

ネットワークの分割と連続体近似による交通量配分

TRAFFIC ASSIGNMENT BY NETWORK DECOMPOSITION
AND CONTINUUM APPROXIMATION飯田 恭敬*・朝倉 康夫**・楊 海***
By Yasunori IIDA, Yasuo ASAKURA and Hai YANG

This paper proposes a traffic assignment method employing the concept of network decomposition and continuum approximation. The whole network is decomposed into many small elements and the detailed network in each element is aggregated and approximated as a continuum. Each element is altered by a hypothetic link, and the relation between average travel time and traffic volume through an element is described by element performance function. Using this approximation, the scale of concerned network is reduced and the calculation cost of the User Equilibrium assignment can be greatly saved. Numerical examples show the stability of the estimated parameters of the element performance function and the availability of the proposed approximation method.

Keywords: traffic assignment, network aggregation, continuum approximation

1. はじめに

高密度な広域都市圏を対象とする道路網計画では、交通量配分に用いるネットワークが大規模化しており、配分にかかわる作業量と計算費用は膨大なものとなっている。配分結果の精度を確保しつつ、作業量と計算費用を減らすためには、計算方法の効率化とネットワーク表示の工夫が必要となる。この問題に関する従来の研究は、

- ① ネットワークの分割と階層化による方法
- ② ネットワークの抽出・削除による方法
- ③ ネットワークの連続体近似による方法

のいずれかに分類することができる。

①は交通量配分の中で最も計算時間を要する最短経路探索の効率化をねらったものである。計算手順の概略は、(i) 対象道路網をいくつかのブロックに分割し、ブロック間を関連づける上位ネットワークと、各ブロックごとの詳細道路網からなる下位ネットワークに階層化し、(ii) 上位ネットワークでの配分結果を下位ネットワー

クへ再配分するとともに、その結果得られる情報を再度上位ネットワークの配分に用いるというものである。従来の理論的研究^{1),2)}のうち、Hearnの提案した Transfer Decomposition とよばれる方法は、利用者均衡の枠組みの中で先の手順を理論的・明示的に取り扱った点で評価されており³⁾、方法論の実用性についても検討されている⁴⁾。Hearnの方法では、繰り返し回数を十分に多くすれば精度確保の面での問題は生じない。しかし、最短経路探索のアルゴリズム自体を効率化すると、単純な分割では計算時間の短縮が期待できない場合もあることが確認されている⁵⁾。

なお、ネットワーク分割による最短経路探索の効率化については井上⁶⁾が論じているのをはじめ、大規模ネットワークの階層化の考え方は従来より検討されてきている^{7),8)}。分割・階層化による配分方法については、IA法の中で用いている例⁹⁾や、メッシュ分割によるもの¹⁰⁾が示されている。また、実務において用いられている2段階配分も、分割・階層化による方法の範疇に属すると考えてよい。

②は、実際の道路網よりも規模(リンク、ノード数)の小さい計算用ネットワークを合理的に作成することを目的としている¹¹⁾⁻¹⁵⁾。集計化とは、実ネットワークから必要なリンク(たとえば幹線道路)を抽出あるいは不

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

** 正会員 工博 愛媛大学講師 工学部土木工学教室
(〒790 松山市文京町3)

*** 学生会員 工修 京都大学大学院 博士課程
(〒606 京都市左京区吉田本町)

必要なリンク（細街路）を削除し、さらに何本かのリンクを束ねて仮想的なリンクを作成することである。この作業は実務における交通量配分においても、経験的に行われている。しかしながら、従来の研究では、抽出・削除の明確な基準を得るには至っていないように思われる。

③は、交通流を都市空間における二次元流れとみなし、個々のリンクの交通量ではなく都市内の任意の地点における方向別の流れを求めようとするものである^{16)~20)}。交通流に関する諸変数（たとえば、交通量、交通密度など）は都市空間における連続変数で表わされ、交通ネットワークも連続体として記述される。一般的には、流れを記述する問題を連続体モデルとして定式化したのち、離散問題に変換して数値解析を行っている。この方法は、高密交通圏の巨視的な解析への適用をねらいとしているが、交通流の特徴である複数 OD ペアの取り扱いが困難であるため、現実性の面で問題があるほか、数値的な操作性も良好とはいえない。

