

パヤオ周辺でのマグロ類の遊泳行動Ⅲ

太田 格

1. 目的

パヤオ漁業は本県の沿岸漁業生産量の 20 % 以上を占める重要な漁業であり¹⁾、マグロ類はその最重要種である。しかし、マグロ類がパヤオへ蟄集するメカニズムについてはよく分かっていない。これまで、コード化音波発信機と自動記録型受信機を用いた調査により、マグロ類（キハダ、メバチ）のパヤオでの滞在期間、パヤオ間の移動、水平分布、鉛直分布の日周期的な変化、潜水行動等について多くの情報を得た²⁻⁶⁾。しかし、これらの行動の意味やその要因がよく分かっていない。そこでパヤオ周辺での詳細な遊泳行動の把握を目的とした新しい超音波テレメトリーシステムを用いた行動観測調査を実施した。

2. 材料および方法

コード化超音波発信機と自動記録型受信機（VR25）を用いた超音波テレメトリーシステム（VEMCO Ltd., Canada）により、パヤオ周辺のマグロ類の長期行動観測を実施した。このシステムの主な特徴は、1) 単周波で複数個体を識別できること、2) 発信機の電池寿命が比較的長いことにより、観測定点で同時複数個体の長期モニタリング

ができることである。記録するデータは、受信時刻、遊泳水深、信号強度である。また、平成 14 年度の調査により、信号強度データはパヤオー標識魚間の距離推定に有効であることが分かっている⁵⁾。平成 14 年度は、周波数 69kHz の発信機（VEMCO 社 V16P-4H Coded）のみを使用し、平成 15 年度はこれに加え、54kHz で出力のやや大きい発信機（VEMCO 社 V16P-5H Coded）を使用し受信範囲の拡大を試みた。VR25 受信機の設定は Sync360ms, Bin20.0(ms), Gain 初期 45dB, Gain 最大 60dB とした。また、受信機の設定上、異なる周波数の発信機は同時に使えないので、調査前半に 69kHz、後半に 54kHz を使用した（表 1）。また、複数個体の同時受信による記録エラーを減らすため⁵⁾、Delay time は 69kHz (5-30s) より 54kHz (30-79s) で長く設定した。Delay time とはランダムに変化する発信間隔を意味し、それぞれ、5-30 秒、30-79 秒がその範囲である。

54kHz 設定の受信範囲確認²⁾および信号強度からの距離推定のために受信機一標識間の距離測定等⁵⁾の予備試験を行なった。2003 年 5 月 22 日に VR25 受信機を糸満沖耐久性浮魚礁ニライ 8 号（以下 N8、水深 4m）に設置し、その後の 3 回の受信デ

表 1. VR25 システムによる超音波発信機標識個体観測状況（H15 年度）

標識個体		発信機					観測					
個体番号	魚種	尾叉長 (cm)	型式	周波数 (kHz)	Delay time (s)	識別番号	場所	放流日	開始日	終了日	日数	備考
83	キハダ	92.2	V16P-4H Coded	69	5-30	4	N8	03/5/22	03/5/22	03/5/22	1	3h
84	キハダ	112	V16P-4H Coded	69	5-30	5	N8	03/5/22			0	受信なし
85	メバチ	62.2	V16P-5H Coded	54	30-79	21	N8	03/6/26	03/6/26	03/6/26	1	10h
86	キハダ	78	V16P-5H Coded	54	30-79	23	N8	03/6/26	03/6/26	03/7/7	12	再捕により中断
87	キハダ	124.8	V16P-5H Coded	54	30-79	24	N8	03/6/26	03/6/26	03/6/26	1	1データのみ
88	キハダ	113	V16P-5H Coded	54	30-79	25	N8	03/6/27	03/6/26	03/6/26	1	2データのみ
89	キハダ	98	V16P-5H Coded	54	30-79	26	N8	03/6/27	03/6/27	03/6/27	1	3h, 04/8/26沖永良部で再捕
90	キハダ	122.5	V16P-5H Coded	54	30-79	22	N8	03/7/16	03/7/16	03/7/16	1	2データのみ
91	キハダ	132.5	V16P-5H Coded	54	30-79	23	N8	03/7/16			0	受信なし
92	キハダ	118.5	V16P-5H Coded	54	30-79	27	N8	03/7/29			0	受信なし
93	キハダ	133.0	V16P-5H Coded	54	30-79	28	N8	03/7/29	03/7/29	03/7/29	1	1h, 26hの受信中断
93-2	キハダ						N8		03/7/30	03/7/30	1	再受信 1h
94	キハダ	119.5	V16P-5H Coded	54	30-79	29	N8	03/7/29	03/7/29	03/7/29	1	1h
95	キハダ	118.5	V16P-5H Coded	54	30-79	30	N8	03/7/29	03/7/29	03/8/1	4	故障により中断

