

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05984

研究課題名(和文) 各種材料の高速引張における高精度計測法の開発

研究課題名(英文) Development of accurate high-speed tension test for various materials

研究代表者

榎田 努 (Umeda, Tsutomu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60305646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：代表的な高速材料試験法であるホプキンソン棒法に基づく高速引張試験において、従来法による応力-ひずみ関係の計測に加え、近年発展の著しい高速度カメラにより撮影した画像データに対してデジタル画像相関(DIC)法を適用すると同時に、試験片にひずみゲージを貼付して応力、ひずみを直接計測し、これらのデータも用いて応力-ひずみ関係を評価した。従来法による応力-ひずみ関係と、DIC法または直接計測の併用による同関係を比較し、精度向上の可能性と、これら新しい手法の視点から試験法の問題点および改善法を議論した。適切な試験片形状・寸法についても検討し、鉄以外の非鉄金属および樹脂材料に対しても提案手法を適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料の高速変形挙動の正確な計測は、自動車等の機械部品のCAE解析におけるひずみ速度依存性を含めた材料の変形応答を表す構成式/材料モデルの構築に必要となる。一方、ホプキンソン棒法による代表的な高速引張試験は、準静的試験と比べて試験条件の微妙な差異により結果が異なり易く、申請時点では標準化されていなかった。このため、問題点を突き詰めて計測精度を向上させるとともに、種々の材料のデータ蓄積が求められている。本研究では、近年発展の著しい高速度カメラおよびデジタル画像相関法の併用と、試験片からの直接計測による応力-ひずみ関係の精度向上を検討し、さらに鉄以外の非鉄金属および樹脂材料にも提案手法を適用した。

研究成果の概要(英文)：In a typical high-speed tension test using the Hopkinson bar method, the digital image correlation (DIC) method was also applied to image data that were shot by the high-speed camera, and strain gauges were also attached to the test piece to directly measure stress and strain. Then, the stress-strain relationship was evaluated using the data, which were obtained by DIC method and direct measurement, together with those obtained by the conventional Hopkinson bar method, and it was compared with that obtained by the conventional method only. The possibility of accuracy improvement by using DIC method and direct measurement together, further problems and those improvements were discussed from the viewpoint of the proposed method. Appropriate test piece shapes and dimensions were also examined, and furthermore the proposed method was applied to nonferrous metals and resin materials other than iron.

研究分野：固体力学、衝撃工学

キーワード：引張型ホプキンソン棒法試験機 DIC法 ひずみ速度依存性 試験片形状・寸法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 材料の変形応答を特徴づける基礎データでは応力 - ひずみ関係がとくに重要であり、近年の CAE に基づく構造強度評価もこのデータから同定した構成式あるいは材料モデルに基づいて行われる。しかし、高速変形時の応力 - ひずみ関係は変形速度に影響され、一般に発生応力が増加する(ひずみ速度依存性)。そのため、例えば自動車のエネルギー吸収部材のような高速変形応答を考えるべき部材の設計では、ひずみ速度依存性の正確な把握が最適化を可能とする。一方、高速変形時には、同時に応力波の干渉、慣性力、温度上昇も発生し、ひずみ速度依存性のみを正確に評価することが難しい。これを実現する試験法として、一次元弾性波伝ば理論に基づき応力波の干渉を回避するホプキンソン棒法がよく用いられるが、その測定精度は微妙な試験条件の差異や試験片の材質・寸法・形状にも敏感に影響されるため、それらへの十分な配慮が要求される。この難点を解決するため、これまで様々な試みがなされてきた。

(2) 本研究室では、これまで引張型ホプキンソン棒法試験機の改善に取り組み、本研究との関連では鋼材を対象として、従来の計測と同時に試験片からの応力・ひずみの直接計測も行うことで、試験片、試験機を含む系の過渡振動の影響を極めて低減した結果を得ていた。この直接計測では、試験片の応力計測部(以下、検力部)におけるひずみ(応力)分布の一様性が重要であり、主に数値解析により検討してきた。研究開始当初の状況では、検力部でのひずみ分布計測法として画像計測法である 2 次元デジタル画像相関(DIC)法を用い、ひずみ分布の確認と計測精度の向上について検討を進め始めていた。DIC 法は衝撃問題にも適用され始めていたが、高速度カメラによる撮影が必要であり、この時点で応力計測の例はほぼ見られなかった。さらに、この手法を非鉄金属材料及び樹脂材料にも適用したいと考えていた。

