

建設機械の省燃費運転

システムテクニカル(株) 久武 経夫

1. 現場でできるCO₂削減

建設機械の省燃費運転のポイントとして、無負荷時のエンジン回転数制御、アイドルストップ機構の採用、制動や前後進シフト時の残留出力の極小化、ダンプトラックの均一積載、積み込み機械の効率的な積み込み、計画的な掘削・押し土・均平作業などがある。必要な時間以上の暖機運転をしない、待ち時間や休憩時間はエンジンを停止する、走行・作業時の空ふかしの防止など基本的な指導も必要である。必要に応じて、オペレータ技量の補完を目的とした各種の運転支援システムの採用も検討する必要がある。基本的な考え方として、仕事を行っていない無駄なエネルギー消費の排除、機械の性能維持と性能を生かした効率的な運転操作、機械が効率良く働くための走路や稼働現場の整備などがある。

建設機械の省燃費を達成するためには、現場の条件や機械のコンディションに合わせてこれらの様々な改善要因を組合せ採用する事になる。本文では、建設機械の稼働分析を通じた省エネ対策の事例を中心に、機械毎、現場毎に何を優先して実施すべきかの事例紹介を行った。

2. 省エネ運転の心掛け

一般の車輛は、アクセルペダルから足を離すと無負荷時はエンストを起こさない最低のエンジン回転数（無負荷最低回転数/ローアイドル）まで、自動的に回転数を下げる仕組みとなっているが、建設機械の場合には、アイドルが無負荷最低回転数から無負荷最高回転数（ハイアイドル）の間の作業に必要なエンジン回転数に設定して使用する場合がある。

ローアイドルからハイアイドル間の無負荷回転域はエンジンのクランク軸の出力（回転モーメント）は零であるが摩擦損失馬力に相当する燃料を消費している。摩擦損失には、①ピストン、コネクティングロッド、クランク軸等の摩擦損失、②吸排気行程でのポンプ損失、③油ポンプ、水ポンプ、燃料ポンプ、ファン、発電機など補機駆動力等がある。①の摩擦損失は、全体の3分の2を占

め回転速度の2乗に比例して増加する。12t級の油圧ショベルの場合、ローアイドル時の燃料消費量が1kg/h、ハイアイドル時の燃料消費量が4kg/hと報告されている。ハイアイドル時には定格作業時の3分の1以上の燃料を消費している。

このアイドル制御機構は、負荷がかかっていないか操縦桿（レバーなど）を一定時間操作をしていない時にエンジン回転数を下げる、操縦桿操作時若しくはオペレータの手元スイッチでエンジン回転数を元の回転数に復帰する仕組みである。

アイドルストップ機構は、路線バスなどの多くに装着されているシステムで、作業や走行の負荷がかかっていない時にエンジンを停止する仕組みである。このアイドルストップ機構は、始動モータの接点（ムービングコンタクト）に大きな負担がかかり、中大型建設機械への適応は現状困難である。休憩時間、作業の中断、長期の待ち時間などに際しては、オペレータがこまめにエンジンを止めることが求められている。

オペレータがエンジンの性能を熟知している事も省燃費運転に必要な要件である。建設機械は一般にディーゼルエンジンを使用している。図1にディーゼルエンジンの性能曲線を例示した。

