

管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNetの新機能

大須賀 直子* 秋村 友香*

New Features of FrontNet/ Γ and FrontNet/ Ω Developed as One-Dimensional CFD Software for Pipeline System

OHSUKA Naoko* and AKIMURA Yuka*

アドバンスソフト株式会社では、配管や流体機器から成る管路系内の流体に対する過渡解析のソフトウェアを開発している。2016 年度において、ガス管路系を中心に適用実績の多い管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/ Γ に、パッシブスカラー解析機能を導入した。一方、水撃やポンプトリップの解析をターゲットとして開発を進めている管路系液体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/ Ω では、空気弁解析機能における性能とロバスト性の向上が実現し、2016 年度中のリリースを目指している。本稿では、最新の Advance/FrontNet/ Γ のパッシブスカラー解析機能を使用した解析事例と、Advance/FrontNet/ Ω による空気弁解析事例を紹介する。

Key word: 管路系、流体、過渡、1 次元流れ、パッシブスカラー、拡散、水撃、ポンプトリップ、液柱分離、空気弁、Advance/FrontNet/ Γ 、Advance/FrontNet/ Ω

1. はじめに

管路内流れの 1 次元過渡解析ソフトウェアとしてアドバンスソフト株式会社が開発している Advance/FrontNet シリーズでは、解析目的に応じた基礎方程式や数値解法を採用し、開発を行ってきた。

Advance/FrontNet/ Γ はバルブ遮断時の圧力伝播解析やガスパージ、熱量調整、熱交換による温度上昇などの多成分ガスや熱流動の過渡解析に実績のあるソフトウェアである。本稿では、2016 年度に実装し、リリース整備中であるパッシブスカラー機能を使った解析事例についてご紹介する。

Advance/FrontNet/ Ω はバルブ遮断時の水撃やポンプトリップ時の液柱分離・再結合による圧力上昇を解析目的として開発されたソフトウェアである。2016 年度に空気弁解析機能の安定化を行い、リリース準備中である。本稿では空気弁の解析事例について紹介する。

2. Advance/FrontNet/ Γ

Advance/FrontNet/ Γ は、ガス管路系の圧縮性 1 次元流体解析を行うソフトウェアである。理想気体の他、実在流体物性データを使用することにより、実在ガス、液体、および超臨界流体も取り扱うことができ、また、多成分ガスにも対応している。ポンプ・タービン・バルブ、ブロワ等の流体機器モデルや制御系、固体熱伝導解析との連成解析が可能であり、流体機器の能力の評価、管路系全体の流体挙動の把握、事故時の安全解析と対策の検討、運転効率や保守費用に対する評価等に利用されることを目的としている。本稿では、新規に開発を行ったパッシブスカラー解析機能を紹介する。

2.1. パッシブスカラー解析機能

パッシブスカラーとは、流速によって受動的に流されるだけでその存在が流れ場に変化を与えないスカラー場のことである。具体的には、水に落としたりインクや、空気中に浮遊する煙、配管や内燃機関内の流体に溶けたイオンや混合物の移流と拡散等は、パッシブスカラーとしてのシミュレーション

*アドバンスソフト株式会社 第 3 事業部

3rd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

が可能な例である。パッシブスカラーは、流体方程式（質量保存式と運動量保存式、エネルギー保存式から成る）を解いた後で、パッシブスカラーの質量保存式のみを解けば良いため、計算が簡略化され、計算時間も短縮される。また、微量の流体を厳密に解くと計算が不安定になるような場合は、パッシブスカラーとして解析することによって、計算安定性が確保される利点がある。

