

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2018 年 10 月号



第 2 回有人宇宙学実習を終えて

第 2 回有人宇宙学実習が 2018 年 9 月 10 日から 15 日にかけて花山天文台で実施された。昨年の第 1 回有人宇宙学実習（2017 年 9 月 11 日-16 日：宇宙ユニット NEWS2018 年 3 月号参照）に引き続いて、今年も波乱万丈の出だしになった。前の週に関西地方を直撃した台風 21 号のために、花山天文台では実習直前まで停電が続いた。また、新館から本館に向かう道路が倒木によって閉鎖されてしまい、模擬微小重力実験で使う実験機材は、迂回路を人手で運ぶことになった。

今年の有人宇宙学実習も天体観測実習、模擬微小重力実験、閉鎖環境実習の 3 課題からなる。今回参加する学生は学部 1 回生から博士課程 2 年生までの計 12 名、3 名ずつ 4 班に分かれて各実習課題に取り組んだ。図 1 は、実習のために特別に作られた記録帳：Crew Notebook である。宇宙ミッションに参加する宇宙飛行士は、自分専用の Crew Notebook を持参

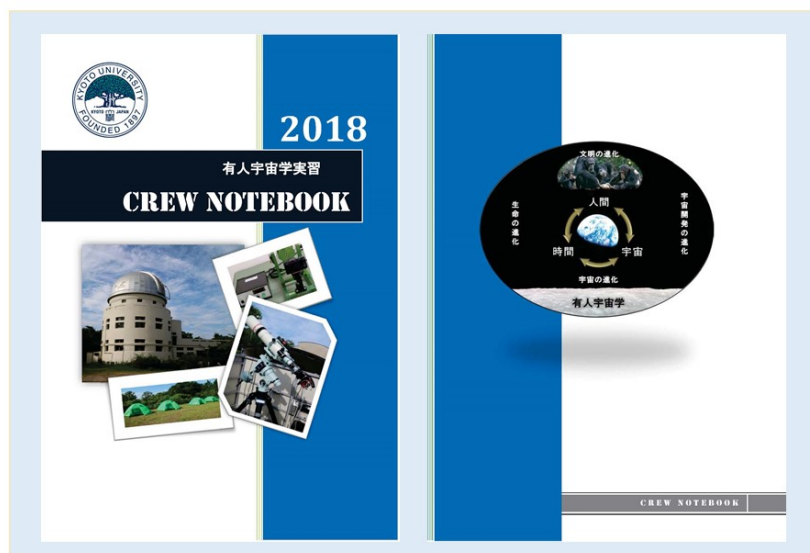


図 1. 有人宇宙学実習用 Crew Notebook

する。そこには、訓練中に書きとめた作業メモから日記まで、訓練中や宇宙ミッション中に起こった大切な出来事が記録される。宇宙ミッションは、起きてから寝るまで、いや、夢を見ている間さえも、すべての時間が発見の連続である。その発見を宇宙飛行士は、自分の Crew Notebook に書き込むのである。有人宇宙学実習に参加する学生も宇宙飛行士と同じように、実習中のすべての発見を書き込み、自分独自の Crew Notebook を完成させることが要求される。

秋雨前線が停滞したために天体観測実習では系外惑星の観測ができず、その代わりそれまで蓄積された観測データの解析を行った。系外惑星がその主星の前面を通過する時にわずかながらその星からの光を遮る。その減光の様子を観測して、系外惑星の大きさや軌道要素を求めるのがトランジット法と呼ばれる観測法である。図 2 に今回のデータ解析に使った系外惑星天体のひとつである HD189733 の光度曲線を示す。減光等級 0.023 等の値から、惑星半径が主星半径の約 15% であることがわかる。

模擬微小重力実験では、クリノスタットを使い、重力の植物（ガーデンクレス）の根の成長に与える影響を観察した。クリノスタットは、水平方向に回転軸を持ち、1回転する間に重力方向が平均化されてゼロになることを使った模擬微小重力発生装置である。各班は、約6時間に及ぶ観察から根の成長

速度を求め、さらに光学顕微鏡を使い植物の重力感知機構が模擬微小重力下でどのように応答するのかを調べた。閉鎖環境実習では、ストレスの影響を調べるために、昨年度も行ったアミラーゼ、フェイススケール、Profile of Mode States (POMS)と呼ばれる心理検査に加えて、瞳孔の反射から交感神経と副交感神経の応答を調べる電子瞳孔計を使った検査を毎日行った。

有人宇宙学実習は、宇宙・生命・社会に関する活動を模擬宇宙ミッションというカリキュラムの中に凝縮させた体験学習であり、今年が2回目の試みであった。12名の学生は、初日から仲間との積極的なコミュニケーション