図中の同心円がディーゼルエンジンの燃料消費率（g/kW・hr）である。燃料消費率が最も低

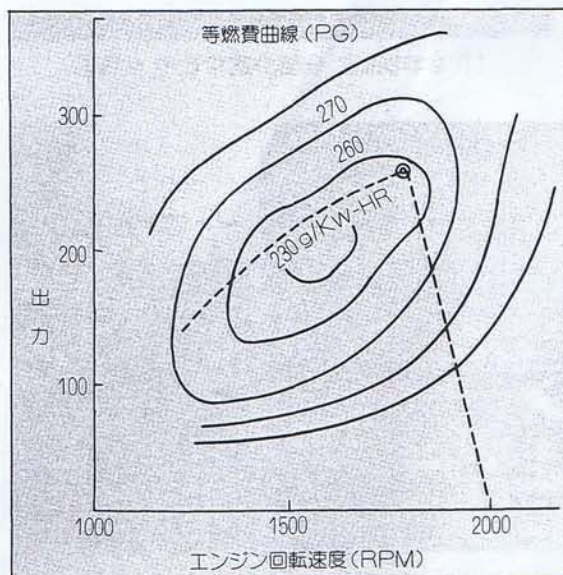


図1 ディーゼルエンジンの性能曲線

い点では、エンジンの最大トルク点近傍で、定格出力点より低い回転数の所にある。その時点より回転数をあげると燃料消費率が悪化する。吸気冷却を行っていない直接噴射式過給エンジンで、中間回転は定格回転の60%~70%の場合、76台の平均値で、回転数を抑え目にした運転で燃料消費率に9%差があるとの報告例がある。建設機械を運転する場合に、作業に支障の無い範囲でエンジン回転を定格回転より低めにして運転する様心がける。

省エネモード機構として、エンジンの回転数、油圧ポンプの吐出量、油圧設定などを作業に必要な値に設定変更を行う装置がある。油圧ショベルの省エネモード運転例で、標準モードに対し燃料消費量が16%低減したとの報告例がある。

センサを用いた運転支援システムの例として、積み込み機械の積載量計測システム、ブルドーザ用のGPSやレーザを用いたブレード制御システム、後出の油圧ショベル用半自動運転支援システムなどがある。これらのシステムの導入によって、作業時間が短縮し省エネが達成できることが実証されている。

3. 機械別の省エネ運転技法

3.1 ダンプトラック

(1) オフロード型ダンプトラック

建設機械は力強く運転をする事が好まれる傾向があり、走行・作業時に必要以上にアクセル操作(空ふかしなど)を行うオペレータが多い。図2は、北海道静内地区の高見ダムにおける32t級ダンプトラックがダム運搬路を走行中に計測した燃料消費などのデータがある。

同一の運搬路条件(勾配、カーブ、路面の転がり抵抗、制限最高速度)と、ダンプトラックの性能をコンピュータに入力して、シミュレーション演算結果を多重表示したデータである。図中の破線部が、シミュレーションによる自動車工学的な理想状態とオペレータによる実走行データの差分である。

比較的急な下り坂を経て水平地の到達したA地点を通過後に、アクセルとシフトアップ操作を運搬路上の窪みの手前でシフトダウンし、1速の段階でアクセルを操作し窪みを乗り越えている。この1回のアクセル操作で、約300ccの燃料が消費される。運搬路を平滑にする、道路を横断する排水ピットに覆いをするなどによって、減速とアクセル操作が不要となる。

また、図中B地点を通過して下り勾配のカーブに差し掛かると、アクセルとブレーキ操作を繰り返し通過している。カーブの走行例で、コンピュータは計算上の速度で一定速度の走行をして

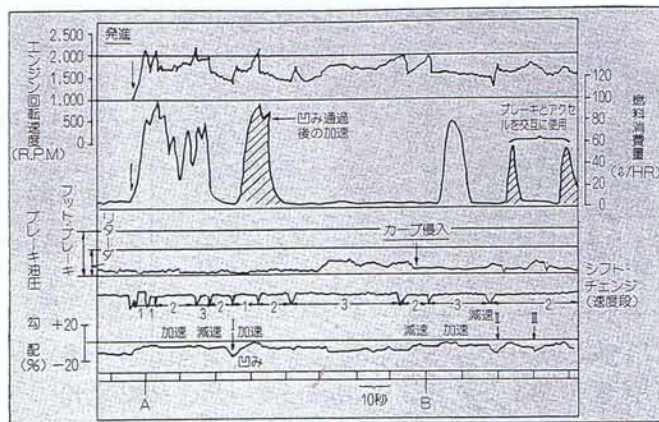


図2 高見ダム試験走路でのダンプトラック実走行

いるが、オペレータは、ブレーキとアクセルを反復使用しながらカーブを通過している。通過速度に合せた横断勾配を持たせておけばブレーキやアクセル操作なしにカーブを通過できる。

