

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820413

研究課題名(和文) 深宇宙探査用大型セイル構造物の初期から詳細設計のための汎用解析手法の構築

研究課題名(英文) Formulation of general-purpose structural analysis for initial to detail design on deep space exploration sail

研究代表者

鳥阪 綾子 (torisaka, ayako)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：70449338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：将来の大型宇宙膜面構造物として有力な構造である膜-ブーム構造に対し、これまで別々に検討されてきた構造特性と非線形性の強い膜面の皺を同時に考慮した設計手法を定式化した。希求水準法とヒューリスティックサーチの組合せを導入する事により、一般的に多用されている線形和による評価関数では得られないモデルの探索が可能となる事を示した。得られたモデルの構造的意義を考察し、一連の設計・解析手法の有効性を示し、併せてケーブルなどの構造要素の構造特性への寄与メカニズムを詳細に調査する事で将来の膜-ブームの基本構造モデルの提案を行った。さらにこの構造の立体化の提案とその可能性まで言及した。

研究成果の概要(英文)：We formulated a simultaneous optimization problem on one of the hopeful large space membrane structures which has membrane-boom elements. Wrinkles with strong nonlinearity, and structural features ever has been separately considered. Focusing on that point, we introduced the combination of satisficing trade-off method and heuristic search, and then, its possibility was shown to explore an optimum design which never can be found by the linear summation objectives. We looked at structural significance of an obtained model, and showed the effects of a series of proposing design and analysis method. Along with that, we examined the contributions in detail about mechanisms of structural members like cables onto structural characteristics, and proposed the future standard model of a membrane-boom structure. Additionally, we proposed the 3D membrane-boom structure, and mentioned its potentials.

研究分野：柔軟大型宇宙構造物のダイナミクスと構造最適設計

キーワード：柔軟構造物 宇宙大型構造物 満足化最適設計

1. 研究開始当初の背景

2010年に打ち上げられ、成功をおさめた大型膜面構造物であるソーラーセイルはさらに引き続き、木星・トロヤ群小惑星への探索ミッションとして50m級のソーラーセイルの利用が2010年代後半に計画されている。しかし大型化に伴い、膜面による慣性力の増大が薄膜そのものの破壊に繋がる可能性があるために、ブームやケーブルを取り付けて展張する構造が有力視されるが、これらの構造部材等に起因するパラメータの動的影響を考慮していく必要があり、大型宇宙構造物においては離散値をとるようなパラメータの最適化まで含めた設計手法の確立が必要となっているが、そのような研究例がない状況である。さらには膜構造を扱うにあたり、設計から詳細解析まで汎用的に活用できる解析手法を取り入れた研究も存在していない状況である。

2. 研究の目的

現状のセイル構造は特段の理由なく正方形の平面構造が主流であるが、幾何的には最もエネルギー状態の高い不安定なコンフィギュレーションであり、製造上の観点からも現実的ではない。この点も含め、本研究の目的を以下に示すように整理し直し、宇宙膜面構造物の解析・設計手法の確立を目指し、かつ膜-ブーム構造の基本構造を提案する。

- (1) 離散パラメータを一度に扱うのに適した設計手法と親和性の高い、リンクル量(皺の定量化)を考慮に含めた解析モデルを構築し、解析を効率化する
- (2) 立体膜面-ブーム構造の検討

3. 研究の方法

本節では研究の流れを示す。

- (1) 離散パラメータを一度に扱うのに適した設計手法と親和性の高い、リンクル量(皺の定量化)を考慮に含めた解析モデルを構築



Figure 1 従来のブーム-構造

既存のブーム-膜構造はFigure 1のようにブーム両端のみを結合するモデルであり、その結合点数や膜上のリンクルを考慮に入れた設計手法は存在していない。非線形性の強い皺の評価および離散変数である結合点の取扱いが困難なためである。また、皺と構造特性を同時に考慮する多目的最適設計問題は

非線形性の強いパレート解(Figure 2)を持つ事が容易に予想される。通常、線形問題で多用される線形和の評価関数ではFigure 3のc点の探索は不可能である。したがって有用な解を見落とす事が大いにある。

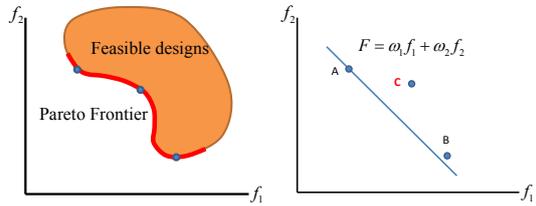


Figure 2 パレート解 Figure 3 評価関数(線形和の場合)

