

令和 5 年 5 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18792

研究課題名（和文）生物と機械のハイブリッドロボットによる海底・宇宙探索

研究課題名（英文）Exploration of sea and outer space using hybrid robots of life and machine

研究代表者

田中 陽（Tanamka, Yo）

国立研究開発法人理化学研究所・生命機能科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：40532271

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：人類は、進化とともにその活動圏を広げてきた。現代、地球上の陸地はほぼ探索が完了したといえるが、将来は海や宇宙に活動範囲を広げていくであろう。ただし、それには地形や生態系などの探索が不可欠になるが、従来法であるリモート探索は情報の精度や質に限界があり、探索機は広範囲をカバーするには膨大な数とコストがかかる。そこで本研究では、根本的に発想を変え、生物に機械を組み込んだハイブリッドロボットを使った探索を実証する。まず比較的容易な(1)海の探索法を検証し、さらに、(2)宇宙についても挑戦することを目的とし、それぞれについてデバイスの開発と実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

まず海の探索法の検証として、発電魚であるシビレイイに通信装置を取り付け、これをシビレイイの発生電力で駆動・通信させられることを実証した。これは今後、実際に海洋での生物を用いた探索に用いられることが期待される。一方、宇宙探索では宇宙でも宇宙空間でも長期間生存できるネムリユスリカを用いて、その動きを追尾できるように、その動きで発電させる微小電極デバイスを作製した。このデバイスは将来の宇宙のみならず、砂漠や極地等の地球上の環境センシングにも用いられることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Human beings have developed survivable zones. Recently, exploration of land areas on the earth has almost completed. In future, it will be extended to sea areas and outer space. However, remote exploration has a limitation of information and the conventional exploration machines needs a numerous number and costs. In this study, we exploit bio-hybrid robot combining life and machines. First, we develop sea exploration method by using an electric ray and then developed the idea to outer space exploration using chironomid larvae.

研究分野：ナノ・マイクロ科学

キーワード：地球惑星探査 海底探査 生存圏 乾燥耐性

1. 研究開始当初の背景

人類は、進化とともにその活動圏を拡げてきた。現代、地球上の陸地はほぼ探索が完了したといえるが、将来は海や宇宙に活動範囲を拡げていくであろう。ただし、それには地形や生態系などの探索が不可欠になるが、従来法であるリモート探索は情報の精度や質に限界があり、探索機は広範囲をカバーするには膨大な数とコストがかかる。

一方、これまでに研究代表者は、「生物エネルギーの実利用」をテーマに様々な生物由来のエネルギーを機械的・電氣的に活用してきた。化学エネルギーから運動エネルギーへの高効率変換機能をもった柔軟な生体材料である心筋細胞・組織を素子として利用し、マイクロ加工技術との融合により、従来の電力駆動型デバイスとは根本的に異なる、生物-機械のハイブリッドシステムを創出してきた。

2. 研究の目的

本提案は、上記のような独自の細胞機能搭載デバイスからのスピノフとして着想した経緯があり、細胞や組織からさらに一步踏み込んで、生物そのものに機械を搭載して探索ロボットを発送したものである。本研究では、従来とは根本的に発想を変え、生物に機械を組み込んだハイブリッドロボットを使った探索を実証することを目的とした。

3. 研究の方法

具体的には、まず比較的容易な(1)海の探索法についてシビレイイを用いて検証し、(2)宇宙についても宇宙でも生きられる昆虫であるネムリユスリカの幼虫を用いて探索手法を確立することとした。以下、それぞれの成果について報告する。

4. 研究成果

(1) シビレイイによる海底探査

人類は海の恩恵を受けて生活している。それは、魚類などの食糧利用をはじめ、海底油田など鉱物資源の利用、さらには海洋を海上交通や輸送のインフラとして利用するなど多岐に渡っている。海洋の利用を促進していくには、海中の情報をより高い精度でより早く把握する必要があり、その第一歩として全世界における高分解能の海底地形図の作成が重要である。

海底地形のマッピングには、音響ビームや光学探査あるいは自律型海中ロボットなど、物理的な装置機械類を用いるものがほとんどである。むろん、これらは海底探査の主軸となる手法だが、音響ビームや自律型海中ロボットは大量の船舶やロボットが必要であり、光学的手法では浅海域に限られるなどそれぞれ課題がある。

