

成層期の東京湾奥における砂浜海岸周辺の熱構造について

内山雄介*・灘岡和夫**・瀬崎智之***・八木宏****

1. はじめに

富栄養化が進行した内湾において、湾スケールでの海水交換機能等とともに、海浜（干潟、砂浜など）の有する環境浄化機能に大きな期待が寄せられている。海浜は陸と海との境界部に位置し、極めて浅いために気象条件等の影響を受けやすく、生態系等も沖や湾央部とは若干異なった様相を呈しているものと考えられる。そのため、浄化機能などを考慮した形で海岸空間を「総合的」に設計していく上では、境界部極浅海域としての空間的な特徴を十分把握しておくことが重要なポイントとなる。

しかしながら、海一陸境界部としての極浅水域の水環境に関する既往の研究では、干潟の水環境に興味が集中している。例えば、物理環境に関しては水鳥ら（1983）などの研究が、また、生物環境に関しては Peterson & Black (1981)などの研究成果がある。一方、ここで対象とする砂浜海岸に関しては、海浜流や温排水等を対象とした海岸工学分野の研究を除くと、その大半が水産・生物的アプローチによるものであり（例えば、Brown & McLachlan (1990)の一連の研究等）、物理環境と生物環境を統合した検討は立ち遅れているのが現状である。

このような背景のもとに、著者らは砂浜海岸の水環境システムを評価するための基礎的研究として、海水の流動特性や水質・生態系が著しく変動する夏期の状況下での内湾性砂浜海岸周辺の極浅海域（東京湾奥稲毛海岸）において1995年に現地観測を実施している（灘岡ら、1996）。それにより、水温・溶存酸素量・クロロフィルa量に関する様々な知見を得ることができたが、冲側データの不足等の問題から、極浅海域の水質・生態系の特徴を十分把握するまでには至っていない。そこで著者らは、1996年夏期に同一水域において、より詳細かつ広範囲な態勢で観測を実施した。96年観測では観測期間を通じて、95年よりも風速レベルが高く、日射量や降雨量等の

気象条件が大きく変動したため、青潮・赤潮等の特徴的なイベントを捉えることに成功した。

本研究では、この96年観測データをもとに、気象条件や植物プランクトンなどの様々な影響を受けた結果として生じる水温構造に着目した解析を数値計算を含めて行うことにより、成層期の内湾性極浅海域砂浜海岸特有の熱構造を明らかにすることを試みた。

2. 現地観測の概要

現地観測は、東京湾最奥部に位置する千葉市美浜区稻毛海浜公園内の人工ビーチ（図-1）において、生態系や密度構造などが時空間的に大きく変動すると考えられる成層期（1996年7月1日～8月14日）を対象として行った。現地海浜の概要については灘岡ら（1996）を参照されたい。機器設置場所や水深などは図-2中に示す通りである。また、沖との関係を把握するために、距岸約3km（北緯140度01分35秒、東経35度36分28秒）に位置する幕張波浪観測塔（水深約9m）に設置された水温計3台・塩分水温計2台・DO計2台・Chl.a量計2台によって東工大・八木らを中心として連続測定されたデータ（今回のデータとともに「東京湾データベース」（仮称）の一部として収録予定）の一部を使用した。

3. 観測結果

3.1 水温変動の周波数特性

まず、水温変動の周波数特性を見るためにスペクトル解析を行った。図-3を見ると、24時間付近の日周成分に明確なピークがあり、さらに低周波数領域（以下、「長周期成分」と呼ぶ）にも大きなエネルギーが含まれていることが分かる。このうち日周成分について見てみると、沖側に位置するSt.1においては、表層では日周成分が卓越するものの、中層や底層では明瞭なピークは存在しない。また、より岸側のSt.3では、底層でも日周変動成分が強く、表層のピークとほぼ同レベルになっている。つまり、岸近くのより浅い水域では鉛直方向の水温構造に差が生じにくく、かなり一様化していることが分かる。一方、長周期成分は、St.1,3ともに表層と底層の差がほとんど現れておらず、全水深にわたる変動現象であるこ

