

# 植生の流れ抵抗性に関する現地実験的研究

福 間 順<sup>※</sup>

Jun FUKUMA

## An Experimental Study on Flow Resistance due to Vegetation

### ま え が き

近年低平地の流出解析を究極の目的として、水理学的観点に立った微視的考察が行なわれるようになってきた。本研究の発端は、低平小排水路における流れ阻害要因のひとつである植生条件の水理学的機能変動を観察することから出発している。すなわち低平小排水路における植生の様相が、流量、水位、水面勾配その他の流れ量に与える影響の大なることは周知のとおりである。しかし植生の多様性はこの問題をより複雑ならしめ、現在にいたっても客観的な定量化を図った報告は数少ない。この報告は、植生のモデルとして稲をとりあげ、若干の現地実験的考察に基づいて、その流れ抵抗性の一見解を述べたものである。

### 1. 実験方法

実験に使用した圃場は島根大学農学部附属本庄農場の一區画(1,323m<sup>2</sup>)で、その短辺側に巾1.5m長さ11.73mの田面水路を設けた。側壁として厚さ0.5mmの簡易ビニール畦畔を埋込み漏水防止を図った。田面水深測定のための基準位設定は田面の特質上きわめて微妙であるが、筆者は水準測量を施した結果、上、下端間に含まれる株列標高のもっとも多数が接する水平線位をもって田面位とした。実質的測定区間を10mとし、下端端でセキ板による水位調節を行なった。測定区間内には $\frac{1}{3}$ 等間隔に6ヶ所の水位測定点を設け、田面位に基準杭を固定した。測定は $\frac{1}{10}$ mm読みのポイントゲージによった。水量は、山地小流域を有する自然承水路から必要に応じて導水

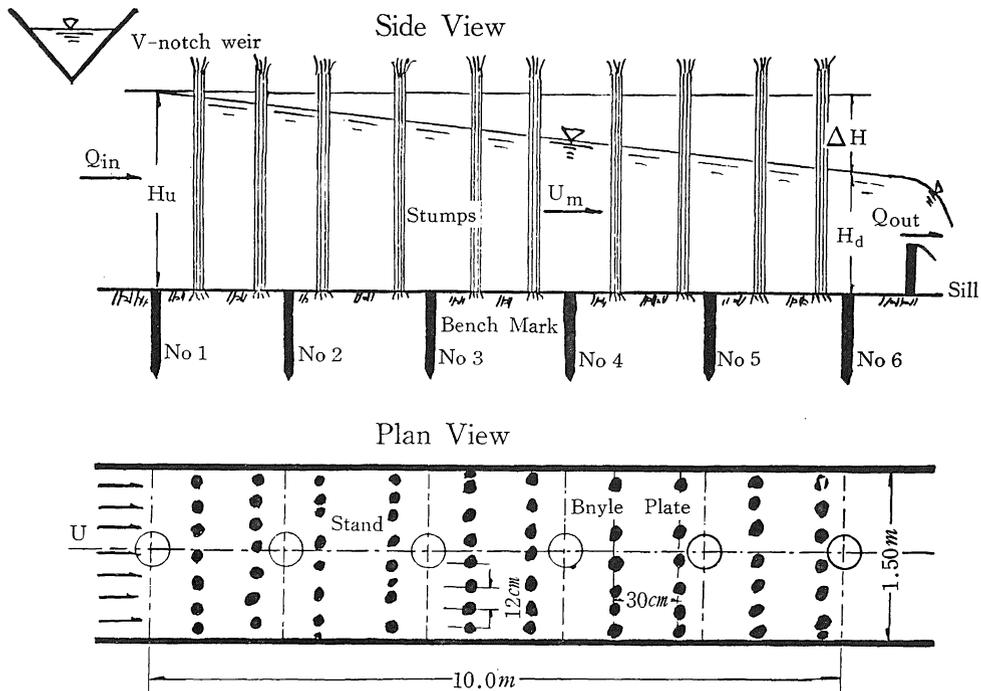


Fig. 1 Sketch of the paddy channel used in the experiment.

