HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	開水路における浮遊砂の輸送機構
Author(s)	板倉, 忠興; 岸, 力
Citation	北海道大學工學部研究報告, 68(1), 129-141
Issue Date	1973-09-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/41145
Type	bulletin (article)
File Information	68(1)_129-142.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

開水路における浮遊砂の輸送機構

板倉忠興* 岸　　力*

(昭和48年3月19日受理)

The Mechanism of Suspended Sediment Transport in an Open Channel

Tadaoki ITAKURA* Tsutomu KISHI*

Abstract

The velocity distribution in an open channel water flow with suspended sediment was investigated by experiments. It is known that the velocity distribution with suspended sediment differs from so-called Karman-Prandtl velocity defect relation. The difference consists of two components; one in which the Von Karman universal constant is smaller than $\kappa=0.4$, and the other where the velocity is higher than the clear water flow for the 10% depth near the bottom.

All measurements were performed in a hydraulically smooth channel for various concentrations of sand. Several theoretical and experimental relationships were examined in the experiments. Shimura's theory was found to give the best correlation with the authors' experiments.

The measurements of turbulence was carried out in an open channel water flow with suspended sand particles using a hot-film anemometer. Characteristics of the structure of turbulence were investigated to obtain some basic data in an attempt to generalize the theories of suspended sediment transport.

1. 概　　説

河川における土砂の輸送に関しては非常に多くの要素が複雑に関連していると考えられ未だ解明されていない部分も少なくないが，この問題はそれ自身が実際の水工計画や工法と密接な関係を持つものであり，水理学上重要な問題である。

一般に水流中の土砂の濃度が高い洪水時などには河川の抵抗係数が減少すると言われている。いくつかの研究の結果によれば，土砂流の抵抗係数は土砂濃度とともに減少し，さらに流速分布の対数則に用いられるカルマン定数が減少することが明らかとなった。カルマン定数が減少することは混合距離が短かく，また渦のスケールが縮小することであり，流速分布の勾配が急になることである。

さらに土砂を含む流れにおいては河床に近づくに従がって流速が欠速度則で表わされる値よりも大となることが知られている。

本研究は，実験水路中で浮遊砂を含む開水路流れの実測を行ない，浮遊砂の輸送機構を明らかにするための基礎資料を得ようとするものである。

* 土木工学科　河川工学研究室　　Department of Civil Engineering

流れの平均的な性質については，流速分布および浮遊砂の濃度分布に関していくつかの理論および実験的解析結果との比較を行なった。

さらに，これらの理論は開水路水流の乱流構造に対していくつかの仮定を行なって展開されたものであり，これらを検討する資料を得るために Hot-film 流速計を用いて浮遊砂を含む流れの乱れの実測を行なった。

2. 実験の概要

測定は幅 30 cm，深さ 50 cm，長さ 15 m の側面プラスチック張り鋼製水路内で行なった。底面はラッカー仕上げである。流下させた砂は比重 2.65，$d_{50}=0.18$ mm であり，水路底に堆積が生じないように水理量を選んだ。平均流速の測定には内径 1 mm のピトー管と傾斜型水マノメーターを用いた。浮遊砂量は内径 4 mm の銅パイプのサイフォンを用いて測定した。

今回行なった実験の水理量は表-1 の通りである。抵抗係数およびレイノルズ数によって判定した結果ではすべてが底面は水理的に滑らかな状態である。また測定は流速の inner law が成立する一定セン断領域までの遷移領域および outer layer で行ない，viscous sublayer 内では行なっていない。

なお，すべての測定は水路の中心線上で行なわれた。

Table 1. Summary of Hydraulic Data for Experiments

Run No.	Depth h (cm)	Discharge Q (l/sec)	Mean Velocity $\bar{U}$ (cm/sec)	Froude number Fr	Hydraulic radius R (cm)	Slope i	Reynolds number Re	Shear velocity u_* (cm/sec)	Mean Sed. Concentr. Cm (gr/ℓ)	Temp. θ (°C)
650	7.17	12.5	58.1	0.639	4.85	0.00180	25,600	2.93	0.622	13.4
N-5	8.40	12.0	47.6	0.525	5.39	0.00147	23,500	2.79	0.321	16.7
N-6	7.58	12.0	52.8	0.613	5.04	0.00173	21,800	2.92	0.812	12.6
TN-2	7.20	12.5	57.9	0.689	4.86	0.00136	24,500	2.55	0.292	14.8
TN-4	7.10	13.2	62.0	0.743	4.82	0.00142	24,300	2.59	0.274	12.2
7	24.4	45.0	61.5	0.400	9.30	0.00072	57,200	2.56	—	—
10	23.9	64.0	89.3	0.580	9.22	0.00167	82,400	3.88	0.530	—
13	25.2	51.0	67.5	0.430	9.42	0.00077	63,500	2.66	0.376	—
17	22.5	35.5	52.6	0.350	9.00	0.00040	47,400	1.86	0.539	—
20	19.1	37.5	65.9	0.480	8.41	0.00100	55,400	2.87	0.713	—
30	22.9	48.6	70.7	0.470	9.07	0.00206	64,100	4.28	1.760	—
31	22.1	45.8	69.0	0.470	8.95	0.00218	61,800	4.38	2.260	—
1*	8.65	8.6	37.6	0.525	5.23	—	19,700	2.54	3.64	25.0
73**	4.14	10.4	51.5	0.958	2.95	0.00277	590,000	2.86	2.39	21.0

