接続された段付き丸棒を伝ばする弾性波の長時間化の試み†

小林 秀敏* 沼 直樹** 小川 欽也***
堀川 敬太郎* 谷垣 健一*

An Attempt to Lengthen Duration of Elastic Waves Propagating in Connected Stepped Rods

by

Hidetoshi KOBAYASHI*, Naoki NUMA**, Kinya OGAWA***,
Keitaro HORIKAWA* and Ken-ichi TANIGAKI*

In this study, the propagation behavior of multiple stress waves propagating in the stepped bar under various mechanical conditions was investigated by numerical analysis and a series of impact experiments. When an incident stress wave with short rising time passes through the connection surface between input and extended bars, low frequency vibration appears on the head of the incident wave. It was found that from the simulation using extremely long extension bar that the vibration on the wave front was caused by the wave dispersion during propagation. The influence of the geometrical effect of the extension bar and its mechanical impedance effect was also investigated. The effect of the cross-section difference between input and extension bars is greater than that of mechanical impedance, especially when the rising time of incident stress wave is short. Using analytical results, a series of trial experiments for the extension of wave duration were performed. We succeeded to extend the duration of the incident stress wave to twice length.

Key words: Connected rods, Impedance match, Extension of duration, FEM analysis, Verification experiment

1 緒 言

材料の衝撃変形挙動を把握するにはスプリット・ホプキンソン棒 (Split Hopkinson Pressure Bar, 以下 SHPB とする) 法¹⁾⁵⁾や検力ブロック法⁶⁾, ワンバー法⁷⁾等いくつかの試験法が提案されている。なかでも SHPB 法は材料の動的応力-ひずみ関係を精密に測定できることから、最も信頼性の高い衝撃試験法の一つとして、衝撃圧縮、衝撃引張、衝撃曲げ等の多くの研究に利用されてきた。しかしながら、SHPB 法における応力波の持続時間は、打撃棒の長さや応力波の伝ば速度に依存するため、例えば、破断までに大きな変形を必要とする延性材料の衝撃引張試験では、一つの入射波のみでは破断に至らないことがあり、本手法の問題点となっている。その対策として、応力波の伝ば速度の遅い塩化ビニル⁸⁾や PMMA⁹⁾などのポリマーを応力棒に用いる方法や、数回の透過・反射波を利用する方法¹⁰⁾なども試みられているが、棒材の粘弾性効果の補正や、分離して取得し波の重ね合わせ等の余分な作業が必要となることから、限定的な利用に留まっている。一方、小川¹¹⁾は応力棒にアンビルやフランジを取り付け、それらに衝撃負荷を入力する手法で、複数の入射波を利

用する新たな試験法を提案している。この手法により、応力波の長時間化や、高速試験におけるひずみ速度急変試験、衝撃変形中に負荷方向を逆転させるリバース試験法等への応用が示唆されたが、1次元弾性波理論を用いた理論予測と簡単なリバース試験結果が示されているのみで、3次元効果等を考慮した詳細な解析やその他の波形制御に関する実験的検証は行われていない。

そこで、本研究では、段付き棒内を伝ばする複数の応力波の伝ば挙動に関して、有限要素法(FEM)によるシミュレーションを行い、伝ばする応力波への3次元効果や波の分散効果等を明らかにし、2つの応力波を連結することで応力波の長時間化を図る試験手法の可能性について、解析的検討を行った。併せて、落錘型衝撃試験による応力波の長時間化の実験的検証を試みた。

2 弾性波伝ば解析

2・1 1次元弾性波の伝ば

Fig.1(a)に示すように、一本の弾性棒の中間にフランジを設け、その端面 P に打撃管を衝突させると (Fig.1(b)), フランジの左右にある棒部 (以後、それぞれ延長棒、入力棒と呼ぶ) に、圧縮波や引張波が入射する。同時に打撃管

† 原稿受理 平成 30 年 4 月 25 日 Received Apr. 25, 2018 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 大阪大学 大学院基礎工学研究科 機能創成専攻 〒560-8531 豊中市待兼山町
Graduate School of Eng. Sci., Osaka Univ., Machikaneyama-cho, Toyonaka 560-8531.

** 学生会員 大阪大学 大学院基礎工学研究科 機能創成専攻 〒560-8531 豊中市待兼山町
Graduate School of Eng. Sci., Osaka Univ., Machikaneyama-cho, Toyonaka 560-8531.

