

日本産アカウミガメの遺伝子流動と
回遊生態に関する研究

2006

東京大学大学院 農学生命科学研究科 水圏生物学専攻

渡邊国広

指導教員 東京大学海洋研究所 塚本勝巳

目次

第1章 緒言	1
第1節 ウミガメ類の進化、生活史、分布	1
第1項 ウミガメとヒト	1
第2項 ウミガメ類の進化	1
第3項 ウミガメ類の生活史	2
第4項 アカウミガメの産卵場の分布	6
第2節 研究の目的	8
第3節 用語の定義	11
第2章 産卵生態	11
第1節 背景と目的	11
第2節 方法	14
第1項 調査地	14
第2項 産卵調査	14
第3項 孵化調査	16
第3節 結果	21
第1項 上陸・産卵状況	21
第2項 標識再捕	21
第3項 孵化幼体の形態	21
第4項 自然孵化状況	27
第4節 考察	27
第1項 上陸・産卵個体	27
第2項 産卵浜変更	30
第3項 孵化状況	34
第4項 孵化幼体の形態	35
第5項 蒲生田海岸における上陸数の減少要因	35
第3章 初期分散	38
第1節 背景と目的	38
第2節 材料と方法	40
第1項 材料	40
第2項 方位選択実験	43
第3項 トラッキング	45
第3節 結果	49
第1項 方位選択実験	49
第2項 トラッキング	49
第4節 考察	58
第1項 実験条件下におけるオリエンテーション	58
第2項 野外における分散過程	63
第3項 初期分散機構	73
第4章 マイクロサテライトによる母性解析	77

第1節	背景と目的	77
第1項	背景	77
第2項	マイクロサテライトマーカーの利用	78
第3項	母性解析	79
第2節	材料と方法	80
第1項	マイクロサテライトマーカーの特性	80
第2項	母性解析	85
第3節	結果	93
第1項	マイクロサテライトマーカーの特性	93
第2項	母性解析	106
第4節	考察	113
第1項	マイクロサテライトマーカーの特性	113
第2項	母性解析	123
第5章	産卵浜内の集団構造	127
第1節	背景と目的	127
第2節	材料と方法	127
第1項	産卵雌のグループ分け	127
第2項	核 DNA マイクロサテライトの解析	128
第3項	分集団構造の検討	128
第3節	結果	129
第1項	産卵雌のグループ分け	129
第2項	遺伝的差異	129
第3項	分集団数の推定	129
第4節	考察	134
第1項	産卵浜内の集団構造	134
第2項	摂餌域利用グループ間の遺伝子流動	134
第3項	ウミガメにおける生活史二型の意義	135
第6章	日本産アカウミガメの集団構造	136
第1節	背景と目的	136
第2節	材料と方法	139
第1項	ミトコンドリア DNA の集団構造	139
第2項	核 DNA の集団構造	142
第3節	結果	144
第1項	ミトコンドリア DNA の集団構造	144
第2項	核 DNA の集団構造	150
第4節	考察	156
第1項	ミトコンドリア DNA による集団構造	156
第2項	Hardy-Weinberg 平衡からのズレ	170
第3項	核 DNA による集団構造	170
第4項	ミトコンドリア DNA と核 DNA で見られた集団構造の違い	171
第7章	総合考察	175
第1節	日本産アカウミガメの集団構造	175
第2節	母浜回帰性	176
第1項	ウミガメの母浜回帰性に関する研究	176

第2項	日本産アカウミガメの母浜回帰性	178
第3項	ウミガメ類における母浜回帰性の進化	183
第3節	遺伝的多様性	186
第4節	ウミガメ類の進化	189
第1項	海洋への進出	189
第2項	大回遊の獲得	189
第3項	分布域の拡大	190
第5節	ウミガメの保全	190
第6節	今後の課題	193
謝辞		194
引用文献		198
要旨		200
付属資料		224

第1章 緒言

第1節 ウミガメ類の進化、生活史、分布

第1項 ウミガメとヒト

「水の江の浦島の子といふ者…ひとり小船に乗りて海中にうかび出でて釣するに、三日三夜を終わるも、一つの魚だに得ずすなはち五色の亀を得たり。」丹後国風土記に登場する浦島の物語の一節である。日本人にとっての“ウミガメ”とは、まず、この「浦島太郎」である。ウミガメという動物は日本人の精神文化に深く根を下ろしている。夏になれば必ずウミガメの産卵の話題が新聞誌上を賑わす。漁師は網にウミガメが入ると酒を飲ませて放流する。海と海の生き物の代表としてウミガメを敬い、海の安全と豊漁を祈願するのである。また、ポリネシアやミクロネシアの人々はウミガメを伝統的に食用に供している。彼らはウミガメを食す際の禁忌や儀礼をもち、ウミガメに対する畏敬の念を決して忘れることがないという。

このようなヒトがウミガメに対して特別な感情を抱くのは、その特異な産卵行動や悠然とした遊泳行動、産卵場所に対する回帰性など、ウミガメ特有の行動や生態と無縁ではない。本論文ではウミガメの生物学の一端を解明し、われわれヒトがより深くウミガメを理解する助けとしたい。

第2項 ウミガメ類の進化

ウミガメ類はその進化の歴史も独特である。約2億年前の三畳紀後期には既に最古の化石カメ類であるプロガノケリス (*Proganochelys*) が地球上に生息していた (疋田

2002)。このカメ目の生き物が海へ進出し、ウミガメへ進化の道をたどり始めたのは、今から約 1 億年前、中生代白亜紀のことである。陸には巨大な恐竜が歩き、海にはまだアンモナイトが生息していた時代といわれる（亀崎 2003a）。白亜紀には 4 科のウミガメ類が生息していたことが知られる。現生するオサガメ科 *Dermochelyidae* とウミガメ科 *Cheloniidae* はこの時点で既に出現していた（Bowen 2003）。つまり、オサガメ *Dermochelys coriacea* と他の現生ウミガメ類とは既に約 1 億年前には分岐していたことになる。

分子系統解析の結果によれば、現在地球上でウミガメ類の代表格ともなっているアカウミガメ *Caretta caretta* とアオウミガメ *Chelonia mydas* が分岐したのは約 5,000 万年前といわれている（Bowen 2003）。これはウナギ属 *Anguilla* がはじめて地球上に姿を現わした年代とほぼ一致する（Minegishi et al. 2005）。最も分岐の新しいヒメウミガメ属 *Lepidochelys* でさえ、中新世中期（約 1,000 万年前）にはすでにアカウミガメ属 *Caretta* から分岐している（Bowen 2003）。このように現生のウミガメ類は長い分岐の歴史をたどってきたにも関わらず、その形態は保守的でほとんど変更されていない。これは現在生息しているアカウミガメ、アオウミガメ、タイマイ *Eretmochelys imbricata*、ヒメウミガメ *Lepidochelys olivacea* の化石がフロリダ州の 500 万年前の地層から出土していることから明らかである（亀崎 2003a）。5,000 万年前に分岐したアカウミガメとアオウミガメの間に野生下で種間交雑が起こる事実もウミガメ類の保守性を如実に示したものと見える（Karl et al. 1995, 亀崎ほか 1996）。

第3項 ウミガメ類の生活史

ウミガメ類の生活史は種により多少の違いはあるが、おおむね似通っており、それは各成長段階に応じておこなわれる回遊行動によって特徴づけられる。Bolten(2003)は大西洋の個体群で最新の生活史の模式図を示している。しかしこれは詳細すぎるうえ、必ずしも全ての個体群に当てはまるものではないため、ここでは Musick and Limpus(1997)によって示されたものを使用する（Fig. 1.1）。

ウミガメ類は砂浜（Nesting Habitat）から孵化したあと海へ降り、沿岸域から外洋への初期分散（Hatchling Dispersal）を経て外洋域（Juvenile Nursery Habitat）で浮遊生活を始める。外洋である程度まで成長すると、生活の場を浅海域（Juvenile Developmental Habitat）へ移して生活様式を浮遊型から定着型へと変更する。浅海の豊富な餌資源を利用することで更なる成長を遂げると、今度は成体の摂餌海域（Adult

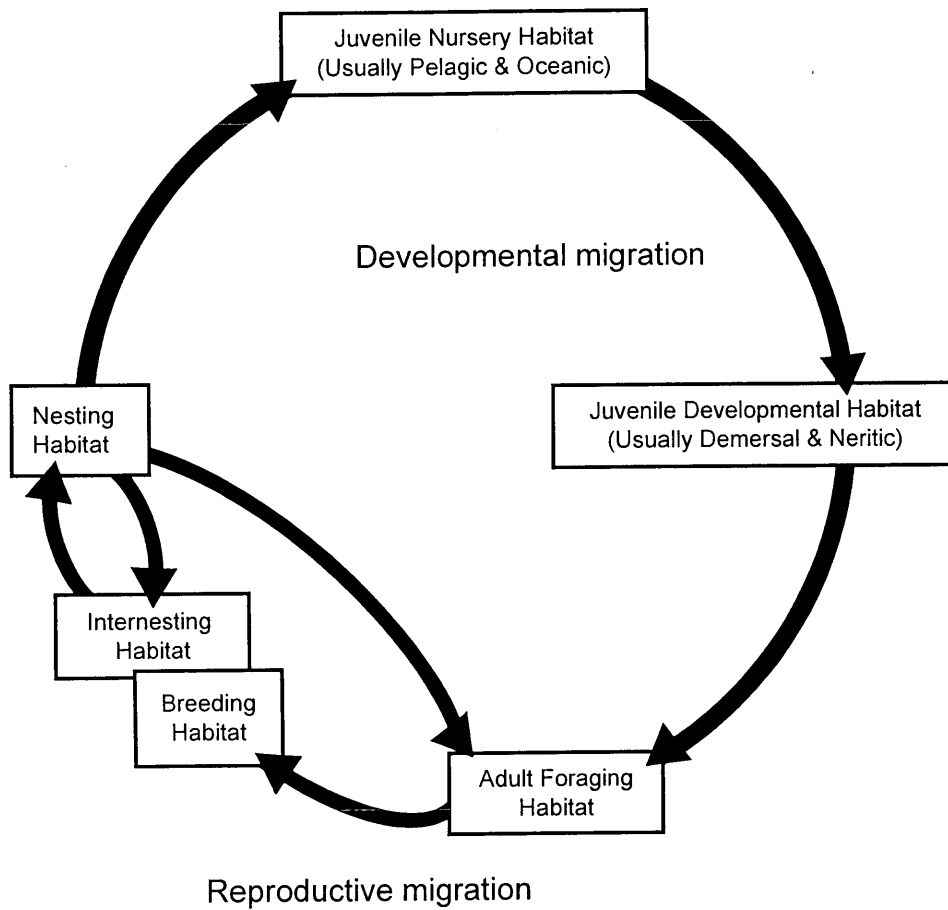


Fig. 1.1. Conceptual model of ontogenetic habitat stages and migrations in sea turtles. (by Musick and Limpus (1997)).

Foraging Habitat) に加入して更に成熟まで成長を続ける。この外洋における浮遊生活から成体の摂餌域に加入するまでの間の回遊は成長回遊 (Developmental migration) と呼ばれ、日本産アカウミガメでは太平洋を横断するほどの大規模なものとなる (Uchida and Teruya 1991, Bowen et al. 1995, Resendiz et al. 1998)。成熟に達した個体は繁殖シーズンになると繁殖場 (Breeding Habitat) へ向かい、雌は交尾が終了すると、砂浜に上陸し 1 繁殖シーズン内に複数回の産卵をおこなう。繁殖期が終わると成体の摂餌海域に戻り、次の繁殖までの期間を過ごす。この成体の摂餌海域と繁殖場との間の回遊は産卵回遊 (Reproductive migration) と呼ばれる。

日本産アカウミガメでは北アメリカ大陸西岸バハ・カリフォルニア沖に若齢個体の摂餌域が存在し、浮遊性のコシオリエビ (*Pleuroncodes planipes*) が主な餌資源とされている (Pitman 1990)。そのため、バハ・カリフォルニア沖は Juvenile Nursery Habitat と位置づけられる。成体の摂餌海域は東シナ海 (Iwamoto et al. 1985, 中島・中村 1994, 亀崎ほか 1997) もしくは太平洋の外洋域である (Hatase et al. 2002b, Hatase et al. 2002d)。Juvenile Nursery Habitat から Adult Foraging Habitat の間に位置する Juvenile Developmental Habitat は渡洋回遊を終えた個体が浮遊型から底生型へと摂餌形態を変化させる日本沿岸と考えられる。しかし、成熟後に外洋域を摂餌域として利用している個体がこの段階を経していない可能性やカリフォルニア半島沿岸でも底生型への移行が起きている可能性もある。

日本産アカウミガメが野生で 466mmSCL (510mmCCL) に成長するには 10 年かかると推定されている (Zug et al. 1995)。日本の沿岸域で混獲され始めるのが 565mmSCL 以上であることを考えれば (岩本ら 2006)、日本近海に加入し始めるのは生まれてから十数年後と考えられる。加入後の成長については日本では十分な知見が得られていないが、オーストラリアの個体群では加入から最初の繁殖までが平均 12.7 年 (95%信頼区間 6-19 年) (Chaloupka 2004) と推定されていることを考慮すると、最初に繁殖をおこなうのは生後およそ 20-30 年後と考えられる。

第4項 アカウミガメの産卵場の分布

世界中に 7 種存在するウミガメ類の中でも産卵場を温帯域にもつ種は唯一アカウミガメ (*Caretta caretta*) だけである。アカウミガメの産卵場は世界中の温帯域に広く分布している (Fig.1.2.)。大西洋、地中海、太平洋、インド洋の沿岸に産卵場が存在しているが、地理的な連続性を考慮すると、北大西洋西部、北大西洋東部、地中海、南大

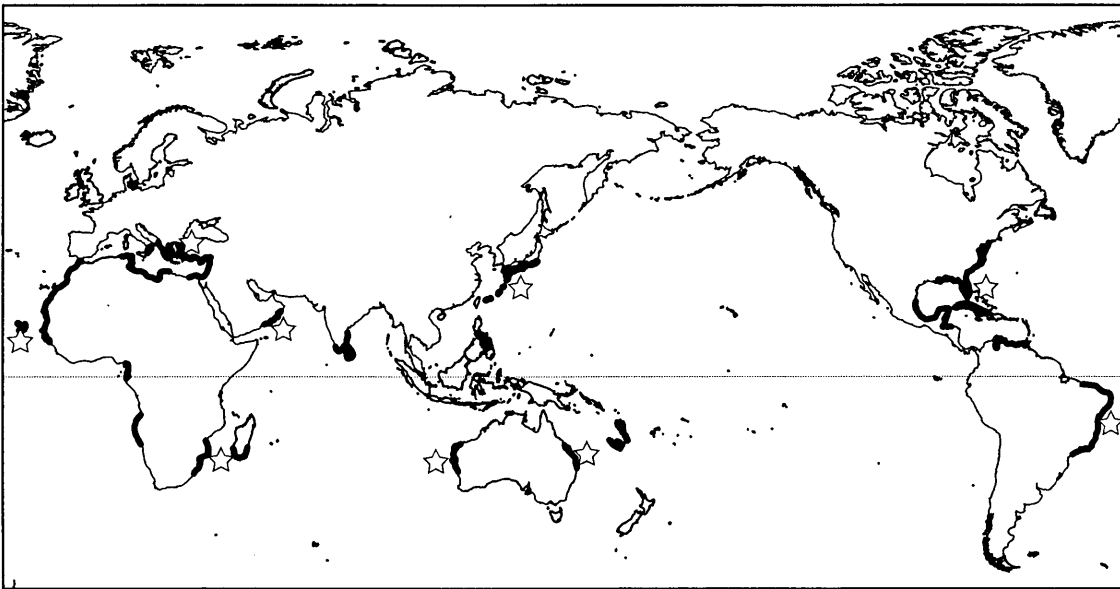


Fig.1.2. Worldwide distribution of nesting sites of the loggerhead turtles. Bold lines represent nesting areas, ☆ represent major nesting beaches.
(after Ehrhart et al.(2003), Margaritoulis et al.(2003),
Limpus and Limpus(2003), Kamezaki et al.(2003), Baldwin et al.(2003))

西洋西部、北太平洋、南太平洋、北インド洋、南インド洋西部、南インド洋東部の9つに大きく分けられ、それぞれについて、フロリダ半島、ベルデ岬諸島、トルコ西岸、ブラジル中部、日本列島南部、グレートバリアリーフ南部、アラビア半島東岸、南アフリカ東岸、オーストラリア西岸が主要な産卵場とされている (Ehrhart et al., 2003; Margalitoulis et al., 2003; Limpus and Limpus, 2003; Kamezaki et al., 2003; Baldwin et al., 2003)。これらの個体群はそれぞれ独自の“回遊環 (migration loop)” (Tsukamoto et al. 2002) を有し、それぞれ別々の繁殖集団を形成していると考えられる。しかし、成熟時の体サイズに若干の違いがある以外は、縁甲板の枚数 (Brongersma 1961)、頭骨の形態 (Kamezaki 2003) などの形態形質に個体群による明確な違いが乏しいため、これらはすべて同一種とされ、亜種すら認められない (Pritchard 1979, Kamezaki 2003)。このような変異性の乏しさは極めて広域に分布する海洋生物の中でも特異である。

世界中のアカウミガメ集団を対象にした分子系統解析によれば、最も深い分岐は大西洋とインド-太平洋の集団間にあり、鮮新世ころ (約 300 万年前) に起きたと考えられている (Bowen 2003)。しかし、この 2 大洋間は完全に隔離されたわけではなく、約 25 万年前に大西洋からオマーンへ、そして後氷期 (12,000 年前よりも最近) に入り南アフリカから大西洋北部へと移住が起きたと推測されている (Bowen et al. 1994)。このように歴史的にたびたび集団間の移住がおこなわれてきたことが、繁殖集団間の形態的な分化を阻んできたものと考えられる。

第2節 研究の目的

日本では 1990 年代に全国的にアカウミガメ (*Caretta caretta*) の上陸・産卵が激減し、個体群の存続が危ぶまれている (Sato et al. 1997, Hatase et al. 2002c, Kamezaki et al. 2003)。個体数減少の原因としては、1970、80 年代に活発に行われた北太平洋の流し網による混獲 (Wetherall et al. 1994) や沿岸域における混獲 (Kamezaki et al. 2003)、メキシコ沖における乱獲やウミガメ卵の採取 (亀崎 2003c)、重金属 (Sakai et al. 2000) の蓄積、産卵環境の悪化 (内田 1986) など様々な要因が指摘されているが、最大の原因が何であるかは未だ不明である (亀崎 2003b)。また、これまで具体的に指摘されてきた要因はある程度成長した段階以降のものに限定されており、魚類で必ず最初に検討される初期減耗については産卵巣から孵化・脱出して海に入るまでのごくわず

かな時間を除いてほとんど検討されてない。これはウミガメ類の初期分散過程、初期生活史が全くといっていいほど解明されていないことが原因である。アカウミガメの初期浮遊生活期は、大西洋では 6.5-11.5 年、太平洋ではそれ以上の長期にわたると推定されているが (Bjorndal et al. 2000)、未だに “lost age” と呼ばれていることからこの時期の知見不足は明らかである。このような状況にも関わらず、孵化幼体の放流が保全対策として現在も実施されていることを考えると、まずは海洋生活のうちで最も初めの段階にあたる初期分散過程が早急に明らかにされねばならない。

初期生活史の知見不足の他に、産卵雌による産卵浜間の交流の実態が把握できていないことも、個体数減少の原因を特定できない理由の一つとしてあげられる。そのため、ある特定の産卵浜で見られた個体数の減少が果たしてどの程度、その産卵浜に特異的な要因によるのか評価が難しい。特に、ウミガメ類では自分の生まれた産卵浜に回帰して産卵をおこなう「母浜回帰性」の存在が古くから信じられてきたため、各産卵浜の個体群は独立性が高いように思われている。しかし、実際にはウミガメ類の母浜回帰性については具体的なデータは極めて少なく、やっと近年になって分子生物学的手法を用いた検証により、母浜回帰性を示唆する証拠が世界各地から集まり始めた段階にすぎない (Bowen et al. 1989, Meylan et al. 1990 など)。実際の保全に役立てることを考えるならば、さらにどの程度の地理的なまとまりで産卵浜の動態を解釈すべきかなど、より具体的な母浜回帰性の実態が明らかにされる必要がある。また、近年では遺伝学的視座から希少生物の保全・管理を行うことが重要視されるようになり、個体群の生存に直接関わる核 DNA の遺伝的多様性や、移動・回遊に伴う産卵場間の遺伝子流動などについても早急に明らかにする必要が出てきた。

そこで本研究では日本産アカウミガメを対象に、(1) 孵化幼体の初期分散過程を水槽実験と野外調査により明らかにすること、(2) 分子生物学的手法を用いて日本産アカウミガメの集団構造と遺伝子流動の実態を母系 (mtDNA) と父系 (核 DNA) の両面から明らかにすることを目的とした。これらの結果をもとに、(3) 日本産アカウミガメの回遊生態、特に母浜回帰性の実態、そして遺伝的多様性を明らかにし、効果的な保全策を考える際の一助とすることを狙った。

本章に続いて第 2 章では、徳島県阿南市蒲生田海岸で行ったアカウミガメの産卵、孵化に関する野外生態調査の結果を記述した。第 3 章では孵化・脱出直後の孵化幼体を用いた方位選択実験と野外における追跡調査を実施して、孵化幼体の初期分散過程を明らかにした。第 4 章では、まず現在ウミガメで使われているマイクロサテライトマー

カーの特性を調べ、母性解析のための解析アルゴリズムを提案した。これをもとに実際の産卵浜で母親不明の産卵巣から採取した孵化幼体・死亡卵の母性解析をおこなうことで調査期間外に産卵した個体の遺伝情報を取得し、後の解析試料に加えた。第 5 章では和歌山県南部町と鹿児島県屋久島の産卵個体群について、同一産卵浜内における分集団存在の可能性を検討した。第 6 章では、5 つの産卵浜を対象に集団構造解析を実施し、日本産アカウミガメの集団構造と産卵浜間の遺伝子流動を明らかにした。最後に第 7 章で、これら一連の研究結果をまとめて、日本産アカウミガメの回遊生態と遺伝子流動について総合的に考察した。

