

環境変動が生簀内におけるブリの鉛直遊泳行動に及ぼす影響

高志利宣, 米島久司, 村田 修, 坂本 亘

Effect of Environmental Change on the Vertical Swimming Behaviour of Yellowtail, *seriola quinqueradiata*, in the Net Cage

Toshinori TAKASHI, Hisashi YONESHIMA, Osamu MURATA, Wataru SAKAMOTO

Fish behaviour in the aquaculture net pen is restricted by habitational limitation. They are passively experienced unavoidable environmental fluctuation such as ambient water temperature, salinity and turbidity. These environmental fluctuations have a great influence on the fish behaviour. In this study, we noticed the characteristics of vertical swimming behaviour of yellowtail in an aquaculture net pen to correlate with fluctuations in the ambient water temperature using a micro data logger from April 2004 to August 2005. Successful long-term measurements (maximum time period: 456 days) of the vertical swimming behaviour of yellowtail were recorded. The results showed that the swimming depth varied seasonally in accordance with vertical difference in water temperature. From June 2004 to October 2004 and from April 2005 to August 2005, when the water temperature at a depth of 0.5 m was higher than that at 4 m, the yellowtail swam vertically from shallow layer to bottom layer within 2.5 to 5.0 m. However, when the water temperature at 0.5 m was lower than that at 4 m, the swimming depth range was confined to the bottom layer (3.4–5.4 m). The yellowtail seasonally changed the diel swimming pattern. In summer, the yellowtail swam in the bottom layer (3.3–5.5 m) during the daytime and in the shallow layer (2.5–4.5 m) during the night. However, the yellowtail did not show a diel pattern of vertical swimming when the typhoon and atmospheric depression passing through. In winter, the yellowtail stayed in the bottom layer (4.4–5.0 m) throughout the day; however, the swimming depth shifted to a shallow layer at dawn and dusk.

Key words: yellowtail, *seriola quinqueradiata*, biotelemetry, swimming behaviour, environmental change, water temperature, seasonal variation

緒論

養殖漁業は世界の食糧生産を支える重要な産業の一つである。2002年の全世界の魚類の総生産量は1.33億トンであり、そのうちの0.40億トンを養殖漁業が支えている (FAO, 2005)。また、総魚類生産量に対する養殖漁業による生産量の割合は、1998年から2002年までの間で、25.9%から29.9%と年々増加している。養

殖漁業は天然資源を漁獲する漁業と比較して、食料の安定供給を可能とする産業であるため、今後もその生産量は増加することが予想される。このような養殖漁業の生産量の増加に伴って養殖規模が大きくなる傾向にあり、養殖魚類を大量生産するために魚類の健康管理の重要性が増してきている。

バイオテレメトリーは、魚類だけではなく多くの動物の行動、生理の状態を遠隔的に測定する技術である。魚類でバイオテレメトリーの手法を利用すれば、魚類の体温、周辺水温、遊泳水深、心拍数、遊泳速度や遊泳姿勢などを遠隔的に測定することができ、多くの生物情報を取得することが可能となる。現在、この技術は主に天然魚類の資源管理や希少種の行動生態を探るための手法の一つとして幅広く活用されている。一方で、近年、バイオテレメトリーの技術を養殖漁業の健康状態の把握や養殖技術の発展に応用しようとする試みが Begout Anras *et al.* (2004), Okano *et al.* (2005) などにより行われている。

魚類の遊泳行動や回遊は水温や塩分、光環境など様々な要因により変化する。これらの物理的な要因は、様々な時間、空間スケールで変動する。例えば、潮汐や内部潮汐などにより半日から1日程度の周期で、鉛直、水平的な水温、塩分の変化が発生し、約14日の周期で潮汐、潮流が変動する。また、季節的な変化や、低気圧や台風の接近、黒潮などの海流変動に伴うイベント的な要因による変動も存在する。自然環境下における魚類は、これらの環境変動に適応したり、逃避行動を行うために、能動的にその遊泳水深や回遊経路を変化させていると考えられる。例えば、天然のブリ (*seriola quinqueradiata*) では、黒潮から暖水塊が沿岸海域に侵入するとブリの回遊経路が変化し、沿岸域でのブリの漁獲量に影響を与えること、気象の変化と遊泳水深には関連性がある事などが報告されている (Kimura *et al.*, 1994 ; Kasai *et al.*, 2000)。一方、養殖生簀内で養成されている魚類は、遊泳可能な範囲が制限されている。そのため、水温などの環境変動の影響を受けた場合、その遊泳行動は自然海域に生息している魚類と異なった応答を示している可能性がある。しかしながら、生簀内の養殖魚類の行動と環境変動を調べた例はない。本研究では、養殖魚の生簀内における鉛直的な遊泳行動の特徴を明らかにするため、養殖魚の遊泳水深と水温、摂餌量を周年にわたって調べ、それらの関係について調べた。なお、本研究では、養殖漁業の重要対象種であるブリを対象種とした。

