

博士論文

バイオテレメトリーを用いた東京湾における

アカエイの生息場利用に関する研究

(Studies on habitat use of red stingray (*Dasyatis akajei*) in Tokyo Bay
with use of biotelemetry systems)

氏名 大瀧 敬由

目次

第1章 緒言.....	3
第2章 超音波バイオテレメトリーによるアカエイの生息場利用の解明.....	9
2.1. はじめに.....	9
2.2. 海底地形の計測.....	10
2.3. 超音波発信器の信号到達距離の確認.....	13
2.4. 超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測.....	15
第3章 アカエイの行動と生息場利用の解明.....	42
3.1. はじめに.....	42
3.2. 加速度に基づくアカエイの行動分類手法の確立.....	43
3.3. バイオテレメトリーを用いたアカエイの行動と生息場利用の評価.....	50
3.4. アカエイの行動の一昼夜を超える計測.....	56
第4章 総合考察.....	97
謝辞.....	101
参考文献.....	102

第1章 緒言

アカエイ (*Dasyatis akajei*) は軟骨魚綱エイ目アカエイ科に属し(中坊 2000), 扁平で菱形の胴部と背面に毒腺を備えた尾棘を有する尾部からなる卵胎生の底生魚である(金澤 2003). 日本から東南アジアの沿岸域に分布し, 日本では北海道南部から沖縄まで生息している(Taniuchi and Shimizu 1993). 生態系内においてアカエイは, 多毛類や甲殻類, 魚類を捕食する高次捕食者として(Taniuchi and Shimizu 1993; 古満 2009), また, 砂に潜る行動である潜砂行動や摂餌行動の際に海底表層面を攪乱するバイオターベーションを行う種として知られている. 生態系内において高次捕食者は, その捕食によって環境収容力や生息する生物の多様性に影響を及ぼすトップダウンコントロールを行う(e.g. Sergio et al. 2008). 高次捕食者の減少によりトップダウンコントロールを失って増加した資源は, 安定性を欠くことが知られ, 減少のサイクルに入ったとしても漁獲による資源の壊滅や他種にニッチをとって代わられてしまう場合がある(工藤 2014). そのため, 高次捕食者は, 安定した生態系を維持することから生態系の鍵種となる. バイオターベーションとは, 生態系エンジニアの構成要因の一つであり(Meysman et al. 2006), これにより物理環境や生物相を変化させることで生物の分布や分散に強い影響を及ぼす. そのため生態系エンジニアも高次捕食者と同様に生態系の鍵種となると考えられている(西川 2010). アカエイ科の一種では, バイオターベーションにより海草の生物量に影響を与えていることが報告されている(e.g. Orth 1975, Valentine et al. 1994). O' Shea et al. (2012)の調査では, エイ類が西オーストラリアのニンガルーリーフにおいて年間 42%以上の砂を動かしていると報告している. したがって, アカエイは生態系において重要な種であり, 生息場とそこでの行動を知ることがアカエイとアカエイが生息する生態系を把握する上で必須となっている.

アカエイが生息する沿岸域は, 漁業による混獲や港湾の開発, 埋め立てなどの人間による影響を受けやすい. そのためアカエイは, 国際自然保護連合(International Union for

Conservation of Nature: IUCN)によるレッドリストにおいて今すぐに絶滅の危険はないが、今後、数を減らし絶滅が危惧される可能性があるとする準絶滅危惧種(Near threatened)に指定されている(Huveneers and Ishihara 2006). 一方、日本では、個体数の増加が報告されている(e.g. 山口 2012). 東京湾において継続して実施されている底曳網調査では、2003年頃から増加傾向になり、近年、単位面積当たりの総重量でアカエイが最も優占する種となっている(堀口 2005, Kodama et al. 2010). アカエイの増加は、環境や生態系に及ぼす影響のみでなく、捕食圧増加により餌生物である水産資源の減少が懸念されることや毒針被害の増加などを通じて人間社会に影響を及ぼしている. 日本ライフセービング協会では、全国の海水浴場の応急処置を行った件数とそれぞれの症状をまとめている. それによるとアカエイによる毒針被害は、2004年から2005年はその他の処置件数としてまとめて計上されていたが、2006年からの増加に伴い、個別の処置件数として集計されている. そして、2010年には、クラゲによる被害、切り傷、擦り傷に次いで4番目に多く応急処置を行ったことが報告され、集計が完了している2014年まで常に上位を維持している(日本ライフセービング協会 2004-2014). 同様に一部の海水浴場ではアカエイが大挙しておしよせ、閉鎖を余儀なくされるといった被害が生じている(ちばとぴ 2012). その他にも漁業者が漁業作業中に混獲したアカエイに刺されることや遊漁者の被害など、統計資料として残らない被害が生じている. 以上のことから同じ空間を利用する人とアカエイの共存に向けた対策が急務となっているが、科学的な調査に基づいたエイ類の管理方法や被害の防除方法は、未だ確立されていない(山口 2005). そのため東京湾の一部の地域では、アカエイを駆除することで対処しようとしている. しかし、個体数が多いから駆除するという対処法は、すでに混獲による個体数の減少が危惧されるアカエイの管理方法として最適ではない. 世界的にアカエイが準絶滅危惧種であることを考慮し、個体数が少なくなってからではなく、個多数が多い現在でも駆除以外の方法も検討すべきである. また、生物多様性を維持するという観点からも駆除することを避け、人とアカエイが共存できる持続的な社会・環境を目指さなければならない. そのためには、人とアカエイが共に利用する沿岸域においてア

アカエイの行動を把握し、いつ、どこで、なにをしているかといった生息場利用を明らかにすること。そして、それらの知見に基づいたアカエイの管理・保全を行うべきである。しかし、日本においてアカエイは漁業対象種でないため、漁業から得られる情報は少なく、漁獲資料などにおいてもエイ類、若しくはその他魚類とされ、種ごとの情報を得ることが難しい(Lack and Sant 2009)。したがって、科学的な調査や研究により、アカエイの行動に関する知見を得る必要がある。

野外において水中を自由に行動する魚類を目視などにより直接観察することは、非常に困難である。そのため、標識再捕法と呼ばれる魚体に標識をつけて放流を行い、再度漁獲することで放流から漁獲までの期間の移動を知る方法(e.g. Lowe et al. 2007)や、アーカイバルポップアップタグと呼ばれる水温や水深、照度センサーを搭載し、計測したデータから移動の経路を推定する方法(e.g. Le Port et al. 2008)を用いた野外での行動調査が行われている。アカエイにおいても近年アーカイバルポップアップタグにより、季節回遊などの解明に向けた調査が進められている(山口・古満 2012)。しかし、上記した、標識再捕法では、移動に関して放流地点と回収地点しかわからず、移動の経路を知ることが困難である。また、アーカイバルポップアップタグでは、照度により日の出、日の入り時刻を求め、それらの時刻から緯度経度を推定する。そのため、測位点位置の誤差が数百メートル以上となり、ある湾内といった沿岸域でのアカエイの移動と生息場とを関連させて把握することが難しい。加えて、それらの方法では、潜砂や遊泳といった行動の状態を計測することができないため、アカエイが何をしていたかについての情報は得られない。エイ類の行動については、摂餌痕や潜砂痕といった摂餌や潜砂の際に海底に残る行動の痕跡を計測することでそれらの行動を行った場所やバイオターベーションの影響を推定する方法がとられている(e.g. Valentine et al. 1994, Meysman et al. 2006)。しかし、砂地や泥地に掘られた痕跡では、潮汐により形が損なわれることや観測が可能である人が立ち入れる浅い海域に調査範囲が限られるなどの問題があり、アカエイの行動や生息場利用に関する知見は十分に得られていない。

近年、海洋生物の行動計測手法としてピンガーと呼ばれる小型の超音波信号を発信する計測器やマイクロデータロガーと呼ばれる小型の記録型計測器を用いるバイオテレメトリー手法が用いられている。ピンガーを用いた超音波バイオテレメトリーでは、対象生物にピンガーを装着して放流し、そのピンガーが発した音波信号を超音波信号受信機により受信・記録することで海洋における対象生物の位置情報を取得する(朴・古澤 2002)。具体的には、手持ち式の受信機や船底装備の受信機を用い、ピンガーを装着した対象生物から連続的に発信される超音波信号を受信し、受信時の船の位置を GPS により測位し、追跡することで対象生物の軌跡を推定する方法(e.g. Cartamil et al. 2003)、設置型の超音波信号受信機を使用し、ピンガーからの信号を受信できる最大受信可能距離をあらかじめ計測しておくことで信号を受信した受信機を中心とした信号の受信可能距離円を発見位置として位置情報を得る方法(e.g. Humston et al. 2005)、3 つ以上の超音波信号受信機で同時に同時刻に発信されたピンガーの信号を受信し、受信時間差を用いることで 3 次元でピンガーの位置を決定する方法(e.g. Espinoza et al. 2011a,b)がある。しかし、アカエイにおいてこれらの方法を用いた研究は、魚類が低酸素水塊を回避して遊泳しているという仮定のもと、アカエイの移動を知ることでアカエイを環境センサーとして使用可能か調べるための予察的な実験を行った徳岡ら(1999)の研究があるだけである。徳岡ら(1999)は、アカエイの移動を約 8 時間追跡したが、計測器の性能に焦点を当てており、アカエイの生態については、遊泳速度が最大で 2.3km/h であり、中層を泳いでいたということに留まった。また、深度データの精度が 1m であること、ピンガーの連続使用時間が 50 時間であること、長時間の観測が難しいことといった課題が残った。マイクロデータロガーを用いたバイオテレメトリーは、音波や電波などによりデータの送信をせず、記録型の計測機を使用して内部メモリにデータを蓄積するためバイオロギングとも呼ばれる(荒井 2009)。対象に取り付けるマイクロデータロガーは重さやサイズ、計測時間、センサーなどが多岐にわたり、取り付ける対象のサイズや調査内容を考慮して計測器を選択する。小さなものでは、Little Leonard 製の D3GT と呼ばれる 3 軸加速度、深度、水温を計測できるマイクロデータロガーがあり、長

さ 4.5cm, 重さ 8.6g ほどである。マイクロデータロガーはデータ記録式のため、計測後に機器を回収することでデータを収集する。そのため、マイクロデータロガーを用いた研究は、回収が容易な鳥類や爬虫類から始められた(e.g. 上田 2009)。近年では、技術の進歩により、小型化が進み、魚類でも用いられるようになった(e.g. Komatsu et al. 2011)。したがって、アカエイにおいてもこの手法を用いることで行動の判別が可能になると考えられる。

アカエイの行動及び生息場利用を解明するためには、個体の位置と何をしていたかといった行動の両方を把握する必要がある。野外においてアカエイがどのような場所を生息場として利用し、そこでどのような行動をとっているのかを把握することができれば、保護区の制定やアカエイの生存に影響がなく、人が利用する場所にアカエイが侵入しないように網を設置することでアカエイを海水浴客から隔離するなど、人とアカエイが棲み分けするようなアカエイの保全や管理方法を検討する上で重要な知見となる。そこで本研究では、ピンガーによりアカエイがどのような場所を利用しているかを把握し、マイクロデータロガーによりそこでの行動を計測する。加えて、サイドスキャンソナーおよびマルチビームソナーを用いて海底地形の測量を行うことでアカエイの生息場の底質および底深を求め、ピンガーおよびマイクロデータロガーから得られる位置と行動がどのような海底環境で行われたかという生息場利用に関する知見を得ることとした。

本論文では、以上を第一章の緒言とし、第二章でアカエイの生息場利用について超音波バイオテレメトリーによる測位データとソナーによる海底地形データを合わせることで考察する。第三章では、第二章で得られたデータに加え、データロガーによって計測したアカエイの行動データをあわせて検討する。第四章では、以上の結果をまとめ、アカエイの生息場利用とそれに基づく管理や保全策について考察する。そして、今後の課題について述べる。

研究を行った海域は、海水浴場などの観光業、定置網、海上生け簀による養殖、刺し網などの漁業が行われている。そのため、すべての調査の実施にあたり、現地の漁業協同組合(以下、漁協)である金田漁協と上宮田漁協および海域関係者と相談し、理解を得ることで

調査許可を取得した。また、現地漁協に所属する漁業者の船を傭船し、調査中も漁業や観光業に影響がないよう配慮した。アカエイを使用した調査は、生命倫理の観点から東京大学動物実験マニュアルに基づき、調査開始前に東京大学大気海洋研究所の認可を得て実施した。

第2章 超音波バイオテレメトリーによるアカエイの生息場利用の解明

2.1. はじめに

沿岸域は、地形が複雑な場合が多く、河川流入の影響があり、藻場や岩礁帯、砂地といった様々な底質がモザイク状に分布する。その中でアカエイの生息場は、一般に砂地や砂泥地と考えられている(e.g. Michael 1993, Yamada et al. 1995)。しかし、実際にアカエイがいつ、どのような場所でどのような行動を行ったかといった生息場を利用している過程を調べた研究はない。アカエイの管理や保全を行っていくうえで、アカエイがどこにいるか把握し、利用している海底地形や底質を把握することは、必要不可欠である。

海洋生物の行動を計測するには、バイオテレメトリー手法と呼ばれる小型の計測器を対象生物に取り付けて行動を観察する手法が適している(e.g. Cooke 2008, Bograd et al. 2010)、これまでのバイオテレメトリーを用いたアカエイの研究では、アーカイバルポップアップタグによる季節回遊の計測が行われている(山口・古満 2012)。アーカイバルポップアップタグは、太陽による下向き照度を計測し、日の出、日の入りから測位するため、その精度は高いとは言えない。本機器は、外洋と内湾の行き来など長距離の分布状況を把握することに優れているが、湾内の数 km という狭い範囲における移動を捉えることはできない。超音波を用いた測位では、アーカイバルポップアップタグと比べて、誤差が数十 m の測位が可能である(Cartamil et al. 2003)。しかし、これまでエイ類で行われてきた、ピンガーを用いてアカエイを追跡して位置を計測する方法では、継続した監視を行わなければならない。そのため、数日間以上の計測が難しいことや途中でピンガーからの信号を見失い、追跡できなくなることなどの問題があった。本研究ではそれらの問題を解決するため、ピンガーを装着した個体を追跡するのではなく、複数台の設置型超音波受信機を使用して位置を計測することにした。設置型超音波受信機は、計測範囲に制限が生じるが、記録容量が大きく、電池寿命も長いため、数ヶ月間の継続した計測が可能である。そこで、調査

海域に設置型超音波受信機を複数台配置し、アカエイにピンガーを取り付けて放流することでアカエイの行動を継続して調べることにした。

しかし、アカエイの位置が分かっても、どのような海底環境にいるのかがわからなければアカエイの生息場利用を明らかにすることはできない。底質と海底地形をマッピングし、海底が平坦な砂地か凸凹した岩場であるのか、浅い底深か深い谷かをなど調べ、そこにアカエイの位置をプロットすることで、アカエイの行動と環境との関係を知ることが必要である。海底地形と底質の計測には、超音波により海底地形を測量する音響測深機を使用することが適している(e.g. Able et al. 1987, Mayer et al. 1999)。そこで、インターフェロメトリースайдスキャンソナーとマルチビームソナーの2種類の音響測深機を用いて、海底地形を調べることにした。

本章では、第2.2節で調査海域の海底地形について、第2.3節でピンガーが発する超音波信号の到達距離の推定実験(以下、レンジテスト)について、第2.4節でアカエイの位置情報と海底地形について述べる。

2.2. 海底地形の計測

これまでの海洋におけるエイ類のバイオテレメトリー調査では、対象生物の移動を把握するだけに留まっており、測位された場所と海底地形との関係が十分に考慮されていない(e.g. Mattern et al. 1998)。しかし、底生魚であるアカエイの生息場利用を把握するには、海底地形や砂地や岩場などの底質も合わせて考える必要がある。そこで、調査海域の海底地形と底質を明らかにするために測深調査を行った。

2.2.1. 調査海域

金田湾(35°10'N, 139°40'E)は、東京湾湾口部に位置し、三浦半島先端部東側の海岸に面する(図 2-1)。海岸の中央付近は、三浦海岸海水浴場から続く砂浜となっており、アカエイの毒針に刺される被害が生じている。海上には、定置網や延縄などの漁具が設置され、アカエイが混獲されている(e.g. 田上 2014)。以上のように、金田湾を人とアカエイとが関わりながら利用していることから、調査海域とした。調査した範囲は、南東-北西方向に 4.22km、南西-東南方向に 4.15km である。

2.2.2 調査方法

2013年7月にインターフェロメトリースイドスキャンソナー(Geo Swath Plus Compact, Kongsberg)により底深 15m 以浅の海域、2015年6月にナローマルチビームソナー(Sonic 2020, R2Sonic)により底深 15m 以深の海域の測深を行った。インターフェロメトリースイドスキャンソナーは、周波数 500kHz であり、深度分解能 1.5mm のものを使用した(Geo Acoustics 2014)。本計測機の最大探索範囲は深度の 12 倍であり、15m 位浅の海域を測量に適している(Lepland et al. 2009)。ナローマルチビームソナーは、周波数 200kHz と 400kHz のいずれかを使用時に選択できる。本調査では、底深 15m 以深を測量するため、200kHz を選択して使用した。それぞれのソナーの調査では、トランスデューサーを専用の治具を用いて鉄パイプ先端部に取り付け、鉄パイプを舷側に装着した(図 2-2)。計測時は、船速 2 ノットから 3 ノットで航行した。インターフェロメトリースイドスキャンソナーは Geo Swath 専用測量ソフト GS+(ver.3.60o, Kongsberg)を、ナローマルチビームソナーは水路測量用ソフト HYPACK MAX and HYSWEEP(ver. 2015, HYPACK Inc.)を用いて測線を作成し、測線に沿って航行して測深データを取得した。

得られたデータは、それぞれ、Geo Swath 専用測量ソフト GS+(ver.3.60o, Kongsberg)および水路測量ソフト HYPACK MAX and HYSWEEP(ver. 2015, HYPACK)で 1m×1m の

グリッドデータに変換した。グリッド化したデータは、地図ソフト Google Earth(ver. 7.1.2.2041, Google)および地理情報システムソフト ArcGIS(ver10.3, Esri)を用いて表示し、第 2.4 節で使用した。

2.2.3. 結果と考察

インターフェロメトリースାଇドスキャンソナーおよびナローマルチビームソナーにより、アカエイが利用していたと考えられる海域周辺の海底地形を計測し、マッピングした(図 2-3)。それにより、海水浴場が存在する計測域の岸側から沖側の底深 15m 付近にかけて、緩やかに深度が深くなっていく砂地が広がっていることが明らかとなった。そして、底深 15m よりも深い場所は、岸側から沖側に向けて急激に底深が増大する、海底谷があることがわかった。海水浴場の南側には、岸から水深 8m まで海中にも岩場が続いていた(図 2-4)。

本研究で対象とするアカエイが混獲される海域は、三浦海岸海水浴場から沖に 1~2 海里の定置網が設置されている場所であり(e.g. 田上 2014)、この周辺は底深 8m から 12m の平坦な地形で、砂地であった。このような平坦な砂地は、アカエイの生活する場所となっていることが知られている(e.g. Michael 1993, Yamada et al. 1995)。他の海域においては、原田ら(2002)が熊本県の富岡湾においてアカエイの摂餌痕を用いた調査を行い、砂質干潟で摂餌していたことを報告している。他のエイ類では、アマモが生えるような砂地に生息していることが報告されている(e.g. O'Shea et al. 2012)。したがって、アカエイが砂地を生息場として利用していることは確かである。しかし、砂地を主な生息場としているか、また、その他の底質の利用については、漁業や研究による情報が少なく、明らかとなっていない。よって、アカエイの移動を計測し、海底地形と合わせて調べる必要がある。

2.3. 設置型超音波発信器の信号到達距離の確認

調査海域の環境により、超音波信号の信号到達距離が変化することが知られている(e.g. 海洋音響学会 2009). よって、ピンガーを用いた超音波によるバイオテレメトリー調査を行う際は、実施する調査に適したピンガーを選ぶ必要がある. 本研究では、設置型超音波受信機を使用し、3つ以上の受信機でピンガーから発信された同じ信号を受信して、その時間差で測位を行う手法を用いる. そのため、アカエイに取り付けるピンガーの他に、設置する複数の受信機の時刻を同期させる基準となるピンガー(以下、基準ピンガー)の選定を行わなければならない. 基準ピンガーは、信号到達距離が長く、受信率が高いものがよい. また、海中に設置する受信機間の距離を定めるためには、受信機がアカエイに取り付けるピンガーから発信される超音波信号を受信できる距離(以下、受信可能距離)を知る必要がある. そこで、レンジテストを行い、基準ピンガーと受信機の設置間隔を決定した.

2.3.1. 方法

レンジテストは、無指向性の設置型超音波受信機(VR2W, ϕ 7.3cm \times 30.8cm, 1190g, Vemco)と4種類のコード化ピンガー(Vemco)を使用した(表 2-1). コード化ピンガーは、海中雑音とピンガーからの信号を判別するため、あらかじめ設定された特徴を持った信号を発信するピンガーである. 使用したピンガーは、発信周期固定型であり、周波数 69kHz の信号を1秒間隔で発信する. 型式が V16 から始まるピンガーは、音圧がそれぞれ異なるものを使用し、基準ピンガーを選定した. 型式 V13-1H のピンガーは、発信周期固定型である以外がアカエイへ装着するものと同様であり、受信可能距離の計測のために使用した.

まず、受信機を海中に3か所、間隔をおいて直線状になるようにブイとロープを用いて係留設置した. 次に、アンカーにより船を固定し、船から受信機とピンガーを取り付けたロープをおろして一定時間内の信号の受信と距離を調べた(図 2-5). 設置した受信機の位置から船から吊り下げた受信機とピンガーまでの位置を距離として、設置したブイの位置と船の

位置を測位精度が約 40cm の D-GPS(CRES XF 101, Hemisphere)により計測し、距離を求めた。

レンジテストにおける計測は船と係留設置した受信機の距離を変えて 2 回行った。1 回目の計測では、船から最も近いブイまでが約 170m、最も遠いブイまでが約 425m になるようにした。2 回目の計測では、1 回目の結果を考慮し、船から最も近いブイまでが約 444m、最も遠いブイまでが約 700m になるようにした(表 2-2)。また、1 回目および 2 回目の計測終了後、船から吊り下げた受信機のデータを船上で確認したところ 1 回目の計測では型式 V13-1H のピンガーの信号が、2 回目の計測では、型式 V13-1H と V16-6L のピンガーの信号が受信できていなかった。そこで、船から吊り下げるピンガーを型式 V13-1H と V16-6L のみにして、10 分程度の追加計測を行った。得られたデータは、Vemco 製超音波受信機専用解析ソフト VUE(ver. 2.2.2, Vemco)を用いて表示、解析した。データ解析は、船から吊り下げた受信機がピンガーからの信号をすべて受信していると仮定し、同時に係留設置した受信機で受信された信号数と比較して、距離ごとの受信率を求めた。

2.3.2. 結果と考察

1 回目の計測では型式 V13-1H のピンガーからの信号が、2 回目の計測では型式 V13-1H と V16-6L のピンガーからの信号が、ほとんど受信できていなかった(図 2-6)。この時、船から吊り下げた受信機とピンガーの距離は、ピンガーの信号を確実に受信可能と考えられる約 1m であった。通常、ピンガーを使用する場合には、ピンガーの発する超音波信号が重なることを避けるため、発信間隔にランダム性を持たせたピンガーを使用する。今回の計測では、信号の受信状態を知るために発信周期固定型のピンガーを使用していた、そのため、型式 V13-1H および V16-6L のピンガーの信号を受信できなかった原因は、複数のピンガーの超音波信号が同時に発信され、重なったためと考えられる。追加計測では、型式 V13-1H と V16-6L の両ピンガーともに他のピンガーと同様に信号の受信を確認することができた。

係留設置した受信機とピンガーの距離を 170m から 444m 間にした場合、調査に用いたすべてのピンガーからの受信率は 8 割以上であった (図 2-7)。しかし、係留設置した受信機とピンガーの距離を 585m 以遠とした場合には、型式 V16-6L および V13-1H のピンガーにおいて受信率が低下した。これは、ピンガーから発信された信号が減衰し、S/N 比が悪くなることで、ピンガーからのコード化信号と海中雑音を判別できなくなったためと推定される。また、型式 V16-6H のピンガーは、距離 585m の地点において、計測中に信号を受信していない時間があった。型式 V16-5H のピンガーは、計測を行った最長距離である 700m でも 8 割以上の受信率があった。

以上をまとめると、型式 V16-6L、V13-1H および V16-6H のピンガーは、444m まで 8 割以上の信号受信率、型式 V16-5H ピンガーは、700m まで 8 割以上の信号受信率となった。基準ピンガーは、受信機間の時刻同期のために継続して信号を受信し続けることが望ましい。そのため、計測した最長距離で最も受信率の良い、型式 V16-5H を基準ピンガーとして使用することにした。また、受信機の設置間隔は、アカエイに取り付けるピンガーである型式 V13-1H のピンガーの結果を考慮し、400m 以内とした。

2.4. 超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測

第 2.3 節により、調査に使用する基準ピンガーと受信機の設置間隔が決定した。そこで、アカエイにピンガーを装着し、設置型超音波信号受信機による長期間の観測を通じて、アカエイの移動を調べることにした。そして、得られたアカエイの移動データと第 2.2 節で計測した海底地形とを合わせることでアカエイの生息場利用について検討した。

2.4.1. 方法

実験に用いたアカエイは、調査海域において延縄によって捕獲した。アカエイは捕獲後、神奈川県長井にある増養殖研究所荒崎支所内の海水かけ流し式の屋外水槽(2.95m×0.9m×0.6m)に搬送した。屋外水槽では、調査までの1週間から1ヶ月の期間畜養し、目視によりアカエイに外傷や寄生虫などが付着していないことを確認した。2012年7月から8月に体盤幅 58.5cm±8.9(SD)の5個体のアカエイと2014年7月から9月に体盤幅 56.1cm±14.7(SD)の5個体のアカエイを使用した(表 2-3)。

アカエイ装着用として、周波数 69kHz、音圧 156dB μ Pa at 1m、発信間隔約1分の深度センサー付きコード化ピンガー(V13P-1H, Vemco)を使用した。また、無指向性の設置型超音波受信機(VR2W, Vemco)と基準ピンガーとして周波数 69kHz、音圧 165dB μ Pa at 1m、発信間隔10分の2種類のピンガー(V16P-5H, V16TP-5H, Vemco)を用いた。ピンガーのアカエイへの取り付けは、個体 2Aのみ吸水孔にワイヤーを通す方法で取り付け(e.g. 徳岡ら 1999)、他個体は、外科的手術によりアカエイ腹腔内に挿入する方法とした。手術後は、水槽内にて3日以上アカエイの経過観察を行い、異常行動を行っていないことを確認した。計測器を取り付けたアカエイは、捕獲場所付近で順次放流した。放流したアカエイはすべて第3章の調査にも同時に使用したため、背部に切り離し装置を介してマイクロデータロガーを取り付けた。

2012年7月から8月にかけての約1.5か月の期間、実験に用いたアカエイが捕獲された海域付近に合計10台の設置型超音波受信機を網目状に配置し、計測を行った(図 2-8, 表 2-4)。設置型超音波受信機を基準ピンガーとともに第2.3節と同様に海中に係留設置した。また、基準ピンガーからの信号の受信漏れを防ぐため、基準ピンガーのみを2か所、海中に係留設置した。

2014年7月から9月にかけての約2か月の期間、実験に用いたアカエイが捕獲された海域、岩場周辺、カタクチイワシの生け簀周辺の3か所に合計13台の設置型超音波受信機を配置した(図 2-9, 表 2-5)。

受信機の係留設置期間中に台風により海況が悪化した場合には、受信機の亡失を避けるために受信機の回収と再設置を行った。そのため、2012年は7月28日から8月16日まで、2014年は8月7日から8月13日までの期間は、受信機を回収したため、欠測となった。

計測したデータは、Vemco製超音波受信機専用解析ソフトVUE(ver. 2.2.2, Vemco)を用いてデータを抜き出し、解析した。設置型超音波受信機で得られた受信信号データのうち、ピンガーの発信間隔より短い間隔で連続して同じ信号を受信していることがある。これは、マルチパスと呼ばれる反射波などのノイズである。超音波を用いた測位では、信号の時間差から発信器と受信機間の距離を求めて行うため、発信器から受信機に直線的に届いた信号を使用する必要がある。音線理論に基づき、マルチパスは、伝搬経路が屈折や反射により長くなるため、直線的に届いた信号と比べて遅れて受信される(海洋音響学会 2009)。したがって、ピンガーの発信間隔より短い間隔で連続して同じ信号を受信した場合は、遅れて受信した信号をマルチパスであると判断して除去した。そして、3つ以上の受信機で同時刻に同ピンガーから発信された信号を受信し、その受信時間差を用いて測位するVR2W Positioning System (以下、VPS)によりアカエイの測位を行った(e.g. Espinoza et al. 2011a, b)。VPSにより得られたアカエイの位置情報は、水平方向にある程度の誤差がある(Smith 2013)。そこで本研究では、Scheel and Bission (2012)の報告を参考に、実際は10m以上の誤差がないとされる、推定される誤差が20m以内の測位データを使用した。アカエイの測位データは、地図ソフトGoogle Earth(ver. 7.1.2.2041, Google)およびArcGIS(ver10.3, Esri)により、マッピングした。なお、設置型超音波受信機を配置し、アカエイに装着したピンガーから発信される超音波信号でVPSにより測位できる範囲を以下では、計測域とよぶことにする。

