

〔農工研技報 214〕  
101～110, 2013〕

## 統合利水管理による渇水リスク低減に向けた 少雨空間分布特性の評価事例

堀川直紀\* 吉田武郎\* 皆川裕樹\* 工藤亮治\* 増本隆夫\*

\* 水利工学研究領域水文水利担当

キーワード：水資源管理, 渇水, 水田灌漑, 分布関数

### I 緒言

これまで、わが国では多くの農業水利施設が整備されてきた。農業水利施設の用水計画においては、それぞれの灌漑地区で計画基準年を設けてその水需要を満たすように農業水利施設が整備されている。しかし、農業水利施設の供用後に社会的状況や自然的状況の変化により、用水計画で想定されていない水需給が生じることがある。例えば、気候変動は今後水需要と供給に大きな影響を与えたと考えられる。

一方で、これまでは水需給の変化に対して安定した用水を供給するために水資源開発や個々の灌漑地区の水管理改善が対策として行われてきた。しかし、新たな水資源開発は次第に困難になっている。このため、効率的な利水を目的として流域において複数灌漑地区の農業水利施設および水利権を統合的に運用することは水需給の変化への今後検討すべき対策手法である。流域内の農業水利施設を統合的に運用することにより流域全体において安定供給水量を増加させ、また渇水リスクを減少させることができる。

効率的な水利用を目的とする統合的な利水管理は今まで多くの検討が行われてきたが、農業水利施設においては渇水時を除き実用化された例は少ない。水源の使用法や利水の優先順位などの河川管理において課せられる制約がこの主要な原因であるが、統合的な利水管理による渇水リスクの低減効果が示されてこなかったことも、この原因の一つであると考えられる。この渇水リスク低減効果のうち利水者間に共通して発現する効果は、少雨が空間的にばらついて発生することによって生じる。このため、少雨の空間分布特性を明らかにすることは統合的な利水管理を推進することに資すると考えられる。

本報告では、統合的な利水管理の実態を整理し、これによる渇水リスクの低減の指標となる少雨の空間分布特性の評価法を提案するとともにそれを関東地方への適用を試みる。

### II 統合利水管理

#### 1 統合利水管理とは

一つの流域にある複数の貯水池（ダム・ため池）には、それぞれ受益となる利水地域が特定されており、その利水のためだけに用水を供給する。空間的にばらつく降水等の影響を受け、それぞれの貯水池における水需給は一つの流域においても異なる。その結果、貯水池間で貯水量にばらつきが生じる。ある貯水池で無効放流している一方他の貯水池では大きな空き容量を持つ場合やある貯水池で貯水量が0になり利水放流ができない一方他の貯水池では確保水量以上の貯水を維持している場合がある。複数の貯水池等の水源を利水者間で、ある範囲内で相互に利用しあう統合的な運用は、この水源における不均衡を是正して無効放流の減少等により総量としての用水供給機能を高めることができる。

また、一つの流域にある複数の灌漑用水利用等の利水はそれぞれの利水で用水を供給する水源手当が行われている。利水間で必ずしも同時には水需要は最大にならないため、渇水が生じた場合においても流域の利水の一部には需要量が想定した需要量、すなわち用水供給量に達していないことがある。この時には、利水間の水融通という形態の統合的な利水管理によって全体の渇水による被害を低減させることができる。

水資源施設計画段階およびその運用段階において、供給側および需要側で水利用の効率を高めて全体の渇水の被害を減少させる枠組みを本報告では統合利水管理と呼ぶこととする。なお、複数の利水施設を一括して管理することは財政面や技術面等の総合的な観点からも効果を認められるところであるが、本報告では検討の対象を効率的な水利用量に限る。

#### 2 統合利水管理の実態

##### a 計画段階および運用段階（平常時）

ダム等の供給や灌漑地区等の需要を統合して管理することにより水資源の効率を高める利水管理は、水資源開発施設の計画段階や平常時の運用段階において、これまでいろいろな形態で行われている。

国土交通省所管の貯水池および水資源開発機構所管の多目的ダムでは「ダム統合管理事業」が行われている。これは、同一の流域内で複数のダムが運用されている場合に、これらのダム群の貯留水を総合的に管理し、最も効果的な用水の補給を行う管理である。ダム群の統合管理としては高水管理と低水管理が行われている。それぞれ、洪水調節容量、利水容量の範囲内で運用されている。ダム統合管理事業は利根川流域において1964年に開始され、2011年時点では全国12流域で実施されている。ダム統合管理事業は既存の供給側施設を統合管理できる数少ない事例であるが、ほとんどの場合は高水管理が主である。低水管理において複数のダムをプール運用して利用効率を上げる統合利水管理（ダム間プール方式）が平常時から行われているのは利根川等に限定されており、ほとんどの水系では平常時は利水を統合的に運用しないシリーズ方式が用いられている（河川審議会、1999、国土交通省、2007）。

また、河川管理者が行っている隣接した流域の供給を統合する利水管理としては流況調整河川事業がある。これは、流況の異なる河川を水路で連絡し、河川の流量のうち使用されることなく海へ流出する無効流出を相互融通させて流況の平滑化を行うものである。

制限水位方式を用いる多目的ダムにおいては有効貯水量が治水容量と利水容量の合計より小さくなるが、複数の利水目的が共同して建設するダムにおいても同様の現象が生じる。共同ダムにおいて各目的の基準年が異なる場合や、それが同一年であっても各目的の確保容量の最大値が同一時点で発生しない場合は、共同ダムにおける確保容量はそれぞれの利水目的の確保容量の合計より小さくなる（堀、1978）。利水共同ダムにおける確保容量の圧縮は需要の統合による水資源の有効利用の具合的な事例といえる。利水共同ダムでは従って利水者間で貯水池容量は統合的に利用されているが、平常時は通帳方式と呼ばれる容量を個別に分割して用いるダムも一部に見られる。

利水者のうち上水道は財政基盤や技術基盤の強化という観点から広域化を進めることが重要であるという認識に移行しつつあるが、従来は主として効率的に水需給の均衡を図る目的で広域化を推進してきた（日本水道協会、2008）とされていることから、水道事業は広域化という枠組みで需要側の統合利水管理が行われてきたと考えられる。

