# 平成27年度応用水理研究部会講演集



平成 27 年 12 月 3 日~4 日

於 農林水産省農林水産技術会議事務局 筑波産学連携支援センター

# (社)農業農村工学会応用水理研究部会共催 農研機構 農村工学研究所

# 平成 27 年度 農業農村工学会応用水理研究部会講演会 プログラム

平成 27 年 12 月 3 日(木) 13:30~4 日(金) 11:45

# 農林水産省農林水産技術会議事務局 筑波産学連携支援センター 本館1階第4会議室

【12月3日】

(13:30~13:35) 開会の挨拶

部会長 樽屋啓之

座長:安瀬地一作(農村工学研究所)

(13:35~14:00)

 リゾチームの吸着がシリカ懸濁液の流動ならびに界面動電現象に与える影響 筑波大学大学院 生命環境科学研究科 。山口敦史

筑波大学 生命環境系 小林幹佳

(14:00~14:25)

2. 豊浦砂中のコロイド輸送:ろ過理論の不飽和領域への拡張

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 o藤田洋輔 筑波大学 生命環境系 小林幹佳

(14:25~14:50)

3. 異符号帯電コロイド粒子の乱流へテロ凝集速度:表面電荷密度の影響

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 o杉本卓也 筑波大学 生命環境系 小林幹佳

(14:50~15:15)

 Sedimentation of Flocculated Slurry of Na-Montmorilloinites Graduate School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba ○Mingyu Wu, Yanuar Agro, Yasuhisa Adachi

(15:15~15:25) <<< 休 憩 >>

座長: 平松研 (岐阜大学)

(15:25~15:50)

5. Designing and modeling on-farm desalination system using dew collection technology (露収集技術を用いた圃場近接型除塩システムの設計とモデル化)

Graduate School of Agriculture, Kyoto University

OMohawesh Osama, Unami Koichi, Fujihara Masayuki

(15:50~16:15)

6. Towards improved water environment productivity in Japanese paddy rice irrigation schemes (日本の水稲灌漑スキームにおける「水環境生産性」の改善に向けて)

Graduate School of Agriculture, Kyoto University •Goden Mabaya, Koichi Unami, Masayuki Fujihara Abul Hasan Md Badiul Alam

(16:15~16:40)

7. 茶園地域における地下水動態の観測と解析

京都大学大学院農学研究科 o石原弘輝・宇波耕一 ゴーデン マバヤ・藤原正幸

(16:40~16:50)

<< 休 憩 >>

# 座長:中達雄(農村工学研究所)

(16:50~17:15)

8. 水田パイプラインで同時に取水する圃場の割合

土木研究所 寒地土木研究所 ○中村和正・酒井美樹・越山直子・伊藤暢男

(17:15~17:40)

9. パイプライン更新時における性能低下予測と塩化ビニル管の疲労破壊

宫崎大学農学部 o稻垣仁根

宫崎大学大学院農学工学総合研究科 秋吉一磨

宮崎大学大学院農学研究科 鈴木結希

(17:40~18:00) 代表幹事会

第4会議室

# 【12月4日】

座長: 久保成隆(東京大学大学院)

(9:00~9:25)

10. Formulation of stochastic control problems for water harvesting reservoirs (集水貯水池に対する確率制御問題の定式化)

> Graduate School of Agriculture, Kyoto University oKoichi Unami, Erfaneh Sharifi, Masayuki Fujihara

(9:25~9:50)

11. SCADA による灌漑排水自動管理システムの開発

農研機構 農村工学研究所 ○中矢哲郎・浪平 篤・樽屋啓之 安瀬地一作・桐 博英

(9:50~10:00) <<< 休 憩 >>

座長: 高木強治(農村工学研究所)

(10:00~10:25)

12. TM/TC を活用した需要主導型大容量開水路配水システムの開発

東京大学大学院農学生命科学研究科 o久保成隆

(10:25~10:50)

13. 田面水の平面2 次元流れ場を考慮した水田内温度環境計算モデル

東京大学大学院農学生命科学研究科 o木村匡臣・小林 聡・飯田俊彰・久保成隆 (10:50~11:15)

14. 小型通し回遊魚の遊泳能力について ーワカサギの遊泳速度の測定-

(株)建設技術研究所東北支社 矢田谷健一 弘前大学農学生命科学部 ○泉 完・東 信行・丸居 篤

(11:15) 閉会の挨拶

部会長 樽屋啓之

リゾチームの吸着がシリカ懸濁液の流動ならびに界面動電現象に与える影響

(筑波大学大学院 生命環境科学研究科) 〇山口 敦史

(筑波大学 生命環境系) 小林 幹佳

e-mail: timo.boll.sp.020@gmail.com

電話・FAX: +81-(0) 29-853-5721

#### 1. 研究の背景

水工学の分野では、粘着性土砂など、凝集状態にある微粒子懸濁液の挙動を予測・制御 することが求められる。一般に、凝集状態にある微粒子懸濁液は非ニュートン流動を示す ことが多く、シアシニングや降伏値の存在が認められる。これらのレオロジー的な性質は 懸濁液中の微粒子の凝集の程度や、凝集体の構造などに大きく影響される。したがって懸 濁液中の粒子間の相互作用は、懸濁液のレオロジーを変化させる重要な要因である。

粒子間の相互作用力は、静電的な斥力と van der Waals 引力の和からなるという DLVO 理論をもとに理解されてきた。静電的な斥力は粒子の表面電位と周囲のイオン強度に依存 する。一種類の粒子からなる懸濁液を用いたレオロジー実験では、粒子表面近傍の電位で あるゼータ電位がゼロとなる等電点付近で降伏値が最大となり、ゼータ電位の絶対値が大 きくなるにしたがって降伏値は減少する[1,2]。また、粒子と反対符号に帯電した有機高分 子を添加した混合懸濁液においても、降伏値の最大値は等電点付近において発現すること が示されている[3]。そのため降伏値はゼータ電位の関数として整理されてきた。その一方、 等電点であっても、添加した高分子の添加量もしくは被覆率によって降伏値は変化してお り、DLVO 力以外の相互作用の存在が示唆されている。しかしながら、高分子の吸着量と ゼータ電位をどちらも測定し、両者の影響を系統的に検討した研究例は不足している。

そこで本研究では、モデルコロイド粒子とモデル高分子電解質としてシリカ粒子とリゾ チームを採用し、シリカ粒子へのリゾチームの吸着量、リゾチームに覆われたシリカ粒子 のゼータ電位および懸濁液の降伏値を測定した。これらの結果から、吸着量とゼータ電位 が懸濁液の降伏値およびシリカ粒子間の相互作用に与える影響を検討した。

#### 2. 材料と実験方法

本研究で用いたシリカ粒子(直径 302 nm)のゼータ電位は、実験条件である KCl 10 mM、 pH 5 および pH 7 の条件でそれぞれ-10 mV と-41 mV であった。モデル高分子電解質と して用いた鶏の卵白由来のリゾチームは大きさが  $3 \times 3 \times 4.5$  nm であり、立体安定性の高い タンパク質である。電気泳動移動度法で求めたリゾチームのゼータ電位は、KCl 10 mM、 pH 5 および pH 7 の条件でそれぞれ 31 mV と 16 mV であった。

リゾチームのシリカ粒子への吸着量は吸光度測定法によって求めた。はじめにシリカ粒子 50 g/L、リゾチームとシリカ粒子の質量比 0~0.024 g/g、KCl 10 mM の懸濁液を調製した。さらに、KOH と HCl を用いて pH 5 または pH 7 に調整したのち、24 時間振とう攪拌を行った。その後、懸濁液を遠心分離することでシリカ粒子を沈殿させ、上澄みのリゾチ

ーム濃度を吸光度(波長 280 nm)の測定から求めた。リゾチームの吸着量を添加量と上澄みの濃度の差から得た。

吸着量の測定と同様の方法で調製した懸濁液を用いて、リゾチームに覆われたシリカ粒 子のゼータ電位をコロイド振動電流法により測定した。

リゾチームとシリカ粒子の混合懸濁液の降伏値をベーン剪断試験法で測定した。シリカ 粒子 50 wt%、リゾチームとシリカ粒子の質量比 0~0.014 g/g、KCl 10 mM、pH 5 または pH 7 の懸濁液を調製し、24 時間振とう攪拌した。このとき KOH および HCl の添加量を あらかじめ予測しておき、イオン強度が 10 mM になるように懸濁液を調製した。懸濁液を 30 秒間激しく振とう攪拌したのち、測定用容器に移した。懸濁液にベーンを挿入し、測定 用容器に移してから 1 分間経過後に測定を開始した。

#### 3. 結果と考察

図1にリゾチームの添加量と吸着量の関係を示す。記号は実験値を示しており、実線は 添加したリゾチームが全て吸着したと仮定したときの吸着量である。グラフより、pH5と pH7いずれの条件においても、添加量が少ない領域では添加量と吸着量は等しく、添加量 が最大吸着量付近に達すると両者の間に差が現れることがわかる。また、pH5のときに比 ベpH7のときの方が最大吸着量が大きい。これは、pH7ではリゾチームのゼータ電位が 小さくリゾチーム間の反発が小さいことと、シリカ粒子のゼータ電位の絶対値が大きくリ ゾチームを強く引き付けるためである。一方pH5では、リゾチーム間の反発力が大きく、 シリカ粒子からの引力が小さいため吸着量が少ない。これらの結果から、シリカ粒子への リゾチームの吸着において静電的な力が支配的であると考えられる。



図 1 リゾチームの添加量と吸着量の関係。 図 2 記号は実験値(□: pH 7, ○: pH 5)を示し、 関係。 実線は添加したリゾチームが全て吸着した 示す。 ことを仮定した際の吸着量を示す。



図 2 リゾチームの添加量とゼータ電位の 関係。記号は実験値(□: pH 7, ○: pH 5)を 示す。

リゾチームの添加量とシリカ粒子のゼータ電位の関係を図2に示す。グラフからいずれ のpHにおいても、はじめ負の値であったシリカ粒子のゼータ電位がリゾチームの吸着に伴 って0mVに近付き、さらに吸着量が増加することでゼータ電位が正になる荷電反転が起こ ることが確認できる。また、リゾチームの吸着によるシリカ粒子のゼータ電位の変化の仕 方は、pH5のときに比べpH7のときの方が緩やかである。これはpH7ではリゾチームの ゼータ電位が小さいことに対応していると考えられる。

シリカ粒子のゼータ電位と降伏値の関係を図3に記号で示す。図中の破線は、リゾチー ムを加えずシリカ粒子のみの懸濁液で pH2の条件、すなわちシリカ粒子が帯電しておらず 粒子間には van der Waals 引力のみが働く条件での降伏値を示している。グラフから pH 5 と pH 7 のいずれにおいても、リゾチームを添加した際の降伏値はシリカ粒子のみで pH 2 のときに比べて大きい。したがって、シリカ粒子間に van der Waals 引力以外に追加的な 引力が働いていることが確認される。この追加的な引力として、一つのリゾチームが複数 のシリカ粒子にまたがるように吸着する架橋作用と、リゾチームの吸着に伴いシリカ粒子 の荷電分布が不均一になることで生じる静電的なパッチ引力が考えられる。粒子間相互作 用がゼータ電位と van der Waals 引力によって決定されるならば、グラフはゼータ電位 0 mVを境に左右対称になるはずである。しかし、いずれの pH においてもグラフは左右対称 になっていない。特に pH7 では、降伏値の最大値が等電点付近ではなく、-10 mV 付近に 位置している。この理由として、架橋作用やパッチ引力の大きさがリゾチームの吸着量に 影響されることに加え、吸着量が大きい領域では吸着しているリゾチーム間の静電的な反 発力が働くことや、シリカ粒子間にリゾチームが挟まることで van der Waals 引力が弱め られること、さらには立体安定効果が働くことが考えられる。以上の結果から、降伏値の 大きさおよび粒子間相互作用はゼータ電位の絶対値だけでは決まらず、リゾチームの吸着 量にも影響されると考えられる。



図 3 シリカ粒子とゼータ電位と降伏値の 関係。記号は実験値(□: pH 7, ○: pH 5)を 示し、破線はシリカ粒子のみ pH 2 の条件 での降伏値を示している。



図 4 相対化したリゾチームの吸着量と 降伏値の関係。記号は実験値(□: pH 7, ○: pH 5)を示す。

図4に降伏値と吸着量の相対値、吸着量を各pHの最大吸着量で除すことで相対化した吸 着量、の関係を示す。グラフからいずれのpHにおいても、吸着量の相対値が0.4付近のと きに降伏値が最大値を取っていることがわかる。このことから、吸着量の相対値が降伏値 に影響することが示唆された。

#### 4. 結論

リゾチームのシリカ粒子への吸着量、シリカ粒子のゼータ電位およびリゾチームとシリ カ粒子の混合懸濁液の降伏値の測定を行った。その結果、粒子間には静電的な反発力と van der Waals 引力以外の非 DLVO 相互作用が働くことを示した。非 DLVO 相互作用として架 橋作用、パッチ引力、van der Waals 引力の減衰、立体安定効果、リゾチーム間の反発力が 考えられる。また、懸濁液の降伏値および粒子間相互作用はゼータ電位だけでは整理でき ず、リゾチームの吸着量にも影響されることを示した。とくに降伏値には最大吸着量に対 する吸着量の割合が影響することが示唆された。

#### 参考文献

- S. B. Johnson, G. V. Franks, P. J. Scales, D. V. Boger, and T. W. Healy, "Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 58, no. 1–4, pp. 267–304, 2000.
- [2] S. B. Johnson, A. S. Russell, and P. J. Scales, "Volume fraction effects in shear rheology and electroacoustic studies of concentrated alumina and kaolin suspensions," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 141, no. 1, pp. 119–130, 1998.
- [3] B. C. Ong, Y. K. Leong, and S. B. Chen, "Interparticle forces in spherical monodispersed silica dispersions: effects of branched polyethylenimine and molecular weight.," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 337, no. 1, pp. 24–31, 2009.

# 豊浦砂中のコロイド輸送:ろ過理論の不飽和領域への拡張

Colloid transport in Toyoura sand: Extending colloid filtration theory into water unsaturated condition

○藤田洋輔、小林幹佳

# Yosuke Fujita, Motoyoshi Kobayashi

# 1. はじめに

土壌汚染の原因物質が土壌中に存在するコロイド粒子(粘土鉱物,金属酸化物,微生物等)に付着し,移動する可能性が指摘されている.このため汚染物質の拡散予測や浄化を行う際には,土壌中のコロイド粒子の移動現象に対して注意を払うことが求められる(McCathy et al., 1989).

土壌中のコロイド粒子の挙動は,移流・分散による間隙中の移動と土壌マトリックスへの沈着の 2つの過程からなると考えられる.このうち,沈着過程はコロイド粒子と土壌マトリックス間及び コロイド粒子同士の物理化学的ならびに流体力学的相互作用力の影響を受ける.代表的な物理化学 的相互作用力として, van der Waals引力と静電反発力があり,コロイド粒子の沈着挙動はこれら の相互作用力の大小に左右される.

沈着の初期過程では、コロイド粒子による土壌マトリックスの被覆率が低く、既に沈着したコロ イド粒子の影響を無視できる.この場合、コロイド粒子と土壌マトリックス間の相互作用力が沈着 挙動に端的に反映される.すなわち、初期過程に着目した沈着実験を実施することで、コロイド粒 子と土壌マトリックス間の相互作用力の影響を定量的に評価することができる.相互作用力のうち、 静電相互作用は溶液の化学性(イオン強度やpH)によって容易に変化するため、静電相互作用が沈 着にあたえる影響を研究した例は多い(Elimelech et al., 1990).しかし、そのような研究は専ら飽和 土を対象としており、不飽和条件での初期沈着挙動を詳細に検討した例は少ない.

不飽和土では間隙中に存在する空気と水の界面(気液界面)が沈着サイトとして機能する.気液 界面への沈着も土壌マトリクスに対する沈着と同様に相互作用力の影響を受けることが,明らかに なっている(Saiers et al., 2003). しかし,気液界面と固液界面が同時に存在する状況で,各界面とコ ロイド粒子の間の相互作用を別々に取り扱うことができるか,相互作用が互いに影響を及ぼし合う のかは明らかではない.そこで,本研究では不飽和条件下でコロイド粒子の初期沈着過程に着目し たカラム実験を実施し,各界面とコロイド粒子の間の相互作用を独立に取り扱うことができるかを 検証する.

# 2. 実験試料及び方法

カラム充填材(コレクター粒子)として豊浦硅石鉱業製の豊浦砂(平均直径 274±7 均直径 µm) を、モデルコロイド粒子として日本触媒製のシリカ粒子(KEP-50) (平均直径 490±23 nm)を用い た.両者とも主成分は二酸化ケイ素であり、シラノール基の解離反応による負電荷を持つ.実験に 用いたシリカ懸濁液の初期濃度*C*<sub>0</sub>を 30 mg/L とし、NaCl 及び NaHCO<sub>3</sub>を用いて、イオン強度を 1 mM から 500 mM に調整した.また、このときの懸濁液の pH を 6.8±0.3 とした.高さ 3 cm、内径 3.2

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 University of Tsukuba コロイド輸送 不飽和

cmの円筒カラムに砂層の高さが2cm,間隙率が0.43となるように水中落下で豊浦砂を充填した. 間隙流速が8.0×.0<sup>5</sup>m/sとなるようにペリスタルティックポンプで流量を調整し,懸濁液をカラム に供給した.実験装置の模式図をFig.1に示す.不飽和条件での実験は,カラム内の溶液条件を調 整した後,供給フラックスを減少させ,カラム下端に作用させるサクションを徐々に増加させるこ とで,カラム内の水分を目的とする値に調整した.このときカラム内の体積含水率θは0.21前後と した.カラム排出液は分光光度計(PD-303, APEL)内に取付けたフローセルに送液した,波長340 nm で吸光度を測定し,検量線をもとに吸光度をカラム出口におけるシリカ粒子の濃度*C*に換算した. 各溶液条件について2回以上実験を行った.



Fig.1 実験装置の概略図 Schematic view of experimental setup

# 3. 結果と考察

飽和条件の場合のシリカ懸濁液の破過曲線を Fig.2 に,不飽和条件の場合の破過曲線を Fig.3 に示す.縦軸はカラム出口でのシリカ懸濁液の濃度を流入口での初期濃度で除した相対濃度であり, 横軸は時間である.実験値を記号で,移流分散方程式による数値計算の結果を実線で示す.

飽和条件の場合,イオン強度が高くなるにつれてブレークスルーした際の相対濃度が低下した. イオン強度が増加すると,コロイド粒子及び土壌マトリックスが持つ電気二重層が圧縮され,静電 斥力が減少する.このため,土壌マトリックスに対してシリカ粒子が沈着し,カラム出口における 流出液の濃度が低下したと考えられる.

不飽和条件の場合も飽和の場合と同様に、イオン強度が高くなるにつれて破過した際の相対濃度 が減少した.不飽和条件下では、土壌マトリックスだけでなく、気液界面も沈着サイトとしてコロ イドの捕捉に寄与する.本実験での溶液条件において、気液界面はシリカ粒子や豊浦砂と同様に負 に帯電している.そのため、イオン強度が低い条件では気液界面とコロイド粒子の間に静電的な反 発力が作用し、砂の場合と同様にコロイド粒子の沈着が妨げられる.しかし、イオン強度が高くな るにつれて、静電的反発力が減少したため、相対濃度の低下が観測されたと考えられる.

同一のイオン強度において,飽和の場合と不飽和の場合を比較すると,不飽和条件で相対濃度が 小さくなった.不飽和条件下では気液界面もコロイド粒子の捕捉に寄与するため,相対濃度が小さ くなったと考えられる.







1000

Time (sec)

1500

1 mM

5 mM

10 mM

50 mM

100 mM

500 mM

2000

### 4. 沈着速度定数の算定

各界面に対する沈着の速度定数を求めることで,各界面とコロイド粒子間の相互作用の独立性に ついて検討する.沈着速度を考慮した多孔質体中のコロイド輸送は式(1)の移流分散方程式で表す ことができる.

1.2

1

0.8

0.6

0.4

0.2

0

0

500

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_p \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial c_s}{\partial t}$$
(1)

 $Cはコロイド懸濁液の濃度, D_hは分散係数, v_pは間隙流速, C_sはカラム内に捕捉されたコロイド粒子の数をそれぞれ表す.右辺第1項は分散によるコロイド粒子の輸送,第2項は移流によるコロイド粒子の輸送を表す.また,第3項はコロイド粒子の沈着を表す.コロイド懸濁液の濃度が十分薄く,コロイド粒子の沈着は界面に対してのみ生じ,脱着も無視できると仮定すると,飽和条件下における固液界面(砂の表面)に対する沈着は式(2)のように表すことができる.$ 

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = k_{s(sat)} f_s \mathcal{C} \quad (2)$$

ここで、k<sub>s</sub>は固液界面に対する沈着速度定数、f<sub>s</sub>は単位間隙体積当たりの固液界面の面積である. 一方、不飽和条件の場合は固液界面に対する沈着に加えて、気液界面(間隙空気)に対する沈着が 生じるため、気液界面に対する沈着速度定数k<sub>a</sub>と単位間隙体積当たりの固液界面の面積f<sub>a</sub>を用いて 沈着項を式(3)のように表す.

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = k_{s(unsat)} f_s C + k_{a(unsat)} f_a C \quad (3)$$

各界面に対する沈着速度定数をフィッティングパラメーターとして移流分散方程式を解き,実験 値を良好に再現する沈着速度定数を求めた. Fig.4 に結果を示す. 横軸はイオン強度,縦軸は各条 件,各界面に対する沈着速度定数である. 飽和条件での固液界面に対する沈着速度定数は,イオン 強度の上昇と伴に増加し,100 mM 以上でおおよそ一定の値となった. 一方,不飽和条件での固液 界面に対する沈着速度定数は,イオン強度 50 mM 以上では飽和の場合と同様な値を示している. しかし,イオン強度が 10 mM 以下の条件では,飽和の場合の沈着速度定数と一致しない. イオン 強度が高い条件では、固液界面と気液界面の相互作用は互いに影響することなく、気液界面が沈着 サイトとして出現したことが、沈着量の増加分と直接結びつけられると考えられる.一方、イオン 強度が低い条件、特に5 mMにおいては、不飽和条件での固液界面に対する沈着速度定数が、飽 和条件の場合の沈着速度定数を上回り、気液界面とコロイド粒子の間の反発的な相互作用が固液界 面に対する沈着を促進した可能性がある.

不飽和条件下での気液界面に対する沈着速度定数は、イオン強度の増加に伴い上昇している.こ れは、カラム実験の結果と定性的に一致している.一方で、本研究の解析では2つの変数をフィッ ティングパラメーターとしているため、絶対値としてこれらの値が正しいかは多少の疑問が残る. 気液界面のみに対する沈着速度定数を個別に算出することで、各界面とコロイド粒子の間の相互作 用が互いに影響を及ぼし合う可能性を、実験的な側面からも検討する必要がある.



**Fig. 4** 各界面に対する沈着速度定数 Deposition rate constants to each interfaces

# 5. おわりに

本研究では、不飽和条件下におけるコロイド粒子の初期沈着過程に着目したカラム実験を実施し、 移流分散方程式に基づいて沈着速度定数の推定を行った。得られた沈着速度定数の値はイオン強度 の増加に伴う沈着量の増加を、沈着速度定数の増加として定量的に表現することができた。また、 イオン強度 5 mM の条件では、不飽和の場合の固液界面に対する沈着速度定数が、飽和の場合の固 液界面に対する沈着速度定数よりも大きくなることから、コロイド粒子と固液界面及び気液界面の 間の相互作用が互いに影響を及ぼす可能性が示唆された。

# 引用文献

- J.F.McCathy, and J.M.Zachara(1989): Subsurface transport of contaminants, *Environmental Science & Technology*, 23, 496–502.
- M.Elimelech, and C.R.O'Melia(1990): Effect of Particle Size on Collision Efficiency in the Deposition of Brownian Particles wit Electrostatic Energy Barriers, *Langmuir.*, 6, 1153-1163.
- J.E.Saiers, and J.J.Lenhart (2003): Ionic-strength effects on colloid transport and interfacial reactions in partially saturated porous media, *Water Resources Research.*, 39, (9)

# 異符号帯電コロイド粒子の乱流ヘテロ凝集速度: 表面電荷密度の影響

Turbulent Aggregation Rate of Oppositely-Charged Colloidal Particles:

Influence of Surface Charge Density

〇杉本 卓也, 小林 幹佳 Takuya SUGIMOTO, Motoyoshi KOBAYASHI

#### 1 はじめに

降雨時や代掻きなどで発生する濁水には,粘土鉱 物や有機物といった種々のコロイド粒子が液体中に 混在し懸濁している.これらのコロイド粒子は重金 属や農薬などの汚染物質を吸着保持し,水の流れと ともに環境中を輸送され,湖沼底泥などへの沈降,堆 積,巻き上げといった輸送過程を経験する.コロイ ド粒子が沈降し,堆積する時間スケールは,その水 理学的な粒径に強く依存する.コロイド粒子は環境 条件に応じて凝集するため,水理学的な粒径は凝集 の進行に伴い増加する.したがって,コロイド粒子 の凝集挙動を理解することは,浮遊・堆積物質の輸 送動態を把握し,制御する上で重要である.

コロイド粒子の凝集挙動は, 粒子の衝突過程と粒 子間の相互作用によって左右される. 衝突過程は, ブラウン運動と流体の速度勾配によるものに大別さ れる.一方,粒子間の相互作用は,流体力学的相互作 用と物理化学的相互作用からなり、物理化学的相互 作用は古典的な DLVO 理論によれば van der Waals (vdW) 引力と静電相互作用力の和として記述され る.近年,同符号に帯電した粒子の凝集速度につい ては,実験と理論との定量的な比較・検討が行われ てきている<sup>1,2</sup>.しかし,実際の環境中で起こるよう な,異なる粒子間の凝集であるヘテロ凝集について は、ブラウン運動や沈着についての検討はあるもの の,流れ場での実験データが不足している.特に,異 符号に帯電した粒子同士の流れ場中でのヘテロ凝集 において、表面電荷密度の影響に着目した実験的検 討は未だ十分でない.

そこで本研究では,異符号に帯電したコロイド粒 子間の乱流ヘテロ凝集速度を測定した.このとき, 異なる電荷密度を有する粒子を用いることで,乱流

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 乱流ヘテロ凝集, 軌道解析, DLVO 理論, 表面電荷密度 ヘテロ凝集速度への電荷密度の影響について検討 した.

# 2 試料と実験方法

試料として、モデルコロイド粒子である、ポリスチ レンラテックス粒子を採用した.ここで、乱流ヘテ ロ凝集速度への電荷密度の影響を明らかにするため に、異なる電荷密度の絶対値を持つ、正に帯電したア ミジンラテックス (AL)、アルデヒドアミジンラテッ クス (AA)を、負に帯電したサルフェイトラテック ス (SL)、およびカルボキシルラテックス (CL)を用 いた.実験に用いた粒子の直径および電荷密度の値 を Table 1 に示す.ほぼ等しい粒径を持つ異符号に 帯電した粒子の 4 つの組み合わせについて、乱流へ テロ凝集速度の測定を行った.

Table 1 Properties of the particles used in present study: d particle diameter, the values of  $\sigma$  surface charge density at 0.01 mM and pH 5, where  $\sigma$  for carboxyl are estimated by 1pK-Gouy-Chapman model.

Abbreviation	Surface head-groups	$d~[\mu m]$	$\sigma~[\rm mC/m^2]$
2.1AL	Amidine	2.1	+302
2.0 SL	Sulfate	2.0	-84
$2.0\mathrm{CL}$	Carboxyl	2.0	-2.3
$1.5 \mathrm{CL}$	Aldehyde Amidine	1.5	+182
1.6SL	Sulfate	1.6	-50
$1.5 \mathrm{CL}$	Carboxyl	1.5	-2.0

乱流ヘテロ凝集速度は、凝集に伴う懸濁液の吸光 度の時間変化の測定から決定した.乱流は転倒撹 拌により発生させた.凝集速度の理論値を計算す るために、マイクロスケールの乱流を特徴づけるエ ネルギー消散率  $\epsilon_{\rm T}$  を  $\epsilon_{\rm T} = ghf$  により算出した <sup>4</sup>. ここで、g は重力加速度、h は懸濁液の落下高 さ、f は落下周期である.このとき、吸光度セルの 寸法 (高さ 4.46 cm、幅および奥行き 1 cm) から h = 2.23 - 0.5 = 1.73 cm、転倒撹拌の回転速度から  $f = 2 \text{ s}^{-1}$  とした. 実験は pH 5 において, KCl 濃 度を変数として行われた. pH 調整剤として HCl を 用いた.

