



Title	アカウミガメ産卵北限域における砂浜環境の特性
Author(s)	溝呂木, 舞波; 渡部, 明美; 猿田, 勇 他
Citation	保全生態学研究. 2026, 31(1), p. 17-32
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/104979
rights	This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka



原著論文

アカウミガメ産卵北限域における砂浜環境の特性

溝呂木 舞波¹・渡部 明美²・猿田 勇³・大木 清⁴・藤田 健一郎⁵
岩瀬 環樹⁶・岩瀬 レン有世⁶・三次 恵美子⁶・平 治隆⁷
吉村 智範⁸・吉田 正人⁹・佐伯 いく代^{10,*}

¹ 筑波大学大学院理工情報生命学術院生命地球科学研究群

² 一宮ウミガメを見守る会

³ 九十九里浜の自然を守る会

⁴ 千葉県自然保護管理員

⁵ 6DORSALS KAYAK SERVICES

⁶ 御宿うみがめパトロール隊

⁷ 公益財団法人ふくしま海洋科学館

⁸ 鴨川シーワールド

⁹ 筑波大学名誉教授

¹⁰ 大阪大学大学院人間科学研究科

Environmental characteristics of sandy beaches at the northern limit of the breeding range of the loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*)

Manami Mizoroki¹, Akemi Watabe², Isamu Saruta³, Kiyoshi Oki⁴, Kenichiro Fujita⁵, Tamaki Iwase⁶, Ariyo Ren Iwase⁶,
Emiko Mitsugi⁶, Harutaka Taira⁷, Tomonori Yoshimura⁸, Masahito Yoshida⁹ and Ikuyo Saeki^{10,*}

¹ Degree Programs in Life and Earth Sciences, Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

² Ichinomiya Sea Turtle Association

³ Kujukuri Beach Nature Conservation Association

⁴ Chiba Prefecture Nature Conservation Management Group

⁵ 6DORSALS KAYAK SERVICES

⁶ Onjuku Sea Turtle Patrol

⁷ Marine Science Museum, Fukushima Prefecture (Aquamarine Fukushima)

⁸ Kamogawa Sea World

⁹ Professor Emeritus, University of Tsukuba

¹⁰ Graduate School of Human Sciences, University of Osaka

要旨：アカウミガメ *Caretta caretta* は温帯に産卵地をもつウミガメであり、北太平洋個体群においては日本沿岸でのみ産卵を行うことが知られている。本種は母浜回帰を行うが、混獲や生息地の減少などから個体数が減少しており、環境省レッドリストでは絶滅危惧IB類 (EN) に指定されている。アカウミガメの産卵北限域は福島県、茨城県、千葉県における太平洋岸の砂浜である。これらの地域は、数は少ないものの、ほぼ継続的に上陸や産卵の確認されている砂浜があり、かつ気候変動による海面水温の上昇により将来的に産卵地としての重要性が増す可能性がある。そこで本研究では、産卵及び孵化脱出に影響を及ぼす要因に着目し、北限域の砂浜環境の特性を把握することを目的とした。北限域の砂浜から産卵実績のある場所を中心として12地点を選び、砂浜の規模・地形・植生、砂中温度、砂質、

* 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-2 大阪大学大学院人間科学研究科

Graduate School of Human Sciences, The University of Osaka, 1-2 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

e-mail: saeki.hus@osaka-u.ac.jp 2025年4月25日受付、2025年12月18日受理、2026年3月30日早期公開 (J-STAGE)

著作権は著者に帰属する。Licensed under CC BY 4.0

および人工構造物と利用の状況について調査を行った。調査地とした砂浜の幅、奥行、傾斜の平均値はそれぞれ4,004 m、38 m、2.9°であり、植生の平均被度は約62%であった。NASAによる海面上昇の予測値から、気候変動が最も進行した場合（SSP5-8.5）の調査地点の砂浜の面積を推定した結果、2100年には平均で約24%減少するおそれがあると推定された。砂中温度については、2023年の夏から秋にかけて9地点で測定を行った。その結果、6地点において孵化率が低下するとされる32°Cを超える温度が観測された。また、調査期に産卵のあった3地点16巣について、砂中温度のデータから子ガメの一次性比の予測を行ったところ、12巣でメスの割合が90%以上（最大99.99%）と推定された。調査地点の土壌硬度は1地点を除いてやわらかく、粒径の分布から繁殖に大きな支障はないと推測された。人工構造物と人工光源は全ての調査地において確認され、海水浴利用及び車・重機の乗り入れは8割以上の調査地点で記録された。以上のことから、アカウミガメの北限域の砂浜環境は、海面上昇による規模の縮小や、気候変動にともなう砂中温度の上昇、ならびに人為による産卵環境の劣化のリスクにさらされていることが明らかとなった。これらを緩和するためには、繁殖への影響を把握・軽減するための調査・保全活動や、アカウミガメが産卵に訪れる可能性に配慮した海岸の利用方法の見直しなどを進めていくことが重要である。

キーワード：海洋生物、気候変動、絶滅危惧種、繁殖、保全

Abstract: The loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) breeds in temperate zones, and females are thought to return to their natal beach to nest. The northern limit of the *C. caretta* breeding range encompasses sandy beaches on the Pacific coast in Fukushima, Ibaraki, and Chiba prefectures, Japan, where nesting is frequently observed, although less commonly than in other parts of its range. Recently, the loggerhead sea turtle population has been declining due to bycatch and habitat degradation. The species is listed as endangered (EN) on the national Red List of Japan, and the importance of these breeding sites may further increase under global warming. However, our knowledge of these northernmost breeding environments remains limited. Therefore, we investigated the ecological factors influencing the nesting, hatching, and emergence of *C. caretta* on sandy beaches at the northern limit of its breeding range. We selected 12 sites for field surveys, focusing on those where nesting had been observed, and recorded the size and geomorphological features of the beach, vegetation cover, sand temperature, sand particle composition, presence of artificial structures, and human activity. The average width, length, and slope of the 12 beaches were 4004 m, 38 m, and 2.9°, respectively. The average vegetation cover was approximately 62%. Using the NASA Sea Level Projection Tool, we predicted that the beaches would decrease in area by approximately 24% by 2100 under the most advanced warming scenario (SSP5-8.5). Sand temperatures at 9 of the 12 study sites were measured during the summer and autumn of 2023; temperatures above 32°C, which are thought to reduce hatching success, were recorded at six sites. Based on sand temperature data from 16 nests at three sites where nesting events were observed during the study period, we predicted a hatchling primary sex ratio of >90% (maximum, 99.99%) female for 12 nests. Measured sand hardness was soft at all sites but one, and appeared suitable for *C. caretta* breeding. Artificial structures and artificial light sources were present at all study sites, and both recreational swimming and cars or heavy machinery were recorded at >80% of all sites. Our results reveal that sandy beach environments at the northern limit of the *C. caretta* breeding range are exposed to risks related to decreased habitat due to sea-level rise, increased sand temperatures due to global warming, and degradation of the nesting environment due to human activities. To minimise these risks, it is important to conduct monitoring surveys and conservation activities at the breeding sites. Mitigation of human impacts on potential breeding areas is also encouraged for beaches with intensive human activity.

Keywords: climate change, conservation, marine organism, reproduction, threatened species

はじめに

アカウミガメ (*Caretta caretta*) は温帯に生息域をもつウミガメであり、北太平洋個体群においては日本沿岸でのみ産卵を行う海洋生物である（環境省自然環境局 2007）。本種は長寿であり、かつ外洋を含む広域を回遊するため、その生態は未解明の部分が多い（Ceriani et al. 2019）。一方で、開発による営巣地の消失や混獲な

どによって、アカウミガメの個体数は減少傾向にある（環境省自然環境局 2007; Wallace et al. 2013; Sella and Fuentes 2019; Casale and Tucker 2017）。そのため、国際自然保護連合（IUCN）による評価では絶滅危惧Ⅱ類（VU）に（Casale and Tucker 2017）、環境省レッドリストでは絶滅危惧ⅠB類（EN）に指定されている（環境省 2020）。

アカウミガメの幼体は生まれた浜から脱出すると、外敵の少ない沖合まで海流に乗って分散し、成長した個体は採

餌海域と呼ばれる場所で生活するようになる(環境省自然環境局 2007)。その後、メスは産まれた浜の周辺に戻って産卵を行う母浜回帰と呼ばれる行動をとる(畑瀬 2016)。母浜の規模は個体群ごとに異なるものの、日本沿岸を産卵地とする北太平洋個体群においては数十km以内と示唆されている(畑瀬 2016; Bowen and Karl 2007)。またウミガメ類は砂の中で孵卵期間に経験する温度によって性別が決まるという性質を持ち、これを温度依存性性決定(Temperature-dependent Sex Determination; TSD)という。ウミガメ類は温度が高いとメスに偏るIa型の性決定様式を持ち(亀崎ほか 2012)、オスとメスの割合が1:1となる臨界点温度は概ね29°Cである(Binckley et al. 1998; Godfrey et al. 1999; Yntema and Mrosovsky 1980; 松沢 1998)。この臨界点温度は種と個体群ごとに異なり、アカウミガメ北太平洋個体群では29.7°Cであることがわかっている(松沢 1998)。孵卵期間に経験する温度は発生の可否や脱出までの日数にも影響し、32°Cを超えると孵化率が低下することなどが知られている(今村ほか 2014)。

