

埋設データロガーによるカブトガニ産卵地および幼生生息地の 温度・塩分環境の計測

清野 聡子*・前田 耕作**・宇多 高明***

1. ま え が き

沿岸や河口部を含む汽水域の環境保全においては、近年、希少生物の保護に対する十分な配慮が求められている。生物種の保全計画の作成においては、生活史から見た生息条件の知見が不可欠である。「生きている化石」として知られる絶滅危惧生物カブトガニ *Tachypleus tridentatus* は、瀬戸内海や九州北部の内湾干潟などに広く生息していたが、高度成長期に広範に行われた埋め立てなどにより環境が激変した結果、現在では絶滅危惧種とされるほどに生息数が減少している。本種は、7月から9月の大潮期の満潮時に、湾奥の海浜や河川感潮域の砂州で産卵する。卵は砂中で発生し、孵化幼生は干潟へ分散して亜成体まで成長するが、野外生態には未解明の部分が多い。

カブトガニは、上述の砂州の地表面下約 15 cm に産卵し、その砂中で約 50 日間以上の発生期間を経る。産卵点の局所環境は、海浜や河道内砂州の材料の粒径、締まり度、間隙水の有無や浸透の状況、標高などとともに変化すると考えられるが、具体的なデータが存在しなかった。そのため生息地の物理環境のデータがほとんど無いままに保全策の立案が行われてきたのが現状である。

大分県守江湾の流入河川河口域および干潟は、本種の野生個体群が現存する数少ない生息地の一つである。筆者らは、この地域において本種の産卵地の地形・底質特性を調べ、これらの場所が河川流や波浪の作用下で安定した場であることを実測により明らかにした（清野ら、1998a）。また孵化幼生の分散については、満潮時に産卵地から海中へ出現した孵化幼生が、干潟上の生息地へと潮流の作用によって移動することをフロート観測により明らかにし、その移動過程は潮流計算に基づくラグランジュ的追跡によって予測可能なことを明らかにした（清野ら、2000a）。これらにより、本種の生息環境の概要が解明されたが、産卵地の砂中の温度・塩分環境や、卵塊と間隙水との接触条件は、筆者らが守江湾に流入する八

坂川の河口部中州で実施した観測（清野ら、1998b）を除き、観測例が乏しい。本研究では、対象地のカブトガニの産卵地と干潟上の幼生生息地において、データロガーを埋設して地表面と地下 15 cm の温度・塩分の連続観測を行い、産卵地と幼生生息地の環境特性の解明、およびミティゲーションの一環として産卵地造成を行う場合の基礎資料を得るものである。

また、本種の生息する汽水域は平常時でも環境の時間変動が激しいが、産卵期と発生時期が台風期と重なるため、しばしば洪水の影響を受ける。本研究では産卵地への洪水の影響も観測した。これは、希少生物の突発的で大きな環境変動への応答という点で重要と考えられる。

一方、朴ら（1997）は、干潟の温熱環境の一般特性を明らかにするために、有明海の六角川河口域において干潟の物理・化学的要素の現地実測を行い、干潟の温度拡散率や熱伝導率を算定した。本研究では、カブトガニの産卵環境に絞って観測を行い、その結果を干潟の一般特性を調べた朴らの観測結果と比較する。

2. 観 測 方 法

本研究では、図-1 に示すように大分県守江湾内のカブトガニ産卵地である、高山川河口付近の首捻防波堤、同河口の上流約 500 m に位置する永代橋、八坂川河口中州の産卵地、および幼生生息地である塩田地区沖干潟において、地表面と地表面下 15 cm（卵塊の位置）に塩分・温度観測のためのデータロガーを埋設し、1996～1998 年

