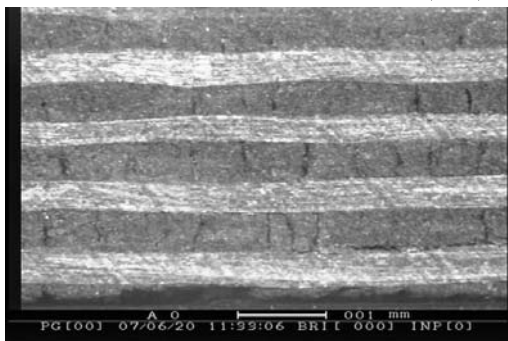
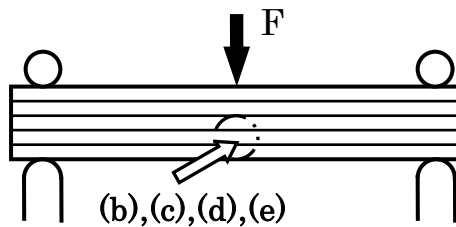
(a) Impact load–deflection relationship



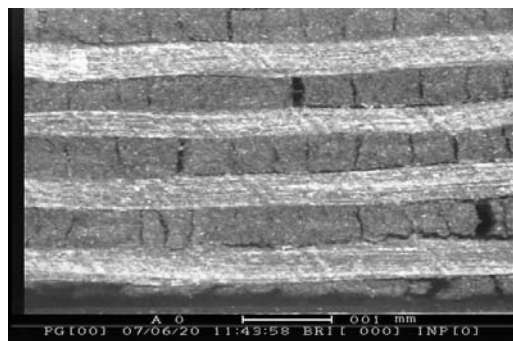
(b) Before impact



(c) Iterative impact: 1st



(d) Iterative impact: 2nd



(e) Iterative impact: 3rd

Fig.5.4 Results of the iterative impact test.

(2D : $\theta_I=0^\circ$, $L=65\text{mm}$, $L/h=6.5$, $m_i=0.43\text{kg}$, $E_p=0.6\text{J}$, $V_0=1.7\text{m/s}$)

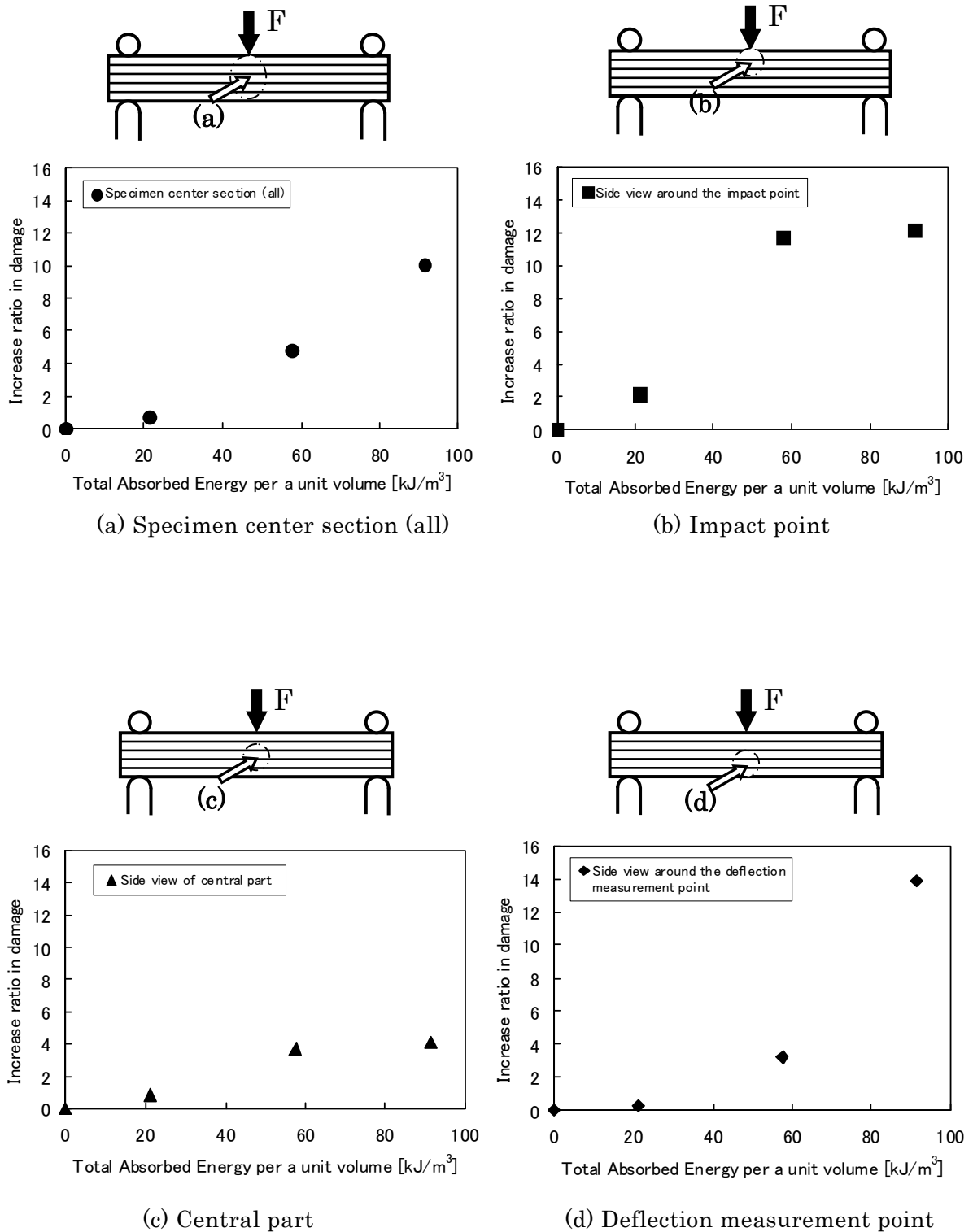


Fig.5.5 Total absorbed energy per a unit volume versus increase ratio in damage.
 (2D : $\theta_I = 0^\circ$, $L = 65\text{mm}$, $L/h = 6.5$, $m_i = 0.43\text{kg}$, $E_p = 0.6\text{J}$, $V_0 = 1.7\text{m/s}$)

5.4.2 吸収エネルギーと剛性低下

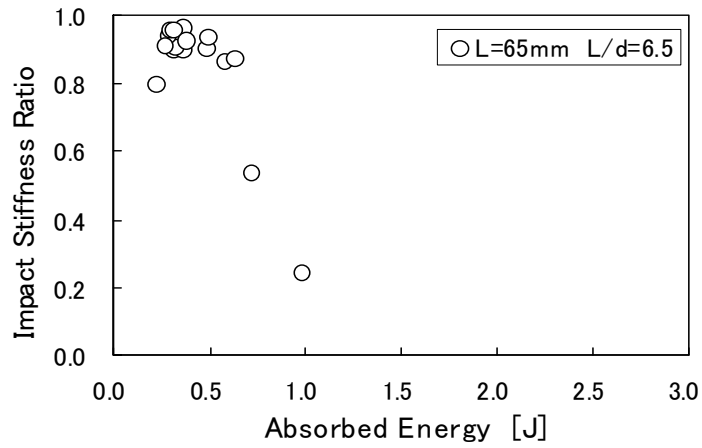
5.4.2.1 UD 丸棒試験片

衝撃荷重履歴 $F(t)$ とたわみ履歴 $w(t)$ の実験結果から得られた k_s の履歴の一例が Fig.5.2 に示されている。 k_s は試験片の衝撃時の剛性に相当し⁽⁶⁹⁾、履歴より衝撃による剛性の変化、低下の割合は衝撃荷重最大値を境としてその前後の k_s の値の比で表すこととする。剛性比は衝撃後も k_s の値が変わらなければ 1 となり、損傷によって k_s の値が低下すれば 0 に近づく。