*1 パヤオ周辺でのマグロ類遊泳行動調査の一環

ータ回収およびバッテリー交換作業（1時間以内）を除いて、2003年8月1日まではほぼ連続的に観測した。その後は受信機の故障により観測を継続できなかった。予備調査、漁獲、標識、放流および受信機データ回収作業は主に調査船南丸で行った。観測したマグロ類は一本釣りで漁獲した。発信機の標識は従来腹腔内に埋め込む方式²⁾をとっていたが、信号強度の減少が懸念されることから⁵⁾、第2背鰭基部真後ろの尾部背面にナイロン製のケーブルタイで装着した⁷⁾。

3. 結果

1) 受信範囲および信号強度からの距離推定

予備試験の結果から、54kHzの受信範囲は半径約1100mで（図1）、69kHz（約1000m）とはほぼ同じであった。このとき記録された信号強度と実測水平距離を対応させたところ、69kHz同様に⁵⁾、両者の関係は指数関数によく当てはまった（図1）。よって観測された信号強度からのパヤオー標識魚間の

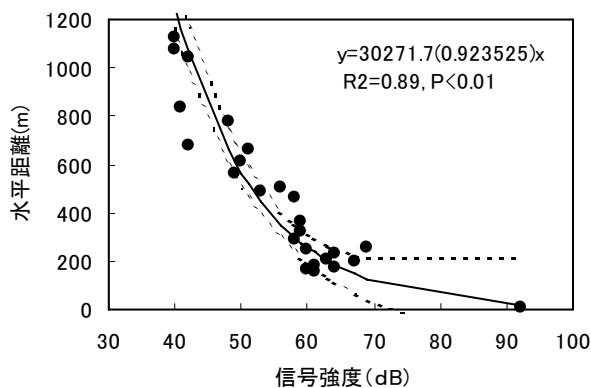


図1. 信号強度と実測水平距離の関係
VR25システム 54kHz

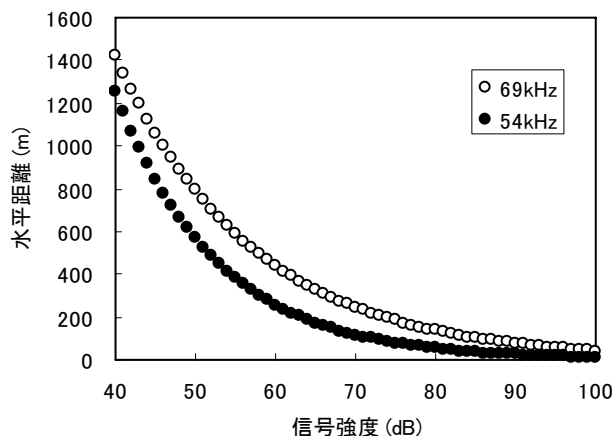


図2. 信号強度と実測水平距離の関係（計算式）
VR25システム 54kHzと69kHzの比較

距離（以下水平距離とする）の推定式は以下のよう表される。

$$69\text{kHz} : y = 14897.8(0.94299)^x, (R^2 = 0.66, P < 0.01)$$

$$54\text{kHz} : y = 30271.7(0.92353)^x, (R^2 = 0.89, P < 0.01)$$

（式1）（図2）

また、時間あたりの最大受信数および複数同時受信による受信減少率等を把握するための予備調査を行なった。調査海域において調査船舷側水深10-15mに受信機と発信機を吊りし、徐々に発信機数を1-10本に増やして受信状態を確認した。その結果、発信機が1本の時、受信数は62h⁻¹であり、平均Delay time 54.5sから計算した66.1h⁻¹に近似した（図3）。この受信数62を最大受信数とすると、受信率は以下の式で表される。

$$\text{Detection rate (\%)} = \text{受信数 } h^{-1} / 62 \times 100 \quad (\text{式2})$$

