

鉱山ダンプの燃料消費量に着目した 鉱山生産コストの分析

川股 幸博¹・大口 敬²・和田 健太郎³

¹正会員 東京大学 大学院工学系研究科/生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: kawamata @iis.u-tokyo.ac.jp

²フェロー会員 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: wadaken@iis.u-tokyo.ac.jp

鉱山現場では、資源生産の効率化のため単位生産量あたりのオペレーションコストを示す生産効率の向上が強く求められている。本報告では、鉱山ダンプの燃料消費量に着目した鉱山生産コストモデルを構築し、搬送路の勾配による鉱山の生産効率の影響について検討した。搬送路の勾配、路面抵抗など鉱山ダンプの抗力から最大走行速度を導出するモデルを構築し、鉱山ダンプの最大速度と搬送路の勾配から生産効率を試算した結果、鉱山ダンプがトルク不足にならず勾配が最も大きい状況下で、生産効率が最大になることを確認した。さらに、鉱山ダンプごとの性能差が与える生産効率を明確にするため、鉱山ダンプの組み合わせによる生産効率の影響について検討した。その結果、鉱山ダンプの登坂速度の差を小さくすることで生産効率を向上できることを確認した。

Key Words : Cost Analysis, Operation Cost, Fuel Consumption, Mining Truck

1. はじめに

資源需要が高まる中、鉱山現場では資源生産の効率化が強く求められている。鉄、銅、石炭といった鉱物は、露天掘り方式で、超大型の鉱山ダンプを用いて大量の鉱石を運び出している。本運搬作業では、鉱山ダンプが露天掘りの最下部で鉱石の積み出しを行い、そこで積み込んだ鉱石を地上部まで運び出し、また、最下部に戻って積み込みを行う繰り返し作業が行われる。

鉱山における生産効率は、一般に単位重量あたりのオペレーションコスト $t/\$$ という単位で表される。鉱山現場では、生産効率 $t/\$$ を最大化するため、鉱山ダンプの燃料消費量、タイヤ交換、交換部品などに関わるオペレーションコストを最小化する要求がある。この鉱山ダンプのオペレーションコストの中では、燃料消費量が最も大きなコストを占め⁴⁾、そのため、エンジン効率の改善などのハード的なアプローチ、走行履歴データによるエコ運転診断などソフト的なアプローチなど鉱山ダンプ本体に関わる燃料消費量の削減策が考えられてきた³⁾。一方、鉱山インフラである搬送路は、鉱山ダンプの燃料消費量に大きな影響を与えるものの、安全に関わる機能が

定めたレギュレーション⁵⁾に従った設計になっており、生産効率という観点で議論は行われていない。

そこで、本報告では、鉱山ダンプの搬送路設計による生産効率の向上を目指し、鉱山ダンプの燃費に着目した生産コストについて検討する。

2. 鉱山ダンプの燃料消費量に着目した生産コストモデルの検討

鉱山では、より多くの鉱石をより少ないコストで産出することが求められている。この鉱山オペレーションにおける生産効率では、単位生産量あたりのオペレーションコストを指標として用いている。鉱山におけるオペレーションコストでは、運搬時の燃料代が約 50%以上の割合を占める²⁾。ここでは、燃料消費量を最小にするオペレーションについて検討する。

鉱山の生産効率 $PE[t/\$]$ は、1日の採掘量 $ED[t]$ と1日あたりのオペレーションコスト $OP[\$]$ により、以下のよう表される。

$$PE = \frac{ED}{OP} \quad (1)$$

この 1 日の掘削量 $ED[t]$ は、鉱山ダンプによる積み出し量による 1 日の総積み出し量で表され、鉱山ダンプ i の 1 日あたりの積み出し量を $DA_i[t]$ とし、鉱山サイトの積み出しに関わるダンプ台数を $N[台]$ とすると以下のように示される。

$$ED = \sum_{i=1}^N DA_i \quad (2)$$

また、1 日のオペレーションコスト $OP[\$]$ は、鉱山ダンプ i の 1 日あたりのオペレーションコストを $DC_i[台]$ とすると、以下のように表される。

$$OP = \sum_{i=1}^N DC_i \quad (3)$$

次に鉱山ダンプ i の 1 日あたりの積み出し量 $DA_i[t]$ について考える。鉱山ダンプ 1 台の 1 日あたりの積み出し量は、ショベルにより鉱石の積み込みを行う積み込み場と、鉱石を集積する放土場とを結ぶ搬送路を往復する回数と、鉱山ダンプの 1 回の鉱石積載量で求められる。ここで鉱山ダンプが鉱石を積み出すための搬送路の長さを $HL[km]$ とし、鉱山ダンプ i の登坂速度を $US_i[km/h]$ 、鉱山ダンプ i の降坂速度を $DS_i[km/h]$ と、鉱山ダンプ i の 1 日あたりの積み出し量を $DH_i[t]$ とすると、以下のように表される。

$$DA_i = \frac{1}{\frac{HL}{US_i} + \frac{HL}{DS_i}} \times DH_i \times 24 \quad (4)$$