※ 農業水工学研究室

し、切欠高15cmの鋼製刃形三角ゼキによって流量を測定した。本圃場の土壌学的調査結果は、島根農科大学研究報告15号に詳細に発表されているが、表層、下層ともに砂質埴土もしくは埴質壤土とされている。土壌学的には透水性が大きいと考えられるが、本実験の場合、流路が短い理由もあって、流入量、流出量の差はほとんど認

められずおおむね漏水に対する懸念はなかったように考えられる。稲の品種はコシヒカリ(ウルチ)、植付方式は列間30cm、株間12cmの並木植である。植付日は昭和43年5月11日でのちに言及する出穂開始日が8月2日と報告されている。測定は7月8日から開始され、現在(9月13日)引き続き測定中である。

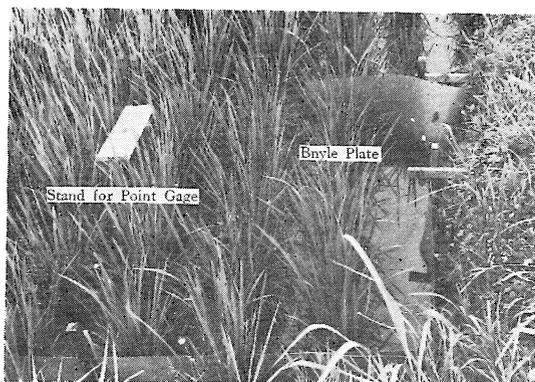


Fig. 2 View of the paddy channel on 63 days after transplantation.

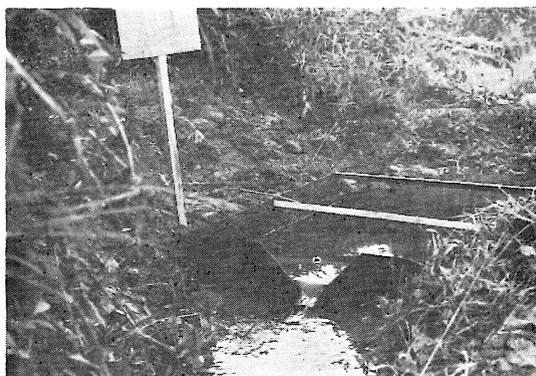


Fig. 3 View of V-notch weir used for measurement of discharge.

Table 1. Arrangement of stumps in the paddy channel

Section		Intake~No. 1				No. 2 ~ No. 3					No. 3 ~ No. 4				
Distance from intake point(m)		0.27	0.56	0.87	1.19	1.51	1.83	2.15	2.45	2.75	3.06	3.36	3.63		
Rank number of stump		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Number of stump		11	11	13	12	13	14	13	13	14	13	13	12		
No. 3 ~ No. 4		No. 3 ~ No. 4						No. 4 ~ No. 5							
3.96	4.25	4.55	4.83	5.13	5.43	5.73	6.04	6.33	6.63	6.93	7.25	7.54	7.83	8.14	8.43
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
13	13	13	12	11	12	12	14	12	12	13	11	11	11	12	10
No. 4~No. 5		No. 5 ~ No. 6						No. 6~Outlet							
8.74	9.03	9.34	8.63	9.92	10.21	10.53	10.81	11.13	11.43						
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38						
12	11	12	12	11	12	10	13	12	13						

## 2. 実験結果と考察

### 2-1 粗度係数 $n$ の経日変化

田面内の流れが、河川におけるそれと大きく異なるのは明らかであるが、具体的に流れ障害要素を量的に把握するために、MANNING 式、CHEZY 式の適用が可能であるとして、粗度係数  $n$  を次式から算出した。流速は全実験を通じて  $10^{-2} m/s$  order であり、実質流速の測定は困難であったのでこの場合すべて平均流速によるものである。各測定点の水深は若干のバラツキが認められるほかおゝむね直線の変化を示し、水面勾配の算出には念のため各ケースについて最小自乗法によって求めた。

$$n = \frac{1}{C} R^{1/6} = \frac{R^{2/3}}{U_m} \sqrt{i - (i-I) \left( \frac{U_m^2}{gh} \right)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$C = \sqrt{2g/f}$$

ここに  $C$  ; ch'zy 公式における  $C$ ,  $R$  ; 径深,  $i, I$  ; 底面および水面勾配,  $g$  ; 動力加速度,  $U_m$  ; 平均流速,  $h$  ; 水深,  $f$  ; 抵抗係数

