土木学会論文集 No. 464／Ⅳ-19, pp. 63~72, 1993. 4

特集論文（社会基盤整備のためのリスク分析）

リスク対応行動を考慮した道路網経路配分

飯田恭敬*・内田　敬**

安定したサービスを供給するために，土木施設においてもリスク管理が必要とされている．本研究は，道路施設におけるリスクとして旅行時間の不確実性がドライバーにもたらす損害を取り扱う．リスクに対応する主体として道路管理者とドライバーを考えてこれら2主体の行動を配分問題―リスク配分問題―としてモデル化する。本稿ではリスク分析の枠組みで旅行時間変動リスクのマネージメント問題を整理し，従来の配分問題を拡張したリスク配分問題を示すとともに，数値計算例を通じリスク配分の特性を示す．

Key Words : *risk analysis, traffic assignment, traffic management, system optimization, effective travel time*

1. はじめに

（1） 道路交通サービスの信頼性

社会的な価値観や目標の変化とともに，道路交通施設の整備・運営に対する社会的な要求も大きく変容しつつある．亀田[1]は都市地震防災の目的について，「安全性」から「信頼性」への変化を指摘しているが，これは道路交通施設の機能面に関する整備目標にもあてはまるであろう．ただしここでの「安全性」とは人命・財産への危害からの解放を，「信頼性」は施設の本来の機能が“支障なく”遂行されることを意味する．同様に岡田[2]は，道路に対する社会的なニーズの時代変化の中で，「信頼性」の重要性を指摘している．これら「広義の信頼性」で想定している施設の機能には，安全性の確保を第一義とし，さらに安定性や快適性なども含めて考えることができよう．すなわち，社会的要求はより複合的に，高度になっている．信頼性は，“支障なく”という言葉に表されるように，時間の次元を考慮にいれて，いつでも，あるいはいつまでに所期の機能を果たすことができる，ということへの要請を端的に示している．

本研究では，道路交通に関して，起終点間の連絡というサービスを，常に，あるいは所期の所要時間内で提供するという意味を持つ「信頼性」について考える．

このような「信頼性」として，任意の時刻における2地点間の円滑な移動の保証水準である連結信頼性[3),4)]や所定の時間内に目的地に到達できる確率である時間信頼性[5)]の概念が既に提示され，信頼性評価が試みられている．

本研究の問題意識は，システム工学におけるような狭義の「信頼性」評価にとどまらない．都市圏などの道路システムの場合には，ネットワークの冗長性が保証されることが多いから，日常的な道路利用においては，2地点間の連絡機能の途絶（システムダウン）そのものが問われることは希であり，むしろ所要時間の長さやその安定性が問われる．したがって「信頼性」の評価には，許容所要時間という，それ自体では決して自明でない基準を検討の対象とする枠組みを必要とする．さらに，交通の所要時間は管理者が提供する道路施設，管理運用のみで定まるのではなく，交通需要や運転行動といった道路利用者の行動との相互作用によって定まるという特徴を持つ．多数の（計画者が制御困難な）利用者の行動を考慮する必要があること，施設の機能レベルを評価するのは最終的にはそのような利用者である，という点に注意しなければならない．すなわち，システム工学における狭義の「信頼性」のように厳密かつ明確に定義されるシステムのみならず，システムのパフォーマンスに関与する主体が複数存在するために行動学的な相互作用を内包したシステムのモデル化が要請される．

（2） リスクマネージメントとリスク分析

上述の意味でシステムの信頼性を評価・選択しマネージメントすることは，裏返せば，マネージメントの結果の良否をリスク（予測・評価の適否，結果の変動，もたらされる損害など）として認識し，受容することにつながる．このように考えると，道路交通のマネージメントはむしろリスクマネージメントとして捉えることが有効である．そこで本研究では，リスク分析の枠組みに依って，道路交通のマネージメント問題にアプローチすることを試みる．

リスク分析とは，リスクマネージメントのための科学的な方法論を総称したものである．これは，「単に被害の発生確率あるいは期待値を算出するための手法ではない….価値観や利害の異なる複数のグループの存在する状況下で，不確実性を持つ事象を取り扱う際にどのよう

*正会員　工博　京都大学教授　工学部交通土木工学教室
（〒606-01　京都市左京区吉田本町）
**正会員　工修　京都大学助手　工学部交通土木学教室

に調整していくか....合意形成のための一つの判断材料の提供を意図」（市川等[6]）した枠組みであり，「主体」を鍵概念として複雑な問題を明確にしようとするものである．

本研究では，道路交通サービスの信頼性評価の問題を，リスク分析の観点にたった配分問題として考える．従来の配分問題をリスク分析的な観点で拡張して「リスク配分」と呼ぶこととする．

リスク分析の枠組みで問題整理を行う目的は，①主体の概念を明確にすること（誰が行動し，誰が評価するのか？），②ドライバー行動・旅行時間の不確実性を明示的に考慮すること，にある．

リスク配分では「主体」として，道路サービスを提供し信頼性（旅行時間変動）の良否ーリスクーをマネージメントしようとする行動主体（管理者・計画者）と，道路サービスを享受すると同時に旅行時間変動に伴う損害にさらされる被害客体（ドライバー）という2主体を考える．そして，リスク配分の2類型としてリスクシステム最適配分（*RSO*）とリスク利用者均衡配分（*RUE*）を提示する．不確実性への事前の対応策として，渋滞の発生を抑制して旅行時間の変動を小さくし，あるいは渋滞が発生したとしてもその損害を小さく抑えるような経路交通量配分—管理者・計画者の行動目標ーがリスクシステム最適配分である．一方，リスク利用者均衡配分は，ドライバーの主体的な交通行動の結果と位置づけられる．これら2つの配分概念を考えることによって，道路交通サービスのリスクマネージメントに関する議論の材料を提供することを意図している．

本稿では，まず2. でリスク配分問題のように人間行動をその対象に含む場合のリスク分析の枠組みを示し，3. でリスク配分問題の定式化を行う．4. では，簡単な例題を示してリスク配分モデルの表現性・適用性を検討する．最後に5. で，本稿の結論と今後の課題をまとめる．