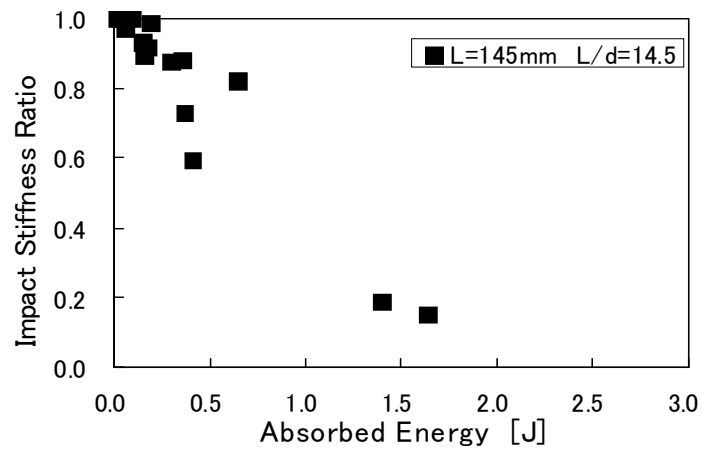
Fig.5.2(a) は低衝撃エネルギー時の場合であり、剛性はほぼ一定の値を示し、衝撃前後の剛性比は約 1 となる。 Fig.5.2(b) の衝撃条件では衝撃前後の剛性比は約 0.55 となり、損傷による剛性低下の割合が高いことがわかる。また、繰返し衝撃を受ける場合などは衝撃ごとに得られる荷重-たわみ線図の傾きより剛性の変化を求めることもできる。衝撃時における試験片の剛性履歴や荷重-たわみ線図の傾きの変化により衝撃前後の剛性比を計算し、吸収エネルギーとの関係を Fig.5.6, Fig.5.7 に示す。

Fig.5.6(a) は $L = 65\text{mm}(L/d = 6.5)$ 、 Fig.5.6(b) は $L = 145\text{mm}(L/d = 14.5)$ 、 Fig.5.6(c) は $L = 205\text{mm}(L/d = 20.5)$ の結果であり、剛性比は吸収エネルギーが増加すると線形的に低下しているのがわかる。但し、 $L = 65\text{mm}(L/d = 6.5)$ のみ剛性比 1 で吸収エネルギーが 0 となるデータが存在しないが、衝撃棒と試験片の接触部にき裂が生じる影響が大きく、その分の吸収エネルギーによるものである。また、それぞれのグラフの傾きが異なるが、試験片の長さが大きくなると吸収エネルギーが増えることを表している。

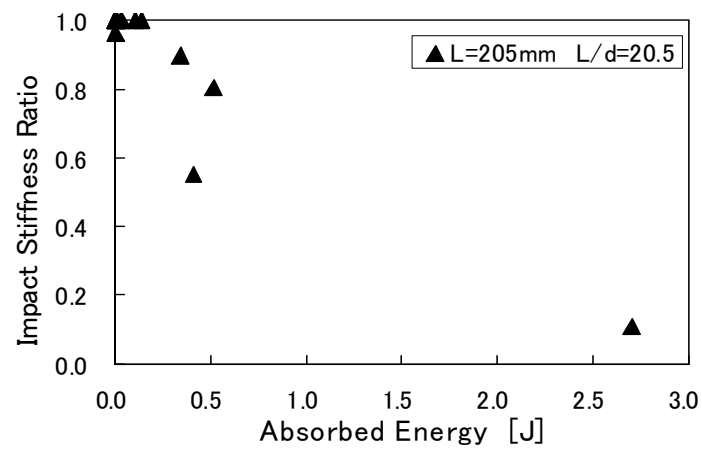
Fig.5.7 は吸収エネルギーを試験片の体積で割った、単位体積あたりの吸収エネルギーで剛性比との関係を示した図である。 Fig.5.7(b) は $L = 65\text{mm}(L/d = 6.5)$ における衝撃棒と試験片の接触部にき裂が生じた影響が大きく、その分の吸収エネルギーを Fig.5.6(a) から約 0.2J として換算し、全体の吸収エネルギーから引いて求めた結果であり、 Fig.5.7(a) は吸収エネルギーにおいて接触部の影響を考慮しない場合である。 Fig.5.7(b) は多少のばらつきがあるが試験片の長さに関係なくグラフの傾きがほぼ一致しており、今回使用した UD 試験片の特性を表すことができている。