以上に述べたそれぞれの方法の問題点を踏まえて、本研究では高密都市圏のマクロな道路網計画へ適用し得る交通量配分計算方法の開発を目的としている。マクロレベルの計画では、都市内の概略的な交通の流れが把握できれば十分であり、詳細なネットワークフローは必ずしも必要ではないことも多いと考えられる。そこで、ネットワーク分割と連続体近似の考え方を応用して細街路を集計・簡略化表示し、交通量配分を行う方法を新たに提案する。

具体的には、まず、計画対象領域を要素に分割し、それぞれの要素内ごとに細街路を集計することにより、要素を連続体近似する。要素を通過する交通量と通過時間の関係を要素走行時間関数で表わし、シミュレーションによりこの関数を特定化する。そして、各要素を1本のリンクで置き換えてネットワークを構成し、要素内を通過する交通量を変数とした等時間配分を行うものである。この方法は、著者らが提案した「境界ノードのバンドリング」の手順⁹⁾を要素内にまで拡張したものであるということもできる。

以下では、2.において要素の連続体近似の方法と要素走行時間関数を説明する。3.では、提案した連続体近似モデルを仮想的な細街路ネットワークに適用し、IA法による交通量配分計算を行った結果について述べる。4.では、幹線街路を通常の離散的なネットワークにより記述し、細街路網は連続体近似した2レベルネットワークを用いた場合の計算結果について述べる。

2. 要素の連続体近似の方法と要素走行時間関数²¹⁾

(1) 連続体近似の考え方

交通量配分の対象圏域を四角形要素に分割する。1つの四角形要素の各辺ごとに、辺を横切る複数の細街路リンクの交通量の合計を、流入および流出交通量として区別する（Fig. 1）。そして、要素内では交通流は一律であり、方向性をもたないと仮定する。さらに、要素を通過するのに要する時間は要素内の交通量の関数で、その値は流入・流出方向やトリップエンドが要素内にあるか否かなどの要因により異ならないとする。この仮定が成立するためには、①要素内の細街路網の密度が高く、リンク属性のばらつきが少ないこと、②要素の各辺における流出入交通量に大きな差がなく、要素内で方向を変えるフローが少ないこと、などの条件が必要である。

以上の仮定により、要素内の細街路網を1本のリンクで代替的に簡略化表示することが可能となる（Fig. 2）。この図において、中央の斜め方向に表示したリンクは要素通過リンクで、それ以外のリンクは隣接要素間を結ぶ流出入リンクを表わしている。走行時間は要素通過リンクのみに定義され、流出入リンクの走行時間はゼロとする。要素内の交通量は、要素を通過する交通量と要素内にトリップエンドをもつ交通量の1/2を加えたものとする。要素の簡略化表示を用いて複数の要素を連結すると、たとえば、Fig. 3 のようになる。

なお、ここで考えているモデルは、要素内の交通流が一律であるという意味での「連続体近似モデル」であり、交通流が二次元空間中の各地点で連続的に変化する「連続体モデル」とは区別しなければならない。

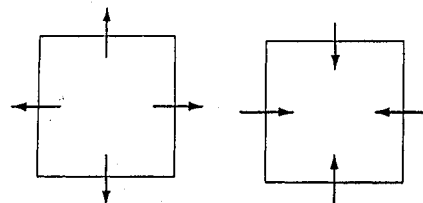


Fig. 1 Out-Flow and In-Flow of an Element.

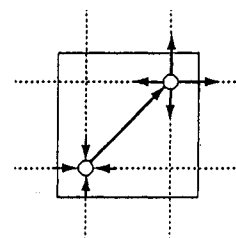


Fig. 2 Network Representation of an Element.

