

原子炉内部調査用ロボットのための巻き取り可能なフレキシブルアーム ～チェーン形状の基礎的検討～

Windable flexible arm for atomic reactor interior surveying robot -Basic investigation of chain shape-

渡邊 悠太 (福島大学), カニエテ ルイス (福島大学), 高橋 隆行 (福島大学)

Yuta Watanabe, CANETE Luis, Takayuki Takahashi

福島大学

Fukushima Universtiy

キーワード： 炉心内部調査用ロボット (atomic reactor interior surveying robot),
フレキシブル・アーム (flexible arm), チェーン (chain), 爪 (click), 巻き取り機構 (windable mechanism)

連絡先： 〒 960-1248 福島市金谷川 1 番地福島大学 理工学群 共生システム理工学類 高橋隆行研究室
渡邊悠太, Tel./Fax: (024)548-5259, E-mail: yuta@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

現在, 東日本大震災で大事故を起こした福島第一原子力発電所の廃炉計画が進められている。その中の 1 つとして格納容器内の燃料デブリを排除する計画がある。しかし, 燃料デブリが格納容器内でメルトダウンを起こしていることは確認されているが, どの程度の量がどのような状態にあるのかは確認されていない。そのため格納容器内の観察と, 溶けて落ちた燃料デブリのサンプリングが必要である。しかし, 格納容器内は放射線量が高く, 瓦礫などで危険な場所が多いため人が格納容器内に侵入して調査することが困難である。そこで, 本研究では燃料デブリのサンプリングが可能な原子炉内部調査用ロボットの開発を行っている。この原子炉内部調査用ロボットは, Fig. 1 に示すように格納容器の壁に開いた穴から侵入し, 格納容器内にある燃料デブリの上にロボットを静止させ, そこ

からアームを伸長し, 微細な燃料デブリを採集する仕組みである。このロボットを完成させる上で, いくつかの課題が存在する。格納容器の壁の穴の直径が 100[mm] であること, ロボットを静止させた場所から燃料デブリまで数 m の高さがあるため伸長するアームは m 単位になること, 数十 [mg] ~ 数百 [mg] の微細物体を把持し燃料デブリを採集することの 3 つが挙げられる。

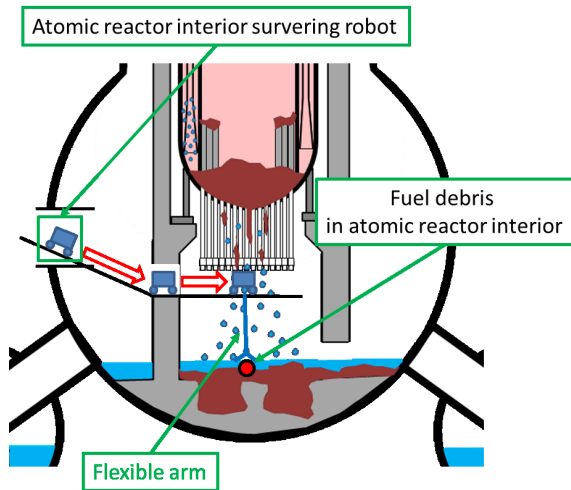


Fig. 1 Interior of atomic reactor

本研究では、これらの問題を解決するために微細物体を把持することのできるハンドと巻き取り可能なフレキシブル・アームを開発する。将来的には Fig. 2 に示すような巻き取り機構への採用を想定している。フレキシブル・アームは Fig. 3 に示すように中にワイヤが通っており、ワイヤの先端にはハンドがある。そして、ワイヤの周りにチェーンが付いている。アームの先端にあるハンドは、本研究室で開発している 3 爪ハンドである [1]。3 爪ハンドを Fig. 4 に示す。このハンドは、3 爪により球状の物体または、微細な物体をも安定して把持することができる。また、Fig. 4 の回転 (roll) 部分を回転させることでハンドが可動する構造になっている。フレキシブル・アームは、Fig. 3 に示すようにアームをドラムに巻きつけて収納する時とサンプリング時をワイヤの張力とチェーンにかかる力の変化によって切り替える。さらに、収納する際に容易に巻き取れるようになり、また、サンプリングする際にチェーン同士を固定させ剛性を持つアームになる。アームが剛性を持つことで燃料デブリが塊状になっている場合、削ることで採集できると考えられる。そこで、チェーン形状に求められることは、収納する時、容易に分離でき、サンプリング時に固定できるチェーン形状を考案する。そして、ハンドを可動させる