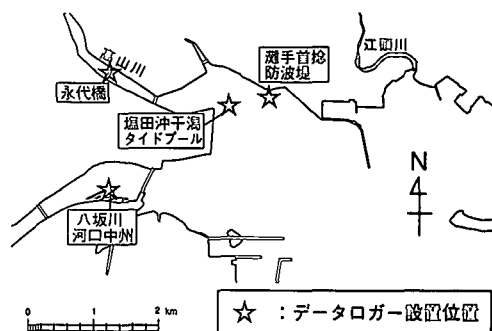


図-1 守江湾内におけるデータロガーの設置地点

* 正会員 農 修 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科

** 学術修 長崎市役所

*** 正会員 工 博 建設省土木研究所河川部長

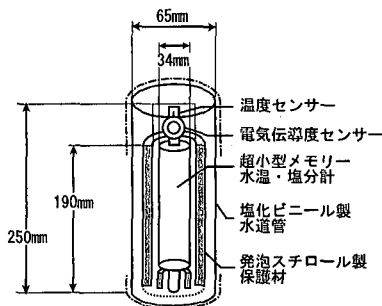


図-2 データロガーの概形

に連続観測を行った。

データロガー設置地点の標高は、T.P.0.8m（首捻防波堤）、0.8m（永代橋）、1.1m（八坂川河口中州）および0.1m（塩田地区沖干潟）であった。また、守江湾の朔望平均満潮位はT.P.0.88mであり、データロガーの測定時間間隔は20分であった。なお、産卵地では観測期間中に実際に産卵を確認している。産卵地の局所環境の計測には、図-2に概形を示す小型メモリー式連続計測器（データロガー：アレック電子製MDS-CT）を用いた。測定項目は、温度と間隙水の塩分濃度である。計測器は砂面または干潟面を掘削して地中に設置し、センサー部をごく表層と地下15cmに設置した。また計測器の洪水流や潮流による流出を防止するためにコンクリートブロックで固定した。

3. 観測結果

(1) 八坂川河口中州での観測

図-3は八坂川河口中州の砂州表面と地表面下15cmにおける温度の経時変化である。カブトガニの卵発生が進行している1997年9月1日～9月15日の変化である。温度変化には、晴れて日射が強い日に典型的に見られる周期的な温度変化が、9月1日～2日、および9月9日～13日に見られた。また9月5日～7日には温度変動の少ない、雨天時の典型的温度変化が見られた。日射に応じた周期変動パターンでは、地表面が日射により暖められて地中まで熱が伝導した結果、地中温度も上昇した。逆に夜間には地表面からの放熱のため地中温が低下した。地表面と地中での温度変化の周期は同一であったが、地表面に対して地中温度には位相遅れが生じていた。

図-4には、とくに9月1日～2日における地表面と地表面下15cmの温度の経時変化を拡大して示した。また、9月1日～2日のデータを整理すると、日最高、最低、平均温度は図-5の通りであった。産卵点(地下約15cm)では、地表面と比較して日最高温度は8.42、8.07°C低く、日最低温度は2.83、2.88°C高かった。日較差から見ても、地表面の16.19、15.54°Cに対して4.94、3.16°C