陸上におけるアカウミガメの繁殖行動は、上陸、産卵、孵化脱出の3段階に大きく分けられる。繁殖成功の可否には様々な要因が関わっていることが先行研究において指摘されている。まずウミガメが上陸海岸を決める基準として、母浜回帰により、自らが生まれた砂浜のある地域を選択する段階がある。比較的小さな空間スケールでの海岸の選択については、地形、海流、人工構造物や人工光などが影響を及ぼすとされる(Witherington 1992; 大富ほか 2001; Fish et al. 2005; 今村・青木 2013; Silva et al. 2017)。上陸を行ったとしても、必ずしも産卵行動に移るとは限らず、外的刺激などの影響により産卵せずに帰海してしまう例もある。産卵に好適とされる砂浜の奥行は40 m以上とされ(今村・青木 2013)、砂浜が裸地から植生帯へ移行する地点に産卵することが多い(Karavas et al. 2005)。砂質については、粒径によって産卵成功率が変化するとされている。粒径が大きすぎると可塑性が低くなり崩れやすくなるため、産卵を行うための穴を掘る際に巣穴の形状が維持されにくくなる(和田ほか 2017)。一方、粒径が小さすぎると、硬度が上昇するおそれがある。特に水分を多く含んでいたり、風波による砂の入れ替わりが少ないことにより、極端に硬度が高まった場合には、産卵巣を掘ることが難しい(小林ほか 2019)。

子ガメの孵化の成功には、砂中温度とそれを左右する産卵地の砂質、周辺の水分量などが影響する。砂中温度は気温(Cardona et al. 2023)、砂色が異なることによるアルベド(太陽光が砂の表面で反射される割合)の違い

(Hays et al. 1995, 2003)、標高(渡辺ほか 2003)など様々な因子によって変動する。孵化が成功すると、子ガメは砂中数十cm付近で数日間待機し、夜を待って脱出する(Matsuzawa et al. 2002)。その際、子ガメが乗り越えられないような段差が存在すると子ガメは海にたどりつけない。子ガメは海に反射する紫外線領域の光を海の方角として認識し、それに誘引される性質をもつ。しかし街灯や背後の建物の明かりなど同じスペクトルを持つ人工光が存在すると、海の方角がわからなくなり迷走する(Salmon 2003)。

気候変動も繁殖成功に負の影響を与える因子として懸念される。これまでの研究においては、砂中温度の上昇による地域個体群のメスへの一次性比の偏り(Jensen et al. 2018)、高温による適応度の低下(Kobayashi et al. 2017)、海面上昇による産卵可能地の減少(Varela et al. 2018; Fish et al. 2005)、台風強度の高まり(気象庁 2025)、集中豪雨などの異常気象による沈水の危険性の増加(Rivas et al. 2018)などが指摘されている。また地中海における研究では、温暖化に対する適応のひとつとして産卵域の変化が起こっていることが示唆されている(Cardona et al. 2023)。日本における研究では、石垣島においてアカウミガメの営巣数の減少傾向が確認され、これは海面水温の上昇が一因であると考察されている(Okuyama et al. 2020)。しかし、アカウミガメは温度に依存した性決定様式や長寿命という特性をもつことから、現在の急速かつ人為的な気温上昇に適応することが困難であり、気候変動に脆弱な種であると推測される。

日本沿岸で産卵するアカウミガメの産卵環境に関する研究例は、九州などの産卵実績の多い地域に限られており、北太平洋個体群の現在の産卵北限域となる福島県、茨城県、千葉県沿岸については知見が乏しい。しかし気候変動に伴う気温の上昇や海流の変化などにより、今後、北限域の重要性が増す可能性がある。そこで本研究では、産卵北限域において砂浜の環境調査を行い、その特徴を把握することを目的とした。具体的には、近年産卵が確認されている、もしくは周辺地域の状況などから産卵が行われる可能性があると判断した地域より12の代表的な砂浜を選定し、砂浜の規模(面積・奥行)、地形、植生、砂中温度、砂質、および人工構造物と利用の状況などについて調査を行った。これにより、絶滅が危惧されるアカウミガメの産卵環境の保全に資することをねらいとした。

方 法

調査地点

アカウミガメの産卵北限域の砂浜環境を調べるため、文献（環境省自然環境局 2007; 環境省自然環境局生物多様性センター 2023b）、ウェブサイトにおける紹介記事（アクアマリンふくしま 2019; 日本ウミガメ協議会 2009）、砂浜の地図（Google Earth (ver.7.3.69750)）などを参考とし、福島県いわき市に3地点、茨城県日立市、大洗町、鉾田市にそれぞれ1地点、千葉県横芝光町、白子町、一宮町、御宿町、鴨川市、南房総市にそれぞれ1地点、計12地点の海岸を調査地として選定した（図1）。このうち千葉県内の6地点では、過去5年の間に1回以上の上陸または産卵が確認されている。また福島県の3地点の付近では過去に上陸、産卵が行われた実績があり、ふくしま海洋科学館が設立された2000年より上陸、産卵情報の蓄積が行われている。茨城県の3地点は、環境省自然環境局生物多様性センター（2002）の報告より、1976年から1999年の間に、上陸、産卵が確認されていることから選定した。保全については、千葉県内の6つの調査地点と福島県の3つの調査地点付近において、モニタリング調査、産卵巣の保護、および普及・啓発活動などが進められている。茨城県内では、アクアワールド茨城県大洗水族館が市民などからの情報提供を受け、上陸、産卵の調査を行っているとの報告がある（徳永 2020）。

調査項目と解析

各調査地にて砂浜環境の特徴を把握するため、2023年5月から同年11月にかけて、(1)砂浜環境の規模・地形・植生、(2)砂中温度、(3)砂質、(4)人工構造物およ

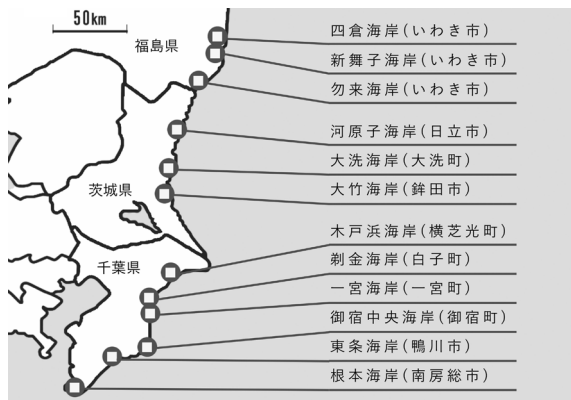


図1. 本研究の調査地点の位置。

Fig. 1. Map of study site locations.

び利用の状況の4項目について調査を行った。

1) 砂浜の規模・地形・植生

各調査地において、砂浜が裸地から植生帯へと移行する地点を調査ポイントとして選定し、その付近の環境調査を行った（付録1）。これは、アカウミガメの産卵が裸地と植生帯の境界付近で多くなることが知られているためである（Karavas et al. 2005）。砂浜の幅はGoogle Earth (ver.7.3.6) の衛星写真にて、河川や人工構造物、植生帯などで挟まれた、連続した砂浜の幅の直線距離を10 m単位で記入した。奥行は、調査時点での汀線から堤防や道路などの人工構造物、もしくは海岸植生が高密度に群生している地点までの距離を、汀線と垂直に巻尺で計測した。また同方向の傾斜をクリノメーター PM-5 (SUUNTO社) で計測した。その後、潮位の変化による奥行の誤差を防ぐため、気象庁の潮位表（気象庁「潮位表」<https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/index.php>, 最終確認日 2023年7月1日）と、計測した奥行および傾斜の値を用い、大潮満潮時の平均潮位における奥行と高さを、調査時点の砂浜の断面模式図と相似な三角形とみなして、三角関数を利用して算出した。算出式は以下の通りである。

$$W_a = W_b - \left(\frac{(T_a - T_b)}{\sin \theta} \right) \quad (1)$$

$$E = W_a \times \sin \theta \quad (2)$$

式(1)が大潮満潮時の平均潮位における奥行 W_a を求める式であり、式(2)がその時点での高さ E を求める式である。ここで、 W_b は調査時に計測した奥行、 T_a は大潮満潮時の平均潮位、 T_b は調査時点での潮位、 θ は調査時に計測した傾斜の値である。なお、砂浜の地形は短期間であっても大きく変化しうることが知られているが（和田ほか 2017）、本研究では調査を実施した時期の状況を記録することとした。

上記の調査で得られたデータを用い、気候変動によって海面上昇が起こった場合、将来の砂浜の規模がどの程度変化するかを予測した。気候変動による海面上昇値は、海岸の位置や気候変動の進行度合いによって異なるが、本研究では、気候変動が最も進んだシナリオであるCO₂高排出シナリオ（SSP5-8.5）（IPCC 2021）およびCO₂排出量が中程度のシナリオ（SSP2-4.5）において、2100年までに予測される海面上昇の推定値（NASA 2023）を参照した。NASA（2023）では、地球上の様々な地点の海面上昇値を1 cm単位で予測しており、本研究では各

調査地点から最も近い地点の値 (SSP5-8.5のシナリオでは小名浜=65 cm、銚子漁港=93 cm、勝浦=89 cm、布良=111 cm; SSP2-4.5のシナリオでは小名浜=35 cm、銚子漁港=66 cm、勝浦=60 cm、布良=83 cm) を用いた。砂浜の奥行の変化は、調査で得られた各地点の奥行と傾斜から三角関数を用いて予測した。算出式は以下の通りである。

$$W_c = \frac{E-S}{\sin \theta} \quad (3)$$

ここで、 W_c は2100年の予測奥行、 S は2100年までに予測される海面上昇の推定値である。

面積の変化は、基盤地図情報数値標高モデル5 mメッシュデータ (DEM5A) (国土地理院「基盤地図情報ダウンロードサービス」<https://service.gsi.go.jp/kiban/>, 最終確認日2023年12月1日) を用いて作成した標高図をもとに、水没すると考えられる砂浜面積の割合を計算した。標高図の作成には基盤情報ビューア (ver.5.00) を、現在の面積から変化する割合の予測にはImageJ ver.1.54g (Rasband 1997–2018) を用いた。地形は、砂丘と河川の流入の有無を目視で確認した。植生は、夏季の調査時に確認された優占種とその高さ、および植生帯内部の被度を目視で記録した。

