

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

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SANDY BEACH AFFECTING HATCHING
OF LOGGERHEAD TURTLE *CARETTA CARETTA*

渡辺国広¹・清野聡子²・宇多高明³・山本明男⁴

Kunihiro WATANABE, Satoquo SEINO, Takaaki UDA and Akio YAMAMOTO

¹学生会員 学術修 東京大学大学院農学生命科学研究科 海洋研究所行動生態計測分野
(〒164-8639 東京都中野区南台1-15-1)

²正会員 工博 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科
(〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1)

³正会員 工博 (財) 土木研究センター審議役なぎさ総合研究室長
(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

⁴カメハメハ王国(〒421-0523 静岡県榛原郡相良町波津508-3)

Temperature distributions were measured at the Susuki coast in Shizuoka Prefecture and the Kamoda coast in Tokushima Prefecture in order to investigate the relation between temperature in the sandy beach and hatching success of loggerhead turtle *Caretta caretta*. Temperature in 50cm depth was positively correlated with beach profile and the correlation rate depended on the condition of vegetation. Hatching success was low in nests located at the upper part of the beach. High sand temperature might cause high mortality of eggs.

Key Words : *Loggerhead turtle, sandy beach, temperature, hatching*

1. はじめに

近年, 自然環境に配慮した海岸管理の重要性が高まり, ウミガメ類は健全な砂浜環境のシンボルとして, エココストを始めとした海岸事業において保全の対象とされることが多くなった。ウミガメ類の再生産の場としての砂浜では, 上陸・産卵が果たせるだけでなく, 幼体の孵化・降海までもが達成できることが求められる。土木の分野では, これまで筆者らを始めとして上陸・産卵に焦点を絞った保全策について数件の研究がなされ, 加藤・鳥居¹⁾に整理されているように配慮事項に関する知見は次第に集積されつつある。一方で孵化・降海の局面についてはほとんど検討がなされておらず, 配慮事項には組み込まれていないのが現状である。

ウミガメ類の孵化については, 個体数を増やすために孵化幼体のある期間飼育してから放流するヘッドスターティングや養殖の必要性から, 主に水産の分野で研究が行われ, 人工孵化場というコントロールされた環境下での配慮事項については多くの知見

が蓄積されてきた。しかし, 最近では人工孵化による弊害が指摘されるようになり, 保全活動では人工孵化場で孵化率のみを追及する手法から, 自然環境下での孵化を目指す方向へとシフトしてきた。また, 土木の分野では, 単にウミガメ類のみを保全することが目的ではなく, シンボル性の高いウミガメを切り口に, 砂浜の物理環境や砂浜生態系に対する理解を深め, 砂浜全体としての自然環境の保全に繋げていくことこそが目的とされる。



図-1 調査海岸の位置

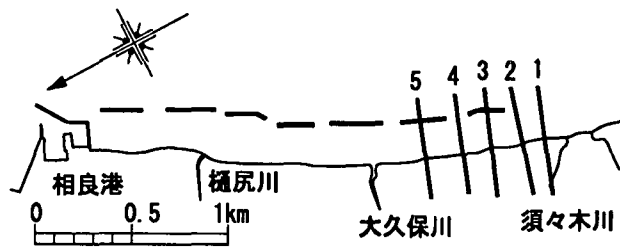


図-2 須々木海岸測線配置図

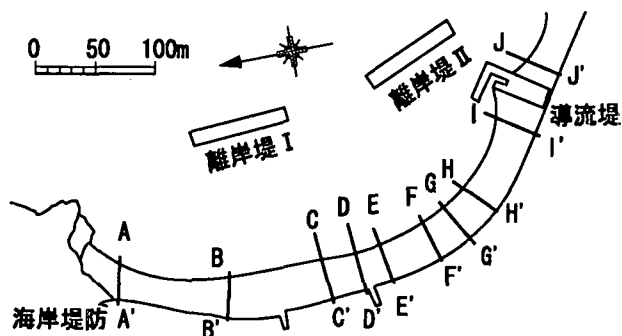


図-3 蒲生田海岸測線配置図

このように、現実の砂浜においてどのような場所でもどのような環境特性が実現されており、そのことがウミガメ類をはじめとする生物にとっていかなる意味を持つのか、砂浜という「場」についての研究が重要となってきた。そこで本研究では、主に砂中の温度環境に着目し砂浜内での砂中温度分布を明らかにし、その影響要因を検討、実際の孵化データとの関係性について議論する。

