

EQUATRAN-Gによる連続加熱炉最適制御系の開発

Development of an Optimization Control System for a Continuous Reheating Furnace in Which EQUATRAN-G is Utilized

向 畑 弘太郎^{*1} 若 杉 宏 之^{*2}
MUKOHATA Koutarou WAKASUGI Hiroshi

運転支援システム、教育・訓練システム、高度制御システムを構築する上で、モデリング技術・シミュレーション技術は重要な要素技術のひとつである。方程式解法ソフトEQUATRAN-Gは、方程式を記述するだけで種々のモデルを計算することができ、これらのシステムのダイナミックモデルを効率的に作成することができる。本稿では、EQUATRAN-Gの機能を述べ、最適制御系の開発にEQUATRAN-Gを用いた事例を示す。

Modeling and simulation technology is one of the key factors in the development of operation support systems, operation training simulators and advanced control systems. EQUATRAN-G, all-purpose equation solver, enables the calculation of various types of mathematical models by simply describing equations. Therefore, it is possible to create the dynamic models for these systems efficiently. This article describes the functions of EQUATRAN-G. It also shows the actual example in which EQUATRAN-G is utilized in an optimization control system for process modeling.

1. はじめに

プラントを適切にそして最適に運転する上で、ダイナミックシミュレーション技術が重要な役割を果たすようになってきている。ダイナミックシミュレーションを大別すると、

- ・ 新設/既設プラントの運転方法・制御方法の検討・改善、高度制御システムの開発・検証などオフラインで利用される場合
- ・ 運転訓練シミュレータ、DCS制御ロジックの開発・検証、プラント診断システムの開発・検証、プロセス/制御技術者・運転員のためのプラント教育など擬似的なオンラインで利用される場合
- ・ 予測シミュレーションに基づく運転支援、連続プラントの非定常操作最適化などオンラインで利用される場合があるが、どのような利用形態においても、プロセスの挙動を模擬するモデルをどのようにして作成し、数値計算を行うかが問題となってくる。

ここで紹介するEQUATRAN-Gはモデルの構築、及びモデルの計算をプログラミングせずに方程式レベルで行うことができ、その意味で「数値計算の簡易言語」と言えるものである。さらにその応用事例として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から日本工業炉協

会が受託した「高性能工業炉開発プロジェクト」において、当社が実施した制御系の開発を取り上げることにする。

2. EQUATRAN-Gの紹介

2.1 EQUATRAN-Gとプログラミング言語との違い

EQUATRAN-Gとプログラミング言語との違いを図1に示す。

この図は問題を解く場合のアプローチの違いを示しており、左側がFORTRANやBASICなどのプログラミング言語の場合である。数式モデルを作成した後、まず計算の手続き、すなわちアルゴリズムを考える。このとき、線形・非線形方程式や常微分方程式などが含まれる場合

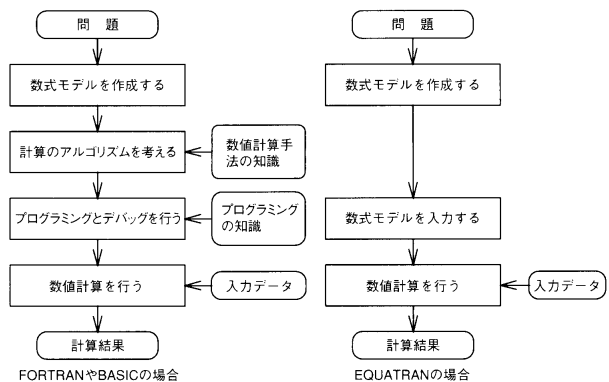


図1 問題解法のアプローチ

*1 IA事業本部 第2営業本部 鉄鋼営業部

*2 株式会社オメガシミュレーション

は、それぞれの数値計算の手法(たとえば、常微分方程式を解くのであればルンゲ・クッタ法など)の知識が必要になる。次にそのアルゴリズムにしたがってFORTRANやBASICによりプログラムを作成し、正しく計算できるように誤りを修正する(デバッグする)。その際、その言語の文法などプログラミングの知識が要求され、また多くの時間と労力が必要となる。

これに比べ図の右側のEQUATRAN-Gの場合は、一番厄介な部分であるアルゴリズムを考える段階と、プログラミングおよびデバッグの段階を自動化しており、技術者はそれぞれが抱える本来の問題に専念することができる。