ここで、鉱山ダンプ i の 1 日あたりのオペレーションコストを $DC_i[台]$ を、オペレーションコストの中で最も大きな割合を占める燃料コストのみであると仮定する。鉱山ダンプは登坂時にはフルアクセルで走行し、降坂時にはエンジンはアイドリング状態でブレーキのみで走行する。鉱山ダンプ i のフルアクセル時、すなわち登坂時の燃料消費率 $FF_i [L/h]$ 、鉱山ダンプ i のアイドリング時すなわち降坂時の燃料消費率 $FI_i [L/h]$ 、また 1L あたりの燃料代 $FP[¥/L]$ とすると、鉱山ダンプ i の 1 日あたりのオペレーションコスト $DC_i[台]$ は、以下のように表すことができる。

$$DC_i = FF_i \times 24 \times \frac{HL}{US_i} + FI_i \times 24 \times \frac{HL}{DS_i} + FP \times \left(\frac{HL}{US_i} + \frac{HL}{DS_i} \right) \quad (5)$$

この鉱山ダンプ i のフルアクセル時、すなわち登坂時の燃料消費率 $FF_i [L/h]$ 、鉱山ダンプ i のアイドリング時すなわち降坂時の燃料消費率 $FI_i [L/h]$ は、鉱山ダンプの仕様により決定される。

鉱山ダンプ i の 1 日あたりの積み出し量 $DA_i[t]$ と鉱山ダンプ i の 1 日あたりのオペレーションコスト $DC_i[台]$ から、生産効率 $PE[t/台]$ は以下のように記述できる。

$$PE = \frac{\sum_{i=1}^N DA_i}{\sum_{i=1}^N DC_i} = \frac{\sum_{i=1}^N DH_i}{\sum_{i=1}^N \left(FF_i \times \frac{HL}{US_i} + FI_i \times \frac{HL}{DS_i} + FP \times \left(\frac{HL}{US_i} + \frac{HL}{DS_i} \right) \right)} \quad (6)$$

3. 鉱山ダンプの性能と生産効率

鉱山ダンプは、車両重量が重いので、登坂時、降坂時に十分な推進力、制動力を得ることが難しい。一方、鉱山現場では生産量を上げるため、できるだけ速く鉱山ダンプを走行させている。そのため、登坂時には鉱山ダンプオペレータはフルアクセルで鉱山ダンプを運用している。しかし、搭載量の増加、勾配の増加、路面の転がり抵抗の増加に比例して速度が小さくなり、生産効率に影響する。

図 1 に、実際の鉱山ダンプの最大積載時の勾配ごとの最大速度を示す。一般に鉱山ダンプは、車両重量、勾配、路面抵抗に対する最大速度の関係を性能表が提供されている。図 1 は、この性能表に基づき、路面抵抗 μ を実際の搬送路と同等の 0.03 としたときの最大積載時の各勾配ごとの最大速度を示した。図 1 におけるダンプ A の最大積載量は 325t、ダンプ B の最大積載量は 525t である。

