

砂浜と干潟の比較による湾奥部極浅海域の 水環境特性に関する研究

内山 雄介*・灘岡 和夫**・堀川 誠司***

1. 緒論

沿岸域の高度利用の進展に伴い、干潟や砂浜などの自然海浜が年を追うごとに姿を消している。このような傾向は東京湾に代表される内湾において特に顕著であり、東京湾奥部に広がっていた干潟、浅瀬に関しては、わずかに盤洲干潟、三番瀬などを残すのみである。しかし最近では、特に自然海浜が有する水質や生態系等に対する環境保全機能に対する関心が高まりつつあり（例えば、細川, 1991）、自然海浜の保全や人工海浜の造成が行われるようになった（港湾環境創造研究会, 1997）。そのため、自然海浜の有する環境保全機能に関する基礎的な知見を積み上げておくことが強く求められている。

内山ら（1998）は、東京湾奥部の砂浜海岸周辺海域において詳細な現地調査を行い、極浅海域の水環境の形成には、沖側海域との相互作用が極めて重要な役割を果たしていることを指摘している。しかし、干潟に関しては調査対照となっていない。そこで本研究では、代表的な自然海浜である干潟と砂浜における水環境特性の相違を把握することを目的として、干潟および砂浜周辺海域において同時観測を行い、岸沖方向の移流特性に関する検討を中心に解析を行った結果について報告する。

2. 現地観測の概要

東京湾最奥部の比較的近距離に位置する千葉市美浜区稻毛海浜公園内の人工砂浜海岸および船橋市高谷船橋海浜公園内の人工干潟（以下、砂浜および干潟と略す）において、1997年8/18～9/18に同時観測を行った（図-1参照）。このうち干潟は江戸川放水路河口部、いわゆる三番瀬に位置しているが、最下流の堰からはここ数年間、0.003 (ton/s) という僅かな維持流量が放流されているのみであり、江戸川の影響は小さい。

図-1のような海底地形断面を有する干潟および砂浜それそれぞれにおいて、岸沖断面内の汀線近傍および沖合に2測点ずつ設けてブイを打ち（図中の○の位置）、図-2

に示すようにセンサーを配置し、水温、Chl. a量等を連続自動測定した。また、採水によりキャリブレーション用のChl. a量、植物プランクトン細胞数、栄養塩濃度等を約2週間毎に測定した。

