

# 米国における土砂水理学の現況

岩 垣 雄 一

## PRESENT STATUS OF SEDIMENT HYDRAULICS IN THE UNITED STATES OF AMERICA

by Dr. Eng. Yuichi IWAGAKI

### Synopsis

This description is based on the special lecture delivered by the author at the annual meeting of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, held on November 1, 1958. The subjects presented here are due to researches on sediment hydraulics at the Hydraulic Laboratory of Colorado State University where the author has stayed for fourteen months as an exchange research engineer, two meetings of Iowa and ASCE hydraulic conferences held in June and August, 1958 respectively, and recent publications. The contents of this lecture consists of the following items:

fall velocity of sediment, laboratory flume, roughness in alluvial channels, sediment transport problems, stable channel, meandering of alluvial channels and local scouring problems.

### 1. 緒 言

土砂水理学 (sediment hydraulics) は、流体中における sediment の運動、あるいは流体の運動によって sediment が輸送される現象、また、それによつてひきおこされる浸食や洗掘、堆積の問題を取扱う水理学の一部門であるといえよう。具体的には、土壌浸食、土砂流出、河床変動、蛇行、貯水池の埋没、水理構造物による局所洗掘、飛砂、海岸浸食などの諸問題がこの学問の範ちゆうにはいる。これらはいずれも河川災害や海岸災害を直接あるいは間接に誘発させる水理現象であつて、その本質を究明し、その特性を十分に把握することによつて、こうした災害を軽減し、また未前に防ぐことが可能となる。しかしながらこの土砂水理学は、従来系統だつた一つの学問分野として発展してきたものではなく、陸水学や河海工学に付随して個々に研究されてきたものである。ところが、最近にいたつて、この方面の体系化が試みられ、Fluvial Hydraulics として<sup>1)</sup>、あるいは応用水理学の一部分として<sup>2)3)</sup>、二、三の著書が世にあらわれ始めたことは誠に喜ばしいことである。

著者は昭和32年7月より約1年2ヶ月にわたり、米国コロラド州立大学において主として土砂水理学の研究に従事し帰国した。その間、機会をみて米国の主な政府関係および大学関係の水理実験所を訪問し、研究施設や研究状況を調べてまわつたのであるが、そのときの著者の見聞や最近の文献を参考とし、また米国で最も活発に sediment hydraulics の研究を行っているコロラド州立大学の研究事情を紹介して、この方面に興味ある方々の御参考にしたと思う。

### 2. Sediment の沈降速度

後述するように、sediment の輸送や砂澱の発生、洗掘の問題などを取扱う場合、砂粒の特性をあらわすものとして、粒径やその比重を用いるかわりに砂粒の沈降速度を採用する傾向が米国には強いようである。

これは1940年に Rouse<sup>4)</sup> が噴流による洗掘の実験結果を次元解析法でまとめるときに、sediment の特性として沈降速度を採用したことから、それ以来このような取扱いがアイオワ大学を中心に広まってきたように思われる。こうした理由から、砂粒の沈降速度を正確に知ることが必要となってくるわけである。砂粒が球状であれば問題はないが、実際の sediment はいろいろな形状をもっているため、どうしても砂粒の形が沈降速度に及ぼす効果を調べておかねばならない。Albertson ら<sup>5)6)</sup>は大きさや形の違った各種の砂粒に対し

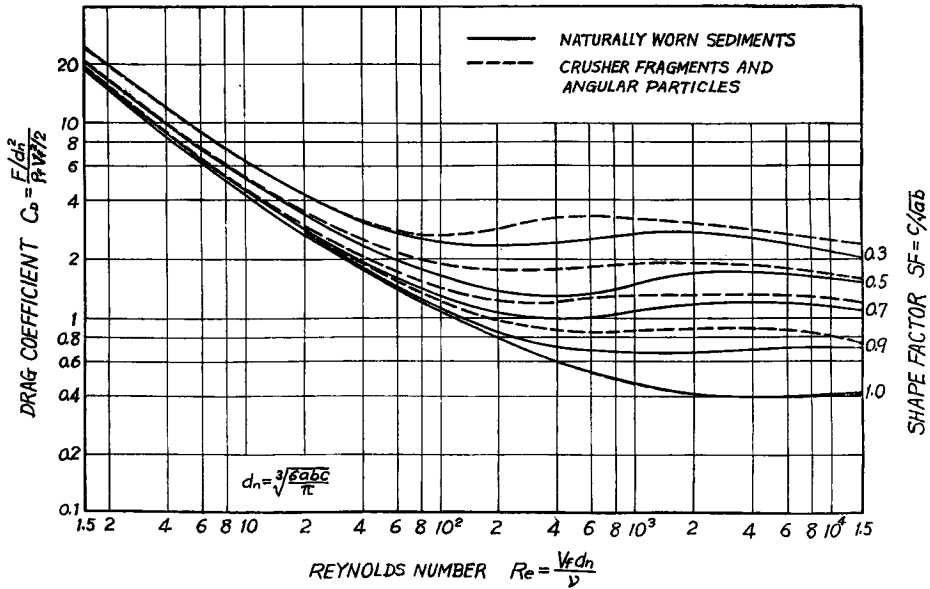


Fig. 1 Relationships between drag coefficient  $C_D$  and Reynolds Number  $Re$  for various sediment particles.

て沈降速度を測定し、Fig. 1 に示すように抵抗係数  $C_D$  に及ぼす砂粒形状の影響を明らかにした。砂粒の形状をあらわすパラメーターとしては shape factor と称する  $c/\sqrt{ab}$  の値を用いた。ここに  $a, b$  および  $c$  は、砂粒子の表面に交わつてできる直交三軸の長さのうち、それぞれ最長、中間および最短のものである。また  $C_D$  および  $Re$  を定義するときに必要な粒径としては、nominal diameter (与えられた粒子と同体積の球の直径  $d_n$ ) を用いている。もちろん Fig. 1 に示される曲線は散乱する実験値の平均を与えるもので、形状の効果が shape factor のみで十分あらわされるかどうかは疑問である。

とにかく、このような図表を用いて沈降速度を算出することができるが、ある混合砂の sample をとつてきて、その平均の沈降速度を求めたい場合には、一粒一粒この図から計算していたのではたまたまないし、また砂粒径についての篩分曲線から間接的に求めても、sieve diameter と nominal diameter とは一般に一致しないので、正確な値を知ることはできない。従つて、どうしても直接沈降速度についての累加曲線を求め、それから平均の沈降速度を見つけてくるが必要となつてくる。こうしたことから、1956年 U.S. Geological Survey によつて Visual Accumulation Tube Method という方法が考案され<sup>7)</sup>、現在米国の水理実験所において広く使用されている。

