

水質管理用水利施設の効率化に関する研究

中央大学 理工学部 都市環境学科
中央大学大学院 理工学研究科 都市環境学専攻
中央大学 理工学部 都市環境学科
公益財団法人 リバーフロント研究所
中央大学 理工学部 都市環境学科

学生会員 ○青木 啓祐
学生会員 小石 一字
正会員 前川 亮太
正会員 中村 徹立
フェロー会員 山田 正

1. はじめに

日本全国において、利根導水事業や霞ヶ浦導水事業など、様々な導水事業が行われている。導水事業は、河川流況を改善やダム開発水量を都市用水や灌漑用水として供給、湖沼の浄化導水を供給することを目的として行われている¹⁾²⁾。また、導水路の水利施設としての働きの一つは、上記を目的に必要な量の原水を管路内に流すことである。

一定流量を導水する際の問題は、導水管の壁面粗度および管路の曲がりによる損失や、プロペラが回転して熱になる損失を含むポンプの特性等に起因する消費電力の増加が挙げられる。特に、管路壁面においては、強度な錆や生物の付着によって管路内を流れる流水の抵抗となっている。例えば、ある湖沼（以下、A湖沼）の導水施設では、管路壁面に付着したカワヒバリガイが流水の抵抗となっており、一定流量を流すために必要な消費電力が増加すると考えられる（写真-1）。

図-1は、A湖沼の導水施設において運用開始年の2000年から2013年までのA湖沼の導水施設において計測された9m³/sと19m³/sの流量で2条導水時の実測消費電力である。図-1の破線は、各流量の平均消費電力を示している。運用開始の2000年と2005年～2013年までの平均消費電力差は、9m³/sの時、207KW、19m³/sの時274KWであり、運用開始年より増加していると分かる。これは、写真-1に示す壁面に付着したカワヒバリガイの影響であり、導水施設の効率化を図る必要があると考えられる。

赤池³⁾⁴⁾はターボ機械の性能予測に及ぼす表面粗さの影響について研究しており、壁面粗度と乱流境界層の速度分布に関する考察されている。しかし、壁面粗度と必要な電力に関する実用性を考慮した考察はされていない。

本研究では、導水施設の効率低下を抑制するための手法を提案することを目的とし、管路の壁面粗度と消費電力との関係を明らかにした。具体的には、管路の壁面粗度を相当粗度とし、管路の壁面粗度の有無が消費電力に与える影響を定量的に示した。

2. 研究手法

本研究では、管路の壁面粗度と消費電力との関係を明らかにするために、導水路1条分の計算を行った。2条で19m³/sの流量が導水されることから、1条で9.5m³/sの流量として計算を行った。

計算条件は、A湖沼の導水路の管径を d 、導水路長を L として計算を行った。また、管路は直管かつ管路内の水は満管の状態と仮定して計算を行った。

計算手順は、1条で9.5m³/sの流量を与えて流速を算出し、一定流量を流すために必要な圧力勾配を算出した。計算には、Bernoulliの定理（式(1)）と抵抗則にはDarcy-Weisbachの式（式(2)）を用いた。また、滑面と粗面の場合でそれぞれ摩擦損失係数を算出した。粗面の