*** 正 会 員 スペース・ダイナミクス研究所 〒616-8255 京都市右京区鳴滝音戸山町
Space Dynamics Laboratory, Ondoyama-cho, Narudaki, Ukyo-ku, Kyoto 616-8255.

内にも圧縮波が伝ばし、右端 Q で反射して引張波となって端面 P に戻って来る (Fig.1(b)). 今、弾性棒と打撃管が同じ材質で、延長棒、入力棒、打撃管の長さをそれぞれ l_1, l_2, l_0 ($l_2 > l_1 > l_0$) とし、棒・管内の応力波の伝ば速度を C とすると、応力波が打撃管を往復に要する時間 t_0 は $t_0 = 2l_0/C$ と与えられる。戻ってきた波は、 t_0 遅れて端面 P から延長棒と入力棒に入射し、それぞれ引張波と圧縮波となって伝ばする。Fig.1(c)は、棒の左端 R を原点とする棒に沿う位置座標 x と時間 t に関して、伝ばする応力波の波頭の位置を連ねたラグランジュ線図で、実線は圧縮波を、破線は引張波を表している。この図から、点 S では、太線で示すように、持続時間が t_0 の 2 つの同じ矩形波が時間差 $\Delta t = 2(l_1 - l_0)/C$ だけ離れて観察されることがわかる。それゆえ、この時間差が $\Delta t = 0$ となるように $l_1 = l_0$ とすれば、2 つの波が繋がって $2t_0$ の持続時間をもつ矩形波が得られ、 l_0 の打撃管で発生できる矩形波の 2 倍の持続時間を持つ矩形波が得られると考えられる。

しかしながら、ここでは、フランジの影響を無視しており、実際の実験においては、打撃管の衝突によりフランジ部に力が作用するために、フランジ部の応力波形への影響を無視することは出来ない。フランジが薄すぎると、フランジが振動し、厚すぎると内部での応力波の伝ば・反射などが生じ、いずれも応力波形を乱す原因となる。そこで、本研究では、Fig.1(d)に示すように、フランジを装着する代わりに断面積の異なる別の棒を延長棒とし、段付き部分に打撃管を衝突させる様式に変更した。ただし、新たに導入する延長棒は、Fig.1(a)の場合と弾性波の伝ば条件が同じになる様、入力棒と同じ弾性波伝ば速 C と機械的インピーダンス $A\rho C$ (A : 断面積, ρ : 棒材の密度) を有する棒とした。

Fig. 1 Schematic drawings for system creating two incident waves: (a), (b) system of extension bar with flange, (c) Lagrange's diagram and (d) system of extension bar with impedance matching.

2・2 FEM 解析モデル

解析は LS-DYNA ver.ls971s R6.0.0 を用いて行った。解析対象は Fig.2(a)に示すような入力棒と延長棒からなる軸対称モデルで、これを 1 辺 1 mm の正方形軸対称要素で分割した。解析に用いた入力棒、延長棒、打撃管のヤング率 E 、密度 ρ を Table 1 に示す。入力棒の材料は一般構造用鋼を、延長棒はアルミニウム合金を想定し、弾性波の伝ば速度は、それぞれ $C_1 = 5.03 \times 10^3$ m/s, $C_2 = 5.06 \times 10^3$ m/s で両者はほぼ等しい。入力棒の直径 d_1 を $d_1 = 14$ mm とし、延長棒の直径 d_2 は、入力棒の機械的インピーダンス $A\rho C$ と等しくなるように $d_2 = 24$ mm を採用した。打撃管は長さ 740 mm、外径 24 mm、内径 15 mm の鋼管で、弾性棒内に応力波を発生させるために、延長棒の右端面に初速度 5 m/s で衝突させた。打撃前の打撃管と延長棒の間には 0.01 mm の隙間を設定し、打撃管と延長棒の接触は 2 次元セグメント方向に依存しない面一面前接触を定義した。時間増分 Δt は、メッシュ幅 Δx と応力波の伝ば速度 C で表されるクーラン条件 $\Delta t < \Delta x/C$ を満たすように設定し、モデルの軸方向への変位は拘束せずに解析を行った。打撃管を衝突させることによって発生した入射波を、打撃面から左右に 250 mm 離れた測定箇所 A, B の棒表面における軸方向ひずみ $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ でモニターした。

Fig. 2 Models for FEM analysis: (a) basic model and (b) long extension bar model.

