

〔農工研技報 207〕
〔183~193, 2008〕

開水路における壁面の凹凸から水路の粗度係数を求める試み

加藤 敬*・本間新哉**・北村浩二**・今泉眞之***

		目 次		
I	緒 言	183	VI	マンニングの粗度係数の観測値と壁面凹凸に関する考察
II	調査対象の水路の概要	183	1	粗度係数の算定
1	調査地区	183	2	粗度係数と壁面凹凸の関係
2	K用水路の概要	183	VII	結 言
3	S用水路の概要	184		参考文献
III	コンクリート水路壁面の凹凸測定	184		Summary
1	コンクリート水路の壁面	184		
2	水路壁面の凹凸測定	184		
IV	壁面凹凸とマンニング粗度係数との関係	187		
V	流量観測	187		
1	流量観測の概略	187		
2	流速測定	188		
3	流量観測の結果	188		
4	水面形の測量結果	188		

I 緒 言

農業生産の資源として用水を送配水する水路施設は重要な役割を果たしている。これら施設を維持管理する上で水路の現状把握は重要である。長期に供用されたコンクリート水路では、壁面が劣化しモルタル分が落ちて粗骨材が見える状態となる場合がある。建設当初は平滑な面であっても、経過年数と共に凹凸が生じ、これにより水理的な影響が生ずると考えられる。水路の水理的な影響を判断する指標として、代表的なものはマンニングの粗度係数と考えられ、粗度係数が分かれば水理計算によって水路の水理状況を推定できる。

壁面の凹凸と水路の抵抗についてはニクラーゼの研究を始め多くの研究がなされている。それらの研究の1つに開水路の凹凸と粗度係数の関係を関係づけるマンニングストリクターの式がある。この式をコンクリート水路に適用して壁面の凹凸からマンニングの粗度係数を求めることを試行した。水路壁面の凹凸を非かんがい期に計測し、その結果をもとに粗度係数を推定し、かんがい期と同じ

水路で流量を観測し粗度係数をもとめ凹凸から推定した粗度係数と比較した結果を報告する。

II 調査対象の水路概要

1 調査地区

調査地域は、北陸の沖積平野に位置する約19,000haの水田地帯である。この地域においては、頭首工から取水して配水する水路、河川から揚水して配水する水路、排水路から揚水する水路といった多様な水利用の用水系統が編み目状に配置している。この地区の土地改良区は総延長約671kmに及ぶ用水路を管理している。この中で対象とした水路は鉄筋コンクリート製農業用開水路で、供用年数が概ね10年～40年の水路である。

2 K用水路の概要

K用水路は供用約40年の古い水路である。計画図面における水路勾配は1/5000と緩やかである。調査区間は水田と林に挟まれた丘陵の裾を通る水路である。水路右岸側が低く水田となっているため水路壁が一部地上に出ている状態にある。Fig.1(a)に示す区間を調査対象とした。橋地点で流量を観測し、橋から上流方向へ水路天端高さや水位の測量を行った。流量観測点の近くに分水路があるが調査時には分水路は行なわれていない。当該水路では、①9mのパレルの内、継ぎ目の上下流0.5mづつ、合わせ

*農村総合研究部

**農村総合研究部 地域資源保全管理研究チーム

***農村環境部長

平成20年1月15日受理

キーワード：開水路、マンニング公式、劣化、算術平均粗さ

て約1m区間が新しいコンクリートで置き換えて目地が補修されている, ②塩ビ系の帯が古い目地の上にか貼られている, などの形式の目地補修が行われている。

3 用水路の概要

S用水路はFig.1 (b) に示す約500mの水路のうちの2区間を調査対象とした。この区間は上流区間が改修済の水路で, 下流区間が未改修の水路となっている。新しい水

路と古い水路が上流, 下流につながった状態にある。

上流の改修された水路は供用約10年で, 下流区間の水路は供用が約40年である。改修された水路と未改修との間に底高の差があり図中の曲部に高さを調整するための傾斜部が設けられている。改修計画図面における水路勾配は1/8500と緩やかである。

