

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18078

研究課題名(和文) 野生コウモリによる長距離音響ナビゲーションアルゴリズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of the long-distance acoustical navigation algorithm of echolocating bats in the wild

研究代表者

藤岡 慧明 (Fujioka, Emyo)

同志社大学・研究開発推進機構・特別研究員

研究者番号：00722266

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、エコーロケーション機構を有するコウモリにバイオロギング研究を応用することで、採餌のために大規模空間を移動するコウモリのナビゲーションや獲物探索の戦略について検討を行った。その結果、コウモリのバイオロギング研究の実験プロトコルを確立し、コウモリがRoute-following戦略を利用したナビゲーションや、停滞地点に行き来する飛行パターン(Foray search)によって餌場探索を効率化している可能性が示唆された。さらに、GPSデータロガーで特定したコウモリの飛行地点にてマイクロホンアレイを用いた音響計測に成功し、停滞地点にて超音波を放射して獲物探索を行っていることを見出した。

研究成果の概要(英文)：We applied bio-logging study to acoustical navigation of echolocating bats in the wild, and examined their flight and echolocation strategies for navigation and target search in the large-scale space. As a result, we established experimental protocol for the bio-logging research for bats and suggested that the bats conducted route-following strategy using sonar for the large-scale navigation. Additionally, the bats occasionally returned to the position where they stayed, suggesting that they conducted the foray search to efficiently search target prey items. On the other hand, we succeeded to measure sonar sounds emitted by bats using the microphone array system at the stay-site that was identified by the GPS data-logging experiment. The results show that the bats emitted ultrasounds and search target prey at the stay-site.

研究分野：生物音響工学

キーワード：生物ソナー 探査行動 コウモリ 音響センシング バイオロギング 数理モデル ナビゲーション 採餌行動

1. 研究開始当初の背景

物体検知や距離測定にはステレオカメラや赤外線、レーダー、超音波などのセンサ方式があり、ロボット技術等においては各センサの特徴に応じてこれらを組み合わせるのが主流である。これらの技術では環境認識を効果的に行える一方で、装置の大型化や実時間処理の困難さ、高価格化の問題点も生ずる。介護・警護用やレスキュー用のロボットなど、自律移動型ロボット技術の発展に伴い、これらの問題を解決するためのブレイクスルーが求められる。

一方で、コウモリは自ら放射した超音波のエコー情報のみから周囲環境を認識し、体長数ミリの動く飛翔昆虫を正確に定位・捕食することを実現している。このような高度なソナー機能を明らかにするために、生物ソナー研究分野では実験室内(人工環境下)での緻密な行動計測に基づいた脳神経学的なアプローチが多く成されてきた。一方で、自然環境下での野生コウモリに対する行動計測は、重要性が認識されながらも計測の困難さ(夜に飛行、行動範囲の広さ)のために、コウモリの音声の特徴を調べるといったような生態学的な側面からの研究に終始していた。近年になって、計測装置のハイスpekク化に伴い、コウモリのユニークな音響センシング戦略が明らかになってきた¹⁾。しかしながら、小規模空間の計測だけでは、音響ナビゲーションに関して限られた一面のみしか調べることができない。コウモリの音響ナビゲーションの本質を知るためには、大規模空間において繰り広げられる軌道計画およびソナー利用について計測し分析する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに大型の動物にて実施されてきたバイオリギング研究をコウモリに応用するとともに、これまでに代表者が構築したマイクロホンアレイシステムを活用することによって、コウモリの長距離軌道とソナー音声を計測し、コウモリの大規模空間における採餌のための音響ナビゲーション戦略の解明を目指す。具体的な課題として、これまでに国内では例がないコウモリのバイオリギング研究の実験プロトコルを構築し、装着して回収されたGPSロガーの軌道データから大規模ナビゲーションに用いる手がかりや、採餌場の探索戦略について検討を行った。また、バイオリギングで計測されたコウモリの座標情報を利用してマイクロホンアレイ計測を実施し、ナビゲーションとソナー利用の関係についての分析を試みた。さらに、コウモリの飛行軌跡を分析するための三次元飛行動態モデルを大規模ナビゲーション軌道の分析へ応用することを指向して、コウモリの実際の軌道を用いて、コウモリの軌道計画について検討を行った。