2. 方法

静岡県相良町の須々木海岸および徳島県阿南市の蒲生田海岸を調査地として選定した(図-1)。須々木海岸は海岸堤防が位置、規模的にほとんど砂浜環境に対して影響を与えない場所にあると考えられるため、自然海岸における温度環境のモデルとして選定した。一方、須々木海岸は年に数頭しかウミガメの上陸がないため、実際のウミガメ産卵・孵化に関するデータと温度環境データとを結びつけるために蒲生田海岸も調査地とした。

(1) 砂中温度測定

須々木海岸での砂中温度測定には、 $\phi 3.2 \times 500\text{mm}$ のプロブ部をもつ温度計(携帯用温度計2455 02, プロブ2459 04, 横河M&C製)を用い、図-2に示す5測線において各測線につき6~13測点で表層および深度50cmの温度測定を行った。測定は2000年7月3日、8月10日の2回実施し、各測線では同時に海浜縦断測量も実施した。測定時刻は7月3日が12:00~15:44、8月10日は10:55~14:22である。

蒲生田海岸での測定には小型メモリー式連続計測器(データロガー:MDS-CT, アレック電子製)²⁾を用い、測定間隔20分で測線E-E'(図-3)上の5点で計測を行った。岸沖方向での測点間隔は、孵化調査結果と対応させるために、St.1~5をそれぞれ堤

防基部から斜面距離で1, 2, 4, 6, 8mと須々木海岸での測点よりも密に設定した。蒲生田海岸では、この範囲で最も産卵巣が多い。計測器は30cmと60cmの2つの深度に埋設し測定した。また、St.1の深度60cmには測定期間中を通じて1基の計測器を設置し続け、比較対照データとした。気温は海岸近くの蒲生田小学校において測定した。

(2) 産卵および孵化調査

孵化調査は、最初に孵化幼体の脱出が確認されてから4日以上経過後、もしくは産卵から約70日経過後に実施した。各産卵巣の中から全ての卵、もしくは卵殻を掘り出し、そのうち卵殻のみ残り、孵化幼体が卵から出たと推測されるものを「孵化」、卵が割れていないか割れていても卵中に発生途中で死亡した胚やその痕跡が見られたものについては「未孵化」として計測した。また孵化卵数と未孵化卵数の合計を「卵数」とし、孵化率は卵数に対する孵化卵数の割合と定義した。調査は2001年7月25日~9月16日、10月14日~16日にかけて実施した。各産卵巣における死亡時期および原因を推定する目的で、未孵化の卵は全て開き胚の状態を調べた。

また、図-3に示すA-A'からJ-J'までの10測線において2001年8月28日、29日に海浜縦断測量を実施し、各産卵巣を含む断面形状は近傍の測線によって代表させ、各産卵巣において計測されている堤防基部からの距離をもとに産卵巣の標高を算出した。産卵巣が2本の測線の間付近に位置する場合には、両測線の平均値から標高を算出した。ここで言う産卵巣の標高とは、産卵巣が位置する砂浜表面の標高とするため、実際の産卵巣はここで値よりも30~60cm低い位置(砂中)にある。以下で用いている「産卵巣の標高」は砂浜表面の標高である。

3. 観測結果

(1) 砂中温度の変化

図-3のE-E'上のSt.1における2001年8月2日の温度変化を図-4に示す。一日の温度変動は、気温で6.67°Cであったのに対し、砂中は深さ30cmで2.49°C、60cmで0.34°Cであった。最高温度が記録された時刻は、気温が16時00分、深度30cmで18時50分、深度60cmで翌日の4時10分であった。日照によって表層が受けた熱が拡散により熱量を減少させつつ位相差をもって下層へも伝達されていることがわかる。