2) 砂中温度

12の調査地点のうち10地点の調査ポイントにて、耐水温度ロガー Tidbit UTBI-001 (Onset社製) を使用し砂中温度の計測を行った。ロガーはアカウミガメ産卵巣の中心付近と考えられる深度40 cm (今村ほか 2014) に埋設し、1時間間隔で温度の測定を行った。ロガーは2023年の6月18日–8月31日に設置し、同年11月1日–11月27日に回収した。得られた砂中温度から、①最寄りの地点の気象データ (気象庁「過去の気象データ・ダウンロード」<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 最終確認日2024年1月1日) を用いた砂中温度の予測モデルの構築、および②2023年に実際に確認された産卵巣からの子ガメの脱出日と一次性比の予測を行った。①については線形回帰モデルを用いて、最寄り地点の気温から砂中温度を推定するモデルを構築した。このモデルでは、Cardona et al. (2023) にならい、砂中温度の日平均値を応答変数、その前の1–8日の気温の平均値のそれぞれを説明変数とする8つの単回帰モデルのうち、最も決定係数が1に近かったものを最良のモデルとして選択した。この解析にはR ver. 4.3.1 (R Core Team 2023)

を用いた。②については、調査地点付近で産卵、脱出確認日が判明している木戸浜 (2巣)、剃金海岸 (3巣)、一宮海岸 (11巣) の計16巣において、Matsuzawa et al. (2002) による予測式を用いて脱出日の予測を行った。

$$D=639.8(F-17.6)^{-1} \quad (4)$$

ここで、 D は最初の脱出までの日数、 F は日平均砂中温度を示す。この式は、孵卵期間の砂中温度の日平均から17.6°Cを引いた値の積分値が639.8°Cに達した日に最初の脱出が起ることを予測したものである。

子ガメの一次性比は、本研究では胚発生モニタリングを行っておらず、温度感受期を直接確認することが困難であったため、Jribi et al. (2013) にならい産卵確認日から脱出確認日の中央1/3の期間を温度感受期として代用した。予測には2つの方法を用いた。1つ目はTanner et al. (2019) によって示された式 (式(5)) を用いてメスの割合 SR_f を予測するものである。

$$SR_f = \frac{100}{1+e^{((pivT-T) \cdot 2.767)}} \quad (5)$$

ここで、 $pivT$ は雌雄比が等しくなる臨界点温度 (°C)、 T は温度感受期の平均砂中温度+代謝熱 (0.5°Cもしくは1°C) を示す。この式は、ギリシャで営巣するアカウミガメの性比と温度の関係を研究したMrosovsky et al. (2002) による実験結果を基にしており、 $pivT$ は松沢 (1998) による北太平洋個体群の研究結果より29.7°Cとした。代謝熱は、Laloë et al. (2014) の大西洋個体群アカウミガメの研究結果を参考に0.5°Cとした。2つ目は環境省モニタリングサイトウミガメ調査 (環境省自然環境局生物多様性センター 2023b) で使用されたもので、Laloë et al. (2014) による式 (式(6)) である。

$$SR_m = \frac{1}{1+e^{\left(\frac{1}{g}\right)(\ln(h+i)-\ln(T+i))}} \quad (6)$$

ここで、 SR_m はオスの割合、 g 、 h 、 i はそれぞれ0.0336281、28.95065、0.1の定数である。ここでは代謝熱を1°C (Godley et al. 2002) とし、臨界点温度は29°Cに設定されている。式(6)でオスの割合 SR_m を算出後、 $SR_f=1-SR_m$ の式からメスの割合 SR_f を求めた。これらの解析にはExcel ver. 2506を用いた。

気候変動による砂中温度の変化の予測として、作成した各地点の予測モデルと過去45年間の気温データ (気象庁「過去の気象データ・ダウンロード」<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 最終確認日2024年1月

1日)を用いて砂中温度の推移を復元した。気温データが継続的に存在した1979年から2023年のうち、各年6月から10月の平均値の推移傾向を回帰分析にて比較すると共に、各年6月1日、7月1日、8月1日に産卵し60日後に脱出したと仮定した模擬巣を用いて、一次性比の推移の傾向を分析した。砂中温度の各年6月から10月の平均値と一次性比の推移の傾向は、以下の式により推定した。

$$Y_f = j + kX \quad (7)$$

ここで、 Y_f は各年6月から10月の砂中温度の平均値もしくは各模擬巣のメスの割合、 X は年である。この解析にはR ver. 4.3.1 (R Core Team 2023)を用いた。

3) 砂質

調査ポイントの表層(深度0 cm)と深度40 cm付近の2ヵ所にて、土壌硬度の測定と砂のサンプル採取を行った。土壌硬度の測定には山中式土壌硬度計(藤原製作所)を用い、各深度において3回の測定を行った後、平均値を算出した。降水による過度な土壌硬度の変動を避けるため、測定は調査の直前24時間に降水がなかった日に実施した。これは、レオンほか(2008)が示した砂浜底質の透水係数より、40 cm深の海砂を水が浸透する時間が約3時間と推定されることを参考とし、湿度などの影響をなるべく排除し、十分に間を空ける目的で24時間と設定した。また、採取した砂サンプルを用いて粒度組成の測定を行った。粒度組成は地盤工学会(2022)を参考に、各サンプルから200 gずつをとり、4750 μm 以上、4750–2000 μm 、2000–500 μm 、500–250 μm 、250–106 μm 、106–53 μm 、53–38 μm の7段階でふるい分け試験を行い、粒径加積曲線を作成した。さらに、それらの結果を日本最大級のアカウミガメ営巣地である鹿児島県屋久島町永田浜のデータ(安藤 2022)と比較した。

4) 人工構造物と利用の状況

人工構造物は、堤防、消波堤、人工光源などの有無を各調査地点にて記録した。各地点、日中に少なくとも二度以上現地を踏査し、堤防と消波堤についてはその有無を目視で記入した。また人工光源の有無については、夜間の光源となりうる街灯、砂浜の後背地の建造物や駐車場の有無、および砂浜の背後の道路を走る車のヘッドライトが視認可能かどうかを調べた。利用の状況については、2023年度における海水浴場としての利用の有無を千葉県観光物産協会(2023)、いばらき観光キャンペーン推進協議会(2023)、いわき観光まちづくりビュー

ロー(2023)より記録した。さらに、自家用車や重機の侵入の有無は、2023年に行った調査に加えて、これまでの保全活動における産卵調査の際の観察による情報も出来るだけ含めることとした。

結 果

砂浜の規模・地形・植生

調査地点とした砂浜の幅の平均値は4,004 mであり、最大は大竹海岸の20,440 m、最小は根本海岸の670 mであった(表1)。大潮満潮時の奥行は、平均約38 m、最大は大洗海岸の95 m、最小は根本海岸の5 mであった。傾斜は平均2.9°(最小0.9°–最大5.9°)であった。CO₂高排出シナリオ(SSP5-8.5)下での海面上昇に伴う2100年の砂浜の規模を推定したところ、砂浜の奥行は平均約22 m(最小6.4 m–最大59.2 m)、面積は平均24%(最小4.8%–最大60.5%)ほど減少することが予測された。また、CO₂高排出シナリオ(SSP5-8.5)よりも気候変動を抑制出来た場合の予測シナリオ(SSP2-4.5)下では、砂浜の奥行は平均14 m(最小3.4 m–最大42 m)、面積は平均16%(最小1.1%–最大54.9%)ほど減少すると予測された。地形については、半数(6地点)の海岸で砂丘が確認された。河川は勿来海岸、大竹海岸を除く全ての海岸で確認された。植生被度は平均で62%であり、ハマボウフウ;*Glehnia littoralis* F. Schmidt ex Miq.やハマヒルガオ;*Calystegia soldanella* (L.) R.Br.などが多く確認された。

砂中温度

ロガーを設置した10地点のうち、大洗海岸では埋設したロガーを回収時に発見することができなかったため、全体で9地点の砂中データを取得した。各地点の計測日数は最長で根本海岸の168日間(2023年6月13日–11月27日)、最短で東条海岸の63日間(2023年8月31日–11月1日)であった。四倉海岸以外の全ての地点において臨界点温度である29.7°Cを超える日平均温度が確認され(図2)、1時間間隔で記録した温度データにおいて、孵化率が低下するとされる32°C(今村ほか 2014)を超えた地点は6地点であった(表2)。全ての地点でデータが得られた9月1日–10月31日の間の平均値は25.4°C、最高値は一宮海岸の26.9°C、最低値は四倉海岸の23.4°Cであった。特筆すべき点として、9月8日に全地点で温度の急降下が見られた。また剃金海岸と勿来海岸では、ロガー回収時に深度が5–10 cmほど浅くなっており、データの解釈には注意が必要と推測された。

表1. 調査地点とした12の砂浜における規模、地形、および2100年の砂浜の奥行および面積の予測値。予測値については、気候変動が最も進んだシナリオであるCO₂高排出シナリオ (SSP5-8.5) と排出を抑制したシナリオ (SSP2-4.5) (IPCC 2021) において、2100年までに予測される海面上昇の推定値 (NASA 2023) を参考とした。

Table 1. Size and geomorphology of sandy beaches at 12 study sites at the northern limit of the loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) breeding range in Japan, and their predicted sizes in 2100. Predictions were based on sea-level rise estimates (NASA 2023) for 2100 under the most advanced warming scenarios with the highest CO₂ emissions (SSP5-8.5) and those with relatively low CO₂ emissions (SSP2-4.5) (IPCC 2021).