そこで、研究代表者は、海中生物を積極的に利用し、これを生物エージェントとして利用することを考案した。ロボットや遠隔操作機の代わりに、生物に最新のデバイス技術で小型化した探査装置や通信装置を装備させ、海底を探査させるというものである。生物エージェントでは、正確な制御は難しいもののある程度自律的に動けるため、ロボットのように動力を必要とせず、材料としては安価であり、広域を探査するのに適している。また、単なる物理情報のみならず、その動きから餌や天敵などの存在を示す生物情報も得られる可能性がある。

図 1(A)にコンセプトや原理について示す。海底を探査するには底棲生物が適しており、本研究ではシビレイイを用いた。シビレイイは、これまでも発電機として使えることを実証しており、十分な電力を発することも確認できている。今回、その生態把握から生物エージェントとしての使用可能性を検証することを目標とし、大型水槽を用いたシビレイイの行動特性調査、および実際の海底においてピンガー

という小型音響発振器(送信機)を用いた位置追跡実験を行った。まず、大型水槽でシビレイイの撮影動画から動きをプロットし、シビレイイがほとんどの時間、底付近を動いていることを確認しました。次に、図 1(B)のように、シビレイイにピンガーを装着して海底に放ち、その位置を追跡することにより、海底の地形情報が得られることを実証した。これは、底棲生物を用いた海底地形マッピングの初めての例であり、ここで得られた知見をもとに、より一般的な底棲生物などを対象にし、また生物の物理的な動きや周囲

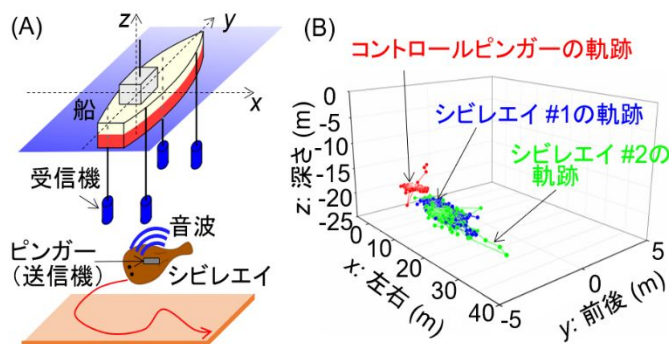


図 1 シビレイイを利用した海底地形図作成実験. (A)位置追跡手法 (B) 2 匹のシビレイイ(#1, #2)と錘をつけて海底に落としただけの「コントロール」の 90 分間の海底での軌跡データ, 底が平坦な 20 m 深さ海域での実験

の潮流の調査、あるいは生物の化学エネルギーなどを利用した発電方法の開発と併せて研究を進めることで、広範囲の海底探査への応用が期待できる。

(2) ネムリユスリカによる宇宙探査

人類の発展にとって生存圏を探すこと、作り出すことは重要である。例えば、砂漠や荒地の緑地化、極地での生存圏確保、そして将来的には宇宙での生存圏探索といったシーンにおいて、生物生存環境の計測は欠かせない。生存圏の探索には、水・空気・温度・化学環境などさまざまなパラメータを計測する必要がある。しかし、従来のセンサーは基本的に一つのセンサーで一つのパラメータのみの探査にとどまるため、多数のセンサーを持っていく必要がある。しかも計測対象ではない未知のパラメータが生物生存に関与している可能性も否定できない。一番確実なのは、生物を実際にその環境に置き、生存できるかどうかを試してみることだが、そもそも過酷な環境で生きられる生物はほとんどなく、長期の探索も難しいという問題がある。

そこで、今回、代表者らは「ネムリユスリカ」という乾燥耐性生物に着目した。ネムリユスリカはアフリカの半乾燥地帯に生息する昆虫で、その幼虫は、乾季になると動きを止め、乾眠状態になりますが、一定の水と温度があれば覚醒する（図2左）。しかも乾眠状態では、宇宙空間に一定期間（最長で2.5年）放出しても、その後再覚醒することも分かっている。この性質を利用して、生存圏が見つければ覚醒し、動き出したことを検知する、生存圏探索バイオセンサーができないかと着想した。

