

進化するダイナミックシミュレータ Visual Modeler

湯本 隆雅*

Takamasa Yumoto

1. Visual Modeler とは

Visual Modeler はバルブ、熱交換器、タンク、反応器、蒸留塔などのプロセスユニットと流量計、PID 制御装置などの計装ユニットを PFD (プロセスフロー図) イメージで配置し、物質の流れ(ストリーム)と情報の流れ(信号線)とでユニット間を接続するだけで、簡単に実行可能なダイナミックシミュレーションパッケージです。これまで化学、石油化学、電力などの分野で多く利用されています。2. ではこれまでの HP 社 EWS に加えて Windows NT をプラットフォームに加えながら、効率的な操作、拡大強化された標準ユニット、向上したモニタリング等により、さらに進化した Visual Modeler (V1.2) の機能について、3. では簡単な蒸留塔シミュレータの構築例、4. では今後の展望を説明します。

2. Visual Modeler の機能

2.1 ユニットとモジュール

現在のダイナミックシミュレータには、実時間でしかも精密に動作することが求められます。Visual Modeler は表 1, 2 のように機能別に標準ユニットが用意されており、必要なダイナミックスの計算を手軽に行えます。ユニットには、作成時にさらに詳細な動作内容の設定が可能です。各ユニットは大きさや素材、外部との接続状況、初期化時の物質質量、運転形態などを表現する変数を持っています。これらのユニット変数の多くは

* 株式会社 オメガシミュレーション 技術本部 パッケージ開発部 担当副課長

予め代表的な値が設定されていますが、シミュレーションしたいプロセスに応じて変更可能です。各ユニットは、シミュレーション開始時の初期化処理や状態に応じて切り替わる実行処理などいくつかのモジュールで構成されています。システムに予め用意されていない独自の機能をもつユニットは、ユーザユニットとして作成することができます。これは、ユニット変数宣言とユニットダイナミクスを表現するプログラム(C または、EQUATRAN)を設定することで行えます。プログラムで行うシステムとの変数値受け渡し、物性計算あるいは圧流設定(後述)のための操作ライブラリ関数が用意されています。

2.2 ストリームと信号線

ユニット間での物質の流れはストリーム(図 1 でユニット間を結ぶひし形に図形、たとえば D 塔トップの S211)で表現し、流量計と配管あるいはバルブとコントローラなどの機器間の情報の流れは、信号線(例えば図 1 で温度計 TI 2247 などと塔を結ぶ破線)で表現します。ストリームの流量と圧力は、接続されたユニットの圧流設定に応じてシステムが計算します。信号線は、計器など外部情報取得機能を持ったユニットと情報を取り出したいストリームやユニットを結びつけるときに利用します。DCS 計器間の接続にも信号線が用いられます。

2.3 物性計算法

表 3 に示すように Visual Modeler は物性ごとにさまざまな計算法が利用可能です。温度の 2 次

表1 プロセスユニットモデル一覧表

バルブ	手動操作弁 絞り弁 ON/OFF 弁 空気式自動弁 絞り HW 付 ダンパー ON/OFF 弁 モーター弁 一般自動弁 3 方分岐弁 絞り ON/OFF 3 方混合弁 絞り ON/OFF 逆止弁 安全弁 大気放出 ライン内 シーケンス弁 調圧弁 制御弁ブロック プリーザ弁	混合・分流	混合点 (2~10 流体) 分流点 (2~10 流体) ヘッダー 2~8 混合・分流 均圧	相平衡分離器	フラッシュドラム 水系 汎用 簡易	
		系外との出入	系外から 定圧 流量指定 逆流あり 系外へ 定圧 流量指定 逆流あり 大気取込 大気放出 プロセス間接続 スタック	蒸留塔	デカンタ 棚段・吹込型 棚段・リボイラ型 充填・吹込型 充填・リボイラ型 包括棚段・吹込型* 包括棚段・リボイラ型* 包括充填・吹込型* 包括充填・リボイラ型* 複合棚段・吹込型* 複合棚段・リボイラ型* 複合充填・吹込型* 複合充填・リボイラ型*	
ポンプ	遠心式 逆止弁つき 逆止弁なし 回転数制御 往復式 容積式	熱交換器	液タンク	コーンルーフ型 密封 攪拌付き	圧縮機/送風機	遠心式圧縮機 往復式圧縮機 送風機 (ベーン付) 真空ポンプ エジェクタ
			ガスタンク	常圧 密封	タービン	汎用ガスタービン 蒸気タービン
配管系機器	一般配管 ムダ時間配管 漏れ配管 U字管 制限オリフィス ストレーナ 単独 前後弁付 切替付 ガスフィルター トラップ 系外排出 ライン内排出 放熱付き 容量付き配管 整流配管	蒸発器 蒸気加熱 顕熱加熱 サーマサイホンリボイラ 顕熱加熱 蒸気加熱 全縮器 分縮型熱交換器 蒸発-全凝縮器 蒸発-分縮器 顕熱型熱交換器 汎用熱交換機 1 流体型熱交換器 出口状態指定 高温側/低温側 空令式熱交換器 多流体熱交換器 回転蓄熱式熱交換器* ジャケット	ポット	炉	加熱炉	
			反応器	汎用気相反応器 攪拌槽型反応器	ボイラー機器	ボイラドラム* 脱気器* その他*
				その他	冷水塔 (可変回転数) 圧縮機タービン接続*	

