

待ち行列による登坂車線設置に関する研究

正 員 板 倉 忠 三*

正 員 加 来 照 俊**

正 員 ○堀 江 清 一***

1. はじめに

自動車交通の重要性和その需要の増大に伴って各地に整備された道路が建設されてきている。道路建設の目標も初期の“自動車の走れる道路”から“利用者により良いサービスをする道路”へと進んできている。これは道路線形、道路舗装、附帯設備などの進歩に大いに依存している。サービスを向上させるには、これら各々についての改善が要求されるが、一般道路においては道路のボトルネックとなる部分を解消することが重要である。本論文はボトルネックの一つである勾配部について研究したものである。

勾配部における車の登坂走行は平坦部における走行に比べるとその車の登坂性能や載荷状態によって大きな影響をうける。一方、下り走行は車種別の性能による差も、大型貨物車の影響も比較的少ないために勾配部登り方向の交通流が研究の対象となることが多い。

勾配登坂部において設置される登坂車線は低速車による交通渋滞発生の要因をとりのぞき、直接的には交通容量の増加と平均速度の増加を目的とする。また、利用者へのサービスとして考えるならば (1) 低速車による妨害がないために希望速度を維持できること。(2) 対向車線に進入して追越す必要がないことによる事故の減少などに重要な意義がある。一般道路においては登坂車線の設置は建設費等の制約により行なわれていない。一方、高速道路においては登坂車線設置基準が主として大型車両の速度低下を根拠として定められている。しかし、今後、登坂車線が高速道路ばかりでなく一般道路に対しても設置する必要が生ずると考えられるがこの場合、速度低下のみを基準に計画すると不合理な結果になることも考えられる。

そこで著者らは合理的な登坂車線計画のための研究を行ってきたが、本論文は登坂車線の設置を利用者へのサービスと経済性を考慮して決定するための研究の一部である。今回はその方法と計算例、および決定のための考察について述べたものであり、その方法として待ち行列理論に

よる手法を用いた電子計算機によるシミュレーションを行ない、待ち時間、待ち行列等から研究したものである。

2. 待ち行列理論の概要

あるサービスシステムにおいて、サービスを受けるもの(人、物など)とサービス設備との間の最適な運用関係を見いだすために発展してきているのが待ち行列理論である。

待ち行列の問題を考える場合には

- (1) 客 (Customer) が窓口に着する時間間隔分布
- (2) サービス窓口の数
- (3) 客が窓口でうけるサービス時間の分布
- (4) 行列を作る場合の一定の規則性
- (5) 客に対するサービス順位の基準
- (6) サービス段の数

等を明らかにする必要がある。

また、システムの状態方程式を解いて解析値が与えられているモデルは次の三つの基本型である。

- (a) M/M/S ポアソン到着、指数型サービス時間分布、窓口数 S 個
- (b) M/G/1 ポアソン到着、サービス時間分布は一般形、窓口数は 1 個
- (c) G/G/1 到着時間分布、サービス時間分布とも一般形、窓口数は 1 個

今、登坂車線の研究においては後述するような勾配部交通流のもとで、主として M/G/1 のモデルを利用する。このモデルについて次に簡単に述べる。

- i) 到着分布はポアソン到着とし、平均到着時間間隔は $1/\lambda$ とする
- ii) サービス時間分布は平均 $1/\mu$ の一般分布
- iii) 窓口数は 1 個で無限行列長を許す

この場合のシステム系の待ち行列の平均行列長 L 、平均待ち時間 W_q 、および待ち行列中の単位ごとの平均待ち時間 W_d は次のようになる¹⁻³⁾。

* 北海道大学工学部教授 工博

** 北海道大学工学部助教授 工修

*** 北海道大学工学部助手 工修

$$L = \rho + \frac{\rho^2 + \lambda^2 \cdot \sigma_v^2}{2(1-\rho)}$$

$$W_q = \frac{1}{\lambda} (1-\rho) = \frac{\rho^2 + \lambda^2 \cdot \sigma_v^2}{2\lambda(1-\rho)}$$