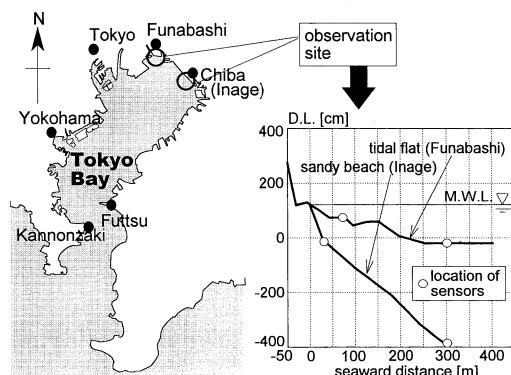


図-1 現地観測地点、海底地形およびブイの設置位置

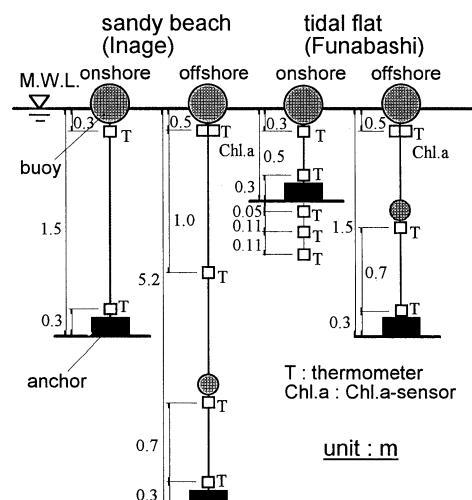


図-2 砂浜と干潟における測定機器の設置概況

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室

** 正会員 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科

*** 正会員 東京都建設局

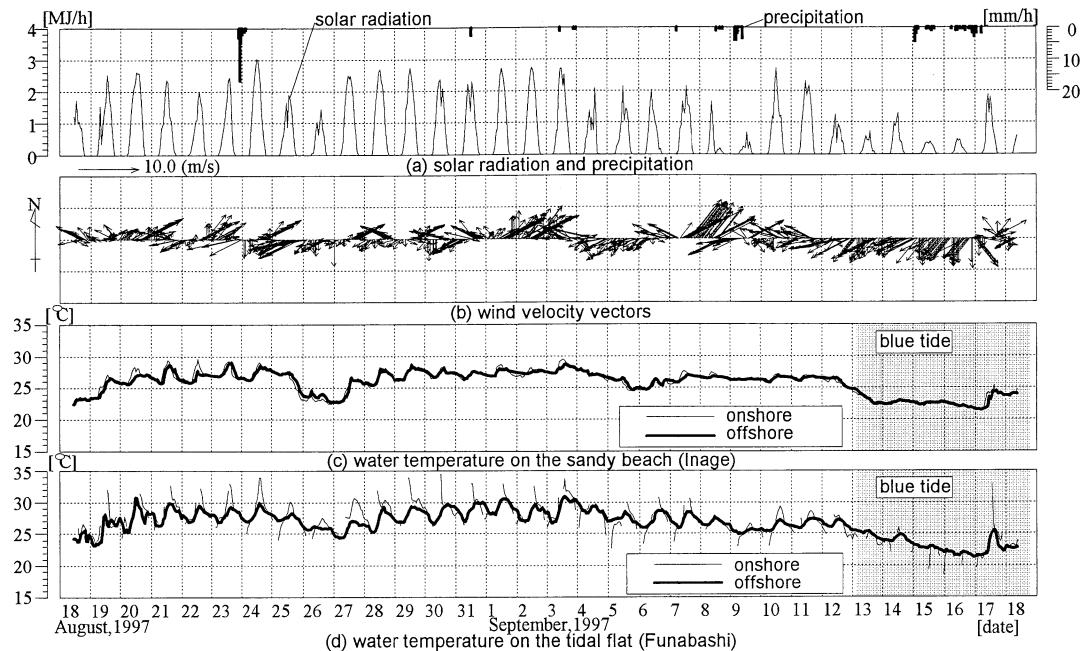


図-3 (a) 日射量と降雨量, (b) 海上風速ベクトル, (c) 砂浜における表層水温, (d) 干潟における表層水温, の時系列。

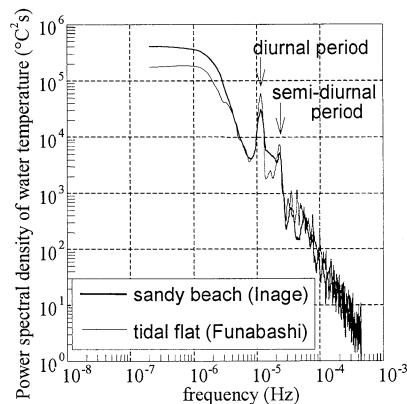


図-4 砂浜と干潟における表層水温変動のパワースペクトル。

3. 観測結果

3.1 気象概況

東京管区気象台による日射量、千葉測候所による降雨量を図-3(a)に、幕張波浪観測塔で測定された海上風速ベクトルを図-3(b)に示す。8/23～24にかけて時間雨量15mmを超える降雨があり、9月中に比較的小規模の降雨が数回記録されている他は、全般的に降雨は少ない。日射量は日中の降雨量と概ね対応しており、8月と比較して9月中の日射量が少ない。また、9/12から9/16にかけて数日間北東風が連吹しているものの、他の期間では卓越風向を見出すことはできない。なお、千葉県水質保

全研究所により、観測水域を含む湾奥部の船橋・市川航路から千葉港までの広い領域において、9/13～9/18に大規模な青潮が発生していたことが報告されている。

3.2 干潟、砂浜における水温変動特性の比較

砂浜と干潟における岸側および沖側測点での表層水温を図-3(c) (d)に示す。ただし、干潟の岸側測点では潮位変動に伴って冠水と干出を繰り返すため、水温センサーが干出していた時間のデータを削除して表示している。まず、各地点ともに日周期および長周期の変動パターンが明瞭に現れていることが図から読み取れる。この時、日周変動振幅は干潟の方が大きく、逆に長周期変動では砂浜の方が水温低下している期間が長く、かつ低下幅も大きい。長周期での水温低下は北東風が連吹して青潮が発生した期間に対応していることから、沿岸湧昇によって沖合い底層の冷水塊が浅海域に到達し、しかもその影響は砂浜の方が強く現れることを示すものと考えられる。また、スペクトル解析の結果(図-4)からも、砂浜の方が低周波領域(長周期変動成分)のパワーが大きく、逆に24時間程度(日周期)のピークは干潟の方が高いことが確認される。さらに、約12時間(半日周期)にも明確なピークが存在しているが、干潟の方が明瞭であり、その値も大きいことが分かる。