2. 研究の目的

衝突安全性を考慮した輸送機械(自動車、航空機、列車等)の最適設計には、材料の高速変形挙動のデータベース構築が重要であり、多くの機関でその整備が進められているが、申請時点ではそのための標準化された試験法が存在しなかった。とくに新素材の開発等で、高速引張試験の重要性が高まり、測定精度の向上も求められている。本研究では、従来のホプキンソン棒法に基づき、試験片での直接計測とデジタル画像相関法を併用することで、材料の高速変形挙動を可視化し、測定精度向上について検討するとともに、高速変形時の材料特性のデータベース化に寄与することを目的に非鉄金属材料、樹脂材料にも提案手法を適用した。

3. 研究の方法

(1) 計測システムの構築・検証

引張型ホプキンソン棒法試験機において、高速度カメラで連続撮影した検力部付き平板試験片の画像から DIC 法によりひずみ分布の推移、ひずみ、応力履歴を算出するシステムを構築・検証した。まず、以前の研究¹⁾でも扱ってきた鋼材(SPCC、SUS316等)を対象として提案手法による試験を実施できるように、必要な機材、ソフトウェアを準備した後、DIC 法により試験片検力部のひずみ分布の推移を測定した。従来の結果や、何種類かの方法で評価した応力 - ひずみ関係を相互に比較するなどして、提案手法による測定結果を検証した。

(2) 試験片検力部におけるひずみ(応力)分布の一様性の検討

試験片での直接計測、DIC 法による応力 - ひずみ関係の測定精度に影響を及ぼす試験片検力部におけるひずみ(応力)分布の一様性について、主に数値解析において試験片形状・寸法を変えたり、実験結果とも比較して検討した。また、検力部におけるひずみ(応力)分布から適切な計測を行える計測部位について検討した。

(3) 非鉄金属及び樹脂材料への適用

材料特性の影響を評価するため、非鉄金属材料(A7075、 β -チタン合金、AZ91)、樹脂材料(PC、PA)に対して提案手法による試験を実施した。

4. 研究成果

(1) 図 1 に本研究で構築した計測システム、図 2 に引張型ホプキンソン棒法試験機の概略、図 3 に試験片の例を示す。実験は引張速度 6~7 m/s、ひずみ速度 $1 \sim 1.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 、高速度カメラのサンプリング間隔 1~2 μs で実施した。高速度カメラは、当初、現有している Phantom V9.1(米 Vision Research)を試したが、応力 - ひずみ関係を得るのに必要な数 μs のサンプリング間隔では十分な解像度が得られず、試行錯誤の上、上位機種の Phantom V2512 及び Kirana(英 Specialised Imaging Ltd.)を用いた。図 2 の引張型ホプキンソン棒法試験機は、2 本の入・出力棒(ともに材質 SUJ2、径 16 mm)と打撃円筒(材質 S45C、内径 16 mm 及び外径 22 mm)により構成され、入・出力棒と打撃円筒は各中心軸が一致するように配置されている。試験片は入・出力棒間に置かれ、入・出力棒には、応力波を計測するため、各棒の中央に、ひずみゲージを中心軸に関して対称に各位置で 2 枚貼付した(図中の Strain gauges)。試験片は通常のもの(図 3(a))と検力部付きのもの(同図(b))を用意し、DIC 法により応力履歴を測定する場合は検力部付きのものを用い、高速度カメラ側の面にエアブラシでランダム・パターンを作成して裏側に直接計測のための

ひずみゲージ (E-02W-12T11W3、ミネベア) を貼付した。試験時には、コンプレッサで3気圧程度に圧縮した空気により打撃円筒を発射し、入力棒端のフランジ部に衝突させて入力棒に引張(ひずみ)波 ε_i を入射させる。 ε_i は入力棒中を試験片に向かって伝ばし、試験片に到達すると、その一部は試験片を通して出力棒に伝ばし(透過波 ε_t)、残りは入力棒の試験片側端で反射してフランジ部に戻っていく(反射波 ε_r)。 ε_i 、 ε_t 、 ε_r は、ひずみゲージの出力電圧をブリッジ回路、動ひずみ計、オシロスコープ、A/Dコンバータを介してPCに記録した。ただし、試験片断面積が小さいため出力棒に伝わる荷重も小さく、出力棒には入力棒と同じ汎用箔ひずみゲージ (KFG-1-350-C1-11、共和電業)の他に、大きな出力を得られる半導体ひずみゲージ (KSP-2-120-E4、共和電業)も位置をずらして貼付した。高速度カメラによる撮影は、入力波形の立上りでトリガーをかけて同期を取り、試験片に貼付したひずみゲージからの出力も入・出力棒からの出力と同様にしてPCに記録した。

