

太田川デルタ地下水の流動と海底濁度層の形成

日比野忠史¹・松本英雄²・水野雅光³

広島湾奥の海底に形成される高濁度層の形成機構について明らかにすることを目的としている。底泥の含水比鉛直プロフィールと海底濁度およびデルタ地下水位の関係等から広島デルタ地下水の流動による広島湾奥海底濁度層の形成機構について検討した。この結果、デルタ地下水位変動および、河岸へ流出する地下水の特性、太田川河口沖および、呉湾南奥での堆積泥層の形成機構について明らかにされた。

1. はじめに

太田川デルタは太田川による河口への砂礫の堆積の後、約 4 千年前からの海面の低下により河口に堆積した礫層が現れたことにより形成された。太田川デルタでは、河口から約 10 km 地点で放水路と市内派川に分岐している。広島湾における潮差は約 4 m あり、この潮差と河川の緩やかな地形勾配によって太田川放水路河道内には干潟地形が形成されている。

この様な流動場において、湾奥部の海底表層付近には、含水比が高く非常に緩い堆積状態の有機泥層が形成されている。近年では、浅場や土砂供給量の減少および生活雑排水の流入が多く、有機泥は過剰の状態でも河口域にヘドロとして堆積している場合が多い。海底付近に浮遊する有機泥は、海底での貧酸素化の主な原因であると同時に栄養塩のキャリアーとなっている。本研究の目的は、広島湾奥の海底に浮遊する濁度層の形成機構について明らかにすることである。これまでに、間隙水の流出入により濁度層が形成されることが示されているが(日比野ら, 2005), 本論文では太田川デルタでの地下水位の変動特性を明らかにし、海底濁度と地下水流動との関連から海底濁度層の形成機構について考察した。

2. 太田川デルタでの地下水位変動機構の把握

(1) 調査の概要

広島湾奥海域、太田川放水路感潮域および太田川デルタにおいて、水温・水位(または塩分)が測定された(図-1)。水位(水深)は太田川河口、湾奥開口部(美能)、湾奥域(太田川河口沖、呉湾)、放水路 5.4 km 地点(河床上、低水路地下)、河口(草津; 太田川河川事務所)、海水が遡上しない放水路分派前約 5 km(矢口第一; 太田川河川事務所)の 7 地点、および太田川デルタ地下(大芝; 太田川河川事務所)で測定されている。

センサーは河口(草津)での平均水位(TP+0 m)を基準として放水路の 5.4 km 地点では、低水路床(TP+0.2 m(常時水没)と TP+1.2 m) および低水路に形成された干潟地盤下(GL-50 cm(TP+0.7 m))に設置された。塩分計は平均潮位面下の位置(TP+1.2 m, 干潮時露出)に固定されて計測されており、満潮時には海域側の塩分、干潮に向かって河川水の塩分を測っていることになる。太田川河川事務所の観測では 1 時間、その他は 10 分間隔で測定されている。なお、放水路 5.4 km 地点のセンサー設置後に TY0416(8/30-31)と TY0418(9/7)に伴う洪水により観測対象区間の干潟地盤高は約 20 cm の上昇があった(この結果、GL-50 cm は地盤下 70 cm に位置された)。

(2) 海面水位と河川水位変動に対する地下水位の応答

図-2 に太田川デルタ(大芝)における地下水位(GWL)から潮汐変動を除いた成分(GWLT)および河口における水位(SWL)から潮汐変動を除いた成分(SWLT)と矢口第一での河川水位(RWL)の 1/3 をたし合わせた水位(SWLT+RWL/3)の比較が示されて

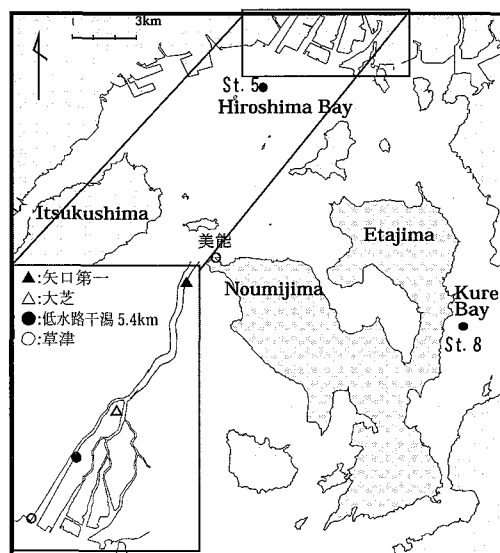


図-1 広島湾、太田川感潮域の地形とセンサー設置位置

1 正会員 博(工) 広島大学助教授大学院工学研究科
2 正会員 工(修) 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所
3 正会員 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所