調査地	調査日	幅 (m)	奥行 (m)	高さ (m)	傾斜 (°)	地形	河川	植生被度 (%)	植生高 (cm)	予測値 (SSP5-8.5/SSP2-4.5)			
										海面上昇 予測値 (m)	予測奥行 (m)	減少奥行 (m)	減少面積 (%)
四倉海岸	2023/7/12	1710	67.4	1.1	0.9	—	あり 横川	60	10	0.65/0.35	26.2/45.3	41.4/22.1	15.7/3.9
新舞子海岸	2023/7/12	3730	22.5	2.3	5.9	—	あり 滑津川 夏井川	60	13	0.65/0.35	16.2/19.1	6.4/3.4	16.3/4.1
勿来海岸	2023/7/12	1510	53.6	3.4	3.6	—	なし —	20	50	0.65/0.35	43.2/48.1	10.4/5.5	60.5/54.9
河原子海岸	2023/7/13	860	19.5	1.1	3.2	—	あり 金沢川	80	10	0.65/0.35	8.2/13.4	11.3/6.1	47.0/30.1
大洗海岸	2023/7/13	2350	95.1	1.5	0.9	—	あり 名称不明	70	15	0.93/0.66	35.9/53.1	59.2/42.0	27.0/16.4
大竹海岸	2023/7/13	20440	28.1	1.3	2.7	砂丘、砂崖	なし —	80	15	0.93/0.66	7.3/13.3	20.8/14.8	41.3/34.6
木戸浜海岸	2023/6/18	2400	38.3	1.7	2.7	砂丘	あり 栗山川	85	10	0.93/0.66	17.0/23.2	21.3/15.1	7.5/5.7
剃金海岸	2023/6/27	3190	42.8	1.7	2.3	砂丘、砂崖	あり 南白亀川	70	10	0.89/0.6	20.1/27.5	22.7/15.3	14.2/9.1
一宮海岸	2023/5/27	7010	23.2	1.2	3.2	砂丘	あり 名称不明	80	18	0.89/0.6	6.6/12.0	16.6/11.2	27.1/17.6
御宿中央海岸	2023/6/13	1440	39.9	1.9	2.9	砂丘	あり 清水川	30	20	0.89/0.6	21.1/27.2	18.8/12.7	21.6/14.7
東条海岸	2023/8/31	2740	18.8	1.2	3.6	—	あり 待崎川	20	5	0.89/0.6	4.6/9.2	14.2/9.6	4.8/1.1
根本海岸	2023/6/13	670	5.4	0.3	3.4	砂丘	あり 長亀川	90	8	1.11/0.83	-14.1/-9.2	19.5/14.6	5.9/3.3
平均	—	4004	37.9	1.6	2.93	—	—	62.1	15.2	0.84/0.6	16.0/23.5	21.9/14.4	24.1/16.3
標準偏差	—	5211	23.7	0.7	1.3	—	—	24.1	11.2	0.1/0.2	14.6/17.4	14/9.7	16.8/15.5

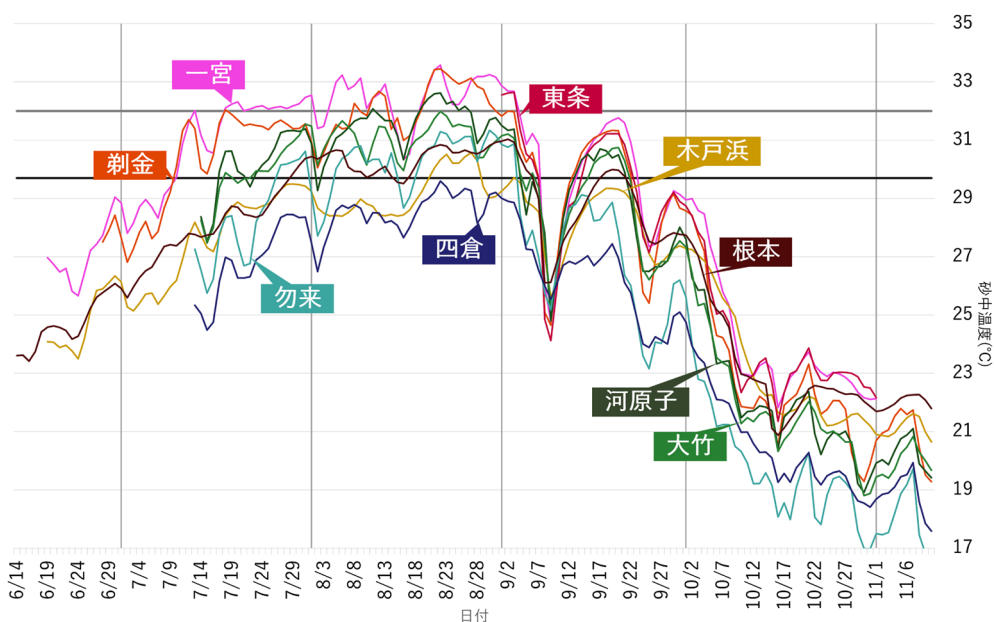


図2. 調査地点における砂浜の砂中温度の計測結果。縦軸は日平均値の推移を示す。実線は性比の臨界点である29.7°C (松沢 1998)、灰色線は孵化率が低下するとされる32°C (今村ほか 2014) を示す。

Fig. 2. Sand temperatures measured at the 12 study sites. Vertical axis indicates daily average sand temperature. Black and grey horizontal lines indicate threshold temperatures at which the sex ratio is influenced (29.7°C; Matsuzawa 1998) and hatching success begins to decline (32°C; Imamura et al. 2014), respectively.

表2. 調査地点における砂中温度の測定値と予測モデルによる解析の結果。予測モデルを作成する際は1-8日前までの気温（気象庁「過去の気象データ・ダウンロード」<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 最終確認日2024年1月1日）の平均を用いた。 p の後の数値は、予測日の何日間前のデータを用いたかを表す。調査は2023年に実施した。

Table 2. Sand temperatures measured at the 12 study sites in 2023, and model predictions based on average air temperatures over 1-8 days (Japan Meteorological Agency; <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, last accessed January 1, 2024). Numbers following “ p ” in the “Predictive model” column indicate the number of days of air temperature data used in the model.

調査地	調査期間	全期間 平均 (°C)	全期間 標準偏差 (°C)	全期間 最大値 (°C)	全期間 最小値 (°C)	9-10月 平均 (°C)	9-10月 標準偏差 (°C)	9-10月 最大値 (°C)	9-10月 最小値 (°C)	予測モデル	r^2
四倉海岸	7/12-11/15	24.6	4.0	30.2	13.8	23.4	3.3	29.5	17.8	$y = 4.73 + 0.85^* (p8)$	0.94
勿来海岸	7/12-11/15	25.1	5.3	32.3	10.6	23.5	4.3	31.8	15.7	$y = 2.41 + 1.09^* (p5)$	0.86
河原子海岸	7/13-11/14	27.0	4.8	33.2	14.2	25.4	3.9	32.0	18.4	$y = 3.37 + 1.00^* (p3)$	0.95
大竹海岸	7/13-11/14	26.8	4.6	32.3	15.0	25.3	3.9	31.5	18.4	$y = 7.27 + 0.83^* (p4)$	0.96
木戸浜	7/18-11/11	26.4	3.0	30.6	20.4	25.7	3.0	29.8	21.0	$y = 9.31 + 0.70^* (p8)$	0.92
剃金海岸	6/27-11/14	27.8	4.7	34.7	13.8	26.0	4.1	32.9	17.8	$y = 5.38 + 0.91^* (p2)$	0.92
一宮海岸	6/18-11/1	29.0	3.6	34.0	21.4	26.9	3.6	33.2	21.4	$y = 8.12 + 0.83^* (p5)$	0.90
東条海岸	8/31-11/1	26.5	3.5	33.0	20.8	26.6	3.5	33.0	20.8	$y = 8.84 + 0.78^* (p2)$	0.88
根本海岸	6/13-11/27	26.1	3.8	31.1	18.1	26.0	3.2	31.1	20.8	$y = 7.41 + 0.79^* (p8)$	0.95
平均	—	26.6	4.1	32.4	16.5	25.4	3.6	31.7	19.1	—	0.92

気温を用いた砂中温度の予測式の構築を試みたところ、全地点において決定係数0.8以上のモデルが構築された（表2）。9地点のうち、3地点では測定日の8日前の平均気温を説明変数に用いたモデルが最も説明力の高いモデルとなった。また2日前および5日前の平均気温の説明力が高かったモデルが2地点ずつあった。

測定した砂中温度を用いて子ガメの脱出日を予測したところ、実際の脱出日と予測日との差は平均で約5日（最小で1日、最大で17日）であった（表3）。臨界点温度を用いた一次性比の予測については、16巢中14巢で、温度感受期（中央1/3の期間）の平均値と代謝熱の和が29.7°Cを超えると予測された。Tanner et al. (2019) の式を用いた一次性比の予測では、平均85.57%、最大99.99%がメスであると予測された（表3）。Laloë et al. (2014) の式を用いた予測では、平均91.50%、最大98.83%がメスであると予測された。

上述の気温を用いた予測式（表3）をもとに、過去45年間の砂中温度を復元した結果、全ての地点において有意に温度が上昇していると予測された（図3；付録5）。この値をもとに、Tanner et al. (2019) の式を用いて全地点を平均したメスの割合の変化を回帰分析で予測したところ、6月から8月の模擬巢全てにおいて、メスの割合が有意に上昇しており、式(7)における回帰係数は、6月模擬巢、7月模擬巢、8月模擬巢でそれぞれ0.08、0.86、0.68であった（図4；付録5）。

砂質

全調査地点の土壌硬度の平均値は、深度0 cmが1.44 kg/cm²、40 cmは6.97 kg/cm²であった。深度0 cmの硬度は大洗海岸でのみ16.17 kg/cm²と高かったが、これを除いた平均値は0.28 kg/cm²であった。粒度については、0 cmと40 cmのサンプルで大きな違いは確認されなかった（付録2）。そのため、0 cmのサンプルについて粒径加積曲線の比較図を作成した。その結果、大洗海岸が最も細粒であり、根本海岸と新舞子海岸が最も粗粒であった（図5）。また永田浜（安藤 2022）の粒径加積曲線と比較したところ、本研究の調査地点は、おおむねその値よりも細粒側に位置していた。

人工構造物と利用の状況

12の調査地点のうち、堤防は7地点、消波堤は6地点、突堤は9地点で確認された（表4；付録3）。光源として、調査地点から目視で確認できる建物は、大竹海岸と木戸浜を除く10地点で記録された。後背地の街灯は6地点で確認された。車のヘッドライトは御宿海岸を除いた11地点で視認可能であった。海水浴場としての利用は、期間の違いはあるものの、12地点中11地点で行われていた。車や重機の乗り入れは7地点において確認された。

表3. 調査期に産卵が確認された産卵巣における子ガメの脱出日数と一次性比の予測の解析結果。脱出日数は初日を含め小数点以下は四捨五入した。平均温度は温度感受期の平均値を示し、温度感受期の始まりを産卵確認日 + (脱出日数×1/3)、終わりを産卵確認日 + (脱出日数×2/3) とした。調査は2023年に実施した。

Table 3. Predicted days to emergence and primary sex ratios at nests where spawning was confirmed during the 2023 survey. The number of days to emergence includes the first day of emergence, and is rounded to the nearest whole number. Mean temperatures were calculated for the temperature-sensitive period, starting at first day of egg laying + (days to emergence × 1/3) and ending at first day of egg laying + (days to emergence × 2/3).

