

都市高速道路ネットワークにおける アベイラビリティについて

Availability of Network System of Urban Expressway

黒田勝彦・瀬賀康浩**・山下智志***

By Katsuhiko KURODA, Yasuhiro SEGA, Satoshi YAMASITA

This paper aims to develop a model to measure the availability of the urban highway road network. The highway road network is simulated by the combination of small units in series and/or redundant sub-systems. The occurrence rate of the traffic accident on the unit is investigated, and the probability distribution of the time for handling the accident is also investigated. The average uptime is defined by the mean time between accident, and the average downtime is defined by the mean time of the time when the congestion due to the accident completely vanishes. The unit availability is defined as the average uptime-downtime ratio. The OD and the network availabilities are defined as the ratio of the traffic volume which can complete the OD-trips per unit time to the total OD-volume.

1. はじめに

国内における主要な輸送機関が鉄道から自動車に移った今日、道路ネットワークにおける交通需要量は増加の一途をたどり、東京・大阪などの大都市においては網の目のような都市高速道路が供用され、またその路線を拡張しつつある。しかしながら、交通量の増加は事故の可能性を増大させ、また事故が起こった場合の交通システムのダウン（いわゆる事故渋滞）は、時間価値を重くみる現在、産業の各分野において多大なる影響を及ぼす。そこで本研究で

は、都市高速道路ネットワークについて、事故が発生した場合の機能停止確率（システムの故障率）と停止機能の回復確率（システムの保全率）の分布を仮定し、それによってシステム信頼性の一つのメジャーであるアベイラビリティを算定する方法を示し、ネットワークモデルを使った数値解析により、ネットワーク全体の機能保持信頼度を評価する方法を提案する。

2. 高速道路ネットワークシステムの構成

（1）用語の定義

a) 故障率

道路において、その本来の機能である「交通疎通機能」が自動車の事故により損なわれた場合、その状態を故障と呼び、一定時間内での故障の発生する回数、または1回の故障が発生する可能性を故障率という。システムの機能停止率、故障を客に見立て

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学科（京都市左京区吉田本町）

** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 交通土木工学専攻 修士1年（京都市左京区吉田本町）

*** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 応用システム工学専攻 修士2年（京都市左京区吉田本町）

たときの到着率という言葉とは同義である。故障率の逆数は平均故障時間間隔 (Mean Time Between Failure, MTBF) である。

b) 事故確率

交通量、道路線形が与えられた場合、1台の車両が一定の割合で事故を起こすと仮定し、その単位トリップ長当りの事故の発生を確率尺度で表現したものを事故確率 P_c という。単位は (回/台) で表される。本研究においては、処理の必要な車線閉塞を起こすものをもって交通事故と呼ぶことにする。

c) 信頼度

狭義の意味としては $R = 1 - P_c$ という形で、上記の事故確率の背反事象の確率である。これは道路利用者 (本研究においては自動車) にとって、ある時間、またはあるトリップ長の旅行を行う場合に事故に遭わずに目的が完了出来る可能性を示すものであるが、道路管理者にとってみれば、自己の管理する交通路が「交通疎通機能」を保持している確率が大きな関心事であるので、この場合の確率は $1 - P_c$ という形で示すことが出来ない。これは、アベイラビリティという尺度で示すことが出来るので、特に断らない限り、広義の意味での信頼度はアベイラビリティと呼ぶことにする。

d) 保全率

道路のある区間で「故障」が発生した場合、車線の一部又は全部が閉塞され、交通疎通機能が低下又は完全に停止し、道路上での渋滞が始まる。ここでは、「渋滞」を機能障害と見なし、後に述べる最大渋滞解消時間を保全時間と呼び、平均保全時間 (Mean Down Time, MDT) の逆数を保全率と定義する。

e) 定常アベイラビリティ

長時間システムを使用したときの単位時間当りのシステムの動作時間の期待値。本研究での信頼度の意味としてはこの概念が最も適当であるので、次章以降のアベイラビリティは全てこの定常アベイラビリティ A は、以下の式で説明される。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad \dots(1)$$