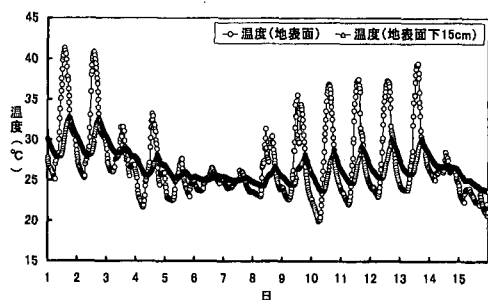


図-3 八坂川河口中州の地表面と地下15cmにおける温度の経時変化（1997年9月1日～9月15日）

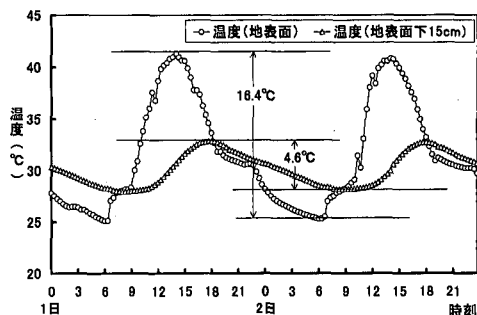


図-4 八坂川河口中州の地表面と地下15cmにおける温度の経時変化（9月1日～9月2日）

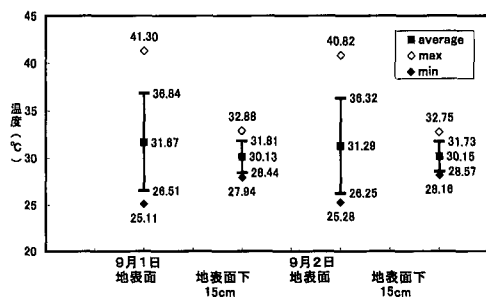


図-5 八坂川河口中州の地表面と地下15cmにおける温度の比較（9月1日～9月2日）

と日較差ははるかに小さかった。一方、日平均温度は産卵点のほうが1.54、1.14とわずかに低いのみである。このことは、地中環境は地表面のように激しい温度変化を有する環境ではなく、かなり緩和された温度環境にあることを表している。一方、9月5～7日の降雨時には地表面と地中15cmの日最高温度は $28.81 \pm 0.77^\circ\text{C}$ 、 $25.99 \pm 0.77^\circ\text{C}$ と地中が 0.82°C 低く、日最低温度は $23.25 \pm 0.64^\circ\text{C}$ 、 $25.05 \pm 0.18^\circ\text{C}$ と地中が 1.8°C 高い。平均は、 $24.65 \pm 0.26^\circ\text{C}$ 、 $25.44 \pm 0.34^\circ\text{C}$ と全体的に晴天時よりも低下し、日較差は $3.56 \pm 1.38^\circ\text{C}$ 、 $0.95 \pm 0.59^\circ\text{C}$ と小さくなる。

図-6は、1997年9月1日～9月15日の観測期間中

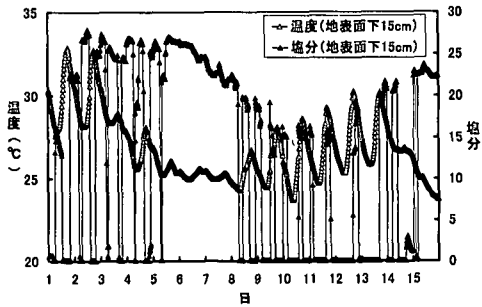


図-6 八坂川河口中州の地表面下15 cmにおける温度と塩分の経時変化 (1997年9月1日～9月15日)

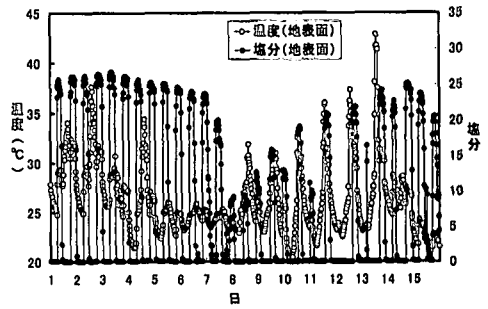


図-7 永代橋の地表面の温度・塩分の観測結果 (1997年9月1日～9月15日)

の、地表面下15 cmにおける温度と塩分の経時変化である。塩分は電気伝導度で計測したため、地中の測点に間隙水がある場合のみセンサーが作動して値を表示し、間隙水の塩分を測定できた。一方、塩分値ゼロは、間隙水が流出したことを示す。これによると、産卵地では潮汐変動に応じて間歇的な塩水の浸入が繰り返されており、産卵地は常時海水に浸った状態にはないと判断された。

以上より、カブトガニの卵塊が埋められている地点の間隙水は、潮汐変動に応じて出入りすると言える。また、カブトガニの卵は人工飼育では止水状態でも発生するが、自然環境下では潮汐変動に応じた1日約2回の緩やかな洗浄作用を受け、しかもかなり長い時間湿潤ではあるが浸水していない状態に置かれていることが示された。また、産卵期初期に産卵された卵の発生期間に相当する、1997年7月15日～9月15日の2カ月間の平均温度(標準偏差)は、地表面が 28.2°C (4.9°C)、地表面下15 cmが 27.5°C (1.9°C)であり、卵は地中にあっても地表と同等の熱量を享受できることが分かった。

(2) 永代橋での観測

永代橋直下の産卵地での、1997年9月1日～15日の地表面(図-7)、地下15 cm(図-8)の温度・塩分の測定結果を示す。温度の変化パターンは図-3に示した八坂川河口中州の場合と非常によく類似していた。塩分については潮汐周期に応じた間歇的な変動が地表面では全体を通じ、地下15 cmでは9月12～13日で顕著に見られた。これは、砂州材料中で間隙水の流入・流出が繰り返されたことを示している。

