

# 道路階層化を念頭に置いた ネットワークデザインモデルの構築

小池 卓武<sup>1</sup>・柳沼 秀樹<sup>2</sup>

東京工業大学大学院 社会・環境理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

E-mail:t.koike@plan.cv.titech.ac.jp

東京理科大学講師 理工学部 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail:yaginuma@rs.tus.ac.jp

道路ネットワークの階層化では、性能照査型設計に基づく改良を行うことにより、アクセス機能とトラフィック機能を明確にすることが求められる。例えば、道路リンクの機能区分に応じて平面交差点をアクセス制限する等の改良が考えられるが、これらを定量的に評価することは困難な状況にある。そこで、本研究ではアクセス制限による階層化と交通ネットワーク配分を組み合わせた二段階最適化によるネットワークデザインモデルを提案する。具体的には、下位問題では均衡配分による総所要時間を算出し、上位問題では任意の平面交差点における完全アクセス制限の有無を表現する。その上で、ネットワークの総所要時間が最小化となる階層化パターンをクロスエントロピー法 (CE 法) により導出する。また、OD 交通量の変化や CE 法の設定パラメータについて感度分析を行い、提案手法の妥当性を検証した。

**Key Words :** hierarchical road network, plane crossings, access control, system optimal, total travel time

## 1. はじめに

我が国の道路ネットワークでは、一般道における旅行速度が低下し、総所要時間が増大している現状にある。この背景には、現行の道路計画設計において、トラフィック機能(交通を円滑に流す機能)とアクセス機能(沿道施設や下位道路への出入りのしやすさを表す機能)<sup>1)</sup>といった道路の機能分担、すなわち階層性が考慮されていない状況にある<sup>2)</sup>。そのため、道路の階層性を考慮した道路計画設計手法の構築が求められている。

道路の階層性を考慮したネットワーク(階層化ネットワーク)は、交差点形式、階層ごとの道路間隔、自由走行速度、沿道出入の可否、階層区分数等のネットワーク構成要素の最適な組み合わせにより成立する。後藤ら<sup>3)</sup>は、ネットワーク構成要素の組み合わせたシナリオを複数生成して、その中から目標性能(総所要時間)を満足し、かつ費用制約の中で最大性能を発揮するシナリオを最適解として導出する道路階層化手法を提案している。ここで、後藤らは総所要時間算出の際に利用者均衡配分を用いて

いるが、道路階層化をネットワーク全体のシステム最適化問題として捉える場合、個人の所要時間を最小化する通常の利用者均衡ではなく、システム全体の総所要時間を最小化するようなシステム最適を採用する必要があると考えられる。また、各種ネットワーク構成要素についての組み合わせシナリオを複数生成し、それぞれの性能の比較計算を逐一行う作業は膨大な時間を要すると考えられる。

そのため本研究では、まず対象とするネットワーク構成要素を一つに絞り、その要素がどのような配置にある時にネットワーク全体の性能が最適化されるかを自動的に抽出する定量的な評価手法を検討する。本研究では、そのような定量的評価に基づく道路階層化手法として、平面交差の完全アクセス制限(図-1)に着目したネットワークデザインモデル(ND モデル)を提案する。ネットワークの性能指標としては総所要時間が代表的であり、またネットワーク構成要素の中でも交差点形式、特に平面交差が総所要時間に与える影響が大きい<sup>3)</sup>ことから、総所要時間が最小となる平面交差と完全アクセス制限の組み合わせである“最適階層化パターン”を導出する。本モデルでは、最適階層化パターン導出のために System Optimal を考慮した交通量配分とクロスエントロピー法による二段階最適化モデルの定式化を行う。また、モデルの妥当性を検証するために、実ネットワークを用いた