* 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程・日本学術振興会特別研究員

** 正会員 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

*** 学生会員 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程

**** 正会員 博(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

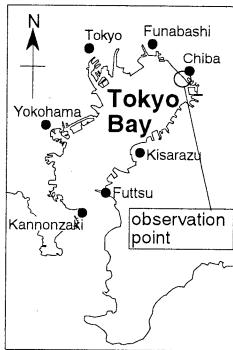


図-1 現地観測海域

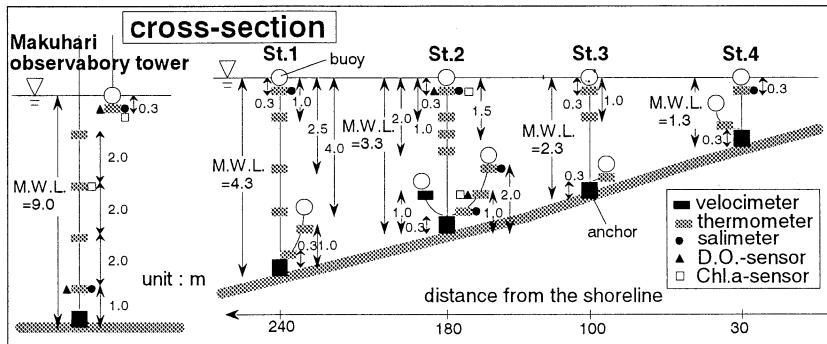


図-2 観測機器の配置 (左: 幕張波浪観測塔, 右: 稲毛海岸)

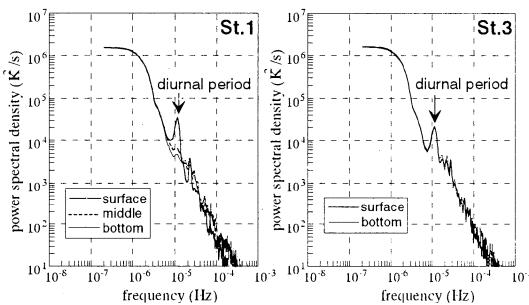


図-3 St.1, 3における各層での水温変動のパワースペクトル密度 (中層 (middle) は表層から 2.0 m の位置)。

とが理解される。以下では、これらの水温変動の長周期成分と日周成分について、それぞれ詳しく考察する。

3.2 長周期水温変動の成因

図-4に(a) 幕張観測塔での水温, (b) St. 2での水温, (c) 風速ベクトル (但し、風向は 16 方位で収録されている), (d) 全天日射量と降水量, (e) 気温の時系列を示す。まず、図-4(b)より、7/11, 23, 8/12頃に最低値を取るような、周期 2 週間程度の長周期の水温変動が存在していることが分かる。さらに、この長周期変動の上に日周変動パターンが重なっている。また、水温の長周期変動は、風や日射などの気象データの長期トレンドと一致している。風との関係に着目すると、南西風 (岸向き風) 連吹時は風速レベルが高ければ日成層の発達は見られなくなるものの、全体的な水温変動レベルは上昇する傾向にあり、逆に北東風連吹時には水温レベルが低下している。

ここで、7/19 および 8/10 の正午付近の NOAA-AVHRR データによる東京湾全体の表面水温分布センターを図-5 に示す。弱い南西風が卓越し、成層状態にある 7/19 では湾奥に高温領域が形成されると共に、神奈川側が千葉木更津側より相対的に高温となっている。また、等温線は等深線にほぼ平行になっている。これに対して

北東風が連吹している時期である 8/10 では、船橋から本観測海域近傍の湾奥部千葉港周辺にかけて水温が著しく低下していることから、この時に沿岸湧昇が生じていたことが分かる。この時、観測水域でも水温レベルが激減している (図-4) ことから、長周期水温変動が風に対応した沿岸湧昇に起因していることが分かる。なお、他の気象データとの関連については、3.4 で述べる。

3.3 水温の日周変動の成因

日周変動の要因として日射量、気温等の気象条件が考えられるが、これらが水温変動に及ぼす影響について考察するため、海表面における熱収支解析を行った。解析に関わる各フラックス成分の定義を図-6 に示す。まず、St. 2 における各フラックスの時系列 (図-7(a)) から、日射や大気放射などによる純放射量 R_{net} が突出して大きいものの、大気中の顕熱 H は日中に負値を取り、しかもその絶対値はかなり小さいことが分かる。同時に海表面からの水蒸気供給により潜熱 IE は H と比較すると日中に大きな値を示すものの、 R_{net} と比較するとかなり低い値である。その結果、海中へ伝達される熱フラックス G が相対的に大きくなることで海表面の熱収支バランスが保たれているものと考えられる。そのため、極浅海域の水温の日周変動は H や IE に関する気温、湿度等ではなく、日射量に大きく支配されているものと思われる。ここで、水平移流が水温の日周変動に影響する可能性も考えられるが、それについて 3.4 で検討する。