ここでの流量観測は上流区間の橋地点で行った。この上流には分水工があり, 調査時に分水が行われていた。

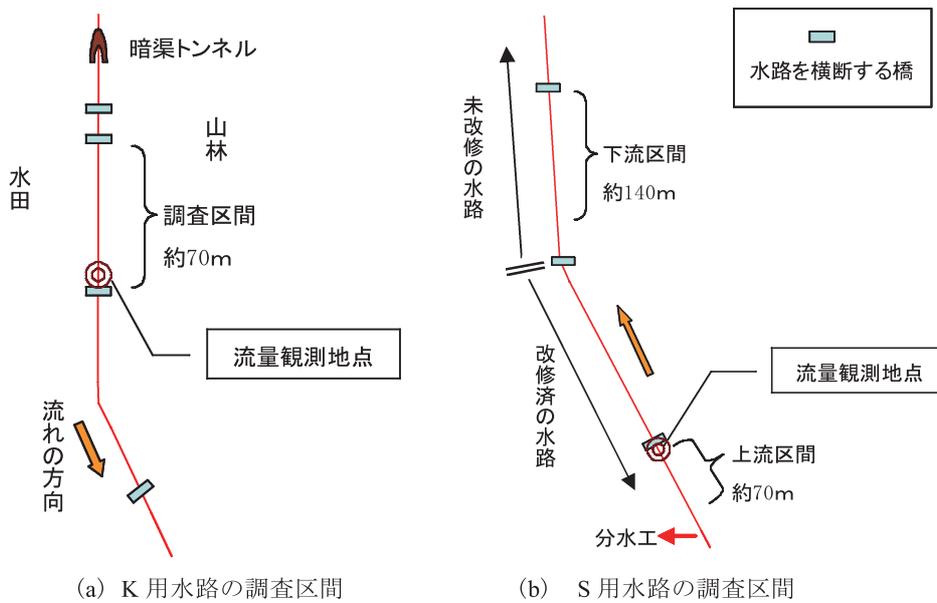


Fig.1 調査地区水路の概要
Study field

III コンクリート水路壁面の凹凸測定

1 コンクリート水路の壁面

新しいコンクリート水路の壁面は表面がモルタル分で覆われ粗骨材は見え, 表面は平滑であるのが一般である。経年とともに表面からモルタル分が流れ粗骨材が現れて凹凸が生ずる。さらに経過すると粗骨材が突き出した状態となる。

調査地区では, 水路は非かんがい期に壁面及び底面が必ず露出状態となるとは限らない。すなわち, 非かんがい期であっても水位は低くなるが水が溜まったままになる, 山林部からの流出水を受ける, 冬期の用水を通す場合などがある。したがって, 水があれば, 壁面の計測は

側壁上部から非かんがい期の水面付近までに限られる。底面の凹凸も考慮すべきであるが, 底面は測定できていないので側壁と同程度に摩耗していると考えた。それぞれの水路の始点には揚水機場があるので土砂流入は少ないと考えられ, 水路底には土砂の堆積はほとんど見られなかったので摩耗は水流によるものが主体と考えた。また, 壁面の凹凸を測定すると, 摩耗によって生じた凹凸の他に, 施工時に生じていたと考えられる空隙が見られ, 空隙は摩耗によって生じた凹凸に比べ, 深くて大きい。

2 水路壁面の凹凸測定

非かんがい期に水路壁面の凹凸を測定した。かんがい期に水面がある位置より下の位置で, 幅15cmの型と

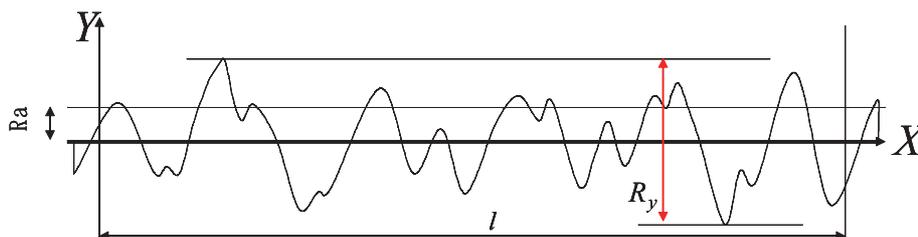


Fig.2 算術平均粗さ R_a の概念図
An image of the arittmetical mean roughness (R_a)

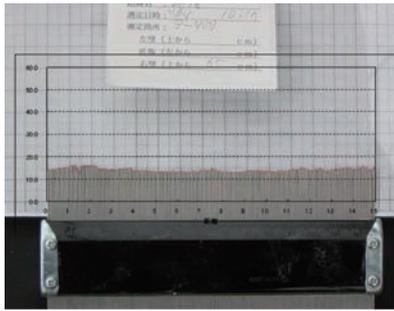


Fig.3 型とり器による凹凸測定
Profile Gauge

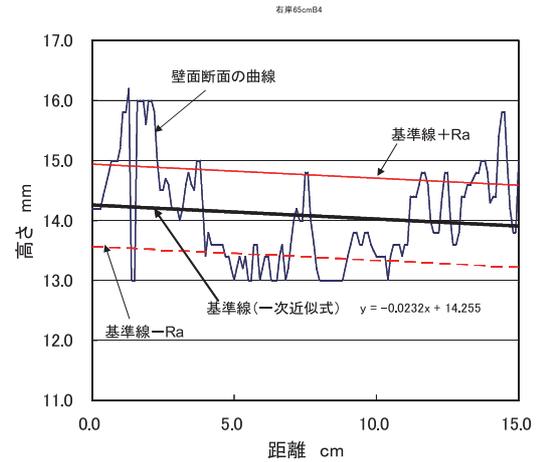
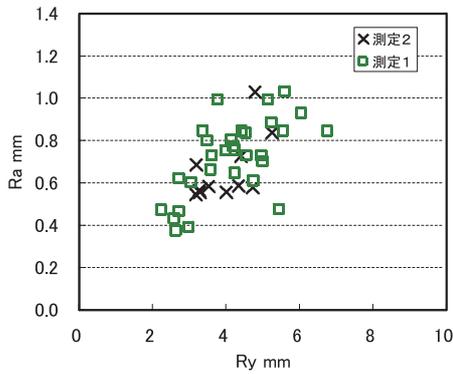
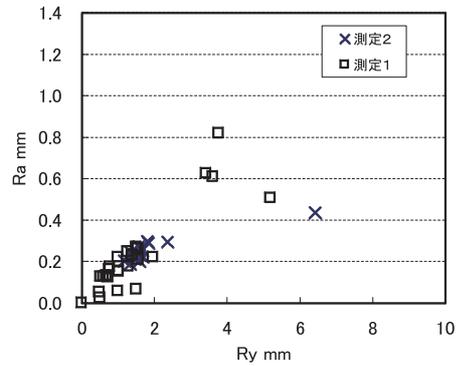


