

手取川扇状地における水田用水の昇順方式
による新しい還元水分析法の提案と適用

2 0 1 3 年

石川県立大学大学院

吉田 匡

手取川扇状地における水田用水の昇順方式による
新しい還元水分析法の提案と適用

目 次

目 次.....	1
第 1 章 研究の目的と対象地域の概況.....	6
1.1 農業用水をめぐる情勢と本研究の位置付け	6
1.1.1 近年の水資源の情勢について	6
1.1.2 農業用水の現状について	7
1.1.3 かんがい排水と反復利用について	10
1.2 手取川扇状地の農業用水	11
1.3 本論文の構成	13
第 2 章 手取川扇状地試験地における水田用水地区内還元水の分析	17
2.1 研究の目的	17
2.2 対象地域の反復利用の考え方と特徴	18
2.3 手取川扇状地の概況と試験流域	20
2.3.1 手取川扇状地の概要	20
2.3.2 地形と土層断面	21
2.3.3 土地利用	22
2.3.4 用排水系統	23
2.4 研究の方法	23
2.4.1 分析の方法と研究対象地域	23
2.4.1.1 対象地域の用排水系統と還元水の求め方	23
2.4.1.2 水路流量と減水深の測定	25
2.4.2 末端水田における消費水量	27
2.5 分析結果	28

2.6 考察	29
2.6.1 本地域の水源整備・圃場整備と用水反復利用	29
2.6.2 水源整備，圃場整備以前の推定	31
2.6.2.1 減水深が大きい場合	32
2.6.2.2 灌漑水量が不足する場合	32
2.6.2.3 反復利用がなされない場合	33
2.6.2.4 上流優先の取水をした場合	34
2.7 本章のまとめ	34
第3章 水田用水の昇順方式による新しい還元水分析法の提案と適用	39
3.1 研究の目的	39
3.2 手取川扇状地と七ヶ用水の概要	40
3.2.1 土地利用	40
3.2.2 末端水田における消費水量	41
3.3 還元水分析の方法	41
3.3.1 還元水の分析（昇順方式）	43
3.3.2 幹線水路，用水系の取水堰・排水系の取水堰，灌漑排水ブロック のナンバーリングの具体的事例	43
3.3.3 計算結果の一例	46
3.3.4 分析に必要な資料	47
3.3.4.1 用水系及び排水系の資料	47
3.3.4.2 減水深資料	48
3.4 分析結果と考察	49
3.5 本章のまとめ	50
3.6 付録 昇順に並び替えた事例	54
第4章 水田用水反復利用の視点からみた取水実態分析	57
4.1 研究の目的	57
4.2 手取川扇状地と七ヶ用水地区の概要	58

4.2.1	土地の利用	58
4.2.2	用排水路システム	58
4.3	分析方法と資料	59
4.3.1	幹線水路の流量の測定	59
4.3.2	水路流量の実測値と推定値の比較地点	60
4.3.3	還元水量の推定	61
4.3.4	取水量の推定	63
4.4	分析結果と考察	63
4.4.1	実測流量と推定流量の比較	63
4.4.2	日当たりの実測流量と計算流量の比較	66
4.4.3	中干し前までの日雨量比較	68
4.5	本章のまとめ	70
第 5 章	元入れ取水量から見た水田有効雨量（取水制限量）の分析	71
5.1	研究の目的	71
5.2	研究の方法	72
5.2.1	降水の状況	72
5.2.2	有効雨量の算定方法	72
5.3	結果と考察	74
5.3.1	年降水量と年有効雨量の経年変化	74
5.3.2	年降水量と年有効雨量の関係	74
5.3.3	年有効雨量と有効降雨率の関係	75
5.3.4	必要取水量に対する有効雨量の経年変化	76
5.3.5	有効雨量と降水量の関係	77
5.3.6	有効雨量と計画設計基準との関係	79
5.3.7	回帰分析による降水と有効雨量の分析	79
5.3.8	降水量と無効雨量の比較	80
5.4	本章のまとめ	82

第 6 章 結論と要約	84
謝辞	86
本論文を構成する論文	88
付録.....	90

第 1 章 研究の目的と対象地域の概況

1.1 農業用水をめぐる情勢と本研究の位置付け

1.1.1 近年の水資源の情勢について

現在、世界各地では人口の増加に伴い、水不足、水質汚染などの問題が発生していることに加え、地球温暖化による環境の変化による洪水の増加など、水資源の問題は地球規模の環境問題の一つになっている。

日本においても、降水量・降雪量の変動の増大や、小雪化により水利用の安定性が低下してきており、ダム等の水資源施設が計画当初の能力を安定的に発揮することが困難になるなど、渇水や洪水被害のリスクが高まっている（国土交通省，2009）。

地球上に存在する水の総量は、14 億 km^3 があると推計されているが、その内海水が 97.5% を占めており、北極南極の氷河や汚染された水などを除くと、全体の 0.01% しかな淡水の液体の水として利用することができない。

人口の増加や社会経済の発展により、水の使用量は増え続けており、世界の人口が 1950 年～1995 年の 45 年間で約 2.2 倍に増加している中、水の使用量は 2.6 倍に増大しており、今後も更なる増加が予想される。また、日本の用途別水使用量をみると、生活用水は 19%、工業用水は 15%、農業用水 66% となっていて、農業用水の占める割合が非常に高い（国土交通省，2009）。

水の利用可能量に対する水の利用量の比を「水ストレス比」と呼び、これが 40% を超えている場合には、「水ストレスが高い状況下に置かれている」という目安となるが、「世界水ビジョン 2000」によれば、水ストレスの高い国に居住する人口が、2025 年までに 40 億人を超えると予想している（世界水会議，2000）。

日本は水の多い国というイメージがあるが、一人あたりの水資源量 $3,337 \text{ m}^3$ は世界平均の $8,559 \text{ m}^3$ の半分以上であり、水資源量が少ない国である。日本は降水量や降雨日が多いため水不足への意識は低いが、高い山と狭い領土であるため、日本の川は急峻な溪谷を通り、降った雨はすぐに海洋へと流出し、利用可能な水資源が少ない。また、日本は急激な経済発展をとげ、アジアの中では水循環に対する環境整備が整っている国であるが、今後アジア地域は日本の水環境の歴史を後追いすることが予想され

る．つまり，ダムなどの開発により，河川流量が減少し，さらには水質悪化などの水循環の悪化をきたすこととなる．

1.1.2 農業用水の現状について

世界的にみると，農業用水に関しては，欧米とアジアでは大きく状況が異なっている．アジアでは，降水量が多い反面，季節的な偏りが大きく，期別降水量の極端な偏りを人為的に矯正することが水不足の解消につながるが，欧米での水不足は，もともと天水農業が可能であった地域で，より高い収益性を得ることを目的に導入された灌漑により発生する水不足である．

世界のコメ生産量の92%を占めるアジアの水田農業が，世界の農地面積の37%にすぎないアジアの農地で，世界人口61%の生活を可能にしている．この面積と人口の関係は，アジアの稲作の人口扶養力が高いことを物語っている．

日本の農業用水の30～40%はダムに依存している．ダムの建設は1970年代をピークとして減少傾向にあり，環境保護の観点や開発コストの増加などの問題により，今後も減少が続くとみられている．また，既存のダム湖への土砂堆積により，2050年頃には現在の貯水容量が50%以上減少することが見込まれている．

今後百年の間に，夏季，秋季の降水量が増大する一方で，冬季，春季には減少傾向となり，日降水量が100 mm以上の年間日数，無降水日数ともに増加するなど，年間の降水パターンの変化が予想されている（国土交通省，2009）．この変化は，冬季に降った降雪からの雪解け水を利用し，春先に大量の用水を必要とする水稻栽培に大きな影響を与えられとされる．

日本の水資源利用量は1人当たり1年間に，生活用水に約130 m³，工業用水に約110 m³，農業用水が460 m³で合計約700 m³であるが，一般的に先進国では1,000 m³の水資源が必要だとされており，食料等を輸入しているため国内の水資源消費量が低く抑えられている．

食料を輸入している国において，もしその輸入食料を生産するとしたらどの程度の水が必要かを推定したものがバーチャルウォーターであるが，カロリーベースでの食料自給率が40%の日本ではバーチャルウォーターの輸入という形で海外の水資源に依存している．海外での水不足や水質汚染等の水問題も，日本に影響を及ぼす可能性

がある．2005 年における日本へのバーチャルウォーターは，1 人当たり約 600 m³であり，これは水資源利用量と同程度である（俊成正樹，2009）．

この農産物を日本国内で生産するためには，現在の耕地面積 470 万 ha の約 3.6 倍，1,700 万 ha の耕地が必要であり，また現在の農業用水利用量 570 億トンの約 2.1 倍，1,200 億トンの農業用水が必要であると言われている（内閣府，2006）．今後，世界の人口増加や，地球温暖化による気候変動等により食料需要が増大する中，食料の確保は農業用水の確保に等しく，大きな問題になることが予想される．

日本の平均年間降水量は約 1700 mm であり，その内 500～600 mm が蒸発散量となり，残りの半分が利用可能な水量であると言われている．日本の年平均降水量は世界の平均値約 970 mm のおよそ 2 倍である．しかし，人口密度が高く人口一人当たりの水量は比較的少ない方といえる．

日本の灌漑期間の降水量は約 700 mm であるが，水田の必要水量は 2,000 mm におよぶ．それにも拘わらず水稻作が成立していることは，人工的に水循環システムを制御していることに他ならない．

日本の水循環の形態は，一過型として特徴づけられる．つまり，豊富な降水量と狭い国土等により，用水の再利用を行なう必要性が少なく，都市用水と農業用水を明確に区別することが可能な点である．これに対し，欧米諸国では，大河川を中心として上流都市部で利用された水を下流域で，複数回にわたり反復利用しなければならない．水資源の安定的な利用にとって重要なことは，年による変動が少ないことである．降水量のバラつきに伴い，水資源賦存量（水資源として利用可能な水量）は 10 年に 1 回は 2/3 以下まで下がってしまう．

日本の水稻作付面積は 1970 年に開始された減反政策の影響や，人口増加や経済発展に伴う急激な都市化の影響などを受け減少傾向にあり，1968 年の約 317 万 ha から 2000 年の 141 万 ha まで約 4 割に減少している．それに対し，農業用水の水利用量は 1968 年の 570 億 m³に対し 2000 年の 586 億 m³に増加しており，水田面積の減少と比例せず，水田面積の減少が用水量減とはなっていない．その理由としては，そもそもの用水不足が考えられる．これまで必要だった水量を確保できなかった農地が，ダムの整備等により需給環境が整ったことにより必然的に用水量が増加した．また水路水位の維持や配水の無効放流や管理上の余剰取水など，水路から圃場へ取水するため

に用水が必要である．これを配水管理用水というが，水田の環境条件により変化し，人為的要素の大きいものであり，水稻の生育や収量に直接かわらないために一見無効な水消費と考えられやすい．しかし，実際は必要な水量も多く削減できない用水量である．機械化のため，水管理調節を伴う要素が多くなり，たん水，落水の水操作を頻繁に行うことによって用水量が増加する．また，兼業農家の増加により連休期に一斉に田植えが行われるため，これまでは順番に行われていた用水利用が一時気に集中し移植期の集中することも用水量増加の原因となる．

また，一般的に水管理労力と用水量は反比例し，管理用水量が増えれば水管理労力が減少し，水管理施設も簡素化できる．減水深 20 mm/d で 500ha 灌漑できる河川比流量は $1.0\text{m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ であり，灌漑面積の 20 倍の水源面積が必要である．用水源の開発コストが増加傾向にあるため，旧来の利水に対する再配分や地下水利用への指向が強まる傾向にある．農業用水も合理化や転用を迫られており，水利権更新の際に，現状の水量を確保するのに困難をきたしている．

農林水産省は 1998 年の「農政改革大綱」で農業用水の都市的用途への転用に対応する姿勢を打ち出している．工業用水の利用量や生活用水の利用量はピークを過ぎ減少へと向かっているが，面積当たりの用水使用量の増加は，稲作生産の効率化を阻害していることは間違いない．農業用水が発揮する多面的機能のコストは，用水システムの建設費，維持管理に影響を与え，多面的機能のコストをより引き下げようとすれば，稲作効率化に向けた農業用水の効率化が必要である．農業用水は無償ではなく設備投資と維持管理を要する．そのため，農業用水施設整備の基本方針を転換しないかぎり，更新にかかる費用負担を税に依存することに問題が生じる可能性もある．これまであいまいであった用水の再利用を明確化することにより，費用分担を合理化し，明確化できると考えられる．

1.1.3 かんがい排水と反復利用について

かんがい排水とは，農地における降雨，蒸発散浸透など自然の水循環を補完して，人為的に農地の水環境をコントロールすることをいい，目的としては，水分補給のみでなく雑草の抑制，連作障害の回避，温度調節，地力の消費抑制，肥料分の供給，虫害の防除などがあり，また，排水には湛水被害の回避や有害物質の除去など多岐にわたっている．

一方，気温の高い地域では適度の還元状態を維持することにより，土壌中の有効成分の生成や有害物質の溶脱流去をはかるための浸透水が必要であり，地球温暖化による高温化が予想される日本において，水田の浸透性が今後重要となってくると思われる．

地球全体でみれば降水量と蒸発散量は約 1,000 mm で等しい．日本では約 1,700 mm の降水量に対し約 500～600 mm の蒸発散量である．渇水年では降水量は 1,200 mm 程度になり，ここから蒸発散量を差し引いた 600 mm が地表水となりその半分が直接流出するものとする，300 mm が利用可能水量となる．これは水量にすると 1,100 億トンに相当し，現在の利用水量とほぼ同程度である．

広域かんがい排水では，水田用水の反復利用を考慮しなければならないため，灌漑と排水を一体として考えなければならない．この点，畑地灌漑では用水の反復利用を考慮する例は少ない．また，流域内には畑や宅地，道路などが混在することで，反復利用解析を難しくしている．

これまで水田用水計画において様々な角度から反復利用に関する研究が行われている．

用水量の算定方法として主に使われている減水深法は地区内の減水深の総和を必要水量とみなす方法であるが，用水の還元や再利用を考慮しないため，実際の必要水量よりも過大となる問題点がある．

大きな水系を対象とした地区間の反復利用分析として考案された複合タンクモデル法は，主に山間の平野に開けた水田での将来の水需要動向を予測することを目的に開発され，水の需給動向を動的に把握できる点に特

徴がある．しかし，流域各地点での流況を予測することはできず，反復利用状況の複雑な低平地では適用が難しいとされている（五十崎，1978）．

また，CB法は，広域の必要取水量を系統的に求めることができる方法で，普通期計画最大用水量を算定することができる方法である．しかし，期間別の必要取水量を算定することが困難であるという問題がある．

反復利用に関する研究については，広域の地域全体の用水量算定を目的としたものが多く，地域内の各地点での用水反復状況を目的としているものは少ない．用水の再利用を行う際に，受動的に利用している例は多いが，計画的な利用例は少ない．しかし，これまで述べてきたように，今後の水環境の悪化や新しい営農形態に対応した用水利用を考える上で，より詳細な反復利用の分析が必要となっていると考える．

1.2 手取川扇状地の農業用水

手取川扇状地には七ヶ用水及び宮竹用水により隔々にまで農業用水が行きわたっている．七ヶ用水の始まりはわかっていないが，平安時代後期にはすでに手取川から用水を取り入れて扇状地の開発が進められている．当時は，扇状地北側の山島用水以北4用水のみであったとされる．鎌倉時代の記録には手取川は現在の大慶寺用水を流れていたとされる記録が残っている．また，戦国時代には現在の手取川である「南川」と後に中島用水となる「北川」の二流をなしていた．1598年に金沢城主前田利家と小松城主丹羽長重が領界を決めるに当たり，当時の手取川である中島用水を境界として，石川郡と能美郡に分けた．そのため，川北町は手取川右岸にありながら能美郡に属している．

地形的には，七ヶ用水中心部の山島用水が手取扇状地のもっとも高い所を流れており，山島用水を中心に小規模な起伏地形を形成している．また，帆立貝の貝殻のような地形をしており，高い所は細長い紡錘状をなし島とよばれている．その間の低い場所を七ヶ用水が流れている．

また，宮竹用水は七ヶ用水よりも形成された歴史が浅く，地形的な関係から手取川より取水することが困難な地域であった．しかし，手取川の南下に伴い，手取川から

の取水が可能となり、江戸時代中期以降は手取川から取水されていたという記録が残っている（七ヶ用水誌，1982）。

水源地域となっている白山山地は万年雪をもつ高山は少なく，2,000mを超える山岳地域は，白山を中心に，16 km²程度にすぎず，ほとんどの山地は中低山性の山地である．そのため，5月上旬には90%以上の積雪が消えてしまう．流域面積809 km²に対し，灌漑面積は150 km²であり，その割合は5.4倍であるが，他の流域に比べ流域面積の割合は少ない（例えば，信濃川は10.8倍，神通川16.1倍）．また，扇状地であり浸透性の高い田であることや，扇状地自体が急勾配であることを考えると，用水確保には不利な条件がそろっている地域である（石川県，1986）。

そのため，過去において用水不足は深刻であった．1955年までは，番水を行って配水を行っていたが，渇水期には激しい争いが絶えなかった．過去には「盗人口」と呼ばれる取水口が設けられたり，夜中に盗水したりすることがあった．集落関係において，水上は絶対的な力を持っており，水下は毎年の江堀人夫を出すことはもちろん，盆や正月における水上への挨拶は，何はさておいても欠くことのできないものであったとされている．

また，急流河川である手取川は，たびたび洪水被害をもたらした．歴史上最大規模と言われる1934年の大洪水では，死者，行方不明者100名余り，床上浸水家屋586棟の被害が記録されている．

このような状況を受け，手取川上流部に，大日川ダム及び手取川ダムの建設が行われた．それぞれ，1967年，1979年に完成し，これより以降は大規模な洪水被害や用水不足は発生しないようになった．

また，「昭和の大改修」と称し，白山堰堤の嵩上げ，大日川ダムの建設に合わせた総延長約140 kmに及ぶ七ヶ用水の幹線・支線水路の改修事業が行われた．ほ場整備と合わせ水路の直進化も行われている．また，近年の営農形態の多様化と都市化の影響を受け，用水路の老朽化と雨水排水に対する改修事業も行われた．これも同じように，「平成の大改修」と称し，現在その工事に取り組んでいる．一方，大日川ダムや手取川ダムによる水源整備に続いて，扇状地内の圃場整備が1965年から1995年の約30年間に活発に行われ，90%以上の圃場が整備済みである．これによって水田の浸透量も大幅に減少し，かつてザルだと言われた漏水田も少なくなった．

手取川扇状地の用水源は手取川からの取水により行われており、古来右岸はセケ用水、左岸は宮竹用水として鶴来町（現白山市）から取入れていた。セケ用水は、白山市、野々市市、川北町、金沢市の一部にまたがる地域を、富樫、郷、中村、山島、大慶寺、中島、新砂川の7つの幹線用水路によって灌漑していた。宮竹用水は、能美市、小松市の一部の地域を灌漑し、以前は八つの独立した水利組織が、独自の取入口を有していて手取川から直接取水を行っていた。しかし、このような取水方法は、渇水期には下流地域の用水不足の原因となっていた。また、洪水のたびに取水施設が流失したり、破壊したりするため、修繕工事に費やす工事費も増大し、地域農民の大きな負担となっていた。

そこで、1903年に手取川・セケ用水普通水利組合を設立し、手取川右岸七つの管理組織を統合して取水口の合併を行った。これまで、セケ用水は、宮竹用水に比べ取水箇所が下流にあったため、条件が不利であったが、この合併により、セケ用水側が有利な地位に変わり、宮竹用水では渇水期に水不足を生じることが少なくなかった。そのため、両用水の間でしばしば水を巡って紛争が繰り返された。

1937年には用水を利用した発電所が作られることとなり、発電量を増やすため、宮竹用水の水も利用する必要があった。手取川に逆サイホン装置を設け、発電に利用した水を宮竹用水へ環流することとなり、1940年に完成した。しかし、サイホン管理はセケ用水側に委ねられており、宮竹用水では水不足が解消されなかった。1962年には大日川ダムの造成を契機に、両者が分水協定を締結・調印し、現在の取水形態に至っている。

本地域では農業用水反復利用形式にも特徴がある。太平洋側の平野での浸透水を利用した反復利用とは異なり、砂礫質扇状地であり地下水位も低いことから、浸透した用水は反復利用の対象とならない。そのかわり、ライニングされた用水路を仲介とした地表水の反復利用を行っている。

1.3 本論文の構成

以上のような背景を踏まえて、有効な水資源利用のために、農業用水の反復利用について、新たな分析方法が必要である。本研究では手取川セケ用水を対象に、新しい

農業用水の還元分析方法を提示し、この方法の有効性、実用性を明らかにすることを目的として、農業用水の反復利用及び有効利用に関する研究を展開することとした。

第1章では、水資源や農業用水に関する最近の動向、研究対象地である手取川扇状地の用水状況について記述した。

第2章では、手取川扇状地内に試験地を定め、幹線水路を媒体とした特徴的な反復利用方式に焦点を当て、本地区の還元水の特徴を明らかにする。そして、何故このように用水の豊富な地域で水田用水の反復利用が行われているのかを考察すると共に、還元水の分析方法を提案した。その結果、比較的潤沢な用水量を確保している本地域において、用水の反復利用を図っている理由は、水源整備・圃場整備以前の慣習を継承しているためと推定された。また、現在でも集落営農等による集団転作の導入により、水利用の形態が大きく変わり、場所的・時間的に水利用が集中するため、多くの取水地点の存在や反復利用システムが有効に機能し、新たな視点から反復利用の有効性が推定できた。

第3章では、用排水系統を体系的に整理することにより、これを1次元の数字で表現し、排水系統を昇順に並び替え、幹線水路ごとの還元水を体系的に分析する方法を新たに提案し、この理論を手取川扇状地に展開する七ヶ用水地区に適用した結果について記述した。用水系の幹線水路、取水堰、灌漑ブロック、これに対応した排水系の幹線水路、取水堰、排水ブロックのナンバーリングを工夫し、幹線水路への還元水量を計算したうえ、排水系の幹線水路、取水堰、排水ブロックなどの結合情報を昇順に並び替え、用水系に対応した排水系に整理し、用水の還元水の状況进行分析する新たな手法を開発した。この方法を七ヶ用水地区に適用した結果、普通期の水利権水量の場合、地区全体の還元水量の割合は、取水量の59%、このうち反復利用が可能な還元水量は33%、残りの26%は最下流の堰より更に下流に流出、あるいは直接日本海に流出して、反復利用が不可能なことが見出された。

第4章では、3章において導きだした新しい還元水分析方法により算定された還元水の状況について、実測されている水路流量を用いて比較を行い、新しい還元水分析方法の有効性について検証を行った。概ね、実測流量と計算流量には大きな差異は見られなかったが、両者の間に正の相関関係はみられなかった。その原因として、都市化に伴って水田面積が減少したにもかかわらず、取水量が変更されていないこと、逆

に都市域の排水が農業排水路に流入していることなどが関係しているのではないかと推定された。また、各水路の用水配分を水路幅で決定している箇所が多いが、水路幅は戦後間もないころの農地面積を基準にして配分された水利権量により決定されたもので、その後、分水の基準となる水路幅の変更がないため、現在の農地面積との間に違いがあり、実利用水量との差異が生じていることが考えられた。今回得られた分析結果から、実際の用水配分実態は、用水の反復利用のほかに上述のように、さまざまな要因が関与していると理解すべきと結論づけられる。

第5章では、手取川扇状地の有効雨量について、37年にわたって観測されている元入れ取水量を利用し、取水制限量と有効雨量の分析を行った結果について記述する。元入れ取水量の制限量を水田灌漑に対する有効雨量と定義し、北陸地方・手取川に展開する七ヶ用水地区について有効雨量と降水量の関係について研究した。まず、年単位の降水量と有効雨量を基本に分析した。その結果、年降水量、年有効雨量の変化に伴って、有効降雨率も大きく変動し、平均 33.2%、標準偏差 11%であること、年降水量と年有効雨量には密接な関係があること、年有効雨量と有効降雨率にも密接な関係があり、年有効雨量が多くなるほど有効降雨率が大きくなることを見出された。更に、年間の全必要取水量に対する年有効雨量の割合も平均 5.0%、標準偏差 2.4%になることを明らかにした。

次に、1日単位の降水量と有効雨量を基本に降水量と有効雨量について分析した。加えて、降雨が連続する場合も考慮し、2日あるいは3日の移動平均をした資料についても併せて検討した。その結果、降水量—有効雨量の関係は広い範囲に分布し一定の関係を見出すことは出来ないこと、ただし、1日単位の分析に対して、2日あるいは3日移動平均の資料は、移動平均期間で平均化されるので、原点に近いところに分布し、分布範囲が小さくなることを示した。土地改良事業計画設計基準に示されている方法と比較した結果、設計基準の方法は、2日連続雨量に対応した有効雨量に相当することが確かめられた。更に、平均的な傾向を得る目的で、降水量と有効雨量の間に回帰分析を行った。最後に、発想を変えて、無効雨量と降水量の関係を分析し、一定以上の降雨は77%以上が無効雨量となることが統計的に示された。

第6章では、本研究のまとめと結論を述べた。

引用文献

石川県（1986）石川県土地改良史．

五十崎恒，田中礼次郎，長堀金造，丸山利輔，西出勤，佐藤晃一，高橋強，三野徹
（1978）応用理論かんがい排水，養賢堂．

国土交通省土地・水資源局水資源部．(2010)．平成 2 1 年版日本の水資源について－
持続可能な水利用に向けて－．

内閣府（2006）地球規模水循環変動研究のこれから－地球と生命と社会の持続性を
支える水循環系の構築へ向けて－， 1.3.1 水問題の現状と予測、今後の論点．

世界水会議（2000） 2 1 世紀における世界水ビジョン

手取川七ヶ用水土地改良区（1982）手取川七ヶ用水誌．

俊成正樹（2009）日本から水がなくなる日，中経出版．

山崎農業研究所（2003） 2 1 世紀水危機 農からの発想，農文協．

第2章 手取川扇状地試験地における水田用水地区内還元水の分析

2.1 研究の目的

農業用水（水田灌漑用水）の特徴の一つは自然の中での用水の循環利用（反復利用）にある。この課題は古くて新しい問題で未だに十分な研究が行われているとはいえない。本地区のように、広域用水量が基本的には減水深のみの地区であっても、複雑な用排水組織（システム）に対応して、具体的な用水量を算定し、用水の場所的、時間的な変化を表す方式は確立されているとはいえない。特に、今日のように、集落営農や集団転作が導入されると水利用が場所的・時間的に集中し、水利用形態に変化が発生する。この場合には新たな視点から反復利用の研究が求められる。すなわち、地域全体の総用水量のみでなく、場所的・時間的な用水量の変化を考慮した対応策を立てることが必要となる。本研究の対象とした手取川扇状地は、石川県の穀倉地帯を形成する代表的な平野で、金沢市と小松市に挟まれた地域である手取川は、北陸地方の特有の急流河川で、それによって形成された扇状地もまた急勾配で砂礫質の平野である。このために、用水路はもとより末端排水路もコンクリートにより完全にライニングされ（2次製品を含む）、水路からの浸透を防ぐと共に、至る所に落差工を設け、落差工と併設して取水口が設けられているところも多い。この落差工や取水口は海岸近くの幹線水路まで設けられている。水田用水の反復利用の方式も太平洋側の平野や湖沼の周辺に展開する低平地とは異なり、幹線水路を仲介とした特有の地区内反復利用体系を取っている。この体系は、筆者らの知る限りこれまで指摘されなかった反復利用システムである。