際にモータの回転をワイヤに伝達させハンドの回転機構を回転させるが、そのときワイヤの回転によりチェーンが滑らないような爪形状の考案をしなければならない。したがって、本論文では、収納時に容易に分離しサンプリング時に固定できるとともに、ワイヤを回転させたときに滑らないようなチェーン形状の検討ならびに試作を行う。

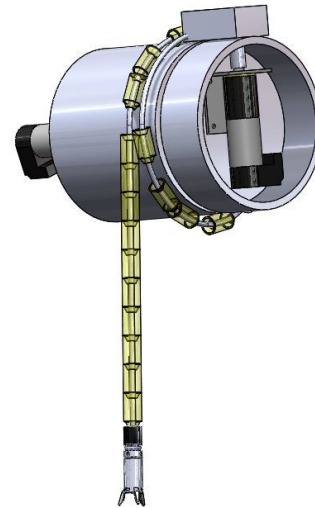


Fig. 2 Proposed winding mechanism

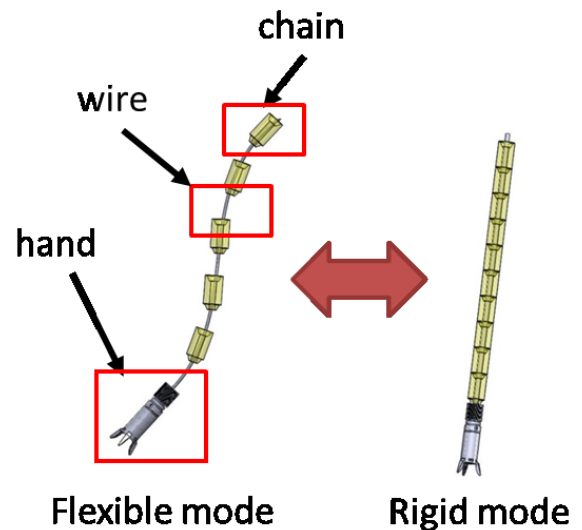


Fig. 3 Flexible arm

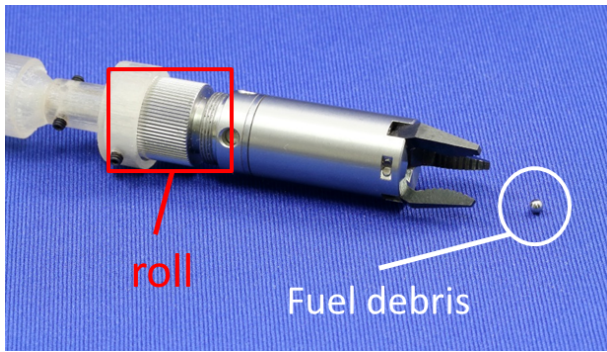


Fig. 4 Three fingered pinching device

2. チェーン形状の検討と製作

2.1 チェーン形状の考案

チェーン形状を考案するにあたり，考慮すべきことがある．ワイヤの張力を小さくし巻き取るときチェーン同士が容易に分離でき，また，ワイヤの張力を大きくしたとき，アームに剛性を持たせるためチェーン同士を固定させる必要がある．なお，チェーン同士が分離できるかを確認するために直径100[mm]のドラムに見立てた塩ビパイプに巻きつけた．はじめに考案したチェーン形状を Fig. 5 に示す．このチェーン形

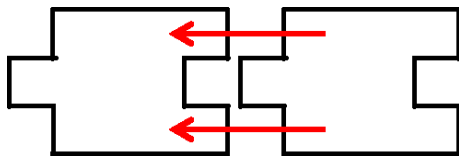


Fig. 5 First version of chain shape

状では，アームに剛性を持たせることはできるものの，巻き取るだけではチェーンを容易に分離させることは難しい．なぜならば，チェーンを分離する際に Fig. 6 に示すような軌跡を描く必要があるが，このチェーン形状では干渉部分が生じてしまう．