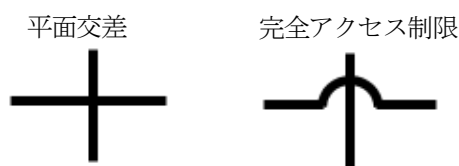


図-1 完全アクセス制限のイメージ

ケーススタディおよびモデルの感度分析を行う。

## 2. 現行の道路計画設計と道路階層化

### (1) 現行の道路計画設計の問題点

現行の種級区分に沿った道路整備では、道路設計が大きく計画交通量に依存し、それに応じて道路の構造や接続が決定される<sup>1)</sup>。このような道路設計手法を仕様設計型道路計画設計という。仕様設計型道路計画設計は大きく計画交通量に依存するというその性質上、道路構造と交通運用に柔軟性が欠け、道路ネットワークに本期待されるトラフィック機能やアクセス機能がネットワーク上の OD 交通量などの交通特性に対して十分機能せず、本来期待される道路機能が十分に発揮されない現状を生んでいる<sup>2)</sup>。言い換えれば、現行の道路計画設計では道路の階層性が考慮されていないということになる。その大きな弊害としては、長距離トリップ車両に利用されるべき幹線道路に短距離トリップ車両が流入することによる道路混雑などが例に挙がる。

### (2) 道路階層化の意義

仕様設計型道路計画設計による問題点克服のため、道路ネットワーク性能に階層性を持たせ、交通特性に応じた道路ネットワーク構造に改編する必要がある。このような交通特性に基づいた道路の設計を性能照査型道路計画設計といい、それによって設計された階層性を持つ道路ネットワークを階層化道路ネットワーク（階層化ネットワーク）、現況ネットワークの階層化ネットワークへの改編を道路階層化という。道路階層化によって、複雑な道路接続や異なるトリップ車両の混在が軽減され、総所要時間の低減につながると考えられる。

## 3. ND モデルを用いた最適階層化パターンの導出

ND モデルを用いてネットワーク上の平面交差と完全アクセス制限の最適な組み合わせ（最適階層化パターン）を導出し、道路階層化を表現する。なお、今回は平面交差の中でも特に総所要時間に影響しうる十字路平面交差点のみを扱うものとする。具体的には、アクセス制限による道路階層化と交通量配分を組み合わせた二段階最適化問題を解くことによって、最適階層化パターンを導出する。下位問題では System Optimal を考慮した均衡配分(SO 配分)を用いてネットワーク総所要時間を算出し、上位問題では平面交差と完全アクセス制限の組み合わせを導出する。以下に、上位問題と下位問題を示す。

### (1) 上位問題：CE に基づく最適階層化パターン

クロスエントロピー法(CE 法)<sup>4)</sup>によって平面交差と完全アクセス制限の最適な組み合わせを導出する。

道路ネットワークの例として図-3.1 のような平面交差点が 5 つ存在するような仮想ネットワークを考える。これら 5 つの平面交差点のうちいくつかを完全アクセス制限ノード(AC ノード)に置き換える組み合わせパターン(階層化パターン)を複数生成し、繰り返し計算によってその中から最適なパターン(最適階層化パターン)を導出する。具体的な流れを以下に示す。

#### a) 初期設定

まず初期設定として、全ての平面交差における AC ノードの生起確率を 0.5 とする。また、生成する階層化パターンのサンプル数  $N$ 、上位サンプル割合  $\rho$ 、繰り返し計算回数を設定する。

#### b) 階層化パターンの生成

取り扱うネットワークの平面交差点の数だけ格納配列を用意し、確率 0.5 の二項分布に従って 0, 1 を格納配列に格納する。ここで、0 は平面交差のまま、1 はその平面交差が AC ノードに置換されることを意味する。この 0, 1 の組み合わせを階層化パターンとし、設定したサンプル数  $N$  の分だけこれを生成する。初期に生成される階層化パターンの例を表-3.1 に示す。今回は、 $N=5$ 、 $\rho=1$  とする。