(2) オフロード型ダンプトラックとコンピュータシミュレーション

図3に、コンピュータにダンプトラックの性能と現場の走路を入力し算出した理想系の走行シミュレーションと実走行のデータを重ね合わせ表示した。

図3の走行距離50m地点のゆるやかな下り坂途中に斜面距離10m程度の上り坂がある。この地点でシフトダウンをして加速している。さらに30m程度先の運搬路上に窪みがある。この手前で減速とシフトダウンし、アクセル操作を行って窪みを通過している。坂部の平滑路化や走路を横断する排水溝などに覆いをするなどでこの部位のオーバーアクセルは解消可能と思われる。

図中左端の基点から100m地点まで緩やかな下り勾配となる。ここでもオペレータをオーバーアクセルで通過している。計測は行っていないが、図中の加速状況では下り坂に掛かった所でブレーキ操作を行っている可能性がある。なお運搬路の

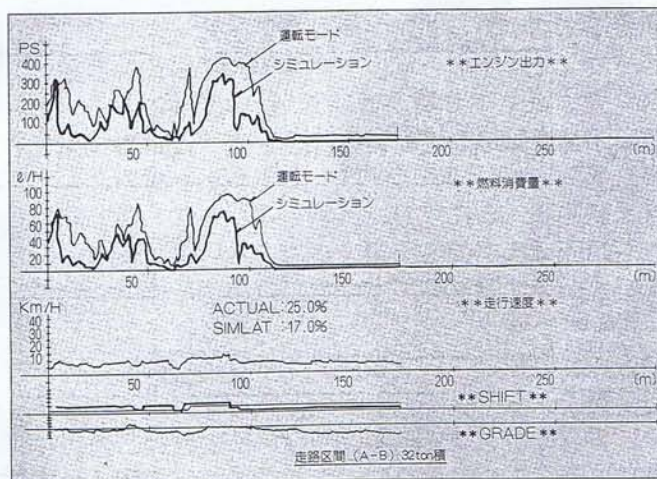


図3 コンピュータシミュレーションと実行

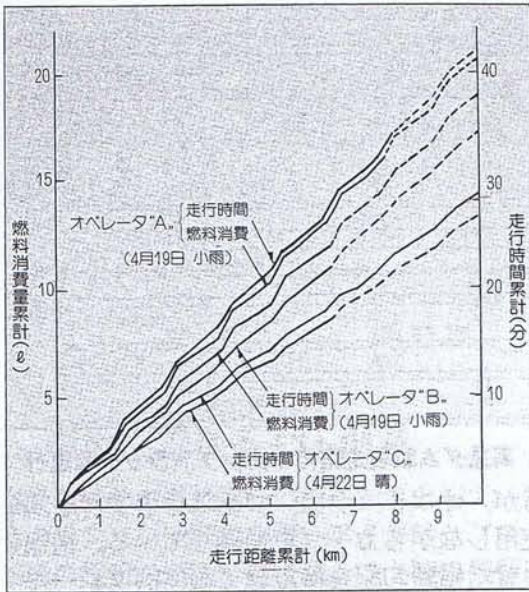


図4 ボトム開閉型ダンプトラックの周回走行時の時間と燃料消費量計測例
表1 開閉型の2連ダンプトラック走行実験

単位	累計走行時間		平均走行速度		累計燃料消費量	
	走行時間	比率	走行速度	比率	燃料消費	比率
オペレータA	42.6	146.4	14.4	68.2	20.8	154.1
オペレータB	35.0	120.3	17.6	83.4	19.0	140.7
A, Bの平均	38.8	130.3	15.8	74.9	19.9	147.4
オペレータC	29.1	100	21.1	100	13.5	100

