

南サンフランシスコ湾における底泥輸送解析

稲垣 聡*・Stephen G. Monismith**・Jeffery R. Koseff**
Jeremy D. Bricker***

1. はじめに

沿岸の砂質・泥質による浅場は多様な生物の生息地を提供しているが、今後の廃棄物処分場・空港などの建設影響評価や人工干潟・浅場の整備も踏まえて、浅海域の各場所で精度良い水深変化予測のできる土砂輸送モデルの整備は急務である。

米国カリフォルニア州の南サンフランシスコ湾(以下、南 SF 湾、図-1)では、湾中央の南北に伸びる水路部(水深約 15 m)を除いて水深が 2~3 m 程度と極めて浅く、底質にシルト分が多いことから風波などによる底泥巻き上げが起こり易く、大規模な底質移動が盛んに行われると考えられる。強風時には湾全体の水が濁る様子が目視でも見られる。このような底泥輸送の予測には、潮流・吹送流の流れの評価から、風波の発達、波による底泥巻き上げ、浮遊土砂の輸送・沈降などの物理プロセスを一通り解析できるツールが必要である。本研究は、風波の予測、底泥の巻き上げのモデル化に比較的シンプルな方法を用いながら、広大な浅海域を有する南 SF 湾の土砂輸送解析を実施し、解析の実用性を検討した。あわせて、南 SF 湾の底泥の輸送に対して、場所によりどのような物理プロセスが重要であるかを明らかにすることを目的とした。

2. 使用数値モデル

(1) 潮流計算モデル

数値計算コード TRIM (Tidal Residual Intertidal Mudflat の略、イタリア・ボローニャ大学で開発 (Casulli ら, 1994)、米国スタンフォード大学などで改良中)を湾内の流れと土砂輸送の計算に用いた。TRIM は 3 次元レベルモデルで、潮汐の干満による浅瀬の干出を考慮しながら海域の潮流・吹送流を計算できる。鉛直方向の乱流モデルには Mellor and Yamada Level 2.5 モデルを改良した QETE モデル (Gross ら, 1999) が用いられている。TRIM による南 SF 湾での潮流流速の計算については、

Cheng ら (1993) や Gross ら (1999) などの適用があり、潮流楕円の実測値との比較などから、湾内の流速を良好に再現できることが確かめられている。

(2) 土砂輸送モデルとその改良

TRIM では運動方程式と運動させて物質の移流拡散方程式を解くことができる。McDonald ら (1997) は、サンフランシスコ湾に適用する底泥の堆積と侵食のモデルについて、以下の式を提案している。これらは移流拡散方程式のシンク・ソース項となる。

$$\left. \begin{aligned} Deposition &= v_s s \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right), & \tau_b < \tau_d \\ &= 0, & \tau_b > \tau_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} Erosion &= P \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right), & \tau_b > \tau_e \\ &= 0, & \tau_b < \tau_e \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 v_s : 沈降速度、 s : 水中の浮遊土砂濃度、 τ_b : 底面摩擦力、 τ_d : 堆積が発生可能な最大底面摩擦力、 τ_e : 侵食が発生する最小底面摩擦力、 P : 侵食速度定数。

また、浮遊土砂の沈降速度に粒子の凝集を考慮した次式を用いている。

$$\begin{aligned} v_s &= v_{s,base}, & s \leq S_{cr} \\ &= v_{s,base} \left(\frac{s}{S_{cr}} \right)^{2/3}, & s > S_{cr} \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

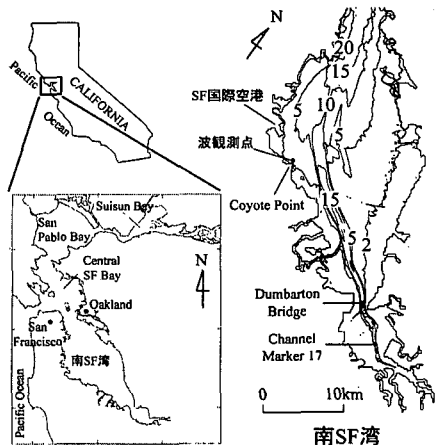


図-1 南 SF 湾の位置と湾内の水深

* 正会員 工 修 鹿島技術研究所 主任研究員
** Ph.D. スタンフォード大学教授 土木環境学部
*** M.S. スタンフォード大学大学院 土木環境学部

$v_{s,base}$: シルト粒子が凝集しない時の基準沈降速度, ser : シルト粒子が凝集を開始する濃度(凝集発生濃度). 上記で扱われる τ_b は計算最下層の潮流・吹送流の速度から対数則を仮定して求められるものであり, 波による水粒子の運動による土砂の巻き上げ等は考慮されない. 本研究では, Rijn (1993) など多くの研究に見られるように, 底面摩擦力を潮流によるものと波によるものの足しあわせとした. すなわち,