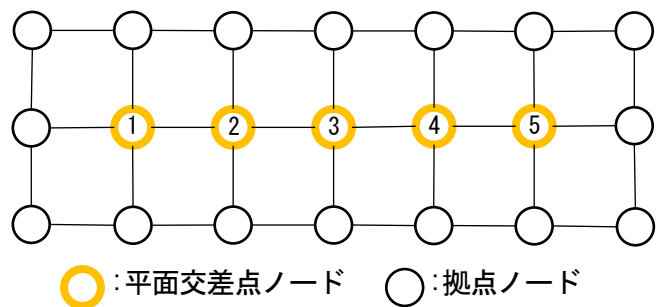


図-3.1 仮想ネットワーク

表-3.1 階層化パターン(初期)

生起確率 P	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	総所要 時間
平面交差	1	2	3	4	5	
階層化 パターン	1	1	1	1	1	45
	0	1	0	0	0	30
	1	1	0	0	1	50
	0	1	0	0	1	40
	0	0	0	0	0	60

c) 総所要時間の算出

生成した各階層化パターンをネットワークデータに反映したのち、各々について S0 配分を実行し、ネットワーク上の交通状況としてのリンク交通量を算出する。その結果より総所要時間を算出し、各階層化パターンに得点として与える。

d) 階層化パターンの並び替え

階層化パターンを得点、つまり総所要時間の小さい順に並び替える。

e) 生起確率の更新・収束判定

小さい順に並び替えられた階層化パターンのうち上位  $\rho N$  個を抽出し、完全アクセス制限の生起確率を更新する。生起確率の更新は、上位サンプルにおいて平面交差が AC ノードに置き換わった回数をカウントし、それを上位サンプル数で除す式 (3-1) を用いる。更新後は「階層化パターンの生成」のステップに戻り、最終的に表-3.2 のように全ての生起確率が 0 か 1 に収束した時点で計算終了とし、それを最適階層化パターンとする。図-3.2 に最適階層化パターン下の仮想ネットワークを示す。

$$P_i = \frac{\sum \rho N ac}{\rho N} \quad (3-1)$$

$P_i$  は平面交差  $i$  に 1 が与えられる確率(完全アクセス制限生起確率)、 $ac$  は完全アクセス制限ダミー、 $\rho$  は上位サンプル割合、 $N$  は生成する階層化パターンのサンプル数である。

(2) 下位問題：S0 に基づく交通量配分

System Optimal を考慮した交通量配分(S0 配分)によって、ネットワークリンク上の交通量を再現し、総所要時間を計算する。System Optimal とはシステムが最適化された状態を指し、本研究では道路ネットワークでいうところの総所要時間最小化がこれにあたる。すなわち S0 配分は、ネットワーク総所要時間が最小になるような配分を実行する交通量配分手法であり、ネットワークにとって最適な交通状況を再現するモデルと言える。

a) S0 配分の手順

従来は利用者均衡配分(UE 配分)による交通状況再現が一般的であったが、道路階層化はネットワーク全体のシステム最適化の色が濃く、個人余剰最大化に基づく UE 配分よりも、システム最適化に基づく S0 配分の方が道路階層化における交通状況再現をする際により適切であると考えられる。そのため、今回は交通状況の再現に S0 配分を適応する。図-3.3 に S0 配分の手順を示す。

表-3.2 階層化パターン(収束後)

生起確率 P	0	1	0	0	0	総所要時間
平面交差	1	2	3	4	5	
階層化パターン	0	1	0	0	0	30
	0	1	0	0	0	30
	0	1	0	0	0	30
	0	1	0	0	0	30
	0	1	0	0	0	30

