

第28回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要説明書

1. 作品情報・応募者情報

作品名（20文字以内） 宇宙爪切り
副題（自由記入） 爪切るのも一発勝負！
学校名 東京工業大学

2. ミッションの概要（プレスリリース等で使用するので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。）

近い未来に多くの人が宇宙で長期滞在することが期待されている。その中で限られたスペースで生活を送るため、衛生管理は宇宙飛行士の身体的および精神的健康に大切である。現状宇宙空間においては爪を切ることすら多くの時間を費やしている。宇宙飛行士はミッション遂行で大変多忙なため、衛生管理の時間を省くことが出来ればよいと思い、更に一般人が宇宙に行く際にも気楽に使えるような宇宙爪切りを考案した。

3. ミッションの目的と意義（目的・重要性・技術的／社会的意義等）

(a) 目的

宇宙飛行士が重力の影響が少ない国際宇宙ステーション（ISS）で長期滞在する際、爪を切るとは衛生環境を保つために避けられない。そこで爪を切ることによって生じる手間と時間を省き、宇宙空間における長期滞在をより快適にそして有意義なものにする。

(b) 重要性・技術的、社会的意義等

現在 ISS に滞在している宇宙飛行士は多くの時間を実験や研究、体力トレーニング等に費やしており、身だしなみを整える時間は極力短いため、衛生管理を手取り早くできるようにする必要がある。宇宙飛行士の健康状態を維持するために衛生環境の向上は不可欠である。

本ミッションにおいてはそのうちの一つである「爪切り」に焦点を当てている。現在使用されている爪切りは、トイレやシャワー等宇宙での使用を想定した物と異なり、専用に設計されたものではなく、地上で古くから用いられているものを宇宙空間において使用しているだけである。重力の影響が少ない宇宙空間では、切った爪が空中に飛び出してしまう、それを防いだり、切った後の爪を処理するために、地上に比べ手間と時間がかかっている。

そのような現状を改善するため、爪が飛び散らないような設計をすることで宇宙飛行士の生活の質（QoL）を向上させ、間接的ではあるが宇宙空間での生産性向上を期待できる。

また、「宇宙爪切り」は重力の有無にかかわらず爪の飛び散りを抑えることが期待されているため、地上でもより快適に爪を切ることが可能である。特に体が不自由な人でも飛び散った爪を回収する手間も省けると思われる。また、衛生環境を整える必要のある医療現場等でも活躍が期待される。そのため、宇宙以外にも老人ホーム、福祉施設や医療施設での利用も考えられる。

本ミッションは宇宙開発自体に直接にかかわるものではないが、人間が宇宙環境で生活する水準の改善を目指したものである。宇宙飛行士が国際宇宙ステーションで長期滞在し、様々な実験や観測を実行する際、心地よく生活できることは非常に大切である。そのためには、地上で日々に問題なく行ってきた生活を宇宙環境においても抵抗なくできる必要がある。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム

(地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等、必要に応じて図表添付のこと)

宇宙爪切りは微小重力環境でも爪が飛び散らない物となっている。そのため、切った爪が密閉されるよう刃の開口部と爪の収納部を何かしらの方法で隔離させる。

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

現在地上における飛び散らない爪切りをアメリカの会社が製造している。我々はこの構造を元に微小重力環境でも飛び散らないよう再設計を行う。図1に提案する宇宙爪切りを示す。爪収納部を刃の開口部から密封することで、微小重力環境でも爪が逆流しないよう、爪切り内部に板(図1右中の赤の部分)を取り付ける。これは口の構造を模して、板は舌に似た設計となっている。そのためこの機構を「ペロ式」と呼ぶ。

