

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02029

研究課題名（和文）粒子試料支持体への応用に向けたカーボンナノチューブヤモリテープ強力接着機構の実現

研究課題名（英文）Adhesion mechanism of carbon-nanotube-based gecko tapes as the supportive device for particular solids

研究代表者

平原 佳織（Hirahara, Kaori）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40422795

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：配向成長させたカーボンナノチューブ(CNT)からなるヤモリテープを粒子状固体に対して効率よく強固な接着を実現するために、従来の強くゆっくり押し潰す予荷重荷方法に代わり高速負荷により被着体に接着させる機構を提案し、その有用性の実証に取り組んだ。1mm-20umの粒子を配向CNTに衝突もしくは高速で接触させた際のCNT変形および接着特性を微視的・巨視的双方のスケールで計測・評価を行い、高速負荷により従来法より接着力が向上すること、被着面近傍のCNTが効率良く変形することで真実接触面積を稼ぐこと、配向CNTの衝撃吸収性、亀裂進展、凝集形態が変形や接着におよぼす影響などを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CNTの配向凝集体からなるヤモリテープは、その構造由来の興味深い諸特性を有するものの、強く押しつけることによるテープの劣化が、その応用展開を阻んできた主な理由といえる。本研究は、完全に配向CNTを潰すところまで押しつけなくても従来より強い接着が得られる方法を提示できた。本研究で得た成果は、配向CNTの基礎研究と応用を繋ぐ意義を有し、結果として、新奇デバイス創成に寄与することとなった。本研究の出発点は、惑星科学分野でのニーズだが、その活用によって、将来広い分野での物質構造解析の進展にも繋がる。また、構造解析に留まらず、成層圏汚染調査、電子部品の排熱基盤などへの応用展開が拓ける可能性もある。

研究成果の概要（英文）：That study proposed an adhesion process of carbon-nanotubes (CNTs) based Gecko tapes for tiny particles with impact preloading to achieve efficient and strong adhesion, instead of a conventional method with strong and slow compression of whole CNTs, and its usefulness was demonstrated. The 1 mm-50um sized particles were individually contacted with vertically aligned CNTs (VACNTs), and the adhesive properties and deformation process of VACNTs were evaluated at both microscopic and macroscopic scales. Experimental results indicated that the adhesive strength was effectively improved by high-speed loading at 2-7 m/s compared to the conventional method. in situ electron microscopy experiments showed that CNTs at the adherent interface were efficiently deformed, obtaining true contact areas that would be the origin of good adhesion by high-speed loading. Moreover, the effects of shock absorption, crack propagation, and aggregation morphology of VACNTs were also investigated.

研究分野：ナノ材料科学，機械工学，惑星科学

キーワード：カーボンナノチューブ 接着 地球外物質解析 高速接触 衝撃吸収 ヤモリテープ

様式 C-19、F-19-1、Z-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

自然界のヤモリは微細繊維が高密度に凝集した足裏構造を有し、個々の繊維先端が固体表面の凹凸に柔軟に追従することでファンデルワールス力に由来する接着力を得る。直径がナノメートルレベルの微細な炭素繊維であるカーボンナノチューブ(CNT)を配向成長させてヤモリ足裏構造を模した人工粘着基材(ヤモリテープ)は、実際のヤモリに匹敵するせん断接着力 ($50\text{N}/\text{cm}^2$) を示す [1]。被着面を汚染させず、真空中で使用できることに加え、炭素由来の帯電防止性、排熱性などの魅力的な機能も有し、従来の粘着テープ基材が適用できない環境・用途での活躍が期待されてきた。本研究では、CNT ヤモリテープの有望な応用用途として、固体物質解析における試料支持体に着目した。粒子状固体を固定する方法は、治具や接着剤の利用が多く用いられているが、粘着テープによる固定は、多彩な形態を有する幅広いサイズの不定形な粒子状固体試料を、加工することなく任意の向きで固定し、脱離が可能である。ただし、従来の粘着テープは高分子粘着剤を使用しており、それによる環境上の制約や、試料をテープから剥がす際の試料汚損のリスクがある。これに対し、CNT ヤモリテープはクリーンな接着機構を有し、試料表面を汚さない。また、様々な雰囲気下、幅広い温度域で安定であり、真空下での熱処理も可能である。元素分析の種類によっては炭素単体からなることも利点となる。さらには、観察・計測中の試料ドリフトもなく、担持試料を FIB 加工しても汚染源とならない [2]。近年の分析装置の精度向上に伴って支持体に対する低ノイズ・低汚染度の要求も厳しくなるなか、CNT ヤモリテープは、実用化できれば、特に不定形固体試料に対して現存する物質中で最も理想的な支持体になり得る素材といえ、地球外物質分析のようなきわめて厳密な環境制御を要する系でも通用すると強く期待されてきた [3]。

