

運行シミュレーション

山崎建設では、お客様のご要望に応じて工事計画時や施工途中で様々なシミュレーションを行っています。ここではその1つ、搬土機械の運行シミュレーションについて紹介します。

ダンプトラック等の運行シミュレーションは、一般に2つのタイプに分類されます。

通常、ダンプトラック等の運搬機のサイクルタイムを算出する方法は、簡便な平均走行速度から求める方法が一般的です。しかし、アップ・ダウン等の変化が激しい走路や“待ち行列”が多く発生する経路では、運搬サイクルタイムの予測が困難です。

こんな場合、コンピュータ・シミュレーションが有効で、前者には“走行シミュレーション”が利用されます。これは運動力学的な計算法で、車両の牽引力と走路の走行抵抗から走行速度を求めるものです。求まる答えは1つで決定的なので、“決定論的シミュレーション”といわれるタイプです。

一方、積込待ちとか、離合待ち等での“待ち行列”は確率的に事象が発生するので、これを取り扱うシミュレーションは“確率論的シミュレーションといわれています。

一車線通行による離合待ちが各所で発生し、待ち行列によるサイクルタイムの遅れやダンプ台数の飽和が予想される現場では、待ち行列型シミュレーションによる検討が必要です。

このように、ダンプトラック等の運行シミュレーションは、目的に応じて両タイプを使い分け、必要に応じて両シミュレーションを併用します。

(1) 走行シミュレーションの概要

一般的な搬土用機械の「走行シミュレーション」は、走行路を走路勾配・ころがり抵抗等の変化点でセグメントに区切り（図-4：経路図）、それらの走行抵抗と走行する車両の牽引力特性（図-1：リプルカーブ）から走行速度を求め、区間制限速度等を考慮して、サイクルタイムを算出します。

弊社の走行シミュレーションでは、更に、ブレーキ性能特性（図-2）とカーブでの走行特性を考慮して、下り勾配や曲線部（曲率と片勾配から）での走行速度の自動計算が行えます。（参考資料¹：欄外）