図-5はSt.3における8月29~30日の温度変化である。この日は蒲生田海岸が豪雨に見舞われた日で、深度30cmでは降雨の影響と考えられるパルスが記録されているのに対して、深度60cmでは全く記録されない。砂中が雨水などによる急激な温度変化の及ばない、安定な環境であることを示すものである。

図-6はSt.1とSt.3の温度変化である。温度変化は両測点ともほぼ同位相で起こっており、他測点でも同様であった。図-4に示したような鉛直方向での熱移動と比較すると岸沖方向での熱移動の影響は無視

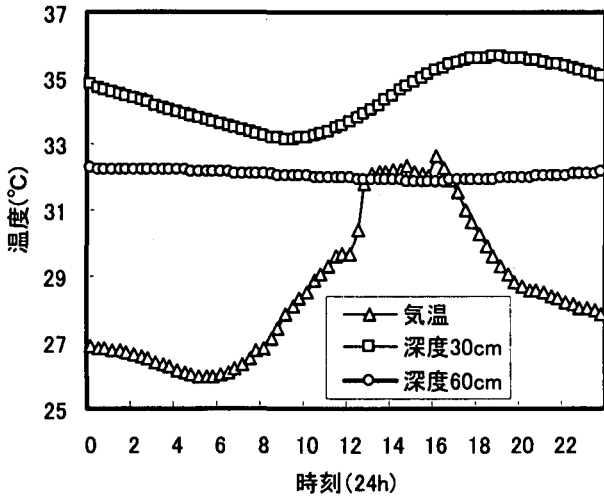


図-4 砂中温度および気温の日変化

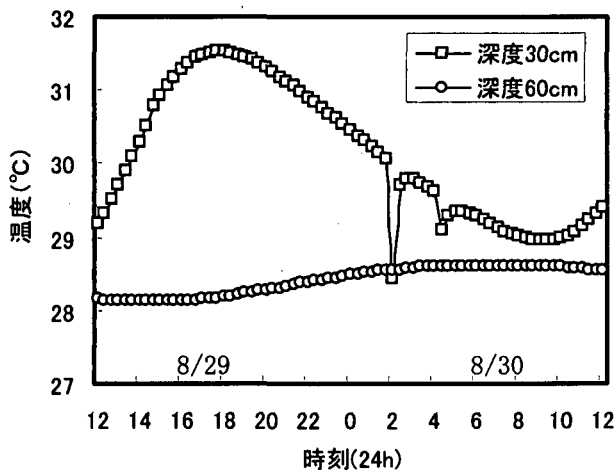


図-5 降水によるパルスの記録状況

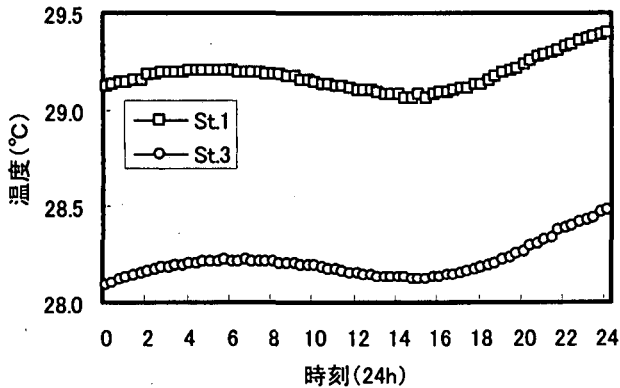


図-6 岸沖方向での温度変化の違い

できる。このことは、岸沖方向での砂中温度分布を測定する際には、同一測線上の測点についてほぼ同時刻に測定を行えば、温度変化のうちの同じ位相を捉えられることになるので、必ずしもデータロガーによる連続観測を行う必要がないことを意味する。

(2) 砂中温度の分布

須々木海岸の測線1における2000年8月10日の海浜縦断形と、深さ50cmでの砂中温度を図-7に示す。標高の高い測点では温度が高い傾向があり、緩勾配部では温度も岸沖方向に緩やかに変化し、急勾配部

