

6. ベテランオペレータの操作パターンのモデル化による 油圧ショベルの自動掘削

株式会社 小松製作所	○森澤 直樹
株式会社 小松製作所	今西 将也
株式会社 小松製作所	井門 佳那子
株式会社 小松製作所	小山 幹
株式会社 小松製作所	勝呂 大
株式会社 小松製作所	柳下 正紀
株式会社 小松製作所	千葉 貞一郎
株式会社 小松製作所	山元 弘
(国研) 土木研究所	遠藤 大輔
(国研) 土木研究所	橋本 穎

1. はじめに

建設業は、新たな構造物の創出により生活を豊かにするだけではなく、自然災害の多い我が国において、災害復旧でも重要な役割を担っており、社会基盤を支える不可欠な分野である。

一方で、少子高齢化に伴う労働人口の減少および若手の担い手不足により、深刻な労働力不足に直面している¹⁾。

この課題への対策として、国土交通省は2016年より「i-Construction」施策を推進しており、2024年には新たに「i-Construction2.0」として、2040年度までに省人化3割を目指し掲げている²⁾。

建設機械の自動化はこの対策の一つとして位置付けられ、ブルドーザや油圧ショベルでのICT施工がその代表例である。建設機械のICT化により、施工に必要とされる精度を担保できる自己位置の認識が可能となり、事前の丁張りなどの補助作業を無くし、補助作業員の作業工数削減が実現した。成形や仕上げの工程においては、機械の部分的な自動化によりオペレータの技能に依存せず、出来形ばらつきの低減を可能にした。また、施工中のバケットの刃先軌跡データを施工履歴として活用することで、施工後の検測作業の代替となり大幅に生産性が向上した。

しかし、現状のICT施工はオペレータが搭乗することが前提であり、限られた工程において、モニタリング機能としてのガイダンス表示や車体制御の部分的な自動化により、機械がオペレータの操作を補助する形に留まっている。特に、油圧ショベルの主作業である掘削作業の自動化は、実用に至っていない。このため、建設機械の自動化においては、適用範囲（工程）の拡大とオペレータの省人化

が課題である。

油圧ショベルの掘削は、掘削対象の土質やバケットに抱えた土の影響を受け、車体への負荷が常に変動する。この負荷変動に対し、適切な操作介入による適応的な制御が行われなければ、掘削効率は低下する。オペレータは運転技能を磨き、短時間で効率よくバケットを満杯にするが、この技能の習得には多大な時間を要する。

従来の建設機械はオペレータの搭乗を前提に進化してきたが、今後は自動運転技術を活用したオペレータの技能に依存しない機械としての進化がより注目されるであろう。そのためには、油圧ショベルの主作業である掘削工程の自動化は有効であり、この実現によりさらなる生産性向上が期待できる。

ICT施工に対応するため、状態認識を目的とした車体センサが建設機械に多く取り付けられている。この車体センサのみで制御ができれば、ソフトウェアのアップデートによる従来機への機能追加(SDV: Software Defined Vehicle)も可能であり、最低限のコストアップでの実現にも期待が持てる。

本稿では、オペレータの掘削操作の根底にあるパターン（以降、操作パターン）に着目し、この操作パターンを機械側で再現することで、単純な制御ながらも高い汎用性を持つ自動掘削の実現可能性について報告する。

2. 既往研究に対する本研究の位置付け

2.1 関連研究

ベテランオペレータと新人才オペレータの掘削効率には顕著な差異が見られる。オペレータは、操作レバーの入力に対する車体の反応や動きを、視覚

などの人間の感覚により把握し、次の瞬間の適切な操作方法を判断し、逐次操作に反映させている（図-1 参照）。このプロセスは、「認知⇒判断⇒操作」という処理を断続的に繰り返しており³⁾、掘削動作を実現するためには有効な方法であると考えられる。ベテランオペレータは経験を重ね、感覚を養いながらこれらの技能を磨いてきたため、高効率の掘削操作は容易ではないとされている⁴⁾。

このような背景から、従来の自動掘削の研究では、操作方法は考慮する一方で、事前に決定した掘削軌跡に多関節ロボットの制御理論を適用して追従制御を行う、「位置制御型」による自動掘削の研究が広く行われてきた⁵⁾。しかし、この方法は、土質が一様でない場合や、地盤の硬度のばらつきによる負荷変動時に、既定の目標軌跡を維持しようとするため掘削効率が低下することがある。