# 3 理論モデル

乱流ヘテロ凝集速度定数 k<sub>нET,T</sub> は,次式のように 表現できる.

$$k_{\rm HET,T} = \alpha_{\rm T} (R_1 + R_2)^3 \sqrt{\frac{8\pi\epsilon_{\rm T}}{15\nu}}$$
 (1)

ここで,  $R_1$ ,  $R_2$  はそれぞれヘテロ凝集する粒子の 半径,  $\nu$  は動粘性係数である.式 (1) は等方性乱流 中の凝集速度 <sup>3</sup> ヘ,捕捉効率  $\alpha_{\rm T}$  を導入することで 相互作用を考慮している.

式 (1) の 捕捉効率  $\alpha_{\rm T}$  を凝集の起こる長さスケー ルが乱流の最小渦径よりも小さいとして, 剪断流中 における軌道解析により近似的に計算した<sup>4</sup>. 軌道 解析とは, 流体力学的・物理化学的相互作用を考慮 して粒子間の相対位置の時間発展を計算する手法で ある (**Fig. 1**). 軌道解析によれば, 捕捉効率  $\alpha_{\rm T}$  は 次式で表せる.

$$\alpha_{\rm T} = \frac{3}{2(R_1 + R_2)^3} \int_0^{z_{max}} [x_{\rm c}(z')]^2 dz' \qquad (2)$$

ここで,  $x_c(z)$  と  $z_{max}$  は, それぞれ **Fig. 1** 中の x-z 平面上の斜線で表した領域における外縁とその 領域上での z の最大値である. この  $x_c(z)$  と  $z_{max}$ により特徴づけられる斜線の領域を捕捉断面積とい い,この断面を通過する粒子は,軌道解析において, 最終的に凝集するということを意味する.

粒子の出発点を順次変化させて軌道解析を実施 し,  $x_c(z)$  と  $z_{max}$  を求めることで,捕捉効率  $\alpha_{T}$  を 計算した. Fig. 1 のように,原点においた基準粒子 から十分離れた x - z 平面上 ( $y = -100R_1$ ) から粒



Fig. 1 Schematic representation of a trajectory analysis.  $U_p$  the particle relative velocity,  $x_c(z)$  the boundary between aggregation or not on x-z plane at the released point, and  $z_{\max}$  the maximum of z on the boundary, respectively.

子を出発させ、各出発位置からの粒子の軌道が凝集 に至るか凝集しないかを判定し、 $x_c(z)$ と $z_{max}$ を求 めた.このとき、次の軌道方程式に従い、粒子の軌 道を計算した<sup>5</sup>.

$$\frac{tr}{tt^{*}} = r^{*}(1 - \mathcal{A}(r^{*})) \sin^{2} \theta \sin \phi \cos \phi + \frac{\mathcal{C}(r^{*})}{6\pi\eta G R_{1}^{2}} (F_{vdW}(h) + F_{edl}(h))$$
(3)

$$\frac{d\theta}{dt^*} = (1 - \mathcal{B}(r^*))\sin\theta\cos\theta\sin\phi\cos\phi \quad (4)$$

$$\frac{d\phi}{dt^*} = \cos^2\phi - \frac{\mathcal{B}(r^*)}{2}\cos 2\phi \tag{5}$$

これらの方程式により,ブラウン運動を無視した場 合について,2つの粒子間の相対運動(衝突軌道)を 決定することができる.ここで, $r^* = r/R_1$  ( $R_1 > =$  $R_2$ )は無次元球中心間距離, $h = r - (R_1 + R_2)$ は 粒子間距離, $t^* = Gt$ は無次元時間,および  $\eta$ は 粘性係数である.また,Gは平均速度勾配であり,  $G = \sqrt{4\epsilon_T/(15\pi\nu)}$ とした. $\mathcal{A}(r^*)$ , $\mathcal{B}(r^*)$ , $\mathcal{C}(r^*)$ は流体力学的相互作用関数である.また,式(3)中 の $F_{vdW}(h)$ と $F_{edl}(h)$ はそれぞれ物理化学的相互 作用力である van der Waals 引力と静電相互作用力 を表わす.

軌道解析において, van der Waals 引力の表式に, 電磁波の有限な伝播速度に起因する遅延効果を考慮 した式 (6), (7) を用いた<sup>5</sup>. London 波長  $\lambda_{\rm L}$  で無 次元化した粒子間距離 p <sup>か</sup>  $p = 2\pi h/\lambda_{\rm L} < 0.590$  の 場合<sup>5</sup>,

$$F_{vdW}(h) = -\frac{A_{\rm H}R_1R_2}{(R_1 + R_2)h^2} \frac{1 + 3.54p}{6(1 + 1.77p)^2}$$
(6)

また,  $p \ge 0.590$ の場合は次式で与えられる.

$$F_{vdW}(h) = -\frac{A_{\rm H}R_1R_2}{(R_1 + R_2)h^2} \left(\frac{2.45}{15p} - \frac{2.17}{30p^2} + \frac{1.18}{105p^3}\right)$$
(7)

ここで, London 波長の値は,  $\lambda_{\rm L} = 100$  nm とした. また,  $A_{\rm H}$  はハマカー定数であり, van der Waals 引 力の大きさを規定する.本研究では,文献値をもと に  $A_{\rm H} = 10^{-20}$  J とした <sup>5</sup>.

また,静電相互作用力 *F<sub>edl</sub>(h)* の計算には,拡散 電気二重層理論に基づき,粒子の表面電荷密度が一 定であるとして,以下の表式を用いた<sup>6,7</sup>.

$$F_{edl}(h) = \frac{4\pi n_b k_B T}{\kappa} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left[ \left( \frac{C}{2} + 1 \right) \kappa h + 2\left( \sqrt{\sigma_1'^2 + 4} + \sqrt{\sigma_2'^2 + 4} - 4 \right) - J_1 + J_2 \right]$$
(8)

ここで、 $n_b$  はバルク中の塩濃度、 $k_B$  はボルツマン 定数、T は絶対温度、 $\kappa = \sqrt{2e^2n_b/(\epsilon_r\epsilon_0k_BT)}$  は デバイのパラメータ、e は電気素量、 $\epsilon_r\epsilon_0$  は溶媒 の誘電率である.また、 $\sigma'_i = e\sigma_i/(\epsilon_r\epsilon_0\kappa k_BT)$  は 無次元化した各粒子の表面電荷密度である. $C = -(P(h)/(n_bk_BT) + 2)$  であり、P(h) は表面間に働 く単位面積当りの相互作用力である. $J_1, J_2$  は C と  $\sigma'_i$  に依存する積分項である<sup>7</sup>.式 (8) および P(h)の粒子間距離 h への依存性を、任意の電位に適用で きる大島の表式により計算した<sup>6,7</sup>.

#### 4 結果と考察

Fig. 2 に,得られた乱流ヘテロ凝集速度と塩濃 度の関係を示す.図中の記号は実験値であり,実線 と破線は軌道解析に基づく理論値である.また,図 中のテキストは粒子の組み合わせを表し,アルファ ベットが粒子の種類を,数字がµm単位での粒子直 径を表している.Fig. 2より,1mM以下のイオン 強度において凝集速度が増加していることが分かる. これはイオン強度の減少に伴い,異符号帯電粒子間 の静電引力の作用範囲が増加したためだと考えられ る.一方,1mM以上においても,見かけ上,凝集 速度の増加が見られた.これはイオン強度の増加に 伴い,同符号帯電粒子間の静電斥力が弱まり,同種



Fig. 2 Turbulent hetero-aggregation rates as a function of ionic strength for four different combinations: symbols are experimental values, solid and dashed lines indicate the theoretical ones calculated by using the trajectory analysis with a Hamaker constant of  $10^{-20}$  J

粒子間のホモ凝集が同時に起こったためだと考えら れる.また,異なる粒子の組み合わせにおける実験 結果から,表面電荷密度が大きく異なっても,1mM 以下での凝集速度の増加には顕著な影響を及ばさな いことが分かった.さらに,理論値は実験結果と定 性的に一致した.従って,低イオン強度での凝集速 度の増加には,電荷密度の絶対値に規定される静電 引力の大きさよりも,イオン強度により制御される 引力の作用範囲が重要であることが示された.

#### 5 結論

異符号に帯電したコロイド粒子の乱流凝集速度へ の表面電荷密度の影響について,電荷密度が異なる 粒子の組み合わせを用いて,実験的に検討した.そ の結果,電荷密度が大きく異なる場合でも,低塩濃度 でのヘテロ凝集速度の増加には,顕著な影響を及ぼ さないことが分かった.さらに,理論モデルによる 計算値は,実験結果と定性的に一致した.したがっ て,低塩濃度でのヘテロ凝集速度の増加には,電荷密 度の絶対値(静電引力の大きさ)よりも,塩濃度(静 電引力の作用範囲)が重要であることが分かった.

# 引用文献

- D. Sato *et al.*, Colloids Surf. A 266 (2005) 150–154.
- [2] T. Sugimoto *et al.*, JSCE, Ser. A2 (Applied Mechanics) 70(2) (2014) I\_475–I\_482.
- [3] P. Saffman, J.S. Turner, J. Fluid Mech. 1 (1956) 16–30.
- [4] Y. Adachi *et al.*, J. Colloid Interface Sci. 165 (1994) 310–317.
- [5] M. Vanni, J. B. Baldi, Adv.Colloid Interface Sci. 97 (2002) 151–177.
- [6] H. Ohshima, Colloid Polymer Sci. 252 (1974) 257–267.
- [7] H. Ohshima, Colloid Polymer Sci. 253 (1975) 150–157.

# Sedimentation of flocculated slurry of Na-montmorillonites

Wu Ming-yu, Yanuar Agro, Yasuhisa Adachi

Graduate School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba, 1-1-1, Tennnoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8572 Japan

# **1. Introduction**

Montmorillonite is an important clay mineral for industrial, agricultural and environmental process (van Olphen, 1977). One important characteristic of this clay is that it is quite easy to make big flocs when the counter ions are replaced by sodium ions under high ionic strength (Miyahara et al, 2001). In this case, the sedimentation behavior is largely influenced by the formation of big flocs. In addition, it is known that microscopic interaction between this clay particles can easily altered by the change of pH and ionic condition. Therefore, montmorillonite slurry can be regarded one of the most reasonable material to study the relation between microscopic interaction of particles and macroscopic behavior of suspension by changing the chemical condition. In the present study, the sedimentation behavior of dilute suspension of Na-montmorillonite in the flocculated regime was studied as a function of ionic strength at the two different pH values, pH9.5 and 4.0. On the basis of Imai's classification (Imai, 1980), the "semi-dilute" region of particle concentration was chosen for the intensive analysis. All the experiments demonstrated three stages of sedimentation characterized by the initial flocculation with very slow rate of sedimentation followed by the rapid movement of interface between sediment and supernatant and the slow consolidation. The duration of initial stage, the maximum velocity of the interface in the second stage and the ultimate height of sediment were considered to be important indexes to characterize the sedimentation behavior. In this study, we are trying to ascribe the sedimentation behavior of flocculated slurry of Na-montmorillonite with particles interactions, which are affected by the chemical factors (NaCl concentration and pH).

# 2. Material and Methods

The slurry of Na-montmorillonite was prepared from Kunipia-F saturated with 1.0 M NaCl solution. The pH value was set at  $4.0\pm0.3$  and  $9.5\pm0.3$ . NaCl concentration varied from 0.05 to 1.5 M. The sedimentation behavior is recorded just by the location of the interface between settling slurry and supernatant as a function of time. The diameter of settling tubes was 50 mm, the initial height of suspension was 158 mm. All the samples were rotated by end-over-end for 5 times at the frequency of 2 times/sec and followed by 1 min. ultra sonication (frequency: 100kHz). The maximum rate of zone sedimentation was analyzed on the basis of Michaels-Bolger (M-B) method (Michaels and Bolger, 1962), which employs Richardson-Zaki equation (Richardson and Zaki, 1954).

# 3. Results and discussion

The flocculation process in different chemical conditions is importantly indexed by

the duration time of initial satage. From Figure 1, we can observe the duration time decreases with increase of NaCl concentration. In the range of low NaCl concentration, obviously longer duration time was observed, and the effect of pH becomes negligible in the high NaCl concentration region. The flocculation rate can be attributed to the probability of effective random collision. On the basis of unique properties of Na-montmorillonite particles, in low NaCl concentration range, under acidic condition, the edge charged positively, the edge-to-face (EF) model is predominant and will result in the increase of the effective collision. In the range of high NaCl concentration, spill-over effect of electric double layer will be eliminated, more bare/ low charge density areas appeared, hydration energy of counter ions will be reduced, probability of effective random collision will be increased. The particles interaction model may apply the multipoint contact structure. That is, as many as possible conjunction points contact each other among the neighboring particles. Therefore, the floc becomes denser and stronger, and the weak EF bond should be broken.

As shown in Figure 2, the maximum velocity increase with increase of NaCl concentration. The pH influences the velocity remarkably in the range of low salt concentration. The values of  $\alpha$  calculated from maximum velocities of the interfaces as function of solid concentrations, employing the M-B method, responds well to the maximum velocities as an inverse relation (Figure 3). Therefore, in the low salt concentration region, the particles associate as Keren's open FF structure (Keren et al, 1988) and van Olphen's "double T" internal mutual flocculation structure (van Olphen, 1964) respectively. In the region of high salt concentration, the variation of  $\alpha$  value by the effect of pH was found to be negligibly small. This can be ascribed to the model of internal particles association or multipoint contact structure. With this picture, it is considered the weak EF bond will be broken. As  $\alpha$  value is smaller, the floc is denser and stronger. Additionally, the trend of variation of  $\alpha$  value as function of salt concentration is different with Miyahara's results (Miyahara et al, 2001). This may contributes to different pretreatment or the suspicion of the validity of M-B method on voluminous flocs, which should be studied further.

From Figure 4, we can find the relation of floc strength as function of salt concentration is well expressed in the variation of ultimate sediment height, which is against the self-weight of the slurry. But the pH influences the sediment height in different models. That is, in the region of low salt concentration, the heights under acidic condition is higher than that of alkaline ones that can attribute to the face-to-face bonds formed by van der Waals force were reformed, the particles conjunction direction became more parallel array under alkaline condition. The strong EF bonds still exist to form the triangular structure under acidic condition. In the high salt concentration range, the contrary trend exists in the effect of pH. The height of acidic samples is slightly lower than that of alkaline ones. One interpretation contributes to the increase of coordination number because of the existence of strong EF bonds under acidic condition. The coordination number is inverse proportion to the volume fraction of sediment. Another is explained by the stronger floc strength under alkaline condition comparing with the acidic one, following with Miyahara's



(Miyahara et al, 1998) opinion. Hitherto, there is lacking of direct evidence to support which one of these interpretations is correct.

Figure 1 The duration time for flocculation stage as function of NaCl concentration at different pH.  $\phi$ =0.1097%.



Figure 3 the increment ratio (  $\alpha$  ) as function of NaCl concentration at different pH values with Miyahara's data (Miyahara et al, 2001)



Figure 2 The maximum velocity of interface (Q, mm/min) for zone settling stage as function of NaCl concentration at different pH (to the left). The relative difference in percentage (RDP) of Q as function of pH at different NaCl concentrations (to the right).  $\emptyset$ =0.1097‰.



Figure 4 The ultimate sediment height (sedimentation time: 31 days) as function of NaCl concentration at different pH value. H0=200mm, the concentration of primary particles:  $\emptyset$ 1=0.1155‰,  $\emptyset$ 2=0.231‰.

# 4. Conclusion

The duration of initial stage decreases with an increase of ionic concentration and that longer for the slurry prepared in high pH at the range of "low" NaCl concentration.

The ultimate sediment height increases with an increase of ionic strength and is found to be slightly larger for the sediment prepared for high pH at the range of high NaCl concentration. This is consistent with the result that larger floc strength for higher ionic strength reported by Miyahara et al (1998).

However, the increment ratio ( $\alpha$ ) obtained from the maximum velocity of the movement of interface in the second stage on the basis of Michaels and Bolger method were found to decrease with an increase of ionic strength.

# Reference

Imai G. (1980) Settling behavior of clay suspension. Soils and Foundations. 20(2):61-77

Keren R., Shainberg I. and Eva Klein. (1988) Settling and flocculation value of

sodium-montmorillonite particles in aqueous media. Soil Science Society of America Journal. 52(1): 76-80

Michaels A. S., Bolger J. C. (1962) Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. 1(1):24-33

Miyahara K., Adachi Y. and Nakaishi K. (1998) The viscosity of a dilute suspension of sodium montmorillonite in an alkaline state. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 131(1-3): 69-75

Miyahara K., Ohtsubo M., Nakaishi K., Adachi Y. (2001) Sedimentation rate of sodium montmorillonite suspension under high ionic strength. Nendo Kagaku (Journal of the Clay Science Society of Japan). 40(3): 179-184

Richardson J.F., Zaki W.N. (1954) Sedimentation and fluidization: part 1. Transactions of the Institution of Chemical Engineers 32, 35-53

van Olphen. (1964) Internal mutual flocculation in clay suspensions. Journal of Colloid Science. 19(4):313-322

van Olphen. (1977) An introduction to clay colloid chemistry. 2nd ed. Wiley-Interscience.

# **Designing and modeling on-farm desalination system using dew collection technology 露収集技術を用いた圃場近接型除塩システムの設計とモデル化**

OMohawesh Osama <sup>1,2</sup>, Unami Koichi<sup>1</sup>, Fujihara Masayuki <sup>1</sup> <sup>1</sup>Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Japan <sup>2</sup>Faculty of Agriculture, Mutah University, Jordan

## 1. Introduction

Water shortage and salinity are crucial factors affecting plant growth in arid and semi-arid regions, where irrigation water shortage and capillary rise from shallow saline water tables are often encountered (Salameh, 2001). An increasing demand for water, particularly in arid and semi-arid regions, has enforced farmers to use low-quality water sources such as brackish water, saline ground water, and leaching returnflow water for irrigation. Having the knowledge on the level of salinity of such water, it is very important to treat and desalinate this water to retain sustainable agricultural practices (Chaibi, 2000). In light of the addressed water-related problems, novel means to tackle water shortage are essential (Unami et al, 2015).

The scarcity and erratic nature of rainfall make this option a viable solution (Unami et al, 2015). This can be achieved using a technology humidification-dehumidification called greenhouses (Perret et al, 2005; Jolliet, 1994). Water desalination powered by solar energy can help to solve the main problems associated with irrigation water demand, mainly for protected cropping. Desalination process needs considerable quantities of energy to attain separate of salt from saline water. The economic and environmental costs of conventional energy sources for water desalination highlighted the solar energy, as a potential power source for desalination. Renewable-energy systems, which utilizing freely available energy source (solar energy) are sensible sustainable solutions.

Desalination looks appropriate where saline or brackish water is available. The cost of power desalination is not practical methods for arid land farming (Goosen et al, 2001). Several countries are facing water shortage, however, they most benefit from solar energy potential. This desalination method can offer a viable key to supply arid lands with fresh water (Chaibi, 2000). The approach is to use solar-powered energy through evaporation, to humidify and saturate the air inside the greenhouse using saline water. If its temperature is falling below the dewpoint, which usually happened during the night, condensation of fresh water should occur. This system potentially can he incorporated into the design of the greenhouses in arid regions. Greenlee et al (2009) stated that desalination is a valuable means of securing water for drinking and agricultural irrigation.

Several studies of solar desalination and its application to greenhouse irrigation have been conducted. Malik et al (1996) experimentally examined the potential use of greenhouse fitted with solar desalination systems for small-scale farming in areas which only saline or brackish water is available. Chaibi (2002) used simulation model and experiments to explore a greenhouse roof integrated desalination system. He found that the system could be used as a means of supplying irrigation water to greenhouse crops in an arid environment. Medina (2006) indicated that the use of water desalination in agriculture is practical. Zhani (2013) found that a suitable distilled water quality for irrigation was obtained using a theoretical and experimental solar desalination study. Mashaly et al (2015) found that  $1 \text{ m}^2$  of solar-still systems met the crop water requirement of about 2 m<sup>2</sup> of protected cultivation in Saudi Arabia.

A considerable part of the Middle East and North Africa (MENA) region are in such a harsh environment with a precipitation of less than 100 mm year-1 (Oroud 2008; Matouq, 2013). Mohawesh (2016) stated that the agricultural irrigation made up approximately 70% of Jordan's water consumption, where agriculture is the primary job activity and a key role in food security. The Jordan Valley is several degrees warmer than adjacent areas and is compared to function as a giant greenhouse, due to the unique location and all-year good climate conditions (Mohawesh, 2014). The agriculture in Jordan Valley is totally depending on water for irrigation (Molle et al, 2008). However, increased water scarcity, low rainfall, and its uneven distribution, high losses due to evaporation and surface runoff, increased demand due to population growth and deteriorating water qualities are major problems affecting agricultural productivity.

In Jordan Valley, farming is commonly practiced using plastic mulches and trickle irrigation systems. This practice is suitable and effective, either in open fields or under greenhouses due to its advantages in preserving the limited irrigation water resources (Mahadeen et al, 2011; Amayreh and Al-Abed, 2005). The aim of the protected cultivation is not only to provide a suitable environment for crop growth but also it decreases crop water requirements (CWR). The average daily open field crop water requirement in the southern part of the Jordan Valley under mulched and drip irrigation system is 3 mm/day (JVA, 2004). However, protected cultivation requires less water than open-field agriculture, with a reduction in CWR of approximately 20-50% (Harmanto et al, 2005).

The southern part of the Jordan valley, near the south end of the Dead Sea part (Lisan Peninsula (LP)), is characterized by the lowest precipitation, due to its elevation below mean sea level (-420 m below sea level) and high salinity along the coast of the Dead Sea. In LP area, the aridity coupled with over-pumping of ground water has often resulted in water quality deterioration. Irrigating with low water quality has resulted in increasing soil salinity. Accordingly, many cultivated lands in LP are being abandoned or less productive (Ammari et al, 2013). This requires securing freshwater for irrigation, which can be achieved by instigating proper methods for exploiting of saline/brackish water sources. Therefore, the objectives of this study are as follows: design a solar-powered GH, assess its performance in water production capacity using simulated model under numerous scenarios, and to determine the command area that can be met by the solar desalination system.

### 2. Mathematical model formulation

The heat and mass balance of the GH has three major parts (Fig. 1): (1) greenhouse cover ( $GH_{cv}$ ), (2) greenhouse air ( $GH_a$ ), and (3) greenhouse ground surface ( $GH_s$ ). Heat transfer in the GH occurs in three means: conduction/convection, radiation, and latent heat (evaporation) (Fig. 1). Models were used to balance mass and heat transfer among these three major parts.

- 2.1 GH energy balance
- 2.1.1 Greenhouse cover (GH<sub>cv</sub>)

The  $GH_{cv}$  is a few microns thickness. Hence, the temperatures of the two sides (internal and external) were assumed comparable.

$$\frac{dQ_{cv} = Q_{sol,cv} - Q_{cnv, cv-a} - Q_{cnv,cv-e} +}{O_{cdcv} - O_{rad,cv-skv} + O_{rad,cv}}$$
(1)

where  $dQ_{cv}$  is GH<sub>cv</sub> net energy flux (W m<sup>-2</sup>),  $Q_{sol,cv}$  (W m<sup>-2</sup>) is solar radiation absorbed by GH<sub>cv</sub>,  $Q_{cnv, cv-a}$  (W m<sup>-2</sup>) is convective heat transfer flux between GH<sub>cv</sub> and GHa,  $Q_{cnv,cv-e}$ (W m<sup>-2</sup>) is convective heat transfer flux between GH<sub>cv</sub> and greenhouse outside air (GHe),  $Q_{cd,cv}$ (W m<sup>-2</sup>) is latent heat produced by water vapor condensation on GH<sub>cv</sub>,  $Q_{rad,cv-sky}$  (W m<sup>-2</sup>) is thermal radiation between  $GH_{cv}$  and sky,  $Q_{rad,cv}$  is thermal radiation balance from the inside and outside of the GH.

The  $Q_{sol,cv}$  is calculated using the following equation:

$$Q_{sol,cv} = C_{cv,abs} R_s \tag{2}$$

where  $C_{cv,abs}$  is  $GH_{cv}$  solar radiation absorptivity and  $R_s$  (W m<sup>-2</sup>) is solar radiation.

The  $Q_{cmv, cv-a}$  is calculated using the following equation:

$$Q_{cnv, cv-a} = h_{cnv, cv-a} \left( T_{cv} - T_a \right) \tag{3}$$

where  $h_{cnv,cv-a}$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) is GH<sub>cv</sub> convective heat transfer coefficient between GH<sub>cv</sub> and GHa,  $T_{cv}$  (K) is GH<sub>cv</sub> temperature, and  $T_a$  (K) is GHa temperature.

The  $Q_{cnv, cv-e}$  is calculated by:  $Q_{cnv, cv-e} = h_{cnv,cv-e} (T_{cv} - T_e)$  (4)

where  $h_{cmv,cv-e}$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) is GH<sub>cv</sub> convective heat transfer coefficient between GH<sub>cv</sub> and GHe, and  $T_e$  (K) is GHe temperature.

The  $Q_{cd,cv}$  is calculated based on  $GH_{cv}$  temperature as follow:

$$Q_{cd,cv} = h_{cnv,cv-a}L_t \left( H_{cv,sat} - H_{a,a} \right)$$
(5)

where  $L_t$  (J Kg<sup>-1</sup>) is latent heat of vaporization,  $H_{cv,sat}$  (Kg<sub>water</sub> Kg<sub>air</sub><sup>-1</sup>) is absolute humidity at saturation based on  $T_{cv}$ , and  $H_{a,a}$  (Kg<sub>water</sub> Kg<sub>air</sub><sup>-1</sup>) is absolute humidity of GHa. Condensation takes place when  $H_{a,a}$  is greater than  $H_{cv,sat}$ . The absolute humidity as a function of air vapor pressure ( $e_a$  or  $e_s$  (Pa)) is calculated using this equation:

$$H = 0.622 \left(\frac{e_a}{e_{atm} - e_a}\right) \tag{6}$$

where  $e_{atm}$  is atmospheric pressure (Pa), 0.622 is the ratio of molecular weights of water vapor (18.02KgKmol<sup>-1</sup>) to dry air (28.97KgKmol<sup>-1</sup>),  $e_a$ is actual air vapor pressure, and  $e_s$  is saturated vapor pressure. The  $e_a$  and  $e_s$  (Pa) at temperature T (°C), are calculated by:  $e_s = 6.1078(7.5T/(T+237.3))^{10}$  (7)

The  $Q_{rad,cv}$  is calculated using this equation:

$$Q_{rad,cv} = Q_{rad,s-cv} + Q_{rad,WRC-cv} + Q_{rad,wditch-cv} = \mu_s \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \mu_{WRC} \varepsilon_{WRC} \sigma T_{WRC}^4$$

$$+ \mu_{wditch} \varepsilon_w \sigma T_{wditch}^4$$
(8)

where  $\mu_{WRC}$  (-) is WRC area ratio,  $\mu_s$  (-) is soil surface ratio,  $\mu_{wditch}$  is water ditch surface ratio,  $\sigma$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>) is Stefan-Boltzmann constant,  $T_s$ ,  $T_{WRC}$ , and  $T_{wditch}$  (K) are GHs, WRC, and water ditch temperatures, respectively. The  $Q_{rad,cv-sky}$  is calculated using the following equation:

$$Q_{rad,cv-sky} = \varepsilon_{cv}\sigma(T_{cv}^4 - T_{sky}^4)(1 - CC)$$
(9)

where  $\varepsilon_{cv}(-)$  is GH<sub>cv</sub> emissivity,  $T_{sky}(K)$  is sky temperature, and *CC* is fraction of cloud cover.