いる。

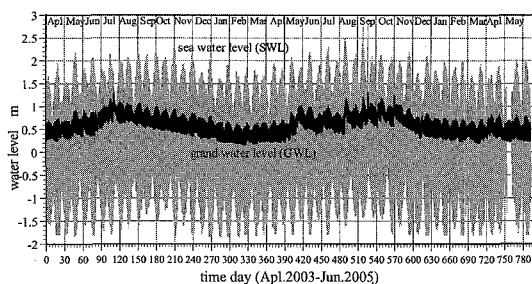
太田川デルタでの地下水位は海水位の季節変動に分流前の上流河川水位を加えた水位と対応しており(図-2(b)), 地下水位が河川と海の両方の水位に依存していることがわかる。すなわち、デルタ地下水位は、海水位変動の年較差約 50 cm と同様の年較差で減衰なく変動し、この年変動に河川の増水による上昇分が重なって変動していることがわかる。日周潮以下の周期変動を除いた海水位の上昇がそのまま地下水位に現われるのに対し、河川水位の地下への伝達量が 1/3 程度であることから、浸透場(透水係数、浸透距離等)が異なっていることが考えられる。また、地下水位は TP+1.2 m (現地盤 -3.6 m) を越えて上昇していないが(図-2(b)), これは GL-3.6 m 上には砂質シルトが 70 cm (-2.9 m まで) 程度堆積しており、地下水の上昇が制限されているためと推定される。

図-3には、(a) 潮汐の干満水位に対するデルタ地下での干満水位の応答、(b) 河川水位に対するデルタ地下水位の干満水位(月平均)が示されている。図-3(a)から地下水位の潮汐成分は潮位の変化に測定間隔の1時間以内で応答していること、地下水位は河口での潮汐変動の約 1/10 で変動していることがわかる。図-3(a)では、河口での潮位に対する応答は干潮位が低い(-1 m 程度以下)時に小さく現れている。満潮位と干潮位が -1 m 以下の場合には約 1/8 (図での傾きは 0.13)、干潮位が -1 m 以上では 1/10 の地下水位の応答になっており、その相関は満潮位で 0.75、干潮位では潮位 -1 m 以上で 0.50、-1 m 以下で 0.31 となっている。このことは図-2で示した河川水の地下への流入によって地下水位が上昇し、潮汐の変動が地下に伝達され難くなることと同様に考えることができる。すなわち、大潮期には満潮時の地下水流入よりも干潮時の地下水流出が小さいため大潮期に地下水位の日平均値は上昇する。この結果、図-2に示すように大潮期に地下水位の上昇が観測されており、満潮期と干潮期の水位応答の違いによって大潮期の地下水位の上昇が起こると推定できる。干潮時の低水位が伝達され難いのは、デルタ地下水位の低下に伴って上流側からの地下水流入によってデルタ地下水位が上昇するためと考えられる。

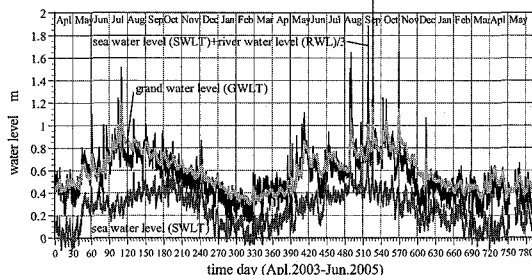
また、矢口第一での河川水位に対する地下水位の潮汐応答(図-3(b))が、河川水位が上昇する時期に小さくなっている。このことから表層水の河川流出が速いこと、高い地下水位が潮汐の伝播を制限することがわかる。

(3) 放水路内での地下水温の季節変動特性

図-4には(a)放水路 5.4 km 地点における低水路床(1時間毎の実測値と 25 時間の移動平均値)、低水路地下(GL-50 cm)での水温、(b)矢口第一(分派前)での河

