

(解説)

プロセスシミュレータによる設計および開発プロセス変革への取り組み

四木悠貴^{*1}・植田 達^{*1}・森田 啓^{*2}

Transformation of Design and Development Processes with Dynamic Process Simulator

Yuki SHIGI・Tatsuki UEDA・Kei MORITA

要旨

当社は、流体を扱う圧縮機のプロセス解析のためにシミュレータを開発した。シミュレータの適用により過渡状態における制御システムの応答を設計初期段階から検証することが可能となる。また、当社のシミュレータは実機の制御プログラムと接続するHILS (Hardware-in-the-Loop Simulation) 機能も有しており、機械に搭載される制御プログラムの妥当性も検証することが可能である。本稿では複雑な圧縮機プロセスの設計検証に適用できるシミュレーションツールの紹介、およびモデルベース開発を基にした開発工数短縮への展望を述べる。

Abstract

Kobe Steel has developed a simulator to analyze the process of compressors that handle fluids. The simulator's application enables the verification of control-system responses in transient states from the initial design stage. Additionally, Kobe Steel's simulator is equipped with Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) functionality, allowing the validation of control programs before installation in the machine. This paper introduces a simulation tool that can be applied to the design verification of complex compressor processes. It also discusses the outlook for reducing development time using model-based development.

検索用キーワード

圧縮機, シミュレーション, モデルベース, スクリュー, レシプロ, ターボ, コンプレッサー, HILS

まえがき=圧縮機を含むプロセスシステムには、時々刻々と変動する流体の圧力、温度および流量を制御するために調節弁や圧縮機の各形式特有の容量制御機器が搭載されている。これらの機器は圧縮機の保護および運転条件に応じたプロセスの状態を実現するために、DCS (Distributed Control System) やPLC (Programable Logic Controller) などのシステムによって制御されている。

CN (Carbon Neutral) 社会の到来に伴い、非汎用圧縮機分野でも水素やアンモニアといった非化石燃料を使ったガスタービンの燃料ガス供給用途やCCS (Carbon dioxide Capture and Storage) 用途などの需要が増加している。これらの新たな用途に対して、例えばガスタービンの燃料消費量が急変したときの流量制御や、高圧プロセスによる超臨界状態のCO₂を物性の変化に応じて制御することが求められる。このような複雑なプロセスや新たな用途の制御設計において、プロセスが変動する過渡部に潜むリスクを網羅的に机上で抽出することが課題である。

当社は、設計段階から圧縮機プロセスのリスクを検証できる物性情報を含んだダイナミックシミュレーションツールを開発した。本稿ではその概要を紹介する。

1. 圧縮機プロセスシミュレーション技術

開発した圧縮機プロセスシミュレータの概要について紹介する。シミュレータの計算プラットフォームには汎用数値解析ソフトウェアであるMATLAB/Simulinkを使用した。ガスの物性計算には冷媒熱物性データベースを用いている。

1.1 シミュレーションモデル

当社にはスクリー式、ターボ式およびレシプロ式圧縮機の性能を模擬できるシミュレーションモデルがそろっている。図1に開発したシミュレータのモデル例を示

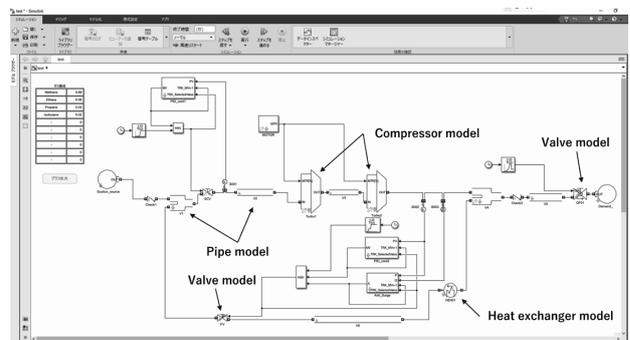


図1 圧縮機プロセスシミュレータモデル例
Fig.1 Example of process simulator model for compressor

^{*1} 機械事業部門 技術本部 メカトロ技術部 ^{*2} 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