Table 1 Material constants of input bar, extension bar and striker tube.

	Young's Modulus E (GPa)	Density ρ (kg/m ³)
Input bar	200	7900
Extension bar	69	2700
Striker tube	200	7900

2・3 自由端と段差面の影響

Fig.3に解析によって得られた測定点 A, B における軸方向ひずみ $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ の時間履歴を示す。衝突時刻を $t = 0$ とし、両ひずみとも、 $\varepsilon_A = \varepsilon_B = 0$ のベースラインから上方に正の引張ひずみを、下方に圧縮ひずみを表している。応力波の伝ば速度、点 A, B の位置、延長棒の長さ等から Fig.3 の波形は以下のように説明できる。即ち、点 A, B は段差面から共に 250 mm 離れているので、段差面から入射し

た波は点 A, B で同時に圧縮波・引張波として観測された (Fig.3の①・②の波). 次に点 A を通過した圧縮波は延長棒左端で反射し, ③の様に引張波となって再び点 A に戻り, さらに, その引張波は段差面を左から右に通過して入力棒に伝ばし, ④で示される引張波として観測されたと考えられる. しかしながら, 波形④の引張波の波頭には比較的大きな振動が見られるが, 最初の入射波②の波頭には見られず, 波頭形状が異なっている. この波頭の振動は, 延長棒上の点 A でも観測されている (③の波) ことから, 延長棒から入力棒へ段差面を通過することは原因でないことが分かる. 残る原因としては, 延長棒自由端での反射の影響, または波形の伝ば距離が長くなるにつれ波形の形が崩れる波の分散による影響¹²⁾が挙げられる.

Fig. 3 Change of normal strains at point A and B with time which were obtained from FEM analysis.

Fig. 4 Comparison of strains observed at point A and B after reflection of stress wave at free end with strains obtained without reflection.

そこで, 波頭の発生の原因が, 自由端反射か波の分散かを明らかにするために, Fig.2(b)に示すように延長棒を4000mm に伸ばした解析モデルを製作し, 新たに測定点 A', B' を設けた. 波③は, 波①が延長棒の左端で反射して戻ってきた波であり, もし反射が無ければ, 波①の測定位置より2000 mm 先の位置で, また波④は, さらにその500 mm 先の位置で観察される波であるから, 測定点 A' は点

A より2000 mm 進んだ位置に, 測定点 B' はそれよりさらに500 mm 先に設けた. それゆえ, 測定点 A', B' で観察される軸方向ひずみ $\varepsilon_{A'}$, $\varepsilon_{B'}$ は, 自由端反射しない場合に点 A, B で観察されると思われるひずみである. $\varepsilon_{A'}$, $\varepsilon_{B'}$ と③, ④の波形と比較するために, $\varepsilon_{A'}$, $\varepsilon_{B'}$ の正負を反転して基線をずらし, それぞれ③', ④' と記して Fig.4に示す. これらの結果から, ③と③', ④と④' は波頭や波全体の形状が非常によく一致しており, 波頭の振動原因として, 自由端反射の影響は非常に小さく, 波の分散による影響が支配的と考えられる.

2・4 入射波の立ち上がりの影響

応力波の波頭に生じる振動は, 応力波の立ち上がり時間と関連があることが知られており¹³⁾, 本研究に用いたモデルに対しても, その関係について詳細に検討しておく必要がある. ただ, 前節で用いた打撃管を延長棒に衝突させる方法では, 出力波形の立ち上がりを制御することが難しいため, 打撃管が衝突していた面に Fig.5 に示す粒子速度履歴を直接与える手法に変更した. 最大粒子速度を2.25 m/s, 波形全体の長さを296 μ s と設定し, 立ち上がり・立ち下がりには1/4 sin 波を用いた. 立ち上がり時間 t_{up0} , 立ち下がり時間 t_{down0} を波形高さの10~90%までの時間と定義して, $t_{up0} = t_{down0} = 6, 18, 42, 58 \mu$ s の4つの波形を前節で用いた打撃管に相当する段付き部の打撃面に入射した.

Fig. 5 Particle velocity histories with different rising times of 6, 18, 42 and 58 μ s.

Fig. 6 Change of strain at point B with time for various incident waves with different rising times.

