

超音波バイオテレメトリーを用いたスズキの移動と回遊の記録

平岡修宜,^{1a*} 荒井修亮,¹ 中村憲司,² 坂本 亘,³
三田村啓理,¹ 光永 靖,³ 米田佳弘⁴

(2002年11月1日受付, 2003年5月7日受理)

¹京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻, ²シャトー海洋調査株式会社,
³近畿大学農学部水産学科, ⁴大阪府環境農林水産部水産課Migration record of Japanese sea bass *Lateorabrax japonicus*
using ultrasonic biotelemetryYOSHINORI HIRAOKA,^{1a*} NOBUAKI ARAI,¹ KENJI NAKAMURA,² WATARU SAKAMOTO,³
HIROMICHI MITAMURA,¹ YASUSHI MITSUNAGA³ AND YOSHIHIRO YONEDA⁴¹Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto, Kyoto 606-8501, ²Chateau Marine Survey Co., Ltd.,
Osaka, Osaka 534-0025, ³Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Kinki University, Nara, Nara
631-8505, ⁴Department of Environment, Agriculture, Forestry and Fisheries, Osaka Prefecture, Osaka, Osaka
540-8570, Japan

Japanese sea bass *Lateprabrax japonicus*, captured in the western shore protection region of Kansai International Airport in Osaka Bay, were released near the place of capture with coded ultrasonic transmitters attached (9 individuals in August 2001 and 11 individuals in November 2001). The behaviors of these fish were monitored with 10 ultrasonic receivers, set along the western seawall (8 receivers) and off-shore (2 receivers). As a result, half of the fish provided continuous signals, whereas the others ceased to send signals immediately after the release. The signals of fish which sent continuous signals also broke off for over one day, suggesting that the sea bass occasionally went beyond the range of the receivers (ca. 350 m). Fish often failed to send signals during the neap tide until the spawning season and during a cold spell or after an atmospheric depression in the spawning season. We suggest that their off-shore migration is related to tidal and atmospheric changes.

キーワード：スズキ, 超音波コード化発信機, 潮汐, 低気圧, 産卵行動

関西国際空港は、24時間運用可能な我が国初の本格的な海上空港として1994年9月に開港した。南北4.4 km, 東西1.3 kmの空港島が建設されたのは大阪湾南部の泉州沖5 kmの地点である (Fig. 1)。建設においては空港島護岸の約80%に緩傾斜護岸が採用され、護岸ブロック、消波ブロックへの海藻胞子の植付けが行われるなど環境への配慮がなされた。さらに大阪府漁業調整規則により水産資源の保護、拡大を目的として空港島の南北、西沖390 m, 東沖490 mの水産動植物の採捕禁止区域が設定されている。また1999年7月には第2期工事として新たな人工島造成が開始された。そのため空港

周辺海域では環境保全の観点から、水質、底質、海生生物についての監視調査¹⁾が継続的に実施されている。これら調査の結果、関西国際空港護岸域では多くの海藻が生長した藻場が形成され、クロダイ *Acanthopagrus schlegeli*, スズキ *Lateolabrax japonicus*, メバル *Sebastes inermis* など多くの水産生物の生息が確認されている。

なかでもスズキは、大阪府において年間400~600 tの安定した漁獲量がある漁業対象種であり、日本全国の沿岸に広く分布する重要な水産資源である。近年では種苗生産技術の急速な進展²⁾により栽培漁業の対象魚種となっている。これまで初期生活史の研究³⁾が行われると

* Tel : 81-75-753-3137. Fax : 81-75-753-3133. Email : hiraoka@bre.soc.i.kyoto-u.ac.jp

^a 現所属：京都大学大学院情報学研究科生物圏情報学講座 (Biosphere Informatics Department of Social Informatics Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan)