一方、複数の農業水利事業地区の利水管理に関しては、広域農業水利施設総合管理事業が1990年に創設された。これは同一水系内の国営土地改良事業により造成された期間水利施設について国が広域的、総合的な管理を行い、安定的な用水供給機能等を確保する事業である。但し、この事業においてはそれぞれの水利施設について水利使用規則等の諸規程に従い、施設の操作を行うこととして

事業概要書、1991）。

この事業に限らず、一般に利水管理は水利使用規則等に従って行うこととされている。単一の灌漑地区が複数のダムやため池等の水源をもっている場合ではその使用方法が定められており、利水者が水を効率的に利用するような柔軟な利水運用は認められていない。また、利水者間で水を使用する優先順位も定められている。利水者間で統合的に水を利用するには、共同ダムの様に水の使用許可を受ける時点でそれを計画しなければならない。

この様に統合利水管理は需要の統合においては運用段階で実施することは困難であり、また、供給の統合においては河川管理者ではない利水者が実施することは一般に認められていない。

#### b 運用段階（渇水時）

上述したように平常時には利水管理は許可を受けた範囲で行わなければならない。但し、河川法53条（渇水時の水利使用の調整）には「異常な渇水により、許可に係る水利使用が困難となり、又は困難となるおそれがある場合においては、水利使用の許可を受けた者（以下この款において「水利使用者」という。）は、相互にその水利使用の調整について必要な協議を行うように努めなければならない」としている。これは、異常な渇水、すなわち水利使用が前提としている10年に1回より少ない頻度で生じる渇水においては、利水者間相互に水利使用の調整を行うことができること、すなわち統合利水管理が実施できることを示している。

平成6年（1994年）渇水においては水融通という形態で統合的な利水管理が行われた。全国で灌漑用水が関係した水融通は187件であり、そのうち灌漑用水間で実施された水融通は27件である（中川、1995）。

但し、建設省が1974年に「渇水対策の推進について」を通達して以降全国で渇水調整協議会を設けられており、それは2003年3月末の時点では一級河川109水系のうち69水系に設置されている（植田、2004）。これらの渇水調整協議会で定められる利水管理は渇水による障害の利水者間での公平負担であることが多く、流域全体で柔軟な利水管理が行われる機会は少ない。また、渇水時には水源のうちダムやため池等の貯水池のほとんどに空き容量が存在しており、この時に統合利水管理を行っても無効放流量の減少、すなわち用水供給可能量の増大には結びつかないことが多い。この様に、渇水時には統合利水管理を実施することは可能であるがその効果は限定的である。

#### c 最近の動向

統合利水管理の現在の状況は上述の通りであるが、これに影響を与える水資源政策及び変化の兆しを見せている。その一方で、灌漑用水をとりまく自然環境および社会環境も変化しており、このため統合利水管理の必要性も変わってきていると考えられる。

まず、水資源政策について見るとその発現形態の一つ

である河川法は1997年に改正された。この改正において、「渇水時における水利使用の特例」が設けられた。これは、「水利使用者は、河川管理者の承認を受けて、異常な渇水により許可に係る水利使用が困難となった他の水利使用者に対して、当該異常な渇水が解消するまでの間に限り、自己が受けた第二十三条及び第二十四条の許可に基づく水利使用の全部又は一部を行わせることができる。（河川法 第53条の2）」としたものである。これは、渇水時には限られるが利水者間の水融通を容易にする規定である。これに基づき、2001年の小貝川における渇水において霞ヶ浦用水から福岡堰用水への水融通（大木ら、2003）等が行われている。

また、ダムにおいてはその治水容量と利水容量が厳格に区別されて運用されてきた。この容量配分を再検討する事業が実施されるようになってきた。その一つが平成2002年度より利根川において実施計画調査が開始されたダム群再編事業である。これは、治水機能が高いダムと利水機能が高いダムの貯水池容量を効率的に再配分することにより、洪水調節効果や河川環境改善効果を高めることを目的としている。また、1997年からは洪水調節に支障を及ぼさない範囲で、洪水調節容量の一部に流水を貯留し、これを適切に放流することにより、ダム下流の河川環境の保全、改善を図るダムの弾力的管理が実施されている（建設省、2000）。これは、施設の統合的な運用ではないが単独運用においても柔軟な運用方法が指向されるようになってきたことを示している。

また、2009年度の水資源白書では、今後の水資源政策は、水を持続的に活用できる社会の実現と健全な水循環系の構築を目指し、直面する課題と将来予想される課題等を包括的・一体的に捉えて水資源を総合的にマネジメントする「総合水資源管理」に取り組む段階になっていると指摘している（国土交通省土地・水資源局水資源部編、2009）。総合水資源管理とは1990年代から世界的な水資源政策の議論の場で用いられているIWRM（Integrated Water Resources Management）の訳語である（堀川、2012）。統合利水管理はこの総合水資源管理の一部に位置づけられる。

次に灌漑用水を含む利水を取りまく自然環境を見ていくと、気候変動等によるトレンドの変化や局地的気象現象の増加が指摘されている。これらにより最近において水需給の変化していることが指摘されており、また、今後変化することが予測されている。例えば、ダム計画時と比較して近年は少雨が多く河川流量が低下し、計画通りの開発水量を安定的に供給することが困難であることが指摘されており、利根川水系と荒川水系の開発水量のシミュレーションから開発水量（供給能力）が計画の84%となっていることが示されている（国土審議会、2007）。

また、灌漑用水を取りまく社会環境も変化している。これには、農地面積の減少、作付時期の変更、多用途米

の栽培による水需要の変化、農家数減少による灌漑用水を管理する土地改良区の運営状況の変化等が挙げられる。これまで蓄積された農業水利施設をどのように効率的に運用していくかが大きな問題になっている。2010年に閣議決定された食料・農業・農村基本計画には、国民に対する食料の安定供給や国内の農業生産の増大等の本基本計画の基本理念の実現に向けて灌漑利水者である土地改良区等の効率的な再編整備につき所要の施策を講じるとしている。上述した水道事業の広域化と同様の動きが灌漑用水においても生じるものと思われる。また、2011年に流域規模の水需要および再編の検討を行うために流域における農業用水の有効利用に関する調査が農林水産省の予算要求事項とされた。