Table 1 Details of 11 yellowtails used in this study.

ID number	logger type	Dates	Duration (days)	Fork length (cm)		Weight (Kg)	
				start	end	start	end
Y002	DST milli	2004/4/16 - 2004/6/3	49	52	53	2.1	2.43
Y003	DST milli	2004/5/18 - 2004/8/2	77	55	55.2	3.8	3.48
Y004	DST Centi	2004/6/3 - 2005/9/1	456	46.8	60.7	2.16	3
Y005	DST milli	2004/6/3 - 2004/8/18	77	50.4	54	2.27	3.48
Y007	DST milli	2004/8/3 - 2004/8/26	24	52.3	55	2.3	2.8
Y008	DST milli	2004/8/28 - 2004/11/12	77	55.8	57.2	2.74	3.26
Y010	DST milli	2004/11/13 - 2005/1/27	76	60.2	66.6	4.15	4.96
Y011	DST milli	2005/1/20 - 2005/4/6	77	61	69.4	4.37	5.15
Y016	DST milli	2005/5/10 - 2005/5/25	16	57	65.7	3.6	4
Y019	DST milli	2005/8/8 - 2005/10/23	77	64	66	4.85	5.8
Y020	DST milli	2005/8/8 - 2005/10/23	77	63.8	65.8	4.95	5.9

材料および方法

実験は2004年4月16日から2005年10月23日の期間に和歌山県西牟婁郡白浜町の近畿大学水産試験所白浜実験場の地先で行った。実験に使用したブリは計11尾で、実験開始時では1歳で、2005年には2歳となった。供試魚の実験開始時と終了時の尾叉長および体重、実験期間をtable 1に示す。使用した生簀の大きさは、縦横約7m、深さ約5mである。実験期間中は1日~2日に一回飽食給餌を行い、給餌時間は16:00~17:00とした。また、生簀網の交換は2週間から1ヶ月に1回行った。

ブリの遊泳水深の記録にはStar-Oddi社製のデータログ DST-centi および DST-milli を用いた。これらのデータログは、温度と圧力を計測するセンサーおよび、時計と記録用のメモリーを備えた小型の電子機器である。実験ではこれを外科的手法によりブリの腹腔内に挿入し、個体の遊泳水深と腹腔内体温を測定した。データログの測定間隔は DST-centi で10分、DST-milli で5分に設定し、それぞれの最長計測期間は455日および75日である。データログの腹腔内への挿入のための手術の手順は以下の通りである。生簀からブリを取り上げ、個体の体重と尾叉長を測定した後、手術台に魚体を固定し、ブリへ酸素を供給するために、ブリの口腔内にホースを挿入し送水した。ブリが暴れるのを防ぐため、黒いビニール袋で頭部を覆い、目隠しをした。イソジンで消毒したメスおよび解剖バサミで腹腔の肛門より2~3cm前方を切開し、データログを腹腔内に挿入した。データログ挿入後、縫合糸付縫合針で開腹箇所を縫合した。その後、個体識別のために背側にダートタグを装着し、実験生簀に再放流した。手術によるブリへのストレスを最小限にするためにこれらの全作業工程を3分以内で終わるようにした。測定期間終了後、再びブリを捕獲し、腹腔内からデータログを回収した。回収後、データログをパーソナルコンピュータに接続し、データを回収した。

