超音波テレメトリーを用いたタイ国ケンカチャン湖における メコンオオナマズ 0 歳種苗の水平分布と日周移動の解明

横山綾子,¹ 荒井修亮,² 三田村啓理,³ 光永靖,^{4*}
山根央之,⁵ VIPUTHANUMAS THAVEE⁶

(2018 年 12 月 24 日受付, 2019 年 6 月 23 日受理, 2019 年 9 月 3 日 J-STAGE 早期公開)

¹京都大学大学院農学研究科, ²京都大学フィールド科学教育研究センター, ³京都大学大学院情報学研究科,
⁴近畿大学農学部, ⁵株式会社 Chill, ⁶タイ国水産局

Horizontal distribution and diel movements of 0-year-old hatchery-reared Mekong giant catfish
Pangasianodon gigas in Kaeng Krachan reservoir, Thailand, obtained by acoustic telemetry

AYAKO YOKOYAMA,¹ NOBUAKI ARAI,² HIROMICHI MITAMURA,³
YASUSHI MITSUNAGA,^{4*} HIROYUKI YAMANE⁵ AND THAVEE VIPUTHANUMAS⁶

¹Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Oiwakecho, Kyoto 606-8502, ²Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Oiwakecho, Kyoto 606-8502, ³Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Kyoto 606-8501, ⁴Faculty of Agriculture, Kinki University, Nakamachi, Nara 631-8505, ⁵Chill Co., Ltd., Niiza, Saitama 352-0014, Japan, ⁶Inland Aquaculture Research and Development Division, Department of Fisheries, Bangkok 10900, Thailand

To monitor the post-release movements of hatchery-reared Mekong giant catfish *Pangasianodon gigas*, 15 0-year-old fish tagged with acoustic transmitters were released into Kaeng Krachan reservoir, Thailand. Twenty automatic monitoring receivers were installed throughout the reservoir and tracked fish for a maximum of 252 days. Most of the fish moved throughout the reservoir for about 1 month and then came to utilize relatively small areas near the middle of the reservoir or near the dam. The radius of the daily habitat was about 1.4 km and the center of the daily habitat moved less than 500 m, indicating that the core areas were fixed within a small area. However, the distance traveled by eight fish monitored for more than 2 months sometimes exceeded 2 km per day. Six of the eight fish showed periodicity, with the transmitter signals detected only during the day or at night, indicating diel horizontal movements. All fish stopped their movements or all receivers ceased receiving signals before the battery lives of the transmitters expired, suggesting predation, bycatch, or transmitter shedding.

キーワード：種苗放流, 水平分布, 絶滅危惧種, 超音波テレメトリー, 日周行動, メコンオオナマズ

メコンオオナマズ *Pangasianodon gigas* はメコン水系の固有種であり, 全長 3 m, 体重 250 kg におよぶ世界最大級の淡水魚である。¹⁾ 本種の稚魚はメコン水系の氾濫原や湖などに生息しており, 成長に伴い徐々に本流へと移動し, 成魚はメコン川の深い場所に生息するとされている。²⁾ 雨季に入り河川流量が増えると成魚は産卵のために下流から上流に数千 km を移動するとされ, タイ国北部チェンライ県のチェンコン周辺域で産卵が確認さ

れている。³⁾ 食性の詳細は明らかでないが, 全長 14 cm 程度の稚魚は上顎, 下顎, 口蓋に歯を有していることから, 動物食であると考えられている。⁴⁾ 一方, 成魚は歯を有していないことから植物食であると考えられている。¹⁾ 本種はタイ国内で文化的にも親しまれており, 伝統的に漁獲してきた地域では「龍神がメコン川を開いた際, 最初に川を上った魚である」とか「諸葛孔明の生まれ変わりである」といった伝承が残されている。¹⁾ しか

し、その食味の良さから貴重なタンパク源として乱獲され、1900年代以降個体数が激減した。²⁾ 加えて、近年ではメコン川に建設中の複数のダムが、本種の産卵回遊を阻害することも懸念されている。²⁾ 現在本種の野生の成熟個体は残すところあと数百尾とされており、⁵⁾ 遺伝的多様性も極めて低くなっている。⁶⁾ こうした現状を受けて、本種はIUCNにより近絶滅種に認定された。⁷⁾ タイ国水産局では本種の個体数回復のために1983年より種苗生産技術の開発に取り組み、翌年にF1種苗、2001年にF2種苗の生産に成功した。近年メコン川本流や国内の複数のダム湖などに年間5万匹から10万匹の種苗が放流されている。⁸⁾

効果的な種苗放流を行うには、対象種の放流先における生態を把握する必要がある。野外に放流された2歳以上（全長60–100 cm程度）の種苗の移動や分布については、超音波テレメトリーによる研究が行われている。例えば、メコン川では、全長100 cm程度の個体が上流に30 km、下流に50 kmほど移動することが確認され、人工種苗のメコン川における遊泳能力が明らかになった。⁹⁾ また、ダム湖では全長60–100 cm程度の個体が溶存酸素躍層によって遊泳深度が制限されていること、さらに昼は岸から離れた場所で活発な鉛直行動を行うのに対し、夜間は浅瀬で一定の深度を遊泳するという日周性を示すことが示唆された。^{10–12)}

