

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02353

研究課題名（和文）超高速衝突からの損傷低減に資すテイラー衝撃試験法に基づく材料力学特性の高精度測定

研究課題名（英文）Higher precision measurement on mechanical properties of materials based on the Taylor impact test for reductions in damage from hyper velocity impacts

研究代表者

岩本 剛（Iwamoto, Takeshi）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：40274112

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：超高ひずみ速度域での材料力学特性の実測法であるテイラー衝撃試験法を拡張し、一回の測定で応力-ひずみ曲線、ひずみ速度、温度曲線の情報を高精度に得られる測定系を開発した。各要素技術の開発し、それらを総合した測定系についての実証と有用性の検証を行った。更に、空気から高压ガスへの変更により、衝突速度を向上させ、超高ひずみ速度における圧縮試験を実施し、未知なる熱・力学的材料特性が解明可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙開発の促進の観点から、10 s 以上のひずみ速度を対象とした超高ひずみ速度域の特性として高ひずみ速度域までの実測データからの推測値が用いられる場合が多く、超高速域ではひずみ速度に対する非線形性が認められるため、安全設計上のマージンを大幅に取らざるを得なかった。本研究の成果から、超高ひずみ速度域における、構造材料が持つ強度特性の非線形性の解明が可能となった。実際、以上は、「どの様にすれば超高ひずみ速度域の材料力学特性を簡便かつ正確に実測できるのか」は、長年多くの研究者が取り組んできた課題であり、その解決に役に立つ。

研究成果の概要（英文）：By extending the classical Taylor impact testing(TI) method, which is a method for measuring the mechanical properties of materials in the ultra-high strain rate range, we have developed a measurement system that can obtain highly accurate information on the stress, strain, strain rate, and temperature curve in a single measurement. We developed each elemental technology, and verified the usefulness of the integrated measurement system. Furthermore, by changing from air to high-pressure light gas, the impact velocity was improved, and compression tests were performed at ultra-high strain rates, making it possible to clarify unknown thermo-mechanical material properties.

研究分野：衝撃工学

キーワード：超高速衝突 損傷回避 材料力学特性 テイラー衝撃試験法 高精度測定

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙開発の促進の観点から、 $10^5/s$  以上のひずみ速度を対象とした超高ひずみ速度域における、構造材料が持つ強度特性の非線形性の解明が急務となっている。材料の力学特性試験は  $10^3/s$  までの高ひずみ速度域までにおいて確立されているが、宇宙ゴミの衝突による損傷の軽減など、宇宙開発の上で想定される  $10^5/s$  以上の超高ひずみ速度域ではテイラー式衝撃試験(TI)法が唯一の方法となる。しかし、従来 TI 法では一本の応力 - ひずみ、ひずみ速度(SS)曲線を描くために、膨大な試験回数が必要である。加えて、超高ひずみ速度域では熱軟化を表現するために必要不可欠である温度分布の実測が困難であり、従来考慮されていなかった。

このように、「どの様にすれば超高ひずみ速度域の材料力学特性を簡便かつ正確に実測できるのか」は、長年多くの研究者が取り組んできた学術的問いであり、未踏の領域でもある。実際、超高ひずみ速度域の特性として高ひずみ速度域までの実測データからの推測値が用いられる場合が多く、超高速域ではひずみ速度に対する非線形性が認められるため、安全設計上のマージンを大幅に取らざるを得ない。

申請者は、衝撃外力の測定の結果得られる応力分布に着目し、有限要素解析(FEA)を用いて、高速度カメラとホプキンソン棒(HPB)の併用により、ただ一度の試験で、超高ひずみ速度域における材料の SS 関係が得られる可能性を示した。

### 2. 研究の目的

これまで、HPB による衝撃外力測定と高速度カメラの併用により、ただ一度の試験で、超高速域における材料の SS 関係が得られる可能性を示してきた。これを受け本課題では、超高ひずみ速度域での材料力学特性の実測法である TI 法を拡張し、一回の測定で SS 曲線、ひずみ速度、温度曲線の情報を高精度に得られる測定系の開発を目的とする。各要素技術の開発し、それらを総合した測定系についての実証と有用性の検証を行う。更に、空気から高压ガスへの変更により、衝突速度を向上させ、超高ひずみ速度における圧縮試験を実施し、未知なる熱・力学的材料特性が解明可能となる。

