

# 高速道路の利用予約制に関する基礎的研究

佐藤 拓也<sup>1</sup>・赤羽 弘和<sup>2</sup>・桑原 雅夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 千葉工業大学 工学研究科 (〒275 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 千葉工業大学教授 工学部土木工学科 (〒275 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

<sup>3</sup>正会員 Ph.D. 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

本研究においては、休日の都市間高速道路を対象とした利用予約制を想定し、交通需要の発生を時間的に平準化することにより、交通渋滞を軽減・解消する可能性を探った。サービスエリアにおける SP 調査に基づき、予約条件、利用者属性、およびトリップ属性を説明要因とする予約制選択モデルを構成した。このモデルと実際の交通渋滞の観測データとを組み合わせ、数値シミュレーションにより予約制の効果を検証した。さらに、予約動向に基づいて交通需要の発生状況を予測し、それを予約条件の設定や予約の受付・処理に反映させるフィードバックループを構築し、交通需要の予測誤差が予約制の効果に及ぼす影響を数値シミュレーションにより検証した。

*Key Words* : TDM,ETC

## 1. はじめに

大きな社会経済問題である交通渋滞対策として、既存の道路網を効率的に利用する施策が望まれており、その1つとしてトリップの出発時刻を変化させて交通需要を時間的に平準化するTDM施策が重要であると認識されている。例えば、フレックスタイム制やロードプライシングの効果、あるいは導入可能性などが盛んに議論されつつある。道路交通における出発時刻選択に関する研究は、明確な時間的制約のある通勤交通を対象に1960年代後半から行われてきた。はじめは単一ボトルネックにおける分析から行われ、複数ボトルネックネットワークにおける分析<sup>1)</sup>、2つの連続するボトルネック問題における分析<sup>2)</sup>等へと発展していった。本研究も、出発時刻選択に関する研究であるが、観光地からの旅行者の集中が主な原因である休日の都市間高速道路における渋滞を対象としているところに特徴がある。比較的限られた地域の交通であり、毎日安定した交通パターンを示す通勤交通が解析しやすいのに対して、その対象地域が広い地域にまたがり、自由度が高く、外部からの時間的制約を受けない観光・レクリエーション交通はその現象がつかみにくく、解析が困難

であることが知られている。

本研究は、このような休日の都市間高速道路を対象として、需要の発生を時間的に平準化する利用予約制により休日渋滞を解消・軽減する可能性を探った。予約制とは、鉄道の座席指定券の予約システムのような仕組みで、交通需要が交通容量を超過しないように旅行者に出発時刻を調整してもらう構想である。具体的には、予め混雑が予想される時間帯には、通常料金に対して割り増したピーク時料金を設定する。ETC技術の利用を前提として、予約制参加者からは、予約の申し込み時にピーク時料金からの割り引き料金を徴収、予約制不参加者からはピーク時料金を徴収することにより予約制を担保する。

調整時間、割り引き率、割り増し率等の関係により予約制の参加率が決まるため、これらの予約条件の合理的設定方法が予約制の大きな課題である。予約条件の設定、及び予約制導入時の諸問題予測のためにアンケート調査を1995年および1996年の2回行った。アンケート結果をもとに非集計分析を行い、予約制導入時の旅行者行動モデル(予約制選択モデル)を作成した。この選択モデルと予約動向に基づく交通需要予測アルゴリズムとで、予約制の効果を数値シミュレーションに

[準備1] 本票を受け取った後で支払われた高速道路通行料金は、概算でいくらだったでしょうか？下欄にご記入ください。（約\_\_\_\_\_円）  
 [準備2] 上記通行料金の20%増しの金額を、下欄にご記入ください。この金額を、以下の設問におけるピーク時料金と想定してください。（約\_\_\_\_\_円）

図-1 アンケート記入様式の一部

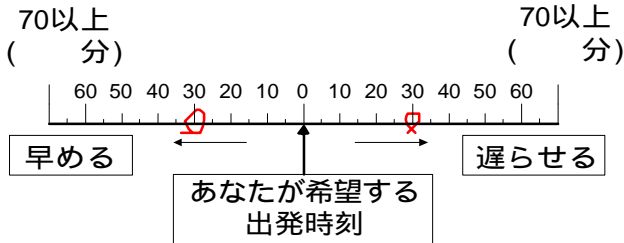


図-2 調整時間記入表

より評価した。

## 2. アンケート

1995年のアンケート結果<sup>3)</sup>を踏まえ、内容を再設計して、関越自動車道上り線の高坂SAで、旅行者の社会属性、トリップ属性、及び予約制に関する想定項目から構成される郵送回収アンケートを行った。この調査の主な対象は、観光地からの帰宅トリップである。

