

現場で出来るCO₂削減技術 -2-



1. CO₂削減のポイント

1・1 現場スタッフによるCO₂削減

先号では、オペレータや施工管理者など現場スタッフの管理領域でのCO₂削減の目標を20%とすることを提言した。この目標を実現するために施工機械の運転技術の向上、運搬路の最適化、機械稼働の定量的な管理の手法を紹介した。

運転技術については、従来定量的な評価の指標がないために看過されていた施工機械の運転技術の向上がCO₂削減に大きく寄与していることを様々な実験事例で解説した。作業装置の制御、走行速度、カーブでの減速、速度段の選択、前後進シフトのタイミングなど運転手法と燃料消費量の関連に就いては実計測データに基づいた考察を行った。

運搬路の維持管理の重要性については、ダンプトラックが異なった勾配、路面条件(ころがり抵抗)の下で走行した場合の所要速度や燃料消費量をコンピュータシミュレーションを用いて計算した結果を示した。本号では、運搬機械の性能を最大限に発揮できる運搬路の形状、最適走行速度、制限速度を変更した場合のサイクル燃費、路面のころがり抵抗が変化した場合のサイクルタイムなどについての分析例を紹介する。

機械稼働の定量的な管理については、積込機械の1杯毎の積込重量、ダンプトラック運行サイクルタイムなどがリアルタイムに把握できればCO₂削減を目標とした最適な機械配置と運転を実現できるとして様々なシステムを紹介した。採用する機械の種類と規格、区間走行速度など、運行管理者の「何が最適か？」の疑問に応えるために開発された各種のシミュレーションシステムも紹介した。

施工管理者やオペレータが与えられた条件下での改善には限界がある。土工事などの場合、環境保全や地元との関連など外的制約でCO₂削減のみを目的とした施工法やレイアウト変更などが実行できない場合がある。これらの制約の中で効果的

なCO₂削減活動を行なうためには、事業計画、設計、施工計画段階での背景的な情報を持つことも必要である。

1・2 工事の流れとCO₂削減

従来、施工コストの算定は用地の手配、構造物の設置位置や形式の決定、施工法や施工設備の選定、直接・間接工事費の積算と見積りなども含めコストミニマムを基本に決定されてきた。今、コストミニマムの発想からCO₂排出量ミニマムへの発想の転換が求められている。画期的なCO₂削減成果を達成するためには、現場での運用の段階で改善を提案する方式から脱却して、計画・設計・施工法と施工機械の決定の段階からCO₂排出量ミニマムを目標とするべきである。

ダム、トンネル、橋梁、道路など土木工事の場合には、事業計画や調査段階の予備設計で構造物の形式や施工法がある程度決定される。ダムの場合、地質調査などを通じたダムサイト選定の段階で、工所用道路、骨材や土取りの場所、仮置き場、捨て場、作業基地などのイメージの大凡が決定される。

調査に基づいた詳細設計と積算の段階で設定した工期と工程に基づいて施工計画書を作成する。

仮設道路、事務所、宿舍、機材搬入と搬出、残土の仮置きと搬出などに必要な用地の取得や、施工過程での環境保全等に関わる地域住民との合意形成には施工管理者も参加する。計画や調査段階での合意形成に至ればCO₂削減を目的とした工法や運搬経路変更には支障を来さず可能性もある。

その歪は、施工管理者が地域との交渉の段階で負うこととなる。環境問題など住民のクレームによる工事の中断や変更は、再作業、工期延長などCO₂排出増の要因となる。計画～施工～維持管理～更新までのライフサイクルの個々の段階を担う担当者が連携して円滑な施工を実現すればCO₂削減効果は倍化する。

工事中の安全管理もCO₂削減と無縁ではない。事故による工事の中断は工期延長によるCO₂排出量増大と遅延回復のための機械やプラントの過負

表1 工事の流れとCO₂削減のポイント

段 階	CO ₂ 削減への留意点
事業計画	工事のニーズや規模などの社会的・経済的な妥当性。地質・地形等施工上の難易度評価値。生態系、文化財、地域の合意形成、用地、予算等が円滑な施工を阻害しないか。
調 査	施工・運用のライフサイクルでのCO ₂ 排出を極少とする施工形式と規模の決定、環境関連など施工を規制する諸法律の調査。
設 計 (詳細設計)	構造物の長寿命化。維持管理に手間の掛からない設計。解体・撤去に要するエネルギーを極少とする設計。廃材が原材料としてリサイクル可能な部材の選定。現地形の特徴を生かし掘削・埋め戻しを極少とするなどエネルギー消費を考慮。
施工計画 (施工準備)	エネルギー効率を考慮した最新の施工技術の採用を可能とする構造。全施工過程でのエネルギー消費を極少とする施工手順(仕事量極少化と位置のエネルギーの活用)。大型機械の投入を可能とする現場設営(効率化と工期短縮)。位置のエネルギーを有効に利用する、運搬などの仕事量を極小とするレイアウト等を案出。
設備・機械 の手配	仮置き、積替え、待機など運動のエネルギーの中断を排除した効率的な施工。現場の土質条件など施工側の要求と現場の規模に合致した種類、規格、組み合わせ。
施工計画 (施工)	省エネルギー設計の設備・機械導入。優秀なオペレータの確保。稼働機械周辺の安全確保。待機など機械の無駄な動きを極少とする機械群の最適な運行。運搬路など稼働環境の整備。CO ₂ 削減を目的とした改善提案。
維持管理	運転手法、稼働環境の維持や改善。運用過程での維持、改修を極少とする施工方法の工夫と提案。
更 新	施設の監視システム、工事事務所など維持管理業務への転用の検討。長寿命化を目的とした念入りな施工。解体・撤去に要するエネルギーを極少とする施工。

荷運転が過剰なCO₂排出を惹き起す。表1に道路、トンネル、造成、ダム、空港など土工事を例とした工事の流れとCO₂削減のポイントを示した。

1.3 施工管理者の立場

表1の事業計画以降の工事の流れの中で施工管理者として施工現場を預かる立場でCO₂削減を行う際に考慮すべきポイントとして下項がある。

(1) CO₂削減の必要性の認識

現場でのCO₂削減活動を効果的なものとするには、当該工事でのCO₂削減効果のみでなくCO₂削減への社会的な要求を現場スタッフが認識することが前提となる。例えば、道路整備によって時間と排気ガスを垂れ流す渋滞が解消されればCO₂削減に大きく貢献する。施工管理者が工事の社会的・経済的な妥当性を理解していることが現場でのCO₂削減活動の効率化と地域住民との連携強化の前提である。