第3節 用語の定義

本論文で用いたウミガメの分類、発育段階、産卵行動、回遊生態などに関する用語は以下のように定義した。

1. ウミガメ類

現生するウミガメ上科の 2 科 7 種の全てを指す。すなわち、アカウミガメ *Caretta caretta*、アオウミガメ *Chelonia mydas*、タイマイ *Eretmochelys imbricata*、ヒメウミガメ *Lepidochelys olivacea*、ケンプヒメウミガメ *Lepidochelys kempii*、ヒラタウミガメ *Natator depressus*、オサガメ *Dermochelys coriacea* の 7 種である。このうちアオウミガメについては太平洋東部に生息する個体群を別種、クロウミガメ *Chelonia agassizii* として認めるか、アオウミガメの亜種 *Chelonia mydas agassizii* とするか分類学上の議論が分かれる。ここではクロウミガメを別種とせずに“7 種”とした。

2. 発育段階

孵化幼体 (hatchling)

孵化直後から、腹部にある卵黄や胚膜の痕跡が消失するまでの間の個体を指す。孵化後、数週間の間がこれにあたる (亀崎 2003d)。

稚ガメ

孵化幼体のこと

成体 (adult)

性的に成熟して、繁殖可能となった個体

産卵雌 (nesting female)

産卵のために砂浜に上陸してきた雌の成熟個体。

3. 産卵浜 (nesting beach)

ウミガメの産卵がおこなわれる砂浜。ここではヒトが認識する一つ一つの砂浜については産卵浜とし、複数の砂浜をまとめた大きな範囲で見たときに産卵場という語を使うことにした。

4. 母浜

ウミガメに認識されている産卵場の範囲がヒトの認識している一つ一つの砂浜と同じとは限らない。そのため本研究では、ウミガメが生まれた砂浜だけでなく、その周辺の砂浜も含めて母浜とする。

5. 母性解析

第4章で、産卵浜に残された母親不明の産卵巣について、それを産んだ雌個体をその産卵巣内の卵や孵化幼体の情報をもとに推定、識別する方法を考案している。母親既知の状態から父親を推定することが父性解析と呼ばれているので、ここではそれになぞらえて、母性解析と呼ぶことにする。詳細は第4章で述べる。

6. 産卵浜変更

産卵雌が産卵に利用する砂浜をひとつの年の繁殖シーズン内、および複数年のシーズン間で変更すること。

7. 産卵浜固執性

一度産卵に利用した砂浜にその後も回帰して産卵をおこなう性質 (nest site fidelity; Schroeder et al. 2003) を産卵浜固執性と呼ぶ (Fig.1.3.)。産卵場固執性という語句のほうがよく用いられるが、本研究では上述のように産卵場と産卵浜を分けて扱っているため、産卵浜固執性とした。

8. 母浜回帰性

本研究ではヒトが認識している一つ一つの浜への回帰という狭義の母浜回帰 (natal beach homing) ではなく、いくつかの砂浜がまとまった地域単位への回帰も含めた広義の母浜回帰 (natal homing on a regional geographic scale; Meylan et al. 1990) を母浜回帰 (natal homing) として扱う。

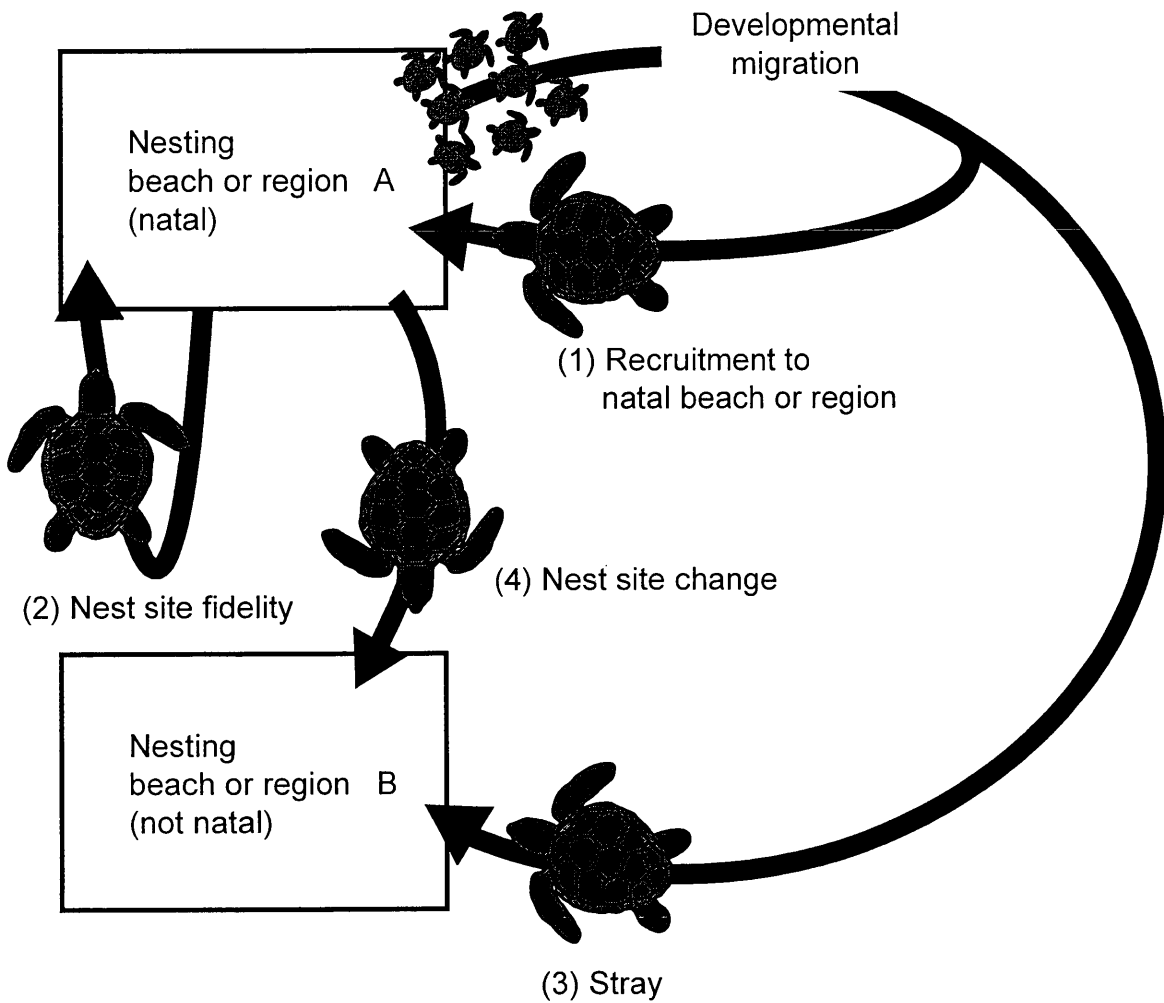


Fig.1.3. Diagram of the gene flows between nesting beaches on sea turtles. Gene flow between nesting beach or region is accomplished by stray(3) and Nest site change(4).

第2章 産卵生態

第1節 背景と目的

産卵浜間の交流を明らかにするには集団解析だけでなく、標識再捕によって得られる個体の実際の移動に関する情報も重要である。現在、完全な夜間調査と標識装着が行われている産卵浜は静岡県御前崎、和歌山県南部町千里浜、徳島県日和佐町日和佐大浜、宮崎県宮崎海岸、鹿児島県屋久島永田区（田舎浜、前浜）である。そこで、産卵浜間の詳細な交流を把握することを目的として、南部と日和佐の2産卵浜の中間に位置する徳島県阿南市蒲生田海岸（Fig.2.1.）で標識再捕調査をおこなった。徳島県から和歌山県にかけての紀伊水道周辺海域における産卵は南部、日和佐、蒲生田でほとんどが占められている（Kamezaki et al. 2003）。このため、蒲生田でも夜間標識調査が実施されることで、少なくとも、紀伊水道周辺の産卵雌の移動を把握できるものと期待される。

なお、蒲生田は1959年には年間781回ものアカウミガメの上陸が記録された大規模産卵浜であったが、現在では年間に上陸が30~40回、産卵が20~30回にまで減少している（Fig. 2.2., 鎌田 1994, 岡本 私信, 阿南市教育委員会 私信）。それでも日本の中では準主要産卵浜（submajor nesting beach）に位置付けられる産卵浜である（Kamezaki et al. 2003）。ちなみにここで準主要産卵浜とは、過去10年間に年間10回以上の産卵が1シーズン中におこなわれた産卵浜のことを指す（Kamezaki et al. 2003）。蒲生田では国内で最も長期間にわたる上陸・産卵数の継続的な記録が残されており、50年以上も前の個体群の状態を知ることができる数少ない産卵浜である。このような産卵浜で行われるウミガメの産卵生態を調査することは保全生物学的にも価値が高い。そのため標識調査だけでなく、孵化幼体の孵化・脱出調査などの生態的な調査や遺伝的解析のためのDNA標本採取もあわせて実施することにした。

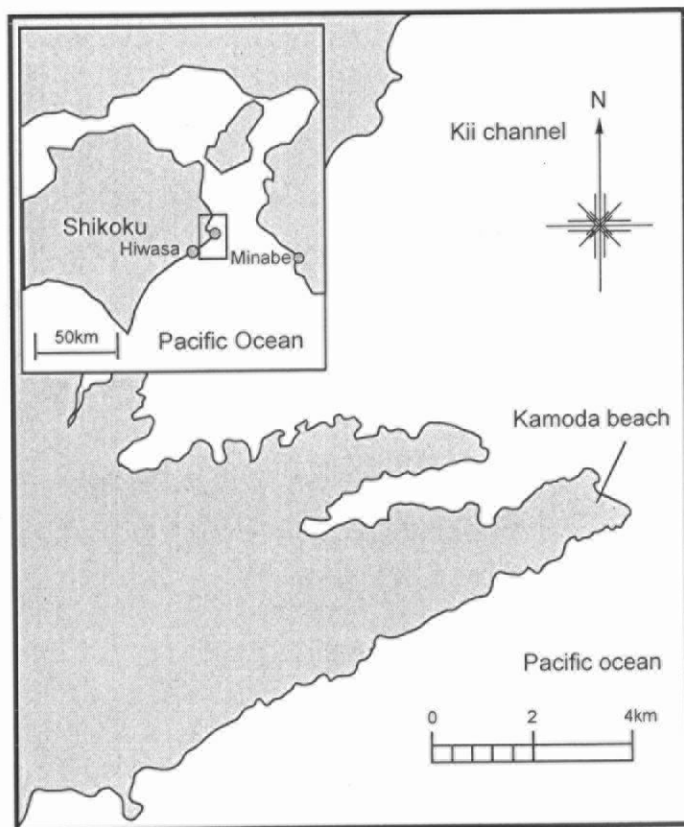


Fig.2.1. Location map of the Kamoda beach.

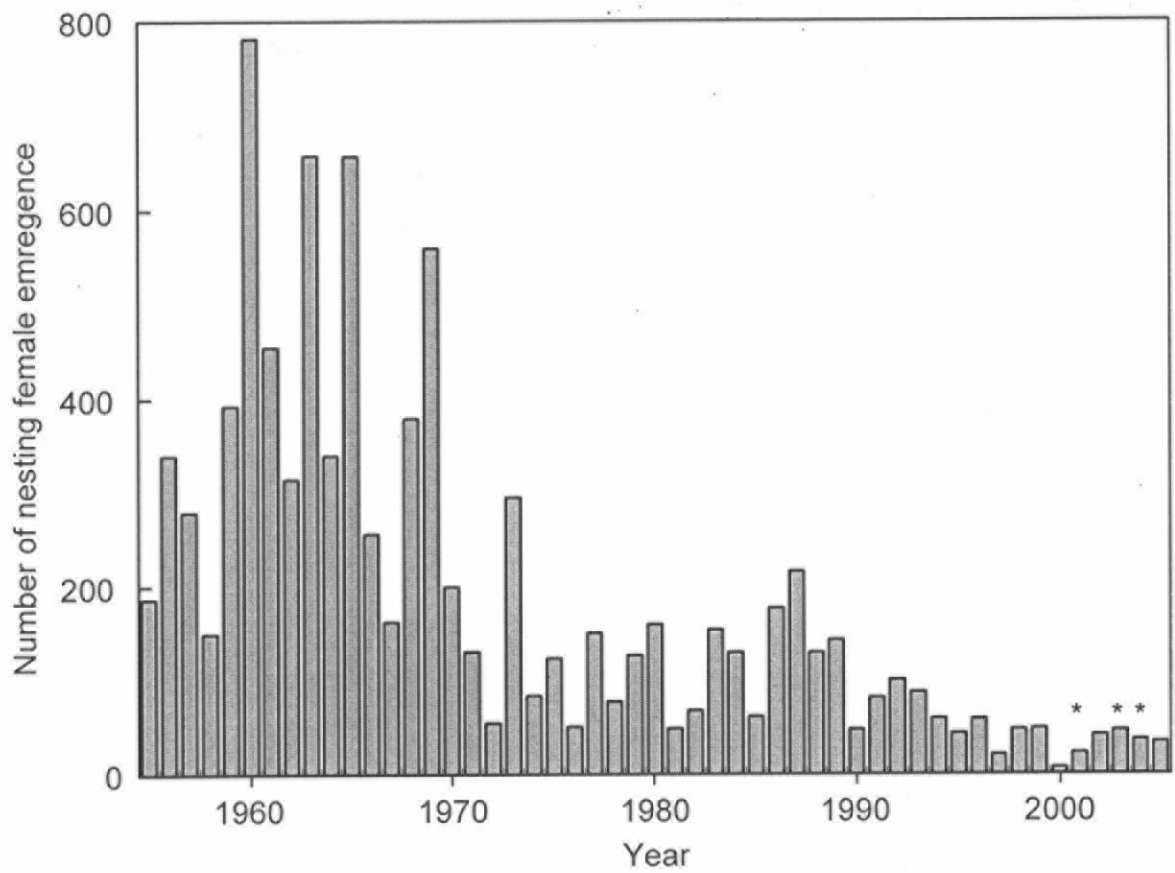


Fig. 2.2. Nesting trends of loggerhead turtles on the Kamoda beach.
 Kamata(1994), Okamoto(pers. com.), Anan city Min. Gov.(pers. com.)
 * This study

第2節 方法

第1項 調査地

調査地とした蒲生田は四国最東端において紀伊水道に大きく突出した蒲生田岬の北側に広がる延長約 500m の砂浜である (Fig.2.1.)。砂浜の背後に天端高 T.P.+6.5m の海浜堤防が設置されているため、浜幅は 27.5~35.8m と狭い (Fig.2.3.)。前浜勾配が 1/10.5 ~ 1/6.2 と急なため、大潮の満潮時 (H. W. L. = 0.82 + T. P. m) でも比高にして 0.7~2.1m が冠水しないで残る (渡辺ほか 2001a)。汀線沿いは礫だが、堤防基部には中央粒径 $d_{50}=0.12\sim 1.00\text{mm}$ の細砂・粗砂が堆積しているため (渡辺ほか 2001b)、堤防基部のわずかな範囲に限り産卵が可能となっている。しかし、台風上陸時には砂浜全域が堤防基部まで波に洗われるため (渡辺ほか 2003)、地形変化による流出などにより、産卵がおこなわれても孵化が達成できない区域もある (渡辺ほか 2002)。

蒲生田におけるウミガメの上陸調査は 1954 年から 1991 年までは蒲生田小学校生徒により、1992 年から現在に至るまでは地元住民の岡本増夫氏や岡本喜和子氏、土肥理氏により継続的に行われてきた。また、1970 年代には内田至氏を中心とした姫路水族館のメンバーにより精力的な夜間産卵調査が実施され (内田 1973, 内田 1975, 内田 1981b など)、現在も年間 3 日間程度ながら姫路水族館により夜間産卵調査が行われている。上陸・産卵数が今日ほど減少していない 1980 年代には国内初の人工衛星によるアカウミガメの追跡をはじめ (相馬 1994)、データロガーを用いた回遊経路の推定など (Naito et al. 1990)、学術的にも重要な役割を果たしてきた産卵浜である。

第2項 産卵調査

2002 年の 6 月 21、22 日、2003 年の 7 月 1 日から 8 月 31 日、2004 年の 7 月 11~28 日、8 月 12 日から 8 月 31 日の計 102 日間にわたり上陸・産卵個体の調査をおこなった。

総延長約 500m の海岸を毎晩 19 時から明朝 6 時まで 1 時間おきに巡回し、上陸している個体があった場合は、そのまま産卵するまで見守った。産卵が始まったのを確認した後、標準直甲長 (SSCL: Straight Standard Carapace Length) と最小直甲長 (MCL: Minimum Carapace Length)、直甲幅 (SCW: Straight Carapace Width) を牛体測定用のノギス (日本ウミガメ協議会統一規格) により 1 mm 単位で測定し、個体識別のため

(A)



(B)



Fig.2.3. Panoramic view of the Kamoda beach(A). Track of the loggerhead turtle on the Kamoda beach(B).

めにプラスチック製（ジャンボタグ黄色, Fig.2.4.）と金属製（モネル）の標識を前肢内側に装着した。標識装着時のパンチで前肢内側を穿孔したとき副次的に採れる組織片を直ちに 99%エタノール中に保存して後の DNA 解析用試料とした（第 4, 5, 6 章）。産卵終了後、約 2 ヶ月後の孵化幼体捕獲のために産卵巣の位置を計測し記録した。調査期間以外の上陸・産卵については、蒲生田住民の岡本増夫氏、岡本喜和子氏および椿町中学校教員の土肥理氏が記録したデータを使用した。

第3項 孵化調査

2002 年の 9 月 10～20 日、2003 年の 8 月 1 日から 9 月 30 日、2004 年の 8 月 12 日から 9 月 30 日の計 122 日間にわたり孵化・脱出個体の調査をおこなった。

6～8 月の上陸・産卵調査期間中に産卵された産卵巣の孵化時期を推定し、脱出時期が近くなったら産卵巣をネットで囲った。脱出が予想される夕方 16 時～翌朝 6 時までの間 1～2 時間おきに産卵巣を確認してまわり、孵化幼体が脱出していたときには即座に採取し、蒲生田海岸の砂を敷き詰めた遮光性のクーラーボックスに入れて海岸から約 200m 離れた蒲生田小学校まで徒歩で運び、一部の個体はオリエンテーションの行動実験、トラッキングに供し、残りの個体は形態計測、DNA 解析用の血液の採取をおこなった後、ただちに採捕地点より放流した。遊泳行動への影響を避けるため、水槽実験に供した個体は実験終了後に形態計測と血液採取をおこない、トラッキングに供した個体は追跡前に形態計測のみおこない、血液を採取しなかった。

孵化幼体の脱出が完全に終了した後、産卵巣を掘り返し、巣内に残された卵殻、死亡した卵および孵化幼体の数を計数した。死亡卵は全て開いて胚の発生段階を確認した。この時、産卵巣 31 クラッチから得られた 332 個体分の死亡個体と卵内で発生途中で死亡した胚から DNA 解析用の試料として前肢の組織片を採取し、直ちに 99%エタノール中に保存した（Table 2.1.）。

血液の採取

産卵巣 24 クラッチから採取した 283 個体の孵化幼体から血液を採取した（Table 2.1.）。採取方法は Dutton (1996) に従い、孵化幼体の頸部静脈洞（Dorsal Cervical Sinuses）から 1ml のシリンジと 25G の注射針（テルモ社製）を用いて血液を少量（約 20 μ l）採取した。血液は採取後直ちに TNES Buffer(100mM Tris-HCl, pH8.0; 10mM NaCl EDTA, pH8.0; 1%SDS) (Bass et al., 1996; Bowen et al., 1996; Encalada et al., 1996) 中に溶解し、常温で保存した。



Fig.2.4. The Loggerhead turtle with yellow plastic tag.

Table 2.1. DNA samples of hatchlings and unhatched eggs.

