（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和６年度　海外派遣研究員研究報告書

令和　6　年　11　月　2　日

日本大学理事長　　殿
日 本 大 学 学 長　　殿

所　　属　　工　　学部（　工学研究所　）
資格・氏名　　教授　ガン・ブンタラ

■本報告書の内容を公表することは，了承しております。
□本報告書の内容を公表することは，差し控えください。
※いずれかにチェックし(■)提出すること

令和６年度海外派遣研究員(短期 B)の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　短期 B

２　研 究 課 題

テンセグリティ構造を用いた力学と生物学の関係から細胞の力学特性を明らかにする研究

３　派 遣 期 間　　西暦　2024 年　7 月　31 日　～　　2024 年　9 月　2 日

４　派　遣　先　　アメリカ／インドネシア／シンガポール

５　研 究 目 的

ブンタラ（2012～2020）は、テンセグリティ構造を建築や土木構造研究に応用する方法を研究してきた。今後の研究では、テンセグリティ構造の概念を生物学や生物に応用する可能性を探る。

骨格構造は、細胞内で細胞の形状を維持している。細胞骨格（CYTOSKELETON）は、細胞を特定の位置に固定し、細胞質や小胞が細胞内を移動するのを助けるタンパク質繊維の複雑なネットワークで構成されている。これらのタンパク質繊維によって、多細胞生物の細胞は動くことができる。

本研究は、細胞の動きと振動を測定することにより、テンセグリティ構造を用いた細胞骨格の力学的挙動をシミュレーションすることを目的とした。

1. SELF-VIBRATIONAL ANALYSIS OF A TENSEGRITY, Buntara S. Gan, The International Conference on Modern Mechanics and Applications (ICOMMA) 2020 年 12 月 3 日
2. A fully automatic group selection for form-finding process of truncated tetrahedral tensegrity structures via a double-loop genetic algorithm, Seunghye Lee, Buntara Sthenly Gan, Jaehong Lee, COMPOSITES PART B-ENGINEERING 106 308-315 2016 年 12 月

3. Node-based genetic form-finding of irregular tensegrity structures, Buntara Sthenly Gan, Jingyao Zhang, Dinh-Kien Nguyen, Eiji Nouchi, COMPUTERS & STRUCTURES 159 61-73 2015年10月
4. Designing an Irregular Tensegrity as a Monumental Object, Buntara S. Gan, International Conference on Architectural and Civil Engineering (ICACE 2012) 2012年10月25日
5. Genetically Finding Algorithm for a Tensegrity Structure, Manabu Yamamoto and Buntara S. Gan, 2012 International Conference on Structures and Building Materials 2012年3月10日
6. テンセグリティー構造の設計・解析及び施工計画について、山本 学、Buntara S. Gan、第54回日本大学工学部学術研究報告会 2011年12月3日 日本大学工学部／工学研究所
7. Computational Modeling of Tensegrity Structures: Art, Nature, Mechanical and Biological Systems, 原著:Buntara Sthenly Gan, Springer International Publishing 2019年9月1日 (ISBN: 9783030178352)

６ 研 究 概 要

①研究の方法

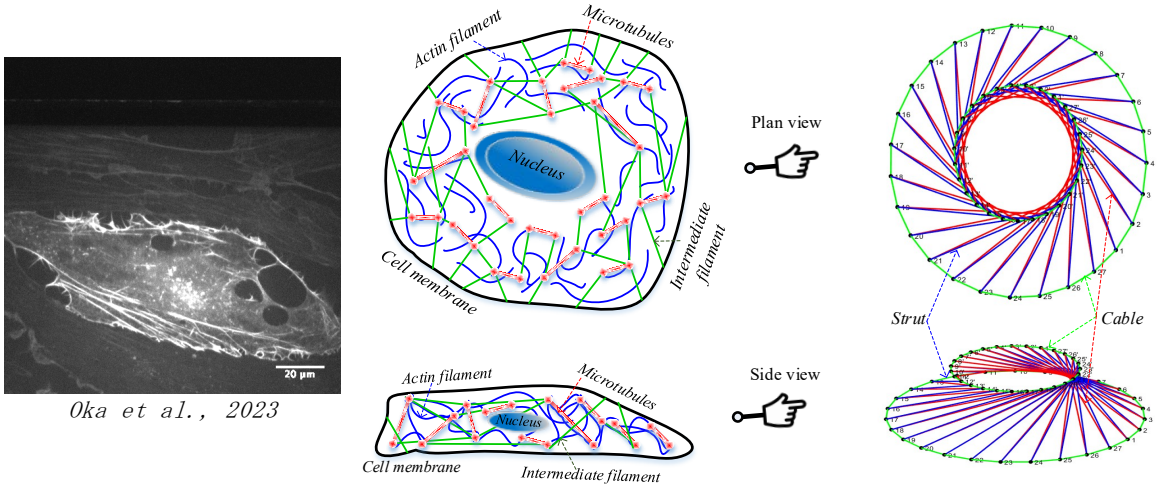
細胞内には、細胞の形状を維持する骨格構造がある。細胞骨格（CYTOSKELETON）は、細胞を特定の位置で固定し、細胞質と小胞が細胞内を移動するのに役立つタンパク質繊維の複雑なネットワークからなる。これらのタンパク質繊維は、多細胞生物の細胞が動くことを可能にする。学者によって提唱された多くの構造モデル仮説があった。しかし、細胞骨格構造の機械的挙動を特定するための抽象化と概念の努力には制約がある。最近の研究では、細胞によるテンセグリティ構造の使用を裏付ける強力な証拠が提供され、数学的形状により細胞の挙動の多くが予測される。しかし、細胞の挙動を機械的な観点からの研究を見付けるのが困難である。

