

超音波テレメトリーを用いた伊豆大島南東部沿岸の 投石漁場におけるイセエビの移動追跡

橋爪伸崇^{*1}・橋本 浩^{*2}

Tracking the movements of Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus* with acoustic telemetry in the artificial stone bed located in southeast Izu-Oshima island, central Japan

Nobutake HASHITSUME^{*1} and Hiroshi HASHIMOTO^{*2}

投石や人工魚礁の沈設による漁場造成は、水産生物の増殖や保護培養を目的に古くから全国的に行われており(伊藤 2011)、水産庁(2017)では2017年からの5年間で50,000 haの魚礁や増養殖場を整備する計画が示されている。東京都の伊豆諸島海域においては、海藻類や貝類のほか、イセエビ *Panulirus japonicus* を対象に、投石などによる増殖場の整備が行われている(東京都産業労働局農林水産部水産課 2018)。

一方、公共事業による漁場造成では、事業の透明性や客観性を確保し、より効率的な事業の執行を図るため、その増殖効果を評価することが求められており(水産庁漁港漁場整備部 2020)、対象生物による漁場の利用状況を把握する必要がある。イセエビを対象とした人工魚礁や増殖場の効果調査では、潜水目視による生息状況の観察や漁獲試験が行われているが(小倉 1994, 坂本 1995)、潜水観察については、イセエビが夜行性で昼間は岩の割れ目や窪み等にひそむことから(松田 2010)、限られた作業時間内にイセエビを発見することは容易ではない。東京都の伊豆大島南東部沿岸にある投石漁場では、潜水によるイセエビの目視調査を5年にわたり実施したが、発見数は合計で3個体のみだった(東京都島しょ農林水産総合センター 2013, 2018a, 2018b, 2020, 2021)。また、イセエビ籠と刺し網による漁獲調査においては、いずれもイセエビが採捕されなかった(東京都島しょ農林水産総合センター 2012, 2013, 2014)。さらに、水中録音装置による調査も行われ、同投石漁場内でイセエビの

鳴音が確認されたものの、イセエビが一時的に接近したのか、投石漁場に滞留したのかは判断できなかった(Kikuchi *et al.* 2015)。これらから、当該投石漁場におけるイセエビの利用状況について、従来の調査方法では十分に把握できていない。

水棲生物の行動を連続的にモニタリングする方法として、超音波テレメトリー手法がある。魚類ではマダイ *Pagrus major* やマアジ *Trachurus japonicus* において、超音波発信機(以下ピンガー)を装着した個体を調査船上の受信機により追跡することで、人工魚礁への滞留状況の調査が行われている(新潟県 1980, 伊藤ら 2009)。また、受信機を3台以上設置してピンガーの位置を詳細に測位するシステムも開発されており、本邦のイセエビや大西洋産のカリブイセエビ *P. argus* において、天然礁に放流した個体の移動を追跡する調査が行われている(佐々木ら 2021, Bertelsen and Hornbeck 2009)。そこで本研究では、超音波テレメトリーを用いて、当該投石漁場に放流した4個体のイセエビの移動を追跡することで、投石漁場におけるイセエビの滞留状況を把握することができたので報告する。

材料および方法

調査は東京都の伊豆大島南東部沿岸のカキハラ地先にある投石漁場で実施した(図1)。投石漁場は、水深15~20 mの砂底域のおよそ4 ha範囲に2008年から2010年にかけて造成され(図2)、海底を覆うように