### 3. 実験水路

流砂や粗度の実験あるいは水理構造物による洗掘などの実験を行うには実験水路が必要であることはい

までもない。こうした流砂をとまなう実験水路として米国では recirculating system の flume を使用しているところが多く、このような水路では上流から sand feeder など砂を補給する必要がない。すなわち、流れ去つた砂はふたたび水とともに上流から流入してくるので、流量が一定の定常状態の実験を行うのに非常に便利である。最近では、このような水路を使わない実験データは、なかなか信用してくれない状態になつてきている。Fig. 2 はその一例としてコロラド州立大学における巾 8ft、長さ 150ft、深さ 2ft の可動勾

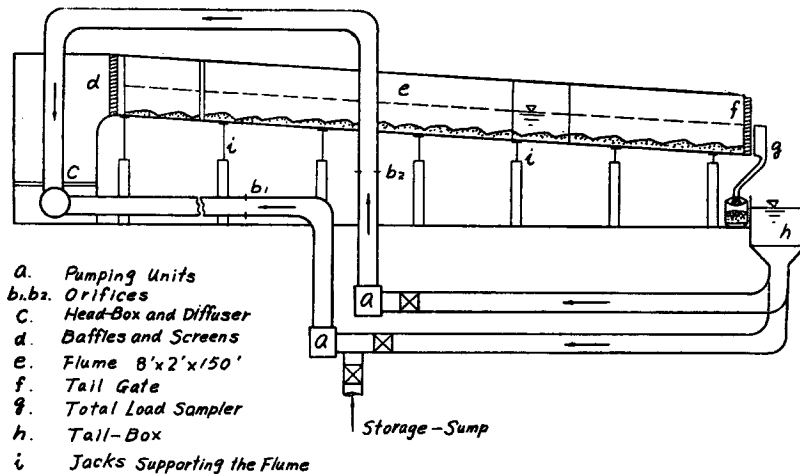


Fig. 2 Schematic drawing of the recirculating type flume in Colorado State University

配水路をスケッチしたもので、最大流量は約 21 cfs である。その他、カリフォルニア工科大学に、巾、長さおよび深さがそれぞれ 10.5in と 33.5in; 40ft と 60ft; 10in と 12in の 2 基の recirculating type の水路があり<sup>8)</sup>、またアイオワ大学にも巾 36in、長さ 90ft、深さ 18in の同 type の水路があつて<sup>9)</sup>、いずれも流砂の実験が行われた。わが国でも最初のものと思われるが、防災研究所において現在建設中である。

#### 4. 流砂水路における粗度

掃流力が限界掃流力に達し、水底の sediment が移動を始めるとやがて砂漣が発達し、急に粗度が大きくなることは 1914 年 Gilbert が詳細な実験を行つて以来みとめられてきたことである。これからさらに掃流力を増加させていくと、かなり systematic な綺麗な pattern を示す ripple とよばれるものから、不規則な凹凸や pattern を示す dune とよばれるものに移り、なおも掃流力を増大させると、dune から平滑な水底状態である transition とよばれる regime になり、さらに antidune と称される dune が上流側へさかのぼっていくような状態に変わる。こうした水路床の状態変化に対応して粗度も変化するのであることは容易に想像される。Fig. 3 は U.S. Geological Survey の Simons および Richardson<sup>10)</sup> が、Fig. 2 に示すコロラド州立大学の水路を用い、中央粒径が 0.446 mm の砂について行つた実験結果の一例を示したもので、平均流速と摩擦速度の比  $V/V_*$  ( $\sqrt{g}$  をかけると Chezy の constant になる) と無次元化した掃流力との関係をあらわす。この図からわかるように、砂が移動を始めると plane bed に ripple が発生し、急に  $V/V_*$  の値が減少する。掃流力を増して行くと、あるところで急に  $V/V_*$  の値が増大し、水底の regime は dune に移る。さらに掃流力を増加させると  $V/V_*$  の値はふたたび減少をはじめ、またある掃流力の値から逆に  $V/V_*$  の値が急増するが、それと相前後して regime は transition の状態に移り、 $V/V_*$  の値は

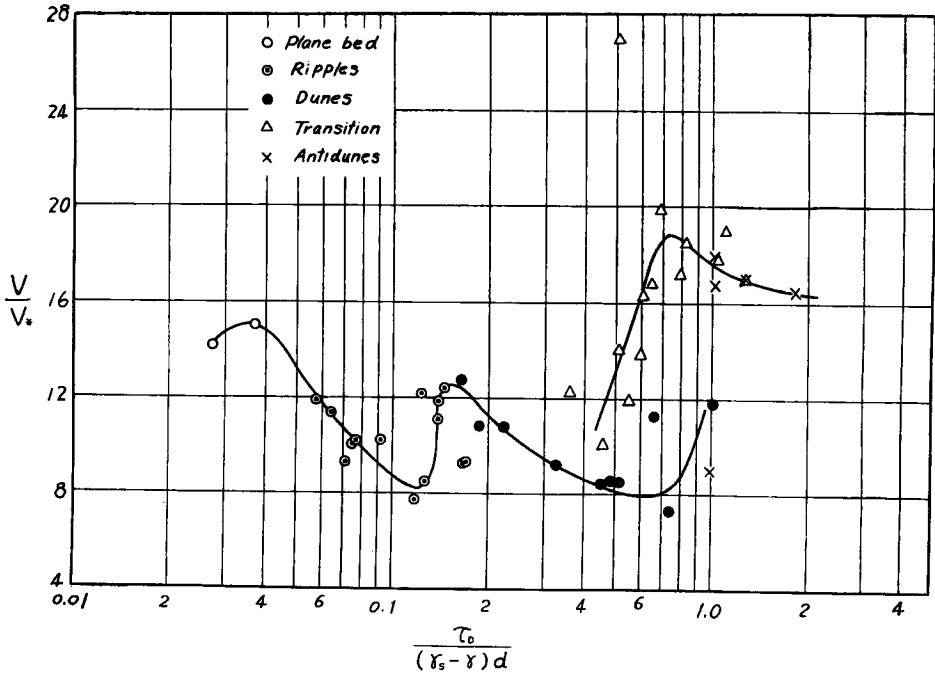


Fig. 3 Variation of the Chezy's constant with the dimensionless bottom shear stress

