

// 当社のテストベンチの能力を超えるものについては、シミュレーションに頼らなければなりません。スーパーヨットやガス採掘ポンプをテスト場に持ち込むことは無理ですから。

工学博士 Sven Christian Fritz 氏 (MTU)



大型エンジン開発のための 仮想テスト環境

MTU Friedrichshafen の仮想テストベンチ

ドイツに拠点を置く MTU Friedrichshafen GmbH の開発者たちは、ラグジュアリーヨットや採掘トラック、鉄道車両などの動力源に使用される最大 10,000 kW の大型エンジンの設計で直面していた問題を解決しました。これらのエンジンは世界各国の排ガス規制に準拠しなければなりません。実際のテストベンチを入手することは難しく、規格外の状況を開発の現場で作り出すには限界があります。ではどうすればいいのでしょうか。その答えは「仮想化」です。

米国のスポーツ分野において「MVP」とは、Most Valuable Player（最優秀選手）を表しますが、同様の意味を含めて、MTU Friedrichshafen における仮想テストベンチも「MVP」と呼ばれています。実際にはドイツ語の「MTU Virtueller Prüfstand（MTU 仮想テストベンチ）」の略なのですが、まさにこれは、大型用途を想定した先進のディーゼルエンジンの開発や妥当性確認において重要な役割を果たす高効率のツールにふさわしい名前といえます。完全に仮想化された自動テスト環境があれば、開発エンジニアは効率的で部門横断的な共同作業に専念することができます。利点はそれだけではありません。実テストベンチにおいて MTU の発電設備の出力限界により生ずる制約も、シミュレーションによって克服することができるのです。

MTU で Methodology Specialist を務める Sven Fritz 博士は、4000 シリーズの発電設備において直面した難問について説明しています。最大重量 15t、出力範囲 2,040 ~ 4,300 kW の発電設備は、ラグジュアリーヨット、巨大な採掘トラック、鉄道車両、石油やガスの掘削用ポンプの駆動、といった用途に使用されます。このように強力なエンジンは 1 時間あたり最大 1 トンもの燃料を燃焼し、そのテストには最大 25 トンの調整空気をテストベンチに送ることのできるシステムが必要でした。ただし、特定の温度と湿度に空気を調整する際に使用される人工気象室は、そのような大量の空気には利用できません。問題は他にもあります。世界各国にはさまざまな規制が存在するので、エンジンには数十種類の排ガス規制が適用されることとなります。しかしこれらの排ガス規制には、準拠すべき環境条件と基準値が厳密に規定されているのです。

鍵となる仮想化

「当社のテストベンチの能力を超えるものについては、シミュレーションに頼るしかありません」と Fritz 博士は言います。シミュレーションによる仮想テストは実テストベンチが及ばない範囲をカバーし、厳しい課題にも対処することができます。たとえば米国市場（EPA Tier 4）では最近、出力範囲が 560 kW を超えるエンジンについて、1 キロワット時（kWh）あたりの窒素酸化物（NOx）を 6.4 g から 3.5 g

に、粒子放射を 0.2 g から 0.1 g に減らすよう求めています。さらに次の段階として、この 10 年間の半ばまでに NOx と粒子放射をそれぞれ 3.5 g/kWh と 0.04 g/kWh に減らすことが義務付けられました。当然、一酸化炭素と炭化水素の排出も削減しなければなりません。その対策を行う際に実際のドライブトレインを利用できないとしたら、それは至難の業です。「スーパーヨットやガス採掘ポンプをテスト場に持ち込むことなど、不可能なことです」と、MTU の専門家は同社が直面した大きな課題の 1 つを指摘します。

エンジンとその制御システムが排気基準を確実に満たすようにするには、従来の枠を超える自由度を取り入れる必要があります。それは、指数関数的に増加するレベルの膨大なパラメータ化作業が必須となるものであり、同時に、かつてないほどの開発期間の短縮と予算の縮小にも対処しなければなりません。そのためには、熱力学や電子工学開発、各種試験などを含むさまざまな分野をカバーする各チーム間にきわめて効率的な協力体制が求められます。つまり運用戦略を入念に計画し、シミュレーションの段階でパラメータ化データを極限まで最適化して、実環境における Hardware-in-the-Loop テストの実施回数を最小限に抑えるという考え方です。テストが主な原価要素になっていることを考えれば、これは特に重要です。MTU のエンジンは、シリーズや出力に応じて 1 時間あたり 200 kg から 2,000 kg の燃料を燃焼します。しかもテストベンチの台数には限りがあるうえ、すべてのテストベンチがすべてのエンジンに対応できるわけではありません。このような状況を考えると、1 つの明白な結論に達します。「テストベンチの使用は、シミュレーションで得たパラメータ値を微調整する目的に限定するべき」と Fritz 博士は言います。

あらゆる分野のノウハウを結集

MVP の開発者たちは、エンジンや ECU の開発、テスト、適合を行う各担当者に最小限の準備期間でテストプログラムを実行できるような仮想テスト環境を提供しなければならない、という課題に直面しました。また、そのソリューションは直感的で扱いやすいものでなければなりません。「まず私たちは、自分たちの持つノウハウとツールを結集し、そ