$$\tau_b = \tau_{b,c} + \tau_{b,w} \dots\dots\dots (4)$$

$\tau_{b,c}$: 流れで発生する底面摩擦力, $\tau_{b,w}$: 波による水粒子の運動で発生する底面摩擦力. Grant ら (1979) の研究から $\tau_{b,w}$ を以下のように求めた.

$$\tau_{b,w} = 1/2 \rho f_w |\hat{U}_s|^2 \dots\dots\dots (5)$$

ここに f_w は摩擦係数で, Madsen ら (1991) の研究から 0.05 の定数で与える. $\hat{U}_s$ は海底付近水粒子の波による運動最大速度であり, ポテンシャル理論により波高 H , 波周期 T , 波長 L , 水深 h から以下のように計算される.

$$\hat{U}_s = \frac{\pi H}{T \sinh(2\pi h/L)} \dots\dots\dots (6)$$

波長 L は周期と水深から分散関係式によって求められるが, 分散関係式は L に対して陰的な式であるので, 計算速度向上のため, 合田 (1990) の 0.1% 精度の下記近似式を用いる.

$$L = \frac{2\pi h}{\sqrt{\left(D(D+1)/(1+D(0.6522+D(0.4622+D^2(0.0864+0.0675D)))) \right)}} \dots\dots\dots (7)$$

$$D = 4\pi^2 h / (gT^2)$$

以上の式を TRIM に組み込むことにより, 流れと波による土砂巻き上げを含む浮遊土砂の輸送を計算することが可能となった. 以上に挙げた式は, 南 SF 湾で得られる土砂輸送のパラメータの情報が乏しいことから, 必要パラメータの数の可能な限り少ないシンプルな式を選択したものである.

3. シミュレーションの準備

(1) 南 SF 湾で使用できる気象データ

a) 潮汐データ

U.S. Geological Survey (以下 USGS と記述) では, SF 湾内 40 箇所以上の点において潮汐の実測を行い, 潮汐調和定数の情報を蓄積している. この調和定数を用いて, 任意の時刻の潮汐を計算可能である.

b) 風データ

USGS 作成の「The San Francisco Bay Wind Patterns」のホームページ (<http://sfports.wr.usgs.gov/wind/>) では, 20 箇所の地上観測局のデータをリアルタイム表示するとともに, 任意の場所の時系列データも入手

が可能である (Ludwig ら, 2000). また, 1994 年以前のデータについては, USGS がデータベース化している.

c) 波浪データ

SF 湾では波高・波周期を定常的に観測しているポイントが存在せず, 潮汐や風に比べてデータの整備が遅れている. また, 本論文の湾全体での土砂輸送のような解析には湾内の計算格子での波高・周期の情報が必要になり, それを現地観測の情報だけでまかなうことは現実的でない. 次節で波浪を推算することについて検討する.

(2) 風波の予測

a) 予測式

Shore Protection Manual (Coastal Engineering Research Center, 1984) に, 浅水波の簡易予測式が掲載されている.

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0.283 \tanh \left[0.530 \left(\frac{g d}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0.00565 \left(\frac{g F}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0.530 \left(\frac{g d}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{gT}{U_A} = 7.54 \tanh \left[0.833 \left(\frac{g d}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0.0379 \left(\frac{g F}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{g d}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに, H : 波高 (m), T : 周期 (s) であり, パラメータは U_A : 地上 10 m での風速 (m/s), F : 吹送距離 (m), d : 水深 (m) の 3 つである. これらパラメータのうち, 水深は図-1 の通りであり, 風速は前述の通りデータが入手できるので, 吹送距離 F が分かれば上記の式から波高と周期が計算できることになる.

