

バイコンベックスブームを用いた大型自己展開トラスの設計法

Design Method of Large Self-Deployable Truss Structure Using Bi-Convex Booms

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

久村 将平

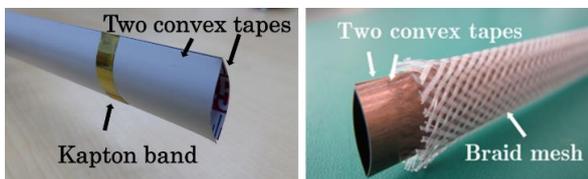
Shohei Hisamura

In recent years, studies on deployable membrane for gossamer structures are actively conducted. However, there are technical problems in the method of transporting large structures to space. The self-deployable boom that consists of convex tapes is one of the candidates for the member of such structures. In this paper, we design a large self-deployable truss as a solution to the method of transporting of large deployable structure and examine the designing method of self-deployable truss and propose the method of the ground experiment.

1. 序論

1.1. 研究背景

近年の宇宙開発において、宇宙太陽光発電システム(Space Solar Power Systems:SSPS)^[1]のような、大型宇宙構造物の検討がされている。SSPSには、発電・送電部として大面積の平板構造物が必要とされているが、コストや安全性の面から有人で組み立てることが困難であり、完全無人での組立技術が必要であると考えられている^[2]。このような技術的な課題の解決策として、展開構造物を利用した大型宇宙構造物の研究が現在盛んに行われており、構造物の部材の研究も行われている。構造物の部材として、コンベックスブームや、それを2枚合わせにしたバイコンベックスブーム (Fig.1(a))、さらに組紐で覆った組紐被膜コンベックス (Braid Coated Bi-Convex: BCON[®]) ブーム (Fig.1(b)) が提案されている。これらのブームは自己伸展力を有しており、収納効率、比剛性にも優れていることから^[2]、大型宇宙構造物への応用が期待されている。



(a)バイコンベックスブーム (b)BCON[®]ブーム

Fig.1 自己伸展部材

本研究室では、これまでにバイコンベックスブームやBCONブームを用いた展開トラスの概念を提案し、設計、展開実験を行ってきた^[3]。その1つが Fig.2 に示す 24N42B(24Nodes 42Booms)である。24N42B とは 2 章に示す自己伸展構造を用い製作された、24 個のノード(24Nodes)と、42 本のブーム(42Booms)から構成される自己展開トラス構造であり、デオービット機構としての利用を目的に設計された。収納時の大きさは直径 500mm、展開後の大きさは直径 4400mm であり、収納効率は約 8.8 倍である。この収納効率は 2 次元の自己展開トラス構造として、比較的高い収納効率であり、これを大型化することで、冒頭で述べた SSPS のような大型宇宙構造物への応用できると考えられる。

しかし、バイコンベックスブームや BCON ブームを用いた自己展開トラス構造は、柔軟な構造であるため、重力の影響を受けやすい。そのためより大型な自己展開トラス構造の地上実験を行うには、地上重力下においても展開可能である自己展開トラス構造の設計方法や実験方法の確立が必要であると考えられる。

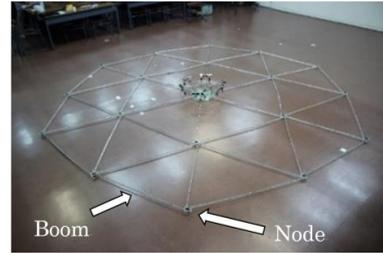


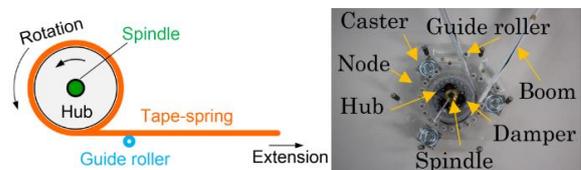
Fig.2 24N42B

1.2. 研究目的

本研究では、過去に設計された自己展開トラスを元に、より大型化するための自己展開トラスの設計方法について検討し、地上実験を行うための設計方法と実験方法を提案する。

2. 自己展開構造

Fig.3 に示す自己展開構造は、ハブ、ブーム、ノードの 3 点から構成されている。ハブは中心のシャフトと共に回転し、ブームは円筒状のハブに巻きつけられており、自らの弾性によりハブから離れようとする力を利用し自己伸展する。ブームの伸展方向はガイドローラーを用いることで、任意の方向に設定することができる。また、このような自己展開構造を組み合わせ、7 個のノードと 12 本のブームから構成される 7N12B(7Nodes 12Booms)や、Fig.2 に示す 24N42B(24Nodes 42Booms)などの自己展開トラス構造を構成することが可能である。