2.1.1. 基礎式

パッシブスカラー解析に用いるのは、次の質量保存式である。

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u) \phi_k}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \rho (D_{iN}^{mol} + D_{iN}^{flow}) \frac{\partial \phi_k}{\partial x} = S_k \quad (1)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 ϕ_k はパッシブスカラー、 u は流体の流速を表している。左辺の第1項は時間項でパッシブスカラーの時間変化を表わしており、第2項は移流項でパッシブスカラーの移流を表わしている。右辺は、ソース項と呼ばれる項であり、パッシブスカラー場の生成や消滅がある場合に考慮される。実用的には、蒸発や凝縮などによる物質の生成消滅や、ススやエアロゾルが重力沈降や拡散泳動で消失したり、再浮遊で増加したりする際のモデル化に利用することができる。

右辺第3項は拡散項である。ランダムな分子運動（Brown 運動）による拡散の寄与の影響は分子拡散係数 D^{mol} で表され、流れ場による拡散の寄与の影響は流れ場の拡散係数 D^{flow} で表される。

分子拡散係数のモデルは Chapman - Enskog の式を参照した[2]。

$$D_{ij} = \frac{3}{16} \left(2\pi kT \frac{M_i + M_j}{M_i M_j} \right)^{1/2} \frac{1}{n\pi\sigma_{ij}^2\Omega_D} f_D \quad (2)$$

流れ場に対する乱流拡散係数のモデルは以下のモデルとした[3][4][5][6]。

$$D_{iN}^{flow} = \begin{cases} \text{Re} < 3000 & D_{iN}^{flow} = ud \frac{Sc \text{Re}}{192} \\ \text{Re} \geq 3000 & D_{iN}^{flow} = ud \text{Re}^{-\frac{1}{8}} \end{cases} \quad (3)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{iN}^{mol}} \quad (4)$$

本モデルは、Re 数が 3000 未満では層流に対する拡散係数、3000 以上では乱流に対する拡散係数を用いることを表している。

2.1.2. 解析事例

パッシブスカラー解析機能を使用したガスパージ解析の事例について説明する。

(a) モデルと解析条件

文献[1]の実験と同じ条件になるように図 1 のような管路系を解析対象とし、得られた解析結果と測定値と比較する。実験に合わせた解析条件は、2 箇所の流入部において、一方の流入境界からは空気（Air）が流入し、もう一方の流入境界からは二酸化炭素（CO₂）が流入して合流し、大気開放端から流出するようにした。流入境界では、時刻 - 3.53 秒を境に空気と二酸化炭素の流量が逆転する（初期の流量比は、空気：二酸化炭素=9:1）。観測地点は合流部から 20m の位置にある。

本来の濃度計算で得られた成分濃度の変化とパッシブスカラーの計算で得られた濃度変化の比較により、パッシブスカラー解析機能の適用性を確認できるように、成分濃度の質量保存式の計算とパッシブスカラーの質量保存式の計算を同時に行った。

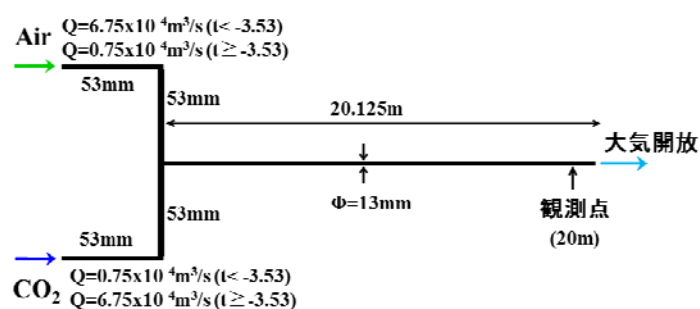


図 1 管路系モデル

ガスは、20℃の空気と二酸化炭素の混合気体とし、理想気体として取り扱う。次の表に、その他の計算条件を示す。

表 1 計算条件一覧

項目	内容
数値計算法	1次元有限差分法、 スタaggerド格子
時間積分法	予測子修正子法による陽解法
対流項の差分法	流束制限関数 minmod 付き TVD 法
クーラン数	0.99
メッシュ幅	約 0.2 m