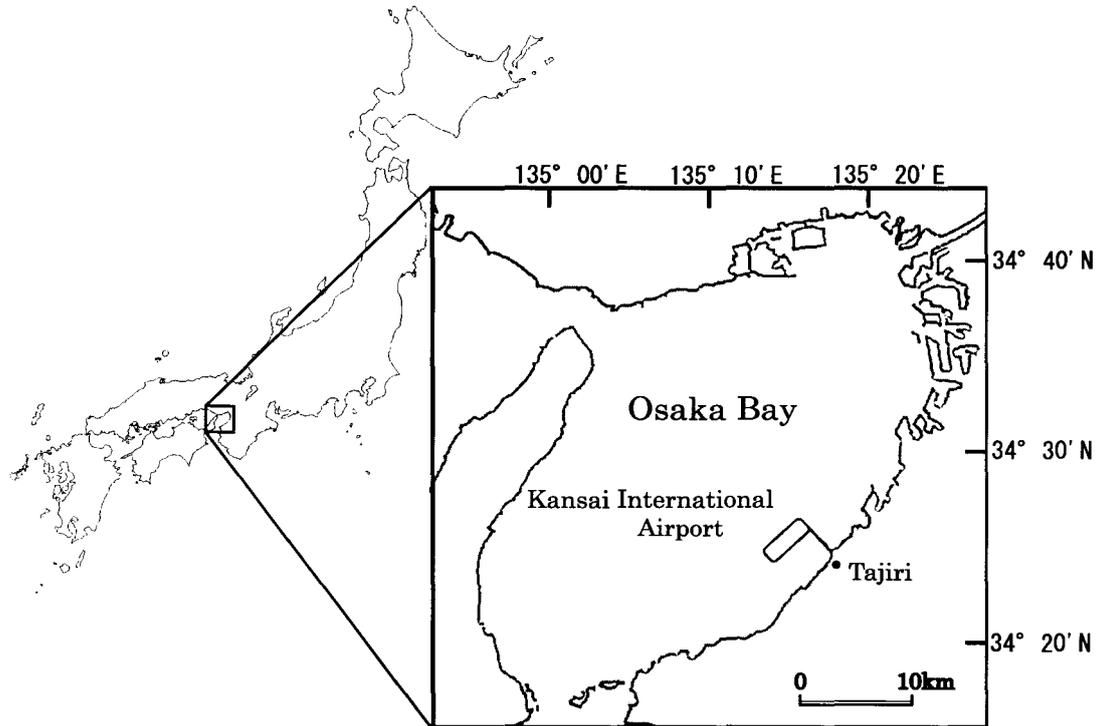


Fig. 1 Map of Osaka Bay and the location of Kansai International Airport.

ともに標識放流、標本漁船⁴⁾、漁獲量の変動⁵⁾などから成魚の分布、移動の調査が行われてきた。しかし遊泳能力が非常に高く、季節により海域のみならず汽水域から淡水域まで分布する⁵⁾ため、これまで長期間に亘る連続したスズキの分布、移動の調査が行われた例はない。そこで本研究では、超音波バイオテレメトリーを用いて関西国際空港護岸域での長期間、連続的なスズキの行動測定を行った。

最初に超音波コード化発信機の装着がスズキへ与える影響を測定するために装着実験を行った。続いて関西国際空港護岸域において超音波コード化発信機を装着したスズキの移動経路の追跡を行った。得られた結果からスズキの行動と空港周辺海域の海象、気象などの環境要因との関係を検討した。特に調査期間がスズキの産卵期である冬季を含むことから、環境要因と産卵にともなう行動の変化に注目した。また関西国際空港護岸域がスズキの生活に果たしている機能について考察した。

試料および方法

使用機器 使用した超音波コード化発信機 (V8SC-6L, Vemco Co., Ltd., Canada) は、超音波信号の発信間隔によって同時に 256 通りの個体識別が可能で、直径 8.5 mm、長さ 25 mm、水中重量 2.2 g、発信間隔は 90 秒、電池寿命は約 180 日であった。受信機には設置型受信機 VR2 (Vemco Co., Ltd., Canada) を用いた。

VR2 (以下、受信機) による超音波コード化発信機 (以下、超音波発信機) の受信範囲は半径約 350 m であり、超音波を発信した個体番号、受信した時刻が内部のフラッシュメモリに記録される。受信機のデータはインタフェースを用いてパーソナルコンピュータに接続し、回収した。

装着実験 装着実験は、京都大学大学院農学研究科附属水産実験所内の室内実験室で行った。供試魚は孵化から育成されたスズキ 2 歳魚である。装着実験では超音波発信機と同サイズ、同重量のダミー発信機 (以下、発信機) を用いた。装着方法は長期間の装着と障害物との接触を考え、Mitamura *et al.*⁶⁾ と同様に麻酔下で外科的な腹腔内装着を行った。発信機の装着後、個体識別のためリボンタグを装着し装着個体群、非装着個体群に分け、500 L の黒色ポリカーボネイト水槽で飼育した。発信機装着の影響を測る基準として体重の増減、鰓蓋の開閉回数を用いた。装着、非装着の各 5 個体の測定を毎週行う長期測定を 6 週間、装着、非装着の各 3 個体の測定を毎日行う短期測定を 1 週間行った。長期測定では飼料、給餌は実験前と同様であり、1 週間に 2 回飽食量を与えた。短期測定では実験中は絶食させた。鰓蓋の開閉回数を測定したのは短期測定の 7 日目である。