をはかり、非常に忙しい時間割を乗り切り、見事にすべての課題を成功裡に達成した（図3：グループ写真）。最後に、有人宇宙学実習の実施にあたり、光学顕微鏡を貸し出して頂いた京都大学大学院理科学研究科生物科学専攻と電子瞳孔計を貸し出して頂いたスカラ株式会社に感謝いたします。（土井 隆雄 記）

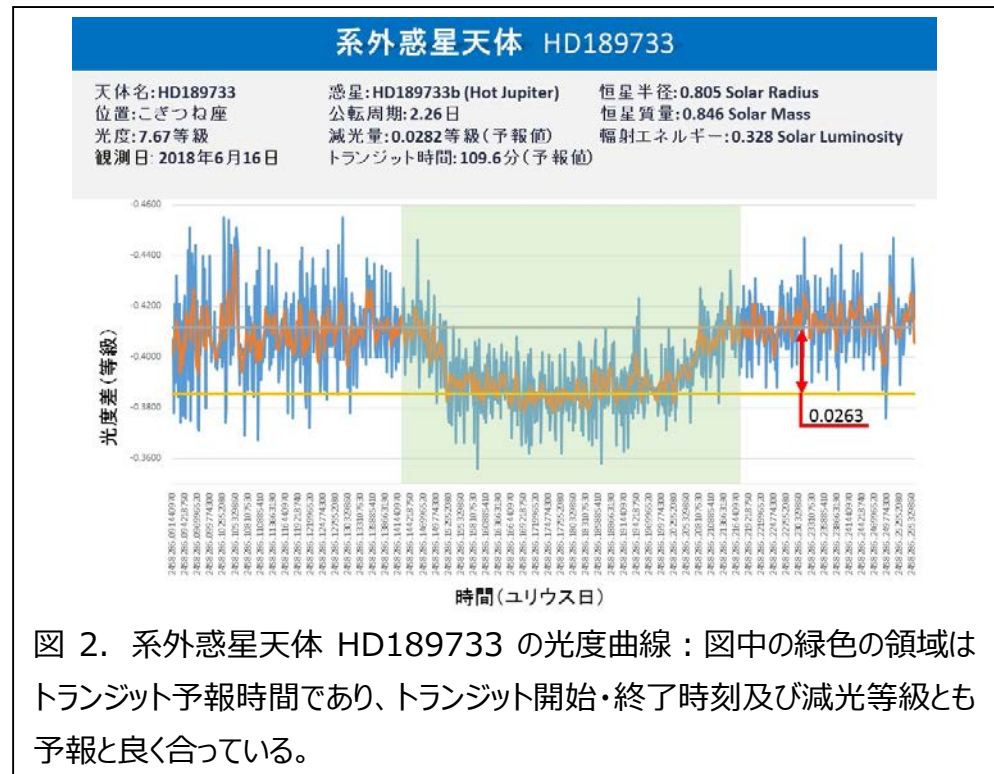


図 2. 系外惑星天体 HD189733 の光度曲線：図中の緑色の領域はトランジット予報時間であり、トランジット開始・終了時刻及び減光等級とも予報と良く合っている。



図 3. 花山天文台における第 2 回有人宇宙学実習グループ写真

産学官共催セミナーに宇宙木材利用研究会が参加！

宇宙ユニット宇宙木材利用研究会が産学官共催セミナー——国産早生樹センダンの使い道——に登壇しました。

このセミナーは林野庁をはじめ、樹木を扱う企業、研究所、大学などから、その早生性と使用法の多様性から注目を集めているセンダンについての最先端の研究を発表しあう場として企画されたものです。宇宙ユニット宇宙木材利用研究会が行っている、木材の真空環境における物性変化の解析にもセンダンが用いられていることから、本セミナーではこれまでの実験結果に加え、センダンの宇宙利用の可能性について講演を行いました。（三木 健司 記）

宇宙開発フォーラム 2018 へのポスター出展報告

9月8日—9日の2日間にわたり日本科学未来館で「[宇宙開発フォーラム 2018](#)」が開催されました。このイベントは主に関東の大学生が「[文科系と理科系が出会うとき 日本の宇宙開発の未来が開く！](#)」とのキーワードで結束した団体「[宇宙開発フォーラム実行委員会\(SDF\)](#)」が主催するもので、今年で16回目となる開催です。宇宙ユニットも2015年から毎年ポスター出展にて参加しており、今年度もポスター出展いたしました。

今回の宇宙開発フォーラムでは、1日目のテーマが「宇宙開発が発展する未来に向けて」と設定されており、セミナー「宇宙探査とオープンイノベーション」・ワークショップ「宇宙データが創る、未来の社会」・パネルディスカッション「オープンデータで変わる宇宙と社会」が実施されました。2日目はテーマが「宇宙開発を手段として、社会がより発展する未来に向けて」と設定されており、セミナー「[社会課題に挑む宇宙ビジネス](#)」・ポスターセッション「[宇宙開発\(Space\)×社会課題\(Society\)](#)」・ワークショップ「[衛星利用による持続可能な社会形成](#)」が実施されました。