1 東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所 〒100-0212 東京都大島町波浮港18

2 東京都島しょ農林水産総合センター八丈事業所 〒100-1511 東京都八丈町三根4222-1

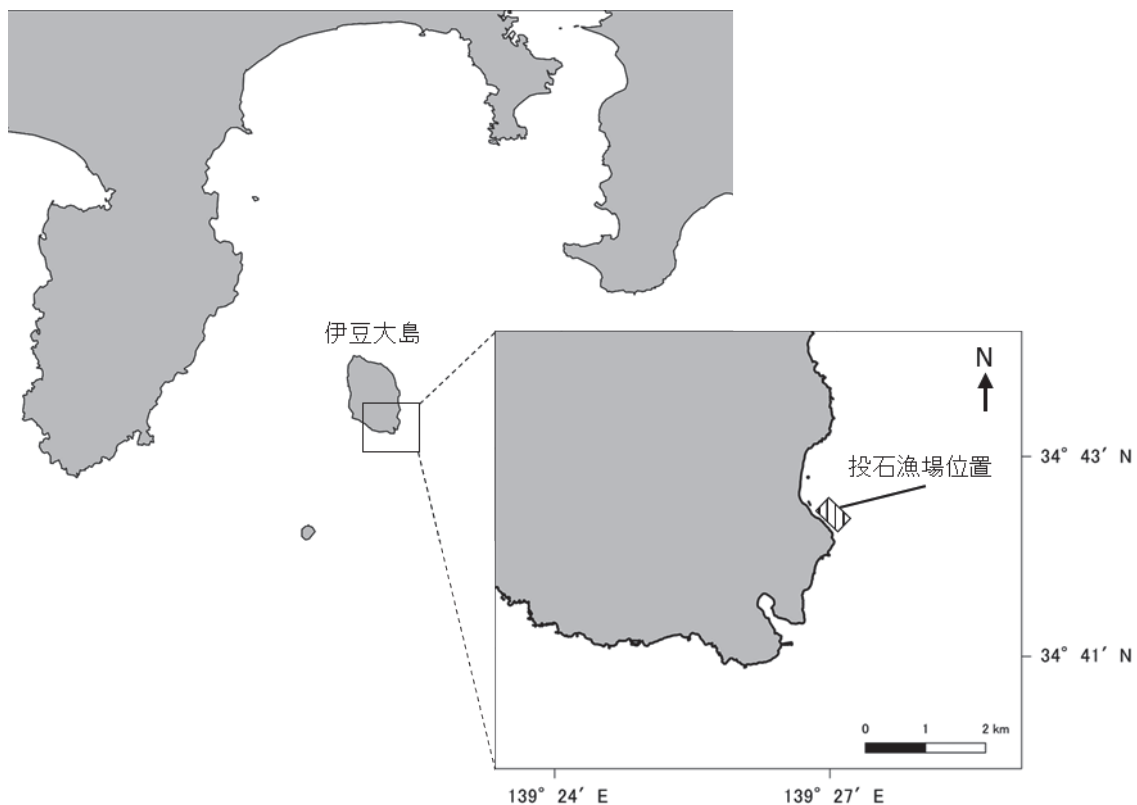


図1 調査実施海域

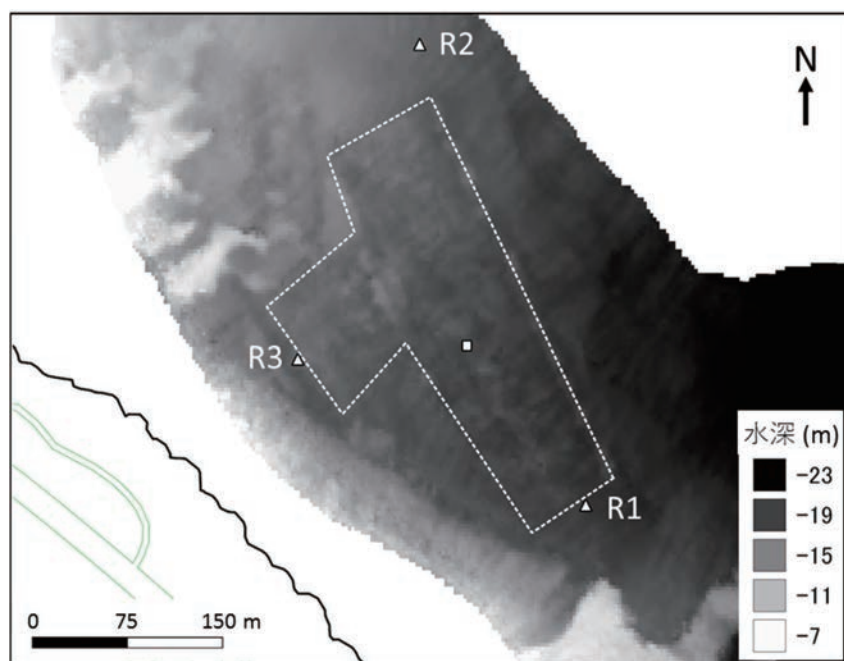


図2 投石漁場地図

破線は投石漁場の範囲，三角形は受信機（R1～R3）設置地点，中央の四角形はイセエビ放流地点を示す。

敷設された直径1～2 mの割栗石が1段ないし3段に積み重なっている（図3）。カキハラ地先の海底地形は、投石漁場のある砂底域は沖合へなだらかに深くなり、岸側には急峻な岩礁域がある。投石上にみられる主な海藻は、紅藻マクサ *Gelidium elegans* やオバクサ