The  $T_{sky}$  is calculated using the following equation:

$$T_{sky}^{4} = 9.365574 \times 10^{-6} (1 - CC) T_{e}^{6} + T_{e}^{4} CC \quad (10)$$

2.2.2 GH air (GHa)

 $dQ_a = Q_{cnv,cv-a} + Q_{cnv,s-a} + Q_{cnv,WRC-a} + Q_{cnv,wditch-a}$  (11) where  $dQ_a$  is GHa net energy flux (W m<sup>-2</sup>),  $Q_{cnv,cv-a}$  (W m<sup>-2</sup>) is convection heat flux between GHa and GH<sub>cv</sub>,  $Q_{cnv,s-a}$  (W m<sup>-2</sup>) is convection heat flux between GHa and GHs,  $Q_{cnv,WRC-a}$  (W m<sup>-2</sup>) is convection heat flux between GHa and WRC, and  $Q_{cnv,wditch-a}$  (W m<sup>-2</sup>) is convection heat flux between GHa and water ditch.

2.2.3 GH ground surface (GHs)

$$dQ_s = Q_{sol,st} - Q_{cnv,s-a} - Q_{rad-net,s} - Q_{evap,s}$$
(12)

where  $dQ_s$  is GHs net energy flux (W m<sup>-2</sup>),  $Q_{sol,st}$  (W m<sup>-2</sup>) is total solar radiation absorbed by GHs,  $Q_{onv,s-a}$  (W m<sup>-2</sup>) is convection heat flux between GHs and GHa,  $Q_{rad-net,s}$  (W m<sup>-2</sup>) is net thermal radiation flux of GHs, and  $Q_{evap,s}$  (W m<sup>-2</sup>) is the evaporation latent heat flux.

The  $Q_{sol,st}$  is calculated using the following equation:

$$Q_{sol,st} = \omega_s C_{abs,s} R_{sol,s} + \omega_w C_{abs,w} R_{sol,s}$$
 (13)  
where  $\omega_s$  (-) is soil area ratio,  $C_{abs,s}$  (-) is GH  
soil absorbance,  $R_{sol,s}$  (W m<sup>-2</sup>) is solar radiation  
reach GHs,  $\omega_w$  (-) is water ditch surface ratio,  
and  $C_{abs,w}$  (-) is water solar radiation absorbance.  
The  $Q_{cmv,s-a}$  between GHs and GHa is calculated  
using the following equation:

$$Q_{cmv,s-a} = h_{cmv,s-a} \left( T_s - T_a \right) \tag{14}$$

where  $h_{cnv,s-a}$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) is the convective heat transfer coefficient between GHs and GHa, and  $T_s$  (K) is GHs temperature.

The  $Q_{rad-net,s}$  is calculated using the following equation:

$$Q_{rad-net,s} = Q_{rad,cv-s} + Q_{rad,WRC-s} - Q_{rad,s} = \mu_s \varepsilon_{cv} \sigma T_{cv}^4 + \mu_{WRC} \varepsilon_{WRC} \sigma T_{WRC}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4$$
(15)

where  $Q_{rad,cv-s}$  (W m<sup>-2</sup>) is thermal radiation between GH<sub>cv</sub> and GHs,  $Q_{rad,WRC-s}$  (W m<sup>-2</sup>) is thermal radiation between GHs and WRC,  $Q_{rad,s}$ (W m<sup>-2</sup>) is thermal radiation of GHs,  $\mu_s$  (-) is (( *GHs*<sub>area</sub> - *WRC*<sub>area</sub> / *GHs*<sub>area</sub> ) ratio, *WRC*<sub>area</sub> (m<sup>2</sup>) is WRC area,  $\varepsilon_{cv}$  is GH<sub>cv</sub> emissivity,  $\mu_{WRC}$  (-) is (  $WRC_{area} / GHs_{area}$  ) ratio,  $\mathcal{E}WRC$  (-) is WRC emissivity, and  $T_{WRC}$  (K) is WRC temperature. The evaporation thermal energy is calculated from water vapor balance inside GH as follows:

$$Q_{evap,s} = L_t M_{evap,s} \tag{16}$$

where  $Q_{evap,s}$  (W m<sup>-2</sup>) is evaporation thermal energy, and  $M_{evap,s}$  (Kg m<sup>-2</sup>) is mass of evaporative water from GHs. 2.2.4 Water vapor balance

$$dM_a = M_{evap,s} - M_{cd,cv} \tag{17}$$

Where  $dM_a$  is vapor net flux (Kg m<sup>-2</sup>),  $M_{evap,s}$  (Kg m<sup>-2</sup>) is water evaporation from the saline water ditches inside GH, and  $M_{cd,cv}$  (Kg m<sup>-2</sup>) is water vapor condensation flux on GH<sub>cv</sub>.

$$M_{cd,cv} = h_{cnv,cv-a} \left( H_{cv,sat} - H_{a,a} \right)$$
(18)

 $M_{cd,cv} = 0$ , if  $H_{a,a} < H_{cv,sat}$  ( $M_{cd,cv}$  takes place when the water vapor concentration of the internal air is greater than the water concentration at saturation calculated based on  $T_{cv}$ ).

$$M_{evap,s} = h_{cnv,s-a} \left( H_{s,sat} - H_{a,a} \right) \tag{19}$$

where  $H_{s,sat}$  (Kg<sub>water</sub> Kg<sub>air</sub><sup>-1</sup>) is absolute humidity at saturation based on  $T_s$ .

The equation systems (1, 11, 12, and 17) were formulated in a form of a system of ordinary differential equations accompanied with initial and boundary conditions to model and balance mass and heat transfer among the major parts of the GH. Numerical solution based on the fourth-order Runge-Kutta method with adaptive step size control were used to simulate mass and heat transfer in the GH.

# **3. Prototype GH dew collection** (GH<sub>p</sub>)

A GH was established at the water resources engineering experimental station, Kyoto University. The station is located at the coordinates 35° 29' 23'' N, 135° 21' 57'' E on Maizuru Bay, the Sea of Japan. The GH<sub>p</sub> is 2.18 m width and 3.58 m length (2.06 m height under the ridge, and 1.19 m height at the roof eaves (gutter)) with a global volume of 12.52 m<sup>3</sup> (3.53 m<sup>2</sup> cross-section area) (Fig. 2). It was oriented with East-West direction. The GH<sub>p</sub> was built with a metal frames, covered with polyethylene plastic sheets. The presented GHp comprises four major parts: GH<sub>cv</sub>, wRC, dew collection measurement instrument, and seawater ditch inside the GH<sub>p</sub> (Fig. 2). The condensed water vapor adsorbed on the greenhouse roof (GHr) in a drip formation,

which either fall or follows the GH<sub>CV</sub> down to WRCs along GH<sub>p</sub> sides, was collected into WRC. Thin plastic sheets were attached to GHr eaves to connect GHp sides with WRC. The seawater is introduced into the GH<sub>p</sub> ditch (0.7 m width, 3.25 m length, and 0.42 m depth) by pumping from the nearby seashore. The WRC (1.18 width, and 1.84 length) was tied to GH side bars using grommet holes at the corners. A small gravel bag was placed at WRC center discharge point (center grommet). Then, the collected dew water was drained to a tipping bucket rain gauge (one pulse is equivalent to  $4.2764 \text{ cm}^3$  (0.2 mm) by 213.82 cm<sup>2</sup>)) (HOBO rain gauge RG 165, Onsetcomp, USA). The total tipping numbers and temperature were logged every ten minutes. The GH<sub>p</sub> air temperature and relative humidity were measured at two heights: 0.8 m, and near the roof using temperature/relative humidity data loggers (HOBO U23 Pro v2, Onsetcomp, USA). The soil temperature, electrical conductivity, and moisture content were measured using soil moisture and temperature sensors (5TM, Decagon Devices, USA). The outside meteorological data were measured using a meteorological station (HOBO U-30-NRC, Onsetcomp, USA). The measured parameters were logged every ten minutes. The model was verified using three periods: winter (00:00 March 1<sup>st</sup> until 23:50 March 31, 2015), summer (00:00 June 1st until 23:50 June 31, 2015), and for a long period compiling different weather conditions (00:00 March 1st until 23:50 June 31, 2015 (122 days)). The model results were validated in terms of comparison with the measured collected dew, and measured temperatures inside the GH versus modeled  $T_{cv}$ ,  $T_{wditch}$ ,  $T_{RWC}$ , and  $T_a$  (Figs. 3, 4, 5, 6, 7 and 8). The average measured collected dew was 0.104 and 0.107 l day<sup>-1</sup> in March and June, respectively. While, the simulated collected dew was 0.064 (-38.3 %) and 0.148 (+38.1%)  $1 \text{ day}^{-1}$ in March and June, respectively. The average measured collected dew was 0.1207 l day<sup>-1</sup> while the simulated dew was 0.1215 (+<1%) 1day<sup>-1</sup> from 00:00 March 1<sup>st</sup> until 23:50 June 31, 2015 (Figs. 7, and 8). The good agreement between the simulated and measured data revealed the model competence for comprehending dew amount and modeling GH mass/heat balance.

# 4. Demonstrative GH (GH<sub>D</sub>)

The  $_{GH_D}$  was established at Ghor Al-Mazrah (31° 15' 41'' N, 35° 29' 37'' E), LP, Jordan Valley, Jordan. The  $_{GH_D}$  is 9 m width and 51 m length (4 m height under the ridge, and 2.05 m

height at the roof eaves (gutter)) with a global volume of 1643.92 m<sup>3</sup> (32.23 m<sup>2</sup> cross-section area). It was oriented with East-West direction. The GH<sub>D</sub> was built with metal frames, covered with polyethylene plastic sheets. The presented GH<sub>D</sub> comprises four major parts: GH<sub>cv</sub>, WRC, designed water collection system, and linedditches inside GH (Fig. 9). The condensed water vapor adsorbed on the GHr in a drip formation, which either fall or follows the GHcv down to WRCs along GHD sides, was collected into wRC. Thin plastic sheets were attached to GHr eaves to connect GH sides with wRC. The water is introduced into GH ditches (five ditches, 0.5 m width, 0.1 m depth, and 45 m length) by pumping. This water is being collected using an intake structure from ephemeral flood flows and stored in a reservoir during the rainy season. The rainwater harvesting (RWH) scheme included a hydraulic structure to divert ephemeral flood flow of the catchment area into a reservoir (Unami et al, 2015; Erfaneh et al, 2015). The water quality is relatively saline due to the catchment surface salinity (9-18 dS m<sup>-1</sup>).

Each wRC (3 m long and 1.47 m width) was holed at five points (center point and four corners); a grommet was fixed to each point. The central grommet represents a discharge point. Each WRC was knotted to GH latitudinal bars using grommet holes at the corners (3 m interval, and 2.05 heights). A small gravel bag (weight around 200-300 gr) was dangled at the center grommet on each WRC, to direct the collected water into wRC discharge point (center grommet). Then, the water is being drained to the water collector container (Fig. 9) for each WRC. The GHD contained 29 WRCs (14 WRCs on the right side, and 15 WRCs on the left side). The measured parameters inside GH<sub>D</sub> were:  $T_a$  and RH at two heights inside  $GH_D$ (underneath  $GH_{cv}$ , and 0.8 m above  $GH_s$ ),  $GH_e$ and RH,  $R_S$ , and pumped saline water and fresh water produced. The measured parameters were logged every 10 minutes interval.

# 5. Conclusions

This current work offers a useful analysis and assessment of the dew yield and temperature variations of the presented  $GH_p$  by using energy and mass balance model. The results showed that the model is capable to predict dew yield and GH temperatures. The dew yield was sensitive to the meteorological data input. The model underestimated the collected dew yield during March while it is overestimated the

modeled dew yield in June. The system performance analysis based on longer periods (March 1<sup>st</sup> to June 31) showed a good agreement between the modeled and the measured dew yield. The average collected dew was 0.12 l day<sup>1</sup>. Overall, the developed model provides a sound basis for describing and explaining the energy and mass balance mechanisms in the **References** 

[1] Ammari TG, Tahhan R, Abubaker S, Al-Zu'Bi Y, Tahboub A (2013) Soil salinity changes in the Jordan Valley potentially threaten sustainable irrigated agriculture, Pedosphere, 23, 376-384.[2] Chaibi MT (2000) Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof, Desalination, 128, 123-138.[3] Chaibi MT (2002) Validation of a simulation model for water desalination in a greenhouse roof through laboratory experiments parameter and conceptual discussions. Desalination, 142, 65-78.[4] Goosen MFA, Al-Hinai H, Sablani SS (2001) Capacity building strategies for desalination: Activities, facilities and educational programs in Oman, Desalination, 141, 181-190.[5] Greenlee LF, Lawler DF, Freeman BD, Marrot B, Moulin P (2009) Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges, Water Research, 43, 2317-2348.[6] Harmanto VM, Salokhe MS, Babel MS, Tantau HJ (2005) Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment, Agricultural Water Management, 71, 225-242.[7] Jolliet O (1994) Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses, Journal of Agricultural Engineering Research, 57, 23-37.[8] Malik MAS, Tiwari GN, Kumar A, Sodha MS (1996) Solar distillation: A practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction and performance, Pergamon Press Ltd., Oxford, England, 100-109.[9] Mashaly A, Alazba A, Al-Awaadh A, Matter M (2015) Area determination of solar desalination system for irrigating crops in greenhouses using different quality feed water, Agricultural Water Management, 154, 1-10. [10] Matoug M, El-Hasan T, Al-Bilbisi H, Abdelhadi M, Hindiyeh M, Eslamian S, Duheisat S (2013) The climate change implication on Jordan: A case study using GIS and Artificial Neural Networks for weather forecasting, Journal of Taibah University for Science, 7(2), 44-55.[11] Medina JA (2006) Feasibility of water desalination for agriculturefrom water desalination for agricultural applications, Land and Water Discussion Paper, Edited by Beltran JM, Oshima SK, FAO, Rome,

developed GH. These findings would help to predict the potential yield that could be harvested and used for irrigation. Nevertheless, more general system design and performance analysis based on crop cultivation under a typical arid climate is under evaluation.

5. 37-44.[12] Mohawesh O (2016) Utilizing deficit irrigation to enhance growth performance and water use efficiency of eggplant in arid environments, Journal of Agricultural Science and Technology, (Accepted).[13] Mohawesh O (2014) Development of pedotransfer functions for estimating soil retention curves and saturated hydraulic conductivity in Jordan Valley, Jordan Journal of Agricultural Sciences, 10, 67-82.[14] Molle F, Vernot JP, Hassan Y (2008) Irrigation in the Jordan Valley: are water pricing policies overly optimistic?, Agricultural Water Management, 95, 427-438.[15] Oroud I (2008) The impacts of climate change on water resources in Jordan, Climatic changes and water resources in the Middle East and North Africa, Edited by Zereini F, Hötzl H, Environmental Science and Engineering, 9, 109-123.[16] Perret JS, Al-Ismaili AM, Sablani SS (2005) Development of humidificationа dehumidification system in а Ouonset greenhouse for sustainable crop production in arid regions, Biosystem Engineering, 91, 349-359.[17] Salameh E (2001) Sources of water salinities in the Jordan valley area/Jordan, Acta hydrochimica et hydrobiologica, 29, 329-362.[18] Sharifi E, Unami K, Mohawesh O, Nakamichi T, Kinjo N, Fujihara M (2015) Design and construction of a hydraulic structure for rainwater harvesting in arid environment. Proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress, Hague, Netherlands.[19] Tarawneh S (1999) Experimental investigation of water harvesting techniques: Al-Hasa Valley in Jordan, Alexandria Engineering Journal, 6, 267-279.[20] Tarawneh S (2004a) Fog water harvesting at five sites south of Mazar-Karak, Alexandria Engineering Journal, 1, 55-65.[21] Tarawneh S (2004b) Vegetal dew and fog harvesting-west of Mazar-Karak, Alexandria Engineering Journal, 4, 525-534.[22] Unami K, Mohawesh O, Sharifi E, Takeuchi J, Fujihara M (2015) Stochastic modeling and control of rainwater harvesting systems for irrigation during dry spells, Journal of Cleaner Production, 88, 185-195.[23] Xing-ming H, Cong L, Bin G, Jian-xin M, Mubarek A, Zhongsheng C (2012) Dew formation and its longterm trend in a desert riparian forest ecosystem on the eastern edge of the Taklimakan Desert in

China, *Journal of Hydrology*, 90–98, 472-473.[24] Zhani K (2013) Solar desalination based on multiple effect humidification process: Acknowledgements

This research is kindly funded from JSPS: Grant-in-aid for scientific research No. thermal performance and experimental validation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 406-417. 26257415 (JSPS), and Invitation fellowship for research in Japan No. L145461 (JSPS).



Fig. 1 Schematic diagram of mass and heat balances inside the greenhouse.





Fig. 2 Schematic diagram of prototype greenhouse, measured parameters, and instruments locations.



**Fig. 3** Modeled GH ditch water (T1), GH air (T3), Water repellent cloth (T4), and GH cover (T5), and measured temperatures inside the GH at two depths:0.8 m(HOBO\_h80) and near the GH roof (HOBO\_R), inside the tipping rain gauge bucket (HOBO RG 165), outside air temperature (T0), and GH soil (T2) in March.



**Fig. 5** Modeled GH ditch water (T1), GH air (T3), Water repellent cloth (T4), and GH cover (T5), and measured temperatures inside the GH at two depths: 0.8 m(HOBO\_h80) and near the GH roof (HOBO\_R), inside the tipping rain gauge bucket (HOBO RG 165), outside air temperature (T0), and GH soil (T2) in June.



Fig. 4 Modeled and measured collected dew inside the greenhouse in March.



Fig. 6 Modeled and measured collected dew inside the greenhouse in June.



**Fig. 7** Modeled GH ditch water (T1), GH air (T3), Water repellent cloth (T4), and GH cover (T5), and measured temperatures inside the tipping rain gauge bucket (HOBO RG 165), outside air temperature (T0), and GH soil (T2) inside GHp from 00:00 March 1<sup>st</sup> until 23:50 June 31, 2015 (122 days).



Fig. 8 Modeled and measured collected dew inside GHp from 00:00 March 1<sup>st</sup> until 23:50 June 31, 2015 (122 days).



Plastic sheet to divert water from GH roof to WRC Grommet ( 12 mm diameter) Water tank Weight to direct water to WRC center



Fig. 9 Schematic diagram of dew collection system integrated inside the  $GH_D$ .

# Towards Improved Water Environment Productivity in Japanese Paddy Rice Irrigation Schemes (日本の水稲灌漑スキームにおける「水環境生産性」の改善に向けて)

OGoden Mabaya, Koichi Unami, Masayuki Fujihara, Abul Hasan Md Badiul Alam *Graduate School of Agriculture, Kyoto University* 

# 1. Introduction

The biggest environment concern of the Trans-Pacific Partnership for Japan is that it might push farmers out of paddy rice cultivation (Katayama et al., 2015). The abandonment of paddy cultivation could lead to loss of the paddy environment multifunctionalities. which include: flood mitigation. groundwater recharging, water pollution reduction, and biodiversity conservation (Matsuno et al., 2006). There is, therefore, an need for innovative urgent environment technologies that promote paddy environment profitability and sustainability, to keep the farmers in the paddy fields. A possible solution could be to improve water environment productivity through optimising use of available water resources in the paddy irrigation schemes to facilitate upgrading to irrigation-aquaculture integrated (IIA). and switching to high yielding/selling rice varieties (Brugere et al., 2006).

Incorporating aquacultures in paddy irrigation schemes could be the logical solution due to their positive technological interdependence with paddy rice production. The paddy irrigation schemes inherently possess biological environments favourable for aquaculture, while aquacultures have non-consumptive water use characteristics (Brugere et al., 2006). The exponential growth of paddy irrigation systems during the period of rapid economic growth presents a huge potential for IIA development, especially in the paddy irrigation schemes (Matsuno et al., 2006). Fish could be raised in irrigation reservoirs upstream or downstream of paddy fields, but also within paddy fields, and irrigation and drainage canals.

Given the need to increase the irrigated paddy rice profits through increased rice yields, and avoid too much complexity in the water management, emphasis on IIA development is placed on the small irrigation reservoirs, also known as irrigation tanks. Irrigation tanks are less capital-intensive (Karthikeyan, 2010), and require minor modifications before incorporating fish (Brugere et al., 2006). In Japan, there are about 200,000 existing irrigation tanks, each with impoundment of mostly less than 5,000 m<sup>3</sup>, which is about 11.4% of the total irrigation water impoundments (Hiramatsu et al., 2003).

For the success of IIA development, the continuity of water supply or storage at specified water quality and turbidity in the tanks has to be guaranteed. However, the majority of irrigation tanks are characteristically small and shallow, not connected to major streams or other reservoirs, depending only on the rainfall and runoff in their own catchment areas (Karthikeyan, 2010). Therefore, temporal water shortages are a common phenomenon in most irrigation tanks. Fish production requires tank water storage to be retained above a certain minimum level at any given time. The mechanistic effects of low flow hydrology in the tank can negatively alter aquatic habitat conditions; consequently leading to mass mortality of fish and other aquatic life (Rolls et al., 2012). On the other hand, adequacy and timeliness of irrigation water supply has to be guaranteed for a good rice crop harvest. Therefore conflicts on water use between the two production entities can arise during water scarcity conditions.

To improve the water supplies, irrigation tanks can be connected to upstream water sources. But, the approach can be constrained when water supplements contains high loads of agrochemicals. Many of alternative water sources in agricultural regions suffer from long-term pollution, due to considerable amounts of fertilisers and pollutants intercepted in runoffs from upslope agricultural fields (Powers et al.2013). Like any other aquatic habitat, IIA tanks require adequate water qualities to sustain aquatic life therein. Nevertheless, the water scarcity characteristic of the irrigation tanks, necessitate the need to develop strategies that optimise the use of other available water resources in the paddy environment.

This study aims at optimal operation of the irrigation tanks for sustainable IIA development. The study focuses on IIA development of an irrigation tank currently used only for irrigation. The tank has water scarcity problems. The alternative water source for water supplements has water quality problems. A Markov decision process (MDP) is formulated and applied to find the optimal policies for the optimal operation of the irrigation tank in conjunctive with the alternative water source for the establishment of a sustainable IIA.

# 2. Problem description of study area

The Higashi irrigation tank, which is in a study area called Imago, extending over the southern part of Shiga prefecture, Japan is proposed for IIA development. The tank is rainwater harvesting earthen impoundment primarily built to irrigate a command area of 5 ha paddy rice fields. It has maximum surface area of 3,060 m<sup>2</sup>, maximum water depth of 1.21 m, capacity of 3,000 m<sup>3</sup>, catchment area of about 7.2 ha. The tank catchment area consists of paddy fields and forest landuses. The water balance analysis results of the tank from 2000 to 2006, especially in the rice growing seasons, show that every successive year the tank experiences excessive water drawdowns, and in some cases the water is withdrawn until near empty storages states. The assessed commercial fish value of the tank during the period 2013-2015, shows that it was almost negligible. The loss of fish value in the tank could be linked to the loss of preferred aquatic habitat caused by routine operation only for irrigation without due consideration of aquatic life therein (Rolls et al., 2012). Therefore the larger Imago dam on the upstream is planned to supplement the water in the tank to assure a continuity of water supply and storage. Imago dam has the reservoir capacity of 110,000 m<sup>3</sup>, and catchment area of 0.2 km<sup>2</sup>, which consists of green tea fields and forest landuses. However, the water quality monitoring tests results in Imago area, between the period of 2013 and 2015, show that Imago dam is NO<sub>3</sub>-N polluted above acceptable specified ranges for fish production. NO<sub>3</sub>-N pollution has long term effects on general health, growth and breeding ability of fish (Kincheloe et al., 1979). Thus, the water quality management strategies for control of NO<sub>3</sub>-N pollutants loads from Imago dam into Higashi irrigation tank have to be incorporated for the development and maintenance of a sustainable IIA.

# 3. MDP model

The future operation of Higashi irrigation tank is assumed to be operated using both water quality and quantity norms, focussed on developing and maintaining a sustainable environment for IIA. The tank operation methodology is assumed to be a dynamical decision making problem involving finite-state, finite-action stochastic system where the system's dynamics are described by state transition probability distributions. An MDP solution is proposed to formulate the abovementioned problem, with the goal to find operation policies with minimum worst case expected value of a given cost function (Ben-Tal et al., 2009). The storage level and the respective NO<sub>3</sub>-N level of Higashi irrigation tank are taken to be a state variable  $i \in X$  where the number of possible states n = |X| is assumed to be finite. The tank  $i \in X$ condition is assumed to be observed at regular finite time points  $t \in T$  of the infinite decision horizon  $T = \{0, 1, 2, ...\}$ .

Depending on the  $i \in X$  observed, the operator chooses a decision  $a \in A$  from a finite set of all possible decisions  $A = \{a_1, ..., a_k\}$ . If the decision  $a \in A$  is chosen for the state  $i \in X$ , then the cost f(i,a) is incurred and the next condition state of the irrigation tank is chosen according to  $P_{ij}(a)$ (Ross, 1990).  $P_{ij}(a)$  are the transition probabilities under control action  $a \in A$  at the stage  $t \in T$  from the state  $i \in X$  to the state  $j \in X$  expressed as

$$P_{ij}(a) = P\{X_{t+1} = j | X_t = i, a_t = a\}$$
(1)

The incurred costs f(i,a) are assumed to be bounded by a positive real number M, such that |f(i,a)| < M for  $\forall i, \forall a$  with a discount factor  $\alpha \in (0,1)$ . Thus, for any policy  $\Pi$  employed when the initial state is  $i \in X$ , the expected total discounted cost incurred is

$$V_{\Pi}^{\alpha}(i) = E_{\Pi} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^{t} f(X_{t}, a_{t}) \middle| X_{0} = i \right]$$
(2)

given that policy  $\Pi$  is employed. Since the costs are bounded and that  $\alpha < 1$ ,  $V_{\Pi}^{\alpha}(i)$  is also bounded and thus equation (2) is well defined. The policy  $\Pi^*$  is said to be  $\alpha$  -optimal, if  $V_{\Pi^*}^{\alpha}(i) = \inf_{\Pi} V_{\Pi}^{\alpha}(i)$ for  $\forall i \in X$ . The above principle of dynamic programming yields the Bellman equation

$$V_{\Pi^*}^{\alpha}(i) = \min_{a \in A} \left\{ f(i,a) + \alpha \sum_{j} P_{ij}(a) V_{\Pi^*}^{\alpha}(j) \right\}.$$
 (3)

Accordingly, the corresponding optimal operation control policies  $\Pi^*$  for Higashi irrigation tank were obtained by

$$\Pi^*(i) \in \operatorname*{argmin}_{a \in A} \left\{ f(i,a) + \alpha \sum_j P_{ij}(a) V_{\Pi}^{\alpha}(j) \right\}.$$
(4)

#### 4. Governing equations

The dynamic water balance of Higashi irrigation tank, is represented as

$$\frac{\mathrm{d}V_t}{\mathrm{d}t} = \delta Q + Q_{\mathrm{cc}} - Q_{\mathrm{ir}} \tag{5}$$

where t is the time,  $V_t$  is the water storage volume of Higashi irrigation tank at t,  $\delta Q$  is the uncontrollable water balance between inflow and outflow,  $Q_{cc}$  is the supplement discharge from Imago dam to Higashi irrigation tank, and  $Q_{ir}$  is the water withdrawal for irrigation from Higashi irrigation tank. Likewise, the mass balance of NO<sub>3</sub>-N in the tank at any given time t is represented as

$$\frac{\mathrm{d}M_{t}}{\mathrm{d}t} = -zM_{t} + \delta F + F_{\mathrm{cc}} - F_{\mathrm{ir}} \tag{6}$$

where  $M_t$  is the mass of the NO<sub>3</sub>-N loads, z is the NO<sub>3</sub>-N decaying coefficient,  $\delta F$  is the uncontrollable flux balance of the NO<sub>3</sub>-N,  $F_{cc}$  is the inflow flux of the NO<sub>3</sub>-N, and  $F_{ir}$  is the outflow flux of the NO<sub>3</sub>-N due to withdrawal. The concentration  $C_t$  of the NO<sub>3</sub>-N at t in the reservoir is  $M_t/V_t$ , where much attention must be paid to the stochastic nature of these variables. Accordingly, the temporal integration over a time step  $\Delta t$  of equations (5) and (6) results in transients of  $V_{t+\Delta t}$  and  $C_{t+\Delta t}$ .

#### 5. MDP operation

#### 5.1 Tank operation decision options

Table 1 shows four (4) water resources management decision options  $A = \{a_0, ..., a_3\}$  identified for the development and maintenance of a sustainable environment for IIA in the Higashi irrigation tank.

