

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14846

研究課題名（和文）球体高速衝突試験による材料の温度・ひずみ速度依存性評価手法の確立

研究課題名（英文）Development of estimation method for temperature and strain rate dependencies via ball impact test

研究代表者

伊藤 潔洋 (Ito, Kiyohiro)

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：10778210

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：金属材料の変形抵抗は温度やひずみ速度に依存して変化する。本研究では、この温度やひずみ速度依存性の簡便かつ高精度な評価を実現するため、球体衝突試験に基づく独創的評価手法を開発した。開発手法では、異なる温度もしくは衝突速度での球体衝突試験により形成した圧痕寸法差から温度やひずみ速度依存性を高精度に評価することができる。有限要素法による球体衝突解析の結果、開発手法により様々な材料、球体半径、衝突速度の条件下で温度やひずみ速度依存性を高精度に推定可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で新たに開発した評価手法では、異なる温度もしくは衝突速度で球体衝突試験を行い、材料表面に形成した圧痕寸法を測定するだけで温度やひずみ速度依存性を高精度に評価することができる。さらに、既存の評価手法では困難であった100000 1/s以上の超高ひずみ速度を実現できる。これにより、自動車などの輸送機器の衝突安全性向上や、切削やプレスといった機械加工の高速・高効率化など、幅広い産業分野への貢献が期待できる。また、超高ひずみ速度下における材料の変形メカニズムの解明にも有効となり得ることが期待でき、高い学術的意義も有している。

研究成果の概要（英文）：The deformation resistance of metallic materials varies depending on the temperature and strain rate. In order to realize simple and high-accuracy estimation of the temperature and strain rate dependencies, an original estimation method based on the ball impact test was developed. Using this method, the temperature and strain rate dependencies can be estimated with high-accuracy from the difference between indentation sizes formed by the ball impact test at different temperatures or different impact velocities. The ball impact analysis based on the finite element method demonstrated that the temperature and strain rate dependencies can be estimated with high-accuracy under the conditions of various materials, ball radii, and impact velocities by the developed method.

研究分野：材料力学・機械材料学

キーワード：ひずみ速度依存性 温度依存性 球体衝突 金属材料 圧痕

1. 研究開始当初の背景

金属材料の変形特性(応力 - ひずみ関係)は、ひずみ速度依存性や温度依存性を示すことが知られる。一般的な機械構造物の設計は、準静的な引張試験などによって得られる機械的特性に基づいて行われる。しかしながら、自動車や航空機などの輸送機器における衝突安全性の問題、鍛造やプレスといった塑性加工の問題などにおいては、材料のひずみ速度や温度依存性の影響を無視できない。これらの問題を扱う場合、ひずみ速度や温度依存性を考慮した構成式を用いた有限要素解析(FEA)を行うことが主流となっている。高精度な解析を行うためには、幅広いひずみ速度および温度域にわたる材料の構成式が必須となる。

ひずみ速度と温度依存性を考慮した構成式として、以下の式で表される Johnson-Cook (JC) 構成式は衝突解析や塑性加工解析に広く用いられている。

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right)^m \right\} \quad (1)$$

右辺第1項は加工硬化、第2項はひずみ速度依存性、第3項は温度依存性を表している。式中の A, B, C, n, m は材料定数であり、 C と m がそれぞれひずみ速度と温度依存性に関する材料定数である。これらの材料定数は実験によって求める必要がある。ひずみ速度依存性(材料定数 C) の評価に関しては、スプリット・ホプキンソン棒(SHB)法が最も実績のある試験法として知られる。しかしながら、装置が長手方向に大型化してしまうことや、正確な測定には熟練した技術と経験が要求されるなどの課題がある。また、高温環境下で試験を行うことは困難であり、温度依存性(材料定数 m)については別な試験によって評価しなければならない。そのため、材料のひずみ速度および温度依存性を簡便に評価できる手法へのニーズが高まっている。

2. 研究の目的

本研究では、ひずみ速度依存性と温度依存性が考慮された JC 構成式の材料定数 C と m について、球体衝突試験により簡便に評価する手法を確立することを目的とした。