そこで, 南 SF 湾内の全計算格子点での, 16 方位の風

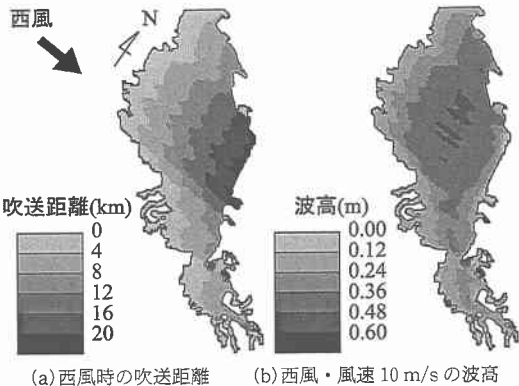
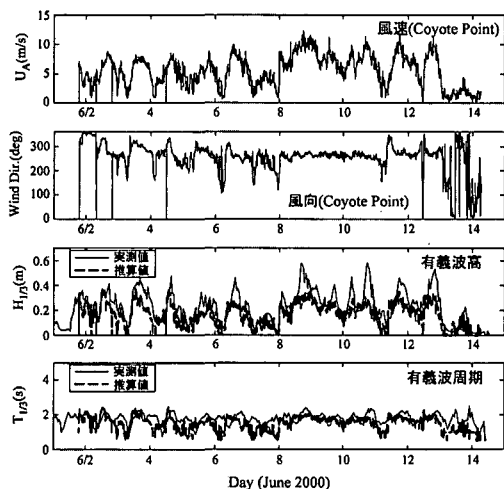


図-2 波浪推算結果



図一3 Coyote Point 沖における波浪推算結果と実測波浪の比較

に対する吹送距離を事前に計算してデータベース化を行った。SF 湾では春～夏の数カ月間にわたり、午前中微風、午後には海陸風の西風 (Afternoon Sea Breeze) が吹くというパターンを毎日繰り返す傾向にある。図一2(a) にその卓越風向である西風に対する吹送距離 F を計算した例を示す。この F を用いて西風 10 m/s の時の波高を計算したものが図一2(b) である。波高は F の増加とともにある程度まで増大するが、湾の東岸付近では浅い水深のために逆に減衰する分布となる。後述の底泥輸送解析中はこのデータベースを呼び出すことにより、風速・風向時系列から各時刻の波高と周期の湾内の分布を推算できるようになった。

なお、このような式 (8), (9) の利用では波浪が発達するのに常に十分な時間風が吹くと仮定することになる。Shore Protection Manual には波浪が発達するために必要な最小吹送時間の推算式も提示されている。

$$\frac{gt}{U_A} = 5.37 \times 10^2 \left(\frac{gT}{U_A} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (10)$$

t : 最小吹送時間 (s)。この式で風速 10 m/s で周期が 2 秒と 3 秒の場合では、最小吹送時間はそれぞれ約 40 分、119 分となる。海陸風が吹くと通常数時間継続するため、波浪の発達に十分な長さであるから上記の仮定は満たされると言える。

b) 予測波高・周期と実測値との比較

ここでは予測値と実測波高・周期の比較を試みる。前述の通り SF 湾では波浪データの蓄積が乏しいため、2000 年 6 月に独自に観測した南 SF 湾西岸 Coyote Point 沖における波高・周期と比較した (場所は図一1 参照)。図一3 に Coyote Point で実測した風向、風速と波高・周期の実測値と推算値を示す。なお、この実測値から分かるように、強風時はほぼ常に西からの風 (風向約

270 度) となっている。推算結果は、周期はよく一致するものの、波高は実測値が大きい時に計算値が過小評価となる結果になった (6 月 6 日, 8 日, 10 日など)。これにはいくつかの理由が考えられるが、重要と思われるのは波と流れの相互作用である。今回過小評価となった強風時の時間帯は、すべて上げ潮の時間帯であり、湾の奥部への流れ (従って Coyote Point の西側では西向きの流れとなる) が西風とちょうどぶつかる形となり、波頭が立つ形で波高が増大した可能性がある。

この波・流れの相互作用に対してはエネルギー平衡方程式などを用いた波浪推算モデル導入で対応できるが、その導入は今後の課題として、次節の解析にはこの簡易的な波浪推算法を用いることとする。

