

令和元年6月20日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17641

研究課題名(和文) 生物遊泳に学ぶ生物規範型遊泳ロボットの新たな性能評価指標と最適化システム提案

研究課題名(英文) Novel performance evaluation index and optimization system for swimming robot: leaning from natural fish

研究代表者

李根(LI, Gen)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・ポストドクトラル研究員

研究者番号：00774035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は自然界の魚類と生物規範ロボットの遊泳性能の評価・最適化ができるシステムを構築した。3Dプリント技術により、磁場で制御する小型遊泳ロボットの開発した。「流体力学」、「構造力学」並びに「動力学」の統合解析計算流体力学モデルの開発を行った。ロボット実験に基づいて計算流体力学モデルの信頼性を評価・改善した。自然界の魚類が様々な周波数と振幅での遊泳パフォーマンスを計算して、波打ち遊泳の様々な新たな流体力学の原理を解明し、単位距離エネルギー消費量が最小化にする方法を発見した。魚類規範遊泳ロボットに遊泳性能の最適化を実現するために、特定の尾部振幅を維持し、周波数により速度を調整する制御方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は物理学、解析力学、生命科学など多分野に貢献できる。異なる機能を持つ生物規範型の遊泳ロボットが災害救助、資源探索、医療等の領域において活躍することが期待されている。本研究は、合理的な遊泳性能評価基準を確立し、遊泳性能の最適化制御方法を発見し、我々がより自然界における生物運動の理解を深め、生物規範型の人工物の設計理念を変える。更に、本研究は磁場で制御する生物規範の小型遊泳ロボットの設計・製作をし、様々な機能を搭載することが可能であることから、医学領域等への応用も期待される。先進的な計算流体力学ソルバを開発し、理論研究と工業応用に流体力学の解析に大きな役割を果たすことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research constructed a system to estimate and optimize the swimming performance of natural fish and artificial swimming robot. By applying 3D print, a micro swimming robot controlled by magnet-field is designed and developed. An integrated solver including 'hydrodynamic solution', 'structure-solution' and 'dynamic solution' is developed. Based on robot experiment, the integrated solver is evaluated and improved. The swimming performance of natural fish under various frequencies and tail-beat amplitudes are tested by simulations. A few novel mechanisms of undulatory swimming are revealed, and the means to minimize the cost of transport is discovered. To optimize the swimming performance of artificial fish-like swimming robot, a control approach as follows is suggested: a specific tail amplitude should be maintained, while using frequency as the control parameter to adjust speed.

研究分野：計算流体力学、生物規範工学

キーワード：遊泳エネルギー最適化 生物規範流体力学 遊泳ロボット 魚類遊泳 計算流体力学 波動的な遊泳

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

異なる機能を持つ生物規範型の遊泳ロボットが災害救助、資源探索、医療等の領域において活躍することが期待されている。しかし、それらの新しい技術の多くは、主に材料と製作技術にフォーカスしており、遊泳性能の評価・最適化には多くの関心を寄せていない。それにより、遊泳ロボットの性能の向上については、いまだ多くの議論すべき余地が残っている。

遊泳ロボットに関する研究の現状としては、遊泳性能最適化の指標も明確とされていない。現在に至るまでは、船舶の推進理論を用いた「推進効率」で魚類の遊泳と遊泳ロボットの性能を評価し、「推進効率」の最大化を目指してきた。しかし、近年の魚類の遊泳観測データから、「推進効率」を生物遊泳の性能評価指標として用いる適切性を見直す必要があることが明らかとなった。より合理的な評価基準を確立することは、我々がより自然界における生物運動の理解を深め、生物規範型の人工物の設計理念を変えることが期待できる。

2. 研究の目的

(1) 磁場の生成及び制御する機構を含め、磁場で制御する生物規範の小型遊泳ロボットの設計・制作を行う。小型遊泳ロボットは、コイルから生じる磁場を用いて、ロボットの頭部の磁石を制御し左右運動させ、その波の伝播で弾性系の胴体変形による前進運動を実現する。

(2) 現在所有している「流体力学」と「動力学」の連成解析が可能なソルバに「構造力学」の連成解析を加え、高性能かつ信頼性の高い数値計算ソルバを開発し、数値計算ソルバの信頼性を評価する。