JC 構成式の材料定数を取得するためには、従来、室温下での準静的引張試験による A, B, n の評価、室温下での SHB 試験による C の評価、高温下での準静的引張試験による m の評価を行う必要があった。しかしながら、高温下での準静的引張試験や SHB 試験には特殊な試験機が必要であり、精度よく測定を行うには熟練した技術と経験が要求されるなどハードルが高い。

本研究では、SHB 試験に替わる簡便な試験法として球体衝突試験に着目した。すなわち、室温および高温下で球体衝突試験を行い、その結果得られる圧痕寸法からこれらの材料定数を推定できるものと考えた。具体的には、まず室温下での準静的引張試験により A, B, n を評価し、室温下での球体衝突試験により C を評価する。また、高温下での球体衝突試験により m を評価する。球体衝突試験後の圧痕寸法を測定するのみのため、技術や経験が不要な簡便な評価手法となり得る。さらに簡便な手法として、異なる速度下もしくは温度下における球体衝突試験により得られる2つの圧痕寸法から材料定数 C と m を推定する手法を考案し、有限要素法による球体衝突解析によりその妥当性を評価した。

3. 研究の方法

(1) 高温下球体衝突試験装置の開発

既存の球体衝突試験装置を改造することで、高温下で球体衝突試験が可能な高温下球体衝突試験装置を開発した。試験片の最大温度を 1000°C とし、直径 $1 \sim 8 \text{ mm}$ の球体を最大 700 m/s で衝突可能とすることを目標とした。球体の速度測定には特注の速度測定装置(ヤマトハンズ)を用い、2本のレーザが遮られる時間差に基づいて速度を測定した。また、減圧チャンバー内にヒータと試験片を設置することで、試験片の酸化を抑制する構造とした。

(2) 球体衝突により形成される圧痕寸法予測理論の構築

球体の衝突過程におけるエネルギー保存則に基づいて、球体衝突により形成される圧痕寸法予測理論の構築を行った。球体は剛体(反発時のみ弾性体)、試験片は JC 構成式に従う弾塑性体と仮定し、準静的押込み問題に適用されるキャビティモデルを衝突問題に拡張することで圧痕寸法の予測精度の向上を図った。本理論では、JC 構成式の材料定数が全て既知であることを前提としており、球体の衝突条件が決まれば試験片に形成される圧痕寸法を予測することができる。市販の汎用有限要素解析コード Marc (Ver.2010, MSC software) を用いて球体衝突解析を行い、本圧痕寸法予測理論の妥当性を評価した。また、C1020, SUS304, S15C に対して準静的引張試験を行うことで A, B, n を評価するとともに、開発した装置を用いて球体衝突試験を行い、予測精度を検証した。

(3) 準静的引張試験と球体衝突試験に基づいた材料定数 C の評価

前述の圧痕寸法予測理論では、JC 構成式材料定数が全て既知であれば圧痕寸法を予測することができる。一方、JC 構成式材料定数 C のみが未知の場合、圧痕寸法が既知であれば材料定数 C を推定できる。そこで、C1020, SUS304, S15C に対して室温下で準静的引張試験を行い材料定数 A, B, n を評価し、球体衝突試験を行うことで圧痕寸法を評価した。これらの結果から、圧痕寸法予測理論に基づいて各材料の材料定数 C を評価した。なお、材料定数 m については文献値を仮定した。また、得られた結果を高速引張試験（目標ひずみ速度 100 s^{-1} 、島津製作所にて実施）の結果と比較した。

(4) 圧痕寸法差に基づいた材料定数 C および m の推定理論の構築

前述の圧痕寸法予測理論に基づいて材料定数 C を評価するためには、球体衝突試験のみならず準静的引張試験も行う必要がある。そこで、球体衝突試験により得られる圧痕寸法のみから材料定数 C と m を推定可能な手法を新たに考案し、推定理論の構築を行った。図 1 に本理論の概念図を示す。図のように、材料定数 C を評価する場合、同一曲率半径を有する 2 つの衝突体を異なる速度かつ同等の衝突エネルギーで試験片表面に衝突させる。このとき、表面に形成される 2 つの圧痕寸法にはひずみ速度依存性に応じただけ差が生じる。すなわち、これらの圧痕寸法差から材料定数 C を理論的に推定可能であるものと考えられる。材料定数 m を評価する場合、異なる温度に保持した試験片表面に対し、同一質量・寸法の 2 つの衝突体を同一速度で衝突させる。同様に、両者の圧痕寸法差から材料定数 m を推定可能であるものと考えられる。市販の汎用有限要素解析コード Marc (Ver.2020, MSC software) を用いて球体衝突解析を行い、構築した理論の妥当性を評価した。