Pterocliadiella tenuis であった（東京都島しょ農林水産総合センター2020）。

イセエビは、調査海域周辺で漁業者が刺し網により漁獲した個体を使用した。東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所で約1年間蓄養した後、摂餌



図3 投石の敷設状況

左: 海底に敷設された投石。右: 2段に積み重なる投石。

表1 使用したイセエビの個体情報

	頭胸甲長 (mm)	体重 (g)
P1	73.04	341.4
P2	76.85	366.5
P3	73.38	327.7
P4	70.86	290.1

が活発で、サイズが均一になるような雄4個体 (P1～P4) にピンガーを取り付けた (表1)。ピンガーは、AQPX-1030P (アクアサウンド社製、直径9.5 mm、長さ36 mm、水中重量1.6 g、信号到達距離500 m程度) を使用した。このピンガーは超音波信号にゴールド系列符号を持つため、単独の周波数から複数のピンガーを同時に識別することができる (笹倉 2016)。信号の送信周期は、調査期間中の電池寿命を確保するため、7秒間隔とした。このピンガーを次の手順でイセエビの頭胸甲部に取り付けた。接着部の水気をタオルおよびドライヤーの送風により除去し、イセエビの行

動を妨げないように水中ボンド (コニシ社製) を可能な限りなだらかに盛り付け、信号が遮られないようピンガーを前後端部が露出するように埋め込んで固定した (図4)。なお、調査に用いないイセエビに同様の手順でピンガーと同サイズの樹脂片を取り付け、手で強く擦っても脱落しないことを確認した。受信機には、AQRM-2000 (アクアサウンド社製) を3台 (R1～R3) 使用した。この受信機はゴールド系列符号をもつ信号に対応するほか、内部にピンガー機能を備え、信号の送受信時刻および音速から複数の受信機間で時刻の同期ができる。

調査期間は、月による夜間の明るさの増加がイセエビの行動を抑制する (小池ら 1993, 小池ら 1996) ことをふまえ、おおよそ下弦から新月へ向かう期間である、2019年2月24日から同年3月5日までの9日間とした。なお、この間の正午月齢は19.2から28.2であった。(東京、国立天文台ホームページ <https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi>)。調査開始日



図4 ピンガーを取り付けたイセエビ
頭胸甲部に水中ボンドを用いてピンガーを固定した。

に、受信機の設置とイセエビの放流を行った。受信機は、海底から約 10 m 上方に位置するように土嚢、ロープ、ブイを用いて係留系を作成し（図 5）、投石漁場を囲うようにそれぞれ約 250 ~ 380 m 離して設置した（図 2）。イセエビは、プラスチック製の籠に収容して SCUBA 潜水により投石漁場中央付近の海底へ運び、5 分間静置した後に放流した。放流後、イセエビは直ちに投石の間隙に散逸した。放流地点の水深は 16.6 m、放流時刻は 14 時 13 分だった。海面でハンディ GPS（GARMIN 社製、GPSMAP62SCJ）を用い、受信機設置地点とイセエビ放流地点の位置座標を取得した（図 2）。海中の音速を調べるため、受信機 R1 の設置地点で小型 CTD（JFE アドバンテック社製、RINKO-Profiler）を使用した。海面から水深 16 m まで 1 m ごとに水温と塩分を測定し、Mackenzie（1981）に基づき平均音速を 1,511 m/s と算出した。また海底付近の水温を測るため、受信機 R1 の係留系に水温記録計（Star-Oddi 社製、DST micro）を設置した。

