# カーボンナノチューブの宇宙環境曝露実験

渕	田	安	浩	
(本社	未来	医技術創	削造部)	
人	見		尚	

石 川 洋 (本社 未来技術創造部)

見 尚

# Space Examination of Durability of Carbon Nanotube

Yasuhiro Fuchita

Yoji Ishikawa

Takashi Hitomi

# Abstract

We performed experiments to test the properties of carbon nanotubes (CNTs) under the extreme environmental conditions in space. CNTs, which are much lighter and stronger than steel and have the necessary tensile strength to sustain the cable of a space elevator, have attracted our attention as the main material of such a cable. The test CNT samples were exposed to the environment in space by placing them on the outside of the International Space Station for one or two years. An analysis and a detailed examination of the mechanical properties, surface appearance, and durability of both thin and thick CNT yarns that were exposed in space were performed. Their results indicated that the apparent degradation of the CNT yarns might have been caused mainly by the action of atomic oxygen. In addition, the changes in Young's modulus were negligible. The necessity of adopting measures to protect a CNT cable against the space environment was also noted.

#### 概 要

カーボンナノチューブ(CNT)は、鋼材より軽くて強い材料である。そのため、宇宙エレベーターのケーブル材 料として注目されている。宇宙の過酷な環境下における物性を確認するため、宇宙空間での曝露実験を行った。 CNTを国際宇宙ステーションの船外に置き、1年または2年間曝露した。本報告では、細撚りおよび太撚りのCNT 撚糸の機械的性状,外観および曝露環境での変状に関して,顕微的に分析した。その結果,宇宙曝露によって, CNTの強度低下および表面の欠損が確認できた。宇宙環境での使用に対して、表面からの損傷を防止するため、 何らかの表面被覆が必要なことがわかった。

#### 1. はじめに

カーボンナノチューブ(CNT: carbon nanotube)は,軽量 (アルミニウムの約半分の比重),高い機械引張強度(鋼鉄 の約20倍),高弾性,高電気伝導性(銅の1,000倍以上)かつ 高熱伝導性(銅の5倍以上)などの優れた特性を有するこ とから, 航空機の構造体, 圧力容器の高強度化・軽量化, 自動車の配線材料などへの適用が期待されている。また, 建設用材料としては,鉄筋コンクリート造の鉄筋の代替 や橋梁を支えるケーブルへの利用が想定され、柱や梁の 断面縮小化、構造物の軽量化などの効果が期待できる。 また、軽量・高強度のCNTはケーブルの主要な材料とし て, 宇宙エレベーター建設 (Fig. 1) に不可欠である<sup>1)</sup>。 そのため、空気が希薄な高層大気中や宇宙空間でのCNT の耐久性を明らかにする必要がある。そこで、本研究で は、厳しい環境下でのCNTの耐久性に関する基礎データ を取得するため、宇宙曝露実験を行うことにした。



Fig. 1 宇宙エレベーター建設構想の概念図1) A Schematic of Space Elevator Construction



「きぼう」とExHAM<sup>2)</sup> Fig. 2 KIBO of ISS and ExHAM

CNTの宇宙環境条件下の劣化については、これまでほ とんど研究されていない。高度85km程度より上空の熱圏 では、太陽放射中の紫外線の作用による酸素分子の解離 で生じる原子状酸素(AO: atomic oxygen)に曝される。あ わせて、放射線や紫外線(UV)、あるいは熱サイクル等に よる劣化が懸念されている。宇宙環境下の曝露実験は、 実験後の試料の回収が容易な国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station)/「きぼう」日本実験棟(Fig. 2参照)で実施できる。

実験では、宇宙曝露における試料(フライト品と称す) のISS外壁への設置位置および曝露期間を説明変数とし、 それに対する劣化の状況を調べた。ここでは、それらの 結果を、宇宙曝露実験に並行して行った地上対照試験の 結果<sup>3,4)</sup>と比較して考察を進める。地上対照試験はこれま でに2回行っており、別ロットのCNTでも引張強度は同様 の傾向を示し、試験の再現性が確認できた。地上対照試 験では、電子線(EB)および紫外線(UV)と比較して、原子 状酸素(AO)による損傷が支配的であった。そのため、本 報告は、文献5)~12)をまとめたものであり、地上対照試 験におけるAOの結果とフライト品の結果を比較する。