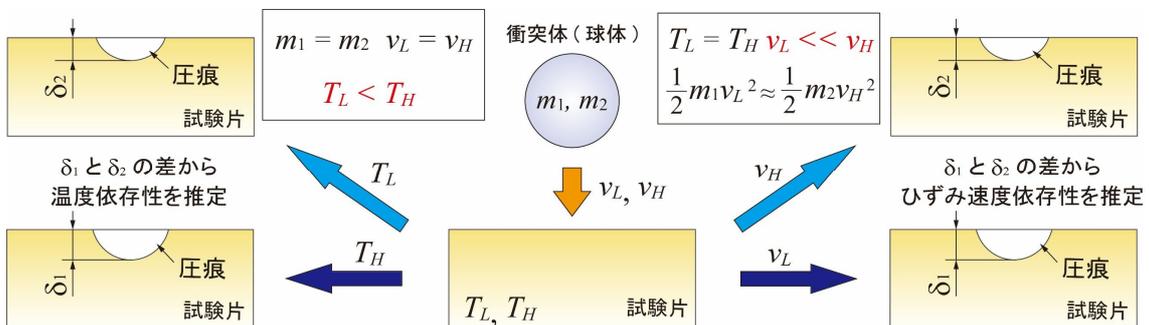


図 1：球体衝突試験により得られる圧痕寸法差に基づく材料定数 C と m の推定理論の概念図

4. 研究成果

(1) 高温下球体衝突試験装置の開発

開発した試験装置の外観写真、および球体衝突試験後の圧痕外観写真の一例を図 2 に示す。搭載したヒータ (275 W, VC401E06A, 坂口電熱) の出力不足のため、最大温度は 900°C に留まったが、幅広い温度範囲において球体衝突試験が可能であることを確認した。また、図のように、室温および 500°C においてほぼ同一の衝突速度で SUS304 に対し球体衝突試験を行った場合、圧痕寸法が顕著に異なることを確認した。これは、圧痕寸法差に基づく温度依存性評価の可能性を示唆するものである。

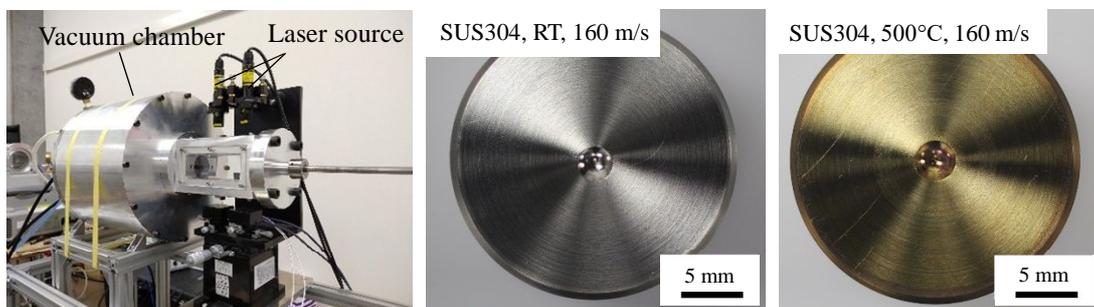


図 2：開発した球体衝突試験装置の外観写真，球体衝突試験後の試験片外観写真：室温および 500°C においてほぼ同一の衝突速度で球体衝突試験を行った場合、圧痕寸法が顕著に異なることを確認した。