2. リスク配分の枠組み

道路サービスのリスクマネージメントの一例として，旅行時間変動の管理を取り上げ，リスク分析の枠組みで整理する．

（1） リスクの同定

リスク分析の枠組みにおいて「主体」の概念が重要な役割を果たす[7]．“何がリスクか”を同定するにもまず，

・誰がリスクを被るのか【被害客体】

・誰がリスクをコントロールするのか【行動主体】

を明らかにしなければならない．本研究では，被害客体としてドライバーを，行動主体として管理者を考える．

管理の対象となるリスクとは，行動主体の行動如何で損害をコントロールできるものであり，そこに不確実性が介在するものである．被害客体がリスクと考えるもの

表—1 リスク認知に影響する因子（甲斐[8]による）

①曝露の随意性	（自発性／制御性）
②曝露による便益	（便益の大きさ／公平さ）
③馴染み	（人為性／新規性）
④確率分布	（空間的な分布／頻度と結果）
⑤障害の形	（重篤度／発現の時間分布／子孫への影響）

を，そして行動主体が制御できる／しなければならないリスクを明らかにすることがリスクの同定である．

何をリスクと認知するか，あるいは，あるリスクが許容できるか否かは，社会経済的な環境，被害客体の意識，行動主体（評価主体）の立場に依存して，空間的にも時間的にも変化する．例えば損害の内容を人命（死亡リスク）としたとき，表—1に示す因子が影響する[8]．表—1に示した因子分類は，⑤を，

⑤被害の形態（損害の大きさ，損害発生の時間分布，他のシステムへの波及の程度）

と読み換えることによって土木計画の文脈においてもあてはまる．例えば，水害のリスクのように，「安全性」と結びついた伝統的なリスク概念は，一旦発生すれば大きな被害を住民が非自発的に受けるという性質を持つとともに，管理者は制御する能力も責任も有していると認識されているために重要視されると解釈できよう．

一方，本研究で取り上げる道路交通における旅行時間変動リスクは，道路の利用はドライバーが自身の便益を求めて自発的に行うものであることと，ドライバーの被る損害が生命や身体に影響するものでは無いという点で大きくはないことから，直感的に受け入れられ易いリスクの概念にはなじまない．しかし，時間損失を経済的・心理的費用として重視するように社会的な価値観が変化してきている．また，旅行時間変動リスクは，個々のドライバーの損害は小さくとも社会全体でトータルすると巨額になる．したがって，従来は個人的に対処すべきとされていた，渋滞などによる旅行時間変動のような日常的（潜在的）リスクであっても，社会的に管理すべきリスクと考えて，道路サービスの信頼性を高めるような効率的な交通管理方策を探ることが必要である．

（2） リスク対応行動の決定

リスクを，不確実性と不確実な事象によってもたらされる損害，と考えると，リスク対応行動の決定問題は最小化問題としての定式化が可能である．ただし，行動主体と被害客体が異なる場合には，リスクの不確実性の要因として被害客体がとるリスク対応行動を考慮せねばならない．一般的に，行動主体と被害客体の間で，互いの行動に関する情報に不完全性が存在すると考えると（他者の行動が予見可能あるいは制御可能な場合も含めて一般化が可能である），行動主体（主体1）は被害客体（主

体2）の行動を直接的な制御の対象とはならない環境条件 $\tilde{A}_2$ として認識（予測）し行動決定せざるを得ない．被害客体の行動を予測する際には，被害客体（主体2）も自ら何らかのリスク対応行動をとるであろうことを考慮して対称的に考える必要がある．すなわち，主体2も主体1がとるであろう（と主体2が認識する）行動 $\tilde{A}_1$ を環境条件として，自らのリスク評価関数を最小化するべく行動を決定する．したがって，次式のような相互決定関係を有する系となる．

$$\begin{cases} \min\limits_{A_1} R_1 = R_1(C_1(H, A_1|\tilde{A}_2, \theta), P(H|A_1, \tilde{A}_2, \theta)) \\ \min\limits_{A_2} R_2 = R_2(C_2(H, A_2|\tilde{A}_1, \theta), P(H|A_2, \tilde{A}_1 \theta)) \end{cases} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，A_i：主体 i の行動，
$\tilde{A}_i$：$j(\neq i)$ が認識する i の行動，
R：リスク，
H：危険事象，
θ：環境条件，
$C(H, A_i|\cdot)$：リスク対応行動 A_i を取ったときの，H による損害額，
$P(H|\cdot)$：H の生起確率．

損害 C は，損害の直接原因となる危険事象 H のみならず，リスクに対応してとられた行動 A_i の関数である．

それぞれの主体は，リスク環境内で行動することによってリスク環境へ作用を及ぼすとともに，リスク環境から情報を獲得していく．こうして得られた私的な情報に基づいて各々の行動が決定される．このような相互決定系においては，行動主体の目的関数が被害客体の行動に依存しているが，これを直接的に制御することはできない．行動主体は自らのリスク対応行動によってリスク環境，とりわけ被害客体が有する情報を操作することを通じて，間接的に被害客体の行動，さらにリスクのパフォーマンスを操作することができる．

リスクの評価・対応行動の決定方法，すなわちリスク関数 R のタイプは，大略，

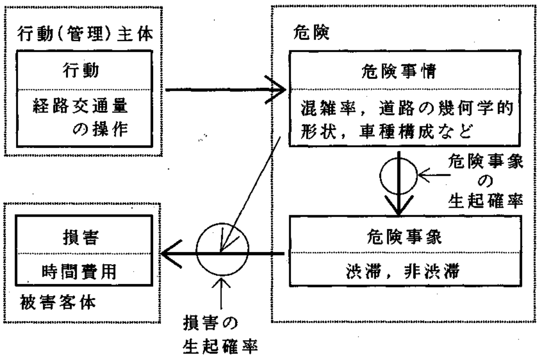
{ある種の期待値を与えるもの
 損害の重篤性を重視するもの

に分類することができる．旅行時間変動リスクのように日常性が高いリスクほど，期待値に基づいた評価関数が用いられることとなろう．

（3） リスク配分

本研究では，既存の道路網を利用して，交通管理によって水準の高い道路サービスを提供することを考える．ここに，高いサービス水準とは，旅行時間に着目して，旅行時間を短く，そしてその変動を小さく維持することを意味とする．リスクの内容としては，ドライバーが移動のために消費する時間を取り上げる．