調査地	上陸 確認日	脱出 確認日	温度感 受期	脱出日数 (日)	脱出日の予測日 (脱出確認日 との誤差)	温度感受期の 砂中温度の 平均値 (°C)	Tanner et al. (2019) の 式によるメス比の 予測値 (%)	Laloë et al. (2014) の 式によるメス比の 予測値 (%)
木戸浜	6/25	8/18	7/12–7/31	55	8/25 (+7)	28.58	15.33	65.47
	7/17	9/4	8/2–8/20	50	9/11 (+7)	28.67	18.54	67.32
剃金海岸	6/27	8/19	7/14–8/2	54	予測不可	31.26	99.66	96.10
	7/23	9/9	8/7–8/24	49	9/5 (−4)	32.24	99.98	98.36
	7/24	9/12	8/9–8/27	51	9/6 (−6)	32.40	99.99	98.58
一宮海岸	6/11	8/11	7/2–7/23	62	予測不可	30.46	97.02	92.15
	6/25	8/9	7/10–7/25	46	8/12 (+3)	31.57	99.86	97.06
	6/28	8/19	7/16–8/3	53	8/14 (−5)	31.99	99.96	97.96
	7/6	8/21	7/22–8/7	47	8/20 (−1)	32.26	99.98	98.38
	7/18	9/2	8/3–8/19	47	8/30 (−3)	32.16	99.97	98.24
	7/23	9/21	8/12–9/1	61	9/4 (−17)	32.47	99.99	98.66
	8/1	9/22	8/19–9/6	53	9/15 (−7)	32.62	99.99	98.83
	8/5	9/24	8/22–9/8	51	9/19 (−5)	32.12	99.97	98.18
	8/10	9/30	8/27–9/13	52	9/26 (−4)	30.66	98.29	93.43
	8/21	10/11	9/7–9/24	52	10/13 (+2)	29.60	75.01	83.75
	8/27	10/25	9/15–10/6	60	10/30 (+5)	29.43	65.59	81.46
平均	7/18	9/8	8/4–8/22	53	—	31.16	85.57	91.50

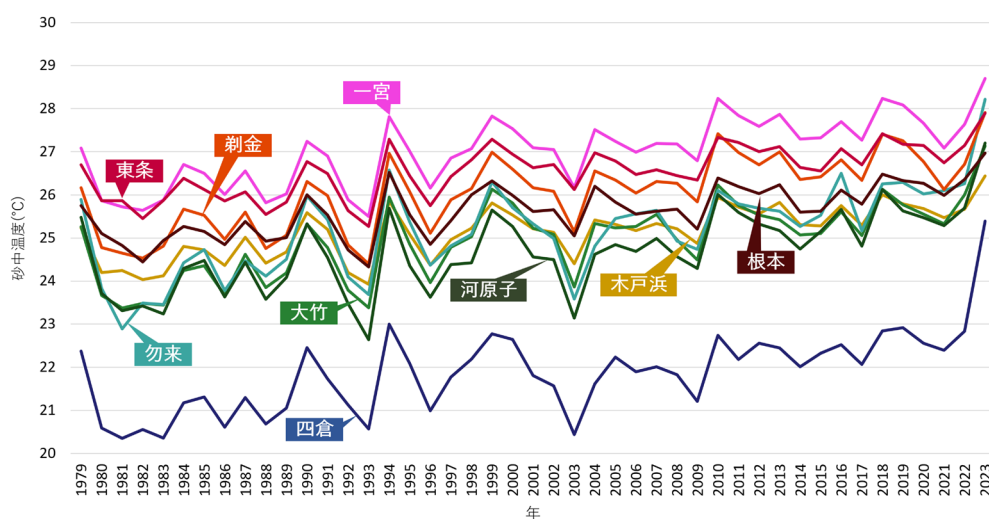


図3. 調査地点における砂中温度の復元結果。1979年から毎年6–10月の平均砂中温度を示した。復元には、表3に示した予測モデルと気象庁データ（気象庁「過去の気象データ・ダウンロード」<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 最終確認日2024年1月1日）を用いた。

Fig. 3. Predicted sand temperatures at the 12 study sites, with yearly sand temperatures averaged from June to October since 1979. Data were obtained from the Japan Meteorological Agency (‘‘Past weather data download’’; <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, last accessed January 1, 2024). The prediction models are shown in Table 3.

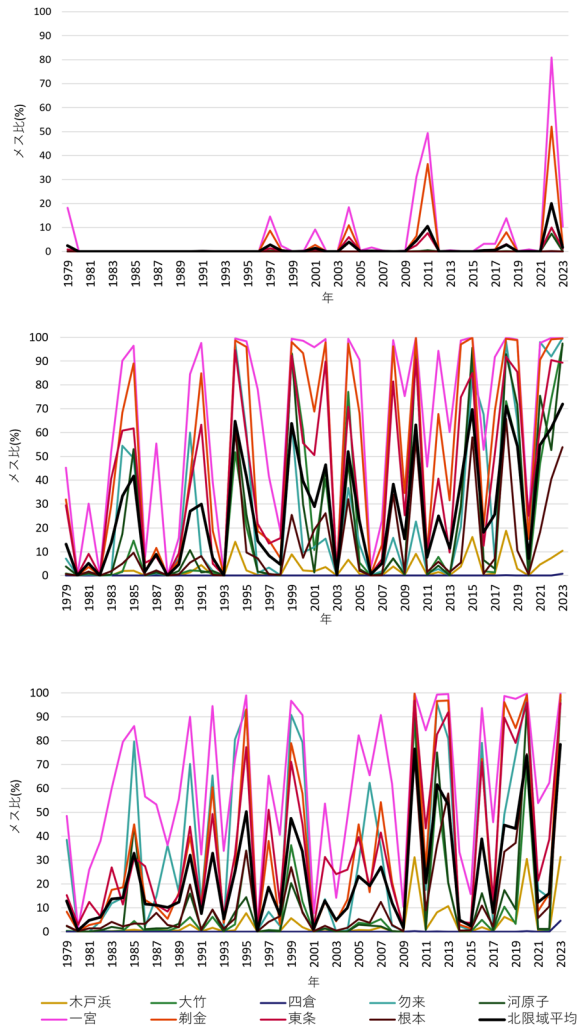


図4. 調査地点における模擬巣の一次性比予測の結果。上からそれぞれ、6月、7月、8月の模擬巣の予測結果を示す。

Fig. 4. Predicted primary sex ratios for simulated nests at the 12 study sites in June (top), July (middle), and August (bottom).

考 察

砂浜の幅と奥行きは、それぞれ4,004 m、38 mであった(表1)。これは北限域よりも産卵実績の多い高知県下の砂浜(小林ほか 2019)の値と比較して大きく違うものではなかったが(付録4)、各地点での値のばらつきが大きく、奥行の平均値は産卵に理想的であると言われる40 m(今村・青木 2013)を下回る結果となった。気候変動シナリオ SSP5-8.5をもとに海面が上昇した場合の奥行を予測した結果、2100年には平均で22 m減少すると予測された。また調査地点の砂浜面積の平均減少率は24%であった。CO₂排出量が中程度のシナリオ(SSP2-4.5)においても、平均で16%減少することが予

測された。砂浜の減少はウミガメ類の営巣可能地の減少をもたらすのみならず、汀線から近い位置に産卵せざるを得なくなることによって、高波による沈水の危険性を増加させる(Varela et al. 2018)。本研究では水没による砂浜消失の予測のみを行っているが、これに加えて土砂移動による消失を考慮した場合には、水没のみを考慮した場合と比較して倍程度の砂浜面積が減少するとの予測もある(有働・武田 2014)。

植生被度は、調査地全体で平均約62%であり、アカウミガメ北太平洋個体群の産卵地の北限域では一定量の植生が分布しているものと推測された。海岸植生は、砂の風食を防止し、砂丘の形成を促進する効果がある(Brown and McLachlan 2002)。これにより産卵巣の沈水・流出の危険性が減少すると共に、砂浜減少への緩衝地となりうるなど、アカウミガメにとっても重要であると言える。しかし、一部の調査地では、植生を踏圧した海岸事業がみられた(付録3)。こうした事業が広い面積で実施されると、植生を減少させる危険性があり、注意が必要である。