* Vanoni and Nomicos,　** Ismail

3. 平均流の特性

図-1 は平均流速の水深方向の分布の一例である。図-2 は同じ例の浮遊砂濃度分布を示している。

一般に浮遊砂を含む流れの流速分布では，いわゆるカルマン定数 κ は 0.4 より小となり，さらに水路底に近づくほど欠速度則からはずれて流速が大きな値となることが知られている。

日野[1] は粒子浮遊流のエネルギー方程式および乱れの加速度方程式から理論的にカルマン定

数の減少に関する (1) 式を導いた。

$$\frac{\kappa}{\kappa'}=\frac{1+\beta\bar{c}}{2}\left[1+\left\{1+4B\kappa(1+\beta\bar{c})s_1\right\}^{\frac{1}{2}}\right] \qquad (1)$$

ここに

$$s_1=\frac{g(\gamma-1)w_0\bar{c}(h-\delta)}{u_*^3\ln(h/\delta)}$$

$$\delta=11.6\frac{\nu}{u_*},\quad B=13,\quad \beta=4.8$$

Ordonez-Ippen[2] は多くの実験結果を整理し，水路底近傍での欠速度則からのはずれを考慮した実験式を提案した。

$$\frac{\bar{u}-u_{\max}}{u_*}=\frac{1}{\kappa'}\ln\left(\frac{y}{h}-\Psi\ln\frac{y}{h}\right) \qquad (2)$$

(2) 式中の Ψ に対しては (3) 式のように図-2 で例示した浮遊砂濃度分布の対数紙上での勾配 z をパラメーターとして図-3 の関係を示している。

$$C\propto\left(\frac{h-y}{y}\right)^z \qquad (3)$$

志村[3] は固体粒子の浮遊によって一次的には乱れの強さは変化しないと仮定し，平均流エネルギー平衡式および変動流エネルギー平衡式からカルマン定数の減少に対してそれぞれ (4) 式および (5) 式を導いた。

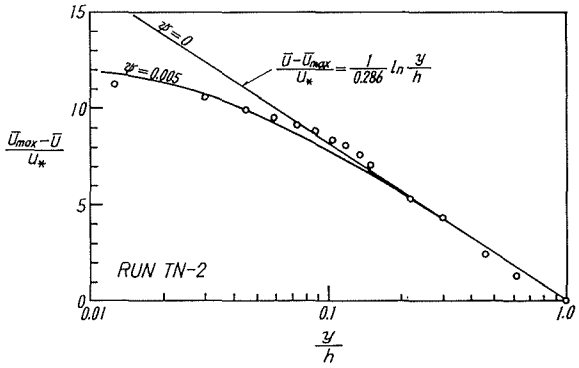

Fig. 1. Typical Velocity Distribution with Suspended Sediment

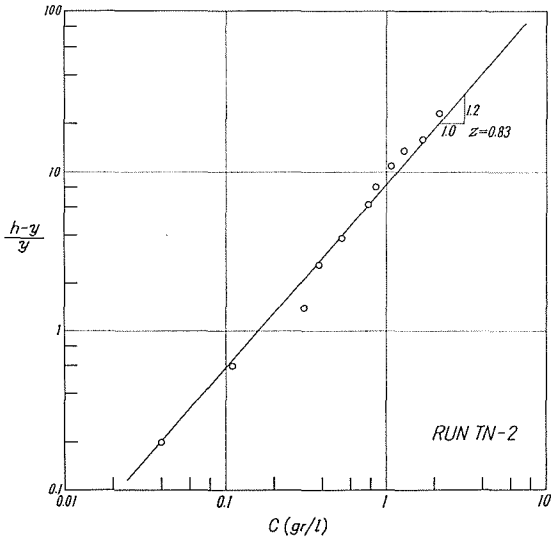

Fig. 2. Concentration Distribution of Suspended Sediment

$$\kappa'=\frac{A}{\dfrac{U}{u_*}-k_1} \qquad (4)$$

$$\frac{1}{\kappa'}=\frac{1}{\kappa(1-\alpha_1\lambda)}+\frac{\alpha(\gamma-1)w_0\bar{c}gh}{u_*^3A} \qquad (5)$$

ここに

$$A=\ln\beta'-\ln\left|\frac{\delta}{h}+\sqrt{\left(\frac{\delta}{h}\right)^2+\beta}\right|-\sqrt{1+\beta}+\sqrt{\left(\frac{\delta}{h}\right)^2+\beta}$$

$$\delta=k_1\frac{\bar{\nu}}{u_*}$$

$$k_1=10.5\quad\left(\text{但し}\ \frac{\gamma\bar{c}}{\kappa'^2}\left(\frac{l_cu_*}{\bar{\nu}}\right)^2<150\right)$$

$$k_1=16.5\quad\left(\text{但し}\ \frac{\gamma\bar{c}}{\kappa'^2}\left(\frac{l_cu_*}{\bar{\nu}}\right)^2>190\right)$$

$$\left(\frac{\bar{\nu}}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}}=1+\frac{2.5\bar{c}}{2(1-1.35\bar{c})}$$

