

動的平衡状態における混合砂礫河床表層の粗粒化

On Surface Pavement of Equilibrium River bed with Sand Mixture

愛媛大学工学部 鈴木 幸一 Koichi SUZUKI

愛媛大学大学院 加藤 幸一 Koichi KATO

Mobile armoring phenomena, which is the sorting of surface sand on an equilibrium river bed with gravel and sand mixture, is discussed through experiments using a steep slope channel and sand mixture with widely distributed grain size. Ripples and dunes are hard to be formed and the bed is usually flat in channels of sand mixture with gravels. And the flat bed forms can be estimated in the category of transition by the Garde-Raju's diagram, if the mean diameter of original sand mixture is used as a representative diameter. Bed surface sand becomes coarser than the original sand mixture even if all the particles on bed surface are moving and the sediment discharge is equilibrium. A method for the estimation of sand composition of bed surface is also proposed and proved to be useful.

Keywords : mobile armoring, pavement, sand mixture, bed form

1. はじめに

大きな礫を含む粒度範囲の広い混合砂よりなっている河床においては、河床表層が粗粒化していることが多いことはしばしば指摘されているところである。このような混合砂礫河床の粗粒化については、従来主として非平衡流砂量場で粗砂が動かないような状態で生じる粗粒化が Gessler¹⁾の研究以来、平野²⁾ら多くの研究者によって研究されてきている。これに対し、Parkerら³⁾⁴⁾は動的平衡状態においても砂礫河川では河床表層は粗粒化していることを指摘し、これは粗砂と細砂が等移動性を示すためには動きにくい粗砂が多く河床に存在しなければならないためだと説明している。この動的粗粒化現象を Parker は "pavement" と呼んでいるが、Kuhnle ら⁵⁾は Gravel Bed Rivers Symposium (Fort Collins, Colorado 1985) に従って "mobile armoring" といい、従来の "static armoring" (静的粗粒化) と区別している。また、混合砂礫河床では河床波が発達しにくいことを Kuhnle らは指摘しているが、これは河床表層が粗粒化することも原因の一つであると考えられる。一方、道上ら⁶⁾は静的粗粒化が必ずしも流砂の非平衡場でのみ生じるのではなく、細砂のみが動いているような平衡状態においても生じることを主張している。従来の非平衡静的粗粒化に関する研究が河川の粗細砂の流下方向の分級(水平分級)現象を明らかにしているのに対して、静的であれ動的であれ平衡状態の粗粒化は河床表層付近の鉛直方向の分級(鉛直分級)が主たる機構として検討する必要があるといえよう。本研究は、混合砂礫河床において流砂が動的平衡状態での表層の粗粒化(mobile armoring、pavement)現象の特性を実験的に明らかにすることを目的としている。すなわち、比較的大きな礫を含む混合砂を用いた実験によって、混合砂礫河床の形態と河床表層砂の粒度分布について実験的考察を加えるとともにその推定法について検討する。

2. 実験の概要

実験は幅 40cm 長さ 10m の鋼製水路で行ったが、この水路では下流端を支点として上流端をチェーンブロックで引き上げることによって勾配を 0 ~ 1/5 の範囲で急勾配まで変えることができる。用いた砂は愛媛県の重信川河口の自然砂を 20mm メッシュのふるいを通して図-3 に太い実線で示す粒径加積曲線を持つ平均粒径 $d_{50} = 0.414\text{cm}$ 標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 3.00$ の混合粒径砂である。なお、重信川は急勾配河川であって河口付近で河床勾配が 1/400 程度である。実験の手順としては、まず水路全体に 10cm 厚で実験

