

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760177
 研究課題名（和文） センサ・アクチュエータの最適配置に基づく展開型知的テンセグリティ構造物の開発
 研究課題名（英文） Development of the intelligence deployment tensegrity structure based on the optimal placement of sensors/actuators
 研究代表者
 川畑 成之（KAWABATA NARIYUKI）
 阿南工業高等専門学校・機械工学科・助教
 研究者番号：70390507

研究成果の概要（和文）：本研究では次世代軽量構造物の基礎モジュールとして期待されるテンセグリティ構造物について、自動展開機構の開発に取り組んだ。その中で、従来の構造様式よりも比強度比剛性に優れた構造様式を提案し、最小重量設計を行った。また圧縮材伸縮方式および張力材調整方式による自動展開構造を開発、試作し展開実験を実施した。その結果本研究で提案する展開方式を採用することで、比較的容易に自立展開構造を実現できることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In this project, the development of the automatic deployment system for tensegrity structure as a foundation module of a next generation of light weight structure is present. First, we designed a new tensegrity system which has the high specific strength and stiffness than other systems, and we denoted some results of the mass minimization. Second, we developed prototype models of an automatic deployment tensegrity structure which has telescopic system of compression members or adjustable system of string length, and then, we presented some experimental results of deployment system. These results denoted the validation for the effect of the present deployment system for tensegrity structure.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |

研究分野：機械力学・構造力学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：テンセグリティ構造・最適設計・展開構造物・適応構造物

1. 研究開始当初の背景

次世代の大型宇宙構造物や地上での軽量構造物を実現するために、様々な展開構造物

の研究結果が報告されている。建築分野ではシザーズ型展開構造物やラチス構造を主体とした研究がある。また、宇宙空間での利用

を想定したものは薄膜を用いたインフレータブル構造や太陽電池パドル等の平面展開機構に関する研究が報告されている。しかしながら、これらの研究結果では依然構造重量が大きく扱いが容易でない、膜の収納方法、展開後の精密な形状保持が困難等の問題点が残っている。またこれまでの構造様式は地上用、宇宙空間用と用途が限定され、共通の構造による双方での設置は困難であると考えられる。そのため、軽量かつ展開後の形状制御が容易であり、様々な環境で利用可能な新たな構造が求められている。

2. 研究の目的

本研究は地上・宇宙空間問わずに利用可能で、軽量かつ形状制御が容易な構造様式としてテンセグリティ構造に着目し、自動展開機構を備えた知的構造物の開発に取り組むものである。

テンセグリティ構造は圧縮力を受け持つ剛体棒（圧縮材）および張力を受け持つワイヤー（張力材）が接続された構造であり、従来の構造様式と異なり、剛体同士の締結部が存在しないため構造重量を大幅に低減することができる。一方で設置後の構造は剛体によって構造重量を支えることから、膜構造と比較して全体剛性および強度に優れている。このようにテンセグリティ構造には従来の構造様式よりも優れた点が多いものの、組み立て手法が確立されておらず、一般的な構造への適用はほとんどなされていない。

そこで本研究はテンセグリティ構造を適用した革新的軽量展開構造の開発を目標に、自動展開機構の開発に取り組む。その中でコンパクトな収納と組み立ての簡単化を目指した圧縮材伸縮型自動展開構造物の開発に取り組む。また、従来のテンセグリティ構造よりも全体剛性が改善された新たな構造様式を提案し、少数のアクチュエータで駆動される張力材伸縮型展開機構を開発する。それらに加え、効率的な展開動作を実現するための構造重量最小化設計にも取り組む。

3. 研究の方法

(1) 圧縮材伸縮型展開構造

本項目では、圧縮材に伸縮用のアクチュエータを組み込んだ自動展開機構の開発に取り組んだ。圧縮材伸縮型は収納時の容積が小さく、運搬が容易になる利点がある。従来の研究ではエアシリンダによる伸縮機構などが提案されているが外部にコンプレッサーが必要などの課題がある。本研究ではよりコンパクトな伸縮機構の開発を目標に2重円筒構造の圧縮材を用いた伸縮機構について試作機を製作し展開実験を行った。