CNT ヤモリテープを粒子状固体物質に対する支持体として実用レベルで機能させるためには、着実かつ強力な固定が求められる。一般に、ヤモリテープが強力な接着を得るには、被着対象となる平面に強く押し付けることが必須とされる。これは、個々の CNT 先端が固体表面に接触した後、さらに押しつけることで、先端から 100nm 程度のところで座屈させつつ CNT 側壁も接触させるためである。この状態を形成する CNT の本数密度で真実接触面積が決まるとされ、実際に押し付けに要する荷重(予荷重)に依存した接着力が得られる[1]。しかしながら、この方法では予荷重により配向 CNT 全体を大きく圧縮する。このとき個々の CNT は弾性的に変形するものの、隣接する CNT 同士が接触・接着してしまうために除荷後に形状が回復しにくくなる。経験則的に、数回押し付けるうちにテープ接着面が完全に潰れてしまう。この劣化が CNT ヤモリテープの実力を頭打ちにしている実質的かつ最も深刻な問題である。さらに、比較的脆い試料では強い押し付けによる圧壊、接着界面近傍での欠けによるテープからの脱離も問題となる。すなわち、CNT ヤモリテープの接着特性に関する数々の先行研究は、大きな予荷重の負荷が前提とされる接着過程自体が CNT ヤモリテープ高機能化の障壁になっていることを示唆している。

2. 研究の目的

本研究課題の研究目的は、CNT ヤモリテープの強力接着実現に繋がる基礎的知見を得ることである。そのために最も重要な鍵となる、

- ・ 接着界面をなす CNT 先端近傍に効率良く予荷重を負荷できる新たな接着機構の確立
- ・ 粒子状の固体に対する接着機構の理解と制御

の2点に取り組んだ。配向 CNT は、CNT が個々に直立しているわけではなく、実際は隣接する CNT 同士がほどほどに網目状のネットワークを組んだ凝集体である [4]。従って、CNT ヤモリテープの接着特性は、接着界面における CNT 先端部の変形特性、トライボロジー特性に加え、この網目構造のマクロな弾性体としての変形特性が階層的に組み合わさり成り立っている。従来法は、真実接着面積を稼ぐために、市販の粘着テープを押しつけて貼るように、配向 CNT 全体を圧縮し、ネットワーク構造部分の弾性を利用して先端部を押しつける。これに対し、CNT ヤモリテープ接着面を被着面に対して高速で接触させると、CNT ネットワーク構造由来の衝撃吸収特性を活かして、配向 CNT 全体を大きく変形させずに接着面(CNT 先端)近傍へ予荷重が負荷できると考えた。本研究ではこのような高速接着系を、CNT ヤモリテープの新たな接着機構として確立することを目指した。一方、CNT ヤモリテープの接着面をなす CNT 成長端(先端)近傍も、 μm サイズの凝集構造をなしている。理論・実験の双方から CNT1本レベル接着-脱離に関する研究はこれまでに少なされているが、それらで考えられてきたような CNT 先端が被着面に接しているケースは非常に少ない。このような先端の凝集形態は、おそらくこれまでの平板に対する接着に関する先行研究ではあまり着目されてこなかったが、粒子への接着のような、配向 CNT の一部が局所的に負荷を与えられる系では CNT のなすネットワークが剪断されることとなる。これがどのように影響するか理解することで、効率良く接着力を得られる構造を明らかにすることも目指した。

3. 研究の方法

粒子状固体に対する CNT ヤモリテープの高速接着特性の本質的理解のために、

- ・ 透過電子顕微鏡(TEM)もしくは走査電子顕微鏡(SEM)内で動作するナノマニピュレータを用いた変形挙動観察と力学計測による、マイクロ・ナノメートルレベルでの素過程解明
- ・ 配向 CNT を用いた接着力計測による、CNT 凝集体としてのマクロな特性計測

を並行する形で、下記の研究項目を実施した。

3-1. 配向 CNT の動体接着メカニズムの理解

CNT 先端近傍に局所的に応力を与える機構として高速での予荷重負荷を検討するにあたって、まず配向 CNT に対してマイクロビーズやステンレス鋼球が高速で接触する(衝突する)系における接着・変形