### (1) 旅行者の属性に関する項目

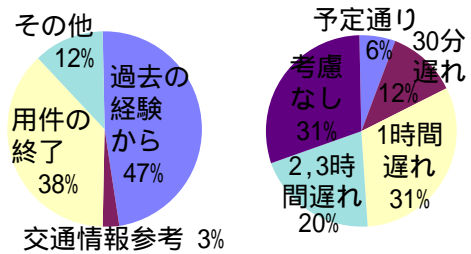
設問内容は、運転者の年齢、性別、運転頻度、乗車人数、旅行距離、トリップ最終目的地、宿泊の有無、トリップ目的、移動出発時刻決定方法、目的地到着遅れの許容範囲、関越自動車道休日渋滞の経験回数、出発時刻調整に対する賛否である。これらの設問により、予約制の効果判断の対象となる乗用車(乗車人員7人以下)で移動した観光目的のトリップを抽出し、有効回答とした。

### (2) 予約条件に関する調査項目

予約制に関しては、休日渋滞の発生期間中には通行料金を一定の割り増し率を掛けたピーク時料金が適用され、予約制の参加者にはピーク時料金からの割り引きが行われる想定とした。アンケート票配付時のトリップに対して実際に支払った通行料金額を回答してもらい、それに割り増し率を乗じた額をピーク時通行料金と想定する質問形式を採用した。図-1に、その記入様式を示す。

表-1 アンケート票配付・回収状況

配付日時	1996年9月23日(秋分の日) 12:00~18:30
配付場所	関越自動車道 上り線 高坂SA
配付数	1537
回収数	445
有効回答数	310



(a) 出発時刻決定方法

(b) 到着遅れの許容範囲

図-3 アンケート単純集計例

アンケートにおいては、想定した割り増し率、割り引き率の全ての組合せを用いる実験計画(完全要因配置計画)で行われるのが望ましい。しかし、回収率や回答率の低下を回避するためには1人当たりの質問数を10問程度に限定する必要がある。そこで、効率的に代替案数を削減する方法として、質問群をピーク時割り増し率10、および20%の2ブロックに分割し、異なるブロックからの回答を結合できると仮定するブロック計画法を適用した。各ブロックにおいて予約制による割り引き率5、10、20%の各々に対して、出発時刻の許容最大調整時間をチェックする形式とした。その際、回答者が時刻の調整を行わなくても予約制により渋滞は解消される想定とした。図-2に、調整時間の記入様式を示す。

## 3. アンケートの解析結果

### (1) アンケート結果

表-1に、アンケートの配付・回収結果を示す。

### (2) 基礎的解析

#### a) 出発時刻決定方法

図-3(a)に、出発時刻決定方法の回答結果を示す。「交通情報を参考にする」層は全体の約3%で、これと「過去の経験から」出発時刻を決定した層とを合わせた、渋滞状況に応じて出発時刻を決定すると見なせる旅行者は、全体の50%程度である。また、時間的制約が小さく、単純に「要件が終了したから」出発した層は、38%に達している。