Year	Clutch ID analysis	Mother		DNA Samples		
		ID	Tag No.	Blood	Tissue	Total
2002	0201	b		0	15	15
	0203	b		0	26	26
	0206			0	0	0
	0208			0	1	1
	0210	b		0	14	14
	0214	b		0	15	15
	0215			0	1	1
	0217			0	0	0
	0218			0	0	0
	0220	b		0	10	10
	0221	b		0	8	8
	0222	b		0	30	30
	0223	b		0	4	4
2003	0301			Destroyed by the storm		
	0302	b		1	0	1
	0303	b		3	20	23
	0304	b		2	0	2
	0305	b		21	2	23
	0306	b		2	1	3
	0307	b		13	2	15
	0308			Lost		
	0309			Lost		
	0310	b		16	0	16
	0311	b		18	29	47
	0312		B 29702	0	2	2
	0313	a	A 29701	20	0	20
	0314		I 29713	No development		
	0315	a	F 29706	24	18	42
	0316		J 29715	Destroyed by the storm		
	0317	a	B 29702	27	0	27

* a: Validation for maternal analysis, b: maternal analysis

Year	Clutch ID analysis	Mother		DNA Samples		
		ID	Tag No.	Blood	Tissue	Total
2003	0318	I	29713			
	0319	F	29706	25	1	26
	0320	J	29715	Destroyed by the storm		
	0321	B	29702	0	0	0
	0322	F	29706	0	4	4
	0323	J	29715	0	2	2
	0401			0	0	0
2004	0402			0	0	0
	0403			8	0	8
	0404	b		0	6	6
	0405	b		26	0	26
	0406	b		6	0	6
	0407	b		3	0	3
	0408			3	0	3
	0409	b		0	5	5
	0410	b		17	2	19
	0411	b		0	1	1
	0412			0	0	0
	0413	a	C 29703	5	0	5
	0414	a	D 29704	0	28	28
	0415		E 29705	1	2	3
	0416		G 29707	3	0	3
	0417	a	C 29703	16	35	51
0418	b		16	15	31	
0419			0	0	0	
0420	b		7	4	11	
0421	b		0	26	26	
0422	b		0	3	3	
0423			0	0	0	
Total			283	332	615	

形態計測

蒲生田の孵化幼体の形態に関する基礎情報を得るために計 276 個体の孵化幼体の形態計測をおこなった。測定項目は Kamezaki and Matsui (1997) に従い、2003 年は SCL (直甲長)、SCW (直甲幅)、HL (頭長, Head Length)、HW (頭長, Head Width)、NSW (頂甲板幅, Nuchal Scale Width)、BD (体高, Body Depth)、FLL (前肢長, Forelimb Length)、FLW (前肢幅, Forelimb Width)、HLL (後肢長, Hindlimb Length)、HLW (後肢幅, Hindlimb Width)、BW (体重, Body Weight)、背甲板数の 12 項目について、2004 年は SCL、SCW、BD、BW、背甲板数の 5 項目を測定した (Fig.2.5.)。長さについての計測はデジタルキャリパー (ミットヨ SC-15) により、0.1mm の単位で、BW については携帯型ハカリ (TANITA Model 1211) により 0.1g 単位で計測した。

孵化状況

孵化状況は工藤・松沢 (2002) の分類基準を簡略化して記載した。孵化幼体の脱出が終了した後の産卵巣中には割れた卵、割れていない卵、産卵巣中に取り残されて死亡した幼体 (①)、産卵巣中に取り残されたが生存している幼体 (②) が残される。割れた卵は全てが孵化に成功したのではなく、孵化の直前段階として殻が破れるピップ (Pip) の段階で死亡したものも含まれる。そこで、内側が比較的乾いており白垂色を呈するものを孵化に成功した孵化卵殻 (③)、内側に卵黄または鱗板が付着しており、ピップ後に孵化できずに死亡したと思われるものをピップ後死亡 (④) として分類した。

割れていない卵については卵を開いて胚体の状態を確認した後、卵黄に対する胚体の大きさをもとに、⑤胚体 > 卵黄、⑥胚体 = 卵黄、⑦胚体 < 卵黄でカメ型 (甲羅を確認できる)、⑧胚体 < 卵黄でカメ型でない、⑨胚が見えない、の 5 段階に分類した。卵が異常に小さい、もしくは卵黄がないものは異常卵 (⑩) とした。

これらの分類のうち、③から⑨までの合計個数が卵数、③の個数が孵化個体数、③から①および②を引いた数が脱出個体数となる。

対象とする卵のうち、孵化した卵の割合をあらわす孵化率 (hatching success) は $100 \times (\text{孵化個体数} / \text{卵数})$ 。対象とする卵のうち、孵化してさらに脱出に至った卵の割合を意味する脱出率 (emergence success) は $100 \times (\text{脱出個体数} / \text{卵数})$ 。孵化幼体のうち、脱出できた個体の割合を意味する脱出成功率 (emergence persentage) は $100 \times (\text{脱出率} / \text{孵化率})$ により算出した。

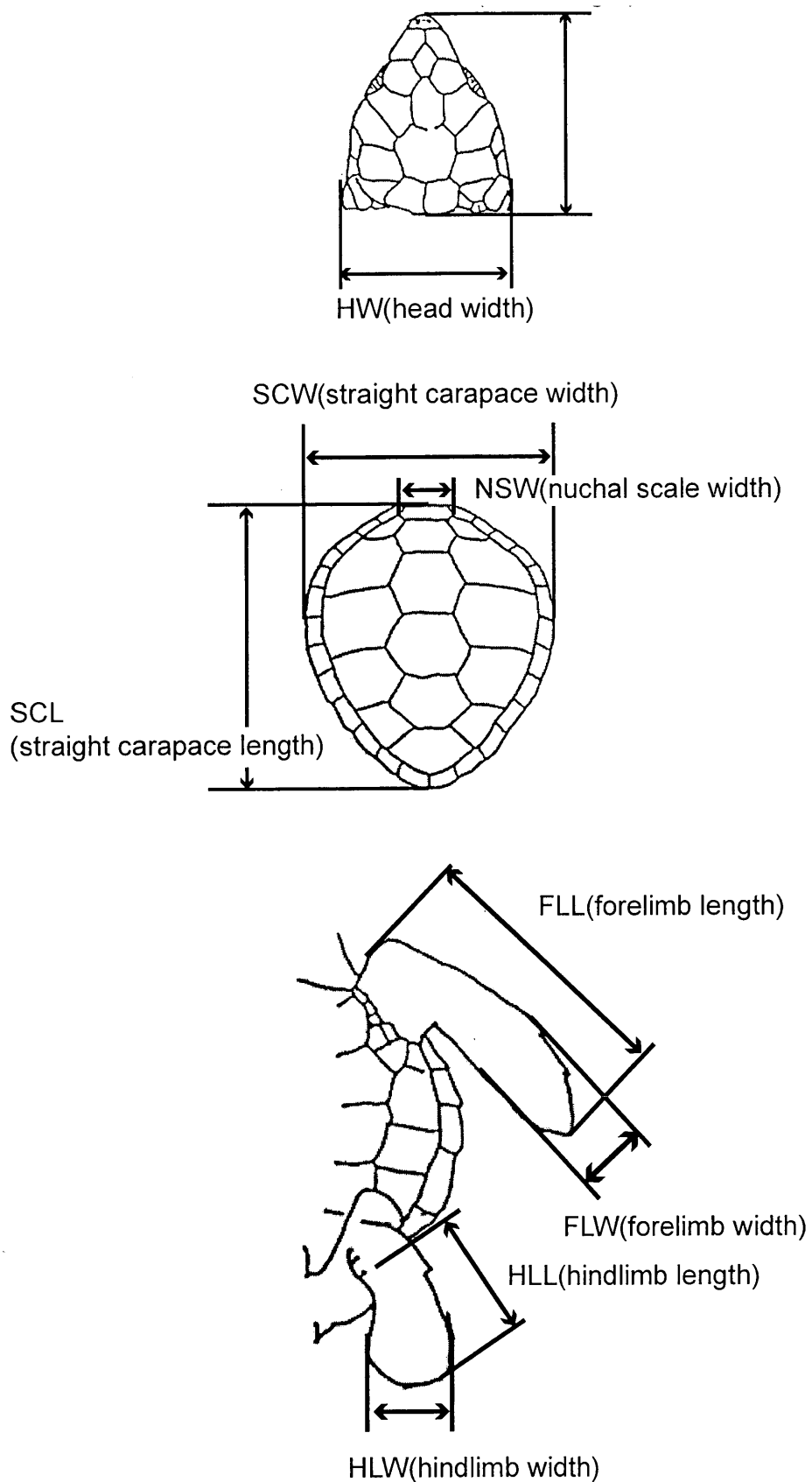


Fig. 2.5. Measurements of morphometric characters.
(after Kamezaki and Matsui 1997)

第3節 結果

第1項 上陸・産卵状況

34回の上陸が確認され、うち55.9%にあたる19回が産卵に至った (Table 2.2.)。標識装着した産卵雌は計10個体で、このうち9個体について計17回の産卵を確認した。5個体で複数回の産卵が確認され、2個体が2回、3個体が3回産卵した (Table 2.3.)。立ち会えなかった2回の産卵は、別の個体の産卵中に行われたものと孵化・脱出の調査中に行われたものであった。9個体の標準直甲長 (SSCL) は786-880mmの範囲で、 828 ± 31 mm (平均±標準偏差) であった (Table 2.4.)。

第2項 標識再捕

標識を装着した産卵雌10個体中6個体が蒲生田に回帰したが (Table 2.3.)、標識した個体の蒲生田海岸以外における再捕は現在まで報告されていない。また、2004年7月16日に蒲生田に上陸・産卵した1個体には約20km離れた日和佐で装着された金属製の標識 (No.7590) が付いており、上陸・産卵する浜を変更する (以下、産卵浜変更) 個体の存在することが確認された。ちなみにこの個体が日和佐に上陸したのは同年の6月12日であり蒲生田の上陸・産卵の34日前であった。したがってこれは1繁殖シーズン内の産卵浜変更であった。

第3項 孵化幼体の形態

産卵巣20クラッチから採取した孵化幼体計276個体の外部形態を計測した。直甲長の平均は 40.2 ± 2.3 mm であった。産卵巣ごとの平均直甲長は最小が Cl.0319 の 37.1 ± 1.5 mm (N=25)、最大が Cl.0310 の 43.6 ± 1.5 mm (N=16) であった (Table 2.5.)。5個体以上を測定した12巣間では産卵巣によって有意に直甲長が異なっていたが (Kruskal-Wallis test, $H = 168.13$, $P < 0.0001$)、同じ個体によって産卵された産卵巣 Cl.0315 と Cl.0319 の間に直甲長の違いは無かった (t-test, $t = 0.9557$, $P = 0.34$)。

Table 2.2. Emergence of loggerhead turtles on the Kamoda beach 2002-2003.

Year	Emergence	Date (Month/Day)	Tag No.	Nesting	Clutch ID	Night Patrol
2002		6/22	29701	x		○
		no data			0201	
		no data			0203	
		no data			0206	
		no data			0208	
		no data			0210	
		no data			0214	
		no data			0215	
		no data			0217	
		no data			0218	
		no data			0220	
		no data			0221	
		no data			0222	
		no data			0223	
2003	1	6/2		x		
	2	6/2		○	0301	
	3	6/3		○	0302	
	4	6/5		○	0303	
	5	6/6		○	0304	
	6	6/14		○	0305	
	7	6/15		x		
	8	6/20		○	0306	
	9	6/22		○	0307	
	10	6/23		○	0308	
	11	6/24		x		
	12	6/24		○	0309	
	13	6/24		○	0310	
	14	6/27		x		
	15	7/2		○	0311	○
	16	7/2	29702	○	0312	○
	17	7/8		x		○
	18	7/9	29701	○	0313	○
	19	7/10	29713	x		○
	20	7/11	29713	○	0314	○
	21	7/12		x		○
	22	7/13	29715	x		○
	23	7/15	29706	○	0315	○
	24	7/15	29715	○	0316	○
	25	7/24	29702	○	0317	○
	26	7/26	29713	○	0318	○
	27	7/29	29706	○	0319	○
	28	8/1		x		○

Table 2.2(continued). Emergence of loggerhead turtles on the Kamoda beach 2003-2004.

Year	Emergence	Date (Month/Day)	Tag No.	Nesting	Clutch ID	Night Patrol
2003	29	8/1	29715	○	0320	○
	30	8/5		x		○
	31	8/7		x		○
	32	8/7		x		○
	33	8/7	29702	○	0321	○
	34	8/13	29706	○	0322	○
	35	8/14	29715	x		○
	36	8/15	29715	○	0323	○
2004	1	5/30		○	0401	
	2	6/3		○	0402	
	3	6/6		x		
	4	6/9		○	0403	
	5	6/12		○	0404	
	6	6/14		○	0405	
	7	6/26		○	0406	
	8	7/1		x		
	9	7/2		x		
	10	7/2		○	0407	
	11	7/2		○	0408	
	12	7/3		x		
	13	7/3		○	0409	
	14	7/3		○	0410	
	15	7/5		○	0411	
	16	7/10		○	0412	
	17	7/11		x		
	18	7/12	29703	○	0413	○
	19	7/16	29704	○	0414	○
	20	7/18	29705	○	0415	○
	21	7/20	29707	○	0416	○
	22	7/23		x		○
	23	7/24	29708	x		○
	24	7/26		x		○
	25	7/26	29703	x		○
	26	7/27		x		○
	27	7/27	29703	○	0417	○
	28	7/29		○	0418	
	29	8/1		x		
	30	8/1		○	0419	
	31	8/2		○	0420	
	32	8/2		○	0421	
	33	8/9		○	0422	
	34	8/23		○	0423	○

Table 2.3. Emergence and nesting by tagged loggerhead turtles.

	ID	Tag No.	Date	Clutch ID		
2002	A	29701	6/22	x		
2003	A	29701	7/9	0313		
			B	29702	7/2	0312
					7/24	0317
	F	29706	8/7	0321		
			7/15	0315		
			7/29	0319		
	I	29713	8/13	0322		
			7/10	x		
			7/11	0314		
	J	29715	7/26	0318		
			7/13	x		
			7/15	0316		
8/1			0320			
8/14			x			
2004	C	29703	8/15	0323		
			7/12	0413		
			7/26	x		
	D	29704	7/27	0417		
			7/16	0414		
	E	29705	7/18	0415		
	G	29707	7/20	0416		
	H	29708	7/24	x		

x: turtle did not nest

Table 2.4. Body size of the nesting females

Plastic Tag No.	Metal Tag No.	Date	MCL (mm)	SSCL (mm)	SCW (mm)
29701		2002.06.22	855	880	675
29702	31626	2003.07.02	835	854	660
29703	31601, 31629	2004.07.11	823	833	651
29704	7590	2004.07.16	827	821	670
29705	31602	2004.07.17	812	823	643
29706	31627	2003.07.15	785	806	644
29707	31603	2004.07.19	782	786	627
29708			-	-	-
29713	A1758, A1787	2003.07.10	850	852	669
29715	31630	2003.07.13	781	794	655

Table 2.5. Summary of morphometric characters of hatchlings

Clutch ID	n	BW (g)		SCL (mm)		SCW (mm)		BD (mm)					
		mean	s.d.	range	mean	s.d.	range	mean	s.d.	range			
0302	1	17.2			44.0		33.2	20.4					
0303	3	18.5	0.3	18.3-18.9	42.8	1.0	41.8-43.7	33.1	1.5	31.5-34.5	19.4	2.6	17.0-22.1
0305	21	17.1	0.9	15.3-18.2	42.0	1.5	39.8-44.4	33.4	1.6	30.1-35.8	19.3	1.2	17.8-22.7
0306	2	16.7		16.6-16.8	40.1		38.0-42.1	34.5		34.0-34.9	18.0		17.9-18.1
0307	13	17.9	1.0	15.4-19.2	42.2	1.1	40.6-44.2	34.2	1.3	30.6-35.7	18.7	1.0	16.6-19.7
0310	16	20.1	1.5	15.9-21.8	43.6	1.5	40.8-46.7	35.6	1.1	33.7-37.1	19.5	0.9	17.0-21.2
0311	18	13.9	1	12.0-15.8	37.8	1.4	34.4-40.4	32.5	1.5	29.7-34.5	17.1	0.6	15.8-18.1
0315	24	14.0	0.9	12.5-15.3	37.5	1.4	35.0-39.6	30.9	1.0	29.3-33.3	16.6	0.9	15.1-18.8
0317	31	17.2	0.8	15.8-18.9	41.4	0.9	39.3-43.0	34.0	1.3	31.0-36.3	18.5	0.8	17.1-20.1
0319	25	13.4	0.9	12.0-15.1	37.1	1.5	34.9-40.0	31.5	0.7	30.2-32.7	16.3	0.6	15.1-17.7
0404	6	12.9	1.1	12.2-15.0	38.8	1.9	35.9-41.2	29.5	0.8	28.7-31.1	16.8	0.8	16.2-18.5
0409	5	15.1	0.7	14.1-16.0	40.7	1.2	39.5-42.7	32.2	1.5	30.6-34.4	17.7	0.8	16.6-18.7
0410	2	18.2	0.2	18.0-18.3	42.8	0.3	42.6-43.0	33.7	0.7	33.2-34.2	19.4	0.1	19.3-19.4
0411	1	15.4			42.1			32.2			17.2		
0415	2	16.2	1.3	15.3-17.1	40.0	0.4	39.7-40.3	32.8	0.6	32.4-33.2	17.6	1.2	16.7-18.4
0417	36	12.5	1.7	9.4-16.1	41.4	1.8	35.7-42.5	31.3	1.4	28.5-34.0	16.3	1.0	14.5-18.3
0418	25	15.5	0.9	14.2-17.4	41.1	1.0	39.2-42.5	33.1	1.2	30.3-34.5	17.2	0.6	15.8-18.3
0420	4	15.6	0.6	14.9-16.4	39.4	1.7	37.1-41.0	31.6	1.4	29.7-32.7	18.1	0.5	17.7-18.8
0421	38	14.8	1.0	12.8-16.7	40.7	0.8	39.4-42.2	33.3	0.6	32.1-34.8	17.0	0.8	15.2-18.9
0422	3	17.7	0.5	17.3-18.3	41.2	0.9	40.6-42.3	32.6	1.0	31.9-33.7	18.4	0.7	17.6-18.8
Total	276	15.3	2.4	9.4-21.8	40.2	2.3	34.4-46.7	32.7	1.8	28.5-37.1	17.5	1.4	14.5-22.7

Clutch ID	n	HL (mm)		HW (mm)		NSW (mm)		FLL (mm)		FLW (mm)		HLL (mm)		HLW (mm)								
		mean	s.d.	range	mean	s.d.	range	mean	s.d.	range	mean	s.d.	range	mean	s.d.	range						
0302	1	19.0			15.3		9.5	30.7		12.1		18.7		12.1								
0303	3	19.5	0.7	18.8-20.2	15.4	0.2	15.2-15.5	9.1	0.1	9.0-9.1	30.1	1.9	28.0-31.5	12.0	1.1	10.8-12.9	18.7	1.2	19.3-21.6	11.8	0.5	11.5-12
0305	21	18.8	0.7	16.9-19.6	14.8	0.4	13.9-15.4	9.5	0.8	8.1-11.0	31.7	1.4	29.5-34.8	12.1	0.4	11.3-12.8	19.1	1.0	17.4-21.0	12.8	0.7	11.7-13
0306	2	19.6		19.5-19.7	15.2		15.1-15.3	9.4		8.6-10.1	32.5		32.2-32.8	11.7		11.3-12.0	19.1		17.4-21.0	12.7		12.5-12
0307	13	18.9	0.5	17.7-19.6	14.7	0.4	13.6-15.0	9.3	0.4	8.4-9.7	33.3	1.2	30.5-35.4	12.1	0.6	10.9-13.2	20.1	0.7	18.7-21.5	13.4	1.0	11.6-15
0310	16	19.9	0.5	19.1-21.6	15.8	0.2	15.4-16.2	9.7	0.4	9.2-10.4	34.1	1.7	30.4-37.2	12.9	0.5	12.1-14.2	20.8	0.6	19.9-22.0	13.4	0.5	12.5-14
0311	18	18.0	0.6	16.7-18.8	13.7	0.5	12.5-14.5	8.5	0.5	7.9-9.7	29.5	2.1	25.7-32.1	11.3	0.8	8.8-12.1	18.7	1.0	16.1-19.8	11.8	0.8	9.8-13
0315	24	17.4	0.4	16.5-18.2	13.2	0.4	12.3-14.0	8.5	0.5	7.8-9.6	28.4	0.9	27.0-30.1	11.3	0.5	10.1-12.2	17.7	0.7	16.2-19.5	11.8	0.6	10.4-13
0317	31	18.7	0.6	17.3-19.8	14.9	0.3	14.3-15.4	9.5	0.6	8.2-11.5	30.0	1.3	27.2-32.6	12.0	0.4	11.4-12.9	19.1	0.8	16.5-20.7	12.7	0.6	11.4-13
0319	25	18.0	0.5	17.1-19.3	13.5	0.4	12.9-14.1	9.0	0.5	7.7-10.1	30.0	0.9	28.3-31.5	12.4	0.5	11.5-13.4	18.7	0.7	17.6-20.0	13.2	0.6	11.8-14
Total	154	18.5	0.9	16.5-21.6	14.3	0.9	12.3-16.2	9.1	0.7	7.7-11.5	30.7	2.2	25.7-37.2	12.0	0.7	8.8-14.2	19.0	1.2	16.1-22.0	12.7	0.9	9.8-15

第4項 自然孵化状況

2001-2004年の4年間で産卵巣63クラッチを調査し4年間の総計では孵化率56.0%、脱出率54.1%、脱出成功率は96.6%であった。孵化率は2003年に71.2%と高い値を示した以外は、各年ともおおよそ50%でまとまっていた (Table 2.6.)。1クラッチあたりの卵数は29-157個の範囲で平均では112.3個であった。

第4節 考察

第1項 上陸・産卵個体

現在の蒲生田でも同一繁殖シーズン内に蒲生田に回帰して複数回の産卵を行う個体が存在することが確認できた。例数が少ないため、約30年前の内田(1981b)の調査結果と比較できないが、シーズン内の回帰回数が劇的に減ったようには思えない。上陸したうち産卵成功した回数を示す産卵成功率は1970年、1971年でそれぞれ47.5%(N=40)、59.0%(N=22)であり(梶原・内田1974)、本研究の55.9%(N=34)と大きく変わらない。同一個体による複数回産卵、産卵成功率が約30年前と大きく変わっていないことから、蒲生田で継続的に記録されてきた上陸回数の激減は産卵個体群そのものの縮小を示すと考えて間違いない。

産卵雌の体サイズは、1969~1973年の調査時で直甲長 $890 \pm 9\text{mm}$ (平均 \pm SD, N=118; 内田1975)、2002~2004年では $828 \pm 31\text{mm}$ (N=9)で本研究のほうが有意に小さかった($t=5.98$, $d.f.=8.10$, $P<0.0005$; Welch Two Sample t-test) (Fig.2.6.)。内田らの直甲長の定義は本研究と同じである(内田1982b)。内田(1975)は本研究で用いたのとは異なる牛体測定器を使用しているため、器具による違いも別途確認が必要だが、これだけの差異が器具の違いによって出るとは考えにくい。甲長組成を見ると、内田(1975)では比較的多く出現した直甲長90cmを越える個体が出現しなくなっている。このような体サイズ変化の要因として、Hatase et al. (2002b)で報告されているような浅海を摂餌域とする大型個体の割合が減ったか、餌環境が悪くなり一律に成熟時の体サイズ小さくなったかが考えられる。蒲生田から約50kmしか離れていない南部には浅海を摂餌域とする個体が健在であることを考えると(Hatase et al. 2002b)、後者の可能性が高い。

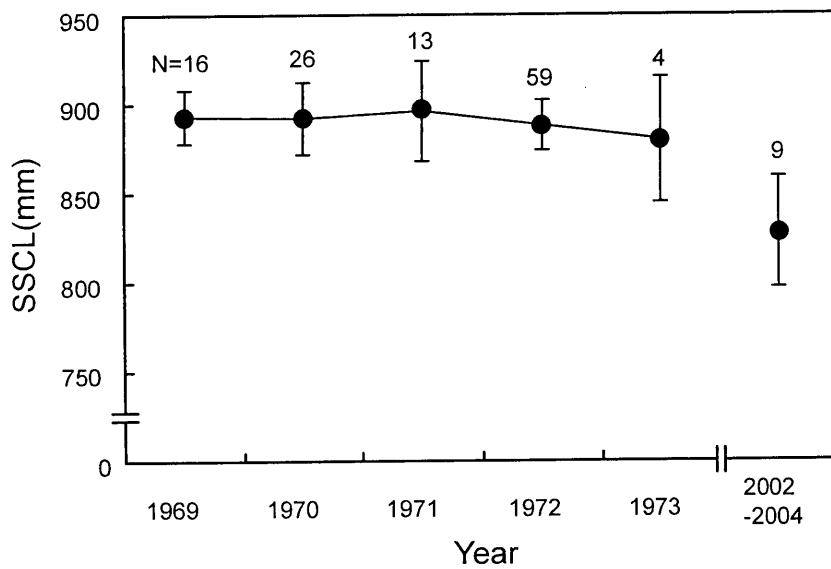


Fig.2.6. Size of loggerhead turtles nested on the Kamoda beach during 1969-1973(Uchida 1975) and 2002-2004(This study). Circle: mean; bars: standard deviation.

Table 2.6. Hatching success, emergence success and emergence percentage.

