

(論文)

# 一次元弾性波伝播理論に基づくSHB試験結果の妥当性の検証

## Split-Hopkinson Bar Experimental Result Validity from One-dimensional Stress Wave Theory Perspective



増田智一\*(工博)  
Dr. Tomokazu Masuda



斉藤賢司\*(工博)  
Dr. Kenji Saito



森田 泉\*  
Izumi Morita



池田周之\*(工博)  
Dr. Shushi Ikeda



槇井浩一\*(工博)  
Dr. Koichi Makii



小川欽也\*\*\*(工博)  
Dr. Kinya Ogawa

In order to evaluate dynamic deformation behaviors under high strain rates, Kobe Steel has developed and applied a Split-Hopkinson Bar (SHB) apparatus. This paper discusses the validity of the strain measurements and strain rates measured by this new SHB apparatus. The strain and strain rate were first measured using high-speed photography. Calculated values based on one-dimensional stress wave theory were compared with the measured values obtained by high-speed photography. The results indicate that both the measured and calculated values correlate well, and prove that the stress-strain relationship evaluated by the SHB apparatus is accurate.

まえがき = 自動車業界では、高まる地球環境保護強化の要求から、自動車車体の軽量化などの燃費向上施策が重要とされている。しかしながら、自動車衝突時の安全性への要求を満足しつつ車体軽量化を達成することは容易でなく、一つの解決方法としてボディ部品への高強度鋼板の適用が進められている。例えばセンタピラーには、側突時の変形を低減し乗員の生存空間を確保するためにできるだけ高い強度、特に降伏点の高い鋼板を使うことが有利とされており、引張強度 980MPa 以上の超高強度冷延鋼板の適用が拡大している<sup>1)</sup>。

自動車用鋼板の引張特性は、通常、ひずみ速度  $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{s}^{-1}$  の準静的条件下で評価される。しかしながら、自動車の衝突時における部材の変形速度は、ひずみ速度で  $10^3 \text{s}^{-1}$  にもなる。衝突安全性向上と車体軽量化の両立を目的として耐衝突部材の高強度化を図るためには、自動車の衝突に相当する高ひずみ速度域での力学特性が重要である<sup>2)</sup>。高ひずみ速度下における応力 - ひずみ関係の測定には、SHB(Split-Hopkinson Bar)法<sup>3)</sup>、油圧サーボ法<sup>4)</sup>、ワンパー法<sup>5)</sup>などいくつかの試験方法が提案されているが、未だ標準化された衝撃試験法はない。

その中でもSHB法は、現状で最も信頼性のある衝撃試験法であり、変形の初期段階から応力 - ひずみ関係が評

価できるといわれている<sup>6)</sup>。この試験法が成り立つためには、入出力棒、ストライカおよび試験片の中心軸が一致していること、試験片内の応力、ひずみが一樣である必要がある<sup>7)</sup>。

我々は、いくつか提案されている衝撃試験法の中でSHB法のメリットに着目し、試験装置の技術確立を行っている。本報では、当社のSHB試験装置について高ひずみ速度下における金属材料の応力 - ひずみ関係の妥当性を検証するため、試験片両端の変位を実測することで求めたひずみと、計算ひずみを比較した結果を紹介する。

### 1. 実験方法

#### 1.1 SHB法による応力、ひずみ速度およびひずみの測定

図1に、SHB試験装置の概略図を示す<sup>8)</sup>。本装置は、長さがそれぞれ1,500mmの2本の同径、同材質の細長い入出力棒と管状のストライカによって構成されている。ストライカ、入力棒、出力棒は同軸上に並べられ、入力棒と出力棒の間に試験片が設置される。コンプレッサに蓄積された圧縮空気によって発射されたストライカを、入力棒の左端に設置したヨークに衝突させることで、入力棒に持続時間  $2L/C_{0,St}$  の入射波  $\epsilon_i$  を伝播させることが

