

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06320

研究課題名(和文)張力安定構造を利用した耐風性を有する農業用ハウス

研究課題名(英文)Agricultural greenhouse with wind resistance using a stabilized structure by tension

研究代表者

横須賀 洋平 (YOKOSUKA, YOHEI)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：40459219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、軽量で高剛性な力学特性を持つ張力安定化補剛による構造システムを農業用ハウスに導入することで経済性と構造剛性に優れた農業用ハウスの設計を目的とする。張力により安定化・補剛する構造システムは、アーチ型架構を実現するための梁要素、ビニールやETFE膜などを実現する膜要素の複合要素による自己釣合い形状を求めることが必要となる。

本研究における研究実績は、3次元空間における立体架構モデルに対する座標仮定有限要素法によるケーブルや膜、梁要素の自己釣合い形状の形状解析を実施し、応力変形解析による許容解の存在を確認した。これにより軽量で高剛性を有する農業用ハウスの設計を実現することが可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、常時被災発生地以外の異常な気象変動による農業用ハウスの被災例が全国各地で報告されている。人命被害はなくとも、農林水産業における被害は甚大なものである。被害のあった農業用ハウス、特に細径のパイプハウスは異常な気象変動による外乱に対する剛性が得られておらず、また剛性を十分に上げると経済性を欠く構造物になってしまう。

本研究では、軽量でありながら剛性が調節可能な張力安定構造を農業用ハウスに導入することで、曲げ抵抗性の構造システムから部材性能を十分に発揮できる軸抵抗型の構造システムへ転換し、従来より高い剛性を持つ農業用ハウスの構築を目指す。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to design an greenhouse with excellent economic efficiency and structural stiffness by introducing a stabilized/stiffened structural system with tension, which is lightweight and has high rigidity mechanical properties, into the greenhouse. For a structural system that is stabilized and stiffened by tension, it is necessary to obtain a self-equilibrium shape by a hybrid element of beam elements and membrane elements in order to realize an arched frame.

As for the research results in this research, we performed form-finding analysis of the self-equilibrium shape of cables, membranes, and beam elements by the finite element technique with coordinate assumption in three-dimensional space, and confirmed the existence of an allowable solution by stress deformation analysis. This makes it possible to design a lightweight and highly rigid agricultural greenhouse.

研究分野：建築構造

キーワード：張力安定構造 農業用ハウス 座標仮定有限要素法 複合張力構造 Active Bending

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化による熱帯の海水面温度上昇に伴い、風速の強い台風の発生割合が増加する傾向にあることが示されている。また気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の予測結果においても熱帯低気圧の最大風速が増加傾向にあることが示唆されている。このように従来より風速の強い台風襲来に伴い、農業用ハウスの倒壊の危険性が高まっている。近年では、沖縄県(2003)、茨城・千葉県(2003)、鳥取県(2012)で台風による農業用ハウスの破損や倒壊が発生した。特に南九州地方では、年間の台風襲来数も多く、台風襲来時にビニール被膜状態で台風を凌ぐことが望まれている。現行の細径のパイプハウスが必要とする耐風性は、「園芸施設安全構造基準(暫定基準)」に準拠した構造計算により風速 35m/s 程度の耐風性を必要とし、日本施設園芸協会が定める「低コスト耐候性ハウス施工マニュアル」では、風速 50m/s 以上の耐風性が求められている。このような耐風性に準拠した農業用ハウスを構築する場合、局所的な補強材や曲げ剛性を確保した鉄骨ハウスを必要とするが、応急的な対策や高コストな対策となる傾向がある。したがって、根本的な耐風対策を立てるには、農業用ハウス自体の構造を見直す必要がある。本研究では、軽量でありながら剛性が調節可能な張力安定構造を農業用ハウスに導入することで、曲げ抵抗性の構造システムから部材性能を十分に発揮できる軸抵抗型の構造システムへ転換し、従来より高い剛性を持つ農業用ハウスの構築を目指す。また可変剛性を持つ構造物を構築することで、予測可能な被害から安全性を確保することも可能となる。このように建築空間構造の考えを農業用ハウスに生かすことで、日本の農産業の防災研究に資する。

## 2. 研究の目的

空間構造で培われた建築構造技術のうち、ケーブルや膜構造といった張力構造を利用することで、農業用ハウスの骨組みに対し、効果的に剛性を付与できる。このような構造システムは、張力導入時に安定する構造形態の形状を決定する非線形方程式を解く必要があり、アーチやドーム型で空間構造に展開しやすい点において独自性がある張力安定構造の釣合形態が得られることを示してきた。このような張力による安定化補剛される構造の数値解析手法として有用な座標仮定有限要素が知られており、座標変換を必要とせず、自己釣合い形状を求める形状解析から応力変形解析に至る移行が容易な手法である。一方で、梁要素は定式化されておらず、膜・ケーブル要素と梁要素を同時に解析する場合には、座標変換の導入が必要であった。本研究において二次元平面問題や三次元空間の座標仮定有限要素法の梁要素の定式化を示し、農業用ハウスの構築に有用な梁・膜・ケーブル要素による複合張力構造の解析に発展させる。

