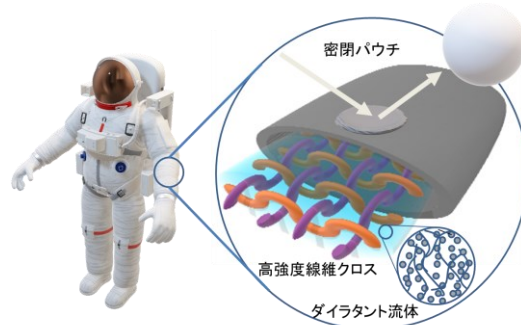


CNT/シェアシックニング流体の複合化による 高耐衝撃吸収特性

赤田 圭史(筑波大), 佐藤 駿介(筑波大), 石橋 諒一(筑波大),
谷岡 大輔(住友電工), 大久保 総一郎(住友電工), 小野木 伯薫(住友電工),
杉本 卓也(筑波大), 小林 幹佳(筑波大), 藤田 淳一(筑波大)

背景

シェアシックニング (shear thickening : ST) またはダイラタント現象とは剪断応力が掛かったときに、材料 (液体) の粘性が可逆的に急激に増大する現象である [1]。典型的には、ナノシリカ粒子とポリエチレングリコール (PEG) などの混合系流体で発現し、最大で2桁程度の粘性係数の上昇が生ずる。最近の研究で、剪断応力による粘弾性変化は極めて高速 (ピコ秒レベル) に発現することが理論シミュレーションで解ってきた [2, 3]。この ST 流体 (STF) を、ケブラー布等の高耐破断強度材に浸漬することで、高速応答性を持つ耐衝撃吸収特性を有する材料創出が期待される (Fig. 1)。我々のグループではこれまでに低欠陥長尺の高品位 CNT を開発し、高張力の CNT 繊維布の開発を進めている。本研究では、この高品位 CNT をベースの CNT 布と ST 現象とを組み合わせた高耐衝撃吸収材料を開発しようとしている。現在、理論を通した高速 ST 機構の解明が進んでいるものの、実験を通した実際のエネルギー吸収特性とその衝撃緩和に関する実験データの収集を必要としている。特に、衝撃吸収特性は、飛翔体のサイズと速度に強く依存してそのエネルギー散逸機構は変化し、低速側ではターゲットの弾性変形によるエネルギー吸収が律速するが、宇宙塵などの高速側での衝突では、プラズマ化にともなう非平衡蒸散が支配的となる。そこで本研究では、JAXA の超高速衝撃試験装置を用いて、実際に製作した CNT/STF 複合体に対して、飛翔体のサイズ、速度、材質依存の衝撃緩和機構に関する実験的データの取得を目的とする。



ダイラタント複合材による衝撃吸収テスト

Fig. 1 ST (ダイラタント) 流体と高強度繊維複合材からなる衝撃吸収シート

手法

Fig. 2 にサンプルの画像を示す。標準的な高強度繊維材として、ケブラー布を使用した (Fig. 2 a)。STF 流体には日本触媒のシリカ粒子と分子量 200 の PEG 溶媒の懸濁液を使用した (Fig. 2 b)。シリカ粒径は 100~2500 nm、濃度は 65~75 wt% の範囲で調べた。いずれの粒径でもシアシックニングが発生することはレオメーターの測定から確認済みである (Fig. 2 c)。CNT は住友電工が合成したもの[4]を巻き取り、シート上に並べている。現段階では CNT 生産量が少ないので、ケブラー布を母材として、ケブラー布、CNT 膜に STF 流体を液浸させ透明バッグに収め、標的サンプルとした。(Fig. 2 d)

(a) ケブラー布

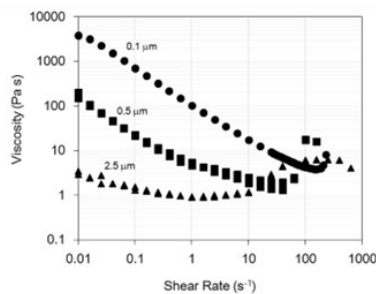


(b) STF (水シリカ) dancing & climbing



Kobayashi et al., Liquids 2023, 3(1), 40-47.

(c) Shear thick



(d) Kevlar, CNT, STFの複合化

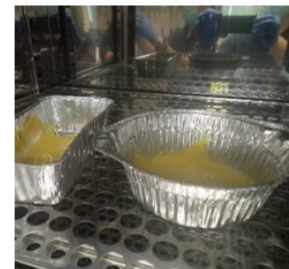
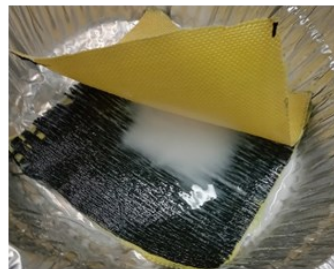


Fig. 2 本実験で使用した(a)ケブラー布、(b)STF のサンプル写真。(c)STF のせん断速度に対する粘度変化。(d)ケブラー、CNT 布、STF 複合材の製作過程

