

3次元人工粗度の粗度特性に関する実験的研究

Experimental Study on the Three Dimensional Artificial Roughness

豊橋技術科学大学 正員 中村 俊六

同上 学生員 中村 勝男

同上 学生員 田中 昌治

1. 緒 言

人工粗度の粗度特性に関しては、一般粗面における流水の抵抗特性を見出す目的や水理模型実験用水路も含めた人工水路の流水抵抗を制御する目的のために、古くから数多くの研究が行なわれておりすでに十分吟味されつくしたと言えないこともない。しかしながら、それらの成果を現実の河川に適用する段になると、必ずしも簡単に処理できない場合も少なくない。従来主として海岸線の消波工などに用いられてきた各種の異型ブロックを、最近では河川の護岸工や護床工に用いる事例が急増しているが、この場合もそうしたケースの一例として挙げられよう。

異型ブロックを河川の護岸工などに用いる場合、通常その形状と配置方法とから溝型粗度、棧型粗度およびイボ型粗度のいずれかとして粗度特性が見積られる。これらの粗度特性については、マニングあるいはニクラゼ以来の研究成果をふまえたうえで、それぞれの粗度形式に対する抵抗特性を理論的、実験的に明示した足立¹⁾(1964)の優れた研究があり多くの実用に供されている。²⁾

ただ、複雑な形状をした粗度要素を用いる場合には、もともと単純な形状をした粗度要素に対して求められた実験公式をそのまま用いることには多少の不安を禁じ得ない。単純な形状に基づいて定義されたパラメーターの諸数値を、たとえば水深についてすら必ずしも簡単には設定できない場合もあり、Morris³⁾(1945)らも用いている shape factor の導入の必要性も懸念されるからである。また、きわめて完成度の高い上述の足立¹⁾の研究にも残された基本的な課題が無いわけではない。例えば、著者自身も今後の課題としているイボ型粗度と棧型粗度の対応関係などもそのひとつである。⁴⁾

本研究は、以上のような認識に立脚して、(1)異型ブロックの例として6脚ブロックと溝型異型ブロックを取りあげてその粗度特性を検討するとともに、(2)イボ型粗度と棧型粗度の各粗度特性を統一的に表現することの可能性について若干の検討を加えたものである。

2. 実験装置と方法

実験に用いた水路は、幅40cm、深さ20cm、長さ14mの鋼製ペンキ塗装の2次元水路である。水路勾配は変えることができるが今回の実験では足立¹⁾の例にならって水路床勾配は500分の1に固定した。粗度としては、図-1(a)に示す一辺が1.45cmの立方体を7個接合して作られるモルタル製6脚ブロックと、同図(b)に示す商品名ビーハイブの溝型異型ブロック(溝の深さ7.3mm、溝の間隔8cm、プラスチック製)を用いた。

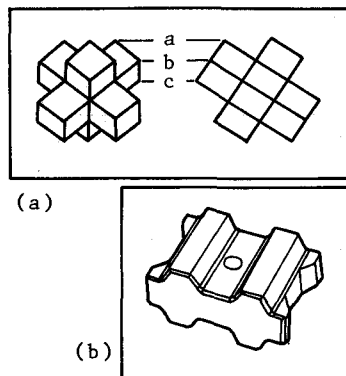


図-1
(a) 6脚ブロックと(b)溝型異型ブロック

- 実験は、(1)溝型異型ブロックを溝型粗度状に敷きつめた場合、
(2)6脚ブロックを図-2のように敷きつめた場合(タイプ1)、
(3)その状態から1列おきに抜き去った場合(タイプ2)、
(4)さらにその状態から1列おきに抜いた場合(タイプ3)、
(5)さらにその状態から1列おきに抜いた場合(タイプ4)、
(6)全面に砕石砂利(2~5mm粒径)を均一に敷きつめた場合

の各ケースについて、水深 3 cm ~ 11 cm の範囲でそれぞれ数種の流量について行なった。上記の粗度はいずれの場合も水路末端から約 1 m 敷設したが、溝型異型ブロックの場合にはセロハンテープを用いて空隙をふさぎ、6 脚ブロックの場合には図-1 の C 点の位置まで砕石砂利 (2 ~ 5 mm 粒径) を敷きつめて実験した。等流水深の測定は、(1) 下流端を適当にせき上げることによって粗面上の大部分の領域で等流状態 (水深が同一の状態) を形成したのち、(2) 水路中央の鉛直方向流速分布が縦断方向にはほとんど変化しない位置 (粗度始点より下流 4 ~ 7 m) の水深を測定して等流水深とした。なお、流速の測定にはピトー管 (穴の径 3 mm) と差動マンメーター (トルエン使用) を用いている。

