

掘削機の変遷と技術動向

三 柳 直 毅

掘削機械の代表とも言える油圧ショベルは、約60年前に誕生し、その後いろいろな種類の建設機械の中で最も市場の成長が大きく、ミニクラスも合わせると、全世界の需要台数の約半分を占めるまでに成長している。この成長の背景には、都市化率の上昇があると考えられる。都市化率は先進国以上に新興国で上昇中であり、人口が集中する都市部では多種多様な作業が要求され、汎用製のあるショベルがそれらの工事を広くカバーできたためと考えられる。本編では、油圧ショベルを中心とした掘削機の変遷と最新の技術動向について触れる。

キーワード：機械式ショベル、油圧ショベル、変遷、作業性能、操作性、安全

1. はじめに

建設機械は、本来、ある作業を機械に置き換えて作業能率を向上させるために開発されてきた。掘削機械の場合は、名前のおり「掘る」作業が目標である。この中で代表格とも言える油圧ショベルは、他の建設機械がある作業に限定されているのに対し、動作の自由度の高さから開発当初の「掘る」目的以外の用途にも拡大され、図-1¹⁾に示す国内の生産高に見られるように伸び率が最も大きくなる要因となっている。本稿では、特にショベルを中心に、前半に主要部分の変遷を、後半は最新の機械を中心とした技術動向について触れる。

2. 機械式及び油圧ショベルの誕生

(1) 機械式ショベルの誕生

ショベルの誕生は1838年と言われている²⁾。動力源は蒸気、フロントはロープで動作し、足回りは車輪である。このタイプは時代につれて大型化すると共に、足回りも接地圧の低い無限軌道のクローラ式(1912年)となり、大正時代に導入された台湾の烏山頭ダムの施工では1回で 2m^3 をすくい上げている³⁾。1903年には動力源として電気式、1914年にはエンジン式が登場したが、国産はそれぞれ1931年神戸製鋼50K(1.5m^3)、1949年日立U05(0.5m^3)と遅れている。フロント動作はワイヤロープ式でクレーン、クラムシェ

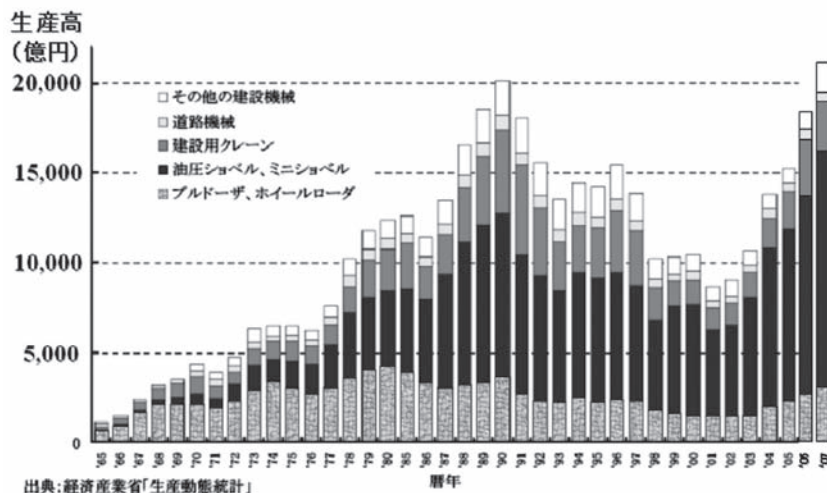


図-1 建設機械の国内生産高の推移

ル、ドラグライン以外にも図-2に示すショベルタイプ、バックホウタイプが多く使われていたようである。クレーンを除くと基本的に「掘る」ための形態であり、初期段階から目的に合わせた汎用性を持っている。

