

全ての道路リンクに相当する単純化ネットワーク作成手法の構築*

Development of a simplified network which represents all roadway links*

中村俊之**・吉井稔雄***・北村隆一****

By Toshiyuki NAKAMURA **, Toshio YOSHII ***and Ryuichi KITAMURA****

1. はじめに

大規模な道路ネットワークを対象とした配分を行う際には、比較的交通量の少ない道路（以下「細街路」）を捨て去り主要な道路（以下「幹線道路」）のみから構成される道路ネットワークが用いられている。これに対して、入力値となる OD 交通量にはゾーン間 OD が用いられており、幹線道路と細街路の区別がなされていない。そのため、入力する OD 交通量は必ずしも配分で用いる道路ネットワーク上を移動するものと限らないことから、道路ネットワークと OD 交通量との間に不整合が生じている。この不整合が黙認されてきた理由は、現在の配分手法が確立された際の貧弱な計算機能力と細街路における交通モニタリング能力の欠如であると推察される。現在では計算機能力が飛躍的に向上し、加えて細街路内での交通状況を観測可能とするプローブカーによる新たな交通モニタリング手法が整備されてきたことにより、これらの問題点は解消されつつある。

一方、細街路も含めた全ての道路を対象とした道路ネットワーク上で配分を行うことを想定した場合、静的配分ではリンクパフォーマンス関数、動的配分ではリンク交通容量など設定を要するパラメータ数が膨大なものとなり、パラメータ同定作業が困難になるという問題、さらには目的地までの経路数が膨大になるため経路決定に要する計算負荷が大きくなるといった計算上の問題が発生する。このような問題に対して、Sasaki ら¹⁾、Yang ら²⁾、Wong³⁾は道路ネットワークを連続体として捉えることによる連続体上での配分手法を提案しているが、これらの研究は各地点における方向性を考慮することが困難であることなどを理由に one-to-many または many-to-one の OD に限られたものとなっている。

そこで本研究では、グラフによって構成されるネットワークの利点を活かすため、細街路で構成される複数の経路を 1 本のリンクで代表する（以下「集約リンク」）。この集約リンク、および道路と 1 対 1 で対応する従前から用いられてきたリンク（以下「幹線リンク」）を組み合わせることによる単純化された配分ネットワークを提案する。

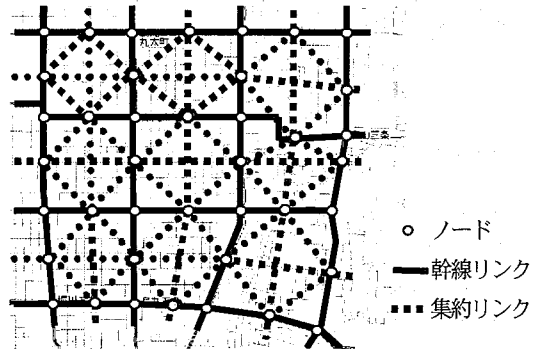


図1 単純化ネットワークのイメージ

提案するネットワークは単純化されているにもかかわらず全ての道路リンクに相当しているため、前記した不整合の問題を解消するのみならず、細街路を含めた全ての道路ネットワークに関連する交通施策の評価を行うことが可能となる。

本稿では、提案する単純化ネットワークの作成方法ならびに経路選択モデルが必要とする経路ポテンシャルの設定方法を提案した後、ネットワーク上で適用される経路選択モデルが細街路を通る経路も含めた全ての経路を対象とした経路選択を取り扱っていることを示すことにより、単純化ネットワークが細街路を含む全ての道路ネットワークに相当していることを示す。

2. 単純化ネットワーク

2.1. 単純化ネットワークの概要

単純化ネットワークは、幹線リンクのみからなる道路ネットワークを基本とし、幹線リンクによって囲まれるポリゴン領域内（以下「細街路エリア」）においてポリゴン上の全ての二辺間を接続する形で与えられる集約リンクとから構成される（図1参照）。この集約リンクは、リンクの起点に位置するポリゴン辺上の点から終点に位置する辺上の点にいたる細街路エリア内に存在する全ての経路を代表する。図2には細街路エリア内の集約リンクの接続例を示す。この例に示される細街路エリアは、16本の幹線リンクと12本の集約リンクから構成される。