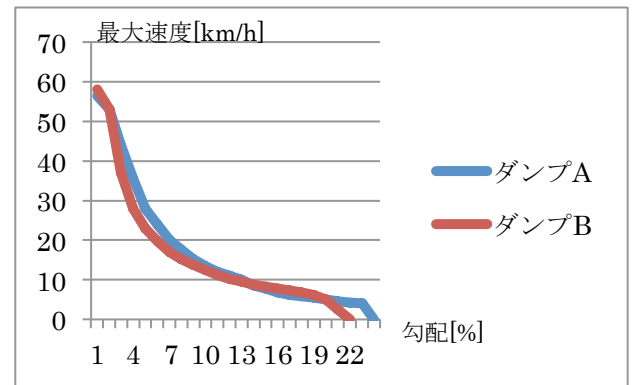


図 1 鉱山ダンプ最大搭載時の各勾配の最大速度

図 2 は、図 1 の最大積載時の勾配ごとの最大速度の関係を式(6)から計算した生産効率である。ここでは、鉱山ダンプ A と鉱山ダンプ B の登坂時の燃料消費率 FF_i をそれぞれ 360[L/h]、504[L/h]、鉱山ダンプ A と鉱山ダンプ B の降坂時の燃料消費率 FI_i をそれぞれ 10.8[L/h]、18[L/h]、1L あたりの燃料代 FP を 0.84[¥/L] とし、深度 400m としたときの各勾配ごとの搬送路の長さ $HL[km]$ を使用した。また、鉱山ダンプの制動力の制約から、勾配が大きい坂ほどゆっくり走行し勾配が小さい坂ほど速く走行する性質がある。そこで登坂速度 US_i と降坂速度 DS_i を同じ速度とした。

図 1 では、勾配 14% までは鉱山ダンプ A の方が鉱山ダンプ B より最大速度が大きく、それより大きな勾配では最高速度が逆転する。つまり、式(6)に示すように生産効率は、鉱山ダンプの最高速度の影響を受けるため、鉱山ダンプごとに生産効率が最大となるときの搬送路の勾配は異なる。そのため、図 2 の例では、鉱山ダンプ A の最大生産効率は勾配 10% であるのに対し、鉱山ダンプ B の最大生産効率は勾配 14% となっている。

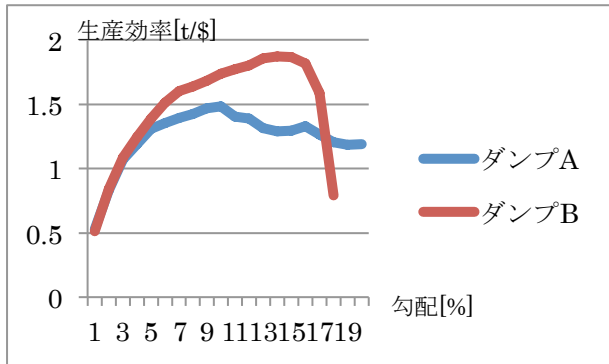


図2 鉱山ダンプごとの生産効率

4. 鉱山ダンプ速度、搬送路勾配と生産効率の関係

4.1. 燃料消費予測モデルの概要

鉱山ダンプの燃料消費と車両速度の関係を明らかにするため燃料消費予測モデルについて考える。大口ら²⁾によると、車両の燃料消費量は車両のエネルギー収支を燃料熱当量および車両のエネルギー効率を用いて変換することで計算できる。すなわち燃料消費量は、車両の運動方程式、搬送路の地形、走行速度などの情報により推定することができる。

この車両エネルギー収支に着目した燃料消費予測モデルは、式(7)のように車両の基礎消費、転がり抵抗、走行時の高度変化、空気抵抗、車両の加減速などのエネルギー変化成分により表現できる¹⁾。

$$Q = f(\text{idle})T + \frac{1}{\varepsilon\eta H} \sum_i \text{MAX} \left[0, \left(\mu_i M g l_i + M g h_i + \frac{1}{2} \rho S C_d v_i l_i + \frac{1}{2} (M + m) (v_{i,e}^2 + v_{i,s}^2) \right) \right] \quad (7)$$

ここで、 l_i は、小区間 i の区間長[m]、 h_i は小区間内の高度差[m]、 v_i は小区間 i 内での平均速度[m/s]、 $v_{i,s}$ と $v_{i,e}$ はそれぞれ小区間 i の始末端での速度[m/s]、 T は区間旅行時間[sec]、 g は重力加速度[m/s²]を示す。 $f(\text{idle})$ は基礎燃費、 ε は正味熱効率、 η は伝達効率、 H は燃料熱当量[J/cc]、 μ_i は小区間 i 内での転がり抵抗、 ρ は空気密度[kg/m³]、 S は前方投影面積[m²]、 C_d は C_d 値、 M は車両重量[kg]、 m は回転部分相当重量[kg]を示す。