Fig.4 読み取り結果例
Curve of Canal Wall Surface

(図のY軸の高さは型とり器から凹凸読み取り時のグラフ基準からの高さ)



(a) K用水路壁面の R_a



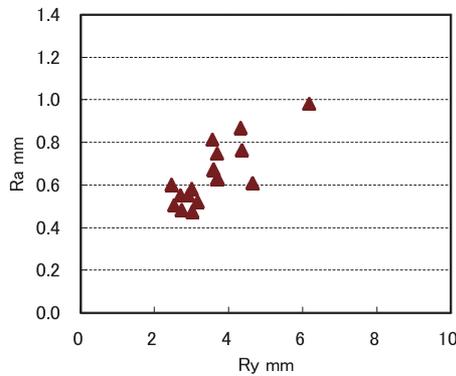
(b) S用水路上流区間 (改修済) 壁面の R_a

型取りの位置

測定1：かんがい期の水面位置から下方へ位置を変えて測定。
測定2：かんがい期の水面より下（天端から65cm位置）で水平方向に1mづつ移動して測定。

型取りの位置

測定1：かんがい期の水面位置から下方へ位置を変えて測定。
測定2：かんがい期の水面より下（天端から70cm位置）で水平方向に1mづつ移動して測定。



(c) S用水路下流区間 (未改修) 壁面の R_a

型取りの位置

測定1：かんがい期の水面位置から下方へ位置を変えて測定。

Fig.5 壁面の測定結果
 R_a of Canal Walls

り器 (Fig.3参照) を水路壁面に押しあてて、表面の凹凸を写し取り、これをグラフ用紙を背景に写真に撮り (Fig.3)、写真から凹凸状態を読み取った (Fig.4)。その結果を算術平均粗さ R_a と、最大高さ R_y で整理した。算術平均粗さは次式で表される。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad \dots (1)$$

ここに、 R_a 算術平均粗さ、 l : 基準の長さ、 $f(x)$: 断面の曲線。最大高さ R_y は断面曲線の最大値と最小値の差。

断面の曲線の計測ピッチは約1mmとした。断面の曲線 $f(x)$ は凹凸読み取り値の1次近似曲線を基準線として求める。

3区間の水路壁面凹凸の計測結果をFig.5 (a), (b), (c)に示す。型とり器では形を写す鋼棒の太さ (0.8mm) があるので、この太さより微細な凹凸はとれない。 R_a がゼロはこの状況にあると思われる。供用後、約40年の

K用水とS用水下流区間では、表面に粗骨材が見られる (Fig.6)。S用水路上流区間は供用は約10年である。壁面に見える粗骨材は少ない。各水路区間での壁面の R_a , R_y の計測結果はつぎのように整理される。

K用水路

R_a は0.7mm付近を中心に0.4~1.0mmの範囲にある。 R_y は2~6mmとなっている。

S用水路上流区間 (改修済)

R_a は0.2mm付近に集中している。10% (54デター中5個) ほどは空隙部分を測定したと見られ、 R_a , R_y が大きい。凹凸は概略 R_a 0.0~0.3mm, R_y は0~3mmとなった。

S用水路下流区間 (未改修)

R_a は0.7mm付近を中心に0.3~1mmの範囲にある。改修区間に比べ大きい。 R_y も2~6mmと改修区間に比べ大きくなっている。



(a) K用水路の壁面 粗骨材が見える



(b) S用水路上流区間 (改修済)