測定点 B から得られた軸方向ひずみ ε_B の時間履歴のうち後半部分 (Fig.3 の④波形に対応する波形) を Fig. 6 に

示す. $t_{up0} = 6 \mu\text{s}$ の入射波の場合は, Fig.3 で見られたような比較的大きい振動が波頭に生じているが, t_{up0} が大きくなるほど, すなわち, 入射波の立ち上がりが緩い程, 波頭の振動が減少し, 少なくとも $t_{up0} \geq 42 \mu\text{s}$ では, 波の分散の効果による波頭の振動は現れないことがわかる.

2・5 段差部の断面積比の影響

段差部の断面積比 β を変化させるために, 入力棒はこれまでと同じにして, 延長棒の長さはそのままで断面積を 2 ~ 10 倍に変化させた. ただし, これまで通り, 断面積は変えるけれども, 延長棒の機械的インピーダンス $A\rho C$ と弾性波伝ば速度 C は入力棒のそれらと同じになるように, 延長棒のヤング率 E_2 と密度 ρ_2 を選定した. 本解析に用いた延長棒のそれらを直径 d_2 と併せて Table 2 に示す. 解析では, 前節同様 Fig.5 に示した 4 つの粒子速度履歴を段差面の内径 16 mm 外径 20 mm の円環領域に与え, 応力

波を発生させた. 解析結果の一例として, 断面積比 $\beta = 3$, 10 の場合の立ち上がり時間が $t_{up0} = 6, 18, 42 \mu\text{s}$ の入射粒子速度履歴に対するひずみ $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ の時間的変化を Fig.7 に示す. この図から, 断面積比 $\beta = 3$ では $t_{up0} = 6 \mu\text{s}$ の場合に, ま

Table 2 Diameter and material constants of extension bars with same mechanical impedance.

β	d_2 (mm)	E_2 (GPa)	ρ_2 (kg/m ³)
2	20	100	3950
3	24	66.7	2633
4	28	50	1975
5	32	40	1580
7	38	28.5	1120
10	44	20	790

Fig. 7 Strain records at point A and B obtained from FEM analyses with conditions: (a) $\beta = 3$, $t_{up} = 6 \mu\text{s}$, (b) $\beta = 3$, $t_{up} = 18 \mu\text{s}$, (c) $\beta = 3$, $t_{up} = 42 \mu\text{s}$, (d) $\beta = 10$, $t_{up} = 6 \mu\text{s}$, (e) $\beta = 10$, $t_{up} = 18 \mu\text{s}$ and (f) $\beta = 10$, $t_{up} = 42 \mu\text{s}$.

た $\beta = 10$ の結果では $t_{up0} = 6, 18 \mu\text{s}$ の場合に、 $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ の③、④ (Fig.3 参照) の弾性波の波頭に振動が確認されることから、波の分散効果による波頭振動軽減のためには、出来るだけ断面積比 β は小さく、弾性波の立上り時間 t_{up} は大きい方がよいと考えられる。また、 $\beta = 3$ では余り顕著ではないが、 $\beta = 10$ では、いずれの入射波立上り時間の場合も、 ε_A の③の弾性波の $t = 600 \mu\text{s}$ 付近で比較的深い谷が出現している。これは、断面積比が大きくなればなるほど、段差面で生じる反射波が大きくなり、その反射波が戻って来て点 A で観察され、それが ε_A の③の弾性波に重なって観察された結果と考えられる。このことから、2つの弾性波をつなげて長持続時間の波を生み出すには、あまり大きくない断面積比の段付き棒が適していると考えられる。

当然ではあるが、入射した粒子速度履歴の立上り時間 t_{up0} が大きいほど、点 A, B で観察される入射波 (Fig.3 の表記に従うと①、②の入射波) の立上り時間 t_{up} も大きくなっており、この傾向は延長棒と入力棒の断面積比 β が大きいほど、より顕著のように思われる。本研究の目的の一つは、弾性波の持続時間の拡大のために、Fig.7 の破線で示された弾性波の第 1 波と第 2 波 (Fig.3 では②の入射波と④の反射・透過波) の接続の可能性について検討することである。そのためには、少なくとも第 1 波の下降時間 t_{down} と第 2 波の立上り時間 t_{up} が等しくなくてはならない。そこで、それら t_{down} と t_{up} を解析結果から求め、両者を比較して Fig.8 に示す。水平方向に引いた破線は、解析で与えた粒子速度履歴の立上り時間 t_{up0} を示している。これから、実際に伝ばしている弾性波の t_{down} や t_{up} は、必ずしも t_{up0} に常に一致しているわけではなく、その乖離は、立上りが急な波ほど、また断面積比が大きくなるほど顕著になることがわかる。このことから、弾性波の接続では、小さい断面積比と短すぎない立上り時間の波が適していると結論づけられる。

Fig.8 Change of t_{down} of incident wave and t_{up} of reflected-transmitted wave with ratio of cross-sectional areas.