$$W_d = \frac{1 + \mu^2 \sigma_v^2}{2\mu(1-\rho)}$$

σ_v : サービス時間の分散

ρ : 利用率 λ/μ

また、 $\rho < 1$ のもとでの待ち行列の長さが i である確率 p_i は確率過程 $\{p_i\}$ の母関数 $\pi(z)$ の形で求めると

$$\pi(z) = \frac{(1-\rho)(1-z)\beta\{\lambda(1-z)\}}{\beta\{\lambda(1-z)\}-z}$$

ここで

$$\beta(z) = \int_0^\infty e^{-zv} dB(v)$$

$B(v)$: サービス時間分布

である。

3. 待ち行列理論の登坂部交通流への適用

一般的に解かれている待ち行列のモデルは客 (Customer) が窓口でサービスを受けている間は他の客はサービスを受けずに (同じ窓口においては) 停止の状態にあると考えられる。しかし、道路交通の登坂部における様相をモデル化する場合には登坂部全体 (あるいは一区間) を1つの“窓口”として考えなければならない。この場合、このモデルでは車 (Customer) が“窓口”でサービスを受けている間に次の車がこのシステムの中に入ることになる。つまり、1個の窓口が同時に複数の客 (車) にサービスを行なうことになる。この点が先に述べた一般の待ち行列モデルと大きく異なる点である。我々はこれを“多重サービス窓口”システムと呼ぶことにする。従って、2. において示した解析値はこのシステムにおける客 (車) の待ち行列長や時間などを示すものではなく、サービスを行なっているシステム内のすべての客 (車) が待ち行列を形成している場合の値を示していることになる。また一方、これを別の面 (窓口の側) からみれば道路交通流のシステム系においては“窓口が時間的に移動する”モデルとして考えることが出来る。つまり、サービス窓口は注目している客 (車) と共に勾配部頂上方向に移動してサービス終了 (登坂終了) 時に次の客 (車) の位置まで登坂部入口側に移動 (この時、勾配部入口からこの点までの所要時間—サービス時間—を加える) し、そこからサービスを開始するようなモデルとなる。このようなモデルを 2. で述べたような形で解析的に解くことは非常に困難なことであるために後で述べるようなシミュレーションによる方法をとった。

4. 登坂部における交通流の特徴

登坂部における交通流の特徴としては主に次の諸点が挙

げられる。

- i) 勾配抵抗による速度低下—主に大型貨物車、バス
- ii) 追い越し距離、追い越し時間の増大 (両車の各速度、速度差が平坦部と同じ場合)
- iii) 勾配上部における視距の制約による運転者への拘束
- iv) 制動停止距離の減少による車頭間隔の縮小

これらの事項が交通流全体の車頭間隔、速度、追越し、追従現象等に影響を与えると考えられる。上記、4点の中で特に重要なものは i) の速度低下による影響であろう。車の速度差が登坂部における車の行列をひきおこしたり、速度低下が交通容量の低下を招く大きな原因となる。

5. 勾配部における交通流のモデル化

1. モデルについての考え方

この項では登坂部交通流システムのモデル化について述べる。モデルは先に述べたような登坂部交通流の諸特性を考慮に入れたものであり、かつ本研究の目的に合致したものが要求される。ここでは待ち行列によるシミュレーションモデルを次の2つのモデルの場合について考察する。後述するがこれら2つのモデルは本研究の最終的なモデルではない。

1-1 第一のモデル

今、勾配部の縦断概略図と交通の様子を図-1に示す。勾配長を L (m) とし ④、⑥ を各々勾配区間の始終点とする。走行車は ④ にある時間分布で到着し、④～⑥ 区間を速度 V (km/h) で走行する。(この速度については後述する。) この場合、走行車の受けるサービス時間は $3.6 L/V$ となる。モデルの動きは I 車 (④ に I 番目に到着した車) が前車、(I-1) 車に ⑥ 地点までの間に追いつくか否かについて判断し、追いつく車は追い越しを行わずに追従走行するものとする。この追従車が待ち行列を形成し、追従しない場合のサービス時間と追従し待ち行列を形成した場合のサービス時間の差が待ち時間となる。このモデルは混雑時の交通状態を仮定して単純化したものである。