3. 研究の方法

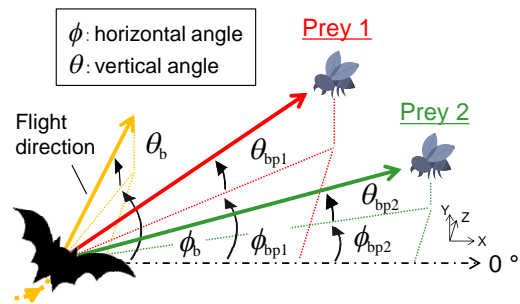


図1. コウモリの三次元飛行モデル構築のための枠組み。獲物方向 (ϕ_{bp1} , θ_{bp1} , ϕ_{bp2} , θ_{bp2}) とコウモリの飛行方向 (ϕ_b , θ_b) との角度差に応じて、コウモリの飛行方向を決定する。

長距離軌道計測

コウモリに装着するGPSデータロガーとして、GiPSy-5 (2.2 g, Technosmart, Italy) と PinPoint-50 (2.0 g, Biotrack, UK) を選定した。さらに、本期間中に開発に携わった音響GPSイベントロガー (2.5 g, ArumoTech, Japan) も使用した。このロガーは、GPS測位と同時にコウモリの音声放射タイミングを記録できる。それぞれのロガーを用いて一晩の内における行動の追跡を行った。

実験場所は、北海道苫小牧の戦争遺跡および福井県大野市の廃隧道とした。計測対象種はキクガシラコウモリで、主に蛾などを捕食し、ソナー音として約69 kHzの周波数定常音(CF音)とその前後に周波数変調音(FM音) 伴ったCF-FM音を用いる。体重は約20-30 gで、ロガーの重量が体重の10%未満となるように、スキンバンドを用いて装着を行った。ロガーの測位間隔は、ロガーのタイプに合わせて短時間(2, 3, 5 s, GiPSy-5 および音響GPS) と長時間(5, 10 分, PinPoint-50) を設定し、日没後から開始した。

数理モデリング分析

コウモリの3次元飛行軌跡の数理モデリングのための枠組みを図1に、そして構築した数理モデルを次式に示す。

$$\frac{d\phi_b(t)}{dt} = \frac{1}{\delta_\phi} [\alpha_h \sin(\phi_{bp1}(t) - \phi_b(t)) + \beta_h \sin(\phi_{bp2}(t) - \phi_b(t))], \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_b(t)}{dt} = \frac{1}{\delta_\theta} [\alpha_v \sin(\theta_{bp1}(t) - \theta_b(t)) + \beta_v \sin(\theta_{bp2}(t) - \theta_b(t))]. \quad (2)$$

このモデルでは、コウモリは自身の飛行方向を獲物方向へ変化させることを基本的な枠組みとし、パラメータとなる α , β の大きさの割合($\alpha^2 + \beta^2 = 1$)に応じて、飛行方向をどちらの標的にどれだけの割合で変化させるかが決まる。さらにこれらのパラメータの逆正接を γ と定義し、このパラメータを実験データから推定することで、コウモリの2匹の獲物に対する注意の割合を分析し、数値シミュレーションとの比較検討を行った。実験データは、マイクロホンアレイシステムを用いて計測したアブラコウモリの獲物捕食時の飛行軌跡を用いた。

