

生物の形態変化の観察に基づく膜面構造物モデルの展開挙動に関する研究

岸本 直子^{*1}

橋元 賢志^{*2}

名取 通弘^{*3}

宮崎 康行^{*4}

梗概

将来の宇宙用アンテナ、太陽発電衛星、ソーラーセイルなどの大型宇宙構造物の基本構造として、膜面構造物の利用は有効である。本論文では、生物の形態変化のうち昆虫の羽化過程の観察に基づき、インフレータブルチューブを埋め込んだ展開膜面構造システムを提案し、その展開挙動について考察した。対象とした展開膜面は、単純な長方形膜面モデルと、遠心力展開を想定した擬似対数らせん折りによる六角形膜面モデルである。張力場理論に基づく非線形動解析法による展開挙動を解析し、提案する構造システムの有効性について示した。

はじめに

将来の高精度宇宙用アンテナ、太陽発電衛星、ソーラーセイルなどの大型宇宙構造物の基本構造として、さまざまな膜面構造システムが提案されている^{1,1)}。膜面構造システムは、小さく収納でき、また軽量で大面積の構造物を構成することができるので、宇宙空間への輸送に空間的・重量的制約の大きい宇宙構造物には非常に有効である。張力部材である膜面を利用するためには、通常圧縮部材を併用する。代表的な例であるアメリカの方形のソーラーセイルでは、インフレータブルチューブを圧縮部材として利用している。しかしながら、100mを超えるような大面積の宇宙構造物システムでは、圧縮部材のみの利用は現実的とは言えず、遠心力や重力傾斜などが効果的であると考えられる。

大面積の膜面構造は、必然的に折り畳まれて収納され、宇宙空間で展開されるが、単純かつ合理的な収納および展開方法は、膜面の大きさや形状に大きく依存する。しかし、幾何学的な折り畳み方法や、展開力は展開の確実性や展開挙動に直接影響を及ぼすため、信頼性の高い収納・展開方法の開発が不可欠となっている。

さらに、膜面の静的・動的挙動の予測は困難である。これらは不均一な応力分布によって生じるシワ・タルミや収納時の折畳

みによる折り癖などが原因である。膜面そのものの妥当な解析モデルを構築することもかなり難しい問題である上に、折り癖やシワ・タルミを正確にモデル化することには一層の困難を伴う。膜面挙動が予測できないことは、展開の確実性ばかりでなく、安定した運用にも影響を及ぼす。

こうした問題点を解決する手掛かりを探索するため、著者らは膜面展開構造物という観点から生物の形態変化に着目してきた^{1,2)}。生物の現在の形態や機能が最適であるとは限らないが、進化の過程で何らかの形で環境に適応してきた結果である。本論文では、生物の形態変化のうち昆虫の羽化過程の観察に基づいた新しい展開膜面構造システムを提案し、代表的なモデルを対象に動的な展開挙動、特に展開過程を制御する可能性について述べる。

2. 昆虫の羽化過程の観察

昆虫の羽化過程のうちトンボの羽化の様子を図1に示す。トンボの羽化様式には2種類あり、(a)のように一度頭が下を向き、その後方向を変えて翅が重力方向に伸びるもの(懸垂型)と、(b)のように上体が直立し翅が重力とは直交方向に伸びるもの(直立型)とがある。チョウの羽化においても蛹の付着する方向と重力方向の関係から2種類の羽化様式がある(垂蛹と帯蛹)。

*1 (独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 招聘開発員

*2 東京大学大学院 現：ブリジストン株式会社

*3 (独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 教授

*4 日本大学 理工学部 助教授



(a) ギンヤンマ (*Anax parthenope* Julius)の羽化過程 (懸垂型)



(b) ダビドサナエ (*Davidius nanus*)の羽化過程 (直立型)

図1 2種類のトンボの羽化過程

翅の伸展は、分岐した翅脈への体液の注入によると考えられ、伸展終了後約 30 分後に左右の翅を広げて展開過程が完了する。その後、次第に翅は透明に、体部は褐色に色づき硬化して羽化過程が終わる。

