

# 建設工事用車両の運行シミュレーション

中沢 喜久雄

## 1. はじめに

軽薄短小化という時代の波はさまざまな形で押し寄せているが、建設業が代表的な重厚長大産業の1つであることには変りない。原子力発電所やダムの建設工事ともなれば数十万～数百万㎡の土砂や岩石が掘削され、さらにそれと同規模の建設資材が使用される。土地造成工事や道路工事などでも大量の土砂の運搬が発生する。これらの運搬には多数の建設工事用車両、特にダンプが投入される。

一方で、これらの工事は人口の比較的希薄な地域で行なわれることが多く、周辺の道路は未整備で幅員が狭く、そのうえ急カーブで見通しも悪い。そのため、工事開始後の交通量増大により車両のすれ違いによる損失時間の増大や待避車両の滞留など、交通の混乱を招く可能性がある。これに対処するには、工事の計画段階で、あらかじめ工事期間中の交通状況を予測し、早期に適切な対策を打つ必要がある。

しかし、このような交通状況を予測するための手法は、従来十分に確立されていなかった。そこで、車両を客、道路区間をサービス窓口とする待ち行列ネットワークとして車両の道路走行をモデル化し、シミュレーションを行なうプログラムを

開発した。また、積込み場や荷おろし場での積込み、計測、荷おろしなどの作業もあわせてとり扱うことにより、工事用車両の運行に要する時間の総合的な予測を可能とした。

この開発により、運搬計画の検討、運搬費の適正な見積り、および的確な道路改良案の検討が可能となり、円滑な資材の搬入や掘削土の搬出を確保するのに効果があった。

以下、幅員の狭い道路における交通状況の予測手法について、モデルの構築、プログラム開発、プログラムの概要、シミュレーションの検証、および若干の理論的考察の順に述べる。

## 2. モデルの構築

対象となる運行システムは工事ごとに多少異なるが、例として原石山より採取した原石を、一般車と共用の道路を使って建設用地まで運搬するシステムを図1に示す。

この運行システムを以下のようにモデル化した。

### (1) 道路

主に工事用車両の運行ルートに着目し、分岐する道路については流出入のみを考慮する。幅員、待避所の有無、見通しなどにより走行条件が変るため、これらが一定と見なせるように道路を20～80m程度の区間に細分する。これにもとづいて、各区間をサービス窓口とする直列型の待ち行列ネットワークとしてモデル化する。

## (2) 車両

幅員に対する走行条件の違いから大型車と小型車に分類し、さらに大型車は走行ルートの違いなどから工事用ダンプと一般大型車に分類する。ダンプは積込み場と荷おろし場をくりかえし往復する。一般車は発生、流入、走行、流出、および消滅という過程をたどる。

## (3) 走行条件

幅員の狭い道路での車両の挙動は複雑であり、待ち行列モデルを構築するにあたり、どのようにサービスのルールを設定するかにも最も苦心した。

### (a) 客の分類

工事用ダンプ、一般大型車、小型車の3車種だが、走行方向により、とり扱いが異なるため、事実上6クラスの客が存在する。

### (b) 窓口数

幅員が二車線分あれば両方向の車両はお互いに干渉しないので、各方向に1つずつ窓口があると考えられる。幅員が一車線分しかなければ単一窓口としてとり扱われる。これらの中間の幅員では車種の組合せにより状況が変わってくる。

### (c) サービス順序

追越しの許される限られた区間を除き先着順となる。なお、ここでいう追越しは一般のそれとは多少異なり、低速車(大型車)が後続の高速車(小型車)に道をゆずるため停止するものである。

### (d) 優先権

一車線区間の優先権は、その時点で区間を走行している方向の車両がもっている。一方の車群が途切れた時に優先権の切替えが行なわれるが、信号により人為的、周期的に切替えることもできる。

### (e) サービス時間

区間の走行時間は車種、走行方向により異なるが、同一車種、同方向では一定とする。ただし、徐行が必要な状況では徐行速度にもとづいて決める。交通流の待ち行列モデルでは最小車頭間隔を時間換算しサービス時間とすることが多いが、本モデルはシミュレーションを主目的とするもので