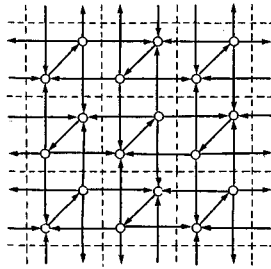


Fig. 3 Example of Approximated Network.

(2) 要素走行時間関数

要素内の細街路ネットワークを構成する個々のリンクの走行時間関数は、すべて次の修正 BPR 関数とする。

$$t_a(V_a) = t_{0a} [1.0 + r(V_a/C_a)^k] \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 t_a : リンク a の走行時間

t_{0a} : リンク a の自由走行時間

V_a : リンク a の交通量

C_a : リンク a の交通容量

r, k : パラメーター ($r=2.62, k=5.0$)

である。

要素の平均通過時間を要素内交通量の関数で表現したものが、要素 e の走行時間関数 $S_e(V_e)$ である。式 (1) と同様に、走行時間を交通量の単調増加関数と考えると、要素走行時間関数は以下のように設定できる。

$$S_e(V_e) = \alpha \frac{D_e^{1/2}}{v_{0e}} \left\{ 1.0 + \beta \left(\frac{V_e}{C_e} \right)^\gamma \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 V_e : 要素 e の交通量

C_e : 要素 e の交通容量

D_e : 要素 e の面積

v_{0e} : 要素 e の自由走行速度

α, β, γ : 単位をもたないパラメーター

である。ここでは、データ作成が容易に行えるように要素の面積、要素内の細街路網を構成する各リンクのリンク長、容量、自由走行時間などを用いて要素走行時間関数を設定している。

要素の自由走行速度 v_{0e} は、要素 e に含まれる細街路リンクの自由走行速度 v_{0a} をリンク長 L_a で重みづけした平均速度と定義する。すなわち、

$$v_{0e} = \frac{\sum_{a \in I_e} L_a}{\sum_{a \in I_e} (L_a/v_{0a})} \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここに I_e は要素 e に含まれる細街路リンクの集合を表わす。

要素が正方形であれば $D_e^{1/2}$ は要素の 1 辺の長さを表わすから、要素内細街路網が均質な格子状ネットワークのとき、式 (2) の $(D_e^{1/2}/v_{0e})$ の項は、要素の 1 辺から対辺への自由走行時間に相当する。しかし、この項だけ

では、要素の形状や要素内の細街路の分布と個々のリンクのもつ属性のばらつきが要素の自由走行時間に与える影響を考慮できないため、パラメーター α を導入して対応するものとした。

要素の容量 C_e は、細街路リンクの容量 C_a 、リンク長 L_a と要素面積 D_e を用いて次式のように定義する。

$$C_e = \frac{\sum_{a \in I_e} L_a C_a}{D_e^{1/2}} \dots\dots\dots (4)$$

この式の妥当性を調べるために、要素内の細街路網が対称で均質な格子状ネットワークを考える。格子状ネットワークの 1 辺が、 m 本の方向をもたないリンクから構成されるとき、各リンクの容量を C 、長さを L とすれば、式 (4) は

$$C_e = \frac{2m(m+1)LC}{mL} = 2(m+1)C \dots\dots\dots (5)$$

となる。式 (5) は、すべてのリンクで交通量が容量に達したときの格子状ネットワークの総通過交通量を表わしているから、 C_e は要素が処理可能な最大交通量を意味することになる。

パラメーター β と γ は、要素内の混雑率が走行時間に及ぼす影響を反映させるためのものであり、それぞれ式 (1) のパラメーター r と k に対応している。

(3) シミュレーションによるパラメーターの推定方法

式 (2) で与えた要素走行時間関数のパラメーター α, β, γ は、要素内の細街路網の形状、リンクの自由走行時間と容量のばらつき、要素内々・内外交通量の割合、要素への流入・流出方向の分布などの影響を受けるため、その値を解析的に決定することは難しい。そこで、パラメーター値に影響を及ぼす要因をランダムに変化させ、要素内での配分シミュレーションを行うことにより、パラメーター値を推定するものとした。

シミュレーションの手順は、次のとおりである。まず、Fig. 4 に示すような要素内細街路網のノード座標を変化させることにより、ネットワークの形状を任意に与える。さらに、リンク容量 C_a 、自由走行時間 t_{0a} 、OD 交通量 T_{ij} をランダムに与える。ここに、OD ペア ij とは要素

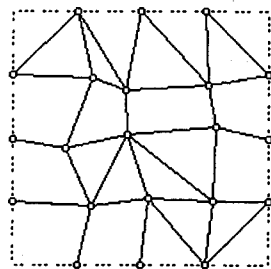


Fig. 4 Network Structure for Simulation.

