

【技術ノート】
(Technical Report)

中海におけるアカエイを用いた バイオテレメトリの基礎実験

徳岡隆夫¹⁾・西村清和²⁾・村上英幸³⁾

Basic experiment of acoustic biotelemetry for monitoring of swimming behaviour of *Dasyatis akajei* in Lake Nakaumi

Takao Tokuoka¹⁾, Kiyokazu Nishimura²⁾ and Hideyuki Murakami³⁾

Abstract: We observed swimming behaviour of the target fish (*Dasyatis akajei*) using a miniature acousitic pinger and an acoustic animal position detection system (AAPDS) based on SSBL (Super Short Base-Line) system in Lake Nakaumi. The pinger is attached to the head of the target and AAPDS is installed in a ship. The pinger generates a sound wave of 20kHz in every six seconds. The AAPDS measures range and direction of sound. The position (X, Y) of the target on the earth is decided by the data of the range and direction between the target and the ship, and ship position and heading. The depth (Z) of the target is obtained by a depth gauge installed in the pinger. In this experiment, we observed that the target swam in about 2.3km/h (max.) and in through the middle depths of water.

Keywords: biotelemetry, *Dasyatis akajei*, Lake Nakaumi, coastal lagoon, pinger, SSBL

はじめに

海洋生物の行動や、その生理および環境情報の遠隔測定を海洋生物テレメトリ (バイオテレメトリ) という (海洋音響研究会, 1984)。テレメトリの方式には大きく分けて電波テレメトリ方式と超音波テレメトリ方式がある。水中を遊泳する生物の追跡では、水中での減衰の大きい電波は利用できないので、もっぱら超音波を用いる。これまでバイオテレメトリにおいては、おもに外洋を回遊する生物を対象とってきたが、本実験では、閉鎖性水域である汽水湖の生

物を対象として試みたものである。海と陸の接点にある汽水湖は、外洋へ下り、あるいは川へと溯上するさまざまな生物にとって重要な生活の場であり、海への出口が狭いことから対象として捕捉しやすいことが、その理由である。また、汽水湖では海から流入する海水と川からの淡水が容易には混じり合わないことから塩分躍層が形成され、夏場を中心に下位の高塩分層は底層で酸素が消費されることによって貧(無)酸素化し、そこに棲む生物のみならず、環境へ大きな悪影響を与える。この貧酸素水塊の挙動の解明に水中を自由に泳ぎ回る生物の動きを把握するこ

1) 島根大学総合理工学部

Faculty of Science and Technology, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

2) 地質調査所

Marine Geology Department, Geological Survey of Japan, Tsukuba 305-8567, JAPAN

3) 海洋電子株式会社

Kaiyo-Denshi Co., Ltd., 2-17-3 Kasumigasekikita, Kawagoe 350-1109, JAPAN

とによって明らかにできないか、環境センサとして利用できないかというのが、この試みのもう一つの動機である(この場合、このような生物は貧酸素水塊をさけて行動する筈であることを前提としている)。対象の生物としてアカエイを選んだ。魚類図鑑によると、アカエイ (*Dasyatis akajei*, 図1) は本州中部から台湾・中国に分布し、冬はやや深いところに、5~8月の生殖期には内湾の砂底で胎児を産み、稚魚は河口に群集することもあり、尾部に1個、まれに2~3個のトゲをもち、刺されると激しく痛む、煮付けなどとしてエイ類中でもっとも味がよく、夏に美味、と記述されている。中海では幼魚が多いが、ときには成魚も入り、漁獲時に胎児をうみこぼすことがあるとのことである。かつては中海は幼魚の生育場としての機能が強く、現在は激減したがそれほどまれではないこと、ときには宍道湖まで溯上し、また堤防でほとんど仕切られた本庄水域にも入り込むこと、冬に近付くと外洋に出て、春先には戻ってくる、またなかには中海の深みに留まるものもあるとのことである。アカエイを選定した理由は、体長が大きく発信器を取りつけやすいこと、動きが比較的ゆっくりしていて追跡が容易であると想定されること、湖底近くに生息することが多いと推定されることから、貧酸素水塊の挙動を知るには格好の生物であると考えたことによる。