但し、MTBF (Mean Time Between Failure) : 平均故障時間間隔

MDT (Mean Down Time) : 平均故障時間

である。

(2) 道路ネットワークのユニット分解

ユニットとは道路の部分において、アベイラビリティ算定の単位となる区間をいう。この区間の設定においては、以下の条件を満足する必要がある。

- ① 道路線形が一樣であること。
- ② 平均保全時間がその区間内ではほぼ一定と見なせる範囲であること。

このような単位区間が設定されると、例えば、図1(a)で示される長さ L の一樣道路は図1(b)に示すようなユニットのシリーズとして表すことができる。

3. ユニットのアベイラビリティ

(1) ユニットの故障率 λ

2. (1) で定義したように、故障率は道路管理者側からみた場合の道路の交通疎通機能の停止率で、ユニットごとに異なる。今、2. (2) で定義したユニットの内、 i 番目のものを考える (これをユニット i と呼ぶことにする)。一般に故障率は時間 t の関数であるから、これを $\lambda_i(t)$ と表す。

さて、 i 番目のユニットの故障時間間隔の確率密度関数を $f_i(t)$ とすると、ユニットが動作を開始してから時間 t の間、故障が発生しない確率 $R_i(t)$ をユニットの信頼度と呼び、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R_i(t) &= \int_0^t f_i(t) dt \\ &= 1 - \int_0^t f_i(t) dt \quad \dots(2) \end{aligned}$$

このとき、ユニットの故障率 $\lambda_i(t)$ は次式で定義される。

$$\begin{aligned} \lambda_i(t) &= \left| \frac{dR_i(t)}{dt} \right| \\ &= f_i(t) / R_i(t) \quad \dots(3) \end{aligned}$$

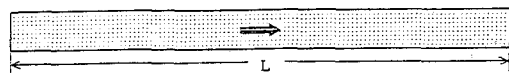


図1(a)

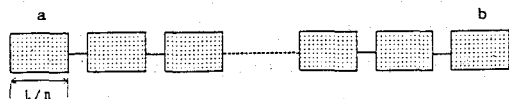


図1(b)

式(3)は時間 t までに故障を発生していないユニットが次の微小な時間間隔で故障を発生する確率を意味している。

さて、交通事故の発生は通常ランダムに起こるものと考えられるが、実際、ある高速道路における一定の区間(ユニット)での事故発生の時間間隔分布を整理したものが、図2である。場所によっては、図2のようなきれいな指数分布に従わない例も見られるが概ねこのような指数分布に従うと考えて良い。このことから、本研究では、事故の発生時間間隔は指数分布に従うと仮定する。今、平均事故発生時間間隔を $1/D_i$ とすると、事故発生時間間隔とユニットの故障時間間隔を同一と定義したので、故障時間間隔 t の確率密度は

$$f_i(t) = D_i \cdot \text{EXP} \{-D_i \cdot t\} \quad \dots(4)$$

となる。式(4)を式(2)、式(3)に適用すると、

$$\lambda_i(t) = \frac{D_i \cdot \text{EXP} \{-D_i \cdot t\}}{1 - [1 - \text{EXP} \{-D_i \cdot t\}]} = D_i \quad \dots(5)$$

となり、 $\lambda_i(t)$ は時間 t とは独立な定数となる。よってこれ以降 $\lambda_i(t)$ は、

$$\lambda_i = D_i \quad \dots(6)$$

と表すことにする。

ところで、MTBF ($1/D_i$) の意味として、「道路のある区間(ユニット i)で交通事故が発生した場合、道路の疎通機能が停止する」という仮定

を設けると、MTBF は平均事故発生時間間隔に等しいと解釈できる。このことから、 $\lambda_i = D_i$ は、単位時間当りの平均事故発生件数とも考えられるので次式のようにも与えられる。