Fig.6 水路壁面の状況

Photo. of Canal Wall Surface

また、K用水路において計測方向による違いを見た。かんがい期に水面下となる場所を約15cm四方の粘土で型どりして垂直22測線と水平方向に23測線について

5mmピッチで R_a , R_y を求めた (Fig.7)。ばらつきが見られるが、垂直、水平方向ではほぼ同じ傾向を示す。

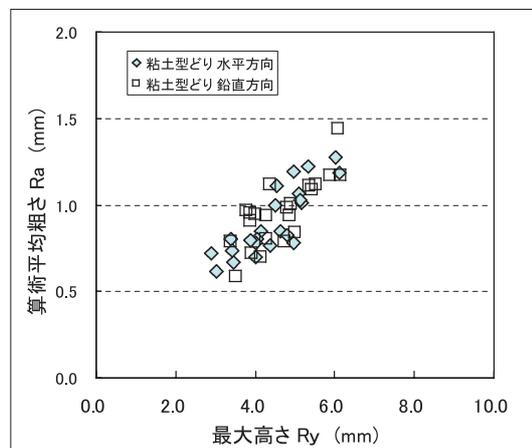


Fig.7 水平、垂直方向 R_a の比較

Relationship between R_a and R_y

IV 壁面凹凸とマンニング粗度係数との関係

水路の水利設計に用いられるマンニングの平均流速公式は次式で表される。

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (2)$$

この式のマンニングの粗度係数は水路での代表的な水利の指標である。計画においては経験値として仮定のn値を用いて水利設計に用いる。これは実際の水路では流量等を観測して得られる数値である。そして、粗度係数の値は表面の凹凸に関係する。壁面の凹凸と流速の関係については、相当粗度kを用いてマンニング式を書き直した、マンニングストリクラー (Manning-Strickler) の式がある¹⁾。

$$V = 7.66 \left(\frac{R}{k} \right)^{1/6} \sqrt{gRI} \quad (3)$$

ここで、V：平均流速，R：径深，k：相当粗度，g：重力の加速度，I：動水勾配。この式からnはkの1/6乗に

比例する ($n = \frac{k^{1/6}}{7.66 \sqrt{g}}$) 。

kとnの関係はTable 1のように計算される。このマンニングストリクラー式を用いれば、水路の相当粗度kの値を知ることが出来れば壁面凹凸から粗度係数が求められる。

相当粗度kは水利実験において水路壁面上に付けられた一様の粗度 (突起物) をもとにしている。水路壁面や河床の凸凹の高さは、実験の突起物と比較すれば様なものとはいえない。しかし、水路の壁面では平らな面からモルタル分が落ちて表面に現れた骨材が凹凸を形成している。このため凹凸の高さは骨材の大きさの範囲内にあると考えられる。そこで、壁面の凹凸をkに読み替えて、マンニングストリクラー式を適用するとすれば粗度係数が得られる。

kの値をR_aの2倍以上から最大高さR_y程度の間であると仮定する。調査した水路におけるkの値を2×R_a～R_yまでの範囲と見積もれば、Fig.5から2×0.1～6 mm程度

となる。マンニングストリクラー式の関係から調査地区の粗度係数はn=0.010～0.017程度と見積もられる。古い水路では、粗度係数の設計値をn=0.015とすることが多いから、余裕高での粗度係数0.001の増加分を考慮すれば水路計画に用いられる粗度係数の想定範囲から大きくはずれていない。

マンニングストリクラーの式を用い凹凸測定結果から水路個別には、

K用水路はkの値を0.3～6mmと見積もり、粗度係数n1=0.011～0.018程度、

S用水路上流 (改修済) はkの値を0.2～3mmと見積もり、粗度係数はn2=0.010～0.016程度、

S用水路下流 (未改修) はkの値を1.4～5 mmと見積もり、粗度係数はn3=0.014～0.017程度の範囲

と推定される。S用水路上流はR_a、R_yともに下流より小さいので、粗度係数は下流より小さくn2<n3となると予想される。

実際水路の壁面の凹凸と、粗度係数が得られれば壁面凹凸の状態R_a、R_yとkの関係が推定できる。この関係を明らかにすれば、壁面状態から粗度係数を推定することが可能となる。

Table 1 kとnの関係
Relationship between k and n

n	k mm
0.010	0.2
0.011	0.3
0.012	0.6
0.013	0.9
0.014	1.4
0.015	2.2
0.016	3.2
0.017	4.6
0.018	6.5

V 流量観測

1 流量観測の概略

流量観測^{2, 3, 4)} はかんがい期の8月に行った。水路断面面積測定し、水路断面を3分割した測線で流速測定を行った (Fig.8)。流量測定地点の上流、あるいは下流側の水路側壁天端高を測量し、天端から水面までの距離を測定した。水位の測定については水面の変動が数cmはあるので、最大このオーダーの誤差が入り得る可能性がある。

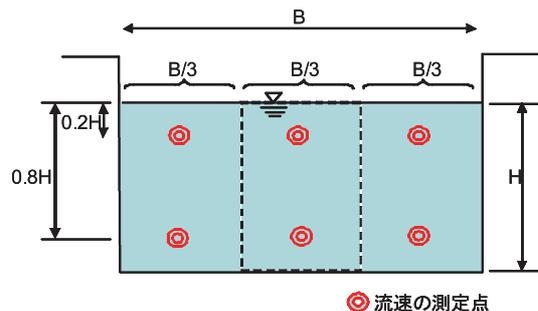


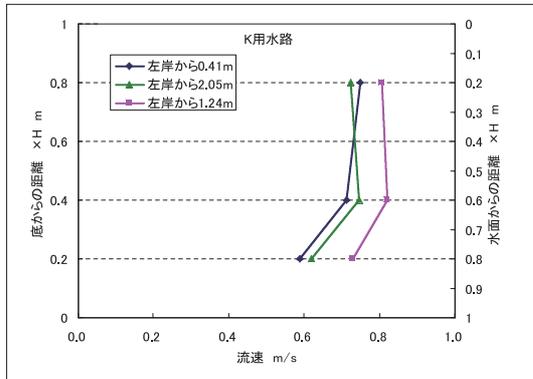
Fig.8 水路断面の分割と流速の測定位置
observation position of velocity