調査終了日の 15 時に受信機を回収し、記録されたデータを解析した。各受信機の記録時刻を 1 時間ごとに同期し、同一のピンガーが発した信号を 3 台すべての受信機が同時に受信できた場合、その受信時刻差か

ら双曲線測位法（Fang 1990）によりピンガーの位置を算出し、イセエビの水平位置として測位した。なお、上記の解析作業は株式会社アクアサウンドへの委託により実施した。

結果

調査期間中、イセエビの水平位置 107 点を測位することができた。各個体について、放流時刻から最終測位時刻までの間を測位継続時間として算出したところ、最短は P1 の 5 時間 45 分、最長は P2 の 7 日と 12 時間 57 分で、調査終了前日まで測位を継続できた（表 2）。調査期間中の日の出と日の入りの時刻をもとに（東京、国立天文台ホームページ <https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi>）、6 時から 18 時を昼間、18 時から翌 6 時を夜間とし、各イセエビの時間ごとの測位回数分布を示した（図 6）。各イセエビとも、測位ができた時間帯は夜間のみであった。また、P2 は 2 月 26 日の 18 時から翌 6 時までの間および 3 月 1 日の 18 時から翌 6 時までの間、P4 は 2 月 25 日の 18 時から翌 6 時までの間においては、測位継続時間中の夜間であったが、一度も測位が得られなかった。

受信機設置地点の位置座標をもとに、イセエビの水

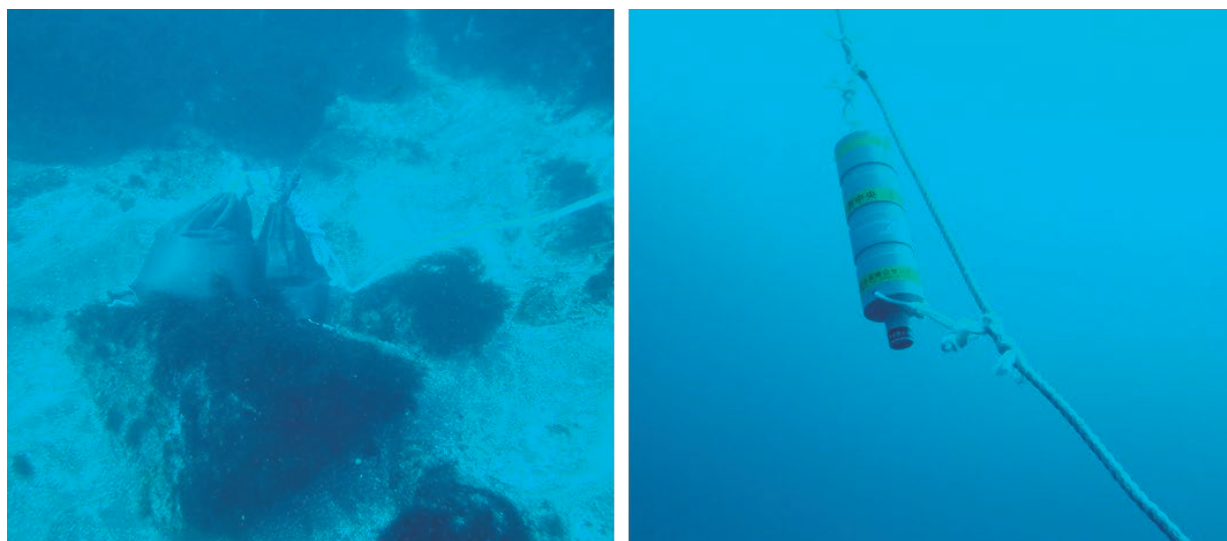


図 5 海中に設置した受信機の係留系
ロープの下端に土嚢を取り付け（左）、上端にブイを取り付け、海底から約 10 m 上方に受信機を取り付けた（右）。

表 2 各イセエビの測位継続時間

	放流時刻	測位点数	最終測位時刻	測位継続時間
P1		50	2/24 19:58	5 h 45 min
P2	2/24 14:13	25	3/4 03:10	7 d 12 h 57 min
P3		16	2/25 21:04	1 d 06 h 51 min
P4		16	3/1 23:59	5 d 09 h 46 min

