

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82708

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02269

研究課題名（和文）地磁気マップを用いた深海性生物の位置測位手法の開発と回遊生態研究への応用

研究課題名（英文）Development of the estimation method of geographical location of marine organisms by using geomagnetic and gravity sensors

研究代表者

奥山 隼一（Okuyama, Junichi）

国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産技術研究所(長崎)・主任研究員

研究者番号：80452316

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では地磁気・重力センサ情報を用いて、海洋生物の位置推定手法を開発することを目的とした。はじめに小型記録計を開発した。次に、記録計に内蔵される地磁気・重力センサの測定精度を現場実験を通じて検証し、位置の推定には厳密な地磁気センサの校正や温度による測定値のドリフトを補正する必要があることを明らかにした。また、これらを事前に補正することで、産卵期間中のアカウミガメの滞在位置の推定が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では地磁気と重力というこれまで用いられてこなかったセンサ情報を用いて、今まで成しえなかった「深海性生物の位置測位」を実現するための手法を開発した。そのために地磁気・重力を長期間記録できる小型記録計を開発し、記録データから位置を推定するアルゴリズムを開発し、位置推定の評価を行った。今後、本手法を深海性水産資源に適用することで、位置推定の実現ならびに回遊生態の解明へ資することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study developed the estimation method of geographical location of marine organisms by using the geomagnetic and gravity sensors equipped with animal-borne data loggers. We developed micro data logger that can record geomagnetic and gravity data for longer period. Through the several experiments on the nesting loggerhead turtles, we figured out the needs of strict corrections of geomagnetic sensor, and also of data correction of geomagnetic sensor drifted by water temperature to achieve the estimation of geographical location of loggerhead turtles with sufficient accuracy.

研究分野：海洋生物行動情報学

キーワード：バイオロギング 深海性水産資源 位置測位 地磁気 重力 加速度 照度 アカウミガメ

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

水産資源の持続的な保護・管理を実現する上で、対象生物種の生態、特に生息域や移動・回遊経路に関する情報は必要不可欠である。キンメダイ、外洋性イカ類、スケトウダラ、ハマダイなどを代表として、光の届かない深海に生息する水産生物の多くは重要な資源として利用されているにも拘わらず、その移動・回遊には不明な点が多い。この理由として、深海性生物に対しての効果的な位置測位手法が確立されていないという点が挙げられる。現在、主に用いられている標識放流・再捕法では、放流地点と採捕地点の2点のみの位置情報しかわからず、その間どのように移動したのかは明らかにできない。また再捕率も低いため情報を得る確実性が低い。顕著な例として、ニホンウナギは衛星通信対応型浮上式深度記録計により、マリアナ海嶺への産卵回遊時に 200m~600m の深海を移動することが明らかにしたが、放流地点と記録計の浮上した地点の位置しかわからなかったため、水平的な回遊経路の解明には至っていない(Manabe et al. 2011, Mar. Ecol. Prog. Ser.)。このため、深海性生物の移動・回遊生態の解明には深海における位置を測位する手法の開発が喫緊の課題となっている。

生物の位置計測を行う場合、陸上においては GPS (Global Positioning System)による位置計測 (正確度: <10m) が可能である。一方、海水中では電波はすぐに減衰するため、GPS を用いた位置計測は肺呼吸のため海面に浮上する海生哺乳類やウミガメ類を除いて不可能である。このため広域移動を行う魚類の位置計測として現在普及している方法は、照度・海面水温を用いた位置推定である。これは生物が経験する照度から滞在環境の南中時刻、日照時間を算出し、それに合致する緯度・経度を推定した上で、さらに生物の表層での経験水温とリモートセンシング等により測位した海面水温との一致度をもとに補正する手法である。しかし、光の届かない深海域において本手法は適用できないため、深海性生物の位置測位はこれまで実現しなかった(狭い範囲を追跡するテレメトリー手法は除く)。

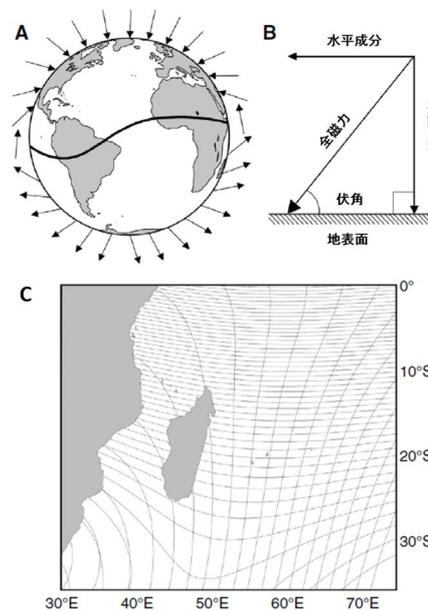


図 1. A. 磁力線の方向。B. 地磁気の各要素。C. 伏角(東西)と全磁力強度(南北)のモザイク図。2 要素だけでもある程度、位置を特定できる。(Lohmann et al. 2007 を改変)