ポスターセッションでは、各出展団体によるショートプレゼンテーションおよびポスターを用いての活動内容の説明の後、宇宙開発に関わる団体・社会課題に関わる団体・一般参加者が小テーブルに同席し、宇宙を利用した社会課題へのアプローチについてディスカッションする形式で実施されました。宇宙ユニットは、「環境×ビジネス」を理念にかかげた学生団体 [em factory](#) さんと同席し、参加者とともに人工衛星をはじめとする宇宙技術の利用で食品ロスを解決できないかを議論しました。このセッションでは、思わぬ所での宇宙技術の活躍と可能性を感じ、また考えさせる有意義な議論となりました。

（水村 好貴 記）



ポスターセッション後のディスカッションで作成した
食品ロス課題に貢献し得る宇宙技術とその活用マップ

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	場所
10月3日(水) 4限 16:30—18:00	研究科開講科目：有人宇宙学 人類の宇宙進出が地球文明にとって何を意味するかを理解し、人類が宇宙に持続可能な社会基盤を構築することが可能であるのかを、有人宇宙学、宇宙環境工学、宇宙生命科学、宇宙霊長類学、宇宙人類学、宇宙工学、宇宙法など幅広い学問分野の融合から探求する。※学部学生も聴講可能です。 https://ocw.kyoto-u.ac.jp/syllabuses/277/31/3030000 をご覧ください。	講義室：東一条館 201 大講義室
10月4日(木) 1限 8:45—10:15	研究科開講科目：宇宙学 人類の活動範囲が地球を出て宇宙にまでひろがりつつある現在から未来において、地球外という未知の環境は人類の心身と社会現象に様々な変容を引き起こすと予想される。自然科学が 明らかにしてきた宇宙の歴史と現在の姿、そして人類生存圏の拡大の営みとしての宇宙開発の現状とそこから生じつつある 人文社会学的な問題群を概説し、人類の生存に関わるようなリスクにどう向き合ったよいかについて議論を行う。天文学等の高度な自然科学の知識を前提とはしないが、基礎的な物理学等を使って定量的に現象を把握する演習は随時行う。 https://ocw.kyoto-u.ac.jp/syllabuses/277/1/3027000 をご覧ください。	講義室：東一条館 201 大講義室
10月9日(火) 14:45~16:15	第7回宇宙学セミナー タイトル：Science Isn't Done Until It's Communicated to the Public 講演者：James L. Green 氏 (NASA Chief Scientist)	基礎物理学研究所 湯川記念館 パナソニックホール

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.s.kyoto-u.ac.jp/seminar.html>) で公開いたします。

航空宇宙力学講座における 宇宙インフレーション構造に関する研究 教授 泉田 啓

(工学研究科 航空宇宙工学専攻 航空宇宙力学講座)

1. はじめに

京都大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻 航空宇宙力学講座では、将来の航空宇宙システムのためのさまざまな研究 [1] を行っている。具体的には

- (1) 航空宇宙システムのダイナミクス、制御、システム設計
- (2) 力学的理解と動物の運動知能理解に基づく制御・運動生成・知能化
- (3) 羽ばたき飛翔の観測・数値計算による運動知能の解明、実現、設計
- (4) 宇宙ロボット、歩行ローバ・ロボットのダイナミクスと知的制御と知能や技能の自律的な学習
- (5) 将来航空宇宙機（太陽発電衛星などの大型構造も含む）のダイナミクスとシステム設計 等

である。本稿では、項目 (5) に関連する研究のうち、将来の大型宇宙機を実現するための超軽量な宇宙インフレーション構造について紹介する。

典型的なインフレータブル構造は、袋状に形成した膜面にガスで内圧をかけて膨張展開させて所望の形状になり、膜面を硬化して構造をなす。インフレータブル構造は、宇宙構造への要求項目 **(1) 高い収納効率、(2) 軽量かつ低コスト、(3) 高信頼性かつ短期間での展開**、等を達成できる有望な構造様式として注目されている。また、将来の大型アンテナや太陽発電衛星などに、インフレータブル構造を前提としたコンセプトが数多く提案されている。他方、NASA の Spartan 207 衛星を用いた IAE (Inflatable Antenna Experiment) における宇宙インフレータブル構造の展開挙動を **Fig. 1** に示すが、展開中に挙動が不安定化したためストラット部を破損し、反射鏡の膨張実験が出来なかった。この実験などから、**(a) 安定に展開を進展させる展開技術、(b) 所望の形状精度を達成する形成技術、(c) 規定状態で必要な強度を達成**



Fig. 1 Spartan 207 衛星での IAE (Inflatable Antenna Experiment) の展開挙動 (Photo Credit: NASA)

する硬化技術、等の未解決な課題があることがわかる。そのため、当講座では、これらの課題を解決すべく、研究開発を進めている。本稿では、課題 (a) に対する研究を中心に説明する。