動きをモニタリングするには通常はカメラを用いるが、常時電力が必要となり、宇宙など電力の供給ができない場所での長期使用は現実的ではない。そこで、微細加工技術を利用した環境発電技術を用い、生物の動きによる発電を利用することで、無電力でも小さな動きを捉えられないかと考えた。特徴的な生物の動きを電気に変換し、これに対応するシグナルが入力されれば、モニタリングを開始・通信するようなシステムを構築することで必要な電力を最小限に抑え、長期的なモニタリングが可能となる。

乾燥無代謝休眠（乾眠）状態のネムリユスリカ幼虫は、水を与えると通常1時間以内に覚醒し、動き出す。ただし、この動きの振幅は1~2mm以下と小さく、これを捉えるため、幅80 μm 、隙間40 μm の櫛歯型の電極をデザインした（図2右）。電気信号は外部のデータ記録計に接続して計測・記録する。ネムリユスリカ幼虫の表面は水中で負に帯電しているため、この微小電極上でネムリユスリカ幼虫が動くと、その動きに応じて電極上の電荷が移動して、電流が発生する。この電流の変動から、幼虫の動きの周波数を測定できる。また、ネムリユスリカ幼虫は電極サイズから見れば比較的大きく、また個体差が大きいいため、集団での平均的な動きを捉える必要がある。そのため、大面積をカバーできる電極設計とし、10匹を電極上に設置した直径1cmのプールに入れる構造とした。

デバイスは、ニッケルを用いて、微小櫛歯型電極をガラス基板上でリフトオフ法により作製した。このデバイス上のプールに乾眠状態のネムリユスリカ幼虫を10匹入れ、水を入れてネムリユスリカ幼虫の動きを電気信号のデータ記録で確認した。

30 $^{\circ}\text{C}$ 、加水2時間後でデータを取得したところ、電圧の時間変化を見ると、水のみを入れた対照データに比べ、ネムリユスリカ幼虫を入れたものでは明らかに波が見えており、その電圧の振幅は約0.11mVであった。デバイスの抵抗値から計算した電流値は720nA、発電量は80pWとなった。この結果より、幼虫の動きによる発電が実証できた。電圧データがどのような周波数特徴を持っているかを示すために、高速フーリエ変換を行ったところ、画像データでの特徴と一致する1~2Hzのところにピークを持つスペクトルが得られた。以上より、今回得られた電圧は確かにネムリユスリカ幼虫の動きを捉えたものだ判断できた。次に、このデバイスを用いた環境センシングの例として、温度およびpHをモニタリングできることを実証する実験を行った。まず、映像で捉えられた温度別のネムリユスリカ幼虫の動きの大まかな違いを、デバイスを用いて的確に捉えられるかを検証した。10 $^{\circ}\text{C}$ 、20 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ の各温度の水を加えて2時間後のフーリエ変換後のデータを見ると、30 $^{\circ}\text{C}$ で全体的に値が大きくなっていることが分かった。0.2Hz以下の値はカットし、映像からネムリユスリカ幼虫の動きの周波数の上限と考えられる4Hzまでの間の周波数で積分をとり、これを「活動量」と定義し、活動量を温度ごとにプロットすると、映像からのデータと同様に30 $^{\circ}\text{C}$ で明確にピークが見られたほか、40 $^{\circ}\text{C}$ での微妙な活動量なども数値化・グラフ化できた。以上より、デバイスにより活動量を指標として評価できるとともに、温度センシングに利用できることが分かった。

