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

FUNCTIONAL EVALUATION OF IRRIGATION CANAL NETWORK BASED ON HIERARCHICAL CHANNEL ORDER

樽屋啓之¹・藤山 宗²・中田 達³・浪平 篤¹

Hiroyuki TARUYA, So FUJIYAMA, Toru NAKADA and Atsushi NAMIHARA

¹正会員 農(博) 農研機構農村工学研究所 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

²非会員 農(修) 株式会社三祐コンサルティング (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-13-17)

³非会員 農(博) 農研機構農村工学研究所 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

This study proposes a new method for evaluating canal functions based on the concept of networking and then verifies the effectiveness of that method for the purpose of smoothly promoting upgrades to future systems and linkage with river management. To begin, it arranges thinking concerning nodes and links in order to convert a farm irrigation system into a network model based on three basic canal functions, specifically the theories of 1) delivery function, 2) collector function, and 3) connector function. Next, it creates a model of an irrigation canal network based on such thinking and then proposes a method for ranking irrigation channel links by introducing a new irrigation canal order that is based on a layered structure.

Key Words : *Irrigation canal network, hierarchical structure, delivery function, collector function, connector function*

1. 序論

農業における灌漑・排水，すなわち農業水利の技術は，国内の長い伝統と歴史を有している．特に，1899年に耕地整理法（旧法）が制定され，農地の改良事業が最初に制度化されて以降は，近代農業土木，現代に通じる新たな農業水利の歴史が始まった¹⁾．その後は国内の河川管理の発展過程と同調し，ときに競合しながらも，密接な結びつきを維持しながら発展してきた．

国内で進められてきた水利事業は，旧来の小さなシステムを公共的に統合化し，水利用を許可水利権化することを主流としてきたが，末端農家の水利慣行は基本的に継承されてきた．そして国内に広がる広大な農村地帯の水循環を管理し，そこに一定の秩序を与えてきたのは，長い歴史に支えられ継承されてきた農家や水利組合などによる水利慣行であり，それらを束ねる上位組織としての土地改良区や自治体の階層的管理であり，その総体としての農業水利システムの存在であったと考えられる．

階層構造を持つことは，農業水利システムの基本的特性²⁾であり，特に新規の開拓地では，システムの階層が

水路規模別に整然と計画的に配置されるのを見ることができる．一方，長い更新の歴史を経た古いシステムの階層は一般に複雑である．農業水利システムを次世代の資産として継承するためには，このような特性をふまえて機能を評価できる技術体系の整備が求められている．

また，特に東日本大震災を一つの転換点として，大きく動き始めた国土強靱化などのインフラ整備の動きが重要である．農業水利を支える水路は国内の隅々まで張り巡らされており，国土形成の視点からの評価，将来的には，河川インフラとの連結をも視野に入れた公共的な防災機能強化のための技術体系作りが求められている．

そこで，本研究は，農業水利の中で人為的な管理制御下にある用水路のレギュレーションシステムを対象として，階層をふまえたネットワーク構造で定式化することにより，インフラの持つネットワーク機能を評価するための新たな手法を提案する．

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³⁾，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⁴⁾，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⁵⁾などを挙げるができる。いずれの研究もシステムの目的に照らし、システムを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⁶⁾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のために、階層性の考え方を中心に取り込むことが可能である。

そして、特に本研究において強調したいのは、Hortonが提案し、Strahlerが改良した河川位数（stream order）の考え方⁷⁾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。河川位数は農業水利における排水路の機能を説明できるが、用水路の機能を説明できず、説明のできる新たな概念が必要ではないかということが着想のきっかけであった。用水路の位数概念による既往の評価研究が無いことから、本研究により新たなネットワーク機能の評価手法として提案する。

2. 用水路のネットワーク化と階層付け

(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などをnodeで置き換えることなどによって、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。一方、nodeが表すべき実体または機能については、もう少し分析を要する。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であろう。

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⁸⁾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、図-1のように表現することができる。次節以降の議論においては、これら3つのユニットで構成される水路による流れのレギュレーションシステム全体のことを「水路ネットワーク」として取り扱うことにする。

(2) 分配・回収・連結点を持つ水理学的な意味と機能

図-1 水路が有する基本的な機能

図-2 水理学的な機構

図-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）などが該当する。

(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（存在しない場合は制御不能ということである）。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いて、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の特性は図-2のように整理される。地域に残る水利慣行などは基本的にこの性能項目で説明可能と考えられる。

(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するので、(1)で説明した図-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。階層構造を持つことは、用水路ネットワークの持つ基本的特性の一つである。

(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。

図-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代わりに、用水路位数では、図-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。

(6) エネルギー損失に基づく用水路のランク付け

現場では、同一のlink内に多数の小規模な分岐（node）が連続する場合があります、(5)の方法で判断のつかない場合には、本節の方法により用水路位数を判定することにする。

一般に、幹線linkの持つ全エネルギーは、ネットワー

図-3 用水路位数の概念

図-4 エネルギーと階層

ク末端方向に減少するので、エネルギーの低下に着目したランク付けを考える。そこで、(5)の方法とは異なり、流れを上流側から追跡し、流れの分岐点（node）で発生するエネルギー損失を目安とする。分岐後の2本（以上）のlink（本線と支線）の比較により、図-4(a)のように分岐時の損失が相対的に無視できる本線linkでは位数を変化させず、支線のみ1つ上げる。一方、図-4(b)のように両link（本線と支線）が同等な損失を生じる場合は、両者共に位数を1つ上げるルールとする。「相対的に無視できる」などの表現に見られるような、一部の判別基準において残る曖昧な点に関しては、今後事例調査を重ねて解消させたい。

