

浮遊砂がデューン上の乱流に与える力学的影響

DYNAMIC EFFECTS OF SUSPENDED-SEDIMENTS TO TURBULENT FLOWS OVER DUNES

秩父宏太郎¹・渡部靖憲²・清水康行³

Kotaro Chichibu, Yasunori Watanabe and Yasuyuki Shimizu

¹学生会員 北海道大学北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 北海道大学准教授 環境フィールド工学専攻 (同上)

³正会員 工博 北海道大学教授 北方圏環境政策工学専攻 (同上)

This paper presents quantitative energy and momentum exchanges between fluid and suspended sands via fluid-sand interactions in open channel flows over sandy dunes through comparisons of the sand-laden flow over movable bed and the single phase flows over the fixed bed, on the basis of double camera PIV measurements with an optical selection technique that is capable of measuring simultaneous velocities for the both water and sand phases at the same locations.

It was found that additional turbulent energy is induced during sand settlement process, which is over five times higher than in the fixed bed case. This additional turbulence may disturb the bed surface and enhance re-suspension of the disturbed sands. This recursive energy and momentum exchanges between the sand and water flows via the suspension, diffusion, settlement and re-suspension processes have important roles to characterize the sand-laden flows over the movable sandy dunes.

Key Words : dune, optical selection technique, PIV, simultaneous measurement, turbulence

1. はじめに

河床近傍の境界層において発生した乱れは河床を攪乱し、接触力を失った砂はその抗力により容易に浮遊させられ、下流へと輸送される。流体はそのエネルギーを砂が駆動するために砂へと受け渡すと同時に浮遊砂近傍で新たな乱れが生成され、逆に砂相が流体運動へ影響を与える。この固液相互作用を経由した固液混相乱流中の乱れの発達あるいは減衰は、固体粒子サイズと乱れスケールとの比で決定される¹⁾。一方、デューン上で剥離を伴うような局所的にせん断力、圧力が急変する複雑な非等方乱流中における固液相互作用については未解明である。特に、デューンのクレスト背後で発生する剥離渦による砂の巻き上げや捕捉、砂の渦からの放出や移流された乱れの河床への再付着など極めて複雑な相間作用を経由して乱流構造並びにデューン形状が決定されるため、砂の浮遊量及び浮遊砂の輸送を一般化し定量的に予測するためには、これら乱流中の固液相互作用を適切に見積もる必要がある。一方、デューン上の流れとデューン形状は互いに極めて敏感に応答し、これらは時々刻々変化し、

完全に同一形状のデューン及び同一瞬時流速場が発生することは殆どありえない。このため、適切に固液相互作用を評価するためには、砂相及び液相の瞬時速度を同時に取得する必要がある。

浮遊砂を含む移動床上の流れは、砂粒子の存在により、広く使われてきたレーザー流速計による流速計測に限界があり、その流況の把握が困難であった。一方、固定床上の開水路流れ、乱流構造については多くの研究があり、固定床模型デューン上の剥離を伴う流速場についても詳細に調査され²⁾、砂を駆動する外力の推定が行われてきた。しかしながら、移動床デューンでは、界面の粗度による抵抗だけではなく、デューンを構成する砂層中の透水、さらに河床上でシートフロー状に移動する影響により、形成される乱流境界層が固定床のそれと大きく異なる。そのため固定床上の流れ場は本来解明すべき移動床デューン上の流れと本質的に異なる可能性がある。

近年、Particle Image Velocimetry (以降PIVと略記)を固定床上の開水路流れに適用し、詳細な流速分布が計測されている³⁾。PIVによる流速計測は、剥離を伴うような流れの局所構造が重要な流況を把握するために有利である。

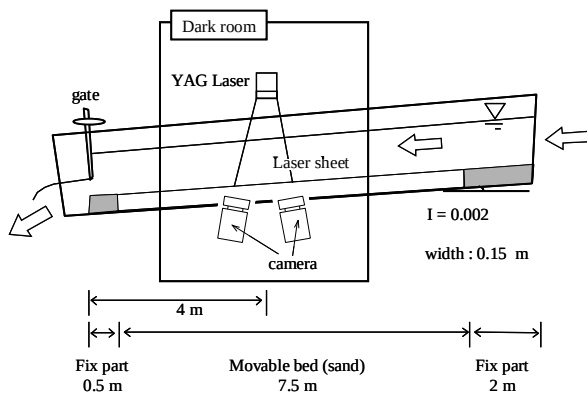


図-1 実験構成

本研究は、固液両相の瞬時速度分布を光学的粒子選択技術を利用したPIVにより同時計測を行い、浮遊砂がデューン上に形成される流れ場へ与える力学的影響を定量的に算定するものである。また、同一形状の移動床及び固定床デューン上の流れ及び乱流統計量を比較することで、乱れの発達過程及びその局所的差異について議論を行う。