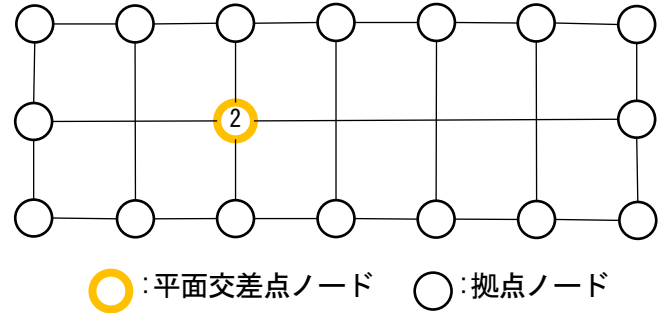


図-3.2 最適階層化パターン下の仮想ネットワーク

1. 初期設定  
繰り返し回数を  $n=1$  とし、リンク交通量の初期解  $x_a^{n=1}$  を設定。
2. リンク所要時間の更新  
リンク交通量  $x_a^n$  を用いてリンク所要時間  $t_a^n = t_a(x_a^n)$  を出す。
3. 降下方向ベクトルの算出  
全 OD 交通量を最短経路に配分し、暫定リンク交通量  $y_a^n$  を求める。  
降下方向ベクトル  $d_a^n = y_a^n - x_a^n$  を求める。
4. ステップ幅  $\xi^n$  の算出  
システム最適化問題を解いて、ステップ幅  $\xi^n$  を求める。
5. リンク交通量の更新  
$$x_a^{n+1} = x_a^n + \xi^n \cdot d_a^n$$
6. 収束判定  
収束判定を満たせば終了。  
 $(x_a^{n+1} - x_a^n \leq \epsilon)$   
満たさない場合に  $n = n + 1$  として 2. リンク所要時間の更新へ

図-3.3 S0 配分の手順

b) SO 配分の定式

SO 配分を式 (3-2) ~ 式 (3-4) に示す.

$$x_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad (3-2)$$

$$\min \sum_a \int_0^{x_a^{n+1} = x_a^n + \xi^n d_a^n} \left[ t_a(w) + w \frac{t_a(w)}{dw} \right] dw \quad (3-3)$$

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{x_a}{Cap_a} \right)^\beta \right\} \quad (3-4)$$

ここで、 $t_a$  はリンク  $a$  を通過する際の所要時間 [hour],  $t_a^0$  はリンク  $a$  の自由走行時の所要時間 (フリーフロー時間) [hour],  $x_a$  はリンク  $a$  の交通量 [台/日],  $y_a$  はリンク所要時間更新後の暫定リンク交通量 [台/日],  $Cap_a$  はリンク  $a$  の交通容量 [台/(車線数・日)],  $\alpha, \beta$  は式 (3-4) の形状パラメータ,  $d_a$  はリンク  $a$  の降下方向ベクトル [台/日],  $R, S$  は出発地, 目的地集合,  $K_{rs}$  は出発地  $r$  から目的地  $s$  への全経路集合,  $q_{rs}$  は出発地  $r$  から目的地  $s$  へ向かう総交通量 [台/日],  $f_k^{rs}$  は出発地  $r$  から目的地  $s$  までの各経路  $k$  における交通量 [台/日],  $\delta_{a,k}^{rs}$  は出発地  $r$  から目的地  $s$  までの各経路  $k$  におけるリンク  $a$  の接続の有無 (1or0),  $\xi_a$  は最適化問題に用いるステップ幅,  $n$  は繰り返し回数のインデックスとしての添え字である.

4. 実ネットワークを用いたケーススタディ

本研究では、柏市、野田市など 7 市を含む 2 次メッシュ範囲を対象に、国道、主要地方道、一般都道府県道によって構成されるネットワーク (図-4.1) でケーススタディを実施する。なお、対象メッシュ外の道路リンクについて、ネットワークの接続性を反映して補助リンクをネットワークに加えた。同ネットワークにおいて設定する交通容量、形状パラメータ、自由走行速度を表-4.1、表-4.2、表-4.3 に示す<sup>89)</sup>。なお、完全アクセス制限によって新たに接続される道路リンクについては、そのトラフィック