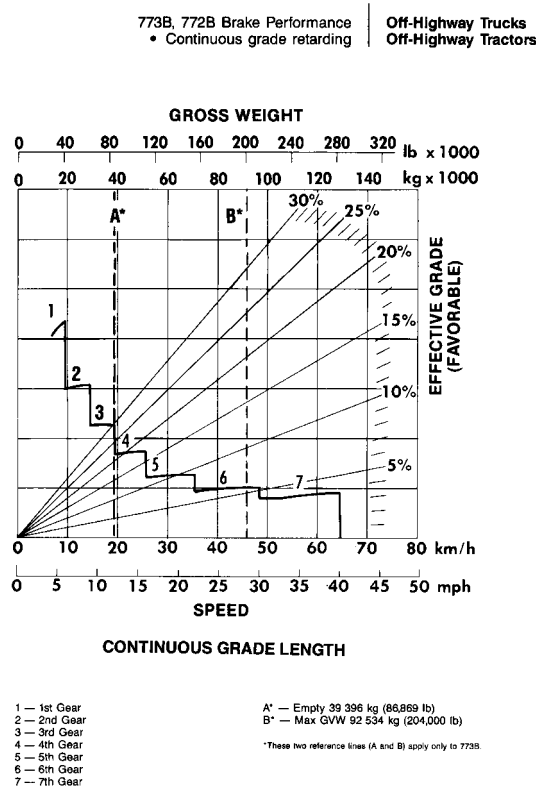


図-1 リンプルカーブ

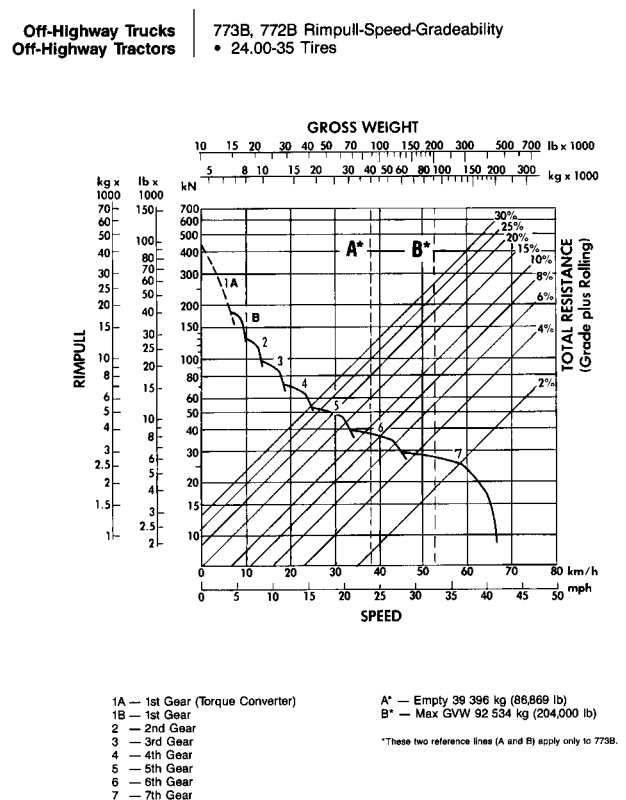


図-2 ブレーキ性能曲線

¹ 「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」岡本、大下
第9回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集 1991年12月

(2) 待ち行列シミュレーションの概要

前記の走行シミュレーションは、時間の経過と共に連続的に速度等が変化する「連続型シミュレーション」です。これに対して“待ち行列シミュレーション”は、システムの状態に変化をもたらす出来事（事象）が不連続的に、即ち、離散的に発生するので「離散型シミュレーション」とも呼ばれています。

待ち行列理論は、銀行窓口等で見られる“待ち行列”の改善等に用いられ、待ち行列シミュレーションは、待ち行列をモデル化し、模擬的に動かして、改善案等と比較評価するものです。

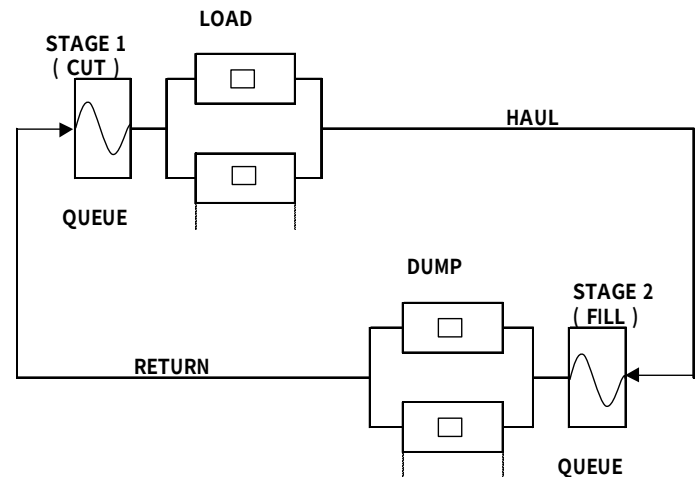


Fig.2 2 Stage Cyclic Queue Model

建設現場で稼働するダンプトラックをモデル化すると、積込場と盛場でサービスを受ける“循環型待ち行列”になり、上図のように表せられます。

循環型待ち行列は、Stage 1 のサービス数 M 、Stage 2 のサービス数 A 、客数 N 、Stage 1 にいる客数を n_1 とすれば、次式のように定式化でき、積込等のサービス時間の分布は、アーラン分布となることが分かっています。

山崎建設では、モデル化のために各地の工事現場で動態調査を実施し、豊富なデータを蓄積しています。

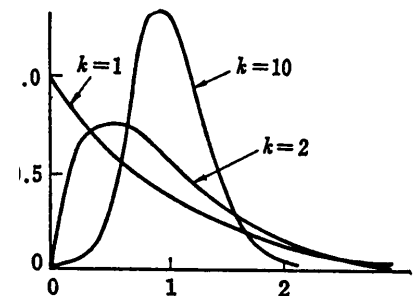


図 -3 アーラン分布曲線

$N-A \geq M$ の場合

$$P(n_1, N-n_1) = \left(\frac{A^{n_1}}{n_1!} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{n_1} P(0, N) \quad n_1 < M \leq N-A$$

$$P(n_1, N-n_1) = \left(\frac{A^{n_1}}{M! M^{n_1-M}} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{n_1} P(0, N) \quad M \leq n_1 \leq N-A$$

$$P(n_1, N-n_1) = \left[\frac{A! A^{N-A}}{(N-n_1)! M! M^{n_1-M}} \right] \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{n_1} P(0, N) \quad M \leq N-A < n_1$$