(3) 波動的な遊泳において、推進効率の最大化はエネルギー消費が増加する可能性があることを示す。また、その背景となる流体力学の原理を解き明かす。

(4) 数値計算手法と魚類の観測実験を用いて、自然界の中の生物運動は、推進効率の最大化ではなく、単位距離あたりのエネルギー消費量が最小化の最適化を目標としていることの合理性を証明する。

(5) 最終的には、計算手法と工学実験を用いて、遊泳ロボットの性能の評価・最適化ができるシステムを構築する。さらに、それを基に、生物規範遊泳ロボットの最適化を行う。また、本研究で確立した遊泳ロボットの性能の評価・最適化ができるシステムは、他の生物規範の遊泳ロボットの設計・評価・最適化にも用いることが出来る汎用性を示す。

3. 研究の方法

(1) 磁場により制御する受動的変形遊泳ロボット（磁場・水槽を含む）の設計・試作。磁場はコイルを用いて製作し、交流電圧を加えることで生じる周期的な磁場を制御する電子回路も製作する。遊泳ロボットの密度を水に近づけるために、ロボットの頭部は磁性を持つ材料と密度が低い材料（磁性材料の密度を中和するため）を用いる。頭部以外は、密度が水に近く、均一の厚みを持つ長方形の弾性体を用いる。これにより、頭部が磁場の影響で左右運動する際に、胴体が受動的な変形を伴い、波動運動を実現する。

(2) 流体構造連成解析（FSI）を含んだ波動的な自由遊泳の数値計算ソルバを開発する。研究代表者が以前開発した「流体力学」－「動力学」の連成解析が可能なソルバに、「構造力学」の連成解析も加え、遊泳ロボットの設計をサポートするソルバを開発する。遊泳ロボットの尻尾の部分は水平面しか変形できないことを仮定し、適切な弾性変形理論モデルを用いて単体のソルバを構築する。ロボットの胴体弾性係数とそれを動かす磁場の強度を入力値として数値計算ソルバに与え、自由遊泳をするロボットの運動速度、胴体変形、及び流れ場の変化を計算する。計算して得られた結果と実験で測定したデータとを比較し、ソルバの妥当性を検証する。

(3) 「推進効率の最大化」は「単位距離あたりのエネルギー消費が最小」ではないことを証明し、自然界の魚類は「推進効率を最大化する」ことを目標としていないことを明らかにする。魚類の観測実験のデータを基づき、計算流体力学モデルを用いて、異なる振幅と周波数の組み合わせ時における魚の「推進効率」と「単位前進距離当たりのエネルギー消費」を算出し、分布図を作成する。さらに、「推進効率」が最大と「単位前進距離当たりのエネルギー消費」が最小の振幅と周波数の組み合わせを探し、魚はどちらの指標を目標として遊泳運動を行っているかを明らかとする。

(4) 遊泳ロボットの性能評価・最適化ができる設計指針を確立する。これらの設計指針は、今後他の遊泳ロボットや飛行ロボットの設計にも応用できる。

4. 研究成果

(1) 磁場生成システムの構築（ヘルムホルツコイル、水槽、および電気回路システムの製作）、並びに磁場による制御する遊泳ロボットの製作を完了した。磁場装置とロボット（図1）の試作が成功したことで、独特かつ精妙な流体実験装置が構築できた。本装置では、ロボットに全く接触しない状態で、ロボットに波動的な遊泳をさせることができる。それは、接触式な駆動装置の自由度の束縛制限を解放できるだけでなく、輸入効率の概算値も簡単にらせる。よって、本装置は今後魚類の遊泳原理の解明や、生物規範型ロボットの最適化の実験に活用できることが期待できる。

磁場発生用のコイルは最初では手作りのものを用いたため、精度が低い、そこでフランスの共同研究者にアドバイスを求めた結果、高精度・低コストの工業既製品を導入し、磁場生成システムの構築が順調に終わった。磁場生成システムはヘルムホルツコイル（空間的に均質な磁場を発生できる、同一の二つのコイルを同一の中心軸を持つように配置し、距離はコイルの半径である）、水槽、周期的な磁場を制御する電子回路及び測定システムから成る。直流電流を与えた状態での測定結果によると、磁場の空間均一性と時間的な安定性共に問題がない。