図3には、具体的に上辺の幹線リンクから下辺の幹線リンクに至る集約リンクが代表する細街路エリア内の経路を示す。これら6つの経路を図4に示す集約リンクが代表して表現するということになる。

* キーワーズ：配分，経路選択，細街路，ITS
 ** 正員 工修 財団法人 計量計画研究所
 *** 正員 博士（工学）京都大学大学院工学研究科
 **** 正員 Ph.D 京都大学大学院工学研究科
 連絡先：〒162-0845 東京都新宿区市ヶ谷本村町2-9
 TEL 03-3268-9911 FAX 03-5229-8081

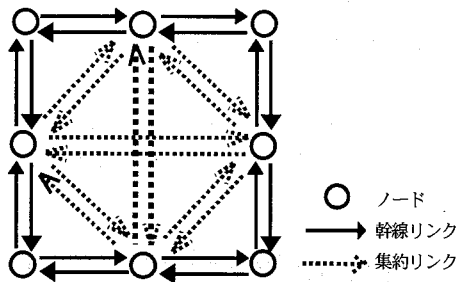


図2 細街路エリア内のリンク

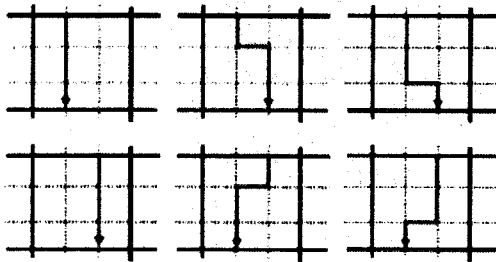


図3 集約リンクに対応する複数の経路

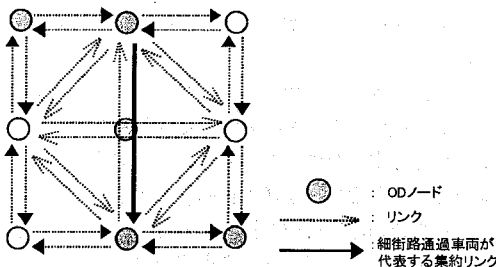


図4 細街路を通過した車両の代表する集約リンク

なお、経路を列挙する際には、起点から各ノードまでの最短距離を判断基準に、起点に近づくようなノード間の移動が含まれる経路を不合理な経路と見なし、これらを排除するものとする。

2.2. 経路効用と経路ポテンシャル

単純化ネットワーク上では確率均衡配分を適用し、各経路の選択確率の決定にはロジットモデルを採用する。すなわち、各車両が複数の選択可能な経路の中から経路 i を選択するときの経路の効用を

$$U_i = V_i + \varepsilon \quad (1)$$

V_i : 経路 i の効用確定項

ε : 誤差項

とし、目的地に向かう n 本の経路の中から j 番目の経路を

選択する確率を

$$P_j = \frac{\exp(V_j)}{\sum_{k=1}^n \exp(V_k)} \quad (2)$$

で与える。ただし、ここでは個々の車両による効用の違いを考慮しない。続いて、各経路の効用確定項が交通フロー条件に依存して変化する経路の認知旅行時間とフローに依存しない経路固有の静的な条件によって決定され则认为、

$$V_j = -\beta \cdot T_j + S_j \quad (3)$$

T_j : 経路 j を選択したときの認知旅行時間

S_j : 静的な条件で説明される経路 j の効用

β : パラメータ

と定義し、右辺の第2項を「経路ポテンシャル」と呼ぶ。このとき、経路 i を m 個の区間に分割した場合、経路 i の確定効用は、

$$\begin{aligned} V_i &= \sum_{k=1}^m (-\beta \cdot T_{ik} + S_{ik}) \\ &= -\beta \cdot T_i + \sum_{k=1}^m S_{ik} \end{aligned} \quad (4)$$