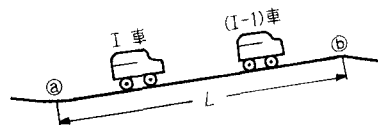


図-1 勾配部交通概略図

1-2 第二のモデル

第一のモデルと大きく異なる点は I 車 (後車) が (I-1) 車 (前車) に追いつく場合には I 車が乗用車であれば対向車をも考慮して追越し可能性を判断することである。追越しが可能であれば待ち行列を形成せずに追越し、不可能であれば待ち行列を形成する。この場合、このモデルは“一段サービス”システムであるから追越し判断は1回行なうだけとする。

第一、第二のモデルとも、いわゆる“単一チャンネル、一段サービス”システムの例である。勾配部において登坂車線が設置されている場合、あるいは設置後の効果などを評価する場合のモデルは2チャンネル(複数チャンネル)モデルが必要であるし、さらに詳細なモデル化を行なう場合には多段サービスシステムモデルが必要になる。多段サービスシステムモデルの場合には、本研究においては追越し判断の回数や速度低下の様相に影響してくる。これらのモデルについては現在研究中である。

2. 登坂部における交通現象観測と入力データについて

勾配部における交通流の解析は種々なされてきているが交通流を“流れ”として観測することは様々な制約のためにほとんど行なわれていない。我々は観測にあたり、特に一台一台の走行車の走行変化の大きい勾配部における交通流を、その本来持つ連続した動きとしてとらえることに留意してきた。その観測方法、結果等についてはすでに明ら

かにしてきた⁴⁾。ここでは本論文において直接必要なデータについての解析結果を示すことにする。観測場所は一般国道230号線藤舞地区の5%勾配部である。しかし、観測機器の関係から勾配部全長にわたる測定は出来なかったが300m区間、あるいは400m区間での連続測定を行なった。