図-9は、1996年12月13～14日における地下15 cmの温度・塩分の観測結果である。潮位の上昇とともに砂州に浸透した水の影響は、その直前の地中温によって異なった。朝の地中温が低い場合には相対的に浸透水のほうが高温なため、黒矢印で示すように急激な温度上昇をもたらした。干潮時に間隙水が流出する場合の温度変化は、浸入時と比較して緩やかであった。

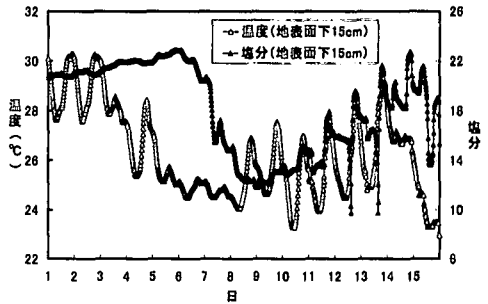


図-8 永代橋の地表面下15 cmの温度・塩分の観測結果 (1997年9月1日～9月15日)

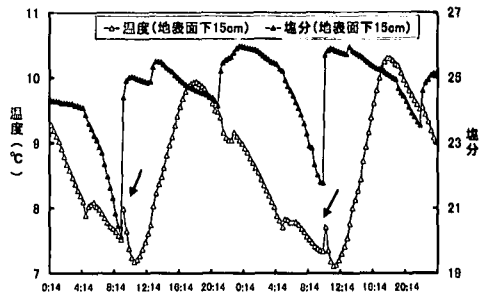
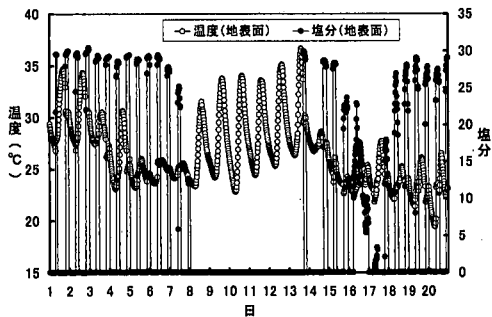


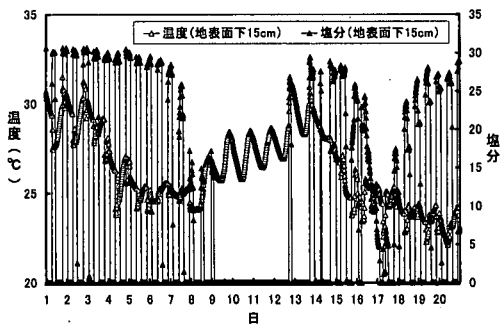
図-9 永代橋の地表面下15 cmの温度・塩分の観測結果 (1996年12月13, 14日)

(3) 首捻防波堤周辺での観測

図-10, 11は首捻防波堤内の砂州における1997年9月1日～9月20日の、塩分と地中温度の観測結果である。首捻防波堤内の産卵地は守江湾内のカブトガニ産卵地の中で最も多くの産卵が行われる場所である(清野, 2000b)。図-10は地表面、図-11は地表面下15 cmのデータである。地表面と産卵地点の温度を比較すると、晴れて日射の強い日、例えば9月8日～9月13日の間、地表面温度の振幅 $9.74 \pm 0.75^{\circ}\text{C}$ に対して地中では $3.05 \pm 0.75^{\circ}\text{C}$ と、温度変化の振幅が小さくなっていった。しかし平均温度ではそれぞれ $28.31 \pm 3.45^{\circ}\text{C}$ 、 $27.44 \pm$



図一〇 首捻防波堤内の砂州における地表面温度・塩分の観測結果 (1997年9月1日～9月20日)

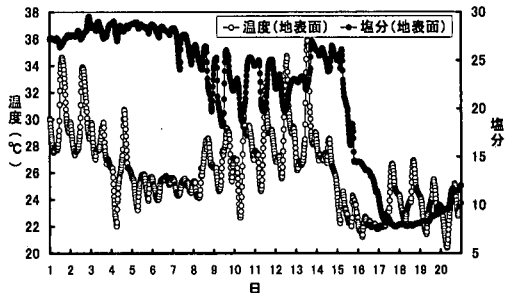


図一一 首捻防波堤内の砂州における地表面下15 cmの温度・塩分の観測結果 (1997年9月1日～9月20日)