(1週1,280m×8周=10,240m走行, オペレータA, B計測時は小雨, C計測時は晴天)

整備とその省エネ上の効果に関しては、文末に示した資料を参照頂きたい。

(3) ボトム開閉型の2連ダンプトラック

図4および表1に、ボトム開閉型の2連ダンプトラックが1周1,280mの楕円走路を8周走行した状態での累計走行時間と燃料消費量計測例を示した。オペレータ, A, Bは小雨時で、同Cが晴天時の計測である。

同一の条件のもと単純な走行で、オペレータにより走行時間や燃料消費量に大きな差異が存在している。図4の場合、オペレータA, B間で、走行時間で18%、燃料消費量で9%の差異が存在している。降雨により泥濘部分(300m)など走行抵抗が大きくなると、走行時間で23%、燃料消費量で32%の差異が発生している。

上記の他、ダンプトラックの省エネ運転のための留意点として、①急発進、急加速を避ける、②速度段を速めに高速度段にシフトし、

低エンジン回転数での運転を心がける、③速度一定での走行を行う、④ダンプ時の吹かし過ぎに留意等がある。

3.2 ブルドーザ

表2に、建設機械施工技術検定の実技試験受験者33名のブルドーザによる掘削、押し土作業、後進時運転中の燃料消費、エンジン回転数、作業装置系油圧の計測例を示した。押し土量の個人差が特に大きい事が判る。表には示していないが、実験掘削と後進時の燃料消費量の標準偏差の平均値との比率は20~25%となり、オペレータ間で燃料