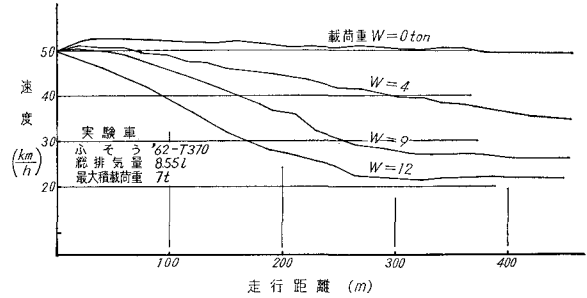


図-2 走行距離-速度図

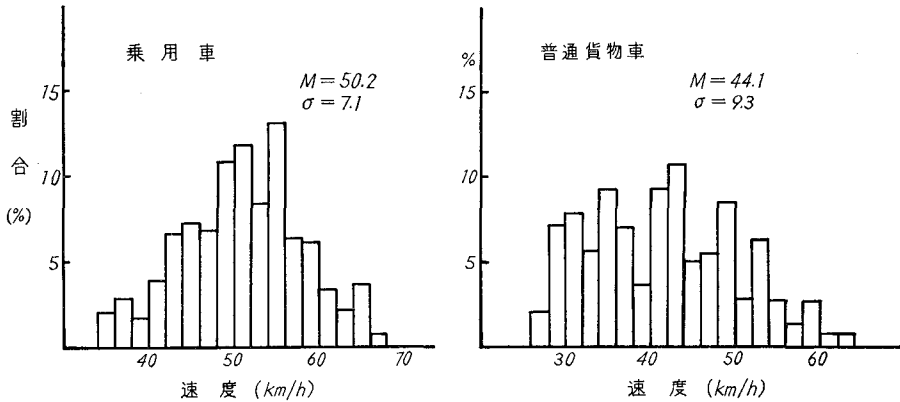


図-3 勾配部における300m区間の速度

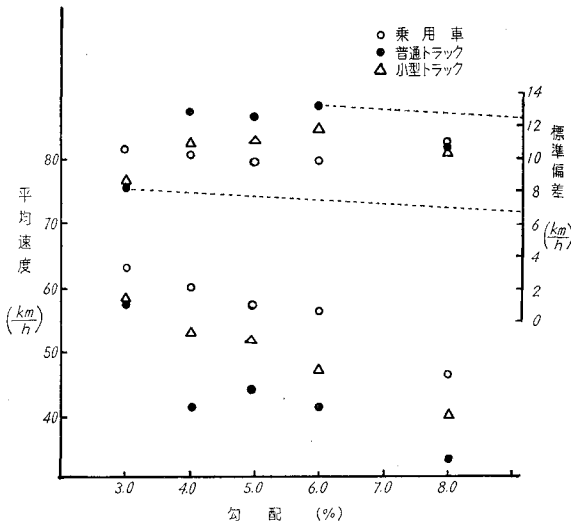


図-4 勾配と速度

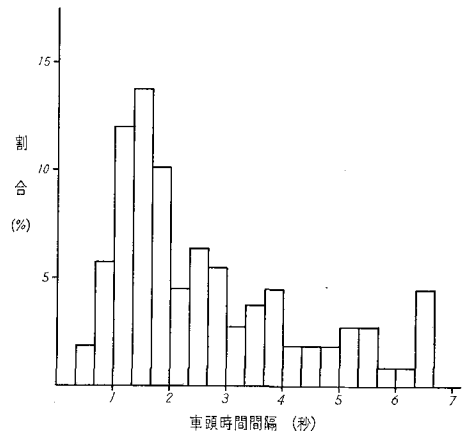


図-5 車頭時間間隔分布

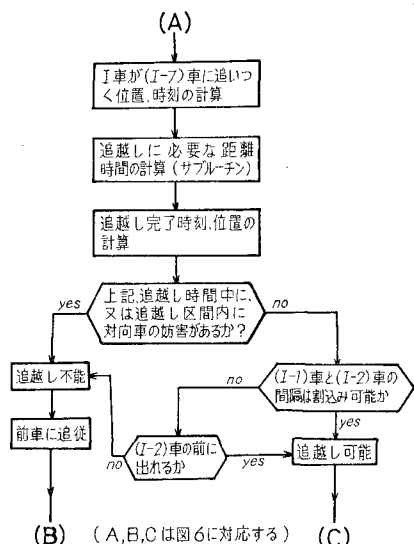


図-7 追越し部分のフローチャート

越すために加速を行なうか、あるいは現在の速度が追越しに十分な速度であれば (I 車との速度差が大きい場合) その速度を維持して追越し動作に入る。加速追越しの場合には資料^{10),11)}より考察して乗用車に対して一率に加速度 α (km/h/sec) を

$$\alpha = 2.8 - 0.03 V_I$$

V_I : I 車の速度 (km/h)

とした。そして、この計算過程は実時間 1 秒間隔で行なった。この計算の結果、ある与えられた時間内に追越しが可能であれば (I-1) 車と (I-2) 車の間に入りこめるだけの間隔があるかどうかを判断し、それが可能であれば、その追越し行動中に対向車の妨害について調べる。対向車の妨害がなければ I 車を追越し可能車とすることにした。これらのモデルのフローチャートは第一のモデルについては図-6に示す。また、第二のモデルは第一のモデルのフローチャートの (A) の部分に 図-7 の追越し判断ルーチンを加えたものである。なお、シミュレーションの演算の方法としては I 車がシステムに到着した後は (I+1) 車 (次車) が到着する時点まで time scanning させる方法である。

7. プログラミングと演算時間

以上、述べてきた勾配部交通流待ち行列シミュレーションモデルのプログラミングは細かな判断が多いために多少複雑ではあるが、通常一般に行なわれている交通流シミュレーションのプログラムに比べるとはるかに容易である。プログラムステップ数は入出力を除くと、第一のモデルで約 200 ステップ、第二のモデルは約 280 ステップである。(比較までに挙げると著者らの作成した unit time scanning 方式のシミュレーションプログラムは約 700 ステップで

