

## Field-ubiquitous Computing

# トラッキング・シミュレータの活用と将来のプラントオペレーションへの応用

## Utilization of Tracking Simulator and its application to the future plant operation

仲 矢 実<sup>\*1</sup>

NAKAYA Makoto

中 林 暁 男<sup>\*1</sup>

NAKABAYASHI Akio

大 谷 哲 也<sup>\*1</sup>

OHTANI Tetsuya

当社では、世界で初めて、仮想と現実を融合するオンライントラッキング・シミュレータを開発した。本稿では、このトラッキング・シミュレータの活用事例と、将来期待されているプラントオペレーションへの応用について報告する。活用事例としては、未来に起こりうることを把握した上で最適な操作を実施する未来予測オペレーションと、従来定数として扱っていたモデルパラメータを、そのパラメータに関連する変数の関数として扱い、より精度の高いモデルを構築する手段について述べる。将来期待されているプラントオペレーションへの応用については、プラントモデルのプラントライフサイクルの中での広範囲に渡る利活用の重要性を説明し、その例として、製品の品質を維持しつつ、頻繁に発生する再スケジューリングを可能とする品質直接制御による生産管理への応用について述べる。

We have developed the world's first on-line tracking simulator which matches the physical world with the virtual world. This paper describes example uses of this tracking simulator and its application to plant operations in the future. As examples of its use, we describe the prediction operation which ensures optimum plant operation by knowing the future plant behavior, and a method to create more accurate models by treating model parameters as variables. Regarding its applications, we explain the importance of various uses of plant models during the plant lifecycle, and then describe an application to production control which is achieved by direct product quality control with frequent re-scheduling while maintaining quality.

### 1. はじめに

21世紀に入り中国、インドなどの新興国での旺盛な経済活動などにより資源価格が高騰が続けるとともに、巨大資本を有しグローバルに展開する欧米企業による化学基礎素材プラントの大型化が進んだ。その一方、わが国化学メーカではグローバル・ニッチを標榜し自動車、エレクトロニクスといった競争力のある産業に向けた機能材料へのシフトが急速に進んでいる。

将来のプラントオペレーションを考えた場合、海外での大型プラントにおいては、製品の安定的な供給のため、より一層の安全操作が求められると同時に生産コストを抑えた効率的なオペレーションが要求される。一方、機能材料プラントにおいてはユーザー顧客からの独自仕様に対応した変則的な生産、即ち顧客要求に柔軟に対処することが望まれる。化学基礎素材プラントから機能材料プラントまで、どのようにプラントを動かすかを決定するために高精度なプラントモデルを有効に活用することが期

待されている。

当社では、現実世界と仮想世界の融合によりプラントオペレーションにおける技術革新を目指し、世界で初めてダイナミックシミュレータをオンラインで動作させるトラッキング・シミュレータを開発した<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>。このトラッキング・シミュレータは、プラントオペレータの訓練用途ばかりでなく、運転支援分野においても新たな応用が可能である。本稿では、このトラッキング・シミュレータの活用事例と、上述した将来期待されているプラントオペレーションへの応用について報告する。

### 2. 当社が開発したトラッキング・シミュレータ

我々は、実際のプラントの挙動を完全に模擬するため2通りのモデルパラメータ同定手法を開発した。1つは、少数のモデルパラメータを常時更新し、シミュレータ内に取り込んだプロセス値に合わせ込む逐次パラメータ同定手法である。この手法では、実際のプラントとモデルとのミスマッチングによるモデル誤差を少数の更新パラメータが吸収していく。場合によっては、更新パラメータが想定物理範囲を超えてしまうこともある。

もう一方の手法は、この問題を解消するために、プラン

<sup>\*1</sup> 技術開発本部 計測制御研究所

トモデルの広範囲な領域で、複数パラメータを定期的に更新する動的補償付きデータリコンシリエーション(Data reconciliation)技術である<sup>(5)</sup>。一般にデータリコンシリエーションは定常状態を前提としているが、非定常状態でもパラメータ同定が実施可能となった。

これらの2つのパラメータ同定技術により、プラントの挙動を高精度に模擬するトラッキング・シミュレータを開発することに成功した。

### 3. トラッキング・シミュレータの活用事例

トラッキング・シミュレータの2つの活用事例を示す。第1の例は、プラント操業での未来予測への応用である<sup>(6)</sup>。第2の例は、より高精度のモデルパラメータの推定による高精度モデル構築への適用である<sup>(7)</sup>。