そこで，筆者らはこの問題を解決するために，Fig. 7 に示すようなテーパをつけることで干渉部分をなくすことができると考えた．

しかし，テーパをつけたチェーン形状を用い

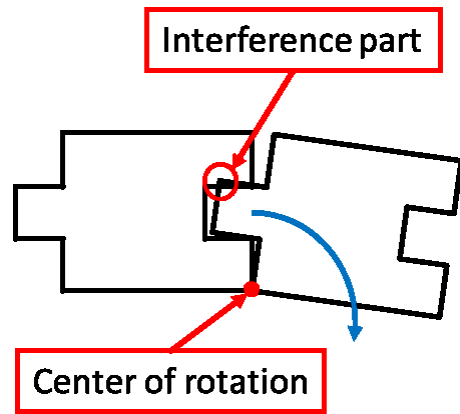


Fig. 6 Interfering section

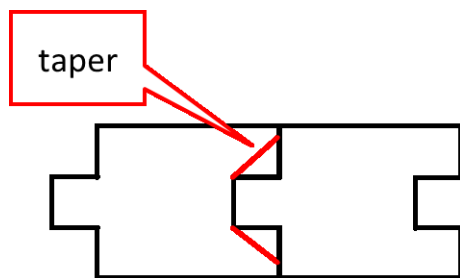


Fig. 7 Invention of taper

たとしてもテーパの角度によっては干渉部分が生じてしまう．そこで，テーパをつけた際に干渉しない高さを算出した．テーパの幾何学的形状の定義を Fig. 8 に示す．

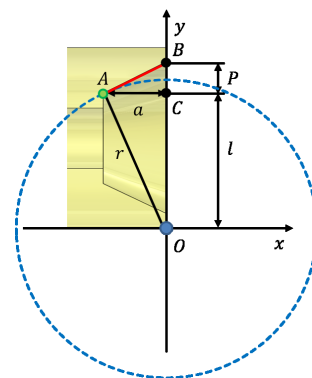


Fig. 8 Calculation of taper height

線分 BC , CO , OA , CA の長さをそれぞれ P , l , r , a とする． P , l , r を用いて a を算出

した．Fig. 8 から線分 BC の傾きは

$$\frac{P}{a} \quad (1)$$

となる．また，点 A の運動軌跡は

$$y_c = \sqrt{a^2 + l^2 - x_c^2} \quad (2)$$

となる．(2) 式を一階微分すると，運動軌跡の接線の傾きが得られるので

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{-x}{\sqrt{a^2 + l^2 - x^2}} \quad (3)$$

となる．Fig. 8 の点 A で線分 BC は運動軌跡に接するようにすることで a を最大化できる．よって，以下の式が成り立つ．

$$\frac{a}{\sqrt{a^2 + l^2 - a^2}} = \frac{P}{a} \quad (4)$$

この (4) 式を整理すると

$$a = \sqrt{Pl} \quad (5)$$

となる．この (5) 式から P と l により a が求められることがわかった．(5) 式を用いて製作したチェーンを Fig. 9 に示す．また，Fig. 9 に示したチェーンを用いたアームを，ドラムに見立てた直径 100[mm] の塩ビパイプに巻きつけた図を Fig. 10 に示す．Fig. 10 のようにチェーンを塩ビパイプに正接して巻きつけられることが確認されたため，テーパに干渉しないような形状を製作できたことが確認された．



Fig. 9 Chain shape with no interference

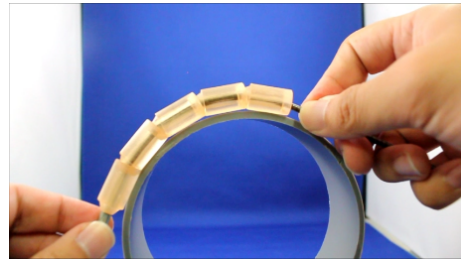


Fig. 10 Arm with taper wrapping ability

2.2 爪形状の考案

前節で試作したチェーンでは，ワイヤの回転に伴ってチェーンが互いに滑ってしまい，ワイヤの回転動力の伝達に支障を生じてしまう．そこで，チェーンの滑りを防止するために，爪を取り付けることとした．爪形状の考案をするにあたり，チェーンを曲げただけで分離できるよう，爪の形状も前節で述べたような干渉の問題を解決しておく必要がある．例えば，Fig. 11 のような爪形状を考案し，Fig. 12 に示すような軌跡を描いてチェーンが分離する時，線分 $C'D'$ が線分 CD より上に位置するため，干渉していると考えられる．また，線分 $A'B'$ と線分 AB も線分の傾きによって干渉する可能性がある．つまり，爪の運動方向によっては干渉部分が生じてしまう．したがって，この問題を解決するために全ての運動方向で干渉部分が生じない爪形状の検討と製作をする必要がある．