(2) 削減成果の顕在化

CO₂削減を目的とした機械の選定の効果を確実なものとする為には、CO₂削減活動と現場の改善を連携して行う必要がある。CO₂は目に見えないが、CO₂削減効果が省燃費、機械の削減、仮置き場の消滅など目に見える成果とリンクしていれば現場全体の意識の集約が容易となる。施工現場での改善意欲を喚起するためにも、CO₂削減プロジェクトの実行は現場を預かる施工管理者の意見を反映したものでなければならない。

(3) 最適な設備と機械の選定と最適な運用

最適な設備と機械の選定とそれらの最適な運用で、CO₂排出を極少化できる。設備と機械の選定に際しては、施工規模と現場の広さに合致した種

類・規格・組み合わせを前提とする。

機械の組み合わせが不揃いであると、作業の進捗は最小作業能力の機械で決定され、過剰な能力を持った機械の低負荷での運転は、CO₂を垂れ流す結果となる。

優秀なオペレータの確保、稼働機械周辺の安全確保なども併せて行う必要がある。

(4) CO₂排出抑制型機械の採用

設備と機械メーカーでは施工過程でのCO₂排出を抑制するためにエンジン、排気ガス浄化装置、動力伝達系の改善やIT技術を駆使した機械制御の高度化など、機械設計面からCO₂削減を行っている。設備と機械の選定に際しては、省エネルギーが設計に反映されているかを確認する必要がある。

(5) 施工プロセスの定量的な管理

機械を効率的に運用するためにIT技術を駆使した運転支援システムや運行管理システムが提供されている。運行管理システムについては先号で項目を紹介した。個々のシステムについての詳細は省略するが次号で報文を紹介したい。施工管理者はこれらの情報を背景に適切な判断を行う必要がある。

(6) 積極的・効果的な改善提案

施工段階でも、調査・設計・施工計画書作成時に想定できなかったCO₂削減のための改善や、新工法のアイデアの提案は積極的に行うべきである。

ただし、施工中のCO₂削減は達成できるが、結果的に勾配や急カーブのある道路など供用後の通行車両のCO₂排出が増す現場改善案は、結果的に負の課題を残す事となる。CO₂削減に向けた設計変更の要求はライフサイクルでのCO₂排出の極少

化に立脚した判断によるものでなければならない。

1・4 土工を例としたCO₂削減施工

建設工事は土砂・岩石の移動、資機材の出し入れなど搬送作業の占める比率が特に大きい。土工計画の立案に際しては、運搬方法と運搬機械の選定、運搬路など稼働環境の整備が重点的な課題となる。運搬に関わるCO₂削減のキーワードとして下項がある。

(1) 最適な土配計画

土工の場合、工事全体の切土、盛土、押土など土石移動に要する仕事量が極少となる土配計画を立てる。

(2) 最適な機械と運搬路

施工規模と工程、積込みエリアの広さ、運搬路の幅員などに対し「CO₂削減定格」を基準にした最適な組合せの積込・運搬機械群を編成する。運搬路の最適設計と機械群の最適編成が相俟ってCO₂削減効果が発揮される。

(3) 運動エネルギーを有効利用

資機材や施工機械は場内の仮置きを極力排して必要の都度搬入する。仮置場の設営や運搬の2度手間を省く。場内での土運搬の場合も工程上中間で仮置きする場合があるが、一気に運搬すれば運搬機械の運動エネルギーを有効に利用でき、仕事量当たりの燃料消費量が減少する。土取りと土捨

て場、骨材採取場と骨材プラントなどの間公道を通過しての運搬となれば、オフロード型の運搬機械とコマーシャルダンプの併用が必要で、仮置きや積み替えなどの手間がかかる。場内での移動で完結すれば積み替えも不要で機械の大型化も可能となる。

(4) 位置のエネルギーの活用

土砂の移動を伴う施工で表2に例示した位置のエネルギーを活用した工法も提案されている。

位置のエネルギー活用例として傾斜地でのブルドーザ作業がある。図1は押土作業、図2にリッピング作業を勾配のある現場で実施した場合の作業効率を例示した。勾配20%の場合、上向きで作業した場合と下り方向で作業した場合の作業効率は、押土作業の場合1.5倍、リッピング作業の場合2倍の差が生ずる。

1・5 最適な機械とは

建設機械への依存度の大きい土工において、機械選定の適否がCO₂排出量、品質、工期（生産性）、施工費用などのすべてに影響する。

CO₂削減のために無駄のない機械運用のポイントとして下項がある。

- (1) 現場の土質条件などに合致した最適な性能の機械を選定する。
- (2) 現場に最も適した機械の種類、規格（大きさ）、組合せ、台数を選定する、

表2 位置のエネルギーを活用した工法

方 式	用 例 等
グローリーホールによる重力落下輸送 シュートによる落下輸送 オープンシュート工法 固液混相流送システム 水流利用輸送 発電機能を有する傾斜ベルトコンベア その他	砕石鉱山、原石山等 立孔構築時の資材供給、建築解体時等 造成、砕石鉱山 堆砂輸送など 位置のエネルギー利用の一種 鉱山で使用例あり 掘削やリッピングを下り向きで行う(ブルドーザ) 機械の設置位置を高くする(油圧ショベル)等