最近の研究（2003～2023）は、細胞によるテンセグリティ構造の使用を支持する強力な証拠を提供し、数学的形状は細胞の振る舞いの多くを予測する。(D.E. Ingber、I-II、2003年)。2003年、ハーバード大学医学部のIngber教授は、細胞内のテンセグリティのような構造の存在を提案したパイオニアである。しかし、機械的な観点から細胞の挙動の研究を見つけることは困難である。

申請者は、計算テンセグリティ構造に関する研究成果（2010年～現在）に基づいて、細胞の挙動を分子レベルでの生体力学的関係も含めて力学的に再現（シミュレーション）することを試みる。

研究期間内には、申請者がIngber教授の元で特定細胞の挙動を理解し、細胞骨格のテンセグリティモデルの構築や推測データとの検証と確認などを行い、細胞の特性パラメータを明らかにし、その諸々パラメータを用いて病気の治療または予防するために役に立つと考える。

（ 様式D－２ ）



損傷あるいは感染した細胞を治癒するための適切な医薬品を開発することにより、ヒトの病気を治すための細胞における生物学的プロセスの重要な機能を研究するために不可欠である。近い将来、ウイルスの活動を飼いならすための高度な治療法が見つかる可能性がある。

これからの医療分野では、さらなる治療・診断の開発が不可欠である。本研究を健康で持続可能な医療技術の開発に活かしていく目的である。

1. Actin filaments that form networks in living cells fluctuate rapidly and independently of each other, International Journal of Biomedical Science and Engineering, Tomoteru Oka, Kouki Furukawa, Yasuyuki Oguma, Buntara S. Gan, Noriyuki Kataoka, 2023 年 9 月
2. Cell Mechanic Based on a Centroidal Void Cylindrical Tensegrity Model to Evaluate the Vibration of a Cellular Cytoskeleton, Buntara Sthenly Gan, Eiji Nouchi, Tomoteru Oka, Noriyuki Kataoka, Yoshihisa Kawano, The 14th International Conference on Computational Methods, 2023 年 8 月 8 日
3. A cellular Cytoskeleton vibration driven by axial vibration of 1 Microtubules and lateral vibration of Actin filaments, Yoshihisa Kawano, Tomoteru Oka, Noriyuki Kataoka, Buntara Sthenly Gan, The 8th International Conference on Advanced Technology Innovation 2023 (ICATI2023), 2023 年 4 月 2 日
4. Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology, Donald E. Ingber, Journal of Cell Science 116, p.1157-1173, 2003.
5. Tensegrity II. How structural networks influence cellular information processing networks, Donald E. Ingber, Journal of Cell Science 116, p.1397-1408, 2003.

②渡航先での活動内容

世界における３カ国の３大学の以下の機関におけるディスカッションによる研究を行った。

1. 滞在期間：2024 年 7 月 31 日～2024 年 8 月 19 日
   派遣先：アメリカ　オハイオ州大学生体医工学科（Daniel Conway 教授）
   訪問先：Ohio State University, Pelotonia Research Center (PRC)

PRC は、がん、遺伝子および細胞ベースの治療、心血管および呼吸器医学、神経疾患、マイクロバイオーム、食品システムと健康、人工知能、感覚生物学、健康の社会的および環境的決定要因などの分野に焦点を当てる。

本研究センターでは、Conway 教授の指導のもと、細胞内の FRET（Forster Resonance Energy Transfer）について学び、研究していた。