本報告は、この特徴ある水田用水の反復利用に焦点を当て、事例に基づいて、どこの水がどこに排水され、再利用されるか、還元水の特徴を具体的に明らかにする。そして、何故このように用水の豊富な地域で水田用水の反復利用が行われているのかを考察すると共に、還元水の分析方法を提案して、今後の用水計画に役立たせることを目的として研究したものである。

なお、これまでも様々な角度から水田用水の反復利用の研究がなされている。大きな水系を対象とした地区間の反復利用の分析法には、複合タンクモデル法（丸山，1988；中桐ら，1998，2000）が提案されているが、一地区内での反復利用については、

用排水組織が複雑なこともあって、十分に研究されているとはいえない。しかし、用水計画には極めて重要な事項であるため、古くから各地での実績が整理されている（農業土木学会，2000）。この実績の整理と並行して CB 法（岡本，1973；佐藤・岡本，1985；農林水産省構造改善局，1993；農業土木学会，2000）や線形計画法（三野・丸山，1983）が提案され、実際に応用されているが（千家ら，1995），これらの方法は、地域全体の用水量算定法を目的としたものであり、地域内の各地点の状況を知ingことを目的としたものではない。このほかにも分布型循環モデルを応用した研究（谷口ら，2009a，2009b）も提案されている。しかし，これらの方法も，本研究で問題としている地区内の複雑な用排水系統を踏まえた反復利用の解析法ではない。

2.2 対象地域の反復利用の考え方と特徴

これまで，水田用水の反復利用の研究や実績はすでにまとめられており，様々な形態がある（農林水産省構造改善局，1993；農業土木学会，2000）。水田に接する末端用水路を堰上げて行う反復利用，支線排水路や幹線排水路を堰上げて行う反復利用などが知られている。末端用水路を使って行うと反復利用は，図 2-1 に示すように，畦区の上流端で用水路を簡単に堰き上げて取水し，畦区の下流端で排水する方法であり，一般によく知られている。

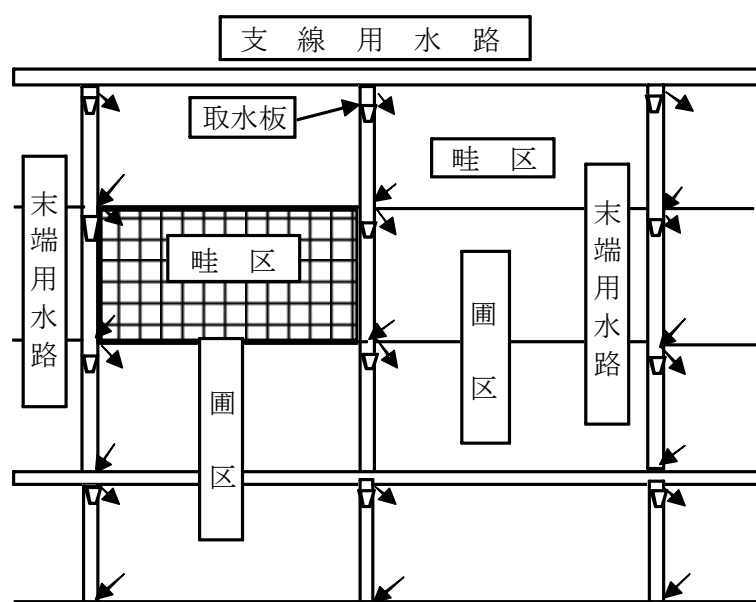


図 2-1 圃区レベルの反復利用

Reuse of irrigation water at lot level

しかし、本論で取り上げる幹線水路を堰上げて用水の反復利用を図っている例はあまり知られていない。本地区では、地形の傾斜が大きいことを有効に活用して、幹線水路では用水路と排水路を兼用させて用水の反復利用を図っている。すなわち、図 2-2 に示すように、等高線に平行に畦区の長辺を配置し、これと直交するように末端用水路と末端排水路を交互に配置している。一方、幹線水路に取水堰を設けて取水し、灌漑ブロック（水田群、具体的には図 2-8 参照）に配水し、各水田に灌漑した後、灌漑ブロックからの排水を末端排水路で受けて、支線排水路に集め、落差の取れる同一あるいは別の幹線水路に排水している。この排水を下流に放流し、より下流の堰で再び取水して用水の反復利用を図っている。なお、末端用水路と末端排水路の配置は、どこでも見られる普通の用排水システムであるが、幹線水路を用排水兼用に使っているのは、急勾配地形をもつ北陸地方独特のものとする。この方式は、完全に用排水分離の機能を維持しながら、用水の反復利用が行える点、北陸地方のように降水が多く、排水不良が問題となる場合に適した方式といえる。このため、水田一筆ごとの用排水分離は完全に行われ、用排水管理は農家個人の意思に従って自由に行うことができる。

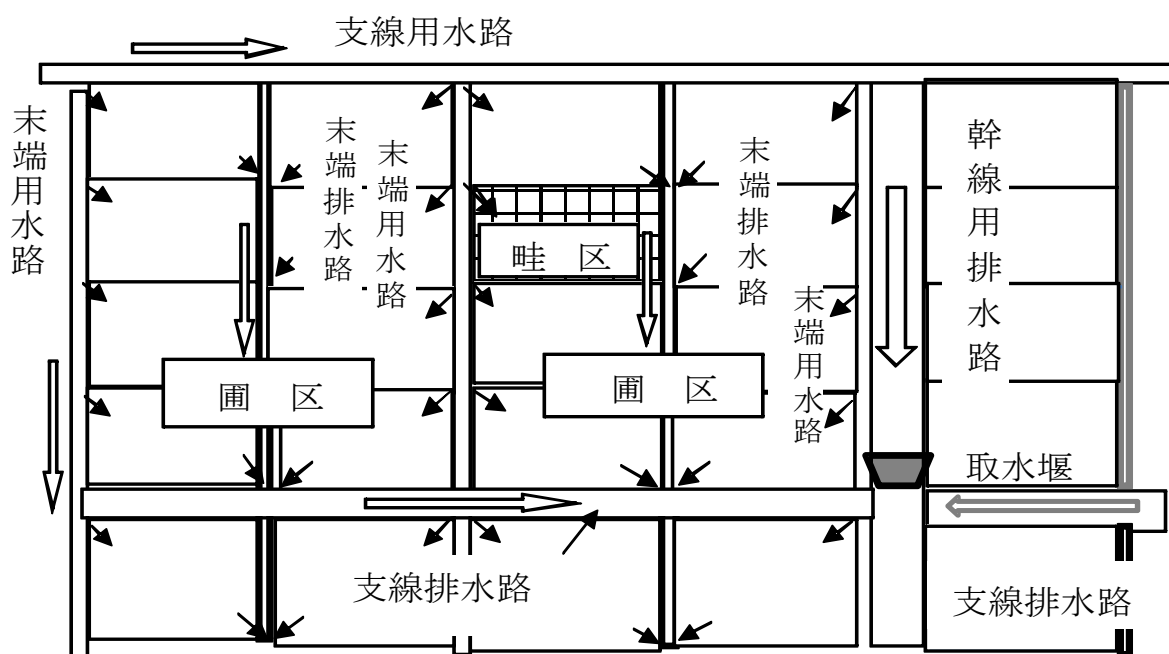


図 2-2 本地区の水田用水の反復利用

Reuse of irrigation water at study area

末端排水路・支線排水路は、コンクリートライニングされ、排水路の管理を容易にすると共に、水路からの漏水を防ぎ、還元水が土砂で汚濁されないように配慮され、取水のための堰上げ施設は設けられていない（図 2-3）。



図 2-3 末端排水路の舗装状況

Concrete pavement of tertiary drainage canal

2.3 手取川扇状地の概況と試験流域

まず、研究対象地域を含む手取川扇状地の概要とその特徴を述べ、研究対象流域の理解を助ける。

2.3.1 手取川扇状地の概要

手取川扇状地は、図 2-4 に示すように、南西部は手取川を挟んで能美市を境界に、北東は犀川を境界に日本海に囲まれた、約 13,000ha の地域である。この地域には白山市を中心として、野々市市、川北町および金沢市の一部（犀川左岸）が含まれている。この地域の農地は、石川県の穀倉地帯の中心をなし、大部分が水田として古くから利用され、畑地・樹園地はわずかである。犀川左岸地域と国道 8 号線沿いには市街地が展開し、全域に地下水の利用を目的とした会社・工場などが立地している。

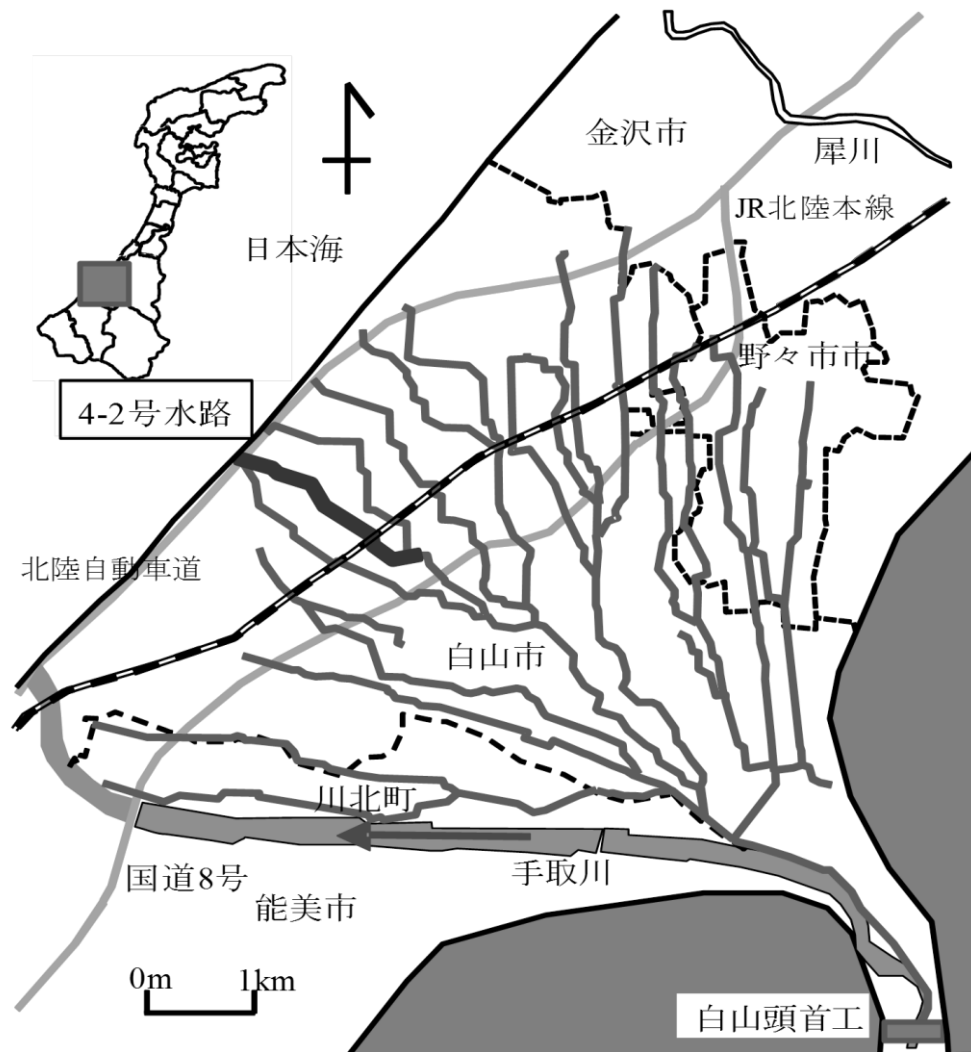


図 2-4 手取川扇状地の平面図と水路系統

Map of the Tedor river alluvial fan area and canal system

2.3.2 地形と土層断面

この地域は、手取川によって形成された典型的な扇状地で、扇頂部の標高が約 80m、扇頂部から扇端部までの距離が約 11km、平均地形勾配が約 140 分の 1 と北陸地方特有の急勾配地形である。地層は図 2-5 に示すように、表層の作土を除いて、砂礫層からなり、一部に粘土層を挟んでいるが、良好な帯水層を形成している。地下水位は扇頂部で海面上約 60m、扇端部で 0m であるが、直線的变化でなく、扇央部で低くなっている。勾配は約 180 分の 1 と地表面勾配より緩やかであるが、かなりの急勾配である。灌漑期の地下水位は非灌漑期よりかなり上昇し、灌漑により地表から水が供給されていることが分かる。

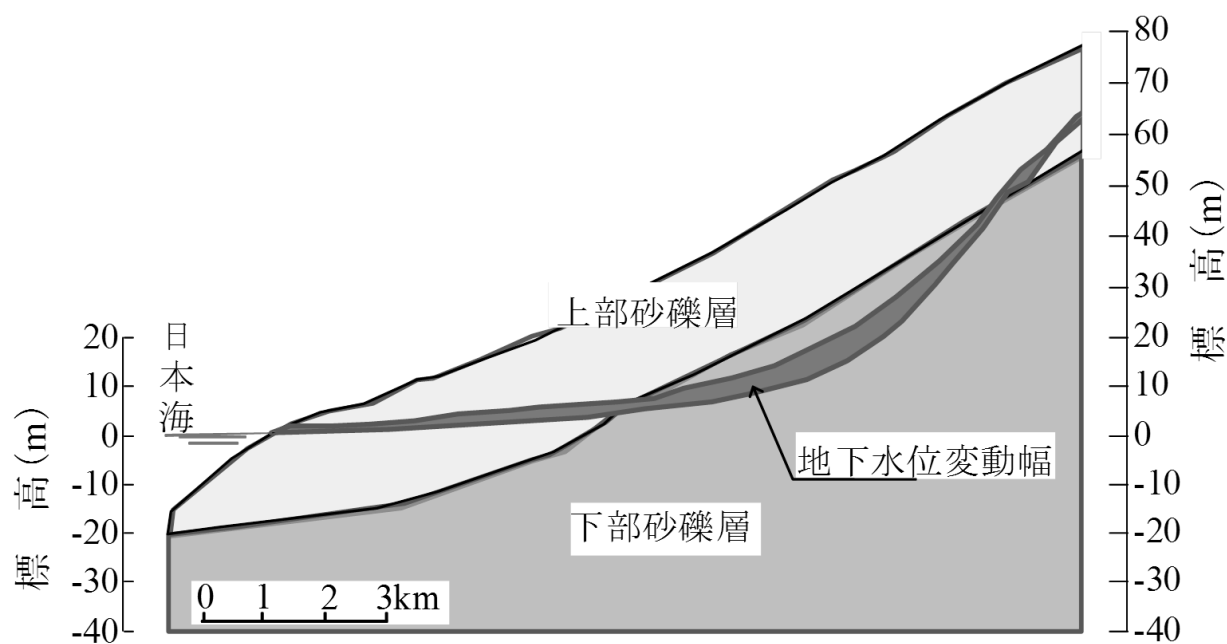


図 2-5 扇状地の土層と地下水断面

Soil horizon and groundwater level in the alluvial fan

2.3.3 土地利用

扇状地内の農地面積（犀川左岸を除く）は表 2-1 の通りである（北陸農政局統計部，2006）。この表から明らかなように，本地域は大部分が水田で占められていて，典型的な水田地帯であることがわかる。

表 2-1 調査地区内土地利用別面積

Land use in the test area					
市町名	全面積	水田	普通畑	野菜畑	果樹園
白山市 (ha)	5,075	4,860	215	142	73
川北町 (ha)	801	786	15	3	12
野々市市 (ha)	392	367	25	20	5
合計 (ha)	6,268	6,013	255	165	90
割合 (%)	100	95.9	4.1	2.6	1.4

2.3.4 用排水系統

手取川扇状地内全体の用水系統を図 2-4 に示す。この地区内の用排水は、七ヶ用水土地改良区によって管理されている。扇頂部に設けられた白山頭首工によって取水された用水は、扇状に広がる用水路を通じて扇状地内の水田に供給される。この用水は、灌漑期のみでなく、非灌漑期も水路の管理用水として流されている。減水深以外の水は還元水として、幹線水路へ戻り、反復利用された後、日本海に排水される。

2.4 研究の方法

2.4.1 分析の方法と研究対象地域

本研究では、研究対象を一つの幹線水路に支配される地域に絞って検討する。研究対象地域は用排水路の流量が長期にわたって測定されている七ヶ用水 4-2 号水路系統を選んだ（図 2-4）。

2.4.1.1 対象地域の用排水系統と還元水の求め方

対象地域の総面積は、179.2ha、灌漑のための取水堰は 14 箇所に設けられ、取水された用水は、その取水堰の用水掛りの水田群（用水ブロック）に配水される。水田群はいくつかに分かれて同一または他の排水路に集まり、やがては幹線水路などに還元される。この水田群の最小単位を排水ブロックと呼ぶ。この排水ブロックと全く同じブロックを灌漑水量算定の必要上、灌漑ブロックと呼ぶ。灌漑ブロックと排水ブロックとは全く同じものであり、還元水算定の必要上定義したものである。したがって、灌漑ブロックと排水ブロックは同数で 49 個である。灌漑および排水ブロックの面積は 0.08ha から 20.3ha に分散し、平均 3.7ha、標準偏差 3.7ha である。試験地区は、図 2-6 に示すように極めて複雑な用排水系統を示し、幹線水路の特定地点に設けられた取水堰（落差工兼用）（図 2-7）から取水された用水は、用水系統に従って、各灌漑ブロックに配水される。各水田で使用された用水は、末端排水路によって、排水ブロックごとに集められ、再度下流の幹線水路に流入し、再利用の機会を持つ。

用水ブロックと排水ブロックの実際の関係は複雑であるので、図 2-6 のブロック 11 を拡大して図 2-8 に示した。

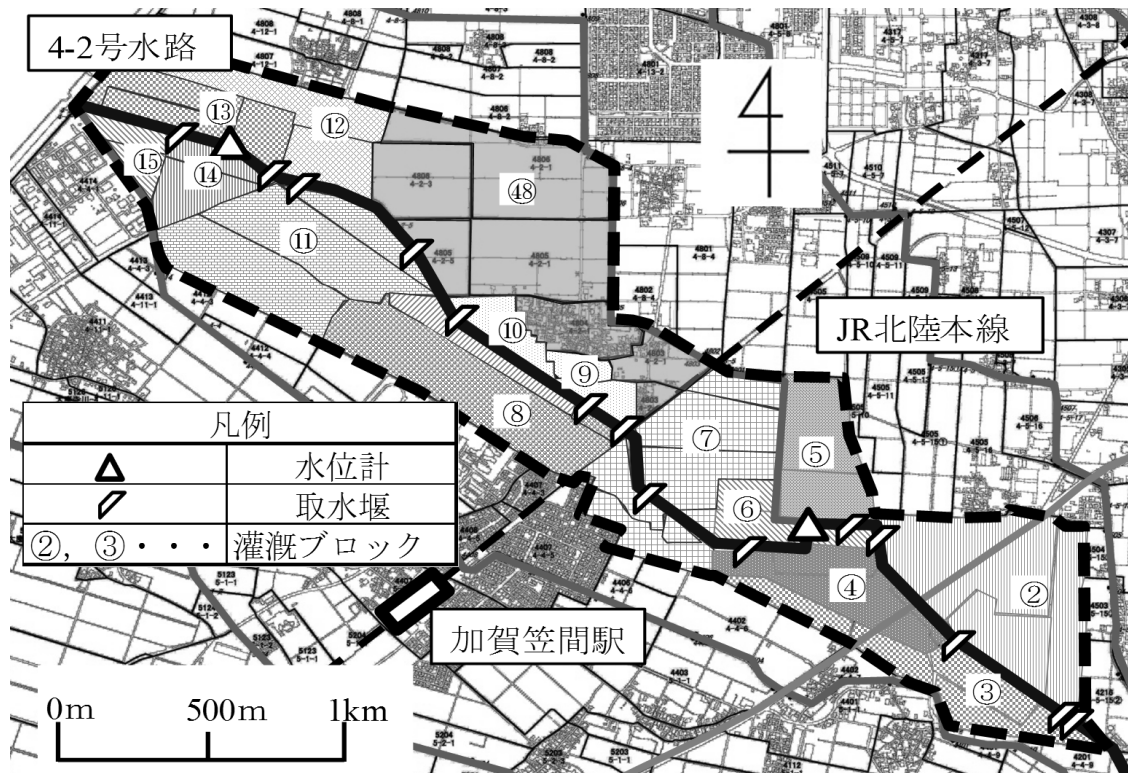


図 2-6 試験地区内用排水系統平面図
Map of irrigation and drainage system in the test area



図 2-7 幹線水路の取水堰
Diversion weir at main canal

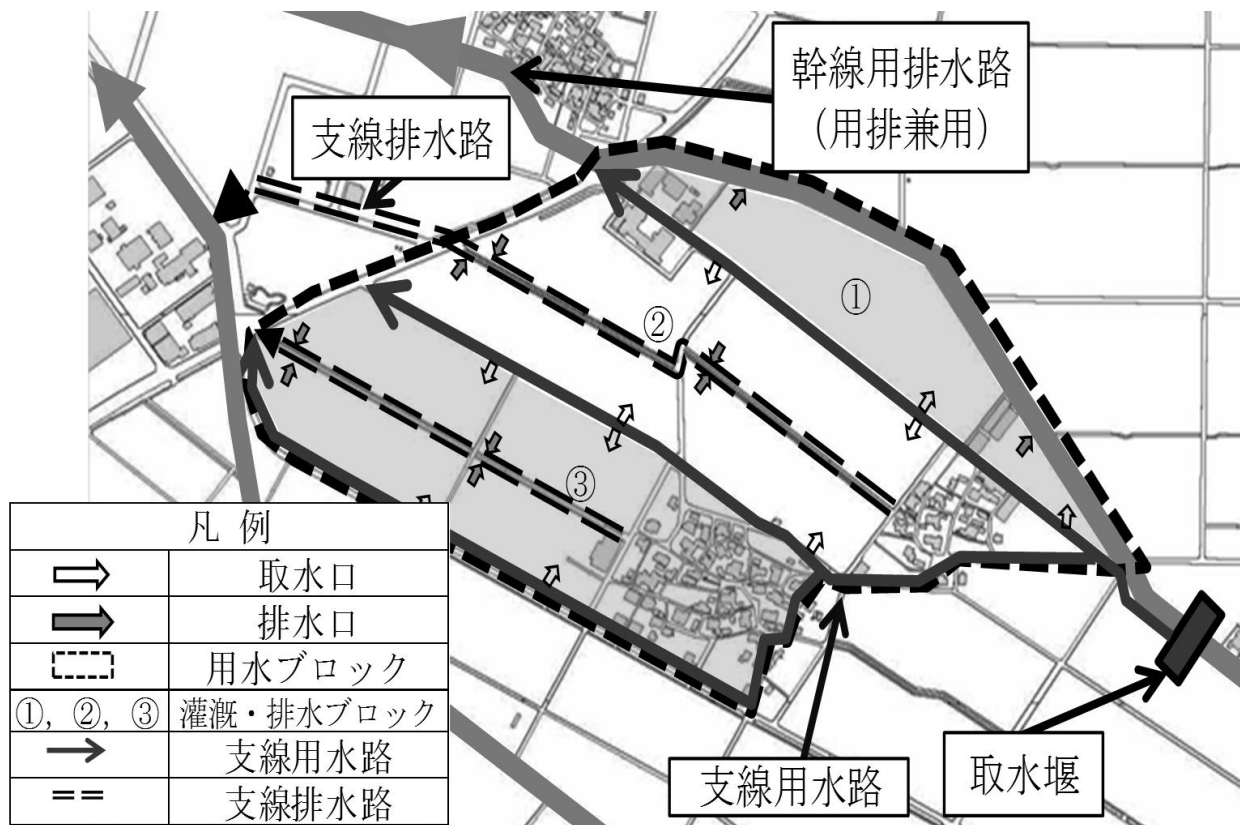


図 2-8 試験地区内用水ブロック 11 拡大図
Enlarge map of drainage block in the test area

2.4.1.2 水路流量と減水深の測定

4-2 号水路の上流部と下流部に超音波水位計が設置され（図 2-6, 9），1 時間単位での水位が記録されている．この資料から日平均水位を算出し， H - Q カーブより日平均流量を求めた．本地区は地形勾配が大きいため，本ブロックのように海岸に近い下流にあっても，落差工が設置されており，バックウォーターを受けないことに加え，海岸近くまでライニングされており，比較的高い精度で流量観測ができています（図 2-10）．もちろん，流量観測の精度は，実測によって確認している．

試験地区内に 12 筆の水田を選んで一筆減水深を調査した．その結果は表 2-2 に示すとおりで，平均 12.6mm/d となった．この実測値は村島（2009）が同地区内において測定した値 12mm/d と差がなかったため 12.6mm/d を使用して分析を進めた．



図 2-9 超音波水位計の設置状況
Setting site of supersonic water level meter



図 2-10 海岸近くの幹線水路の舗装状況
Concrete pavement of main canal near the Japan Sea

表 2-2 対象地区内の減水深測定結果
Consumptive use of water in the test paddy

測定地点	最上流部	上流部	中流部	下流部
地点平均減水深 (mm/d)	17.5	10.2	13.5	9.3
測定箇所数 (mm/d)	2	5	2	3
平均 (mm/d)	12.6			

※測定期間 2011 年 7 月 5 日～15 日

2.4.2 末端水田における消費水量

対象地域は，すでに述べたように，砂礫質の扇状地の上に水田が展開しており，透水性の小さい作土・心土の下に透水性の大きい砂礫層がある．地下水位は地表から，海岸に近い一部の地域を除いて 5～40m と深く，大部分の水田では開放浸透を生じていると考えられる．事実，石川県立大学農場において，深さ 0.5～1.0m の地点では地下水面が見られず，大気圧以下の状態で浸透していることが確かめられている．したがって，図 2-11 に示すように，地域全体の地下水流動は，水田からの浸透を受けているが，圧力的には不連続であると考えられる．このようなところでは，消費される水量は，単純に減水深（蒸発散量＋浸透量）と考えてよい．このような前提に立つと末端水田では各水田（ブロック）ごとに次の水収支式が成立するものと考えられる．ただし，貯留量変化を無視し，田面水位が欠口敷高を超えた場合には，その日の内にすべて流出するものとした．

$$Q_{out} = Q_{in} + R - ET - P \quad (2-1)$$

ただし， Q_{out} ：ブロックからの還元水量， Q_{in} ：ブロックへの灌漑水量， R ：ブロック内への降水量， ET ：ブロックからの蒸発散量， P ：ブロックからの浸透量．