放流実験 放流実験は関西国際空港東側護岸で行った。大阪府漁業調整規則に基づく特別採捕許可の下、供試魚は空港東側護岸のタンカーバース周辺でルアー釣り

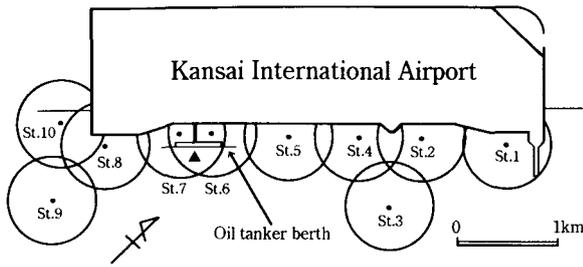


Fig. 2 Fish release location (▲), receiver locations (●), ranges (○ diameter) and station numbers.

によって採捕した。採捕後、田尻漁業協同組合の生簀に移し、蓄養した。次に採捕個体の中から傷などを考慮し放流個体を選抜、装着実験と同じ手法・手順で超音波発信機の装着を行った。超音波発信機を装着した放流個体は、行動や装着の傷口に異常がないことを確認し、採捕場所であるタンカーバース周辺に放流した。放流後のスズキの行動測定は、放流前に関西国際空港東側の護岸沿いに8台、沖合に2台設置した受信機を用いて行った。この10台の受信機は関西国際空港東側護岸域（以下護岸域）の大部分が測定範囲になるように設置した（Fig. 2）。

放流実験は夏季、秋季の2回行った。夏季の放流実験では2001年8月28日に採捕、29日に超音波発信機の装着を行い、30日に9個体を放流した。また秋季の放流実験では2001年11月12日に採捕、14日に超音波発信機の装着を行い、16日に11個体を放流した。受信機からのデータの回収は2001年9月12日、10月5日、26日、11月28日、12月19日、2002年1月10日、31日の7回行った。また解析に使用した潮位、気温、表層水温などのデータは関西国際空港の南西沖に設置された海上観測局での観測値を用いた。

結 果

装着実験 長期測定では1週間前、短期測定では前日の測定体重に対する測定体重の比を体重の変化率とした。長期測定、短期測定の装着個体群、非装着個体群における体重の変化率の平均を Fig. 3 に示す。なお長期測定の体重の変化率において発信機装着後1週間目以外は有意な差はなかった ($p > 0.05$)。短期測定では装着個体群と非装着個体群の体重の変化率において有意な差はなく ($p > 0.05$)、発信機装着後1日目以外、大きな差は見られなかった。また3回の目視観察による鰓蓋の開閉回数の平均は、装着個体群が毎分58.0、61.7、64.3回、非装着個体群が毎分50.7、61.0、72.7回となり、有意な差はなかった ($p > 0.05$)。