また、実験生簀の水温を測定するため、水深0.5mと4mにアレック電子社製のCOMPACT-CT設置し、1分間隔で測定した。加えて、給餌記録と気象庁のAMEDASにより計測されている田辺市の気象データ(気温、気圧、降雨量、風向風速)も解析に使用した。

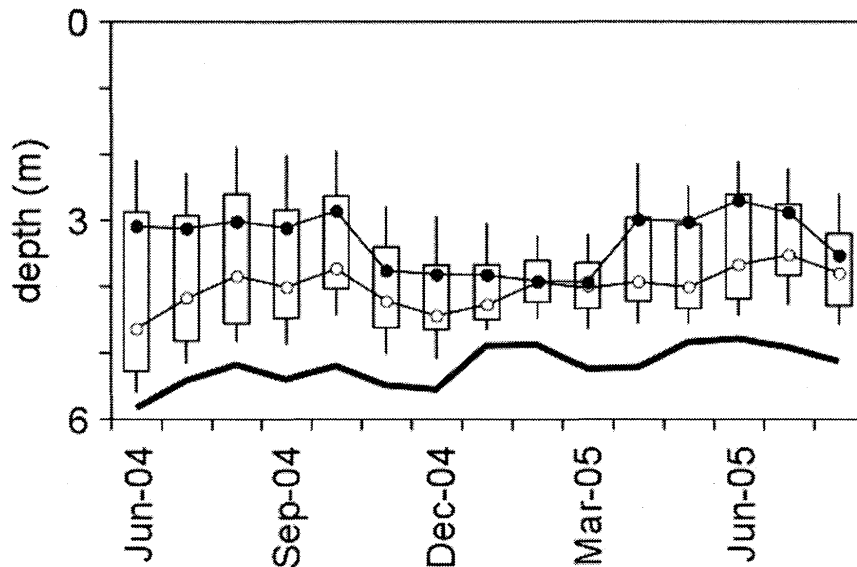


Fig. 1 Seasonal variation of swimming depth of Y004 in the aquaculture pen. The box means the range of middle of 50% in the swimming depth data. Whisker indicates the range of 10% and 90% of the values. Open and closed circles indicate average swimming depth in daytime and nighttime.

結果

遊泳水深, 摂餌量の季節変化 Figure 1 は, 計測期間の最も長かった Y004 のデータを使用して, 2004 年 6 月から 2005 年 9 月までの月ごとの遊泳水深の変化を示している。まず, 各月の遊泳水深データの 25~75 % の範囲を示すボックスにより, ブリが生簀内でどの水深帯を遊泳していたのかを見ると, 2004 年 6 月から 10 月までのブリの遊泳水深は 2.5 m から 5 m 付近で生簀内を鉛直的に幅広く利用している。一方, 2004 年 11 月から 2005 年 2 月にかけては 3.4 m から 4.6 m となって遊泳水深の幅が狭くなっている。そして, 3 月以降は遊泳水深の幅が 1.5 m から 2.0 m と広がっていった。次に, 日中と夜間の平均遊泳水深の変化を見てみると, 2004 年 6 月から 10 月の間, 日中の平均遊泳水深は 5 m から 4 m 付近にまで浅くなる傾向が見られ, 夜間の遊泳水深は 3 m 付近となっていた。秋季は 11 月から急激に夜間の平均遊泳水深が水深 4 m 付近となり, 1 m ほど深くなっていた。この頃になると日中の遊泳水深の方がやや深いものの, 日中と夜間の遊泳水

