

永遠の美の追求を通じた教育ミッション

防衛大学校 システム工学群 航空宇宙工学科
学部4年 瀬川昌学 小山将弘 宮内嶺成 村松泰輔 高橋岬佑 木島玲

1. 序 論

1.1. 背景

近年、プリザーブドフラワーは生花のような生々しさを持つ枯れない加工花として注目を集めているが、実際は大気中の湿気や酸素、紫外線等により色落ち等劣化するため、永久的であるとは言えない。また、花びらが少なく散り易い花や花びらの薄い花、花卉が大きすぎる花は製造過程で花の形を保てなくなるため、地上での製造は困難とされている。我々は、プリザーブドフラワーの作成を宇宙空間で行い、拡散接合を利用したパッキングにより保存環境を整えることで、どのような花も永久的に保存可能なプリザーブドフラワーにすることができるのではないかと考えた。

1.2. 目的

ISS「きぼう」日本実験棟及び中型曝露実験アダプタ (i-SEEP) [1] を用いた宇宙空間でのプリザーブドフラワーの作成、拡散結合を用いたパッキングによって、重力の影響により地上での作成が困難な花も含めどのような花でも永遠に枯れることのないプリザーブドフラワーへと加工する。その様子を動画で撮影して配信及び教育活動に用い、芸術表現の拡大、日本の技術力、未来を見据えた人類の可能性を全世界に示す。

また、作成したプリザーブドフラワーのうち、宇宙飛行士の気分転換のための鑑賞用として ISS に飾るもの以外は地上へと輸送し、保存環境や花の状態の観察を行い、今後の改善や拡散結合やパッキングの技術力向上を目指す。

1.3. 意義

現在、JAXA では「きぼう」日本実験棟を利用

した教育的な活動や文化・人文的な試みによって、「地球人育成」「人類未来の開拓」「宇宙利用による新たな価値の創出」を目指している[2]。本ミッションはこの活動に最適であると考えます。

また、1 輪のバラを用いたミッションを行うことで、「美女と野獣」の実写映画化や 2020 年の東京ディズニーランドの「美女と野獣」エリアの新設などの話題性もあり、2020 年に行われる東京オリンピックと合わせて日本は注目を集め、対外的なアピールにも繋がることも期待できる。

2. ミッションの概要

宇宙空間でのプリザーブドフラワーの作成、拡散結合を用いたパッキング及びその撮影に用いる船外実験装置の概略を図 1 に示す。

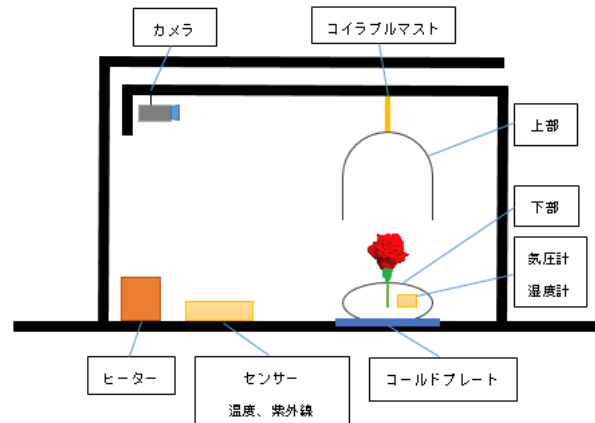


図 1 船外実験装置の概略図

この船外実験装置を用いたミッションの流れを以下の 1)~7)に示す。

- 1) こうのとりの 7 号により必要なコンポーネントと生花を ISS へ打ち上げる。
- 2) ISS「きぼう」日本実験棟において、クルーにより花を密閉容器内で溶液に浸けて脱色、染色し

