

底面における吸水に伴う波動境界層流れの変化

佐藤 道郎*・矢倉 貴文**

1. はじめに

近年, 海岸の景観保全が重視されるようになり, 景観を損ねることのない海岸侵食対策工法として Coastal Drain System がデンマークやアメリカなどで取り上げられている。これは, 砂浜に汀線より陸側に多孔管を埋設し, ポンプで吸水することにより砂を海底表面に吸着させて侵食に抵抗させようとするものであるが, どの程度の吸水量でどの程度の効果が期待できるかという点を明らかにしていく上で, その機能の全体の把握が重要であり, そのためにはいくつか解明していかなければならない問題がある。その一つとして本研究では, 吸水が底面の砂移動にどんな影響をもたらさうか, という問題を考える上での基礎研究として底面からの吸水に伴って波による底面の乱流境界層流れの特性がどのような変化をするのか数値解析によって調べてみた。また, 負の吸水すなわち湧水によってどのように変化するかという点についても検討した。これらの結果は海岸地下水の底面からの出入りが底質移動にどんな影響を与えるかという問題の理解にも有用と思われる。

2. 計算の概要

乱流境界層の数値計算にあたっては Choudhury & Sato (1995, 1997) による計算モデルを, 底面における吸水速度を考慮し, 修正して用いた。これは, Stokes 波の第二近似の底面速度を外縁流速 U として与え, 乱流の一方程式モデル (Launder and Spalding, 1972) に基づいて境界層方程式を数値的に解くものであるが, 計算にあたっては, 境界層内の乱れに関する平均軌道速度成分 ($\bar{u}, \bar{v}$) および乱れエネルギー $\bar{E}$ の解を各成分波に対応するものの重ね合わせとして表現し, それを境界層方程式 (1) と乱れエネルギーの式 (2), 連続方程式 (3) に代入して各成分に対する方程式系を求め, それらを差分化して数値的に解を求めるもので, 直接に定常流成分, 一次, 二次の各成分が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{E}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{E}}{\partial z} = K \left(\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - \varepsilon \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, U は
 $U = u_{\infty} \{ \cos(kx - \sigma t) + \gamma \cos 2(kx - \sigma t) \} \quad \dots\dots\dots (4)$

$$u_{\infty} = \frac{H\sigma}{2 \sinh kh} \quad \dots\dots (5) \quad \gamma = \frac{3Hk}{8 \sinh^3 kh} \quad \dots\dots (6)$$

また, 渦動粘性係数 K , 乱れエネルギーの逸散率 ε は次で与えられる。ただし, κ は Karman 定数 ($=0.4$), $C=0.08$, z は鉛直上向きにとった座標で静水面を原点にとっている。 h は水深を表す。

$$K = C^{1/4} \kappa (z+h) \bar{E}^{1/2} = \frac{C \bar{E}^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\varepsilon = \frac{C^{3/4} \bar{E}^{3/2}}{\kappa (z+h)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

吸水の影響は直接には鉛直流速成分 $\bar{w}$ が底面上でゼロでない吸水速度を有することとなり, また, 底面下は透水性媒質として考えることになるので, 底面下にも波による運動が誘起されることになって, 水平速度も固定床の場合のように slip 速度をゼロで与えるというわけにはいかず, ある大きさを有することになる。それらを通して底面境界層内の流れや乱れの特性が変ってくる。それがここでの計算の対象である。

実際の状況を想定した場合には底質の移動もあるのでそれを厳密に表現しようとするとかかなり複雑になることが考えられるが, 実験の観察では吸水を行うと碎波による乱れがあるところでも砂は底面に吸い付けられたようになり, 吸水がないときにみられる砂澱の形成もなくなる。そして, その部分からの砂の移動はかなり抑制される。そのような特性を考慮して, ここでは底質の移動は考えず, ポーラスストーン等のような多孔質の変形しない底面上で形成される境界層を想定して計算を行うこととした。

* 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
** 正会員 工修 日本工営株式会社

そこで、境界層外縁 $z = -h + \delta$ での境界条件は、

$$\bar{u} - \bar{u}_{\text{mean}} = U, \quad d\bar{u}_{\text{mean}}/dz = 0, \quad d\bar{E}/dz = 0 \quad \dots\dots\dots (9\text{-a}, b, c)$$