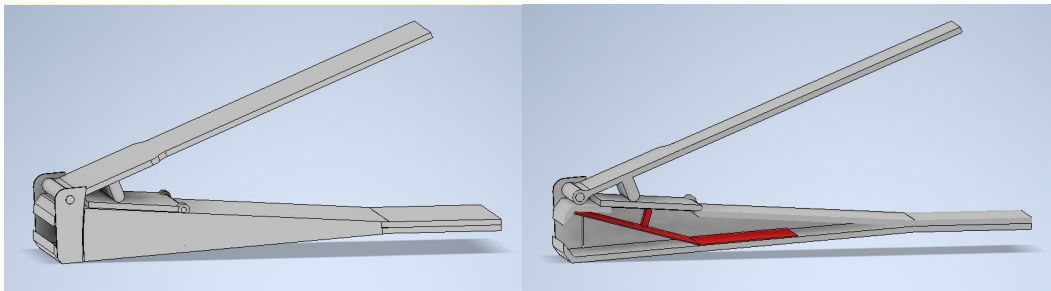


図1. 宇宙爪切り CAD 図
(左：宇宙爪切りの全体図； 右：宇宙爪切りの断面図)

実用化に向けて以下のステップを実施する。

- 試作モデルを完成させ、ペロの動作を確認する
- 実際に試作モデルで爪を切り、爪が密閉されているかを確認する
- ペロの耐久性を考慮し、計算と試験でペロの厚さと材質を決定する
- 刃の裏にへばりつく爪に対応させるため、ペロ先端の素材や形状を選定する
- 上記のステップを繰り返し微調整を行い最終モデルを作る
- 最終モデルで耐久試験を行い、宇宙爪切りとしての役目を実証する

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

「宇宙爪切り」は宇宙飛行士が国際宇宙ステーションで爪を切る際の作業を減らすためのものである。そのため、爪を切る際、一般的な爪切りと違い以下の特徴がある。

- 切られた爪は決められた方向に飛ばされるので任意な方向に飛び散らない
- 従来の爪切りは切った爪が容器に収まらず逆流することがあるが、「宇宙爪切り」は逆流しない設計が施されている
- 無重力空間でも掃除を容易にするため、爪がたまる機構を加える

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

効果としては宇宙飛行士が国際宇宙ステーションで長期滞在の際に少しでも快適に過ごせるようになる。わずかな改善ではあるが、このような細かいことの積み重ねが生活の快適さをもたらす。さらなる効果として、宇宙飛行士にとって少しでも生活が快適になり、本来の仕事の作業効率が上がることが期待される。また、この爪切りは宇宙で使用できるので地上でも使用可能である。特に福祉施設や医療施設等人間の密閉空間での生活の衛生面において貢献できると思われる。更に飛び散る爪を回収する手間が省けることから体が不自由な人以外にも限らず一般人も快適に利用できることを期待している。

第28回衛星設計コンテスト アイデアの部 ミッション解析書

タイトル 宇宙爪切り — 爪を切るのも一発勝負
学校名 東京工業大学
メンバー名 ジグジッド・ヘルレン, 野木侃, 福島展隆
(五十音順)

1.はじめに

1.1 爪を切る重要性

人間が活着している限り、また、死んだ後もしばらくの間も、爪は伸び続けている。普段意識して測ることはないと思うのだが、実に毎日0.1mmものスピードで爪は伸びており^[1]、多くの方が定期的に爪を切っていることだろう。ISSに滞在する期間は平均で6ヶ月であるが、1年を超えることもあり、前述の数字を用いると、その間に爪は1.8cmほど伸びる。国際宇宙ステーション（ISS）内では平均して6人が同時に滞在するため、120本の指から爪が伸び、6ヶ月で216cmもの爪がISS内で伸びることになる。では爪を伸ばすとどういふことが起こるのかと考えると、例えば、自身や他者を傷つける可能性があったり、モノを掴んだり操作する時に邪魔になったりなど様々な問題が生じることが容易に想像できる。また、肉眼では観測できないが爪の裏には種々の細菌が付着しており、その数は爪の長さ依存して急激に増えていくことが報告されている。さらに、ISS内では地上と同様に頻りに手を洗うことができず、アルコールなどの消毒液も火災防止のために気軽に使うことができない。そのため、爪を短く維持するのは物理的にも衛生的にも必須であり、こまめに行うことが求められる。

1.2 宇宙空間における爪切りの現状と問題点

1.2.1 宇宙飛行士がISS内で爪を切る様子

カナダ宇宙庁はYouTube上に 宇宙飛行士クリス・ハドフィールドがISS内で爪を切る様子を公開している。彼は「無重力で爪を切ると爪が飛び散り、目や口に入る恐れがある」と述べている。そのため、彼は切った爪が飛び散るのを避け図1のように、宇宙機の吸引ダクトの真近に手を寄せ爪を切る。しかしながら、空気が吸引されているにもかかわらず爪が飛び散る様子が映っている。細菌が多く付着した爪が生活モジュール内に飛び散るのは不衛生であ