**Table 1** water management decision options  $a \in A$ 

а	$Q_{\rm cc}$	$Q_{ m ir}$	Description
$a_0$	0	0	Do nothing
$a_1$	0	+	Release irrigation water
$a_2$	+	0	Receive water supplement
$a_3$	+	+	Supplement and then irrigate

#### 5.2 Defined storage/NO<sub>3</sub>-N states

The  $i \in X$  states of the storage/NO<sub>3</sub>-N condition for Higashi irrigation tank are identified to be any of the following 12 possible states in Table 2.

 Table 2 Tank storage/NO<sub>3</sub>-N states

Storage volume	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)					
(m <sup>3</sup> )	0-1	1-3	> 3			
> 3000	<i>i</i> = 10	<i>i</i> = 11	<i>i</i> = 12			
2000-3000	<i>i</i> = 7	<i>i</i> = 8	<i>i</i> = 9			
1000-2000	<i>i</i> = 4	<i>i</i> = 5	<i>i</i> = 6			
0-1000	<i>i</i> = 1	i = 2	<i>i</i> = 3			

5.3 Identification of decision costs

Depending on the decision  $a \in A$  applied for every  $i \in X$  observed state, the costs incurred f(i,a) include some or all of the following costs: irrigation operation and maintenance costs  $[OM_{ir}]$ , Imago dam water supplement costs  $[OM_{cc}]$ , irrigated paddy rice potential value loss [RVL], and fish potential value loss [FVL] formulated as:

 $f(i,a) = OM_{ir} + OM_{cc} + RVL + FVL$  (7) where  $OM_{ir} = W_{ir}V_{ir}$  and  $OM_{cc} = W_{cc}V_{cc}$ ,  $W_{ir}$  and  $W_{cc}$  are respective unit water costs, and  $V_{ir}$  and  $V_{cc}$  are respective water volumes in 7 days irrigation cycle.  $RVL = \theta_{ir}RV$  where RV is the irrigated paddy rice value in the command area and  $\theta_{ir}$  is the irrigation deficit coefficient that depicts storage effect of the  $j \in X$  state on RV.  $FVL = FV[\theta_W + \theta_N]$  where FV is the estimated fish value in the Higashi irrigation tank (after restocking);  $\theta_N$  and  $\theta_W$  are the respective coefficients that depicts the NO<sub>3</sub>-N effect and storage effect of each of the  $j \in X$  state on FV.

 $W_{ir}$  and  $W_{cc}$  were approximated 0.025 US\$/m<sup>3</sup>. Assuming, a high yielding rice crop variety at 10 tonnes/ha, at average price of 2500 US\$/ton, and assuming the crop cycle of 20 weeks for paddy rice, the weekly RV  $\approx$  US\$3,775. For  $a \in A$  which involves irrigation activity;  $V_{t+\Delta t} < 1000 \text{ m}^3$ , are assumed to indicate irrigation inadequacy, thus,  $V_{t+\Delta t} < 1000 \text{ m}^3 \Rightarrow \theta_{ir} \approx 0.60$ , otherwise  $\theta_{ir} \approx 0$ .

The total potential fish value in the Higashi irrigation tank is estimated US\$22,500, and thus

weekly FV  $\approx$  US\$1125. The minimum threshold of fish water volume is set at  $V_{t+\Delta t} \ge 1000 \text{ m}^3$ . Thus, at  $V_{t+\Delta t} < 1000 \text{ m}^3 \Rightarrow \theta_w \approx 0.65$  otherwise  $\theta_W \approx 0$ . For the  $j \in X$  NO<sub>3</sub>-N transitions  $C_{t+\Delta t} \le 1 \text{ mg/L} \Rightarrow \theta_N \approx 0$ ;  $C_{t+\Delta t} = 1.1 - 3.0 \text{ mg/L} \Rightarrow \theta_N \approx 0.25$ ; and  $C_{t+\Delta t} > 3.0 \text{ mg/L} \Rightarrow \theta_N \approx 0.60$ .

# 5.4 Computed probability transitions

Figs. 1-4 shows the  $\Delta t = 1$  week time transition probabilities under control action  $a \in A$  from the state  $i \in X$  to the state  $j \in X$  expressed as in (1), obtained from concurrent operation of (5) and (6).







Table 3 shows the optimal operation policies  $\Pi^*$ and their corresponding optimal costs  $V_{\Pi^*}^{\alpha}(i)$  for the 12  $i \in X$  obtained from the computation of the equations (3) and (4). When the Higashi irrigation tank storage/NO<sub>3</sub>-N condition is in  $i \in X$  state 1-6 and 8-9, the optimal policy is to supply water from Imago dam to the tank until its full capacity, and later release irrigation water. For other states, releasing irrigation water is optimally enough.

	$i \in X$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$V^{lpha}_{\Pi^*}(i)$	1209	1209	1209	1105	1176	1176	781	1072	1143	564	889	1110
$\Pi^*$	$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_3$	<i>a</i> <sub>3</sub>	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_1$

**Table 3** Optimal operation policies  $\Pi^*$  and optimal costs  $V_{\Pi^*}^{\alpha}(i)$  in US\$

## 6. Conclusions

The water environment productivity in the paddy irrigation schemes can be improved by optimising use of available water resources, upgrading to IIA, and switching to high yielding/selling rice crop varieties. The water scarcity phenomenon common with the irrigation tanks operation, necessitate the use of alternative water sources to augment water supplies. In situations, where alternative water sources have poor water qualities which constraint successful IIA production, an MDP model is an effective method to find optimal policies for the joint operation. The MDP method can also be readily adapted to other agricultural watersheds which have water quantity/quality problems. The implementation however, requires a careful analysis and in-depth evaluation of different periods to produce transition hvdrologic probabilities that fully describe water quantity and quality changes in the respective tanks.

#### References

- [1] Kawatama, N., Baba, Y.G., Kusumoto, Y. and Tanaka, K. 2015. A review of post-war changes in rice farming and biodiversity in Japan, *Agricultural Systems*, 132: 73-84.
- [2] Matsuno, Y., Nakamura, K., Masumoto, T., Matsui, H., Kato, T., Sato, Y., 2006. Prospects for multifunctionality of paddy rice cultivation in Japan and other countries in monsoon Asia. *Paddy and Water Environment*, 4:189-197.
- [3] Brugère, C., 2006. A review of the development of integrated irrigation aquaculture (IIA), with special reference to

West Africa. Integrated irrigation and aquaculture in West Africa: concepts, practices and potential. FAO 181:27–60.

- [4] Karthikeyan, C., 2010. Competition and conflicts among multiple users of tank irrigation systems. *Proceedings of the 14th International Water Technology Conference*, IWTC 14 2010, Cairo, Egypt.
- [5] Hiramatsu, K., Itagaki, H., Sato, A., Kawachi, T., 2003. Nutrient residual in an irrigation pond: a case study of Higashiike. *Proceedings* of the 11th international Rainwater Catchment Systems Conference, Texcoco, Mexico.
- [6] Rolls, R.J., Leigh, C., Sheldon, F., 2012. Mechanistic effects of low-flow hydrology on riverine ecosystems: ecological principles and consequences of alteration. *Freshwater Science*, 31(4):1163-1186.
- [7] Powers, S.M., Julian, J.P., Doyle, M.W. and Stanley, E.H., 2013. Retention and transport of nutrients in a mature agricultural pond, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118:91-103.
- [8] Kincheloe, J.W., Wedemeyer, G.A., Koch, D.L., 1979. Tolerance of developing salmonid eggs and fry to nitrate exposure. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 23:575-578.
- [9] Ben-Tal, A., El Ghaoui, L., Nemisroviki, A., 2009. *Robust optimization*. Princeton Series in Applied Mathematics.
- [10] Ross, S.M, 1990. *Applied probability models with optimization applications*. Dover 0-486-67314-6.
茶園地域における地下水動態の観測と解析 Observation and analysis of groundwater dynamics in a tea plantation area

京都大学大学院農学研究科 〇石原弘輝, 宇波耕一, ゴーデン・マバヤ, 藤原正幸

#### 1. はじめに

茶園では,窒素肥料を大量に使用することから, 地下水汚染が懸念される.滋賀県甲賀市に位置す る布引丘陵では,茶園を集水域に含む湧水,水路, 溜池において高い硝酸性窒素濃度が報告されてお り,この地域では窒素肥料によって地下水さらに は地表水体が汚染されているものと考えられる (Mabaya et al, in press).このような汚染物質の挙動 を把握するためには,地下水の動態を調べること が必要である.浅い地盤内では,地下水位変動は 主に降雨によってもたらされる.本研究では,茶 園で観測されたデータをもとに,降雨量を入力, 地下水位を出力としたときの入出力関係を,逆問 題的解析手法(Kirsch, 2011)によって推定する.

#### 2. 対象地域と観測点の概要

滋賀県甲賀市に位置する布引丘陵は、一帯が茶園 として利用されている.この茶園の一角にボーリ ング孔を付随する観測点を設置し、地下水位、降 雨量、地表付近の体積含水率等のデータ収集を実 施している.その観測システムを図1に示す.深 さ4mのボーリング孔の底面に、水位計を設置し ている.また、地下20cm、40cm、60cmの3地点 に土壌水分計を設置している. 土質区分は, 地表 から 70cm までがシルト混じり粘土, 70cm から 200cm が礫混じり粘土, 200cm から 400cm が玉石 混じり砂礫となっている. 2014年6月20日から現 在に至るまで, 10分ごとのデータを取得している. 地下水位,降雨量,地表付近の体積含水率等のデ ータを図2に示す.







#### 3. 計算手法

**2**つの時系列データ*x*と*y*の入出力関係は, 第1種 Fredholm 積分方程式

$$y(t) = \int_0^t K(t-\tau)x(\tau) \,\mathrm{d}\,\tau \tag{1}$$

によって与えられるものと仮定する.ここに,xは 降雨量,yは地下水位,Kは核関数である.畳み込 み積分である(1)を,一定時間間隔の有限長データ について

$$\begin{pmatrix} y_{0} \\ \vdots \\ y_{i} \\ \vdots \\ y_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{0} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ x_{1} & x_{0} & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_{n-2} & x_{i-j} & \ddots & x_{0} & 0 \\ x_{n-1} & x_{n-2} & \cdots & x_{1} & x_{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{0} \\ \vdots \\ K_{i} \\ \vdots \\ K_{n-1} \end{pmatrix}$$
(2)

と離散化する. ここに, 添え字は時間ステップを 表す. 式(2)を y = XK と略記する. X と y から K を求めることは,「非適切」な逆問題であるので, 非適切な逆問題の近似解を得る手段として最もよ く使われる正則化法である Tikhonov 正則化法を用 いる. 汎関数

$$J_{\alpha}(\mathbf{K}) = \|X\mathbf{K} - \mathbf{y}\|_{2}^{2} + \alpha \|\mathbf{K}\|_{2}^{2}$$
(3)

を最小化する  $\mathbf{K} = \mathbf{K}^{\alpha}$ を求める問題を Tikhonov 正則 化法と呼ぶ.ここに、 $\alpha > 0$  は正則化パラメータと 呼ばれる定数である.これより、 $\mathbf{K}^{\alpha}$  は

$$\mathbf{K}^{\alpha} = (X^{T}X + \alpha I)^{-1}X^{T}\mathbf{y}$$
(4)

と表され<sup>2)</sup>, この $\mathbf{K}^{\alpha}$ を用いると地下水位時系列は

$$z_i = \sum_{k=0}^{\infty} K_{i-k}^a x_k \tag{5}$$

で与えられる $z_i$ として補正される.ここに、 $K_i^{\alpha}$ は K<sup> $\alpha$ </sup>の第i成分である.

#### 4. 計算結果

式(5)において $M = X^T X + \alpha I$ ,  $\mathbf{v} = X^T \mathbf{y}$  とし, Gauss-Seidel 法で $M\mathbf{K}^{\alpha} = \mathbf{v}$  を解けば、 $\mathbf{K}^{\alpha}$ が得られる. 2014年6月20日から2015年11月5日までの データを用いて、地下水位の上昇が観測された降雨イベントごとに計算を行った. ここでは例として、図3に示す3つの期間(a),(b),(c)それぞれにおける降雨イベントについて詳述する. それぞれの期間に対して算出した降雨と地下水位の入出力 関係を表す核関数を図4に示す.期間(a)では短時間にまとまった降雨,期間(b)では、長時間にわたる弱い降雨,期間(c)では、地下水面が形成されている間の降雨が観測されている. 地下水位の応答は、期間(a)では40分後にピークを迎えた後100分後にはほぼ0になるのに対し、期間(b)では、緩やかに上昇し、350分後にピークに達する. 期間(c) では、即時的に応答し、60分後にピークを迎える. 核関数を用いれば、このように降雨形態や初期土 壌水分布等によって異なる地下水位の応答を、定 量的に表現することができる.



図3 各降雨イベントにおける降雨量と地下水位



#### 5. おわりに

本研究では、茶園に設置した観測システムで得ら れたデータをもとに、入力を降雨量、出力を地下 水位として、その入出力関係を推定した.また、 降雨イベントごとの核関数を比較した.今後は他 の観測データも利用し、さらに詳細な考察を行う.

引用文献 [1] Mabaya G, Unami K, Yoshioka H, Takeuchi J, Fujihara M (in press) Robust optimal diversion of agricultural drainage water from tea plantations to paddy fields during rice growing seasons and non-rice growing seasons, *Paddy and Water Environment*. [2] Kirsch A (2011) *An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems*. Springer, pp.36-43.

## 水田パイプラインで同時に取水する圃場の割合

○中村和正\*·酒井美樹\*·越山直子\*·伊藤暢男\*

#### 1. はじめに

近年、北海道の稲作地帯では、1 戸当たりの経営面積の拡大 に対応するために、作業効率の向上を目指して、地下灌漑可能 な大区画水田の整備が進んでいる。このような整備では用水路 のパイプライン化を伴う場合がある。水田パイプラインでは、 灌漑地域のうちの多数の圃場で取水時期や時間帯が重複する と配水が不均等になる。しかし、灌漑対象範囲で同時に取水す る圃場の数あるいは割合の調査事例は少ない。



図-1 調査地区

北海道内で経営規模が大型化している地域では、家族経営で 1 戸当たりの経営面積が 20ha を超えると、移植栽培だけで稲作を行うには労力が不足す るため、上記のような整備を契機として直播栽培の導入が進む傾向がある。圃場の水管 理は直播栽培と移植栽培で異なる。移植栽培では代かき・移植期の用水量が大きいのに 対し、直播栽培では初期入水の用水量が大きいほかに、浅水管理期間中は取水1回当た りの用水量や取水強度が大きい<sup>1)</sup>。それゆえ、移植栽培における代かき期間と重複すれ ば、水需要の集中が生じて配水に支障が生じることが予想される。

このような背景から、著者らは北海道空知地域の M 地区(図-1)において、水田パイ プラインの給水栓操作時期を調査して、同時に取水している圃場数や移植栽培と直播栽 培の用水利用時期の重複状況を分析した。

#### 2. 調査方法

調査対象は、M地区にある図-2のような支線パイプラインである(以下では、調査支線と記す)。調査支線は、43筆の圃場(合計 74.5ha)に給水している。調査を行った平成 27年の作付け状況は、図-2に示すとおりである。

M地区の標準的な面積の耕区には、図-3のような管理ユニットや地下水位調整型水開 が4基ずつ設置されている。農家はこれらを利用して地下からの給水や地下水位の管理 を行う。平成27年の灌漑開始前に、調査支線の区域内の128カ所の管理ユニットに、図 -3に示すような温度ロガーを設置し、灌漑期間中の水温を10分間隔で観測した。ロガー 設置位置は、図-2の各圃場内にある丸印の位置である。温度ロガーを設置していない圃 場(図-2の圃場番号34、35、38、40)の管理ユニットには、水温も記録される水位ロガ ーを設置し、10分間隔でデータを収録した。

#### 3. 調査結果

(1)給水栓操作日時の推定方法の検討

図-4 に管理ユニットからの取水状況とそのユニット内の水温変化を示す。このデータ

<sup>\* (</sup>国研) 土木研究所 寒地土木研究所, Civil Engineering Research Institute for Cold Region キーワード:水利システムの管理、圃場整備、水田灌漑







図-3 整備後の大区画圃場と温度ロガーの設置位置

は、40番の圃場にある4カ所の管理ユニットのうちの1カ所の水位ロガーで得たもので ある。取水状況は、管理ユニットの水位記録で推定した。なお、図中の気温は近傍アメ



図-4 管理ユニット内の水温と取水状況

ダスのもの、降水量は圃場近傍の観測値、用水路水温は幹線開水路における観測値であ る。この図のように、取水を開始するために給水栓を開くとユニット内の水温は不連続 な変化を生じる。このような水温変化に着目すれば、給水栓を開いた日時を推定できる。 一方、給水栓を閉じて取水を終了した日時は、図-4 に示すように、水温の変化からは推 定困難である。それゆえ、時期別の平均的な取水継続時間を用いて推定することにした。 図-5 と図-6 は、平成 23 年、24 年、25 年の圃場番号 34、35、38、40 における管理ユニ ット水位、圃場地下水位・湛水深から推定した取水時間帯データを用いて、4 期に区分し た灌漑期間に対し、1 回ごとの取水について取水開始時刻と取水継続時間をプロットし たものである。農家がほぼ同じ時刻に取水を停止する頻度が高い場合、図中でプロット が斜線上に並ぶ。そこで、図中に6時、12時、18時に取水を停止した場合の斜線を記し た。図-4 のような水温変化から推定した取水開始日時を起点とし、4 期のそれぞれで得 られる平均取水継続時間を経過した後に給水栓が閉じられると仮定して、取水停止日時 を推定した。

#### (2)給水栓開操作日時の推定

図-7 は、水温変化から推定した水稲作圃場での給水栓開操作日時である。移植栽培圃 場と直播栽培圃場に分けて、それぞれ最初の取水の早い順に並べた。また、1回当たり の取水量が比較的大きい、移植栽培における代かきから移植終了までと直播栽培におけ る初期入水から浅水管理終了までの取水であると想定されるもの(以下では初期灌漑と 記す)は、それ以降の取水と区別してプロットした。なお、水温変化に不連続な変化が 現れない水稲作圃場については欠測扱いとした。

古檜山ら<sup>1)</sup>によれば、移植栽培における代かき時期の複数回の取水と、直播栽培にお ける初期入水および浅水管理のための取水の時期が重複すると地域の水需要の大きなピ ークを形成する可能性がある。現状(平成 27 年)では、各圃場の最初の取水は、移植栽



この時期は、移植と直播で共通のデータを用いる。

図-5 時期別の取水継続時間の検討(移植栽培)



この時期は、移植と直播で共通のデータを用いる。

培と直播栽培で時期的に相違がある。すなわち、移植栽培の合計 18 圃場のうち 14 圃場 で代かき用水の最初の取水を終えたのちに、直播栽培の初期入水が始まっている。

給水栓の開操作の頻度は、移植栽培では移植後の2週間程度で高く、生育が進むにつれて低くなる。一方、直播栽培では7月20日ころまでの頻度が高い。いずれの栽培方式でも、8月にはいると取水頻度は低くなる。

## (3)調査支線において同時に取水する圃場の割合

図-7の開操作日時と図-5、図-6の取水継続時間を用いて、(1)で述べたような方法 で各圃場の取水時期を推定し、さらに調査支線区域内での取水圃場割合の経時変化を求 めた結果を図-8に示す。灌漑期間の前半の太線は、比較的用水量の大きい初期灌漑の取 水を行っている圃場の割合である。また図-8の上段には同期間の気温と降水量もあわせ て示す。

図-6 時期別の取水継続時間の検討(直播栽培)









今回の調査支線を対象とした中村ら<sup>2)</sup>による配水シミュレーションでは、直播栽培面 積が現状程度であれば、水稲作圃場の半数で初期灌漑が行われても幹線用水路から調査 支線への分水量が計画分水量を超えないだろうとされている。一方、今回の調査結果に おいて、初期灌漑の期間の取水圃場割合の最大値が 35%(9 圃場)であった。これらの ことから、現状においては初期灌漑の期間について、配水に支障を生じるような水需要 の集中は起きていないと考えられる。

初期灌漑期間以降の取水圃場割合は、大きな時間的変動を有している。10%~30%の 範囲にあることが多いが、7月中旬のように半数以上の圃場で同時に取水される時間帯も ある。冷涼な北海道では、冷害対策として、気温の低下が予想される場合には、湛水深 を深くするという圃場水管理が行われる。しかし、図-8の気温の変化と取水圃場割合の 関係からは、この点についての明確な関連性は現れておらず、取水圃場割合が高くなる 要因の分析は今後の課題である。

#### 4. おわりに

本研究では、管理ユニット内の水温変化を観測して、水田用水の支線パイプラインに ある 43 筆の圃場(うち水稲作は 29 筆)の給水栓操作日時や取水状況を推定し、同時に 取水している圃場の割合を分析し、①その割合が大きな変動を有する、②比較的用水量 の大きな初期灌漑の時期でも現状では配水に支障を生じるような水需要の集中はないだ ろう、という結果を得た。取水圃場割合の変動要因については、今後の課題である。

本研究の推進にご協力をいただいた北海道開発局札幌開発建設部ならびに地元の土地 改良センター、調査支線の農家各位に心より感謝申し上げます。

#### 引用文献

- 1) 古檜山雅之・中村和正・鵜木啓二・石田哲也:地下灌漑が可能な大区画水田における 圃場水管理,農業農村工学会論文集,82(2),pp.81-90(2014)
- 2) 中村和正・古檜山雅之・酒井美樹:地下灌漑が可能な大区画水田整備地域を対象とした配水シミュレーション,寒地土木研究所月報,737, pp.10-18(2014)

宮崎大学農学部 稲垣仁根

宫崎大学大学院農学工学総合研究科 秋吉一磨

宮崎大学大学院農学研究科 鈴木結希

## 1. はじめに

農業用水のパイプラインは,昭和30年代の後半から畑 地かんがいに導入され,現在では幹線,支線の農業用水 路に広範囲に用いられている.国営規模の基幹的な施設 についても,水路延長は約1万2千kmにのぼり,今後,標 準的な耐用年数を迎える管水路が急激に増加していくと 考えられる<sup>1)</sup>.そこで,管路の持つ優位性の高い機能を将 来的に維持するために,水利システムの性能低下を適切 に予測し,適確な機能保全を図る計画・設計手法の確立 が求められている.

応用水理部会は、平成27年度農業農村工学会大会講 演会において、企画セッション「水利システム更新時にお けるパイプラインの水理学的課題」を開催し、システム更 新時の管水路の問題について、水理学の視点から広く議 論を行った.その中の「技術の進歩と事故リスク低減の関 係」<sup>3)</sup>についての議論をベースに、基幹的管路と末端管路 での事故発生、塩ビ管の疲労破壊と末端における施設更 新に向けた技術課題について、基礎的な整理と検証を行った.



## 2. 基幹的パイプラインの事故発生について

## 2.1 基幹的パイプラインの整備状況

基幹的農業水利施設のうち農業用水路の延長は約4万 9千kmあり、そのうち、用水路が約3万7千km、排水路が約 1万1千kmとなっている.パイプラインは昭和40年代から本 格的に整備が始まり,基幹的な施設のストックは約1万2千 kmにのぼる<sup>1)</sup>.また,年代別布設延長は,横浜市の水道で は,昭和40年代~昭和60年代で200~350km/年,昭和 45年と昭和55年にピークがあり,その後減少し,平成4年 以降は100~150km/年程度である<sup>3)</sup>.農業用排水路につ いては,国営造成施設の供用経過年数と延長を図1に示 す<sup>1)</sup>.

表	1	管水路の管径区分と管種構成
~	-	

	口径			
管種	2800~ 900mm	800~600mm	$500 \mathrm{mm}$ $\sim$	
DCIP	30	60	61	
FRPM	29	24	2	
SP	16	6	0	
PC	15	5	0	
RC	9	3	0	
PVC	0	0	32	
ACP	0	0	2	
PE	0	0	0	
			畄位%	

## 2.2 パイプラインの突発事故の状況

農業水利施設の突発事故(災害以外の原因による施設 機能の損失)の件数は増加傾向にあり,図2に示すように パイプラインの事故件数が半数を占める<sup>1</sup>.



図 2 突発事故件数の増加状況(基幹水利施設)

また,パイプラインの管路資材(管種)は多岐にわたり, 表1に示すように管径によって使用管種の構成比率が異 なっている.管水路の突発事故の発生原因は使用管種別 に異なり、PC管・RC管では継手部変状による漏水が7割を 占め、鋼管では管体腐食による漏水が8割を占めている<sup>10</sup>. さらに、管種別の事故率(図3)では、他管種と比べて塩化 ビニル管とFRPM管の事故率が高く、鋼管とダクタイル鋳 鉄管が低いという調査結果が報告されている<sup>4,5)</sup>.



図 4 管種別の事故率曲線(機能劣化予測式)

#### 2.3 管路の機能劣化予測式の一例

パイプラインは、埋設構造物であり、直接的な目視調査 が困難な場合が多いので、平成20年度の「農業水利施設 の機能保全の手引き」において、標準劣化曲線を用いる のではなく、漏水量、事故発生確率、カバーコートモルタ ルの残厚などの個別の性能指標による性能管理、性能低 下予測の手法が示された<sup>6</sup>.

しかし,現地では過去の漏水量のデータなどの性能指標の記録や事故履歴の入手が困難であり.合理的な性能低下予測を行うことが出来ず,限られた性能指標による不 +分な性能予測を行うのが限界である.このため,パイプラインの性能低下は,結果的に突発事故により顕在化することが多いという現状がある.

(公財)水道技術研究センターでは,管路事故の実績を

分析し、図4に示すような管路の機能劣化予測式(経過年数による事故率の推定)を作成している<sup>7</sup>.

## 2.4 基幹的パイプラインの布設延長と事故率の仮定

基幹的なパイプライン施設のストックは約1万2千kmに 達しており,年当たり布設延長を昭和40年代~昭和60年 代では350km/年、平成1~18年では200km/年と設定す る.また,1965年に管を敷設して20年経過後,事故が発生 し始め,40年目までに事故率が0.1件/km/年に直線的に 増加すると設定する.なお,管種や口径による事故率の違 いや,補修による事故率の低減については,考慮しないも のとする.パイプラインの布設延長と事故率の関係につい て,設定した結果を図5に示す.



# 2.5 基幹的パイプラインの年度別事故件数と累計事故 件数の推定

図5に示す管路延長と事故率の推定値に基づいて,年 度別事故件数と累計事故件数を求めた結果を図6,7に示 す.なお,1987~1992年においては,敷設直後のため, 事故発生の可能性が低く,事故件数のデータがないの で,1993~1996年の実績数を基に補完している.

累積事故発生件数(図7)については,全体的に予測値

が実績をやや下回る傾向を示している.これは年度別事 故件数(図6)において,1997~2001年の予測値と実績値 がよく一致しているのに対して,初期の1993~1996年で は,予測値が実績に対して低く算定されており,この累積 が影響している.



図 7 累計事故件数

敷設後の経過年が増加すると予測値が実績値に接近 し,2006年には事故件数の予測値と実績が,ほぼ一致し ている.従って,事故の増加率を一定に設定した単純な 機能劣化予測モデルでも,事故件数はほぼ予測できると 考えられる.

年度別事故件数(図6)において,1993~1996年で事故 数が増加傾向にあるのに対して,1997年で急減し,その 後漸増しているのは,事故発生に対応して基幹的パイプ ライン全般で補修が行われ,事故の発生件数が抑制され たことが原因であると推定される.



図 8 管路延長と事故率の推定値(機能保全)

# 2.6 機能保全を図った場合の年度別および累計事故 件数の推定

事故率の推定については、図8に示すように、1965年に 管を敷設して20年経過後、事故が発生し始め、30年目ま でに事故率が0.08件/km/年に直線的に増加すると設定す る. その後, 基幹的パイプライン全般で補修が行われ, 事 故発生が抑制され, 30年目から40年目にかけて, 事故率 が0.03~0.05件/km/年に直線的に増加すると設定する<sup>8)</sup>.



基幹的パイプラインにおいて,事故発生の増加に対応 して全般で補修が行われ,事故の発生が一旦減少し,そ の後,事故率が抑制された状態が継続すると仮定した場 合の年度別および累計事故件数の予測を図9,10に示す が,予測値は実績によく一致している.