ロボットの頭部は磁石と密度が水と同程度の樹脂 3D プリント材料を用いた。3D プリント技術により、中空の頭部を作った（磁石の密度を中和するため）。磁石は中空の頭部の内側に配置された。頭部以外は、密度が水に近い、均一の厚みを持つ長方形の弾性ゴムを用いた。これにより、全体の密度は水とほぼ同じく、頭部が磁場の影響で左右運動する際に、胴体を受動的な変形を伴い、波動運動を実現した（図2）。

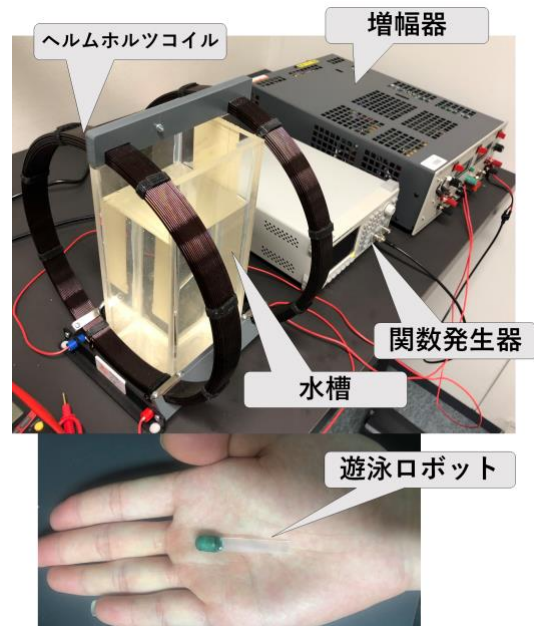


図1 磁場生成・制御システムと遊泳ロボット

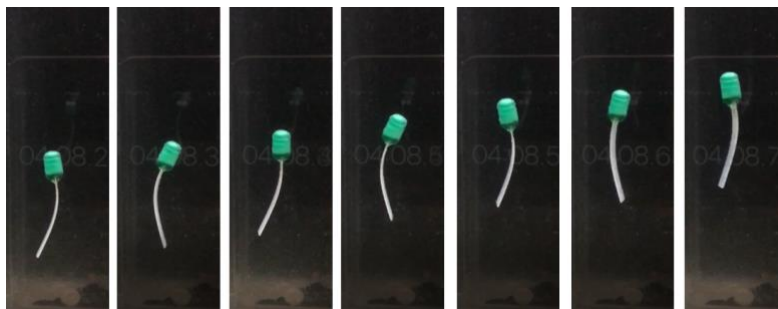


図2 遊泳ロボットの高速撮影。周波数 = 6Hz。

(2) 流体構造連成解析 (FSI) を含んだ波動的な自由遊泳の数値計算ソルバの開発、「流体力学」、「構造力学」と「動力学」の統合解析ソルバの構築とテストを行った。

弾性変形理論モデルを用いて 2 次元の弾性変形の計算モデルを構築した。この弾性変形の計算モデルは、Thomas らのモデル（参考文献1）を参考して、Fortran 言語でプログラムされた。その後、弾性変形の計算モデルと既存の「流体力学」-「動力学」ソルバと弱連成し統合ソルバを構築する（流れ図は図3に示す）。

高速度カメラによる磁場制御ロボットの運動撮影と MATLAB 画像処理による変形・運動解析（図2）を行って、統合解析計算流体力学モデルにより、自由遊泳をするロボットの運動速度、胴体変形、及び流れ場の変化を計算し、得られた結果と実験で測定したデータとを比較し、計算流体力学モデルの信頼性を評価した。今までのところ、ソルバの計算安定性はまだ改善する必要があるので、その調整やテストは進行中である。

本統合解析ソルバは、弾性変形体の水中運動のようないくつか異なる力学性質をもつ複雑な解析において、商用流体計算ソフト以上の適用範囲と正確度を出すことができる。今後、魚類の遊泳原理の解明や、生物規範型ロボットの最適化などの流体力学の解析に大きな役割を果たすことが期待できる。