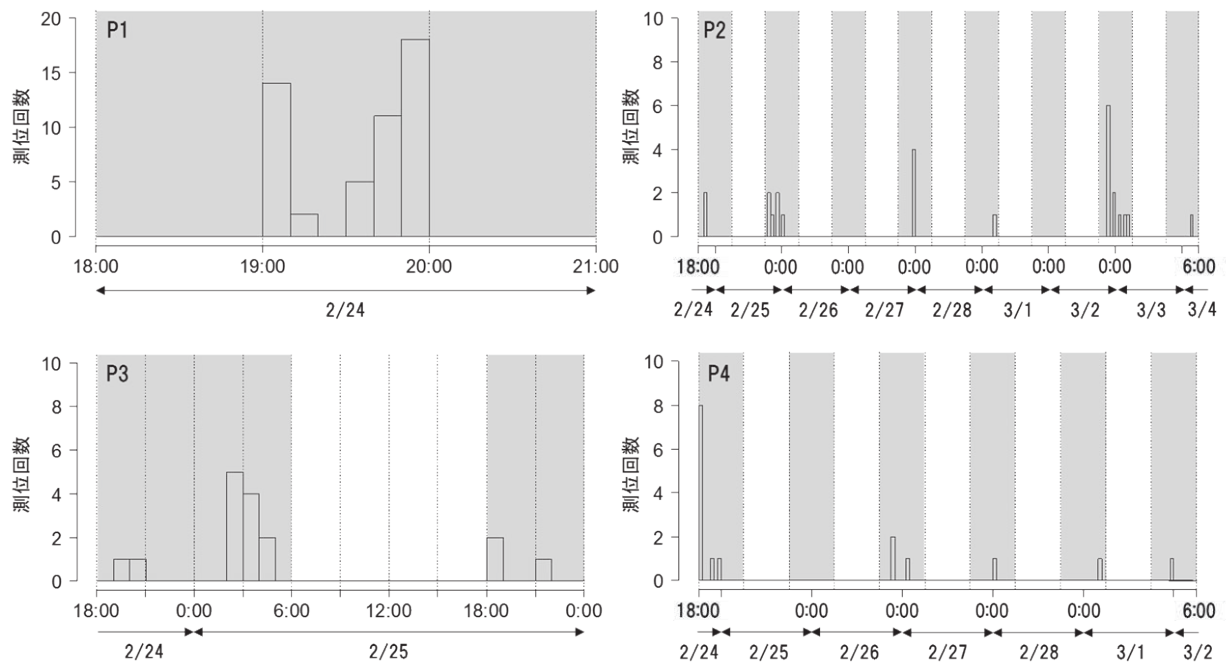


図6 各イセエビの時間ごと測位回数分布
P1は10分ごと、P2～P4は1時間ごとの測位回数を示す。図中の着色部は夜間であることを示す。

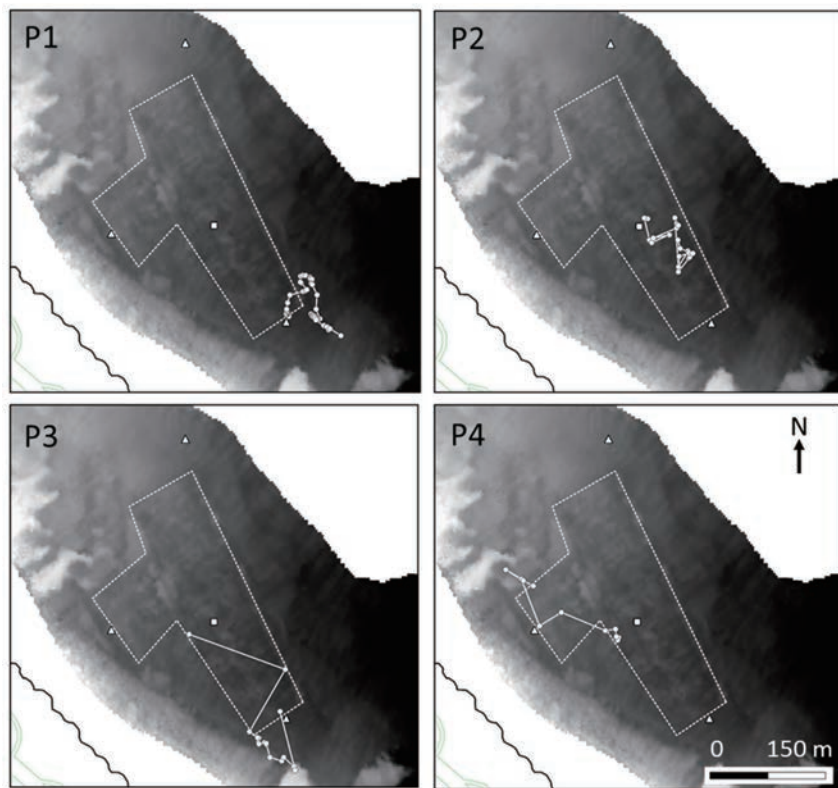


図7 各イセエビの水平移動
丸はイセエビの測位点、実線はイセエビの移動経路を示す。破線、三角形、四角形はそれぞれ投石漁場範囲、受信機設置地点、イセエビ放流地点を示す。

平位置を投石漁場地図に重畳させ、各測位点を直近の測位点と線でつなぐことで、各イセエビの水平移動を示した(図7)。P1は放流後南東方向へ移動し、投石漁場の外へ出ていったのち測位が途絶えた。P2は放流地点から大きく移動せず、常に投石漁場内に留まり続けた。P3は放流後南東方向へ移動し、投石漁場の外や縁辺部に位置したのち測位が途絶えた。P4は放流後北西方向へ移動し、投石漁場縁辺部に位置したのち測位が途絶えた。各イセエビについて、1つの測位点と次の測位点の距離を全測位点で合計して移動距離を求め、移動距離と測位継続時間から移動速度を求めたところ、最小はP2およびP4の2 m/hで、最大はP1の72 m/hだった(表3)。なお、水温記録計により求めた調査期間中の海底付近水温は平均16.5℃だった。

考 察

本研究で放流したイセエビ4個体のうち、測位継続時間が最大となったP2は、すべての測位点が投石漁場内から得られ、放流後から調査終了前日までの7日間、投石漁場内に滞留していたことが認められた(図7)。また、4個体ともに、各測位点の測位時刻はいずれも夜間だった(図6)。