特性およびその機構を理解するため、以下の実験を行った。

a. SUS 鋼球の衝突試験

配向 CNT への撃力負荷時の変形や衝撃吸収特性については調べられている先行研究が存在していたが [5], それとヤモリテープとしての接着特性の相関は未解明であった。そのため、まず配向 CNT に対して直径 0.5~1.5mm ステンレス(SUS)鋼球を衝突させ、接着可否や接着力と衝突速度の相関を調べた。簡易的に衝突速度を制御するため、水平な台の配向 CNT に様々な高さから SUS 球を自由落下させた。SUS 球が反発せず CNT に留まる場合、反発し CNT から飛び出す場合の衝突速度、さらに前者では SUS 球を引き離すのに必要な力を計測することで垂直接着力を評価した。衝突速度は、ハイスピードカメラ(最大 14400fps)を導入して衝突の瞬間の動画から計測し、SUS 球が反発・脱離した場合の反発係数の評価、および衝突時の配向 CNT の変形の観察も合わせて行った。さらに、配向 CNT の底面にフォースセンサを配置しておくことで、衝突により負荷された撃力が底面まで伝播する程度を評価し、衝撃吸収特性が接着特性に及ぼす影響について調べた。

b. 配向 CNT 変形挙動の SEM 観察

走査電子顕微鏡内でマニピュレータを用いて、マイクロビーズや円柱状の圧子を配向 CNT に押し込み、引き離す一連の過程を、配向 CNT 断面方向から観察した。さらに、従来法と同等の速度でゆっくり押し込んだ場合 (<10 μ m/s)、高速で押し込んだ場合(高速負荷)の変形挙動および接着力の違いを調べた[4]。高速負荷は、当初の計画では既存のマニピュレータを改良してステージを高速で変位させる機構を導入するか、もしくは高速負荷の可能なマニピュレータの新規導入を考えていたが、交付金額が当初計画より減額されたこと、SEM 本体の真空系の故障が生じ高額の修理費を要したことから断念した。しかしながら、既存のマニピュレータのステージ上に、配向 CNT の端面に近い位置に走査プローブ顕微鏡用のカンチレバー探針を取り付け、この梁をたわませて弾く機構を製作した。これを利用して、梁の先端にあらかじめ固定したマイクロビーズを配向 CNT へ衝突させることができ、梁のばね定数を選択することで、マクロスケールでの衝突試験の衝突速度を再現した。

3-2. 配向 CNT の形態が粒子状固体の接着特性に及ぼす影響

a. 水素エッチングによる CNT 先端近傍の凝集形態変化

被着物を強く押しつけない系では、被着物のラフネスや表面曲率に応じて、CNT ヤモリテープ接着面をなす CNT 先端近傍の最適な凝集形態が存在する可能性がある。配向 CNT を水素ガス中で加熱処理することで CNT 先端部をエッチングしながら凝集サイズを変化させ、その上に直径 20~80 μ m 程度のマイクロ粒子1個1個をそっと置く程度の予荷重を負荷して得られる接着力を、原子間力顕微鏡(AFM)を用いたフォースカーブ計測により調べた。

また、表面近傍の CNT 凝集構造では、CNT 同士を引き離すのに要する力が他の場所に比べ 5 倍大きい[6]ことから、水素エッチング処理によりこれを除去すると、接着面で CNT ネットワークが破断しやすくなり、粒子が高速接触した際に亀裂が生じやすくなる。配向 CNT に対して SUS 球が衝突する際にこのような処理が亀裂進展および接着に及ぼす影響を調べた。

b. 配向 CNT の成長条件

本研究で CNT ヤモリテープに用いた配向 CNT は Chakrabarti らにより確立された合成条件[4]により作製した。この手法で合成された配向 CNT は粘着テープとしての接着特性が比較的優れていることが実証されている。アルミナバッファー層を成膜した Si 基板上に Fe 触媒を担持し、エチレンを炭素源に用いて、アルゴン雰囲気中で成長させることで、2層以上、直径 5 μ m 程度の CNT が、バンドルを形成せずほどほどに孤立した状態で隣接 CNT 同士で点接触することでネットワークを形成しつつ、基板から配向成長する。平板に対する接着では、その接着機構と関連して、高さ(テープの厚さ) 600 μ m 以上に成長させると十分な接着力を発揮することが示されていた[1]が、効率的な衝撃吸収が要求される高速接着では、それとは異なる観点からの合成条件最適化が必要となると考えた。また、先行研究での衝突実験でも基本的にはサイズや形態が一定の配向 CNT が用いられ、配向 CNT の形態による捕捉性の違いについては検討されていない。そこで、最終年度では、CNT の合成時間を変化させることで高さ 500 μ m~3mm に配向成長させ、その影響を調べた。