このような昆虫の羽化過程を展開膜面構造物という観点から、次のように整理した。

- 1) これらの展開膜面構造は、展開後硬化する翅脈と薄膜からなる複合構造である。
- 2) 展開力は、体液注入によって集中的に供給される。
- 3) 翅脈が分岐構造を呈していることで、翅の各部は分散的に展開する。翅脈の太さは前縁部の根元が最も太く、膜面も前縁部

から順次展開していく。

- 4) 重力方向に対し 2 種類の羽化様式があることと各々の膜面展開の様子から、膜面展開への重力の利用が考えられる。

- 5) 膜面は階層的に折り畳まれている。

3. 新たな展開膜面構造モデルの提案

前項に示した昆虫の羽化過程観察に基づく考察から、展開膜面構造システムとして、さまざまな折り畳みパターンの膜面に展開後硬化するインフレータブルチューブを埋め込んだシステムを提案する。図2に提案するモデルの例を示す。図2は、遠心力による展開を前提として提案された膜面の折り畳みパターンであり、膜厚を考慮して折線が曲線となっている^{3,1)}。

このような折り畳みパターンでは折線が分岐しているので、その稜線に展開後硬化するインフレータブルチューブを埋め込むことで、提案するシステムが実現できる。このような展開膜面構造システムの工学的な利点を次に挙げる。

- 1) インフレータブルチューブには中央の衛星バス部から期待等を注入し展開力とするため、気体貯蔵や注入に必要な装置は一箇所でよい。
- 2) インフレータブルチューブを分岐させることで、分散的な膜面展開が期待できる。
- 3) 分岐パターンは自由に設計することができる。特にフラクタル形状に代表される階層的な構成によれば、膜面の大きさは形状の変化に柔軟に対応できるパターンを構成することができる。
- 4) このシステムは伸展マストや遠心力、重力傾斜など他の展開方法との併用が容易である。
- 5) 遠心力による展開力は周縁部ほど大きいのに対して、インフレータブルチューブによる展開力は中心部ほど大きいことから、回転数や気体注入速度を変化させることによって全体の展開を制御できる可能性がある。
- 6) 展開後硬化するチューブによって膜面剛性をあげることができる。このとき、分岐パターンを適切に設計することで、膜面の

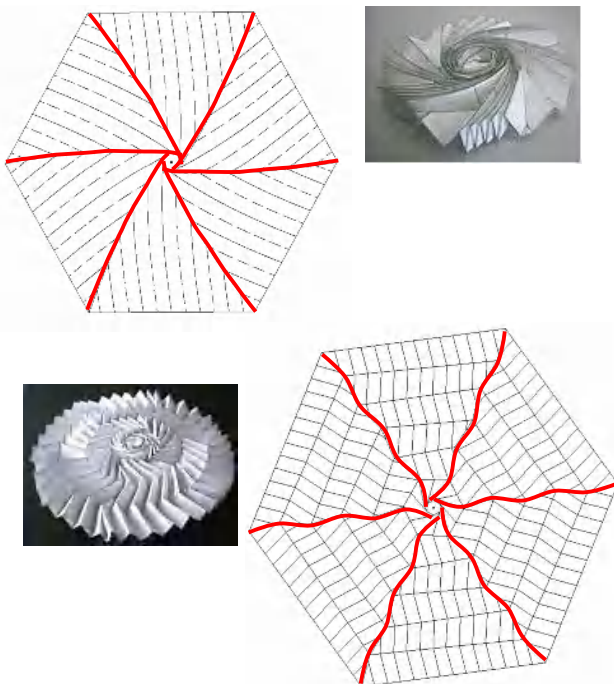


図2 新しい展開膜面構造システムの例

剛性分布も設計できる。

4. 展開解析に用いた有限要素法

膜面構造物の挙動解析は、幾何学的非線形性と材料非線形性の両方を含む数値解析となる。本論文では、張力場理論に基づく剛性変化法を用いた非線形弾性動解析ツール (Nonlinear Elasto-Dynamic Analysis code) を用いた⁴⁾。膜面は、等方性を仮定し、シワおよびタルミの領域では、修正主応力 $\tilde{\tau}$ と主ひずみ γ の関係は、修正剛性マトリクス $\tilde{\Gamma}$ を用いて次のように書ける。

