

格子投影法を用いた地上実験と数値計算によるスピン展開膜面の運動解析

Motion Analysis of Spin Deployment Membrane by Ground Experiment Using Lattice Projection Method and Numerical Simulation

指導教授 宮崎 康行

M7018 鈴木 脩斗
Shuto Suzuki

Recently, research and development of lightweight, flexible and large space structures is conducted around the world. One of them is the small solar power sail "IKAROS" developed by JAXA in 2010. The ground experiments on a full-scale model of IKAROS was not conducted because IKAROS is a large membrane structure. Therefore, it was developed on the basis of the numerical analysis results. Also, scaling experiments on the scale model were done, but detailed motion couldn't be measured. In this paper, we compare the detailed motion of the spin deployment membrane using lattice projection method with ground experiment and numerical analysis.

1. 序論

1.1. 背景

近年、ミッションの高度化に伴い、宇宙構造物には様々な要求が課せられるようになってきている。中でも、薄い膜面を用いた構造物は軽量かつ収納性が優れているため、SSPS やソーラーセイル等の大型宇宙構造物として期待されており、国内外で研究が進められている。その中でも、日本では、2010 年に宇宙研究開発機構(JAXA)によって開発された小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS(Fig.1)が、相乗り衛星として打ち上げられている^{[1],[2]}。

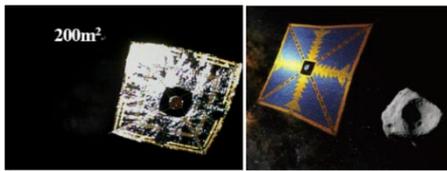


Fig.1 Solar sail (left "IKAROS"^[1], right: "OKEANOS"^[3])

現在では IKAROS の実績を踏まえて、Fig.1 の右図のような木星圏探査機 OKEANOS が計画・開発されている。今までよりもさらに以遠の惑星を探査するためには、より大きな推力が必要である。推力を得る手段として、現状、探査機に搭載された太陽電池によって発電した電力からイオンエンジンを動かすことが必要不可欠であるが、太陽から離れれば離れるほど太陽光が届かず、発電量は減少し、探査が困難となる。そこで、OKEANOS は一辺 39.7m もの正方形膜面を IKAROS と同様のスピン展開により広げ、その膜面に高効率の薄膜太陽電池を貼り、木星付近 (5.2AU) で 5kW の電力を稼ぐことで、木星圏までの航行ができるだけの電力を確保し、探査することを目指している^{[2],[3]}。そのため、ソーラー電力セイルにとって膜面の展開成功は、不可欠である。しかし、OKEANOS は IKAROS より 8 倍も大きな膜面を有しているため、軌道上での膜面展開・展張は容易ではないと予想されている。展開・展張を成功させるには膜の運動を理解することが必須である。しかし、地上には空気抵抗や重力があるため、宇宙環境を模擬することは難しく、薄膜を展開させられるような十分な広さのある場所もないため、実機サイズの薄膜構造物を地上で展開させるのは極めて困難である。そのため、相似則を用いた小型モデルでの実験などが行われているが、スピン展開膜の 2 次展開における膜面の挙動を詳細に計測し解析と比較している事例は少なく、筆者らの研究室においても、膜面上の特徴点を追跡して 3 次元位置復元を行う方法しか行っていない。そこで、本研究では、格子投影法という面計測が可能な計測方法により、今までの特徴点を追跡する方法よりもはるかに高分解能で膜の形状を計測する。これにより、数値解析との比較をより詳細に行うことができる。

1.2. 本研究の目的

以上を踏まえて、本研究の目的は、スピン展開膜面を格子投影法により計測した膜の展開挙動や中心剛体の角速度において、数値解析モデルと実験モデルを合わせて得た結果を比較し、差異の原因を考察する。これにより、膜面の運動の特徴をより詳細に理解することとする。

2. 相似則

本研究で用いる実験モデルは、軌道上で展開実績がある IKAROS と相似なモデルを用いることとした。ここで、相似モデルを求めるためには、我々の先行研究により導出した相似則を用いる^[4]。ただし、本研究では先行研究と回転方式が異なり、実際の IKAROS のように初期角速度を与え、トルクフリー状態で展開をするような実験を行うため、回転運動に関する相似パラメータを追加した。