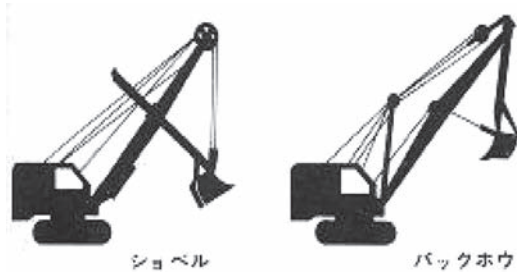


図-2 機械式ショベルのフロントタイプ

(2) 油圧ショベルの誕生

油圧ショベルは1948年にCarlo & Mario Bruneriによって初めて開発された²⁾。国産は1961年シカム社から技術導入した新三菱重工製、純国産は図-3に示す1965年日立製が最初となる。図-1に示す生産統計とも重なる時期である。この登場以来、機械式に比べ、油圧ショベルは操作が簡単で正確な掘削が可能であることから急速に置き換わっていった。ちなみに、筆者も機械式、油圧ショベルの両方を操作した経験があるが、油圧ショベルから始めたことから機械式はとても使えたものではなかった。当時まだ稼働中の機械式を使いこなしている方々に敬意を表した記憶がある。



図-3 機械式(左)及び油圧(右)ショベル1号機

3. 油圧ショベルの変遷

(1) 油圧ショベル初号機

1968年には、バケット容量を基準にすると、現在主流となっている20tクラスの先祖とも言える16.4tのショベルが発売された(図-4)。

このクラスの初代(UH06)の仕様を見ると、図-5に示すように、すでにフロント動作の複合性を確保



図-4 初代の20tクラス油圧ショベル

した2ポンプ2バルブ式を採用している。この機械では当初より可変容量型の油圧ポンプを採用しており、操作レバーの操作量に応じてポンプの吐出量を変化させる外部コンペン制御も備えていた。ブームも2ポンプ合流式で、普通の掘削ではサイクルタイムも18~25秒とカタログに記載されており、現在の性能と比較しても侮れない速さを持っている。

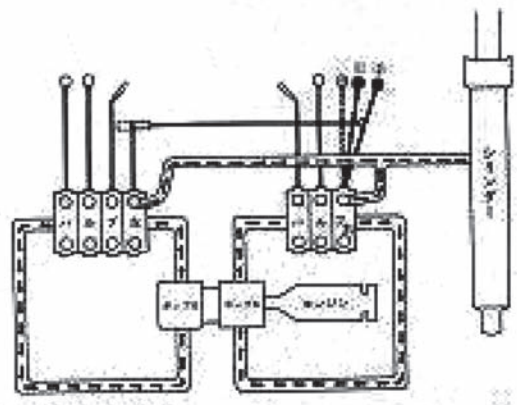


図-5 2ポンプ2バルブシステム

以下、20tクラスを対象に初代と比較しながら、特に変化が大きい部分を対象として変遷を述べる。

(2) 動力源の変遷

図-6にエンジン馬力及び油圧の変遷を示す。初代85PS、175kgf/cm²に対し、油圧が先行しながら最新の仕様166PS、370kgf/cm²とそれぞれ約2倍に増加している。

これらの仕様値は掘削力、旋回力、走行力、あるいは作業速度といった作業の生産性に直接関わるもので、前述したように初代の遜色ないサイクルタイムを見ると、むしろ掘削力等の性能向上の方に大きく寄与しているようである。

このような作業性能面の向上は、燃費の向上或いは同等の車格で掘削力などの力を伝達する構造物にとっては厳しい方向に作用することになる。これに対応する油圧システム、構造物の信頼性、モノづくり品質などがメーカ各社の隠れた競争部分になっているとも言える。