本報告における機能劣化予測については、パイプラインは、管径によって使用管種の構成比率が異なっていること、突発事故の発生原因や事故率も使用管種別に異なることを考慮しておらず、図2の基幹的パイプラインの突発事故件数の増加状況にのみ基づいて、検証している.従って、図8の事故率は、基幹的パイプライン全体について、平均化した値であり、値の内部に個々の固有の条件を包含していると考えられる.

これまでの管路事故の調査研究は、地区の水理・構造 条件の特徴や使用管種に焦点を当て、ミクロなデータを積 み上げることにより、管水路事故発生メカニズムの全体像 を明らかにしようとしてきた. 今回の検証により、基幹的パ イプライン全体を対象として、年度別および累計事故件数 の予測がある程度可能であることが明らかになったので, 農林水産省に集積されているデータ「農業水利ストック情 報データベースシステム」<sup>9</sup>を用いて検証を行って,管水路 事故の全体的な予測式の精度を向上させ,さらに詳細な 検証を加えて管径,管種,埋設条件,水理条件などの要 因を考慮した予測式を整備することが必要である.

## 3. 中小規模パイプラインにおける事故の特徴

## 3.1 中小規模パイプラインの延長

農業用水路の総延長は、中小規模の水路を含むと、基 幹的水路の延長約4万9千kmの10倍の約40万kmに達す る<sup>10</sup>.例えば、愛知用水では、幹線水路の延長約112kmに 対して、支線水路の延長は約9倍の約1,012kmである.従 って、中小規模のパイプラインは、基幹的パイプライン(約 1万2千km)の9倍の延長11万km と推定される.中小規模 のパイプラインについては、事故のデータが一元的に集 積されておらず、基幹的パイプラインと異なり、管路事故の 実態が十分明らかになっていない.

th IX	事業期間	送水方式	管種	最大設計内圧 Mpa		延長 km
- <u> </u>						
口目以非反	1959(S34)	ファームポンド 経由自然流下	ACP	試験水圧	0.18	16.0
			RC	4K	0.26	6.7
れ泉れ地区	1969(S44)		PC	3種	0.80	23.8
			SP	試験水圧	2.50	3.4
F県B 地区	1967(S42) ~1994(H6)	加圧タンク式 ポンプ送水	PVC	VU	0.60	57.4
	1987(S62)	ファームポンド		VP	1.00	10.5
O県M地区	~	& 減圧弁経由	FRPM	3種	0.70	11.7
	2001(H13)	自然流下	DCIP	T&K型継手	3.00	104.5

表 2 検討対象地区の概要

#### 表 3 管路事故の原因と対応策

的场		计内华			
自住	1	2	3	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	
ACP	耐圧強度不足,中性化			他管種へ敷設替え	
RC	中かせんし ニトス みけてかせんていて	継ぎ手ゴム輪のバクテ		合成ゴム輪へ交換	
PC		リアによる浸食	PC鋼線の腐食	既設管の更新	
VU	タンク機能不全時のボンプ 起動停止による圧力変動	TS継手剥離	ビンホール発生	RR維手管に交換 インバータ式回転数 制御の導入	
VP	散水施設の稼働に起因す る圧力変動による疲労破 壊	減圧弁の作動不良	外荷重など複 合要因	安全弁の設置など 検討中	

## 3.2 検討対象地区の概要と事故原因<sup>®</sup>

検証の対象とする地区として、パイプライン化の黎明期 (K県K地区)<sup>11,12</sup>,その後、水利の便が悪かった台地へ、 大容量・高揚程のポンプを用いて展開する最盛期(F県B 地区)、地下ダムに水源を求めて、高位のファームポンド から供給する現在(O県M地区)<sup>13,14</sup>に至る3つの地区を取 り上げた.対象とするパイプラインは、ファームポンドや加 圧揚水機場から末端圃場までの範囲とした.

各地区の事業時期と送水方式,管種,内圧,延長などの概要(表 2)とパイプラインの事故原因(表 3)について 管種別に整理して示す.

#### 3.3 累加事故発生頻度

3地区について,管種毎の事故発生回数を初回から年 単位で累計し,累計事故回数を単位長さkm当たりの事故 発生回数に換算し,これを累加事故発生頻度とした.1969 (昭和44)年から2013(平成25年)までの累加事故発生頻 度を図 11に示す.



図 11 累加事故発生頻度の推移

管種毎の事故発生の原因,対応策,発生頻度の傾向は, 以下のように整理できる.

- ①石綿セメント管(ACP)は、耐圧強度が低いため、供用 開始直後から事故が発生している。事故の急激な増加 はないが、経年的な中性化の進行による耐圧低下は避 けられない。
- ②コンクリート管は、他管種と比べ早い時期に事故が起き やすいという傾向が現れた.RC管は、中性化とゴム継 手(天然ゴム)の劣化が、PC管は、さらにPC鋼線の切断 が事故の主な原因であり、時間の経過とともに中性化と 管厚の減少が進行するので、供用開始後から一定の頻 度で事故の発生が継続している.抜本的な対策として、 新設管への置換工法、また既設管へのライニング工法 や反転・形成工法などの対策が必要である.
- ③DCIPとSP管は、他管種と比べて高価であるが、適切に施工されていれば、事故の発生頻度は低いと考えられる.図 11のデータでは、1990年以降にSP管の事故頻度が増加しているが、これは事故発生件数は少ないが、管路延長が短いことが影響している。

- ④VU管は、加圧タンクの空気が抜けて、ポンプの起動停止が1分程度で繰り返され、0.2MPa程度の圧力変動が管路全体に作用したものである。その結果、TS継手の接着部の剥離やピンホールなど総計1100件の事故が発生した。対策としては、インバータによるポンプ吐出圧一定の回転数制御を導入することにより、事故の発生が収束した。
- ⑤VP管は、減圧弁の作動不良やスプリンクラーなどの起動停止が発生する場合、設計内圧以下であっても、圧力変動の繰り返しによる疲労破壊を生じることがある。 繰り返し荷重が作用する場合、管材の疲労が進行するので、事故の発生を完全に防止するための有効な対策が無いのが現状である。

以上のように、パイプラインの導入開始後、約40年間の 技術の進歩と発生した事故について振り返りを行った.こ れまで、パイプラインの事故が発生する毎に原因が究明さ れ、有効な対策が講じられ、それが技術の進歩に貢献し てきた.一方、パイプラインの進展と事故の発生は無縁で はなく、常に新しい側面で事故が発生する可能性があると 考えられる.

#### 4. 塩ビ管の疲労破壊について

## 4.1 塩ビ管に作用する圧力脈動と疲労破壊

塩化ビニル管(PVC)の原料である塩ビ樹脂は,汎用 プラスチックに比べ,クリープ歪みが小さな優れた材 料であるため,静的負荷が連続して作用した状態では, 長期間にわたって機械的強度を維持できる材料であ る.従って,土地改良事業計画設計基準「パイプライン」 においては、硬質塩化ビニル管(VP)では、静的な圧力と して、設計水圧 1.0MPa(静水圧+水撃圧)が規定されて いる.

畑地潅漑の末端側のパイプラインは, 圃場のスプリンク ラーや給水栓, ハウスの電磁弁などの散水機器に接続し ているため, ある平均的な動水圧の上に, 脈動圧が重なっ た複合的な圧力の作用を受ける.

このように、材料が力学的応力を継続的に、あるいは 繰り返し受けた場合に、その機械的強度が低下して、 最終的に破壊に至る疲労破壊を生じる場合がある.塩 ビ管の設計においては、繰り返し作用する動的な圧力 については、これまで考慮されて来なかった<sup>15</sup>.





図12 塩ビ管の累加事故発生頻度と事故箇所の静水圧



図14 事故を発生した管の管種と口径

#### 4.2 塩ビ管事故事例

表2に示すO県M地区においては、塩化ビニル管の 内側に生じた微小な亀裂が進行して、表面に貫通する 破壊事故が供用開始後10年間で49回発生しており、補 修工事を繰り返している<sup>13,14</sup>.

図12に、塩化ビ管について、路線毎に供用開始後の 累積事故件数を延長で除した累積事故発生頻度で示し ている.5カ所のファームポンドをA~D、ファームポ ンドから受益に向かう路線を1~6で示している.さら に、漏水事故発生位置における静水圧を右縦軸の隣に マークで示している.また、事故発生後、作用水圧を 削減する目的で減圧弁が、A-3、A-4、B-1、C-3路線 に設置されており、累加事故発生頻度の該当年にマー クで示している.

43

図13に,路線毎のかん水面積と塩ビ管の累積事故発生 頻度の関係を示している.また,図14に事故を発生し た管の管種と口径の割合を示している.

図12~14の結果より得られる塩ビ管の事故発生について、以下にまとめる.

①供用開始後、5~12年で事故が発生している.

②かん水面積が増加して一定になった後に、5年程度経 過してから事故が発生し始めている.

③地区内14路線の内,8路線で事故が発生しており,事故 が発生する路線としない路線に分かれている.

④事故箇所における静水圧は、0.33~0.73MPaであり、作 用圧力が低圧であっても、事故が発生している.

⑤減圧弁設置後も,事故が減少しておらず,作用圧力の 低減が事故の減少に寄与していない.

⑥事故発生後に補修を行っても、その後、事故が継続し て発生する場合がある.

⑦事故の発生は、塩ビ管が80%を占めており、口径は 300mmが約半数となっている.

⑧塩ビ管の破断面には、肉眼による観察で貝殻模様が生成されており、疲労破壊の特徴的な破面<sup>10</sup>が確認されている。

⑨管周辺の基礎材については, 試掘調査の結果, 台湾砂 (川砂)を管頂から0.3m程度上部まで使用しており, 粒径 20mm以上の材料は認められていない.

⑩管体表面に細かな傷が認められるが、埋設施工の締固 めによりついたものと想定され、それ以外には特に大きな 傷は認められていない.ただ、表面の小さな傷でも、内壁 における応力集中を生じさせることがあるので、クラック発 生による疲労亀裂の進展の可能性は、否定できない.

上記のことより,塩ビ管の破壊の原因としては,高い レベルの静水圧が作用した事による静的破壊ではな く,末端の自動給水栓やスプリンクラーによる圧力脈 動による繰り返し荷重の影響による疲労破壊の可能性 が高いと考えられる.

#### 4.3 塩ビ管の疲労亀裂進展

塩ビ管の破裂事故は, 脆性破壊であり, 圧力の増減が 長期間繰り返して作用する(動的負荷)ことにより, 塩ビ管の内側に生じた微小な亀裂から始まるクラック が徐々に成長し, 最終的に危険な大きさか表面に貫通 して最終的な破壊に至る場合がある.パイプ壁内の応 力の大きさがクラックを成長させる程度に高ければ,パイ プの寿命を決定する主な因子は,クラックの成長速度であ る<sup>17</sup>.



図15 クラック成長速度におよぼす ΔKの影響

表4 クラック成長速度の定数

	log A	A	т
Herzberger	-6.29	5.13E-07	2.80
Leevers	-6.85	1.41E-07	2.60
Kim	-7.44	3.63E-08	2.67
Mai&Keer	-7.36	4.37E-08	2.81
Joseph&Leevers	-7.00	1.00E-07	2.75
Mandell&Chevailler	-7.25	5.62E-08	3.00

## 4.3.1 Paris式

Paris式は,疲労クラック進展速度*da/dNを*(1)式で 与える<sup>18,19,20)</sup>.

$$\frac{da}{dN} = A \left( \Delta K \right)^m \tag{1}$$

ここで, a: 亀裂寸法(m), N:繰り返し数, da/dN: 疲労ク ラック進展速度(m/cycle),  $\Delta K$ : 応力拡大係数の変動範 囲(MPam<sup>1/2</sup>, MN/m<sup>3/2</sup>),  $A \ge m$ は材料の定数である.

既往の実験結果より、クラックの成長速度を図15に、定数Aとmを表4に示す.クラックの成長速度は、HerzbergerとKimが、上下限であり、Leeversのデータはほぼ中間値を示している.また、曲線の勾配mは、2.6~3.0の範囲にある.

#### 4.3.2 修正Paris式

図16に示すような脈動圧が作用している場合,平均 応力*P*<sub>m</sub>と応力振幅ΔPを用い,塩ビ管の疲労クラック の伝播速度を、応力拡大係数Kと応力拡大係数振幅 $\Delta K$ の関数として定義して、(2)式の修正Paris式で記述できる<sup>21)</sup>.



図16 平均応力と応力振幅

$$\frac{da}{dN} = B\left(K_m \Delta K\right)^n \tag{2}$$

ここで, K:応力拡大係数(MPam<sup>1/2</sup>, MN/m<sup>3/2</sup>),  $K_m$ :平均 応力拡大係数,  $\Delta K_m$ :応力拡大係数範囲,  $B \ge n$ は材料の 定数である.

応力拡大係数が、0~2Kmの範囲に変動するとすれば、

$$K_m = \frac{1}{2}\Delta K$$

の関係が成立するので、(2)式を通常のParis式である(1) 式と比較して、

$$m = 2n$$
$$A = \frac{B}{2^n}$$

が得られる.

表4に示したクラックの成長速度の定数AとmをBとnに換算し,他の実験結果と合わせて表5に示す.

	В	п	
Herzberger	1.35E-06	1.400	
Leevers	3.48E-07	1.300	表4の換算
Kim	9.16E-08	1.335	
Kim(2)	8.40E-08	1.300	宝殿店
Mai	1.00E-07	1.500	天映恒
採用値	1.00E-07	1.400	

表5 クラック成長速度の定数Bとn

## 4.3.3 応力拡大係数

亀裂に引張り応力 σ を受ける場合, 亀裂の先端で応力 集中が発生し, 応力が無限大に発散する特徴がある. 応 力拡大係数を一般的な形式で, (3)式のように表す<sup>22,23</sup>.

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \tag{3}$$

ここで, α: 亀裂材の形状や境界条件による補正係数

例えば,遠方一様引張応力を受ける有限幅板片側亀裂の場合は,α=1.1215 である.

塩ビ管の場合は、内面の小さい半円形クラックから破壊 が始まるとする.深さaの半円形クラックに材料の降伏応力 の1/2の引張応力σが作用する場合の応力拡大係数は、 (4)式で与えられる<sup>21)</sup>.

$$K = 1.2438\sigma\sqrt{a} \tag{4}$$

クラックの近傍にみられる応力 $\sigma$ は、パイプのフープ応力 $\sigma$ <sub>h</sub>およびクラックを引き裂こうとする圧力Pである、パイプの外径をD、管厚をtとすると、応力 $\sigma$ は(5)式で与えられる.

$$\sigma = P + \sigma_h = P + \frac{P(D-t)}{2t} = \frac{P(D+t)}{2t}$$
(5)

従って,内面に小さい半円クラックを有する塩ビ管の応力 拡大係数は,(6)式で与えられる.

$$K = 1.2438 \frac{(D+t)}{2t} P \sqrt{a} \tag{6}$$

そこで,平均応力拡大係数*K*<sub>m</sub>と応力拡大係数振幅Δ*K* を平均応力*P*<sub>m</sub>と応力振幅ΔPを用いて,(7)式で表す.

$$K_{m}\Delta K = FP_{m}\Delta Pa$$

$$F = 1.547^{2} \left(\frac{D+t}{2t}\right)^{2}$$

$$(7)$$

#### 4.3.4 クラック進展則による寿命予測

大きさ*a*<sub>0</sub>の最初のキズが,疲労クラックとしてゆっくり成長し,臨界値に達した時,破壊が生じるとすれば,(2)式と(7)式を結合して,積分することにより,(8)式によりサイクル数を求める<sup>21)</sup>.

$$N_{f} = \int_{a0}^{ac} \frac{da}{B(K_{m}\Delta K)^{n}} = \int_{a0}^{ac} \frac{da}{B(FP_{m}\Delta P)^{n} a^{n}}$$
  
$$= \frac{1}{B(FP_{m}\Delta P)^{n}} \int_{a0}^{ac} a^{-n} da$$
  
$$= \frac{1}{BF^{n} (n-1)(P_{m}\Delta P)^{n}} \left(\frac{1}{a_{0}^{n-1}} - \frac{1}{a_{c}^{n-1}}\right)$$
  
$$= \frac{C}{(P_{m}\Delta P)^{n}}$$
  
$$C = \frac{1}{BF^{n} (n-1)} \left(\frac{1}{a_{0}^{n-1}} - \frac{1}{a_{c}^{n-1}}\right)$$
(8)

ここで, Nf:破壊にいたるサイクル数, ao:最初のキズの大きさ, ao:破壊の起こるクラック長さ

パイプはクラックが貫通したときに破壊するので,薄肉 管では,最終のキズの大きさa。は管厚に等しい.

塩ビ管では、管の内壁に発生したキズが疲労クラックの 始点となるが、最初のキズはao=0.5mmが適当であるとされ ている.

(8)式のCは、パイプのクラスと口径によって決まる定数 であり、P<sub>m</sub> Δ P=一定 となる圧力条件下で、サイクル数を 特定できる.このようにして、疲労クラックの成長速度を用 いて、脈動圧にさらされた塩ビ管の寿命を予測することが できる.

表 6 クラック進展則による寿命予測のC値

最初のキ ズの臨界 甌7%容 最大外径 最小管厚 C値 の大きさ D a0 ac B·平均值 B·下限值 n 1.35E-06 mm mm mm mm mm 1.00E-07 13 18.2 2.2 1.4 0.5 1.73E+06 1.28E+05 2.1 1.4 1.90E+06 1.41E+05 16 22.2 27 0.5 1.25E+06 9 29E+04 20 26.2 14 0.5 32.2 3.1 1.4 0.5 3.1 1.11E+06 8.24E+04 25 30 38.3 3.1 1.4 0.5 3.1 7.12E+05 5.28E+04 40 48.3 3.6 1.4 0.5 3.6 6.06E+05 4.49E+04 50 60.4 4.1 0.5 4.1 4.95E+05 3.66E+04 65 76.5 41 14 0.5 41 2.65E+05 1 96E+04 75 89.5 5 5 0.5 4 13E+05 3.06E+04 14 55 100 114.6 6.6 14 0.5 3.63E+05 2 69E+04 6.6 125 140.8 7.0 14 0.5 7.0 2 49E+05 1 84E+04 150 166.0 8.9 1.4 0.5 8.9 3.19E+05 2.36E+04 200 217.3 10.3 1.4 0.5 10.3 2.36E+05 1.75E+04 250 268.6 12.7 1.4 0.5 12.7 2.42E+05 1.79E+04



図17 クラック進展則による寿命予測のC値

塩ビ管の呼び径(mm)

#### 4.4 塩ビ管の疲労寿命評価

塩ビ管には、使用圧力によりVPとVUの2種類があるが、 圧力管路に使用されるVPについて、クラック進展則による 寿命予測を行った.

表5に示すクラックの成長速度の定数Bとnについて,平 均的なn=1.4, B=1.00E-07とクラックの成長に対する抵抗 性が下限であるn=1.4, B=1.35E-06(Herzberger)を用いた.

VP管について、クラック進展則による寿命予測計算を行った結果を表6に示し、呼び径毎のC値を図17に示す. 口径の小さいほど、管の寿命は長くなっており、口径が200mmを越えると破損事故が増加するという経験知と一致している.

塩ビ管の寿命は、サイクル数で表され、呼び径毎のC値 を用いて、平均応力P<sub>m</sub>と応力振幅ΔPの組み合わせから (8)式で求められる.図18、19に、応力振幅ΔPを平均応力 P<sub>m</sub>の関数として、各寿命サイクルについて、プロットした.



# 図18 寿命サイクルと平均応力*P*mと応力振幅ΔP (クラックの成長速度が平均的な材料)



図19 寿命サイクルと平均応力*P*<sup>m</sup>と応力振幅ΔP (クラックの成長に対する抵抗性が下限)

#### 4.5 キズの発生要因

塩ビ管の寿命は、キズの深さ、キズの先端半径、応力の 特性、パイプ材料の破壊脆性などのいくつかの因子によ って影響を受ける.脈動圧にさらされる管路においては、 特に、キズの深さと鋭さは、寿命を規定するクラックの開始 速度と進展速度に重要な影響を及ぼす<sup>19,24)</sup>.

塩ビ管では、包含物、気泡、未ゲル化による残留粒子 等で多数のミクロクラックが存在する.また、管の押し出し 形成時における機械加工レベルの不足、あるいは塩ビ管 を布設する際に生じる施工損傷によるキズが発生する.施 工損傷には、転石による鋭い窪みから移動や転圧の際に 生じる長くて深い引っ掻き傷まである.このような管表面に キズを生じる場合、圧力脈動下においては、管内壁に応 力集中を生じ、クラックの発生に繋がる可能性がある<sup>25)</sup>.

## 4.6 事例検討

クラック進展則による寿命予測をO県M地区における塩 ビ管の疲労破壊に当てはめると、一般論も含めて以下 のように考察でされる.

①O県M地区において実際に使用したと思われる平均 応力*P*<sub>m</sub>と応力振幅ΔPの組み合わせによるサイクル数は, 平均的な材料で10<sup>6</sup>サイクル,クラックの成長に対する抵抗 性が下限である場合は10<sup>5</sup>サイクルである.

②通常の通水条件下で圧力脈動が作用しても、小さな亀 裂を起点とするクラックは、管材料が平均的なものであれ ば、危険なレベルまで成長するのに長期間を要する.

③事故の事故履歴から判断して,塩ビ管の疲労破壊の 発生については,年間150日稼働で5年間に圧力脈動が1 時間に6回発生するとして,繰り返し回数10<sup>5</sup>回程度で事 故が発生する可能性が推察される.

④塩ビ管のクラック進展則による寿命予測に用いるデータ には複雑な要因が関与しており、データのばらつきも大き いので、パイプは予想された寿命よりも短い時間で破壊す ることがあることを考慮する必要がある.

⑤塩ビ管は、ゲル化が不十分でクラックの成長に対する抵抗性が不十な場合、寿命サイクルが下限値10<sup>5</sup>サイクルに比べて一桁程度低下する可能性がある。

⑥塩ビ管の破壊脆性が不良の場合は、ミクロクラックや転 石等でクラックを生じると、低圧の負荷でも大きい応力拡 大係数になり、小さいキズでも脆性破壊を引き起こす可能 性がある.

⑦減圧弁設置後あるいは破損補修後も既往事故箇所の 近傍で事故が継続して発生することは,工事区間で布設 された塩ビ管全体に材質の問題,施工精度の問題を抱え ていることを示しており,局所的な補修では,破裂事故を 完全に防止できないと考えられる.

⑧塩ビ管の疲労破壊については、作用する平均的な水圧の大きさよりも、工場製作時の誤差や施工時の精度などが影響するので、これらの要因をどのように制御するのかが

課題となる.



図20 パイプラインの設計思想と計画設計

## 5. 末端側の施設更新に向けた技術課題

## 5.1 パイプラインの設計思想

パイプラインの設計思想は、図20に示すように、これま で"単価を安く"、"耐用年数を長く"、"維持管理を少なく"を 軸とする[低コスト]と、"流速係数を大きく"、"耐圧強度を 大きく"を軸とする[省エネルギー]を基調としてきた. さら に、管材やポンプ、バルブなどの機材が進歩したため、水 理・構造の計画設計においては、これらを効果的に組み 合わせることにより、位置エネルギーを極限まで活用する 方向で進んできている.

#### 5.2 塩ビ管の事故と対策

塩化ビニル管についても, 圧送管は設計水圧0.6MPaの VU管から1.0MPaのVP管へ移ってきており, VU管のような 継ぎ手破損や単純な静的破壊は発生しなくなっている. し かし, VP管はより厳しい条件で運用することになるため, 僅かな管の材質や施工精度の問題が疲労破壊を引き起 こして, 管の寿命を低下させる場合がある.

既設の塩ビ管において,破損事故が材質や施工に原

因があると推定される場合は、工事工区の全体に関わる 問題なので、当該の塩ビ管を新規の塩ビ管あるいはDCIP 管に置き換える以外に、事故の発生を完全に防止するた めの有効な対策が無いのが現状である.

## 5.3 管材の進歩と課題

管材の進歩という側面からは、塩ビ管では剛性を強化した許容設計内圧1.25MPaのVH管の導入が想定され、 DCIP管では、口径300~600mmで管厚を薄くし、設計水 圧を1.0MPaに抑えたALタイプが開発された.管厚は口径 300mmにおいて、従来管の7.5~6.5mmから6.0~4.5mm に減少させて、コスト削減を図っている.

農業用パイプラインにおいて、口径300mmは、水理構 造や経済性の面から、選択肢としてVP管とDCIP管が重な る口径であり、塩ビ管のVH管はより高い設計圧力へ、 DCIP管のALタイプはより低い設計圧力でより安価にという 方向で、競争力の強化を図っている.

しかし,塩ビ管では、VH管によりVP管の疲労破壊の問題を完全に解消できない可能性がある.一方,DCIP管は 埋設地盤の状況によって,外面腐食を受け,その腐食深 さPは埋設年数tの関数 P=kt<sup>n</sup> で表されることより,管厚を 薄くすることは,腐食の面からは危険側になると言える.

#### 6. まとめ

パイプラインにおける技術の高度化は、必ずしも事故の 減少に直結するとは限らず、技術者の意図せぬ新たな側 面から管路事故を招く可能性があることに留意する必要が ある.

今後のパイプライン設計においては,静的な破壊を対象として,設計水圧を静水圧+水撃圧の概念でとらえ,定格圧力以下に設定するだけでは無く,末端側との接続状況により,圧力脈動の発生が想定される場合は,疲労破壊を想定して,動的な荷重に対する設計技術<sup>36,27)</sup>を導入する必要がある.

## 参考文献

- [1] 農村振興局(2008): 農業水利施設の機能保全の手引き -パイプライン編-の策定について
- [2] 稲垣仁根(2015): パイプラインにおける技術の進歩と事故 リスク低減の関係, 平成27年度 農業農村工学会大会要 旨集, pp.82-83.
- [3] 横浜市水道局(2008):老朽管改良(耐震化)計画報告書

- [4] 谷中ら(2013): 農業用パイプラインの事故要因分析.平成 25年度農業農村工学会大会講演会要旨集, pp.758-759.
- [5] 井端ら(2014): 農業用パイプラインの事故要因分析ー調 査対象拡充と新たな傾向ー.平成26年度農業農村工学会 大会講演会要旨集, pp.738-739.
- [6] 農村振興局(2009): 農業水利施設の機能保全の手引き 「パイプライン編」, pp.56-58.
- [7] 水道技術研究センター(2011): 持続可能な水道サービス のための管路技術に関する研究(e-Pipe)報告書
- [8] 農村振興局(2009): 農業水利施設の機能保全の手引き 「パイプライン編」, pp.16-17.
- [9] 農業水利ストック情報データベースシステム(2007): http://www.suiridb.go.jp/sdb/jsp/index.jsp(最終確認日:2015/12/13)
- [10] 農林水産省:ホーム > 組織・政策 > 日本の水土 http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/suidozu/index.html (最終確認日:2015/12/13)
- [11] 九州農政局笠野原農業水利事業所(1969): かさのはら
- [12] 名和規夫・園田和記・岩田博文・鈴木哲也(2002):老朽化 した管路施設の機能調査評価,農業土木学会誌, 70(12), pp.31-35.
- [13] 田中良和(2013):小口径塩ビ管の破損事故歴の調査,平 成25年度 農業農村工学会大会要旨集, pp.110-111.
- [14] 田中良和(2015): 水撃圧による小口径塩ビ管の破損事 故, 平成27年度 農業農村工学会大会要旨集, pp.84-85.
- [15] 稲垣仁根(2015): 減圧弁を用いた低圧化パイプラインシ ステムにおける自励振動的圧力脈動と疲労破壊のメカニ ズム、土地改良の測量と設計, 80, pp.41-50.
- [16] 白石哲郎(2000):硬質ポリ塩化ビニルの疲労き裂進展と破 波面形態,材料,49(5), pp.567-571.
- [17] 百武 秀·萩尾照俊(1988):硬質塩化ビニル管の疲労強 度, 材料, 37(423), pp.1381-1385.
- [18] 黄木景二・白石哲郎(2012): ポリカーボネートにおける連続および不連続疲労き裂進展に対するパリス則,材料, 61(8), pp.719-723.
- [19] R Selden, PA Gradin.(1993): Lifetime Predictions of uPVC Pipes from Short Time Tests, Journal of Testing and Evaluation, 21(5), pp. 402-405.
- [20] Burn, L. S(1994): Lifetime prediction of uPVC pipes : experimental and theoretical comparisons , Plastics, rubber and composites processing applications, 21, pp. 98-108..
- [21] TRUSS R. W.(1988):Lifetime predictions for uPVC pipes subjected to combined mean and oscillating pressures, Plastics and rubber processing and applications, 10(1), pp. 1-19.
- [22] 村上敬宣・原田昭治ら(1982):ぜい性プラスチック材を用いた応力拡大係数の実験的決定法,材料,31(344), pp.515-519.
- [23] 原田昭治・村上敬宣ら(1984):ぜい性プラスチック材を用いた応力拡大係数の実験的決定法(第2報),材料, 33(372), pp.1147-1152.
- [24] 鈴木 恵・岩本正治ら(1984):粒子充てん塩化ビニルの疲労き裂伝はと破壊機構との関係,材料,33(366), pp.304-310.
- [25] 鈴木 恵・岩本正治ら(1981):ポリ塩化ビニルの疲労き裂 伝ぱに及ぼす重合度,安定剤および改質剤の影響,材 料, 30(331), pp.380-336.