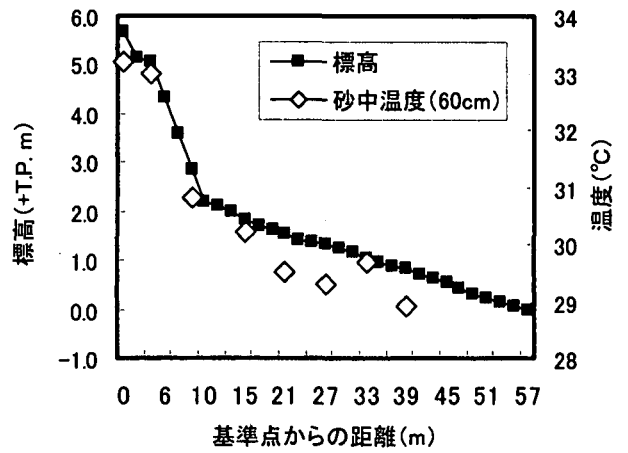


図-7 海浜縦断形と差中温度分布

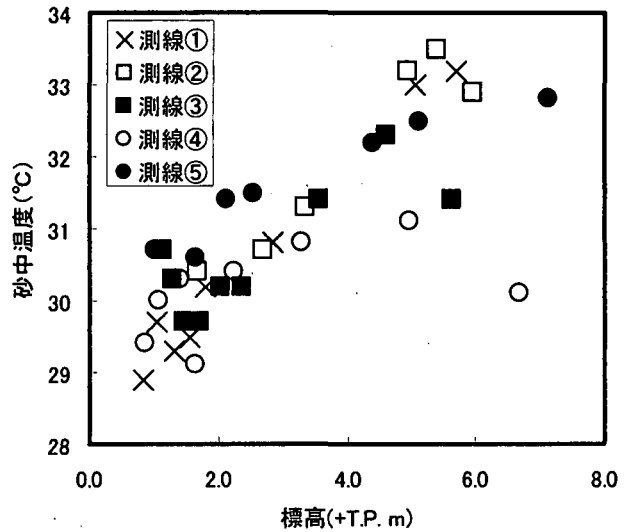


図-8 標高と砂中温度の関係

では温度変化も急となる傾向があらわれた。8月10日の結果を全5測線について標高と砂中温度の関係を見たものが図-8である。スペアマンの順位相関では両者の間に有意な正の関係が示された。 $(r_s = 0.768, n = 38, p < 0.005)$, 7月3日についても同様に有意な正の関係が認められた。 $(r_s = 0.472, n = 42, p < 0.01)$ 。

測線別に相関関係を見ると表-1のようになる。測線1, 測線5では強い相関関係が見られるが、測線4では2回とも有意な関係は得られていない。2回の測定で同様な結果が得られたことから、測線による相関の強さの違いは偶然によるものではなく、各測線の特性に起因するものと考えられる。

そこで次に各測線の定性的な特徴を見てみる。強い相関関係の見られた測線1は須々木川の河口に最も近く、海岸堤防前に河口の浚渫土砂が積み上げられ、後浜は急勾配をなしており、この測線に植生は全く存在しない(写真-1)。測線5は植生帯前線にハマヒルガオが生育し、標高が高くなるにつれて次第にオニシバとコウボウムギが優占してくる。しかし被度は低い。後浜上部にはススキが繁茂しているものの範囲は狭い。測線4は離岸堤の開口部にあた

表-1 各測線における標高と砂中温度の相関関係

| 測線 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|
| 7月3日 | r_s | 0.856 | 0.786 | 0.857 | 0.607 | 0.795 |
| | n | 13 | 8 | 7 | 7 | 7 |
| | | $p < 0.005$ | $p < 0.025$ | $p < 0.025$ | ns | $p < 0.025$ |
| 8月10日 | r_s | 0.929 | 0.829 | 0.546 | 0.595 | 0.964 |
| | n | 8 | 6 | 9 | 8 | 7 |
| | | $p < 0.005$ | ns | ns | ns | $p < 0.005$ |