砂を敷き詰めた後、所定の水路勾配に設定する。実験の混合砂は粒度範囲を広くとるため直径が 2cm 近い礫を含むが、これらが移動している動的状態を得るためには河床勾配をかなり急にする必要がある。給砂は河床に敷き詰めた元河床と同じものを用い、上流端から手動で上流側の基準断面での河床が常に一定になるように給砂量を調整しながら行った。流砂量が多いので流砂は平衡状態に比較的早く達したが、平衡状態に達したのちに一定時間通水する。水深を測定した後、下流端を堰上げて河床表層を乱さないように止水排水した後、河床形態を観察し河床表層砂を採取する。採砂は流下方向に 1m 間隔の断面で行うが、表層砂を 10cm 幅で水路全幅 (40cm) にわたってコテで削り採る。採砂厚は図-6 に示す surface layer であり、各採砂場所での最も突出した砂粒子最上点から 2cm (最大砂粒径) としたが、厳密に採砂することは困難であり精度は高くない。

実験条件は表-1 に示す通り、河床勾配 I を 1/100、1/50 および 1/30 の 3 通りとし、最大粒径の砂も移動しているような水理条件である。表-1 には実験結果である河床形態 (全て平坦) や河床表層砂の平均粒径および粒径の標準偏差も合わせ示している。なお、流出砂の粒度分布は給砂 (元河床砂と同じ) の粒度分布とはほぼ同じであった。

表-1 実験条件と結果

Run No.	Bed slope I	Flow discharge q (cm ² /s)	Flow depth h (cm)	Sand mixture mean diameter $d_{50}=0.414$ cm standard deviation $d_{84}/d_{16}=3.00$	Bed forms plane (bed load sheets)	Bed surface sand	
						Mean diameter d_m (cm)	Standard deviation $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$
1	1/100	400	5.56			0.603	3.47
2	"	450	5.92			0.589	3.50
3	"	500	6.42			0.597	3.62
4	"	600	6.92			0.409	3.16
5	"	700	7.64			0.367	2.95
6	1/50	200	3.12			0.466	3.37
7	"	225	3.50			0.496	3.39
8	"	275	3.90			0.518	3.39
9	"	300	4.08			0.440	3.28
10	"	325	4.40			0.419	3.01
11	1/30	100	1.94			0.412	3.24
12	"	125	2.40			0.414	3.24
13	"	150	2.70			0.394	3.08
14	"	175	3.12			0.348	2.80
15	"	200	3.44			0.416	3.23

3. 実験結果の考察

河床形態 実験は全ての粒径の砂が移動するように掃流力を比較的大きくして $0.08 < \tau_{*mo} < 0.15$ の範囲で行っている。ここに、 $\tau_{*mo} = u_*^2 / sg d_{mo}$ 、 u_* : 摩擦速度、 $s = \sigma / \rho - 1$ 、 σ : 砂の密度、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 d_{mo} : 元河床砂の平均粒径である。全ての実験 Run で全粒径の砂が活発に移動していたが、顕著な河床波は形成されなかった。礫を含む混合砂河床の河床形態に関するデータは少ないが、Kuhnle & Southard⁵⁾ は、混合砂礫河床では河床波が発達しにくいことを指摘するとともに平坦河床を bed load sheets と呼んでおり、 $\tau_{*mo} < 0.22$ 以下では河床は平坦である実験データを示している。