4. 研究成果

4-1. SUS 球の衝突における接着力の発現

SUS 球を、3-1a に述べた方法で配向 CNT へ衝突させた結果から、特定の範囲の衝突速度において、SUS 球が跳ね返らず埋め込まれることで固定される場合が確認された。直径 1mm の場合、2~7m/s の範囲の衝突速度において、約 20% の SUS 球が固定され、それ以上もしくは以下の速度では全ての球が反発した(図 1)。SUS 球が捕捉されたときには配向 CNT の全体が波打つように振動するのに対し、反発した場合そのような挙動は見られなかった。衝突時の接着可否はこのような反発後の挙動に伴う衝撃吸収過程が関与していると推察された。さらに、配向 CNT に埋め込まれた SUS 球を CNT から引き離す力を接着力として計測した結果、撃力による接着は準静的な予荷重負荷時に比べて 2 倍以上の接着力を生じさせることが分かった。

このような、特定の衝突速度で接着される確率が向上する要因を調べるために、衝突痕の走査電子顕微鏡(SEM)観察を行

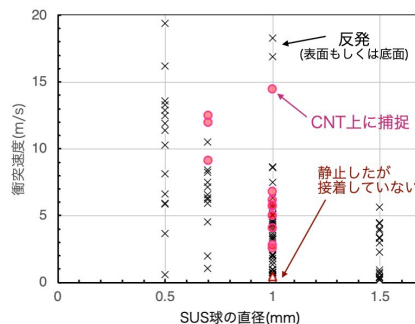


図 1. SUS 球反発可否の衝突速度依存性.

った。JAXA 矢野らにより先行研究で行われたマイクロビーズの衝突試験では、配向 CNT の衝突粒子捕捉には、衝突痕の周りに生じる円周状亀裂の形態が関与していると推察されていた [7]。本研究で得られた衝突痕についても、まず円周状亀裂の形状について着目し、衝突粒子の捕捉可否によって分類した。その結果、比較的低速で反発した場合には亀裂が生じないか、衝突痕周りの一部のみに生じる傾向が確認でき、これは先行研究と一致した。しかしながら、捕捉・接着が見られる速度域においては、先行研究では、衝突痕より大きな円周状亀裂が発生して衝突した球を包み込むように CNT が倒れ込むことが捕捉率を高くしていると予測されていたのに対し、本研究で得られた結果は、衝突速度が同等であれば、捕捉時、反発時の円周状亀裂のサイズは変わらなかった。試験に用いたビーズ、SUS 球のサイズや衝突速度の値が異なっていることから比較は慎重に行う必要があるが、引き離れたときの接着面近傍の SEM 観察からも、亀裂が生じることで CNT が球側に倒れ込んでくるものの、SUS 球には接着した状態を形成しておらず、接着している CNT の変形の程度も顕著な差は見られなかったことから、それらが接着可否を決めているわけではないことが示唆された。

4-2. 配向 CNT のネットワーク破断による亀裂進展が接着に及ぼす影響

配向 CNT 表面の亀裂発生が衝突粒子を捕捉し接着された状態を形成する条件となっていることが経験則的に確認できたことから、配向 CNT の水素エッチング処理により表面に亀裂の生じやすい状態を形成したときの SUS 球の接着可否を調べた。その結果、エッチング処理により SUS 球の捕捉性は向上せず、衝撃吸収性が低下した。このことは、亀裂発生、進展過程では CNT ネットワークの破断に伴うエネルギー散逸が生じることによる衝撃吸収過程が捕捉可否と関わりがあることを示唆する。ここで、衝突痕まわりの円周状亀裂の形状に着目すると、SUS 球が反発・脱離した場合には衝突痕と同心円状に亀裂が生じていたのに対し、捕捉・接着された場合には円周状亀裂の中心が衝突痕の中心からずれた、非対称な形状をなしている傾向があった。この違いがどのように衝撃吸収機構に反映されているかを明らかにするために、SEM 内で直径 $300\mu\text{m}$ の円柱型圧子を用いた配向 CNT の押し込み試験を行った。その結果、亀裂発生時の圧子の押し込み深さが深いほど、圧子から遠い位置で亀裂が発生した。言い換えれば、遠方で亀裂が生じる直前には、配向 CNT はより大きなひずみエネルギーを蓄積した状態である。亀裂が発生してこれが放出されると考えれば、ハイスピードカメラ観察において、捕捉時のみ配向 CNT が大きく振動したと矛盾せず、このことがより効率的なエネルギー散逸を生じさせる要因となっていると推察される。SUS 球が捕捉された場合には衝突痕の中心に対して非対称な円周状亀裂が生じることで、局所的に深いところで亀裂が進展する状態を形成できていると考えられる。そのような非対称性が生じるのは、配向 CNT のエッジに近い部分に衝突した場合に選択的に見られたことから、球の周りに存在する CNT に働く張力のバランスが影響したものと考えられる。このことは、一様に成長させた配向 CNT よりもそのようなエッジを意図的に形成するような成長制御を行うことで衝撃吸収性を向上させられることを示唆しており、高速接着における接着性を向上させるために有用な知見と言える。