ある測位点から30分以内に測位された点の距離がVPSにより推定されたそれぞれの点の誤差より大きい場合、その2点間をアカエイが移動していたと考えられる。そこで、その2点間の距離とそれぞれの測位点が計測された時間からアカエイの移動速度を求めた(e.g. Cartamil et al. 2003)。また、計測開始後、最初の測位点と前の測位点から30分以上経過した後の測位点を進入時の測位点とし、次の測位点まで30分以上経過した測位点を退出時

の測位点とした。その他、計測された測位点の内、ある時間内の測位点数からアカエイの計測域内の出現頻度を求めた。

2.4.2. 結果

2012年および2014年ともにすべての個体から受信機の設置期間中に複数回のピンガーからの信号を受信することができた。得られた受信データをVPSにより測位データに変換してマッピングした。測位結果では、個体2Aの位置が放流直後からほとんど動かず、ピンガーがアカエイから脱落したと考えられた。そこで解析には、個体2Aを除いた、個体2Bから個体2Jの結果を用いた。

2012年に放流した4個体の測位結果では、個体2Bの測位点が354点と最も多く、個体2Cが17点と最も少なかった。測位点の数を昼夜で比較すると、個体2Cと個体2Dは日中に多かったが、個体2Bと個体2Eは夜間に多かった。移動時の測位点から移動速度を算出すると、個体の体サイズに関係なく、 $20.3\text{-}25.5\text{ m min.}^{-1}$ の範囲であった(表2-6)。

2014年に放流した5個体の測位結果では、個体2Fの測位点が201点と最も多く、個体2Gの測位点が7点と最も少なかった。受信機ごとの測位点数では、どの個体でも実験に用いたアカエイが捕獲された海域付近の受信機で最も多かった。測位点の数を昼夜で比較すると個体2Gと個体2Jが日中に多かったが、個体2Fと2Iが夜間に多かった。個体2Hは、昼夜での差が見られなかった。移動時の測位点から算出した移動速度は、 $18.6\text{-}21.3\text{ m min.}^{-1}$ の範囲であった(表2-7)。

マッピングした測位点から計測域内にアカエイが進入した方向と退出した方向を北側、南側、岸側、沖側の4つに分類した。さらに、測位された時間およびその時の潮汐やその日の天気などと比較した(表2-8)。その結果、アカエイは上げ潮時、下げ潮時、憩流時などの潮時に関わらず、計測域内に現れた。進入から退出までを1回として数えると夜間の方が多かった。また、計測域に進入し、退出するまで直線的に移動する個体が多かった。進入お

よび退出の方向では、2012年、2014年ともに沖側からアカエイが進入し、岸側に退出していく場合が多かった。

第2.2節の海底地形とアカエイの測位点を合わせると、沖側から進入して岸側へ退出していく個体は、海底谷を通過していた(図2-10)。また、北側から進入し、南側に退出する個体は、砂地や岩場を利用していた(図2-11)。

2.4.3. 考察

これまでのピンガーを用いた調査では、位置情報や滞在深度に関する情報のみであった。そのため、対象がいた場所がどのような場所であったか、また、滞在深度はその海域の水柱の表層、中層、底層のどの層かといった場に関する情報が得られていなかった。本研究では、海底地形図とピンガーによる情報を組み合わせることでアカエイがいつ、どこにいたかを知るとともに、それらがどのような場所(深度や傾斜、砂地か岩場などの底質)であったかという生息場に関する情報を得ることができるようになった。したがって、本結果をもとに今後アカエイの生息場利用を調べ、データの蓄積をすることでアカエイの行動や生態に適した保全や管理が可能になるものと期待される。

アカエイの計測域への出現頻度を昼夜で比較すると、4個体が日中、4個体が夜間、1個体が昼夜同数で昼夜での差がなかった。しかし、計測域内への進入から退出までを1回として数えると、全部で60回計測されており、そのうち夜間が43回と多かった。測位点数は、計測域内にいた時間が長いほど多くなる。したがって、出現頻度の比で昼夜に差異がないにもかかわらず、進入と退出が夜間の方が多いため、アカエイは日中に計測域内へ進入した際に夜間と比べて計測域外に出ない、方向転換を繰り返す移動、もしくは、ゆっくりとした移動や海底に留まるなどの休息をとることで計測域内に長い時間滞在していたことが推測される。進入から退出までの移動を確認すると、アカエイは方向転換を繰り返し行う計測域外に出ない動きではなく、直進的な移動をしていた。このことから、日中は、計測域

内において留まる行動をとっていたと考えられる。したがって、アカエイは夜間に活発に行動することが示唆された。

海底地形とアカエイの測位点をあわせた結果から、アカエイが生息場として計測域よりも深い海底を利用していること、緩やかな浅場を利用していること、岩礁域を利用していることが明らかとなった。以上のことからアカエイにとって岩場や深度の変化がある場所が、浅い平坦な砂地以外にも生息場として重要であると考えられる。

アカエイは季節的な水温の低下に伴って湾中央部や深場へ移動すると考えられている(金澤 2003)。しかし、本研究の結果から夏季の水温が比較的高い時期であっても海底谷のような湾中央部の計測域より深い場所をアカエイが利用していることが示された。ピンガーによる調査を行った Matern et al. (2000)は、トビエイ科の *Myliobatis californica* が水温の比較的高い湾内で捕食を行い、水温の比較的低い湾外で休息をとることで効率的なエネルギー消費を行っていることを報告している。また、Neto and Sazima (2009)は、アカエイ科のエイ類と同様の捕食方法をとる potamotrygonidae 科の 2 種、*Potamotrygon orbignyi* と *Potamotrygon falkneri* が浅海域で餌生物を捕食することを目視やビデオカメラを用いた観察による調査から明らかにしている。以上のことからアカエイが岩場や計測域よりも深い海底、緩やかな浅場の利用は、索餌と効率的なエネルギー消費を行うためだと推測される。

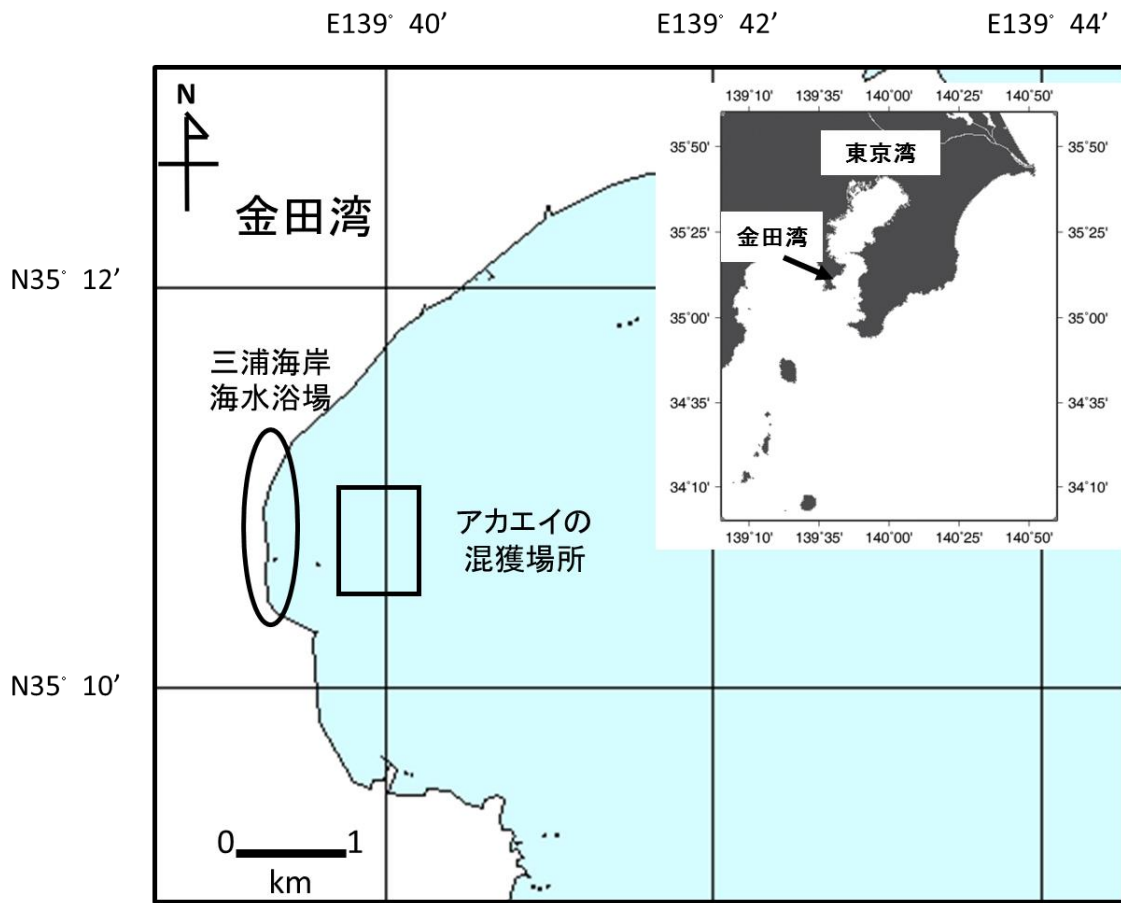


図 2-1. 超音波バイオテレメトリーによるアカエイの生息場利用の解明に関する調査海域.

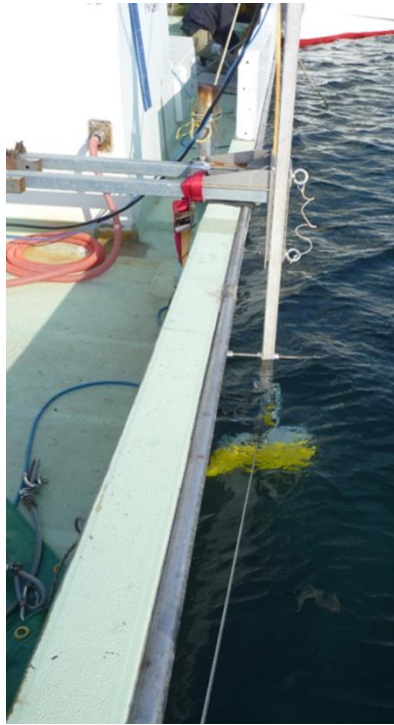


図 2-2. 海底地形測量のために漁船の舷に設置したインターフェロメトリースାଇドスキャンソナー(Geo Swath Plus compact)のトランスデューサー(水中, 黄色).

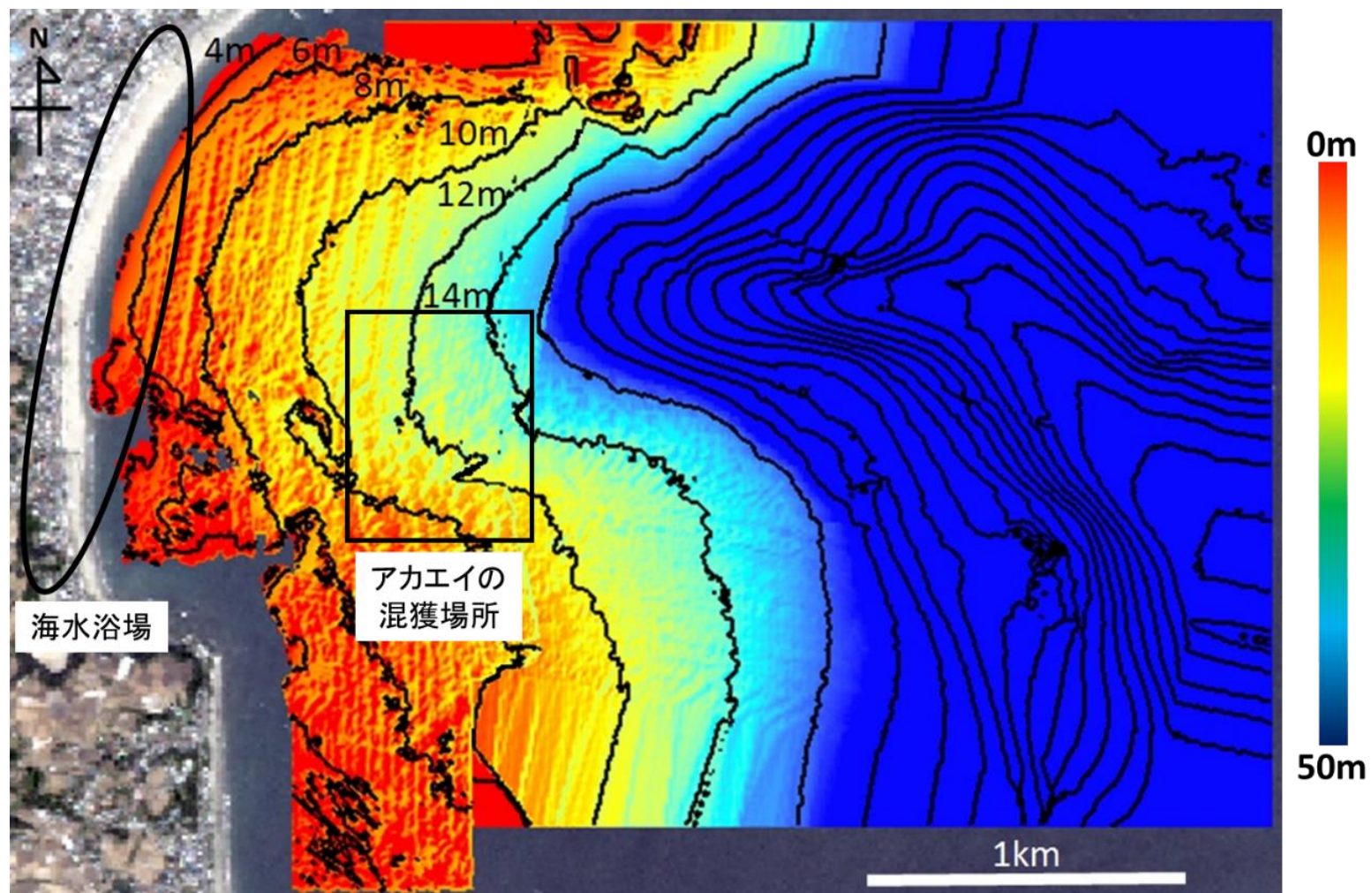


図 2-3. 海底地形調査により得られた調査域周辺の海底地形図. 右のカラーバーは底深を示し, 海底地形図上の黒実線は 2m ごとの等深線を示す.

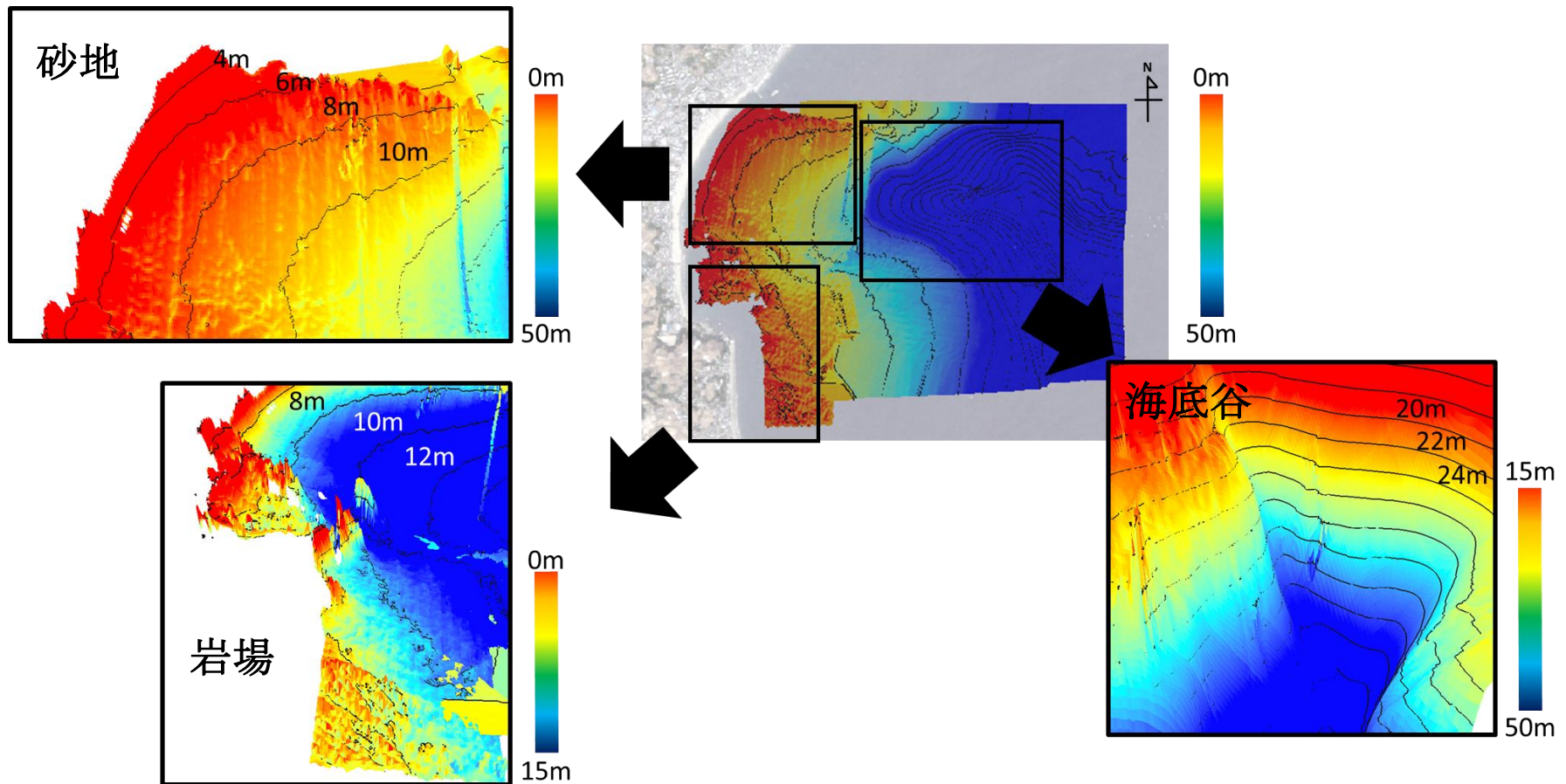


図 2-4. 海底地形の一部を拡大した図。図右のカラーバーは底深を示し、海底地形図内の黒実線は 2m ごとの等深線を示す。中央図は全体図を示し、左上はアカエイ計測海域岸側、左下はアカエイ計測海域南側、右下はアカエイ計測海域沖側の拡大図。

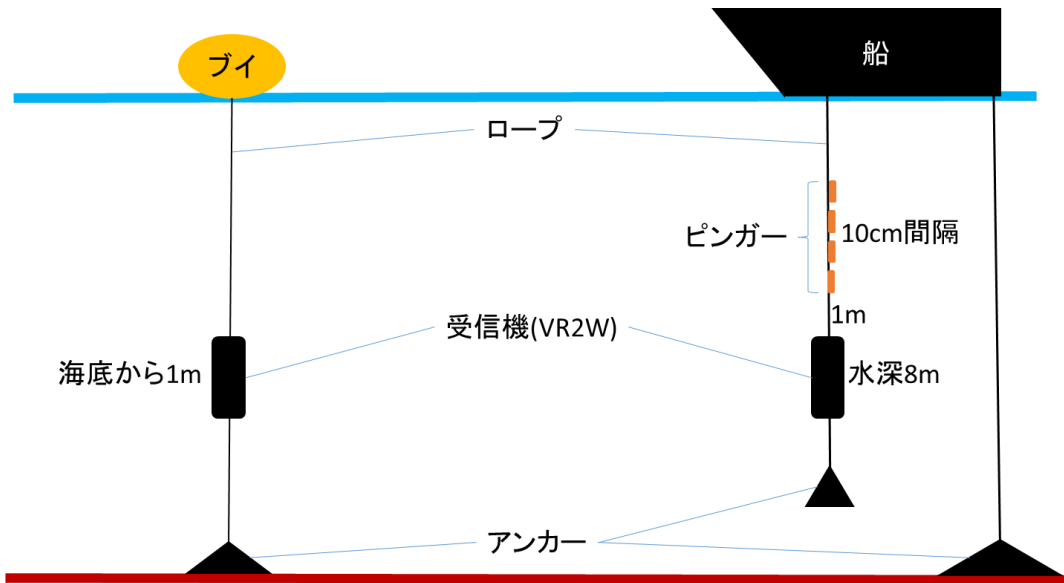


図 2-5. レンジテストの模式図.

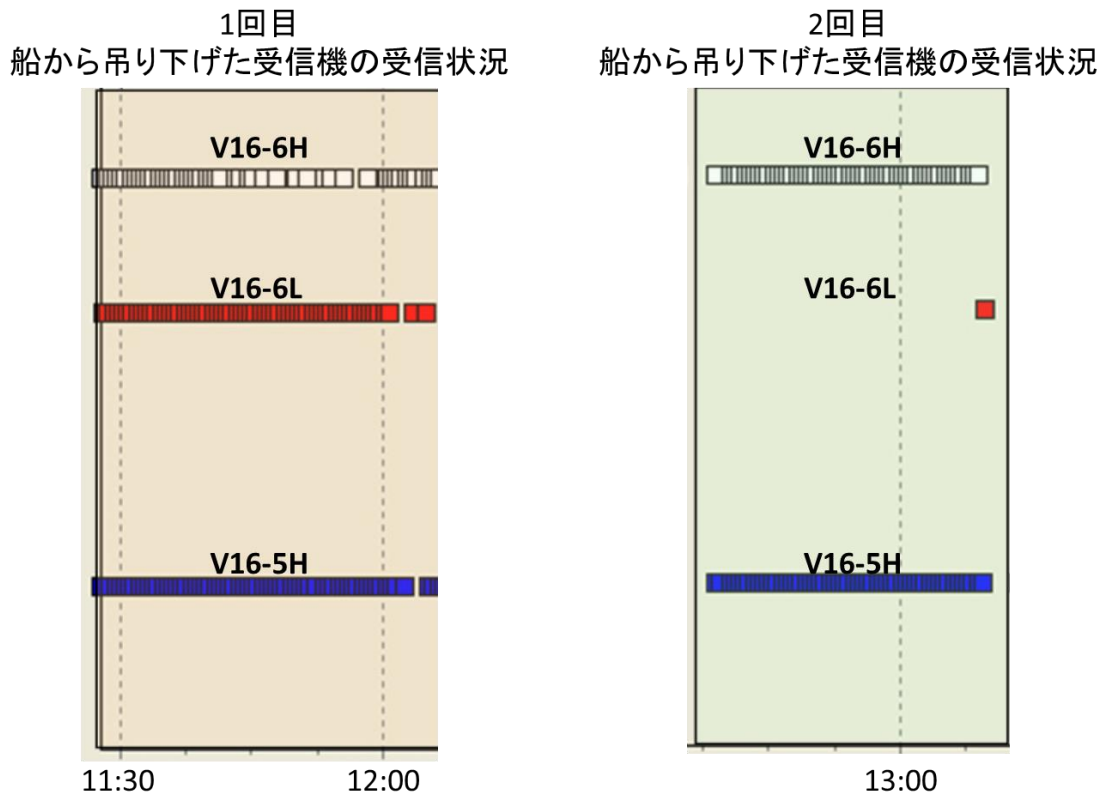


図 2-6. 船から吊り下げた設置型調音場受信機の受信状況. 左図は 1 回目の計測時, 右図は 2 回目の計測時を表す. 正方形の列は, ピンガーの型式 V16-6H, V16-6L, V16-5H, V13-1H から発信された信号を受信した時間を示す.

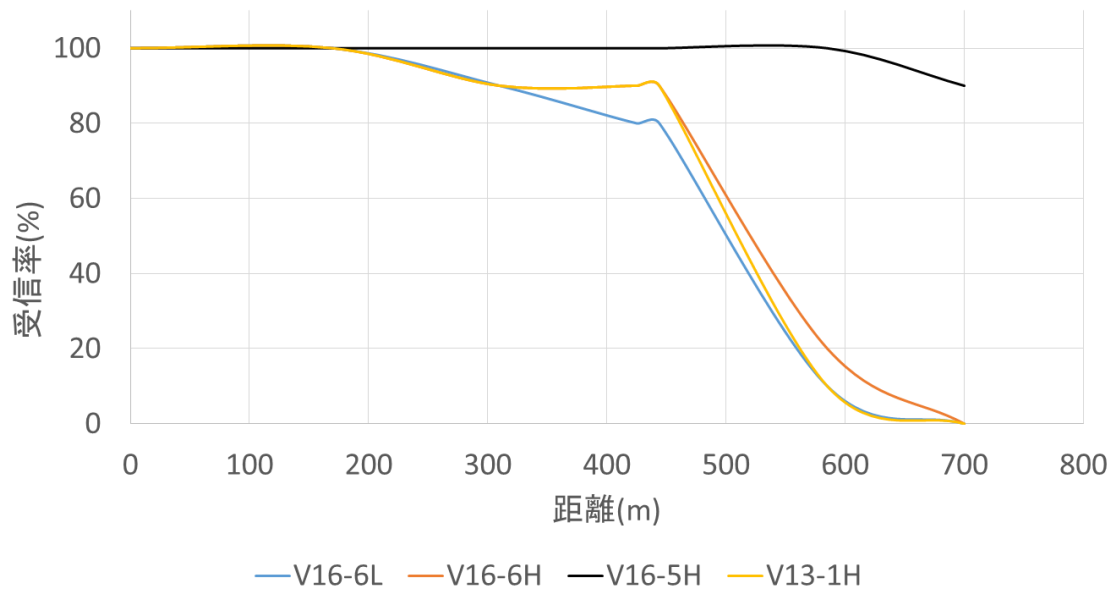


図 2-7. 各ピンガーから発信された信号の距離ごとの受信率の変化図. 縦軸は受信率を表し, 横軸は距離を表す.

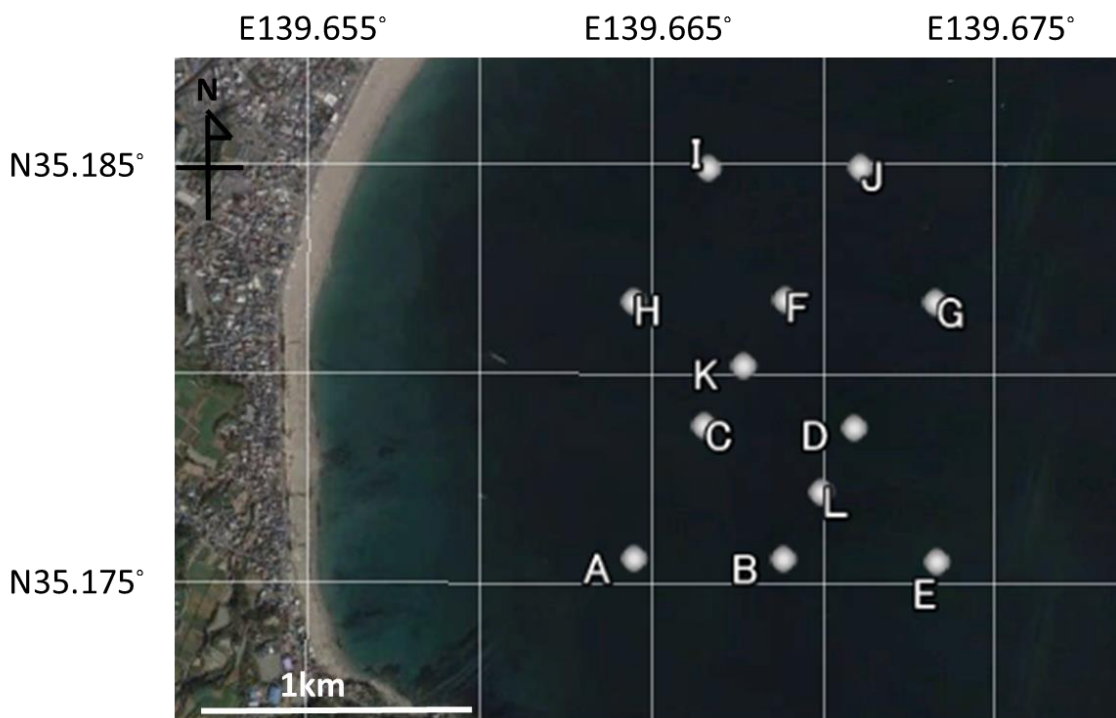


図 2-8. 2012 年 7 月 26 日から 8 月 31 日の期間に金田湾に配置した設置型超音波信号受信機の位置(表 2-4). 丸印 A から J は設置型超音波信号受信機と基準ピンガーを, K と L が基準ピンガーのみを設置した場所を示す.