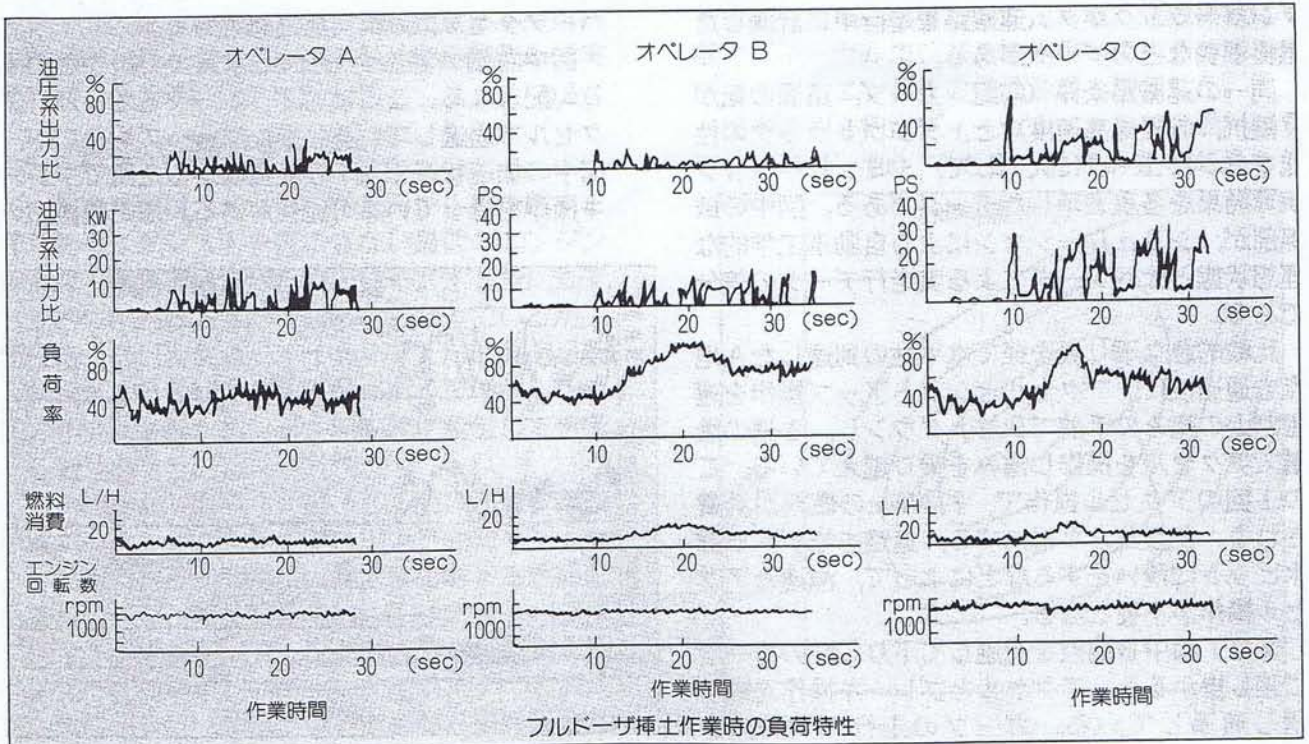


図5 ブルドーザの運転モード

表2 ブルドーザの運転技量差

項目	単位	平均	標準偏差
押土量	m ³	3.7	1.5
所要時間	秒	375	35.7
燃料消費量	cc	1500	153.0
燃料消費率	L/h	14.8	1.8

消費量に大きな差異が存在している事も判明した。

図4に作業工程中の押土作業時の負荷モードを示した。オペレータAはある程度の運転技量を有しており、同Cは未熟練、同Bが中間の技量を有している。Aが負荷を均一に使用し、排土板を小刻みに動かして運転しているのに対し、Cは排土板を大きく動かし、大きな負荷が加わっている。

当然の事ながら、Aは平らに、Cは押土跡に大きな凹凸が残されている。A、C間に、作業量当たりの燃料消費量に2倍以上の差が生じている。

ブルドーザによる平らな敷き均し(均平)作業にはさらに高度な運転技術が求められる。均平施工の支援技術としてGPSやレーザ均平装置を用いた排土板(ブレード)の位置計測システムがある。これら支援システムの採用で作業時間と燃料消費が大幅に削減する。

ブルドーザの運転には上述の他、①下り勾配を利用した掘削や押土、②ブレードが効率良く土を抱え込む運転の工夫、③スリップ、トルコンストール、油圧リリーフなどの無駄を生じさせない運転、④均平等低負荷作業は高速度段で低エンジン回転で行う、⑤作業に適した作業装置の選定など状況に応じた機械の運転操作が求められる

3.3 ホイールローダ

図6に、5.4m³級タイヤローダによる水平50mに運搬作業時のエンジン回転数、燃料消費量、ブレーキ操作信号、速度段、作業内容の推移を示した。同一オペレータによる運転方法のAは作業優

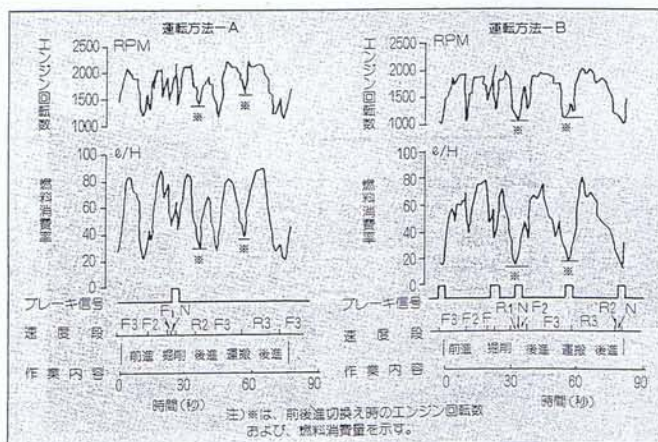


図6 5.4m³級ホイールローダにおける省エネ運転

表3 運転方法による燃料生産性

	サイクルタイム	サイクル燃費	作業量/燃料	後進切替時 タイヤ空転時間
単位	秒	1	m ³ /1	秒
運転方法A	74.0	1.22	4.42	3.6
運転方法B	81.6	1.08	5.00	1.2
差B/A%	110	88	113	33

