

製品紹介

PC950-11用電子油圧システム

Electronic Hydraulic System for PC950-11

名倉 忍
Shinobu Nagura
永田 紀孝
Noritaka Nagata

2022年7月に日本国内から発売開始したPC950-11は、主に碎石現場で活躍している従来機PC850-8E0の12年ぶりのフルモデルチェンジ機である。本機では、作業量向上と燃費改善の両立を目指し、新型エンジンを搭載するとともに、「電子制御式閉回路旋回システム」をはじめとした油圧システムの大幅改善を織り込んだことで、燃費効率40%改善を達成した。本稿では、PC950-11に織り込んだ電子油圧システムを紹介する。

The PC950-11, which was released in Japan in July 2022, is the full model change in 12 years from the conventional PC850-8E0, which is mainly used at stone crushing sites. To achieve both increased work volume and improved fuel efficiency, this machine introduced a new engine and a new hydraulic system including “Electronic Control Closed Loop Swing System”, achieving a 40% improvement in fuel efficiency. This paper describes the hydraulic system installed in the PC950-11.

Key Words: 閉回路旋回システム, 高効率再生システム, 燃費効率改善, 電子油圧システム

1. はじめに

油圧ショベルのトータルライフコスト低減やカーボンニュートラルに向けて、燃費効率を向上させることは建設機械の商品力向上のために重要なことであるとともに、建設機械メーカーとしての責務であると考え研究開発に取り組んでいる。最近では自動車の世界と同じく電動化によるカーボンニュートラルへの取り組みも行っているが一部機種に限られ、特にシリンダの駆動方式に電動モータ等の電動アクチュエータを備えたものは、パワーデンシティの観点からコマツに限らず、ごく小型の建設機械に適用されるのみである。動力源としては多様な選択肢が考えられているが、その先のシリンダなどのアクチュエータの駆動に油圧システムが用いられる状況は当面続くことが想定されるため、これからも油圧システムの効率を高めて、建設機械の燃費を向上させることは、とても重要なことであると考えている。

2. PC950-11で採用した電子油圧システム

ショベル用油圧システムとして燃費効率を向上する方法には、圧力損失を低減する、漏れを低減する、減速時等発生するエネルギーを回収して再利用（回生）する方法等がある。特に従来からある油圧ショベルでのロスとしては、分流ロスと呼ばれる圧力損失と、非常に大きな慣性を持つ上部旋回体を駆動・制動するときには発生するロスは比較的大きく、PC950-11（**図1**）ではこれらの大幅な低減を目指した。**図2**に電子油圧システムの概要を示す。

従来システムでは、二つの作業機ポンプの油ですべての作業機に分流して動かしていた。PC950-11では、旋回に電子制御式の専用ポンプを設け閉回路に構成した。またコントロールバルブ内のアーム掘削とブーム下げには後述する高効率再生が可能となるようにスプールの構造を変更するとともに、ブーム下げに関しては下げ速度アップのために別置きの再生弁も今回新たに開発した。これら再生弁やコントロールバルブの制御には、燃費効率向上および複合操作性向上のためスプールの電子制御を必要部位に取り入れた。またコントロールバルブ内の従来システムで旋回に用いていたセクションについてはアタッチメント（ATT）用バルブとすることで、多様なニーズに応えられるシステムとした。