(2) 球体衝突により形成される圧痕寸法予測理論の構築

球体の衝突過程におけるエネルギー保存性は、球体の衝突エネルギーが試験片の塑性変形エネルギーと球体の反発エネルギーにのみ費やされると仮定すると、以下のように表される。

$$\frac{1}{2} m_p v_i^2 - \frac{3\pi^2 p^2 a_{p\text{ite}}^3}{20E^*} - \int_0^{\delta_p} p \cdot \pi a_{p\text{ite}}^2 d\delta = 0 \quad (2)$$

ここで、左辺第1項は球体の衝突エネルギー、第2項は球体の反発エネルギー、第3項は試験片の塑性変形エネルギーを表している。第3項の積分範囲である δ_p は除荷後の塑性変形のみによる圧痕深さである。また、 a_{pile} は圧痕縁の盛り上がり部の半径である。 p は球体/試験片間の動的接触圧力であり、 p の適切な評価が圧痕寸法の高精度な予測の鍵となる。準静的な押し込み問題に適用されるキャビティモデルを衝突問題に拡張することにより、 p を次式のように定式化した。

$$p = \frac{2}{3}\sigma_E + 2 \int_{R_{cav}}^c \frac{\sigma_y}{r} dr + \frac{3}{2}k\rho_t \bar{v}^2 \quad (3)$$

式中の σ_E は変形前の初期降伏応力、 σ_y は塑性変形後の流動応力であり、式(1)のJC構成式を適用した。さらに、圧痕近傍の塑性ひずみ分布は、球体半径により無次元化された圧痕深さのみに依存することに基づいて塑性ひずみ分布と塑性ひずみ速度を定式化するとともに、断熱変形を仮定することで温度分布を定式化した。以上より、材料定数が全て既知の場合、式(2)を数値解析的に解くことで圧痕深さ δ_p の予測が可能である。

C1020, SUS304 および S15C に対する球体衝突試験により得られた圧痕深さと圧痕寸法予測理論 (PMIS) により予測された圧痕深さを図3に示す。図のように、材料や衝突速度によらず圧痕深さの予測値は実験値と高精度に一致することを示した。

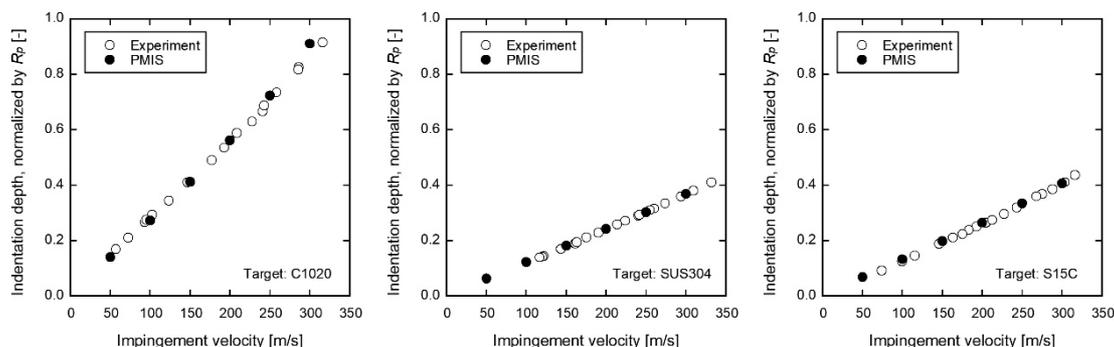


図3：C1020, SUS304 および S15C に対する球体衝突試験により得られた圧痕深さと圧痕寸法予測理論 (PMIS) により予測された圧痕深さ：材料や衝突速度によらず圧痕深さの予測値は実験値と高精度に一致することを示した。

(3) 準静的引張試験と球体衝突試験に基づいた材料定数 C の評価

準静的引張試験により得られた材料定数 A, B, n 、および球体衝突試験により得られた圧痕深さから圧痕寸法予測理論 (PMIS) により推定された材料定数 C を図4に示す。図中の黒と灰色の直線は準静的引張試験と高速引張試験により得られた材料定数 C の下限値と上限値を示している。球体衝突試験と高速引張試験ではひずみ速度が顕著に異なるものの、両者の結果は概ね一致することを示した。

