小径開口から挿入するたわみ調整型 CFRP 製ロッド調査点検機構の開発

Development of deflection-controlled CFRP inspection rod inserted from small openings

東京電力ホールディングス(株)　吉川　慶一　Keiichi　YOSHIKAWA　Non Member
東京電力ホールディングス(株)　桜木　洋一　Youichi SAKURAGI　Non Member
東京電力ホールディングス(株)　熊谷　克彦　Katsuhiko KUMAGAI　Non Member

Access methods to the investigation point are limited in the investigation via small diameter opening or in severe environment. In this study, a carbon fiber reinforced plastic (CFRP)-rod access mechanism is developed. The deflection of the rod is controlled utilizing the lightweight, high strength and rigidity-designable properties of CFRP so that the tip of the rod inserted from a small-diameter opening reaches to the investigation site without any active mechanism.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, CFRP rod, inspection, remote access

1．はじめに

人が立ち入れない場所の調査、例えば小径の開口を経由する必要がある調査、狭隘あるいは過酷な環境（例えば高湿度、低酸素、放射線）の調査の場合、カメラ等の計測器を調査地点まで投入できるアクセス機構が必要となる。走行経路がない、あるいは走行経路上に障害物がある場合には、空間をアクセスする必要がある。また、人の立ち入ることはできないので、調査後にアクセス機構を確実に撤去することが必要な場合、原理的に故障しないシンプルな構造であれば、調査装置としての信頼性は向上する。

本研究では、上記のようなアクセスが困難な場所へ計測器を搬送するためのアクセス機構を開発した。同機構は、炭素繊維強化プラスティック（CFRP）の屈折部のないロッドであり、貫通部と調査対象部の既知の位置関係に合わせ、自重によるたわみ量をコントロールすることで、複雑な可動機構を用いずに調査地点へアクセスするものである。CFRP の軽量で高強度である特性、配置する炭素繊維の種類・量・方向により剛性を自由に設計可能である特性を利用することで、ペイロードの自由度が高く、カメラに加え様々な計測器の搭載が可能となる。

連絡先:吉川　慶一、〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1 東京電力ホールディングス株式会社
経営技術戦略研究所　技術開発部　材料・化学エリア
E-mail: yosikawa.keiichi@tepco.co.jp

また、ロッドを用いて計測器が空中を通っていくことで、走行路上にある障害物を回避して目的地へのアクセスが期待できる。

2. たわみを利用したアクセス機構の設計

2.1 幾何学的制約条件

小口径の開口部を通過させるためのロッドの寸法制約条件、先端に搭載する荷重の条件（調査用の計測器の重量を想定）を設定した。また、目的地へ至るまでのルート上に干渉物を想定し、これを回避するための所定位置でのたわみの条件を設定した。（表 1、図 1,2）

表 1 ロッドの設計制約条件

寸法条件	ロッド外径 : 10cm 以下
先端荷重	2kg 以上(先端に計測器としてカメラの搭載を想定)
たわみ量 (図 1,2 参照)	片持ち 8m の状態で 0.8m 以上、片持ち 12m で 2.2m 以下

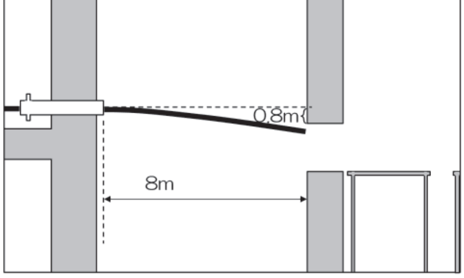

図 1　ロッド　片持ち 8m のたわみ

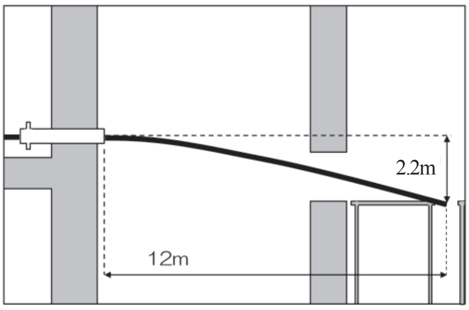

図 2　ロッド　片持ち 12m のたわみ

2.2 材料選定

使用する材料として、CFRP およびチタン合金(**Ti-6Al-4V**)を検討した。CFRP は、金属材料と比較して比強度及び比弾性率（比剛性）（図 3）で優れる。また、疲労強度の保持率は、他の構造材料と比べても優れた特性をもっている[1]。この特性を活かして、宇宙・航空、エネルギー分野などの産業利用からスポーツ・リクリエーションなど生活利用にわたり幅広い分野で利用されている。