2.2 EQUATRAN-Gの機能

以下、EQUATRAN-Gの各機能を紹介する。

(1) 方程式解法機能

EQUATRAN-Gでは、線形連立方程式、非線形連立方程式、常微分方程式(高階または非線形を含む)、そして最適化計算、最小2乗法計算(非線形を含む)を数値的に解くことができる。方程式はそのままの形で入力すればよく、変形したり解く順序に並び替える必要はない。解く順序はEQUATRAN-Gによって自動的に生成される。

線形・非線形連立方程式の場合は、そのまま入力するだけでよい。特に非線形の場合は一般に直接解くことができないため、繰り返し収束計算が必要になるが、EQUATRAN-Gでは線形部分や非線形部分を判断して、それぞれの計算手法が自動的に組み込まれる。また、ユーザーが繰り返し収束計算の方法を指定することも可能である。常微分方程式の場合は、積分を指定する文をひとつ記述するだけで、高階の方程式でもそのまま扱うことができる。最適化計算も独立変数と評価変数を指定するだけで解を求めることができる。

EQUATRAN-Gでは、以上の方程式を解く問題のほかに、これらの方程式が混在した複合問題、たとえば常微分方程式と線形・非線形連立方程式が混在した問題、最適化計算の中に非線形連立方程式が含まれるような問題なども、扱うことができる。さらにユーザ関数を利用すれば、高度な複合問題(多重積分、2点境界値問題、動的システムのパラメータ同定問題、MINIMAX問題など)も扱うことが可能となる。

(2) 方程式記述機能

数式モデルを簡潔に記述するために、以下のような豊富な記述機能を有している。

- ・ 配列変数…1次元および2次元の配列変数。
- ・ 組み込み関数…対数、指数、三角関数など36種。

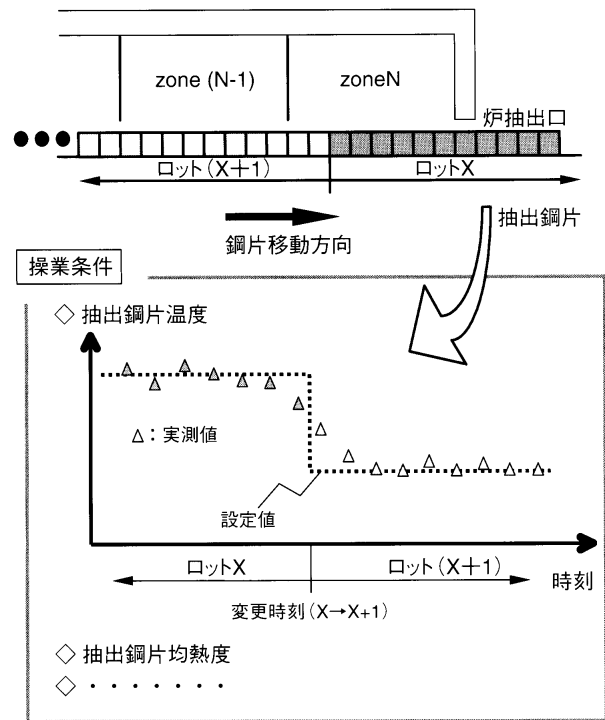


図2 スケジュールフリー加熱

- ・ 数表…図や表として与えられているデータを数表として定義し、方程式の中で関数のように利用可能。
- ・ 条件付きの式…条件によって場合分けされる式。
- ・ ユーザ関数とマクロ…規模の大きな数式モデルはモジュール化して記述可能。

(3) グラフ作成・レポート作成機能

片対数・両対数グラフ、スプライン曲線による補間、1～3次式による近似曲線など、科学技術分野向けのグラフ機能が用意されている。自動設定機能により、簡単にグラフが作れ、しかも、各種のメイクアップ機能により、完成度の高いグラフを得ることができる。

また、レポートの形に作成したテキスト(フォーム)中に、計算結果を任意の位置に、任意のフォーマットで埋め込むことができる。これにより、レポートの作成を容易に行うことが可能となる。

3. 応用事例

応用事例として、前述のEQUATRAN-Gで開発した、オンタイム加熱方式(オンラインスケジュールフリー加熱)を実現する制御系を紹介する。以下、本制御系の構成と、制御系が使用するモデルの概要を紹介し、さらに実験炉での実験結果を示す。