なお、本実験は、ExHAM(Exposed Experiment Handrail Attachment Mechanism)<sup>2</sup>利用テーマのひとつとして、宇宙 航空研究開発機構(JAXA)との共同研究として実施した。 ExHAMは、Fig. 2に示すようにISSの外側に設置してあり、 曝露試験の試料をその外壁面に設置できる設備である。 本実験の実施主体は、大林組、静岡大学、有人宇宙シス テムである。

# 2. 実験の概要

# 2.1 地上対照試験

フライト試験に先立って行った地上対照試験での試験 体は、CNT撚糸<sup>13,14)</sup>とした。フライト環境では、宇宙空 間の複合環境となり、個別の環境影響が判別できないた め、個別の環境条件ごとの影響度をあらかじめ把握する ために行った。Photo 1に直径20µmのCNT撚糸の走査電子 顕微鏡(SEM)画像を示す。現段階では、単結晶で構成さ れた長尺のCNTの合成が実現していないため、CNTを分 子間力で撚り合わせた撚糸を使用することにした。撚り の太さは、撚り速度等を調整し、細撚りおよび太撚りの2 種類を準備した。

地上対照試験は、JAXA所有の真空複合環境試験設備 においてAO・EBの照射を、小型スペースチャンバ3号機 においてUVの照射を別々に行った。Table 1に地上対照試 験の照射期間を、Table 2に照射条件を示す。本試験では、 AOおよびUVはJAXAでの新規材料に関して行う通常の 最大の照射期間の照射量とし、宇宙環境の半年程度に相 当する。通常、照射期間と劣化の度合いは、線形関係に なり、フライト品の評価にあたり、地上対照試験結果を 外挿して比較するとされている。EBは、約2年間の曝露 環境に相当する照射量である。環境仕様は、JAXAの「宇



(a)側面 Photo 1 CNT 撚糸の電子顕微鏡像 SEM Images of CNT Yarn

lable I 地上対忠訊練の忠射期	able 1	地上対照試験の照射期	靔
--------------------	--------	------------	---

Terms of Exposition of Ground Test			
	照射日(番号は照射回)		
原子状酸素(AO)	①2014/11/17~27, ②2016/6/8~17		
放射線(EB)	①2014/11/12, ②2016/6/21		
紫外線(UV)	$(1)2015/2/24 \sim 3/2, (2)2016/6/22 \sim 30$		

Table 2 地上対照試験の照射条件

Articles of Exposition of Ground Test			
No.	宇宙曝露 環境	環境スペック (SEES 解析予測値)	試験実績値 (AO・UV:半年, EB:2年相当)
1	原子状酸素 (AO) [atoms/cm <sup>2</sup> ]	(進行方向前面) 最大値 : 3.960×10 <sup>21</sup> 平均値 : 2.468×10 <sup>21</sup> 最小値 : 1.448×10 <sup>21</sup>	第1回合計照射量 7.163×10 <sup>20</sup> 第2回合計照射量 7.127×10 <sup>20</sup>
2	放射線 (EB) [kGy]	(総照射量) 無限平板:2.861 有限平板:2.184 球殻 :5.722	第1回総照射量 3.003 第2回総照射量 2.861
3	紫外線 (UV) [ESD]	(進行方向前面)211ESD (飛翔体は正方形, ISS 等 の形状による影響等は 考慮していない。)	総照射量 50 (最大流束 10ESD/day)
4	地上保管	常温保管	常温保管

[注 1] 放射線は、トータルドーズ(陽子と電子線の合計)であり、 さまざまな宇宙線が存在する環境を SEES 結果の総量と して電子線に置き換えている

- [注2]紫外線は、波長の短い方が影響は大きく、通常はキセノ ンランプにて代用しているが、新規材料については波長 の影響を考慮し、限界・課題を把握した上で実施した。
- [注 3] 地上保管は,曝露試験に供しない試験体を試験前・1年 間保管・2年間保管した場合の特性変化を測定した。
- [注 4] Gy(グレイ)は、電離放射線の照射により物質 1kg につき 1Jの仕事に相当するエネルギーが与えられるときの吸収 線量が 1Gy
- [注 5] ESD(Equivalent Sun Day)は、紫外線照射量の単位、
  1ESD は 1 日間にわたって終日大気圏外で太陽光が垂直 入射されたときに相当する紫外線量

