

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709004

研究課題名(和文)インデンテーションによる動的構成式定数の導出方法の開発

研究課題名(英文)Development of Derivation Method of Dynamic Constants for Constitutive Equation by Indentation

研究代表者

山田 浩之(Yamada, Hiroyuki)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・准教授)

研究者番号：80582907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：現在の輸送機器の設計開発は、構造材料のひずみ速度依存性を考慮した構成式を利用して解析を行うことが主流である。その際、高精度な構成式が必要となる。そこで、スプリット・ホプキンソン棒法等の高速変形試験装置を利用して材料の動的強度特性の調査が行われている。しかし、これらの装置は、使用者に知識と熟練した技術を必要とし、利用拡大を妨げている。そこで、従来、インデンテーションにおいて誤差因子として処理されたひずみ速度の影響を逆転の発想により活かす方策を考え、インデンテーションを利用した構成式定数を導出する方法を開発した。同時に、インデンテーションに及ぼすひずみ速度の影響に関する物理的な意味を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the present design and development of transportation equipment, it is mainstream to conduct simulation analysis using a constitutive equation considering the strain rate dependence of the structural material. In that case, a high-precision constitutive equation is required. Therefore, the dynamic strength properties of the materials are investigated using a high-rate deformation test apparatus such as the split Hopkinson pressure bar method. However, these apparatus require knowledge and skills for users, which hinders the expansion of use to public in general. Therefore, considering to utilize the effect of the strain rate processed as an error factor in the indentation test by the reversal idea, a simple evaluation method of dynamic constants for constitutive equation using the indentation has been developed. In addition, we clarified the physical meaning of the effect of the strain rate on the indentation.

研究分野：衝撃工学，材料力学，機械材料学

キーワード：インデンテーション ひずみ速度 材料構成式 スプリット・ホプキンソン棒法 有限要素法 代表ひずみ速度

1. 研究開始当初の背景

現在の輸送機器の設計開発は、構造材料の動的強度特性(ひずみ速度依存性)を考慮した構成式を利用してシミュレーション解析を行うことが主流である。その際、高精度な構成式が必要となる。そこで、スプリット・ホプキンソン棒(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)法等の高速変形試験装置を利用して材料の動的強度特性の調査が行われている^[1, 2]。しかし、これらの装置は、使用者に知識と熟練した技術を必要とし、社会一般への利用拡大を妨げている。よって、SHPB 法等の従来法に代わり、簡易的に動的強度特性を取得できる方法の構築が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、SHPB 法に代わり、インデンテーションの結果から簡易的に動的強度特性(構成式定数)を導出する方法を開発することである。従来、押込試験において誤差因子として処理されたひずみ速度の影響を逆転の発想により材料強度特性として活かす試みを本研究の主眼とする。同時に、インデンテーションに及ぼすひずみ速度の影響に関する物理的な意味を理解する。

3. 研究の方法

単軸試験は、準静的試験をインストロン万能試験装置で、衝撃試験はスプリット・ホプキンソン棒法を使用した。得られた応力-ひずみ関係のひずみ速度依存性を構成則(Cowper-Symonds 構成式^[3])として表現し、実験および解析の基礎とした。

押込量がマイクロオーダーのインデンテーションは、島津製作所製ダイナミック超微小硬度計 DUH-201 を使用した。負荷速度一定で圧子を制御している。一方、変位量をマイクロメートルからミリメートルまで拡張し、微視スケールの影響を低減できる「マルチスケールインデンテーション」を実施した。

マルチスケールインデンテーションは、従来のマイクロインデンテーションと比較すると、微視スケール(酸化膜厚さ、結晶粒径および方位、表面粗さなど)に起因した試験結果のばらつきは低減され、信頼性の高い実験結果を得ることが可能となった。また、準静的インデンテーションおよび落錘試験装置を応用した衝撃インデンテーションを行うことで、幅広い範囲の速度依存性の評価ができた。