3.3 熱収支解析

砂浜と比較した場合、干潟では湧昇に対応した長周期水温変動振幅が小さく、反対に日周期・半日周期の変動振幅が大きいという特徴が明らかになったが、その成因

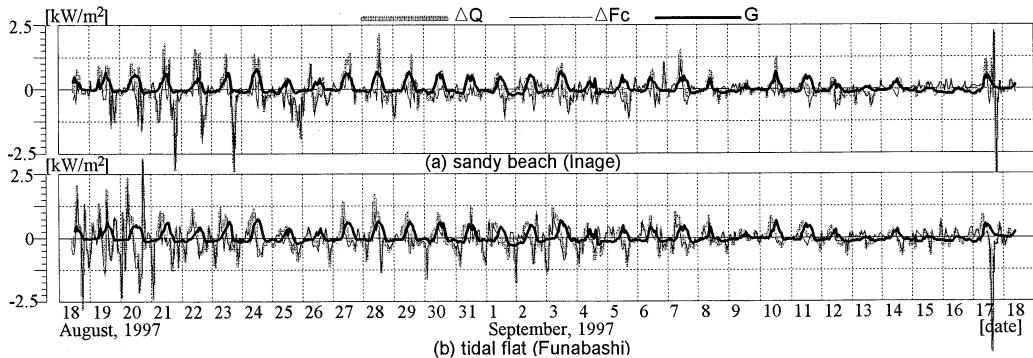
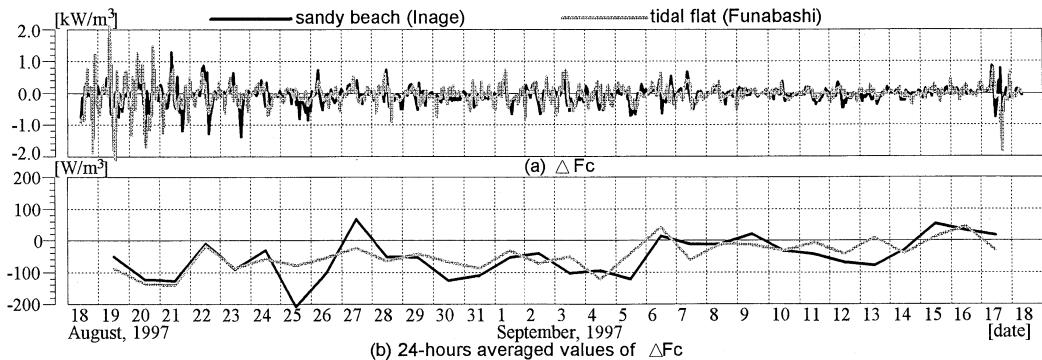


図-5 砂浜と干潟における熱収支各フラックス成分の時系列。(a) 砂浜岸側, (b) 干潟沖側。

図-6 砂浜と干潟における単位体積当りの水平移流熱フラックス (a) ΔF_c および (b) ΔF_c の 24 時間平均値の時系列。

を探るべく、両地点の水塊に対して熱収支解析を行った。

熱収支解析の細かな手法に関しては内山ら (1998) と同様であるので、その詳細はここでは省略するが、水塊温度の上昇・下降効果を表す貯熱フラックス ΔQ は、海水表面から鉛直一次元的に与えられる熱フラックス G 、および水平方向の移流に伴う熱フラックスの収支 ΔF_c の和として式 (1) のように表現される。

$$\Delta Q = G + \Delta F_c \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