宙環境計測情報システム(SEES: Space Environment & Effect System)」<sup>15)</sup>を用いた検討から,2015年4月1日から2017年4月1日までの2年間(フライト試験における最長期間)を曝露期間として模擬した。その間の総照射量に対して1/3,2/3,3/3の3つの水準の照射量に対する試験体を作製した。

Anticles of Fight Examination			
フライト品 試験体記号	曝露位置	計画 曝露期間	実施 曝露期間
R	背面	2年	769日
S	背面	1年	384日
Т	背面	1年	384日
V	前面	1年	484日

Table 3 フライト品の実験条件の組合せ Articles of Flight Examination



(a)背面側
 (b)前面側
 Photo 2 フライト品のExHAMへの設置状況
 (赤矢印はISS進行方向を示す)
 Appearance of Settlement of Exposed Flight Specimens



Fig. 3 フライト品の組立て概要 Outline of Specimens for Flight Irradiation



Photo 3 フライト後試験体の外観の例 Appearance of Specimens after Flight Irradiation

# 2.2 フライト試験

フライト品の宇宙曝露実験の組合せをTable 3に示す。 ExHAMへのフライト品の設置状況をPhoto 2, Fig. 3およ びPhoto 3に示す。1年曝露試験体では、ISS進行方向背面 (SおよびT試験体)と前面(V試験体), 2年曝露試験体では、 背面(R試験体)を設定した。ISSの地球周回軌道の地上高 度は約400kmであり、極めて希薄であるものの地球大気 の熱圏の中にある。そのため、ISSの進行方向の前面と背 面とでは、熱圏内のAOなどの気体原子の当たり方が異な る可能性があり、前面、後面を区別してフライト品を設 置することにした。

Table 4	評価項目

Articles of Evaluation			
目的	評価項目	内容	
機械的特性調查	引張強度 ヤング率	強度・弾性率の変化	
外観調査	SEM+EDS	ミクロスケール観察	
欠陥の変化	ラマン計測	分子レベルの構造変化	



Fig. 4 引張試験で使用した試験片の模式図 Apparatus of Measurement of Tensile Strength

# 試験体の評価方法

# 3.1 機械的性状調查

地上対照試験およびフライト品試験体の評価項目を Table 4に示す。いずれの試験体でも、CNT撚糸のほかに CNT/エポキシ複合材料の試験体を搭載したが、大きな変 状がみられなかったため、本報告は、CNT撚糸のみにつ いて対象としている。

引張試験は、小型卓上試験機を用いた。Fig. 4に引張試 験に使用した試験片の模式図を示す。ケント紙で作製し た試験片土台に、シアノアクリレート系モノマーを主成 分とした瞬間接着剤を用いてCNT撚糸を固定した。引張 試験はゲージ長10 mm、変位速度0.1 mm/minで行った。 また、ひずみの測定は非接触伸計により行った。

光学測定顕微鏡で直径を測定し,CNT撚糸断面を真円 と仮定して断面積を求めた。測定した引張力を断面積で 除することにより,引張応力および破断時の引張強度を 求めた。ひずみは,ゲージ長から測定した変位から求め た。以上から,応力-ひずみ(S-S)曲線をプロットし,傾き が最大となる領域からヤング率を求めた。ヤング率を求 めたひずみの範囲は,0-0.3%であった。

各材料の各照射量に対して5個の試験片の引張試験を 行い,引張強度やひずみ等はそれら5つの測定値の平均値 として評価した。

#### 3.2 外観調査方法

表面形態の外観観察には,走査型電子顕微鏡を用いた。 観察は加速電圧3kVで行った。撚糸直径は、マイクロメ ータや光学顕微鏡を用いて測定した。いずれも、フライ ト品の宇宙曝露面側から観察した。

### 3.3 欠陥の測定方法

CNT結晶構造の欠陥の測定には、ラマン分光測定装置

を用いた。これは、光源、分光器、および検出器から構成される。得られる信号は、横軸を波長(波数)、縦軸を 強度(比)とするラマンスペクトルで表される。ラマンス ペクトルはある波長域に分子振動由来のピークを持って いる。高配向熱分解黒鉛(HOPG)は、炭素の平面状に広が るsp<sup>2</sup>結合で構成されたグラフェンが層状に合成された 実験用素材であり、Gバンド(1,580cm<sup>-1</sup>付近)と呼ばれるス ペクトルのピークを持っている。欠陥を持つ結晶構造や 損傷を受けたものは、Dバンド(1,360cm<sup>-1</sup>付近)やD'バンド (1,620cm<sup>-1</sup>)などのスペクトルピークが現れる。