受信率は発信機の増加とともに減少し、平均受信率は発信機2本で84%、3本で45%、5本で36%、10本で25%になった（図3）。

2) マグロ類の行動観測

2003年5月22日-7月29日の間に、N8周辺にて、キハダ12尾（YF、尾叉長78-133cm、平均±標準偏差：114±16cm）、メバチ1尾（BE、62cm）に発信機をつけ放流した（表1）。放流後、24時間以上観測できたのはYF86、YF93、YF95の3個体のみであった。そのうちYF93は、放流後1h滞在した後受信が途絶え、26時間後に再び1h観測された。BE85は約10時間、YF83、YF89、YF94は約1-3時間観測され、残りの6個体はほとんどないし全く受信できなかった。以下に比較的長く観測されたYF86について詳しく解析した結果を述べる。

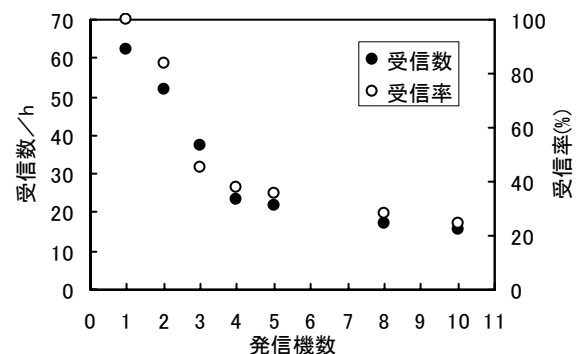


図3. 使用発信機数と受信数、受信率の関係
VR25システム 54kHz, Delay time 30-79s

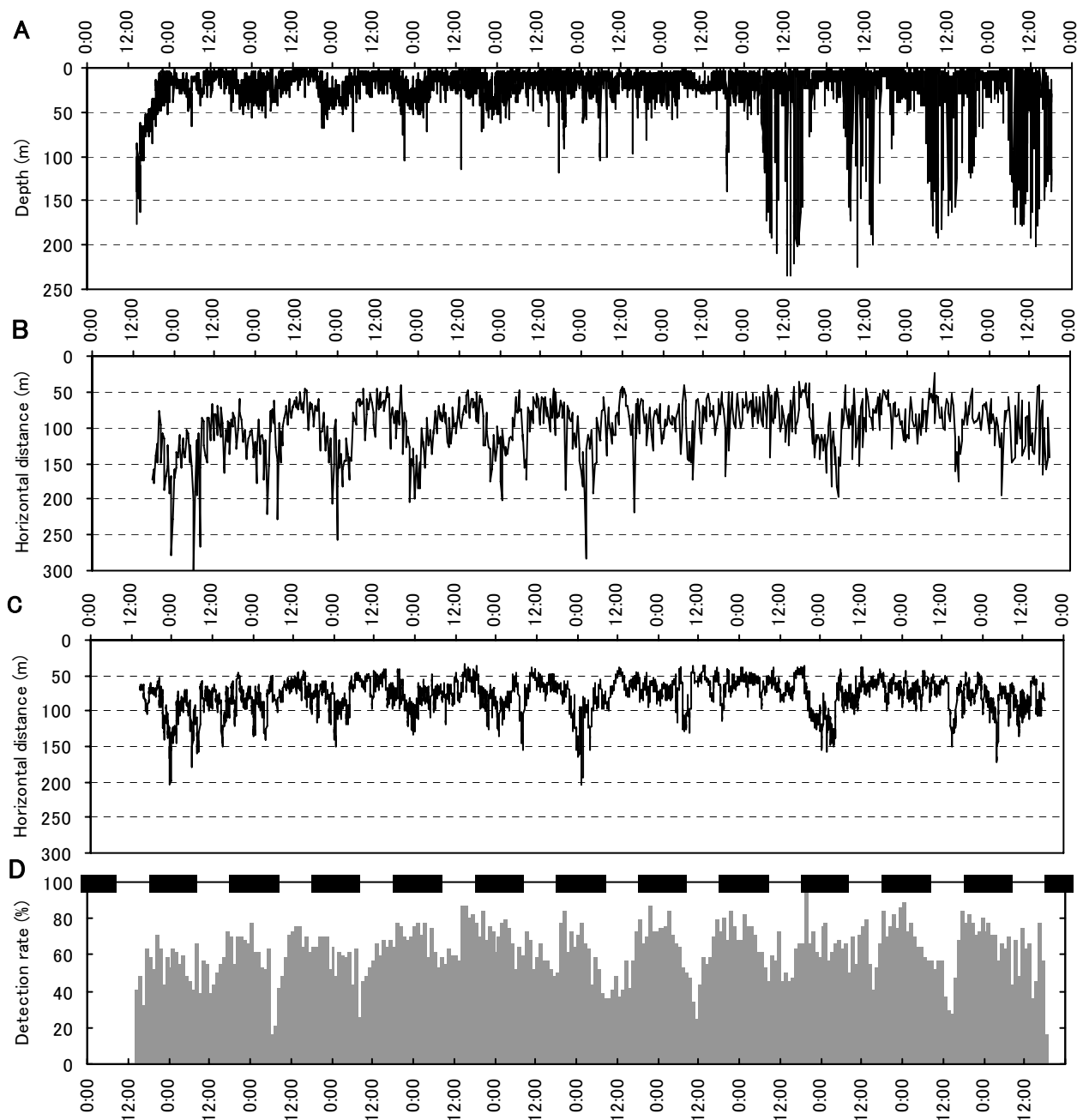


図4. VR25によるキハダ YF86(78cm FL)のパヤオ周辺での行動観測時系列データ (2003年6月26日-7月7日:12日間)
 A: 遊泳水深, B: 水平距離 A, C: 水平距離 B, D: 受信率 横黒棒は夜間を示す

3) パヤオ周辺での滞留