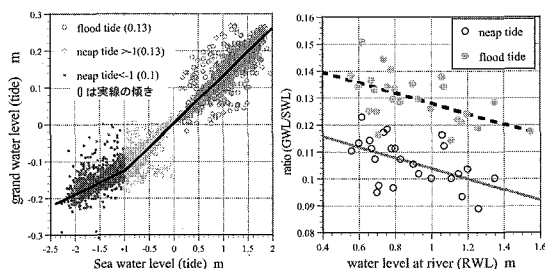


(a) 地下水位 (GWL) と河川水位 (SWL) の経時変化



(b) 潮汐成分を取り除いた地下水位 (GWL) と河川水位 (SWL) + 河川水位 (RWL) の経時変化

図-2 太田川デルタ(大芝)における地下水位から潮汐変動を除いた成分および河口(草津)における水位から潮汐変動を除いた成分と矢口第一(海水遡上なし)での河川水位をたし合わせた水位の比較(2003.4 ~ 2005.6 観測値)



(a) 潮汐成分に対する地下水位 (b) 河川水位に対する地下水位

図-3 草津の水位変動に対する大芝地下水位の潮汐成分の応答

川水位、(c) 低水路地下 (GL-50 cm, 破線はセンサー設置深) に設置したセンサー上の水深が示されている。

図-4から、①低水路地下(干潟地盤内)水温と河床水温との差は季節的な変動をしており、地下水温は河床水温に比較して5~9月頃には低く、2~4月頃には高くなっていること、②デルタ地下水温(淡水)は18℃±0.5℃程度に保たれており、低水路水温は河床水温と比較してデルタ地下水温に近い値をとっていること、③秋~春期(10月~3月頃)には、上流河川水温が海水温より低くなるために、河床水温は干潮期に低くなっていること、④河床、低水路地下とも水温は河川流出と朔望

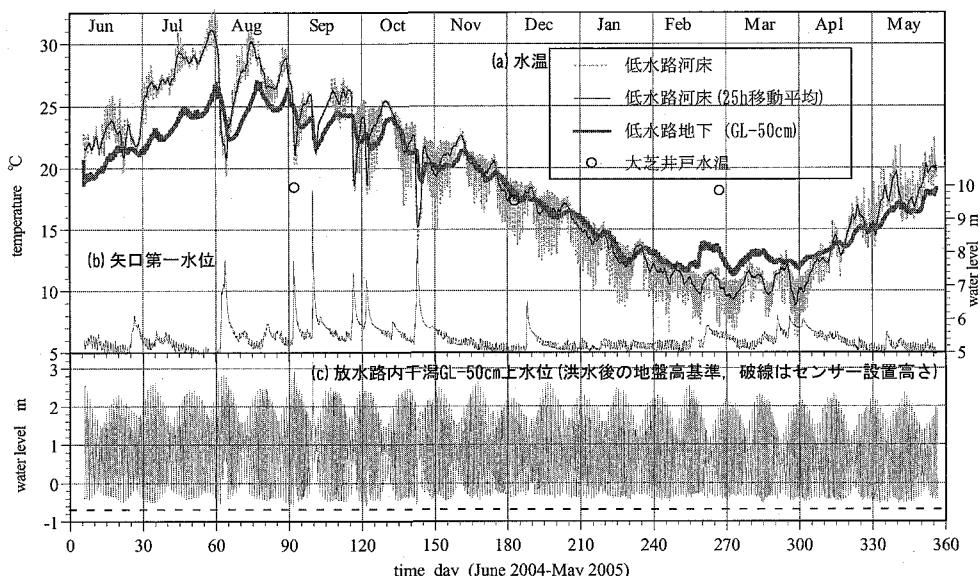


図-4 放水路 5.4km (河床, 地下), 海域 (美能) での水温および GL-50cm に設置したセンサー上, 広島デルタおよび分派前の上流河川水位の季節変動

周期の変化が卓越していること, ⑤低水路地下に設置したセンサー上には, 大潮最干時においても地下水が維持されていることがわかる。上記の①～⑤の現象から以下のことが推定できる。

a) 上流側で流出する河川 (地下) 水には, デルタ地下を経由して放水路に流出される成分があり, この成分により, 放水路地下の水位が維持されている (⑤)。また, 上流側河川水位の上昇に伴ってデルタ地下水の放水路への流出量は増大している (①)。

b) デルタ地下水位は干潮期に比較して満潮期に応答がよいことから, 大潮期にデルタ地下での水位上昇が起こる (図-3(a))。このために, 低水路地下水温は朔望周期の変化が卓越する (④)。

c) 季節的な干潟地下水温の変動 (③) は夏期に海域に比較してデルタ地下での水位が高くなることに加えて, デルタ地下水温の季節変動が小さい (②) ことによる。デルタ地下水と水温の年較差の大きい夏期と冬期に, 海水, 河川水との間に温度差 ($\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度) が生じる。