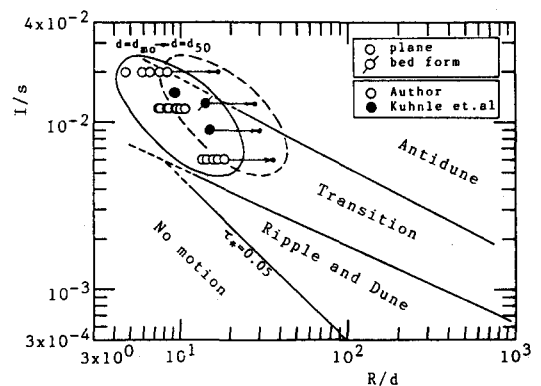


図-1 河床形態区分図(Garde-Raju)と本実験データ

図-1 は Garde-Raju による河床形態区分図に本実験と Kuhnle らのデータを示したものである。この図のように $I/s \sim R/d$ 平面で示した区分図と 芦田らによる $\tau_* \sim R/d$ 平面での区分方法とは、 $\tau_* = RI/sd$ であることを考えると両者は同じ区分方法である。ただし、 I : エネルギー勾配、 R : 径深、 d : 砂粒径、 $\tau_* = u_*^2/sgd$ である。礫を含む砂粒径 d の大きい河道においては R/d が小さくなるのが通常であるが、この場合 砂澁や砂堆は存在しにくくなる。礫を含む混合砂の場合、細砂は移動していても粗砂が移動しない場合は河床は平坦であり、掃流力が大きくなって粗砂も移動するような状態でも河床形態は遷移領域に入り河床は平坦に近い。Garde-Raju の領域区分線を延長すれば、粒径 d として元河床の平均粒径 d_{mo} を使用した場合の本実験データは全て遷移領域に入っている。Kuhnle のデータも 1 つを除いては全て平坦河床であるのでこの河床形態区分図でこれらのデータは一応説明できるといえよう。いま、 d_{mo} の代わりに 50% 粒径 d_{50} を用いた場合はデータは右方に移動し、反砂堆の領域に入るもののがかなり出てくる。したがって、これらのデータのみについていえば粒径として平均粒径を使うことによって、Garde-Raju の河床形態区分図から混合砂礫河床の形態が推察できる。例えば、 $R/d_{mo} = 10$ では、 $I/s < \sim 0.02$ あるいは $\tau_* (=RI/sd) < \sim 0.2$ の領域では河床は平坦とみなせる。

河床表層砂の粒度 図-2 は本実験における動的平衡状態における河床表層砂の粒度分布を示したもので、河床勾配毎に図を分けて示している。図(a)に示す $I = 1/100$ の場合 $\tau_{*mo} = 0.081, 0.087$ および 0.094 と掃流力が比較的小さいときには河床表層ははっきり粗粒化していることが認められ、 $\tau_{*mo} = 0.101$ 及び 0.112 と掃流力が大きい場合は元河床砂と変わらないことがわかる。図(b)の $I = 1/50$ では $\tau_{*mo} = 0.091$ と 0.12 の場合はやや粗粒化しているが、 $\tau_{*mo} = 0.114, 0.120$ 及び 0.129 と掃流力が比較的大きい場合には粗粒化は生じていない。図(c)に示す $I = 1/30$ と急勾配の場合は掃流力が全体的に大きい、全ての Run について河床表層砂は粗粒化していない。これらを総合すると本実験の使用砂については $\tau_{*mo} = 0.095 \sim 0.1$ 程度より τ_{*mo} が小さい場合に河床表層砂の粗粒化が現れてきており、 τ_{*mo} がそれより大きい場合は粗粒化現象は起こっていないことが分かる。Kuhnle ら⁵⁾は、動的平衡状態での河床表層砂の粒度