旅行時間およびその変動（旅行時間変動リスク）は，リンク交通量の関数であると仮定する．管理者は経路交



図—1 リスク配分の枠組み

通量の操作を通じて渋滞の生起確率および旅行時間変動を抑制することによって，ドライバー全体の時間的リスクを最小化するものとする．同時にドライバーも個々に，自身がおかれたリスク環境に対応するものと考える．旅行時間変動リスクを経路交通量の関数と仮定すると，リスク最小化行動は経路交通量決定問題，すなわち配分問題となる．このようにして経路交通量を決定すること，あるいは決定されたネットワーク交通流をリスク配分[9]と呼ぶ．

リスク配分の枠組みは図—1および以下のようにまとめることができる．

【リスク環境の構成要素】
- 主体1（行動主体）—交通管理者
- 主体2（被害客体）—ドライバー
- 施設のパフォーマンス—リンクの旅行時間

【リスク】
- 損害の内容—旅行時間遅れによる時間損失
- 不確実な事象—①【危険事象】渋滞の生起
  ②リンク所要時間の変動

【リスク対応行動】
- 主体1—経路間の交通配分の操作
- 主体2—出発時刻の変更

【リスク対応行動の決定規準】
- 主体1—ドライバーの総時間費用の期待値の最小化
- 主体2—走行に要する時間費用と遅刻ペナルティの期待値の利己的な最小化

不確実な事象について，渋滞を危険事象としてとりあげたのは，旅行時間の変動にともなうリスクを最小化することが本問題の目的であるが，あるひとつのリンク交通量に対しても交通流には渋滞流と非渋滞流の2つの状態があり，旅行時間の分布は渋滞時と非渋滞時で大きく異なるために，それぞれをわけて分布を取り扱う方がモデル化が容易なためである．本研究では，各経路の実旅行時間は，渋滞時，非渋滞時それぞれにおいて正規分布

すると仮定し，渋滞，非渋滞それぞれの生起確率を掛けて重ね合わせることによって実旅行時間の分布とする．

3. リスク配分モデル

（１） リスク配分の前提

ここでは，旅行時間変動に対応して行動する主体として管理者とドライバーを考え，リスク分析的アプローチでそれら主体の行動を記述する交通量配分を考える．

式（２）は管理者とドライバーの行動を表している．リスク配分は管理者の視点に立つが，ドライバーのリスク対応行動を考慮した評価関数を用いて管理者の行動を決定することを考える．

問題の定式化にあたっては以下を前提とする．

【前提条件】

① ある長さの時間帯（例えば１時間）を考えマクロにかつ静的に評価する．定常状態について考える．

② OD 交通量，OD パターンは一定かつ所与とする．出発時刻の変更行動は内生的には取り扱わない．

③ 管理者のとる行動をみてドライバーは最適反応行動をとる．

④ そのこと（③）を管理者は知っている．

前提条件②は，前提条件①（定常状態を考える）を受けている．ドライバーのリスク対応行動である出発時刻選択行動については，時間費用関数において考慮する．前提条件③，④は時間費用関数を構成するための条件である．

２．で述べたように，各主体はリスク環境内で行動することによって情報を獲得していく．情報の蓄積によってその行動も変化していくから，リスク配分問題は，本質的に主体間の動的な相互作用を含む．

しかし，ここでは第１段階のアプローチとして定常状態を考えることとする．交通管理政策変更のタイムスパンに比較して情報獲得過程は十分に短い時間で完了し，ドライバーの行動ならびに経路の旅行時間分布，渋滞確率は安定していると仮定する．道路交通のリスクのうち，定常的な確率分布で記述できる不確実性のみを取り上げる．このような取扱いの計画論的な意味については（５）で述べる．

（２） リスク配分

リスク配分では，旅行時間変動リスクに対して，ドライバーと管理者という２つの主体を取り扱う．そのために，知覚旅行時間分布と実旅行時間分布，実効旅行時間と期待時間費用というそれぞれ互いに類似した概念を区別して用いる．

実旅行時間分布は経路のパフォーマンスとして客観的に観測可能な分布である．一方，知覚旅行時間分布はドライバーが主観的に知識として有しているものである．管理者はドライバーの立場に立った時間費用として実効旅行時間を考慮した旅行時間費用関数を用いる．実効旅行時間とは，ドライバーが出発時刻を決定する際の，トリップに費やす時間と遅刻する確率のトレードオフ関係を考慮したものであり，ドライバーの知覚旅行時間分布に基づいて算出される．そして，管理者の行動決定に際しては，経路のパフォーマンスを実旅行時間分布を用いて客観的に評価して期待時間費用を算出する．これらの関係は以下のようにまとめられる．

実効旅行時間：ドライバーの経路評価値
　$=func.$（知覚旅行時間分布）
期待時間費用：管理者の行動評価値
　$=func.$（実旅行時間分布，実効旅行時間）
　$=func.$（実旅行時間分布，知覚旅行時間分布）

リスク配分として２類型を示す．道路管理者が期待時間費用を最小化するときの目標となる交通流を与えるリスクシステム最適配分と，ドライバーの主体的な判断に基づいた行動に任せるという管理（放任も管理の一形態と考える）の結果に関する管理者の予測を記述するリスク利用者均衡配分である．

リスクシステム最適配分は経路交通量を操作変数とした制御問題の形式を持つ．しかし，経路交通量を現実に操作することは困難であり，むしろリスク分析的観点からの理想的な交通状態を明らかにするための問題と位置づけられる．例えば，情報提供によるドライバーの経路誘導[10]や時差出勤制[11]といったソフトな渋滞対策が近年注目されているが，リスクシステム最適配分は，これら誘導策で目標とすべき望ましい交通流状態のひとつを示すものである．

a） リスクシステム最適配分（*RSO*）

２.（３）で述べたように危険事象として渋滞を取り上げ，式（１）に従って次式のように定式化する．

$$\min_{Q} EC(Q)=\sum_{i}\sum_{X}\sum_{t} q_i t_i(Q)\cdot P(t_i)\,|\,X,Q)P(X|Q) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i} q_i=\text{const.}$$

ここに，EC：期待費用，
Q：経路交通量 q_i のベクトル，
X：経路の状態 x_i のベクトル，
（状態 x_i は経路 i における渋滞の生起，非生起を表す．）
$t_i(Q)$：Q の下での経路 i の時間費用，
$P(t_i|X,Q)$：Q, X の下での実旅行時間 t_i の確率，
$P(X|Q)$：Q の下での状態 X の確率（渋滞確率）．