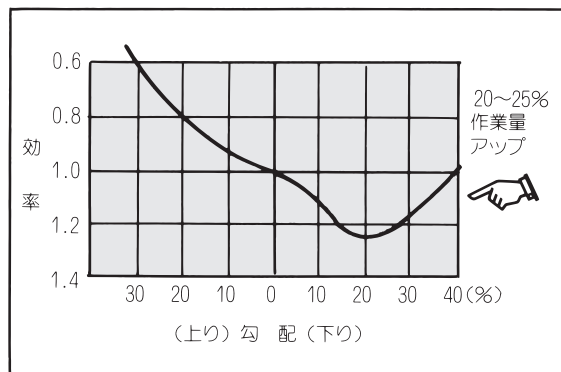


図1 押土作業を勾配のある現場で実施した場合の作業効率（ブルドーザ）

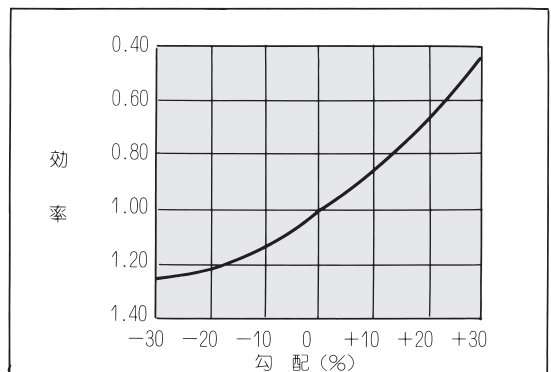


図2 リッピング作業を勾配のある現場で実施した場合の作業効率（ブルドーザ）

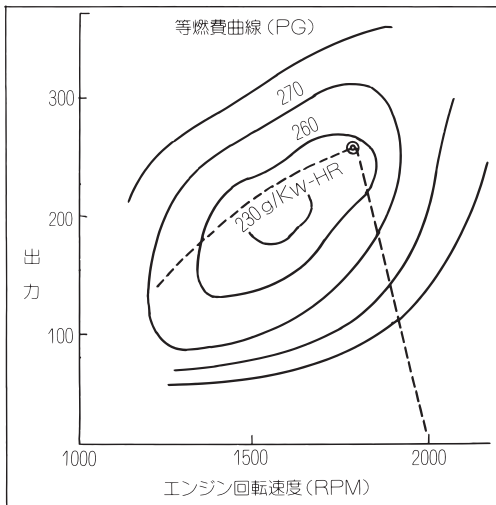


図3 エンジン特性例

- (3) 施工効率向上を目的に最適な作業装置(アタッチメント)を採用する。作業機械の数を減らすために機械の多機能化も検討するべきである。
- (4) 積み込み機械とダンプトラックなど複数の機械が協調して作業を行う場合や同一運搬路を異なった規格のダンプトラックが走行する場合など、機械サイズや性能の最適な組み合わせなどを前提とした機械の選定を行う。
- (5) 機械の効率化を意識した現場のレイアウト設計を行う。
- (6) 機械メーカーの省エネ設計の動向も注目する必要がある。生産調整で、機械の一部を待機させる場合、燃料生産性の低い機械から待機させる。
- (7) 作業量や稼働スペースなどを勘案し、投入可能な範囲で大型機械を採用する。(一般に同型の機械であれば大型ほど燃料生産性は高く、オペレータ数も削減できる)。

先号表4でのホイールロードによるロード&キャリ作業、後出図20のダンプトラックの走行速度を変更した運搬作業で例示した様に、施工コスト低減(施工生産性向上)とCO₂削減(燃料生産性向上)は必ずしも合致しない。図3に例示した様に、一般に建設機械の定格出力(図中のエンジン出力が最大点)はエネルギー効率の極大点(図中の燃料消費率が最小点)より高出力側に設定されている。CO₂削減を前提

とするためには、機械の施工(運搬)能力を定格より多少下回った先出の「CO₂削減定格」を基準とした機械手配を行うべきである。

施工現場では、日々の要求施工量に対し「CO₂削減定格」を基にした最適な施工法の決定して機械の配置と運行を行う。最適な施工法の決定には、予めシミュレーションなどの手法を用いて施工負荷毎の作業量とCO₂排出量(燃料生産性)を算出しておく。施工負荷毎の最適運行データが揃っていれば、施工中の工程調整や機材の手配待ちなどで施工手順の変更を行う場合など、CO₂排出ミニマム、施工コストミニマム、生産量極大など要求に応じた手順変更が極めて容易となる。

2. 個々の機械の選定

2.1 積み込み機械

(1) 大きさと燃料生産性

積み込み機械として油圧ショベルが最も一般的で

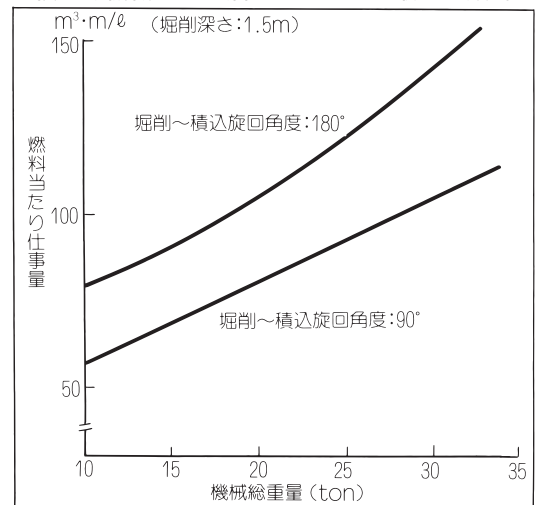


図4 油圧ショベルの総重量・旋回角度と燃料当たりの仕事量

表3 油圧ショベルの総重量と燃料生産性比較試験手順

試験条件	内容
機械の大きさ	12t, 19t, 29t (3機種)
掘削 積み込み間の旋回角度	90度, 180度
掘削深さ(規定深さ)	1.5m, 3m
掘削幅(規定幅)	バケットの外幅, バケットの外幅の2倍
掘削長さ(概略)	15m(深さ3m, 幅バケットの外幅の2倍の時) 30m(深さ1.5m, 幅バケットの外幅の時)
排土位置	10t級ダンプトラックのベッセル想定位置の地上にマーキング
積み姿勢時のバケット高さ	最低2.3m(ダンプトラックへの積み込みを想定)
試験の手順	規定幅, 規定深さの溝を指定時間掘削
試験時間(指定時間)	30分連続
オペレータ	1名
搭載エンジンの設定	フルスロットル(試験時)
計測項目	作業時間, 燃料消費量, 作業量(レベル, 箱尺, 巻尺)

ある、油圧ショベルについても運転操作技術と燃料生産性、同一の作業を行った場合の機械の大型化による省燃費効果を確認するために、熟練オペレータによる異なった大きさの機械を用いた時の燃料生産性の分析を行った事例が報告されている。表4に油圧ショベルの大きさで性能評価試験手順、図4に機械総重量の異なる油圧ショベルを用いて、90度、180度の2種の旋回角度で掘削と積込作業を行った場合の燃料当たりの仕事量を示した。

実験の結果、土の平均移動距離を考慮した「燃料当たりの仕事量」で評価すると、機械の大型化の効果が顕著に顕われている。すなわち、図4で示した1.5m深さの掘削と旋回角度90度、180度の積込み作業時の実測例では、同一作業量での消費燃料に倍以上の差異が存在している。旋回角度90度の場合と180度の場合の消費燃料は1.5倍差である。

掘削深さと燃料当たりの仕事量の関係では、掘削幅をバケットの外幅に規定した場合には、29t級と12t級油圧ショベル間に仕事量当たりの燃料消費量に1.5~1.7倍の差異が存在している。大型化の効果が顕著である。旋回角度と燃料当たりの仕事量の関係でも、ほぼ同じ様な傾向が示されている。

掘削深さ3mでの試験を実施しているが燃料生産性に大きな差異は認められなかった。

(2) 運転技術(追補)

前号ではブルドーザやホイールローダを例として建設機械の操縦技術の個人差や操縦方法の差が燃料生産性に及ぼす影響について定量的な評価を行った事例を紹介した。

油圧ショベルについても72名の建設機械施工技術検定受験者の試験過程のデータ分析(同一機械)による同様な実験を実施した事例がある。前号の補足となるが、以下にその概要を紹介する。

表4に試験手順、図5に油圧ショベルにおける燃料当たりの作業量(燃料生産性)と時間当たりの作業量(作業生産性)