4.2. 鉱山ダンプ走行時の最大速度の導出

鉱山ダンプは、エンジン出力に対し車両重量が大きいいため、登坂時にはフルアクセルで走行している。ここで、登坂時の最大速度を式(7)から導出する。

鉱山ダンプはフルアクセル時には、燃料噴射量の上限値を噴射しエンジンを回転させる。また、搬送路は概ね

一定の勾配で設計されており、路面も定期的にメンテナンスしているため、勾配や路面抵抗を一定と仮定することができる。つまり、鉱山ダンプの登坂速度は、ほぼ一定のため、式(7)において加減速項は 0 と仮定する。さらに、車量重量の大きい鉱山ダンプでは、空気抵抗の影響は極めて小さいので、式(7)の空気抵抗項を 0 と仮定できる。鉱山ダンプの登坂時の燃料消費の関係は、以下のように記述できる。

$$Q = f(\text{idle})T + \frac{1}{\varepsilon\eta H} (\mu_i M g l_i + M g h_i) \quad (8)$$

ここで、単位時間（式(7)の区間旅行時間 T ）における燃料噴射量の上限値を $J_{\max}$ ($= Q / T$)、登坂時の最大速度 $v_{\max} = l_i / T$ 、勾配を $s_i (= h_i / l_i)$ とおくと、最大速度 $v_{\max}$ は以下のように求めることができる。

$$v_{\max} = \eta \frac{J_{\max} - f(\text{idle})}{\frac{1}{\varepsilon H} (\mu_i + s_i) M g} \quad (9)$$

4.3. 鉱山ダンプ速度、搬送路勾配と生産効率の関係

鉱山ダンプの運動、搬送路勾配と、生産効率の関係について検討する。式(6)は、鉱山ダンプの速度、積み出し量、燃料消費量と、搬送路の勾配に着目した生産効率の関係式であり、式(9)は、鉱山ダンプの運動エネルギーに着目した燃料消費量、勾配、路面抵抗、車両重量、最高速度と伝達効率の関係式である。

この式(6)と式(9)を用いると、以下の鉱山ダンプの運動、搬送路の状態と、生産効率の関係を示す式(10)が導出できる。

$$PE = \sum_{i=1}^N \frac{D H_i}{(F F_i + F I_i) \times F P \times H L} U S_i = \sum_{i=1}^N \frac{(F F_i - F I_i) D H_i}{\frac{1}{\varepsilon H} (F F_i + F I_i) \times F P \times M \times g} \frac{\eta}{H L (\mu_i + s_i)} \quad (10)$$

ここでは、 $J_{\max} = F F_i$ 、 $f(\text{idle}) = F I_i$ 、 $v_{\max} = U S_i = D S_i$ とした。

式(10)において、伝達効率 η 、搬送路の長さ $H L$ 、路面抵抗 μ_i と搬送路の勾配 s_i により生産効率は変化する。つまり、鉱山ダンプの燃料消費量に着目した生産コストモデルでは、鉱山ダンプの伝達効率 η が大きく、搬送路長が短く、鉱山ダンプの抗力に影響を与える路面勾配および路面抵抗が小さい場合に、生産効率は最大化する。

図3、図4に、鉱山ダンプAと鉱山ダンプBの伝達効率、抗力、および搬送路長と、生産効率の関係を示す。図3、図4において、縦軸は、生産効率、伝達効率、搬送路長、抗力をそれぞれ、最大値を1として規格化した値であり、横軸は搬送路の勾配である。図3、図4は、3章で示した鉱山ダンプAと鉱山ダンプB、搬送路のパラメータと同じ値を使用した。

鉱山ダンプAは、図3のように勾配が5%以下のときは搬送路長が非常に大きいため、生産効率が小さくなる。一方、勾配が11%以上になると伝達効率が小さくなるため、生産効率が小さくなる。

鉱山ダンプBは、図4のように勾配が7%以下のときは搬送路長が非常に大きいため、生産効率が小さくなる。一方、勾配が14%以上になると、伝達効率が急激に小さくなるため、生産効率も急激に小さくなる。

鉱山ダンプの抗力は、大きくなるほど生産効率が小さくなるものの、勾配や伝達効率と比較して、相対的に生産効率に与える影響が小さく、図3、図4では明確な影響が見られなかった。