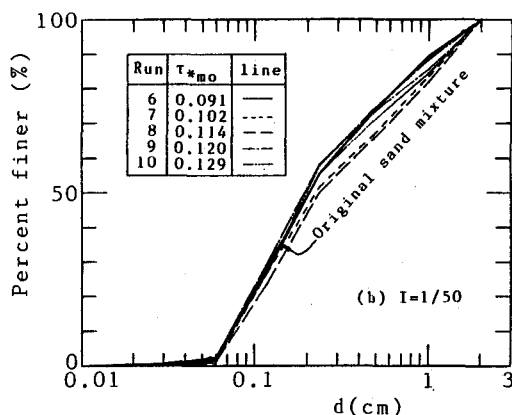
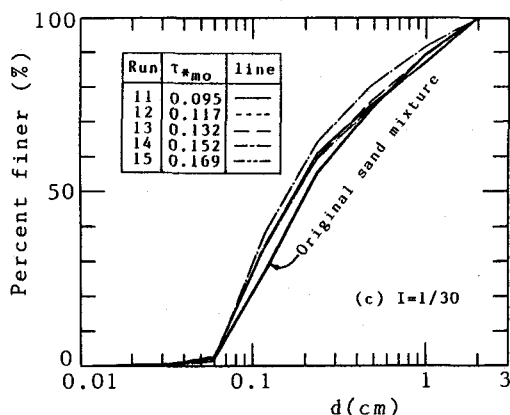
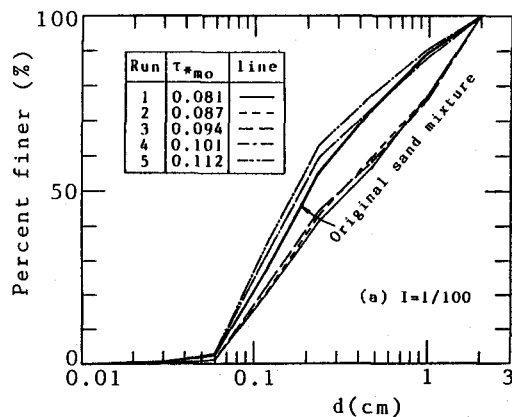


図-2 河床表層砂の粒径加積曲線((a) $I = 1/100$, (b) $I = 1/50$, (c) $I = 1/30$)

を調べるために、水分を含む粘土を先端に付けた直径 13cm のピストンを河床に押し付けることによって、河床表層砂のみを採取した。図-3 は Kuhnle らのその実験結果を示したもので、掃流力が特に大きい Run H5 を除いては、河床表層砂はかなり粗粒化していることがわかる。ピストン式の採砂器だと粗粒化が少しでも生じていると表層に突出している砂が主として採取されるので図-3 では粗粒化が強調され過ぎて現れていると考えられる。本実験の結果である図-2 の粒度分布から求められる河床表層砂の平均粒径 d_m と元河床砂の平均粒径 d_{m0} の比 d_m/d_{m0} と τ_{*m0} との関係を示すと図-4 のようになる。図中曲線は後で示す(7)式で計算された粒度分布から求めたものである。データにばらつきはあるが、 $\tau_{*m0} > \sim 0.12$ では河床表層砂が粗粒化したデータはないが、 τ_{*m0} が小さくなるにつれて粗粒化が顕著になるような傾向が認められる。すなわち、 $\tau_{*m0} < \sim 0.12$ のように掃流力が特に大きくなければ、粗細砂の選択輸送の効果として粗粒化が生じていると考えられる。河床表層砂粒径の標準偏差 σ と元河床砂の標準偏差 σ_0 との比については、図-5 に示すように本実験で用いた砂及び水理条件では τ_{*m0} が小さくなるほど σ/σ_0 が大きくなり粒度分布が大きく変化していることを示している。

