

Bed material loadの流送過程 における問題点と新たな展開

2007.12.18

早稲田大学理工学術院
関根 正人

移動床問題へのアプローチ

■ 流砂の取り扱い：

- 掃流砂 → 平衡流砂量関数で評価
 - 浮遊砂 → 移流拡散方程式を解くことで評価
- 土砂の移動については運動方程式に基づき解析されるべき！

■ 河床変動の取り扱い：

- 体積保存則に基づく解析 / Exnerの式
- 河床変動は、基本的には個々の土砂粒子の離脱・堆積の過程を数値的に再現すれば解けるはずである！

移動床問題への新たなアプローチ

- 掃流砂・浮遊砂を問わず**土砂の質点系の運動方程式**に基づき解析する。
- 地形の変動もこうした運動の結果を直接反映させるように解くことで予測する。ただし、「**力学法則以外のモデル**」をできるだけ持ち込むことのないように心がける。

- 流砂の非平衡性に対するこれまでのアプローチとしては、**確率過程論的な考え方**に従い、いわゆる**畳み込み積分**の形で**流砂の非平衡性の影響を考慮しようとする手法**が提唱され、成果を上げてきている。ただし、平均Step lengthの評価法などに検討の余地が残されている。はたして流れ場の非平衡性をどの程度考慮できているのか疑問である。
- 近年、**個別要素法**に従う数値解析手法が開発され、これに依拠した解析が行われている。この手法では、固体粒子間をバネやダッシュポットなどで結ぶことで粒子間衝突を再現しているため、**土砂移動の本質に関わる部分に明らかなモデルを組み込むことになっている**。そこで、流砂やそれに伴う地形変動のメカニズムを議論する上では、この手法を導入することは必ずしも望ましいとは言えない。

土砂粒子の運動を支配する 質点系の運動方程式

$$\begin{aligned}
 \rho \sigma_s V \frac{d\vec{u}_p}{dt} = & \underbrace{\rho (\sigma_s - 1) V \vec{g}}_{\text{Gravity}} + \underbrace{\rho V \frac{d\vec{u}_f}{dt}}_{\text{Pressure}} \\
 & \underbrace{+ \frac{1}{2} \rho C_D A |\vec{u}_r| \vec{u}_r}_{\text{Drag}} + \underbrace{\rho V C_M \frac{d\vec{u}_r}{dt}}_{\text{Pressure}} \\
 & + \underbrace{\frac{1}{2} \rho C_L A [(u_r^2)_T - (u_r^2)_B] \vec{e}}_{\text{Lift}}
 \end{aligned}$$

ここに,

下付き文字の p, f および r は, 粒子, 流体ならびに両者の間の相対的な値をそれぞれ表す. また, 以下は各係数を表す.

C_D : 抗力係数 ($= 24 / R_e + 3 / R_e^{0.5} + 0.34$)

C_L : 揚力係数 ($= 0.2$)

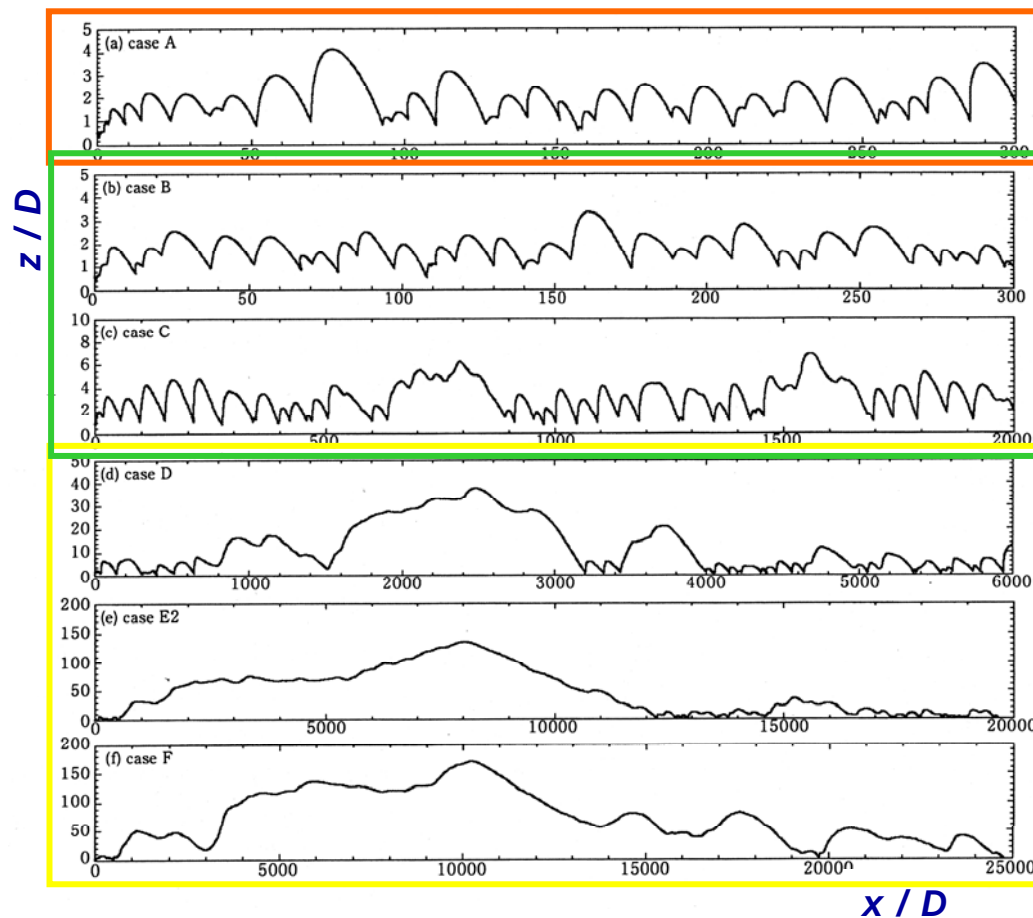
C_M : 付加質量係数 ($= 0.5$; for sphere)