2 流速測定

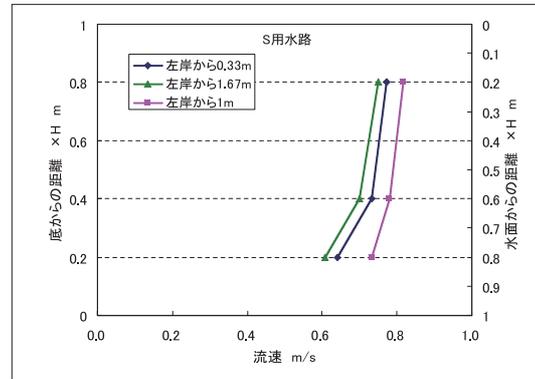
流速計は、T社2方向電磁流速計（型番名）を用いた。流速はX, Y, 2方向の値があるので $\sqrt{X^2 + Y^2}$ を観測の平均流速とした。流速は1点につき10秒間の計測を2回行い、平均した。なお、1秒毎に表示される値を

視認していて極端に大きな値が現れた場合はその観測を破棄した。そのような状態は、1観測断面の測定中（流速を18回測定）で数回発生した。

平均流速の算定は2点法（水面から水深の2割、8割の地点）を用いるものとした。補足として水面から6割地点の流速も測定した。測定した流速の分布をFig.9に示す。



(a) K用水路流速分布



(b) S用水路流速分布

Fig.9 水路の流速分布
distribution of velocity

3 流量観測の結果

平均流速の算定は2点法（水面から水深の2割、8割の地点）とし、(1)式を用いた。流量は水路断面を3分割した通水面積に平均流速を掛けて求めた。

$$v_m = \frac{1}{2} (v_{0.2} + v_{0.8}) \quad (4)$$

$$Q = \sum V_j \cdot A_j \quad (5)$$

ここに、 v_m ：平均流速、 $v_{0.2}, v_{0.8}$ ：水面より水深の20%、

及び80%下の流速、 V_j, A_j ：断面Jの平均流速、通水断面積。

観測の結果は、K用水路の流量は1.562m³/s、S用水路の流量は1.022m³/sとなった。平均流速を1点法とすれば、流量は幾分多くなる。

4 水面形の測量結果

水面形の測量結果をTable 2~Table 4に示す。各区分とも、変動は小さいが水深は変化しているので等流状態とはいえない。

Table 2 K用水路測量結果

A result of measurement of the water level in K channel

地点番号	距離 m	壁天端高さ m	天端と水面までの距離 m	水路壁高さを1.55mとしたときの底高さ	水位 m	水深 m
No4	86.3	-1.569	0.610	-3.119	-2.179	0.940
No5	76.2	-1.589	0.610	-3.139	-2.199	0.940
No6	66.2	-1.576	0.610	-3.126	-2.186	0.940
No7	56.1	-1.627	0.565	-3.177	-2.192	0.985
No8	46.2	-1.596	0.610	-3.146	-2.206	0.940
No9	36.1	-1.643	0.555	-3.193	-2.198	0.995
No10	26.2	-1.627	0.572	-3.177	-2.199	0.978
No11	16.2	-1.618	0.585	-3.168	-2.203	0.965
No12	6.2	-1.614	0.592	-3.164	-2.206	0.958

Table 3 S用水路（上流区間）測量結果

A result of measurement of the water level in S channel

地点番号	距離 m	壁天端高さ m	天端と水面までの距離 m	水位 m	水路壁高さを1.08mとしたときの底高さ	水深 m
No122	71.9	-1.395	0.330	-1.725	-2.475	0.750
No123	62.9	-1.373	0.330	-1.703	-2.453	0.750
No124	53.9	-1.386	0.336	-1.722	-2.466	0.744
No125	44.9	-1.392	0.348	-1.740	-2.472	0.732
No126	35.9	-1.393	0.340	-1.733	-2.473	0.740
No127	26.9	-1.388	0.340	-1.728	-2.468	0.740
No128	17.9	-1.384	0.348	-1.732	-2.464	0.732
No129	9.0	-1.395	0.352	-1.747	-2.475	0.728
No130	3.5	-1.400	0.352	-1.752	-2.480	0.728

Table 4 S用水路（上流区間）測量結果

A result of measurement of the water level in S channel (down stream)