$$\tilde{\tau} = \tilde{\Gamma} \gamma, \quad \tilde{\tau} = \begin{bmatrix} \tilde{\tau}_1 \\ \tilde{\tau}_2 \end{bmatrix}, \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

各々の張力状態に応じて、修正剛性マトリクスは次式とした。

$$\tilde{\Gamma} = \frac{E}{1 - a_1 a_2 \nu^2} \begin{bmatrix} a_1 & a_1 a_2 \nu \\ a_1 a_2 \nu & a_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} (a_1, a_2) = (1, 1) & : \text{張力状態} \\ (a_1, a_2) = (\varepsilon_1, 1) & : \text{シワ} \\ (a_1, a_2) = (\varepsilon_1, \varepsilon_2) & : \text{タルミ} \end{cases}$$

ここに、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。 ε_1 、 ε_2 は膜の面内主応力方向の圧縮剛性を示すが、本論文ではどちらも0と仮定した。

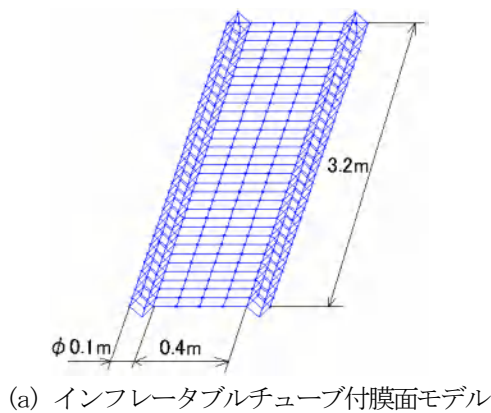
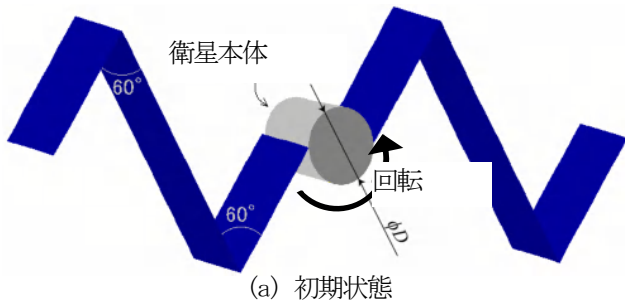


図3 長方形膜面モデル

インフレータブルチューブ内の気体は、一次元圧縮性断熱流とし、次式で示す隣接するチューブ要素間の質量流率 $\dot{m}$ を用いた。

$$\dot{m} = CA \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \frac{P_{in} m_{in}}{V_{in}} \left(\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{1 + \frac{1}{\kappa}} \right)} \quad (3)$$

ここに、 P, V, m, κ, A, C はそれぞれ、要素の圧力、体積、流体の質量、比熱比、チューブの断面積、オリフィス係数を示す。添え字の *in* は、高圧側の要素を、*out* は低圧側の要素を示す。

5. 数値計算例

図3に中央の衛星が回転することによる遠心力で展開する長方形膜面構造システムを示す。本論文では、このモデルを用いてこのようなシステムの基本的な展開挙動について考察する。本モデルにおける膜面は、0.6m×3.2mの長方形で、接触間