(9-b) の条件は Batchelor (1970) によるものである。

$\bar{u}_{\text{mean}}$ は境界層の平均流速 (streaming velocity) を表す。

下側の境界条件は粗面乱流のみを対象とし粗度高さを z_0 ($=k_b/30$, k_b : Nikradse の粗度係数) として $z = -h + z_0$ で

$$\bar{u} = \bar{u}_{\text{slip}}, \quad \bar{w}_{\text{mean}} = \bar{w}_s, \quad \bar{E} = K|\partial\bar{u}/\partial z|/\sqrt{C} \quad \dots\dots\dots (10\text{-a}, b, c)$$

として与えた。 $\bar{w}_s$ は底面の吸水速度で、底面全域で一様かつ定常的な流れであるとしている。

計算を進めるにあたり、この底面での境界条件で slip 速度をどのように与えればよいかという点について検討する必要がある。底面上の波動境界層の流れと底面下の浸透層内の流れを計算し接続するのが基本的な考え方であろうが、かなり厄介な計算となることが考えられた。ところで、この透水性の底面での波による運動は近年 Liu (1996) らによって層流境界層が対象であるが詳細な計算が行われており、底面で両層の流れが接続する解析的表現が得られている。底面上の境界層の流れが層流でも乱流でも slip 速度には透水層の特性によるところが大きいと考えられる。そうであれば Liu らの計算結果を境界条件として用いる事もできるであろうと考えた。

Liu らは摂動展開により境界層の流れの水平流速成分について彼等の表現で次式の解を得た。

$$u^+ = \nabla[(\phi_0 + \beta\phi_{11} + \varepsilon\phi_{10})e^{i(kx-t)}] + [u_0^{+r} + \beta u_{11}^{+r} + \varepsilon u_{10}^{+r}]e^{i(kx-t)} + \alpha u_{11}^{+r} + \dots\dots (11)$$

この式中、 $\alpha, \beta, \varepsilon$ は摂動パラメータで次式のように表される。

$$\alpha = \frac{\omega^2 a}{g}, \quad \beta = \frac{K\omega}{\nu}, \quad \varepsilon = \frac{\omega^2}{g} \left(\frac{\nu}{w} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ω は角周波数、 a は波の振幅、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度、 K は透水係数である。 K と ε は前述の (7), (8) 式のものとは異なる。全変数は無次元化されており、各項の具体的な表現は紙数の都合上略す。Liu らの理論で得られているさまざまな成分について実際にどの程度の大きさを有するものか計算を行い、境界条件としてどの成分までを考慮すべきか検討した。

上式で $z = -h$ の場合について各項の大きさを比較するために行った計算例を図-1 および図-2 に示した。図-1 は、 $\phi_0, \phi_{11}, \phi_{10}$ を含む各項の大きさの比較したもので、これらの結果を見ると、 β や ϕ の値が極めて小さく ϕ_0 と比べて、 ϕ_{11}, ϕ_{10} を含む項は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ のオーダーである。また、同様に図-2 から u_0^{+r} と比較して、 u_{11}^{+r}, u_{10}^{+r} はその $10^{-4} \sim 10^{-3}$ のオーダーである。したがって、 $\phi_{11},$

ϕ_{10} および u_{11}^{+r}, u_{10}^{+r} を含む項は ϕ_0, u_0^{+r} に比べて省略することができると考えられた。そこで、底面上では ϕ_0, u_0^{+r} だけを考慮しそれらを用いて整理すると次式のような表現が得られる。

$$u_0^{+r} = \bar{u}^+ \cos(kx - t) + \bar{u}^+ \cdot \theta^{-1} \cos(kx - t - \pi/4) \quad \dots\dots\dots (13)$$

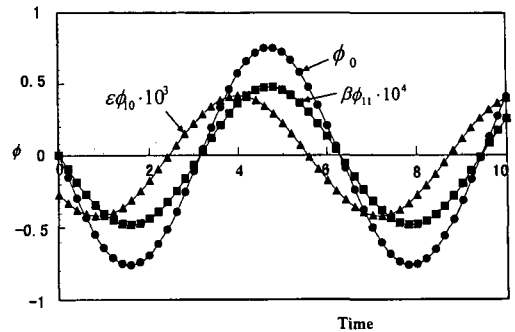


図-1 無次元流速 (11) 式各項の比較 (ϕ)