(a) $L = 65\text{mm}$, $L/d = 6.5$

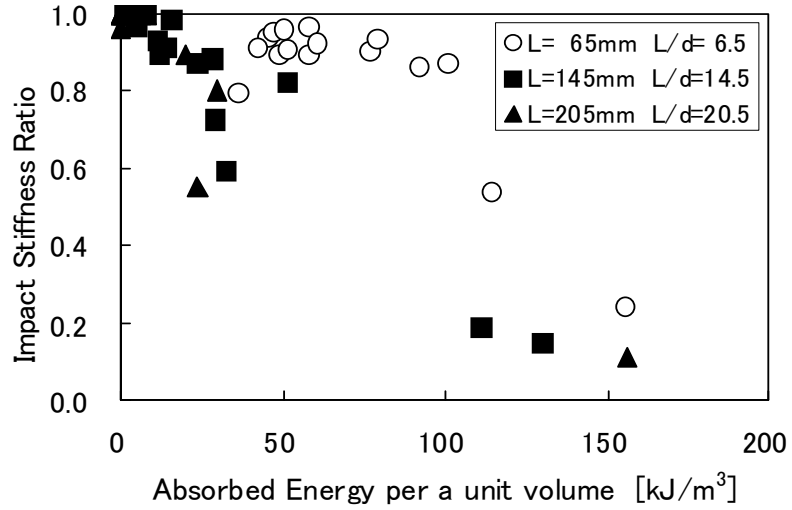


(b) $L = 145\text{mm}$, $L/d = 14.5$

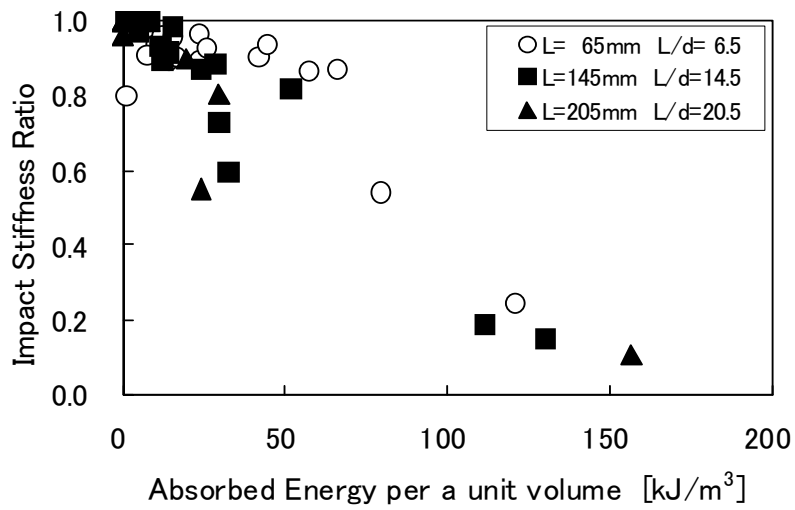


(c) $L = 205\text{mm}$, $L/d = 20.5$

Fig.5.6 Absorbed energy versus impact stiffness ratio. (UD)



(a) Nothing in consideration of impact point damage



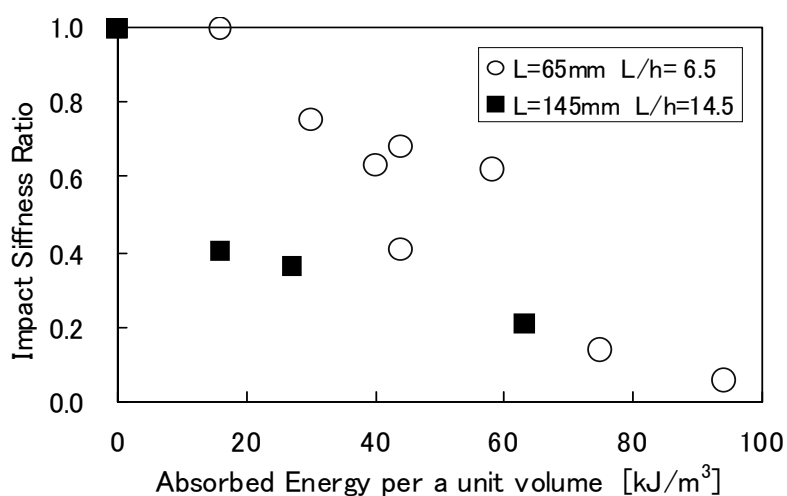
(b) In consideration of impact point damage

Fig.5.7 Absorbed energy per a unit volume versus impact stiffness ratio. (UD)

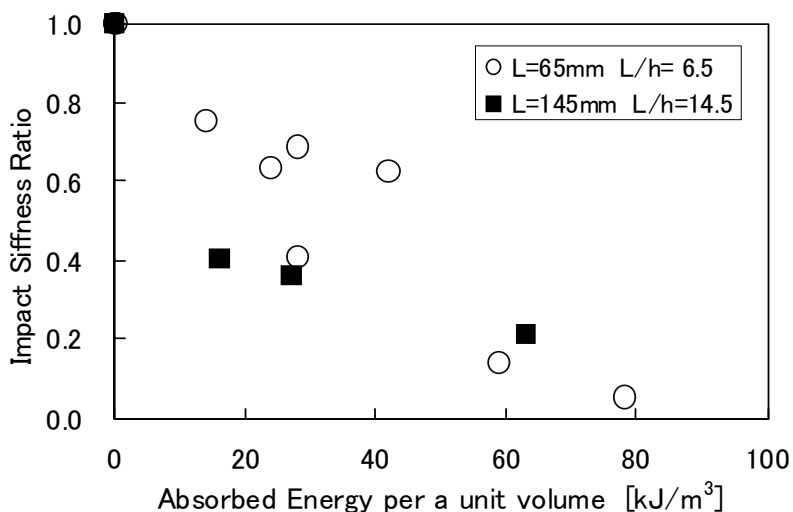
5.4.2.2 2D 角棒試験片

Fig.5.8 は UD 試験片と同様に 2D 角棒試験片における吸収エネルギーを試験片の体積で割った単位体積あたりの吸収エネルギーで剛性比との関係を示した図である。

Fig.5.8(b)は $L=65\text{mm}$ ($L/h=6.5$)における衝撃棒と 2D 角棒試験片の接触部にき裂が生じた影響が大きく、その分の吸収エネルギーを Fig.5.8(a)の剛性比 1.0 での値から約 0.16J として換算し、全体の吸収エネルギーから引いて求めた結果であり、Fig.5.8(a)は吸収エネルギーにおいて接触部の影響を考慮しない場合である。Fig.5.8(b)は多少のばらつきがあるが試験片の長さに関係なくグラフの傾きがほぼ一致しており、今回使用した 2D 試験片の特性を表している。



(a) Nothing in consideration of impact point damage



(b) In consideration of impact point damage

Fig.5.8 Absorbed energy per a unit volume versus impact stiffness ratio. (2D)

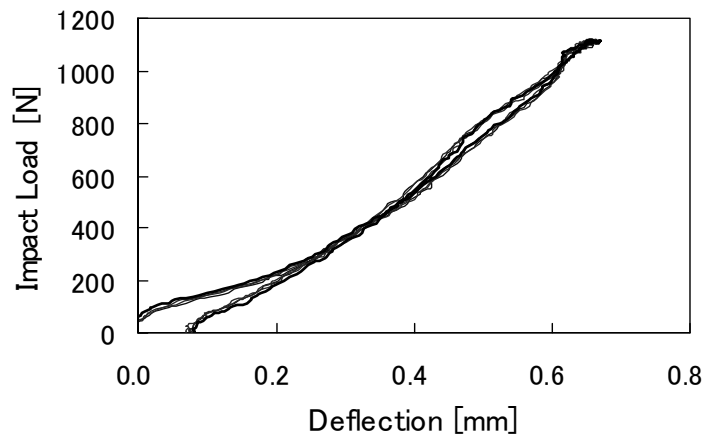
5.4.2.3 2D 積層板試験片

前報⁽⁵⁹⁾⁻⁽⁶⁰⁾を含めて丸棒材や角棒材などのはり形状の試験片の実験結果について今まで報告してきた。新たに板形状の試験片についても実験を行ったので、その結果について考察する。