本デバイスは、宇宙のみならず、地球上でも水・温度・化学状態などの検出デバイスとして環境のモニタリングや生存圏の探索への応用が期待できる

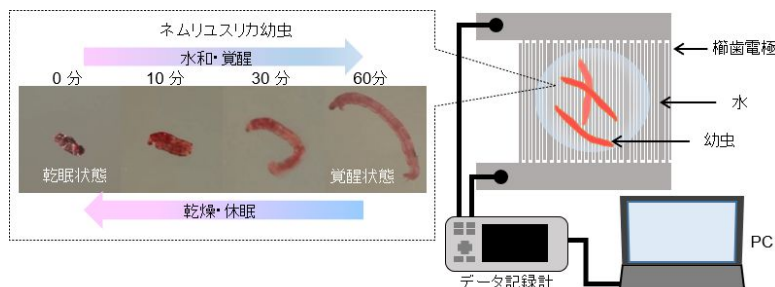


図2 覚醒したネムリユスリカ幼虫の動きを微小電極でセンシングする生存圏探索デバイス

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yo Tanaka, Doudou Ma, Satoshi Amaya, Yusufu Aishan, Yigang Shen, Shun-ichi Funano, Tao Tang, Yoichiro Hosokawa, Oleg Gusev, Takashi Okuda, Takahiro Kikawada, Yaxiaer Yalikun	4. 巻 25
2. 論文標題 Anhydrobiotic chironomid larval motion-based multi-sensing microdevice for the exploration of survivable locations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 104639 ~ 104639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isci.2022.104639	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Shun-ichi Funano, Nobuyuki Tanaka, Satoshi Amaya, Akira Hamano, Toyoki Sasakura, Yo Tanaka	4. 巻 2
2. 論文標題 Movement tracing and analysis of benthic sting ray (<i>Dasyatis akajei</i>) and electric ray (<i>Narke japonica</i>) toward seabed exploration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SN Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42452-020-03967-6	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Yo Tanaka, Satoshi Amaya, Doudou Ma, Yigang Shen, Oleg Gusev, Takahiro Kikawada, Yaxiaer Yalikun	4. 巻 1
2. 論文標題 Biosensing and power generation robots using the anhydrobiotic chironomid for space exploring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceeding of Micro Total Analysis Systems	6. 最初と最後の頁 239-240
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 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 Yo Tanaka, Satoshi Amaya, Wataru Nagafuchi, Norihiro Kamamichi, Yaxiaer Yalikun	4. 巻 1
2. 論文標題 Ion based pressure driven electric power generator using micro/nano glass porous device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceeding of Micro Total Analysis Systems	6. 最初と最後の頁 1484-1485
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 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 Yo Tanaka, Shun-ichi Funano, Yuji Noguchi, Yaxiaer Yalikun, Norihiro Kamamichi	4. 巻 9
2. 論文標題 A valve powered by earthworm muscle with both electrical and 100% chemical control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-44116-3	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Nobuyuki Tanaka, Tadahiro Yamashita, Yaxiaer Yalikun, Satoshi Amaya, Asako Sato, Viola Vogel, Yo Tanaka	4. 巻 293
2. 論文標題 An ultra-small fluid oscillation unit for pumping driven by self-organized three-dimensional bridging of pulsatile cardiomyocytes on elastic micro-piers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 256 ~ 264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2019.04.087	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 Yo Tanaka, Shun-ichi Funano, Yuji Noguchi, Yaxiaer Yalikun, Norihiro Kamamichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Earthworm muscle driven valve with both electrical and chemical controls	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of Micro Total Analysis Systems	6. 最初と最後の頁 707 ~ 709
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 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 -

1. 著者名 Yaxiaer Yalikun, Yuji Noguchi, Norihiro Kamamichi, Yo Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Earthworm muscle-tissue actuated atmospheric-operable 3D printed wheel runner	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of Micro Total Analysis Systems	6. 最初と最後の頁 1012 ~ 1014
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 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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yo Tanaka, Satoshi Amaya, Doudou Ma, Yigang Shen, Oleg Gusev, Takahiro Kikawada, Yaxiaer Yalikun
2. 発表標題 Biosensing and power generation robots using the anhydrobiotic chironomid for space exploring
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yo Tanaka, Satoshi Amaya, Wataru Nagafuchi, Norihiro Kamamichi, Yaxiaer Yalikun
2. 発表標題 Ion based pressure driven electric power generator using micro/nano glass porous device
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yo Tanaka, Shun-ichi Funano, Yuji Noguchi, Yaxiaer Yalikun, Norihiro Kamamichi
2. 発表標題 Earthworm muscle driven valve with both electrical and chemical controls
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yaxiaer Yalikun, Yuji Noguchi, Norihiro Kamamichi, Yo Tanaka
2. 発表標題 Earthworm muscle-tissue actuated atmospheric-operable 3D printed wheel runner
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

田中陽Researchmapホームページ:

<https://researchmap.jp/yo.tanaka>

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