$$\lambda_i = P_{ci} \cdot Q_i \quad [\text{件/時}] \quad \dots(9)$$

但し、 P_{ci} はユニット i における事故確率、 Q_i は平均時間交通量である。

(2) ユニットの保全率 μ

今、ユニット i において車線閉塞が生じるような交通事故が起こったとする。このとき、ユニット i が故障を発生させたとみなすことは前述した通りである。さて、このユニットの故障を修理、すなわち、事故処理を行うことによって機能の回復を図ることを考える。この機能回復の作業を信頼性理論に対応させて「保全」と呼ぶことにする。本研究では、図3に示したように、事故が発生してから処理車が現場に到着するまでの時間 d_{i1} と実際に処理作業を行っている時間 d_{i2} を車線閉塞時間 d_i と呼び、次第に渋滞が解消して完全に事故発生以前の状態に戻るまでのトータルな時間 (= 最大渋滞解消時間 τ_i) を保全時間とする。

a. 事故処理車到着時間 d_{i1}

高速道路上のある地点で事故が発生した後、通報を受けて基地から処理車が現場に到着するまでの時間を処理車到着時間と呼ぶが、処理車の走行速度を V とし、基地から現場のユニット i までの距離を L_i とすると、所要時間 d_{i1} は、

$$d_{i1} = L_i / V \quad \dots(8)$$

で与えられる。実際には、交通事情その他の要因により d_{i1} 確率的に変動するものと考えられるが、ここでは平均所要時間を考える。

b. 事故処理時間 d_{i2}

処理車が事故現場に到着し、検証その他の手続きを終え事故処理が完了するまでの時間を事故処理時間 d_{i2} とする。軽微な接触事故等は、事故処理も比較的簡単に行え、従って車線閉塞時間も短い。逆に車両の横転、大破、多重衝突(同一時に同一地点で起こっている限り、複数の車両の事故でも1つのユニットの故障と見なす)等の大規模な事故は、事故処理に時間がかかり、車線閉塞も長時間にわたる。また、事故の件数としては、前者のようなもの

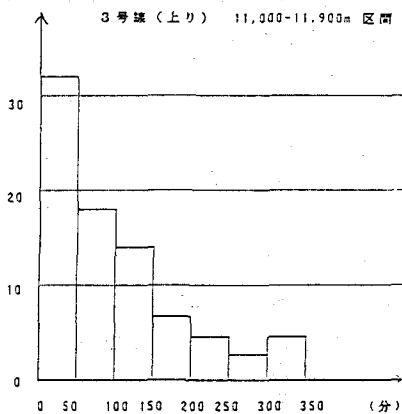


図2 事故発生時間間隔分布

が多く、後者は前者に比べ、かなり少なくなっている。このようなことから、 d_{i2} もまた指数分布が予想される。図4は、首都高速道路における事故処理時間のデータから d_{i1} を各地点で算定し、残りの事故処理時間の分布を調べた一例である。これによると、 d_{i2} はほぼ指数分布をするものと考えて良い。

以上により、車線閉塞時間 d_i は

$$d_i = d_{i1} + d_{i2} \quad \dots(9)$$

であるので、平均 $\{\bar{d}_{i1} + \bar{d}_{i2}\}$ の指数分布を仮定する。

c. 最大渋滞解消時間 τ_i

車線閉塞時間から渋滞解消時間を求める方法としては、波動理論を用いた井上の推定式がある。井上の式によれば、車線閉塞度、及び上流からの交通量が変化しない場合、最大渋滞解消時間 τ_i は、事故を起こした当該ユニット i で生じ、車線閉塞時間 d_i を用いて以下のように表される。

