

管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ の 高度実用化に向けた取り組み

秋村 友香* 大須賀 直子* 三橋 利玄**

Highly Practical Application of the One-Dimensional Fluid Analysis Software for Pipeline Systems : Advance/FrontNet/Γ – Centering on Cooperation with External Organization –

Yuka Akimura*, Naoko Ohsuka* and Toshiharu Mitsuhashi**

アドバンスソフト株式会社では、管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ の大規模管路網解析の実用性を高めるために、さまざまな開発に取り組んでいる。その一つとして、株式会社オメガシミュレーションのダイナミックプロセスシミュレータ Visual Modeler とアドバンスソフトの Advance/FrontNet/Γ の連成計算機能の開発例が挙げられる。そこでは大規模な都市ガス管路網解析における計算効率化・高速化を目的とした陰解法の開発やパッシブスカラー機能の開発を行った。本稿ではこれらの取り組みについて紹介する。

Key word: 管路系 1 次元流体解析、外部機関との連携、ダイナミックプラントシミュレータとの連成解析、大規模管路網解析、陰解法、高速化、パッシブスカラー

1. はじめに

管路内流れの 1 次元過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet シリーズの一つである Advance/FrontNet/Γ (以下、FrontNet/Γ) [1]は、管路系の圧縮性流体解析を主目的としたソフトウェアであり、理想気体のほか、実在流体物性データを使用することにより、実在気体から液体および超臨界流体も取り扱うことができ、多成分ガスも取り扱うことができる。さらに、ポンプ、タービン、バルブ (制御系含む)、ブロワ等の流体機器モデルとの連成解析や固体熱伝導モデルとの連成解析が可能であるため、管路系全体の流体挙動の把握やシステムとしての流体機器の性能評価、事故時の安全解析と対策の検討、運転効率や保守に対す

る評価などに利用することができる。

本ソフトウェアでは、近年は、大規模管路網解析の実用性を高めるためにさまざまな開発に取り組んでいる。「アドバンスシミュレーション Vol. 24」で報告したように、都市ガス供給網向け運転訓練システムの構築を目的として、株式会社オメガシミュレーションのダイナミックプロセスシミュレータ Visual Modeler[2]とアドバンスソフトの FrontNet/Γ の連成計算機能の開発を株式会社オメガシミュレーションと連携して行った[3]。

当運転訓練システムでは、限られた訓練時間内に効率的な訓練を行う必要があるため、計算精度を損なわないで高速に流体計算を行うことが必須であったため、従来の陽解法ではなく、新たに開発した陰解法を用いることにより、これを実現した[4]。陰解法の開発に当たっては、解析の目的に合わせた数種類の解析手法に基づく陰解法の開発を行った。

また、当運転訓練システムでは、計算負荷を大

*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

**アドバンスソフト株式会社 技師長

Chief Engineer, AdvanceSoft Corporation

幅を増やすことなく、多成分ガスの各成分の追跡を行う必要があったため、パッシブスカラー機能の開発を行った[8]。これは都市ガス管路網における熱量変化・分布の追跡や、基地由来ガストレーサー追跡として利用でき、さらには流体中の微量成分、蒸発・凝縮、沈着・沈降などの多様な物理化学挙動を扱える一般的なものである。

本稿ではこれらの取り組みについて紹介する。

2. 都市ガス供給網向け運転訓練システムの構築のための Visual Modeler と FrontNet/Γ の連成

都市ガス供給網向け運転訓練システム[3]の構成を図 1 に示す。訓練シミュレータサーバーでは Visual Modeler と FrontNet/Γ の連成計算機能によりモデル化された高圧導管網、中圧導管網、それぞれの導管網に配置されたガバナーステーション、整圧所などのプロセスモデルと、各ステーションの制御装置モデルが実行される。

オペレーターの監視指令操作環境は実システムと同じとするため、実際に使用されている監視指令システムのオペレーター端末と同じ装置を接続している。訓練シミュレータサーバー側で実行されている制御装置モデルとは、実システムで使用されている電文と同じ形式の電文をネットワーク経由でやりとりするようにしているため、実システムでの監視指令システムの改造等にも容易に対応できるようになっている。