の関係を示した。燃料、時間当たりの作業量共に優れた成績を残した図中右上の熟練運転者に対し図中左下の未熟練運転者との間には、3~4倍の生産性の差がある。表5に燃料当たり作業量の全平均に対する最大作業量の運転者の比率を示した。2.4倍の開きがある。表中のブルドーザの運

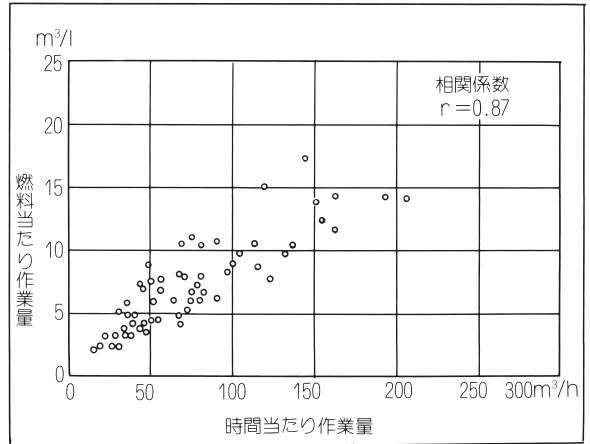


図5 油圧ショベルにおける時間当たり作業量と燃料当たり作業量の関係

表4 油圧ショベル燃料生産性を評価試験手順

試験条件	内容
機械の大きさ	18.5 t級(山積みで0.7m³級バケット装着)
掘削 積込み間の旋回角度	90度
掘削深さ	規定なし
積込み回数	2回
調査対象オペレータ	72名
試験の手順	屈曲走路を22m前進・掘削・積込み・後退 (二級建設機械施工技術検定試験手順)
計測項目	作業種別毎の時間、燃料消費量、積込重量(トラックスケール)、土の湿潤密度(ルーズ)

表5 燃料生産性(作業量/燃料)の個人差

機種	試験機械仕様	試験者数	燃料当たり作業量 (m³/l)			備考
			平均値(A)	最大値(M)	比(M/A)	
油圧ショベル	19 t級	72名	7.4	20	2.4倍	
ブルドーザ	15 t級	38名	12	22	1.8倍	

注: 試験対象は二級建設機械施工技術検定試験受験者

表6 油圧ショベルとタイヤローダの燃料生産性比(例)

項目	単位	ホイールローダ	油圧ショベル	差
バケット容量	m³	1.3m³	0.8m³	-
定格出力	kW	63	103	-
1日の積込量	m³/日	327	310	-
1日の燃料消費量	ℓ/日	48	96	-
燃料生産性	m³/ℓ	6.81	3.23	2.11倍

転量量の差は先号表5のデータを参考に付記したものである。検定試験受験者で全員が初心者に位置づけられる中での比較ではあるが、油圧ショベルの運転の難しさを示している。

(3) ホイールローダ

積み込み機械として油圧ショベルを万能とする考えは合理的ではない。積み込み専用機械としては、ローダ(タイヤ型、クローラ型)の方が高い燃料生産性を発揮する場合がある。工場のストックヤードや砕石現場などで連続的な積み込み作業を行う場合、砕石販売時短時間で多数のダンプトラックに積み込むなどの場合などには、ホイールローダが用いられている。表6に、油圧ショベルとタイヤローダの燃料生産性比の算出例を示した。

表7 異なる大きさのホイールローダの燃料生産性比(例)

項目	単位	9.6m ³ 級	7.7m ³ 級	9.6/7.7m ³ 比
バケット容量	m ³	9.6	7.7	1.25
積込量/台	t	50.5	47.0	1.07
積込回数/台	杯	3	4	
積込時間/杯	分	9.3	9.1	0.98
積込時間/台	分	2.8	3.65	0.77
燃料消費量/台	ℓ	2.08	2.72	0.76
燃料消費率/Hr	ℓ/hr	44.6	44.7	1.00
燃料生産性	t/ℓ	1.13	1.05	0.93

[D鉱山における優先使用機械決定のための実機試験]

大小2種類の機械を所有していたが、施工量に余裕が出てきた為、どちらを優先して使用するかの判断が必要となり、実測によって燃料生産性の差異を求め大型機械の優先使用を決定した事例である。

45t級ダンプトラックへの積み込みに際し、9.6m³級の大型ホイールローダを使用した場合、7.7m³級に比べ積込時間が23%、消費燃料量が7%改善した。表7に両者の燃料生産性、図6に両機械の積込作業燃料消費などの稼働時の負荷モード、図7に積込作業に要する時間と燃料消費量を示した。

積み込み作業時の最高燃費は両機械に差異はない。

9.6m³級の場合、ゆとりある負荷での運転と作業装置のリンク機構の改善が相俟って燃費率の良いポイントでの運転に成功している。1杯当たりの積み込みに要する時間は同等のため、7.7m³級の場合は積み込みに1杯分余計な時間を要している。

9.6m³級は高い位置からの積み込みでベッセルに満遍なく積み込み、結果的に7%増の積み込みを行っている。

2・2 運搬機械

運搬機械の選定は燃料消費と作業効率に大きな影響がある。距離によって運搬手段ごとのコストと燃料生産性が異なる近距離では、掘削機械や積み込み機械がそのまま自走して運搬する。運搬距離が長くなると、積込～運搬～排土・巻出しなどの手順の内、運搬に要する時間の割合が大きくなりダンプトラックなどの運搬専