境界ノードおよび要素内の発生・集中ノードペアをいう。なお、要素のすべての辺に交通の流入があり、ある辺から流入した交通が同一辺から流出することはないとしておく。

与えられた条件に対し利用者均衡配分を行うことにより、1組の要素交通量 V_e と平均要素通過時間 S_e の値が得られるから、配分に必要な条件をランダムに変更しながら配分を繰り返せば、要素走行時間関数の推定に用いる複数組の交通量と時間のデータが作成できることになる。

パラメーター α は、式(2)における $\alpha(D_e^{1/2}/v_{0e})$ の項が、要素の平均的な自由走行時間に相当するように設定すればよい。すなわち、

$$\alpha(D_e^{1/2}/v_{0e}) = \sum_{i,j} t_{0ij} T_{ij} / \sum_{i,j} T_{ij} \dots\dots\dots (6)$$

の関係を満足するように、 α の値を定める。ここに

t_{0ij} : 自由走行時の流入・流出ノード間の走行時間である。

パラメーター β, γ の値を求めるために、式(2)を変換して両辺の対数を取ると、 β と γ に関する以下の線形式を得る。

$$\ln \left\{ \frac{S_e v_{0e}}{\alpha D_e^{1/2}} - 1 \right\} = \ln \beta + \gamma \ln (V_e / C_e) \dots\dots\dots (7)$$

したがって、均衡配分より得られた複数組のデータポイントと、式(6)により推定された α の値を用いて、最小二乗法によりパラメーター β と γ の値を推定することができる。

(4) パラメーター推定結果とその考察

パラメーターに影響を及ぼすと考えられるすべての、あるいは一部の変動要因の組合せにより、約100ケースのシミュレーションを行った。具体的には、要素内細街路のリンク長、容量、自由走行速度およびODパターンをある基準値まわりでランダムに変動させ、均衡配分のための条件を設定した。1つのケースごとに、配分対象トリップ数を漸増させながら均衡配分を行って、20組のデータポイントを作成し、パラメーターを推定した。

パラメーターの推定結果を Table 1 に示す。また、リンク長、容量、自由走行速度の平均値をそれぞれ 3(km), 1500 (veh/h), 45 (km/h)、変動係数を 0.2 としたときのシミュレーション結果を Fig. 5 に示す。これらの結果から、以下のことがわかる。

① 各パラメーターの値を1つの値に定めることはできないが、推定された値の範囲は比較的小さく、おおむね安定していると判断できる。推定された要素走行時間関数の全体的な適合性も良好であり、要素走行時間関数は要素交通量 V_e 、平均通過走行時間 S_e の関係を良く再現していることがわかる。

Table 1 Results of Parameter Estimation.

Parameters	Range of Estimated Value
α	1.10 ~ 1.22
β	6.00 ~ 7.00
γ	3.60 ~ 4.50
R*	0.95 ~ 0.99

R*: Correlation Coefficient of Element Travel Time (By Simulation v.s. By Estimated Element Travel Time Function)

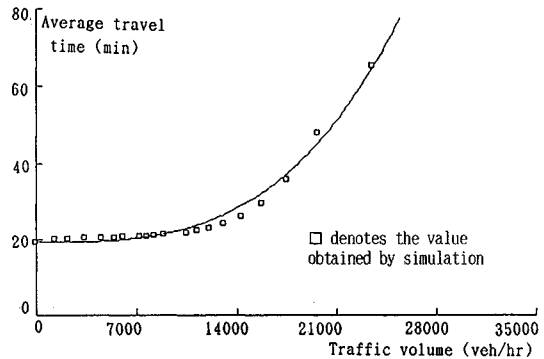


Fig. 5 Example of Estimated Travel Time Function.