先、Bは燃費改善を意識した運転である。表2に計測結果を示した。BはAに較べて1回の運搬に要する時間(サイクルタイム)は10%多くなるが、1サイクルで消費する燃料は12%少なくなる。この燃費削減の理由として下項がある。

- ① 前後進切替時(図3中の※)に運転方法AとBで、エンジン回転数が350~500rpmの差がある。加速と減速の場合のエンジン回転数変化率は回転系の慣性質量によって決定され、500~600rpm/秒前後と想定される。前進→後進時の間合いを0.7~1秒間増やすと、トルコンやタイヤの滑りで吸収する制動時の残留馬力が3分の2程度になる。実測の結果、A、B間でタイヤの空転時間に3倍の差異が認められた。
- ② エンジン最高回転数がAは2200rpm、Bは2000rpmである。
- ③ サイクルの平均負荷率がAは67%、Bは53.5%程度である。

この機械は稼働時間5000Hr時にA、Bの運転方式の変換後、8500時間までの追跡調査を行い、稼働時間当たりの修理費が2分の1に改善された事が判明した。

上記の他、ホイールローダの省エネ運転の一般的な手法として、①ダンプトラック等への積込はVシフト、②現場条件に合致したバケットの選定、③掘削時にストールしない運転を心がける、などがある。

3.4 油圧ショベル(バックホウ)

図7に、3t級電動型油圧ショベルによる管理設用の溝掘削時の掘削~旋回~排土(ダンプトラックへの積込み)~旋回の作業サイクルの負荷特性、ブーム・アーム・バケットの挙動例を示した。

1作業サイクルは、掘削5.4秒、排土5.5秒、旋回10秒、アイドル4秒の24秒である。掘削は比較的円滑に行われているが排土と前後の旋回には改善の余地が認められる。省燃費運転の手法として下項がある。

- ① ダンプトラックや埋戻し用の仮置き場所の配置を油圧ショベルの旋回角度が小さくて済む位置に設置する(旋回時間を少なくする)。
- ② 油圧ショベルをダンプトラックより高い位置に置き、上段から積込む(積込前後のアイドル

- ③ アイドル時間はエンジン回転数を下げる。
- ④ 掘削深さが深い場合には上層からバケット一杯分の定量掘削を素早くおこなう（掘削時間の短縮と無駄の無い積込）。