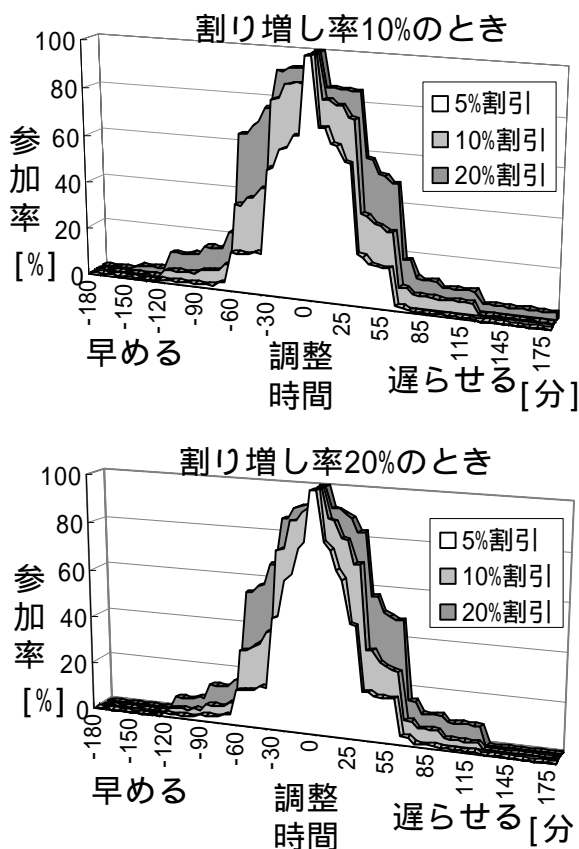


図-4 割り増し率，割り引き率，調整時間幅の関係

b) 目的地到着遅れの許容範囲

図-3(b)に，目的地到着遅れの許容範囲の回答結果を示す．出発時に想定した目的地到着時刻に遅れることに抵抗を感じる旅行者は少ないことが分かった．このことにより，この回答者層は，時刻調整に対して柔軟に対応するであろうことが推測される．

(3) 予約制に関する回答の分析

図-4は，割り増し率が10%，20%の場合の，割り引き率と調整時間幅の関係を示す．同図から，割り増し率および割り引き率と調整時間との間には，正の相関があることがわかる．加えて，調整時間0分を軸に左右で参加率に大きな違いがないことから，回答者各人の問題は別として全体としては調整に関して，早める，遅らせるは同様の価値であるとして後の解析に生かしている．

アンケートにおいて渋滞を避けることができるという条件で時刻調整に対する賛否を問うたところ，90%以上の旅行者が時刻調整に応じると答えており，予約制の実現が少なくともある程度は期待できることがわかった．

表-2 二項選択データへの変換例

選択結果	参加条件			不参加条件		
	割増率	割引率	調整時間	割増率	割引率	調整時間
参加	20%	10%	30分	20%	0%	0分
不参加	20%	10%	35分	20%	0%	0分

表-3 旅行者行動モデルパラメータ

項目	説明変数	パラメータ値	t 値
予約条件	調整時間	-0.035788	-11.14 *
	支払い比率	-0.002364	-2.38 *
乗車人員	1,2人	+0.066457	+2.31 *
	3人以上	0	
旅行距離	100km以下	-0.083734	-0.63
	100~150km	-0.011818	-7.21 *
	150km以上	0	
定数項		-0.052361	-14.51 *
的中率		72.9%	
尤度比		0.359	
サンプル数		1557	

4. 予約制選択モデル

表-2に，割り増し率が20%，割り引き率が10%のときに，図-2の回答票において最大調整時間として30分が選択されたサンプルを，二項選択データに変換した例を示す．このとき，回答者が出発時刻の調整時間を判断するときの最小時間単位を5分と仮定し，上記の回答例を，30分までなら予約制に参加するが，35分以上なら不参加であると解釈して変換した．

ここで支払い比率とは，予約制実施時通行料金の通常料金に対する比率を表し，ピーク時割り増し率と予約制参加時の割り引き率とから算出される．

表-3に，以上のように作成したデータにロジットモデル<sup>4)</sup>を適用した結果を示す(\*印は，5%有意を示す)．出発時刻調整時間が短く，通常料金に対する支払い比率が低いほど予約制に応じる割合が増加する傾向が示されている．さらに，乗車人員が少なく，旅行距離が長くなるほど予約に応じやすい傾向も見られた．これは乗車人員に関しては，乗車している各個人ごとに時間的制約を持っており，その人数が増えれば全体として予約制に応じにくくなるのではないかと考えられる．旅行距離に関しては，旅行距離が長くなるほど旅行時間も増えるために時間のずれに対して柔軟になることや，旅行距離が長くなるにつれ増加する通行料金により，割り増し割引の影響が大きくなることが起因しているものと考えられる．

表-4 検証対象渋滞

発生日時	1995年11月5日(日) 11:15~22:00
ボトルネック位置	関越自動車道上り 3.92KP地点(新座料金所)
最大渋滞長	22.68[km]
渋滞原因	交通集中
ボトルネック容量	2,843[台/時/2車線]
最大遅れ時間	33[分]
総遅れ時間	9,900[台・時]