実験に使用したアカエイは中海漁業協同組合の永島 年氏に依頼して、実験の行われる1週間程まえに意宇川河口沖合いで、延縄により捕獲し、中海漁協まえの港の生け簀に入れておいたものである。

実験システムの概要

この実験では、水中を遊泳する生物の三次元的な位置の捕捉をおこなう。平面的な位置 (X, Y) は対象生物に取り付けたピンガから発せられ、追跡船で受信するまでの音波の伝搬時間およびその到来方向を測定する。ピンガからは6秒間隔で20kHzの音波が発信される。音波の伝搬時間をT、音速をVとすると、ピンガと追跡船の受波器までの直距離Rは、 $R=VT$ で算出できる。水中での音速Vはおおよそ1500m/sである。また深度(Z)はピンガに圧力式の深度計を設け、その測定値の情報を発信音波にのせて(パルス間隔変調)、受信後解析する。ピンガは内蔵のリチウム電池で作動し、約50時間使用できる。

図2に生物位置検知システムの構成を示す。本システムは、対象生物に装着したピンガ(同期ピンガ)、追



図1. アカエイ.

Fig. 1. Photograph of the Stingray.

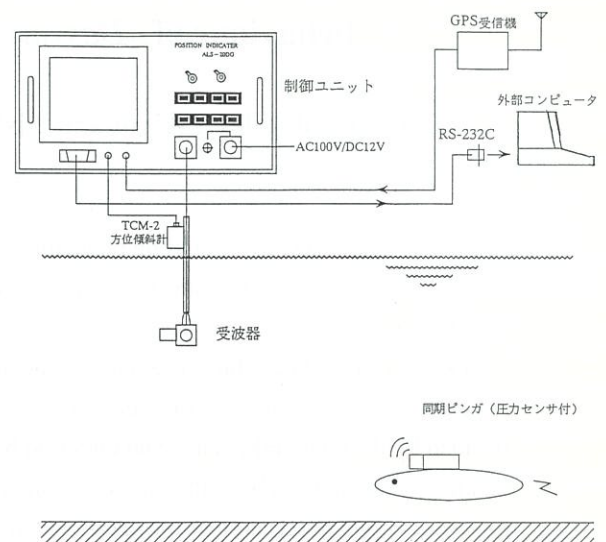


図2. 生物位置検知システムの構成.

Fig. 2. Configuration of the acoustic animal position detection system (AAPDS).

跡船に設置した制御ユニットおよび受波器から構成される(表1)。受波器は船の舷側に固定される。あらかじめ、ピンガの発信時刻と制御ユニットの時刻をあわせておくと、その後、制御ユニット側では、時間計測開始からピンガ信号受信時までの時間を計測することによりピンガ・受波器間の直距離を求めることができる。また受波器は、一定距離離れた2つの受波部からなり、それぞれの受波部へ到来する音波の位相を検出し、その差分から到来方向を算出するものである。これはいくつかの音響測位方式の中のSSBL方式(Super Short Base-Line System)と呼ばれるものである。上記のシステムにより、船を中心として何m離れたどの方向から音波が到来したかを検知することができる。しかしながら、これだけでは必要とするピンガの地球上の位置は特定することができない。絶対位置を算出するには、船の位置と船首の方位の値が必要となる。船の位置はGPSまたはDGPS測

表 1. 生物位置検知システムの仕様概要.

Table 1. Basic specifications of the animal position detection system.