図1 PC950-11

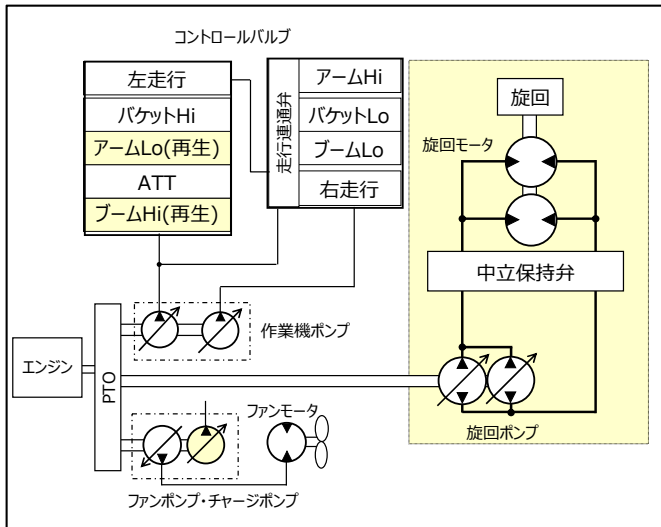


図2 PC950-11電子油圧システム概要

3. 電子制御式閉回路旋回システム

油圧ショベル用の旋回システムは、旋回と作業機の同時操作性を確保する目的で油圧ショベルの黎明期には旋回用に独立したポンプを持っていることが多かった。その後、特に中型クラスのショベルでは旋回用ポンプを廃止し、作業機と旋回を含む2ポンプシステムとして、QCDバランスの取れたシステムが主流となり現在に至っている。ところがここに来て前述のような事情から更に燃費効率の向上が重要となってきた。油圧ショベルの作業では、旋回と作業機の同時作業が多く、そのときに分流ロスが多く発生する。また旋回体の加速、減速時にもロスが発生する。そこで着目したのが旋回を作業機から独立させることで油圧ロスを低減するという閉回路旋回システムである。

またコマツでは、ブルドーザやホイールローダー、フォークリフトなどの走行駆動用として、閉回路のHST（Hydro Static Transmission）を開発し搭載してきた。この技術をショベルの旋回駆動用として適用したのが、PC950-11で採用した閉回路旋回システムであり、図3に示す特長を持つ。

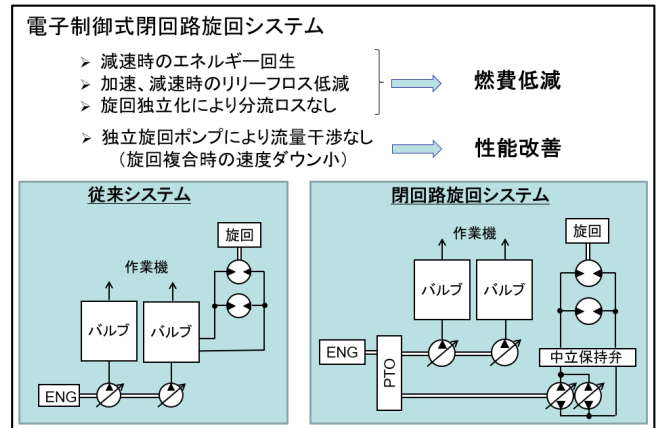


図3 閉回路旋回システムの特長

3.1 閉回路旋回システムによるロス低減

閉回路旋回システムにより燃費効率向上が可能になる仕組みについて図3に示した3つの項目について説明する。

3.1.1 旋回減速時のエネルギー回生

図4に従来システムと、閉回路旋回システムの、旋回減速時のエネルギーの流れを示す。従来システムでは旋回減速時に旋回モータから出た油をメインバルブの旋回スプールのコントロールノッチで絞り、減速圧を立ててコントロールしている。すなわち旋回スプールでロス（＝減速圧×戻り流量）を作って、旋回運動エネルギーを大気中に放出している。自動車に例えるとディスクブレーキで摩擦熱を発生させ車体の運動エネルギーを大気中に放出していることに等しい。これは従来システムでは必要なロスである。

一方、閉回路旋回システムでは、減速時に旋回モータから出た油で旋回ポンプを駆動し、エンジンを逆駆動する。自動車に例えるとエンジンブレーキに等しい。ダンプ積み込みなどの実作業時では、旋回ポンプの逆駆動エネルギー（回生エネルギー）を利用して、作業機ポンプやファンポンプの消費するエネルギーの一部をまかなうことができるので、燃費効率向上につなげることができる。ただし回生エネルギーが消費エネルギーを上回るとエネルギー蓄積手段を持たない本システムでは回生エネルギーを無駄にしてしまうことになるが、積み込み作業のようなショベルの主要作業においては、二つ以上の作業機を同時に動作させる複合操作が多いことから、実作業で無駄になるエネルギーは操作方法にもよるがわずかである。