解析は、有限要素(FEM)解析を行い、実験では測定できない、材料内部の変形場の予測を試みた。

4. 研究成果

(1) インデンテーションによる材料構成則の決定「応答曲面法による逆解析手法」

インデンテーションで得られる荷重-変位関係は、下記の二乗関係式が成立するとされている。

$$P = Ch^2 \quad (1)$$

ここで、 C は負荷曲率と呼ばれている。負荷曲率は材料や圧子角度に依存する値とされてきた。しかし、Suresh ら^[4]は衝撃押込試験の実験および有限要素解析から、負荷曲率はひずみ速度の影響により変化すると指摘した。よって、これまでの研究から負荷曲率は次式のように表すのが適切である。

$$C = f(E^*, \sigma_s, n, \alpha, \dot{\epsilon}, T) \quad (2)$$

まず、負荷曲率にひずみ速度の影響が作用することを利用し、応答曲面法^[5]による逆解析手法により簡易的に材料構成則定数を決定することを考えた。

本研究では、ひずみ速度を考慮できる構成式として、Cowper-Symonds の式を利用する。ひずみ速度が零の場合の仮想的な静的応力、ひずみ関係を σ_s 、動的構成式定数を m, γ とすると次式^[3]で表される。

$$\sigma = \sigma_s \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\gamma} \right)^m \right] \quad (3)$$

以下に逆解析の手順を示す。

動的構成式定数である m と γ を変化させた 63 種類の材料に対し、インデンテーションを行う。

インデンテーションから得られた負荷曲率と変位の関係(負荷曲率曲線)を式(1-14)のように関数化し、データベースを構築する。負荷曲率の収束値(C_∞)は材料により異なるため、負荷曲率は C_∞ で正規化する。

$$\frac{C}{C_\infty}(m, g, h) = \frac{1}{ah+b} + c+1 \quad (4)$$

ここで、 a, b, c は特性値と呼ばれており、解析から得られた負荷曲率曲線に対しフィッティングすることで決定する。

決定した特性値と m, γ を 3 次式で次式のように表すことで応答曲面を作成する。

$$RS_j(m, g) = a_9^{(j)}m^3 + a_8^{(j)}m^2 + a_7^{(j)}m + a_6^{(j)}mg + a_5^{(j)}m^2g + a_4^{(j)}mg^2 + a_3^{(j)}g^3 + a_2^{(j)}g^2 + a_1^{(j)}g + a_0^{(j)} \quad (5)$$

評価したい材料に対し、インデンテーションを行い、負荷曲率曲線を得る。

作成した応答曲面に負荷曲率曲線を入力する。

入力データと応答曲面から得られる負荷曲率曲線の最小二乗誤差が最も小さい m と γ をその材料の動的構成式定数とする。

上記手法により、インデンテーションのみで簡便に材料強度のひずみ速度依存性を評価することが可能となった。しかし、本来ならば、負荷曲率とひずみ速度の関係を理論的に明らかにし、構成式として表現することが適切である。

(2) インデンテーションによる材料構成則の決定「代表ひずみ速度を利用した手法」

インデンテーションは単軸試験と異なり、圧子下では様々な方向の応力が生じるため、複合応力下で塑性変形をする。よって、得られるひずみ速度は場を形成しており、このひずみ速度場をどのように評価するのかという概念が定まっていない。そこで、FEM による数値解析によりひずみ速度場を評価する。

解析モデルは4節点軸対称要素を用い、最大押込量 $20\mu\text{m}$ に対し、高さ $10000\mu\text{m}$ 、幅 $5000\mu\text{m}$ とし、要素数は 29609 とした。圧子是对頂角 $\alpha=70.3^\circ$ の円錐圧子、制御方法を変位制御とし、押込速度はひずみ速度の効果を表現するために $1\mu\text{m/s}$ および $10\mu\text{m/s}$ とした。圧子と材料間の摩擦係数は 0.15 とした。