これは佐々木ら(2021)の先行知見とも一致する結果であり、イセエビが昼間岩の割れ目等にひそみ夜間索餌することや(松田2010)、巣穴からの出入り行動を野外海域で観察した調査で、日中は巣穴内に留まり夜間に離脱と帰巣を繰り返すことが確認されていることをふまえると(Morikawa *et al.* 2003)、投石漁場に滞留したイセエビは、当該漁場をすみかおよび索餌場として利用していた可能性がある。なお、4個体はいずれも放流後、調査終了日以前に測位が途絶えた。この原因として、イセエビが投石漁場外に移動してピンガーの信号到達距離以上に受信機から離れたこと、あるいは脱皮や被食によりピンガーが投石などの空隙に脱落し、受信できなくなったことが考えられる。また、P2およびP4において測位継続時間中に1晩中測位が途絶えることがあったほか(図6)、佐々木ら(2021)による音響テレメトリー調査においてもイセエビが追跡エリア内に

いると推測される場合に数日間測位点を得られなかったことから、イセエビが最終測位時刻から受信機回収時刻まで投石の陰に位置し続けていた可能性もある。

イセエビの水平移動について、P2とP4は移動速度が小さく投石漁場内での測位が多い一方、P1とP3は移動速度が大きく投石漁場外での測位が多かった(図7、表3)。また、P1とP3はいずれも南東方向へ移動した。放流後のイセエビの移動については、天然礁での標識放流調査に関するTakagi(1972)や東京都水産試験場(1984)、高木ら(1998)、長谷川・成生(2014)の報告があり、多くのイセエビが放流地点付近で再捕される一方で一部は大きく分散する傾向や、一定の方向へ移動する傾向が示されている。本研究のイセエビの移動傾向は、これらの標識放流調査の結果と類似しており、当該投石漁場でのイセエビの水平移動は、天然礁の例と比較して、特異的なものではなかったと考えられる。