- [26] P. Davis, S. Burn, M. Moglia, S. Gould(2007): A physical probabilistic model to predict failure rates in, Reliability Engineering and System Safety, 92, pp.1258-1266.
- [27] Plastics Industry Pipe Association of Australia Limied(2009): Industry Guidelines : PVC PRESSURE PIPES DESIGN FOR DYNAMIC STRESSES

## 1. Introduction

Operation of reservoirs collecting surface water such as flash floods typically involves stochastic control problems. Dynamic programming is an approach to deduce optimal strategies in terms of maximization of a performance index, and the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation governing the maximized performance index is a partial differential equation whose solution is rigorously understood with the concept of the viscosity solution (Crandall and Lions, 1992). The authors have formulated different control problems, which are firstly reviewed in this manuscript. Then, another stochastic control problem is formulated to deal with a water harvesting reservoir which may dry up or spill over during an irrigation period having a fixed terminal time. Computational methods to approach the HJB equations are addressed as well.

## 2. Control problems studied so far

The dynamics of the storage volume  $X_t$  of a water harvesting reservoir at time t is generally governed by the water balance equation

$$\mathrm{d}X_t = \left(Q_{\mathrm{in}} - Q_{\mathrm{out}} - u\right)\mathrm{d}t \tag{1}$$

where  $Q_{in}$  is the inflow discharge,  $Q_{out}$  is the outflow discharge due to evaporation, seepage, and overflow from spillway, and u is the intake discharge as a control variable. An extra differential equation may accompany (1), to represent stochastic behavior of the system involving the water harvesting reservoir. A first exit time as a stopping time is considered to define the spatio-temporal domain where the system is operated. The extra differential equation and the spatio-temporal domain used in earlier papers are as follows.

Unami et al (2013) proposed a stochastic differential equation to represent the readily available soil moisture in the farm land, which was the command area irrigated by the reservoir. Operation of the system, which was dry season irrigation, was assumed to continue while there was water in the reservoir and while the soil moisture was between the wilting point and saturation.

Unami et al (2015) developed a zero-reverting process model, which is governed by the Langevin equation, for the occurrence of recharge events recovering the reservoir storage and terminating operation of the system. Zero-reverting processes alone are applicable to a wide range of problems ○Koichi Unami, Erfaneh Sharifi, Masayuki Fujihara Graduate School of Agriculture, Kyoto University

dealing with alternation of wet and dry regimes such as in rainfed agriculture (Sharifi et al, 2014; Sharifi et al, in press). Ryo et al (2012) explicitly added a stochastic term to (1), whose deterministic term was driven by a zero-reverting process.

Sharifi et al (2015) presented a primitive problem, where  $Q_{in} = Q_{out} = 0$  in (1) and no stochastic variable was involved. The optimal control problem formulated in that study is to maximize the performance index

$$J^{u} = J^{u}(s, x) = \int_{s}^{T} -|u - q| dt$$
(2)

where s is the current time, x is the storage volume as an independent variable, q is the water demand which is equal to the target intake discharge, and the irrigation period with the fixed terminal time T is considered. The admissible set U of u is

$$U = \begin{cases} [0, \infty), & \text{if } x > 0 \\ \{0\}, & \text{if } x = 0 \end{cases}$$
(3)

The HJB equation for this optimal control problem with a constant q has a unique viscosity solution

$$\Phi = \begin{cases} 0, & \text{if } x \ge q(T-s) \\ x-q(T-s), & \text{if } x < q(T-s) \end{cases}$$
(4)

where  $\Phi = \sup_{u \in U} J^u$ .

#### 3. A generalized stochastic control problem

A stochastic control problem is formulated here to generalize the control problems studied so far.

A zero-reverting process  $Y_t$  is considered as a virtual water flow index. The governing equation of  $Y_t$  is the Langevin equation

$$dY_t = -rY_t dt + \sqrt{2D} dB_t \tag{5}$$

where *r* is a reversion coefficient, *D* is a positive diffusion coefficient, and  $B_t$  is the standard Browninan motion. The coefficients *r* and *D* are assumed to be constant. A monotone non-decreasing function  $\varphi^+(y)$ , where *y* is the virtual water flow index as an independent variable, is assumed to define the relationship between  $Y_t$  and  $Q_{in}$  as  $Q_{in} = \varphi^+(Y_t)$ . A common example for  $\varphi^+(y)$  is

$$\varphi^+(y) = 0 \lor C(y - K) \tag{6}$$

where  $\lor$  denotes the maximum, K is a threshold for inflow events, and C is a positive constant. While,  $X_t$  as well as  $Y_t$  determine the outflow discharge due to evaporation and seepage with another function  $\varphi^-(x, y)$ . The storage volume  $X_t$  of the water harvesting reservoir is assumed not to exceed its capacity V almost surely, because of well-functioning spillway. Therefore, (1) is rewritten as

$$dX_t = a(X_t, Y_t, u)dt$$
(7)

with

$$a(x, y, u) = \begin{cases} 0 \land (\varphi^{+}(y) - \varphi^{-}(x, y) - u) & \text{if } x = V \\ \varphi^{+}(y) - \varphi^{-}(x, y) - u & \text{if } 0 < x < V \\ 0 \lor (\varphi^{+}(y) - \varphi^{-}(x, y) - u) & \text{if } x = 0 \end{cases}$$
(8)

where  $\wedge$  denotes the minimum. The admissible set U is also revised as

$$U = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0, \infty \end{pmatrix} & \text{if } X_t > 0 \\ \begin{bmatrix} 0, \left( 0 \lor \left( \varphi^+ - \varphi^- \right) \right) \end{bmatrix} & \text{if } X_t = 0 \end{cases}$$
(9)

A stochastic and generalized counterpart of the performance index (2) is

$$J^{u}(s, x, y) = E^{x, y} \left[ \int_{s}^{T} -\frac{1}{p} |u - q|^{p} dt \right]$$
(10)

where  $E^{x,y}$  represents the expectation with respect to the probability law of the stochastic processes starting at the point (x, y), and p is a positive parameter.

The HJB equation for this stochastic control problem is the second order partial differential equation

$$\frac{\partial \Phi}{\partial s} + a(x, y, u^*) \frac{\partial \Phi}{\partial x} - ry \frac{\partial \Phi}{\partial y} + D \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - \frac{1}{p} |u^* - q|^p = \sup_{u \in U} \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial s} + a(x, y, u) \frac{\partial \Phi}{\partial x} - ry \frac{\partial \Phi}{\partial y} + D \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right.$$
(11)  
$$- \frac{1}{p} |u - q|^p = 0$$

with the terminal condition

$$\Phi|_{s=T} = 0. \tag{12}$$

The domain  $\Omega$  of the HJB equation (11) is taken as  $[0,T] \times [0,V] \times \mathbb{R}$ , implying that the solution  $\Phi$  to (11) with (12) is examined in the sense of viscosity solution and that boundary condition is imposed on neither on x = 0 nor on x = V.

#### 4. Computational methods

In order to numerically solve (11) with (12), the independent variable y is transformed into another

variable z as

$$z = \tan^{-1} \left( \frac{r}{2D} y \right) \tag{13}$$

so that the computational domain becomes bounded. Indeed,  $\mathbb{R}$  is mapped to  $(-\pi/2, \pi/2)$ . The resulting HJB equation is a degenerate elliptic partial differential equation

$$\frac{\partial \Phi}{\partial s} + a \frac{\partial \Phi}{\partial x} - r \sin z \cos z \left(1 + \cos^2 z\right) \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{r}{2} \cos^4 z \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{p} \left|u^* - q\right|^p = 0.$$
(14)

The first order upwind scheme is applicable to finite difference discretization in the s and x directions, while the finite element scheme developed by Unami et al (2015) satisfactorily handles the degenerating coefficients in the z direction.

#### 5. Conclusions

The stochastic control problem has been formulated so that operation of the system does not terminate at a first exit time. Water balance dynamics in the water harvesting reservoir has been generalized as well. These advances in modeling methods have brought about the new issues to be rigorously discussed. Researches on the convergence of numerical solutions to viscosity solutions are ongoing in the framework of the stochastic control problem formulated here.

#### References

- Crandall MG, Lions PL (1992) Viscosity solutions of Hamilton-Jacobi equations, *Transactions of the American Mathematical Society*, 277(1), 1-42.
- Ryo M, Unami K, Fujihara M (2012) Stochastic control of micro rainwater harvesting systems, 平成 24 年度農業農 村工学会応用水理研究部会講演集, 114-115.
- Sharifi E, Unami K, Fujihara M, Yangyuoru M (2014) Optimality of rainfed agriculture in the sense of stochastic control, 平成 26 年度農業農村工学会応用水理研究部 会講演集, 45-46.
- Sharifi E, Unami K, Yangyuoru M, Fujihara M, (in press) Verifying optimality of rainfed agriculture using a stochastic model for drought occurrence, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, DOI: 10.1007/s00477-015-1129-y.
- Sharifi E, Unami K, Yoshioka H, Fujihara M (2015) The viscosity solution solving a primitive optimal control problem for an irrigation tank, 第23回日本雨水資源化 システム学会大会研究発表会講演要旨集, 51-52.
- Unami K, Mohawesh O, Sharifi E, Takeuchi J, Fujihara M (2015) Stochastic modelling and control of rainwater harvesting systems for irrigation during dry spells. *Journal of Cleaner Production*, 88, 185-195.
- Unami K, Yangyuoru M, Alam AHMB, Kranjac-Berisavljevic G (2013) Stochastic control of a micro-dam irrigation scheme for dry season farming, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(1), 77-89.

# SCADA による灌漑排水自動管理システムの開発

# 中矢哲郎\* · 浪平篤\* · 樽屋啓之\* · 安瀬地一作\* · 桐博英\* Tetsuo NAKAYA, Atsushi NAMIHIRA, Hiroyuki TARUYA, Issaku AZECHI, and Hirohide KIRI

\* 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)

Key Words:水管理システム,灌漑管理,農業用水, SCADA, PLC, 反復水利用

#### 1. はじめに

現在,我が国の農業水利システムにおける主要な幹線水 路には、テレメータ・テレコントロール(TM/TC)による 水管理システムが整備されているが、支線以下の圃区レベ ルや小貯水池、小型揚水施設は水管理システムの対象外で あり, 主に手動で管理されている. その原因としては, 圃 場毎の水管理システムの導入は,現状では土地改良事業の 適用範囲外であり,導入における初期コストは農家に負う ものが大きいことがあげられる.しかし近年の通信制御シ ステムの導入コストはかなり低減しており、圃場レベルで も構築や導入が簡易になってきている.また、農地の集積 が進み一農家の管理面積が増えたことから、遠隔管理シス テム導入による省力化のメリットが従来よりも大きくなっ ている.また、農家と広域農地全体との連携に基づく効率 的なポンプ利用による電気代の節約は、農家や水管理組織 の負担を減らすことになり、システム導入の初期コストの 早期回収が可能となってきている.よって今後,次世代農 林水産業創造技術研究開発計画 いに示されている、圃場水 管理の自動化、及び地域全体の水源から末端圃場までの水 分配システム開発に向けた取り組みが急がれる状況にある.

#### 研究の目的

以上の背景のもと、情報通信技術を利用した末端圃場か ら将来的には幹線システムまでの連携を見据えた拡張性の ある灌漑排水自動管理システムの開発を行う.開発するシ ステムには、豪州や欧米の灌漑システムに導入されており、 幹線水路のゲートなどのオペレーションを行っている SCA DA (Supervisory Control And Data Acquisition)システム を導入し、5ha~50ha 規模の末端灌漑エリアにも適用可能な 灌漑排水管理システムの構築を行う.さらにポンプ灌漑地 区において、省エネ運転や節水が可能な水管理システムを、 実際の SCADA システムを搭載した実験模型の運用により 再現し、システム構築の簡便性や制御運転のリアルタイム での運用性を把握し、現地への導入可能性について検討す る.

#### 3. 対象とする灌漑地区の概要

モデルとしたのは Fig.1 に示す,汎用農地を対象としたパイプライン灌漑システムである.本システムは印藤<sup>2</sup>が次

世代型水管理の三点セットとしてあげているパイプライン 化,調整施設,ICT 利用を導入し,さらに作目の変化への 対応が可能な需要主導型の水管理を実現することが可能で ある.まず用水路系統をパイプライン化し,無効放流を削 減しつつ,支線バルブ,調整池及び調圧水槽と,圃場内で の自動バルブやセンサーを通信制御技術により連携する. 運転においては,末端圃場の水需要によって末端バルブが 自動で開閉し,末端バルブの開度の状況に応じて支線,幹 線バルブの開閉が自動調整される.分水地点への給水は調 圧水槽からなされ,調圧水槽の水位が設定水位より低下し たら調整池から用水がポンプアップされる.このシステム により需要主導型の水管理がなされるとともに,調整池か らの揚水が需要に応じてなされることで,これまでかけ流 しであった地区ではポンプ運転費の低減や用水の有効利用 による節水効果が期待できる.

# 4. SCADA による灌漑排水自動管理システムの開発 4.1 システムの構成

SCADA の構成は主に、①遠方監視制御装置(PLC)、② 監視制御とデータ収集を行うサーバー(PC)、③通信設備 (Ethernet や次世代型の通信規格である Wi-SUN などの無 線通信)、④監視画面表示用端末(タブレット端末や PC)、 からなる. PLC (Programable Logic Controller)とは入出力部 を介して各種装置を制御するコントローラーで、制御内容 を記憶するメモリを内蔵しているため設備の小規模化が可 能になる.

現地におけるシステムの構築は Fig.2 のように行う.まず 圃場単体の給排水管理のみの場合は、PLC 一台で稼動する SCADA1 を構築する. 複数圃場の給排水を管理する場合は PLC2 を増設し SCADA2 を構築する. さらに分水地点や小 規模水源を含めた灌漑ブロックにおいては、取水施設等を PLC3 に接続し SCADA3 を構築する. さらに SCADA3 で集 約したデータを中央管理所に送信することで圃場から幹線 レベルまでの連携が可能となる. 本システムの主なメリッ トは以下の点にある。

①圃場単体の給排水バルブから, 圃場ブロックの上流側 にある分水地点の揚水ポンプの制御等まで, スケーラブル に導入することが可能である.

②PLC 用のプログラム言語は IEC 61131-3 により定義さ



Fig.1 汎用水田を対象としたパイプライン灌漑システム

れているため、末端圃場の水需要の変化に対応する機能の 追加、変更が容易であり、需要主導型水管理が可能となる.

③既存のバルブ,ポンプなどをそのまま PLC に接続し利 用することが可能であるため,低コストで現地への導入が 可能である.

このように SCADA システムを末端圃場から水源まで導入することで, 圃場スケールから広域スケールまで汎用性のあるシステム構築が可能となる.

#### 4.2 灌漑排水自動管理システムの機能

SCADA システムを Fig.1 のパイプライン灌漑地区に導入 することで以下の機能を発現することが期待される. ①自動化,遠隔化による水管理の省力化,効率化. ②地区全体の節水や省エネによる運転コストの低減. ③幹線バルブや支線バルブの制御によるパイプラインへの 圧力負荷の低減.

①においては、農家レベルでもタブレット端末などを用 いて遠隔で監視制御を行うことで、水管理の省力化が可能 となる.また末端バルブ全ての自動化がコスト的に困難な 場合は、末端バルブは固定開放にし、それらの上流側にあ る分岐バルブにすることで低コスト化が可能となる.

②においては、農業用水の節水方法である反復水利用手 法を用いる.反復水利用とは一度農地に灌漑した用水のう ち排水路に流出した水を繰り返し用水として利用するもの で、用排水兼用水路を通じて再度農地に灌漑するもの、調 整池に導入しポンプにより戻す方法などがある.具体的に は、農家レベルで行う圃場の水管理と、土地改良区や水利 組合が管理する水源からの取水管理を連携させることで、 上流側の水源の取水量を優先する供給主導型の現状の水管 理から、末端圃場の需要によって取水を行う需要主導型の 遠隔水管理システムへと変更することで、節水や省エネ運 転を行う.

③においては、パイプラインの形式は、オープンタイプ、 セミクローズドタイプ、クローズドタイプの三つが代表的 であるが、支線、幹線レベルで自動制御バルブを導入し、 未利用系統のバルブを閉にすることで、下流パイプライン



Fig.2 SCADA システムの概要

の管圧の負荷を減じることが期待できる.よって末端バル ブ操作時の高圧発生による老朽化機器の破損事故等を防止 するなど利用時のメリットが生じる.

#### 4.3 実験模型の作成

水理模型実験により,開発した灌漑排水自動管理システムの制御,各種モニタリング,データ収集・分析機能,導入コスト,操作の簡便性や安定性を実証した.実験は農村 工学研究所の頭首工第一実験棟で行った.

構築した SCADA システム実験用のパイプライン模型の 用排水系統の概要を Fig.3 に示す. Fig.1 に示したパイプラ インシステムとほぼ同じ機能を再現できるように設計し た. 幹線パイプライン区間の長さは16mで, 幹線パイプラ インから調圧水槽下部までの高さは0.7m である.3 箇所の 分散した圃場ブロック内の各圃場においては水位計により 水深をモニタリングし設定水位が低下したら末端バルブか ら給水される. 幹線バルブ, 支線バルブは下流部分のバル ブ使用状況に応じて、開度制御がなされる.たとえば、末 端バルブ 311, 312 のいずれかのバルブが開いているとき支 線バルブ21が開度50%で開き,2箇所開いている場合は開 度 100%で開く. さらに上流の幹線バルブ 11 は支線バルブ 21、または下流の幹線バルブ12が開いていれば開度100% で開く.また調圧水槽の水位に応じて調整池から揚水され る. このように圃場の需要主導型の制御を行うことで、必 要な水を給水するだけでなく水未使用系統のバルブ閉操作 により下流側の余剰圧力を低減させる.

3箇所の分散した圃場ブロック毎に配置された PLC 同士 は、920Mhz 帯の特小無線ユニット(住友精密工業株式会社, Crossbow, RS485 無線化ユニット)を使用し、親 PLC にデ ータを無線中継する.本無線ユニットは PLC の RS485 イン ターフェースに接続可能で、汎用性の高い MODBUS プロ トコルに対応可能である.親 PLC からは PLC の Ethernet ユニットからインターネットに接続しサーバーとなるパソ コンにデータを送信する.

これらの構成によりゲート・ポンプ・バルブ等により 場ブロックへの水配分を効率的に行う監視制御・データ収 集システムが構築され,需要主導型の水管理,各種バルブ 操作による水供給の効率化が可能となる. PLC は三菱電機 の MELSEC-F シリーズを用いた. SCADA システム構築に は、SCADA 開発パッケージソフト Roboticsware 社製の FA-PANEL を用いた.本ソフトは画面開発ツール (Panel Edito r) と、開発した画面の実行を行うブラウザー (Panel Brow ser) と、PLC との通信、ロギング、アラーム監視などを行 うサーバーアプリケーション (Panel Server) から構成され ている.

#### 4.4 システム運用結果

圃場の水槽底面で手動排水を行うことで現地の土壌浸透 を模し,各圃場ブロックで異なる減水深を与え水管理制御 の自動運転を行った.水位計によるセンサー制御,ポンプ のON/OFF 制御,バルブ開閉の比例制御など各種制御動作 が正常におこなわれていることを確認した.末端バルブ, 支線バルブ,幹線バルブ,PLC等の設置状況,及び運転状 況を示す回転灯の状況を Photo.1 に示す.システム構築に おいては入出力の規格に合う様々なメーカーのセンサーや 制御機器が接続できるので,機器選択の幅が大きく拡がる 利点を確認した.今回使用した末ルブ,ポンプ,水位計等 は全て入手が容易な安価な機器である.

Fig.4 に各制御機器やセンサー値のデータ収集結果を示 す.水田水位は設定された減水深で水位が低下しており, 下限水位以下になると給水により上限水位まで上昇してい る.各水田は減水深が異なるために,水位の変動速度が異 なっていることがわかる.調圧水槽は水位が設定下限値以 下になると調整池からポンプアップされ上限水位で止まる.



Photo.1 水管理制御実験模型の概要

このようにこれまでかけ流しがほとんどだったポンプ灌漑 が無効放流なしで必要な水量のみ供給される.減水深が圃 場によって異なる場合は浸透量に対する給水量が多いケー スが発生し,かけ流しにした場合の損失割合は大きくなる ため,自動制御による節水効果が発現する.幹線バルブの 開度データを見ると,下流の水田を制御するバルブ13 は圃 場での減水深が小さいため,閉じている期間が長くなって いる.この制御は支線バルブにも適用している.この操作 により管圧負荷を下げる効果が期待できる.末端バルブは 開度 50%に設定されているが,減水深の急激な減少におい ては開度が大きくなる制御も実装されている.

PLC 同士の無線通信においては、一時的な通信遮断があ るものの、自動制御には支障なく運用された.しかし現地 においてはより安定的に通信する必要があることから、現 在国際標準となっており通信安定性に優れる Wi-SUN に準



Fig.3 SCADA システム実験用パイプライン模型の用排水系統の概要



Fig.4 各制御機器, センサーのデータ収集状況

拠した無線端末等に変更する必要がある.

Photo.2 にタブレット端末上に表示した監視画面を示す. 作成した SCADA 上のインデックス画面,トレンド画面, メーター画面,設定値調整用画面等は,正常かつ容易に操 作できることを確認した.また,日報,月報,年報等の Excel 帳票への集計や CSV ファイルへの自動保存が可能である ため運用状況の管理や分析が容易に行えた.監視用 PC に よる監視用端末はサーバーを兼ねているが,イーサネット 経由で監視画面の閲覧や遠隔操作は利用者個別で行うこと ができるため,各農家が端末を持ち末端の需要に合った水 管理操作が可能となる.

#### 5. まとめ

圃場から圃場ブロックを含めるスケール,さらに圃場ブ ロックレベルから水源までを含める広域レベルまでスケー ラブルに導入でき,汎用性を有する SCADA を導入した灌



Photo.2 タブレット端末による SCADA 監視画面の例

漑排水自動管理システムを構築した.また,圃場と支線バルブ,揚水ポンプが連携した水管理システムを実験模型上で構築し,反復水利用のための制御運転を行った.その結果,水需要主導型の自動制御は正常かつ安定的に行えることを確認した.また,計測制御機器のPLC計装からシステムのカスタマイズ、データ通信までを低コストかつ簡易にできることを確認した.

謝辞:本研究は内閣府「戦略的イノベーション創造プログ ラム(SIP)(次世代農林水産業創造技術)」,および日本学 術振興会科学研究費(若手研究(B), No. 25871100),の補助 を受けて行われました.ここに記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 1)日本経済再生本部:日本再興戦略(平成 25 年 6 月 14
   日), http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/saikou jpn.pdf (p14), 2015.9閲覧
- 2)印藤久喜: 次世代型の農業水利システムの転換に向けて, 水土の知, No.83(4), pp.1-2, 2015.
- 3)David, G. Ramchand, O. and Kristoph-Dietrich, K.: Irrigat ion System Modernization: Case Study of the Middle Rio Grande Valley, Journal of Irrigation and Drainage Engin eering, Vol.135-2,pp.169-176, 2009.
- 4)中 達雄 樽屋啓之:次世代型水管理システムへの計画 設計の方向,水土の知, No.83(3), pp.3-6, 2015.
- 5)中矢哲郎 桐 博英 安瀬地一作::SCADA (監視制御・デ ータ収集システム)による用排水管理の高機能化,ARIC 情報,114号,pp.26-33,2014.

