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) 秋村 友香^{*} 大須賀 直子^{*} 清水 雅嗣^{**} 三浦 真太郎^{**}

Fluid Analysis of Pipeline System and Dynamic Process Simulator (Part2)

Yuka Akimura*, Naoko Ohsuka*, Masatsugu Shimizu** and Shintarou Miura**

アドバンスシミュレーション Vol.18 (2014 年発行)では、第1報として化学プラント向けダイナミッ クプロセスシミュレータおよびその応用システムである運転員訓練シミュレータ分野での管路系流体 解析の応用について述べた[1]。その後アドバンスソフト株式会社の管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Г[2]と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 との連成計算機能の開発を進め、都市ガス供給網向け運転訓練システムとして納入するに至っ ている。本稿では第2報として、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の連成計算 機能と都市ガス高中導管網での応用事例を報告する。

Key word: 管路系、連成解析、大規模解析、訓練シミュレータ(OTS)、陰解法、パッシブスカラー

1. はじめに

オメガシミュレーションが開発・販売を行って いる、ダイナミックプロセスシミュレータ Visual Modeler[3]を核としたソフトウェアパッケージ群 OmegaLand は、国内外で石油精製、石油化学、化 学、LNG、電力などのプラントオペレータ向け運 転訓練システムとして数多くの納入実績を持っ ている。

通常、上記のようなプロセスプラント向けのダ イナミックシミュレーションでは、物質収支とエ ネルギー収支を基にした物理化学モデルを扱っ ており、運動量保存則については取り扱っていな い。従って、第1報で述べたような管路系の諸問 題を取り扱うことができるように、アドバンスソ フトとオメガシミュレーションとで、アドバンス ソフトの管路系流体過渡解析ソフトウェアと

*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

***株式会社オメガシミュレーション 事業本部 Simulation Business Division, Omega Simulation Co., Ltd. Visual Modeler との連成計算機能の共同開発を行っており、現在、ガス系の管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γを基にした連成計 算機能を Visual Modeler の「配管網オプション」 として製品化している。

このたび、この機能を使用した都市ガス供給網 システム向けの運転訓練シミュレータの開発を 行って納入に至ることができたので、その概要に ついて述べる。

以下では、Visual Modeler に移植されカスタマイ ズされた Advance/FrontNet/Γを単に FrontNet/Γと表 記することとする。

2.都市ガス供給網向け運転訓練システム 2.1.都市ガス供給網の概要

都市ガス供給網の概要を図 1 に示す。LNG タ ンカーにより運ばれてきた LNG は LNG 基地に て気化処理が行われ、さらに熱量調整、付臭処理 を経て、都市ガス供給エリア全体をカバーする高 圧導管網に供給される。

都市ガス供給エリア全体はいくつかのブロッ クに分けた供給エリアが設定されており、このブ ロック内での供給をカバーし、ブロック間をつな ぐ中圧導管網がある。中圧導管網からは工場や地 域冷暖房などの大口需要家への供給が行われる。 また、都市ガス需要変動に対する LNG 基地生産 量調整のバッファーとなるガスホルダーを備え た整圧所などが配置されている。中圧導管網から は、一般家庭にまで供給される低圧導管網がはり めぐらされている。

高中圧導管網のガバナーステーション、バルブ ステーション、整圧所、放散塔などの状態は供給 指令センターで集中監視されており、各ステーシ ョンの制御は供給指令センターから送信される 弁開閉指令、圧力・流量設定値などを基に、それ ぞれのステーションに設置された制御装置が自 律的に行っている。



2.2. 都市ガス供給網向け運転訓練システム

都市ガス供給網向け運転訓練シミュレータは 供給指令センターにおけるオペレータ訓練、すな わち、日常の都市ガスの安定供給のための訓練と 異常時の対応訓練を目的としている。従って、シ ミュレーション対象は都市ガス供給源としての LNG 基地から、高圧導管網、中圧導管網までとし ている。

高圧導管網は配管網全てをシミュレーション 対象としているが、中圧導管網については、供給 指令センターでの挙動変化の監視の主眼が高圧 導管網であることから、需要変動、緊急時の中圧 導管網の遮断時といった訓練対象事象での高圧 導管網での状態変化を損なわないよう簡略化を 行っている。