*印はオプション提供のユニット

式で計算する方法は大規模プラントや、計算時間のかかるユニットモデルを多数含むプラントでの実時間実行に適しています。プロセスに応じて、ユーザー定義の物性計算を追加利用することも可能です。また、システム内蔵の純成分に加えてユーザー定義の成分を追加できます。物性計算法はユニットやストリーム毎に異なるものを設定できますので、システムに数種類の物性計算法を登録しておけば、制度のよい計算を効率よく行うことが可能です。

2.4 プラントと規模

Visual Modeler で一度に行うシミュレーションの対象範囲をプラントといい、大きなプラントは作業効率を向上させるために分割したプロセス

で構成します。各プロセスは表示する画面サイズに合わせてページを切り替えて編集することが可能です。ユニット数、ストリーム数は名称が重ならない範囲内で数の制約はありません。プラントの装置と制御系を別のプロセスに分けて作成し、解析のために複数の制御系プロセスを切り替えたり、シミュレーションの目的に応じてフィード工程、出荷工程など分割したプロセスの必要部分を組み合わせることが可能です。ダイナミックシミュレーションの負荷が CPU、メモリーなど計算機能力に対して過大にならないように調節することができます。

2.5 入出力とプロセス間信号線接続

上記のように、分割されたプロセスの間でも、

表2 計装ユニットモデル一覧表

一般測定器	流量計 絞り 面積式 容積式 真値流量計 温度計 配管用 装置用 液面計 液密度差圧式 汎用 圧力計 配管用 装置用 浸水型 差圧計 配管用 装置用 濃度計 配管用 装置用 粘度計 配管用 装置用 密度計 配管用 装置用 電流計 電力計 回転計	DCS 演算器	四則演算器 加算器 (2/3/4 入力) 乗算器 割算器 開平器 セレクター ハイ (2/3 入力) ロー (＃) シグナルセレクター 信号分岐 2 出力 3 出力 進み/遅れ器 1 次遅れ 進み遅れ むだ時間 むだ時間+1 次遅れ むだ時間補償器 m-n 次伝達関数 関数発生器 定数設定 正弦/三角/矩形波 折れ線近似 M系列信号 論理回路 AND (2/3 入力) OR (＃) NOT EOR (2/3 入力) IF MEMORY TIMER 2of3 回路 BYPASS 回路 AUTOBYPAS 回路 レンジ変換器 微分器 積分器 ランプ器	ワンループ 制御器	流量制御 PI/PID 温度制御 PI/PID 液面制御 PI/PID 圧力制御 PI/PID
				ワンループ 演算器	加算器 セレクター ハイ ロー 1 次遅れ 関数発生器 正弦/三角/矩形波 折れ線近似 論理回路 AND OR NOT レンジ変換器
特殊測定器	フレームアイ 百葉箱 酸価分析計* リミットスイッチ			配線関係機器	配線 端子盤 配列変換 (スカラー/ ベクトル /マトリクス)
ローカル/リモ ート型制御器	位置型 PID 速度型 PID バッチ PID オンオフ制御 比率制御器 手動操作器 バッチ設定器 2 位値スイッチ 3 位値スイッチ			高度制御機器	2 自由度 PID*

*印はオプション提供のユニット

ストリームや信号線によって接続することができます。任意のユニット変数は「公開」を指定することによって他のプロセスからの接続が可能になります。公開された変数は、Visual Modeler 内だけでなく外部のデータベースやツールからもアクセスすることができるようになります。

2.6 シミュレーション実行

Visual Modeler では、作成されたプラントのシミュレーションを開始する際に「実行」操作を行い各ユニットの変数設定値やユニット間の接続の正当性、必要な物性成分の有無などをチェックしてプラント構成の不具合がないことを確認することができます。「起動」で各ユニットに設定された変数を元にすべてのユニットやストリームの状態を初期化し、シミュレーションを開始可能な状態(初期状態という)を作成します。シミュレーション開始後いつでもこうした全てのユニット、