相似パラメータで用いる変数は以下の Table 1 に示す通りである。

Table 1 Nomenclature

T	展開開始から膜面が開ききるまでの時間
X	膜面の幾何学的な外辺長さ
ρ, ρ_{Air}	膜面密度, 空気密度
h	膜面の厚さ
E	膜面のヤング率
L_f	膜全体の折り目長さの合計
m_t	先端マスの質量
I	剛体の慣性モーメント
ω_0	初期角速度
η	減衰係数

また、 \tilde{a}, a^* のようにチルダ、アスタリスクがついた文字はそれぞれ a の割合 (無次元量) を表し、物理量 (有次元係数) を表す。また、時間での微分はドット、無次元時間での微分はシングルクォートとする。次項では、回転の運動エネルギーの相似パラメータを導出するとともに、そのほかの相似パラメータをまとめる。

2.1. 回転運動と初期角速度

剛体の回転運動の運動エネルギー K_{rot} は、次式のように表せる。

$$K_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$

ここで、 ω は角速度であり、 $\omega = \dot{\phi}$ と表せる。(1)式を変形すると、剛体における回転の運動エネルギーは次式のように表せる。

$$K_{rot} = \frac{1}{2} \frac{I}{T^2} (\phi')^2 \quad (2)$$

これより、相似パラメータは $K_{rot}^* = I/T^2$ となる。

初期角速度 ω_0 は、無次元角速度 φ' を IKAROS と地上実験モデルで合わせると、次式のように表せる。

$$\omega_{oL}T_L = \omega_{oS}T_S \quad (3)$$

ここで、添字 L は大型モデル（実機）、添字 S は小型モデル（地上実験モデル）に関する量を表す。

2.2. 相似パラメータ

相似パラメータを Table 2 にまとめる。さらに、解析では、膜面内力やテザー内力の減衰に関するパラメータは、減衰係数を η とし、大小であわせた。

Table 2 Scaling Law Parameter

項目	式	項目	式
重力項	$-\frac{gT^2}{X}$	スプリングバック項	$\frac{EhL_fT^2}{\rho X^4}$
空気抵抗項	$-\frac{\rho_{Air}X}{\rho h}$	膜面の面内力項	$\frac{ET^2}{\rho X^2}$
先端マスの慣性項	$\frac{m_t}{\rho hX^2}$	中心剛体の回転項	$\frac{I}{\rho hX^4}$
初期角速度	ω_0T	減衰項	$\frac{\eta_L}{T_L} = \frac{\eta_S}{T_S}$

スプリングバック項は、膜面の折り目の弾性歪エネルギーに関するパラメータである。これらの値を実機と地上実験モデルで合わせることで運動が相似になる。

2.3. IKAROS の諸元

相似則に用いる IKAROS の幾何学・材料パラメータを Table 3 にまとめ、実験モデルの概要図を Fig. 2 に示す。実験モデルの構成は、4枚の台形膜（ペタル）をブリッジでつなぎ合わせ、正方形膜にする。そして、テザーを用いて、先端マスを正方形膜の四隅につける。同様のテザーを用いて、Fig. 2 のように正方形膜を中心剛体に取り付ける。また、IKAROS は台形膜の短辺側 1 列だけ折幅が半分となり、ブリッジも小さい。ブリッジは、膜と同じ材質を使用し、台形膜への固定には 2mm の両面カプトンを用いる。ブリッジの取り付け位置は、台形膜の長辺側の折り目からブリッジの端まで 6mm になるように取り付けた。内側の小さいブリッジは Fig. 2 のように膜の内辺と接するように取り付けた。また、IKAROS の解析では、主に膜面及び中間テザーの減衰量を調整し、フライトデータと解析を合わせこんだ。それらの要素の減衰係数の値も Table 3 に示す。

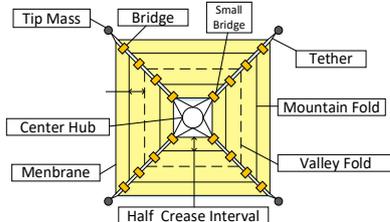


Fig. 2 Schematic of specimen

Table 3 Parameter of IKAROS^[5]