る。また、爪を切るたびに切られた爪一つ一つが飛び散らないよう慎重に手をつかみ吸引ダクトにつける様子が見られる。さらには、切った爪が飛び、機器の間または掃除不可能な領域に入り動作に支障を与える可能性がある。また、動画の最後に彼は「後に吸引ダクトの網に引っかかった爪を掃除機で掃除する」と述べている。結果、本来地上で爪を切るための準備や後始末より、多くの時間が費やされていることがわかる。



図1.国際宇宙ステーション内での爪切り
(左：宇宙飛行士が爪を切る様子
右：拡大写真^[2])

1.2.2 爪切りの問題点

1.2.2.1 足の爪

前節で述べた動画より、単純な爪切りの作業が国際宇宙ステーションではいかに大変でやっかいな作業であることがわかる。さらに、足の爪を切る作業の大変さも簡単に予想がつく。まず、足を吸引ダクトに近づけて爪を一回切る。その後、切った爪を吸引ダクトにつける。足のすべての爪を切るためには、このような作業を繰り返せなければならない。さらに、足の爪を切る際はずっと座り姿勢を保つ必要があることを忘れてはならない。

1.2.2.2 吸引ダクトへの影響

さらに、この動画から、吸引ダクトが本来設計されている役割と異なる使われ方をしていることがわかる。

図2および図3は、ISSの環境制御・生命維持

システム (ECLSS) の全体図およびISSの水還元装置の全体図である^[3].宇宙飛行士が爪を切る際に使われる吸引ダクトは主に気温・湿度調整に使われ, 調湿するにはその空気を結露させ飲用水製造装置にも使われる.

爪の破片等がダクトのフィルターを貫通した場合, 飲用水製造装置にも影響を及ぼす可能性が十分ありえる.空調のCommon cabin air assembly(CCAA)にはフィルターが設けられ, 爪カスによる目詰まり等が起きる.最悪水還元装置にも影響を及ぼし, 飲用水を作れなかったり, 廃水を管理できなくなる可能性も十分ありえる.

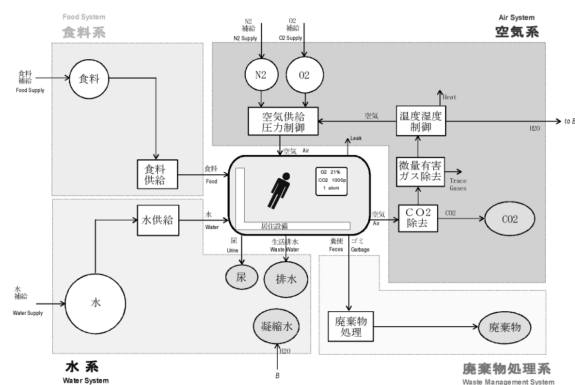


図2.ECLSSの全体図

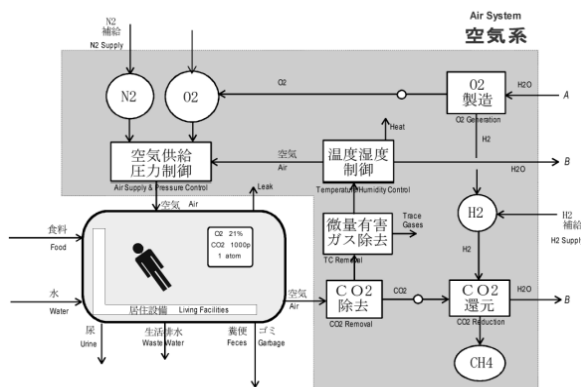


図3.水還元装置の全体図

図3を見ると, 吸入された空気はまず二酸化炭素除去プロセスに入る^[3].このプロセスにはアメリカのHoneywell製CDRAが使われている.これはゼオライト (多孔性) を用いた吸着剤によってCO₂の吸着や脱着を行う.これに爪等のゴミが入ってしまったら効率が落ちる.最悪故障の可能性があり, CO₂を除去できず, 宇宙飛行士の命にも関わる.