す。本シミュレータは圧縮機の諸元と特性式に基づいて圧縮機の圧縮過程と熱収支をモデル化し、配管、熱交換器、吐出圧力調整弁などを加えて圧縮機ユニット全体をモデル化することで、起動および停止動作や制御パラメータ変更時の過渡応答を再現できる。シミュレーションモデルは圧縮機、弁、配管、ガスクーラなどの機能ごとに分かれたモデルから構成され、時刻tにおけるプロセスの状態量（圧力、温度、流量）および制御信号を各モデル内で演算する。その結果を隣接するモデル間で双方向に受け渡し、時間刻みΔt後の時刻t+Δtにおける状態量を逐次計算する。時間積分法は、MATLAB/Simulinkの固定ステップソルバBogacki-Shampine¹⁾を用いる。

(1) 圧縮機モデル

圧縮機本体モデル（スクリュ式、ターボ式、レシプロ式）の中で、代表例としてターボ式圧縮機モデルを紹介する。圧縮機モデルでは、理論計算とガス物性データベースを組み合わせて、吐出流量、吐出温度および動力を計算する。モデルには圧縮機入口および出口のプロセス状態量のほか、圧縮機回転数および吸込ガスを調節できるIGV（Inlet Guide Vane）開度指令値を変数として入力できる。当社の性能計算プログラムから作成した圧縮機特性テーブルと、圧縮機回転数、IGV角度およびヘッドから圧縮機の吐出流量を導出する。吐出温度は、下流側のモデルにて演算された圧力と、圧縮機出口のエンタルピーから冷媒熱物性データベースを用いて導出する。

一品一様に設計された圧縮機ごとに、前述した圧縮機特性テーブルの変更や理論式をベースに最適化された圧縮機モデルに変更することで様々な形式と仕様の圧縮機に対して高精度な演算を実現できる。

(2) 弁モデル

モデルは弁前後の圧力から弁を通過する流量を計算するモデルであり、弁前後圧力差に応じて式（1）あるいは（2）を用いて計算する²⁾。P_{in}-P_{out}≤0.5F_L²P_{in}のとき、式（1）を使用し、それ以外のときに式（2）を用いて計算する。

$$Q = \lambda_1 C_v \sqrt{(P_{in} - P_{out})(P_{in} + P_{out})} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = \lambda_2 C_v P_{in} \dots\dots\dots (2)$$

P_{in} : 入口圧力

P_{out} : 出口圧力

C_v : 弁が有する固有の流量係数

λ₁, λ₂ : 弁開度、ガス密度、温度から決まる係数

F_L : 圧力回復係数

このほか、弁操作の応答特性として弁ストローク速度、無駄時間、動作遅れを模擬できるモデルとした。

(3) 配管モデル

配管モデルは任意のボリュームに対するガスの流入出による圧力および温度変化の計算を行う。各計算ステップにおける配管内の熱量変化量を積分計算することで配管内の温度を計算する。同様に、流量変化量を積分計算することで配管内部に存在するガス質量を演算し式（3）

から圧力を計算するモデルである。複数のポートを有する多ポート配管に対しても同様である。

$$P = \frac{MRT}{V} \dots\dots\dots (3)$$

P : 配管内圧力

M : ガス質量

R : 気体定数

T : 配管内温度

V : 配管体積

(4) 熱交換器モデル

熱交換器モデルは異なる流体間で熱交換を行うモデルであり、熱伝達係数や伝熱面積などから導出される移動単位数（NTU（Number of Transfer Units））を用いて温度計算を行う。いっぽうで、ガスクーラのように冷却水など十分な冷却能力を持った冷媒を用いる場合、プロセスガスは冷媒によって指数関数的に冷却され、十分冷却が進むと冷媒温度に漸近するとみなすことができるため、式（4）により入口温度から出口温度を導出する。

$$T_{out} = e^{\gamma}(T_{in} - T_w) + T_w \dots\dots\dots (4)$$

T_{out} : ガスクーラ出口温度

T_{in} : ガスクーラ入口温度

T_w : 冷媒温度

ここでγはガスクーラの設計変数であるガスクーラ入口と出口の温度、冷媒温度、およびガス流量に関して設計値と計算値の比率に基づいて決定する係数である。

(5) その他のモデル

上記四つのモデルのほかに、PID制御モデル、逆止弁モデル、計器モデル（圧力計、温度計、流量計）を備えており、必要に応じて組み合わせることで目的のプロセスシミュレーションを実行することができる。

