

管路系流体過渡解析ソフトウェアの紹介

秋村 友香*

Introduction of Our Software For Analysis of Fluid Transient Piping System

Yuka Akimura*

アドバンスソフト株式会社では、長年の経験、特に原子力安全解析のノウハウを基にして独自のソフトウェアを開発してきた。本稿では、水撃やポンプトリップ解析で実績のある管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Ω、ガス管路の圧力波解析や熱流動解析で実績のある管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ、冷凍サイクルの解析で実績のある管路系気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontNet/TP のソルバー機能について最新の機能と主要実績、開発計画を紹介する[1]。また、パラメーター感度解析に応用可能な管路系流体定常解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Λ について紹介する。

Key word: 流体解析、1次元、管路系、過渡解析、水撃、熱流体、気液二相流

1. はじめに

管路系流体解析は1次元方向の流体解析である。例えば、水道、都市ガス、空調、消火用水などのライフラインとしてのパイプライン、エンジン内の管路系システム、冷凍システム、プラント設備の管路系システムなど、さまざまな対象に対して1次元流れの近似はよく成り立つものである。

管路系流体解析は3次元の詳細CFD解析が進展しつつある今日においても設計の分野や、安全解析においてニーズが多くあり、特に要望があるのは新しい機能を持った機器の作成や既存機能のカスタマイズである。アドバンスソフト株式会社の管路系流体解析のソフトウェアはこれらのニーズを積み上げて強化されてきている。カスタマイズが可能であるのは、独自開発によりソースプログラムを保有しているからであり、これが強みとなっている。

アドバンスソフト株式会社の管路系流体解析ソフトウェアは汎用性を重視して開発を進めて

きたが、ユーザーから見た場合には特定機能専用のソフトウェアの方が使いやすい場合もあり、現在は開発の方向性を探っている。

アドバンスソフト株式会社の持つ管路系流体過渡解析ソフトウェアは扱う流体の相に対して分かれており、液体用、単相用、気液二相用の3種類で構成されている。液体用は数値解法として特性曲線法をベースに開発されており、計算負荷が最も少なく安定性にも優れている。単相用では数値解法としてより一般的なコントロールボリュームに基づく方法を採用しており、計算負荷は液体用よりは大きい安定性に優れている。気液二相流用はこの中では最も計算負荷が大きく、計算安定性についても計算条件に依存する。以上のように相を事前に指定することができればユーザーの負担を軽減するソフトウェアを選択することができるが、相を事前に指定できない場合の統一的な取扱いが今後の課題である。

以下では、それぞれのソフトウェアの機能、主要実績、開発計画について最新の情報をまとめる。

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2. Advance/FrontNet/Ω

本ソフトウェアは水撃のような圧縮性に起因する急激な圧力上昇・圧力波伝播を解くことを目的に開発されている。

2.1. 機能

表 1 にソフトウェアの機能をまとめた。基礎方程式を 2 本とし、状態方程式を解いていない、つまり温度を一定としている。圧縮性の影響は考慮しているが、流動による密度変化は無視できるほど小さいという近似を用いている。数値解法は特性曲線法であり、陽解法的であるため水撃のような圧力波の伝播の解析に優れている。圧力が飽和蒸気圧以下に低下したときに起こるキャビテーション（液柱分離）モデルが実装されており、ポンプトリップ時に起こる液柱分離・再結合時の圧力上昇を考慮することができる。

表 1 Advance/FrontNet/Ω 機能

基礎方程式	圧縮性を考慮した 質量保存式と運動量保存式
数値解法	特性曲線法
物理モデル	摩擦損失係数モデル(層流から乱流 までを統一的に取り扱う)
	キャビテーションモデル (液柱分離モデル)
境界条件	流量指定境界または圧力指定境界
流体機器	管（勾配を考慮）
	弁（開度変化を入力で与える (ONOFF 弁)
	ポンプ
	タンク

2.2. 主要実績

本ソフトウェアの主要実績を表 2 に示す。ソフトウェアの取り扱う流体が液体に特化されていることから、水や LNG に関するものが多い。現象としてはバルブ操作に伴う水撃（液撃）解析やポンプトリップ解析が挙げられる。

表 2 Advance/FrontNet/Ω 主要実績

分野	主要実績
エネルギー プラント	・ 冷却系 ON-OFF 弁の応答解析 ・ 地熱発電所ポンプトリップ解析
水道・設備	・ 浄水場ポンプトリップ解析 ・ ビル施設内ポンプトリップ解析
農業	・ 農業用パイプライン水撃解析（樹 枝状パイプライン、管網）
ガス分野	・ LNG 水撃解析 ・ LNG パイプライン制御系解析
海洋分野	・ 情報伝送システム解析
原子力	・ 液体リチウムターゲット施設の 水撃解析