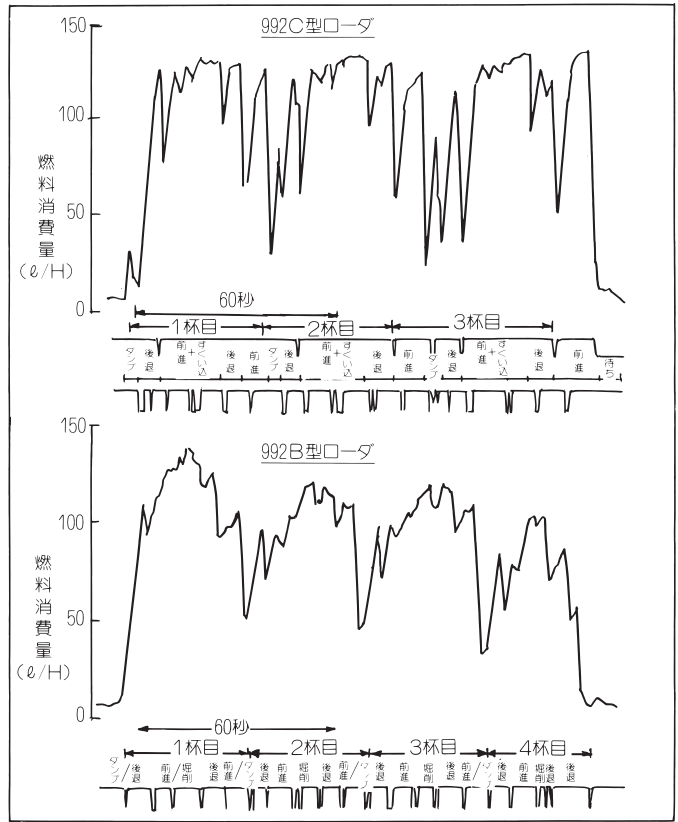


図6 異なる大きさのホイールローダの積込時の負荷モード

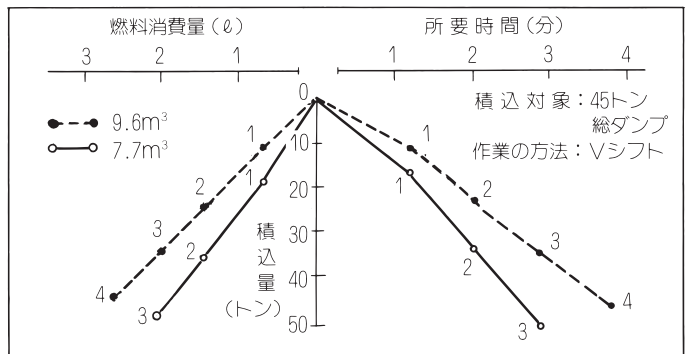


図7 積込作業に要する時間と燃料消費量

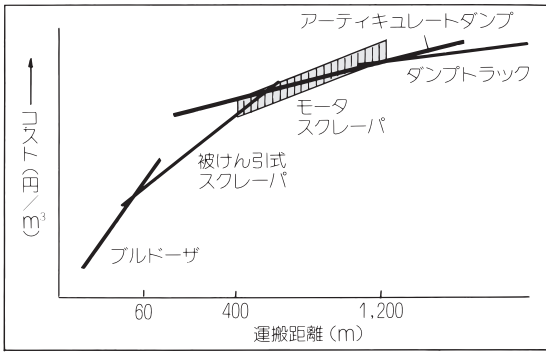


図8 運搬距離別経済範囲(土の場合)

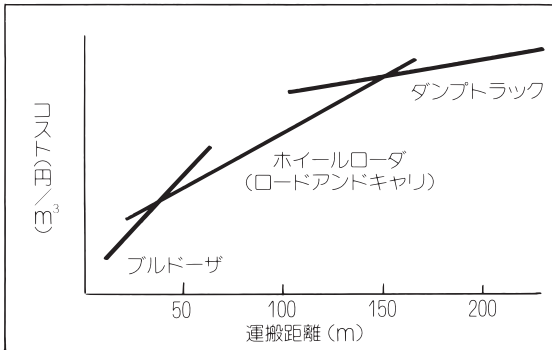


図9 運搬距離別経済範囲(岩石の場合)

用機の出番となる。図8に土運搬の場合、図9に岩石の場合の距離別の経済的な運搬手段例を示した。運搬作業の経済性評価の場合には燃料消費量の差が判断要素となる。経済性即ちCO₂削減と考えてよい。

なお、図8および9に示した以外の運搬手段として、ベルトコンベアやスラリーや粉体状にして管内を搬送する方法などがある。

ダンブトラックなど運搬機械は、大型化する程燃料当たりの運搬量が大きく燃料生産性が高い。

省エネ、省人の観点から複数のベッセルが運転室を共有するトレーラダンブトラックを使用した事例もある。

同一の運搬路面凹凸条件ではタイヤ径が大ききほどころがり抵抗が小さくなることも大型機械の生産性を押し上げている。また、前号の図7で示した様に同一仕様のダンブトラックの場合、運搬量を増すと燃料生産性は高くなる。全運搬機械を定格積載で運行すれば効率は極大となる。

積載量がまちまちな運搬機械や、異なった仕様の機械が同一の運搬路を走行すると、運搬途中での追い越しや先行機械の後ろを低速で追従するなど効率の悪い運行になる。とくに幅員が狭く追い越しができない場合、登り下りの勾配がある場合など性能差が生産性を阻害する。運搬機械の設計者は、大きさが異なる機械が同一の運搬路を混合走行した場合も想定し、常に同じ速度で走行できる様に機械のサイズと性能のバランスを考慮した

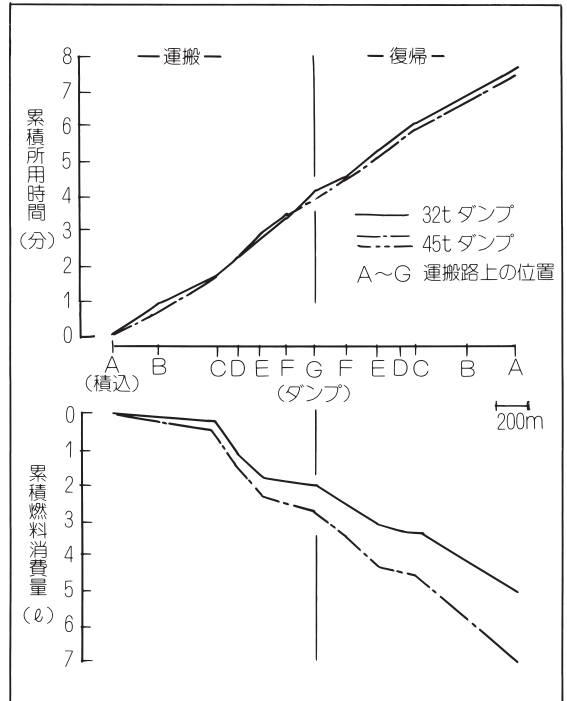


図10 同一地形を走行する32 t , 45 t 級ダンブトラックの通過特性

表8 ブルドーザの試験条件

試験条件	内容
機械の大きさ	15 t , 20 t , 45 t , 90 t (4 機種)
作業	掘削・押土
試験の条件	1 : 2 の勾配で掘削 1 : 2 の勾配で元の高さに戻る スロープを含めた全長を L とする。
掘削深さ (D)	0.5 m , 1 m , 1.5 m
運土距離 (L)	20 m , 40 m , 60 m
後進時の速度段	1 速 , 2 速 , 3 速
オペレータ	2 名 (同程度の技量)

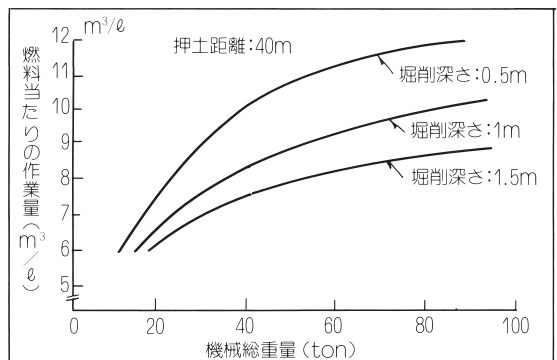


図11 掘削・押土作業時の機械総重量と燃料当たりの作業量(ブルドーザ)