本研究では、ひずみ速度感受性の高い高純度アルミニウム (99.999%, 5N 材) のデータを代表値として採用し、準静的試験および衝撃試験の応力 - ひずみ関係に最小二乗法を適用して m, γ を決定した。 m, γ はそれぞれ 0.16 と 5000 となった。

ひずみ速度場

解析により得られた相当塑性ひずみの時間変化から各節点におけるひずみ速度を算出し、数値計算ソフトウェア MATLAB にひずみ速度と節点座標を引数として与え、ひずみ速度場を描画した。ひずみ速度の時間ステップは 2ms とした。一例として、押込速度 $1\mu\text{m/s}$ 、押込量 $0.2\mu\text{m}$ の時のひずみ速度場を図1に示す。高ひずみ速度を示したのは、圧子直下の高ひずみ領域ではなく、圧子縁近傍の低ひずみ領域であった。これは、常に高ひずみ状態である圧子直下よりも圧子縁近傍の新たに変形した領域の方がひずみの時間変化率が高くなるためである。また、ひずみ速度場は、押込量が増加するのに伴い低ひずみ速度領域は増大し、押込速度が速くなると高ひずみ速度領域が増大する傾向を示した。

平均ひずみ速度

ひずみ速度場を平均化し、押込試験のひずみ速度を表す指標を考える。ある境界値以上の相当塑性ひずみの要素を抽出し、該当する要素におけるひずみ速度の平均を算出する。本研究では、ここで求めた値を平均ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_{av}$) と称する。この境界値の候補として、識別限界ひずみ (ϵ_c)^[6] および、代表ひずみ (ϵ_R)^[7] を挙げる。識別限界ひずみは押込試験による塑性特性評価の境界の値、代表ひずみは円錐圧子押込におけるある種の変形場におけるひずみであり、次式で求められる。

$$\epsilon_c = (2.3n^2 - 0.3n - 1.0)(\alpha - 88.4) \quad (6)$$

$$\epsilon_R = 0.0638 \cot \alpha \quad (7)$$

ここで、 n は加工硬化指数、 α は圧子角度である。5N 材における ϵ_c, ϵ_R はそれぞれ $0.15, 0.03$ となる。各境界値とひずみ速度場の関係を図1に示す。

平均ひずみ速度および負荷曲率と押込量の関係の一例を表1に示す。平均ひずみ速度

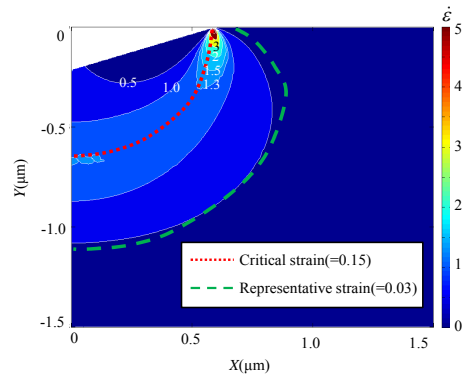


図1 $\dot{h}=1\mu\text{m/s}$, $h=0.2\mu\text{m}$ におけるひずみ速度場

表1 $\dot{\epsilon}_{av,X}$ と負荷曲率の関係

$\dot{\epsilon}_{av,X} (\text{s}^{-1})$	$\dot{\epsilon}_{av,c}$		$\dot{\epsilon}_{av,R}$		C(GPa)	
	$1\mu\text{m/s}$	$10\mu\text{m/s}$	$1\mu\text{m/s}$	$10\mu\text{m/s}$	$1\mu\text{m/s}$	$10\mu\text{m/s}$
$h(\mu\text{m})$						
0.2	7.25×10^{-1}	8.69×10^0	7.90×10^{-1}	7.63×10^0	4.03	4.33
2	7.11×10^{-2}	7.23×10^{-1}	7.86×10^{-2}	7.88×10^{-1}	3.80	4.01
20	6.00×10^{-3}	7.19×10^{-2}	6.76×10^{-3}	7.95×10^{-2}	3.65	3.81