YF86 (尾叉長 78cm) は 2003 年 6 月 26 日の放流後、7 月 7 日に漁業者によって再捕されるまでの 12 日間観測され、合計 10,362 データセットが得られた。観測期間中の受信間隔 (平均±SD) は 93 ± 72 s, 式 2 から求めた受信率の観測期間中の平均は $62.3 \pm 13.5\%$ で、0.5 時間以上受信が途絶えることなく連続的に滞在した (図 4D)。受信率には顕著な昼夜の差が認められ、夜間 ($68.9 \pm 4.9\%$) は昼間 ($58.1 \pm 5.1\%$) よりも高かった (1 標本の t 検定, $p < 0.001$) (図 4D, 図 5D)。また受信率の時系列デ

ータをスペクトル分析によって解析した結果、24h 周期に明瞭なピークがみられた (図 6B)。

4) 鉛直分布

YF86 は放流直後 180m 付近まで急潜行したが日暮れとともに浮上し、その後 7 日後 (7 月 2 日) まで約 90% の時間を水深 50m 以浅に分布した (図 4A)。その後、再捕されるまでの 4 日間、YF86 は昼間に急潜行浮上を繰り返す顕著な潜水行動が観察された。観測期間全体では遊泳水深に昼夜の差は認められなかったが、昼間の約 50% を表層 0-10m で過ご

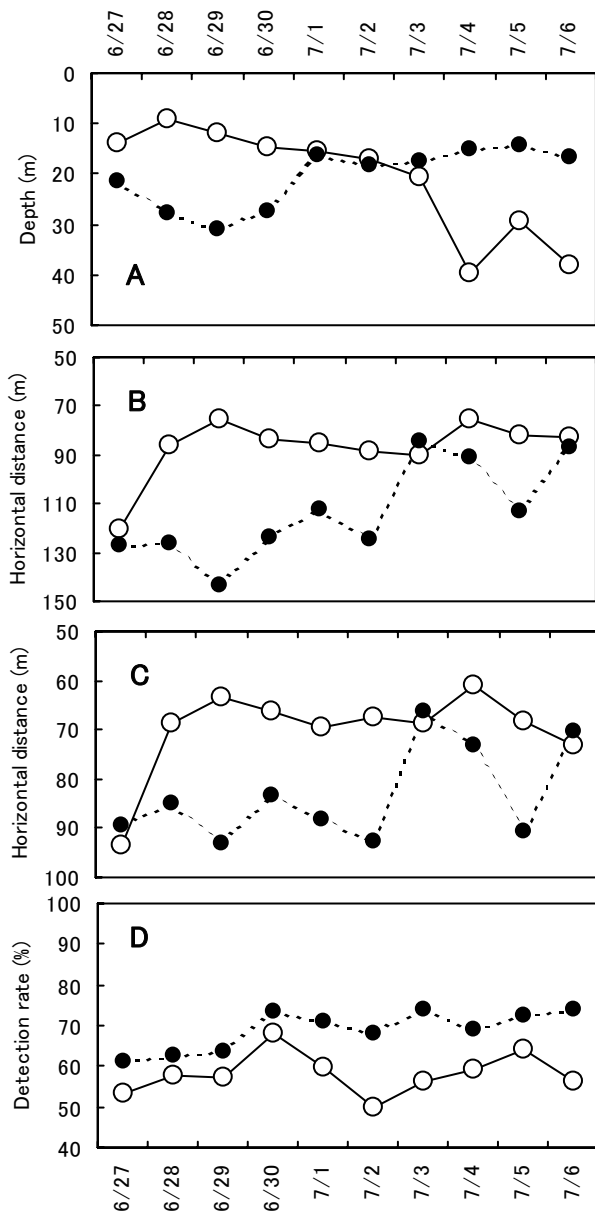


図 5. YF86 の遊泳水深(A), 水平距離 A(B), 水平距離 B (C), 受信率(D)の昼夜別日平均時系列データ
○昼間 ●夜間 観測初日, 最終日を除く