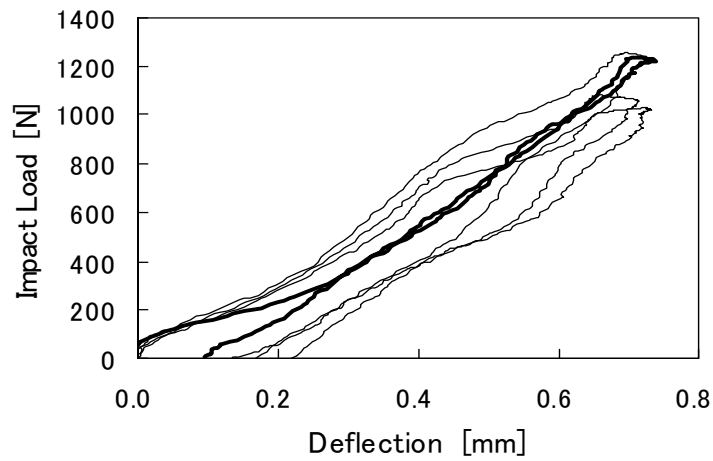
Fig.5.9 は各衝撃条件下で繰返し衝撃実験を行った結果を荷重-たわみ線図で示している。繰返し衝撃数は4回である。各荷重-たわみ線図において太線で表しているのが1回目の衝撃実験の結果であり、Fig.5.9(a)から Fig.5.9(c)にかけて衝撃エネルギーを増加させており、衝撃エネルギーによる荷重-たわみ線図の変化の様子が現れている。Fig.5.9(a)では繰返し衝撃数が4回でも荷重-たわみ線図は変化がないことがわかる。Fig.5.9(b)から Fig.5.9(c)にかけては繰返し衝撃回数が増えるごとに荷重-たわみ線図が変化しており、その変化の割合は衝撃エネルギーが増えるごとに大きくなっている。

Fig.5.10 は単位体積当たりの吸収エネルギーあるいは単位体積当たりの累計吸収エネルギーと剛性比の関係を示している。Fig.5.10(a)は繰返し衝撃において衝撃1回ごとの衝撃前後の剛性比と単位体積当たりの吸収エネルギーとの関係を示す。Fig.5.10(b)は同一条件下での繰返し衝撃における吸収エネルギーの累計と試験片の初期剛性値と繰返し衝撃ごとに変化する剛性値の比較で求めた剛性比との関係を示している。試験片の初期剛性値とは、繰返し衝撃1回目の荷重-たわみ線図の荷重増加時の傾きに相当する。Fig.5.10(a)と Fig.5.10(b)の結果を比較すると剛性比と吸収エネルギーの関係はほぼ同一傾向を示していることがわかる。

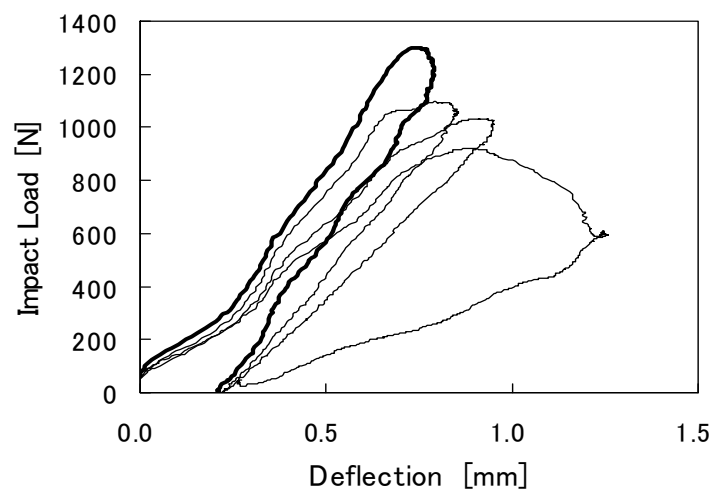
また、Fig.5.8 の2D 角棒試験片の結果と比較しても試験片形状による違いは見られず、ほぼ同じ傾き値で単位体積当たりの吸収エネルギーと剛性比の関係が示されていることがわかり、今回使用した2D材の特徴が一致して得られている。



(a) (2D : $m_i = 0.43$ kg, $E_p = 0.64$ J, $V_0 = 1.7$ m/s)

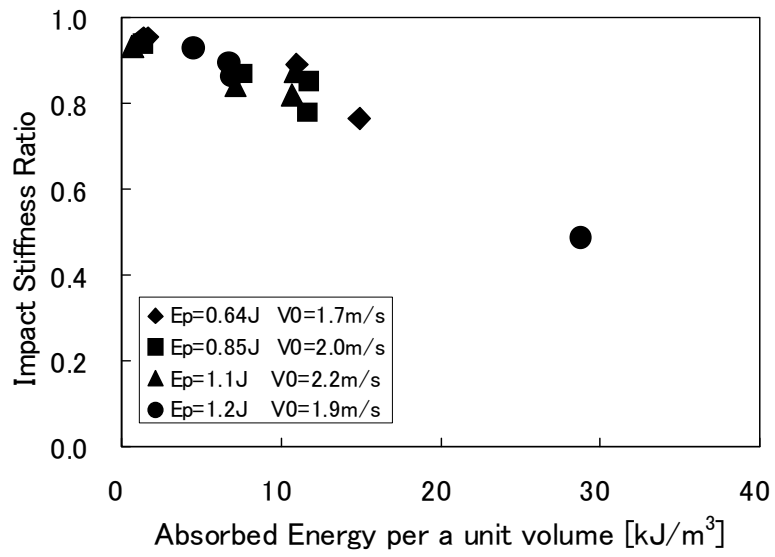


(b) (2D : $m_i = 0.43$ kg, $E_p = 0.85$ J, $V_0 = 2.0$ m/s)

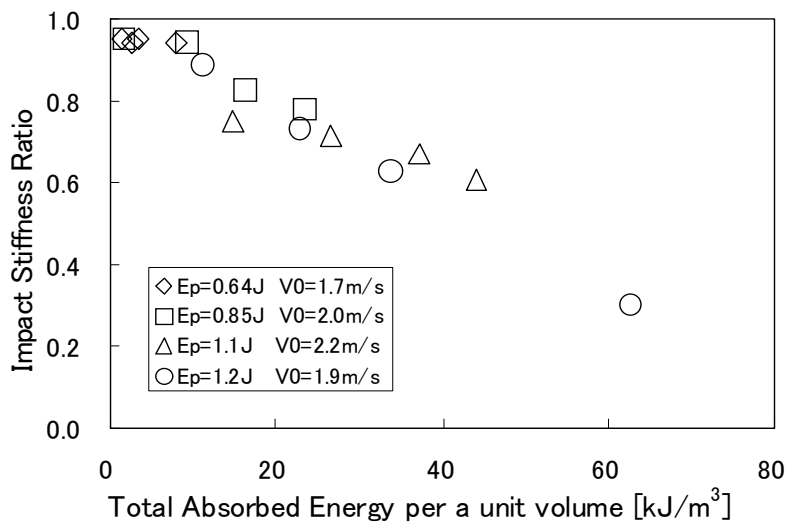


(c) (2D : $m_i = 0.68$ kg, $E_p = 1.2$ J, $V_0 = 1.9$ m/s)

Fig.5.9 Results of the iterative impact test. (2D : Impact load-deflection relationship)