材料	ポリイミド
展開時間 T	10 s
厚さ h_L	7.5 μ m
膜の外周 1 辺の長さ X_L	13.56 m

密度 ρ_L	1.42 kg / m ³
ヤング率 E	3 GPa
ポアソン比 ν	0.3
折数	18.5 折
ブリッジ 幅×高さ	0.2 × 0.265 m,
小ブリッジ 幅×高さ	0.205 × 0.153 m
中心テザー・先端テザー長さ	1.7975 m, 0.5 m
膜面・中間テザーの減衰係数	3.9×10^{-5} , 1.0×10^{-6} s

(3)式及び Table 2 と Table 3 より、IKAROS と相似となる地上実験膜面の幾何学パラメータと材料の諸元、実験条件を Table 4 に示す。

Table 4 Parameter of Ground model

Type 1 (内力の項)		Type 2 (スプリングバック項)	
材料	ポリイミド	材料	ポリイミド
X_{S1}	1 m	X_{S2}	1 m
h_{S1}	12.5 μ m	h_{S2}	12.5 μ m
折数	8.5 回	折数	8.5 回
初期角速度	78.4 rpm	初期角速度	250 rpm
慣性モーメント (剛体)	2.99×10^{-4} kg · m ²	慣性モーメント (剛体)	2.99×10^{-4} kg · m ²
先端マス	0.046 kg	先端マス	0.046 kg
圧力	1.0×10^{-2} Pa 以下	圧力	1.0×10^{-2} Pa 以下

重力項、回転項以外の相似パラメータは考慮した。ただし、スプリングバック項と膜面の面内力項のパラメータがトレードオフの関係のため、一方を合わせ、もう一方は 10 倍及び 1/10 倍ずれるように設定した。また、空気抵抗項は、IKAROS の展開時に空気がないため、実験も真空槽を用いてできる限り近づけた。

また、筆者らの過去のパラボリックフライトでの真空槽による試験結果から、相似パラメータの重力項は他のパラメータに比べ影響が小さいということがわかっているため、重力項は無視する^[4]、加えて、回転項を合わせるためには、現在の供試体の 15 倍もの重さにしなればならず、トルクフリー機構が重さに耐え切れないため、合わせていない。

次に、相似則によって決まらない供試体のブリッジ寸法や位置、テザー長さは、幾何学的相似によって決定した。ただし、相似則により、IKAROS と折数が異なるため、折幅に対するブリッジの割合を合わせることで、ブリッジの高さを決定した。展開方式は、宇宙空間での IKAROS と同様に初期角速度を与え、その後はトルクをかけないトルクフリーの実験を行った。また、IKAROS の展開シーケンスを以下の Fig. 3 に示す。本研究では、Fig. 3 に示した IKAROS の 2 次展開を模擬する。

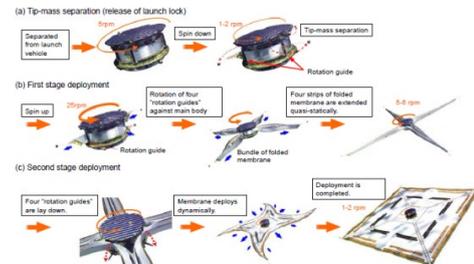


Fig. 3 Deployment sequence^[1]

3. 大型真空槽でのスピン展開膜の実験

3.1. 格子投影法^[6]

格子投影法は計測対象にプロジェクタで格子を投影し、カメラで撮影することでプロジェクタから投影される格子の位相を計測する方法である。撮影した画像の位相解析を行うことで、画像の 1 ピクセ

ルごとに位置座標が得られるため、撮影に用いるカメラ解像度 (1024 × 1024) の分解能で計測が可能である。位置座標を計測するため、格子の描かれた基準面 1, 2 を Fig. 4 のように撮影する。基準面の 3 次元位置座標と位相 ($x_{1,2}, y_{1,2}, z_{1,2}, \phi_{1,2}$) を求めておくことで、測定対象へ投影された格子の位相 (ϕ) を計測し、以下の(4)式を用いることにより測定対象の位置座標 (x, y, z) を求めることができる。ここで、 z 方向はカメラレンズの奥行方向である。また、計測カメラを用いて基準面の撮影を行い、その画像をもとに測定対象の 3 次元座標を求めるため、レンズ歪の影響はほとんど受けない。