(2) 張力材伸縮型展開構造

本項目では、張力材の伸縮アクチュエータを備えた展開型テンセグリティ構造の開発に取り組んだ。張力材伸縮型は収納容積の観点からは圧縮材伸縮方式と比較して不利な点があるが、展開過程を通してワイヤーが混線しにくく、スムーズな展開動作が期待できる。また制御張力材の配置を最適化することでアクチュエータ数を低減することが可能である。一方圧縮材に着目すると、本方式では圧縮材が単純な剛体棒で構成されるため、圧縮材伸縮方式と比較して構造の全体剛性及び強度が高いと考えられる。本研究ではシンプルな制御システムおよび全体剛性の向上を目標に新たなテンセグリティ構造様式の提案をし、展開実験モデルを製作した。

(3) 最小重量設計

テンセグリティ構造の取り扱いを一層容易にするためには軽量化による運搬の簡単化が必要である。また軽量化によって展開動作に必要なエネルギーが低減され、より効率的な展開機構が実現される。本研究では張力材伸縮型の dual spiral テンセグリティ構造を対象に、力学的なつり合い式および座屈強度に基づく最小重量設計のための目的関数を定義し、いくつかのパラメータを用いて最小重量設計を行った。

4. 研究成果

(1) 圧縮材伸縮型展開構造

① 手動展開機構の開発

初めに基礎的な検討として手動展開型の実験モデルを製作した。本モデルは4本の圧縮材からなり、伸縮部は図1に示すようにボルト固定される。



図1 伸縮部

図2は収納状態を表し、簡単に持ち運びが可能なサイズとなっている。

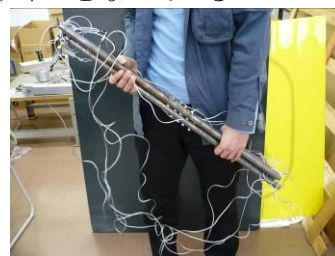


図2 ワイヤーテンセグリティ収納状態

本構造は、図3に示すように圧縮材を伸長後に簡易展開し、自立させることができ、その後各展開部の調整とバックルによるワイヤー張力を調整することで図4に示すように完全に展開された状態になる。



図3 簡易展開

図4 完全展開

本構造は十分な全体剛性を有しており、部材の一部を保持して運搬することも可能となっている。以上の実験により圧縮材伸縮方式の展開機構がテンセグリティ構造の容易な設置に効果的であることが示された。

②圧縮材自動伸縮機構

①の結果を踏まえて、自動伸縮機構の開発に取り組んだ。本研究では圧縮材内部に全ての展開システムを内蔵することを目標にし、図5に示すようなアクチュエータとしてDCモータおよびボールねじを圧縮材の内部に格納するシステムを設計した。

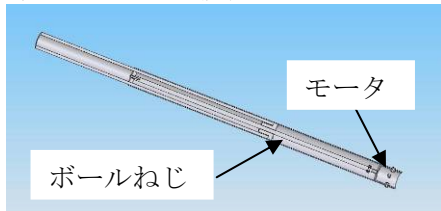


図5 自動伸縮機構

2008年度には鋼材を用いた部材を製作し、部材単体での動作は滑らかであった。しかしながら、テンセグリティ構造の展開実験では構造重量が大きく、展開状態を保持することができないことが明らかとなった。そこでより軽量な構造の開発を現在継続して実施している。

(2) 張力材伸縮型展開構造

①dual spiral テンセグリティ

初めに全体剛性の向上と展開システムの単純化を目的に新たな構造様式を提案した。図6は本研究で提案したdual spiral クラス2テンセグリティモデルを表わしている。本モデルは一般的なテンセグリティ(クラス1:図7)と異なり、圧縮材同士が節点を共有し、圧縮力を効率よく分散することができる。

本様式で展開構造を構成した場合の展開動作を数値シミュレーションによって実施し、CGアニメーションによって動作過程を可視化した。また各張力材の伸縮過程を図8に示すように数値化し、システムの設計に活用した。