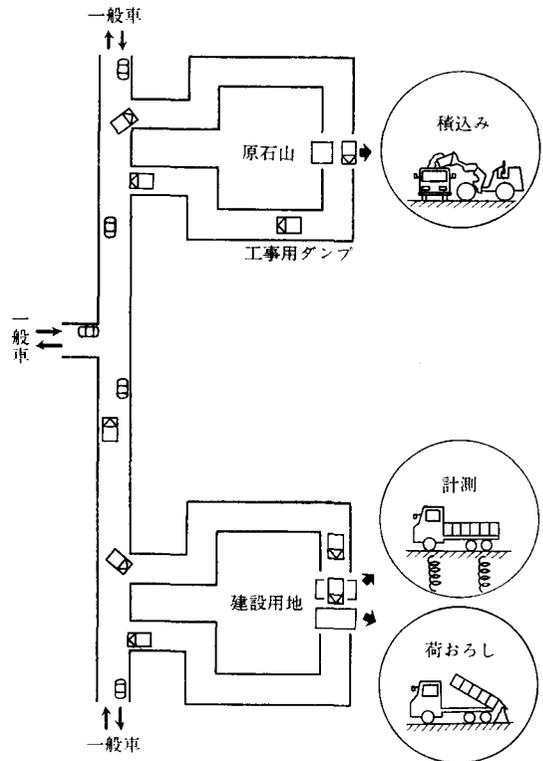


図1 原石運搬システム

あり走行時間に注目する。そのため、複数の車両が同時に一区間内に存在することが可能となる。

### (f) 容量

区間に流入できる車両数に制限を設けて、その区間の容量とする。容量を越える車両は手前の区間を流出できず待ち状態となり、ブロッキングが生じる。

### (g) 後退

見通しの悪い一車線区間では後退が発生する。これは、優先権をもつ客が到着したときの割込みに類似しているが、サービスが白紙にもどるだけでなく、必要な点まで後退する余分な時間がかかる。

### (h) デッドロック

一車線区間にはさまれた待避所に両方向の車両が集中すると、ブロッキングのためにどちらも前進できない状態となる。これを解消するために、いちど区間を通過した車両も、後退できるように

する。

#### (4) 車両の動き

図2に示すように、各車両は道路区間の入口において前方の見通し区間内と後方に存在する他車の位置、車種、および動きを認識し、道路状況とあわせて自車の次の動きを決定する。動きのレベルとして前進、徐行、待避、停止、および後退の5種類を設定する(図3)。ここで前進とは他車の障害なく自由に走行することをいう。また待避とは停止のうちで特に走行可能な状態にありながら自発的に他車に道をゆずることをいう。

### 3. プログラム開発

前章に述べたモデルはかなり複雑であり、そのまま理論的に解析することは不可能である。そこで、シミュレーション・プログラムを開発して交通状況の予測を行なうことにした。

プログラム開発を進めるに当たっての基本的な考え方は以下のとおりである。

#### (1) 事象間隔時間制御方式の採用

道路を区間に細分し、待ち行列モデルで表現したことから、事象間隔時間制御方式を採用した。

#### (2) FORTRAN 言語の採用

車両の動きには幅員、見通し、他車の状態など多数の要因がからむうえ、後退など待ち行列モデルではとり扱いにくい現象も考慮するため、運行システムの状態とその変化の記述がプログラムの大半を占める。そこで記述に柔軟性のある汎用言語として FORTRAN を採用した。