3. 実験結果とその整理

3-1) 粗度基面の設定 主要なケースについて流速分布を測定した結果、いずれの場合も十分に対数分布とみなし得ることが確認された⁵⁾ので、断面平均流速を中心とする測定結果のすべては足立¹⁾の方法に準拠して整理することとした。それにはまず粗度基面を設定しなくてはならないが、砕石砂利 (この場合は砂利天端面) の場合を除いては粗度要素形状が複雑なため単純には設定できない。このため、ここではつぎのようにして基面高を決定した。すなわち、(1) まず、粗度要素の突起をすべて水平にならしてしました場合の高さ x (幾何学的基面高) を求め (この高さはいかなる形状の、いかなる配列の粗度に対しても計算できる)、(2) その x を用いて基面高 c は表-1 中の式 1 で与えられる、とした。これは、足立¹⁾が棧粗度における抗力係数の実験結果を用いた考察の結果を近似的に他の形状の粗度要素にも適用できると仮定したものであり、式 1 は (1) 相対粗度間隔 s/k に対して足立¹⁾が提示した相対基面高 c/k の関係 (図-3 上図) を両対数紙にプロットしなすと図-3 下図の白丸のように -4/5 の勾配をもった直線で近似でき、一方、(2) 用いた棧粗度要素の形状 (高さ 5 mm、幅 6.4 mm) から相対幾何学的基面高 x/k を求めて同図にプロットすれば、これは当然 -1 の勾配をもった直線となる、ことから両者を対応づけて求めたものである。この結果から、タイプ 1 では天端、タイプ 2 では図-1 の b 点、タイプ 3、4 は砂利面を、それぞれ基面とすることにした。

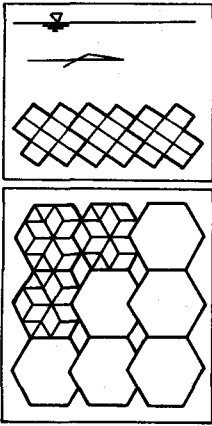


図-2 6脚ブロックの配置 (上が側面図、下が平面図、タイプ1)

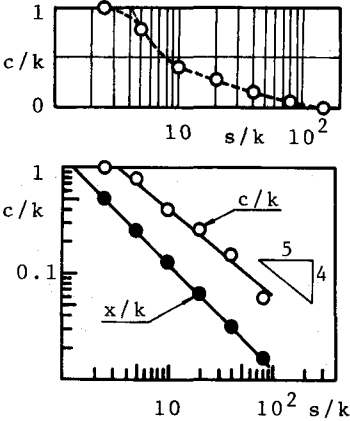


図-3 s/k に対する幾何学的基面高と基面高の関係

表-1 実験結果の整理に必要な諸式

No.	式	記号の意味
1	$\frac{c}{k} = 2.1 \left(\frac{x}{k} \right)^{4/5}$	c: 有効基面高 x: 幾何学的基面高 k: 粗度高さ
2	$R_{eB} = \sqrt{g I_e (B/2)} \frac{B/2}{v}$	g: 重力の加速度 Ie: エネルギー勾配 v: 動粘性係数 B: 水路幅
3	$\frac{U}{U_{*R}} = K \log_{10} R_{eB} + A$	K, A: 2R/B に対して得られるパラメーター U: 断面平均流速 $U_{*R} = \sqrt{g R I_e}$ Ie: エネルギー勾配
4	$\frac{2R_i}{B} = \frac{1}{1 - (1 - (1/a)^2) \frac{2R}{B}}$	Ri: 底面領域に関する径深 R: 全断面に関する径深 a: セン断力の不均一性を表すパラメーター

