

津波による港湾内の海底地形変化に及ぼす流速場の影響

Effects of Tsunami Velocity Field on Bottom Topography Change in Harbor

榊山 勉¹・松山昌史²・木原直人³

Tsutomu SAKAKIYAMA, Masafumi MATSUYAMA, Naoto KIHARA

Vecocity field in a harbor due to tsunami as well as free surface displacement was investigated experimentally to discuss bottom topography change. Vortices generated near a breakwater head and inside the harbor were clearly observed. Mechanism of the bed topography change featured as an accumulation in the center of the habor and erosion in surrounding area of the accumulation was explained with the velocity field and observation of trace of sand movement. Using an analytical solution and the measured velocity as boundary conditions, an radial velocity component in Ekman layer was estimated to be about 30% of the azimuthal one.

1. 緒 言

津波による砂移動により原子力発電所の専用港湾内の取水口が閉塞されると冷却水の取水量の確保が困難になり原子炉の安全性が懸念される。このため、数値計算モデルを用いて港湾内外の海底地形変化を評価している。

藤井ら(1997)は津波による港内流況の数値計算モデルの再現性を検討した。榊山ら(2007)は実験により津波による港内地形変化の特徴をとりまとめた。木原・松山(2007)は数値計算により榊山ら(2007)の実験結果の再現を試みたが精度向上の課題が残された。港湾内の地形変化に関しては、港内に発生する渦が支配的な役割を果たすことが明らかになってきたが、現象の解明のためには港内の流況と地形変化との関係を把握する必要がある。

津波による地形変化に関しては、これまでチリ地震津波による気仙沼湾の地形変化に関する研究が高橋ら(1991, 1992, 1993, 1999), 藤井ら(1998), 西畑ら(2007)により報告されている。また、西畑ら(2005)は、2004年スマトラ沖地震津波によるスリランカ・キリンダ港の地形変化を検証した。これらの研究では、気仙沼湾内で確認された渦や防波堤背後の港内に発生する渦に代表される津波による流況の再現性に検討の余地が残されている。

本研究は、固定床の下で津波による港湾内外の水位変動と流速の測定結果と既往の移動床実験結果から海底地形変化に及ぼす流速場の影響について考察を加える。

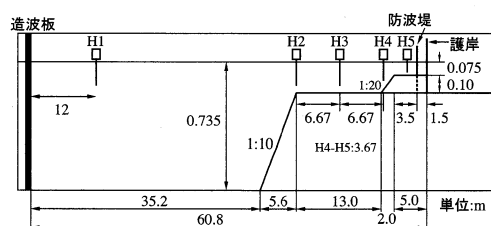


図-1 実験装置



図-2 港湾模型と波高計・流速計アレイ

2. 実験方法

実験は、図-1に示す長さ78m、深さ1.20m、幅0.90mの2次元造波水路を用いて、水路内に防波堤、港口部、護岸からなる単純な矩形の港湾模型を設置して行った。港湾模型を図-2に示す。港湾模型の寸法は奥行150cm、幅90cm、防波堤は長さ66cm、厚さ12cm、港口幅は24cmである。防波堤と護岸の高さは津波が越波しない高さとした。造波水深は73.5cm、港湾部の水深は7.5cmである。

港湾内外の水位変動と水平流速2成分を岸沖方向、水路幅方向とも6cm間隔で測定した。防波堤の先端で発生する渦をとらえるために港口部周辺では、3cm間隔で測定した。水位変動は容量式波高計で、流速は平面2成分電磁流速計で測定した。流速測定は底面上3.0cmの高さとした。データサンプリング周波数は100Hzである。図