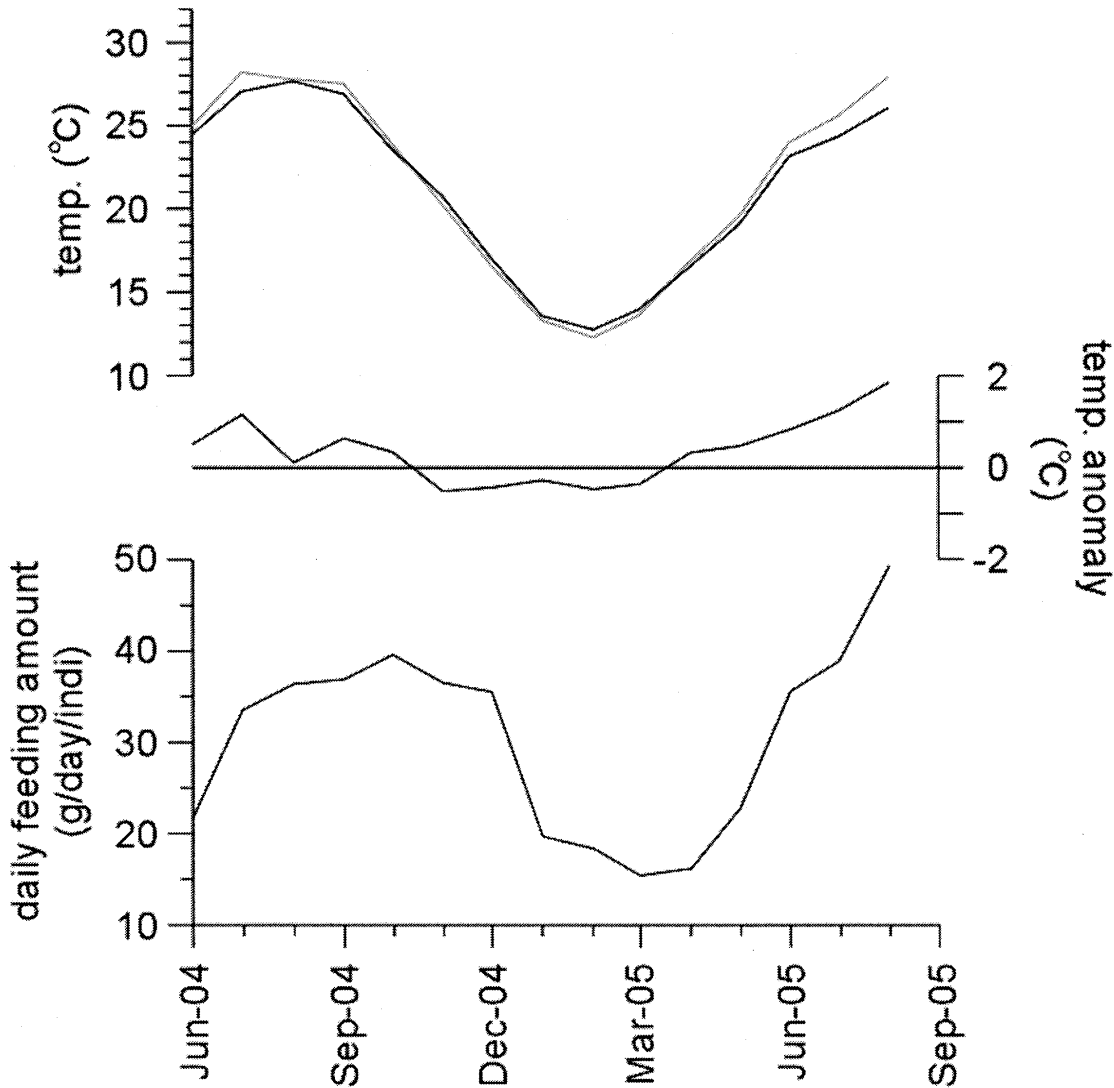


Fig. 2 Monthly change in a) temperature at 0.5 m (gray) and 4 m (black) depth, b) temperature anomaly (temperature difference between 0.5 m and 4 m depth), and c) daily feeding amount.

深にあまり差は見られなくなり, 2005年2月から3月は日中と夜間の遊泳水深の差はほぼ無くなっていた。2005年4月になると夜間の遊泳水深が3m付近にまで急激に浅くなったが, 日中の遊泳水深は約4mと変化は見られなかった。そのため, 日中と夜間の遊泳水深に差が生じ始めた。このように季節によって日中と夜間に利用する水深の違いが, ブリが生簀内で利用する遊泳水深の幅に変化を引き起こしたと考えられる。

実験期間中の水深0.5mと4mの水温を見てみると (Fig. 2a), 水温変動には明瞭な季節変動が確認できるが, ブリの遊泳水深の月変動との関連性は見られなかった。しかしながら, 水深0.5mと4mでの水温差 (Fig. 2b) とブリの遊泳水深 (Fig. 2) には関連性が確認できる。表層の方が水温の高い2004年6月から9月, 2005年3月から9月の期間中, 日中と夜間の遊泳水深に差が見られ, 生簀内を幅広く遊泳している。一方, 表層の方が低温となる2004年10月から2005年2月の期間は, 昼夜の遊泳水深の差が小さくなり, 遊泳水深の幅が小さくなっている。このことから, 鉛直的な水温の違いが生簀内でのブリの遊泳行動に影響を与えていたと考えられる。