なお，時間費用は離散変数とし，経路交通量ベクトル

および交通状態（渋滞か否か）に依存して分布が変わるものとする．さらに，渋滞の生起確率も経路交通量ベクトルの関数とする．

式（1）では同時決定系としてリスク対応行動の決定問題を定式化したが，ここでは定常状態を考えているために，相互決定関係は明示的には現れない．しかし，交通管理者が経路交通量を決定するための目的関数に含まれている時間費用はドライバーのリスク評価値である実効旅行時間を用いたものであり，一方ドライバーのリスク評価は非遅刻確率の関数であるために経路交通量に依存するという関係にある．

リスクシステム最適配分の目的関数は一種の総時間費用である．ただし，実旅行時間の確率的な変動を考慮して，経路時間費用に実効旅行時間を用いて期待値演算を行うという点で従来のシステム最適配分の拡張となっている．

b）リスク利用者均衡配分(RUE)

交通を制御せずドライバーの主体的な行動に任せる場合，実現される交通配分は，ドライバーの主観的な情報，すなわち知覚所要時間に基づいた経路選択で与えられると仮定する．経路交通量の関数として与えられる知覚旅行時間分布から実効旅行時間を求め（式（7）），実効旅行時間関数をパフォーマンス関数として用いて等費用配分を行う．例えば，2経路間の配分で，一方が有料の場合，

$$t_{e1}(q_1)+(\text{料金})/(\text{時間価値})=t_{e2}(q_2) \quad \cdots\cdots(3)$$

となるような配分である．安全余裕時間を見込んだうえで等時間になるものとする．

（3） 時間費用関数

時間費用関数は，管理者が客観的に交通流状態を評価するためのものである．したがって客観的に観測される旅行時間を基本として，併せてドライバーの行動も考慮するものとする．ドライバーは，管理者が提供している交通状態に対応して（定常的な知覚旅行時間分布に基づいて）出発時刻を決定していると仮定し，式（2）に用いる時間費用関数 $t_i(Q)$ を以下のように定義する．

$$t_i(Q)=\begin{cases} t_{ei}(Q) & (T_i \leqq t_{ei}) \\ T_i & (T_i > t_{ei}) \end{cases} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに，$t_{ei}(Q)$：実効旅行時間，
T_i：経路 i の実旅行時間，
i：経路の番号．

実効旅行時間 $t_{ei}(Q)$ は，ドライバーの経路評価を，旅行時間変動に起因する遅刻リスクへ対応するためにとる出発時刻選択行動[12),13)]という側面から捉えたものである．実効旅行時間は，トリップのために消費する時間と遅刻によるペナルティの期待値のトレードオフから定められる．到着制約時刻 t_d を与件とすると，次式の L を最小にする出発時刻 t_0^* によって，$t_e(Q)=t_d-t_0^*(Q)$ として与えられる．

$$\min_{t_0} L=(t_d-t_0)+\gamma(1-F(t_d\,|\,t_0)) \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに，γ：遅刻に対するペナルティ（単位：時間），
t_d：目的地に到着すべき時刻（到着制約時刻），
t_0：出発時刻，
$F(t_d\,|\,t_0)$：出発時刻が t_0 のときに時刻 t_d までに到着する確率の知覚値（非遅刻確率）．

t_e は，知覚旅行時間が正規分布 $N[\mu_T^c,\ \sigma_T^{c2}]$（必ずしも真の旅行時間分布には一致しない）に従うならば，

$$\frac{dL}{dt_0}=-1+\gamma\cdot\frac{1}{\sigma_T^c}\cdot\phi\left(\frac{t_d-t_0-\mu_T^c}{\sigma_T^c}\right) \quad \cdots\cdots(6)$$

ここに，μ_T^c：知覚旅行時間の平均，
σ_T^c：知覚旅行時間の標準偏差，
$\phi(\cdot)$：標準正規確率密度関数．

であるから，

$$t_e(Q)=\begin{cases} \mu_T^c(Q)+\sigma_T^c(Q)\phi^{-1}(\sigma_T^c(Q)/\gamma) & (\sigma_T^c/\gamma<\phi(0)) \\ \mu_T^c(Q) & (\sigma_T^c/\gamma\geqq\phi(0)) \end{cases} \quad \cdots\cdots(7)$$

ここに，$\phi^{-1}(\cdot)$：標準正規確率密度関数の逆関数．

で与えられる．$\sigma_T^c\gamma/\geqq\phi(0)$ のときには，遅刻に対するペナルティが相対的に小さいために余裕時間をとること無く，平均旅行時間と実効旅行時間が一致する．

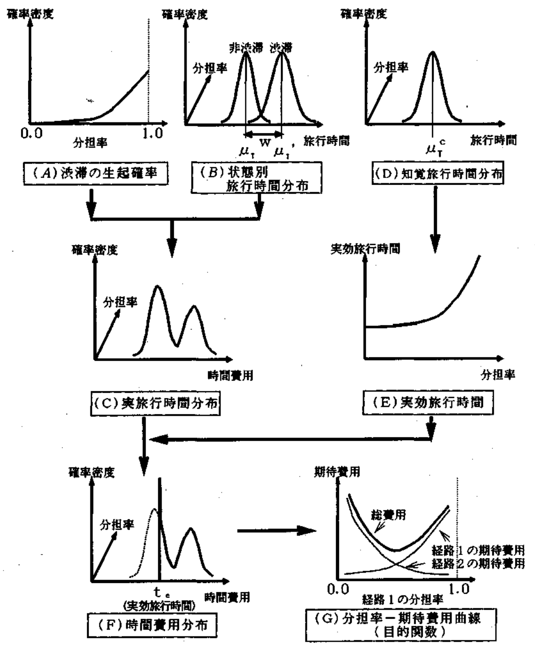
実効旅行時間は，知覚旅行時間の分散が大きくなるとその値も大きくなることから，時間タームで計測したリスク評価あるいは信頼性の指標[14)]と見ることができる．したがって式（7）はドライバーのリスク評価モデルとして解釈できる．実効旅行時間が経路・出発時刻選択行動に与える影響も実証的に確認されている[15)]．