(2-1) 式で表現される灌漑水量や還元水量を基本に，多数の灌漑ブロック，排水ブロックが複雑に組み合わさった実際の水田地域の用水の反復利用の解析を行う．具体的には (2-1) 式を用い，灌漑ブロックごとに日々の還元量を求めた．各灌漑ブロックの取水量は各取水堰掛の用水ブロック面積に比例して配分した．また，浸透量には減水深 12.6mm/d からペンマン式によって算出した蒸発散量の期間平均値

4.67mm/d を差し引いた 7.93mm/d を用いた．その上で日々計算した蒸発散量を加えて日々の減水深とした．

4-2 号水路（図 2-6）では，最上流の取水量から各堰での取水量（灌漑水量）を差し引き，その堰直上流の還元水量を加え，各日の下流地点の計算流量とした．ただし，本地区内の，白山頭首工地点から日本海までの用水流下時間は 2～3 時間程度と推定される．したがって，日単位で計算される本研究では，用水到達の遅れ時間は考慮せず，（2-1）式のみによって日単位で解析を進めた．

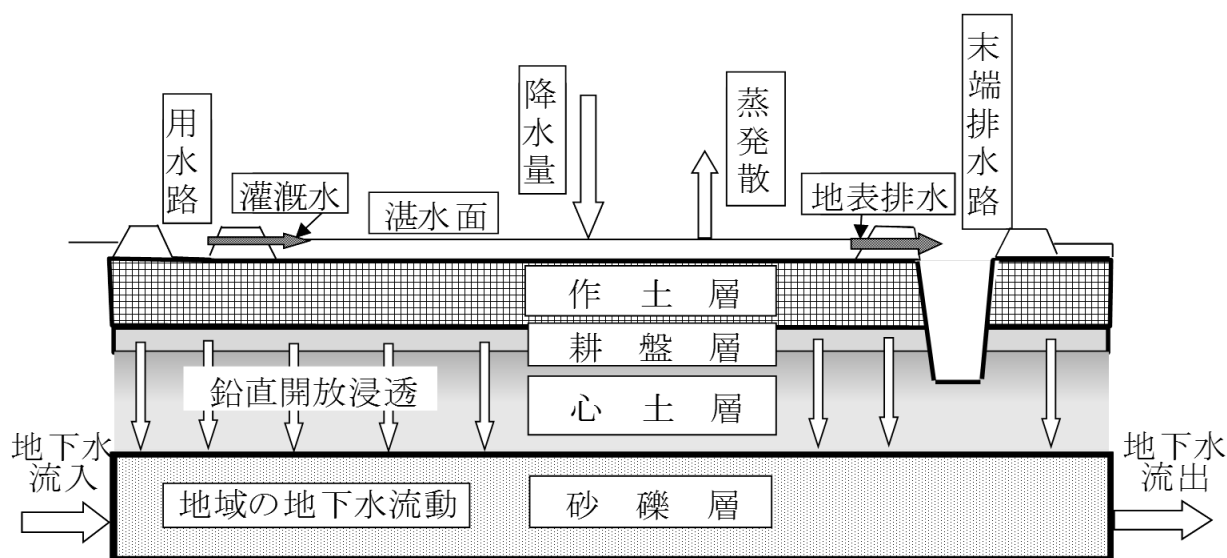


図 2-11 本地区域における水田用水の消費と地下水涵養
Consumption and groundwater recharge of irrigation water in the test area

2.5 分析結果

以上の方法によって，対象地域の日単位の還元水量（反復利用可能量）計算を行い，その状況を 2008 年の灌漑期間について示した（図 2-12）．この資料は，上流からの取水量に実測流量を与え，灌漑ブロックの面積を使って降水量と減水深を流量に換算し，これを差し引き，さらに途中の還元水量を加えて，本対象地域下流の還元水量を求めた．ただし，本地区では排水路を作土層の高さまでライニングしていることもあり，畦畔の横浸透はほとんど無視できることを確認している．この図から明らかなように，下流地点流量の実測値と計算値は相対誤差 26%，絶対誤差 $0.050 \text{ m}^3/\text{s}$ となり，これは取水量平均 $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$ の約 11%であり，よく一致し，ここに提案した反復利用の分析方法の妥当性が検証できた．

なお、本試験地域の幹線用水路、取水堰の個数、灌漑ブロック、幹線排水路、排水先の堰、排水ブロックは表 2-3 に示した通りである。用水システム欄の数字の第 1 は幹線用水路の番号、第 2 は取水堰の番（図 2-6 の用水ブロックと同一）、第 3 は灌漑ブロックの番号を示す。また、灌漑ブロック欄は灌漑面積（a）を表し、排水システムの数字の第 1 は幹線排水路の番号、2 番目は還元水（排水）直下流の取水堰の番号を示す。

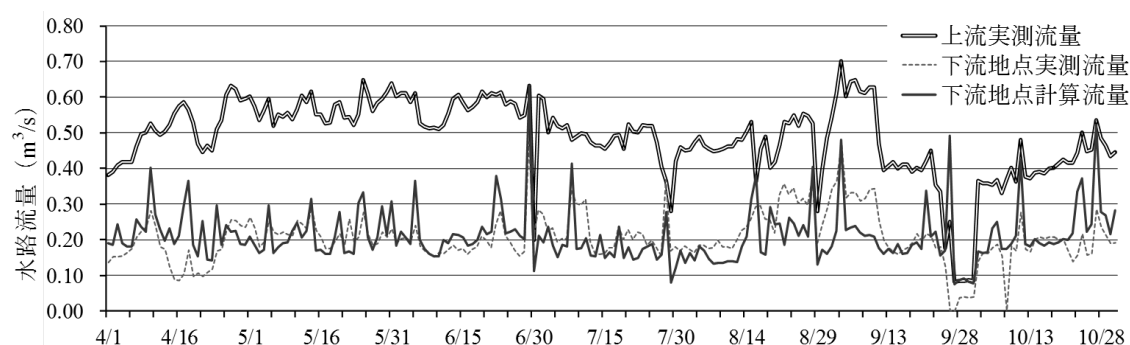


図 2-12 4-2 号水路下流地点流量の実測値と計算値の比較（2008）
Comparison of the observed and the calculated discharge at downstream observation site

2.6 考察

2.6.1 本地域の水源整備・圃場整備と用水反復利用

本地区のように用水事情に恵まれているところで、何故用水の反復利用が行われていたかは、筆者らにとって当初遭遇した疑問であった。そこで、本地区の水源整備・圃場整備以前の状況との関係で考察する必要があるのではないかと考えた。この整備の歴史的経過を図 2-13 に整理した。

本地区の灌漑水源である大日川ダムは 1967 年に完成し、共用を開始した。また、手取川ダムは 1979 年に共用を開始した。時を同じくして、大型区画の圃場整備が開始され、急速に圃場整備が進捗した。

圃場整備はこの時から約 15 年間の間に、予定地区のほとんどが実施され完成した。通常、圃場整備は大型機械によって施工されるために、土壌が転圧された（耕盤が形成）と推定され、浸透量が減少する。本地区は砂礫質土壌のため漏水田であったが、この圃場整備によって漏水状況は大幅に改善された。このことは当時の事情を知る農

表 2-3 試験地の幹線用水路，取水堰，灌漑ブロック面積(a)，
排水先の堰，幹線排水路

Numbering of main irrigation canal, diversion weir, area of irrigation block,
drainage weir and main drainage canal

	番号	用水	灌漑	排水	備考
		システム	ブロック	システム	
	1	42-2-1	453.4	42-4	
	2	42-2-2	144.6	42-8	
	3	42-2-3	1,059.3	45-11	他
	4	42-2-4	423.4	45-11	他
	5	42-3-1	321.9	42-5	
	6	42-3-2	165.0	44-8	他
	7	42-3-3	224.9	44-7	他
	8	42-3-4	382.6	44-3	他
	9	42-4-1	84.1	42-5	
	10	42-4-2	299.8	42-8	
	11	42-4-3	744.7	44-8	他
	12	42-5-1	329.9	48-1	他
	13	42-5-2	308.5	48-1	他
	14	42-6-1	155.7	42-9	
対象 地域 の 幹 線 水 路 4 2 号 水 路	15	42-6-2	211.0	42-8	
	16	42-6-3	305.9	45-9	他
	17	42-7-1	100.6	42-9	
	18	42-7-2	32.6	42-8	
	19	42-7-3	113.5	44-8	他
	20	42-7-4	241.8	42-12	
	21	42-7-5	229.6	42-9	
	22	42-7-6	26.0	42-8	
	23	42-7-7	91.5	48-2	他
	24	42-8-1	132.2	42-12	
	25	42-8-2	2,032.3	44-15	他
	26	42-9-1	71.0	42-16	
	27	42-9-2	269.5	42-12	
	28	42-9-3	8.5	42-11	
	29	42-10-1	203.5	42-11	
	30	42-10-2	51.4	44-15	他
	31	42-11-1	420.3	42-14	
	32	42-11-2	910.8	44-15	他
	33	42-11-3	820.5	44-15	他
	34	42-12-1	608.3	42-16	
	35	42-12-2	340.9	42-15	
	36	42-13-1	340.1	42-16	
	37	42-13-2	264.8	42-16	
	38	42-13-3	191.4	42-15	
	39	42-14-1	253.0	42-16	
	40	42-14-2	359.6	44-15	他
	41	42-15-1	220.8	42-16	
	42	42-15-2	134.0	44-15	他
他 の 幹 線 か ら	43	48-3-1	264.8	42-16	
	44	48-3-2	70.0	42-12	
	45	48-4-1	50.1	42-16	
	46	48-5-1	1,070.5	42-16	
	47	48-5-2	396.0	42-13	
	48	48-6-1	1,264.3	42-16	
	49	48-6-2	724.8	42-15	
		合 計	17,923.7		

※他：他の幹線への排水

家の方に確認した。当時は毎日、時には朝夕 2 回灌水に出かけたが今日では 2 日に 1 回で十分とのことであった。このように、水源整備と圃場整備によって、本地区の用水事情は著しく改善され、今日の状態になったといえる。それまでは、灌漑用水がしばしば不足し、上下流の間で、盗水が行われる程であったといわれている（手取川七ヶ用水土地改良区，1982）。

したがって、現在の水路に設置されている数多くの取水堰は、水源や圃場整備以前の水利系統を継承した可能性が高いと思われる。また、末端排水路がコンクリートライニングされている理由は、先に述べたように、用水の反復利用を促進するほかに、水路の管理労力の不足を招来したこと、水回り等の水管理労力が不足したことなどの理由があげられる。

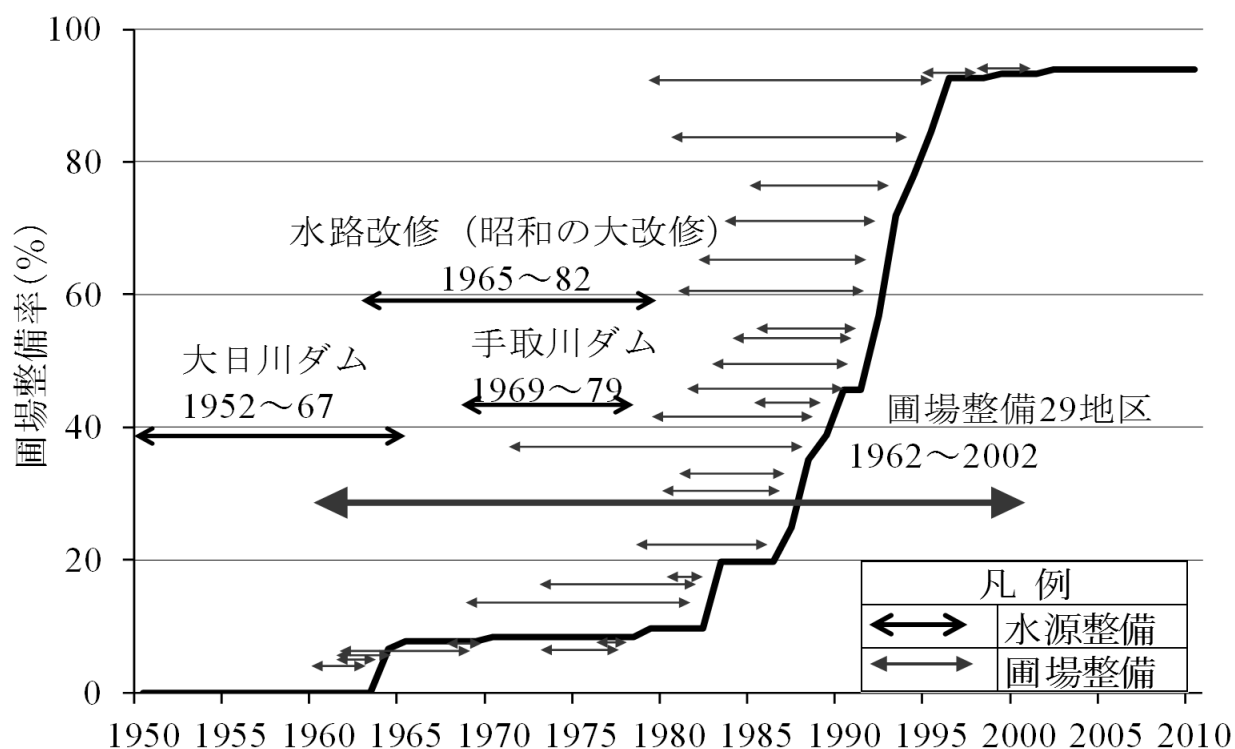


図 2-13 水源と圃場整備の歴史的変遷
Historical process of reservoir construction and land consolidation

2.6.2 水源整備，圃場整備以前の推定

以上のように、現在の水利施設は、水源整備，圃場整備以前の状況を反映していると思われたので、当時の状況を推定する意味で、減水深が大きい場合、灌漑水量が不

足する場合、反復利用がなされない場合、上流優先の取水をした場合について、この試験地域でどのような用水状況になったかを推定した。

2.6.2.1 減水深が大きい場合

本地区は、後述するように、大日川ダムが築造される以前（1967 年完成）には度重なる用水不足に悩まされていたといわれている。そこで当時の事情を再現するために、1957 年の調査値である減水深が 34mm/d（北陸農政局，1969）の場合と現在の水路流量を推定し、各地点の水量を比較した（図 2-14）。この図によると、用水の反復利用をしているにも拘わらず、本地区の最下流端では用水が無くなることとなる。現在では、圃場整備により浸透量が減少し、減水深が 12mm/d と大幅に減少しているため、このような用水不足は見られない。

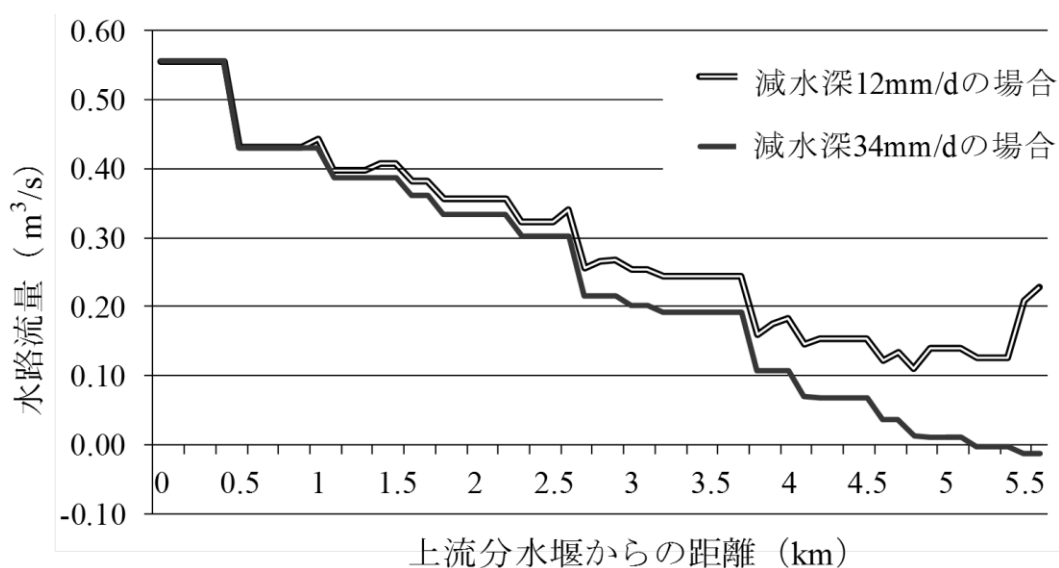


図 2-14 減水深が大きい場合
In case of large consumptive use of water

2.6.2.2 灌漑水量が不足する場合

本地区の上流端で灌漑水量が通常通り取水できず用水不足の場合を再現してみる。これはいわば大日川ダムが築造される以前の状態に相当する。そこで、観測初期の平均的取水量 $0.556\text{m}^3/\text{s}$ （5 月 1 日）と、灌漑水量が仮に 1/2 になった場合と比較した（図 2-15）。この場合は、さらに厳しい用水不足がみられ、下流域では、用水が明らかに不足となり、過去に用水不足が発生したことが理解できる。

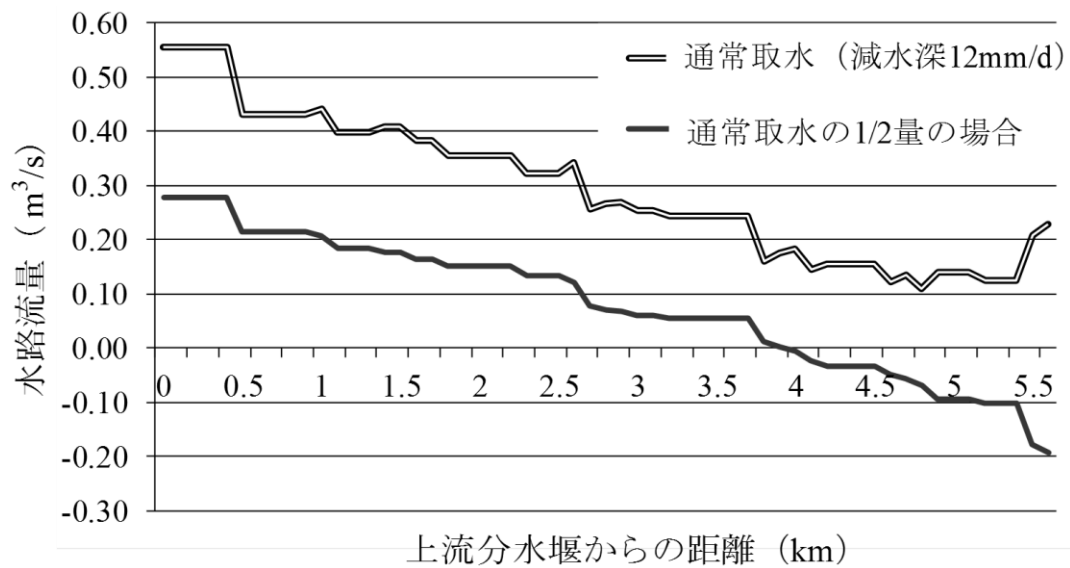


図 2-15 灌漑水量が不足する場合
In case of shortage of irrigation water

2.6.2.3 反復利用がなされない場合

現在は用水幹線に多くの取水堰を築造し、用水の反復利用を図っている。もし反復利用がなされなかった場合にはどんな状況になるだろうか。図 2-16 にこのような場合を想定して、水路の流量を推定した。この場合も取水量は前述のとおり $0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。この図によると、減水深が 12mm/d と小さい場合でも、下流から 3 分の 1 地点では用水量が $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ を切り、下流部では取水が困難となる。反復利用がなされた場合にはこのようなことはない。

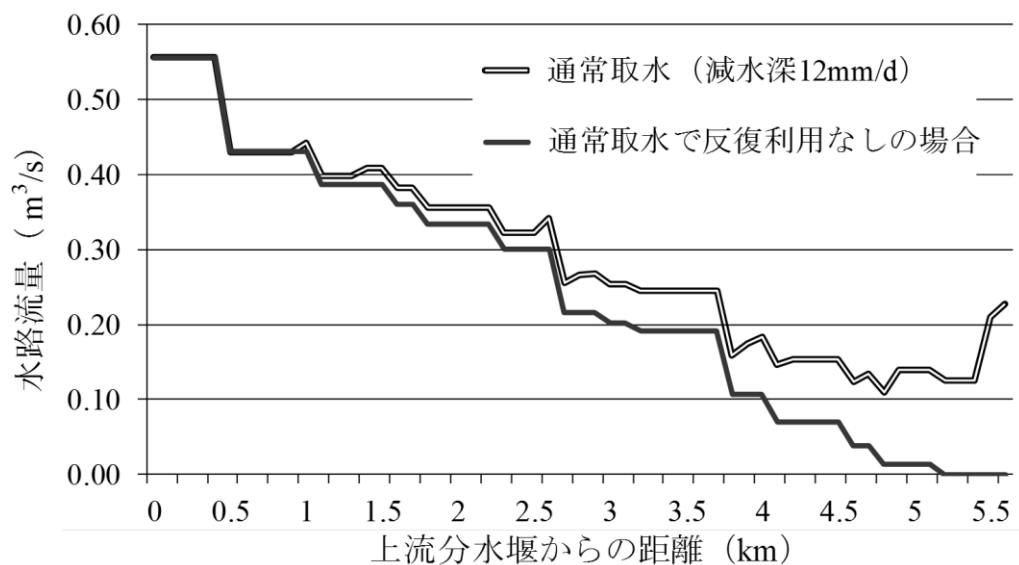


図 2-16 反復利用がされない場合
In case of no reuse of water

2.6.2.4 上流優先の取水をした場合

用水路の上流に水田を持つ農民は上流優先の取水をすることはよく知られた事実である。この場合はどのような状況になるだろうか。上流域の取水口において流入量が30%多い場合、これに対し中流では平均の取水，下流では取水30%減の取水を想定した（図2-17）。

上流では通常に比べ水路流量は減少するが，下流では還元水により水量が回復し，通常と変わらない水量を確保している。しかし，還元水がない場合では中流域から，通常の半分以下の水量しか確保できなくなる。

本研究の対象地域の消費水量は，基本的に減水深のみであるので，水田用水の反復利用の分析は，比較的単純であり，問題は少ないと考えていた。しかし，上記のように，減水深，灌漑水量，反復利用，取水の慣習等，条件の変化によって，灌漑用水の不足が発生することが推定された。

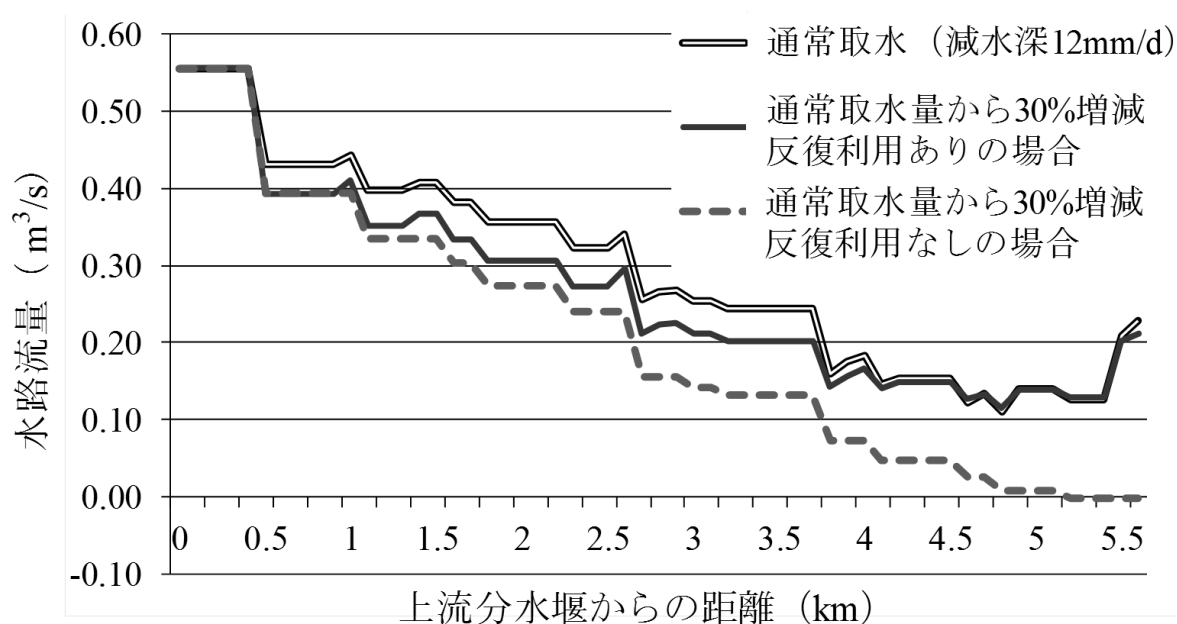


図 2-17 上流優先の取水をした場合
In case of over intake water at the upstream

2.7 本章のまとめ

手取川扇状地では，北陸地方特有の急勾配地形と砂礫質土壤に特徴づけられ，幹線水路を利用した独特の水田用水反復利用の体系をとっている。本研究は，この扇状地

内に展開する約 179ha の試験流域を選定し、用水の反復利用の実態を分析し、実測結果と照合して分析方法の妥当性を検証したものである。その結果明らかになった事項は次のようにまとめられる。

(1) 複雑な用排水系統からなる用排水ブロックから形成されている水田地域に対して、用水による還元水の分析方法を提案し、その妥当性・有効性を実測資料により検証した。また、この分析方法を活用することにより様々な水利状況を推定することが可能となった。

(2) そこで、水源整備・圃場整備の歴史的経過を整備し、それ以前の水源状況・減水深状況・取水状況・反復利用状況を想定して、具体的に用水の過不足状況を分析した。すなわち、水源整備以前には用水源が不安定なことや、圃場整備以前には浸透量が多いことが、用水不足の一因となっていたことが具体的に推定された。

(3) 比較的潤沢な用水量を確保している対象地域において、下流地域に多数の取水堰を設けて用水の反復利用を図っているのは、水源整備・圃場整備以前の慣習を継承している可能性が大きい。

(4) しかし、現在でも集落営農や企業的経営の導入や集団転作によって、水利用の形態が大きく変わり、時間的、場所的に水利用が集中するため、多くの取水地点の存在や反復利用システムが新たな視点から良く機能している。

反復利用については、その実態が複雑であり、かつ地域条件によって大きく異なるため、現段階では実例を蓄積し、これを参考に反復利用水量を推定する段階にとどまっている。概念としては CB 法や線形計画法が提案され、反復利用水の総量を評価する方法が整理されているが、具体的に各水田からの還元水量が推定できない。

本研究では減水深のうち浸透量がそのまま地下水流動に加わり、還元水の対象にならない場合を検討した。しかし、一般的な場合には、手取川扇状地とは異なり、水田からの浸透水の一部は地区内排水路に還元される。この場合には、灌漑ブロックごとの還元率を与えることにより、還元水量を求めることができる。

今後の課題として、試験地域よりもさらに広大な地域を対象にした場合には、用排水系統はさらに複雑化することが予想される。このような場合に適用できる反復利用分析のシステム化について、さらに研究を深める必要がある。

引用文献

- 朝岡良浩, 風間聡, 沢本正樹. (2002). 広域積雪水資源量の変動特性とその地理・気候依存性. 15(3), 279-289.
- Bach A. (2002). Snowshed Contributions to the Nooksack River Watershed North Cascades Range Washington. 92, 192-212.
- Barnet T.P., Dumennil L., Schlese U., Roeckner E., Latif M. (1989). The effect on Eurasian snow cover on regional and global climate variations. J Atmos. Sci, 46, 661-685.
- Brutsaert W., Stricker H. (1979). An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. Water Resour. Res., 15, 443-450.
- Cline D., Elder K., Barles R. (1998). Scale effect in a distributed snow water equivalence and snowmelt model for mountain basins. Hydrol. Process, 12, 1527-1536.
- Elder K., Rothenthal W., Davis R.E. (1998). Estimating the spatial distribution of snow water equivalence in a mountainous watershed. Hydro. Process, 12, 1793-1808.
- Walter U.G., United States Bureau of Reclamation, Rocky Mountain Forest and Range experiment Station. (1958). Factors affecting snowmelt and stream flow. U.S Government Printing Office, 21-30.
- 東野外志男, 野上達也, 小川弘司. (1996). 白山高山帯の室堂平における 1993-1995 年夏季・秋季の降水観測資料. 石川県白山自然保護センター研究報告, 23, 1-9.
- 北陸農政局計画部資源課. (1987). 地域資源管理システム形成調査(手取川地区) 報告書.
- 鎌田新悦. (1995). Kalman Filter による融雪量補整-融雪解析における Kalman Filter の応用 (I). 農土論集, 180, 93-102.
- 鎌田新悦. (1996a). Kalman Filter による融雪量補整-融雪解析における Kalman Filter の応用 (II). 農土論集, 181, 69-77.
- 鎌田新悦. (1996b). 融雪流出分離モデル-刀利ダム流域における融雪解析 (I). 農土論集, 181, 79-86.
- 鎌田新悦. (1996c). 流出モデルおよびディグリーディ Factor による融雪量の比較-刀利ダム流域における融雪解析 (II). 農土論集, 181, 87-96.

