

農業水利施設を対象とした
水理および水利用機能診断に関する研究

藤山 宗

2017

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3
第 2 章 評価板を用いたコンクリート開水路の粗度係数の推定	5
2.1 緒論	5
2.2 方法	7
2.2.1 粗度係数評価板	7
2.2.1.1 仕様および作製方法	7
2.2.1.2 粗度係数 n	7
2.2.1.3 算術平均粗さ R_a とスキューネス R_{sk}	9
2.2.2 現地水路および観測概要	11
2.3 結果と考察	14
2.3.1 粗度係数評価板の粗度係数に影響を及ぼす因子	14
2.3.2 現地水路の粗度係数	14
2.3.2.1 評価板法と携帯型測定法に基づく粗度係数の比較	14
2.3.2.2 評価板法とマニング式法に基づく粗度係数の比較	16
2.4 結論	18
第 3 章 農業用水路における漸縮係数に関する実験的研究	20
3.1 緒論	20
3.2 研究の方法	22
3.2.1 実験方法	22

3.2.2	漸縮係数 f_{qc} の算定方法	25
3.3	結果と考察	26
3.3.1	流況の概要	26
3.3.2	水路の縮小角度 θ と縮小比 B_2/B_1 が縦断水面形とフルード数 F_r に及ぼす影響	26
3.3.2.1	縦断水面形と水面落下位置のフルード数 F_{r3} への影響	26
3.3.2.2	上流フルード数 F_{r1} と下流フルード数 F_{r2} への影響	30
3.3.3	漸縮部下流のフルード数 F_{r2} と漸縮係数 f_{qc} の関係	34
3.3.4	水路の縮小角度 θ と縮小比 B_2/B_1 が漸縮係数 f_{qc} に及ぼす影響	36
3.4	結論	38
第4章	パッチ状の水路補修が開水路の通水性に関する水理機能に及ぼす影響評価	39
4.1	緒論	39
4.2	研究の方法	40
4.2.1	対象水路の概要	40
4.2.2	水路構造および流速の計測方法	43
4.2.3	粗度係数 n の評価	44
4.2.4	不等流計算による縦断水面形に影響を及ぼす因子の評価	45
4.3	結果と考察	46
4.3.1	構造および水理諸元	46
4.3.1.1	対象水路の縦断水路底高および水路幅	46
4.3.1.2	縦断水面形	46
4.3.1.3	横断流速分布	49
4.3.2	粗度係数	49

4.3.3	パッチ状の水路補修が縦断水面形に及ぼす影響	52
4.3.4	パッチ状の水路の通水性に関する水理機能診断項目	55
4.4	結論	57

第5章 水路の階層に基づく用水路ネットワークの機能評価手法に関する研究

5.1	緒論	59
5.2	用水路のネットワーク化と階層付け	60
5.2.1	水路ネットワークのモデル化手法	60
5.2.2	分配・回収・連結点を持つ水理学的な意味と機能	62
5.2.3	Nodeが持つ機能とその性能項目	62
5.2.4	用水路ネットワークの持つ機能	63
5.2.5	受益面積に基づく用水路のランク付け	63
5.3	直分問題への適用事例	65
5.3.1	用水路の直分とそれに由来する問題	65
5.3.2	長大幹線水路の直分問題の分析	67
5.3.3	直分問題の解決方法	69
5.4	番水問題への適用事例	69
5.4.1	番水の概要	69
5.4.2	渇水時における長大水路の階層問題と対策	72
5.4.3	番水による水路階層の表示	72
5.5	結論	75

第6章 総括

76

謝辭 ····· 81

参考文献 ····· 83

第 1 章 序論

1.1 研究の背景と目的

農林水産省では、長期供用を経て変状が生じている農業水利施設に対し、機能診断を実施し効率的かつ経済的に改修を行う、ストックマネジメント事業が実施されている（食料・農業・農村政策審議会，2010）．ストックマネジメントにかかる基本的な考え方が導入された平成 18 年から 10 年が経過し，国営施設の機能診断済みの割合は再建設費ベースで 9 割にまで達している（食料・農業・農村政策審議会，2016）．近年，長束ら（2002）によりコンクリート構造物の劣化診断の基本的な考え方が整理され，森ら（2008）により開水路の変状をデジタル情報として迅速かつ効率的に記録できる農業用水路壁面画像連続撮影技術が開発され，渡嘉敷（2013）によりコンクリート水路の摩耗機構が検討されるなど，農業水利施設のコンクリート構造の機能診断にかかる多くの有用な研究成果が得られている．これらの研究成果は，現在の機能診断の円滑な遂行に寄与しているとともに，今後の機能診断にも十分に活かされることが期待される．しかし，その一方で，これまで機能診断を実施してきた中で，課題も明らかとなっている．

農業水利施設の機能は，構造（structural ability），水理（hydraulic ability）および水利用（water serviceability）の三つから成り（中・樽屋，2008），これらの三つの機能が発揮されてはじめて，農家のもとへ適切に農業用水を配水することが可能となる．しかし，これまでの機能診断では，安定性や力学的安全性等，いわゆる構造機能の性能項目を診断することが主体であり，水理および水利用にかかる機能診断が十分に行われていない状況であった．その結果として，例えば水路改修を行った事例では，現地水路で必要水位を確保できないような水理的な不具合が生じる（皆川ら，2014）など，水理機能あるいは水利用機能にかかる問題が

生じている。今後の機能診断では、これまでと同様に構造機能はもとより、通水性や水位・流量制御性といった水理機能の性能項目、分水均等性や配水弾力性といった水利用機能の性能項目を含めた、三つの機能を網羅した機能診断の実施が求められている（樽屋・三春，2009）。

また、日本の販売農家戸数は、雇用機会の拡大による都市部への農家人口の流出や高齢化に伴う離農等により、昭和 25 年をピークに減少を続けている（農林水産省，2015）。農林水産省では、その対策として、農地の大区画化や汎用化，それに伴う水利用の合理化，ICT 化などを図り，担い手の水管理の省力化を進めるとともに，経営の自由度を確保できる需要主導型の農業水利システムへ転換することを目標として掲げている（食料・農業・農村政策審議会，2016）。このような社会的背景を踏まえ，農業水利システムの再編に取り組むことになるが，その際，既設の農業水利施設（システム）の水理および水利用にかかる機能・性能を明確にしなければ，再編後の農業水利施設（システム）に求められる同機能・性能を達成することは困難である。近年，中矢ら（2008）により携帯型の粗さ測定装置を用いた粗度係数の推定手法が検討され，鈴木ら（2014）により弾性波を用いた農業用パイプラインの水理機能診断法が検討され，藤山ら（2014）により水理機能平面図および水理機能診断カルテを用いた水理機能診断の手順が検討されるなど，農業水利施設の水理および水利用にかかる機能診断手法の研究成果が得られている。しかし，これらの研究成果は，上述のコンクリート構造にかかる研究成果に比べると少なく，農業水利施設において抱えている水理および水利用にかかる問題を解決するための手法としての体系的な整理を行うまでには至っておらず，現状の機能診断の体系では来る時代の変化に対応することができない。そのため，水理および水利用にかかる問題を解決するための手法としての体系的な整理を最終目標とし，水理および水利用にかかる機能診断手法を検討することが急務の課題となっている。

以上のことから，本研究では，農業水利施設，主に開水路を対象とし，水理および水利用に関する機能診断手法を検討することを目的とする．

1.2 本論文の構成

本論文は，全6章で構成されている．第2章から第4章では水理機能にかかる診断手法，第5章では水利用機能にかかる診断手法について検討する．

第1章では，前節において，ストックマネジメント事業における機能診断の考え方と課題，担い手の減少に伴い水管理の省力化を目指した農業水利システムの再編を行う社会的要求について概説し，本研究の目的について述べた．また，本節では，本論文の構成について述べる．

第2章では，現地水路の側壁および底版を含めたコンクリート面に対して，湿潤および浸水状態で，容易かつ省力的にマンシングの粗度係数 n を評価するために，粗度係数評価板を用いた推定法（評価板法）を提案し，同手法の有効性を評価する．中矢ら（2008）の携帯型粗さ測定装置（携帯型測定法）による推定値と比較することでその有効性を評価する．参考までに，水路縦断方向の複数点で評価板により粗度係数を評価し，マンシングの平均流速公式に基づく従来法（マンシング式法）による粗度係数推定値とも比較を行う．

第3章では，開水路漸縮部を対象に水理模型実験を実施し，水路形状にかかわる重要なパラメータである漸縮部の縮小角度 θ と水路幅縮小比（水路幅変化部の下流水路幅 B_2 /上流水路幅 B_1 ）が損失係数（漸縮係数 f_{qc} ）に及ぼす影響を評価する．また，開水路漸縮部およびその下流区間では，特有の縦断水面形が見られ，開水路漸縮部の設計を行う際，開水路漸縮部を含めた上下流にて想定される流況も把握しておく必要がある．そのため， θ と B_2/B_1 が縦断水面形とフルード数 F_r に及ぼす影響についても併せて検討する．

第4章では、一定区間毎に水路壁面材料が不連続に変化するコンクリート開水路（パッチ状の水路）を対象に、現地調査と水理計算に基づき通水性に関する水理機能を評価する。現地観測結果を基に、水路壁面粗度、水路底高および水路幅の構造諸元を変更した場合における不等流計算を実施し、パッチ状の水路補修が縦断水面形に及ぼす影響について考察を行う。また、パッチ状の水路の通水性に関する水理機能診断を実際に行う場合を想定し、水理機能診断項目と水理機能を診断するための調査項目を整理し、新たに提案する。

第5章では、Hortonが提案し、Strahlerが改良した河川位数（stream order）の考え方（Strahler, 1952）を参考に、用水路ネットワークの機能を評価するための新しい水路用の位数を提案し、その有効性を直分と番水の問題を例とし検証を行う。

第6章では、各章で得られた成果を総括し、本論文の結論とする。

第2章 評価板を用いたコンクリート開水路の粗度係数の推定

2.1 緒論

農林水産省では、長期供用を経て水路内面の摩耗や損傷による凹凸が生じている農業用水路に対し、機能診断を実施し効率的かつ経済的に水路補修を行う、ストックマネジメント事業が実施されている（食料・農業・農村政策審議会，2010）。現在の農業用水路を対象とした機能診断では、安定性や力学的安全性などの水路の構造機能を診断することが主体である。しかし、構造機能に着目した機能診断結果に基づき、例えば水路改修を行った結果、現地水路で必要水位を確保できないような水理的な不具合が生じている（皆川ら，2014）。そのため、今後の機能診断については、通水性や水位・流量制御性などの性能項目を含む水理機能、あるいは配水弾力性や分水均等性などの性能項目を含む水利用機能までを見据えたものにするのが求められている（例えば、樽屋・三春，2009；中・樽屋，2008；藤山ら，2015）。

農業用水路に求められる水理機能の性能項目において、通水性能の指標には、マンニングの粗度係数（以降、「粗度係数」と称する）が一般に用いられる。機能診断において実際に水路の通水性能を評価する場合には、粗度係数の既往の参考値（例えば Chow（1962））と現地における推定値とを比較してその性能の低下具合を評価する。現地水路の粗度係数は、一般に、通水時に流量、水深、動水勾配を計測し、その計測値をマンニングの平均流速公式に代入して求められる。そのため、この手順は、労力とコストがかかる上、観測誤差による不確実性が生じやすい。また、粗度係数を精度よく評価するためには、水路に分土工や落差工などの構造物が無く、等流状態が現れる十分な長さの直線区間の確保が望まれるが、日本の農業用水路では、それらの条件を満足する水路は少ない（加藤ら，2008）。

以上のような背景を踏まえ、既往の研究では、水路の通水性能を省力的かつ低コストで、精度よく評価することを目的とし、摩耗したコンクリートの表層形状から粗度係数を推定する手法の検討が行われている。中矢ら（2008a）は、骨材が露出したコンクリート水路を用いて水理模型実験を実施し、コンクリート表面の粗さパラメータ（算術平均粗さ、最大高さ）と相当粗度の関係式を見出した。さらに中矢ら（2008b）は、レーザー変位計による携帯型の粗さ測定装置を開発し、上述の関係式を用いて、粗度係数を推定する手法を提案した。また、太田垣ら（2012）は、デジタルカメラによる撮影画像の解析値を中矢ら（2008a）が整理した関係式に適用し、粗度係数評価断面を2次元から3次元へと拡張した。最近では、小古ら（2015）により、空中超音波の最大振れ幅を利用した粗度係数の推定方法が提案されている。しかし、これらの粗度係数推定法は、乾燥したコンクリート面への適用に限定されるため、例えば溜まり水が生じているような水路底版への適用は困難である（浅野ら、2014）。また、特殊な機器あるいは技術を必要とするため、必ずしも省力的な手法とは言えない。

本研究では、現地水路の側壁および底版を含めたコンクリート面に対して、湿潤および浸水状態で、容易かつ省力的に粗度係数を評価するために、粗度係数評価板を用いた推定法（評価板法）を提案し、同手法の有効性を評価することを目的とする。まず、粗度係数評価板を複数自作し、各評価板の粗度係数を上述の中矢ら（2008a）の方法に従って決定した。その際、評価板の算術平均粗さ R_a と凹凸の対称性の指標であるスキューネス R_{sk} を中矢ら（2008a）の実験水路壁面のそれらと比較し、評価板と中矢ら（2008a）の実験水路壁面の特性の差異を確認した。次に、作製した評価板の粗度係数に対する影響因子を予め把握するために、評価板の骨材の種類および骨材の露出具合が粗度係数に及ぼす影響を評価した。対象水路の粗度係数を、自作した粗度係数評価板で評価し、中矢ら（2008b）の携帯型粗さ測定装置（携帯型測定法）による推定値と比較することでその有効性を評価

した。参考までに、水路縦断方向の複数断面で評価板により粗度係数を評価し、マンニングの平均流速公式に基づく従来法（マンニング式法）による粗度係数推定値とも比較を行った。

2.2 方法

2.2.1 粗度係数評価板

2.2.1.1 仕様および作製方法

Table 2.1 は、粗度係数評価板の仕様を示す。粗度係数評価板の種類は、骨材（2種類）および骨材の露出割合（4種類）の組合せが異なる計 8 枚とした。粗度係数評価板 1 枚の寸法は、短辺 8cm×長辺 12cm×厚さ 2cm とした。粗度係数評価板の作製は、型枠底面にコンクリート表面遅延剤を塗布した後、コンクリート打設、気中養生、脱型および洗浄の順に行った。骨材の露出割合については、コンクリート表面遅延剤（ヒーバウ社製、RSE-L）の種類を変更することによって、その露出量を変化させた。実際には、コンクリート水路表面の施工直後（平滑面）の状況を No.1、供用開始後に粗骨材の露出が生じた状況を No.4 と定め、凹凸中央位置（凹凸高さ 0mm）を基準面とした凹凸高さによって、No.1 を 0mm、No.4 を ±2mm とした（**Fig.2.1**）。また、両者の中間の露出状況として、No.2 を ±0.25mm、No.3 を ±0.75mm とした。

2.2.1.2 粗度係数 n

相当粗度 $k_s(m)$ と流速 $v(m\ s^{-1})$ の関係は、粗面乱流の平均流速公式(2.1)で表され、式(2.1)にマンニングの平均流速式(2.2)を代入して整理することにより、 k_s と n の関係式(2.3)が導かれる（日野，1983）。

Table 2.1 粗度係数評価板の仕様
Specification of roughness coefficient plates

セメント	普通ポルトランドセメント
骨材	川砂利, 碎石 (粒径20mm)
骨材の露出具合: 凹凸高さ	No.1 : 0mm
	No.2 : ± 0.25 mm
	No.3 : ± 0.75 mm
	No.4 : ± 2.0 mm

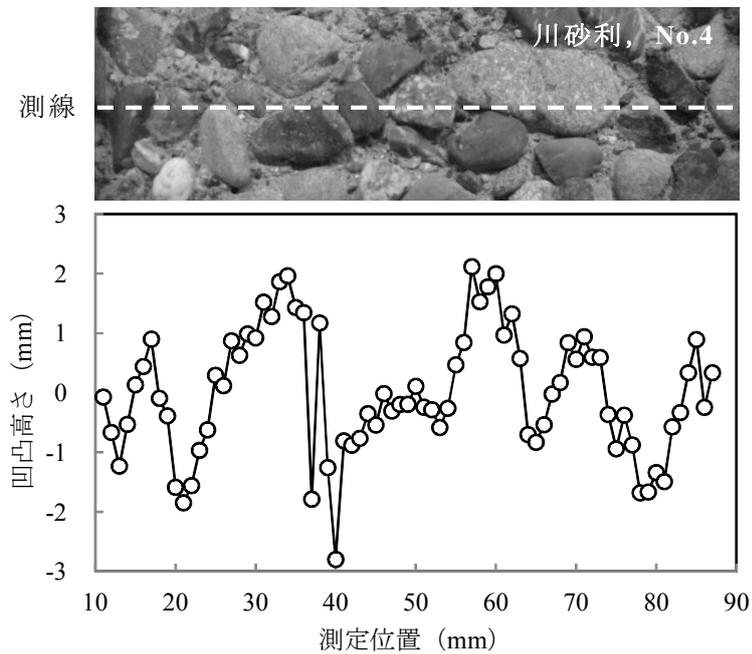


Fig.2.1 粗度係数評価板の表層形状の測定例
Example of the surface profile on roughness coefficient plates

$$v = 7.66 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{1/6} \sqrt{gRI} \quad (2.1)$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (2.2)$$

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66 \sqrt{g}} = 0.042 k_s^{1/6} \quad (2.3)$$

ここで、 R ：径深(m) ($=A/P$)， A ：流積(m²)， P ：潤辺(m)， I ：動水勾配， g ：重力加速度(m s⁻²)である．本研究では、 k_s を中矢ら (2008a) が水理模型実験の結果に基づいて整理した次式で評価した．

$$k_s = 2 \times R_a \quad (2.4)$$

ここで、 R_a ：算術平均粗さであり、レーザー変位計（キーエンス社製、センサヘッド LB-040、アンプユニット LB-1000）を用いて、長辺方向 1mm 間隔の 77 点の測定値から求めた (Fig.2.1)．具体的には、レーザー変位計による各測定値の偏差の平均値として、 R_a を算出した．この測定を評価板の中央付近にて、短辺方向 1mm 間隔の 36 測線で行い、得られた 36 個の R_a における中央値を代表値とした．