T_{ij} : 経路 i 上 j 番目区間の認知旅行時間

S_{ij} : 経路 i 上 j 番目区間の静的な条件で説明される効用 (以下「区間ポテンシャル」)

と表現され、各区間の区間ポテンシャルの総和と経路の認知旅行時間によって経路の効用が決定される。

ここで、同一の細街路エリア内に起終点を持つ OD に関して、全てのドライバーについて、起終点間を結ぶ全経路の認知旅行時間は等しいとの仮定を置く。なお、この仮定を設定するにあたっては、北村ら⁴⁾による実交通観測結果を参考にした。ここでは、限られた条件下の観測ではあるものの、幹線道路とその幹線道路に対応する細街路との選択確率が、幹線道路の交通状況によらずほぼ一定であることを示している。すなわち、幹線道路が混雑する場合には同様に細街路も混雑すると考えられ、幹線道路か細街路かのドライバーの選択行動が交通状況によらないとの可能性を示唆するものである。

上記の仮定の下、図5に示す道路ネットワークを考える。図は同一の細街路エリア内に起終点 O,D を持つ m 本の経路を表現したものである。このうちノード X,Y を通る n 本の経路を経路 1~経路 n とする。この時、ノード X,Y を通る n 本の経路を表現する概念上の経路 I を想定し、

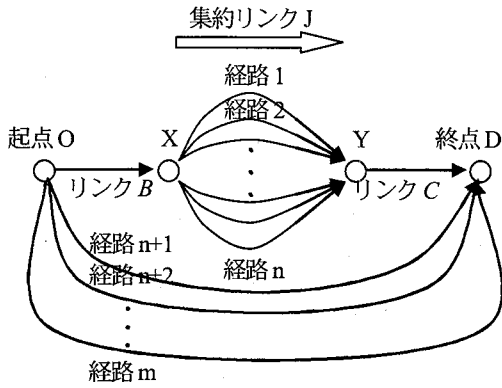


図5 集約リンクによる経路集約の例

その確定効用を

$$V_I = V_B + V_C + \ln \left(\sum_{k=1}^n \exp(V_k^{XY}) \right) \quad (5)$$

V_B, V_C : リンク B, C の効用確定項

V_k^{XY} : k 番目経路上区間 XY における効用

として与えると、 m 本の全経路の中からノード X, Y を通る n 本の経路のいずれかを選択する確率は、

$$\begin{aligned} prob &= \frac{\sum_{k=1}^n \exp(V_k)}{\sum_{k=1}^m \exp(V_k)} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^n \exp(V_B + V_C + V_k^{XY})}{\sum_{k=1}^n \exp(V_k) + \sum_{k=n+1}^m \exp(V_k)} \\ &= \frac{\exp(V_B + V_C) \sum_{k=1}^n \exp(V_k^{XY})}{\exp(V_B + V_C) \sum_{k=1}^n \exp(V_k^{XY}) + \sum_{k=n+1}^m \exp(V_k)} \\ &= \frac{\exp(V_I)}{\exp(V_I) + \sum_{k=n+1}^m \exp(V_k)} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。すなわち、 n 本の経路を概念上の経路と置き換えた場合においても、全経路から概念上の経路 I を選択する確率に等しくなる。言い換えれば、式(5)で確定効用を評価した概念上のリンクで複数の経路を置き換えて経路選択率が保存される。