異常時の対応訓練としては、地震発生時のガス 需要量変動対応訓練や熱量異常時の送出ガス引 き戻し、設備故障時の対応などが挙げられる。ま た、年々更新されるガス供給網システムの事前確 認・ロジック検証といった用途での活用も考慮さ れている。

図 2 に今回納入したシステムの構成図を示す。 訓練シミュレータサーバーでは Visual Modeler と FrontNet/Г 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 2 運転訓練システムのシステム構成

2.3. 連成計算機能

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、気液分離槽、反応器、蒸留塔、ポ ンプ・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。

プロセスプラント内の圧力と流量の関係は、ス タートアップ・シャットダウン操作、通常運転で のプラント負荷変更操作、異常事態時の操作等に より複雑に変化し、かつ、機器内の状態とも連動 しているため、Visual Modeler ではこれらの操作 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/Гは、図3に示すような"ボリュ ーム"と"ジャンクション"とから構成されるシミ ュレーションモデルであり、ボリューム(以下 Vol と表記)には配管が、ジャンクション(以下 Jct と表記)には配管が、ジャンクション(以下 Jct と表記)にはバルブやオリフィスが定義される。 FrontNet/Γではスタガード格子を採用しており、 Volには長さや体積が定義され、圧力、温度、密 度が質量保存式とエネルギー保存式によって解 かれる。Jct上には速度が定義され、運動量保存式 が解かれる。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、圧力項の離散化に起因 する定常状態の圧力チェッカーボード現象を防 ぐことができる。

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。



 \boxtimes 3 FrontNet/ Γ \mathcal{O} Vol \succeq Jct

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。

以下に、簡単な LNG 気化基地プラントを対象 としたプラントモデル構築の例を示す。この例で は、LNG の気化、熱量調整などのプロセス部分を Visual Modeler の弁、ポンプ、熱交換器、制御器 などの機器モデルを使用して構築し、ガスの送出 ならびに緊急時の放出ラインを FrontNet/Γを使用 して構築している。



図 4 LNG 基地簡易モデル(Visual Modeler)



図 5 ガス送出・放出ラインモデル(FrontNet/Γ)

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、おのおのに「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。

境界条件の設定は、流量を指定され圧力を返す か、圧力を指定され流量を返すかのいずれかをシ ミュレーションモデルの構造に応じて選択でき る。

図 6 に、このプラントモデルにおいて、Visual Modeler による LNG 基地モデル側で検知した送出 ガスの濃度異常で、FrontNet/Γ による送出・放出 ラインモデル側の放出ラインを開け、送出ライン のガスの引き戻し操作を行った場合の送出ライ ンのガス濃度変化と放出ラインのガス流速変化 のシミュレーションを行った結果を示す。

送出ガスの引き戻しにより、送出ライン入口の ガス組成が正常値に復帰している様子が分かる。 また、FrontNet/Γ では臨界流の扱いを行っている ので、放出ラインの流速はガスの音速で制限され ていることが分かる。



図 6 LNG 基地濃度異常時のシミュレーション

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。

もともとの Advance/FrontNet/Γ はバッチ処理系 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。

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
	ルヘセーブ
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

連成プログラムのフローを図 7 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。



図 7 連成プログラムのフロー

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 8 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。



図 8 実時間と8倍速の概念図

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よりも小さい時 間刻み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。

2.4. 陰解法機能の開発

前述のように、運転訓練シミュレータでは限ら れた訓練時間内に効率的な訓練を行うため、計算 精度を損なわないで倍速シミュレーションを行 う機能が必須である。

FrontNet/Γは前進差分スキームを用いた陽解法 を採用しており、特に、圧力波の伝播解析では、 後の記事に示すように実測値を精密に再現する ことができる。しかしながら、陽解法では計算精 度を保つためには時間刻みを小さくする必要が あり、都市ガス供給網のような大規模な配管網で は計算精度と計算負荷の問題から、運転訓練シミ ュレータとしての実用性が懸念された。そのため、 FrontNet/Γでは、新たに時間刻みを大きくとるこ とのできる陰解法による計算機能を追加するこ とにより高速化を行った。陰解法の詳細は本誌の 記事「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」で説明する。