そのため、掘削時の負荷が小さい仕上げ掘削の工程などでは効果的であるが、土質の急変など外乱要因の影響を受けやすい荒掘削の工程においてはロバスト性を充分確保することが難しい。

また、近年のAI（人工知能）の発展に伴い、ベテランオペレータの掘削操作をAIに学習させ、状況に応じた操作方法を生成させて油圧ショベルを制御する研究も増加しており、実証実験が進められている⁶⁾。この方法は、様々な環境変化へ対応が可能である一方で、大量の高品質な教師データが必要であることや、品質保証およびAIの使用に起因する安全性の検証に課題が残されている。



図-1 オペレータの掘削操作

2.2 本研究のアプローチおよび仮説

筆者らは試作車の品質確認を行う部門に所属しており、複数のベテランテストオペレータの指導の下で油圧ショベルの運転技能を習得してきた。

ベテランテストオペレータから効率の良い掘削方法について学ぶ過程で、掘削操作の根底にある基本的な操作パターンは単純であり、かつオペレータ間で共通していることを見出した。

一例として、車体側の負荷増大による掘削速度の低下時には、「ブームを若干上げて負荷を緩和す

る」という掘削時の共通のパターンが存在する。

「若干」の意味する定量的な操作量やタイミングは、各オペレータの経験や感覚に依存するが、この操作パターンはオペレータ間で共通認識となっている。

本研究では、ベテランオペレータが掘削時に遵守している基本的な操作パターンを機械側で再現することを目指す。この考え方は山口らによる提唱の例はあるが、報告の例は見当たらない⁷⁾。このアプローチにより、複雑な制御を必要としない自動掘削の実現が可能であると考えた。さらに、本手法は従来の位置制御型の手法とは異なり、オペレータが日常的に行っている掘削操作の再現が可能なため、土質や掘削対象地形の変化に対しても高い適用性が期待できる。

この仮説に基づき、ベテランオペレータへのヒアリングを通して、掘削において共通する基本の暗黙知を形式化し、制御ロジックを構築する。

なお、溝掘削や耕掘りにおける掘削の工程は、設計面に対して約10~20cmの余肉を残す荒掘削を実施後、設計面に合わせた仕上げ掘削が行われる。仕上げ掘削の工程はICT施工によって既にシステム代替されており、位置制御型の自動掘削での対応が可能であると考えたため、本研究では、荒掘削の工程の自動化を対象とする。

3. 掘削時の根底にある操作パターンの把握

油圧ショベルの自動掘削における制御則を確立するため、数名のベテランテストオペレータに、効率の良い掘削を行うための注意点についてヒアリングを実施した（表-1）。

次に、20tクラスの油圧ショベルを用いた平地での掘削実験を行い、2名のベテランテストオペレータ（経験年数16年および15年）の各レバー操作の時系列データを取得した（図-2）。掘削実験は、コマツが保有する屋外試験場（細粒分礫質砂のフィールド）にて行った。土質の不均質さによる結果へのばらつきを防止するため、車体左右方向に3m、前後方向に5m、深さ2m程度の掘削柵を準備した（図-3 参照）。今回の実験では、掘削が容易な土質条件として、簡易N値が2~3のほぐしたルーズな土壤を準備した。掘削前に（株）西日本試験機製の土研式貫入試験機を用いて、掘削箇所の前後方向に3か所計測を行い、土質の均質性を確認後に、掘削実験を行った。

また、掘削開始姿勢によるばらつきを防止するため、掘削開始姿勢を統一した。アームを最大まで伸ばし、バケット角度 $\theta = 0.105$ [rad]の姿勢を掘削開始姿勢として、平地での掘削実験を行った。なお、このバケットの角度 θ は、事前に社内のテストオペレータ数名の掘削開始姿勢を参考に設定した（図-4 参照）。

掘削開始姿勢を一定とした一方で、オペレータには掘削方法に関する指示は与えず、自由に操作を行ってもらった。これらの結果をもとに、具体的な掘削を行うための操作パターンの解明を進めた。