Year	Number of clutches	Number of eggs	Hatching success	Emergence success	Emergence percentage
2001	20	2371	48.7	46.6	95.8
2002	13	1397	52.7	47.2	89.7
2003	14	1629	71.2	71.0	99.7
2004	16	1681	54.1	53.9	99.6
Total	63	7078	56.0	54.1	96.6

他の産卵浜では本研究とは逆の甲長変化も指摘されている。和歌山県南部では 1992 年から 2001 年にかけて直甲長平均がやや増加した(Hatase et al. 2002c)。屋久島でも産卵回数が減少傾向にあった 1990 年から 1998 年まで平均甲長は上昇傾向にあったとされている(西岡ら 2003)。これらの産卵浜も 1970 年代と比較すれば、蒲生田と同様の変化が起きているのかもしれないが、当時は未だ調査が行われていない。本研究で明らかになった蒲生田の体サイズ変化は 2000 年以降の測定個体数が少ないという欠点はあるものの、日本全体の個体群の減少原因を明らかにするうえで重要な知見である。今後も蒲生田における産卵雌の個体識別調査を継続していく必要がある。

第2項 産卵浜変更

わずか 1 例ではあるが、本調査のような短い期間でも蒲生田と約 20km 離れた日和佐との間で雌による産卵浜変更が確認された。これまでに蒲生田から牟岐までの徳島県南東部約 40km の範囲では本研究も含めて 7 例の産卵浜変更が確認されている(内田 1975, 相馬 1994, 相馬 2000, 浜崎 2005, 中崎 2005)。これ以外に日本全体で産卵浜変更の報告(日本ウミガメ協議会の機関紙に掲載された速報を含む)が過去 30 年間で 11 例にすぎないこと(Table 2.7., Fig.2.7., Fig.2.8.)、また、1991 年から 1995 年にかけて南日本の 16 の産卵浜において標識装着した 2,219 個体のうち産卵浜を変更したのがわずか 5 個体(距離 74-630km)にすぎないことを考えると(亀崎ほか 1997)、徳島南東部だけでこれだけ多くの報告例があるのは特異である。この範囲が一区切りの産卵場としてアカウミガメに認識され、その内部で積極的な産卵浜の選択が行われているのかもしれない。

また、100km 以上離れた産卵浜間で確認されている産卵浜変更は、日和佐→広の浜、宮崎→日和佐、吹上→南部、屋久島→吹上、宮崎→志布志湾、宮崎→長崎の 6 例であるが、変更先の産卵浜の詳細な位置を文献から特定できない宮崎→長崎を除く 5 例では、いずれも砂浜の海に面する方位が似通った産卵浜間で起きている。例えば日和佐、広の浜、宮崎、志布志はいずれも産卵浜が東～南東方向に向かって開けている浜なのに対して、南部、屋久島、吹上は西～北西方向に向かって浜が開けている。遠く離れて砂浜へ産卵浜を変更する先には、地勢的な要素や地磁気コンパス(Lohmann and Lohmann 1996a)のようなウミガメ特有のオリエンテーション機構と関連した何らかの特徴があるのかもしれない。更なる事例の蓄積が待たれる。

Table 2.7. Recaptures of the female loggerhead turtles on different nesting beach in Japan.

Capture location	Date	Nesting	Recapture location	Date	Nesting	Within-season	Reference
Kamoda coast, Tokushima	-	-	Izari, Tokushima	-	-	○	1
Kamoda coast, Tokushima	-	-	Tainohama, Tokushima	-	-	○	1
Kamoda coast, Tokushima	-	-	Hisawa Ohama, Tokushima	-	-	○	1
Miyazaki beach	1979.06.26	○	Nagasaki	1979.07.29	○	○	2
Kamoda coast, Tokushima	1984.09.01	-	Mugi, Tokushima	1984.09.22	satellite	○	3,4
Yakushima Is.	1994.05.16	○	Fukiage beach, Kagoshima	2000.06.07	-	-	5
Horinouchi beach, Miyazaki	2002.06.06	○	Hiwasa Ohama beach, Tokushima	2002.07.12, 07.29	○	○	6,7
Hiwasa Ohama beach, Tokushima	2001	○	Hironohama beach, Mie	2003.06.19, 06.27, 07.08, 07.11, 07.30	satellite	-	8
Hiwasa Ohama beach, Tokushima	2003.07.03	○	Minabe Senri beach, Wakayama	2003.07.16	-	○	8
Sagara beach, Shizuoka	2003.06.05	○	Omaezaki beach, Shizuoka	2003.07.17	○	○	9,10
Amami Is.	-	-	Inakahama beach, Yakushima Is.	2004.04.21	x	-	11
Oida beach, Miyazaki	2002.07.29	-	Shibushi beach, Kagoshima	2004.06.18	○	-	12
Kamoda coast, Tokushima	1994.07.15	○	Hiwasa Ohama beach, Tokushima	2004.06.24	○	-	13
Horinouchi beach, Miyazaki	2004.05.29	-	Shintomi Tomita beach, Miyazaki	2004.07.02	x	○	14
Myojinyama, Miyazaki	2004.05.30	○	Uchinoura Kishira beach, Kagoshima	2004.07.05	○	○	15
Hiwasa Ohama beach, Tokushima	2004.06.10	○	Kikishirahama beach, Tokushima	2004.07.21	○	-	16
Fukiage beach, Kagoshima	2004.06.07	○	Minabe Senri beach, Wakayama	2004.07.28	○	○	17
Hiwasa Ohama beach, Tokushima	2004.06.12	-	Kamoda coast, Tokushima	2004.07.16	○	○	This study

1:Uchida(1975), 2:Iwamoto et al.(1985), 3:Soma(1994), 4:Soma(2000), 5:Ikumi(2002), 6:Okamoto(2002), 7:Hamazaki(2003), 8:Sea turtle association of Japan(2004), 9:Nobetsu(2004), 10:Yamamoto(2004), 11:Omura and Michihiro(2005), 12:Yamato(2005), 13:Hamazaki(2005), 14:Yamamoto(2005), 15:Nakahara(2005), 16:Nakazaki(2005), 17:Hayashi(2005)

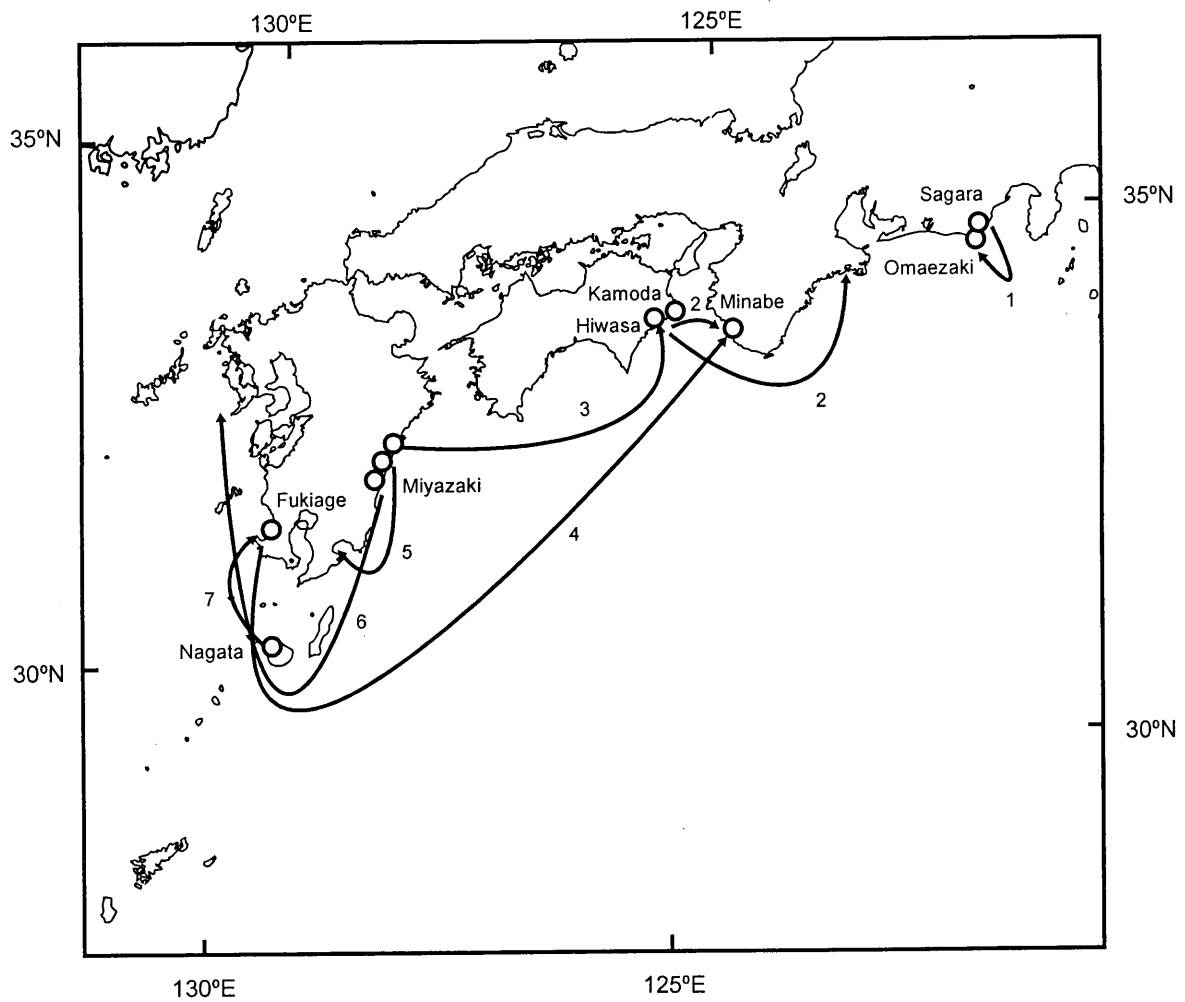


Fig. 2.7. Recaptures of the female loggerhead turtle on different nesting beach in Japan. 1:Nobetsu(2004) & Yamamoto(2004), 2:Sea Turtle Association of Japan(2004) 3:Okamoto(2002) & Hamazaki(2003), 4:Hayashi(2005), 5:Yamato(2005), 6:Iwamoto et al.(1985), 7:Ikumi(2002)

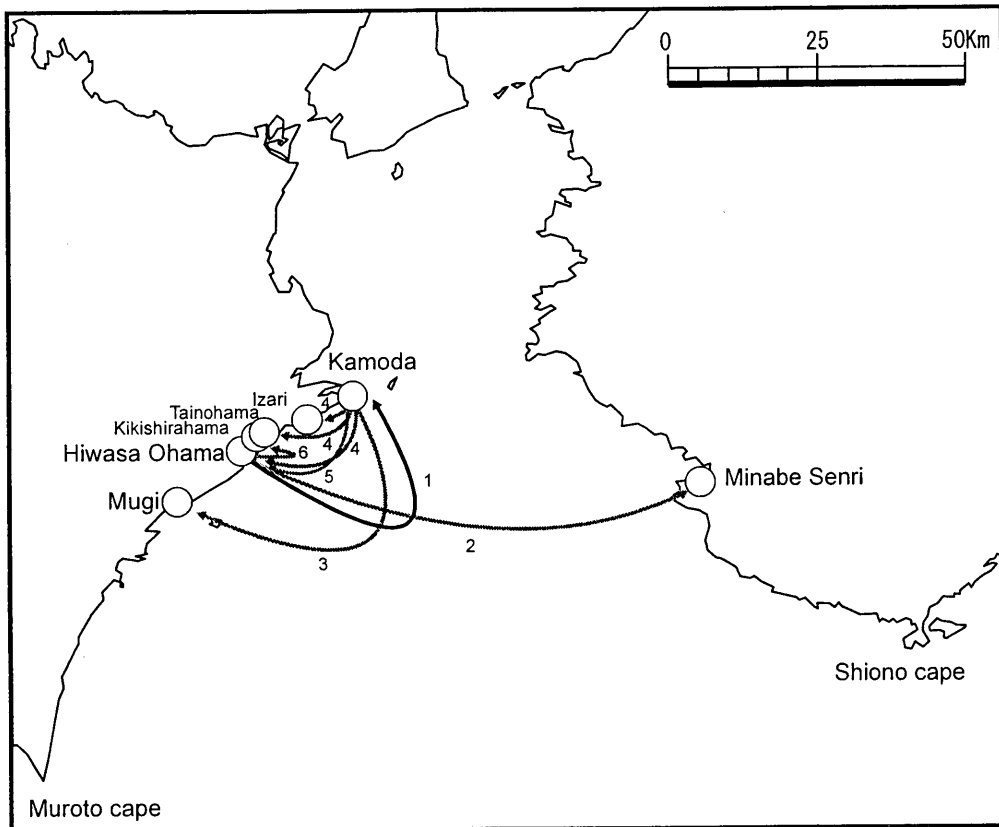


Fig. 2.8. Recaptures of the female loggerhead turtle on different nesting beach around the Kii channel. 1:This study, 2:Sea Turtle Association of Japan(2004), 3:Soma(1994) & Soma(2000), 4:Uchida(1975), 5:Hamazaki(2005), 6:Nakazaki(2005)

このように考えると、40km 程度の範囲で見られた頻繁な産卵浜変更と 100km 以上はなれた産卵浜間で見られた産卵浜変更は質的に異なり、前者は母浜区域内での積極的な産卵浜選択であるのに対して後者は迷入であるのかもしれない。

第3項 孵化状況

自然孵化率は 0.0~98.3%と産卵巣によって大きく異なっていた。これは、産卵巣がおこなわれた時期や場所によって孵化環境が大きく異なることによる（渡辺ら 2003）。しかし、2001、2002、2004 年の平均孵化率が約 50%でまとまったように、浜全体として見れば各シーズンの平均孵化率は安定している（Table 2.6.）。ある程度、孵化率低下のリスクを分散させるような形で産卵が行われているのかもしれない。

本研究では 2003 年に 71.2%という高い孵化率が得られたが、愛知県豊橋でもこの年のみ 68.7%と高い孵化率が得られているように 2003 年は全国的に孵化率が高かった（牧野 2003a）。これは冷夏であったために、Matsuzawa ら（2002）や鈴木ら（2002）が指摘するような高温による死亡が少なかったことが原因と考えられる。

他の産卵浜と比較すると、屋久島における同シーズン（2001~2002 年）の孵化率は 60~80%と蒲生田より若干高いのに対して（工藤ら 2004）、豊橋は蒲生田と同等の値を示している（牧野 2003a, 2003b, 豊橋市環境部環境政策課編 2003）。孵化環境としては屋久島の方が蒲生田や豊橋よりも全体的に好適なのかもしれない。

日本国内でも、産卵浜によっては浜特有の要因により孵化率や脱出率が抑えられる場合もある。例えば、和歌山県南部町千里浜では、2004 年に全体の 37%もの産卵巣が流出したように、高波浪による産卵巣の流出が卵の生残率を下げる大きな要因となっている（林ら 2005）。また、鹿児島県吹上浜などは動物による食害が最大の生残率低下要因であり、毎年半分以上の産卵巣がこれにより全滅している（上辻ら 2002, 鹿児島大学ウミガメ研究会 2005）。屋久島では、観光客が産卵巣の上を踏みつけることによる踏圧が脱出率を低下させることが指摘されている（工藤ら 2004）。蒲生田では産卵巣の流出もあるものの、その比率は高くない。動物による食害も孵化脱出後の産卵巣以外では確認できなかった。観光客による踏圧も、脱出成功率が平均 96.6%(n=63)と非常に高いことを考えれば、個体群に重大な影響を与えるほどでは無いと考えられる。

第4項 孵化幼体の形態

黒柳・亀崎（1993）は砂中温度などの孵化環境が孵化・脱出時の体サイズに影響を与えるとした。しかし本研究では、同一個体によって産卵された Cl.0315 と Cl.0319 は産卵時期と場所が全く違ったにも関わらず、2 巣間に体サイズの違いは無かった。今後例数を増やして検討する必要があるが、松沢・坂本（2002）が述べたように卵の大きさ、産卵雌の体サイズの方が孵化幼体の体サイズに影響するのかもしれない。

約 40 年前の日本産アカウミガメの孵化幼体直甲長の文献値として、平均 45.8mm（範囲 40.0-55.0mm, N=60）という値が残されている（Nishimura 1967）。これは本研究の平均 40.2mm（S.D. 2.3mm, 範囲 34.4-46.7mm, N=276）や南部で 1993~1995 年に計測された平均 41.9mm（S.D. 1.51mm, 範囲 36.0-46.3mm, N=684）と比較すると明らかに小さい。Nishimura(1967)には測定に用いた個体が孵化・脱出直後であるとは書いておらず注意が必要だが、産卵雌のみならず孵化幼体についても小型化が生じている可能性もある。産卵雌の小型化が起きているのであれば、それに伴う卵、孵化幼体の小型化も起きうる。

世界各地のアカウミガメ孵化幼体の甲長は Dodd(1988)に整理されている。大西洋で平均 44.5-46.1mm、インド洋が 44.1-45.2mm、地中海 40.0-40.4mm、オーストラリアクイーンズランド 43.3-43.7mm となっている。本研究の結果によれば地中海の値に近く、世界的にみてもやや小型ということになる。

第5項 蒲生田海岸における上陸数の減少要因

蒲生田でアカウミガメの上陸回数が減少した原因について、これまで指摘されてきた事項を整理し、本研究の現地調査で得られた知見と併せて考察する。まず、変動の要因を日本の個体群全体に共通して起きた変動と蒲生田周辺のいくつかの産卵浜で地域限定的に生じた変動、蒲生田のみで生じた変動とに分解して考える。

蒲生田に特異的な減少要因として、内田（1981b）は観光客の影響を指摘した。もしも観光客の存在により海岸が騒がしくなっていることが原因であれば、上陸しても産卵に至らない個体が多く、産卵成功率も低くなるはずである。しかし本研究によれば、観光客がほとんどいなくなった現在でも内田らの時代と比較して産卵成功率が変わっていない。そのため、観光客による影響は主要因とは考えにくい。

鎌田（1994）は海岸堤防と離岸堤の設置を原因としてあげた。これに対して中野ら（2002）は、蒲生田と日和佐大浜における上陸数変化を比較し、離岸堤設置後に明らか

に蒲生田で特異的に上陸数が減少したことを指摘した。直接的な証拠は無いものの、離岸堤の設置によりアカウミガメの上陸位置に変化が起き（内田 1986）、今日もその傾向が持続されていることも併せて考えると（渡辺ら 2002）、離岸堤の設置が上陸数減少の一因である可能性は高い。堤防設置については確かに産卵空間を狭め（渡辺ら 2001b）、設置時期と減少時期がほぼ一致しているものの、他産卵浜で調査が行われていない時代であるために比較検証できないのが難点である。

このように蒲生田固有の要因が指摘されている一方で、地域的な変動要因についても指摘がある。井口ら（2005）は徳島県内で外洋に近い大里松原より、紀伊水道に入った蒲生田、日和佐大浜の減少傾向が顕著であることを挙げ、徳島県北部に特異的な要因が存在する可能性を指摘した。孵化幼体の初期分散時もしくは成熟個体の産卵回遊時に、この周辺海域に何らかの脅威が存在するものと考えられる。日本のアカウミガメが母浜回帰性をもたず、現在徳島県北部で産卵している個体が日本各地の産卵浜で生まれた個体であるならば、要因は後者のみに絞られる。しかし、母浜回帰性を持つならば前者の可能性も否定できない。本研究では蒲生田と日和佐の間で産卵雌による産卵浜変更が確認され、過去には日本国内の広い範囲で産卵浜変更の報告があったが、標識調査だけでは十分でない。地域的な要因を明らかにするには、産卵浜間の交流、集団構造が把握され、母浜回帰性の有無が明らかにされる必要がある。

日本全体に共通した変動については、Kamezaki et al.(2003)が述べている。少なくとも繁殖個体数は安定していた 1970 年代、産卵回数の増加が見られた 1980 年代、産卵回数が減少した 1990 年代に分けられる。全国で産卵回数が最低水準となったのは 1997~1999 年で共通している。中野・片岡（2003）は、蒲生田・日和佐の上陸回数と東部太平洋の漁獲高とが 20 年以上の遅れ年数を考慮すると統計的に有意な負の相関を示すことを挙げ、幼体の生育場所である東部太平洋における混獲増加の影響を指摘した。これも日本全体的な変動要因と考えるべきであろう。蒲生田・日和佐以外の産卵浜についても同様な傾向があてはまるのかを確かめる必要があるが、実際にカルフォルニア半島でアカウミガメの死亡漂着が多いという報告もある（水野ら 2003）。本研究で示唆された産卵雌の小型化も餌環境に原因があれば、全国共通の要因といえよう。1 個体が生涯に産む卵数の減少、卵径や孵化幼体の小型化によって個体群の適応度低下につながる可能性がある。

このように、蒲生田でおきた上陸回数の減少には砂浜環境の変化のような蒲生田固有の要因も影響しているものの、地域的および全国的な要因も無視できないことがわかる。2000 年代に入ってから屋久島や宮崎では産卵回数が増加傾向に転じたとの報告も

ある（日本ウミガメ協議会 私信）。現在のところ蒲生田や南部では回復の兆候は見られないが、屋久島や宮崎でみられた傾向がいずれ蒲生田にも波及しうるのか。今後の保全策を考えるうえでも日本国内の集団構造の把握が急務である。

第3章 初期分散

第1節 背景と目的

産卵巣から孵化・脱出して海に入ったアカウミガメの孵化幼体は流れ藻や浮遊物に依存した生活を行うことで捕食から逃れ、豊富な餌資源を得ることができるようになるとされている (Witherington 2002)。そのため、魚や鳥などの捕食者に発見されやすい浅海や沿岸をすばやく抜け、流れ藻や浮遊物が集積される沖合のフロント域までいかに早く到達できるかがその後の生残を大きく左右すると考えられる (Lohmann and Lohmann 2003)。降海後、せわしなく遊泳し続ける最初の数時間から数日はフレンジー期と呼ばれ (frenzy period)、いち早く浅海域を抜けるためにウミガメに備わった本能行動と考えられている。

海流に到達するためのオリエンテーションに関しては、これまでに多くの研究が実施されている。その結果、アカウミガメの孵化幼体は視覚 (Witherington 1997)、波向き (Salmon and Lohmann 1989, Wyneken et al. 1990)、地磁気 (Lohmann 1991, Light et al. 1993, Lohmann and Lohmann 1994) に反応して遊泳もしくは浜での歩行を行うことが実験的に示されている。Lohmann and Lohmann (1996b) はこれらの感覚や環境要因を段階に応じて使い分けることで孵化幼体は産卵浜から海へ入り、浅海域を抜けて沖を流れる海流まで到達しているという仮説を提唱した (Fig.3.1.; Lohmann et al. 1997, Lohmann and Lohmann 2003 に総説)。

しかし、この仮説は実験条件下で各要因に対する孵化幼体の反応を個別に調べた研究結果に基づくものであり、実際の野外でこれらをもとにしたオリエンテーションがどれほど有効に働いているか確かめられてはいない。Lohmann らのオリエンテーション仮説はそもそもフロリダ半島東部の個体群をもとに考案されたものである。フロリダ東部では産卵浜から沖 (北東方向) に向かって遊泳し続けるだけで湾流 (Gulf stream) に

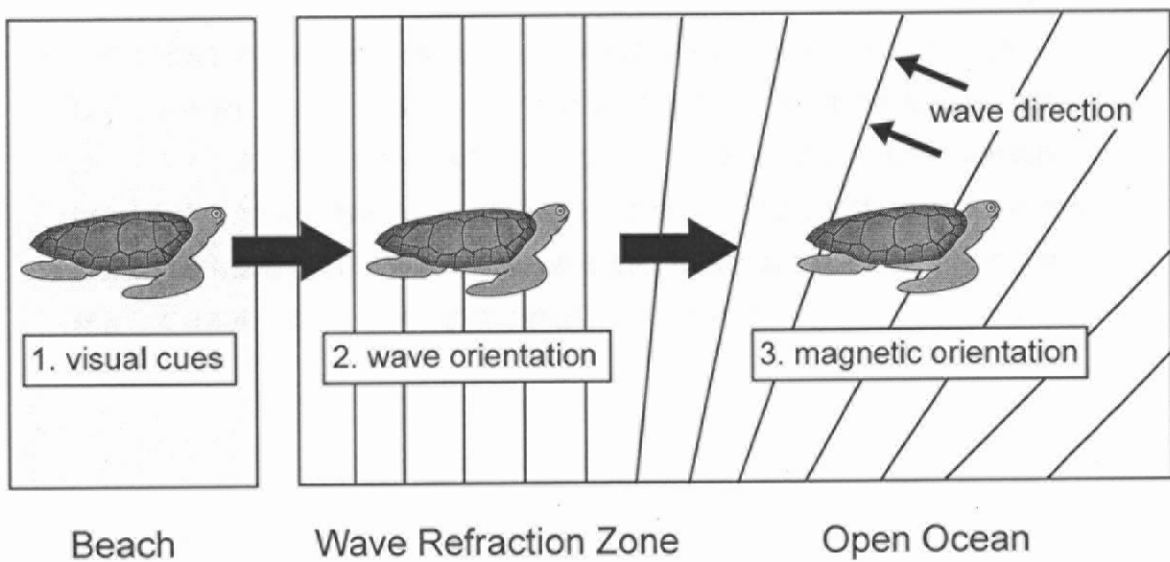


Fig. 3.1. Diagram summarizing the orientation cues hypothesized for hatchling by Lohmann and Lohmann(1996b). The beach is to the left, and progressively deeper water is to the right. Lines represent oceanic waves.