一方、ノード X, Y を通る経路 k の確定効用は

$$V_k = S_B + S_C + S_k^{XY} + T_k \quad (7)$$

S_B, S_C : 静的な条件で説明されるリンク B, C の効用

S_k^{XY} : 静的な条件で説明される経路 k 上区間 XY における効用

T_k : 経路 k の認知旅行時間

で示されるので、先の認知旅行時間が等しいとの仮定より、全経路の認知旅行時間を T とすれば、

$$\begin{aligned} \exp(V_I) &= \sum_{k=1}^n \exp(V_B + V_C + V_k^{XY}) \\ &= \sum_{k=1}^n \exp(V_k) \\ &= \sum_{k=1}^n \exp(S_B + S_C + S_k^{XY} + T_k) \\ &= \exp(S_B + S_C + T) \sum_{k=1}^n \exp(S_k^{XY}) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。そこで、ノード X, Y 間を結ぶ全区間経路を表現する集約リンク J を想定し、その確定効用のうち静的な条件で説明される部分（以下「リンクポテンシャル」）を

$$S_J = \ln \left(\sum_{k=1}^n S_k^{XY} \right) \quad (9)$$

として定義すれば、式(8)は

$$\begin{aligned} \exp(V_I) &= \exp(S_B + S_C + T) \sum_{k=1}^n \exp(S_k^{XY}) \\ &= \exp(S_B + S_C + S_J + T) \end{aligned} \quad (10)$$

となり、ノード X, Y 間を結ぶ全区間経路を集約リンクで置き換えた場合でも、細街路エリア内の起点から終点に至る選択可能な実経路集合の中からノード X, Y を通る経路のいずれかを選択する確率が保存されることとなる。

この区間 (X, Y) における n 本の経路を細街路エリア内の経路と置き換えれば、細街路エリア内においては各経路の認知旅行時間が等しいとの仮定の下、式(9)に示すリンクポテンシャルを定義すれば、経路選択率を求める上で細街路内の全ての経路と等価な概念上のリンクを作成することが可能となる。

2.3. 認知旅行時間

配分を実施する際には、前節にて定義した集約リンク

のリンクポテンシャル値に加えて各リンクの認知旅行時間が必要となる。一般には、認知旅行時間は静的な配分ではリンクパフォーマンス関数、動的な配分では配分によって達成される直前の時間帯における旅行時間をもって評価される。対して、本研究によるネットワークでは、限られたエリアにおいては、細街路エリア内における各経路の認知旅行時間が等しいとの仮定を設けていることから、幹線リンクを交通量の関数として与え、集約リンクは対応する周辺幹線リンクの旅行時間に等しいものとして評価する。すなわち、図6に示す配分ネットワークの例において、幹線リンクの認知旅行時間を交通量との関係で評価した後、例えば、集約リンクAEの認知旅行時間は幹線リンクABとBEの認知旅行時間の和で、集約リンクAGの認知旅行時間は、幹線リンクOC、CF、FGの認知旅行時間の和からOAの認知旅行時間を差し引いた値またはAB、BE、EDの認知旅行時間の和からGDの認知旅行時間を差し引いた値のいずれかのうちネットワークの形状を考慮していずれかの値を以て評価する。この方法では、細街路エリア内において、交通量と旅行時間の関係に代表される交通現象が直接的には記述されないという問題が残る。しかしながら、集約リンクに配分される交通量と対応する複数の周辺幹線リンクそれぞれの交通量とは強い正の相関があること。さらに、集約リンクの認知旅行時間に、対応する複数の幹線リンクの旅行時間の和を充てていることから、間接的にはあるものの、交通量が増えれば旅行時間が増えるという交通量と旅行時間の定性的な関係は概ね担保されている。

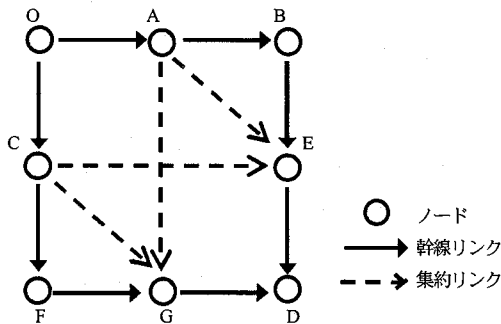


図6 配分ネットワークの例

3. 経路ポテンシャルとリンクポテンシャル

3.1. 経路ポテンシャル

経路ポテンシャルは、経路上での右左折回数、信号交差点数、車線数別の道路延長を説明変数として式(11)で与える。ここで設定した6つの説明変数は、道路形状によってのみ決定される変数である。

$$S_i = \alpha_1(NL_i) + \alpha_2(NR_i) + \alpha_3(NS_i) + \alpha_4(DS_i) + \alpha_5(DD_i) + \alpha_6(DT_i) \quad (11)$$