の値は、圧子縁の高ひずみ速度領域の値とは一致しなかった。これは、高ひずみ速度領域は境界値内の体積に比べて非常に小さいためである。また、押込速度が $1 \sim 10\mu\text{m/s}$ の時、変形初期の段階で平均ひずみ速度は動的ひずみ速度領域であった。

$\dot{\epsilon}_{av,c}, \dot{\epsilon}_{av,R}$ とともに、押込量の増加に伴い減少し、押込速度が速くなると増加した。これらの結果をまとめると、押込量と押込速度の間に次式の関係が成立した。

$$\dot{\epsilon}_{av,X} \approx 0.15(\dot{h}/h) \quad (8)$$

平均ひずみ速度は、押込試験におけるひずみ速度の指標である「代表ひずみ速度」と考えることができる。

負荷曲率に及ぼす平均ひずみ速度の影響

平均ひずみ速度と負荷曲率の関係を調査し、押込試験におけるひずみ速度の影響について考察する。

表1より負荷曲率は平均ひずみ速度と同様に押込量の増加に伴い減少し、押込速度が速くなると増加する。よって、Cowper-Symonds の式を考慮すると平均ひずみ速度と負荷曲率の間に次式の関係が成立した。

$$C \approx C_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{av,X}}{\gamma} \right)^m \right] \quad (9)$$

ここで、 C_0 はひずみ速度の影響を考慮しなかった (Cowper-Symonds の式を導入しない) 場合の負荷曲率である。式(9)から求めた負荷曲率と FEM から得られた負荷曲率の比較を表2に示す。式(9)およびFEM から得られた負荷曲率の誤差は最大で 3.46% であり、大きな差は見られない。よって、ひずみ速度に起因した負荷曲率の変化は動的構成式定数で表現できることが明らかになった。

$\dot{\epsilon}_{av,c}, \dot{\epsilon}_{av,R}$ から求めた負荷曲率と FEM から

表 2 式 (9) から求めた負荷曲率と FEM から得られた負荷曲率の比較

C(GPa)	1 μ m/s			10 μ m/s		
	h(μ m)	C(FEM)	C($\dot{\epsilon}_{av,c}$) C($\dot{\epsilon}_{av,R}$)	C(FEM)	C($\dot{\epsilon}_{av,c}$) C($\dot{\epsilon}_{av,R}$)	C($\dot{\epsilon}_{av,R}$)
0.2	4.03	4.11 (1.81%)	4.12 (2.09%)	4.33	4.47 (3.10%)	4.48 (3.46%)
2	3.80	3.86 (1.45%)	3.87 (1.65%)	4.01	4.11 (2.37%)	4.12 (2.65%)
2	3.65	3.69 (0.95%)	3.69 (1.09%)	3.81	3.86 (1.43%)	3.87 (1.63%)

得られた負荷曲率に大きな差異はなく、平均ひずみ速度を定義する有効な境界値を決定することはできなかった。そこで、材料パラメータを変化させた数値解析を行い、最適な境界値を考察する

代表ひずみ速度の算出

材料は、ヤング率を 197GPa、加工硬化指数 (n) 0.3, $m=0.2$, $\gamma=10000s^{-1}$ を基礎データとし、 m, γ, n, α をそれぞれ変化させ、合計 11 種類の材料に対し、数値解析を行った。

各材料に対し解析を行い、境界値が識別限界ひずみおよび代表ひずみの時の平均ひずみ速度をそれぞれ算出した。解析結果をまとめると、すべての材料において、式 (10) の関係が成立した。

$$\dot{\epsilon}_{av,X} \approx k_{X,Y} (\dot{h}/h) \quad (10)$$

X は境界値である識別限界ひずみ (c) または代表ひずみ (R) を表し、 Y は変数である m, γ, n, α を表す。すなわち、 $k_{X,Y}$ の値は材料特性および圧子角度に依存する値となる。本研究では、各パラメータを変化させた際の $k_{X,Y}$ に着目し、考察を行う。