制御ユニット

方式	SSBL音響測位
測定距離	0-1000m
測定深度	0-300m (トランスポンダ) 0-35m (ピンガ)
検知対象	同期ピンガ (1台) トランスポンダ (最大6台)
送信(呼出) 周波数	19.608-21.739kHz
受信周波数	19.231kHz
表示方式	自船中心の距離座標表示
表示レンジ	100, 500, 1000m
外部入出力	DGPS入力 方位傾斜計入力 データロガー (パソコン) 入出力
電源	AC100VまたはDC12V
外形寸法	幅360mm x 奥行141 x 高さ200mm
重量	約6kg

同期ピンガ

発信周波数	20kHz
発信間隔	6秒
深度情報変調方式	パルス間隔変調 パルス間隔 $t=1s$ 水深 0m, $t=1.85s$ 水深35m
電源	リチウム電池 (6V)
連続使用時間	50時間
外形寸法	直径34mm x 長さ141mm
重量	約50g

位で決定し、船首方向は方位傾斜計で決定する (図3). 直距離, 方角, 深度, 船首方向, 船位等のデータは制御ユニットから外部のコンピュータへ送出され, データ収録が行われる. これらのデータからピンガすなわち生物の3次元的な位置を計算する.

実験結果

実験は1998年10月31日および11月1日に中海において行った (図4). 1日目はピンガの性能確認試験, 2日目はアカエイにピンガを装着して行動の追跡実験をおこなった.

(1) ピンガの性能確認試験

1998年10月31日15:00~17:00, 中海の中浦水道 (島根大学汽水域研究センター中浦分室前) にて, 2つの舟を用い, ピンガの性能確認試験を行った. 一方の舟には, 制御ユニットおよびDGPS受信機を搭載し, 受波器を舷側に固定した. また, もう一方の舟からは, ピンガを水中に吊した. 二舟の距離を変え, 位置測定を行い, ピンガの性能確認を行った. それによ

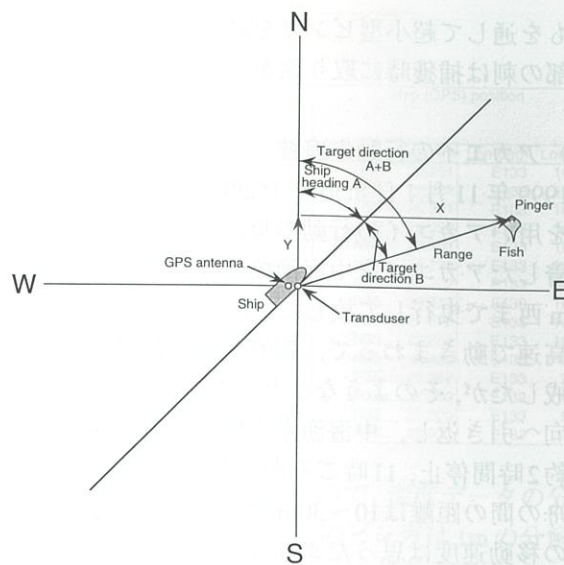


Fig.config

図3. 舟と生物の位置関係.

Fig. 3. Related to the position with the ship and the animal.

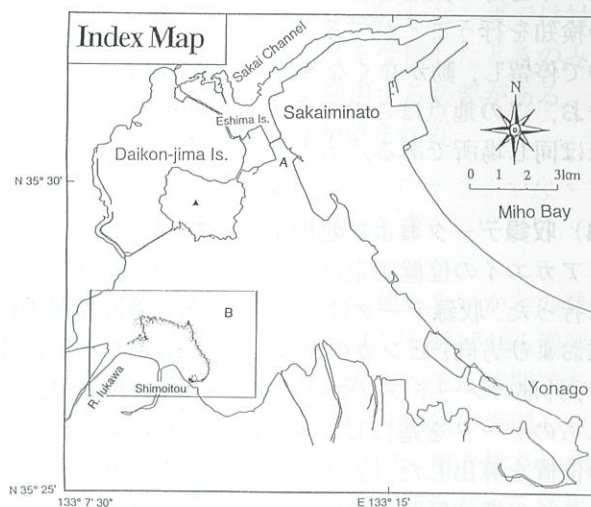


図4. 中海における実験水域を示す図. Aは1998年10月31日の実験水域, Bは同年11月1日の実験水域.