4. 土砂輸送解析

(1) 計算パラメータの設定

主な計算条件を表一1 に示す。計算は海陸風の卓越時期で USGS から潮汐・実測風・実測浮遊土砂濃度の時系列データが全て得られた 1993 年 4 月 12 日～5 月 2 日を選んだ。底泥輸送のパラメータについては、McDonald ら (1997) にまとめられている値を参考に設定した。ただし、侵食速度定数については、パラメータを振り、浮遊土砂濃度のオーダーが実測値と合うように設定した。

(2) 解析結果と考察

a) 浮遊土砂濃度分布

図一4 は計算期間内のいくつかのタイミングにおける

表一1 主要計算パラメータの設定

全般	計算観測 計算水平格子数 水平格子間隔 鉛直方向層分割 計算時刻み	南 SF 湾全体 (図一1) 116 (x) × 268 (y) 200 m 1 m 180.0 sec
時系列設定	計算期間 潮汐 風向・風速 波高・周期	1993 年 4 月 12 日～5 月 2 日 (21 日間) 開境界で与えられる 40 分潮から生成 上記計算期間の SF 国際空港 (図一1) での毎時実測値 (湾内では一様と仮定) 式 (8), (9) から推算
底泥輸送 2. (2) 参照	基準沈降速度 侵食が発生する 最小摩擦力 堆積が発生する 最大摩擦力 侵食速度定数 擬集発生濃度	0.0004 m/s 0.3 N/m ² 0.15 N/m ² 2.5 × 10 ⁻⁹ kg/m ² /s 300 mg/l
底面粗度	流れによる底面 摩擦に対して	0.01 m (水深 2 m 未満) 0.005 m (水深 2 m 以上)
初期条件	水位 流速 浮遊土砂濃度	0.0 m 0 0

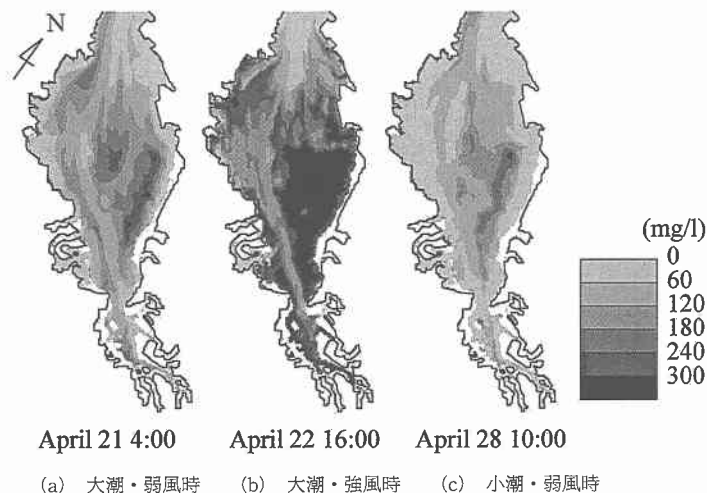


図-4 平均海面下2 mでの浮遊土砂濃度の分布

平均海面下2 mでの浮遊土砂濃度分布の計算結果を示したものである。図-4(a)は大潮時の弱風時(風速2 m/s以下)で水路部の西側の部分と東側の水深の浅い場所に高い濃度の分布が見られる。一方、図-4(b)は大潮時の強風時の例であり、南SF湾の浅い海域全体に高濃度の浮遊土砂が分布する様子が見られ、水路部では相対的に浮遊土砂濃度が低くなる。このとき、湾の西部の浅海域においても濃度が高いことは重要で、西風による吹送距離の短い場所においても浅い場所では波が重要であることを意味している。図-4(c)は小潮・弱風時のときで、舞い上げられた土砂はこのときまでに沈降し、濃度が低くなっている。これは穏やかな日に青々とした海水が目視される状況に対応する。

b) 浮遊土砂濃度実測時系列との比較

計算値の時系列を実測と比較したものを、図-5に示す。実測値はUSGSにより期間内に水路部でOBS(Optical Backscatter)を用いて連続観測したもので、湾南部のChannel Marker 17(水深7 m)とDumbarton Bridge(水深15 m)の中層での値である(場所は図-1を参照)。なお今回データの不足から浮遊土砂濃度の初期条件が与えられない(ゼロとした)ため、計算値との比較は、事前計算から初期条件の影響がなくなることを確認した後半の14日間で行う。