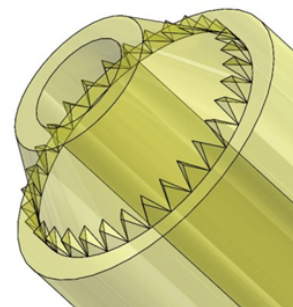


Fig. 11 Shape with teeth-like stoppers

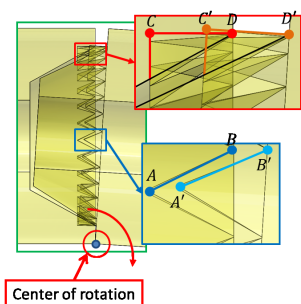


Fig. 12 Interference with teeth-like stoppers

上記のことを考慮した爪形状を Fig. 13 に示す．Fig. 13 の爪形状は底面が円の半球状の爪を持つチェーンである．Fig. 14 に示すような軌跡を描いてチェーンが分離するとき，爪の底面を円にすることで，どの地点においてもすべての運動方向で干渉部分が生じない．しかし，Fig. 15 に示すようにオス側の爪がメス側の結合部分にはまらない箇所が生じてしまう．そこで，Fig. 16 に示すような爪の底辺を円にし，ドーム部分を三角形にする円錐形状を製作した．

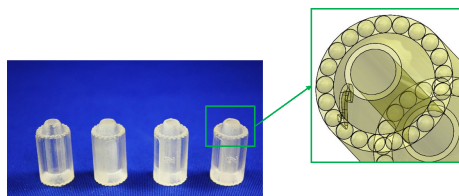


Fig. 13 Chain with hemispherical stoppers

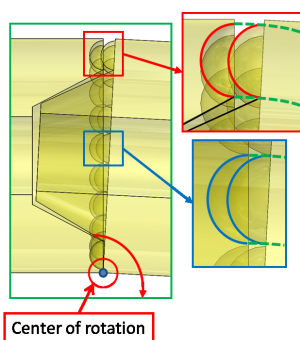


Fig. 14 No interference with hemispherical stoppers

Fig. 16 に示すような爪形状であれば，Fig. 15

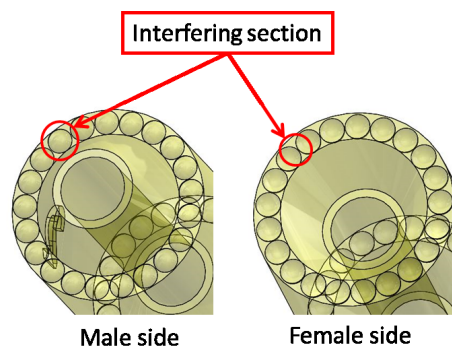


Fig. 15 Male and female side of hemispherical stoppers

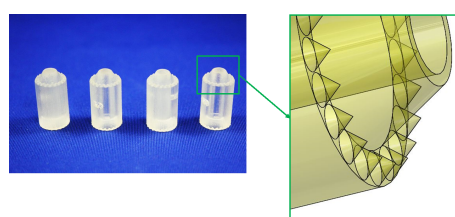


Fig. 16 Chain with conical stopper

に示すような問題は解決される．しかし，Fig. 16 に示す爪形状であるとメス側の壁が薄くなってしまい，強度が低下してしまう．この問題を解決するために爪の底面の直径を大きくした．円錐形状を持つチェーンを試作した（Fig. ??）．テーパ部分を無くし，円錐の底面を大きくしたことにより円錐の高さを出すことができ，メス側の壁を厚くすることができた．