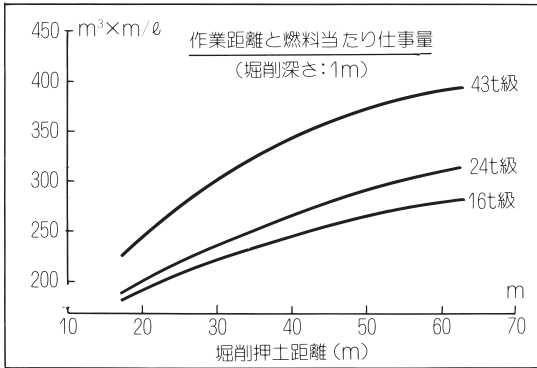


図12 掘削・押し距離と燃料当たりの仕事量(ブルドーザ)設計を行う必要がある。図10に、同一地形を走行する32 t, 45 t 級ダンプトラックの通過特性を示した。

2.3 ブルドーザ

ブルドーザについても、同一の作業を行った場合の機械の大型化や掘削・押し距離による燃料消費量の差を確認するために、機械重量15~90 t 級の4台のブルドーザを用いて表8の条件で実験を行った事例がある。図11に40mの掘削・押し作業時の掘削深さ当たりの機械総重量と燃料当たりの作業量の関係、図12に掘削・押し距離と燃料当たりの仕事量 ($m^3 \times m / \ell$) の関係を示した。

機械重量15 t 級と90 t 級のブルドーザによる掘削と押し作業に必要な燃料消費量の計測結果では、掘削深さ0.5m, 1 m, 1.5mと運土距離40mでの実測例で、同一作業量での消費燃料に1.6~1.8倍の差が存在している。作業量さえ確保されていれば機械の大型化がCO₂削減に大きな効果を発揮する。

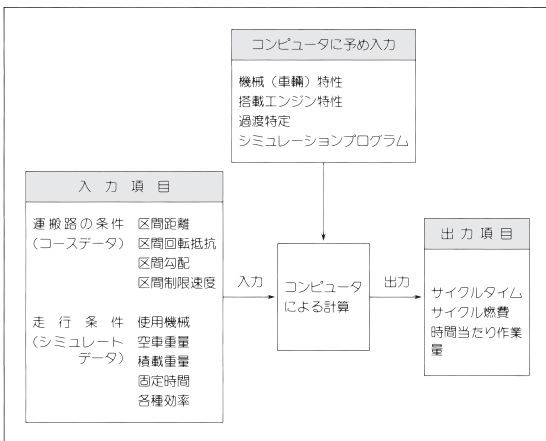


図13 ビークルシミュレーションのための入出力項目

3. 運搬路の設計

3.1 ビークルシミュレーションの目的と仕組み

ビークルシミュレーション手法を用いて、与えられた運搬路条件に対する最適走行速度の算出や運搬路整備(ころがり抵抗の低減)のCO₂削減効果などについて先号で紹介した。(前号図4, 5, 6, 7)

ビークルシミュレーションの用途として下項がある。

(1) 正確な作業量と燃料消費量の推定

機械、運搬路の条件、走行条件が確定すれば、走行する機械の作業量、サイクルタイム、燃料消費量が算出できる。

(2) 運搬路の設計

(1)の手法を用いて想定される複数の運搬路や、走行条件の比較検討を通じた最適な運搬路と走行条件を導きだすことができる。

(3) 運搬路の改善

現状に対する改善成果の推定が可能で、改善のためのコストと効果を定量的に推定できる。

図13に、ビークルシミュレーションを行うためにコンピュータに格納するデータ、入力項目、出力項目を示した。

3.2 ビークルシミュレーションの効能

性能と整合した勾配、最適な片勾配を持ちカーブ部の減速不要、必要箇所に変差部を有し待機不要、見通しがよく定速運転を維持できる、一時停止がない、排水ピットなどが横断していない、表面が平滑に管理されている、などが運搬路に求められる機能である。走行車両のCO₂排出が最少となる運搬路の設計、運搬路に合致した車両の選択など機械の選定と運搬路の設計はシミュレーションが得意とする所である。車両が長期間連続して往復移動する運搬路は、僅かな瑕疵でも工期全体では大きな影響がでる。

車輛走行時の燃料消費の多寡は、車輛固有の性能以外に、運搬路の設計(幅員、勾配、カーブ、カーブの視界や片勾配)、運搬路の整備状況(ころがり抵抗/平滑度)、運転操作技術、オペレータの疲労度等に依存している。これらの諸因は、走路の凹凸や屈曲が運転操作に大きく影響を及ぼす等、相互に影響を受けている。CO₂削減の実効を上げるためには、総合的な視野に立った試みが必須である。CO₂削減、燃料生産性の高い運搬路は下記の条件を具備している。

ダンプトラック等運搬機械のサイクルタイムを極小とするために、交叉や一時停止などを必

要とせず定速運転が可能，
 運搬機械が性能を最大限に発揮できる勾配の
 組み合わせ，
 登り積載・下り空車など運搬効率を配慮した
 土捨て場。仮置き場などを計画する，
 見通し確保・運搬路としての専用化など安全
 の確保，
 カーブの横断勾配など減速・一時停止なしに
 一定速度で走行できる構造とする，
 オペレータ疲労の極少化

高低差のある施工現場での機械施工の場合，運搬経路の決定が燃料生産性に大きく影響する。

地形的な拘束の中で効率の良い運搬路の設計を行うためには，想定し得る全てのケースについて，それを採用した場合の燃料消費と施工コストを見積り，コスト最少のケースを見つけ出す必要がある。

3.3 ピークルシミュレーションの活用例

(1) カーブの通過モデル

図14は，半径50～100mのカーブを30t級ダンプトラックが通過するための所要時間と燃料消費量を算出するためのモデルである。

当然のことながら，曲率を大きくすれば通過時間も消費する燃料も少なくなるが，現場での運搬路施工コストと運搬路造成に要する燃料との比較検討が必要となる。なお，計画走行速度を実現するために幅員は，片側1車線対面通行の場合，車幅の4倍必要である。