計算で求めた濃度と実測濃度は、まずオーダー的には一致している。計算結果は、流れのみを考慮した場合(すなわち式(4)で τ_{bc} のみを考慮した場合)と波の巻き上げまでを考慮した場合の両方を示している。流れ(主に潮流)のみ考慮の場合はバックグラウンドの浮遊土砂濃度までは説明できるが、大きく変動する部分は波の巻き上げまで考慮しないと再現できない。実測値は強風時の大潮干潮時に大きな濃度を示すが、これは干潮時に水深

が小さくなった時に周辺浅海域で波による大きな土砂巻き上げが発生し、水路部に流れ込むためと考えられる。またDumbarton Bridgeでの4月22日、23日の結果に顕著のように、潮流だけでは上潮時・下げ潮時に濃度のピークを持つと計算してしまいが、波までを考慮すると干潮の位置にピークが移り、実測値に合うようになる。湾の大部分を占める浅海域では、水路部のすぐ脇の部分においても、潮流による直接の土砂侵食より、波による土砂巻き上げが底泥の海水中への浮揚に重要ということになる。

なお実測値の方が、計算より濃度が高くなる時に鋭いピークが見られる傾向があるが、これはMcDonaldら(1997)も指摘するよう

に、水路部付近の粒径の大きい砂粒子が波や潮流の強い流れで巻き上がり、短い間に沈降するためと考えられる。このピークを再現するには、複数の粒径の土粒子を考慮した計算を行う必要がある。

c) 長期的な土砂の堆積・侵食の傾向

Beeman(1992)は、1955年と1990年の海図水深を比較することで南SF湾内の35年間の土砂の侵食・堆積量を調べている(図-6)。今回の解析で、底泥侵食・堆積

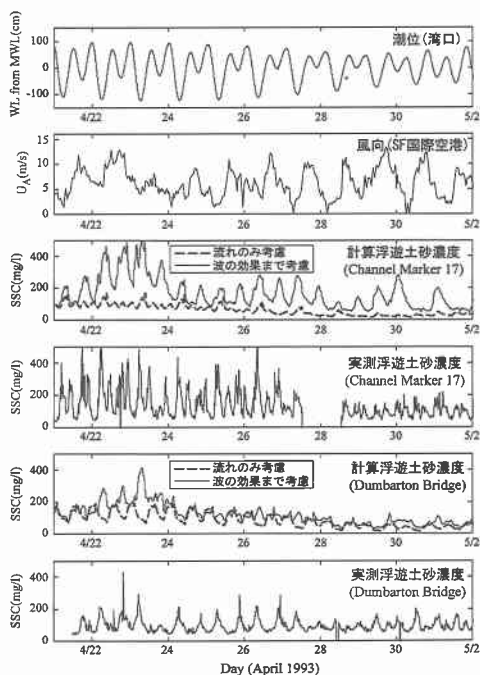


図-5 浮遊土砂濃度分布の実測値と計算値の比較

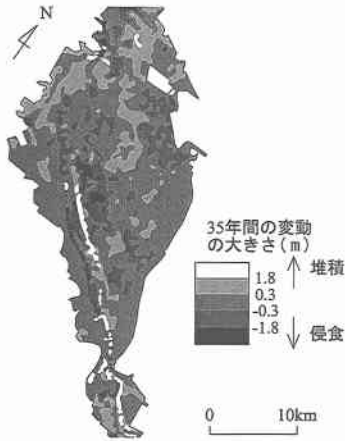


図-6 1995年と1990年の間の南SF湾の地形変化 (Beeman (1992) より作成)