摂餌量の季節変動は, 水温変動と対応して変動していた (Fig. 2b, c)。摂餌量は2004年7月から12月までは1尾あたり33.5~39.6 g/dayを摂餌していた。水温が17℃以下となった1月に摂餌量は急激に減少し, 2005

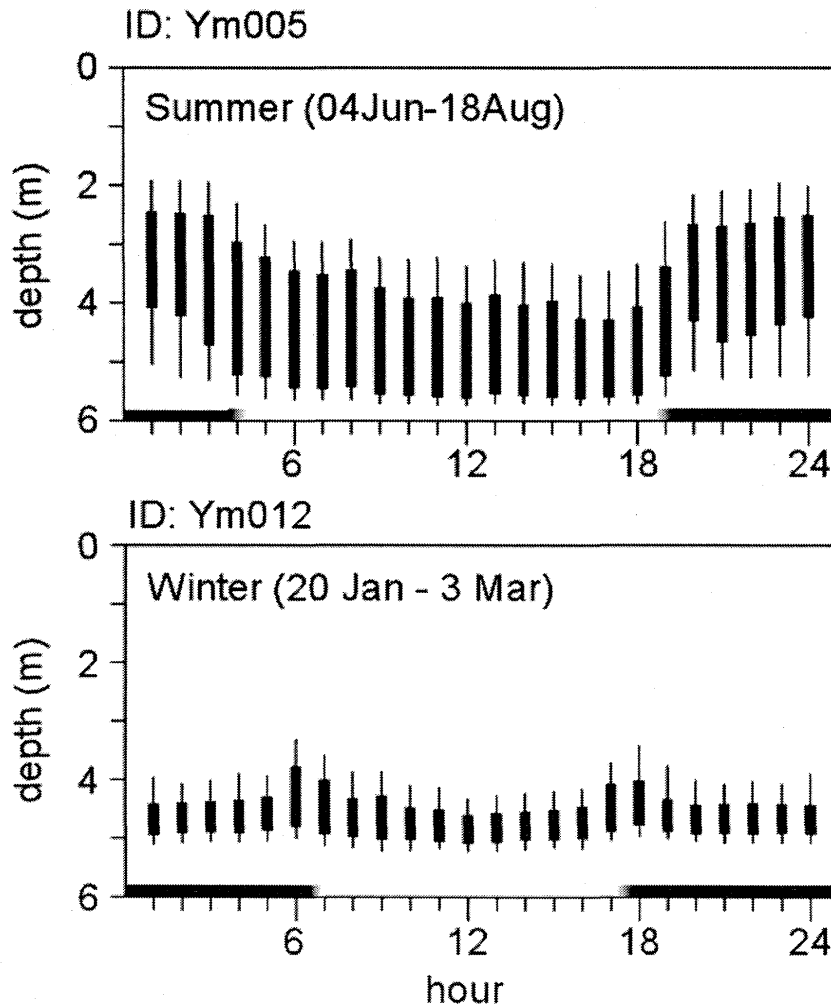


Fig. 3 Diel change in swimming depth of yellowtail. a) Y005; 2004/6/4 - 2004/8/18, b) Y012 2005/1/20 - 2005/3/3. The box means the range of the middle 50% of the swimming depth data. Whisker indicate the range of 10% and 90% of the values.