4-3. 高速負荷時の配向 CNT の変形挙動および接着力

3-1.a に述べた方法で配向 CNT に約 $50\mu\text{m}$ のマイクロビーズを押し込みながら変形過程を SEM 観察した。ゆっくり押し込んだ場合数 $100\mu\text{m}$ の広い領域で配向 CNT が圧縮され、ビーズ直下では CNT が大きく湾曲して深さ方向に $10\mu\text{m}$ オーダー座屈が複数生じる。ビーズを引き離す際にはやや形状が回復して実際の貫入深さよりも浅い痕が形成された(図 2a)。これに対し、高速負荷時には、ビーズを囲むように円周状亀裂が発生すると同時に、ビーズ直下では CNT 先端部分のみが局所的に押し潰されるように変形した。衝突痕表面近傍の厚さ数 μm の白いコントラストを示す部分に幾重にも細かい座屈が形成されており(図 2b)、これは接着界面での CNT 高密度化を意味する。実際に、ビーズを引き離しながら接着力を計測した結果、ゆっくり押し込んで CNT 全体がたわむ系では $<10\mu\text{N}$ であったのに対し、高速負荷時には $10\sim 130\mu\text{N}$ であった。高速負荷により真実接触面積が効果的に増大し、これが接着力の違いに反映されると考えられる。

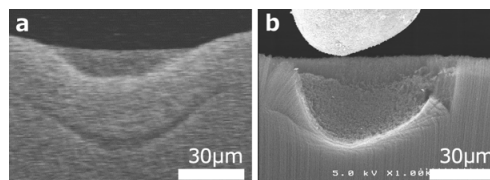


図 2. 直径数 $10\mu\text{m}$ のマイクロビーズを(a) $10\mu\text{m/s}$, (b) 9m/s で押し込んだ後の配向 CNT.

4-4. 配向 CNT 先端の凝集構造が粒子に対する垂直接着力に与える影響

水素エッチング処理を行った配向 CNT に対して、 $20\sim 60\mu\text{m}$ 程度の異なる粒径のマイクロビーズをそれぞれ $0\sim 700\text{nm}$ 程度の深さまで押し込んで予荷重を負荷した後、引き離した際に接着力を計測した。その結果、配向 CNT 先端が針山状の凝集構造を形成するとより小さい予荷重で大きい接着力が得られ、その程度は粒径と針山のサイズの組み合わせが影響することを示した。しかしながら、粒径に最も敏感だった、エッチング処理 30 分の配向 CNT のなす針山のサイズや分布は、その谷間に実験に用いたマイクロビーズ入り込めるような形状ではない。真実接触面積を稼げている要因として、個々の針山が大きくなると同時に CNT が低密化していることが考えられる。実際に、エッチング処理を行うと弾性率が低下することがフォースカーブから裏付けられた。粒子を押しつけた際、わずかな予荷重で個々の針山が変形・座屈しやすくなり針山の側面をなす CNT がより被着面に追従しや

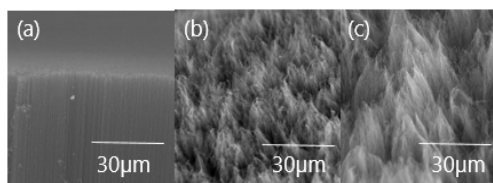


図 3. (a)合成直後、および水素エッチング処理を (b)30 分、(c)60 分行った配向 CNT.

すくなくて真実接触面積が稼げたと推察される。

このようにエッチングにより針山構造を形成する構造制御は、粒子をゆっくりわずかな予荷重で接着させる場合には有効であることが示された。ただし、高速で粒子を接触させる場合には十分な接着力が得られないことも確かめられた。この傾向は、配向 CNT に対して圧子をゆっくり針山に押し込んだ後、ピエゾアクチュエータを用いて約 9m/s の速さでさらに 9 μ m 押し込み、その後引き離しながら接着力を計測することで確かめられた。その代わりに、エッチング処理を 10 分間行ったとき、最大の接着力が得られる傾向があった。撃力負荷時には針山状の構造をなす CNT の変形挙動が準静的な押し込み時とは異なっていることが推察され、それについては今後解き明かしていく必要がある。