3-2) 底面領域に関する径深 R_1 の計算⁶⁾ この種の実験においては側壁効果を見逃すことができないため、水深 H や通常の (全断面に関する) 径深 R ではなく底面領域に関する径深 R_1 を用いる必要がある。その計算方法の大略はつぎのようである。すなわち、(1)まず表-1中の式2を用いて滑面の両側壁の影響を決定づけるパラメーター R_{eB} を求める。(2)せん断力の不均一性を表すパラメーター a をパラメーターとした関係式 ($K \sim 2 R/B$ 、 $A \sim 2 R/B$) と、表1中の式3、および実験結果を相対断面平均流速 U/U_{*R} と相対径深 $2R/B$ について整理した結果とから求める。(3)その a を表-1中の式4に代入することによって R_1 が計算される。

3-3) 断面平均流速と水深の関係 すべての実験結果について、断面平均流速と等流水深の関係を図示すれば図-4のようである。両者は R_1 を用いた摩擦速度と粗度高さ k でそれぞれ無次元化してある。また同図中にはニクラゼによる均一砂粒粗度に対する対数則を実線で併記した。同図から、

- (1) 砕石砂利 (最大粒径 $5 \text{ mm} = k$) と溝型異形ブロックについてはニクラゼの式と良く一致しており、粗度高さ k を均一砂粒粗度 k_s としてニクラゼの式 (表-2、式5) をそのまま用いれば良い。
- (2) 6脚ブロックのタイプ1 (全面敷設) およびタイプ2では相対水深が小さい場合を除けばニクラゼの式と一致しないまでもほぼ平行しているが、6脚ブロックのタイプ3、4については勾配も異なっていると見るのが妥当であって、一律に特定の砂粒粗度 (相当砂粒粗度) に置き換える手法は適用できない。と判断して良いように思われる。

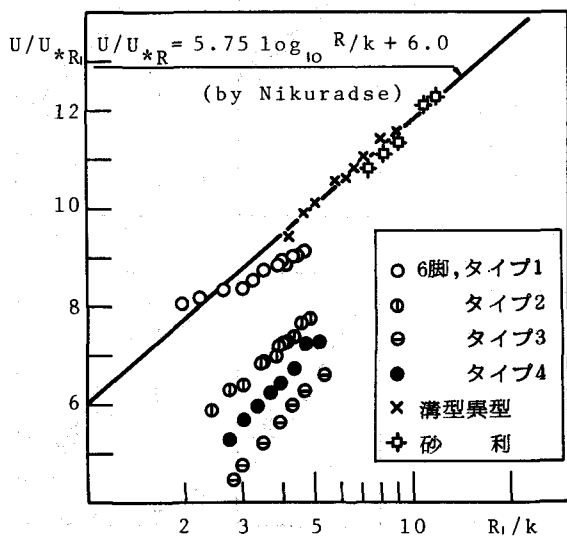


図-4 断面平均流速と水深の関係

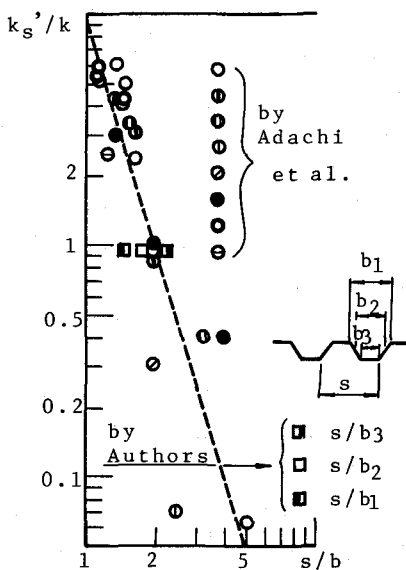


図-5 溝型粗度に対する相当砂粒粗度

3-4) 溝型異形ブロックの粗度特性 溝型粗度に対しては、足立¹⁾によって表-2中の式6が与えられているが、いまの場合、溝幅 b としては3通りをとることができる。図-4から相当砂粒粗度 k'_s ($\approx$ 粗度高さ) を求めて、それぞれの b に対する関係を図示すれば図-5中の四角の記号のようである。図-5は足立¹⁾が各種の溝型粗度に対して相当砂粒粗度と相対溝間隔の関係を図示したものであって式6は破線で併記されている。これを見ると、溝型異形ブロックの場合、溝幅として平均的な値を用いれば、足立¹⁾による溝型粗度に対する公式がそのまま使用できると判断して良いように思われる。

3-5) 6脚ブロックに対するイボ型粗度公式の適用性 6脚ブロックを全面に敷設した場合 (タイプ1) について、足立¹⁾のイボ型粗度に対する式を適用すれば図-6のようである。ただし、できるだけ適合性を高めるために、相対イボ間隔 S/F の計算においては図-1の b 点より下の部分を無視し、イボ型粗度公式中