年1月から4月までの摂餌量は15.4~19.6 g/dayと、夏季の半分程度までに減少していた。水温が18℃以上となった2005年5月以降から8月まで、摂餌量は増加していた。このように、摂餌量の変動には、水温が関係していると考えられるが、遊泳水深の変動との関連性は見られなかった。

日周期鉛直遊泳行動 夏季に計測したY005のデータを用いて、夏季の平均的な遊泳水深の時間変化をFig. 3aに示す。夜間にブリが遊泳する水深は2.5 mから4.5 m程度となっているが、日出とともに3.3 mから5.5 mとなり、日中の遊泳水深は深くなる傾向にある。そして日没とともに遊泳水深は再び浅くなっている。このような日出・日没に対応した日周期の遊泳水深の変化は生データにも明瞭に現れている(Fig. 4a)。しかしながら、台風の影響時にはこのような日周期の遊泳水深の変化は不明瞭になった(Fig. 4b)。7月30日の日出前までは水深3.8 m付近を中心に遊泳し、日出とともに生簀の底付近で遊泳するようになった。しかし、その後台風が接近してきた午前7時以降には、ブリは遊泳水深を3 m付近に変化させ、8月1日まで明瞭な日周期の変動は見られなくなった。このように、ブリの基本的な遊泳水深の変化には日周期の変動が見られるものの、台風来襲などの気象変動に伴って日周期変動が不明瞭になる傾向にあった。

次に、冬季に測定したY013の遊泳水深の時間変化について見てみると、ブリは日中、夜間ともに水深約4.4~5 m付近の生簀の底付近を遊泳しており、日中と夜間とではブリが利用している遊泳水深に差が見られない(Fig. 3b)。しかしながら、日出・日没の時間にあたる6:00および18:00頃は他の時間帯に比較して遊泳水深の幅が3.8 mから4.9 mと大きくなっている。生データを見てみると、ブリの遊泳水深は日出・日没の時間帯に急激に浅くなっている(Fig. 4c)。

考察

本研究では、データロガにより生簀内のブリの遊泳水深を長期期間にわたって測定することに成功し、得られた結果よりブリの遊泳水深は季節的に変動すること、日出・日没に対応して遊泳水深を変化させることが明らかとなった。各月の遊泳水深には水温の鉛直的な構造の変化が影響していて、表層水温が下層水温よりも高温のとき、ブリは日中と夜間の水深差が大きく、生簀内を鉛直に幅広く利用していた。一方、冷却期に上層の水温が低下して、上層よりも下層の水温の方が高温になるとブリの日中と夜間の遊泳水深の差が小さくなり、鉛直的な行動範囲も小さくなった。遊泳水深と摂餌量の月変化には、明瞭な関連性は認められなかった。日周期の鉛直遊泳行動パターンには、冬季と夏季で明瞭な違いがみられた。

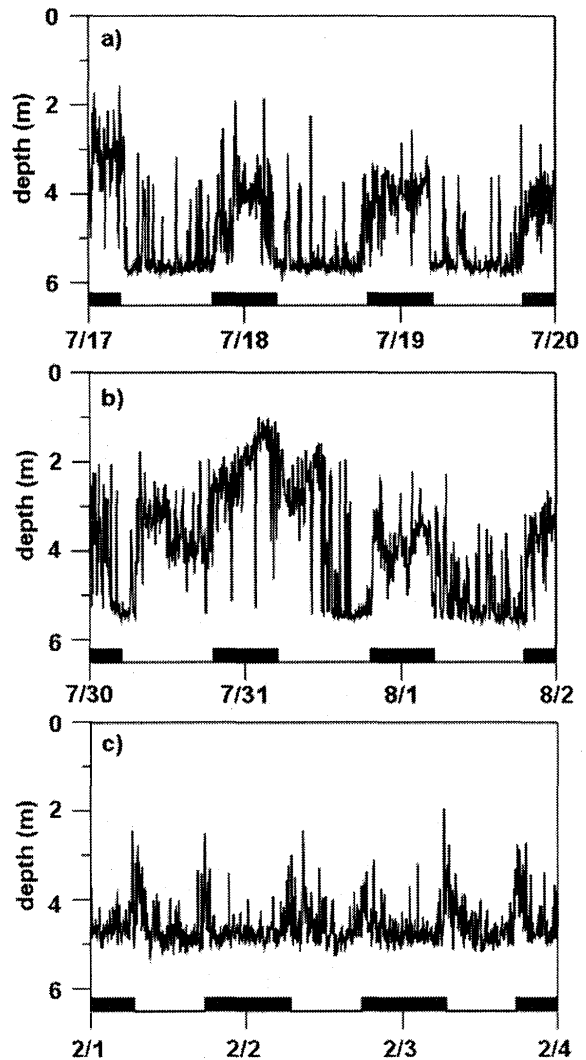


Fig. 4 Time series of the swimming depth of the yellow tail. Bottom black bars indicate night. a) Y005; 2004/7/17 - 2004/7/20, b) Y005; 2004/7/30 - 2004/8/2, c) Y012; 2005/2/1 - 2005/2/4.