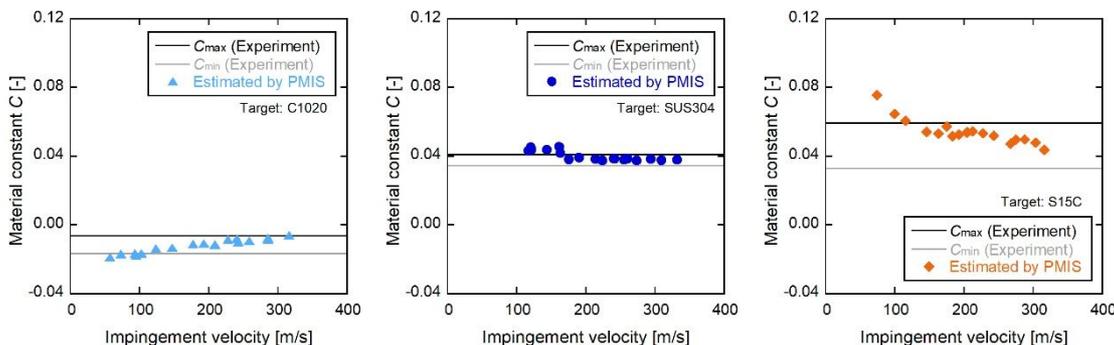


図4：準静的引張試験と球体衝突試験の結果から圧痕寸法予測理論 (PMIS) により推定された材料定数 C ：推定値は実験値と概ね一致することを示した。

(4) 圧痕寸法差に基づいた材料定数 C および m の推定理論の構築

球体の衝突過程におけるエネルギー保存式から、衝突過程における平均流動応力は以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_y = \frac{U_{imp} - U_{reb}}{3V_p} - \frac{1}{2}k\rho_t \bar{v}^2 \quad (4)$$

ここで、 U_{imp} は衝突エネルギー、 U_{reb} は反発エネルギー、 V_p は圧痕体積である。すなわち、異な

る衝突速度かつ同等の衝突エネルギーで球体衝突試験を行った場合に得られる圧痕寸法から、それぞれの平均流動応力を評価できる。圧痕寸法差が小さい場合、両者の塑性ひずみ分布は同等とみなせることから、低速度側の衝突速度が準静的とみなせる場合、材料定数 C は次式で求められる。

$$C = \frac{\left(\frac{\bar{\sigma}_{yH}}{\bar{\sigma}_{yL} \bar{D}(T_H)} - 1 \right)}{\bar{F}(\dot{\epsilon}_{pH})} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{F}(\dot{\epsilon}_p)$ および $\bar{D}(T)$ は、式(1)中のひずみ速度および温度依存性に関する項の衝突過程における平均値である。また、下添字 L と H は低速度および高速度の値であることを示す。

同様に、異なる温度下での球体衝突試験により得られる圧痕寸法から、それぞれの平均流動応力を評価できる。この場合、以下の式が成り立つ。

$$\frac{\bar{\sigma}_{yL}}{\bar{D}(T_L)} = \frac{\bar{\sigma}_{yH}}{\bar{D}(T_H)} \quad (6)$$

ここでの下添字 L と H は室温および高温の値であることを示す。式(6)を数値解析的に解くことで温度依存性に関する材料定数 m の推定が可能である。

FEA により得られた圧痕深さから推定された材料定数 C と FEA への入力値との関係を図 5 に示す。様々な材料について衝突速度によらず両者は高精度に一致しており、構築した理論により材料定数 C を高精度に推定可能であることを確認した。FEA により得られた圧痕深さから推定された材料定数 m と FEA への入力値との関係を図 6 に示す。様々な衝突速度、球体半径、および材料について両者は高精度に一致しており、構築した理論により材料定数 m を高精度に推定可能であることを確認した。本理論により、異なる衝突速度もしくは異なる温度下で球体衝突試験を行い、圧痕寸法を測定するだけという極めて簡便な手法で、流動応力のひずみ速度依存性と温度依存性の高精度な評価を実現した。さらに、球体衝突試験や落錘試験などによって $10^2 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ の広範囲のひずみ速度を実現可能であり、高ひずみ速度下の変形メカニズムを解明する上でも有効な手法であると考えられる。