2.爪が切られた時に飛び散る理由

人間の爪は図4^[4]で示す通り異なる特性を持つ3つの層が重なってできている.外側と内側に存在する層はそれぞれ背爪 (dorsal layer) と腹爪 (ventral layer) と呼ばれ, ほとんど同じ靱性を持ち, 方向に依存しない等方性材料である.一方, これらの層の間には中間爪 (Intermediate layer) と呼ばれ, 複合材料のように方向に依存する靱性をもつ異方性材料となる層が存在する.繊維の向きは爪が伸びる方向 (以降は縦方向と言う) に垂直な方向 (以降は横方向と言う) である.中間爪の横方向, 背爪と腹爪の靱性はほとんど同じでおよそ1kJ/m²となる.しかし, 中間爪の縦方向はそれらより4倍の4kJ/m²であることが実験的に知られている^[4].結果, 3層からなる爪の靱性は縦方向におよそ3kJ/m²と横方向におよそ6kJ/m²となる.爪は物を掴む際に指先が曲がらないようにするためのものであり, 繊維が縦方向に向いていればその強度は上がるとされる.しかし, 爪先が何か当たって破損したとき, 亀裂が爪の奥まで進まないように現在の形状に至ったと考えられる.

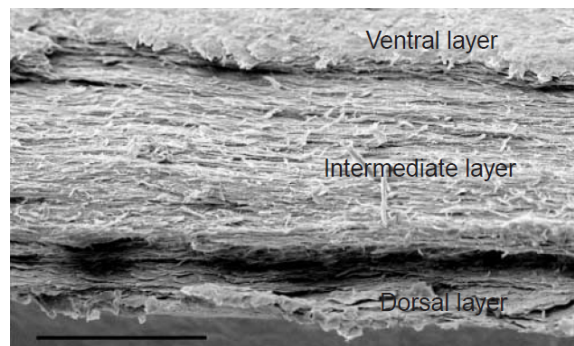


図4.人間の爪の断面図^[4]

爪の成分に関する研究文献は存在するが, 爪の飛び方についての研究は行われていないため, 物性値から予測される爪が飛ぶメカニズムについて考察してみる.

爪を切るために爪切りの刃で挟む際, 爪に弾性ひずみが生じ, 切られた直後にはそのひずみにより蓄えられた弾性ひずみエネルギーが運動エネルギーに変換されて飛ぶと思われる.弾性ひずみは爪切りの挟んだ爪の断面積内で生じるため, 蓄えられるエネルギー量は断面積に比例する.要するに, 爪の厚さを一定とした場合, そのエネルギーは刃の爪に当たる

長さに比例する。爪が飛ばされる速度は蓄えられたエネルギーが運動エネルギーに変換される際のエネルギー保存則とその質量から求められる。このようなことから、単位断面積に対する質量が小さい場合に爪はより高速に飛ぶと考えられる。

また、2005年にテレビ番組「トリビアの種」で爪を切った時の飛ぶ最大速度が計測されており、実験的に11m/sと求められている^[9]。本実験は東洋大学の田村善昭助教授(当時)によって行われた。田村氏によると、爪の飛ぶ速度は爪切りの形状、切る速度と切られる部分の長さに依存するという。爪に均等な力が加わるような爪切りは切る線上すべての点において弾性ひずみエネルギーを蓄えることができ、より大きいエネルギーを蓄えられる。同じく、切る速度を遅くすれば、刃の力が爪に静荷重として働き爪が耐えられる最大限の力をかけることができ、弾性ひずみエネルギーが最も大きく蓄えられる。また、爪を切る部分の長さが短ければ、質量も小さくなるので加速度が増し速度が上がる。しかし、短すぎると切る部分が爪の先に相当するので、断面積が小さくなり、蓄えられる弾性ひずみエネルギーが小さくなる。そのため、刃の圧縮でつぶれた爪から完全に分離することができず刃に付いたまま残ってしまう。