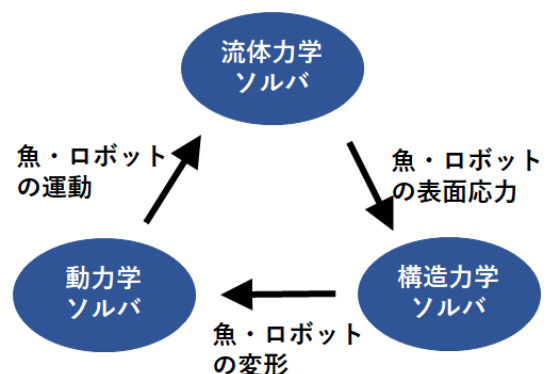


図3 「流体力学」、「構造力学」と「動力学」の統合解析ソルバの流れ

(3) 計算流体力学モデルを使用して、自然界の魚類が様々な周波数と振幅での遊泳パフォーマンスを計算して、魚類の波打ち遊泳の様々な新たな流体力学の原理を解明した。

例えば、図4に示すように、2つの興味深い現象が注目された：①魚が受ける抗力は、3次元の球体の抗力と同じ寸法効果(抗力曲線の傾斜角)で、2次元板の抗力の寸法効果と違う。②同じ速度の場合、波打ち遊泳の魚は、波動なしの魚より、3倍以上の抗力を受ける。この波打ち遊泳の抗力は波打ち振幅の影響を強く受ける。極端に小さいまたは大きい波打ち振幅は抗力を増加させる。

それによって、自然界の魚類は「単位距離あたりのエネルギー消費量が最小化」にするように、一定の尾鰭の振幅を維持し、周波数の調整による速度を調整する必要があることを発見した。魚類波動的な遊泳において、「推進効率の最大化」の場合、単位距離あたりのエネルギー消費が増加する可能性があることを示した。自然界の魚類の観測実験の統計を行い、自然界の魚類は「推進効率を最大化する」ことを目標としていないことを明らかにした(図4)。