ある)

また、フローチャートからもわかるが各車について演算を行なうのは高々 3 回程度である。このため、一定時間毎にシステム内のすべての各車の情報を計算し更新する unit time scanning の方法に比べ演算時間が大幅に短縮される。演算時間は第一のモデルの場合、交通量によっても異なるが交通量 1,000 台/h 程度では北大計算センター HIPAC 103 で、実時間の 2 倍程度であり、東大大型計算センター HITAC 5020 E では同じく 1/40 程度で可能である。これは unit time scanning 方式と比べると約 1/50 程度である。なお、第二のモデルは第一のモデルの場合に比べて約 4 割程度増加する。

8. シミュレーションの結果

1. 道路交通条件とモデルの定常性

計算は第一のモデルについては、勾配長 100~1,000 m、交通量 300~1,500 台/h、勾配 3~7% について行なった。また、第二のモデルについては、勾配長 300~900 m、交通量 600~1,100 台/h、勾配 5% について行なった。シミュレーションの場合、モデルの状態を把握するには実時間にして何時間 (あるいは分) 位の計算を行なえば良いかという事が問題になる。我々はこの時間を決めるために実時間 2 分間毎にモデルから得られる ① 待ち行列台数 ② 待ち時間 (秒) の分布を得て、それらの分布の変動が小さくなった時点をとらえることにした。この様子を勾配 5%, 勾配長 500 m、交通量 1,100 台/h の場合について 図-8 に示す。この結果より我々は 10~12 分間 (実時間) の計算をすることにした。今回我々が行なった道路条件、交通条件のもとではいずれもこの程度で十分であると思われた。しかし、モデルの定常性については要求するシミュレーションの内容からも考察しなければならないので、さらに適切な分析をする必要があると考えている。なお、交通流のシミュレーションモデルが“定常になる”ということは、上記入力データの場合のように交通渋滞が生じることなく運用されている時に言えることである。

2. 計算結果

シミュレーションによる計算結果の代表的な例を 図 9~11 に示す。図-9 は勾配 6%, 交通量 1,000 台/h の場合について勾配長別に待ち時間の分布を示したものである。図-10 は交通量 1,000 台/h、勾配長 700 m の場合について勾配別の待ち時間分布を示したものである。また、図-11 には第二のモデルによる結果を勾配 5%, 勾配長 700 m の場合を交通量別に示したものである。

しかし、入力データが統一されていないために各々の比較は別の機会に行ないたい。

これらのシミュレーションの結果を実際の交通流と比較することは今後の課題となるが、急勾配、長勾配になるほ

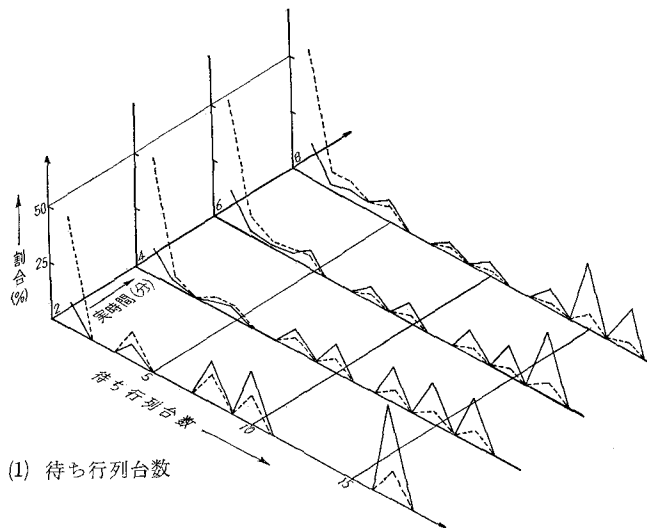


図-8-(a) シミュレーションの時間的变化 ((2)と同じ条件)