$n$  の経日変化を図示すると **Fig. 4** のようである。すなわち、確たる規則的変動は認められないが、実験値の比較的多数が  $0.1 \sim 0.2$  の範囲にあることは、概略の  $n$  値を見積る際の一助とならう。 $n$  の極端な変化が認められないのは、本実験の測定開始が稲株の分けつ終了期に該当し、その結果稲株の肥大が現われなくなったことを意味しているようである。稲作物学の教えるところでは、一般に出穂開始日の約 1 か月前に分けつが終了するといわれているから、本実験の場合に照らし合わせてみると 8 月 2 日の出穂確認によって実験開始日の 7 月 8 日はまさしく分けつ完了直後に該当し、前述の推定とよく符合する。 $n$  値そのものが、普通の河川、水路におけるものより約 10 倍も大きい値を示していることと合わせて興味深い。

### 2-2 粗度係数 $n$ と径深 $R$ の関係

**Fig. 5** は  $n$  と  $R$  の関係を示したものである。一般的にいわれている  $n$  と  $R$  の逆比例的な関係はこの図からも認められるが、定量的な関係式は誘導し難い。

**Fig. 6** は筆者が内水害共同研究の一環として昭和 39~40 年に調査した小排水河川である網場川の  $n$  と  $h$  の関係を参考までに示したものである。

粗面開水路の乱流領域において、 $n$  と  $R$  の関係をもっとも厳密な表現をしているものとしてつぎの岩垣の理

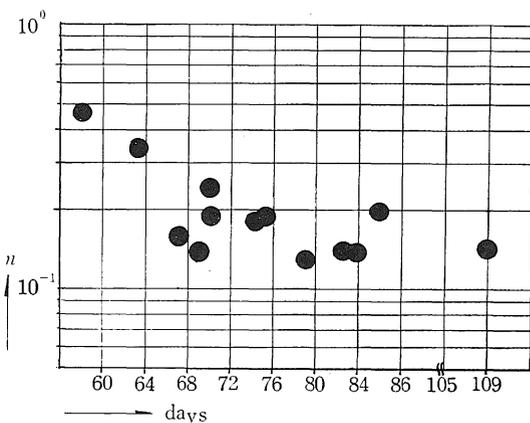


Fig. 4 Change of roughness  $n$  in days after transplantation.

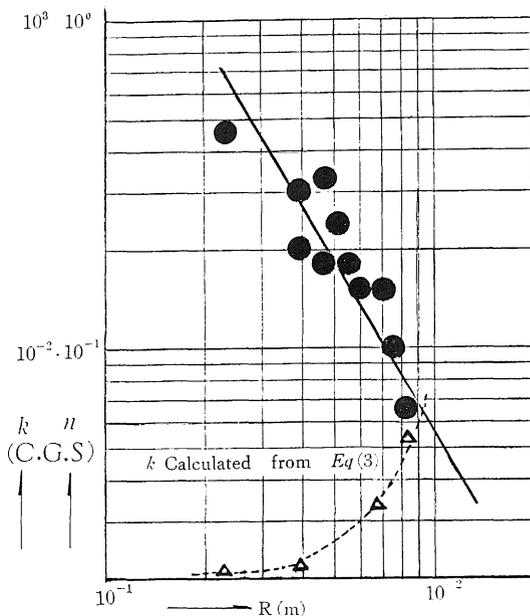


Fig. 5 Relation between roughness  $n$  and  $R$

論式がある。

$$\frac{n}{k^{1/6}} = \frac{\left( \frac{R}{k} \right)^{1/6}}{\sqrt{g} \left\{ A_r - \frac{1}{K} + \frac{1}{K} \ln \left( \frac{R}{k} \right) \right\}} \quad \dots\dots(2)$$

ただし

$$U_{R*} k / \nu > 51.1$$

$$F_r \leq 0.89 \quad A_r = 10$$

$$F_r \geq 0.89 \quad A_r = 9.7 - 5.75 \log F_r + 1.2 (\log_r F_r^2)$$

ここに  $U_R$ ; 摩擦速度,  $k$ ; 相当粗度,  $\nu$ ; 動粘性係数,  $A_r$ ; 定数,  $F_r$ ; FROUDE 数,

$K$ ; カルマン定数

本実験における  $n$  と  $R$  の関係を算出するには, 実験の内容と精度を勘案して直接(2)式による計算を避け, 本質的に同じ内容の次の近似式によるものとする.