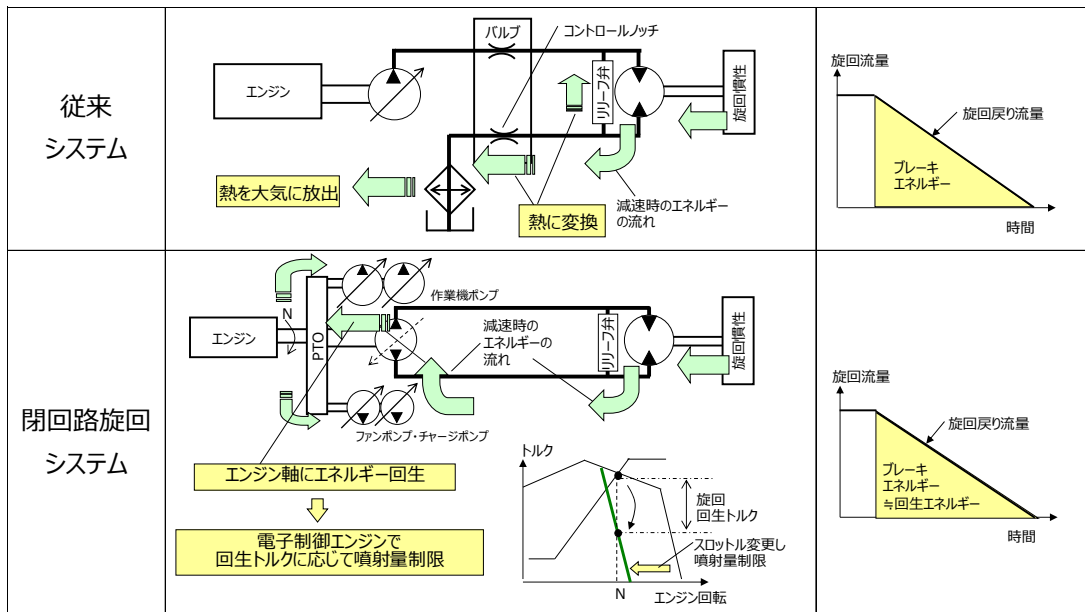


図4 旋回減速時のエネルギーの流れ

3.1.2 加速, 減速時のリーフロスの低減

従来の旋回システムでは、旋回停止状態からの加速当初は作業機ポンプを出た油の大半は旋回モータのリーフ弁より捨てられてしまう。いわゆるリーフロスである。一方、閉回路旋回システムでは、旋回加速時、減速時にはポンプ流量を最適にコントロールすることでリーフロスが最低限となるように制御している（図5）。

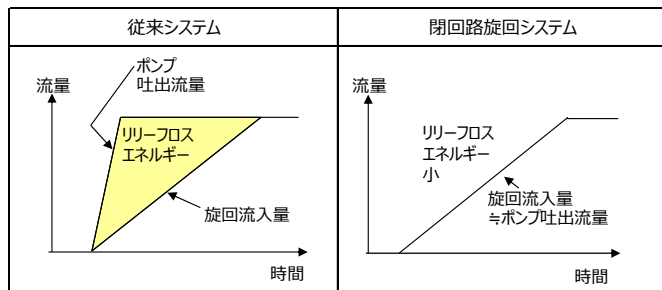


図5 加速時リーフロスエネルギーの低減

3.1.3 分流ロスの低減

図6に分流ロスの概念図を示す。ひとつのポンプで二つ以上の作業機を同時に動かすためには、負荷の軽い側の回路を絞る必要があり、このときに生じるロスが分流ロスである。閉回路旋回システムでは旋回が独立した回路であるから、従来システムで旋回と他の作業機を同時に動かすときに生じていた分流ロスエネルギーをゼロにすることが可能である。