#### (3) 入出力処理の分離

プログラム構造の単純化による開発期間の短縮および保守性向上のため、データ入力および計算

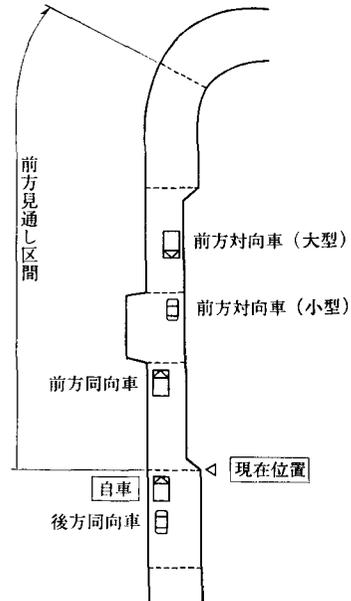


図2 車両の動き決定モデル図

結果の編集・出力をシミュレーションの実行部分から分離した。

#### (4) デバッグ支援機能の強化

シミュレーション・プログラムは複雑な要因がからみ合った直観的な予測のむずかしい現象をとり扱うため、処理の異常を結果から判定しにくい面がある。したがって、デバック支援機能の設定の巧拙が、プログラムの開発効率や信頼性に大きな影響をおよぼす。本プログラムには、異常状態の早期検出や任意時点での発生事象に関する情報トレース等の機能をもたせている。

#### (5) 過渡的現象の考慮

工事用車両は日に数回～十数回往復するが、作業開始・終了時や昼休みの前後は工事用車両の集中や減少のため過渡的に交通状況が変化する。こ

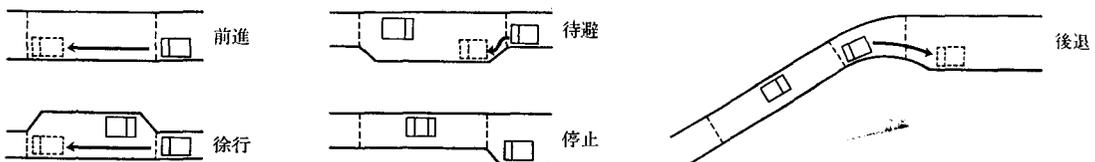


図3 車両の動きモデル図

表 1 入力データ一覧表

	データ項目		データ項目
道路状況	地点名, 区間距離, 道路幅員 待避所幅員 走行速度 (往路, 復路別, 車種別) 前後の見通し地点名	走行条件	自由走行, 徐行, 待避すれ違い可能幅員 (車種組合せ別) 追い越し可能幅員, 見通し距離 徐行速度, 後退速度
積込み条件	取付地点名 (入口, 出口) 構内道路走行時間 (積込み前, 積込み後) 積込み機械台数, 積込み時間	信号	信号設置地点名 (始点, 終点) 信号周期, 各青時間, 全赤時間 複数の信号間のオフセット
荷おろし条件	取付地点名 (入口, 出口) 構内道路走行時間 (計測前, 荷おろし後) 計測時間, 荷おろし時間	区間容量	平均車長 車間距離
交通量	ダンプ投入台数 一般車走行ルート (流入, 流出地点名) 時間当り流入台数 (ルート別, 車種別)	作業条件	作業開始, 終了時刻 昼休み開始時刻, 昼休み時間 作業開始時のダンプ位置
		その他	シミュレーション開始, 終了条件 出力帳票指定 図面作成条件

の影響は無視できないため、1日の作業時間を忠実にシミュレーションで追えるようにした。

#### 4. プログラムの概要

本プログラムは、幅員が狭く見通しの悪い道路を多数の工事用車両が走行する場合に発生する、すれ違い等のための損失時間を算定する。一車線

区間のように特に道路条件の悪い場合に、許容交通流量算定に用いることもできる。道路上での損失時間の算定が主目的であるが、積込み場・荷おろし場での待ち時間も算定できる。

工事用車両は単一の運行ルートをくりかえし往復する。一般車はランダムに発生し、道路に流入して目的地点まで走行したのち流出、消滅する。

プログラムに汎用性をもたせるため、道路状況、交通量、走行条件などは入力データとした。

表1に入力データ一覧表を示す。これらはシミュレーション・モデルの各構成要素を規定する重要なものであり、実測や資料調査などの裏づけに対して、モデルの構築やプログラム開発に劣らぬ配慮が必要である。

計算結果として、表2の一覧表に示す資料を選択的に出力できる。これらの資料により次の評価検討を行なえる。

- (a) 全般的な交通状況、特に滞留の有無
- (b) 運搬費の見積り
- (c) 損失時間発生の主原因
- (d) 一般車への影響
- (e) 改良すべき道路区間と改良方法

