

波浪による水圧変動をうける砂質土地盤からの 細粒分の流出に関する研究

Study on Washout of Fines from Sandy Ground under Water Pressure Change due to Waves

土田 孝¹・高橋祐子²・浅海綾一³

Takashi TSUCHIDA, Yuko TAKAHASHI and Ryoichi ASAUMI

The movement of fines in soil under one-dimensional water pressure change was studied experimentally. The sandy soil containing 10% fines were subjected to the cyclic water pressure change, and in some conditions, it was observed that the fines, whose diameters were 10-75 μ m, moved to the upper directions in the soil and finally reached to the surface. When the soil was fully saturated and the liquefaction did not occur, the upward movement was not observed. The upward movement of fines occurred when the soil was liquefied on the shaking table. It is concluded that the occurrence of liquefaction under cyclic water pressure change is closely related to the upward movement of fines in the soil.

1. はじめに

干潟は海と陸と大気が接する場所として、生物数も豊富で多様であり、高い生産能力を有する。また身近な自然であることから、様々な環境機能を有する空間として捉えることができる。干潟の空間の主な環境機能として、生物生息機能・水質浄化機能・生物生産機能・親水機能が挙げられるが(国土交通省港湾局, 2003)、埋立てなど沿岸域の開発によって干潟の面積は激減している。このため、沿岸域においては開発の過程で失われてきた干潟や藻場の再生(保全, 修復, 創造)が強く求められ、瀬戸内海地域では平成 17 年 1 月に「瀬戸内海環境修復計画」が策定され、今後約 20 年間で藻場・干潟等の浅場を約 600 ha 修復することが目標とされている。

浚渫土を用いた人工干潟の造成はこれまでも多くの事例があるが、自然干潟と同程度の環境再生が達成された例もある一方、地盤の変形による干潟面積の縮小、表層からの細粒分の流失による砂浜化、生態系の形成不良などの問題が指摘されている。沿岸環境再生の目的を達するためには、藻場・干潟の再生に必要な科学的な知見を増やし、それらに基づいた合理的な設計・施工・維持管理技術を確立することが不可欠である。

造成干潟の生物生息機能において地盤表層(覆砂部)における粒度分布は重要である。底生生物やアサリなど有用生物が生息する上では、表層部の土が 10 ~ 20 % 程度の細粒分を保持していることが望ましいとされている。広島港五日市地区の人工干潟では、干潟表層部(浚渫粘

土層の上に覆砂層として造成)に完成当初 10 % 弱含まれていた細粒分の多くが 3 ~ 4 年後に消失していることが報告されている(広島県広島港湾振興局, 2001)。一方、尾道糸崎港海老地区造成干潟は、五日市地区人工干潟と同様に、港湾整備で発生したシルト・粘土分主体の浚渫土で埋め立てた上に覆砂を行っているが、自然干潟と同程度の底生生物現存量及び貴重種の生息が報告されており(春日井ら, 2003)、自然に近い砂泥質の造成干潟として高く評価されている。篠崎らの調査によると、海老地区造成干潟では、造成後 18 年が経過しているにもかかわらず覆砂層全体に約 10 % の細粒分が含まれており、このことが底生生物の生息に良好な条件のひとつになっていると考えられる(篠崎ら, 2006)。

細粒分が干潟表層の地盤中から抜け出す原因として、海水流動によるせん断力によって表層の微細粒子が移動するということが考えられるが(李ら, 1999)、表層内部からの抜け出しは説明されていない。

土田ら(2006)は、波浪による海底地盤の水圧変動に着目して室内実験を行い、地盤表層に一次元に水圧変動を加えることにより地盤の表面に液状化が発生する場合、地盤内の細粒分が上方に移動し、最終的に表層に表出する現象が起こることを報告した。本研究では、一次元水圧载荷中の間隙水圧の発生と载荷後の地盤中の粒度分布を調べ、深度方向の粒度分布の変化、地盤の飽和度を示す B 値の応答特性の影響、振動台により地盤を液状化させたときの細粒分移動現象との比較を行って、一次元水圧変動下での細粒分の移動に関する考察を行った。