2.3. 開発計画

表 3 に本ソフトウェアの開発計画をまとめた。制御弁は既に計算機能が開発済みであり、GUI の整備を実施後、リリースを予定している。空気弁は精度検証中となっている。温度の概念の導入も検討している。温度が導入されれば、熱交換器などの機器の導入を行うことができ、音速の大きい液体に対して、軽い計算負荷で熱流動解析を行うことができるようになる。発電プラント内の機器や、消火設備関連機器については現在調査中である。ニーズの高いものから順次開発していきたい。

表 3 Advance/FrontNet/Ω 開発計画

開発項目	開発計画
制御弁	開発中、次期バージョンリリース予定
空気弁	開発中、次期バージョンリリース予定
温度	検討中
熱交換器	検討中
発電プラント機器	調査中
消火設備関連機器	調査中
地震解析機能	開発中

3. Advance/FrontNet/Γ の機能

本ソフトウェアは圧力波伝播や熱流動の過渡変化を解くことを目的に開発されている。

3.1. 機能

表 4 に機能をまとめた。状態方程式は数値テーブル形式のファイル読み込みによる実流体物性と理想気体に対する状態方程式から選択することができる。本ソフトウェアでは、「流路」と「固体」の概念があり、流路を流体が流れ、固体（構造物）内では熱伝導方程式が解かれる。流体と固体では対流による熱伝達をすることができ、固体同士では輻射熱伝達をする。これらの接続関係は複雑となるため GUI を使って入力設定を行う。

表 4 Advance/FrontNet/Γ 機能

流体の基礎方程式	圧縮性を考慮した ①質量保存式 ②運動量保存式 ③エネルギー輸送式	
基本変数	密度、内部エネルギー	
流体の状態方程式	①実流体物性 ②単成分・混合成分の理想気体	
流体の格子スキーム	スタガード格子	
流体の時間発展スキーム	Euler 予測子修正子法（陽解法）	
流体の対流項スキーム	1 次精度風上差分	
固体の基礎方程式	1 次元非定常熱伝導方程式	
物理モデル	①壁面摩擦損失モデル ②臨界流モデル ③流体固体間対流熱伝達モデル ④固体間の輻射熱伝達モデル	
境界条件	圧力、温度、流量	指定値または外挿
流体機器	配管	直管（勾配を考慮）
	弁	開度変化を入力で与える(ONOFF 弁)
		圧力制御弁
	送風機	流量に応じて昇圧
	タービン	流量に応じて減圧 エネルギー降下

3.2. 主要実績

表 5 に主要実績をまとめた。適用分野としてはエネルギーガス分野が多い。総延長が数十キロオーダーのパイプラインに対する圧力波伝播解析や、混合成分から成る天然ガスの過渡応答については実績がある。熱流動解析については原子力分野が挙げられる。また、顧客特化機能として開発されたエンジン動力バランス解析などに実績がある。

表 5 Advance/FrontNet/Γ 主要実績

分野	主要実績
ガス分野	・管路のガス漏えい解析 ・都市ガス管路内圧力波解析 ・バッファタンク機能解析 ・混合ガス組成応答解析 ・ガス管路制御弁応答解析
原子力	・定常時炉心熱流動解析 ・ビームトリップ時の熱応答解析
航空宇宙	・エンジンバランス解析 ・ハザード解析

3.3. 開発計画

表 6 に開発計画をまとめた。気化器は開発予定であり、ある条件によって気化したガスの条件を境界条件として設定できるようにする予定である。圧縮機については導入を検討中の段階である。また、各種機器（バルブ、熱交換器、送風機、タービン）については、機器の種類を増やし、機能検証を重ねていくことを検討している。

表 6 Advance/FrontNet/Γ 開発計画

開発項目	開発計画
拡散項	導入済、次期バージョンリリース予定
3 次風上差分 TVD (minmod, superbee)	導入済、次期バージョンリリース予定
気化器	開発予定、境界条件として導入検討中
圧縮機	検討中

