

(II-8)

搬土機械の走行シミュレーションにおける走行速度の合理的決定法

Determining truck speed for hauling simulation

傾口ボテック研究所 岡本直樹*

傾口ボテック研究所 大下裕之*

傾口ボテック研究所 宮本芳行*

山崎建設 山崎裕司**

Naoki Okamoto, Hiroyuki Oshita, Yoshiyuki Miyamoto, Hiroshi Yamazaki

土工における搬土機械のサイクルタイムの算定法として、搬土機械の平均速度から求める方法が一般的であるが、走路勾配が複雑に変化する地形での算定には従来から走行シミュレーションが利用されてきた¹⁾²⁾³⁾。これ等は搬土機械の牽引力特性と走路条件等から各地点における走行速度を求め、所要時間を累積していくものである。この方法は上り勾配・平坦部の走行時には有効であるが、下り走行時には予め与えた制限速度に従うだけで、下り走行の速度算定に有効なアルゴリズムが組み込まれていなく、シミュレーションとしては片手落ちであった。そこで、重ダンプトラック等の大型搬土機械の下り勾配における走行速度決定の因子であるブレーキ性能に着目し、ブレーキ性能による走行速度の算定法を組み込み、曲線部の速度決定法と合わせて合理的な走行速度の決定法を提案する。また、ブレーキ制動による減速パターンの改良点についても述べ、最後に、試作した走行シミュレーションとその応用例を紹介する。

【キーワード】シミュレーション、土工計画、土工事、土運搬

1. はじめに

大規模土工であるダム築造工事や宅地・敷地等の大型造成工事では、数百万 m^3 から数千万 m^3 単位の搬土が発生することがあり、重ダンプトラックやモータークレーパ等が積込場と盛場を繰り返し往復する循環型の輸送形態となっている。土工計画立案においては、この運搬のサイクルタイムの算定が基本となり搬土機械の投入台数等が決定される。従って、施工計画や積算の精度を上げるために、サイクルタイムのより正確な予測手法が要請されている。

2. 従来の走行シミュレーションの問題点

搬土機械のサイクルタイムの算定は、往路・復路それぞれの平均速度から求める方法が一般的であるが、走路の勾配が複雑に変化する地形で正確なサイクルタイムを算出するには、従来からも走行シミュレーションが利用されてきた。

これは、搬土機械の牽引力特性から各走路条件（勾配・ころがり抵抗）での走行速度を求め、その所要時間を累積してゆくものである。つまり、それはその機械が出し得る最大速度で走行したことになる。搬土機械は、積載量・走路勾配等過酷な条件下での稼働のため、その持てる性能のぎりぎりのところで走行している。このため、前述の最大速度に若干の効率ロスを考慮すれば利用可能となり、それが走行シミュレーションとして利用されてきた。

* 第2研究室群管制グループ 0473-38-1650
(市川市大野町3丁目1848-1)

** 企画室 03-3661-1361
(東京都中央区日本橋小舟町10-9)

しかしながら、この従来の走行シミュレーションは、牽引力特性のみを考慮して求めているため、上り勾配、平坦部走行時の走行速度算定には有効であるが、ブレーキ制動を必要とする下り走行時には走行速度を決定する有効なアルゴリズムが組込まれてなく、予め制限速度を入力しておく必要があった。

一般に、搬土計画は下り方向に計画するので、下り積荷・上り空荷状態となり、牽引力による計算は主に空荷状態の復路で行っていたことになり、この点も問題であった。

3. 問題点に関する検討とその改良

(1) ブレーキ性能による適正速度の算出

重ダンプトラック等の大型搬土機械では、減速制動にリターダが使用され、リターダの制動力を保つために、加熱した循環オイルをオイルクーラで冷却する必要がある。しかし、オイルクーラで冷却するには一定以上のエンジン回転が必要になり、これによって下り走行での適正な速度が要求される。