## 3. 研究の方法

本研究は、3次元梁要素の開発をはじめ、数値解析による形状決定手法の構築を行い、解析結果に基づき、実験モデルを製作するものである。当初は、実験モデルの製作と妥当性を確認する予定であったが、座標仮定有限要素法の梁要素の開発を先行し、実際の農業用ハウスに応用可能なモデルを製作するために施工時の様々な外力条件を与えて、数値実験を実施し、本手法の妥当性を確認する。実験モデルについては、今後製作・実験を行う予定である。

## 4. 研究成果

(1) 座標仮定有限要素法による3次元梁要素の定式化を示した。これにより、複雑な3次元梁要素の定式化の簡素化を行ない、座標変換が必要ない簡便な記述され、形状解析から応力変形解析に至る移行が容易である。本手法の有用性を確認するために、大変形時の梁形状を追跡する幾何学的非線形解析と解析解を比較し、妥当性を確認した。

図1は、全体座標系における解析解と数値解の曲げ変形形状図を示している。図1より解析解と数値解析結果の座標値が良く一致しており、曲げによる大変形を追跡可能であることが判る。一方で、曲げモーメントに若干の誤差が生じており、大変形に対して影響は小さいと考えるが、今後詳細な検討を要する。

(2) 膜やケーブルの張力や施工時の一時的な外力が梁要素に作用した構造物は **Bending-active** 構造として知られている。構造性能を検証する応力変形解析において、**Active Bending** による梁要素の残留応力の継承が重要であることが示されており、本手法では梁要素に作用する **Active bending** による応力と形状決定後に梁の断面性能を変化した場合の応力の更新式を示した。

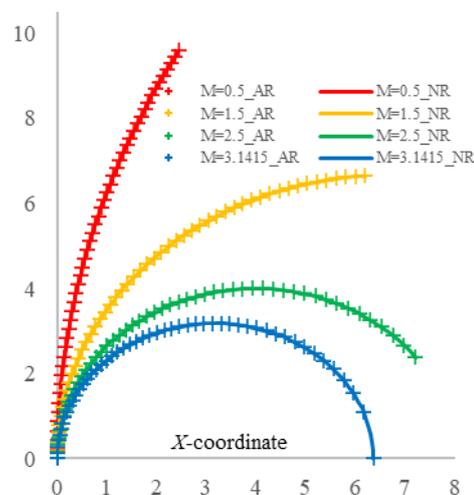


図1 解析解と数値解の比較

これにより、施工時の一時的な外力で曲げ変形させた梁を補剛した後の応力変形解析においても **Active bending** による応力の継承が行われる。例題では、一般構造用鋼材を採用し、梁断面は、曲げ変形が生じ易く平鋼を積層したせん断すべりを許容する重ね梁とし、**Active bending** 作用後にせん断すべりを許容しない合成梁に変更している。以下の式は、非線形の反復計算における幾何剛性項  $\mathbf{K}_{G\gamma}$ ,  $\mathbf{K}_{G\kappa_y}$ ,  $\mathbf{K}_{G\kappa_z}$  の更新方法を示している。

$$\mathbf{K}_{G\gamma} = EA \int_0^1 \frac{\partial \mathbf{B}_{\gamma}^{*T}}{\partial \mathbf{X}} (L_0 \gamma_{x0} + L \gamma_x) d\xi \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{G\kappa_y} = E \int_0^1 \frac{\partial \mathbf{B}_{\kappa_y}^{*T}}{\partial \mathbf{X}} (I_{y0} L_0 \kappa_{y0} + I_y L \kappa_y) d\xi \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_{G\kappa_z} = E \int_0^1 \frac{\partial \mathbf{B}_{\kappa_z}^{*T}}{\partial \mathbf{X}} (I_{z0} L_0 \kappa_{z0} + I_z L \kappa_z) d\xi \quad (3)$$

ここで、 $L_0, L$  : 初期形状の部材長さ、形状解析時の収束解の部材長、 $\gamma_{x0}, \gamma_x$  : 形状解析の収束解の軸ひずみ、応力変形解析時の軸ひずみ、 $I_{y0}, I_{z0}, I_y, I_z$  : 形状解析時の断面二次モーメント、応力変形解析時の断面二次モーメント、 $\kappa_{y0}, \kappa_{z0}, \kappa_y, \kappa_z$  : 形状解析の収束解の曲率、応力変形解析時の曲率を表す。