$$\tau_i = \frac{\alpha}{1 - Q_0/Q_c} \cdot d_i \quad \dots(10)$$

但し、 α ：車線閉塞度 $(= (Q_c - Q_a) / Q_c)$

Q_c ：交通容量

Q_0 ：事故直前までの交通量

Q_a ：事故地点における、事故後の交通量

しかしながら、式(10)は、上流からの交通量が変化しない場合を想定したものであるから、ランプ間の距離が長大で、一定の交通量を仮定できる都市間高速道路ならば適用可能であるが、比較的短い区間に出入路ランプ、分合流点が存在する都市高速道路網においては、そのままの適用が困難である。井上は式(10)の発展として、上流側で入路制限を行うことによる交通量変化を伴う場合の渋滞解消時間を求めているが、本研究ではその考えを基にして分合流点ごとに区間交通量が変化する場合の渋滞解消時間を求めた。この算定方法の詳細は紙数の都合上、ここで述べられないが、数値計算結果の一例を示したものが図5(b) (次頁)である。図5(b)は、図5(a)に示すように、事故発生地点の上流側に分流点、合流点、オフランプ、分流点がある場合の事故発生地点における車線閉塞時間 d_i と最大渋滞解消時間 τ_i の関係を示したものである。

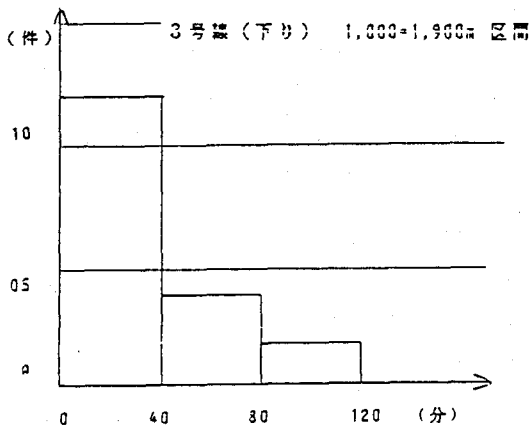


図4 事故処理時間の分布

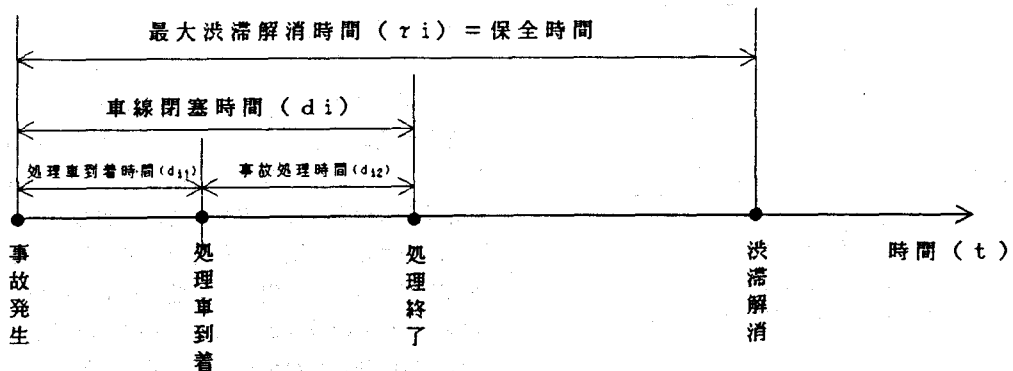


図3 保全時間の内容

以上の様に、各ユニット i における最大渋滞解消時間 τ_i が確定的に算定できると、 τ_i は i の車線閉塞時間 d_i の一価の関数

$$\tau_i = G_i(d_i) \quad \dots(11)$$

として求めることができる。ところで先に示したように、 d_i は指数分布 $\Phi(d_i)$ に従う確率変数と考えられるので、 τ_i の平均 i は

$$i = \int G_i(d_i) \cdot \Phi(d_i) d d_i \quad \dots(12)$$

となる。式(12)より、ユニット i における保全率 μ_i は

$$\mu_i = 1 / \tau_i \quad [\text{件/時}] \quad \dots(13)$$

で与えられる。これは、単位時間当りにユニットを正常に戻すまでの保全件数と考えることができる。

(3) ユニットのアベイラビリティ

路線上の渋滞の解消は、事故発生地点で最も時間

がかかるので、ユニット i の保全率を式(13)で定義した場合、ユニットのアベイラビリティ A_i は式(14)で与えられる。

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{1 / \lambda_i}{1 / \lambda_i + 1 / \mu_i} \\ &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad \dots(14) \end{aligned}$$