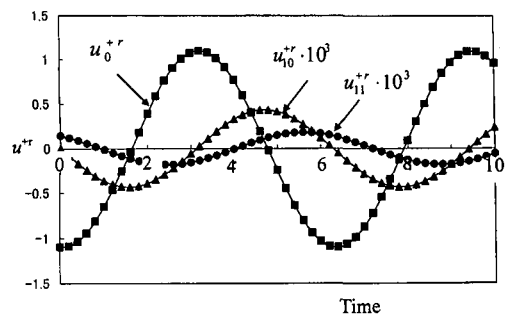


図-2 無次元流速 (11) 式各項の比較 (u^+r)

表-1 計算条件 (1)

	水深	周期	波高
SERIES 1	10.0 m	6.0 s	3.00 m
SERIES 2	0.3 m	2.0 s	0.12 m

表-2 計算条件 (2)

	RUN No.	底面	吸水速度
SERIES 2	RUN 1-1	不透水圧	
	RUN 1-2	透水床	なし
	RUN 1-3		-0.01 m/s
	RUN 1-4		-0.02 m/s
	RUN 1-5		+0.02 m/s
	RUN 1-6		+0.05 m/s
SERIES 2	RUN 2-1	不透水圧	
	RUN 2-2	透水床	なし
	RUN 2-3		-0.001 m/s
	RUN 2-4		-0.005 m/s
	RUN 2-5		+0.005 m/s