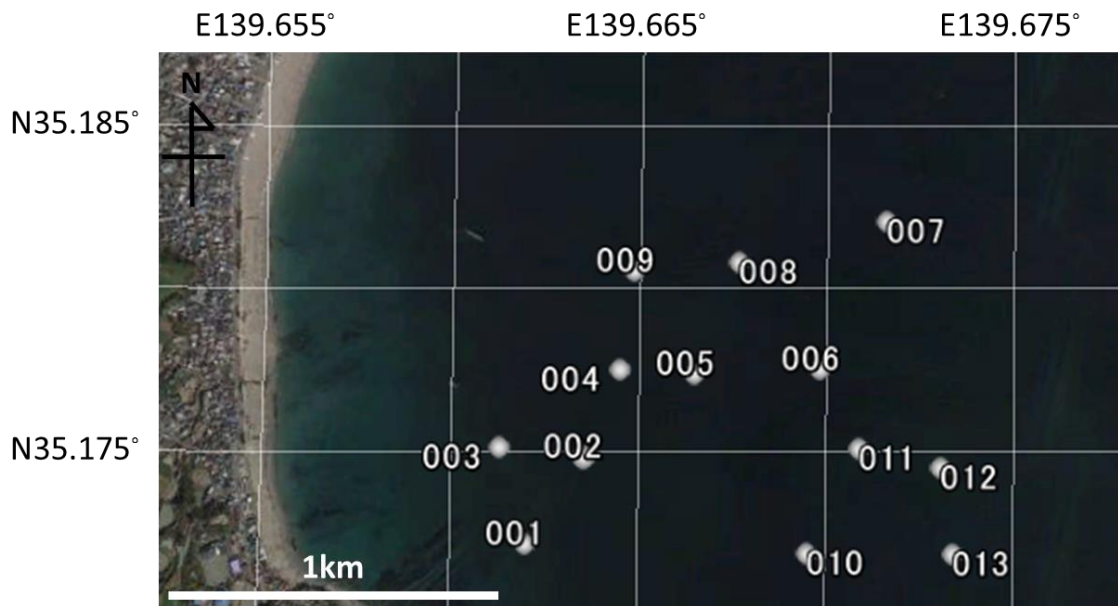


図 2-9. 2014 年 7 月 28 日から 9 月 23 日の期間に金田湾に配置した設置型超音波信号受信機の位置(表 2-5). 丸印 1 から 13 が設置型超音波信号受信機と基準ピンガーを設置した場所を示す.

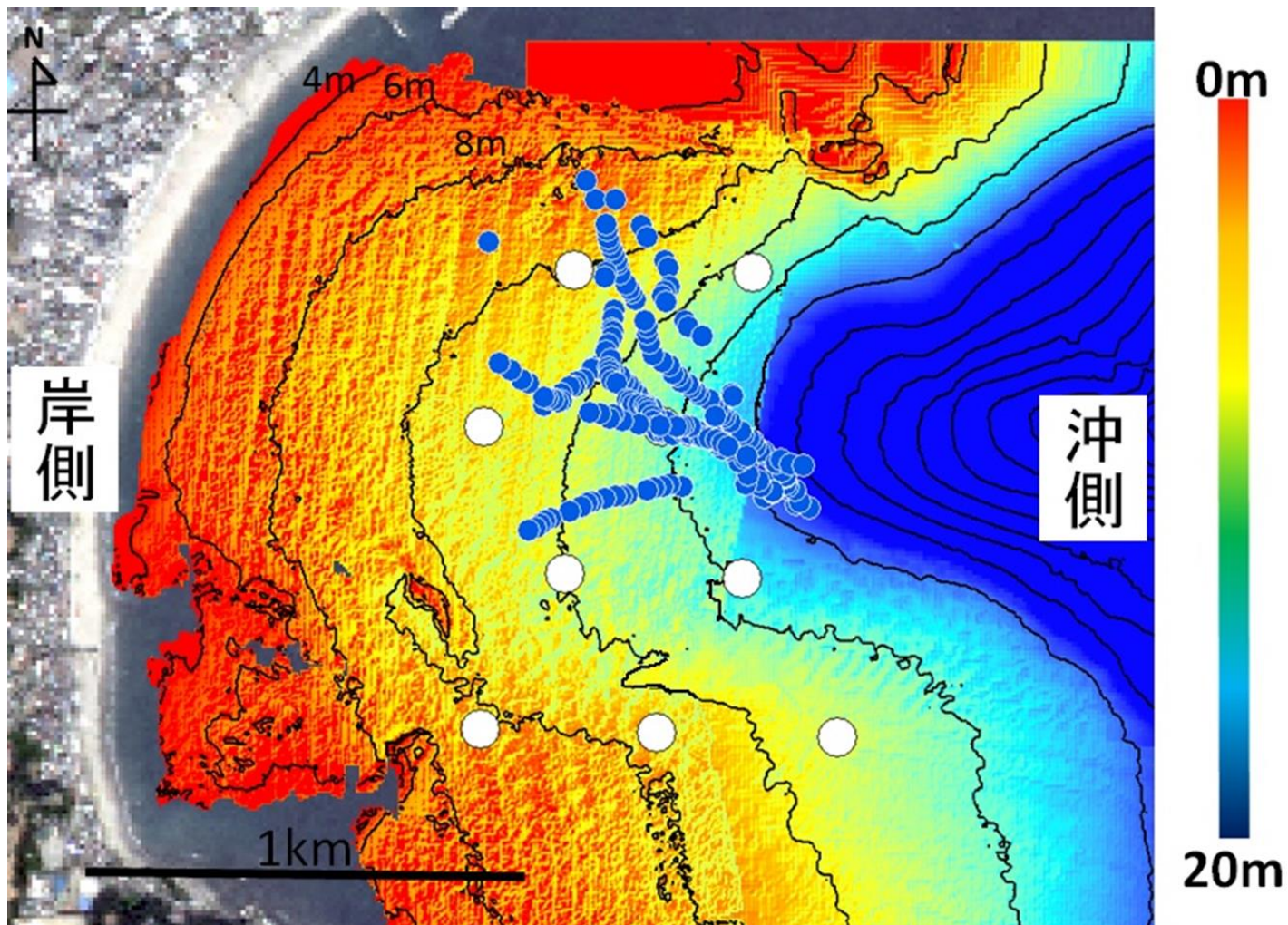


図 2-10. アカエイ個体 2B が沖側から進入し、岸側へ退出した時の移動経路図。青丸は、個体 2B の測位点を示し、白丸は受信機の設置位置を示す。図右のカラーバーは底深を示し、海底地形図内の黒実線は 2m ごとの等深線を示す。

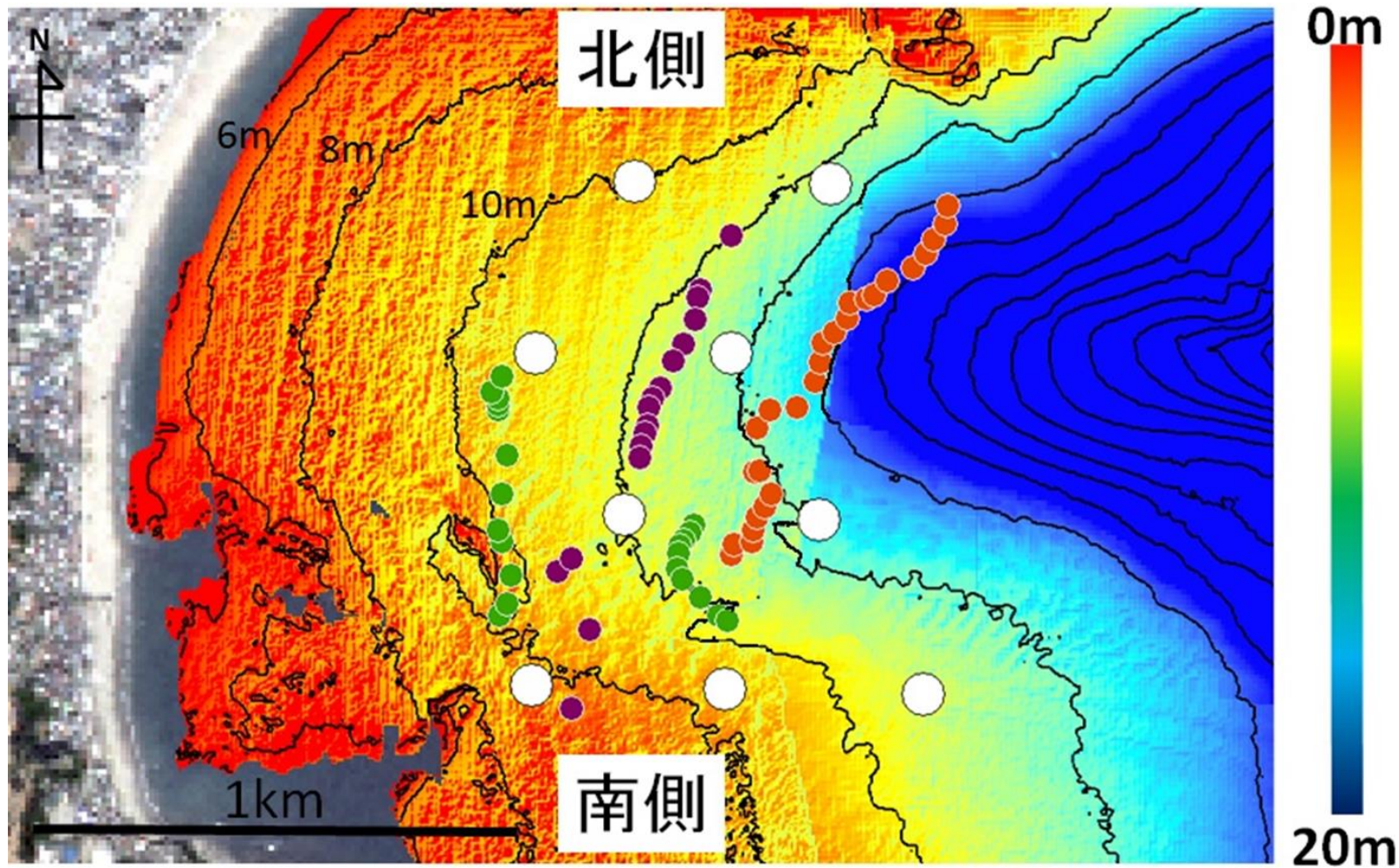


図 2-11. アカエイ個体 2B(橙色), 2C(緑色), 2E(紫色)が北側から進入し, 南側へ退出した時の移動経路図. 白丸は受信機の設置位置を示す. 図右のカラーバーは底深を示し, 海底地形図内の黒実線は 2m ごとの等深線を示す.

表 2-1. レンジテストに使用したピンガーの仕様

型式	周波数(kHz)	音圧(dB μ Pa at 1m)	サイズ(cm)	空中重量(g)
V13-1H	69	156	ϕ 1.3 \times 3.6	11
V16-6L	69	153	ϕ 1.6 \times 9.5	34
V16-6H	69	160	ϕ 1.6 \times 9.5	34
V16-5H	69	165	ϕ 1.6 \times 9.5	36

表 2-2. レンジテスト時の船の位置（緯度経度）と船から測位点までの距離

測位点	計測時間	緯度(度)	経度(度)	船からの距離(m)
1 回目船	11:25-12:30	35.17896	139.66822	0
2 回目船	12:40-13:44	35.17661	139.66679	0
St.1	11:25-12:30	35.18040	139.66846	170
St.2	11:25-12:30	35.18149	139.66913	310
St.3	11:25-12:30	35.18260	139.66966	425
St.4	12:40-13:44	35.18040	139.66846	444
St.5	12:40-13:44	35.18149	139.66913	585
St.6	12:40-13:44	35.18260	139.66966	700

表 2-3. 超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測に使用した

アカエイの放流年月, 雌雄, サイズ, 装着ピンガー

個体番号	放流年月日	雌雄	体盤幅(cm)	体盤長(cm)	装着ピンガー名
2A	2012/7/26	♀	53.9	50.7	F4,T01
2B	2012/7/27	♀	64.0	65.0	F5,T02
2C	2012/8/17	♀	56.5	55.0	F1
2D	2012/8/20	♀	46.0	43.0	F2
2E	2012/8/21	♀	72.0	70.0	F3
2F	2014/7/28	♂	31.0	27.3	388
2G	2014/7/28	♀	66.0	60.5	387
2H	2014/8/2	♀	66.5	59.8	386
2I	2014/8/19	♀	61.4	65.8	382
2J	2014/8/26	♀	55.5	50.0	383

表 2-4. 2012 年度超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測時の

超音波信号受信機設置位置

設置場所名	緯度(度)	経度(度)
A	35.17560	139.66449
B	35.17558	139.66886
C	35.17877	139.66655
D	35.17871	139.67092
E	35.17552	139.37334
F	35.18177	139.66891
G	35.18171	139.67330
H	35.18173	139.66448
I	35.18492	139.66666
J	35.18494	139.67110
K	35.18020	139.66769
L	35.17718	139.66996

表 2-5. 2014 年度超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測時の

超音波信号受信機設置位置と設置場所の特徴

設置場所名	緯度(度)	経度(度)	設置場所の特徴
001	35.17356	139.66204	岩場
002	35.17547	139.66357	岩場
003	35.17568	139.66133	岩場
004	35.17739	139.66451	岩場
005	35.17729	139.66649	捕獲場所付近, 砂地
006	35.17740	139.66983	捕獲場所付近, 砂地
007	35.18066	139.67159	捕獲場所付近, 砂地
008	35.17975	139.66765	捕獲場所付近, 砂地
009	35.17956	139.66485	捕獲場所付近, 砂地
010	35.17336	139.66953	生け簀周辺, 砂地
011	35.17565	139.67090	生け簀周辺, 砂地
012	35.17523	139.67308	生け簀周辺, 砂地
013	35.17334	139.67342	生け簀周辺, 砂地

表 2-6. 2012 年の超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測で得られた

個体毎の測位点数（昼夜別および移動定位別）と平均遊泳速度

個体番号	測位点数	測位点数昼夜比 (昼：夜)	移動時 測位点数	移動時測位点昼夜比 (昼：夜)	平均遊泳速度 (m/min.)
2B	354	105:249	104	46:58	21.4
2C	17	17:0	8	8:0	20.3
2D	81	68:13	57	45:12	23.4
2E	24	8:16	17	5:12	25.5

表 2-7. 2014 年の超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測で得られた

個体毎の位置の点数（昼夜別および移動定位別）と平均遊泳速度

個体番号	測位点数	測位点	放流場所	岩場	生け簀	移動時	移動時測位点	平均遊泳速度 (m/min.)
		数昼夜比 (昼：夜)	測位数	測位数	測位数	測位点数	昼夜比 (昼：夜)	
2F	201	17:184	176	8	17	96	13:83	19.1
2G	7	7:0	7	0	0	5	5:0	18.6
2H	28	14:14	26	2	0	17	11:6	19.8
2I	25	0:25	19	6	0	18	0:18	19.0
2J	8	7:1	7	1	0	5	5:0	21.3

表 2-8. 2012 年および 2014 年の超音波バイオテレメトリーによるアカエイの移動の計測で得られた個体毎の計測海域への侵入と退出時刻，侵入の方向と退出の方向，潮汐，月齢，天気

個体番号	年月日	時刻 (始点 hh:mm:ss-終点 hh:mm:ss)	進入方向	退出方向	潮位 (始点 cm-終点 cm)	潮回り	月齢	天気
2B	2012/7/27	7:07:27-7:51:13	放流場所	北側	80.8-89.7	小潮	7.9	晴れ
2B	2012/8/19	20:28:42-20:38:38	南側	北側	124.6-120	大潮	1.4	晴れ
2B	2012/8/25	21:19:51-23:38:21	岸側	岸側	145.1-127.1	小潮	6.4	晴れ
2B	2012/8/26	18:45:50-19:30:06	岸側	沖側	128.9-131.2	小潮	8.4	晴れ
2B	2012/8/28	15:49:40-16:15:48	沖側	岸側	146.4-144.5	若潮	10.4	晴れ
2B	2012/8/28	6:51:54-8:01:25	沖側	岸側	56.7-50.5	若潮	10.4	晴れ
2B	2012/8/29	1:17:13-3:07:28	沖側	岸側	145.8-140.1	中潮	11.4	晴れ
2B	2012/8/30	13:23:05-13:38:22	沖側	岸側	113.7-120.4	中潮	12.4	晴れ
2B	2012/8/30	3:42:38-5:30:44	沖側	岸側	152.2-118.5	中潮	12.4	晴れ

2B	2012/8/21-22	23:42:04-1:57:04	沖側	沖側	64.7-54.1-57.1	中潮	4.4	晴れ
2B	2012/8/24-25	19:35:03-0:20:39	北側	岸側	151.3-99.3	小潮	6.4	晴れ
2C	2012/8/17	8:43:11-8:56:25	放流場所	南側	56.9-51.4	大潮	28.9	晴れ
2C	2012/8/22	12:54:58-13:37:45	南側	北側	76.9-78.1	中潮	4.4	晴れ
2D	2012/8/20	16:58:29-18:34:8	沖側	南側	153-165.6	中潮	2.4	晴れ
2D	2012/8/20	7:08:27-8:28:37	放流場所	南側	159.1-127.7	中潮	2.4	晴れ
2D	2012/8/30	18:01:08-18:03:11	沖側	岸側	141.2-140.7	中潮	12.4	晴れ
2E	2012/8/21	7:15:12-7:32:05	放流場所	岸側	159.9-157	中潮	3.4	晴れ
2E	2012/8/24	18:11:36-18:53:35	沖側	沖側	140.3-147	小潮	6.4	晴れ
2E	2012/8/24	3:35:15-4:17:50	北側	南側	61.3-69.2	小潮	6.4	晴れ
2E	2012/8/26	22:29:02-22:32:57	北側	南側	139.1-139.1	小潮	8.4	晴れ
2F	2014/7/28	8:04:24-8:07:45	放流場所	南側	92.5-90.8	大潮	1.1	晴れ
2G	2014/7/28	21:52:23-22:51:25	岸側	沖側	97.1-83.2	大潮	1.1	晴れ
2G	2014/7/28	8:03:56-8:30:11	放流場所	岸側	92.5-77.7	大潮	1.1	晴れ

2G	2014/7/29	1:26:11-2:06:55	沖側	岸側	100.5-115.6	中潮	2.1	晴れ
2G	2014/8/2	1:03:12-1:22:30	岸側	南側	73.8-70.7	小潮	6.1	晴れ
2G	2014/8/7	2:25:18-4:19:01	沖側	岸側	132.7-100.1	中潮	11.1	晴れ
2G	2014/8/15	1:10:30-3:42:42	沖側	岸側	61.6-105.7	中潮	19.1	晴れ
2G	2014/8/15	20:12:09-20:38:13	岸側	沖側	155.1-148.8	中潮	19.1	晴れ
2G	2014/8/18	6:27:36-6:47:44	北側	南側	95.9-100.7	小潮	22.1	晴れ
2G	2014/8/19	21:02:21-23:02:19	沖側	岸側	140.3-142-139.2	小潮	23.1	晴れ
2G	2014/8/20	13:33:02-14:21:29	沖側	岸側	130.2-131-130.9	長潮	24.1	晴れ
2G	2014/8/20	21:07:10-21:11:32	南側	北側	130.1-130.6	長潮	24.1	晴れ
2G	2014/8/20	4:10:08-4:29:49	北側	沖側	74.5-71	長潮	24.1	晴れ
2G	2014/8/22	8:25:58-8:50:01	沖側	岸側	46.1-46.7	中潮	26.1	晴れ
2G	2014/8/23	0:02:20-0:15:17	岸側	沖側	133.4-136.2	中潮	27.1	晴れ
2G	2014/8/27	21:02:36-22:13:07	北側	沖側	104.6-74.7	中潮	1.5	くも り

2G	2014/8/28	0:20:11-3:59:57	沖側	岸側	60.4-147.2	中潮	2.5	くも り
2G	2014/8/28	19:09:39-21:58:33	沖側	北側	159.8-89.9	中潮	2.5	くも り
2G	2014/9/2	19:55:33-20:19:21	沖側	岸側	142.1-143.5	小潮	7.5	晴れ
2G	2014/9/2	2:12:23-3:08:36	沖側	北側	68.8-63.3	小潮	7.5	晴れ
2G	2014/9/2	21:16:30-21:26:33	岸側	沖側	143.8-143.4	小潮	7.5	晴れ
2G	2014/9/2	23:11:56-23:31:05	岸側	北側	143.9-126	小潮	7.5	晴れ
2G	2014/9/3	0:19:00-0:25:20	北側	南側	114.7-113.1	長潮	8.5	晴れ
2G	2014/9/4	0:07:57-01:55:34	沖側	岸側	130.8-110.8	若潮	9.5	くも り
2G	2014/9/7	20:13:21-20:23:13	南側	北側	94.5-92.1	大潮	12.5	くも り
2G	2014/9/9	18:52:04-19:31:35	南側	南側	137.7-120.5	大潮	14.5	晴れ

2G	2014/9/12	21:31:06-22:00:37	北側	沖側	97.1-82.8	中潮	17.5	晴れ
2G	2014/9/15	0:40:18-0:54:19	北側	南側	55.9-53.4	小潮	20.5	くも り
2G	2014/9/16	19:37:58-20:28:41	岸側	沖側	146.6-146.6	小潮	21.5	晴れ
2G	2014/8/5-6	23:56:14-0:21:32	北側	南側	140.2-138.1	長潮	9.1	晴れ
2H	2014/8/2	7:00:12-7:13:28	南側	北側	131.4-133.5	小潮	6.1	晴れ
2H	2014/8/3	21:57:45-22:18:10	岸側	沖側	145.2-142.4	小潮	7.1	晴れ
2H	2014/8/16	21:06:03-21:11:57	北側	南側	147-145.5	中潮	20.1	晴れ
2H	2014/8/21	11:27:53-11:33:05	沖側	岸側	103.1-104.6	若潮	25.1	晴れ
2H	2014/8/24	16:28:49-17:01:56	南側	岸側	161.2-159.6	大潮	28.1	晴れ
2H	2014/8/6-7	22:56:59-3:14:52	岸側	沖側	142.1-120.8	若潮	10.1	晴れ
2I	2014/9/9	2:42:19-3:26:53	岸側	沖側	155.5-166.5	大潮	14.5	晴れ
2I	2014/9/11	2:08:39-2:48:10	南側	北側	105.5-126	中潮	16.5	くも り

2I	2014/8/20-21	20:56:13-00:04:52	北側	岸側	129.1-139.1	長潮	24.1	晴れ
2J	2014/8/26	7:00:45-7:32:21	放流場所	南側	129.2-112.8	大潮	0.5	くも り

第3章 アカエイの行動と生息場利用の解明

3.1. はじめに

アカエイは砂地を利用していると考えられていたが(e.g. Michael 1993, Yamada et al. 1995), 第2章より本種は, 岩場や海底谷も利用していたことを明らかにした. そこで本章では, アカエイにピンガーと加速度や深度などを計測できるマイクロデータロガーを装着し, 位置情報とともに行動を計測することにした. そして, アカエイの行動とそれらを行った生息場との関係を把握し, 生息場利用を明らかにすることにした.

マイクロデータロガーによる魚類の行動計測では, Komatsu et al. (2011)が重力加速度を用いてイサキの体角度の推定を行っている. また, Tanoue et al. (2012)は, アカメの行動に伴う加速度を計測し, 頭尾方向および背腹方向に生じる加速度から, 野外での捕食行動の推定を行っている. アカエイにおいても同様に行動時の加速度を計測することで行動を推定できるものと考えられる. しかし, 多くの魚類が尾鰭を使って遊泳するのに対し, アカエイは胸鰭を使って遊泳する(e.g. Rosenberger et al. 1999, Rosenberger 2001). そのため, アカエイの行動様式は他魚類と異なり, 行動により生じる加速度の特徴も異なる可能性がある. したがって, 他魚類で得られている結果をそのまま使用できない. アカエイの生息場利用をマイクロデータロガーを用いて把握するには, 加速度によるアカエイの行動推定手法を確立する必要がある.

そこで, 第3.2節において, 加速度ロガーを装着したアカエイを用いた水槽実験と野外実験を行い, 計測した加速度をもとにしたアカエイの行動分類手法の開発を行なった. そして, 第3.3節において, 野外でアカエイの行動と位置を計測し, 海底地形と合わせることでアカエイの行動と生息場の関係について検討した. また, ピンガーを用いた位置情報の計測では, 計測範囲や計測時間に問題が生じる場合がある(e.g. 徳岡ら 1999). 一方, マイクロデータロガーでは近年, 磁気方位, 対水速度, 深度, 加速度を計測することで個体の位

置が求められている(e.g. Aoki et al. 2012). そこで、マイクロデータロガーによる測位を行い、ピンガーによる測位と比較した。そして、第 3.4 節では、2 日間以上の連続した計測を行い、アカエイの一昼夜での行動の差異について検討した。

3.2. 加速度に基づくアカエイの行動分類手法の確立

マイクロデータロガーを用いた調査では、遊泳深度や水温などの環境データと装着した生物の行動に伴う加速度変化のデータとを記録する(奥山 2009)。マイクロデータロガーで記録される加速度や環境データと調査対象の行動との関係が分かれば、計測された加速度と環境データから行動が判別可能となる。そこで、マイクロデータロガーを装着したアカエイを水槽に放流し、行動を目視およびビデオカメラにより観察した。そして、マイクロデータロガーにより計測された加速度と行動とを比較し、加速度波形から行動を判別できるか検討した。さらに、カメラロガーと加速度および環境データを計測できるロガー、ピンガーを装着したアカエイを用いた野外実験を行い、野外においても加速度波形からアカエイの行動を判別することができるか検証した。

3.2.1. 計測機器および調査方法

水槽実験は、2009 年 6 月 11 日から 12 日に福山大学生命工学部附属マリンバイオセンター内の室内水槽(2.8m×1.1m×0.85m)と 2009 年 6 月 14 日から 15 日に増養殖研究所荒崎支所内屋外水槽で行った。アカエイは、前者で体盤幅 35.5cm、後者で体盤幅 71.0cm の 2 個体を使用した(表 3-1)。計測機器として、3 軸加速度、深度、水温を計測できる直径 1.2 cm 長さ 4.5cm 空中重量 10 g のマイクロデータロガー(D3GT-ORI380, Little Leonard)を使用した。マイクロデータロガーは、アカエイの頭背部に生分解性の手術糸を用いて外科的手術によりゴムネットを装着し、その上にインシュロックタイを用いて装着した(図 3-1)。マ

マイクロデータロガーを取り付けたアカエイは、水槽に放流し、マイクロデータロガーによる計測と同時に目視とビデオカメラによる観察を行った。

野外実験は、金田湾現地で捕獲された体盤幅 $44.4\text{cm} \pm 6.5(\text{SD})$ の 5 個体のアカエイを使用して 2011 年 7 月から 12 月に行った(表 3-2)。計測器として、マイクロデータロガー (PD3GT-W190, Little Leonard) とビデオカメラロガー、ピンガー(V13-1H, Vemco)、電波発信器(mm130B, Advanced Telemetry System)を浮力体(日油技研工業)にひとまとめにして使用した。マイクロデータロガーの大きさは、直径 2.1cm 長さ 11.7cm 空中重量 60g であり、3 軸加速度、深度、水温、速度を計測できる。ビデオカメラロガーは、小型ビデオカメラ(Gloridge)を改造して円筒型の防水ケースに入れたもので、大きさが直径 3.9cm、長さ 13.6cm、空中重量 118.1g である。約 3 時間の連続撮影が可能であり、マイクロデータロガーと同様にアカエイの行動を計測するために使用した。ピンガーおよび電波発信器は、1 秒間隔で連続発信するように設定した。浮力体は、アカエイに装着する機器全てを含めて、海水中で中性浮力となる大きさに調整した。計測器をまとめたものは、大きさが縦 7.5cm、横 27.0cm、高さ 6.5cm、空中重量 305g である(図 3-2)。アカエイには、水槽実験と同様に外科的手術により取り付けたゴムネット上に切り離し装置(e.g. Watanabe et al. 2004)を介して取り付けた。切り離し装置は、ビデオカメラロガーの撮影時間を考慮し、放流から約 3 時間でタイマーにより火薬が爆発し、インシュロックタイが切断され、ひとまとめにした計測器(以下、計測器)が浮上するように設定した。計測器の取り付けは、実験開始日早朝に水産総合研究センター増養殖研究所荒崎支所内屋外水槽で行った。計測器を取り付けたアカエイは、金田漁港まで水槽に入れて運び、傭船した漁船に水槽ごと載せた。その後、捕獲場所付近でアカエイを放流した。放流後は、指向性がある超音波受信機(VR100, Vemco)を漁船から吊り下げて、ピンガーからの信号を受信することでアカエイの追跡を行った。追跡時は、船位を GPS(geko201, GARMIN)で調べ、得られた位置をアカエイがいた位置とする追跡による測位を行った。そして、あらかじめ設定した切り離し時刻になり、アカエイから切り離されて浮上した計測器を回収した。回収方法として計測器は、海面に浮上す

ると波を受けても電波発信器が海上にある形になっている。電波発信器が発信する信号は、水中では減衰が大きい海上に出ることで受信可能となる。よって、計測器からの電波信号を4エレの八木アンテナ(ハムセンター)により受信することで、計測器が海面に浮上したことを確認し、且つ、方向を調べて計測器を回収した。回収した計測器は、データロガーおよびカメラロガーを外し、データを取得した。

マイクロデータロガーが計測する加速度は、カウント値であり、加速度に直すための較正を行う必要がある。また、型式 PD3GT のロガーから得られる速度もロガー先端部に取り付けられたプロペラの回転数であり、速度に直すための較正が必要である。そこで、実験を行う前に使用するすべてのマイクロデータロガーの較正を行った。加速度の較正は、地面に水平な面の上でマイクロデータロガーの加速度の軸が水平面に対して鉛直になるようにして置き、その時のマイクロデータロガーのカウント値を重力加速度 9.8m s^{-2} として較正した。マイクロデータロガーには、3軸の加速度センサーがあるため、それぞれの軸に対してこの操作を行った。速度の較正では、マイクロデータロガーを一定速度で鉛直曳きし、深度変化と時間経過から速度を算出し、その速度とプロペラの回転数を比較することにより較正した。