3 弾性波接続実証試験

3・1 落錘型実験装置

Fig.9 に、検証実験用に製作した落錘形装置の概略図を示す。入力棒は SUS304 製で、直径 16.0 mm、長さ 1500mm であり、延長棒は A2017 製で、入力棒の機械的インピーダンスに等しくなるように直径は 26.8 mm とし、長さ 600 mm とした。入力棒と延長棒の接続には、できるだけ弾性波の伝ばを乱さぬようねじ締結は避け、延長棒の片端面に直径 15.9 mm、深さ 12 mm の穴を開け、そこに入力棒を圧入して、締め込みにより両者を接続した。この段付き棒の上端部 A のみを固定し、底部 B は自由端になるようにした。入力棒を伝ばする弾性波は、段付き面から 150 mm 離れた延長棒上および入力棒上に、90° おきに軸対称に貼付した 4 枚の半導体ひずみゲージ (KSP-1-350-E4, 共和電業) A, B の出力を、ホイートストンブリッジ回路、差動アンプを介して、デジタルオシロスコープに記録した。打撃管は A6063 製で外径 25 mm、肉厚 1 mm の薄肉アルミ円管で、長さ L は、最初は延長棒より長い 640 mm とし、波形接続のため伝ば波形を確認しながら徐々に切断して落下実験を行った。打撃管が段付き面に衝突することで、まず第 1 引張波が入力棒に生じる。同時に延長棒に発生した圧縮波は、自由端 B で反射して第 2 引張波となって入力棒に伝ばする。本実験では、この 2 つの波を、打撃管の長さを調節することで接続し第 1 引張波の 2 倍の持続時間を持つ引張波の生成を試みた。

Fig.9 Experimental setup using input and extension bars.

3・2 実験結果および考察

Fig.10 に、打撃管長さ $L = 640 \text{ mm}$ 時のゲージ A, B で記録した軸方向ひずみ $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ を示す。前章の解析結果を参考に、入射波の急な立上りを抑えるために、打撃管と段差

面の間に紙を挟んで打撃した。そのため、 ε_A , ε_B どちらも立上り時間が $t_{up} \approx 50 \mu\text{s}$ と、かなり大きい立上り時間になり、矩形波よりもむしろ台形波に近い入射波となった。また、波全体に高周波の振動や平坦部の傾斜も見られ、特に ε_A の方が顕著であるが、これは、打撃管の端面の片当たりや打撃管と延長棒の軸心のズレ等に起因すると思われる。実験精度の面からは改善の余地があると考えている。ただ、今回の実験の目的は、段差のある棒をよる2つの引張波の接続であり、この観点から入力棒に伝ばした ε_B の波を見ると、打撃管は長さ $L = 640 \text{ mm}$ で延長棒より長いので、第1波が除荷する前に第2波の負荷がはじまり、両波の重なりによる小山が ε_B の波の中央付近に認められるものの、その持続時間は約 $500 \mu\text{s}$ あり、 ε_A の最初の圧縮波の持続時間のおよそ2倍になっており、打撃管長さの調節により接続は十分可能と思われる。確認のため、 $L = 640 \text{ mm}$ 打撃管を用いた落錘実験に相当する粒子速度履歴（粒子速度は 0.1 m/s 、波形の立上り・立下り時間は $50 \mu\text{s}$ ）を与えた解析結果を Fig.11 に示す。解析モデルは実験に用いた延長棒・入力棒のサイズで、測定点 A, B は実験同様、段差面からそれぞれ 150 mm 離れた延長棒および入力棒上の点である。解析結果の点 A, B におけるひず

Fig.10 Strain records obtained from impact test of input and extension bar apparatus .

Fig.11 Strain records obtained from FEM analysis for input and extension bar system.