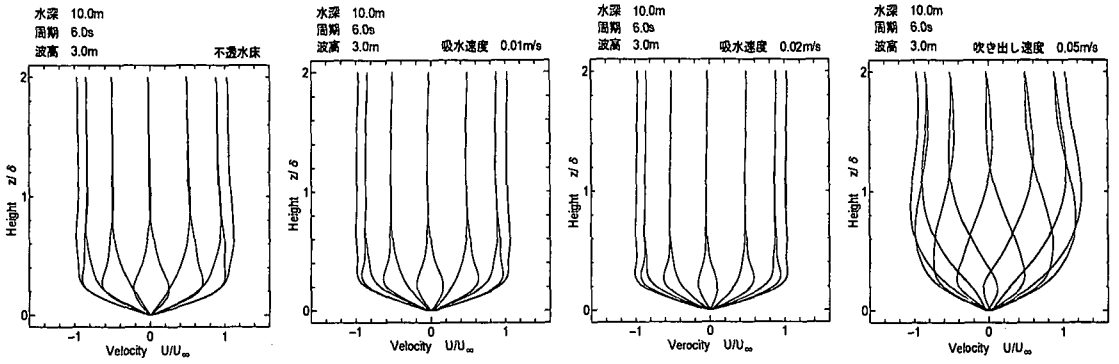


図-3-1 水平流速成分の鉛直分布の変化 (1)RUN 1-1 (2)RUN 1-3 (3)RUN 1-4 (4)RUN 1-6

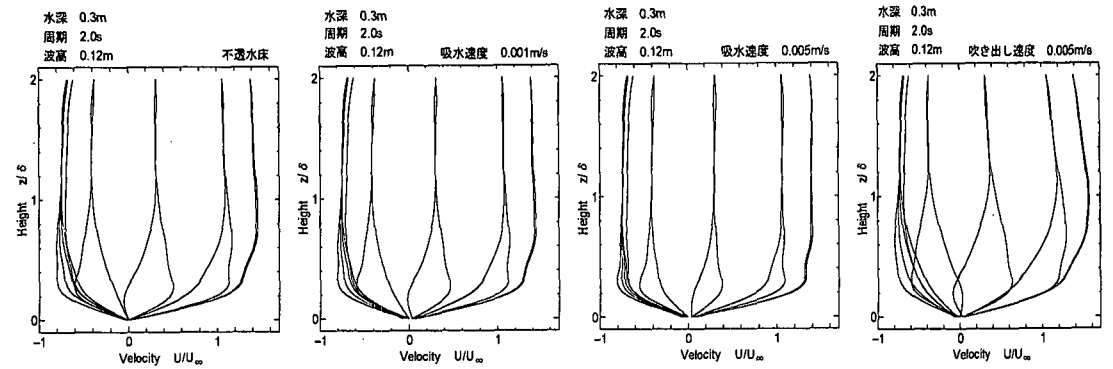


図-3-2 水平流速成分の鉛直分布の変化 (1)RUN 2-1 (2)RUN 2-3 (3)RUN 2-4 (4)RUN 2-5

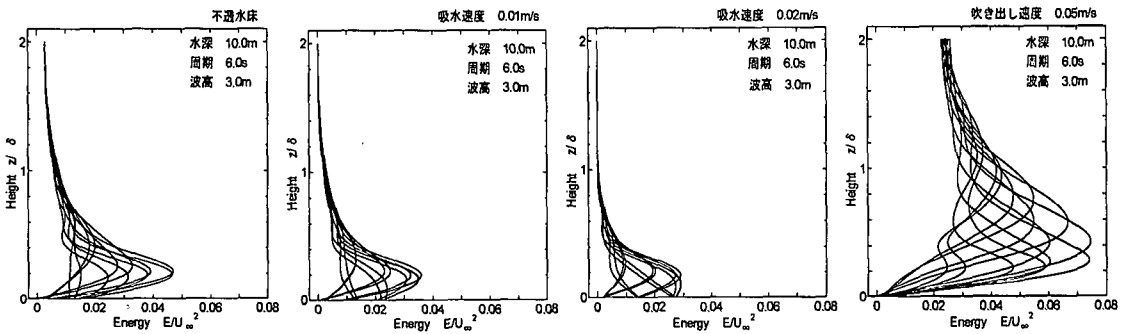


図-4-1 乱れエネルギー鉛直分布の変化 (1)RUN 1-1 (2)RUN 1-3 (3)RUN 1-4 (4)RUN 1-6

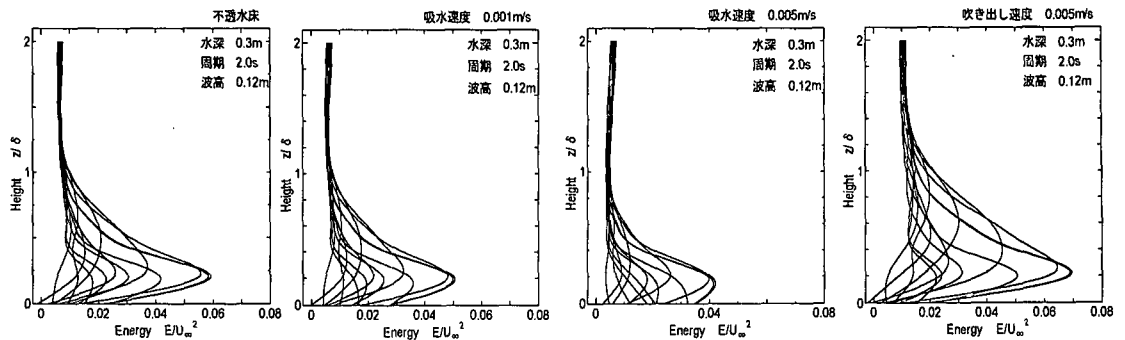


図-4-2 乱れエネルギー鉛直分布の変化 (1)RUN 2-1 (2)RUN 2-3 (3)RUN 2-4 (4)RUN 2-5

$$\bar{u}^+ = \frac{2}{(\sqrt{2}\theta^{-1} + 1)^2 + 1} \cdot \frac{k}{\cosh kh} \dots\dots\dots(14)$$

そこで上式により境界条件の slip 速度を与えることとした。式中の θ は透水係数、粒径、周波数、動粘性係数の関数で、透水層の特性に関するパラメータである。

$$\theta = \left(\frac{\gamma}{K}\right)^{1/2} \left(\frac{K\omega}{\nu}\right)^{1/2} \dots\dots\dots(15)$$

式中の γ はガラスビーズの径 D と次式で関連付けられる。

$$\gamma = \frac{D^2}{80} \dots\dots\dots(16)$$

この値が底面での slip 速度に影響を与え、 θ の値が大きくなれば slip 速度は大きくなる。

3. 計算結果と考察

計算は表-1 のように現地スケールの条件と実験スケールの条件の下での 2 シリーズについて行っている。それぞれのシリーズで (1) 不透過床の場合、(2) 透水床ではあるが吸水の無い場合、(3) 透過床で吸水を行った場合、また、(4) 水を湧き出しがある場合、について表-2 に示すようなケースについて行った。