2.5. パッシブスカラー機能の開発

本運転訓練シミュレータでは、あるステーショ ンに流入するガスがどの基地から送出されたも のかを表示して基地の負荷割合や送出時間を認 識する機能ならびに LNG 基地から送出された異 常熱量のガスが供給網のどこまで伝搬されたか、 放出操作を行った場合にどこまで引き戻された かを表示する機能を実現した。

FrontNet/Γ は多成分ガス系を取り扱うことがで きるため、都市ガス成分(メタン、エタン、プロ パン、ブタンなどの軽質炭化水素)の濃度変化に よる熱量変化はもともと計算可能である。またガ スがどの基地からのものかについても、トレーサ 成分を導入することで計算可能である。

しかしながら、本運転訓練シミュレータにおい ては、高圧プロセスであることから、物性計算法 として Peng-Robinson 状態方程式によるエンタル ピー、密度計算を行っており、この計算において 成分数を増やすことは、著しく計算負荷に影響す る。

Peng-Robinson 状態方程式は次式の通りである。

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b) + b(v - b)}$$
(1)

ここで、a(T)、bはi成分の臨界定数 Tc_i 、 Pc_i 、 偏奇係数 ω_i から以下のように計算される。

$$a(T)_i = a_{ci}\alpha(T)_i \tag{2}$$

$$a_{ci} = 0.45724R^2 \frac{Tc_i^2}{Pc_i}$$
(3)

$$b_i = 0.07780R \frac{Tc_i}{Pc_i} \tag{4}$$

$$\alpha(T)_{i} = \left[1 + m_{i} \left\{1 - \sqrt{\frac{T}{Tc_{i}}}\right\}\right]^{2}$$
(5)

$$m_i = 0.37464 + 1.54226\omega_i - 0.26992\omega_i^2 \tag{6}$$

混合物の混合則より

$$a(T) = \sum_{i} \sum_{j} (1 - k_{ij}) \sqrt{a(T)_{i} a(T)_{j}} x_{i} x_{j}$$
(7)

$$\mathbf{b} = \sum_{i} b_{i} x_{i} \tag{8}$$

ここで、*k_{ij}*は相互作用パラメータ、*x_i、x_j*はモル分 率である。従って、本運転訓練シミュレータでは、 計算精度を保ちつつ計算負荷を下げるため、都市 ガス 13A の代表成分組成と等価な物性値を示す 疑似成分を定義してシミュレーションを行って いる。このため、この2つの要求に対して、都市 ガス成分に対する Visual Modeler の物性計算を用 いず、FrontNet/Γ の保存式の計算で得られた密度 と流速をそのまま用いることで、濃度変化の単純 な移流方程式の扱いだけとするパッシブスカラ 一解析機能の開発を行った。

パッシブスカラーは、質量分率、体積分率、重 み付分率が定義できるようにしており、本運転訓 練シミュレータでは各 LNG 基地由来であること 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2種類のトレーサ成分を定義している。

パッシブスカラー解析機能の詳細は本誌の記 事「パッシブスカラー計算の実用性検討」で説明 する。

3. 事例紹介

Visual Modeler と FrontNet/Γの連成計算により、 実際の大規模ガス導管網を対象に計算した事例 を以下に紹介する。ユーザーの意向により、場所 が特定できるような情報や実際のステーション 名は伏せることとするが、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、メッシュ幅は 1km とし た。ガバナ、ガスホルダーおよび制御弁は Visual Modeler が計算し、FrontNet/Γ では配管の境界条件 およびバルブの開度が指示され、配管内の流動を 計算する。

3.1. 事例1 (ステーション遮断)

ある高圧導管網上のガスステーションを 15:00 に完全遮断することを想定した計算を 16:00 まで 実施した。ここで、遮断後もガバナや制御弁の影 響を考慮している。