たのちに溶液のふき取りを実施する。この際、溶液の飛散による他の装置等の汚損が起こらないように注意する。

- 3) 染色された花を容器の下部に設置し、船外実験装置内に収容する。
- 4) 船外実験装置を、JEM エアロックを介して宇宙曝露空間に移設し、ロボットアームにより i-SEEP に取り付け、宇宙曝露空間で花の乾燥を実施する。
- 5) 完全乾燥後、コイラブラルマストを回転させながら拡張していき、容器の上部を容器の下部に回転・加圧しながら接地させ、拡散接合により永久結合させる。
- 6) 容器を回収し、宇宙船で地上へ輸送する。また、宇宙飛行士の気分転換のための鑑賞用として ISS にも設置する。
- 7) 地上に輸送した後、保存環境や花の状態の観察を行い、今後の改善や拡散結合、パッキングの技術力向上を目指す。

3. 宇宙空間で行う意義

3.1. 高真空である利点

プリザーブドフラワーの劣化原因として湿気の影響が挙げられる。湿気にふれることは変色、色落ちに繋がる。そこで真空中で乾燥させればプリザーブドフラワーの完成に良い影響をもたらすと考え、自然乾燥させた花と真空槽（真空度は 0.1 気圧）で乾燥させた花の比較実験を行った。プリザーブドフラワーの乾燥後の経過時間と質量の関係調べたところ図 2 のようになった。

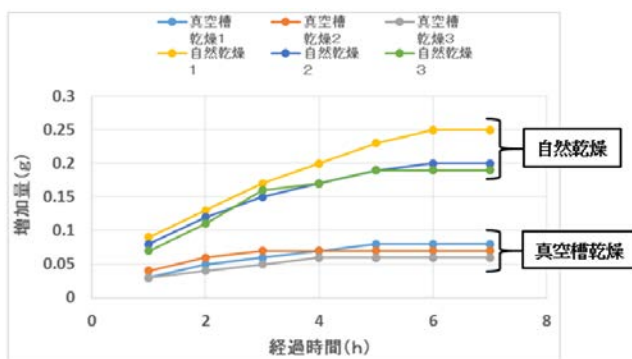


図 2 経過時間と花の質量の増加量の関係

図 2 から分かる通り、自然乾燥させたプリザーブドフラワーは総じて真空槽で乾燥させたプリザーブドフラワーよりも時間の経過による重さの増加量が大きくなっている。これは、高真空で乾燥させる方が花の内部の水分が排出され溶液がよく浸透するのに対し、自然乾燥させた場合には溶液が浸透していない部分が残し、そこに大気中の水分が入り込むことによるものである。しかし、いずれにしても大気中の水分が吸収されることが分かる。これを防止するには、乾燥からパッキング完了まで空気に触れないことが求められる。地上における真空槽を用いた乾燥の場合、乾燥後に一度取り出してパッキングするまでの間に大気に曝されるため、より良いプリザーブドフラワーの作成には、宇宙空間での作成が望ましい。

また、真空槽で乾燥させたプリザーブドフラワーと自然乾燥させたプリザーブドフラワーを約 4 ヶ月間、湿度変化の大きい環境（最高湿度 85%）に放置して比較した様子を図 3 に示す。

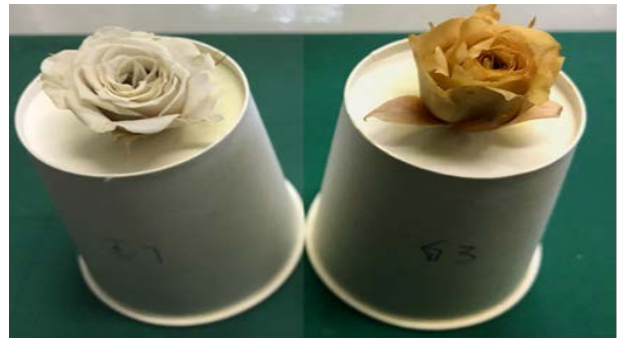


図 3 比較の様子

左：真空槽で乾燥させたプリザーブドフラワー
右：自然乾燥させたプリザーブドフラワー

真空槽で乾燥させたプリザーブドフラワーは白さを保っているが、自然乾燥させたプリザーブドフラワーは茶色に変色し劣化している。

以上の 2 点を踏まえると、高真空であることより良いプリザーブドフラワーを作成することができ、また、乾燥後の状態をそのまま維持するためにも宇宙空間での作成、パッキングが必要である。