まず、乱れエネルギー、水平速度、鉛直速度の 3 つの成分がどのように変化するか比較検討した。だが、鉛直流速成分に関してはもともと境界層であるため小さく吸水による顕著な影響は見られなかったためここでは略した。以下に示す図では 30° 毎の各位相での値を表している。

(1) 水平速度成分

図-3-1、図-3-2 に水平流速分布の計算結果を示した。図-3-1 の現地スケールの条件下では slip 速度が境界層流速に比べてあまりにも小さすぎるためはっきりしないが、実験室規模の条件下の図-3-2 では透水床の場合に微小であるが slip 速度の存在を確認することができる。

シリーズ 1 の現地スケールの計算結果は、波形勾配が小さく非線形性が弱くてほぼ対称的な速度分布を示している場合のものである。それに対してシリーズ 2 の実験スケールでの計算はシリーズ 1 に比べ、非線形性も強く、非対称的な速度分布を持っている場合のものである。

どちらの場合も吸水を行うと、不透過床の場合と比べて境界層下部の位相差が小さくなる。また、逆に水を吹き出してみても、全体的に位相差を持つ部分が上方まで広がり境界層厚さの増大を示す。さらに速度勾配は緩やかとなり、流速分布形状がふつくと丸みを帯びてくる。

(2) 乱れエネルギー

図-4-1、図-4-2 は乱れエネルギーの鉛直分布を示したものである。不透水床の場合である RUN 1-1、

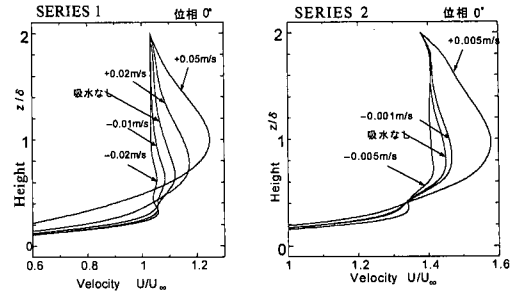


図-5 各ケースの位相 0 度の時の水平流速分布

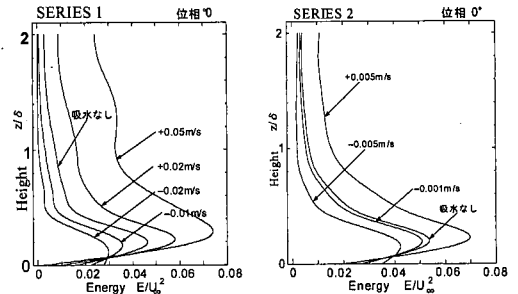


図-6 各ケースの位相 0 度の時の乱れエネルギー分布

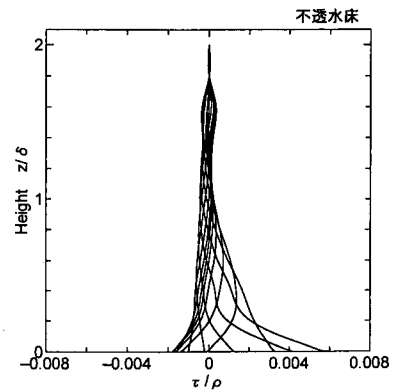


図-7-1 せん断応力分布 (RUN 2-1 不透水床)

RUN 2-1 と吸水したときの RUN 1-3、RUN 1-4 および RUN 2-3、RUN 2-4 の結果を見ると吸水量が増すにつれて乱れエネルギーは全体的に弱くなり、上方へのエネルギー拡散も弱くなっていることがわかる。

次に、RUN 1-6 や RUN 2-6 のように水が湧き出している場合について見ると、乱れのエネルギーはかなり増幅され、エネルギー拡散も上部まで及びかなり顕著な変化をみせている。