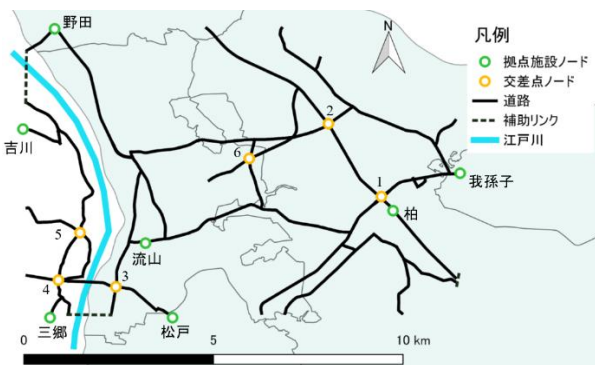


図-4.1 対象ネットワーク

機能を際立たせるため高速道路レベルの交通容量、形状パラメータ、自由走行速度を持たせるものとする。

(1) SO 配分による交通状況再現

最適階層化パターン導出にあたり、対象ネットワークの交通状況を System Optimal を考慮した均衡配分 (SO 配分) により再現する。SO 配分の入力値となる OD 交通量は、道路交通センサスにおける自動車起終点調査を用いて集計する (図-4.2)。OD の拠点範囲は市町村、拠点施設は役所とし、市町村間のトリップを役所間のトリップに代表させる。メッシュ外に役所が立地する場合は、そこに至る際に利用される道路リンクのメッシュ境界に役所を仮想的に配置することで対応する。図-4.2 より、柏における OD 交通量が卓越しており、交差点 1 がネットワークの流動性に大きく寄与していると考えられる。また、江戸川の影響で千葉-埼玉間を連絡する道路本数が少なくなっている。

表-4.1 道路種別ごとの交通容量

道路種別	交通容量 [台/(日・車線)]
高速道	12000
国道	18000
主要地方道	12000
一般都道府県道	10000

表-4.2 一般道と高速道における形状パラメータ

	一般道	高速道
$\alpha$	0.48	0.70
$\beta$	2.82	2.30

表-4.3 一般道と高速道における自由走行速度

一般道	高速道
60 [km/h]	80 [km/h]

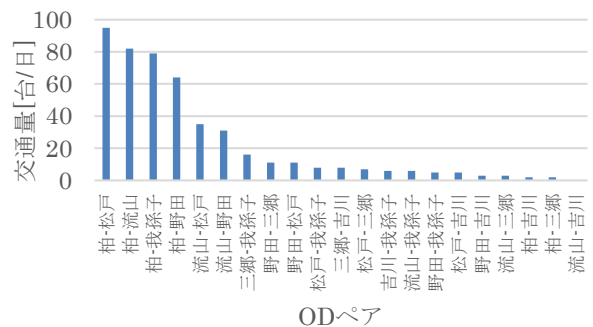


図-4.2 対象ネットワークにおける OD ペア



(2)最適階層化パターンの導出結果・考察

ND モデルによる最適階層化パターンの導出結果を図-4.3 に示す。今回は交差点 5, 6 がアクセス制限されるという結果が導出された。交差点 5 は長距離道路に短距離道路が接続する交差点である。そのため、両者がアクセス制限されることで、本来の長距離道路のトラフィック機能が回復し、所要時間の削減に繋がったと考えられる。また、交差点 6 がアクセス制限されることによって新たに生成される道路リンクが、柏-野田間などを移動する車両の迂回路として機能し、ネットワーク上の混雑の分散に寄与したと考えられる。一方、交差点 1 は完全アクセス制限されない結果となった。図-4.2 より、柏を発着する OD 交通量の卓越が見られる。これより、交差点 1 をアクセス制限した場合、隣接する柏に発着する多くの車両が大幅な迂回を強いられ、総所要時間が増大することになる。このため交差点 1 は平面交差として残されたと考察される。

(3)ND モデルの感度分析

ND モデルでは、複数の階層化パターンの生成を確率的に行っている性質上、最終的に導出される最適階層化パターンには誤差が生じる。しかしながら、生成するサンプル数 N が大きいほど、より大きな母集団の中から最適解が抽出されることになるため、同モデルの精度は向上されると考えられる。また、時間帯などによって OD 交通量のスケール変化が生じた場合、望ましい最適階層化パターンは変化すると考えられる。以上のことを考慮し、生成サンプル数 N と OD 交通量スケール変化を数段