3.4 水温変動への水平移流フラックスの効果

水温変動に対する水平移流による熱フラックスの寄与を評価することを試みる。まず、海底面を通じて出入りする熱フラックス G_{soil} を無視できると仮定すれば、水塊温度の増減効果を現わす貯熱フラックス ΔQ は、水表面から鉛直一次元的に与えられる G 、および水平方向の移流に伴う顕熱フラックス供給 $\Delta Fc (= Fc_1 - Fc_2)$ の和として表現される。これらの時系列を図-7(b) に示す。水塊水温の時々刻々の増減を表す貯熱フラックス ΔQ に

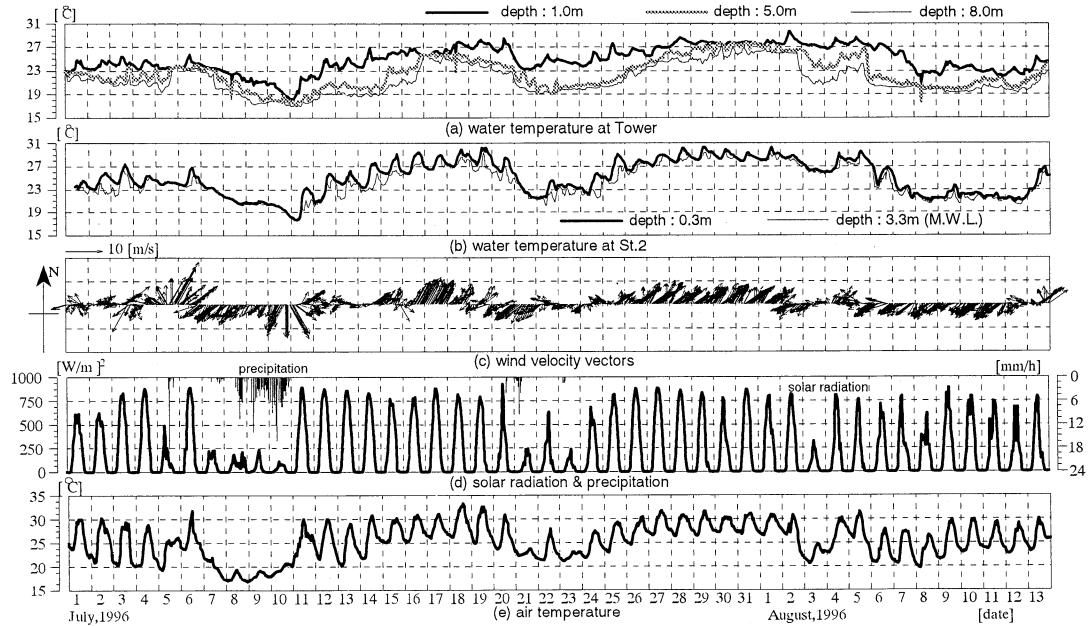


図-4 (a) 幕張観測塔での水温, (b) St. 2 での水温, (c) 海上風速ベクトル, (d) 全天日射量と降水量, (e) 気温, の時系列.