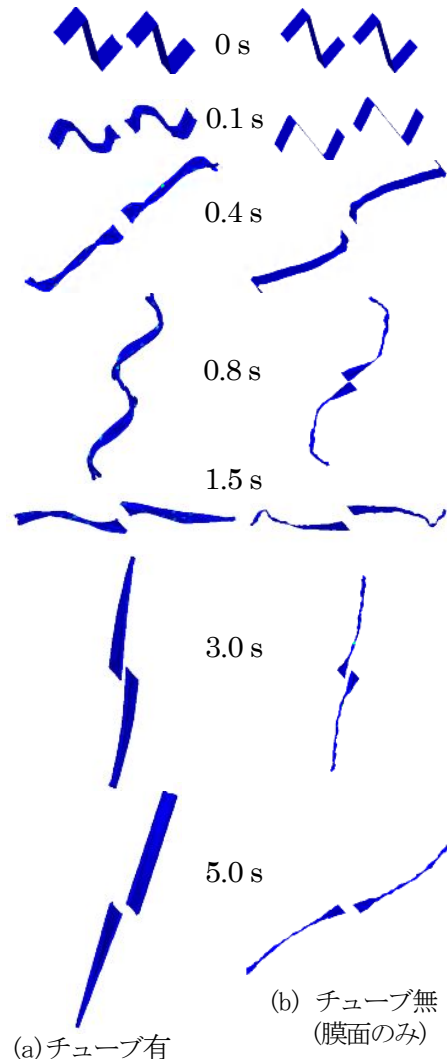


図4 長方形モデルの展開挙動解析例

題を避けるため初期状態は60度の三つ折りを仮定している(図3(a)). 直径 0.1mのインフレータブルチューブが長方形の両端に埋め込まれている. 膜材は, 等方性ポリイミド(ヤング率: 6.963GPa, ポアソン比:0.3), 膜厚は $7.5\mu\text{m}$ と仮定し, インフレータブルチューブの断面は正方形とした. バス衛星の半径を意味する, 回転中心からのオフセットは, 0.2mとした.

このシステムにおいて, 膜面はインフレータブルチューブの伸展力と, バス衛星の回転による遠心力とで展開する. 図4に, このモデルの展開挙動解析例と, 参考までにインフレータブルチューブのない長方形膜のみの展開挙動解析例とを示す. いずれも回転数は, 1.0Hz, 作動流体の圧力は $1.0\times 10^3\text{Pa}$, 雰囲気圧力は, $1.0\times 10^{-5}\text{Pa}$ とした.

図4より, インフレータブルチューブのあるモデルの方が, ないモデルに比べてスムーズに展開していることがわかる. 特にチューブのない膜面では, 長方形膜の単軸方向の張力が働かないため, 伸展後でも膜面が完全に展開することがない.

図5に, 膜要素における最大ひずみエネルギー密度の値を, いくつかの回転数(0.25Hz, 0.5Hz, 1.0Hz)と, 気体の流入率(ここでは参照充填時間:16~0.25 秒)について示した. 参照充填時間とは, インフレータブルチューブを充填する気体の総質量を式(3)で示した質量流量で単純に割ったもので, おおよその充填時間であり, この値が大きいほど単位時間当たりの気体の流入量が少なく, 小さいほど大きいことを意味する. また, 最大ひずみエネルギーが大きいほど, 膜面の局所的な変形が大きいことを意味する.