4-5. 配向 CNT からなる試料支持体の合成法確立と宇宙物質解析への寄与

粒子状固体に対する接着特性を明らかにした配向 CNT を用いて実際に宇宙物質解析用の支持体を作製した。得られた知見を元に、CNT 成長時間および成長後のエッチング時間を最適化した。支持体として利用するためには、通常の合成に用いる Si 基板ではなくステンレス鋼(SUS304)の表面に合成する必要があった。ステンレス中の Fe は CNT 合成触媒として機能するため合成環境に深刻な影響を与えるが、表面改質を行い、ヤモリテープとして機能する形態の配向 CNT を合成する条件を確立した。合成した配向 CNT の上に、小惑星探査機「はやぶさ2」の持ち帰った試料中の mm サイズの様々な形状の粒子を保持した結果、長時間の計測でもドリフトや振動を生じさせることなく、かつ支持基板が X 線に対して影を作ることもなく、個々の粒子全体の内部構造の三次元マップを極めて高精度に非破壊で捉えることに寄与できた。これは Phase-2 高知チームによる複数機関が連携してマルチスケールで個々の粒子の多元解析を行う最初のプロセスであり、これが成功したことで、それ以降の解析を戦略的に進めることを可能とし、宇宙物質科学での様々な成果をアシストする役割を果たした [8]。

4-6. 衝突粒子の捕捉・接着における配向 CNT の高さの影響

4.1, 4.2, 4.4 節で述べた、配向 CNT を用いたマクロスケールでの接着特性評価では、高さ 1.2 ~ 1.5 mm に成長させた配向 CNT を用いた。直径 1 mm のステンレス鋼(SUS)球を衝突させると、衝突速度が 2~7 m/s において捕捉でき、接着力もゆっくり押し込むときよりも高くなることが示された。ただし、この速度域においても実際に捕捉できる確率は約 20 %であった。これに対して、2 高さ 0.5~3.0 mm の配向 CNT に対して、同じサイズの SUS 球を衝突させた結果、CNT 高さを 2.0 mm 以上にすると捕捉確率は 50 %を超えることが確認できた (図 4a)。衝撃吸収材として働く配向 CNT の高さを増大させればより効率的に衝突エネルギーを散逸させられると考えれば当然の結果かと考えられた。しかしながら、実際に粒子衝突による撃力が配向 CNT 底面まで伝播した力を計測した結果、その大きさは衝突速度に依存する傾向が確認できたが、CNT の高さによる顕著な違いは見られず、さらには SUS 球が捕捉・接着できるときと、反発・離脱したときにも差はみられないことが示された(図 4b)。この結果は、配向 CNT に対して SUS 球の貫入直後から底面に到達するまでのエネルギー散逸の大きさは捕捉可否に大きく影響しないことを示唆する。その一方で、ハイスピードカメラ観察から、SUS 球が捕捉される場合には、SUS 球が底面に到達していったん反発した後に、配向 CNT から飛び出すことなく内部で上下左右に振動しながら静止する過程がみられた。このようなテープ面内方向に振動する振る舞いは、SUS 球が反発して配向 CNT から飛び出した場合には見られなかった。このような挙動において、SUS 球が CNT の接着力で拘束されながらエネルギーを散逸していく過程が高速接着系における捕捉・接着機構を理解する鍵となっていると考えられる。

また、捕捉可能な速度域は 3.5-6.0 m/s であり、これも CNT 高さにはよらなかった。この速度域の下限は、衝突痕の観察から、図 1b に見られるような亀裂が生じる最小の衝突速度であることがわかり、貫入時のエネルギー散逸が CNT の高さには影響しないという考えと矛盾しない。一方、上限は、接着界面における個々の CNT 接着力に加え、配向 CNT 内部でのエネルギー損失の大きさにより決まると考えられる。上に述べた様な高速負荷時の接着界面構造由来の接着力向上、および、より効率的にエネルギー散逸を生じさせる CNT ネットワーク構造を検討していくことにより、衝突捕捉材としての機能向上に繋げたいと考えている。

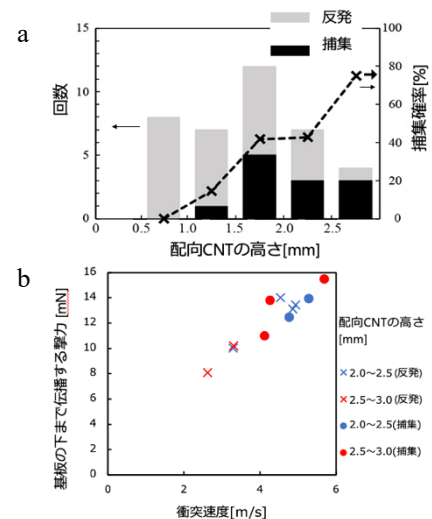


図 4. 異なる高さの配向 CNT に直径 1mm の SUS 球を衝突させたときの(a)捕捉確率、および (b)配向 CNT 底面まで伝播した撃力の衝突速度依存性。