2.2.1.3 算術平均粗さ R_a とスキューネス R_{sk}

JIS B0601 に示される以下の式 (2.5) および式 (2.6) により、粗度係数評価板の表層形状のスキューネス R_{sk} を算出した．

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_n^3 \right] \quad (2.5)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_n^2} \quad (2.6)$$

ここで、 Z_n ：粗さ曲線の平均線からの高さ（本論では、凹凸高さに相当する．）， N ：データ数， R_q ：二乗平均平方根粗さである．Table 2.2 は、レーザー変位計の測定値から求めた算術平均粗さ R_a と式(2.5)で求めたスキューネス R_{sk} を示す．川

Table 2.2 レーザー変位計の測定値から求めた算術平均粗さ R_a と式(2.5)で求めたスキューネス R_{sk}
 Arithmetical mean roughness R_a calculated from measurements by a laser distance meter and Skewness R_{sk} calculated by equation(2.5)

パラメータ	本研究の粗度係数評価板							
	川砂利				碎石			
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4
R_a (mm)	0.38~0.62	0.07	0.19	0.66	0.02	0.08	0.16	0.52
R_{sk} (-)	-1.11	-0.79	0.54	-0.24	-2.51	-0.28	-0.09	0.53

砂利および碎石の R_a と R_{sk} は、骨材の露出具合 No.1 から No.4 に移行するにつれて、いずれも次第に大きくなる傾向にあった。 R_a は、中矢ら (2008a) の実験時の $R_a=0.38\sim 0.62\text{mm}$ と比較して、骨材の露出具合 No.4 では比較的近い値を示したが、No.1~3 では差異が大きかった。一方、 R_{sk} は、中矢ら (2008a) の実験時の $R_{sk}=-2.66\sim 0.86$ の範囲内であった。本研究では、中矢ら (2008a) の R_a の範囲から特に外れた No.1 から No.3 の評価板については、式の簡便さを重視し、 k_s の算出にそのまま式(2.4)を適用した。

2.2.2 現地水路および観測概要

研究対象水路は、茨城県つくばみらい市に位置する福岡堰土地改良区管内の台通用水路である。この水路は、整備後 30 年以上が経過した現場打ちのコンクリート開水路であり、水路内面の摩耗に伴う細骨材および粗骨材の露出が確認されている。調査区間の水路幅、高さ、勾配、延長、計画最大流量は、それぞれ 5.5m、1.6m、1/5,053、202m、6.7m³/s である。研究対象水路における調査区間は、水路湾曲が無い直線水路区間である。また、調査区間における、著しい堆砂および植生繁茂の状況、取水による流量変化の状況は見られない。

評価板法による粗度係数評価に際しては、現地水路での目視によるコンクリート骨材種類の把握に基づき、川砂利を骨材とする評価板を使用した。粗度係数の評価箇所は、同一横断面上、左右岸の側壁および底版にて計 11 点とした。左右岸の側壁においては、対象水路の水位痕跡高 $h=1.2\text{m}$ より判断した喫水面上部 $h=1.3\text{m}$ にて 1 点ずつ、喫水面下部 ($h=1.0\text{m}$, $h=0.7\text{m}$, $h=0.3\text{m}$) にて 3 点ずつで粗度係数の評価を行った。また、底版においては、3 点で粗度係数の評価を行った。評価者は、用排水路に係る仕事に従事している技術者 2 名 (経験年数 4 年、14 年) と従事したことがない大学生 2 名の計 4 名とした。評価板法の適用に際しては、まず、上述の 11 点の評価箇所にて、粗度係数評価板の面積と同程度の領域

を目安に、直接手で触れ、目視することにより、水路内面の摩耗状況を把握した。各評価者は、評価箇所ごとに水路内面の摩耗状況に最も近い粗度係数評価板を選定し、選定した粗度係数評価板の番号（例えば、1～4）を記録用紙に記入した。また、実際には、水路内面と粗度係数評価板の摩耗状況が一致せず、それぞれの粗度係数評価板の中間に位置する摩耗状況であると判断された場合には、記録用紙に 0.5 刻みで数値を記入した。Table 2.3 の結果に従って、たとえば No.1 は $n=0.008$ で、No.2 は $n=0.010$ とし、中間の摩耗状況の場合は、それぞれの平均値として $n=0.009$ とした。1つの評価箇所の影響範囲を、側壁では上から順に、0.35m, 0.35m, 0.50m, 底版では 5.50m（水路幅）とし、喫水面上部を除く喫水面下部 9 点の合成粗度係数を整理した。なお、後述するマニング式法との比較のために、対象水路の縦断方向の 28 断面にて、同様の評価を行った。

携帯型測定法では、レーザー変位計により、1mm 間隔での表層形状の計測を行い、その計測結果を用いて粗度係数を推定した。評価箇所は評価板法と同じ 11 箇所とし、評価領域はそれぞれの評価箇所を中央とした 50cm 区間である。なお、同法は水中では適用できないため（浅野ら，2014）、調査時に水路内に滞水が生じている評価箇所については、評価箇所を部分的に粘土で囲い、囲った内側のコンクリート表面の水をウェスで拭き取ってから測定を行った。

マニング式法で粗度係数を算出するために、水位と流速の計測を行った。水位の計測位置は、調査区間 $L=202\text{m}$ における、それぞれの水路施工目地間（7.5m 程度）の中央にて、28 断面とした。水路天端から水面までの距離を標尺によって手測りし、平均水深は 1.05m であった。流速の計測位置は、調査対象区間の最上流 1 地点にて、水深方向に 2 点法で、横断方向に 6 地点とした。各点の流速を 2 次元方向 (x - y) 電磁流速計（ケネック社製、本体部型式 VP1200、検出部型式 VPT2-200-08PS）で計測し、断面平均流速 $v=0.682\text{m/s}$ 、流量 $Q=4.00\text{m}^3/\text{s}$ であった。

Table 2.3 作製した 8 枚の評価板の粗度係数
Manning's roughness coefficient of eight roughness coefficient plates

骨材の 露出具合	粗度係数 n	
	川砂利	碎石
No.1	0.008	0.008
No.2	0.010	0.010
No.3	0.011	0.011
No.4	0.014	0.013

2.3 結果と考察

2.3.1 粗度係数評価板の粗度係数に影響を及ぼす因子

Table 2.3 より，川砂利および砕石を骨材とする粗度係数評価板の n は，骨材の露出具合 No.1～4 においてどちらも同様に増大し，No.1 で最小の $n=0.008$ ，No.4 でそれぞれ最大の $n=0.014$ ， 0.013 となった．一方，川砂利と砕石の間で n の値を比較すると，両者に大きな違いがないことから，骨材の違いが n に及ぼす影響は小さいと判断される．したがって，今回自作した評価板では，骨材の種類の違いが n に及ぼす影響は小さく， n の差異は骨材の露出具合の違いによって生じることを確認した．

2.3.2 現地水路の粗度係数

2.3.2.1 評価板法と携帯型測定法に基づく粗度係数の比較

Table 2.4 は，評価板法と携帯型測定法で評価したコンクリート開水路 1 断面の粗度係数の比較を示す．評価板法と携帯型測定法による，合成粗度係数は，それぞれ $n=0.012$ と $n=0.013$ であり，その差は 0.001 であった．この結果より，評価板法に基づく推定法が，実務上，精度良く評価できることを確認した．評価板法と携帯型測定法による各評価箇所の n の誤差は，側壁では $0.0004\sim 0.0019$ であるのに対し，底版では $0.0016\sim 0.0023$ の差が生じ，側壁よりも底版の方が誤差が大きかった．この原因には，底版における両法の評価条件の違いが挙げられる．すなわち，滞水が存在する底版において，評価板法では湿潤状態あるいは浸水状態で直接評価したのに対し，携帯型測定法は浸水状態で評価できないことから滞水を除去して乾燥および湿潤状態での評価を行った (**2.2.2** 参照) 影響が考えられる．

評価者 4 名が評価した粗度係数の標準偏差については，左右岸側壁で $0.0004\sim 0.0006$ ，底版で 0.0008 であり，底版の方が若干大きくなった．**Table 2.3** より，評

Table 2.4 評価板法と携帯型測定法で評価したコンクリート開水路1断面の粗度係数の比較
Manning's roughness coefficient estimated by roughness coefficient plates and laser measurements

	左岸側壁						右岸側壁						合成 粗度			
	喫水面 上部		喫水面下部		喫水面		水面側		喫水面下部		底版					
	水面側	中央	中央	底版側	上部	下部	水面側	中央	中央	底版側	左岸側	中央		右岸側		
標準偏差 σ	0.0005	0.0123	0.0005	0.0117	0.0005	0.0101	0.0120	0.0006	0.0005	0.0117	0.0112	0.0008	0.0115	0.0115	0.0115	0.012
評価板法 (評価者4名)	0.0101	0.0123	0.0123	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127
粗度係数 n	0.0105	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0105	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0114	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127
	0.0096	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0096	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
携帯型測定法	0.0110	0.0131	0.0127	0.0132	0.0132	0.0108	0.0133	0.0133	0.0126	0.0131	0.0131	0.0138	0.0131	0.0133	0.0133	0.013
差 (=①-②)	-0.0010	-0.0008	-0.0004	-0.0015	-0.0008	-0.0008	-0.0013	-0.0009	-0.0019	-0.0023	-0.0016	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.001

評価板の粗度係数の間隔が最小で 0.001 であることを勘案すると、各評価者が評価した粗度係数のばらつきは比較的小さいことを確認した。また、側壁と底版の標準偏差に大きな差は見られないことから、評価箇所の水分状態の相違が、各評価者の触診および目視による粗度係数評価板の選定基準に及ぼす影響は小さいものと推察される。Skedung et al. (2013) によれば、人がアクティブタッチにより知覚できる表面粗さはナノメートルオーダーであること、また、神明前 (2007) によれば、人は高さ 0.2mm 以上の凹凸形状を指先の触覚により、判別できることが明らかにされている。本研究で使用した評価板において、凹凸高さの最小値は 0.25mm (No.2) である。したがって、特殊な技能やセンサーを用いなくても、今回提案する粗度係数評価板と触診および近接目視によって、現地水路の粗度係数を評価することができると思われる。

2.3.2.2 評価板法とマニング式法に基づく粗度係数の比較

Fig.2.2 は、評価板法とマニング式法で評価したコンクリート開水路縦断方向 (延長 $L=202\text{m}$) の粗度係数の比較を示す。評価板法により推定した合成粗度係数は、3 断面 ($n=0.011$) を除き、すべて $n=0.012$ となり、比較的均一であった。この値は、設計基準水路工 (農林水産省農村振興局, 2014) で示されている、供用開始後、摩耗が生じたコンクリート水路の粗度係数 $n=0.012\sim 0.016$ (現場打ちフルーム、暗渠等) の範囲内であった。一方、マニング式法に基づき算出した粗度係数は、 $n=0.018$ であり、コンクリート水路の粗度係数 $n=0.012\sim 0.016$ の範囲外であった。摩耗したコンクリートの表層形状から推定する評価板法と、水深、流量等の観測結果から算出するマニング式法に基づく粗度係数が一致する現地水路の条件は限られる。堆砂、植生繁茂等が存在する水路条件下では、評価板法とマニング式法に基づく粗度係数に差異が生じることが想定されるが、対象水路の状況は、これらの水路条件に該当しない。そのため、評価板法とマニング式法に

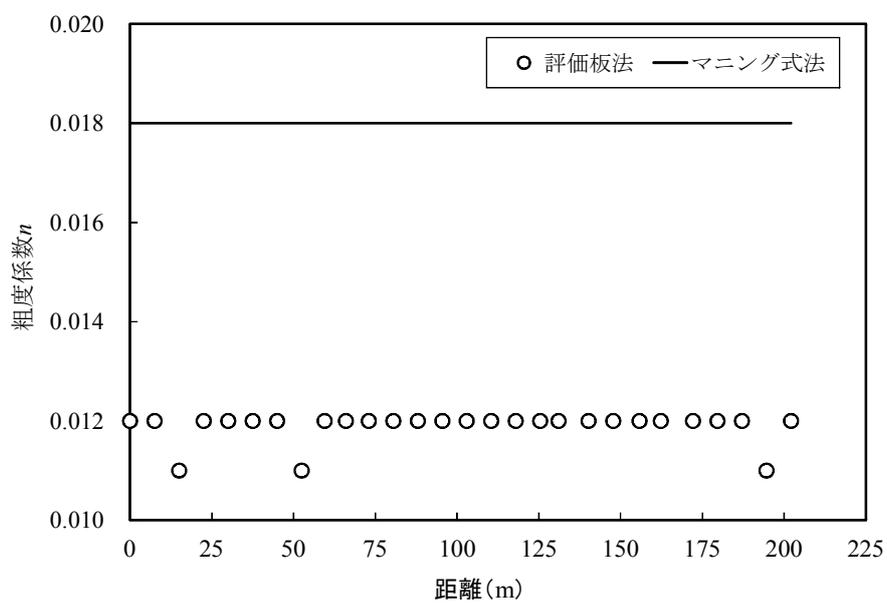


Fig.2.2 評価板法とマンニング式法で求めたコンクリート開水路縦断方向 (延長 $L=202\text{m}$) の粗度係数の比較
Manning's roughness coefficient in the concrete open channel ($L=202\text{m}$) estimated by the roughness coefficient plates and Manning equation

基づく両者の粗度係数の差異を生み出した主要因は、堆砂、植生繁茂等の水路条件では無いものと推察される。加藤ら（2009）によると、マニング式に基づいて粗度係数を求める場合、水深、流量および水面勾配の観測精度がその推定精度に影響を及ぼす。よって、水位および流速の観測誤差が、対象水路の粗度係数の推定誤差を拡大したものと想定される。

2.4 結論

本研究では、骨材の種類および骨材の露出割合の組合せが異なる 8 枚の粗度係数評価板を自作し、作製した評価板を用いた現地水路の粗度係数測定法（評価板法）の有効性を検討した結果、以下のような知見を得た。

- 1) 川砂利および砕石を骨材とする評価板の粗度係数は $n = 0.008 \sim 0.014$ の範囲であった。また、川砂利および砕石を骨材とする評価板の粗度係数の値には、大きな差が見られないことから、骨材の種類が n に及ぼす影響は、小さいことを確認した。
- 2) 滞水のあるコンクリート開水路の評価板法による粗度係数の推定値は、摩耗が生じたコンクリート水路の基準値の範囲内であり、また、レーザー変位計を用いた携帯型測定法による推定値との差異は 0.001 で小さかった。滞水条件下では、携帯型測定法では水を除去する必要があるが、評価板法では、直接適用可能である。したがって、評価板法は、滞水条件でも省力的に、現地水路の粗度係数を実務上精度よく評価できることがわかった。
- 3) 評価板法では、実務経験の異なる 4 名の評価者により、対象水路の粗度係数を評価した。各評価者が評価した粗度係数の標準偏差は、最大でも 0.0008 であり、各評価者による粗度係数のばらつきは、比較的小さかった。よって、本手法は、評価者の実務経験によらず、客観的に粗度係数を評価できることがわかった。

本研究は，川砂利を骨材とする現地水路における一調査事例にすぎない．したがって，川砂利と碎石の骨材の種類を問わず，現地水路にて，今後さらに調査事例を積み重ね，本手法の有効性を検討していく必要がある．

第3章 農業用水路における漸縮係数に関する実験的研究

3.1 緒論

農業水利の分野では、河川に設けられた頭首工より農業用水を取水し、末端圃場へと送配水する水利システムが構築されている。送配水する過程においては、サイホン上流部、落差工下流部、その他、送配水路における構造変化部（たとえば、フルームからボックスカルバートへの接続）等のように、開水路の断面変化部としての水路幅変化部が生じる。開水路の水路幅変化部では、エネルギー損失として、摩擦損失に加えて水路幅の縮小に伴う形状損失が発生する。そのため、開水路の設計において水理計算を行う際は、適切に形状損失を評価し、計算条件に反映させることが求められる。

開水路の水路幅縮小部を対象とした既往の研究成果は、急縮（縮小角度 $\theta=90^\circ$ ）と漸縮（ $\theta<90^\circ$ ）を取り扱うものに大別される。急縮に関しては、石原・志方（1967）により、急縮部における流況とその時の損失水頭および損失係数について、急縮部下流のフルード数と水路幅縮小比（水路幅変化部の下流水路幅 B_2 /上流水路幅 B_1 ）に関連づけた考察が行われている。一方、漸縮に関しては、Hinds（1928）、Ippen（1951）、Formica（1955）、芦田（1961）および鬼束ら（1996）により、水理実験結果を踏まえ、漸縮部における流況とその時の損失水頭および損失係数についての考察が行われている。Hinds（1928）によれば、水路幅の縮小に伴う形状損失を小さくするために、 θ は最大で 12.5° とし、その時の損失係数（漸縮係数） f_{qc} は0.1とすることが提唱されている。芦田（1961）によれば、損失水頭は、 $\theta=15^\circ$ 付近において最小となり、 $\theta=15^\circ$ より縮小角度が小さくなると、流速が大きくなることによる摩擦損失水頭の増大により、逆に増大する。農林水産省農村振興局（2001）では、6パターンの開水路漸縮部の形状別に、設計値としての f_{qc} が定性的に整理されてい

る。また、岩佐・細田(1989)は、Ippen(1951)による漸縮部を有する急勾配水路の水理実験結果をもとに、数値計算の適用性について考察した。

既往の研究で得られた知見に基づき、現行の開水路漸縮部の設計は一般に次のように実施される。用地等の制約条件が無ければ、Hinds(1928)の知見に基づき、 θ は 12.5° 以下に設定される。それに対し、制約条件を有し、 θ を 12.5° 以下に設定できない場合、 θ に応じた f_{qc} を設定することができない。このような場合、水理上、重要な施設（主要な分土工等）においては、縮尺模型による水理実験を実施し f_{qc} が評価される。また、その他の施設については、設計者の判断により、便宜的に、急縮として扱うこともある。現行の設計方針においては、 f_{qc} を詳細に決定する上での基準や参考とすることのできる基礎的知見が乏しいため、対象とする個々の水路で漸縮部の形状やそれに伴う流況が多様に変化した場合、 f_{qc} を適切に評価することは困難な状況にある。

昨今のストックマネジメント事業（食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会，2010）では、ある限定された区間にて補修・補強等が行われ、水路幅の変化が生じる可能性がある（藤山ら，2015）。そのため、対策を講じる水路区間の流況変化を想定しながら、漸縮部を含めた水路の損失水頭のより詳細な検討が求められる（樽屋ら，2014；樽屋ら，2015）。つまり、今後、増大するストックマネジメント事業による水路改修を想定し、多様な水路形状やその形状変化に伴う流況の変化と f_{qc} との関係性を検討することは極めて重要である。