この熱収支式中の各フラックス成分の寄与を、平均水深が同一である 2 地点を比較する形で図-5 ((a) 砂浜岸側, (b) 干潟沖側) に示す。 ΔQ には、 ΔF_c と G とが同程度のオーダーで寄与しているが、砂浜岸側では 8/19~8/23 など、干潟沖側では 8/18~8/21 などの期間では、 ΔF_c の方が圧倒的に大きい期間が存在していることが図から読み取れる。この時、 G は最大でも数 100 W/m^2 程度であるのに対して、 ΔF_c や ΔQ は 2~3 kW/m^2 程度にまで達することがある。次に、この 2 地点における単位体積当りの ΔF_c を図-6 に示す。但し、長周期成分を代表する量として ΔF_c の 24 時間平均値を用いている。水平移流熱フラックスは水温変動と同様に、短周期 (図-6(a)) では干潟の方が大きく、長周期成分 (図-6(b)) は砂浜の方が大きいことが分かる。すなわち、水平移流による岸

沖方向の熱輸送特性の相違が干潟と砂浜の水温変動を特徴付けていると言える。

3.4 冠水・干出による地表面と海水との熱交換

図-3(d) に示したように干潟では、沖側と比較して岸側の水温は日中に著しく高く、逆に夜間は低い。この原因として、干出時に日射等の作用によって熱フラックスが直接底質土壌へ蓄積され、それが冠水とともに海水中へ伝わる (Harrison and Phizacklea, 1985) ことが考えられる。そこで以下では、干潟潮間帯における土壌への蓄熱特性と、それが水温構造および水平移流熱フラックスに及ぼす影響について検討する。

海底面を通じて地中へ伝わる熱フラックス G_{soil} は、以下の式 (2) のように表される (近藤, 1994)。

$$G_{soil} = \int_0^D \frac{d(\rho_C C_G T_G)}{dt} dz \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 D : 热フラックスがゼロになる深さ、 ρ_C : 土壌の密度、 C_G : 土壌の比熱、 T_G : 地中温度、である。

図-7 に干潟岸側測点における、(a) G_{soil} の時系列、(b) 8/27~8/30までの G_{soil} と水位をそれぞれ示す。まず (a) を見ると、 G_{soil} の変動パターンは日射量変動 (図-3(a)) 等とは異なり、比較的不規則な変動をしている。また (b) から、水位がゼロクロスする位相において G_{soil} の

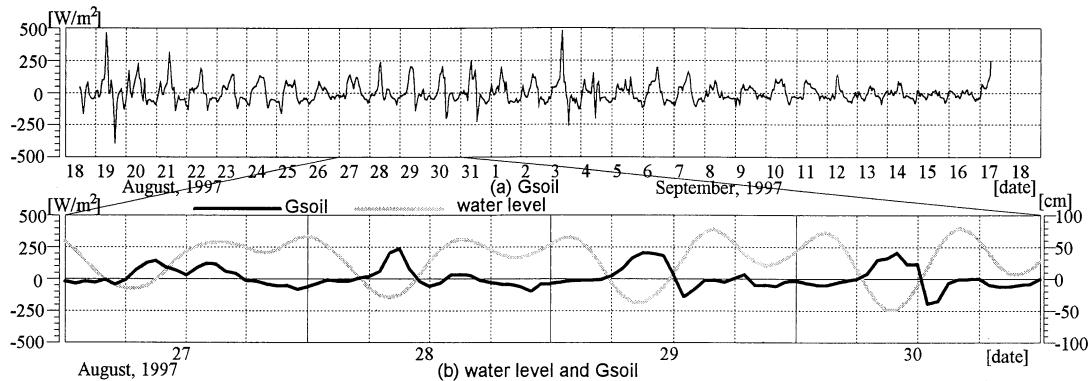
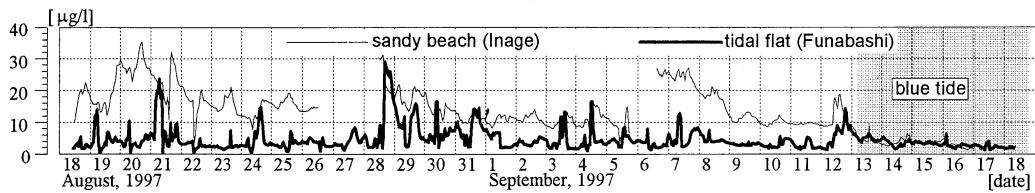
図-7 干潟上岸側測点における、(a) 地中伝導熱フラックス G_{soil} , (b) 8/27～8/30 での G_{soil} と水位の時系列。

図-8 砂浜と干潟における Chl. a 量の時系列。(8/26, 9/5 前後における砂浜の Chl. a は欠測)