3. 宇宙爪切り

3.1 解決案

以上で述べた問題点を解決するにあたって、最初に根本的な問題にアプローチをする。つまり爪が飛ぶのを防ぐ事である。

宇宙空間で飛び散る爪対策として、爪が飛び散らない宇宙空間に特化した爪切りの設計を提案する。

3.2 従来の爪切りについて

図5は現在流通している爪切りを示す。これは上刃、下刃、レバーとレバー支柱とおおまかに4つの部品で作られるようになっている。このレバー支柱は刃の中央に設置されている。これがレバーの支点となり、レバーを180度回転させる事で展開・収納ができる。



図5.従来の爪切り

この爪切りを使用する際飛び散る問題について追求してみる。実際に爪を切った瞬間をスローモーションで見ると、爪を切った瞬間ある初速を持って飛ぶ動作が確認できた。加えてこの初速を持った爪がレバー支柱に衝突し、思わぬ方向へ飛び散る事が確認できた。それ以外にも刃の裏にへばりつく爪も確認できた。

ケース付きの爪切りも存在するが、宇宙空間では問題が生じる。地上では重力の影響で切った爪はケース内に収納されるが、微小重力環境では刃の開口部から爪が逆流する可能性がある。この問題に対処するため、爪を切るときだけ刃の開口部を開け、それ以外の時は閉まっている必要がある。**つまり、切った爪を爪切り内に密封する必要がある。また、従来の爪切りをベースに改良設計をすることで、爪を切る作業に対して新たな手順を付加しないようにし、かつ、改良構造をできるだけ単純にすることで、実用化に向けて製造を容易にできるようにする。**

3.3 既存の爪が飛び散らない爪切り

アメリカのNo-Mes社が図6に示す飛び散らない爪切りを製造していたのでそれについて考察してみる。

これは従来の爪切りと異なって、レバー支柱が無く、支点が刃の両端に2つある。その代わりにレバーの裏に突起があり、これが上刃に当たり刃が収納箱に落ちる仕組みとなっている。この設計により切った爪が初速を持っても近くに当たるような支柱が無く収納部に収まり、飛び散らない設計となっている。



(a).全体写真



(b).爪の収納部の蓋を開けた場合

図6 アメリカ製の飛び散らない爪切り

しかし、これを微小重力環境で利用してもまだ飛び散る可能性がある。なぜかというとな収納部と刃の開口部が繋がっており、いくら収納部に爪が回収されてもちょっと力が加わると刃の開口部から逆流してしまうのである。地上で言うと爪を切ったあとに爪切りを下に向けると開口部から爪が逆流する事と同じである。つまり切った爪を収納部に「密封」する必要がある。

3.4 宇宙爪切りのシステム要求

宇宙で利用できる爪切りに関して以下の要求が求められる：

- **切った爪を確実に集める事ができる**
爪切りの内部で切った爪を能動的に移動させる事で実現
- **切った爪が飛散したり逆流しない**
切った爪を刃等開口部から瞬時に移動させる事で実現
- **掃除が容易である**
切った爪を爪切りの構造内で一つの場所に貯蔵する事で実現

- **使い勝手が良い**

利用に支障が無い大きさであること、また支障が無い程度で爪が切れる事。また、場所に束縛されず爪が切れる必要がある。

これらの要求を全て微小重力環境でクリアする必要がある。また、バッテリーや外部電力に頼らず、全て機械的に設計する。これはバッテリー交換や外部電力に繋げる工程を省き、使い回しを向上させるためである。

3.5 宇宙爪切り設計方針

この爪切りを設計するにあたり、使い勝手を確保するため通常の爪切りのサイズになるよう設計を進めた。基本的にはアメリカの爪切りの支柱がない構造を継承しつつ、爪切りの中に入った爪の飛び出しを内部に密封された収納部を設けることで対処した。もちろんただ密封するだけでなく、爪が切り離されるときには爪が収納部に送り込まれるように工夫する。刃が鋭いとひずみエネルギーがたまる前に切断されてしまうため、刃に付く可能性が高くなるとされる。さらにメンテナンス性を高めるため、収納部につながった蓋を設けることで切った爪の掃除を容易にしている。

これらの工夫を施すことで、吸引ダクトの近くで爪の飛び散りを気にして慎重に爪を切る必要をなくし、より手軽に、時間をかけずに爪を切ることを目指す。同時にできるだけシンプルな構造機構を目指し、製造性を高めることも目指す。