Bed material loadの運動軌跡

典型的な掃流砂
Saltation

両者の中間に
位置する運動

典型的な浮遊砂



u^*/w_o

0.25

0.5

1.0

1.5

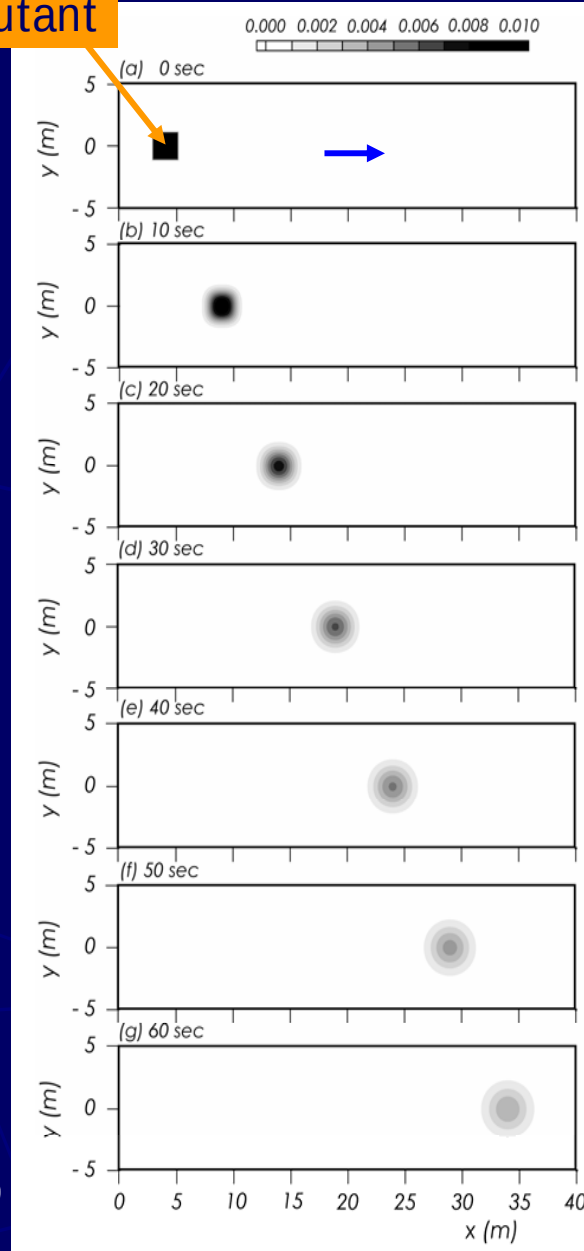
2.0

4.0

組織性のない一様乱流場での解析

移流拡散過程とは？

pollutant



Uniform flow : $U = 0.5 \text{ (m/s)}$

せん断乱流場において土砂粒子は組織
渦の影響をいかに受けて輸送されるか？



背景

- 浮遊砂の輸送に関するこれまでの研究は, H. Rouse (1936)の研究以来ずっと移流拡散方程式に基づいて解析されてきた.
- 厳密に言えば, 現時点でも克服すべきいくつかの基礎的な問題が残されている.
 - (i) 浮遊砂が輸送される速度は本当に水流の平均流速に等しいと言えるのか?
 - (ii) 拡散係数をどう評価すればよいのか?
 - (iii) 基準面濃度の持つ物理的意味とは?

目的と概要

- 本研究では、せん断乱流場における浮遊土砂の下降(沈降)過程を解析し、乱れが土砂の運動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。
- 組織的な渦の影響をも考慮に入れた解析を行うため、本研究ではLES (Large Eddy Simulation) 乱流モデルを適用する。また、土砂粒子の運動は質点系の運動方程式を解くことにより解析することにし、いわゆる移流拡散方程式には依拠しない。

流れ場の解析 - Turbulence model -

- 解析の簡略化のため, 河床を滑面であるとする.
- 以下の境界条件を用いる.
 - + 底面: Non-slip condition
 - + 側方境界・上下流端: Cyclic boundary conditions
- 計算領域 : 9 cm x 3 cm x 3 cm (96 x 64 x 96 nodes)
- 移流項の評価には, 森西(1996) による4次精度のスキームを用いる.

土砂粒子の運動解析

- 質点系の運動方程式を数値的に解いて、せん断乱流場における浮遊土砂の軌跡を追跡する。
- 本解析では、土砂粒子を球と近似し、その粒径 0.2 mm とする。なお、この粒子の静水中の最終沈降速度 w_0 は 2.64 cm/s である。
- 計算対象とする流れ場の摩擦速度 u^* は、 w_0 の 1.3, 1.7 ならびに 2.1 倍とする。
- 計算格子間隔は、いずれの方向とも上記の粒径よりも大きくとる。

土砂粒子の運動解析

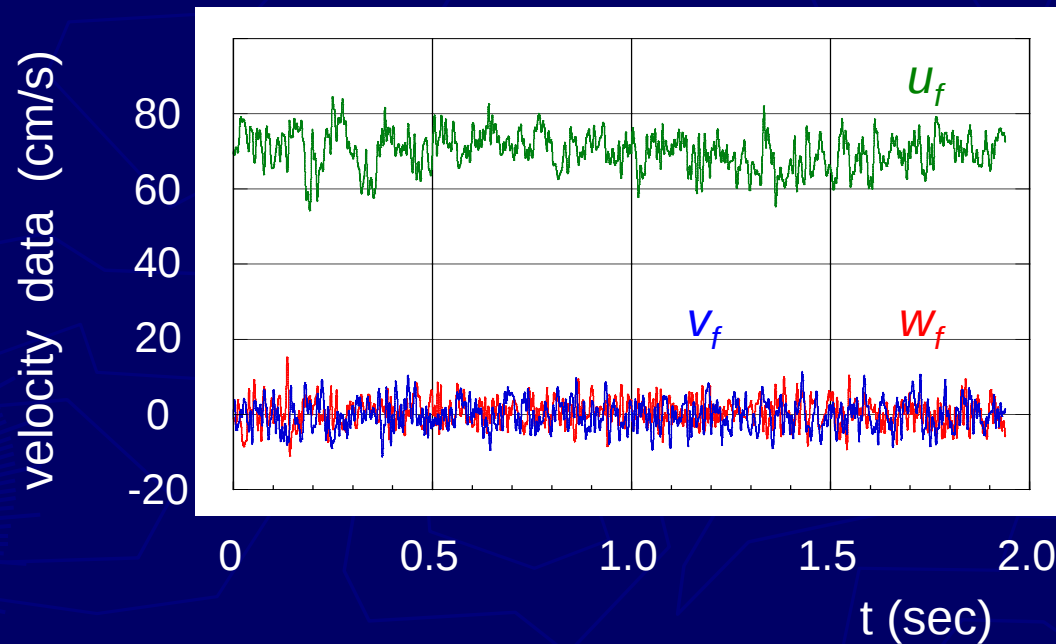
- 乱流中に土砂粒子が混入すると、乱流構造自体が変質することが知られているが、ここではそれほどの土砂濃度とならない範囲を対象とすることにして、乱流場の変質については考慮に入れない。[One-way model]