- [1] Y. Maeno, Y. Nakayama, Appl. Phys. Lett. **94**, 012103 (2009).
- [2] M. Uesugi, K. Hirahara, et al. Rev. Sci. Instrum. **91**, 035107 (2020).
- [3] N. Shirai et al., Meteoritics & Planetary Science **55**, 1665-1680 (2020).
- [4] S. Chakrabarti et al., Jpn. J. Appl. Phys. **45** L720 (2006).
- [5] C. Daraio et al., Appl. Phys. Lett. **85**, 5724 (2004).
- [6] A. F. Gilvaei et al. Carbon **49**, 4928 (2011).
- [7] R. Serizawa et al. Adv. Space Res. **69**, 2787 (2022).
- [8] M. Ito et al., Nature Astronomy **6**, 1163 (2022)など。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Serizawa Ryota, Yano Hajime, Takeda Yuki, Oizumi Shuto, Ishibashi Yukihiro, Arai Kazuyoshi, Li Yuxuan, Hirahara Kaori, Hirai Takayuki, Sun Yuchen, Kooi Steven E., Nelson Keith A.	4. 巻 69
2. 論文標題 Modeling the particle capture performance by vertically aligned carbon nanotubes for a comet rendezvous sample return	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 2787 ~ 2797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2021.10.013	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 該当する

1. 著者名 M.-C. Liu, K. A. McCain, N. Matsuda, A. Yamaguchi, M. Kimura, N. Tomioka, M. Ito, M. Uesugi, N. Imae, N. Shirai, T. Ohigashi, R. C. Greenwood, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, K. Hirahara, et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Incorporation of 160-rich anhydrous silicates in the protolith of highly hydrated asteroid Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 1172 ~ 1177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01762-4	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 該当する

1. 著者名 N. Tomioka, A. Yamaguchi, M. Ito, M. Uesugi, N. Imae, N. Shirai, T. Ohigashi, M. Kimura, M.-C. Liu, R. C. Greenwood, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, K. Hirahara, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 A history of mild shocks experienced by the regolith particles on hydrated asteroid Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	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) 10.1038/s41550-023-01947-5	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 該当する

1. 著者名 M. Ito, N. Tomioka, M. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Shirai, T. Ohigashi, M.-C. Liu, R. C. Greenwood, M. Kimura, N. Imae, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, A. Tsuchiyama, M. Yasutake, R. Findlay, I. A. Franchi, J. A. Malley, K. A. McCain, N. Matsuda, K. D. McKeegan, K. Hirahara, A. Takeuchi, et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 1163 ~ 1171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01745-5	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 該当する