以上のことから、本研究では、開水路漸縮部を対象に水理模型実験を実施し、水路形状にかかわる重要なパラメータである漸縮部の縮小角度 θ と水路幅縮小比 B_2/B_1 が漸縮係数 f_{qc} に及ぼす影響を評価することを目的とする。また、開水路漸縮部およびその下流区間では、特有の縦断水面形が見られ、開水路漸縮部の設計を行う際、開水路漸縮部を含めた上下流にて想定される流況も把握しておく必要がある。そのため、 θ と B_2/B_1 が縦断水面形とフルード数 F_r に及ぼす影響につい

ても併せて検討した．さらに，石原・志方（1967）より， f_{qc} に対しては漸縮部下流のフルード数 F_{r2} の影響が大きい可能性があるため， f_{qc} と F_{r2} の関係について考察した．

3.2 研究の方法

3.2.1 実験方法

Fig.3.1は，実験水路の概要を示す．実験水路は，水路延長 $L=10\text{m}$ ，水路壁高 $H=17\text{cm}$ ，水路幅 $B_1=14.5\text{cm}$ ，水路勾配 $I=1/1,000$ の亚克力製の長方形断面開水路である．上流端から $350\sim 366.5\text{cm}$ の $L_2=16.5\text{cm}$ 区間では，水路幅の縮小区間を設けており，最下流部には，自由に水位調整が可能な転倒ゲートが設置されている．

Fig.3.2は，水深の計測位置を示す．水深の計測位置は，No.1～15の 1.4m 区間にて， 10cm 間隔を基本とし，水路幅縮小に伴う水面落下が見られるNo.6(漸縮開始点)～No.9区間では， 2cm 間隔とし，計27点とした．水深の計測方法は，サーボ式水位計(ケネック社製，本体部型式NS-101，検出部型式NST-30)による自動計測に行った．また，流量の計測においては，最下流部転倒ゲートの越流量を，秤とストップウォッチにより手測りした．

Table 3.1は，実験条件を示す．実験条件は，水路幅縮小比 $B_2/B_1=0.5$ にて，縮小角度 $\theta=12.5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の 6 パターンとし， $B_2/B_1=0.7$ にて，縮小角度 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の 5 パターンとした．本実験では，開水路漸縮部の上下流での流量変化は無く， $B_2/B_1=0.5$ の実験条件の設定は，極めて稀なケースであるが，水路幅の縮小に伴う形状損失を大きくし水理特性を把握しやすくするために，同条件を設定した． $B_2/B_1=0.7$ の実験条件は， $B_2/B_1=0.5$ に対して，より現実的なケースとして位置付けた．流量は $0.002\sim 0.006\text{m}^3/\text{s}$ の範囲で転倒ゲートを用いて調節し，各パターンに対して流量条件を変えて複数ケースの計測を行

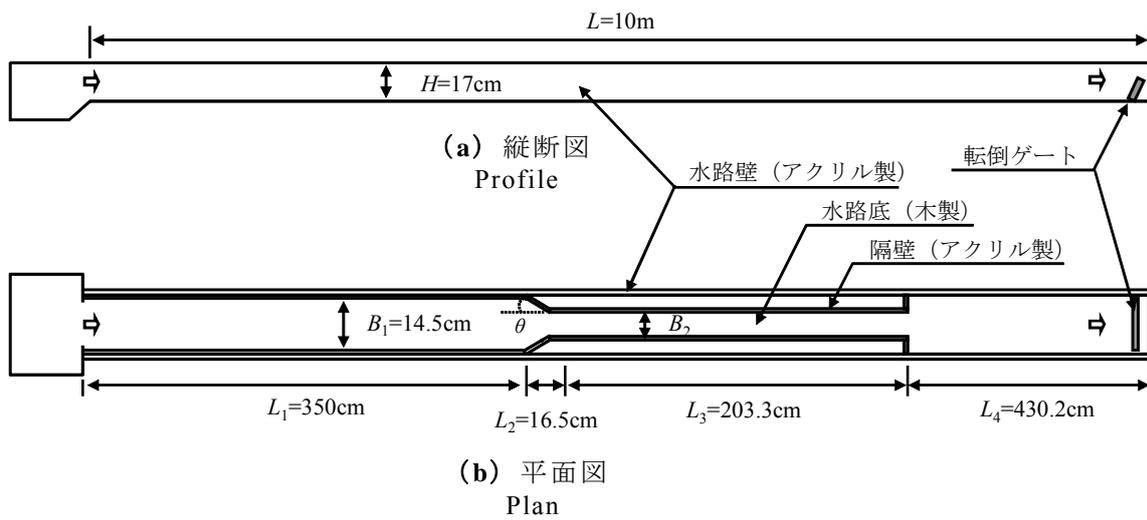


Fig.3.1 実験水路の概要
Outline of the hydraulic model experiment channel

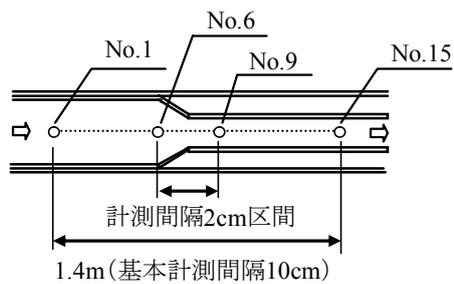


Fig.3.2 水深の計測位置
Measurement position of water depth

Table 3.1 実験条件
Hydraulic model experiment conditions

水路幅縮小比 B_2/B_1	縮小角度 θ (°)	流量 Q (m ³ /s)	フルード数 F_r	ケース数
0.5	12.5	0.002~ 0.006	<1	17
	30			21
	45			26
	60			25
	75			26
	90			3
0.7	30			2
	45			5
	60			3
	75			24
	90			3

った。なお、実験時の流況は、最下流部の転倒ゲートを用いた水位調整により、開水路漸縮部の上下流の流況が常流となるように調整した。

3.2.2 漸縮係数 f_{qc} の算定方法

漸縮係数 f_{qc} は、開水路漸縮部の上流および下流の水深、最下流部における流量の計測結果をもとに、式(3.1)を用いて算出した(農林水産省農村振興局, 2014)。なお、水深の計測区間では、一定幅での水面変動が生じており、極力、代表的な水深を算定するために、式(3.1)、式(3.2)にて用いる開水路漸縮部の上下流の水深は、それぞれ、上流では5点(**Fig.3.2**に示す, No.1~5区間)、下流では6点(**Fig.3.2**に示す, No.10~15区間)の算術平均値(それぞれ、 h_1 , h_2)を採用した。

$$f_{qc} = \frac{\Delta h + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} - h_f}{\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}} \quad (3.1)$$

$$h_f = \frac{Q^2 \cdot l}{2} \left(\frac{n^2}{R_1^{4/3} \cdot A_1^2} + \frac{n^2}{R_2^{4/3} \cdot A_2^2} \right) \quad (3.2)$$

ここで、 Δh : 水位変化量(m) ($=h_1-h_2$)、 f_{qc} : 漸縮係数、 v_1 : 開水路漸縮部の上流における流速(m/s) ($=Q/(h_1 \cdot B_1)$)、 v_2 : 開水路漸縮部の下流における流速(m/s) ($=Q/(h_2 \cdot B_2)$)、 g : 重力加速度(m/s²) ($=9.81 \text{ m/s}^2$)、 h_f : 摩擦損失水頭(m)、 Q : 流量(m³/s)、 A_1 , A_2 : 開水路漸縮部の上下流の通水断面積(m²)、 l : 対象区間長(m) ($=0.95\text{m}$)、 n : マニングの粗度係数(実験水路における予備実験結果に基づき、 $n=0.009\text{s/m}^{1/3}$ を採用)、 R_1 , R_2 : 開水路漸縮部の上下流の径深(m) ($=A/P$)、 P : 潤辺(m)である。

3.3 結果と考察

3.3.1 流況の概要

Fig.3.3には、本実験における流況の概要を説明するため、 $B_2/B_1=0.5$ 、 $\theta=45^\circ$ の実験条件における実験結果（全26ケースの内、4ケース）を例とし、縦断水面形およびフルード数 F_r を示す。図中では、漸縮部下流のフルード数 F_{r2} として、 $F_{r2}=0.4\sim 0.7$ の範囲で0.1刻みにて実験結果を整理した。なお、縦断水面形（**Fig.3.3(a)**）と F_r （**Fig.3.3(b)**）はそれぞれ対応している。

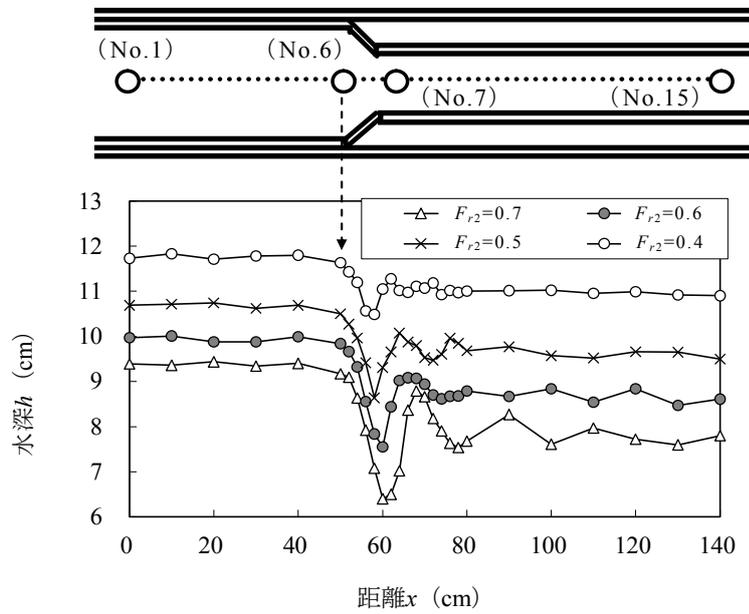
開水路漸縮部の上流区間(No.1～6)は、常流の流れであり、水路幅の縮小に伴い堰上げ背水の水面形となる。開水路漸縮部(No.6～No.7)では、同区間の上下流水位差に伴い、交叉波を伴う水面落下が生じ、上下流水位差が大きくなるにつれて、水面落下位置(水位が最も低下した位置)は下流へと移動する。水面落下位置では、 $F_{r2}=0.7$ のケースで見られるように、一時的に射流の流れも生じる。開水路漸縮部の下流区間(No.7～15)では、交叉波に起因した、一定幅での水面変動が生じており、縦横断の水面形状の凹凸が見られる。

以上が、本実験における流況の概要であり、以降、実験結果に基づき、 θ と B_2/B_1 が縦断水面形、フルード数 F_r および漸縮係数 f_{qc} に及ぼす影響、ならびに下流フルード数 F_{r2} と f_{qc} の関係について詳述する。

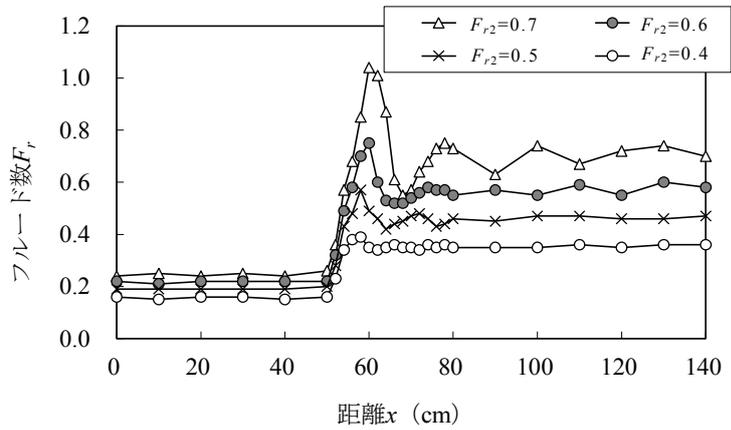
3.3.2 水路の縮小角度 θ と縮小比 B_2/B_1 が縦断水面形とフルード数 F_r に及ぼす影響

3.3.2.1 縦断水面形と水面落下位置のフルード数 F_{r3} への影響

Fig.3.4では、 $B_2/B_1=0.5$ 、 $\theta=12.5^\circ$ 、 30° 、 75° の実験条件における実験結果の内、開水路漸縮部下流のフルード数 $F_{r2}=0.7$ 、 0.4 の実験結果を示す。**Fig.3.4(a)**より、 $F_{r2}=0.7$ の時、 θ が 75° から 12.5° に縮小すると、水面落下位置は下流14cm($x=60$ cm

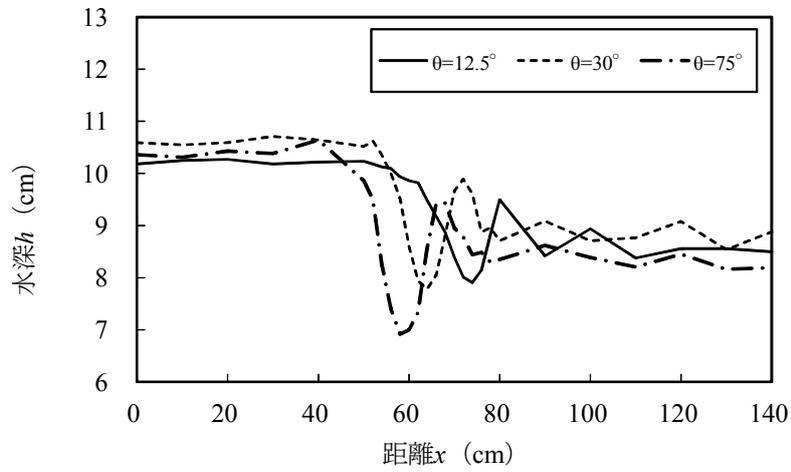


(a) 縦断水面形
Longitudinal water surface profile

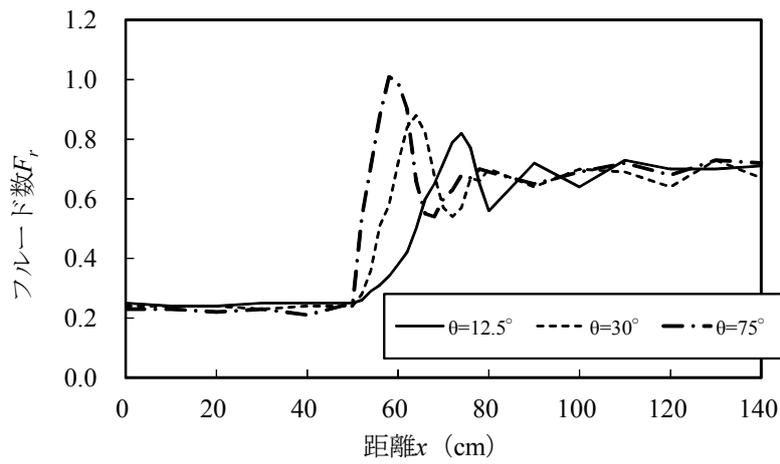


(b) フルード数 F_r
Froude number F_r

Fig.3.3 縦断水面形とフルード数 F_r の変化 ($B_2/B_1=0.5$, $\theta=45^\circ$)
Fluctuations in longitudinal water surface profile and Froude number F_r ($B_2/B_1=0.5$, $\theta=45^\circ$)

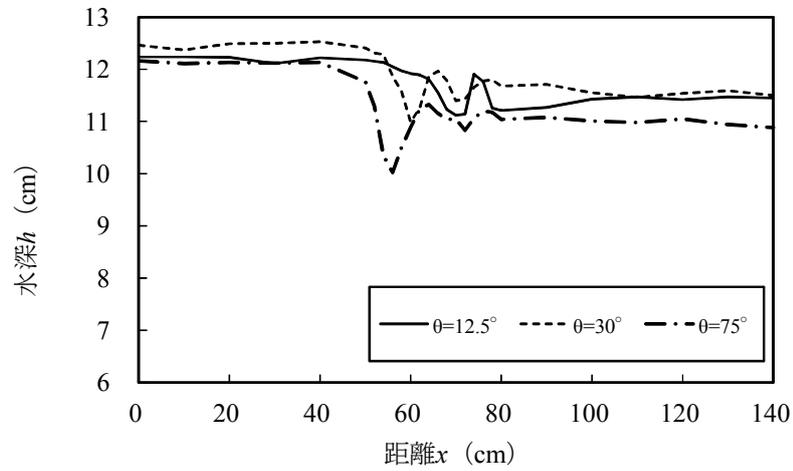


(a) 縦断水面形 ($F_{r2}=0.7$)
 Longitudinal water surface profile ($F_{r2}=0.7$)

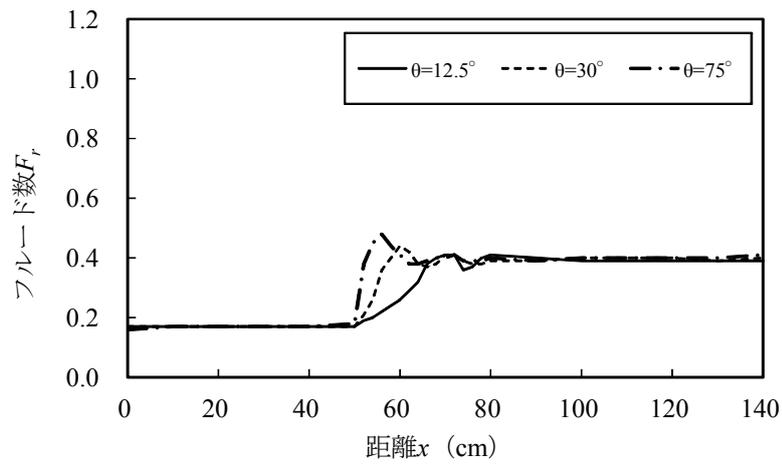


(b) フルード数 F_r ($F_{r2}=0.7$)
 Froude number F_r ($F_{r2}=0.7$)

Fig.3.4 (1/2) 縮小角度 θ の変化に伴う縦断水面形とフルード数 F_r の変化 ($B_2/B_1=0.5$)
 Fractuations in longitudinal water surface profile and Froude number
 with the change of reduction angle θ ($B_2/B_1=0.5$)



(c) 縦断水面形 ($F_{r2}=0.4$)
Longitudinal water surface profile ($F_{r2}=0.4$)



(d) フルード数 F_r ($F_{r2}=0.4$)
Froude number F_r ($F_{r2}=0.4$)

Fig.3.4 (2/2) 縮小角度 θ の変化に伴う縦断水面形とフルード数 F_r の変化 ($B_2/B_1=0.5$)
Fractuations in longitudinal water surface profile and Froude number
with the change of reduction angle θ ($B_2/B_1=0.5$)