Numerical Results



Time series of turbulence data

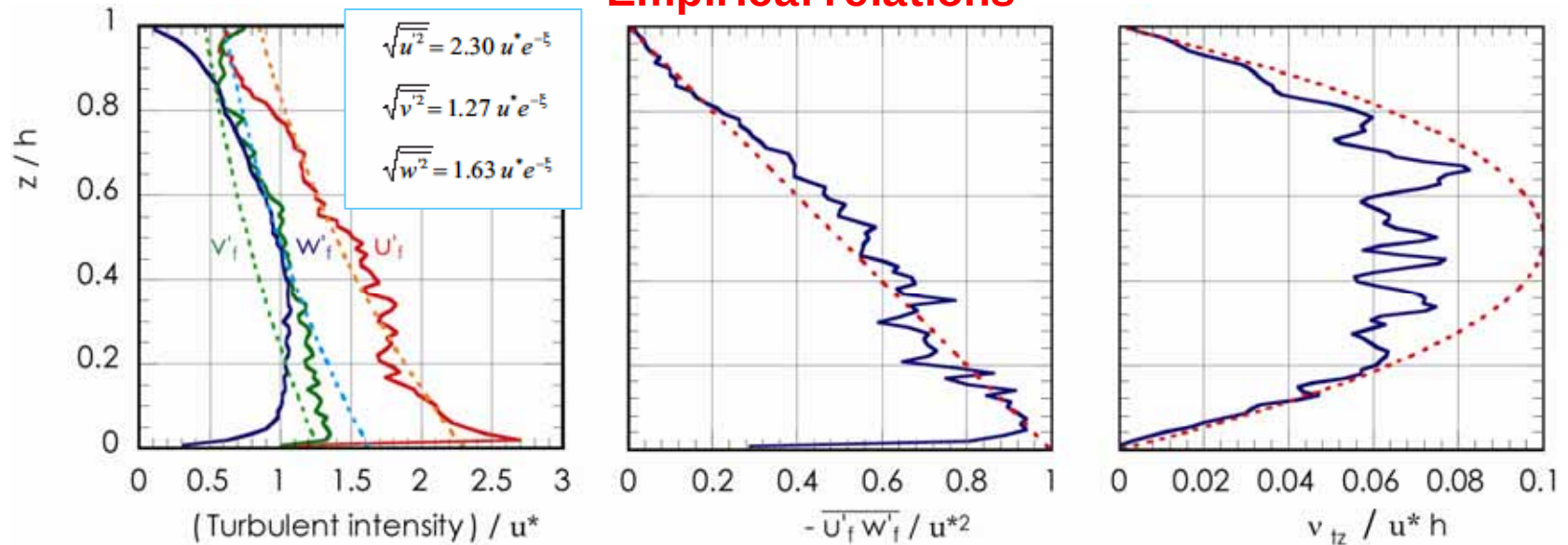
Sample



sampled at $(x, y, z) = (6.0, 1.5, 1.0)$ (cm)