### 2. 研究の目的

本研究は、これまで成しえなかった「深海性生物の位置測位」を実現し、それを応用して深海性水産魚種の回遊生態解明に寄与することを目的とする。これまで生物の位置測位に利用されてこなかった地磁気・重力情報を用いることで深海における生物の位置推定を実現する。そのために地磁気・重力を長期間記録できる記録計を開発し、記録データから位置を推定するアルゴリズムを開発する。次いで実証実験として、アカウミガメを用い GPS との比較により地磁気・重力による位置測位の正確度・精度評価を行う。最後に応用研究として深海性生物の回遊生態の解明に取り組む。

位置推定の理論は以下の通りである。地球上の南磁極から北磁極を走る地磁気は、伏角、磁力強度(全磁力、水平成分、鉛直成分)の要素に分けることができる(図 1AB)。これら要素は地球の磁極に沿って等しく変遷しないという特徴を有しているため、各要素の等値線を重ね合わせるとモザイク状の地図を作製することができる(図 1C)。このため、生物が経験する環境の地磁気各要素を記録しておくことで、おおまかな滞在位置を推定することができる。しかし地磁気センサ単体で生物周辺の地磁気成分を計測した場合、記録計は対象生物に固定されているため生物の体軸に対する測位になってしまう。このため体軸が変化した場合には、地表面に対しての伏角が測定できない(図 2)。そこで三軸加速度(重力)センサを併用して重力方向を検出し、地磁気センサの測位方向を三次元的に補正することで対象生物が滞在する地磁気伏角、全磁力(水平・鉛直成分)を測定することを可能にする。

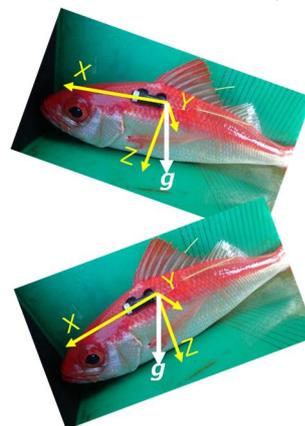


図 2. 魚に固定した記録計における三軸地磁気の測位軸(XYZ)と重力方向(g)。魚が傾くと地磁気の測位軸も傾くが、重力方向は常に一定。

### 3. 研究の方法

#### (1). GPS データを評価基準とした海洋における地磁気・重力位置推定法の正確度・精度評価

地磁気・重力による位置推定方法の正確度・精度を評価するには、真値と比較する必要がある。また、深海域における磁場特性は局所的に乱れることが知られている（例：磁性体や海底火山の存在）。このため、汎用的な位置測位を実現するためには、実海域にて位置推定の正確度・精度を評価する必要がある。海洋での高精度位置測位は GPS で実現できる。このため評価をおこなうモデル生物は、地磁気・重力と GPS 両測器による位置測位が可能であり、かつ広域移動を行うウミガメ類が最適である。本研究では鹿児島県沖永良部島で産卵するアカウミガメを対象に、地磁気・重力記録計と GPS 記録計(正確度<30m)を背甲に装着し放流した(図3)。アカウミガメは海中に潜水しつつも呼吸のために海面に浮上する。各記録計は、海中において地磁気・重力情報を記録し、海面において GPS による位置情報を記録する。沖永良部島で産卵するアカウミガメは、産卵期に約 12 日間隔で繰り返し産卵を行う。このため、測器を装着・放流した次の回の産卵時に再び当該個体を再捕し、測器を回収した。これにより、産卵と産卵の間の期間(産卵間期)における位置情報の推定を行った。

実験は 2018 年に予備実験として 2 個体に装着を行い、地磁気・重力のセンサ情報がどのような条件の時にどのように変動するのかをテストした。地磁気の測定テストには、携帯型磁力計(MTI 社製) 地磁気シールドボックス、消磁器を用いた。2019 年に 3 個体を対象として、GPS 記録計と地磁気・重力記録計を装着して供試個体を放流した。2020 年にも改善した測器を用いて調査を計画していたが、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、沖永良部島における現地調査は中止した。