していた (図 7)。この頃の水温鉛直構造を測定したところ、水深 20–90m に温度躍層が認められた (図 8)。昼夜ごとの日平均遊泳水深は 7 月 2 日まででは昼間 ($14 \pm 3\text{m}$) よりも夜間 ($24 \pm 6\text{m}$) で深く、反対にその後の 4 日間では夜間 ($16 \pm 2\text{m}$) よりも昼間 ($32 \pm 9\text{m}$) で深く、その水深差は顕著でないものの有意差が認められた (1 標本の t 検定, $P < 0.05$) (図 5A)。また時系列データをスペクトル分析によって解析した結果, 21.8h 周期に明瞭なピークがみられた (図 6A)。

5) 水平分布

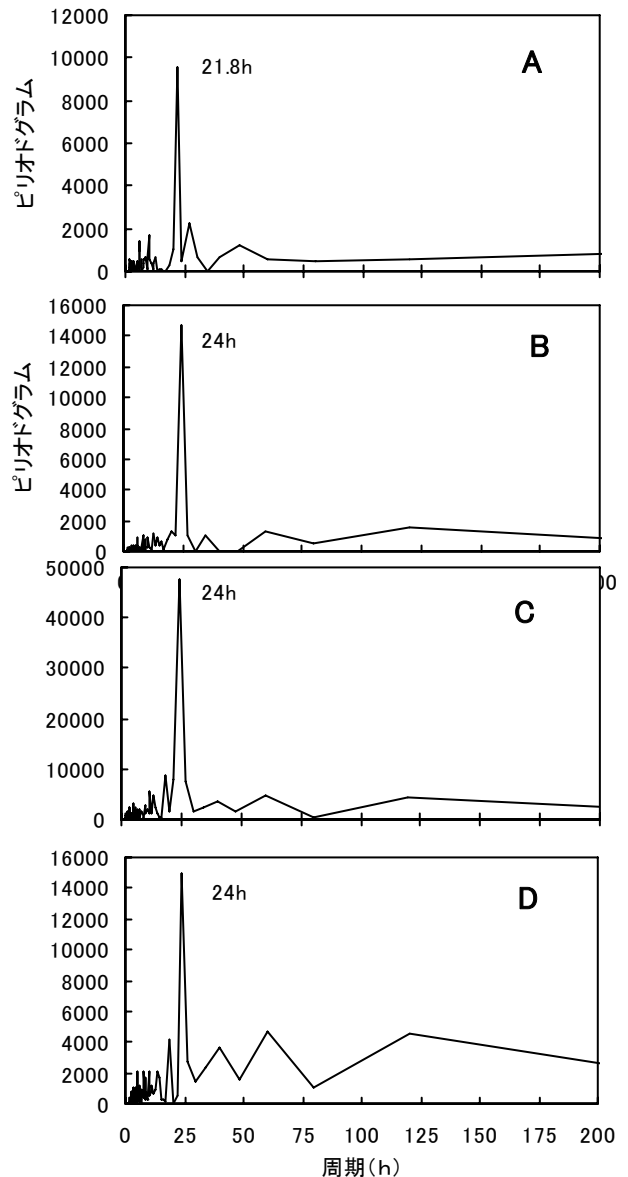


図 6. スペクトル分析による行動観測時系列データの周期
YF86 A: 遊泳水深, B: 受信率, C: 水平距離 A, D: 水平距離 B

水平距離の推定は主に式 1 を用いて行なったが、測定誤差や水温、圧力が著しく変化する鉛直方向の音波減衰過程を勘案し、異なるいくつかの方法で現実的な値が得られるよう努めた。本稿では以下 2 通りの解析結果を示す。