地点 番号	距離 m	壁天端 高さ m	天端と水 面までの 距離 m	水位 m	水路壁高 を1.08m としたと きの底高 さ	水深 m
No162	14.8	-0.872	0.238	-1.110	-1.952	0.842
No163	24.7	-0.878	0.220	-1.098	-1.958	0.860
No164	34.8	-0.861	0.243	-1.104	-1.941	0.837
No165	44.8	-0.854	0.253	-1.107	-1.934	0.827
No166	50.3	-0.843	0.270	-1.113	-1.923	0.810
No167	51.3	-0.850	0.248	-1.098	-1.930	0.832
No168	61.3	-0.886	0.222	-1.108	-1.966	0.858
No169	71.3	-0.904	0.223	-1.127	-1.984	0.857
No170	81.3	-0.890	0.225	-1.115	-1.970	0.855
No172	101.3	-0.903	0.205	-1.108	-1.983	0.875
No173	108.4	-0.927	0.210	-1.137	-2.007	0.870
No174	111.6	-0.902	0.213	-1.115	-1.982	0.867
No175	121.6	-0.924	0.215	-1.139	-2.004	0.865
No176	131.6	-0.921	0.213	-1.134	-2.001	0.867
No177	141.6	-0.903	0.225	-1.128	-1.983	0.855
No178	151.6	-0.932			-2.012	
No179	161.6	-0.922	0.210	-1.132	-2.002	0.870
No180	164.1	-0.942				

流量観測を行った橋はNo180の下流に位置する。
側壁天端高さを測量した基準点は、各区間それぞれ測量機器を
設置した高さとなっている。

VI マニングの粗度係数と壁面凹凸に関する考察

1 粗度係数の算定

マンシングの粗度係数は、流量と動水勾配、水路断面を求め、平均流速公式に当てはめ求められる。しかし、粗度係数を求めるについて竹村ら⁶⁾はその測定の難しさ、測定上の問題点を整理している。特に水面形を捉えることに難しさがあることを指摘している。ここでは少し簡略な方法で算定を行った。

観測結果からマンシングの粗度係数の推定にあたってはつぎの3つの算定方法によった。

- ① 等流と仮定して水面勾配、流量、水深（流観地点）、水路幅からマンシングの流速公式から求める。
水面勾配は、観測データの距離 x と水位 y の関係から1次式の近似式 $y=a \cdot x+b$ を求め、平均水面勾配 $I=1/a$ とする。
- ② 不等流として区間の上流下流端の水深の違いによる速度水頭を考慮し、水位条件に区間損失に合う粗度係数を試算で求める。
- ③ 不等流の水面形を計算して観測水面形と比較する。②では途中の水面形を考慮しないので、途中の水面を主観的になるが判断材料とする。

S用水路上流区間は、上流に分水工による水面低下と下流曲部の低下排水があると考えられる。

各区間における粗度係数の推定結果をTable 5に示す。また、Fig.10に不等流計算面と観測水位の比較を示す。

K用水路については推定方法によりばらつきが見られる。算定①では流観位置の水深を用いているが、上流側の水深を使えば粗度係数は0.016程度まで変わり得る。算定②では観測値のバラツキがあるが、途中水位の影響は無視されている。水深は変化して流況は不等流の状態といえる。算定③では計算水面形と観測水面形の比較では粗度係数は0.017程度の時が一致がよい。不等流状態であるので、③の値をこの区間の粗度係数とする。

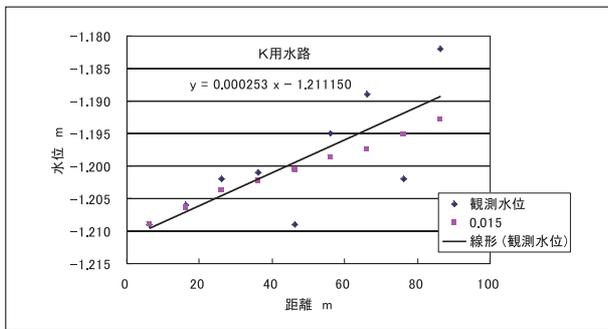
S用水路の上流区間は壁面の凹凸から判断すれば、下流区間より小さくなると推定されるが、算定結果は差がほとんどなく、下流側の値がいくぶん小さくなった。

上流区間は算定方法での差が小さく、粗度係数は0.016～0.017程度となっている。下流区間は算定①、②の差が小さいが、水面形が緩やかなため不等流の水面形比較では、判定が難しい。下流区間は粗度係数が0.0164～0.0165と考える。