の水深 H の代りに b 点を基面として求めた R_1 を用いている。また、マンニングの式に基づく実測値も同様にして計算した。同図から、6脚ブロック（タイプ1）に対してイボ型粗度公式を適用する場合、（基面を b 点にとってその点まで砂利を敷いたと仮定して用いたとしても）水深の浅い時には実際よりもやや大き目の値を、また、深い時にはやや小さ目の値を与えることに注意する必要があると言えよう。なお、同図中の黒丸および破線は、基面を天端としたときの R_1 を用いたマンニングの式に基づく実測値と、 k_s' （相当砂粒粗度）/ k （砂利面からの粗度高さ） $= 1.22$ としてニクラゼの式を用いた計算結果であり、イボ粗度公式よりは実測値に対する適合性が高いことがわかる。

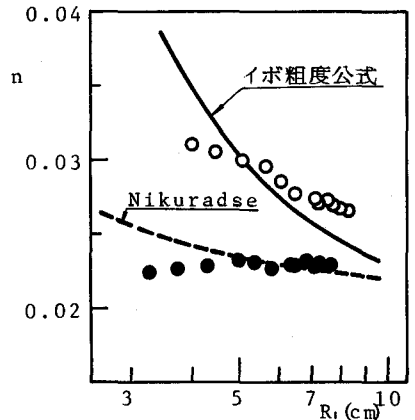


図-6 6脚ブロックに対するイボ型粗度公式とNikuradseの式の適用性

4. イボ型粗度と棧型粗度の各粗度特性についての統一的表现

元来少くとも幾何学的には、3次元粗度の特殊なものが2次元粗度である。したがって、各粗度要素によって強制的に発生する乱れの大きさとその拡散が、もし粗度要素の幾何学的形態によって支配されるのであれば、2次元粗度の粗度特性を表わす式は、3次元粗度のその特殊な形として表現できるはずである。このことを検討するため、まず足立¹⁾がその実験公式を定めるに至る過程の精査を試みたところ、(1)棧型粗度における実験公式曲線が実験による実測値とのきわめて高い精度での対応性を見せながら順次求められているのに対し(2)イボ型粗度の場合には、別の曲線を用い得る可能性が十分にあるように見うけられた。例として k_s'/k と R_1/k との関係について示せば図-7のようである。図中、丸印は実測値、細い実線は足立¹⁾による実験公式曲線であり、太い実線は筆者らが試みに引いた実験曲線である。

図-7において筆者らが引いた実験曲線を、 $(k_s'/k) = 30m(R_1/k)^{-\theta}$ と置くことによって得られる m および θ と、相対イボ間隔 S/F との対応関係を図示すれば図-8のようである。

同図には棧型粗度に対する足立¹⁾の実験結果の値も併記した。なお、 S （粗度1個の水路支配面積）も F （粗度1個の流れに対する投影面積）も粗度1個の水路横断方向支配距離で除して考えることにすれば、棧粗度の場合、 $S/F = s/k$ （ここに s ；棧間隔、 k ；粗度高さ）である。また、6脚ブロックについて同様の手順で求めた値も付記されている。同図から、

