

King of the HIL

露天掘り用電動ダンプトラックの
HIL (Hardware-in-the-Loop) テスト



中国 SANY グループが開発した SET230 ダンプトラックは、最大 230 トンもの積載物を輸送することができます。dSPACE HIL シミュレータにより車両のディーゼル電気駆動装置をテストすると、過酷な使用環境にある車両の複雑な駆動制御を極めて効率的に開発および検証できるようになります。



数 階建てのアパートが20度の傾斜を登るのを見たことがありますか。もし無ければ、大規模な露天掘りの鉱山に足を運ぶことをお勧めします。今日の鉱山では、ダンプトラックが小型の住宅一棟分のサイズに達しており、総重量も軽く数百トンになります。膨大な重量に関わらず、これらの巨大な車体は荒れた急勾配の地形を常に安全に、しかも従来に比べて非常に効率的に移動しています。これが可能になった理由の1つはディーゼル電気駆動装置です。この規模のダンプトラックでは、現在これは業界標準となっています。この駆動装置では、ディーゼルエンジンにより電動インバータを使用したジェネレータが駆動し、リアアクスル上の2つの3相モーターに電力を供給することで推進力を生み出しています。この駆動装置は、ディーゼルモーターから駆動軸までの堅固なドライブシャフトを搭載していないため、マニュアルトランスミッション、機械接続部、ディファレンシャル、およびドライブシャフトを全く使用せずに動作することが可能です。このため、車両の重量およびメンテナンスコストの大幅な削減が可能になっています。ただし、鉱山での過酷な使用環境で高い効率性および安全性を保証するには、この駆動装置に対し、極めて複雑な制御を行える電気コンポーネントを実装する必要があります。

モデルベースのテストで新たな次元へ

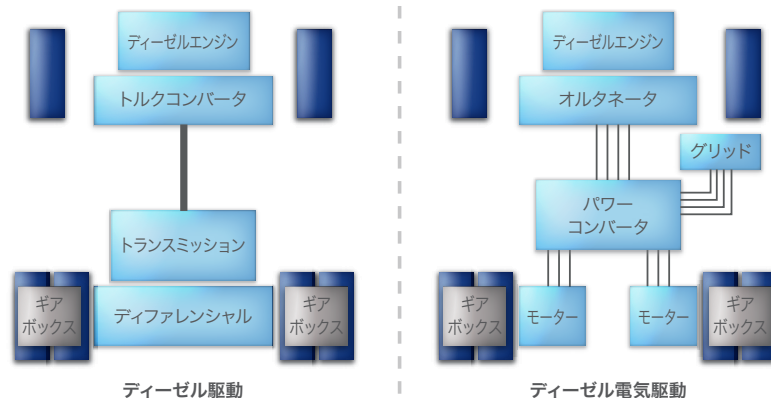
SET230 ダンプトラック（技術データについては表を参照）の開発において、中国 SANY グループのエンジニアもやはり、この従来の手法では解決できない課題に直面しました。ここでは、すぐに2つの問題が生じました。まず、230トンというトラックの巨大な積載重量は本社にとって全く未知のものでした。また、同社のエンジニアはディーゼル電気駆動テクノロジーに関して初歩的な経験しか持ち合わせていませんでした。そのため、SANY 社では、制御開発の大部分のテストをシミュレーションを使って行い、その妥当性を確認することにしました。