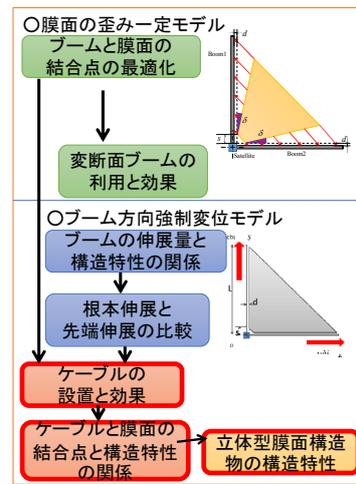


Figure 4 研究の流れ

そこで本研究ではチェビシェフノルムを改良した関数を用いて定式化した希求水準法を取り入れ、従来型モデルを希求水準とし、これよりも評価関数値の最小化を満たすモデルを探索し、その

構造的意義を探求する事でこの最適設計モデルの妥当性を示す。また、Figure 4に示す研究の流れで将来の大型膜-ブーム構造の基本的な構造モデルを提案する。

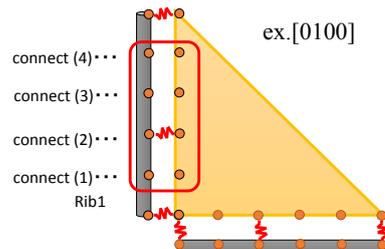


Figure 5 設計変数の定義 (1:結合 0:結合無)

ここで扱う基本解析モデルは対称性を考慮してFigure 5の1/4モデルとし、設計変数であるブームと膜面の結合点は  $[p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_{15}]$  ( $p_i=1$  or  $0$ )として表す。評価関数には今まで同時に考慮される事のなかった、皺を定量化したリンクル量、ブーム反力、一次固有振動数を多目的評価関数として考慮し、かつ希求水準を満たした後も評価関数の最小化を求める希求水準法を用い、式(1)で定式化する。

$$\min \left[ \max_{1 \leq i \leq r} \omega_i (f_i(\mathbf{x}) + \bar{f}_i) + \alpha \sum_{i=1}^r \omega_i f_i(\mathbf{x}) \right] \quad (1)$$

最適化手法は離散変数の扱いを得意とする非線形最適化手法のうちヒューリスティックサーチの1つである遺伝的アルゴリズム(GA)とする。なお、皺の定式化に用いたリンクル強度と呼ばれる Wrinkle intensity は、総歪エネルギーを弾性歪に依る部分とリンクルによるゼロ歪部分の和であると仮定し、射影行列  $\mathbf{CP}$  を用いた総エネルギーを示す式から下記のように導出する。

$$\phi_w = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_w^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}_w$$

$$\phi = \phi_e + \phi_w$$

$$\phi_e = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_e^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}_e \left( = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon} \right)$$

$\phi_w$  : wrinkle intensity       $\phi$  : total strain energy

$\phi_e$  : elastic strain energy

$\boldsymbol{\varepsilon}$  : wrinkle mode deformation

$\mathbf{C}$  : elasticity matrix

これらの手法を用い、まず平面膜-ブーム構造について上記最適設計手法を用いた膜-ブーム構造の基本モデルを示し、その構造的意義を検証する。次にこの最適設計手法から得られる基本構造を核として、変断面ブーム、ケーブル、ブーム伸展位置、膜-ケーブルの結合といった各構造部材の適用意義について検証する。これら併せて膜-ブーム構造の基本設計としてまとめる。

## (2) 立体型膜-ブーム構造の提案

平面型膜面構造は、基本的には幾何的に不安定な構造であり、大型になれば製作上の都合からも現実的ではない事が予想される。したがってブームの取付角  $\theta$  を導入し、Figure 6 のように立体化する事による構造特性の影響を、前項までの構造検討を加味したうえで調査し、新しい膜-ブーム構造物の基本設計の提案とする。