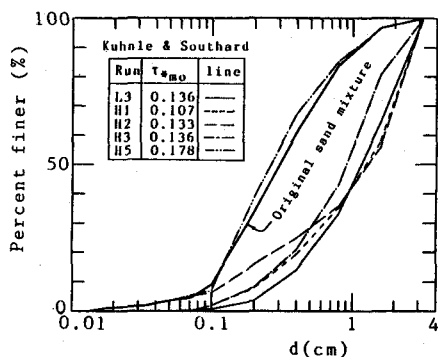


図-3 (Kuhnleらの実験)
河床表層砂の粒径加積曲線

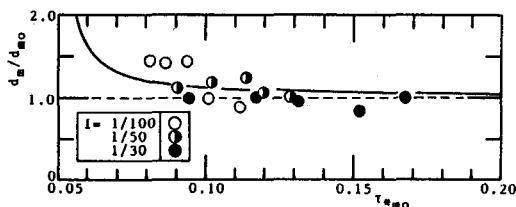


図-4 河床表層砂の平均粒径と掃流力

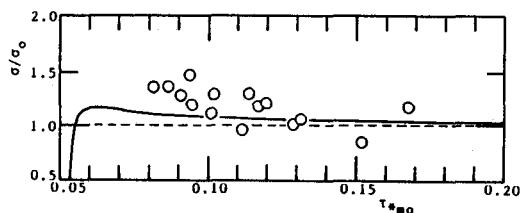


図-5 河床表層砂粒径の標準偏差と掃流力

4. 河床表層砂の粗粒度の推定

Parker によると、動的平衡河床において粗砂が細砂より移動しにくくしたとすれば、流出砂の粒度分布が元河床砂（給砂）と等しくなるためには、河床表層砂の粗砂の割合が元河床砂での割合より増えていなければならない。この混合砂河床表層が粗粒化する機構としては粗砂が移動した後の穴に細砂が入り込んで動きにくくなり、結果として表層での細砂の割合が減っていくと考えられる。すなわち、図-6 の概念図に示すように河床表層付近の移動砂層は直接流れの掃流力を受けるやや粗粒化した層（surface layer）とその下のやや細粒化している層（subsurface layer）とに分けられる。ここでは、従来の subsurface layer を original sand mixture としている。

従来、混合砂の粒径別流砂量は、均一砂に対する流砂量式中の掃流力あるいは限界掃流力を遮蔽係数を用いて修正することによって推定できることが示されている。いま限界掃流力を修正した方が合理的であるという立場に立つと、無次元限界掃流力 τ_{*c} を各粒径別限界掃流力 τ_{*ci} で置き換えると粒径別流砂量は、

$$i_o \cdot q_{s*i} = i_s \cdot f(\tau_{*i}, \tau_{*ci}) \quad (1)$$

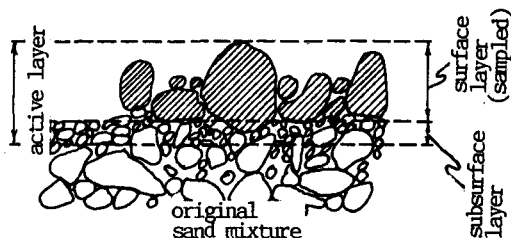


図-6 河床表層砂の鉛直分級概念図

である。ここに、 i_o および i_s : それぞれ流出砂および河床表層砂中で粒径 d_i の砂が占める割合、 $q_{s*i} = q_s / \sqrt{sg d_i^3}$ 、 q_s : 単位幅当たりの全粒径流砂量 (実質体積)、 $\tau_{*i} = u_*^2 / sg d_i$ 、 $\tau_{*ci} = u_{*ci}^2 / sg d_i$ 、 u_{*ci} : 粒径 d_i の砂の移動限界摩擦速度 である。また、粗砂も活発に移動しているような状態での全流砂量 q_s は、平均粒径 d_m を代表粒径として、

$$q_{s*dm} = f(\tau_{*dm}, \tau_{*cm}) \quad (2)$$

と表される。ここに、 $q_{s*dm} = q_s / \sqrt{sg d_m^3}$ 、 $\tau_{*dm} = u_*^2 / sg d_m$ 、 $\tau_{*cm} = u_{*cm}^2 / sg d_m$ および u_{*cm} は粒径 d_m の砂の限界摩擦速度 である。したがって、(1)式と(2)式より

$$q_s = \frac{i_s}{i_o} \cdot \sqrt{sg d_i^3} \cdot f(\tau_{*i}, \tau_{*ci}) = \sqrt{sg d_m^3} \cdot f(\tau_{*dm}, \tau_{*cm})$$

となるから、

$$\frac{i_s}{i_o} = \left(\frac{d_m}{d_i}\right)^{3/2} \cdot \frac{f(\tau_{*dm}, \tau_{*cm})}{f(\tau_{*i}, \tau_{*ci})} \quad (3)$$