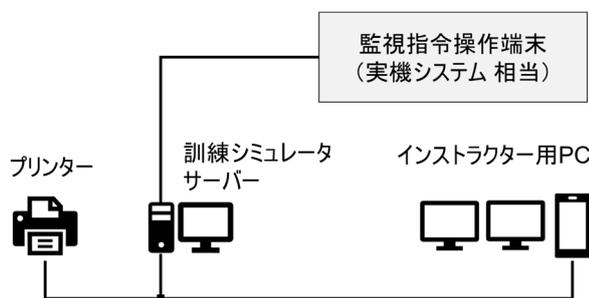


図 1 運転訓練システムのシステム構成

Visual Modeler はプロセスプラントのダイナミックシミュレーションモデルを構築するための、弁、熱交換器、反応器、蒸留塔、圧縮機などの回転機といったさまざまな機器ユニットモデルを備えている。また、プロセスプラントのシミュレ

ーションで必要とされるさまざまな物性計算法もシミュレーション対象のプロセスに合わせて選択できるようになっている。

Visual Modeler では、始動停止操作、通常運転での負荷変更操作、異常事態時の操作に対応してプラント内の圧力と流量の変化の斉次方程式群を解くソルバーを備えている。

一方、FrontNet/Γ は、質量、運動量、エネルギーの各保存方程式をスタガード格子の有限差分法で離散化し、圧力、密度、温度、全エネルギーなどのスカラー量と運動量、流速などのベクトル量を求めている。管路網は、主に配管を模擬するボリューム（以下 Vol と表記）と、Vol 間の接続やバルブなどを模擬するジャンクション（以下 Jct と表記）でモデル化される。スタガード格子では、Vol には長さや体積が定義され、スカラー量が定義される。Jct には流路面積が定義され、ベクトル量が定義される。Vol では流れ方向に細分化することが可能である。スタガード格子を採用するとプログラム処理は複雑になるが、主に圧力のチェッカーボード現象に起因する計算不安定性を防ぎ、さらには、質量とエネルギーの保存性がよくなる。

上記のようにシミュレーションモデルの構造が異なるため、Visual Modeler と FrontNet/Γ との連成計算機能は、Visual Modeler 単独で作成されたプラントモデル実行モジュールと FrontNet/Γ を使用するプラントモデル実行モジュールとを同期して実行する方式としている。

FrontNet/Γ の開発は、プラントモデル構築操作、実行結果の一貫性ならびに整合性を考慮して以下の方針のもとで行っている。

- Visual Modeler のプロセスモデル構築 UI を使用して、Visual Modeler の標準の機器モデルによるプラントモデル構築と同じ配管網モデル構築環境を提供する。
- Visual Modeler のプロセスモデル構築 UI で指定した取り扱い成分ならびに物性計算法を FrontNet/Γ 内の計算に使用する。

FrontNet/Γ によるシミュレーションモデルと Visual Modeler によるシミュレーションモデルでは、おのおの「プロセス間接続ユニット」と呼ぶ実行モジュール間で流量、圧力、温度、組成の情報を相互にやりとりするユニットを配置している。これはシミュレーションモデルにとっては、それぞれのシミュレーションモデルでの境界条件を与える役割をしている。

本運転訓練シミュレータでは、高圧導管網、中圧導管網の配管ならびに弁を FrontNet/Γ を使用して構築し、その他の LNG 基地部分、ステーション部分、制御系モデルを Visual Modeler で構築している。

表 1 連成のための FrontNet/Γ の主要な関数

関数名	目的
Open	入力ファイルを読み込み、ライブラリを初期化
Close	シミュレーションを終了
SetCmpSys	物性に関する情報の設定
Init	計算のための初期設定
PauseCalc	計算の実行を中断
SaveInitData	初期状態データをファイルへセーブ
LoadInitData	初期状態データをロード
PutBoundaryData	境界 Vol パラメータ設定
GetBoundaryData	境界 Vol のデータを取得
PutVolumeInitData	Vol の初期パラメータ設定
PutVolumeData	Vol パラメータの設定
GetVolumeData	Vol の計算結果を取得
PutValveData	バルブパラメータの設定
GetValveData	バルブの計算結果を取得
GetJuncData	Jct の計算結果の取得
ExecCalc	指定された経過時間分の計算を実行

