

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21921

研究課題名（和文）ケーブルの応力弛緩性と冗長性に基礎をおくテンセグリティネットワーク構造体の機能化

研究課題名（英文）Functionalization of tensegrity network structures based on stress relaxation and redundancy of cables

研究代表者

中谷 彰宏（Nakatani, Akihiro）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50252606

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,500,000円

研究成果の概要（和文）：機構の「あそび」（バックラッシュ、クリアランスなどとも称される）が持つ構造系の力の分散と安全・安心の担保に関連する能動的意義を積極的に評価するために、本研究では、ケーブル（線材）と剛な部材との組み合わせにより決定される広義のテンセグリティネットワーク構造を考えています。ケーブルの一部に「あそび」に相当する応力弛緩性を導入し、力学特性の変化を明らかにしました。さらに二次元面内の南京玉すだれの運動方程式を解析するコードを作成し、弛緩性と冗長性を考慮したシミュレーションを行いました。解析結果から「あそび」を積極的に組み入れた人工物創成の可能性に結びつく知見を見出しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平常時に冗長・無駄である（と思われる）眠れる自由度が、想定外の外的要因に対して知的に振舞う潜在的能力を持つことを明らかにする挑戦的研究で、基礎的成果を得ることができました。冗長性・無駄は生命体では進化の過程で育まれています。人工物も含めその積極的意味を再確認することで理工学、生命科学にとどまらず、人文学の諸分野へのインパクトや学術的意義も明確になると考えます。また例えばナノメートルスケールで「あそび」を有する材料組織の特性理解から、都市空間の交通渋滞の緩和などの日常的問題に至るまで、広く本質的アナロジー（類似性）を探れば、広い学術的分野の裾野をカバーする社会的意義が見いだせると考えます。

研究成果の概要（英文）：In order to positively evaluate the positive significance of the "play" (looseness in constraint, also called backlash, clearance, etc.) of the mechanism in relation to the dispersion of structural system forces and the safety and security, we consider a broadly defined tensegrity network structure that consists of cables (wires) and rigid members. We have introduced stress-relaxation into a part of the cable, and have clarified change the mechanical properties. Furthermore, a code for analyzing the equation of motion for the Nankin Tamasudare in a two-dimensional plane has been developed and simulated. From the analysis, we found knowledge that leads to the possibility of creating artifacts that positively incorporate "play".

研究分野：工学

キーワード：変形体力学 メタマテリアル ひずみエネルギー マルチスケール解析 インテリジェント構造 知能・機能創成工学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

機構の あそび (同じ意味で、バックラッシュ、クリアランス、がたつきなどとも称される言葉) は、構造系本来の機能や健全性に対して脇役のような存在かもしれない。しかし不確かさへの適応性が必ず要求される人工物の設計においては本質的に必要不可欠なものである。あそびは物理的には「何も無い」、力学的には「何も無い」要素ととらえられるものであり、そこで力の伝達がほんの一瞬途切れるなど、応答に対する役割は不安定さを生み出すことである。にもかかわらず構造が大きな崩壊にいたらないのは、あそびが機能する配置空間における領域が微小に維持されて、大変形下では系全体でエネルギーの集中を緩和するための冗長性が確保されているからである。また、あそびにはその寸法に依存した未知の特性が隠されている。

あそびの設定が不適切であれば、系は期せずして応力集中などの危険に晒される。しかし適切な設計がなされている構造の冗長性は、力の分散、さらには、安全・安心の担保に結びついている。

あそびの応答を決定づける普遍的メカニズムは何だろうか という本研究課題の中心となる問いが提起される。

2. 研究の目的

比較的簡単な要素からなる一軸圧縮引張構造のネットワークを研究の題材にする。アスペクト比が極めて大きいゴムひもやピアノ線のようなケーブル(線材)は、引張力に対して剛性を有するが、圧縮力担うことができず事実上あそびのある状態となる。このような性質をここでは 応力弛緩性 と呼ぶ。ケーブルは荷重の向きに応じて、あそびを制御できる柔な基本部材である。柔な基本部材を、初期張力を利用して複数組み合わせると釣り合い状態を作り、剛な部材を組み合わせることで、三次元空間の中で自立する構造物を創成できる。そのような広義の安定構造をここでは テンセグリティ構造 と定義する。