動的構成式定数の m および γ をそれぞれ 0.2 から 0.8, 1000 から 10000 の間で変化した時の $k_{c,m\gamma}$ および $k_{R,m\gamma}$ の変化を比較する。 $k_{c,m\gamma}$ はそれぞれの材料に対し異なる値を示し、規則性は見られなかった。この原因として、識別限界ひずみはひずみ速度の影響を考慮していないことが考えられる。一方、 $k_{R,m\gamma}$ は材料が変化しても、ほぼ一定の値を示した。このことから、 $\dot{\epsilon}_{av,R}$ は動的構成式定数の影響を受けないことが示唆された。

平均ひずみ速度に及ぼす加工硬化指数の影響を考察するため、 n を 0.1 から 0.5 まで変化した。図 2 に n と各押込速度、変位における $k_{c,n}, k_{R,n}$ の関係を示す。 n と $k_{c,n}, k_{R,n}$ の間にそれぞれ次式の関係が成立した。

$$\begin{aligned} k_{c,n} &= 0.750n^2 - 0.500n + 0.212 \\ k_{R,n} &= -0.118n + 0.188 \end{aligned} \quad (11)$$

一般的なインデンテーションにおいて、 n が小さい時、材料表面にひずみが集中するため、ひずみ速度は大きくなる。一方、 n が大きいと、ひずみは押込方向に深く広がるため、ひずみ速度は小さくなる。図 2 より、 $n=0.3$ 以降、加工硬化指数増加に伴い、 $k_{c,n}$ は大きくなっているため、この現象に反している。一方、 $k_{R,n}$ は n とともに、減少しているため、ひず

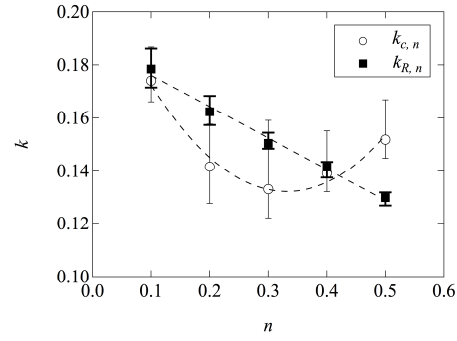


図 2 $m=0.2$ and $\gamma=10000 s^{-1}$ における $k_{c,n}$ および $k_{R,n}$ と n の関係。

み速度場の現象を表現できている。また、 $k_{X,n}$ のばらつきも、 $k_{R,n}$ の方が小さくなった。

よって、 $\dot{\epsilon}_{av,R}$ がインデンテーションにおける代表ひずみ速度と判断できる。

(3) マルチスケールインデンテーションによる動的構成式定数決定手法の確立

マルチスケールインデンテーションの結果から代表ひずみ速度を利用して、動的構成式定数を決定する手法を提案する。以下にその手法の手順を示す。

単軸の引張・圧縮試験により準静的応力 - ひずみ関係を得る。

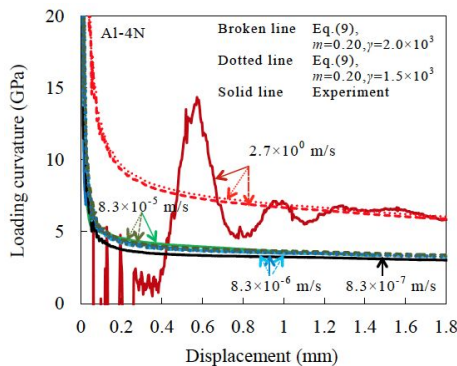
十分に遅い速度を基準とし、それより 10 から 100 倍以上速い速度でマルチスケールインデンテーションを実施する。可能であれば、さらに 10 から 100 倍以上速度を上げて試験を行う。マルチスケールインデンテーションから得られた負荷曲率 - 変位関係と式 (9) を用いて、次式から得られる最小二乗誤差 (Φ_C) が最も小さくなるような Cowper-Symonds の式の動的構成式定数を決定する。この際、十分に遅い押込速度における負荷曲率 - 変位関係を C_0 とする。