時間を横軸に、走行距離を縦軸にとり、各車両の動きを運行ダイヤグラムとしてプロットした時

表 2 アウトプット一覧表

項目	内容	出力形式
サイクルタイム	ダンプのサイクルタイム " 往路走行時間 " 復路走行時間	平均 範囲 ヒストグラム
積込み時間	積込み場内での滞留時間 積込み時間 (待ちを含む)	平均, 範囲 ヒストグラム
荷おろし時間	荷おろし場内での滞留時間 計測時間 (待ちを含む)	平均, 範囲 ヒストグラム
走行損失時間	徐行回数, 合計損失時間 待避 " , " 停止 " , " 後退 " , "	平均 範囲 ヒストグラム
一般車走行時間	ルート別 大型車走行時間 " 小型車 "	平均, 範囲 ヒストグラム
区間ごとの損失時間	徐行回数, 合計損失時間 待避 " , " 停止 " , " 後退 " , "	全車両についての集計表
時間距離図	時間軸と距離軸に対して 各車両の動きをプロット	図面

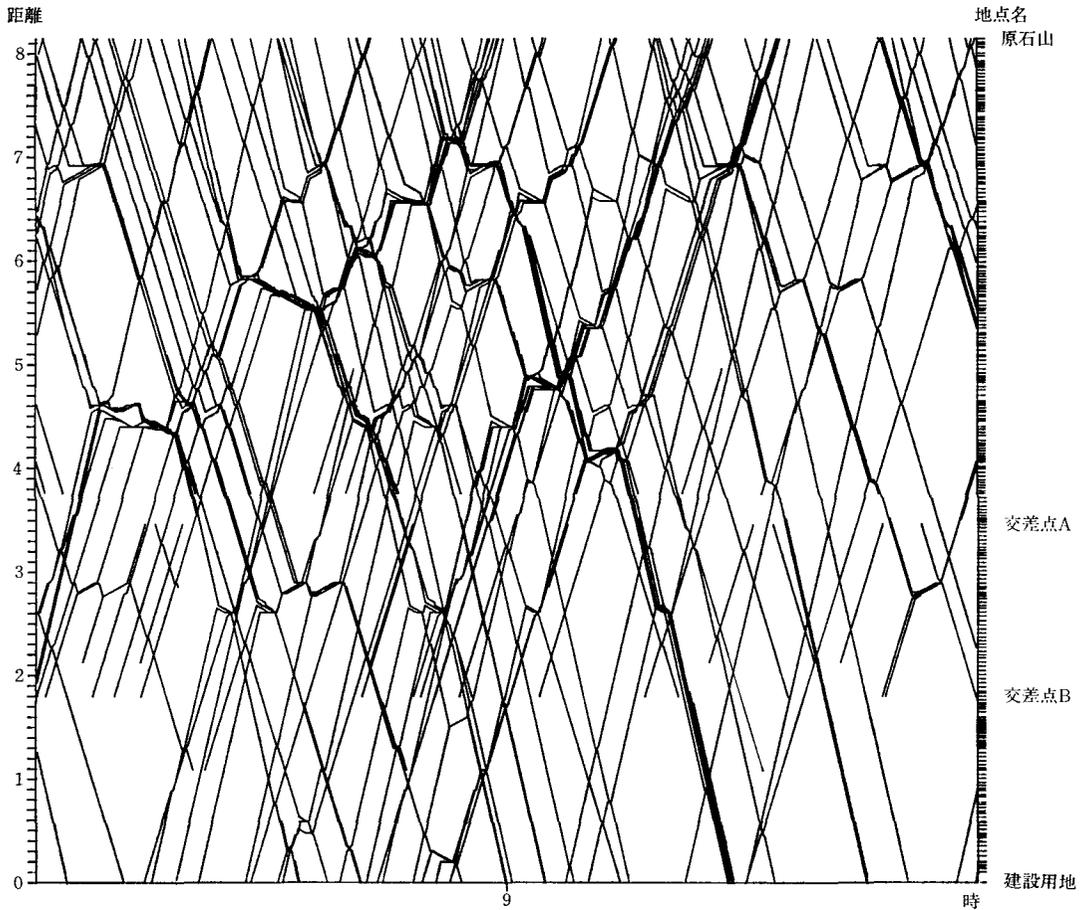


図4 時間距離図例

間距離図(図4)は、全般的な交通状況を視覚的に把握するのに有効である。図4の例は運行ルートの一部に一車線区間をもつため、随所に車両の後退を生じており、大きな混乱はないが、かなり厳しい交通状況であることが見てとれる。