3.2. 微小重力である利点

花びらが少なく散り易い花や花びらの薄い花、

花卉が大きすぎる花は製造過程で花の形を保てなくなるため、地上での製造は困難とされている。実際にデルフィニウムを用いた地上実験を行ってみたが、乾燥の段階で重力により花卉がつぶれてしまい、花の形が保てなくなった（図4）。



図4 デルフィニウムのプリザーブドフラワー

しかし、ISS内は微小重力環境であり、花びらにはほとんど重力が働かないので、花びらの形を保つことができると考えられる。今回のミッションでは微小重力空間を利用し、脱色から染色及び乾燥まで実施することにより、プリザーブドフラワーに加工しにくい花も使用できると考える。また、地上での製造では溶液の色素成分が沈殿してしまうため、色のムラを失くすためには攪拌が必要になるが、微小重力下では沈殿しないため、攪拌による花びらの形を壊す要因を失くすことができる。

4. ミッション機器の詳細

中型曝露実験アダプタ (i-SEEP) では船外実験プラットフォーム結合機構 EFBM[3]を結合すると同時に電力系、通信制御系、熱制御系が接続され、船内実験室から船外実験プラットフォームへの電力供給や各種データのやり取りなどが可能になる。

4.1. 船外実験装置

機器を十分に搭載でき、実験の様子を綺麗に撮影できるように船外実験装置は搭載可能最大値である360×500×390mmとする。また、ISSが飛行する軌道周辺は、一般的に原子状酸素の多い環境であり、完全に曝露した状態では、真空容器

の金属部は確実に酸化されて酸化膜が発生するので、拡散接合に大きな影響を与える。また、花が酸化されるという影響も考えられる。そこで、ISSは軌道速度が大きいため原子状酸素は進行方向前面に衝突するため、船外実験装置のカバーを設け、原子状酸素の流入を防ぐ。

4.2. カメラ

投光器を用いることで船外実験装置内での撮影も可能な衛星搭載モニタカメラを使用し、プリザーブドフラワーの作成やパッキングの様子を動画で撮影する。

4.3. コイラブルマスト

3本の縦部材をコイル状に折り畳んで、収納した伸張性のあるコイラブルマストを容器に取り付けて設置する。コイラブルマストが伸展する際の回転運動を利用して容器の上部と下部をこすり合わせ、金属表面の酸化被膜を取り除くことで、金属の拡散を促進し拡散接合する。

4.4. 容器

容器の上部 (UV カットガラス) にはあらかじめ拡散接合のためにアルミニウムを中間体として接着しておく。下部はアルミニウムで作成する。下部は2種類の機構を想定しており、スポンジによって保持する容器を容器α、機械的に保持する容器を容器βとした (図5)。

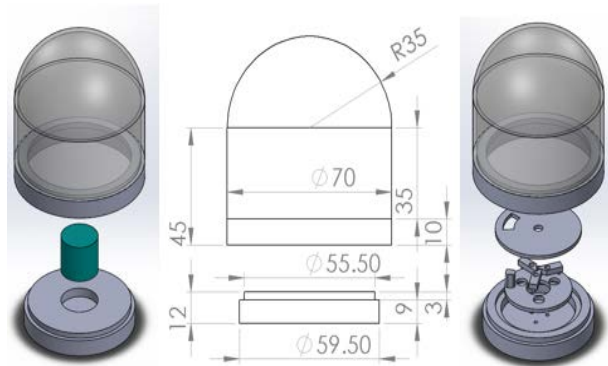


図5 容器の構成と寸法

左：容器α 中央：寸法 右：容器β

容器αは Creative Floral Life GZ3 アレンジフ

オームをφ20 mm高さ 20 mmに加工して設置した。
このスポンジはフラワーアレンジメントや造花の装飾に使用されるものであり、花への影響が少なく、複数の花を装飾するアレンジができるという利点がある。