1. 著者名 Shirai Naoki, Karouji Yuzuru, Kumagai Kazuya, Uesugi Masayuki, Hirahara Kaori, Ito Motoo, Tomioka Naotaka, Uesugi Kentaro, Yamaguchi Akira, Imae Naoya, Ohigashi Takuji, Yada Toru, Abe Masanao	4. 巻 55
2. 論文標題 The effects of possible contamination by sample holders on samples to be returned by Hayabusa2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1665 ~ 1680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13480	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 A. Yamaguchi, N. Tomioka, M. Ito, N. Shirai, M. Kimura, R. Greenwood, M.-C. Liu, K. McCain, N. Matsuda, M. Uesugi, N. Imae, T. Ohigashi, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, K. Tanaka, F. Hirahara, I. Sakurai, I. Okada, Y. Karouji, S. Nakazawa, T. Okada, T. Saiki, S. Terui, M. Yoshikawa et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Insight into multi-step geological evolution of C-type asteroids from Ryugu particles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 398 ~ 405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-01925-x	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 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 M. Ito, N. Tomioka, M. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Imae, N. Shirai, T. Ohigashi, M. Kimura, M.-C., Liu, R.C. Greenwood, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, A. Tsuchiyama, M. Yasutake, R. Findlay, I.A. Franchi, J.A.Malley, K.A. McCain, N. Matsuda, K.D. McKeegan, K. Hirahara, A. Takeuchi, et al.
2. 発表標題 ONE YEAR ON! A SUMMARY OF THE ANALYTICAL WORK ON RYUGU PARTICLES CONDUCTED BY PHASE2 KOCHI CURATION
3. 学会等名 MetSoc 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Richard, 上杉健太郎, 中藤亜衣子, 与賀田佳澄, 湯沢勇人, 兒玉優, 平原佳織, 櫻井郁也, 岡田育夫, 唐牛讓, 岡崎啓史, 野口高明, 三宅亮, 宮原正明, 瀬戸雄介, 松本徹, 伊神洋平, はやぶさ2キュレーションチーム, 白井寛裕, 渡邊誠一郎, 津田雄一
2. 発表標題 小惑星リュウグウ表層粒子の衝撃変成
3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Hirahara
2. 発表標題 Application of carbon nanotube-based gecko adhesive tapes for aerospace materials science
3. 学会等名 第63回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Ito, N. Tomioka, M. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Imae, N. Shirai, T. Ohigashi, M. Kimura, M-C, Liu, R.C. Greenwood, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, A. Tsuchiyama, M. Yasutake, R. Findlay, I.A. Franchi, J.A. Malley, K.A. McCain, N. Matsuda, K.D. McKeegan, K. Hirahara, A. Takeuchi, et al.
2. 発表標題 Hayabusa2 returned samples: Unique and pristine record of Solar System materials from asteroid Ryugu
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (JpGU2022) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Shirai, M. Ito, N. Tomioka, M. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Imae, T. Ohigashi, M-C. Liu, R.C. Greenwood, M. Kimura, S. Sekimoto, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, M. Yasutake, K. Hirahara, A. Takeuchi, I. Sakurai, I. Okada, Y. Karouji, T. Yada, M. Abe,
2. 発表標題 Chemical characteristics of Ryugu particles returned by the Hayabusa2 spacecraft
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (JpGU2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Uesugi, H. Yuzawa, T. Ohigashi, M. Ito, N. Tomioka, Y. Kodama, N. Shirai, K. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Imae, M. Kimura, A. Nakato, K. Yogata, K. Hatakeda, A. Miyazaki, T. Yada, M. Abe, K. Hirahara, I. Sakurai, I. Okada, M.-C. Liu, R. C Greenwood
2. 発表標題 Characterization of organic materials in Ryugu particles and investigation for their origin and nature
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (JpGU2022)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名	M. Uesugi, M. Ito, N. Tomioka, N. Imae, A. Yamaguchi, M. Kimura, N. Shirai, T. Ohigashi, M-C. Liu, R.C Greenwood, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, M. Yasutake, K. Hirahara, A. Takeuchi, I. Sakurai, I. Okada, Y. Karouji, T. Yada, M. Abe
2 . 発表標題	Multiscale characterization of the Asuka 12169 meteorite; rehearsal of Hayabusa2 returned sample analysis
3 . 学会等名	The 12th Symposium on Polar Science
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	M. Ito, N. Tomioka, M. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Imae, N. Shirai, T. Ohigashi, M. Kimura, M-C, Liu, R.C. Greenwood, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, A. Tsuchiyama, M. Yasutake, R. Findlay, I.A. Franchi, J.A. Malley, K.A. McCain, N. Matsuda, K.D. McKeegan, K. Hirahara, A. Takeuchi, et al.
2 . 発表標題	Hayabusa2 Returned Samples: Unique and Pristine Record of Solar System Materials from Asteroid Ryugu
3 . 学会等名	The 53rd Lunar and Planetary Science Conference (LPSC 2022) (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	M. Ito, N. Tomioka, M. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Imae, N. Shirai, T. Ohigashi, M. Kimura, M-C. Liu, R.C Greenwood, K. Uesugi, A. Nakato, K. Yogata, H. Yuzawa, Y. Kodama, M. Yasutake, R. Findlay, I.A. Franchi, Malley J., K. Hirahara, A. Tsuchiyama et al.
2 . 発表標題	The C-type asteroid Ryugu: A first detailed look by Phase2 Curation Kochi (Ph2K)
3 . 学会等名	Hayabusa symposium 2021 (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	K. Hirahara
2 . 発表標題	Carbon nanotube-based gecko tapes as supportive devices for microparticles
3 . 学会等名	The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem 2021) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1. 発表者名 M. Abe, K. Hirahara
2. 発表標題 Effect of Impact Preloading on The Adhesion of Carbon Nanotube Gecko Tapes Against The Collision of Stainless Steel Balls
3. 学会等名 MNC2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 太智, 平原 佳織
2. 発表標題 カーボンナノチューブヤモリテープの衝突粒子捕集におけるテープ形態の影響
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2022年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩井 広樹, 平原 佳織
2. 発表標題 窒化ホウ素ナノチューブからなる難燃性ヤモリテープの開発
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2022年度関西学生会卒業研究発表講演会
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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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