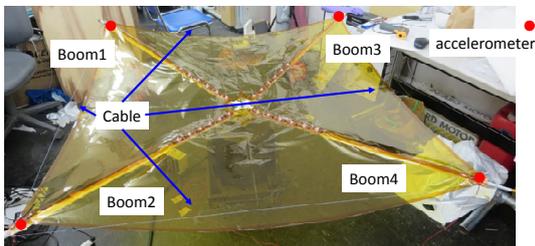


Figure 6 立体型膜-ブーム構造 実験モデル

## 4. 研究成果

### (1) 平面型膜-ブーム構造

#### ① ブームと膜面の結合点の最適化

希求水準モデルを既存の膜-ブーム構造として設定し、最適解を得たところ全てにおいて

希求水準を上回るパフォーマンスを得た。Table 1 に各評価関数値を示す。

Table 1 最適解と希求水準モデル

評価関数	最適モデル	希求水準モデル
結合点	[11111000000100]	[00000000000000]
モデル図		
ブーム反力	$2.08 \times 10^8$ [N]	$2.75 \times 10^8$ [N]
1 mode	30.6 [Hz]	28.4 [Hz]
リンクル強度の最大値	$3.70 \times 10^8$	$45.4 \times 10^8$
リンクル強度分布		

なお、評価関数の線形和を用いた事による最適解は [11111000000000] であり、[111000000100] のような解を探索する事はできなかった事からも、希求水準法の導入は必要不可欠な事が示された。なお、これによる最適モデルの特徴は以下の通りである。

- ・衛星本体側に結合点を集中する。

- ・Figure 5 の青で囲った結合点を導入する。

なお、全結合モデルは最も剛性の面で不利であり、膜面フルモデルを用いた結果によるとリンクル量は最も低くてもブームにリンクルが集中する結果となり、これが剛性の低下を引き起こすというメカニズムの知見も得た。

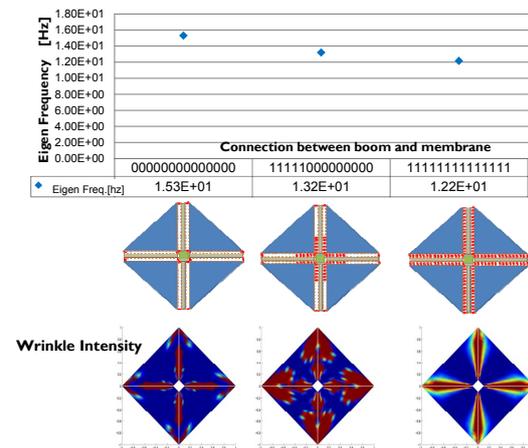


Figure 7 膜-ブームの結合点によるリンクルの集中度

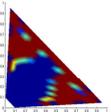
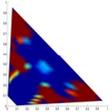
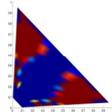
以下、検討事項に用いる基本モデルは上記満足最適設計モデルを用いて得られたものを用いる。

### ② 変断面ブームの利用とその効果

ここでは、変断面ブームの利用を想定した最適化を行う。構体側から 1/3 の領域のブーム

厚さを変化させたときの構造特性の変化を Table 2 に示す. ブーム厚さの増加に伴い, 結合点数を減少する事ができるため, 断面ブームの導入には一定の効果がある事が分かる. また, ブーム厚さが 2 倍の場合にはブーム反力がそれほど落ちずにリンク強度が減少しており, 3 倍の場合にはブーム反力の低下と剛性の向上が得られるという傾向から, ブーム厚 2 倍の場合には膜面のテンションによる剛性向上が主な剛性向上メカニズムである事が分かる. 一方でブーム厚 3 倍の場合にはテンションのかかる領域が少ない事からも, 剛性の向上はブームそのものの剛性によるものである事が分かる. この事から, 変断面ブームの導入に際してはその構造特性に寄与するメカニズムを考慮に入れる必要がある事が分かった.

Table 2 変断面ブームによる構造特性の変化

ブーム厚さ	×1	×2	×3
結合位置	11111000000100	11100001000000	11010000000000
結合点数	6	4	3
ブーム反力	$2.08 \times 10^8$ [N]	$1.95 \times 10^8$ [N]	$1.82 \times 10^8$ [N]
1 <sup>st</sup> mode	30.6 [Hz]	30.9 [Hz]	31.6 [Hz]
リンク強度	$3.70 \times 10^8$	$1.44 \times 10^8$	$2.19 \times 10^8$
リンク強度分布			

### ③ ケーブル設置とその効果

ここではケーブルの構造特性への影響を調べた. これは将来のモジュール構造に本構造を適用した時のフープ材として機能する部材となる.