である。(3)式は、流出砂の粒度 i_o と河床表層砂の粒度 i_s との関係を示している。(3)式中の τ_{*cm} は Shields の限界掃流力で示されると考えられるから一定と考えておく。また、粒径別の無次元掃流力 τ_{*ci} については、道上ら⁶⁾は、無次元流砂量 q_{s*i} が 10^{-3} となるところの τ_{*i} を粒径 d_i 砂の混合砂河床での無次元掃流力と定義して、

$$\tau_{*ci} / \tau_{*cm} = (d_i / d_m)^{-0.93} \quad (4)$$

を実験的に示している。これらの関係を用いると、(3)式の右辺は、 τ_{*dm} と d_i / d_m のみの関係となる。いま、流砂量式として、(4)式を決定する際の基礎となった芦田・道上の式

$$q_s / \sqrt{sg d^3} = 17 \cdot \tau_{*e}^{3/2} \cdot (1 - \tau_{*c} / \tau_{*e}) \cdot (1 - u_{*c} / u_*) \quad (5)$$

を用い、河床は平坦であるから τ_{*c} (無次元有効掃流力) = τ_{*e} とすると、(3)式は、

$$\frac{i_s}{i_o} = \frac{(1 - \tau_{*cm} / \tau_{*dm}) \cdot (1 - \sqrt{\tau_{*cm} / \tau_{*dm}})}{\{1 - (d_i / d_m)^{0.97} (\tau_{*cm} / \tau_{*dm})\} \cdot \{1 - \sqrt{(d_i / d_m)^{0.97} (\tau_{*cm} / \tau_{*dm})}\}} \equiv G(\tau_{*dm}, d_i / d_m) \quad (6)$$

となる。流出砂(給砂)と元河床砂が同じである本実験のような動的平衡状態の場合には、 i_o は流出砂と元河床砂とで同一である。(6)式の間係を $\tau_{*cm} = 0.047$ として示せば図-7 のようになり、 τ_{*dm} が約 0.1 より大きいような場合は i_s / i_o は 1 に近く河床表層砂の粗粒化は顕著ではないが、 τ_{*dm} がそれより小さくなると、 $d_i / d_m > 1$ の粗砂は急激に増加、 $d_i / d_m < 1$ の細砂は急激に減少し河床表層砂は粗粒化することが認められる。また、粗粒化した河床表層砂の粒径加積曲線 $F(d_i)$ は、(6)式より d_{min} を最小砂粒径として、

$$F(d_i) = \int_{d_{min}}^{d_i} i_o(d_i) \cdot G(\tau_{*dm}, d_i / d_m) \cdot d d_i \quad (7)$$

であるから、本実験での混合砂に対しては図-8 のような粒径加積曲線が得られる。(7)式中の平均粒径 d_m としては粗粒化する前は元河床砂が河床表層砂であるので元河床砂平均粒径 d_{m0} を用いている。すなわち、 τ_{*dm0} が最大粒径砂の無次元限界掃流力 (~ 0.06) に近くなれば河床表層砂は粗粒化しているが、 $\tau_{*dm0} > 0.1$ と掃流力が大きい場合にはほとんどが粗粒化していない。

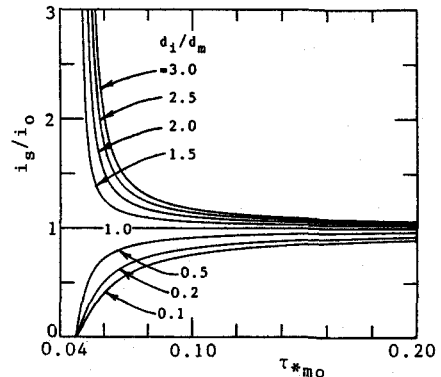


図-7 河床表層砂の各粒径の割合と掃流力

図-9 は(7)式で計算した河床表層砂の 90 % 粒径、平均粒径および 50 % 粒径とそれぞれに対応する実測の粒径との関係を示したものである。河床表層砂の採砂方法のあいまいさや現象のもつ不規則条件のため実測データはかなりのばらつきを持っていることを考えれば、(7)式で河床表層砂の粗粒化後の粒度分布をある程度推定できると考える。