#### 3.1 未来予測を考慮したオペレーション

プラントオペレーションは、高度制御の導入により、自動化が進んではいるものの一連の操作がオペレータに委ねられているケースが、まだまだ数多く存在する。この場合、通常、オペレータは操作を実施し、その結果をトレンドで確認し、設定がプラントに反映されたことを確認する。

しかし、時定数の大きなプラントの操作においては、応答の確認に時間がかかるため、例えば銘柄変更などに伴う一連の操作を行う場合に、確認までに長大な時間がかかってしまい、操作ミスがあった場合、製品ロスが大きくなってしまいます。また、プラントへの操作は影響規模が大きく、オペレータへの心理的負荷が高いという点も軽視出来ない。これらの問題に対するソリューションとして、プラント操業での未来予測を我々は提案している。

未来予測は2つの機能からなる。1つは、現在のプラント運転条件のままであった場合に、どうなるのかを示す『定期予測機能』。そして、もう1つは、現在のプラント状態に対して仮想的な操作入力を与え、その結果を示す『ケーススタディ機能』である。

『定期予測機能』では、システムが定期的にプラントの予測を行い、その結果を画面上に表示する。図1は、外乱により、前回の予測に対して、最新の予測では結果が異なっている状況を示している。このような状況の時、オペレータは『ケーススタディ機能』により対処方法を検討できる。図2は『ケーススタディ機能』を用いて、3つの条件をそれぞれ入力した場合にプラントがどう動くのかを分析した結果である。オペレータはいくつかの条件を検討し、最善と思われる対処をすればよい。

外乱を例に未来予測の応用を示したが、プラント操業の最適化にも応用できる。これらの機能により、求めるプラント状態へより高速に辿りつくことができ、プラント運転の改善を図ることができる。また同時に、操作の妥当

性を事前に検証することができ、心理的負荷を緩和できる。さらに、操作入力時にシミュレーションを自動で実施・検証することで、制御システムへの操作入力のフルプルーフとすることもできる。



図1 定期予測画面

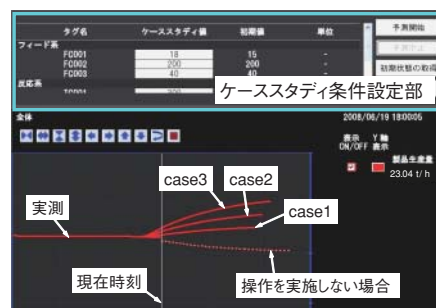
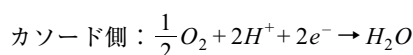
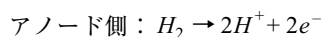


図2 ケーススタディ画面

#### 3.2 パラメータマッピングによる高精度モデル構築

一般的にシミュレーションパラメータは定数として扱われることが多いが、トラッキング・シミュレータを利用して、運転条件の関数としてモデルパラメータを同定することができる。この例を燃料電池発電システムに適用した結果に関して説明する。

燃料電池は、アノード(陽極)に水素ガスを、カソード(陰極)に空気を導くことにより、水の電気分解の逆反応即ち、下記反応式により電気を発電する。



我々は、アノードとカソードの間に挟まれる湿り気を持った高分子膜中の水素イオンの伝導状況を表現するイオン伝導度をトラッキングパラメータにとり、燃料電池の出力電圧に合わせ込むトラッキング・シミュレーションを行った。トラッキング開始後、負荷電流が変化する毎にイオン伝導度パラメータを調整して燃料電池の出力電圧を実測値に一致させた。負荷電流の増減により水素イオンが伝導する高分子膜中の水分量が変化するため、イ

オンの伝導度を負荷電流の関数として表現することは理にかなう。燃料電池の負荷電流を変化させ定常状態となった時点で推定されたイオン伝導率を負荷電流の関数として求めた結果が図3である。負荷電流の関数としたイオン伝導度モデルを利用して再度シミュレーションした結果を図4に示す。トラッキング・シミュレーション単独では急峻な変化に調整パラメータが対応できないため、過渡応答を表現できないが、図3から得られた近似式をモデルに適用した場合にはよいシミュレーション結果を得られることが実証できた。