一方、0–1歳の種苗（全長10–40 cm程度）については形態学的な研究はなされているものの、⁴⁾ 移動や分布などの自然環境下における生態学的な研究は行われてい

ない。タイ国水産局は本種を全長10–40 cmの時点で放流することが多く、当該サイズの生態情報はより効果的な放流を行うために不可欠である。そこで本研究では、タイ国ケンカチャン湖において全長20 cm程度のメコンオオナマズ0歳種苗を、小型の超音波発信機^{13–15)}を用いて追跡した。ケンカチャン湖では約25年前から種苗の放流が行われており、全長2 m程度の個体が毎年10–30尾ほど漁獲される。放流された種苗は2 mまで成長することから、ケンカチャン湖はメコンオオナマズの生育に適していると考えられる。本研究では特にケンカチャン湖において0歳種苗が好む生息場所および移動特性を明らかにすることを目的とした。

材料と方法

調査地 調査は2016年12月から2017年12月にかけて、タイ国ペッチャブリー県ケンカチャン湖で行った（Fig. 1）。ケンカチャン湖は面積が約46.5 km²の人造のダム湖である。北部と西部から河川が流入し、東部のダムより放水される。西部の流入河川からダムにかけて湖底に旧河川があり、その付近は水深が深い。ダム付近が最深部となり、満水時の最大水深は約40 mであるが、雨季と乾季で約6 mの水位変動が起きる。気候は3月から5月の暑期、6月から10月の雨季、11月から2月の乾季に大別される。調査期間中の最低気温は21°C（2月）、最高気温は38°C（8月）であった。

供試魚と超音波テレメトリー 本研究において、供試魚はF1種苗の0歳魚15尾（ID 1–15、全長20.6 ± 1.2

Fig. 1 Map of study site. (a) Map of Kaeng Krachan reservoir in Petchaburi Province, Thailand. Two inlets are located in the western and northern parts of the reservoir, and the dam is in the eastern part. The filled circles and crosses represent the locations of receivers (St.) and DO (dissolved oxygen) measuring points, respectively. (b) Layout of receiver array. Four of the twenty receivers deployed near the dam (St. 13–16) were used to establish a receiver array to calculate fish position with high accuracy. The distance between the receivers was 500 m. The filled star indicates the fish release site.

Table 1 Summary of 15 sample fish which were tagged with acoustic transmitters and released into the reservoir

Fish ID	TL (cm)	Weight (g)	Release date	Last detection	No. of detections	TD (d)	MD (d)	RN	DM (day)	PP
1	20.8	71.2	2016/12/6	2016/12/06	25	1	1	—	—	0
2	22.9	105.0	2016/12/6	2017/09/29	18051	298	77	3.7	0	4
3	20.0	61.0	2016/12/6	2017/05/10	10632	156	156	2.9	6	9
4	23.1	94.0	2016/12/6	2017/03/01	28408	86	86	2.6	0	438
5	21.1	68.8	2016/12/6	2017/08/14	11321	252	252	2.1	3	1
6	21.8	69.0	2016/12/6	2016/12/26	2284	21	21	—	—	0
7	20.7	66.9	2016/12/6	2016/12/06	52	1	1	—	—	0
8	18.9	47.3	2016/12/6	2016/12/06	143	1	1	—	—	0
9	20.8	71.8	2016/12/6	2017/09/09	4148	278	118	1.4	13	0
10	19.7	54.7	2016/12/6	2017/04/29	13561	145	118	2.6	4	101
11	19.9	53.0	2016/12/6	2016/12/19	193	14	14	—	—	0
12	19.9	56.2	2016/12/6	2017/02/24	5321	81	79	1.3	11	0
13	20.0	57.2	2016/12/6	2016/12/07	53	2	2	—	—	0
14	20.9	59.2	2016/12/6	2017/03/15	6797	100	100	2.2	11	25
15	19.0	43.8	2016/12/6	2017/01/19	344	45	1	—	—	0

TD, total number of monitoring days; MD, number of days from release date to date when the fish stopped their movements; RN, number of receivers which detected signals from each fish per day; DM, number of days when the fish showed diel horizontal movement, PP, number of positioning points which were calculated using data in the receiver array.

cm, 体重 63.3 ± 19.8 g, 以降同様の記述は全て平均 ± 標準偏差とする)を用いた (Table 1)。これらの種苗は、タイ国ペッチャブリー県ターヤンに位置する Petch-aburi Inland Fisheries Development and Research Center で飼育された。供試魚は歯を有していた。

追跡は、個体を識別する ID 情報を発信する小型超音波発信機 (V7-2L: 直径 7 mm, 長さ 20 mm, 空中重量 1.65 g, 音圧 136 dB, 周波数 69 kHz, Vemco, カナダ) を用いて行った。超音波信号の発信間隔は放流後 30 日間は 60–120 秒と短く, 31 日以降は電池寿命を延ばすために 240–360 秒と長く設定した。この設定で電池寿命は 288 日間 (2016 年 12 月初旬から 2017 年 9 月末まで) であった。20 台の受信機 (VR2W, Vemco, カナダ) を湖全域に設置し, 個体の移動をモニタリングした (Fig. 1a)。以降, 各受信機の設置地点を St. 1–20 とする。St. 1 は西部流入河川, St. 20 は湖の最北端である。受信機は, 受信範囲内にある個体の ID と受信日時を記録する。個体の追跡に用いたものと同じ発信機と受信機を用いて, 本研究の水域における受信範囲の半径を調べたところ, 最小で 100 m, 最大で 400 m, 平均で 250 m 程度であった。

個体の放流は湖東部のダム付近から行った (Fig. 1a)。放流直後の逸散経路を明らかにすること, さらに放流場所に留まる個体があった場合にその詳細な日周行動を明らかにするため, ダム付近の 4 台 (St. 13–16) の受信機は 500 m 間隔で正三角形を成すように設置し, 個体の詳細な位置を測位するための受信機アレイを構築した (Fig. 1b)。各受信機には時刻同期用の発信機 (V16–