従って、走行速度は車両のブレーキ性能によって決定されることに着目し、ブレーキ性能に基づいた適正速度算出のアルゴリズムの検討を行った。

ブレーキ性能による適正速度算出は、ブレーキ制

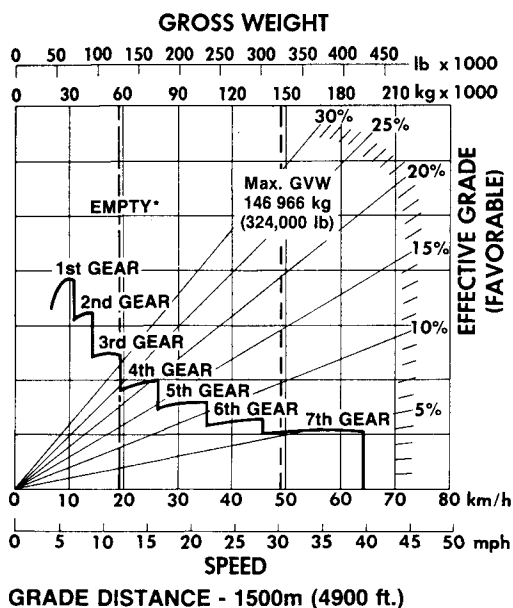


図-1 ブレーキ性能曲線

動を必要とする走行抵抗 (= 勾配抵抗 + ころがり抵抗) が負の場合に適用される。リターダは空気作動油圧により制動を行うものであり、リターダとオイルクーラの冷却能力から安定した制動力を保つための適正な速度を算出する。この速度は図-1に示すブレーキ性能曲線を用いて求めるが、下降距離が短い、つまり制動時間が短くなると使用可能な制動馬力は増加するので、曲線式は下降距離の長さによって異なる。

適正速度の算出プロセスを以下に示す。

《下り勾配の抽出》



《下り連続区間の平均化》



《使用するブレーキ性能曲線の選択》



《適正速度の算出》

a) 下り勾配の抽出

連続した下り勾配を持つセグメントを抽出する。なお、走路はセグメントの並びで構成されており、セグメントは縦断勾配、ころがり抵抗の変化点や曲線部等を境界にして区切られた最小単位である。

b) 下り連続区間の平均化

抽出されたセグメント全体の距離 (下降距離) を L とすると、次式のようになる。

$$L = \sum l_i$$

(l_i : i 番目セグメントの延長距離)

c) 使用するブレーキ曲線の選択

予め代表的な距離に対応するブレーキ曲線 (式) を求めておき、b) で得られた下降距離に近い曲線式を選択する。曲線式は、(車両 + 積載) 重量と走行抵抗の積と速度の相関を回帰式で表す。

$$V = a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + e$$

V : 適正速度

x : (車両重量 + 積載重量) × (走行抵抗)

a, b, c, d, e : 係数

d) 適正速度の算出

c) で選択された代表的な曲線式から、セグメント毎に内挿して算出する。算出された速度が、当該下り走路における安定したブレーキ性能を得るための適正速度となる。

(2) その他の改良点

a) 曲線部における制限速度の算出

車両が急カーブを走行する際は、遠心力によって生ずる横滑り・転倒を防止するために減速制動を行う。一般に、図-2に示す曲率半径(R)、横滑り摩擦係数(f)、片勾配(i)と安全走行速度(V)の関係は、以下の理論式で表される。

$$V = \sqrt{127 \cdot R \cdot (f + i)}$$

この式より求められる速度が、当該曲線部を安全に走行する速度であり、曲線部における制限速度となる。

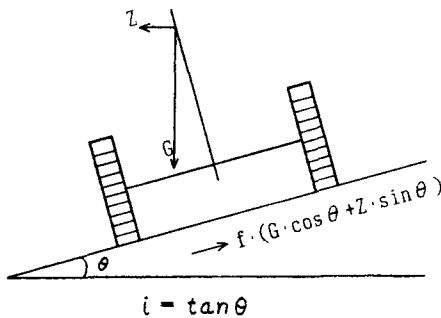


図-2 曲線部走行時の横断面図

b) 減速処理方法の改良

ブレーキ制動時の減速については、従来から一般制動とパニック制動時に分け、一般制動については等減速度を採用し、加速中あるいは等速走行中から一気に一定減速度へ変化させるものであった。これを自然な減速運動にするため、観察による実際の減速パターンを模倣した。