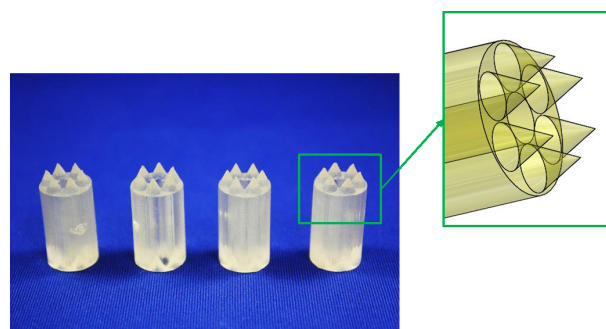


Fig. 17 Chain with large conical stopper

しかし，円錐形状だとしても稜線の斜度によっては干渉部分が生じてしまう．そこで，Fig. 17

の円錐の高さを算出した．Fig. 17 の分離部分の拡大図を Fig. 18 に示す．線分 AB と線分 $A'B'$ が重なっているため，干渉部分が生じていることが分かる．しかし，線分 CD と線分 $C'D'$ は重なっていない．したがって，回転中心に 1 番近い円錐において干渉部分が大きくなっていると考えられるため，回転中心に 1 番近い円錐が干渉しない高さを算出する．円錐の幾何学的形状の定義を Fig. 19 に示す． P を円錐の半径と置くことで (5) 式を用いて，円錐の高さを算出することができる．(5) 式を用いて円錐の高さを算出し，円錐が干渉しないチェーンを製作した．製作したチェーンを Fig. 20 に示す．また，Fig. 20 を用いたアームを直径 10[cm] の塩ビパイプに巻きつけた図を Fig. 21 に示す．Fig. 21 のようにチェーンを塩ビパイプに正接して巻きつけられることが確認された．また，円錐形状でも (5) 式で算出し，干渉しない円錐が形成することが確認された．

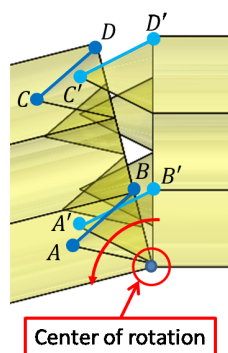


Fig. 18 Expanded view of conical stopper interference

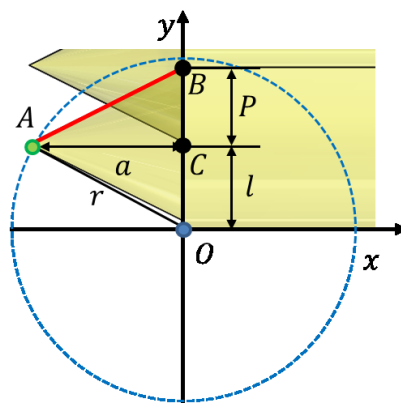


Fig. 19 Calculation of cone height

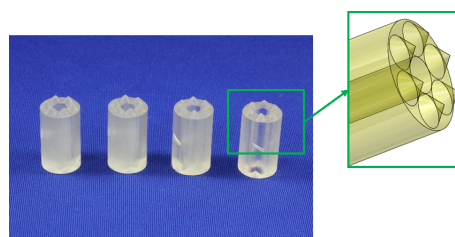


Fig. 20 Chain with optimal cone stopper height

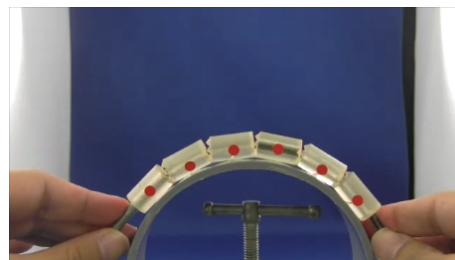


Fig. 21 Arm using cone stoppers with optimal height

3. 結言

本論文では，収納時に容易に分離し，サンプリング時に固定できる，また，モータを回転させたときワイヤの動力を阻害しないチェーン形状と爪の形状を検討と試作をした．そして，試作したチェーンは目的の性能を有していることを確認できた．今後は，フレキシブルアームの

中に通っているワイヤの基本的特性，巻き取りとワイヤを回転させるために必要なモータの選定，巻き取るドラム経の縮小の検討をしていき Fig.1 に示すような製作を行う予定である．

参考文献

- 1) 伊藤究，伏見雅英，秦安延，秦豪一，高橋隆行: 立体カム機構を用いた対向3指小型ピンチングデバイスの設計と評価，ロボティクス・メカトロニクス講演会 DVD-ROM，1P2-O10 (2015)