(1) m については、イボ型粗度に対しても棧型粗度に対しても全く同一の式（図中の実線）

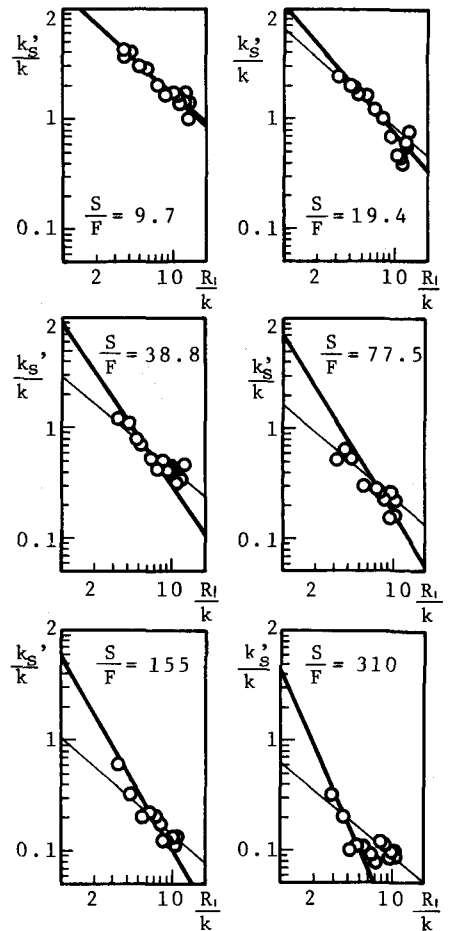


図-7 イボ型粗度の $k_s'/k \sim R_1/k$

$m = 0.94 (S/F)^{-0.32}$ で表わされ、

(2) θ については、2本の直線、 $\theta = \alpha (S/F)^\beta$ (ただし、イボ型粗度るとき $\alpha = 0.51$, $\beta = 0.27$ 、
 棧型粗度るとき $\alpha = 0.02$, $\beta = 0.79$) で表現できる。

(3) その結果、両粗度に対する粗度公式としては表-2中の式8を得る。

(4) 6脚ブロックについては、上記のいずれの式でも表現できず、強いて言えば、 S/F が10程度となるように配置したとき(タイプ3)、棧型粗度の特性に最も近くなる。

と判断されよう。

なお、上記(8)の実験式(式8)は、棧型粗度については足立¹⁾の式とほとんど同じものであるが、イボ型粗度については図-7に示したようにかなりの変更をしているので、他の実験結果を用いての検

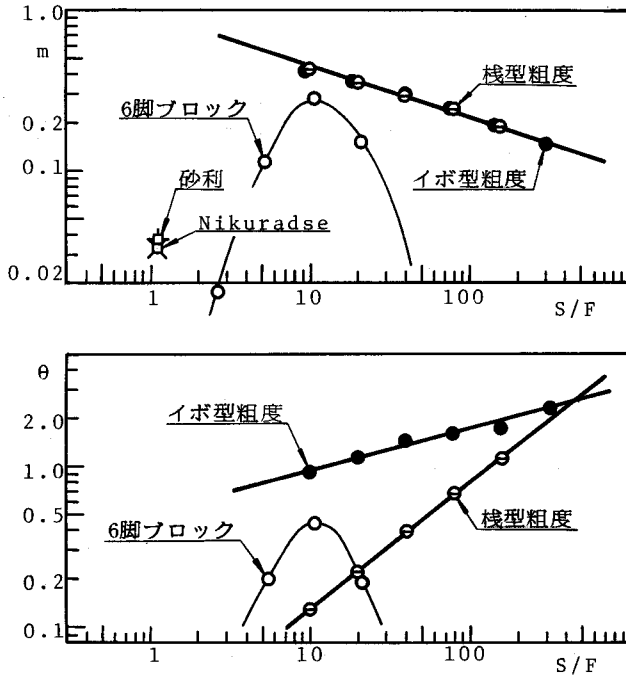


図-8 m, θ と S/F の関係曲線

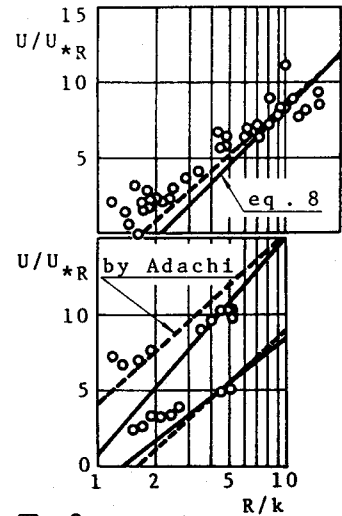


図-9

W. E. S. の実験値に対する検証

表 - 2 実験公式

No.	式	記号の意味
5	$\frac{U}{U_{*R}} = 5.75 \log_{10} \frac{R}{k_s} + 6.0$ (Nikuradse : 対数則)	k_s : 砂粒径 $U_{*R} := \sqrt{g R I e}$
6	$\frac{k_s'}{k} = 10 \left(\frac{s}{b} \right)^{-3.3}$ (Adachi: 溝粗度)	s : 溝間隔 b : 溝幅 k_s' : 相当砂粒粗度
7	$\frac{U}{U_*} = 19.0 \log_{10} \frac{s}{b} + 0.25 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{k}$ (Adachi: 溝粗度)	H : 水深 k : 粗度高さ
8	$\frac{U}{U_*} = 1.84 \log_{10} \frac{S}{F} - 2.34 + 5.75 \{ 1 + \alpha \left(\frac{S}{F} \right)^\beta \} \log_{10} \frac{H}{k}$	イボ型粗度 $\alpha = 0.51$ $\beta = 0.27$ 棧型粗度 $\alpha = 0.02$ $\beta = 0.79$