本研究課題では、テンセグリティ構造について、ケーブルの一部に応力弛緩性を導入し、力学特性の変化、さらには力学的メタ構造と呼ばれる特異な機能性を見出す。具体的には、ケーブルの冗長性を利用した あそび による運動の動力学的メカニズムの解明、さらにはあそびを能動的につくりだす機構を内在した人工物創製の可能性に挑戦することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) あそびの応答を決定づける普遍的メカニズムは何だろうか という究極的な問いに答えることを念頭に研究目的のために以下の方法で研究を行う。まず、自立テンセグリティ構造の力学モデルを作成し、外力の付与、強制変位条件での応答について、力学的解析、幾何学的解析を行う。

図1(a)に示すようなストラット(剛部材)とケーブル(柔部材)からなるT3と呼ばれるテンセグリティ構造(引用文献)を考える。このモデルはケーブルに引張力、棒に圧縮力がはたらくとき自己釣り合い状態を作ることができるが、その一次元変形では引張圧縮とねじりの関係に幾何学的な条件が要求される。例えば上面と下面に圧縮力を作用させたとき、相対変位は小さくなると同時に回転が生じる。これら端面の重心と頂点の距離、棒材の長さを規定すると、相対変位と相対ねじれ角には幾何学的な関係が成立する。一方、力学的には柔部材の初期張力によって剛性が異なる。さらに剛性は幾何非線形性を示す。

この性質を考慮し、図1(a)を一次元格子構造のユニット構造とし、それを連ねた図1(b)に示す格子構造(テンセグリティ柱構造)を考えることができる。こうして、テンセグリティユニットを連結した構造体の力学モデルを作成する。

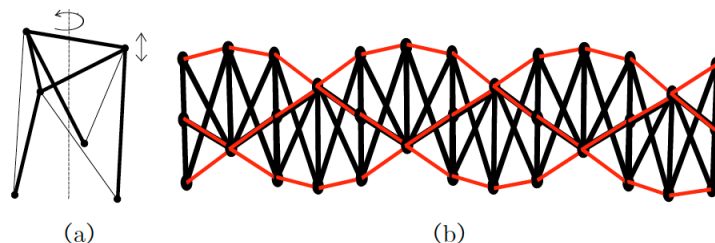


図1 テンセグリティ構造モデル:(a) T3テンセグリティ構造単位、
(b)テンセグリティ格子構造

なおユニット構造のひずみエネルギーは、ある配置で極小となる。この配置は柔部材の張力には依らない。一方、構造の引張・圧縮力に対する剛性は、張力に依存し変化する。本研究ではこのようなテンセグリティの構造特性および可変剛性に注目し、その極端な場合として、先行研究(引用文献、)を参考にしつつ、新たにケーブルの弛みを考慮した構造を考え波動伝ば解析を行う

計算モデルとして、柔部材のケーブルには、引張を受けるときは伸びに比例する弾性力がはたらくが、圧縮を受けるときは弛みを生じ剛性を有しないという特徴を付与する。こうして、節点に質量を集中させる集中質量モデルを作成し、速度 Verlet 法を用いて運動方程式を解くことで動力学シミュレーションを行う。

(2) あそび を有するテンセグリティモデルの動力学研究をさらに発展させ、南京玉すだれの数理モデリングを考える。南京玉すだれは、剛体棒とひも輪からなる大道芸の道具であり、剛体棒とひも輪という剛性が極端に異なるテンセグリティ構造といえる。その運動において、隣接する剛体棒が違いに長手方向に平行な方向に相対運動することにより、構造全体がさまざまな形態に変化することを興じ観客に魅せることを主とした遊具であるが、展開構造物としての応用の観点からその機構には学ぶところが大きいと考える。通常のテンセグリティ構造は、剛部材と柔部材に作用する圧縮力と引張力に抗する剛性を利用して静力学的釣り合いを実現している。一方、柔部材の張力を弛緩させ、剛部材と柔部材の連結点の可動性や不動性を付与することにより、人為的に変形を誘導できれば、あそび と拘束を配置によって変化させることができる新しい機能を持つ構造の実現につながる。す構造設計が実現できると期待される。南京玉すだれはこのような性質を持つ機構のひとつと考えられる。