表-1 掘削中の着眼点

掘削開始	・バケット刃先を貫入しやすい姿勢にセット ・アーム掘削し、レバー入力に対しての刃先の貫入量を確認
掘削途中	・バケットの刃先が常に掘削方向に沿っているか確認し、刃先の向きを調整 ・負荷が高い場合は、ブームを上げて負荷を緩和 ・基本的にアームは掘削側100%入力し、上記のバケットとブームの操作で負荷を調整
掘削終了	・バケットの中が満杯になった時点で掘削終了し、持ち上げ ・手前まで掘削しきるごとに土盛りができるため、アーム垂直（ブームトップピンとアームトップピンを結んだ直線が地面と垂直）ぐらいを目安 ・持ち上げてもこぼれないぐらい（上面が水平）までバケットを動かす

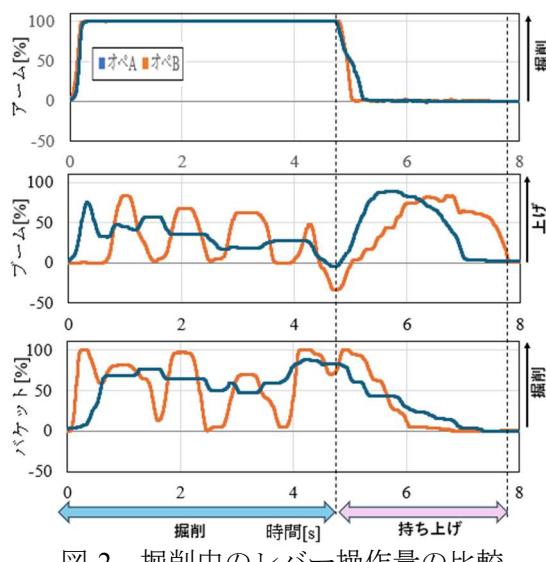


図-2 掘削中のレバー操作量の比較



図-3 掘削作業の概要



図-4 掘削開始姿勢

3.1 掘削の操作パターンの選定

掘削は、ブームとアームとバケットの動作の組み合わせで行われる。このため、これら3軸それぞれについて制御則を定める必要がある。まずアームの操作について、掘削開始と同時に中立状態から掘削操作側にステップ状に入力した状態を掘削終了まで維持しており、オペレータ間での差異は掘削工程全体で小さかった。アーム軸が回転す

ることでバケット刃先が円弧状に運動する。この移動成分を主として、バケットの奥まで土を押し込むことで、掘削土量を確保する意図と推察される。このことから、掘削中のアーム操作量は掘削操作側への100%一定のステップ入力とする。

一方、ブームとバケットの操作では、入力量とそのタイミングにオペレータ毎に顕著な差異が見られた。ヒアリングの結果、高負荷時にはブームを上昇させて負荷を低減、あるいはバケットの刃先角度を掘削の進行方向に合致するように維持させ、アームをスムーズに動かすという基本的な意図は共通していた。しかし、具体的なタイミングや操作量および入力パターン（オペA：ある程度の操作量を保持したまま連続的に調整を行う入力方法、オペB：断続的なON-OFF操作を繰り返す入力方法）はオペレータ毎に、ばらつきが生じていた。

これまでの分析結果から得られた掘削のために有効と考えられる制御則の案を表-2に示す。また、掘削動作の終了判定にするための条件も必要となるため、これについてもヒアリングの結果に基づいて設計した（操作パターン4）。

表-2 掘削の操作パターン

操作パターン1	アーム	アーム掘削側の操作100%で掘削
操作パターン2	ブーム	負荷が高い感じ時に、ブーム上げ操作にて負荷を低減 ⇒掘削終了後、持ち上げる
操作パターン3	バケット	バケット掘削の操作で、刃先の向きが悪く、掘削抵抗となりないように調整 ⇒掘削終了後、土がこぼれない様にバケット上面が水平になるまで動かす
操作パターン4	（掘削終了判断）	アームが垂直付近まで掘削が行えた時に、掘削終了

3.2 より具体的な掘削制御パターンの決定

本章では、3.1章で仮定した操作パターンのソフトウェア上の実装について具体的な検討を行う。

操作パターン1は、掘削開始後にアームを掘削操作側に100%のステップ入力を行い、掘削中はその制御を維持する。

操作パターン2では、オペレータが感覚的に判断している高負荷状態をシステムに検知させるため、その感覚を置き換えるセンサが重要である。この点について、再度オペレータにヒアリングを行い、さらに分析を進めた。