### 3. 研究の方法

本研究は、外力、変形、速度、さらに超高速領域試験では未知であった温度分布を高速イメージングとファイバーセンシング等の組合せにより、実時間で測定する拡張 TI 法を実証し、各要素技術を高精度化することで一度の試験回数により、単一の SS 曲線が得られる手法として確立させる。

以下で詳細に説明する項目を設定し、並行して3年間で実施する。

#### ①検力装置の製作と計測装置の構築

試験片によるくぼみ変形の低減のため、超硬質の炭化タングステンを用い、衝撃外力を計測することが可能な HPB に基づく検力装置を製作する。超高速域では 1MHz を超える帯域が必要となることから、FBG センサを用いる。FBG センサを曲げ消去のため軸方向同位置に 2 個固定し、温度補償用 FBG センサも用いる。中島ら(機械学会論文集, 2012)に従って、FBG センサからの反射光を電圧に換算し、AD 変換器を通じて電圧の時刻歴を記録する。

既開発のテイラー式衝撃試験装置への実装と外力の時刻歴計測

の検力装置を実装する。その後、純アルミを対象に実際に試験を実施し、外力の時刻歴を計測し、所望の高速な計測が可能であることを確認する。

高速度カメラによるひずみ分布計測

の試験と同時に、今回申請の高速度カメラを使用し、試験片が HPB 端面に衝突する動画を撮影する。動画から静止画を得て、画像中の試験片外形から半径ひずみを計測し、変形中体積一定の仮定に従って試験片軸方向のひずみを算出し、時々刻々のひずみ分布を得る。

内力分布の算出と SS 曲線の取得

内力が弾性と塑性の 2 つの領域において異なる空間勾配を持つと仮定し、2 直線近似により内力分布を得る。内力分布に の外力値を導入し、 の結果から断面積分布を求め、両者の除算により応力分布を得る。ある時刻における応力分布と のひずみ分布を重ね合わせ、SS 曲線を一度の試験で得ることを試みる。

質量保存則に基づくひずみ速度分布測定

ある瞬間の 1 枚の画像に対してひずみ速度分布を求めるため、質量保存則と、 で仮定した応力分布の勾配、および塑性波粒子速度の理論を適用し、瞬間における 1 枚の画像に対して、ひずみ分布および自由端変位加速度の算出を試みる。

変形中の温度測定の試み

保有の赤外線温度測定用素子と光ファイバを用いて遠隔測定を試みる。試験片が HPB の一端に衝突する直前の位置に光ファイバの一端を設置し、試験片の一点における温度の時刻歴を測

定する。 のひずみ分布と の応力分布より、断熱変形を仮定し、温度分布を算出する。

検証実験の実施と FEA による妥当性検討

既開発の小型分割式 HPB 法、拡張前の TI 法試験、作成済みの FEA モデルを用いた商用コードにより、温度、ひずみ速度の測定を含めて、本研究の結果と比較し、妥当性を検討する。