写真-1 導水管内のカワヒバリガイの付着状況の例³⁾

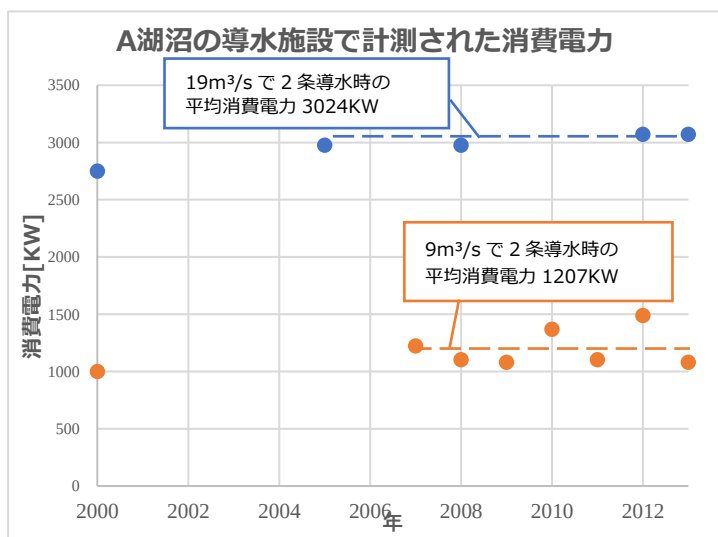


図-1 2条導水時の導水施設で測定された消費電力（点）と平均消費電力（破線）

計算では相当粗度を変えて、圧力勾配を算出し、仕事率を求めた。この算出した仕事率を、本研究では消費電力とし、実測値の消費電力と比較した。滑面の計算では、レイノルズ数を算出し、摩擦損失係数を算出した。また、壁面粗度がない場合を滑面としたため、滑面の消費電力を算出した。

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z + h_l = \text{const.} \quad (1)$$

$$I_f = \frac{dh_l}{dx} = -\frac{1}{\rho g} \left(\frac{dp}{dx} + \frac{dz}{dx} \right) \quad (2)$$

(1)式のBernoulliの定理を1回微分し、エネルギー勾配について解いた式を(2)式に示す。

$$h_l = f' \cdot \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad I_f = \frac{dh_l}{dx} = f' \cdot \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad f' = \frac{f}{4} \quad (3)$$

キーワード 水利施設, 効率化, Moody図, 相当粗度

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 Tel 03-3817-1805

$$I_f = \frac{fv^2}{8Rg} \quad (4)$$

ここに、 f : 摩擦損失係数、 R : 径深 [m]、 g : 重力加速度 [m/s²]、 l : 管路長、 D : 管径 [m]、管路内の流速: v [m/s] である。抵抗則には、(3)式の Darcy-Weisbach の式を用いた。(3)式を一回微分し、エネルギー勾配について解いた式が(4)式である。

$$(\text{滑面}) \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log_{10}(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8 \quad (5)$$

$$(\text{粗面}) \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2.0 \log_{10} \frac{k_s}{d} \quad (6)$$

ここに、 Re : レイノルズ数、 k_s : 相当粗度 [cm]、 d : 管径 [m] を表す。摩擦損失係数の算出には、Moody 図表から、管路壁面の滑面と粗面の摩擦損失係数をそれぞれ算出した⁵⁾。

滑面には(5)式、粗面には(6)式を用いた。動粘性係数は水温が 20℃の状態を仮定して、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ とした。レイノルズ数は管路内の流速に管路長を乗じたものを動粘性係数で除して算出した。

$$\frac{dp}{dx} = \rho g \left(\frac{fv^2}{8Rg} + \frac{dz}{dx} \right) = \frac{\rho f v^2}{8R} - \rho g \frac{\delta h}{L} \quad (7)$$

ここに、 δh : 導水路の標高差、 L : 導水機場間の距離距離である。抵抗則として、Darcy-Weisbach の式を用いた場合、(2)式、(4)式を圧力勾配について解いた式が、(7)式である。

$$P = \int_0^L \frac{dp}{dx} dx \quad (8)$$

(8)式は、(7)式で得られた圧力勾配を管路長で積分して圧力を算出した式である、(8)で得られた圧力に断面積を乗じて管路全体にかかる力を算出した。ここで得られた管路全体にかかる力に、管路内の流速を乗じて仕事率を算出した。本研究では、この算出した一定流量を維持するための仕事率を、消費電力として扱い、実測値の消費電力と比較した。

3. 計算結果と考察

図-2 は、 $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を管路内に流すために必要な消費電力と相当粗度の関係を示す。この図-2 中の曲線は、圧力勾配から算出した仕事率の計算値であり、黄色で示す線は、滑面の時の消費電力である。1 条で $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を管路に流した時の消費電力の実測値から得られる相当粗度は 9.4 cm であった。相当粗度の参考値として、25 年使用の強度に錆が生じたりベット止め管の相当粗度は 1.25 cm である⁶⁾ことから、計算で得られた数値は、現実的な数値と比べて約 7 倍大きいと言える。また、カワヒバリガイの殻長は、2~3cm である。

