

油圧ショベル積込み重量計測技術の開発

Development of Loading Weight Measurement Technology for Hydraulic Excavator

● 西 牧 潤* 平 沼 一 則*
Jun NISHIMAKI Kazunori HIRANUMA

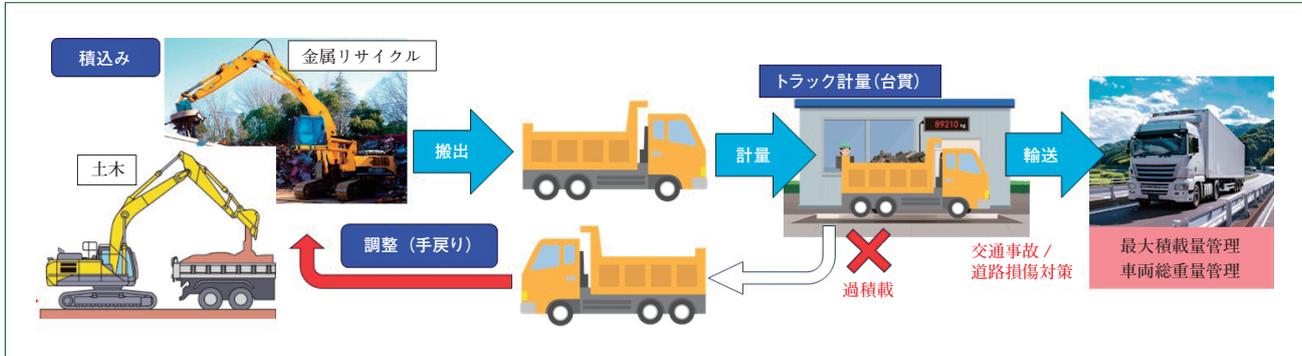


図1 油圧ショベル積込み作業現場
Loading work site by hydraulic excavators

油圧ショベルのペイロード機能は、トラックへの積込み作業中に搬送重量をリアルタイムで計量するシステムである。この機能により、オペレータは正確な積載重量を把握することができ、トラックの過積載防止と効率の良い輸送を可能とする。本報では、油圧ショベル標準機およびマテリアルハンドリング機向け製品の機能開発、製品実装および精度評価結果について報告するとともに、各種アタッチメントへの適応を目的とした機種展開と、開発効率向上のための手法について説明する。

The payload technology of hydraulic excavators is a system that measures the transport weight in real time while loading the truck. The operator can know the exact load weight, which prevents overloading of the truck and enables efficient transportation. In this paper, we report on the technology development and product implementation of products for standard hydraulic excavators and material handling machines and the results of accuracy. We will also explain the development of models that are compatible with various attachments and methods for improving development efficiency.

1 まえがき

油圧ショベルにおけるペイロード機能は、作業中に搬送物の重量をリアルタイムで計量して正確な積載目標を達成することを目的とした技術である。この機能によりオペレータはトラックへの正確な積載重量を把握でき、違法で危険な過積載や作業効率を低下させる過少積載を防ぐことができる。

実際の現場では、土砂や金属材料などの資材を積載したトラックが公道や構内通路へ出る際に積載物の重量を台貫によって計測する必要がある(図1)。このとき積載物がトラックの最大積載重量を超えている場合、運搬を予定した重量よりも少ない場合には、トラックは再度積込み位置まで戻り積載物の重量を調整した後に再計量する。このような手戻り作業が発生することや、それが繰り返されることでエネルギーの浪費やコストの増加にもつながる。また、船への積込み現場など台貫を使用せず経験による積込み量調整を行っている現場では、往々にして目標積載量に対し過少量の積込みとなるが、ペイロード機能を使用することで最大積載量近くまで積み込むことが可能となり、20%程度の積込み効率改善が見込まれる。これによりトラックの輸送回数が減り人件費、停泊料、CO₂排出の削減につながる。このように輸送の安全性

を確保しつつ輸送効率を向上させることができるペイロード機能の需要は、環境保全の観点からも高まっている。

主にバケットが装着され土砂掘削に使用される油圧ショベルの標準機において、ペイロード機能付きの製品は各社からすでに市場投入されており、このたび、当社でも商品開発を行い製品への実装を実現した。一方、マグネットやグラブが装着され金属スクラップや木材の搬送などに使用されるマテリアルハンドリング機においては、各社に先駆けて商品開発を行い、機械特性や作業特性に合わせてペイロード機能を追加した製品を上市した。