(2) 図4(a),(b)は動的有限要素法ソフトウェアLS-DYNAを用いて検力部の寸法とアスペクト比が応力分布と応力-ひずみ関係に及ぼす影響を調べたもので、対称性から同図(a)の各コーナー図は幅方向を半分のみ示している。(長さ l_L) / (幅 b_L) 比が大きくなるほど応力一様な領域の割合が大きくなるが、一方、(b)の応力-ひずみ関係の比較から l_L/b_L 比が大きいほど、ホプキンソン棒法による結果 (By usual NCHBM) の立上りの振動が大きくなる傾向が示された (By proposed method: 試験片からの直接計測)。これらの結果と実験結果を組み合わせると図3(b)の検力部付き試験片の寸法を決定した。図5(a),(b)には、入・出力棒からの出力波形と高速度カメラ (Phantom V2512、サンプリング間隔: 1.26 μ s) による撮影画像の例を示す。同図(a)において、この試験機は入・出力棒の長さが異なり、半導体ひずみゲージも出力棒の中央からずらして(試験片側端から40mmの位置)貼付して対応がわかりにくい、およそ1200 μ sまでが反射波の影響を受けず有効な計測データとなった。また、サンプリング間隔が小さいほど解像度を下げる必要があるため苦労したが、エアブラシにより(b)のような比較的鮮明なランダム・パターン