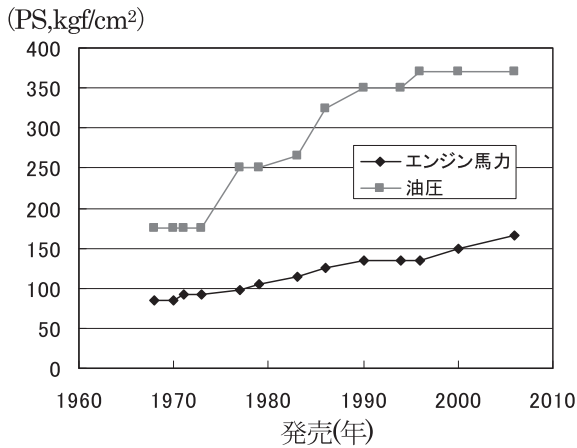


図-6 エンジン馬力と油圧の推移

(3) 足回りの変遷

足回りはショベル式と呼ばれ、今でもクレーンで採用されているトラックリンクのないタイプである。足回りは、図-7に示すように、旋回輪下のトラックフレーム内に備えられた走行モータよりチェーンを介して駆動される。チェーンの伸び等を調整できるようにsprocketの位置を大きなネジで調整できるようになっている。その後、表-1に示すように、走行駆動方式はチェーン式からダイレクト駆動式へ、またシュー幅内にモータ及び減速機が納まるようになっている。

(4) 操作レバーの変遷

キャブは今から見ると非常に狭いが、それでも当時のカタログでは、広々としたキャブ内スペースとうたっている。初代の操作レバーは6本で床から立ち上がっている。当時の操作レバーは油圧のコントロール

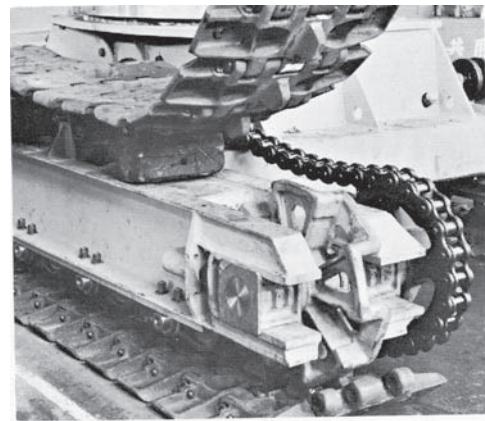


図-7 20tクラス初代の足回り

バルブスプールをロッドやリンクを介して直接操作する直引き式で、走行用が2本、フロント・旋回用が4本のレバーで操作するものである。掘削時は4本のレバーを同時に操作する必要があり、最外側のブーム・旋回は手で、内側のアーム・バケットはレバー根元にあるペダルを足で操作し複合動作を行っていた。その後、表-2に示すように、1本のレバーに前後と左右の2方向操作を割付け、足を使わずに操作が可能な方式、さらにレバーの位置をシートの前側からシートサイドへ移し楽な姿勢で操作可能なアームレスト式へと変遷してきている。

機構的にも前述の直引き式から油圧パイロットバルブを使う油圧パイロット式と変わってきている。操作レバーはオペレータが直接接触するところであり、操作性の評価、オペレータの疲労や好みにも直接関係するところであり各メーカとも苦勞していると思われるが、操作性とのバランスをとりながら、レバーのストロークをより短く、操作力を軽くする方向で変遷してきている。

4. 最近の技術動向

前章では初期の油圧ショベルに対して、特に変化の大きい部分をトピックとして取り上げたが、最近の

表-1 足回りの変遷

チェーン駆動式	初期ダイレクトドライブ	中期ダイレクトドライブ	初期シューイン	現在シューインタイプ
チェーン駆動式、ショベル式のシュー	油圧モータのダイレクトドライブだが、減速機が大きくでっぼている	減速機や走行モータが邪魔にならないようにレイアウトされている	シュー幅内にモータと減速機が納められている。配管はフレームの外側	最近では配管をフレーム内に通している。モータは2速タイプが多い。