2. 実験方法

(1) 実験装置

全長10m、幅0.15m、壁面高さ0.3m、勾配0.002をもつアクリル製水路で移動床及び固定床実験を行った（図-1参照）。

移動床実験において、水路上流端から2mの位置から7.5mの区間に深さ50mmのサンドピットを設置し、平均粒径0.34mmの東北6号硅砂（比重2.61）をサンドピット内に敷き詰めた。実験中、上流側の固定床との境界部分において河床高が一定に保たれるように給砂を行った。

移動床における速度計測の終了後、移動床実験において形成された河床形状を固定し、同一計測領域において固定床実験を行う。デューンの形状が変化しないように注意深く排水を行い、その後、セメントを河床面全体に塗布し固定した。

移動床、固定床実験共に、共通の流量（6.84 l/sec）を与え、実験を行った。この時、水深はそれぞれの実験で112mmと104mmであった。なお、計測対象としたデューンは波高17mm、波長240mmであった。

水の流れに対するトレーサーとして比重1.0となるよう調整した蛍光中立粒子(DIA ION, HP20, 粒径250~600 μm)を用いた。砂相、液相をそれぞれ撮影する2台の同期された高速度カメラ(解像度：1K×1K画素、フレームレート：250fps)が計測領域側方に設置され暗室内で撮影が行われた。FOV(Field of view)を含む流下方向に平行な鉛直縦断面に対してYAGレーザーシート(励起波長532nm)を水面上方より照射した(図-2参照)。なお、

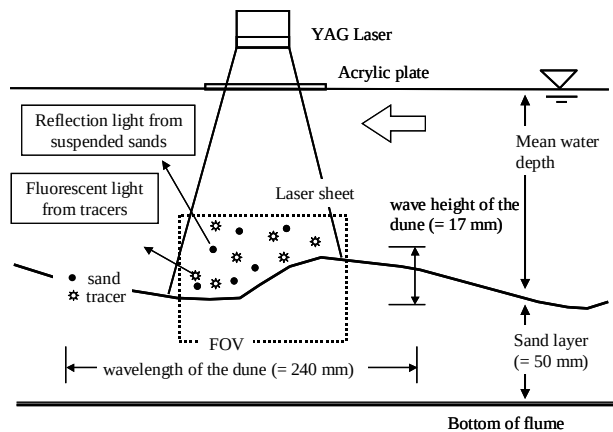


図-2 計測領域

レーザー照射面ではアクリル板で水面を覆い、水面の揺らぎによるレーザーシート面の変位を防いでいる。

(2) 画像計測と前処理

同期された2台のカメラの内、一方のカメラには550nm以上の光のみを透過させるハイパスフィルタを装着させることで、レーザー照射により励起した蛍光中立粒子から放出される励起光（波長ピーク630nm）のみを撮影できる。また、他方のカメラには532nmに透過ピーク波長をもつバンドパスフィルタを装着させることで、砂からのレーザー反射光のみ撮影することができる。この様に、砂及び中立粒子から放出される、異なった波長の光を光学的に選択して撮影し、それぞれの粒子の移動からPIVにより各相の瞬時速度を算定することができる。

2台のカメラで同一のFOVを撮影する場合、光行差により歪んだ画像が撮影される（図-3参照）。この歪みを補正し、対応する点を実座標に対応させるためキャリブレーションを行った。FOVを含む1cm間隔正方グリッドボードを両者のカメラであらかじめ撮影し、線形投射により画像座標上のグリッドを直交実座標へと座標変換を行った。この変換により2つのカメラで撮影された画像は同一の実座標上で評価可能となる。なおこの座標変換による最大誤差は5.4pix=0.25mmであった。

本研究では、広く使われている相互相関係数による標準的なPIVにより速度分布を算定した。これは連続した撮影フレーム間において複数の粒子群の輝度分布から相互相関係数を計算し、その最大値をとるものから粒子群の代表移動距離を推定するものである。ここでは、PIV法の詳細は省略する⁴⁾。