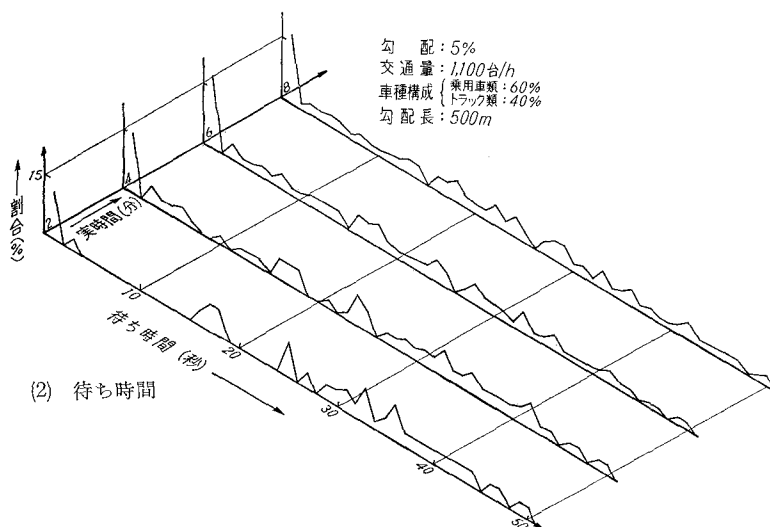


図-8-(b) シミュレーションの時間的变化

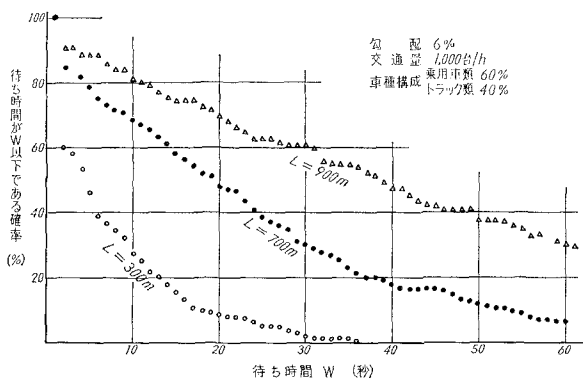


図-9 勾配長 (L) と待ち時間 (W)

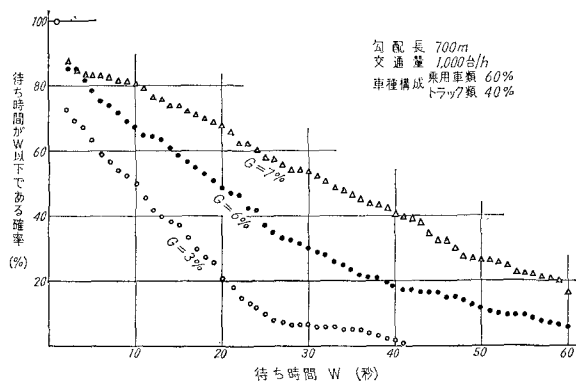


図-10 勾配 (G) と待ち時間 (W)

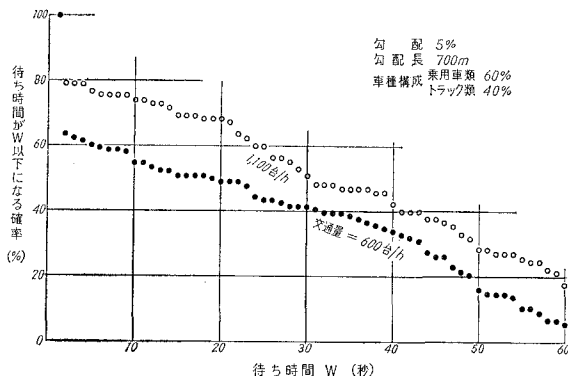


図-11 第二のモデルによるシミュレーション結果

と実際の場合より待ち時間（遅れ時間）が大きくなる傾向があると思われる。

9. 登坂車線設置に関する考察

シミュレーションによって得られた結果をもとにして登坂車線設置を計画する方法を2つの点から考察した。

1. サービスの度合いからの考察

今、予想される交通量が Q である道路に要求されるサービスの基準を“速度 V_s (km/h) 以下になる確率が全走行車の $\beta\%$ 以下とする”場合、勾配部では次のように考えることが出来る。平坦部での自由走行車の平均速度を V_m (km/h)、勾配長を L (m) とする。そして勾配部での平均速度を V_s (km/h) とすると、この区間での遅れ時間 T_W (秒) は次のように求めることが出来る。

$$T_W = 3.6 L \left(\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_m} \right) \quad (1)$$