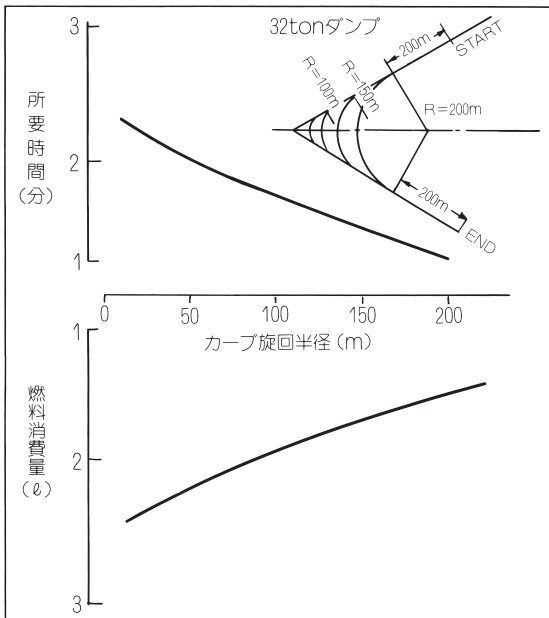


図14 カーブの通過モデル

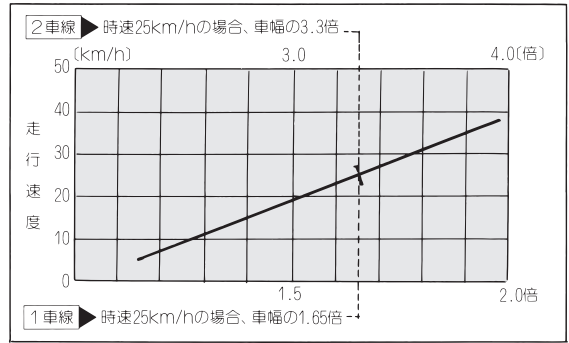


図15 ダンプトラックが安全に走行するための走行速度毎の推奨運搬路幅

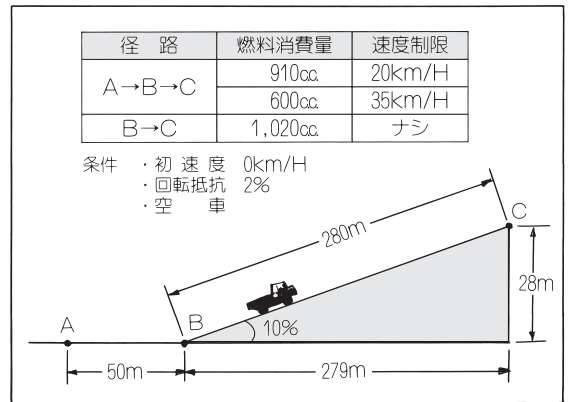


図16 助走区間の有無と燃料消費量

シミュレーションで最適走行速度を求めてもダンプトラックがその速度で走行できなければ意味がない。図15にダンプトラックが安全に走行するための走行速度毎の推奨運搬路幅を車両幅員との倍率で示した。

現実の作業現場では，路肩の条件，運搬路幅員，片勾配の角度，排水溝など運搬路を横断する障害の有無などによって現実とシミュレーション結果との間に差異が発生する。その差異の要因究明と排除が現場管理者の仕事となる。

(2) 坂道の通過（助走の有無と燃費）

坂道を通過する場合，助走区間の有無によって燃料消費量に大きな差異が生じる。図16は32t級

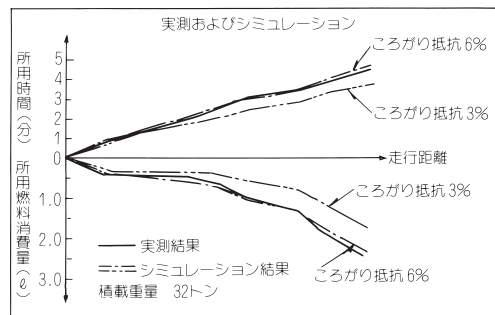


図17 運搬所要時間の実測と改善効果予測

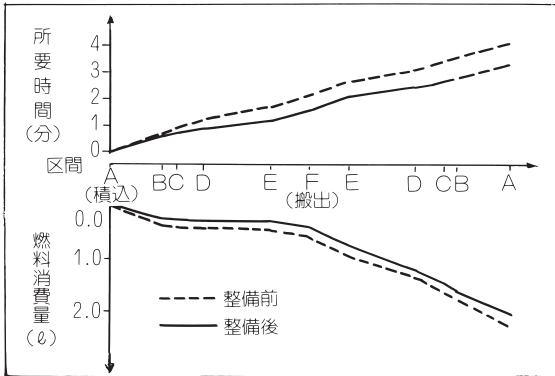


図18 運搬路整備効果

ダンプトラックが50mの助走区間を設けた場合と勾配の起点から走行を開始した場合の燃料消費量とをシミュレーションを用いて比較した結果である。

助走区間なしの場合、助走ありの1.1~1.6倍の燃料を必要としている。

〔E鉱山における運搬路の改善と効果〕

E鉱山では運搬路の整備と省燃費の関連に注目して、計測機器を用いた機械の稼働分析とピークルシミュレーションによる改善効果の推定を行った。図17に、現状の稼働分析の結果(実線)、路面のころがり抵抗6%の実測結果を元に行ったシミュレーション結果(一点鎖線)、ころがり抵抗を3%に改善した場合を想定したシミュレーション結果(二点鎖線)を示した。

稼働分析の結果(実線)とシミュレーション結果(一点鎖線)は極めて精度良く合致している。

この状態から路面整備によって二点鎖線の状態まで改善すると燃料消費量が20数%改善すると想定された。この想定で路面整備を行い、その効果を確認した。図18に整備前と整備後のサイクルタイム(所要時間)と燃料消費量を示した。サイクルタイムは20%改善したが燃料消費量の改善は10%程度であった。

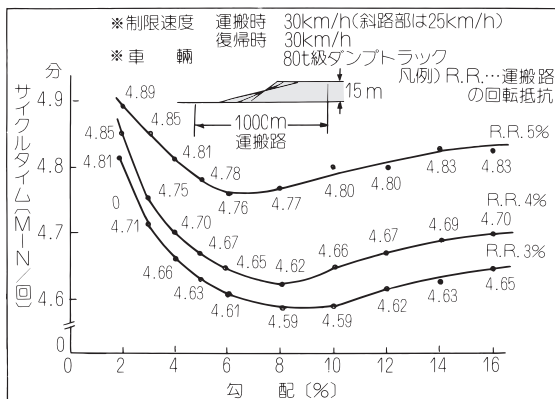


図19 勾配変化時のサイクルタイム

〔F鉱山における省エネの試み〕

F鉱山で実施した省燃費の試みは、個々の車輛の省燃費と同時に、同鉱山の将来的なレイアウトに沿った運行効率の向上可能性も包含していた。

このため、施工の経験を積んだ運行管理者と機械の性能を熟知したメーカーが協力して使用機械と運搬路の最適整合を極限まで追求した。

最適な現場レイアウトと走行条件を決定するために、現場で選択し得る様々な条件での走行シミュレーション、複数の機械の最適な組み合わせ検討、機械に測定器を装着して稼働中の燃料消費量や運行サイクル等を測定し、シミュレーションの精度と成果の確認などを実施した。

ダンプトラックのオペレータに、運搬路表面の平滑度、積載状況などと最適走行速度の関係を燃料生産性の面から理解させるため、これらの値を変更したシミュレーションも行った。検討と結果は下項の通りである。