FrontNet/Γ はバッチ処理で動作するソフトウェアであるが、連成計算機能を実現するためには、Visual Modeler からの要求に従って、実時間シミュレーションや倍速シミュレーションなどを指

定された時間周期で計算を行う必要がある。また、運転訓練シミュレータ特有の機能として、ある時点の計算状態を保存したり、保存した状態を回復したりする処理が必要となる。これらを実現するため、FrontNet/Γ を Visual Modeler のライブラリモジュールとして開発した。FrontNet/Γ 自体は Fortran で書かれているため、Visual Modeler からの関数コールに対応する C++ のラッパーを介してライブラリ化した。なお、ラッパーの存在による速度負荷はほとんどない。表 1 に FrontNet/Γ の主要な関数をまとめる。

連成プログラムの処理の流れを図 2 にまとめる。このような構成により、運転の途中で計算条件が変更されても FrontNet/Γ はそれを反映させることができるようになっている。

運転訓練シミュレータでは、実時間シミュレーションは当然であるが、ある操作に対するプラントの応答が非常に遅い場合、訓練時間の制約から、その応答の結果を待つことができないといった問題がある。このような場合には、シミュレーションモデル全体を倍速シミュレーションし、訓練コースの効率的な運用が行われる。この倍速シミュレーションについては、FrontNet/Γ では以下のように処理している。Visual Modeler から「8 倍速」の指令がくると、FrontNet/Γ は実時間 1 秒に対して 8 秒分進んだ結果を返す。図 3 に倍速シミュレーション機能のイメージを示す。FrontNet/Γ の速度には限界があり、計算対象に系や想定事象に応じて倍速機能が何倍速まで対応可能かが決定される。

FrontNet/Γ では Courant 条件の制約から、Visual Modeler から指定された時間刻み幅よりも小さい時間刻み幅で計算する場合がある。その場合は FrontNet/Γ は 1 秒分の計算を行ったのちに Visual Modeler へ値を返すようにしている。

Visual Modeler と FrontNet/Γ の連成計算機能の有効性については、実際の大規模ガス導管網を対象とした計算を実施し確認を行った。計算対象とした導管網規模は高圧導管網および中圧導管網を合わせて総延長が数千 km であり、格子幅は 1km とした。ガバナ、ガスホルダーおよび制御弁は

Visual Modeler で計算を行い、FrontNet/Γ では配管の境界条件およびバルブの開度が Visual Modeler から指示され、配管内の熱流動を次章で述べる陰解法を用いて計算を行った。いくつかのパラメータスタディを実施した結果、大規模都市ガス高中導管網に対しても実時間の十数倍の倍速機能で、陽解法と同等の結果を得ることができた。事例計算結果の詳細については、前報[3]を参照されたい。