(a) Absorbed energy per a unit volume



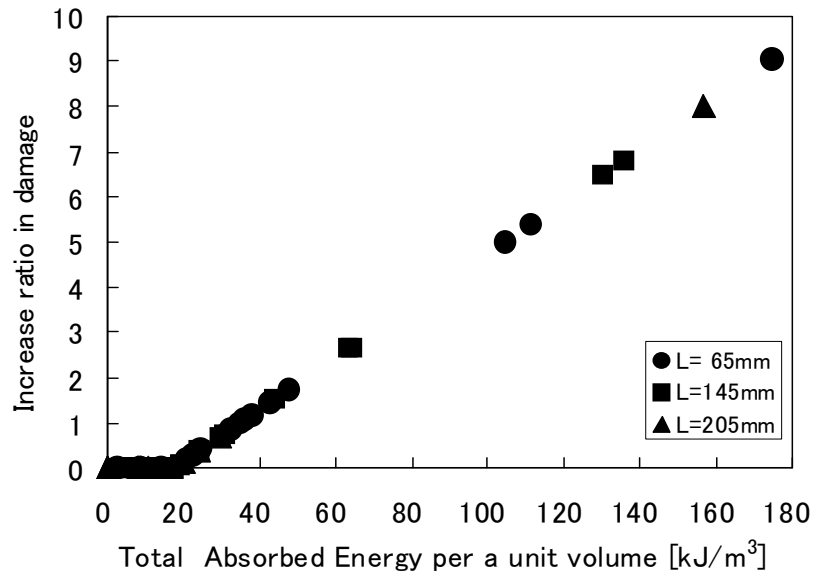
(b) Total absorbed energy per a unit volume

Fig.5.10 Absorbed energy per a unit volume versus impact stiffness ratio. (2D)

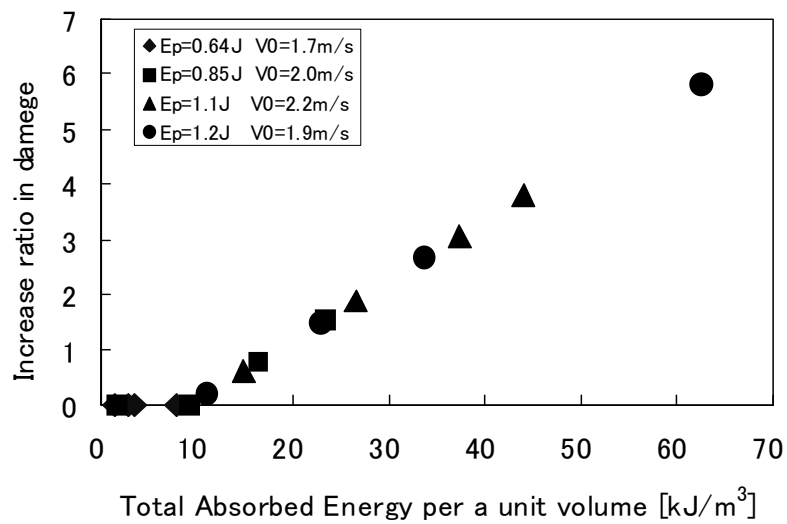
5.4.3 吸収エネルギーと損傷増加比

Fig.5.11 は単位体積当たりの累計吸収エネルギーと損傷増加比の関係を示している。Fig.5.11(a)は UD 丸棒材，Fig.5.11(b)は 2D 積層板の結果である。吸収エネルギーは試験片のエネルギー解放率と増加した損傷面積の積であることから，ある基準となる吸収エネルギーとの比によって損傷増加比として算出することができる。今回は剛性低下が小さい剛性比約 0.95 での吸収エネルギーを基準として，各衝撃試験ごとの吸収エネルギーから損傷増加比を算出してグラフ化している。

Fig.5.11 より UD 材，2D 材共に単位体積当たりの累計吸収エネルギーと損傷増加比は基準とした吸収エネルギーよりも大きい場合はほぼ線形の関係となっていることがわかる。また，グラフの傾き値によって UD 材，2D 材の衝撃特性の違いも明らかとなっている。なお，Fig.5.11(b)の 2D 材の結果は，試験片の観察から求めた Fig.5.5(a)と比較して，同一傾向を示していることが確認できる。



(a) UD



(b) 2D

Fig.5.11 Total absorbed energy per a unit volume versus increase ratio in damage.

5.5 結言

本研究では、低速域に重点を置いた落錘式衝撃試験による 3 点曲げ試験方法によって、PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃損傷評価を行った。その評価においてウェーブレット解析を適用し、衝撃荷重-たわみ線図による損傷の評価、試験片の吸収エネルギーと剛性低下の関係などについて検討を行った。

その結果、衝撃荷重-たわみ線図や吸収エネルギーと試験片の剛性低下の関係によって、C/C 複合材料における低衝撃エネルギーの実験条件から破壊に至るまでの試験片の挙動と損傷の評価を行い、PY 法で製造された各種の C/C 複合材料の衝撃特性を明らかにし、C/C 複合材料の衝撃損傷評価法を確立することができた。

第 6 章

結 論

本論文は、高耐熱性に加え、軽量で高強度を有し、耐食性、生体適合性、電気伝導性ならびに熱伝導性などにも優れた特長を持つ反面、衝撃負荷に対して脆弱であり、耐衝撃性ならびに衝撃に伴う損傷機構の詳細については十分に明らかにされているとは言えない C/C 複合材料を研究対象としている。その PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃特性について、落錘式衝撃試験によりわずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の衝撃における特性、損傷評価に重点を置いて各種実験条件下での衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程を実験および数値解析的に詳細な検討を行ったものである。

その結果、まず衝撃荷重を正確に評価するために、落錘式衝撃試験で計測した衝撃荷重信号の処理において、ウェーブレット解析による離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により信号分解し、衝撃時に励起される曲げ振動の影響について主に検討を行った。そして、試験片の曲げ振動の影響を除去することが可能となることを確認し、C/C 複合材料の衝撃損傷評価でウェーブレット解析が有効であることを実証している。

次に落錘式衝撃試験により、UD-C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程を衝撃荷重履歴の多重解像度解析によって求められる荷重-たわみ線図および吸収エネルギーによる評価などの方法によって解明し、同様に 2D-C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程についても明らかにしている。

さらに、繰返し衝撃を受ける C/C 複合材料の衝撃損傷評価において、衝撃荷重履歴およびたわみ履歴から得られる試験片の剛性より、衝撃による試験片の剛性の低下と吸収エネルギーの関係について検討した。試験片の剛性低下率と吸収エネルギーの関係による評価法によって、各種の C/C 複合材料の衝撃特性を確認できたことを示している。

以上のようにして得られた C/C 複合材料の衝撃損傷評価における新たな知見は、これまで明確にされていなかったことであり、今回検証した衝撃損傷評価法は、C/C 複合材料のみならず複合材料の動的特性評価に関しても寄与することと考える。本研究の成果は、各章ごとに結言として示しているが、本章では本論文全体の結論として以下に述べる。

第 1 章は本研究を遂行するに至った背景、経緯および研究の目的、意義や特徴を従来の研究の問題点や解明されていない内容を踏まえて本論文の概要と共に述べ、本研究の特色について言及している。

第 2 章は、落錘式衝撃試験における計測した衝撃荷重信号の処理において、離散ウェーブレット変換を適用し、多重解像度解析により信号の分解、衝撃時に励起される曲げ振動の影響および除去について検討を行っている。その結果、衝撃荷重のウェーブレット解析が衝撃荷重評価に有効であることを確認し、第 3 章から第 5 章までの C/C 複合材料の衝撃損傷評価の基盤となる衝撃荷重の評価について述べている。そして、ウェーブレット解析による衝撃荷重信号の多重解像度解析により、衝撃によって励起される試験片の曲げ振動や衝撃棒と試験片の接触部での局所変形による衝撃荷重とたわみの評価への影響を取り除くことが波形情報を損なうことなくできることを確認した成果が得られている。