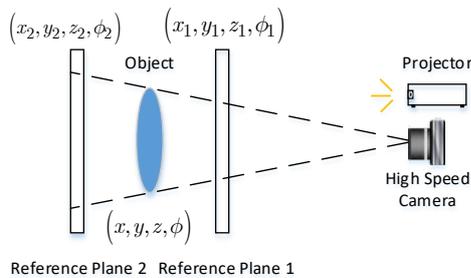


Fig. 4 Construction of Lattice Projection Method

$$x = \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1} (x_2 - x_1) + x_1 \quad (4)$$

大型真空槽での実験では測定対象とカメラの間に Fig. 6 に示すような大型真空槽の観察窓があるため、Fig. 5 のようにキャリブレーションを行った。

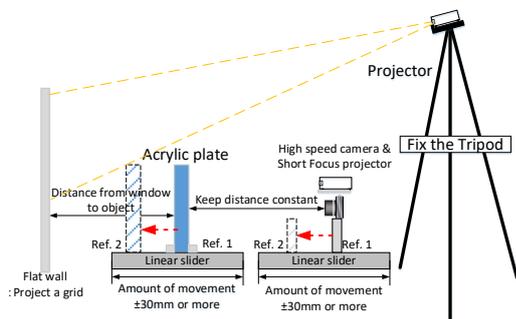


Fig. 5 Camera Calibration

キャリブレーションは、カメラとプロジェクタ、測定対象までの距離があていれば、場所を問わず行える。今回は平らな壁に格子を投影し、計測系を移動させ行った。Fig. 4 のように基準面 1, 2 を撮影できるような位置に計測系を動かす、基準面を撮影した。この時、Fig. 6 に示す観察窓の代わりに同様の材質であるアクリル板を設置して、そのアクリル板越しに基準面を撮影した。プロジェクタは 2 種類あり、常に固定されているプロジェクタと計測系とともに移動する短焦点プロジェクタがある。固定プロジェクタは水平垂直の格子を投影し、短焦点プロジェクタは水平の格子を投影する。前者は x, y 座標を計測するために必要な格子であり、後者は z 座標を計測するために必要な格子である。ただし、格子は同時に投影せず、1 つずつ基準面を撮影する。このとき、格子の幅は、撮影時 1 ピクセルに最低限 1 ピッチが写るような最小幅である 11mm に調整した。

また、測定対象となる膜面が透明なため、つやなし白スプレーを塗布することで、格子がはっきり投影されるようにした。

Fig. 6 のように、観察窓の直径が小さく、短焦点プロジェクタから投影する格子が一部観察窓に遮られ、計測できる範囲は膜面全体の約 70% である。

3.2. スピン展開膜面における地上実験

実験は、2 節で得られた Table 4 のパラメータに可能な限り合わせ、実験を行った。この実験では、格子投影法による膜面の位置座標や中心剛体の角速度を計測する。加えて、それぞれのタイプにつき 3 つの膜面を作成し、実験を行うことで、製造誤差による差異があるかを計測結果から評価する。また、本稿では、角速度の計測結果や展開動画と展開解析の結果を比較し考察する。(現在、格子投影法は解析中であるため、格子投影法の計測結果との比較はできていない。) 本実験の外観図を以下の Fig. 6 に示す。

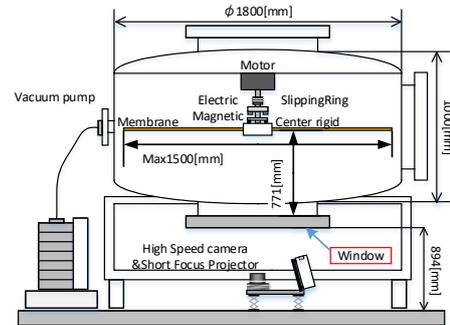


Fig. 6 Experimental Setup

実験モデルはトルクフリー用機構へ取り付け、その機構を大型真空槽内に設置したスピンモーターに取り付ける。そして、大型真空槽の下側からプロジェクタで格子を投影し、ハイスピードカメラ (1000fps) で撮影を行う。トルクフリー用機構は供試体とモーターを電磁石で吸着させており、吸着状態でモーターを駆動させると強制回転、解放するとトルクフリーとなる機構である。実験方法は、まず吸着状態で回転させる。1 次展開状態にて、実験条件の角速度に到達してから電磁石を解放する。解放と同時に膜面の展開と高速度カメラの撮影を開始する。