マイクロデータロガーを用いて計測されたデータは、時系列データ解析ソフト Igor Pro (ver. 6.36J, Wave Metrics)を使用し、Igor 内で動作するマクロ Ethographer (Sakamoto et al. 2009)と Igor Filtering Design Laboratory (Wave Metrics)を用いて解析した。計測された加速度データは、アカエイの体盤幅方向を X 軸、頭尾方向を Y 軸、体盤に垂直な背腹方向を Z 軸とした。また、マイクロデータロガーを生物に装着して加速度を計測したときの加速度は、生物の行動から生じる動的加速度と姿勢角による重力加速度から生じる静的加速度からなる。動的加速度は、ある一定の周期性を有することが知られており、得られた加速度のうち、短時間で周期的な加速度が行動により生じる加速度と考えられる(e.g. Tanaka et al. 2001, Sato et al. 2007)。そこで、得られた加速度データを Ethographer 内のスペクトル解析と連続ウェーブレット変換を用いて動的加速度と静的加速度に分類し、

行動の解析には、動的加速度を使用した。ビデオカメラおよびビデオカメラロガーにより計測されたデータは、GOM PLAYER (ver. 2.2.73.5253, グレテックジャパン)と画像解析ソフト Super Bara-Baby X (ver. 1.5, LNSOFT)により再生、画像処理を行い解析した。

3.2.2. 結果

水槽実験

目視観察およびビデオカメラの映像からアカエイが胸鰭を羽ばたかせて移動する行動、水槽底面でほとんど動きがなくじっとしている行動、水槽底面で胸鰭を大きく羽ばたかせて砂の中に潜る行動を確認した。そこで、本研究では、胸鰭を羽ばたかせて移動する行動を遊泳、底面でじっとしている行動を定位、砂の中に潜る行動を潜砂とした。マイクロデータロガーからは、実験を行った2個体から合計約51.5時間の3軸加速度データを計測することができた(図3-3)。そこで、アカエイが遊泳、定位、潜砂を行っていた時間と同時間の加速度データとを照合すると、遊泳時は、3軸すべての加速度の振幅が $\pm 0.2\text{m s}^{-2}$ 以上あり、周期的な加速度波形を示していた。また、定位時は、3軸すべての加速度の振幅が $\pm 0.2\text{m s}^{-2}$ より小さく、ほとんど振幅がない加速度波形を示していた。潜砂時は、3軸すべての加速度の振幅が徐々に大きくなっていき、潜砂の開始時を頂点として終盤に最も大きくなる二等辺三角形型の加速度波形を示していた(図3-4)

野外実験

野外実験では、放流した5個体すべてから計測器を回収でき、マイクロデータロガーから5個体合わせて約16.3時間の3軸加速度、深度、水温、遊泳速度の各データを取得した。また、ビデオカメラロガーから、故障のため計測ができなかった個体3Eを除く4個体合わせて約11.0時間の映像データを得た。加速度データから、水槽実験で計測された結果と同様

の遊泳、潜砂を示す特徴的な加速度波形を判別できた(図 3-5)。それらの加速度波形が示された時間と同時間のビデオカメラログの映像データを確認すると、海底や漁網が映り、それらが動くことでわかるアカエイが移動している様子が記録されていた。また、潜砂と考えられる画面が上下に激しく揺れ、砂が舞い上がる様子が記録されていた(図 3-6)。このことから加速度波形によってアカエイの遊泳と潜砂の行動を分類できることが明らかとなった。遊泳時の加速度の振幅の周期からアカエイの羽ばたきの周期をスペクトル解析により求めると最大が 1.37Hz であり、最少が 1.11Hz であった (図 3-7, 表 3-3)。また、潜砂時は、加速度の振幅が最も強くなるピークが行動の最後であった(図 3-8)。

一方、定位については、加速度波形が定位を示している時であっても、カメラログの映像では移動している場合があった。その時間帯の加速度以外のデータを確認すると、水深が変化していた(図 3-9)。また、得られたすべての映像データを確認すると、他のアカエイ個体が映っている時間があり、胸鰭を広げたまま飛行機が滑空するような移動を行っていた(図 3-10)。このことから、定位と同様の加速度波形を示し、深度が変化している場合、アカエイは羽ばたきを行わずにそれまでの推進力、もしくは、自身の負の浮力によって潜降する行動(以下、グライディング)をとっていたと判断される。

加速度データから、アカエイが周期的でないスパイク状の加速度波形が見られた(図 3-11)。このスパイク状の加速度を示している時間帯の映像データを確認すると、すべての場合において、一瞬大きく行動する様子が写っていた。そこで、これをバーストと呼ぶことにする。

以上の結果をもとにビデオカメラログで映像を記録することができた時間帯をビデオカメラログのみから行動分類した結果と加速度データと深度データを用いて行動分類した結果を比較した(表 3-4)。すると、映像から行動分類したアカエイが移動、潜砂、定位をしている時間の 90%以上の時間が加速度データと深度データを用いて行動分類した結果と一致した(表 3-5)。また、マイクロデータログで計測したすべての時間を遊泳、定位、潜砂、グライディング、バーストのいずれかの行動に判別することができた。

3.2.3. 考察

これまでマイクロデータロガーを用いた魚類行動の研究における行動分類では、サケのように尾鰭を主に動かして遊泳する魚類や背鰭や尻鰭を主に動かして遊泳するマンボウで、主に遊泳と休息の行動分類が行われてきた(e.g. Tanaka et al. 2001, Watanabe and Sato 2008). しかし、胸鰭を主に動かして遊泳するエイ類について、マイクロデータロガーを用いた行動分類は行われておらず、また、遊泳方法が異なるため、尾鰭、尻鰭、背鰭を使って遊泳する魚種の行動分類方法を利用することができない。

本研究による行動分類の結果からアカエイの潜砂は、加速度で表すと振幅が徐々に大きくなっていき、潜砂の開始時を頂点として終盤に最も大きくなる、三角形のような加速度波形であった。スペクトル図を見ると、最後にもっとも強度が高くなっている。したがって、アカエイが潜砂の際は徐々に羽ばたきを強くさせて行っていることがわかる。アカエイのように扁平な体形をもつヒラメの水槽内での加速度による行動分類と比較すると(e.g. Kawabe et al. 2003), ヒラメの潜砂の加速度波形は振幅が最も強くなるピークが潜砂の途中に何度もあるという違いが見られた(図 3-12)。ヒラメは、主に尾鰭を動かすことで潜砂を行い、頭部から胴部にかけて砂が覆うようにして潜る(e.g. Tanda 1990, 上田ら 2008)。そのため、尾鰭を強く振ることで、より砂の中に潜っていくと考えられる。一方、アカエイは、体軸の両側にある胸鰭を羽ばたかせて潜砂を行い、ヒラメと同様に頭部から胴部にかけて砂が覆うようにして潜る。その際、羽ばたかせる胸鰭も砂に覆われるようにするため、定位した砂地上で徐々に羽ばたいて砂に潜っていき、最後に強く羽ばたいてから羽ばたきをやめることで胸鰭上を砂が覆うようにしている。つまり、強く羽ばたいた後に羽ばたきをやめることは、ヒラメのように再び強く羽ばたくことで胸鰭を覆っていた砂が落ちてしまうことを防いでいるのである。したがって、アカエイは潜砂の最後に最も強く羽ばたき、動かしていた胸鰭の上に砂を覆うように行動を工夫していると推察される。アカエイは潜砂を行う魚類として知られ、外敵から身を隠すためや体表に付く寄生虫を落とすためなど様々な潜砂を行う理由が考えられてきたが、結論に至っていない。しかし、アカエイの潜

砂が砂を体に被せるためであるのであれば、アカエイの潜砂は身を隠すために行っているであろう。

アカエイの遊泳は、胸鰭を上下に羽ばたかせる行動により推進力を得る。遊泳を加速度で表すと周期的な加速度波形であり、遊泳時のアカエイの胸鰭の羽ばたきを示していると考えられる。Rosenberger(2001)によるとエイ類の羽ばたきの周期は、個体サイズが大きい種になるほど羽ばたき周期が短くなることが報告されている(表 3-6)。アカエイの羽ばたき周期を他のアカエイ科のエイの羽ばたき周期と比較すると他のアカエイ科エイ類の羽ばたき周期を指数近似した値に近く(図 3-13)、サイズと羽ばたき周期が反比例するという報告に一致する。

野外実験から水槽実験で得られなかったバーストおよびグライディングを分類した。バーストは、アカメやスズキで捕食の際に行われる行動として知られている(田上 2014)。しかし、アカエイにおいて映像データを確認したところ、加速度においてもバーストの後に遊泳や定位など分類可能な加速度波形が示されていたにもかかわらず、餌生物を確認することはできなかった。したがって、今回得られたアカエイのバーストが何を目的としていたのか特定することは、カメラロガーの映像および加速度によるバーストの前後の行動からは確認できなかった。アカメやスズキなどの魚類では、尾鰭、背鰭、胸鰭などの多くの鰭を使い複雑な動きをするが、アカエイが行動に使用できる鰭は、胸鰭しかなく、軟骨魚類の利点を生かして柔軟な体と合わせて複雑な動きに対応している。そのため、急旋回や海底から浮上する際など、捕食でない場合でも強く体を動かす必要が生じる場合にアカエイは、バーストをとっていると推察される。

グライディングは、ヒラメなどの他の扁平な体を持つ魚類でも行われている。扁平な魚体形状は、海底で定位するのに適しているだけでなく、移動の際にグライディングをすることで遊泳の時間を少なくし、使用するエネルギーを節約している可能性がある(川邊 2000)。アカエイのグライディングは、胸鰭を広げた状態でそれまでの推進力および負の浮力により行われていることから、移動のエネルギー効率をあげるなどの重要な役割を担っ

ていると考えられる。

以上、本研究では、初めてアカエイにマイクロデータロガーを取り付け、アカエイの行動に伴う加速度と深度変化によって行動分類ができることを明らかにした。本研究により得られた胸鰭を主に使用する魚類であるアカエイの行動分類結果は、エイ類の行動分類を行う基礎的な知見になる。また、エイ類の行動による影響推定は、これまで摂餌痕や潜砂痕といった海底に残された痕跡の大きさを計ることで行われてきた(e.g. O'Shea et al. 2012)。しかし、エイによって作られた痕跡か他の要因か判別が難しいことや潮汐などにより痕跡が崩れること、人が立ち入れる浅い海域に調査範囲が限定されるといった問題があった。本研究では、マイクロデータロガーをアカエイに直接取り付けて行動を計測するため、計測されたデータがアカエイの行動による結果であることが明らかであり、調査範囲にも制限がない。本研究と同様のシステムを使用し、行動分類結果を用いてデータを蓄積し、これまでの成果と合わせることで、アカエイが環境に及ぼす影響をより正確に推定できるだろう。

3.3. バイオテレメトリーを用いたアカエイの行動と生息場利用の評価

第 3.2 節の結果から加速度データと深度データをもとに、アカエイの遊泳、定位、潜砂、グライディング、バーストの各行動の分類手法を確立した。そこで、アカエイの行動を知るためにマイクロデータロガーを使用し、アカエイの位置を知るためにピンガーを用いてアカエイの行動がどのような場所で行われているのかを調べることにした。そして、得られたアカエイの行動を海底地形上で重ねあわせることにより、アカエイの行動と海底環境の関係について検討した。

また、マイクロデータロガーにより計測できる 3 軸地磁気と 3 軸加速度、遊泳速度、深度を用いることでこれまでに他種で移動の軌跡が捉えられている(e.g. Narazaki et al. 2009, Aoki et al. 2012)。マイクロデータロガーは、生物に装着して計測し、データを内部

メモリに記録する。そのため、ピンガーと違い計測器を回収してデータを得る必要があるが、計測範囲に制限がない。そこで、アカエイの移動をマイクロデータロガーの3軸地磁気、3軸加速度、遊泳速度、深度から推定できるか検討した。

3.3.1. 計測機器および調査方法

アカエイはすべて、調査を行った海域で捕獲した個体を用いた。2011年の調査では、体盤幅 $44.4\text{cm} \pm 6.5(\text{SD})$ の5個体を使用し、2012年の調査では、体盤幅 $58.5\text{cm} \pm 8.9(\text{SD})$ の5個体を使用した。2011年に使用したアカエイは、第3.2節の野外実験で使用した個体3Cから個体3Gであり、2012年に使用したアカエイは、第2章で使用した個体2Aから個体2Eである。これらの個体には、既述の増養殖研究所荒崎支所内屋外水槽で実験当日の早朝に予め、次に述べる計測器を取り付けた。そして、金田漁港に運び、漁船により放流場所へ運び、放流した。

2011年の調査では、第3.2節で述べた計測器と方法でデータを取得した。2012年の調査では、第2章で述べたピンガー(V13P-1H, Vemco)以外に、マイクロデータロガー(W1000-3MPD3GT, Little Leonard), 前述のカメラロガー, 電波発信機(mm130B, Advanced Telemetry Systems), 浮力体をひとまとめにした計測器も切り離し装置を介して装着し、ピンガーによる位置以外のデータを取得した(図3-14)。型式3MPD3GTのマイクロデータロガーは、大きさが直径2.6cm, 長さ17.4cm, 空中重量135gであり、3軸地磁気, 3軸加速度, 深度, 水温, 速度を計測できる。計測器のアカエイへの取り付けは、第3.2節の野外実験と同様である。切り離し装置は、両年ともにビデオカメラロガーの連続計測可能時間を考慮し、放流から約3時間で作動するように設定した。実験に使用したデータロガーは、第3.2節の方法で較正を行った。また、3MPD3GTロガーで計測できる地磁気も加速度と同様にロガーごとのカウント値で計測される。そこで、加速度の較正と同時に、水平面に鉛直方向の地磁気のカウント値に較正值の全磁力(F)と伏角(i)を用いて算出し

た鉛直分力($F \cdot \sin(i)$)を用いてカウント値から地磁気に補正した。較正に使用した全磁力および伏角は、国土地理院および National Centers for Environmental Information が公表しているデータを使用し、地磁気の較正時は、周囲に磁気を持つ可能性がある金属などがないことを確認してから行った。

両年の調査とも、第 3.2 節と同様に捕獲場所付近で計測器を取り付けたアカエイを放流し、ピンガーからの信号を用いて追跡した。その後、タイマーによって切り離され浮上した計測器を回収した。回収した計測器からマイクロデータロガーおよびビデオカメラロガーにより計測されたデータをダウンロードし、第 3.2 節で述べた方法で解析した。

アカエイの位置は、漁船から既述の超音波受信機を吊り下げて、ピンガーから発信される超音波を受信し、その時の漁船の位置を GPS(geko201, GARMIN)により測位した。これらの測位点をつなげてアカエイの移動の軌跡を作成した。また、ピンガーから送信される超音波信号を設置型超音波受信機で受信して測位する VPS(第 2.4.1 項参照)により、アカエイの位置を求めた。マイクロデータロガーによるアカエイの位置は、時系列データ解析ソフト Igor Pro (ver. 6.36J, Wave Metrics)内で動作するマクロ ThreeD-path を使用し (Shiomi et al. 2010, Narazaki and Shiomi 2010), 3 軸地磁気, 3 軸加速度, 遊泳水深, 遊泳速度, 調査海域の地磁気の偏角を用いて求めた(e.g. Johnson and Tyack 2003)。Igor Pro の ThreeD-Path により作成される軌跡は、開始を原点としてそこから 1 秒ごとの距離の点として作成される。そこで、アカエイの放流地点を原点とし、計測器が切り離し装置のタイマーで起動した爆破装置でアカエイから切り離され浮上して回収されるまでの地点の軌跡を作成した。次に、GPS で計測したアカエイの放流地点をユニバーサル横メルカトル図法(Universal Transverse Mercator: 以下, UTM)による座標値に換算して、Igor Pro の ThreeD-Path で作成したアカエイの軌跡に加算し、UTM 座標値に変換した。UTM 座標による軌跡の終了地点と GPS による計測器回収地点の差を計測されたポイント数で割ってそれぞれの軌跡のポイントに代入することで、放流地点と回収地点が合うように誤差を修正した。得られたアカエイの位置のデータは、地理情報システムソフト ArcGIS(ver10.3,

Esri)に読み込み，UTM の海図にマッピングした。

3.3.2. 結果

2011 年および 2012 年の調査により，放流した全 10 個体に装着したマイクロデータロガーのデータから合せて約 34.2 時間，ビデオカメラロガーの映像データを故障で計測できなかった 1 個体分を除く 9 個体から合せて約 26.4 時間が得られた。ピンガーを装着した個体については，漁船から吊り下げた超音波受信機の故障により信号を受信できなかった 2 個体と計測器の切り離し予定の 1 時間前に受信機が停止した 1 個体を除き，7 個体の放流から計測器の回収までの位置を得ることができた(表 3-7)。

マイクロデータロガーによって得られたデータを第 3.2 節の行動分類手法を適用したところ，計測したほぼすべての時間を加速度データと深度データからいずれかの行動に分類することができた(表 3-8)。また，深度データからアカエイが鉛直移動を繰り返し行っていたことがわかった。映像データからは，アカエイの行動のみでなく，アカエイが他個体と遊泳している様子や岩場や藻場といった底質を利用していたことが分かった(図 3-15)。また，映像データに他個体が映った場合があり，計測器を装着した個体が群れで遊泳していた。

ピンガーを用いて追跡した結果を海底地形と合わせた。その結果，アカエイは放流場所から岩場へ行くこと，およそ底深 4m の浅海域に進入すること(図 3-16)，計測海域沖側にある海底谷に沿って深い底深の海域に移動した 4 個体のうち 3 個体が底深 14m から 16m 付近の浅い平坦な海底から急傾斜が始まる海底の比較的限定された場所を通過していたことが示された(図 3-17)。また，アカエイが群れで遊泳していた場所は，底深 4m から底深 12m 付近の浅い平坦な砂地から底深 20m の急傾斜であった(図 3-18)。浅い場所や岩場へ移動する個体は，鉛直移動を繰り返し行いながら移動していた。また，鉛直移動は，個体 3C を除き，浅い場所へ移動している個体でのみ行われていた。深い場所へ移動しているにもかかわらず，鉛直移動を行っていた個体 3C では，他個体を追尾していた様子が映像データで記

録されていた。

海底地形とアカエイの移動の軌跡、映像データから、アカエイが利用していた岩場には岩礁性の藻場が広がっていたことが明らかとなった(図 3-19)。また、どの底質でも定位は行われていたが、潜砂は砂地でのみ行われていた(図 3-20)。

2012年に放流した、3軸加速度、3軸地磁気、速度、深度を計測できるマイクロデータロガーを装着した5個体の移動を ThreeD-path により推定した。マイクロデータロガーによる位置推定、ピンガーを用いた追跡、VPSの3種の方法で測位したアカエイの同時刻の位置を比較すると、マイクロデータロガーにより推定した位置とVPSで得られた位置間の水平方向の差は、個体2Bで最も大きく、約320mとなった(図 3-21)。また、ピンガーの信号を漁船で追跡して得られたアカエイの位置とVPSで得られた位置の同時刻の位置間の水平方向の差は、個体2Dで最も大きく、約116mとなった(図 3-22)。マイクロデータロガーにより推定したアカエイの位置とピンガーの信号を漁船で追跡して得られたアカエイの位置の同時刻の位置の水平方向の差は個体2Eで最も大きく、約214mとなった(図 3-23)。

3.3.3 考察

映像データからアカエイが他個体を追尾している様子が記録され、海底地形と合わせてマッピングすると複数の場所で追尾していたことがわかった。これまで、アカエイが集団で河川を上る様子や海水浴場に大挙して押し寄せたことが報告されているが(e.g. J-CAST ニュース 2012, ちばとび 2012), 科学的な調査によりアカエイが集団でいる様子を記録した例は、本研究が初めてである。

アカエイの移動の軌跡と映像データを合わせて海底地形上にマッピングしたところ、アカエイの潜砂は、砂地のみで行われており、第3.2節におけるアカエイの潜砂が身を隠すためという考察を支持している。また、アカエイが岩礁性藻場を利用していることが明らかとなり第2章の結果が裏付けられた。

アカエイと同様に鉛直移動を行うヒラメでは、浮上時に遊泳し、その後、グライディングを行うことでエネルギーを効率よく使用しているとされる(Kawabe et al. 2004)。アカエイも同様にグライディングを行うため、鉛直移動を行っていると考えられる。しかし、個体 3C は、深い場所へ移動しているにも関わらず、鉛直移動を行っていた。アカエイが現在いる水深より深い場所へ移動するは、浮上することなくグライディングが可能であり、負の浮力を持つアカエイが浮上することは、エネルギーの損失と考えられる。個体 3C の映像データを見ると他個体を追尾している様子が記録されていた。したがって、アカエイの鉛直移動は、エネルギー効率だけでなく、仲間を探すなど探索行動としての意味も持つと推察できる。

マイクロデータロガーによる測位、ピンガーを用いた追跡による測位、VPS による測位、それぞれで同じ時間の場所を比較すると数百メートルの誤差が生じた。マイクロデータロガーによる ThreeD-Path を用いた測位では、生物の細かな動きに影響され、誤差が生じることが知られている(e.g. Shiomi et al. 2010)。また、アカエイが定位した際に海底にある磁気を帯びたものに地磁気センサーが影響を受けることや速度を計測するプロペラが潮流の影響を受けること。潜砂の際に舞い上がった砂などでプロペラが詰まることで誤差が生じることも考えられる。加えて、本調査では、マイクロデータロガーとともにつけた他の計測器の金属部分による影響も考えられる。ピンガーを用いた追跡による測位では、船位を測定する GPS の測位の誤差は実測で約 10m 程度あり、さらに、船からアカエイまでの斜距離が誤差として含まれる。VPS による測位では、水平距離に誤差が生じ、位置と誤差とが推定される(Smith 2013)。本研究では、VPS の結果を用いる際に推定誤差が 20m 以内のデータを使用した。Scheel and Bisson (2012)によると VPS の推定誤差が 20m の時の実際の誤差は平均 5.2m であると報告されており、本研究で使用した測位手法の中では、VPS による位置情報が最も誤差が少ない。VPS による測位結果が正しいアカエイの位置だと仮定すると、マイクロデータロガーによる測位結果が最も誤差が大きく、本研究結果では約 320m であった。この誤差は、海底地形とアカエイの移動を比較する際に様々な底質が混在

する場合、アカエイが利用していた場所を把握するには大きな誤差となる。しかし、先行研究で行われているエイ類のアーカイバルポップアップタグによる測位精度は、0.1度の範囲であり(Port et al. 2008)、比較するとマイクロデータロガーによる測位であっても精度が向上しているといえる。加えて、VPSでは、測位範囲に制限があり、アカエイの放流から計測器の回収まで測位し続けることが難しいが、マイクロデータロガーによる測位であれば範囲に制限がない。同様にピンガーによる追跡においてもピンガーからの信号を受信し続けることができれば、放流から回収まで範囲に制限なく計測が可能であるが、マイクロデータロガーによる測位と比べ、長時間の連続した計測が困難である。以上のことからアカエイの生息場利用を把握する上でアカエイの移動を推定するためには、マイクロデータロガーによる連続した測位を行うとともにVPSによる底質の異なる場所などの限定的な場所の測位を行い、それぞれでデータを補い合うことが望ましいといえる。

3.4. アカエイの行動の一昼夜を超える計測

第2章の結果からアカエイが昼夜で行動を変えていることが示唆された。また、先行研究によりエイ類では、潮汐や昼夜の光環境で行動パターンを変化させている種がいることが知られている(e.g. Cartamil et al. 2003)。そこで、本節では、データロガーによる一昼夜以上の連続した計測を行い、アカエイの昼夜での行動の差異や潮汐との関係を検討した。

3.4.1. 計測機器および調査方法

2013年に4個体、2014年に4個体の合計8個体のアカエイを使用した(表3-9)。計測器として次に述べるロガーをひとまとめにし、切り離し装置(Little Leonard)を介して、放流日の早朝に装着した。計測器を装着したアカエイは、捕獲場所付近で放流した。調査に使

用したアカエイは、すべて放流した海域で捕獲した。2014年に使用したアカエイは、第2章で用いた個体2G, 2H, 2I, 2Jである。

2013年は型式PD3GTのマイクロデータロガー(W190, Little Leonard)を2014年は型式3MPD3GTのマイクロデータロガー(W1000, Little Leonard)を使用した。マイクロデータロガーは、回収用の浮力体(日油技研工業)、ピンガー(V13-1H, Vemco)、電波発信器(mm150, Advanced Telemetry Systems)をひとまとめにして計測器とし(図3-24)、第3.2節と同様の方法でアカエイの頭背部に装着した。切り離し装置は、放流から約48時間で作動するように設定した。マイクロデータロガーは、加速度および深度を第3.2節と、磁方位および速度を第3.3節と同様の較正を行ってから使用した。計測器の回収とデータ解析は、第3.2節および第3.3節と同様の方法を用いた。また、マイクロデータロガーから得られたデータを行動分類すると遊泳、潜砂、定位、グライディング、バーストに分類できる。分類された行動の内、遊泳とグライディングは、移動を伴う行動である。そこで、マイクロデータロガーによる測位結果をマッピングする際に行う誤差修正は、代入する誤差を移動を伴う行動が行われていた時間のみで代入することで行った。

3.4.2. 結果

放流した8個体のうち、2013年に2個体、2014年に2個体の合計4個体から約196.2時間のデータを取得した。加速度データ及び深度データをもとにアカエイの行動を分類したところ、遊泳がすべての行動の中で最も長い時間行われ、どの個体も鉛直移動を繰り返し行っていた(表3-10)。また、遊泳やグライディングといった行動が最も少ない個体2Gにおいても、それらの行動の割合が全行動の55%を占めていた。

一昼夜以上の計測を行った4個体のアカエイの行動を昼夜で比較すると、2個体が夜間に鉛直移動を繰り返し行っていた。また、4個体すべてにおいて日中の方が潜砂を行う回数が多く、3個体が昼に長く定位を行うという昼夜での行動の差が生じた(表3-11)。潮汐につい

では、個体 3K および個体 2G が夜間の満潮時から潮位が下がりだし、次の満潮になるまでの間に鉛直移動を伴う遊泳を行っていた。(図 3-25)

2014 年に計測した 2 個体のデータからアカエイの移動の軌跡を作成し、第 3.3 節と同様の方法で海底地形と重ね合わせた。すると、潜砂や定位を行っている位置でアカエイが海底に接しておらず、海底よりも深い場合があった(図 3-26)。そこで、第 3.4.1 項で述べた方法でマイクロデータロガーのデータから分類した移動時の位置に対してのみ、位置の誤差を修正した。その結果、定位および潜砂の時に海底に接するように修正された(図 3-27)。そこで、修正された移動の軌跡と海底地形を比較すると、1 個体は岩場へ移動しており、1 個体は海底谷を通過していたことがわかった。また、海底谷を通過した個体は、緩やかな傾斜の場所から海底谷につながる場所において、第 3.3 項の結果と同じ場所を通過し、深場に移動していた(図 3-28)。

3.4.3 考察

マッピング結果からアカエイは、岩場や海底谷などの様々な場所へと移動していた。また、行動分類結果からどの個体も移動を伴う行動に費やす時間が最も長かった。以上のことから、アカエイは広い範囲を移動している可能性が示された。Cartamil et al. (2003)は、ピンガーを装着した個体の追跡実験をハワイのカネオヘ湾で行ない、アカエイ科の *Dasyatis lata* が同じ高次捕食者であるアカシュモクザメ(*Sphyrna lewini*)より広い範囲を遊泳していることを報告した。Cartamil et al. (2003)は、*D. lata* が、餌生物としてゴカイ類やエビやカニなどの甲殻類を捕食すること(Smith and Kukert, 1996)から、カネオヘ湾における餌生物の動物相が乏しいので、索餌のために広い範囲を遊泳していると推定した。アカエイにおいても多毛類や甲殻類を餌生物としている(Taniuchi and Shimizu 1996, 古満 2009)。第 2 章で計測した海底地形から、調査を行った金田湾は、岩場や岩礁性藻場が点在する砂地であった。一般に砂地では、動物相もそれらの現存量も少ないと考えられる

(e.g. Costanza et al. 1997, Lalli and Parsons 2005). 反対に、藻場や干潟では、餌となる動物も多いとされる。したがって、本研究で明らかとなった傾斜の緩やかな浅い場所や藻場のあるところへのアカエイの移動とそこでの遊泳は、索餌を目的とした行動ではないかと推測される。

一方、アカエイ科の *D. lata* やヤマトシビレイ科のゴマフシビレイ (*Torpedo californica*) などの多くの板鰐類が昼間と比べて夜間の移動量が多いと報告されている (Bray and Hixon 1978, Cartamil et al. 2003)。金田湾のアカエイでも日中の方が潜砂を行う回数が多く、3 個体が昼に長く定位を行うという休息的な行動を行い、夜間に鉛直移動を盛んに行っていた。したがって、アカエイが *D. lata* やゴマフシビレイのように夜間の方が移動する魚であることを示している。*D. lata* が夜間に移動する理由として、昼間に移動して捕食者であるアカシュモクザメやイタチザメなどの大型のサメ類に遭遇する可能性を避けるためだと考えられている。同様にアカエイもシュモクザメなどの大型のサメ類により捕食されることが知られている (山口 2011)。したがって、調査を行った金田湾では、大型のサメが出現する例は極めて少ないが、アカエイの生存のための習性として夜間に移動し、昼間に潜砂をして砂に隠れている可能性が考えられる。

トビエイ科のマダラトビエイ (*Aetobatus narinari*) の行動を超音波発信器を用いた追跡により調べた Silliman and Gruber (1999) は、この種の行動が潮汐と関係していると報告している。また、アカエイ科のアメリカアカエイ (*Dasyatis americana*) の行動を漁獲場所と漁獲時の大きさや胃内容物から調べた Gilliam and Sullivan (1993) は、アメリカアカエイの行動が潮汐と同調した行動をとることを明らかにした。行動が潮汐の影響を受ける種について Cartamil et al. (2003) は、生息場の水深が関与しているとしているのではないかと指摘している。潮汐と同調した行動を行う *A. narinari* や *D. americana* などのエイの種の生息場は、水深が非常に浅い潮間帯も含むため、潮位の変化で移動可能範囲が増減する。一方、アカエイや *D. lata* が生息する生息場は、ほとんどの場所において潮位が低い時間であっても移動可能な潮下帯以深の海域である。そのため、潮汐に同調した行動をとる必要が

ないものと考えられる.

