

# プラント操業の自律化を支援するダイナミック・デジタルツイン・プラットフォーム

Dynamic Digital Twin Platform to Support Autonomous Plant Operations

<オンラインとオフラインをシームレスに連携する新プラットフォーム  
OmegaLand V4>

(株)オメガシミュレーション 深野 元太郎・石丸 新・大谷 哲也

## 1. はじめに

近年、企業を取り巻く事業環境は、複合的かつ不確実性の高い要因によって大きく変容している。特に、コロナ禍、地球温暖化による自然災害、ウクライナ情勢、トランプ政権による関税政策などは、グローバルビジネスに対して顕著な影響を及ぼしている。

このような中、プラント操業は、グローバル市場での競争激化、労働力不足、脱炭素対応、サイバー攻撃を含むセキュリティリスク、規制強化や関税によるサプライチェーンの変化などの課題に直面している<sup>(1)</sup>。

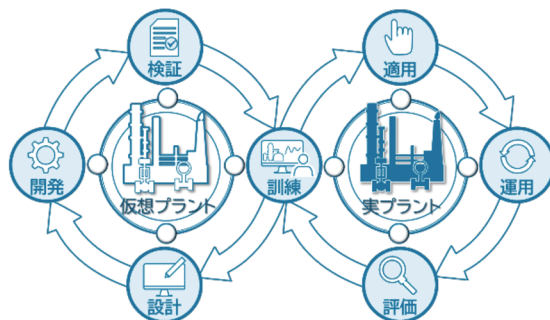
OmegaLand V3は、統合ダイナミックシミュレーション環境として、主に運転訓練シミュレータ (Operator Training Simulator : OTS) の構築に必要な機能を提供してきた。一方、OmegaLand V4は、上記の課題に対応するため、OTSだけでなく、プラント操業における課題の洗い出し、解決手段の開発、現場へのスムーズな適用、維持・運用を可能にする環境を提供する。

また、AIをはじめとするデジタル技術の進展により、プラント操業の自律化への期待が高まっている<sup>(2)</sup>。しかし、自律化は一足飛びに達成できるものではなく、まずプラントの状態を数値データとして可視化することが不可欠である。可視化によって問題を明確化し、それを解決しながら運転の最適化を進め、自動化から段階的に自律化へ移行する必要がある。

OmegaLand V4は、プラント内部の可視化、運転の最適化、運転リスク評価などを通じてプ

ラント制御の高度化を実現した上で、自律化が進む中では、違和感検知、機器診断、将来挙動の予測、異常時対応などを可能にする。

OmegaLand V4を一言で言い表すと、ダイナミック・デジタルツイン・プラットフォームである (第1図参照)。プラント改善活動を行う場合、まず仮想プラントで改善策の設計・開発・検証を実施する。その後、実プラントに反映する前に、訓練環境に組み込み、オペレーターが事前に新しい運転環境に適應できるよう支援する。次に、改善策を実プラントに適用・運用し、定期的に対策の有効性を評価する。評価結果が悪い場合は、新たな対策の設計や改良を行う。



第1図 ダイナミック・デジタルツイン・プラットフォーム

ダイナミック・デジタルツイン・プラットフォームの特徴は以下の通りである。

- 制御システムとの連携によるオンラインとオフラインをシームレスに融合する
- 高精度ダイナミックシミュレータによる動的最適化が可能になる

- 仮想プラントでの事前検証と実プラントでの有効性の評価によりプラント操業の自律化へ向けた取り組みを加速する

これらの特徴により、今後以下を可能にしていく。

### (1) 制御システムとの連携強化によるダイナミックモデルの活用拡大

横河電機CENTUM VPとの連携を強化し、制御システムを含めたシミュレーションの精度を向上させるとともに、制御システム上でダイナミックモデルを活用したアプリケーションを稼働可能にする。これらを通じて、制御システムの自律化を支援する。

### (2) AI、および高度制御とダイナミックシミュレータの連携で広がるソリューション

ダイナミックシミュレーションをAIモデル構築や高度制御の開発に活用し、自動制御と運転支援を推進する。AIとシミュレータを連携したソリューション開発環境を提供するとともに、ダイナミックモデルによる可視化を含むオンラインソリューションを強化し、プラント操業の多様な用途に対応する。