到達できるため、産卵浜を出た時の針路を保つことさえ出来れば外洋の強い海流をとらえるのに十分である。しかし、日本産アカウミガメの産卵浜の中には真直ぐ泳ぐだけでは北大西洋の湾流に相当する黒潮に到達できないものも多い。本研究で野外生態調査のフィールドとした蒲生田もその一つである。蒲生田は砂浜が東北東に向かって開けているため、フロリダと同じようにただ一定方向に針路を保つだけでは黒潮の流れる外洋へ到達できない。そのため、地域固有の何らかのナビゲーションメカニズムを備えることにより、外洋に出てうまく黒潮をとらえていることも考えられる。地磁気説が最初に示された 1991 年から 15 年を経た今でも、フロリダ以外の個体群で Lohmann らの説が成立するのか検証されていない。

そこで本章では蒲生田を対象地としてまず Lohmann らの実験系を模倣して作成し、Lohmann(1991)が提唱した磁気コンパスによる定位能力が蒲生田で孵化した日本産アカウミガメで成り立つかどうか検証をおこなった。次に野外における実際の分散過程を明らかにするために、孵化幼体の追跡調査をおこなった。また、野外における孵化幼体の分散に最も影響を及ぼすと考えられる表層流況の観測もおこなった。これらの結果を総合して日本産アカウミガメの初期分散過程について考察した。

第2節 材料と方法

第1項 材料

第2章の孵化・脱出調査で採取された孵化幼体を使用した。方位選択実験には実験系の立ち上げや予備実験も含めて、全部で 11 クラッチ 62 個体を使用した。最終的に本実験に使用したのは 2004 年 9 月 23 日～9 月 25 日の期間中に産卵巣 Cl.0421 から採取した 12 個体であった (Table 3.1.)。この 12 個体は直甲長 SCL39.4～41.8mm、平均 40.5mm、体重 BW は 14.3～16.7g、平均 15.5g であった。

野外におけるトラッキングには計 14 個体を供した (Table 3.2.)。直甲長 SCL は 39.9～42.5mm、平均 41.6mm、体重 BW は 14.9～17.8g、平均 16.4g であった。

Table 3.1. Observed swimming behaviors and orientations.

No.	Hatchling ID	SCL (mm)	BW (g)	Experimental period (min)	Number of oriented swimming periods	Time of oriented swimming (min)	Percentage of time spent in oriented swimming	Hatchling Rayleigh <i>r</i> value	Mean angle (degrees)
1	CCKN-576	40.5	15.5	60.7	2	10.3	17.0	0.21	52
2	CCKN-577	40.1	15.5	57.2	0	0.0	0.0	0.06	206
3	CCKN-578	41.0	16.1	58.0	2	8.2	14.1	0.09	212
4	CCKN-581	39.4	14.4	60.7	0	0.0	0.0	0.14	305
5	CCKN-582	42.1	15.6	58.7	3	12.2	20.7	0.20	101
6	CCKN-583	39.6	15.8	57.5	3	10.8	18.8	0.18	44
7	CCKN-584	39.5	15.1	57.0	1	3.3	5.8	0.14	83
8	CCKN-585	41.3	16.2	56.8	1	4.3	7.6	0.11	124
9	CCKN-593	40.9	14.3	77.2	3	11.8	15.3	0.16	126
10	0417	41.3	15.2	65.0	0	0.0	0.0	0.08	126
11	0419	41.8	15.5	213.3	8	51.5	24.1	0.13	152
12	0420	41.8	16.7	210.2	17	148.8	70.8	0.06	93
mean		40.5 ± 0.9	15.5 ± 0.7						115

Table 3.2. Hatchlings tracked in this study: individual hatchling information and tracking duration

Hatchling	Clutch	SCL(mm)	BW(g)	Release date	Release time	Tracking method	Tracking duration	Sampling date	Sampling time
1	0317	41.7	17.8	2003.9.18	19:53	Radio	1:27	2003.9.18	19:30
2	0317	41.6	17.2	2003.9.19	20:28	Radio	13:37	2003.9.19	18:00
3	0417	-	-	2004.9.16	18:52	Radio	18:04	2004.9.15	21:00
4	0417	-	-	2004.9.18	19:26	Illuminant	1:06	2004.9.18	6:00
5	0417	-	-	2004.9.18	23:07	Illuminant	1:26	2004.9.18	6:00
6	0418	39.9	14.9	2004.9.19	19:42	Illuminant	2:37	2004.9.19	2:30
7	0418	40.4	15.4	2004.9.19	22:53	Illuminant	1:28	2004.9.19	17:20
8	0418	42.0	17.4	2004.9.20	0:45	Illuminant	1:18	2004.9.19	17:20
9	0418	42.1	16.1	2004.9.20	19:23	Illuminant	1:37	2004.9.19	17:20
10	0418	41.4	15.8	2004.9.20	21:29	Illuminant	1:07	2004.9.20	2:00
11	0418	41.7	16.6	2004.9.20	22:58	Illuminant	0:40	2004.9.20	2:00
12	0418	42.5	17.1	2004.9.21	18:55	Radio	17:29	2004.9.20	3:00
13	0418	41.5	15.7	2004.9.21	18:39	Radio	2:21	2004.9.20	3:00
14	0418	42.3	16.3	2004.9.21	19:05	Radio	2:35	2004.9.20	3:00

第2項 方位選択実験

実験系

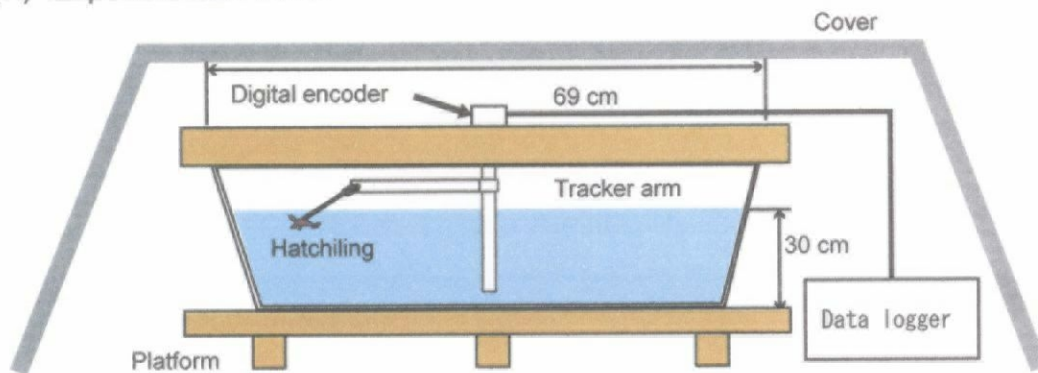
内径 69cm のプラスチック製の円形水槽を底面から約 30cm まで海水を入れた状態で使用した (Fig.3.2.)。条件づけに使用する LED の光の壁面反射を低減させるため、内壁を黒色に塗装した。孵化幼体の遊泳方向を検出するために自由に回転できるアームを木製の天蓋にとりつけ、アームの先端に結びつけた非伸縮性のナイロン製糸を装具 (Salmon and Wyneken 1987) を介して子ガメに装着することで、子ガメの定位方向を密閉遮光された水槽の外から観察できるようにした。アームの回転は水槽フタに取り付けられたロータリーエンコーダー (EC202A100A, 岩通アイセック) に伝えられた後、角度演算回路 (ロータリーエンコーダードライブ回路 Kit, 秋月電子) を経てデータロガー (8CH10 ビットデータロガーキット, 秋月電子) に伝えられ、一定時間ごとに記録された。これにより、測定者による孵化幼体の行動への影響を排除した。また、実験水槽全体を紫外線に対しても不透過な遮光シートで覆うことで水槽外からの光の侵入を防いだ (Fig.3.2.)。これらの実験系の大筋は Lohmann(1991)を模したものである。

実験手順

実験手順は Irwin and Lohmann (2003) に従った。実験に先立ち、孵化幼体を測定アームに取り付けない状態で水槽内に投入し、LED (波長約 550nm) を点灯した。孵化幼体は一般に走光性があるといわれているので (Salmon and Wyneken 1987)、LED に対して走光性を示した個体を正常個体とみなし、実験で使用した。LED による走光性の確認後、孵化幼体をアームに取り付け、80° の方位 (砂浜からみた海の方) から LED を点灯させた状態で 60 分間条件付けを行った。次に LED を消灯し、視覚が全く効かない暗条件下で 3 分間馴致した後、同じく暗条件下の定位方向を 10 秒間隔で測定した。12 個体中 10 個体は約 60 分間測定し、残りの 2 個体はさらに長い時間の定位を知るために約 4 時間測定した。

条件付けに用いた方位 (80°) は、蒲生田海岸中央部から 2 基の離岸堤開口部に対面した方位であり、当地において孵化幼体が産卵浜から海へ向かうためにとる針路に相当する。また、水槽中の化学物質の分布がオリエンテーションに影響するのを避けるため (Grassman et al. 1984, Grassman and Owens 1987 など, Bartol and Musick 2003 に総説)、各個体の測定開始前に水槽中の海水を攪拌して均質化した。

(A) Experimental Arena



(B) Digital encoder and data logger

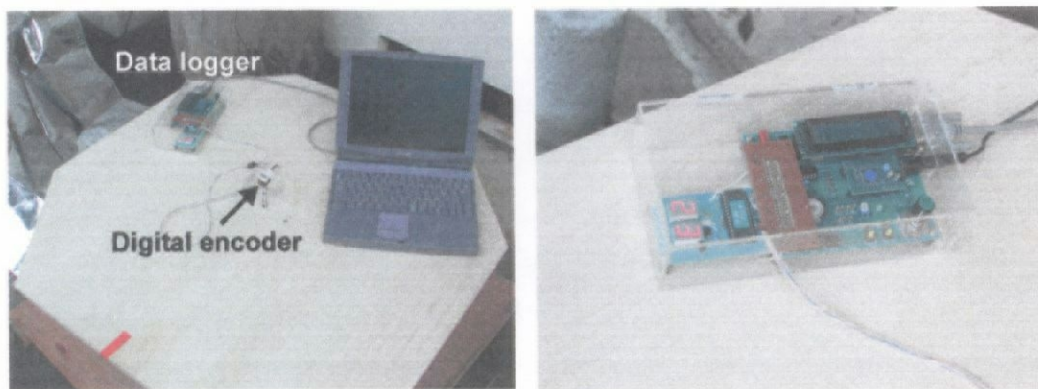


Fig.3.2. Experimental arena and data logging system.

データの解析

遊泳行動

Lohmann(1991)は実験中に観察された孵化幼体の遊泳パターンを、水槽内をぐるぐると回る巡回遊泳 (Circling) と水槽の中心から外へと特定の方角に向かって泳ぎ続ける定方向遊泳 (Oriented swimming) の2タイプに分類した。定方向遊泳は3分以上同じ 90° の区間に定位した時と定義されているので、本研究ではデータを取得した各時点から3分間の移動が前後 45° 以内であった場合を定方向遊泳と判定した。

定位方向

データロガーに記録された測定時間内 (約 60~213 分) の全位置データを Irwin and Lohmann(2003)と同様、円統計法 (circular statistics, Batschelet 1981) により定方向遊泳と巡回遊泳を区別せずに単純平均した値を各個体の平均定位方向とした。

第3項 トラッキング

追跡方法

2003年9月18日~20日、2004年9月16日~9月22日に蒲生田で孵化幼体の追跡をおこなった。電波発信機 (7.3×18mm, 空中重量 1.4g ;MCFT_3KM, LOTEX) もしくは釣具視認用の発光体 (ケミホタル, LUMICA) を長さ約 1m の生分解性の釣り糸 (ECOLOGIST 4lbs, DUEL) を介して孵化幼体の後部縁甲板に釣り針 (ケン付流線 サイズ 12 ハリス 3, がまかつ) で装着して曳航させた (Fig.3.3.)。電波発信機は釣り用の浮きに、発光体は発泡スチロール (8×2cm, 空中重量 11.2g) で作成した浮体の上にそれぞれ載せ、海面上に浮かせ電波の発信性および視認性を増した。曳航させた発泡スチロールには板錘を底部に付けて安定性を高めた。

装着後は脱出した産卵巣の位置から浜を歩かせて放流し、あらかじめ待機していた船外機付きゴムボートもしくはチャーターした漁船により行動を阻害しない程度の距離間隔 (約 10~50m) をたもちながら追跡した。電波発信機の位置特定には専用の受信機 (SRX400/W5, LOTEX) を使用した。孵化幼体に対して約 10m 以内の距離に接近した時に携帯電話に付属の GPS を用いて船の位置情報を取得し、子ガメの位置とした。本研究では最終的に電波発信機 5 個体、発光体 9 個体の計 14 個体 (Table 3.2.) を追跡した。追跡終了後、子ガメは回収して発信機・発光体を外した後、その場で放流した。

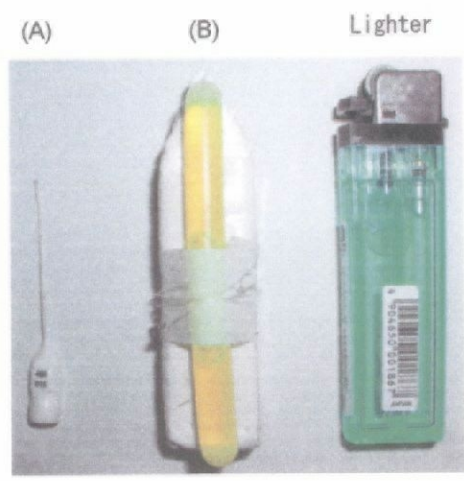
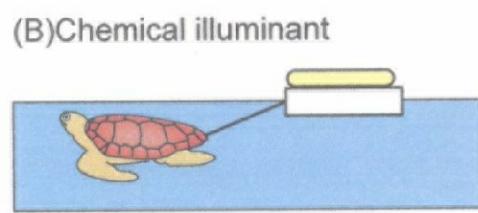
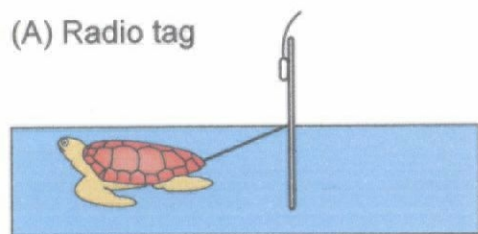


Fig.3.3. Radio tag (A) and chemical illuminant (B).

表層流況の観測

GPS 機能付き携帯電話 (F505iGPS, Fujitsu) を利用して作成した GPS ブイを追跡途中で投入して表層の流動場を測定した。孵化脱出直後の幼体は平均して表面から約 20cm の深さを泳ぐとされているので (Frick 1976)、孵化幼体が実際に受けている流れを反映するようにブイの長さは約 30cm とし、海表面に約 1-3cm ほど頭が出るように錘を入れて浮力を調整した (Fig.3.4.)。ブイの位置情報は、携帯電話回線網 (NTT ドコモ) とインターネットを利用した遠隔ナビゲーションサービス「ここっ P」(ナビッピドットコム) を介して取得した。ゴムボートによる短時間観測の際にはブイを回収してログデータを読み出し、長時間の追跡の際には東京の研究室で待機している研究者が Web 経由でデータを取得した。

位置データの解析

GPS により得られた孵化幼体およびブイの位置データ (緯度、経度) は PC 用航海参考図 (PEC) version 2.10 (日本水路協会) を使用して地図上へプロットし、追跡軌跡を描画した。漁船に備え付けの GPS は日本測地系であるため、国土地理院測地部の web サイト (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/>) を用いて世界測地系 (WGS 84 系) に変換して使用した。移動した距離と方角は Bowring(1996)の方法に従い、同じく国土地理院測地部の web サイト (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/bl2stf.html>) を使用して楕円体モデル (GRS80) により算出した。

環境情報の取得

追跡時の風向・風速は気象庁の蒲生田観測所で観測されたものを気象庁の Web サイト (<http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>) から取得した。また、潮位は気象庁の白浜観測所で測定された毎時潮高データを日本海洋データセンターの Web サイト (http://www.jodc.go.jp/index_j.html) から取得し使用した。

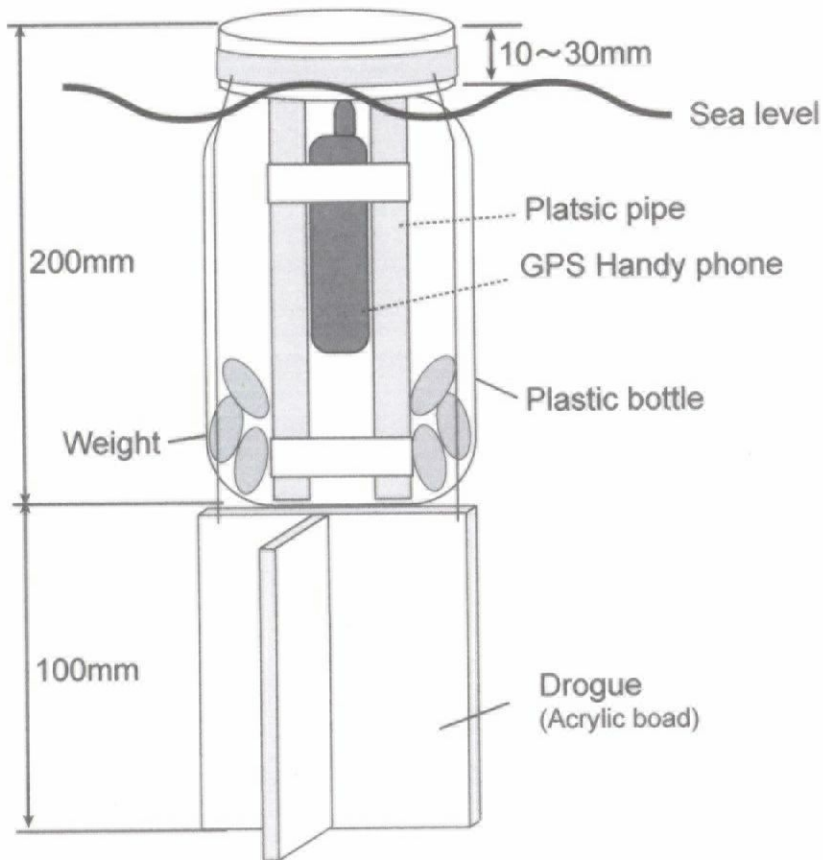


Fig. 3.4. GPS buoy used for observation of surface current

第3節 結果

第1項 方位選択実験

遊泳行動

LEDによる条件付け中は10分以上連続でLEDの方向に定位することが多く、定位方向は安定していた。しかし、LEDが消灯し、暗条件となると水槽内を巡回遊泳するようになった (Fig.3.5.)。暗条件下の遊泳行動を分類したところ、No.12の個体は測定時間のうちの70.8%が定方向遊泳であったのに対して、他の11個体は巡回遊泳の時間が長く、定方向遊泳を行う時間の割合は全測定時間のうち0.0-24.1%と短かった (Fig.3.5., Fig.3.6.)。各個体が定方向遊泳をおこなった回数は0-17と個体により大きく異なり、定方向遊泳をおこなう時間帯に一定の傾向は見られなかった (Fig.3.6.)。

定位方向

各個体の平均定位方向は $52-305^\circ$ の範囲であったが、平均定位方向へのまとまりの強さを表す r は $0.06-0.21$ と低かった。この結果を常に速度 1.0km/h で遊泳したとして1時間分積算すると、各方向へ $60-210\text{m}$ 動く程度でしかない (Fig.3.7.)。12個体の定位方向の平均は 115° (95%信頼区間 $\pm 49^\circ$, $r = 0.51$, $N = 12$, $P < 0.05$, Rayleigh test)で、定位方向の偏りは統計的に有意であった (Table 3.1., Fig.3.8.)。