南京玉すだれは、図 2 (a) のように剛体棒がひも輪で繋がれ、ひも輪の拘束下での剛体棒の摺動運動とひも輪どうしの結絡による固定機構により、初期条件、境界条件、運動の履歴に依存した動的変形が起こる。この機構を解明するため、図 2 (b) に示すようにモデルを提案し、動力学解析を実施する。ここで、ひも輪に張力が働く時のみ相互作用力がはたらく。またひも輪の摺動により生じる結絡による拘束などを非線形の仮想的なばねで表現する。剛体棒の交差を許容する準二次元問題を考へて、各々の剛体棒の運動方程式を導出し、それらを連立して数値的に時間積分することによって解析する。

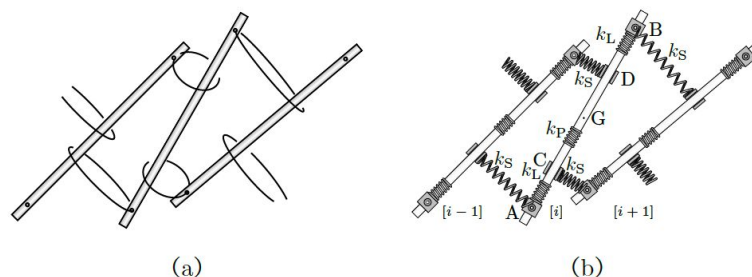


図 2 南京玉すだれのモデル : (a) 概念図、(b) 力学要素モデル

4. 研究成果

(1) テンセグリティ格子構造について、まず、単位構造に対して、ケーブルの自然長を初期張力と対応付けるパラメータに選定し、これらの釣り合い状態と、あそびについて、解析解を導出した。

次に、単位構造を 30 個直列に連結した構造に対して、さまざまなケーブルの自然長 (すなわち あそび の有無やその量を表すパラメータ) に対して、端部に初速度を付与したときの波動伝ば現象を計算機シミュレーションによって解析した。初期構造におけるケーブルの長さがその自然長よりも小さいとき、ケーブルは応力弛緩性を有しており、構造は あそび を有している。そのような構造に対して、与える初速度を変化させると、波動伝ばに対する時間遅れ、および伝ばするエネルギーの違いが現れた。

図 3 (a) と (b) に あそび の無い場合、有る場合にそれぞれの、シミュレーション結果の一例を示す。カラーバーは単位格子の上面と下面の相対変位から評価した軸ひずみ、横軸は固定端からの格子番号で、時系列の結果を示している。いずれの場合においても縦波が自由端から固定端方向に伝ばしたが、あそび を有する場合には、振幅は大きく、伝ば速度が小さくなった。また複雑波形へと変化した。

あそび を有するモデルの伝ば速度について考察を行う。弛みのない場合の速度を基準に弛みを解消するまでに要する時間と、ケーブルの幾何を考慮することによって、伝ば速度を補正するモデル式を考察した。正規化した速度の あそび を定量的に表すパラメータ依存性を図 3 (c) に示す。図から、評価点のプロットを実線で結んだシミュレーション結果と、破線で示した提案のモデル式による結果がよく一致することがわかり、波動伝ばに与える弛緩部の影響が明らかになった。

さらに集中質量を用いたモデルの短所を改良して、四元数を用いた解析シミュレーターを作成しモデルを一般化した。また広義のテンセグリティネットワーク構造の例として、変形時に剛性の喪失と回復が起こる双安定性を示す単位構造からなる二次元固体の変形伝ば挙動についての静力学解析について検討し、あそびを積極的に組み入れた人工物創製の可能性に結びつく知見を見出した。