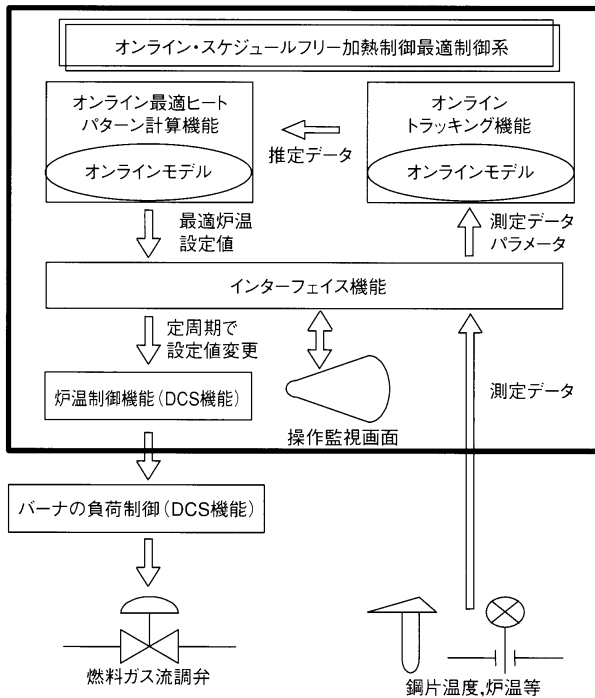


図3 制御系の機能構成

3.1 スケジュールフリー加熱制御とは

図2のような連続加熱炉において抽出鋼片目標温度、均熱度などの操業条件をある時刻で変更する要求を実現する加熱方式をスケジュールフリー加熱と呼ぶ。また、本加熱方式で設定値と実際の温度との誤差等を最小にする最適化問題をリアルタイムに解く制御系をオンライン・スケジュールフリー加熱最適制御系と呼ぶこととする。

3.2 機能構成

図3に本制御系の機能構成を示す。図中、
 ・オンライン最適ヒートパターン計算機能
 ・オンライントラッキング機能
 をEQUATRAN-Gで開発した。以下制御系の各機能を説明する。

(1) オンライントラッキング機能

連続加熱炉において制御系が必要とするデータのうち、直接測定できないデータ(加熱鋼片内部の温度分布、炉壁内部の温度分布)を推定する機能である。具体的には、測定可能なデータ(炉温、空燃比等)および過去の温度分布データを、「オンラインモデル」に与えることにより、現在の温度分布データを推定計算する。また、温度分布データの一部が熱電対あるいは放射温度計等により測定可能である場合、測定データによる推定計算値の補正を行う。

- (2) オンライン最適ヒートパターン計算機能
 制御系全体の核となる機能である。将来に亘る炉温を一定制御周期毎の設定値に対する一次遅れ関数として仮定し、「オンラインモデル」によって加熱炉出口でのスラブ温度を予測することで、適当な評価関数の最適化問題を制御周期毎に解く。最適化問題の解として得られた一定周期毎の炉温設定値群のうち初回の設定値を、最適な設定値としてインターフェイス機能に渡す。
- (3) インターフェイス機能
 連続加熱炉内からオンライントラッキング機能のオンラインモデルが必要とする鋼片温度、炉温等の情報を一定周期で収集する。また、オンライン最適ヒートパターン計算機能から得られた最適炉温設定値を一定の制御周期で炉温制御機能に渡す。
- (4) 炉温制御機能
 設定される最適炉温設定値になるように燃料の投入量を決定する。実際にはDCS機能で行った。
- (5) 操作監視画面
 本制御系の機能の起動停止、及び状態の表示を行う。

3.3 オンラインモデル

上述の制御系の機能構成の中で、

- ・オンライン最適ヒートパターン計算機能
- ・オンライントラッキング機能

は、それぞれオンラインで動作する制御対象のモデルを、その機能の中にもつ。以下に、そのモデルの概略を記述する。

(1) 炉内ガス周りの熱収支

炉内ガス周りで、熱収支のアンバランス分を計算し、炉内ガスのエンタルピー変化を求める。放射熱流束は総括熱吸収率法(Φ_{CG} 法)による。

(2) 鋼片内伝熱

鋼片内温度分布を、厚み方向に分割し差分法によって計算。また、進行方向には鋼片毎に独立して計算。但し、炉内ガスと接触している面からはガスからの放射伝熱、対流伝熱を、下面では一定量の熱損失があるものとする。

(3) 炉壁内伝熱

炉壁と天井は一括して扱っている。鋼片と同様、厚さ方向に分割して差分法によって計算。

(4) 鋼片の移動

モデルの計算はある時間の刻み幅で行われる。鋼片の移動速度から進行方向のメッシュ幅に相当する移動時間だけの計算が行われたときに、鋼片の温度を進行方向に次のメッシュへ移動させる。