NL_i : 経路*i*上の左折回数

NR_i : 経路*i*上の右折回数

NS_i : 経路*i*上の信号交差点数

DS_i : 経路*i*上の1車線道路の総延長

DD_i : 経路*i*上の2車線道路の総延長

DT_i : 経路*i*上の3車線以上の道路の総延長

$\alpha_1 \sim \alpha_6$ パラメータ

さらに、筆者ら³⁾は、経路の選択確率を決定する静的条件に関して、上記経路ポテンシャルによる経路選択モデルの妥当性を検証するために、タクシードロブから得られたデータに基づいてパラメータ推定を行い、モデルが十分な説明力を持つことを確認した。結果は表1に示す。また、信号交差点数以外の説明変数が全て有意に経路選択に影響を与えていることを確認した。よって、経路ポテンシャルの算定には信号交差点数を除く5つの説明変数を用いることとする。さらに、右折回数と左折回数は、パラメータ値が負値を示すとともに、右折回数のパラメータ値の絶対値が左折回数のそれよりも大きな値を示していることから、対向直進車両の影響を受ける右折の方が左折よりも抵抗が大きいということが示された。車線数別の経路距離に関しても、全ての説明変数が有意であるとの結果を得るとともに、全てのパラメータ値が負値となった。すなわち、ドライバーが経路距離の短い経路を選択するという傾向を示している。さらに、1車線、2車線、3車線以上となるに従ってパラメータ値の絶対値が小さな値を示しており、ドライバーがより幅員の大きな道路を選択する傾向にあるということが示された。

表1 パラメータ推定結果

全体エリア	Coeff	t-ratio
右折回数	-1.258	-17.933 *
左折回数	-0.980	-12.599 *
信号交差点数	0.002	0.029
経路距離(1車線)	-1.733	-23.842 *
経路距離(2車線)	-1.006	-12.616 *
経路距離(3車線~)	-0.626	-7.456 *
sample size	183910	
$\ln L(0)$	-1314363	
$\ln L(\beta)$	-934512	
χ^2	759702	
ρ^2	0.289	
修正 ρ^2	0.289	

*有意水準1%で有意

ここで用いた全ての説明変数は、経路を複数の区間に分割した場合に、分割したそれぞれの区間において値を定めることを可能とするものである。そのため、経路ポ

テンシャルを複数の区間に分割した各区間における「区間ポテンシャル」の総和として評価することが可能となる(式(12))。なお、経路を単純にリンクに分割すると右左折回数を表現することができないため、リンクをノードと見なし、接続するリンク間を結ぶターンの概念を導入して各区間における右左折回数を表現している。具体的には、直進右左折3方向のリンクに接続するリンクの場合、直進リンクのリンクポテンシャルに等しいポテンシャルを持つ直進ターン、直進リンクに1回分の右折に相当するポテンシャルを加えたポテンシャルを持つ右折ターンならびに直進リンクに左折分のポテンシャルを加えた左折ターンの3本のターンで表現される(図7)。

$$S_i = \sum_{k=1}^n S_{ik}$$

$$S_{ik} = \alpha_1 \cdot NL_{ik} + \alpha_2 \cdot NR_{ik} + \alpha_4 \cdot DS_{ik} + \alpha_5 \cdot DD_{ik} + \alpha_6 \cdot DT_{ik} \quad (12)$$

- N : 経路 i を複数の区間に分割するときの区間分割数
 S_{ik} : 経路 i を複数の区間に分割したときの k 番目区間における区間ポテンシャル
 NL_{ik} : 経路 i を複数の区間に分割したときの k 番目区間上の左折回数
 NR_{ik} : 経路 i を複数の区間に分割したときの k 番目区間上の右折回数
 DS_{ik} : 経路 i を複数の区間に分割したときの k 番目区間上の1車線道路の道路総延長
 DD_{ik} : 経路 i を複数の区間に分割したときの k 番目区間上の2車線道路の道路総延長
 DT_{ik} : 経路 i を複数の区間に分割したときの k 番目区間上の3車線以上の道路の道路総延長