2. 一次元水圧変動下における地盤内細粒分の上方移動と抜け出し

図-1 に一次元水圧変動载荷装置を示す。本装置は、内径 220 mm、高さ 500 mm で、下部に間隙水圧計ニ-

1 正 会 員 工 博 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
2 正 会 員 学(工) 国土交通省四国地方整備局
3 学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

ドル穴があり、24時間の载荷中の間隙水圧を測定した。この装置の上部に変動水圧载荷装置を接続し、各条件を満たすサイン波の水圧を载荷した。

実験には人工干潟の覆砂の粒度を参考にして、5号珪砂(平均粒径0.338 mm)90%と細粒分10%を混合した試料を用いた。混合する細粒分は、非塑性の碎石粉と広島港粘土(液性限界118.8%)を混合調整したものを用いた。表-1に細粒分の混合比を示し、それぞれの粒度分布を図-2に示した。図のように碎石粉と広島港粘土の粒度特性は類似しているが塑性は大きく異なり、碎石粉だけの試料C0-SF10、碎石粉9%で粘土1% C1-SF9、碎石粉8%で粘土2% C2-SF8は液性限界が測定できなかった。

実験条件を表-2に示すが、模型地盤の初期相対密度は50%とし、波浪条件は水深2mにある地盤を想定し静水圧として地盤表面に19.6 kN/m²の水圧を加え、変動水圧として波高1.2 m(両振幅11.5 kN/m²)の正弦波形を用いた。なお、波浪条件は五日市人工干潟の平衡勾配算出時に用いられた設計波浪を参考に決定した。

海底面の圧力変動が地盤内に伝わる時圧力伝達の遅れに起因して周期的に過剰間隙水圧 Δu^* が発生する。今回の実験では、 Δu^* は次式で求められる。

$$\Delta u^* = u_z - p_w - \gamma_w z \quad \dots \dots \dots (1)$$

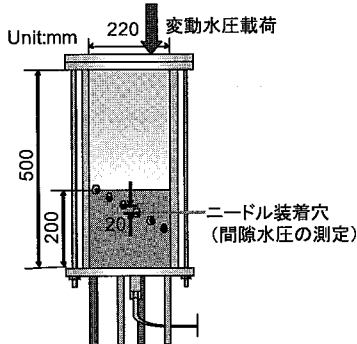


図-1 一次元水圧変動载荷装置

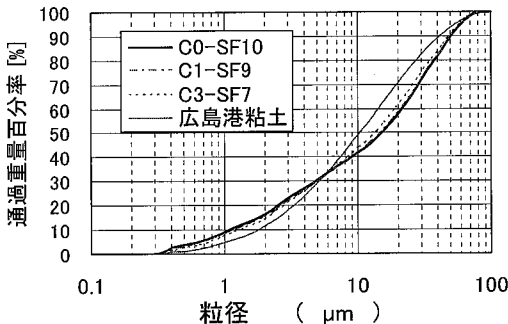


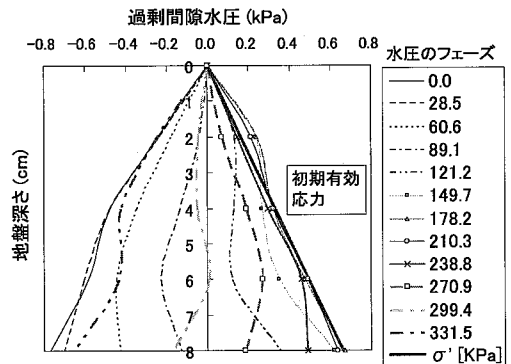
図-2 珪砂と混合した細粒分の粒度分布

表-1 細粒分中の粘土添加率

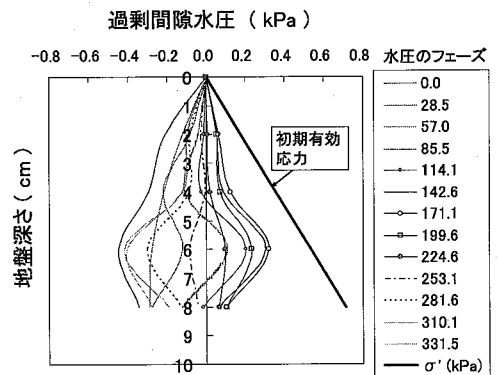
試料名	砂	細 粒 分		液性限界 (%)
		海成粘土	碎石粉	
C0 - SF10	90 %	0 %	10 %	N.P.
C1 - SF9	90 %	1 %	9 %	N.P.
C2 - SF8	90 %	2 %	8 %	N.P.
C3 - SF7	90 %	3 %	7 %	40.1