第 3 章は、各種実験条件下での UD-C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程を荷重-たわみ線図および吸収エネルギーによる評価などの方法によって検討し、今まであまり明らかにされていなかったわずかな損傷しか起こらない低エネルギーの衝撃を含めた低速域の UD-C/C 複合材料の衝撃損傷評価の成果が得られた。主な内容として、

- (1)繰返し衝撃による損傷の評価
- (2)衝撃破壊
- (3)吸収エネルギーによる損傷評価

について UD-C/C 複合材料の丸棒材における低衝撃エネルギーから破壊に至るまでの試験片の挙動と損傷を評価し、衝撃損傷評価法が有効であることを検証できた。

第 4 章は、第 3 章に引き続き各種実験条件下での 2D-C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃による損傷の評価、破壊の過程を荷重-たわみ線図および吸収エネルギーによる評価などの方法によって検討し、衝撃荷重の信号からの損傷評価、損傷の発生状況などを考察し、2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価における成果を明らかにしている。特にウェーブレット解析による衝撃荷重信号の多重解像度解析を適用し、衝撃荷重-たわみ線図および吸収エネルギーによって、

- (1)低衝撃エネルギー時の衝撃特性
- (2)繰返し衝撃を受ける場合の衝撃角度の影響
- (3)衝撃破壊におけるの衝撃角度の影響
- (4)吸収エネルギーによる損傷評価

について 2D-C/C 複合材料の丸棒材における損傷発生時の試験片の挙動、損傷を評価し、衝撃損傷評価法が有効であることを検証できた。

第 5 章は第 3 章と第 4 章で得られた結果の上に、主に繰返し衝撃を受ける C/C 複合材料の衝撃損傷評価において、衝撃荷重履歴およびたわみ履歴から得られる試験片の剛性より、衝撃による試験片の剛性の低下と吸収エネルギーの関係について検討した。その結果、衝撃荷重-たわみ線図や吸収エネルギーと試験片の剛性低下の関係によって、C/C 複合材料における低衝撃エネルギーの実験条件から破壊に至るまでの試験片の挙動と損傷の評価を行うことが可能であり、各種の PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃特性を明確にし、衝撃損傷評価法を確立することができた。

以上のように、本論文で述べた研究成果がこれまであまり明らかにされてこなかった低速域での PY 法で製造された C/C 複合材料の衝撃特性、衝撃損傷の評価とその評価法が、新たな C/C 複合材料の開発と共に他の材料特性の評価法としても寄与することと考える。

その一例として、C/C 複合材料の衝撃特性や衝撃損傷を評価することにおいて、C/C 複合材料の層間強度、層間破壊挙動を動的な負荷条件で評価することは大切であり、破壊靱性値は重要なパラメータとなる。そこで、C/C 複合材料の動的破壊靱性評価において、実験による衝撃荷重履歴とたわみ履歴から境界条件の同定法を提案すると共に、得られた境

界条件などを適用して動的破壊靱性評価を行い、境界条件同定法の確認と理論、数値計算によって得られる動的破壊靱性の比較検討がされている。

その主な内容としては、

- (1) き裂進展開始時の限界荷重値の決定に際し、ウェーブレット解析による衝撃荷重信号の多重解像度解析が有効である。
- (2) 提案した境界条件同定法によって、弾性支持条件などを同定することで試験片支持部の変形や衝撃荷重評価における減衰力の影響を考慮し、より正確な動的破壊靱性値の算出が可能である。
- (3) C/C 複合材料における動的破壊靱性評価法の理論や数値計算による比較。

などが挙げられる⁽⁶²⁾。

なお、今回の実験方法では、試験片のたわみ量を非接触型渦電流式変位計で計測している。FRPのような樹脂系の複合材料には適さないため、FRPの試験片のたわみ量測定面に金属を薄く蒸着させる方法などによって、非接触型渦電流式変位計で計測可能な状態にする必要が生じる。もしくは非接触型渦電流式変位計ではなくレーザー変位計などに置き換えて実験を行う必要がある。このようにたわみ量を直接計測する方法を材料によって選択すれば、今回の衝撃損傷評価法は一般的にどの材料にも適用することが可能であり、材料の形状による影響なども考慮して評価することが可能である。そして、衝撃損傷評価法で得られた試験片の特性は、シャルピー衝撃試験のように試験片寸法、形状やその他の試験条件が測定結果に影響を与えたり、測定量は物理的に意味のある材料固有の材料定数を与えず、ある測定条件下での相対的な比較しかできないこととは異なり、材料固有の特性として評価することができる。

また、C/C 複合材料もそれぞれの用途に応じた高機能性を活かした新たな開発が続けられている。C/CMC 材は C/C 材と各種金属を複合させた材料であり、AL との複合により軽量かつ高強度、高靱性の C/C-AL や Cu との複合により導電性を付与した高強度なカーボン摩擦材の C/C-Cu などが開発されている⁽³⁾。このような新たな C/C 複合材料と共に、他の材料の特性評価法としても本研究の成果が活かされることと確信する。

なお、本研究では衝撃荷重履歴やたわみ履歴に基づいて C/C 複合材料の衝撃損傷評価を行ってきた。しかし、それぞれの履歴が不明な状況下において衝撃を受けた際に生じる損傷の大きさや位置を明確にするための損傷検知、損傷同定法の研究も重要であり、今後の研究で取り組むことを最後に明示することとする。

謝 辞

本論文は、筆者が神奈川工科大学工学部機械工学科の高橋一郎研究室において完成させることができました。高橋一郎教授には筆者の希望する研究分野として、研究に関して数多くのご支援を賜り、そして終始激励のお言葉を頂戴したことに対して、感謝の言葉もありません。ここに、衷心より厚く御礼申し上げます。

このたび、首都大学東京において筆者の学位審査を行って戴きましたことに、心から厚く御礼申し上げます。

本論文の学位審査につきまして御多忙中にも拘らず貴重な時間の中、多くの有益な御指導、御助言を戴きました。首都大学東京大学院システムデザイン研究科システムデザイン専攻 青村茂教授をはじめとして、システムデザイン研究科システムデザイン専攻 諸貫信行教授、理工学研究科機械工学専攻 若山修一教授、システムデザイン研究科システムデザイン専攻 北菌幸一准教授には、心から厚く御礼申し上げます。

このように学位取得を目指す動機となったのは、30年程前の中央大学理工学部精密機械工学科および大学院理工学研究科精密工学専攻において、学生時代を過ごした3年間に亘る研究室での体験によるものであります。研究室の恩師であった古川浩先生、笠松勇先生から研究者として、大学人として非常に多くのことを学ばせて戴いたことを厚く御礼申し上げます。