オペレータは主に、アームの速度変化や油圧音の変化から負荷変動を判断していた。しかし、油圧ショベルに音響センサは搭載されていないため、作業機の姿勢把握のためのシリンダーストロークセンサによる速度の値を用いる方法が第一に考えられた。しかし、このセンサはICT油圧ショベル専用であり、搭載されている車両は限定的である。開発する技術をより多くの機体へ展開するためにはシリンダーストロークセンサに依存しないことが望ましい。そこで代替として、多くの機種で標準的に取り付けられており、後付けも容易なシリンダーの圧力センサを用いることを検討した。

油圧システムの特性上、シリンダー内の圧力と油の流量（すなわち速度）には相関関係がある。掘削中に車体が受ける負荷が増大し、シリンダーの速度が低下した場合、掘削側のシリンダー内の圧力が上昇する。つまり、掘削中の速度の低下に伴う圧力上昇は、負荷状態の指標としての利用が可能である。そこで、アームのボトム側の圧力を監視し、ある閾値を超えた場合に、ブームを上昇させ、その操作によって圧力が閾値を下回った場合はブームの上昇を停止する制御とした。簡略化のため、その閾値とブーム上昇のためのレバー入力量はベテランオペレータの掘削中の波形データの平均値を参考に決定した（図-5 参照）。

操作パターン 3 について、本研究では、取組の第一ステップとしてオペレータの掘削時のレバー操作量の時系列データから得られた平均値である 50% の一定入力とすることにした（図-5 参照）。

操作パターン 4 に関しては、掘削時の波形データを参考に、アーム角度センサの情報を用いて、アームが 100° になると停止する制御とした。ここまでで決定した制御則を表-3 に示す。

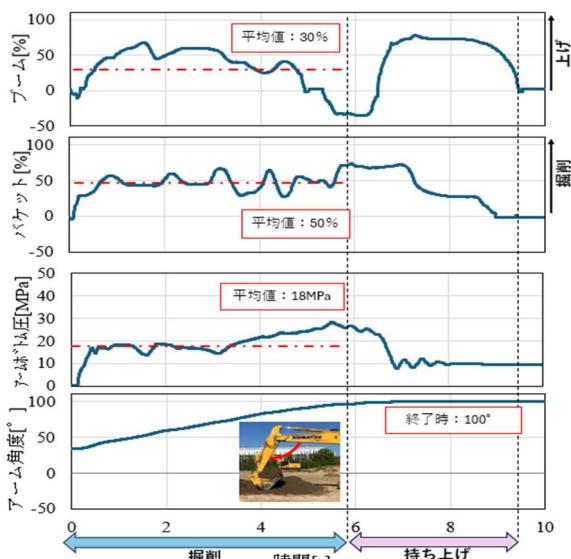


図-5 掘削中の各車体センサの時系列データ

表-3 自動掘削の制御則

ベテランオペレータの根底にある掘削時の操作パターン	制御則
①アーム掘削側の操作 100%のステップ入力	①アーム掘削側の操作 100%のステップ入力
②負荷が高い時、ブーム上げ操作で負荷を緩和	②負荷状況→アームボトム圧力で代替 アームボトム圧力が 18 MPa 以上の時ブーム上げ 30% 入力
③バケット角度を調整し土を奥まで入れこむ	③（簡素化のため）バケット掘削 50%一定入力
④アーム垂直附近で掘削終了⇒持ち上げ操作	④アーム角度 100° に到達時に掘削終了⇒持ち上げ操作

4. 車両の制御ロジック

4.1 制御対象の車両

コマツ（株式会社小松製作所）製 20t クラスの ICT 油圧ショベル PC200i-12 を使用する。この車両は、EPC（Electromagnetic Proportional Control）バルブを用いた電子制御システムを有している。

従来の油圧ショベルでは、オペレータのレバー

操作により PPC（Pressure Proportion Control）バルブからの油圧信号をホースでメインバルブまで導き、操作量に応じてメインバルブのスプールの開閉度合いを変えることで作業機の動きを制御している。このため、自動掘削の制御を行うには、外付けモータを用いて直接レバーを動かす方法や、操作レバーとメインバルブの間に電磁弁を追加し、その電磁弁を制御する方法等が考えられるが、大掛かりな車両の改造や構造の追加が必要となる。