- 加藤徹, 倉島栄一. (1998). 融雪期流量中の融雪流出高の分離と融雪水依存度の推定. 農土論集, 193, 177-184.
- 小池俊雄, 高橋裕, 吉野昭一. (1985). 融雪量分布のモデル化に関する研究. 土木学会論文集, 363(Ⅱ-4), 165-174.
- 倉島栄一, 加藤徹, 佐藤晃三. (1996). 長期融雪流出解析への熱収支法の適用. 雪氷, 58(2), 133-144.
- 倉島栄一, 佐藤晃三. (1991). 積雪の熱収支と融雪モデル—融雪流出の基礎的研究 (Ⅰ)—. 農土論集, 154, 99-107.
- 倉島栄一, 佐藤晃三. (1992). 熱収支積雪・融雪モデルとその適用—融雪流出の基礎的研究 (Ⅲ) —. 農土論集, 160, 59-69.
- 永井明博. (1995). 長短期流出両用モデルの標準的定数について. 農土論集, 180, 59-64.
- 佐藤晃三, 倉島栄一, 松山幹男. (1989). 4種類の積雪・融雪変換モデルの推算精度の比較. 農土論集, 141, 45-52.
- 能登史和, 丸山利輔, 早瀬吉雄, 瀧本裕士, 中村公人. (2010). 手取川山地流域におけるタンクモデルを用いた積雪水資源量の評価. 農業農村工学会論文集, 268, 31-37.
- NotoF., MaruyamaT., TakimotoH., NakamuraK., OnishiT. (2011). Evaluation of Water Resources by Snow Storage Using Water Balance and Tank Model Method in the Tedor River Basin of Japan. PAWEES, 8(3), 1-9.
- 島村雄一, 泉岳樹, 中山大地, 松山洋. (2003). 積雪指標を用いた積雪水当量・融雪量の推定—黒部湖集水域を事例に—. 水文水資源学会誌, 16(4), 331-348.
- 田中丸治哉, 角屋睦. (1994). 長短期流出両用モデルによる農地造成流域の流出特性の吟味—農地造成が流域水循環に与える影響 (Ⅱ) —. 農土論集, 170, 99-105.
- 菅原正巳. (1972). 流出解析法. 共立出版, 99-105.
- 大槻恭一, 三野徹, 丸山利輔. (1984). 水収支法と補完関係式による流域蒸発散量の比較—実蒸発散量推定に関する研究—. 農土論集, 112, 17-23.
- OhtaT. (1994). A distributed snowmelt prediction model in mountain areas based on an energy balance method. Ann. Glacial, 19, 107-113.
- TaniM. (1996). An approach to annual water balance for small mountainous catchments with

wide spatial distributions of rainfall and snow water equivalent. J. Hydrol, 183, 205-225.

戸塚岳大, 風間聡, 朝岡良浩, 沢本正樹. (2004). 積雪モデルと衛星積雪面情報を用いた東北地方の積雪分布と融雪係数の解析. 水文・水資源学会誌, 17(5), 439-502.

YamadaT. (1982). Studies on accumulation-ablation processes and distribution of snow in mountain regions. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, 31, 1-33.

第3章 水田用水の昇順方式による新しい還元水分析法の提案と適用

3.1 研究の目的

水田灌漑用水の特徴の一つは自然の中での用水の反復利用にある。この水田用水の反復利用の課題は後述するように古くから研究が開始されているが、未だに十分な研究が行われているとはいえない。本研究では、用排水系統を体系的に整理することにより、これを1次元の数字で表現し、排水系統を昇順に並び替え、幹線水路ごとの還元水を体系的に分析する方法を新たに提案し、この理論を手取川扇状地に展開する七ヶ用水地区に適用した結果について報告する。

次に、これまで行われてきた反復利用に関する研究について概観しておく。この問題は、第2次大戦直後から金子（1957）、福田ら（1961）によって研究が開始された。当時は、ダムなどの水源整備が十分でなく、水田用水が不足しがちで、減水深のうち浸透量の一部が下流に流出し、この水を再利用しようとの考え方に基づいている。金子（1957）は、水収支という考え方を提示し、全国各地で特定地区の水の流入流出を調査し、その領域内の消費水量（流入と流出の差）を求めた。この消費水量は、土地の条件によって大きく変わることからその特徴をまとめている（農業土木学会、2000；丸山、1986）。この水収支法は実測値を集積するという点では実際に役立ったが、体系的・理論的には十分ではなく、CB法（岡本、1973；佐藤・岡本、1985；農林水産省構造改善局、1993）や線形計画法（三野・丸山、1983）が提案された。また台湾においても近年水資源の不足から、水田用水の反復利用の問題が取り上げられている（Chien and Fang, 2012）。

以上、これまで提案されている方法は、当時の用水事情を背景に、いずれも地区全体の元入れ取水量（原則として最上流の取水量）を算定することを目的としたものであった。また、水田に浸透した用水のうち、どれだけが排水路に浸出して再利用できるかを前提とした方法であった。したがって、地区内の詳細な水の動きを追跡することを目的としたものではなかった。

しかし、近年では、集落営農や集団転作が活発に行われ、元入れ取水量のみでなく、地区内の部分的な用水管理も問題になることが多くなり、用水の部分的な動きを知る

必要が生じてきた。また，学問的にも水田群の中の用水の追跡が行えることは，灌漑排水学の知見を深める上でも大切と考える。この地区内の反復利用を研究対象とする点が従来の還元水利用・反復利用の研究とは異なる点であり，また研究する意義でもある。

3.2 手取川扇状地と七ヶ用水の概要

3.2.1 土地利用

本研究で対象とした七ヶ用水地区はその名の示すように，7本の基幹水路を基本に，それに接続する幹線水路がいくつかの支線に分岐した複雑な用水系統を示している。幹線水路には多数の取水堰と落差工が設けられ，水田用水の反復利用が図られている。設置された堰の数は464か所にのぼる（図3-1）。



図 3-1 研究対象地区内の取水堰

Map of intake weirs in study area

3.2.2 末端水田における消費水量

対象地区は、砂礫質の扇状地の上に水田が展開しており、透水性の小さい作土・心土の下に透水性の大きい砂礫層がある。地下水位は深く、海岸に近い一部の地域を除いて、大部分の水田では開放浸透が生じている。したがって、地区全体の地下水流動は、水田からの浸透を受けているが、圧力的には不連続である。このようなところで、消費される水量は、単純に減水深（蒸発散量＋浸透量）と考えてよい（丸山，1986）。このような前提に立つと末端水田では水田ブロックごとに次の水収支式が成立する。

$$(Q_{in} + R) - (Q_{out} + ET + P) = \Delta S \quad (3-1)$$

定常状態では $\Delta S=0$ とみなせるので、次式が得られる。

$$Q_{out} = Q_{in} + R - ET - P \quad (3-2)$$

Q_{out} ：ブロックからの還元水量

Q_{in} ：ブロックの取水量

R ：ブロック内への降水量

ET ：ブロックからの蒸発散量

P ：ブロックからの浸透量

ΔS ：湛水深変化量

3.3 還元水分析の方法

第2章において、(3-2)式で表現される水収支から還元水量を導き、反復利用水量を評価する手法自体については、七ヶ用水地区の4-2号線における実測値との比較により、妥当性と有効性が示されている。本研究では、大規模な用排水路ネットワークに適用する際の体系的な還元水の分析手法の提案を目的として、後述する昇順方式による新しい分析手法を開発した。まず、(3-2)式で表現される取水量や還元水量を基本に、多数の灌漑および排水ブロック（分析の最少単位）が複雑に組み合わさった実際の水田地域の還元水の解析を行う。なお、排水ブロックとは、同一取水堰から取水された用水により灌漑された水田群で、同一幹線水路の同一取水堰に排水される水田

群を示すこととする。排水ブロックと同じブロックを分析の必要上灌漑ブロックと定義し、両者をあわせて、水田ブロックと呼ぶ。

幹線水路から取水された用水は、支線用水路を通じて水田ブロックに配水される(図 3-2)。この用水は減水深だけ消失して還元される (CB 法でいえば本地区はすべて CB ブロックに相当する)。また、末端用水路と末端排水路との結合は全く任意(独立)に行われている。

そこで、次に示すように、水路、堰等のナンバーリングを工夫し、昇順方式というべき新しい方法を考案し、還元水の分析を行った。

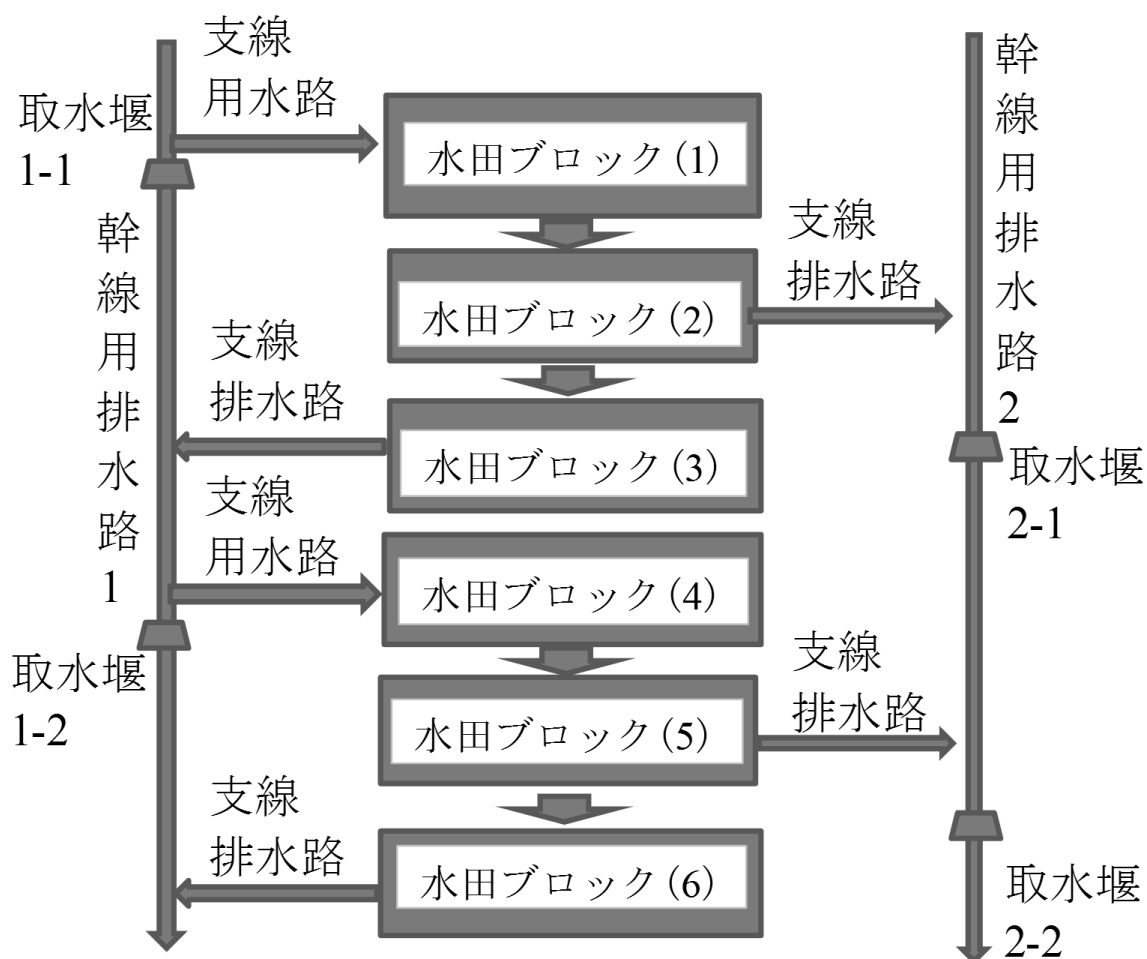


図 3-2 用排水末端組織の結合状況模式図

Schematic expression of irrigation and drainage network at tertiary canals

3.3.1 還元水の分析（昇順方式）

- 1) 用水系では、幹線水路、取水堰、灌漑ブロックに各 2 桁の番号を付け、その次に、6 桁程度の領域を取り、灌漑ブロックの面積を入れる。
 - 2) 排水系についても用水系と同様に、幹線水路、排水系の取水堰、排水ブロックに各 2 桁の番号を付け排水ブロックの面積を入れる。
 - 3) 用水系と排水系では灌漑面積、排水面積を共通に取る。幹線水路の番号は数値の小さいものから順に並べる。取水堰の番号も同様に幹線水路ごとに上流から 1, 2, 3 と小さいものから順に並べる。
 - 4) 用水系データと排水系データを別々に読み込み、幹線水路、排水系の取水堰、排水ブロック番号（結合情報）を消去したのち、排水ブロック面積から還元水量を計算する。
 - 5) これに結合情報を再び加え、排水系データを昇順（小さい番号から順に）に並べ替える。この操作によって、用水系に対応した排水系の還元水量を求められる（ただし、この操作は、繰返し計算に効率的な Fortran の使用を前提としている）。
 - 6) 幹線水路ごとに、上流端の取水量から各堰の取水量を差し引き、還元水量を加えて幹線水路ごとの流況を分析する。
- 以上の計算方式のフローチャートを図 3-3 に示す。この方法によれば、どんなに複雑な用排水組織を持つ水田であっても、具体的に還元水の計算が行える。

3.3.2 幹線水路、用水系の取水堰・排水系の取水堰、灌漑排水ブロックのナンバーリングの具体的事例

上述の用排水組織のナンバーリングの例を 2 号幹線水路について示す（表 3-1）。用水系には 12 桁の領域をとり、排水系にも同じく 12 桁の領域を取る。灌漑面積および排水面積をいれる領域に 6 桁を使う（面積の単位によって変える）。用水系には、結合情報のために 6 桁を使い、幹線水路（A）、取水堰（B）、灌漑ブロック（C）に各 2 桁の番号を付け、次に灌漑面積（D）を入れる。排水面積（D）と灌漑面積（D）は共通に取る。排水系では、各 2 桁の領域に排水ブロックに対応した幹線水路（E）、その水路の排水系の取水堰の番号（F）、排水ブロック番号（G）を付ける。ただし、排水ブロック番号は、同一排水系の取水堰では上流から順に 1, 2, 3 のように付ける。

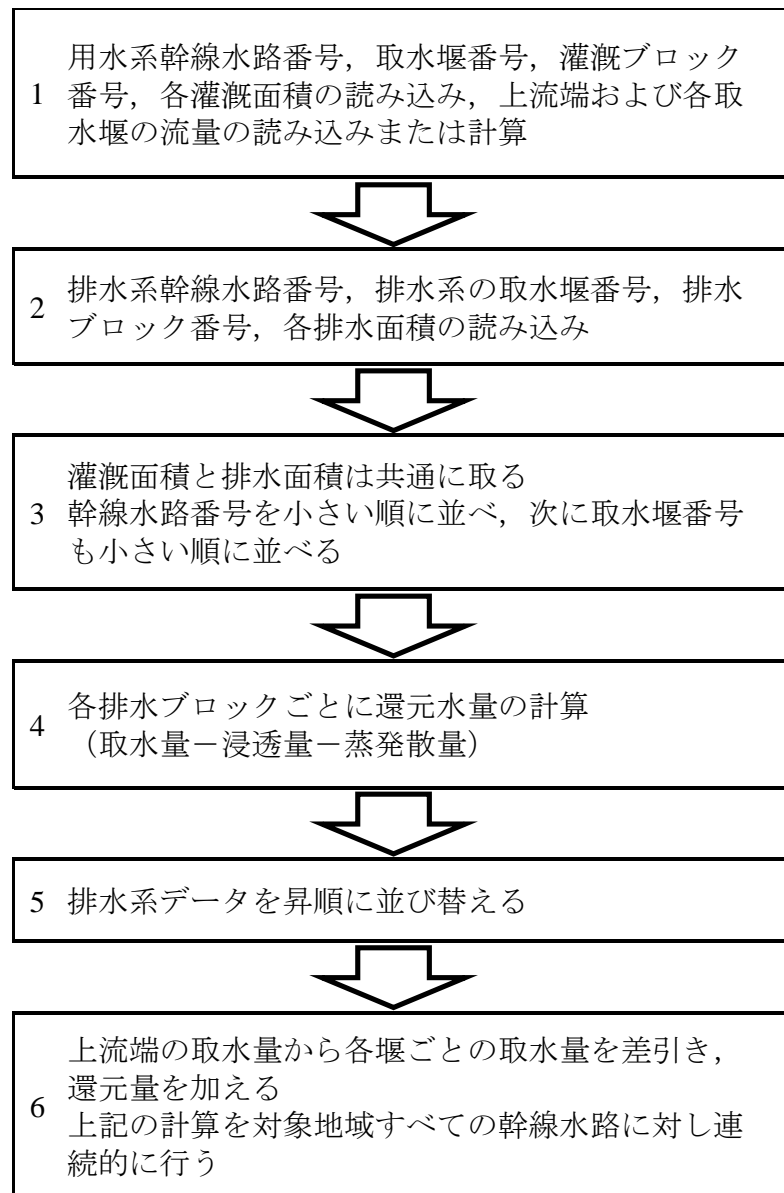


図 3-3 水田灌漑用水の還元水量計算の流れ図
Flow chart for reuse calculation of paddy irrigation water

したがって，用水系には，A，B，C，D の 4 組の数値が入り，排水系には D，E，F，G の 4 組の数値が入る．D は前述のように共通である．この共通の枠をとることによって，排水系を昇順に並べ替えれば，用水系に対応した排水系の還元水量の解析が可能となる．ただし，灌漑および排水ブロックの番号は資料整理の便宜上付けたもので，分析には直接利用されない．なお，実際の計算経過と用水の流れをより具体的に示すために，付録として最後に入出力データを示す．

表 3-1 用排水組織のナンバーリング

Numbering method of irrigation and drainage network

用 水 系 デ ー タ						
排 水 系 デ ー タ						
幹 線 水 路 番 号	取 水 堰 の 番 号	灌 漑 ブ ロ ッ ク 番 号	灌 排 水 面 面 積 (ha)	幹 線 水 路 番 号	取 水 堰 の 番 号	排 水 ブ ロ ッ ク 番 号
A	B	C	D	E	F	G
02	01	01	6.4639	02	11	01
		02	28.0490	71	04	01
		03	25.0588	81	99	01
	02	01	3.0457	02	11	02
		02	1.0023	71	02	01
	03	01	4.1752	02	11	03
		02	2.3470	71	02	02
	04	01	1.6366	41	03	02
		02	4.9157	41	03	03
		03	6.5387	51	07	01
	05	01	7.0703	02	11	04
		02	4.8863	51	07	02
		03	3.5282	71	02	03
	06	01	8.5786	02	11	05
		02	3.3985	71	02	04
	07	01	1.9411	51	07	03
		02	0.5844	61	05	01
	08	01	0.1562	53	03	01
		02	1.0757	61	05	02
		03	11.9061	61	05	03
	09	01	2.8983	02	11	06
		02	0.6361	61	05	04
		03	4.2607	71	04	02
		04	14.0288	71	04	03
		05	12.2324	71	02	05
	10	01	1.704	61	05	05
	11	01	5.2254	71	02	06
	12	01	1.5973	61	09	01
	13	01	3.8685	61	05	06
平均			5.9590			

3.3.3 計算結果の一例

以上の方法で 2 号幹線水路について計算した還元状況の例を表 3-2 に示す。この例では 13 か所に堰が設置されている。ただし、各堰の取水量は、幹線水路の堰の上流端で取水した水量（水利権水量）が、各堰の水田の受益面積に比例して配分されるものとした。また各灌漑ブロックへの取水量も当該ブロックの水田面積に比例するものとして配分した。

上流端で与えられた取水量 $0.773\text{m}^3/\text{s}$ から各堰での取水量が差し引かれ、他のブロックまたは 2 号幹線水路からの還元水量がこれに加わり、水路流量が漸次減少している様子が表現されている。ただし、他のブロックへの還元水量や他のブロックからの還元水量があるため、幹線水路単位で水収支はとれていない。なお、上記の計算は Fortran を使って乗除加減を繰り返し、必要な幹線水路、取水堰、ブロック数などの整数を取り出し、還元水量の計算を行った。また、桁落ちしないよう倍精度で計算を実施した。

表 3-2 用水の還元状況の計算例（2 号幹線水路）
Example of return flow calculation for No.2 main canal

堰番号	水路流量 (m^3/s)	取水量 (m^3/s)	還元水量 (m^3/s)
1	0.506	0.266	0.000
2	0.488	0.018	0.000
3	0.459	0.029	0.000
4	0.409	0.059	0.007
5	0.345	0.069	0.007
6	0.292	0.054	0.000
7	0.280	0.011	0.000
8	0.222	0.059	0.000
9	0.069	0.152	0.000
10	0.062	0.008	0.000
11	0.123	0.023	0.085
12	0.116	0.007	0.000
13	0.099	0.017	0.000
合計		0.773	0.099

取水量 $0.773\text{m}^3/\text{s}$, 灌漑面積 172.8ha

3.3.4 分析に必要な資料

3.3.4.1 用水系及び排水系の資料

この分析を行うには幹線水路の受益面積，幹線水路上の堰の位置と数，灌漑ブロックの位置と面積などの詳細な資料が必要であるが，これは七ヶ用水土地改良区から提供を受けた．この資料の要約を表 3-3 に示す．

表 3-3 対象地区の用排水組織基礎資料
Basic data for irrigation and drainage network of study area

番号	幹線水路番号	堰の数	ブロック数	幹線取水量 (m^3/s)	灌漑面積 (ha)
A	B	C	D	E	F
1	0	3	34	0.785	176
2	2	13	29	0.773	173
3	11	33	50	1.121	251
4	12	34	66	1.276	285
5	13	20	51	1.396	312
6	21	21	61	1.478	331
7	22	35	95	1.848	414
8	23	11	33	0.966	216
9	24	4	13	0.581	130
10	31	9	26	1.000	224
11	32	18	45	0.776	174
12	33	14	18	0.291	65
13	34	15	42	1.214	272
14	35	20	39	0.802	180
15	41	12	26	0.925	207
16	42	17	44	0.848	190
17	43	17	44	1.280	286
18	44	14	26	0.647	145
19	45	13	25	0.578	129
20	46	13	50	0.799	179
21	48	11	29	0.951	213
22	51	30	73	2.308	516
23	52	4	12	0.301	67
24	53	7	25	0.825	185
25	61	26	67	2.867	641
26	71	15	21	0.446	100
27	72	16	26	0.845	189
28	73	19	30	1.146	257
29	81	日本海に流出			
30	91	受益面積なし			
合計		464	1,100	29.073	6,505
平均				1.038	232

この表に示したように、幹線水路を 28 に分割し、日本海に直接流出する水路 29 と、都市化等により受益面積が無くなった地区に 30 の番号を割り当てた。実際の幹線水路の番号は、セキ用水土地改良区が通常使用している番号（同表 B 欄）を使った。

例えば幹線水路 11 は当該土地改良区では、1-1 号幹線を示す。各幹線水路の堰の数を C 欄に示した。前述のように、堰の数は全体で 464 個となった。また、各堰によって灌漑されるブロック（排水ブロックと同数）を D 欄に示した。全体でブロック数は 1,100 にのぼった。ブロックの平均面積は、約 5.9 ha となった。

また、幹線水路ごとの普通期の水利権水量は同表 E 欄に示した通りで、全量では $29.07\text{m}^3/\text{s}$ 、平均 $1.038\text{m}^3/\text{s}$ となった。堰ごとの灌漑面積も全体では、6,505ha、平均 14ha となった。なお、水利権水量は、水田転作を考慮していないので、本解析も同様とした。

3.3.4.2 減水深資料

減水深は、図 3-4 に示す 12 か所の 25 筆の水田において、村島（2012）により、週 2～5 日、朝夕 2 回測定された。その結果を表 3-4 に示した。場所による差が明確でなかったため、平均値 15.9mm/d を全域に適用した。

表 3-4 減水深観測結果
Observed data of water requirement rate

地点 番号	減水深 (mm/d)	地点 番号	減水深 (mm/d)
1-1	25.8	7-1	17.5
1-2	11.4	7-2	17.3
2-1	13.0	8-1	23.5
2-2	10.6	8-2	22.9
3-1	9.4	9-1	20.3
3-2	11.7	9-2	19.7
4-1	17.4	10-1	14.6
4-2	18.1	10-2	14.3
5-1	27.1	11-1	7.6
5-2	13.7	11-2	11.7
6-1	28.9	12-1	11.5
6-2	9.9	12-2	11.5
6-3	8.0	平均値	15.9