3.6 宇宙爪切りのシステム設計

微小重力環境で使える爪切りの設計において以下の項目を考慮する。

- 切った爪を容器に収納する
- 収納した爪を逆流させない
- 部品数が少なく製作コストが少ない

3.6.1 設計プロセス

3.6.1.1 ピンボール式

まず最初に考えられたのが、図8に示すピンボールのフラップのような機構である。爪切りの刃が閉じる際の2つの板の相対運動によってバネが押されフラップが開く。そのため、爪が

かることもない。

一方で、爪を切る際にベロの先端が爪に触れるという問題が生じるが、先端部をゴムなどの柔軟な素材に置き換えることで対応する。

作動シーケンス：

1. 図11(左)の状態ではレバーを押すと、ベロが下に押される。結果、図11(中)の通りベロは爪の下に移動する。その際、ベロの先端にある柔らかい素材が爪に触れる可能性はあるが、これは正常である。
2. 図11(右)の瞬間、刃によって爪が切られる。この時に爪は3つの状態が想定される：
 - 完全に切れ、ベロの上にある収納内部に飛んでいく
 - 完全に切れるが、刃にへばりつく
 - 完全に切られない
3. レバーを離すと、図11(左)に示すようにベロが上に戻る。この瞬間にへばりついた爪が柔らかい素材によって掻きとられる。もし爪が完全に切られていない場合は再度柔らかい素材に触れるが、柔らかい素材を利用するため支障なく繰り返し切る動作に移行する。

この「ベロ式」にはもうひとつの役割がある、それは切った爪を収納部に「密封」し、開口部からの逆流を防ぐ事である。図11(左)に示すように、爪を切ってレバーを上げた後、ベロが刃の開口部より上にある。つまり収納部でいくら爪が飛び回っても脱出する隙間がなくなるようになる。

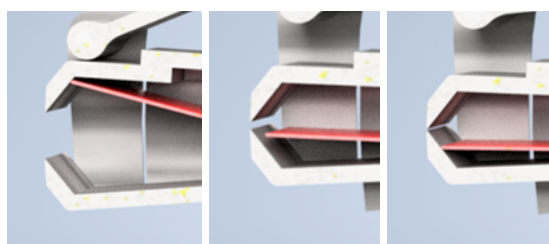


図11. ベロ機構（左：初期状態，中：切る直前，右：切った直後）

3.7 使用対象・使用方法

宇宙爪切りは従来の爪切りの内部に爪の逆流防止機構を加えたのみなので、今まで従来

の爪切りを使用してきた利用者がこの爪切りの使用に困ることはないと思われる。しかし、逆流防止機構に使われるベロの先端の素材やベロの硬い部分と刃の距離によって1回に切られる爪の長さが限られる可能性がある。足の爪は指の爪より切る量が多いため、複数回に分けて切る必要がある。もしくはこまめに爪を切る習慣をつけることでこの問題を回避する事ができる。更にこまめに爪を切ることで衛生面と作業効率の向上も期待される。

切った爪が爪切りの後ろへ飛ぶようにするためには以下のことを推奨する。

- 一回で完全に切るようにする
- レバーをゆっくり押し、ゆっくり切る
- 爪が切られる部分の横向きの長さは爪切りの刃の長さ以下に収まるようにする。

使用手順：

まず、宇宙爪切りは図12(a)に示すように、収納されている状態とする。

1. 収納されている状態から、図12(b)の通りレバーを上げる。
2. レバーが上がるとフタが自由になるので、図12(c)のようにフタを閉める。
3. レバーを再び下ろし、図12(d)に示す通り初期位置にセットする。その後、爪を刃の間に入れる。
4. レバーを押すと刃が閉じる。その際、ベロも同時に下がる。ベロは刃が閉まるよりも先に降りる。切られる直前には図12(e)に示すように爪より下にある。このように、切られた爪が収納部に収まる準備がされる。
5. 図12(f)のように、完全に切られたらレバーを上げる。ここで切った爪が収納部に入る。また、切る際は一回の動作で爪が確実に切れるように注意する。
6. 爪切りが終わるまで3～5を繰り返す。
7. 爪を捨てる際はレバーを完全に上げ、掃除機のスイッチをONにして、吸引口をフタに近づけてからフタを開けて掃除機を使って吸い取る。この際爪切りごと吸われないように注意をする。
8. 掃除が完了した後、図12(a)の通りに収納状態に戻す。