$$\Phi_C = \sum_{k=1}^N [C_{Exp,k} - C_{Eq(9)}]^2 \quad (12)$$

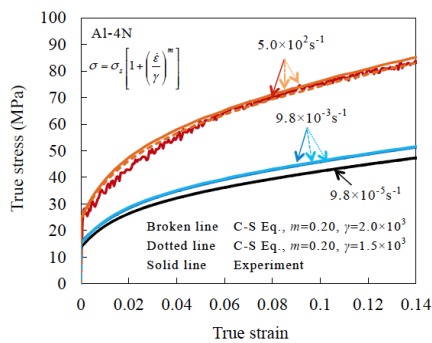
4N アルミニウムにおいて、実験値と本手法で決定した動的構成式定数により求めた理論値の関係を図 3 (a) に示す。 γ の値に誤差が生じた。この動的構成式定数の精度を確認するため、単軸試験の試験結果との比較を行った。試験結果と Cowper-Symonds の式から得られた結果の比較を図 3 (b) に示す。試験結果と Cowper-Symonds の式から得られた応力 - ひずみ曲線は良い一致を示した。よって、マルチスケールインデンテーションによる動的構成式定数が決定できることがわかった。

(4) 結論

本研究では、微視スケールの影響を低減することにより、バルク材に対し信頼性の高く、かつひずみ速度の影響を受けた機械的特性が得られる「マルチスケールインデンテーシ



(a) マルチスケールインデンテーションの結果と理論式の比較



(b) インデンテーションから得られた動的構成式定数と試験結果の比較

図3 99.99%Alのマルチスケールインデンテーションによる動的構成式定数決定

「オン」という新しいインデンテーションを創成した。また、インデンテーションにおいて問題となっていた、ひずみ速度の影響を式(9)を用いて定量的に評価することにより、解決することができた。今後は、本手法の対象材料の拡大が必要となる。

(5) 参考文献

- [1] B. Hopkinson: Phil. Trans. Roy. Soc., A213 (1914), 437-452.
- [2] H. Kolsky: Proc. Phys. Soc. B62(1949), 676-700.
- [3] G. R. Cowper, P. S. Symonds, Brown Univ., Applied Mathematics Report (1958).
- [4] E.W. Andrews, A.E. Giannakopoulos, E. Plisson, S. Suresh Int. J. Solids Struct., 39 (2002), 281-295.
- [5] R. H. Myers and D. C. Montgomery, John Wiley & Sons, New York, NY (1995).
- [6] 小笠原永久, 山田浩之: 微小押込試験の適用可能ひずみ範囲, 日本非破壊検査協会秋季講演大会, 67-68 (2010).
- [7] N. Ogasawara, N. Chiba, X. Chen, J. Mater. Res., 20 (2005), 2225-2234.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

山田浩之, 覚野千尋, 立山耕平, 小笠原永久, ロードセル対向式動的・衝撃圧縮試験装置の開発, 実験力学, 査読有,

印刷中, 2017.

立山耕平, 覚野千尋, 小笠原永久, 山田浩之, 全変形速度対応型ロードセルの開発, 実験力学, 査読有, 印刷中, 2017.

T. Kami, H. Yamada, N. Ogasawara, X. Chen, Strain Rate behavior of Pure Aluminum in Conical Indentation With Different Control Method, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, 査読有, 印刷中, 2017.

H. Yamada, M. Hotta, N. Ogasawara, Effect of Displacement Rate on Sharp Millimeter Indentation, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 715, 2016, pp. 111-115.