4. 研究成果

長距離軌道計測

北海道の実験場所では、計7個のGPSロガー（GiPSy-5が5個、PinPoint-50が2個）の回収に成功し、国内で初めてコウモリの大規模ナビゲーション軌道の計測に成功した。ねぐらを出たコウモリはほぼ同じ方向に4-5 m/sの速さで移動し、最長30 kmの距離を、途中で停滞を繰り返しながら移動していた（図2）。また、音響GPSロガーのプロトタイプを1個回収することにも成功した。この回収データからは、コウモリは移動時よりもむしろ停滞時に多く音声を放射していることが分かり（図3）、停滞時に獲物を探索し、採餌を行っている可能性が強く示唆された。そこでコウモリが停滞した地点にてマイクロホンアレイを用いた音響計測を試みたが、コウモリの出現はなかった。

移動時におけるコウモリは、森の中を選好的に移動しながら、その中で道路に沿って飛行している場面がよく見られた。これより、大規模空間のナビゲーションの際には、特定の経路を追従するRoute-following戦略²⁾を利用している可能性が示唆された。また、停滞した地点に何度も戻る飛行パターンが数回観測された（図4）。このような移動パターンはForay searchと呼ばれ、標的が偏って分布した際には効率よく探索できることが報告されている³⁾。これより、コウモリもForay searchによって効率的に獲物探索を行っている可能性が考えられる。

福井県における観測地では、計6個のロガー（全てPinPoint-50）の回収に成功した。これらのデータからは、コウモリが川沿いを移動し、川沿いの林などの茂みにて多く停滞していることが分かった（図5）。そこでこの停滞地点を採餌場所と考え、マイクロホンアレイを用いてコウモリのソナー音声の計測を試み、そして成功した（図6）。キクガシラコウモリは木の枝から飛び立って獲物を捕獲して元の場所に戻るということが報告されている⁴⁾。よってこの計測によって停滞地点にてコウモリが獲物探索を行っていることが確かめられた。今後、このようなバイオロギングとマイクロホンアレイのハイブリッド計測によって、小規模から大規模空間における標的へのナビゲーションとその際の音響

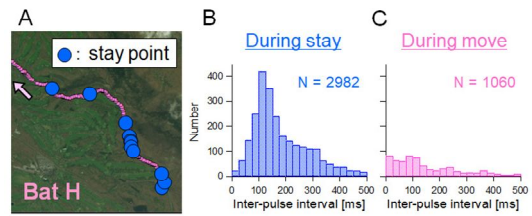


図3. 回収した音響GPSイベントロガーの軌道データ(A)と、停滞時(B)および移動時(C)における放射タイミングの時間間隔の頻度分布。双方で分布が大きく異なり、停滞時の方が移動時に比べて放射パルス数が多いことが分かる。

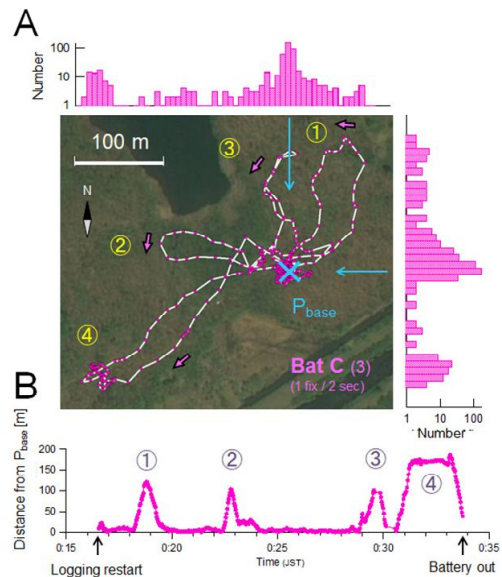


図4. 移動後に元の停滞地点に戻る飛行パターン。(A) 飛行軌跡と座標の頻度分布。(B) 基点(P_{base})からの距離の時間変化。

センシングについて詳しく調べる予定である。音響GPSイベントロガーについては、コウモリの獲物捕食パターンが計測できるように改良中であり、これが回収できるようになれば、コウモリのナビゲーションと最適採餌理論との関連性など、コウモリの効率的な採餌のための音響センシング戦略について新たな知見が得られることが期待できる。