砂中温度を9地点において解析したところ、孵化率が低下する32°C以上の高温が6地点で確認された(表2)。環境省モニタリングサイト1000の調査地点でもある一宮海岸では、これまでの調査結果から、低緯度のサイトの大半に比べて砂中温度が低い傾向が確認されている(環境省自然環境局生物多様性センター 2023a)。このことから、緯度が高く気温が低いと考えられている北限域では、他の海岸に比べて砂中温度が低いことが推察される。しかし本研究では、複数の地点で連続した高温が記録され、個体群全体のメス化や、孵化率の低下などの危険性が高まっていると推察された。このことは、愛知県渥美半島のモニタリング結果からも指摘されている(環境省自然環境局生物多様性センター 2024)。また、本調査で確認された砂中温度の急降下は台風接近による降水の影響であると考えられる(気象庁 2023)。集中豪雨などの異常気象は、気候変動によってさらに増加すると考えられている。降水は砂中温度を低下させるが、一方で冠水による胚の窒息死の危険性も高まるとされ(亀崎ほか 2012)、このような異常気象の増加はアカウミガメの発生に悪影響を及ぼす可能性がある。また、ロガーの設置時と回収時で深度が異なっていた刺金海岸と勿来海岸の2地点についても、高波や風などの気象現象の影響で砂浜の形状が変化したものと考えられる。本研究における砂中温度の値は、記録的猛暑(WMO 2023)となった2023年のみの観測であるが、継続してロガーの設置を

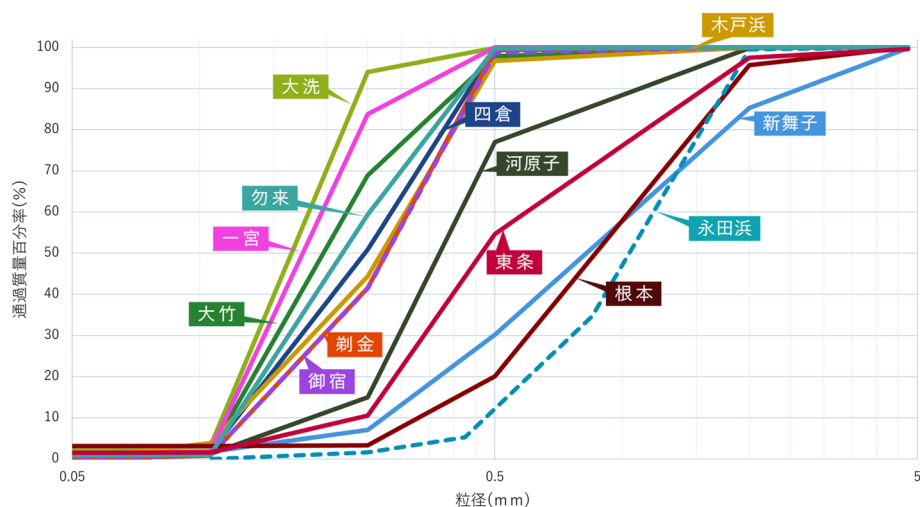


図5. 調査地点の砂浜にて採集した砂の粒径加積曲線。青色の破線は、鹿児島県屋久島町永田浜の値（安藤 2022）を示す。

Fig. 5. Cumulative particle size distributions for sand collected from beaches at the 12 study sites. Blue dashed line indicates a reference distribution from Nagata Beach, Yakushima, Kagoshima Prefecture (Ando 2022).

表4. 調査地点で確認された人工構造物および利用の状況。確認されたものを黒丸で示す。

Table 4. Presence of artificial structures and/or human activity, indicated by black circles, at the 12 study sites.

調査地	人工構造物				人工光源			利用状況	
	堤防	消波堤	突堤	その他構造物	建物	街灯	車のライト	海水浴利用	車・重機による乗り入れ
四倉海岸	●	●	●	●	●	●	●	●	●
新舞子海岸	●	●	—	●	●	—	●	—	—
勿来海岸	●	●	●	●	●	●	●	●	—
河原子海岸	●	●	●	●	●	●	●	●	—
大洗海岸	●	—	●	●	●	●	●	●	—
大竹海岸	—	●	●	—	—	—	●	●	●
木戸浜海岸	●	●	—	—	—	—	●	●	●
剃金海岸	—	—	●	●	●	—	●	●	●
一宮海岸	—	—	●	●	●	—	●	●	●
御宿中央海岸	—	—	—	●	●	—	—	●	●
東条海岸	●	—	●	●	●	●	●	●	—
根本海岸	—	—	●	●	●	●	●	●	●

行っている木戸浜海岸、剃金海岸、一宮海岸などの地点では、2024年においても32°Cを超える高温が観測された（溝呂木ほか 未発表）。

砂中温度を気温から予測するモデルの構築については、解析対象とした全地点で決定係数0.8以上のモデルが構築された（表2）。これにより、気温を基に現地での脱出日が予測できると考えられたが、2023年に確認された産卵巣における脱出日の予測では、平均で約5日間、最大で約17日間の誤差があった（表3）。これは実際の産卵巣と温度を記録した調査ポイントとの日当たり

や水分量などの違いが原因として考えられた。実際に現地での脱出日の予測に用いる際には、このような誤差を考慮し、脱出確認を行う際の目安の一つとして利用することができる。調査期間中に観察された16巣の子ガメの一次性比については大きくメスに偏っていると推定された。ウミガメ類の最適な一次性比については、メスが同年に複数回産卵を行うことや、一夫多妻制をとる生態からメスの方が多いことが示唆されている（Hays et al. 2017）。また、Sousa-Guedes et al. (2025) による研究では、過去の気温上昇によりメスの個体数が増え、営

巣数が増加する傾向が示されている。この現象は、個体数が増えやすいというメリットがある一方、気候変動の影響を覆い隠し、さらに温度が上昇し致死的な上限温度に達するまで気づかずに見過ごされる危険性も指摘されている。さらに、孵化直後の幼体の一次性比と繁殖に参加する成熟個体の性比は異なることが予測され (Maurer et al. 2021)、正確な一次性比の最適比は未解明である。しかし、一次性比の極端な偏りが進むと地域個体群の絶滅につながる可能性が示唆されており (Hawkes et al. 2007)、メスの割合が99%と予測された産卵巣の温度が気候変動によってさらに上昇した場合、孵化率の低下を引き起こし、個体群の存続に危険な影響を及ぼすと推察される。

構築した予測式を用いて、過去45年間の砂中温度を復元したところ、全地点で有意な上昇傾向が見られた (図3)。年ごとの変動は大きいと推測されるものの (図4)、気候変動による気温上昇は、北限域のアカウミガメに何らかの影響を及ぼしていることが懸念される。気候変動に対するウミガメ類の適応的な行動の例として、産卵域の移行 (Cardona et al. 2023) や、営巣季節の早期化が挙げられるが、営巣季節の早期化は温度変化の影響を完全に緩和するには不十分であるとの予測もある (Fuentes et al. 2023)。

調査ポイントの砂浜の表層の土質はほとんどの地点においてやわらかく、産卵巣を掘ることは、人為的な活動によって踏み固められるなどの行為がない限り、容易であると考えられた。しかし、最も細粒であった大洗海岸では、土壤硬度の測定値が高かった。粒度の細かい砂は、水を含んだ場合などには、砂の粒子間が固く締まり、硬度が増すことが知られている (小林ほか 2019; 和田ほか 2017)。大洗海岸では、そのようなメカニズムにより硬度が上昇していたと推測される。粒径は、ほとんどの調査地点において、日本最大の産卵地である永田浜 (安藤 2022) よりも細粒であった (図5)。アカウミガメの産卵には比較的粒径が小さい方が適しており (和田ほか 2017)、調査地点中、2番目に粒径の細かった一宮海岸では、毎年継続的に産卵が確認されている。そのことから、土壤硬度が特に高かった大洗海岸を除き、北限域の砂浜の砂質は、産卵に大きな支障はないものと考えられた。

人工構造物は全ての海岸で確認され (表4)、アカウミガメの産卵環境に影響を及ぼしている可能性が示唆された。人工構造物は、設置物そのものの影響だけでなく、施工中に発せられる音や光などによっても影響を与える

ことが懸念される。こうした構造物は、建設時の環境影響評価のほか、建設後においても継続的な管理を通じ、ウミガメの産卵環境への影響を低減していく取り組みが求められる。光源となる建物については、12地点中10地点において確認された。街灯については、アカウミガメの産卵・脱出に影響が大きいとされるLED灯が確認された地点もあった。LED灯は、ウミガメの保全のため、低圧ナトリウム灯への移行や、産卵シーズンの消灯の要請が著者を含む現地の保全関係者によって行われている。後背地の道路状況として、道路を走る車のヘッドライトは12地点中11地点で確認され、砂浜を分断した道路も存在した。砂浜背後の道路や建造物は光源として問題となるだけではなく、産卵地の分断化を引き起こすと共に、海岸浸食に対する脆弱性を増すものであるとの指摘がある (Fish et al. 2005)。従って、産卵可能性のある場所では、地域住民や観光客の理解と協力を仰ぎながら、産卵環境の劣化を防ぐ取組を進めていくことが重要である。

海水浴利用は12地点中11地点で、うち車や重機の乗り入れは7地点で確認された。こうした砂浜の利用は、母ガメの産卵行動や子ガメの孵化脱出を妨げる危険がある。特に北限域においては、気候変動による海面水温の上昇によって産卵数の増加が起こることも考えられるため、レジャーなどの利用が頻繁になされている海岸においては、産卵地と脱出ルート付近への立入を制限する区域を設けたり、砂浜への車両の進入などを規制するなどして、保護と利用のバランスをはかる取組を進めていくことがのぞましい。

結 論

本研究は、アカウミガメの産卵北限域における砂浜環境の特性について調査を行った。その結果、気候変動が進行した場合、海面上昇などにより砂浜の規模が大きく減少するおそれがあること、北限域であるにもかかわらず、一次性比の臨界点である29.7°Cを上回る砂中温度が記録され、気候変動による繁殖活動への影響が危惧されること、人工の構造物や光源が高頻度で砂浜に設置されており、雌個体の上陸や孵化個体の生存に影響を与えている可能性があることなどが示唆された。これらのうち、どの要素が将来のアカウミガメ個体群の動態に最も影響を及ぼしうるのかは、本研究の結果のみで論じることには難しいが、北限域において著しい性比の偏りが予測されたことは、保全を進めていく上で特に留意すべき点