1 正 会 員 博(工) 電力中央研究所流体科学領域
2 正 会 員 工 修 電力中央研究所流体科学領域
3 正 会 員 博(理) 電力中央研究所流体科学領域

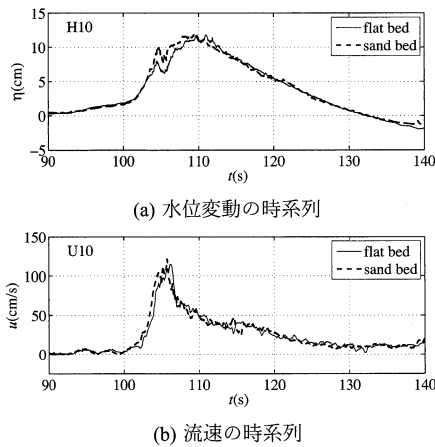


図-3 固定床と移動床の比較

-2に示す波高計と流速計各6台を移動して繰り返し測定した。図-1に示す波高計 H3の水位データを基準に全データを同期させ、実験データ解析を行った。

3. 実験結果と考察

以下では、固定床での測定結果を用いて、砂移動による海底地形変化の外力に関する議論をする。そのためにまず、移動床上と固定床上の水位変動 η と流速 x 方向成分 u の比較を行う。比較できる測定点は5点あるが図-3に代表例として港内の侵食が著しかった領域の比較を示す。測定点は、移動床実験が $(x, y, z) = (425, 81.5, -0.04)$ 、固定床実験は $(x, y, z) = (422, 84, -0.045)$ で両者は若干ずれている（座標は図-4を参照のこと）。榊山ら（2007）による移動床実験では同じ条件の下で4回繰り返した。これらの再現性は良好であったので1測定結果で代表させた。固定床上の水位変動は、時間 $t = 103\text{s}$ から 110s で移動床の時系列と若干差がみられる。図は省略したが、全測定点の比較を総合すると比較場所の若干のずれの影響よりも地形変化の有無や底面粗度などの違いの影響が現れ、移動床と固定床とでは水位変動や流速は完全に一致しない。その差は図-3にみられる程度であり、流速より水位変動の方が差が明瞭である。上記の差があることを認識した上で固定床での測定結果で代用することにする。

港湾内外の流速ベクトルの時間変化を図-4に示す。また、同時刻の水面分布を図-5に示す。ここで時間 t はデータ収録開始からの時間を示し、造波開始は $t = 60\text{s}$ である。測定時間中の流速ベクトルと水位の平面分布から以下のような渦の移動と発達が明瞭に確認できた。防波堤先端で発生した渦は、防波堤の内外の水位差の増加により港口部での流速の加速にともない港内へ移動しながら発達する。港外の水位が最大になった後に港内外の水位差が逆転すると港外への流出が始まる。その後も港内では渦