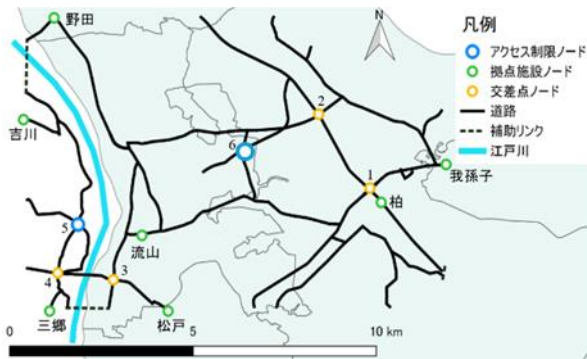


図-4.3 最適階層化パターン

階に分け、それぞれのケースにおける同モデルの出力結果を集計することで同モデルの感度分析を行う。

感度分析に際して、サンプル数 N については 10, 20, 30, 40, 50 個のパターンを設定し、サンプル数 10 刻みでの導出結果の変化を見る。今回はサンプル数 N と OD 交通量の組み合わせごとに最適階層化パターン抽出を 10 回行うものとする。OD 交通量についてはその交通量の増減による導出結果の変化を分析する目的で 0.5 倍, 0.8 倍, 1 倍, 1.2 倍, 1.5 倍, 2 倍のケースを設定する。

a) OD スケール変化に伴う最適階層化パターンの変化

表-4.4 に OD 交通量スケール別の最適階層化パターンの導出結果を示す。階層化前に比べて階層化後は総所要時間がおしなべて低く出ており、今回のケーススタディにおいては完全アクセス制限による道路階層化は効果を示したと言える。また、OD 交通量のスケール変化が 0.5 倍や 2 倍などの極端な変化でない限り、導出される最適階層化パターンは変動しにくいことも確認できた。このことから、平常時の OD 交通量を想定する場合、同モデルによる道路階層化の出力結果は妥当であると推察される。

b) 総所要時間が最小パターンの導出頻度

図-4.4 に総所要時間が最小となる最適階層化パターンの導出頻度を示す。

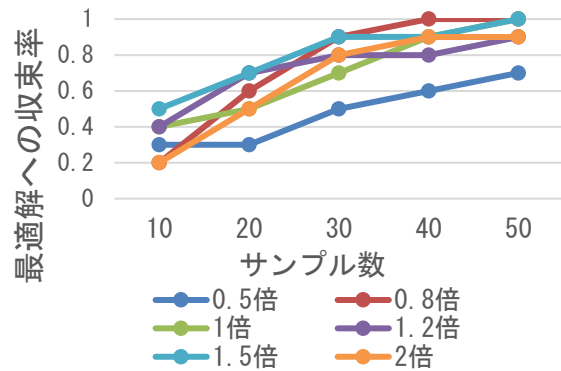


図-4.4 総所要時間最小パターンの導出頻度

表-4.4 OD スケール別最適階層化パターン

OD スケール	0.5 倍	0.8 倍	1 倍	1.2 倍	1.5 倍	2 倍
最適階層化パターン	[4, 6]	[5, 6]	[5, 6]	[5, 6]	[5, 6]	[4, 5, 6]
階層化後 総所要時間[h]	41.1	64.7	81.9	97.3	121.7	164.2
階層化前 総所要時間[h]	41.7	66.7	83.4	100.0	123.0	166.7

図-4.4 では表-4.4 に示した総所要時間が最小となるような最適階層化パターンの導出頻度をサンプル数  $N$ , OD スケール(0.5 倍, 0.8 倍など)ごとに示している。なお, 縦軸にあたる総所要時間最小パターン導出頻度とは, 各サンプル数  $N$ , OD スケールごとに最適階層化パターンの導出を 10 回行い, その中で最も総所要時間の小さな階層化パターンを導出した回数を 10 で除した値である。

図-4.4 より, OD スケール間のわずかな挙動の違いはあるが, 生成する階層化パターンのサンプル数  $N$  の増加に伴って総所要時間が最小となる最適階層化パターンの導出頻度は高くなる傾向にある。このことから, サンプル数を増加させることによって精度の高い結果の導出が期待できることが示された。