6H: 音圧 158 dB, 周波数 69 kHz, 発信間隔 600 秒, Vemco, カナダ) を取り付けた。1 発の信号が, 3 台もしくは 4 台の受信機に受信されていた場合, その到達時刻差を用いて双曲線位置決定法により個体の位置を測位した。¹⁶⁾ この測位技術は数 m から数十 m の誤差で測位でき, 本研究の水域における測位誤差は約 15 m であった。¹⁷⁾

2016 年 12 月 6 日に 2-フェノキシエタノールを用いて供試魚に麻酔を施し, 外科手術によって腹腔内に発信機を挿入した。¹⁸⁾ 麻酔から覚醒した約 3 時間後に受信機アレイの中心部で放流した (Fig. 1b)。2017 年 7 月 14 日と 2017 年 12 月 13 日に受信機からデータをダウンロードした。

超音波テレメトリーのデータ解析 受信機から得られたデータを用い, 次の 5 つの項目を分析した。

1. 放流場所からの移出時間と移出方向 放流場所からの各個体の逸散過程を明らかにするために, 受信機アレイの受信データを用いて測位を行ったが, いずれの個体も放流直後には測位点は得られなかった。そこで, 各個体が放流場所であるダムエリアから移出するまでの時間と移出方向を, ダムエリア外の受信機 (St. 13–16 以外) で初めて受信されるまでの時間と, その受信機の位置から推定した。

2. 各地点での滞在時間 放流個体の湖全体における水平分布を把握するため, 各受信機の受信範囲内への滞在時間を調べた。ある個体が同一受信機で連続して受信され, かつその受信時刻差が 20 分以内の場合, 個体はその間受信範囲内に滞在していたとした。そして, その

ような 20 分以内の値を 1 か月ごとに合計することで、各月の受信機ごとの合計滞在時間を求めた。

3. 1 日当たりの行動範囲と移動距離 個体の 1 日 (0:00–24:00) 当たりの行動範囲と、移動距離を求めた。まず 1 日当たりの行動範囲を推定するために、各個体は何台の受信機で受信されたかを 1 日ごとに調べ、その値を平均することで平均受信機台数を算出した。ただし、ダムエリアの 4 台の受信機は設置間隔が短いため、他の場所の受信機間距離との均整を取るために、まとめて 1 台とカウントした。次に、湖に設置したすべての受信機について、最も近い場所に設置された受信機までの距離を算出し、その値を平均することで平均受信機間距離を算出した。ただし、ダムエリアの 4 台の受信機については St. 13 を代表として用いた。そして、平均受信機間距離に 1 日当たりの平均受信機台数をかけることで行動範囲を見積もり、その半分の値を行動半径とした。次に、1 日に受信のあった受信機の各受信回数で重み付けした平均の位置座標を行動範囲の重心とし、¹⁹⁾ 連続する 2 日の重心間の距離を算出することで、1 日当たりの移動距離を算出した。

4. 日周性の有無 日周性を確認するため、各受信機の受信回数を確認し、以下の A と B の条件のいずれかを満たす期間を「日周性の見られた期間」と定義し、それぞれの期間の合計日数を集計した。A：同一の受信機で 3 日以上連続して、白昼 (9:00–15:00) と深夜 (21:00–3:00) の、どちらか一方の受信回数が 0 回、他方の受信回数が 10 回以上である場合。B：白昼と深夜のそれぞれで最も多く受信された受信機が 3 日連続で異なった場合 (例えば、3 日連続で白昼は St. 3、深夜は St. 5 で最も多く受信されていたなど)。

5. 受信機アレイ内での昼夜の滞在時間と移動距離 放流直後に双曲線測位法により測位点を得られた個体はいなかったが、その後各個体が受信機アレイ内に滞在し、測位点を得られた期間について、アレイ内への滞在時間と移動距離とをそれぞれ昼夜で比較した。アレイを設置した場所の湖底には旧河川があり、アレイ外と比べて水深が深い。全長 60–100 cm 程度の種苗が行っていた日周深浅移動を、本研究における 0 歳種苗も示すかを調べるために、昼夜のアレイ内への滞在時間を調べた。連続する測位点間の時刻差を全て算出し、20 分以内であればアレイへ滞在していたとした。そしてその値を各日の昼 (6:00–18:00)、夜 (18:00–6:00) ごとに合計し、Mann-Whitney の *U* 検定を用いて比較した。さらに、昼夜の移動距離を比較するために、2 つの連続する測位の時間差が 3 時間以内の場合、2 点間の距離から 1 時間当たりの移動距離を算出し、昼 (6:00–18:00) と夜 (18:00–6:00) で Mann-Whitney の *U* 検定を用いて比較した。

溶存酸素と水温 2016 年 11 月 30 日と 2017 年 7 月 16 日に湖内 5 か所 (St. 1, 12, 16, 18 および St. 8 の南方約 2 km [以下 SP], Fig. 1a) の溶存酸素 (DO) 鉛直プロファイルを、温度センサ付溶存酸素記録計 (RINKO I ARO-USB, JFE アドバンテック, 日本) を用いて取得した。各地点とも、深度 0, 1, 2, 4, 6 m、以降湖底 (最深 32 m) まで 2 m 間隔で計測した。

2016 年 12 月から 2017 年 12 月にかけて、湖の水温鉛直プロファイルを温度ロガー (TidbiT v2, Onset, USA) を用いて連続計測した。湖中央部 (St. 12 付近) の深度 0, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25 m に 8 個の温度ロガーを設置して、各深度の水温を 30 分間隔で計測、記録した。得られた水温データを深度 0.1 m 間隔で線形補間し、統計ソフト R (ver. 3.5.0) でコンター図を作成した。