ストリーム、Visual Modeler システムが管理する共通変数の状態をファイル(初期状態ファイル)に保存することができ、作成済みの初期状態ファイルを読み込むことでその状態からシミュレーションの続行が可能です。また、Visual Modeler では初期状態読み込みの実行時に、プラントの構成が初期状態を作成した時点からユニットの追加、削除などで変更されていた場合でも、変更されていないユニットやストリームの状態を復元するように工夫されています。

2.6 実行周期とタイムスケール

ダイナミックシミュレーションでは、ユニットのダイナミクスに時定数の小さなモードがある場合や、制御系のサンプリング周期を変更したい場合があります。その際 Visual Modeler では、実行周期を設定することができます(基本周期は 1 秒)。また、時定数の大きなプロセスのシミュ

レーションを高速に行いたいとき、制御系を変更せずに定常状態を見極めたいときなど、実時間より高速でシミュレーションしたいときにタイムスケールを2倍、8倍速など指定すれば実時間の2倍、8倍の速度で実行可能です。逆に、大規模なプラントや計算機の処理能力が小さい場合に、外部と実時間で状態の受け渡しが必要であれば、実行周期を大きくして計算量を減らし、実時間対応することも可能です。

2.7 圧流計算

上記のように、各ユニットは物質収支や熱収支を考慮したダイナミクスをモジュール内で定義しており、システムに設定された実行周期で順次これらのモジュールの計算が行われます。同時にストリームが接続されるユニットには、圧流に関する以下の関係式(圧流設定)が定義されています。それらは、圧流設定をユニットで結びついたストリームの流量間には、ユニットの物質収支による関係式(流量制約式)と流量と圧力間の圧力損失関係式です。Visual Modeler では、こうしたストリームの流量とそれによって変化するストリーム圧力に関して、ストリームを通して影響しあうユニット全ての状態を考慮してシステムが計算します。その際システムは、ユニットがストリーム接続端ごとに定義されたダイナミックに応じて変化する圧力(差圧)と流量の関係を各ユニットが行う「圧流設定」から抽出し、関連し合うユニット間の関係を連立させて計算します。これにより、

大規模プラントでも安定かつ高速にシミュレーション実行が可能になります。

2.8 スナップショットとステップバック

Visual Modeler では指定した初期状態ファイルに書き出すことなく、実行中のシミュレーションの状態を、GUI 操作または指定した頻度で自動的に保存するスナップショット機能を備えています。初期状態ファイルを読み込むのと同様、スナップショットを作成した状態を再現するステップバック機能も備えています。

2.9 自動操作

完成されたプロセスでバルブの開閉や装置のON/OFF など操作手順が定まり、自動的にその操作をシミュレーションしたい場合に自動操作機能を利用することができます。自動操作は、時刻や任意のユニットの変数が指定の条件を満たしたときといった実行条件と、そのとき行うべき操作内容によって構成します。操作内容は、ユニットやストリーム変数の設定、スナップショット実行、ステップバック実行、スケール変更、ユニットのプロシージャの休止・実行、入出力の休止・実行などを定義可能です。この機能は、デモンストレーションや、プラントの一部の操作を自動化した部分的なトレーニング、簡単な異常状態の実行、制御系の切り替え、一部プロセスの切り離しなど多くの応用が可能です。また、操作ファイルの結合もできるようになっており、容易に編集可能です。

表3 物性計算法の一覧

物性	計算法	物性	計算法
気液平衡係数	(1) 理想溶液 (Antoine 式+Raoult 則) (2) 理想気体+液活量係数 (Wilson 式) (3) 理想気体+液活量係数 (NRTL 式) (4) 理想気体+液活量係数 (UNIQUAC 式) (5) SRK 式 (6) PR 式 (7) 蒸気表の近似式 (水単成分系) (8) ユーザー関数 (9) 上記に対するフリーウォーター指定	密度	(1) 理想気体 (気) (2) 温度の2次式 (液) (3) 指数近似式 (液) (4) SRK 式 (気、液) (5) PR 式 (気、液) (6) 蒸気表の近似式 (水単成分系、気、液) (7) ユーザー関数 (気、液)
		粘度	(1) 温度の2次式 (気、液) (2) 指数近似式 (液) (3) 多項式 (水単成分系、気、液) (4) ユーザー関数 (気、液)
液液平衡係数	(1) NRTL 式 (2) UNIQUAC 式 (3) ユーザー関数		
エンタルピ	(1) 温度の2次式 (気、液) (2) SRK 式 (気、液) (3) PR 式 (気、液) (4) 蒸気表の近似式 (水単成分系、気、液) (5) ユーザー関数 (気、液)		