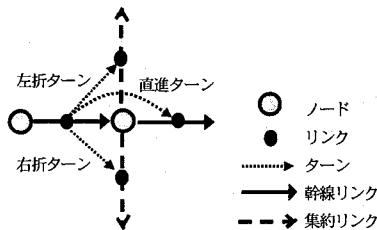


図7 ターンとリンクの関係

3.2 リンクポテンシャル

経路ポテンシャルが区間ポテンシャルの和をもって算定することが可能であるという特性を利用し、単純化ネットワーク上の幹線リンク・集約リンクにおけるリンクポテンシャルを以下の方法にて算定する。

(1) 幹線リンクポテンシャル

図2に示すように、幹線リンクは、細街路エリアを示

すポリゴンの2つの頂点間を2本のリンクで結ぶ。両幹線リンクを結合するノードは、細街路エリアへ進入する可能性のある複数地点を代表するノードである。各リンクはそれぞれのリンクポテンシャルが等しくなるようポリゴンの辺を均等に2分割して作成する(図8)。

$$L_{OA} = L_{AB} = \frac{1}{2} S_{OB} \quad (13)$$

L_{ij} : 幹線リンク ij のポテンシャル

S_j : 区間 ij のポテンシャル

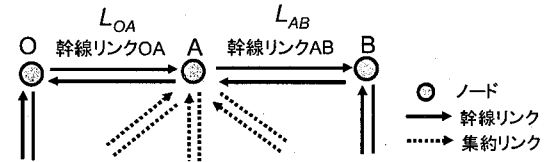


図8 幹線リンクポテンシャル

(2) 集約リンクのリンクポテンシャル

幹線リンクのポテンシャルは各リンクが対応する道路区間の形状によって直接算定することが可能であるが、集約リンクは複数経路を束ねたものであることから、直接的にリンクポテンシャルを算定することはできない。そこで、式(9)を用いてリンクポテンシャルを算定することになるが、図9に示されるように、実経路上のノード(図中A,E,C)と概念上の集約リンクの起終点ノード(図中X,Y)とはそのノードの位置が一致していない。そこで、以下によりノード位置の違いを補した上でリンクポテンシャルを算定する。

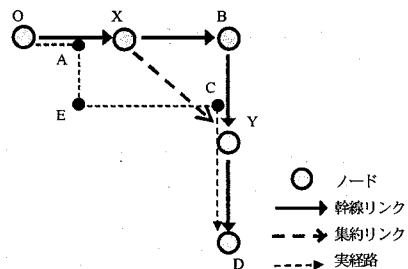


図9 集約リンクのポテンシャル算出方法

図9において、実経路の経路ポテンシャルと集約リンクを含む簡略化ネットワーク上の経路(OXYD)との間には、

$$S_{OA} + S_{AE} + S_{EC} + S_{CD} = S_{OX} + S_{XY} + S_{YD} \quad (14)$$

が成立することから、経路OAECDに対する区間XYに対応する区間ポテンシャルを

$$S_{OAECD}^{XY} = S_{OA} + S_{AE} + S_{EC} + S_{CD} - S_{OX} - S_{YD} \quad (15)$$

と算定する。このとき、ノード O を起点とし、上辺 OB から細街路エリアに流入し、右辺 BD 上で細街路エリアから流出して終点 D に向かう全経路の集合を A とすれば、集約リンク XY のリンクポテンシャルを

$$S_{XY} = \ln \left(\sum_{k \in A} S_k^{XY} \right) \quad (16)$$

と算定することで、起点 O、終点 D とする経路集合について、集約リンクに代表される細街路内の全経路の経路選択率を保持したまま簡略化ネットワーク上で配分することが可能となる。