ところで、ユニットの内、図7のような分流部ユニットでは、その下流で発生した事故による渋滞が延びてきて車線閉塞を起こし、本来は有していたはずの、別方向への交通疎通機能が失われてしまうことが考えられる。この場合のアベイラビリティは、システムのトータルな使用時間から、分流部ユニットそれ自身の事故によるダウンタイム、及び他の全てのユニットに起因する渋滞の延長による分流点での渋滞解消時間を差し引いたものを、分流部ユニットにおけるアップタイムとみなすことにする(但し、

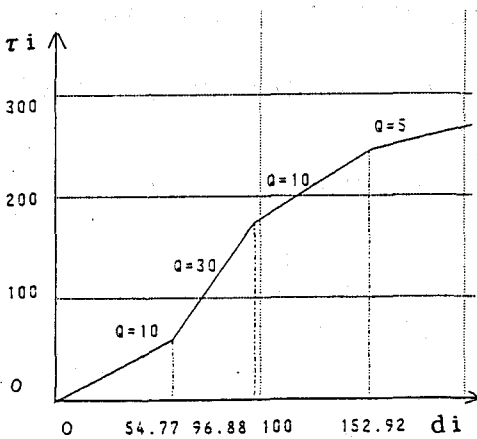


図5(b) τ_i と d_i の関係

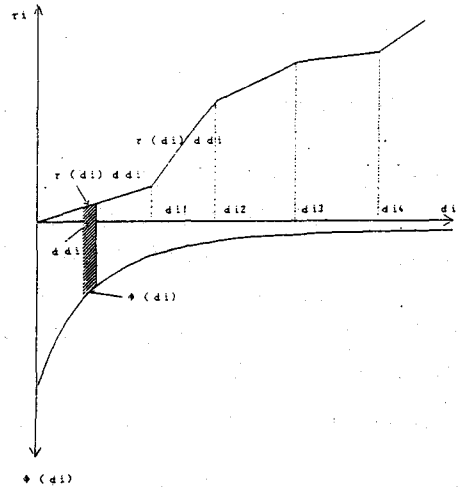


図6 期待保全時間 ($1/\mu_i$) の求め方

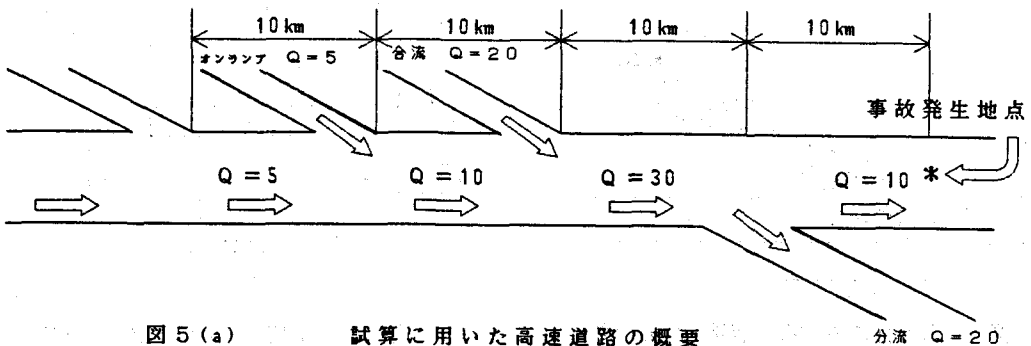


図5(a) 試算に用いた高速道路の概要

この場合、事故が同時に2カ所で起こらないという仮定が必要である。事故は稀現象であるから、この仮定は妥当なものであると思われる)。これの1サイクル当りの平均値を求めるものとして考えてゆけば、システムの使用時間は $(1/\lambda_i + 1/\mu_i)$ 、分流部ユニット自身のダウンタイムは $1/\mu_i$ 、及びあるユニットjのダウンによる分流部ユニットでの渋滞解消時間の期待値は $(1/\lambda_i + 1/\mu_i) \cdot (\lambda_j/\mu_{ij})$ と表すことが出来るから、分流部ユニットのアベイラビリティ A_i は以下の式で示されることになる。