### (3) 自律化時代の安全性確保を支えるシミュレーション技術

自律化が進むにつれ、人の介入が減り、異常

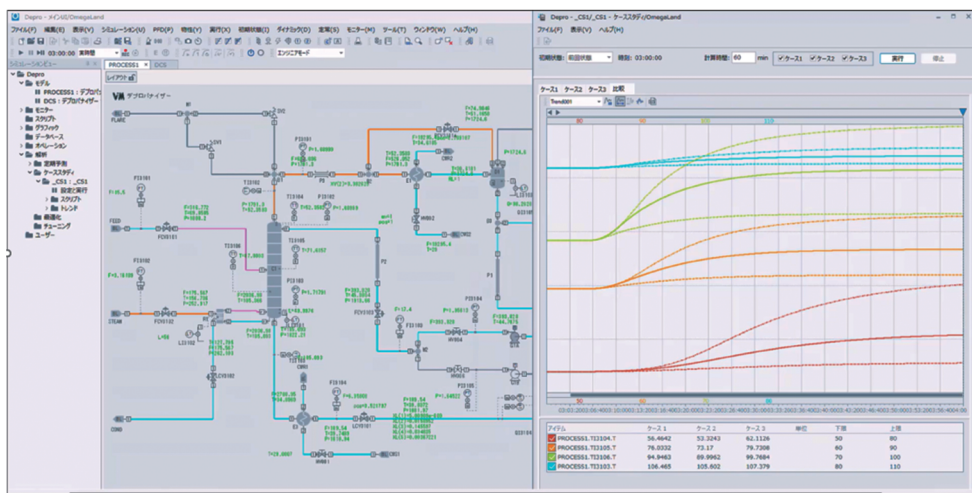
時や緊急時の対応をシステムに委ねる必要がある。この課題に対し、運転リスクを事前評価し、ダイナミックシミュレーションで多様なシナリオを検証する仕組みを組み込み、安全性を確保する環境を提供する。

V4.1ではオンライン・オフライン共通の解析機能が大幅に強化され、ケーススタディや最適化といった機能が含まれる。さらに、システム機能の強化も実現した。

詳細は2～4章で機能や適用例を説明し、最後に今後の展望を述べる。

## 2. ケーススタディ機能

OmegaLand V4.1のケーススタディ機能では、運転条件やモデルパラメータを変更した複数ケースを並列計算し、その挙動をトレンド画面上で比較できる。従来は個別にシナリオを作成し、逐次的にケーススタディを行う必要があったが、V4.1では最大10シナリオを登録し、各シナリオで3ケースを同時に実行・比較することが可能である（第2図参照）。これにより、運転条件の変更がプロセス挙動に与える影響を迅速かつ直感的に把握でき、最適な運転パラメータの探索や異常時の対応策検討が容易となっている。本機能は、生産計画やスケジューリングの検討にも利用できる。



第2図 ケーススタディ例

このように、OmegaLand V4.1のケーススタディ機能は、現場の課題解決と業務効率化を両立するものであり、今後のプラント運転支援やシミュレーション技術の発展に寄与する。

### 3. 最適化機能

プラントにおける課題を解決するため、対象プロセスのダイナミックシミュレータを構築して、改善方法の検討と動作確認を行う場合、必ず最適化すべき問題が含まれている。

OmegaLand V4.1の最適化機能では、評価変数・独立変数・制約変数を定義し、モデルを活用した運転条件の最適化が実現される。例えば、生産量や製品スペック幅などの制約条件を設定し、コストやエネルギー投入量などの評価変数を最大化・最小化する運転条件を自動的に探索できる。最適化問題の定義（シナリオ）は10件まで登録可能であり、複雑な運転条件下でも柔軟に対応できる設計となっている。

さらに、本最適化機能は、定常状態だけでなく、時間変化を伴う動的状態においても最適化を行える。

以上の特徴により、現場の技術者は従来の経験則や手作業に頼ることなく、化学工学に基づいたシミュレータによる科学的根拠に基づいた最適運転を実現できる。以下に例題を用いて、最適化の実施方法と効果を紹介する。