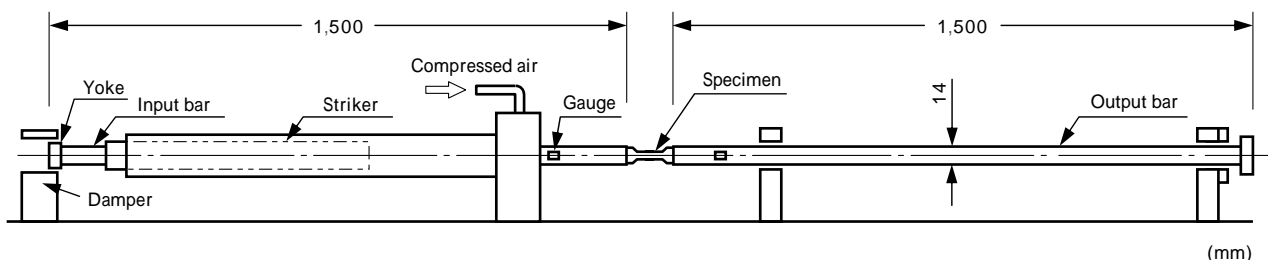


図1 スプリットホプキンソン棒式衝撃試験装置(SHB)の概略  
Fig. 1 Split-Hopkinson bar (SHB) apparatus for impact tensile test

\*技術開発本部 材料研究所 \*\*スペース・ダイナミクス研究所



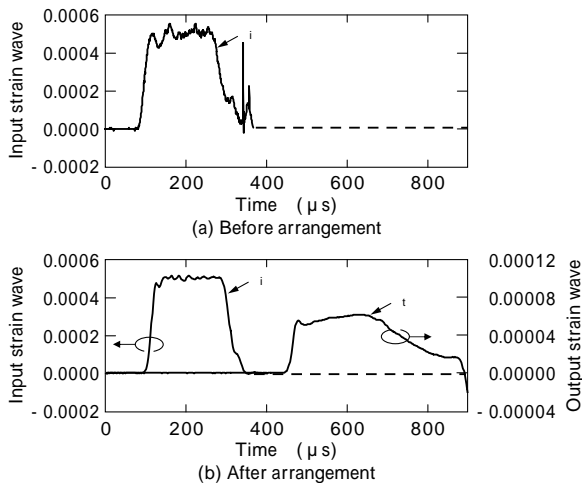


図3 SHB 試験で測定された代表的な入出力ひずみ - 時間関係  
Fig. 3 Typical input and output strain wave-time curves measured by SHB testing

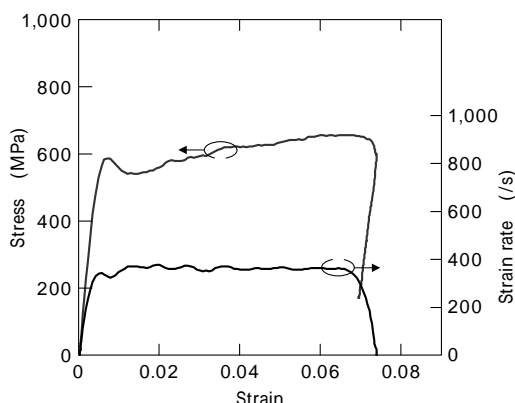


図4 SHB 試験で測定された応力 - ひずみおよびひずみ速度 - ひずみ曲線  
Fig. 4 Stress-strain and strain rate-strain curves measured by SHB testing

り、ストライカのエネルギーが入力棒に正しく伝わっていることを示している。

図4に、 $\sigma$  および  $\dot{\epsilon}$  を(3),(5)および(6)式に代入することで求めた応力 - ひずみ、およびひずみ速度 - ひずみ曲線を示す。上降伏点発生時のひずみ速度は約  $3.5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$  となっており、降伏応力が高ひずみ速度下で測定できていることがわかる。図4のひずみ速度 - ひずみ曲線は、 $\dot{\epsilon}$  に比べて  $\sigma$  が小さいため、変形中のひずみ速度はほぼ一定値を得ることができた。一方、本SHB試験機の  $\dot{\epsilon}$  の持続時間では、試験片を破断させることができなかった。そのため、ひずみ約0.07以降はひずみ速度の減少に伴い、応力が減少している。この応力除荷時の勾配は、変形初期の勾配とほぼ同じであり、試験片が弾性応答していることを表している<sup>11)</sup>。

## 2.2 高速度カメラによる応力およびひずみの検証

図5に、高速度カメラで撮影したSHB試験中の試験片の変形挙動を示す。0  $\mu\text{s}$  から 2,450  $\mu\text{s}$  まで、時間の経過に伴い入出力棒および試験片が左側に移動している。また、試験片自体も引張変形を受け、伸長していることがわかる。これは、入出力棒および試験片に引張波が伝播しているためである。試験片の変形を詳細に観察すると、0  $\mu\text{s}$  は変形直前であり、200  $\mu\text{s}$  までの時間の経過に