$$A_i = \frac{(1/\lambda_i + 1/\mu_i) - 1/\mu_i - (1/\lambda_i + 1/\mu_i) \sum_j (\lambda_j/\mu_{ij})}{1/\lambda_i + 1/\mu_i}$$

$$= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} - \sum_j \lambda_j / \mu_{ij} \quad \dots(15)$$

但し、 λ_j はユニットjの故障率、 $1/\mu_{ij}$ はユニットjの故障による分流部ユニットiでの平均渋滞解消時間である。 $1/\mu_{ij}$ の求め方は、ここでは省略する。

4. ODアベイラビリティ

(1) 直列路のODアベイラビリティ

ここでいう直列路とは、図1(a)に示すような、構成をいう。さて、各ユニットの保全がそれぞれ独立に行えるものと仮定すれば、ノードaからノードbへのODアベイラビリティ $As(ab)$ は、以下の式で表される。

$$As(ab) = \prod A_i \quad \dots(16)$$

即ち、ユニットアベイラビリティ A_i の相乗積である。これは、直列のユニットシステムを考えた場合、

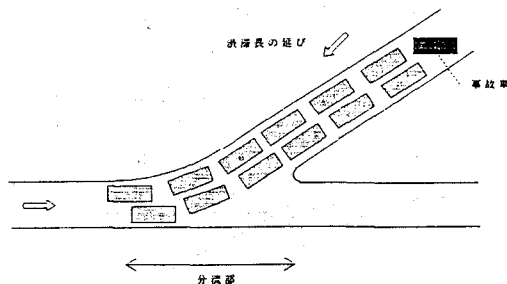


図7 分流部における上流部事故の影響

ユニットのどれか1つがダウンしたとしても、システムは機能しなくなるためである。

(2) 並列路のアベイラビリティ

図8(a)の様な、並列路の存在する場合を考える。この場合も直列路の場合と同様にユニット分割を行って解析を進めるが、分合流部ユニットは3。(3)でそのアベイラビリティを求めた際に他のユニットからの影響を算定しているので、並列路の外におかれるものとする。さて、これも直列路の場合と同様に、各ユニットが独立に保全を行えると仮定するならば、図8(b)の様なシステムのアベイラビリティ $Ap(ab)$ は式(17)のように表すことが出来る。

$$Ap(ab) = \{1 - (1 - As1) \cdot (1 - As2)\} \cdot Aa \cdot Ab \quad \dots(17)$$

ここで $As1$ 、 $As2$ は各々の経路の直列アベイラビリティである。これは、並列システムを考えた場合、経路1、及び経路2のいずれもが同時にダウンした場合に初めてシステムが機能しなくなると考えるためである。