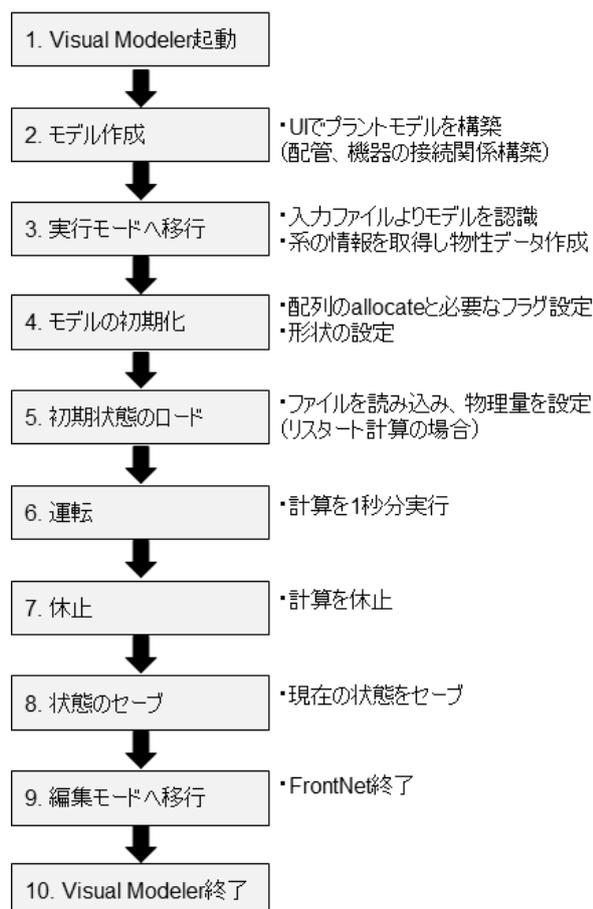


図 2 連成プログラムの処理の流れ

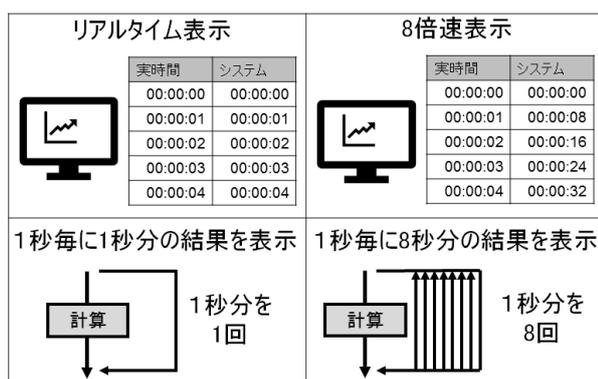


図 3 実時間と 8 倍速の概念図

3. 陰解法の開発

FrontNet/Γ に従来から組み込まれていた陽解法は、バルブ遮断時の圧力伝播解析や圧力衝撃解析などの圧縮性が支配的な流れの解析や、大規模管路系を比較的大きな格子でモデル化した場合には、効率よく高精度で計算することができる。

しかしながら、気体と液体や超臨界が混在する解析などに用いられる時間刻み幅が液体の大きな音速で制限されるため、計算時間が多大になることがある。また、ガス管路系であっても、格子の細分化が必要な場合や複雑な管路系を対象とした定常解析または準定常解析では、解析対象の管路全体の圧力や流量が静定するまでを計算するのに多大な計算時間が必要となる。

そこで、多大な計算時間を必要とする解析に対して計算効率化および高速化を図るために、従来の陽解法に加えて新たに半陰解法 2 種類と準陰解法 2 種類の合計 4 種類の陰解法を開発を行い、FrontNet/Γ に実装を行った。

陰解法は従来からある密度ベースの陽解法とは異なり、圧力ベースの数値解法を採用しており、時間刻み幅に対する音速による制限を取り除くことができる。

4 種類の陰解法の特徴を陽解法と合わせて、表 2 に示す。2 種類の半陰解法の場合、圧力以外の未知数に対して代数的に計算を行い、2 種類の準陰解法では、圧力に加えて運動量束、密度、全エネルギーを未知数とする線形連立方程式を、BiCGStab 法行列解法ソルバー[7]を用いて計算を行う。

準陰解法とは、完全陰解法ではないが、主要な変数を未知数とした線形連立方程式を行列計算によって解くことで、Courant 数が 1.0 を超えても解析できることから、そのように名付けている。参考のために、半陰解法と準陰解法の運動量保存式の離散式を以下に示す。ここで、式(1)は陽解法および半陰解法に対する運動量保存式の離散化式、式(2)は準陰解法に対する運動量保存式の離散化式である。両者を比較すると、対流項(左辺第 2 項)運動量束を前時刻とするか、新時刻とするかの時間的な扱いが異なることが分かる。準陰解法