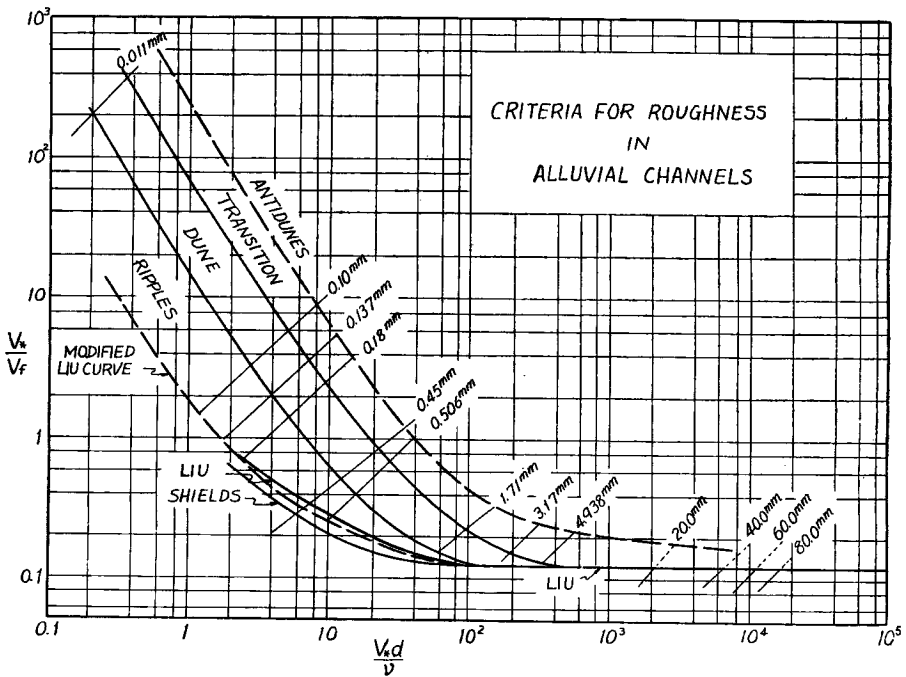


Fig. 4 Criteria for roughness in alluvial channels

急に増大し始め、砂が動かないときの値より大きい  $V/V_*$  をもつにいたる。さらに掃流力を増せば regime は antidune に移行し、 $V/V_*$  の値はほぼ一定値をとるようになる。このように bed の状態によつて粗度が大きく変動し、複雑な変化をするので、この問題を取扱う前に、どのような条件のときいかなる bed の状態になるかを知る必要がおこってくる。

Fig. 4 は Liu<sup>11)</sup> による ripple の発生限界に加えて Albertson, Simons および Richardson<sup>12)</sup> によつて提案された各 regime の限界をあらわした図であつて、縦軸に摩擦速度と沈降速度の比  $V_*/V_f$ 、横軸に  $V_*d/\nu$  がとつてあり、粒径がパラメーターとなつている。この図から粒径  $d$ 、動粘性係数  $\nu$ 、摩擦速度および沈降速度がわかると、bed の状態がどの regime に属するかが見出されるわけであるが、しかし transition とか antidune あたりになるとフルード数の影響が入ってくるべきであり、このような表示法では不十分であるという批判があり<sup>13)</sup>、やがてこのような表示法は改良されるか姿を消すことであろう。

移動床水路の粗度については、近年いろいろ研究され各種の表示法が提案されてきているが、前述した bed のすべての regime に対して適格にその roughness をあらわすことができるようなものはない<sup>14)</sup>。最近 Liu および Hwang<sup>15)</sup> はこの問題を、これまで発表された粒径が 0.011 mm から 77.1 mm に及ぶ数多くの実験資料を集め、次元解析法によつて研究した。

彼らは7つの無次元量

$$\frac{V_*d}{\nu}, \frac{V}{V_*}, \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d}, \frac{R_b}{d}, F_r, \frac{V_f d}{\nu} \text{ および } S$$

を考え、そのうち5つの無次元量を組合せて作った

$$K = \frac{(V/V_*)\{\tau_0/(\gamma_s - \gamma)d\}}{(R_b/d)^m F_r^n} S^a \dots\dots\dots(1)$$

という量と  $V_*d/\nu$  との関係が

$$\frac{V_*d}{\nu} = f\left(\frac{V_f d}{\nu}\right) \cdot K^a \dots\dots\dots(2)$$

という形であらわされることを足がかりとして、砂は移動するが平滑な水底であるという plane bed と dune (ripple もこの中に含ませる) の2つの regime に対して別々に取扱つていつたのである。ここに、

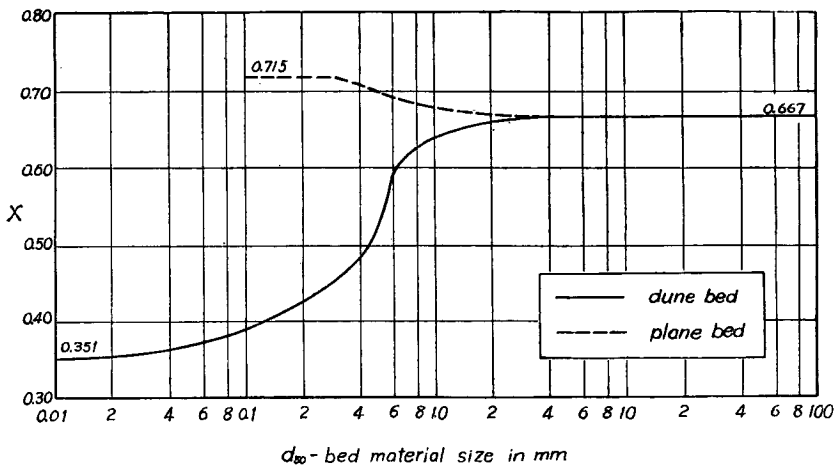


Fig. 5 Variation of the exponents of the hydraulic radius with sediment size for plane and dune beds

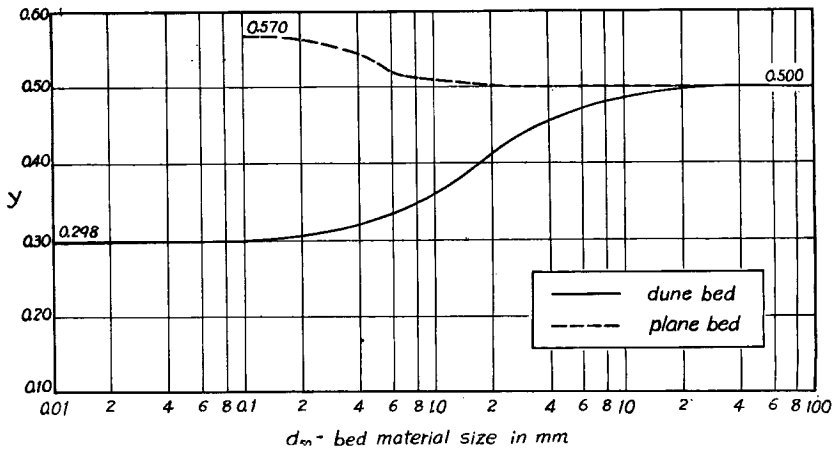


Fig. 6. Variation of the exponents of the slope with sediment size for plane and dune beds