表一 2 操作レバーの変遷

4本レバー	床立ち2本レバー	スタンド2本レバー	アームレスト式	Wスライド式シート
				
両手と両足で4本のレバーを操作する4本レバー式。レバー方向は前後のみ。	1本のレバーに前後・左右の2操作方向を割付。床立ちなのでストロークは大きい。	スタンド式でレバーが短く、ストロークも小さくなった。	安全性のため、ゲートロックがそなわるようになった。これ以降大部分がパイロット式。	操作レバーに対しシートが前後して体型に合わせられるほか、レバー・シート全体がスライドし、オペレータの前後方向位置を調整できるようになった。

改良は、基本的な掘削、走行、操作といった生産性に深く関わるもの以外に、居住性、安全性、メンテナンス性、環境対応と多岐に亘っている。本章では、最近の技術動向を中心に述べる。

(1) 生産性

「掘る」機械の使命とも言える生産性の向上のためにエンジン出力はモデルチェンジごとに継続して増加しているが、一方で低燃費、排ガス規制の対応など相反する要求にも応える方向にある。

燃費向上に関しては、作業量重視か燃費重視かでエンジンおよび油圧システムの制御により作業モードを切り換えられるようになってきたが、更に燃費重視でもエンジン回転・トルクの最適制御で作業量を確保する技術が搭載されてきている。

また、図一 8、図一 9 に示すように、燃料を高圧化して各インジェクタに均一に供給するコモンレール式燃料噴射システム、及び一度燃焼させた排出ガスの一部を吸入空気と混合して再燃焼させるクールド EGR システムなど、高出力化と排ガス規制を両立させたエンジンも搭載され始めている。今後も排ガス規制は強化される方向にあり、後処理装置の開発と共に電動化に向けた開発も活発である。

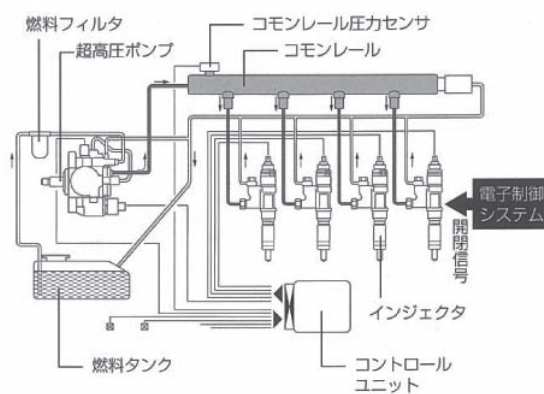
一方、油圧回路の改良によって生産性を上げる工夫も行われている。例えば、シリンダの戻り側の油を作業油タンクに戻さずに直接シリンダの反対側に戻すことで、シリンダ速度を速める「再生機構」の採用も増えてきており、軽負荷時の作業スピードを早めたり、水平引き時の複合性を向上させ、生産性を上げることに貢献している。図一 10 は最新の一例で、アーム引き動作、及びアームとブーム下げ複合時にそれぞれスピードアップが図られている。

また、掘削以外のアプリケーションの拡大にも対応

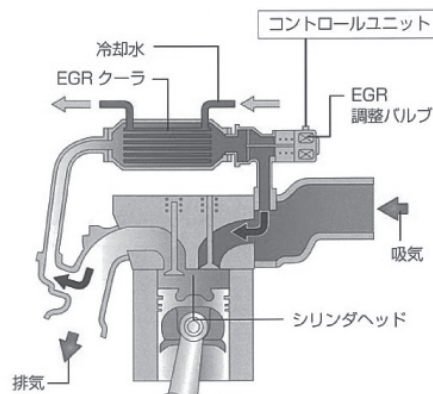
すべく、

- ・ プレーカ等のアタッチメント作業モードを選択できるようにし、最適な油圧システムで生産性を高める、
- ・ 一時的にリリースセット圧力を上げて掘削力を増加させるパワーディギング、
- ・ 矢板引抜作業等で負荷の大きい時自動的にリフト力をアップするオートパワーリフト、