表-2 実験条件

両振幅[kN/m ²]	11.5
周期 T[s]	5
相対密度[%]	50
想定水深[m]	2.0



(a) C0-SF10 载荷12時間後



(b) C2-SF8 载荷12時間後

図-3 過剰間隙水圧の深さ方向分布

ここに u_z は深度 z における間隙水圧、 γ_w は水の単位体積重量、 p_w は地盤表面における変動水圧である。

図-3(a), (b)に载荷12時間後の間隙水圧の深さ方向分布を示す。図の右側の数字はサイン関数で与える水圧のフェーズを表している。0°の変動水圧0を基準に、90°までが水圧増加過程、90°から180°がもとの静水圧に戻る過程、180°から270°はさらに減少する過程、270°から360°は増加してもとの静水圧に戻る過程を表

す。図-3(a)をみると、C0-SF10の場合、深さ約3.0 cmまでの範囲において水圧下降フェーズのときに過剰間隙水圧が初期有効応力を上回り液状化が発生している。しかし水圧上昇フェーズでは負の過剰間隙水圧が発生して有効応力が増加しており、善ら(1987)がきれいな砂地盤について報告した液状化と高密度化が、地盤の表層で繰り返し起こっていることがわかる。一方、図-3(b)はC2-SF8の試料の場合であるが、水圧下降過程でも過剰間隙水圧は初期の有効応力よりも小さく、液状化は発生していない。

図-4は24時間载荷後の各地盤深さにおける細粒分含有率である。図よりC0-SF10では深度1.5～7 cmの範囲で細粒分が減少し、その分は表層に表出している。C2-SF8の場合は細粒分含有率の変化はみられず、地盤内で安定していたと考えられる。

図-5は、細粒分が地盤表面に大きく抜け出したときの、载荷後の各地盤深さにおける細粒分の粒度分布である(図中の数字は深度(cm))。図をみると、表層(深度0.5 cm)の細粒分は粒径が $10\mu\text{m}$ 以上で平均粒径が $35\mu\text{m}$ と、粒径の大きい粒子が集中しており、細粒分の中でも粒子の大きいものが選択的に上方に移動していることがわかる。

このように特定の細粒分が上方に移動する原因を波による液状化と関連付けて考えてみる。波による液状化は水圧の伝達遅れが生じることにより地盤内に過剰間隙水圧が発生し、過剰間隙水圧が有効応力を超えたときに生じる。液状化時は通常の状態では拘束しあっていた土粒子がその拘束力を失う状態になる。波浪による液状化は水圧下降時に周期的に発生し、その後水圧上昇で有効応力が回復するので、土粒子は再配列し拘束される。このとき大きな粒子ほど先に沈むので粒子の再配列が起こり、 $10\mu\text{m}$ 以上の細粒分は徐々に上方に移動していく。一方、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子が移動しない理由はあきらかではないが、粘性があって大きな粒子に接触している場合は液状化の影響を受けにくいと推測される。

3. 地盤内飽和度が細粒分流出に与える影響

地盤内飽和度が波による液状化に影響を及ぼすことは知られているが、細粒分の流出との関係を調べるために飽和を高めたときと飽和が不十分の場合について一次元水圧载荷実験を行った。試料はすべてC0-SF10を用いた。

図-6(a)、(b)は、地盤を飽和させる際に、間隙空気をいったん二酸化炭素に置き換えて水を通すことにより地盤を十分に飽和させた場合と、二酸化炭素を通さないで水を通すことにより地盤を作成した場合の2つについて、地盤に加わる水圧を増加させた時の地盤内の間隙水圧の応答を間隙水圧係数 B で示している。