写真-1 測線1の後浜状況

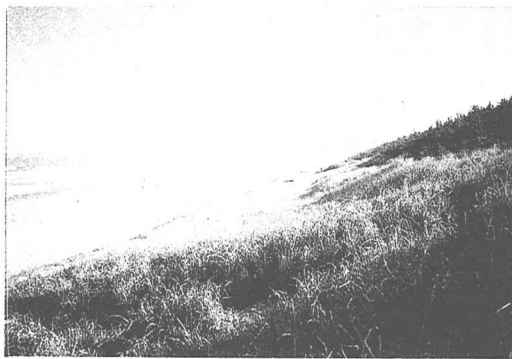


写真-2 測線4の基準点から西を望んで撮影

り、新しくないが高い浜崖が形成されている。浜崖斜面にはハマヒルガオが群生している。浜崖より背後ではハマボウフウが優占してくる。ススキが広範囲にわたって生育しており、被度も高い。写真-2は測線4の後浜上部から西を望んで撮影したものであるが、写真手前には腰丈ほどのススキが高被度で繁茂しているのに対して、測線3周辺を含む写真奥にはコウボウムギ、コウボウシバなどの草高の低い多年生の植生に後浜が覆われており、ケカモノハシがパッチ状に存在する。

(3) 砂浜における産卵巣の分布、孵化率

蒲生田海岸において孵化調査ができた産卵巣は20巣であった。産卵巣標高と孵化率との関係を示したのが図-9である。図-9で孵化率が10%に満たない3巣は、未発生卵の多くが写真-3に示すような発生の途中段階で死亡したものであった。Miller³⁾による発生段階の分類からこれらの死亡時期を推定すると、おおよそ大型で勢力の強い台風11号が来襲した8月21日付近になり、台風接近に伴う高波浪が原因となって死亡したものと推測される。台風11号が最接近

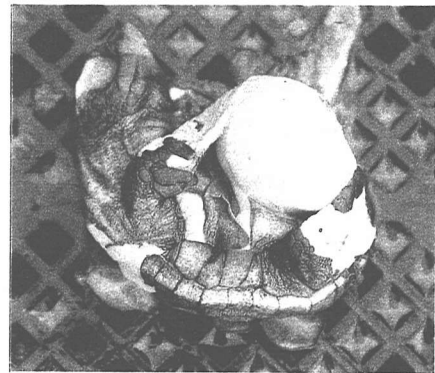


写真-3 発生途中で死亡した胚

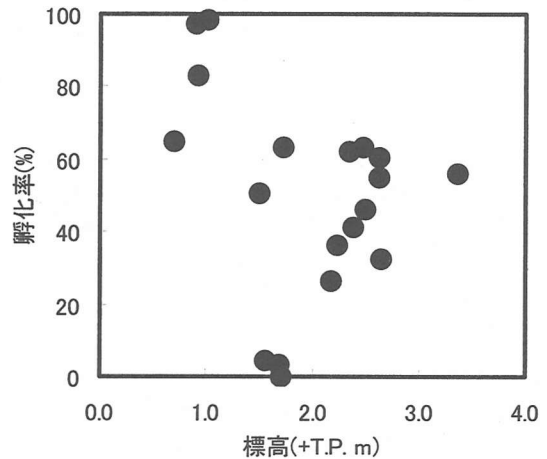


図-9 産卵巣標高と孵化率の関係

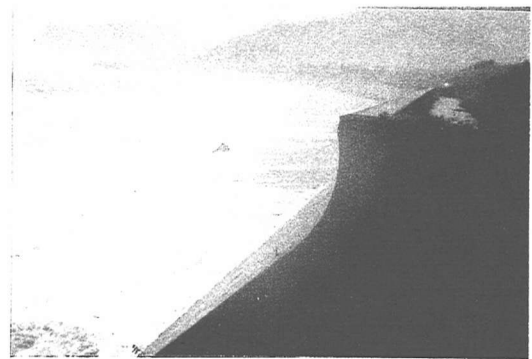


写真-4 台風11号最接近時の波の遡上状況

近した8月21日は大潮でもあったため、波高も非常に高くなり、写真-4のように砂浜のほとんどの区域においてほぼ堤防基部まで波が遡上した。このように台風11号の接近は相当大きなインパクトとして影響していることが推測される。上記の死亡原因が明らかでない3巣を除外すると、産卵巣標高と孵化率との間には有意な負の相関が見て取れる。 $(r_s = -0.506, n = 16, p < 0.025)$