(Eiler による)

$$\beta=\frac{\gamma\bar{c}}{\kappa'^2}\left(\frac{l_c}{h}\right)^2$$

$$\beta'=1+\sqrt{1+\beta}$$

$$l_c=15.8\,\bar{c}^{-\frac{1}{3}}d$$

(但し $\bar{c}<0.1$)

$$l_c=23.5\,\bar{c}^{-\frac{1}{6}}d$$

(但し $\bar{c}>0.1$)

$$\lambda=\left(\sqrt[3]{\frac{0.74}{\bar{c}}}-1\right)^{-1}$$

$$\alpha=5.3$$

$$\alpha_1=0.15$$

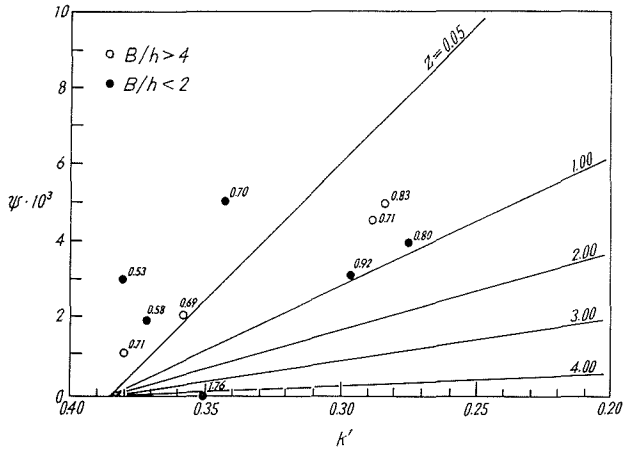

Fig. 3. Correlation between Ψ and κ' for Different Values of Z (after Ordonez-Ippen)

さらに浮遊物質を含む流れの流速分布に対して (6) 式の関係を導いた。

$$\frac{\bar{u}-u_{\max}}{u_*}=\frac{1}{\kappa'}\ln\left|\frac{\frac{y}{h}+\sqrt{\left(\frac{y}{h}\right)^2+\beta}}{1+\sqrt{1+\beta}}\right| \qquad (6)$$

(6) 式によれば水路底付近での流速の欠速度則からのはずれをも理論的に説明されている。

図-4 は図-1 で例示した実測値に (6) 式を適用した結果を示している。なお，志村は抵抗係数 f の浮遊砂の効果による減少について (7) 式を得ている。

$$\sqrt{\frac{2}{f}}=\frac{1}{\kappa'}\ln\frac{hu_*}{\nu}+c' \qquad (7)$$

$$c'=\frac{1}{\kappa'}\ln\beta'-\frac{1}{\kappa'}\ln\left|k_1+\sqrt{k_1^2+\frac{\gamma c}{\kappa'^2}\left(\frac{l_c u_*}{\bar{\nu}}\right)^2}\right|+k_1+\frac{B}{\kappa'}$$

$$B=\frac{1}{2}\beta'(\ln\beta'-1)-\frac{\beta}{2\beta'}(\ln\beta'+1)+\sqrt{\beta}-\ln\beta'$$

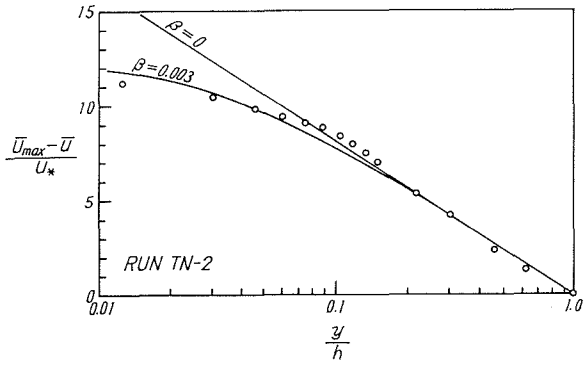

Fig. 4. Velocity Distribution with Suspended Sediment

(7) 式では非常に多くの量が複雑に関連しているので，抵抗係数の変化の状態を簡単に把握することは難しいが，いくつかの仮定から理論的に抵抗係数の減少が説明されている。

また，浮遊流砂量は最少限水面に近い 2 点の流速の値を知れば (5) 式によって算出することができることになる。

4. カルマン定数の変化

標題の定数の変化と言う表現はおかしいが，流速の対数分布則の係数の変化の意味である。

前章で略述した (1) 式，(4) 式および (5) 式による κ' の計算値と実測の欠速度則によるプロットから求めた κ' の値を比較してそれぞれ図-5，図-6，図-7 に示した。Ordonez-Ippen による結

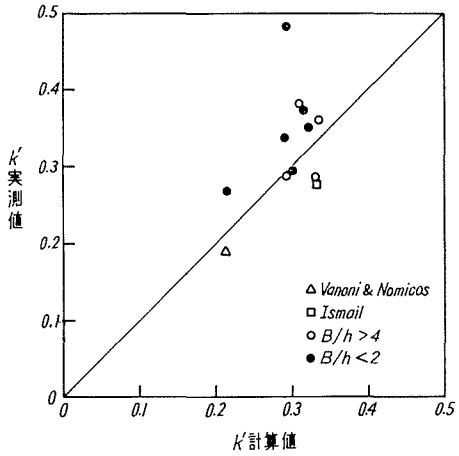

Fig. 5. Comparison between Measured κ' and Hino's Theory (Equation (1))

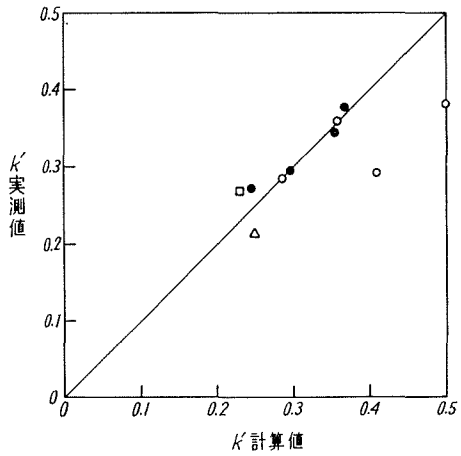

Fig. 6. Comparison between Measured κ' and Shimura's Theory (Equation (4))