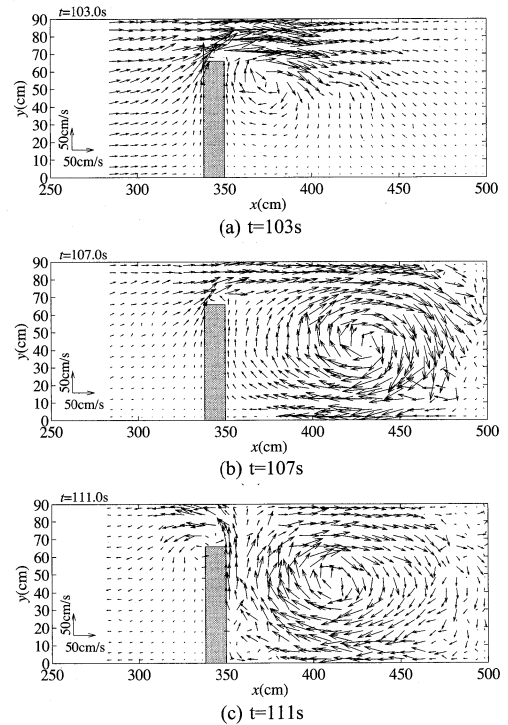


図-4 流速ベクトル

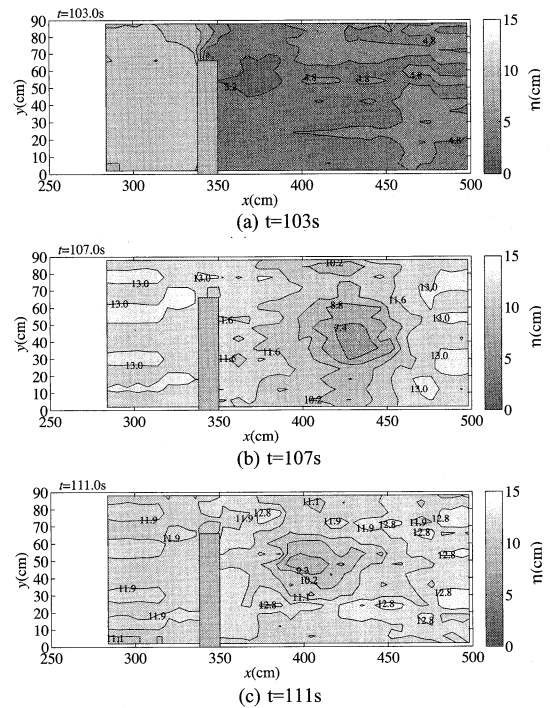


図-5 水位分布

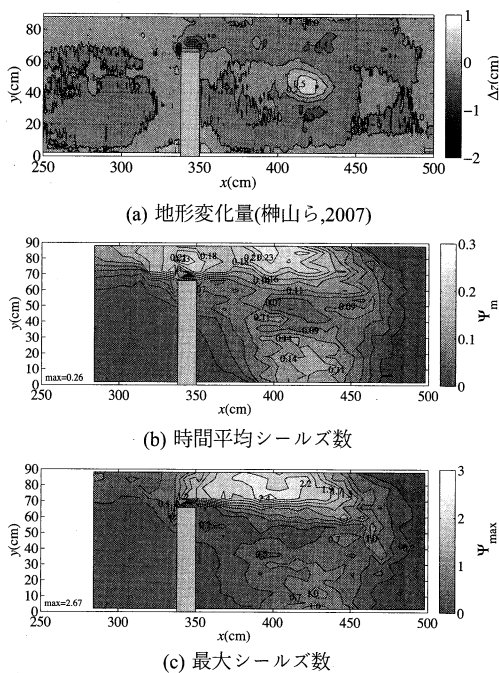


図-6 地形変化量とシールズ数の平面分布

は惰性により回転し続ける。港内中央の渦の中心位置の変動は、 $t=106s$ から $114s$ の間で、 x 方向に約 $25cm$ 、 y 方向に約 $10cm$ であった。

図-6に移動床実験による地形変化量、シールズ数の時間平均値と最大値の平面分布を示す。時間平均は津波が港内に作用する $t=100$ から $140s$ の範囲とした。図-6(a)に示す港内外の地形変化量の平面分布(榊山ら, 2007)の特徴は、防波堤先端の局所的な洗掘、港内中央部での堆積とその周辺の侵食である。後者の堆積と侵食が港内に発達した渦の作用によるものである。護岸前の2カ所の隅角部と防波堤の基部は死水域となる。これらの領域には移流により浮遊砂が運ばれることはなく、拡散が支配的になるものと考えられる。図-6(a)によると防波堤の基部の隅角部での堆積量のほうが大きい。

シールズ数の算出には固定床の水位変動と流速を用いる。底面せん断応力の計算では、流速を対数則と仮定した。西畑ら(2007)は、移動床での相当粗度の取り方による地形変化の再現性を比較した。しかし、定説にはなっていないので藤井ら(1998)と同じく相当粗度を移動床実験で用いた砂の中央粒径 $0.08mm$ とした。

摩擦速度 u_* は測定高さ z と流速 u から流速の対数則を適用して次式で算出する。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

ここに、 z_0 : 粗度長さ ($=k_s/30$)、 k_s : 相当粗度である。

ただし、流速は絶対値 $\sqrt{u^2 + v^2}$ で与えた。

シールズ数 Ψ は、上式で求めた摩擦速度 u_* を用いて次式で算出した。

$$\Psi = \frac{u_*^2}{sgd_{50}} \quad (2)$$

ここに、 $s = \rho_s/\rho - 1$: 砂の水中比重、 g : 重力加速度、 d_{50} : 砂の中央粒径、 ρ_s : 砂粒の密度、 ρ : 流体の密度である。