### 3 統合利水管理の推進における課題

これまで見てきたように運用段階においては、渇水時以外では河川管理上統合利水運用の実施は困難である。また、水資源計画段階においては需要の統合運用は可能であるが、供給の統合運用は困難である。流域にある河川管理上議論される供給施設に河道外貯留がある。これについては「取水利用が安定的に継続可能となるような工夫を行い、水利使用の実行の確実性が確保される水利使用である場合において、水系全体における今後の水資源開発の展望、取水管理方法等を総合的に検討の上」許可が与えられることがあるとされている。統合利水運用の実現性を検討するときにおいてもここで示された水利使用の実行の確実性を示す手続きは必要だと考えられる。

次に利水者側における統合利水管理における課題（障害）について検討する。1990年に広域農業水利施設総合管理事業が創設された。この事業の検討時には全国で31流域において複数の国営造成施設が存在することが確認されている（土地改良施設管理問題検討委員会、1988）。しかし、現時点においても事業実施されたのは1流域のみである。すなわち、利水者からは1流域以外からは申請されていない。

この理由を検討するにあたり統合的利水管理の効果について考える。統合利水管理の効果には、補完効果（渇水に対する弾力性の向上）と格差の平滑効果（水資源賦存量の格差の是正）とがある。

降雨には空間的なばらつきがあり、降雨によって生じる水需要量や渇水被害にも空間的なばらつきがある。このため、渇水や渇水被害は空間が広くなるにつれてその極値の面積平均の深刻さ（強度）は減少する傾向がある。これが補完効果である。

一方で、一つの流域にある複数の利水者間には水資源利用上の優劣が一般的には生じている（松井ら、2005）。この格差は、水利権設定における順位によってもたらされる場合のほか、計画と実際の水需給の差異によって生じる場合もある。中澤ら（1979）は貯水池規模決定手法

によって優劣が生じることを指摘している。統合利水管理において水資源利用上の平等が確保される場合においては、この格差が是正される。渇水被害は取水量に対して一般に下に凸の関数となるので、格差が小さくなると流域平均の被害は減少する。これが統合利水管理における格差の平滑効果である。複数の利水者が存在するすべての流域でこの効果があると考えられる。しかし、もともと有利な利水者においては格差の平滑化は安全度の減少もしくは危険度の上昇に結びつく。このため、格差平滑効果が、もともと有利な利水者の統合管理参画への阻害要因となっている。格差の平滑効果が、統合利水管理が実現しない原因の一つとなっていると考えられる。

格差の平滑効果によって不利益を被る可能性のある利水者の反発を避けるためには、それを上回る利益をこれら利水者に提示する必要がある。灌漑用水の統合管理の枠組みにおいては、これまで同一河川における複数の頭首工や堰を統合させる合口が全国で数多く行われてきた。合口によって灌漑用水の利水者の一部はその取水地点の優位性を失うことになる。しかし、貯水池の建設などによる水源手当等の損失を上回る利益により、合口事業は実現されていたと考えられる。

複数の灌漑地区の統合的な運用により、水利的な改善のほか財政的改善や技術的改善も実現されると考えられる。本報告では水利的な改善を示していく。統合利水管理によって参画利水者全体の水利状況の改善は補完効果によって生じる。この効果を明確にすることは関係利水者の参画を促進するだけでなく「水利使用の実行の確実性」を示す上でも重要であると考えられる。補完効果は流域において渇水が一部に生じることによって生じる。志村(1979)は広域利水の有効性を指摘し、その計画のためには近接地域を対象にして、渇水が同時に起こる確率を事前に分析することが望まれると指摘している。このため、統合利水管理を促進するためには流域規模における渇水分布特性を明らかにする必要がある。

### Ⅲ 渇水分布特性

#### 1 既往の研究

渇水の空間分布の検討の多くは、少雨や干害が生じた範囲を対象としている。関根(1976)は、被害地域がはっきりしている36例の干害記録から全国を7つに分けた地方単位で空間的範囲を概観し、干害は「200～300km<sup>2</sup>の範囲内にも起こりうるが、この場合は、たいていの強さはそれほどのもではなく、期間も比較的短い」と指摘している。一方、林ら(1987)は全国57箇所の月雨量を用いて、1894年、1967年、1973年、1978年の4回の深刻な少雨において等値線を用いて少雨の空間範囲を計測した。少雨の発現地域は長期間に至ってもその中心域は移動せず、少雨の面積はその期間が長くなる場合はあまり変化しないか増大するとしている。葛葉ら(2001)

はアメダス年降水量を用いて、渇水年である1978年、1984年、1994年の年降水量の平年値に対する比の等値線図を作成し、年降水量では細かな少雨傾向はとらえきれないとして、各地点の頻度分析を行った。

この様に日本の渇水の空間分布に関する研究は主に全国的に影響の大きい干害・干ばつを対象としてきた。また、大規模な渇水が生じた時の面積範囲を知ることが目的とされていることが多い。一方で、統合利水管理は流域の一部で発生する渇水においてその渇水リスクを軽減する効果を発揮する。堀川ら(2010)はそのような流域の一部で生じる渇水が存在することとその空間範囲を示した。

さらに、流域内の水資源施設や灌漑地区の水需給における補完効果を示すためには、渇水リスクのそれら施設間または地区間の関係を明らかにする必要がある。渇水リスクの地点間の相互関係に関する研究としては、九州の代表的な渇水年8例を対象に気象官署間の雨量の相関係数を求めた事例(林ら、1987)および降水量の同じ再帰確率を持つ年(渇水基準年)の全国分布を示した事例がある。前者は、距離と雨量にある程度相関が見られること、後者は地域によっては流域内でも基準年は異なる可能性があることを示している。

これらの研究は、統合利水管理が渇水リスクを軽減する効果を持つことの可能性を示すものであるが、その効果を明確に示すまでには至っていない。統合利水管理を推進するためには、それと渇水リスクの軽減効果の関係を分析する必要がある。