#### 3-1 最適化例1（動的最適化）：CCUS

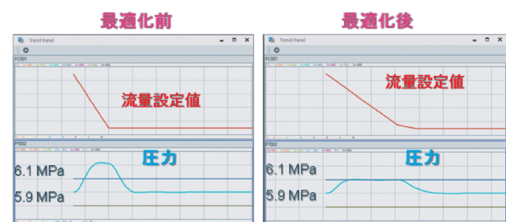
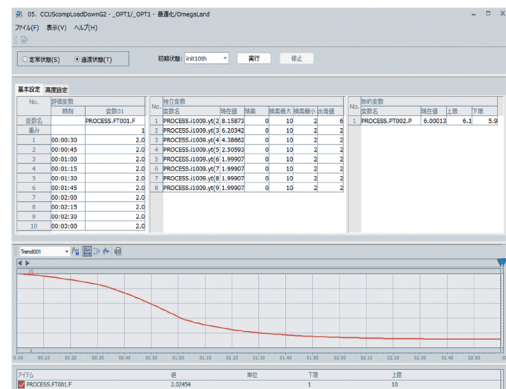
プラントからCO<sub>2</sub>回収して地下に注入・貯留するCCSプロセスの中でCO<sub>2</sub>圧縮、液化プロセスを対象とする。4段の圧縮機で昇圧、途中冷却して、最終的に液化して、ポンプにより地下に注入する。CO<sub>2</sub>は臨界点に近い状態であり、圧力はミニフロー弁により制御されている。回収されるCO<sub>2</sub>量は、工場や発電所の稼働状況によって変わるため、ここでは、CO<sub>2</sub>量が急に減少した状況を想定して、その間もポンプ手前で気化、あるいは、ドライアイス生成を抑制するために、圧力制約条件を5.9～6.1MPaとする。しかし急激に流量を減らすとミニフロー弁による圧

力制御が追い付かず圧力が上昇する。そこで、圧力の制約条件を満たしつつ、最短時間で流量を減らす方法を求める。最初10t/h、最終的に2t/hにするが、30秒毎に流量設定値を変更して、できるだけ早く2t/hにすることを目的とした。

動的最適化の設定画面を第3図に示す。各設定パラメータは以下とした。

- 評価関数：過渡状態における実流量と目標流量2t/hの差の合計を最小化する
- 独立変数：30秒毎に流量設定値
- 制約条件：圧力上限値6.1MPa、下限値5.9 MPa

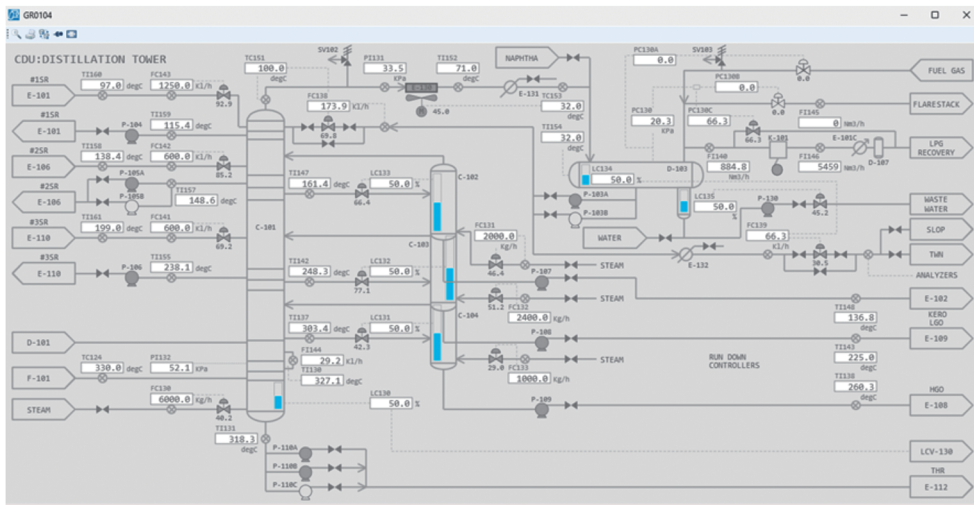
流量設定を急激に下げた場合は、途中で圧力が6.1MPa以上になっているが、最適化後は、圧力を6.1MPa上限値内に抑えるよう流量設定を変更するパターンとなっている。



第3図 CCUS動的最適化

#### 3-2 最適化例2（定常／動的最適化）：常圧蒸留プロセス

常圧蒸留プロセス（第4図参照）において運転員の教育訓練を目的としたジェネリックシミュレータを対象に、定常最適化と原油切り替え



第4図 常圧蒸留プロセス (ジェネリックシミュレータ)

時の動的最適化を実施した例を示す。

原油は、製品ランダウンやサイドリフラックスから熱回収した後、脱塩槽、プレフラッシュドラム、加熱炉を経てメインカラムへ流入する。メインカラムには、ボトムスチーム、三つのサイドリフラックスと三つのサイドストリップを装備している。各サイドストリップでは、スチームストリップされた後、製品が抜き出される。製品としては、トップからナフサ、サイドストリップから灯油、軽油、重油、ボトムから残渣油を抜き出される。

### (1) 定常最適化

製品性状としてナフサ、灯油、軽油、重油の留分を表すASTM値の上下限を制約条件として、消費エネルギーや製品価格から計算されるトータル利益を最大化することを目的とする。定常最適化の設定パラメータは以下とした。