2. 10 モニタ機能

シミュレーション実行時にはスタートアップから定常、あるいは異常状態でプロセス内で管理、監視すべき情報は変化していきます。通常の実プロセスではそうした情報の多くは計測器を通してDCSなどで監視されます。Visual Modelerでは計器出力の時間的な変化をグラフまたは数表で観察するトレンド機能や、重要な装置情報と関連操作を一画面での観察操作を可能とした監視パネルの機能があります。トレンドや監視パネルはプロセスの状態に合わせて必要な組み合わせで用意しておけば、状態に合わせて必要なモニタ情報をすぐに参照することができます。また、トレンドや監視パネルへの表示登録変数は計器に接続されていないユニット内部変数やストリーム変数を選ぶことができます。ユニットやストリーム変数値は、PFD上に数値を定周期で更新する表示設定ができますので、短時間でプロセスの状態を把握する

ことが可能です。さらに、プロセス全体での物質収支や組成情報を確認あるいは解析するために複数のストリームの圧力、温度、組成、流量などを表形式で表示するストリーム表の機能を利用することができます。

3. 蒸留塔ユニットとシミュレータ

3. 1 蒸留塔ユニット

Visual Modeler が標準で備えるユニットの1つ蒸留塔は棚段式と充填式の大きく2形式あります。ユニットの選択時にこの形式とボトムにリボイラを接続するタイプか吹き込むタイプかを選択し、フィード段数とサイドカット段数をプロセスにあわせて設定します。図1の例ではリボイラ型棚段塔でフィードが2つ、サイドカットはなしですが、その他に塔底と塔頂からのプロダクトストリームが接続できるユニットになっています。サイドカットのあるユニットの場合には、液だめを

