アカウミガメのふ化・脱出に及ぼす海浜砂中温度の影響

Influence of Sand Temperature of Sandy Beach on Incubation and Emergence of Loggerhead Sea Turtle (*Caretta caretta*)

今村和志¹・加藤 茂²・田中輝彦³

Kazuyuki IMAMURA, Shigeru KATO and Teruhiko TANAKA

Field measurement was conducted at the Omotemaha Coast from 2008 to 2010 to grasp the influence of sand temperature affecting hatching and emergence success of loggerhead sea turtles. From the results of the nest depth measurement, it was found that the thickness of the egg cabin was relatively uniform despite the depth of nest. Negative significant correlation was found between high sand temperature (> 32 degrees Celsius) and emergence success on relocated nests. However there was no significant correlation between low sand temperature (< 24 degrees Celsius) and emergence success. Long-term exposure under the high sand temperature condition affects to emergence success.

1. はじめに

海と陸が接するエコトーンとして、砂浜は多様な動植物に生育・生息空間を提供している。これまで港湾整備や高潮・津波対策等の沿岸域の人工化が進み、自然海浜の規模が縮小したことから、近年では、エココスト事業など自然環境との調和を図る取組が各地で実施されてきた。

愛知県と静岡県に跨る遠州灘のうち、浜名湖今切口から伊良湖岬までは表浜(図-1)と呼ばれ、同海岸の豊橋市小島町でもアカウミガメ(*Caretta caretta*)を保全対象種としたエココスト事業が実施された。この事業は親ガメが上陸・産卵するまでを対象としたものであるが、卵がふ化し、子ガメが無事帰海できて初めて砂浜の生物的環境機能の保全が達成されたと言える。我が国において、ウミガメの上陸・産卵を取り扱った事例は数多く、例えば加藤・鳥居(2002)によって整理されている。それと比較し、ふ化をテーマとした研究事例はMatsuzawaら(2002)や渡辺ら(2003)によるものがあるが、その事例数は限られている。今後、海岸事業において自然再生をテーマとした取組が実施される際、適切な砂浜環境の保全・再生には、対象とする動植物に関する知見が不可欠であり、それらの情報を詳細設計にフィードバックする必要がある。アカウミガメは砂浜環境の指標種として取り上げられることが多いことから、本種の生態学的な知見の集積は重要である。ウミガメの性決定やふ化・脱出率は産卵巣内の砂中温度に左右されることから、本研究では、表浜におけるアカウミガメの繁殖調査データ

図-1 遠州灘(表浜)および調査対象地点

を基に、砂中温度と子ガメがふ化し巣穴から脱出するまでの日数やふ化・脱出率との関係を明らかにする。

2. ウミガメの産卵巣(卵室)の深度分布

砂中温度は地表面からの深度に依存する。ウミガメは砂浜に穴を掘って産卵するため、産卵巣内の温度環境調査には、その深度の把握が必要となる。2007年~2012年に湖西市域西部(図-1)に産卵された234例の産卵巣のうち100例(全体の42.7%)について地表から卵室までの深度を計測した。計測方法は以下の通りである。ウミガメの産卵巣の形状(図-2)は入口が狭く、中は広い壺型で、地表面から掘り進んだ先に卵がある。ここが卵室である。ウミガメが産卵後に埋め戻し終わった産卵巣を元の形状を崩さないように素手で掘る。その後、巣穴入口を跨ぐ形で砂表面に棒を渡し基準面とする。そこから垂直方向に卵室の上面までをメジャーにて計測した後、卵を全て取り出す。最後に底面深度を計測する。作業は産卵後12時間以内に実施し、卵は数量を計測した。表-1に卵室の深度について、既往の松沢ら(1995)およびHoughton・Hays(2001)の結果と併せて示した。卵室上面の平均深度は33.4cm(最小10, 最大53), 底面52.2cm(最小35, 最大67)で、上面と底面の平均値から求めた卵室厚は平均18.8cm, 中心部の平均深度は42.8cmであった。図-3に

1	修(工)	豊橋技術科学大学大学院 環境・生命工学専攻
2	正会員	博士(工学) 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系
3		カレッタ君のふる里を守る会代表

図-2 アカウミガメの産卵巣の模式図

表-1 卵室の深度(既往の結果との比較)