② パラメーター α の値は、1よりやや大きい。先に述べたように、四角形要素においてネットワークが均質で格子状であれば、 $(D_e^{1/2}/v_{0e})$ は自由走行時間に相当するため $\alpha=1$ となる。これに対し、シミュレーションで用いたネットワークの形状はランダムであることにより、要素通過のための走行距離の平均が同じ面積をもつ要素の1辺の長さよりも長くなったため、 α が1よりやや大きな値となったものと考えられる。

③ パラメーター β は、リンク走行時間関数のパラメーター r ($=2.62$) に対応するが、その数倍程度の大きな値となっている。一般に、リンク容量をランダムに与えると、ボトルネックが生じやすくなるため、容量が均一な場合に比較して実質的な要素容量は小さくなる。すなわち、実際の容量は式(4)で与えた C_e より過小に評価されるため、逆に、パラメーター β の値が大きくなったものと考えられる。

④ パラメーター γ は、リンク走行時間関数のパラメーター k ($=5.0$) に対応するが、 k よりやや小さな値となっている。一般に、ネットワークに負荷する交通量を増加させるにつれて OD 間の所要時間も増加するが、OD 間の利用可能経路が十分に多ければ、配分経路数が次第に多くなるため、所要時間の増加割合は単一リンクの場合よりも小さくなる。このことにより、パラメーター γ は k よりも小さな値になると考えられる。なお、

γ の値は、リンク間で容量や自由走行時間のばらつきが大きいほど小さくなる傾向にあることがわかった。

これらの結果から、仮定した要素走行時間関数やパラメーター値は数値的にみて妥当なものであると考えられるが、シミュレーションによる検討が必ずしも十分ではない部分も残されている。注意すべき点として、以下の点が挙げられる。

- ① 配分対象領域の境界に位置する要素は、交通の流出入のない辺を含むため、パラメーター値の修正が必要。
- ② 要素内の詳細ネットワークの規模（リンク数やノード数）がパラメーターの精度に及ぼす影響を調べる。
- ③ BPR 関数のパラメーター r, k の値と要素走行時間関数のパラメーター α, β, γ の値との関係を調べる。

3. 連続体近似モデルによる配分計算

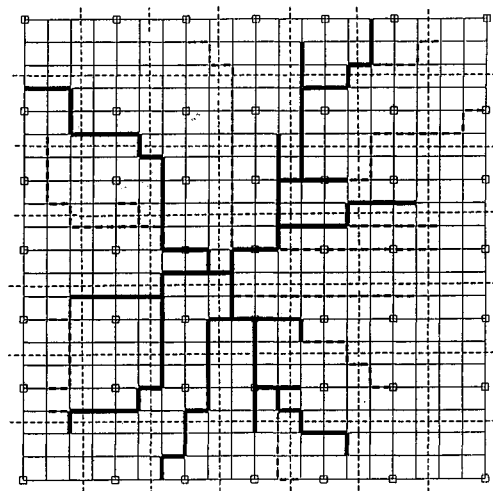
配分対象ネットワークを要素分割し、各要素を 2. で作成した要素走行時間関数を用いて連続体近似した場合について交通量配分計算を行い、提案した連続体近似モデルの数値的挙動を調べる。特に、計算時間と精度について、連続体に近似しない場合と比較・考察するほか、ネットワーク全体の混雑率が計算結果に及ぼす影響を調べる。

(1) 計算の前提条件

用いた配分対象ネットワークは、一辺 20 リンクの仮想的な格子状ネットワークであり、ノード数 441 本、リンク数（両方方向合計）1680 本、セントロイド数 49 個である (Fig. 6)。リンク長はすべて等しく、容量は 3 水準とした。自由走行時間は、図に示している範囲内でランダムに与えた。