4. おわりに

本研究は、Parker が pavement と名づけている動的平衡河床表層の粗粒化 (mobile armoring) 現象を実験によって確かめその特性を検討しようとしたものであるが、得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 礫を含む混合砂河床では通常 R/d が小さく砂漕や砂堆の河床形態は生じにくい。流砂が活発である動的平衡状態では平坦河床になりやすく本実験でも全て平坦河床であったが代表粒径として元河床砂の平均粒径を用いると Garde-Raju の河床形態区分図で遷移領域に該当し河床形態を説明できた。
- 2) 掃流力が粗砂の限界掃流力よりずっと大きい場合は河床表層砂の粒度は元河床砂とほとんど変わらないが全ての粒径の砂が移動している平衡状態においても粒径別選択輸送の強く残る程度の掃流力であれば、河床表層は粗粒化する。
- 3) 動的平衡河床表層砂の粒度分布は、元河床砂粒度分布と掃流力とを用いて(6)式によって推定できる。

なお、河床表層砂の粗粒化に関する実験では表層砂の粒度分布の実測が難しく、本研究のように採砂によって行う場合は採砂の方法によって結果が大きく異なる。したがって今後、河床表層部を樹脂液で固めて粒度を調べるなど、より客観的に粒度を決定する必要がある。

参考文献

- 1) Gessler, J. : Self-stabilizing tendencies of alluvial channels, Proc. ASCE, Vol. 96, WW2, pp. 235~249, 1970.
- 2) 平野宗夫 : Armoring をともなう河床低下について、土木学会論文報告集、第195号、pp. 235~255, 1971.
- 3) Parker, G., Klingeman, P.C. and Melean, D.G : Bed load and size distribution in paved gravel-bed streams, Proc. ASCE, Vol. 108, HY4, pp. 544~571, 1982.
- 4) Parker, G. and Klingeman, P.C. : On why gravel bed streams are paved, Water Resources Research, Vol. 18, No. 5, pp. 1409~1423, 1982.
- 5) Kuhnle, R.A. and Southard, J.B. : Bed load transport fluctuations in a gravel bed laboratory channel, Water Resources Research, Vol. 24, No. 2, pp. 247~260, 1988.
- 6) 道上正規・鈴木幸一 : 混合砂礫河床における増水・減水時の平衡流砂量、土木学会論文報告集、第399号/Ⅱ-10, pp. 95~104, 1988.

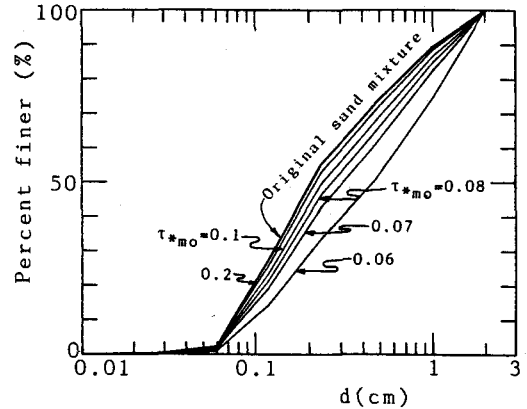


図-8 河床表層砂の粒径加積曲線(本実験)

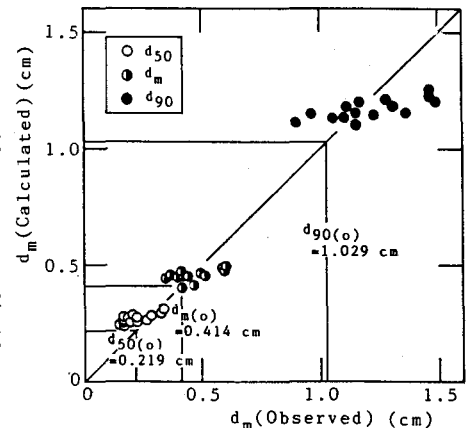


図-9 表層砂粒径の実測値と計算値の比較