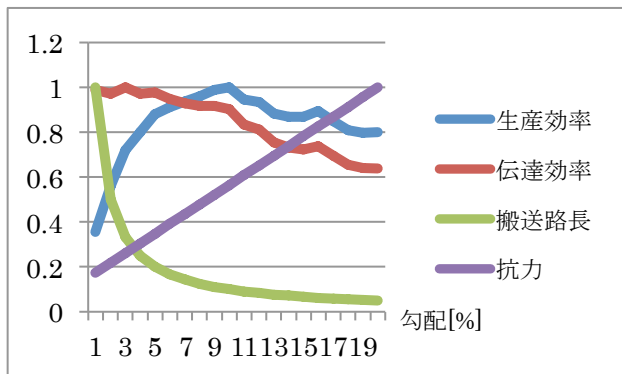


図3 鉱山ダンプA、搬送路と生産効率の関係（ダンプA）

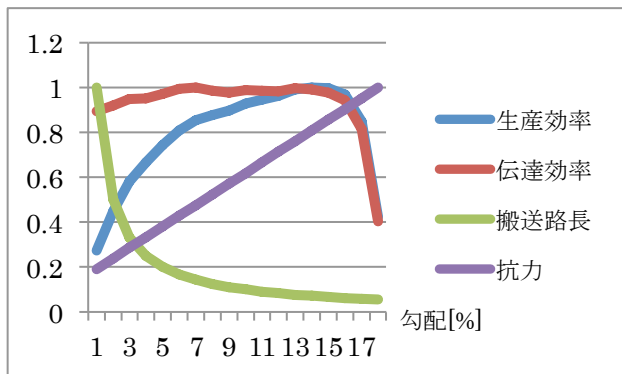


図4 鉱山ダンプB、搬送路と生産効率の関係（ダンプB）

鉱山ダンプは、勾配が大きくなるとトルクが不足し、伝達効率が急激に小さくなる。そのため、勾配が大きい領域では、生産効率が急激に小さくなる。また、勾配が小さいとき搬送路長が非常に大きくなる。そのため、勾配が小さい領域では、生産効率が小さくなる。つまり、鉱山ダンプのトルクが足りており、かつ勾配が最も大きい領域が最も生産効率が大きくなる。

5. 鉱山ダンプ混在環境下における生産効率

鉱山ダンプは、伝達効率がトルクが足りている領域、かつ勾配が大きい領域で生産効率が最大になる。しかし、鉱山ダンプは、それぞれ車種ごとにトルク性能が異なるため、生産効率が最大となる勾配が異なる。また、鉱山

現場では複数の種類の鉱山ダンプが混在運転しており、鉱山ダンプの組合せにより生産効率が最大となる搬送路の勾配は異なる。

そこで、鉱山ダンプAと鉱山ダンプBが混在する環境における生産効率について検討する。図5は、(1)鉱山ダンプAを40台、(2)鉱山ダンプBを40台、(3)鉱山ダンプAと鉱山ダンプBを20台ずつ使用した場合の生産効率である。図5では、(1)鉱山ダンプAが40台の場合、勾配14%で最大生産効率1.87[t/\$]となり、(2)鉱山ダンプBが40台の場合、勾配10%で最大生産効率1.48[t/\$]となる。

また、鉱山ダンプAと鉱山ダンプBが混在する環境では、登坂速度が速い鉱山ダンプが、登坂速度の遅い鉱山ダンプの走行速度に合わせる必要がある。そのため、(3)鉱山ダンプAと鉱山ダンプBが20台ずつ混在する場合、鉱山ダンプBが最大登坂速度で走れなくなり、勾配10%で最大生産効率1.60[t/\$]となる。