Characteristics of generated turbulence data

Empirical relations



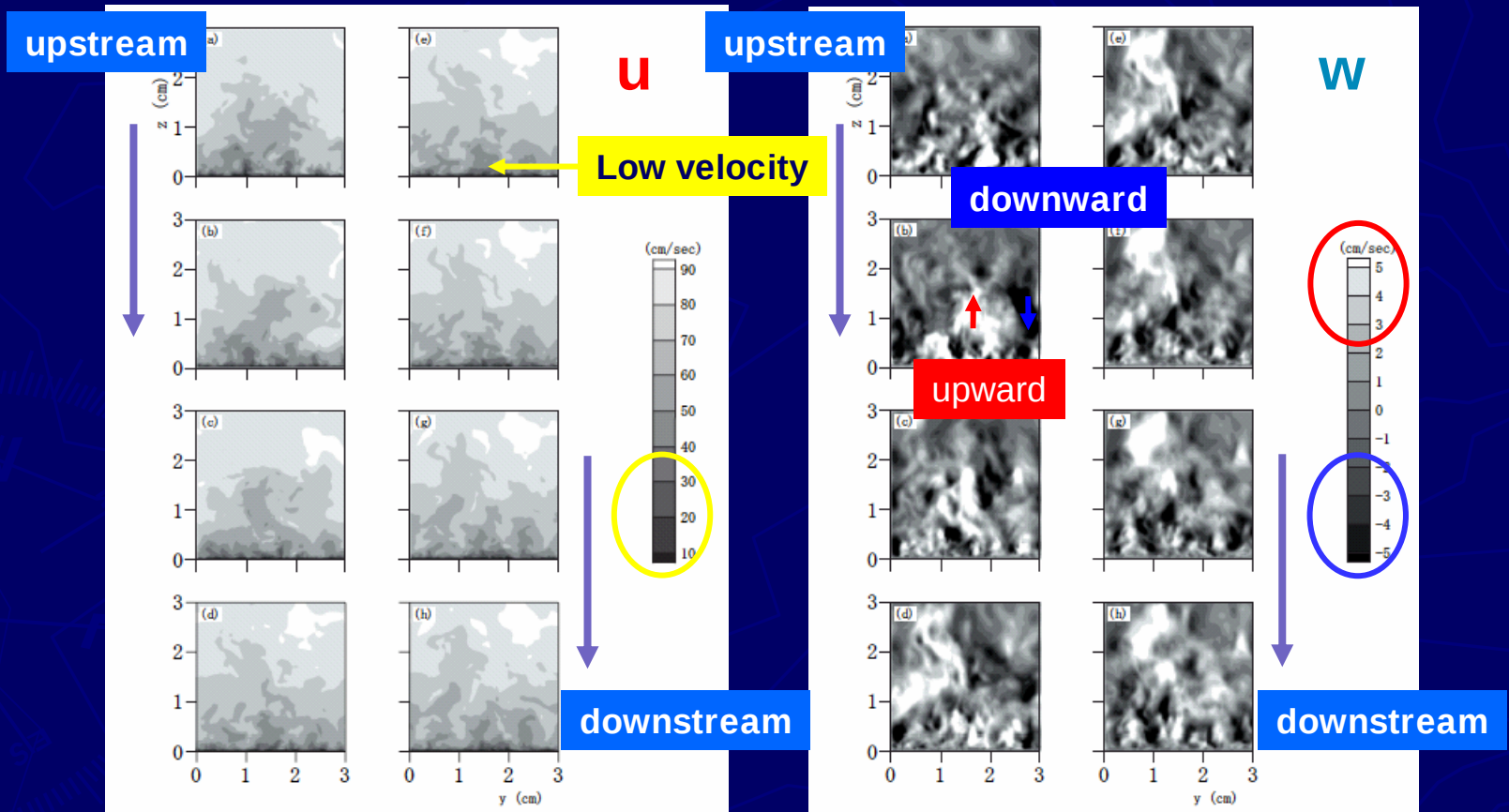
Turbulent intensity

Reynolds stress

Turbulent diffusion coefficient

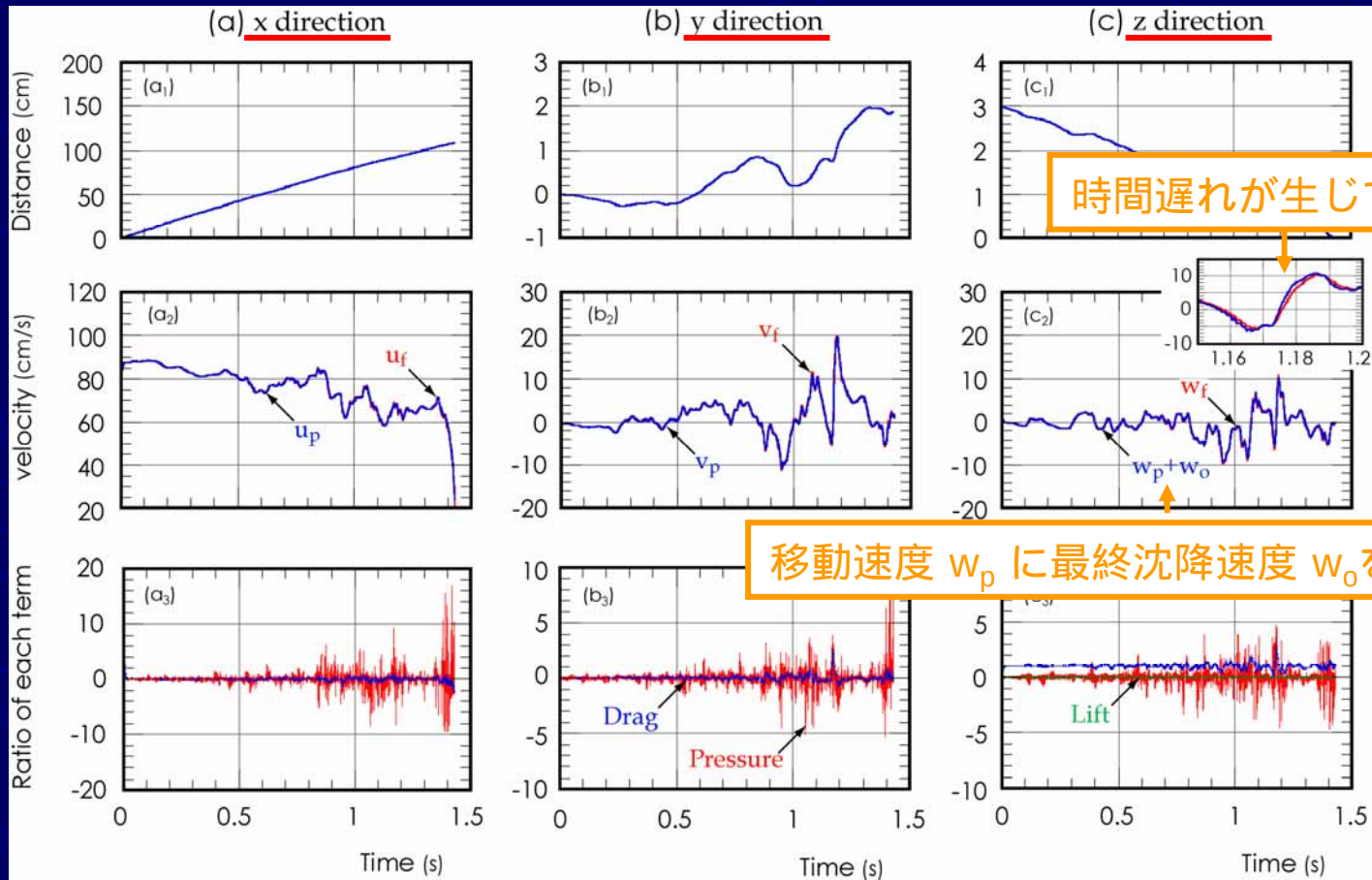