第2項 トラッキング

産卵浜周辺における移動

14個体中13個体が放流地点から2基の離岸堤の開口部を通過して外海へ出た (Fig.3.9.)。残りの1個体は開口部よりも南に位置する離岸堤と導流堤の間から外海へ出た。それ以降は全個体が東方向へ移動したが、14個体中11個体は次第に南東方向へ針路を変え、残りの3個体は東方向への針路を維持した。得られた軌跡から移動方向と速度の経時変化を算出すると、孵化幼体のものとブイのものは似通ったものとなった (Fig.3.10., Fig.3.11.)。離岸堤開口部を抜けた後に北向きの進路をとったものについても、このときのブイの動きは北向きであった (Fig.3.10., Fig.3.11.)。放流後40分以内の遊泳速度は平均 13.1m/min (0.79 km/h)であった (Table 3.3.)。また全追跡時間を通

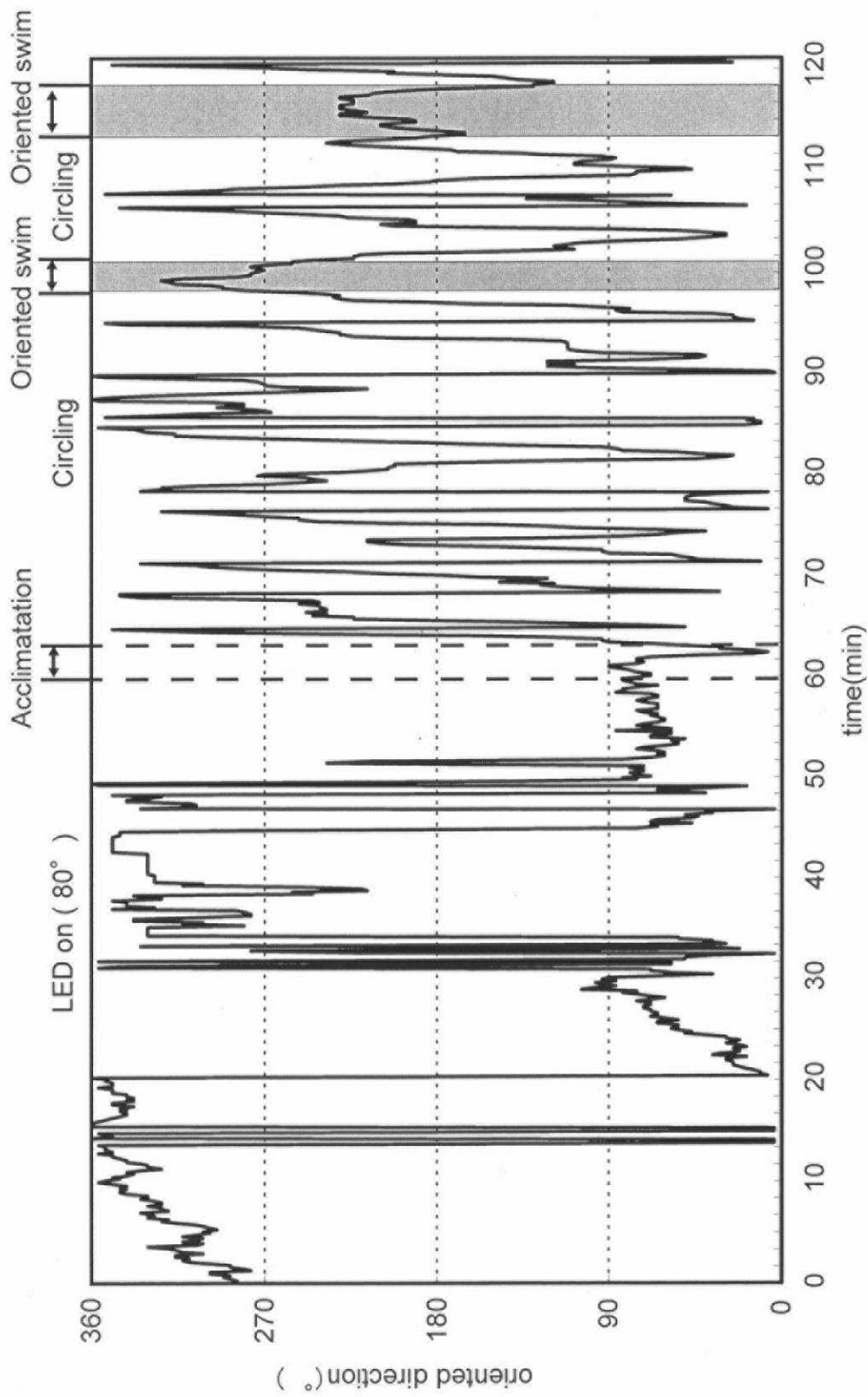


Fig.3.5. Sequential orientation records obtained by data logger(CCKN-578)

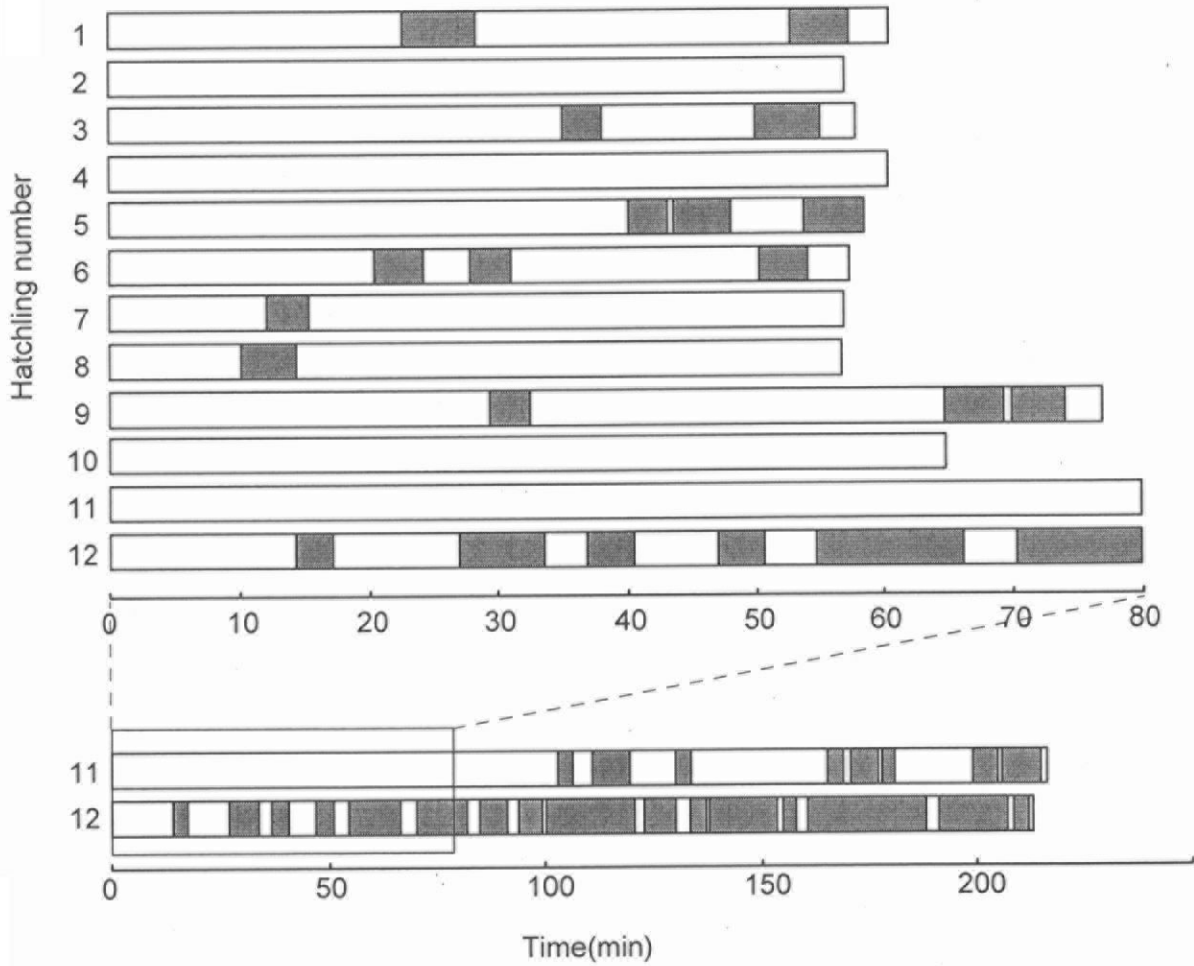


Fig. 3.6. Temporal patterns of swimming behavior.
 White bar: "Circling", gray bar: "Oriented swimming"

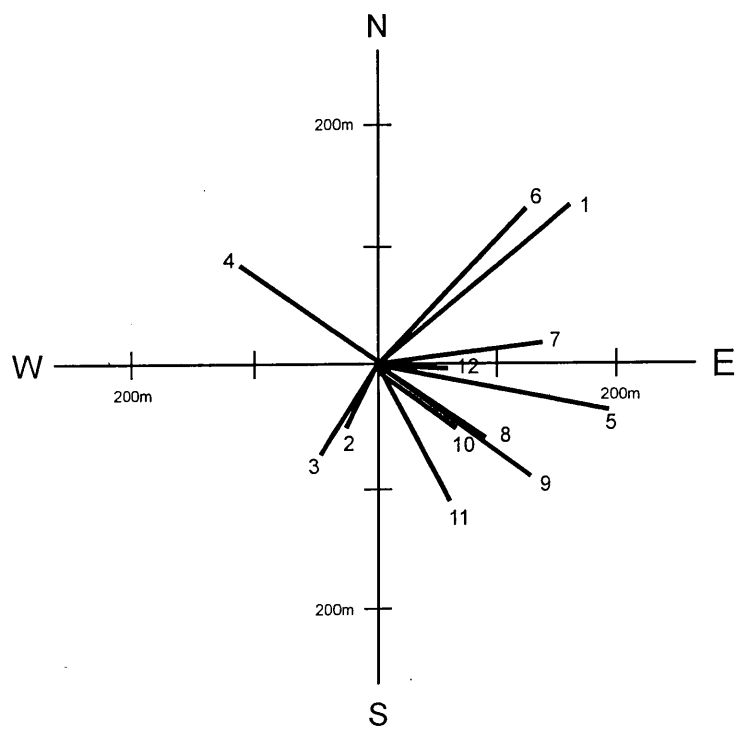


Fig.3.7. Simulated movement of hatchlings during one hour. Numbers on the top represent the identification number of individual hatchling (Table 3.1.). Swimming velocity was assumed to be 1.0km/h.

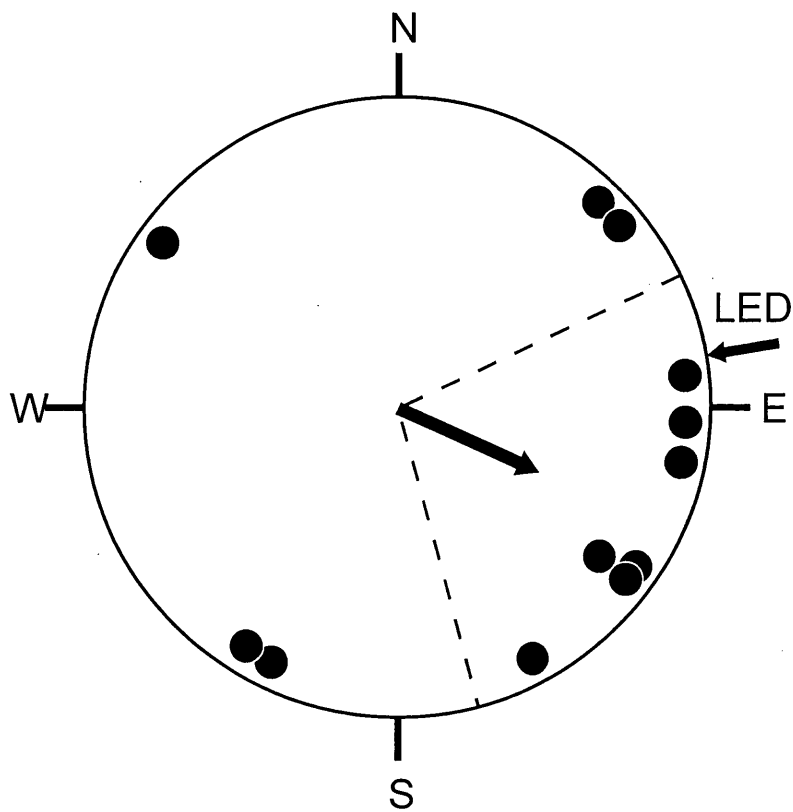


Fig. 3.8. Mean angle of hatchling orientation under no light cue condition. Each circle represents the mean angle for individual hatchlings. Turtles were significantly oriented ($r=0.51$, $N=12$, $P<0.05$, Rayleigh test.). The arrow indicates the group mean angle and vector. Dashed lines represent the 95% confidence interval for mean angle.

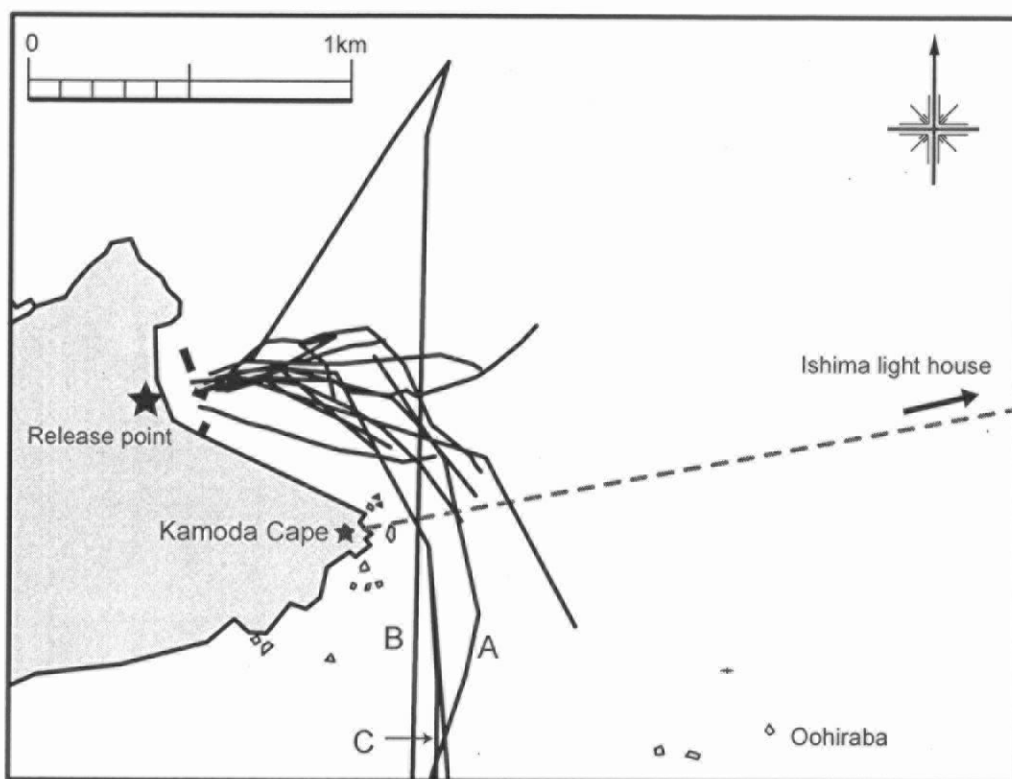


Fig.3.9. Courses taken by hatchlings during a few hours after release.

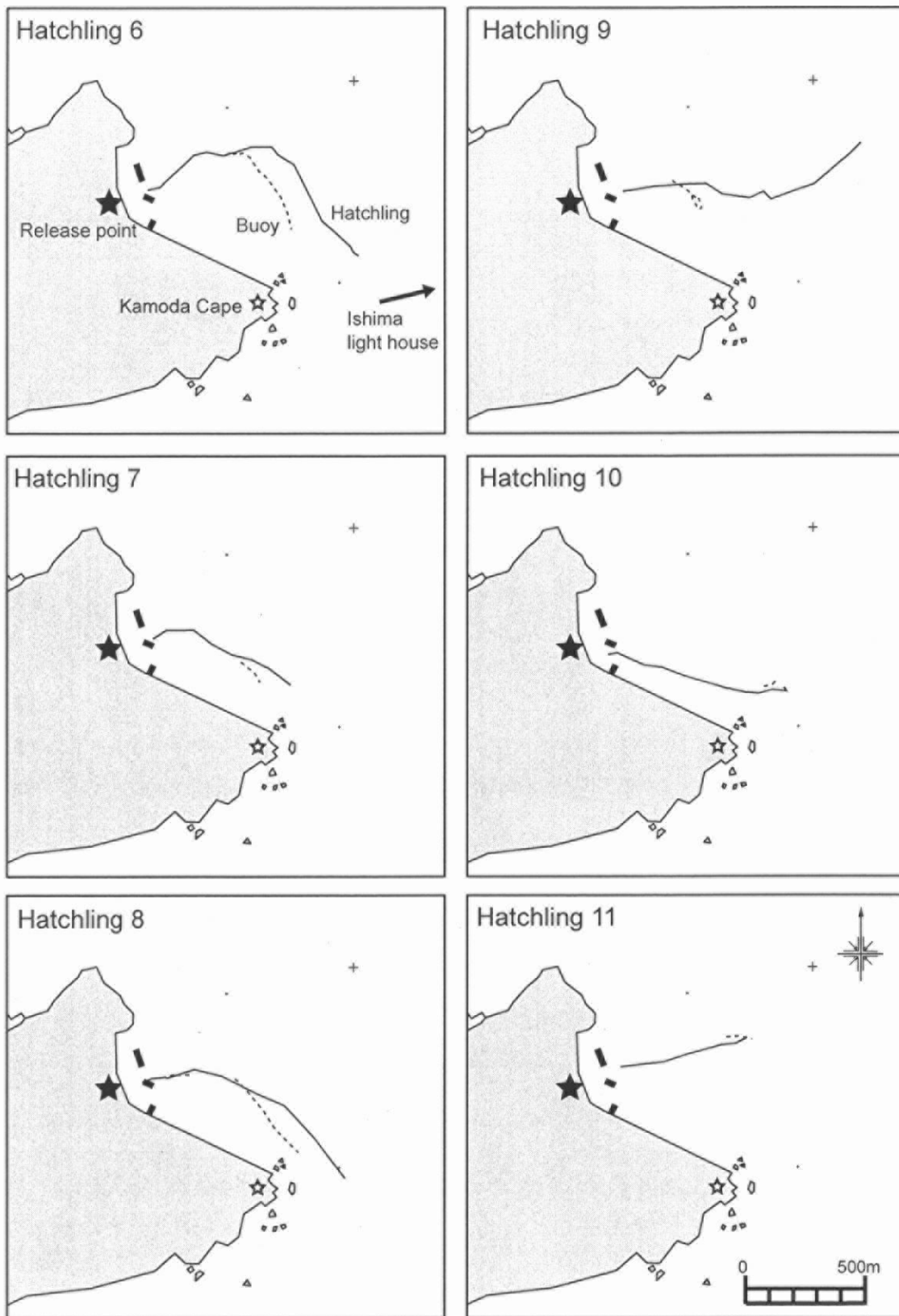


Fig.3.10. Courses taken by hatchlings and GPS buoy. Solid line: Hatchling, Broken line: GPS buoy, ★: Release point, ☆: Kamoda light house.

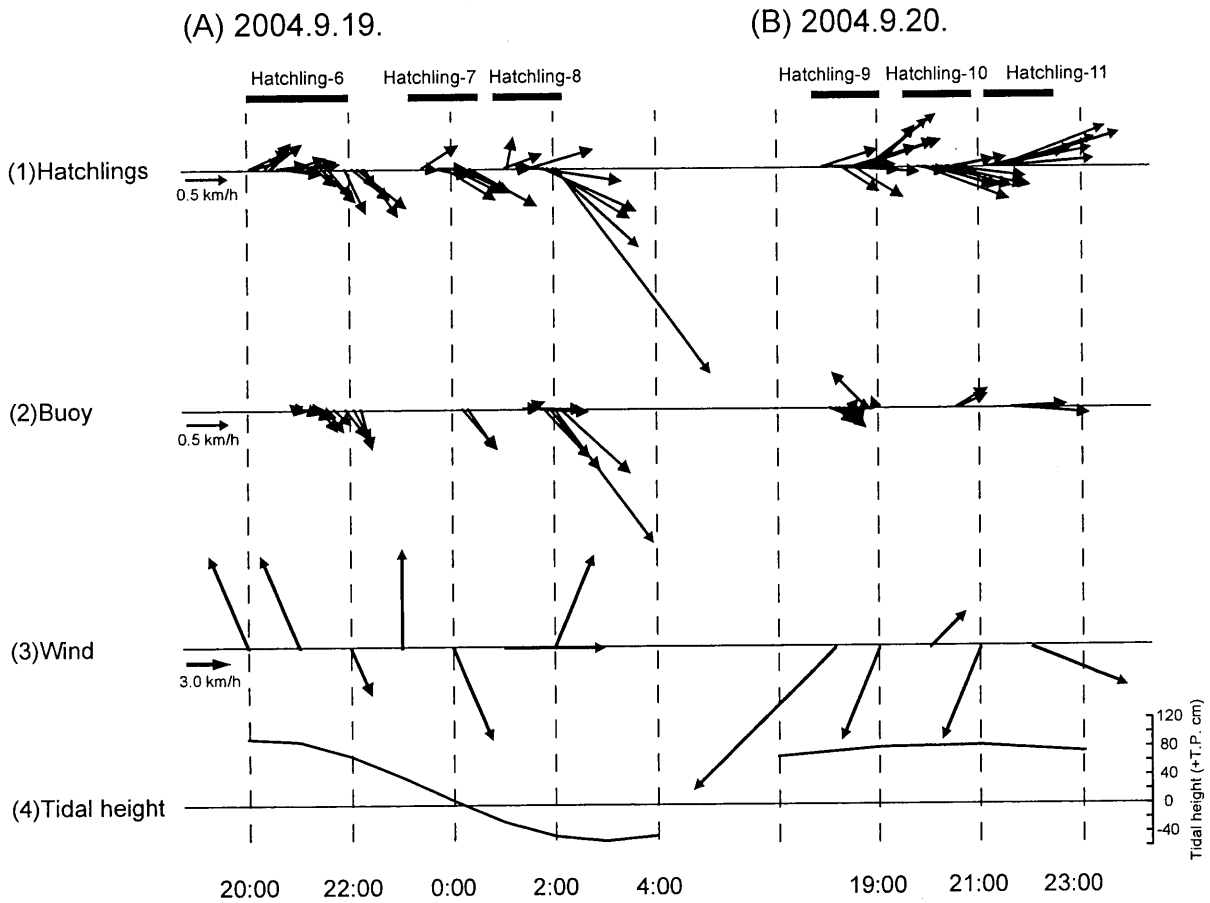


Fig.3.11. Hodograph of swimming directions and speeds of hatchlings, surface current, wind and tidal conditions. (1) Hatchlings: vectors were calculated from tracked course. (2) Buoys: vectors were calculated from course of the drift buoy. (3) Wind: observed by Meteorological agency on Kamoda. (4) Tidal height: observed by Meteorological agency on Shirahama, Wakayaka.