## 2 統合利水管理による効果

### a 渇水リスク

渇水分布特性の検討にあたり、それが目的とする統合利水管理の効果の定量化を試みる。統合利水管理は流域に散在する複数の水源施設や灌漑地域を統合的に運用して、その渇水リスクを軽減するものである。このため、統合利水運用の効果を定量化するためにはまず、それが対象とする渇水リスクを定義する。

渇水リスクは渇水危険度や利水安全度等のいろいろな用語で表現されており、また、多くの概念が提案されてきた。これらの渇水リスクの概念を、建設省(1981)は、頻度、長さ、大きさ、厳しさ、経済的被害の5つに分類しその特性を比較した。Hashimoto et al.(1982)は、同様にこれらを信頼度、回復度、深刻度の3つに、吉川ら(1982)は頻度、深刻さ、被害の3つに分類し、これの特性を検討した。また、田尻ら(1996)の様にこれらをまとめた総合的な概念を示す試みも行われている。

渇水リスクに関してはこれまでこの様に多くの概念が提出されてきたが、そのうち広く使われてきたのが頻度に関連した概念である。大内ら(1982)は、水資源開発の進展に伴い同一の頻度であっても渇水被害額等の他の概念による渇水リスクの値は異なることを示しており、

頻度を渇水リスクの指標とすることの問題点を指摘している。また、渇水が生じたときには頻度を用いて対策を比較することができない。しかし、「利水安全度とは、(略)水源としている河川の流況の渇水生起確率(危険度)で表現される。わが国では生起確率が1/10(回/年)程度の渇水流況を対象として利水計画が策定されている」(土木学会, 1999)とあるように、農業水利事業を含むわが国の水資源計画においては一貫して生起確率やリターンピリオドで表現される頻度が渇水リスクを定量化する概念として使われてきた。また、渇水を生じさせる気象現象は空間的に定常ではない、すなわち同じ同時確率分布を持たないことから、既往の研究例に見られるように、統一的に議論するには頻度を用いることが適切である。このことから、本検討において渇水リスクを頻度、具体的には渇水の生じるリターンピリオドで表現することとした。

### b 渇水リスク低減効果の定量化

渇水リスクを頻度で扱うときの統合利水管理の効果は2つの面から示すことができると考える。まず、それぞれ渇水が生じるリターンピリオドが10年となるようにダム等の水源が整備された複数の灌漑地区がある流域を想定する。また、これらの灌漑地区では物理的には相互の水源を利用可能であるとする。それぞれの灌漑地区を地区番号*i*で区別して、その需要量を $x_i$ 、それを超過する確率を示す関数を $F_i(x_i)$ とする。各灌漑地区におけるリターンピリオド10年における需要量はこの関数の逆関数を用いてそれぞれで $F_i^{-1}(1/10)$ で示される。この値はすなわち、それぞれの灌漑地区における水源の供給可能量と等しいから、流域全体における供給可能量は、それらの和で与えられる。一方で、すべての灌漑地区の需要量の和の超過確率を示す関数を $F_T(\Sigma x_i)$ とすると、需要量の和が水源からの供給可能量に一致するときのリターンピリオド $R_\alpha$ は式(1)によって得られる。

$$R_\alpha = 1/F_T \left( \sum_i F_i^{-1}(1/10) \right) \quad (1)$$

式(1)で求められる $R_\alpha$ は、10年に1回までの渇水に耐えられるように整備された灌漑地区およびその水源を統合的に利水運用したときの渇水のリターンピリオドである。この値が10よりも大きいときには、統合利水管理による渇水リスク低減効果があると言える。

次に、利水共同ダムを想定する。先ほどと同様に流域にこの利水共同ダムの受益になる複数の灌漑地区があり、その需要量を $x_i$ 、その値を超過する確率を示す関数を $F_i(x_i)$ とする。また、すべての灌漑地区の需要量の和の超過確率を示す関数を $F_T(\Sigma x_i)$ とする。利水共同ダムはこれらの灌漑地区を統合的に利水運用することを前提にして、リターンピリオドが10年とするために必要な水源の供給水量を $F_T^{-1}(1/10)$ として建設されている。一方、それぞれの灌漑地区がリターンピリオド $R_\beta$ の水準

において個別に水源を運用するときに必要な容量の合計は $\Sigma F_i^{-1}(1/R_\beta)$ である。この2つの値が等しいとき、すなわち

$$\sum_i F_i^{-1}(1/R_\beta) = F_T^{-1}(1/10) \quad (2)$$

が成立するときの $R_\beta$ は統合利水管理を前提として渇水のリターンピリオド10年で整備された水源を灌漑地区毎に個別に管理したときに生じる渇水が生じるリターンピリオドである。この値が10より小さいときには統合利水管理の効果があると見なすことができる。また式(2)が値を持つときには、リターンピリオドが10年より小さい $R_\beta$ の水準である複数の灌漑地区があるとき、これらの灌漑地区を統合的に運用することにより、リターンピリオドを10年に改善できることを意味する。

これらのリターンピリオドの算出においては利水者間の渇水リスクが統合利水管理以前は同一であることが前提とされている。利水者間の水利用上の優劣を考慮していないことは、ここで示される統合利水管理の渇水リスク軽減効果は参画利水者全体に有利に働く統合利水管理における補完効果であることを意味している。

### 3 少雨の空間分布特性の評価法

渇水リスクを頻度として扱うことを前提として統合利水管理の渇水リスク低減効果の評価方法を提示した。これを算出するには、関係する灌漑地区の需要量およびダム等の水源の供給量の累積分布関数を知る必要がある。これらの水文量の累積分布関数を求めるには、灌漑地区やダム等の諸元を収集し、長期間にわたって水量および水源水量を計算する必要がある。統合利水管理の具体的な計画段階ではその作業は必要である。しかし、どの地域でどの時期を対象に統合利水管理を実施することが有利かを構想するときにはより簡便な評価方法があることが望ましい。