ここに

$$P(0, N) = \left[\sum_{n_1=0}^{N-1} \left(\frac{A^{n_1}}{n_1!} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{n_1} + \sum_{n_1=M}^{N-A} \left(\frac{A^{n_1}}{M! M^{n_1-M}} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{n_1} + \sum_{n_1=N-A+1}^N \left(\frac{A! A^{N-A}}{(N-n_1)! M! M^{n_1-M}} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{n_1} \right]^{-1}$$

(3) 走行シミュレーションの実行例

シミュレーション条件：積載重量 45.5t

ころがり抵抗 5%

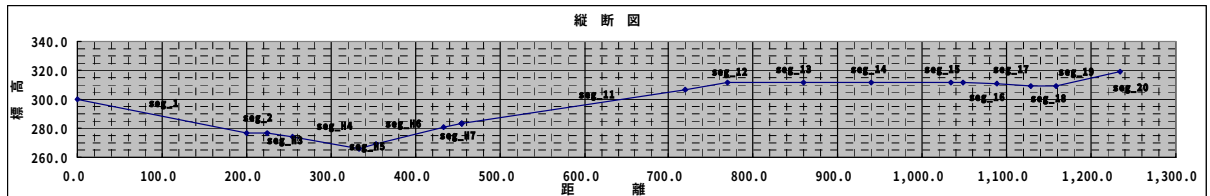
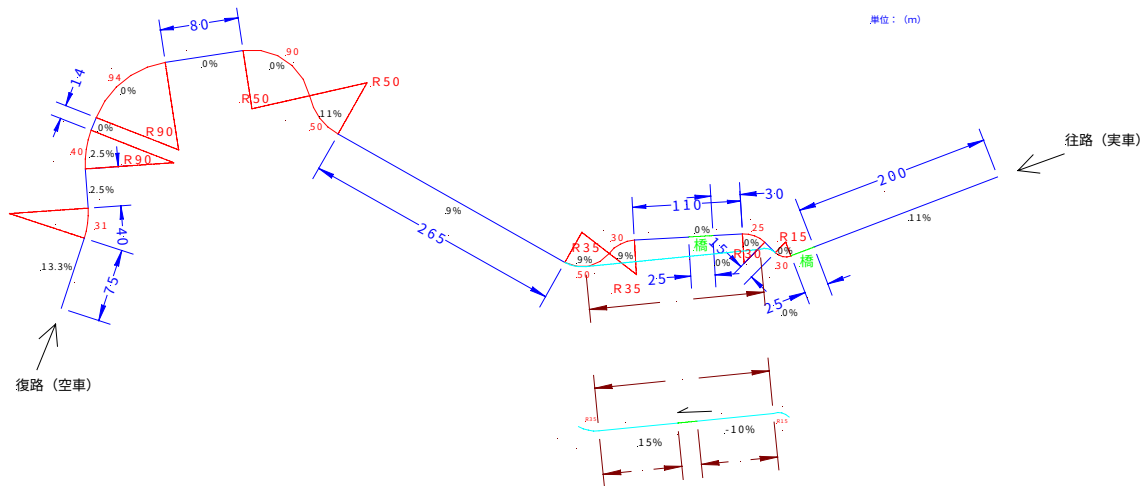
制限速度の設定 Seg.2（陸橋） 10km/h

Seg.7（側道橋） 5km/h

走路諸元

セグメント	0	1	2	H3	H4	H5	H6	H7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
平面距離	0	200	25	30	78	20	80	22				265	50	90	80	94	14	40	40	31	75
曲率(R)			15	15				35					50	50		90		90		80	
累積距離	0	200	225	255	333	353	433	455	455	455	455	720	770	860	940	1,034	1,048	1,088	1,128	1,159	1,234
勾配		-11.5%	0.0%	-10.0%	-10.0%	15.0%	15.0%	9.0%	0.0%	9.0%	9.0%	9.0%	9.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-2.5%	-2.5%	0.0%	13.3%
標高	300.0	277.0	277.0	274.0	266.2	269.2	281.2	283.2	283.2	283.2	283.2	307.0	311.5	311.5	311.5	311.5	311.5	310.5	309.5	309.5	319.5