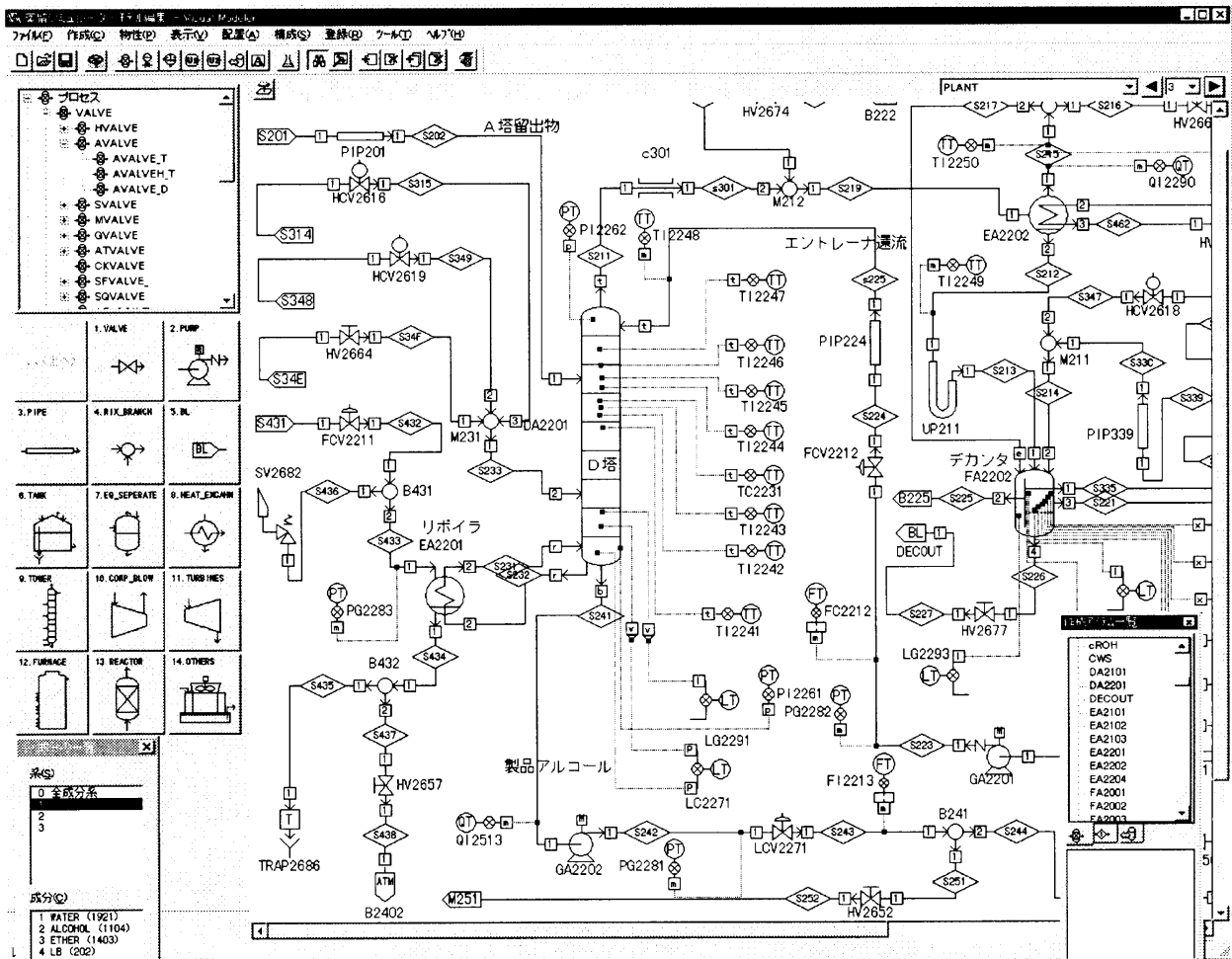


図1 蒸留プロセスシミュレータ

追加設定することもできます。作成時に蒸留塔の段数を入力し、実行前にサイドフィード段、液成分ホールドアップ、気組成、各段温度、塔頂圧力など初期化に必要な変数の設定と塔重量、塔容積、塔断面積、せき高さなどサイズに関する変数、さらに塔本体比熱、放熱伝熱係数など熱バランスに関する変数、その他圧損係数、最大液流量などユニット独自のダイナミクスを定める変数などを設定します。このうちいくつかはデフォルトの値がありますから、制御系の動作確認などにはそのまま利用することもできます。実プロセスが存在する場合にはその設計値や実測値を設定します。棚段式、充填式ともに理論段ベースのモデルを採用しています。蒸留塔ユニットの物質収支式には、各段で上段からの流下液量、下段への流下液量、下段からの蒸気流量、上段への蒸気流量にフィード段ではフィード流量が加味されます。熱量の収支式には液量、蒸気量、フィードによる熱の出入りと蒸留塔壁または、外部との熱伝達が含まれます。蒸留塔内のダイナミクスとして、棚段式の場合各段からの流下液量は格段上のホールドアップのせきを超えた高さで液流下係数から計算します。充填式では容積あたりの駅ホールドアップの関数として計算します。各段の蒸気量と温度とは各段の熱バランスと気液平衡関係とから計算されます。塔頂の圧力は塔内の気相ホールドアップから計算され、各段の圧力は蒸気流量と段上ホールドアップによるヘッドと圧力損失から計算します。この蒸留塔モデルの特徴は、塔内に液のないドライ状態からのシミュレーションが可能であり、特に高速で安定な計算法を採用しているのでプラントのスタートアップの検討から異常時の安全性など広範囲で利用することができます。

3. 2 シミュレータ

簡単な例として、アルコール、水とエントレーナを含む共沸蒸留系の精製プロセスを図1に示します。このシミュレータはDCSと接続した本格的なトレーニングシミュレータ用のもので、起動、停止用のラインや現場計器やDCS監視計器類も含めて精密なモデル化が行われています。詳細は文献¹⁾を参照してください。

4. 今後の展望

Visual Modelerは、単体のシミュレータのみならず、DCS(分散制御システム)と接続して実際のオペレーションマシンを利用する本格的なトレーニングシミュレータ、教育システムのプラントモデルエンジン、またはDCSでの監視や操作や現場操作をGUIで模擬する簡易シミュレータのコアシステムとして利用されています。特徴であるわかりやすい操作性、ユニットモデルをCやEQUATRANで手軽に追加、編集可能で、物性計算法の追加、変更を容易に行えるなどの柔軟性を維持し、今後も標準やオプションユニットの追加、外部アプリケーションとの情報交換機能などを増強していきます。現場計器や計装設備など実機の操作、監視をGUIから操作する環境構築ツール、Visual Modelerだけでなく外部とリアルタイムで利用可能なタグデータベース機能、スプレッドシート形式のタグ登録、編集ツールなどさまざまなユーティリティと連携しながら、広範囲のニーズに応えるシミュレーション環境を提供します。

参考文献

- 1) 木村哲雄, *et al.*: ケミカルエンジニアリング, 40(2), 79-85 (1995)