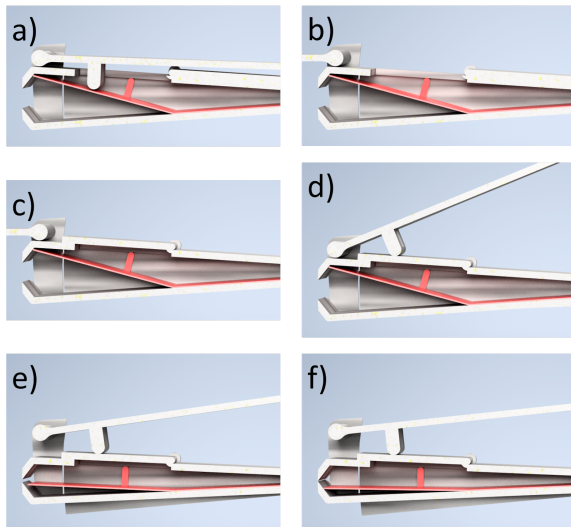


図12.宇宙爪切りの使用手順

補足として、上述のように刃の押し込む速さや切る爪の長さによって爪の初速度は変わるので、積極的に切った爪を収納部に送り込むためには、ベロの金属部に触れない程度の長さの爪をゆっくりと切ることが求められる。

また、下のパネルに空気口を設ける。これによって掃除機で吸い取るときに空気の流れが良くなり、挟まった爪も吸い取れる。

4. まとめ・今後の課題

従来の爪切りの内部構造に先端の柔らかいベロをつけることで切った爪を刃の開口部から密封する事が可能になった。

また、レバーの展開や刃が閉まる機構を地上における飛び散らない爪切りの設計をベースにする事で従来の爪切りに起きる支柱に当たり飛び散る問題を解決できると考えられる。

更に使用方法に少量の工夫を入れる事で宇宙爪切りで爪を切る際に生じる問題を回避でき、同時にISS船内の環境向上にも繋がる。

宇宙爪切りを使うことで微小重力環境という慣れない空間で起こり得る生活問題を解決し、より快適な滞在ができる事を期待している。

このベロ式宇宙爪切りを実用化させるにあたっていくつかの課題をクリアする必要がある。アイデアを考案して、概念設計の初歩を実施し、模型で機構の動作まで確認できたが、試作モデルがまだできていないために、実際

に爪を切る動作や試験による検証が出来ていない状態である。

今後の流れとしてはまず試作モデルを完成させ、実際に爪を切って実用性を検証する。ここで爪の密封に対する評価も行う。

続いて、繰り返し曲げられる状況において塑性変形が起きないようにする必要があるため、ベロの厚さと材料を計算と実験によって決定する。更に、刃の裏にへばりつく爪にも対応させるため、ベロの先端に付ける素材の材料と形状を実験的に選定する。これらを繰り返して、実用的な製品を目指す。

5. 参考文献

- [1] 五十嵐孝, and 大久保憲, 2012, "看護師を対象とした手の爪下の菌に影響する因子についての研究," *Journal of Healthcare-associated Infection*, 5, pp. 52-58 (18-23).
- [2] Canadian Space Agency, "Chris Hadfield - Nail Clipping in Space," YouTube Video, Jan 11, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=xICkLB3vAeU>
- [3] 下田隆信, 2014, "宇宙ステーションの空気環境を創る環境制御・生命維持システム," *Medical Gases Symposium*, Japan, 16, 1, from https://www.jstage.jst.go.jp/article/medical-gases/16/1/16_7/_pdf
- [4] L.Farren, S., Shayler and A., R., Ennos, 2004, "The fracture properties and mechanical design of human fingernails," *J. Exp. Biol.*, 207, pp. 735-741.
- [5] Fuji TV, "【トリビアの種】爪切りで爪を切ったとき一番速く飛ぶ指の爪の速さは時速何キロM?," YouTube Video, Sep 9, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=PPnBKsUOVok>
- [6] "Aerogel photos," last modified Jan 1, 2004, accessed July 3, 2020, <https://stardust.jpl.nasa.gov/images/gallery/aerogelhand.jpg>