須々木海岸での計測では、標高が高い場所ほど砂中温度が高くなる傾向が示された。蒲生田海岸でも同様の傾向があるとすれば、標高の高い産卵巣では砂中温度が高すぎたために孵化率が低下した可能性がある。実際に8月2日にはSt.1で砂中温度の日平均が32.04℃と記録されている。Yntema and

Mrosovsky⁴⁾の孵化実験では34℃以上ではほとんど孵化しなかったこと、孵化前後には胚の代謝上昇で産卵巣内の温度が巣によっては3℃以上も周囲より高くなる⁵⁾こと、8月2日以降は砂中温度がさらに高くなる事が予想されることなどを考えると高い砂中温度が死亡原因として有力である。

4. 考察

(1) 砂中温度の決定機構

本研究と同様に、標高が高いところで砂中温度が高くなる傾向があることは、伊藤⁶⁾やMrosovsky⁷⁾によっても報告されているが、高い場所、低い場所と単純に分けて測定を行ったのみである。Hays & Speakman⁸⁾は海からの距離と砂中温度との間に相関関係があることを示しているが、両者ともその要因についての議論は行われていない。縦断測定を合わせて多測点で温度を測定したのは本研究が初めてであるので、温度の決定機構について考察する。

土壌の温度は、地中に熱源がなければ、地表面の熱収支と土壌中の熱伝導によって決められる⁹⁾。蒲生田海岸のSt.1で得られた砂中温度の測定値をもとに(1)式で与えられる温度拡散率 K_1 ¹⁰⁾を計算すると、 $K_1=6.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。

$$K_1 = 6.86 \times 10^{-6} \times \frac{(z_2 - z_1)^2}{(\log_{10} R_1 - \log_{10} R_2)^2} \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

.....(1)

この値が表層から深度30cmまで一定であると仮定すれば、表層での温度の振幅差は18.2℃と算出される。つまり、砂浜表層温度の振幅差が18.2℃であるときに深度30cm、60cmでの振幅差はそれぞれ約2.5℃、0.3℃にしかならず、砂浜においては、かなりの熱量が伝導途中で拡散されることを意味する。須々木海岸で、同一測線の岸沖方向で見た場合、表層温度の差異は8月10日の結果では測線1が最も大きく18.3℃(35.8-54.1℃)、測線5で最も小さく3.8℃(46.6-50.4℃)であった。これに対し深度50cmでの温度の差異は測線1が4.3℃(28.9-33.2℃)、測線5が2.2℃(30.6-32.8℃)であり、一日の温度振幅に比べてはるかに大きい。このことから深度50cmにおいて見られた岸沖方向での温度勾配は、全てが砂表面での熱収支の違いによるとは考えにくい。

砂中温度を決定するもうひとつの要素、砂中の熱伝導について考える。土壌の熱伝導率はとくに含水量に強く依存する⁹⁾。砂中の含水量はまた、その地点での地下水位に強く依存すると考えられるが、地下水については柳嶋¹¹⁾によって砂浜では標高が高くなるにつれて標高と地下水位との差が大きくなる事が報告されている。今回は須々木海岸の地下水位についてのデータを取得していないものの、同様な傾向があると推測される。標高と地下水位との差が小さい場所では砂中の含水量が多いため、深度

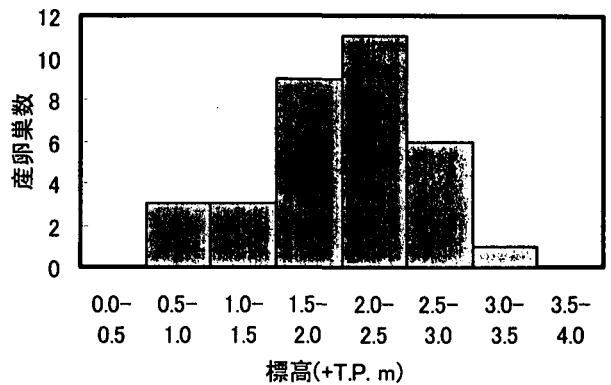


図-10 産卵巣標高の頻度分布

50cmよりも下層の熱伝導率は高くなる。表層から伝導してきた熱は高い伝導率によりすぐに下層へ伝導され、他の地点に比べて相対的に深度50cmでの温度が低くなったものと考えられる。