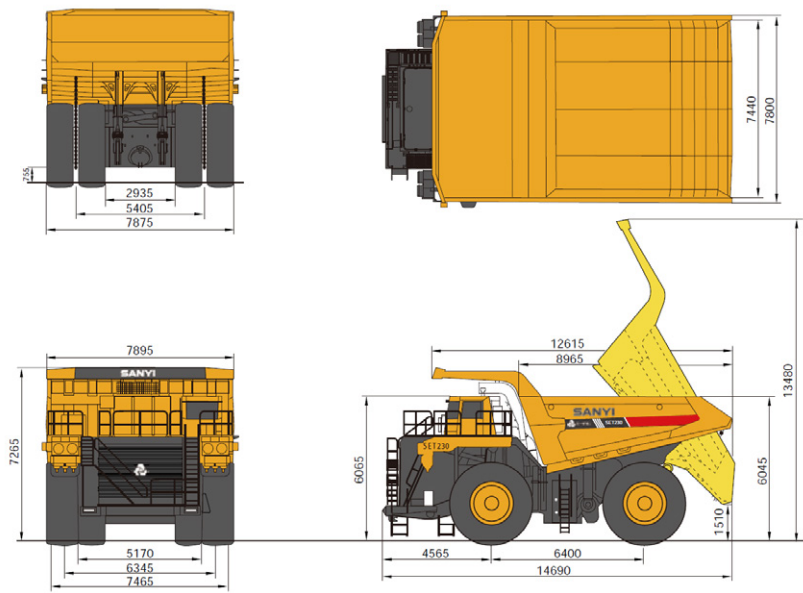
ターンキーシステムによるバーチャルビークルシミュレーション

SANY 社は、大規模なラボで実際の電気コンポーネントをテストするのではなく、ターンキーシステムである dSPACE Full-Size シミュレータを活用して SET230 の駆動システム全体をシミュレートすることにしました。これにより、新たな制御方式を開発して電子制御ユニット (ECU) に実装すれば、直ちに「仮想」車両全体と連携させてテストおよび妥当性確認を行えるようになりました。エンジニアは、制御方式をテストベンチに実装した状態で最適化することができるようになったため、コストのかかる実際のトラックプロトタイプに

>>

従来のディーゼル駆動採掘トラック（左図）と比較した場合、SET230 などのディーゼル電気車両はディーゼルエンジンから駆動軸に及ぶ堅固なドライブシャフトが不要です（右図）。このため、車体重量と保守に要する労力を大幅に削減できます。





上り斜面の最大能力	24%
上り斜面の持続能力	12.5%
下り斜面の最大能力	-14%
下り斜面の持続能力	-13%
最高车速	64 km/h
Electric Drive システムの重量	45 t
最大積載量	230 t
最大許容総重量	400 t

SANY SET230 の技術データ：最大 400 t の車両重量を持つディーゼル電気ダンプトラックは、荒れた地形においても目覚ましい走行性能を発揮します。

よるコース上でのテストを行う必要性が減少しました。それに、安全性について妥協する必要も全くありません。

強力かつ柔軟性に優れたシミュレータ

SANY 社の HIL シミュレータには、高性能クアドコアプロセッサを搭載した DS1006 Processor Board が使用されており、極めて複雑なシミュレーション

モデルもリアルタイムで計算することができます。このプロセッサでは、さまざまな機能テストを行う際に、各種の計算タスクを複数のコアに分散させることができます。SANY 社では、信号処理を行う場合やプロセッサベースのモーターシミュレーションを信号レベルで行う場合、2つの DS5202 FPGA Base Board をベースとした dSPACE Electric Motor HIL

(EMH) Solution を活用しています。このソリューションでは、パワーエレクトロニクス制御の PWM 信号など、高速なモーター固有の ECU 信号を計測できるだけでなく、モーター制御用のロータリーエンコーダ信号を生成することができます。dSPACE では、SANY 社固有の要件に正確に合わせてシグナルコンディショニングを調整し、最大± 600 mA のフィードバック信号を伴う電流出力でセンサをシミュレートできるようにしました。また、SANY 社では CAN バス通信のテストを他の車両システムと共に行えるようにするため、2つの DS2202 HIL I/O Board を導入しました。これにより、エンジニアは RTI CAN MultiMessage Blockset を使用して容易にレストバスシミュレーションを実施することができます。

細部に至るまでのモデリング

SANY 社では、強力かつ柔軟性に優れたシミュレーション用ハードウェアを導入するだけでなく、ダンプトラックの極めて正確なモデルを作成したり、実際の過酷な作業環境に可能な限り近い状況を再現したりできるようにすることに注力しました。同社は、MATLAB®/Simulink® によるオフラインシミュレーションでこれらに対応できるようにすることを決め、さまざまな dSPACE Automotive Simulation Models (ASM) を実装することにしました。これらの ASM モデルは、既にダンプトラックの技術領域のすべてをシームレスにカバーしているか、または多大な時間や労力をかけずに調整できるものでした。ディーゼル電気システムをシミュレートするために使用したコンポーネントの 1 つに、ASM Engine Basic モデルがあります。このモデルには、ディーゼルエンジンに必要なすべてのパラメータがすでに再現されています。駆動装置のさまざまな電気コンポーネントについては、ASM Electric Components (ASM EC) Library を主に使用し、各コンポーネントを特別な用途に適合するよう個別に調整しました。また、カスタマイズされたいくつかのモデルも併用しました。個別に調整されたコンポーネントには、ジェネレータの他励同期モーター（修正された ASM EC）、インバータ (ASM EC)、整流器 (ASM EC)、中間回路 (ASM EC)、ブレーキレジスタ、および 2 つの非同期かご型牽引