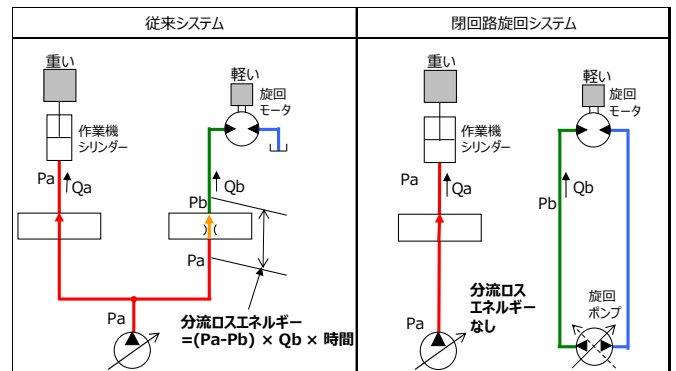


図6 分流ロスの概念図

3.2 PC950-11用閉回路旋回システムの構成

既出の図2に電子制御式閉回路旋回システムの構成を示した。閉回路旋回システムでは、ブームやアームなどの作業機用ポンプとは別に、PTOで接続した旋回ポンプを設ける。旋回ポンプを出た油は操作弁を通らずに直接旋回モータへと入り、旋回モータを出た油はそのままポンプへ吸い込まれる閉回路を構成している。ポンプはEPC弁（Electric-Proportional-Control、電磁比例制御弁）により容量を制御する電子制御ポンプである。中立保持弁は坂道での自然降下や坂上への旋回起動時の一旦落下を防止するためのバルブである。また旋回減速時の回生エネルギーが消費エネルギーを上まわり、エンジン回転が許容回転数を超過するオーバーランを防止する必要がある場合に油路を絞って回生エネルギーを熱に変える役割も担っている。前述のとおり、実作業中にこのような場面になるのはわずかであるが、単純に旋回単独操作で減速停止するような場合には、このオーバーラン防止制御が発動する。また本システムは閉回路となっており、閉回路中の油の補充や入れ替えのため可変容量式チャージポンプを搭載している。

3.2.1 旋回制御

前述の燃費効率の向上を可能にするとともに、旋回単独、あるいは旋回と作業機の同時操作において現行機以上の操作性を確保するため、PC950-11用閉回路旋回システムでは電子制御を行っている。図7は制御内容の概略図である。なお制御内容については、ハイブリッドショベルHB205の制御をベースに応答性の違いや車格の違いを考慮しチューニングを行った。制御対象が電動モータを制御するインバータなのか、油圧モータを制御する油圧ポンプの容量なのかの違いこそあるが、非常に似通ったシステムで

あり、特に旋回速度指令の生成方法や、作業機と旋回を複合操作したときの味付けなどは共通する部分が多く、これにより完成度の高い電子制御式閉回路旋回システムにすることができた。これらの制御ソフトはMATLAB/Simulink（※1）を使用し効率良く開発を行なった。