灌漑地区の需要量の供給量を算出する代わりに、長期間において多くの地点で値が入手しやすい降水量を用いて統合利水運用の効果を示すことができる渇水分布特性の評価指標を検討する。

わが国の主たる灌漑用水利用は水田灌漑であるため、水田灌漑における用水計画に基づいて灌漑地区の需要量を検討する。需要量である水田用水量の構成要素のうち年毎に変動がある主な要素は有効雨量である。有効雨量が増加すると需要量は減少する。面積および同じ作付体系が等しくリターンピリオド10年で整備されている2つの灌漑地区*a*、*b*を想定し、水源地点における需要量(必要水量)が取水地点の需要量(計画用水量)に一致すると見なす。このとき、地区*a*および地区*b*の有効雨量をそれぞれ $x_a$ 、 $x_b$ 、これらの非超過確率を示す累積分布関数と2つの和の累積分布関数をそれぞれ $F_a(x_a)$ 、 $F_b(x_b)$ 、 $F_{a+b}(x_a+x_b)$ とすると、式(1)で示される統合利水管理によって変化する渇水のリターンピリオドは $I_\alpha$ で表される。

$$I_{\alpha} = 1/F_{a+b}(F_a^{-1}(1/10) + F_b^{-1}(1/10)) \quad (3)$$

また、同様に式(2)における統合利水管理によって変化するリターンピリオド $R_{\beta}$ に相当する $I_{\beta}$ は次式で得られる。

$$F_a^{-1}(1/I_{\beta}) + F_b^{-1}(1/I_{\beta}) = F_{a+b}^{-1}(1/10) \quad (4)$$

この2つのリターンピリオドをそれぞれ少雨の空間分布特性の評価指標 $I_{\alpha}$ 、評価指標 $I_{\beta}$ とする。評価指標 $I_{\alpha}$ は非超過確率0.1の2地点降水量の和を2地点の降水量の和が下回る少雨が発生するリターンピリオドである、リターンピリオド10年(再起確率1/10)の渇水年に対応する利水施設を統合した場合において渇水が生じるリターンピリオドを想定した指標である。評価指標 $I_{\beta}$ は各灌漑地区において渇水の生起確率を1/10に低下させる水資源開発を行うときに、統合的に利水管理することにより圧縮できる施設規模のリターンピリオドを想定する。なお、評価指標 $I_{\beta}$ は逐次近似によって求める。

提案した少雨の空間分布特性の評価指標は、上述した条件を前提している。具体的な対象灌漑地区や水源においてこれらの前提条件が厳密に成立していることは無い。計画段階においてはこれらの指標は統合利水管理の効果を評価するには不適當であると考えられる。しかし、これらの評価指標は降水量のみによって容易に算出できることから、使用目的を限定して用いることが適切であると判断した。

#### IV 少雨の空間分布特性の評価法の適用事例

##### 1 適用条件

提案した空間分布特性を示す2つの評価指標の適用を試みる。中心部には関東平野が広がり、渇水を含む気象条件に大きな影響を与える山地が周辺部にしかない関東地方を検討対象地域とする。

評価指標の計算に用いる降水量データは地域気象観測(AMeDAS)の日降水量とする。地域気象観測を採用した理由は、同じ気象庁が実施する地上気象観測と同様に観測および統計の品質が高いこと、地上気象観測と比較して観測期間は短い観測密度(面積当たりの観測地点数)が高いことによる。

検討対象期間は、地域気象観測が開始された1976年から2009年までの34年間のうち、灌漑期に相当するそれぞれ5から8月までとする。指標値は観測地点間のすべての組み合わせにおいて求める。対象期間において156地点において地域気象観測が実施されているが、欠測や観測期間がそれぞれの組み合わせにおいて異なるため、計算が可能な観測所の組み合わせは指標値によって異なるが、4000~6000組であった。

評価指標が対象とする水文学量は、継続期間毎の降水量および水田用水計画における有効雨量とする。渇水の目

安となる連続干天日数が20日とされていることから(農業土木学会, 2003), 継続検討期間は暦半月, 暦月, 灌漑全期(5から8月までの4か月)の3通りとする。有効雨量は、日降水量のうち5から80mmまでの80%を暦半月毎に集計して求める。減水深は20mm/dに設定し、これを半月有効雨量の上限とする。

検討対象期間において灌漑期合計降水量等の水文学量を算出し、これから水文学量毎に累積分布関数を求めた。累積分布関数には2母数のガンマ分布を用い、平均と分散から積率法によりこれを同定した。

## 2 評価結果

### a 灌漑期間における空間分布特性

灌漑期間(5~8月)の総有効雨量を対象として指標を求めた。距離が離れるほど降水量等の2点間の水文学量の相関は低くなり、統合利水管理の効果を示す評価指標の値が高くなると考えられることから、2地点の水文学量から産出される指標値をその間の距離と比較する。

指標 $I_{\alpha}$ の計算結果をFig.1に示す。評価指標 $I_{\alpha}$ はリターンピリオド10年(再起確率1/10)の渇水年に対応する利水施設を統合した場合において渇水が生じるリターンピリオドを想定した指標である。計算された値はいずれも10年のリターンピリオドを超えている。

わが国では重要な流域(水系)は一級水系に指定されている。その総数は109水系であるが、このうち利根川水系等10水系の本川延長が200km以上である。統合利水管理が可能で2地点間の距離を本川延長を目安に考えると、わが国においては数百km等の長距離間の統合利水運用は一部水系を除いては難しいと考えられる。5218組のアメダス観測点の組み合わせにおいて指標値を求めたが、Fig.1にはこのうち2点間の距離が200km未満の4946組の値を示した。