超高速衝撃実験に使用する飛翔体は 0.2 g、 $\Phi 8$ mm のポリカーボネート球体を採用した。弾丸の発射に、弾速 0.5~0.8 km/s の 1 段ガス銃と、弾速 1.5 ~ 3.0 km/s の 2 段ガス銃を使用した。1 段ガス銃は速度が不安定なため、2 段ガス銃を主として利用した。標的衝突前後の弾丸速度の変化は、横方向から高速カメラ (Phantom, v2512) で測定し、エネルギー吸収量を求めた。弾丸質量 m は衝突前後で一定として、衝突前の初期速度 V_i と衝突後の残留速度 V_r から、衝撃吸収エネルギー E_{ad} は以下の式で与えられる。

$$E_{ad} = \frac{1}{2}m(V_i^2 - V_r^2)$$

さらにもう一台の高速カメラ(Shimadzu, HPV-1)を斜め前方から撮影し、サンプル生得を多方向から観察した (Fig. 3)。

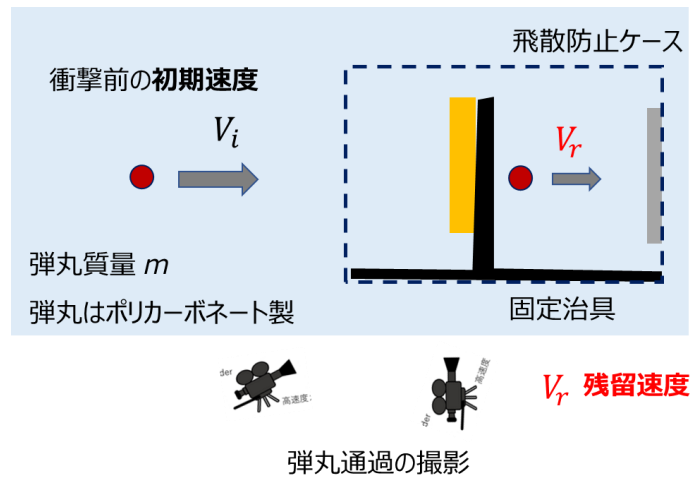


Fig. 3 (上段) 実験セットアップの概略図。弾丸衝突の過程は2台の高速カメラで撮影し、衝突前後の速度差から吸収エネルギーを見積もった。(下段) 横方向から撮影した衝突過程の連続写真。

結果

STF の効果

まず、ケブラーのみと、STF を含浸させたケブラーとで STF の効果を比較した。ケブラーに STF を含浸させると、衝撃吸収性能が 44 → 92 J に増大し、STF を含むことで衝撃吸収性能が顕著に向上した。次に STF の組成の影響を調べた。シリカ濃度が高いほど吸収性能が向上した一方、シリカの粒径と吸収性能との間に明らかな相関は見られなかった。

CNT の効果

ケブラーで CNT を挟んだ場合、エネルギー吸収は 36 J と、ケブラーと同等かやや低い結果だった。しかし STF を含浸させるとエネルギー吸収は 136 J に向上し、ケブラーのみより高い性能を示した。

いずれのサンプル条件でも弾丸速度を上げると吸収能力が向上したが、特に STF を含浸させた場合に顕著な性能向上が見られ、STF 特有の効果を示唆した。弾速 3.1 km/s の弾丸を

STF 含浸ケブラー布に打ち込んだ際は弾丸が完全に破壊された。入射エネルギーが全て吸収されたと考え、583 J の衝撃吸収性能を示したことになる。

以上のように、ケブラー<ケブラー+STF<ケブラー+STF+CNT の順で衝撃吸収性能が向上することが明らかになった。今後は CNT の含有量を増やし、さらなる性能向上を目指す。

- [1] K. Akada, S. Okubo, T. Yamada, K. Tokuda, K. Yamaguchi, S. Uemura, T. Onoki, S. Tejima, M. Kobayashi, J. Fujita, Anisotropic flocculation in shear thickening colloid-polymer suspension via simultaneous observation of rheology and X-ray scattering, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 658 (2023) 130727.
- [2] P.A. Bonnaud, H. Ushiyama, S. Tejima, J.-I. Fujita, Neat and Aqueous Polyelectrolytes under a Steady-Shear Flow, *J. Phys. Chem. B.* 125 (2021) 6930–6944.
- [3] R. Jono, S. Tejima, J. Fujita, Microstructure of the fluid particles around the rigid body at the shear-thickening state toward understanding of the fluid mechanics, *Sci. Rep.* 11 (2021) 24204.
- [4] T. Fujimori, D. Yamashita, Y. Kishibe, M. Sakai, H. Inoue, T. Onoki, J. Otsuka, D. Tanioka, T. Hikata, S. Okubo, K. Akada, J. Fujita, One step fabrication of aligned carbon nanotubes using gas rectifier, *Sci. Rep.* 12 (2022) 1285.