

マイクロ粒子の超音速飛翔の高速度撮影 —レーザー誘起粒子衝突試験の開発—

米津 明生¹、梶原 美紀²、矢野 文彬³、西川 祐貴³

¹ 中央大学 理工学部、² 中央大学 大学院理工学研究科 精密工学専攻、³ 株式会社島津製作所

ユーザーベネフィット

- ◆ 高速度ビデオカメラHPV-X2により最高1000万コマ/secの高速度撮影が可能です。
- ◆ 数μmから数十μmのマイクロ粒子の飛翔挙動を高解像度で撮影可能です。

■はじめに

金属や高分子材料のマクロな塑性変形はひずみ速度に依存することが知られていますが、その理由としてミクロな材料構造の局所的な変形挙動に大きく依存することがあげられます。なかでも速度依存性が顕著な高分子材料の超高ひずみ速度域の塑性変形挙動は明らかにされておらず、その力学的検討は、軽量かつ耐衝撃性に優れた材料開発における重要なテーマであると考えられます。そのため、マイクロ・ナノ粒子の高速飛翔および衝突実験を実現したレーザー誘起粒子衝突試験 (Laser-induced particle impact test; LIPIT) が開発されました¹⁾。さらに最高1000万コマ/secの撮影速度を有する高速度ビデオカメラHPV-X2を使用することで、LIPITにおけるマイクロ粒子の飛翔および衝突挙動の詳細な観察が可能となりました。

本稿では高速度ビデオカメラを用いてマイクロ粒子の高速飛翔および衝突を捉えた事例を紹介いたします。まずLIPITを用いて様々な種類の粒子の高分子材料への衝突実験を行い、衝突痕形状を調べました。次に粗視化分子動力学法により高速衝突現象のナノスケール解析を行い、塑性変形挙動のメカニズムを分子鎖の変形の観点から考察しました。

■レーザー誘起粒子衝突試験 (LIPIT) ¹⁾

本稿では、微小なマイクロ・ナノ粒子を高速で発射させる駆動力としてレーザーアブレーションを用いました。発射された微小粒子がターゲット材料の試験片に衝突すると塑性変形による圧痕が生じます。この圧痕の生成過程から高ひずみ速度における変形強度を評価しました。図1に開発したLIPITの概要を示します。Nd:YAGレーザーから発射されたパルスレーザーは集光レンズを通過して、発射台に照射されます。この発射台は透明な硬質拘束層と黒色のエネルギー吸収層から構成され、アブレーション現象によって急激に体積膨張します。この瞬間的な大変形に伴い、エネルギー吸収層表面に散布した微小粒子が真直に発射されます。

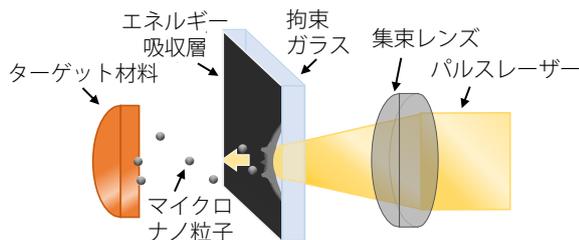


図1 レーザー誘起粒子衝突試験 (LIPIT)

■高速度ビデオカメラHPV-X2による飛翔粒子の撮影結果^{2),3)}

図2に示す高速度ビデオカメラ (HPV-X2) を用いて飛翔粒子を可視化し、粒子の飛翔速度を計測しました。撮影装置を表1に示します。今回はシャドウグラフ法により、マイクロ粒子の飛翔挙動を撮影しました。ターゲット材料には、耐衝撃性に優れたエンジニアリングプラスチックの一つであるポリカーボネートを用いました。飛翔粒子には、高速度鋼粒子HSS (直径40 μm)、ジルコニアZrO₂粒子 (直径30 μm)、シリカ粒子SiO₂ (直径15 μm、6 μm) の4種類の粒子を用いました。