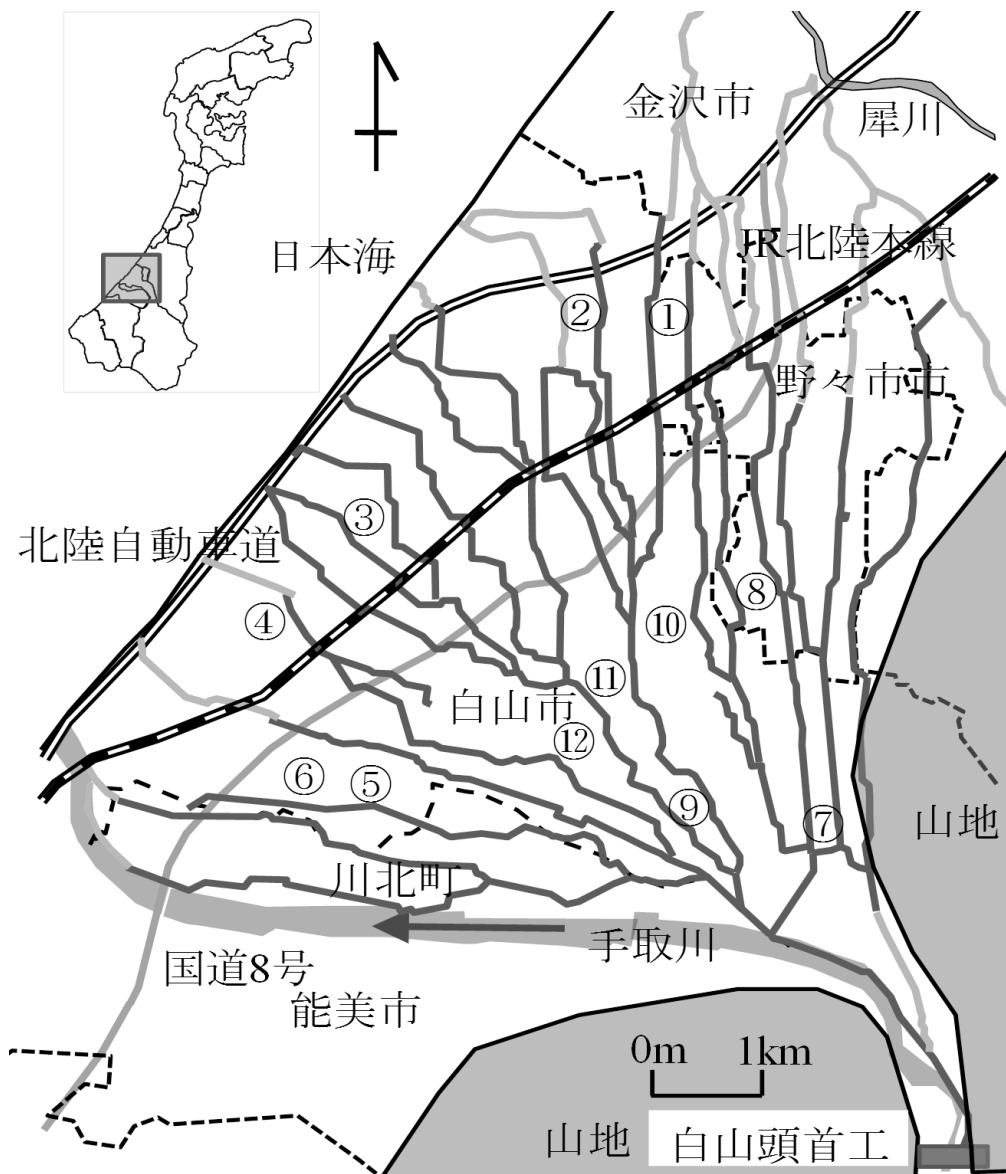


図 3-4 研究対象地区の平面図と減水深測定位置
Map of study area and measurement site of water requirement rate

3.4 分析結果と考察

次に、全域の還元状況を表 3-5 に示した。この表に示されるように、幹線水路によって流入する還元水量に大きな差がある。

全域還元水量とはこの路線全体に対する還元水量を示し、地区内還元水量とは最下流の堰より上流に還元され、用水として再利用が可能な水量を示す。地区外還元水量とは最下流の堰よりさらに下流に排水され、反復利用できない還元水量を示す。また、還元率とは各路線全体で取水される水量（取水量）に対する各路線に還元された水量

の合計（還元水量）の割合を示す．この表から明らかなように、 $29.07\text{m}^3/\text{s}$ の取水量に対して、全体の還元水量は、 $17.1\text{m}^3/\text{s}$ となり、この差は減水深で、深部浸透して地下水となり、あるいは蒸発散として失われる．取水量に対する全体の還元率は 59%である．このうち地区内の還元率は 33%、地区外の還元率は 26%となった．

幹線水路ごとの反復利用状況を明らかにするため、還元率を 20%刻みにして、図 3-5 に全域に対する還元率（B/A）を示し、反復利用が可能な状況を判断するため、地区内還元率（C/A）を図 3-6 に示した．

全域に対する還元率が 100%以上ある幹線水路に注目してみる．この水路は No.12, 13, 19, 23, 24, 27 である．

還元率 20%以下の幹線水路は、No.1, 2, 3 などの山麓や最上流の路線、および No.15, 21, 25 の路線である．後者の路線は周囲に対して微高地に当たり還元水量の期待できない路線と考えられる．

これに対し、再利用可能な地区内還元率は、全域の場合よりも当然低くなるが、傾向はかなり似通っている．還元率 20%以下の路線は増加し、No.11, 20, 28 が加わる．100%以上の路線は大幅に減少している．しかし No.12, 23 は依然として 100%以上の還元率を保っている．

このように、地区内還元率は場所によって大きな差があり、0%から 115%までと大きく変動している．これは用水管理を検討する際の重要な情報と考える．

3.5 本章のまとめ

本研究は、用排水幹線を仲介とした水田用水の還元水の分析法を提案し、実際に手取川扇状地、七ヶ用水地区に適用した結果を述べたものである．

1) 昇順方式ともいふべき用水の還元水分析の方法を提案した．この方式は、用水系には幹線水路、取水堰、灌漑ブロックに番号を付け、灌漑ブロックの面積を入れる．一方、排水系には幹線水路、排水系の取水堰、排水ブロックの順に整理し、灌漑ブロックと同じ排水ブロックを設定する．この排水ブロックからの還元水量を求めた後、排水系を昇順に並び変え、最初に設定した用水系と同じ順序とする．その上で、幹線上流端の取水量から各堰での取水量を差し引き、各堰での還元水量を加えて、幹線水路ごとの流況を計算する．

表 3-5 幹線水路別用水の還元状況（水利権水量の場合）

Return flow of irrigation water for main canals under allowable water right

幹線水路 番号	の取水量 (m^3/s)	還元水量(m^3/s)			還元率 (%)		
		全域	地区内	地区外	全域	地区内	地区外
		A	B	C	D	B/A	C/A
1	0.785	0.000	0.000	0.000	0	0	0
2	0.773	0.099	0.099	0.000	13	13	0
3	1.121	0.000	0.000	0.000	0	0	0
4	1.276	0.627	0.514	0.113	49	40	9
5	1.396	0.934	0.493	0.441	67	35	32
6	1.478	0.408	0.408	0.000	28	28	0
7	1.848	0.841	0.534	0.307	46	29	17
8	0.966	0.814	0.700	0.114	84	72	12
9	0.581	0.150	0.134	0.016	26	23	3
10	1.000	0.538	0.538	0.000	54	54	0
11	0.776	0.670	0.122	0.548	86	16	71
12	0.291	0.310	0.310	0.000	107	107	0
13	1.214	1.318	0.455	0.863	109	37	71
14	0.802	0.446	0.226	0.220	56	28	27
15	0.925	0.156	0.156	0.000	17	17	0
16	0.848	0.533	0.382	0.151	63	45	18
17	1.280	0.823	0.796	0.027	64	62	2
18	0.647	0.383	0.198	0.185	59	31	29
19	0.578	0.750	0.539	0.211	130	93	37
20	0.799	0.225	0.078	0.146	28	10	18
21	0.951	0.185	0.146	0.039	19	15	4
22	2.308	1.113	0.911	0.201	48	39	9
23	0.301	0.346	0.346	0.000	115	115	0
24	0.825	1.641	0.417	1.224	199	51	148
25	2.867	0.425	0.425	0.000	15	15	0
26	0.446	0.195	0.195	0.000	44	44	0
27	0.845	0.953	0.345	0.608	113	41	72
28	1.146	0.697	0.149	0.548	61	13	48
29		0.901	0.000	0.901			
30		0.626	0.000	0.626			
合計	29.073	17.107	9.616	7.489	59	33	26

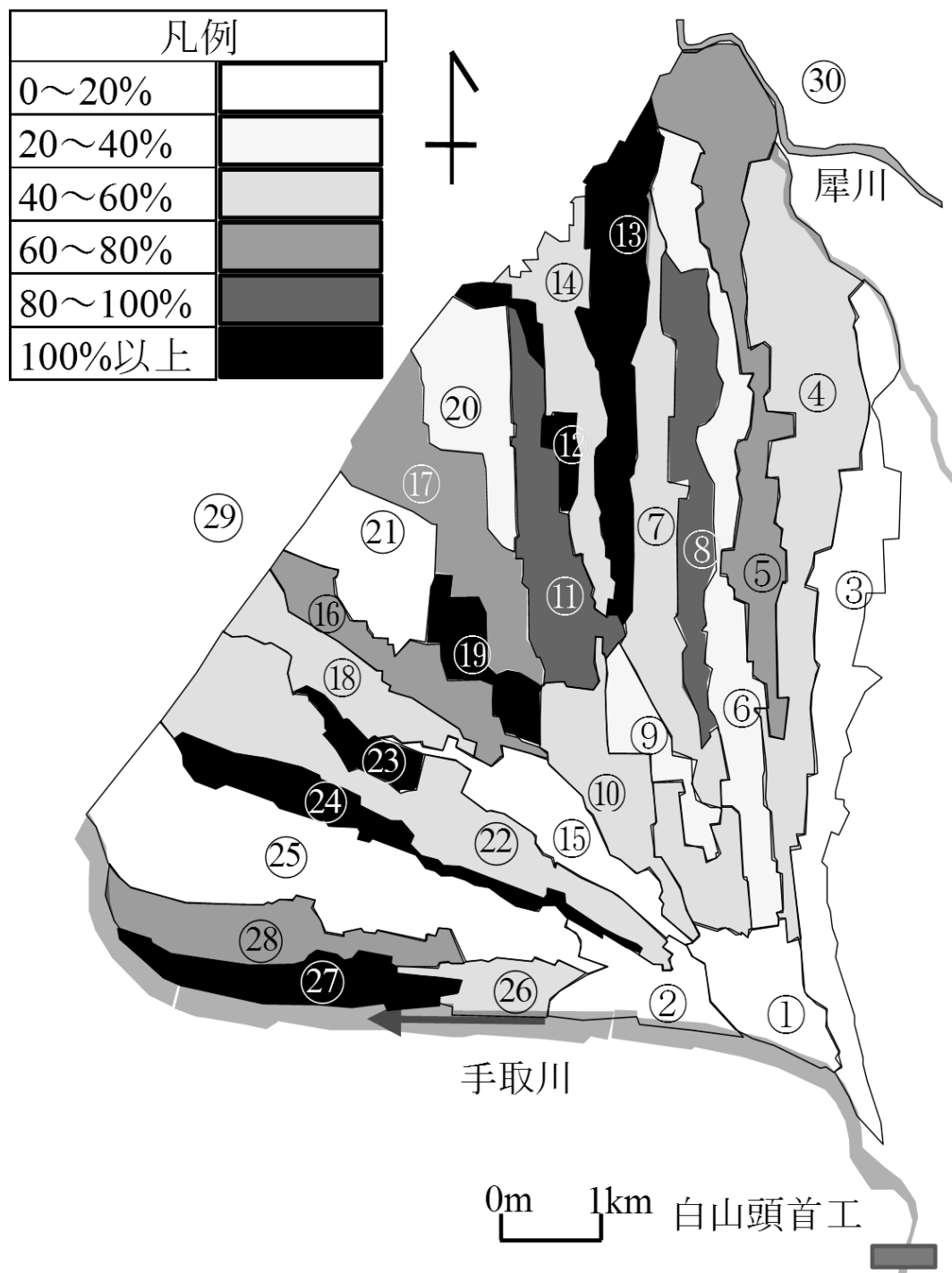


図 3-5 全域に対する幹線水路ごとの還元率
Return flow ratio of main canals for all study area

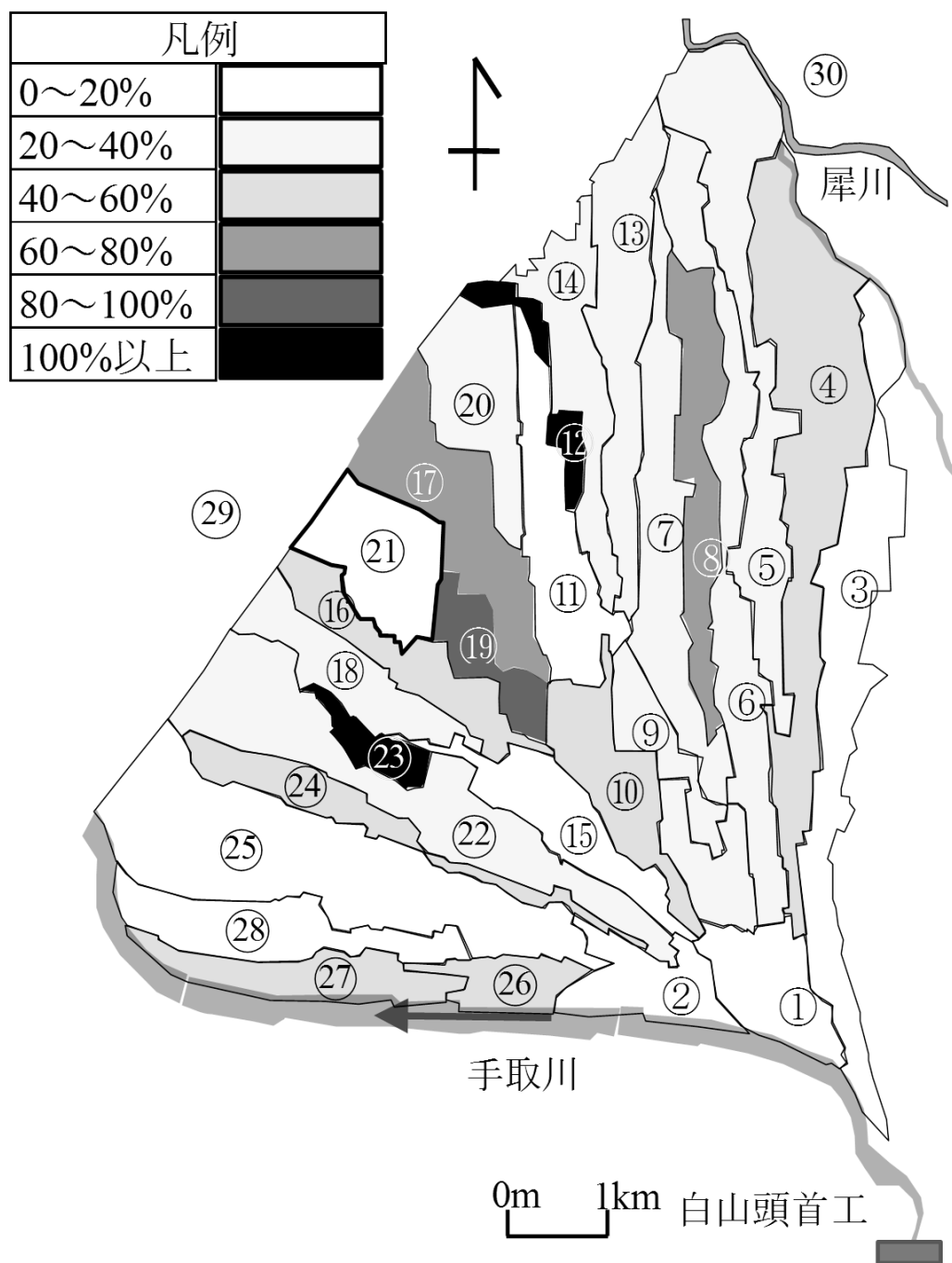


図 3-6 幹線水路ごとの地区内還元率（反復利用可能割合）
Available return flow ratio of main canals for all study area

2) 以上の方法を手取川扇状地、七ヶ用水地区に適用した結果、普通期の水利権水量 $29.07\text{m}^3/\text{s}$ の場合、地区全体の還元水量の割合は、取水量の 59%、このうち反復利用可能水量は 33%、残りの 26%は最下流の堰より下流に流出、あるいは直接日本海に流出して、反復利用が不可能なことが見出された。

3) この状況は、幹線水路によって大きな差があり、全く還元水が期待できない水路から、還元水量が取水量よりも多いものまで見られた。一般に山麓部の幹線水路では還元水量が期待できないのに対し、下流部の周囲より低地の水田ブロックでは 100% 以上の還元水量が期待できることが推定された。

本法は、消費水量が減水深であることを前提としているが、ブロックごとの減水深の還元割合が別途算定できればどのような地区でも適用できると考える。また、本研究は、事例として、水利権水量を取水した場合を検討しているが、実際の取水量の場合、各堰での取水量が異なった場合など、実態に合わせた条件で分析を重ねることにより、より有用な水管理のための情報が得られる。また、幹線水路に多数の堰が設けられているため、この地区の農家は用水利用の自由度が大きいと評価している。

3.6 付録 昇順に並び替えた事例

本分析法を適用するにあたって、データの動きと用水の動きを具体的に理解するために、2 号幹線水路について用水系のデータとこれに対応した排水系データおよび排水系のデータを昇順に並び替えた例を表 3-6 に示す。

用水系データは最初に与えたブロックごとのデータで、最初の 2 桁が 2 号幹線水路であることを示し、次の 2 桁が取水堰の番号を示す。この場合には 1 から 13 までであるので、堰の数は 13 である。次の 2 桁が水田の灌漑ブロックで、例えば最上流の堰からは 3 ブロック（面積各 6.4639ha 、 28.0490ha 、 25.0588ha ）の水田に用水を供給していることを示す。このように、堰ごとにいくつかのブロックが存在するので、ブロックの数は全体で 29 となる。

排水系データの並び替え前のデータは用水系データと対応している。最初の 2 桁がどの幹線に排水されるかを示す。2 号幹線水路の最上流の堰（1 号堰）から 3 灌漑ブロック（排水ブロックと同じ）に排水される。第 1 灌漑ブロックからは 2 号幹線水路に、

第2灌漑ブロックからは7-1号幹線に、第3灌漑ブロックからは8-1号幹線に排水される。以下同様に用水系データと排水系データとは対応している。

並び替え後の排水系データの最初の2桁は、2号幹線水路に流入する排水ブロックであることを示し、次の2桁は2号幹線水路のどの堰に還元するかを示す。この例では、8ブロックから2号幹線水路に還元されていることを示し、その内、第4の堰に面積2.7652haのブロックから、第5の堰に面積2.5525haのブロックから還元することを示し、第11の堰に他の幹線の6か所の排水ブロックから還元していることを示す。

この様にして、用水系データ、並び替え前後の排水系データを追跡すれば、水田群内の用水、排水の動きが詳細に追跡できる。なお、用水系データ、排水系データを堰ごとに集計すれば、各堰が分担する取水量、還元水量を求めることができる。

表 3-6 並び替え前後の用排水組織の番号 (2号幹線水路の例)
Number of network after rearrangement of drainage network for No.2 canal
Available return flow ratio of main canals for all study area

ブロック 番号	用水系データ	排水系データ	
		並び替え前	並び替え後
1	020101064639	021101064639	020401027652
2	020102280490	710401280490	020501025525
3	020103250588	819901250588	021101064639
4	020201030457	021102030457	021102030457
5	020202010023	710201010023	021103041752
6	020301041752	021103041752	021104070703
7	020302023470	710202023470	021105085786
8	020401016366	410302016366	021106028983
9	020402049157	410303049157	
10	020403065387	510701065387	
11	020501070703	021104070703	
12	020502048863	510702048863	
13	020503035282	710203035282	
14	020601085786	021105085786	
15	020602033985	710204033985	
16	020701019411	510703019411	
17	020702005844	610501005844	
18	020801001562	530301001562	
19	020802010757	610502010757	
20	020803119061	610503119061	
21	020901028983	021106028983	
22	020902006361	610504006361	
23	020903042607	710402042607	
24	020901140288	710403140288	
25	020905122324	710205122324	
26	021001017040	610505017040	
27	021101052254	710206052254	
28	021201015973	610901015973	
29	021301038685	610506038685	

引用文献

Chien, C.P. and Fang, W.T. (2012) : Modeling irrigation return flow for the return flow reuse system in paddy fields, *Paddy and Water Environment*, **10**, 187-196.

福田仁志, 野口正三, 大塚嘉一郎 (1961) : 広い水田地域における水収支の考え方, 農業土木研究, **28**(8), 31-37.

北陸農政局統計部 (2006) : 石川県農林水産統計年報 (農林編) 平成 16-17 年, 12-13.

金子 良 (1957) : 水田用水量の水文学的考察, 農業土木研究, **25** (3), 1-6.

丸山利輔 (1986) : 第 4 章 水田灌漑, 4.4 広域用水量, “丸山利輔, 五十崎 恒, 西出勤, 村上康蔵, 四方田 穆, 高橋 強, 三野 徹共著, 新編灌漑排水 (上巻)”, 養賢堂, 69-70, 78-90.

三野 徹, 丸山利輔 (1983) : 用水系統の再編成と広域用水量の決定について, 農業農村工学論文集, **108**, 9-17.

村島和男 (2012) : 第 3 章 扇状地内の地表水・地下水の量と質に関する分野, 9 節農業用水利用実態と変化予測, “丸山利輔, 早瀬吉雄, 瀧本裕士, 能登史和, 吉田 匡編著, 農業用水を核とした健全な水循環”, 石川県立大学出版会, 87-91.

農業土木学会 (2000) : 農業土木ハンドブック改訂 6 版, 本篇, 農業土木学会, 183-186.

農林水産省構造改善局 (1993) : 土地改良事業計画設計基準 計画 農業用水 (水田), 農業土木学会, 59-61.

岡本雅美 (1973) : 水田農業用水の計画需要量の推定法, 水利科学, **91**, 51-65.

佐藤政良, 岡本雅美 (1985) : CB 法におけるブロック判定の理論的検討, 農業農村工学論文集, **118**, 17-22.

吉田 匡, 丸山利輔, 能登史和, 高瀬恵次, 瀧本裕士 (2012) : 手取川扇状地試験地における水田用水地区内還元水の分析, 農業農村工学論文集, **282**, 35-42.

第4章 水田用水反復利用の視点からみた取水実態分析

4.1 研究の目的

水田灌漑用水の特徴は、工業用水や生活用水と異なり、反復利用が行われている点であり、用水の反復利用の問題が古くから大きな課題であった。

現在、わが国の農業用水需要は、年間約 546 億トン（国土交通省，2009）といわれているが、この水量は、取水地点における水量を合計したものであって、実際の消費水量ではない。詳しくはわからないが、実際の消費水量は、蒸発散によって消失する水量と用水路や河川下流部で再利用の機会を失って海洋に直接流入する水量のみと考えられる。したがって、実際の消費水量はこれよりはるかに少ないと想定される。この意味でも水田用水の反復利用の問題を検討する必要性は大きいが、現状では必ずしも十分な研究が行われているとはいえない。本研究は、実際の灌漑地域で水田灌漑用水の反復利用がどの程度行われているか、石川県手取川扇状地に展開する七ヶ用水地区を例に、実態を分析したものである。

前章において、七ヶ用水地区を対象に用水の反復利用状況について、昇順方式と呼ぶ新しい還元水分析方法を提案してきた。この地区では、他の地区に多く見られる水田用水の反復利用とは異なり、地形勾配の大きいことと灌漑水量の大きなことを利用し、幹線水路を活用して、地表水の反復利用を行っている。また、この地区では後述するように、数多くの水位計が設置され、基幹用排水路の流量が実測されている。本研究では、実測された流量と先に提案した昇順方式によって求めた流量を比較し、実際の水田地帯で、反復利用がどのように機能しているか、その実態を分析することとした。

この問題を検討するに当たってあらかじめ注目しておかなければならない課題がいくつかある。実際の水田では、用水の反復利用のみに注目して用水の管理を行っているわけではない。本地区のように豊富な用水源を持つところでは、反復利用に対する農民の意欲はあまり大きいとは思われない。加えて、この地域は北陸地方としては都市化の進行が著しい地域であり、流域内各地域の水田面積と水利権水量との間に大きな格差が生じているにもかかわらず、水田面積の実態にあわせた流域内

各地域の水利権改定は行われていない。都市化以前の水田面積に対応した水配分が現在でも依然として行われている。また、農業用水のみでなく、都市用水も流入している。したがって、本地区の水田用水の利用は、複合要因の影響のもとで行われているという認識が、実態を理解する上で重要な事項と考える。このような認識の下で本研究を実施したものであることをあらかじめ明示しておきたい。

4.2 手取川扇状地と七ヶ用水地区の概要

4.2.1 土地の利用

本地区は、農地のほとんどが水田で占められている典型的な水田地帯である。しかし、金沢市に隣接しており、石川県内でも人口増加率が高い地区である。この影響を受け、近年、北東部を中心に水田面積が減少し、都市域が増加している（図 4-1）。中村ら（2012）によれば、1976 年の手取川扇状地の水田面積率は 68%であったものが、2006 年には 51%となり、30 年の間に水田面積が 20%近く減少している。金沢市に近接した北東部の減少が顕著であるため、用水利用量実態に変化が生じていると考えられる。

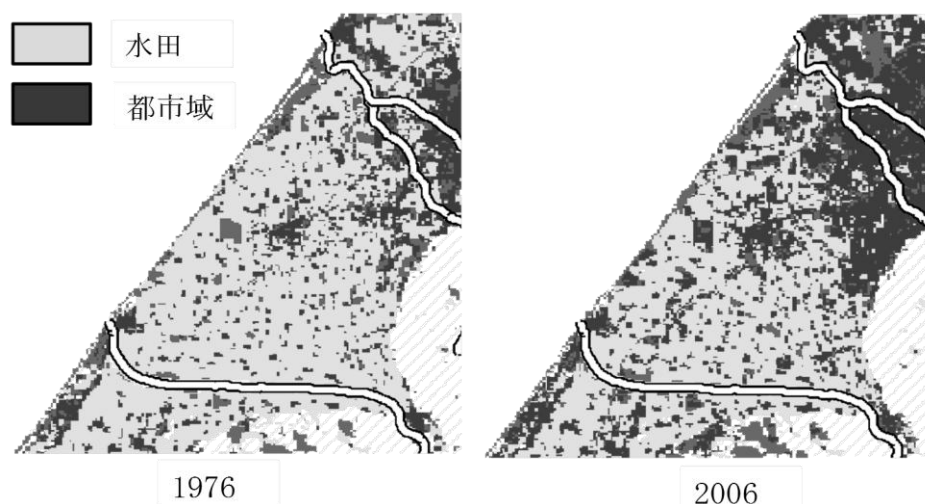


図 4-1 土地利用変化
Changes in land use

4.2.2 用排水路システム

本研究で対象とした七ヶ用水地区はその名の示すように、7本の基幹水路を基本に、それが分岐した21本の派線水路からなり、この28水路を幹線水路と呼ぶ。取水堰か

ら取水された用水は水田で利用され、減水深以上の取水は下流の幹線水路や隣接する幹線水路へ還元され、網目状の末端水路により用水の反復利用が行われている。このように、水田用水の反復利用方式も太平洋側の平野や湖沼の周辺に展開する低平地とは異なり、幹線水路を仲介とした特有の形式を取っている。