	場所	上面 (cm)	中心部 (cm)	底面 (cm)	卵室厚 (cm)
松沢ら (1995) n = 82	みなべ町 (千里浜)	31.6	43.0	54.4	22.8
Houghton & Hays (2001) n = 33	Greek (Kefalonia)	—	—	50.9	—
湖西市域 n = 100	湖西市 (表浜)	33.4	42.8	52.2	18.8

図-3 卵室上面および底面の深度分布

産卵巣の深度分布を示す。卵室上面と底面深度には高い相関 (Spearmanの順位相関係数 $r_s = 0.643$, $p < 0.01$) (p : 危険率) があり, これは深度によらず卵室の「厚さ」が比較的均一であることを示している。一度の産卵で産まれる卵の数 (卵塊サイズ) は 115.5 ± 21.8 個 (Mean $\pm$ SD) で, 卵室厚と卵塊サイズに相関はみられなかった。

3. 砂中温度の計測

2008年～2010年の3カ年、親ガメが産卵に訪れる5月中旬から子ガメのふ化・脱出が終息を迎える10月下旬までの期間、インターバル1時間で砂中温度を計測した。計測には温度データロガー Stowaway TidbiT v2 (Onset社製: 精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 分解能 0.02°C)を用いた。データロガーの設置深度は卵室中心部の平均深度である40cmとした。2009年は深度20cmと60cmの温度についても計測した。温度ロガーの設置地点は、2008年および2009年は豊橋市小島町の地先(以下、A地点、H.W.L.から約48m陸側)、2010年は湖西市白須賀地先(以下、B地点、H.W.L.からの距離は未計測)であり(図・1)、両地点ともコウボウムギなどの海浜植物がまばらに生え、静穏時は波が遡上しない砂丘である。深度40cmにおける温度データの計測期

表-2 砂中温度の計測期間と取得データ数

調査年	計測期間	データ数	備考
2008	5/14~10/31	4,105	
2009	5/14~10/31	4,072	8/18 ~ 9/2: 欠測 (代替データ使用) 10/9 ~ 10/10: 欠測
2010	5/26~10/31	3,816

図-4 気温と砂中温度の日変動(2009年7月16日)

図-5 深度60cmと20cmの砂中温度差(2009年5月～10月)

間および取得データ数を表-2に示す。なお、2009年8月18日～9月2日は欠測のため、別地点の同一深度にて得られたデータにて代替した。代替データの妥当性については、A地点における6月14日～8月17日までの平均砂中温度は27.1℃、代替地点は26.2℃で0.9℃の差がある程度である。砂浜は風波の影響で地形が経時的に変化し、設置深度が変化すると推測されるため、2008年5月～10月にかけてA地点にて断面測量を週約1回の頻度で実施した。計測の結果、A地点の平均標高は $3.63 \pm 0.02\text{m}$ (Mean $\pm$ SD)であった。B地点の標高は約3.3mでA地点のような連続的な測量は実施していないが、地形変化のほとんどみられない場所である。

鉛直方向における砂中温度の日周変動の典型例を図-4に示した。深度ごとの平均砂中温度は深度20cmで30.7℃、40cmで29.3℃、60cmでは28.2℃で、図からも明らかにように気温のような大きな変動はなかった。砂中温度は深度が深いほど上層よりもピーク（図中▼）は遅れて表れ、その変化量も僅かであった。図-5に卵室の上面近くの深度20cmと同底面近くの60cmの砂中温度差を示す。両者の温度差は平均0.6℃、最大8.1℃と卵室内は多様な温熱環境を有していることが分かる。図-6に2008年～2010年5月～8月における砂中温度の時系列変化および湖西市域西部（延長4.5km）のアカウミガメの産卵回数（3日間分ごと）を示した。同図より、深度40cmにお

図-6 砂中温度(深度40cm)と産卵回数の経時変化

ける最高砂中温度(図中▼)は2008年において31.6°C(7月28日午前0時に観測), 2009年は31.2°C(8月18日午前1時), 2010年は32.4°C(9月1日午後3時および9月2日午前2時)であった。なお, アカウミガメの好適なふ卵温度の範囲(25°C以上34°C未満: Yntema・Mrosovsky, 1980; 松沢, 1998)も併せて示した。ところどころにみられる急激な温度低下は主に降雨による影響である。2010年は8月~9月にかけて高い砂中温度が記録された。特に8月18日~9月8日にかけて32°C以上の砂中温度は合計149時間(最長18時間継続)に達した。これはこの期間の総時間528時間の28.2%を占める。