顧客ニーズや市況に対応した開発を速やかに行うには、ソフトウェアの早期開発とリードタイムの短縮が必須であったが、当社はモデルベースデザイン開発手法を採用することで、開発の効率化とソフトウェアの品質向上を両立した。また、機種やエンドアタッチメント展開のさらなる拡充を見据えてプロダクトライン開発の設計手法を導入し、設計品質の向上と設計リスクの低減を図っている。

当社のペイロード機能付き油圧ショベルにおいては、オペレータが通常行っている作業感覚はそのままに、計測精度が高くストレスフリーな機能設計を行った。特に、台貫補正機能を実装し、作業を重ねるごとにオペレータの癖や作業環境

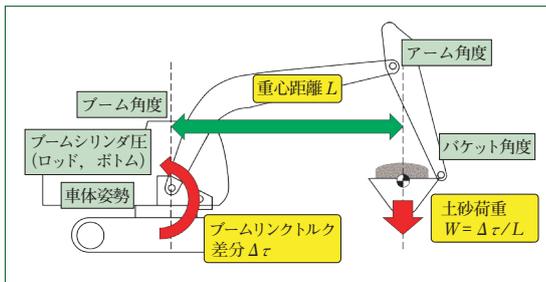


図2 基本重量計算
Basic weight calculation



図3 機種展開と対象アタッチメント
Model lineup and applicable attachments



図4 機種ごとの搬送軌跡の違い
Differences in transport trajectories

の影響を補正可能とした点や、スピードモードと調整モードの切り替え機能により搬送作業全体の速度を落とさず精度を保つ機能を実装した点を特長としている。これらの機能の詳細は後述する。

当社製品の顧客試乗会やモニタ試験を実施したところ使用感、精度ともに高い評価が得られ、市場に受け入れられる性能を十分に有していることが実証できた。

2 ペイロード機能の基本原

標準機、マテリアルハンドリング機ともに、基本となるペイロード機能の重量計算方法は同じで、ブームリンクトルク差分 $\Delta \tau$ を搬送物重心距離 L で割ることで搬送物重量 W を算出する(図2)。

重量計算に使用するセンサの構成例は、①ブームシリンダ圧力センサ、②アタッチメント角度計測センサ、③車体およびアタッチメント角速度センサだが、このほかにアタッチメント自重による空荷時のトルクや、ブーム・アーム、旋回の動作時に生じる誤差トルクを補償することで、搬送物のより正確な重量を算出する。さらに、掘削積込み中に安定した動作を行った瞬間の計算重量を切り出し、搬送物重量を確定させている。

3 ペイロード機能の技術開発

3.1 ペイロード機能の機種展開

ペイロード機能の対象機種は、バケットが装着された20t標準機およびマグネットが装着された33tマテリアルハンドリング機である。これに加えて、簡易にエンドアタッチメントを交換可能にするオプションとして、クイックヒッチが装

着された場合も対象としている。これらのうち、特にバケットにおいては顧客が装着するアタッチメント形式を特定できないという実情から、正確な諸元を知ることができない。この点においては、現場で可能な寸法および質量の計測方法の確立や、キャリブレーション機能による誤差の吸収などで対応している。図3に、機種展開と対象アタッチメントを示す。これ以外の機体サイズや対応アタッチメントの拡充を図るべく現在も開発継続中である。

3.2 標準機向けペイロード機能の開発

土砂掘削機である標準機を対象としたペイロード機能の開発では、土砂を掘削して持ち上げ、搬送してトラックに積み込むという一連の動作において、ペイロード機能が追加されてもオペレータは特別な操作を求められないストレスフリーであること、正確な重量を計測できることに重点を置いた。これは、すくい上げる動作にほぼ限定できる土砂掘削のオペレーション特性を最大限に活用するとともに、機械の配置と作業現場環境によって発生する動作軌跡のわずかな違いによる誤差要因への補償機能を加えることにより実現した。なお、土砂掘削作業の特性を分析しバケット姿勢の検知が不要であることを見極め、損傷を受けやすいバケット角度センサを不要とする設計としたことで、さまざまな用途に兼用で使われる機械にも搭載が可能となった。これらの機能開発により、高効率・高精度な積込み作業をストレスフリーに実行することができる。誤差調整の手戻り回数が激減することも相まって、現場での有用性は非常に高い。