結 果

溶存酸素と水温 2016 年 11 月 30 日は計測した 5 地点すべてで深度 5–10 m に溶存酸素量が 6–8 mg/L から 0 mg/L まで減少する DO 躍層が生じていた (Fig. 2a)。2017 年 7 月 16 日は St. 1 を除く 4 地点では同じく深度 5–10 m に DO 躍層が生じていたが (Fig. 2b)、流入河川となる St. 1 では湖面から湖底まで一様に約 7 mg/L であった。

2016 年 12 月から 2017 年 2 月までは湖面から深度 25 m まで水温は 27°C 以下と一様で一年を通して最も低い水温であった (Fig. 3)。2 月中旬ごろから湖面水温が徐々に上昇していき、4 月ごろから深度 5 m 当たり水温が 2–3°C 変化する水温躍層が形成された。水温躍層は 2017 年 11 月に再び消失するまでのおよそ 8 か月間、深度 5 m から 15 m の間で推移していた。

放流場所からの移出時間と移出方向 2017 年 7 月にすべての受信機からデータをダウンロードした (Fig. 4)。2017 年 12 月には St. 9, 18 の受信機の電池が切れており、この 2 台からは 7 月以降のデータは得られなかった。すべての受信機が信号を受信しており、各個体について 25 回 (ID 1) から 28,408 回 (ID 4) の受信データが得られ、最短で 1 日間、最長で 252 日間モニタリングできた (Table 1)。全 20 か所の St. のうち、各個体が受信された St. の数は、最小で 4 か所 (ID 15)、最大で 19 か所 (ID 5) であった。1 個体 (ID 15) を除く 14 個体は、放流後 11.5 ± 7.2 時間 (最短 0.97 時間、最長 26.3 時間) でダムエリアから移出した。南西方向 (St. 11, 12) に移出した個体が 8 個体と最も多く、北方向 (St. 17, 18) へは 4 個体、南方向 (St. 10) へは 2 個体が移出した。ダムエリアから移出しなかった ID 15 を含む 7 個体 (ID 1, 6, 7, 8, 11, 13, 15) は放流後 1 日から 45 日までに受信が途絶え、それ以降全く受信されなかったため (Fig. 4)、滞在時間や 1 日当たりの行動範囲・移

Fig. 2 Vertical distributions of dissolved oxygen at five measuring points (St. 1, 12, 16, 18 and SP) in the study site. At each site, DO was measured at 2-m intervals from the surface to the bottom: (a) 30 November 2016, (b) 16 July 2017.

Fig. 3 Vertical distribution of water temperature. The vertical profile of water temperature was measured at St. 12 every 30 minutes from December 2016 to December 2017, using temperature loggers deployed at depths of 0, 5, 8, 10, 12, 15, 20 and 25 m. The data was linearly interpolated at intervals of 0.1 meter. A thermocline occurred at the depth of 5–15 m from April to November.

動距離の解析は行わなかった。このうち、ID 7は放流した翌朝に St. 17 付近で漁業者の刺し網によって混獲された。8 個体 (ID 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 14) は放流後 2 か月以上モニタリングできたが、ID 2を除いて発信機の電池寿命前に受信が途絶えた。ID 2, 9, 10は途中から移動しなくなった。例えば、ID 2は放流後 77 日間は複数の St. 間を移動していたが、78 日目以降 St. 8 の受信範囲内から移動しなくなったため、以降の期間は滞在時間や 1 日当たりの行動範囲・移動距離の解析から除外した。ID 9, 10 も同様に移動しなくなった 119 日目以降の期間は解析から除外した。

各地点での滞在時間 2 か月以上の長期モニタリングができた 8 個体について、それぞれ放流後 1 か月間に滞在した受信機台数は 10.3 ± 3.6 台、受信機 1 台当たりの滞在時間は 19.0 ± 19.1 時間であった (Fig. 5)。放流後 2 か月目には滞在した受信機の数 6.9 ± 3.5 台に減少し、1 台当たりの滞在時間は 25.7 ± 30.3 時間に増え

た。これは、各個体の行動範囲は放流後 1 か月ほどで狭くなり、特定の場所に滞在するようになったことを示す。2 か月目以降、3 個体 (ID 9, 12, 14) は比較的浅い北部エリア (St. 18, 19, 20) に分布するようになった (Fig. 5)。この 3 個体は、時折ダムエリアに侵入することがあったが、1 日から 3 日以内に北部エリアへと戻った。2 個体 (ID 4, 10) は最深部であるダムエリアに主に滞在した。2 個体 (ID 2, 3) は湖中央部に主に滞在した。ID 5 は湖全体を広く遊泳した。

1 日当たりの行動範囲と移動距離 各個体の 1 日に受信のあった受信機台数は 1.3 台 (ID 12) から 3.7 台 (ID 2) で、平均 2.4 台であった (Table 1, RN: number of receivers)。平均受信機間距離は 1.2 km であり、1 日当たりの行動半径は 1.4 km ほどであることが分かった。各個体の 1 日当たりの移動距離の中央値は 0 m (ID 12) から 557 m (ID 5) であった (Table 2)。500 m 以下の移動が計 460 回 (全体の 56%) みられた一方で (Fig.

Fig. 4 Post-release horizontal movements of all fish. The vertical axis shows the station number and the horizontal axis shows the date. The black dots show signal reception. Eight fish (ID 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 14) were monitored for over 2 months.