容器βは図6のように3つの小さな爪で鉛筆削りのように保持する機構であり、1輪の花を確実に保持することができる。

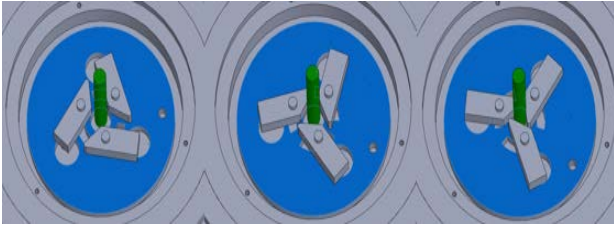


図6 容器βの下部の機構（動作の様子）

また、パッキング後は図7のようになる。

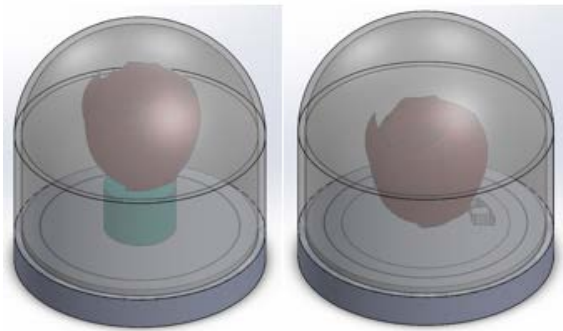


図7 容器の完成図
左：容器α 右：容器β

4.5. 気圧計・湿度計

気圧計と湿度計を容器の下部に取り付け、ケーブルを通した後にシーリングを実施する。これにより、乾燥中やパッキング後、地上に持ち帰った後の気圧や湿度を知ることで、容器内の状態と花の状態を比較的把握でき、今後の技術力の向上や改善が期待できる。

4.6. コールドプレート

中型曝露実験アダプタ (i-SEEP) の排熱サービスとして利用できるコールドプレートを使用する。フロリナートと呼ばれる冷媒を循環させコールドプレートを冷却することにより、熱伝導形態で200Wまで排熱が可能である[4]。

4.7. センサー

温度センサーにはK型熱電対を用いて、低温環境にも幅広く使用できるようにし、船外実験装置内の温度管理に用いる。

着色したプリザーブドフラワーは生花や鉢花と逆で紫外線に当たると変色や色褪せをするので、紫外線センサーを取り付け、装置内部にまで紫外線が届いてないことを確認する。

4.8. ヒーター

ミッション部は宇宙空間に曝されるので、実験装置が凍結により不全状態に陥ることを防ぐために、ヒーター供給電力系統により人工衛星搭載用ヒーターを運用して装置の内部環境の維持に努める。

5. システム系

5.1. 拡散接合

拡散接合とは母材の接合面に圧力を加えることにより密着させ、母材の融点以下の温度で原子の拡散を利用して接合する方法である[5]。本ミッションにおける拡散接合の様子を図8に示す。

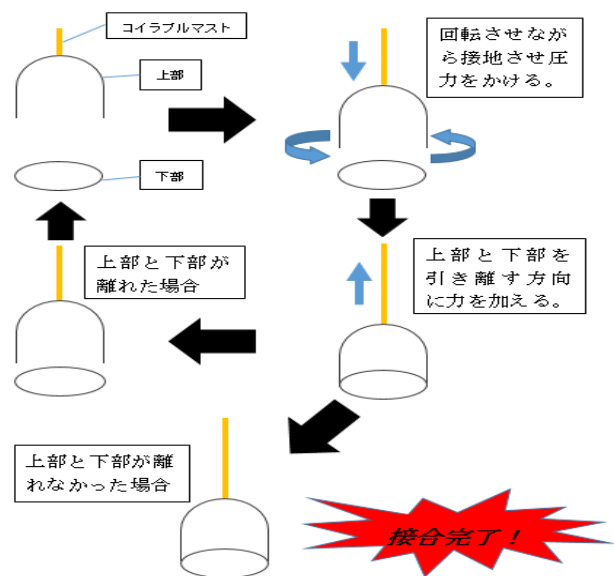


図8 拡散接合の過程

コイラブルマストの拡張に伴う回転・加圧により酸化膜やプリザーブドフラワーからの脱ガス

等の吸着層を除去し、金属面を露出させる。本ミッションでは、高真空下で酸化膜を取り除いた同種金属面をコイラブルマストによって密着、加圧して拡散接合を行う。この際、シリコン製のオリングを用いて容器を密閉する。