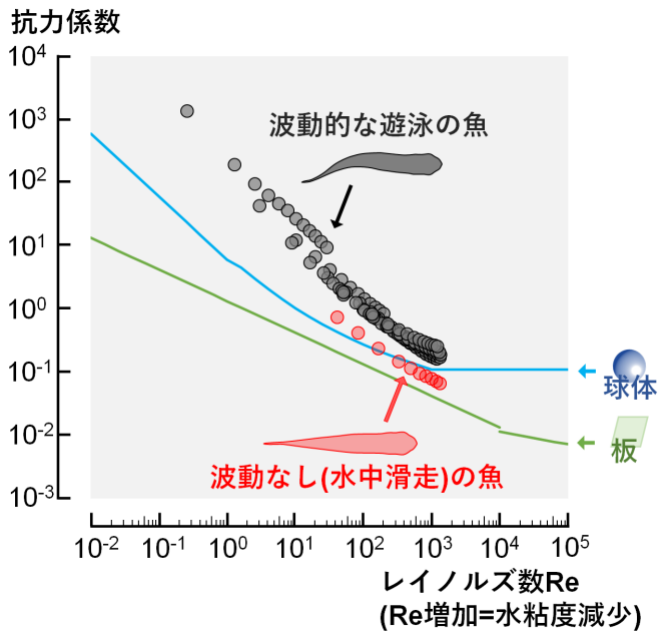


図4 計算流体力学モデルによる波打ち遊泳魚は、波動なし魚、3次元球体と2次元板の抗力の結果

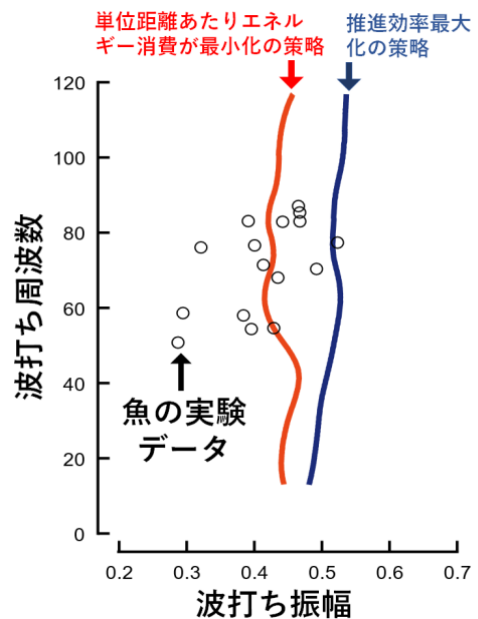


図5 自然界の魚類は「推進効率を最大化する」ことではなく、「単位距離あたりのエネルギー消費量が最小化する」ことである。

(4) 本研究は今まで生物遊泳の評価に用いた「推進効率の最大化」の不適性を指摘し、より適切な評価体系「単位距離あたりのエネルギー消費が最小」を確立した。自然界の魚類が合理的な柔軟性を保って、簡単な周波数制御だけで遊泳性能の最適化が保証できる可能性を示した。魚類規範遊泳ロボットに遊泳性能の最適化を実現するために、特定の尾部振幅を維持し、周波数により速度を調整する制御方法を確立した。

<参考文献>

① Thomas Engels, Dmitry Kolomenskiy, Kai Schneider, Jörn Sesterhenn, Numerical simulation of vortex-induced drag of elastic swimmer models、Theoretical and Applied Mechanics Letters、7巻、2017、280—285。

5. 主な発表論文等
[雑誌論文] (計 6 件)

① Gen Li, Dmitry Kolomenskiy, Hao Liu, Benjamin Thiria, Ramiro Godoy-Diana, On the interference of vorticity and pressure fields of a minimal fish school Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms、査読有、8巻、2019、27—33
DOI: 10.5226/jabmech.8.27

② Tanaka Hiroto, Gen Li, Yusuke Uchida, Masashi Nakamura, Teruaki Ikeda, Hao Liu, Measurement of time-varying kinematics of a dolphin in burst accelerating swimming、PLOS ONE、査読有、14

卷、2019、e0210860

DOI: 10.1371/journal.pone.0210860

- ③ Lijun Li, Gen Li, Ruoxin Li, Qing Xiao, Hao Liu, Multi-fin kinematics and hydrodynamics in pufferfish steady swimming, *Ocean Engineering*, 査読有、158巻、2018、111—122
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.080
- ④ Ruoxin Li, Qing Xiao, Yuanchuan Liu, Jianxin Hu, Lijun Li, Gen Li, Hao Liu, Kainan Hu, Li Wen, A multi-body dynamics based numerical modelling tool for solving aquatic biomimetic problems, *Bioinspiration & Biomimetics*, 査読有、13巻、2018、056001—056001
DOI: 10.1088/1748-3190/aacd60
- ⑤ Shi-Hong Gu, Gen Li, Hsiao-Yen Hsieh, Pei-Ling Lin, Sheng Li, Stimulation of JNK Phosphorylation by the PTHH in Prothoracic Glands of the Silkworm, *Bombyx mori*, *Frontiers in Physiology*, 査読有、9巻、2018、43
DOI: 10.3389/fphys.2018.00043
- ⑥ Hao Liu, Dmitry Kolomenskiy, Toshiyuki Nakata, Gen Li, Unsteady bio-fluid dynamics in flying and swimming, *Acta Mechanica Sinica*, 査読有、33巻、2017、663—684
DOI: 10.1007/s10409-017-0677-4

[学会発表] (計 15 件)

