

鋼管送水管システムにおける圧力変動を用いた流量推定

Flow Rate Estimation in Steel Water Transmission Pipelines Using Pressure Transients

○浅田洋平*, 萩原大生**, 鈴木哲也***

○Yohei Asada*, Taiki Hagiwara**, Tetsuya Suzuki***

1. はじめに

気候変動による影響で渇水リスクや作物の高温障害リスクが高まっている昨今において、食糧生産性の維持を目的として各ケースに細やかに対応した適切な水利用計画、水管理がより一層求められると予想され、そのためにはまず各圃場での水使用量を正確に把握することが重要である。また、管理労力の削減や自由度の高い水利用などを目的として、送配水施設のパイプライン化が現在も進められており、農業用パイプラインを対象とした水使用量の計測方法を検討することには意義がある。本研究では、流量計よりも安価で精度が高く設置が容易な圧力計によって管内の圧力変動を実測し、圧力変動から流量を推定する手法を提案する。提案した手法の有効性について現場の鋼管送水管システムで検証を行った。

2. 流量推定方法

圧力計測によって流量を推定する場合、2点間の圧力水頭差からダルシーワイズバッハ式などの摩擦損失式によって流量を求めるのが一般的である。しかし、この方法は摩擦損失係数に大きく依存し、摩擦損失係数は経験式による正確な同定が極めて難しいという問題がある。一方、バルブ閉塞による水撃圧推定の理論式としてジューコフスキー式(式(1))とアリエビ式(式(2))が提案されているが、これらの式は下記のように、圧力変化量から流量変化量を逆推定するのに用いることができ摩擦の影響もほとんど受けない¹⁾。

$$\Delta Q = \frac{gA}{c} \Delta H \quad (1) \quad \Delta Q = \frac{gTH_0A}{L} \frac{\Delta H_{\max}/H_0}{\sqrt{1 + \Delta H_{\max}/H_0}} \quad (2)$$

ΔQ は流量変化量 (m³/s)、 ΔH は圧力変化量 (m)、 A は管断面積 (m²)、 c は圧力波伝播速度 (m/s)、 g は重力加速度 (m/s²)、 L は管全長 (m)、 T はバルブ操作時間 (s)、 ΔH_{\max} は最大圧力上昇量 (m)、 H_0 は定常状態の圧力 (m) である。(1) 式はバルブ急閉塞 ($T \leq 2L/c$) の場合に適用でき、(2) 式はバルブ緩閉塞 ($T > 2L/c$) の場合に適用できる。バルブを完全に閉塞する時、 ΔQ は元々使用していた流量に等しくなる。水利用によるバルブの開閉操作によってパイプライン内には圧力変動が頻繁に発生しており、それを捉えることで(1)、(2) 式から流量を推定することが可能である。また、水撃圧推定の数値解法として、非定常流況解析モデルによる圧力変動シミュレーションがあるが、上記と同じ考え方でこれも流量推定に利用できる。本研究では、非定常流況解析モデルによる逆解析によって、計測した圧力変動から流量をパラメータとして最適化推定する方法を用いた。

*東京農工大学大学院農学研究科, Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

**山口大学大学院創成科学研究科, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University

***新潟大学自然科学系(農学部), Institute of Agriculture, Niigata University

キーワード: パイプライン、水撃圧、非定常流況解析、最適化計算

3. 現場パイプラインシステムでの実証試験

2章で提案した3つの流量推定手法について新潟県佐渡市にある小倉幹線パイプラインシステムで検証を行った。本パイプラインシステムは全長約18kmの本線と二つの支線を有する鉄管およびダクタイル鋳鉄管で構成された長距離鉄管送水管システムである (Figure 1)。本線下流端

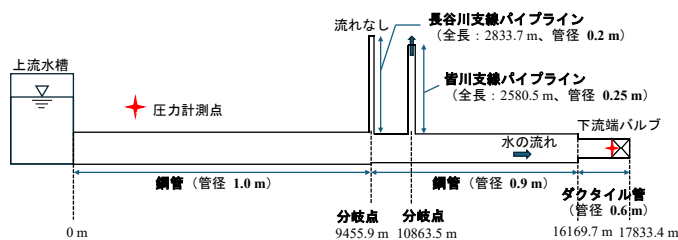


Figure 1 小倉幹線パイプラインシステムの模式図

Schematic diagram of Ogura transmission pipelines

流量 Q_{down} が $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$ (Case1)、 $0.048 \text{ m}^3/\text{s}$ (Case2)、 $0.165 \text{ m}^3/\text{s}$ (Case3)の3つの条件下で下流端バルブを完全閉塞することで発生させた圧力変動をバルブ直上部で計測し (Figure 2)、提案した手法で流量推定を試みた。すべてのCaseでバルブ閉塞完了時間が圧力波の管往復時間よりも短かったため、アリエビ式は適用できなかった。ジューコフスキー式で流量推定したところ、Case1で

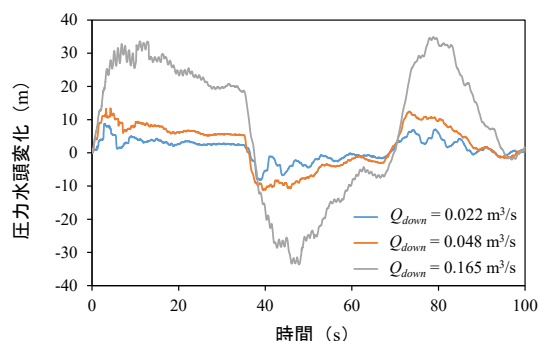


Figure 2 計測した下流端の圧力変動

Measured transient pressures in downstream end

$0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ (誤差 4.5 %)、Case 2 で $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$ (誤差 32.8 %)、Case3 で $0.080 \text{ m}^3/\text{s}$ (誤差 51.2 %) となった。Case2, 3 で流量が過小評価され誤差が大きくなっている原因は、バルブ閉塞完了時間がCase1より長く、そのバルブ閉塞中に下流にある0.9から0.6mの管径変化で発生した反射波 (圧力低下の波) が計測点に到達し、初期圧力変化量 ΔH が減少したからである。ジューコフスキー式はバルブ閉塞中にそのような反射波が計測点に到達すると適用できなくなるため、留意する必要がある。非定常流況解析モデルによる最適化手法によって流量推定を行ったところ、Case1で $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ (誤差 3.1 %)、Case2で $0.050 \text{ m}^3/\text{s}$ (誤差 3.9 %)、Case3で $0.171 \text{ m}^3/\text{s}$ (誤差 3.8 %) となった。すべてのケースにおいて約3~4%の精度で流量推定が可能であることが明らかになった。また、全長1000m、圧力波伝播速度1000m/s、流量 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ で圧力波が管全長を往復する時間が2sである直線管路を想定して、アリエビ式の適用性に関する数値実験を行ったところ、バルブ閉塞完了時間が $T=3, 5, 10$ (s) であるとき、アリエビ式による推定流量はそれぞれ $0.162 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.161 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.161 \text{ m}^3/\text{s}$ となり誤差が約61~62%と非常に大きくなった。アリエビ式は管路を剛体と仮定し圧力波伝播を無視して導出されるため精度に限界があると考えられる。

4. おわりに

ジューコフスキー式と非定常流況解析モデルによる最適手法の流量推定に対する有効性が示された。しかしジューコフスキー式は管構造変化を多数含む現場パイプラインでは適用が限られる。アリエビ式は剛体モデルを仮定しているため精度が悪く流量推定には適さない。

参考文献：1) 横山 (1979) 水撃入門, 日新出版, pp.20-25.