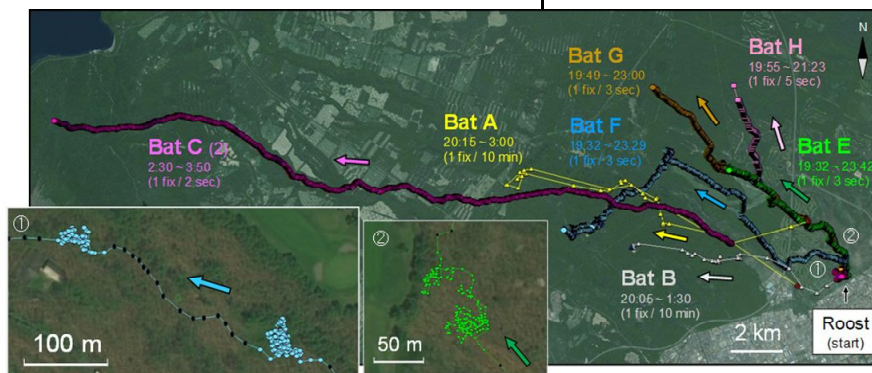


図2. コウモリの大規模飛行軌跡。拡大図(、地点)より、道中で停滞を繰り返していることが分かる。

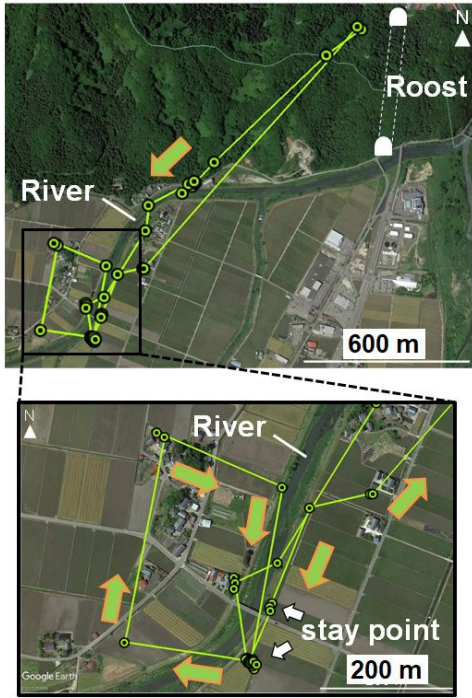


図5．川沿いを飛行して停滞するコウモリの飛行軌跡。測位間隔は3分。

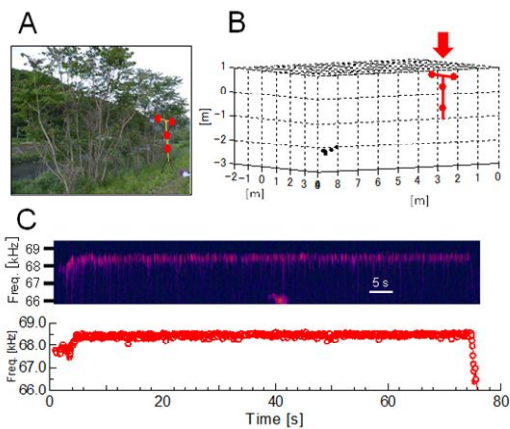


図6．コウモリのマイクロホンアレイ計測。(A) GPS ロガーで特定したコウモリの停滞地点。図中赤丸がマイクロホン。(B) コウモリがソナー音を放射した三次元座標(図中黒丸)。(C) 放射パルスのスペクトログラム(上段)と周波数の時系列変化(下段)。

数理モデリング分析

マイクロホンアレイシステムを用いて計測したコウモリの軌道データからパラメータを推定した結果、長い時間間隔で2匹の獲物を捕食した際の飛行軌跡は、ほぼ直近の獲物(Prey 1)に対する注意にのみ基づき軌道が計画されていることが分かった(図7A, B)。一方で、短い時間間隔で2匹の獲物を捕食した際には、コウモリが目の前の獲物だけでなく次の獲物にも飛行の注意を分散させていること(図7C, D)そして捕食成功率を調べ