放流実験 供試魚の体重、全長の概要を Table 1 に示す。第1回放流では全長435~610 mm、体重650~

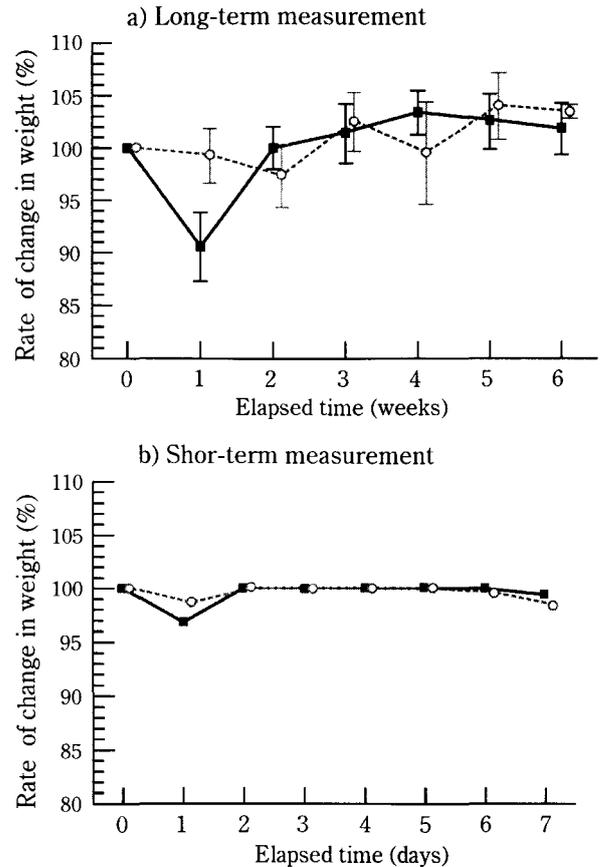


Fig. 3 Changes in body weights after surgical implantation of dummy transmitter. a) Long-term measurement in fish with surgical implantation of dummy (■) and those in control fish without operation (○); $n = 5$. b) Short-term measurement in fish with dummy (■) and without operation (○); $n = 3$.

Table 1 Total length and body weight of released Japanese sea bass

	TL ± S.D. (mm)	BW ± S.D. (g)
First release ($n = 9$)	521 ± 53	1428 ± 655
Second release ($n = 11$)	573 ± 100	1697 ± 937

2800 gであった。個体番号（以下ID）はF1~9である。第2回放流では全長438~740 mm、体重640~3720 g、IDはS1~11である。受信機に記録されたデータは、放流後7回（第1回放流）並びに4回（第2回放流）に亘って回収した。各データ回収日に得られた個体ごとの受信記録数を Table 2 に示す。第1回、第2回放流ともに、①受信記録がなくなるもの（F1, 4, 5, 8, S3, 4, 6）、②一度受信記録はなくなるが再び記録されるもの（F6, S7, 11）、③継続した受信記録があるもの

Table 2 The number of signals received from each individual

ID	31/Aug -12/Sep	12/Sep -5/Oct	5/Oct -2/Oct	2/Oct -28/Nov	16/Nov -28/Nov	28/Nov -19/Dec	19/Dec -10/Jan	10/Jan -31/Jan	Total
First release									
F 1	76	0	0	0		0	0	0	76
F 2	8296	19239	16146	27191		15364	18024	15812	120072
F 3	971	374	310	130		53	400	80	2318
F 4	121	0	0	0		0	0	0	121
F 5	491	0	0	0		0	0	0	491
F 6	146	0	208	9		0	0	0	363
F 7	705	634	646	2076		898	702	1814	7475
F 8	20	0	0	0		0	0	0	20
F 9	596	554	531	1843		2945	6088	8508	21065
Second release									
S 1					3566	619	271	1569	6025
S 2					1431	821	3589	3317	9158
S 3					146	0	0	0	146
S 4					11	0	0	0	11
S 5					1940	1898	5318	4304	13460
S 6					1104	0	0	0	1104
S 7					45	0	0	2	47
S 8					2049	1246	1096	0	4391
S 9					4059	2121	1023	261	7464
S 10					664	637	1422	2166	4889
S 11					0	1	0	0	1

The dates represent when the data recovered from receivers. The first release was performed on 31 August 2001, and the second release on 16 November 2001.

(F 2, 3, 7, 9, S 1, 2, S 5, 8, 9, 10) と 3 種類の受信パターンが観察された (Table 2)。各パターンを示す代表的な個体の移動を、受信機の設置場所 (Fig. 2) と対応させ Fig. 4 に示す。①の受信パターンを示したものは全て放流から 1 週間以内に記録がなくなった。また②の受信パターンを示したのも全て放流から 1 週間以内に記録がなくなった。しかしその後、再び短期間の受信が記録された。受信記録の間隔が最も長いものでは、S 7 において一度受信がなくなってから 59 日後に再び受信が記録された。③の受信パターンを示したものは、個体により受信記録の頻度はさまざまであるが、採捕地点である St. 6, 7 を中心に記録が続いた。しかし Fig. 4 の破線枠で示すように長期間の継続した記録の中に数日間、記録の途切れる期間もあった。

環境要因と受信個体数 第 1 回放流から第 2 回放流までの期間において各日の受信記録が確認された個体数と潮位、気温、表層水温の観測値を Fig. 5 に表す。放流から 1 週間以内に F 1, 4, 5, 6, 8 の 5 個体の受信記録がなくなった。これらの個体のうち第 1 回放流では F 6 において一度受信記録がなくなってから 35 日後の 10 月 10~12, 14 日に短時間ではあるが再び受信が記録された。放流から 1 週間後も護岸域に留まっていた個体