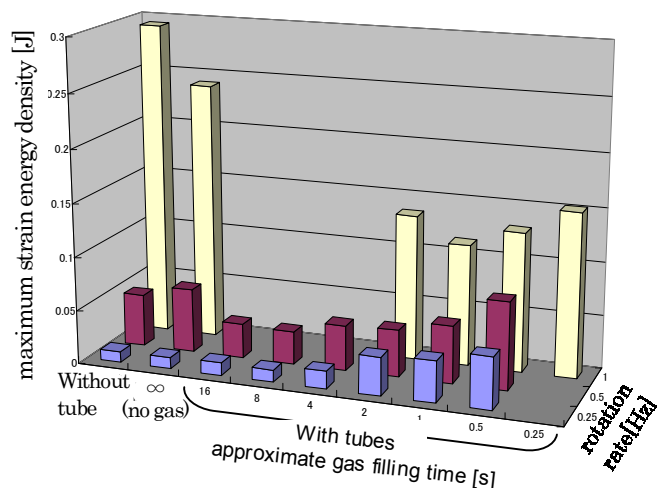
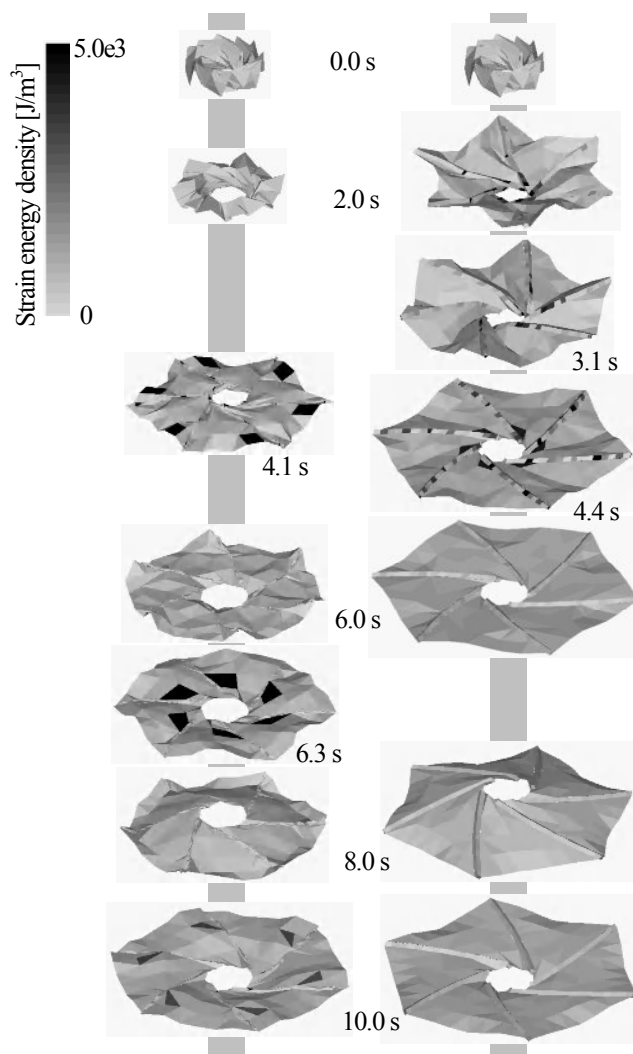


図5 膜要素における最大ひずみエネルギー値

回転数が大きいほど, また気体の流入量が大きいほど最大ひずみエネルギーは増加する. 回転数 1.0Hz および 0.5Hz では, 最大ひずみエネルギーの値が最小となる適切な気体の流入量が存在する. このような結果から, 回転数と気体の流入量を適切



(a) 気体注入無 (b) 気体注入有
図6 六角形膜モデルの展開挙動解析例

に制御することで, 局所的な変形の少ないスムーズな展開が期待される.

さらに, 図6に図2で示した六角形膜面モデルの展開挙動解析例を示す. 色調の濃淡は, 膜要素のひずみエネルギー密度分布を示し, 濃い部分はひずみエネルギーが大きく局所的な変