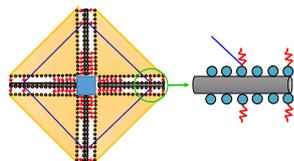


Figure 8 ケーブルの結合

Figure 8 に示す位置にケーブルを導入し, 特に高次モードに与える影響に注目して Table 3 に示す結果を得た. ケーブル無のモデルでは 2 次および 3 次に現れた面内モードが, ケーブル導入モデルの 3 次および 4 次に移動し, モードの入れ替が生じた. なお, ケーブル無の 1

次および 2 次は面外モードであり, これらへの影響がない事からもケーブルの導入は面内モードの剛性向上に寄与する事が分かった.

Table 3 ケーブルの高次モードへの寄与

Base Structure	[11111000000100]	
	No cable	Cabled
1 <sup>st</sup> mode [Hz]	30.56	30.56
2 <sup>nd</sup> mode [Hz]	86.79	116.64
3 <sup>rd</sup> mode [Hz]	86.79	137.10
4 <sup>th</sup> mode [Hz]	116.64	137.10

### ④ ブームの伸展位置について

本節では展開終了後に必要となる張力付与による構造特性への影響を示す. Figure 9 に示すように先端伸展と根本伸展の二通りが現実的である.

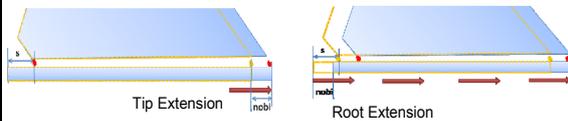


Figure 9 先端伸展(左)と根本伸展(右)

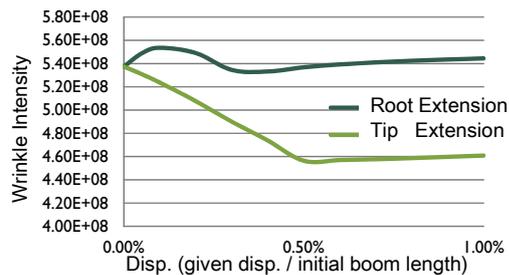


Figure 10 伸展箇所によるリンクルへの影響

Figure 10 から, 明らかに先端伸展の方がリンクルの低減に寄与する事が分かる. かつ剛性の向上の点でも有利である事が得られている. これは先端伸展の方が衛星構体側に圧縮応力がかかる領域が少ない点からも説明ができる.

### ⑤ 膜とケーブルの結合

本節ではケーブルと膜面との結合による構造特性への影響を示す.

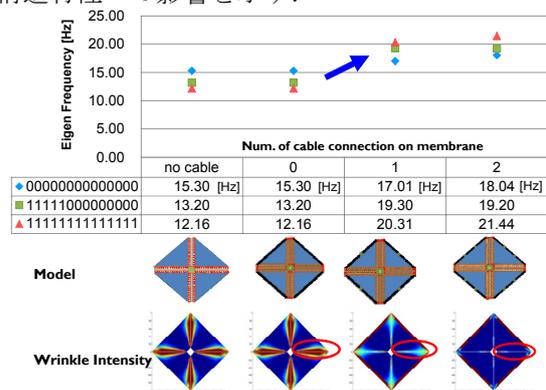


Figure 11 ケーブルと膜面の結合点の影響

希求水準モデル, 最適設計モデル, 全結合モデルの3つの基本構造に対し, 各辺にケーブルと膜面の結合箇所を0~2点設けた結果がFigure 11である。

結合点を設ける事で飛躍的に剛性が向上する様子が分かる。下側のリンク強度分布は全結合モデルの結果であるが, ブームに沿った領域のリンクが消滅する事による剛性向上メカニズムが働く事を良く示しており, ケーブル-膜の結合がこれを効率良く実現する手段である事が分かった。

なお, 上記①~⑤に示した構造的知見は同様の手法を用いて調査した六角形ブーム-膜構造においても同様であった。

## (2) 立体膜面-ブーム構造の検討

Figure 12に四角形膜の場合の取付角による1次~5次モードおよびリンク強度の解析値を示す。1次では4[deg]で149[%], 7[deg]で199[%]の飛躍的な剛性向上が得られた。しかし, 7[deg]以降ではリンク強度も急上昇するために実際にはこれ以下の取付角を選択する事になる。なお, 実験では1次モードの測定しかできなかったが, 同様の傾向を示した。Figure 13は六角形の場合を示しており, 4[deg]で126[%], 7[deg]で160[%]もの剛性向上が得られる。さらに赤で囲った部分のように明らかにリンクに関しては最適解が存在する事が分かる。つまり, このような立体型膜-ブーム構造の設計に関しても, これまでに提案したリンクと剛性といった評価値を導入した非線形多目的最適設計が必要となる事が示された。この取付角が各評価値へ寄与するメカニズムの解明は課題として残してしまっていたが, 取付角の導入による立体化は射影面積の点で不利になる事なく膜-ブーム構造特性を向上する手段として有効である事が示された。