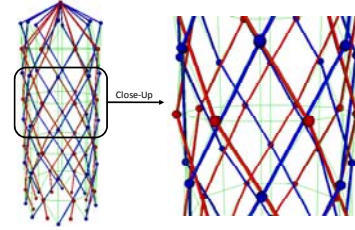


図6 dual spiral クラス2テンセグリティ

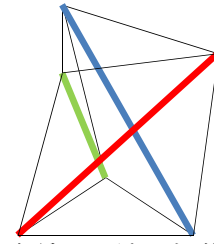


図7 クラス1テンセグリティ

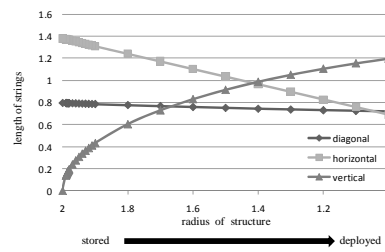


図8 張力材伸縮過程

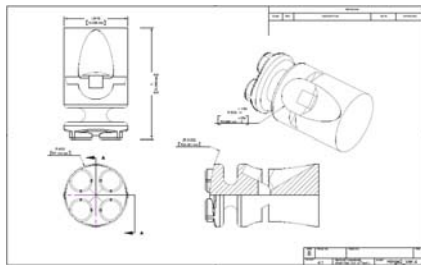
②節点部品の開発

本様式の展開機構を実現するためには、節点を共有している圧縮材が滑らかに回転し、曲げモーメントが作用しないような節点部品が必要である。またシステムの単純化を考慮した結果、以下のような設計要件を満たす節点部品が必要であった。

- 圧縮材の接続は圧縮力のみにより、ボルト等の締結部品が不要であること
- 固定部材としての張力材が展開動作時に接続点において自由に回転すること
- 制御部材としての張力材が固定部材や圧縮材と干渉することなく接続されること
- 制御部材が一つの巻き取りウインチに収束するように配置されること

以上のような設計要件に基づいて、図9のような節点部品を設計した。図9(a)は設計図であり、(b)はABS樹脂によって製作した試作品を示している。本節点部品によりテンセグリティ構造を構成した際の使用部分拡大写真を図10に示す。図中に示した通り、制御張力材は節点部品の最外周部分を通過することで他の固定張力材や圧縮材との干渉を回避しながら、構造下方へ接続することがで

きている。構造下方へ収束した制御張力材は図 11 に示すように一つのウインチにまとめられ、構造中央に設置したモーターで巻き取られる。



(a) 設計図



(b) 試作品

図 9 節点部品



図 10 節点部拡大図



図 11 張力材巻き取り部

③展開実験結果

展開実験の様子を図 12 に示す。本装置では固定張力材の設計に不備があり、完全な収納状態に移行することができなかった。そのため展開実験は最大展開時の 70%程度の状態から開始している。本実験結果より、最小限のアクチュエータで効率よく構造の展開が実現されていることが示された。

(3) 最小重量設計

dual spiral テンセグリティの単位要素

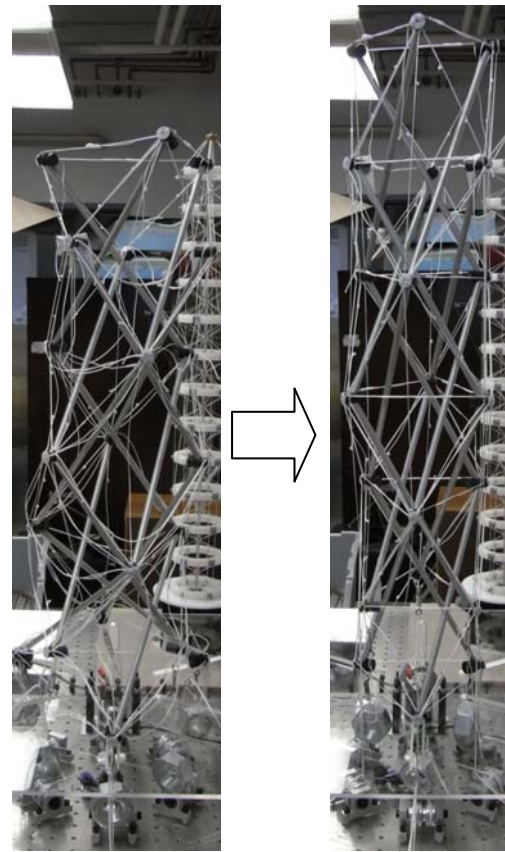


図 12 展開動作過程

(図 13) を対象に力学的なつり合い式を構築した。また座屈・引っ張り強度を考慮し、部材に作用する荷重の密度 (force density) を導入することでパラメータを単純化した。以上によって導出された最小重量設計のための目的関数を以下に示す。

$$n^* = \sqrt{2} p \left(\frac{H}{2R} \right) \sqrt{\frac{r_c(1+4r_{\gamma}) - 2r_{\gamma} - (1+\cos\phi)^{-1}}{(1+r_c)(1-\cos\phi+2r_{\gamma}\sin^2\phi)}} \quad \dots (1)$$