計算の前処理として誤ベクトルの原因となる河床面からの反射光を除去するため、計測時間全ての画像輝度の平均より背景を求め、各画像より差し引いた。

本研究では、相関係数0.7以上の結果のみ採用し、これ以下の相関係数をもつ信頼性の低い検査領域では逆数補間法により周囲の流速から補完した。また、デジタル画像上で輝度値パターンを表すと画素単位の移動量しか得られないが、より詳細な移動量を検出するために周

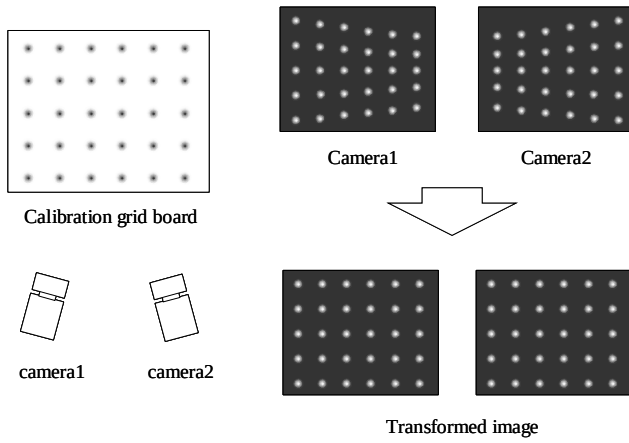


図-3 座標変換図

画素の相関係数を重み関数としてサブピクセル精度で流速を算出した。

検査領域は10mm(=110pixel)四方に設定し、2.5mm(=75pixel)毎にオーバーラップさせて計算を行った。探查領域はそれより前後75(pixel)広い領域、つまり260×260(pixel)と設定した。PIVでは、一様な密度で検査領域内に十分な数の粒子が存在していることが精度良く流速を評価するための条件となるため、検査領域内の粒子数が低い場合は周辺8点の中で粒子数が十分な領域から算出した速度から逆数補間により速度を決定した。

本研究で用いたPIVプログラムの精度を確認するために可視化情報学会⁹⁾より提供されている人工画像を用いた。これによって流速の相関は0.97、代表速度に対する相対標準偏差は4.97%という結果が得られ、流速を評価する上で十分な精度を有することが確認された。仮に流量が増えて流速が増加しても流速に対して十分高いフレームレートで計測することによって同等の精度が得られる。

(3) 乱流統計量

局所定常性を仮定した計測期間10秒間(1250frames)の流体速度から得られる統計量をもとに、浮遊砂の存在する移動床流れと存在しない固定床流れの結果を比較することにより固液相間のエネルギー授受について議論を行う。なお、この計測期間は、河床波の伝達周期(約20分)と比べ十分に短くかつ剥離渦近傍の速度変動の代表時間スケール(10msecオーダー)と比べて十分に長く、局所定常性を仮定し統計評価を行う上で適当である。粒子数密度の変動の影響を排するため統計評価において、計測期間内に統計的に意味をもつ有効サンプル数に満たないグリッドにおいては周囲8点から内挿補間を行った。

移動床実験における液相及び砂相の時間平均速度 $\overline{u_f}$ 及び $\overline{u_s}$ をベースとし、時間平均からの逸脱を変動速度とすると、液相の乱れエネルギーおよびレイノルズ応力

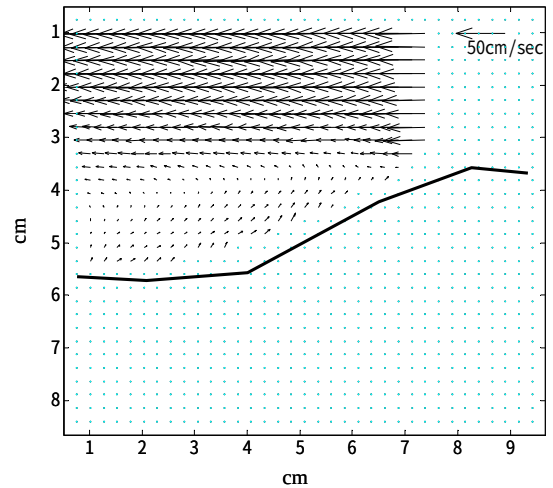


図-4 固定床における水の時間平均速度

を以下のように定義できる。

$$k_f = \frac{1}{2}(\overline{u_f'^2} + \overline{v_f'^2}) \quad (1)$$

$$\overline{u_f' v_f'} \quad (2)$$

なお定義したレイノルズ応力(式2)の符号に注意する必要がある。

移動床実験における固液相同時計測により、相間にはたらく抗力のパラメータとなる相対速度が次式により与えられ、その分布を取得することができる。

$$\mathbf{u}_r = \overline{\mathbf{u}}_s - \overline{\mathbf{u}}_f \quad (3)$$

3. 結果と考察

(1) 固定床実験

図-4は、固定床デューン上の流れの時間平均速度分布である。クレスト前面で発達した境界層の典型的な剥離がクレスト背後に見られ、剥離に伴うせん断層がほぼクレストと同等な高さに形成され下流へ広がっている。またデューン背後の斜面上で弱い逆流域と回転性の流れを確認できる。