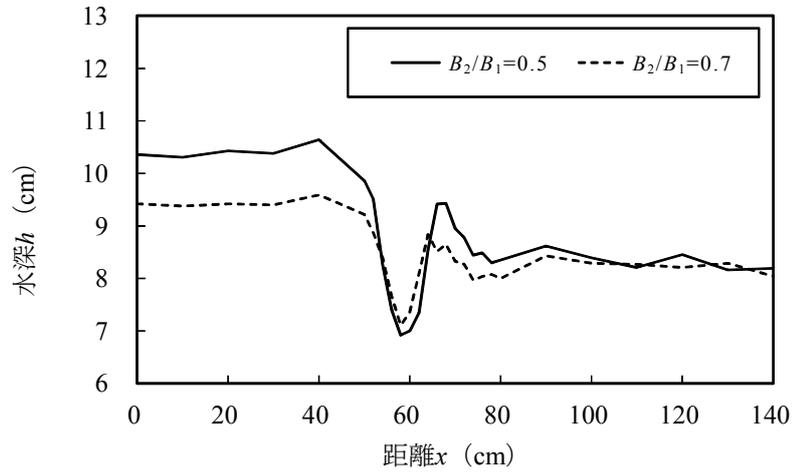
→74cm) 移動した。その際、水面落下位置のフルード数 F_{r3} は、 $F_{r3}=1.01$ (射流) から $F_{r3}=0.82$ (常流) に移行した (**Fig.3.4 (b)**)。 **Fig.3.4 (c)** より、 $F_{r2}=0.4$ の時、 θ が 75° から 12.5° に縮小すると、水面落下位置は下流へと 14cm ($x=56\text{cm}\rightarrow 70\text{cm}$) 移動し、その移動距離は $F_{r2}=0.7$ の時と違いは見られなかった。 $F_{r2}=0.4$ の条件では、 F_{r3} は 1 より小さくなり、検討したすべての流量ケースが常流の範囲内であった。また、 $F_{r2}=0.4$ の場合の θ の縮小に対する F_{r3} の変化は、 $F_{r2}=0.7$ の場合と比べると極めて小さかった (**Fig.3.4 (d)**)。一方、 $B_2/B_1=0.7$ の場合 (**Fig.3.5**)、水面落下位置における水深と F_{r3} の変動は小さくなったものの、上下流の縦断水面形と F_{r3} の変動傾向は $B_2/B_1=0.5$ の場合と同様であった。

以上より、縦断水面形については θ が縮小するほど水面落下位置は下流へと移動したが、 B_2/B_1 が大きくなった場合は水位変動が小さくなるだけで水面落下位置の変化は認められなかった。 F_{r3} については θ の縮小に対して低下傾向を示した。 B_2/B_1 が大きくなると F_{r3} の変動は小さくなったが、それ以外に顕著な影響は認められなかった。

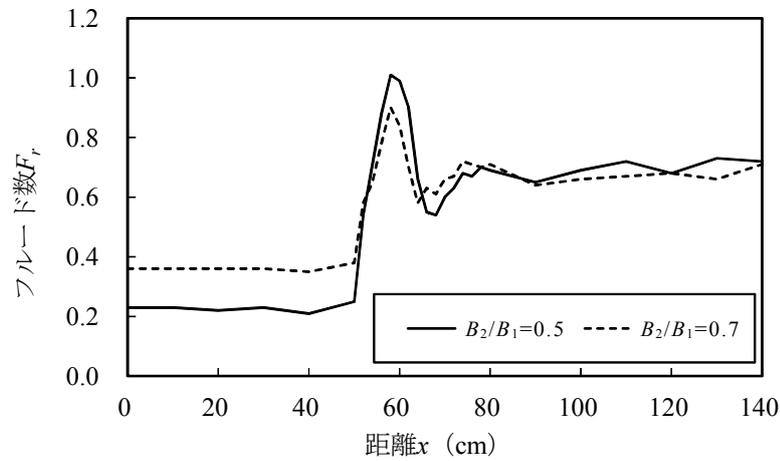
3.3.2.2 上流フルード数 F_{r1} と下流フルード数 F_{r2} への影響

Fig.3.6 は、 $B_2/B_1=0.5$ と 0.7 の場合の F_{r1} と水面落下位置フルード数 F_{r3} の関係 (**Fig.3.6 (a)**) および F_{r2} と F_{r3} の関係 (**Fig.3.6 (b)**) をそれぞれ示す。ここで F_{r1} と F_{r2} は、それぞれ **Fig.3.2** に示す No.1~5 区間 (5 点) と No.10~15 区間 (6 点) のフルード数の算術平均値である。**Fig.3.6 (a)** および **(b)** より、 B_2/B_1 を変更すると、 F_{r1} と F_{r3} の関係に変化が生じるが、 F_{r2} と F_{r3} の関係には変化が認められなかった。 F_{r1} については同一の F_{r3} 条件で比較すると、 B_2/B_1 を大きくすることで、 F_{r1} が明らかに増大する傾向を示した。この現象は B_2/B_1 を大きくすることにより、開水路漸縮部上流における堰上げ背水の影響が軽減されることを意味する。

Fig.3.7 は、水路幅縮小比 $B_2/B_1=0.5$ において、縮小角度 θ が異なる場合の F_{r1} と F_{r3}

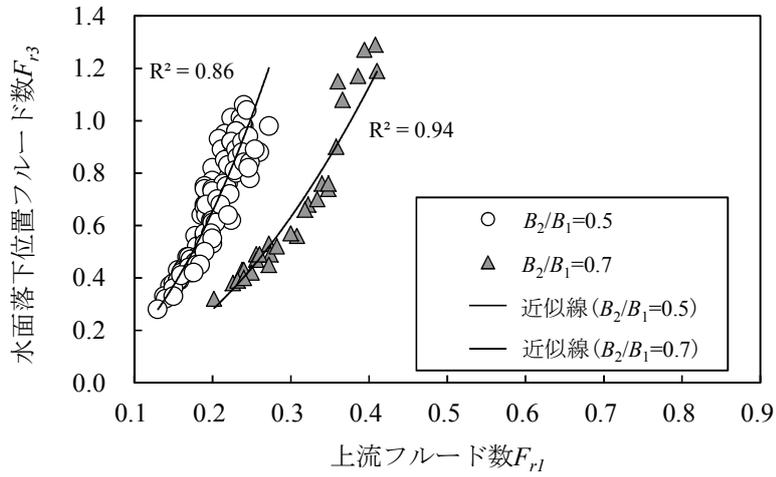


(a) 縦断水面形
Longitudinal water surface profile

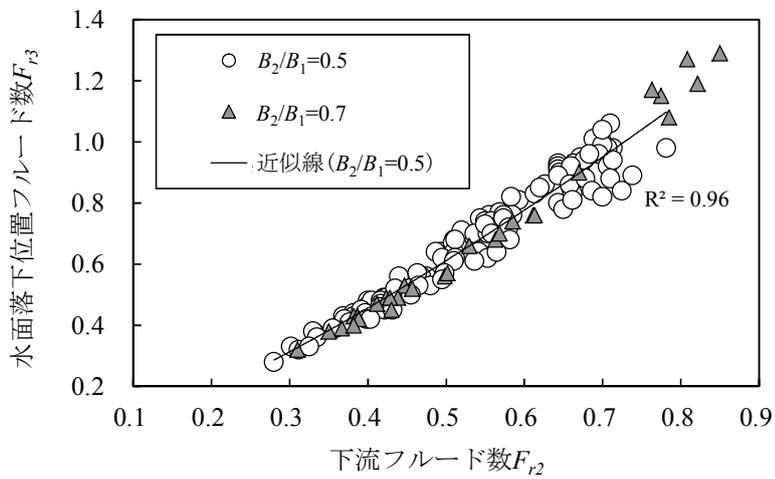


(b) フルード数 F_r
Froude number F_r

Fig.3.5 水路幅縮小比 B_2/B_1 の変化に伴う縦断水面形とフルード数 F_r の変化
Fractuations in longitudinal water surface profile and Froude number
with the change of reduction ratio B_2/B_1

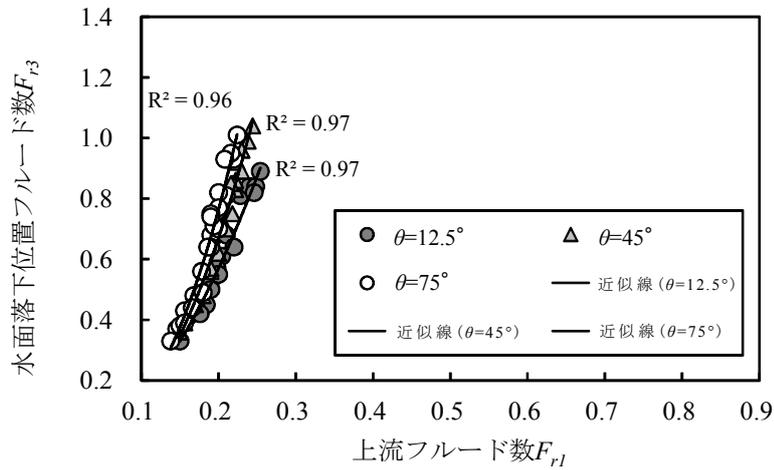


(a) F_{r1} と F_{r3} の関係
Comparison of F_{r1} and F_{r3}

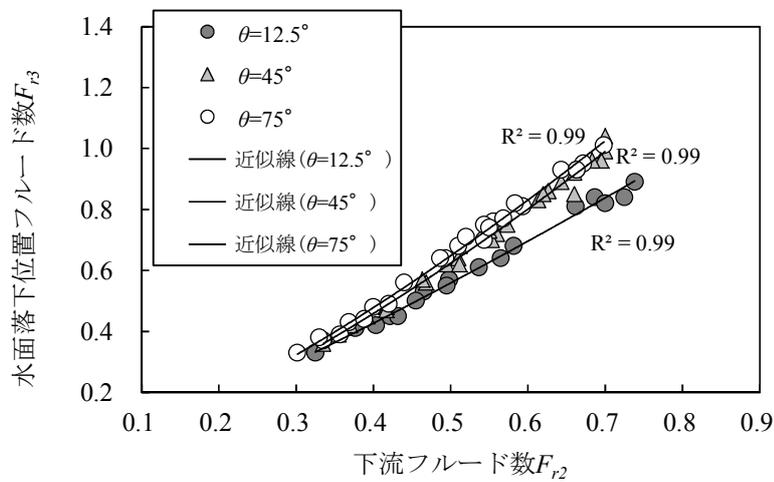


(b) F_{r2} と F_{r3} の関係
Comparison of F_{r2} and F_{r3}

Fig.3.6 水路幅縮小比 B_2/B_1 がフルード数に及ぼす影響
Influence that B_2/B_1 gives to Froude number



(a) F_{r1} と F_{r3} の関係
Comparison of F_{r1} and F_{r3}



(b) F_{r2} と F_{r3} の関係
Comparison of F_{r2} and F_{r3}

Fig.3.7 水路の縮小角度 θ がフルード数に及ぼす影響 ($B_2/B_1=0.5$)
Influence that θ gives to Froude number ($B_2/B_1=0.5$)

の関係 (Fig.3.7 (a)) および F_{r2} と F_{r3} の関係 (Fig.3.7 (b)) をそれぞれ示す.

Fig.3.7 (a) および (b) より, θ が F_{r1} と F_{r2} に及ぼす影響には差異が認められた.

同一の F_{r3} 条件で比較すると, θ が縮小するほど F_{r1} と F_{r2} は共に増大する傾向を示したが, その傾向は F_{r1} よりも F_{r2} の方が比較的大きかった.

以上より, B_2/B_1 の影響は下流フルード数 F_{r2} よりも上流フルード数 F_{r1} に対して大きく, θ の影響は F_{r1} よりも F_{r2} に対して比較的大きいと考えられる.

3.3.3 漸縮部下流のフルード数 F_{r2} と漸縮係数 f_{qc} の関係

Fig.3.8は, F_{r2} と f_{qc} の関係を示す. なお, 図中には, 参考までに, $\theta=90^\circ$ の実験結果をもとに, 式(3.1)にて, f_{qc} を算出した結果も併記した. 通常, $\theta=90^\circ$ の実験結果は急縮として取り扱うため, 漸縮係数として算出するべきではないが, ここでは, 漸縮から急縮に移行する過程を把握することを目的とする.

検討した各 θ において, f_{qc} は $F_{r2}=0.3\sim 0.7$ の範囲でばらつきが見られるものの, F_{r2} の違いによる特定の変化傾向は認められない. 線形回帰分析に基づき, 例えば $\theta=75^\circ$ における F_{r2} の $0.3\sim 0.7$ の変化に対する f_{qc} の変量を求めた結果, 0.01 に過ぎなかった. すなわち, f_{qc} は θ 毎で一定の分布幅 (0.2 程度) を有するが, F_{r2} の影響は極めて小さい. また, θ が大きくなるにつれて, f_{qc} の分布は上方に移動する. $\theta=12.5^\circ$ の時, f_{qc} (=0.0~0.2) は最小となり, $\theta=75^\circ$ の時, f_{qc} (=0.2~0.4) は最大となる. 石原・志方 (1966) は, 水理実験の結果に基づき, 開水路急縮部における損失水頭を評価するとともに, 実験値のばらつきの問題について考察している. その際, 水理実験で評価される損失水頭は非常に小さいため, その損失水頭から摩擦損失水頭と形状損失水頭への分離は困難であることが述べられている. 本実験でも, 値として小さく, 少なからず計測誤差を含む損失水頭を摩擦損失水頭と形状損失水頭に分離して評価したため, 漸縮係数 f_{qc} にばらつきが生じたものと解釈できる. ただし, $B_2/B_1=0.5$, $\theta=12.5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の標準

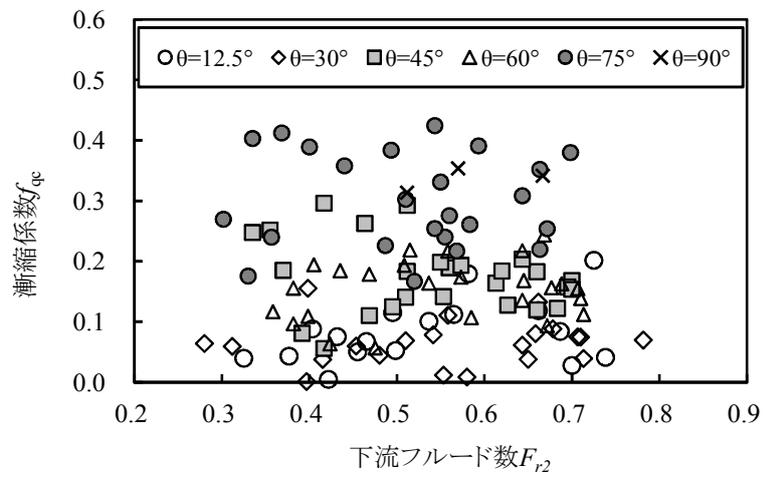


Fig.3.8 下流フルード数 F_{r2} と漸縮係数 f_{qc} の関係 ($B_2/B_1=0.5$)
 Comparison of downstream Froude number F_{r2}
 and coefficient of conversion loss f_{qc} ($B_2/B_1=0.5$)

偏差 σ は、それぞれ 0.052, 0.038, 0.060, 0.049, 0.077, 0.021 であり、 $B_2/B_1=0.7$, $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の標準偏差 σ は、それぞれ 0.046, 0.065, 0.085, 0.069, 0.065 であり、それぞれの標準偏差は 0.1 未満である。

3.3.4 水路の縮小角度 θ と縮小比 B_2/B_1 が漸縮係数 f_{qc} に及ぼす影響

Fig.3.9は、 θ と f_{qc} の関係を示す。図中には、 θ 毎の f_{qc} の算術平均値を示す。水路幅縮小比 $B_2/B_1=0.5$ の場合における f_{qc} は、 $\theta=12.5^\circ$ の時、 $f_{qc}=0.08$ となり、 θ が大きくなるにつれて増大し、 $\theta=75^\circ$ の時、 $f_{qc}=0.30$ となった。また、 $B_2/B_1=0.7$ の場合における f_{qc} は、 $\theta=75^\circ$ の時、 $f_{qc}=0.12$ であり、 $B_2/B_1=0.5$ の場合 ($f_{qc}=0.30$) と比べると f_{qc} は0.18低下し、 B_2/B_1 が大きくなることによる f_{qc} の減少が見られた。以上の結果から、 f_{qc} に及ぼす B_2/B_1 の影響は $\theta=75^\circ$ で最大となり、 $\theta=12.5^\circ$ では極めて小さく、 θ が拡大するほど B_2/B_1 の影響が大きくなる傾向にあることが分かった。石原・志方(1967)は、 B_2/B_1 の影響を急縮部の下流のフルード数と比較しており、開水路急縮部の損失水頭は下流フルード数よりもむしろ水路幅縮小比によって左右され、水路幅縮小比が大きくなるにつれて損失係数は減少することを述べている。本研究でも、前節で述べたように下流フルード数 F_{r2} の違いが f_{qc} に及ぼす影響は小さく、急縮部にて確認された知見と一致した。

Hinds(1928)によれば、水路幅の縮小に伴う形状損失を小さくするために、縮小角度 θ は最大で 12.5° とし、その時の漸縮係数 f_{qc} は0.1とすることが提唱されている。本研究では、 $B_2/B_1=0.7$ の f_{qc} は、 $\theta=75^\circ$ のように大きい場合であっても $f_{qc}=0.12$ であった (**Fig.3.9**)。 **Fig.3.9**より、 B_2/B_1 が大きくなるほど f_{qc} は小さくなる傾向を示すことから、水路改修を行う際、少なくとも B_2/B_1 が0.7以上の場合には、 $f_{qc}=0.1$ 程度を見込むことが適当であると考えられる。

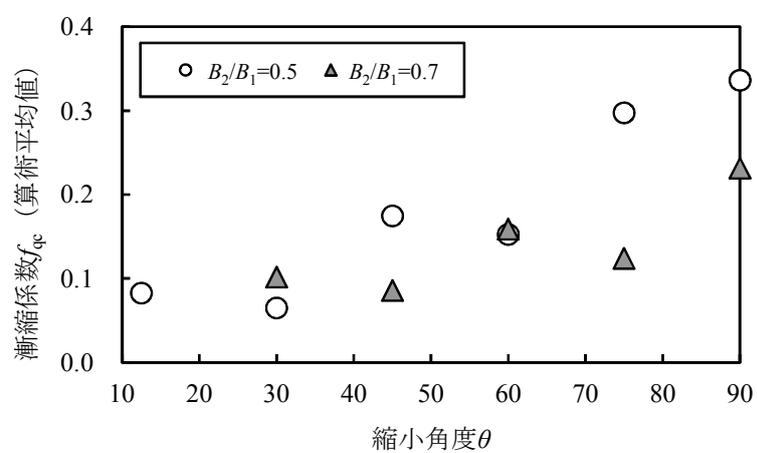


Fig.3.9 縮小角度 θ と漸縮係数 f_{qc} の関係
 Comparison of reduction angle θ and coefficient of conversion loss f_{qc}