4. Advance/FrontNet/TP の機能

本ソフトウェアは二相流の圧力波伝播や熱流動の過渡変化を解くことを目的に開発されている。

4.1. 機能

表 7 に機能を示す。二相流モデルとしてドリフトフラックスモデルが導入されている点や物性値を数値テーブルで与えられる点 (ASME 蒸気表や REFPROP 等で出力される表) が特長である。完全陰解法であるため、陽解法に比べてタイムステップが大きくとれることが利点である。ただし、陰解法ゆえに新たな機器の導入に手間がかかることが難点である。本ソフトウェアは顧客ニーズがあったため、流体構造連成機能がついている。

表 7 Advance/FrontNet/TP 機能

基礎方程式		質量保存 気相質量保存 運動量保存 エネルギー保存式
基本変数		圧力、エンタルピー、ボイド率、質量流束、変位
流体構造連成		ビームモデル、強連成
要素 機器	蒸発器	二相域と過熱域モデル
	凝縮器	二相域と過熱域モデル
	圧縮器	流量を与えるモデル
	膨張弁	流量を与えるモデル
	液溜り	幾何形状(高さ等)を考慮したモデル
物性値		数値テーブル形式
数値 解法	アルゴリズム	完全陰解法 修正 Newton 法
	二相流	ドリフト・フラックスモデル
	時間積分	完全陰解法

4.2. 主要実績

表 8 に主要実績を示す。適用分野は冷凍空調分野および原子力が主である。LNG 関連もニーズ

に応じて解析を行った実績がある。

表 8 Advance/FrontNet/TP 主要実績

分野	主要実績
冷凍空調	・新冷媒に対する冷凍空調設計ツールの開発 ・大型冷熱機器の性能評価過渡解析
原子力	・高圧高温水ブローダウン試験 Edwards' Pipe 解析および IITR 解析 ・ブローダウン時 PWR 圧力容器動荷重試験の流体構造連成解析 ・ブローダウン時隔壁衝撃応答試験の流体構造連成解析
ガス分野	・LNG 受入配管の凝縮を伴う気液二相流過渡解析 ・LNG タンク 3 次元流動解析との連成過渡解析

4.3. 開発計画

開発計画としては、基本機能について、より適応範囲を広げ、さらにロバスト性を高める方向で検討している。

5. Advance/FrontNet/Λ

本ソフトウェアは管路系の定常解析を高速に行うことを目的に開発されている。特に、パラメーター感度を見るための解析などを念頭に置いている。

5.1. 機能

表 9 に機能をまとめる。現在は単相流体に対する仕様となっている。陰解法のため、計算は瞬時に終了する。そのため、パラメーター感度を調べるための解析などに応用できる。管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ は圧力波を精度よく解析するために陽解法ベースで開発されているが、陽解法はタイムステップを音速に制限されるため、長時間の解析には計算コストがかかる。また、音速が大きい液体に対してもタイムステップが大きくとれないという欠点がある。この欠点を補うために、圧力波よりも緩やか

な現象を解析する目的や、液体パイプラインに対する熱流動解析を実施するには、Advance/FrontNet/Λを使用することは1つの手段になると考えられる。本節での考察は開発計画へとつながる。

表 9 Advance/FrontNet/Λ

流体の基礎方程式	圧縮性を考慮した ①質量保存式 ②質量流量と圧損の関係式 ③エネルギー保存式	
基本変数	圧力、エンタルピー	
流体の状態方程式	実流体物性	
数値解法	陰解法	
物理モデル	壁面摩擦損失モデル	
境界条件	圧力、温度、流量	指定値または外挿
流体機器	配管	直管（勾配を考慮）

5.2. 開発計画

表 10 に Advance/FrontNet/Λ の開発計画をまとめた。5.1 節で述べた理由により、時間項の導入や熱伝導機能の導入により、本ソフトウェアの適用範囲が広がると考えられる。

表 10 Advance/FrontNet/Λ 開発計画

開発項目	開発計画
時間項の導入	ニーズに応じ導入予定
熱伝導機能の導入	2013 年度中に導入予定
二相化	ニーズに応じ導入予定
流体機器類の充実	ニーズに応じ導入予定

6. おわりに

アドバンスソフト株式会社では、企業ニーズに応じて3本の管路系流体過渡解析ソフトウェアと1本の管路系流体定常解析ソフトウェアを開発している。今後の開発計画策定に関しては調査中の部分があり、要望や意見などがあれば読者にはぜひ連絡および情報提供をお願いしたい。

参考文献

- [1] アドバンスソフト株式会社ホームページ、
http://www.advancesoft.jp/product/advance_frontnet/
 (ウェブアドレスは 2013 年 11 月時点。)

※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。)