図-2 に示している実測値の消費電力から得られる相当粗度 9.4 cm には、管路壁面の損失だけでなく、管路の曲がりによる損失や、一定の流量を流すために、プロペラが回転して熱になる損失が含まれている。これらから得られる消費電力を図-2 に示す実測値の消費電力から差し引けば、相当粗度は小さくなると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 1 条で $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を管路に流した時の消費電力の実測値から得られる相当粗度は 9.4 cm であった。
- 2) $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を管路内に流すために必要な実測値

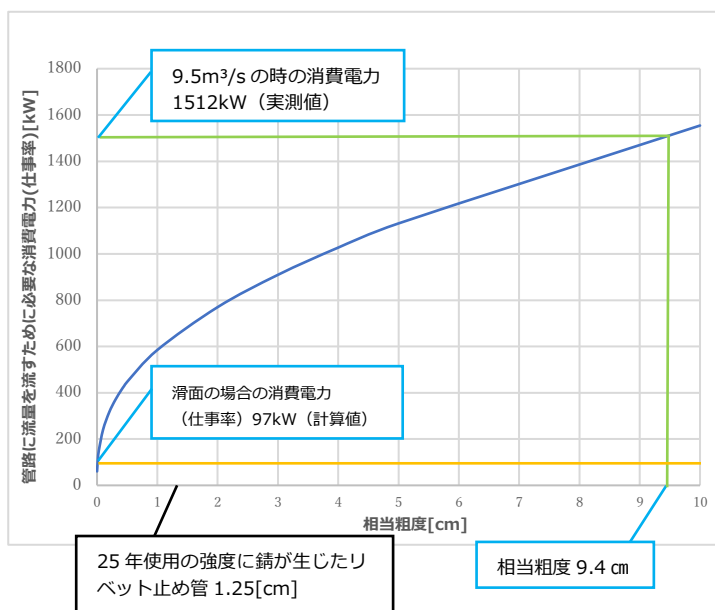


図-2 $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を管路に流すために必要な消費電力と相当粗度の関係

の消費電力と滑面の消費電力差は 1415 KW と分かった。

5. 今後の展望

- 1) 実測値から滑面の消費電力 (仕事率) を引いた差が、滑面の消費電力 97 KW と比べて、 1415 KW と大きい。その要因として、機場のプロペラが回転して熱になる損失を含むポンプ特性や管路の曲がりによる損失等が、実測の消費電力には含まれている。これらの損失によって生じる消費電力を実測値の消費電力から引いていくことが必要である。
- 2) 熱になる損失や曲がりによる損失によって得られる電力量を実測値から引いた電力量を算出し、導水路の水利施設としての効率化を目指す。

6. 参考文献

- 1) 独立行政法人水資源機構 利根導水総合事務所 HP. <http://www.water.go.jp/kanto/tonet/index.html>
- 2) 群馬県 HP. <http://www.pref.gunma.jp/06/f3600167.html>
- 3) 赤池志郎: ターボ機械の性能予測に及ぼす表面粗さの影響 (その 1: 粗面上の乱流境界層), ターボ機械第 19 巻第 12 号, 1991 年
- 4) 赤池志郎: ターボ機械の性能予測に及ぼす表面粗さの影響 (その 2: 実用粗面の等価砂粒径), ターボ機械第 19 巻第 12 号, 1991 年
- 5) 日野幹雄: 明解水理学, 丸善出版, 1983.
- 6) 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会 (編): 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗, (一社) 日本機械学会, 1980.
- 7) 中村徹立, 山田正: 手賀沼浄化のための日内水位変動及び水位低下に関する研究, 水利科学, No.35 (第 61 巻 第 5 号), 2017.
- 8) 中村徹立, 山田正: 導水管内に付着するカワヒバリガイの対策に関する研究, 水利科学, (No.36), 2018 (掲載予定).