以上の結果から、境界層の流れについて大略次のことが言えそうである。まず、水平速度成分は吸水により弱められ、逆に、湧出によって強められる。乱れエネルギー

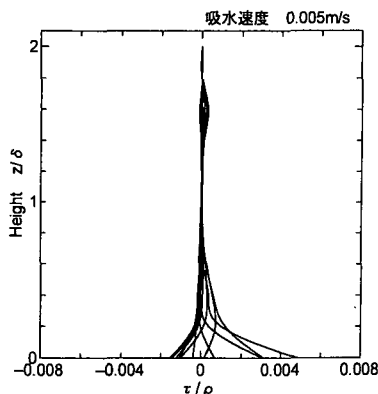


図-7-2 セン断応力分布 (RUN 2-4 吸水)

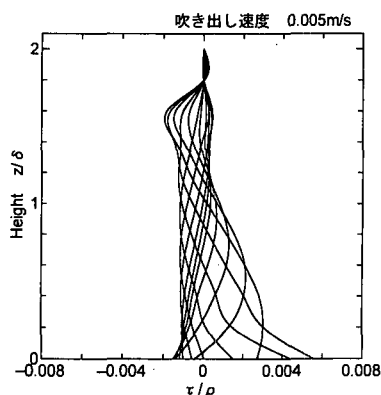


図-7-3 セン断応力分布 (RUN 2-5 吹き出し)

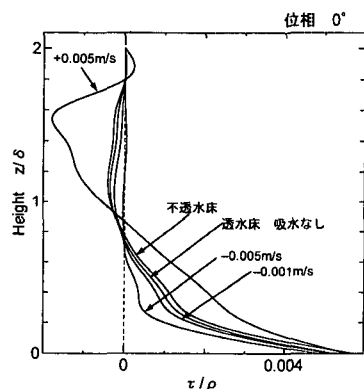


図-8 セン断応力分布の比較

も吸水によりエネルギーが弱められ、その拡散は抑制させる。逆に、湧出はエネルギーを増幅させエネルギー拡散を境界層上部にまで及ぼす。境界層の厚さは吸水により減少し、湧出によって増す。吸水および湧出速度の増加によってそれらの傾向は強くなる。

(3) セン断応力

図-7はシリーズ2の場合についてせん断応力を計算したものである。不透水床の場合に比べて5 mm/s程度の吸水速度であるRUN 2-4の結果を見ると底面でのせん断応力も少し小さくなっているが、底面から少し離れると急速にせん断応力が小さくなっている。図-8はそのあたりの状況を見易くするために位相角0度のときのせん断応力の分布を示したものである。

4. 結 語

底面からの水の出入りがある場合について波動境界層の流れの変化を計算によって検討した。Stokes波の第2近似の底面流速を外縁流速とし、乱流の1方程式モデルを用いた。底面での境界条件としてLiu (1996)らによる透水性の底面での波による運動の解析結果を検討して用いている。

計算は現地スケールと実験スケールの2通りの条件下で、吸水および湧き出しに伴う乱れエネルギー、水平速度成分を求め、それぞれがどのように変化するか比較した。吸水により、流速成分、境界層厚、乱れエネルギーの変化が生じ、特に、乱れエネルギーに変化が顕著に現れた。

計算から、以下の事柄が明らかになった。

(i) 水平速度成分は吸水により弱められ、逆に、湧出によって強められる。

(ii) 乱れエネルギーも吸水によりエネルギーが弱められ、その拡散は抑制させる。逆に、湧出はエネルギーを増幅させエネルギー拡散を境界層上部にまで及ぼす。

(iii) 境界層の厚さは吸水により減少し、湧出によって増す。

(iv) 吸水および湧出速度の増加によってそれらの傾向は強くなる。

(v) 吸水に伴いせん断応力も小さくなる。

今後、実験的にこれらの結果について検証していくことが必要であろう。また、こういった変化がCoastal drainによる漂砂量の変化にどう影響しうるかといった点についても検討していくことが今後の課題と考えている。

参 考 文 献

- Choudhury S. A., M. Sato and A. Ueno (1997): Numerical model of the turbulent wave boundary layer induced by finite amplitude water waves, Applied Ocean Research 19, pp. 201-209, Elsevier Science Ltd.
- Batchelor, G. K. (1970): An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, pp. 360.
- Philip L. -F. Liu, Matthew H. Davis and Sean Downing (1996): Wave-induced boundary layer flows above and in a permeable bed, J. Fluid Mech. Vol. 325, pp. 195-218.