といった個別の作業に対する生産性向上のための機能も付加されている。



図一 8 コモンレール式燃料噴射システム



図一 9 クールド EGR システム

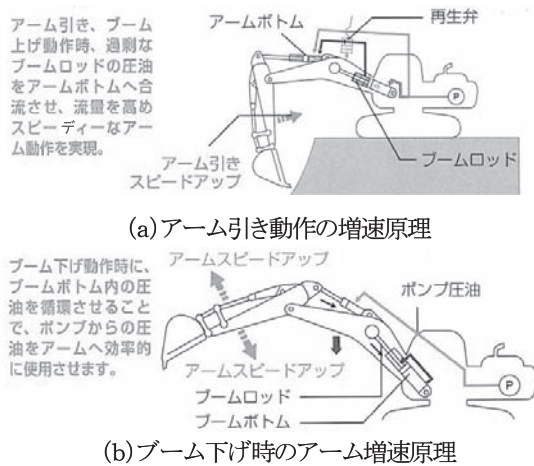


図-10 フロント動作増速原理の例

(2) 耐久性・信頼性

3. (2) で述べたように、世代と共に掘削力等が増加し、機械に作用する力も増加している。これに対応するため、各社過去の機械情報や応力解析、実機測定といった情報から構造物の改善を行ってきている。特にここ数年ではCAD及び解析技術の進歩により、コンピュータ上での事前検証が可能になり、単に板厚を上げるのではなく、よりスリムにより機能的に構造物を構成し、結果として作業中に無駄な燃料消費を少なくし、生産性向上に役立っている。

また、耐久性の面では、メンテナンスインターバルの延長を目指して、例えば、力を伝達する接触面も進化している。図-11はその一例で、タングステンカーバイド(WC)溶射の有無による、アーム先端ボス部の耐久試験結果を示す。溶射を施したものは、1,000時間無給脂にもかかわらず傷がないのに対し、溶射がないと、300時間ですでに傷が多数付いてしまうのがわかる。これ以外にプッシュなども、他の部位のメンテナンスサイクルと同等の長寿命化が図られている。

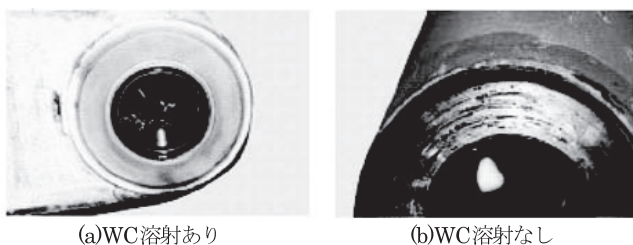


図-11 ボス部の耐久試験結果の一例

(3) 居住性・操作性

キャブは、ここ数年幅1mを超える広い空間を備え、快適性と一方で安全性も向上させている。

居住性に関しては、キャブ全体を液封式防振ゴムで

支えることでオペレータへの振動及び騒音を極力抑えて、運転が長時間に及んでも疲労することが少ないように設計されている。

また、各社モデルチェンジと共に、エアコンのオプション採用から標準化へ、次に冷暖房能力の大幅向上、更にはバイレベルフルオートエアコンの採用と進化してきた。図-12にバイレベルフルオートエアコンにおける風の流れの例を示す。従来の自動的に温度管理する機能に加え、室内、室外の温度条件により複数個の噴出し口から最適な噴出し口を自動的に選択する機能を持っている。加えて外気導入型のエアコンとし、加圧キャブ化することで密閉性を上げ、キャブ内騒音低減及びほこりの進入を防ぐ工夫がされている。エアコン仕様においては、前面に配置されたダクトが直接オペレータに暖冷気を吹付けることができると共に前窓のデフロスタとしても使え、居住性の向上に貢献している。