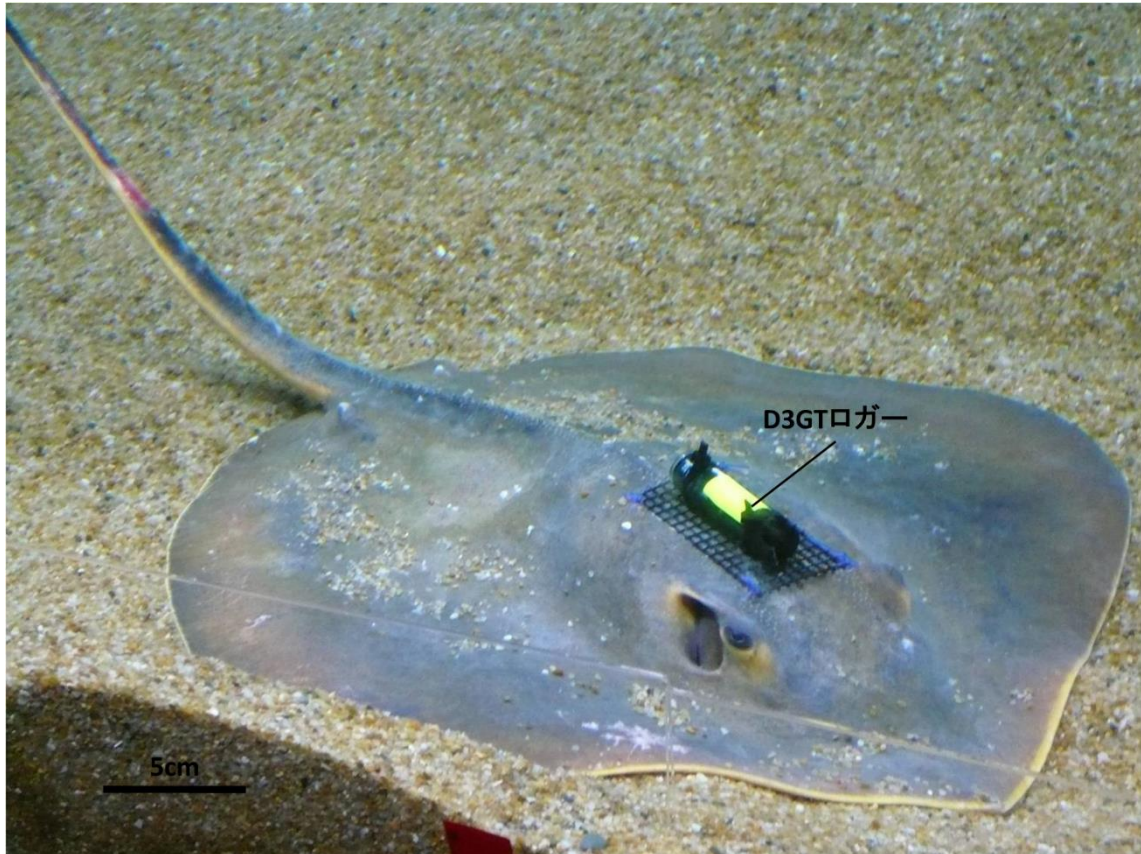


図 3-1. D3GT ロガーを頭背部に装着したアカエイ. 2009 年 6 月に福山大学および増養殖研究所で実施した水槽実験で使用.

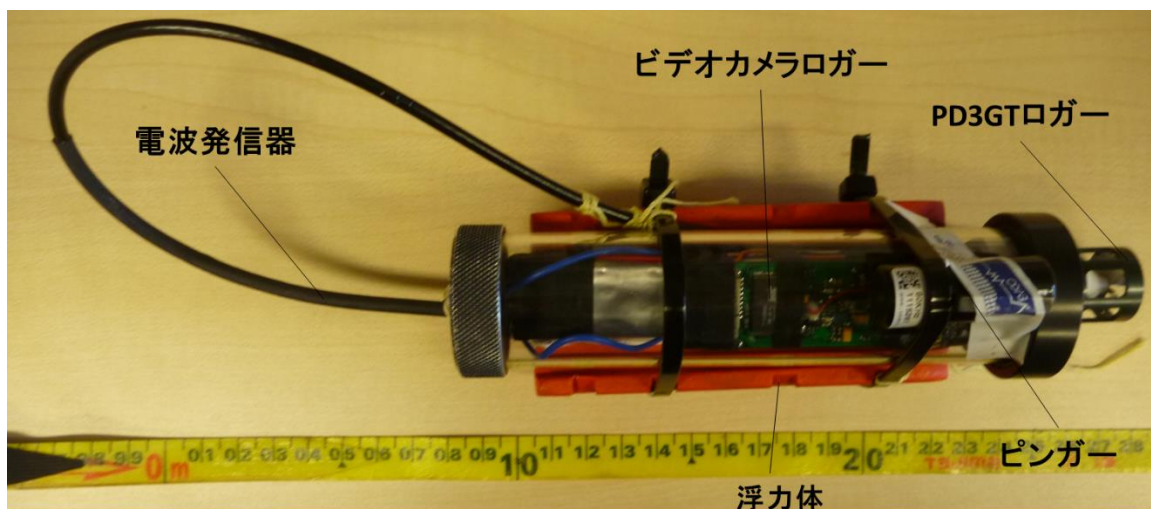


図 3-2. PD3GT ロガー, ビデオカメラロガー, 超音波発信器(ピンガー), 電波発信器, 浮力体を一体化した計測器. 2011 年 8 月から 12 月に金田湾で実施した野外実験で使用.

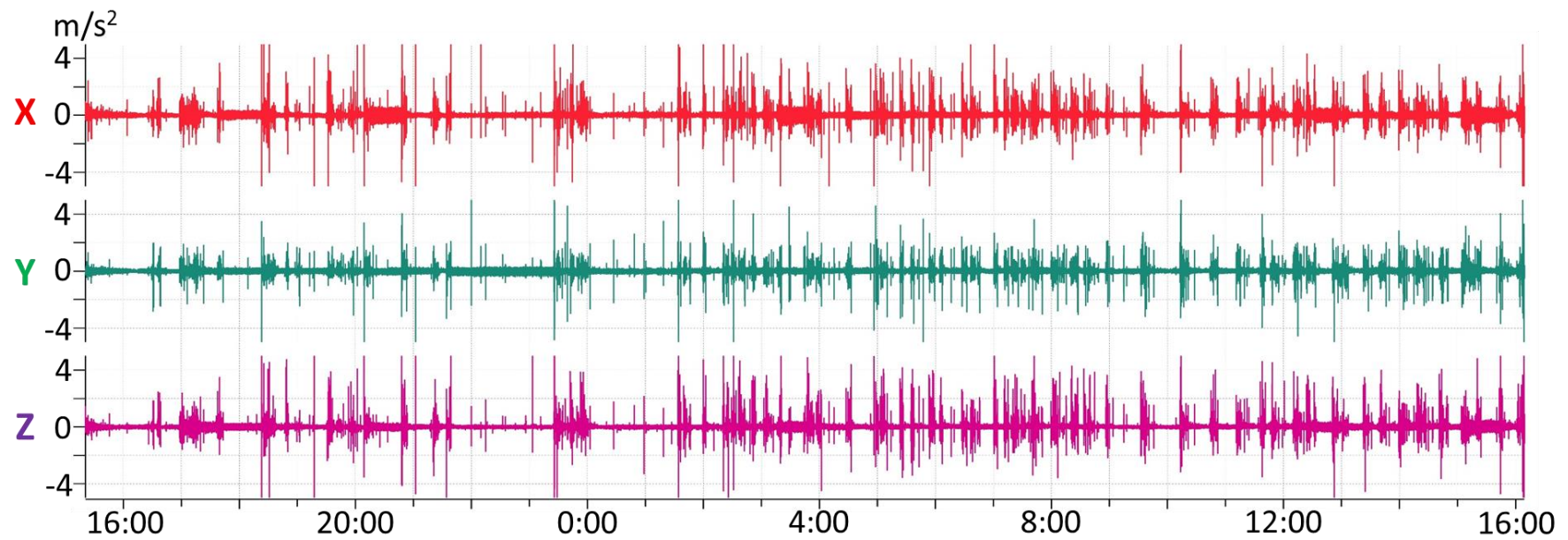


図 3-3. 個体 3A に装着したマイクロデータロガーから得られた 3 軸加速度データ. 上から X 軸(体盤幅方向), Y 軸(頭尾方向), Z 軸(背腹方向)の加速度を示す. 縦軸は加速度(ms^{-2}), 横軸は時間を示す.

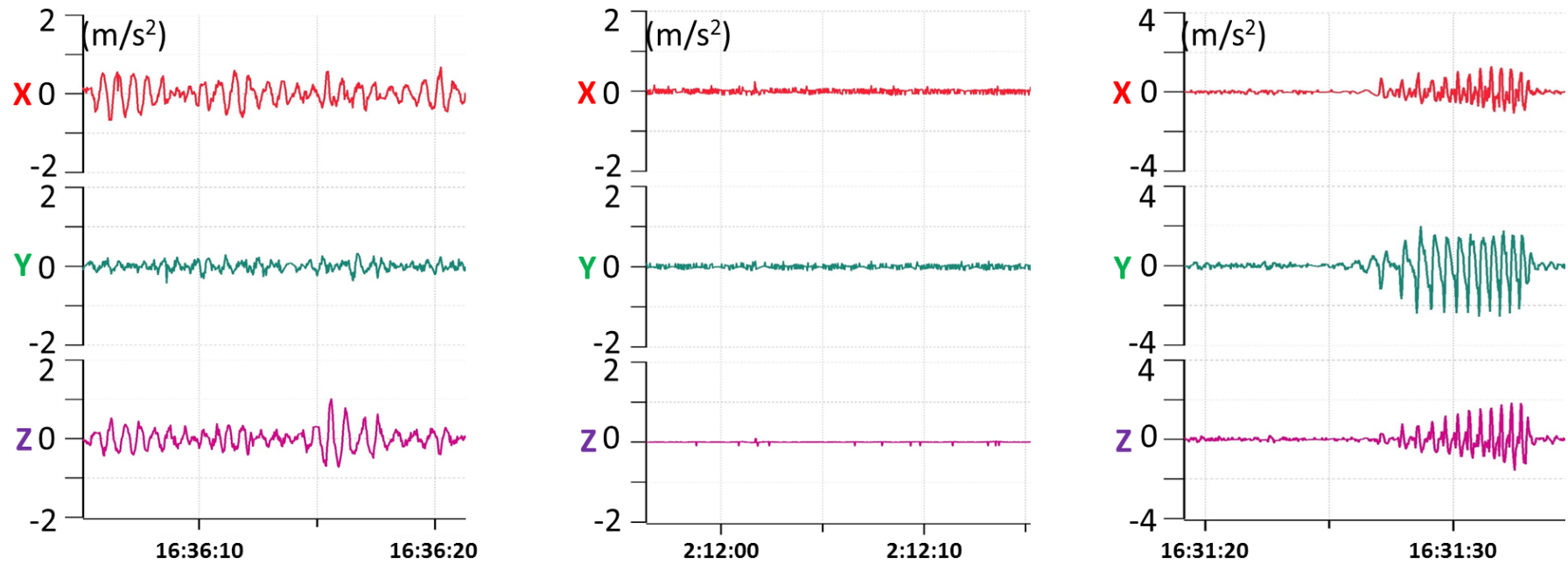


図 3-4. 個体 3A の遊泳(左図), 定位(中央図), 潜砂(右図)時の加速度波形. 上から X 軸(体盤幅方向), Y 軸(頭尾方向), Z 軸(背腹方向)の加速度を示す. 縦軸は加速度($m s^{-2}$), 横軸は時間を示す.

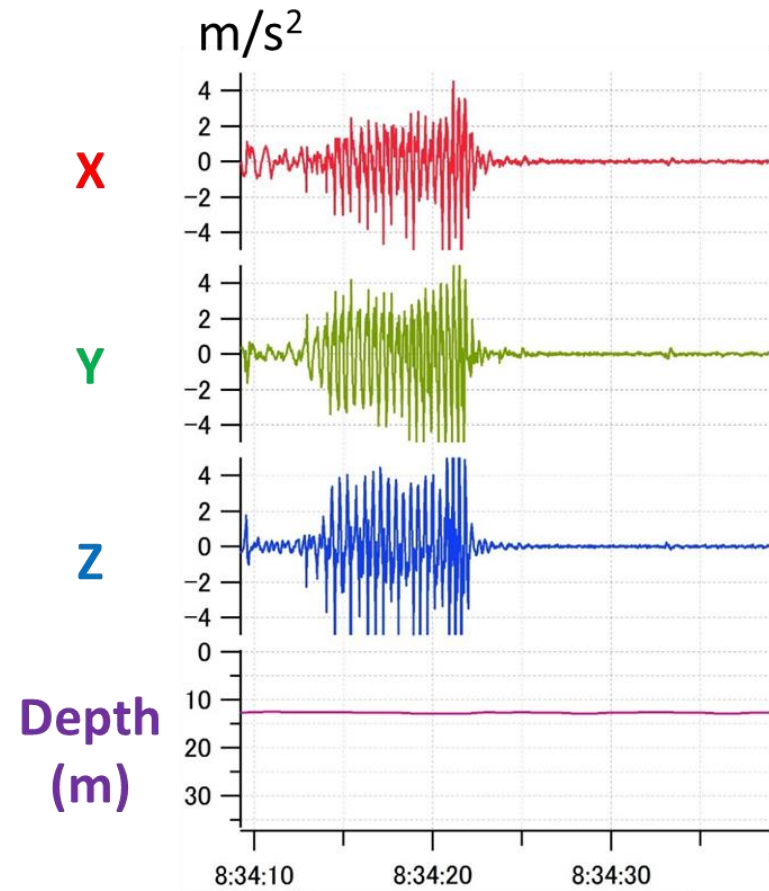
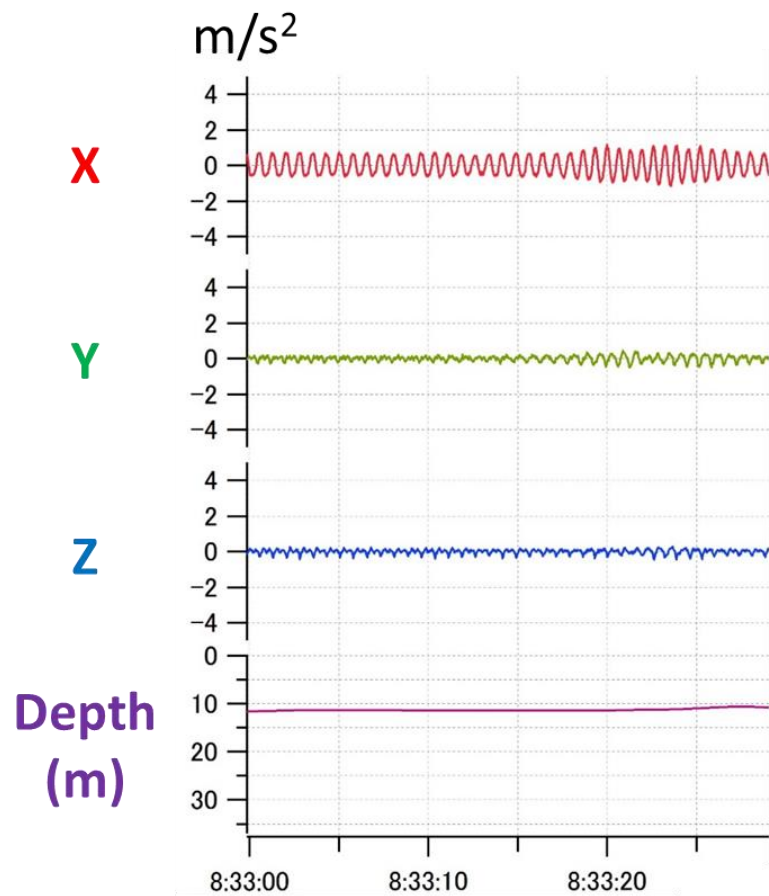


図 3-5. 個体 3C で得られた遊泳(左図)と潜砂(右図)を示す加速度波形と深度変化. 上から X 軸(体盤幅方向), Y 軸(頭尾方向), Z 軸(背腹方向)の加速度($m s^{-2}$), 経験深度(m)を示し, 横軸は時間を示す.



図 3-6. 加速度から判定した個体 3F の遊泳時と個体 3D の潜砂時の同時刻にビデオカメラ
ロガーで撮影された移動時(上図)および潜砂時(下図)の映像の切り抜き画像.

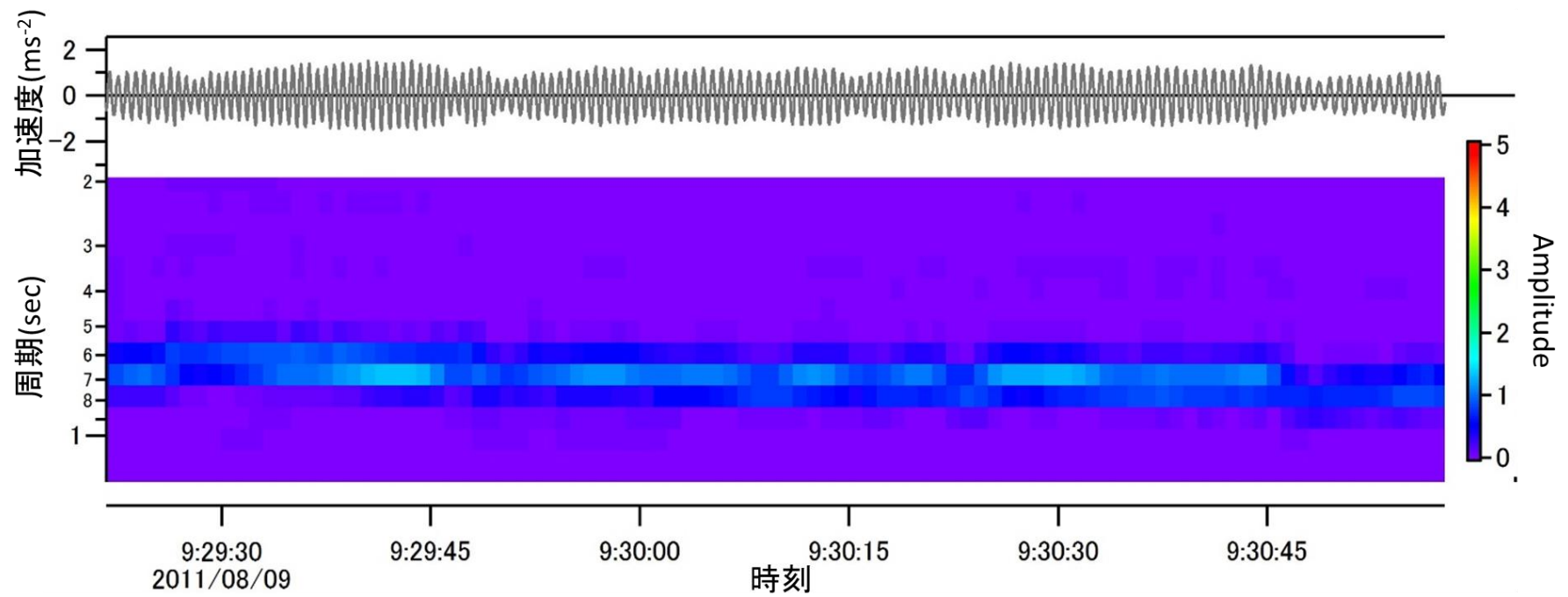


図 3-7. 個体 3C を例とした遊泳時のスペクトル図. 図上が X 軸(体盤幅方向)の加速度波形を示し, 図下が周期と強度を示す. 図左の縦軸が上から, 加速度と周期を表す. 図右のカラーバーは, 強度を表す.

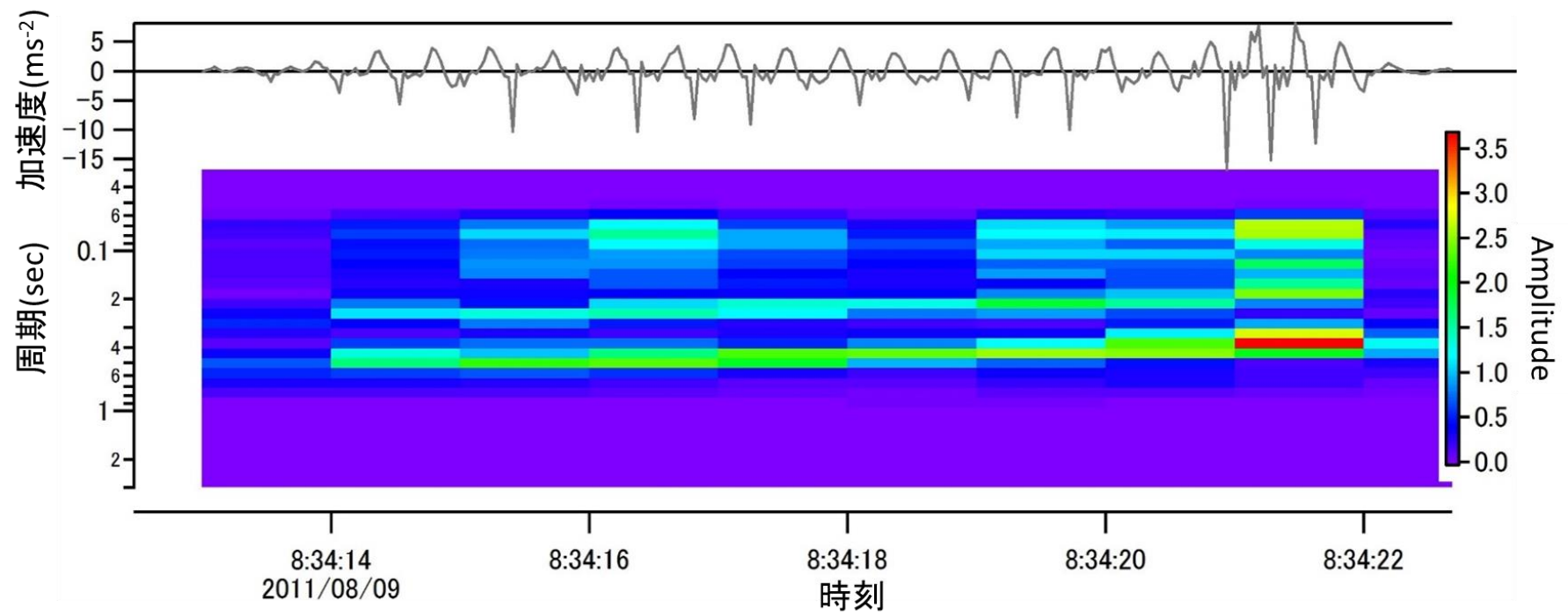


図 3-8. 個体 3C を例とした潜砂時のスペクトル図. 図上が Z 軸(背腹方向)の加速度波形を示し, 図下が周期と強度を示す. 図左の縦軸が上から, 加速度と周期を表す. 図右のカラーバーは, 強度を表す.

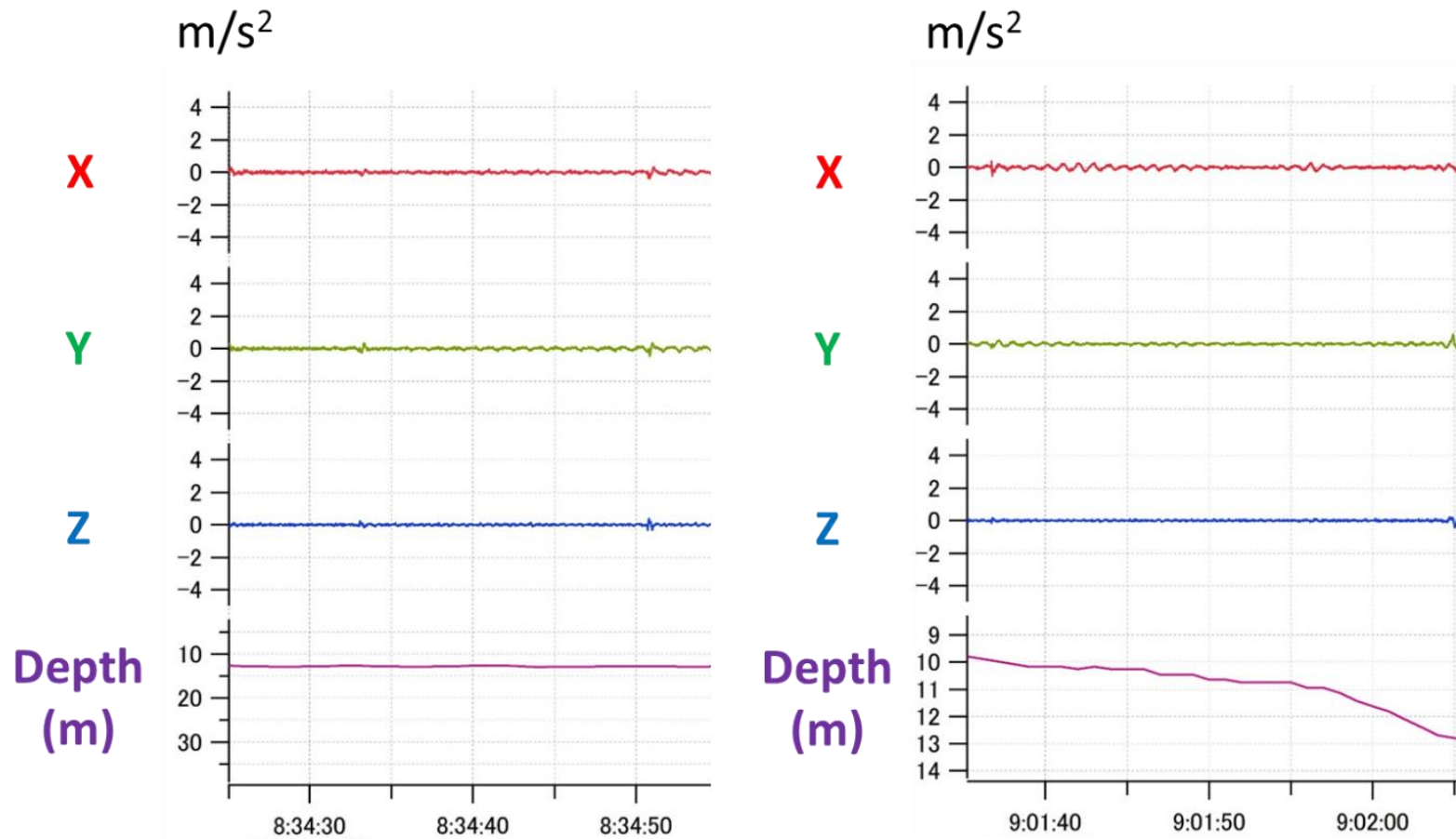


図 3-9. 個体 3C から得られた定位(左図)とグライディング(右図)の 3 軸加速度および深度の変化. 上から X 軸(体盤幅方向), Y 軸(頭尾方向), Z 軸(背腹方向)の加速度($m s^{-2}$), 経験深度(m)を, 横軸は時間を示す.



図 3-10. 個体 3C に装着したビデオカメラロガーで記録されたグライディングをするアカエイ他個体.

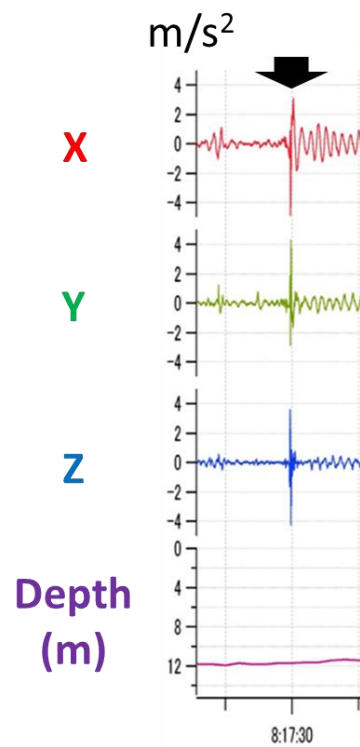


図 3-11. 個体 3C から得られたバースト(図中の矢印)を示す 3 軸加速度波形と深度変化. 上から X 軸(体盤幅方向), Y 軸(頭尾方向), Z 軸(背腹方向)の加速度(m s^{-2}), 経験深度(m)を, 横軸は時間を示す.