3.3 標準機とマテリアルハンドリング機における使用方法の違い

標準機では図4左に示すように土砂をすくってこぼさないような搬送動作(バケットを手前に引き寄せて持ち上げるという軌跡)となり、姿勢を限定しやすく動作中のアームの動きは小さい。一方、マテリアルハンドリング機はスクラップ山のいたるところから金属材料を吸着・把持し持ち上げられることから、図4右に示すように作業現場のレイアウトや各オペレータの操作特性などにより軌跡や姿勢が限定しにくく、また動作中のアームの動きが大きくなる。さらに、各アタッチメントの質量が大きいため相まって搬送作業中の振動が大きくなりやすく、その結果精度が悪くなるという問題がある。

つまり、マテリアルハンドリング機のスクラップ積込み作業では、土砂掘削を行う標準機に比べて把持の瞬間の姿勢や搬送軌跡が限定しにくいという特徴がある。これに対して振動しないように丁寧な操作を要求することで高い精度を保つ

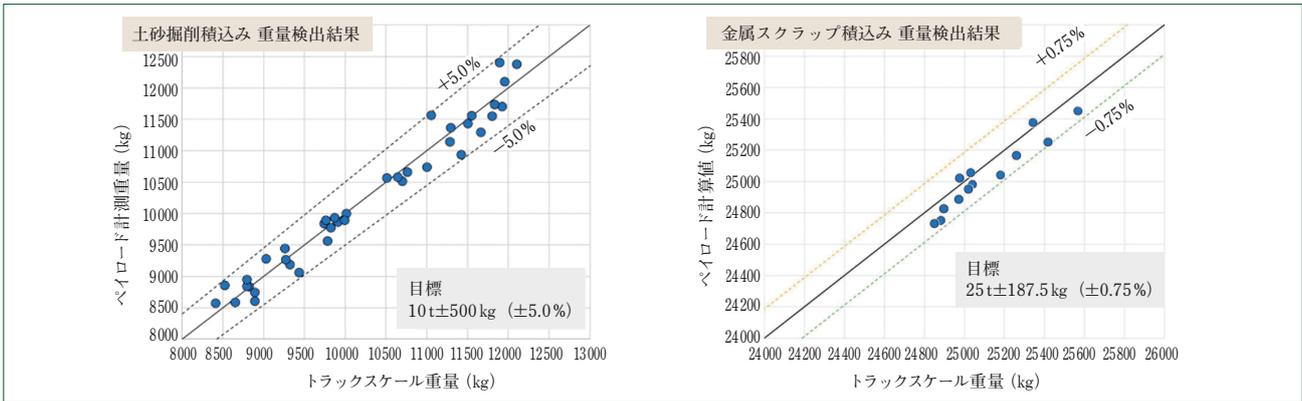


図5 積込み重量検出精度
Payload measurement accuracy

表1 積込み重量精度の目標仕様
Payload measurement accuracy target specifications

土砂掘削積込み作業	10t±500kg (±5%)
スクラップ積込み作業	25t±187.5kg (±0.75%)

こともできるが、オペレータに対する操作制約が厳しくなり、作業速度・効率の低下、オペレータの負担増加やストレスにつながってしまう。

3.4 マテリアルハンドリング機向けの技術開発

当社のマテリアルハンドリング機向け製品では、搬送作業の分析をもとに、トラックへの積込み作業を「スピードモード」と「調整モード」の2つの作業モードに分類することとした。

スピードモードは、計測精度よりも作業速度を優先するモードである。精度が低いと推定される動作による確定重量であっても、そのまま積算できることから計量に特別な操作は要求されず、通常の搬送作業と同様にストレスフリーな作業が可能である。

調整モードは、作業速度よりも計測精度を優先し、計量操作の安定性を高めるべく強い制限を課すモードである。操作制限値を満たさない場合はオペレータにエラーを伝え、再計測動作を求める。これは、スピードモードで積み込んだトラックの台貫計量後の再計測、つまり目標重量に対する誤差調整作業への使用を想定しているが、積込み作業全体のなかで調整モードによる積込み回数の割合はかなり少ない。つまり、現状では高精度計量のための丁寧な操作をオペレータに要求することや、所望の精度が得られない操作の場合のやり直しが許容されている。これら2つのモードは操作画面上からオペレータが任意に切り替えることができる。

このように、通常の搬送作業ではスピードモードによって計量を意識しない操作で大半の作業を行うことができ、調整モードの高精度計量により、調整作業の手戻りがおおよそ1回で済む。このことは、誤差が大きくなりやすいマテリアルハンドリング機でも、ストレスフリーと積込み作業の効率改善を両立できるという大きな効果をもたらす。