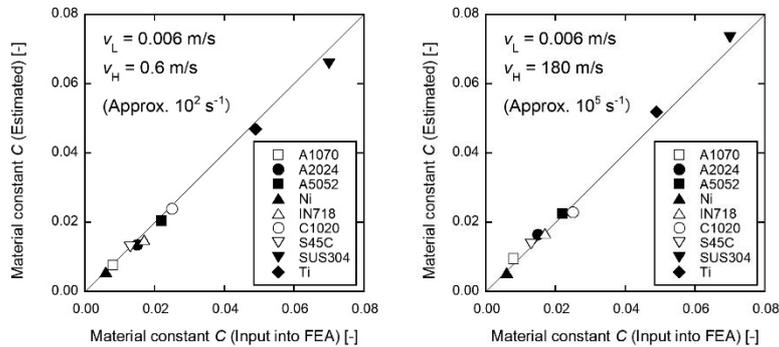


図 5：FEA により得られた圧痕深さから推定された材料定数 C と FEA への入力値との関係：材料や衝突速度によらず推定値は実験値と高精度に一致することを示した。

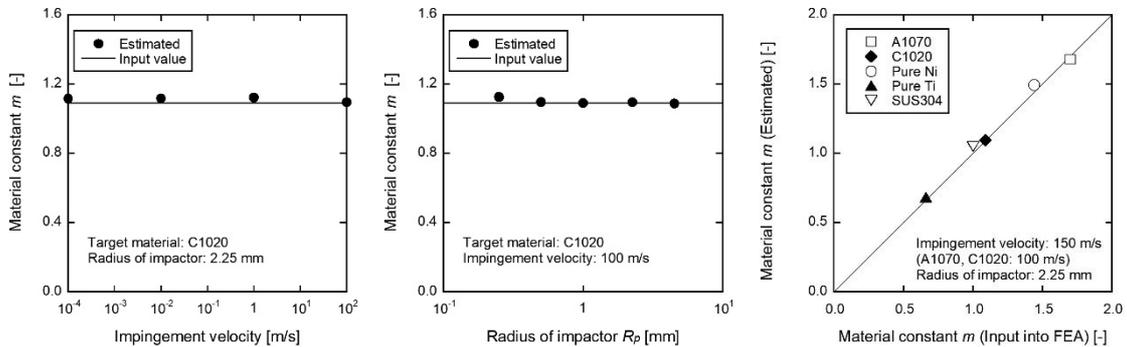


図 6：FEA により得られた圧痕深さから推定された材料定数 m と FEA への入力値との関係：衝突速度、球体半径および材料によらず推定値は実験値と高精度に一致することを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 伊藤潔洋, 荒井正行	4. 巻 -
2. 論文標題 圧痕寸法差に基づく広範囲のひずみ速度下における流動応力の温度依存性推定手法の提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料	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) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kiyohiro Ito, Masayuki Arai	4. 巻 189
2. 論文標題 Simple estimation method for strain rate sensitivity based on the difference between the indentation sizes formed by spherical-shaped impactors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 106007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2020.106007	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 Kiyohiro Ito, Masayuki Arai	4. 巻 2309
2. 論文標題 Effectiveness of prediction method of indentation size formed by high-velocity impingement of a solid sphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 20047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0034344	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 伊藤潔洋, 村松寿和, 荒井正行	4. 巻 86
2. 論文標題 球体高速衝突試験に基づく材料のひずみ速度依存性推定手法の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 20-00060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kiyohiro Ito, Masayuki Arai	4. 巻 142
2. 論文標題 Expanding cavity model combined with Johnson-Cook constitutive equation for the dynamic indentation problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Engineering Materials and Technology	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4045329	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3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Kiyohiro Ito, Masayuki Arai
2. 発表標題 Prediction of indentation size formed by a high-velocity impingement of a solid sphere based on an expanding cavity model
3. 学会等名 18th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤潔洋, 荒井正行
2. 発表標題 球体の高速衝突問題に拡張されたキャピティモデルに基づく圧痕寸法の予測
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 伊藤潔洋, 荒井正行
2. 発表標題 球体の高速衝突により形成される圧痕寸法予測モデルの有効性
3. 学会等名 日本材料学会第69期学術講演会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------