- 評価関数：ナフサ、灯油、軽油、重油、残渣油の生産額から、フィード原油、加熱炉燃料、スチームのコストを引いたトータル利益
- 操作変数：加熱炉出口温度設定値、メインカラムと各サイドストリッパーのスチーム量、および灯油、軽油、重油の拔出流量
- 制約条件：ナフサ、灯油、軽油、重油の

ASTM値の上下限 (製品品質)

重質原油と軽質原油に対して、第5図のように最適運転条件を求めた。

### (2) 動的最適化

重質原油の最適運転状態から軽質原油の最適運転状態に切り換え時は、加熱炉の出口温度を高く設定した方が製品品質は維持しやすいが、燃料消費量は抑えたい。他の操作変数は、ランプ状に変更して、製品品質は制約条件内に、加熱炉出口温度をできるだけ低くする。動的最適化の設定パラメータは以下とした。

- 評価関数：加熱炉燃料消費量の合計
- 独立変数：加熱炉出口温度の5分毎の設定値
- 制約条件：過渡状態での製品品質

最適化前に比べて、最適化後は燃料消費量を2%削減できた。原油切り替え時に途中の定常最適条件を順に解く方法とは違い、ダイナミックシミュレーションによってより効率的な操作が求められている。

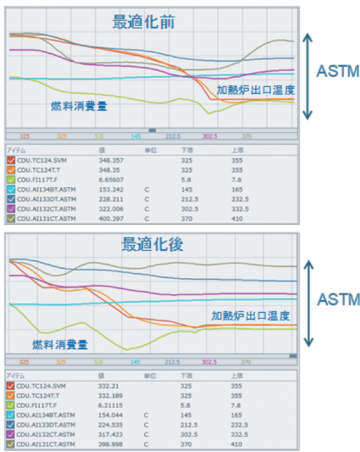
## 4. システム機能強化

OmegaLand V4.1では、ダイナミック・デジタルツイン・プラットフォームの実現のため、システム機能を強化した。具体的には、オンラ

定常状態最適化結果

独立変数	重質原油	軽質原油
加熱炉出口温度	348.4 °C	332.2 °C
メインカムスチーム	5980 kg/h	6190 kg/h
灯油ストリッピング スチーム	2140 kg/h	2180 kg/h
軽質油ストリッピング スチーム	2010 kg/h	1920 kg/h
重質油ストリッピング スチーム	953 kg/h	889 kg/h
灯油抜き出し流量	106.4 m3/h	108.9 m3/h
軽油抜き出し流量	134.3 m3/h	123.9 m3/h
重油抜き出し流量	76.0 m3/h	77.9 m3/h

動的最適化により原油切り換え時の燃料消費量を約2%削減



第5図 常圧蒸留プロセスの動的最適化

イン・オフライン連携機能を拡張し、さらにCENTUM VPとの連携を強化した。以下で各取り組みについて述べる。

4-1 オンライン・オフライン連携機能の拡張

当社ではオンラインでデータを取得しながら、シミュレーションを同時並行に実行するプラットフォームであるミラープラントを提供してきた。ミラープラントでは複雑なエンジニアリングが必要であるという課題があった。この課題を解決するため、下記2点の改良を行った。

一つ目は、可視化機能と現在のプラントの状態からシミュレータの初期状態をオンラインで生成する機能に特化して、オンラインシミュレータの初期導入コストを削減することを目的としたソリューションであるPlant Trackerである。コスト低減により、ユーザーはプラント内部状態の可視化や、OTSなどのオフラインシミ

ュレータによる現行プラント状態を起点としたシミュレーションを容易に実現できる。なお、Plant Trackerはミラープラント機能のサブセットとなっており、可視化機能と初期状態生成機能のみを提供する。

二つ目は、ミラープラントのエンジニアリング環境の改善である。従来、ミラープラントのエンジニアリングは複雑な手順と多くの作業量を要していた。V4.1では、これらの作業をシステム化し、予測アイテム定義画面にて、トラッキングポイントや可視化アラームの設定が可能となった(第6図参照)。トラッキング変数や可視化ポイント、アラーム設定値の管理を一元化し、システム内でアラーム計算を処理することで、従来の実装手順に比べて作業負担を軽減している。以下にその効果をまとめる。