1.2 実機稼働データとの比較検証

シミュレーションモデルの妥当性を検証した事例の一つとして、ガスタービンへの燃料ガス供給用途で使用したターボ圧縮機ユニットの評価結果を紹介する。ユニットの構成を図2に示す。ユニットの構成は、2段ターボ圧縮機、圧縮機を可変速運転できるVFD（Variable Frequency Drive）、圧縮機吸込圧力を調節する吸込圧力調節弁、バイパスガス温度を冷却する熱交換器および吐出風量または吐出圧力を調節し、かつサージ防止を担うバイパス弁が搭載されている。

プロセスの初期値および、時間軸を実機に合わせ、実

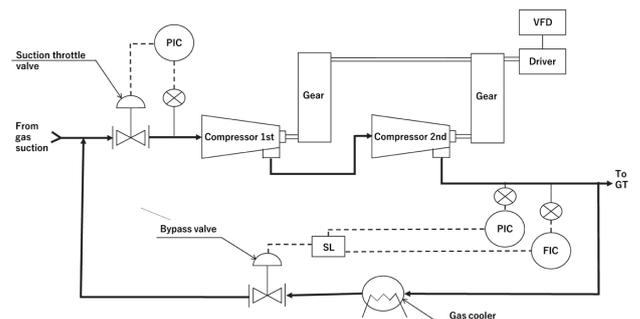


図2 ガスタービン用燃料ガス圧縮機系統図
Fig.2 Process diagram for gas turbine fuel gas booster compressor

機とシミュレーション結果の比較を実施した。比較範囲は駆動機の起動から昇圧完了までを対象とした。比較対象を圧力（図3）、温度（図4）とし、結果を物理量ごとに示す。横軸は時間、縦軸は各物理量を正規化した値で表す。破線は実機データ、実線はシミュレータによる演算結果を示す。

実機データを基準とし、比較範囲内でのシミュレーション結果の平均誤差を過渡状態と昇圧完了後の定常状態に分けて表1に示す。

圧力は定常時で1%以下の範囲に収まっているが、過渡時では吸込圧で3.2%、吐出圧で1.3%と大きくなっている。これは調節弁のCV値や立上り、立下りに関する時定数の誤差によるものと思われる。指令値に対して、調節弁CV値や動作遅れに実機とシミュレーションで誤差があるため、調節弁を通過する流量にずれが生じ、圧力に影響をおよぼしていると考えられる。

温度は、定常時において誤差の増加が見られる。この誤差は、実機環境下で発生する周囲温度とプロセス流体の温度差による入熱および放熱のような外乱の影響によるものと考えられる。

1.2節では圧縮機プロセスシミュレータの性能について述べた。実機とシミュレーション結果の誤差は約3%となっており、実機をよく表現できている。また、プロセスの挙動や傾向といった過渡状態を良く再現できており、プロセス制御設計を検証できる性能を十分に有して

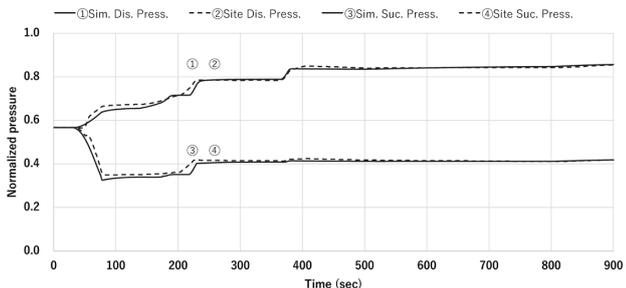


図3 吸込および吐出圧のシミュレーション結果と実機データの比較
Fig.3 Comparison of simulation results for suction and discharge pressures with actual data