一方、PC200i-12 では、電子制御システムによりオペレータのレバー操作量は電気信号に変換される。この信号はメインバルブに取り付けられた EPC バルブに指令を出し、スプールの開閉度合いの制御が可能である。つまり、オペレータのレバー操作を模擬した電気信号を与えるだけで、車両の制御が可能である。本研究では、この電子制御の特徴を活用して、レバーと車体コントローラの間にレバー操作を模擬した電気信号を与えることで、車両を自動で制御する。

4.2 制御ロジックの実装

車体制御用のモデルは、MATLAB/Simulink を用いて作成した（図-6）。このモデルは、車体コントローラに接続し CAN（Controller Area Network）を通じて、車体センサ情報（アームボトム圧力、アーム角度、バケット角度、ブーム角度）を 100Hz で取得する。取得した情報をもとに、3.2 章で検討した掘削操作の制御則を実際に車体で動かせるように制御モデルに実装した。なお、バケット角度とブーム角度は、掘削終了後にバケットを持ち上げる動作を自動化するのに用いた。アームが規定角度

(100°) に到達し掘削が終了した後（図-6 のフロー終了後）、バケットを地面から約 1m 持ち上げるために、既定のブーム角度になるまでブーム上げに 50% の入力を与える。また、バケット掘削側にも 50% の入力を与え、土がこぼれないようバケットの上面が水平になる既定角度まで入力を続けるフローとした。ただし、この持ち上げの操作は、掘削終了後の予備的操作であり、本稿では議論や評価の対象としない。

処理の遅延を防止するため、自動掘削用のコントローラとして Spead Goat 社製の Baseline-S real-time target machine を用いて実際の処理は行われた。

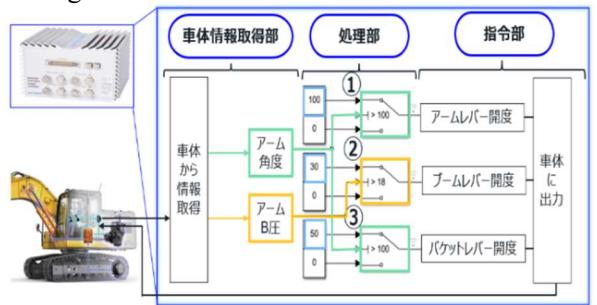


図-6 自動掘削制御ロジック

5. 挖削実験

5.1 目的

本章では、前章で設計した自動掘削のロジックにて掘削を行い、まず設計意図に沿った掘削動作が行われているかを確認する。さらに、ベテランオペレータと掘削効率の比較を行い、本ロジックの有効性を検証することを目的とする。

5.2 実験方法

本実験は、3章の試験条件に基づき、ほぐしたルーズな土質の掘削枠を準備して実施した。掘削は3回行い、掘削効率の評価には車体のペイロードメータにより計測した掘削重量と、アームレバーの操作履歴データから算出した掘削時間（掘削側への入力開始から中立側へ戻すまでの時間）を用いて、1時間当たりの掘削重量 [t/h] を算出して比較を行った。

5.3 実験結果と考察

自動掘削とベテランオペレータによる掘削を行った際に得られた各レバーの入力およびアームボトム圧、アーム角度の時間履歴データの一例を図-7に示す。これにより、3.2章の表-3に示した制御則に基づいて掘削動作が行われていることが確認できた。また、自動掘削の動作は、ハンチングの発生や途中での停止ではなく、スムーズで掘削土量も良好であり、マニュアルの掘削操作時と大きな差は見られなかった。

負荷が増大した際にブームを上げることで負荷を低減するロジックについて、掘削開始から0.7秒後に閾値であるアームボトム圧 18MPa を超過し、ブーム上げ操作を継続したが、アームボトム圧は 18MPa を超える状態を維持し続けた。その結果、ブーム上げ操作は一定の入力を保持した。これは制御ロジックに従った動作であるものの、オペレータの操作パターンとは異なる結果となった。

熟練オペレータの操作を代替することを目的とする前提であれば、この現象は、負荷逃し操作（ブーム上げ）がオペレータに比べて少ないことによるものと考えられる。負荷緩和時のブーム上げのレバー開度の設定を増大させることで、より効果的な負荷緩和が実現し、オペレータの掘削操作により近づく可能性がある。様々な土質条件や掘削対象地形などの環境変化への適用性を高めるためにも、パラメータの最適化は今後の課題である。