撮影結果の一例を図3に示します。カメラ視野 (横) は約1 mmになります。図3の画像 ①~⑦において飛翔粒子がターゲット材料に衝突するまでの飛翔挙動を明瞭に捉えていることがわかります。画像 ⑧で飛翔粒子はターゲット材料に衝突し、その後、画像 ⑨~⑫に示す通り、衝突後の反発挙動も観察されました。一連の飛翔、衝突、反発の過程を撮影できたことで、反発係数や塑性変形の仕事量も算出可能になりました。このような飛翔粒子の可視化を、様々なサイズや質量のマイクロ粒子を用いて行い、それぞれの飛翔速度を算出しました。その結果、飛翔速度は最大で800 m/sに達することがわかりました²⁾。

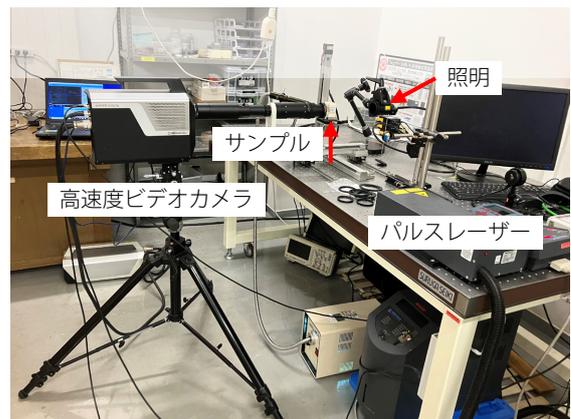


図2 高速度ビデオカメラによる撮影

表1 撮影装置

高速度ビデオカメラ	: HPV-X2
顕微鏡	: Z16 APO
照明	: Cavilux

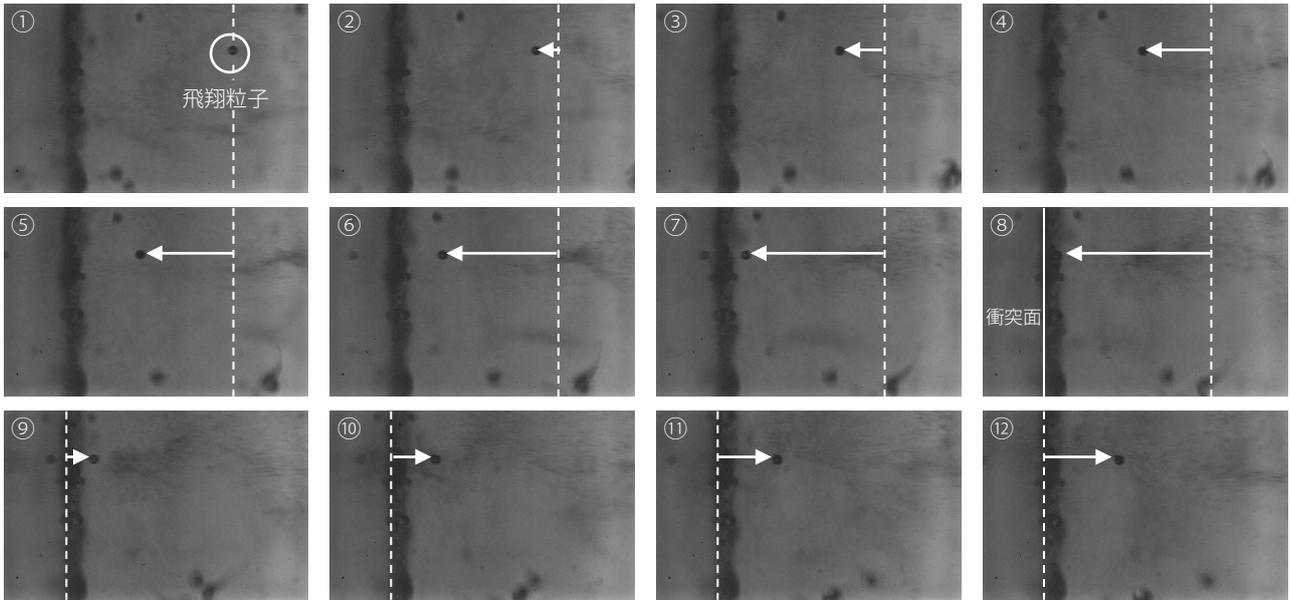


図3 マイクロ粒子の飛翔・反発挙動の可視化
(画像間の撮影間隔は200 ns)