では、当該セルに隣接するセルの運動量束も未知数となるため、運動量束に関する線形連立方程式を解く必要がある。

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho u)_{j+1/2}^{n+1} - (\rho u)_{j+1/2}^n}{\Delta t} \\ & + \frac{(\rho u)_{j+1}^n u_{j+1}^n - (\rho u)_j^n u_j^n}{\Delta x_{j+1/2}} + \frac{p_{j+1}^{n+1} - p_j^{n+1}}{\Delta x_{j+1/2}} \\ & + \frac{1}{2} \frac{K_{j+1/2}^n}{L_{j+1/2}} \left(2(\rho u)_{j+1/2}^{n+1} - (\rho u)_{j+1/2}^n \right) \left| u_{j+1/2}^n \right| \\ & - \rho_{j+1/2}^n g \sin \theta_{j+1/2} - F_{j+1/2}^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho u)_{j+1/2}^{n+1} - (\rho u)_{j+1/2}^n}{\Delta t} \\ & + \frac{(\rho u)_{j+1}^{n+1} u_{j+1}^n - (\rho u)_j^{n+1} u_j^n}{\Delta x_{j+1/2}} + \frac{p_{j+1}^{n+1} - p_j^{n+1}}{\Delta x_{j+1/2}} \\ & + \frac{1}{2} \frac{K_{j+1/2}^n}{L_{j+1/2}} \left(2(\rho u)_{j+1/2}^{n+1} - (\rho u)_{j+1/2}^n \right) \left| u_{j+1/2}^n \right| \\ & - \rho_{j+1/2}^n g \sin \theta_{j+1/2} - F_{j+1/2}^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

4 種類の陰解法の適用性を陽解法と合わせて、

表 3 に示す。適用性は多数の事例解析に基づいたものであり、事例解析の一端については前報 [4][5][6] で詳しく紹介しているので参照されたい。

事例解析の一例として大規模管路網解析に対する性能の比較を表 4 に示す。本解析では、全長 34km の管路網を全ボリューム数 1,000、総格子数 17,000 でモデル化し、定常計算に相当する Null Transient 計算を 1,000 秒行い、その後過渡計算を 200 秒行った。2 種類の準陰解法については、時間刻み幅の制御に必要な Courant 数を 5、10、20 とした 3 ケースの計算を行った。なお、計算の実行時間の測定は次の計算機サーバーを用いて行った。

(a)OS : CentOS release 5.9
(b)CPU : Intel(R) Xeon(R) Processor X5660 12M Cache, 2.80 GHz
(c)Memory : 99GB

計算で得られた結果を比較すると、陽解法で見られる詳細な圧力伝播を除けば、全体の傾向は概ね一致している。計算時間は陽解法に比べて陰解法の方が 4 倍から 8 倍速し、陰解法の高速度が認められる。また、準陰解法は半陰解法に比べて、時間刻み幅を大幅に大きくすることができるため、計算タイムステップ数が激減し、計算時間も減少している。しかしながら、時間刻み幅が 5 倍以上大きくなることから、1 タイムステップの圧力 Poisson 方程式を求める行列計算の反復回数が大幅に増えるため、計算時間は大幅には減っていない。また、準陰解法では、Courant 数をさらに大きくしても、計算タイムステップ数は Courant 数に応じて減少するものの、行列計算の反復回数が大幅に増えるため、計算時間は大幅には減っていない。本解析に限れば、準陰解法の Courant 数は 10 程度が最適といえる。

時間刻み幅と行列計算の反復回数にはトレードオフの関係にあるため、解析ごとに時間刻み幅制御に必要な Courant 数をよく吟味して与えることが重要である。

今後は、計算のさらなる高速化・安定化を目指し、陰解法の性能向上のための改良および新規の陰解法の導入を検討していきたい。また、管路系のグループ単位の特徴に合わせて複数の陰解法が適用できるハイブリッド型のモデルも検討していきたい。