Hays¹²⁾は、アオウミガメの有名な産卵地であるアセンション島において深度55cmの砂中温度と砂浜表面のアルベドとの間に有意な負の相関があることを示したが、測点は全て大潮満潮線より5m上部で行っている。標高と地下水位との差が全測点でほぼ一定であったために、砂中温度の差異は砂表面での熱収支の差異のみに依存したのであろう。

本研究では、植生の全く存在しない測線において標高と砂中温度との間に正の相関が最も強く現れた。植生の存在が砂表面の被覆や影の形成により砂表面での熱収支に影響を与え、茎や根が砂中に存在することで砂中の熱伝導性を変化させることは容易に想像できる。図-8の測線4のデータで植生による影響のない低い標高においては標高と砂中温度が高い正の相関を示し、ススキなどのような植生が高被度で繁茂する高い標高部分では温度がやや低めに抑えられていることは上記のような機構により説明できる。

(2) 孵化に適した場

ウミガメは砂浜に上陸後、できる限り高いところまで上ろうとすることから、標高の高い場所ほど孵化環境としては良好であると考えやすい。ところが、本研究の結果では標高の高い場所は砂中温度が高く、蒲生田海岸では高い標高にある産卵巣ほど孵化率が低かった。温度環境のみに着目した場合、温度が高温になりすぎないある程度標高の低い場所こそが孵化の上では好適であり、高い場所まで砂浜を登ることはかえってマイナスとなる。ところが、標高の低い場所は温度環境的には好適な反面、台風などの突発的な高波浪による影響を受けやすく、今回極端に孵化率が低かった3巣のように運悪く全滅に近い状態になるリスクも合わせ持つ。ウミガメが産卵を行う時点では、卵が孵化する約2ヵ月後までの波浪状況など推測できるはずもなく、高温と高波浪の両方のリスクが等量となる標高を中心にして産卵を行うという戦略がとられるのではなかろうか。実際に岩瀬¹³⁾は八重山諸島ではアカウミガメの産卵巣の標高頻度分布はドリフトラインから120±85cmの正規分布に従うとしている。蒲生田海岸の場合は海岸堤防による上陸阻害がある¹⁴⁾ため正規分布とはならず、

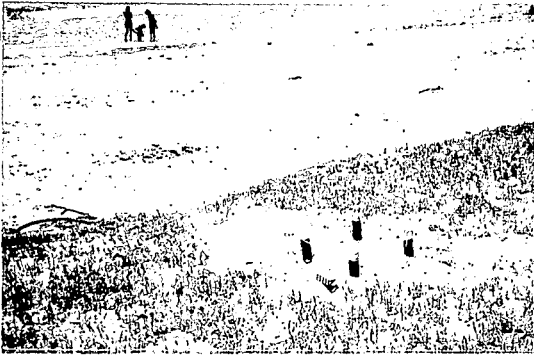


写真-5 相良海岸における産卵場所

図-10に示すように堤防基部から近いT.P. +2.0～2.5mに産卵が集中している。

このように考えると、植生帯の存在が重要となる。なぜならば、植生の存在する場所では同じ標高であっても植生がない場合に比べて砂中温度の上昇が抑えられ、高波浪に対するリスク軽減のトレードオフとして与えられる高温による死亡リスクを若干軽減させることができるからである。実際に須々木海岸では、浜崖や急勾配により遡上が妨げられない限り、写真-5に示すような植生帯前線部のハマヒルガオ～オニシバが群生する場所に産卵する傾向が見られる。植生帯が存在している事実は、そこが絶えず波浪の作用を受けない場所であること、また地下水が常時湧出している場所でもないことを間接的に意味する。また海岸線付近にある植生帯は必ず海風による飛砂をトラップし、同時に海岸植生は深く根を張ることから、そこに細砂がかなり厚く堆積していることを意味し、植生の存在により孵化までに卵が経験するであろう砂中の物理環境を推測することができる。上陸するウミガメはこれらのことを経験的に知ったうえで産卵場所を選択しているのかもしれない。