産卵の最盛期は6月下旬から約1ヵ月間続き, 例年8月10日以降に急速に終息する。この最盛期の開始は深度40cmにおける砂中温度が25°Cに到達した頃と重なる。

4. 砂中温度と子ガメのふ化・脱出

(1) 砂中温度と子ガメの脱出日数

Matsuzawaら(2002)は卵が産み落とされてから子ガメが巣穴を脱出するまでの期間(脱出日数)について, 卵塊と同じ深さの砂中温度の日平均から17.6°Cを差し引いた値を産卵日から積算していき, それが639.8°Cに達した頃が脱出の目安となることを現地実験から導き出した。このことは, 平均砂中温度が高ければ, 脱出日数は短くなることを意味する。脱出日数にはふ化後, 子ガメが巣穴で待機する日数も含んでおり, 産卵巣内での待機日数は4日~7日(平均5.4日, $n=7$ 巣)(Christens, 1990)と言われている。温度ロガーによって得られた深度40cmの砂中温度にどの程度の代表性があるかを検証するため, 図-7に脱出日数が分かっている卵塊群(2008~2010年, $n=88$)の脱出日数と有効積算温度(639.8°C)から推算した脱出日数を比較した。ここで, 「脱出日数」は産卵日から子ガメの脱出が最初に確認された日までの期間と定義する。Spearmanの順位相関では, 実際の脱出日数と有効積算温度による推算脱出日数に有意な正の関係($r_s=0.919$, $p<0.01$)が示された。しかし, 脱出日数が短期間である場合, 実際の脱出日数の方が短く, 脱出までの日数が長期に渡る場合は実際の脱出日数の方が長い傾向にあった。そこで, 産卵巣を移植したもの(以下, 移

植巣)と自然放置したもの(以下, 自然巣)に分けた。移植は, 獣害を避ける目的や波打ち際や水路(湧水)の近くに産卵した場合などに, 卵塊をふ化場と呼ばれる特定の場所に移す行為である。2008年~2010年における移植率は全産卵巣98巣に対して71巣(72.4%)を占める。なお, 移植巣と自然巣における子ガメの平均脱出率は前者が 62.5 ± 29.1 ($n=71$), 後者が 72.5 ± 23.0 ($n=27$)で, 移植巣の方が10%低かった。図-8に移植巣と自然巣に分類して, 実際の脱出日数と推算脱出日数の関係を比較した。移植巣の場合, 実際の脱出日数と推算脱出日数には平均で -1.2 ± 2.5 日の差がある程度で良い一致が示された。一方, 自然巣(ただし, 親ガメの後肢が欠損していることなどにより, 卵室の深度が浅い場合は底面深度が50cmになるまで掘り足した後に卵を戻した)では -3.0 ± 4.9 日と, こちらはややその差が開き, 移植巣と同様に, 実際の脱出日数の方が推算脱出日数よりも短い傾向を示した。移植先であるふ化場は卵が特定範囲に集約され, 埋設深度も人為的に画一化されることからふ卵環境が似通る。推算日数により近い結果となったと考えられる。なお, ふ化場は露地で標高は3.8m(温度ロガーの設置標高と同程度)である。一方, 自然巣は移植巣と比較して多様な環境下(標高, 植生帯, 飛砂による地形変化, 湿度等)にあるため, 推算日数との差が開いたと推測される。ウミガメ類は, ふ卵期間に経験する温度によって性別が決まる温度依存性決定を有する。雌雄比が等しくなる臨界温度(図-6)(29.7°C: Matsuzawaら, 2002)を境に, それ以上の温度ではメスに, それ以下ではオスになる(Yntema・Mrosovsky, 1980)。Hays・Speakman(1993)は, 産卵巣の位置が海から離れるほどふ化率は高まること, 砂中温度が上昇することを報告している。標高と砂中温度には正の相関があり(渡辺ら, 2003), 一般的に, ふ化場が小高い砂丘に設置されることを考えると, 移植巣の深度が自然巣の平均値程度であれば, 自然巣よりも高い砂中温度を経験すると予測され, たとえふ化率が高まったとしても, 性比がメスに偏ると考えられる。ふ化場への集約は卵が経験する温度を画一化し, 個体群の性比バランスに影響を与える可能性が高いと考えられる。