#### 4. 試験の結果

### 4.1 機械的特性

Fig. 5に細撚りCNT撚糸の応力-ひずみ曲線を示す。図には、フライト品のフライト前、背面384日(1y)、背面769日(2y)の結果(試験体数各5個)が示されている。Fig. 6に照射量と機械的特性(引張強度、ヤング率)との関係を示す。図の横軸Total doseは、地上対照試験のAO照射量を表し、それぞれ0/3(照射なし)、1/3(2か月相当)、2/3(4か月相当)、3/3(6か月相当)を意味する。前面細撚りは、フライト回収時に数本が切断するほど劣化が進んでおり、目視でも糸の直径の減少がわかる状況であった。このため、前面細撚りは、引張強度の測定ができなかった。

地上対照試験の結果について再現性が確認できたため, ここでは地上対照試験の2回目のAO照射結果に, CNT細 撚りのフライト品の結果を重ねた。地上対照試験の計測 結果は縦の誤差棒を付したプロットで表示し,宇宙曝露 試験の試験結果の平均値を太線で示す。照射量0/3(フラ イト前,未照射)と比較して,回収後のフライト品は引張 強度が低下していることがわかる。引張強度は,地上対 照試験の1/3の照射量(進行方向前面で2か月相当)と同程 度であり,宇宙環境は地上対照試験の照射条件より緩慢 であると考えられる。

Fig. 7に太撚りCNT撚糸について,フライト品のフラ イト前,背面384日(1y),前面484日(1y),背面769日(2y) の応力-ひずみ曲線を示す。Fig. 8に照射量と機械的特性 (引張強度,ヤング率)の関係を示す。太撚りについては, 前面設置の試料に対する測定ができなかった細撚りと異 なり,前面,背面両方の測定ができ,背面よりも前面の 方が引張強度は低下していることが測定できた。背面の 引張強度は,細撚りと同様に地上対照試験の1/3程度,進 行方向前面の引張強度は地上対照試験の2/3(4か月)~3/3 (6か月)に相当し,前面の宇宙環境が厳しいことがわかる。

ヤング係数は、地上対照試験・フライト品の細撚り・ 太撚りともに照射量にかかわらず,大差がないことから, CNT撚糸内部の損傷を受けていない部分の弾性変形性能 が保持されていると推察される。

#### 4.2 外観観察

Photo 4にCNT撚糸の走査電子顕微鏡画像を示す。フラ





(a)照射量と引張強度
 (b)照射量とヤング率
 Fig. 6 CNT 撚糸(細撚り)フライト品の機械的特性
 (誤差棒ありプロットは地上実験,直線は宇宙実験)
 Mechanical Properties of Thin Yarns of Exposed CNT



Fig. 7 CNT 撚糸(太撚り)フライト品の S-S 曲線 Strain-Strength Curves of Thick Yarns of exposed CNT







(b)フライト品CNT細撚り(前面曝露, V試験体) 左:カバー部分,右:露出部分 30,000倍





(d)フライト品CNT太撚り(前面曝露,V試験体) 左:カバー部分,右:露出部分 30,000倍
 Photo 4 フライト品CNT撚糸の走査電子顕微鏡画像(囲み部分は損傷箇所の例)
 SEM Images of Exposed CNT Yarns



左:1,500倍,右:30,000倍 Photo 5 フライト前CNT撚糸(太撚り)の走査電子顕微鏡画像 SEM Images of CNT Yarns



イト品試験体のサンプル固定用のカバーで覆われている 部分と露出部分との比較を行った。特に,劣化の大きい 細撚りのV試験体について(a),(b)に示す。 直径はカバー 部分での 24.9µmに対して,露出部分では20.6µmと4.3µm の差異があり,空間への直接的な曝露により,明らかに 直径が減少している。また,カバー部の撚糸表面にCNT 繊維とは異なる粒状のものが観察されることから,カバ 一部でも若干の損傷を受けていると考えられる。これに 対して、露出部分では,表面から数本分の深さまでが欠 損している様子が観察できる。これから,カバー部でも、 原子状酸素(AO)のカバー内部への回り込みがあったも のと考えられる。