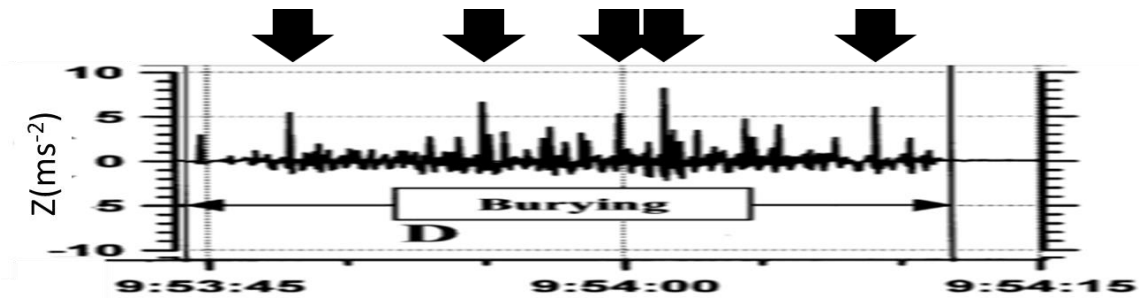


図 3-12. ヒラメの背腹方向の加速度波形. 矢印は, それまでと比べて強い加速度の振幅があったところを示す. Kawabe et al. (2003)を一部引用.

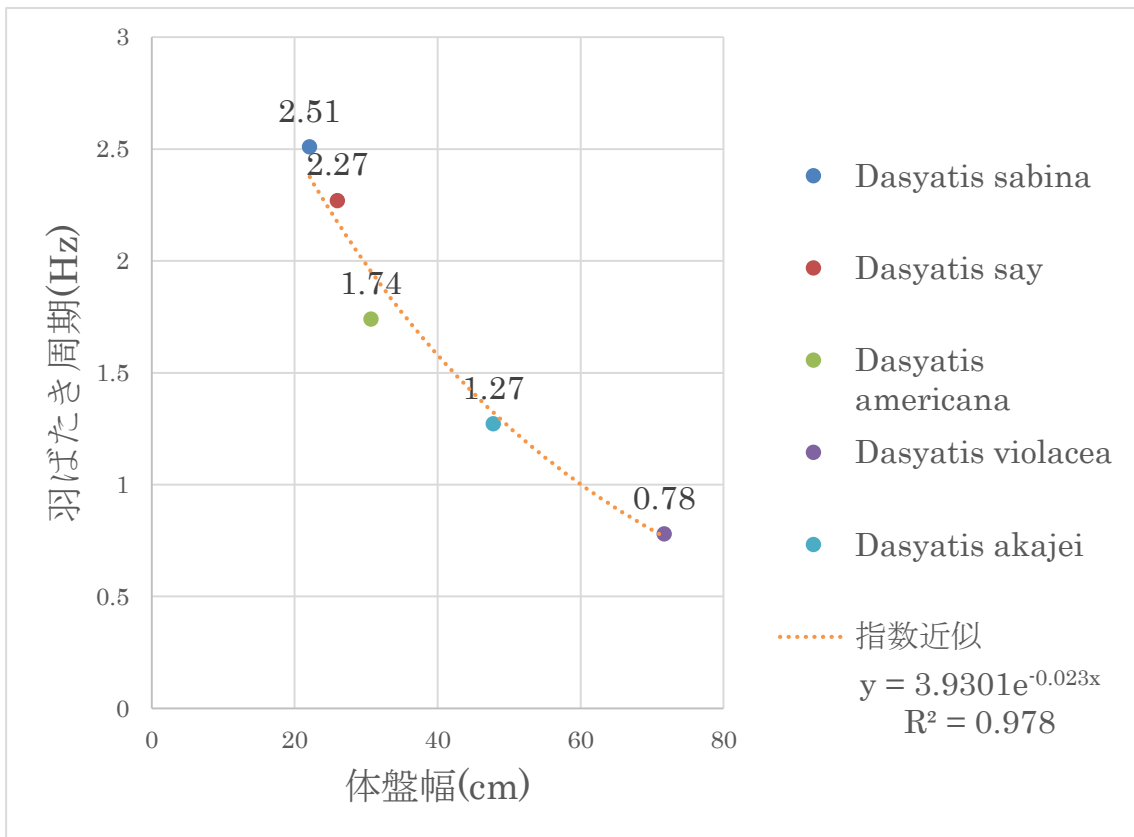


図 3-13. Rosenberger(2001)のデータに基づいたアカエイ科エイ類および本研究で得られた2011年に放流したアカエイの体盤幅と羽ばたき周期の平均値の関係. 図内の点線は, Rosenberger(2001)のデータから算出した近似曲線. 丸印の色は図内右側の種に対応.

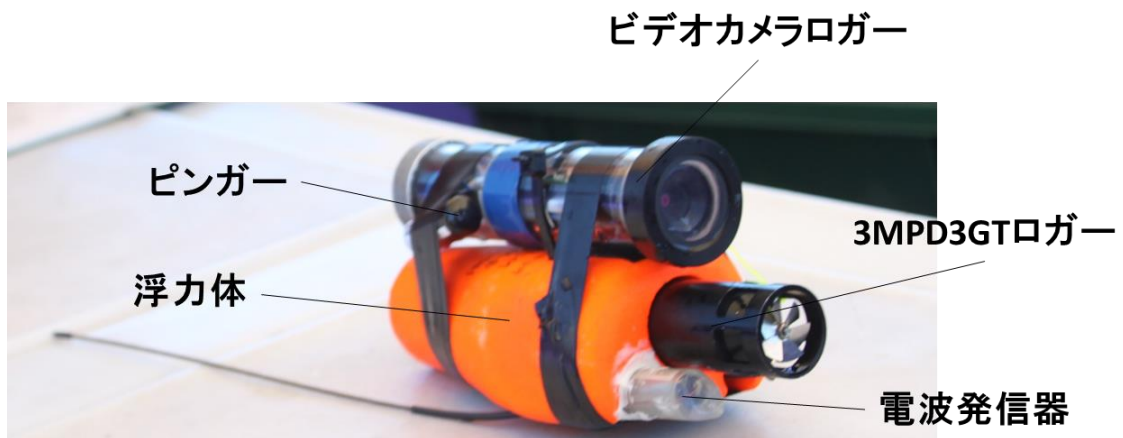


図 3-14. 3MPD3GT ロガー，ビデオカメラロガー，超音波信号発信器(ピンガー)，電波発信器，浮力体を一体化した計測器．2012 年の野外調査でアカエイ背部に装着．



図 3-15. 個体 3C で記録された他個体と遊泳するアカエイ(左図)と個体 2C で記録された岩礁性藻場(右図).

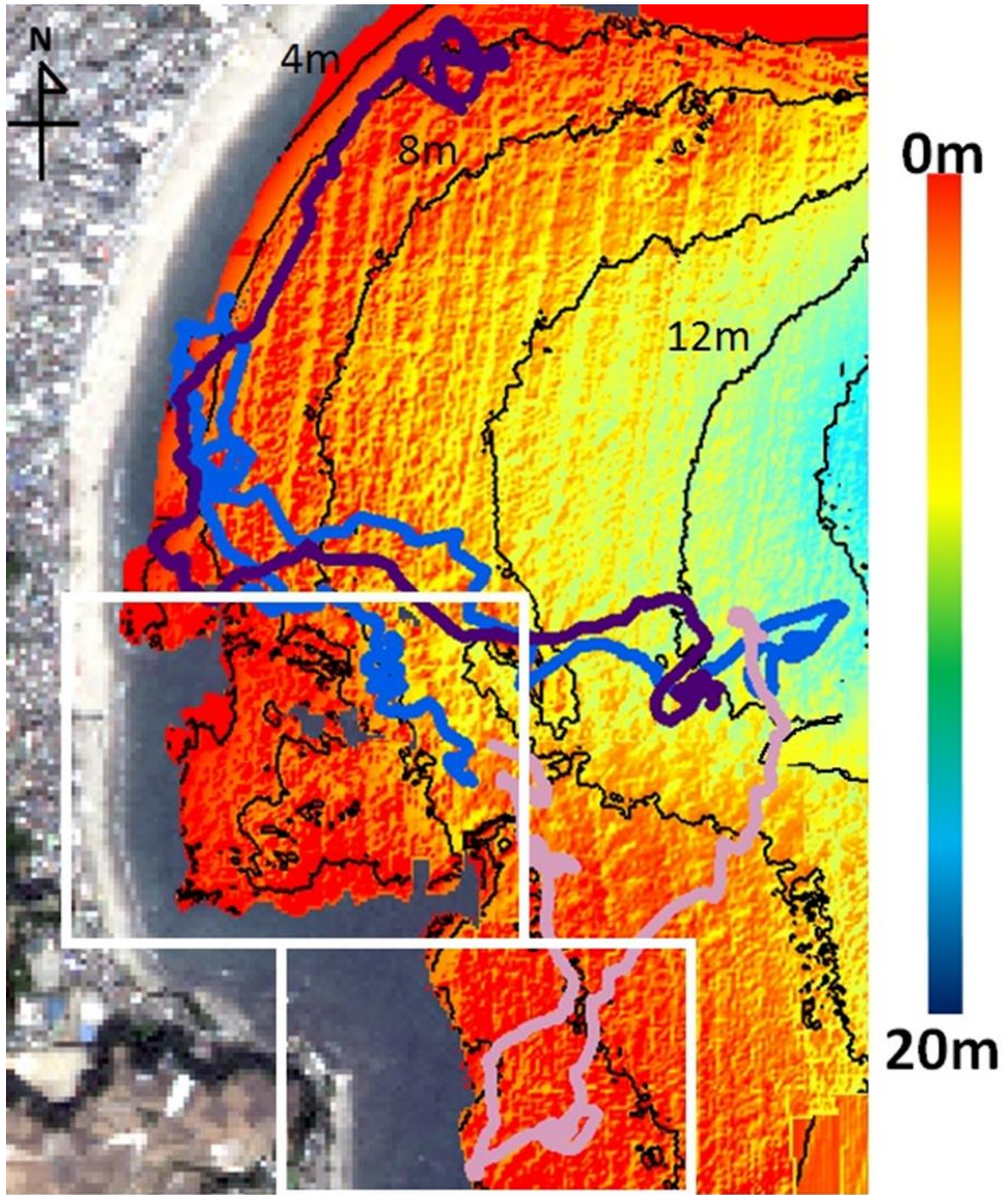


図 3-16.海底地形図上と合わせてマッピングしたアカエイの移動。図右のカラーバーは底深に対応する。軌跡の色は紫色が個体 2A, 桃色が個体 2C, 青色が個体 2E を示す。白四角で囲んだ範囲は岩場を表す。

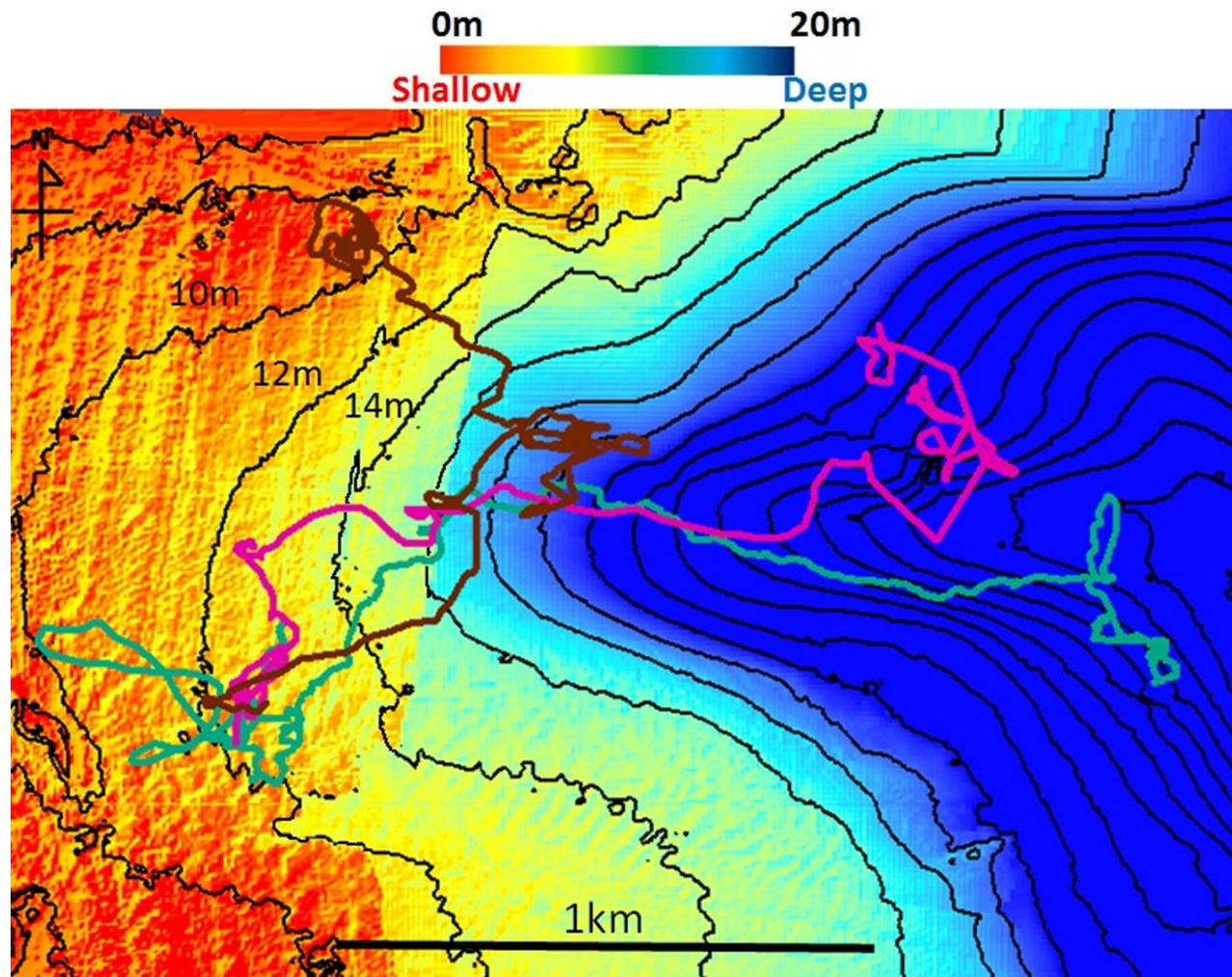


図 3-17. 海底地形図と合わせてマッピングしたアカエイの移動. 図上のカラーバーは底深に対応する. 軌跡の色は緑色が個体 2D, 桃色が個体 3C, 茶色が個体 3D を示す.

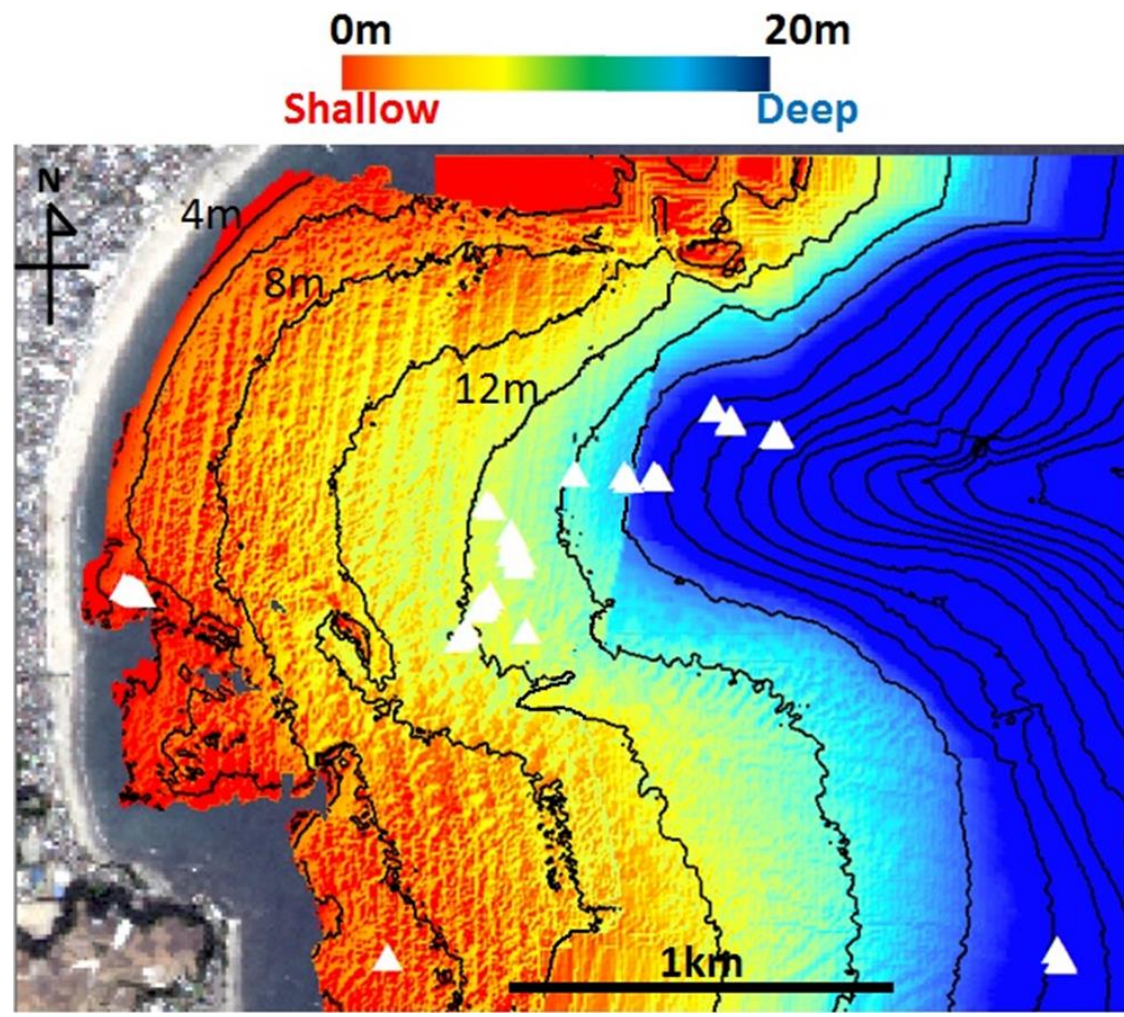


図 3-18. 海底地形図上にマッピングした 2011 年および 2012 年に放流したアカエイが他個体と遊泳していた位置(白三角). 図上部のカラーバーは底深に対応し, 黒線は 2m ごとの等深線を示す.

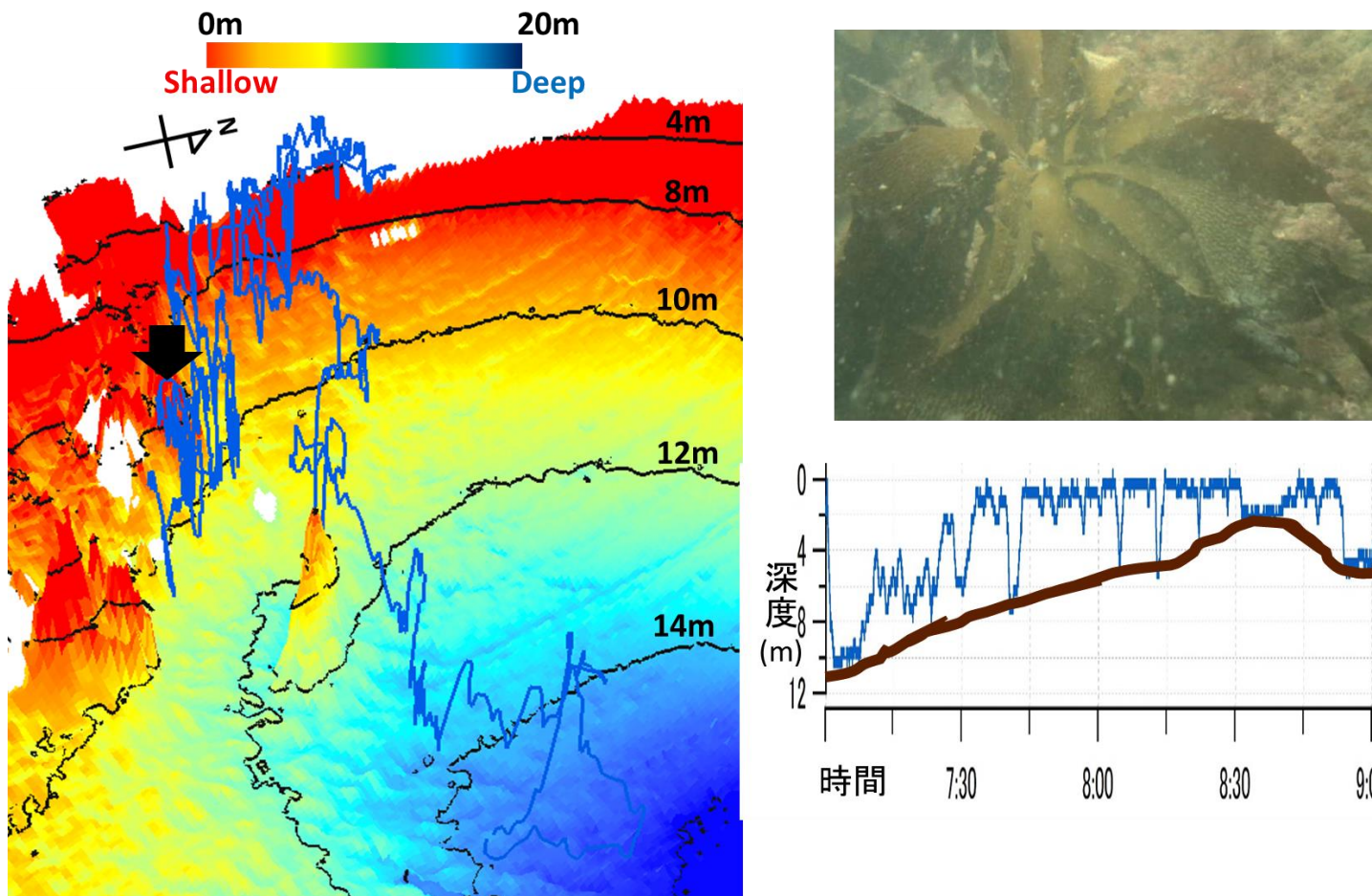


図 3-19. 海底地形図上にマッピングした個体 2E の 3 次元移動図(左図). 左図内の黒矢印で示した地点においてカメラロガーで記録された岩礁性藻場映像の切り抜き(右上図). 移動軌跡直下の底深とアカエイ個体の深度(右下図). 左図上部のカラーバーは底深に対応し, 黒線は 2m ごとの等深線を示す. 右下図中の青色実線はアカエイの深度を表し, 茶色は海底を表す. 縦軸は深度を示し, 横軸は時間を示す.

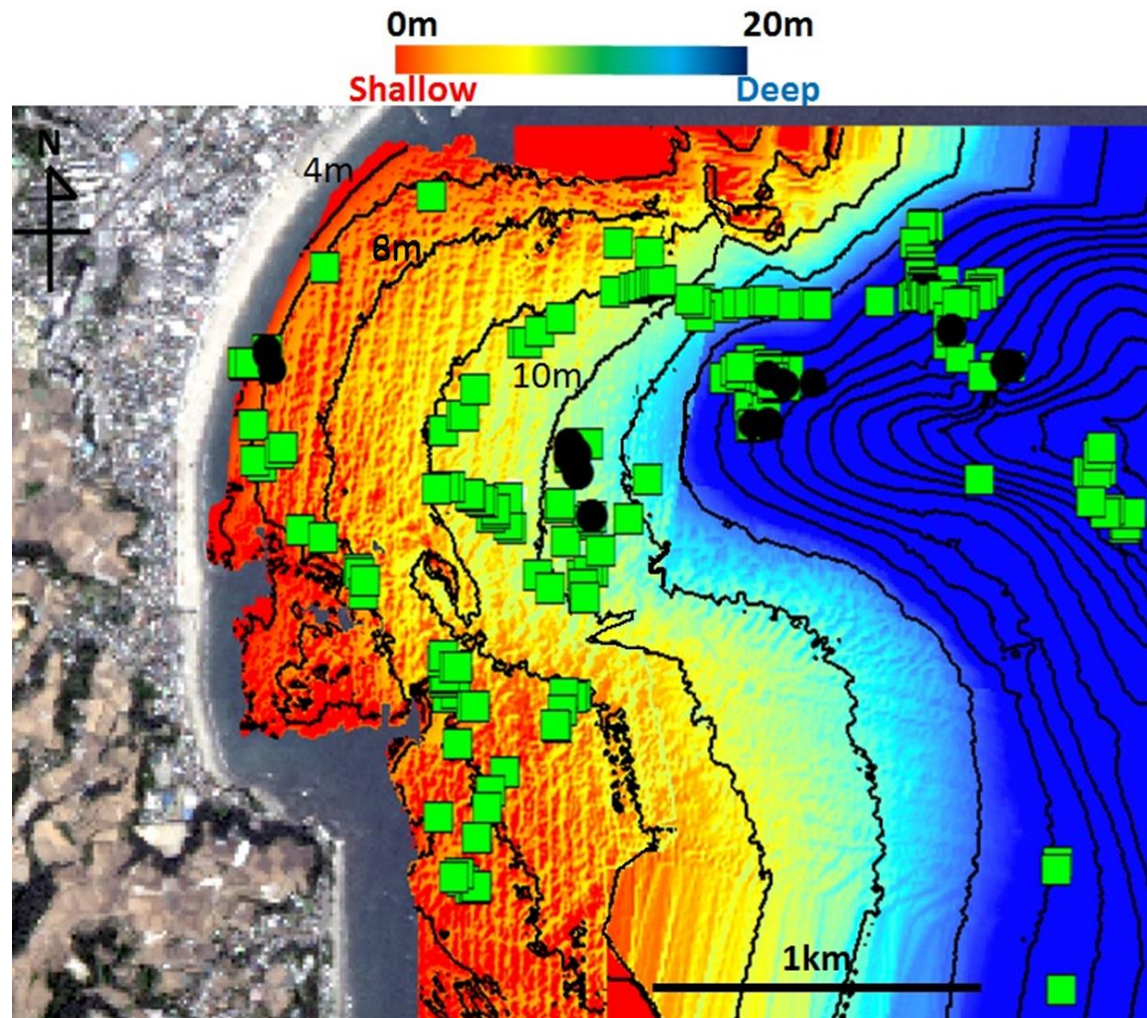


図 3-20. 海底地形図上にマッピングした 2011 年および 2012 年に放流したアカエイの潜砂(黒丸)と定位(緑四角)の位置. 黒線は 2m ごとの等深線を示す. 図上部のカラーバーは底深に対応.

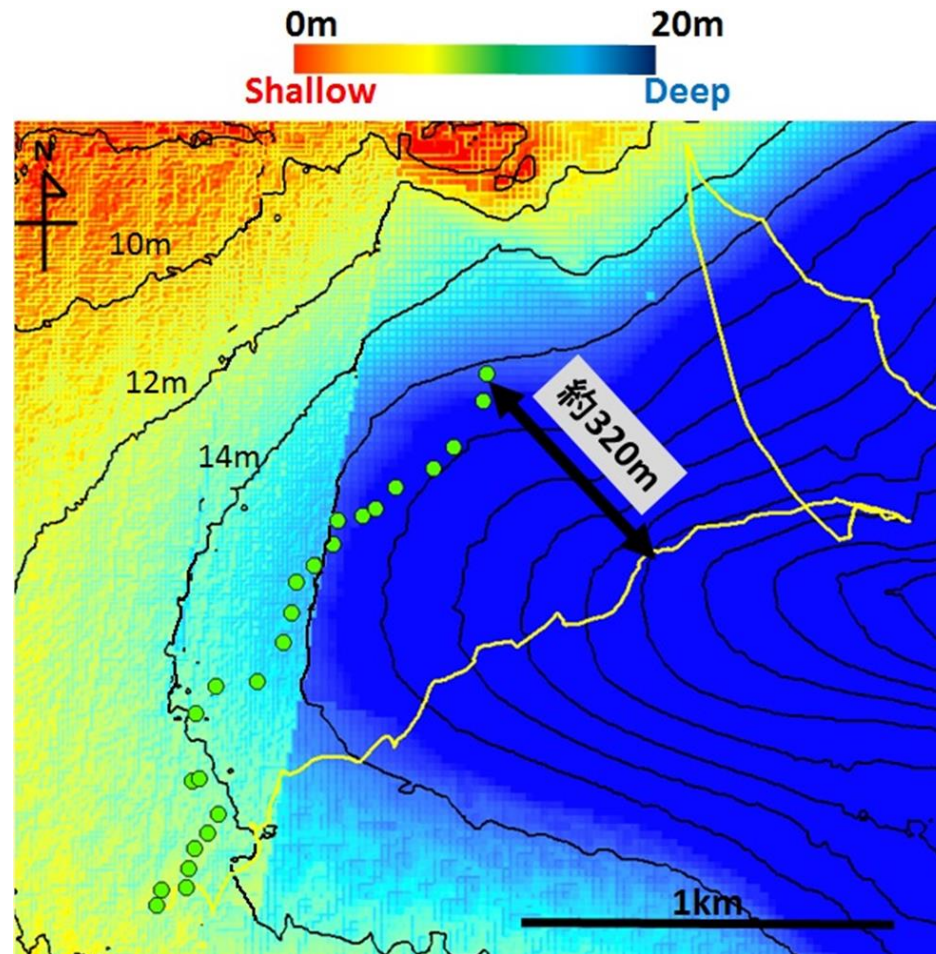


図 3-21. 海底地形図上にマッピングした、個体 2B のマイクロデータロガーのデータから推定したアカエイの位置(黄色実線)と VPS により測位した位置(緑色丸印). 図上部のカラーバーは底深に対応し, 図中の矢印は最も水平距離に差が出た測位点とその距離を示す. 黒線は 2m ごとの等深線を示す.