一般的に距離が長くなるにつれて、指標値は大きくなる傾向があるが、同じ距離であっても地点間の組み合わせ

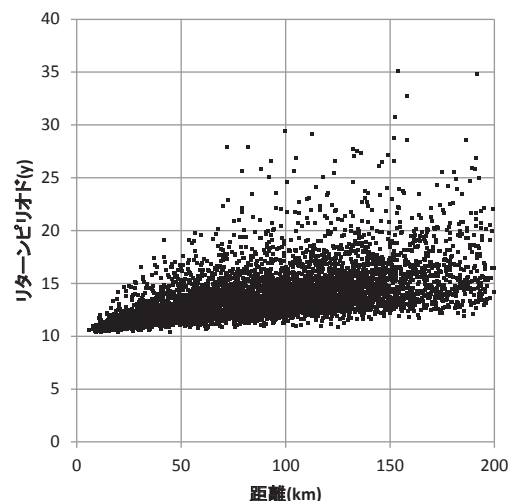


Fig.1 灌漑期有効雨量の空間分布評価指標 $I_{\alpha}$   
Spatial distribution index  $I_{\alpha}$  of total effective rainfall during 4 months

せによってその指標値は大きく異なる。その間の距離が200km以下の2地点から求めた値の7割が15年未満である。その一方で3%の指標値は20年を超えているが、2地点間の距離が50km以上の指標値に限られている。

評価指標 $I_\beta$ の計算結果を指標 $I_\alpha$ と同様にFig.2に示す。この評価指標は各灌漑地区において渇水の生起確率を1/10に低下させる水資源開発を行うときに、統合的に利水管理することにより圧縮できる施設規模のリターンペリオドを示している。いずれの組み合わせにおいても指標値は10年未満である。

距離が長くなるにつれて、評価指標 $I_\beta$ の値は小さくなる傾向があるが、評価指標 $I_\alpha$ と同様に同じ距離であっても地点間の組み合わせによってその指標値が大きく異なる。その間の距離が200km以下の2地点から求めた値の6割が7.5年以上であり、値が5年以下になる組み合わせは全体の1.4%である。

次に、計算結果を把握しやすくするために、2地点の組み合わせをその距離で階級に分け、それぞれの階級で指標 $I_\alpha$ および $I_\beta$ の平均値をFig.3に示す。このとき、階級間隔は10kmとし、データが比較的大きいことから平均には算術平均を用いた。

また、灌漑期間（5～8月）の総降水量を対象として評価指標 $I_\alpha$ 、 $I_\beta$ の値を求め、総有効雨量と同様に階級間隔10kmで2地点間の距離ごとに階級分けし、それぞれの平均値をFig.3に併せて示した。評価指標 $I_\alpha$ を見ると降水量の指標値は2地点間の距離が約80kmを超えると有効雨量の指標値より若干大きくなるが、それ以下の距離においては有効雨量の指標値とはほぼ等しい。評価指標 $I_\beta$ においても傾向は同じであり、2地点間の距離が約80kmを超えると有効雨量と降水量の指標値は乖離する。有効雨量には実質的に上限があるため、空間的なばらつきは降水量と比較して小さくなるが、Fig.3はその差が小さ

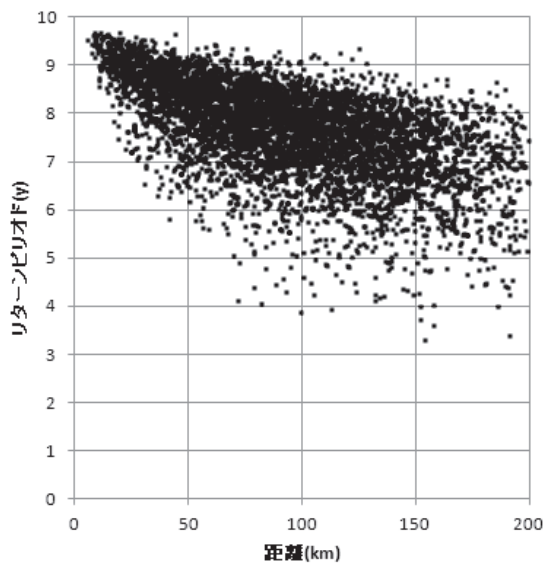


Fig.2 灌漑期有効雨量の空間分布評価指標 $I_\beta$   
Spatial distribution index  $I_\beta$  of total effective rainfall during 4 months

いことを示している。

このため、以下では降水量を対象とする指標値のみを用いて評価指標を検討する。また、評価指標 $I_\alpha$ 、 $I_\beta$ では大きな特性の違いが見られないことから、以下の検討では評価指標 $I_\alpha$ の結果のみを示す。

#### b 時期別の空間分布特性の違い

統合的利水管理の効果の時期による違いを明らかにするために、灌漑期間をいくつかに分けて指標値を算出しそれらを比較する。まず、評価指標の対象とする水文量を灌漑期間（5～8月）の暦月の月合計降水量とする。2地点の降水量から求めた指標値を、その間の距離区別に平均をとりFig.4に示す。各暦月において求めた評価指標に大きな違いは見られない。

次に各月を15日までの前半と16日以降の後半に分け、半月間の合計降水量を対象として指標値を算出し、暦月の評価指標と同様にFig.5に示す。この図から、田植え時期である5月前半においては2地点間の距離が比較的大きい（100km以上）場合において指標値が高いことがい

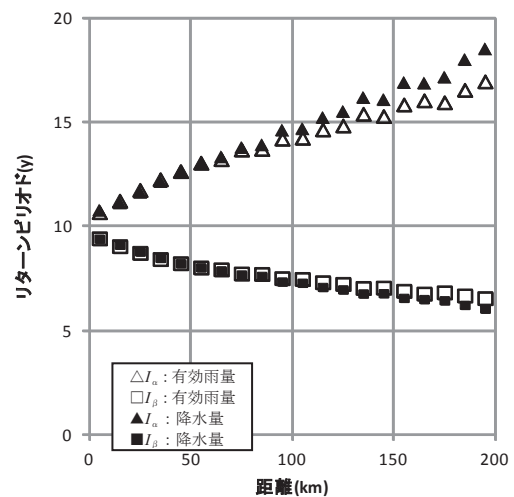


Fig.3 灌漑期間の有効雨量と降水量の空間分布評価指標  
Spatial distribution index of total effective rainfall and total precipitation during 4 months