- ⑤ 排土時など油圧系のリリースをさせない運転を行う。
- ⑥ シリンダの動かし始めに円滑な油圧経路の切替えが行える様に緩やかな操作を行う。

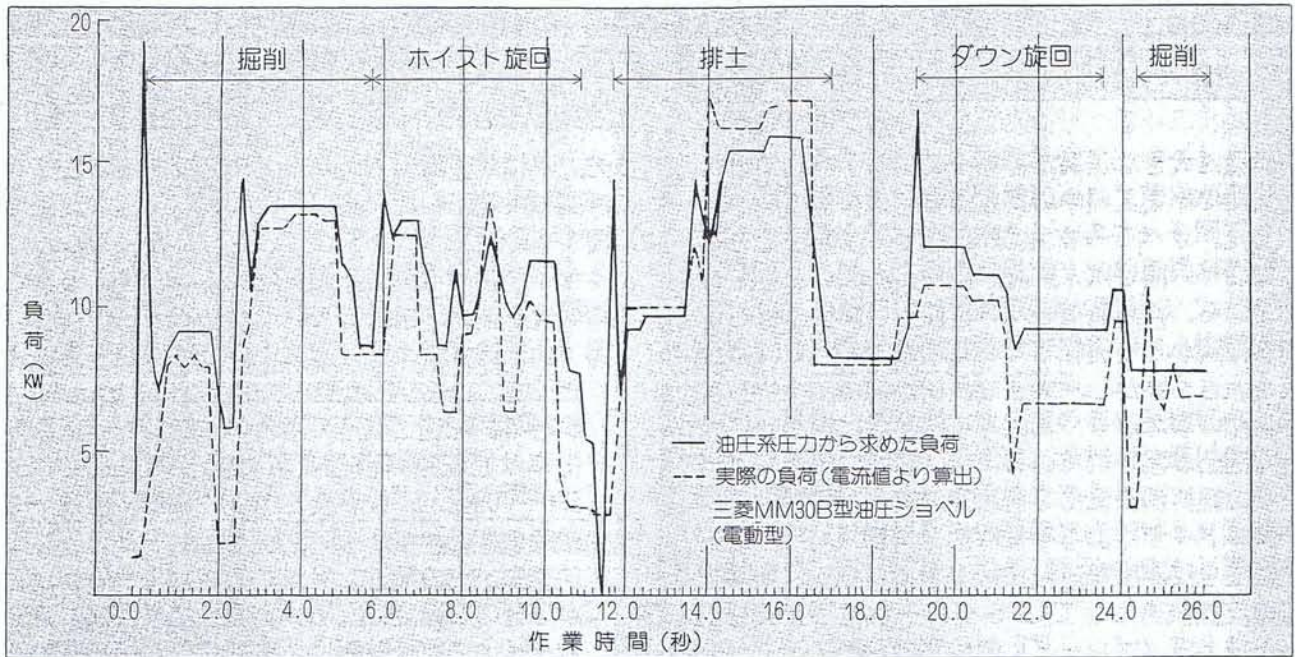
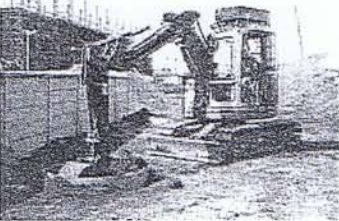
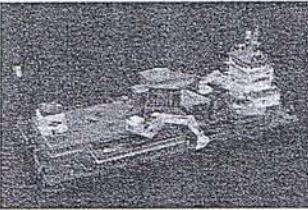


図7 油圧ショベルの負荷特性

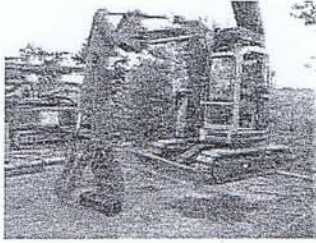
立坑掘削(都市土木)
同一位置(X-Y)での垂直
(Z)方向の掘削位置を自動
的に設定し正確・迅速
に行う



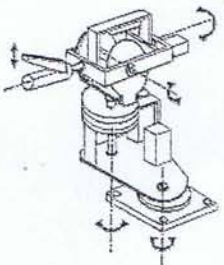
バックホウ浚渫船,揚
土船,他バケット位置
制御と作業反力の感知
により作業の効率
化が目的



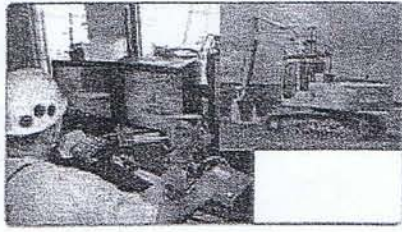
ハンドリングマシン
把持対象物による操縦
レバー把持トルク差の
認識実験を実施した。
コンクリート薄板につい
ては,把持力自動調整に
よる非破砕ハンドリン
グを実現



法面整形,直線仕上げの自動
によって,難易度の高い作業時の操
縦が初心者でも可能となる



無人化施工用バックホウ
右手で作業装置,左手でカメ
ラシステムの制御を行う。現
在は機械操縦の手を休める
か,カメラ操作専用の要員を
配置している。「モノレバー」導
入によって切れ目のないカメ
ラ操作が可能,作業装置位置
決めの自動化も実現する