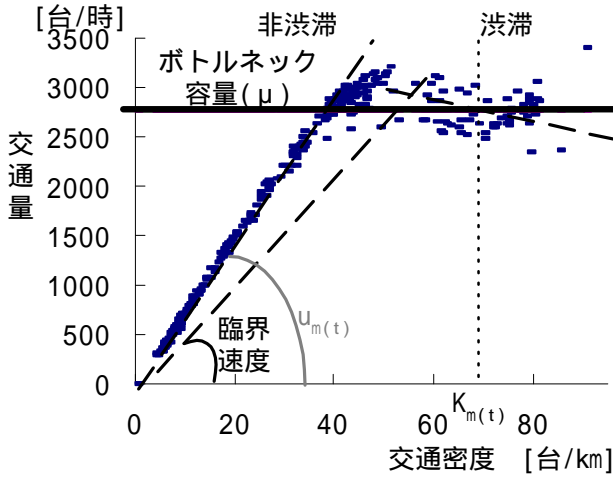


図-5 5.00kp 地点における交通量-密度相関図

### 5. 予約システム効果解析

本効果解析は、分析の容易さのため、起点からの出発時刻に代わってボトルネックからの流出時刻を決定する問題としてとらえて行った。これは、FIFO(First In First Out)サービスであるボトルネックでは流出時刻が決まれば流入時刻が決まり、流入時刻からフローインディペンダントな移動時間を引けば、起点からの出発時刻も決まるからである。

#### (1) 検証対象とした渋滞

表-4に、検証対象とした渋滞の概況を示す。この渋滞は、休日に関越自動車道で発生し、渋滞長が長く、渋滞発生時間中の渋滞先頭位置がほぼ一定であるとの条件で選定した。

図-5に、5.00kp地点における感知器データに基づく交通量-密度相関図を例示する。各道路区間において、交通量-交通密度相関の分布の疎部へ原点から直線を引き、その傾きを臨界速度とした。また、非渋滞時および渋滞時の分布をそれぞれ直線近似し、自由流速度  $u_{m(t)}$  とボトルネック容量  $\mu$  に対応する渋滞側の交通密度  $k_{m(t)}$  を推定した。ここに、 $m$

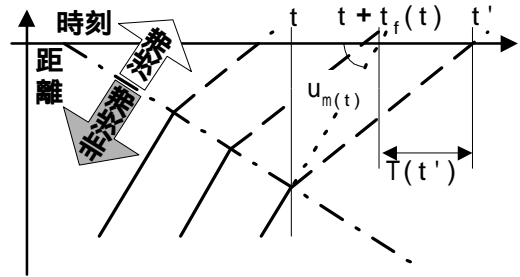


図-6 渋滞・非渋滞の時間と距離との概念図

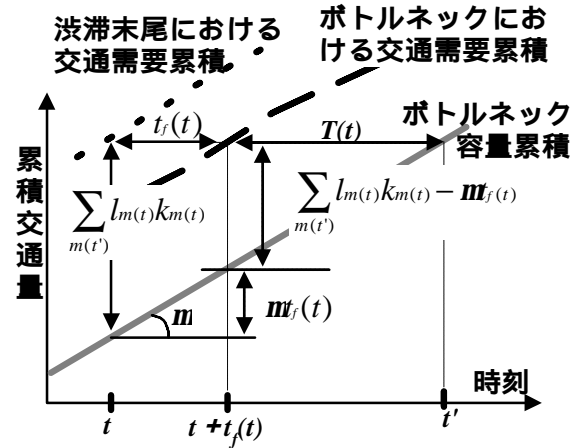


図-7 累積交通需要曲線の推定概念図

( $t$ )は時刻  $t$ における渋滞区間を示す添え字である。

図-6に、渋滞・非渋滞の時間と距離との概念図を示す。時刻  $t$ に渋滞末尾に到着した車両  $i$ が、そこからボトルネックに到着するまでに要する時間は、もし渋滞が発生していなければ次式の  $t_f(t)$ となる。

$$t_f(t) = \sum_{m(t)} \frac{l_{m(t)}}{u_{m(t)}} \quad (1)$$

ここに、 $l$ は区間長を示す。

渋滞末尾の需要を表す「渋滞末尾における交通需要累積曲線」を  $t_f(t)$ だけ右にシフトさせるとボトルネックにおける需要となる。

渋滞時には、速度が  $u_{m(t)}$ から渋滞流中の平均速度へと低下し、遅れ時間  $T(t')$ が発生する。ここに、

$$t' = t + t_f(t) + T(t') \quad (2)$$

である。

$$T(t) = \frac{\sum_{m(t')} l_{m(t')} k_{m(t')} - m_f(t')}{m} \quad (3)$$

図-7には、図-6と同様の状況を累積交通量曲線により示す。遅れ時間  $T(t')$ は、時刻  $t$ において車両  $i$ からボトルネックまでの区間に存在する車両台数から、 $t_f(t)$ の間にボトルネック容量  $\mu$ で捌