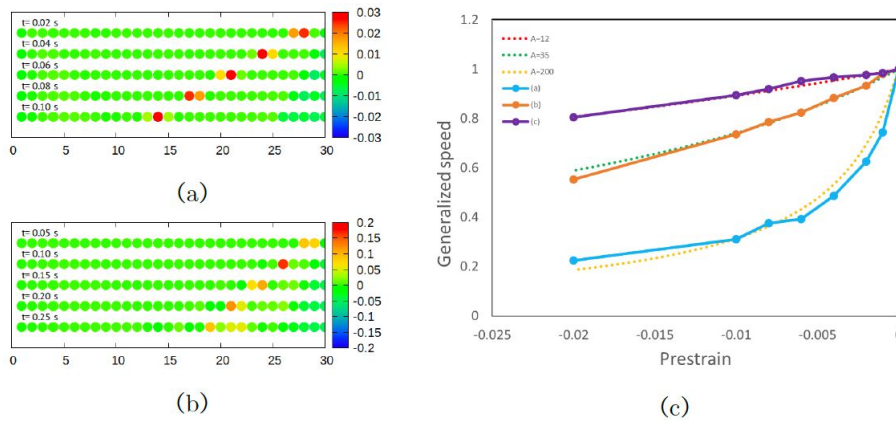


図3 シミュレーション結果:(a) あそびのないモデル、(b) あそびを有するモデル、(c) 波動伝ば速度の あそび量の依存性

(2) 南京玉すだれの運動機構の研究において、その本質は、運動の際に隣接する剛体棒間の距離がひも輪の閉曲線の長さによって規定される一定値以下になるという不等式制約条件、また、ひも輪が終端で結絡することによるロック機構がその相対運動の上下限を特徴づけるという不等式制約条件、および、ひも輪どうしがロックまたは解放された状態で運動する状況という不等式制約条件からなる あそび を有する構造であることを明らかにした。さらに二次元面内の南京玉すだれの運動をマルチボディダイナミクスにより解析するコードを作成し、シミュレーションを行った。

解析結果の一例として、図4(a)(b)に、束状の初期配置から引き伸ばしてアーチ型の自立平衡構造、および、この平衡構造に外力を付与することによって生じる飛び移り遷移により得られた別の平衡構造を、それぞれ示している。図4(c)はこの遷移の過程でのひずみエネルギーの変化を示している。この結果は、あそびを有する構造に特有の多重安定構造における安定状態から別の安定状態への飛び移り不安定とその後の剛性回復の現象の一例を見出したものである。以上のように、テンセグリティ構造に可動性や拘束の動的な変化が備わる南京玉すだれ機構から発現する新しい機能の可能性を示した。

テンセグリティ構造とその拡張系としての南京玉すだれにおける、ケーブルの あそび を考えた複雑な高次の不静定問題の非線形性解析を動力学・静学的に解析するコードを開発し解析を行った。得られた知見は あそび を積極的に組み入れた人工物創成に結びつくことが期待される。