式(1)において、左辺の n^* は最小重量を実現する構造の複雑さを表わすパラメータで、 $n=pq$ で定義される。ここで p, q はそれぞれ単位要素の周方向および高さ方向の圧縮部材数を表わしている。また、 $r_c = c_s/c_b$ で $c_s = \rho_s/\sigma_s$, $c_b = \rho_b/\sigma_b$ であり、 ρ は部材の質量密度、 σ は部材の降伏応力を表わす。一方、 $r_{\gamma} = \gamma_h/(\gamma_1+\gamma_2)$, $r_{\gamma} = \gamma_v/(\gamma_1+\gamma_2)$ であり、 γ は各部材の荷重密度を表わしている。なお、 ϕ は圧縮部材が構造の中心軸に対してなす角度であり、 H は構造の高さ、 R は構造の半径を表わす。以上の定式化に基づき、複雑化パラメータを変化させて構造重量を求めた結果を図 14 に示す。図 14 より、複雑化パラメータが特定の値をとるとき、構造重量が最小化されていることがわかる。計算結果より本研究で提案する構造について、より効率的な展開機構の構築が可能となることが示された。

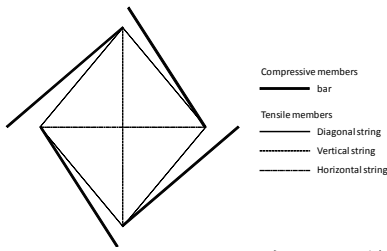


図13 dual spiral テンセグリティ単位要素

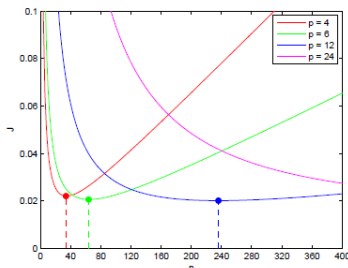


図14 複雑化パラメーター構造重量

(4) 全体のまとめ, その他の成果

① 本研究ではテンセグリティ構造を利用した展開構造の実現を目標に, 従来の構造様式より軽量で扱いの容易な自動展開構造物の開発に取り組んだ. その結果, 圧縮材伸縮型・張力材伸縮型の2方式について展開構造実験モデルを製作し, 展開実験により本研究で提案する手法の有効性を示した. 特に張力材伸縮方式では1つのアクチュエータのみで構造の展開を実現し, シンプルなシステムでの展開機構を開発できた. 一方圧縮材伸縮方式では本研究期間中に製作した試作機は構造重量が大きく, 十分な展開実験を実施できなかった. 現在より軽量化したモデルを設計・製作中であり, 継続して本研究に取り組んでいる.

② より扱いの容易な展開構造物の実現には構造重量の低減による展開エネルギーの省力化や運搬の簡単化を図る必要がある. 本研究では張力材伸縮型展開構造を対象に, 最小重量設計にも取り組んだ. その結果, 構造の座屈条件等を考慮しながら, 特定の条件で最小重量が実現されることを数値シミュレーションによって示した.

③ 本研究実施期間中には米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) の Robert E. Skelton 教授と共同研究を実施し, テンセグリティ構造を利用した革新的軽量航空機翼構造の開発にも取り組んだ. 締結部品を必要としない構造を設計し, 長さ 6m 程度の試験モデルを製作した. 製作されたモデルは現在 UCSD 工学部ビルのエントランスホールに常設展示されている.

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)

[学会発表] (計1件)

- ① 川畑成之, テンセグリティ構造の展開機構に関する一検討, 構造強度に関する講演会, 2008.8.1, 福岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川畑 成之 (KAWABATA NARIYUKI)

阿南工業高等専門学校・機械工学科・助教

研究者番号: 70390507