2. 芒星折の設計と航空機を用いた微小重力環境での展開実験

宇宙での建築を考えると、予め計画した展開挙動に従って展開させることが求められるが、膜面の展開挙動を予測・制御することは容易ではない。そこで、インフレータブル・チューブが直線状に展開する、芒星折 [2] という折畳み方法を提案している。**Fig. 2** に折畳の断面形状を示す。図中の四角形折や六角形折などの多角形折は既存の方法であり、三芒星折や五芒星折などの芒星折が提案手法である。既存の六角形折は、先行研究により安定に直線的に展開すると言われている。多角形折は角数を決めると形状が一意に定まるのに対し、芒星折は一意に定まらず、図中の α と h という設計変数を持つ。この設計自由度を用いて、安定で直線的に展開する折畳み方法を設計することができる。なお、芒星折は十亀折 [4] に分類されるが、そのうち直線的に展開できるように設計したものを芒星折と呼ぶ。

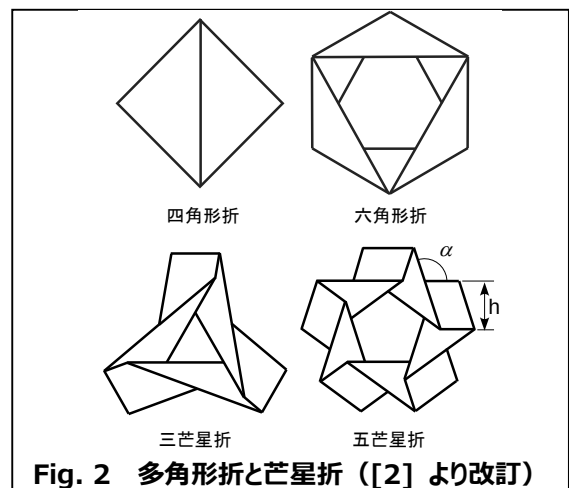


Fig. 2 多角形折と芒星折 ([2] より改訂)

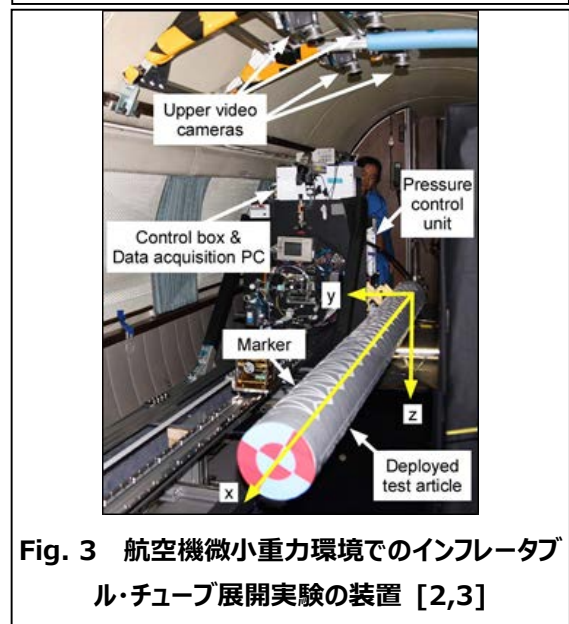


Fig. 3 航空機微小重力環境でのインフレータブル・チューブ展開実験の装置 [2,3]

提案手法の有効性を検証するために、航空機の放物線飛行による微小重力環境でインフレータブル・チューブの展開挙動を観察する実験を行った。**Fig. 3** は、その実験の様子と航空機内の実験装置である。航空機実験では、既存の折畳方法で直線的に展開する六角形折、提案する五芒星折の展開挙動を比

較している。五芒星折では、予備検討において安定に直線的に展開すると予想された設計の五芒星折 (a) と、それよりやや直進性に劣ると予想された五芒星折 (b) を比較している。Fig. 4 に示すように、航空機の放物線飛行による微小重力環境では、六角形折は蛇行しつつ振動した。五芒星折 (b) では、根元付近で曲がり上方に進展し、展開終了間際に曲った部分が伸びている。五芒星折 (a) のみがインフレータブル・チューブを直線状に展開させることに成功している。なお、地上の重力下の実験では、五芒星折 (b) がこのように曲がることはなく、微小重力実験の重要性を示唆している。