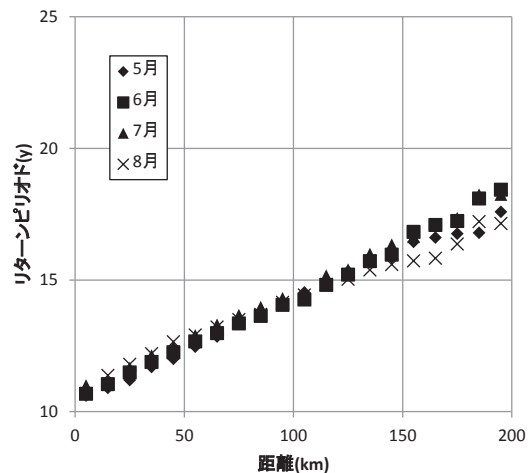


Fig.4 月降水量の空間分布評価指標  
Spatial distribution index of monthly precipitation

える。また、梅雨の前後である6月前半と7月後半の指標値が他の期間と比較して高いことは、この時期に関東地方の一部が実質的な梅雨の範囲に含まれるためだと考えられる。これらは、関東地方においては、田植時の水需給がひっ迫している灌漑地区や梅雨における取水の貯留を前提とする灌漑地区では統合的利水運用の効果が相対的に高いことを示唆している。

小規模な渇水は継続期間が短いという傾向が指摘されている。この様な渇水においては小規模な貯水池すなわちため池の渇水軽減に果たす役割が高いと考えられる。渇水の継続期間と空間的な範囲の関連を明らかにするために、指標の対象期間が暦月と半月のそれぞれの指標値を平均し、これを灌漑期間4か月を対象とする指標値と比較して Fig.6 に示す。いずれの指標値も大きな違いがないことから、これから渇水の継続期間と空間的範囲の関係は確認できなかった。

**c 空間分布特性の時系列変化**

最近、ゲリラ豪雨とも呼ばれる局地的豪雨に代表され

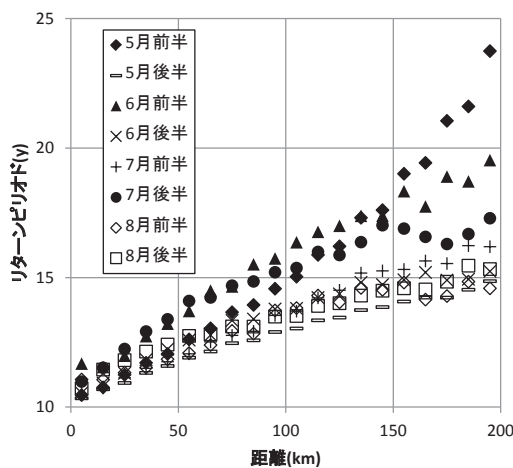


Fig.5 半月降水量の空間分布評価指標  
Spatial distribution index of half month precipitation

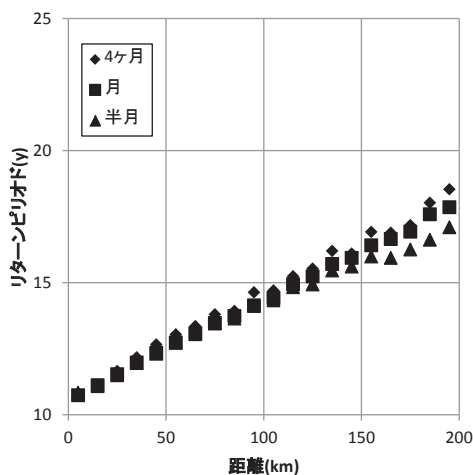


Fig.6 継続期間毎の少雨の空間分布指標  
Spatial distribution index and drought duration

るような空間的に小規模な気象現象の発生が増加していると指摘され、その原因として地球規模の気候変動やヒートアイランド現象が挙げられている。小規模な気象現象については主に水害を生じさせる豪雨に注目が集まっており、降雨現象の中でも渇水を生じさせる少雨においてその特性の時系列的な変動はほとんど検討されていない。しかし、渇水は局地的な雨によって解消されることがある(谷, 1970)とされていることから、局地的な降雨が増加するときには局地的な渇水も増加すると考えられる。

狭い空間範囲で生じる小規模な少雨の変化の有無を明らかにするために、ここで提案した渇水にかかる指標の変化について検討する。これまで示してきた指標は34年間の降水量を用いている。ここでは、これまでの検討期間を前期(1976~1992年)と後期(1993~2009年)のそれぞれ17年間の二期において空間分布の評価指標を算出する。また、対象は灌漑期(5~8月)合計降水量とする。

前期と後期において指標 $I_d$ を2地点の降水量から求め、これをその間の距離区間別に平均をとり、Fig.7に示す。いずれの距離区間においても空間分布評価指標の平均値は前期より後期で大きい。指標の増加は、統合的利水管理の渇水リスク軽減効果が以前よりも最近において大きくなっていることを意味する。また、現象面においてはこれは少雨発生空間的ばらつきが大きくなっていることを示している。

**V 結言**

わが国においては、これまで多くの農業水利施設が整備され、これにより灌漑用水の安定供給が実現されてきた。しかし、灌漑をとりまく自然環境および社会環境は今後変化していくことが予想され、このため灌漑用水の水需給もそれぞれの灌漑地区で異なっていくと考えられ

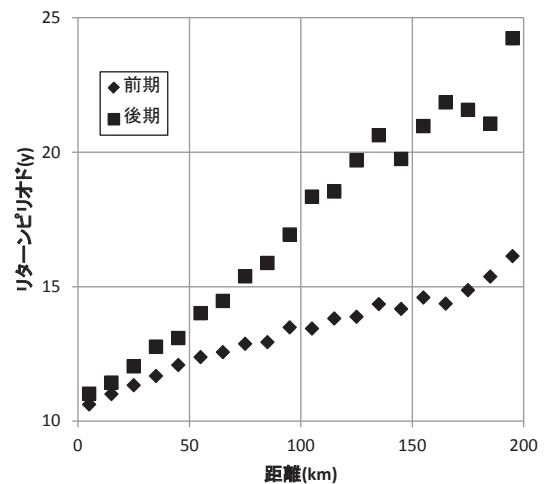


Fig.7 少雨の空間分布評価指標の時系列変化  
Inter annual variation in spatial distribution index



る。水需給の変化に対して、今後も安定した灌漑用水が供給されていくためには、灌漑地区ごとに運用されてきた既存の農業水利施設群を流域単位などの広域において効率的に運用していくことが必要だと考えられる。