### 5. シミュレーションの検証

シミュレーションを使用する場合、モデル、プログラム、およびデータがすべて適切でなければ正しい結果は得られない。結果の正当性を検証するには、通常実測値または理論値との対比が用いられる。

#### (1) 実測値との対比

最も説得力のある検証方法は実測値との対比である。ある工事について、ダンプのサイ

クルタイムを実測し、シミュレーションによる予測値と比較した結果を表3に示す。この工事ではシミュレーションの実施後に道路の改良が実現したため、改良前、改良中、および改良後の3時点について比較することができた。表3によれば、予測値の精度は実用上十分といえる。改良中については予測値と実測値に多少不一致が見られるが、これは道路状況の正確な把握が困難であった

表3 シミュレーションによる予測値と実測値の比較

ケース	道路条件	シミュレーション 予測値		実測値	
		投入ダンプ台数	サイクルタイム(分)	投入ダンプ台数	サイクルタイム(分)
1	改修前	25	85.3	19	88.5
2	改修中	25	96.3	22	90.1
3	改修後	25	69.6	26	71.0

ためである。

## (2) 理論値との対比

徐行や停止による損失時間など、モデルの細かい部分を検証するには理論式と比較するのが有効である。ただし、理論式はモデル構築時の仮定を前提としているため、実測値より多少説得力に欠けるきらいはある。

未整備道路の交通流については、従来理論的な研究が数少なかったため、プログラム開発と並行してこの面の理論的研究も試みており、いくつかの有用な成果を得ている。

例として、信号制御の交互通行区間における平均損失時間 $W$ の算定に、一般の信号制御交差点での損失時間を算定する Webster [1] の実験式

$$W = \left[ \frac{(1-g)^2}{2(1-\rho)} + \frac{(\rho/g)}{2SC(g-\rho)} - \frac{0.65(\rho/g)^{4/3+5g}}{(SCg)^{2/3}} \right] C$$

ただし、 $S$ ；飽和交通流量

$\rho$ ；流入交通量/飽和交通流量

$C$ ；信号サイクル長

$g$ ；緑信号時間長/信号サイクル長

を適用し、交通量に対して $W$ を図示したものを図5に示す。図中にはいくつかの交通量での実測値とシミュレーションによる予測値も示してある。

信号区間の交通流が飽和状態とならないかぎり、理論値と予測値はよく一致している。

## 6. 理論的考察

幅員の狭い道路における交通流は複雑であり、待ち行列モデルを構築しても理論的に解くのは困難である。しかし、一部のより簡単なモデルについては理論的な解析が可能である。最も簡単で代表的なものを見通しのよい一車線区間をとり扱うものである。このようなモデルは、走行方向の異なる車両に対応した2クラスの客が交互に区間走行の優先権をもつところから、alternating-priority queueing model と呼ばれる。優先権の切替えには区間の走行時間に相当するあいだ、車両が区間に流入しないことが条件となる。優先権の