No.	Comment	Actual value	Actual value	Estimated value	DP
1	ATR Oxygen	1	8111.49	8100.78	0
2	SMR Fuel Gas	1	8033.62	8000.3	0
3	SMR Air	1	102388	102376	0
4	Natural Gas	1	32001.7	32001.4	0
5	Steam	1	78735.8	78706.3	0
6	S/C	1	2.99999	2.99999	2
7	MPS SMR Combustion	0	0	286.66	1
8	MPS SMR Transferred Heat	0	0	166.263	1
9	MPS SMR Reaction Heat	0	0	-88.9188	1
10	SMR Inlet Temp	1	476.993	476.197	1
11	SMR Outlet Temp	1	722.56	722.092	1
12	SMR CH4 Slip (dry)	1	28.5666	28.5666	2

第6図 予測アイテム定義画面

- ① エンドユーザー自身によるエンジニアリング作業が簡便化され、ユーザーによる可視化ポイントの変更も容易に行うことができる。
- ② 初期状態の生成が、OmegaLandのユーザーインターフェースやスクリプト機能を活用して容易に行える。
- ③ Plant Trackerからミラープラントへの移行もスムーズに行える。
- ④ 予測トレンドやケーススタディの画面が提供され、シミュレータ環境で速やかな結

果確認や迅速な状況判断が可能となり、運転支援の高度化が実現された。

従来は複数のツールや手順を組み合わせで対応していた作業が、V4.1では一つのシステム上で完結できるようになり、エンジニアリング作業の効率化と品質向上に大きく寄与している。これらのミラープラント機能の標準化により、エンドユーザー自身が必要な設定やカスタマイズを容易に行えるようになったため、プラントの運転支援やプロセス挙動の予測、内部状態の可視化機能の高度な活用が期待される。これらの機能は、多様な運転現場のニーズに応え、今後のプラント運転支援の発展に広く貢献していくであろう。

#### 4-2 CENTUM VPとの連携強化

横河電機CENTUM VPとOmegaLandの組み合わせでは、OmegaLandの実行周期に合わせた同期実行を可能とした。従来、制御シミュレータとOmegaLandは非同期で実行されており、倍速運転時の計算安定性や再現性の確保には課題があり、特に非定常運転の場合にはシミュレーション結果の再現性が十分でないことが問題となっていた。V4.1では、OmegaLandとCENTUMシミュレータを同期して実行する機能を開発し、OmegaLandのコネクション機能を通じて実行タイミングを厳密に規定することで、計算の再現性と安定性を大幅に向上させている。

この機能により、同じ初期状態をロードしてシミュレーションを実施した場合でも、厳密に同一のシミュレーション結果が得られるようになり、解析用途の計算において高い信頼性が確保される。倍速運転時には、制御演算による計算不安定性が改善され、予測やケーススタディなどの高速シミュレーションが可能となっている。

CENTUM同期実行は、シミュレーション技術を高度化し、制御システムを含めた、真のデジタルツインを実現するための重要なアップデートであり、今後のダイナミックシミュレーション技術を活用したソリューション開発における基盤技術の強化となっている。

## 5. おわりに：今後の見通し

本稿では述べなかったが、当社ではモデルをより精緻化するモデルチューニングサービスを提供している。ヒストリカルデータを用いたチューニングによりモデルを高精度化して、ダイナミックシミュレータが多用途に活用できる環境を整えている。

その活用の一例として、HAZOPスタディへの応用が挙げられる。HAZOPスタディにおいてダイナミックシミュレータによりプロセス挙動を確認する仕組みを備えたツールを現在開発中である。

今後は、OT (Operational Technology) 技術とシミュレータやAI等のIT (Information Technology) 技術とを融合させることにより、顧客のDX (Digital Transformation) を推進する技術開発を引き続き進めていく。

#### <参考文献>

- (1) 経済産業省：「2025年版ものづくり白書」, (2025年12月24日取得 (2025)  
<https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2025/index.html>)
- (2) 深野元太郎：“AIとミラープラントによる化学プラント運転変更操作の効率化”, 配管技術, Vol.63, No.9, pp.66-69 (2021)

#### 【筆者紹介】

深野 元太郎

(株)オメガシミュレーション パッケージ部

〈主なる業務歴および資格〉

計測自動制御学会技術賞 (2013年)、他、受賞  
工学博士

石丸 新

(株)オメガシミュレーション 事業開発部

大谷 哲也

(株)オメガシミュレーション 顧問、工学博士

〈会社事業内容および会社の近況〉

当社、横河電機と三井化学の合弁会社として1997年に設立された。横河電機の計装・制御技術と、三井化学のモデリング・シミュレーション技術を融合させ、プラント運転の進化に寄与する製品、およびソリューションを提供している。