家屋の解体
把持・破碎装置の位
置きめの自動化,対
象物に応じた把持
力の自動制御




図8 運転支援システム (モノレバー)

4. 運転支援システム

燃料消費を必要最小限に押えた建設機械の運転を行うためには、高度な運転技術が求められるため、すべてのオペレータに省エネ運転を期待することは難しい。この問題を解決するために、センサや半自動操作などの様々な運転支援システムが開発されている。

建設機械の中で比較的運転操作が難しいとされている油圧ショベルの例では、バケットなどの作業装置を動かすためのブーム、アーム、バケットの各シリンダと旋回モータの操作は、運転席の2本の操縦桿の前後左右の動きに割当てられている。

この操縦桿の動きと作業装置の動く軌跡が異なるため、熟練運転者でも頭の中で複雑な計算をしながら操縦桿を操作している。図8に様々な利用局面を例示した1本(モノ)レバーは、作業装置の操作を1本のレバーに集約して3次元空間におけるバケット(作業装置)の挙動と操縦桿(モノレバー)の動きを同一化する事によって、人間工学的視点での操縦の容易化を計った操縦支援システムである。作業装置の操作を作業装置を動かしたい方向に操縦桿を動かすと、それに倣って作業装置が動く仕組みとなっているため、未熟練オペレータでも効率良い作業ができる。

また、モノレバーは、作業装置の半自動操作機能と作業反力の検知を併持している。

半自動操作機能は、掘削位置・経路・エリア、繰返し作業の設定など、作業要求に合わせた装置を自動的に動かすモードで、法面、平面、立孔など難易度の高い作業を最小時間で高精度に施工ができる。

モノレバーの作業反力検知機能は、作業量の把握を通じた高効率な施工、対象物を損傷しないソフトな把持などを目的に開発されたものであるが、油圧供給圧力を必要最小限に設定する機能を付加すれば、作業装置系の省エネシステムとしても利用できる。

5. おわりに

建設機械の省燃費運転により10%前後の省エネと機械修理費用の大幅な削減が可能である。機械メーカーは更に高度な運転支援システムの開発を、

機械利用者は運転シミュレータなどを通じたオペレータの効率的な教育手法研究が求められる。

施工現場の管理者やオペレータができる省燃費対策として、①施工要求に合致した最適な機械の選定、②機械の性能を発揮するための最適な現場レイアウトと現場の整備、③機械の配置や機械群としての最適な運用、④機械の運転技術、⑤適正な保守を通じた機械の性能維持などがある。機械の選定には、電動化やデュアルモード化なども視野に置いておく必要がある。

本稿では、上項④の機械の運転技術を通じた省燃費(CO₂削減)の手法について述べたが、機械本来の性能を発揮し、エネルギー効率を極大化するためには、①、②、③、⑤についても留意する必要がある。

なお、4項で近未来型の運転支援システムとして紹介した「モノレバー」は、独立行政法人科学技術振興機構の支援(研究成果最適移転事業/育成モデル化)により、国立大学法人東北大学とシステムテクニカル㈱が開発を行っているものである。

【参考資料】

- 「建設施工における地球温暖化対策の手引き」
(社)日本建設機械化協会2003.7
- 建設業部会施工技術活性化分科会建設工事における二酸化炭素【CO₂】排出量の算定
(社)日本建設機械化協会2002.5
- 久武経夫「現場で出来るCO₂削減技術-1-, -2-, -3-」土木コスト情報2002.10, 2003.1, 2003.4
- 松島・長神・久武「運転技術の経済効果-良好な維持管理と共にあるもの-」建設荷役車輛 第24号/(社)建設荷役車輛安全技術協会
- 久武・廣瀬「稼働分析の方法-計測とデータ解析の技術-」建設機械 第19巻 第9号 1983.9
- 丸山隆和監修「掘削・採鉱・建設工事の自動化・無人化・ロボット化/第5章 建設機械のオペラビリティと生産性向上を目的とした作業のシステム化」フジテクノシステム 1983