本研究で用いた測器としては、GPS 記録計は Wildlife Computers 社製 Mk10-F、もしくは SMRU 社製 GPS-SRDL を、加速度・重力記録計としては、Little Leonard 社製 3MPD3GT、Bio-logging Solutions 社製 LagLow、もしくは CTL 社製 G6a+ と Star Oddi 社製 DST-magnetic を併用したものをを用いた。記録計の製造業者間による推定値の比較も行った。

記録した地磁気・重力データから伏角、アカウミガメが経験した磁力強度(全磁力、水平成分、鉛直成分)を算出し、アメリカ NOAA の National centers for environmental information (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml>)において公開されている地磁気各要素のマップと照合することで、条件を満たす緯度・経度(NOAA の地磁気マップでは最小 0.01 度の解像度)を算出し、位置を推定した。



図 3. GPS 記録計と地磁気・重力記録計を装着したアカウミガメ産卵個体

#### (2). 深海性魚類を対象とした位置測位の実証試験

上記(1)により開発した位置測位手法を深海性魚類に適用するため、実証実験を計画した。対象としては、高度移動性の大型回遊魚であること、漁業による記録計の高い再捕率が望めること、従来の位置推定手法である照度・水温による位置推定が可能であること(Furukawa et al. 2020)、かつ 200 m 以深に潜水するため照度による位置推定に一部限界があるブリを対象に選定した。

2021 年、2022 年にそれぞれブリを用いた実証試験を計画していたが、新型コロナウイルス感染拡大に伴う半導体不足に起因するブリ用記録計の製造の大幅な遅延、現地での感染拡大を回避するための試験の中止、などの影響を受け、本科研費の研究期間においては試験の実施には至らなかった。

### 4. 研究成果

#### (1). 地磁気センサの測定値の正確度・精度と変動条件

地磁気センサを搭載した記録計の測定値の正確度・精度と変動条件を調査した。また、各製造業者の記録計の比較を行った。この結果、どの製造業者の記録計においても、また同一業者の製品間においても測位のズレが大きいことが明らかになった。また、環境温度によって測定値のドリフトが起こることが明らかになった。このため、地磁気情報を用いて位置測位を実現するためには、海洋生物への測器装着前に、厳密な校正と水温による測定値のドリフト特性を明らかにしておく必要があることが明らかになった。

#### (2). 産卵間期中のアカウミガメの位置・行動パターン

沖永良部島で産卵するアカウミガメに装着した GPS 記録計ならびに地磁気・重力記録計を述

べ4台回収し、GPS情報から産卵間期中のアカウミガメの滞在位置、ならびに付随する深度・加速度情報から、アカウミガメの行動パターンを明らかにした。実験の結果、いずれのアカウミガメも産卵間期中は、産卵した砂浜の地先に常時滞在し、ほとんどの時間を水深20mほどの海底でじっとしながら休息していることが明らかになった。産卵間期中のアカウミガメは次回の産卵に備え、卵が体内で成熟するまで余分なエネルギーを消費しないように休息をメインとした行動戦略をとっていると考えられる。

### (3). 地磁気・重力情報を用いたアカウミガメの位置推定

上記(1)の通り、地磁気センサによる測位データを位置推定に利用するには、厳密な校正が必要であることが2018年の試験にて明らかになった。このため、2019年に実施した実験では使用する測器の厳密な校正、ならびに水温ドリフト特性を把握した上で、実験を実施した。実験の結果、アカウミガメ3個体のうち2個体から地磁気・重力記録計ならびにGPS記録計を回収した。

地磁気・重力センサのデータを分析した結果、測定された地磁気データは概ね現地の地磁気全磁力、伏角の値に近い値であった。しかし、一秒間隔で記録される一回一回の測定において、重力(3軸加速度)センサによるアカウミガメの姿勢角の推定にわずかなズレが生じていることによって、それを用いて推定する位置にもズレが見られることが明らかになった。これは、地磁気・重力記録計を装着する際に、アカウミガメに対して測器を厳密に水平に装着できていなかったことに起因する問題であるが、これを現場実験の際に厳密に実施することは現実的ではなく、将来的な深海性魚類を用いた実証試験においても同様に現実的ではないと考えられる。このため、位置測位に用いるデータセットについて検討したところ、10潜水分(2~3時間)の3軸加速度(重力)データの重心を取ることで、真値との位置のズレを最小化できることが明らかになった。本手法により、地磁気・重力情報を用いてアカウミガメの位置推定を実現できたと考えられる(図4)。今後、本技術を用いて、深海性水産資源の位置推定の実現、ならびに回遊生態の解明が期待される。