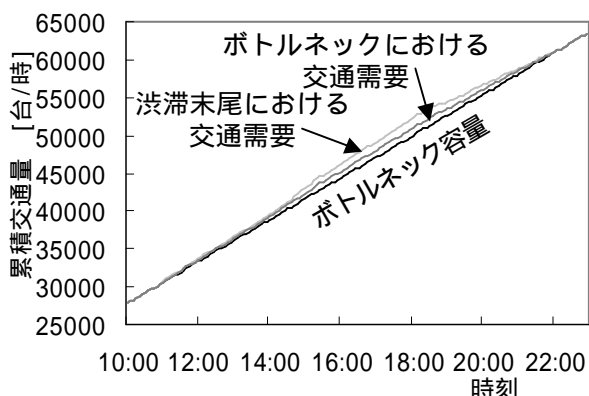


図-8 ボトルネックと渋滞末尾における交通需要

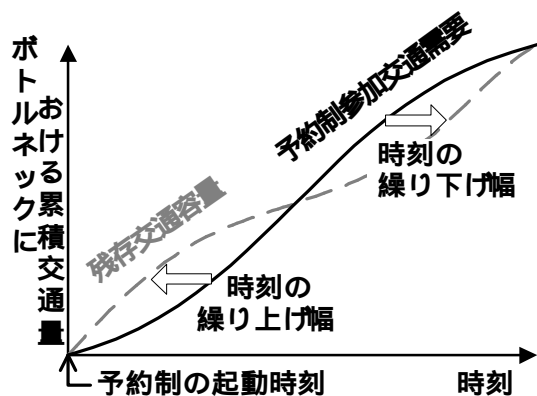


図-9 出発時刻の調整幅の算定概念

ける分を差し引いた台数が、ボトルネック容量  $\mu$  で捌けるまでの時間として推定できる。

図-8 に、ボトルネックと渋滞末尾における交通需要の関係を示す。この渋滞の最大遅れ時間は33分、総遅れ時間は9,900[台/時]であったと推定された。

## (2) 最大調整時間と参加率の関連

予約制による交通状況の変化を数値シミュレーションにより推定し、渋滞を回避するためのボトルネック流出時刻調整時間と予約制参加率との関係を解析した。なお、以下においては、予約制参加率は、時間的に一定であると仮定した。

### a) 出発時刻調整の概念

図-9 に、ボトルネック容量から予約制不参加交通需要を除いた残存交通容量、すなわち予約制参加者に割り当てられる容量の累積と、予約制参加者の需要の累積を示す。両曲線に囲まれた面積が出発時刻の総調整量であり、予約制参加者の需要を調整し残存交通容量の曲線に一致させると、需要と容量が均衡し、渋滞発生を回避できる。両曲線の時間軸方向の差が渋滞を発生させないための、最小限の調整時間となる。

累積を開始する時刻、すなわち予約制起動時刻

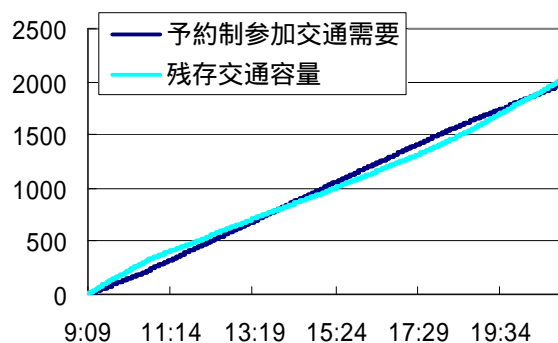


図-10 交通量累積曲線(予約制参加率 30%)

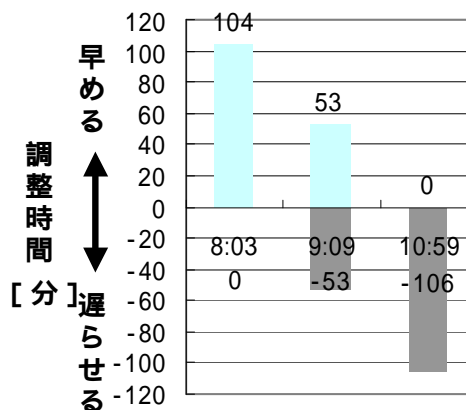


図-11 予約制起動時刻と最大調整時間(予約制参加率 30%)