$R_b$  は側壁の影響を除いた bed のみに対する径深,  $F_r$  はフルード数,  $S$  は勾配である。  $F_r$  および  $S$  のべき  $n$  および  $\lambda$  は粒径  $d$  のある関数であたえられるので, (2) 式を分解して

$$V = C R_b^x S^y \dots \dots \dots (3)$$

という形にしてしまうことができ, 砂粒および水の単位重量  $\gamma_s$  および  $\gamma$ , さらに動粘性係数  $\nu$  と重力加速度  $g$  の値を与えれば, (3) 式の  $C, x$  および  $y$  は  $d$  のみの関数となる。 Fig. 5 および Fig. 6 は, それぞれ  $x$  および  $y$  と  $d$  との関係を示したもので,  $x$  の値は粒径が大きくなると plane bed, dune のいずれの場合も 0.667 という Manning type のときの値に一致し,  $y$  の値も同様に粒径が大となれば Chezy や Manning type の 0.5 という値になることがわかる。 Fig. 7 は (3) 式の  $C$  と粒径との関係であつて, 粒径が大きくなると dune が消滅して plane bed の曲線と一致するようになること示し, dune の場合には plane bed のときにくらべて, いち

じるしく  $C$  の値が小さい, すなわち粗度が大きいことをあらわしている。これらの図と (3) 式によつて求められる計算値と測定値とを比較した結果によると, 両者の差が 10% 以内に入るものが dune bed の場合全体の 70%, plane bed のとき 83%, 20% 以内に入るものがそれぞれ 99% および 100% となつており, 実用的にはかなり満足すべきものと思われるが, 実際の河川や水路に, このような実験室内における資料を用いて作られた結果を, そのまま拡張使

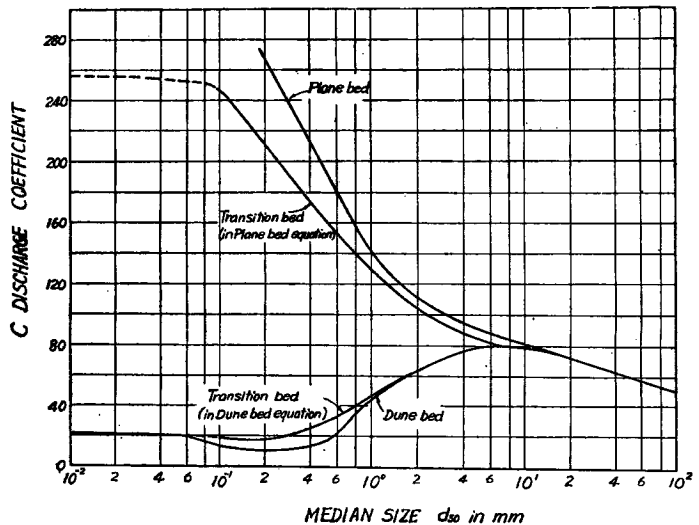


Fig. 7 Variation of the discharge coefficients with sediment size for plane and dune beds (ft-sec unit)

用してよいかどうかは問題である。

5. 土砂の輸送

現在、浮遊流砂も掃流砂をも含めた全流砂量を見積る最も解析的な方法は、Einsteinの方法であろう。しかしこの方法は実際の流砂量より過大に見積られる傾向があり、またその算出過程もかなり複雑である。こうした観点から、米国では全流砂量を浮遊と掃流とに分けて見積ることをせず、それを直接に経験式あるいは図によつて簡単に求める方法はないものであろうかという要求が強い。それに答える意味であろうか、最近アイオワ大学からミシガン大学にかつた Laursen は、経験的直観的につぎのような関係を提案した<sup>9)</sup>。すなわち、

$$\left(\frac{d}{h}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau_0'}{\tau_0} - 1\right) = f\left(\frac{V_*}{V_f}\right) \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\bar{c}$  は平均濃度で重量百分率、 $h$  は水深、 $\tau_0'$  は

$$\tau_0' = \frac{V^2}{30} \frac{d^{1/3}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots(5)$$

そして関数  $f(V_*/V_f)$  は Fig. 8 であらわされるものである。図中の破線を含む直線は掃流砂量をあらわし、実線が全流砂量に対するものであるが、粒径 0.011 mm から 4.08 mm までの実験値は非常に散乱している。いちおう前述の表示法の簡易化の目的は達せられているが、その精度が非常に悪いことは彼の論文に載せられている計算値と測定値との比較の図から明らかである。また実際の河川や水路における実測値と計算値との比較においても、かなり一致する場合もある一方、著るしく合わない場合があり、このような表示法が十分でないことを示している。さらに、 $\tau_0'$  の算出のとき平均流速  $V$  を与えることが必要であり、これをあらかじめ何らかの方法で見出しおかねばならないことから、(4) および (5) 式が完全な流砂量公式であるとはいえない。

流砂量に関するもう一つの研究傾向は、これまで提案されてきた各種の公式を、実際河川における実測値にあてはめて、どのような公式がよく適合するかを検討することである。Stall, Rupani および Kandaswamy<sup>16)</sup> はイリノイ州の Money Creek から Bloomington 湖に流入して堆積した土砂量と、Einstein の計算法、Schoklitsch の掃流砂公式および DuBoys の公式の3つの計算法や公式から流砂量を計算して求められる堆積土砂量とを比

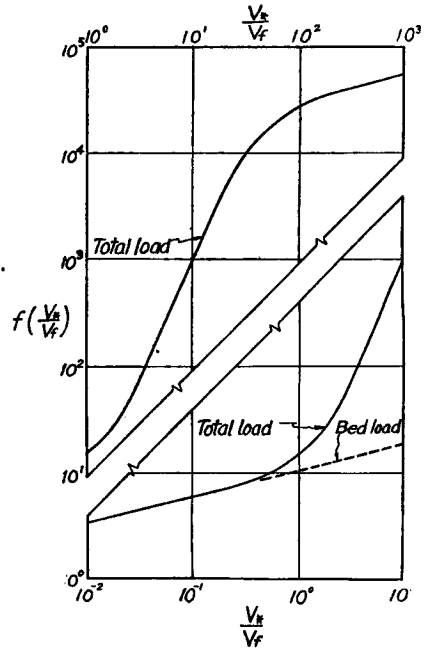


Fig. 8 Correlation of mean concentration with hydraulic and sediment characteristics

Table 1 Bed load material deposited in Lake Bloomington compared to computed bed material movement in Money creek (ton)

Periods	1st Period (Dec. 1929-Aug. 1948)	2nd Period (Aug. 1948-Aug. 1952)	3rd Period (Aug. 1952-July 1955)	Total (Dec. 1929-July 1955)
Measured	48 176	10 725	1 626	60 527
Einstein	139 045	42 774	14 658	196 477
Schoklitsch	55 981	17 224	5 890	79 065
DuBoys	372 745	115 798	41 401	529 944