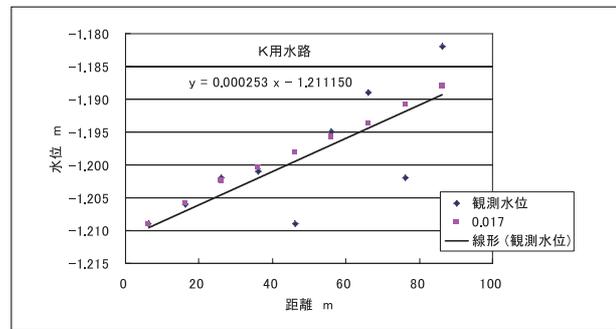
Table 5 推定方法による粗度係数の値

The figures of the roughness coefficient by the way of estimating it

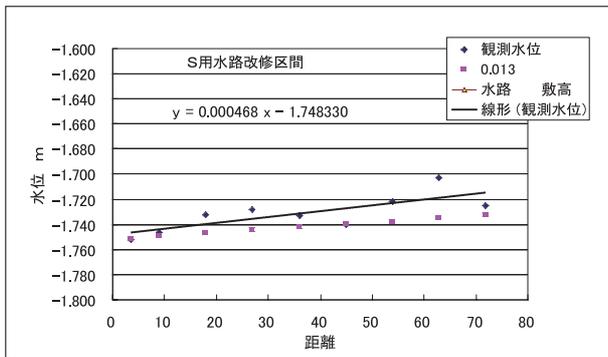
水路名	算定方法	粗度係数	備考
K用水路	①	0.0147	h=0.90m (流観地点), I=1/3952 途中水位の下がった観測水位は無視される
	②	0.0185	
	③	0.017程度	
S用水路上流区間 (改修済区間)	①	0.0169	h=0.71m (流観地点), I=1/2137
	②	0.0160	
	③	0.017程度	
S用水路下流区間 (未改修区間)	①	0.0165	h=0.88m (下流の橋地点), I=1/4132 nにより計算の水位が上下するが, 判定が難しい。
	②	0.0164	
	③	0.014~0.017	



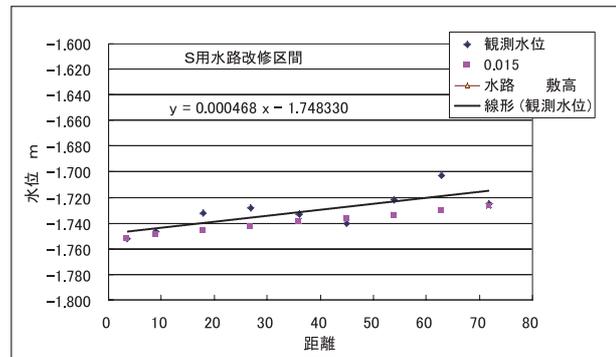
(a) K 用水路



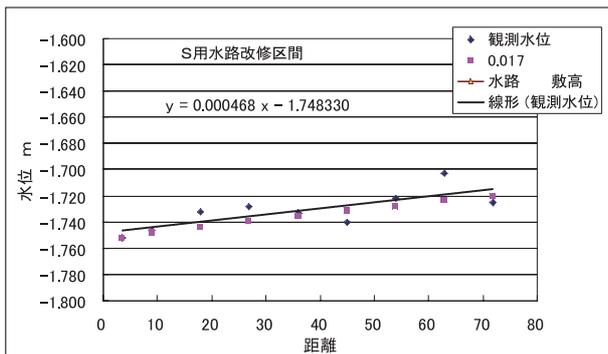
(b) K 用水路



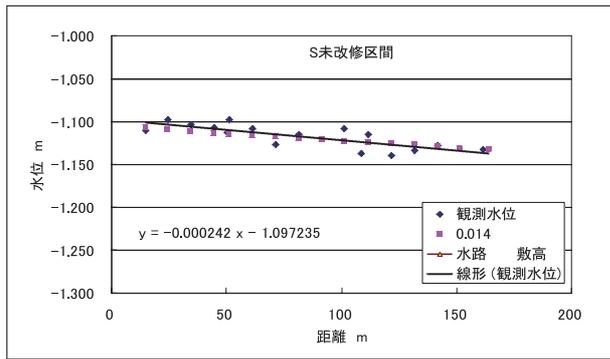
(c) S 用水路上流区間



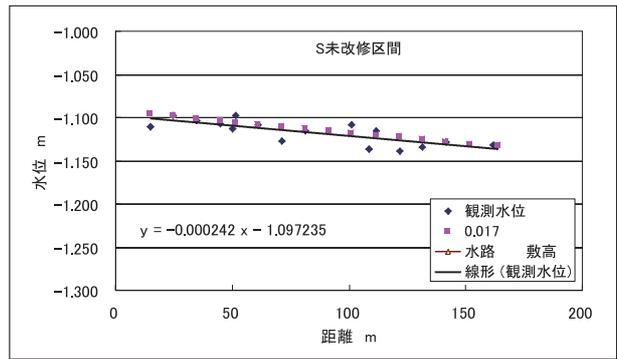
(d) S 用水路上流区間



(e) S 用水路上流区間



(f) S用水路下流区間



(g) S用水路下流区間

Fig.10 不等流計算水位及び観測水位

The comparison of the observation water level and the calculation water level

2 粗度係数と壁面凹凸の関係

観測から得た粗度係数から相当粗度 k を求めたFig.5で得た壁面の凹凸データ中に示せば(図中の直線) Fig.11に示すようになる。C用水路の k はA用水路、B用水路に比べ、壁面の R_y に対して大きめになっている。C用水路は改修されており壁面状態はB用水路に比べ良いので、粗度係数が小さくあるべきと考えられる。