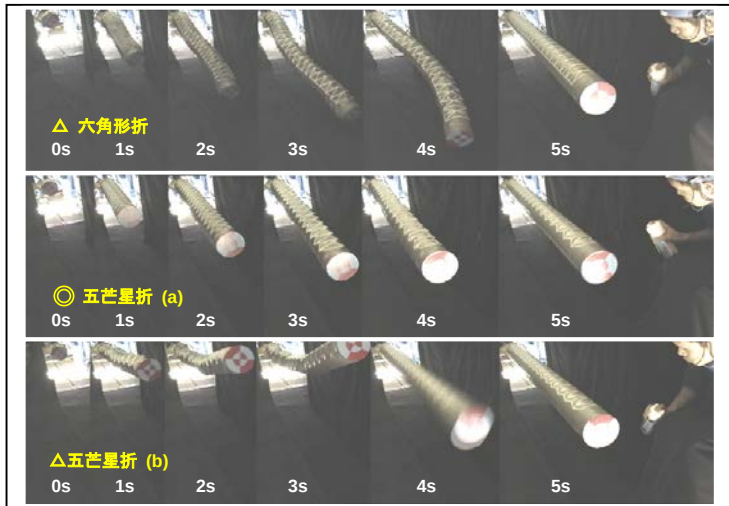


Fig. 4 微小重力環境での各種折畳み様式のインフレータブル・チューブの展開挙動 ([2] より改訂)

3. 羽化する昆虫の翅を参考にした翅脈付き複合膜面インフレータブル構造

Fig. 5 はトンボの羽化の様子である。羽化前の翅はいくつかの小さなヒダに折り畳まれており、翅脈（血管）に体液を送り込み圧力を加えることで畳まれた部分がキレイに開いて広がり、羽化すると考えられている。また、よく観察すると小さなヒダの折り畳まれ方は、ミウラ折りとして知られる折り紙の折り方と共通点があるように思われる。ミウラ折りは山折りと谷折りを組み合わせた折り方で、宇宙分野で太陽電池アレイなど概略平面をなす膜面を折り畳む方法としての応用が期待されている。そこで、昆虫の翅脈の構造を参考に翅脈付き複合膜面を



Fig. 5 トンボ（ギンヤンマ）の羽化の様子 ([5] より改訂)

構成してミウラ折りで折り畳むことにより、収納効率が高く、安定に展開し、概略平面をなすインフレータブル構造を実現できないか研究した。折り目に対して、どのように翅脈を配置すると展開しやすいかを検討するため、実験および有限要素法を用いた数値計算によって幾つかの翅脈配置を解析した。解析結

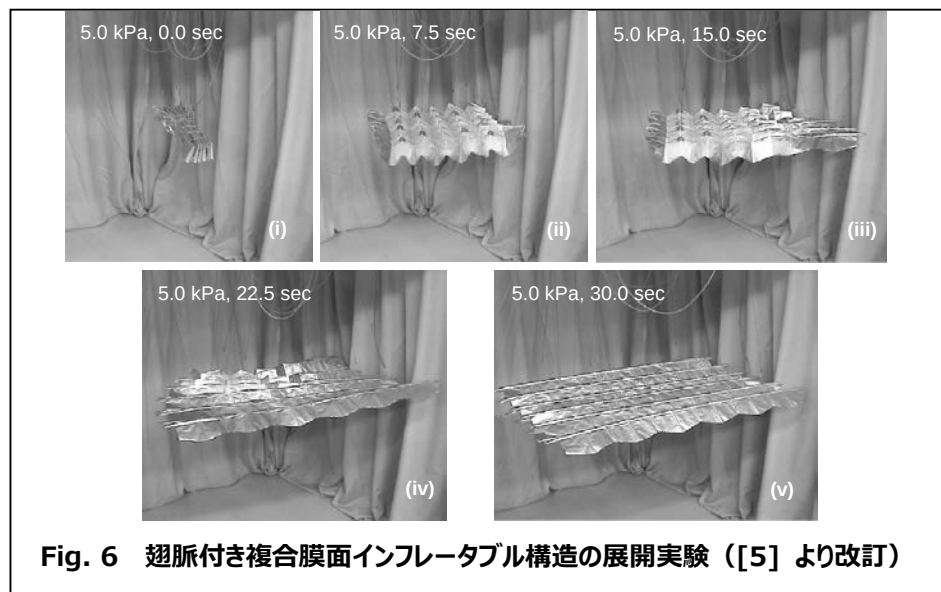


Fig. 6 翅脈付き複合膜面インフレータブル構造の展開実験 ([5] より改訂)

果に基づいて設計された翅脈付き複合膜面インフレータブル構造の展開実験の様子を **Fig. 6** に示す。翅脈の1箇所から空気を注入し、空気圧を加えることで複合膜面を展開している。空気を注入した右手前の辺りがやや早く、注入箇所から離れた左奥に向かって展開する傾向が観られるものの、概ね計画通りに全体が安定に同期展開した。この設計方法を拡張することにより、球面などさまざまな立体形状の構造になる、高収納効率で安定に展開する膜面インフレータブル構造が可能になると期待される。

4. 膜面インフレータブル構造に生じるシワのカオス的挙動

膜面インフレータブル構造が展開する際、Fig. 4 の六角形折により折畳まれたチューブが展開するときと同じように、一般的に膜面にシワを生じる。これは、折畳まれた状態から展開後の形状に移行する際、折目で囲まれた膜面セグメントが平面を保ったまま展開す