d) 夏～秋期の洪水時に低水温の河川水が低水路地下に浸透し, 地下水温を低下させる (④) が, 周辺地下からの地下水の流出により数日間程度で水温差が洪水前のレベルに戻る。

e) 最干時においても水位が維持される (⑤) のは, デルタ地下から流出による。上流河川水位の高くなる夏期には, デルタ地下水の流出によって低水路地下水が低温に保たれる。

f) デルタ地下からの地下水の流出は, 地下水位が高く

なる夏期の大潮期に卓越していると考えられる。これは下げ潮期に河岸水位が低下することにより, 地下水面勾配が河岸側に向かって形成されるためと考えられる。

3. 地下水位変動に対する広島湾海底面の応答

(1) 浮泥の堆積機構調査の概要

呉湾沖南奥 St.8 において 2003 年 8 月 19 日から 62 日間, 太田川河口沖 St.5 において 2005 年 6 月 6 日から 129 日間の連続観測が行われた。海水の泥内への流入や間隙水の流動状況を把握するため, 海底泥内での水温・圧力および海底面上での流速・濁度・水温・DO の測定が行われた。平均水深は St.8 で 22 m, St.5 では 15 m である。水温は, 海面下 5 m, 海底面上 1 m, 50 cm, 7 cm, 海底面 (0 cm) と底泥内の泥深 10 cm, 20 cm, 30 cm, 濁度は海底面と底面上 50 cm, 流速は海底面上 7 cm で測定された。

(2) 呉湾における高濁度層の形成機構

図-5 には 2003 年 8 月 19 日～10 月 18 日に観測された (a) 呉湾海底面上に作用する水頭 (海水重量: 海底での圧力と平均海面 -3 m での圧力差), (b) 太田川デルタでの地下水位変動 (日周潮以下と朔望周期以上の潮汐変動を除いた変動量) と呉湾での潮位, (c) 呉湾海底での濁度, および (d) 泥温分布から計算によって求められた海底面を通過する海水 (または, 間隙水) の流出入量の経時変化が示されている。図-5(d) に示した海底面通過量は, 海底～泥内で実測された水温から熱伝導分を除

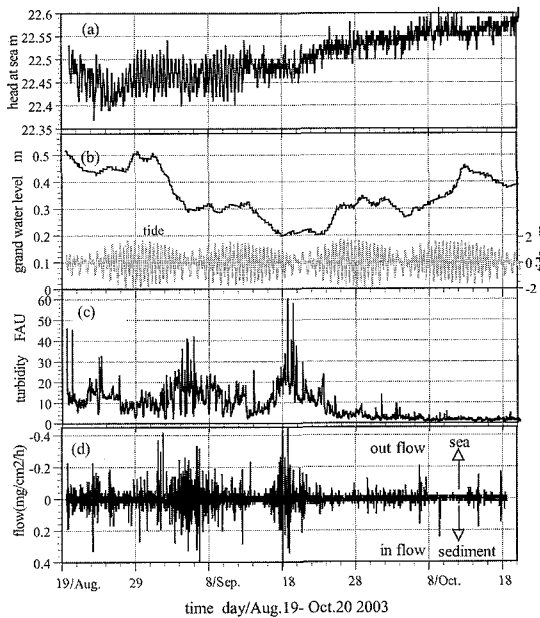


図-5 (a) 呉湾海底にかかる水圧(海水重さ), (b) 太田川デルタの水位変動(25時間移動平均値から朔望周期以上の低周波成分を除いた変動量)と呉湾での潮位, (c) 呉湾海底での濁度, および (d) 海底面を通過する海水量の経時変化

いた移流量から算出している(日比野ら, 2005)。

海底面上に存在する海水の重さは, 8月と10月では約15 cmの水頭差が生じている。夏期には, 水温上昇や躍層の形成により秋～冬期に比較して軽い水塊が海底泥の上に存在していることがわかる。一方, デルタ地下での海面水位に対する相対的な日平均水位(25時間移動平均された地下水位と海面水位の差)は, 成層期に減少, 成層崩壊後に増加し, この変動に大潮期の増分がたし合わされた変動をしている。成層消滅後(9/9, 海水密度の上昇開始時)にデルタ地下側で水位が高くなるのは, デルタ地下水位の流出が海側水頭の上昇によって抑制されるためと考えられる。濁度の上昇は海水位に相対的なデルタ地下水位の変動に対応しており, 濁度は海水重量が小さい成層期の地下水位の低下する大潮から小潮期に向かって大きくなっている。さらに, 図-5(d)に示した海水の流出量は濁度の上昇時に大きくなっていることがわかる。ちなみに, 濁度の上昇が観測される成層期には間隙水の堆積泥層への流入成分が卓越し, 底泥の含水比は上昇している(田多ら, 2004)。以上の結果から, 海底濁度の上昇は底泥内への海水の流入と底泥内の間隙水の流出と関連していることが予想される。