走路経路図



シミュレーション条件

セグメント	1	2	H3	H4	H5	H6	H7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
路面距離	201	25	30	78	20	81	22	0	0	0	266	50	90	80	94	14	40	40	31	76
曲率(R)		15	15				35					50	50		90			90		80
勾配	-11.5%	0.0%	-10.0%	-10.0%	15.0%	15.0%	9.0%	0.0%	9.0%	9.0%	9.0%	9.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-2.5%	-2.5%	0.0%	13.3%
制限速度	無	10			10															

図-4 運行経路セグメント分割図

セグメント分割した経路図（図-4）を基に、積載量等のシミュレーション条件を入力し、シミュレーションを行います。セグメント分割した区間毎のシミュレーション条件と計算過程を表-1に示します。区間（セグメント）毎の距離と走行抵抗（GR:勾配抵抗、RR:ころがり抵抗）、曲率、制限速度を入力し、区間内での進入から退出までの走行速度を計算し、区間毎の所要時間を求めています。

*** Hauling Simulation ***

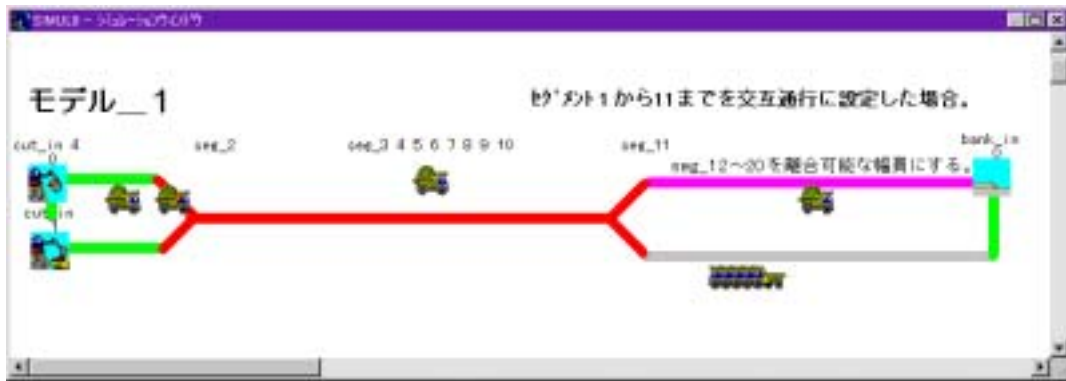
機 種 004 773B ○○工事(改善走路)
 車 両 重 量 39.0 t 積荷重量 45.5 t
 性能低下率 10.0
 走路 データ TUCHI_2.DAT
 走 路 区 分 往復路(一部片側通行+分離) 往路区間数 18 復路区間数 20
 積 込 時 間 0.00
 排 土 時 間 0.00