図-5は、デューン背後の乱れエネルギーの分布を表している。図-4で示したクレスト背後から剥離したせん断層に沿って強い乱れエネルギーが分布し、剥離点近傍で最も強く、流下方向に向かって徐々に拡散していることがわかる。また、クレスト部及びせん断層近傍でレイノルズ応力の符号の交代が見られ(図-6参照)、これらの領域で流下する水平運動量が乱れに強く影響を受けていることがわかる。

(2) 移動床実験

固定床では高い速度勾配を有した不透過なnon-slipの底面において境界層が顕著に発達するが、移動床では底

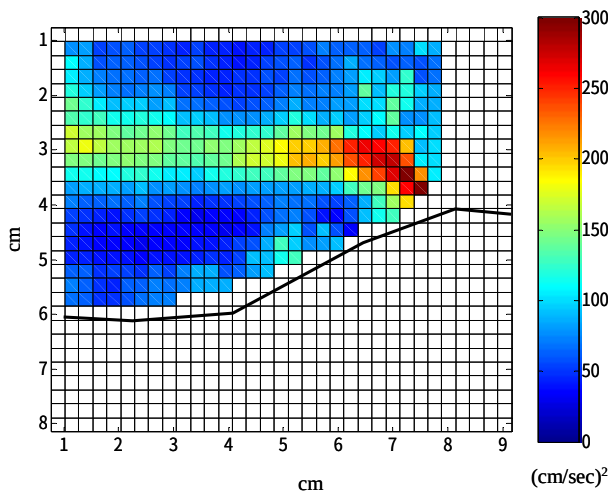


図-5 固定床における水の乱れエネルギー

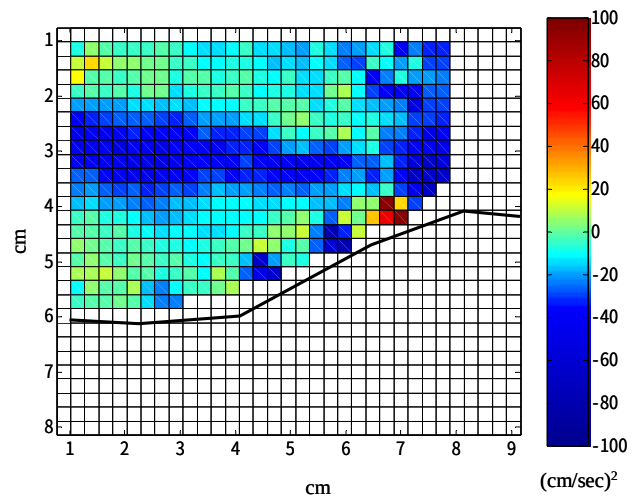


図-6 固定床における水のレイノルズ応力

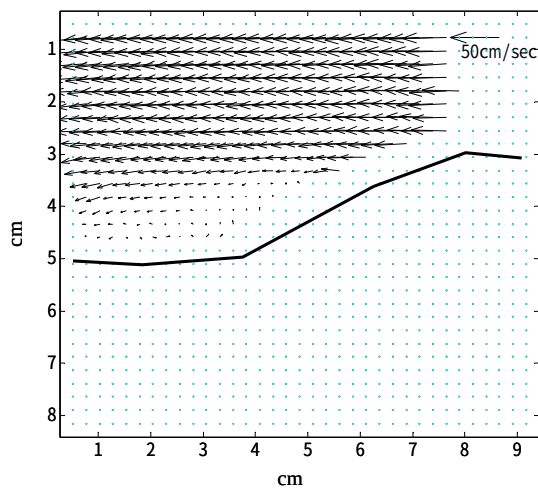


図-7 移動床における水の時間平均速度

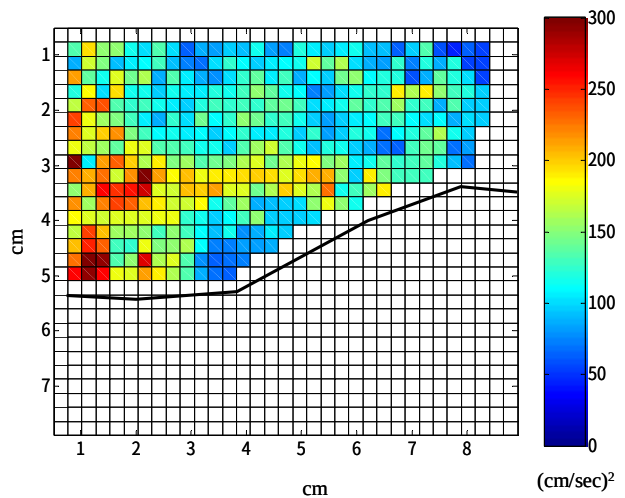


図-8 移動床における水の乱れエネルギー

面砂による流体の攪乱とシートフロー状となって移動する底面下の薄い砂層の存在によりその発達が妨げられる。このため、クレスト背後から発達するせん断層は固定床のそれより弱く、デューン背後の斜面上低い位置において剥離が発生するため、剥離域は相対的に狭くなる(図-7参照)。しかしながら、形成されたせん断層に沿う乱れエネルギーは固定床のそれよりも弱い分布となる一方、さらに下流側ではせん断性がさらに弱くなるにもかかわらずトラフ部上方の広い領域において有意な乱れエネルギーが広く分布していることがわかる(図-8参照)。これは、せん断層に沿ってのみ強い乱れが発生する固定床上の結果から説明されるような流体の強いせん断力に起因する通常の乱れの生成過程では説明のできない移動床特有の現象である。すなわち、この領域では、クレスト背後から浮遊し、放出された砂粒子がその輸送及び沈降過程において新たな乱れを顕著に誘発しているものと考えられる。