「当社では、dSPACE の HIL シミュレータと ASM ツールスイートを使用して良い結果を得ることができました。そのため、さらに多くの dSPACE ツールを当社のツールチェーンに統合する予定です」

Lu Liling 氏、プロジェクトエンジニア、SANY Group 社

モーター (ASM EC) が含まれています。シミュレーションモデルは ASM Vehicle Dynamics Library によりほぼ完全にパラメータ化することができ、減速ギアからタイヤ、ステアリングシステム、ブレーキ、およびサスペンションまで、縦および横方向のあらゆる動的影響を再現することができました。ただし、無積載時の走行から 230 トン満載の最大利用時まで及びダンプトラックのさまざまな積載状態の影響に関する要素だけは、モデリングおよびパラメータ設定の際に唯一追加で統合する必要がありました。また、ダンプトラックが走行する困難な地形プロファイルを正確に再現する場合は、ASM Vehicle Dynamics にすでに含まれていた環境モデルを使用しました。これにより、短い距離の登り運転から急勾配の傾斜、さらに

は長い下り坂での連続運転まで、SET230 の駆動システムで求められる幅広く多様なニーズをカバーすることができました。

直感的なパラメータ設定と明確なビジュアル表示を実現

SANY 社では、dSPACE ModelDesk の GUI を使用して、モデルのパラメータ設定を直観的に調整したり、特別調整したコンポーネントを含む拡張パラメータセットを管理したりしています。また、ビジュアル表示ソフトウェアである dSPACE MotionDesk も活用しています。MotionDesk を使用すると、シミュレーション対象のさまざまな運転操作やシナリオを含め、結果をすべて鮮やかな 3D オンラインアニメーションで表現することができ、パラメータ変更の影響もリア

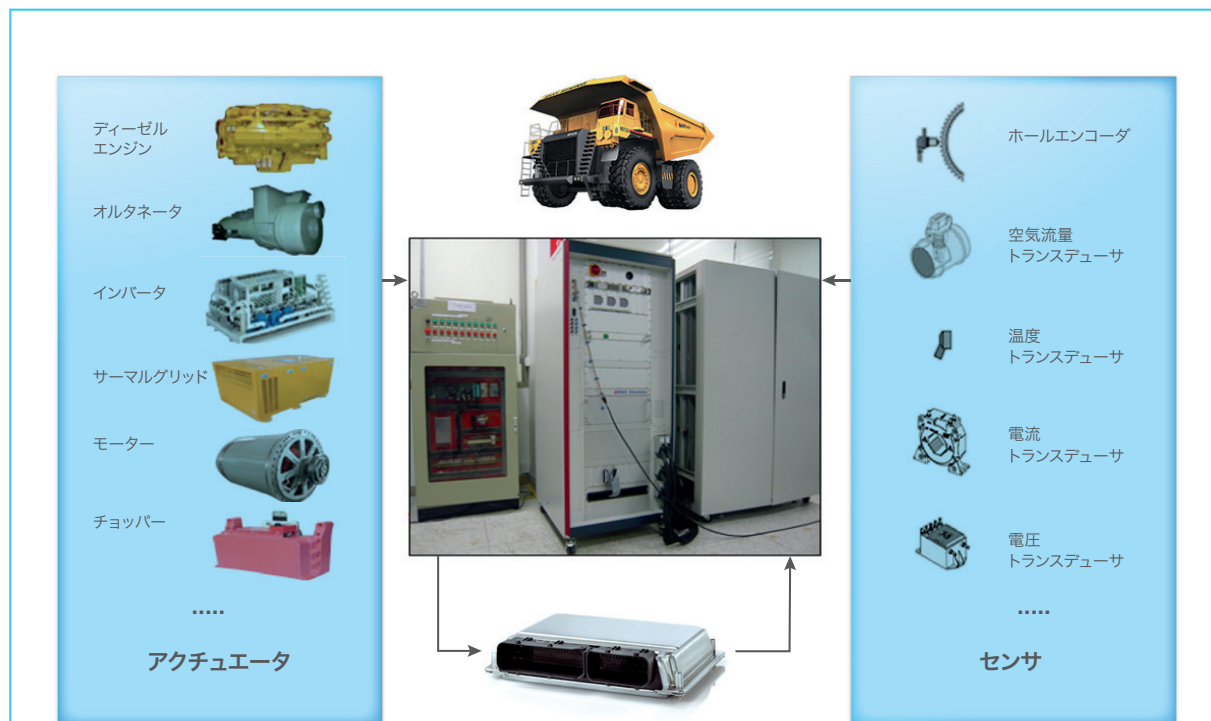
ルタイムで視認できます。SANY 社のエンジニアは、dSPACE ControlDesk でオペレーション全体を実行し、テストデータを記録しています。