6a, b), 8 個体すべてが 2 km を超える長距離移動を計 67 回 (9%) 行った (Fig. 6a, b, Table 2)。このうち 31 回 (46%) が放流から 1 か月以内, 残りの 36 回 (54%) がそれ以降に行われていた。

日周性の有無 日周性の条件のうち, 条件 B の昼夜で多く受信された受信機が異なった期間はいずれの個体でも確認されなかったが, A の昼夜で受信回数が異なった期間は 8 個体のうち 6 個体 (ID 3, 5, 9, 10, 12, 14) で確認された (Table 1, DM: diel movement)。日周性がみられた期間の回数は 2 個体 (ID 9, 14) で 3 回, 1 個体 (ID 12) で 2 回, 3 個体 (ID 3, 5, 10) で 1 回ずつであった。連続してみられた日数の最長は ID 12 の 8 日間であり, この期間 ID 12 は昼間のみ St. 20 で受信されていた (Fig. 7)。期間の合計日数は, 最大で 13 日間

(ID 9), 最小で 3 日間 (ID 5) であった (Table 1)。

受信機アレイ内での昼夜の滞在時間と移動距離 ダムエリアの受信機アレイによって 2 個体 (ID 4, 10) からそれぞれ 438 点 (2016 年 12 月 22 日から 2017 年 2 月 28 日の 69 日間), 101 点 (2016 年 12 月 23 日から 2017 年 1 月 9 日の 18 日間) の測位点を得られた (Table 1, PP: number of positioning points)。残りの 13 個体はアレイ内に滞在していた時間が短く, 測位点数が 20 点以下と少なかったため解析から除外した (Table 1)。アレイ内への滞在時間は, ID 4 は昼が 8.9 ± 24.0 分, 夜が 15.1 ± 24.6 分で, 夜の滞在時間が有意に長かった ($U=1961, p<0.05, n=69$)。ID 10 は昼が 3.8 ± 12.2 分, 夜が 16.0 ± 39.9 分であり, 統計的に有意な差は見られなかった ($U=123.5, p>0.05, n=18$)。1 時間

Fig. 5 Monthly residence time of eight tagged fish which were monitored for over 2 months at each receiver. If one fish was continuously detected at the same St. and its reception time difference was within 20 minutes, we assumed that the fish stayed within the detection range. Then, by totaling such values less than 20 minutes, the monthly residence time at each St. was calculated. The vertical axis shows the station number and the horizontal axis shows the months. The bubble size represents the residence time.

Table 2 Distance moved per day of eight fish which were monitored for over 2 months

Fish ID	<i>n</i>	%	Mean (m)	Median (m)	Min. (m)	Max. (m)	No. of > 2 km movements
2	76	100	445	108	0	3508	4
3	120	77	637	395	0	2765	7
4	85	85	816	481	0	4596	9
5	181	72	746	557	0	4663	16
9	66	56	510	25	0	4655	8
10	103	87	588	464	0	2973	3
12	46	59	524	0	0	3385	5
14	71	73	937	509	0	4937	15

The mean position (latitude and longitude) of each fish was calculated from daily detections weighted by the number of detections at each station. The distance between the positions of two consecutive days was then calculated. *n*, Total number of data; %, number of data divided by total monitoring days.

当たりの移動距離は、ID 4 では夜 (259 ± 274 m) の方が昼 (194 ± 239 m) よりも有意に大きかった ($U = 13713$, $p < 0.05$, 昼: $n = 141$, 夜: $n = 225$)。一方、ID 10 では昼 (233 ± 215 m) と夜 (257 ± 310 m) に有意な差は見られなかった ($U = 823$, $p > 0.5$, 昼: $n = 28$, 夜: $n = 61$)。

考 察

本研究では、超音波テレメトリーを用いることでメコンオオナマズ 0 歳種苗の放流後の水平分布と日周移動を初めて明らかにした。15 個体中 14 個体が放流場所

あるダムエリアから 26 時間以内に移出した。全長 100 cm 程度の本種の人工種苗をメコン川に放流した先行研究では、長期追跡できた 6 個体のうち 5 個体が放流地点から上流に移動した。¹⁰⁾ ケンカチャン湖ではダムが唯一の排水地点であり、水はダム方向に流れ込む。さらに、多くの個体が移出した南西方向には西部の流入河川からダムへと続く旧河川が湖底を走っている。0 歳種苗も大型個体と同様に、流れに逆らって泳ぐ習性(走流性)を示したのかもしれない。

2 か月以上追跡できた 8 個体がそれぞれ放流後 1 か月間に滞在した受信機の数 10.3 ± 3.6 台であり、湖を広く遊泳したことが示された (Fig. 5)。同様の行動は、全長 60 cm 以上の本種の人工種苗や、^{11,12)} 他魚種の人工種苗でも報告されており、²⁰⁾ 好ましい生息場所の探索だと考えられている。0 歳種苗も地形、水温、流速といった非生物要因や、餌生物の有無などの生物要因から、より好ましい場所を探索していたのではないかと考えられる。

放流後 1 か月目と比べて 2 か月目の行動範囲は狭くなり、特定のエリアに集中して分布するようになった。タイ国北部のパヤオ県に位置するメプン湖 (8.3 km^2) に全長 60 cm 程度の本種の人工種苗を放流した先行研究では、放流後およそ 1 か月経つとすべての個体が広くそして水深が比較的深い場所に滞在するようになった。¹²⁾ 一方、本研究では 8 個体中 4 個体が最深部 (約 40 m) であるダムエリアおよび湖中央部 (水深約 30 m) に滞在していたが、比較的浅い北部エリア (水深約 10–20 m) に滞在する個体も 3 個体いた。この理由として、

Fig. 6 Moving distance per day of eight fish. The mean position (latitude and longitude) of each fish was calculated from daily detections weighted by the number of detections at each St. The distance between the positions of two consecutive days was then calculated. (a) Time series of moving distance pooled from eight fish. (b) Histogram of moving distance pooled from eight fish.