較して Table 1 のような結果をえた。

この表から 25.6 年間の全堆積土砂量についていえば、Einstein の方法によるものは 225% も実測値より大きく、Schoklitsch 公式は 31%、DuBoys 公式は実に 776% も大きい値を与えていることがわかる。このように公式によつて求められる流砂量に大きい差違があるので、われわれはいつたいどの公式を用いたらよいかのかわけがわからなくなる。従つて、実河川の流砂量を推定するにあつては、できるだけ実測を行つてその河川に適した公式を見出すか、従来の公式を修正して用いる以外に現在のところでは方法がないのであろう。

## 6. 安 定 水 路

Stable channel について、従来いろいろ研究がなされてきたが、水理学的な根拠のある公式や図表はまだないようである。しかし実際に流砂をとまらう灌漑用 canal や creek を作ろうとする場合、何かもともになる資料が必要である。こういつたことから、最近 U.S. Geological Survey の Simons は regime method という方法で、とにかくこれまでの多くの canal や creek の実測資料を用いてプロットし、何か統一した傾向を見出し、それをもとにして計画をしようという方針で、つぎのような結果を得ている<sup>17)</sup>。

(1) 潤辺  $P$  と流量  $Q$  の関係

$$P = 2.51 Q^{0.512} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (6)$$

これは sand bed で cohesive banks の場合に対するものである。

(2) 径深  $R$  と  $Q$  の関係

$$R = a Q^{0.361} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (7)$$

sand bed で cohesive banks のときは  $a=0.43$ , coarse non-cohesive material のときは  $a=0.247$  をとる。

(3) 流積  $A$  と  $Q$  の関係

$$A = b Q^{0.873} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (8)$$

sand bed あるいは cohesive bed で cohesive banks のとき  $b=1.076$ , coarse non-cohesive material のとき  $b=0.45$  をとる。

(4) 流速  $V$  と  $Q, R$  および勾配  $S$  の関係

Coarse non-cohesive banks と beds に対しては

$$V = 1.68 Q^{0.182} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (9)$$

が適用され、また bank も bed も sand のときには、つぎの式が用いられる。

$$V = 0.72 Q^{0.156} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (10)$$

流量の代りに径深と勾配であらわせれば、coarse non-cohesive に対して

$$V = 17.9 (R^2 S)^{0.286} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (11)$$

sand beds で cohesive banks のとき

$$V = 16.0 (R^2 S)^{1/3} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (12)$$

また bed も bank も sand のとき

$$V = 13.86 (R^2 S)^{1/3} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (13)$$

となる。なお、

$$V = c (R^2 S)^{0.18} - 1 \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (14)$$

の形で表わせば実測値がかなりよくまとまることを述べている。ここに、 $c$  は sand beds で cohesive banks のとき 9.3, bed も bank も sand のとき 8.55 という値をとる。

(5) 勾配  $S$  と  $Q$  の関係

1936年に Bose と Punjab 灌漑研究所の人たちが提案した

$$S \times 10^3 = 2.09 \frac{Q^{0.83}}{Q^{0.21}} \quad (\text{ft-sec 単位}) \dots\dots\dots (15)$$



の関係式を検討した結果、散乱はかなり著しいが、 $S$  と  $d^{0.83}/Q^{0.21}$  との間にある相関があることが見出された。ここに、 $d$  は水底にあらわれている砂の平均粒径である。

以上の関係は Simons & Bender data, Punjab data, Sind data および U.S. Bureau of Reclamation data にもとづいて見出された結果であつて、用いられた資料の数(水路の数)はそれぞれ 24, 42, 28 および 18, 合計 112 に及んでいる。

## 7. 直線水路における二次流

最近、直線水路内に発生する二次流の研究が米国で始められている。Powell は Rocky Mountain Hydraulic Laboratory の三角形断面の開水路内の二次流の観測を行い、水底の人工粗度との関係を見出そうとし、また Albertson は前述の Simons & Bender data を用い、水路における浮遊砂の垂直分布と横断面にそつ水底のせん断応力の分布から、二次流の存在を実証しようと試みた。また Einstein および Li は vorticity が存在しない開水路の流れはあり得ない、という逆説的な方法で、なぜ二次流が発生するかを理論的に究明していつた。いずれも未発表なので、詳しい紹介をすることをさしひかえるが、Einstein および Li の論文の結論を要約すればつぎのようである。

- (1) 流れが層流で直線一様流の場合には二次流は発達しない。
- (2) 乱流の場合には

$$\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v^2} - \overline{w^2}) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\overline{v'w'}) - \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\overline{v'w'}) \dots \dots \dots (16)$$

の右辺各項の値が0でなければ、二次流は発達するであろう。これは等流速線が平行でない摩擦のある壁面近くでとくにおこるものと期待される。

このように彼らの二次流発生根拠は、水流の乱れにあるというわけであるが、この点については著者も彼らの論文を知るまえに考えていたことであり同感である。ただ、vorticity を取扱うかぎり、二次流の速度や 'pattern' を知ることができないということがいえる。

## 8. 蛇行の発達

直線水路に発生する二次流が原因かどうかまだはつきりしないが、移動床水路には蛇行が発生する。蛇行の問題については、従来多くの人びとが研究を行つてきたのであるが、まだ定量的に取扱う段階にはきていないようである。蛇行の実験は京大防災研究所でも、矢野教授、足立助教授らによつて数年来実施されているが、米国においてかなり系統的に行われたのは、U.S. Waterways Experiment Station<sup>18)</sup>によるものであろう。最近コロラド大学でも、三角形断面(底勾配は両辺とも1/40)の移動床水路に水を流して蛇行を発生させ、各種の資料をとつたが、この資料を用いて Nagabhushanaiah は Albertson および著者の指導のもとに蛇行巾の発達について次元解析を行つた<sup>19)</sup>。その結果を示すと Fig. 9 のようである。蛇行は砂の輸送に関連があり、また砂の輸送は水底にはたらくせん断応力と密接な関係があることを考慮して、三角形断面の場合には無次元量  $Qt/d^3$  は勾配  $S$  と  $QS^2t/d^3$  の形で結びつくべきであるとした。さらに、この実験結果では蛇行の発生限界は限界掃流力と一致するという事実にもとづいて、Fig. 9 の横軸としてとつた無次元量をきめたわけである。縦軸としては蛇行巾  $M_w$  と砂の粒径  $d$  の比がとつてある。プロットした結果はかなり散乱しているが、整一な形状の蛇行がなかなか得られにくいという点を考えれば、この程度で満足されるべきであるかも知れない。著者は彎曲流の性質を利用して、蛇行の発達を理論的に考察し、別の表示法を提案したが、実験値をこの表示法でプロットした結果は Fig. 9 よりかなり散乱が少ないようである。著者の理論は Nagabhushanaiah の master 論文の付録として集録されており、未発表なのでここでは述べない。Fig. 9 で示されるように、次元解析の結果ではつぎの実験式が得られる。

$$\frac{M_w}{d} = 0.76 \left[ \left( \frac{QS^2}{d^3} - \frac{Q_c S_c^2}{d^3} \right) t \right]^{0.46} \dots \dots \dots (17)$$