■ 結果および考察^{3), 4)}

図4に微小粒子の運動量と圧痕深さの関係を示します。圧痕深さはLIPITによる衝突痕から取得しました。図4のように本実験から、運動量大きいほど圧痕深さは大きくなることわかりました。また、図3の結果より計測した運動エネルギーの差から得た本実験の高速粒子衝突における降伏強度は、図5に示すように準静的な負荷（球状圧子の押し込み試験、図中ではRefsと記載）の10倍以上の値を示すことわかりました。

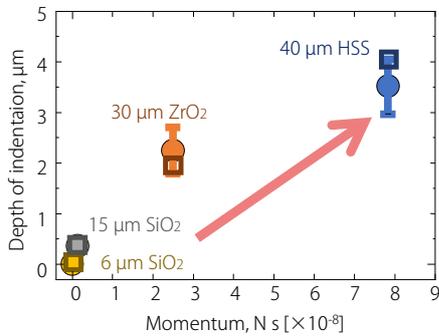


図4 LIPIT実験による圧痕深さと運動量の関係

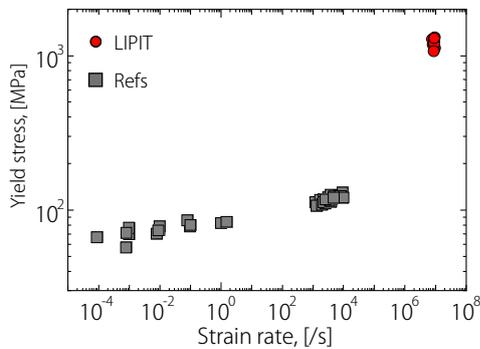


図5 降伏応力とひずみ速度の関係³⁾

次に粗子化分子動力学法を用いて、LIPITを想定した高速衝突現象の力学解析を実施しました。解析モデルの詳細は参考文献^{3), 4)}に記載されています。対象試験片となるポリカーボネートは重合度100を有する500本の分子鎖によって構成しました。なお、今回は商用ソフトウェアJ-OCTAを用いて分子動力学シミュレーションを実施しました。図4と同様に解析においても運動量と圧痕深さおよび最大荷重（最大反力）の関係性をまとめたものを図6に示します。実験と同様に運動量が大きくなると、圧痕深さが大きくなり、最大荷重も大きくなることわかりました。

次に、分子鎖の変形挙動に着目し、衝突中の分子鎖の結合伸縮 (Bond stretch) と結合角 (Bending angle) のエネルギー分布を調べました。低速度の粒子衝突の結果は割愛しますが、図7に高速度の粒子衝突の結果を示します。低速度の負荷では衝突時からエネルギーが分散していますが、高速で衝突させた場合は粒子直下に各エネルギーが集中し、その後エネルギーが分散していくことがわかります。このことから、高速で衝突させると、衝突箇所の分子鎖の変形が局在化し、その範囲が制限されることでエネルギーが集中し降伏強度が上昇すると考えられます。