本研究から得られたイセエビの移動速度は、4個体の平均が23 m/hだった。移動速度に影響する要因として、水温と潮位変動が挙げられる。既報の水槽実験では、イセエビの摂餌活動が11.8～28℃まで水温の上昇に伴って増加し(小池ら2003)、18.4℃では20.1～23.2℃の半分程度に減少しており(森川ら2000)、本研究の調査期間中の平均水温16.5℃では、盛んな索餌活動が行われなかった可能性がある。また、Kikuchi *et al.* (2015)は、潮位変動が大きいほどイセエビの活動を反映する鳴音の頻度が高くなることを示しているが、本研究を実施した9日間における1日の潮位干満差は平均90.5 cmであり、同年の年平均値158.7 cmと比べて小さかった(岡田、気象庁ホームページ <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/gaikyo/nenindex.php>)。このことから、高水温期や干満差の大きい期間に調査を実施した場合、今回の結果より大きな移動速度が得られる可能性がある。

これまで、当該投石漁場では、潜水目視観察や漁獲調査、水中録音装置による調査が行われてきたが、イセエビによる利用状況を十分に把握できていなかった(東京都島しょ農林水産総合センター2012, 2013, 2014, 2018a, 2018b, 2020, 2021, Kikuchi *et al.* 2015)。今回、人為的に放流した個体の一部であるが、追跡期間中は投石漁場に滞留していたことを確認でき、超音波テレメトリーによる測位が人工魚礁や増殖場におけるイセエビの滞留状況を把握するのに有効な手法であることが示唆された。また、本手法を用い

表3 各イセエビの移動速度

	移動距離 (m)	移動速度 (m h ⁻¹)
P1	413	72
P2	342	2
P3	441	14
P4	297	2

た移動追跡では、標識放流など従来の手法よりも詳細な行動履歴を把握することができた。得られた位置情報を用いて、改めて潜水等を併用し、イセエビが頻繁に測位された地点の地形など環境を分析することで、より効果的な漁場造成のための知見が得られるものと期待される。

要約

超音波テレメトリーによる測位手法を活用し、投石漁場に放流した4個体のイセエビの水平移動を追跡した。その結果、最大7日間測位を継続することができ、1個体は放流地点から大きく移動せず、常に投石漁場内に滞留していたことを確認できた。

キーワード: イセエビ, 投石漁場, 超音波テレメトリー, 水平移動

謝辞

本研究を行うにあたり、東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所の職員各位および漁業調査指導船「かもめ」船長向山常比古氏には資材準備や現場作業にご協力を頂いた。本稿執筆にあたり、東京都島しょ農林水産総合センター振興企画室の滝尾健二副参事研究員および同大島事業所の高瀬智洋所長、田中優平統括課長代理にはご助言ならびにご校閲を頂いた。ここに記し、深く感謝の意を表する。