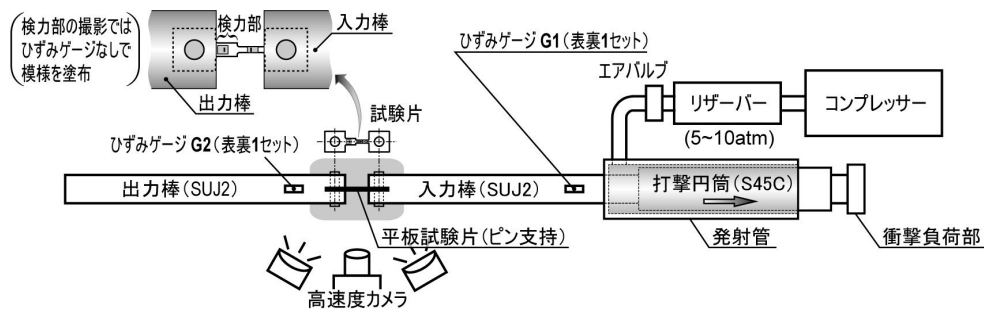


図1 引張型ホプキンソン棒法試験機、検力部付き試験片及び高速度カメラによる計測システム

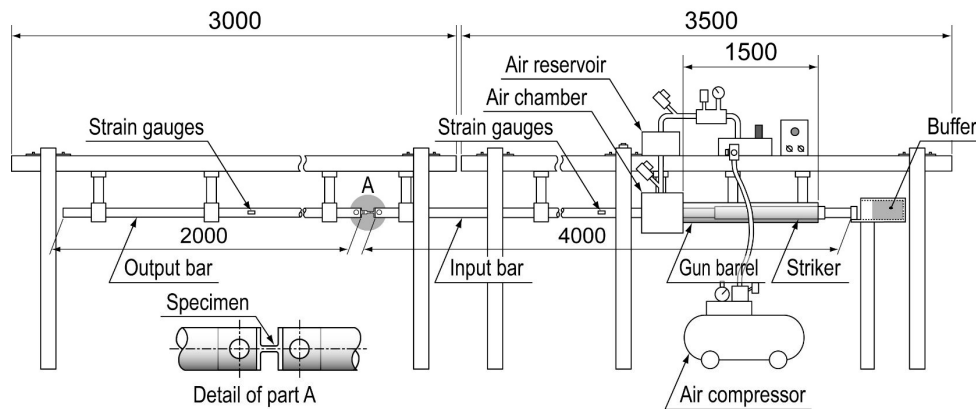


図2 引張型ホプキンソン棒法試験機の概略

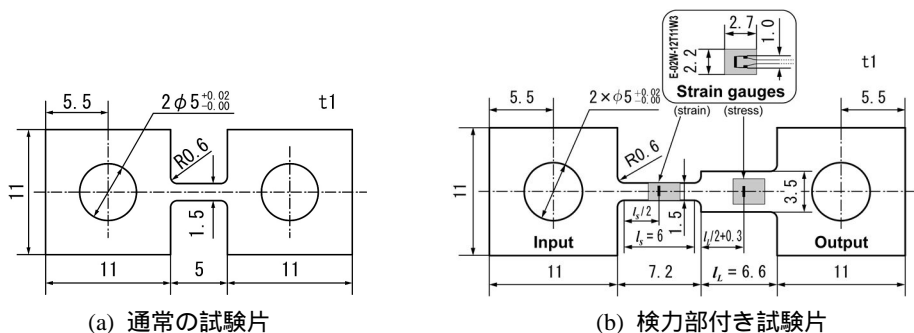
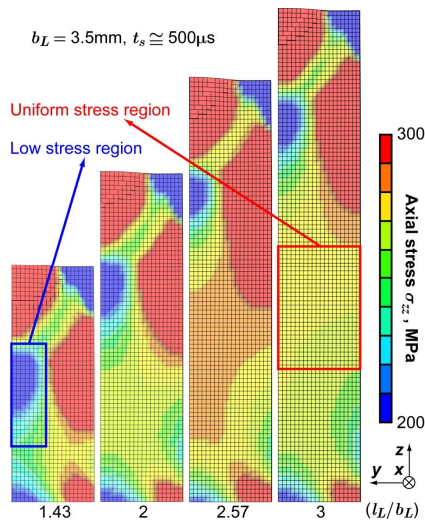
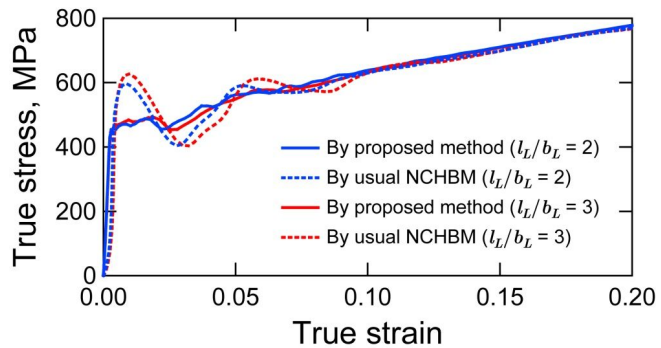


図3 試験片 (SUS316)

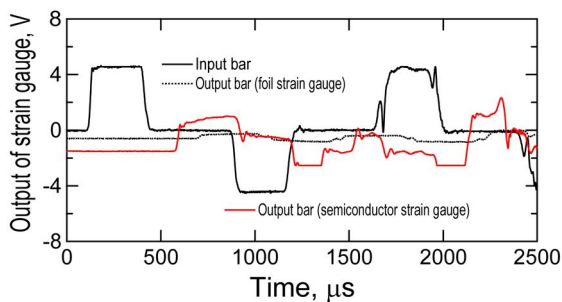


(a) 検力部の応力分布 (対称性から右半分のみ)

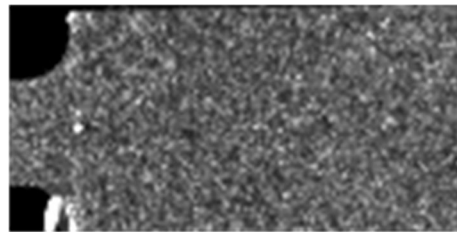


(b) 応力 - ひずみ関係の比較

図4 検力部の寸法とアスペクト比が応力 - ひずみ関係に及ぼす影響 (SUS316)

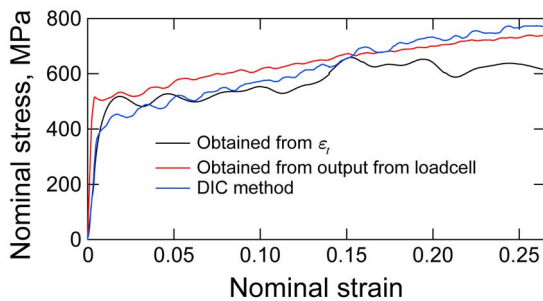


(a) 入・出力棒からの出力波形

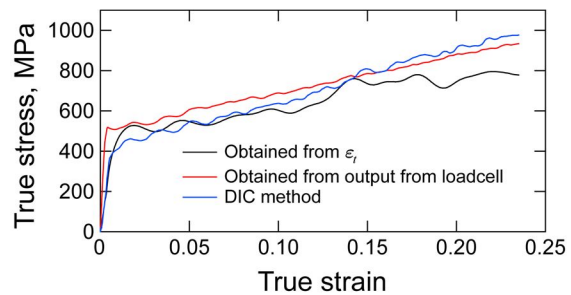


(b) 検力部の画像 (128×64 pixel)