(5) その他

空燃比制御、炉圧制御は完全に行われていると仮定

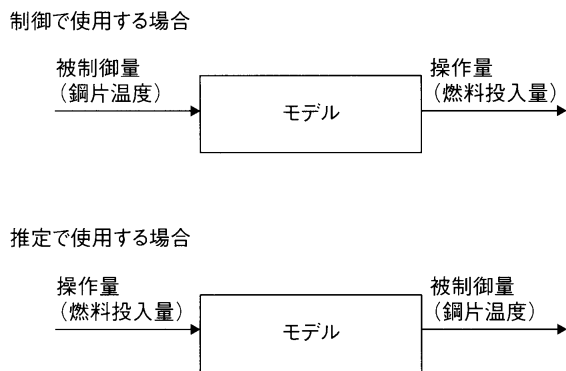


図4 目的別のモデルの計算

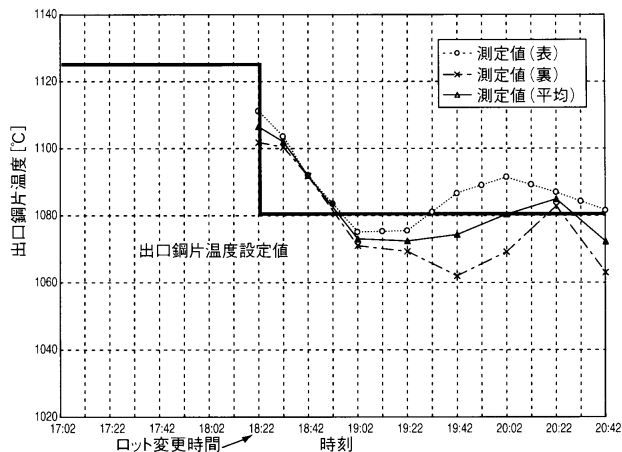


図5 抽出鋼片温度

する。また、バーナの動作に伴う極短時間の挙動は無視する。

3.4 EQUATRAN-Gを使用した開発

3.3のオンラインモデルは、非線型連立常微分方程式で記述することができる(詳細は参考文献(1)を参照)。しかし、「オンライン最適ヒートパターン計算機能」は制御のため、「オンライントラッキング機能」は推定のためと、同じモデルを使用するにもかかわらず、目的が違うために計算アルゴリズムは全く違うものになってしまう(図4)。

したがって、プログラミング言語で本制御系を開発した場合には、全くアルゴリズムの違う2つのプログラムを作成する必要がある、その労力はデバッグも含めると大変なものとなる。

本開発では、EQUATRAN-Gを利用したことにより、モデル部分には全く同じソースファイルを使用して、上述の2つの機能開発を行うことができた。このことで開発期間の短縮は言うまでもなく、試行錯誤的なケーススタディを行う際に非常に大きな効果を得ることができた。

3.5 実験結果例

本制御システムを実験炉(サイズ:幅×高×長=4.0 m×3.0 m×8.0 m, ゾーン数:2, 燃焼量:400×10⁴ kcal/h)に適用した際の、操業条件(抽出鋼片温度設定値)変更に対する実績値の推移を図5に示す。

モデルの精度に課題を残したものの、図に示された通りの制御応答を得ることができた。

4. おわりに

方程式解法ソフトEQUATRAN-Gを用いることにより、種々のダイナミックモデルを容易に作成することができる(詳細は参考文献(2)を参照)。特に応用事例で述べたようなモデルをもとに設計される制御系の開発にEQUATRAN-Gを用いた場合、ソースファイルの入出力指定を変更するだけで、制御系に組み込むオンラインモデルと推定のためのオンラインモデルの双方を作成することができ、制御系を開発する上で大幅な工数削減が期待できる。

EQUATRAN-Gは今後もダイナミックシミュレーションのモデル作成言語として、プロセス制御コンピュータやトレーニングシミュレータなどの実時間システムにおいて、さらなる利用の拡大が見込まれる。

謝辞

本稿第3章(応用事例)については、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から日本工業炉協会が受託した「高性能工業炉開発プロジェクト」の再委託研究成果の一部に関する紹介であり、それら再委託研究はNEDOにより開発援助を受けたことを記し、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) NEDO: 高性能工業炉の開発に関する研究成果報告書(1998)
- (2) 横山, 方程式解法ソフト EQUATRAN-Gとその応用, 化学装置, 8月号, p. 38(1994)

* EQUATRANは三井化学(株)の登録商標です。