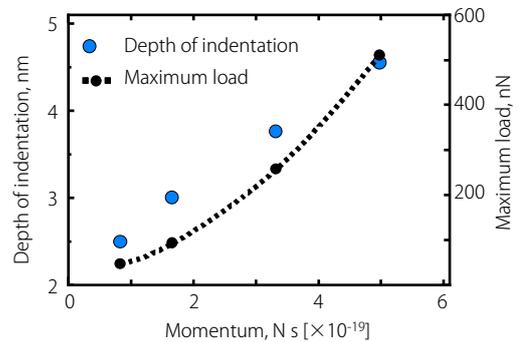


図6 分子動力学法による圧痕深さと運動量の関係

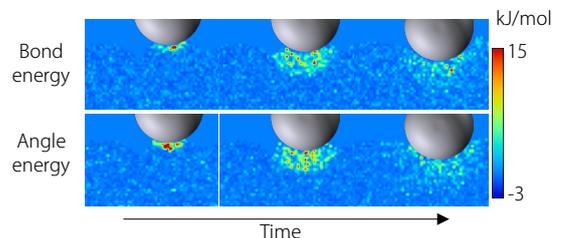


図7 分子動力学法による分子鎖の変形挙動
(分子鎖の結合伸縮および結合角に着目)

■まとめ

マイクロ・ナノスケールの局所的な超高速変形を誘起できるLIPITを用いて、高分子材料の耐衝撃性の力学的検討を行いました。LIPITは、単一もしくは少量の微小な粒子を高速衝突させるユニークな技術ですが、更なる実用化のためには粒子の飛翔速度や反発速度を計測する必要があります。そこで、高速度ビデオカメラ（HPV-X2）を用いて粒子の飛翔速度の撮影を行い、撮影画像から飛翔速度を求めました。この結果より、運動量と圧痕形状の関係や高速衝突時の降伏強度の推定が可能となりました。さらに分子動力学法を用いて、衝突時の塑性変形メカニズムを考察しました。本LIPIT技術は微小な衝撃試験を実現し、微小スケールかつナノ秒時間のダイナミックな力学現象を創出できる特徴を有しています。これにより、新たな材料特性や未知の力学現象を把握できるほか、様々な表面改質や加工技術としての展開も期待できることから、さらなる粒子の微小化と高速化の実現が必要とされています。そのためにも粒子の飛翔挙動の可視化技術は不可欠であり、本稿でご紹介したHPV-X2は適しており、本研究のような微小粒子の超音速飛翔挙動の可視化が行える高速度ビデオカメラといえます。

本研究は科学研究費補助金（挑戦的研究20K20966）および精密測定技術振興財団の援助を頂きました。記して謝意を表します。

撮影協力：中央大学 大学院理工学研究科 精密工学専攻
<http://mater.mech.chuo-u.ac.jp/>

<参考文献>

- 1) R. Komine, S. Yasuda, M. Kajihara, A. Yonezu, Material Parameters in Constitutive Equation for Plastic Deformation at a High Strain Rate Estimated by High-Velocity Microparticle Collisions, Journal of Materials Engineering and Performance, 2022/10/17 2022, doi: 10.1007/s11665-022-07507-8.
- 2) 梶原美紀, 米津明生, 「粒子移動速度計測装置及び粒子移動速度計測方法」、特願2022-171734（2022年10月26日）
- 3) A. Morimura, H. Nishino, M. Kajihara, Y. Nakao, A. Yonezu, Molecular Dynamics and Experimental Studies of the Dependence of Strain Rate on the Indentation Deformation of Polycarbonate, Journal of Polymer Research, in press, doi:10.0.3.239/s10965-023-03616-7
- 4) D.Ikeshima, K.Miyamoto and A.Yonezu: "Molecular deformation mechanism of polycarbonate during nano-indentation: Molecular dynamics simulation and experimentation" Polymer, vol. 173, pp. 80-87.

Hyper Vision、HPVは、株式会社 島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

株式会社 島津製作所 分析計測事業部
<https://www.an.shimadzu.co.jp/>

01-00514-JP 初版発行：2023年 7月

島津コールセンター ☎ 0120-131691

本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。
本文中に記載されている会社名、製品名、サービスマークおよびロゴは、各社の商標および登録商標です。
本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

▶ アンケート

関連製品 一部の製品は新しいモデルにアップデートされている場合があります。



▶ Hyper Vision HPV-X2
高速度ビデオカメラ

関連分野

▶ 工業材料・マテリアル

▶ 素材観察

▶ 価格お問い合わせ

▶ 製品お問い合わせ

▶ 技術お問い合わせ

▶ その他お問い合わせ