砂粒子に働く抗力は流速との相対速度(式3)の二乗に比例し、これにより砂粒子が駆動されると同時に流体の運動に影響を与える。図-9は、デューン背後の相対速度の

分布を表したものである。クレスト背後に顕著に発生する相対速度は、抗力を介して砂がこの領域で浮遊し下流へと駆動され、また流体は逆に水平方向に減速されることを表している。また、トラフ上の剥離域では、浮遊砂が沈降することで鉛直下向きに流体を加速させていることを表している。これらの結果は、浮遊砂の存在が流体の運動量輸送(図-7)及び乱流構造(図-8)に極めて大きな影響を与えていることを示している。

図-10は固定床と移動床の流体の速度差 $\bar{u}_{FM} - \bar{u}_{FF}$ を表している。クレストレベルより上方の水平流速は固定床上のものが移動床上のものを上回り、下方では移動床の流速が卓越する。この流速差を流体が砂を駆動するために与えた運動量の力学的寄与と考えると、流体はデューンのトラフ上広い領域において最大2割に及ぶ運動量を砂の輸送に受け渡していることになる。

図-11は、移動床上の乱れエネルギー k_{FM} の固定床上のそれ k_{FF} に対する比を表している。前述した移動床上の剥離域において、固定床上の乱れの5倍以上におよぶ強い乱れエネルギー分布し、浮遊砂の沈降過程を経由した砂

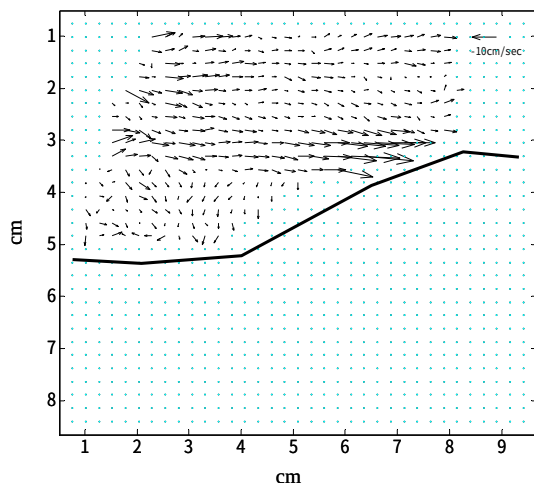


図-9 水と砂の相対速度($u_r = u_s - u_f$)

由来の新たな乱れが生成されていることを表している。
この浮遊砂が誘発する乱れは、底面近傍で新たに底面を
乱し、近傍の砂を巻き上げることによって新たな浮遊を
誘発させる再帰過程により広領域に渡り乱れが存在する。