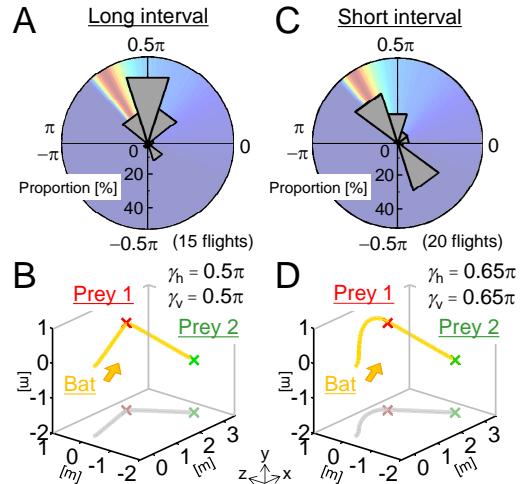


図7．数理モデルを用いた飛行注意パラメータ γ の推定。捕食時間間隔が長い軌道から推定されたパラメータ(A)では、直近の獲物に直線的に接近する(B、 $\gamma = 0.5\pi$ のとき)。一方で、捕食時間間隔が短い軌道から推定されたパラメータ(C)では、次の獲物に向かうように直近の獲物にアタックする(D、 $\gamma = 0.65\pi$ のとき)

た数値シミュレーションにおける最適な軌道を選択して飛行していることが明らかとなった(図7C、第二象限の赤色部分)。このシミュレーションでは、獲物を見失うことなく2匹の獲物を捕食出来た場合に成功としている。よって、コウモリは直近の獲物とその次の獲物をソナーで認識しやすいルートを選択しているという仮説が得られた。本研究によって、コウモリの飛行動態分析のための数理モデルを整備すると同時に、コウモリの注意分散による“先読み”音響ナビゲーションを明らかにすることが出来た(発表論文5)。この成果は、ドローンなどのアクティブセンシングを行う自律移動ロボット等への応用研究が期待できる。

また、上記の仮説を検証するためにビームパターンを調べた野外実験からは、コウモリが獲物捕食直前にビームの指向性(音の視野)を広げていること(発表論文2)そして捕食時間間隔が短い際には直近の獲物とその次の獲物を音の視野の中に入れながら接近していることが分かった(発表論文3)。今後は、本研究で構築・整備した数理モデルを応用することで、小規模空間における軌道の最適性や、大規模ナビゲーション軌道における意思決定について分析を進めていく予定である。

【引用文献】

- 1) Fujioka, E., Aihara, I., Watanabe, S., Sumiya, M., Hiryu, S., Simmons, J.A., Riquimaroux, H. and Watanabe, Y. (2014). Rapid shifts of sonar attention by *Pipistrellus abramus* during natural hunting for multiple prey. J.

Acoust. Soc. Am. 136(6), 3389-3400.

- 2) Geva-Sagiv, M., Las, L., Yovel, Y., and Ulanovsky, N. (2015). Spatial cognition in bats and rats: from sensory acquisition to multiscale maps and navigation. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(2), 94-108.
- 3) Conradt, L., Zollner, P. A., Roper, T. J., Frank, K., and Thomas, C. D. (2003). Foray search: an effective systematic dispersal strategy in fragmented landscapes. *The American Naturalist*, 161(6), 905-915.
- 4) Schnitzler, H. U., Hackbarth, H., Heilmann, U., and Herbert, H. (1985). Echolocation behavior of rufous horseshoe bats hunting for insects in the flycatcher-style. *Journal of Comparative Physiology A*, 157(1), 39-46.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