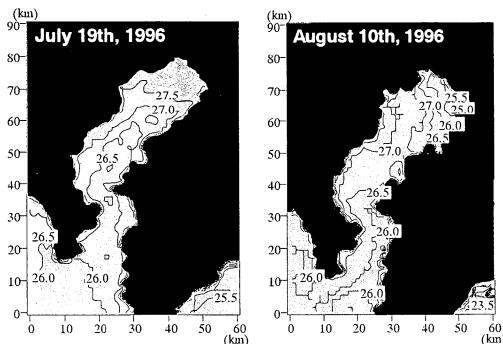


図-5 NOAA-AVHRR による東京湾の表面水温分布コンター

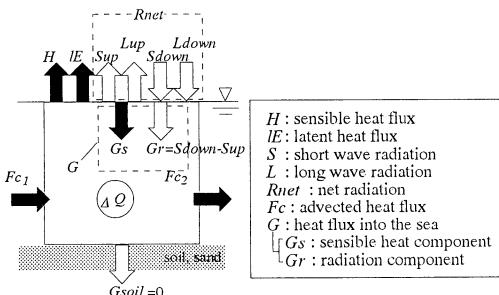


図-6 热収支解析に用いた各フラックスの定義

は、 G と ΔF_c とが同程度に寄与しているものの、岸向き風が連吹する 7/11～16 に見られるように、 G よりもむしろ ΔF_c の方が卓越する期間が多くなっている。このこと

から、岸側極浅海域水温の短周期変動には水平移流もかなり大きく関与している可能性が高いことが分かる。

また、上記の各フラックスが長周期水温変動に及ぼす影響を見るべく、日平均値を計算した（図-7(c)、日平均値にはそれぞれ()を付している）。水塊水温の長周期の増減を表す $\langle \Delta Q \rangle$ には、 $\langle G \rangle$ と $\langle \Delta F_c \rangle$ とが同程度に寄与している。 $\langle G \rangle$ は主に日射の長周期変動を反映しており、 $\langle \Delta F_c \rangle$ は沿岸湧昇などの移流効果を表していることから、長周期の水温変動は水平移流だけではなく、日射量の長周期変動にも大きく依存していることが分かる。

3.5 極浅海域特有の水温変動特性について

沖側の幕張観測塔（水深約 9 m）での水温データとの比較などを通して、海-陸境界部としての極浅海域特有の熱特性を抽出することを試みる。まず、図-4(a) と (b) を見ると、沖側では底層付近の水温がかなり低く、温度成層が岸側極浅海域よりも明確に形成され、温度躍層が概ね海表面から 1.0～5.0 m の水深に存在している。一方、浅海域では全層的にほぼ一様な水温構造になっていることから、海岸近くの極浅海域では沖に比べて水塊の鉛直混合が顕著であることが分かる。また、沖での水温の長周期変動に着目すると、7/11～19、7/25～8/1 等の成層発達期では極浅海域での測定値よりもやや低く、逆に湧昇期（7/7～10、8/6～12 等）ではやや高い水温レベルになっている。さらに日周変動振幅を見てみると、表層付近では沖側のほうが小さい期間が多いことが分かる。

そこで、この日周変動振幅の特徴をより詳しく調べるために、沖と岸における水深毎の水温の日周変動成

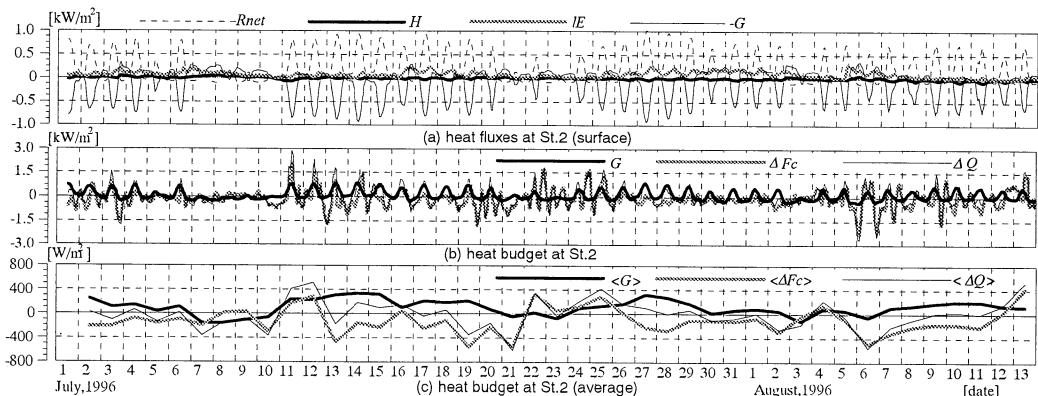


図-7 St. 2 における、(a) 水表面熱収支各成分の時系列、(b) 海表面から入射する熱フラックス G 、水温変化による貯熱フラックス ΔQ 、水平移流による顕熱輸送量 ΔFc の時系列、(c) (b) 中での各フラックスの日平均値の時系列。