4 精度目標値と性能

表1に、標準機とマテリアルハンドリング機それぞれの積

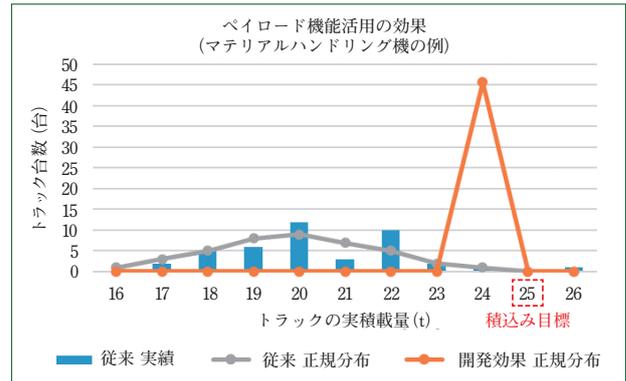


図6 ペイロード機能活用による効率向上効果見込み
Estimated effect by payload technology

込み重量精度の目標値を示す。

この後に記述する手法で作成されたソフトを性能検証機のコントローラに実装し、トラックへの積込み試験を行った。図5に、精度目標に対しての達成結果を示す。縦軸がペイロード機能で計測されたトラック1台分の積算重量で、横軸が台貫で外部計測された実重量である。実線は誤差がゼロとなる点を示し、点線で挟まれた範囲が目標仕様範囲を示している。すべての試験条件で計測誤差が目標精度を達成する結果となったことが示されている。

図6に、マテリアルハンドリング機を例にこの目標精度を達成したことによるトラックの輸送効率向上に対する見込み値を示す。ペイロード機能を使用しない場合、25tの積込み目標値に対して実測値は16~24tの範囲で正規分布の広いつきを示す。この25tに満たない分は、再度積込み量を調整することを数回繰り返すか、そのまま搬出される。一方、ペイロード機能を使用した場合は、1度の調整作業によって積込み量がほぼ24t前後の値に集約され、高い輸送効率を実現することが可能である。これにより、手戻りを繰り返す分の積込み作業時間が削減されることや、トラックの輸送台数が削減されることで、環境負荷や輸送コストに対して約20%もの大きな改善効果が期待できる。