Fig. 4. Index map of experiment areas in the Lake Nakaumi. A and B show experiment area on October 31 and November 1, 1998 respectively.

ると, 実測による最大測定距離は720m (水深8m, ピンガの深度7m) であった. またピンガの深度測定値のチェックは, ピンガの水面からの深度を何段階か変え測定値をチェックした. 実際の深度と測定値は一致せず, 測定値に1mを加えることにより, 深度にほぼ等しくなることを確認した.

(2) アカエイへのピンガの装着

捕獲されたアカエイの頭部背面の鼻腔 (噴水孔) に

ひもを通して超小型ピンガを固定した(図5)。なお、尾部の刺は捕獲時に取り除かれていた。

(3) アカエイの行動の追跡

1999年11月1日8:30～15:30生物位置検知システムを用いアカエイの行動の追跡を行った。ピンガを装着したアカエイを中海漁協前の下意東漁港から約30m西まで曳行して放した(図6)。その際にかかなりの高速で動きまわって、観測が不可能になることを警戒したが、そのようなことはなく、ゆっくりと元の方向へ引き返し、中海漁港の防波堤外側付近の湖底で約2時間停止、11時ごろから遊泳を開始した。エイと舟の間の距離は10～30m程度として、追跡した。エイの移動速度は思ったより速くはなく、十分追跡でき、エイを見失うことはなかった。アカエイの位置は本システムの制御ユニットの液晶表示(図7)でリアルタイムに的確にとらえることができた。15:00頃にはエイと舟の距離を150m以上離れたが、良好に位置の検知を行うことができた。15:30頃に、意宇川河口沖で停留し、動かなくなり、エイの追跡を終了した。なお、この地点はこのアカエイが捕獲された地点とほぼ同じ場所である。

(4) 収録データおよび処理結果

アカエイの位置測定はピンガの発信間隔(6秒)毎に行った。収録データは時刻、ピンガ・受波器間の距離および方向、ピンガの深度、舟の針路、舟の位置等で、外部のノートブックコンピュータに収録した。これらのデータを基にピンガの位置すなわちアカエイの位置を算出した(表2)。収録データを基に算出したエイの遊泳経路を図8に示す。エイの位置はドットで示した。ドットが連続し、実線となっているところが、アカエイの遊泳経路である。周囲に散布するドットは測位に失敗した不良データを示す。

エイの位置測定結果から次のことが言える。エイの遊泳経路はジグザグで100m程度直進すると方向を変えている。エイの遊泳速度は一定してないが最大2.3km/h程度であった。エイの遊泳深度は水面下2～3m(湖底水深3～6m)である。このことから水中の中層を泳いでいたものと考えられる。

舟の位置測定用GPSは、FM多重放送から配信されている補正データを利用したDGPS受信システムを用いたが、この付近の水域ではDGPS補正データが良好に受信できず単独測位GPSのみで測位が行われた(図9)。



図5. アカエイへのピンガの装着。

Fig. 5. Installation of the pinger to the Stingray.



図6. アカエイのリリース。

Fig. 6. Release the Stingray into a water.

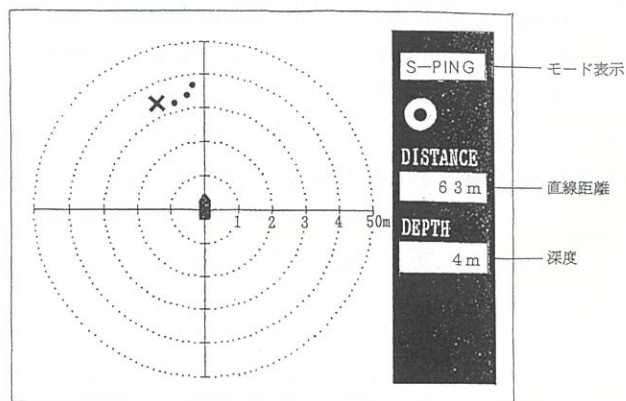


図7. 生物位置の画面表示例 最も新しい計測結果をXマークで、それ以前の3回を•マークで示す。

Fig. 7. Display example of the animal position. "X" mark shows the freshest measurement result, and "•" mark shows three times of previous measurement.