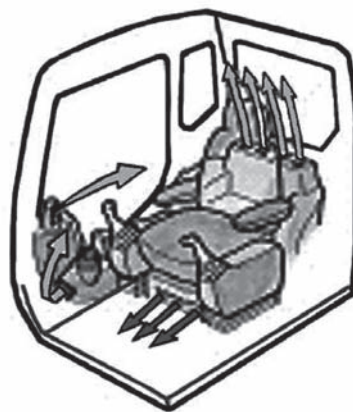


図-12 エアコンの風の流れ

本来のキャブの機能である視認性に関しても、図-13に示すように強度向上と両立させながらガラス面積を増やし、作業性、操作時の安全性確保に寄与している。



図-13 キャブからの視認性向上の例

(4) 安全性

油圧ショベルが使用される土木・建設業においては、労働災害の撲滅が非常に大きな課題である。こうした要望に対し、車体側にも様々な機能が付加されている。

例えばシートベルトに関しては、ここ10年くらいの間にオプションから標準装備となり、また不慮の事態で車体に閉じ込められた場合に窓ガラスを割り脱出するためのハンマー、あるいは窓枠取り外し機能といったものが装備された。

また、図一14に示すように、後方監視カメラとモニタを備え、走行時のレバー操作によって自動的に画面が切り替わる、などの機能が搭載され、音による作業への警報とオペレータによる周囲作業者の視覚的確認の両面から安全性を確保できるようになってきている。



図一14 後方監視カメラ (左) とモニタ (右)

前述した快適性と視認性を向上させつつ、強度を持たせたキャブの採用も安全性を重視した結果としての付加機能である。

図一15はJCMAS（日本建設機械化協会規格）が規定し最近ISO化された、転倒に対する安全基準（ROPS, Roll Over Protective Structure）に対応したキャブ構造の一例である。ここでも実際に転倒したときのキャブの変形がシミュレーションにより再現され、これらの事前検証技術が、変形を抑えオペレータを保護するための構造に寄与している。



図一15 ROPS 対応キャブ構造

(5) アプリケーション対応

かつては標準仕様に対し、せいぜい足回りの長いLC（ロングクローラ）仕様しかなかったが、顧客ニーズに応じて重掘削仕様、解体仕様といった用途別仕様機が準備されるようになってきた。また、自動掘削或いは掘削のモニタリングを行える情報化施工に対応した機種も品揃えされている。更にここ数年では、法令で定める構造と安全装置を装備し、日本クレーン協会規格に合致した小型移動式クレーン（MLクレーン）仕様機の普及率が急速に高まっている。労働災害撲滅の見地からも今後の普及が見込まれる。旋回半径を小さくし、衝突や挟まれ事故をなくすことに貢献する小旋回型機、超小旋回型機、後方小旋回型機の台頭も、最近の傾向である。従来あったブレーカや破碎機といったアタッチメント対応は、こうした機能をより付け易くしたベースマシンの開発といった結果を導いているが、更に様々な専用機の開発も、このところ各社で盛んに行われている。

5. おわりに

代表的な技術動向を取り上げたが、建設機械メーカーが進めているサービス対応を中心とした情報系（例えばKOMTRAX, e-Service）、あるいは情報化施工など取り上げられなかった動向も多い。また、1990年頃には日本での稼働が最も多かったが、ここに来て、BRICsなどの新興国を含め、よりグローバルに稼働台数とエリアが拡大し、その分その国々独自の要求も加わり、油圧ショベルに対する要求・課題は更に多岐に亘ってきている。昨年の後半から急激に需要が減ってはいるものの、油圧ショベルは更に需要が拡大する機械であり、今後もグローバルな要求に応えるべく進化し続けていくと信じている。

JCMMA

《参考文献》

- 1) 建設機械工業会まとめ
- 2) 岡本、建設機械の歴史、建設の施工企画、'08.1
- 3) 日本建設機械化協会編、日本建設機械要覧2007、p7

【筆者紹介】

三柳 直毅（みやなぎ なおき）
日立建機株
事業戦略室
室長