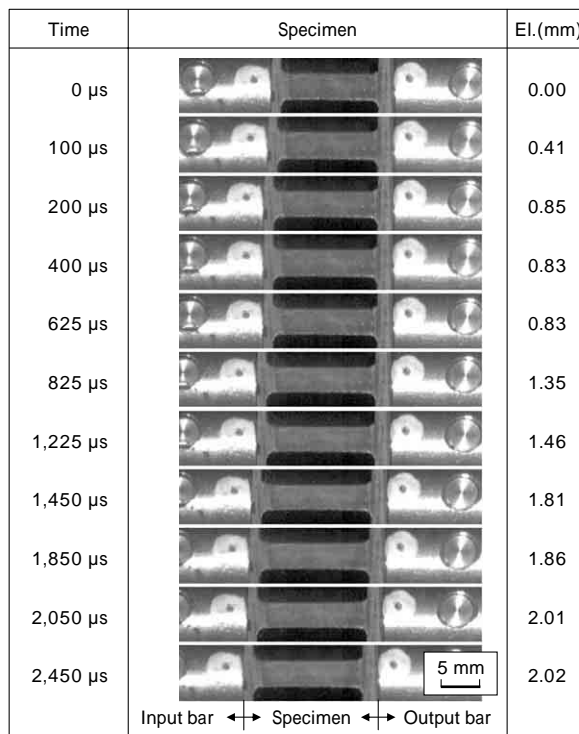


図5 ひずみ波伝播時における試験片の変形挙動

Fig. 5 Deformation behavior of specimen during strain wave propagation under dynamic condition

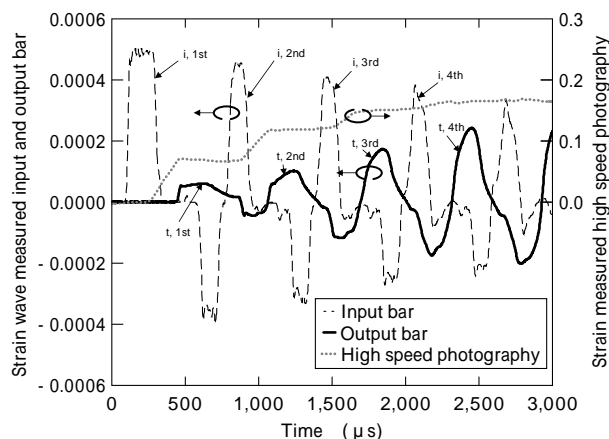


図6 ひずみ - 時間関係の測定結果の比較

Fig. 6 Comparison of measured strain-time curves

伴い試験片が引張変形を受けている。200  $\mu\text{s}$  から 625  $\mu\text{s}$  までは、弾性変形分が回復するため試験片の伸び値がわずかに減少しており、引張変形は受けていないことがわかる。625  $\mu\text{s}$  から 825  $\mu\text{s}$  に至る間に試験片が再び引張変形を受けている。これは、図4に示したように、本SHB試験では試験片が破断に至っていないため、 $\sigma$  および  $\dot{\epsilon}$  がそれぞれ入出力棒を伝播し、入出力棒の他端で反射した後、試験片に再び入射したことを示している。試験片が変形を開始する時刻は、それぞれ、0, 625, 1,225  $\mu\text{s}$  であり、入出力棒の長さ  $C_0$  から予測される時刻のタイミングと良い一致を示す。このようにSHB試験で試験片が破断に至らない場合には、試験片が繰り返し引張変形を受けることになる。本SHB試験では、試験後の試験片の伸びと1回目の  $\sigma$  と  $\dot{\epsilon}$  から算出されるひずみは一致しないことになる。

図6に、入出力棒で測定した  $\sigma$  および  $\dot{\epsilon}$ 、高速度カメ

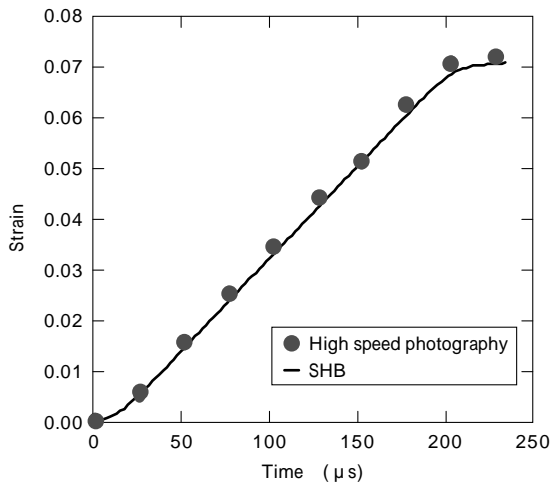


図7 一次元弾性波伝播理論に基づく計算ひずみと高速度カメラによる実測ひずみの比較

Fig. 7 Comparison between calculated strain value by one dimensional stress wave theory and measured value recorded with high speed photography