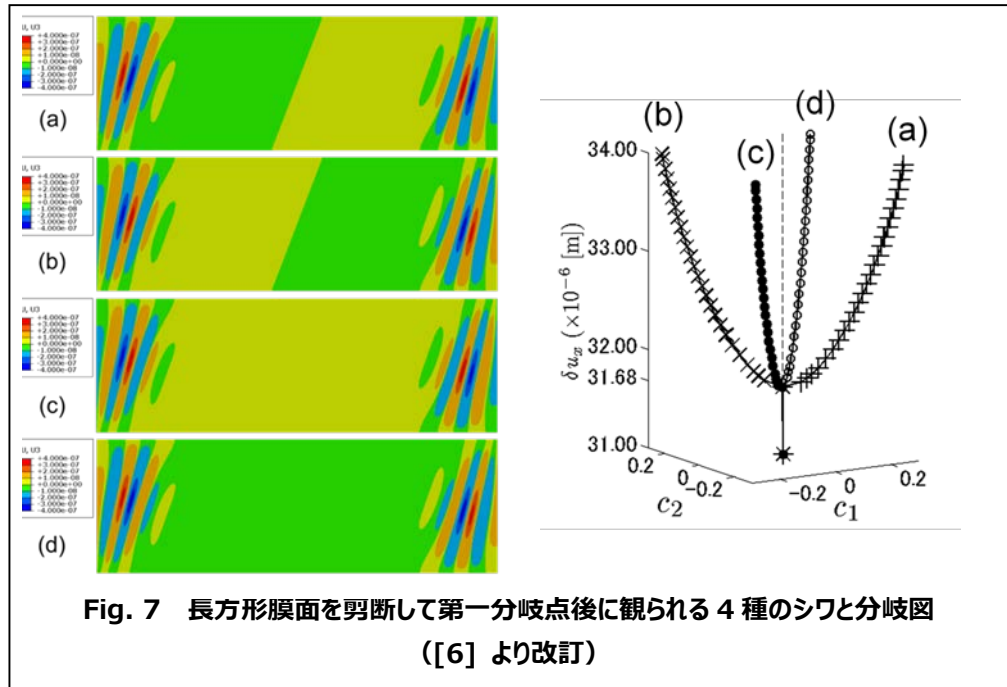


Fig. 7 長方形膜面を剪断して第一分岐点後に観られる4種のシワと分岐図
([6]より改訂)

ることができないためである。実際、膜面セグメントが平面を保ちつつ展開する折畳み方としては、平面膜面のミウラ折など限られた場合しか知られていない。そのため膜面構造の展開時にはシワが生じてしまうものとして、膜面上のシワの生成メカニズムについて研究している。

長方形膜面を対象とし、左右の辺が自由境界で上下の辺が固定境界であり、上辺を下辺に対して徐々にせん断変位させる場合の有限要素解析の結果を示す。**Fig. 7 左図**は、第一分岐点の直後に観られる4種類の面外変形の形状を表している。これらのシワは、せん断変位方向とは直交する面外方向の変位として現れる座屈である。全ての変形形状 (a)~(d) において、自由境界の付近に7個のシワを生じている。何れの変形形状も直交する2つの変形モードの重ね合せで表現することができる。経路パラメータをせん断変位 δu_x 、2つの変形モードの座標を C_1 と C_2 として、 δu_x の増加に伴う変形形状の変化の様子を分岐図に表すと **Fig. 7 右図**になる。平面形状を保っていた膜面は、せん断変位が $\delta u_x = 31.68 \times 10^{-6}$ [m] に達すると平面形状の主経路が不安定になり、経路 (a)~(d) の4経路に枝分れ分岐する。分岐直後のせん断変位 $\delta u_x = 31.83 \times 10^{-6}$ [m] のときの経路 (a)~(d) の変形形状が左図の (a)~(d) である。

せん断変位 δu_x を更に増加させると、この膜面には新たなシワを生じてシワの数が増加する。上と同様に枝分れ分岐によりシワの数が増加する場合について、経路パラメータ δu_x に対する膜面変形形状の変化を Fig. 7 右図と同様に分岐図（概念図）で表すと **Fig. 8** のようになる。この図より、

δu_x の増加に伴い、各経路が枝分れして新たな複数の経路に分岐することを繰返すため、経路すなわち変形状パターン数が指数関数的に増えることが解る。すなわち、この系はカオスを生じ得る可能性があり、カオスに至らないまでも非常に多くの変形状パターの何れになるか事前には判らず、シワを生じる膜面の挙動は予測できないということになる。Fig. 4 の六角形折の展開などにおいて、膜面セグメントの局所的な変形が全体の展開挙動に影響を与えることが観察されており、シワを生じる膜面構造の展開挙動も予測不可能になってしまう。そのため、展開時にシワを生じることが避けられないとすると、折畳まれた膜面構造を予定の軌道に沿って安定に展開することは困難ということになる。論理的な帰結として、「膜面インフレータブル構造は高い信頼性で宇宙構造をなすための構造様式ではない」ということになってしまう。