①鉛直方向の音波減衰の推定は困難なので、表層遊泳時には鉛直方向の音波減衰を無視できると仮定した。そこで水深 50m 以浅を遊泳しているときのみの信号強度データ ($n=9480$) を抽出し、20 分間ごとに平均信号強度を算出した。これを式 1 に当てはめ水平距離 A を推定した (図 4B)。

②YF86 の遊泳層と平均信号強度およびその低下率

の関係を図 9 に示す。両者ともに非常に高い負の相関が認められた ($R^2=0.95$, $p<0.01$)。ゆえに、この低下率は以下のように表される。

$$\text{Decline rate } y = -0.0012 \times \text{水深 } x + 0.962 \quad (\text{式 } 3)$$

実際の水平距離は未知であるが、相対的な信号強度の低下率が鉛直方向の音波減衰を表すとみなし、(式 3) によって各データの補正信号強度を算出した。さらに連続して受信される信号強度はデータ数 20 以上で安定するという結果⁵⁾を基に、21 データの移動平均で信号強度の時系列データを平滑化した。ここで求められた平滑化信号強度と式 1 を用いて水平距離 B を推定した (図 4C)。

水平距離 A および B は概ね良く似た変化パターンを示し (図 4, 図 5), 時系列データをスペクトル分析によって解析した結果、どちらも 24h 周期に明瞭なピークがみられた (図 6)。どちらも水平分布には昼夜で有意な差が認められ (1 標本の t

検定, $p<0.01$), 夜間には昼間に比べパヤオから離れて分布していた (図 4, 図 5, 図 10)。一方, 2 通りの推定値には有意な差が認められ (1 標本の t 検定, $p<0.001$), 水平距離 B (昼間 $70 \pm 9\text{m}$, 夜間 $83\text{m} \pm 10\text{m}$) は, 水平距離 A (昼間 $87 \pm 13\text{m}$, 夜間 $113\text{m} \pm 20\text{m}$) よりも推定値が小さく範囲が狭かった (図 4, 図 5, 図 10)。どちらの推定値においても, YF86 は水平距離 150-200m 以内のパヤオの近くに分布し, その変動範囲も狭かった。しかし, 視覚でパヤオ

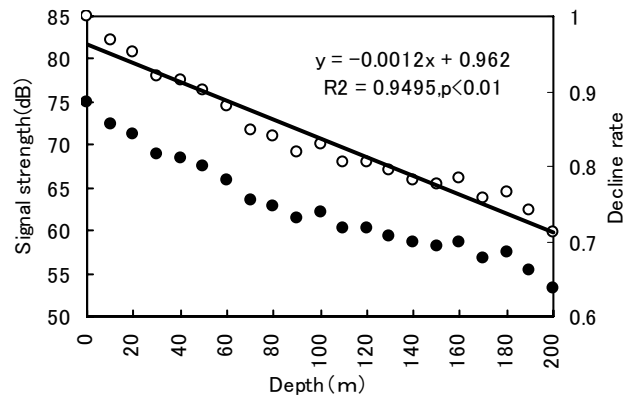


図 9. 各遊泳層と平均信号強度および信号低下率の関係
YF86 10m 遊泳層ごとの平均信号強度 dB (●) およびその低下率 (○)。回帰直線は信号低下率に対する。