正負が入れ替わっていることが分かる。水位が負（すなわち干出）のときは海底面と大気が直接熱交換を行うため、 G_{soil} は大きな正の値となる。逆に水位が正（冠水）の時には、地表面に貯えられた G_{soil} は直ちに海水との熱交換によって水中へ伝達されるため、まず速やかに負値を取り、その後は小さな値で推移し、定常（ゼロ）に近づく。なお、干出時の G_{soil} の値は 200 W/m^2 を超えることがあるが、これは観測期間後半における熱収支各フラックス（図-5）と同程度のオーダーである。そのため、水深が浅い干潟岸側測点では、 G_{soil} が海水の熱収支に大きな影響を及ぼすことがあると考えられる。

以上のことから、広大な潮間帯を有する干潟では、土壤中に蓄熱された熱フラックスが冠水に伴って海水中へ与えられるために汀線近傍の水温が著しく上昇し（図-3 (d)），その結果、水温の岸沖分布が砂浜と比較して強調されることになる。そして、強い水温勾配を有する水塊が潮汐や流れに伴って移流されるため、干潟における ΔF_c の短周期変動振幅が砂浜よりも大きくなっているものと考察される。

3.5 Chl. a 量の変動特性

千葉県水産試験場（1997）によると、東京湾内湾部では1997年7～9月上旬にかけて赤潮が連続的に観測されており、湾奥部で青潮が発生した9月下旬では赤潮が認められなくなったと報告されている。砂浜における Chl. a 量の時系列データ（図-8）はこの報告と対応しており、観測期間前半は Chl. a 量が高濃度であるものの、観測期

間終盤では9/13の青潮に対応して濃度レベルがかなり低下していることが分かる。Chl. a 量変動パターンについても、水温変動（図-5）と同様に、Chl. a 量の短周期変動振幅は干潟の方が大きく、反対に湧昇に対応した長周期変動の振幅は砂浜の方が大きいという傾向が確認される。また、観測期間全般を通じた Chl. a 量のレベルは砂浜の方が干潟よりも高いが、これは干潟におけるベンチによる海水の濾過作用によって植物プランクトン量が低減したことを示すものと考えられる。

4. 物質輸送に及ぼす地形の効果

4.1 数値シミュレーションの概要

沿岸湧昇に起因した水温および Chl. a 量の長周期変動特性に関する砂浜と干潟における明確な相違は、海底地形の違いにより説明されるものと考え、数値実験的な計算によって検討した。数値計算には、POM (Blumberg and Mellor, 1983) をベースに海表面熱収支と水塊への日射の透過吸収を考慮した内山ら（1998）の計算コードを使用し、砂浜および干潟を模したモデル地形を設定した岸沖断面2次元の計算を行った。以下、砂浜地形での計算を run-1、干潟地形での計算を run-2 と呼ぶ。計算の初期条件は、全領域で流速ゼロ、夏期の典型的な湾奥部の鉛直密度分布を岸沖方向に一様に与えた。そして一定風速（10 m/s）の沖出し風を連続的に吹かせて沖側底層水塊の湧昇をシミュレートした。海底地形以外の諸条件は全て同一とし、境界条件などは内山ら（1998）と同様のも