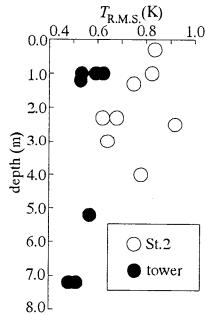


図-8 沖と岸における水深毎の水温変動のR.M.S.値の比較

分のR.M.S.値を求めて比較した。図-8がその結果であるが、これから、R.M.S.値は沖側では概ね0.5~0.6[K]であるものの、岸側では0.6~0.9[K]程度であり、岸における一日程度以下の時間スケールでの変動レベルが沖側と比較してかなり大きいことが分かる。

以上の長周期および日周期での変動特性の差異の原因を理解するために、3.5と同様にして沖側の幕張観測塔での ΔFc とその日平均値 $\langle\Delta Fc\rangle$ を求め、先のSt. 2の結果と比較する形で図-9(a)と(b)に示した。ただし、水平移流フラックスの大小の比較に際して、水深差の影響を排除するため、ここでは水深で割って、単位水深当たりの値として表示している。これらを見ると、瞬間値、日平均値とともに、沖側と比較して岸側極浅海域の方が水平移流による顕熱輸送の影響をより強く受けていることが分かる。このことは、極浅海域では水平移流による顕熱輸送量が相対的に大きいため、沖側よりも水温の変動振幅が大きくなることを示している。

ΔFc の変動パターンとしては、日中に正值、夜間に負値を取ることが多く、逆に長周期変動成分を表す $\langle\Delta Fc\rangle$ は全期間を通じて負値を取ることが多い。岸側極浅海域では、岸の存在に伴う流れの遮蔽効果により、岸向き風

時には、日射の作用に伴い昼間は暖かく、夜間は冷たい沖側表層水が吹き寄せられることによって、 ΔFc が日中に正、夜間に負値を取るものと考えられる。また、沖向き風時には、観測地点よりもさらに岸側からの影響を受けるものの、底層からの冷水塊の湧昇が支配的となるため、 ΔFc は負になりやすい。これらがベースとなって、 ΔFc の変動パターンが決まっているものと思われる、一方、水温の長周期変動に関わる $\langle\Delta Fc\rangle$ の正負についても同様に、岸向き風連吹時には表層水の吹き寄せ効果によって正、沖向き風時には湧昇に伴って負となるものと考えられる。しかしながら、7/26~8/2のように岸向き風であるにも関わらず、 $\langle\Delta Fc\rangle$ が負となる期間がしばしば見られるが、本観測では十分なデータがないため、その詳細を議論することはできない。

なお、海岸付近の極浅海域では、図-8で見たように、水温の日周変動振幅が全水深でほぼ一様になるが、これも、吹き寄せ効果によって等温線が傾き、比較的水温が近い水塊が全水深を覆う形になることがその原因の一つと考えられる。このことは、岸近くでは風による流れが鉛直循環流的になって、水塊が一様化されやすいことが原因、と言うこともできる。

このように、岸側極浅海域では、海岸線という明確な幾何学的境界条件の存在により、熱フラックスの吹き寄せ効果や底層水の湧昇などが生じるとともに、熱的構造が一様化されやすいという特徴が存在する。

4. 数値シミュレーション

水平移流による顕熱輸送が極浅海域の熱環境に及ぼす影響を検討するべく、数値シミュレーションを行った。計算にはPOM (Blumberg & Mellor, 1983) を用い、海表面熱収支および水中への透過日射による熱ソース項を考慮した。ここでは、沖側からの水平移流の効果を考慮