5 開発効率ならびにソフトウェア品質の向上

5.1 モデルベースデザイン開発の導入による開発効率化

従来の開発は、作成したソフトウェアを実装して繰り返し実機試験が行われており、非常に効率の悪い方法であった。そこで、本開発におけるペイロード機能の実装用ソフト開発

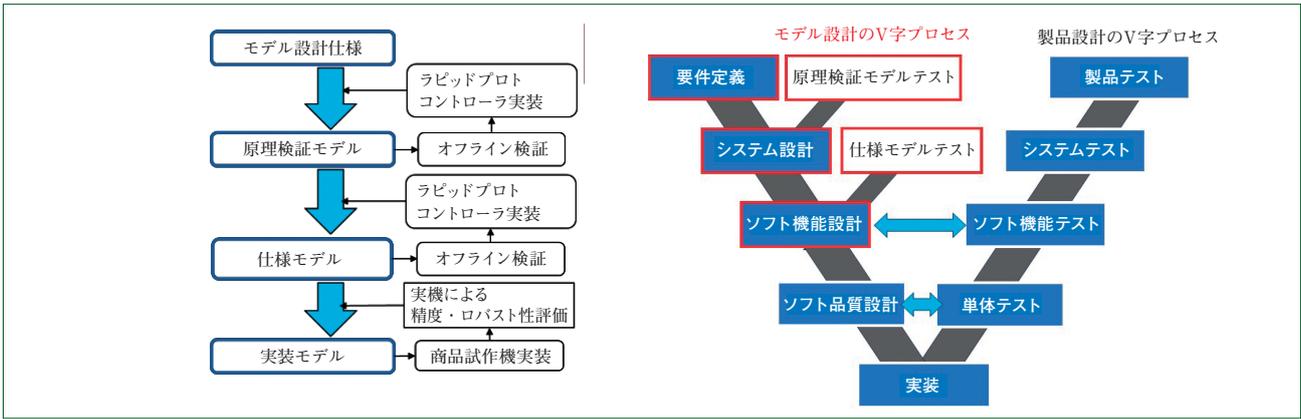


図7 ペイロード開発におけるモデルベースデザインのV字プロセス
V-process of MBD in payload development

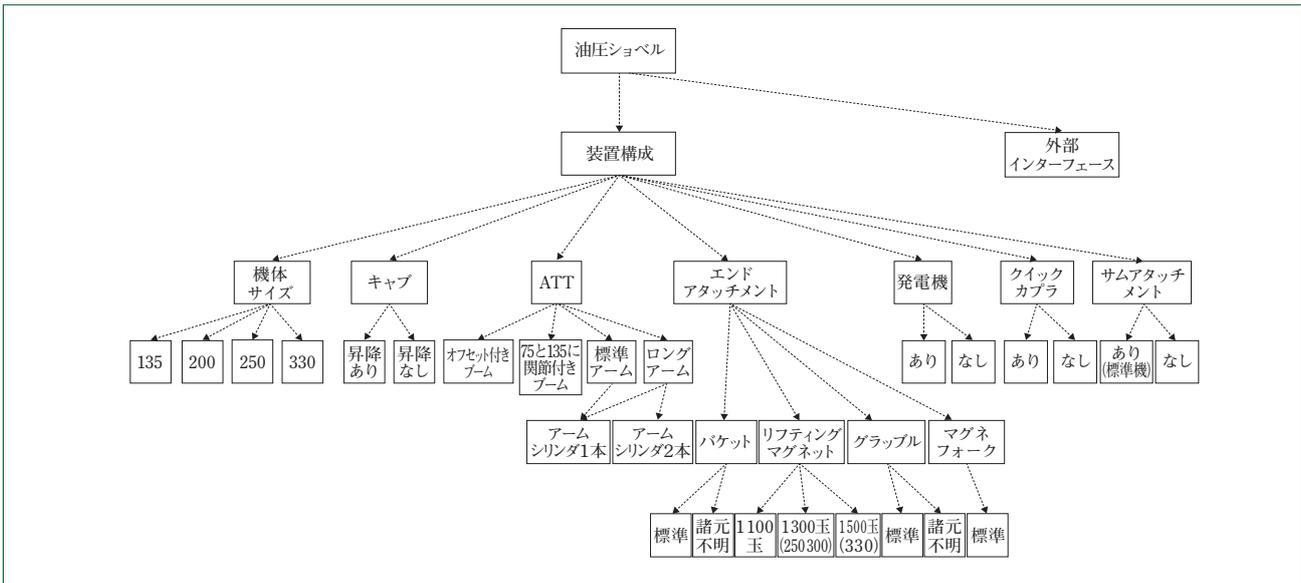


図8 機種展開におけるフィーチャー図
Feature diagram for model lineup

には、モデルベースデザイン開発手法を用いた。この手法により、シミュレーション技術による品質向上が早期の段階で可能となった。図7に、ペイロード機能のモデルベース開発におけるV字プロセスを示す。

図7の「原理検証モデルテスト」と「仕様モデルテスト」において、開発目標のリファレンスとする油圧ショベル動作データを活用したシミュレーションが可能となったことで、試作と実機実装試験を削減した革新的効率化を実現し、ソフトウェア開発のリードタイム短縮に非常に大きな効果があった。

5.2 プロダクトラインの開発戦略

油圧ショベルは、用途ごとに異なる機種サイズやエンドアタッチメントが選択され、それによって作業現場や運用方法も異なる。このことから、ソフトウェアの構成も変更が必要となる。このソフトウェア管理の問題を解決する方法として、自動車産業やエレクトロニクス業界のソフトウェア開発に広く使われているプロダクトライン開発手法を適用した。異なる機種間で共有できるコア資産を特定し、再利用することで開発リスクやコストを削減でき、品質の向上とトレーサビリティの確保を可能とする。本開発においては、機種展開に際しての機能変動点をフィーチャー図によって抽出し、それに

対応したペイロード機能のマッピングを行い、分類に基づいたソフトウェアアーキテクチャの再構築を行った(図8)。これにより今後の機種展開やアタッチメント展開に際して起こり得るリスクを大幅に削減し、ソフトウェアの品質を向上させることができる。

6 むすび

- (1) 油圧ショベル標準機ならびにマテリアルハンドリング機の2機種に対して、搬送重量とトラックへの積載量をリアルタイムで算出するペイロード機能を実装し、上市を実現した。
- (2) 機能の特長であるオペレーションの特性を踏まえた当社独自の重量計測手法により、作業性を損なわないストレスフリーかつ精度の高い重量計測手法を実現した。
- (3) 顧客試乗会や客先モニタ試験を実施し、高い評価を得たことで当社製品の優位性を実証した。
- (4) 製品の実現に際しては、開発効率向上を目的として建機機種にモデルベース開発手法を適用した。また、適用機種をさらに展開させるに当たって、ソフトウェアの品質確保を目的としたプロダクトライン開発を導入した。