(a)自己伸展構造 (b)実験モデル

Fig.3 自己展開トラス構造

3. 膜付き 3N3B の設計および地上実験

3.1. 設計方法

上記の概念モデルを用いブームの長さが 1 辺 5m、形状が正三角形の膜付きの 3N3B を製作した。Fig.4(a)に展開時のモデルを示す。概念モデルに採用するノードの構造は、これまでに製作されてきたノードの構造を大型化し、製作した。Table 1 に仕様を示す。

ブームは、一般に市販されているコンベックステープを 2 つ用いたバイコンベックスブームであり、その仕様を Table 2 に示す。このコンベックステープを用いた自己伸展構造の伸展力は大き

く、展開が非常に速い速度で完了するためノードやブームへの衝撃が大きく、塑性変形の発生が懸念される。そのためハブの回転軸にオイルレスロータリーダンパーを取り付け、伸展力を低下させた。オイルレスロータリーダンパーの取り付け個数を変更することで展開速度を適切に設定できる。

組紐の代替として Fig.1(b)に示す、非常に薄くブームを収納した際の形状に影響が少ないポリイミドフィルムと、耐久性が強く宇宙環境でも使用できるカプトンテープを用いた、カプトンバンドを自作した。膜付き 3N3B に用いるブームは 5m であり、収納時にブームをハブに巻き付けた際、バイコンベックスブームの内側と外側のブームの間に、巻き付け半径の差によって、大きな周差が発生する。周差は展開時に解消するため、2枚のコンベックスブームが軸方向にスライドできる必要がある。カプトンバンドは、2枚重ねたコンベックスブームの片方にカプトンテープの粘着層を接着し、もう片方のブームに、粘着性のないポリイミドフィルムが触れるように巻き付けられており、2本のコンベックスブームが軸方向に自由にスライドすることが可能である構造となっている。

ハブはブームの仕様に基づいて決定した⁴⁾。この形状は、ハブ半径がブームの曲率半径より大きいこと、保持状態においてブームの巻き付け状態が安定すること、自己展開トラス構造が正三角形であるためブームの取り付け位置を 60 度間隔に配置できること、以上の3つの条件の基に決定した。

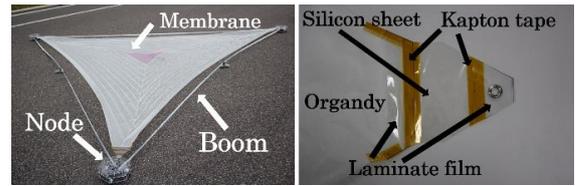
Table 1 ノードの仕様

ノード形状	0.16mm
素材	ノード：アクリル ハブ：PLA 樹脂
ハブ基準半径	30mm
ノード全高（軸を除く）	75.4mm
オイルレスロータリーダンパー	名称：ADV-S-8 定格トルク：10±2.5N・m

Table 2 ブームの仕様

厚さ	0.16mm
幅	25.0mm
曲率半径	19.15mm
素材	スチール
カプトンバンドの素材	カプトンテープ ポリイミドフィルム

膜には市販されていて入手することが容易であるオーガンジーを使用した。膜の折り方には蛇腹折りを採用し、110°Cに設定したヘアアイロンを用いて折り目を付けた。事前実験により、オーガンジーはヘアアイロンを使用した際の熱で収縮してしまい、各辺によって収縮する長さが異なってしまったため、膜の端面にシリコンシートを使用した。シリコンシートが伸縮することにより、ヘアアイロンを使用した際に発生する辺の長さの違いの影響を吸収している。膜の端面は、Fig.4(b)に示すように膜の頂点を 10cm ほど切断し、ラミネートフィルム、シリコンシート、カプトンテープを用い、端面処理を行った後にハトメリングを用いて各ノードに結合した。



(a)展開状態 (b)膜の端面処理

Fig.4 膜付き 3N3B

3.2. 実験方法

展開実験には床の傾きや凹凸の少ない教室を使用した。膜を収納した状態の収納部を、地面に固定し、膜の端面を 3N3B の各ノードに結合させ、展開実験を行った。収納状態の 3N3B を手で押さえ保持し、手を離すことにより展開させる。

3.3. 実験結果

1 辺のブームの長さが 5m であり形状が正三角形である膜付き 3N3B の展開実験を行った。収納時の直径は 600mm であり、展開時の直径は 5770mm である。その収納状態を Fig.5 に示す。