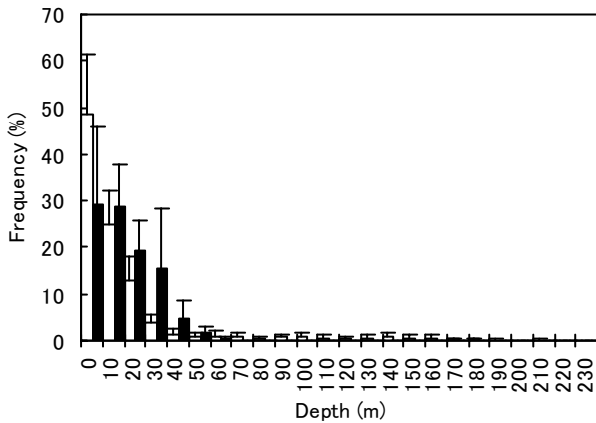


図 7. YF86 の遊泳水深頻度分布
□昼間 ■夜間 縦棒は標準偏差

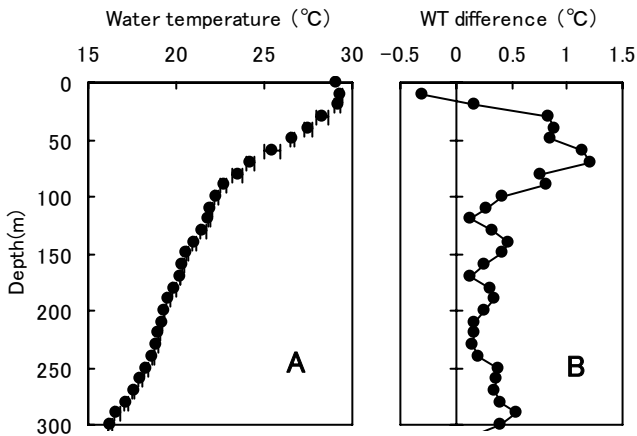


図 8. 7 月の N8 の水温鉛直構造
A: 水温鉛直構造 B: 10m 層ごとの温度差
2003 年 7 月 14 日 XBT による測定結果

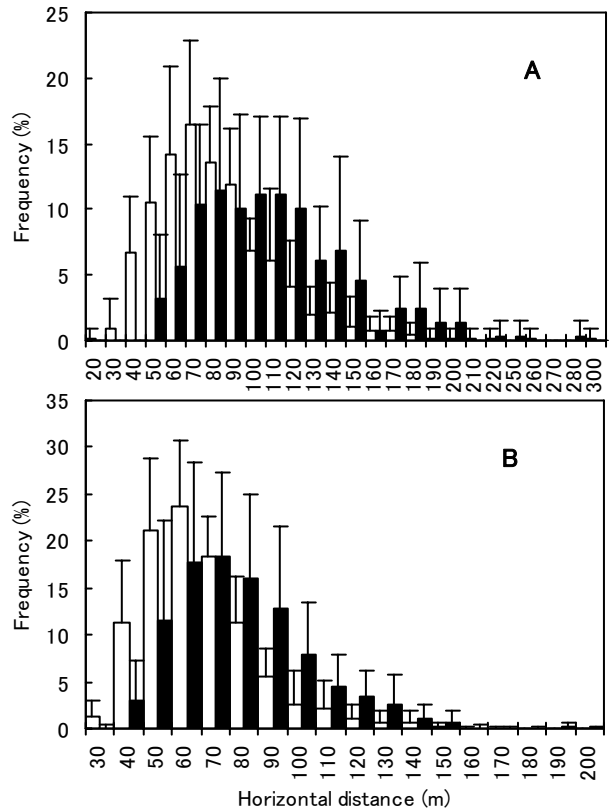


図 10. YF86 の水平距離頻度分布
A: 推定距離 A B: 水平距離 B
□昼間 ■夜間 縦棒は標準偏差

を認識できるような近い距離にはほとんど分布していなかった。

4. 考察

本調査は前年に引き続き、VR25受信機を用いた超音波テレメトリーシステムによってパヤオ周辺のマグロ類、特にキハダの大型個体およびメバチの行動観測を目的として実施した。平成15年度は平均尾叉長114cm（推定体重30kg）の比較的大型のキハダ12尾およびメバチ1尾に発信機をつけ観測を試みた。しかし、多くは滞在期間が短く、十分なデータが得られなかった。これまでの調査から、大型個体は小型個体に比べ滞在期間が短い傾向が認められている^{4,6)}。今後も引き続き放流調査を行なうことで、長期の観測も可能と思われる。

本稿では主にキハダYF86の12日間の行動を解析した結果を述べた。この行動観測データは受信範囲内のものであるが、高い受信率、短い受信間隔、平均化してない水平距離の変化データから、受信範囲外への分布はほとんどなかったと思われる。観測前半の遊泳水深は特に浅かったが、データロガーや発信機による標識後は1週間程度遊泳水深が浅くなる傾向があり⁸⁾、標識によるストレス等の可能性がある。しかし、水深20–100mの比較的浅い層に発達した温度躍層の影響の可能性もある⁸⁾。また、観測期間の終わりには頻繁な短時間の潜水行動が認められ、同様の行動はこれまでに観測したYF80⁵⁾にも認められている。

この超音波テレメトリーシステムの最大の特徴は、信号強度データから水平距離を推定できることである⁵⁾。よって、遊泳水深のデータとともにより詳細な行動データを得られることが期待できる。2通りの水平距離の推定値には違いがあったが、時系列の相対的な変化はほぼ同様であった。また、遊泳水深と水平距離の時系列変化には、若干の対応が見られるが明確ではなかった。特に水平距離Bの推定値は深度の増加による信号強度の低下を補正したので、より事実に近い水平分布の変化を捉えていると思われる。水平距離AおよびBは平均化、平滑化されており、実際の水平移動の範囲を過小