この様な原因として観測誤差が考えられる。水路には

数cm以上の波立ちがあるので水面の計測を1cm単位で読み取った。観測誤差を1cmとし観測区間長さとして観測した勾配を考慮して動水勾配が粗度係数へ与える変化を検討すると最大30%程度と見積もられ、誤差が大きいことが判明した。

観測の誤差を1mm程度とすれば流量観測の誤差程度となるが、波立ちのある状態での計測方法が課題となる。

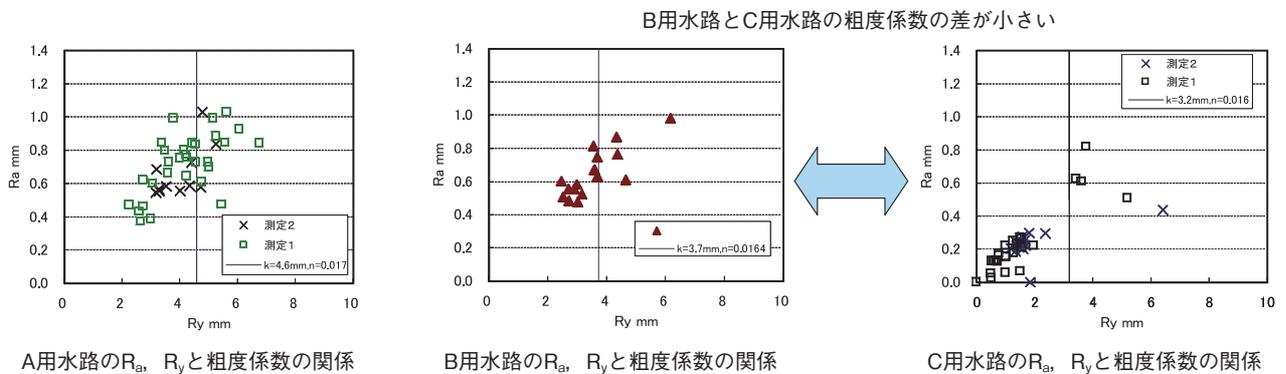


Fig.11 R_a , R_y と観測した粗度係数の関係

Relationship between R_a , R_y and roughness coefficient n

粗度係数を測るには水路に分水工、落差工などの構造物がなく、直線であり等流状態が現れる十分な長さの区間が望まれる。距離が大きく取れば水位差が大きくなり、波立ちの誤差としての影響を減らすことができる。しかし、日本の農業用水路では、短い距離で分水工があり、地形の変化も多い。したがって、等流状態を得られる水路は少ないと考えられる。よって、観測の精度を高く観測することが必要である。

Ⅶ 結言

マンシングストリクター式を用いて壁面の凹凸データから k を仮定し水路のマンシングの粗度係数を推定した。流量観測により求めた粗度係数は、相当粗度 k から推定した範囲にあった。推定範囲を狭めるには k と R_a , R_y の詳細な対応関係を詰めなければならない。しかし、マンシングの粗度係数を流量、水面形の観測から求める場合、観測の誤差による影響を受ける。特に、動水勾配が緩く、短区間の水路では精度を上げる観測方法を検討しなければならない。この報告では、壁面の凹凸から粗度係数を求めることを試みた報告のみとした。

参考文献

- 1) 荒木・椿 (1960) : 水理学演習下巻11版, p7-10
- 2) 安芸浩一 (1952) : 平均流速の測定法, 流量測定法, p29-34
- 3) 川田裕郎・小宮勤一・山崎弘郎, 編著 (1979) : 大型開水路の流量測定, 流量計測ハンドブック, 408-409, 日刊工業新聞社
- 4) 鈴木晴之 : 流量測定, 水工学便覧p204-224
- 5) 農林水産省農村振興局 (2001) : 土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」, p60-63
- 6) 竹村武士, 丹治肇 : 開水路現場粗度係数の推定方法の検討, 農土誌69 (5), p26-29

Deterioration of Irrigation Canals and Change in Roughness Coefficient

KATO Takashi, HONMA Shinya, KITAMURA Koji and IMAIZUMI Masayuki

Summary

The unevenness of the canal wall was measured, and the figures of R_a and R_y were calculated. The figures of k were estimated based on R_y and R_a . The Manning's roughness coefficients were calculated by using Manning-Strickler's formula and the figures of k . The discharge and the water surface form were observed in canals, and Manning's roughness coefficients were calculated. The figures of k were estimated based on the observed Manning's roughness coefficients. The range of k based on the observation was close to the range of R_y . Therefore, Manning's roughness coefficient can be estimated based on the unevenness of the canal wall.

Keyword : open channel, Manning's formular, arithmetical mean roughness, deterioration,