ラの画像を解析することで求めた試験片の実測ひずみを示す。1, 実測ひずみ, 2の順にひずみの立ち上がり時刻が遅れるのは, 計測位置が異なるためである。1の持続時間と, 高速度カメラで撮影した試験片が変形している時間とは, 良い一致を示した。1は1回目と比較して2回目のひずみ波のピーク値が $5.1 \times 10^{-4}$ から $4.6 \times 10^{-4}$ まで減少しているが, それに伴い試験片に与えられるひずみ量も0.071から0.051まで減少していることがわかる。一方, 2はひずみ波のピーク値が2回目以降増加している。1および2は4回目の試験片への入射時にひずみ波の大きさがほぼ同じになるため, それ以降はひずみ波の伝播を繰返しても試験片はほとんど変形しない。

図7に, SHB法における一次元弾性波伝播理論に基づく計算ひずみと, 高速度カメラによる実測ひずみの比較を示す。計算ひずみは実線, 高速度カメラの計算ひずみは,  $25 \mu s$ ごとの測定値を点で示してある。このひずみ-時間関係は, 1回目の1によって試験片が変形したときのひずみを比較している。

1が試験片を変形させている間(変形初期から約 $200 \mu s$ )における計算ひずみと, 実測ひずみは, 良い一致を示した。したがって, 本SHB試験機では, 一次元弾性波伝播理論に基づく式(5)および(6)が成立し, これらの式を用いることで応力およびひずみが測定可能であるといえる。

一方, 試験片から測定精度の検証を行う場合は, 試験片内の応力, ひずみ状態が一様であることを確認する方法が用いられる。我々が精度検証したSHB試験装置は, 変形初期を高精度に捉えるため入出力棒を $1,500mm$ と比較的短くしている。今回の検証において, 変形初期の応力とひずみが高精度に測定できていることは立証できたが, 一方で, 試験片を破断させることができなかったため, 大ひずみ域の応力とひずみの測定精度を確認することができなかった。今後は, 入出力棒の長さを大きくし, 試験片を破断させたときの試験片内の応力, ひずみ状態を確認する必要がある。

むすび=高ひずみ速度下における金属材料の応力-ひずみ曲線を評価するため, SHB試験装置の技術確立を行った。本SHB試験装置において応力およびひずみの妥当性を検証した結果, 以下のことが明らかとなった。

- (1) 入出力棒, ストライカおよび試験片の中心軸の調整と, ノイズ対策を行うことによって, 高ひずみ速度下における応力-ひずみおよびひずみ速度-ひずみ曲線を高精度に測定することができた。
- (2) 高速度カメラを用いることで, SHB試験中における試験片の変形の様子を詳細に捉えることができ, 入射波1および透過波2の伝播と試験片の変形挙動との関係を明らかにすることができた。
- (3) SHB試験における試験片のひずみの測定精度を検証した結果, 一次元弾性波伝播理論に基づく計算ひずみと高速度カメラによる実測ひずみは良い一致を示した。したがって, 測定される変形初期の応力およびひずみは信頼性が高く, 本SHB試験装置は, 高ひずみ速度下における金属材料の応力-ひずみ関係を測定するのに適している。

#### 参考文献

- 1) 田村享昭ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3 (2002) p.6.
- 2) 高木周作ほか: 鉄と鋼, Vol.83, No.11 (1997) p.748.
- 3) H. Kolsky: Proc. Soc., B62 (1949) p.676.
- 4) 向井陽一ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3(2002) p.32.
- 5) M. Itabashi and K. Kawata: Int. J. Impact Eng., Vol.24(2000) p.117.
- 6) 横山 隆: 非破壊検査, Vol.48, No.7 (1999) p.388.
- 7) 小川欽也: 実験力学, Vol.2, No.2 (2002) p.89.
- 8) K. Ogawa: Proc. of 4th ISIE4, Vo.1 (2001) p.99.
- 9) T. Nicholas: Exp. Mech., 21 (1981) p.177.
- 10) 小川欽也: 材料, Vol.51, No.10 (2002) p.1169.
- 11) 小川欽也: 軽金属, Vol.51, No.3 (2001) p.175.