表 2 Advance/FrontNet/ Γ の数値解法（陽解法と4種類の陰解法）の特徴

No.	数値解法		特徴
1	陽解法	予測子修正子法	定常計算や大規模計算では計算時間が膨大にかかる。 音速基準の Courant 条件は 1.0 以下が必須。 時間刻み幅が音速に制限されるため、音速の大きい液体では計算時間がかかる。圧力伝播計算の解析精度がよい。圧縮性流体を精度よく解くことができる。
2	半陰解法 1	質量保存式ベースの圧力 Poisson 方程式 運動量保存式とエネルギー保存式は代数計算	陽解法に比べて計算時間が速い。流速基準の Courant 条件は 1.0 以下が必須。 液体を解くことができる。圧縮性の強い現象を解くことができない。
3	半陰解法 2	エネルギー保存式ベースの圧力 Poisson 方程式 運動量保存式と質量保存式は代数計算	陽解法に比べて計算時間が速い。流速基準の Courant 条件 1.0 以下が必須。 圧縮性流体を精度よく解くことができる。圧力伝播計算の解析精度は陽解法より鈍る。液体を解くことはできない。
4	準陰解法 1	質量保存式ベースの圧力 Poisson 方程式 運動量保存式とエネルギー保存式は行列計算	陽解法と半陰解法に比べて計算時間が速い。流速基準の Courant 条件は 1.0 以上も可。 液体を解くことができる。圧縮性の強い現象を解くことができない。計算は陰解法の中では最も安定である。
5	準陰解法 2	エネルギー保存式ベースの圧力 Poisson 方程式 運動量保存式と質量保存式は行列計算	陽解法と半陰解法に比べて計算時間が速い。流速基準の Courant 条件は 1.0 以上も可。 圧縮性流体を精度よく解くことができる。圧力伝播計算の解析精度は陽解法や半陰解法 1 より鈍る。

表 3 陽解法と陰解法の適用性

No.	数値解法	圧力伝播	ガス	衝撃波	液体	大規模計算	定常計算
1	陽解法	○	○	○	△	△	△
2	半陰解法 1	○	○	×	○	○	○
3	半陰解法 2	○	○	○	×	○	○
4	準陰解法 1	○	○	×	○	○	○
5	準陰解法 2	○	○	○	×	○	○

表 4 大規模管路網解析に対する陽解法と陰解法の性能比較

No.	数値解法	Courant 条件 (注 1)	全タイムステップ数	計算時間	高速化倍率 (注 2)	反復回数 (注 3)
1	陽解法	0.8	1,252,251	30 時間 18 分 34 秒	—	—
2	半陰解法 1	0.8	151,400	7 時間 43 分 40 秒	3.9	10
3	半陰解法 2	0.8	88,411	6 時間 25 分 17 秒	4.7	18
4	準陰解法 1	5.0	19,308	5 時間 45 分 55 秒	5.3	116
5	準陰解法 1	10.0	13,244	3 時間 36 分 25 秒	8.4	197
6	準陰解法 1	20.0	10,559	3 時間 49 分 59 秒	7.9	323
7	準陰解法 2	5.0	19,309	4 時間 26 分 02 秒	6.8	115
8	準陰解法 2	10.0	13,247	4 時間 11 分 55 秒	7.2	204
9	準陰解法 2	20.0	11,737	4 時間 20 分 10 秒	7.0	270

(注 1) ケース No.1 は音速基準、それ以外は流速基準

(注 2) 陽解法に対する計算時間の比の逆数

(注 3) 圧力 Poisson 方程式の行列計算の反復回数の 1 タイムステップ当たりの平均値

4. パッシブスカラー解析機能の開発

パッシブスカラーとは、流体の流れ場によって受動的に流されるだけでその存在が流れ場に影響を与えないスカラー場のことである。具体的には、水に落としたインクや、空気中に浮遊する煙、配管や内燃機内での流体に溶けたイオンや混合物の移流と拡散は、パッシブスカラーとしてのシミュレーションが可能な例である。

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よいため、計算が簡略化され、計算時間も短縮される。

パッシブスカラーの質量保存式は、時間項、移流項、拡散項、ソース項から成る。拡散は分子拡散と乱流拡散が考量でき、ソース項は、蒸発、凝縮の相変化やエアロゾルの沈降、沈着、再浮遊などの生成消滅を考慮することができる。

都市ガス供給網向け運転訓練システムでは、計算負荷の軽減を目的として、複数の LNG 基地由来を示すトレーサ成分と異常時の熱量を表すトレーサ成分の管路網内での追跡のためにパッシブスカラー解析機能を活用している。