3.4 結論

本研究では，開水路漸縮部を対象に水理模型実験を実施し，漸縮部形状を規定する水路幅縮小比 B_2/B_1 と縮小角度 θ が縦断水面形，フルード数 F_r および漸縮係数 f_{qc} に及ぼす影響，ならびに漸縮部下流のフルード数 F_{r2} と f_{qc} の関係について検討した．得られた知見は以下の4点に要約される．

- 1) 漸縮部付近で生じた水面落下現象について，水面落下位置は， θ が縮小するほど下流へと移動したが， B_2/B_1 が大きくなった場合は水位変動が小さくなるだけでその位置変化は認められなかった．
- 2) θ が縮小するにつれて水面落下位置におけるフルード数 F_{r3} は低下傾向を示し， B_2/B_1 の増大に対しては F_{r3} の変動が小さくなった．また，漸縮部の上流と下流のフルード数 F_{r1} と F_{r2} に対する B_2/B_1 と θ の影響を比較した場合， B_2/B_1 の影響は F_{r2} よりも F_{r1} に対して大きく， θ の影響は F_{r1} よりも F_{r2} に対して比較的大きいと考えられた．
- 3) $B_2/B_1=0.5$ の場合における f_{qc} は θ が大きくなるにつれて増大する傾向にあった．一方， $B_2/B_1=0.7$ の場合， f_{qc} は低下し， θ が拡大するほど B_2/B_1 の影響が大きくなる傾向にあることが分かった．この B_2/B_1 の影響と比べて， F_{r2} が f_{qc} に及ぼす影響は極めて小さく，この知見は石原・志方(1967)により急縮部にて確認された知見と一致した．
- 4) $B_2/B_1=0.7$ では θ が 75° のように大きい場合であっても $f_{qc}=0.12$ であった．したがって，水路改修を行う際，少なくとも B_2/B_1 が 0.7 以上の場合には， $f_{qc}=0.1$ 程度を見込むことが適当であり，この知見は，Hinds(1928)の知見と一致した．

第4章 パッチ状の水路補修が開水路の通水性に関する水理機能に及ぼす影響評価

4.1 緒論

開水路の使用性，耐久性，安全性といった構造機能を損なう劣化，変状が見られる水路区間については補修，補強等を行い，構造機能が損なわれていない区間については対策を講じないという方針のもと，ストックマネジメントによる水路補修等が実施されている（食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会，2010）．このように構造機能のみに基づく機能診断の結果によりストックマネジメント事業が遂行されると，自ずと，補修区間と未補修区間が比較的短い区間で混在したつぎはぎの水路（以降，「パッチ状の水路」と称する）が生み出される．また，毎年新たな補修工法（施工方法，施工材料）が各社メーカーより開発されており（農業土木事業協会，2016），施工性，経済性等を総合的に判断した上で，過年度採用した補修工法に固執せず，新たな補修工法を採用することが起こりうる．こうしたことから，異なる補修工法が補修区間で混在するパッチ状の水路が生み出される．

また，近年，構造機能に着目した機能診断結果に基づき，補修，補強等を行った結果，現地水路で必要な水位を確保できない等，水理的な不具合が生じている．樽屋・三春（2009）は，このような状況に対し，新たな機能診断の取り組みとして，流速や水面形といった通水性を含めた水理機能の評価が重要であることを提唱している．水理機能の評価に関する既往の研究成果では，補修後あるいは補修前の十分に長い区間の水路に対し，レーザー変位計やデジタルスチールカメラを用いて測定した結果に基づき，マンニングの粗度係数 n （以降，「粗度係数 n 」と称する）を評価する，水理機能の評価手法が提案されている（中矢ら，2008；太田

垣ら, 2012). しかし, これらの既往の研究成果は, 同種類の水路壁面材料が連続する条件に限定され, パッチ状の水路に関しては想定外である. すなわち, これまでパッチ状の水路の壁面構造が通水性に及ぼす影響は未解明であり, それに関する知見は皆無である. 今後, 現地水路で随所に現れることが想定されるパッチ状の水路について, 通水性に関する水理機能を評価しておくことは, その設計・維持管理を行う上で重要と考える.

以上のことから, 本研究では, 一定区間毎に水路壁面材料が不連続に変化するコンクリート開水路 (パッチ状の水路) を対象に, 通水性に関する水理機能を評価することを目的とする. 対象水路において, まず縦断水路底高および水路幅の計測を行い各水路補修区間の構造の変化を把握した. 次に各断面において, 水深および流速の計測を行い, 2通りの算出方法により粗度係数 n を算出した. これらのデータに基づいて, 現地水路におけるパッチ状の壁面補修が水位および流速に及ぼす影響について考察した. また, 現地観測結果を基に, 水路壁面粗度, 水路底高および水路幅の構造諸元を変更した場合における不等流計算を実施し, パッチ状の水路補修が縦断水面形に及ぼす影響について考察を行った. 最後に, パッチ状の水路の通水性に関する水理機能診断を実際に行う場合を想定し, 水理機能診断項目と水理機能を診断するための調査項目を整理し, 新たに提案した.

4.2 研究の方法

4.2.1 対象水路の概要

研究対象水路は, 岩手県岩手郡雫石町板橋地内に位置する (**Fig.4.1**). 本水路は, 整備後 40 年以上が経過したコンクリート開水路であり, 1 区間が 5~10 m 程度で補修工法の異なる 39 区間から成る (**Fig.4.2**; No.1~39). 計画時の水路幅, 高さ, 勾配, 延長は, それぞれ 0.9 m, 0.75 m, 1/1,300, 306 m である (**Table 4.1**). ま

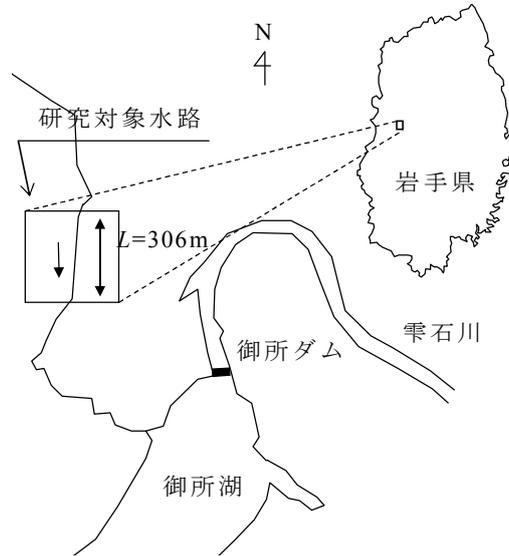


Fig.4.1 研究対象水路の位置
Location of the investigated channel

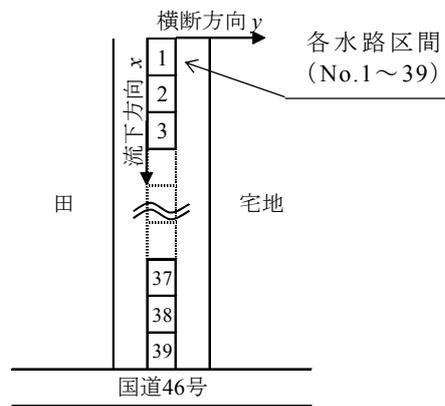


Fig.4.2 研究対象水路の概要
Outline of the investigated channel

Table 4.1 研究対象水路の諸元
Characteristics of channel

構造諸元	水路幅（計画時）	0.9m
	水路側壁高（計画時）	0.75m
	水路床勾配（計画時）	1/1,300
	水路延長	306m
	区間毎の補修延長	5~10m
水理諸元	水深（平均値）	0.5m
	流速（中心流速の平均値）	0.8m/s
	流量（平均値）	0.4m ³ /s
	Fr （平均値に基づく）	0.36

た、農林水産省農村振興局（2001）によれば、流況が比較的安定している場合、フルード数 Fr は 0.54 程度以下である。水路構造および流速の計測を行った 2012 年 5 月 29 日の本水路の Fr は 0.36（**Table 4.1**）であり、 $Fr \leq 0.54$ であった。

本水路では、平成17～19年度（3ヶ年）において、岩手県盛岡広域振興局農政部農村整備室の指導のもと、コンクリート水路補修工法PR施工が実施された。PR施工とは、補修工法開発企業が独自に開発した工法（断面修復系、樹脂系、パネル系、シート系）を持ち寄った試験的な補修のことであり、26社から40工法による施工区間が展示されている（岩手県盛岡広域振興局農政部農村整備室，2008）。なお、こうした異なる補修工法の混在に加え、補修区間の中には複数箇所の未補修区間もランダムに混在している。

4.2.2 水路構造および流速の計測方法

縦断水路底高および水路幅の計測位置は、水路区間 No.1～39 のそれぞれの区間中央の横断面中心線上（ $y=45\text{cm}$ 程度）を基本とし、計測方法はそれぞれ水路底におけるトータルステーションによる 3 次元計測、水路天端における標尺による手測とした。縦断水路底高については、各水路補修区間の上流端および下流端も追加計測を行った。

水深については、計測を縦断水路底高および水路幅の計測位置と同じ位置で行った。計測方法は、標尺による手測とした。

流速は、2次元方向（**Fig.4.2** の x - y 方向）電磁流速計（ケネック社製、本体部型式 VP1200、検出部型式 VPT2-200-08PS）を用いて計測した。

パッチ状の水路の各断面において横断方向の流速分布を測定する流速計測点は、水深計測位置にて、水深方向に 1 点法で、横断方向に 7 地点（左右岸側壁より 5cm, 10cm, 27.5cm, 中央 45cm）とした。結果の整理においては、補修を行わない「未補修（3 区間）」、モルタル・樹脂等を塗布または吹き付けを行う「断面修復、樹

脂系等（以降、「断面修復等」と称する）（26 区間）」、パネル状（FRP 等）の被覆材により被覆を行う「パネル系（6 区間）」、シート系（塩ビウレタン等）の被覆材により被覆を行う「シート系（4 区間）」の 4 種類（計 39 区間）に横断流速分布を区分した。なお、断面修復系と樹脂系は材料が異なるものの、計測した横断流速分布と目視による流況の差異は両材料において小さかったため、本報では両者を統一した。

4.2.3 粗度係数 n の評価

各補修区間の流れを等流と仮定すれば、粗度係数 n は各区間での平均水深と平均流速を用いて算出することができる。平均流速を v (m/s)、径深を R (m)、エネルギー勾配(ここでは等流を仮定して、水路勾配 1/1,300 とする)を I とすると、 n は次式で与えられる。

$$n = \frac{R^{2/3} I^{1/2}}{v} \quad (4.1)$$

ここで、 $R = A/P$ であり、 A は流積 (m²)、 P は潤辺 (m) である。以下、式(4.1)による粗度係数 n の算出法を簡易評価法と呼ぶことにする。

一方、等流を仮定せず、粗度係数 n を横断流速から推定することもできる。壁面から 5 および 10 cm の 2 点の横断流速を次の粗面水路に対する流速算定式(4.2)より求める。

$$\frac{u(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad (4.2)$$

ここで、 κ はカルマン定数 (= 0.4)、 k_s は相当粗度 (m)、 $u(y)$ は壁面からの水平距離 y における流速、 U_* は摩擦速度 (m/s) ($= \sqrt{gRI}$)、 g は重力加速度 (m/s²)、 I はエネルギー勾配 (便宜的に、水路勾配 1/1,300 とする) である。壁面近傍の横断流速を 5 および 10cm の流速の実測値で代表した。これら 2 点の流速の実測値

と式(4.2)で求められる流速の計算値を比較することによって、 k_s を最適化した。水路左右岸にて決定した k_s の平均値を用いて、粗度係数 n は次式で与えられる(日野, 1983)。

$$n = \frac{1}{7.66\sqrt{g}} k_s^{1/6} = 0.0417 k_s^{1/6} \quad (4.3)$$

以下、式(4.3)による粗度係数 n の算出法を直接評価法と呼ぶことにする。

直接評価法による粗度係数 n の算出値を基に、簡易評価法による粗度係数 n の算出値の評価を行うにあたっては、未補修と異なる補修工法(断面修復等、パネル系、シート系)を含めた4ケースについて、粗度係数 n の大小関係や平均値の差異を比較検討した。また、両者の相関について検討した。これらの検討に基づき、パッチ状の水路特有の流況が粗度係数 n に及ぼす影響を評価した。

4.2.4 不等流計算による縦断水面形に影響を及ぼす因子の評価

構造と水理諸元の計測結果、および粗度係数 n の算出結果より、パッチ状の水路補修が縦断水面形に影響を及ぼす因子(構造諸元)として、水路壁面粗度の変化、水路底高の変化(段落ち、段上がり)および水路幅の変化(縮小、拡大)であることが想定された。そこで本節では、それぞれの因子が、縦断水面形に及ぼす影響の違いをより詳細に評価するために、不等流計算を行った。不等流計算は、式(4.4)、式(4.5)に示す、ベルヌーイの定理に準じた逐次計算法である(農林水産省農村振興局, 2001)。

$$h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} + z_1 + h_f = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} + z_2 \quad (4.4)$$

$$h_f = \frac{Q^2 l}{2} \left(\frac{n_1^2}{R_1^{4/3} A_1^2} + \frac{n_2^2}{R_2^{4/3} A_2^2} \right) \quad (4.5)$$

ここで、 z は基準面から水路底までの高さ (m)、 Q は流量 (m^3/s)、 h_f は 1-2 断面間で生じる摩擦損失水頭 (m)、 l は 1-2 断面間の斜距離 (m) である。

Table 4.2 は、各検討ケースにおける計算条件を示す。Case1 は、すべて現地観測結果を反映した検討ケースである。Case2~4 は、Case1 を基にそれぞれ水路壁面粗度、水路底高、水路幅のみを変化させた検討ケースである。また、すべての検討ケースにおける水路底高は、実測結果に基づいており、計算（調査）対象区間の上流端と下流端の水路底高から算出した水路床勾配は $I=1/1,220$ である。なお、Case1 においては、実測水位と計算水位を合わせるために、断面変化部における損失として、水路幅の変化（縮小、拡大）を考慮した。

4.3 結果と考察

4.3.1 構造および水理諸元

4.3.1.1 対象水路の縦断水路底高および水路幅

Fig.4.3 は、対象水路の縦断水路底高と水路幅の変化を示す。対象水路にて、縦断的な凹凸が生じていた。水路底高における段落ちおよび段上がりの最大値は、両者ともに 0.05m であり、水路幅における縮小および拡大の最大値は、それぞれ 0.06m、0.07m であった。また、各水路補修区間の延長を L とすると、水路幅 B に対する各水路補修区間の延長 L の平均比 (L/B) は 8.4 であった。

4.3.1.2 縦断水面形

Fig.4.4 は、対象水路の縦断水面形を示す。実測水位においては、水路壁面粗度の変化、水路底高の変化（段落ち、段上がり）および水路幅の変化（縮小、拡大）に起因した、縦断的な水面変動が生じている。

Table 4.2 各検討ケースにおける計算条件
Calculation conditions in each nonequivalent flow analysis

検討ケース	計算条件				
	水路底 勾配 (実測)	段落ち, 段上が りの有無	水路幅 (m)	粗度係数 n	流量 (m ³ /s) (上流端境界条件) 下流端境界条件)
Case1	すべて現地調査結果を反映したケース。			0.012~0.017	
Case2	壁面粗度の影響把握を目的とし、Case1を基に、粗度係数 n を変更したケース。なお、変更後の粗度係数 n は、現地調査結果の最小値を採用。	有	0.84~ 0.92	0.012	
Case3	水路底高の変化（段落ち、段上がり）の影響把握を目的とし、Case1を基に、上下流の水路床勾配はそのまま、段落ち、段上がりを無くしたケース。	無			0.34 0.461
Case4	水路幅の変化（縮小、拡大）の影響把握を目的とし、Case1を基に、水路幅を変更したケース。なお、変更後の水路幅は、補修前の計画水路幅を採用。	有	0.90	0.012~0.017	

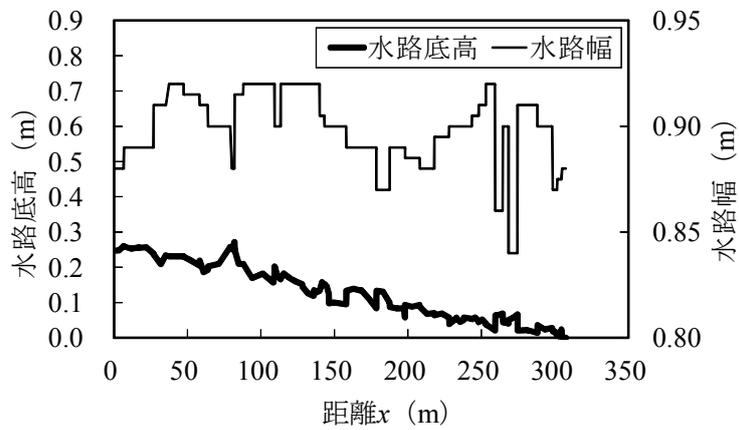


Fig.4.3 対象水路の縦断水路底高と水路幅の変化
Fluctuations in the longitudinal channel bed and width

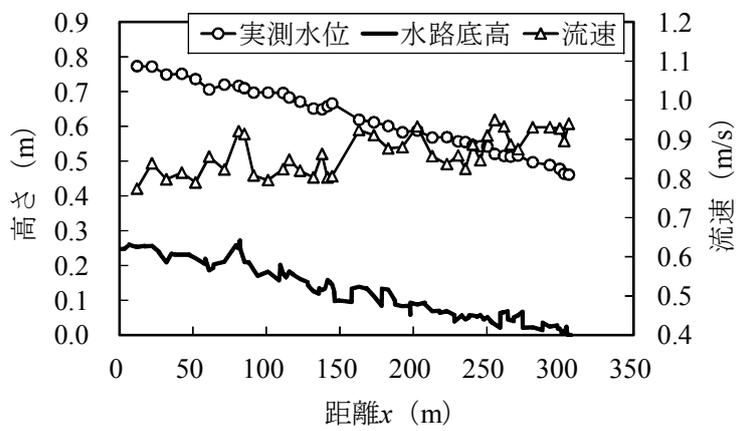


Fig.4.4 対象水路の縦断水面形
Longitudinal water surface profile

Fig.4.5 は、交叉波の発生状況の例を示す。交叉波は、複数の水路断面移行部（補修工法変化地点）にて生じており、**Fig.4.4** に示す縦断的な水面変動の一因となり得る。縦断水面形の変化の要因となる交叉波は、水路幅の縮小によって生じることが知られている（石原・志方，1967）。水路幅の変化が縦断水面形に及ぼす影響は交叉波の発生によって把握することができ、縦断水面形の変化は水路の通水性に影響を及ぼす可能性がある。したがって、通水性に関する水理機能を評価する際、交叉波の発生状況を観察することが重要である。