Fig. 7 Diel horizontal movement of ID 12 from 21 January 2017 to 29 January 2017. The white and black bars indicate day (6:00–18:00) and night (18:00–6:00), respectively. The black dots represent signal reception. During this period, transmitter signals were detected only during the day and not at night.

供試魚の体サイズの違い、そして放流した湖の大きさや水深の違いが考えられる。山間の河川を堰きとめて建設されたメプン湖は細長い形状をしており、最深部でも15 mと比較的浅い。それに対してケンカチャン湖は広大かつ地形が入り組んでおり最大水深は約40 mに達する。湖の最深部や中央部ではなくても水深が15 m以上の場所は広く存在するため、湖北部エリアにも分布したと考えられる。

同じくメプン湖で行われた先行研究では、全長80 cm以上の本種の人工種苗が深度3–5 m付近に形成された貧酸素水塊を避ける行動が報告されている。^{10,11)} 本研究でも7月と11月のDO計測時には5–10 m付近に躍層が生じていた (Fig. 2)。水温が4月から11月まで成層していたことから (Fig. 3)、同じ期間にDO躍層も形成されていたと推測できる。そのため個体は貧酸素水塊を避けるために大半の時間はDO躍層より上層にいたと思われる。水深が10 m以上あれば、それ以上水深が深くなっても鉛直的に自由に遊泳できる深度帯が増える訳ではないため、ケンカチャン湖では広く分布したのかもしれない。

平均受信機間距離と1日当たりの平均受信機台数から、1日当たりの行動範囲は半径1.4 km程度だと推定された。ID 9およびID 12の平均受信機台数が2台以下と他の6個体よりも小さかったのは、受信機の設置

台数が少ない湖北部に主に滞在していたためと考えられる。一方、行動範囲の重心は、1日に500 m以下の移動が56%であったことから (Fig. 6)、0歳種苗は半径500 m以内の特定の場所を中心として半径1.4 km程度の一定範囲内を遊泳していたと考えられる。このような行動の中心となる場所はコアエリアと呼ばれ、餌が豊富である、捕食者が少ない、過ごしやすい地形であるといった特徴がある。²¹⁾ 0歳種苗も餌生物が豊富なエリアを選択的に遊泳していたのではないかと考えられる。500 m以下の移動が過半数であった一方で、2 km以上の長距離移動も9%行っていた (Fig. 6, Table 2)。このうち、放流後1か月以内に生じた46%は放流後の好適な環境の探索であると考えられる。放流後1か月が経ち行動範囲が狭くなって以降の54%の長距離移動はコアエリアを変えたことを示唆する。何がコアエリアの変化に影響を与えたかは明らかではないが、これまでに水温やDOといった環境の変化や、^{22–24)} 餌の探索、捕食者からの逃避などが理由として考えられている。

8個体中6個体で、日周性を示す期間が3–13日見られた (Table 1)。昼あるいは夜に休息のために構造物に隠れたり、¹³⁾ 昼夜で水平移動したりする種^{25–27)} ではこのような受信記録が得られることが報告されている。日周水平移動は、全長60 cm程度の本種の人工種苗でも報告されており、¹²⁾ 摂餌や休息、捕食者回避などと関連し

ていると考えられる。さらに、昼に深く夜は浅い、日周深浅移動を伴うことも報告されている。¹²⁾しかし、本研究では昼夜ともに深いダムエリアに設置した受信機アレイ内に滞在しており、特に ID 4 は夜間の方が昼間よりも滞在時間が有意に長かった。このことから少なくとも 0 歳種苗は夜間に浅瀬にのみ分布しているわけではないことが明らかになった。

日周性の条件の内、A の昼夜で受信回数が異なるという条件を満たす個体はいたが、B の昼夜で多く受信された受信機が異なるという条件を満たした個体はいなかった。このことは、日周水平移動の距離が受信機の設置間隔（平均 1.2 km）に満たなかったことを示唆する。さらに、受信機アレイ内での移動距離は昼夜ともに 1 時間あたり 200 m 程度であった。よって 0 歳種苗は日周深浅移動を伴う全長 60 cm 程度の個体ほど長距離の日周水平移動は行わないが、昼夜問わず遊泳していると考えられる。

本研究では 8 個体の長期モニタリングに成功したもの、電池寿命（288 日間）までモニタリングできた個体はなかった。全ての個体が発信機の電池寿命前に受信が途絶える、もしくは移動しなくなった（Fig. 4）。この理由として、1 つ目は混獲されたことで受信が途絶えた可能性が考えられる。ID 7 は放流の翌朝に、コイ科のタピアン *Hypsibarbus wetmorei* を漁獲する刺し網によって混獲された。ケンカチャン湖では、全長 2 m 前後に満たないメコンオオナマズは漁獲対象ではない。しかし、地元漁業者は他魚種を狙った刺し網によるメコンオオナマズ稚魚の混獲を証言している。放流後、86% の個体が放流場所から拡散し、湖を広く遊泳したが、この広範囲の移動により刺し網のような受動的漁具によって漁獲される機会が増えた可能性がある。2 つ目の理由として被食が考えられる。海産魚の人工種苗では野生個体よりも被食される可能性が高いことが報告されている。²⁸⁾ また、放流直後は種苗が自然環境に慣れていないために、特に被食圧が高い可能性がある。²⁹⁾ ケンカチャン湖にはライギョ *Channa micropeltes* など大型の肉食魚が生息しており、適切な回避行動を取らなかった個体が被食された可能性がある。被食が起これば、発信機が排泄されるまでは捕食者の行動を反映し、受信範囲外に排泄されれば受信が途絶える、あるいは受信範囲内であれば特定の受信範囲内から移動しなくなる。本研究では明らかな行動の切り替わりは確認できなかったが、捕食者の胃液に反応することで発信する ID を変えるプレデションタグ³⁰⁾を用いれば被食の有無を明らかにすることができると考えられる。3 つ目の理由として、発信機の脱落の可能性が考えられる。一般に、ナマズ類は消化管や手術痕を通じて腹腔内の発信機を体外に排出することが報告されている。^{31,32)} 本種の全長 60 cm 程度の人工