Table 3.3. Moving speed of the hatchlings during first 40 minutes after release.

Hatchling	Average speed (km/h)	n	Tracking method
1	1.4	1	Radio
2	2.1	1	Radio
3			Radio
4	0.7	1	Illuminant
5	0.3	2	Illuminant
6	0.5	3	Illuminant
7	0.3	2	Illuminant
8	0.3	4	Illuminant
9		0	Illuminant
10	0.8	2	Illuminant
11	0.8	4	Illuminant
12	1.2	7	Radio
13			Radio
14			Radio
total	0.8	27	
Radio	1.8	2	
Illuminant	0.7	25	

n: number of period used for estimating the speed.

じて、遊泳速度は平均 19.8m/min (1.19km/h)、最大で 73.5m/min (4.41km/h) であった (Table 3.4.)。

産卵浜脱出後の移動

12 時間以上の長時間追跡した 3 個体は 18:30~20:30 の間に産卵浜から放流され、蒲生田岬を抜けた後、いずれも岬を巻くような形で進路を南西へ変え、海岸線に沿うように移動した (Fig.3.12.)。うち 1 個体 (Fig.3.12.中 B) は翌朝の 5:30 ごろに突然進路を逆転させ、通過してきた経路を遡って再び紀伊水道へ入っていった。その後しばらく北進を続けたが、9:30 ころに北進がとまり、再び少しずつ南へと進路を変え始めた。このときの周辺海域には潮目が形成されていた。個体 A (Hatchling_2) と C (Hatchling_12) は蒲生田岬を抜けた後はいずれも進路をほぼ一定に保ったまま移動し、個体 A は追跡終了の 11:30 までに放流地点から約 30km 離れた牟岐町大島周辺まで、個体 C は 12:30 までに約 20km 離れた日和佐町沖合まで移動した。総追跡時間はそれぞれ 13.5 時間、17.5 時間であった。個体 C の移動経路上で投入した 2 基のブイは個体 C とほぼ同じ経路を漂流した (Fig.3.13.中 m と k)。ブイの移動速度は 0.23~1.82km/h、平均 1.08km/h で、その変化は約 2 時間の位相遅れをもって潮汐と対応していた (Fig.3.14.)。

第4節 考察

第1項 実験条件下におけるオリエンテーション

孵化幼体の定位方向には有意な偏りが見られ、95%信頼区間を考慮すると、これは最初に海方向の条件づけとして与えた LED の方角に向かった結果と考えられた (Fig.3.8.)。これは視覚の全く効かない暗条件下では、あらかじめ条件付けされた方位付近に遊泳針路が集中するというフロリダのアカウミガメ孵化幼体の実験結果と同じであった (Lohmann 1991, Lohmann and Lohmann 1994, Irwin and Lohmann 2003)。しかし、遊泳行動を各個体について経時的に見ると、定方向遊泳を示したのはごく僅かな時間にすぎなかった。測定方法に若干の違いはあるものの、地磁気説を最初に提唱した Lohmann (1991) の実験でも半数の個体は定方向遊泳の時間が全体の

Table 3.4. Moving speed of the hatchlings during whole tracking period.

Hachling No.	Average speed (km/h)	Min. speed (km/h)	Max. speed (km/h)	n
1	1.71	1.16	2.55	3
2	3.04	1.07	4.41	15
3	1.06	0.37	2.96	29
4	1.32	0.72	1.90	6
5	0.98	0.25	1.97	7
6	0.49	0.28	0.78	17
7	0.58	0.14	0.95	9
8	1.01	0.07	3.20	10
9	0.83	0.56	1.09	12
10	0.84	0.38	1.15	10
11	1.18	0.91	1.44	7
12	0.46	0.26	0.66	5
13	1.40	0.31	4.33	34
14	0.80	0.31	1.57	5
total	1.19	0.07	4.41	169

n: number of periods used for estimating the speed

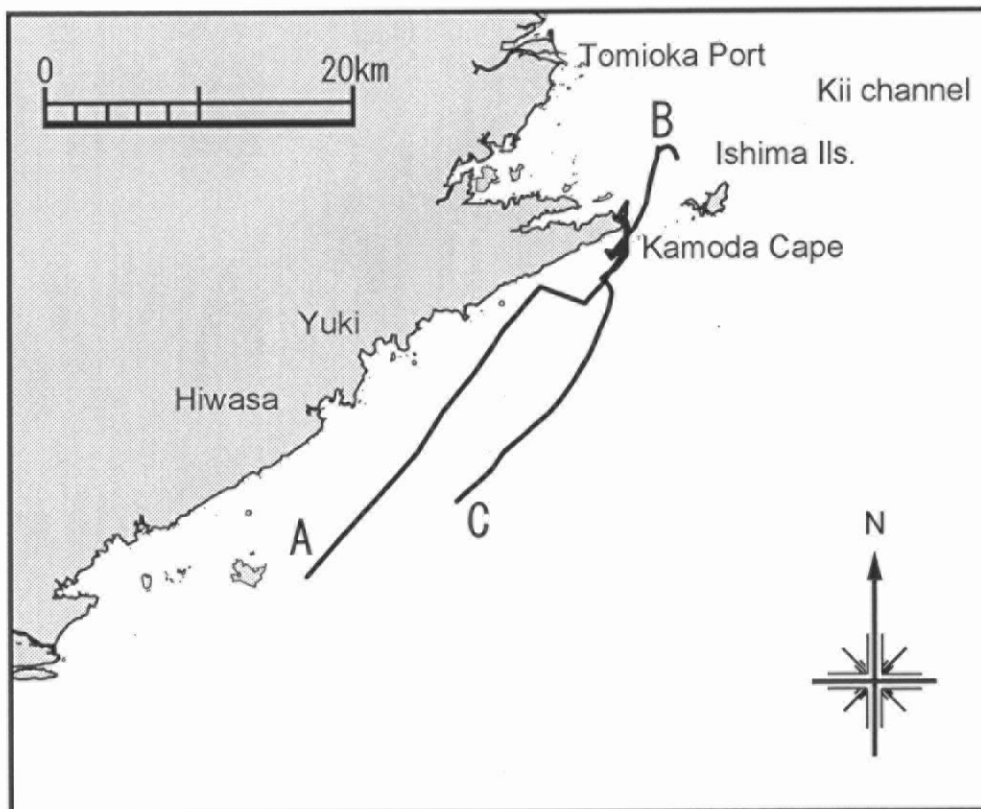


Fig.3.12. Courses taken by the hatchlings during one day after release. Lines represent the courses taken by the hatchling. A: hatchling_2, B: hatchling_3, C: hatchling_12 (Table 3.2.)

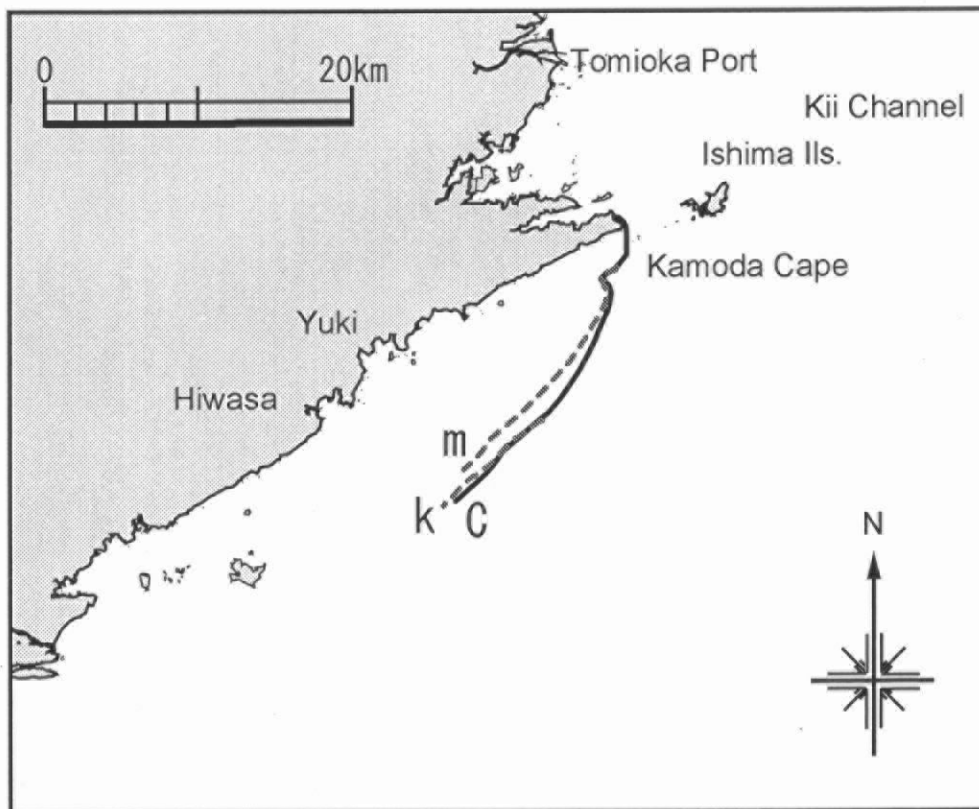


Fig.3.13. Courses of the drift buoy during one day after release. Dashed line "m" and "k" represent the courses of the drift buoy. Both buoys are released on the course of hatchling "C".

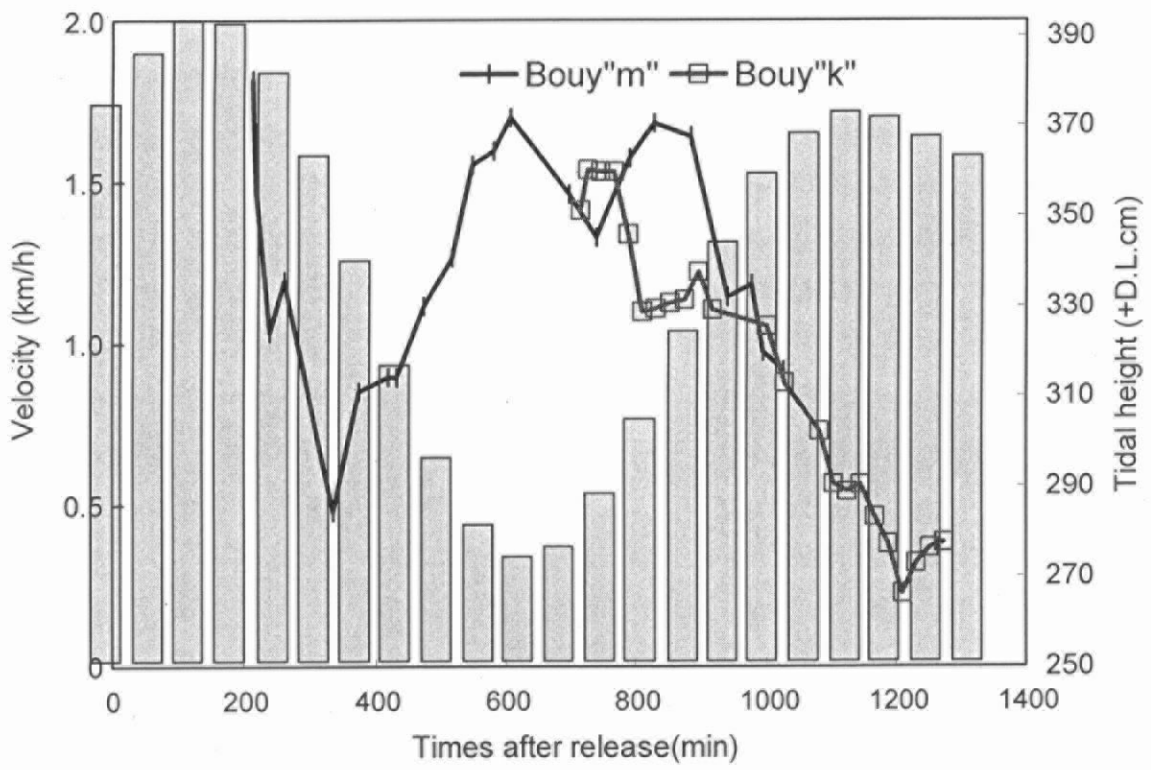


Fig.3.14. Relationship between surface current velocity (lines) and tidal height (columns). Velocities of surface current were estimated using the GPS buoys. Tidal height was observed by the Meteorological agency on Shirahama, Wakayama.

15-25%に過ぎず、大半が巡回遊泳で占められていた。巡回遊泳は孵化幼体が針路を探して彷徨っている状態かもしくは混乱している状態と考えられ、本研究や Lohmann (1991) で見られた定位方向の偏りはそれほど拘束力の強いオリエンテーションではないように思われる。ただし、Lohmann (1991) が用いた水槽が直径 102cm であったのに対して、本研究で用いた水槽は直径 69cm と小さい。そのため、孵化幼体の遊泳によって生じた微弱な波の壁面反射が影響して定位傾向が弱まった可能性も考えられる。

第2項 野外における分散過程

電波発信機を用いた追跡方法

これまで孵化幼体のトラッキングは後ろから泳いで追いかけるか (Frick 1976, Abe et al. 2000)、発光体を曳航させて追いかける (Salmon and Wyneken 1987, Witherington 1995, Pilcher et al. 2000) ことによって行われてきた。しかし、遊泳して追いかける場合には本来孵化幼体が産卵浜から海に入る時間帯である夕方から夜間に実施することができない点、接近して遊泳する観測者の存在が孵化幼体の遊泳行動に影響を与える可能性がある点が欠点であった。一方で、発光体を曳航させる方式は夜間こそ視認性に優れるものの、昼間には発光することの利点が全く無くなり、見失いやすくなってしまう。本研究では電波発信機を用いることで、これらの欠点が解消された。

ウミガメ類の孵化幼体に対する電波発信機の使用はこれまでにオサガメで孵化幼体の背中に背負わせて追跡した例がある (Liew and Chan 1995)。しかし、ウミガメ類の中で最大の体サイズを誇るオサガメは孵化幼体も他のウミガメに比べて大きく、実際にこのとき使用された孵化幼体 2 個体の体重は 35g、38g と日本産アカウミガメ (15.3 ± 2.4 g, Table 2.5.) の 2 倍以上重い。予備実験ではオサガメのように背中に背負わせる方法も試したが、体サイズの小さいアカウミガメではバランスを崩してしまい明らかに遊泳に支障をきたした。オサガメ以外のウミガメの孵化幼体で電波発信機を使用するには別の装着方法を採用すべきである。

本研究で考案した曳航式には利点が 2 つある。まず 1 つは孵化幼体の遊泳行動への影響が少ない点。そしてもう 1 つが、発信機の位置を高く保持することが可能となることで電波の発信距離を格段に向上させることができる点である。これにより本研究では個体を見失った後も容易に位置を特定することができ、長距離の追跡では電波発信機の効力が十分に発揮された。一方で、放流直後の産卵浜周辺では崖などによる電波の反射が強いために位置特定が困難になるという電波発信機特有の欠点も確認された。電波発信

機は全ての点で他の標識方法に勝っているわけではなく、例えば夜間のみの短距離の追跡には発光体のほうが有用であることがわかった。追跡の場所や距離に応じて使用する標識を変える必要がある。

本研究により、これまで使用例のなかったアカウミガメ孵化幼体への電波発信機の装着方法を確立することができたが、遊泳への影響はまだ大きい。発信機自体は非常に小型化（7.3×18mm、空中重量 1.4g）されたものの海水に弱いという電波の特性のため装着方法が大掛かりとなってしまう、発信機が小型化された利点を半減させている。装着方法については更なる改善が必要である。

追跡方法が遊泳行動に及ぼす影響

本研究では孵化幼体の位置を特定するために電波発信機もしくは発光体を曳航させている。このような曳航体は当然、遊泳において負荷となると予想される。表層流の影響が少ない放流後 40 分までの移動速度は平均 0.79 km/h (n = 27) であった。手法別では電波発信機が 1.78 km/h (n = 2) , 発光体が 0.71 m/min (n = 25) であった (Table 3.3.)。電波発信機のほうが速いのは、電波の反射のために砂浜近くで位置特定できた回数が少なく、流れの影響を受ける位置のデータに偏ったためと考えられる。実際に追跡した印象では電波発信機のほうが負担は大きいように思われた。流れの影響のない実験環境下におけるアカウミガメ孵化幼体の遊泳速度はフロリダで 1.28 km/h (Wyneken 1997)、日本で 0.53-0.85 km/h (福田ら 1993) という値が得られている (Table 3.5.)。フロリダの個体と日本の個体で大きく遊泳速度が異なるが、これは個体群による体サイズの違いの影響もあるだろう。実際にフロリダの孵化幼体は直甲長 41-48mm、体重 15-21g (N=169, 12 clutch) (Salmon and Wyneken 1987) なのに対して本研究で測定した蒲生田の個体群 (N=276) は直甲長 40.2 ± 2.3 mm (範囲 : 34.4 - 46.7 mm)、体重 15.3 ± 2.4 g (範囲 : 9.4 - 21.8) と明らかに小さかった (Table 2.3.)。日本の個体を用いた福田ら (1993) の遊泳速度と比較すると、放流後 40 分間の遊泳速度 (平均 0.79 km/h) は福田ら (1993) の 92% に相当する。本研究とほとんど同じ曳航方式を採用した Witherington (1995) でも、遊泳速度は曳航体が無かったときの 91% であったことから、この値は妥当であろう。このことから、本研究で用いた曳航体による遊泳への負担は約 8% 遊泳速度を落とす程度に過ぎず、著しく分散過程を乱すものではなかったといえる。

Table 3.5. Swimming speed of hatchling measured on field and arena.

Species	Locality	Condition	Method	Average speed (km/h)	Range (km/h)	Reference
Green turtle	Bermuda	field	free-swimming	1.56	-	1
	Costa rica	field	free-swimming	1.49	-	1
	-	-	-	1.1	0.8-3.2	2
	-	-	-	1.57	-	3
	-	arena	free-swimming	0.91	-	3
	Malaysia	field	towing float	1.2	0.00-3.47	4
	Japan	field	free-swimming	1.62	-	5
Leatherback turtle	-	arena	free-swimming	0.91	-	3
	Malaysia	field	back-pack	2.13	-	6
Loggerhead turtle	Florida	arena	free-swimming	0.72	max:1.08	7
	EC Florida	field	free-swimming	1.26	1.10-1.37	8
	EC Florida	-	-	0.83-0.89	-	9
	EC Florida	field	towing float	-	top 1.31	9
	EC Florida	field	free-swimming	-	0.96-1.32	10
	EC Florida	field	towing float	3.76	-	10
	-	arena	free-swimming	1.28	-	3
	Japan	arena	free-swimming	0.53-0.85	-	11
	Japan	field	back-pack	0.83	-	12
Loggerhead turtle	Japan	field (40min)	towing float	0.79	0.07-2.10	This study
	Japan	field (total)	towing float	1.19	0.07-4.41	This study

1: Frick(1976), 2: Ireland et al.(1978), 3: Wyneken(1997), 4: Pilcher et al.(2000), 5: Abe et al.(2000), 6: Liew and Chan(1995), 7: O'Hara(1980), 8: Salmon and Wyneken(1987), 9: Witherington(1991), 10: Witherington(1995), 11: Fukuda et al.(1993), 12: Kudou et al.(2002)

表層流が孵化幼体の移動経路に及ぼす影響

孵化幼体とブイがほとんど同じ移動経路をとったことから、孵化幼体の移動経路の大部分は表層の流れによって決定されているものと考えられた(Fig.3.13.)。特に産卵浜の南東に位置する蒲生田岬を抜けた後の南西方向への急速な移動(最大 4.41 km/h)は黒潮分枝流に乗ったためであることが GPS ブイの軌跡から推察された。産卵浜周辺では移動経路にいくらかの差異が認められたが、追跡時の表層流況が経時的に変動していることが原因であることがブイの軌跡から明らかとなった (Fig.3.10., Fig.3.11.)。

表層流況の変動

表層流況には時間変動が見られた (Fig.3.11.)。ブイによる流況観測の際には海上を吹く風がブイを直接押し流す効果(風圧流)に注意せねばならないとされているが(道田 2005)、本研究で得られたブイの移動方向と風向データの間には全く関係性が見られない (Fig.3.11.)。このことから、本研究で使用したブイはほとんど風圧流の影響を受けておらず、実際の表層の流況を反映していると考えられた。

表層流況の変動には潮汐が大きく影響していると考えられた。満潮近くに流したブイはほとんど南へ流れなかったのに対して、しばらく時間が経過した後の下げ潮中に流したブイは南東向きに移動した(Fig.3.11.A.)。ひとたび蒲生田岬を抜けて南西の進路をとった個体が突然進路を反転させて紀伊水道内に戻ってきた例(Fig.3.12.)も潮汐に応じた流向の変化が原因と推測される。このときに流したブイは不具合により位置データを取得できなかったものの、孵化幼体同様に紀伊水道内に戻ってきていることを目視により確認している。

約ブイの移動方向と移動速度から潮流楕円を描くと、楕円の中心は原点とはならず、南西方向にずれた位置となる(Fig.3.15.)。これは、この海域にもともと南西方向に流れる恒流が存在し、それに潮汐流が加わることで流動場が形成されていることを意味する。この恒流は黒潮分岐流の一つである紀南分枝流もしくはそれに付随した沿岸流と考えられる (Fig.3.16., 殿谷 1979)。南西方向に流れる恒流の存在を認めれば、満潮から約 2 時間後にブイの移動速度が最低になったのは、北東方向への潮流が最大となり南西に向かう恒流の効果が最も打ち消されたと解釈される (Fig.3.14.)。位相遅れが約 2 時間程度であったのは、この海域が太平洋に直接面しながらも陸岸に近い場所であったために、潮汐と潮流が同位相となる進行波 (progressive wave)、潮汐と潮流の位相が $\pi/2$ ほどずれる定常波 (standing wave) の双方の性格を潮汐波がもったことが原因と考えられた (柳 2001)。

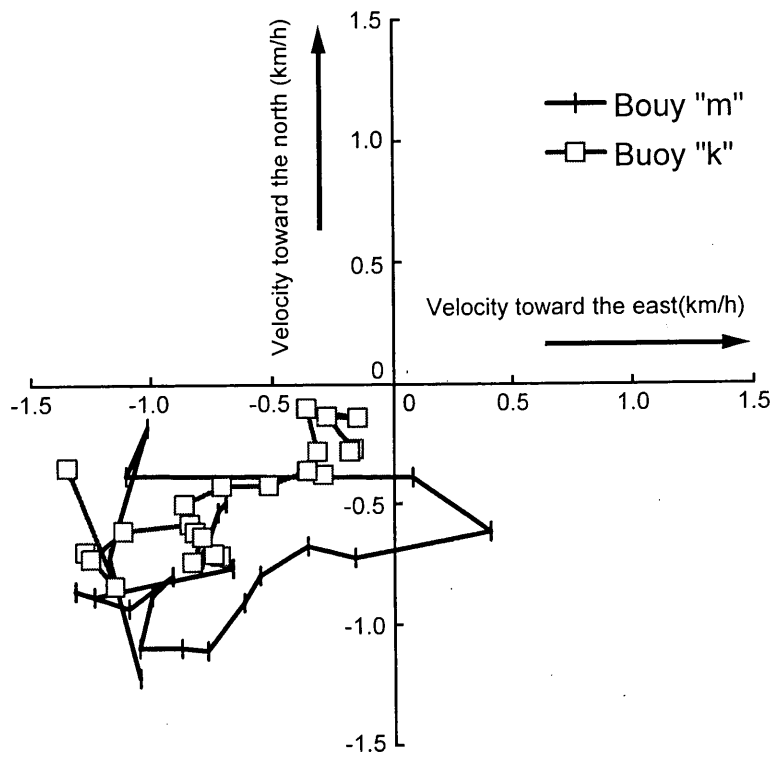


Fig.3.15. Tidal current ellipse observed using drift buoys.