(2) 解析結果

図 2 に、計算で得られた二酸化炭素のモル濃度変化を実験値と比較したものを示す。ここで、時刻ゼロ秒は観測地点において二酸化炭素のモル濃度が 0.5 となる時刻としている。計算は実験値と比較して良好な結果であり、また、乱流拡散を考慮した場合は、考慮しない場合と比較して、緩やかにパージが進んでおり、実験との一致がより良いことが分かる。

図 3 は本来の濃度計算（パッシブスカラー機能ではなく、多成分ガス流体としての計算）で得られた濃度変化とパッシブスカラーの計算で得られた濃度変化を比較したものである。両者の計算で得られた濃度変化は、よく一致していることがみてとれる。このことは、パッシブスカラーによる濃度拡散の結果は、負荷のかかる濃度計算と比べて遜色ないことを示している。なお、パッシブスカラー解析機能で得られる計算結果は質量分率相当のため、多成分ガス流体計算結果の質量分率と比較している。また、乱流拡散による影響を除くため、乱流拡散モデルは考慮していない。

図 4 は観測地点における密度変化を表している。初期には、観測点の密度は $1.26[\text{kg}/\text{m}^3]$ を示しており、パージが進むにつれて空気と二酸化炭素の比が逆転した流体が流れてくるために、密度は次第に上昇し、やがて一定値 $1.77[\text{kg}/\text{m}^3]$ になることが示されている。

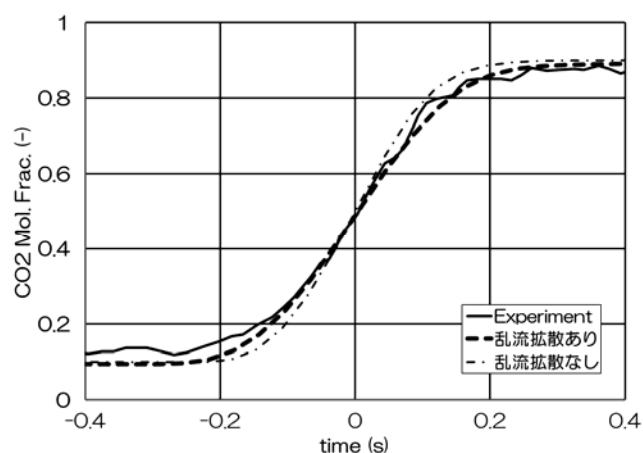


図 2 観測地点における二酸化炭素のモル分率
(実線は実験値[1]、破線は計算値)

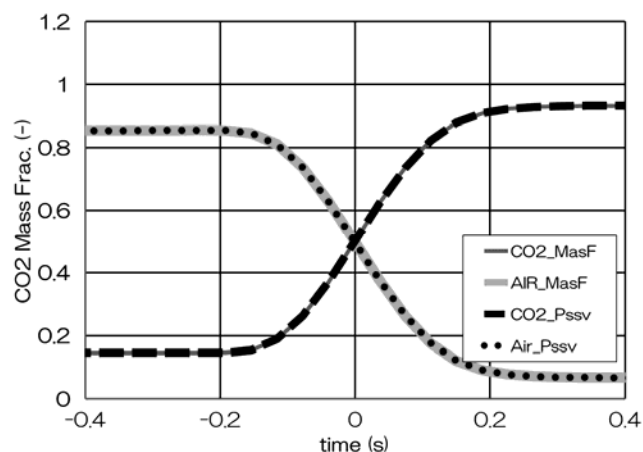


図 3 観測地点における成分濃度の計算結果と
パッシブスカラーの計算結果の比較

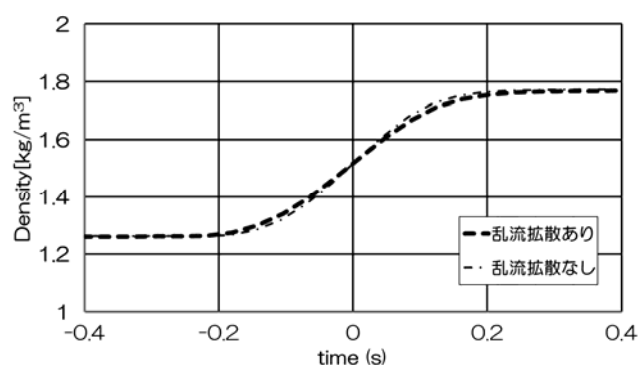


図 4 観測地点における密度の時間変化

図 5 は配管中の空気と二酸化炭素濃度分布を表している。上から、時刻-3.6 秒、-1.93 秒、-0.33 秒、-0.02 秒での空気と二酸化炭素の濃度分布を表している。