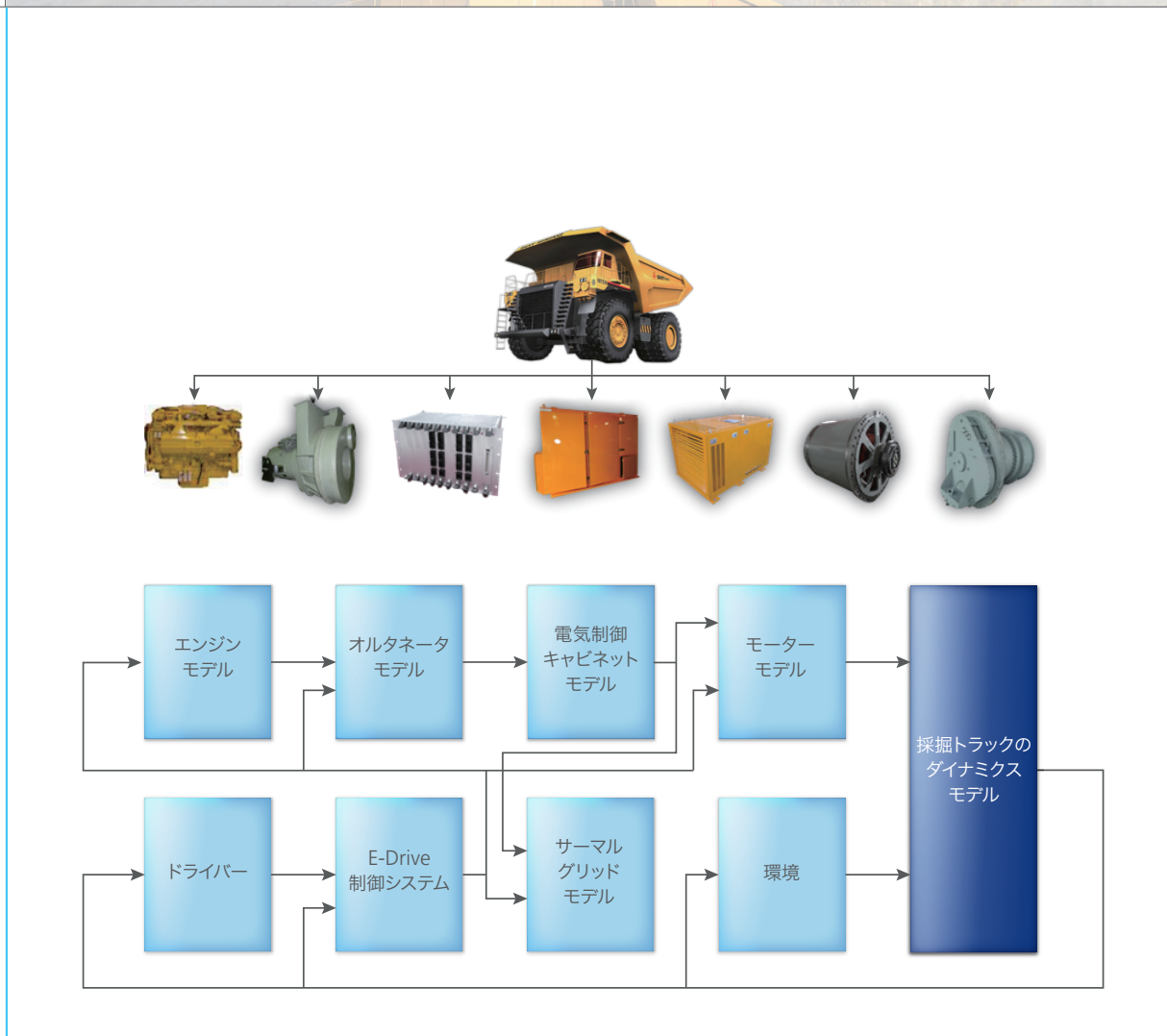
すばやい対応で運用開始をサポート

SET230 用の HIL シミュレータの開発は、すべてのハードウェアおよびソフトウェアコンポーネントを含め、dSPACE Engineering チームによって行われました。同チームは SANY 社と連携して、シミュレータを修正、実装、プログラミング、およびテストし、上海の現場で使用するターンキーシステムとして納品しました。dSPACE への発注からシステムの配備までに 8 ヶ月しかかからなかったため、SANY 社は予定通りに SET230 のモーター制御の開発を始めることができました

>>

バーチャルピークル：ターンキーシステムである dSPACE Full-Size シミュレータにより、SET230 のセンサシステム全体 (右側) およびアクチュエータコンポーネント (左側) が再現されます。これにより、SANY 社のエンジニアは実際のダンプトラックを使用したコストのかかるテストドライブを行うことなく、開発の早期の段階で基本的な制御方式を他の車両コンポーネントと合わせてテストすることができます。





幅広いモデルパラメータ：ダンプトラックのピークルダイナミクスモデルでは、ディーゼルモーターから Electric Drive の各種コンポーネント、オペレータ、および環境に至るまで、多数の要素が連携しています。

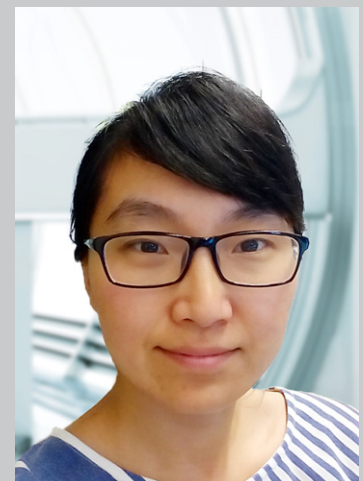
た。dSPACE のモデルベース手法および効率性や汎用性に優れたツールを使用することにより、SANY 社のエンジニアは日程通りにすべての開発手順を実装し、基本的な制御方式をテストし、かつ上海の現場で妥当性確認を行うことができました。プロセスの完了時には、考えられる最大の効率性と信頼性を備えたモーター制御を実現できました。dSPACE ツールを使用することにより、ラボでの開発時間と車両での適合時間がはるかに短縮され、またコストも大幅に削減されました。