筆者が研究を遂行できましたのは、当時の高橋一郎研究室における学生諸氏のご協力によるものであり、特に本研究に携わり大学院生であった茅ノ間喜宣氏、岡安佑樹氏、菊池浩章氏、学部生であった磯部永舟氏、加藤忠克氏、高木雅樹氏、小山健氏、平出貴司氏、片寄誠氏、吉間大喜氏、草間学氏、國信哲也氏、木内勝氏、稲葉洋希氏、森下直弥氏、柳澤祐輔氏、岩田桂氏、岩正幸三氏、福島健吾氏、齋藤裕一氏、鈴木史仁氏、本林淳氏には、深く感謝申し上げます。

最後に常に励まし、暖かく見守ってくれた家族に心から感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 安田榮一, 田辺靖博: C/C 複合材料開発に関する最近の課題, 日本複合材料学会誌, Vol.16, No.6(1990), 219-226.
- (2) 八田博志, 向後保雄, 浅野正, 澤田豊: C/C 複合材料のピン継手強度, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.63, No. 611(1997), 1586-1593.
- (3) <http://www.across-cc.co.jp/jp/index.html>
- (4) 向後保雄, 八田博志, 大蔵明光, 大林陽子, 澤田豊, 藤倉正国: C/C 複合材料の超高温下における強度靱性, 東京工芸大学紀要, Vol.17, No.1 (1994), 50-58.
- (5) The Columbia Accident Investigation Board released Volume I of its final report on Aug. 26, 2003.
- (6) 小島隆: 平織り繊維強化 C/C コンポジットに生じる衝撃損傷の特徴と電位差法による探傷, 非破壊検査, 第 50 巻, 3 号(2001), 170-178.
- (7) 座古勝, 高野直樹, 倉敷哲生, 椎野努: CFRP 積層板の低エネルギー衝撃損傷評価に関する研究, 第 31 回 FRP シンポジウム講演論文集(2002), 259-260
- (8) 宇治橋貞幸, 田中克典, 松本浩之, 足立忠晴: 落錘試験による繊維強化プラスチックの衝撃強度評価法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.63, No.616 (1997), 2560-2567.
- (9) 武田展雄: 複合材料の衝撃応答と破壊(III), 日本複合材料学会誌, Vol.12, No.1 (1986), 23-37.
- (10) 鈴木恵, 吉田治夫: FRP の衝撃破壊に関する研究(強化プラスチック部門委員会研究報告), 材料, Vol.28, No.315(1979), 1235-1245.
- (11) 鈴木恵, 永守正道: FRP の衝撃破壊に関する研究(続報)(強化プラスチック部門委員会研究報告), 材料, Vol.30, No.339(1981), 1203-1210.
- (12) 村井正光, 吉永泰, 野家和雄, 政田悟: 一方向強化 FRP のシャルピー試験, 材料, Vol.43, No.487 (1994), 482-488.
- (13) 武田展雄: 複合材料入門 第 6 章複合材料の衝撃特性, 日本複合材料学会誌, Vol.22, No.6 (1996), 233-241.
- (14) 武田展雄, 万利群, 平松幹雄, 袁建明: 改良 SHPB 法による GFRP の衝撃圧縮破損進展挙動のひずみ速度・温度依存評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.63, No.616 (1997), 2598-2603.
- (15) 網島貞男, 藤井透, 網野博一: FRP 板の静的・衝撃せん断試験, 材料, Vol.28, No.315 (1979), 1198-1203.
- (16) 日下貴之: ホプキンソン棒法を用いた積層複合材料の衝撃破壊じん性評価, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集, 01-1, I (2001), 373-374.
- (17) 足立忠晴, 荒井政大, 阪部直樹, 松本浩之: 一方向 CFRP 積層板の動的破壊靱性値の評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.63, No.616(1997), 2568-2574.

- (18) 日下貴之, 黒川知明, 北條正樹, 落合庄治郎: ランプ入力による衝撃 ENF 試験法の適用限度の検討—エネルギー解放率の評価に与える試験片寸法および負荷速度の影響—, 材料, Vol.46, No.3 (1997), 302-308.
- (19) 日下貴之, 黒川知明, 山内良昭: CFRP のモード II 層間破壊じん性のひずみ速度依存性, 材料, Vol.43, No.487 (1994), 445-450.
- (20) 日下貴之, 北條正樹, 黒川知明, 落合庄治郎: 層間高じん化 CFRP 材のモード II 層間破壊じん性の負荷速度依存性, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.64, No.621 (1998), 1152-1159.
- (21) 梶田雅義, 日下貴之, 堀川教世: 炭素繊維/エポキシ複合材料の混合モード層間破壊特性に及ぼすひずみ速度およびモード比の影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.67, No.663 (2001), 1833-1839.
- (22) 松本浩之, 岡崎光宏, 足立忠晴, 宇治橋貞幸: 衝撃後の CFRP 積層板の残留疲労強度評価(四点曲げ試験の場合), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.57, No.535 (1991), 576-582.
- (23) 松本浩之, 荒井政大, 足立忠晴, 宇治橋貞幸: CFRP 積層板の貫通強度評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.57, No.535 (1991), 583-590.
- (24) 河津幸雄, 野口健一: CFRP 積層板の貫通衝撃挙動, 材料, Vol.41, No.464 (1992), 721-727.
- (25) 盛田英夫, 浜本章, 足立忠晴, 松本浩之: 低速/高速衝撃試験による CF/PEEK の耐衝撃損傷性の評価, 材料, Vol.44, No.499 (1995), 423-427.
- (26) 田邊靖博, 石本卓士, 赤津隆, 安田榮一: 炭素繊維織物を用いた CFRP の衝撃損傷, 日本複合材料学会誌, Vol.25, No.4(1999), 149-155.
- (27) 足立忠晴, 坂上啓, 宇治橋貞幸, 松本浩之: 繰返し衝撃を受ける CFRP 積層板の損傷評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.57, No.535 (1991), 569-575.
- (28) 足立忠晴, 坂上啓, 宇治橋貞幸, 松本浩之: コンプライアンス応答による CFRP 積層板の衝撃損傷評価法, 非破壊検査, Vol.40, No.3 (1991), 165-170.
- (29) J.D,Winkel, D.F.Adams : Instrumented drop weight impact testing of cross-ply and fabric composites, *Composites*, Vol.16, No.4(1985), 268-278.
- (30) B.Z.Jang, L.C.Chen, C.Z.Wang, H.T.Lin, R.H.Zee : Impact resistance and energy absorption mechanisms in hybrid composites, *Composites Science and technology*, Vol.34, No.4(1985), 305-335.
- (31) 大上俊光, 金原勲, 影山和郎, 鈴木利夫, 大沢勇: アラミド/ガラスハイブリッド積層板の衝撃破壊解析, 材料, Vol.41, No.462 (1992), 382-388.
- (32) 永井功, 田中利光, 松川真美: 平織ガラス/エポキシ積層板の落錘衝撃損傷, 材料, Vol.42, No.478 (1993), 811-816.
- (33) 永井功, 田中利光, 松川真美, 小牧和夫, 北條正樹: 平織カーボン/エポキシ積層板の落錘衝撃損傷, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.60, No.571 (1994), 846-852.
- (34) 盛田英夫, 松本浩之: 落すい試験による CFRP 積層板の耐衝撃損傷性評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.61, No.581 (1995), 127-132.