4.3 分析方法と資料

4.3.1 幹線水路の流量の測定

幹線水路には用水管理や洪水調整のため、灌漑地域内各地点の流量を測定するために図 4-2 に示すような超音波式水位計が 58 ヶ所に設置されている。この水位計は、分土工の直下流や水路末端部に設置され、各水路の用水配分量の実態を観測している。この水位計の中で、転倒式ゲートや落差工等による水位変動の影響を受けず、水路流量が正確に観測できる水位計は図 4-3 に示す 24 ヶ所である。この地点の水位記録から $H-Q$ カーブ方式により幹線水路流量を求めた。その一例を図 4-4 に示す。



図 4-2 超音波式水位計の設置状況
Setting site of supersonic water level meter

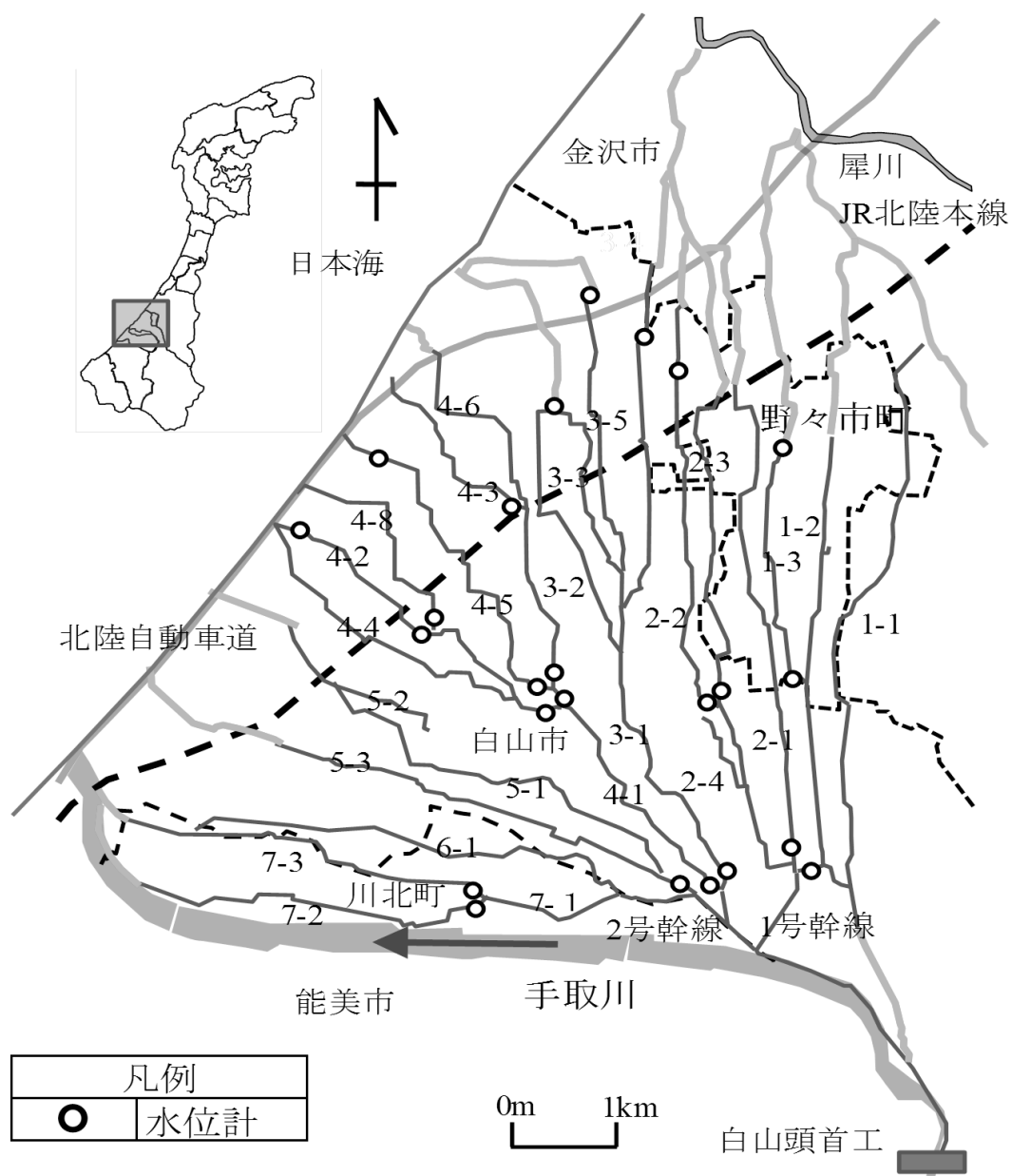


図 4-3 手取川扇状地の平面図と水路系統

Map of the Tedor river alluvial fan area and canal system

4.3.2 水路流量の実測値と推定値の比較地点

水路流量の実測値と推定値の比較するため、幹線水路の上流地点で取水量が正確に求められ、かつ下流地点で流量が実測されている 8 本の幹線水路を選定し分析に供した。また、観測期間は、全水位計の観測記録が揃っていて、取水量が安定している 2008 年 5 月 4 日～9 月 10 日の普通期を対象に、全期間の平均流量を用いることとした。

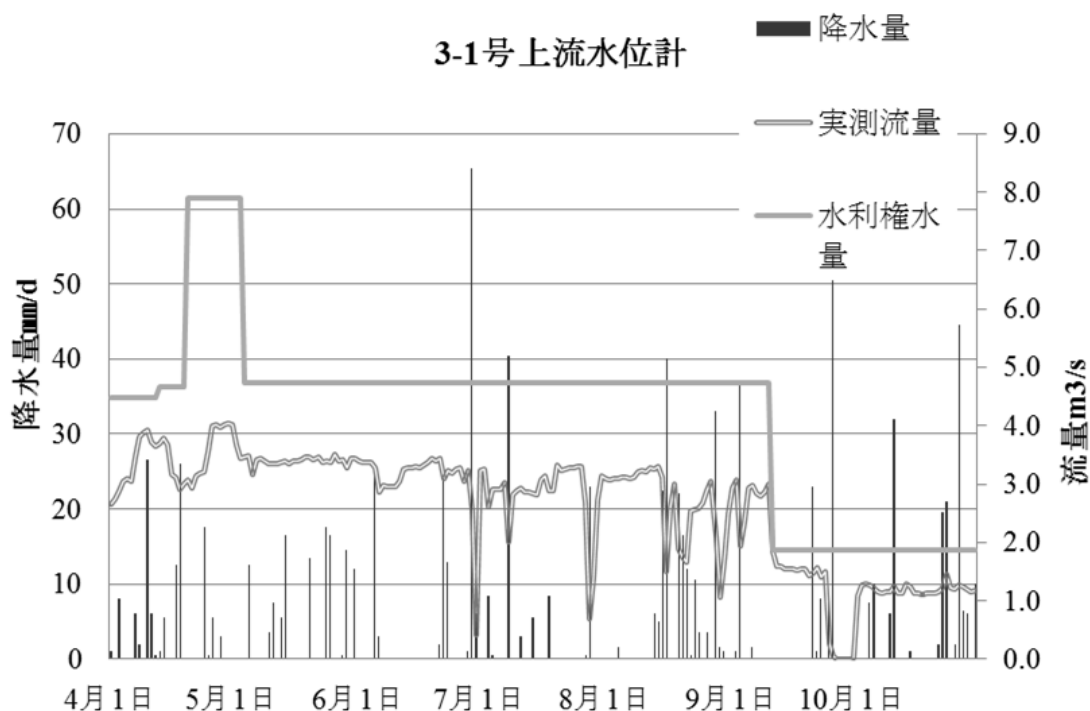


図 4-4 流量測定の一例
Case of the measurement of flow rate

4.3.3 還元水量の推定

還元水量の推定には昇順方式を利用した。この方式を現地に適用するに当たっては、検討対象とした幹線水路関係の用排水組織はもちろん、七ヶ用全体の用排水組織を採用し、当該幹線水路に対しては次項で述べる取水量を与え、検討対象区間内の取水量と還元水量を求めた。この方法を簡単に説明する。

昇順方式は、これまで提案されている CB 法や線形計画法とは異なり、灌漑必要水量が減水深以下であることを前提とせず、原則として、地表水の還元量を求める方法である。本地区は幹線水路を仲介として減水深以上の用水の反復利用を行っており、このような農地に対して、新たに提案した昇順方式は、地区内の詳細な水の動きを追跡し反復利用量を推定できる特徴を持っている。

この算定方式は、用水系には幹線水路、取水堰、灌漑ブロックに番号を付け、灌漑ブロックの面積を入れる。一方、排水系には幹線水路、排水系の取水堰、排水ブロックの順に整理し、灌漑ブロックと同じ排水ブロックを設定する（図 4-5）。

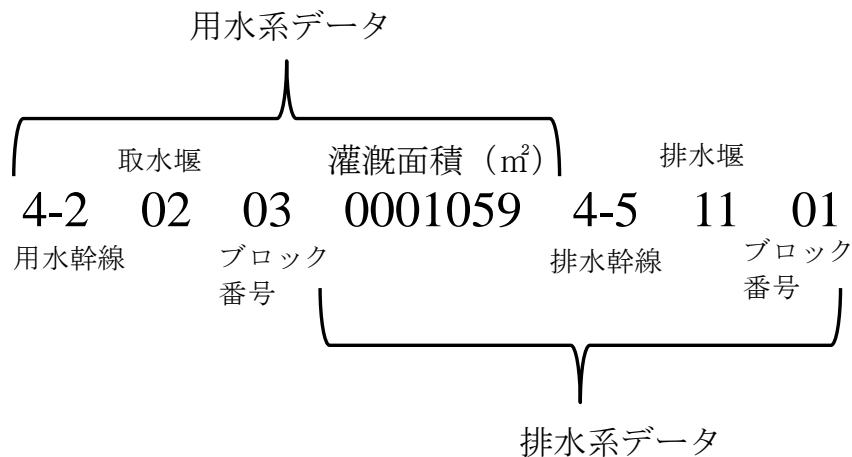


図 4-5 昇順方式ブロックデータ事例
Example of block data system of replacement in order

この排水ブロックからの還元水量を求めた後，排水系を昇順に並び変え，最初に設定した用水系と同じ順序とする．その上で，幹線上流端の取水量から各堰での取水量を差し引き，各堰での還元水量を加えて，幹線水路ごとの流況を計算することにより反復利用量を算定する（図 4-6）．

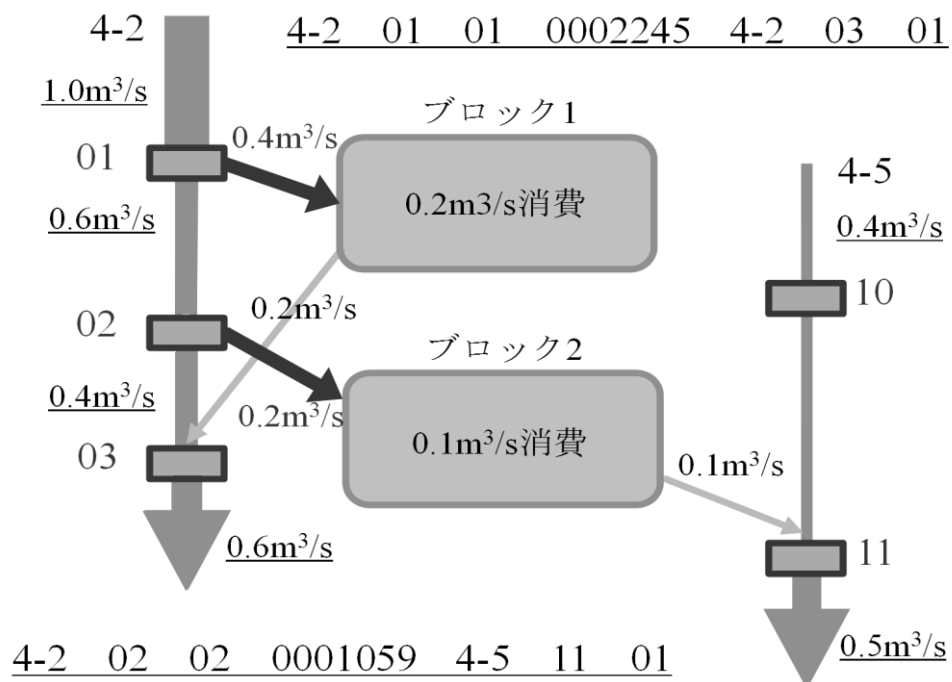


図 4-6 昇順方式による計算結果の一例（4-2 号幹線水路）
Example of result of replacement in order

4.3.4 取水量の推定

本研究で使用した 8 幹線水路の実測取水量は、幹線水路の状況によって次のような 4 通りの方法で決定した。ただし、水路番号は図 4-1 参照。

①実測値利用方式：水路上流端の流量が測定され、水路末端に下流に接続する水路が無い場合（7-2, 1-3 号水路等）はこの上流端の流量を実測取水量とする。

②流量差し引き方式：水路上流端の流量が実測され、末端部で下流に接続する水路がある場合（4-1 号水路等）、上流端の実測流量から下流の実測流量を差し引いて実測取水量とする。

③面積配分方式：七ヶ用水全体の取水量から、他水路の実測流量を引き、残りの水量を受益面積割合で配分した水量を取水量とする（6-1, 2-2 号水路等）。

④水路幅配分方式：下流域の水路で上端に実測水量が無い水路（3-2, 3-3 号水路等）は、水路分岐前の上流の実測水量を水路幅の割合で配分する（図 4-7）。

なお、七ヶ用水全体の取水量は、実測されている 2008 年 5 月 4 日～9 月 10 日の灌漑期普通期、全期間の平均流量（21.597m³/s）とした。

以上の方法により求めた取水量を当該水路の上流端流量として入力し、昇順方式により当該水路の各地点の還元水量を推定した。併せて流量観測点までの取水量を算定し、当該幹線水路の上流端の流量に推定した還元水量を加えて、この取水量を差し引き、実測地点の流量の推定値とした。なお、昇順方式で利用した減水深は、七ヶ用水全体の平均値である 15.9mm/d を使用し（村島ら, 2012）、降水量については考慮していない。

以上の方法により算定した計算流量と実測流量をとりまとめて表 4-1 に示した。

4.4 分析結果と考察

4.4.1 実測流量と推定流量の比較

分析の対象とした 8 幹線水路下流水位計の実測と計算流量の関係を図 4-7 に示した。実測流量と計算流量の間におおきな差異は見られなかったが、よく一致したとはいえない結果となった。また両者の間には、相関はほとんど見られなかった。この理由は、この地域の用水管理が、用水の反復利用を主眼として行われているわけではなく、これを意識しないで行われていることを意味すると考えられる。実際には幹線水路に一

且使用された用水が大量に流れ込んでおり、用水の反復利用が盛んに行われている(図4-9)。また、過去に定められた水利権水量に応じた用水分配システムとなっており、

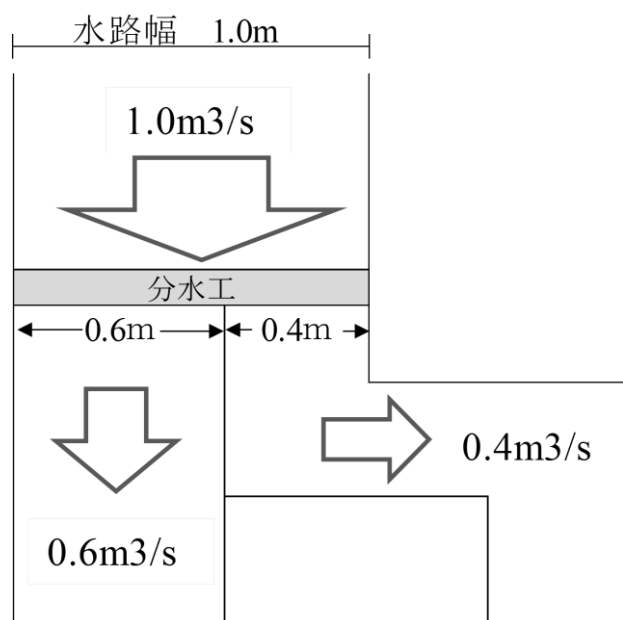


図 4-7 水路幅配分方式イメージ図
Image of the distribution by channel width

表 4-1 取水量の推定と水路末端水量の実測結果
Observed data of water end flow and the calculated intake water

単位：m³/s

幹線 NO.	堰下流幹線 水路流量	取水 量 Qin	当該水路取 水量合計 Qi	当該水路還 元水量合計 Qr	計算流量 Qb Qc-Qi+Qr	取水量 算定方式	水路末端 実測流量 Qa	
1	1-3	0.950	0.95	0.339	0.250	0.864	1	0.137
2	2-2	1.047	1.38	0.739	0.164	0.472	3	0.794
3	3-3	1.455	0.66	0.967	0.203	0.691	4	1.126
4	3-4	0.548	0.50	0.301	0.152	0.399	4	0.450
5	3-5	0.488	0.44	0.260	0.083	0.311	4	1.064
6	4-2	1.560	1.56	1.424	0.383	0.208	4	0.230
7	4-3	0.788	1.46	0.352	0.114	0.550	1	0.294
8	4-5	0.980	0.98	0.980	0.949	0.949	1	0.508

最近の水田面積の減少や都市化の影響を考慮した用水配分が行われているとはいえない状況にもある。これらの状況を反映して図4-8に示した状況になったと理解できる。

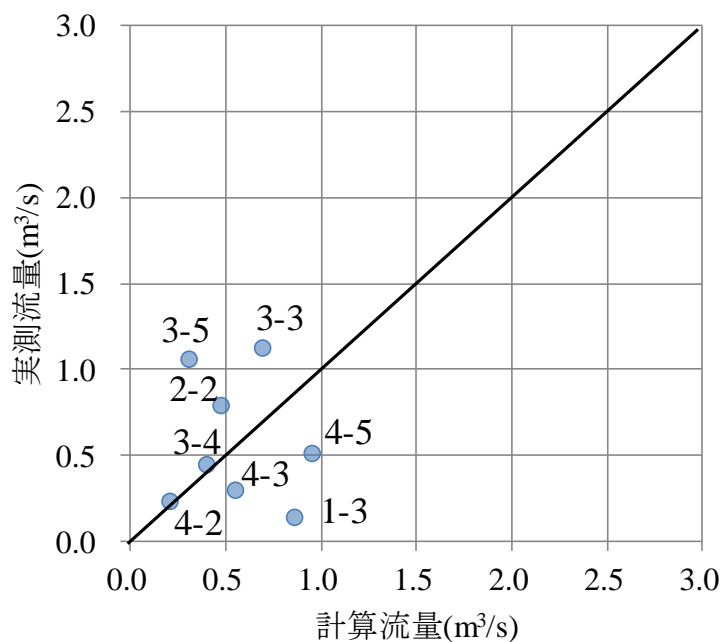


図 4-8 実測流量 (Qa) と計算流量 (Qb) の比較
Comparison of the observed and the calculated



図 4-9 実測流量 (Qa) と計算流量 (Qb) の比較
Comparison of the observed and the calculated

4.4.2 日当たりの実測流量と計算流量の比較

実測流量と計算流量の比較を詳細に行うため、水路の上流部と下流部で流量が測定されている 2-2, 4-2, 4-5 号線の 3 路線について検討を行った。2008 年 5 月 4 日～9 月 10 日の 130 日間に行われた日単位の流量と昇順方式により算定した計算流量の比較し、その結果を図 4-10, 11, 12 に示した。計算流量の減水深は地区で実測した減水深 12.6mm/d を使用し、日雨量を考慮している。この場合、同じ日の降雨はその日のうちに流出すると考えて、日単位で流量を推定した場合と、仮に降雨が 4-5 日間は水田に貯留されるものとして、0.4, 0.3, 0.2, 0.1 のウェイトをつけて流出量を移動平均した場合をそれぞれ示した。両者には顕著な差は見られないが後者のほうがやや適合性が良いように思われる。

実測流量と計算流量が合わない要因としては、各取水堰での取水量を計算流量では面積で均等割りしているが、実際の取水量と違う点、すべての用水量を取水すると仮定しているため水路管理維持流量などの常時流量を加味していない点、中干し時や降水時等が要因で取水を行わない水田の影響がある点などが考えられる。

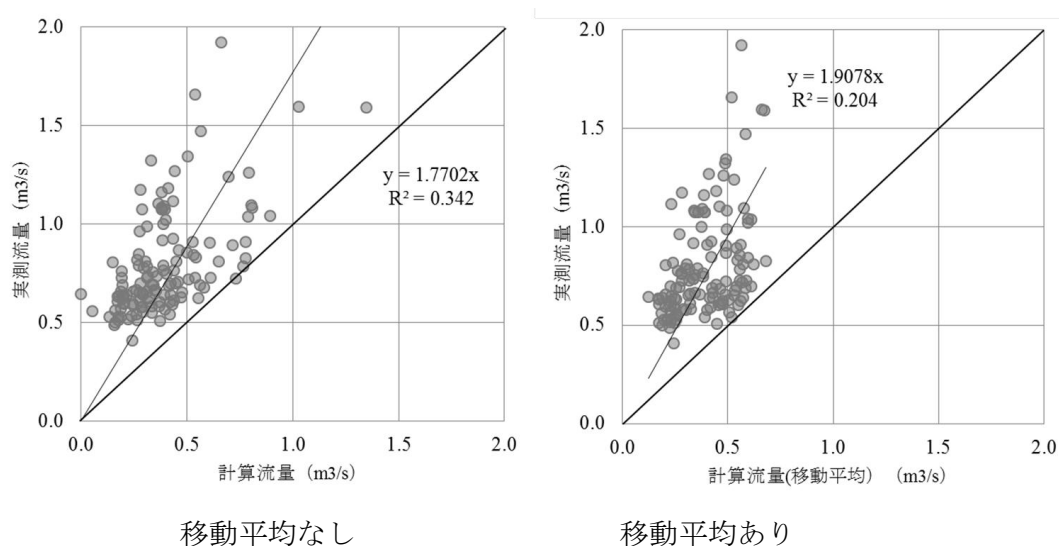


図 4-10 2-2 号線 実測流量と計算流量の日流量比較

Comparison of the observed and the calculated by daily (2-2canal)

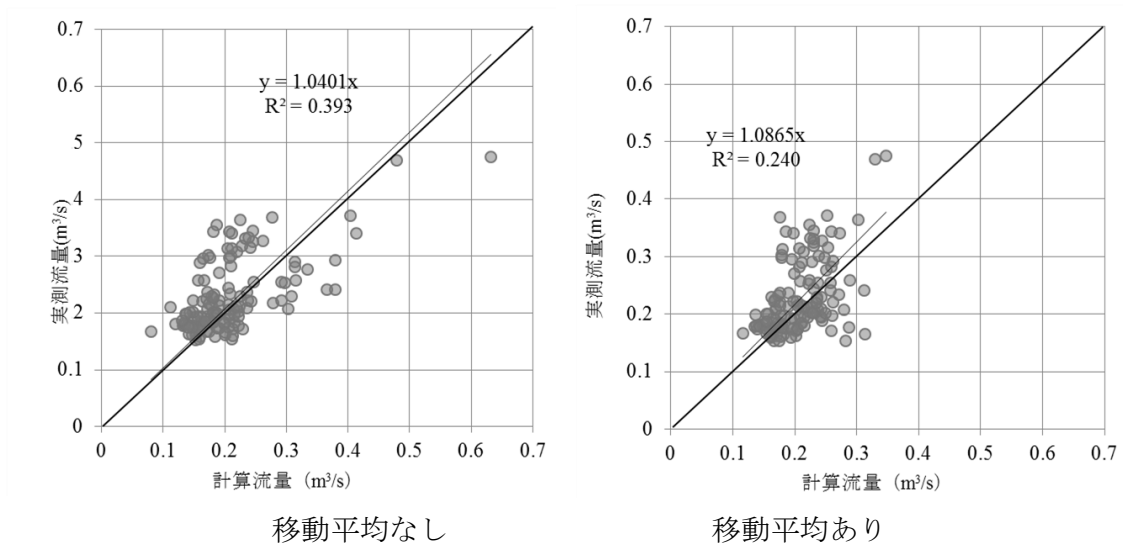


図 4-11 4-2 号線 実測流量と計算流量の日流量比較
Comparison of the observed and the calculated by daily (4-2canal)

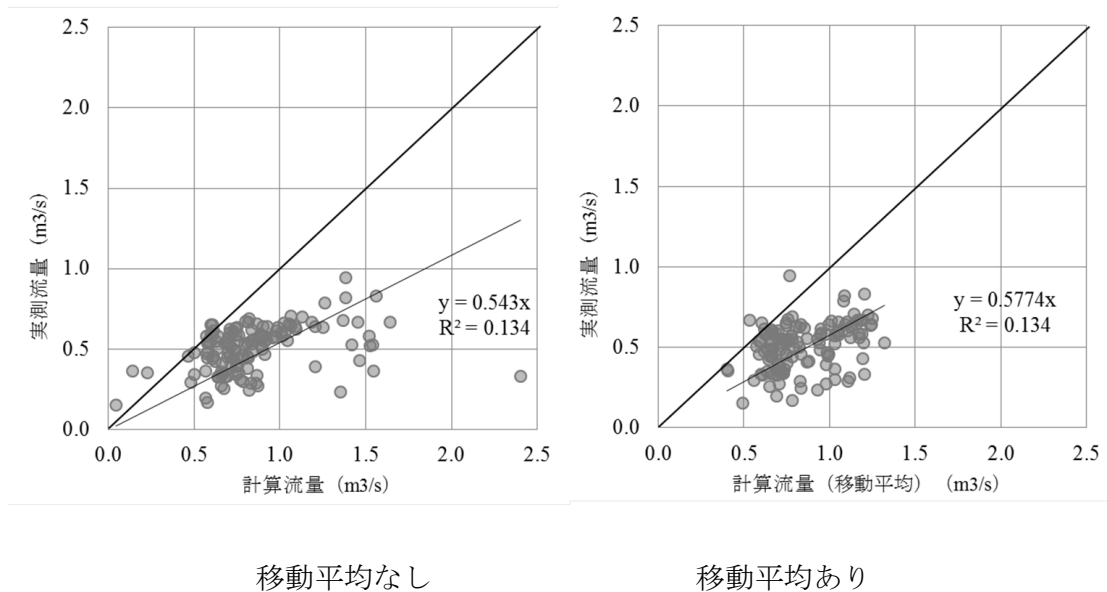


図 4-12 4-5 号線 実測流量と計算流量の日流量比較
Comparison of the observed and the calculated by daily (4-5canal)