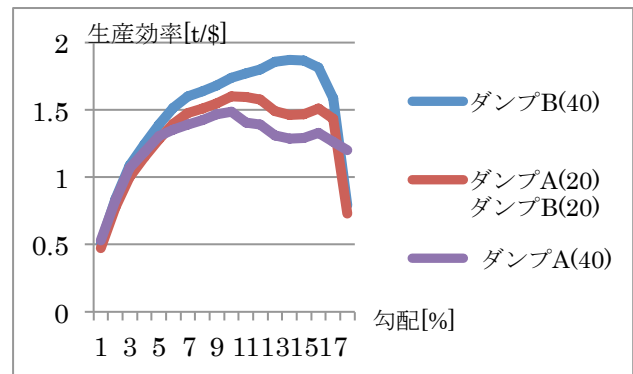


図5 鉱山ダンプ混在環境における生産効率（満積載）

次に、鉱山ダンプAの積み込み量を減らすことで、鉱山ダンプAの最大登坂速度を大きくした場合の生産効率について検討する。図6は、(1)積み込み量を減らし車両重量300tとした鉱山ダンプAを40台、(2)鉱山ダンプBを40台、(3)鉱山ダンプAと鉱山ダンプBを20台ずつ使用した場合、(4)積み込み量を減らし車両重量300tとした鉱山ダンプAと鉱山ダンプBを20台ずつ使用した場合の生産効率である。図6では、(1)車両重量300tとした鉱山ダンプAが40台の場合、勾配9%で最大生産効率1.39[t/\$]となり、(4)車両重量300tとした鉱山ダンプAと鉱山ダンプBを20台ずつ使用した場合、勾配13%で生産効率1.62[t/\$]が最大となる。つまり、鉱山ダンプAと鉱山ダンプBを混在して運用する場合、鉱山ダンプAの積み込み量を減らし、車両重量300tとした場合の方が、鉱山ダンプ全体の最大登坂速度が大きくなるため、鉱山ダンプAを満積載で運用するよりも生産効率が0.02[t/\$]大きくなる。

このように、生産効率を最大化するためには、鉱山ダンプ全体の登坂速度を上げられるように、最大登坂速度の遅い鉱山ダンプの積み込み量を減らすことが有効な場合がある。

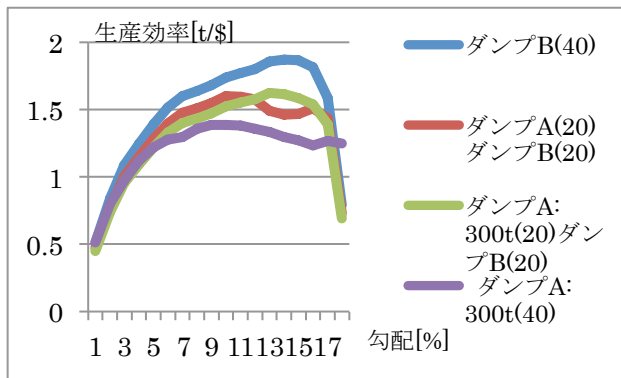


図6 鉱山ダンプ混在環境における生産効率
(積載量：減)

6. 結論

本研究では、鉱山ダンプの燃料消費量に基づく生産コストモデルを構築し、鉱山ダンプの性能差による生産効率について検討した。また、搬送路の勾配、路面抵抗など鉱山ダンプの抗力から、最大走行速度を導出するモデルを構築した。搬送路の勾配と生産効率の関係を検討し、勾配が小さい領域では搬送路長の影響を大きく受け、勾配が大きい領域では鉱山ダンプの伝達効率の影響を大きく受けることがわかった。さらに、実際の鉱山現場の運用形態に合わせ、車種が異なる鉱山ダンプが混在する環境下における生産効率を検討した。鉱山ダンプは車種ごとに性能が異なることから、鉱山全体の鉱山ダンプの登坂速度を、速度が遅い鉱山ダンプに合わせる必要がある。このため、鉱山ダンプの性能を引き出すことができず、生産効率が小さくなる。速度の遅い鉱山ダンプの積み込み量を減らし登坂速度を大きくすることで、生産効率が向上する場合があることを確認した。

今後、実際の鉱山現場における走行速度との比較、鉱山ダンプの組み合わせによる生産効率の違いについて検討を進める。

参考文献

- 1) 川股幸博, 板東幹雄: 地図データを利用した燃料消費予測手法の大型作業車両への適用, 情報処理学会論文誌, vol.55, No.1, pp.430-463, 2014.
- 2) 大口敬, 片倉雅彦, 谷口正明: 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, 土木学会論文集, No.695/IV-54, pp.125-136(2002)
- 3) 社団法人自動車技術会: 自動車技術ハンドブック(1)理論・基礎編, pp.136-139(2008)
- 4) Infomine 社: Cost Mine,
<http://costs.infomine.com>(2015/7 参照)
- 5) MSHA: Haul Road Inspection Handbook,
<http://www.msha.gov/READROOM/HANDBOOK/PH99-I-4.pdf> (2015/7 参照)

(2015.7.31 受付)

Mining Operation Cost Analysis based on Fuel Consumption Model for Mining Dump-Trucks

Yukihiro KAWAMATA, Takashi OGUCHI and Kentaro WADA

In mining industry, an operation cost reduction and improvement of mining production efficiency is most important. We develop a mining operation cost model based on the mining dump-truck fuel consumption and study a relation between mining production efficiency and haul road gradient. For improvement of mining production efficiency, we study a relation between combination of mining dump-trucks and mining production efficiency, and show that reducing a performance gap of each mining dump-truck by adjusting the weight of mining truck is useful for the efficiency improvement.