文献

- Bertelsen, R. D. and J. Hornbeck. 2009. Using acoustic tagging to determine adult spiny lobster (*Panulirus argus*) movement patterns in the Western Sambo Ecological Reserve (Florida, United States). *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **43** (1): 35-46.
- Fang, B. T. 1990. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **26**(5): 748-753.
- 長谷川雅俊・成生正彦. 2014. 南伊豆海域におけるイセエビ標識放流再捕結果の検討(2). 静岡県水産技術研究所研究報告, (46): 33-43.
- 伊藤 靖. 2011. 漁場整備・人工魚礁の歩みと現状. 水産工学, **48**(2): 157-160.
- 伊藤 靖・三浦 浩・中村憲司・吉田 司. 2009. 日本海佐渡島羽茂地先の人工魚礁における超音波バイオテレメトリーを用いたマアジの行動様式. 日本水産学会誌, **75**(6): 1019-1026.
- Kikuchi, M., T. Akamatsu and T. Takase. 2015. Passive acoustic monitoring of Japanese spiny lobster stridulating sounds. *Fisheries Science*, **81**(2): 229-234.
- 小池 隆・森川由隆・前川行幸・森永 勤. 1993. イセエビの夜間行動におよぼす水中の明るさの影響. 日本水産学会誌, **59**(10): 1689-1694.
- 小池 隆・山崎博貴・内田 誠. 2003. イセエビの摂餌活動の周年変化. 日本水産学会誌, **69**(4): 568-574.
- 小池 隆・吉見恭子・永田 豊. 1996. イセエビの活動を抑制する夜間照度の閾値. 日本水産学会誌, **62**(3): 458-459.
- Mackenzie, K. V. 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, **70**(3): 807-812.
- 松田浩一. 2010. イセエビをつくる. 成山堂書店, 東京, pp. 26.
- 森川由隆・荒川久幸・小池 隆. 2000. イセエビの日周摂餌行動に与える水温の影響. 日本水産学会誌, **66**(5): 791-798.
- Morikawa, Y., C. P. Norman, T. Nuka and Y. Nagata. 2003. Development of a monitoring system to record the activity patterns in juvenile Japanese spiny lobsters, *Panulirus japonicus*. *Journal of the Japan Society for Marine Surveys and Technology*, **15**(1): 17-23.
- 新潟県. 1980. 昭和53・54年度大規模増殖場開発事業調査報告書(上越地区・マダイ): 76-87.
- 小倉通男. 1994. 人工魚礁と魚-II. 株式会社小野田, 東京, pp. 117-118.
- 坂本博規. 1995. 印南町島田地先に造成された地先型増殖場におけるイセエビの生息状況調査. 平成5年度和歌山県水産試験場事業報告: 72-74.
- 佐々木幾星・中村乙水・中野 豪・眞角 聡・丸山裕豊・内田 淳・青島 隆・河邊 玲. 2021. 音響テレメトリーを用いた長崎県五島列島北部沿岸域におけるイセエビ *Panulirus japonicus* の移動追跡. 日本水産学会誌, **87**(4): 421-423.
- 笹倉豊喜. 2016. 水中バイオテレメトリ. 日本音響学会誌, **72**(4): 207-212.
- 水産庁. 2017. 新たな漁港漁場整備長期計画のポイント https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/attach/pdf/200929-2.pdf (2022.7.8 閲覧).
- 水産庁漁港漁場整備部. 2020. 水産基盤整備事業費用対効果分析のガイドライン <https://www.jfa.maff>.

- go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/attach/pdf/index-107.pdf (2022.7.8 閲覧).
- Takagi, K. 1972. Migration of the tagged Spiny Lobster, *Panulirus japonicus*, on the southern Boso Peninsula, Chiba Prefecture: A continuous experiment, 1951-1968. *La Mer*, **10(3)**: 95-110.
- 高木俊祐・天真正勝・山添喜教. 1998. イセエビ標識放流調査. 平成 8 年度徳島県水産試験場事業報告書: 43-46.
- 東京都産業労働局農林水産部水産課. 2018. 東京都の水産. 平成 29 年版: 45-47.
- 東京都水産試験場. 1984. 大規模増殖場開発事業調査報告書 (イセエビ). 東京都水産試験場調査研究要報, (172), pp. 90-97.
- 東京都島しょ農林水産総合センター. 2012. 大島カキハラ地先における築いそ漁場環境調査 - II. 平成 23 年度東京都島しょ農林水産総合センター事業報告: 54-55.
- 東京都島しょ農林水産総合センター. 2013. 築いそ漁場データベースの作製. 平成 24 年度東京都島しょ農林水産総合センター事業報告: 56-57.
- 東京都島しょ農林水産総合センター. 2014. 築いそ漁場における漁具を用いたイセエビの生息状況調査. 平成 25 年度東京都島しょ農林水産総合センター事業報告: 53.
- 東京都島しょ農林水産総合センター. 2018a. 大島カキハラ地先における築いそ漁場環境調査. 平成 28 年度東京都島しょ農林水産総合センター事業報告: 18.
- 東京都島しょ農林水産総合センター. 2018b. 大島カキハラ地先における築いそ漁場環境調査. 平成 29 年度東京都島しょ農林水産総合センター事業報告: 18.
- 東京都島しょ農林水産総合センター. 2020. 大島カキハラ地先における築いそ漁場環境調査. 平成 30 年度東京都島しょ農林水産総合センター事業報告: 17-18.
- 東京都島しょ農林水産総合センター. 2021. 大島カキハラ築いそ漁場における生物環境調査. 令和元年度東京都島しょ農林水産総合センター事業報告: 16.