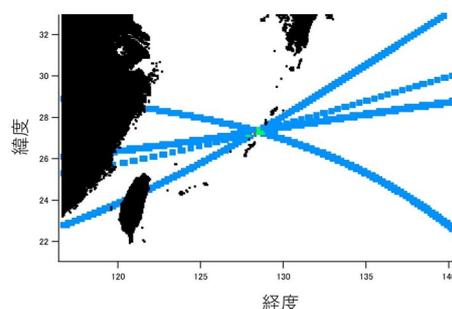


図4. 地磁気・重力情報に基づく沖永良部島で産卵するアカウミガメ産卵間期中の滞在位置。各地磁気成分の等値線(青線)が交わるところが推定位置。

#### <引用文献>

Furukawa, S., Kozuka, A., Tsuji, T., Kubota, H. (2020). Horizontal and vertical movement of yellowtails *Seriola quinqueradiata* during summer to early winter recorded by archival tags in the northeastern Japan Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 636, 139-156.

Lohmann, K. J., Lohmann, C. M., Putman, N. F. (2007). Magnetic maps in animals: nature's GPS. *Journal of Experimental Biology*, 210(21), 3697-3705.

Manabe, R., Aoyama, J., Watanabe, K., Kawai, M., Miller, M. J., Tsukamoto, K. (2011). First observations of the oceanic migration of Japanese eel, from pop-up archival transmitting tags. *Marine Ecology Progress Series*, 437, 229-240.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Junichi Okuyama, Hirotooshi Shishidou, Takeshi Hayashibara	4. 巻 85
2. 論文標題 Post-release horizontal and vertical behavior and philopatry of deepwater longtail red snapper <i>Etelis coruscans</i> around a bank	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fisheries Science	6. 最初と最後の頁 361-368
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12562-019-01287-2	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 Kishida Narumi, Okuyama Junichi, Arita Mamiko, Kume Natsuki, Fujita Kento, Nishizawa Hideaki, Torisawa Shinsuke, Mitsunaga Yasushi	4. 巻 10
2. 論文標題 A validation of abstracted dive profiles relayed via the Argos satellite system: a case study of a loggerhead turtle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Animal Biotelemetry	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40317-022-00292-0	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 Okuyama Junichi, Watabe Akemi, Takuma Shunichi, Tanaka Kentaro, Shirai Kotaro, Murakami Sugihara Naoko, Arita Mamiko, Fujita Kento, Nishizawa Hideaki, Narazaki Tomoko, Yamashita Yoshiya, Kameda Kazunari	4. 巻 28
2. 論文標題 Latitudinal cline in the foraging dichotomy of loggerhead sea turtles reveals the importance of East China Sea for priority conservation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Diversity and Distributions	6. 最初と最後の頁 1568 ~ 1581
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/ddi.13531	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 Fujita K, Nishizawa H, Okuyama J, Arita M, Takuma S, Narazaki T, Watabe A	4. 巻 707
2. 論文標題 Polymorphic foraging tactics in a marine reptile: insight from horizontal movement and dive behavior analyses	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Marine Ecology Progress Series	6. 最初と最後の頁 115 ~ 129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3354/meps14258	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 0件）

1. 発表者名 有田蒔実子、奥山 隼一、西澤秀明、藤田健登、細井彩香、光永靖
2. 発表標題 沖永良部島で産卵するアカウミガメの産卵間期の潜水行動
3. 学会等名 日本ウミガメ会議みなべ大会(第30回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有田蒔実子、奥山 隼一、藤田健登、久米菜月、西澤秀明、光永靖
2. 発表標題 アカウミガメは産卵期間中に本当に休んでいるか？
3. 学会等名 第29回日本ウミガメ会議 与論島大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田健登、西澤秀明、奥山 隼一、久米菜月、有田蒔実子、檜崎友子、詫間竣一、渡部明美
2. 発表標題 アカウミガメの採餌回遊における海流の影響
3. 学会等名 第29回日本ウミガメ会議 与論島大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥山隼一
2. 発表標題 ハマダイの瀬周辺の水平・鉛直行動と定住性
3. 学会等名 平成30年度沖縄県水産研究機関・西海区水研垂熱帯研究センター交流会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 黒部ゆみ、奥山隼一	4. 発行年 2022年
2. 出版社 偕成社	5. 総ページ数 40
3. 書名 海に生きる！ ウミガメの花子	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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