SEG. NO.	距 離		抵 抗		限界速度		区間速度				走行時間	
	区間	累計	GR	RR	曲線	制限	進入	限界	最高	最終	区間	累計
01	201.0	201.0	-11.0	5.0		40.0	0.0	40.0	24.3	10.0	55.1	55.1
02	25.0	226.0	0.0	5.0		10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.0	64.1
03	30.0	256.0	-10.0	5.0	10.7	40.0	10.0	10.7	10.7	10.7	10.2	74.3
H3	30.0	286.0	-10.0	5.0	10.7	40.0	10.7	10.7	10.7	10.7	10.1	84.4
H4	78.0	364.0	-10.0	5.0		40.0	10.7	35.0	16.1	10.0	19.5	103.9
H5	20.0	384.0	15.0	5.0		10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	7.2	111.1
H6	80.0	464.0	15.0	5.0		40.0	10.0	40.0	16.2	16.2	21.0	132.1
H7	22.0	486.0	9.0	5.0	16.3	40.0	16.2	16.3	16.3	16.3	4.9	137.0
11	266.0	752.0	9.0	5.0		40.0	16.3	40.0	26.0	19.5	44.0	181.0
12	50.0	802.0	11.0	5.0	19.5	40.0	19.5	19.5	19.5	19.5	9.2	190.2
13	90.0	892.0	0.0	5.0	19.5	40.0	19.5	19.5	19.5	19.5	16.6	206.8
14	80.0	972.0	0.0	5.0		40.0	19.5	40.0	22.6	22.6	13.7	220.5
15	94.0	1066.0	0.0	5.0	26.2	40.0	22.6	26.2	25.3	25.3	14.1	234.6
16	14.0	1080.0	0.0	5.0		40.0	25.3	32.5	25.7	25.7	2.0	236.6
17	40.0	1120.0	-2.5	5.0	26.2	40.0	25.7	26.2	26.2	26.2	5.5	242.1
18	40.0	1160.0	-2.5	5.0		40.0	26.2	40.0	27.1	24.7	5.0	247.1
19	31.0	1191.0	0.0	5.0	24.7	40.0	24.7	24.7	24.7	24.7	4.5	251.6
20	75.0	1266.0	13.3	5.0		40.0	24.7	40.0	26.2	0.0	9.1	260.7
20	75.0	1341.0	-13.3	5.0		40.0	0.0	40.0	23.0	23.0	23.4	284.1
19	31.0	1372.0	0.0	5.0	24.7	40.0	23.0	24.7	24.7	24.7	4.6	288.7
18	40.0	1412.0	2.5	5.0		40.0	24.7	40.0	26.7	26.2	4.9	293.6
17	40.0	1452.0	2.5	5.0	26.2	40.0	26.2	26.2	26.2	26.2	5.5	299.1
16	14.0	1466.0	0.0	5.0		40.0	26.2	32.5	26.6	26.2	1.0	300.1
15	94.0	1560.0	0.0	5.0	26.2	40.0	26.2	26.2	26.2	26.2	12.9	313.0
14	80.0	1640.0	0.0	5.0		40.0	26.2	40.0	29.4	19.5	9.0	322.0
13	90.0	1730.0	0.0	5.0	19.5	40.0	19.5	19.5	19.5	19.5	16.6	338.6
12	50.0	1780.0	-11.0	5.0	19.5	40.0	19.5	19.5	19.5	19.5	9.2	347.8
11	266.0	2046.0	-9.0	5.0		40.0	19.5	40.0	34.2	16.3	32.6	380.4
10	50.0	2096.0	-9.0	5.0	16.3	40.0	16.3	16.3	16.3	16.3	11.0	391.4
09	30.0	2126.0	-9.0	5.0	16.3	40.0	16.3	16.3	16.3	16.3	6.6	398.0
08	55.0	2181.0	0.0	5.0		40.0	16.3	38.4	20.4	5.0	9.4	407.4
07	25.0	2206.0	0.0	5.0		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	18.0	425.4
06	30.0	2236.0	0.0	5.0		40.0	5.0	31.9	11.5	11.5	13.1	438.5
05	25.0	2261.0	0.0	5.0	15.1	40.0	11.5	15.1	15.1	15.1	6.7	445.2
04	15.0	2276.0	0.0	5.0		40.0	15.1	25.0	16.4	15.1	2.6	447.8
03	30.0	2306.0	0.0	5.0	10.7	40.0	15.1	15.1	15.1	10.0	10.1	457.9
02	25.0	2331.0	0.0	5.0		10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.0	466.9
01	201.0	2532.0	11.0	5.0		40.0	10.0	40.0	30.3	0.0	33.3	500.2

8.34 分

表-1 走行シミュレーション出力例

(4) 待ち行列シミュレーションの実行例（イメージ）



シミュレーション条件（当初計画走路）：

稼働時間：9時間/日

積込機：台数2台、積込時間2.5分（アーソ分布K=10）。

走路区分：Seg.2～11は、一車線の交互通行。

Seg.1とSeg.12～20は、2車線の対面通行可。

走行時間：走行シミュレーションの結果より、表-1の走行時間を入力。

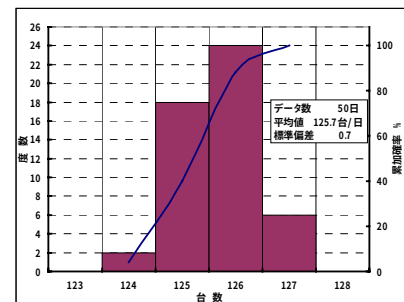
結果：運搬台数：126台/日

標準偏差：0.7

運搬量：2,646m³/日

$$6 \times 5 \times 1.1 \times 0.64 = 21$$

$$V = 126 \times 21 = 2,646$$



<走路改善案のシミュレーション>



シミュレーション変更条件：

走路区分：Seg.2（陸橋）とSeg.11は、1車線の交互通行。

Seg.3～10を往路、復路はSeg.H3～H7に分離。

結果：運搬台数：254台/日

標準偏差：5.6

運搬量：5,334m³/日