孵化率に影響を及ぼす環境要素はもちろん砂中温度だけでなく、例えば酸素分圧¹⁵⁾や含水量¹⁶⁾なども知られている。これらの物理環境も岸沖方向に標高に依存した分布を示していることが予想され、その総合的な結果として今回のような標高に依存した孵化率の傾向が現れたものと考えられるが、本研究では測定を行っていない。今回は基本的傾向を把握したことに意義があり、複数の要素を含めたより詳細な検討については今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究で得られた主な知見は以下の通りである。

- ①砂中深度50cmの温度には標高と正の相関がみられ、その傾向は植生の存在しない測線で強かった。
- ②標高の高い産卵巣では孵化率が低くなる傾向がみられた。

謝辞：須々木海岸での調査の際には堀口瑞穂氏、増田茂夫氏、相良町観光協会の絹村氏およびNPO法

人カメハメハ王国国民の皆さまに、蒲生田海岸での現地調査の際には井口利枝子氏、岡本増夫氏、鎌田武氏、新居順子氏に特にお世話になった。なお本研究を進めるに際しては、(財)日本科学協会の笹川科学研究助成から研究助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤史訓, 鳥居謙一: ウミガメに配慮した海岸づくりの検討, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 539-543, 2002.
- 2) 清野聡子, 前田耕作, 宇多高明: 埋設データロガーによるカプトガニ産卵地および幼生生息地の温度・塩分環境の計測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1216-1220, 2000.
- 3) Miller, J.D.: Embryology of marine turtles, In C.Gans et al. eds. *Biology of the Reptilia*, Vol.14, pp.269-328, 1985.
- 4) Yntema, C.L. and Mrosovsky, N.: Sexual differentiation in hatchling loggerheads (*Caretta caretta*) incubated at different controlled temperatures, *Herpetologica*, 36(1), pp.33-36, 1980.
- 5) Matsuzawa, Y., Sato, K. and Bjorndal, K.A.: 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, pp.639-646, 2002.
- 6) 伊藤立則: 砂のすまの生き物たち-間隙生物学入門-, 海鳴社, 241p. 1985.
- 7) Mrosovsky, N., Lavin, C. and Godfrey, M.H.: Thermal effects of condominiums on a turtle beach in Florida, *Biological Conservation*, 74, pp.151-156, 1995.
- 8) Hays, G.C. and Speakman, J.R.: Nest placement by loggerhead turtles, *Caretta caretta*, *Animal Behavior*, 45, pp.47-53, 1993.
- 9) 中野政詩, 宮崎 毅, 塩沢 昌, 西村 拓: 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, 236p, 1995.
- 10) 朴 鐘和, 中山哲蔵, 瀬口昌洋: 干潟底生生物の生息環境に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1161-1165, 1997.
- 11) 柳嶋慎一, 加藤一正, 福田真人: 現地海岸における前浜地下水水位の変動特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 411-415. 1993.
- 12) Hays, G.C., Adams, C.R., Mortimer, J.A., Speakman, J.R.: Inter- and intra- beach thermal variation for green turtle nests on Ascension Island, South Atlantic, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 75, pp.405-411, 1995.
- 13) 岩瀬文人, 亀崎直樹, 相原正尚, 御前洋: 八重山諸島におけるウミガメ類の産卵と砂浜の微環境, 八重山諸島における海洋動物繁殖地等の保全対策検討調査報告書, 環境庁自然保護局西表国立公園管理事務所, pp. 70-83, 1992.
- 14) 渡辺国広, 清野聡子, 宇多高明: ウミガメ産卵地の人為改変パターンの類型化と配慮すべき事項, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 545-550, 2002.
- 15) Ackerman, R.A.: Growth and gas exchange of embryonic sea turtles (*Chelonia*, *Caretta*), *Copeia*, 4, pp.757-765, 1981.
- 16) Mortimer J.A.: The influence of beach sand characteristics on the nesting behavior and clutch survival of green turtle (*Chelonia mydas*), *Copeia*, pp.802-817, 1990.