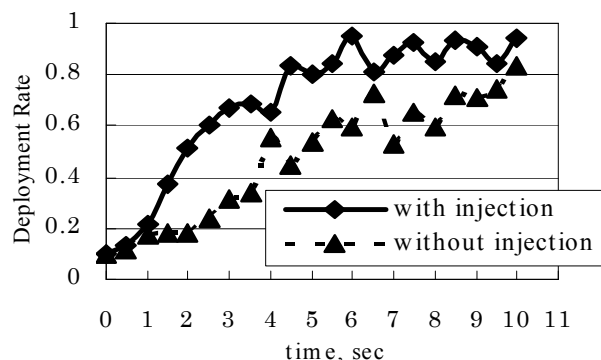


図7 面積展開率の推移

形が起きていることを示す。図6(a)は、気体を注入せず遠心力のみの展開挙動解析例で、(b)は気体を注入し遠心力と併用した展開挙動解析例となっている。二つの解析例を比較すると、インフレータブルチューブに気体を注入した場合は、チューブ要素に大きなひずみを引き起こすが、膜面には局所的な変形が起きず、スムーズな展開となっている。また、図7に面積による展開率の推移を示した。この図より、インフレータブルチューブに気体の流入が有る場合は、約 6.0 秒でほとんど展開していることがわかる。こうした結果から、インフレータブルチューブの伸展力による展開力と、遠心力による展開力との併用は局所的な変形が少なく、短時間でスムーズな膜面展開に有効であると考えられる。

6. まとめ

- 1) 昆虫の羽化過程観察に基づく展開膜面構造システムの提案
展開膜面構造システムの実現例である昆虫の羽化過程の観察に基づき、インフレータブルチューブを埋め込んだ展開膜面構造システムを提案した。提案システムは、中央のバス衛星から分岐するインフレータブルチューブと膜面からなる複合膜面構造であり、インフレータブルチューブの伸展力による展開力以外に伸展マスト、遠心力などの他の展開力を併用することができる。
- 2) 展開挙動の動解析
張力場理論に基づく剛性変化法を用いた非線形弾性動解析法をもちいて展開挙動を解析した。
- 3) チューブの伸展力と遠心力とのバランス
長方形膜面モデルを対象とした解析結果より、気体流入量と回

転数を変化させた解析結果より、気体流入量と回転数を適切に選択することが、局所的なひずみの少ないスムーズな展開に有効であることがわかった。

4) 展開率の推移

六角形膜面モデルを対象とした解析結果より、インフレータブルチューブの伸展力による展開力とバス衛星の回転で生じる遠心力による展開力とを併用した展開方法が、局所的なひずみの少ないスムーズな展開に有効であることがわかった。

[参 考 文 献]

- 1.1) C.H.M. Jenkins (ed.), "Gossamer Space craft: Membrane and Inflatable Technology for Space Applications," Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 191, AIAA, 2001.
- 1.2) N.Kishimoto, M.C. Natori, K.Higuchi, and K.Ukegawa, "New Deployable Membrane Structure Models Inspired by Morphological Changes in Nature," 47th AIAA/ASME/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics, and Material Conference, 2006.
- 2.1) H.Watanabe, M.C.Natori, N.Okuizumi, and K.Higuchi, "Folding of a Circular Membrane Considering the Thickness," ISAS 14th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics: A Collection of Technical Papers, 2004, pp.19-24.
- 4.1) Y.Miyazaki, "Wrinkle/slack Model and Finite Element Dynamics of Membrane," International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006.

Deployment Analysis on Membrane Structures Embedding Inflatable Tubes Inspired by Insects' Eclosion Processes

Naoko Kishimoto ^{*1)}
Masashi Hashimoto ^{*2)}
M.C. Natori ^{*3)}
Yasuyuki Miyazaki ^{*4)}

SYNOPSIS

For future development of large space structure systems, we propose a new concept of deployable membrane structures embedding inflatable tubes inspired by insects' eclosion processes. One advantage of the concept is that we have possibility of controlling deployment processes due to hybrid deployment forces, which include extension forces due to inflatable tubes and centrifugal forces due to rotation of a central satellite bus. Rectangular membrane model with inflatable tubes and hexagonal one are shown. Their deployment behaviors are also numerically analyzed using nonlinear elasto-dynamic analysis code. We focus on deployment behaviors and changes of strain energy density of membrane elements. In the case of rectangular membrane model, rotational angular velocity and pressure of working gas are varied in order to control deployment processes. And in the case of hexagonal membrane model, deployment rates are shown.

^{*1)} Dr.-Eng. Invited Engineer at Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science

^{*2)} Graduate Student of Tokyo University, Currently Bridgestone Corporation

^{*3)} Dr.-Eng. Professor and Director at Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science

^{*4)} Dr.-Eng. Associate Professor at Nihon University, Dept. of Space Engineering