は、渋滞の発生時刻と一致させる必要はなく、出発時刻の総調整量、あるいは調整時間の最大値等を基準として最適化する余地がある。図-10 に、検証対象渋滞において予約制参加率 30% の場合についての交通量累積曲線を示す。予約制起動時刻により、予約制参加交通需要の累積曲線が変化し、それによってボトルネック容量と予約制不参加需要との差である残存交通容量の累積曲線も変化する。

図-11 に、予約制起動時刻と最大調整時間との関係を示す。起動時刻が 9:09 の場合は、渋滞発生前に需要管理を始める例で、出発時刻の繰り上げ調整に続いて繰り下げ調整を行うことになる。すなわち、需要の発生を時間軸上で左右に平準化することを意味する。これに対して起動時刻が 10:59 の場合には、渋滞発生とほぼ同時に需要管理を開始するため、出発時刻の繰り下げのみが選択肢となる。すなわち、需要を時間軸上で右方向にのみ平準化することになり、その結果として前者の起動時刻と比較して、出発時刻の最大調整値および総調整量が増大する。一方、8:03 の時にはボトルネック流出時刻を遅らせる時刻調整はなく、逆に 10:59 の時には早める時刻調整がない。そこで、最大調整時間を最小化するように、出発時刻の繰り

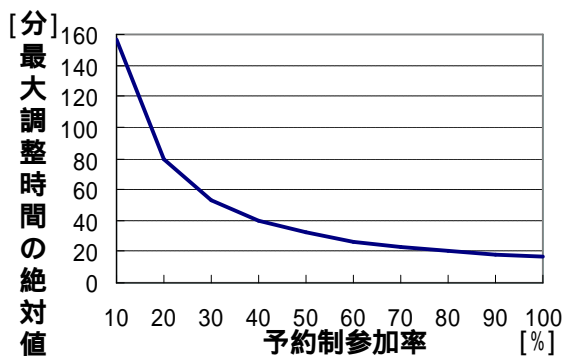


図-12 最大調整時間の最小値

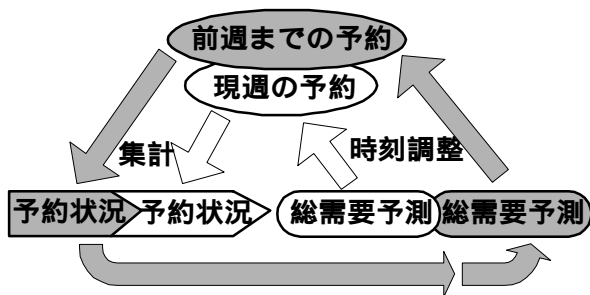


図-13 予約制のシミュレーションフロー

上げ幅と繰り下げ幅を等しくした結果，9:09 が最適な起動開始時刻となった。

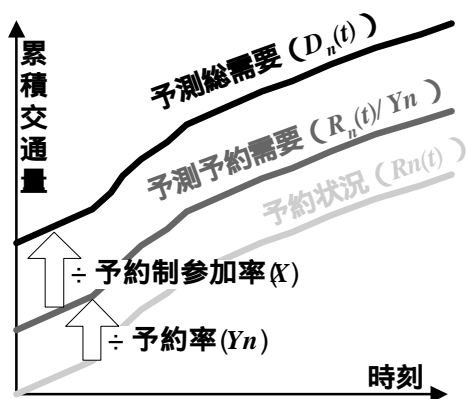
#### b) 最大調整時間と参加率の関係

図-12 は，前述の方法で最適化した最大調整時間を，各参加率ごとに示したものである．同図上の点は各参加率において需要と容量が一致して，渋滞が発生しない状態に対応している．同図から参加率が 90% でも，最大で 18 分調整する必要があることが分かる。

#### (3) 交通需要の予測誤差の影響評価

本項においては，予測時点までの予約状況に基づいた交通需要予測を前提として，予測誤差が予約制の実施効果に与える影響を評価する。

一方，すでに現状においても，過去 3 ヶ年の実績データに基づいて，渋滞発生予測が行われている<sup>5)</sup>．したがって，実際には予約状況に加えて実績データも需要予測に反映させることになるため，予測精度は本項における解析結果よりも，さらに良好になり得ると期待される。



#### a) シミュレーションの構成

図-13 に，予約制のシミュレーションフローを示す．利用予約制適用当日の 1 ヶ月前から予約の受付を開始し，予約の集計を 1 週間周期で前日までの計 5 回行うものと想定した．図に示すように需要予測は，現週までに蓄積された予約状況を基に行う．渋滞を発生させないようなボトルネック