Fig.5 膜付き 3N3B 収納状態

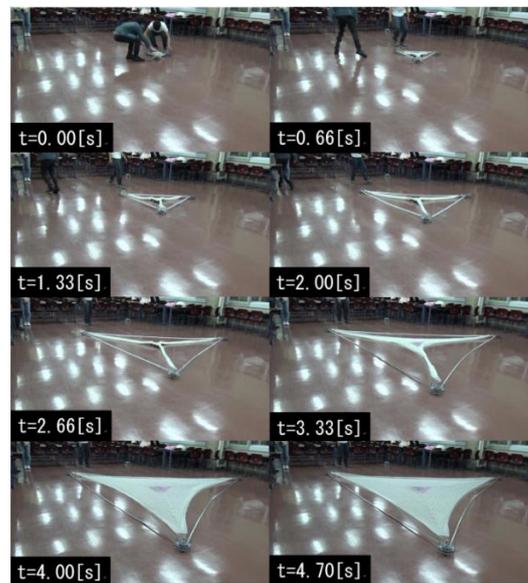


Fig.6 膜付き 3N3B の展開挙動

実験時の展開挙動はビデオカメラを用いて記録をした。Fig.6 に示すように展開挙動を時系列化し、静止画にした。展開は、4.7[sec]で完了した。ブームが地面に擦りながら展開するため各ブームが内側に歪んだ状態で展開した。また、ブームが重力によって下方方向に弾性変形することにより、ノードの底面のアクリル板にブームが接触し、大きな抵抗となっていることが分かった。

1 つのノードと膜の収納機構を固定した状態での展開実験も行った。展開は 7.7[sec]で完了した。前述の実験と同様に固定したノードの向かい側のブームが内側に大きく湾曲していた。

収納効率は9.3倍であり、膜付き自己展開トラスとして、比較的高い収納効率の展開構造物であるといえる。

4. 24N24B の設計及び地上実験

4.1. 設計方法

3N3B より大型のモデルとして、Fig.7 に示すような、展開後の形状が対称であり、組み立てが簡易なモジュール構造を採用できる、星型の24N24B の自己展開トラス構造の設計を行う。設計条件を以下に示す。

1. 自己展開トラス構造は24N24B であること。
2. 24N24B は、同じ形状の4N4B を6つ結合させたモジュール構造であること。
3. 4N4B は1つの角が60度のひし形であること。
4. ブームの長さが600mm であること。

以上の条件の基、自己伸展トラス構造の設計を行った。

また、膜付き3N3B の展開実験を踏まえ、自己展開トラス構造の改良を行った。改良点は2点である。1点は、ブームが伸展する際、ノードの底面のアクリル板にブームが擦れることによる抵抗を減少させるため、Fig.8(a)に示すような地面と水平にサポートローラーを設置した点である。サポートローラーは、ブームが伸展する際に回転する構造となっており、伸展時に発生する抵抗を大幅に減少させることができる。もう1点はFig.8(b)に示すように、ブームの midpoint に、サポーターを設置した点である。本実験で使用する概念モデルの収納時において、ブームの底面が地面より42.2mm の位置にある。サポーターがない状態では、ブームが300mm 以上伸展するとブームが地面と接触してしまうが、サポーターを使用することにより、ブームが地面と接触し始める距離を600mm まで伸ばすことが可能となった。そのため24N24B で使用するブームの長さは600mm とした。

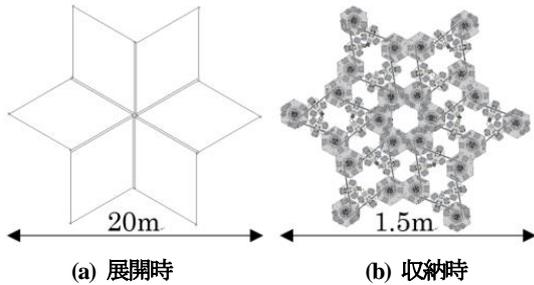
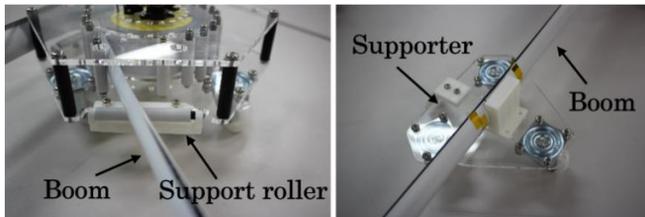


Fig.7 24N24B 概念モデル



(a) サポートローラー (b) サポーター

Fig.8 自己展開トラス構造の改良点

24N42B ではすべてのノード及びブームが一体化している構造となっているが、本実験で使用するモデルは、6つの4N4B を結合させ、モジュール構造となる、24N24B を使用した。モジュール化をすることにより星型のような自己展開トラス構造から