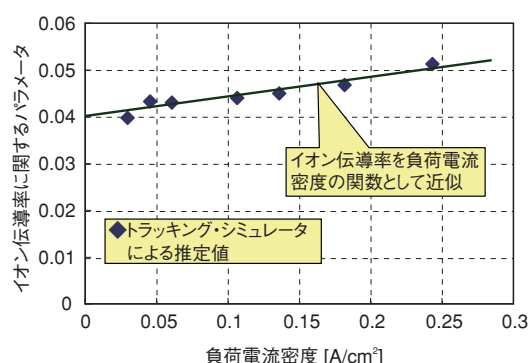
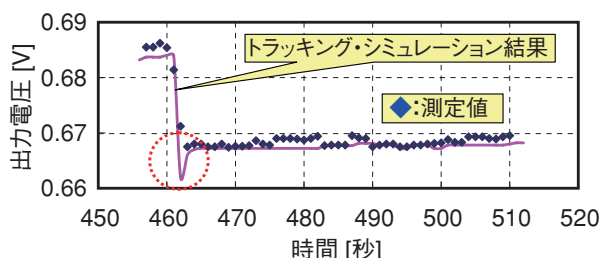
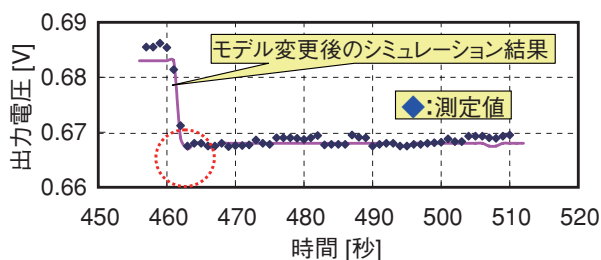


図3 電流密度の関数としてパラメータ推定



(a) トラッキング・シミュレーションのみでの結果



(b) トラッキング・シミュレーション結果からパラメータを推定した場合

図4 モデル修正によるシミュレーション結果

シミュレーションモデルを構築する上で、今まで定数として扱っていたモデルパラメータをある変数の関数としてモデルに組み込むことができることを実証した。この手法により、より精度の高いシミュレーションが可能となる。

#### 4. プラントモデルライフサイクルにおけるモデル利活用

我々が開発したトラッキング・シミュレータのプラントモデルは物質収支やエネルギー収支を基にした物理モデルである。一般に、この種のプラントモデルへの投資は膨大であり、我々は、図5に示す「基本設計」から「廃棄」までのプラントライフサイクル全体でプラントモデルを有効に活用することが重要であると考え。プラントの設計からプラントの立上げ、運転・操業や設備の増設といった分野だけでなく、設計、解析、予測・診断、最適化などでもモデル利活用することを想定している。

図5の中央部分に示すように、プラントモデルといってもその形態は様々である。トラッキング・シミュレータのような物理法則に基づき記述した厳密モデルから、入出力間の関係を記述した単純な入出力モデルなど、形態は様々で、設計用、訓練用などのように単独にその用途に応じてモデルが作成されているのが現状である。また、図5の下部に示すモデルを取り扱う運用面から見れば、モデルを作成し、現実と合うように修正し、多くの場面でその用途に応じて活用できるように再利用するのが現状の一般的な手順である。

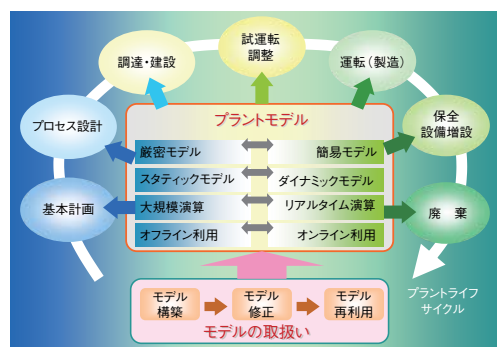


図5 プラントライフサイクルでのモデルの利活用

モデルの取扱い、すなわち、モデル構築、モデル修正及びモデル再利用における、今後のモデル利活用について以下に説明する。

##### a) モデル構築

モデルの構築では、たとえ厳密モデルであっても商用のシミュレータならモデルビルダーツールがあり、ユーザはGUI (Graphic User Interface) 上でモデルを容易に構築できる環境が提供されている場合が多い、しかし、精度の高いモデルを作成するためには、対象とするプロセスの物理・化学的な現象をよく熟知している必要がある。シミュレーターベンダーが提供するプラント機器モデルで十分な近似度を得られない場合は、ユーザ自身が現象を分析し、モデル方程式を作成しなければいけないことも多々ある。



モデル構築は、今後モデル活用を効率的に実施するために技術開発を推し進める必要がある領域である。

#### b) モデル修正

実際の測定値と合わせるチューニング作業を含むモデル修正においては、我々が開発したトラッキング・シミュレータが持つ、モデルパラメータを同定しモデル修正を自動的に行う機能を利用してオンラインで活用することにより、モデル修正にかかる工数を圧縮できる。