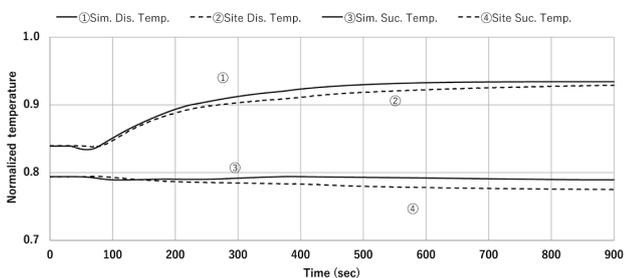


図4 吸込および吐出温度のシミュレーション結果と実機データの比較
Fig.4 Comparison of simulation results for suction and discharge temperatures with actual data

表1 過渡状態および定常状態の平均誤差

Table 1 Average error of transient and steady part

	Suc. Press.	Dis. Press.	Suc. Temp.	Dis. Temp.
Transient part error (%)	3.2	1.3	0.7	0.8
Steady part error (%)	0.5	0.3	1.8	0.9

いることを確認した。

2. 圧縮機プロセス制御のHILS技術

制御システム開発の効率化とプラント立上げ時の失敗リスク低減において、HILS (Hardware In the Loop Simulation) 評価技術が有効な手段となる。HILSは、自動車分野ではエンジンや変速機、ECU (Electronic Control Unit) などの開発³⁾、鉄道分野では走行安定性の仮想試験⁴⁾などで活用されており、開発の大幅な効率化や性能・品質の向上に寄与している。そこで1章にて解説したシミュレータを実機の仮想モデルとして活用し、PLC制御装置と組み合わせて、圧縮機プロセス制御の妥当性や運転法案を試運転前に検証できるHILSシステムを構築した。図5に構成機器および各機器間での信号の流れを示す。本システムは、圧縮機プロセスシミュレータ、PLC、SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) から構成される。

まず、弁の開度指示値のような操作信号がPLCからシミュレータに送信され、操作信号に基づいてプロセスの状態量（圧力、温度、流量）をリアルタイムでシミュレータが導出する。同時にシミュレータで演算されたプロセス状態量がPCメモリを介してPLCに渡され、次の目標動作を決定する。

当社において、従来は図6に示すようにプロセスの変動に対するプログラムの応答を評価できるのは、実機の試運転時とならざるを得なかったが、HILS技術を活用することで、これまで机上のシステム検証では確認できなかった昇圧中や負荷変動時といった過渡状態でのプロセスの応答を事前に確認することができる。事前にプログラムや運転法案を最適化することによって、現地で

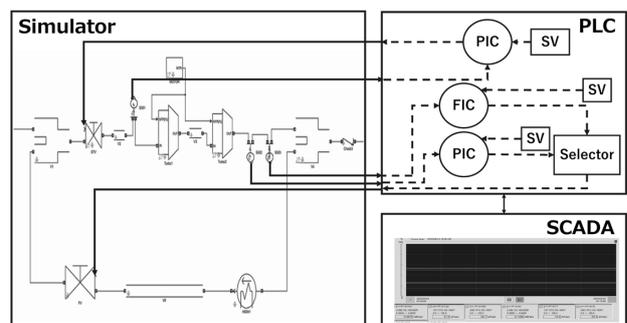


図5 HILSシステム構成図
Fig.5 HILS system architecture

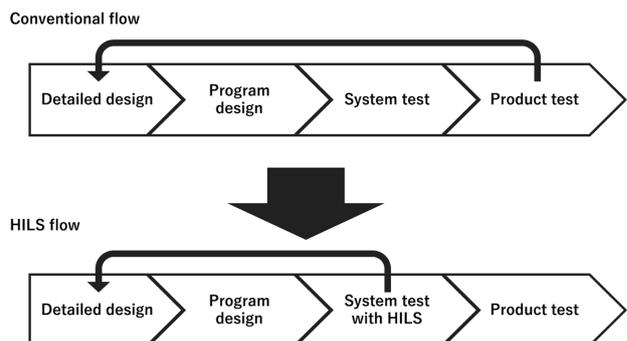


図6 プログラム設計フロー
Fig.6 Program design flow

の調整や不具合を最小限に抑えることができ、試運転期間を短縮することができる。

3. 今後の展望

本稿で解説した技術を活用することにより設計の初期段階から実機を伴わないリスク検証を行うことが可能となる。設計の各段階においてシミュレータを適用することで設計効率の改善や高品質な機械を提供することを目指す。