$$\frac{n}{k^{1/6}} = \frac{\left(\frac{R}{k}\right)^{1/6}}{\sqrt{g} \left\{5.98 + 5.75 \log\left(\frac{R}{k}\right)\right\}} \dots\dots(3)$$

ここで相当粗度  $k$  の見積りが問題になるが, 元来  $k$  の値は河床構成材料によって異なる長さ dimension を有する数値であって多数の研究がある. 本実験の場合, 田面による特異性を考慮して直接(3)式によって  $k$  の値を逆算出すると,  $k$  の範囲として  $10\text{cm} < k < 45\text{cm}$  が得られた. この数値は一見して現場底面の起伏状況と一致していないことがわかる. この理由として, 粗度係数  $n$  が田面における壁面, 底面および稲株による抵抗要因の総合的指数として算出された結果と考えられる. そのかぎりにおいて,  $k$  が現場底面の視察によっては推定できない値を示すことは当然の帰結であるともいえる.

相当粗度  $k$  が必ずしも現場凹凸高さに一致するとは異論のあるところで即断できないが, この仮定のもとでいま田面の状況から  $k$  の概略値として  $1.0\text{cm} < k < 4.5\text{cm}$  と考えても危険ではない. さすれば計算による値  $10\text{cm} < k < 45\text{cm}$  はこの概略値の10倍に相当していること

### 2-3 抵抗係数 $f$ と $Re$ 数および $F_r$ 数の関係

抵抗係数  $f$  は一般的な表現をすれば, 円管に対する

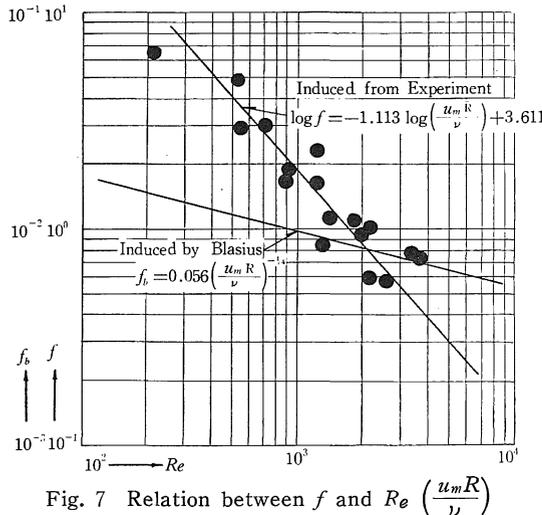


Fig. 7 Relation between  $f$  and  $Re \left(\frac{u_m R}{\nu}\right)$

になる. 見方を変えれば, 計算による  $k$  の値の 90% が株による抵抗によるもので見かけ上の相当粗度  $k$  として加算されたものと見なされる.  $n$  と  $k$  の関係は直線的ではないが,  $n$  の実測値が普通水路のそれよりも10倍近い大きな値を示していることとあわせ考えて, 底面摩擦抵抗よりも稲作による抗力がはるかに卓越していることがじゅうぶん裏付けられる.

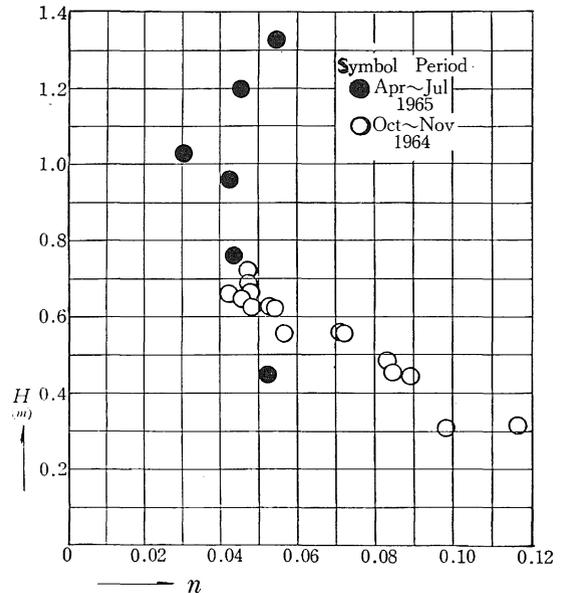


Fig. 6 Relation between roughness  $n$  and  $H$  measured on Amba river.