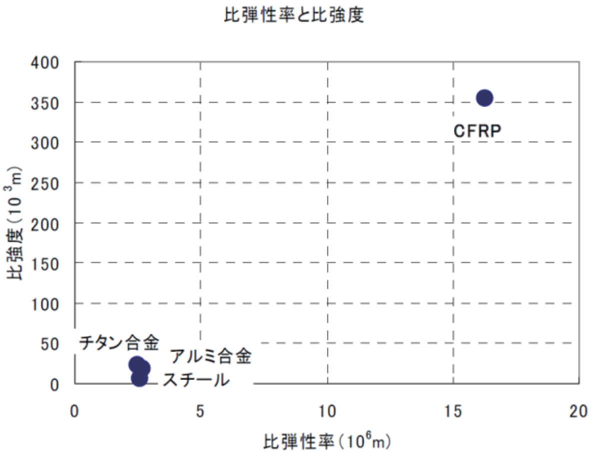

図 3 主な構造材料の比強度と比弾性率[2]

ロッドの外形、板厚、ヤング率、先端荷重をパラメータとして設定し、片持ち梁の計算式で、所定位置でのたわみ量を算出した結果、表 2 に示す条件で目標位置まで到達でできる評価となった。なお、本検討でのロッド外形については、今回はたわみ易さとロッド全体の重量を考慮してΦ70mm、 板厚 5mm、全長 15m で検討を実施した。

CFRP については、全体を同じヤング率で設計した場合、たわみ量の設計条件を満足することが困難であったため、先端から 8m まではヤング率 55GPa、先端 8m より手前は 90GPa と設定した（表 2 CFRP①）。

CFRP の場合、炭素繊維方向の調整のみで剛性を約 30GPa～160GPa の範囲で自由に設計できことから、高剛性化により、重量の大きい調査機器の搭載が可能となる。高剛性化の例についても検討した（表 2 CFRP②）。

金属材料の中で比較的、高強度かつ軽いチタン合金で同じ寸法のロッドを試作した場合、ロッド自体の自重が CFRP と比較して 3 倍以上となり、作業上のハンドリングが難しくなる。また、自重によるたわみ量が多い分、搭載できるペイロードが少なくなる（表 3 チタン合金：Ti-6Al-4V）。

以上の結果から、本研究では、CFRP を採用し、実物大モックアップ試験を実施した。今回はハンドリン
グ性を優先して表 2 の CFRP①を試作した。

表 2 CFRP 材とチタン合金の仕様比較検討

	CFRP①	CFRP②	チタン合金 :Ti-6Al-4V
先端荷重	5kg	15kg	2kg
ロッド自重	22kg	22kg	68kg
ヤング率	55GPa 以上の ハイブリッド型	90GPa 以上の ハイブリッド型	113.2GPa

2.3 たわみの調整機構

片持ちのロッドは自重と先端荷重によりたわむ。単純なロッドの場合、断面の形状、荷重、素材のヤング率が決まると一意的にたわみの大きさが決まる。図 1 のような手前に高さ上限の制約となる障害物がある場合、その奥にある高さ下限の条件を満たさない可能性もある。
（図 2 でロッド先端が床面と干渉する場合）