4.3.1.3 横断流速分布

Fig.4.6 は、水路断面補修工法別の平均横断流速分布（水路横断方向（ y ）の x 方向流速分布）の比較を示す。平均横断流速分布とは、流速計測点位置毎の流速の算術平均値を示す。未補修と異なる補修工法（断面修復等，パネル系，シート系）毎の平均横断流速分布を比較すると、未補修区間よりも補修区間の方が、どの地点においても流速が大きくなった。また、未補修と異なる補修工法（断面修復等，パネル系，シート系）の横断面中心線上（ $y=45\text{cm}$ 程度）のそれぞれの平均流速は、 $v=0.818\text{m/s}$ ， 0.861m/s ， 0.911m/s ， 0.854m/s であり、未補修に対してパネル系の平均流速は 1.1 倍の増加が見られた。

4.3.2 粗度係数

Table 4.3 は、簡易評価法と直接評価法により算出した水路断面補修工法別の粗度係数 n （平均値）を示す。簡易評価法による算出結果では、未補修区間と補修区間の粗度係数 n を比較すると、未補修区間よりも補修区間の方が粗度係数 n が小さく、また、補修工法別では粗度係数 n に相違が見られた。また、得られた粗度係数は $n=0.013\sim 0.016$ であり、一般的な現場打ちフルームの粗度係数 $n=0.012$



Fig.4.5 交叉波の発生状況の例
Cross waves in a transition

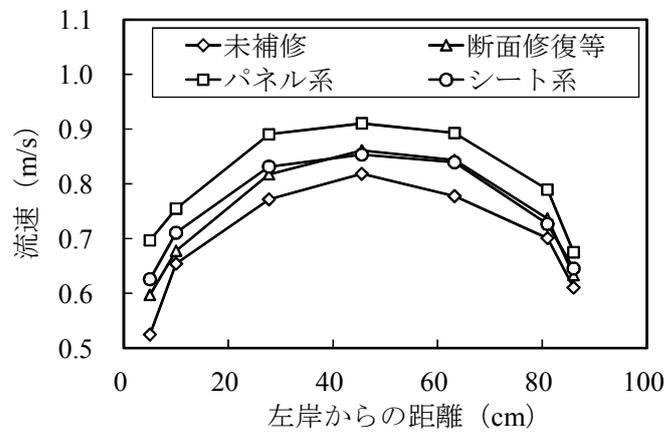


Fig.4.6 水路断面補修工法別の平均横断流速分布の比較
Cross sectional distribution of average velocity for each repair method

Table 4.3 簡易評価法【式(4.1)】と直接評価法【式(4.3)】により算出した水路断面補修工法別の粗度係数 n (平均値)
 Manning's roughness coefficients n (average) by equation (4.1) and equation (4.3) for each repair method

	簡易評価法		直接評価法	
	粗度係数 n (平均値)	相当粗度 k_s (平均値)	粗度係数 n (平均値)	粗度係数 n (平均値)
未補修	0.016	0.008	0.018	
補修工法	断面修復等	0.015	0.006	0.017
	パネル系	0.013	0.003	0.015
	シート系	0.015	0.005	0.017

～0.016（農林水産省農村振興局，2001）の範囲内である．一方，直接評価法による算出値は，簡易評価法に比べると，全体的に大きな値になった．その理由としては，交叉波の発生が見られるような条件下において，水路壁面付近における流速・流向の変化が著しく比較的流況が不安定な流速分布を壁面から 5 および 10cm の 2 点のみで評価したことが挙げられる．また，その 2 点で計測した流速は実際よりも小さく評価された可能性があり，結果として相当粗度 k_s が大きな値になったことが想定される．

Fig.4.7 は，簡易評価法と直接評価法により算出した粗度係数 n の関係を示す．両法により算出した粗度係数 n の関係に高い相関 ($R^2=0.93$) が見られた．粗度係数 n の評価において，等流を仮定した簡易評価法と等流を仮定していない直接評価法が高い相関を示したことは，現地水路における各水路補修区間の中央での流況が概ね等流であったと推察できる．つまり，水路断面移行部の前後の水位および流速には，パッチ状の水路補修の影響が及んでいることが想定されるが，各水路補修区間の中央においては，大きな影響が及んでいないものとする．

4.3.3 パッチ状の水路補修が縦断水面形に及ぼす影響

Fig.4.8 は，実測水位と計算水位（Case1）の比較を示す．実測水位と計算水位（Case1）の差は最大 0.03m 程度（水深 0.5m に対して 6%程度）であり，計算結果は概ね実測を再現できている．

Fig.4.9 は，計算水位（Case1～4）の比較を示す．Case2 および Case4 では，Case1 との縦断水面形凹凸の相違が殆ど見られず，水路壁面粗度および水路幅の変化が縦断水面形に及ぼす影響は小さい．Case2 は，その他の検討ケースに比べ低い水位となっているが，**Table 4.2** に示すとおり，粗度係数 $n=0.012$ が最も小さいためである．また，Case3 では，Case1 で確認できる縦断水面形の凹凸が生じておらず，水路底高の変化が縦断水面形に及ぼす影響は，比較的大きい．以上のことから，

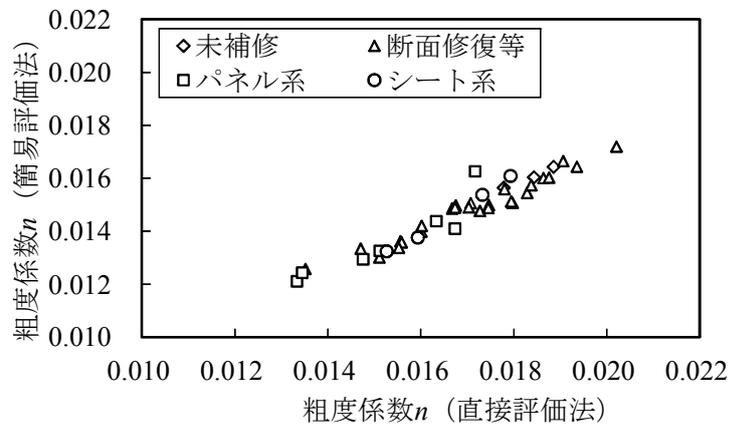


Fig.4.7 簡易評価法と直接評価法により算出した粗度係数 n の関係
 Comparison of Manning's roughness coefficients n calculated by equations (4.1) and (4.3)

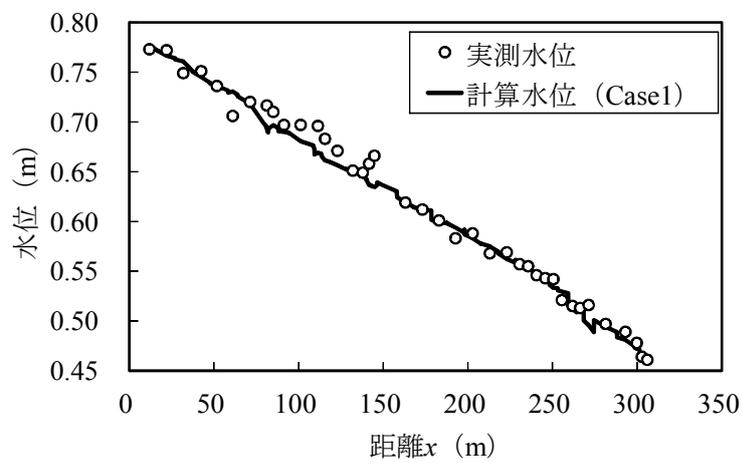


Fig.4.8 実測水位と計算水位 (Case1) の比較
 Comparison of observed and calculated water levels

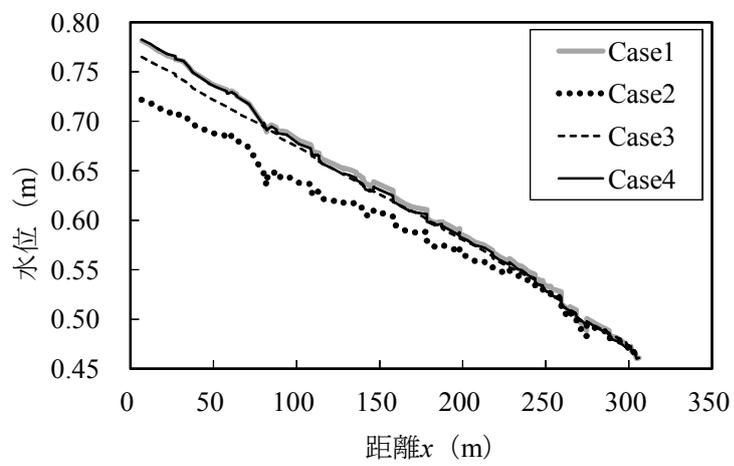


Fig.4.9 計算水位 (Case1~4) の比較
Comparison of calculated water levels

本検討条件においては、パッチ状の水路補修が縦断水面形に及ぼす影響は、検討した水路壁面粗度、水路底高および水路幅の3者の構造諸元の中で、水路底高の影響が最も大きくなった。

4.3.4 パッチ状の水路の通水性に関する水理機能診断項目

前節では、今回対象としたパッチ状の水路の縦断水面形に及ぼす影響は、水路底高の変化による影響が比較的大きいことを明らかにした。しかし、水路補修の工法や区間等が本対象水路と異なる条件、すなわち水路壁面粗度や水路幅の変化が異なる条件では、これらが縦断水面形に及ぼす影響は、本対象水路から得られた結果と異なることが十分に考えられる。つまり、水路壁面粗度、水路底高および水路幅の構造諸元の変化が縦断水面形に及ぼす影響は、パッチ状の水路補修によって様々であることが考えられる。そのため、パッチ状の水路に対して、通水性に関する水理機能診断を実際に行う場合を想定し、これら3者の構造諸元を機能診断項目とすることを提案する。

中田ら（2012）は、沈下した水路を対象とした水理機能に関する機能診断項目と調査項目について整理している。これを参考に、パッチ状の水路における通水性に関する水理機能診断項目と診断項目を明らかにするための調査項目の関係を整理し、ここに新たに提案する（Table 4.4）。Table 4.4では、中田ら（2012）が提示した通水性に関する機能診断項目としての通水断面の変化を、水路底高の変化と水路幅の変化に細分化した。機能診断項目に対応するそれぞれの調査項目を、表中に丸印で示した。また、補修工法の変化に伴う水路断面移行部における交叉波は、水路の通水性に影響を及ぼす要因として重要であるため、交叉波の有無を確認する調査を表中の調査項目に新たに追加した（星印）。非かんがい期、かんがい期、通年における調査期間にて、丸印および星印の調査を実施することにより、機能診断項目として掲げた、水路壁面粗度の変化、水路底高の変化および水路幅

Table 4.4 パッチ状の水路の通水性に関する水理機能診断項目とそれぞれの調査項目の関係
 Indicators and field investigations for hydraulic function diagnosis of the patchy channels

調査期間	水理機能		通水性			
	機能診断項目	調査項目	水路壁面粗度の変化	水路底高の変化 (段落ち, 段上がり)	水路幅の変化 (縮小, 拡大)	
非 か ん が い 期	機能診断項目	縦断水路底高の計測	○	○		
		水路幅の計測	○		○	
		各水路補修区間延長の計測		○		
		痕跡水位高の計測	○	○	○	
か ん が い 期	機能診断項目	水位・流量観測	○	○	○	
		縦断水面形の計測	○	○	○	
		水路断面移行部における交叉波の有無の確認			☆	
		横断流速分布の計測	○			
通 年	機能診断項目	農家・施設管理者への聞き取り	○	○	○	
		竣工図 (横断図等) の確認	○	○	○	
		補修工法仕様 (壁面粗度等) の確認	○	○	○	
		調査結果に基づく粗度係数 m の評価	○			
		調査結果に基づく不等流計算	○	○	○	

の変化を順次把握し，通水性に関する水理機能を診断することが可能になる．

4.4 結論

本研究では，水路壁面材料が不連続に変化するパッチ状の水路に対し，通水性に関する水理機能について以下のような知見を得た．なお，今回対象とした水路は，断面修復等，パネル系およびシート系の補修材と未補修のコンクリート壁面から構成されるパッチ状の水路である．

現地観測より，補修工法の変化に伴う水路断面移行部において交叉波が生じていた．交叉波は，水路の通水性評価の際の1つの指標である縦断水面形に影響を及ぼすことから，通水性に関する水理機能を評価する際，交叉波の発生状況を観察することが重要であることを指摘した．また，2通りの算出方法（簡易評価法と直接評価法）で求めた粗度係数 n の比較結果より，パッチ状の水路補修区間の中央では等流条件が概ね成立していた．本結果より，各水路補修区間の中央ではパッチ状の壁面補修が水位および流速に及ぼす影響は小さいことを明らかにした．

一方，現地水路では確認されなかった，パッチ状の水路補修が縦断水面形に及ぼす影響を把握するために，不等流計算を行った．水路壁面粗度，水路底高および水路幅の各構造諸元を変更した場合の不等流計算を行い，縦断水面形の差異を比較した．その結果，縦断水面形に及ぼす影響は，水路底高の変化が最も大きく，水路壁面粗度および水路幅の変化は比較的小さなものであった．

また，水路壁面粗度，水路底高および水路幅の3者の構造諸元を機能診断項目とすることを提案した．また，これらの診断項目に対応する調査項目を整理し，調査項目の中では，水路断面移行部における交叉波の有無の確認を新たに提案した．提案した診断項目と調査項目に準じて，水路壁面粗度，水路底高および水路

幅の変化を順次把握することにより、パッチ状の水路の通水性に関する水理機能を診断できるものとする。今後は、パッチ状の水路補修が開水路の水理機能に及ぼす影響を定量的に評価し、水理機能診断技術として確立させる必要がある。

第5章 水路の階層に基づく用水路ネットワークの機能評価手法に関する研究

5.1 緒論

前章までに示したとおり，昨今のストックマネジメント事業において実施される機能診断は，構造機能が主体であり，水理および水利用にかかる機能までを見据えたものにするのが求められている．第2章から第4章については，主に水理機能にかかる，水路改修に伴う粗度係数の変化（第2章），水路幅の変化（第3章），粗度係数および水路断面の変化（第4章）に着目した研究成果のとりまとめを行った．本章では，水路の階層構造に着目した，水利用機能にかかる機能診断手法を検討する．

階層の違いに基づいた水路(流れ)の管理または制御に関する先行研究として，血管の分岐の形態と生命活動との関係に関する分析（戸川，1981），城下町を対象とした水路による庭園への水の引き込みと景観に関する分析(佐々木ら,2004)，都市空間における遣り水景観を構成する水路の階層構造に関する分析（河端ら，2000）などを挙げるができる．いずれの研究も生命，景観の維持と形成を目的としてシステムの持つ階層構造とその管理の間に関係性を見出そうとする点が共通している．また，物流（輸送システム）を対象としたグラフ理論とネットワーク形態分析に基づく階層構造の研究（渡部，2007）は，同じレギュレーションシステムを持つ農業水利と共通点が多く，水路ネットワークの定式化に際して，階層性の考え方を中心に取り込むこととした．

そして，特に本研究において目指したのは，Horton が提案し，Strahler が改良した河川位数（stream order）の考え方（Strahler，1952）をヒントにした新しい水路用の位数の導入とその有効性の検証である．河川位数は基本的に排水路の機能

と同等の指標化であり，用水路とは根本的に逆の機能を持つ．用水路の位数に基づく既往の評価研究は無いことから，新たなネットワーク機能の評価手法として提案する．

5.2 用水路のネットワーク化と階層付け

5.2.1 水路ネットワークのモデル化手法

一般的に，ネットワークの構造は，線（link）と点（node）によって表示される．本節においては，例えば水路の路線区間を link で，それらが繋ぐ水利施設や装置を node で置き換えることによって，用水路と排水路を含む全ての水路をネットワーク型でモデル化する手法を考える．

link は水路の路線区間であると同時に，流れの方向を持つ要素であることに注意すれば，路線区間の link への置き換えは困難ではない．また，水路のネットワークにおいては，輸送の対象を水として，node が水の流れを制御する機能を持つと考えれば，情報ネットワークと同様な構造を組むことができる．

そこで，水路の機能に関する，アメリカ開拓局（USBR）の整理方法（U. S. Bureau of Reclamation, 1991）を導入する．それによれば，水路が持っている基本的な機能は次の3つのユニット（システム）で表すことができるとされる．すなわち，①Delivery system（分配システム，分配機能），②Collector system（回収システム，回収機能），③Connector system（連結システム，連結機能）の3つである．方向を持つ link と，3つの異なる機能を持つ node の違いが分かるように，①～③の3つのユニット（システム）を，**Fig.5.1**のように表現することができる．

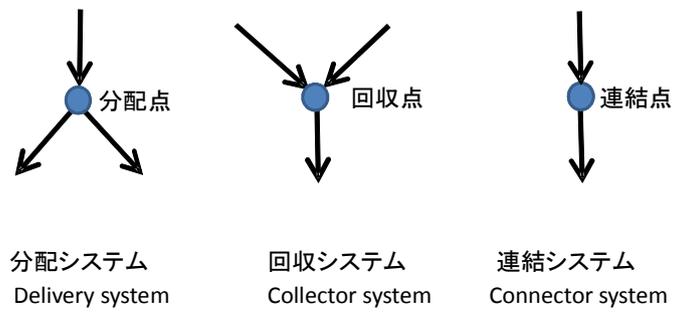


Fig.5.1 水路が有する基本的な機能
Basic canal functions

5.2.2 分配・回収・連結点を持つ水理学的な意味と機能

Fig.5.1における各 node の機能の違いは、流れに対する制御方法の違いであった。そこで、node に対して、さらに水理学的な説明を補足して違いを明らかにする。