4.4.3 中干し前までの日雨量比較

さらに、前述の3路線において、比較の期間を水田用水利用に偏りの少ない代掻き期後から中干し前までの期間である5月4日～6月10日の38日間の日単位の流量と昇順方式により算定した計算流量の比較し、その結果を図4-13、14、15に示した。中干し前においては、全地区において相関が良くなった。中干し前までは、積極的に水田に水を取り入れるため、用水の反復利用や幹線間での移動が活発となり、計算条件に近い状態となることが要因でないかと思われる。

また、実測流量と計算流量の関係を回帰分析した。その結果を図4-13、14、15に示した。3路線において、切片が実測流量側にプラスに現れた。この原因は、実測流量には手取川からの取水と降水以外に都市部から排出される生活用水などが影響していると考えられる。この3路線の中では一番手取川に近く都市部を通らない4-2号線の切片が一番小さくなり、野々市市の都市化の激しい地域の2-2号線と水位計の直上流部に大きな団地のある4-5号線では切片が大きくなったと考えられる。都市部での反復利用の解明には、農業用水以外の地域特性についても考慮する必要がある。

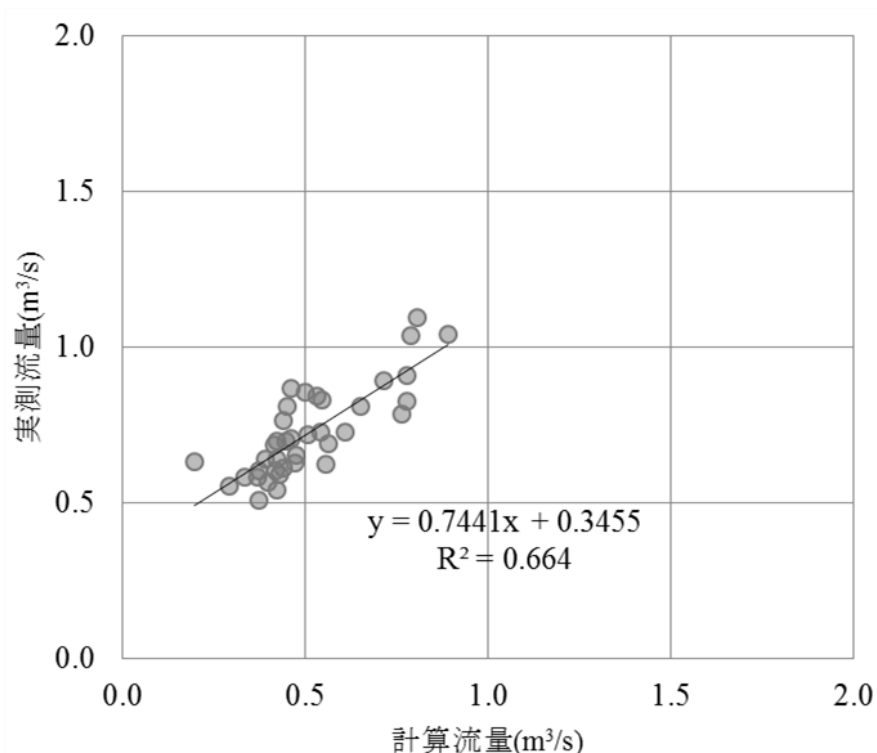


図 4-13 2-2 号線 実測流量と計算流量の日流量比較（中干し前）

Comparison of the observed and the calculated by daily (2-2canal)

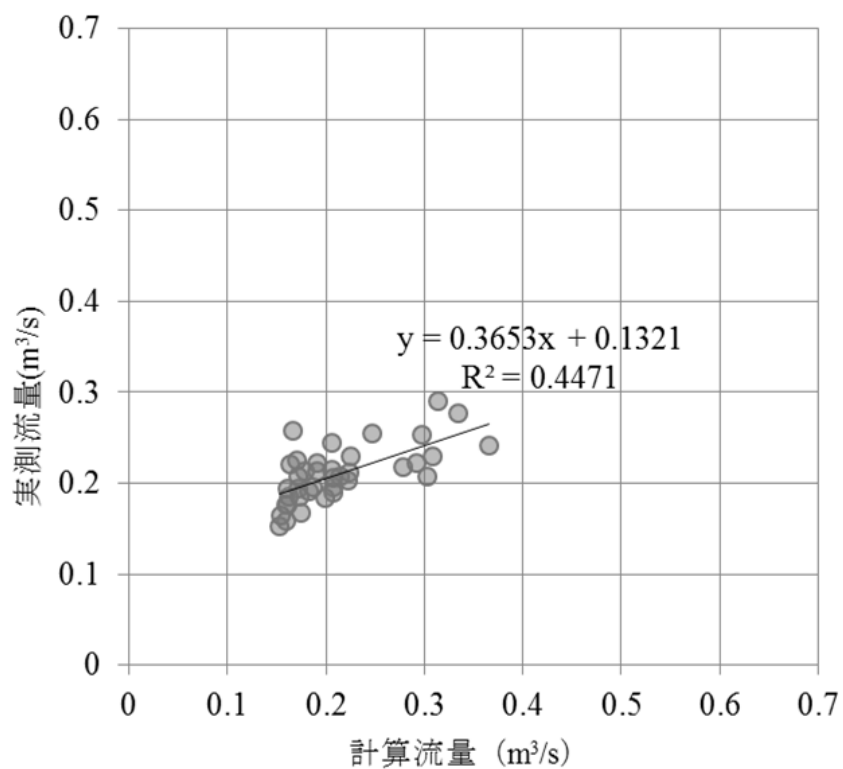


図 4-14 4-2 号線 実測流量と計算流量の日流量比較 (中干し前)
Comparison of the observed and the calculated by daily (4-2canal)

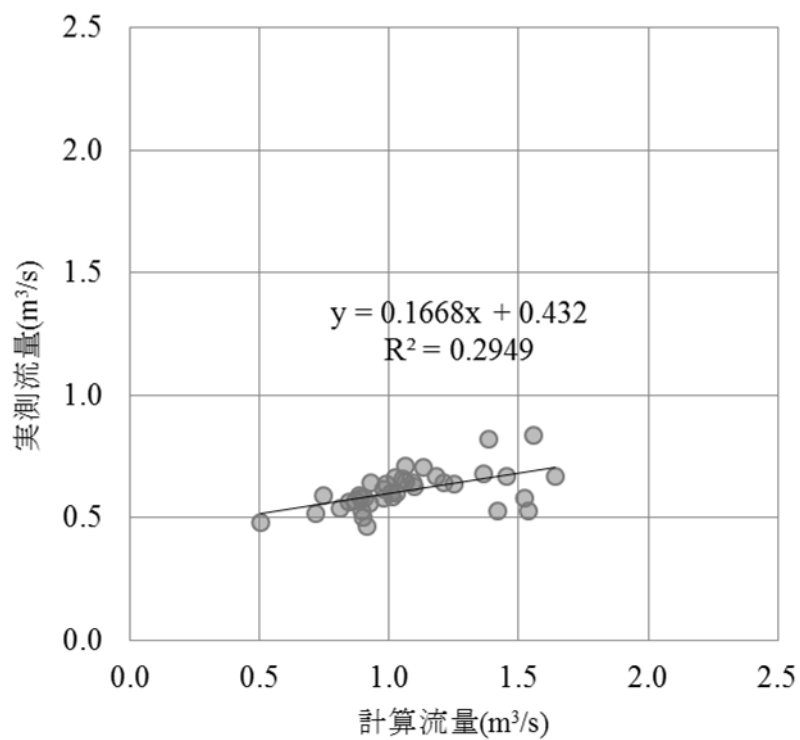


図 4-15 4-5 号線 実測流量と計算流量の日流量比較 (中干し前)
Comparison of the observed and the calculated by daily (4-5canal)

4.5 本章のまとめ

本研究では、実測された流量と昇順方式によって算定された流量を比較し、水田の取水実態を水田用水の反復利用の視点から検討を行った。概ね、実測流量と計算流量には大きな差異は見られなかったが、両者の間に正の相関関係はみられなかった。その原因として、都市化に伴って水田面積が減少したにもかかわらず、取水量が変更されていないこと、逆に都市域の排水が農業排水路に流入していることなどが関係しているのではないかと推定された。また、各水路の用水配分を水路幅で決定している箇所が多いが、水路幅は戦後間もないころの農地面積を基準にして配分された水利権量により決定されたもので、その後、分水の基準となる水路幅の変更がないため、現在の農地面積との間に違いがあり、実利用水量との差異が生じていることが考えられた。しかし、中干し前の用水利用状況が安定している期間には、実測流量と計算流量の間に相関関係が確認でき、昇順方式によって反復利用状況の一部を解明できた。今回得られた分析結果から、実際の用水配分実態は、用水の反復利用のほかに上述のように、さまざまな要因が関与していると理解すべきと結論づけられる。

引用文献

国土交通省 土地・水資源局水資源部(2009)：日本の水資源・総合水資源管理の推進。
村島和男，丸山利輔，吉田匡（2012）：農業用水利用実態と変化予測，農業用水を核とした健全な水循環，石川県立大学出版会，87～91。
中村公人，岩崎有美，堀野治彦，尾崎正志（2012）：手取川扇状地の地下水流動の変遷，農業用水を核とした健全な水循環，石川県立大学出版会，145～151。

第5章 元入れ取水量から見た水田有効雨量（取水制限量）の分析

5.1 研究の目的

水田灌漑用水の特徴は、自然の降水をできるだけ活用して、不足する水を灌漑によって補おうとする考え方に基づいている。これは生活用水や工業用水と大きく異なる点である。水田有効雨量は田面有効雨量と元入れ有効雨量に大別される。田面有効雨量は末端水田に貯留されて、灌漑水と全く同様に利用される降雨であり、元入れ有効雨量は降雨時に取水口あるいは頭首工地点での取水（送水）量を制限し、田面に貯留容量を与えて、灌漑水と同様に利用される降雨である。水源計画の立場から考えると後者の元入れ有効雨量が大切と考える。

水田灌漑水の有効雨量について土地改良事業計画設計基準（農林水産省，1993）では、「有効雨量は降水量上・下限値をもうけ、その降水量に一定比率（有効化率）を乗じて算出する。用水計画においては、5mm/day 以上から、上限 80mm/day の降雨を対象とし、80%を有効雨量として算出するのが一般的である」としている。丸山ら（1980）は田面有効雨量について実際の水田湛水状況を考慮し、降雨を模擬発生させて検討している。しかし、田面有効雨量について本格的な研究は少ない。また、元入れ有効雨量（以下、有効雨量）は灌漑水源計画上大切な項目であるにも拘わらず本格的な研究は殆ど見られない。

本研究は、上記の状況を踏まえて、北陸地方、石川県手取川扇状地に展開されている七ヶ用水地区の元入れ有効雨量を分析した結果について報告する。なお、本地区の白山頭首工地点で取水されない水量は、日本海に流入し、再利用の機会を持たないが、本地区では水利権の総量規制、期別規制が行われており、元入れ取水量を出来るだけ節約し、降雨を有効に利用とする努力がなされている。このことは、手取川本流の水量確保につながり、河川環境の改善に貢献していることは指摘するまでもない。

また、元入れ地点での取水制限は、地区内の洪水被害を軽減するが、取水制限の副次的役割にすぎない。

5.2 研究の方法

5.2.1 降水の状況

この地域の年間平均降水量（1981～2000）は、近傍の金沢地方気象台で灌漑期 1,100mm，非灌漑期 1,300mm，年間 2,400mm 余りで，降水日数も年平均約 200 日を数え，春夏に比べ，冬期間に降水・降雪量の多い日本海側気候である．積雪が多いため，融雪水を春先の灌漑用水として利用している．

5.2.2 有効雨量の算定方法

七ヶ用水土地改良区では，長年にわたり（1975～2011），白山頭首工からの取水量（元入れ取水量）を正確に測定・記録している．測定方法は，幹線水路（図 5-1）に自記記録計を設置し，水位記録から取水量を算定したものである．その記録によれば，降雨の有効利用と下流の洪水被害防止のため，取水量は厳格に管理されている様子が伺える（図 5-2）．本地区では白山頭首工地点の河川流量が安定していることから，水田地域の要請通りの取水が可能である．

このため，無降水時の取水はほぼ一定で，降水時用水の節約が可能なとき，あるいは下流部に洪水被害の発生するおそれのあるときのみ，取水制限を行う．この量を本研究では有効雨量と定義し研究の対象とする．

以下，この有効雨量の算定方法を具体的に図 5-2 に基づいて説明する．本地区では，前述のように，比較的安定した取水を行っており，降雨の取水制限量は明確に算定することが可能である．ただし，降雨が連続して 2 日以上に及ぶ場合 2 日以上連続して取水制限する場合もある．このため，日単位の分析に加え，2 日単位，3 日単位の分析も併せておこなった．具体的な分析は以下の手順によった．

- ①日降水量が 5mm 以下の場合は対象から除外する．
- ②日降水量が 5mm 以上あり，取水量調整を行った日を対象とする．
- ③降水日を除く前 2 日，後 2 日間の平均を調整前基準取水量とする．
- ④基準取水量から取水量（午前 9 時測定）を差引いた水量（減水量）を有効雨量と定義する．
- ⑤降水量に合わせるため，減水量を水利権上の農地面積（6,576ha）で割り，mm 単位に換算する．

図5-2に2011年の事例を示す. この年には17ケースの有効雨量が見られた. なお, 降雨があっても取水調整を行っていない日は除外している.

以上の方法で37年間の資料を整理した結果, 中干し前(5月4日~6月10日, 38日間)91ケース, 中干し後(6月11日~9月10日, 92日間)380ケース, 合計471ケースの資料が得られ, この資料を検討対象とした.

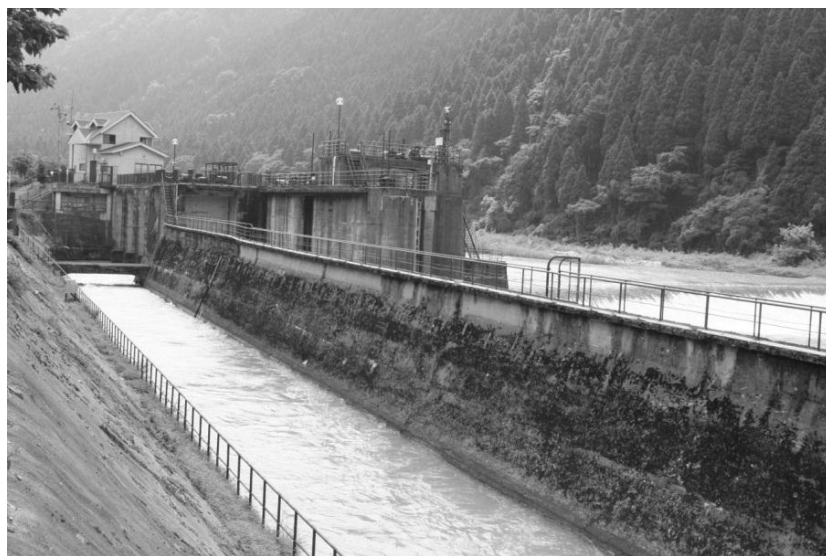


図 5-1 白山頭首工取水状況写真

Photo of Water intake availability in Hakusan headworks

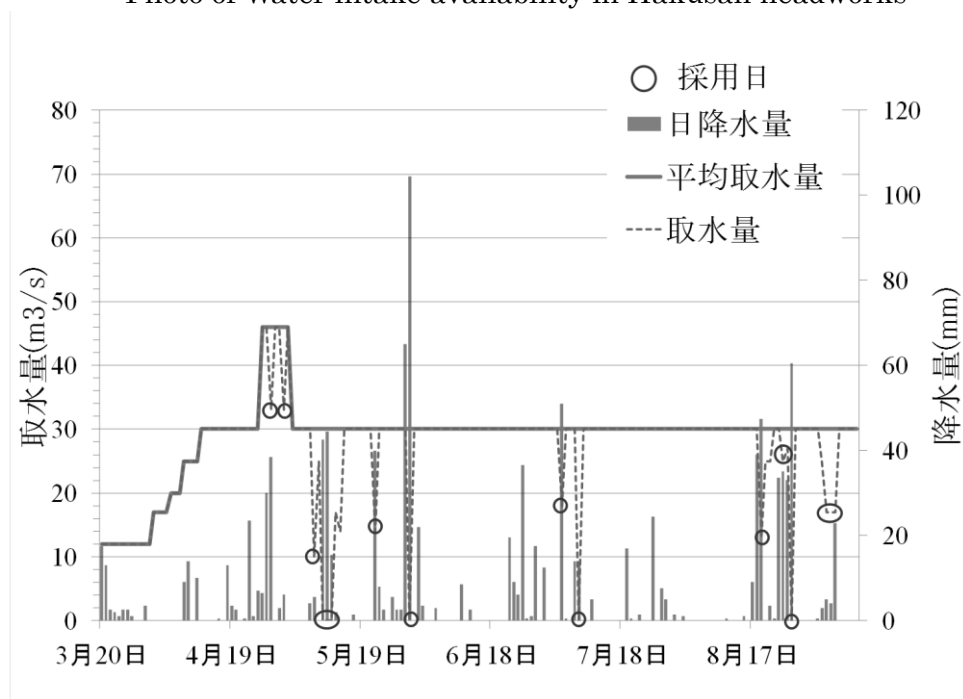


図 5-2 基準取水量と実測取水量及び降水量の比較 (2011)

Comparison of precipitation and observed intake water and amount of water right

5.3 結果と考察

5.3.1 年降水量と年有効雨量の経年変化

調査期間 37 年間の降水量と有効雨量の変化を整理し、図 5-3 に示した。ここに年降水量とは灌漑期間の降水量の合計を指し、年有効雨量とは灌漑期間の有効雨量の合計を示す。有効降雨率とは、この年有効雨量に対する年降水量の比率を示す。この図から明らかなように、降水量、有効雨量共に経年的に変化し、有効降雨率も 5～55% の間で大きく変化している。この有効降雨率の平均は 33.2%、標準偏差は 11% であり、その年の降水状況、降水時期などによって大きく変動しており、降雨を有効化するように取水量を調整している様子が見えてくる。

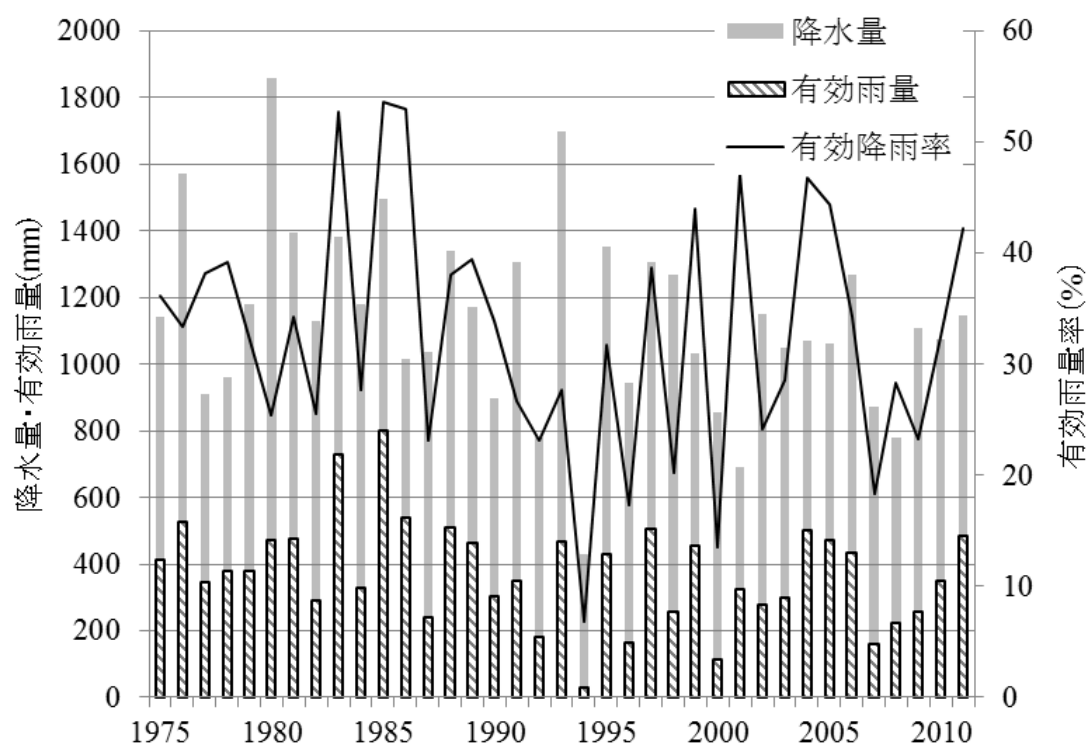


図 5-3 降水量と有効雨量の経年変化
Secular changes of effective rainfall and precipitation

5.3.2 年降水量と年有効雨量の関係

図 5-3 と同様の資料を用いて年降水量と年有効雨量の関係を調べ図 5-4 に示した。この図から明らかなように降水量 X が大きくなると有効雨量 Y も大きくなり、両者の関係は、両者は密接な関係を持つことが分かった。

$$Y = 1.19X + 683 \quad R^2 = 0.456 \quad (P < 0.05) \quad (5-1)$$

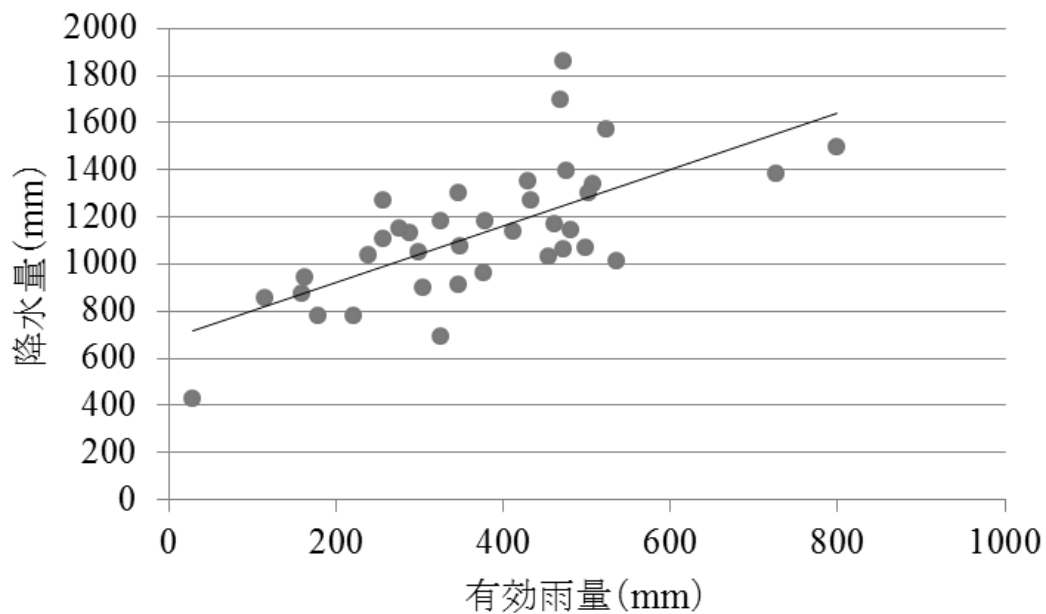


図 5-4 降水量と有効雨量の比較
Comparison of effective rainfall and precipitation

5.3.3 年有効雨量と有効降雨率の関係

図 5-3 と同様の資料を用いて年有効雨量 X と有効降雨率 Y の関係を調べ図 5-5 に示した。この図から明らかなように、有効雨量が多くなると有効降雨率も大きくなり両者の関係は次のように表された。

$$Y = 0.059X + 10.2 \quad R^2 = 0.717 \quad (P < 0.05) \quad (5-2)$$

田面有効雨量は、降雨が少ない場合、有効雨量率が一般的に高くなるため、図 5-5 ように、両者が高い正の相関を持つことは、筆者らの想定しないことであった。この理由は、降水量の少ない時は有効雨量も少ないことから降水量の少ない時には取水堰の操作をせず、有効雨量が発生しないことによると推定した。

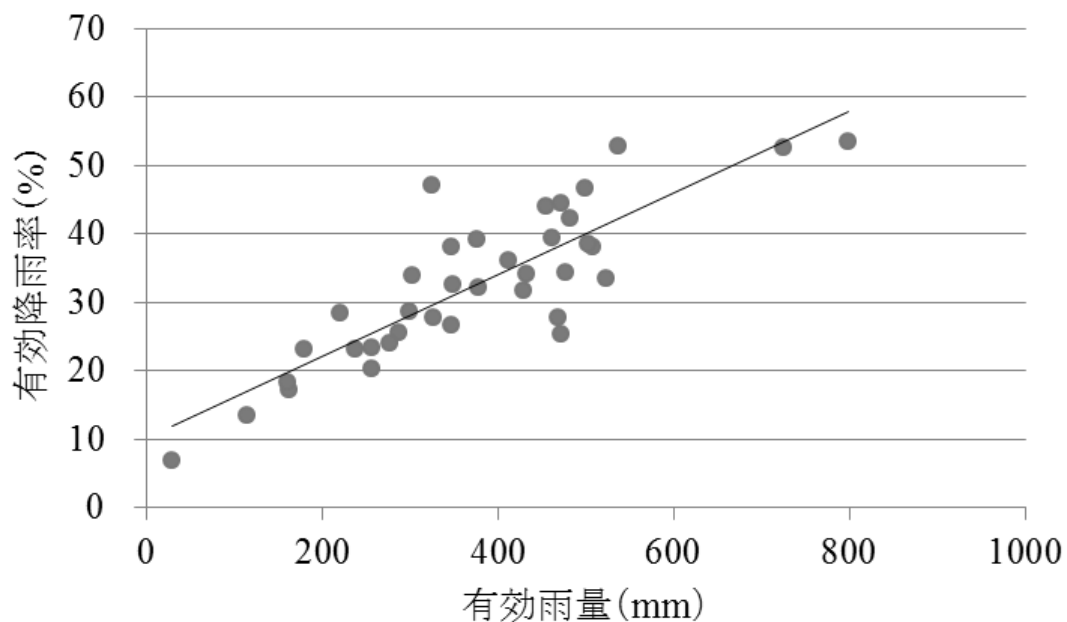


図 5-5 有効雨量と有効降雨率の比較
Comparison of effective rainfall and effective rainfall rate

5.3.4 必要取水量に対する有効雨量の経年変化

次に、灌漑期間の必要水量（取水予定量，ほぼ水利権水量に等しい）に対する当該年間の有効雨量の合計に注目して，その経年変化を整理した．

この必要取水量に対する有効雨量の経年変化を示すと図 5-6 のようになり，取水量は 7,476mm と一定である．有効雨量は平均 375.7mm,標準偏差 157.6mm と年によって大きく変化した．有効雨量の割合は平均 5.0%，標準偏差 2.0%と変動が大きかった．このように，全体の必要水量に対する有効雨量の割合が小さいのは，この地域の必要水量が，水田に対して年間 7,476mm と非常に大きいこと，すなわち，水田に供給される降水量よりも，上流から供給される河川に依存する割合が高いことによると推定される．