DARCY-WEISBACH 式の拡張定義として次式で示される値である.

$$\tau = f \frac{\rho U_m^2}{2} \dots\dots\dots(4)$$

ここに  $\tau$ ; 壁面における剪断応力,  $\rho$ ; 流体密度,  $U_m$ ; 境界層外の一様流速

$f$  と MANNING, CHEZY 両平均流速公式の関係は(1)式で示される. 管路および開水路の抵抗係数  $f$  は水路固有の値ではなく  $Re$  数  $\left(\frac{U_m R}{\nu}\right)$  および  $F_r$  数  $\left(\frac{U_m}{\sqrt{gh}}\right)$  の函数であることがほぼ認められている. 本実験の場合,  $f$  を(1)式によって算出し図示したものが Fig. 7. である. Fig. 7 によれば傾向として BLASIUS の式と類似しているが, 1~2 order が上っていることが大きく異なる.

$$\text{BLASIUS 式 } f_b = 0.056 (U_m R / \nu)^{-1/4} \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{実験式 } \log f = -1.113 \log (U_m R / \nu) + 3.611 \dots\dots(6)$$

Fig. 8. によれば,  $f$  と  $F_r$  数の間に何らかの相関が存

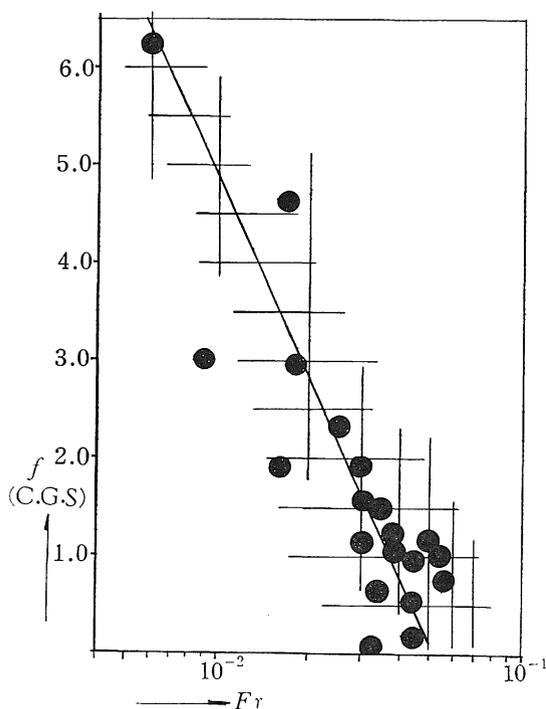


Fig. 8 Relation between  $f$  and  $F_r \left( \frac{u_m}{\sqrt{gh}} \right)$

### 2-4 稲株の変形抗力係数 $C_{mD}$ と $F_r$ 数の関係

2-3で述べた抵抗係数  $f$  は田面の底面、壁面および稲株による抵抗要因の総合的指数であることは2-2で粗度係数  $n$  について論考した場合と全く同様である。したがって稲株自体の抵抗性については何らの定量化が行われていないので若干の approach を試みる。

本実験による水面勾配測定値は、測定区間長が短かつかつ流量が数  $l/s$  と小さいにもかかわらず  $10^{-3}$  order の値を示している。このことから、株列による screen もしくは filter によるような効果が出現していることも想像される。いま各稲株を一樣流れにおかされた円柱体としてのとり扱いを施して考察する。

Fig. 9. のような模式化を図って I, II 断面に対して運動量式を示すと次式のようなものである。

$$\frac{Qw}{g}(U_2 - U_1) = P_1 - P_2 + W \sin i - \Sigma F_R \quad \dots\dots(7)$$

ここに  $w$ ; 水の単位重量,  $Q$ ; 流量,  $U_1, U_2$ ; 各断面における流速,  $P_1, P_2$ ; 各断面における水圧,  $W$ ; I, II 断面間の水重量,  $i$ ; 田面底勾配,  $\Sigma F_R$ ; 流れに対する抵抗力の総和さらに