仮想の導管網を対象としたパッシブスカラー

解析機能による熱量分布の計算例を図 4 に示す。この結果では、基地 B から高熱量ガスが送出されているが、中圧地区には至っていない。このような検討は、早期の高熱量ガス引き戻しのオペレーションを行った場合の検討にも使用できる。パッシブスカラー解析機能の事例解析については前報[8]で詳しく紹介しているので参照されたい。

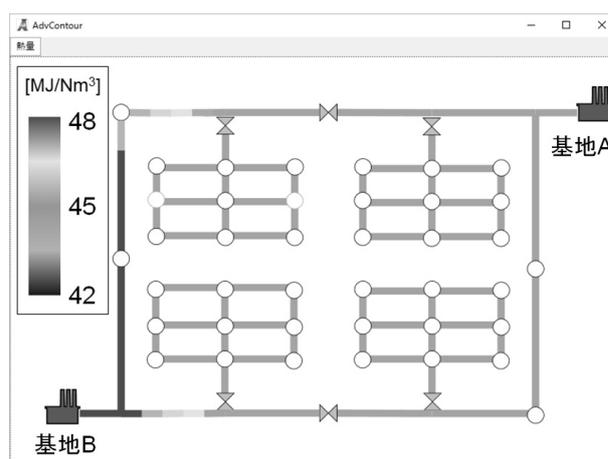


図 4 熱量分布の計算例

5. まとめ

管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/の外部機関との連携例として、オメガシミュレーション社の Visual Modeler と FrontNet/を連成さ

せてダイナミックプロセスシミュレータ上で精密な配管内流動の影響を考慮できるようにした都市ガス供給網向け運転訓練システムの構築を紹介した。さらには、運転訓練システムの計算精度を損なわないで高速に計算できる陰解法の開発と、基地由来および熱量解析を目的としたパッシブスカラー解析機能の開発を紹介した。

今後は、運転訓練システムの機能向上、陰解法のさらなる高速化・安定化、パッシブスカラー解析機能の向上を目指していきたい。

謝辞

本稿は、株式会社オメガシミュレーションの登録商標である OmegaLand の Visual Modeler に FrontNet/Γ を搭載し、運転訓練システムを構築した成果をまとめたものである。株式会社オメガシミュレーションの方々には、協業の機会を与えていただいただけでなく、業務の遂行にあたっては終始、技術面での有益なご討論とご助言をいただいた。ここに深謝の意を表する。

参考文献

- [1] アドバンスソフト株式会社 管路系流体解析ソフトウェア
http://www.advancesoft.jp/product/advance_frontnet/
(2017年11月アクセス)
- [2] 株式会社オメガシミュレーション Visual Modeler 製品紹介
<http://www.omegasim.co.jp/product/vm/>
(2017年11月アクセス)
- [3] 秋村, 大須賀, 清水, 三浦, “ダイナミックプロセスシミュレータと管路系流体過渡解析(第2報)”, アドバンスシミュレーション vol.24 (2017).
- [4] 秋村, 大須賀, 三橋, “管路系流体解析ソフトウェアへの陰解法導入による計算効率の向上性検討”, アドバンスシミュレーション vol.24 (2017).
- [5] 大須賀, 秋村, 三橋, “圧力伝播解析への数値解析モデルの適用性検討”, アドバンスシ

ミュレーション vol.24 (2017).

- [6] 秋村, 大須賀, 三橋, “液体管路系・等温管路系への適用性検討”, アドバンスシミュレーション vol.24 (2017).
- [7] H. A. van der Vorst, “Bi-CGSTAB : a fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems”, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing (1992). 13(2):631–644.
- [8] 秋村, 大須賀, “パッシブスカラー計算の実用性検討”, アドバンスシミュレーション vol.24 (2017).

Visual Modeler, OmegaLand は株式会社オメガシミュレーションの登録商標です。

Advance/FrontNet/Γ はアドバンスソフト株式会社の登録商標です。

※ 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。)