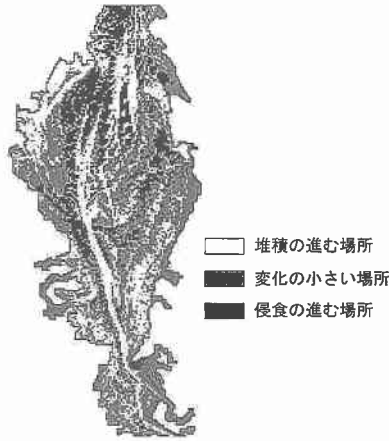


図-7 計算期間内平均の堆積・侵食の傾向

が発生する場所 (計算期間内平均) を描くと図-7となる。両者を比較すると、湾中央の西に張り出すようにカーブしている水路部の西側で侵食が起こり、東側で堆積が起こる傾向が実測・計算ともに一致している。計算される潮流速分布を詳しく見ると、水路部内の西側が東側より速くなっており、上記の底泥侵食・堆積は河川湾曲部の外側で侵食、内側で堆積が起こるのと同じ原理と考えられる。従って、土砂の侵食・堆積の長期的な変動で見ると水深の大きい水路部で潮流の直接の寄与が大きいことが分かる。その他の部分では、北西部などに堆積傾向となる場所が見られるが、実測値も多くの場所ではランダムに変化しており、風による影響は局地的には効くと考えられるものの、湾全体の輸送で明確な説明のつく変動はないと考えられる。

今回の計算は20日間程度の計算結果であり、35年間の変化の結果と定量的な比較までを行うことはほとんど意味はない。しかしながらSF湾では春から夏の数カ月に渡って午前微風・午後西風が繰り返され、Shoellhamer (1996) の指摘で南SF湾での浮遊土砂濃度は夏に最大になるとの実測結果から、この時期の計算で長期的な傾向もある程度把握できると考えられる。

5. おわりに

大規模な浅海域が広がる南SF湾を対象に底泥輸送の解析を行い、以下の点が明らかになった。

- ・南SF湾内の短期的な浮遊土砂濃度の変化には波による浅水部での土砂巻き上げが極めて重要であり、その影響は水深の大きい水路部での濃度にも及ぶ。海陸風の西風に対して吹送距離の短い湾西岸付近でもこの傾向は同様である。

- ・一方で長期的な土砂堆積・侵食の傾向を見ると、水路部

の両岸での堆積・侵食が顕著であり、潮流の効果が重要となる。

- ・TRIMに波による土砂巻き上げの効果と浅水波予測式を加えたモデルは、風波の過小評価や浮遊土砂濃度の精度に問題を残すものの、湾内の土砂の輸送機構を説明できた。今後モデル各部分やパラメータに検討を加えることで、さらに精度の良い底泥輸送予測が期待できる。

なお、南SF湾の潮汐調和定数と風データ、浮遊土砂濃度データについてはUSGSに提供を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計 (増補改訂版), 鹿島出版会, p. 174.
- Beeman O. & Associates, Inc. (1992): Sediment Budget Study for San Francisco Bay, Final Report, prepared for San Francisco District, Corps of Engineers.
- Casulli, V. and Cattani, E. (1994): Stability, accuracy, efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow, *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 27, pp. 99-112.
- Cheng, R. T., Casulli, V. and Gartner, J. W. (1993): Tidal Residual Intertidal Mudflat (TRIM) model and its applications to San Francisco Bay, California, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 36, pp. 235-280.
- Coastal Engineering Research Center (1984): Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Govt. Printing Office, vol. I, pp. 3-55-3-77.
- Grant, W. D. and Madsen, O. S. (1979): Combined wave and current interaction with a rough bottom, *J. Geophysical Res.*, vol. 84, No. C4, pp. 1797-1808.
- Gross, E. S., Koseff, J. R. and Monismith, S. G. (1999): Three-dimensional salinity simulation of South San Francisco Bay, *J. Hydraulic Eng.*, vol. 125, No. 11, pp. 1199-1209.
- Ludwig, F. L. and Sinton, D. M. (2000): Evaluating an objective wind analysis technique with a long record of routinely collected data, *J. Applied Meteorology*, vol. 39, pp. 335-348.
- Madsen, O. S. and Wikramanayake, P. N. (1991): Simple models for turbulent wave-current bottom boundary layer flow, Contract Rep. DRP-91-1, U.S. Army Corps of Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 150 p.
- McDonald E. T. and Cheng, R. T. (1997): A numerical model of sediment transport applied to San Francisco Bay, California, *J. Marine. Lm. Eng.*, vol. 4, pp. 1-41.
- Rijn, L. C. van (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, and Coastal Seas, Aqua Publications, p. 9-16.
- Shoellhamer, D. H. (1996): Factors affecting suspended-solids concentrations in South San Francisco Bay, California, *J. Geophysical Res.*, vol. 101, No. C5, pp. 12,087-12,095.