図-7 実際の脱出日数と有効積算温度による推算脱出日数

図-8 自然巣(左)と移植巣(右)における推算脱出日数と実際の脱出日数の比較

図-9 平均砂中温度(深度40cm)とふ化率

図-10 ふ化率と32℃以上の砂中温度の合計暴露時間

(2) 砂中温度とふ化率

平均砂中温度とふ化率の関係を図-9に示した。ここで、ふ化率は2008年～2010年にかけて湖西市で記録された移植巣のデータを、砂中温度は卵塊ごとの産卵日からふ化日(脱出日数から5日を差し引いた期間(待機日数を考慮))までの期間の平均値を用いた。なお、「ふ化率」は、ふ化した個体数を総卵数で除したものと定義する。分析に用いたサンプルサイズは合計60例で、その内訳は2008年20例、2009年25例、2010年15例である。平均ふ化率は2008年73.6%、2009年70.5%、2010年65.5%である。2010年は高温化の影響と考えられるふ化率の低下がみられた。同年8月18日～9月8日にかけて砂中温度が高温化し、この間の平均砂中温度は31.8℃(最高32.4℃、最低

30.7℃)であった(図-6)。8月中の平均ふ化率は72.6%($n=9$)であったのに対し、9月は54.8%($n=6$)であった。好適なふ卵温度の範囲は25℃以上34℃未満とされている。深度40cmは卵室中心部付近であり、同深度で32℃が記録されたということは、卵室の上層に位置する卵は32℃以上の砂中温度に曝されたと考えられる。図-10に移植巣15例について、産卵後からふ化までのふ卵期間(脱出日数-5日間)のうち、32℃以上の砂中温度に暴露された合計時間とふ化率との関係を示した。産卵巣が経験した32℃以上の砂中温度の合計暴露時間は平均88.5時間(最短18時間、最長167時間)に及んだ。Spearmanの順位相関分析では、合計暴露時間が増えるほどふ化率が低下する負の相関が示された($r_s = -0.601$, $p = 0.02$)。胚が34℃に達した時点ですぐ死滅するとは考え難いが、暴露時間が短い場合にも、長い場合にもふ化率の低下がみられ、合計暴露時間から単純にふ化率の高低を判断することは難しいと考えられる。そこで、ふ卵期間を初期、中期、後期に三等分し、ふ化率と各期間における32℃以上の砂中温度に曝された合計時間を比較したのが図-11である。同図より、後期に合計暴露時間が長時間に及んだNo.10からNo.14の卵塊のふ化率が低くなっていること、中期に暴露時間が長かったNo.15のふ化率が高かったことから後期に長時間高温を経験するとふ化率が低下する可能性が示された。一方、24℃以下の砂中温度を経験した移植巣($n=25$)については、合計暴露時間とふ化率の間に相関は見られなかった($r_s = -0.165$, $p = 0.432$) (図-12)。24℃以下の砂中温度が記録されたのは5月から6月初旬の間および9月下旬以降であった(図-6)。産卵シーズン初期に当たる5月～6月に産卵された卵塊は産卵直後に24℃以下の低温に暴露されるものの、ふ卵期間の中盤～後半に温度が上昇すれば、ふ化率の大きな低下は避けられるようである。2008年～2010年における24℃以下の温度に暴露された移植巣のうち、暴露時間の長い上位5巣の平均ふ化率は77.4%(平均暴露時間301.2時間)で、2008年～2010年の全移植巣の平均ふ化率68.2%よりも高い値となった。ただし、8月下旬以降など産卵シーズン後半に産卵された卵塊はふ卵期間の序盤に好適なふ卵温度内にあっても、中盤から後半にかけて24℃以下の温度に曝されると未ふ化のまま死亡することになる。

(3) 砂中温度と子ガメの脱出率

Matsuzawa (2002) は、ふ化した子ガメが巣穴から脱出する4日前から脱出までの平均砂中温度(深度50cm)が「31.6℃」を超えると脱出率が半減することを報告している。2010年の調査結果においても、ふ化後に産卵巣内で待機していたと考えられる子ガメの死亡が4巣で確認されている(表-3、平均7.3匹:最小1匹～最大21匹)。この4巣は、2010年7月21日～7月29日の間に産卵され、

図-11 ふ卵段階ごとの32℃以上累積暴露時間とふ化率

図-12 ふ化率と24℃以下の砂中温度の合計暴露時間

表-3 産卵巣内での子ガメの死亡数と砂中温度(2010)