5.2. 熱制御

船外実験装置内は高真空であり対流はないので、熱伝達は、熱伝導と熱放射による。

中型曝露実験アダプタ (i-SEEP) 利用ハンドブックによると、フロリナートと呼ばれる冷媒を循環させコールドプレートで冷却することにより、熱伝導形態で200Wまで排熱が可能である。また、実験装置からの深宇宙への放熱も可能である。

以上のことから、実験装置の熱伝達は図9のようになる。

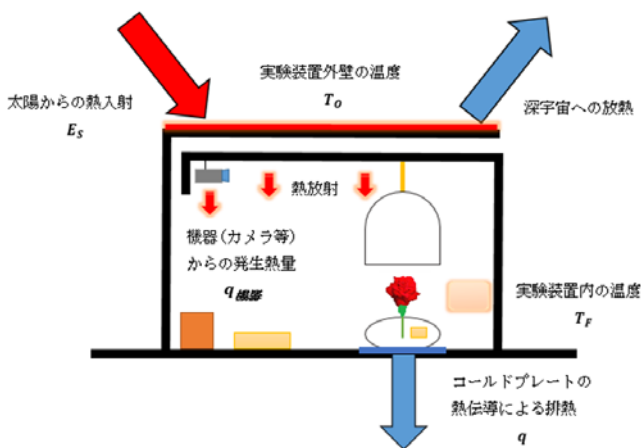


図9 実験装置の熱伝達

まず、実験装置外壁の温度 T_0 は、以下の式で求めることができる。

$$T_0 = \left(\frac{\alpha_s E_s A_s}{\varepsilon \sigma A} \right)^{\frac{1}{4}}$$

α_s : 太陽光吸収率

ε : 放射率

E_s : 地球軌道の平均半径上における太陽からの熱入射 $E_s = 1.353 \times 10^3 \text{ W/m}^2$

σ : ステファン-ボルツマンの定数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$

A_s : 熱入射のある面積

A : 放熱のある面積

ここで、様々な材料表面における太陽光吸収率 α_s と放射率 ε の関係は図10の通りである。

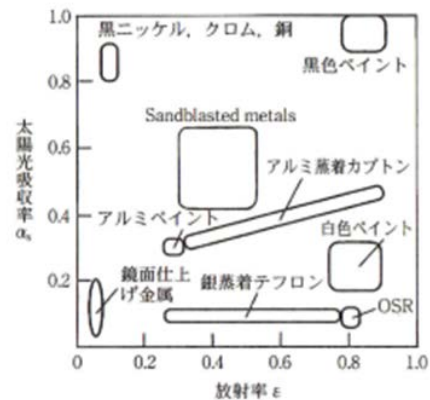


図10 材料表面の α_s と ε の関係[6]

コールドプレートによる排熱には限りがあるので、 T_0 は目的温度に近い方が良く考え、表面材料を $\alpha_s = 0.3$ 、 $\varepsilon = 0.8$ の白色ペイントとする。また、図9のような構成を想定すると、熱入射のある面積と放熱のある面積は等しいので、 $\frac{A_s}{A} = 1$ となる。

よって、

$$T_0 = \left(\frac{0.3}{0.8} \times \frac{1.353 \times 10^3}{5.67 \times 10^{-8}} \times 1 \right)^{\frac{1}{4}} = 307.56 \text{ K}$$

と求まる。

次に、実験装置内部の温度解析の方程式は、

$$q = \sigma \varepsilon F (T_0^4 - T_F^4) + q_{\text{機器}}$$

となる。

ここで、実験装置内の温度を実験に適温である20°Cに保ちたいので、 $T_F = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$ とする。

実験装置の寸法は、360×500×390mmなので、図9の熱伝達の場合、

$$F = \frac{(\cos 0)^2 \times (0.5 \times 0.39)^2}{\pi \times (0.36)^2} = 0.093 \text{ m}^2$$