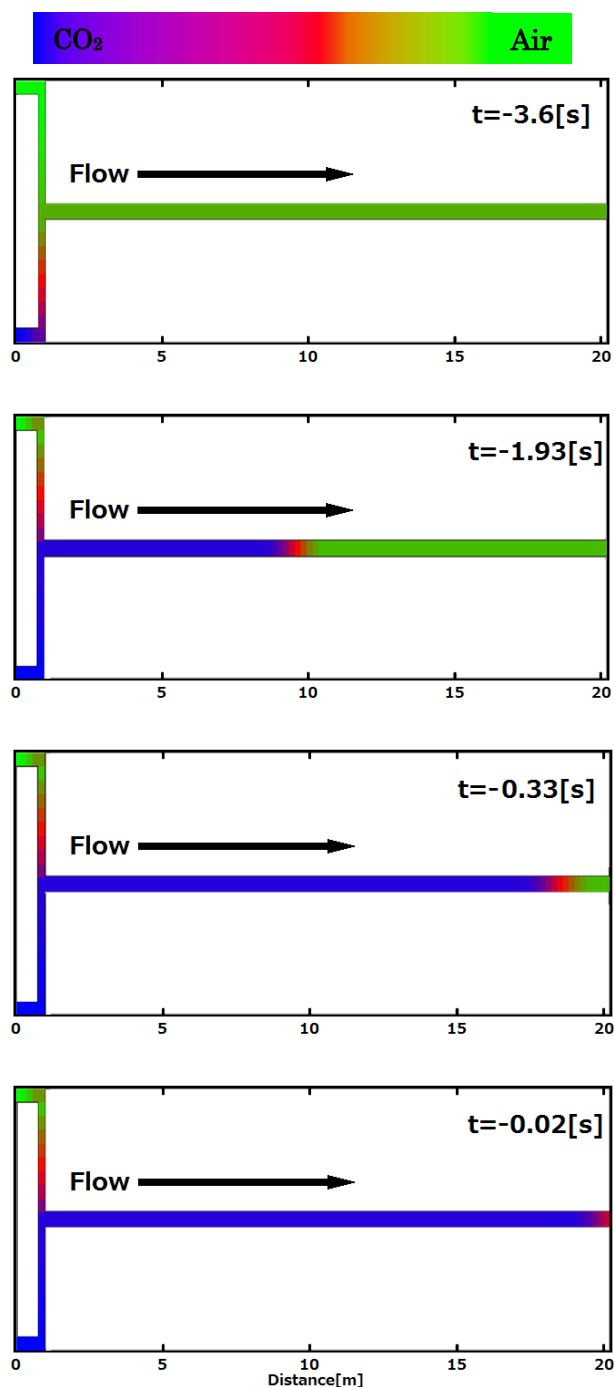


図 5 配管中の空気と二酸化炭素濃度分布の時間変化

2.1.3. パッシブスカラーの応用

本稿で取り上げたガスパーズの例の他、パッシブスカラーの応用例としては、種々の化学物質やイオンの移流と拡散現象、煤やエアロゾル、汚泥等の重力沈降と拡散泳動、再浮遊等の現象の追跡、あるいは、流体の輸送履歴を追跡するトレーサーとしての利用も可能である。パッシブスカラー解析機能を使用すれば、幅広い分野に応用が可能である。以下に、