み ε_A , ε_B は、Fig.10の実験結果に比べ、高周波振動も無く全体的になめらかで、 ε_B の中央付近の小山も低いけれども、実験結果と概ね一致していることが確認できる。

実験は、打撃管を $L = 640 \text{ mm}$ からスタートして 20 mm おきに短くし、Fig.10のゲージ B のひずみ出力に見られた小山の減少の程度を確認しながら行った。Fig.12に $L = 580 \text{ mm}$ と $L = 560 \text{ mm}$ の場合のゲージ B のひずみ出力波形を示す。前者では引張波の中央にまだ小山が認められるが、後者では同じ場所がやや窪んだ波形となっており、最適な波形は $L = 570 \text{ mm}$ 程度ではないかと推察される。延長棒の長さは 600 mm であるが、必ずしも延長棒の長さが打撃棒長さの最適値にはならないようである。ただ、後者の $L = 560 \text{ mm}$ 程度のくぼみはひずみ波形全体の約10%程度で、実用にはこの程度の変化は許容範囲かと思う。

Fig.12 Strain records obtained from impact test using two strikers with 560 and 580 mm in length.

4 結 言

本研究では、段付き棒内を伝ばする複数の応力波の伝ば挙動に関して、有限要素法(FEM)によるシミュレーションを行い、2つの応力波を連結することで弾性波の長時間化の可能性について、解析的検討を行った。さらに、その結果を基に、段付き棒衝撃試験装置による検証実験を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) インピーダンスを一致させた大断面の延長棒を持つ段付き弾性棒において、延長棒自由端で反射した波形には大きな振動が生じるが、この振動は自由端反射や段付き面の透過の影響ではなく波の分散効果によることが判った。それ故、波形の立上りを緩やかにすることで、波頭の振動を抑制できることがわかった。
- (2) 入射波の立上がり時間が極端に短い場合や、延長棒と入力棒の断面積比が大きい場合は、伝ばする弾性波の立上り・立下り時間が大きく増加する。
- (3) 段付き棒衝撃試験装置による検証実験を行い、2つの弾性波の接続による持続時間の長時間化が可能であることが実験的に確認された。また、2つの弾性波を接続する最適な打撃管長さは、必ずしも延長棒の長さに一致しないことが判った。

参 考 文 献

- 1) H. Kolsky, "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading", *Proceedings of the Physical Society. Section B*, Vol. 62 pp.676-700 (1949).
- 2) U. S. Lindholm, "Some experiments with the split Hopkinson pressure bar", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.12, pp.317-335 (1964).
- 3) K. Ogawa, "Recent developments on the split Hopkinson pressure bar method", *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, Vol.2, pp.89-96 (2002).
- 4) M. F. Omar, H. Md Akil, Z. A. Ahmad, A.A.M. Mazuki and T. Yokoyama, "Dynamic properties of pultruded natural fibre reinforced composites using split Hopkinson pressure bar technique", *Materials and Design*, Vol.31, pp.4209-4218 (2010).
- 5) H. Kobayashi, K. Horikawa, K. Ogawa and K. Watanabe, "Impact compressive and bending behaviour of rocks accompanied by electromagnetic phenomena", *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol.372, 20130292, (2014). (<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0292>).
- 6) Y. Chuman, K. Mimura, K. Kaizu and S. Tanimura, "A sensing block method for measuring impact force generated at a contact part", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.19, pp.165-174 (1997).
- 7) M. Itabashi and K. Kawata, "Carbon content effect on high-strain-rate tensile properties for carbon steels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.24, pp.117-131 (2000).
- 8) H. Kobayashi, M. Daimaruya and T. Kobayashi, "Dynamic and Static Compression Tests for Paper Honeycomb Cores and Absorbed Energy", *JSME International Journal*, Vol.41, pp.338-344 (1998).
- 9) H. S. U. Butta and P. Xue, "Determination of the wave propagation coefficient of viscoelastic SHPB: Significance for characterization of cellular materials", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.74, pp.83-91 (2014).
- 10) H. Zhao, "Testing of Polymeric foams at high and medium strain rates", *Polymer Testing*, Vol.16, pp.507-616 (1997).
- 11) K. Ogawa, "Impact tension compression test by using a split-Hopkinson bar", *Experimental Mechanics*, Vol.24, pp.81-86 (1984).
- 12) H. Kolsky, "Stress waves in solids", Dover Publications, pp. 58-60 (1963).
- 13) M. Daimaruya, H. Kobayashi and H. Tsuda, "Discussions on method of impact tension test for strip specimen", *Journal of the Society of Materials science Japan*, Vol.53, pp.1240-1246 (2004).