2003年の7～9月(成層期)には海水位に対して太田川デルタでの地下水位が低下(図-2)していることから, 地下水が海側へ流出していると考えられる。小潮に向か

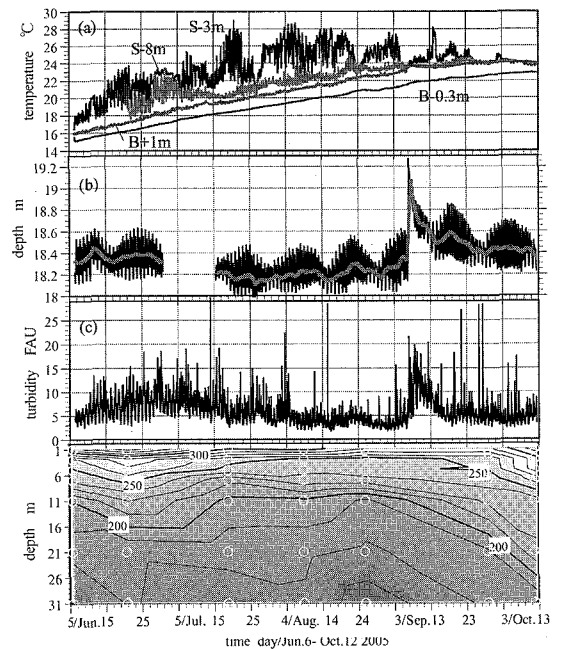


図-6 (a) 海水温・泥温, (b) 太田川デルタの地下水位変動, (c) 太田川河口沖海底での濁度, および (d) 底泥含水比の分布の経時変化

ってデルタ地下水位の低下速度が大きくなるためには, 地下水の流出量が増大することが必要である。ただし, 大潮期では満潮位と干潮位の応答の差によって地下水位の低下が鈍化している。また, デルタ地下水位の低下を起こす地下水流出は, 図-4に示した河川低水路地下での朔望周期での水温変動に現れている。河川では小潮期にデルタ地下水温に近い水温が観測されている(図-2)のは, 大潮期の河道地下への流出が河道からの流入水が卓越するのに対し, 小潮期には, デルタ地下水の流出が卓越するためと考えられる。

地下水面に形成される水面勾配は小潮期に小さいことから, 沿岸域海底へのデルタ地下水の流出は大潮期に比較し表層流出が低下することで小潮期に地下浸透が卓越することが推定される。この地下浸透に伴う間隙水の流出入によって底泥層は膨張し, 底泥からの有機泥の浮上が起こり易い場が作られたと考えられる。

躍層の消滅時期は, 並年, 上流側河川水位の低下時期と重なっており, 海水位と地下水位が均衡してくる(図-2(b))。このため, 成層消滅後には海水位が相対的に上昇し, 地下水の海底からの流出は制限される。さらに, 海水密度の上昇(図-5(a))が加わり, 海底にかかる圧力が大きくなり, 地下水の海底面への圧力伝播が陸側に向かうために(海水重量の上昇, 地下水位の上昇は10～20 cm, 図-5(a)と(b)), 海底堆積泥層の圧密が進

成層期の特性

- ① 海水の密度が小さい(軽い)
- ② 平均水位はデルタ地下側が高い

地下水位変動の特性

- ① 海水位と上流河川水位に依存
- ② 潮汐の約 1/10 の潮汐運動
- ③ 満潮位時に地下水位上昇
- ④ 朔望周期の運動(小潮期に水位低下)