生成された乱れの統計的性質は，禰津・中川による実験結果とほぼ一致する。

Contour maps of **U** and **W** in successive cross sections



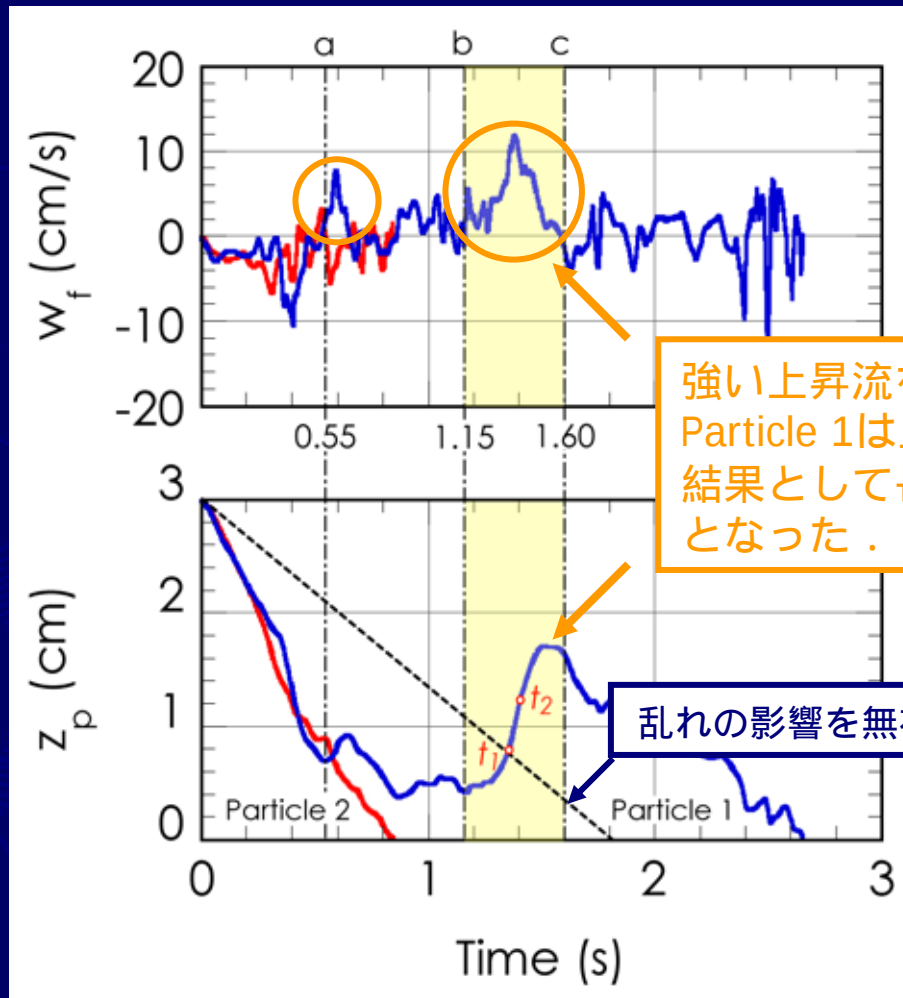
**Bursting period T_B : $T_B U_{\max} / h = 3 - 4$: this analysis
 $= 2 - 5$: Nezu & Nakagawa (experiments)**