である。

ここで、カメラ等の機器の発生熱量を見積もり

$q_{\text{機器}} = 20\text{W}$ とすると、以上より、

$$q = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.8 \times 0.093$$

$$\times \left\{ (307.56)^4 - (293)^4 \right\} + 20$$

$$= 26.66 \text{ W}$$

となる。表面材料を白色ペイントにすると、必要な排熱量は200W以下であるため、クールドプレートを用いた排熱を行うことで、温度の上昇を抑制でき適温に保つことができる。

6. 検討すべき事項

6.1. 容器の耐圧性

容器の中は真空となるため、地上に持ち帰った際に、1気圧=1.013×10⁵ N/m²の力がかかり座屈する可能性と静的に壊れる可能性が考えられる。よって、この容器に対して座屈解析と静解析を行った(図11, 12)。

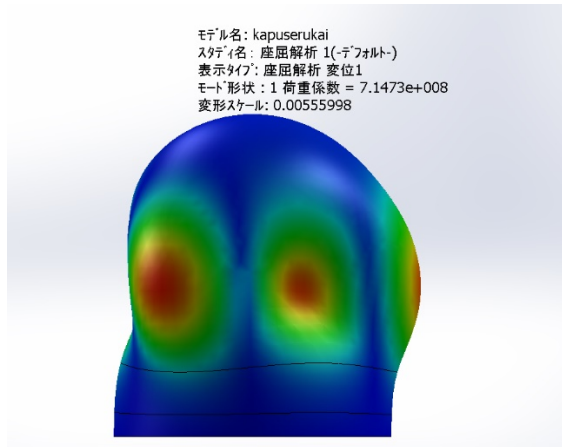


図 1 1 座屈解析の結果

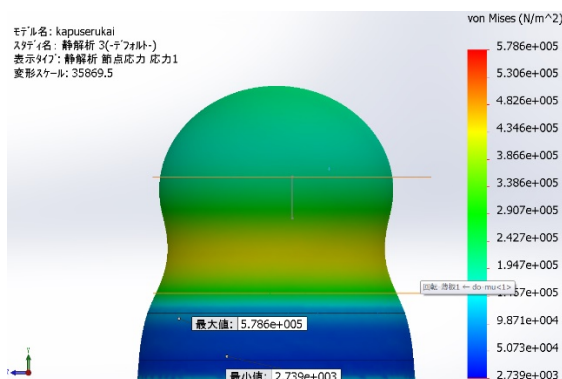


図 1 2 静解析の結果

座屈解析の結果(図11)より、設計した容器は、7.143×10⁸ N/m²の圧力まで耐えられる。地上の気圧は1気圧=1.013×10⁵ N/m²であり、真空容器の耐圧はこれに比べ十分に大きいため、十分なマージンがある。

また、1気圧の圧力をかけた静解析の結果(図12)より、この容器には最大5.79×10⁵ N/m²の圧力がかかる。容器上部に使用するシリカガラスの破壊応力は4.9×10⁷ N/m²、容器下部のアルミニウムの耐力は4.95×10⁸ N/m²であり、十分なマージンがある。

6.2. 振動環境

打ち上げ時は生花であり、荷台にバンドで固定することで振動の影響は小さいと考えた。花に直接の衝撃を避けるように梱包を施すことで、破損は避けることができる。

再突入時は容器に固定された状態のプリザーブドフラワーである。そこで、再突入時の振動・衝撃にプリザーブドフラワーが耐えられるのか、IMV社VS-2000加振試験装置を用いた正弦波振動、ランダム振動による加振試験(縦・横2方向)を行った。試験条件は表1の通りである。

表 1 加振試験の試験条件

| 試験項目 | 概要 |
|--------------|---|
| 正弦波 加振試験 | 加速度レベル 10G, 12-100Hz, 4oct/min, 往復 |
| ランダム 加振試験 | 7.3Grms, 1分 (20Hz: 0.01G ² /Hz; 20-50Hz: +3dB/oct; 50-800Hz: 0.04G ² /Hz; 800-2000Hz: -3dB/oct; 2000Hz: 0.01G ² /Hz) |

容器αに固定した場合、スポンジに茎を奥まで挿し込んだ状態でしか花を保持することができなかったが、その状態では正弦波振動、ランダム振動ともにプリザーブドフラワーが容器から外れることや、破損することはなく、再突入時の振動・衝撃に耐えることができる。