図-3のように、初期制動区間に進入した車両は等減速度から求まる仮想点を目指して減速を始める。最終制動区間に進入すると、車両は制動終了地点を目標に最終制動動作に入る。この時点より、減速度は現在速度と希望速度の差に比例すると仮定して、 Δt 毎に計算を行い制動終了地点に到達する。

このアルゴリズムをいくつかの事例に当てはめて、 $\Delta t = 0.1$ 秒毎の走行結果をグラフに表したのが図-4～6である。各々、等速、加速、そして加速→等速から制動区間に突入した場合である。

(3) クリティカル速度の算出

走行シミュレーションは、セグメント毎に次に示す4つの制限速度が得られる。

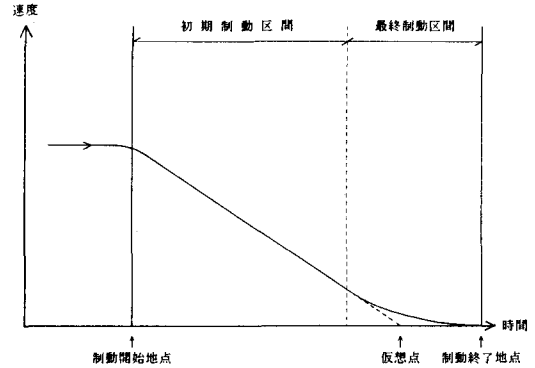


図-3 減速パターン

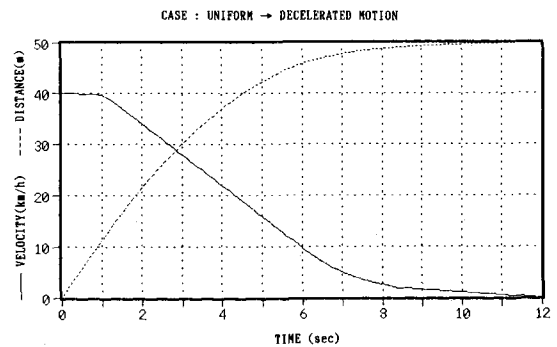


図-4 等速→減速行動

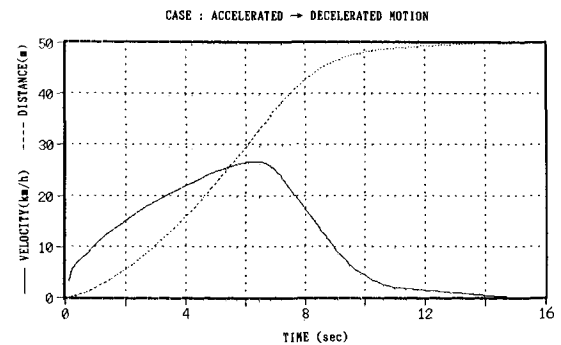


図-5 加速→減速行動

- ①牽引力による性能限界速度
- ②安全制限速度
- ③ブレーキ性能による限界速度
- ④曲線部における制限速度

①牽引力による性能限界速度は、走行抵抗が正の場合に従来同様、図-7のリンブルカーブより求める。

②安全制限速度は、現場の交通規則として任意に定める制限速度である。

これら4つの制限速度は、シミュレーション実行

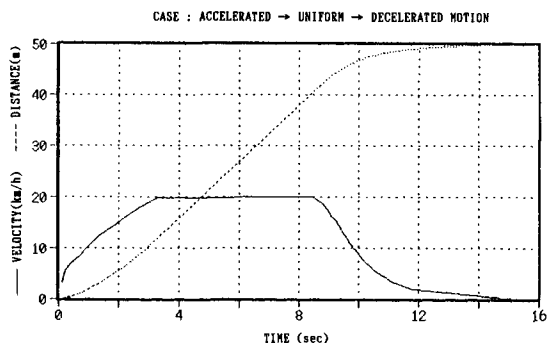


図-6 加速→等速→減速行動

時において加減速に制限を与えるもので、その場面（条件）で最も優先される制限速度が選択される。選択された制限速度をクリティカル速度と呼び、従来の走行シミュレーションでは、①と②を比較して最小値を採用したが、今回、③と④を取り入れたアルゴリズムに改良したことから、以上の4つの制限速度からクリティカル速度を決定する。原則として、セグメント毎に4つの制限速度の中で最小値を取るが、下り勾配区間においてはブレーキ性能による速正速度と曲線部における制限速度を優先して決定するようにした。図-8は、このアルゴリズムの処理フローを示したものである。