次に7.において得られた結果の累加分布曲線を図-12のように各道路、交通条件毎に作成する。ここで $Q = Q_2$ とすると待ち時間（遅れ時間） T_W の生ずる確率は図より β' であることがわかる。この結果 $\beta' > \beta$ であればこの勾配部には登坂車線の設置が必要と言える。また、サービスの基準を車種別に区別することも可能である（図-13参照）。

次に、登坂車線を勾配部の全長にわたって設置するか、あるいは頂上から下り方向に L' (m) だけ設置するかは次のように計算出来る。

今、 L' にだけ設置すると仮定した場合、登坂車線のない部分 $(L-L')$ における遅れ時間 $T_{W'}^*$ (秒) は

$$T_{W'}^* = 3.6 (L-L') \left(\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_m} \right) \quad (2)$$

で求められるから L' の登坂車線を設置することによって遅れ時間を $(T_W - T_{W'}^*)$ 秒だけ減らすことが出来る。ここで $t_{W'}^*$ を先に述べた $\beta\%$ の確率の遅れ時間とすると $T_{W'}^*$ は

$$T_{W'}^* = t_{W'}^* - T_W \quad (3)$$

で求められるから (2) 式より、登坂車線設置長 L' が求ま

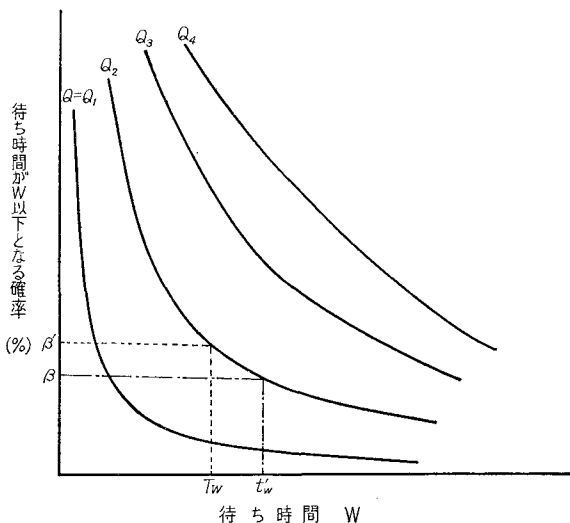


図-12 交通量 Q と待ち時間 W

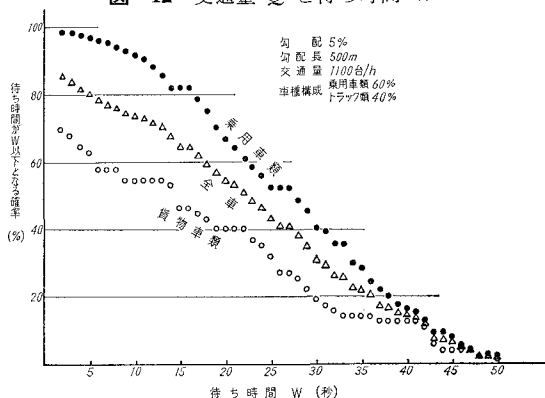


図-13 車種別の待ち時間の例（シミュレーション結果）

る。しかし、この点については待ち行列の形成過程等が問題として大きく残るので今後、研究を続けたい。

2. 経済面からの考察

登坂車線設置に必要な費用と待ち時間（遅れ時間）による経済的な損失とのバランスによって評価する方法である。待ち時間による損失は種々考えられるが、我々は比較的数量化しやすい“走行時間の損失”について考えることにする。日本道路公団、運輸省、建設省の調査によると走行時間の損失は乗用車 10.1、バス 23.4、普通トラック 7.8、小型トラック 4.6 (単位 円/台・分) であるという¹²⁾。本論文では前述したように車種を乗用車類、貨物車類に分類しているので実際の車種構成比から加乗平均によって求めるが、ここでは乗用車類 r_p 、貨物車類 r_t (単位 円/台・秒) とする。次に、待ち時間が t_i (丸めた値) 秒である乗用車類の台数を n_i 台、貨物車類の台数を m_i 台とすると走行時間の総損失額 G は

$$G = \sum_{i=1}^k t_i (n_i \cdot r_p + m_i \cdot r_t) / 60 \quad (4)$$

となる。

このようにして得られた損失額と建設費との“便益比”を計算することになる。

経済面から登坂車線の設置を計画する場合には、交通事故の減少、運転者の疲労軽減など重要な点もあるので十分な配慮をしなければならない。

10. あとがき

本論文は登坂車線設置計画の基準を設定するための研究の一部であり、登坂部における交通流を“多重サービス窓口”待ち行列モデルとしてモデル化し、シミュレーションモデルを作成し電子計算機により解いたものである。本シミュレーションはモデルが通常行なわれている交通流シミュレーションと比較すると“雑”であるが本研究の目的のためにはこのシミュレーションの結果から判断してもかなり良好な結果が得られたと思う。