Analysis of individual particle motion



抗力項と圧力項が運動を支配する主要因

Effect of turbulence on the trajectories of sediment particles

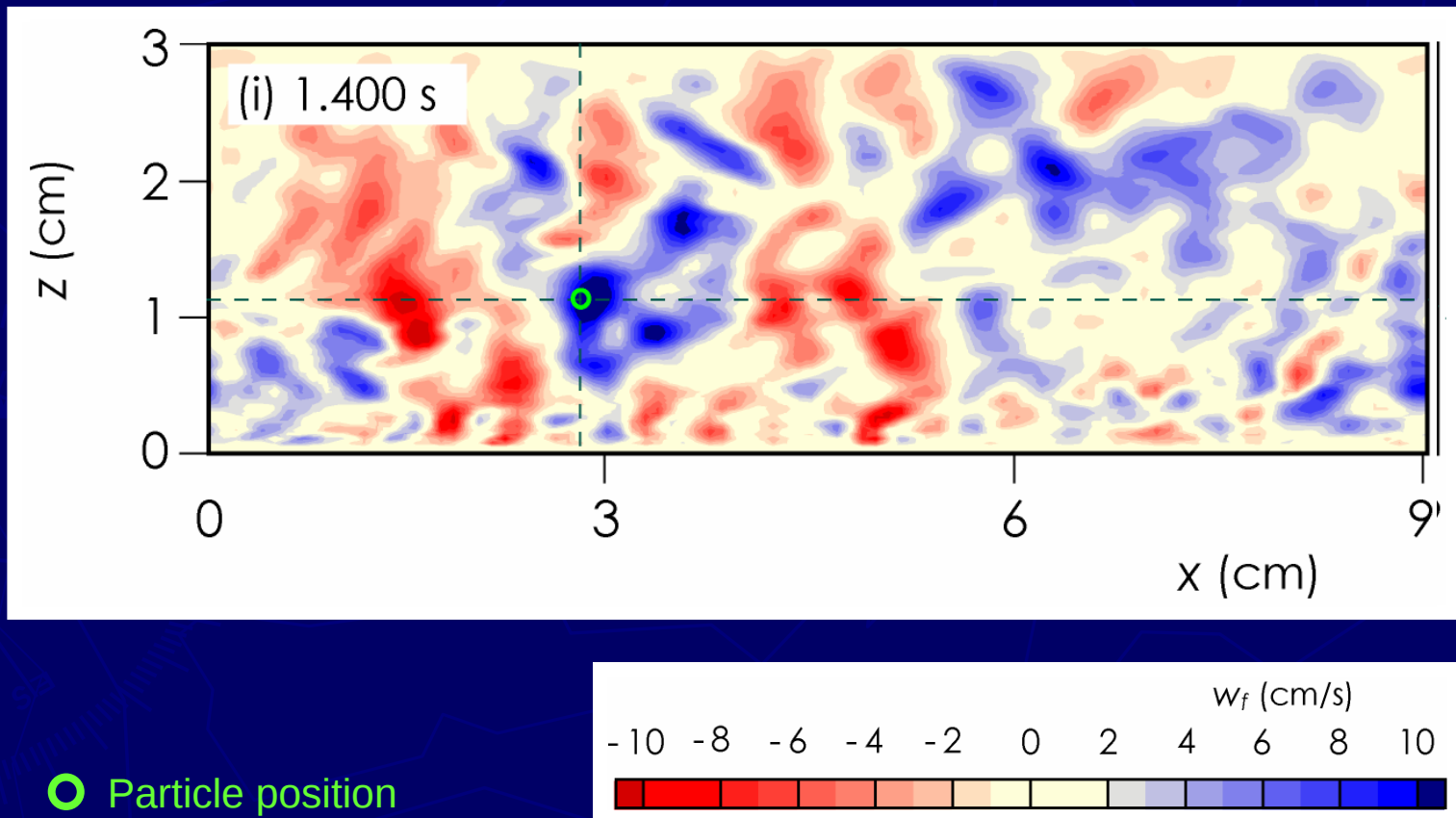


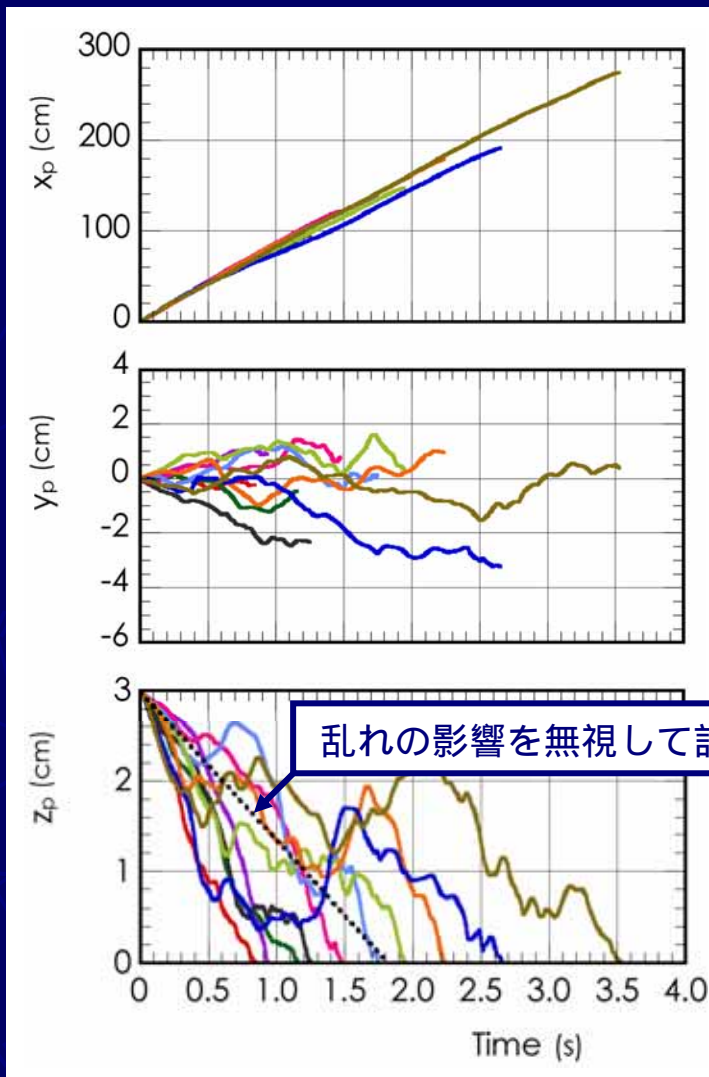
強い上昇流を受けたことにより、Particle 1は上昇運動を継続し、結果として長時間にわたる運動となった。

乱れの影響を無視して計算した軌跡

— Particle 1
— Particle 2

Contour maps of w_f and the position of sediment particle





ここでは、500個のうち任意に抽出した10個の粒子の軌跡を示している。



どれひとつとして同じ軌跡はない。



土砂粒子群の拡散あるいは分散が生じている。

Evaluation of diffusion coefficient

coordinate

Velocity

$$X'_p = X_p - \bar{X}_p, \quad V'_p = V_p - \bar{V}_p$$

Diffusion coefficient ϵ :

$$\epsilon = \frac{1}{2} \frac{d \overline{X_p'^2}}{dt} = \overline{V_p'^2} \times T_L$$

$$T_L = \int_0^\infty R(\tau) d\tau = \int_0^\infty \frac{\overline{V_p(t) V_p(t + \tau)}}{\overline{V_p'^2}} d\tau$$