太撚り((c),(d))についても、カバー部分での直径44.0µmに 対して、露出部分のそれは40.7µmで、3.3µmの差異とな った。細撚りと同様に、カバー部分に比べて露出部分の 損傷が大きいことがわかる。撚りの直径にかかわらず、 いずれの撚糸も1年間の宇宙曝露で約4µmの直径の減少 があったといえる。 フライト前のCNT撚糸の走査型電子顕微鏡画像をPhoto 5に示す。フライト前(地上対照試験では0/3に相当)では, CNTの繊維が明確に確認できる。これとは異なり,フラ イト品のカバー部分,露出部分となるに伴い,CNT繊維 が欠損している様子が観察できる。

また、カバー部分ではCNTの方向はほぼ揃っているの に対して、露出部分では、長い繊維が表面にみられず、 短い繊維となって再付着したものや、アモルファス化 (CNTの結晶構造が破壊され非晶質化)した炭素が付着し たようなものがみられた。今回使用したCNTは合成時に 塩化鉄を触媒として使用しており、CNT内部に包含され ている触媒金属の成分がCNTの層状部分の損傷により露 出した可能性もあると考えられる。

# 4.3 欠陥の測定

CNTの分子構造の欠陥の測定は、ラマン分光測定を用いて行った。Fig. 9にAO照射のCNT撚糸のラマンスペクトルを示す。地上対照試験でのAO照射では、 Gバンド



(1,580cm<sup>-1</sup>付近)が低下しDバンド(1,360cm<sup>-1</sup>付近)が増加 している。これは、AO照射による損傷によって、CNT に多くの欠陥が生じたことを示している。フライト品で は、CNT細撚り、太撚りのいずれでも、Gバンドのスペ クトル強度が低下し、Dバンドのそれが増加しているこ とがわかった。また、AO照射およびフライト品では、未 照射(フライト前)に現れなかったD'バンド(1,620cm<sup>-1</sup>)が みられる。D'バンドは、Huangら<sup>16,17</sup>により、CNTの結晶 構造面の端部であるグラフェン層端部が露出していると 定義されている。Fig. 9でも、D'バンドが観察され、グ ラフェン層端部の露出があると推察される。Photo 4の電 子顕微鏡画像で見られる外観観察における、CNTのグラ フェン層端部の存在を裏付けていると考えられる。

Fig. 10に,地上対照試験の電子線(EB)および紫外線 (UV)によるG/D比(GバンドとDバンドのピークの比)の測 定結果を示す。未照射と照射でのG/D比の変化はなかっ たことを確認している<sup>5,6)</sup>。このことから,以降の考察で は,地上対照試験の原子状酸素(AO)の結果と比較するこ ととした。

Fig. 11にAOによるG/D比への影響について、細撚り、 太撚りの結果を示す。図中には、フライト品の結果を太 線で併記する。G/D比は、結晶構造の欠陥の度合いを表 わす指標であり、G/D比が大きいほど、損傷が小さいこ とを表している。CNTの結晶性を示すG/D比が、照射前 に比べ照射量に関わらず低下している。このラマン分光 測定ではCNT撚糸の表層に近い部分を測定していること



から、CNT撚糸の表層は、少ない照射量でも損傷を受けたものと考えられる。

未照射(フライト前)と,地上AO照射,あるいはフライ トによる宇宙曝露とでは明らかな差異が認められた。フ ライト品の曝露位置(ExHAMへの設置位置で前面か背面 か)による違いについては,G/D比に示される損傷度合い の前面と背面との間の差異はむしろ小さい。背面での損 傷が前面の損傷度合いと大差がないといえる。ISSは物資 輸送時のドッキングや太陽光パネルの制御に伴い,曝露 期間中に時間的な長さとして1.3~1.4%の期間で,前面・ 背面が通常の位置関係ではなくなったことが記録されて いるが,引張強度など機械的性状が曝露位置により逆転 するほどの影響は受けなかったと考えられる。

### 5. まとめ

宇宙エレベーターの実現に向けたカーボンナノチュー ブの宇宙曝露実験を行い,地上対照試験の結果と比較検 討した。その結果,宇宙曝露した試験体(フライト品)に 対して以下のことがわかった。