であると考え。砂浜海岸はウミガメや他の生物のハビタットとして重要である他、天然の消波工としての防災機能、水質浄化機能などを持ち、レクリエーションや漁業の場としても利用される(上野 1996)。こうした多様な生態系サービスに配慮しながら、アカウミガメの産卵場という機能を保全するためには、できるだけ繁殖に影響が少なく、景観を損なわない手法を用いて、良好な産卵環境を維持するための対応が急務である。一方で、調査を実施した海岸の多くでは、地域の自然保護関係者などが中心となり、長期にわたる調査や海岸の清掃および個体の保護活動、普及・啓発活動などが行われている。これらの活動は、アカウミガメに対する気候変動や人為的影響を緩和し、産卵環境を維持・増進していく上で重要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にご協力いただきました。認定NPO法人エバーラスティング・ネイチャーの北山知代様には研究計画へのご助言や各調査地点の保全活動家の方々のご紹介などをしていただきました。また、伊豆大島みどりの地球大好き会会長の成瀬裕昭様には先行研究等に関するアドバイスをいただきました。また筑波大学の上條隆志博士、門脇正司博士、清野達之博士、森林生態環境学研究室のみなさまには貴重なアドバイスと励ましをいただきました。査読者の方からは有益なコメントをいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

著者情報

ORCID

Ikuyo Saeki <https://orcid.org/0000-0003-3252-6819>

引用文献

- アクアマリンふくしま (2019) ウミガメへの手紙—浦島伝説の地・いわきより—。アクアマリンふくしまホームページ。 <https://www.aquamarine.or.jp/events/umigameheno-tegami/>, 2024年2月23日確認
- 安藤 沙弥 (2022) ウミガメが多く上陸産卵する永田浜の謎を探る。屋久島ソサエティ会誌 屋久島学, 9:174-181
- Binckley CA, Spotila JR, Wilson KS, Paladino FV (1998) Sex determination and sex ratios of Pacific Leatherback turtles, *Dermochelys coriacea*. Copeia, 1998:291-300. <https://doi.org/10.2307/1447425>

- Bowen BW, Karl SA (2007) Population genetics and phylogeography of sea turtles. Molecular Ecology, 16:4886-4907. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03542.x>
- Brown AC, McLachlan A (2002) 砂浜海岸の生態学。(須田 有輔, 早川 康博訳)。東海大学出版会, 平塚
- Cardona L, San Martín J, Benito L, Tomás J, Abella E, Eymar J, Aguilera M, Esteban JA, Tarragó A, Marco A (2023) Global warming facilitates the nesting of the loggerhead turtle on the Mediterranean coast of Spain. Animal Conservation, 26:365-380. <https://doi.org/10.1111/acv.12828>
- Casale P, Tucker AD (2017) *Caretta caretta* (amended version of 2015 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species, 2017:e.T3897A119333622. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T3897A119333622.en>
- Ceriani SA, Casale P, Brost M, Leone EH, Witherington BE (2019) Conservation implications of sea turtle nesting trends: elusive recovery of a globally important loggerhead population. Ecosphere, 10:e02936. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2936>
- 千葉県観光物産協会 (2023) 【2023】千葉県の海水浴場総まとめ！人気・穴場・おすすめビーチも紹介|特集|千葉県公式観光サイト ちば観光ナビ. ちば観光ナビ. https://maruchiba.jp/feature/detail_134.html, 2024年2月24日確認
- Fish MR, Côté IM, Gill JA, Jones AP, Renshoff S, Watkinson AR (2005) Predicting the impact of sea level rise on Caribbean sea turtle nesting habitat. Conservation Biology, 19:482-491. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00146.x>
- Fuentes MMPB, Santos AJB, Abreu-Grobois A, Briseño-Dueñas R, Al-Khayat J, Hamza S, Saliba S, Anderson D, Rusenko KW, Mitchell NJ, Gammon M, Bentley BP, Beton D, Booth DTB, Broderick AC, Colman LP, Snape RTE, Calderon-Campuzano MF, Cuevas E, Lopez-Castro MC, Flores-Aguirre CD, Mendez de la Cruz F, Segura-Garcia Y, Ruiz-Garcia A, Fossette S, Gatto CR, Reina RD, Girondot M, Godfrey M, Guzman-Hernandez V, Hart CE, Kaska Y, Lara PH, Marcovaldi MAGD, LeBlanc AM, Rostal D, Liles MJ, Wyneken J, Lolavar A, Williamson SA, Manoharakrishnan M, Pusapati C, Chatting M, Mohd Salleh S, Patricio AR, Regalla A, Restrepo J, Garcia R, Santidrián Tomillo P, Sezgin C, Shanker K, Tapilatu F, Turkozian O, Valverde RA, Williams K, Yilmaz C, Tolen N, Nel R, Tucek J, Legouvello D, Rivas ML, Gaspar C, Touron M, Genet Q, Salmon M, Araujo MR, Freire JB, Casthologe VD, Jesus PR, Ferreira PD, Paladino FV, Montero-Flores D, Sozbilen D, Monsinjon JR (2023) Adaptation of sea turtles to climate warming: Will phenological responses be sufficient to counteract changes in reproductive output? Global Change Biology, 30:e16991. <https://doi.org/10.1111/gcb.16991>
- Godfrey MH, D'Amato AF, Marcovaldi MÂ, Mrosovsky N (1999) Pivotal temperature and predicted sex ratios for

- hatching hawksbill turtles from Brazil. *Canadian Journal of Zoology*, 77:1465-1473. <https://doi.org/10.1139/z99-117>
- Godley BJ, Broderick AC, Glen F, Hays GC (2002) Temperature-dependent sex determination of Ascension Island green turtles. *Marine Ecology Progress Series*, 226:115-124. <https://hdl.handle.net/10536/DRO/DU:30058246>. <https://doi.org/10.3354/meps226115>
- 畑瀬 英男 (2016) 竜宮城は二つあった—ウミガメの回遊行動と生活史の多型—. 東海大学出版部, 平塚
- Hawkes LA, Broderick AC, Godfrey MH, Godley BJ (2007) Investigating the potential impacts of climate change on a marine turtle population. *Global Change Biology*, 13:923-932. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01320.x>
- Hays GC, Adams CR, Mortimer JA, Speakman JR (1995) Inter and intra-beach thermal variation for Green turtle nests on Ascension island, South Atlantic. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 75:405-411. <https://doi.org/10.1017/S0025315400018269>
- Hays GC, Ashworth JS, Barnsley MJ, Broderick AC, Emery DR, Godley BJ, Henwood A, Jones EL (2003) The importance of sand albedo for the thermal conditions on sea turtle nesting beaches. *Oikos*, 93:87-94. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.930109.x>
- Hays GC, Mazaris AD, Schofield G, Laloë J-O (2017) Population viability at extreme sex-ratio skews produced by temperature-dependent sex determination. *Proceedings. Biological Sciences*, 284:20162576. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2576>
- いばらき観光キャンペーン推進協議会 (2023) 茨城の海水浴場。観光いばらき。 https://www.ibarakiguide.jp/special/ibaraki_summer/beach2023.html, 2024年7月25日確認
- 今村 和志, 青木 伸一 (2013) 砂浜の環境がアカウミガメの上陸・産卵行動特性に及ぼす影響—豊橋・湖西海岸の事例より—. *沿岸域学会誌*, 26(3):41-52. https://doi.org/10.57296/jaczs.26.3_41
- 今村 和志, 加藤 茂, 田中 輝彦 (2014) アカウミガメのふ化・脱出に及ぼす海浜砂中温度の影響. *土木学会論文誌B2 (海岸工学)*, 70:I_1176-I_1180. https://doi.org/10.2208/kaigan.70.I_1176
- IPCC (2021) *Climate Change 2021—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge
- いわき観光まちづくりビューロー (2023) いわきで海水浴といえばここ! いわき市観光サイト. <https://kankou-iwaki.or.jp/feature/iwakibeach/top>, 2024年2月24日確認
- Jensen MP, Allen CD, Eguchi T, Bell IP, LaCasella EL, Hilton WA, Hof CAM, Dutton PH (2018) Environmental warming and feminization of one of the largest sea turtle populations in the world. *Current Biology*, 28:154-159.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.11.057>
- 地盤工学会 (2022) 土質試験—基本と手引き—(第三回改訂版). 地盤工学会, 東京
- Jribi I, Hamza A, Saied A, Ouergui A (2013) Sex ratio estimations of loggerhead marine turtle hatchlings by incubation duration and nest temperature at Sirte beaches (Libya). *Scientia Marina*, 77:617-624. <https://doi.org/10.3989/scimar.03855.28B>
- 亀崎 直樹(編), 石原 孝, 松沢 義将, 柳澤 牧央, 佐藤 克文, 畑瀬 英男, 藤井 弘章 (2012) ウミガメの自然誌—産卵と回遊の生物学—. 東京大学出版会, 東京
- 環境省 (2020) 環境省レッドリスト2020. 環境省ホームページ. <https://www.env.go.jp/press/107905.html>, 2024年2月1日確認
- 環境省自然環境局 (2007) ウミガメ保護ハンドブック. 環境省自然環境局, 東京
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2002) 浅海域生態系調査(ウミガメ調査)報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 富士吉田
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2023a) 2022年度モニタリングサイト1000 ウミガメ類調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 富士吉田
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2023b) モニタリングサイト1000 ウミガメ類調査20172021年度とりまとめ報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 富士吉田
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2024) モニタリングサイト1000 第4期とりまとめ報告書概要版. 環境省自然環境局生物多様性センター, 富士吉田
- Karavas N, Georgiou K, Arianoutsou M, Dimopoulos D (2005) Vegetation and sand characteristics influencing nesting activity of *Caretta caretta* on Sekania beach. *Biological Conservation*, 121:177-188. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.04.017>
- 気象庁 (2023) 気象庁|台風位置表2023年. https://www.data.jma.go.jp/yoho/typhoon/position_table/table2023.html, 2024年2月16日確認
- 気象庁 (2025) 日本の気候変動2025—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—. <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>, 2025年8月20日確認
- Kobayashi S, Wada M, Fujimoto R, Kumazawa Y, Arai K, Watanabe G, Saito T (2017) The effects of nest incubation temperature on embryos and hatchlings of the loggerhead sea turtle: Implications of sex difference for survival rates during early life stages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 486:274-281. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.10.020>
- 小林 陽介, 藤本 竜平, 小坂 将, 三宅 香成, 田中 幸記, 齊藤 知己 (2019) 高知県におけるアカウミガメの産卵海岸選択に影響する環境要因. *黒潮圏科学*, 12:156-173
- Laloë J-O, Cozens J, Renom B, Taxonera A, Hays GC (2014) Effects of rising temperature on the viability of an important sea turtle rookery. *Nature Climate Change*, 4:513-518. <https://doi.org/10.1038/nclimate2236>