実効旅行時間とは，ドライバーが出発前にあらかじめ見積もる旅行時間である．実効旅行時間を用いる旅行費用関数式（4）における場合分けは，実効旅行時間は出発時刻の決定の際に負担を決定づけられた費用であるために結果として実旅行時間が実効旅行時間よりも短く（$T_i<t_{ei}$）なっても回復不能な費用であることと，実旅行時間が事前に予定していた費用である実効旅行時間を上回った場合（$T_i>t_{ei}$）には追加的な損害をもたらすことを意味している．

なお，式（5）の導入の際に到着制約時刻 t_d を与件と仮定したが，定常状態を考えている本モデルでは最終的に誘導された式（7）を用いる際には，t_d を具体的に知ることを必要としない．前提③の下では，ドライバー

表—2　リスク配分で必要な外生変数，パラメータ

施設のパフォーマンス	渋滞の生起確率		$P(X\mid Q)$
	旅行時間分布	非渋滞時	$N[\mu_T, \sigma_T^2]$
		渋滞時	$N[\mu'_T, \sigma'^2_T]$
ドライバーの行動	知覚旅行時間分布		$N[\mu^c_T, \sigma^{c2}_T]$
	遅刻ペナルティ		γ



図—2　リスク配分の計算手順（1OD2 リンクの場合）

は到着制約時刻下でリスク評価を反映した出発時刻を選んでいるから，到着制約時刻と出発時刻は実効旅行時間によって一意に対応づけられるからである．リスク配分の対象交通となるということは，その時間帯における実効旅行時間を受け入れることを意味する．

（4）　リスク配分の計算手順

表—2 に挙げる関数関係やパラメータを全ての配分交通量 Q（旅行時間分布も配分交通量の関数である）に対して定めることができれば式（2），（3），（4），（7）より，図—2 に示すような手順でリスク配分を求めることができる．（簡単のために 1OD2 リンクで OD 交通量は一定，リンク交通量は OD 交通量に対する割合，すなわち分担率で表す．）

まず分担率ごとの，(A) 渋滞の生起確率 $P(X\mid Q)$ と (B) 渋滞・非渋滞時の旅行時間分布 $P(t_i\mid X, Q)$ から，(C) 実旅行時間分布を求め，一方（D）知覚旅行時間分布 $N[\mu^c_T, \sigma^{c2}_T]$ から，(E) 実効旅行時間 $t_{ei}(Q)$ を計算して，分担率ごとに (F) 時間費用分布 $t_{ei}(Q)$ を求める[9]．リスクシステム最適配分の場合には，この期待値をとって (G) 期待費用曲線を分担率の関数として得て，両経路の期待費用の和を最小とする分担率を解とする．リスク利用者均衡配分では (E) で求めた実効旅行時間 $t_{ei}(Q)$ を用いて，式（3）のように等時間配分となる分担率を求める．

（5）　定式化の前提に関する議論

a）定常状態を想定した取扱い

リスクシステム最適配分では，管理者は各経路ごとの交通量を定める．個々のドライバーは必ずしも利用経路を指定されるものではないが，集計レベルでは管理者によって定められた経路交通量に一致するように行動を制約されるとともに，そうして実現する交通流状態を受け入れることを，このモデル式では要請している．

このような状態は果たして長期間継続するであろうか．利用経路が制約されているために，ドライバーは利己的な対応行動として出発時刻を変更することが予想される．リスク配分の実施は，その前提としていた OD 交通量を変化させてしまうであろう．

したがって，現実への適用，特に具体的な管理方策を検討する際には，出発時刻分布を内生化し動的相互決定構造を表現するモデルが望ましい．しかし，管理指針を検討する場合など，長期的な（例えば年単位の）リスクマネージメントの観点から定常状態を考えることも，大きな意味を持つと思われる．リスク管理の観点で最も理想的な交通管理を行った場合に達成される（すべき）交通流状態であるリスクシステム最適配分と，管理を行わずに放置した場合の交通流状態(リスク利用者均衡配分)を明らかにすること，そして現状と比較することによって，リスクマネージメント的な交通管理に関する議論の材料を提供できる．

b）各主体の有する情報

リスク配分において，管理者は旅行時間変動に関する客観的な情報とドライバーの知覚旅行時間分布を知っており，ドライバーは旅行時間変動に関して主観的な知覚分布しか持たないと仮定している．

管理者が完全情報を有するという仮定は定常状態を想定していることと関係している．定常的に，同じ確率分布に従って旅行時間変動が生じていると仮定できるならば，交通状態の観測によって客観的な分布を知ることができる．またドライバーの知覚分布に関しても，フローを観測すれば実効旅行時間モデルの逆推定によって導くことは不可能ではない．したがって本研究では，定常な確率分布で表現される不確実性のみをリスクとしている．

しかしドライバーの知覚旅行時間分布に関しては議論の余地が大きい．そこで本研究では，走行経験の蓄積によって知覚旅行時間分布は収束することを想定したものの，どのような分布に収束するかについては措いて，客観的な分布と区別して知覚分布を表記している．計画者が知覚分布を知り得るか，また，知覚分布と客観的分布

の関係等，計画の枠組みに関わるリスクについてはこれからの課題である．

4. 数値計算例

リスク配分モデルの表現性・適用性を検討するために，簡単な道路網を設定し，ドライバー行動に関するパラメータを変化させて3ケースの数値計算を行う．

(1) 計算条件

a) 経路特性

配分対象ネットワークは，ODペアを1つだけ持ち，唯一の起点Oと終点Dの間を並行する2つのリンクが結んでいるものとする．一方のリンクは有料で出入り制限された高速道路，もう一方は一般道路とする．

表—2に示したパラメータや関数は，適用対象に関して統計的な調査を行って決定すべきものである．したがってここでは，これらについては従来の研究[9]と同様に便宜的に与える．

それぞれのリンクの非渋滞時の平均旅行時間を与える関数には修正BPR関数を用いる．

$$\mu_{Ti}(V)=t_{fi}\{1+2.62(V/C_i)^5\} \quad (8)$$

ここに，V：経路交通量（台／時）

C_i：経路 i の交通容量（台／時）

t_{fi}：経路 i の自由走行時間(時)