まず、分配システムは用水路に見られる典型的なシステムに位置づけられ、流量を所定の link に分配する機能を果たす。node の上下流のエネルギー勾配を制御して node から所定の流量を分配する。具体的水利構造物としては、取水工、分水工、ポンプ、角落としセキ板、余水吐き、放流工などが該当する。

次に、回収システムは排水路に見られる典型的なシステムに位置づけられ、流量を所定の link から回収する機能を果たす。node の上下流のエネルギー勾配を制御して、node に接続する link から所定の流量を回収する。具体的構造物としては、合流工、ポンプ、注水工、集水渠などが該当する。

最後に、連結システムは、node において流量の分配と回収のための link を持たないが、node の上下流において、エネルギーと流量の両方、またはどちらか一方を直接制御するためのシステムに位置づけられる。具体的構造物としては、水位チェックゲート（エネルギーの調整）、落差工（エネルギーの調整）、調整池（流量の調整）などが該当する。

5.2.3 Node が持つ機能とその性能項目

3 つのシステムに共通する機能は、いずれもエネルギーまたは流量を制御することである。さらに各 node に対応する水利施設（上述の例で示したもの）には、施設自体が持っている水理学的な機構（セキやポンプなど）と、それに応じた H-Q 特性（水位または揚程と流量との間の特性または性能曲線のこと、以下「H-Q 特性」と称する）が必ず存在する。存在しない場合には、制御不能であることを意味する。また、流量や水位は制御変数であり、これらの制御変数は node ごとに制

御目標値が決められており，QH-T 特性（流量・水位の時系列特性のこと，以下「QH-T 特性」と称する）として表示される．以上の 2 種類の特性は，node の機能を発揮するための性能項目として位置づけられる．特に，次節以降で説明する用水路ネットワークの持つ node の特性は **Fig.5.2** のように整理される．

5.2.4 用水路ネットワークの持つ機能

用水路ネットワークは，水源の用水を個別農地に分配することを目的とし，**Fig.5.1** の分配システムを中心に組み立てられる．また，路線ごとの流量の大きさは，ゴールである農地面積（受益面積）の積み上げで決まる．下流に向かって何度か node を経るたびに，link は，幹線水路，支線水路，末端水路の順に link の規模が階層的に減少する．同時に，node と link を管理する組織（国，県，土地改良区，市町村など）の階層も下がる．以上のような階層構造を持つことが，用水路ネットワークの基本的な特徴（岩田・岡本，2000）でもある．

5.2.5 受益面積に基づく用水路のランク付け

本節では，河川位数のアナロジーにより，用水ネットワークの階層を客観的な位数（「用水路位数」と定義する）で表示する方法を提案する．

Fig.5.3 (a) は，河川の順位付けの方法として，Horton が提案し Strahler が改良した河川位数（Stream order）の考え方を図示したものである．河川位数は，水源に端を発する河道の位数を全て 1 とし，ある河道と同じ位数の河道との合流で位数を 1 つ上げ，小さい位数の河道との合流では位数を変化させない，というルールで設定される指標である．

この考え方を使い，用水路ネットワークの用水路位数を以下のように設定する．まず，河川位数の集水面積を末端用水路の受益面積に置き換えて考え，河川位数とは逆に末端から上流に向かって追跡する．河川位数で水源に端を発する河道の

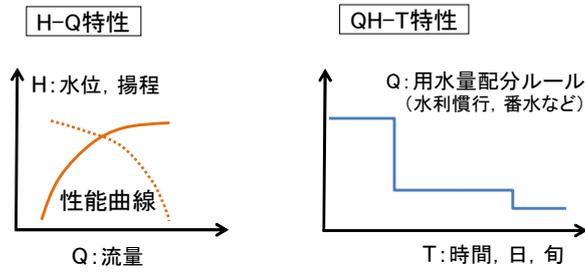


Fig.5.2 水理学的な機構
Hydraulic mechanism

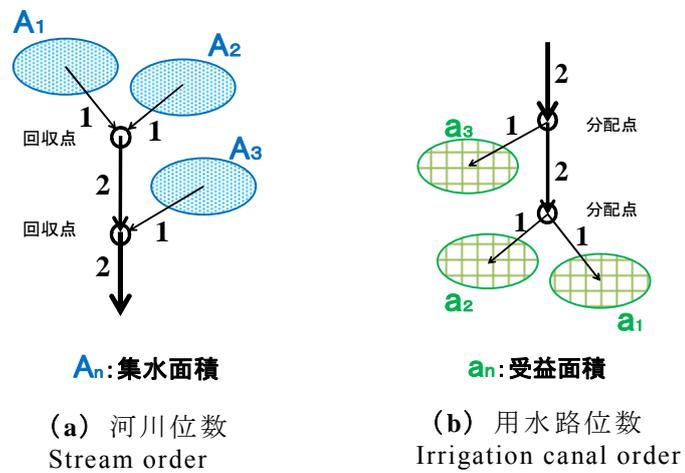


Fig.5.3 用水路位数の概念
Concept of irrigation canal order

代わりに、用水路位数では、**Fig.5.3 (b)** のように、末端用水路 link の位数を 1 とする。

そして、位数 1 の link の上流側の node で同じ位数の link が分岐する場合には、上流に向かって本線 link の位数を 1 つ上げる。本線 link よりも小さい位数の link が分岐する場合には、上流に向かって本線 link の位数を変化させない。以上を、用水路位数の設定ルールとする。

5.3 直分問題への適用事例

5.3.1 用水路の直分とそれに由来する問題

水路の直分（ちやくぶん）（志賀，1984）とは、**Fig.5.4** の写真に示すように、用水路の側壁に設けられた小口径の取水口（オリフィス）から、用水路に隣接する水田に用水を直接引き込む分水方法である。一般に、オリフィスには分水ゲートが併設され、その操作は隣接水田の農家に委ねられている。直分は所定の分水位さえ確保できていれば、安定した自由な取水を続けることが、その水理学的構造から保証される。

現在の農家は兼業農家の割合が多いために、直分を管理する農家による取水は出勤前の早朝に開始され、停止は帰宅後の夕方に行われることが一般的である。その結果、各々の農家による取水の開始および停止時刻が異なり、各々の取水量も異なる。土地改良区に代表される施設管理者は、限られた用水資源を確保するため、各々の農家による直分のゲート操作に対して節水指導を行うことがあるが、現実には農家主導の自助努力だけで節水を実現することは難しい。

さらに、直分が用水路ネットワークにとって厄介な存在となる場合がある。その典型的な問題は、長大な幹線用水路において多数の直分が上下流に連続的に存在する区間において現れる。前項で述べたとおり、幹線～支線を経て末端に至る



Fig.5.4 直分の状況
Direct outlet

階層構造が、用水路ネットワークの基本構造であるのに対し、幹線水路に農家管理の末端水路が直結する直分の構造は、中間階層を省略した不規則構造である。不規則構造の過剰取水に基づく用水不到達の問題、上下流の不均衡分配などの問題が、長大幹線用水路で発生する。以下、この問題について分析する。

5.3.2 長大幹線水路の直分問題の分析

Fig.5.5 に、適切な水路統合が実施された場合の、統合前後における用水路位数の変化を表示した。**Fig.5.5 (a)** は、水路の統合前において、受益地 A のネットワークが用水路位数 3 の水路から分水を行い、順次、階層を下げる構造を表している。受益地 B のネットワークも同様に表される。**Fig.5.5 (b)** は、受益地 A および B のネットワークにおいて、取水口の統合が行われた場合、用水路位数 3 同士の水路が統合し、上流に、より高い用水路位数 4 の水路が形成されることを表している。これらの過程では、直分が幹線水路に現れることはない。

Fig.5.6 に、不適切な水路統合が実施された場合の、統合前後における用水路位数の変化を表示した。**Fig.5.6 (a)** は、水路の統合前において、受益地 A のネットワークが用水路位数 2 の支線・末端水路から直分を行う構造を表している。また、受益地 B のネットワークは、受益地 A のネットワークよりも高次の用水路位数 3 の幹線・支線水路から分水を行い、順次、階層を下げる構造を表している。**Fig.5.6 (b)** は、受益地 A のネットワークに、より高次の階層を有する受益地 B のネットワークが統合され、両者の受益地に送水する導水路線を共有化する場合を表している。ここで共有化区間の用水路位数に着目すると、統合前は用水路位数 2 であったのに対し、統合後は用水路位数 3 となり、階層が 1 つ上がる。その結果、受益地 A で、用水路位数 3 の水路から用水路位数 1 の水路へ分水する事態（直分）が発生する。直分は用水路位数とそのギャップ（2 以上）で定義できることも分かる。

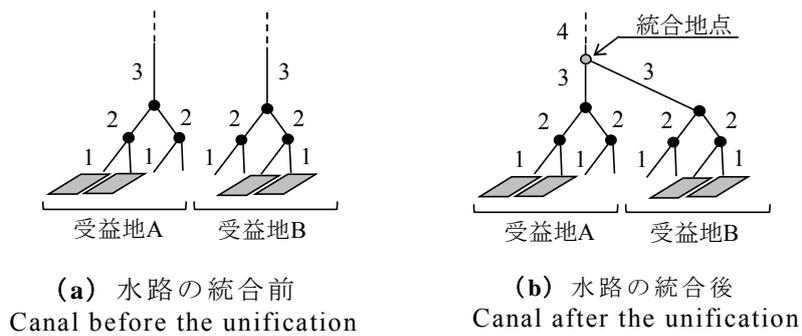


Fig.5.5 適切な水路統合における用水路位数
Irrigation canal order with appropriate canal unification

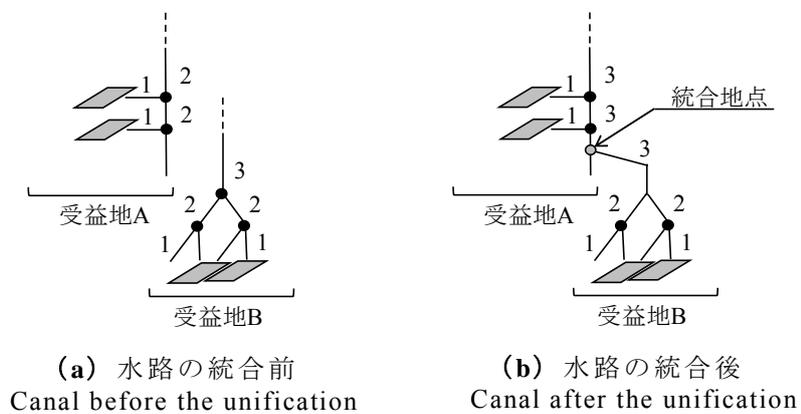


Fig.5.6 不適切な水路統合時における用水路位数
Irrigation canal order with inappropriate canal unification

5.3.3 直分問題の解決方法

Fig.5.7 は、幹線水路からの直分を解消するための対策を示す。なお、**Fig.5.7 (a)** および **Fig.5.7 (b)** の対策法は、**Fig.5.6 (b)** の問題に対応している。**Fig.5.7 (a)** は、二連化による対策事例である。受益地 A および B のネットワークの統合により、共有化された水路区間を、二連化により再分割する。その結果、受益地 A に向かう用水路の位数は、統合前の 2 (**Fig.5.6 (a)**) に戻され、その結果、水路共有区間は専有区間に変更され、直分が解消される。**Fig.5.7 (b)** は、バイパスによる対策事例である。二連化と同様の方法で、直分の解消が説明できる。ネットワークで扱う場合、二連化とバイパス化の評価は類似のものと考えられ、以降はこれらを総称して「複線化」とする。

以上のように、用水路ネットワークの階層性と密接な関わりを持つ直分問題の発生と、その対策の合理性を分析するためには、階層に基づく用水路位数の考え方が有効であることが分かる。

5.4 番水問題への適用事例

5.4.1 番水の概要

番水とは、農家の長年の経験や伝統に基づくルール（配水順序、流量、送水・断水時間）に従う水利慣行である。番水の目的は、水田・畑地灌漑用水のための水源量が一定以下に制限されたとき、均等で、精度良く、公平に、対象とする受益地全体に用水を行き渡らせることである。番水は、幹線・支線・末端水路と、様々な管理対象範囲で実施され、一般的に、渇水状況が厳しくなるにつれて、対象範囲が拡大し、管理レベルが高くなる（田島ら，2009）。

Fig.5.8 は、開水路による支線範囲での番水のようすを表している。開水路における分水の制御機構はセキである。番水ブロックの下流に位置する本線にセキを

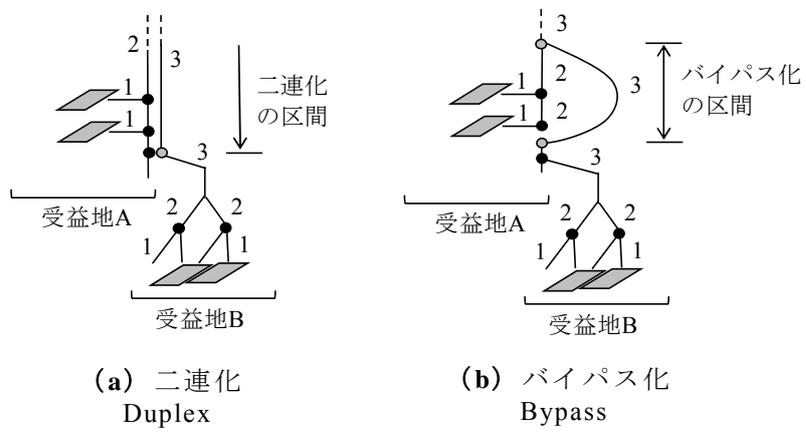


Fig.5.7 幹線水路から直分を解消するための対策
 Measures to remove direct outlets in major canals



Fig.5.8 支線水路レベルの番水状況
Rotational irrigation in branch canals

設け、所定の分水位を確保して、配水を行う。また、堰上げを行う構造は、スライドゲート、転倒ゲート、角落とし (Fig.5.8) など様々であり、その規模も圃場・支線・幹線水路レベルで異なる。

5.4.2 渇水時における長大水路の階層問題と対策

前項に引き続き長大幹線用水路を検討対象とする。長大幹線用水路は、もともと上下流の均等な配水を使命としているが、渇水時にはより高度な配水技術が求められる。Fig.5.9 は、長大水路の用水路ネットワークにおける平常時（非渇水時）の典型的な水路階層の構成を示している。最も高次の用水路位数を3として、幹線が水路階層を維持しながら、支線・末端水路に向けて階層を下げる。一方、渇水時において、非渇水時と全く同じルールが適用されるならば、図中の水路階層3の水路は、本線下流に沿って水路階層を維持できないことは明らかである。維持できない原因は、流量と分水位の減少であり、下流になるほど不公平が発生する。

このことは、長大幹線用水路のすべての分水地点が幹線を空間的に共有せざるを得ない以上、避けられない問題であり、その基本的構造は、直分問題と同じである。したがって、複線化はこの問題に対しても有効である。Fig.5.10 (a) に、最下流の番水ブロックへ導水するために、複線化を行った場合の用水路位数の変化を示した。

5.4.3 番水による水路階層の表示

Fig.5.10 (b) は、最下流から順番に上流へと番水ブロックを移行することによる番水のしくみを、用水路位数の変化によって表示している。複線化が共有区間の施設改変によって空間的専有化を進める対策であるのに対し、番水は、大規模な施設の改変を伴わず、共有幹線区間を時間的に分割し専有化する手法であると

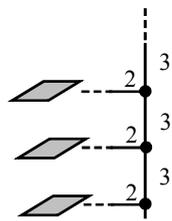
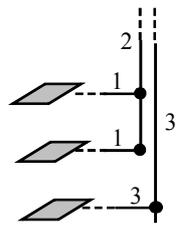
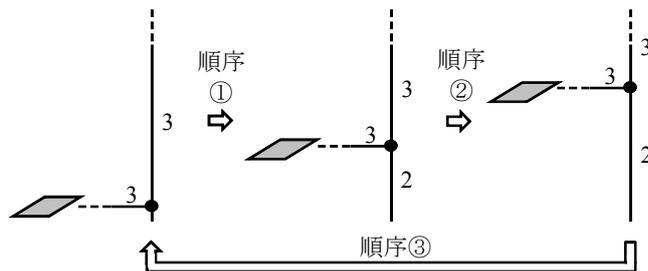


Fig.5.9 長大水路の分水における用水路位数
Irrigation canal order based on division of water in long canal



(a) 複線化
Multiple track



(b) 番水
Rotational irrigation

Fig.5.10 複線化と番水における用水路位数
Irrigation canal order based on multiple track and rotational irrigation

解釈できる。大規模な施設改変には建設コストがネックになる。一方、番水の実施に建設コストはかからないものの、用水の制御操作にかかる労力は甚大である。用水路位数は、いずれの対策に対しても同様の評価を与える。用水路ネットワークの持つ機能とそのトレードオフ関係を説明するためには、用水路位数の導入が有効である。

5.5 結論

本研究では、水路の階層構造に着目した、水利用機能にかかる機能診断手法を検討し、以下のような知見を得た。

水路が有する基本的な機能の一つである分配機能に基づき、水路をネットワーク化するための手法を提案した。また、用水路ネットワークが持つ特徴である階層性を客観的に表示するための指標として、用水路位数 (irrigation canal order) を導入した。

農業水利の分野における、長大幹線水路の直分問題と番水問題を例とし、用水路位数を用いた水利用機能の評価手法を適用し、有効性を検証した。長大幹線水路における直分問題を事例として、水路の複線化による対策が有効であることを、用水路位数を用いて説明した。また、長大幹線水路の分水構造を用水路位数にて把握し、渇水時における対策工としての番水システムの有効性を説明した。

第 6 章 総括

本研究では，農業水利施設，主に開水路を対象とし，水理および水利用に関する機能診断手法の検討を行った．ここに各章で得られた成果を総括し，本論文の結論とする．なお，第 2 章から第 4 章では水理機能にかかる診断手法，第 5 章では水利用機能にかかる診断手法について詳述した．

第 1 章では，ストックマネジメント事業における機能診断の考え方と課題，担い手の減少に伴い水管理の省力化を目指した農業水利システムの再編を行う社会的要求について概説し，本研究の目的および研究全体の構成について述べた．

第 2 章では，骨材の種類および骨材の露出具合の組合せが異なる 8 枚の粗度係数評価板を自作し，作製した評価板を用いた現地水路の粗度係数測定法（評価板法）の有効性を検討した結果，以下のような知見を得た．