Based on the diffusion theory of G. I. Taylor

Diffusion coefficient in z direction

Convection

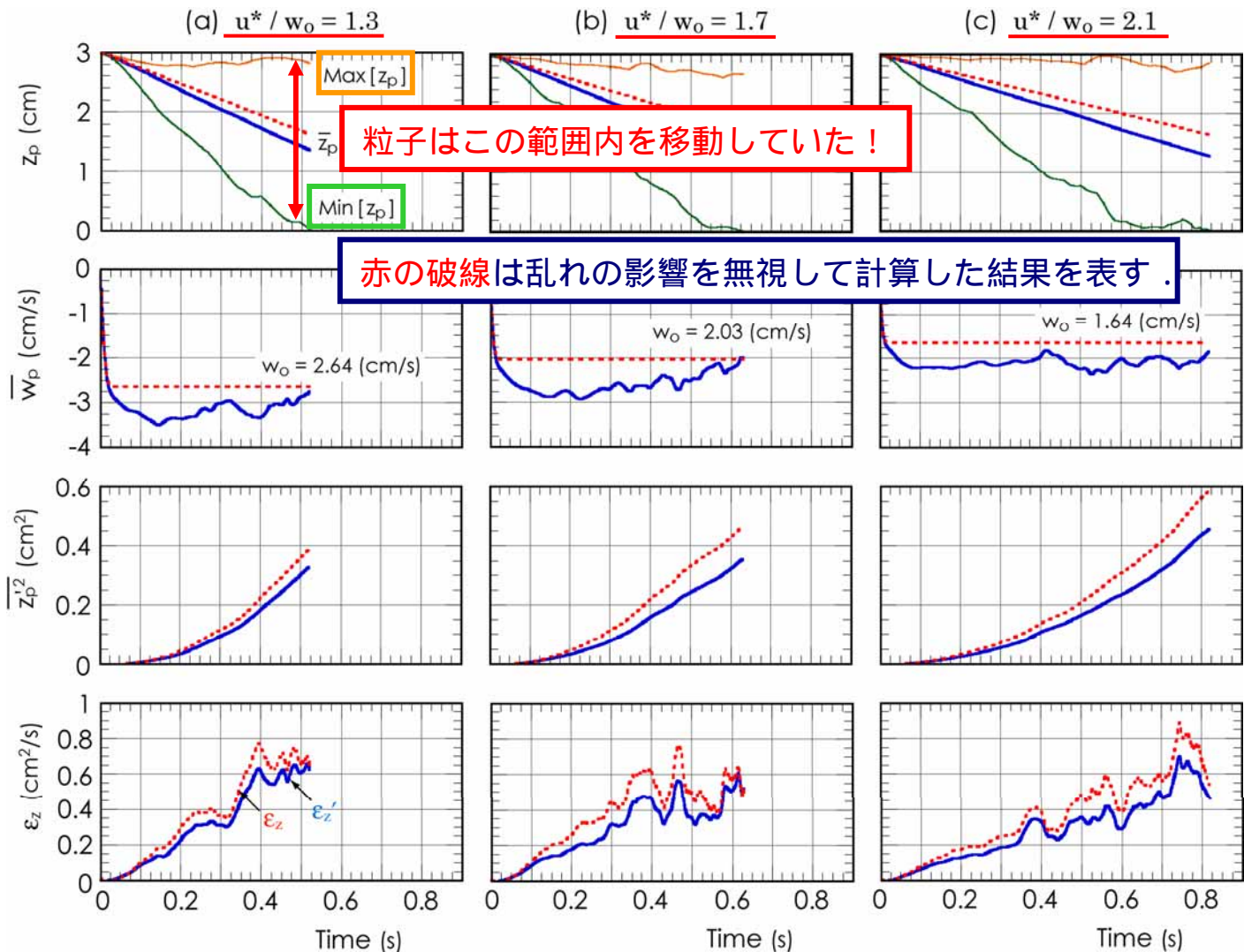
Mean trajectory

Mean velocity

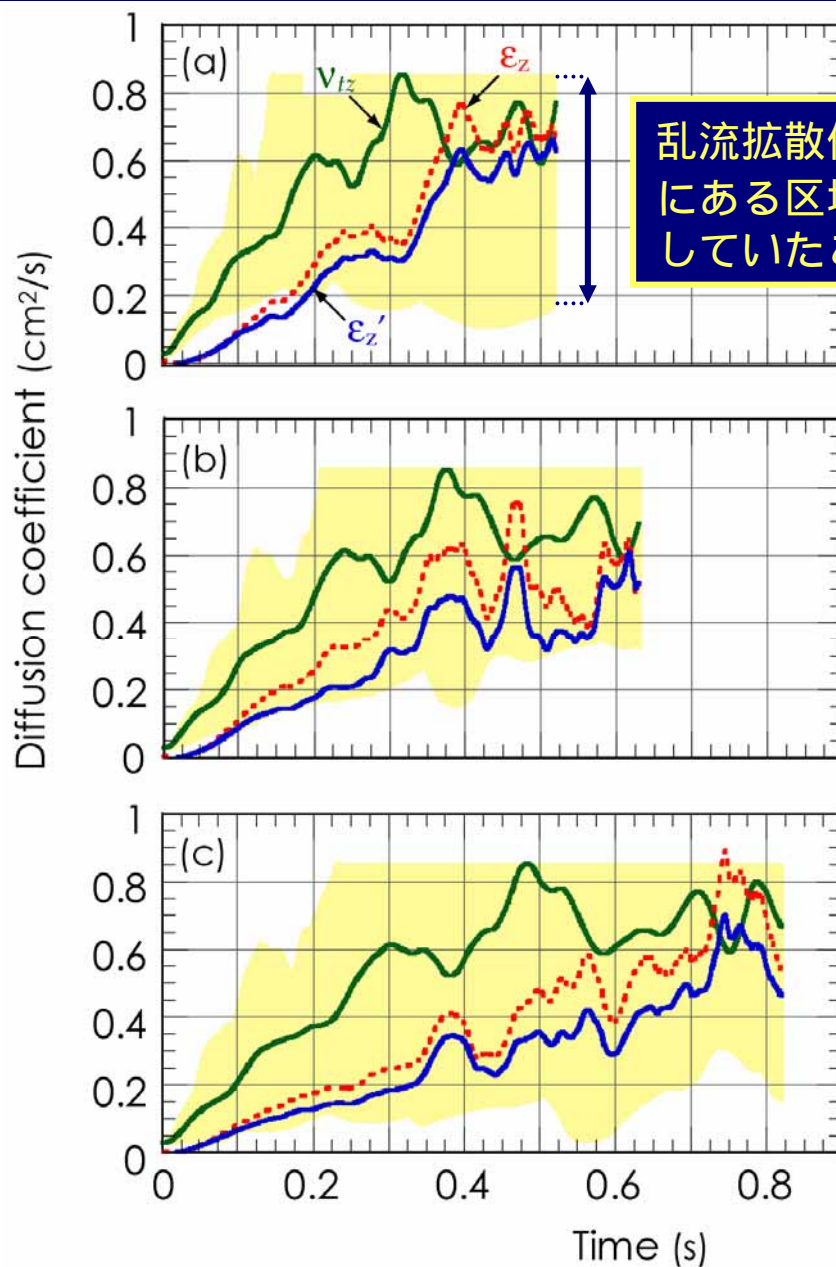
Deviation

Diffusion

Diffusion coefficients



赤の破線で示した ε_z は、粒子の平均的な軌道が上段の図中の赤の破線のように乱れの影響を受けないとした場合の拡散係数を表す。

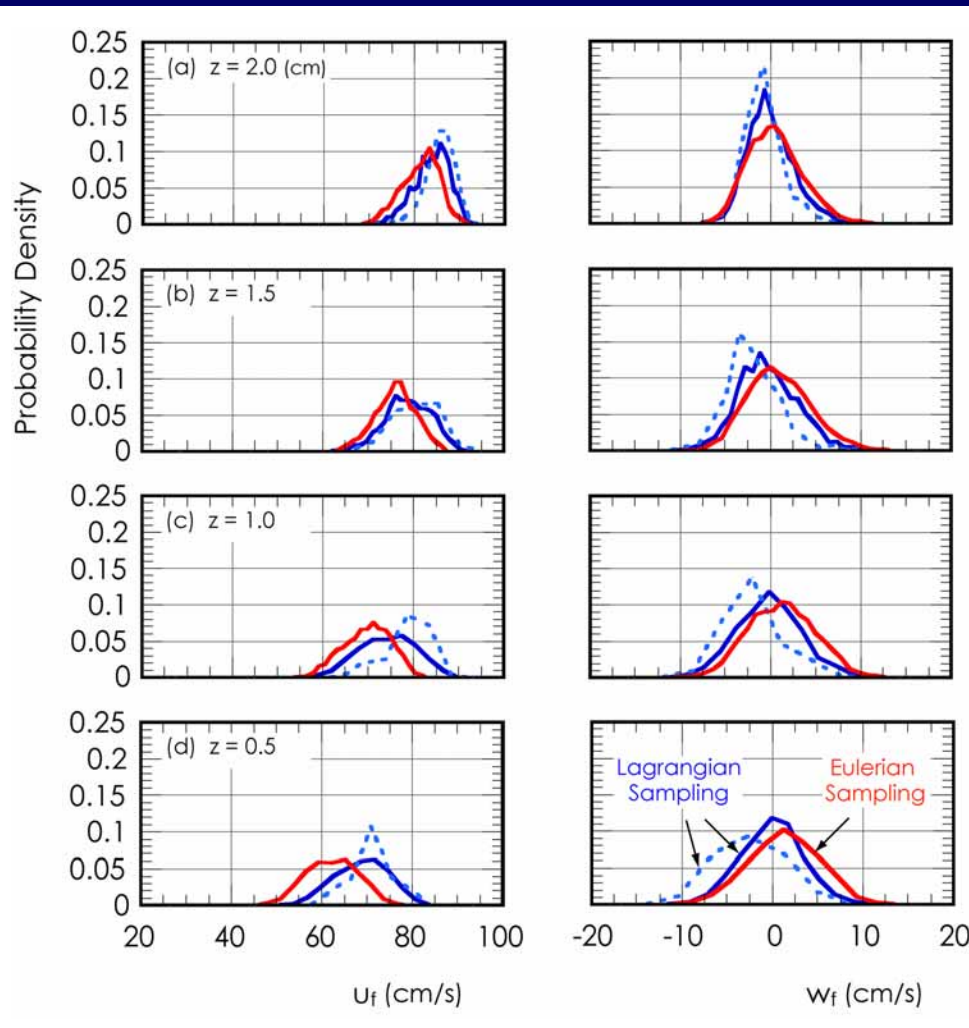


乱流拡散係数がこの範囲にある区域を粒子が移動していたことを表す。

乱流拡散係数がほぼ一定となる領域を十分な時間にわたって移動すると、浮遊砂の拡散係数は一定の値に漸近し、その値は乱流拡散係数とほぼ等しくなる傾向にある。

v_{tz} : 乱流拡散係数
 ϵ_z, ϵ'_z : 土砂の拡散係数

Probability density function of flow velocity exerted on the sediment particles



赤線 : Eulerian sampling

各固定点でサンプリングされた
流速の確率密度分布



両者は一致とは限らない！



青線 : Lagrangian sampling