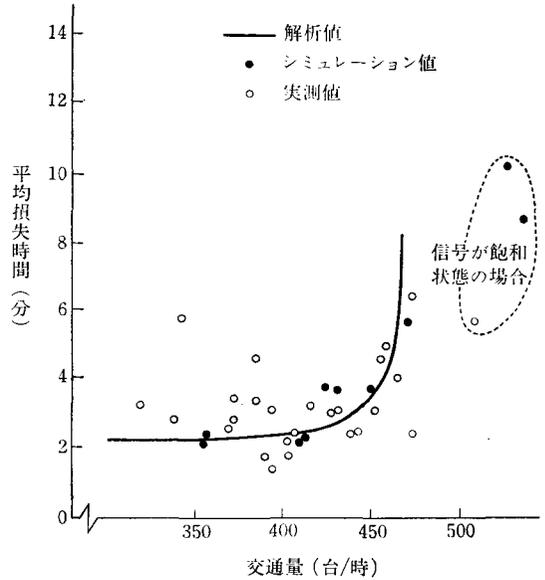


図5 交互通行の信号制御区間における交通量と平均損失時間の関係

切替えの制御方法として信号を用いることもでき、その場合は前述の Webster の式が得られる。信号のない場合は先入車優先となるが、このようなモデルをとり扱った研究として、ポアソン到着、サービス時間一定を仮定した Tanner [2] の論文がある。これは数学的にあざやかな解析ではあるが、結果が積率母関数を含む連立関数方程式で表わされるため、切替え時間またはサービス時間がゼロであるような特殊な場合を除き、平均損失時間の値は求められない。

そこで、筆者は平均損失時間を与える近似式を導いた。その結果から、信号設置が有効となる交通量の下限値や、交通整理員を置く場合の最適制御方法などについても検討が可能となった。

## 7. おわりに

当社では昭和54年より、建設工事用車両の運行状況を予測するシミュレーション・プログラムを開発してきた。その中から、本文では幅員の狭い単一の運行ルートを対象としたシミュレーションについて紹介した。この開発を通じて得られた知識・経験は他のシミュレーション・プログラムの

開発にも生かされている。

今後の方向として、コンピュータになじみのない者にもシミュレーションの結果が容易に理解できるように配慮が一層要求されるものと予想される。これに対処するため、出力の図面化、カラー化、さらにアニメーション化を進めてゆきたい。

#### 参 考 文 献

- [1] Webster, F.V.: "Traffic Signal Settings", Road Research Technical Paper, No. 39, Great Britain Road Research Lab., 1958
- [2] Tanner, J.C.: "A Problem of Interference between Two Queues", *Biometrika*, Vol.40(1953), pp.58-69
- [3] Gross, D. and Harris, C.M.: "Fundamentals of Queueing Theory", John Wiley & Sons, 1974
- [4] Haight, F.A.: "Mathematical Theories of Traffic Flow", Academic Press, 1963
- [5] (社)日本道路協会:「道路構造令の解説と運用」, 丸善, 1970
- [6] 景山, 中沢, 佐々:「幅員の狭い道路におけるダンプの走行シミュレーション」, 日本OR学会 1981年春季研究発表会アブストラクト集
- [7] 中沢, 佐々, 金香:「建設工事用車両の運行シミュレーション」, HITAC ユーザー研究会第22回大会論文集, 1985



● ミ ニ ● ミ ニ ●

● O ● R ●

## 「こだわり」と「観る」

・仏教ブームという。いろいろな解釈があろうが、考え方の1つの原点を教えてくれることも事実である。般若心経 262文字にいう「色不異空、空不異色、色即是空、空即是色」。こだわりと先入観を捨てて、虚心坦懐、物事のあるがままの姿を、本質を観よという。わかったようで実践はむずかしい。心のゆらぎ、つまり煩惱をなくすることもできない。物事にこだわるので、特定の人を愛し、わが社を他にぬぎ出たものにしようとする。

・企業が種々の投資を行なうにあたって、プロジェクトとして各種の経済計算を行なう。ディスカウント・キャッシュ・フローなど精緻な評価により、プロジェクトそのものの採算性を問題にする。米国の数百家の実績を蓄積したPIMSデータベースの分

析によると、積極的な投資を行なっても企業全体としてのROIが悪化した例は少ない。一般に、将来の長期的成長のために短期の利益を犠牲にしても、という認識があるが、必ずしもそうではない。むしろ、収益性に影響するのは、その投資が、プロジェクトそのものだけでなく、企業全体の売上高増、コスト低減にいかに関与したかが、ROIを左右するとしている。(H. M. ワグナ, ハーバード・ビジネス・レビュー, 84年9/10月号)

・「見る」と「観る」は異なるという。「観る」とは、知識や、心で物事の本質を見究めること。プロジェクトそのものだけにこだわることなく、その目的とする本質を「観る」。生きたORの心くばりであろう。(山下達哉)