本報告では、効率的な水利用を実現する統合利水管理の評価に関して次の事項を報告した。

(1) 統合利水管理の現状を概観して、農業水利施設では渇水時を除いてこれがほとんど実施されていないこと示し、統合利水管理を実現するにはその効果を明らかにする必要があることを指摘した。

(2) 渇水リスクを頻度で表現したときの統合利水管理による渇水リスク軽減効果を示す少雨の空間分布特性の評価法を提案した。

(3) 関東地方にこの評価法を適用し、梅雨の前後および田植え時期に渇水現象の空間的ばらつきが大きくなることを示した。また、1976年から2009年の期間において、前半よりも後半の方が統合利水管理による渇水リスクの軽減効果が高いことを示した。

本報告で示した渇水の空間分布特性の評価指標について今後次の事項の分析が必要である。

(1) 評価指標と統合利水管理による軽減効果の関係の詳細な分析

(2) 全国を対象とした地域ごとの渇水の空間分布特性の分析

(3) 渇水の空間分布特性の時系列変化の分析

### 参考文献

- 1) 土木学会編 (1999):土木学会土木用語大辞典, 技報堂出版, 東京
- 2) 葛葉泰久・友杉邦雄・岸井徳雄・早野美智子 (2001):少雨の空間分布に関する研究, 水文・水資源学会誌, 14(2), 142-150
- 3) Hashimoto, T., D.P.Loucks, J.R.Stedinger (1982): Robustness of water resource systems, *Water Resources Research*, 18(1), 21-26
- 4) 林静夫・元田雄史郎 (1987):渇水に関する少雨のDA解析, 農土論集, 132, 21-26
- 5) 堀和夫 (1978):水資源の開発, 83-144, ケーススタディ水資源, 彰国社, 東京
- 6) 堀川直紀 (2012):小講座 IWRM (総合水資源管理), 水士の知, 80(12), 60
- 7) 堀川直紀・増本隆夫・吉田武郎 (2010):関東地方における計画用水量を指標とした干ばつの空間分布, 平成22年度農業農村工学会大会講演会要旨集, 228-229
- 8) 河川審議会(1999):今後の水利行政のあり方について(提言)
- 9) 建設省 (2000):平成12年国土建設の現況
- 10) 近畿農政局加古川水系広域農業水利施設総合管理所(1991):国営加古川水系広域農業水利施設総合管理事業概要書
- 11) 国土交通省 (2007):気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源管理のあり方について, リスクマネジメント第2回研究会資料
- 12) 国土交通省土地・水資源局水資源部編 (2009) 平成21年度日本の水資源-総合水資源管理の推進, 1-31
- 13) 国土審議会 (2007):供給施設の安定性低下, 国土審議会水資源開発分科会第4回利根川・荒川部会資料
- 14) 松井宏之・水谷正一 (2005):関東地方における農業用水の水利条件の把握と耐渇水性の類型化, 農土論集, 236, 35-42
- 15) 中川敬夫 (1995):平成6年渇水と農業用水, 土木誌, 80(8), 87-89
- 16) 中澤式仁・今村瑞穂・石崎勝義・中村昭 (1979):渇水時の水管理に関する計画学的研究, 土木研究所資料, 1508, 26-39
- 17) 日本水道協会(2008):水道広域化検討の手引き 水道ビジョンの推進のために
- 18) 農業土木学会編 (2003):改訂5版農業土木標準用語事典, 農業土木学会, 東京
- 19) 大木洋介・園田哲夫 (2003):小貝川渇水に伴う水融通について, 水の技術, 11, 100-107
- 20) 大内忠臣・佐々木元・松下越夫 (1982):利水安全度に関する2, 3の分析と考察, 土木技術資料, 24(1), 21-26
- 21) 関根勇八 (1976):干害の時間空間的性質, 147-159, 異常気象と農業, 朝倉書店
- 22) 志村博康 (1979):異常渇水と河川水利計画, 水利科学, 129, 18-40
- 23) 田尻要・神野健二・河村明 (1996):リスク解析を用いた福岡都市圏の自治体における利水安全度の検討, 水文・水資源学会誌, 9(5), 404-413
- 24) 谷信輝 (1970):気象災害の予想, 972-979, 日本農業研究所編戦後農業技術発達史I巻水田作編
- 25) 土地改良施設管理問題検討専門委員会 (1988):土地改良施設問題検討専門委員会第二次報告書-基幹的水利施設の水系統合管理について
- 26) 植田剛史 (2004):日本における渇水調整, 第19回日中河川及びダム会議要旨集, 11-28
- 27) 吉川秀夫・吉川勝秀 (1982):計画超過渇水を考慮した水資源計画に関する考察, 土木論集, 319, 153-165

## Development of Spatial Distribution Index for Droughts

– Effects of integrated irrigation management on reduction of drought damage –

HORIKAWA Naoki, YOSHIDA Takeo, MINAKAWA Hiroki, KUDO Ryoji and MASUMOTO Takao

### Summary

Many irrigation facilities have been constructed in Japan to stabilize the supply of irrigation water. Changes in the water cycle and agriculture may affect the irrigation water supply system, which would change the role of each irrigation facility. To maintain a sustainable water supply system, it is important to perform integrated water management of irrigation facilities. Important issues for promoting integrated water management were investigated and the following four results were obtained.

- 1) Integrated management of irrigation facilities was not carried out except during drought periods, mainly due to the lack of information on its effect. The impact of integrated irrigation management should be assessed.
- 2) A method for assessing integrated irrigation management to reduce drought frequency was proposed and a spatial distribution index for rainfalls was developed to show the effect of integrated irrigation management.
- 3) Values of spatial distribution index were calculated. The obtained values showed that the effect of integrated water management has gradually increased in the Kanto region.

**Keywords :** Water resources management, Draught, Paddy irrigation, Distribution function