在するようだが,  $F_r$  数が  $10^{-2}$  以下の data が少なく, 現在までの資料をもってはこれ以上の言及は不可能である。結論的には流れの流速分布が対数法則に基づくものか否かによって従来の研究の適用の可否と比較が可能となるようである。

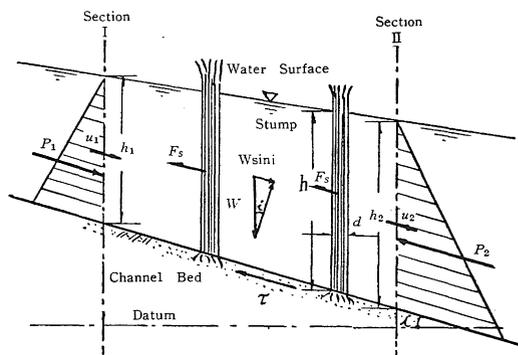


Fig. 9 Schematic diagram of flow through the stumps on the paddy field.

$$\Sigma F_R = \Sigma \tau + \Sigma F_s \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\Sigma \tau = \frac{1}{2} \rho f U_m^2 S \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに  $\Sigma F_s$ ; 株による抵抗力の総和,  $\Sigma$ ; 壁面, 底面剪断応力総和,  $S$ ; 流水接触面積,  $\rho$ ; 水の密度,  $U_m$ ; 平均流速。

田面内の流速は微小であるから, 稲株による抵抗力として STOKES による球体運動のような変形抵抗 (deformation resistance) を考えることもできるが, 本実験の場合むしろ稲株の成長度を考慮に入れるので形状抵抗 (form resistance) によるものとする  $F_s$  は次式で表わされる。

$$F_s = \frac{1}{2} C_D \rho U_m^2 A_p = \frac{1}{2} C_D \rho U_m^2 d h \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに  $C_D$ ; 稲株の抗力係数,  $\rho$ ; 水の密度,  $U_m$ ; 平均流速,  $A_p$ ; 株の鉛直面に対する射影面積,  $d$ ; 株の直径,  $h$ ; 株の水没水深。したがって稲株の総数を  $N$  とすれば  $\Sigma F_s$  として次式が示される。

$$\Sigma F_s = N \frac{1}{2} C_D \rho U_m^2 d h \quad \dots\dots\dots(11)$$

しかし, 稲株直径  $d$  の人為的誤差の入らない具体的な測定方法は期待できない。よって  $d$  の変化を含めたも

のとして次の変形抗力係数 (modified coefficient of resistance) として  $C_{mD}$  を定義すると (11) 式は次式のように書き改められる。

$$\Sigma F_s = N \frac{C_{mD}}{2} \cdot \rho U_m^2 h \dots\dots\dots(12)$$

$$C_{mD} = C_{Dd} \dots\dots\dots(13)$$

したがって  $C_{mD}$  は長さ dimension を有する数値である。

測定水量と 2-3 で得た抵抗係数  $f$  および (7)~(13) 式によって稲株の変形抗力係数  $C_{mD}$  の算出が可能であるが、(6)式による  $f$  を直接代入することは稲株による抵抗を二重に見積ることになり適切ではない。いま 2-2 で考察したように稲株の抵抗が壁面および底面におけるそれよりもはるかに卓越していると考えらるならば、各個の抵抗について不明な現時点ではむしろ  $\Sigma \tau = 0$  とした方が妥当であろう。

$$\Sigma \tau = 0 \dots\dots\dots(14)$$

以上の見解に基づいて資料を整理し、 $C_{mD}$  と  $F_r$  数の関係を示したものが Fig. 10. である。Fig. 10. によれば  $C_{mD}$  と  $F_r$  数とは顕著な相関が認められ実験式として次式が得られた。

$$\log C_{mD} = -2.737 \log \left( \frac{U_m}{\sqrt{gh}} \right) - 1.872 \dots\dots(15)$$

$C_{mD}$  が  $F_r$  数と相関を有するということから、株列による抗力が水面勾配もしくは落差に基づく慣性流れに影響を受けることが首肯できるようなのである。一般に造波抵抗のように  $F_r$  数を parameter とした場合、抗力係数は増加函数であるといわれるが、本実験の場合  $C_{mD}$  が長さ dimension を有する数値であるとはいえ、減少函数として表わされるのは一考に値し、考察の余地がある。