は、その後も 5 ヶ月以上、継続して受信が記録されていた。継続して受信が記録されたのは F 2, 3, 7, 9 の 4 個体である。多い時でその 4 個体中 3 個体の受信記録がない日があった。この 3 個体は F 3, 7, 9 である。2 個体以上の受信記録がない期間の潮汐は、干満の差が小さく変化の間隔も短い小潮期であった。受信記録が確認できた個体数と気温、水温との明確な関係は見られなかった。

第 2 回放流以降の期間において各日の受信記録が確認された個体数と潮位、気温、表層水温の観測値を Fig. 6 に示す。放流から 1 週間以内に S 3, 4, 6, 7, 11 の 5 個体の受信記録がなくなった。これらの個体のうち第 2 回放流では S 7 において一度受信記録がなくなってから 59 日後の 1 月 13, 14 日に短時間ではあるが再び護岸域での受信が記録された。また S 11 は放流直後、全く受信が記録されなかったが放流から 24 日後の 12 月 9 日に護岸域での受信が記録された。この期間に継続して受信が記録されたのは、第 1 回放流個体に新たに第 2 回放流個体である S 1, 2, 5, 8, 9, 10 が加わったため 10 個体である。約半数の個体の受信記録がない期間が、12 月上旬、1 月上旬の 2 回見られる。この期間の潮汐を見ると 12 月上旬では第 2 回放流までの時期と同様、

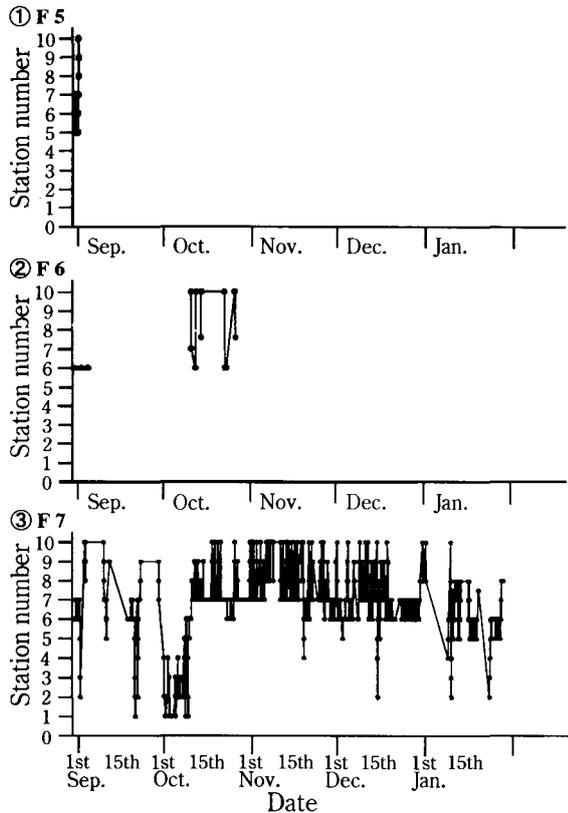


Fig. 4 Movement patterns of three typical individuals. Station numbers correspond with Fig. 2, and ● indicates the receiving time and station. Top figure: F 5 (520 mm TL), middle: F 6 (480 mm TL), bottom: F 7 (490 mm TL). Vertical marks on the X-axis indicate the first and fifteenth days of the months. The dotted line indicates the period (*ca.* 8 days) without receiving signals.

干満の差は小さく変化の間隔も短い小潮期である。しかし1月上旬では干満の差は大きくその変化が急激な大潮期であった。

12月まで継続して記録された10個体のうち6個体が受信されなくなった1月上旬の1月1日から2日において、気温は12.6°Cから1.1°Cと急激に低下していた。この期間、大阪での最低気温も3.2°Cから-0.9°Cと氷点下まで約4°C低下し、寒波が到来していたと推定される。同じ期間の表層水温においては低下する時期にも関わらず急激に約1°C上昇し、その後再び低下した。またこの寒波が到来した期間には低気圧が通過していた(Fig. 7)。

考 察

手法の妥当性 長期測定において発信機装着後2週間目以降の装着個体群と非装着個体群の体重の変化率に大きな差は見られなかった。短期測定では発信機装着後1日目の体重の変化率に差があったが、その後、装着個