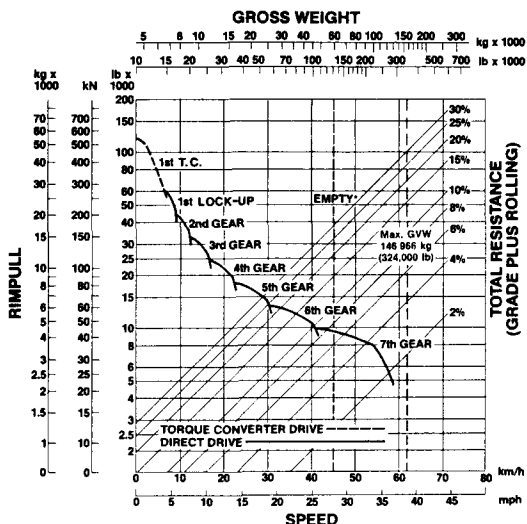


図-7 リンプルカーブ

表-1に、セグメント毎に算出された各制限速度とクリティカル速度のサンプルを示す。

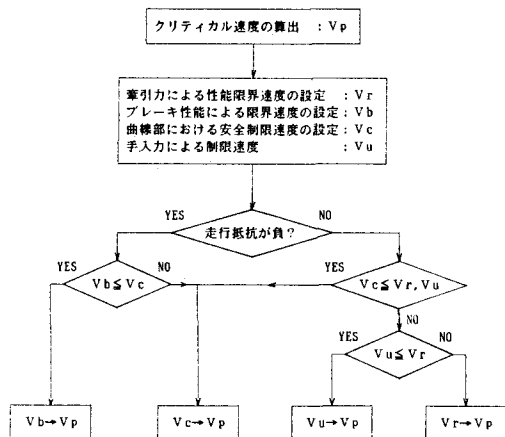


図-8 クリティカル速度算出フロー

表-1 セグメント別クリティカル速度算出例

セグメントNo.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
走 延長距離 ■	272.8	37.9	38.3	31.6	112.8	175.0	300.0	125.0
路 勾配抵抗 %	6.9	6.9	6.9	6.9	8.9	-11.0	-10.0	-8.0
デ コルリ抵抗%	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
1 曲率半径 ■		31.0		28.0			74.0	
ク 片勾配 %		4.0		5.0			3.0	
限 牽引力	29.4	29.4	29.4	29.4	22.7			
界 ブレーキ性能						35.0	35.0	35.0
速 曲線部		19.8		19.8			29.1	
度 安全制限			25.0				30.0	
クリティカル速度	29.4	19.8	25.0	19.8	22.7	35.0	29.1	35.0

4. 走行シミュレーションの試作とその利用例

(1) 走行シミュレーションの試作

図-9は、新しい走行シミュレーションの処理フローである。クリティカル速度がシミュレーション実行前に計算され、セグメント別に得られたクリティカル速度に制限された走行速度で△t毎に加減速処理してシミュレーション計算を進める。

図-10は走行シミュレーションのシステム構成を機能面から示したものである。ここで、シミュレーション条件は、使用機械・走路、進入・最終速度、車両・積載重量等である。セグメントの形状等を表す走路諸元は以下で構成される。