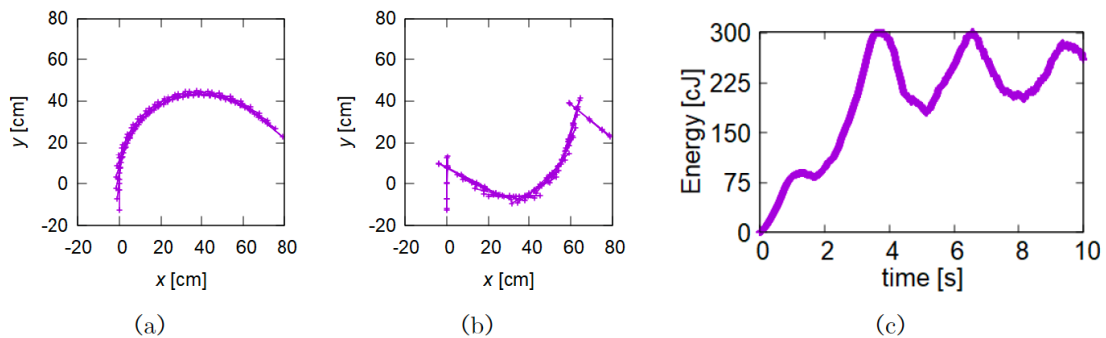


図4 南京玉すだれの解析:(a) 平衡配置、(b) 外力付与による飛び移り構造遷移後の配置、(c) 構造遷移過程のひずみエネルギーの変化

引用文献

Skelton, R. E., Adhikari, R., Pinaud, J.-P., and Chan W., Helton, J. W., An introduction to the mechanics of tensegrity structures, Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228), 4-7 Dec. 2001

Micheletti, A., Ruscica, G., and Fraternali, F., On the compact wave dynamics of tensegrity beams in multiple dimensions, Nonlinear Dynamics, 98-4, 2019, 2737-2753

Fraternali, F., Senatore, L., and Daraio, C., Solitary waves on tensegrity lattices, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 60-6, 2012, 1137-1144

Fabbrocino, F. and Carpentieri, G., Three-dimensional modeling of the wave dynamics of tensegrity lattices, Composite Structures, 173, 2017, 9-16

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yan Yi, Nakatani Akihiro	4. 巻 202
2. 論文標題 Crack sensitivity of nacre-like laminate composite materials: Monte Carlo simulation based on stability theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 646 ~ 659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsolstr.2020.06.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中谷彰宏	4. 巻 72-3
2. 論文標題 非なるものへの挑戦：不安定現象を積極的かつ安全に利用するための力学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生産と技術	6. 最初と最後の頁 29-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大佐古悠生, 土師勝人, 土井祐介, 中谷 彰宏
2. 発表標題 テンセグリティ性に着目した南京玉すだれの機構解析
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川敏崇, 土井祐介, 中谷彰宏
2. 発表標題 フラクタル構造を有するばねによって支持されたコア・シェル構造体の動力学解析
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村拓哉, 丸岡漠, 土井祐介, 中谷彰宏
2. 発表標題 摩擦のある斜面上での能動的局所曲率変化による曲線状構造体の運動の最適化
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丸岡漠, 土井祐介, 中谷彰宏
2. 発表標題 局所曲率変化に着目したはり構造体のスマート化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土師勝人, 中谷彰宏, 土井祐介
2. 発表標題 密閉空間の流体圧に着目した固体の力学特性の構成論的理解
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中谷彰宏
2. 発表標題 ミクロ不安定性に基礎をおく機能構造の実現に向けた理論応用力学アプローチ
3. 学会等名 デジタル造形工学第一回フォーラム “異方性/等方性の視点から見たモノづくり” (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊拓也, 土井祐介, 永島 壮, 中谷彰宏
2. 発表標題 連接回轉並進機構の非線形動力学解析
3. 学会等名 日本材料学会第6回材料WEEK材料シンポジウム若手学生研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三須 龍, 石原 尚, 土井祐介, 永島 壮, 中谷彰宏
2. 発表標題 人の顔面の動作時における皮膚表面のひずみ分布の時間変化
3. 学会等名 日本材料学会第6回材料WEEK材料シンポジウム若手学生研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三須 龍, 石原 尚, 永島 壮, 土井祐介, 中谷彰宏
2. 発表標題 主ひずみ分布推定を用いたアンドロイドと人の表情解析
3. 学会等名 電気学会電子・情報・システム(C)部門知覚情報技術委員会知覚情報研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長瀧知也, 永島 壮, 土井祐介, 中谷彰宏
2. 発表標題 弛緩部と剛体拘束部を有するテンセグリティ構造体の動力学解析
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

村山剛主、永島 壮、石原 尚、土井祐介、中谷彰宏、ケーブルの弛みを考慮した構造体の振動特性解析、日本機械学会関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会、10A24, 2020.3.10 (同志社大学〔発表採択・開催中止〕)

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
研究分担者	LEI XIAOWEN (Lei Xiaowen) (50726148)	福井大学・学術研究院工学系部門・准教授 (13401)	

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
---------	---------