- 1) 川砂利および砕石を骨材とする評価板の粗度係数は $n = 0.008 \sim 0.014$ の範囲であった．また，川砂利および砕石を骨材とする評価板の粗度係数の値には，大きな差が見られないことから，骨材の種類が n に及ぼす影響は，小さいことを確認した．
- 2) 滞水のあるコンクリート開水路の評価板法による粗度係数の推定値は，摩耗が生じたコンクリート水路の基準値の範囲内であり，また，レーザー変位計を用いた携帯型測定法による推定値との差異は 0.001 で小さかった．滞水条件下では，携帯型測定法では水を除去する必要があるが，評価板法では，直接適用可能である．したがって，評価板法は，滞水条件でも省力的に，現地水路の粗度係数を実務上精度よく評価できることがわかった．
- 3) 評価板法では，実務経験の異なる 4 名の評価者により，対象水路の粗度係数を

評価した。各評価者が評価した粗度係数の標準偏差は、最大でも 0.0008 であり、各評価者による粗度係数のばらつきは、比較的小さかった。よって、本手法は、評価者の実務経験によらず、客観的に粗度係数を評価できることがわかった。

本研究は、川砂利を骨材とする現地水路における一調査事例にすぎない。したがって、川砂利と碎石の骨材の種類を問わず、現地水路にて、今後さらに調査事例を積み重ね、本手法の有効性を検討していく必要がある。

第 3 章では、開水路漸縮部を対象に水理実験を実施し、漸縮部形状を規定する水路幅縮小比 B_2/B_1 と縮小角度 θ が縦断水面形、フルード数 F_r および漸縮係数 f_{qc} に及ぼす影響、ならびに漸縮部下流のフルード数 F_{r2} と f_{qc} の関係について検討した。得られた知見は以下の 4 点に要約される。

- 1) 漸縮部付近で生じた水面落下現象について、水面落下位置は、 θ が縮小するほど下流へと移動したが、 B_2/B_1 が大きくなった場合は水位変動が小さくなるだけでその位置変化は認められなかった。
- 2) θ が縮小するにつれて水面落下位置におけるフルード数 F_{r3} は低下傾向を示し、 B_2/B_1 の増大に対しては F_{r3} の変動が小さくなった。また、漸縮部の上流と下流のフルード数 F_{r1} と F_{r2} に対する B_2/B_1 と θ の影響を比較した場合、 B_2/B_1 の影響は F_{r2} よりも F_{r1} に対して大きく、 θ の影響は F_{r1} よりも F_{r2} に対して比較的大きいと考えられた。
- 3) $B_2/B_1=0.5$ の場合における f_{qc} は θ が大きくなるにつれて増大する傾向にあった。一方、 $B_2/B_1=0.7$ の場合、 f_{qc} は低下し、 θ が拡大するほど B_2/B_1 の影響が大きくなる傾向にあることが分かった。この B_2/B_1 の影響と比べて、 F_{r2} が f_{qc} に及ぼす影響は極めて小さく、この知見は石原・志方(1967)により急縮部にて確認された知見と一致した。
- 4) $B_2/B_1=0.7$ では θ が 75° のように大きい場合であっても $f_{qc}=0.12$ であった。した

がって、水路改修を行う際、少なくとも B_2/B_1 が 0.7 以上の場合には、 $f_{qc}=0.1$ 程度を見込むことが適当であり、この知見は、Hinds(1928)の知見と一致した。

第4章では、水路壁面材料が不連続に変化するパッチ状の水路に対し、通水性に関する水理機能について以下のような知見を得た。なお、今回対象とした水路は、断面修復等、パネル系およびシート系の補修材と未補修のコンクリート壁面から構成されるパッチ状の水路である。

現地観測より、補修工法の変化に伴う水路断面移行部において交叉波が生じていた。交叉波は、水路の通水性評価の際の1つの指標である縦断水面形に影響を及ぼすことから、通水性に関する水理機能を評価する際、交叉波の発生状況を観察することが重要であることを指摘した。また、2通りの算出方法（簡易評価法と直接評価法）で求めた粗度係数 n の比較結果より、パッチ状の水路補修区間の中央では等流条件が概ね成立していた。本結果より、各水路補修区間の中央ではパッチ状の壁面補修が水位および流速に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。

一方、現地水路では確認されなかった、パッチ状の水路補修が縦断水面形に及ぼす影響を把握するために、不等流計算を行った。水路壁面粗度、水路底高および水路幅の各構造諸元を変更した場合の不等流計算を行い、縦断水面形の差異を比較した。その結果、縦断水面形に及ぼす影響は、水路底高の変化が最も大きく、水路壁面粗度および水路幅の変化は比較的小さなものであった。

また、水路壁面粗度、水路底高および水路幅の3者の構造諸元を機能診断項目とすることを提案した。また、これらの診断項目に対応する調査項目を整理し、調査項目の中では、水路断面移行部における交叉波の有無の確認を新たに提案した。提案した診断項目と調査項目に準じて、水路壁面粗度、水路底高および水路幅の変化を順次把握することにより、パッチ状の水路の通水性に関する水理機能

を診断できるものとする。今後は、パッチ状の水路補修が開水路の水理機能に及ぼす影響を定量的に評価し、水理機能診断技術として確立させる必要がある。

第5章では、水路の階層構造に着目した、水利用機能にかかる機能診断手法を検討し、以下のような知見を得た。

水路が有する基本的な機能の一つである分配機能に基づき、水路をネットワーク化するための手法を提案した。また、用水路ネットワークが持つ特徴である階層性を客観的に表示するための指標として、用水路位数 (irrigation canal order) を導入した。

農業水利の分野における、長大幹線水路の直分問題と番水問題を例とし、用水路位数を用いた水利用機能の評価手法を適用し、有効性を検証した。長大幹線水路における直分問題を事例として、水路の複線化による対策が有効であることを、用水路位数を用いて説明した。また、長大幹線水路の分水構造を用水路位数にて把握し、渇水時における対策工としての番水システムの有効性を説明した。

以上のことから、本研究では、摩耗が生じた水路の粗度係数の評価手法（第2章）、水路幅の縮小が生じた水路の損失係数（漸縮係数）の評価手法（第3章）、水路壁面材料が不連続に変化する水路の通水性の評価手法（第4章）および用水路位数を用いた水路ネットワークの評価手法（第5章）について検討を行い、それぞれの評価手法の有効性を明らかにした。これらの研究成果は、近年、現地水路で生じている、あるいは今後生じることが想定される事象を対象にしており、今後の水理および水利用にかかる機能診断の円滑な実施に寄与することが期待される。しかし、本研究では、それぞれの診断手法の検討に終始しており、既往の研究成果を含めた、水理機能および水利用機能にかかる診断手法としての体系的な整理にまでは至っていない。そのため、今後は、水理および水利用にかかる機

能診断を全国的に普及させることを目的とし、マニュアル化を含めた機能診断手法の体系的な整理が必要であると考えます。本研究結果が、水理および水利用にかかる機能診断の普及に寄与するとともに、今後の研究に活かされることを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くの方々にご指導、ご助言およびご支援をいただきました。

はじめに、主指導教官をお引き受けいただきました、鹿児島大学農学部教授 井和朗先生に心よりお礼申し上げます。無事に本論文の取りまとめを終えることができましたのもひとえに先生の懇切丁寧なご指導、ご教授の賜と深謝致します。また、鹿児島大学農学部准教授伊藤祐二先生には、副指導教官として、研究への取り組み方、得られた結果に対する客観的な考察のしかたなどについて、ご指導、ご助言をいただくとともに、公私にわたってご支援をいただきましたことに対し深く感謝致します。琉球大学農学部教授酒井一人先生におかれましては、快く副指導教官をお引き受けいただき、貴重なご意見、ご助言を賜りました。ここに厚く謝意を申し述べます。

鹿児島大学農学部准教授肥山浩樹先生、助教平瑞樹先生におかれましては、度々温かい励ましのお言葉をいただきましたことに対し、感謝致します。また、琉球大学農学部教授中野拓治先生、佐賀大学農学部教授近藤文義先生におかれましては、ご多忙の中、学位公開審査会にお越しいただき、貴重なご意見、ご助言をいただきましたことに対し、謝意を表します。

農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門樽屋啓之ユニット長、中達雄博士、田中良和上級研究員、浪平篤上級研究員、嶺田拓也上級研究員、中田達研究員におかれましては、研究の基礎から細部に至るまでご教示を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。また、新潟大学農学部准教授鈴木哲也先生におかれましては、学会発表のたびに、研究内容にかかる貴重なご助言や温かい励ましのお言葉をいただきましたことに対し、深く感謝致します。

(株)三祐コンサルティング久野格彦代表取締役社長におかれましては、鹿児島

大学大学院連合農学研究科での学位取得にご理解いただきましたことに対し、深く謝意を表します。東京支社久野叔彦支社長，堀田昇克部長，三春浩一課長のほか，社員の皆様には，日常業務の傍ら研究活動を行う中で，多大な励ましのお言葉，業務のサポートをいただきましたことに対し，心よりお礼申し上げます。また，札幌支店長野浩一課長，名古屋本社伊藤夕樹主幹におかれましては，学位論文（第2章）の作成にあたり，多大なご助言いただきましたことに対し，深く感謝の意を表します。

最後に，何事も好奇心をもって探究することの大切さを教えてくれた父親，健康な身体を授けてくれた母親，仕事と研究の両立を支援してくれた妻，そして満面の笑顔で元気を与え続けてくれた子どもたちに感謝します。

参考文献

第1章 序論

- 藤山 宗，樽屋啓之，中田 達（2014）：開水路からパイプラインに移行する水路システムの放水工改修に関する水理機能診断，農村工学研究所技報，**215**，1-16.
- 皆川明子，木村 幸，藤山 宗，樽屋啓之（2014）：都市化地域での水路の部分改修が水路システムに及ぼす影響，水土の知，**82**(1)，15-18.
- 森 充弘，藤原鉄朗，齋藤 豊，増川 晋，渡嘉敷 勝（2008）：農業用水路変状調査システムの開発，農業農村工学会論文集，**253**，71-78.
- 中 達雄，樽屋啓之（2008）：用水路系に対する水利学的性能の基本的考え方，農業農村工学会論文集，**256**，9-16.
- 中矢哲郎，森 充広，森 丈久，渡嘉敷 勝（2008）：携帯型粗さ測定装置によるコンクリート水路の粗度係数推定手法，農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集，**63**，58-60.
- 長束 勇，甲本達也，青山咸康，野中資博，服部九二雄（2002）：農業水利コンクリート構造物の更新と維持管理，農土誌，**70**(12)，3-6.
- 農林水産省（2015）：農林業センサス
- 食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会（2010）：農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」.
- 食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会（2016）：平成27年度第1回技術小委員会配布資料 参考資料 4_新たな土地改良長期計画の策定について (http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/gizyutu/h27_1/) .
- 鈴木哲也，樽屋啓之，中田 達，藤山 宗，中 達雄（2014）：弾性波検出による農業用パイプラインの水理機能診断法の開発，水土の知，**82**(1)，7-10.

樽屋啓之，三春浩一（2009）：用水路系における水理・水利用機能診断のチェックポイント，農土誌，**77**(4)，11-14.

渡嘉敷 勝（2013）：農業用コンクリート水路における摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究，農村工学研究所報告，**52**，1-57.

第2章 評価板を用いたコンクリート開水路の粗度係数の測定

浅野 勇，渡嘉敷 勝，森 充広，西原正彦（2014）：レーザー距離計による摩耗測定手法の開発，農業農村工学会論文集，**293**，1-12.

Chow, V.T. (1962)：開水路の水理学 I，石原藤次郎訳，丸善，92-191.

藤山 宗，樽屋啓之，中田 達，嶺田拓也，伊藤祐二，靱井和朗（2015）：パッチ状の水路補修が開水路の通水性に関する水理機能に及ぼす影響評価，農業農村工学会論文集，**297**，II_35-II_41.

日野幹雄（1983）：明解水理学，丸善，144-145.

加藤 敬，本間新哉，北村浩二（2009）：コンクリート製農業用開水路の粗度係数を求めるための現地観測について—とくに水面が緩勾配な場合—，平成 21 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，394-395.

加藤 敬，本間新哉，北村浩二，今泉眞之（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，農工研技報，**207**，183-193.

小古貴晃，岡島賢治，石黒 寛，伊藤良栄，長岡誠也（2015）：空中超音波による開水路の粗度係数測定方法に関する基礎式の提案について，平成 27 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，678-679.

皆川明子，木村 幸，藤山 宗，樽屋啓之（2014）：都市化地域での水路の部分改修が水路システムに及ぼす影響，水土の知，**82**(1)，15-18.

中 達雄，樽屋啓之（2008）：用水路系に対する水利学的性能の基本的考え方，農

- 業農村工学会論文集, **256**, 9-16.
- 中矢哲郎, 渡嘉敷 勝, 森 充広, 森 丈久 (2008a): 摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法, 農業農村工学会論文集, **258**, 23-28.
- 中矢哲郎, 森 充広, 森 丈久, 渡嘉敷勝 (2008b): 携帯型粗さ測定装置によるコンクリート水路の粗度係数推定手法, 農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, **63**, 58-60.
- 農林水産省農村振興局 (2014): 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」平成 26 年 3 月, 185-189.
- 太田垣晃一郎, 長谷川雄基, 鈴木哲也, 松本伸介, 佐藤周之 (2012): 三次元画像解析によるコンクリート水路表面粗度の測定手法に関する研究, 農業農村工学会論文集, **280**, 7-13.
- 神明前方嗣, 畑中哲生, 仲谷正史, 川上直樹, 舘暲 (2007): 指先の皮膚感覚による凹凸形状判別に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会論文集, 181-182.
- 食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会 (2010): 農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」.
- Skedung, L., Arvidsson, M., Chung, J.Y., Stafford, C.M., Berglund, B. and Rutland, M.W. (2013): Feeling Small: Exploring the tactile perception limits, Scientific Report, **3**, 1-6.
- 樽屋啓之, 三春浩一 (2009): 用水路系における水理・水利用機能診断のチェックポイント, 農土誌, **77**(4), 11-14.

第3章 農業用水路における漸縮係数に関する実験的研究

芦田和男（1961）：河川改修に伴う断面急変部の水理とその適用に関する研究，学位論文。

Formica, G. (1955) : Esperienze preliminari sulle perdite di carico nei canali, dovute a cambiamenti di sezione, *L'Energia Elettrica*, **32**, 554-567.

藤山 宗，樽屋啓之，中田 達，嶺田拓也，伊藤祐二，靱井和朗（2015）：パッチ状の水路補修が開水路の通水性に関する水理機能に及ぼす影響評価，農業農村工学会論文集，**297**，II_35-II_41.

Hinds, J. (1928) : The Hydraulic design of flume and siphon transitions, *Trans. ASCE*, **92**, 1423-1459.

Ippen, A. T. and Dawson, H. (1951) : Design of channel contractions, *Trans. ASCE*, **116**, 326-346.

石原藤次郎，志方俊之（1966）：開水路急縮部の水理学的性状に関する研究，水理講演会論文集，**10**，99-104.

石原藤次郎，志方俊之（1967）：開水路急縮部の水理学的性状に関する研究，土木学会論文集，**138**，30-38.

岩佐義朗，細田 尚（1989）：漸縮水路の高速流に関する数値解析，京都大学防災研究所年報，**32(B-2)**，657-667.

農林水産省農村振興局（2014）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」，217-220.

鬼束幸樹，浦 勝，秋山壽一郎，坂本 真（1996）：開水路漸縮部における流況について，水工学論文集，**40**，767-772.

食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会（2010）：農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」.

樽屋啓之，藤山 宗，中田 達（2014）：水路の複線化に基づく水路ネットワークの機能強化，*水土の知*，**82**(1)，11-14.

樽屋啓之，藤山 宗，中田 達，浪平 篤（2015）：水路の階層に基づく用水路ネットワークの機能評価手法に関する研究，*土木学会論文集 B1*，**71**(4)，I_1333-I_1338.

第4章 パッチ状の水路補修が開水路の通水性に関する水理機能に及ぼす影響評価

日野幹雄（1983）：明解水理学，丸善，144-145.

石原藤次郎，志方俊之（1967）：開水路急縮部の水理学的性状に関する研究，*土木学会論文集*，**138**，30-38.

岩手県盛岡広域振興局農政部農村整備室（2008）：コンクリート水路補修工法 PR 施工実施工法集平成 20 年度追加版.

中田 達，藤山 宗，樽屋啓之，田中良和（2012）：水路の沈下による水利用・水理機能の低下に関する実態調査および分析，*農村工学研究所技報*，**212**，29-42.

中矢哲郎，渡嘉敷 勝，森 充広，森 丈久（2008）：摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法，*農業農村工学会論文集*，**258**，23-28.

農業土木事業協会（2016）：農業水利施設保全補修ガイドブック平成 28 年度版.

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」基準書 技術書，154-170.

太田垣晃一郎，長谷川雄基，鈴木哲也，松本伸介，佐藤周之（2012）：三次元画像解析によるコンクリート水路表面粗度の測定手法に関する研究，*農業農村工学会論文集*，**280**，7-13.

食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会（2010）：農業

水利施設の機能保全の手引き「開水路」.

樽屋啓之, 三春浩一 (2009) : 用水路系における水理・水利用機能診断のチェックポイント, 農業農村工学会誌, **77**(4), 11-14.

第5章 水路の階層に基づく用水路ネットワークの機能評価手法に関する研究

岩田敏靖, 岡本雅美 (2000) : 日本の重層的農民水利組織の構造と機能, 農村計画学会論文集, **2**, 181-185.

河端邦彦, 山田圭二郎, 中村良男 (2000) : 都市空間における遣水型水路網に関する研究, 土木計画学研究・論文集, **17**, 497-502.

佐々木邦博, 米林由美子, 平岡直樹 (2004) : 城下町の庭園と庭園を結ぶ水路の特性, 信州大学農学部紀要, **40**(1・2), 27-34.

志賀永一 (1984) : 農業水利問題の発生と用水利用の変化ー北海道・南幌町の事例分析ー, 北海道大学農経論叢, **40**, 63-85.

Strahler, Arthur, N. (1952) : Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography, Bulletin of the Geological Society of America, **63**, 1117-1142.

田島正廣, 石井 敦, 三輪 弼, 千谷小百合 (2009) : 水田用水の異常渇水対応策としての「番水」の論理と実態, 東北地域災害科学研究, **45**, 163-168.

戸川達男 (1981) : 血管の分岐の形態とその機能, 物性研究, **36**(1), A40-A47.

U. S. Bureau of Reclamation (1991) : Canal Systems Automation Manual, A Water Resources Technical Publication, **1**, 3.

渡部大輔 (2007) : 近接性からみたネットワーク形態解析と輸送システム最適化に関する数理的研究, 都市計画, **56**(4), 110.