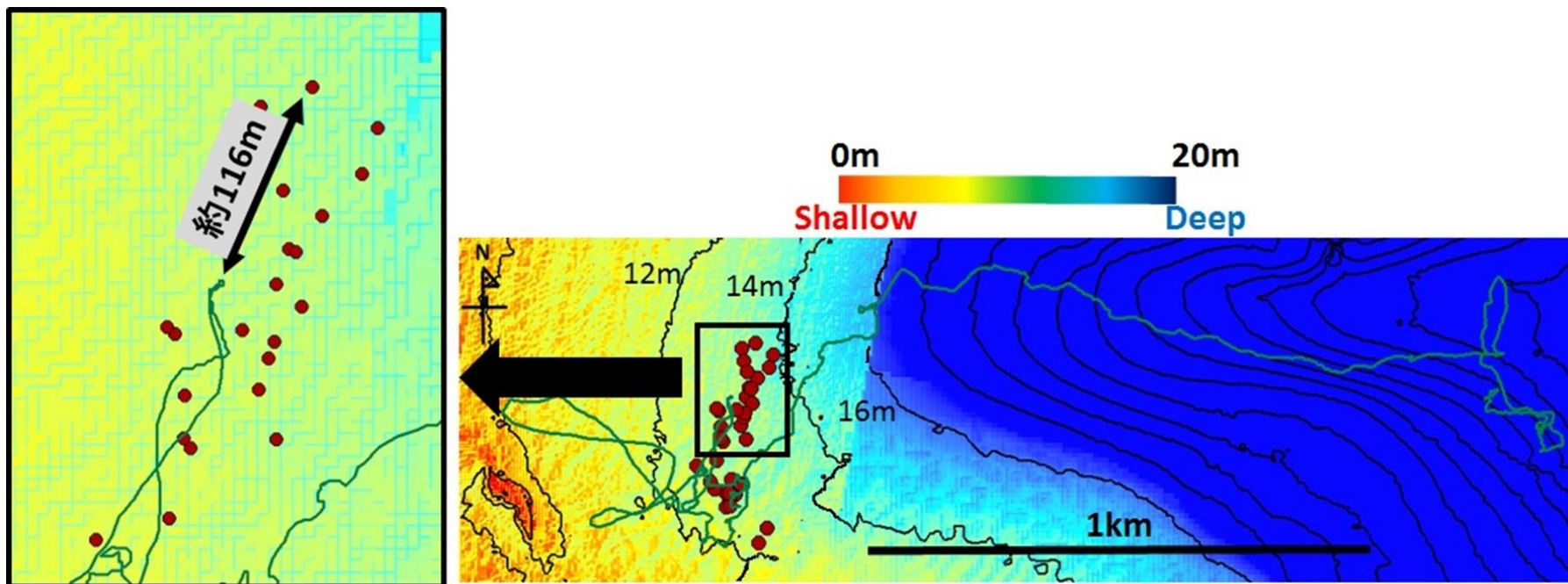


図 3-22. 海底地形図上にマッピングした、個体 2D のピンガーを用いた追跡で得られたアカエイの位置(緑色実線)と VPS により測位した位置(茶色丸印). 右図上部のカラースケールは底深に対応し、左図は右図の黒四角で囲った場所の拡大図. 左図中の矢印は追跡で得られた位置と VPS により推定された位置の水平距離の差が最大のところを示す. 黒線は 2m ごとの等深線を示す.

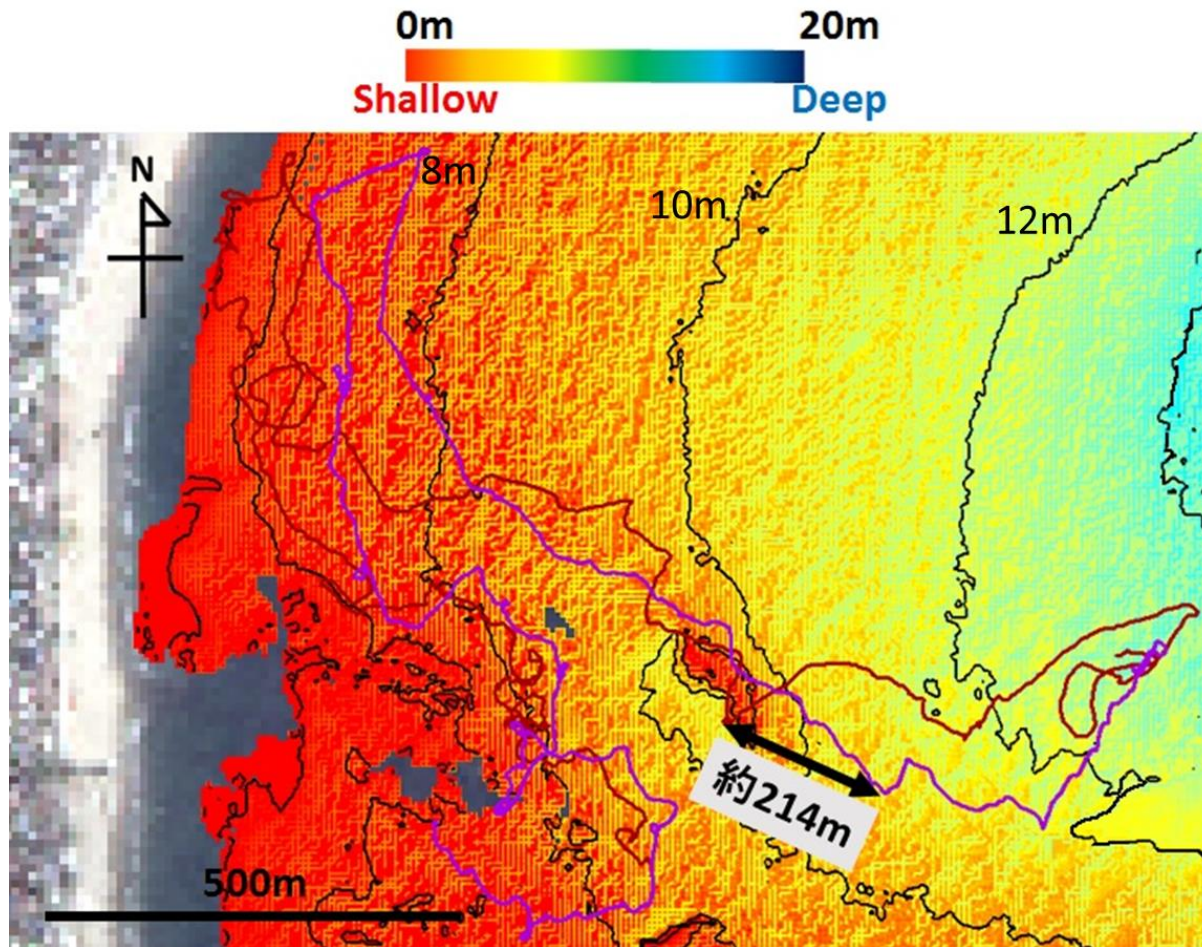


図 3-23. 個体 2E のマイクロデータロガーのデータから推定した移動の軌跡(紫色実線)とピンガーを用いた追跡で得られた移動の軌跡(茶色実線). 図上部のカラースケールは底深に対応し, 図中の矢印はマイクロデータロガーのデータから推定された位置と追跡して得られた位置の水平距離の差が最大のところを示す. 黒線は 2m ごとの等深線を示す.

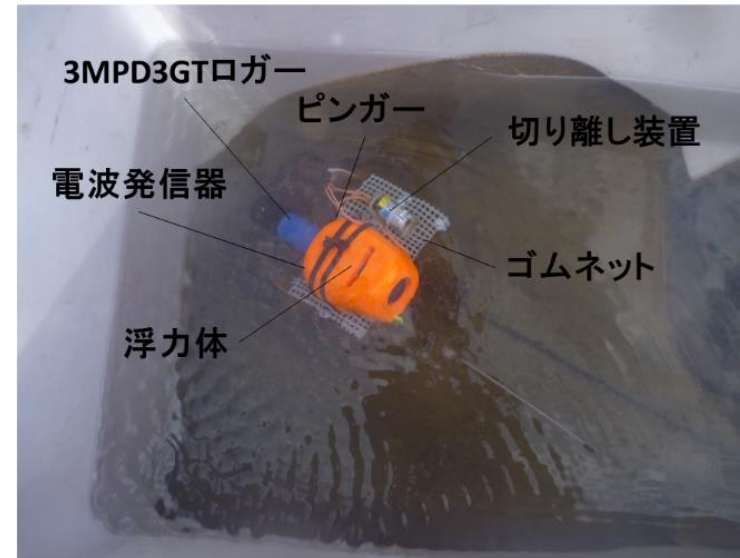


図 3-24. 左図は、PD3GT ロガー，超音波信号発信器(ピンガー)，電波発信器，浮力体を一体化した計測器．2013 年に使用．右図は，3MPD3GT ロガー，超音波信号発信器(ピンガー)，電波発信器，浮力体に一体化した計測器をアカエイ頭背部に取り付けた様子． 2014 年に使用．

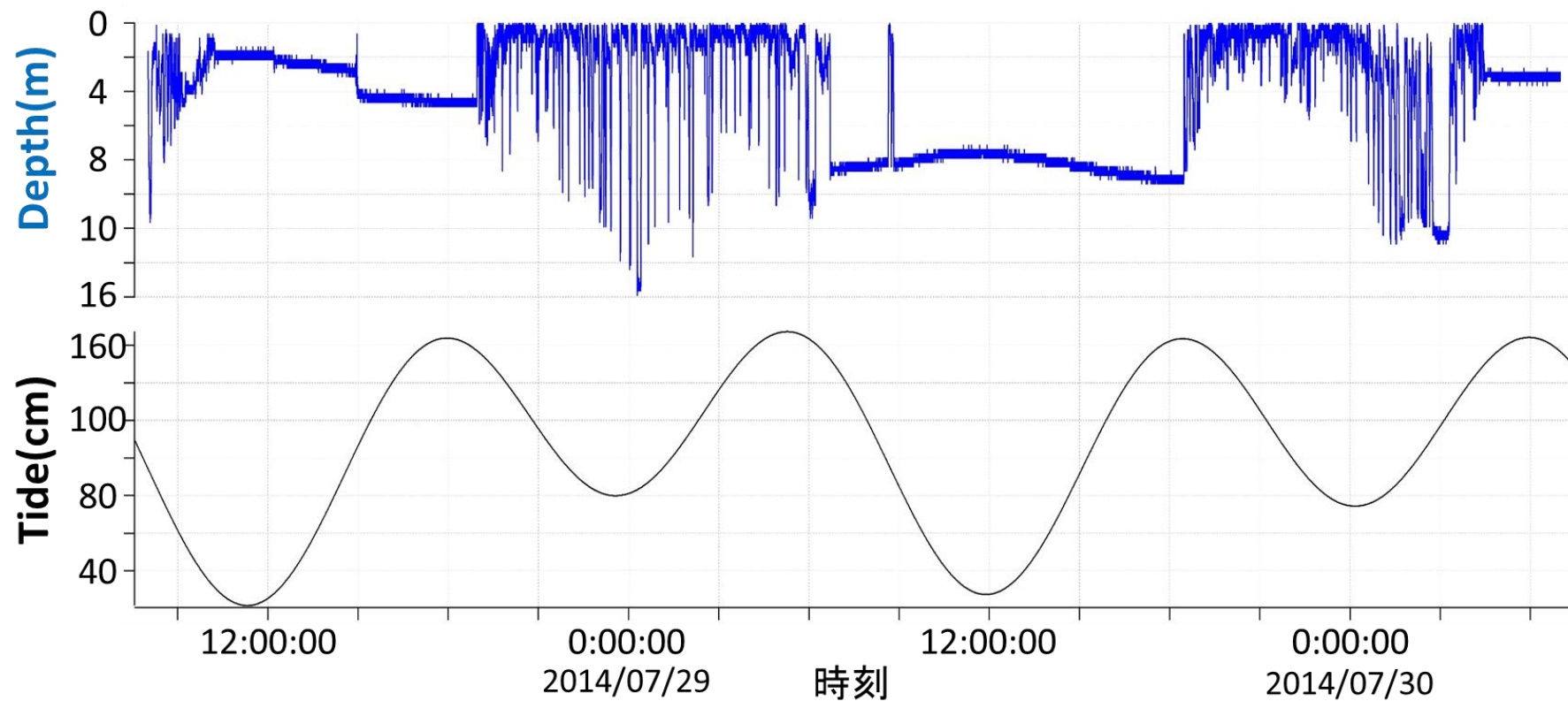


図 3-25. 個体 2G を例としたアカエイの深度変化と潮汐の変化. 縦軸は, 上から深度, 潮汐を示す. 横軸は時刻を示す.

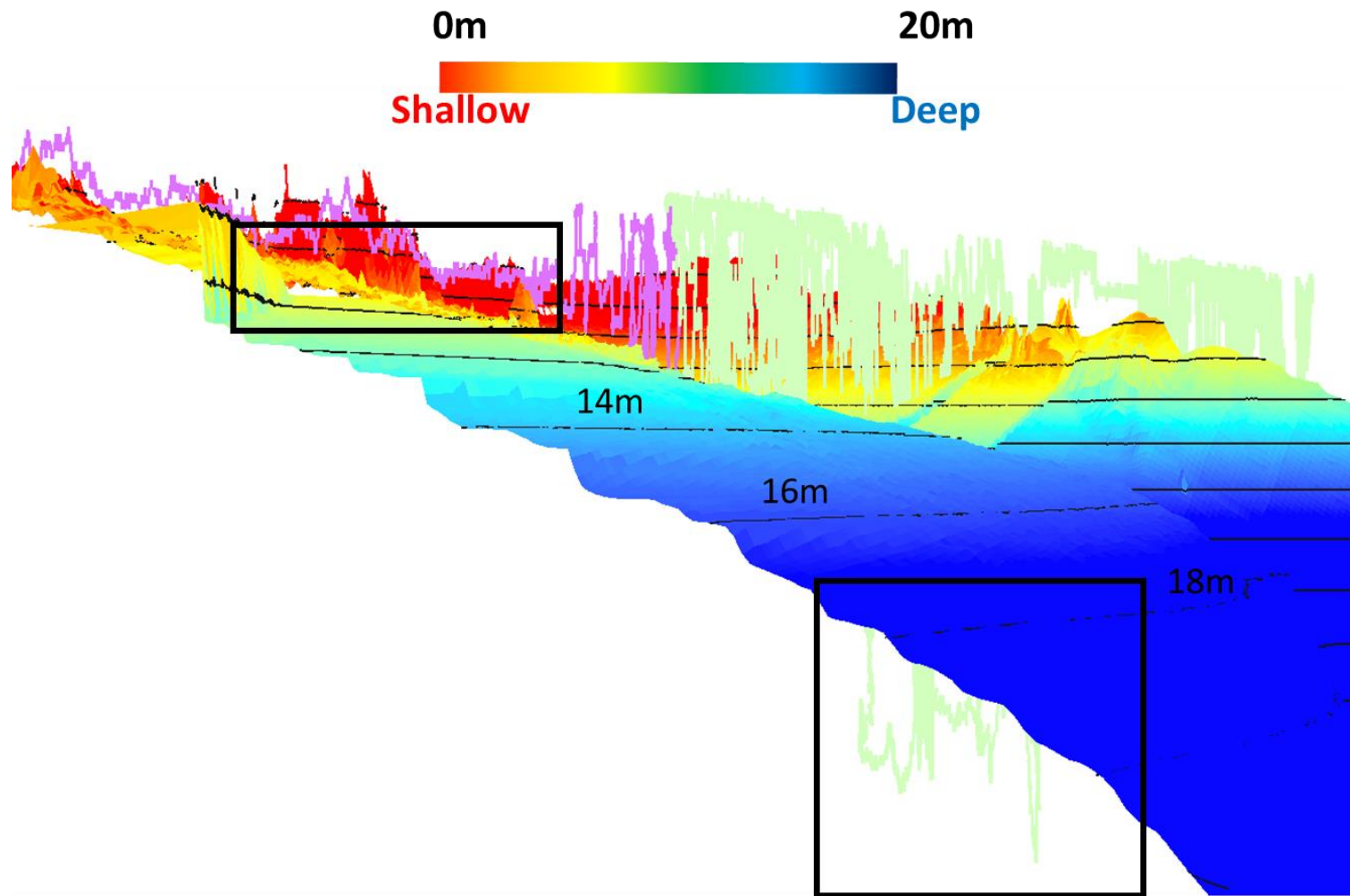


図 3-26. 海底地形図にマッピングした個体 2G(桃色)と 2I(乳白色)の 3 次元軌跡. 図上部のカラーバーは底深に対応, 黒線は 2m ごとの等深線を示す. 図中の黒四角で囲った場所は移動の軌跡が海底に接しない, または, 海底を突き抜けているところを示す.

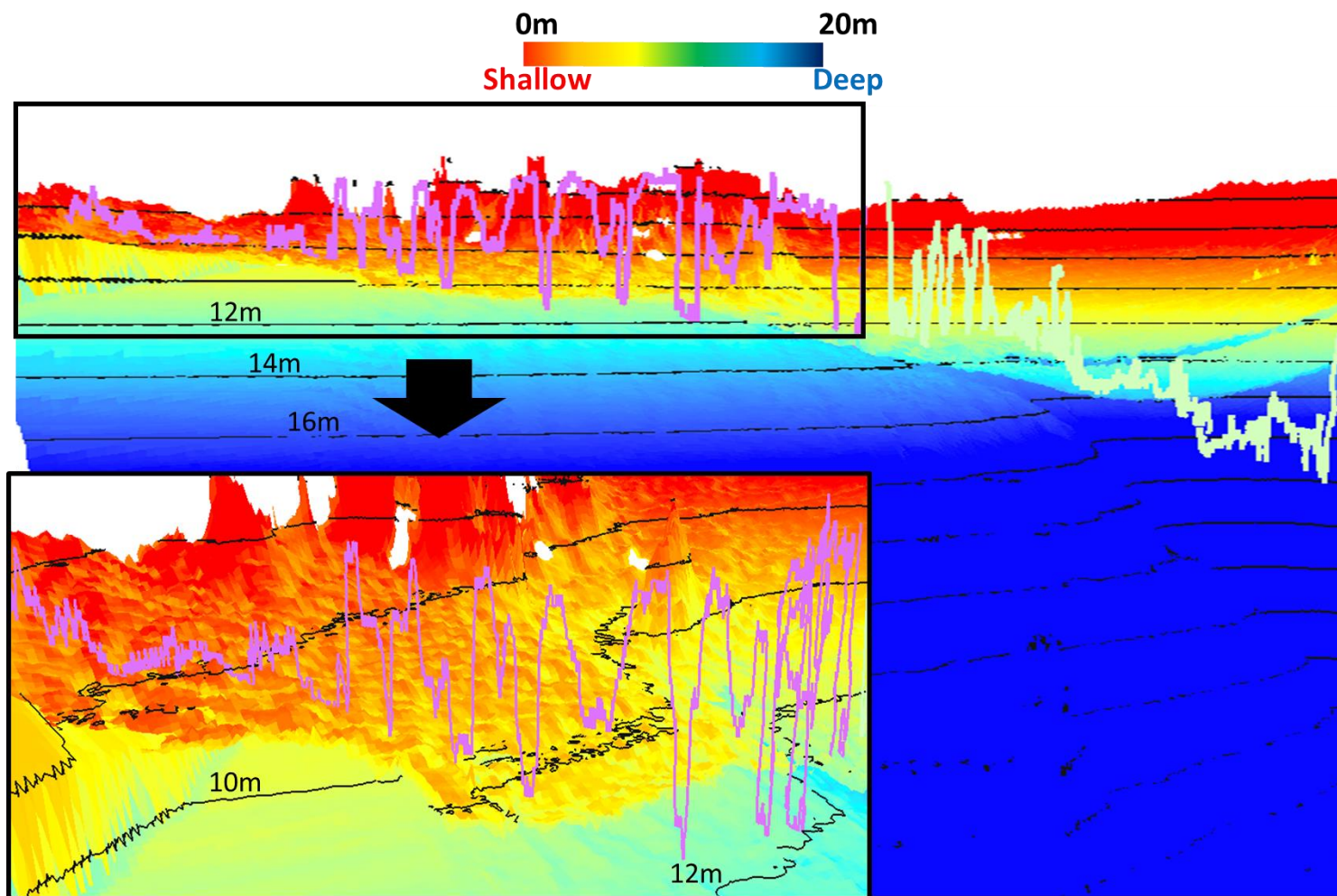


図 3-27. 補正して海底地形図にマッピングした個体 2G(桃色)と 2I(乳白色)個体の 3 次元軌跡. 図上部のカラーバーは底深に対応, 黒線は 2m ごとの等深線を示す. 左下図は, 黒四角で囲った場所の拡大図を表す.

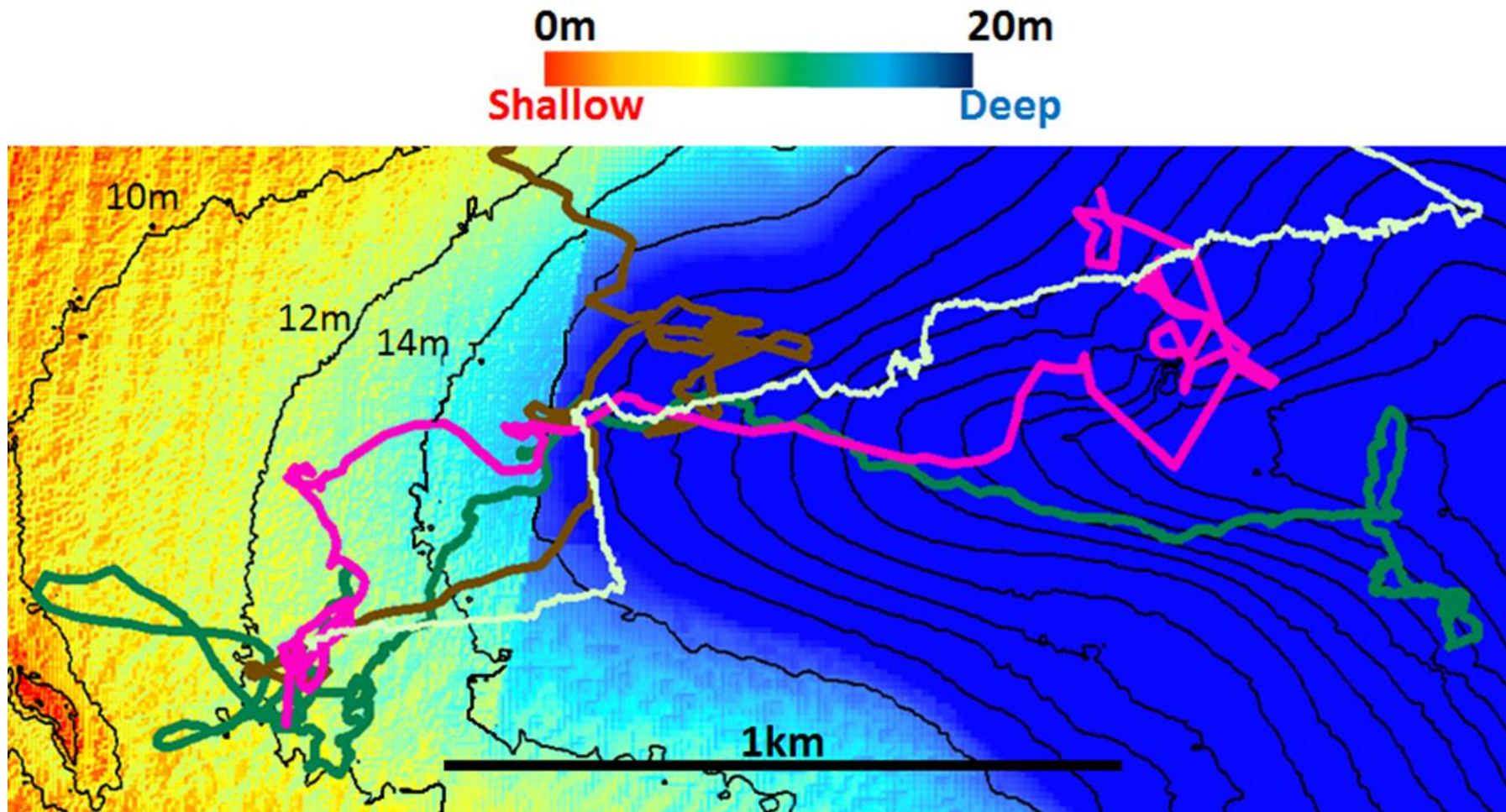


図 3-28. 海底地形図にマッピングした個体 2I の軌跡(乳白色)と第 3.3 節で得られた個体 3C(桃色), 3D(茶色), 2D(緑色)の軌跡. 図上のカラーバーは底深に対応し, 黒線は 2m ごとの等深線を示す.

表 3-1. 2009 年 6 月に水槽実験で使用したアカエイの雌雄，体サイズ，計測時間

個体番号	実験場所	実験水槽	雌雄	体盤幅(cm)	体盤長(cm)	計測時間(h)
3A	福山大学内	室内水槽	♀	35.5	33.0	24.7
	海生物資源研究所					
3B	増養殖研究所	屋外水槽	♀	71.0	60.0	26.8

表 3-2. 金田湾における野外実験で使用したアカエイの雌雄，放流年月日，体サイズ

個体番号	雌雄	放流年月日	体盤幅(cm)	体盤長(cm)
3C	♀	2011/8/9	52.0	45.0
3D	♀	2011/9/16	53.0	48.0
3E	♂	2011/9/29	53.0	48.0
3F	♂	2011/12/13	46.0	43.0
3G	♀	2011/12/14	35.0	32.0

表 3-3. 金田湾において 2011 年 8 月から 9 月に放流したアカエイの遊泳の加速度周期

個体番号	周期(sec)	周波数(Hz)
3C	0.73	1.37
3D	0.84	1.19
3E	0.73	1.37
3F	0.90	1.11
3G	0.76	1.32
平均	0.79	1.27
SD	0.08	0.12

表 3-4. 2011 年 8 月 9 日に放流した個体 3C を例とした

映像データによる行動分類と加速度データおよび深度データによる行動分類結果

映像データから分類					ロガーによる解析結果						
Time	移動	定位	潜砂	バースト	Time	遊泳	グライディング	潜砂	定位	バースト	不明
7:53:52					7:53:52						
7:56:43	0:02:51				7:54:35		0:00:43				
7:57:49		0:01:06			7:56:40	0:02:05					
8:17:30	0:19:41				7:57:49				0:01:09		
8:17:32				0:00:02	8:17:29	0:19:40					
8:34:13	0:16:41				8:17:30					0:00:01	
8:34:24			0:00:11		8:34:02	0:16:32					
8:35:30		0:01:06			8:34:12					0:00:10	
8:47:15	0:11:45				8:34:23			0:00:11			
8:47:23			0:00:08		8:35:29				0:01:06		

8:55:05	0:07:42		8:37:25	0:01:56	
8:55:10		0:00:05	8:37:35		0:00:10
9:02:10	0:07:00		8:40:18	0:02:43	
9:02:16		0:00:06	8:40:42		0:00:24
9:02:43		0:00:27	8:42:27	0:01:45	
9:02:47		0:00:04	8:42:33		0:00:06
9:11:37		0:08:50	8:46:44	0:04:11	
9:28:55	0:17:18		8:47:13		0:00:29
	以上		8:47:23		0:00:10
			8:50:25	0:03:02	
			8:50:35		0:00:10
			8:54:15	0:03:40	
			8:55:03		0:00:48
			8:55:10		0:00:07

8:57:20	0:02:10			
8:57:21				0:00:01
9:00:24	0:03:03			
9:01:11		0:00:47		
9:01:58	0:00:47			
9:02:04		0:00:06		
9:02:15			0:00:11	
9:02:42				0:00:27
9:02:46			0:00:04	
9:11:37				0:08:51
9:21:43	0:10:06			
9:21:49		0:00:06		
9:26:03	0:04:14			
9:26:05				0:00:02

9:27:17	0:01:12	
9:27:27		0:00:10
9:28:16	0:00:49	
9:28:55		0:00:39

表 3-5. 2011 年 8 月 9 日に放流した個体 3C を例とした

映像データによる行動分類と加速度データおよび深度データによる行動分類の一致率(%)

		加速度データと深度データによる行動分類				
映像データによる 行動分類		移動 (遊泳+グライディング)	潜砂	定位	バースト	不明
	移動		98.8	0.2	0.6	0.3
潜砂		0.0	91.2	8.8	0.0	0.0
定位		0.2	0.0	99.8	0.0	0.0
バースト		100.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 3-6. Rosenberger(2001)によるエイ類の遊泳時の羽ばたきの周期数と体サイズ

種名	羽ばたきの周波数(Hz)	体盤幅(cm±SD)	体盤長(cm±SD)
<i>Dasyatis sabina</i>	2.51	22.1±3.9	20.9±4.2
<i>Dasyatis say</i>	2.27	26.0±8.2	23.3±7.9
<i>Dasyatis americana</i>	1.74	30.7±8.8	27.7±7.0
<i>Dasyatis violacea</i>	0.78	71.7±17.6	55.0±13.5
<i>Rhinobatos lentiginosus</i>	4.20	10.4±2.3	13.2±3.3
<i>Raja eglanteria</i>	1.78	26.7±3.0	22.0±2.6
<i>Gymnura micrura</i>	1.29	28.9±1.0	16.0±0.5
<i>Rhinoptera bonasus</i>	1.04	46.4±2.6	28.7±2.0