夏季には、遊泳水深が日中は深く、夜間は浅くなる明瞭な日周期のパターンが認められた。しかしながら、台風来襲時には明瞭な日周期の変動パターンが見られなかった。一方、冬季になると日中と夜間の遊泳水深の差はなくなり、ほぼ同じ水深を遊泳していたが、日出・日没の時間帯にやや浅い水深を遊泳していた。

データロガの魚類への装着方法は主に2種類あり、背鰭付近に外部装着する方法と外科的な手法で腹腔内に挿入する方法がある。本研究では、外科的な手法によりデータロガを腹腔内に挿入する方法を採用した。挿入後、手術による切開傷は2週間程度で塞がっており、手術から1ヵ月後には切開箇所への傷はあまり目立たなくなっていた。また、データロガを装着したブリの遊泳行動を観察したところ、異常な遊泳行動は観察されず、摂餌行動も活発であった。測定終了後にデータロガを再び外科的手法により摘出した際、ブリ体内のデータロガ周辺には目立った炎症も見られず、ブリ個体の健康状態も良好であった。これらのことからデータロガ挿入によるブリの行動への影響は軽微であったと考えられる。

日周期の鉛直遊泳行動は、自然海域で測定されたブリの遊泳行動パターンにも表れているが(上野, 1977; 村山, 1977; 笠井ら, 1998; Kasai *et al.*, 2000), 他の魚種でも同様の行動を示すことが報告されている(Holland *et al.*, 1990; Dedual, 2002)。本実験で得られた結果からブリは生簀内においても、天然ブリの行動と同様の日周鉛直移動を行っていた。一方、冬季は日中と夜間で遊泳水深に差は見られなかったが、日出・日没の時間帯に顕著な鉛直行動が観察された(Fig. 3b, Fig. 4c)。自然環境下のブリでは、このような遊泳行動の変化は確認されていない。しかしながら、ブリの遊泳行動と水温の構造とを関連させて考えれば、共通点を見出すことができる。冬季のブリは、日中と夜間は上層よりも水温の高い下層に分布し、日出・日没のころに水温の高い上層を遊泳する。一方、冬季の自然環境下のブリは、日中と夜間は水温の低い沿岸海域に滞在し、日出・日没頃に高温な外海水と低温な沿岸水とのフロント域まで回遊する(Kasai *et al.*, 2000)。生簀内のブリの行動と天然海域でのそれとは、鉛直移動と水平移動という違いはあるものの、日出・日没に高温な水塊に向かって移動するという点では共通している。

一般に、魚類の日周期の遊泳行動には、摂餌が深く関連していることが知られている(Yuen, 1970; Holland *et al.*, 1990)。ブリの摂餌時間について、畑中ら(1958)によって調べられていて、ブリの摂餌は明け方に最もよく摂餌し、その後夕刻にかけて再び摂餌を行うことが報告されている。Kasai *et al.* (2000) は天然ブリが行う岸沖方向の水平移動にも日周期性があり、摂餌行動との関連性が示唆されている。本実験でも、類似した日周期の行動が見られることから、これらの行動はブリの摂餌と関連している可能性がある。魚類のこのような摂餌行動は、消化や代謝リズムと関係していると考えられ、今後、魚類の行動と生理的リズムとの関係を調べることで、健康で成長の早い魚類飼育方法を明らかにすることが出来ると考えられる。