流出時刻調整は，予約を行い受付時刻の確定した予約者，つまり前週までの予約者は予約制不参加者（固定層）として扱い，現週の予約者に対してのみ行った．なお，本シミュレーションの参加率は，45%と設定した．この値は，アンケートにおける予約条件の組み合わせのうち参加率が最大となる，割り増し率および割り引き率がそれぞれ 20%であるときについて，最大限 120 分の時間調整を受け入れる層の全体に対する割合である．

#### b) 需要予測

図-14 に，需要予測の仕組みを示す．予約制実施日の  $n$  週前において，予約制実施日の時刻  $t$  までの総交通需要を下式で予測すると想定した．

ここで， $D_n(t)$  は  $n$  週前に推定された時刻  $t$  までの総交通需要， $R_n(t)$  は同様に時刻  $t$  までの累積予約数， $X$  は予約制参加率， $Y_n$  は最終的な予約数

$$\hat{D}_n(t) = \frac{R_n(t)}{\hat{X}\hat{Y}_n} \quad (4)$$

に対する  $n$  週前までの累積予約数の割合であり， $\hat{\phantom{x}}$  は予測値を示す．

$X$  と  $Y_n$  の予測値は， $R_n(t)$  の動向に基づいて先験的に設定されることになる．ここでは， $X$  と  $Y_n$  の想定値に平均値 0 の正規乱数を加え，予測誤差の発生を模擬した．なお，予測精度は予約数の増加につれて改善されると期待できるため，上記の正規乱数の標準偏差を予約制実施日に近づくにつれて減少させた．すなわち，予約の発生過程が二項分布に従うと仮定すると式(5)により評価される  $R_n(t)$  の標準偏差  $SR_n$  を， $X$  と  $Y_n$  の予測誤差の標準偏差として設定した．

なお，評価シミュレーションにおいては，予約発生過程における確率的変動以外の予測誤差発生

$$SR_n = \sqrt{D_0(t)(XY_n)(1 - XY_n)} \quad (5)$$

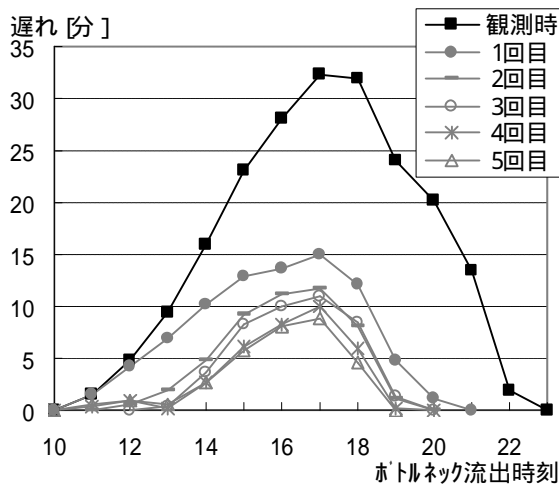


図-15 遅れとボトルネック流出時刻

要因を考慮し、この標準偏差  $SR_n$  の 3 倍の値を  $X$  と  $Y_n$  の予測誤差の標準偏差とした。

c) 需要予測誤差に対する余裕量 (マージン)

交通需要が実際より過小に予測され、それに基づいて需要の平準化が行われると、渋滞が発生してしまうことになる。したがって、実務的には予測誤差を見込んで交通需要を割り増す、あるいはボトルネック容量を割り引く必要がある。

本シミュレーションにおいて総交通需要は、 $n$  週前に推定された時刻  $t$  までの累積予約数  $R_n(t)$  から式(4)のように推定した。この時に、確定値  $R_n(t)$  以外の予測値  $X$ 、 $Y_n$  の予測誤差が、総交通需要  $D_n(t)$  の推定に与える影響として、 $D_n(t)$  の予測誤差の標準偏差  $SD_n(t)$  を、 $X$  と  $Y_n$  が独立であるとの仮定のもとに式(6)により評価し、ボトルネック容量からマージンとして差し引くモデルを想定した。

$$SD_n(t) = \frac{\frac{R_n(t)}{Y_n} \times \sqrt{X^2 S_{Y_n}^2 + Y_n^2 S_X^2 + S_X^2 S_{Y_n}^2}}{XY_n \times \sqrt{XY_n^2 + \left( \sqrt{X^2 S_{Y_n}^2 + Y_n^2 S_X^2 + S_X^2 S_{Y_n}^2} \right)^2}} \quad (6)$$