B 値は次式で算出され、間隙が水で完全に満たされ

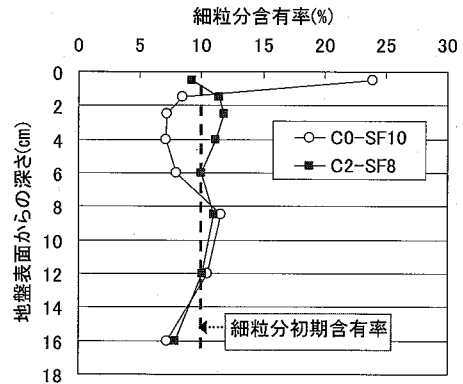


図-4 変動水圧载荷後の細粒分含有率

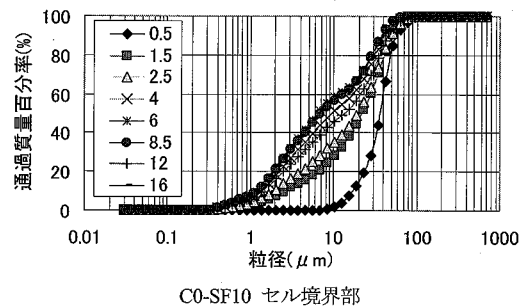
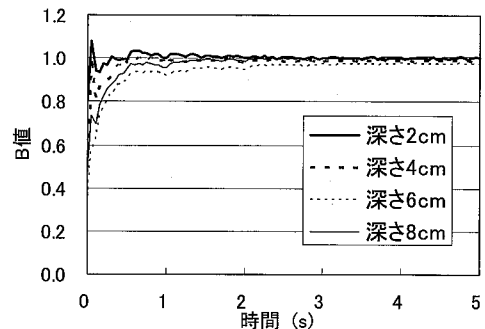
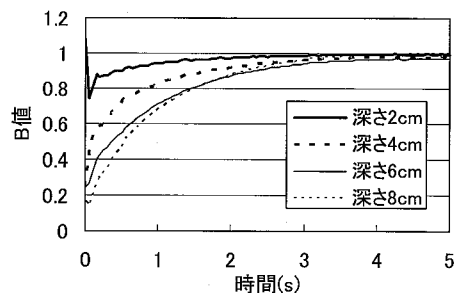


図-5 一次元水圧変動载荷後の各深度における粒度分布



(a) 飽和化に CO_2 を使用したときの B 値と時間の関係



(b) 飽和化に CO_2 を使用しないときの B 値と時間の関係

図-6 B 値の経時変化の比較

ていれば、通常の土ではほぼ B 値が 1.0 に等しくなり、一般に $B \geq 0.95$ の場合には完全飽和状態をほぼ満足していると考ええる。

$$B = \Delta u / \Delta \sigma \quad (2)$$

図-6(a)では載荷後の時間が 0.5 秒程度で B 値は 1 になっているが、図-6(b)では B 値が 1 に達するまでに 3 秒程度を要することから、地盤の間隙水圧の応答の遅れに起因する液状化が発生しやすくなっていると考えられる。

図-3(a)、図-4 は、図-6(b)の条件で作成した地盤に一次元水圧変動を加えたときの、間隙水圧特性と実験後の細粒分含有率-深度関係であった。図-7 は、図-6(a)のように二酸化炭素を用いて飽和化したときの一次元水圧変動下の間隙水圧応答である。図のように、過剰間隙水圧の発生量が非常に少ないが、これは間隙水圧応答が良いために、地盤内の水圧と地盤表面に加わる水圧の差が少ないことに起因する。図-8 は、一次元変動水圧を 24 時間載荷した後の細粒分含有率の深さ方向分布である。図のように、飽和を十分に行ったときは細粒分の移動はほとんどみられなかった。

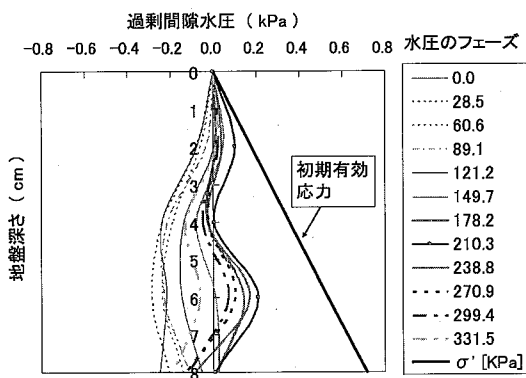


図-7 飽和度の違いによる過剰間隙水圧発生比較

図-9 は載荷終了後の地盤表面の様子である。飽和度低ではほとんどあらゆる場所で細粒分が表層から抜け出しており、細粒分(黒い部分)が表層に堆積している。また、変動水圧を載荷中に約 2.5 mm の振幅で表層は振動した。一方、飽和度を十分高めた場合には載荷中の地盤の変動は視覚的に確認できなかった。以上の実験結果は、細粒分の移動が地盤内の液状化発生の有無に密接に関連していることを示している。