移動する粒子に作用した流速の
確率密度分布

青の破線は500個の粒子うちのわずかひとつ
でも河床に到達するまでの時間帯に限定して
サンプリングされたデータに対するもの。

“sweep motion” の影響が卓越する！

結論

- 土砂粒子は水流の乱れに対して概ねよく追隨する。しかし、その移流流速がその場で評価されるオイラー平均の流速に一致するとは限らない。
- 浮遊土砂の下降過程に注目すると、土砂粒子はsweepと呼ばれる組織的な渦運動の影響を強く受ける。

このことは、土砂の上昇過程においてejectionの影響が強いことと対照的である。

結論

- Taylorの拡散理論に基づき算定された拡散係数は、時間の経過とともに一定の値に漸近する傾向を示すほか、その値が流れの乱流拡散係数とほぼ一致することがわかった。ただし、そのためには十分な助走時間が必要であり、瞬時にその場の乱流拡散係数に見合った拡散が生じるわけではない。
- 拡散係数を乱流拡散係数に等しいとして移流拡散方程式に基づき浮遊砂の輸送を解析してきたが、厳密に正しい考え方とは言えないものの工学的には適切な判断であった!?

今後の展望

任意の流れ場において生じる土砂粒子の運動を，質点系の運動方程式に基づいて解析することによって，移動床水理の分野でこれまで課題とされてきた点についての新たな発展が期待できるのではないかと考える．

これをライフテーマと位置付けて，今後も研究を進めていくつもりである！

The End.

Thank you for your attention!