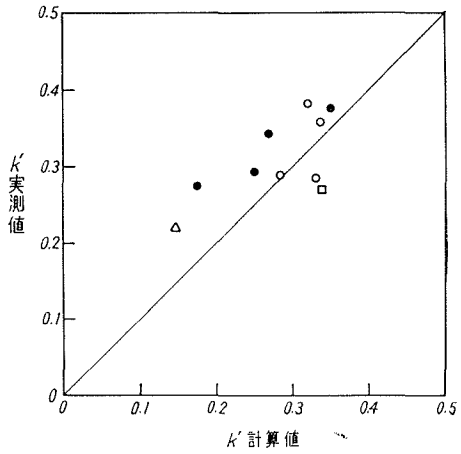

Fig. 7. Comparison between Measured κ' and Shimura's Theory (Equation (5))

果は図-3中に示してある。

なお(1)式，(4)式および(5)式の数値計算の際には次のような方法によった。

i) 水温が不明のものは $\nu=0.01\ \mathrm{cm^2/sec}$ とした。

ii) h には $u_{\max}$ を与える y の値を用いた。

iii) すべての例について $\gamma=2.65$ を用いた。

iv) 粒子の沈降速度は(8)式の鶴見公式を用いた。

$$w_0 = 171.5\,d\ (\mathrm{cm/sec})$$
$$(0.015\ \mathrm{cm} < d < 0.11\ \mathrm{cm}) \qquad (8)$$

v) 参考までに Vanoni-Nomicos の Run 1[4] および Ismail の Run 73[5] に対しても試算を行なったが，河床付近の実測値が報告されていないので志村式については $\beta=0.003$ とした。

図-3，図-5，図-6および図-7から判るように，いずれも現象を比較的良く説明しているようである。図-3において κ が比較的0.4に近いところでのはずれは，浮遊砂の濃度が比較的小さいためにその効果が顕著に現われていないことによるのであろう。

図-5，図-7図中で相関の良くない実測値●はいずれも $B/h<1.5$ のものであり，水路幅に比較して水深が比較的大きく，水路側壁の効果が大きい場合である。先に述べた理論はすべて二次元の流れについて展開されたものであり，$B/h=2$ が適用の限界と思われる

以上の結果から，志村の理論によれば，カルマン定数の減少および水路底附近における流速分布の変形の両面で実験結果と最も良く適合することが解る。

5. 浮遊砂を含む流れの乱れの測定

(1) 流速計

測定には Hot-film 流速計を用いた。流速検出部は図-8のように2本の Hot-film を交直さ

せ，双方共に流れに対して45°の角度を保つように支持してある。

流速計の出力電圧 E と流速 u との間には(9)式の関係を用いる。

$$u = aE + b \qquad (9)$$

この流速検定式は2本のそれぞれの検出部に対して設定する必要がある。

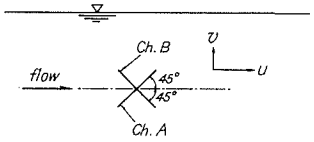

Fig. 8. Measurement of Turbulence by Two Sensors in X-Array Configuration

原因は定かではないがこの流速計が安定に動作するのは最大で約30分間であり，検定を含めて測定に要する時間は可能な限り短かくする必要がある。

最初に流水を十分大きな別の容器にとり，水の動きが止るのを待って流速が0の場合に流速計の出力電圧を0となるように調整する。次に双方の流速計からの最大出力を推定してその特性を一致させる。その後検出部を水流中に設定し測定を開始する。出力は磁気テープに記録し，$A-D$変換を施した後デジタル量の平均値に対してピトー管による流速の実測値との間で(9)式を適用する。

結果の一例を図-9に示すが，前述の調整にもかかわらず(9)式の b の値が0となることはまれであり，また双方の流速計の特性が同一となることは殆んどない。

双方の流速計の出力の和から流速の流れ方向成分(u)，差から垂直方向成分(v)が得られる。ところで図-9のように回帰直線からの双方の出力電圧の平均値の隔りは一般に等しくないため，2本の(9)式の差が0，すなわち $\bar{v}=0$ とならないのが普通である。これは事実に反するので，データー処理の段階で平均値が丁度回帰直線上の値となるように係数を乗じて補正を施した。

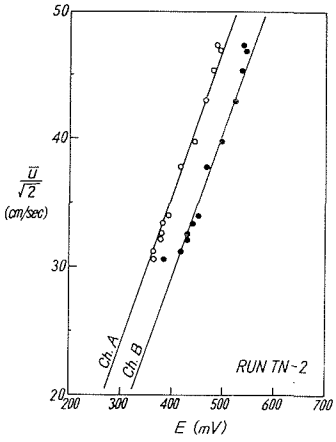

Fig. 9. Relation between Velocity and Output of Anemometer

なお，A-D 変換の際のサンプリング間隔は2つの系統それぞれ $\Delta t=0.01$ 秒である。2つの系統のサンプリング時間には約74～85 μ 秒の遅れがあるが Δt に対して約1/100以下であり非常に小さいので特に補正は施こしていない。記録の長さは各測定について50秒であり，資料数は各点5000個である。