- レオン マリオ デ, 西 隆一郎, 北村 良介 (2008) 海浜底質の粒度特性と透水係数について. 海洋開発論文集, 24:1201-1206. <https://doi.org/10.2208/prooe.24.1201>
- 松沢 慶将 (1998) アカウミガメの孵化と性決定におよぼす産卵場温度環境の影響とその地域特性に関する研究. 京都大学農学系博士論文. <http://hdl.handle.net/2433/182419>, 2025年3月11日確認
- Matsuzawa Y, Sato K, Sakamoto W, Bjørndal K (2002) Seasonal fluctuations in sand temperature: effects on the incubation period and mortality of loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) pre-emergent hatchlings in Minabe, Japan. Marine Biology, 140:639-646. <https://doi.org/10.1007/s00227-001-0724-2>
- Maurer AS, Seminoff JA, Layman CA, Stapleton SP, Godfrey MH, Burford Reiskind MO (2021) Population viability of sea turtles in the context of global warming. Bioscience, 71:790-804. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab028>
- Mrosovsky N, Kamel S, Rees AF, Margaritoulis D (2002) Pivotal temperature for loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from Kyparissia Bay, Greece. Canadian Journal of Zoology, 80:2118-2124. <https://doi.org/10.1139/z02-204>
- NASA (2023) Sea Level Projection Tool - NASA Sea Level Change Portal. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>, 2024年1月22日確認
- 日本ウミガメ協議会 (2009) 産卵地について. 日本ウミガメ協議会ホームページ. https://www.umigame.org/umigamenitsuite/cn10/kyoukasho_sanranti.html, 2024年2月23日確認
- Okuyama J, Ishii H, Tanizaki S, Suzuki T, Abe O, Nishizawa H, Yano A, Tsujimura M, Ishigaki T, Ishigaki T, Kobayashi M, Yanagida H (2020) Quarter-century (1993–2018) nesting trends in the peripheral populations of three sea turtle species at Ishigakijima island, Japan. Chelonian Conservation and Biology, 19:101-110. <https://doi.org/10.2744/CCB-1428.1>
- 大富 将範, 大牟田 一美, 西 隆一郎 (2001) ウミガメ保護に関する海岸工学的考察. 海岸工学論文集, 48:1201-1205. <https://doi.org/10.2208/proce1989.48.1201>
- Rasband WS (1997–2018) ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. <https://imagej.net/ij/>, 2024年2月16日確認
- Rivas ML, Spínola M, Arrieta H, Faife-Cabrera M (2018) Effect of extreme climatic events resulting in prolonged precipitation on the reproductive output of sea turtles. Animal Conservation, 21:387-395. <https://doi.org/10.1111/acv.12404>
- R Core Team (2023) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria
- Salmon M (2003) Artificial night lighting and sea turtles. Biologist (London, England), 50:163-168
- Sella KAN, Fuentes MMPB (2019) Exposure of marine turtle nesting grounds to coastal modifications: Implications for management. Ocean and Coastal Management, 169:182-190. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.011>
- Silva E, Marco A, da Graça J, Pérez H, Abella E, Patino-Martinez J, Martins S, Almeida C (2017) Light pollution affects nesting behavior of loggerhead turtles and predation risk of nests and hatchlings. Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology, 173:240-249. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.06.006>
- Sousa-Guedes D, Campos JC, Bessa F, Lasala JA, Marco A, Sillero N; Flora Fauna y Cultura de Mexico (2025) The effects of warming on loggerhead turtle nesting counts. The Journal of Animal Ecology, 94:566-581. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.14242>
- Tanner CE, Marco A, Martins S, Abella-Perez E, Hawkes LA (2019) Highly feminised sex ratio estimations for the world's third largest nesting aggregation of the loggerhead sea turtle. Marine Ecology Progress Series, 621:209-219. <https://doi.org/10.3354/meps12963>
- 徳永 幸太郎 (2020) アクアワールド茨城県大洗水族館のウミガメ類産卵・漂着調査. マリンタートル (日本ウミガメ協議会機関誌), 29:7-8
- 有働 恵子, 武田 百合子 (2014) 海面上昇による全国の砂浜消失将来予測における不確実性評価. 土木学会論文集G (環境), 70:I_101-I_110. https://doi.org/10.2208/jscej.70.I_101
- 上野 久 (1996) ミティゲーションを導入した沿岸域管理の実現化に向けての検討. リバーフロント研究所 研究所報告, 7:36-44
- Varela MR, Patricio AR, Anderson K, Broderick AC, DeBell L, Hawkes LA, Tilley D, Snape RTE, Westoby MJ, Godley BJ (2018) Assessing climate change associated sea-level rise impacts on sea turtle nesting beaches using drones, photogrammetry and a novel GPS system. Global Change Biology, 25:753-762. <https://doi.org/10.1111/gcb.14526>
- 和田 真央子, 藤本 竜平, 大山 淳也, 小林 翔平, 熊澤 佳範, 齊藤 知己 (2017) 高知県仁淀川河口浜 (新居・仁ノ海岸) におけるアカウミガメの産卵生態および産卵場所の砂の粒径について. 黒潮圏科学, 10:136-147
- Wallace BP, Kot CY, DiMatteo AD, Lee T, Crowder LB, Lewison RL (2013) Impacts of fisheries bycatch on marine turtle populations worldwide: toward conservation and research priorities. Ecosphere, 4:40. <https://doi.org/10.1890/ES12-00388.1>
- 渡辺 国広, 清野 聡子, 宇多 高明, 山本 明男 (2003) 海浜におけるウミガメ類の孵化に影響する砂中温度の分布と特性. 海洋開発論文集, 19:403-408. <https://doi.org/10.2208/prooe.19.403>
- Witherington BE (1992) Behavioral responses of nesting sea turtles to artificial lighting. Herpetologica, 48:31-39
- WMO (2023) Provisional State of the Global Climate 2023. WMO, Genève
- Yntema CL, Mrosovsky N (1980) Sexual differentiation in hatchling loggerheads (*Caretta caretta*) incubated at different controlled temperatures. Herpetologica, 36:33-36

付 録

付録1. 調査を行った砂浜の規模、地形、および植生帯の概略図。左：平面図、右：断面図。12の調査地点の特徴をもとに代表的なイメージ図を作成した。

Appendix 1. Schematic illustration of a typical sandy beach used in this study, indicating the beach extent, geomorphology, and vegetated zones. Left: top view. Right: vertical section.

付録2. 調査地点の砂浜における深度0 cmと40 cmの粒度組成の比較。四倉海岸の値を事例として作成した。

Appendix 2. Sand particle size distribution (depths: 0 and 40 cm) at Yotsukura Beach.

付録3. 調査地点の砂浜における人為的影響の事例。左上：植生の踏圧（四倉海岸）、右上：蛇籠の設置（一宮海岸）、左下：人工灯（河原子海岸）、右下：車両の進入（大竹海岸）。

Appendix 3. Examples of human impacts at four sandy beaches. Top left: vegetation trampling at Yotsukura Beach. Top right: gabions installed at Ichinomiya Beach. Bottom left: artificial lights at Kwarago Beach. Bottom right: vehicle access at Otake Beach.

付録4. 北限域と高知県との砂浜の規模の比較。上：奥行、中：幅、下：傾斜。北限域は本研究で得られたデータより作成した。高知県の値は、小林ほか（2019）による平均値、最大値、最小値より作成した。上の横線が最大値、下の横線が最小値、×印が平均値を示

す。北限域の箱ひげ図は、上の横線から順に第三四分位数、中央値、第一四分位数を示す。

Appendix 4. Width (top) and length (middle) measurements and slopes (bottom) of sandy beaches in our study sites and at other sites in Kochi Prefecture. Data for the northern limit of the breeding range were obtained in this study. Plots for Kochi Prefecture include mean, maximum, and minimum values reported by Kobayashi et al. (2019). Whiskers indicate the maximum and minimum values, “×” indicates the mean, and the box indicates the third quartile, median, and first quartile, respectively, starting from the top line.

付録5. 温度ロガーを設置した9地点の砂浜で復元した砂中温度について、砂中温度の推移傾向の解析結果と、それに基づいて予測した子ガメの一次性比の全地点平均値の推移傾向の解析結果。推移傾向の解析には式7を用いた。一次性比の予測には、Tanner et al. (2019) によるメス比の推定式（式(5)）を用いた。

Appendix 5. Sand temperature trend analysis results for nine sandy beaches in which a temperature logger was installed, and predicted average primary sex ratios for hatchlings at these beaches, based on Equation (7) in this study and Equation (5) developed by Tanner et al. (2019), respectively.

リンクが示されていない付録は本文のオンラインサイトに掲載。

<https://doi.org/10.18960/hozen.2511>