1.68°Cと大差がなかった。また塩分については、いずれの地点でも潮汐変動に対応した毎日2回の間欠的な変動を有し、砂州中の間隙水の流入・流出が繰り返されていた。このような間隙水の交換によって、卵が海水に没し続け周囲の水が滞留し腐敗する状況を回避し、かつ溶存酸素を含んだ水の侵入により卵中の胚の健全な発生に寄与していたと考えられる。また、9月9日～13日の4日間では、全く海水に曝されない状態が起きており、こうした条件下でも卵は死滅しなかった。これは湿度の高い砂中にあることでも卵発生が進むことを示している。地表面と地下15 cmを比較すると、後者では海水に曝される時間が表面よりやや長くなっているが同様な特徴が見られた。また、台風が来襲した9月16日には、地表面と地下15 cmともに塩分の急激な低下が観測された。これは八坂川と高山川での台風19号に伴う大洪水に起因すると考えられる。この場合、首捻防波堤では塩分の急激な低下は約2日でもとの周期的な変動に戻っている。大洪水による守江湾内への大量の淡水供給に対する首捻防波堤周辺の砂浜環境は、この程度の時間的応答性を有することが分かった。

(4) 塩田地区沖干潟での観測

図一十二は幼生生息地の塩田地区沖干潟の1997年9月1日～20日の地表面での観測結果である。温度変化は



図一十二 幼生生息地の塩田地区沖干潟の地表面温度・塩分の観測結果 (1997年9月1日～9月20日)

図一八に示した永代橋地下15 cmの場合と似ているが、塩分の振幅は小さい。カブトガニ産卵地、例えば、首捻防波堤の産卵地標高(T.P. 0.8 m)と比較して塩田地区沖干潟では標高がT.P.+0.1 mと0.7 m低いために、塩分は間欠的な変化を示さず差が認められる。ほぼ連続して塩水に囲まれていると考えられる。また、台風による9月16日の出水の影響は、20日までの継続的な塩分の低下として認められる。よって、カブトガニの卵や胚に比較して、干潟に生息する幼生は、低塩分に4日間晒されたことになる。

4. 温度拡散率の算定

朴ら(1997)は、地中温度の測定値をもとに温度拡散率を求めた。温度拡散率は、温度が24時間で周期的に変動する2地点(深さが異なる)を選び、それらの温度の振幅差に注目したもの(K_1)と、24時間の温度変動の位相差に注目したもの(K_2)とがある(土壌物理測定法委員会, 1972)。いずれも温度の拡散方程式に対する解として求められる。 K_1 , K_2 は次式で与えられる(朴ら, 1997)。

$$K_1(\text{cm}^2/\text{s}) = 6.86 \times 10^{-6} x(z_2 - z_1)^2 / (\log_{10} R_1 - \log_{10} R_2)^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 R_1 , R_2 は深さ z_1 , z_2 における温度較差である。また、 K_2 は、深さ z_1 , z_2 における温度のピーク時刻をそれぞれ t_1 , t_2 とすると、式(2)で与えられる。なお、式(2)の係数は時間の次元を有する。

$$K_2(\text{cm}^2/\text{s}) = 6.88 \times 10^{-3} x(z_2 - z_1)^2 / (t_2 - t_1)^2 \dots (2)$$

いま、八坂川河口中州の表面と地下15 cmにおける温度の経時変化(図一四)より、 $z_1=0$, $z_2=15$ cm, $R_1=16.4^\circ\text{C}$, $R_2=4.6^\circ\text{C}$ と読み取れるので、これらの値を式(1)へ代入すると、 $K_1=5.3 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ となる。同様にして $t_2-t_1=3.75$ hrを式(2)へ代入すると、 $K_2=8.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ となる。両者の平均値 $6.9 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ は、朴らが干潟面上で求めた平均的な温度拡散率($K_1=4 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$)より約73%大きい。このことは、カブトガニ産卵地は通常の干潟面よりも熱拡散が起こり易い条件下にあ