同様に考えて、N重並列の場合は式(18)のようになる。

$$Ap(ab) = \{1 - \prod (1 - As_j)\} \cdot Aa \cdot Ab \quad \dots(18)$$

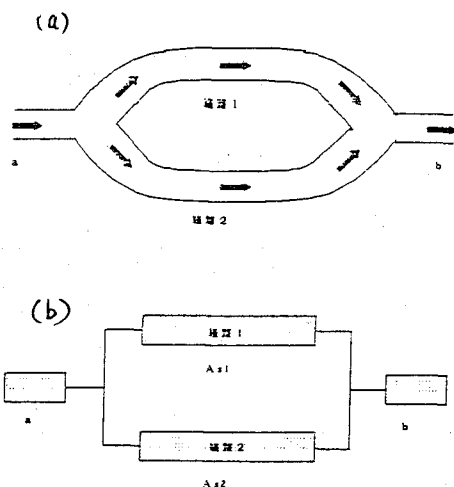


図8 並列ネットワークの分解図

5. ネットワークアヴェイラビリティ

道路網全体のアヴェイラビリティを、ここではネットワークアヴェイラビリティAと呼ぶことにする。さて、通常の装置とは異なり、道路網はOD交通量を流すことが大きな使命であるので、ODトリップが1つでも達成できていれば、ネットワーク全体として全ての機能が停止したことにはならない。そこで、ネットワーク全体を眺める場合に、ODトリップを滞りなく完結したいとする全ての交通需要 $\Sigma \Sigma Q_{ab}$ が、定常的にその目的を何割達成できるかという観点がある。この観点からネットワークアヴェイラビリティを定義すれば次式のようになる。

$$A = \frac{\Sigma \Sigma A_{ab} \cdot Q_{ab}}{\Sigma \Sigma Q_{ab}} \quad \dots(19)$$

6. ネットワークモデルによる数値解析

(1) 概説

図9に示すような、ブリッジ型のネットワークモデルをつくり、表1(a),(b)に示すような各数値をあたえて計算を試みた。ここで用いた仮定は以下の通りである。

- ① 事故確率は各路線の交通量に比例するものとし、道路線形の違いから直線路部と分合流部及びランプ別に、そのユニットへ流入する交通量より算定した。
- ② OD交通量は、市内へ向かう車の多い平日の午前8時から10時頃を想定している。各OD交通量はそれぞれ最短経路を通るものとし、等距離になる場合は等配分になるものとする。
- ③ 事故処理基地は、ランプDに設置されているものと考えた。

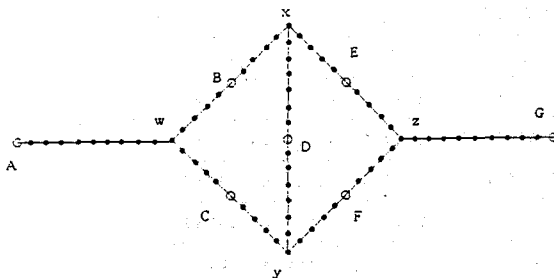


図9 仮想的な道路ネットワーク

のと考えた。

- ④ 各ユニット間の距離Lは500mとした。これは、事故処理車の平均速度を毎分500mとしたことから、この区間内では事故1件当りの平均事故処理時間に対し、影響を及ぼさない範囲と考えたためである。

(2) 各種アヴェイラビリティの算定結果

a) ユニットアヴェイラビリティ

抜粋として、AW間の各ユニットのアヴェイラビリティの算定結果を記す(表2参照)。各アヴェイラビリティは全てパーセントで表示している。これを見て分かることは、同一路線の処理基地に近いユニットと遠いユニットを比較してみて、必ずしも前者が後者より高い数値になっている訳ではないということが挙げられる。このことが顕著に現れているのは、分枝線の下り方向である。これは、中心となる環状部の交通量が分枝線に比して多く、ユニットが環状部に近づく程、渋滞解消時間が長くなるためであると考えられる。

b) ODアヴェイラビリティ

表3に、各ODアヴェイラビリティを示す。これを見ると、枝線の上り方向(起点がA及びGの場合)のODアヴェイラビリティが、下り方向に比べ、かなり小さな値をとっている。長い直列ユニットシステムとなるODトリップ(AE, AF, GB, GC)では、その傾向が著しい。これは、下り線に対する交通量の違いもさることながら、分合流点ユニット

OD	A	B	C	D	E	F	G	計
A	\	5	5	15	5	5	5	40
B	1	\	2	5	2	4	1	15
C	1	2	\	5	4	2	1	15
D	1	2	2	\	2	2	1	10
E	1	2	4	5	\	2	1	15
F	1	4	2	5	2	\	1	15
G	5	5	5	15	5	5	\	40
計	10	20	20	50	20	20	10	150