3.3. 実験結果

Table 4 に示したパターンの実験結果を以下の Fig. 7 に示す。

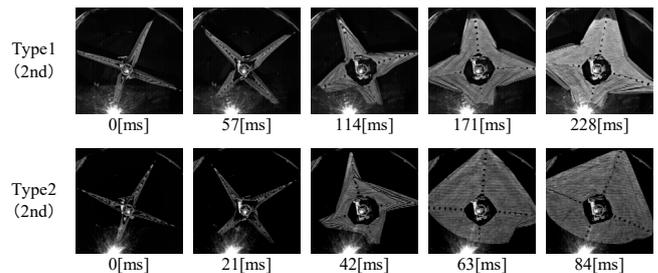


Fig. 7 Result of Spinning Deployment Membrane

まず、格子投影法は現在解析中であり、問題は、膜面が連続的でないため、ペタル同士の位相を合わせることに時間がかかっている。連続しているペタル内の座標は計測出来ているが、ペタル同士をつなぐブリッジとブリッジの間にある穴によって、不連続となっており、 xy 座標が正確に解析できていない。格子投影法では、今まで連続的な物体の形状や運動は計測されてきたが、不連続となっているものの運動の計測はやられていない。解決策として、解析前の画像の穴の部分塗りつぶすことで位相をつなぐことで解析ができることが分かった。また、投影する格子を水平垂直にすることで、この問題は解決しやすくなると思われる。

次に、Fig. 7 は展開開始から膜面が展開きるまでの結果である。角速度履歴は、解析結果と Fig. 9 と Fig. 10 とともに示す通りである。

Fig. 8 の 4th の結果は、展開中に中心テザーが 1 本取った結果であり、5th の結果は展開時にガイドバーが非同期に展開した結果である。非同期展開は、隣合う 2 本のガイドバーと逆側の 2 本のガイドバーが約 13ms ずれて展開した。

実験結果より、Type1 は 3 回中 3 回とも折り目が重なっている部分で膜面が展開しきらず、Type2 は 5 回とも膜面が展開しきる結果であった。Type2 は、5 回の実験を行い、どれも約 80ms で展開し、以降収縮、展開を繰り返す結果となった。Fig. 8 に IKAROS のフライトデータと実験結果を比較したグラフを示す。

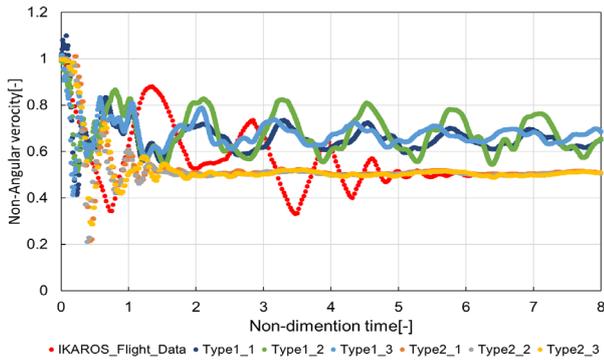


Fig. 8 Flight data of IKAROS and Result of Experiment

縦軸は、無次元角速度で時々刻々の角速度データを初期角速度で割った値で、横軸は、無次元時間で時間を有次元係数で割った値である。この結果から、IKAROS の展開は、展開開始から展開終了前までは Type1 の運動と似たような周期を示しており、展開終了後は、Type2 と同じ無次元角速度に収束している。

4. スピン展開膜面における運動解析^{[1],[7]}

ソーラー電力セイルは、数値解析による設計・開発が行われた。IKAROS では 2 種類の解析手法により設計・開発され、そのうちの 1 つである柔軟多体有限要素モデルを用いて、エネルギー・モーメント法 (EMM) による過渡応答解析手法を用いた。この解析手法は、IKAROS のフライトデータと比較し、角速度履歴が解析とほとんど一致していることが報告されている。^[7] EMM は、外力やモーメントが作用しなければ系全体で全エネルギー、運動量、角運動量を保存した計算を行うことができる。解析モデルは、膜面及びブリッジ、テザー、中心剛体、先端マスをそれぞれ膜要素、ケーブル要素、剛体要素、質点要素によってモデル化している。解析モデルの総節点数は 857、総要素数は 646 である。また、解析モデルのパラメータは、Table 4 のとおりである。加えて、解析では、回転項の相似パラメータや減衰項を合わせたモデルの計算も行った。