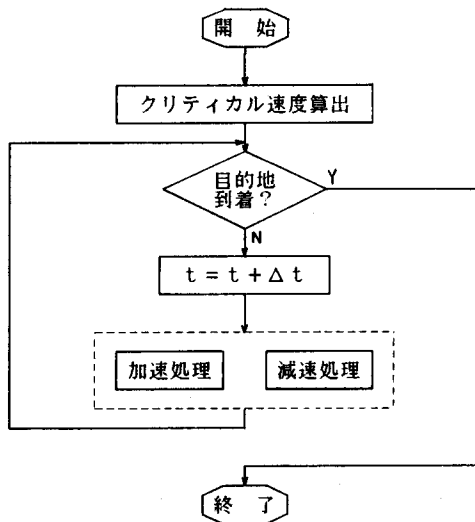


図-9 走行シミュレーション処理フロー

- ・延長距離 (m)
- ・縦断勾配 (%)
- ・ころがり抵抗 (%)
- ・曲率半径 (m) - 曲線部区間のみ -
- ・片勾配 (%) - 曲線部区間のみ -
- ・制限速度 (km/Hr)

試作した走行シミュレーションは、上記のシミュレーション条件より、施工計画や積算において搬土機械の走行時間（サイクルタイム）算定に利用できる。また、仮設設計において、走行シミュレーションを利用して、搬土機械の走行特性に合わせた走路設計を行うこともできる。

なお、一定時間 Δt 毎にシミュレーションを実行するので、セグメント別の走行時間や速度を把握でき、また、走行状態をアニメーション表示し、走行速度・ブレーキ油温等のリアルタイム表示を可能としている。

以上より、改良された走行シミュレーションの実行結果の一部を走行曲線（距離／速度）で示したものが図-11である。

(2) 利用例

上記の走行シミュレーションの走行速度算定機能をモジュール化して、下記の複数台の車両のシミュレーションにも組み込み利用している。

a) 運行シミュレーション

運搬作業に複数台投入された搬土機械や積込機械

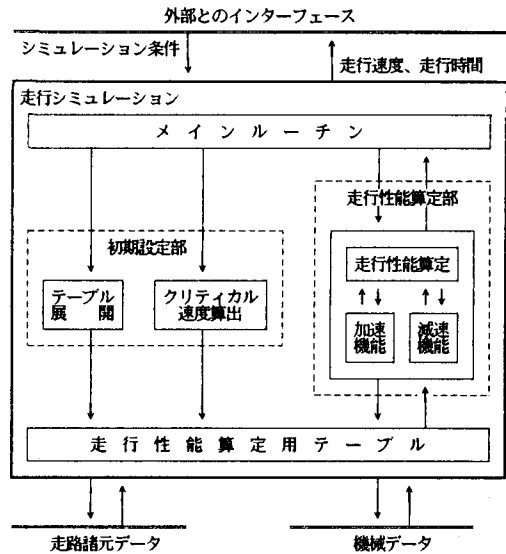


図-10 走行シミュレーションシステム構成

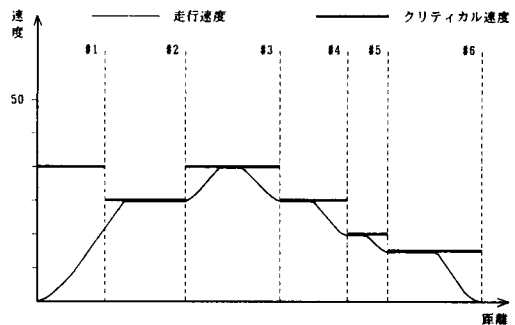


図-11 走行曲線グラフ (例)