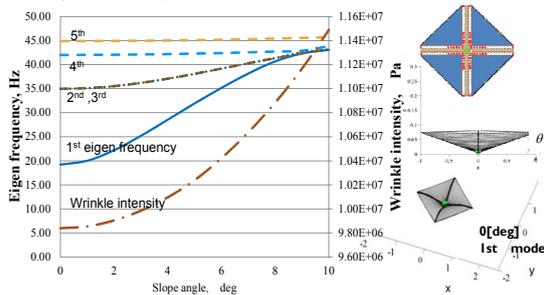


Figure 12 四角形立体膜-ブーム構造の特性

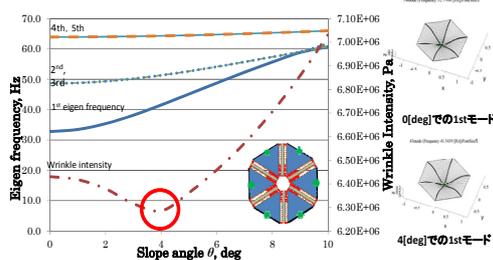


Figure 13 六角形立体膜-ブーム構造の特性

## (3) まとめ

以下に, 上記の得られた結果をまとめる。

- ① 非線形性の強い膜-ブーム構造物の多目的最適設計手法として満足化最適化手法を導入し, リンクおよび構造特性を同時に考慮する定式化を提案した。これにより, 特に結合点によるリンク強度分布が剛性に影響するメカニズムの知見を得る事が出来た。
- ② 提案する最適設計手法で得た基本構造に対して, 各構造要素が与える影響を調べた結果を下表にまとめる。

条件		期待できる効果
ブームと膜間の結合点について	衛星本体周辺の結合	ブーム反力の低減 リンク量の低減
	ブーム先端周辺の結合	剛性の向上 膜面の斜辺への応力集中の回避(四角形モデルのみ)
変断面ブーム		面内モードの剛性向上 ブーム-膜間の結合点数の減少
ケーブル		面外モードの剛性向上 面外変位の低減
膜とケーブルの結合		皺の低減 剛性向上

- ③ 膜-ブームの立体化を提案し, その卓越した剛性向上性を示した。しかしリンクを犠牲にするというトレードオフが存在するため, この関係性から最適解の存在が示唆される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

[学会発表] (計11件)

- ① Ayako Torisaka, Yoshitaka Satoh, Takeshi Akita, M.C Natori, Hiroshi Yamakawa, Tomoyuki Miyashita, Membrane Space Structure with Sterical Support of Booms and Cables, AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2016 (AIAA SciTech 2016), Proceeding of SciTech2016, AIAA 2016-1217, 6th Jan 2016, San Diego(USA)
- ② Ayako Torisaka, Yoshitaka Satoh, Takeshi Akita, M.C Natori, Hiroshi Yamakawa, Tomoyuki Miyashita, Characteristics of Square Shaped and Hexagonal Shaped Membrane Space Structures with Sterical Support of Booms and Cables, Proceeding of ICAST2015, ICAST2015 #62, 16th

2015 Oct, Kobe Fassion Mart ,  
(Kobe,Hyogo)

- ③ 弘, 山川宏, 宮下朋之, ブームによる立体的支持を有する膜面構造の構造特性, 第 57 回構造強度に関する講演会, 第 57 回構造強度に関する講演会 講演集, 2A04, 2015 年 8 月 6 日, 岡山理科大学(岡山県岡山市)
- ④ 佐藤佳孝, 鳥阪綾子, 秋田剛, 名取通弘, 山川宏, ブームおよびケーブルを有する膜面構造の構造特性, 第 56 回構造強度に関する講演会 講演論文集 2A04, 2014 年 8 月 7 日, 浜北文化センター(静岡県浜松市)
- ⑤ A.Torisaka, Y.Sato, T.Akita, M.C. Natori, H.Yamakawa, N.Kobayashi, Study on optimum connecting points of boom-membrane structure as a basic model for larger lightweight space structure, Proceeding of ICAST2013, 7<sup>th</sup> Oct 2013, Aruba(Netherland)

#### 6. 研究組織

研究代表者

鳥阪 綾子 (TORISAKA, Ayako)

首都大学東京・システムデザイン研究科・  
助教

研究者番号： 70449338