登坂車線設置基準は現在までのところ大部分が大型貨物車の速度低下に依存しているが、この点において本論文の方法は1つの提案になると考える。

今後、さらに次の諸点について研究が必要である。

- (1) 道路・交通条件による交通現象を整理すること。
 - (2) 一段サービスモデルを複数段サービスモデルに進めて勾配を数区間に分割すること。
 - (3) 実際の勾配部交通流とモデルとの比較を進め、モデルを改良していくこと。
- などである。

参 考 文 献

- 1) 本間鶴千代：待ち行列の理論，理工学社。
- 2) 森村英典他：待ち行列の理論と実際，日科技連。
- 3) 宮脇一男他：待ち合わせ理論とその応用，日刊工業。

- 4) 板倉・加来・堀江：勾配部，曲線部における交通現象について，土木学会第24回年次学術講演会概要集。
 - 5) 吉田 滋：“2車線専用道路における歩行実態 (I) (II)”，高速道路と自動車，7月，8月 (1967)。
 - 6) Harry, C. Schwender: “New methods of capacity determination for rural roads in mountainous terrain”. H. R. B, Bull **167**, (1957).
 - 7) 堀江清一：“交通容量に関する研究”. 昭和44年度北海道大学工学研究科修士論文。
 - 8) 高速道路調査会：“登坂車線設置に関する研究，その1，その2”. 2月 (1963), 3月 (1964)。
 - 9) D. L. Gerlough: “Traffic inputs for Simulation on a digital computer” Proc. Highway Reserch Board. **38**, (1959).
 - 10) 高田 弘：“電子計算機を利用したシミュレーションによる道路交通流の解”. 土木学会論文集，第124号，12/1965.
 - 11) モーターファン：“ロードデスト”. 三栄書房。
 - 12) 高橋朝雄：首都高速道路の渋滞損失の評価について，第9回日本道路会議一般論文集。昭和44年。
- 他に
- 13) H. S. Huff: Vehicle Climing Lanes, Highway Reserch Board Bull. **104**, (1955).
 - 14) William E. Willey: “Survey of Downhill Speeds of Trucks on Mountain Grades” Proc. Highway Reserch Board. **30**, (1950).
 - 15) 自動車技術会：トラック登坂性能に関する研究報告書，昭和36年3月。
 - 16) Alee M. Lee: Applied Queuing Theory, MACMILLAN ST MARIN'S PRESS.
 - 17) D. E. Cleveland: “Queuing Theory Approaches” Highway Reserch Board, Special Reports **79**, (1964).