ここで、 $R_n(t)/Y_n$  は  $n$  週前時点での予約制参加需要、 $S_X$  は  $X$  の標準偏差、 $S_{Y_n}$  は  $Y_n$  の標準偏差である。

ただし、式(6)によりマージンを設定すると、その値が過大になることもあったので、算出した値を基準値として、一定のマージンを確保するためにボトルネック通過時刻の最大調整時間幅が 120 分の値をとるように基準値を調整した。

d) 出発時刻調整

本シミュレーションにおいては a)シミュレーションの流れの項で説明したように、時刻調整を行った前週の予約者は、次週以降には予約制不参加

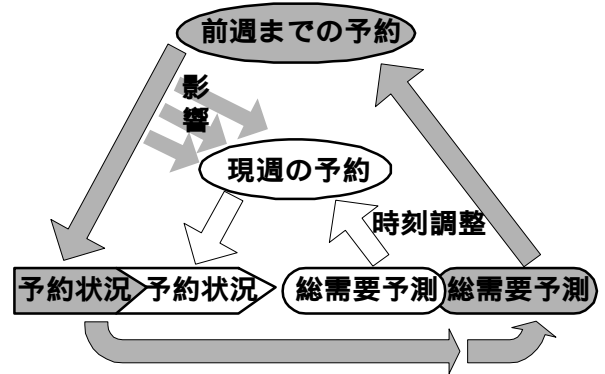


図-16 予約状況に基づく需要管理

者 (固定層) として扱った。そのため残存交通容量は、ボトルネック容量から予約制不参加交通需要、前項で設定したマージン、時刻調整後の予約需要を割り引いて設定した。予約制参加交通需要は、予約制参加交通需要から時刻調整前の予約需要を引いて求める。この処理により、予約制参加者が 2 度時刻調整することはなくなる。そして前項の方法により最適化を行う。この時に利用者の予約受付時間や、ボトルネック流出時刻調整後の指定時間は、実用性を考慮して、1 時間単位で行った。

e) 結果

図-15 は、渋滞による遅れとボトルネック流出時刻との関係を示す。観測時に 33 分であった遅れの最大値が、シミュレーションにおいては平均で 12 分弱へと、60%以上も短縮された。遅れの延べ時間に至っては、9,900 台・時から約 2,200 台・時へと、75%以上も軽減している。

6.まとめと今後の研究展開

需要予測シミュレーションにおいては、今回は基礎的解析にとどまったが、今後は、累積予約率の時間変化や混雑状況と予約動向との相互作用に関する情報等を、列車、航空機等の予約システムの運用実績から収集し、実用的な予約処理アルゴリズムを開発する必要がある。また、同一路線上の複数ボトルネックへの対応も踏まえて検討、発展させたい。

図-16 に、前週までの予約状況の影響を考慮した予約制の流れを示す。現週までに蓄積された予約状況から総需要を予測する。ここで、渋滞情報の提供のような形で前週までの予約状況を提供すれば現週の予約状況は影響を受けることが予想される。

このような利用者の情報に対する反応行動を定

量的に把握し,それに基づいて予測精度を改善し,渋滞予測情報の交通需要管理効果を高めて行く必要がある.そこで,渋滞予測情報に対する利用者動向をより高精度に定量評価するために,インターネットを介して,利用者に渋滞予想を自動的に提供すると同時に,利用者の高速道路利用動向をオンラインで収集する実験システムを構築中である.

本研究を進めるにあたり清宮正好氏,加藤正明氏,杉山愛氏(当時千葉工業大学学生)の参画,また吉井稔雄助手(東京大学生産技術研究所)および日本道路公団の協力を得たことを記し,謝意を表する次第である.

#### 参考文献

- 1) Kuwahara M.,and Newell G.F. : Queue Evolution on Freeways Leading to a Single Core City during the Morning Peak, Proc. of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory,pp.22-40,Boston, 1987
- 2) Kuwahara M.: Equilibrium Queueing Patterns at a Two-Tandem Bottleneck during the Morning Peak,Transp.Sci.Vol.24,No.3,pp.217-229 , 1990.
- 3) 赤羽 弘和, 桑原 雅夫: A Basic Study on Trip Reservation Systems for Recreational Trips on Motorways, The Third Annual World Congress on Intelligent Transport Systems, 1996.
- 4) 社団法人 交通工学研究会:やさしい非集計分析, 1993.
- 5) 日本道路公団:

(1998.X.XX 受付)