(2) 変動流速の頻度分布

変動流速の頻度分布をヒストグラムで描いたところ流れ方向の速度成分 ($u=\bar{u}+u'$) もそれ

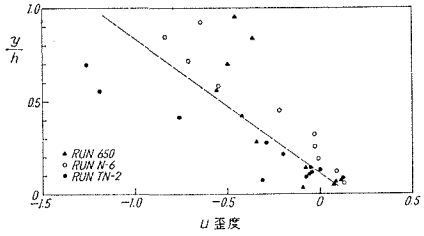

Fig. 10. Variation of Skewness Factor of Londitudinal Turbulent Velocity Component

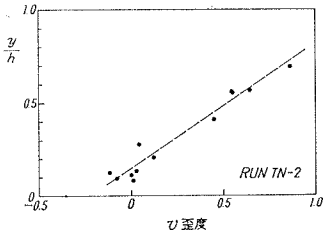

Fig. 11. Variation of Skewness Factor of Vertical Turbulent Velocity Component

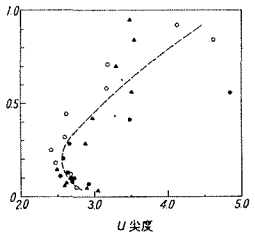

Fig. 12. Variation of Flatness Factor of Longitudinal Turbulent Velocity Component

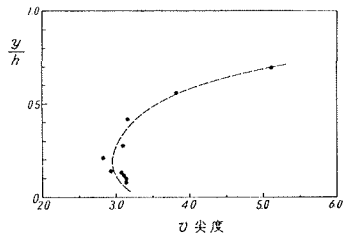

Fig. 13. Variation of Flatness Factor of Vertical Turbulent Velocity Component

に垂直な水深方向の成分 $(v=\bar{v}+v')$ も非常に正規分布に近い分布を示した。

図-10, 図-11 は u および v の歪度の分布である。図-12, 図-13 は尖度の分布を示している。

歪度については $y/h>0.3$ で u' は負に偏し，v' は正に偏している。すなわち継続時間は短かいが値としては非常に大きな $u'<0$, $v'>0$ の乱れが存在することを表わしている。これは底面付近から u の小さな流体塊が間けつ的に上方へ移動することによるものと考えられる。

(3) 乱れの強度

一般に浮遊砂を含む流れでは土砂を浮遊させるために乱れのエネルギーが消費されるから乱れの強さは減衰すると考えられる。

図-14 は摩擦速度との相対乱流強度の分布である。図中の曲線は清水中における測定の例である。今回の実測値と比較すると $y/h>0.5$ ではほぼ同程度であり，河床付近では今回の実測値がやや大きい結果となっている。

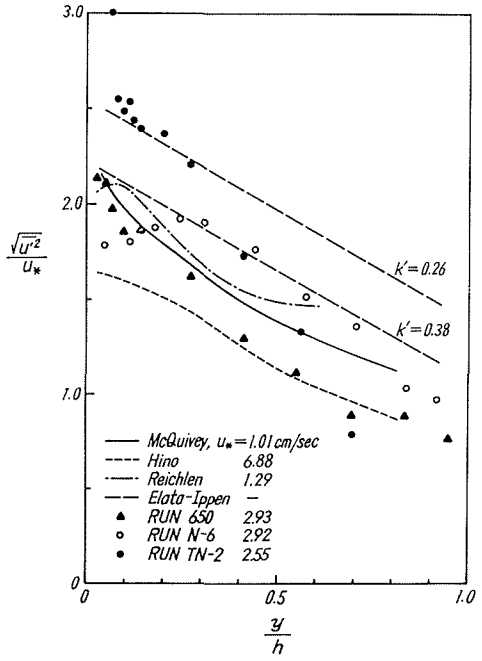

Fig. 14. Distribution of Relative Turbulent Intensity with Relative Depth

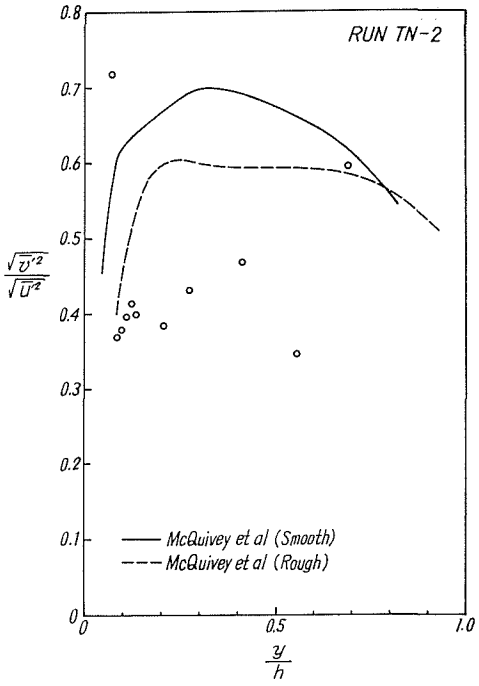

Fig. 15. Distribution of Turbulent Intensity with Relative Depth

図中の直線は Elata-Ippen[6] の中立浮遊粒子を含む流れの結果であり，水路底面近傍では比較的近い。

図-15 は流れ方向と垂直方向の乱れの強度の比を示したものである。図中の曲線は清水中で行なわれた結果であるが $y/h>0.1$ ではほぼ同程度の大きさでありそれより水面までは今回の測定値はやや小である。

図-16 は $\overline{u'v'}$ の分布を示したものである。流れが二次元等流の場合平均の Navier-Stokes の運動方程式は (10) 式となる。

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} = \rho g i (h-y) \qquad (10)$$