様々な用途に応じてその形状を変えることができる。

一般にモジュール構造の課題として、モジュール間の接続を行うため、余計なコストや、接続の際に使用する部品が必要となる点があげられる。しかし、本研究で用いる概念モデルでは、量産が可能であることからコストダウンが可能であり、様々な形状に変更でき、問題が発生したモジュールのみ交換及び修理すればよいことから、前述の問題点を踏まえても、モジュール構造が本研究の目指す大型の自己展開構造に最適であると考えられる。

4.2. 実験方法

収納状態の24N24B (Fig.9) の外周にダイニーマを巻き付けて固定をし、切断することにより展開させる。展開実験は日本大学理工学部スポーツホールで行った。実験時にスポーツホールの床を傷つけないため、床に4.5μm のPET膜を敷いて実験を行った。



(a) 星型の24N24B (b) 平行四辺形型の24N24B

Fig.9 24N24B 収納状態

4.3. 実験結果

4.3.1. 星型の24N24B の実験結果

ビデオカメラを用いて記録した展開挙動を時系列化し、静止画にしたものをFig.10 に示す。

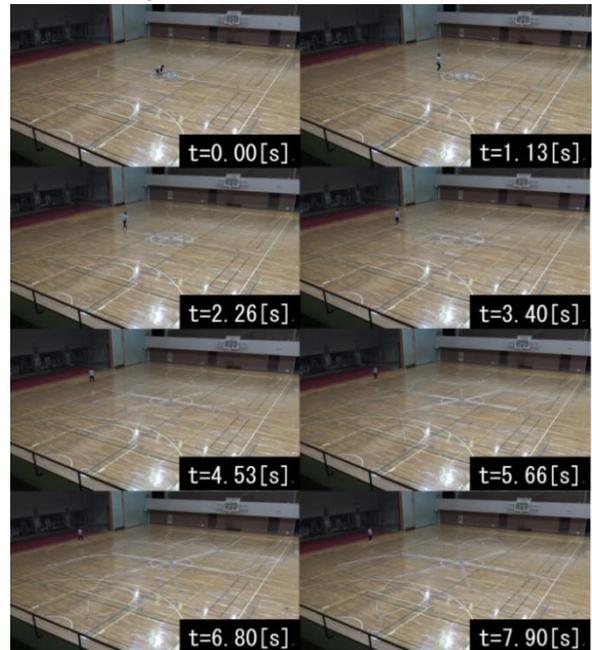


Fig.10 24N24B の展開挙動 (星型)

展開は7.9[sec]で完了し、全てのブームが伸展完了し、座屈も発生せず、本概念モデルを用いた地上実験は成功した。

4.3.2. 平行四辺形型の24N24B の実験結果

モジュール構造の利点である形状を変更できる点を検証するため、4.3.1 項で示した星型から4N4B の組み合わせを変更しFig.9 (b) に示すような展開後の形状が平行四辺形になる24N24B の展開実験を行った。展開方法は星型の24N24B と同様、外周にダイ

ニーマを巻き付け切断し展開させる。ビデオカメラを用いて記録した展開挙動を時系列化し静止画にしたものを Fig.11 に示す。

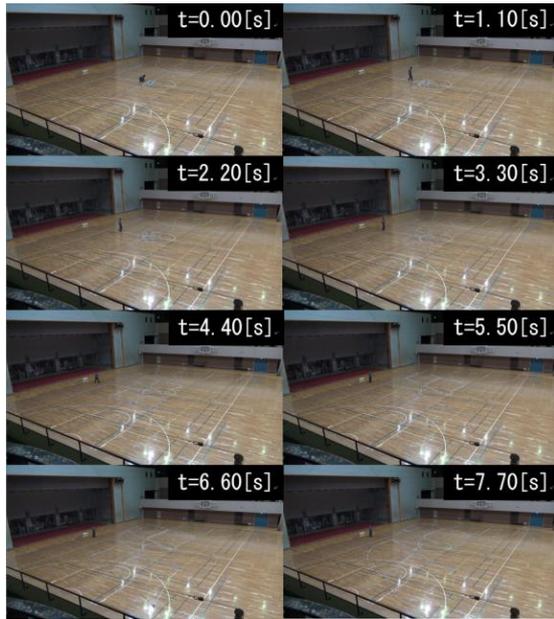


Fig.11 24N24Bの展開挙動（平行四辺形）

展開は7.7[sec]で完了し、全てのブームが伸展完了し、座屈も発生しなかったため、本概念モデルを用いた地上実験は成功した。また、4N4Bの組み合わせ方を変えることにより異なる展開形状を再現することが可能である事を確認できた。