れに基づいて集約した知識を仮想テスト環境に取り入れる作業に着手しました」と Fritz 博士は話しています。エンジンや ECU ハードウェア/ソフトウェアの開発者、さらには適合エンジニアが、新しい計測装置やソフトウェアルーチンについて学ばなくても、実績あるツールをそのまま使用できるようにしたいと考えたのです。充電や燃料噴射に関する多種多様な方針を考慮したエンジンのパラメータ化の作業自体が非常に複雑なのですから。排ガス再循環や排ガス処理まで考慮した場合の複雑さは言うにおよびません。

いくつかのサブコンポーネントは、すでに MATLAB®/Simulink® で用意されており、簡単にプラットフォームに移行することもできたので、Simulink® が仮想テスト環境の要になることは最初から明らかでした。このプラットフォームは、中心となるエンジンと ECU モデルの基盤となるもので、負荷モデル、冷却系モデル、排ガス処理モデルなども統合できます。ETAS INCA と AVL Puma Open とのインターフェースも用意されていました。

試験法を開発する担当者と違って、チーム内で適合を担当するエンジニアは INCA の操作に慣れていたので、標準化されたインターフェースを活用するという ETAS の戦略の真価が発揮され、これこそが、すべてのエンジニアが最新のツールチェーン（各チームや分野が使用する複数のツール）とともに使い慣れた既存のツールを使い続けることができるようにする唯一の方法であることがわかりました。「使用するツールを常に調整し続けなくても済むように、要件に応じて簡単に調整できるソリューションが必要」と、Fritz 博士は説明します。

仮想テスト環境において、試験法の開発者が INCA-SIP V7.2 を介して INCA を MATLAB®/Simulink® 環境に接続しました。INCA V7.2 以降では、INCA-EIP（INCA Experimental Target Integration Package）で INCA を MATLAB®/Simulink® に接続することができます。これにより、INCA の機能を利用して Simulink® の ECU 機能モデルを直接計測・適合することができるので、適合エンジニアは複雑な MATLAB® 環境を習得する必要がありません。いつものツールをそのまま使用して、速度要件や負荷要件の実験を行ったり、ECU や環境のパラメータを調整したりすることができるのです。「これは私たちにとって重要なことです。適合を担当するエンジニアたちが、直感的で使いやすい INCA のユーザーインターフェースを使用して複雑なシミュレーション環境を操作することができるのですから」と Fritz 博士は言います。MTU と ETAS のきわめて建設的な協業により、必要なシステム調整は、おおむねスムーズかつシームレスに実施されました。「プロジェクトの複雑さにかかわらず、両パートナーは比較的容易に順応することができました。特に、互いの効果的な連携を通じて解決策を模索できたことが大きい」と、Fritz 博士は両者の努力を称えながら話しています。

自動テストベンチの明るい未来

前述の構成に加え、MTU Friedrichshafen は、完全に仮想化されたテストベンチとしてソリューションを拡張し、徹底した自動化システムを作り上げました。多様な負荷要件の下で計測技術と仮想走行プログラムをシミュレートする仮想テストベンチは、実際のテストベンチとまったく同じように機能します。仮想環境で実施されたテストは、いつでも実際のテストベンチで再現・検証することができ、その利点は、コストの削減や人工気象室の使用に関する問題の解決策という範囲をはるかに超えています。「シミュレーション環境で実験を行えば、実際のテストベンチでは時間とコストの制約により実施できないような大胆な手法や運用戦略を自由に試すことができます。私たちはすでにいくつかの素晴らしいアイデアを持っており、この分野でのノウハウを大きく拡大してきました」と Fritz 博士は言います。実際のテストベンチとは異なり、仮想テストベンチのシミュレータの使用に費やされる時間がボトルネックになることはありません。適切なデータをすべて与えれば、必要な処理をコンピュータが自分で行います。ランニングコストは電気代をわずかに上回る程度ですが、実際のテストベンチでは 1 時間あたり数千ドルにもなります。また仮想化は CO₂ や排気ガスの排出量削減にもつながります。

Fritz 博士によれば、大きな利点があるもう 1 つあります。シミュレーションの段階における全体のうち 3 分の 2 のケースでは、実際の値の近似値が明らかになれば十分だと言います。「精度は必ずしも重要ではありません。大切なのはむしろテストの質です。小数点第 2 位の値でさえ無意味であることも少なくありません」と話しています。しかも「ECU とエンジンモデルが同じタイムサイクルで稼働する限り、リアルタイム性は二の次になってもかまわない」というのです。現状、大型エンジンの物理モデルは CPU にきわめて大きな負担をかけ、シミュレーションをリアルタイムで実行するには無理があります。この点についてはさらなる調査が続けられていますが、Fritz 博士は、別の可能性も考えています。それは、ETAS のラピッドプロトタイプングツール、INTECRIO を使用すれば、機能のプロトタイプングをすべてシミュレーションで行えるのではないかと、ということです。また博士は、MTU の実 ECU とそのソフトウェアのテスト、妥当性確認、検証などを行う手段として、仮想テスト環境を Hardware-in-the-Loop 試験の一部として使用することも視野に入れています。このようにさまざまな可能性が広がるなかで唯一はっきりしていることは、「仮想化」こそが、未来の効率的な大型エンジンに取り組むうえでの真に効果的な協力体制への道を切り開く鍵であるということです。

インタビュー協力

Dr. -Ing. Sven Christian Fritz、MTU GmbH Friedrichshafen（ドイツ）

実験計画法、試験法開発、テストベンチ自動化、仮想テストベンチスペシャリスト