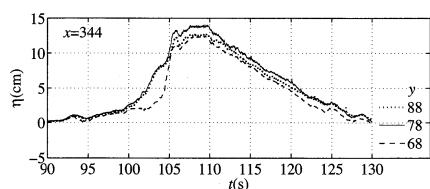
今回の実験でのシールズ数の最大値は $\Psi_{\max} = 2.7$ であった。時間平均のシールズ数の最大値は $\Psi_{m\max} = 0.26$ であった。地形変化量の平面分布とこれらのシールズ数の平面分布とを比較すると、瞬間値である図-6(c)の $\Psi_{\max}$ より地形変化に及ぼす作用時間を考慮した図-6(b)の時間平均値 Ψ_m と地形変化量との対応がよい。しかし、防波堤先端の局所洗掘による侵食量に関しては時間平均ならびに最大シールズ数とも傾向が一致していない。

港口部の流速を図-7に示す。この図は港口内の横断方向の3点の水位変動と流速 x 方向成分の時間変化を示したものである。防波堤の先端が $y=66cm$ であるので、最も近い $y=68cm$ の水位と流速は、防波堤先端に発達した渦の内部の値を表す。水位は、渦の発達時には他の2点より低く、流速は全体を通じて小さくなっている。

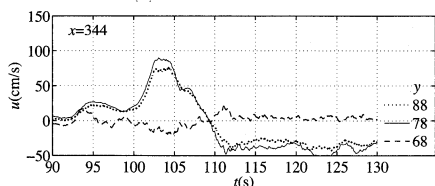
図-8に測定間隔 $3cm$ で測定した港口部近傍の流速ベクトルを示す。港口部の防波堤先端では、逆流が確認でき、その流速は小さい。防波堤先端で発生した渦は、定在し局所洗掘を引き起こす。また、港内へ移動し発達する渦が港内地形変化の主要因となる(榊山ら, 2007)。

藤井ら(1997)は、津波による港内流況の計算を実施し、実験結果と比較し防波堤先端で発生する渦ならびに港湾内の渦を再現した。防波堤先端の局所洗掘は3次元の流れの影響があり、シールズ数のみの漂砂量モデルでは再現が困難であろう。中村ら(2007)は、津波による構造物周辺の局所洗掘を砂地盤内部の応力変動で説明したが渦による砂の巻き上げなどは議論されていない。

図-9に固定床上の代表的な2箇所に砂を置き、その輸送を撮影した結果を示す。1) 図-9(a): 固定床上にはこれより先に観察した時の砂が底面に薄く残っている。この状態から実施した。2) 図-9(b): 津波が到達し、港内に流れが発生し防波堤の背後に渦が形成し始める。3) 図-9(c): 防波堤先端で発生した渦が港内へ移動する。これに伴い底面から巻き上げられた砂が渦の中央に集まる。4) 図-9(d): 港内の側壁の近くにある砂が巻き上げられ渦の中心に輸送される。5) 図-9(e): さらに渦が発達し港内の反対側の側壁に達するとこの地点の砂も同様に渦の中心に輸送される。渦が発達する間は、浮遊砂は渦の中央部に集中する。6) 図-9(f): 港内の渦の旋回流が強い



(a) 水位変動の時系列



(b) 流速の時系列

図-7 港口部の水位変動と流速の時間変化

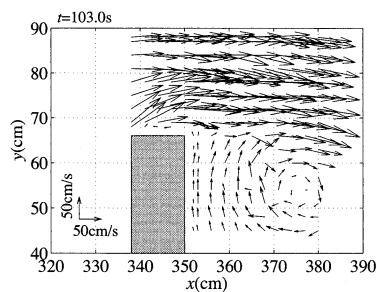


図-8 港口部とその港内側近傍の流速ベクトル

間は浮遊砂の存在する領域は渦中央に集中している。移流が卓越し、渦周辺への拡散は顕著ではないと思われる。底面全体を砂面とした移動床実験の場合にも、港内全域に浮遊砂が拡散するのは引き波が発生した後であった。7) 図-9(g): 港外へ引き波が始まって渦は惰性で回転を続ける。この間に浮遊砂は渦中央から周辺へと拡散した。8) 図-9(h): 引き波後に港内が静穏になった状態で港内中央部に砂が堆積していることを確認した。