次に掘削効率について、考察する。自動掘削とベテランオペレータの掘削効率を比較した結果を図-8に示す。自動掘削ではベテランオペレータと比較して掘削時間は約1秒短縮したもの、掘削重量は約17%減少した2.04tとなった。しかし、掘削効率で比較すると、自動掘削では1475t/h、ベテランオペレータでは1528t/hと同等の結果が得られた。

ベテランオペレータの掘削終了時のアーム角度

は90°であり、自動掘削の100°よりも、アームの移動量が多いため掘削時間は長くなつた。しかし、その分、多くの土量が獲得出来たため同等の掘削効率となつたと考えられる。

今回開発した自動掘削は予め設定された制御とパラメータに従い、レバーのON-OFF操作を機械的に実行するものである。

一方、人間は掘削対象地盤の性状を探りながら掘削を行い、また作業疲労を軽減するため、急激な操作による腕への負担や車体振動を避け、緩やかな操作入力を行う傾向がある。このような操作特性の違いも、掘削時間の差異を生む要因の一つと考えられる。将来、人が搭乗しないことを前提とした場合、機械的なON-OFFの操作でも乗り心地や疲労を考慮する必要がないため、人間の掘削効率を上回る可能性も考えられる。

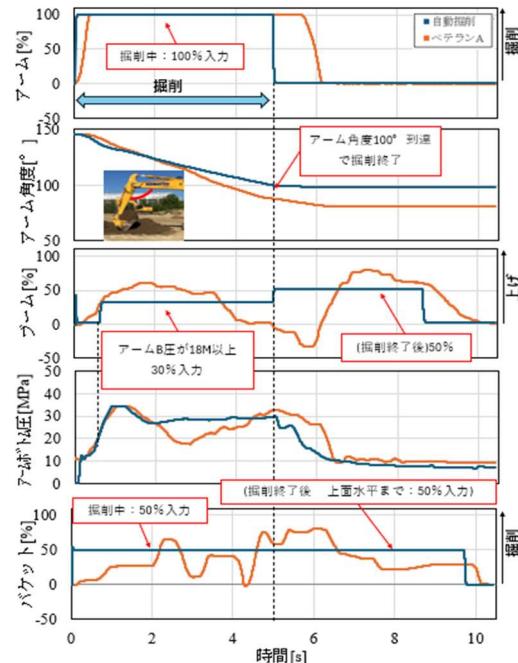


図-7 掘削中の各センサの時系列データ

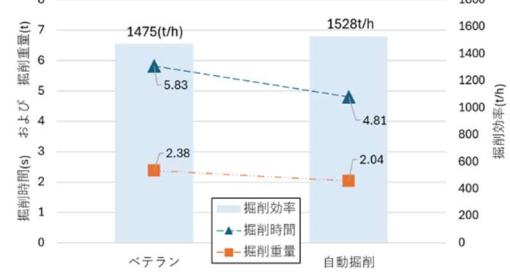


図-8 掘削効率の比較

6. 連続掘削実験

6.1 目的

前章では整った土質において、本ロジックの有効性が確認できた。本章ではさらに土質や掘削地形の変化に対する適応能力を検証するため、ダンプ積み込みを想定した連続掘削試験を実施する。

6.2 実験方法

掘削作業は自動掘削により実施し、掘削終了後

は、マニュアル操作で旋回角度 90°までの荷の持ち上げ旋回、排土、掘削開始位置への戻り旋回を実施した。同じ場所を連続で 5 回掘削し、その後、掘削場所と排土場所を入れ替え、合計 15 回行った

(図-9 参照)。社内で経験年数が 16 年と 15 年のベテラン、13 年の中堅、3 年の若手の計 4 名のオペレータと掘削効率を比較した。

平地での掘削とは異なり、連続掘削では掘削の開始位置が徐々に下がるため、事前に試掘を行い、オペレータの操作を参考に自動掘削のパラメータを調整した。ブームは掘削開始位置の低下に応じて多く上昇させる必要があるため、ブーム上げのレバー入力は 70% (平地掘削時は 30%) に設定した。その設定に伴い、迅速なブームの上昇に対して多くの土を掬いこむためバケット掘削のレバー入力設定を 65% (平地掘削時は 50%) に引き上げた。また、掘削開始時のバケットの貫入を増大させるため、ブームの上昇が開始するタイミングを遅らせるなどを狙い、アームボトム圧の閾値は 20MPa (平地掘削時は 18MPa) の設定で実施した。