分野別のパッシブスカラーの応用例を示す。

表 2 分野別パッシブスカラー応用例

分野、対象	パッシブスカラー	物理現象
火力プラント等の燃焼ガス	煤	付着、重力沈降、拡散泳動
水力プラント石油掘削	砂利	沈降
上下水道浄水場	不純物	沈降、凝集
空調衛生クリーンルーム	埃、粉塵、アスベスト、臭気、湿気、アレルギー	フィルター吸着
ビル火災排煙ダクト	煙粒子	凝固、凝縮、蒸発、沈降
噴射器、付臭、ミキサー	噴霧	蒸発、凝縮
吸着装置	微量成分	吸着
放射性物質	ラドン	吸着、反応
テロ	細菌	吸着、反応
冷凍	霜	蒸発、凝縮

2.2. 開発計画

Advance/FrontNet/Γ は、様々な分野における配管系の設計、リスク評価に貢献することを目指し、ソルバーの高精度化をはじめ、流体機器モデルの充実、GUI のユーザーフレンドリー性の向上を図ってきた。2017 年度には、陰解法を実装したソルバーのリリースを計画している。陰解法を使用した解析では、従来の陽解法と比較して数十倍の高速化が達成される見込みである。陰解法によって高速化が達成されれば、定常解析や感度解析、パラメータサーベイにかかる時間が短縮されるため、配管設計、リスク評価に対してさらなる貢献が期待できる。

本稿でご紹介したパッシブスカラー機能は次期バージョンアップにて Advance/FrontNet/Γ のパッケージ版にリリースする予定である。今後もユーザーの要望に応じ、機能拡充に邁進したい。

3. Advance/FrontNet/Ω

本ソフトウェアは管路系におけるバルブ遮断時の運動エネルギーが圧力に転化されることによる水撃や、ポンプトリップ時の液柱分離・再結合による水撃を解析するために開発されている。Ver. 1.0 では水撃値が許容値よりも大きかった場合、以下の検討を行うことができた。

1. バルブの遮断速度を変更する。
2. ポンプにフライホイールを設置する。
3. サージタンクを設置する。

2011 年発行のアドバンスシミュレーション Vol.7 では「水理学と管路系過渡解析」で Advance/FrontNet /Ω を使用した空気弁の解析事例を紹介したが、このときの空気弁モデルは安定性が悪く、パッケージ版としてリリースしていなかった。今回、空気弁モデルを改めて整備し、Advance/FrontNet/Ω Ver. 2.0 として 2016 年度中のリリースを目指して開発を進めている。本稿では空気弁解析機能の概要と解析事例を報告する。

3.1. 空気弁とは

空気弁は管路内の圧力が低下したときに開いて大気中から空気を吸い込み、管路内の圧力が大気圧よりも下回ることを抑制する機能を持つ。設置費用もサージタンク設置による土地購入などと比べるとはるかに安価である。管路内の圧力が回復したときに空気弁は空気を大気に排出する。空気を排出した際に液柱分離の再結合が生じ、大きな圧力上昇を起こすことがあるため、十分な配慮が必要である[1]。

プログラムの扱いとしては、管路内の液体の流れと、空気弁が吸い込んだ空気の二相を扱うこととなる。

3.2. 空気弁の計算モデル

空気弁の解析機能において、下記の仮定を行った。

- (1) 空気は理想気体の状態方程式に従う。
- (2) 管路内の圧力が大気圧以下になると空気弁が空気を吸い込み、管路内の圧力は大気圧になる。

(3) 空気弁と大気の空気移動量は差圧と抵抗係数の関係に従う。

(4) 空気をすべて排出したときの管路内の圧力上昇は液柱分離・再結合の式と同様とする。

3.3. 空気弁の解析事例

文献[1]に空気弁が設置されている場合とされていない場合のポンプトリップ時の実測値が載っているため、ここからポンプ諸元を推定し、解析を行った。

3.3.1. 空気弁がない場合のポンプトリップ解析

計算条件は文献[1]と同様とし、ポンプ諸元を表 3 のように設定した。

表 3 ポンプ諸元の推定値

ポンプ諸元	数値
定格揚程	16.4 m
定格流量	1116 ton/h
慣性	30kg・m ²
回転数	600 RPM
逆止弁閉速度	2s/100%

Advance/FrontNet/Ω の GUI による計算設定画面は図 6 となる。左端に境界条件（リザーバ）があり、ポンプが水をくみ上げ、水が斜め管を流れ、右端にある境界条件リザーバへと流出する。