山田浩之, 清水陽子, 堀田緑, 小笠原永久, 鋭い圧子押し込みにおける応答曲面法を用いたCowper-Symonds構成式定数の決定, 材料, 査読有, Vol. 64, No. 10, 2015, pp. 790-797.

小笠原永久, 清水陽子, 上剛史, 山田浩之, 鋭い圧子押し込みで生じたひずみ場に与えるひずみ速度の影響, 材料, Vol. 64, No. 10, 2015, pp. 783-789.

〔学会発表〕(計27件)

上剛司, 山田浩之, 岡田峰光, 小笠原永久, 5000系アルミニウム合金におけるインデンテーションの負荷曲率変動に及ぼすマグネシウム添加量の影響, 第132回軽金属学会春期大会, 2017年5月20日, 名古屋大学(名古屋市).

上剛司, 山田浩之, 小笠原永久, インデンテーションの負荷曲率変動を利用した5082アルミニウム合金のセレーション評価, 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会, 2017年3月17日, 東京理科大学(葛飾区).

上剛司, 山田浩之, 小笠原永久, インデンテーションにおける5000系アルミニウム合金のセレーション挙動, 第131回軽金属学会秋期大会, 2016年11月5日, 茨城大学(水戸市).

覚野千尋, 宮首拓, 立山耕平, 山田浩之, 小笠原永久, ロードセル対向式衝撃荷重測定装置の開発, 山梨講演会, 2016年10月22日, 山梨大学(甲府市).

上剛司, 山田浩之, 小笠原永久, Xi Chen, インデンテーションにおける圧子速度制御に起因したひずみ速度挙動, 日本機械学会M&M2016材料力学カンファレンス, 2016年10月8日, 神戸大学(神戸市).

山田浩之, 堀田緑, 小笠原永久, 衝撃インデンテーションによる材料強度のひずみ速度依存性評価, 非破壊検査総合シンポジウム, 2016年6月7日, 日本非破壊検査協会亀戸センター(江東区).

山田浩之, 堀田緑, 小笠原永久, マルチスケールインデンテーションによる純アルミニウムの材料強度のひずみ速度依存性評価, 第130回軽金属学会春期大会, 2016年5月28日, 大阪大学(吹田市).