種苗を使用した飼育実験において、2 か月の期間内に 2 個体のうち 1 個体が腹腔内に挿入した発信機を排出した。¹⁸⁾ 発信機の排出率は魚の体サイズによって異なるため、³³⁾ 0 歳種苗が発信機を排出するかはさらなる検証が必要となるが、受信範囲外に排出されれば受信が途絶える、あるいは受信範囲内であれば特定の受信範囲内から移動しなくなる。ID 2 は放流から 77 日後、ID 9, 10 は放流から 118 日後に特定の受信範囲内から移動しなくなったが、この時期には歯が消失し終わり、動物食から植物食への変化が生じていたと考えられる。食性の変化による行動の変化や体サイズの増大、消化管構造の変化などが発信機の脱落を促した可能性も考えられる。

本研究のように放流後の種苗の行動を明らかにすることは、適切な種苗放流と資源管理に繋がる。例えば、水平分布や移動を明らかにすることで、保護区を設定する際の科学的な根拠となる。また、本研究では放流した種苗が被食や混獲により減耗する可能性が示唆された。種苗の分布域では刺し網など漁業を規制する、あるいは目合いを大きくするといった施策をとることで、放流後の生残率を向上させることができるであろう。今後テレメトリーや標識放流を用いてさらに詳細な種苗の生残率および死亡原因を明らかにできれば、適切な放流サイズや放流量を設定でき、本種の持続的な利用に繋がると期待される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご支援を下さったタイ国ケンカチャン漁業管理局のスタッフの皆様に感謝申し上げます。京都大学大学院情報学研究所の西澤秀明博士および京都大学大学院農学研究科海洋生物環境学分野、近畿大学農学部水産学科漁業生産システム研究室の学生の皆様にはフィールド調査にて多大なるご協力をいただきました。京都大学の高木淳一博士には測位に関する解析においてご協力をいただきました。感謝申し上げます。本研究は JSPS 科研費 16H05792, JST, CREST, JPMJCR13A5 の助成を受けたものです。

文 献

- 1) Akagi O, Akimichi T, Akishinonmiya F and Takai Y. An ethnoichthyological study of *Pla buk* (*Pangasianodon gigas*) at Chiangkhong, northern Thailand. *Bull. Nat. Muse. Ethno.* 1996; **21**: 293-344.
- 2) Hogan ZS, Moyle PB, May B, Vander Zanden MJ and Baird IG. The imperiled giants of the Mekong. *Am. Shi.* 2004; **92**: 228-237.
- 3) Bellemain E, Patricio H, Gray T, Guegan F, Valentini A, Miaud C and Dejean T. Trails of river monsters: Detecting critically endangered Mekong giant catfish *Pangasianodon gigas* using environmental DNA. *Glob. Ecol. Conserv.* 2016; **7**: 148-156.
- 4) Kakizawa Y and Meenakarn W. Histogenesis and disap-