4. おわりに

本研究では、細街路も含めた全道路ネットワークに相当する単純化ネットワークを提案した。細街路エリア内においては各経路の認知旅行時間が等しいとの仮定の下、提案した単純化ネットワークは、幹線リンクと細街路内の全ての経路と等価な概念上のリンク（集約リンク）から構成され、リンク数の大幅削減を可能としている。提案する単純化ネットワークを用いた配分手法が確立されれば、設定を必要とするパラメータ数を少なく抑えた上で、細街路も含めた大規模な道路ネットワークを対象とした配分を行うことが可能となる。例えば、細街路に通行禁止規制や一方通行規制など各種交通施策を施す場合には、施策実施後のリンク接続関係に基づいて集約リンクのリンクポテンシャルを更新し、新たなリンクポテンシャルを用いた配分を行うことにより、容易に周辺に与える影響を考慮しつつ各種交通施策の影響評価を行う

ことが可能となる。

今後は、単純化ネットワークを用いた動的あるいは静的配分手法を確立する。

参考文献

- 1) Sasaki T., Iida Y. & Yang H. : User equilibrium traffic assignment by continuum approximation of network flow, Proceedings of the 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Japan, Yokohama, July, pp233-252, 1990
- 2) Yang H., Yagar S. & Iida Y. : Traffic assignment in a congested discrete/continuous transportation system, Transportation Research Part B, Vol.28, No.2, pp161-174, 1994
- 3) Wong S.C. : Multi commodity traffic assignment by continuum approximation of network flow with variable demand, Transportation Research Part B, Vol.32, No.8, pp567-581, 1998
- 4) 北村清州・吉井稔雄・山本俊行・森川高行：交通シミュレーションに用いる車両移動モデルの構築に向けた細街路エリア内の車両挙動観測調査，土木計画学研究・講演集 Vol.27, 2003
- 5) 中村俊之・吉井稔雄・北村隆一：単純化ネットワークを用いた経路選択モデルの構築と適用，第 60 回年次学術講演会講演概要集，2005
- 6) インターネット ITS 協議会ホームページ：
<http://www.internetits.org/ja/top.html>
- 7) 三輪富生・森川高行・岡田良之：プローブデータによる OD 表の作成と経路選択行動の分析，第 1 回 ITS シンポジウム，pp.591～596，2002

全ての道路リンクに相当する単純化ネットワーク作成手法の構築*

中村俊之**・吉井稔雄***・北村隆一****

本研究では、複数の経路を集約し主として細街路における道路網を表現する集約リンクと、1本の道路に対応する形で主として幹線道路を表現する幹線リンクを考案し、これら性質の異なる2種類のリンクから構成される単純化ネットワークを提案した。単純化ネットワークは、全道路を表現するネットワークとの比較において非常に少数のリンクで構成することが可能である。さらに、幹線リンクで囲まれた1つのエリア内に起終点を持つ OD に関して、「全てのドライバーについて、起終点間を結ぶ全経路の認知旅行時間は等しい」との仮定を置くこと、加えて経路選択モデルに用いる経路効用が分割可能、すなわち複数の分割した各経路区間の効用の和で算出可能となるように効用関数を設定することで、単純化ネットワーク上での配分が全ての経路を対象とする配分と同等となりうることを示した。

Development of a simplified network which represents all roadway links*

By Toshiyuki NAKAMURA **, Toshio YOSHII ***and Ryuichi KITAMURA****

This paper proposes the simplified network which consists of two types of links, one is "aggregate link" that represents many routes and mainly deals with streets, the other is "arterial link" that represents the road section and mainly indicates arterials. The simplified network can be formed with smaller number of links comparing to one including all roads, arterials and streets. Moreover, this paper shows the equivalence between the assignment on the simplified network and on the network of all roads on the assumption and using the special utility function in the route choice model. As for the assumption, the study is assuming that the cognitive travel time of all routes from Origin to Destination is the same within the streets area, which is surrounded by arterial links. On the other hand, the special utility function is adopted that can be divided into several road sections.