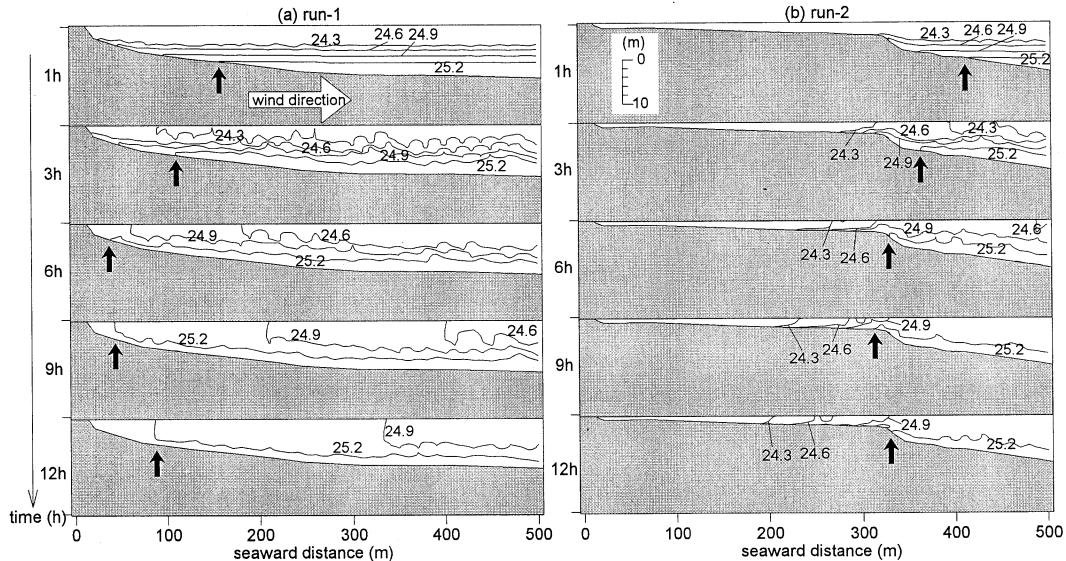


図-9 計算開始から 1, 3, 6, 9, 12 時間後における塩分分布. (a) run-1—砂浜, (b) run-2—干潟に対する計算結果.

のを用いている。なお、モデル地形は最大水深 22 m、岸沖距離 2 km であり、それを岸沖方向には等間隔で 200 鉛直方向には σ 座標を用いて 40 層で解像した。

4.2 干潟、砂浜における物質輸送に及ぼす地形効果

図-9 に計算開始から 1, 3, 6, 9, 12 時間後における塩分分布を示す。図中の黒矢印で示すように、砂浜を模した地形を与えた run-1 では沖向き風の連吹によって底層の高塩分（低水温）水塊が速やかに岸近くの表層まで達しているのに対して、干潟地形を与えた run-2 では底層水塊が岸近傍に到達しにくいことが分かる。紙面の都合上ここでは示さないが、一様緩勾配地形を与えた計算を予備的に行ったところ、run-2 と同様に沖側底層水の影響が岸近くに現れにくいという結果を得ている。これは、浅海域を広く有する地形では、底面摩擦によって水平流速が抑制されるために沖側底層水が岸近くまで移流されにくうこと、また、そもそも沖側底層水が岸近くに存在しないということによるものと考えられる。

以上のことから、浅海域が岸沖方向に長く存在するという干潟地形そのものが、海域の水温や Chl. a 等の物質に対して湧昇の影響を受けにくくさせる要因になっていることが示された。

5. 結論

干潟域では、潮間帯周辺における土壤への蓄熱効果およびそれに伴う地面と海水の直接的な熱交換によって、岸近傍の水塊が顕著な加熱を受けるために、砂浜と比較

して岸沖方向の水温勾配が強くなる。そして、その水塊が潮汐等に伴い岸沖方向に輸送されることにより、日周期、半日周期の水温変動振幅が大きく現れる。

また、水温の長周期変動は主として沿岸湧昇に対応したものであり、その影響は砂浜の方が強く現れる。これには干潟と砂浜の地形の相違が関係しており、冲合い水塊の位置や底面摩擦などの相違に起因して、干潟の方が湧昇の影響が岸近くに到達しにくいことによる。

Chl. a 量は砂浜の方が干潟よりも圧倒的に多く、その長周期変動パターンも水温と同様に、湧昇に対応した移流特性の相違によって説明される。

参考文献

- 内山雄介・灘岡和夫・瀬崎智之・八木 宏 (1998): 東京湾奥極浅海域の砂浜海岸周辺における成層期の水環境特性, 土木学会論文集, No. 593/II-43, pp. 125-144.
- 港湾環境創造研究会 (1997): よみがえる海辺, 山海堂.
- 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 千葉県水産試験場富津分場(1997): 東京湾海況速報, 第 8 版~第 13 版.
- 細川恭史 (1991): 浅海域での生物による水質浄化作用, 沿岸海洋研究ノート, Vol.29, No. 1, pp. 28-36, 1991.
- Blumberg, A. F. and Mellor, G.L. (1983): Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, pp. 4579-4592.
- Harrison, S. J. and Phizacklea, A.P. (1985): Seasonal changes in heat flux and heat storage in the intertidal mudflats of the Forth Estuary, Scotland, *J. of Climatology*, Vol. 5, pp. 473-485.