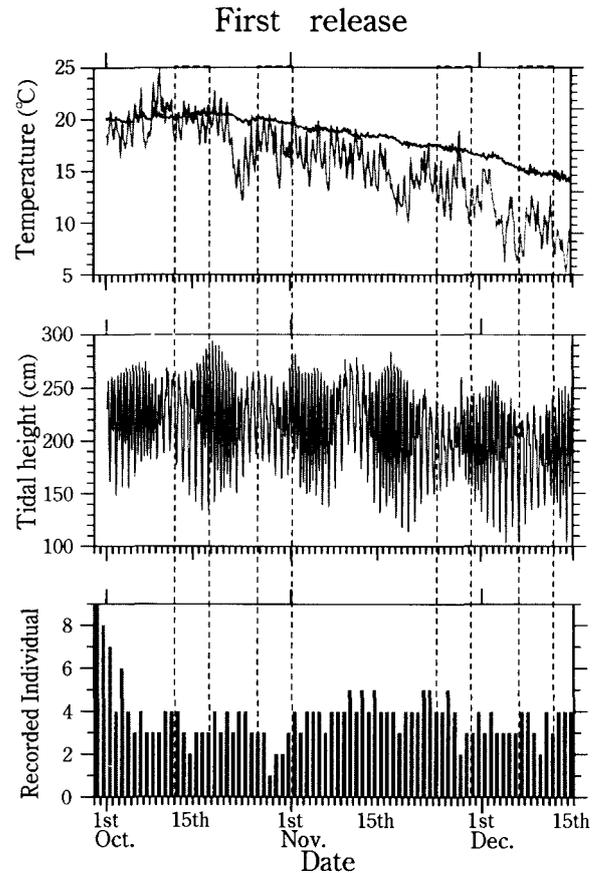


Fig. 5 The number of recorded individuals (bottom), tidal heights on the basis of Osaka datum line (middle), and atmospheric temperature and surface water temperature (top), during the period from 30 August 2001 to 15 November 2001. The longer vertical marks on the X-axis indicate the first and fifteenth days of the months. The thick line of the top graph indicates surface water temperature, and the thin line indicates atmospheric temperature. The dotted line indicates the period when relatively few individuals sent signals.

体群と非装着個体群の体重の変化に大きな差は見られなかった(Fig. 4)。これらから長期測定において発信機装着後1週間目に現れた体重の変化率の差も装着直後に生じたものと考えられる。魚類は変温動物で代謝が低いいため急激に体重が変化することは考え難い。発信機装着直後に生じた体重の減少は、開腹による体液など体内の水分の流出が原因と考えられる。また鰓蓋の開閉回数においても装着個体群と非装着個体群との間に大きな差はなかった。これらから超音波発信機の装着によるズキへの影響は装着から1日目までにはあるものの、以後はないと仮定し、放流実験において放流は超音波発信機の装着から2日目以降に行った。

Mellas *et al.*⁷⁾ は、腹腔内への超音波発信機の装着の利点として、魚体の重心近くに装着できること、遊泳に

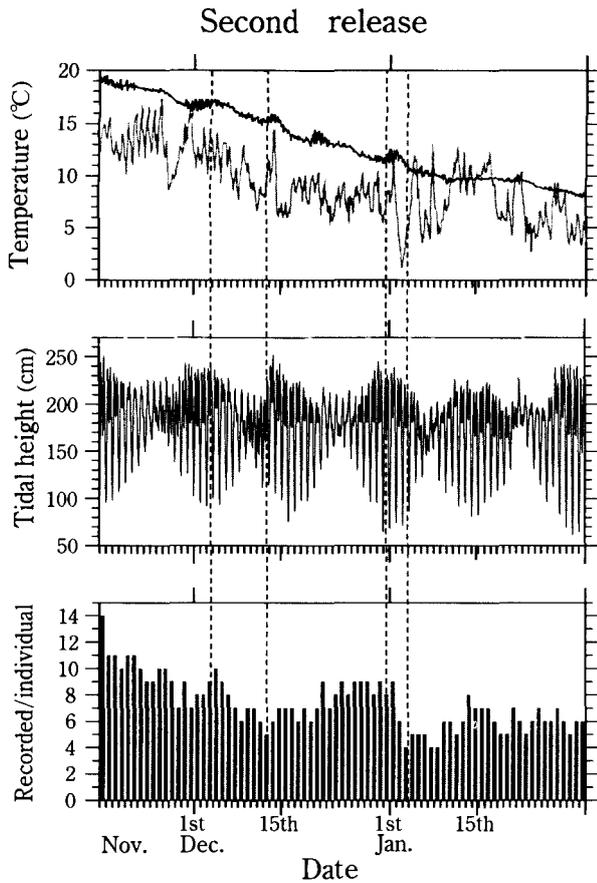


Fig. 6 The number of recorded individuals (bottom), tidal heights on the basis of Osaka datum line (middle), and atmospheric temperature and surface water temperature (top), during the period from 16 November 2001 to 31 January 2002. The symbols and lines are the same as in Fig. 5.