参 考 文 献

1. 防災ハンドブック編集委員会；防災ハンドブック、1964、技報堂、東京、p. 307~308
2. 土木学会水理委員会；1965年水工学に関する夏期研修会講義集 65-06 1965、土木学会、東京、p. 6~7  
土木学会水理公式集委員会；水理公式集 1967、土木学会、東京、p. 183
4. 本間仁；水理学—技術者のための流体の力学—

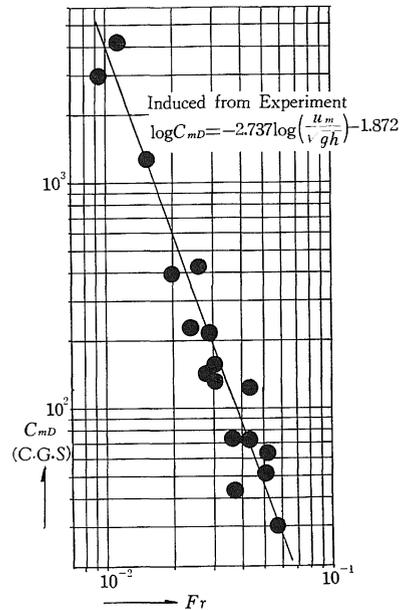


Fig. 10 Relation between  $C_{mD}$  and  $F_r \left( \frac{u_m}{\sqrt{gh}} \right)$

あ と が き

植生の条件として稲作田面をモデルとし若干の考察を行なった。本実験の結果は必ずしもじゅうぶんなものとは言いがたが、2、3の問題点を明らかにすることができた。とくに底面および壁面の剪断抵抗と稲株の形状抵抗の各個の推定はつきに究明さるべき問題であろう。目下、現場における本実験の不備を補うべく室内実験を計画中である。本実験を遂行するにあたり本研究室の末沢教授に終始有益な示唆を受けた。また本学附属本庄農場の寺田講師、福田助手はじめ職員各位には、実験区の設定、その他筆者の専門外とする面で種々懇切な教示と協力を受けることができた。さらに43年度本研究室専攻生には実験作業および資料整理に多大の労をかけた。記して深甚なる謝意を表する。

- 1967、丸善、東京、p. 180~189
5. 本間仁、石原藤次郎；応用水理学(上) 1959、丸善、東京、p. 97
6. 本間仁、安芸皎一；物部水理学 1963、岩波、東京、p. 106~110
7. 石原藤次郎訳；開水路の水理学 I 1962、丸善東京 p. 177~179
8. 岩佐義朗；水理学 1967、朝倉、東京、p. 16、p. 61~68、p. 136

9. 春日屋伸昌編；水工学便覧 1966, 森北, 東京, p. 59~60
10. 小柴尚博, 佐野豊, 古山光夫；本庄農場の土壌調査；島根農科大学研究報告 **15(A-3)** : 60, 1967
11. 角屋睦, 今尾明夫；緩勾配流れに関する研究(1) 京都大学防災研究所年報 **6** : 200~208, 1963
12. 尾崎晃；急勾配開水路の抵抗係数について 北海道大学工学部研究報告 **30** : 1~49, 1962
13. 白滝山二・福間順・末沢慶康；湖畔地区における内水の流出特性に関する研究(1)；島根農科大学研究報告 **14(A)** : 129~133, 1966

### Summary

It is well known that condition of flow in a small open channel is largely influenced with state of the vegetations. However, the relation between vegetation and roughness of channel has not been thoroughly analysed. In order to find rational approach to the problem, some experiments have been carried out on the paddy field as the model of vegetation throughout the growth period.

This report deals with some of discussions on the characteristics of resistance against flow on the paddy field. It is essentially found that the main factor of resistance is rather the rice stump than the shear force on the bed and wall caused by viscosity of fluid. The authors induced the modified coefficient of resistance peculiar to the stump transformed as Eq. 13 and recognized that there was a relation between  $C_{mD}$  and Froude number as shown in **Fig. 10**. Although this experiment has not been enough to discuss in detail, some suggestions to the future studies are indicated.