図-16 中の曲線は (10) 式によるものであり実測の $u'v'$ と非常に良い相関が見られる。

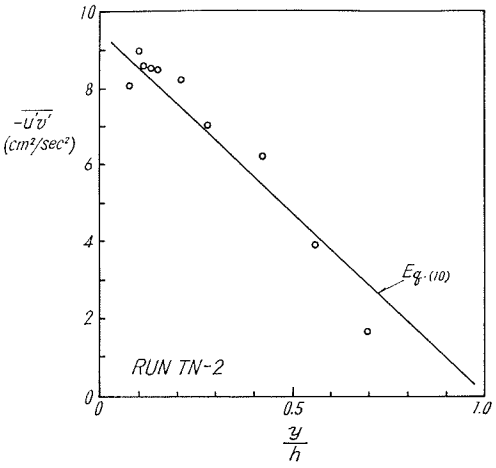

Fig. 16. Comparison of Theoretical and Measured Reynolds Stress

(4) 乱れのスケール

一般に土砂を含む流れではカルマン定数が減少する。このことは混合距離が短かくなることであり，渦のスケールは縮小することである。

乱流場は種々の大きさの渦から成立していると考えられるが，各々の渦が持つエネルギーの分布については後に述べるパワースペクトル密度関数によって知ることができる。

ここでは乱れの構造を表現する代表寸法として，平均渦径と最小渦径とについて検討を行なう。流れ方向のみを考えて各々の定義は次の通りである。

マクロスケール (平均渦径)

$$L_x = \bar{u}\, T_E = \bar{u} \int_0^\infty R(\tau)\, d\tau \qquad (11)$$

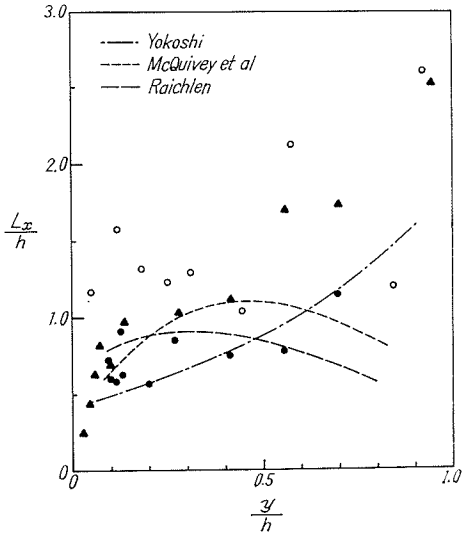

Fig. 17. Variation of Turbulent Macroscale with Relative Depth

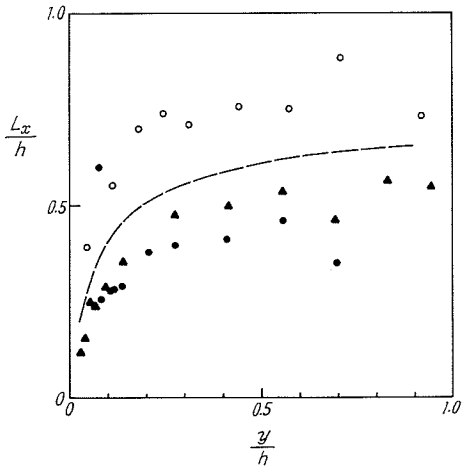

Fig. 18. Variation of Semi-Integral Scale with Relative Depth

セミ・インテグラルスケール（平均渦径）

$$L_x = 2\bar{u}\,[\tau]_{R(\tau)=0.6} \tag{12}$$

ミクロスケール（最小渦径）

$$\frac{1}{\lambda_x^2} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{1-R(x)}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{2\overline{u'^2}}\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} = \frac{1}{2\bar{u}^2\,\overline{u'^2}}\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^2} \tag{13}$$

または

$$\frac{1}{\lambda_x^2} = \frac{2\pi^2}{\bar{u}^2}\int_0^\infty n^2 F(n)\,dn \tag{14}$$

図-17は(11)式によるマクロスケールと相対水深の関係，図-18は(12)式によるセミ・インテグラルスケールを示している。

乱れのマクロスケールは $y/h<0.5$ では水路底からの距離とともに増大する傾向にある。$y/h>0.5$ ではばらつきが大きいが，一定またはやや増大するようであり，水面付近で減少する傾向は明確には見られない。

マクロスケールの大きさとしては図-17と図-18の丁度中間程度と推定され河床付近で $L_x \fallingdotseq 0.3\,h$ であり，$y/h=0.5$ 付近でほぼ $L_x=h$ となる。

図-19は(13)式による乱れのミクロスケールと相対水深の関係を示している。

乱れエネルギーの消散の平均渦径，ミクロスケールは $y/h<0.6$ では y と共に増大し $y/h>0.6$ ではほぼ一定と思われる。ミクロスケールの大きさは河床付近で $\lambda=0.1\,h$ であり，$y/h>0.6$ では $\lambda_x=0.2\,h$ 程度である。