FRET とは、近接した 2 個の色素分子（または発色団）の間での双極子-双極子相互作用により、励起エネルギーが移動する現象である。即ち、一方の分子（供与体、ドナー）の励起状態から基底状態への遷移双極子と他方の分子（受容体、アクセプタ）の基底状態から励起状態への遷移双極子との共鳴により励起エネルギーが移動し、更に受容体が蛍光分子の場合には受容体から蛍光が放射される。ドイツの科学者テオドール・フェルスターにより定式化された（Förster, 1965）。このエネルギー移動効率（FRET 効率）は両分子間の距離の 6 乗の関数となり、距離が短いほど起こりやすくなる。両分子間の距離により、両分子間の力（ひずみ）を推定できる。両分子間の力を測定できれば、テンセグリティモデルの構築可能になる。ただし、FRET の効率は量子収率と蛍光寿命の関係を示しているため、実際の分子間の力ではなく、蛍光寿命と力の相関関係を研究対象としていた。

- Förster, Th. (1965). “Delocalized Excitation and Excitation Transfer”. In Oktay Sinanoglu. Modern Quantum Chemistry. Istanbul Lectures. Part III: Action of Light and Organic Crystals. 3. New York and London: Academic Press. pp. 93-137 2011 年 6 月 22 日

2. 滞在期間：2024 年 8 月 20 日～2024 年 8 月 26 日
派遣先：インドネシア大学の生体医工学研究センター（Siti Fauziyah Rahman 教授）
訪問先：Universitas Indonesia, Research Center for Biomedical Engineering (RCBE-UI)

バイオメディカル工学研究センター（RCBE）は、インドネシア大学工学部の新設の研究センターである。ここでは、工学研究者の能力と専門知識を活かし、人々の健康に関するコミュニティの実際の問題解決に積極的に取り組んでいる。

本研究センターでは、Siti Fauziyah Rahman 教授の研究チームと会談し、将来の共同研究を視野に入れ、細胞内のテンセグリティ構造に関する研究のメカニズム的側面について意見交換した。本研究センターの施設を利用する可能性も探る。

3. 滞在期間：2024 年 8 月 26 日～2024 年 9 月 2 日
派遣先：シンガポール国立大学生体医工学科（Leo Hwa Liang 准教授）
訪問先：National University of Singapore, College of Design and Engineering, Department of Biomedical Engineering.(NUSBE)

NUSBE は、工学と生物医学の融合を通じて質の高い教育を提供し、新しい知識の創出を促進させる。さらに、生物医学工学の研究、新技術の開発、および革新的な応用においてリーダーシップを発揮させる。

（ 様式D－２ ）

本研学科では、Leo Hwa Liang 准教授と会談し、将来の共同研究を視野に入れ、細胞内のテンセグリティ構造に関する研究の数値的側面について意見交換した。Leo Hwa Liang 准教授は、メカノバイオロジーやバイオメカニクスの問題を研究するために無償で使用できるさまざまなソフトウェア・解析プログラムについて、とても親切に教えてくれた。

7　研究結果・成果

今回の海外派遣先で得られた研究課題は、メカノバイオロジーの分野における FRET の研究である。FRET は、細胞におけるメカノトランスダクションを調べるために広く用いられているバイオセンサーである。FRET バイオセンサーは、細胞とマトリックスがどのように相互作用するかをよりよく理解するためのメカノバイオロジー研究に、また疾患介入のためのメカノ薬理学的スクリーニングに、強力なツールを提供してきた。

しかし、テンセグリティ構造を用いた細胞のモデリングは、まだ多くの研究分野で検討されていない。そこで私は、数値シミュレーションのための細胞内力（ひずみ）の解明するために、FRET の特性をさらに研究する予定である。

1. Application of FRET Biosensors in Mechanobiology and Mechanopharmacological Screening, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, Longwei Liu, Fangchao He, Yiyan Yu and Yingxiao Wang, 2020 年 11 月

海外派遣先で得た細胞の力学に関する知識は、台湾の嘉義で開催される IMETI 2024(2024 年 10 月 25-29 日)の基調講演者として非常に役立ちます。基調講演の内容は“自然からイノベーションへ:テンセグリティは、現代工学における芸術、科学、技術、生物学のギャップを埋めている”について講義した。

さらに、当研究室の大学院生２名（田中、末永）は、会議でのプレゼンテーションに対して最優秀論文賞を受賞した。

1. From Nature to Innovation: Tensegrity is Bridging the Gap Between Art, Science, Technology, and Biology in Modern Engineering, The 13th International Multi-Conference on Engineering and Technology Innovation 2024, Keynote Speaker.
2. Study on the Resonant Frequency of the SARS-CoV-2 Virus Membrane by Using Tensegrity Structural Approach, Proceeding of the 13th International Multi-Conference on Engineering and Technology Innovation 2024, Kaito Tanaka and Buntara Sthenly Gan, October 25-29, 2024, Chiayi, Taiwan.
3. Correlations Between the Seismic Intensity Level and Electroencephalogram During the Earthquake, Proceeding of the 13th International Multi-Conference on Engineering and Technology Innovation 2024, Riku Suenaga and Buntara Sthenly Gan, October 25-29, 2024, Chiayi, Taiwan.

以　上