分散 σ_T^2 は，交通量における平均と分散に関する関係式から，次式のように平均値 μ_T の関数として与える[9]．

$$\sigma_T^2=rb^{2-s}(\mu_T-a)^s \quad (9)$$

a, b, r, s：パラメータ

渋滞時に関しては，非渋滞時からの平均的な遅れ時間 W を考え，平均値を $\mu'_T=\mu_T+W$ で与える．分散 σ'^2_T は，μ'_T を μ_T の代わりに式(9)に代入して求める．なお，渋滞による平均的な遅れ時間 W は混雑率の増加関数とする．

$$W(V)=\nu(V/C)^2 \quad (10)$$

ν：経路の性格により決定するパラメータ．

渋滞の生起確率と混雑率の関係については，自然渋滞に関する阪神高速のデータを用いて，渋滞生起確率 p を混雑率 π で回帰分析した．線形回帰と対数回帰を試みた結果，

$$p=\exp(A+B\pi) \text{（相関係数：0.78）} \quad (11)$$

$A=-12.0, \ B=14.2$

が得られている[9]．

経路特性に関しては，表—3に示すように，それぞれの経路に次に示すような特徴を持たせた．

① ゼロフロー時の旅行時間を高速道路は1.0 h (hour)，一般道路は1.33 h とする．

② 渋滞の生起確率ならびに，渋滞が生起したときの非渋滞時からの遅れ時間の大きさはリンク交通量が大きいほど大きくなるが，その程度は高速道路の方が小さい．

③ 配分に通行料の影響を取り入れるため料金は時間換算値で与えて，旅行時間との和を旅行費用として配分の計算に用いる．

表—3 計算条件（経路特性）

		経路1	経路2
OD交通量	V	（助変数）	
通行料	Ch	＊＊	0円
交通容量	C_i	共に 4,320台/h	
自由走行時間	t_{fi}	1h	1.33h
旅行時間分散 式(9)のﾊﾟﾗﾒｰﾀ	r	0.014	0.028
	s	2	2
渋滞による平均遅れ時間 式(10)のﾊﾟﾗﾒｰﾀ	ν	2.0	4.5
渋滞の生起確率*	p_i	$0.2p$	$0.3p$

*式(11)に定義される渋滞確率関数を用いる。
**表4参照。

すなわち，旅行時間および渋滞のリスクについては高速道路が有利であるが，利用者均衡配分においては料金抵抗によって一般道路の方が選好される．

なお，リスク配分の前提としてOD交通量一定を仮定しているが，需要条件の違いがリスク配分に及ぼす影響をみるためにOD交通量を助変数とした．OD交通量は両リンクの容量の和で除して基準化する．

b) ドライバーの行動特性

リスク配分では，客観的な実旅行時間分布とドライバーの知覚旅行時間分布を区別して取り扱う．知覚旅行時間分布と実旅行時間分布がズレていることによる影響，すなわちドライバーが有する「情報の質」が交通量配分に及ぼす影響を把握し，情報の管理の問題を取り扱える枠組みとなっている．

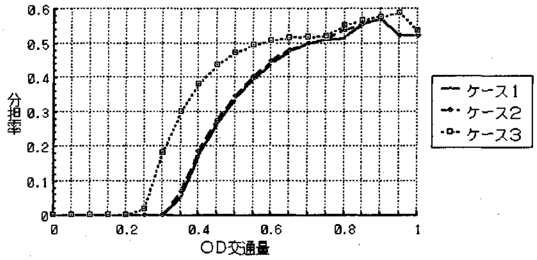
本計算例では，ドライバーの行動変化に影響する要因として，知覚旅行時間分布と高速道路の通行料を取り上げ，モデルの表現性を確認するとともに，システム最適配分の実現可能性について考える．表—4のように知覚旅行時間分散と料金を変えて3ケースの計算を行った．

表—4 計算条件（ドライバーの行動特性）

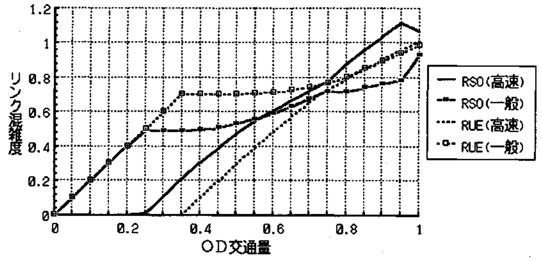
	知覚旅行時間 平均 μ_T^c	知覚旅行時間 分散 $\sigma_T^{c\,2}$	高速道路通行料 CH	遅刻ﾍﾟﾅﾙﾃｨ γ
ｹｰｽ1	μ_T	σ_T^2	2.0h	5.0h
ｹｰｽ2		$(1+p_i)\times\sigma_T^2$		
ｹｰｽ3			0.5h	

記号は表2，表3を参照。

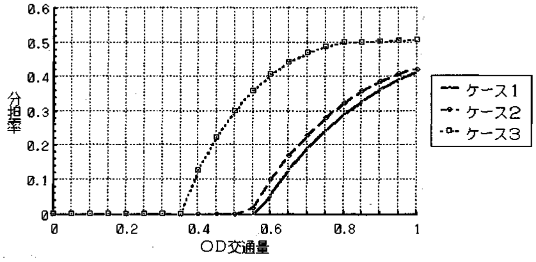
なお，知覚旅行時間分布は必ずしも施設のパフォーマンスを表す実旅行時間分布と一致する必要は無いが，ここでは簡単のためにケース1では非渋滞時の実旅行時間分布をそのまま用い，ケース2，3では非渋滞時の分散を渋滞生起確率で割り増して与える．つまり，管理者は