また、SANY 社は電動パワートレインに関するさまざまな経験を通じて、多くの知識を蓄積することもできました。この新たな経験は、新しい開発者チームを立ち上げる際の極めて大きな原動力にもなりました。HIL シミュレータと ASM モデルの導入の成功に続き、SANY 社はテストオートメーションソフトウェア AutomationDesk、量産コード生成ツール TargetLink®、お

よびデータ管理ツール SYNECT® などの製品を初めてとして、さらなる dSPACE ツールを同社のツールチェーンに統合する予定です。SET230 によって大型のディーゼル電気駆動ダンプトラック市場の突破口を切り開いた現在、SANY 社は今後さらに大型のモデルでその地位を拡大してゆく計画を立てています。近い将来、「動くアパート」は高い確率で 2、3 階増しとなる見込みです。 ■

Lu Liling 氏、Qi Lie 氏、SANY Group

Lu Liling 氏

SET230 採掘トラック開発チームのエンジニア、SANY Group (中国、上海)





明確なビジュアル表示：SANY 社のエンジニアは、dSPACE MotionDesk を使用することにより、HIL システム上でシミュレーション対象の運転操作やシナリオをわかりやすい 3D オンラインアニメーションで再現し、パラメータ変更の影響をリアルタイムでビジュアル表示することができます。

Qi Lie 氏
SET230 採掘トラック開発チームのエンジニア、
SANY Group (中国、上海)



誇りを持って取り組む開発チーム：SANY 社では、直感的に操作できる dSPACE ツールにより、ダンプトラックの開発およびテスト手順を大幅に簡素化し、開発期間を短縮できただけでなく、電動パワートレインを構成するさまざまなテクノロジーに対する理解を深めることができました。これらの新たな経験を利用して、高度な専門開発者チームが設立される予定です。