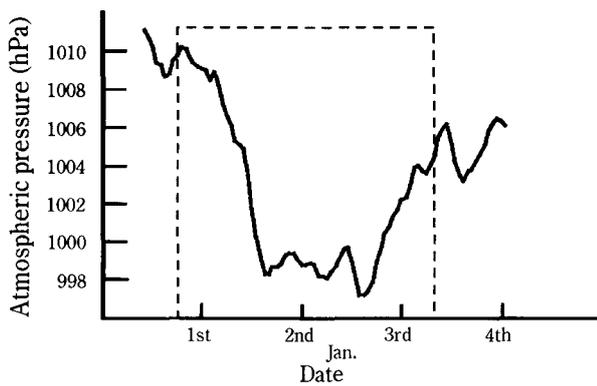


Fig. 7 Atmospheric pressure in Osaka. The dotted line indicates the same period as in Fig. 6.

影響を及ぼさないこと、超音波発信機が障害物に接触する恐れがないこと、脱落が少ないことを挙げている。長期間の行動測定においてこれらの利点は重要である。装

着実験により超音波発信機の装着がスズキに与える影響が続くのは比較的短期間であると考えられる。これらから、スズキの長期間の行動測定に腹腔内への超音波発信機の装着は適している。また超音波発信機と設置型受信機による海洋生物の長期間の行動測定は、これまであまり移動しないとされる底生のメバル類⁸⁾などを対象に行われてきた。今回、放流実験では最高で約5ヶ月間、スズキの行動を測定することができた。この結果から記録式標識⁹⁾や加速度記録計¹⁰⁾ほど完全な時系列は得られないが、スズキのように高頻度に移動する海洋生物の長期間の行動測定にも、この手法は有効である。受信機の感度の向上、超音波発信機の高出力化の実現にとともに、今後より広範囲の行動測定が可能となることが期待される。

スズキの行動 供試魚は体長組成 (Table 1) と林¹¹⁾ の大阪湾におけるスズキの成長率から、全て3歳以上の成魚である。護岸域の大部分は受信機の測定範囲となっていることから受信記録がない期間は護岸域を離れ、受信機の測定範囲を超える沖合へ移動したと考えられる。放流直後の受信状況、個体間の行動の違い (Table 2, Fig. 4) から、放流から1週間以内に受信記録がなくなり測定範囲を離れた個体 (F 1, 4, 5, 6, 8, S 3, 4, 6, 7, 11) は、採捕時においては護岸域に分布していたが、本来は関西国際空港の周辺海域を含む大規模な生活域を有すると考えられる。また F 6, S 7, 11 のように再び受信記録が確認された個体においては、受信記録が長期間に亘る場合は回遊における休息所、短期間の場合は回遊経路の一部として護岸域を利用していると推定される。一方、測定範囲に留まった個体 (F 2, 3, 7, 9, S 1, 2, S 5, 8, 9, 10) は沖合に出ることもあるが護岸域を中心とする生活域を有すると考えられる。遊漁者のあいだではスズキには一地点に留まる「居着型」と広範囲に移動する「回遊型」の2つの行動パターンがあると言われている。関西国際空港東側護岸域のスズキに放流直後見られた行動パターンの違いは、これら「居着型」と「回遊型」の行動パターンの違いに一致する。

継続した受信記録があり護岸域に留まった個体において、小潮期に複数個体が沖合へと移動する傾向と寒波、低気圧の到来に一致した沖合への移動が見られた。また第1回放流から第2回放流までの期間において小潮期に複数個体が沖合へと移動している期間は約2,3日と短期間である (Fig. 5)。この行動パターンから、小潮期には餌料生物であるイワシ類、アジ類、イカナゴ¹¹⁾などが空港島護岸域に回遊しないため、スズキは沖合へ索餌のため移動したと推測される。しかし裏付けとなるこれら餌料生物の回遊に関する知見は今のところ乏しく、今後の調査が待たれる。