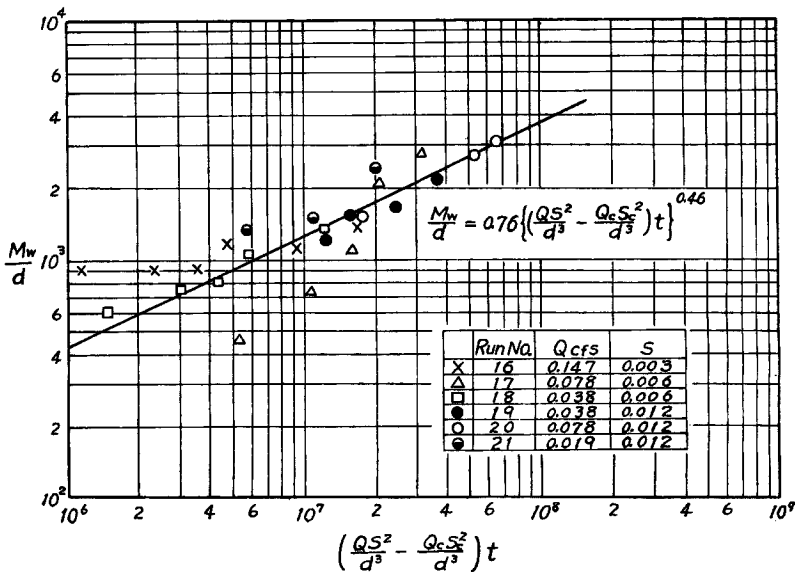


Fig. 9 Variation of meander width with time by the method of dimensional analysis

この式は時間とともに蛇行巾が増大し、発達していく関係式であつて、最終状態あるいは極限状態すなわち、これ以上蛇行が発達しない最大の蛇行巾は(17)式から求めることができないが、流量や勾配が大きくて、 $(QS^2)$ が蛇行が発生し始めるとき(この実験では砂が動き始めるときに一致する)の $(Q_c S_c^2)$ の値よりはるかに大きい場合には、蛇行巾は $Q^{0.46}$ に比例し、また $S^{0.92}$ に比例することが(17)式よりわかる。これらの関係は三角形断面に対して適用されるべきものであるが、Inglisが多数の河川の実測資料から得た経験式では、蛇行巾は流量の $1/3$ 乗に比例しており<sup>20)</sup>、上の関係と比較して非常に興味深いことである。

### 9. 噴流による洗掘

つぎに局所洗掘(local scour)の1つである噴流による洗掘について述べてみたい。

米国における噴流洗掘の研究は、1940年にRouse<sup>4)</sup>によつて始められたとみてよい。彼の実験は二次元でかつ噴流の出口が水中にあつて垂直の場合である。そして砂粒径の標準偏差は同一であるが平均径が異なる三種類の砂を用いて、洗掘深さの時間的変化を測定した。実験結果をまとめるにあつて次元解析法を利用したが、その結果洗掘深さと噴流の巾との比 $Z_s/B_0$ と $\log V_{jt}/B_0$ とが噴流の速度と沈降速度の比 $W_0/V_f$ をパラメーターとして直線的関係にあることを見出した。さらに噴流の衝突によつて両側へ輸送される砂の運動形式の相違と、 $Z_s/B_0 \sim \log V_{jt}/B_0$ 関係の差違とから、この洗掘の進行機構に2つの異つた形式があることを見つけ、Rouseはこれらをmaximum jet deflectionおよびminimum jet deflectionとなづけた。

その後アイオワ大学でLaursen<sup>21)</sup>によつて二次元水平噴流(実際は噴流口が少し下をむいている)による洗掘の実験が行われ、さらにコロラド大学ではDoddiah<sup>22)</sup>によつて水面上から落下する三次元垂直噴流による洗掘実験が、またThoms<sup>23)</sup>によつて二次元自由越流水による洗掘の実験が実施された<sup>24)</sup>。これらの実験結果はいずれもRouseの解析法にならつて整理されている。すなわち、砂粒の特性として大きさや密度を用いず、その沈降速度を用いたこと、洗掘深さの時間的変化は時間の対数をとることによつて直線関係となることである。

著者はこうした噴流による洗掘の問題を力学的に解析することを試み、噴流の拡散特性と噴流の衝突、そ

れにともなう境界層の発達を考慮し、流砂の連続式を導入することによつて、理論を展開した<sup>25)</sup>。その結論を要約すればつぎのようである。

(1) 洗掘深さの時間的変化は噴流の拡散特性によつて支配される。すなわち、噴流の出口が水中にある場合には、洗掘深さは時間に関する指数法則によつて変化し、一方噴流口が水中でなく水面上にあるときは、洗掘深さは対数法則に従つて変化する。

(2) 洗掘深さおよび時間に関する無次元量はそれぞれ

$$\frac{Z_s}{\sqrt{A_j} \sin \theta} \quad \text{および} \quad \frac{d}{\sqrt{A_j} \sin \theta} \frac{W_0 t}{b}$$

であらわされる(記号は Fig. 10 および 11 を参照)。

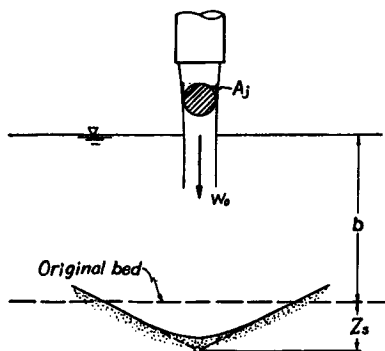


Fig. 10 Schematic drawing for a characteristic depth of scour in the case of the vertical jet issuing from a non-submerged outlet

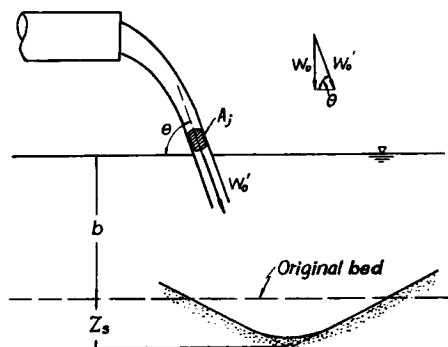


Fig. 11 Schematic drawing for a characteristic depth of scour in the case of the inclined jet issuing from a non-submerged outlet