図-10と図-11は、港内の渦が最も発達したと思われる時刻 ($t=107s$) の渦中心を通る断面における、それぞれ x 方向、 y 方向の水位と流速の分布を示す。渦中心と周辺の水位差は、図-10(a)より、 x 方向では約6cm、図-11(a)より、 y 方向では約4cmになる。渦中心は流速ベクトルから流線を作図し、目視により判断した。 $t=107s$ では渦の中心は $(x_v, y_v) = (434, 42)$ であった。水位の最も低下した位置と流速の符号が反転する位置はほぼ一致している。半径方向の流速成分はこの x 方向断面では流速成分 u になり、図-10(b)からほとんど0であることがわかる。図-11(b)の流速分布によると y 方向分布から流速が一定となる外周の位置は $y=25$ と 55 で渦の直径を30cmと見積った。

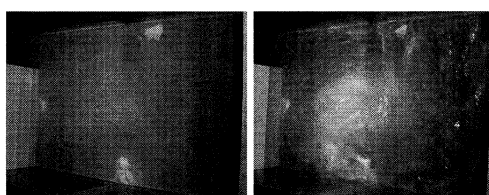
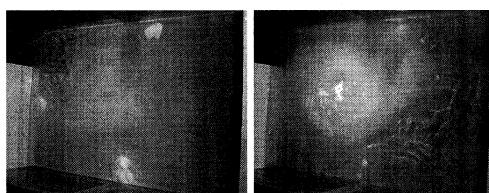
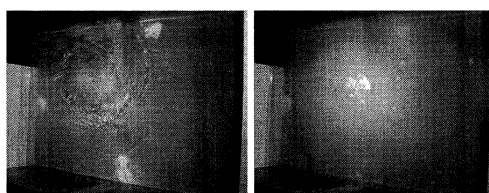
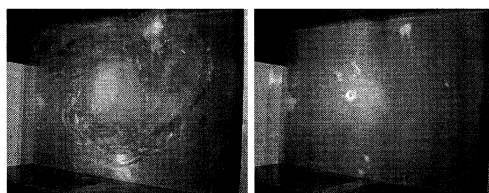
(a) $t=98s$ (e) $t=106s$ (b) $t=102s$ (f) $t=110s$ (c) $t=103.5s$ (g) $t=113s$ (d) $t=105s$ (h) $t=129s$

図-9 固定床土上の砂移動

渦運動の底面近傍には粘性の影響でエクマン層が発達し、中心に向かう2次流が発生することが知られている。港湾形状の縦横比の影響を受けるために渦の形状は歪み、理想的な真円の渦にはなっていないが、図-10と図-11に示す本実験条件における渦中心を通る水面波形と流速分布から渦の大きさ、流速、角速度を算出し、エクマン層内の流速を推定する。円筒容器内の回転流によるエクマン層内の周方向成分 v_θ と半径方向成分 v_r は、それぞれ次式で与えられる (Andersen ら, 2003)。

$$v_\theta(r, z) = v_0(r)[1 - \exp(-kz) \cos kz] \quad (3)$$

$$v_r(r, z) = -v_0(r) \exp(-kz) \sin kz \quad (4)$$

ここに、 $k=1/\delta$ で、 $\delta=\sqrt{\nu/w}$ は境界層の厚さを表す代表スケールである。

図-12に、渦の直径を30cmと見積った外周 ($r=30/2=15$) での計算結果を示す。 v_θ と v_r は、実験の回転方向に一致させて図示した。また、図中の $v_r - v_\theta$ 平面上の曲線は、流速ベクトルの頂点を投影した軌跡を示