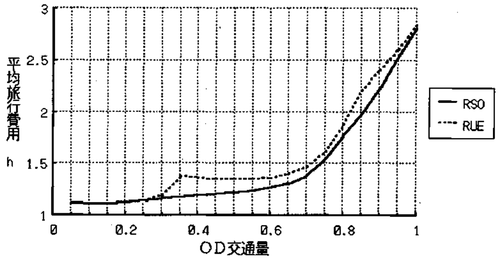
図―3（a） *RSO* における高速分担率



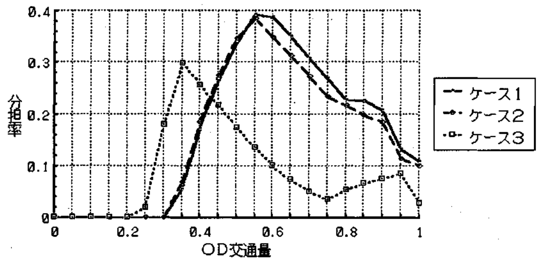
図―4 配分交通量（ケース 3）



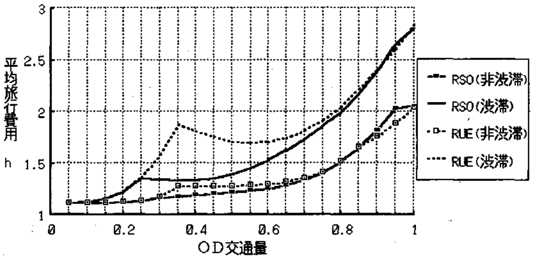
図―3（b） *RUE* における高速分担率



図―5 平均旅行費用の期待値（ケース 3）



図―3（c） *RSO* と *RUE* の高速分担率差



図―6 渋滞時，非渋滞時の平均旅行費用（ケース 3）

渋滞による旅行時間変動に関して完全な情報を有しているのに対して，ドライバーは部分的にしか知らないという状況を考えている．現実のドライバーは経験や情報によって渋滞の生起に関する知識を有しているから，こうして表現されるフロー状態は極端な例ということになる．現実のフローはここで得られるリスクシステム最適フローとリスク利用者均衡フローの間に位置すると考えられる．

c） 計算結果

以上の問題設定のもとでの計算結果を図―3～図―6に示す．

図―3に示す高速道路の分担率（OD 交通量に対する高速道路交通量の割合）と図―4の各リンクの交通量（リンク交通量をリンク容量で基準化し，リンク混雑度として表している）とを見ると，OD 交通量が少なくて渋滞の生起確率が小さいときには，料金抵抗のためにいずれの配分においても高速道路分担率は 0 である．しかし OD 交通量が増すと，リスクシステム最適配分（*RSO*）においては渋滞リスクを避けるために，リスク利用者均衡配分（*RUE*）よりも少ない OD 交通量で高速道路へフローが流れるようになる．そして高速道路の分担率は，*RSO* の方が常に *RUE* に比べて高くなる．

特異な点として，OD 交通量が 0.9 程度のときに *RSO* における高速道路の分担率が突出していることが目を引く．これは，一般道路での渋滞の生起確率が 1.0 に達したことによる．交通量が多く渋滞時と非渋滞時で旅行費用の差が極めて大きいために，渋滞の生起確率がわずかでも小さい高速道路へより多く配分される．しかし OD 交通量が 1.0 になると高速道路の渋滞生起確率も 1.0 に達するため高速道路の分担率は低下する．

一方，*RUE* においては渋滞リスクを考慮しないために，OD 交通量が多くなるに従って，リンクパフォーマンス関数で表される旅行時間の増加と高速道路の通行料のバランスで，なだらかに交通量，分担率は変化する．

高速道路分担率の両配分間の差を見ると図―3（c）のようである．差のピークを示す位置は，*RUE* において高速道路利用が始まる OD 交通量に相当する．この差は *RUE* においては旅行時間分布に関して，不完全な

情報である知覚旅行時間分布を用いていることに起因する．*RSO* は客観的な実旅行時間分布に基づいた交通管理の目標と位置づけられるから，この意味で図―3（c）はドライバーの知覚旅行時間分布の不完全性の指標，あるいは交通管理による改善ポテンシャルと解釈できる．

次に，配分フローが実際に負担する旅行費用を比較するために，両リンクを通行する全ての配分フローについての1台当たりの平均旅行費用をみる．*RSO* と *RUE* の差が最も小さいケース3について示す．

平均旅行費用は経路の交通状態が渋滞か非渋滞かによって異なるので，図―5にはその期待値を，一方，図―6には両リンクとも渋滞した場合および非渋滞であった場合それぞれの平均費用を示している．これは，リンクの状態に応じて異なる平均旅行費用のうちの最大値と最小値を与えるものであり，渋滞の生起確率で重みづけると期待値に一致する．なお *RSO* の場合には，平均旅行費用の期待値に OD 交通量を乗じると目的関数値となる．これらの費用曲線は，料金抵抗によって高速道路の分担率が0である場合に相当する部分と，両方のリンクへの配分時に相当する部分との2つの曲線から成り，その境目が変曲点となる．

図―5で期待値を比較すると，*RSO* は期待費用最小解であるから常に *RUE* よりも小さな値を示す．しかしその差は OD 交通量によって大きく異なる．OD 交通量が 0.25～0.35 のとき，*RSO* では高速道路にフローが配分されるが *RUE* では高速道路が利用されない．そのために *RUE* フローは図―6に示すように渋滞リスクが大きくなることから，期待費用は急激に増加して *RSO* との差が大きくなっている．OD 交通量が増して非渋滞時の旅行時間が増大することによって *RUE* においても高速道路に配分されるようになると，高速道路では渋滞リスクが小さいことから *RUE* の全フローの平均旅行費用は一旦低下し，両配分間での期待費用の差は縮小する．ただし総費用では大きな差が残る．

図―6で非渋滞時の平均費用を比較すると OD 交通量が 0.9 を越える範囲では *RSO* フローの平均費用が *RUE* フローのそれを上回っている．リスクを事前に考慮した交通配分によってたまたま渋滞に遭遇せずに通行したドライバーは，結果的に無駄な費用を負担したこととなる．ただしこの OD 交通量では非渋滞となる確率は小さく，またこれら以外の OD 交通量においてはむしろ *RSO* の方が平均費用が小さい．

渋滞時の費用を比較すると，事前に渋滞リスクを考慮していることから当然 *RSO* の方が平均費用が小さくなるが，OD 交通量が大きく容量に余裕がない場合には *RSO* であっても効果は小さい．逆に，OD 交通量が 0.3 のときのように容量に余裕があると，その効果は極めて大きい．

最後に，*RUE* を *RSO* へと誘導することの可能性をみてみる．図―3においてケース1とケース2を比較して，情報（知覚旅行時間分布）の操作による *RSO* への交通誘導の可能性について検討すると，料金抵抗のために *RUE* では高速道路が利用されない OD 交通量の範囲では，知覚旅行時間の変化の影響は認め難い．しかし OD 交通量が多い領域では，知覚旅行時間分布の変化が配分結果の違いとして表れている．ケース3をこれらと比較すると，通行料の引き下げは分担率曲線を左へシフトさせる効果を持つことが分かる．そして今回の計算条件においては，*RUE* が *RSO* にかなり近づいている．しかしケース1，2と異なり，OD 交通量が 0.75 を越えると再び両配分間の差が拡大している．