## TM/TC を活用した需要主導型大容量開水路配水システムの開発

久保成隆(東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻)

#### Abstract

多くの農業用水の幹線水路では、チェックゲート(CKG)により上流水位を一定に制御して、 供給主導型の配水を行っている。しかし、近年、支線や末端水路の管路化が進み、需要主導型の 配水方式の可能性が模索されている。その際、幹線水路を含むシステム全体が管路化されれば需 給の整合性はよいが、幹線水路が開水路のままでは、用水到達遅れが生じるので、接続点に調整 池を設置したり水路内貯留量を増加させたりする必要がある。

そこで本研究では、そのような物理的対応を遠隔監視遠隔操作(TM/TC)による CKG 操作に よって代替が可能かどうかを検討した。愛知用水を対象に、先ず、現在の幹線水路系の施設規模 は変えずに、制御方式を下流水位一定制御に変更した場合の最大配水流量を求めた。次いで、 TM/TC を活用した4つのゲート制御方式を提案して、下流水位一定制御を基点に、4つの制御方 式の長短を検討した。その結果、4方式中、応答性においては「貯留量均衡制御」が、最大配水 流量においては「最大流量等流制御」が、最も優れていることが判明した。

#### 1. はじめに

緒形<sup>1)</sup>は開水路における配水方式を、余水放流方式(必要量を使い残りは放流)、予備貯留方 式(貯留施設に予め蓄え水量不足を補填)、予定注文方式(使用者は予定水量を供給に注文し、 供給者はスケジュール通りに送水)、配給方式(供給者が配水スケジュールを決め送水)という 4方式に整理している。この中で、予備貯留方式は、需要量と供給量の時間差をファームポンド のような貯留施設によって調整する需要主導型の配水方式であり、貯留施設の容量が小さいと過 不足を生じる。この方式で、仮に、幹線水路が管水路ならば、供給者は需要に瞬時に対応でき、 貯留施設は不要となる。応答速度は管水路では1000 m/s 程度、開水路では 2~3 m/s であるの で、30 km の距離を伝わるのに開水路では 3~4 時間かかる。伝播時間を、仮に 10 分の1 に短縮 できれば貯留施設の容量も 10 分の1 となり、水路内貯留を増強するだけで対処できる可能性が でてくる。

管水路は高低差のある地形に設置でき、ゴミ・汚水・熱など外部の影響を受け難いという利点 があるが、建設費が開水路に比べ高く、パイプ破裂などの事故が起こるとその影響と被害は甚大 である。一方、開水路は地表に設置されるので交通・河川の障害になるが、水路の様子を観測で きて異常を探知し易い。また建設費が安く、大流量を流すのに適し、輸送過程でのエネルギロス も少ない。開水路の安価で監視が容易という特長を生かしつつ、水路内貯留量や**チェックゲー** ト(CKG)を活用して、短所である伝播速度の遅さを補完できれば、開水路は需要主導型の配 水システムにおいても、大いに活用が可能となる。

CKG は幹線水路に設置され、水路水位を調節して支線水路への分水を確実なものとしている。この CKG の制御方式には、上流水位一定制御方式(UC 方式)と下流水位一定制御方式

(DC 方式)の2つがあり、前者は供給主導型、後者は需要主導型の配水方式に適合する。これ は連続する2つのCKG間で分水による水位変動が生じた場合、UC 方式では下流側のCKG が操 作されて影響が下流側にのみ伝播するのに対し、DC 方式では上流側のCKG が操作されて影響 が上流側にのみ伝播するためである。現在、多くの用水で用いられている予約注文方式は、需要 者が必要量を供給者に通知して、供給者はこれに従って送水するため、一見、需要主導型に見え るが、需要者は指定時間に指定量の分水を行わなければならないため、供給主導型の配水方式で あり CKG は UC 方式で操作される。UC 方式と DC 方式は、情報伝達の方向が逆であることに 加え最大流量が大きく異なる。これは静水時に UC 方式では上流側水位が低下するのに対し、 DC 方式では下流側水位が上昇するので、静水時に水路からの溢水を防ぐため、チェック水位を 低く設定せざるを得ないためである。このことは、DC 方式で UC 方式と同程度の配水流量を達 成するためには、施設容量を大きくせざるを得ないことを意味する。仮に、DC 方式で最大流量 時に下流設定水位が高く、静水時に低く設定できれば、施設容量を大きくせずに DC 方式を採用 できる可能性が出てくる。

以上の様に、開水路の持つ伝達速度の遅さと、DC 方式における最大流量の小ささが、幹線開 水路を使っての需要主導型配水を実現するに当たっての障害となっている。

#### 2. 研究の目的と方法

本研究の目的は、現在の施設規模を変えることなく、大流量を供給できる需要主導型の配水シ ステムを開発することである。日本の先進的な大用水である愛知用水では、供給者は予約注文方 式によって注文を受け、到達時間を考慮して送水量を決定し、送水量を正確に送水するべく、終 日、桜鐘 CKG(農水専用区間の上流端に位置する)で流量調整を行っている。一方、需要者 は、注文通りの分水を行い、下流側で水不足か無効放流が発生する事態を回避している。現時点 において、この様な配水が徹底されているので、全分水工に対してほぼ100%の分水率が達成さ れているが、この配水方式は供給者と需要者の双方にとって、窮屈であり利便性が大きいとは言 えない。

需要者が一定の制限の下で自由な分水を行うことができ、供給者は送水量を決定することなく 桜鐘 CKG が需要量に応じて自動操作されるなら、供給者と需要者の利便性は格段に向上すると 考えられる。そのような需要主導型の配水を実現させるには、下流側の流況が上流側に自動的に 伝達される仕組みが必要であるが、通常の下流水位一定制御は、CKG の直下流水位を監視する ので、大流量を流すことができない。下流側 CKG の上流水位を監視して当該 CKG を操作する ことができれば、流況情報を上流側に伝播しつつ大流量を流すことが可能となる。そのような仕 組みは TM/TC を活用することで実現可能であるが、TM で送られた情報をどのように処理し て、TC でどの様に操作するかが問題である。Fig.1 はそのような操作方法の概略を示している。

配水システムの性能を検討する方法として、非定常流シミュレーションを行う。これにより、 幹線水路での流況、支線への分水、CKG 群の動きを再現して、各配水システムの長短を調べ る。非定常流シミュレーションには、UIWDC-model<sup>2)</sup>を活用するが、この方法の骨格部分は、 陽解法の 2 step Lax-Wendroff 法である。

#### 3. 対象地区

対象とするのは愛知用水の農業用水専用の約 30 km 区間であり、ここには 50 箇所以上の分水工と 12 基 の CKG が設置されている。上流側から、桜鐘 CKG では流量制御が行われ、北池 CKG では灌漑期間中ゲ ートは全開され、それに続く 9 基の CKG では上下流 水位制御が行われ、末端の美浜 CKG では上流水位一 定制御が行われている。また、美浜 CKG を通過した



水は美浜調整池に貯留され、無効放流を極力減ら している。

Fig.2は、愛知用水農水専用区間の縦断図で、 現況施設で下流水位一定制御と上流水位一定制御 が行われた場合の静水位が示されている。現状の 施設規模で、計画水位を達成できるように下流水 位一定制御を行った場合、静水位が CKG 地点で 天端を越えることが分かる。また、水路底の凹凸 が激しいが、これはトンネルの底版部が台形断面 の場合より低いためである。9基の上下流水位制 御 CKG (U2DC) は、これまでのアミルゲート に代わって採用された新型ゲートで、3つの水位 (上流側設定水位:H1、上流側下限水位:H2、 下流側設定水位:H3)と現在の上流水位:Hu、 下流水位:Hdの位置関係によってゲート開度が

変更される。ゲート操作ルールは 複雑で、貯留量に余裕のある場合 には下流水位(H3) 一定制御が行わ れ、多過ぎる場合は上流水位(H1) 一定制御が、余裕のない時も上流 水位(H2) 一定制御が行われる。な お、H1 は水路嵩上げ後のチェッ ク水位、H2 は嵩上げ前のチェッ ク水位、H3 はひとつ下流側に位 置する CKG の上流設定水位に近 い水位である。Fig.3に上下流 水位制御 CKG の操作ルールを 示す。なお、この CKG は自動 でゲートの開度が変更され る。

8

6

4

2 06

8

б 4

2

0 0

n

n

## 4. 現状分析

現在の送水ルールに従って 配水操作を行った場合の7日 間(2013年6月8日~14日) にわたる送水流量と分水流量 のデータを水資源機構から提 供を受けた。Fig.4 は、7 日間 の分水流量を、比較的小規模 な28分水工の合計と比較的大 規模な24分水工の合計を示し たものである。なお、分水は 原則として午前8時から午後



5時までの9時間行われるが、ご く小規模な分水工では、終日、連 続的に一定量が分水されている。 Fig.5は、桜鐘チェックからの供給 流量と52分水工での分水流量の合 計の比較である。本格的な分水が 開始される午前8時の3時間ほど 前から送水量が急増し、分水が停 止される午後5時の1時間ほど前 から急減している様子がわかる。



**Fig.6**は日単位でみた桜鐘通過流量(供給量)と分水工分水量(需要量)の関係(左図)と7日間での供給量と需要量の関係(右図)である。日単位で見れば、供給量と需要量に多少の差異が認められるが、7日間の合計量で見れば殆ど差がなく、僅かに供給量の方が多い。

現在の施設規模で、需要主導型の配水を行うために CKG 群を DC 方式に変更すれば、どの程度の配水流量まで対応できるかを検討する。現在の U2DC CKG の H3 を維持し、H1 を極端に高く、H2 を極端に低く設定すれば、実質的に U2DC CKG は DC CKG として機能する。また、H1 は維持し、H2 だけを極端に低く設定すれば、U2DC CKG は上流設定水位と下流設定水位で操作される上下流水位制御(UDC) CKG となる。Fig.7 に U2DC CKG を DC CKG や UDC CKG に変更した場合の桜鐘地点での流量を分水需要量(灰色実線)と共に示す。なお、桜鐘 CKG と北池 CKG は下流水位制御方式とし、両 CKG の制御水深を共に 1.6 m とした。

結論として、DC 方式(破線)とUDC 方式(実線)に 殆ど差がなく、共に、現在 の需要量を100%満たすこと が出来る。ただし、分水需 要量が1.1 倍になれば、需要 を満足できない分水工が9 箇所出てくるので、現在の 分水需要量が供給可能な最



Fig.7現状施設規模で需要主導型配水を実施した場合の供給可能量

大需要量と考えられる。2 方式による桜鐘流量と分水需要量を比べた場合、2 方式では時間遅れ とピーク流量減が見られる。これは、分水開始時の遅れは水路内貯留量の利用によって埋め合わ され、分水終了後の給水は水路内貯留量の補填に使われることを意味する。また、これら2 方式 による最大供給流量は5.5 m<sup>3</sup>/s 程度が限界であることが分かる。DC 方式では小流量時に摩擦損 失が小さくなり、CKG 間での波の往復に起因する流量変動が見られるが、UDC 方式では上流水 位一定制御により波が通過する(反射しない)ため流量変動は抑えられている。

## 5. TM/TC を用いた新制御方式の提案

## (1) 下流 CKG 上流水位で当該 CKG 開度を制御する方式

先ず、Fig.1 に示すような下流 CKG 上流水位を一定とする様に、当該 CKG の開度を調整する 方式が考えられる。即ち、〔下流 CKG 上流水位変化〕→〔当該 CKG 開度変更〕→〔当該 CKG 下流水位変化〕→〔下流 CKG 上流水位変化〕、というサイクルで CKG が操作される。下流 CKG の水位情報は TM によって、当該 CKG に一瞬で届くが、当該 CKG 操作の影響は下流 CKG 地点に届くまで時間がかかる。このため、変更後の流況が落ち着くのを待って、次の操作を行わ なければならない。

**Fig.8**は TM/TC で上流側 CKG の開度調整を行った場合 の計算例である。ゲート開度操 作量の最大値が±2cm(破線) と±5cm(実線)の場合の供給 量と分水需要量(灰色実線)を 比べたもので、CKGの操作間 隔は共に 20 分である。操作間 隔や操作量を決めるのが難し



く、この例の場合は操作量の最大値を変えただけで大きく異なる結果になった。

(2) 下流 CKG 上流水位で当該 CKG の設定水位を制御する方式

そこで、〔下流 CKG 上流水位変化〕→**〔当該 CKG の下流設定水位変更〕**→〔当該 CKG の設 定水位になるよう開度変更〕と制御方式を変更する。この場合、当該 CKG の下流水位は、ゲー ト開度調整により、短時間で下流設定水位に近づく。この方式では「下流 CKG 上流水位から、 如何にして望ましい当該 CKG 下流設定水位を求めるか」が問題となる。

1) ΔH 累加制御方式 「現在の水面形」を「期待する水面形」に変更するために、下流 CKG 地点における両者の水位差ΔH を、当該 CKG の下流設定水位に累加して、設定水位を変更する 方式で、緩やかな流況変化を前

提としている。**Fig.9**参照。実際の運用においては、①望ましい水面形の下流 CKG 地点での水位は、下流 CKG 上流設定水位より $\alpha$ だけ低い水位とし、② 当該 CKG の下流設定水位を変更する際には堰上げ効果を考えて加算量を $\beta \Delta H$ とし、③流況変化が落ち着くのを待つ時間



#### Fig9 AH累加制御方式による下流設定水位変更

**τ**、の3個のパラメータを決める必要がある。**Fig.10**に2通りのパラメータ設定における供給流 量を示す。二例共に、分水需要が発生して CKG 上流水位が低下すれば、直ちに下流設定水位が

変更されて供給量が増加す るが、供給流量の急増と急 減が見られ、また、分水需 要量が減った後も供給が継 続し、水路からの溢水が見 られた。この方式の欠点 は、**Fig.8**の開度調整方式と

も共通することであるが、 下流 CKG の直上流側水位を



7

一定に維持すること(即ち、施設規模を変えずに大流量を供給すること)を第一目標に、待ち時間 τ を導入したことにある。このため、ゲート開度変更が過大過小となって流況変化に対応できず、水路からの溢水につながった。そこで、以下では大流量供給を多少犠牲にして、待ち時間 τ を必要としない制御方式を検討する。

0

2) 貯留量均衡制御方式 UC 方式と DC 方式の他に Constant Volume method<sup>4)</sup> と呼ばれる制御 方式がある。この制御方式は Fig.11 に示すように、下流 CKG 直上流水位の変動に対して当該 CKG の下流水位を変動させ、二つの CKG 間に存在する貯留量をほぼ一定に保つことで、二つの CKG の中間地点における水位が一定となる様に制御する方式である。下流 CKG の現在の水位情

報を、直ちに当該 CKG に伝達する 必要があるため、TM/TC 技術が不 可欠である。当該 CKG の水位を変 動させる方法としては、直接、当 該 CKG の開度を変更せず、当該 CKG の下流設定水位を変更して、 時々刻々と設定されていく下流設 定水位に追随するように、CKG の 開度変更を行う。



Fig.11 貯留量均衡制卸方式

この方式の長所は、これまでの

二方式に必要であった待ち時間  $\tau$ をゼロとできることに加えて、**Fig.9** における二つのパラメータの値を、  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1.0$  と固定できること、即ち、パラメータの値を設定する必要がなくなることである。一方、この方式の短所は、UC 方式ほどの大流量は流せないことで、UC 方式と DC 方式の中間に位置付けられる。

Fig.12 は、この方式を Fig.5 の分水需要に適用した 場合のシミュレーション結 果である。破線は予約注文 (供給主導)方式による供 給(実測)流量で、灰色の 実線は分水需要流量、実線 はこの方式による自動制御 時の供給流量である。現在 の予約注文方式では、分水



開始時の3時間ほど前から送水量を急増させ、分水停止時の2時間ほど前から急減させなくては ならない。しかし、この方式では分水需要流量(灰色の実線)に対して、用水が自動的に供給さ れ、その流量(実線)は、分水需要量によく追随していることが分かる。

**Fig. 13** は、**Fig.12** の4日~ 5日の24時間の詳細な送水状 況である。分水需要流量が 2m<sup>3</sup>/s 以上の場合の追随性が 特によく、遅れ時間も数分程 度で、その反応性のよさは、 パイプラインに匹敵しうるも のと考えられる。



この時の水位情報の伝達の 様子を Fig.14 に示す。下流水

位一定制御方式の場合、需要の情報は水の波によって伝播する。この時の波速は3m/s程度であるため、10kmの距離を伝わるのにおよそ1時間かかる。しかし、TM/TCを使えば、CKG直上

流で生じた水位変化は、瞬時に、上流側 CKG に伝えられてゲート開度が変更され、その上流側 CKG の直上流水位も直ちに変化し、その情報は更に上流側の CKG に伝えられる。その際、 CKG 間の貯留量は殆ど変化することがない。



この方式の短所は大流量を供給できないことと思われるので、この方式による最大供給可能量 を検討した。検討方法としては、52分水工の分水需要量を一律に増加させ、全分水工の需要を 満たせるか否かを調べた。その結果、分水需要量を135%とした場合には、持続的に(最大需要 量が長時間継続しても)分水が可能であること、150%とした場合には、水路内貯留量を活用し て分水が可能であることが分かった。一方、160%にまで増やすと4箇所の分水工で不足が生 じ、水路内貯留量を利用しても需要量を満足させることができなかった。160%の場合は最大分 水需要量は10.5 m<sup>3</sup>/s 程度で、桜鐘 CKG での供給流量を9 m<sup>3</sup>/s 以上に増加させることはできな かった。よって、この CVC 方式の最大供給流量は9 m<sup>3</sup>/s と考えられる。

3) 最大流量等流制御方式 貯留量均衡制御方式は、需要量に対する応答性が良く安定した制 御方式ではあるが大流量を供給できないという短所がある。そこで供給可能流量を増加させる目 的で、水位一定とする点の位置を下流 CKG に近づける方法を検討する。開水路において流量が 最大となるのは、溢水しない範囲内の水深で流れが等流状態(水面勾配が最大)の時である。そ こで、Fig.15 に示すように、需要最大流量が<u>等流状態で送水された場合の水面形と静水時の水面</u> 形との関係から制御方式を整理する。なお、静水時の水面形は送水が停止された時の水面形で、 その水位は当該 CKG の初期下流設定水位と下流 CKG の上流設定水位に等しい。

(a1)は最大需要時水面形が静水面を下回る場合で、水路の供給可能流量は当該 CKG の下流水 位を初期下流設定水位に維持した状態で常に最大需要流量を上回ることを意味する。そこで、こ の様な場合には、(a2)に示す様な下流水位一定制御方式を採用することができる。この場合にも 貯留量均衡制御方式を適用できるが、TM を必要としない DC 方式の方が優れた方式と考える。 逆に、(c1)は最大需要時水面形が静水面を上回る場合で、最大需要流量を流すことはできない。 運用時においては(c2)のように下流水位一定制御方式を採用し、需要を満たせないが供給流量を 最大化する操作がなされると考える。(b1)は最大需要時水面形が静水面と交わる場合で、最大需 要流量を供給するためには、当該 CKG の下流設定水位を上げる必要がある。そこで、(b1)中の a= $\Delta H_2/\Delta H_1$ の値を増幅率(amplification rate)として、当該 CKG の下流設定水位を、<u>下流 CKG</u> <u>の現時点の水位と上流設定水位との差の $\Delta H$ をa倍した値</u>を、初期下流設定水位に加えることで 変更する方式(b1)を、最大流量等流制御(Max flowrate uniform flow Control) 方式</u>と呼ぶことに する。

MC 方式を愛知 用水下流部に適用 する場合、**Fig.2**の 縦断図に見られる ように、水路はト ンネルやサイホン などで構成されて いて変化に富むた め、**Fig.15**のよう な等流水面形を求 めることはできな い。そこで、各区 間で想定される最 大流量を等流に近 い状態(水面形が 水路底に平行に近 い状態)で流した



#### Fig.15 最大流量等流制御(MC)方式

場合の静水面からの乖離量のΔH<sub>1</sub>とΔH<sub>2</sub>を概算し、各区間に採用するべき増幅率を検討した。 その結果、増幅率 a の値として、①桜鐘~北池では a<sub>1</sub>=2.0;②北池~半田、③半田~成岩、④ 成岩~板山、⑤板山~桧原、⑥桧原~大脇では、a<sub>2</sub>=a<sub>3</sub>=a<sub>4</sub>=a<sub>5</sub>=a<sub>6</sub>=1.0(即ち、貯留量均衡制御方 式);⑦大脇~鵜ノ池、⑧鵜ノ池~菅苅、⑨菅苅~河和、⑩河和~内海、⑪内海~美浜では、 a<sub>7</sub>=a<sub>8</sub>=a<sub>9</sub>=a<sub>10</sub>=a<sub>11</sub>=0.0(即ち、DC 方式)を採用することとした。

**Fig.16**は、分水需要量を 元の1.6倍とし、MC 方式で CKG を操作したときの結果 である。最大供給可能流量 が、10.5m<sup>3</sup>/s 程度にまで増 加している様子が分かる。 ただし、需要量への即応性 は良いものの、流量変動が 大きく、流れが安定してい ない。この原因は、桜鐘



CKGの下流設定水位が、北池CKGでの上流水位乖離量 $\Delta$ Hの2倍の値でもって変更しているため、流れの変動が増幅されているためと考えられる。増幅率 a の値は $0\sim\infty$ までの値をとり得るが、a の値が大きい場合は、当該CKGの下流設定水位の修正量が大きく、流れが不安定になる可能性がある。それを避ける方法として、乖離水位 $\Delta$ Hの時間移動平均をとって、変化を緩やかにする方法が考えられる。

時間移動平均に際し、現在に近い時点の ΔH をより重視できるように以下の式を用いる。

64

 $\Delta \overline{H}_0 = w \,\Delta H_0 + (1 - w) \,\Delta \overline{H}_1$ 

 $\Delta \bar{H}_0 = w \{ \Delta H_0 + (1 - w) \Delta H_1 + (1 - w)^2 \Delta H_2 + (1 - w)^3 \Delta H_3 + \cdot \cdot \cdot \}$ ここに、  $\Delta H_0$ :現時点の水位乖離量、  $\Delta \bar{H}_0$ :現時点の移動平均量、  $\Delta H_n$ :n  $\Delta t$ 前の時点の水位 乖離量、  $\Delta \bar{H}_n$ :n  $\Delta t$ 前の時点の移動平均量、w:重み係数の初項。

即ち、Δ*H*<sub>n</sub>に係る重み係数は等比数列を成していて、重み係数の無限級数の値は 1.0 に等しい。 初項から第 n 項までの重み係数の和が 0.8 となる n<sub>0.8</sub> と、0.9 となる n<sub>0.9</sub> は、以下の式で求められ る。

 $n_{0.8} = 1.61/w, n_{0.9} = 2.30/w$ 

現時点において、重み係数の初項 w と増幅率 a の定量的関係は分からないが、少なくとも w は a が大きいほど小さくする必要がある。今回は、桜鐘~北池区間の  $a_1=2.0$  に対して、 $w_1=0.002$ 、  $a_2=a_3=a_4=a_5=a_6=1.0$ の上流 5 区間に対しては、 $w_2=w_3=w_4=w_5=w_6=0.01$  なる初項重み係数を用いる ことにした。なお、w=0.002 の場合、 $n_{0.8} \times \Delta t=40$ 分、w=0.01 の場合、 $n_{0.8} \times \Delta t=8$ 分である。

の変動が抑制されている様 子が分かる。ただし、この 方式でも、Fig.16の場合に 比べて改善は見られるもの の、流量急増時に overshoot が、小流量時に振動が見ら れる。





 $(a_1=2.0, a_2 \sim a_6=1.0, a_7 \sim a_{11}=0.0; w_1=0.002, w_2 \sim w_6=0.01)$ 

の初項wなる2つのパラメータによって、その性能が左右されると考えられる。即ち、増幅率a は大きいほど供給可能流量を増加させるが、その代償として流れの不安定性を増す。一方、重み 係数の初項wは小さいほど安定性を増加させるが、その代償として操作遅れを伴う。

#### 5. 結論

幹線開水路と支線パイプラインから構成される送水システムにおいて、水利施設を大規模に変 更することなく、TM/TC技術により需要主導型の分水が可能かどうかの検討を行った。先ず、 観測データのある一週間の分水需要に関しては、DC方式で供給可能であることが判明した。た だし、最大需要量は観測データの場合を上回ると考えられるので、分水需要が1.1倍になった場 合を検討したが、その場合には需要量を満たすことができない分水工が出てきた。

そこで、需要主導型の分水を実現しつつ、供給可能量を増やすため下流 CKG の水位情報を TM によって上流側に伝達して、CKG を制御する制御方式を検討した。

先ず、供給可能流量を最大化するため、下流 CKG の上流水位が一定となるように当該 CKG を操作する 2 方式を検討した。第一は、当該 CKG のゲート開度を直接変更する方式で、第二 は、当該 CKG の下流設定水位を変更して、間接的にゲート開度を変更する方法である。両者共 に、開度や水位の変更量、操作待ち時間などの設定が難しく、愛知用水の様に流量の日変動の大 きな用水の制御に適用するのは難しいと考えられる。

次に、供給可能流量を DC 方式と UC 方式の中間程度とし、制御に係るパラメータを単純化した貯留量均衡制御方式を検討した。この方式は、需要流量への供給の追随性と安定性が良く、開

水路でありながら、パイプライン的な応答特性を示した。また、分水需要量を 1.5 倍に増加させ ても、需要を満足させることができた。但し、最大需要流量は 11m<sup>3</sup>/s であったが、最大供給流 量は 9m<sup>3</sup>/s で、不足量は水路内貯留量で賄われ、11m<sup>3</sup>/s の需要流量が長時間継続すれば、需要を 満足できなくなることが分かった。

最後、供給可能流量を増加させるために、最大流量等流制御(MC)方式を検討した。この方 式では、最大供給流量を10.5m<sup>3</sup>/sにまで増加させることができ、分水需要量の1.6倍(水路内貯 留を使えば、更に大きな分水需要量に対応可能と思われる)まで供給が可能となった。需要への 追随性も良好であるが、流れを安定化させるために、時間移動平均に用いる重みパラメータw を導入する必要が出てきた。このwは、値を小さく設定すれば流れは安定化するが追随性は低 下するという性格のものである。このため、相反する安定性と追随性の総和を最大化する課題が 残された。

#### 謝辞

この研究を行うに当たり、愛知用水土地改良区、水資源機構愛知用水総合管理所、水資源機構中部支社の職員の方々には、施設調査や情報提供などの多大な協力を頂いた。記して謝辞とする。

## References

- 1. 緒形博之,ファームポンドー水需要と水供給のなかだち-,(社) 農業土木学会 農業水利研 究部会, pp19-22, 1991
- 2. Unggoon Wongtraggon, Naritaka KUBO, Hajime TANJI, Performance diagnosis of Mae Lao Irrigation Scheme in Thailand (I) Development of Unsteady Irrigation Water Distribution and Consumption model, Paddy and Water Environment, Vol. 8, No.1: pp1-13, 2010
- 3. 稲垣仁根, 井爪宏, 益田和範, 数値モデルを用いた開水路チェックゲートの機能評価-その II: フロート式上下流水位一定ゲートの場合-, Journal of Rainwater Catchment Systems Vol.17/No.1, pp34, 2011
- 4. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Canal System Automation Manual, A Water Resources Technical Publication, pp.37, 1991
# 田面水の平面2次元流れ場を考慮した水田内温度環境計算モデル

# Numerical Model for Calculating Paddy Thermal Conditions Considering Two-Dimensional Flow Field of Ponding Water

# ○木村匡臣\*,小林 聡\*,飯田俊彰\*,久保成隆\* ○Masaomi KIMURA\*, Satoru KOBAYASHI\*, Toshiaki IIDA\*, and Naritaka KUBO\*

# 1. はじめに

近年水稲の高温登熟障害による米の等級低下が問題となっており,対策方法として掛流し灌漑が その簡便さと有効性から注目を集めている.出穂後の夜間の高気温が高温登熟障害の主な要因の一 つとして考えられているが,掛流し灌漑を行うことにより,田面水の水温や水稲の葉温を低下させ る効果が期待される.掛流し灌漑による田面水温の低減効果は,湛水深が浅く,灌漑水量が多いほ どより広範囲に及ぶことなどが実験結果より明らかになっており<sup>1)</sup>,田面水の1次元的移流と熱収 支モデルを組み合わせた解析も試みられている<sup>2)</sup>.

本研究では,稲株による流れの抵抗を考慮した田面水の平面2次元流れ計算<sup>3</sup>を応用し,田面水の移流を考慮して水田内の熱収支を解くことにより,田面水温や葉温,地温などの温度環境の平面分布を計算するモデルを構築し,その検証を行った.

# 2. 稲株の影響を考慮した田面水の平面 2 次元流れ場の計算

本研究では、稲株が規則的に配置された水田内における田面水の平面2次元流れ場を記述する方 程式として、(1)~(3)式の浅水流方程式を採用する.ここでは、水平床における層流を仮定し、風に よる水面せん断応力は無視している.なお、浸透や蒸発散による損失は考慮していない.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} - \nu \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial y^2} + \mathbf{S} = \mathbf{0}$$
(1)

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 \\ uh \\ uv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{Dx}/\rho \\ \tau_{Dy}/\rho \end{pmatrix}$$
(2)

vは動粘性係数, hは水深, uはx方向流速, vはy方向流速, gは重力加速度,  $\rho$ は水の密度,  $\tau_{0x}$ ,  $\tau_{0y}$ はそれぞれx, y方向の水路底単位面積当たりの,流れに働く抵抗力であり, (3)式のように表される<sup>3</sup>.

$$\frac{\tau_{Dx}}{\rho} = C_D N_D D h \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{2}, \quad \frac{\tau_{Dy}}{\rho} = C_D N_D D h \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{2}$$
(3)

C<sub>D</sub>は(4)式で表される稲株の抵抗係数, N<sub>D</sub>は単位面積当たりの稲株の本数, D は稲株の直径である.

$$C_D = 0.217 \left( \sqrt{u^2 + v^2} \right)^{-0.945} \tag{4}$$

<sup>\*</sup> 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo キーワード: 田面水, 平面2次元流れ, 田面水温分布, 掛流し灌漑



図1に示すような短辺30m長辺100mの水田区画(N<sub>D</sub>=25, D=0.1m)を想定し,空間メッシュサ イズは 1m 四方,変数の配置には Staggered 格子,離散化した連続式と運動量方程式のカップリン グには SIMPLE 法を用いた.境界条件は水口において流量を与える流入境界,水尻において水深を 与える流出境界, 畦畔は No-slip 壁面境界とした

# 田面水の移流を考慮した水田内温度環境分布の計算

水田内の温度環境分布の計算には、以下に説明するようなモデル化 2.3)を採用した.まず、水田内 を鉛直方向に地中,田面水,群落内大気,植生(稲体),群落上大気に分割し,それぞれの層の間で の熱移動(短波放射,長波放射,潜熱,顕熱)を計算する(図2).

植生の葉面では、(5)式の熱収支が成り立つ.

 $R_{nc} = H_c + lE_c$ ここで、Rncは(6)式で表される葉面における純放射(W·m<sup>-2</sup>)、Hcは葉面から群落内へ放出される顕

熱フラックス ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $IE_c$ は潜熱フラックス ( $W \cdot m^{-2}$ ) である.

 $R_{nc} = (1 - f_v) \{ (1 - \alpha_c) S + L_{da} + L_{uw} - 2L_c \}$ (6) $f_v$ は植生の放射透過率, $a_c$ は葉面のアルベド,Sは日射量(W·m<sup>-2</sup>), $L_{da}$ は大気からの下向き長波放 射(W·m<sup>-2</sup>), L<sub>uw</sub>は水面からの上向き長波放射(W·m<sup>-2</sup>), L<sub>c</sub>は葉面から放出される長波放射フラッ クス ( $W \cdot m^{-2}$ ) である. 植生の放射透過率  $f_{v}$ は(7)式により与えた.

$$f_{v} = \exp(-k \cdot LAI) \tag{7}$$

kは植生の吸光係数,LAIは葉面積指数である.