#### 4. 研究成果

本研究の成果より、超高ひずみ速度域での材料力学特性の実測法である TI 法を拡張し、一回の測定で SS 曲線、ひずみ速度、温度曲線の情報を高精度に得られる測定系を開発した。各要素技術の開発し、それらを総合した測定系についての実証と有用性の検証を行った。更に、空気から高圧ガスへの変更により、衝突速度を向上させ、超高ひずみ速度における圧縮試験を実施し、未知なる熱・力学的材料特性が解明可能となることを示すことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Chong Gao and Takeshi Iwamoto	4. 巻 206
2. 論文標題 Measurement of transient temperature at super-high-speed deformation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmecsci.2021.106626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chong Gao and Takeshi Iwamoto	4. 巻 157
2. 論文標題 An instrumented Taylor impact test for measurement of stress-strain curve through single trial	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Impact Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijimpeng.2021.103980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chong Gao and Takeshi Iwamoto	4. 巻 250
2. 論文標題 A study on measuring distribution of temperature for instrumented Taylor impact test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202125001028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chong Gao, Takeshi Iwamoto, Yoshikazu Tanaka and Takayuki Kusaka	4. 巻 179
2. 論文標題 Numerical and experimental studies on specimens with integrated pulse-shaper used for the instrumented Taylor impact test to measure stress-strain curves at high rates of strain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Impact Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijimpeng.2023.104644	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 高崇, 岩本剛
2. 発表標題 Taylor式衝撃試験中の瞬間におけるひずみ速度測定法の検討
3. 学会等名 日本材料学会第13回材料の衝撃問題シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北野孝歩, 高崇, 倉元啓志, 岩本 剛
2. 発表標題 衝撃圧縮試験における赤外線検出素子を用いた純アルミニウムの温度変化測定
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部学生会第51回学生員卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高崇, 北野孝歩, 岩本剛
2. 発表標題 計装化Taylor衝撃試験における温度測定分布について
3. 学会等名 日本材料学会第70期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chong Gao and Takeshi Iwamoto
2. 発表標題 A Study on Measuring Distribution of Temperature for Instrumented Taylor Impact Test
3. 学会等名 13th INTERNATIONAL CONFERENCE on MECHANICAL and PHYSICAL BEHAVIOUR of MATERIALS under DYNAMIC LOADING (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒田 奈央子, 高 崇, 岩本 剛, 田中 義和
2. 発表標題 PIRファイバー及びPVDFを用いた計装化Taylor衝撃試験における材料の熱・力学特性の測定に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高 崇, 日下 貴之, 岩本 剛, 田中 義和
2. 発表標題 超高速度下における材料の熱・力学的挙動測定のための計装化Taylor衝撃試験の提案
3. 学会等名 日本材料学会衝撃部門委員会第165回公開部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高 崇, 岩本 剛, 田中 義和, 日下 貴之
2. 発表標題 パルスシェーパーを導入した計装化 Taylor 衝撃試験における応力 ひずみ曲線同定
3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoko Sakata, Chong Gao, Takeshi Iwamoto, Yoshikazu Tanaka
2. 発表標題 A measurement of impact force by PVDF for instrumented Taylor impact test
3. 学会等名 3rd International Conference on Impact Loading of Structures & Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chong Gao, Takeshi Iwamoto, Yoshikazu Tanaka and Takayuki Kusaka
2. 発表標題 Suppression of extra oscillations on impact force wave in instrumented Taylor impact test by pulse-shaping technique
3. 学会等名 3rd International Conference on Impact Loading of Structures & Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒田 奈央子, 高 崇, 岩本 剛, 田中 義和
2. 発表標題 計装化 Taylor 衝撃試験における PVDF を応力棒に用いた衝撃力測定の試み
3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田 瑛晟, 酒田 奈央子, 高 崇, 岩本 剛
2. 発表標題 超高速域における純Ti及びMg合金の計装化Taylor試験
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒田 奈央子, 高 崇, 岩本 剛, 田中 義和
2. 発表標題 計装化Taylor衝撃試験におけるPVDFセンサの非対角成分圧電効果を利用した衝撃外力波の測定
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高 崇, 石田 瑛晟, 酒田 奈央子, 岩本 剛, 日下 貴之
2. 発表標題 単段式軽ガス銃を導入した計装化Taylor 衝撃試験による軽金属の変形挙動の評価
3. 学会等名 日本材料学会第72期学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒田 奈央子, 高 崇, 岩本 剛, 田中 義和
2. 発表標題 PIRファイバならびに圧電フィルムを導入した計装化Taylor衝撃試験による材料の熱・力学特性測定
3. 学会等名 日本材料学会第72期学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chong Gao, Takeshi Iwamoto, Yoshikazu Tanaka and Takayuki Kusaka
2. 発表標題 An Instrumented Taylor Impact Test to Obtain the Stress-strain Curves of Materials at the Hyper Velocity
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Impact Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究協力者	日下 貴之  (Kusaka Takayuki)		



6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	田中 義和  (Tanaka Yoshikazu)		
研究協力者	高 崇  (Gao Chong)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関