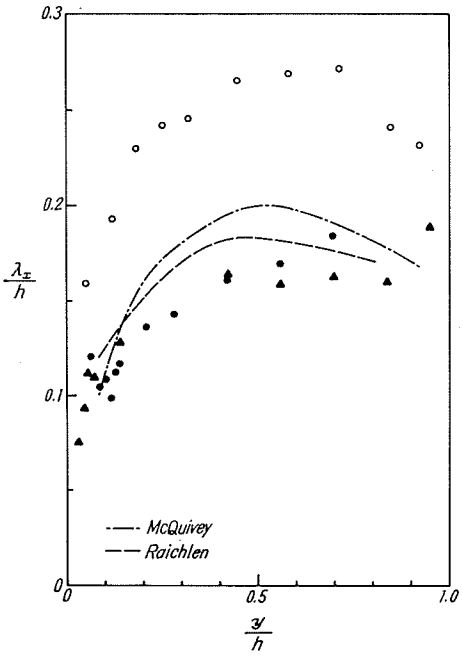

Fig. 19. Variation of Turbulent Microscale with Relative Depth

(5) 乱れのパワースペクトル

図-20は浮遊砂を含む流れ方向の速度成分 u' のパワースペクトルの例である。水路底に近づくほど，高波数成分の占める割合が増加することを示している。慣性領域を示す −5/3 乗則

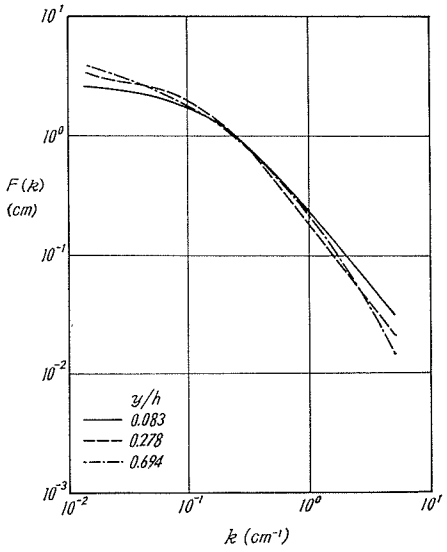

Fig. 20. Normalized Energy Spectra of u' at Three Relative Depths

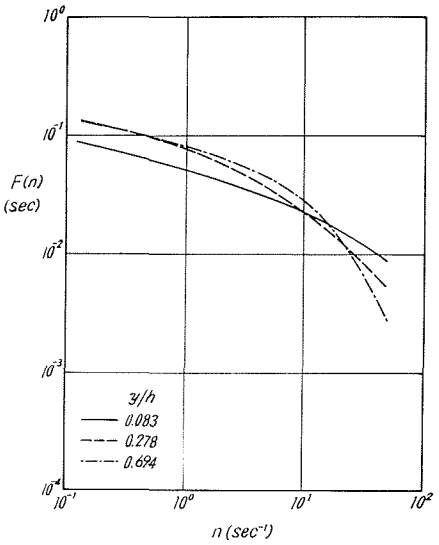

Fig. 21. Normalized Energy Spectra of v' at Three Relative Depths

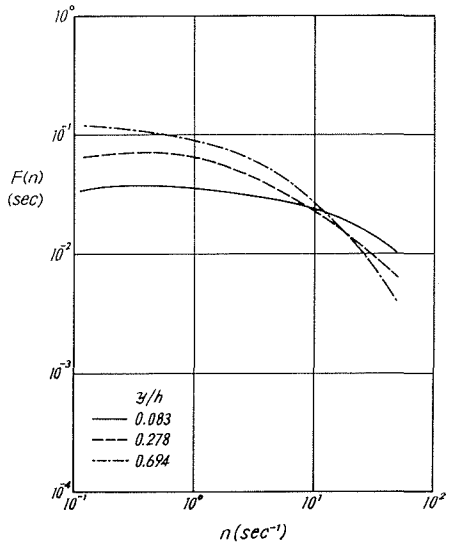

Fig. 22. Normalized Energy Spectra of $u'v'$ at Three Relative Depths

は $k \fallingdotseq 2$ cm で見られ，粘性領域を示す -7 乗則は観測されなかった。

図-21 は v' のパワースペクトルである。図-20 の u' に比較して分布が非常に一様分布に近いことがわかる。傾向としては相対水深が小（水路底）ほど高周波成分の占める割合が増加している。

図-22 は $(u'v')$ のパワースペクトルである。u' および v' について見出された傾向はさらに強く表われ，水路床付近ではほとんど白色雑音に近い分布を示している。

あとがき

流体運動の乱流構造の研究は従来大気乱流などを中心に進められて来ており多くの貴重な知識が得られている。しかし，水の流れについては測定の困難さのために乱れの実測資料は余り多くない。水流の乱流構造が問題となるような場合には，空気流に関して得られた知識から推測するのが普通であった。

開水路における水の流れは空気流とは異なって，自由水面という境界を有し，さらに水の流れは空気流に比較して重力および慣性力の効果が大きい。従がって開水路の水流にはそれ特有の乱流構造が存在することが予想される。

近年，計測技術の進歩により，次第にその特性が明らかとなって来たが未だ不明の点が多い。現段階ではできるだけ多くの実測値を集積する事が理論的解析と相まって必要不可欠であると考えられる。

本研究における実験と計算には当学科学生中山　隆君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

本研究は，文部省科学研究費（浮遊物質を含む流れの乱流機構に関する研究，代表者：中央大学服部昌太郎教授）の援助を受けた。また，本研究における計算には，北海道大学汎用シミレーター室の HIDAS-2000 および同大型計算機センターの FACOM-260-60 を使用した。

参考文献

1) 日野幹雄：固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化，土木学会論文集，第92号，1963.
2) Ippen, A. T.: A New Look at Sedimentation in Turbulent Streams, Jl. of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 58, No. 3, 1971.
3) 志村博康：浮遊砂のある流れの基礎的研究，山形大学紀要（農学），第4巻，第4号，1964.
4) Vanoni, V. A. and Nomicos, G. N.: Resistance Properties of Sediment-Laden Streams, Trans. of ASCE, Vol. 125, 1960.
5) Ismail, H. M: Turbulent Transfer Mechanism and Suspended Sediment in Closed Channels. Proc. of ASCE, Vol. 77, Separate No. 56, 1951.
6) Elata, C. and Ippen, A. T.: The Dynamics of Open Channel Flow with Suspensions of Neutrally Buoyant Particles, M. I. T. Hyd. Lab. Tech. Rep. No. 45, 1961.
7) 余越正一郎：河川の大規模の乱れ，京都大学防災研究所年報，第10号B，1967.