（※1）：MATLAB/Simulinkは、The MathWorks, Inc.社の商品。

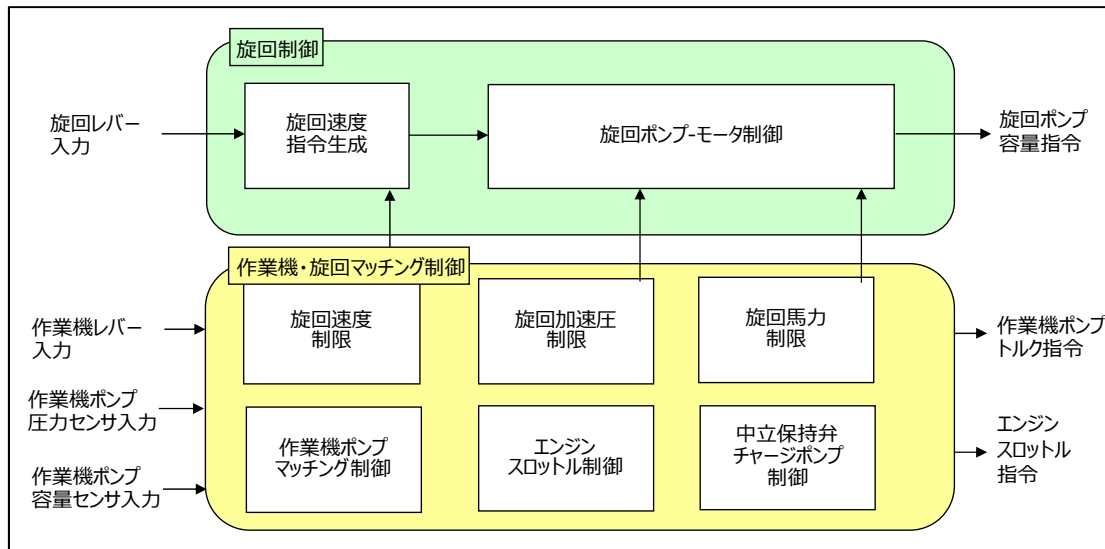


図7 閉回路旋回システムの制御概要

3.2.2 エンジンスロットル制御

電子制御式閉回路旋回システムにおいて、作業機ポンプ、旋回ポンプの吸収・回生馬力、エンジン出力馬力をマッチングさせ、いかに燃費効率向上につなげるかということが操作性とともに重要なポイントである。これを達成するために、時々刻々変化する旋回ポンプの回生馬力に合わせてエンジンのスロットル制御を行っている。すなわちオペレータのレバーの操作から旋回減速することが想定されると、旋回ポンプからエンジン軸に回生されるトルクを予測し、エンジン回転を保ったままエンジン出力トルクを下げるようにスロットル指令の変更を即時行なっている。この制御により、エンジン燃料噴射を効率よく抑制することができ、旋回減速時のエネルギーを無駄なく燃費効率向上につなげることができるようになった。一昔前に比べエンジンの燃料噴射が電子制御となり応答性が向上したことも大いに貢献した。

4. 作業機電子油圧制御システム

PC950-11では旋回のみではなく、作業機をコントロールする油圧システムにも電子制御を取り入れ、ロス低減とともに操作性の大幅な改善も行っているため、その内容について説明する。

4.1 高効率再生システム

作業機系のロス低減策の一つである高効率再生システムについて説明する。図8は、軽負荷時のアーム掘削＋ブーム上げの操作をした場合の油の流れを示している。従来システムではアーム掘削に使用する流量を一つのポンプでまかなう事が出来なかったため、もう一方のブーム上げに用いるポンプの一部をアームに合流していた。ブーム上げには比較的高圧が必要となるため、絞りを介して合流することになり、分流のためのロス、すなわち分流ロスが発生していた。これらのことからアーム掘削＋ブーム上げの速度は限定せざるを得なかった。PC950-11ではアーム掘削に高効率再生システムを搭載した。これはアーム掘削時にシリンダから戻ってくる油の一部を再度アームシリンダに送り再利用するものであり、これによりポンプから送り込む必要のある流量を減らし、アーム掘削に関して一つのポンプ流量で賄うことができるようになった。従ってもう一方のポンプについてはブーム上げに専念することができるようになり、アーム掘削、ブーム上げ速度ともに上がり、PC950-11の作業機速度の向上と燃費効率向上に大いに役立った。同様にブームの下げにも高効率再生システムを搭載しており、軽負荷時の作業機速度の向上に貢献している。