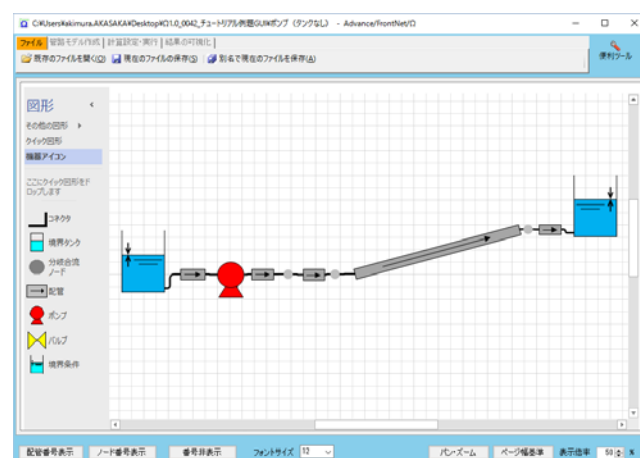


図 6 空気弁がない場合の GUI 設定画面

十分定常をとったのちにポンプをトリップさせた結果を図 7 に載せる。文献[1]の測定値と比較して、ポンプトリップ時の圧力低下の時定数や圧力のピーク値、また、圧力の山の数が合っていることが分かる。計算では、時刻約 5 秒に逆止弁が閉まることによる圧力上昇がみられる。また、計算では圧力の反射合成による山の形の変形がみられる。計算値と実測値は条件を推定して行った計算の割には妥当な範囲で一致していると解釈できる。

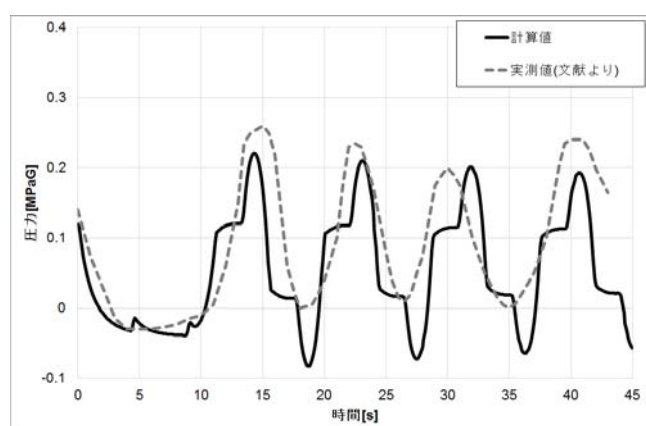


図 7 圧力の経時変化（計算値と実測値の比較）

3.3.2. 空気弁がある場合のポンプトリップ解析

前節と同じポンプ諸元を用いて、空気弁を考慮した計算を行った。Advance/FrontNet/ Ω の GUI による計算設定画面は図 8 となる。矢印で指し示したように、ポンプ出口に空気弁アイコンを設置している。