- pearance of the teeth of the Mekong giant catfish, *Pangasianodon gigas* (Teleostei). *J. Oral. Sci.* 2003; **45**: 213–221.
- 5) Lorenzen K and Sukumasavin N. A conservation strategy for the Mekong giant catfish. *Catch and Culture*. 2007; **13**: 22–25.
 - 6) Ngamsiri T, Nakajima M, Sukmanomon S, Sukumasavin N, Kamonrat W, Na-Nakorn U and Taniguchi N. Genetic diversity of wild Mekong giant catfish *Pangasianodon gigas* collected from Thailand and Cambodia. *Fish. Sci.* 2007; **73**: 792–799.
 - 7) IUCN 2011. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2011.1 (<http://www.iucnredlist.org/species/15944/5324699>). Downloaded on 28 June 2017.
 - 8) Chaengkij M. Thailand's concerns in endangered species and stock enhancement. SEAFDEC/AQD Institutional Repository. 2006.
 - 9) Mitamura H, Mitsunaga Y, Arai N and Viputhanumas T. Movements of immature hatchery-reared Mekong giant catfish *Pangasianodon gigas* released in the Mekong River, measured using acoustic telemetry. *Fish. Sci.* 2008; **74**: 1034–1039.
 - 10) Mitamura H, Mitsunaga Y, Arai N, Yamagishi Y, Khachaphichat M and Viputhanumas T. Vertical movements of a Mekong giant catfish (*Pangasianodon gigas*) in Mae Peum Reservoir, Northern Thailand, monitored by a multi-sensor micro data logger. *Zoolog. Sci.* 2007; **24**: 643–647.
 - 11) Mitamura H, Mitsunaga Y, Arai N, Yamagishi Y, Khachaphichat M and Viputhanumas T. Horizontal and vertical movement of Mekong giant catfish *Pangasianodon gigas* measured using acoustic telemetry in Mae Peum Reservoir, Thailand. *Fish. Sci.* 2008; **74**: 787–795.
 - 12) Mitamura H, Arai N, Yamagishi Y, Kawabaa Y, Mitsunaga Y, Khachaphichat M and Viputhanumas T. Habitat use and movement of hatchery-reared F2 Mekong giant catfish in the Mae Peum reservoir, Thailand, studied by acoustic telemetry. *Fish. Sci.* 2009; **75**: 175–182.
 - 13) Alos J, March D, Pamer M, Grau A and Morales-Nin B. Spatial and temporal patterns in *Serranus cabrilla* habitat use in the NW Mediterranean revealed by acoustic telemetry. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2011; **427**: 173–186.
 - 14) Cordoleani F, Notch J, McHuron AS, Ammann AJ and Michel CJ. Movement and survival of wild chinook salmon smolts from Butte Creek during their out-migration to the ocean: Comparison of a dry year versus a wet year. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2017; **147**: 171–184.
 - 15) Perry RW, Skalski JR, Brandes PL, Sandstrom PT, Klimley AP, Amman A and MacFarlane B. Estimating survival and migration route probabilities of juvenile chinook salmon in the Sacramento-San Joaquin River Delta. *N. Am. J. Fish. Manag.* 2010; **30**: 142–156.
 - 16) Espinoza M, Farrugia TJ, Webber DM, Smith F and Lowe CG. Testing a new acoustic telemetry technique to quantify long-term, fine-scale movements of aquatic animals. *Fish. Res.* 2011; **108**: 364–371.
 - 17) Yoshida N, Mitamura H, Arai N, Yamane H, Mitsunaga Y, Viputhanumas T and Ratanachamnong D. Detection range and horizontal accuracy of a fine-scale positioning telemetry system at Kaeng Krachan Reservoir, Thailand. *PROCEEDINGS of the design symposium on conservation of ecosystem (The 13th SEASTAR2000 workshop)*. 2014; **2**: 9–14.
 - 18) Mitamura H, Mitsunaga Y, Arai N and Viputhanumas T. Comparison of two methods of attaching telemetry transmitters to the Mekong giant catfish, *Pangasianodon gigas*. *Zoolog. Sci.* 2006; **23**: 235–238.
 - 19) Simpfendorfer CA, Heupel MR and Hueter RE. Estimation of short-term centers of activity from an array of omnidirectional hydrophones and its use in studying animal movements. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2002; **59**: 23–32.
 - 20) Yokota T, Mitamura H, Arai N, Masuda R, Mitsunaga Y, Itani M, Takeuchi H and Tsuzaki T. Comparison of behavioral characteristics of hatchery-reared and wild red tilefish *Branchiostegus japonicus* released in Maizuru bay by using acoustic biotelemetry. *Fish. Sci.* 2006; **72**: 520–529.
 - 21) Wal EV and Rodgers AR. An individual-based quantitative approach for delineating core areas of animal space use. *Ecol. Modell.* 2011; **224**: 48–53.
 - 22) Jonsson N. Influence of water flow, water temperature and light on fish migration in rivers. *Nordic J. Freshw.* 1991; **66**: 20–35.
 - 23) Danek T, Kalous L, Petrtyl M and Horky P. Move or die: change in European catfish (*Silurus glanis* L.) behavior caused by oxygen deficiency. *Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst.* 2014; **414**: 1–11.
 - 24) Wada T, Kamiyama K, Mitamura H and Arai N. Horizontal movement and emigration of juvenile spotted halibut *Verasper variegatus* released in a shallow brackish lagoon: Matsukawa-ura, northeastern Japan, revealed by acoustic telemetry. *Fish. Sci.* 2017; **83**: 573–585.
 - 25) Kawabata Y, Okuyama J, Asami K, Yoseda K and Arai N. The post-release process of establishing stable home ranges and diel movement patterns of hatchery-reared black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii*. *J. Fish. Biol.* 2008; **73**: 1770–1782.
 - 26) Mitamura H, Arai N, Mitsunaga Y, Yokota T, Takeuchi H, Tsuzaki T and Itani M. Directed movements and diel burrow fidelity patterns of red tilefish, *Branchiostegus japonicus*, determined using ultrasonic telemetry. *Fish. Sci.* 2005; **71**: 491–498.
 - 27) Hobson ES. Diel feeding migrations in tropical reef fishes. *Helgolander wiss. Meeresunters.* 1973; **24**: 361–370.
 - 28) Blaxter JHS. The enhancement of marine fish stocks. *Adv. Mar. Biol.* 2000; **38**: 1–54.
 - 29) Sudo H, Kajihara N and Fujii T. Predation by the swimming crab *Charybdis japonica* and piscivorous fishes: A major mortality factor in hatchery-reared juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* released in Mano bay, Sado Island, Japan. *Fish. Res.* 2008; **89**: 49–56.
 - 30) Halfyard EA, Webber D, Papa D, Leadley T, Kessel ST, Colborne SF and Fisk AT. Evaluation of an acoustic telemetry transmitter designed to identify predation events. *Methods. Ecol. Evol.* 2017; **8**: 1063–1071.
 - 31) Marty GD and Summerfelt RC. Pathways and mechanisms for expulsion of surgically implanted dummy transmitters from Channel catfish. *Trans. Soc. Fish. Soc.* 1986; **115**: 577–589.
 - 32) Sakaris PC and Jesien RV. Retention of surgically implanted ultrasonic transmitters in the brown bullhead catfish. *N. Am. J. Fish. Manag.* 2005; **25**: 822–826.
 - 33) Summerfelt RC and Mosier D. Transintestinal expulsion of surgically implanted dummy transmitters by Channel catfish. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1984; **115**: 760–766.