手順として、まず、2 次展開前の定常状態 (初期状態) を、動的緩和法 (Dynamic Relaxation) と呼ばれる系全体の静的な平衡解を求める方法で求めた。また、実験も 2 次展開前の角速度に達した後、定常状態なるように約 1 分の時間を置いて実験を行った。

Type1, 2 の実験結果と数値解析の結果を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。Fig. 9 と Fig. 10 は、Fig. 8 と同様に縦軸が無次元角速度、横軸が無次元時間である。どちらの結果も、膜面が展開し最初に開き終わる前までは、実験と解析で無次元角速度が一致している。しかし、膜面が展開しきったところで、急激に角速度が変化し、その後、解析と実験の結果が合わなくなっていることがわかる。現在の解析と実験では、以下のような 3 つの差異がある。

- 中心テザーの取り付け位置が、実験では中心剛体の上下に取り付けられているが、解析では中心剛体の真ん中の位置についている。
- 解析では、膜面の折り目剛性を加味していない
- 実験では、展開機構とトルクフリー機構の間に摩擦があるが、その影響を加味していない。

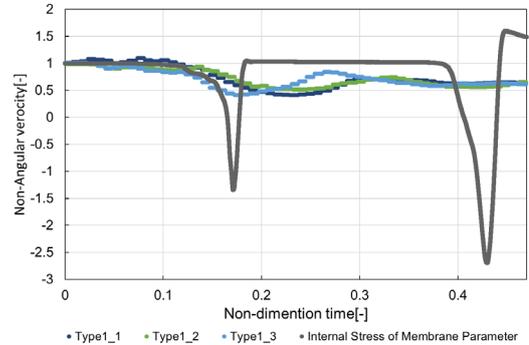


Fig. 9 Typ1 Results of Numerical Analysis and Experiment

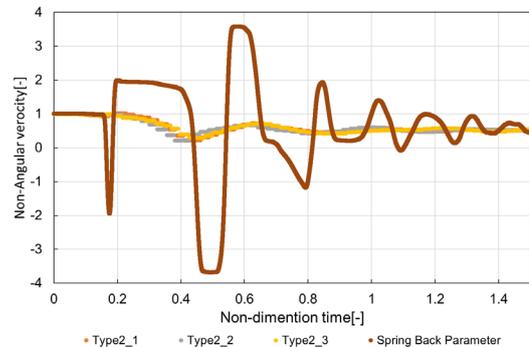


Fig. 10 Typ2 Results of Numerical Analysis and Experiment

5. 結論

本研究の結論は以下の通りである。

- 格子投影法によるスピン展開膜の形状計測が可能であることを示した。ただし、計測対象に不連続部分がある場合は、投影する格子を水平垂直にすることや白スプレーを塗るなど格子を投影しやすくする必要がある。
- IKAROS の展開は、展開開始時から展開終了前まで、膜面の面内力項が中心剛体の角速度に影響している。また、展開終了し安定してからは、中心剛体の角速度に影響している。

謝辞

本研究は文科省・科研費 18H03817 の補助を受けました。摂南大学の岸本准教授には、格子投影法のご教授を頂き、大変お世話になりました。

参考文献

[1] 奥泉信克, 他, 小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の薄膜セイル展開挙動, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.20, No.1, 2012, 48-55
 [2] 森谷他, ソーラー電力セイル探査機による外惑星探査調査, 2018
 [3] 松下, 他, 「OKEANOS の電力セイル膜面試作状況」, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2018-4650, 2018-10
 [4] 立松裕基, 遠心展開式膜面の展開相対則に関する研究, 日本大学大学院 理工学研究科 航空宇宙工学専攻修士論文, 2016
 [5] JAXA, 「IKAROS 飛行実験計画書」, 2010 年 5 月
 [6] 岸本直子, 画像計測による古代瓦の 3 次元形状計測, 摂南大学融合科学研究論文集, 第 2 巻 第 1 号, 2016
 [7] Yasuyuki Miyazaki, et al, 「FINITE ELEMENT ANALYSIS OF DEPLOYMENT OF GOSSAMER SPACE STRUCTURE」, MULTIBODY DYNAMICS 2011, ECCOMAS Thematic Conference, July 2011