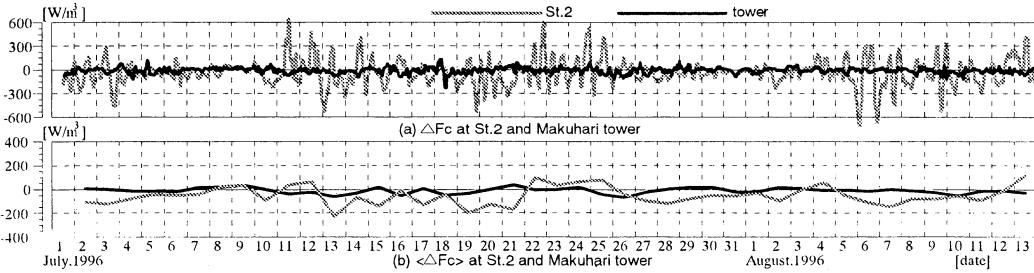


図-9 St. 2 および幕張観測塔における単位水深当たりの、(a) 水平移流による顕熱輸送量 ΔFc , (b) ΔFc の日平均値の時系列。

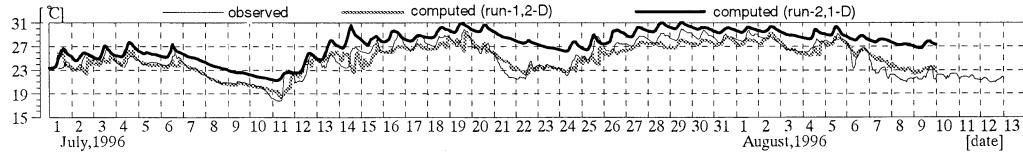


図-10 観測値と計算値による水温の比較。(St. 2 表層とそれに相当する位置での計算結果との比較)

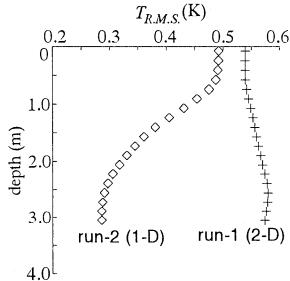


図-11 St. 2 における水温の日周変動の R.M.S. 値の計算値

するために St. 1 での観測水温を沖側境界条件として与え、さらに σ 座標系を導入した岸沖断面 2 次元計算(run-1)を行った。また、比較のため、水平移流をゼロとした鉛直一次元計算(run-2)も行った。

2 次元計算(run-1)の結果を見ると、岸側極浅海域の St. 2 に相当する水深の位置での表層水温の日周変動と長周期変動とともに良好に再現できていることが分かる(図-10)。このうち、水温の日周変動に関しては一次元計算によてもかなり再現でき、このことから岸近くの浅海域での日周変動が鉛直一次元的な熱バランスによって決まっているよう見える。

しかしながら、図-11 に示す水温の日周変動成分の R.M.S. 値の鉛直分布を見ると、観測値と比較して特に一次元計算結果は全体的な $T_{R.M.S.}$ がかなり過小評価されている。このことからも、岸側極浅海域では水温の日周変動に水平移流が大きく関与しており、鉛直一次元計算ではその分布特性を表現することができないことが分かる。また、2 次元計算では、 $T_{R.M.S.}$ の鉛直分布は観測結果(図-8)に近い形になるものの、その変動レベルはやは

り過小評価されている。このことから、岸側極浅海域では、さらに、ここで考慮しなかった砂浜との熱交換などの影響も少なからず受けているものと考えられる。

5. おわりに

内湾性極浅海域の水温変動特性は、長周期変動に対しては風による沿岸湧昇などの水平移流と日射の長期トレンドが、日周変動に対しては日射と短周期の移流が大きく寄与している。そのため、鉛直一次元的な取り扱いで現象を把握することは困難である。

なお、観測では東工大灘岡研の学生諸氏に多大なるご助力をいただいた。また、本研究は文部省科学研究費補助金試験研究(B) (1) (課題番号: 07555642, 代表者: 灘岡和夫) および同特別研究員奨励費(内山雄介)の一部を使用した。併せて深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 灘岡和夫・内山雄介・瀬崎智之 (1996): 夏期の内湾性砂浜海岸周辺の水温・DO・クロロフィル a の変動特性について, 海岸工学論文集, 第 43 卷, pp. 1101-1105.
- 水鳥雅文・角湯正剛・曾我雅海・加藤正進・和田 明 (1983): 干潟の発達する浅海域における水温変動機構と熱輸送について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 541-545.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1983): Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, J. Geophys. Res. Vol. 88, pp. 4579-4592.
- Brown, A. C. and A. McLachlan (1990): Ecology of sandy shores, Elsevier, XII.
- Peterson, C. H. and R. Black (1987): Resource depletion by active suspension feeders on tidal flats: Influence of local density and tidal elevation, Limnol. Oceanogr., Vol. 32, No. 1, pp. 143-166.