15mの高低差構築する斜路の最適勾配の決定

中間に標高差15mある水平距離1000mの運搬路を、80t級ダンプトラックが積載時下り、空車時登坂で往復する条件で様々な勾配の斜路のモデル

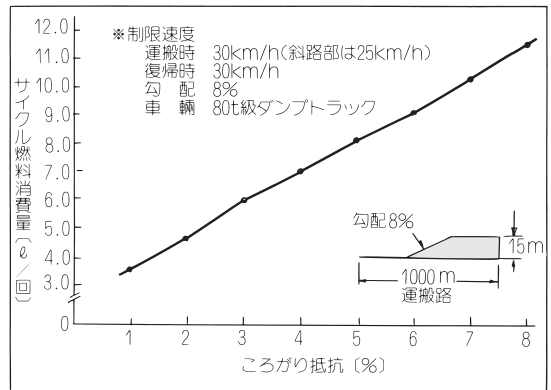


図20 ころがり抵抗の変化による燃料消費量の変化

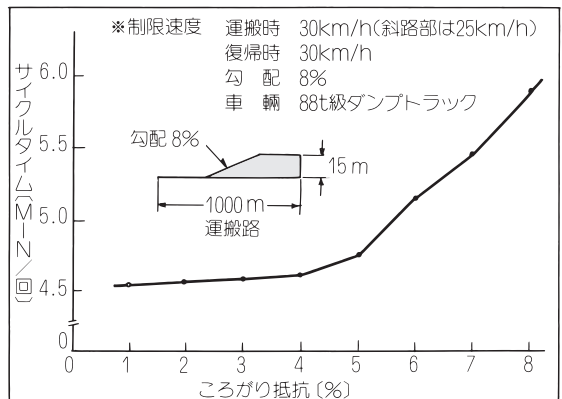


図21 ころがり抵抗の変化によるサイクルタイムの変化

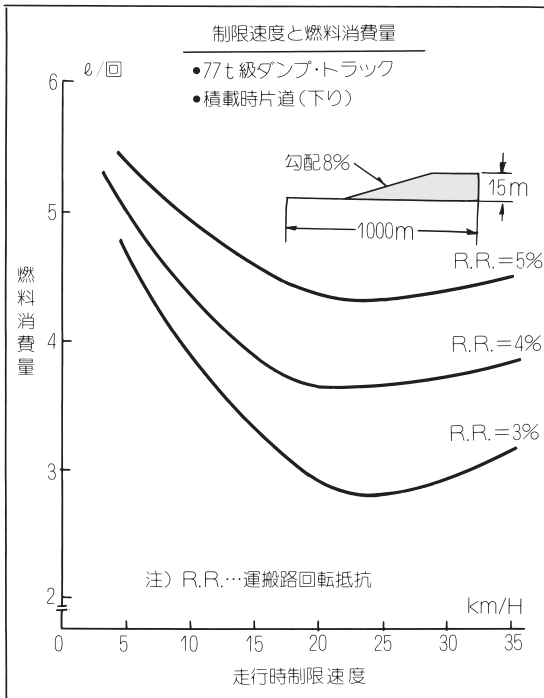


図22 制限速度を5～35kmとした場合の燃料消費量(積載時)

をコンピュータ中に構築し擬似走行(シミュレーション)を行った。シミュレーションでは15m高低差の斜路の勾配を2%～16%変更した。運搬路表面の平滑度の指標である路面のころがり抵抗は、整備の目標を設定するために3, 4, 5%を選択した。図19にシミュレーションの結果を示した。

最適勾配は、ころがり抵抗5%時6%, 同4%時8%, 同3%時8～10%であった。最終的に現場の勾配は、路面の実態と次項の整備目標値なども勘案し8%とすることに決定した。

路面整備の目標の決定

図20及び図21に、上記で決定した勾配8%の斜路がある15mの高低差の運搬路を80t級ダンプトラックが定格積載で下り、空車で登坂した場合の燃料消費量(図20)と、サイクルタイム(図21)を示した。

ころがり抵抗を3%に保つことができれば、現状の6%前後の状態に比べ、サイクル燃料消費量が40%, サイクルタイムが13%低減する。当該現場では、路面の整備コストなども勘案し路面の整備目標をころがり抵抗4%に保つこととした。

空車時の制限速度の設定

図19～図21は走行時の制限速度を、水平部30km/h, 斜路部25km/h, 空車復帰部は水平部と斜路

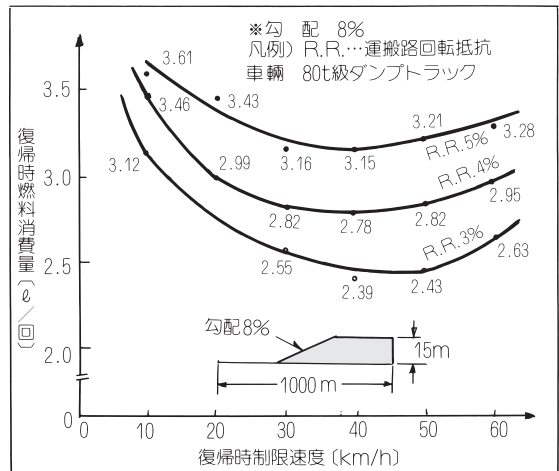


図23 制限速度を5～60kmとした場合の燃料消費量(空車時)

部共に30km/hとした。

図22および図23は、この制限速度の一部を変更した場合の燃料消費量への影響を推定した結果である。図22が積載下り時の制限速度を5 km/h～35km/h間、図23が空車復帰時の制限速度を5 km/h～60km/h間で変更した場合の燃料消費量のシミュレーションによる算出結果である。機械の日常的な運用の最適化を目的にシミュレーション計算を行ったものである。

シミュレーションの結果、通常は燃料生産性が極大となる積載時25km/h, 空車時40km/hを制限速度とし、出荷量優先時は積載時の制限速度のみ35km/hとする運行を行うこととした。

実際の運用はこの値に安全上の配慮を行うこととなる。

ホッパーの選択

採掘現場には2つのホッパー(グローリホール)がある。ベンチの中間域にある原石をどらに運搬する方が、少ない燃料消費量で運搬を行えるかも問題となる。この問題に対する回答を求めため、ダンプ・トラックの走行シミュレーションによって燃料消費量および運搬サイクル時間の各々について2つのホッパーへの所要量と時間の等しい位置を求めベンチ上に印を付けオペレータが容易に判断できる様にした。

その他

ベンチをホッパーに向かって数%下る形状とし積載時下り・空車時登坂とする、昼食時は大型機械はベンチに残して出勤時の送迎バスがオペレータを迎えに行くなど、省燃費のためのあらゆる可能性の検討を行った。

▶▶次号に続く