3. 直分問題への適用事例

(1) 用水路の直分とそれに由来する問題

水路の直分（ちょくぶん）とは、図-5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。前章で述べたとおり、幹線～支線を経て末端に至る階層構造が、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。以下この問題を分析する。

(2) 長大幹線水路の直分問題の分析

図-6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。図-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。図-6 (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。

図-7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。図-7 (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

図-5 直分の状況

図-6 適切な水路統合時の用水路位数と評価

図-7 不適切な水路統合時の用水路位数と評価

いる。図-7 (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。

(3) 直分問題の解決方法

図-8は、幹線水路からの直分を解消するための対策と用水路位数との関係を表す。なお、図-8 (a) および図-8 (b) の対策法は、図-7 (b) の問題に対応している。図-8 (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（図-7 (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。図-8 (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」と表記する。

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。

4. 番水問題への適用事例

(1) 番水の概要

番水とは、農家の長年の経験や伝統に基づき、配水順序、流量、送水・断水時間等のルールによって合意形成された水利慣行である。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、精度よく、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。

図-9は、開水路の支線用水路での番水の様子を表している。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（図-9）等様々であり、その規模も圃場・支線・幹線水路レベルで異なる。

(2) 渇水時における長大水路の階層問題と対策

前章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。図-10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、主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、流量の減少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主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。

図-11 (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。

図-8 幹線水路から直分を解消するための対策と用水路位数の関係

図-9 支線水路レベルの番水状況

図-10 長大水路の分水における用水路位数

(3) 番水による水路階層の表示

図-11 (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り、そのことで、いわゆる「水争い」を通じた悲惨な歴史を背負う地域もある。用水路位数は、いずれの対策に対しても淡々と同様の評価を与える。前章での分析とも併せて、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、この種の指標の導入が有効であることがわかる。

5. 今後の展望—河川ネットワークとの連携

(1) 排水路ネットワークの構造

排水路ネットワークの構造もまた、用水路ネットワークと同様に説明することができる。排水路の場合は、図-1の回収システムを中心に組み立てられ、用水路とは逆向きの階層構造を持つ。そして、河川のネットワークもまた、回収システムを主体とする構造を持っている。このことから、排水ネットワークの定式化を通じて、将来的には、農業水利と治水管理、河川生態系との連結関係をネットワーク構造で説明することが期待される。

(2) 強いインフラを作るための取り組み

水路と同じような考え方を基に、将来、河川でも同様のネットワークのモデルが整備され、両者の連携をネットワークで評価することが可能になれば、管轄を越えた新たなインフラ強化の途を模索することが期待される。

(3) あるべき河川の姿との関係

芦田・江頭・中川⁹⁾は、同著書 (pp.264) において「河川環境と治水問題と利水・利用問題は、個別の問題ではなく、流水・流砂という糸を通じて調和融合問題としてつながる」と述べている。一方、前章までの議論は、すべて農業水利の説明原理を基にネットワーク定式化のプロセスと適用事例を説明しただけである。本研究をここで留めてしまえば、単に農業水利内部の機能強化のための評価研究で終わってしまう。今後は、例えば、あるべき河川の姿を想定して、それに水路がどれだけ貢献できるのか、などという問題設定を進める必要がある。そして、将来どのような問題を設定するにせよ、本稿で提示したような、異なるシステム間で共有可能なネットワークの定式化と機能評価手法の整備が不可欠である。

6. 結語

本研究は、既存の農業水利システムを対象として、将来的なシステムの更新、河川管理との連携をスムーズに進めることを目的として、ネットワーク化の考え方に基づく水路機能の新しい評価手法の提案とその有効性の検証をおこなった。結論は以下の通り整理される。

(1) 水路のもつ3つの基本的な機能—1) 分配機能, 2) 回収機能, 3) 連結機能—に基づいて、水路をネットワーク化するための手法を提案した。

(2) 用水路ネットワークの持つ特徴のひとつ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。

(3) 農業水利の現場において、用水路ネットワークの直分問題と、渇水時の番水システムの問題を事例として、

図-11 複線化と番水における用水路位数

用水路位数を用いた解釈と評価の有効性を説明した。

今後は、農業水利内部の問題に留まらず、河川と水路が連携できる新たなネットワーク作りを目的として、治水および他種水利間の複雑な現場問題にも取り組みたい。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、東京海洋大学の渡部大輔博士からは、ネットワークの分析手法について多くのご示唆を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 志村博康：農業水利と国土，東京大学出版会，pp.293-296，1987.
- 2) 岩田敏靖，岡本雅美：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，Vol.2，pp.181-185，2000.
- 3) 戸川達男：血管の分岐の形態とその機能：物性研究 36(1)，pp.A40-A47，1981.
- 4) 佐々木邦博，米林由美子，平岡直樹：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，Vol.40 No.1・2，2004.
- 5) 河端邦彦，山田圭二郎，中村良男：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，No.17，2000.
- 6) 渡部大輔：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)，110，2007.
- 7) Strahler, Arthur, N. : Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography, Bulletin of the Geological Society of America, Vol.63, pp.1117-1142, 1952.
- 8) U. S. Bureau of Reclamation: Canal Systems Automation Manual, A Water Resources Technical Publication, Vol.1, pp.3, 1991.
- 9) 芦田和男，江頭進治，中川一：21世紀の河川学，京都大学学術出版会，pp.261-265，2008.

(2014. 9. 30受付)