二次元の場合は  $\sqrt{A_j}$  の代りに巾  $B_0$  をとればよい。

(3) 砂粒の特性は  $W_0^2 / \{(\sigma/\rho) - 1\}gd$  によつてあらわされる。

(4) 静水の深さ、あるいは噴流口が水中にあるときは、それより砂面までの距離は  $b/\sqrt{A_j} \sin \theta$  によつて無次元化される。

(5) 噴流の衝突角度  $\theta$  は、噴流口が水面上にある場合は洗掘深さに対して重要な要素である。

この理論解析の結果は前述の Doddiah によつて行われた Fig. 10 に示す実験や Smith<sup>26)</sup> によつて実施された Fig. 11 に示すような水平に張り出した円管のカルバートから落下する水による洗掘実験の結果を用いて実証がなされた。Smith は洗掘を防止する方法として、ある程度洗掘された孔の一部に捨石を置くという立場から、洗掘防止に効果的な捨石の大きさ、粒径分布、置く位置などを調べた。これらの問題は道路の築堤の際、雨水の流出にともなつておこる流出水排除に関係するもので、公共道路局の依頼研究として現在なお研究が続けられている。

## 10. 橋脚および橋台による洗掘

この問題については、米国では1948年頃から主としてアイオワ大学で研究がなされてきた<sup>21),27),28),29)</sup>。橋脚による洗掘の問題は Laursen の行つた実験結果を要約すれば、洗掘深さ  $d_s$  は等流水深  $h_n$  によつて変化するが、流速の影響はほとんどみとめられないということである。こうした事実にもとづいて、彼は洗掘深さの無次元量として橋脚の巾あるいは直径との比  $d_s/b$  をとり、これが等流水深と橋脚の巾の比  $h_n/b$  と

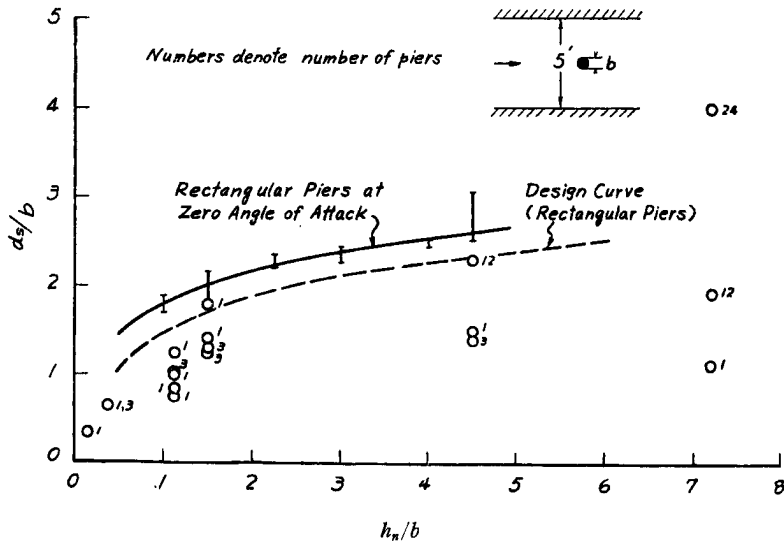


Fig. 12 Equilibrium depth of scour around circular and rectangular piers

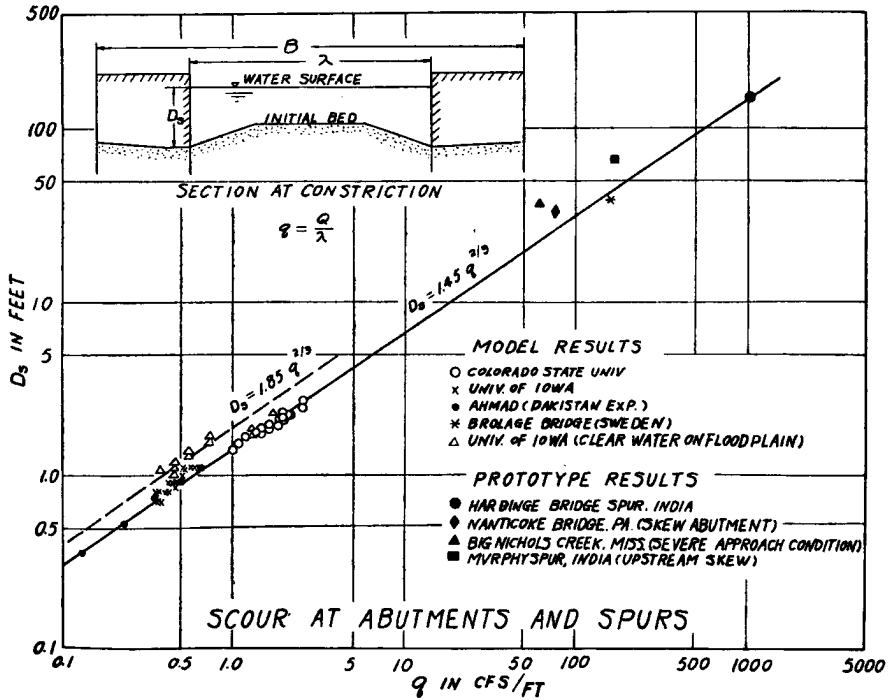


Fig. 13 Scour around spurs and abutments

一義的な関係があるものとしてプロットした。Fig. 12 は矩形断面と円形断面の橋脚に対する実験結果の一例である。この図をみると、橋脚の数が重要であること、 $b$  が 0 に近づくときは  $d_s$  も 0 に近づくはずであるが、その場合  $d_s/b$  の値が不定形になつて都合がわるいことなどから、Fig. 12 のような表示法では工合

が悪いのではないかということがいえる。

橋台による洗掘については、米国では河巾がかなり広いため、堤防 (spur dike) を河の流れと直角に長く中央までつき出して橋梁の全長をなるべく短くする方針をとっているが、そのために洪水時の橋台や spur dike のまわりの洗掘が重要な問題となる。この場合も橋脚のまわりの洗掘と同様、理論的解析にもとづいて実験実測資料をまとめるといった段階には至っていないので、次元解析法に従って整理する以外に方法はない。パキスタンの Ahmad<sup>30)</sup> は spur dike のまわりの洗掘の実験を行い、その結果を次元解析法でまとめたところ、水面から測った洗掘深さ  $D_s$  は、流量を spur dike による縮流巾でわつた  $Q/\lambda=q$  の2乗に比例することを見出した。こうした事実にもとづいて、米国公共道路局の Izzard および Bradley<sup>31)</sup> は各地の多くの実測結果や実験室内の実験資料をプロットし、上述の関係がかなり明瞭で実測、実験の両方ともほぼ成り立つものであることを実証した。しかし、もし spur や橋台の長さが0となつた極限を考えると、 $D_s$  は等流水深  $h_n$  に等しくなり  $q$  は単位巾流量  $h_n V$  となるので、 $V \propto h_n^{1/2}$  という関係が得られ、上述の  $D_s = \alpha q^{2/3}$  という関係は Chezy 型の流速公式にもとづいていること、比例常数  $\alpha$  は一定でなく、勾配や河床の粗度あるいは砂粒径その他によつて変化する可能性があること、が理解される。従つて、Fig. 13 は大ざつぱな洗掘深さを知るという意味で役立つであろうが、普遍性という点で疑問があることはどうしても認めざるをえない。最近コロラド大学でも橋脚や橋台による堰上げの問題と関連して、こうした洗掘問題に対しても実験が開始され着々と実験資料がとられている。