- 堀田 緑, 尾関 未羽, 山田 浩之, 小笠原 永久, インデンテーションを用いた動的構成式定数決定手法の精度向上, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015 年 11 月 21 日, 慶応義塾大学(横浜市).
- 山田 浩之, 堀田 緑, 小笠原 永久, インデンテーションにおける代表ひずみ速度の導入, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015 年 11 月 21 日, 慶応義塾大学(横浜市).
- 10 山田 浩之, 堀田 緑, 小笠原 永久, 押込試験のマルチスケール化によるひずみ速度効果の実験的検討, 第 53 回飛行機シンポジウム, 2015 年 11 月 12 日, 松山市総合コミュニティセンター(松山市).
- 11 堀田 緑, 大和 憲弘, 山田 浩之, 小笠原 永久, マルチスケールインデンテーションによるひずみ速度依存性の実験的評価, 山梨講演会, 2015 年 10 月 17 日, 山梨大学(甲府市).
- 12 H. Yamada, N. Ogasawara, M. Hotta, K. Tsuyoshi, X. Chen, Effect of Dynamic Strain-Rate on Micro-Indentation Properties of Pure Aluminum, EPJ Web of Conferences (11th DYMAT Conference), 2015, Lugano (Switzerland), Vol. 94, 04034.
- 13 堀田 緑, 山田 浩之, 小笠原 永久, 鋭い圧子を用いた押込試験に及ぼす平均ひずみ速度の影響, 日本材料学会第 64 期学術講演会, 2015 年 5 月 23 日, 山形大学(米沢市).
- 14 山田 浩之, 堀田 緑, 小笠原 永久, インデンテーションのひずみ速度に関する一考察, 材料の衝撃問題シンポジウム, 2015 年 11 月 29 日, 豊橋科学技術大学(豊橋市).
- 15 堀田 緑, 山田 浩之, 小笠原 永久, マイクロインデンテーションにおける押込速度とひずみ速度場の関係, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 2015 年 11 月 22 日, 岩手大学(岩手市).
- 16 山田 浩之, 立山 耕平, 小笠原 永久, 渡辺 圭子, 全変形速度対応型ロードセルの開発および評価, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 2015 年 11 月 22 日, 岩手大学(岩手市).
- 17 H. Yamada, Y. Shimizu, M. Hotta, N. Ogasawara, K. Ogawa, Determination of Constants for Cowper-Symonds Constitutive Equation Using Sharp Indentation, icEM2014 and ACEM, 2014, Republic of Singapore (Singapore).
- 18 山田 浩之, 立山 耕平, 小笠原 永久, 渡辺 圭子, 小川 欽也, ロードセル対向式落錘試験装置を用いた発泡構造体の動的圧縮特性評価, 第 58 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2014 年 10 月 27 日, 京都テルサ(京都市).
- 19 堀田 緑, 尾関 美羽, 清水 陽子, 山田 浩之, 小笠原 永久, 微小押込試験によるひずみ速度を考慮した材料構成式定数の決定, 山梨講演会, 2014 年 10 月 18 日, 山梨大学(甲府市).
- 20 堀田 緑, 山田 浩之, 小笠原 永久, 微小押込試験における荷重変位関係に及ぼすひずみ速度場の影響, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014 年 10 月 9 日, 長崎ブリックホール(長崎市).
- 21 山田 浩之, 清水 陽子, 小笠原 永久, 鋭い圧子を用いた押込試験による動的 material 特性の決定, 第 56 回構造強度に関する講演会, 2014 年 8 月 8 日, 浜松市浜北文化センター(浜松市).
- 22 堀田 緑, 清水 陽子, 山田 浩之, 小笠原 永久, 微小押込試験を利用した Cowper-Symonds 構成式定数の導出, 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス, 2014 年 7 月 20 日, 福島大学(福島市).
- 23 山田 浩之, 清水 陽子, 小笠原 永久, 微小押込試験を用いた動的構成式定数の決定, 日本非破壊検査協会春季講演大会, 2014 年 6 月 4 日, アルカディア市ヶ谷(千代田区).
- 24 清水 陽子, 松山 孝平, 岡本 修平, 山田 浩之, 小笠原 永久, 圧縮試験時のひずみ速度履歴が微小押込解析に及ぼす影響, 山梨講演会, 2013 年 10 月 26 日, 山梨大学(甲府市).
- 25 清水 陽子, 上 剛司, 山田 浩之, 小笠原 永久, 微小押込試験の負荷速度増加による荷重増加の要因, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 2013 年 10 月 13 日, 岐阜大学(岐阜市).
- 26 山田 浩之, 清水 陽子, 上 剛司, 小笠原 永久, 高純度アルミニウムの微小押込特性に及ぼすひずみ速度の効果, 第 153 回日本金属学会秋期大会, 2013 年 9 月 18 日, 金沢大学(金沢市).
- 27 山田 浩之, 上 剛司, 清水 陽子, 小笠原 永久, 高ひずみ速度の影響を受けた微小押込試験における識別限界ひずみ, 日本実験力学学会 2013 年度年次講演会, 2013 年 8 月 20 日, 由利本荘市文化交流館「カダール」(由利本荘市).

〔その他〕

http://www.nda.ac.jp/cc/users/ynda/home/H_Yamadas_Home_page/Top_page.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 浩之 (YAMADA, Hiroyuki)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号: 80582907

(2) 研究協力者

小笠原 永久 (OGASAWARA, Nagahisa)
防衛大学校・システム工学群・教授