- ① Gen Li, Hao Liu, Ulrike K. Muller, Cees J. Voesenek, Johan L. van Leeuwen, Optimisation strategies and hydrodynamic constraints in undulatory swimming: lessons learned from larval fish, *The Society for Integrative and Comparative Biology Annual Meeting 2019 Tampa*, 2019
- ② Gen Li, Cees Voesenek, Hao Liu, Ulrike Muller, Johan van Leeuwen, Drag duality in undulatory swimmers governs optimization strategies, *Society of Experimental Biology Annual Meeting 2019 Seville*, 2019
- ③ Cees Voesenek, Gen Li, Florian Muijres, Johan van Leeuwen, Learning how to swim: lessons from bending moment patterns, *Society of Experimental Biology Annual Meeting 2019 Seville*, 2019
- ④ Gen Li, Dmitry Kolomenskiy, Hao Liu, Benjamin Thiria, Ramiro Godoy-Diana, A pair of swimming fish: energetics and stability, *4th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids (ECCOMAS MSF 2019) Sarajevo*, 2019
- ⑤ Gen Li, Hao Liu, Undulatory fish swimming: sources of drag and optimizations of energetics, *2019 RIMS workshop "Mathematical Methods in biofluid mechanics"*, 2019
- ⑥ Ulrike Muller, Gen Li, Otto Berg, Johan van Leeuwen, Bladderwort Suction Feeding: Insights from Mathematical Models, *The Society for Integrative and Comparative Biology Annual Meeting 2018 San Francisco*, 2018
- ⑦ Gen Li, Cees Voesenek, Dmitry Kolomenskiy, Benjamin Thiria, Ramiro Godoy-Diana, Hao Liu, Ulrike Muller, Johan L. van Leeuwen, Simulation-based swimming performance mapping: an effective way to explain and predict fish swimming strategies, *Society of Experimental Biology Annual Meeting 2018 Florence*, 2018
- ⑧ Ulrike Muller, Cees Voesenek, Gen Li, Otto Berg, Johan van Leeuwen, Suction feeding in the carnivorous plant bladderwort (*Utricularia*): insights from mathematical models, *8th World Congress of Biomechanics Dublin*, 2018
- ⑨ Gen Li, Hao Liu, Ulrike Muller, Cees Voesenek, Johan L. van Leeuwen, Optimal swimming techniques for the intermediate Reynolds number regime: lessons from larval fish, *8th World Congress of Biomechanics Dublin*, 2018
- ⑩ Zhenkai Zhao, Qing Xiao, Xinhua Shu, Gen Li, Hao Liu, A study of zebrafish locomotion using experimental and numerical simulation, *7th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC2018) Tokyo*, 2018
- ⑪ Gen Li, Dmitry Kolomenskiy, Hao Liu, Benjamin Thiria, Ramiro Godoy-Diana, Parametric study on the hydrodynamic influence of collective swimming in fish, *7th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC2018) Tokyo*, 2018
- ⑫ 新保貴也, 李根, 中田敏是, 劉浩, 尾びれの運動特性がイルカ遊泳の推進性能に及ぼす影響, *日本機械学会第31回バイオエンジニアリング部門講演会*, 2018
- ⑬ 池田裕樹, 李根, 中田敏是, 劉浩, 魚規範型飛行ロボットののための波打ち運動機構の創製, *日本機械学会第31回バイオエンジニアリング部門講演会*, 2018
- ⑭ Gen Li, Dmitry Kolomenskiy, Hao Liu, Intesaaf Ashraf, Ramiro Godoy-Diana, Benjamin Thiria, Swimming hydrodynamics of synchronization and collective swimming patterns in fish, *Society of Experimental Biology Annual Meeting 2017 Gothenburg*, 2017
- ⑮ Ulrike Muller, Gen Li, Otto Berg, Janneke Schwaner, Matt Brown, Maxwell Hall, Bladderwort prey capture: lessons from the smallest suction feeders, *Society of Experimental Biology Annual Meeting 2017 Gothenburg*, 2017

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名： Johan van Leeuwen (ワーヘニンゲン大学、オランダ)
ローマ字氏名： Johan van Leeuwen

研究協力者氏名： Benjamin Thiria (ESPCI Paris、フランス)
ローマ字氏名： Benjamin Thiria

研究協力者氏名： Ramiro Godoy-Diana (ESPCI Paris、フランス)
ローマ字氏名： Ramiro Godoy-Diana

研究協力者氏名： 劉 浩 (千葉大学)
ローマ字氏名： Hao Liu

研究協力者氏名： Ulrike Muller (カリフォルニア州立大学フレズノ校、アメリカ)
ローマ字氏名： Ulrike Muller

研究協力者氏名： Dmitry Kolomenskiy (海洋研究開発機構)
ローマ字氏名： Dmitry Kolomenskiy

※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、研究者個人に帰属されます。