宇田は低気圧や前線の通過前後に定置網でのブリの漁獲量が増加することを指摘している。また、Kasai *et al.* (2000) は風速とブリの遊泳水深には正の相関があり、低気圧の通過とブリの鉛直的な遊泳行動との関連性を示唆している。このように、気象変動は自然海域のブリの遊泳行動に影響を与えることがわかっているが、本研究でも夏季に台風が通過すると、ブリの日周期の鉛直遊泳行動が見られなかった。台風が通過すると、海域の流動環境や波高、水温、塩分、濁度などの物理環境が変化すると考えられる。しかしながら、どの要因がブリの遊泳行動に影響しているのかは不明である。また、今回は月変動と日周期の変動について調べたが、数日周期での遊泳水深の変動も確認されている。このような変動は、上記に示したような、台風や出水、赤潮などのイベント的な現象と関係していた可能性がある。今後は水温以外の物理、生物環境要因についても測定し、それらとブリの遊泳行動との関係を調べていく必要がある。

現在、“Fish welfare”という養殖魚のストレスの評価や健康管理を目的とする概念のもといくつかの研究がなされている。たとえば、McFarlane *et al.* (2004) は超音波テレメトリーによりニジマスの遊泳行動と摂餌の

有無やストレスとの関係を調べ、その関連性を指摘している。また、Begout Anras *et al.* (2004) は飼育密度がニジマスの遊泳行動にどのような影響を及ぼしているのか調べている。本研究でも、バイオテレメトリーの技術により、遊泳行動と環境変動との関係を明らかにすることが出来た。そのため、養殖魚の健康管理を行うシステムの開発には、バイオテレメトリーの技術を利用することが有効であると考えられる。

謝辞

本研究にご協力いただいた近畿大学水産研究所白浜実験場職員の和泉健一氏、学部生の工藤利洋氏、内海慶子氏、大学院生の久保敏彦氏、河野博俊氏に深く感謝致します。本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「クロマグロ等の魚類養殖産業支援型研究拠点」、および COE 萌芽研究助成金の支援を受けて行われた。

文献

- Begout Anras, M. L. and J. P. Lagardere (2004) : Measuring cultured fish swimming behaviour: first results on rainbow trout using acoustic telemetry in tanks. *Aquaculture*, **240**, 175–186.
- Dedual M. (2002) : Vertical distribution and movements of brown bullhead (*Ameiurus nebulosus* lesueur 1819) in Motuopa Bay, southern Lake Taupo, New Zealand. *Hydrobiologia.*, **483**, 129–135.
- FAO (2005) : World review of fisheries and aquaculture, FAO, pp. 2–5
- 畑中正吉, 高橋正雄, 村上五郎 (1958): ブリの生態に関する二, 三の実験的研究. 日本水産学会誌, **24**, 251–255.
- Holland K., R. W. Brill and K. C. C. Randolph (1990) : Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices. *Fish. Bull.*, **88**, 493–507.
- 笠井亮秀, 坂本 亘, 光永 靖, 山本章太郎 (1998): マイクロデータロガーによるイナダの遊泳行動解析. 日本水産学会誌, **64**, 197–203.
- Kasai A., W. Sakamoto, Y. Mitsunaga and S. Yamamoto (2000) : Behaviour of immature yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) observed by electronic data-recording tags. *Fisheries Oceanography*, **9**, 259–270.
- Kimura S., A. Kasai and T. Sugimoto (1994) : Migration of yellowtail in relation to intrusions of warm water from the Kuroshio. *Fisheries Science*, **60**, 635–641.
- McFarlane W. J., K. F. Cubitt, H. Williams, D. Rowsell, R. Moccia, R. Gosine and R. S. McKinley : Can feeding status and stress level be assessed by analyzing patterns of muscle activity in free swimming rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum)?, *Aquaculture*, **239**, 467–484.
- 村山秀男 (1977) : 新潟県 (両津湾) におけるブリの移動について. 海洋科学, **9**, 27–40.
- Okano S., Y. Mitsunaga, A. Ishikawa, W. Sakamoto and H. Kumai (2005) : An acceleration data-logger provide new information on swimming bluefin tuna in a net cage. *Proceedings of the 21st Century COE International Symposium on Stock Enhancement and Aquaculture Technology*, 187–196.
- 宇田道隆 (1960) : 海洋漁場学, 恒星社厚生閣, 東京, 245–260.
- 上野山清 (1977) : バイオテレメトリー手法による若狭湾ブリの行動に関する調査, 福井県水産試験場報告, **5**, 19–34.
- Yuen H. (1970) : Behavior of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, as determined by tacking with ultrasonic devices, *J. Fish. Res. Board Can.*, **27**, 2071–2079.