表 3-7. 2011 年および 2012 年に金田湾で放流した各アカエイの

ロガー計測時間, 映像記録時間, ピンガーの発信する超音波信号を用いた追跡の有無

放流年月日	個体番号	ロガー計測時間 (hh:mm:ss)	映像記録時間 (hh:mm:ss)	追跡結果
2011/8/9	3C	3:05:31	1:35:04	有
2011/9/16	3D	3:41:04	3:41:02	有
2011/9/29	3E	3:44:44	no data	有
2011/12/13	3F	3:32:09	3:32:06	有
2011/12/14	3G	2:13:11	2:13:06	無
2012/7/26	2A	2:43:18	2:43:18	有
2012/7/27	2B	3:54:27	2:47:03	無
2012/8/17	2C	3:16:35	1:53:59	有
2012/8/20	2D	3:55:22	3:55:19	有
2012/8/21	2E	4:05:06	4:04:05	途中
	合計	34:11:27	2:25:02	

表 3-8. 加速度および深度データによる行動分類で得られた

2011 年および 2012 年に金田湾で放流したアカエイの個体ごとの各行動の割合

個体番号	遊泳	グライディング	潜砂	定位	バースト	不明
3C	2:23:32	0:12:05	0:01:14	0:28:07	0:00:27	0:00:06
3D	1:54:04	0:06:01	0:00:45	1:40:03	0:00:11	0:00:00
3E	2:38:40	0:05:38	0:01:19	0:58:35	0:00:32	0:00:00
3F	3:26:42	0:00:00	0:00:00	0:05:21	0:00:06	0:00:00
3G	2:07:12	0:05:59	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00
2A	2:39:56	0:00:59	0:00:00	0:02:06	0:00:17	0:00:00
2B	1:25:42	0:02:10	0:01:23	2:24:18	0:00:54	0:00:00
2C	2:57:03	0:12:43	0:00:00	0:06:42	0:00:07	0:00:00
2D	3:46:19	0:03:53	0:00:00	0:03:57	0:01:13	0:00:00
2E	3:14:15	0:28:49	0:00:38	0:16:03	0:05:21	0:00:00
合計	26:33:25	1:18:17	0:05:19	6:05:12	0:09:08	0:00:06
割合(%)	77.67	3.82	0.26	17.80	0.45	0.00

表 3-9. 2013 年および 2014 年に金田湾で放流したアカエイの雌雄，体サイズ

放流年月日	個体番号	雌雄	体盤幅(cm)	体盤長(cm)
2013/8/20	3H	♀	67.5	68.0
2013/9/11	3I	♀	75.0	71.0
2013/11/14	3J	♀	66.0	65.0
2013/11/20	3K	♀	66.0	65.0
2014/7/28	2G	♀	66.0	60.5
2014/8/2	2H	♀	66.5	59.8
2014/8/19	2I	♀	61.4	65.8
2014/8/26	2J	♀	55.5	50.0

表 3-10.行動分類によって得られた

2013 年および 2014 年に金田湾で放流したアカエイの各行動の割合

個体番号	計測時間	遊泳	グライディング	潜砂	定位	バースト	不明
3I	49:23:50	29:48:07	1:00:37	0:03:04	17:45:06	0:09:42	0:37:14
3K	51:42:38	32:14:21	1:53:43	0:04:01	17:29:10	0:01:23	0:00:00
2G	46:58:46	24:42:50	1:11:57	0:02:17	20:57:39	0:04:03	0:00:00
2I	48:15:49	42:34:00	2:20:39	0:01:31	3:16:57	0:02:42	0:00:00
合計	196:21:03	129:19:18	6:26:56	0:10:53	59:28:52	0:17:50	0:37:14
割合(%)	100.00	65.86	3.28	0.09	30.29	0.15	0.32

表 3-11. 2013 年および 2014 年に金田湾で放流した

各個体の昼夜での潜砂と定位時間の割合

個体番号	全計測時間昼夜比 (昼:夜)	潜砂回数 (回)	潜砂回数昼夜比 (昼:夜)	日中の定位時間	全定位時間における 日中の定位時間の割合(%)
3I	5:6	16	12:4	11:28:30	64.6
3K	11:10	20	12:8	14:55:31	85.4
2G	11:8	11	9:2	20:13:37	96.5
2I	11:9	6	5:1	0:19:58	10.1

第4章 総合考察

これまでの魚類行動研究では、ピンガーを装着した個体から発信される超音波を受信することで個体の位置情報を計測していた。しかし、計測範囲が限定されることや個体がそこで何を行っていたのかを知ることができなかった(e.g. 徳岡ら 1993, Mattern et al. 1998)。アーカイバルポップアップタグによる測位では、計測範囲が限定されることはないが、緯度約 0.1 度の範囲でしか位置を得ることができていない。加えて、ピンガーと同様に何をしてきたかといった行動がわからなかった(e.g. Port et al. 2008)。近年、マイクロデータロガーを使用して個体の加速度から行動を分類することで把握することが進められている。しかし、行動を把握できてもそれらの行動を行った場所が計測することができていない (e.g. 田上 2014)。上述の位置を知るだけ、行動を知るだけという各々のアプローチでは、行動と位置の両方の情報がない。そのため、調査した個体が生息場をどのように利用しているのかを把握することは困難であった。本研究では、アカエイにピンガーとマイクロデータロガーを同時に装着し、アカエイの行動とその時の位置情報を計測するとともに超音波測深機を用いてアカエイが使用していた海域の海底地形を計測した。これにより、アカエイがいつ、どこで、なにをしていたかといった生息場利用に関する情報を得ることに成功した。これらの結果は、エイ類だけでなく、魚類の生息場利用に関する研究手法として新しい地平を切り開くものである。また、本手法は、研究対象の海洋生物を殺すことなく、多くの生態情報を取得できる(Tanoue et al. 2012)。したがって、準絶滅危惧種に指定されているアカエイにとって、そして、保護が必要とされる種が多いエイ類を含む板鰓類にとって(Lack and Sant 2009)、行動を把握するために適切な研究方法と言えるだろう。

人とアカエイが共存していくには、両者の間で生じる問題を解決していく必要がある。そのためには、本研究結果のようなアカエイの生息場利用に関する知見を利用して対策を考えていく必要がある。例えば、人とアカエイが同じ空間を利用する上で起こる問題の一

つとして毒針による人への被害がある。アカエイの尾部にある毒針は鋭利であり、長靴などを貫通するだけでなく、殺傷能力を持つ毒を有する（富岡ら 2014）。アカエイは、砂地で海底に這うようにしてじっとしているという固定観念がある。このことから、対策としてすり足で歩くことでアカエイを踏まないようにすることやエイガードと呼ばれるブーツ状の防護布を履くことで被害を防ごうとしている。しかし、第3章よりアカエイは、全ての行動の中で移動を伴う行動を最も長く行っていることが明らかとなった。また、海底地形とアカエイの移動を重ね合わせると海底付近のみでなく海底から海面付近まで移動しており、砂地のみでなく岩場や藻場も利用していることがわかった。徳岡ら(1999)によると深度データからアカエイが中層付近を移動していたことが報告されており、本研究結果と一致する。したがって、アカエイによる被害を防ぐ方法としてすり足で歩くことが困難である岩場や藻場での対策やアカエイを踏む場合のみでなく、遊泳しているアカエイに対する対策も必要である。

アカエイの生息場計測として第2章では、岸から緩やかに深くなる台地状の浅場から急に深くなる場所までを覆う計測範囲を設定した。そして、アカエイにピンガー装着して1-2ヶ月間にわたり行動を記録した。また、計測範囲の海底地形を超音波測深機により計測した。その結果、アカエイが計測範囲の浅場を利用する場合に海底谷に沿って深場から入ってくることや浅場の砂地から岩場に向かって計測範囲を出て行くことが多いという知見が得られた。また、第3章のアカエイの移動と海底地形を合わせた結果、深場へ移動する個体の多くが海底谷の同じ場所を通過していたことが明らかとなり、アカエイの通り道がある可能性が示唆された。加えて第3章の結果からアカエイは、夜間に多く移動を行っていることが明らかとなった。漁業現場においてアカエイは、混獲されるとその大きさと重さにより漁網が破れる、延縄が絡むということによる漁業効率が下がる被害がある(金澤 2003)。また、人とアカエイが関わることにより、尾にある毒針に刺されるといった被害が生じることがある。本研究で得られた知見は、漁業権場において混獲率を下げるために漁具の設置位置をアカエイの通り道から避けるなどの対策を講じるための基礎となる。した

がって、沿岸の同じ空間を利用する人とアカエイの共存を図るうえで役立つと考えられる。また、以上のように対策を行い、混獲率を減少させることは、アカエイの保全にもつながる。

アカエイと人との共存を考えていく上で毒針による人への被害のみでなく、アカエイの生態も考慮していく必要がある。田上(2014)は、海水浴場や潮干狩り場においてアカエイと人との接触率が高い底深 2m より浅い場所にアカエイが侵入できないように防護ネットを設置することを提言している。しかし、本研究結果からアカエイは、索餌のために浅い海域に移動している可能性が示された。つまり、アカエイにとって浅い海域は、生存に重要である可能性もある。このような情報はこれまでに得られておらず、アカエイの生態解明に向けた大きな一歩といえる。また、生物多様性の観点からアカエイの生存を脅かす可能性がある対策をとることは、適した対策と言えない。人にとっての利益のみでなく、アカエイの生態を把握し、両者の立場を考慮した施策を取る必要がある。

本研究結果から海底地形とアカエイの行動を合わせて計測することで、アカエイの通り道があることが示唆された。海底地形などの環境条件により魚類の通り道となる場所があることは、これまで考えられており、定置網の設置などで利用されてきた(e.g. 井上ら 1987)。しかし、実際に魚の移動を計測し、通り道があることを示した研究は、本研究が初めてである。また、アカエイが岩場や海底谷などの平坦な砂地以外も利用していることも新たな知見である。本研究では、アカエイが海底谷や岩場、岸からつながる傾斜の緩やかな砂地を利用する理由として、索餌とエネルギー消費を抑えるためと推測した。しかし、本研究では、アカエイの摂餌を計測できず、摂餌の行動分類は完了していない。そのため、実際にアカエイが岩場などで摂餌を行っているか明らかとなっていない。アカエイの摂餌を計測できなかった理由は、アカエイの餌生物とエネルギー効率にあると考えられる。アカエイと同様に沿岸域に生息し、魚類や甲殻類を捕食するスズキでは、行動と代謝の関係が調べられている(e.g. Mori et al. 2015)。それによると、スズキは、1日に約1匹のイワシを捕食することで行動に必要なエネルギーを賄えるとされている。アカエイも同様だとすれば、

計測期間中に摂餌の必要がなかったため摂餌を行わず、摂餌を計測できなかったと考えられる。摂餌は、生存に関わる行動であり、生態を把握する上で重要である。また、摂餌場はアカエイの保全策やアカエイが影響を及ぼす場所を考えるうえで重要な場所となる。よって、今後、アカエイの摂餌時の加速度を計測し、行動分類を行う必要がある。そして、その結果と本研究手法を用いて野外実験を行うことで、どのような場所で摂餌を行っているのか明らかにできると考える。また、上記のようにアカエイの行動に伴うエネルギー消費が明らかとなっておらず、課題として残った。本研究からアカエイがグライディングを行うことや海底谷を利用することなど、エネルギーを抑えるための行動や生息場利用をしていることが示唆されている。したがって、アカエイの代謝効率は、なぜアカエイがその生息場を利用したのかといった疑問に答える一つの知見となるだろう。

最後に、本研究は個体に計測器を取り付けて計測し、計測後に計測器を回収するという特徴がある。そのため、個体が確実に行っていた行動を計測することができるが、短い期間に多くの個体のデータを集めることが難しい。したがって、今後も本研究で得られた結果および本研究により開発した研究手法を基にアカエイの行動と生息場利用に関する知見を集積していくことが重要である。そして、それらを利用することで人とアカエイの共存を目指していくことができるものとする。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京大学大気海洋研究所の小松輝久准教授には、研究の機会を与えてくださるとともに終始温かい御指導を頂戴したことを篤く御礼申し上げます。

国立研究開発法人水産総合研究センター増養殖研究所では、薄浩則博士、黒木洋明博士、渋野拓郎博士をはじめ、所員の方々に、施設の借用および多大なる御協力と御指導を頂きました。御礼を申し上げます。

元神奈川県水産専門研究職員の三谷勇博士と金田漁協所属漁船菊丸船長田村隆氏には、アカエイの行動計測調査に同行して頂き、長期にわたる御助力と御助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

調査で使用する機材の購入や借用において、東京大学大気海洋研究所の佐藤克文教授、青木かがり博士、檜崎友子博士、鈴木一平博士、岩田高志博士に御協力を頂きました。心から感謝を申し上げます。

東京大学大気海洋研究所行動生態計測学分野の皆様には、常日頃厳しくも温かい励ましを頂きました。行動生態計測分野の特任研究員の阪本真吾氏、佐々修司博士、澤山周平博士をはじめとする研究室の大学院生諸氏には、本研究に対する御協力、御助言を日々頂くとともに、共に充実した研究生活を送れたことを深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に東京大学バイオリソロジープロジェクト、海洋政策研究財団の援助を頂きました。篤く御礼を申し上げます。

最後に本研究は、ここに書ききれない多くの方々に支えられて遂行することができました。その方々のご協力なくしては、本研究は実現し得ません。この場をお借りして感謝の意を表させて頂くとともに、篤く御礼申し上げます。

参考文献

- Able KW, Twichell DC, Grimes CB, Jones RS (1987) SIDESCAN SONAR AS A TOOL FOR DETECTION OF DEMERSAL FISH HABITATS. *Fishery Bulletin* 85:725-736
- Aoki K, Amano M, Mori K, Kourogi A, Kubodera T, Miyazaki N (2012) Active hunting by deep-diving sperm whales: 3D dive profiles and maneuvers during bursts of speed. *Marine Ecology Progress Series* 444:289-U322
- 荒井修亮 (2009) バイオロギング-最新科学で解明する動物生態学. 京都通信社. 3p
- Bograd SJ, Block BA, Costa DP, Godley BJ (2010) Biologging technologies: new tools for conservation. Introduction. *Endangered Species Research* 10:1-7
- Bray RN, Hixon MA (1978) NIGHT-SHOCKER - PREDATORY BEHAVIOR OF PACIFIC ELECTRIC RAY (TORPEDO-CALIFORNICA). *Science* 200:333-334
- Cartamil DP, Vaudo JJ, Lowe CG, Wetherbee BM, Holland KN (2003) Diel movement patterns of the Hawaiian stingray, *Dasyatis lata*: implications for ecological interactions between sympatric elasmobranch species. *Marine Biology* 142:841-847
- ちばとぴ (2012) アカエイ大量発生 海水浴場閉鎖や規模縮小も 九十九里では 330 人被害. 千葉日報 <http://www.chibanippo.co.jp/news/local/97922>.
- Cooke SJ (2008) Biotelemetry and biologging in endangered species research and animal conservation: relevance to regional, national, and IUCN Red List threat assessments. *Endangered Species Research* 4:165-185
- Costanza R, d'Arge R, deGroot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, Oneill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, vandenBelt M (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260
- Espinoza M, Farrugia TJ, Lowe CG (2011a) Habitat use, movements and site fidelity of the gray smooth-hound shark (*Mustelus californicus* Gill 1863) in a newly restored southern California estuary. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 401:63-74
- Espinoza M, Farrugia TJ, Webber DM, Smith F, Lowe CG (2011b) Testing a new acoustic telemetry technique to quantify long-term, fine-scale movements of aquatic animals. *Fisheries Research* 108:364-371
- 古満啓介 (2009) 東アジア産アカエイ属魚類の分類および生活史に関する研究. 博士学位論文, 長崎大学大学院生産科学研究科

- Garrone-Neto D, Sazima I (2009) Stirring, charging, and picking: hunting tactics of potamotrygonid rays in the upper Parana River. *Neotropical Ichthyology* 7:113-116
- Gilliam D, Sullivan KM (1993) DIET AND FEEDING-HABITS OF THE SOUTHERN STINGRAY *DASYTIS-AMERICANA* IN THE CENTRAL BAHAMAS. *Bulletin of Marine Science* 52:1007-1013
- Geo Acoustics (2014) GEOSWATH PLUS COMPACT. Geo Acoustics, Geo Swath Plus Compact data sheet
- 原田和幸・玉置昭夫 (2002) 砂質干潟に生息するハルマンスナモグリ個体群に対するアカエイ捕食圧の推定. 長崎大学水産学部附属海洋資源教育研究センター年報 4: 25-26
- 堀口敏宏 (2005) 東京湾における底棲魚介類の種組成と生物量の変遷. 国立環境研究所ニュース 24:3-6
- Huveneers C, Ishihara H (2006) *Dasyatis akajei*. The IUCN Red List of Threatened Species 2006
- Humston R, Ault JS, Larkin MF, Luo JG (2005) Movements and site fidelity of the bonfish *Albula vulpes* in the northern Florida Keys determined by acoustic telemetry. *Marine Ecology Progress Series* 291:237-248
- 井上善洋・長洞幸夫・渡辺俊広・石田亨一 (1987) 定置網の針立てによる魚群行動の変化. *Nippon Suisan Gakkaishi* 53: 695-698
- J-CAST ニュース (2012) アカエイの大群が千葉の川を遡上 川面埋め尽くす異様な光景に驚く. Yahoo! JAPAN <http://www.j-cast.com/2012/07/20140177.html?p=all>
- Johnson MP, Tyack PL (2003) A digital acoustic recording tag for measuring the response of wild marine mammals to sound. *Ieee Journal of Oceanic Engineering* 28:3-12
- 海洋音響学会 (2009) 海洋音響の基礎と応用. 成山堂書店
- 金澤孝弘 (2003) 水温下降期の有明海におけるアカエイの漁獲分布と食性. 福岡水技研報 13:149-152
- 川邊玲 (2000) データロガーによるヒラメの遊泳行動. *Nippon Suisan Gakkaishi* 66:923-924
- Kawabe R, Naito Y, Sato K, Miyashita K, Yamashita N (2004) Direct measurement of the swimming speed, tailbeat, and body angle of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Ices Journal of Marine Science* 61:1080-1087
- Kawabe R, Nashimoto K, Hiraishi T, Naito Y, Sato K (2003) A new device for monitoring the activity of freely swimming flatfish, Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. *Fisheries Science* 69:3-10

- Kodama K, Oyama M, Lee J-h, Kume G, Yamaguchi A, Shibata Y, Shiraishi H, Morita M, Shimizu M, Horiguchi T (2010) Drastic and synchronous changes in megabenthic community structure concurrent with environmental variations in a eutrophic coastal bay. *Progress in Oceanography* 57:157-167
- Komatsu T, Tanoue H, Mohammad N, Watariguchi K, Osswald T, Hill D, Miyazaki N (2011) Relation Between Body Tilt Angle and Tail Beat Acceleration of a Small Fish, *Parapristipoma trilineatum* (Threeline Grunt), During Mobile and Immobile Periods Measured with a Micro Data Logger. *Global Change: Mankind-Marine Environment Interactions*:261-264
- Lack M, Sant G (2009) Trends in Global Shark Catch and Recent Developments in Management. TRAFFIC International, Cambridge, UK: 1-33
- Lalli CM, Parsons TR (2005) 生物海洋学入門第2版. 講談社
- Lepland A, Boe R, Lepland A, Totland O (2009) Monitoring the volume and lateral spread of disposed sediments by acoustic methods, Oslo Harbor, Norway. *Journal of Environmental Management* 90: 3589-3598
- Le Port A, Sippel T, Montgomery JC (2008) Observations of mesoscale movements in the short-tailed stingray, *Dasyatis brevicaudata* from New Zealand using a novel PSAT tag attachment method. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 359:110-117
- Lowe CG, Moss GJ, Hoisington G, Vaudo JJ, Cartamil DP, Marcotte MM, Papastamatiou YP (2007) Caudal spine shedding periodicity and site fidelity of round stingrays, *Urobatis halleri* (Cooper), at Seal Beach, California: Implications for stingray-related injury management. *Bulletin Southern California Academy of Sciences* 106:16-26
- Matern SA, Cech JJ, Hopkins TE (2000) Diel movements of bat rays, *Myliobatis californica*, in Tomales Bay, California: Evidence for behavioral thermoregulation? *Environmental Biology of Fishes* 58:173-182
- Mayer L, Clarke JH, Dijkstra S (1998) Multibeam sonar: Potential applications for fisheries research. *Journal of Shellfish Research* 17:1463-1467
- Meysman FJR, Middelburg JJ, Heip CHR (2006) Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends in Ecology & Evolution* 21:688-695
- Michael SW (1993) Reef sharks and rays of the world. A guide to their identification, behavior, and ecology. Sea Challengers, Monterey, California. 107 p.
- Mori T, Miyata N, Niizuma Y, Sato K (2015) Estimation of metabolic rate from activity measured by recorders deployed on Japanese sea bass *Lateolabrax japonicas*. *Fisheries Science* 81: 871-882
- 中坊徹次 (2000) 日本産魚類検索全種の同定第二版 I. 東海大学出版会

- Narazaki T, Sato K, Abernathy KJ, Marshall GJ, Miyazaki N (2009) Sea turtles compensate deflection of heading at the sea surface during directional travel. *Journal of Experimental Biology* 212:4019-4026
- Narazaki T, Shiomi K (2010) Reconstruction of 3-D path (ThreeD_path). http://bre.soc.i.kyoto-u.ac.jp/bls/index.php?3D_path
- 上田宏 (2009) バイオロギング-最新科学で解明する動物生態学. 京都通信社. pp.16-17
- 日本ライフセービング協会 (2004) 平成 15 年度パトロール報告資料
- 日本ライフセービング協会 (2005) 平成 16 年度パトロール統計
- 日本ライフセービング協会 (2006) 平成 17 年度全国海水浴場パトロール統計
- 日本ライフセービング協会 (2007) 平成 18 年度全国海水浴場パトロール統計
- 日本ライフセービング協会 (2008) 平成 19 年度全国海水浴場パトロール統計
- 日本ライフセービング協会 (2009) 平成 20 年度全国海水浴場パトロール統計
- 日本ライフセービング協会 (2010) 平成 21 年度全国海水浴場パトロール統計
- 日本ライフセービング協会 (2011) 平成 22 年度パトロールログ集計報告書
- 日本ライフセービング協会 (2012) 平成 23 年度パトロールログ集計報告書
- 日本ライフセービング協会 (2013) 平成 24 年度パトロールログ集計報告書
- 日本ライフセービング協会 (2014) 平成 26 年度 Life Saving Report
- 西川潮 (2010) 河川生態系のキーストーン種～雑食性エンジニアの機能的役割を解明する. *日本生態会誌* 60:303-317
- 奥山隼一 (2009) バイオロギング-最新科学で解明する動物生態学. 京都通信社. 18-21
- Orth RJ (1975) Destruction of Eelgrass, *Zostera marina*, by the Cownose Ray, *Rhinoptera bonasus*, in the Chesapeake Bay. *Chesapeake Science*, 16:205-208
- O'Shea OR, Thums M, van Keulen M, Meekan M (2012) Bioturbation by stingrays at Ningaloo Reef, Western Australia. *Marine and Freshwater Research* 63:189-197
- Park JS, Furusawa M (2002) The evaluation and design method of ultrasonic biotelemetry system. *Nippon Suisan Gakkaishi* 68:334-344
- Port AL, Sippel T, Montgomery JC (2008) Observation of mesoscale movements in the short-tailed stingray, *Dasyatis brevicaudata* from New Zealand using a novel

- PSAT tag attachment method. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 359: 110-117
- Rosenberger LJ (2001) Pectoral fin locomotion in batoid fishes: Undulation versus oscillation. *Journal of Experimental Biology* 204:379-394
- Rosenberger LJ, Westneat MW (1999) Functional morphology of undulatory pectoral fin locomotion in the stingray *Taeniura lymma* (Chondrichthyes : Dasyatidae). *Journal of Experimental Biology* 202:3523-3539
- Sakamoto KQ, Sato K, Ishizuka M, Watanuki Y, Takahashi A, Daunt F, Wanless S (2009) Can Ethograms Be Automatically Generated Using Body Acceleration Data from Free-Ranging Birds? *Plos One* 4
- Sato K, Watanuki Y, Takahashi A, Miller PJO, Tanaka H, Kawabe R, Ponganis PJ, Handrich Y, Akamatsu T, Watanabe Y, Mitani Y, Costa DP, Bost C-A, Aoki K, Amano M, Trathan P, Shapiro A, Naito Y (2007) Stroke frequency, but not swimming speed, is related to body size in free-ranging seabirds, pinnipeds and cetaceans. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 274:471-477
- Scheel D, Bisson L (2012) Movement patterns of giant Pacific octopuses, *Enteroctopus dofleini* (Wulker, 1910). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 416:21-31
- Sergio F, Caro T, Brown D, Clucas B, Hunter J, Ketchum J, McHugh K, Hiraldo F (2008) Top Predators as Conservation Tools: Ecological Rationale, Assumptions, and Efficacy. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 39:1-19
- Shiomi K, Narazaki T, Sato K, Shimatani K, Arai N, Ponganis PJ, Miyazaki N (2010) Data-processing artefacts in three-dimensional dive path reconstruction from geomagnetic and acceleration data. *Aquatic Biology* 8:299-304
- Silliman W, Gruber S (1999) Behavioral biology of the spotted eagle ray, *Aetobatus narinari*. *Bahamas Journal Science* 7: 13-20
- Smith F (2013) Understanding HPE in the Vemco Positioning System (VPS). Vemco Document #: DOC-005457-01
- Smith CR, Kukert H (1996) Macrobenthic Community Structure, Secondary Production, and Rates of Bioturbation and Sedimentation at the Kane'ohe Bay Lagoon Floor. *Pacific Science* 50: 211-229
- 工藤孝浩 (2014) 水産海洋学入門 海洋生物資源の持続的利用. 講談社 pp.246-247
- Tanaka H, Takagi Y, Naito Y (2001) Swimming speeds and buoyancy compensation of migrating adult chum salmon *Oncorhynchus keta* revealed by speed/depth/acceleration data logger. *Journal of Experimental Biology* 204:3895-3904

- Tanda M (1990) STUDIES ON BURYING ABILITY IN SAND AND SELECTION TO THE GRAIN-SIZE FOR HATCHERY-REARED MARBLED SOLE AND JAPANESE FLOUNDER. *Nippon Suisan Gakkaishi* 56:1543-1548
- Taniuchi T, Shimizu M (1993) DENTAL SEXUAL DIMORPHISM AND FOOD-HABITS IN THE STINGRAY *DASYATIS-AKAJEI* FROM TOKYO BAY, JAPAN. *Nippon Suisan Gakkaishi* 59:53-60
- 田上英明 (2014) 沿岸域総合管理のための先駆的科学技术適用の取り組み-バイオロギングによる魚類の生息域利用調査に関する研究-. *海洋政策研究* 12:53-83
- Tanoue H, Komatsu T, Tsujino T, Suzuki I, Watanabe M, Goto H, Miyazaki N (2012) Feeding events of Japanese lates *Lates japonicus* detected by a high-speed video camera and three-axis micro-acceleration data-logger. *Fisheries Science* 78:533-538
- 徳岡隆夫・西村清和・村上英幸 (1993): 中海におけるアカエイを用いたバイオテレメトリの基礎実験. *LAGUNA(汽水域研究)* 6:293-298
- 富岡典子・太田暁子・志垣瞳・福本タミ子・藤田賞子・水谷令子 (2014): エイの魚食文化と地域性. *日本調理科学会誌* 43: 120-130
- 上田佳奈・山下徹・中瀬浩太 (2008): 海上工事で発生する振動が周辺海域の底生生物におよぼす影響. *海洋開発論文集* 24: 699-704
- Valentine JF, Heck KL, Harper P, Beck M (1994) EFFECTS OF BIOTURBATION IN CONTROLLING TURTLEGRASS (*THALASSIA-TESTUDINUM* BANKS EX KONIG) ABUNDANCE - EVIDENCE FROM FIELD ENCLOSURES AND OBSERVATIONS IN THE NORTHERN GULF-OF-MEXICO. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 178:181-192
- Watanabe Y, Baranov EA, Sato K, Naito Y, Miyazaki N (2004) Foraging tactics of Baikal seals differ between day and night. *Marine Ecology Progress Series* 279:283-289
- Watanabe Y, Sato K (2008) Functional Dorsoventral Symmetry in Relation to Lift-Based Swimming in the Ocean Sunfish *Mola mola*. *Plos One* 3
- Yamada U, Shirai S, Irie T, Tokimura M, Deng S, Zheng Y, Li C, Kim YU, Kim YS (1995) Names and illustrations of fishes from the East China Sea and the Yellow Sea. Overseas Fishery Cooperation Foundation, Tokyo, Japan. 288 p.
- 山口敦子 (2005) 板鰐類の資源生物学的研究. *Nippon Suisan Gakkaishi* 71:523-526
- 山口敦子 (2011) 沿岸海域におけるエイ類増加の要因を探る. *科研費 NEWS*. 3: 14
- 山口敦子・古満啓介 (2012) 九州・沖縄周辺海域におけるサメ・エイ類の行動生態調査について. *日本板鰐類研究会シンポジウム講演要旨集* 17

Yoda K, Murakoshi M, Tsutsui K, Kohno H (2011) Social Interactions of Juvenile Brown Boobies at Sea as Observed with Animal-Borne Video Cameras. Plos One 6