記号表

A: (5)式による
B: ① 水路の幅
② (1)式による
c: 浮遊砂の濃度
c_m: 平均重量濃度 (gr/l)
$\bar{c}$: 平均体積濃度
a, b: 定　数
E: 流速計の出力電圧
d_{50}: 50% 粒径
Fr: フルード数
$F(n)$: 正規化したスペクトル密度
f: 摩擦抵抗係数
g: 重力加速度
h: 水　深
i: エネルギー勾配
k: 波　数
k_1: (4)式による
L_x: 乱れのマクロスケール
n: 周波数
Q: 流　量
R: 径　深
Re: レイノルズ数
$R(\tau)$: 自己相関係数
T_E: インテグラルタイムスケール
Δt: 読み取り間隔
$\bar{U}$: 断面平均流速
u: x 方向の測点流速
$\bar{u}$: 局所平均流速
u': 測点変動流速
u_*: 摩擦速度
$\sqrt{\overline{u'^2}}$: 乱れの強度
v: y 方向の測点流速
$\bar{v}$: 局所平均流速
v': 測点変動流速
$\sqrt{\overline{v'^2}}$: 乱れの強度
w_0: 沈降速度
x: 流れ方向
y: ① 水深方向
② 河床からの高さ
z: (3)式による
α, α_1: (5)式による
β: (1), (5)式による
γ: 砂の比重
δ: ① 粘性底層の厚さ
② 乱流領域の速度分布式と粘性底層の速度分布式の交点
κ': 浮遊砂流のカルマン定数
κ: 0.4
λ: (5)式による
λ_x: 乱れのミクロスケール
ν: 動粘性係数
$\bar{\nu}$: 有効動粘性係数
ρ: 密　度
τ: 自己相関のずらし時間
Ψ: (5)式による

付表—1　Run　N-5

No.	y (cm)	$\bar{u}$ (cm/sec)	c (gr/ℓ)
1	0.14	32.5	
2	0.30		1.45
3	0.64	41.8	
4	1.14	45.3	0.14
5	1.64	47.5	
6	2.14	49.8	0.16
7	3.14	52.7	0.09
8	4.14	55.5	
9	5.14	57.8	0.08
10	6.14	59.1	
11	7.14	61.2	0.08
12	7.94	61.9	

付表—2　Run　650

No.	y (cm)	$\bar{u}$ (cm/sec)	c (gr/ℓ)
1	0.2	46.0	
2	0.3	48.5	2.63
3	0.4	50.1	
4	0.5	51.6	2.00
5	0.7	54.0	1.12
6	1.0	56.0	0.80
7	2.0	60.7	
8	3.0	64.2	0.34
9	4.0	67.0	
10	5.0	68.7	0.13
11	6.0	70.1	
12	6.8	70.7	0.11

付表—3　Run　TN-2

No.	y (cm)	$\bar{u}$ (cm/sec)	c (gr/ℓ)
1	0.1	38.4	
2	0.2	40.1	
3	0.3	41.5	2.12
4	0.4	42.5	1.60
5	0.5	43.3	1.30
6	0.6	44.2	1.08
7	0.7	45.4	
8	0.8	46.2	0.87
9	0.9	47.3	
10	1.0	48.1	0.74
11	1.5	53.5	0.53
12	2.0	56.3	0.38
13	2.5	58.6	

No.	y (cm)	$\bar{u}$ (cm/sec)	c (gr/ℓ)
14	3.0	60.8	0.21
15	3.5	62.6	
16	4.0	64.2	
17	4.5	65.4	0.11
18	5.0	66.4	
19	5.5	66.7	
20	6.0	66.9	0.03
21	6.65	66.7	

付表—4 Run TN-4

No.	y (cm)	$\bar{u}$ (cm/sec)	c (gr/ℓ)
1	0.1	43.6	
2	0.2	48.1	
3	0.3	50.5	1.22
4	0.4	52.3	0.99
5	0.5	53.6	0.84
6	0.6	54.5	0.76
7	0.7	55.5	
8	0.8	56.3	0.62
9	0.9	56.7	
10	1.0	57.1	0.48
11	1.5	58.7	0.36
12	2.0	60.7	0.26
13	2.5	62.1	
14	3.0	63.7	0.18
15	3.5	65.7	
16	4.0	67.2	0.14
17	4.5	68.5	
18	5.0	69.0	0.07
19	5.5	69.2	
20	6.0	69.2	0.02
21	6.5	69.2	

付表—5 Run N-6

No.	y (cm)	$\bar{u}$ (cm/sec)	c (gr/ℓ)
1	0.38	41.3	18.20
2	0.88	48.7	2.62
3	1.38	52.0	
4	1.88	55.0	1.28
5	2.38	57.4	
6	3.38	61.4	0.62
7	4.38	65.1	0.63
8	5.38	67.5	
9	6.38	68.9	0.34
10	6.98	69.7	