- 1) 山田恭史, 藤岡慧明, 飛龍志津子, "コウモリの音響ナビゲーション - 動的変化の仕組みからロボット制御などへの応用探る -", "生物の科学 遺伝", Vol. 71, No. 6 pp. 526-532, Nov 1, 2017. 査読無し .
- 2) Kazuya Motoi, Miwa Sumiya, Emyo Fujioka and Shizuko Hiryu, "Three-dimensional sonar beam-width expansion by Japanese house bats (*Pipistrellus abramus*) during natural foraging, " *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, Issue 5, pp. EL439-EL444, 2017. (DOI:10.1121/1.4981934) 査読有り .
- 3) Miwa Sumiya, Emyo Fujioka, Kazuya Motoi, Masaru Kondo and Shizuko Hiryu, "Coordinated Control of Acoustical Field of View and Flight in Three-Dimensional Space for Consecutive Capture by Echolocating Bats during Natural Foraging," *PLoS ONE*, 12(1): e0169995, 2017. (DOI: 10.1371/journal.pone.0169995) 査読有り .
- 4) 藤岡慧明, "野生コウモリによる"先を読む"超音波センシング戦略 (Ultrasound Sensing Strategy of Wild Echolocating Bats Using Future-target Information)," *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.* Vol. 44 No. 1, pp.1-5, Jan. 2017. 査読無し .
- 5) Emyo Fujioka, Ikkyu Aihara, Miwa Sumiya, Kazuyuki Aihara and Shizuko Hiryu, "Echolocating bats use future-target information for optimal foraging," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol.113, no.17, pp.4848-4852, 2016. (DOI:10.1073/pnas.1515091113) 査読有り .
- 6) Miwa Sumiya, Emyo Fujioka, Yoshiaki Watanabe, Shizuko Hiryu, Ikkyu Aihara, "Mathematical modeling of flight and acoustic dynamics of an echolocating bat during multiple-prey pursuit," *Proceedings of the International symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA) 2015*, pp.369-372, 2015. 査読有り .

[学会発表](計18件)

- 1) Emyo Fujioka, Shizuko Hiryu, "Microphone-array measurement and mathematical analysis of the acoustic navigation behavior by bats during natural foraging," 65th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, Sapporo Convention Center, Sapporo, March 2018.
- 2) Emyo Fujioka, Fumiya Hamai, Miwa Sumiya, Kazuya Motoi, Dai Fukui, Kohta I. Kobayashi and Shizuko Hiryu, "Echolocation and flight strategies of aerial-feeding bats during natural foraging," 174th Meeting of the Acoustical Society of America, J. Acoust. Soc. Am., Vol.142, No.4, p.2495, New Orleans, Louisiana / USA, Dec 2017.
- 3) Tomohiro Ujino, Dai Fukui, Ken Yoda, Shizuko Hiryu and Emyo Fujioka, "Analysis of navigation strategy by echolocating bats across small to large spaces, Measurement of echolocation and flight behavior of bats using GPS data-loggers and microphone-array system," The 6th International Bio-Logging Science Symposium, Bodensee Forum Konstanz, Konstanz/Germany, September 2017.
- 4) 藤岡慧明, 氏野友裕, 福井大, 依田憲, 飛龍志津子, "野生コウモリの大規模ナビゲーション戦略の分析 環境情報の利用戦略と標的探索戦略について (Analysis of the Large-scale Navigation Strategy of Wild Echolocating Bats -Strategies to utilize surrounding information and to search target prey-), "ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, ビッグパレットふくしま, 2017年5月 .
- 5) 藤岡慧明, "野生コウモリから学ぶ音響ナビゲーションアルゴリズム; Acoustic