図5 出力波形と高速度カメラ (Phantom V2512) による撮影画像の例 (SUS316)



(a) 公称応力 - 公称ひずみ関係



(b) 真応力 - 真ひずみ関係

図6 実験結果の例 (SUS316)

を作成できた。図6(a)、(b)は得られた公称応力 - 公称ひずみ関係、真応力 - 真ひずみ関係を示しており、それぞれ、従来のホプキンソン棒法による測定 (Obtained from ϵ_t)、試験片からの直接計測 (Obtained from output from loadcell)、DIC法による測定 (DIC method) の結果を比較している。DIC法による測定精度は、高速度カメラの指定サンプリング間隔 (1.26 μ s) における解像度に依存するものの、上位機種を用いることである程度良好な結果を得られることがわかった。

今回は、既存の高速度カメラの使用を断念して上位機種の高速度カメラをレンタルして実験を行ったが、そのタイミングで半導体ひずみゲージの出力が安定しないトラブルが起きてしまった。そのため、従来法による結果の測定精度がかなり低くなってしまったが、過去の検討結果から試験片からの直接計測が最も良好な結果と考えられる。今回初めて行ったDIC法による応力評価では、ひずみゲージのゲージ部に相当する検力部の箇所からのひずみ出力を平均化したが、DIC法におけるサブセットサイズやゲージ長の取り方により影響を受け、今までのところ試験片からの直接計測による結果との差異を十分小さく出来ていない。ホプキンソン棒法における新しい応力 - ひずみ関係の評価方法を実現したものの、DIC法による応力分布測定は検力部の微小な弾性変形を処理する必要があるため、その高精度測定のためには更なる検討が必要だと考えられる。

(3) 非鉄金属 (A7075、 β -チタン合金、AZ91) 及び樹脂材料 (PC、PA) について提案手法を適用した高速引張試験を実施した。A7075、 β -チタン合金、PAについては、鋼材と同様に処理で

きたが、AZ91 や PA は脆性的な変形挙動を示して破断ひずみも小さいため、引張型ホプキンソン棒法や DIC 法による処理が難しい結果となった。また、追加内定だったため半年遅れて開始したのと、とくに高速度カメラ関係のトラブルで実施が遅れて当該実験が最終年度までずれ込んだため、これらの論文投稿や学会発表は十分出来ていない。今後も引き続き、国内外での発表に努めていく予定である。

<引用文献>

榎田 努, 三村 耕司: 非共軸ホプキンソン棒法の測定精度に及ぼす試験片の拘束条件, 寸法の影響とその改善, 非破壊検査, **58-2** (2009), pp. 65-71.

Umeda, T. and Mimura, K., Accurate Measurement of Stress–Strain Relation under High Strain Rate Condition by Using Non-Coaxial Hopkinson Bar Method, Proceedings of DYMAT 2009, (2009), pp. 127-134.

Umeda, T. and Mimura, K., Measurement of Stress–strain Relation by Using Load-sensing Part Incorporated with Specimen under High Strain Rate Tension, Proceedings of Seventh International Symposium on Impact Engineering (ISIE2010), CD-ROM, (2010), pp.674-680.

榎田 努, 堀口 陽平, 山本 雄大, 三村 耕司: Hopkinson 棒法引張試験における応力直接計測の検討, 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス, No. 19-301, GS31 (PDF) (2019), Total 3 pages.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 榎田努, 堀口陽平, 山本雄大, 三村耕司
2. 発表標題 Hopkinson棒法引張試験における応力直接計測の検討
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀口陽平, 山本雄大, 佐藤貴一, 榎田努, 三村耕司
2. 発表標題 Hopkinson棒法引張試験機におけるDIC法併用による応力測定 of 検討
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 第95期定時総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤貴一, 堀口陽平, 山本雄大, 榎田努, 三村耕司
2. 発表標題 Hopkinson棒法引張試験におけるDIC法による試験片の応力測定
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会 2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Horiguchi
2. 発表標題 Improvement of Hopkinson Bar Device for Tension Tests Using DIC Method
3. 学会等名 The 2nd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science & Technology (JSAMST-2) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本 雄大, 堀口陽平, 榎田努, 三村耕司
2. 発表標題 Hopkinson棒法とDIC法の併用による高速変形中の試験片ひずみ分布の測定
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会 2018年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀口陽平, 榎田努, 三村耕司
2. 発表標題 引張型Hopkinson棒法試験機へのDIC法の導入
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会 2017年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考