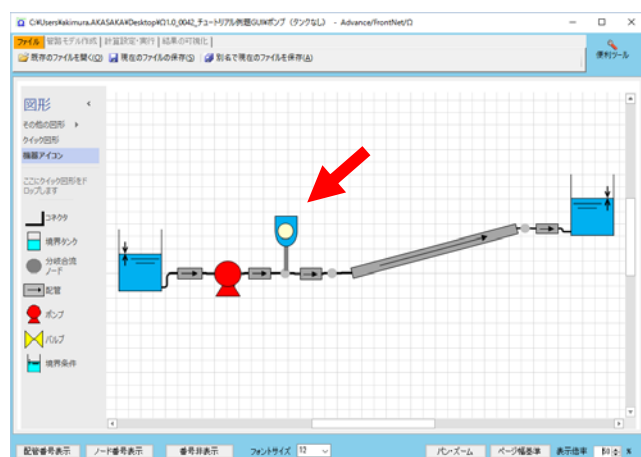


図 8 空気弁がある場合の GUI 設定画面

十分定常をとったのちにポンプをトリップさせ

た結果を図 9 に載せる。ポンプトリップ後の時刻 2 秒付近の圧力を図 7 と比較すると、負圧が抑えられ、圧力が大気圧（ゼロ MPaG）に抑えられていることが分かる。実測値と比較すると圧力の大きさは半分程度となってしまう、ピーク値をよく再現することはできなかった。

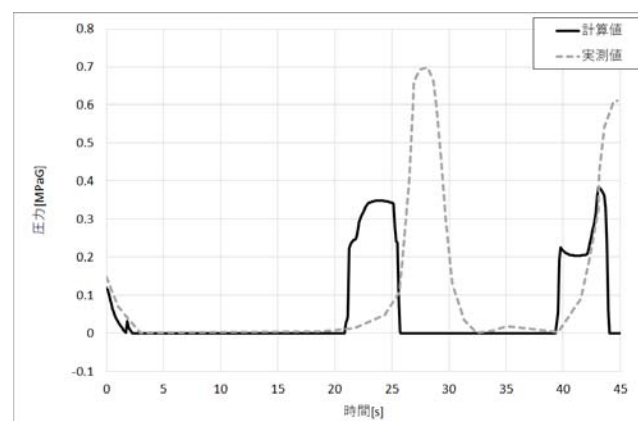


図 9 圧力の経時変化（計算値と実測値の比較）

空気弁の吸込み空気量の計算値は図 10 のような振る舞いとなった。図 9 と比較すると空気を排出しきったときに圧力上昇が起きていることが分かる。

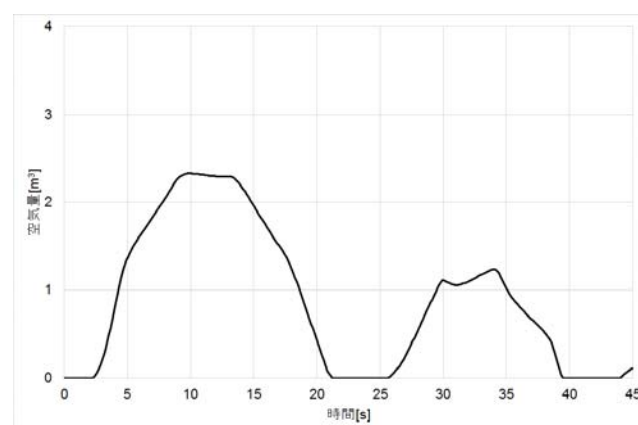


図 10 空気量（計算値）

3.4. 開発計画

空気弁モデルを組み込んだ Advance/FrontNet/ Ω を用いて計算を実施し、文献の実測値と比較を行った。空気弁が設置されている場合、実測値の再現精度は劣るものの、空気弁の機能そのものと、空気弁による流体挙動をよく再現することができた。今後は計

算設定や出力整備を進め、Ver. 2.0 としてリリースする予定である。

参考文献

- [1] 染谷雄史他、"管路内での異種気体混合に関する研究"、日本流体力学学会(2007).
- [2] 大江修造著、物性推算法、データブック出版社.
- [3] Taylor, Proc. of the Royal Society of London (1953).
- [4] Flint, the Canadian Journal of Chemical Engineering (1969).
- [5] Tichacek, A. I. Ch. E. Journal (1957).
- [6] 荒川正裕、「ガス管路における成分拡散・混合・置換に関する研究」(2009).
- [7] 中田信夫、三輪俊夫、田中和男、藤原実、“空気弁による水撃防止”、荏原時報 114 号(1980).

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)