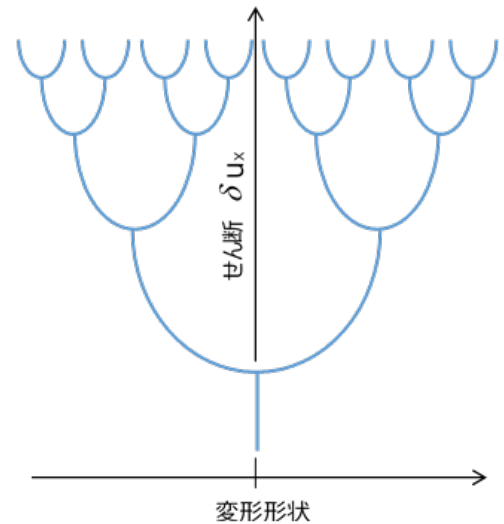


Fig.8 枝分れ座屈分岐によるシワ形成から予想される膜面変形状のカオス

この膜面インフレータブル構造にとって絶望的な状況を打開する方法を考えるために、先の長方形膜面の解析において、せん断変位 δu_x を更に増加させてシワの生成メカニズムの解析を続けた。すると、奇妙な現象が 2 つ発見された。まず、現在の経路が不安定化して複数の経路に分岐する枝分かれ分岐とは異なり、安定経路上で分岐を伴わずにシワが生成される現象が観られ、新たにシワが生成されも経路の数が増えることがなかった。その詳細なメカニズムの説明は難しいため文献 [6] に譲るが、これまで常識とされてきた「新たなシワは分岐座屈によって生じる」という考えを否定する発見であった。次に、せん断変位 δu_x の増加に伴って分岐した複数（場合によっては非加算無限個）の経路が合流して 1 つの経路になるという現象である。これは、分岐などで生じた複数の異なった変形状が、せん断変位 δu_x の増加とともに徐々に似た変形状になり、やがて同じ形状になるということである。異なった平面形状、異なった境界条件、円筒形状の膜面などについても解析を行ったが、それらにおいても同様の現象が観られた。非常に多くの変形状パターンを取り得る特定の δu_x の領域は在るものの、それ以外では上記 2 つの現象の結果として、多くても数個程度の少数のパターンしか取り得なかった。それゆえ、シワを生じる膜面の挙動を完全に予測することはできないが、変形過程の殆どの場合では、少数の変形状の何れかになることは予測できることが明らかになった。

これらの解析の結果、膜面インフレータブル構造は前述の絶望的な状況にある訳ではなく、展開挙動がある程度予測できることが明らかになった。しかし、シワの生成メカニズムは、十分に理解されているとは言えず、今後の継続的な研究が必要である。

5. 軌道上実験

国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟 (JEM) の船外実験プラットフォームにおいて、Fig. 9 の宇宙インフレータブル構造の宇宙実証実験（代表：東京大学 教授 青木隆平）を実施した。その実験目的は、インフレータブル構造を実際の宇宙環境のもとで長期間運用し、その実用性を実証するとともに今後の宇宙構造物への適用のための基礎データを集めることであった。JAXA の長期ビジョンのうち、特に「世界最高の技術により、自在な宇宙活動能力を確立する」に符合した研究開発であった。実験ミッション名の **SIMPLE** (**S**pace **I**nflatable **M**embranes **P**ioneering **L**ong-term

Experiments) は、将来の大型宇宙構造物を高い信頼性で実現するために、インフレータブル構造により **SIMPLE** な宇宙構造システムを研究開発することを現している。

具体的な研究目的は、以下のとおりであった。

(1) 宇宙インフレータブル構造の基礎技術実証

今後の宇宙開発に必要な基盤技術である宇宙インフレータブル構造を宇宙実証し、宇宙実績を積み上げる。これまでの学術的蓄積を検証するための軌道上データ取得するとともに、将来に向けて新たな学術研究課題を探索する。



Fig. 9 国際宇宙ステーション JEM 暴露部でのインフレータブル構造の実証実験 SIMPLE (手前の宇宙飛行士は星出彰彦さん, Photo Credit: JAXA)

(2) 宇宙インフレータブル構造のアプリケーションの提示およびその技術実証

具体的利用方法を考え、開発・実証し、宇宙インフレータブル構造が実現可能であることを示す。

(3) 宇宙インフレータブル構造システムの運用のためのノウハウの蓄積

個々の技術の統合により宇宙インフレータブル構造システムを設計・開発・運用し、同時に、それに対応した地上試験技術を獲得する。

実験ミッションの概要は以下のとおりである。実験装置は書架ほどの大きさ (1.8 x 1.0 x 0.8 [m]) の MCE (Multi-mission Consolidated Equipment) と呼ばれるユニットに他の実験ミッション装置と混載され、MCE は JEM 船外実験プラットフォームに Fig. 9 のように装着された。