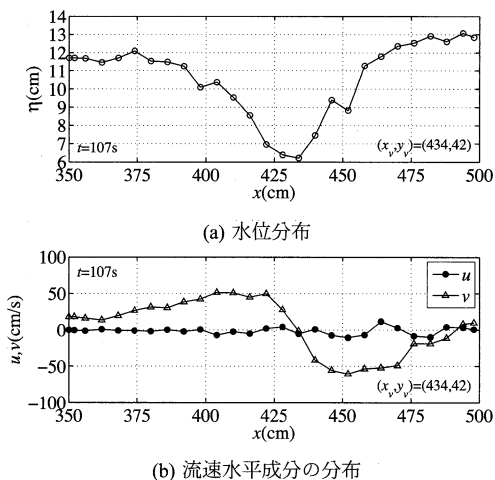


図-10 渦中心を通る水位と流速水平成分の x 方向分布

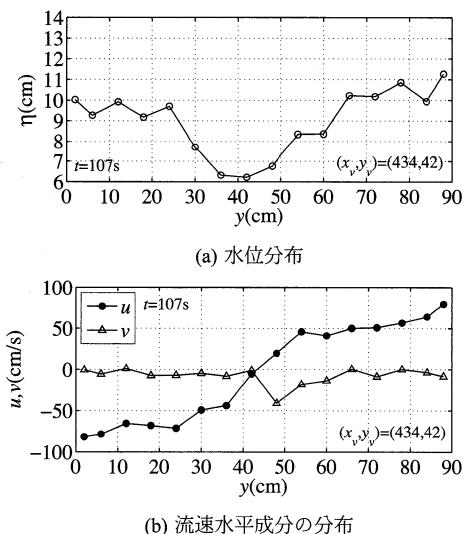


図-11 渦中心を通る水位と流速水平成分の y 方向分布

す。周方向流速成分の最大値 (約60cm/s) に対して中心に向かう流速成分の最大値 (約20cm/s) はその約30%である。

観察結果から渦中心近傍の浮遊砂の濃度は非常に高くなることがわかった。この浮遊砂が沈降することにより中央に堆積するのが第1の現象である。エクマン層の厚さは底面から数 mm と薄いが濃度は高いため渦中心に向かう砂の輸送量は無視できないものと思われる。地形変化に及ぼす現象の寄与率を明らかにするためには津波による砂移動計算モデルの精度を向上する必要がある。

4. 結言

津波による港湾内の海底地形変化には港内で発達する

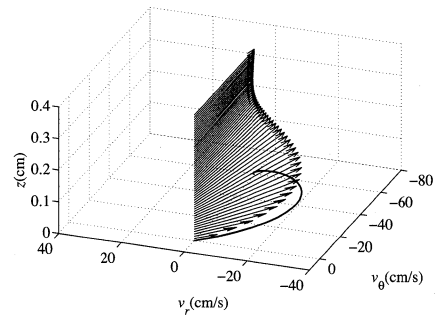


図-12 エクマン層の流速の解析解による流速分布の推定結果

渦が支配的であり、最も特徴的な現象は渦の中心の砂の堆積である。渦の発達初期の段階では、渦中心に取り込まれる浮遊砂が観察された。渦による回転流が発生している間は、水深全体にわたる移流拡散沈降現象に加えて、エクマン層内を渦中心に向かう2次流による砂の輸送が考えられる。地形変化の評価に当たっては、平面2次元数値モデルによる地形変化の計算精度の問題に加えてエクマン層内の砂輸送量の寄与率を検討する必要がある。

参考文献

- 木原直人・松山昌史 (2007) : 静水圧3次元モデルを用いた津波による地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.516-520.
- 神山 勉・松山昌史・吉井 匠 (2007) : 津波による港湾内の海底地形変化に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.506-510.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1991) : 津波による流れと海底変動に関する研究—1960年チリ津波の気仙沼湾での場合—, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.161-165.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1992) : 土砂移動を伴う津波計算法の開発, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.231-235.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1993) : 津波移動床モデルの適用性と再現性の検討, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.171-175.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔 (1999) : 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.606-610.
- 中村友昭・倉光泰樹・水谷法美 (2007) : 陸上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.856-860.
- 西畑 剛・田島芳満・森屋陽一・関根恒浩 (2005) : 津波による地形変化の検証, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1386-1390.
- 西畑 剛・佐貫 宏・森屋陽一・後藤和久 (2007) : 津波による地形変化モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.521-525.
- 藤井 直樹・大森 政則・高尾 誠・大谷 英夫 (1997) : 津波による港内流況の数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.291-295.
- 藤井 直樹・大森 政則・高尾 誠・金山 進・大谷 英夫 (1998) : 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.376-380.
- Andersen, A., B. Lautrup and T. Bohr (2003) : An averaged method for nonlinear laminar Ekman layers, J. Fluid Mechanics, vol.487, pp.81-90.