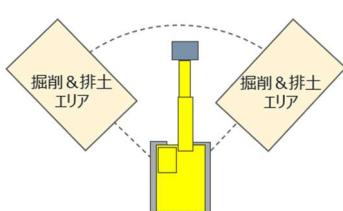


図-9 連続掘削実験の概略図

6.3 実験結果と考察

15 回の連続掘削試験で得られた結果を図-10 に示す。

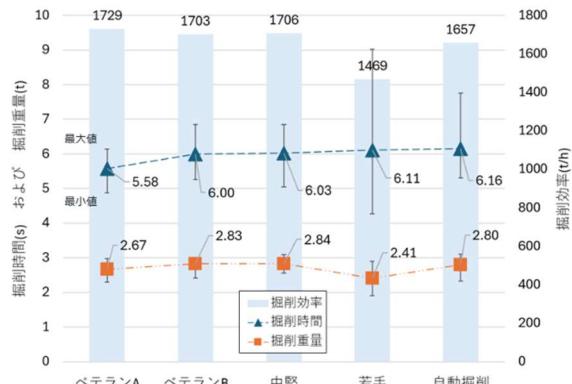


図-10 連続掘削試験における掘削効率の比較

ベテランオペレータ A の掘削効率と比較すると、自動掘削は約 4% 低い結果となったが、マニュアルの操作では作業者の状態によって、数パーセントの作業効率の変動が生じることを考慮すれば、ベテランオペレータと同等の掘削を達成しているとみなせる。一方、若手オペレータと比較すると、自動掘削は約 12% 掘削効率が上回り、掘削時間も安定していた。

連続掘削によって掘削土質は不均質となり、掘

削地形も変化するが、パラメータを適合することで同じロジックにて対応可能であることが明らかになり、本自動掘削の有効性や汎用性の高さが確認できた。

7. 結論

本研究では、ベテランオペレータの掘削動作に共通する根底にある操作パターンを形式化した。これらの操作パターンを模擬した制御ロジックを実装し、油圧ショベルの荒掘削工程の自動化システムを試作・評価した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・オペレータの掘削時の操作パターンをシステムで模擬することで、油圧ショベルの掘削が自動化できることを示唆した。
- ・本手法を適用することで、シンプルなシステムで、オペレータと同程度の掘削効率を達成できる可能性を示唆した。
- ・従来機が有するハードウェアで自動掘削が実現できる可能性を示唆した。
- ・本手法は土質や掘削地形の変化に対して、パラメータの適合により幅広く対応できる可能性がある。

今後、パラメータ適合の手法確立と制御の最適化が重要な課題であり、様々な土質や地形で検証を行う予定である。効率と汎用性の高い自動掘削の早期達成に向けて、引き続き研究を進めていく。

参考文献

- 1) 国土交通省HP, "建設業を巡る現状と課題", <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf>(参照2025/8/6)
- 2) 国土交通省HP, "i-Construction 2.0 ~建設現場のオートメーション化~", <https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>(参照2025/8/6)
- 3) 藤田光伸, 鎌田実, 宮田圭介, "機械操作における技量の抽出に関する研究", 日本機械学会論文集(C編), Vol.67-653, pp.201-208, 2001
- 4) 境田右軌, 中後大輔, 川端邦明, 浅間一, "熟練オペレータによる油圧ショベルの掘削作業解析", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007, 1P1-M07
- 5) 山元弘, 茂木正晴, 大槻崇, 柳沢雄二, 野末晃, 山口崇, 油田信一, "動作計画と制御に 3 次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発", 計測自動制御学会論文集, vol.48, no.8, pp.488-497, 2012
- 6) DeepX, "掘削からダンプ積み込みの繰り返し連続操作を現場で実証", <https://www.deepx.co.jp/ja/business/excavator2023/>(参照2025/8/6)
- 7) T.Yamaguchi, H.Yamamoto, "Motion Analysis of Hydraulic Excavator in Excavating and Loading Work for Autonomous Control", 23rd ISARC2006, pp602-607, 2006