ま と め

汽水域の環境保全、漁業資源の管理・培養を図るうえで水域内の生物の分布や行動を把握することは極めて重要である。今回、中海に棲息するアカエイに超

表2. アカエイおよび舟の位置データ(1998年11月1日).

Table 2. Position data of the Stingray and the ship (Nov. 1, 1998).

Time (h:m:s)	Range to target (m)	Target depth (m)	Ship heading A (deg)	Target direction on ship B (deg)	Target direction A+B (deg)	Target position from ship		Target position				Ship (GPS) position			
						X(m)	Y(m)	Lat(deg)	Lat(min)	Lon(deg)	Lon(min)	Lat(deg)	Lat(min)	Lon(deg)	Lon(min)
8:30:04	60	1	311	84	35	34.5	49.1	N35	26.317	E133	10.414	N35	26.291	E133	10.392
9:00:03	27	4	187	56	243	-24.1	-12.1	N35	26.332	E133	10.411	N35	26.338	E133	10.427
9:30:03	44	3	38	230	268	-44.0	-1.9	N35	26.300	E133	10.416	N35	26.301	E133	10.445
10:00:02	2	3	359	270	269	-2.0	0.0	N35	26.302	E133	10.448	N35	26.302	E133	10.449
10:30:01	12	3	359	329	328	-6.4	10.2	N35	26.307	E133	10.445	N35	26.301	E133	10.449
11:00:00	22	3	302	227	169	4.3	-21.6	N35	26.287	E133	10.454	N35	26.298	E133	10.452
11:29:59	15	3	272	98	10	2.6	14.8	N35	26.310	E133	10.714	N35	26.302	E133	10.712
11:59:59	63	2	258	56	314	-45.1	44.0	N35	26.741	E133	10.735	N35	26.717	E133	10.765
12:30:05	11	2	342	336	318	-7.4	8.2	N35	27.277	E133	10.429	N35	27.272	E133	10.434
13:00:04	16	2	101	124	225	-11.3	-11.4	N35	27.362	E133	10.331	N35	27.368	E133	10.338
13:30:04	23	2	294	28	322	-14.2	18.1	N35	27.434	E133	9.725	N35	27.424	E133	9.734
14:00:10	123	3	18	348	6	12.4	122.4	N35	27.459	E133	9.431	N35	27.392	E133	9.423
14:30:03	101	3	27	153	180	-0.8	-101.0	N35	27.304	E133	9.280	N35	27.359	E133	9.280
15:00:03	168	2	13	335	348	-35.5	164.2	N35	27.092	E133	9.269	N35	27.003	E133	9.292
15:27:03	11	3	278	343	261	-10.9	-1.7	N35	26.976	E133	8.920	N35	26.977	E133	8.927

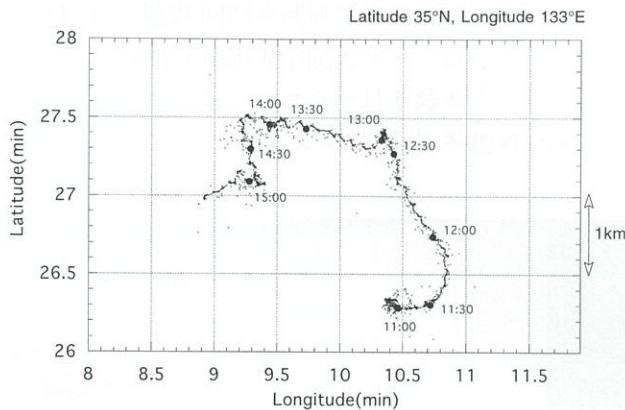


図8. アカエイの遊泳経路.