証が求められる。足立¹⁾がイボ型粗度公式の検証に用いたW. E. S. の実験値に対して適用した結果を示せば図-9のようである。同図には足立¹⁾のイボ型粗度公式も併記した。これを見ると実測値に対する適合性は従来のイボ型粗度公式よりもやや劣るが、水深がある程度大きければ上記実験式もかなりの適合性を見せていると言えよう。

また、同じく足立¹⁾によりとりまとめられたJohnson らの実測値と比較すれば、図-10のようである。同図中の実線の曲線は水深に関して平均的に $R_1/k=5$ とした場合のイボ型粗度に対する計算値、破線は同じく平均的に $R_1/k=8$ としたときの棧型粗度に対する計算値であって、実測値のちらばり具合から考えれば十分に許容し得る適合性を見せているものと思われる。なお、同図には6脚ブロックの各タイプにおける実測値を $R_1/k=4$ について併記した。6脚ブロックの実験結果も他の実験結果とはほぼ同様な変化をしていることがうかがわれよう。

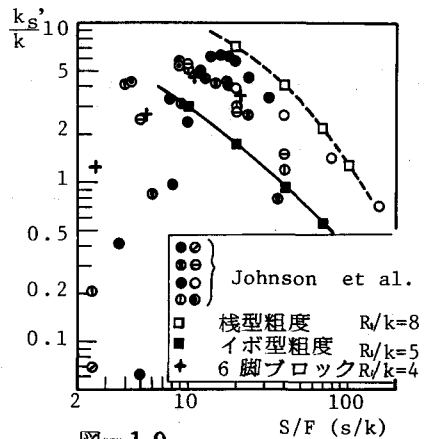


図-10
Johnson らの実験値との比較

5 結言

以上、溝型異型ブロック、6脚ブロックおよび砕石砂利の粗度特性を実験的に検討するとともに、3次元粗度と2次元粗度の対応関係を探る手がかりを得るため、イボ型粗度と棧型粗度の各粗度特性を統一的に表現することを試みた。得られた主要な結果を列挙すれば以下のようである。

- (1) 溝型異型ブロックに対しては、相対溝間隔 s/b として、形状から常識的に見積り得る平均的な値を用いたうえで、足立¹⁾の溝型粗度に対する式(表-2中の式7)をそのまま適用することができる。
- (2) 6脚ブロックに対しては、水路底全面に敷設する場合には、中込め砂利基面から天端までの高さを粗度高さ K とし、相当粗度 k_s' に対して $k_s'/k=1.22$ とし、ニクラゼの平均流速公式(表-2中の式5)を適用できる。
- (3) イボ型粗度と棧型粗度に対しては、相対粗度間隔とも呼び得るパラメーター S/F を用いて、式8によって統一的に表現できる。
- (4) 複雑な形状をした粗度要素の基面高 e は、幾何学的基面高 x をまず求めることによって、式1から近似的に求めることができる。

以上の成果によって、当面の社会的要請に対してはある程度応え得たと自負するものであるが、今は亡き足立昭平先生の御研究をひきついで者として、先生御生前の成果を少しでも前進させることができたか否かについては、一抹の不安を禁じ得ない。

なお、御遺族からの寄贈を賜わり先生の実験データ等の生原稿に接することができたことを付記し、末尾ながら深甚なる謝意を表するとともに、ここにあらためて先生の御冥福を心より御祈り申しあげる次第であります。

参考文献

- (1) 足立昭平：人工粗度の実験的研究、土木学会論文集、第104号、1964、(2) 例えば、農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準、1978、(3) H. M. Morris : Flow in Rough Conduits、Trans. A. S. C. E.、1955、(4) 足立：固定床河川模型水路の人工粗度に関する研究、京都大学学位論文、1961、(5) 中村、他：6脚ブロック上の流れに関する実験的研究、土木学会中部支部講演概要集、1982、(6) 足立：長方形断面水路の側壁効果に関する研究、土木学会論文集、第81号、1962。