このミッションには、以下のサブミッションが含まれる。

(i) インフレータブル伸展マスト (Inflatable Extension Mast: IEM)

インフレータブル展開実験, 長期特性評価

(ii) インフレータブル・スペース・テラリウム (Inflatable Space Terrarium: IST)

インフレータブル展開実験, 内圧維持、植物発芽実験

(iii) インフレータブル材料実験パネル (Inflatable Material Experiment Panel: IMP)

形状記憶ポリマ, 紫外線硬化樹脂の材料実験

IEM は進展マストの展開と評価, IST はテラリウムの実現, IMP は軌道上での材料評価が主な内容であった。IST でリーク生じたため当初目標の 6 ヶ月間の内圧維持が達成されなかったが、他のサブミッションはエクストラ・サクセスまで成功裏に完了した。

参考のため経緯を述べる。2007 年 2 月に『「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォーム第 2 期利用に向けた候補ミッション公募』へ応募し、同年 4 月に選定され、2009 年 9 月に開発移行審査にパスし、設計・製作・試験を行い、2011 年 3 月に装置を JAXA へ引渡し、2012 年 7 月 21 日に宇宙ステーション補給機「こうのとり」3 号機に搭載されて H-IIB ロケットで打上げ、同年 8 月

9日に国際宇宙ステーションの船外実験プラットフォームに取付け、同年8月17日に IEM を伸展、その後継続して IST と IMP の実験を実施、2015年8月に運用終了、2015年9月29日に「こうのとり」5号機に積載されて国際宇宙ステーションから放出され、同年9月30日に大気圏に突入し燃え尽きた。

この実験を通じて、宇宙インフレータブル構造が今後の宇宙開発に必要な基盤技術に成り得る有用な技術であることを国内外にアピールし、当該分野の技術発展に大きく寄与することができた。

6. おわりに

宇宙インフレータブル構造の実現に向けて当講座で行ってきた研究のうち、「1. はじめに」で示した課題「(a) 安定に展開を進展させる展開技術」を中心に説明した。その他の課題「(b) 所望の形状精度を達成する形成技術」、「(c) 規定状態で必要な強度を達成する硬化技術」に関連して、非線形有限要素法を用いた膜面挙動の解析、ラミネートされた金属薄膜の加工硬化を用いた硬化技術に関しても有用な成果 [2] を得ている。さらに、展開過程の動的および静的な形状の高精度な計測方法技術 [3] などの課題についても研究を進めている。

これらの宇宙インフレータブル構造の研究成果が、革新的な宇宙機の実現に貢献できる日も近いとの手ごたえを感じている。他方、今後の研究課題もある。特に「4. 膜面インフレータブル構造に生じるシワのカオス的挙動」で述べたように、研究を進めるにつれ、より基礎的で本質的な課題が明らかになってきた。これらの興味深い研究課題と向き合いながら、これらを克服してインフレータブル構造を実現してきた昆虫や植物などの生命進化の過程を想像し、インフレータブル構造が宇宙で開花することに夢をはせている。

参考文献等

- [1] <http://space.kuaero.kyoto-u.ac.jp/>
- [2] K. Senda, et al., "Deploy Experiment of Inflatable Tube using Work Hardening," Proc. of AIAA 47th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference / 7th Gossamer Spacecraft Forum, May 1-4, 2006, Newport, Rhode Island, AIAA-2006-1808, 18 pages, doi: 10.2514/6.2006-1808.
- [3] K. Senda, et al., "Motion Measurement of Inflatable Tube from Video Images," Proc. of AIAA 48th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference / 8th Gossamer Spacecraft Forum, April 23-26, 2007, Honolulu, Hawaii, AIAA-2007-1840, 14 pages, doi: 10.2514/6.2007-1840.
- [4] A. Sogame, and H. Furuya, "Conceptual Study on Cylindrical Deployable Space Structures," IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications (1998), edited by S. Pellegrino and S. D. Guest, Vol. 80, Kluwer Academic Publisher, 2000, pp. 383-392.
- [5] K. Senda, et al., "Finite Element Method Analysis and Experiment of 2-Dimensional Deployable Membrane Structures Embedding Inflatable Tubes," Proc. of AIAA 49th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference / 9th Gossamer Spacecraft Forum, April 7-10, 2008, Schaumburg, Illinois, AIAA-2008-2054, 9 pages, doi: 10.2514/6.2008-2054.
- [6] K. Senda, M. Petrovic, and K. Nakanishi, "Wrinkle Generation without Bifurcation in a Shear-Enforced Rectangular Membrane with Free Boundaries," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 52, No. 4, pp. 1057-1073, 2015 (July-August), doi: 10.2514/1.A33018.

京都大学 宇宙総合学研究ユニット
<http://www.uss.s.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人：出口雅規

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: uss.s@kwasan.kyoto-u.ac.jp