(3) 複合張力構造の形状決定問題に発展し、形状解析および応力変形解析を実施した。これにより釣合い形状が存在することを確認し、応力変形解析の結果より許容応力度設計の範囲内に解があることを確認した。ただし、形状解析の初期ステップにおいて張力で梁が座屈する場合、荷重が低下する経路に入る。座屈を避けて断面性能を大きくしても、曲げ変形による梁の形態抵抗性能が劣る場合があることを確認した。したがって、梁の断面性能と膜・ケーブルの張力をバランス良く配置する必要があることを確認した。

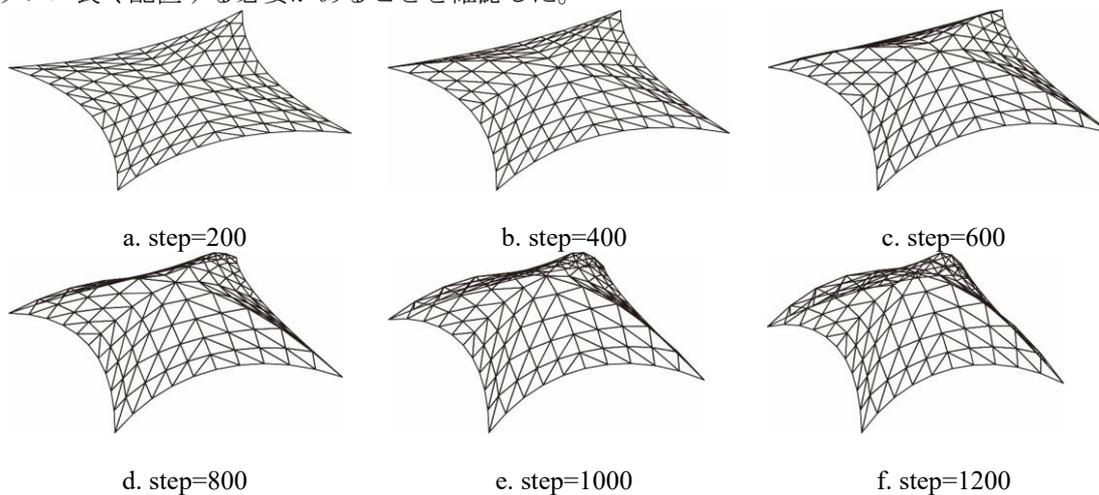


図 2. 釣合い形状

(4) 力学的な形状決定問題とは別に幾何学的な汎関数を最小化することで膜・ケーブル・梁要素の複合張力構造の形状決定問題の定式化を行なった。張力を導入した場合に曲げモーメントが生じない梁の形状決定問題として定式化を行ない、獲得した釣合い形状が同様の性質を持つことを確認した。一方で、アーチ梁が図 2 のように対角線に配置された場合には、曲げモーメントが中央部で僅かに発生することが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Yokosuka, T. Honma
2. 発表標題 Form-finding of Cable-reinforced Membrane Structures formalized by Discrete Differential Form
3. 学会等名 9th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥越 さくら, 横須賀 洋平, 本間 俊雄
2. 発表標題 座標仮定有限要素法による梁要素の定式化と形状解析
3. 学会等名 第15回コロキウム構造形態の解析と創生2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野涯 海斗, 横須賀 洋平, 本間 俊雄
2. 発表標題 幾何学的変分問題による骨組膜構造の形状決定法 - 応力一定・応力密度一定とした膜の釣り合い形状 -
3. 学会等名 第15回コロキウム構造形態の解析と創生2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野涯 海斗, 横須賀 洋平, 本間 俊雄
2. 発表標題 幾何学的変分問題による膜構造の形状決定法
3. 学会等名 応用数学会第17回 研究部会連合発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥越 さくら, 横須賀 洋平, 本間 俊雄
2. 発表標題 座標仮定有限要素法による梁要素の定式化と形状解析 - 二次元平面における梁要素とケーブル要素の複合構造 -
3. 学会等名 第60回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野涯海斗, 横須賀洋平, 本間俊雄
2. 発表標題 幾何学的変分問題による骨組膜構造の形状決定法 曲げモーメントが生じない骨組膜構造の自己釣合い形状
3. 学会等名 第61回 日本建築学会九州支部 研究発表会, 2022年3月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳥越さくら, 横須賀洋平, 本間俊雄
2. 発表標題 座標仮定有限要素技術による張弦梁構造の形状最適化
3. 学会等名 第61回 日本建築学会九州支部 研究発表会, 2022年3月
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------