Fig. 8. Swimming route of the Stingray.

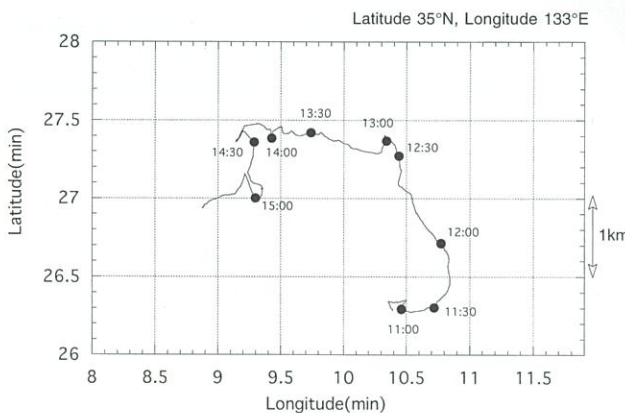


図9. GPS測位による舟の位置.

Fig. 9. Position of the boat by the GPS navigation.

音波発信器（ピンガ）を取付け、生物位置検知システムを用い、その遊泳行動を約8時間にわたって観測した。位置検知システムは良好に作動して、行動の追跡を連続的に行うことができた。今回の実験では、エイの遊泳速度は最大2.3km/hであり、深度データからはほぼ中層を泳いでいることがわかった。

基礎実験としては十分な成果を得ることができたが、今後の課題として以下の改良が必要である。

(1) 生物の遊泳深度が重要なので、深度データの分解能、精度を向上させる。現在のピンガは1mの分解能なので、これを0.1mとする。

(2) ピンガの使用時間を延ばす。連続使用時間は現在50時間である。発信間隔を適正な範囲で長くしたり、電池容量を増大させることにより可能である。

(3) 長期間にわたり観測を行う場合、ピンガでは対応できないので、呼びかけ信号を受信したときのみ返事をするトランスポンダを利用する必要がある。超小型トランスポンダの開発が望まれる。

あ と が き

アカエイを環境センサとして使えないかとの発想から本実験を試みた。“エイ名人”と呼ばれる漁師永島氏は実験に先立って、エイが海へ下る時期であることを考慮して、放せばまっすぐに海（中海湖心の観測塔の方向）に向かうと予想された。解き放されたエイは、捕われていた生け簀の近くにもどって休止した後、予想どおり海の方へと向かったが、途中から大きく転向し、もとの生息場に戻った。予想とは異なる結果を実験終了時に永島氏に伝えた。その後、実験結果をまとめて報告にいった際に氏が語ったのは「自分の予想と異なった動きをよく考えてみた。エイを意東の沖で2尾捕まえ、同じ生け簀に入れた。実験で放したのはそのうちの一つ。もどに戻ったのは仲間を待つためだったのではない。仲間と一緒にあれば、まっすぐに海へむかったにちがいない」というものである。このことも考慮すると、今回のエイの遊泳行程は自然のものに近いとは言い難い。

謝辞：本実験において、中海漁業協同組合の角 高盛組合長と永島 年氏には、アカエイの捕獲をはじめ種々実験へのご協力をいただいた。海洋電子株式会

社の袁島克久氏, 高井龍太氏には, 生物位置検知システムの設置および測定にご協力いただいた。島根大学汽水域センター中海分室管理人松本雅夫氏には, 実験船の操船をしていただいた。東京水産大学古澤昌彦助教授には最近のバイオテレメトリーに関する資料・文献をご紹介いただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 海洋音響研究会 (1984) 海洋音響 ー基礎と応用ー, 海洋音響研究会 (現海洋音響学会), 東京, 259p.
- Uchiyama, A. and Amlaner, C.J. Jr. (1991) BIOTELEMETRY XI. Proc. 11th Intern. Symposium on Biotelemetry, Waseda Univ. Press, Tokyo, 435p.