そこで、本研究では長尺ロッド内で錘を移動させることでロッドにかかるモーメントを変化させ、先端のたわみ量を調整する機能を持たせた（図 4）。

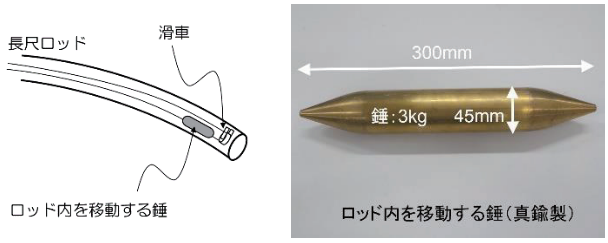

図 4　ロッドにかかるモーメントを変化させる機構

錘を固定したワイヤーをロッド先端配置した滑車にかけ、ワイヤーで錘を移動させることで、ロッド先端のた

わみ量を変化させることができる。

2.4 放射線による影響評価

CFRP を強い放射線環境下で使用する場合には、材料の劣化が懸念される。CFRP に対する放射線影響を評価するため、試作体の材料として選定した CFRP①と同じ素材を用いた直径 30mm、板厚 5mm の単管にガンマ線を照射して、破壊試験を行った。ガンマ線照射は照射なし、10kGy、100kGy の 3 水準とし、同一条件での繰り返し数を 3 とした。福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内の雰囲気線量として 30～70Gy/h の値が計測されているが[3]、仮に 70Gy/h として累積で 100kGy に達するには約 1400 時間の曝露に相当することから、福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内のような強い放射線環境での長時間の照射と見なすことができる。

強度評価は、図 5 に示すような 4 点曲げ試験により実施した。負荷中にひずみゲージによるひずみを測定し、破断時のひずみを測定した。ひずみの測定は、せん断応力のかからない単管の中心で行った。

試験結果を図 6 に示す。なお、いずれの試験においても、内側の荷重点（図 5 の下向き矢印）で破壊が発生した。つまり、今回の破壊ひずみ評価値は、荷重点近傍に作用した局所ひずみ分だけ、真の限界ひずみより低いと考えられる。また、各照射線量の条件下での破壊ひずみは幅があるが、その幅については未照射から 100kGy まで顕著な変化が認められないことから、100kGy までのガンマ線照射により破壊ひずみが顕著に低下することはないと判断される。仮に今回選定した材料の破壊限界のひずみを 9 回の破壊試験の最低値 0.7%（100kGy 照射体）とすると、片持ち 12m／先端荷重 5kg 時のひずみ 0.19%に対して 3.7 倍の裕度を持っている。

さらに、図 7 に示すように、3 点曲げの変位固定状態（中心部のひずみ 0.19%）で 100kGy までガンマ線を照射した後、拘束を取り除いても、残留変形が生じないことも確認した。

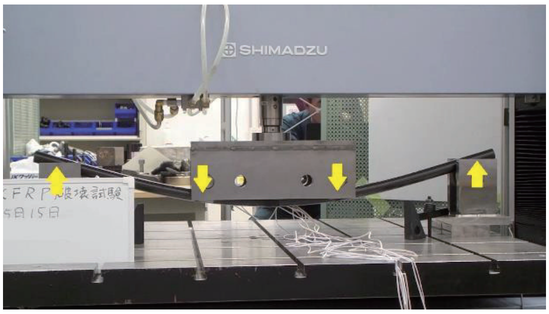

図 5　CFRP 単管の破壊試験

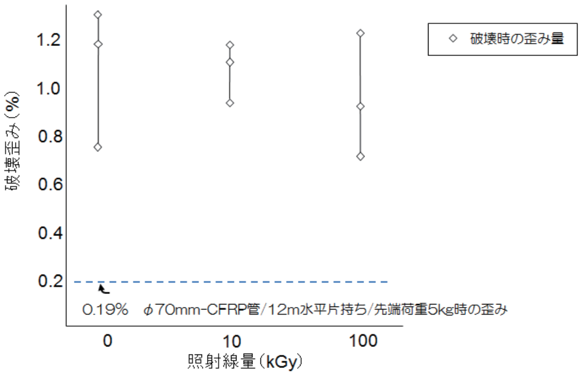

図 6　照射線量と破壊ひずみの関係

平均±誤差　1.09±0.29※

誤差は観測値の分散の 0.5 乗

図 7　照射による残留変形の有無の確認試験

3. 実物大モックアップ試験結果

3.1 たわみ量の評価

CFRP 用いたロッドを試作し、実物大モックアップ試験を実施した(図 8)。 先端荷重は 2kg とし、ロッド内に設置した錘 3kg（Φ45mm×L300mm、真鍮製）を移動させることで、先端のたわみを調整した。