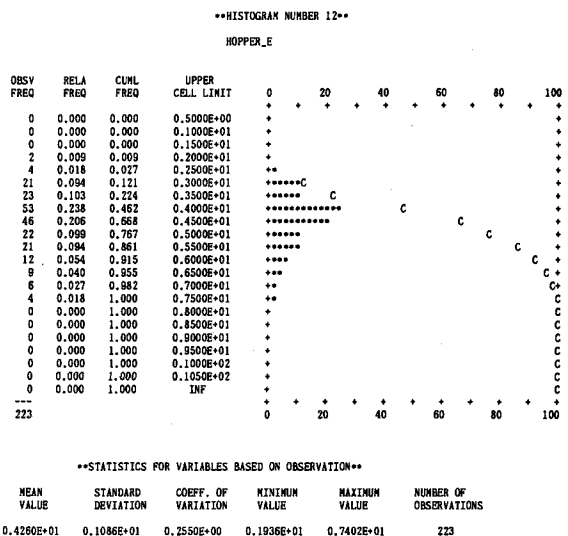


図-12 シミュレーション結果

の稼働状態を評価する待ち行列タイプの動態シミュレーションであり、複数の搬土系列を同時に取り扱うことができ、また、稼働モデルの変更も容易である。土工事における施工計画・施工管理の計画作成支援ツールとして開発している。

図-12はシミュレーション結果のヒストグラム出力例である。また、写真-1は某ダム築造工事をモデルに、シミュレーション結果をアニメーション表示したものである。これらより、搬土ルート別の投入台数やルートの見直しを支援することが可能となる。

b) 交通シミュレーション

無人車両の交通制御の評価用シミュレータで、複数台・複数系列を扱い無人車両の走行機能に利用している。

4. おわりに

従来のクリティカル速度の算出は、牽引力による性能限界速度のみを考慮していたが、今回新たに下り勾配や曲線部区間における限界速度や安全制限速度も考慮して算出するようにした。これらの新機能については、今後も実際の走行車両等の実測値との比較評価を重ねたい。

また、走行シミュレーションの応用例として、運送シミュレーション・交通シミュレーションを紹介したが、これ等への応用もさらに研究し発展させたい。

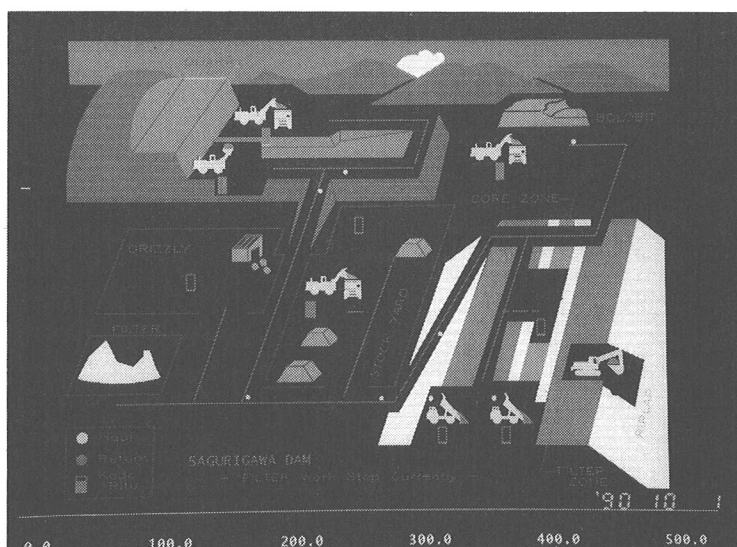


写真-1 アニメーション画面

【参考文献】

- 1) 千田・熊谷・間：フィルタイプダム盛立工事における施工機械の最適配置に関する研究報告-その1-, -その2-, 建設省土木研究所資料、1975年9月, 12月
- 2) 山田：運搬機械に関するコンピュータシミュレーション、月刊建設、1978年9月
- 3) 堀・上田・原田：大規模土工における施工計画・管理のシステム化、土木施工と情報、1982年10月
- 4) 岡本・大下：施工シミュレーションの研究とその開発、第8回シミュレーションテクノロジー・カンファレンス発表論文集、1989年6月
- 5) Caterpillar: Caterpillar performance handbook