また, 今回のケーススタディでは 6 点の平面交差において完全アクセス制限するか否かを考えているため, 想定される階層化パターンは  $2^6=64$  通り存在する。この階層化パターンの母数に対して, どの程度の数の階層化パターンサンプル数を生成すればよいかについても言及する。図-4.4 より, OD スケールごとの違いはあるが, 本ケーススタディではおおよそサンプル数が 40~50, つまり想定される階層化パターンの母数 64 通りに対して 6 割~8 割程度のサンプル数を設定すれば, 高い頻度で最適階層化パターンが導出される結果となった。

## 5. おわりに

本研究では, 道路階層化において重要となるネットワーク構成要素の一つである交差部形式に着目し, ネットワーク総所要時間が最小となる場合の平面交差と完全アクセス制限の最適な組み合わせ(最適階層化パターン)を System Optimal 配分, クロスエントロピー法により自動導出するネットワーク設計モデルを提案した。また, 実ネットワークを用いたケーススタディでは, 簡易化した千葉県柏市周辺の道路網を用いて OD 交通量スケールごとの最適階層化パターン導出し, 交通量変化に対する同モデルのロバスト性を確認した。加えて, 生成する階層化パターンのサンプル数を変化させ, より大きなサンプル数を設定することで同モデルの精度が向上されることを確認した。

しかし, 今回は総所要時間のみで階層化パターンの優劣を定めている点, 交差部形式以外のネットワーク構成要素を十分考慮に入れていない点, 対象ネットワークが簡易的であり精密な分析に至らなかった点など, 本研究にはまだまだ多くの考慮の余地がある。これらの要素を考慮し, 適宜同モデルに組み込んでゆくことで, より汎用性の高い道路階層化手法の構築が期待できる。

## 参考文献

- 1) 山川 英一, 内海 泰輔, 泉 典宏, 野見山 尚志, 若林 糾: 道路階層別の走行性能を実現するための道路構造条例と道路階層区分相互の接続方法, 土木計画学研究・講演集, Vol.33, CD-ROM, 2006.
- 2) 交通工学研究会: 道路の交通容量とサービスの質に関する研究 最終成果報告書, 2015.
- 3) 後藤 梓, 中村 英樹, 浅野 美帆: 階層化道路ネットワーク構成要素に関する最適解の導出方法, p.1-5, 2011.
- 4) 武井 伸生, 長江 剛志: 道路ネットワーク耐震化戦略最適化のための便益推計手法 クロスエントロピー法, p.1-4, 2014.
- 5) 中村 英樹, 大口 敦: 性能照査型道路計画設計の導入に向けて, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.67, No.3, 2011
- 6) 下川 澄雄, 内海 泰輔, 野中 康弘, 中村 英樹, 大口 敦: 道路の階層区分を考慮した性能照査型手法の意義と課題, 土木計画学研究・講演集, Vol.45, CD-ROM, 2012.
- 7) 桑原 雅夫: 動的な限界費用に関する理論的分析, 土木学会論文集, No.709, IV56, pp.127-138, 2002.
- 8) 島川 陽一, 鹿島 茂: 交通量配分のための入力データの作成法, Theory and Applications of GIS, Vol.17, No.2, pp69-75, 2009

(2018. 4. 27 受付)

## DEVELOPMENT OF NETWORK DESIGN MODEL CONSIDERING HIERARCHICAL ROAD NETWORK

Takumu KOIKE and Hideki YAGINUMA

Road networks in Japan have a lot of plane crossings which have caused long vehicle travel time and high delay. The reason is considered to be that the road networks have not designed with the concern of road hierarchy functions, such as traffic and access functions. Thus, it is necessary to reconsider the road design method by the viewpoint of road hierarchy function. In this study, we developed a network design model based on quantitative evaluation focusing on access control at plane crossings. Through this model, the best combination of plane crossings and access control which can minimize total travel time in real network is derived as the best strategy. In addition, influences of traffic volume and parameters on the model are also analyzed. As a result, the best strategy in real networks and the proposed model are expected to contribute to the road design plan in future.