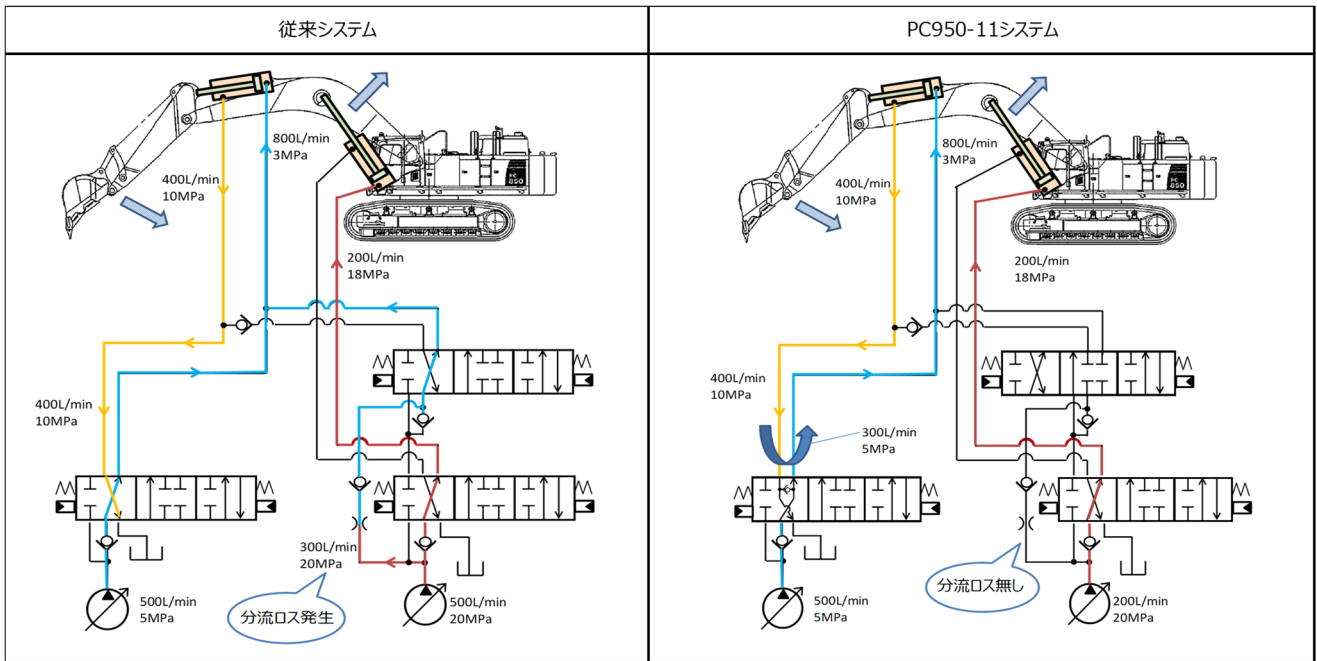


図8 高効率再生システムの概要

4.2 コントロールバルブ、ポンプの電子制御

掘削中や複合操作時の操作性・作業性向上によって作業時間短縮による燃費効率向上のため、コントロールバルブおよび作業機用ポンプの電子制御を行なっている。従来のOLSSシステム（Open-center Load Sensing System）では複合操作時は負荷の軽い作業機に油が流れてしまうため、複合操作時負荷が重い作業機はスピードが遅くなる特性があった。PC950-11ではコントロールバルブ、作業機用ポンプを電子制御することにより、重負荷側の作業機により多くの油を流すことが可能になった。図9は重掘削時のポンプからの油の流れである。従来システムでは土中での掘削時にはアーム、バケットの負荷が高いような場合、高負荷のアーム、バケットを動かそうとすると単軸動作が基本となり、サイクルタイムが遅くなる欠点があった。その欠点を補うためにポンプのトルク配分、流量制御、コントロールバルブの制御を実施し、負荷に応じてアーム、バケットまたはブームにより多く油を供給できるシステムを実現し、複合操作性を大幅に向上させた。