図 9 ガス遮断時の経時圧力

図 9 に遮断先のステーションにおける圧力の 経時変化の計算結果を示す。グレーの実線は陰解 法、黒の点線は陽解法を使用した結果であり、両 者はほぼ一致した。遮断が起こってから約7分後 に測定点において圧力の降下が始まっている。圧 力の降下に遅れが見られるのは、流体の慣性の影 響である。その後、約50分かけて圧力が70%程 度まで下がっていることが分かる。このような考 察により、システムダウン時のサバイバル時間が 分かる。

計算速度は陽解法が実時間の3倍(60分の計算 を20分)、陰解法が実時間の12.6倍(60分の計算 を約2分)となり、陰解法は陽解法の4.2倍の計算 速度となった。なお、ここで使用した陽解法では 局所時間刻み法を併用しているため、通常の陽解 法より2倍程度高速化されており、陰解法では、 通常の陽解法の8.4倍の計算速度が達成されてい ることになる。

最大時間刻み1秒の制約がない場合、陰解法は さらに大きな時間刻み幅を採用して高速化でき るが、1秒毎の連成計算のため、今回の高速化率 が限界であった。

本事例では、陰解法による高速化の効果および その精度について確かめることができた。OTS と して現実的な時間内に訓練を行うことができる と考えられる。

3.2. 事例2(ステーション遮断)

事例1とは別のある高圧導管網上のガスステー ションを15:00 に完全遮断することを想定した計 算を17:00 まで実施した。

図 10 に遮断場所の下流側の圧力の経時変化を 示す。圧力変化の大きいところで陰解法と陽解法 がわずかにずれているが、圧力の変化が落ち着い たところでは両者は一致していることが分かる。 一般に、陰解法は変化の大きいところで陽解法に 比べて変化が鈍ることが知られており、ここでも 同様の現象が見られた。

図 11 に遮断場所のさらに遠方の下流側の流量 の経時変化を示す。この導管網では供給が遮断さ れると別の基地から供給がバックアップされる 仕組みであり、遮断後、流量が増えていることが 分かる。陰解法と陽解法は圧力の経時変化の差と 同様にずれている箇所が見られるが、流量変化の 少なくなったところで両者は一致している。計算 速度は事例1とほぼ同様の速度となった。本計算 より、バックアップの供給が正常に働き、圧力低 下を 25%程度で食い止めることができることが 確認できる。





図 11 ガス遮断時の経時流量

3.3. 事例3(基地由来パッシブスカラー解析)

仮想の導管網を想定し、パッシブスカラーによ る基地由来解析機能を使って、ガスがどの基地に 由来しているかの計算結果イメージを図 12 に図 示した。ここで、基地 A から送出されたガスは赤 で、基地 B から送出されたガスは緑で示されてい る。赤と緑が併記されている場所は基地 A 由来ガ スと基地B由来ガスが混合して流れていることを 示している。ガスがどの基地に由来しているかは、 消費点の消費流量とガスの送出能力に依存して 変化する。



図 12 基地由来解析の例

3.4. 事例 4 (熱量パッシブスカラー解析)

事例3と同様の仮想の導管網を想定し、パッシ ブスカラーによる熱量解析機能を使って、導管網 の各部のガス熱量計算結果イメージを図13に示 す。この結果では、基地Bからは高熱量ガスが送 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。



図 13 熱量計算の例

4. まとめ

Visual Modeler と FrontNet/Г 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、これを都市 ガス高中導管網 OTS へと応用した事例を紹介し た。OTS への応用のためには、FrontNet/Γ の高速 化や工夫が必要であり、高速化は陰解法を導入し、 基地由来および熱量解析機能は計算負荷を伴わ ないパッシブスカラー解析機能を導入すること によりこれを実現した。いくつかのパラメータス タディを実施し、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。今後、さらなる機 能改良を行っていく。

*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ある。

参考文献

- [1] 清水雅嗣、「ダイナミックプロセスシミュレ
 ータと管路系流体解析」、アドバンスシミュ
 レーション Vol18, (2014.1)
- [2] 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_front net/ (2017 年 5 月アクセス)
- [3] 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 5 月アクセス)
- ※ 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。)