に推定していると考えられるが、相対的な水平分布の変化やおおよその値については有用な情報となる。

YF86の水平距離の時系列には24hの周期性が認められ、昼夜で分布が異なることが示された。これまでの研究で、受信率の日周期変動や規則的な短時間の受信ブランクがパヤオ周辺での規則的な分布の変化を反映するとされ、キハダ、メバチの日周期的な行動および分布の変化が示唆された²⁻⁶⁾。特に受信率の昼夜の違いは、パヤオ周辺の狭い範囲内（数百メートル程度）における行動変化、特に水平分布の変化を反映したものと考えられている^{4,6)}。受信率の日周パタンの約4割は昼間低く夜間高いパターン（パターンA）であり^{4,6)}、YF86もこれにあてはまる。しかし、YF86の水平距離、すなわちパヤオまでの距離は、昼間近く、夜間にやや遠いパターンであり、受信率変動から推察される行動と一致しない。また、昼間の頻繁な潜水行動、すなわち標識魚の深度が受信率の低下に関わる可能性も示されている⁵⁾が、YF86では受信率と遊泳水深に相関は認められなかった。ゆえに受信率の昼夜の違いは、昼間の顕著な潜水行動や水平分布の変化以外にも要因があると思われる。この要因は明らかでないが、パヤオ周辺の狭い範囲内（数百メートルスケール）で水平分布に日周期性があることが実証された。過去の研究により、キハダ、メバチ、カツオでは、パヤオを離れ再び戻るなど水平移動に数マイルスケールの日周期性が認められており、このことからマグロ類が高い定位能力を持ち、何らかの方法でパヤオの位置を認識または記憶できると考えられている^{5,7,9-11)}。これまでにVR25を用いて調査したYF80⁵⁾およびYF86の水平分布の推定結果から、パヤオから比較的限られた範囲に分布すること、パヤオを視覚で認識できるほど近くに分布していないこと、YF86のみであるが水平分布に日周期性があることが示された。これらのことからキハダがパヤオの位置をかなり正確に認識していること、また、その認識には視覚以外の何らかの方法を用いていることが示唆された。

文 献

- 1) 沖縄開発庁沖縄総合事務局農林水産部. 第29次沖縄農林水産統計年報. 2001; 177-256.
- 2) Ohta I, Kakuma S, and Kanashiro K. Aggregating behavior of yellowfin and bigeye tuna tagged with coded ultrasonic transmitters around FADs in Okinawa, Japan. Sibert and Nielsen (eds.) Electronic tagging and tracking in marine fisheries. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2001; 131-145.
- 3) 太田格, 鹿熊信一郎. パヤオ周辺でのマグロ類の遊泳行動. 平成12年度沖縄県水産試験場事業報告書. 2002; 25-33.
- 4) 太田格, 鹿熊信一郎. パヤオ周辺でのマグロ類の行動長期モニタリング. 平成13年度沖縄県水産試験場事業報告書. 2003; 27-40.
- 5) 太田格, 渡辺利明. パヤオ周辺でのマグロ類の遊泳行動II. 平成14年度沖縄県水産試験場事業報告書. 2004; 24-34.
- 6) Ohta I, Kakuma S. Periodic behavior and residence time of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices around Okinawa Islands, as identified with automated listening station. Mar. Biol. In press.
- 7) Holland KN, Brill RW, Chang RKC. Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices. Fish. Bull. 1990; 88(3): 493-507.
- 8) 太田格, 下條武, 福田将数, 松本隆之. パヤオ周辺でのキハダ, メバチの遊泳行動生理. 平成13年度沖縄県水産試験場事業報告書. 2003; 41-51.
- 9) Cayré, P. Behavior of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) around fish aggregating devices (FADs) in the Comoros Islands as determined by ultrasonic tagging. Aquat. Living Resour. 1991; 4: 1-12.
- 10) Dagorn, L., Josse, E., and Bach, P. Individual differences in horizontal movements of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in nearshore area in French Polynesia, determined using ultrasonic telemetry. Aquat. Living Resour. 2000; 13: 193-202.
- 11) Brill RW, Block BA, Boggs CH, Bigelow KA, Freund EV, Marcinek DJ. Horizontal movements and depth distribution of large adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) near the Hawaiian Islands, recorded using ultrasonic telemetry: implications for the physiological ecology of pelagic fishes. Mar. Biol. 1999; 133: 395-408.