4. 振動による液状化が細粒分流出に与える影響

細粒分の抜け出しが液状化現象によるものなのかを実証するために、振動台を用いて繰り返しせん断による液状化と波浪による液状化を比較検討した。表-3 にそれぞれの実験条件を示す。振動台実験の試料は表-1 の

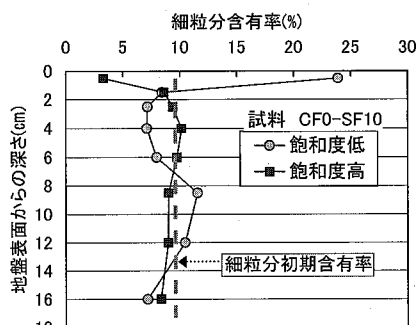
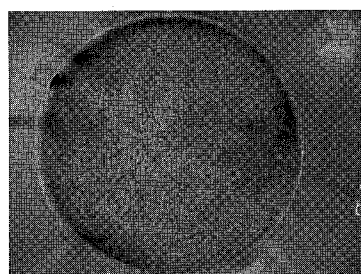
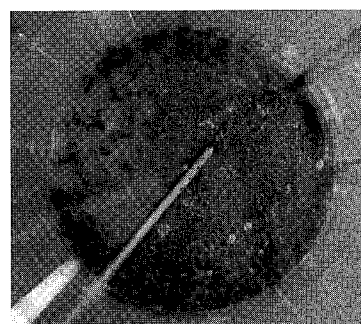


図-8 飽和度の違いと細粒分の移動の関係



(a) 飽和度高 (CO-SF10)



(b) 飽和度低 (CO-SF10)

図-9 24 時間載荷後の地盤表面

表-3 実験条件の比較

	両振幅	周波数	相対密度
振動台	4 mm	7.5 Hz	50 %
振動台	4 mm	7.5 Hz	30 %
一次元水圧変動	11.5 kN/m ²	0.2 Hz	50 %

CO-SF10 を用い、図-1 に示す実験装置内に一次元変動水圧実験と全く同様に地盤を作成した。なお、このときに CO_2 を用いた飽和化は行わなかった。その後装置をそのまま振動台の上に移動して固定し、ひずみ制御(ひずみ両振幅 4 mm)、周波数 7.5 Hz で振動を加えた。

振動台の機械的な制約のため、相対密度 $\text{Dr} = 50\%$ の試料では液状化が発生しなかったが、 $\text{Dr} = 30\%$ の試料では土槽全体で液状化が発生したことを観察した。

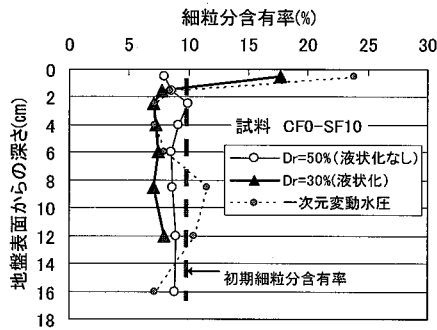


図-10 振動後の細粒含有率の変化

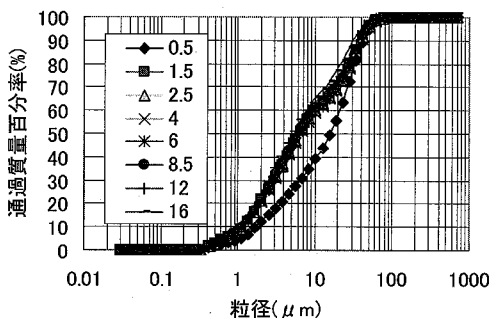
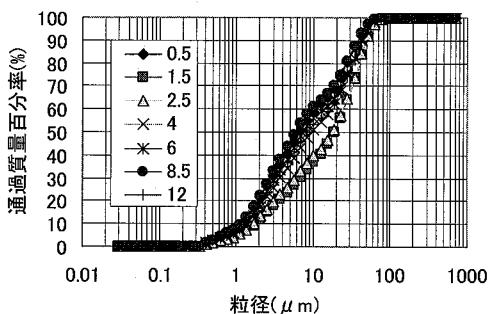
(a) 振動台 $D_r=50\%$ (C0-SF10)(b) 振動台 $D_r=30\%$ (C0-SF10)