ることを示している。

5. 考 察

観測の結果、カブトガニは満潮時にのみ水没する場所に産卵することがわかった。従来、カブトガニが砂中に産卵する理由として、①捕食者の回避、②波浪や流れによる流出からの防御、と定性的理由が考えられてきた。本研究により、その生物学的理由がさらに付加され、間隙水の交換という視点から、①卵発生に必要な酸素を含んだ新鮮な水の供給、②間隙水の交換による卵の腐敗防止、をあげることができる。また砂中は、地表面温度と比較してマイルドな温度環境にあることから、本種は砂浜や砂州を恒温性のある場、すなわち孵卵器として利用しているとも言える。さらに卵は、台風などの降雨の影響で低塩分濃度が継続する環境に晒されても生息し続けることも分かった。また、カブトガニの産卵は海中で行われるために、体のサイズによる産卵穴のために掘れる深さに制約があると同時に、穴が深すぎれば地表面からの熱の供給量が減少してしまうことから、卵塊を埋める深度の選択は最適化されていると考えられる。

清野ら (2000b) は、守江湾内の首捻防波堤、永代橋、江頭川湾曲部砂州および江頭川河口砂州、の4カ所のカブトガニ産卵地の地形および底質材料特性を調べ、カブトガニの産卵が最も行われやすい場所の特徴として次の条件が必要なことを明らかにした。

① 産卵地点の標高は T.P. + 0.62 m ± 0.18 m であること。

② 産卵地の海浜・砂州材料の d_{50} は、平均で 0.70 ± 0.17 mm であり、粗砂および礫の含有率が約 67~88% を占める一方、シルト・粘土の割合は約 3% 以下と非常に低いこと。

このようにカブトガニ産卵地は、幼生が生息する塩田地区の干潟などと比較して絶対標高が高く、しかもそこに河川流や波浪の作用によってよく淘汰された粗粒の底質が存在する場所であり、そのような場所であるからこそ、本研究で述べたような塩分・水温変化が現れ、同時に熱拡散率が大きくなったと考えられる。カブトガニ産卵地が河川流や波浪の作用による適度な攪乱を受けなければ、干潟面のように表面シルト質の底質が堆積し、ここで得られた特性は消失するが、河川流や波浪の作用がそのような条件となることを防いでいると言える。また、

産卵地の堆積物 (砂) の中央粒径は上述のように約 0.62 mm であるが、この程度の中央粒径を有する砂の透水係数は 0.1 cm/s のオーダーである。この場合、海水が地表面下 15 cm へ浸透に要する時間のオーダーは、 $t = 15 / 0.1 = 150$ s となり、これは潮汐変動の時間スケールと比較してごく短い。したがって堆積物表面が浸水した時点で 15 cm 地下の産卵点もほぼ同時に浸水すると考えられる。

本研究で見出された点は、既往の研究によっておおまかには推測されていたが、実際に現地で局所環境が計測され、カブトガニの産卵をめぐる仮説が実証されたのは初めてである。カブトガニは産卵後の卵を地中に放置する。その卵の健全な発生のために、繁殖個体による産卵地の物理環境の選択には十分な配慮がなされていると考えられるべきである。産卵地のミティゲーションを行うとすれば、この繁殖個体による産卵地の選択性を充分考慮しなければならない。

謝辞：観測に際しては、大分県土木建築部河川課のご協力を得た。また干潟上の熱拡散については、水産工学研究所の中山哲蔵室長より貴重な意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 関口晃一編 (1984): カブトガニの生物学, サイエンスハウス, 東京, p. 345.
- 清野聡子・前田耕作・日野明日香・宇多高明・真間修一・山田伸雄 (1998a): カブトガニは何故その岸辺に産卵するのか? —産卵地の地形・堆積物・波・流れの特性—, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1091-1095.
- 清野聡子・前田耕作・宇多高明・山田伸雄・真間修一 (1998b): カブトガニ産卵場の局所環境の観測—大分県八坂川河口の例—, 第53回年次学術講演会講演概要集, (共通セッション), pp. 208-209.
- 清野聡子・宇多高明・前田耕作・山路和雄 (2000a): 守江湾内の八坂川河口沖干潟におけるカブトガニ孵化幼生の分散機構, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1209-1214.
- 清野聡子・宇多高明・土屋康文・前田耕作・三波俊郎 (2000b): カブトガニ産卵地の地形特性と孵化幼生の分散観測—希少生物生息地のミティゲーション計画のために—, 応用生態工学, 3巻1号, (印刷中).
- 朴 鐘和・中山哲蔵・瀬口昌洋 (1997): 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.
- 土壌物理測定法委員会 (1972): 土壌物理測定法, 資賢堂, pp. 287-289.