大阪湾でのスズキの産卵期は11月~2月、盛期は12

月下旬～1月中旬であり産卵場所は大阪湾南部, 西部の比較的外洋水の影響の強い海域とされている。¹¹⁾ 1月上旬の複数個体が護岸域を離れている期間はこの産卵盛期である。また同じ期間の表層水温は, 急激に変化していた (Fig. 6)。人工飼育ではスズキは低気圧の通過により産卵が起こり, 天然でも九州有明海々域では急激な寒波の襲来により沖合への移動が促され, 放卵・放精するものが多いという報告がある。¹²⁾ こうした知見から1月上旬に見られた沖合への移動は, 低気圧の通過, 寒波の襲来にともなう混合により生じた急激な水温変化に誘発された産卵回遊であることが考えられる。以上から関西国際空港東側護岸におけるスズキの沖合への移動は, 12月までは餌生物であるイワシ類などを追跡する索餌行動であり, 産卵期においては急激な水温変化にともなう産卵行動に起因すると示唆される。

本研究の結果より関西国際空港護岸域は, ここを主たる生息域としている「居着型」スズキ群の生息場や餌場として機能しているだけでなく, 放流直後に護岸域から離れた個体のように広範囲の回遊を行う「回遊型」スズキ群へ休息場を提供していると考えられる。また建設から年月を経ない関西国際空港周辺海域において, 本来沿岸域に生息するスズキが生息し, これまで沿岸域でのスズキの生態に関して言われてきた産卵に伴う沖合への移動と思われる行動が見られた。これらから関西国際空港周辺海域が少なくともスズキには沖合の生態系と沿岸の生態系を兼ね備えた環境を提供していると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり大阪府環境農林水産部水産課, 大阪府立水産試験場, 関西国際空港株式会社の皆様には, 貴重な資料, 御意見をいただきました。シャトー海洋調査の向井幸則博士(現, マレーシア, サバ大学講師)には実験を行うに当り, 多大な御支援をいただきました。京都大学大学院情報学研究所生物圏情報学講座, 同農学研究科海洋生物資源学講座海洋生物環境学分野, お

よび同海洋生物増殖学分野の皆様には心ある御指導をいただきました。また本稿を作成するにあたり, 匿名の査読者, 編集委員の方々から有益な御指摘をいただきました。深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 白石修章, 飯島眞治, 永野国松, 中辻啓二. 関西国際空港沖における潮流と波による底泥の巻き上げ現象. 海岸工学論文集 2000; 47: 1076-1080.
- 2) 牧野 直. 種苗生産の現状と課題. 「スズキと生物多様性」(田中 克, 木下 泉編) 恒星社厚生閣, 東京. 2002; 21-31.
- 3) 田中 克, 松宮義晴. スズキの初期生活史. 栽培技研 1982; 11: 49-65
- 4) 林 文三, 清野精次. 若狭湾におけるスズキの生態—I 久美浜湾における季節的移動. 京都府立海洋センター研究報告. 1977; 1: 29-43.
- 5) 庄司紀彦, 佐藤圭介, 尾崎真澄. 資源分布と利用実態. 「スズキと生物多様性」(田中克, 木下 泉編) 恒星社厚生閣, 東京. 2002; 9-20.
- 6) Mitamura H, Arai N, Sakamoto W, Mitsunaga Y, Maruo T, Mukai Y, Nakamura K, Sasaki M, Yoneda Y. Evidence of homing of black rockfishes *Sebastes inermis* using biotelemetry, *Fish. Sci.* 2002; 68: 1189-1196.
- 7) Mellas E J, Haynes J M. Swimming performance and behavior of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) and white perch (*Marone americana*): Effects of Attaching Telemetry Transmitter. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1985; 42: 488-493.
- 8) Starr RM, Hine JN, Felton JM, Calliet GM. Movement of bocaccio (*Sebastes paucispinis*) and greenspotted (*S. chlorostictus*) rockfishes in a Monterey submarine canyon: implication for the design of marine reserves. *Fisheries Bull.* 2002; 100: 327-334
- 9) Ishida Y, Yano A, Ban M, Ogura M. Vertical movement of a chum salmon *Oncorhynchus keta* in the western North Pacific Ocean as determined by a depth-recording archival tag, *Fish. Sci.* 2001; 67: 1030-1035.
- 10) Kawabe R, Nashimoto K, Hiraiishi T, Naito Y, Sato K. A new device for monitoring the activity of freely swimming flatfish, Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*, *Fish. Sci.* 2003; 69: 3-10.
- 11) 林 凱夫. スズキ. 関西国際空港漁業環境影響調査. 漁業生物班資料1. 日本水産資源保護協会, 東京, 1977; 59-69.
- 12) 伏見 徹. 養成スズキの自然産卵について. 栽培技研 1974; 3: 9-14.