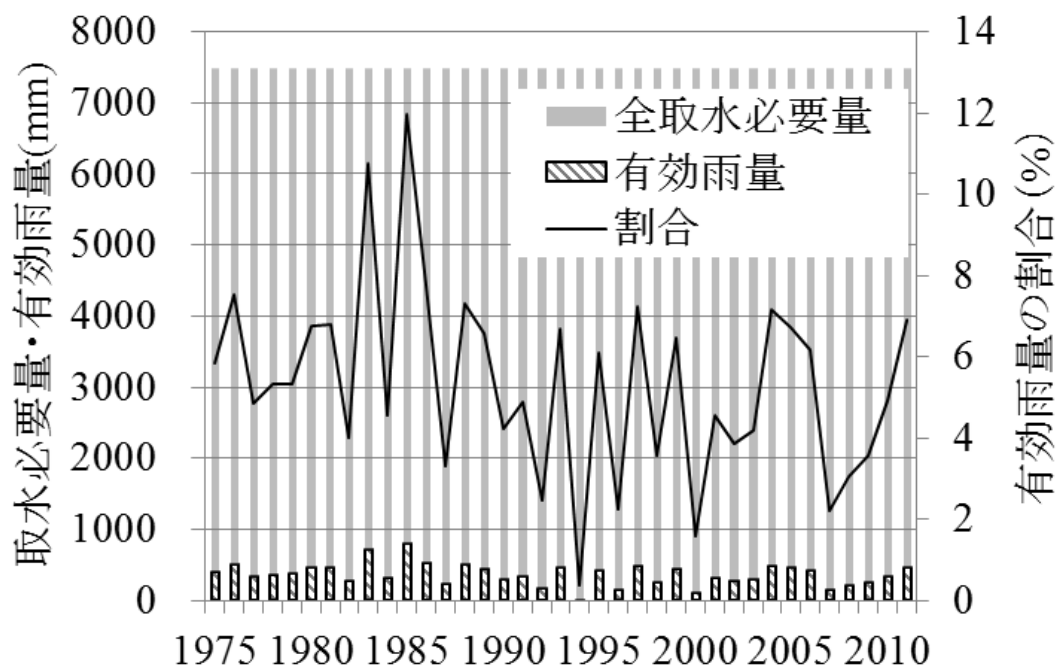
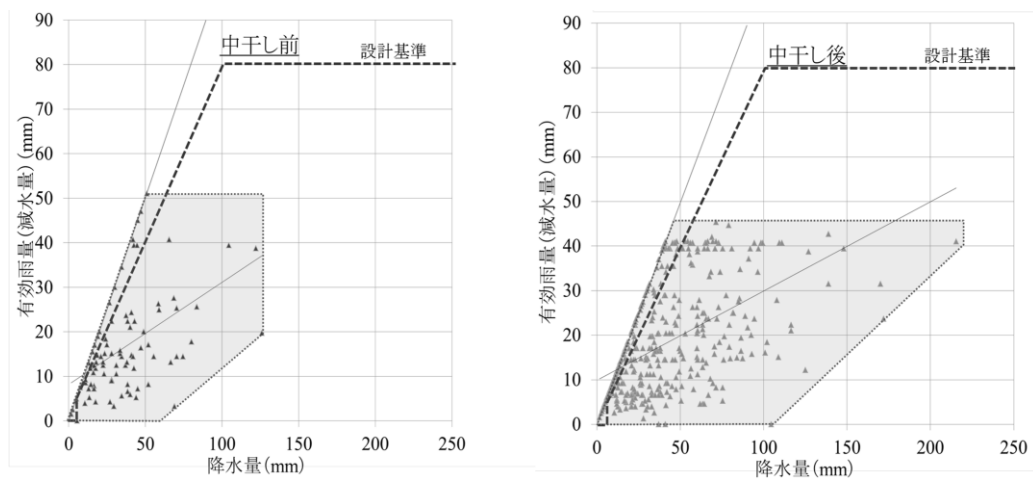


図 5-6 取水必要量に対する有効雨量の割合
Percentage of effective rainfall for water intake requirement

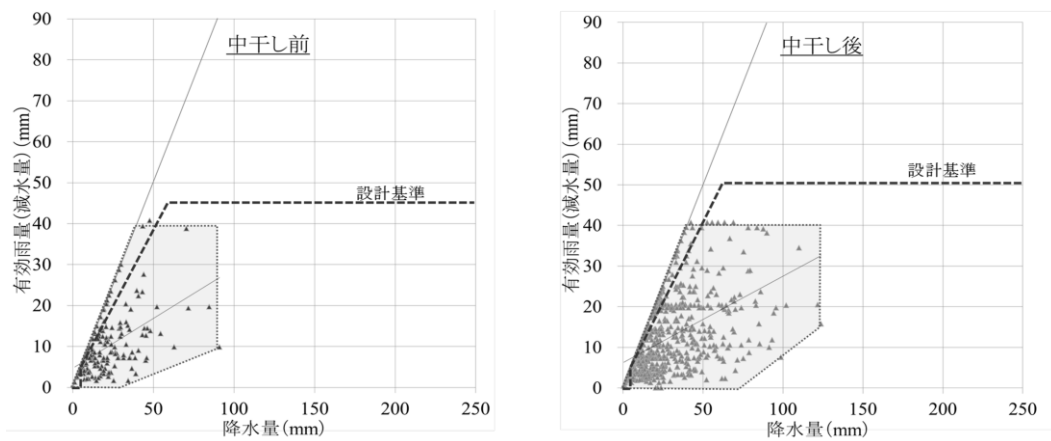
5.3.5 有効雨量と降水量の関係

有効雨量と降水量の関係を直接比較した。この場合日単位の比較を基本としたが、降雨が連続して、2日以上にわたるとき、あるいは、田面に十分な貯留容量があり、2日以上にわたって取水を停止したときを想定して、2日間の移動平均、3日間の移動平均の場合の降水量と有効雨量の資料についても同様に比較した。その結果を中干し前と中干し後に分けて図 5-7 (a), (b), (c) に示した。これらの図から明らかなように、降水量 0mm から約 40mm (取水量の上限) までは降水量を上限として有効雨量が発生し、それ以上の降水量の場合でも 40mm 程度と一定となることが示された。2日間の移動平均資料についても3日間の移動平均資料についてもこの傾向は同じであった。ただし、移動平均時間が長くなるにつれ、有効雨量と降水量関係の資料の分布範囲が縮小され、資料が原点の近くに集まり、平均化の効果が示された。

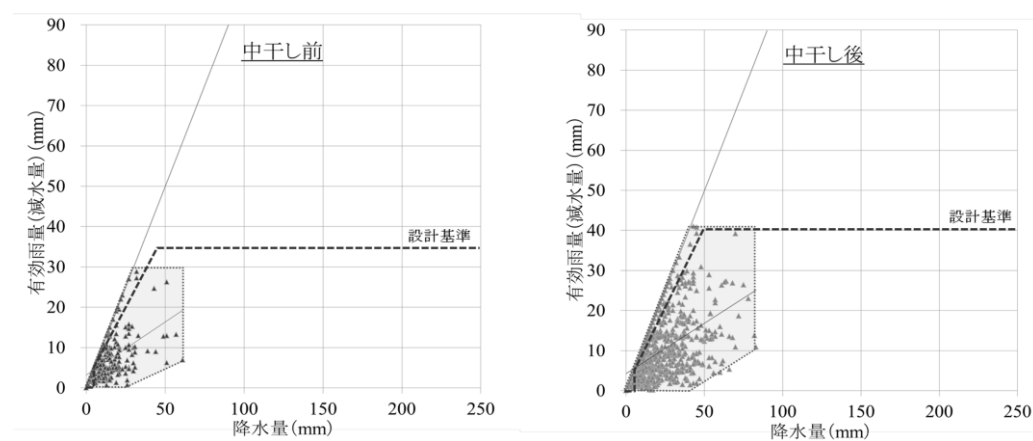
しかし、両者の間にはいずれの時期においても明確な関係性は見られない。このことは、有効雨量は降水量とは直接関係なく、その時の条件によって大きく異なること、有効雨量と降水量との対応は一義的に決定出来ないことを示している。ただし、2日



(a) 1 日単位



(b) 2 日移動平均



(c) 3 日移動平均

図 5-7 有効雨量と降水量の比較

Comparison of rainfall and effective rainfall

間の移動平均あるいは3日間の移動平均資料は日平均で示してあるために、一連の降水については、2日移動平均の場合は、降水、有効雨量ともにこの2倍、3日移動平均の場合は、この3倍の降水あるいは有効雨量であることに注意して図5-7を見る必要がある。

なお、2日間の移動平均の資料数は、取水制限が1日の場合は日単位の資料数の2倍、2日連続の場合は1.5倍、3日連続の場合は1.3倍となっている。同様に3日間の移動平均資料数は、取水制限が1日の場合は日単位の資料数の3倍、2日連続の場合は2倍、3日連続の場合は約1.7倍となっている。

5.3.6 有効雨量と計画設計基準との関係

計画設計基準では最初に示したように、用水計画においては、「5mm/day 以上から、上限 80mm/day の降雨を対象とし、80%を有効雨量として算出するのが一般的である」としている。さらに、農業土木ハンドブック（農業土木学会，1989）では2日連続雨量の場合には、2日以降は減水深を差し引いた量が田面有効雨量の上限であるとしている。本地区の減水深は実測によると中干し前は 13mm/day，中干し後は 21mm/day（村島，2012）であるので、この点を考慮して日降水の場合は、上限 80mm，2日移動平均の場合は中干し前上限 46.5mm，中干し後上限 50.5mm，3日移動平均の場合は中干し前上限 35.3mm，中干し後上限 40.6mm とし、図5-7にこの値を挿入した。このように考えると、図から明らかなように、日単位の場合上限は計画設計基準の値が過大、2日及び3日移動平均の場合は両者がほぼ同等となった。ただし、この考察は、計画設計基準が適正であるか否かを問題とすることではなく、計画設計基準の方法で算定すれば本地区の場合は、およそ2日間の平均を想定したものと同等になっていることを示した過ぎない。

5.3.7 回帰分析による降水と有効雨量の分析

図5-7に示す降水と有効雨量関係を回帰分析した。このように分散した測定値を回帰分析することには大きな意義は見いだせないが、平均的な値を示す意味で分析した。その結果、両者の間には次のような関係が得られた。ただし、有効雨量 Y と降水量 X の間に次のような関係があるものとし、係数 A と B について整理した。

$$Y=AX+B$$

表 5-1 降水量と有効雨量との回帰分析式

Regression analysis of precipitation and effective rainfall

移動 平均	中干し前			中干し後		
	傾き	切片	決定 係数	傾き	切片	決定 係数
	A	B	R ²	A	B	R ²
1 日 単位	0.229	8.17	0.246 p<0.05	0.200	9.90	0.270 p<0.05
2 日 移動 平均	0.244	4.66	0.262 P<0.05	0.213	6.24	0.254 p<0.05
3 日 移動 平均	0.263	3.20	0.277 P<0.05	0.251	4.25	0.285 p<0.05

この表から明らかなように、降水量にかかる係数 A は 0.20－0.26 の値を示し、中干し前、後ともに平均期間が長くなるほど大きくなり、定数は 3.2－9.91 の値を示し、平均期間が長くなるほど小さくなることが示された。

5.3.8 降水量と無効雨量の比較

次に、発想を変えて、降水量と無効雨量との関係を調べた。無効雨量は降水量から有効雨量を差し引いて求めた。この結果を図 5-8 に示した。この図から、降水量と無効雨量との間には明瞭な関係があることが分かった。この両者の関係を回帰分析し次の経験式を得た。

$$Rne = 0.771R - 8.17 \quad R^2 = 0.787 \quad (P < 0.05) \text{ 中干し前} \quad (5-3)$$

$$Rne = 0.800R - 9.90 \quad R^2 = 0.854 \quad (P < 0.05) \text{ 中干し後} \quad (5-4)$$

ここに Rne：無効雨量，R：降水量

中干し前には降雨の内、約 8.2mm 以下は有効雨量となり、それを越える降水量は約 77%が無効雨量になること、中干し後にも同様に降雨の内、約 9.9mm 以下は有効雨量となり、それを越える降水量は約 80%が無効雨量になることを示している。

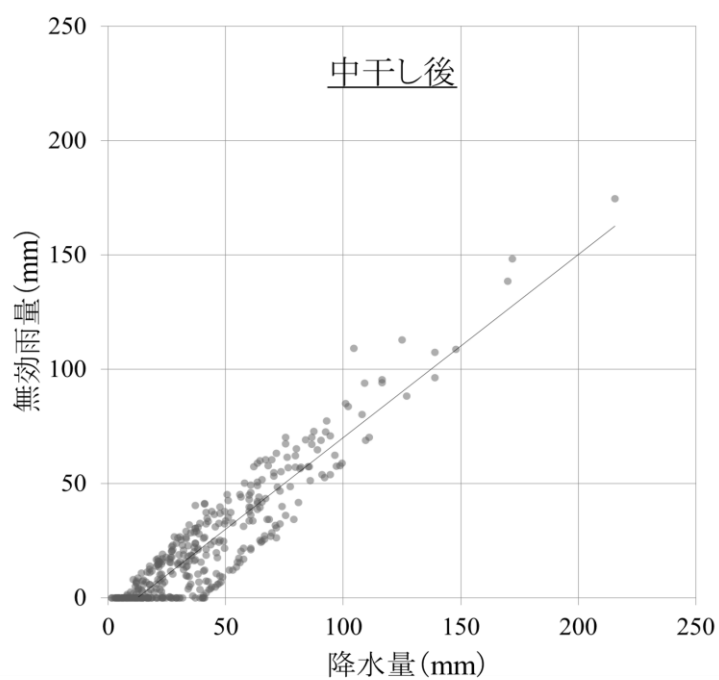
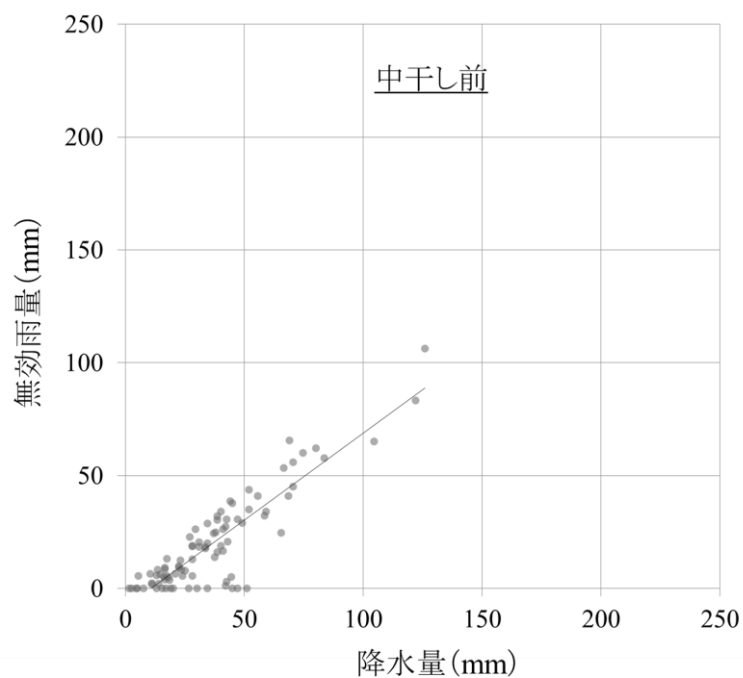


図 5-8 無効雨量と降水量の比較
Comparison of precipitation and rainfall invalid

5.4 本章のまとめ

元入れ取水量の制限量を水田灌漑に対する有効雨量と定義し、北陸地方・手取川に展開する七ヶ用水地区について有効雨量と降水量の関係について研究した。まず、年単位の降水量と有効雨量を基本に分析した。その結果、①年降水量、年有効雨量の変化に伴って、有効降雨率も大きく変動し、平均 33.2%、標準偏差 11%であること、②年降水量と年有効雨量には密接な関係があること、③年有効雨量と有効降雨率にも密接な関係があり、年有効雨量が多くなるほど有効降雨率が大きくなることを見出された。④更に、年間の全必要取水量に対する年有効雨量の割合も平均 5.0%、標準偏差 2.4%になることを明らかにした。

次に、1 日単位の降水量と有効雨量を基本に降水量と有効雨量について分析した。加えて、降雨が連続する場合も考慮し、2 日あるいは 3 日の移動平均をした資料についても併せて検討した。その結果、①降水量—有効雨量の関係は広い範囲に分布し一定の関係を見出すことは出来ないこと、ただし、1 日単位の分析に対して、2 日あるいは 3 日移動平均の資料は、移動平均期間で平均化されるので、原点に近いところに分布し、分布範囲が小さくなることを示した。②土地改良事業計画設計基準に示されている方法と比較した結果、設計基準の方法は、2 日連続雨量に対応した有効雨量に相当することが確かめられた。③更に、平均的な傾向を得る目的で、降水量と有効雨量の間に回帰分析を行った。④最後に、発想を変えて、無効雨量と降水量の関係を分析し、一定以上の降雨は 77%以上が無効雨量となることが統計的に示された。

このように降雨の利用率はその時の取水条件によって大きく異なると思われるので、地域の実態に合わせて調査決定することが適切と考える。また、計画段階では、条件の類似した地区の事例に学ぶことが適切と考える。

また、このような取水堰地点の元入れ取水量の制限は、降雨の有効化を計ると共に、下流地域の湛水被害防止の役割を併せ持っていることは前述した通りである。このことに注意していただきたい。

いずれにしても、本報告のような元入れ取水量から有効雨量を検討する場合には、取水地点の取水容量に大きく左右されることを念頭に置いて考察することが大切であろう。

引用文献

農林水産省構造改善局(1993)：土地改良事業計画設計基準，計画・農業用水（水田），
p.58.

丸山利輔,前川俊清(1980)：水田カンガイにおける田面有効雨量（2）農土論集，85,28
～33.

村島和男（2012）：農業用水を核とした健全な水循環，石川県立大学出版会，p.88.

農業土木学会（1989）：農業土木ハンドブック，改訂五版，135～136.

第 6 章 結論と要約

第 1 章では、近年の水資源状況と農業用水の現状についての概要と反復利用におけるこれまでの研究状況について記載し、本研究の位置付けを明らかにすると共に、続く 2 章から 5 章までに共通する手取川扇状地の概要をまとめて述べた。

第 2 章では、手取川扇状地内に試験地（4-2 号支線）を定め、幹線水路を媒体とした特徴的な反復利用方式に焦点を当て、本地区の還元水の特徴を明らかにした。また、この分析方法を活用することにより様々な水利状況を推定することが可能となり、過去の水源状況や減水深状況などを想定し、用水の過不足状況を分析した結果、何故このように用水の豊富な地域で水田用水の反復利用が行われているのかを考察すると、水源整備・圃場整備以前の慣習を継承している可能性が大きいことが考えられた。また、集落営農などの集団転作による水利用形態の変化によって時間的、場所的に水利用が集中する現在の営農において、多くの取水地点がある本地域の反復利用システムが機能していることがわかった。

第 3 章では、用排水路を仲介とした水田用水の新たな還元水分析方法である昇順方式を提案し、手取セヶ用水全域で適用した結果を述べた。普通期の水利権水量の場合、地区全体の還元水量の割合は、取水量の 59%、このうち反復利用が可能な還元水量は 33%、残りの 26% は直接日本海に流出して反復利用が不可能なことが見出された。また、この状況は、幹線水路によって大きな差があり、山麓部では還元水量が期待できないのに対し、下流部の低地の流域では 100% 以上の還元水量が期待できることが推定された。今後は、集団転作などの導入に伴って、どのような状況になるかを具体的に表現し、実際の水利用の分析や計画に役立てたい。また、温暖化に伴う水田水温の研究や、水田内の窒素循環の研究などに活用できうと考える。

第 4 章では、実測された流量と昇順方式によって算定された流量を比較し、水田の取水実態を水田用水の反復利用状況の視点から検討を行った。実測流量と計算流量には大きな差異は見られなかったが、両者の間

に強い相関関係が見られなかった．その原因として，都市化による水田面積の減少に比例して取水量の減少がなされていないことや，都市用水の影響などが考えられた．実際の用水反復利用はさまざまな要因が関与していると考えられる．また，日流量において実測流量と計算流量を比較したところ，代掻き期後から中干し前までの用水量と用水利用量が安定している期間においては，両者に相関関係が確認でき，昇順方式によって用水の反復利用状況を再現することができた．

第5章では，水田用水の有効利用に欠かせない水田有効雨量について，元入れ取水量の制限量を有効雨量と定義し，有効雨量と降水量の関係について検討した．年単位の降水量と有効雨量を分析した結果，年降水量と年有効雨量の変化に伴い有効降雨率も大きく変動し，平均で33%であり，年降水量と年有効雨量には密接な関係があることがわかった．また，年有効雨量と有効降雨率にも密接な関係があり，年有効雨量が多くなるほど有効降雨率が大きくなることを見出された．さらに，年間の必要取水量に対する年有効雨量の割合も平均で5%になることを明らかにした．また，日単位の降水量と有効雨量について分析し，土地改良事業計画設計基準に示されている方法と比較すると設計基準の方法は，2日連続雨量に対応した湯降雨量に相当することが確かめられた．降雨の利用率は取水条件により大きく異なると思われるので，地域の実態に合わせて調査を行うことが適切であると考えられた．

以上のように，本論文では，新しく提案した昇順方式と呼ぶ農業用水反復利用の分析方法について，その妥当性及び有効性について検証した．農業用水の反復利用解析における，一つの方法を提案することができた．今後も本方式の他地域での活用や新しい利用方法について検討していきたい．

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々に御世話になりました．ここに深く感謝の意を表します．

研究活動全般にわたり格別なる御指導と御高配を賜りました石川県立大学丸山利輔参与に甚大なる謝意を表します．私が 3 年間という限られた期間に博士論文をまとめることができたのは，先生の丁寧な指導があったのものであります．先生の研究に常に前向きに取り組む姿勢は，**私の仕事に対する考え方にも影響を与えました．**

貴重な御教示を賜りました石川県立大学高瀬教授には，心より感謝申し上げます．先生には的確な御助言や英語論文の書き方について指導をいただきました．また，ゼミにも誘っていただき，学部生とのゼミ合宿など学生としての貴重な体験をさせていただきました．久々の学生生活を有意義に過ごすことができました．本当にありがとうございました．

石川県立大学青山咸康教授，早瀬吉雄教授，瀧本裕士准教授には，懇切なる御指導をいただきました．本研究は，地球温暖化を前提とした「農業用水を核とした健全な水循環に関する研究」の一環として取り組んだものです．本プロジェクト研究執行のため，石川県農林水産部の水野裕士部長はじめ各位には，石川県の公務として石川県立大学へ派遣していただきました．このような博士号取得の機会を与えていただき，まことにありがとうございました．

このプロジェクト研究に関わった石川県立大学米林甲陽名誉教授，菊沢喜八郎名誉教授，上田哲行教授，皆已幸也准教授，塚口直史講師，大阪府立大学堀野治彦教授，京都大学中村公人准教授，九州大学大槻恭一教授，農村工学研究所増本隆夫上席研究員，皆川裕樹研究員，山形大学奥山武彦教授，石川県農林総合研究センター林業試験場八神徳彦副場長，石川県農林総合研究センター農業試験場北田敬宇副場長など多数の研究者たちのご協力により，プロジェクト研究を無事にとりまとめることができたとともに，多くの研究者の方々と研究を通して知り合えたことが，

大きな財産となりました。また、石川県立大学松野隆一前学長及び熊谷英彦学長には、研究環境に配慮していただきました。誠にありがとうございました。

手取川七ヶ用水土地改良区、宮竹用水土地改良区には、研究を進める上で必須であった貴重な水文資料を提供していただき、誠にありがとうございました。また、**Fortran** のプログラム作成において、石川県立大学稲葉宏和准教授には基礎からご教授いただき大変感謝いたします。

研究生活における事務的な手続きや身近なお世話をしていただきました石川県立大学事務局の皆様のご支援、ご協力、励ましに深く感謝申し上げます。

また、石川県農林水産部能登史和様には、研究の進め方から学生生活にいたるまで、様々な指導、支援をいただき感謝申し上げます。

通常の学生生活のない社会人博士課程では、研究を共に進める数少ない友人たちとの出会いは非常に貴重な財産でした。特に石川県林業試験場の小倉晃主任研究員、九州大学篠原慶規助教には研究に一心に取り組む姿が幾度となく刺激を与えてくれました。

また、研究を進めるにあたり、御支援、御協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申しあげ、謝辞といたします。

本論文を構成する論文

査読付き論文

- (1) 吉田 匡, 丸山利輔, 能登史和, 高瀬恵次, 瀧本裕士 (2012), 手取川扇状地試験地における水田用水地区内還元水の分析, 農業農村工学会論文集, 282, 35-42
- (2) 吉田 匡, 丸山利輔, 高瀬恵次, 能登史和, 瀧本裕士 (2013), 水田用水の昇順方式による新しい還元水分析法の提案と適用, 農業農村工学会論文集, 284, 31-38
- (3) 吉田 匡, 丸山利輔, 高瀬恵次, 瀧本裕士 (2013), 水田用水反復利用の視点からみた取水実態分析, 農業農村工学会誌, 投稿中
- (4) 吉田 匡, 丸山利輔, 高瀬恵次, 瀧本裕士 (2013), 元入れ取水量から見た水田有効雨量の分析, 農業農村工学会誌, 81 (12), 27-32
- (5) Yoshida M, Maruyama T, Takase K, Noto F, Takimoto H (2013) Proposal of new return flow analysis by replacement in order for paddy irrigation water, PAWEES, (accepted)

口頭発表

2012.9.18-20, 農業農村工学会, 吉田 匡, 丸山利輔, 能登史和, 高瀬恵次, 瀧本裕士, 手取川扇状地試験地における水田用水地区内還元水の分析

2012.9.18-20, 農業農村工学会, 吉田 匡, 丸山利輔, 能登史和, 高瀬恵次, 瀧本裕士, 新しい地区内水田還元水分析法の対案と適用

2013.9.3-5, 農業農村工学会, 吉田 匡, 丸山利輔, 高瀬恵次, 瀧本裕士, 元入れ取水量から見た水田有効雨量の分析

2013.11.13, 農業農村工学会京都支部, 吉田 匡, 丸山利輔, 高瀬恵次, 瀧本裕士, 水田用水反復利用の視点からみた取水実態分析

