

さまざまな制御理論のチェックゲート運用に対する適用可能性 Applicability of Different Control Theories to Operation of Check-Gates

○宇波耕一*・オサマ モハウエシ**・藤原正幸*
Koichi Unami, Osama Mohawesh, Masayuki Fujihara

1. はじめに

開水路形式の長大な幹線水路を中心とした広域水利システムの管理においては、チェックゲートの運用が困難かつ重要な課題である。現在、チェックゲートを有する幹線水路の運用においては中央管理局での集中管理が普及しているが、時々刻々と変化する水位などの情報を操作に反映させていくフィードバックについては熟練した管理者の判断に基づくことが多いように見受けられる。

本稿は、さまざまな制御理論の視点に立ち、チェックゲート運用の実態を理解し、また、自動化の可能性について検討することを目的とする。そのため、まず、チェックゲートで制御される広域水利システムの支配式を制御理論になじみやすい形で提示する。それに対し、最適制御、線型制御、動的計画法の各側面から考察する。さらに、ヨルダン溪谷における事例を通じて、適用可能性について論じる。なお、基本的な考え方は拙稿（河地・宇波，2003）を踏襲している。

2. 広域利水システムのモデル化

チェックゲートを有する幹線水路の水収支について考える。幹線水路全体は、 m 基のチェックゲートによって n 本の水路区間に分割されているものとする。第 i 水路区間の水貯留量を第 i 成分とする n 次元ベクトルを状態変数 \mathbf{V} 、第 j チェックゲートの通過流量を第 j 成分とする m 次元ベクトルを制御変数 \mathbf{u} とすれば、水収支式は常微分方程式系

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = B\mathbf{u} + \mathbf{q} \quad (1)$$

となる。ここに、 t は時間、 B は $n \times m$ の接続行列、 \mathbf{q} は第 i 水路区間における横流出入流量（流入が正）を第 i 成分とする n 次元ベクトルである。横流出入流量としては、水源からの導水、支線水路への分水、受益地への直接給水などが考えられる。一方、幹線水路全体には、 l 箇所の水位観測点が設けられているものとする。第 k 観測点の水位を第 k 成分とする l 次元ベクトルを観測変数 \mathbf{h} とする。観測変数 \mathbf{h} は、(1)に現れる3変数と一般には非線型の関係 \mathbf{f} にあり、観測誤差 \mathbf{e} が生じることも避けられないので、

$$\mathbf{h} = \mathbf{f}(\mathbf{V}, \mathbf{u}, \mathbf{q}) + \mathbf{e} \quad (2)$$

とすることが妥当である。チェックゲートの運用とは、現時刻までの \mathbf{h} 、 \mathbf{q} 、 \mathbf{e} の情報に基づいて \mathbf{u} を決定していくフィードバックを意味する。そのフィードバックの論理、すなわち制御則を合理的に設計するため、さまざまな制御理論が適用される。

3. チェックゲート運用に適用しうる制御理論の概要

まず、決定論的な最適制御の適用可能性を検討する。分水流量などの実際の値が目標値とどれだけずれるかを定量化する汎関数を設定し、モデルとしての(1)式と(2)式が実際の水理現象を十分正しく再現するという前提のもとで、変分原理を適用して汎関数を最小化するようにあらかじめチェ

*京都大学大学院農学研究科, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

**ヨルダン国立ムタ大学農学部, Faculty of Agriculture, Mutah University, Jordan

キーワード：開水路, チェックゲート, 制御理論

ックゲートの開度などをオフラインで計算しておく。これは、1960年代から試みられている考え方であるが(Wylie, 1969), 開水路流れの完全なモデル化が困難であることと横流出流量 q が確率論的であることから、現実的なものとは言い難い。

次に、産業界において多くの実用化がなされている線型制御理論の枠組みにおいて考察する。すなわち、(1)を状態式、(2)を観測式としてとらえる。状態式(1)は線型であるが、観測式(2)については何らかの線型化手法を用いて

$$\mathbf{h} = \mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{D}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{q} + \mathbf{e} \quad (3)$$

のように形にすることが必要である。式(1)と式(3)は、通常、平衡状態からの偏差にラプラス変換を施した形で議論される。古典的かつ実用的には、「上(下)流水位一定制御」に代表される \mathbf{h} の目標値追従性が要求される。これには、PI制御やPID制御のような積分器を含む制御器が必要である。これに加えて現代制御理論を用いれば、横流出入流量 q に関する情報の不確実性、観測誤差 \mathbf{e} の構造、規範モデルからの摂動、制御量の飽和といった要素を考慮することが可能となり、より洗練された制御則の構築が期待できる(Unami and Kawachi, 2001)。

最後に、意思決定支援手法として最も一般的な枠組みである動的計画法に則ったチェックゲート運用を考える。状態変数 \mathbf{V} や観測変数 \mathbf{h} は、制御変数 \mathbf{u} の選び方に依存する確率過程として捉えることが必要である。現時刻においてある制御変数 \mathbf{u} を選ぶことにより、最大化したい便益の現時刻以降における期待値が決まる。その期待値ならびに制御変数 \mathbf{u} の選び方に関する支配方程式は、確率過程の次元数が独立変数の数となる巨大な偏微分方程式となる。Sharifi et al (2015)のように単純化した問題の数値解や解析解からの類推に基づいて、より複雑な問題の解の構造を定性的に調べれば、熟練した管理者の判断による操作の最適性を評価できるのではないかと考えている。

4. ヨルダン渓谷における広域水利システム

ヨルダン渓谷のヨルダン領内には、灌漑を主目的としたアブドラ国王水路(KAC)を軸に広域水利システムが構築され、ヨルダン渓谷開発庁(JVA)が管理している。主水源としては、ヨルダン国内ザルカ川のタラール国王ダム(1988年竣工)、シリア・ヨルダン国境を流れるヤルムーク川のウェヘダダム(2011年竣工)などがあり、KACの起点はゴラン高原非武装地帯とヨルダンの境界上にあるヤルムーク川からの取水工である。Shuurmans et al (1992)はKACのチェックゲート運用について開水路水理学ならびに線型制御理論に基づいた議論を展開している。1994年のイスラエル・ヨルダン平和条約およびウェヘダダム建設を経た現在、KACの管理にはSCADAが導入され、中央管理局における集中管理が行われている。チェックゲート開度は、前日までに各受益ブロックから提出される需要要求に応じるべく、技術職員の判断に基づいて24時間体制で遠隔操作されている。

5. おわりに

ヨルダン渓谷におけるKACの事例を精査することにより、古典的な線型制御理論の限界を明らかにし、また、動的計画法の意味における現状の最適性評価を行っていく予定である。

引用文献

- [1] 河地・宇波, 2003. 水資源管理に対する制御工学的接近法, システム/制御/情報, 47(7), 318-323. [2] Sharifi E, Unami K, Yoshioka H, and Fujihara M, 2015. The viscosity solution solving a primitive optimal control problem for an irrigation tank. *Proceedings of the 23rd Annual Congress of JRCSEA*, 51-52. [3] Shuurmans W, Brouwer R, and Wonink P, 1992. Identification of control system for canal with night storage, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 118(3), 360-369. [4] Unami K, and Kawachi T, 2001. Robust control of irrigation channel network systems, *Proceedings of ICID 1st Asian Regional Conference*, B(2), 1-13. [5] Wylie EB, 1969. Control of transient free surface flow. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 95(1), 347-361.