#### c) モデル再利用

モデル変換技術により、要求するアプリケーションにプラントモデルを変換して利用することができる。次項では、この利用法の例を解説する。

### 5. フレキシブル生産に向けた性状制御への応用

「はじめに」で述べたように、ファインケミカルとも呼ばれる付加価値の高い機能材料では、一般的に多品種少量生産の形態をとる。グローバル・ニッチを目指す我が国の化学プラントは、今後益々多品種少量生産のファインケミカルに向うものと予想される。この分野においては、化学メーカーの顧客がたとえ同業種であってもその顧客が指定する独自仕様で生産しなければならず、ユーザーへの個別対応が必要となってくる。

高機能材料の多品種少量生産では、在庫を極力少なくするため、製品の品質を維持しながら銘柄を頻繁に効率よく切り替え、かつ突発的な顧客からのオーダー変更などに対応するため、再スケジュール可能な生産管理体制を整えることが要求される。生産管理部門においては、製品品質、生産量、時間(生産タイミング)を考慮し生産スケジュールリングしなければならない。

このようなフレキシブルな生産を実現するために、現在、プラントモデルを積極的に活用することを検討している。特に品質制御に関しては、従来は温度、圧力、流量といった変数を制御して所望の製品品質を作り込んでいたが、オペレータが直接品質を指定して生産するシステムの実現を目指している。実在するプラントの挙動を忠実に表現できるトラッキング・シミュレータにより、品質を制御するための必要かつ十分な情報がリアルタイムで得られる。即ち、本来センサを挿入して測定したかった物理情報や分析に膨大な時間を要していた組成値などを、正確にかつ瞬時に仮想空間から情報が得られる。

図6に製品の品質を、トラッキング・シミュレータを利用して制御するシステム構成図を示す。製品品質を決定付ける性状を物理・化学モデルで表現できない場合はトラッキング・シミュレータとソフトセンサを接続して性状推定を実施する。従来の多変数制御パッケージと化学ソフトセンサを組み合わせた高度制御では、プラントの局所的な制御にとどまっていたが、トラッキング・シミュレータの利用によりプラント全体の仮想的な情報が利用

可能となる。例えば、使用エネルギー量や排出CO<sub>2</sub>量などの制約条件をつけて、製品の品質や重要な指標を直接制御することが可能となる。

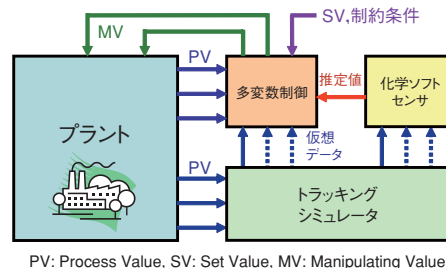


図6 トラッキング・シミュレータを利用した品質制御

### 6. おわりに

トラッキング・シミュレータの活用事例と将来のプラントオペレーションへの応用について述べた。後者については、物理・化学法則に基づいたプラントモデルをプラントライフサイクルに渡って有効的に活用するには、その精度を維持するために常日頃モデルを修正し、その目的ごとに変換して利用することが重要であることを述べた。将来予想される多品種フレキシブル生産では、生産量、時間、品質を保証できる生産管理支援ツールを、プラントモデル技術を活用して実現することを目指している。

#### 参考文献

- (1) M. Nakaya, G. Fukano, et al., "On-line Simulator for Plant Operation", SICE Annual Conference 2005, 2005, pp. 3811-3815
- (2) M. Nakaya, G. Fukano, et al., "On-line Simulator for Plant Operation", Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Control and Automation, 2006, pp. 7882-7885
- (3) A. Nakabayashi, G. Fukano, et al., "Application of Tracking Simulator to Reforming Process", SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 2006, pp. 1871-1875
- (4) 深野元太郎, 尾上寧, 他, "トラッキング・シミュレータの水蒸気改質プロセスへの適用", 横河技報, Vol. 50, No. 3, 2006, p. 27-30
- (5) 石建信, 深野元太郎, 他, "トラッキング・シミュレータによるプラントの運転革新", 横河技報, Vol. 52, No. 1, 2008, p. 35-38
- (6) 石建信, 深野元太郎, 他, "トラッキング・シミュレータを用いた過渡応答予測", SICE 第7回計測自動制御学会制御部門大会 72-2-3
- (7) M. Nakaya, K. Kawaguchi, et al., "MODEL PARAMETER ESTIMATION BY TRACKING SIMULATOR FOR THE INNOVATION OF PLANT OPERATION", Proceedings of the 17<sup>th</sup> World Congress The International Federation of Automatic Control, 2008, pp. 2168-2173