## 11. 結 語

以上、主な土砂水理学の課題について、米国とくにコロラド大学で行われた研究を中心として概要を述べたが、ここに書きもらしたこともかなりあると思う。その他測定器械についても書くべきであろうが、あまり注目すべきものはみかけなかつた。ただ、ミネソタ大学では超音波を利用して浮遊土砂濃度や粒度分布を測定する研究を行つていたし、コロラド大学では超音波測深機を用いて砂漣や砂堆などの水路床の凹凸を測定しており、また洗掘深さの時間的変化もこれで自記させていたことは特筆すべきであろう。

これを要するに、米国における土砂水理学の現状は、理論的解析的な研究よりも、実用に使うための研究を第1の目的として、大規模な実験や実測を系統的に行い、次元解析で資料をまとめようとするものがほとんどである。これは依託研究が大部分であることや研究費の額とも関連があると考えられるが、逆に本質的なものは何も解決がつかないということもいえる。著者はこの土砂水理学は依然として甚だ道遠く、混沌たる状態であるといつても過言でないような気がするのである。

## 参 考 文 献

- 1) Leliavsky, S. : An Introduction to Fluvial Hydraulics, Constable & Co. Ltd., London, 1955.
- 2) Rouse, H. : Engineering Hydraulics, Chap. XII, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950, pp. 769-857.
- 3) 石原藤次郎編 : 応用水理学, 中 I, 丸善, pp. 1-124.
- 4) Rouse, H. : Criteria for Similarity in the Transportation of Sediment, Proc. Hydraulics Conference, University of Iowa, Studies in Engineering, Bulletin 20, 1940, pp. 33-39.
- 5) Albertson, M. L. : Effect of Shape on the Fall Velocity of Gravel Particles, Proc. Fifth Hydraulics Conference, State University of Iowa, Studies in Engineering, Bulletin 34, 1952, pp. 243-261.
- 6) Schulz, E. F., Wilde, R. H. and Albertson, M. L. : Influence of Shape on the Fall Velocity of Sedimentary Particles, Colorado A and M College, Fort Collins, Colorado, 1954, pp. 1-161.
- 7) Colby, B. C. and Christensen, R. P. : Visual Accumulation Tube for Size Analysis of Sands, Jour. Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 82, June 1956, pp. 1-17.

- 8) Vanoni, V. A. and Brooks, N.H. : Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams, Final Report to Corps of Engineers, U.S. Army, Missouri River Division, California Institute of Technology, Report No. E-68, Dec. 1957, pp. 1-121.
- 9) Laursen, E. M. : The Total Sediment Load of Streams, Jour. Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 84, Feb. 1958, pp. 1-36.
- 10) Simons, D. B. and Richardson, H. V. : Resistance Experiments in an Alluvial-Bed Channel, ASCE New York Annual Convention, Oct. 1958 にて発表.
- 11) Liu, H.K. : Mechanics of Sediment-Ripple Formation, Jour. Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 83, April 1957, pp. 1-23.
- 12) Albertson, M. L., Simons, D. B. and Richardson, E. V. : Discussion of "Mechanics of Sediment-Ripple Formation by Liu", Jour. Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 84, Feb. 1958, pp. 23-32.
- 13) Liu, H. K. : Closure of "Mechanics of Sediment-Ripple Formation by Liu", Jour. Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 84, Oct. 1958, pp. 5-31.
- 14) 文献 3) p. 36.
- 15) Liu, H. K. : Analytical Study of Alluvial Channel Roughness, ASCE Portland Convention, June 1958 にて発表.
- 16) Stall, J. B., Rupani, N. L. and Kandaswamy, P. K. : Sediment Transport in Money Creek, Jour. Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 84, Feb. 1958, pp. 1-27.
- 17) Simons, D. B. : Theory and Design of Stable Channels in Alluvial Materials, Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, May 1957, pp. 1-394.
- 18) Friedekin, J. F. : A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers, U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1945, pp. 1-40.
- 19) Nagabhushanaiah, H. S. : Meandering of Alluvial Rivers, Master's Thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colo., 1958, pp. 1-227.
- 20) Dury, G. H. : Contribution to a General Theory of Meandering Valleys, American Journal of Science, Vol. 252, April 1954, pp. 193-224.
- 21) Laursen, E. M. Observations on the Nature of Scour, Proc. 5th Hydraulics Conference, State University of Iowa, Studies in Engineering, Bulletin 34, 1953, pp. 179-197.
- 22) Doddiah, D. : Comparison of Scour Caused by Hollow and Solid Jets of Water, Master's Thesis, Colorado A and M College, Fort Collins, Colo., 1950, pp. 1-156.
- 23) Thomas, R. K. : Scour in a Gravel Bed, Master's Thesis, Colorado A and M College, Fort Collins, Colo., 1953, pp. 1-117.
- 24) Doddiah, D., Albertson, M. L. and Thomas, R. A. : Scour from Jets, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, 1953, pp. 161-169.
- 25) Iwagaki, Y. : Analytical Study of the Mechanics of Scour for Three-Dimensional Jet, ASCE Atlanta Hydraulics Conference, August 1958 にて発表.
- 26) Smith, G. L. : Scour and Energy Dissipation below Culvert Outlets, Colorado A and M College, Fort Collins, Colo., 1957, pp. 1-122.
- 27) Scour Around Bridges, Progress Report of Model Studies of Scour around Bridge Piers by E. M. Laursen and Investigation of Flexible Mats to Reduce Scour around Bridge Piers by C. J. Posey, D. W. Appel and E. Chamness, Highway Research Board, Research Report No. 13-B, 1951, pp. 1-22.
- 28) Laursen, E. M. and Toch, A. : A Generalized Model Study of Scour around Bridge Piers and

- Abutments, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, 1953, pp. 123-131.
- 29) Laursen, E. M. and Toch, A. : Scour around Bridge Piers and Abutments, Iowa Highway Research Board Bulletin No. 4, 1956, pp. 1-60.
- 30) Ahmad, M. : Experiments on Design and Behavior of Spur Dikes, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, 1953, pp. 145-159.
- 31) Izzard, C. F. and Bradley, J. N. : Field Verification of Model Tests of Flow through Highway Bridges and Culverts, Seventh Hydraulics Conference, State University of Iowa, June 1958 にて発表.