表1(a) ランプ間のOD交通量

$\alpha = 1.0$, $V = 500.0 \text{ m/min}$, $L = 500.0 \text{ m}$, $d_1 = L/V \text{ min}$
 $d_2 = 25.0 \text{ min}$, $d = d_1 + d_2$, $Q_c = 60.0 \text{ 台/min}$
 $Pc1 = 0.5 \times 10^{-6}$, $Pc2 = 1.0 \times 10^{-6}$ [件/台]

表1(b) 条件として与えた各数値

(W, Z)を通過する際の影響が大きいためでもある。

c) ネットワークアベイラビリティ

式(199)よりネットワークアベイラビリティを求めると、 $A=93.37716$ という結果を得た。これは、通常の機械装置システムのアンアベイラビリティ ($=1-A$) が、 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ のオーダーであることを考えると、システムアベイラビリティという観点からすれば、かなり低い値であるといえるだろう。

7. おわりに

本研究は、都市高速道路網の信頼性を、システムアベイラビリティの観点から評価し、モデルケースをつくって数値解析を行ったものである。

高速道路網の整備計画においてネットワークの信頼性を評価する際、渋滞解消時間から求めた道路ネットワークのアベイラビリティは、その一つの指標とすることができる。道路ネットワークにおいては、交通量が増大すれば、それだけ事故が起こった場合の渋滞解消までの時間が長くなり、システムのダウンに遭遇する確率が高い。逆にアップタイムを長くするためには、バイパスなどをつくって交通量を減らしたり、事故処理基地を増設して保全時間

を短くする必要がある。

道路網の整備計画を行う際、本研究において提案した手法を用いれば、事故処理基地の建設位置を選ぶ際、役に立つものと思われる。また、事故確率のモデル化が確立されれば、新しく道路網を建設する場合にも本研究の手法を利用することができよう。

最後に、本研究の問題点と、今後の課題について述べる。

①道路ネットワークの事故渋滞に対する信頼性のみを扱い、自然渋滞に関しては全く触れていない。都市高速道路においては自然渋滞の影響が大きいため、新しくモデルを開発する必要がある。

②事故の際の迂回交通を算定しなかったため、現実にはそぐわない面が生じた。迂回交通の交通量に対する割合も考慮にいれるべきである。

③道路線形による事故確率算定のモデル化が出来れば、新規に行われる道路網計画にも利用できることは、前述した通りである。

参考文献

- (1) 黒田勝彦・王能勇：広域湾内海上交通システムのアベイラビリティについて、第10回土木計画学研究講演集、pp.477-484、1987
- (2) 依田浩：信頼性理論入門、pp.159-164、朝倉書店、1972
- (3) 井上矩之：波動理論による事故渋滞の解析、交通工学99、No.6、pp.22-31、1974

オンランプ										分流点	
	A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	W
上り	99.92269	99.96098	99.96135	99.96161	99.96177	99.96184	99.96185	99.96179	99.96169	99.96153	99.65822

オフランプ										合流点	
	A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	W
下り	99.37987	99.74266	99.73670	99.73073	99.72476	99.71879	99.71283	99.70686	99.70090	99.69493	95.48956

表2 AW間のユニットアベイラビリティ

	A	B	C	D	E	F	G
A		90.29882	90.29882	92.08762	87.41711	87.41711	91.52040
B	97.95409		96.00508	95.65932	95.03837	99.40313	94.14757
C	97.95409	96.00508		95.65932	99.40313	95.03837	94.14757
D	98.90290	97.02829	97.02829		97.02829	97.02829	98.90290
E	94.14757	95.03837	99.40313	95.65932		96.00508	97.95409
F	94.14757	99.40313	95.03837	95.65932	96.00508		97.95409
G	91.52040	87.41711	87.41711	92.08762	90.29882	90.29882	

表3

ODアベイラビリティ