卵塊 サンプル No.	産卵日	脱出日	死亡数	脱出前5日間の砂中 温度 (深度40cm)			31.6℃ 以上合 計時間
				平均	最高	最低	
11	7/21	9/7	21	31.8	32.3	31.5	101
12	7/27	9/13	3	30.4	31.8	29.6	12
13	7/27	9/14	4	30.2	30.7	29.6	0
14	7/29	9/12	1	30.2	30.7	29.6	0

脱出日は9月7日～9月14日の間である。卵塊サンプルNo.は図-11と対応している。ふ化から脱出までの待機期間(5日間)における平均砂中温度(深度40cm)は30.2℃～31.8℃の範囲で、最高32.3℃に達した。ふ化後子ガメは巣の上方に移動してから待機する性質がある。産卵巣内での子ガメの待機位置は地表から10～25cm(Christens, 1990, Moranら, 1999)と言われ、巣穴上層に移動することでより高い砂中温度に曝される可能性がある。O'Hara (1980)は、温度と子ガメの遊泳速度に関する実験から、30℃以上の高温条件下で子ガメの活性が低下することを報告している。これらを総合的に勘案すると、巣穴上層で待機中に砂中温度が上昇し、活性が低下したことにより脱出できず、そのまま熱死したと推察される。死亡個体数が最も多かったNo.11の卵塊において、子ガメが待機中に経験したと推測される31.6℃の砂中温度(深度40cm)は、101時間に達し、砂表面まで移動した個体群および卵室上層付近の個体群が死亡したものと考えられる。No.12～No.14の卵塊については暴露時間が短いことから、砂表面付近で待機していた個体群が死亡したと推察される。

5. おわりに

海浜砂中温度がアカウミガメの脱出日数やふ化・脱出

率に及ぼす影響について現地調査から明らかにした。本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- ・アカウミガメの産卵巣卵室の平均深度は上面33.4cm、底面52.2cmで、卵室厚は比較的均一である。
- ・産卵巣を移植する際、ふ化場など一定の範囲に集約すると標高および埋設深度が似通ることになるため、卵が経験する砂中温度が画一化されることから、自然界で保たれてきた雌雄比のバランスを崩す可能性がある。
- ・ふ卵期間の後期に32℃以上の砂中温度に長時間曝されるとふ化率の低下を招く可能性が高い。
- ・ふ卵期間の初期に24℃以下の砂中温度を経験した場合、中盤～後半にかけて砂中温度が上昇すればふ化率の低下は避けられる。
- ・産卵巣内は上層から底層にかけて多様な温熱分布を有しており、この巣内の多様な温熱環境を利用してウミガメ類はこれまで存続してきたと考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたって、西野和俊氏には調査への協力など多大な支援を賜った。ここに謝意を表す。

参考文献

- 加藤史訓・鳥居謙一 (2002)：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。
- 松沢慶将・坂東武治・坂本 亘 (1995)：南部町千里浜海岸におけるアカウミガメ産卵巣の深度分布と深度ごとの砂中温度，うみがめニュースレター，No.26，pp.3-7。
- 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，京都大学博士論文，82p。
- 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，第19巻，pp.403-408。
- Christens, E (1990): Nest emergence lag in loggerhead sea turtles, *Journal of Herpetology*, Vol.24, pp.400-402。
- Hays, G.C. and J. R. Speakman (1993): Nest placement by loggerhead turtles, *Caretta caretta*, *Animal Behaviour*, Vol.45, pp.47-53。
- Houghton, J.D.R. and G.C. Hays, (2001): Asynchronous emergence by loggerhead turtle (*Caretta caretta*) hatchlings, *Naturwissenschaften*, Vol.88, No.3, PP133-6。
- Matsuzawa, Y., K. Sato, W. Sakamoto and K. Bjorndal (2002): Seasonal fluctuation in sand temperature: effects on the incubation period and mortality of loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) pre-emergent hatchlings in Minabe Japan, *Marine Biology*, Vol.140, issue3, pp.639-646。
- Moran, K. L., K. A. Bjorndal and A. B. Bolten (1999): Effects of the thermal environment on the temporal pattern of emergence of hatchling loggerhead turtles *Caretta caretta*, *J. Mar Ecol Prog Ser*, Vol.189, pp.251-261。
- O'Hara, J. (1980): Thermal influences on the swimming speed of Loggerhead turtle hatchlings, *Copeia*, No.4, pp. 773-780。
- Yntema, C. L. and N. Mrosovsky (1980): Sexual differentiation in hatchling loggerheads (*Caretta caretta*) incubated at different controlled temperatures, *Herpetologica*, Vol. 36, No.1, pp.33-36。