- navigation algorithm learned from echolocating bats in the wild," 豊田中央研究所講演会, 豊田中央研究所, 2017年7月.
- 6) 氏野友裕, 中井元貴, 藤岡慧明, 福井大, 依田憲, 飛龍志津子, "野生コウモリを追跡! GPSロガーとマイクロホンアレイからみた音響探餌行動戦略," 日本動物行動関連学会 2017(Koudou2017), 東京大学 駒場キャンパス, 2017年8月.
 - 7) 氏野友裕, 中井元貴, 藤岡慧明, 依田憲, 福井大, 飛龍志津子, "GPS データロガーとマイクロホンアレイを組み合わせた野生コウモリの探餌飛行戦略の分析," 第13回日本バイオロギング研究会シンポジウム, 福山大学宮地茂記念館, 2017年11月.
 - 8) 中井元貴, 氏野友裕, 藤岡慧明, 依田憲, 福井大, 飛龍志津子, "バイオロギング手法に基づいた野生コウモリの音響ナビゲーション戦略の検討," 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 仙台国際センター, 2017年12月.
 - 9) 氏野友裕, 藤岡慧明, 福井大, 飛龍志津子, "コウモリの大規模・小規模空間における探餌行動時のソナー戦略の分析 ~ GPS イベントロガーとマイクロホンアレイを用いた動態音響計測 ~," 日本生態学会第64回全国大会, 早稲田大学, 2017年3月.
 - 10) 藤岡慧明, "小規模・大規模空間におけるコウモリの獲物探索ルートに関する実験的・数理的検討," 第12回日本バイオロギング研究会シンポジウム, 同志社大学寒梅館, 2016年12月.
 - 11) 藤岡慧明, 飛龍志津子, "野生コウモリから学ぶ音響ナビゲーションアルゴリズム," 第5回ネイチャー・インダストリー・アワード, 大阪科学技術センター, 2016年11月.
 - 12) 藤岡慧明, "コウモリの広帯域音波の利用とその探餌戦略," 海洋音響学会 2016年度第2回シンポジウム ~ 広帯域海洋音響探査技術シンポジウム ~, 東京工業大学蔵前会館ロイヤルブルーホール, 2016年11月.
 - 13) Shizuko Hiryu, Emyo Fujioka and Kazuma Hase, "Tracking from small to large scale navigation of bats," International Bat Research Conference, Gateway Hotel - Umhlanga, Durban/South Africa, July 2016.
 - 14) Emyo Fujioka, Ikkyu Aihara, Miwa Sumiya, Kazuyuki Aihara and Shizuko Hiryu, "Wild echolocating bats plan their flight paths using future-target information," International Bat Research Conference, Gateway Hotel - Umhlanga, Durban/South Africa, July 2016.
 - 15) 藤岡慧明, "Echolocating bats use future-target information for optimal foraging," 海洋音響学会 2016年談話会・シンポジウム, 2016年6月.
 - 16) Emyo Fujioka, Koki Yoshimura, Kazuya Motoi, Dai Fukui and Shizuko Hiryu, "GPS tracking of large-scale navigation behavior by bats, *Rhinolophus ferrumequinum nippon*, combined with elaborate acoustic measurement using microphone array for small-scale navigation," The 2nd annual meeting of the Society for Bioacoustics, Ohashi Campus, Kyusyu University, Fukuoka/Japan, December 2015.
 - 17) Miwa Sumiya, Emyo Fujioka, Yoshiaki Watanabe, Shizuko Hiryu, Ikkyu Aihara, "Mathematical modeling of flight and acoustic dynamics of an echolocating bat during multiple-prey pursuit," International symposium on Nonlinear Theory and its Applications 2015, Kowloon, Hong Kong, China, December 2015.
 - 18) 吉村洸基, 本居和也, 近藤大, 藤岡慧明, 福井大, 飛龍志津子, "GPS データロガーとマイクロホンアレイを用いたコウモリの大規模ナビゲーション行動の計測," 第11回日本バイオロギング研究会シンポジウム, 長岡技術科学大学, 2015年10月.
- 〔その他〕
同志社大学プレスリリース
<https://www.doshisha.ac.jp/news/2016/0412/news-detail-3325.html>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
藤岡慧明 (EMYO FUJIOKA)
同志社大学・研究開発推進機構・特別研究員
研究者番号: 00722266