具体的にはフィード段階における適切なユニットのサイジングや圧縮機制御方案の検証、設計段階では、HILS技術を用いた運転方案に応じたプロセスの検証や制御システムの妥当性検証、また現地試運転時に発生した不具合事象を再現し、迅速な原因究明と解決策の提示を実現できると考えている。

加えて、今回開発したシミュレータを活用することで、機械が故障した際の挙動を再現することができる。実機では様々な故障が発生する可能性があるが全ての故障モードに対して十分なデータを取得することはできない。そういったデータが不足する場合でもシミュレータで事前に予測し、それを基に実プロセスデータから早期に状態を予測する診断技術として展開することができる。実機に対してシミュレータをリアルタイムで並列に演算し比較することで、機械の故障や経年劣化による性能を予測する診断機能や運転状態に合わせた最適制御といったアフターサービスにも本技術の展開を検討している。

また、自動車分野を中心にシミュレーション技術を活用したモデルベース開発 (Model based development) という考え方が広まっている。モデルベース開発とは図7に示すように、コンピュータ上で機械をモデル化し、設計初期段階から机上でシミュレーションによる検証を行いながら開発を進めていく手法である。産業機械分野にこの開発プロセスは同様に当てはめることができ、本稿で解説したシミュレータを活用することができる。例えば、基本設計時は制御モデルも含んだシミュレータによる机上でのモデル検証 (MILS (Model In the Loop Simulation)) や実機製作前に制御プログラムと接続し制御システムの妥当性検証 (HILS) に活用できる。

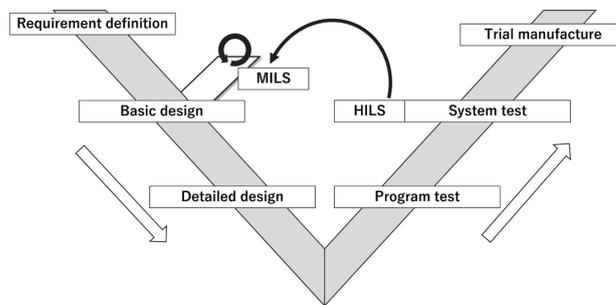


図7 モデルベース開発の流れ
Fig.7 Model based development flow

むすび=今後、CN社会の到来によって、需要増が見込まれる水素、CCSのような、CN用途や多段圧縮機のような複雑かつ前例の無いプロセスに対して、高品質な性能を有する機械が求められる。機械の性能を正しく評価するために、前述したモデルベース開発の考え方を適用し、コストと時間を最小限に抑えつつ、高品質な機械を開発、検証できるツールは、顧客要求が大きく変化するCN社会の初期である今、必要不可欠であると考えている。当社としては本稿で述べた技術の発展に今後も注力し、環境変化に伴う新たな領域でのニーズに迅速に対応するため、今回開発したプロセス全体の動的シミュレーション技術をコア技術とした構造解析と流体解析の連成解析技術により、構造的な成立性を担保し、さらなる開発サイクルの短縮や安定稼働を実現する高品質な製品を開発する設計開発力の強化を見据えた開発を進めていく。

また、様々な事業を有する当社において圧縮機事業だけではなく他機種、他部門への技術の展開も検討し、さらなるモノづくり力の向上を目指していく。

参考文献

- 1) P. BOGACKI, L.F. SHAMPINE. Appl. Math. Lett., 1989, Vol.2, No.4, pp.321-325.
- 2) 土屋喜一. 計測と制御. 1964, Vol.3, No.9, p.702-704.
- 3) 奥田尚住ほか. 計測と制御. 2010, Vol.49, No.4, p.250-254.
- 4) 山口輝也ほか. 日本機械学会論文集. 2013, Vol.79, No.806, p.3420-3431.