上記により、図 1,2 に示した既設干渉物を適切に回避し、12m 先の調査地点を模した場所にアクセス可能であることが実験的に確認された。

図 8　水平方向に支持した長尺ロッド・張り出し長さ 12m

たわみ調整機構により、錘を先端から 6m 手前に戻すと先端が 42cm、12m 戻すと 59cm 上昇した。（図 9、10）このたわみ調整機能により、想定外の障害物が確認された場合にも、回避できる可能性がある。

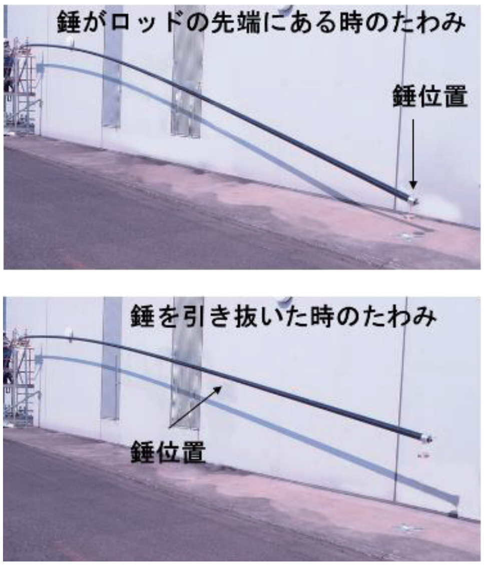

図 9　錘の位置を移動させた時のたわみの変化

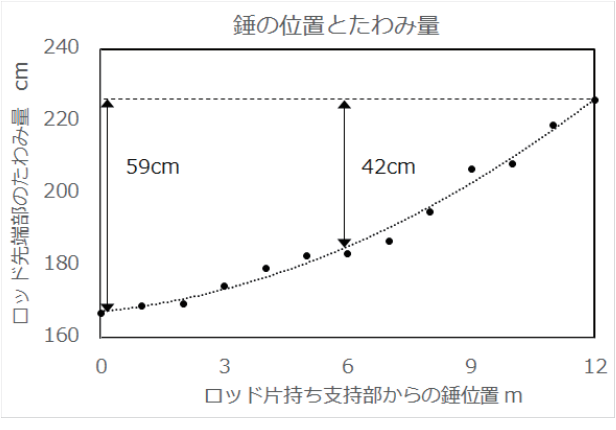

図 10　錘の位置とたわみ量

3.2 挿入・引き抜き時の摩擦力の評価

小径の開口部を模擬した挿入部は長さ 1.2m、Φ73.9mm のステンレス管とし、その両端および中央付近に、摩擦力を緩和するためのフッ素樹脂製の軸受け（軸受内径：Φ71.9mm)を装着した。

これに加え、本機構は自重と先端荷重によりたわんでいるため、引き抜き時にロッドが挿入部を通過する際には、たわみを解消するための荷重が引抜き抵抗として作用し、引き抜きが困難となる可能性がある。

そこで、最大の先端荷重を加えた状態で長尺ロッドの挿入、引き抜き試験を行い、必要な荷重を実測した。

引き抜き時に要した力は 880N (90kgf)で、挿入時 590N (60kgf)より大きかったが、作業者 2 名で挿入および引き抜きができる程度であった。

4. まとめ

- CFRP の調査用ロッドを開発し、実物大モックアップにより基礎的有効性を確認した。
- 剛性を自在に設計できる CFRP の特性を生かし、ロッドのたわみを活用することで、複雑な動作機構を排除したシンプルな構成を実現した。
- たわみ調整機構により、ペイロードの調整や、想定外の障害物回避が可能となる。
- 放射線照射試験により累積 100kGy の使用環境下では、照射の影響がないことを確認した。

参考文献

[1]　炭素繊維協会、”炭素繊維の特長とその性質”、http://www.carbonfiber.gr.jp/material/feature.html

[2]　“航空機用等の炭素繊維強化プラスチック（ＣＦＲＰ）の加工技術の開発に関するフィージビリティスタディ”　、pp.1, 平成２３年３月、財団法人 機械システム振興協会、委託先 財団法人 金属系材料研究開発センター

[3]　東京電力株式会社, “2 号機原子炉格納容器内部調査（２回目）について”, pp.11, 2014 年 3 月 28 日, 政府・東京電力中長期対策会議運営会議（第 4 回会合）