5. 考察

5.1. 膜付き 3N3B の展開

膜なしの 3N3B の展開実験と比較すると、展開時間が約 0.7[sec]、膜付きの 3N3B の方が遅かった。これは膜が地面に引きずられる際の抵抗が原因である。今後、より大型な膜付き自己展開トラスの地上実験を行う際、トラス構造の大型化に伴い、膜の総重量も増加する。それに伴い、膜が地面に引きずられることで発生する抵抗もより大きくなる。この問題の解決策として、各ノードに膜の収納機構を設置し、展開時に膜を地面に引きずられる距離を最低限に抑える事などが考えられる。

5.2. 24N24B の展開

星型の 24N24B の収納効率は 13.3 倍であり、自己展開トラス構造として高い収納効率であるといえる。自己展開トラス構造が H-IIA ロケットによって打ち上げられると考えた時フェアリング直径は 4000mm であるため星型の 24N24B の収納効率であると 50m 級の自己展開トラス構造が展開可能であるといえる。

24N24B 展開実験の際に、各モジュールで展開速度が異なっていた。これは、オイルレスロータリーダンパーのダンパー値に個体差があることや、実験を行ったスポーツホールが、完全な平面ではなく凹凸があることから展開速度が異なると考えられる。

また、ブームの伸展完了時の衝撃により、弾性変形し、変形した状態で釣り合ってしまうブームがあった。この現象は平行四辺形型の 24N24B の展開後に多く発生した。解決策として、より大きなダンパー値のロータリーダンパーを使用し展開スピードを遅くすることや、ブームがすべて伸展完了した後に、その反発に

よりハブが逆方向に回転しないようラッチギアを使用することなどが考えられる。

大型の自己展開トラス構造の地上実験を行うには、サポートローラーやサポーターが必要であることが確認できた。大型の展開トラス構造の地上実験において重力補償装置を使用した実験は、非常に大型な実験装置が必要であるが、サポートローラーとサポーターを使用することで、20m 級の自己展開トラス構造であれば、重力補償装置を使用せずに地上実験が可能である事を示した。

さらに 1 モジュールの大型化を検討する際の問題点として、1 ノードに巻き取るブームの長さが増加することがあげられる。これにより巻き付け半径が増加し、伸展力が低下する。また、巻き付け半径の変化量が大きいため、ブームが伸展し、巻き付け半径が小さくなるにつれて、ブームとスパーサーの間に大きな隙間が発生し、その隙間にブームがつまり展開が止まることが考えられる。この問題の解決策として、ブームが伸展し巻き付け半径が小さくなるにつれて、スパーサーの取り付け半径も小さくなっていくような機構を製作し、ブームとスパーサーのすきまが生じないようにすることが考えられる。

6. 結論

過去に設計された自己展開トラス構造をより大型化した際の設計方法について検討し、地上実験を行うための設計方法と実験方法を提案した。それに対し以下のような結論を得られた。

- ・蛇腹折りにより収納されたオーガニックの膜を使用し、組紐の代替としてカプトンバンドを用いることにより、地上で 1 辺 5m の膜付き 3N3B の展開を確認した。
- ・ノードと一体化した膜の収納部を用いれば、より大型な膜付き自己展開トラス構造の地上実験が可能となる。
- ・サポートローラーとサポーターを用いることにより、地上で直径 20m の 24N24B の展開を確認した。
- ・より抵抗の大きいロータリーダンパーや、ラッチギアを使用すれば、展開後の弾性変形を防ぐことが可能となる。
- ・モジュール構造の利点である形状の変更が可能であることを示した。
- ・サポートローラーとサポーターを用いることにより、大型の自己展開トラス構造の地上実験が可能であることを示した。

謝辞

この研究は文科省・科研費 15H04204 による支援を受けています。

参考文献

- [1] 上土井大助, 他, 「宇宙太陽光発電システム用大型構造物への STEM 構造の適用性検討」, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2013-4479, 2013
- [2] 渡邊秋人, 伊藤裕明, 堀利行, 組紐を被覆した伸展構造物の検討, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2012-4496, 2012 年.
- [3] 高坂大樹, 宮崎康行, バイコンバックスブームを用いた自己展開トラス構造の試作検討, 第 59 回構造強度に関する講演会, IA15, 2017
- [4] Momoko Fukunaga, Yasuyuki Miyazaki, Structural Characteristics of BCON Truss, The 31 of ISTS, 2017