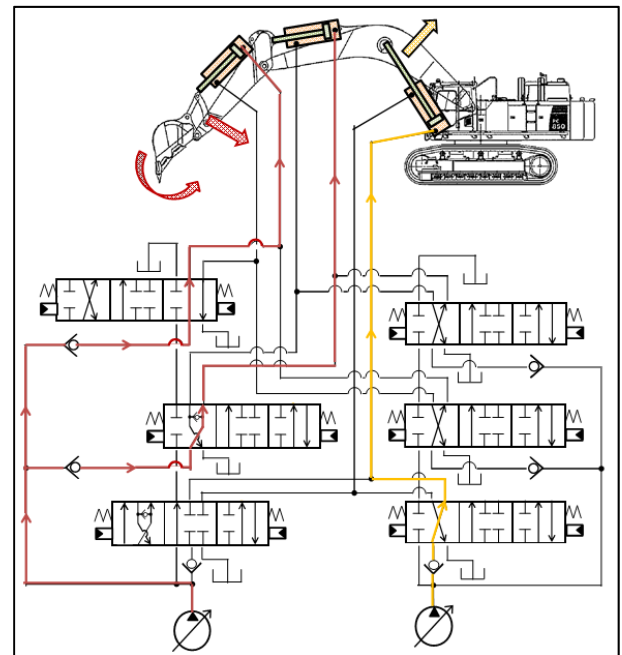


図9 重掘削時のポンプからの油の流れ

5. 油圧アシスト付き軽操作力PPCLレバー

本機では、オペレータと油圧システムとの最初の接点であるレバーに、オペレータの操作性・疲労軽減をねらい油圧アシスト付き軽操作力PPC（Proportional Pressure Control）レバーを新たに開発し採用した。電子制御による流量配分やポンプへの馬力配分の最適化や、作業機速度アップ、閉回路旋回システムや高効率再生システムの効果と相まって、とても軽快に操作ができるものとなっている。

6. 開発におけるMBD，MBSEの活用

本システムの企画・先行研究から開発では、MBD（Model Based Development）を採用した。特に先行研究段階ではシミュレーション、特に1D-CAEを大いに活用し、実機にて計測した波形をシミュレーションに入力し不具合を再現。対策検討・効果確認、制御ソフトへの実装と、とてもスピーディに開発を進めることができた。研究初期段階では、昼間に実機テストを行い波形を計測。夕方からシミュレーションにかけて、終業までに打ち合わせで対策方針を決定。翌朝に対策ソフト作成、シミュレーション上での効果確認、お昼前後には実機確認というサイクルを毎日繰り返すことで高速な開発を実現した。

先行研究から量産開発に移行する前には、MBSE（Model Based Systems Engineering）の手法を採用し、先行研究で得られた膨大な知見を失敗も含めて整理し、量産仕様として再構築する過程を見える化した。MBSEは仕様をモデリング言語にて記述する手法で、要求仕様の変遷、それに伴うソフト設計変遷のトレサビリティが取れる利点がある。この手法は後に中型ショベルの新開発にも採用されている。

7. おわりに

PC950-11の油圧システムは、企画段階では大幅な燃費効率向上を目指して開発を進めてきたが、実際に実機に搭載して仕上げていく中で、燃費効率のみではなく作業機の色度や応答性の向上、複合操作での作業のしやすさ、掘削の色強さなどの操作性、作業性のメリットも確認され、それを活かした形で商品化することが出来たと思っている。新型エンジンの搭載も含めて車両トータルで燃費効率40%向上を達成しており、今後市場での高い評価が得られることを期待したい。

筆者紹介



Shinobu Nagura

名倉 忍 1997年、コマツ入社。
開発本部 油機開発センタ所属



Noritaka Nagata

永田 紀孝 1995年、コマツ入社。
開発本部 ICTシステム開発センタ所属

【筆者からひと言】

2022年7月に日本国内から発売開始したPC950-11は、研究段階から開発、量産までさまざまな人が関わり、それぞれの思いが詰まった機種である。その思いがかなったのか、発売直後から大変嬉しい評価をいただいており、企画段階から関わってきた私にとって設計者冥利に尽きるというものである。海外への発売もアナウンスされており、多くのお客さまに使っていただき、その良さを実感して頂きたいと願っている。