以上に示した簡単な数値計算例によって，リスクマネージメント的な交通管理は OD 交通量によって，その効果が異なることが示せた．また，リスク配分モデルは知覚旅行時間や通行料といった交通管理政策を表す変数に敏感なモデルとなっており，「情報の質」や，交通管理のあり方について検討することが可能であることを確認できた．

5. おわりに

本稿では，道路交通サービスの信頼性の良否をリスクとして評価する立場から，リスク分析アプローチによる交通量配分を提案した．具体例として2つのリスク配分モデルを提示し，数値計算によってモデリングの表現性と適用可能性について検討した．数値計算においては，ドライバーが渋滞に関して不完全な情報しか持たない場合を想定した．現実のドライバーは渋滞に関しても何らかの情報を持つはずであるが，客観的な旅行時間分布を正確に知ることは困難である．このような場合に，本数値計算例で示した結果の妥当性が保証される．情報の欠如によってドライバーが大きな損失を被るリスクの存在を指摘できたと考える．

リスクシステム最適配分フローは理論上のフローであり，リスク管理的な交通管理の可能性を示すものに過ぎない．しかし，数値計算例で示したように，ドライバーの知覚旅行時間や高速道路の通行料を操作することによって，利用者均衡配分フローをリスクシステム最適配分フローに近づけることは可能である．現在，情報提供や料金政策によって交通制御を行おうという機運が高まっているが，制御の目標とするフローを設定する際の検討要素として，リスクへの対応も考えねばならない．また即効的な交通制御方策であるランプ制御においてもリスク配分が考えられても良いであろう．ただしシステム最適配分である以上，一部のドライバーの犠牲のもとに総費用を最小化している．したがってドライバー間での負担の公平性にも配慮した配分ルールへの改良，ある

いは上で述べたような方法で利用者均衡フローを誘導することが現実的課題となろう．その際には，知覚旅行時間分布の形成メカニズムに対する理解が必要となる．

本稿で示した結果は，基本的な概念と簡単な数値計算例に留まっている．上で述べたような現実への適用を図るには，いまだ概念の整理に不十分な点も残っており，次に示すようなモデルの改良の作業を通じて改善を図る所存である．

① 時間費用関数に用いられるドライバー行動の記述モデルの精緻化．

② リスク配分の対象をネットワークへ拡張するための方法論の検討．

③ 問題構造を動学化するとともに，ドライバーの知覚形成過程へアプローチを図る．

最後に，本論文をまとめるにあたっては土木学会「社会公共システムの信頼性・リスク分析」分科会における議論から得たところが多いことを記したい．特に，岡田憲夫教授（京都大学防災研究所），小林潔司教授（鳥取大学工学部）には，論文全般にわたる有益なご示唆とともに，いくつかの検討課題を提起して頂いた．本論文はこれらの議論の経過を踏まえてまとめたものである．また，4. で示した数値計算にあたっては泉谷透氏（京阪電鉄株式会社）の多大なる協力を得た．感謝の意を表します．

参考文献

1) 亀田弘行：都市地震防災からみたリスク評価と対策技術，日本リスク研究学会誌，Vol. 2，No. 1，pp. 29～34，1990.
2) 岡田憲夫：道路の整備度指標の諸問題と性能評価法の開発，高速道路と自動車，Vol. 30，No. 3，pp. 17～25，1987.
3) 若林拓史・飯田恭敬：道路網信頼性解析法の開発とライフラインネットワークへの適用性の検討，土木計画学研究・講演集，No. 13，pp. 915～922，1990.
4) 高山純一：異常気象時における道路網の連結性能評法，土木計画学研究・講演集，No. 12，pp. 559～565，1989.
5) 朝倉康夫・柏谷増男・熊本仲夫：交通量変動に起因する広域道路網の信頼性評価，土木計画学研究・論文集，No. 7，pp. 235～242，1989.
6) 市川 新・水野敏之：治水計画とリスクアセスメント，日本リスク研究学会誌，Vol. 2，No. 1，pp. 78～83，1990.
7) 岡田憲夫：災害のリスク分析的見方，土と防災セミナーテキスト，土木学会，1985.
8) 甲斐倫明・斎藤史郎・草間朋子：階層分析法を用いたリスク比較法に関する考察，日本リスク研究学会誌，Vol. 3，No. 1，pp. 123～132，1990.
9) 飯田恭敬・内田 敬・泉谷 透：旅行時間変動による損失を考慮した適正経路分担交通量，土木計画学研究・論文集，No. 8，pp. 177～184，1990.
10) 飯田恭敬：交通管理のハイテク化と都市交通計画，都市問題研究，Vol. 41，No. 12，pp. 3～15，1989.
11) 飯田恭敬・柳沢吉保・内田 敬：通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法，土木計画学研究・論文集，No. 9，1991.
12) Hall, R.W.：Travel outcome and performance：the effect of uncertainty on accessibility, Transpn. Res., Vol.17B, pp.275～290, 1983.
13) 松本嘉司・角 知憲・田辺俊郎：一般化出発時刻に基づく交通の実質消費時間の推定，土木学会論文報告集，No. 337，pp. 177～183，1983.
14) 加藤文教・門田博知・浜田信二：道路の信頼性評価の簡便法，土木計画学研究・論文集，No. 4，pp. 181～188，1986.
15) 松本昌二・白水義晴：旅行時間の不確実性が時刻の指定された物資輸送に及ぼす影響，土木学会論文集，No. 353，pp. 75～82，1985.

(1992. 5. 15 受付)

RISK-MINIMIZED CAR ROUTE ASSIGNMENT STRATEGY CONSIDERING DRIVERS' RESPONSES TO TRAVEL TIME VARIATION

Yasunori IIDA and Takashi UCHIDA

Risk Management, or reducing loses resulting from uncertainties, has been becoming a great concern in infrastructure planning. This paper addresses the risk that drivers suffer in connection with travel time variation. Two agencies, a road traffic manager and drivers, are considered to severally react against the risk, and a model of Risk Assignment is proposed, which determines traffic manager's action to minimize total drivers' risk. This paper firstly depicts the general framework of risk management in traffic management and then specifys the Risk Assignment problem. Numerical examples are presented in order to refine the formulation of Risk Assignment problem.