- (35) 荻原慎二, 小林昭, 田中知樹: CFRP 積層板の落錘衝撃による微視的損傷と残留圧縮強度, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.63, No.611 (1997), 1505-1510.
- (36) 永井功, 田中利光, 松川真美, 小牧和夫, 北條正樹: 疑似等方性カーボン/エポキシ積層板の落錘衝撃損傷進展, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.61, No.590 (1995), 2176-2184.
- (37) 永井功, 田中利光, 松川真美, 小牧和夫, 北條正樹: CFRP 積層板の落錘衝撃損傷と衝撃吸収エネルギーの関係に及ぼす積層構成の影響, 材料, Vol.45, No.7 (1996), 792-798.
- (38) D.Delfosse, A.Poursartrip: Energy-based approach to impact damage in CFRP laminates, *Composites Part A*, Vol.28A, No.7 (1997), 647-655.
- (39) G. Belingardi, R.Vadori: Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *International Journal of Impact Engineering*, Vol.27, No.2(2002), 213-229.
- (40) M.V.Hosur, M.Adya, J.Alexander, S.Jeelani: Studies on Impact Damage Resistance of Affordable Stitched Woven Carbon/Epoxy Composite Laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.22, No.10(2003), 927-952.
- (41) T.-W.Shyr, Y.-H.Pan: Impact resistance and damage characteristics of composite laminates, *Composite Structures*, Vol.62, No.2(2003), 193-203.
- (42) 竹村振一, 水田美能, Albert S.Kobayashi: ピッチ系低弾性率炭素繊維により補強した層間ハイブリッド炭素繊維一方向強化材の低速度衝撃特性, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.70, No.699 (2004), 1658-1664.
- (43) J.H.Park, S.K.Ha, K.W.Kang, C.W.Kim, H.S.Kim: Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.201, No.1-3(2008), 425-430.
- (44) 吉村健佑, 江角務: 衝撃負荷を受ける積層材料に対する破壊制御設計の体系化に関する一考察, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.75, No.758 (2009), 1368-1373.
- (45) G.Caprino, V.Lopresto, A.Langella, M.Durante: Irreversibly absorbed energy and damage in GFRP laminates impacted at low velocity, *Composite Structures*, Vol.93, No.11(2011), 2853-2860.
- (46) 東藤貢, 中村尊繁, 馬田俊雄, 高橋清: 高速変位装置を用いた FRP 積層板の動的層間破壊靱性の測定, 日本複合材料学会誌, Vol.23, No.5 (1997), 182-188.
- (47) V. K. Srivastava, K.Maile, A.Klenk: High velocity impact perforation on C/C-SiC composites, *High Temperatures-High Pressures*, Vol31, No.5 (1999), 487-49.
- (48) V. K. Srivastava, K.Maile, A.Klenk: Effect of impact damage on flexural strength of the C/C-SiC composites, *Materials Science and Engineering*, A271, 1/2 (1999), 38-42.

- (49) H.Kasano, T.Okubo, O.Hasegawa : Impact perforation characteristics of Carbon/Carbon composite laminates, *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol.16, 1/3 (2001), 165-170.
- (50) Y.Tanabe, T.Akatsu, K.Fujii, E.Yasuda : Impact fracture behavior of polycrystalline graphites and C/C composites using high velocity steel sphere, *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol.16, 1/3 (2001), 149-155.
- (51) 放生明廣, 茶谷明義, 立矢宏 : 衝撃曲げ試験による応力ひずみ曲線の測定, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集, 01-1, I (2001), 377-378.
- (52) 井上裕嗣, 岸本喜久雄, 中西智明, 渋谷壽一 : ウェーブレット変換による分散性応力波の時間一周波数解析(群速度の同定と超音波材料評価への応用), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.61, No.581(1995), 153-160.
- (53) 斎藤直哉, 竹本幹男, 鈴木裕晶, 小野桓司 : UD-GFRP と UD-C/C コンポジットの AE 信号パターン認識解析による破壊タイプの分類, 日本複合材料学会誌, Vol.26, No.6(2000), 227-235.
- (54) 宅間正則, 新家昇, 鈴木健, 藤井俊行 : AE 信号のウェーブレット変換による FRP 積層板の曲げ疲労損傷評価, 精密工学会誌, Vol.68, No.10(2002), 1309-1315.
- (55) 遠藤智子, 榊原進 : 衝撃吸収エネルギーの測定におけるウェーブレット解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.631(1999), 962-969.
- (56) 周風華, 米内山誠, 小河明紀, 橋本良作, 祖父江靖 : C/C 複合材料丸棒のせん断弾性常数の同定, 日本機械学会材料の強度と破壊に関するモデリング/シミュレーション/マルチメディアシンポジウム講演論文集, (1997), 77-80.
- (57) 吉岡孝和, 高橋一郎 : 落錘試験による C/C 複合材料の衝撃損傷評価(衝撃荷重のウェーブレット解析), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.72, No.719 (2006), 1049-1056.
- (58) T.Yoshioka, I.Takahashi : Estimation of Impact Damage in C/C Composites by Drop Weight Tests (Wavelet Analysis of Impact Load) , *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering* Vol. 2, No. 3 (2008), 384-395
- (59) 吉岡孝和, 高橋一郎 : 2D-C/C 複合材料の衝撃損傷評価, 日本複合材料学会誌, Vol.30, No.3 (2004), 111-119.
- (60) 吉岡孝和, 菊池浩章, 高橋一郎 : 落錘試験による C/C 複合材料の衝撃損傷評価(UD-C/C 複合材料の衝撃損傷評価), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.72, No.719 (2006), 1057-1064.
- (61) 吉岡孝和, 高橋一郎 : 落錘試験による C/C 複合材料の衝撃損傷評価(C/C 複合材料における吸収エネルギーと剛性低下), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.781 (2011), 1490-1499.
- (62) 吉岡孝和, 高橋一郎 : C/C 複合材料の動的破壊靱性の評価法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.741 (2008), 678-685.

- (63) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫: ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版 (1999), 49-68.
- (64) チモシェンコ: 工業振動学, (1981), 377, 東京図書.
- (65) チモシェンコ: 工業振動学, (1981), 305, 東京図書.
- (66) 松本浩之, 中原一郎, 渡辺常雄: 曲げ衝撃を受ける PMMA 材の粘弾性応答, 材料, Vol.34, No.376 (1985), 47-52.
- (67) 中原一郎: 材料力学(下巻), (1980), 126, 養賢堂.
- (68) 金原勲, H.Chul Kim, 大沢勇, 竹鼻三雄: 一方向 CFRP の三点曲げ破面のフラクトグラフィ, 材料, Vol.28, No.315 (1979), 1160-1166.
- (69) 倉敷哲生, 座古勝, 樺田訓名理: CFRP 積層板の低エネルギー衝撃損傷評価に関する研究(第 1 報, 損傷発生後の静的曲げ試験法による残存強度評価), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.704 (2005), 656-662.