上流表層(地下)
水のデルタ地下へ
の流出

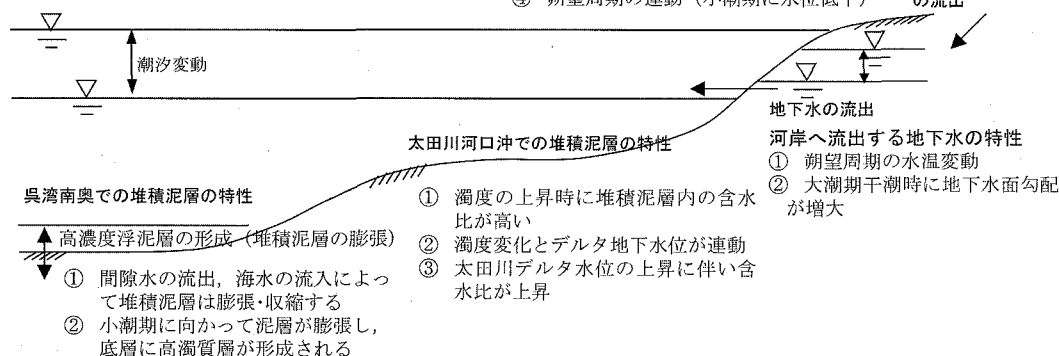


図-7 太田川デルタと海域間での地下水の挙動

行することが考えられる。

(3) 太田川河口沖海底濁度の上昇とデルタ地下水位

図-6には太田川河口沖(St.5, 平均水深 15 m)において 2005 年 6 月～10 月に計測された (a) 海水温(平均海面 -3 m, 8 m, 海底 +1 m)と泥温(海底 -0.3 m), (b) デルタ地下水位, (c) 海底濁度(海底 +10 cm), および (d) 底泥含水比分布の経時変化が示されている。図-6(d)の堆積泥の含水比分布は 7 回の柱状採泥結果から内挿して作成されており, ○は含水比の分析点を示している。

本観測期間では図-6(a)に示される様に高水温層は表層に限られており, 成層は弱い状態にあった。9 月 5 日には TY0514 によりデルタ地下水位, 海底濁度および海底泥含水比に顕著な変動が現われている。

海底濁度は, 堆積泥の含水比が高い時期に上昇しており, 濁度の上昇が海底泥内の含水比の上昇に依存していることがわかる。特に, TY0514 通過後の 9 月 29 日の採取泥では顕著な含水比の上昇があり, デルタ地下水位の上昇が継続する 10 月 12 日の採取泥においては -21 cm 深で 200 % を超える含水比の上昇が観測される。含水比の上昇はデルタ地下水位の高い時期に起っており, デルタ地下水位の上昇が太田川河口沖海底堆積泥の含水比を上昇させることがわかる。

4. おわりに

本論文では太田川デルタ地下での上流側河川水位と海水位に対する水位変動特性およびデルタ地下と海域間の水頭差の変動と海底高濁度層の形成との関係について検討した。以下に得られた結論をまとめる。

(1) 太田川デルタ海域での地下水の水位変動と流出

太田川デルタ～広島湾奥部での成層期の地下水の挙動および海底濁度の形成に関する特性を図-7 に示した。

(2) 成層期, 地下水位低下時の海底濁度層の形成

大潮期にはデルタ地下水の潮汐に対する応答は, 干潮位時に比較して満潮位時に良いために残留地下水位は大潮期に 10 cm 程度高くなる。このため, 大潮期に向かってデルタ側地下水の日平均水位が上昇する。デルタ地下水位が上昇し, 海側よりも水頭が大きくなると, 海底からの間隙水の流出が増大するはずである。しかし, 上げ潮時には海側での水頭が大きくなるために, 海底からの間隙水の流出は抑制される。下げ潮になると, 地下水面勾配が河岸側に向かって形成されるために, 圧力差は海底からの間隙水の流出よりも地下水は表層から流出に使われることになる。小潮期ではデルタ地下水の潮汐に対する応答は, 満潮位時, 干潮位時とも同程度であるため, 小潮期に向かって, 満潮に伴う残留地下水位の上昇量は小さくなっている。小潮期には河川, 海域での水位低下が小さいために, 地下水面に形成される勾配は大潮期に比較して小さくなり, 河岸への流出は制限される。これらの現象と成層期の高い上流側河川水位から, デルタ地下での水頭が高い状態が小潮期に向って形成されることで, 海底での間隙水圧の上昇が生起される。

参考文献

- 田多一史・日比野忠史・松本英雄・村上和男(2004): 間隙水の流動に伴う底質の性状変化, 海岸工学論文集, 第 51 巻(2), pp. 991-995.
- 日比野忠史・村上和男・松本英雄(2005): 底泥内での間隙水の動きと浮泥層の形成機構, 海岸工学論文集, 第 52 巻(2), pp. 961-965.