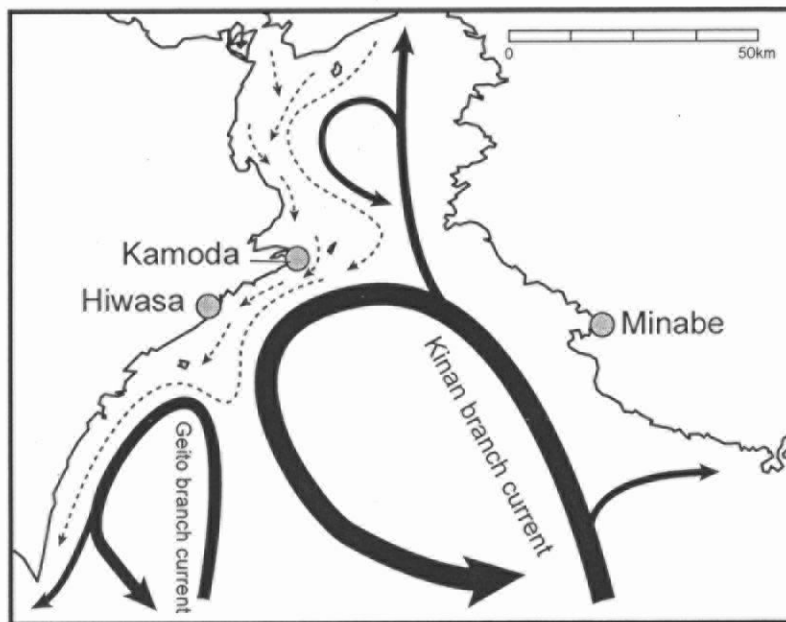


Fig. 3.16. Diagram of the currents off the Tokushima coast.
(after Tonoya 1979)

恒流の強さは一定であっても、潮汐流の大きさは、その日の月齢に大きく左右される。孵化幼体が上げ潮に伴い、紀伊水道へ戻されてしまった 2004 年 9 月 16 日が大潮に近い日であったのに対して、潮汐が変化しても孵化幼体が戻されなかった 2004 年 9 月 21 日は小潮に近く、潮汐は小さかった。潮汐の大きい 9 月 16 日は紀伊水道へ向かう上潮が恒流の力を上まっただめに流向が逆転するに至ったと考えられる。つまり、個体 B と C との移動状況に差をもたらしたのは、放流時の月齢の違いであったと考えられる。

孵化幼体の遊泳

孵化幼体の移動は表層流況に大きく依存していることがわかったが、孵化幼体の軌跡とブイの軌跡との間には若干の違いがみられた。ブイの軌跡が表層流のみに依存しているに対し、孵化幼体の軌跡には能動的な遊泳の効果も含まれているためにこのような差異が生じたと考えられる (Fig.3.17.)。そこで、ゴムボートによって短距離の追跡をおこなった個体のうち、同時に GPS ブイによる流況測定がおこなわれた 6 個体 7 例について、孵化幼体の移動方向と速度 (ベクトル) から表層流の流向と流速 (ベクトル) を差し引いた。するとどの個体も東向きの移動成分 (平均 0.37 km/h, 範囲 0.16-0.69 km/h) が残り、孵化幼体は表層流によって流されながらもやや東へ移動する傾向にあった (Fig.3.18.)。全ての個体で一貫して東へ軌跡がずれていたことから (平均方位 91° , $r = 0.93$, $n = 7$, $z = 5.998$, $P < 0.001$)、これは偶然によるものではなく、孵化幼体の能動的な遊泳の影響と考えられる。同様の処理を長距離追跡した個体にも施すと、蒲生田岬を抜けて南西方向に進路を変更したあとの個体 C は 1 時 59 分から 6 時 26 分までが速度 0.29 km/h で 187° の成分が残るのに対して、6 時 26 分から 12 時 22 分までは 0.22 km/h で 199° といずれもブイよりもやや南方へずれる軌跡を示した (Fig.3.19.)。

初期分散過程における捕食

マレーシアのサバ州でアオウミガメの孵化幼体を用いておこなわれた追跡では、最初の 2 時間で 40-60% もの個体が失われ、捕食されたものと解釈された (Pilcher et al. 2000)。また、フロリダのアカウミガメでは同じく捕食者不明ながら、6.8% (Witherington and Salmon 1992)、バミューダのアオウミガメではダツ *Tylosurus* sp. やオニカマス *Sphyræna barracuda* によって 8.3% (Frick 1976, Hirth 1971) が追跡中に捕食されている。これに対し本研究では追跡した 14 個体のうちで追跡中に捕食された個体はなかった。この 14 個体の他に追跡途中で孵化幼体が曳航体から外れたケースが 2 個体あったものの、捕食を示す急激な曳航体の沈み込み (Pilcher et al. 2000)

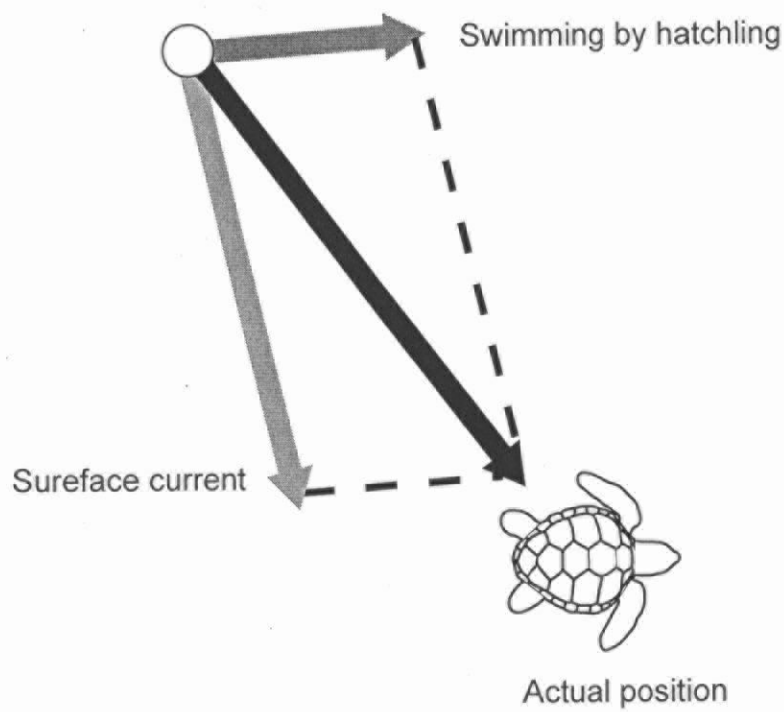


Fig.3.17. Relationship between swimming direction and actual position of hatchling under surface current condition.

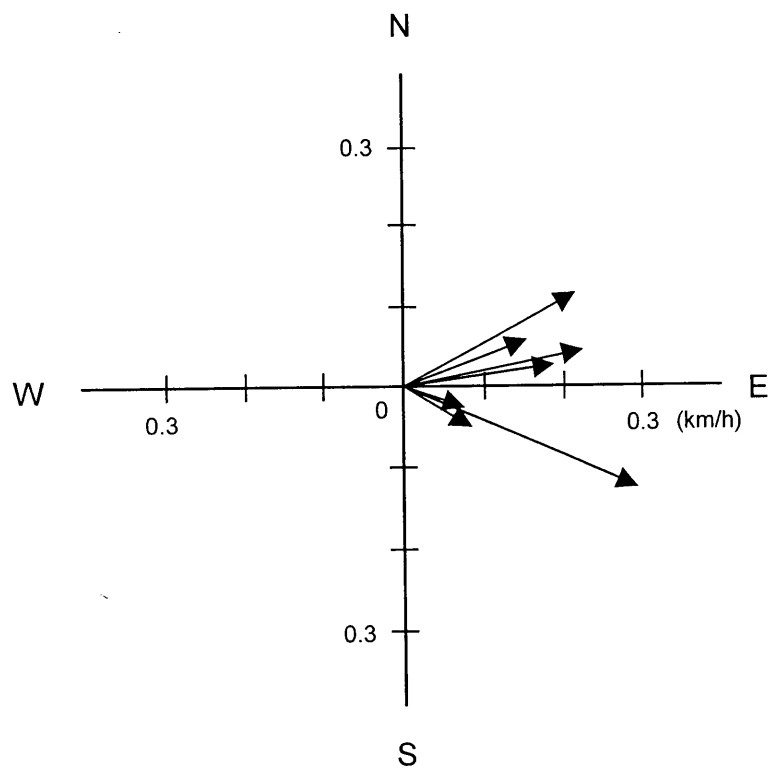
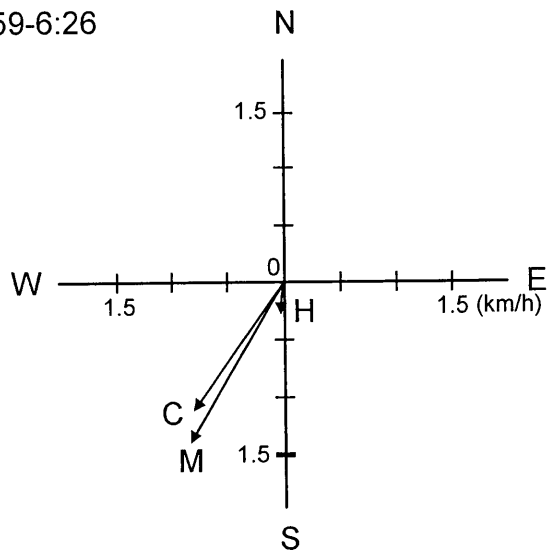


Fig.3.18. Swimming vector elements estimated from the tracks of hatchlings and buoys.

(A) 1:59-6:26



(B) 6:26-12:22

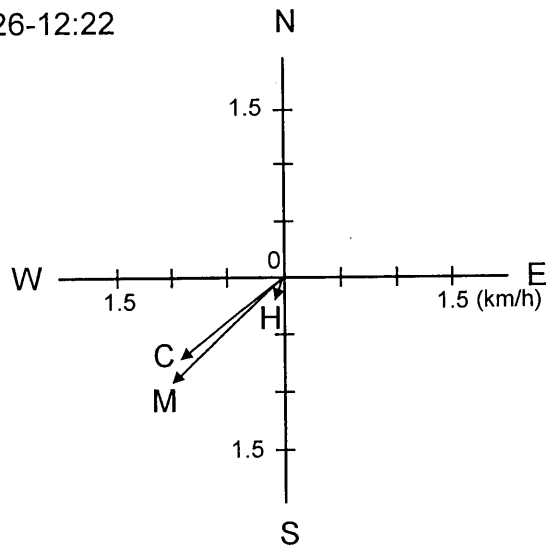


Fig.3.19. Vector elements composing the movement of hatchlings. Length of arrow represents the velocity. M: actual movement of hatchling. H: swimming vector by the hatchling, C: the surface current.

は観察されていない。日本産アカウミガメが初期分散をおこなう日本の産卵浜周辺海域では Pilcher et al. (2000) が実験したような熱帯のリーフ性の海域に比べれば捕食圧は高くないのかもしれない。しかし、捕食されるか否かは偶発的な要素が強いので、例数を重ねる必要がある。

孵化幼体のトラッキングの今後

本研究の追跡では個体を最後まで個体を見失うことはなかったが、備船時間の問題のため途中で打ち切らざるを得なかった。個体ごとに追跡せねばいけないため、人員や備船などが制約となってしまうのが本トラッキング方法の難点である。いずれは成体の衛星追跡のように、一度装着したら船で追跡することなしに移動を把握できるようになるのが理想であろうが、衛星用の発信機が孵化幼体に使用できるほどに小型化し、大量の個体を追跡できるほど安価になるにはまだ時間がかかりそうである。本研究結果のように孵化幼体が長い時間にわたって沿岸を遊泳するのであれば、GPS ブイでおこなったように携帯電話網を利用する方が近い将来の実現可能性は高いだろう。得られるのは沿岸における移動に限られるが、これまで日本産アカウミガメの初期分散の追跡例が全くなかったことを考えれば非常に大きな進展となる。

第3項 初期分散機構

Lohmann (1991) によって地磁気定位仮説が提唱されて以来、水槽内におけるオリエンテーション実験と野外における追跡はそれぞれ別々の研究者によって行われてきた。そのため、双方の結果を刷り合せて解釈するには無理があることが多かった。また、実験条件下と野外の最も大きな違いである表層流についても追跡と同時に観測をおこなった研究はあるものの、観測頻度が少ないことから補足的なデータとして紹介するだけに留まっていた (Frick 1976, Witherington 1995, Pilcher et al. 2000)。Abe et al. (2000) の研究は唯一、流れの影響を詳細に検討したものであるが、放流地点からリーフを抜けるまでの 1km 以下の追跡に限られている。

本研究では同じ産卵浜由来の孵化幼体について水槽実験と野外追跡を初めて同時におこなうことができた。そのうえ、表層流況についても GPS ブイを使用したことで信頼度の極めて高い連続的なデータを得ることができた。そこで、これらの水槽実験と野外における追跡結果を総合して孵化幼体の分散機構について以下で考察する。

外洋への脱出機構

本研究の対象地である蒲生田のように外洋に直接面していない産卵浜からも外洋への分散が行われることの説明として、これまでは孵化幼体が持つ特殊な定位能力が挙げられきた (Pilcher et al. 2000)。Lohmann and Lohmann(1996b)が定位仮説に盛り込んだ波向きを手掛かりとしたオリエンテーションはそのような産卵場からの分散を説明するためのものでもある。しかし、本研究では孵化幼体が南進して紀伊水道を抜けるうえで、能動的な定位以上に表層流が重要な役割を果たしていることが示された。夏期の紀伊水道では鉛直的には上層で低塩分水が外洋へ流出し、下層で高塩分水が紀伊水道に流入するエスチュアリー循環流が存在する (笠井ら 2001)。そのため、孵化幼体が遊泳するような表層では潮汐流の影響を受けながらも、紀伊水道を南へ抜け出るような流れが卓越しやすいのであろう。波向きに対する定位は確認することが出来なかったが、Witherington (1995) や Pilcher et al. (2000) も指摘したように実際には砕波帯などのもっと早い段階で既に使用された可能性がある (Fig.3.1.)。

また、孵化幼体の移動から表層流の成分を差し引いたときに残った東向きの成分 (Fig.3.18.) は水槽実験で示された地磁気による東方への定位傾向 (Fig.3.8.) に相当するものと考えられた。このことから、水槽実験で示された定位は少なくとも蒲生田岬を抜けるまで保持されていたが、流れの強い沖に出るに従い移動経路は孵化幼体自身の定位よりも流れに強く影響されるようになったと解釈できる (Fig.3.20.)。Lohmann and Lohmann (1996b) によって提唱されたウミガメ孵化幼体の定位能力は流れの弱い産卵浜のごく周辺を遊泳するときのみ有効に作用し、その後外海に面した流れの強い海域では主に海流の影響を受けて分散していくものと考えられた。孵化幼体の軌跡と表層流況から推定した孵化幼体自身の遊泳速度は蒲生田海岸から離れるに従って 0.37、0.29、0.22km/h と低下していったが、孵化幼体の行動を直接観察していないので、これが果たしてフレンジー期が終了したことを意味するのかどうかは分からない。

孵化幼体の分散を助ける沿岸流の意義

日本列島の場合、アカウミガメが産卵をおこなう砂浜の近傍には往々にして大河川が存在する。例えば蒲生田の場合は徳島平野を流れる吉野川があるし、宮崎では大淀川、遠州灘では天竜川がこれにあたる。孵化幼体が分散をおこなう夏から秋にかけては河口で成層化が起りやすいため、このような大河川から流出した高温で低塩濃度の河川水が表層を外洋に向かう流れを作ることが多い。大河川に近い産卵浜ではこのような表層流に乗った分散が行われているものと予想される。蒲生田は他の産卵浜に比べて波浪の穏やかな内湾的な性格をもち、総延長約 500m と規模も小さいうえに礫が多く存在し、

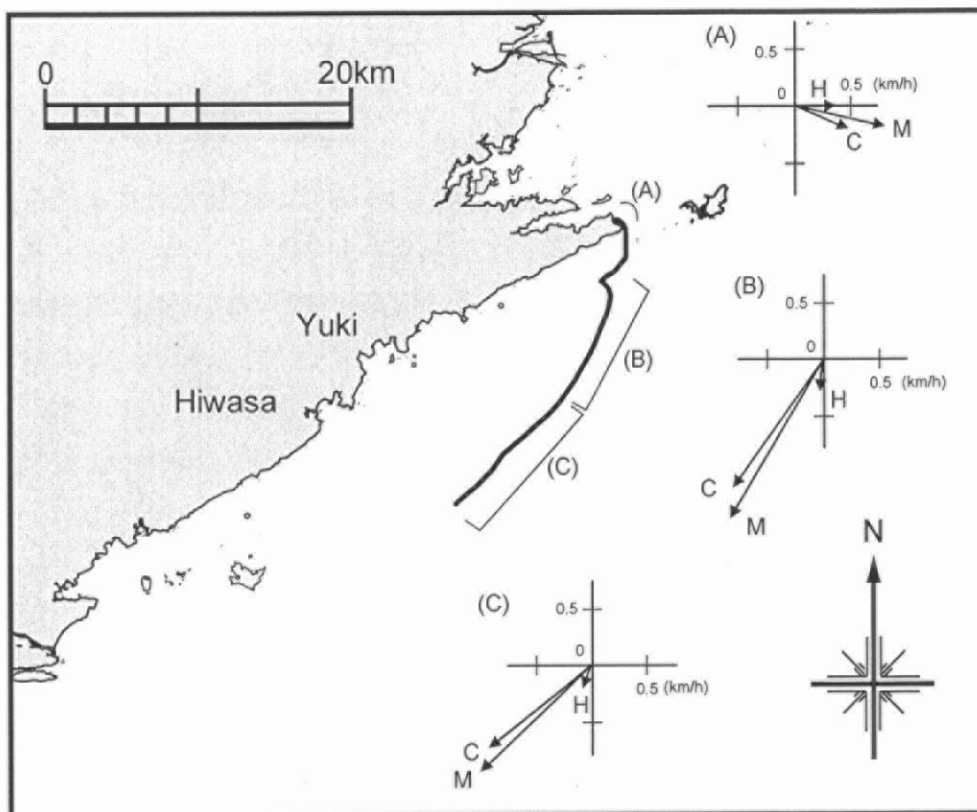


Fig.3.20. Changes in hatchling orientation during tracking period. Length of arrow represents velocity. M: actual movement of the hatchling. H: swimming vector of hatchling, S: surface current. Line represents the course taken by hatchling_12. (A) vectors estimated from the results of 6 hatchlings and 7 buoys near the Kamoda beach. (B) estimated from hatchling_C and buoy_m, (C) estimated from hatchling_C and buoy_k.

決して産卵条件のいい砂浜ではない。そのような場所でも重要なアカウミガメの産卵浜となりえたのは本研究で見た初期分散を助ける表層流が存在したからではなかろうか。東シナ海に面する九州西岸の産卵浜も黒潮との位置関係からすると初期分散が成功しないかのように思われるが、漂流ハガキによる調査ではそのような場所からも太平洋側を流れる黒潮への到達が可能であることが示されている（小林 1993）。長期的な産卵場の形成と維持には従来言われてきたような砂浜の質だけでなく、周辺の流況も重要な要素であると考えられた。

初期分散の成否が個体群動態へ与える影響

蒲生田岬を抜けたあとの孵化幼体の移動は紀南分枝流に乗ったものと解釈された。紀南分枝流は和歌山県南部町の沖をかすめて北上したのち、蒲生田岬と紀伊半島の日ノ岬を結ぶ線で西へ転じて蒲生田岬の沖をかすめて室戸岬方面へと流れていくとされている（殿谷 1979）。このことを考えると紀伊水道を挟んで蒲生田の対岸に位置する大規模産卵地の南部町で孵化・脱出した個体は紀南分枝流に乗って一旦北上し、蒲生田沖をかすめて外洋へ出ているのかもしれない。この海域の主要な産卵地である南部、蒲生田、日和佐を旅立ったアカウミガメの孵化幼体は分散のごく初期の段階で互いに混合され、同じような経路を通過して外洋へ出ている可能性がある。

現在、日本のアカウミガメは屋久島や宮崎では回復傾向が見られる一方で、徳島沿岸および南部の個体群はいずれも低水準で安定し、回復の兆しが見られない（日本ウミガメ協議会 私信）。徳島・和歌山に何らかの特異的な減少要因が存在するのではないかと考えられているが、繁殖期の沿岸における混獲のみならず初期分散過程にも何らかの脅威が存在するのかも知れない。初期分散過程における生残率低下の要因としては人為的なもの以外にも黒潮の流路パターンなど海洋構造が変化することで浅海を抜けるのに要する時間が長くなり、捕食の危険性が高まることも考えられる。実際にこの海域では黒潮の流路パターンによって分枝流の形成状況が全く異なることが分かっており（殿谷 1979）、今後は海洋構造の変化が孵化幼体の初期分散に与える影響にも注意を払っていく必要がある。