砂粒子の浮遊、拡散、沈降、再浮遊を経由した一連の
輸送過程においてデューン上の固液混相乱流中で相間の
エネルギーおよび運動量の交換が行われ、これがデューン
上における乱流構造を特徴化する上で重要な役割を
担っている。

4. 結論

本研究において、固液両相の速度場の同時画像計測を
デューンを過ぎる開水路流れに適用し、移動床及び固定
床上の乱流特性の比較を行うことにより浮遊砂と流体の
相互作用を通じたエネルギーおよび運動量の交換につい
て議論を行った。

移動床では、デューンのクレスト背後に発達する剥離
せん断層は固定床のそれより弱く、結果としてせん断面
上の乱れは砂粒子の存在しない固定床より小さい。しか
しながら、浮遊砂が誘発する新たな乱れによりトラフ上
の剥離域に広範囲に渡って固定床上の5倍に及ぶ有意な
乱れを生成する。この乱れは底面を攪乱し新たな浮遊を
促進させる。

砂粒子が放出されるクレスト背後から発達するせん断
層では砂粒子に働く抗力は水の流れを抑制し、このせん
断層より下方では浮遊砂の沈降に伴い流体を鉛直下方へ
加速させる。

砂粒子の浮遊、拡散、沈降、再浮遊といった一連の砂
輸送を通して行われる浮遊砂と流体間のエネルギーおよ
び運動量交換はデューン上における混相乱流に極めて大
きな影響を与えることを明らかにした。

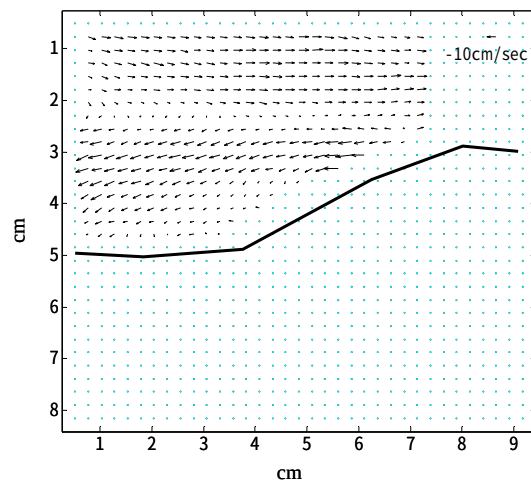


図-10 移動床と固定床間の水の速度の違い

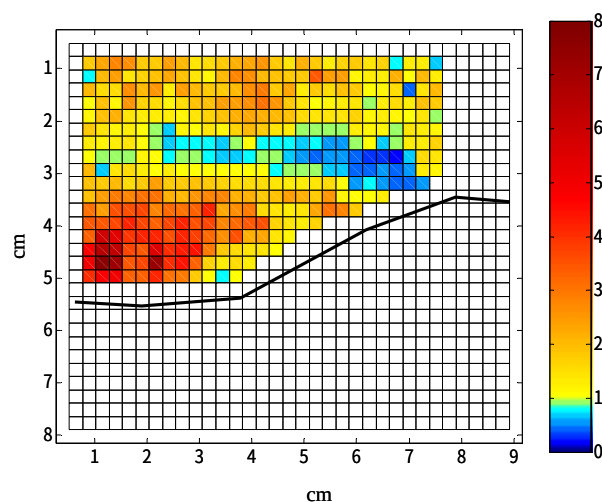


図-11 固定床と移動床の乱れエネルギーの比 (k_{fm} / k_{ff})

参考文献

- 1) Gore, R. A. & Crowe, C. T.: Effect of particle size on modulating turbulent intensity, Int. J. Multiphase Flow, Vol.15, pp.279-285, 1989.
- 2) McLean, S. R., Nelson, J. M. & Wolfe, S. R.: Turbulence structure over two dimensional bed forms, Implications for sediment transport, Journal of Geophysical Research, Vol.99 (C6), pp.12729-12747, 1994.
- 3) 禰津ら：河床波上の浮遊砂流れにおける粒子濃度が固相・液相の乱流構造に及ぼす影響，応用力学論文集，Vol.9, pp.951-958, 2006.
- 4) 秩父宏太郎ら：小規模河床波上の流体—浮遊砂速度の同時PIV計測，応用力学論文集，Vol.9, pp.659-666, 2006.
- 5) Visualization society of Japan. Standardization and popularization project. Standard images. <http://www.vsj.or.jp/piv/>.

(2007.9.30受付)