 ISSの進行方向・背面方向の位置にかかわらず引張 強度の低下がみられた。地上対照試験で短時間に照 射した損傷の比較により,宇宙環境での損傷の進行 は,解析に基づいた地上での想定実験結果より緩慢 であることがわかった。背面1~2年では2か月相当, 前面2年では4~6か月相当と推察される。

- 2) 宇宙曝露で表面の損傷を受けても、ヤング係数は保持されることがわかった。これは、CNT撚糸内部が健全であり、曝露されていない部分で応力伝達できているものと推察される。この傾向は、細撚り・太撚りに共通していた。
- 3) 電子顕微鏡観察から,原子状酸素が衝突したと考えられる撚糸表面の損傷があることがわかった。ラマン分光測定からも,CNT撚糸表面の結晶度が低下し,CNT撚糸の表面が損傷していることが裏付けられた。細撚り・太撚りに共通した結果であった。
- 4) ラマン分光測定および電子顕微鏡観察から,層状の CNT結晶構造が切断されていると推察される。今後, さらなる詳細分析が必要である。

今後,実際の宇宙環境でのAO照射量やAOの流束密度 に応じた検討を加える必要がある。宇宙エレベーターの 構造材料として想定しているが,CNTが露出か被覆など の適用範囲も含めた検討,ならびに損傷を防止・低減す る対策を考案する必要があると考える。

#### 謝辞

貴重な実験データとともに,本研究を共同で進めてい ただいた宇宙航空研究開発機構,静岡大学および有人宇 宙システムの関係各位に深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 大林組,季刊大林N0.53「タワー」,宇宙エレベータ 一建設構想,2012.2
- 2) http://http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/150528\_exham.html/, 2019.9.10閲覧
- 渕田安浩,他:3F12カーボンナノチューブの耐宇宙環 境性試験 その1 地上対照試験概要と機械的性能 の評価,第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2016-4434,2016.9
- 4) 人見尚,他:カーボンナノチューブの耐宇宙環境性試験
  ※ その2 地上対照試験における原子構造影響評価,第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2016-4435, 2016.9

- 5) 石川洋二,他:2F14宇宙応用を目指した先端材料宇宙 曝露実験テーマについて,第59回宇宙科学技術連合講 演会講演集,JSASS-2015-4317,2015.10
- (1) 渕田安浩,他:カーボンナノチューブの耐宇宙環境性 試験 その3,第61回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2017-4396,2017.10
- Motoyuki Karita, et al. : Characterization of structures and mechanical properties of carbon nanotube yarn exposed to actual space environment, 第53回フラーレン・ナノチュ ーブ・グラフェンシンポジウム, 2017.9
- 8) 人見尚,他:カーボンナノチューブの耐宇宙環境性試験 その4,第61回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2017-4397,2017.10
- Yoji Ishikawa, et al. : Survivability of Carbon Nanotubes in Space, IAC-18- D4.3.3, 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 2018.10
- 人見尚,他:カーボンナノチューブの耐宇宙環境性 試験 その5,第62回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2018-4187,2018.10
- 渕田安浩,他:宇宙エレベーターのためのCNT宇宙 環境曝露試験,第62回宇宙科学技術連合講演会講演 集,JSASS-2018-4727,2018.10
- 12) Motofumi Karita, et al. : Structural changes in carbon nanotube yarn exposed to actual space environment, Carbon Nanotubes, Graphenes and Related Nanostructures, MRS Fall Meeting & Exhibit, 2018.11
- Inoue, Y., et al. : Anisotropic carbon nanotube papers fabricated from multi-walled carbon nanotube webs, CARBON, vol. 49, pp. 2437-2443, 2011
- 14) 井上翼:連続乾式によるカーボンナノチューブ紡績
  糸,日本画像学会誌,第53巻,第1号, pp.71-76,2014
- 15)http://seesproxy.tksc.jaxa.jp/fw/dfw/SEES/Japanese/Top/t op\_j.shtml, 2019.9.10閲覧
- 16) C.H.Huang, et al. : Ultra-low-edge-defect graphene nanoribbons patterned by neutral beam, Carbon, Vol.61, pp. 229-235, 2013
- 17) 片桐元:炭素材料のラマンスペクトル,炭素, No. 183, pp. 168-172, 1998