群落内では、(8)式の顕熱収支と(9)式の水蒸気収支が成り立つ.

$$H_{1} = H_{c} + H_{w}$$
(8)
$$\Delta e = \frac{lE_{c} + lE_{w} - lE_{1}}{R_{0}(T_{1} + 273)}$$
(9)

$$\Delta e = \frac{lE_c + lE_w - lE_1}{ln_{\rm H_2O}\delta_1} R_0 (T_1 + 273)$$



図2 水田内温度環境分布計算モデルの概要

(5)

 $H_1$ は群落内から大気へ放出される顕熱フラックス (W·m<sup>-2</sup>),  $H_w$ は水面から群落内へ放出される顕 熱フラックス (W·m<sup>-2</sup>),  $\Delta e$  は水蒸気圧変化量 (kPa),  $n_{H2O}$ は水分子量 (kg·mol<sup>-1</sup>),  $\delta_1$ は群落内空気 層の厚さ (m),  $R_0$ は気体定数 (kJ·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>),  $T_1$ は群落内の気温 (K) である.

田面水中の熱収支は(10)式を用いた.

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + u \frac{\partial T_w}{\partial x} + v \frac{\partial T_w}{\partial y} = D_{T_w} \left( \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2} \right) + \frac{R_{nw} - H_w - lE_w - G}{\rho_w c_w h}$$
(10)

ここで、 $T_w$ は水温(K)、 $R_{nw}$ は(11)式で表される水面における純放射(W·m<sup>-2</sup>)、 $D_{Tw}$ は水の熱拡散率 (m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>)、Gは地中熱伝導フラックス(W·m<sup>-2</sup>)、 $\rho_w$ は水の密度(kg·m<sup>-3</sup>)、 $c_w$ は水の比熱(J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) である.

$$R_{nw} = f_v \{ (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_c) S + L_{da} \} + (1 - f_v) L_c - L_{uw}$$

$$\alpha_w は水面のアルベドである.$$
(11)

(5),(8),(9),(10)式を連立して解くことにより,水田内の群落内気温,群落内比湿,葉温,田面 水温の数値解を得るモデルを作成した.なお,(10)式中の移流項の離散化には CIP 法を,拡散項の 離散化には中心差分を用いた.また,気象データは石川県手取川七ヶ用水地区において観測された ものを入力した.

# 4. 結果および考察

湛水深が h=5cm, 灌漑水量が Q=0.002m<sup>3</sup>/s, 灌漑水温が 20℃で一定であった場合の田面水温分 布(2013 年 8 月 11 日 16 時)の計算結果を図 3 に示す.水口より取水された低温の灌漑水は,水田 内で次第に温まっていき,水尻付近ではほとんど灌漑水温の影響がなくなっていることがわかる. 図 4 は湛水深を h=5cm, 灌漑水量を Q=0.005m<sup>3</sup>/s とした場合の計算結果を示している. 図 3 の結 果と比較して,低温の灌漑水の影響が広範囲に及んでいる様子がうかがえる. 湛水深を h = 10cm, 灌漑水量を Q=0.002m<sup>3</sup>/s とした場合の結果(図 5)からは,図 3 の結果に比べて水尻付近の水温が 低いことがわかる. これは, 湛水深が深くなったことにより,田面水の熱容量が増えたため,昼間 の日射の影響が小さくなったためであると考えられる.

手取川七ヶ用水地区における観測水田の水尻における田面水温の計算結果と観測結果を図 6 に 示す.田面水温の日較差の大きい6月において比較的大きな誤差が見受けられるものの,本モデル による計算値は観測値をおおむね良好に再現できていることがわかる.

今後は、本モデルを用いて、掛流し灌漑による葉温や地温の低減効果や、田面に小溝を切った場 合の効果について考察を行う予定である.







# 参考文献

1) 西田和弘, 宇尾卓也, 吉田修一郎, 塚口直史(2015): 冷水掛流し灌漑時の灌漑水量・水深・時間帯が水田の水 温形成に及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, 300, I\_185-194.

2) K. Yoshida, I. Azechi, H. Kuroda (2013): Application of two layer heat balance model for calculation of paddy thermal condition, Journal of JSCE B1 (Hydraulic Engineering), 69(4), I\_139-144.

3) 木村匡臣, 纐纈 光, 飯田俊彰, 久保成隆(2015): 稲株を考慮した田面水の平面 2 次元流計算法, 農業農村工 学会論文集, 295, 47-58.

謝辞 本研究は、文部科学省気候変動適応研究推進プログラム「地球環境変動下における農業生産最適化支援シ ステムの構築(代表:二宮正士)」の一部として行われた.研究遂行に当たり、手取川七ヶ用水土地改良区および 石川県立大学に多大なるご配慮を頂いた.記して謝意を表する.

# 小型通し回遊魚の遊泳能力について - ワカサギの游泳速度の測定-

矢田谷健一\*泉完\*\*\*東信行\*\*\*丸居篤\*\*

\*(株) 建設技術研究所東北支社,〒980-0014 仙台市青葉区本町 2-15-1
 \*\*弘前大学農学生命科学部,〒036-8561 弘前市文京町3

## 要 旨

河川下流域を生息環境とする遡河性回遊魚の一つである小型のワカサギを対象とした魚道設計に対する知見を得る ため、サイズの小さなワカサギの遡上期に遊泳速度に関する実験を野外の現地河川で実施した.その結果、(1)管内代 表流速 100cm・s<sup>-1</sup>以上の条件で遊泳した体長 5.1~8.8cm のワカサギは、体長の平均 19.5 倍の遊泳速度で泳ぐこと、(2) 遊泳速度と遊泳時間の関係を表す遊泳曲線式から、同サイズのアユに比較して泳力がやや弱いこと、(3)体長 6~7cm 程 度のワカサギを遡上させる際には、魚道内の速い流速場とその距離を 100~110 cm・s<sup>-1</sup>程度,40~50cm 程度にすれば、 遡上可能の目安であることが示唆された.

キーワード: ワカサギ, スタミナトンネル, 遊泳速度, フィールド測定

# 1. はじめに

ハゼ科魚類のシロウオ (Leucopsarion petersi)・ヨシノ ボリ (Rhinogobius sp)・ウキゴリ (Gymnogobius urotaenia sp) やワカサギ (Hypomesus nipponensis)・イトヨ

(Gasterosteus aculeatus)をはじめとする小型の通し回遊 魚は、日本の河川に広く生息している.魚類相の河口か ら上流への連続性を保持させるため河川横断工作物には 魚道が設置されている.魚道は、河川に生息する生物相 の水域ネットワークを維持・保全するための極めて重要 な施設である.しかし、河口に近い下流域での小型通し 回遊魚に対する魚道設計は経験的技術に依存しており、 科学的根拠による魚道整備が必要である.このためには、 これら小型通し回遊魚の遊泳能力を解明する必要がある.

小型魚の遊泳速度については、シラウオ (Salangichhys icrodon) (山口・高谷、2000)、小型通し回遊魚のシロウ オ (泉ら、2013) の研究があるものの、小型のワカサギ・ イトヨなどの泳力に関する基礎的な知見は乏しい. そこ で、本研究では下流域における小型通し回遊魚に対する 魚道設計への知見を得ることを目的として小型のワカサ ギを対象にした.

ワカサギは、遡河性回遊魚のキュウリウオ科で国内で はおもに島根県以北の本州日本海側と北海道の河川湖沼 に自然分布している(川那部ら,2001; 久下,2006). 成 魚の全長は14cm ほどである(川那部ら,2001). 国内の ワカサギには生活史の相違から,遡河回遊型と陸封型が ある. 遡河回遊型は春に海から河川に産卵遡上するタイ プと秋に海から湖沼に遡上,越冬後春に再び流入河川に 産卵遡上する2つのタイプがある(Hamada,1961; 宇藤・ 坂崎,1987). 陸封型は多くの湖沼に移植され水産資源と して繁殖している(例えば, Hamada, 1961). 北海道の 石狩川では 30km 以上も遡上するとされている(川那部 ら, 2001). 最近では,水温が約 10℃を超えると遡上し 始め,成長に応じて淡水域と海水域を交互に回遊するこ とも明らかになっている(Sasaki et al., 2003;佐々木ら, 2006). また,琵琶湖流入河川におけるワカサギの遡上実 態調査(井出ら, 2002)によれば,やなの河川横断構造 物により遡上阻害がみられ,堰堤状の河川横断構造物の 落差が 23cm 程度以上では遡上できないと報告している が,遊泳速度に関する定量的な知見は不明である.

そこで、本報告はワカサギの遊泳能力を明らかにする ためフィールドにおいて遊泳実験を行い、遊泳速度に関 して実験的に検討・考察を加えたものである.

# 2. 河川水を用いた遊泳実験

# 2.1 実験日および実験装置と実験方法

本実験では泉ら(2013)の実験と同じくスタミナトン ネル(管水路)を用い,現地の河川水を直接通水させた フィールドでの計測方法を採用した.実験した河川は, 青森県一級河川の岩木川(流路延長約112km)で実験場 所は日本海に面する十三湖河口から約11km上流に位置 する芦野頭首工左岸の河川敷内である.十三湖にはワカ サギが生息しており(塩垣,1982),芦野頭首工魚道の遡 上調査によれば初夏にかけて大きなサイズのワカサギも 遡上するとの報告がある(東北農政局北奥羽土地改良調 査管理事務所調査結果報告書,2014).

実験は 2014 年と 2015 年の 5 月上・中旬のワカサギ遡 上時期に管内流速を変化させて実験番号 Run.1~Run.8 までの合計 8 回行った(Table 1).実験日には天気と河

実験月日	実験 番号	天	気	供試個体		敝面亚			計測したワカサギ					
				(尾)	平均 体長	均流速	水温	(尾)	平均 全長	平均 体長	平均 体高	平均 体幅	代表 流速	S.D.
2014年					(cm)	$(cm \cdot s^{-1})$	(°C)			(ci	n)		(cm•	s <sup>-1</sup> )
5月6日	Run.1	晴	れ	9	7.0	107	11.5	8	8.0	7.0	1.1	0.5	114	14
5月7日	Run.2	晴	れ	1	7.5	146	10.9	1	8.5	7.5	1.3	0.6	152	-
5月11日	Run.3	晴	れ	3	6.9	38	13.4	3	8.0	6.9	1.1	0.6	40	0
		前日	ł	13	7.0			12	8.1	7.0	1.1	0.5		
2015年														
5月6日	Run.4	晴	れ	12	6.9	127	12.4	8	7.5	6.7	1.1	0.6	131	3
5月7日	Run.5	晴	れ	21	7.2	121	12.8	18	8.2	7.0	1.2	0.7	126	20
5月8日	Run.6	晴	れ	12	6.9	103	11.4	10	8.1	6.9	1.1	0.7	108	1
5月11日	Run.7	晴	れ	10	7.5	106	13.4	5	8.7	7.5	1.4	0.6	110	2
5月12日	Run.8	晴	れ	2	9.2	110	12.9	0	-	-	-	-	-	-
		前日	ł	57	7.2			41	8.1	7.0	1.2	0.7		
		合	計	70	7.2			53	8.1	7.0	1.2	0.6		

Table 1 実験日と実験条件

断面平均流速:平均值, V:管内代表流速, S.D.:標準偏差



Fig.1 実験装置の概要

川水温も測定した.

スタミナトンネルは,透明アクリル製の長方形パイプ で長方形断面の内寸は幅 5.0cm×高さ 3.0cm と 4.0cm (2 種類),長さ 230cm である.パイプ断面の高さ (Run.1~ Run.4:3cm, Run.4~Run.8:4cm)と幅の寸法は,ワカ サギの遊泳に支障がない断面である (久保田ら,2000; 泉ら,2012).また,これらのパイプには供試魚を挿入す るスタンドパイプがある.

実験装置は,矢田谷ら (2015) によるドジョウ稚魚の 遊泳実験と同じ形式で,Fig.1 に示すように余水吐と整流 板のある貯水槽(幅 35cm・高さ 30cm・長さ 30cm・長さ 55cm),パイプ,フレキシブルホース,流速調節用コッ ク(2 ヶ)で構成されている.パイプとフレキシブルホ ースは 2mm の目合い網をつけた取り外し可能な異形ソ ケットで連結されている.貯水槽とパイプは架台の上に 水平に置かれ,パイプの底面に目盛付きの白色板がある. 魚を挿入するスタンドパイプは 45°傾斜している (Fig.1).また,Fig.2 は実験装置の全景を示したもので



Fig.2 実験装置の全景

ある.

供試魚は, Fig.1 のようにスタンドパイプから挿入され, 上流部に目合い 2mm の仕切網が施された計測区間内で 遊泳できるようになっている.河川水は, Fig.1 に示すよ に河川から直接水中ポンプで貯水槽に給水され,余水吐 で一定水位に保持しながら,パイプ末端に接続されて 遊泳できるようになっている.河川水は, Fig.1 に示すよ うに河川から直接水中ポンプで貯水槽に給水され,余水 吐で一定水位に保持しながら,パイプ末端に接続されて いるフレキシブルホースの出口から再び下流河川へ流下 するシステムになっている.

#### 2.2 実験方法

遊泳速度の測定はパイプ内を満流状態にし,設定する 管内流速は Table 1 に示すように 40~150 cm·s<sup>-1</sup>前後を 想定して出口部上流コックで調節した. 遊泳実験は,シ ロウオの実験(泉ら, 2013)と同様,出口部下流コック をある程度開放し初期流速を与えた.

本実験装置では流速が 70 cm・s<sup>-1</sup> 超えるとスタンドパ イプから空気が混入するので、初期流速を与えた状態で 供試魚を1尾ずつスタンドパイプから挿入した後、ゴム 栓でスタンドパイプ上端を閉じ,供試魚が上流へと前進 すると同時に出口部下流コックを一気に開放した.長方 形パイプ上流から 40cm の地点に二軸電磁流速計 (φ: 5mm, センサー部の長さ:2.5cm, ACM250)を設置し(Fig.1, Fig.2), 流速計指示計を後述するようにリアルタイムで 録画しているので、指示値が一定になった時点で定常と 判断し、その時点から開始して、供試魚が力尽きて流さ れた時点を終了時点とした.供試魚はパイプ末端の異形 ソケットを脱着して採捕し,供試魚の全長・体長・体高・ 体幅を測定した.供した個体は1回限りの遊泳とした. なお、ワカサギはハンドリングに弱いので、慎重に取り 扱って挿入した. 電磁流速計の検出部の長さは 2.5cm で あり、パイプ内の断面平均値を示さない. したがって、 電磁流速計の指示値とパイプ内の断面平均流速値の関係 を調べるため、電磁流速計指示値に対応する流量測定を 行い、キャリブレーションした.

供試魚の遊泳速度の測定のために,長方形パイプの上 方にデジタルビデオカメラ (SONY:HDR-CX420)を2 台設置して,供試魚の遊泳行動,および流速計指示値を 撮影・録画した.

#### 2.3 供試魚 (ワカサギ)

実験に用いた供試魚は、実験場所の岩木川下流域で採 捕されたワカサギを使用した.実験に際しては各実験で 供試魚を Table 1 に示す供試個体数より多く遊泳させた が遊泳意欲の個体差により挿入しても泳がない個体もあ り、その場合は供試個体数としてカウントしなかった. 実験に供試したワカサギは 70 尾,平均体長 7.2cm で供試 したが定常状態で計測できなかった個体が 17 尾あり,計 測できたワカサギは 53 尾,体長 5.1~8.8cm (平均体長 7.0cm;偏差 0.8cm)である (Table 1).比較的小さなサ イズである.

#### 2.4 遊泳速度の整理方法

遊泳速度の整理方法については、流れが定常時点の遊 泳位置からワカサギがパイプ内を上流へ前進し、力尽き て対地速度がゼロになった地点まで遊泳した距離とその 間の遊泳時間、または定位した遊泳時間を計測した.遊 泳速度はこの対地速度に後述する管内代表流速を加えて 求めた.

魚道設計の際には指標の一つとして突進速度がある. この突進速度は、1~5秒間持続できる最大遊泳速度と定 義されている(Blaxster, 1967).ただ、鬼束ら(2009) も指摘するように魚道越流部の速い流れ場を1秒以下で 瞬時に遊泳する報告(泉ら,2002)もあることから、こ こでは1s以下で遊泳した個体もカウントした.

## 3. 実験結果と考察

実験時の天気は晴れで,河川水温は10.9~13.4℃(**Table** 1) である.

#### 3.1 管内代表流速の算定

管内の代表流速値は、供試魚が満流の中を遊泳していることを考慮し、供試魚が位置する横断面の平均流速を用いた.算定には管内流量と供試魚がパイプ内を遊泳している状態の通水断面積から求めた.この通水断面積とは、パイプの通水断面積から供試魚の流れに直交する魚の最大横断面積(体高と体幅から楕円に近似した(神田、1953)面積)を差し引いた面積である.各実験日の平均管内代表流速は40~152 cm·s<sup>-1</sup>の範囲である(Table 1).

#### 3.2 体長と遊泳速度について

**Fig.3** は体長と遊泳速度の関係について管内代表流速 を 10cm・s<sup>-1</sup> 台に区分して示したものである. 図から同じ 体長でも管内代表流速が速くなると遊泳速度も速くなる 傾向にあり, ワカサギについても既往の管水路によるウ



Fig.3 体長と遊泳速度との関係

73



Fig.4 遊泳速度と遊泳時間の関係

グイ・オイカワ・アブラハヤ(泉ら,2006,2007;泉・ 矢田谷,2007)やヤマメ稚魚(泉ら,2009),鬼束ら(2008, 2009)の長方形断面水路での実験結果と一致している.

遊泳速度は体長(BL)の倍数でも表わされるので,図には体長の10倍・20倍のラインも記した.管内代表流速100cm・s<sup>-1</sup>以上の条件で遊泳した個体(46尾,体長5.1~8.8cm)について調べると,体長の平均19.5倍の遊泳速度で泳いでいることがわかる.

ただ,体長と遊泳速度との関係が明確でないので,供 試魚の体長サイズの分布を大きくしてさらにデータを蓄 積し,検討する必要がある.

#### 3.3 遊泳速度と遊泳時間について

**Fig.4**は,計測個体(平均体長7.0cm)の遊泳速度と遊 泳時間の関係を両対数で示したものである.遊泳速度と 遊泳時間はそれぞれ50~189 cm・s<sup>-1</sup>, 0.2~22.5s の範囲で, 遊泳速度が増加すると遊泳時間が指数曲線的に短くなる 傾向にある.この傾向は、ウグイやオイカワの実験(泉 ら,2006,2007)、ヤマメ稚魚の実験(泉ら,2009)、シ ロウオの実験(泉ら,2013)とも酷似している.

遊泳曲線は(1)式(塚本・梶原, 1973)で示されている.

$$Vt^k = a \tag{1}$$

 $V: 遊泳速度 (cm \cdot s^{-1}), t: 遊泳時間 (s), a: 1s 間持$  $続できる遊泳速度 (cm \cdot s^{-1}), k: 定数 (0 < k < 1)$ 

そこで,(1)式の*a*および*k*値を最小自乗法で求めた. その結果,**Fig.4**に示すように*a*=129 cm·s<sup>-1</sup>,*k*=0.10 と なった.塚本・梶原(1973)は60分間遊泳できる遊泳速 度までの積分値((2)式)をSAI(Swimming Ability Index, 遊泳能力指数)と表して評価している.係数*a*,*k*の値を 用いてSAI値を求めるとSAI=20.7×10<sup>4</sup>となった.

$$SAI = \int_{0}^{3600} V dt = \int_{0}^{3600-k} dt = \int_{0}^{3600} 129t^{-0.10} dt$$
(2)



Fig.6 管内代表流速と遊泳距離の関係

管内代表流速

 $(\mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}^{-1})$ 

**Fig.5** は、本実験で得られたワカサギの SAI 値を示したものである.図には塚本・梶原(1973)の結果の一部も加えて示した.平均体長 7.0cm のワカサギの SAI 値は体長 6.6cm のアユよりやや小さい値で、アユに比較して遊泳能力が弱い魚であることがわかる.

#### 3.4 遊泳距離

流速場と遊泳距離との関係も魚道設計には重要な要因 の一つである.魚道隔壁の越流部など局所的に速い流れ 場の距離が 50cm であれば魚が遡上できることも報告さ れている(泉ら,2002;農業農村工学会(2015),よりよ き設計のために「頭首工の魚道」設計指針).

Fig.6 は、計測個体のうち前進個体の多い体長 6cm 台を抽出して管内代表流速と遊泳距離との関係を調べたものである.前述したように井出ら(2002)のワカサギの 遡上実態調査によれば、「やな」のような河川横断構造物 がある場合、その構造物の落差が 7cm 程度であれば親魚 が遡上でき、23cm 程度以上の落差では遡上できないと報 告している.体長サイズにもよるが、ワカサギが遡上で きるとした水位差 7cm(井出ら、2002)のときの越流水

底部の流速を仮に $V = \sqrt{2gh}$ とすれば117 cm·s<sup>-1</sup>なので,

本実験結果では110~120cm・s<sup>-1</sup>程度の流速条件に相当する. Fig.6 からこの流速条件で体長 6cm のワカサギは 40 ~50cm の距離を遊泳することがわかる.

一方, 佐藤ら (2003) による芦野堰 (芦野頭首工に併 設されている) 右岸の階段式魚道 (落差 20cm, 隔壁の厚 さ 40cm) における 8 月の遡上調査によると, 魚道入口部 で平均体長 4.8cm のワカサギが採捕されるも魚道出口で は確認されず, 同じく芦野頭首工の階段式魚道 (落差 20cm) の遡上調査結果では, 隔壁部水深 20cm 程度, 隔 壁底部の流速 120~150 cm・s<sup>-1</sup>の水理条件で 9~10cm 程 度のワカサギが遡上するものの, これ以下のサイズは確 認されていない (東北農政局北奥羽土地改良調査管理事 務所調査結果報告書, 2014). 体長 6cm のワカサギは 140cm・s<sup>-1</sup>以上の流速条件で 30cm 程度前進することから 上述した調査結果と概ね一致する.

実際の魚道の流れとスタミナトンネル(管水路)内の 流れは異なるが,現地魚道で計測された遊泳魚の遊泳速 度の調査事例(泉ら,2002)と本実験と同じくスタミナ トンネルで計測された遊泳魚の遊泳速度の値は酷似する ことが報告されている(泉ら,2007).上述したワカサギ の既往の調査報告や本実験から,6~7cm 程度のワカサギ を対象魚として魚道を遡上させる観点から,魚道内の速 い流速場の流速を少なくとも100 cm・s<sup>-1</sup>以下にすること が一つの目安になると考えられる.

#### 6. まとめと今後の課題

河川下流域を生息環境とする遡河性回遊魚の一つであ る小型サイズのワカサギを対象とした魚道設計に対する 知見を得るため、ワカサギの遡上期に遊泳速度に関する 実験を野外の現地河川で実施した.その結果、以下の知 見を得ることができた.

(1) 管内代表流速 100cm・s<sup>-1</sup>以上の条件で遊泳した体 長 5.1~8.8cm のワカサギは,体長の平均 19.5 倍の遊泳 速度で泳した.

(2) 平均体長 7.0cm (偏差 0.8cm, 53 個体,) のワカ サギの遊泳速度と遊泳時間の関係を表す遊泳曲線式が 得られ,遊泳能力指数から同サイズのアユに比較して 泳力がやや弱いことがわかった.

(3) 体長 6~7cm 程度のワカサギを遡上させる際の一つとして,魚道内の速い流速場とその距離を 100~110 cm・s<sup>-1</sup>程度,40~50cm 程度にすれば,遡上可能であることが示唆された.

なお,体長と遊泳速度との関係が明確でないので, 供試魚の体長サイズの分布を大きくしてさらに実験を 行い,データを蓄積して検討する必要がある.

謝辞:本実験を行うに際し,岩木川漁業協同組合の齋藤氏には 多大なご便宜をいただいた.各関係機関および弘前大学農学生 命科学部研究室大学院の清水秀成君はじめ学生諸氏からは多く の協力を得た.これらの皆様に心より感謝致します.本研究の 一部は平成26年度文科省科学研究補助金基盤研究(C)を受けて いる.

#### 引用・参考文献

Blaxter, J.H.S (1967) : Swimming Speeds of Fish, *Proceedings of the FAO Conference on Fish Behaviour in relation to Fishing Techniques and Tactics*, in Bergen, Norway, 69-100.

Hamada,K. (1961) : Taxonomic and ecological studies of the genus Hypomesus of Japan.Mem.Fac.Hokkaido.Univ, 9(1), 1-56

井出充彦,山中 治,片岡佳孝(2002):琵琶湖流入河川でのワ カサギの産卵状況と特性,滋賀県水産試験場研究報告,49, 39-49.

塩垣 優 (1982):青森県産魚類目録,青森県水産試験場報告, 1-36.

泉 完,高屋大介,工藤 明,東 信行 (2002):アイスハーバー 型魚道における魚類の隔壁遡上特性—赤石川赤石第2頭首工 魚道を事例にして—,農業土木学会論文集, No.217: 55-63.

泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明 (2006):河川流下水 を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について, 農士論集, 244, 171-178.

泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明, 加藤 幸(2007): 自然河川流下水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの 突進速度に関する現地実験, 水工学論文集, **51**, 1285-1290.

泉 完, 矢田谷健一 (2007):河川における自然誘導式スタミナ トンネルを用いた野生魚の突進速度に関する実験, 農土論集,

**249**, 115-116.

泉 完,山本泰之,矢田谷健一,神山公平(2009):河川におけ る挿入式スタミナトンネルによるヤマメ稚魚の突進速度に関 する実験,農業農村工学会論文集, 262, 103-109.

泉 完, 菊地真弘, 加藤 幸, 東 信行 (2012): 河川水を用い たヤマメ稚魚の尾部の動きと遊泳速度, 農業農村工学会論文 集, 278, 99-107.

泉 完,大田敏貴,東信行(2013):河川水を用いた遊泳実験に よるシロウオの遊泳能力と尾部の動き,農業農村工学会論文 集,283:41-50

川那部浩哉,水野信彦,細谷和海(2001):日本の淡水魚,山と 渓谷社,60-63.

神田献二(1953):網地の縮結と網目の通過について-I,日本 水産学会誌,18(8),365-372.

東北農政局北奥羽土地改良調查管理事務所調查結果報告書 (2014).

農業農村工学会(2015):よりよき設計のために「頭首工の魚道」 設計指針.

久下敏宏(2006):群馬県におけるワカサギの増殖に関する研究, 群馬県水産試験場研究報告, 12, 1-128.

久保田哲也,中西 章,谷口政由貴(2000):砂防施設の斜路式 魚道における渓流魚の遡上水理条件,砂防学会誌,53(2),48-56. 鬼束幸樹,秋山壽一郎,山本晃義,飯國洋平(2008):流速およ び体長別のオイカワの突進速度,水工学論文集,52,183-1188.

- 鬼束幸樹,秋山壽一郎,山本晃義,渡邉拓也,脇 健樹(2009): 河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究~アユ,オイ カワ,カワムツ,ギンブナを対象~,土木学会論文集 B,65(4), 296-307.
- Sasaki, T., Saruwatari, T.and Watanave, S. (2003) : Spawning Ecology of Anadromous Wakasagi, *Hypomesus nipponesis* inhabiting Hei River in Iwate, Japans, *Suisanzoshoku* 51(2), 141-150.
- 佐藤 純,泉 完,工藤 明,東 信行 (2003):全面越流型階 段式魚道における魚類等の遡上特性-芦野堰右岸魚道を事例 にして-,平成15年度農業土木学会応用水理研究部会講演集, 21-26.
- 佐々木 剛, 猿渡敏郎, 渡邊清一 (2006): 岩手県閉伊川におけ る遡河回遊型ワカサギの回遊履歴, 日本水産学会, **72**(5), 31-36.
- 塚本勝巳,梶原 武(1973):魚類の遊泳速度と遊泳能力,水産 土木, **10**(1), 31-36.
- 山口幹人,高谷義幸(2000):シラウオの遊泳速度(短報),北水 試験報,**57**,31-32.
- 宇藤 均,坂崎繁樹(1987):網走湖産ワカサギの生活史 第3 報 降海及び遡河移動について,北海道立水産試験場報告,
  - **29**, 1-16.
- 矢田谷健一,泉 完,東 信行,丸居 篤 (2015):ドジョウ稚 魚の遊泳能力の測定,農業農村工学会論文集,300,Ⅱ\_121-Ⅱ\_126.