図-11 振動後の各深度における細粒分の粒度分布

図-10は相対密度30%(液状化), 50%(液状化せず)における実験後の深度と細粒分の関係である。地盤の相対密度 $D_r=30\%$ のときに液状化が発生し細粒分が大きく抜け出したが $D_r=50\%$ では液状化が発生せず抜け出しも起こらなかった。図中には比較のため一次元水圧変動の載荷後の細粒分の分布を示しているが、振動により液状化した場合は深さ方向にほぼ均等に細粒分が低下しているのに対し、一次元水圧変動の場合は2~7cmの深度で減少し、それ以降の深度では増加するなど、深さ方向の変化があるという違いがある。

図-11は振動後の細粒分の粒径加積曲線である。細粒分が抜けだした $D_r=30\%$ における粒径加積曲線は図-5と類似しており抜けだした細粒分の平均粒径は約 $20\mu\text{m}$ であ

った。また、液状化にいたらなかった $D_r=50\%$ の場合も表層に近い範囲では細粒分の粒度分布の変化がみられた。

以上のように、一次元水圧変動、振動による繰返しせん断という全く異なるメカニズムで液状化が起こった場合のいずれにおいても、載荷後において粒径 $10\sim 75\mu\text{m}$ の範囲の細粒分が上方に移動し表層に抜け出すという現象が起こることが確認された。なお、熊谷らは砂泥質の底質上の造波水路による移動床実験を実施し、波によるせん断力によっても砂泥内に液状化が発生し、分級が起こっていることを報告している(熊谷ら, 2006)。細粒分の流出に関しては、今後水圧変動だけでなく波によるせん断力の効果も考慮する必要があると考えられる。

5. まとめ

人工干潟の覆砂中の細粒分が干潟造成後の時間経過とともに流出する原因として波による地盤の液状化を想定し、実験的に検討を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 一次元水圧変動下で抜け出した細粒分は、主に $10\mu\text{m}$ 以上、平均 $30\mu\text{m}$ の粗い細粒分である。
- (2) 地盤の飽和度を高めて実験を行った結果、一次元水圧変動による液状化が発生せず細粒分の抜け出しは見られなかった。
- (3) 模型地盤に振動台を用いて液状化を発生させたところ、細粒分の抜け出しが起こり、移動した細粒分の粒度特性は一次元水圧変動下で抜け出した細粒分によく類似していた。以上のことから、細粒分の上部への抜け出しは地盤の液状化が原因であることを確認した。

なお、本研究は(財)港湾空港建設技術サービスセンターより助成を得て実施した。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 春日井康夫・久本忠則・中山康二・松本英雄(2003): 広島県尾道糸崎港における干潟再生事業, 海洋開発論文集, Vol. 19, pp. 107-112.
- 熊谷隆宏・池野勝哉・土田 孝(2006): 波浪作用下における砂泥質土の粗粒化および液状化特性について, 海工論文集, 第53巻, pp. 426-430.
- 国土交通省港湾局(2003): 海の自然再生ハンドブック—その計画・技術・実践—第2巻干潟編, pp. 1-110.
- 善功企・山崎浩之・渡辺 篤(1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 液研報告, 第26巻, 第4号, pp. 125-180.
- 篠崎 孝・羽原浩史・山本裕規・明瀬一行・竹口はや人・吉武理恵・土田孝(2006): 造成干潟における機能発揮要因に関する研究, 海工論文集, 第53巻, pp. 1026-1030.
- 土田 孝・吉牟田卓・浅海綾一(2006): 一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究, 海工論文集, 第53巻, pp. 491-495.
- 広島県(2001): 広島港五市地区人工干潟環境モニタリング記録
- 李正奎・鄭正朝・西嶋 渉・岡田光正・馬場栄一(1999): 干潟の土壤構造に及ぼす海水の流動の影響, 水環境学会誌, 第22巻, 第8号, pp. 677-682.