容器βに固定した場合、茎を残した状態の時は正弦波振動の低周波に耐えきれず、茎とがくの境目が破断した（図13）。

以上より、容器α、βともに図14のように固定に必要な最低限の茎のみを残して固定することで、振動・衝撃に耐えることができる。

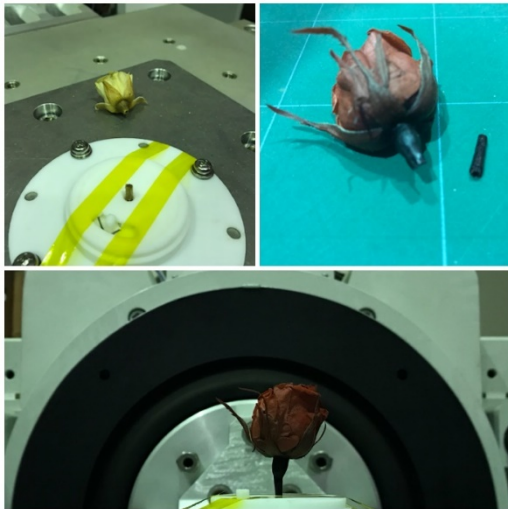


図13 茎が破断した時の様子

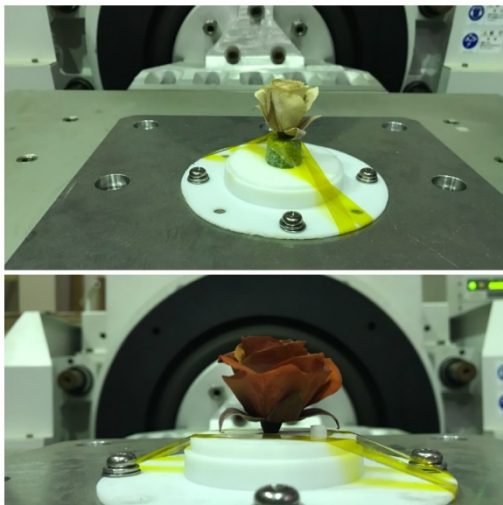


図14 振動・衝撃に耐え得る固定方法

7. 結論

宇宙空間でのプリザーブドフラワーの作成、拡散接合によるパッキングの様子を動画で撮影して配信及び教育活動に用い、芸術表現の拡大、日本の技術力、未来を見据えた人類の可能性を全世界に示すという目的で本ミッションを提案した。

他の手法として窒素充填や樹脂包埋による保

存が考えられたが、窒素充填においては接合雰囲気として真空の方が適しており、樹脂包埋においては樹脂と化学反応を起こし花が変色する可能性がある。また、どちらもシステム的な負担が増えるため、本提案が有効であると言える。

そして、話題性もあるので注目が集まり、この「永遠の美の追究を通じた教育ミッション」はJAXAの目指す「地球人育成」「人類未来の開拓」「宇宙利用による新たな価値の創出」に寄与できると考える。

8. 参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構 広報・情報センター，“中型曝露実験アダプタ（i-SEEP）”，<<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/i-seep/>> [アクセス日:2017年6月15日].
- [2] 宇宙航空研究開発機構 広報・情報センター，“宇宙ステーション・きぼう 文化・人文社会科学利用”，宇宙航空研究開発機構，<<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/epo/pilot/>> [アクセス日:2017年6月15日].
- [3] 宇宙航空研究開発機構 広報・情報センター，“「きぼう」日本実験棟 船外実験プラットフォーム”，宇宙航空研究開発機構，<<http://iss.jaxa.jp/kibo/about/kibo/jef/>> [アクセス日:2017年6月15日].
- [4] 宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術センター『中型曝露実験アダプタ（i-SEEP）利用ハンドブック（JMX-2016226）』宇宙航空研究開発機構
- [5] 日本工業標準調査会，“日本工業規格の簡易閲覧”，日本工業標準調査会，<<http://kikakurui.com/z3/Z3001-1-2013-01.html>> [アクセス日:2017年6月15日].
- [6] 小林繁夫（2001）『宇宙工学概論』丸善株式会社