この詳細ネットワークを、49 個の等面積の正方形要素を用いて要素分割した。要素分割の際は、現実道路網に対応させてそれぞれの要素が均質な要素内ネットワークをもつように、要素の大きさや形状を変化させるべきであるが、ここでは便宜的に最も単純な分割方式を採用した。この分割により、すべてのノードはいずれかの要素に含まれ、セントロイドはそれぞれの要素に 1 つずつとなる。詳細ネットワークにおいて要素境界と交差するリンク（以下では要素境界リンクとよぶ）を除くリンクは、いずれかの要素に含まれるが、要素境界リンクについては、境界の両側の要素にその属性を配分するものとした。

要素の自由走行時間 v_{oe} および容量 C_e の値は、それぞれ式 (3), (4) を用いて、要素内の各リンクの容量、リンク長および自由走行時間より算出した。このとき、要素境界リンクのリンク容量は両要素に加算し、リンク



	Capacity (veh/hr)	Free Travel Time (min)	Element	Centroid
—	4000	5 ~ 15	[Dashed Box]	□
- - -	2000	10 ~ 25		
⋯	1000	10 ~ 30		

Fig. 6 Detailed Network Configuration.

長および自由走行時間はその半分の値をそれぞれの要素に加算するものとした。また、セントロイドは各要素通過リンクの起点に配置した。

このような要素分割および連続体近似を行うと、ネットワーク規模は詳細ネットワークに比較してかなり小さくなる (Table 2)。正方形のネットワークを正方形要素に分割する場合は、連続体近似ネットワークのノード数、リンク数はそれぞれ次式で与えられる。

$$\text{ノード数} = 2N$$

$$\text{リンク数} = 4\sqrt{N}(\sqrt{N}-1) + N$$

ここに、 N は要素数である。

要素走行時間関数のパラメーターは、2. のシミュレーションによって推定された値を参考として、すべての要素に同一のパラメーターを与えた。その値は、

$$\alpha = 1.2, \quad \beta = 7.0, \quad \gamma = 4.0$$

である。

OD 交通量は、ネットワーク全体の平均混雑率が 0.6 程度になるように与えた。具体的には、各セントロイドから同じ交通量 (2500 トリップ) を発生させ、目的地

Table 2 Comparison of Network Size.

Measures of Network Size	Detailed Network	Continuum Approximation
Number of Nodes	441	98
Number of Links	1680	217
Number of Centroids	49	49
Memory Size (KB)	67	20

選択確率が距離に反比例するような OD パターンとした。

以上の前提条件に対して、分割配分法 (IA 法) による配分計算を行った。繰り返し回数は 10 回である。

(2) 計算時間と計算精度

a) 計算時間 Table 3 は IA 法による計算時間を、連続体に近似した場合と詳細ネットワークをそのまま用いた場合とで比較したものである。連続体近似を行うことで、計算時間は 1/5 以下に短縮されている。特に最短経路探索に要する時間の短縮効果が大きい。一般に、格子状ネットワークでは、最短経路探索に要する時間は、ノード数の 1.1~1.2 乗に比例することが確認されているが⁵⁾、連続体近似を行うと同数のノードをもつ格子状ネットワークよりもリンク数が少なくなるため、計算時間はさらに短縮されている。

b) 要素交通量の計算精度 連続体近似した場合の計算結果と詳細ネットワークをそのまま用いた場合の計算結果を要素交通量レベルで比較するために、以下の指標を用いる。

R: V^d と V^c の相関係数

AE: 平均値の差 = $E[V^c] - E[V^d]$

DSD: 標準偏差の差 = $SD[V^c] - SD[V^d]$

CV²: 共分散 = $(1-R)SD[V^c] \cdot SD[V^d]$

RMSE: 残差平方和平均

$$RMSE^2 = \sum (V_c^e - V_d^e)^2 / (N-1)$$

$$= (N/(N-1))AE^2 + DSD^2 + CV^2$$

$$RMSE(\%) = RMSE / E[V^d] \times 100$$

ここに、 V_c^e : 連続体近似しない場合の換算要素交通量 (詳細ネットワーク交通量を要素各辺ごとに流入交通量として加算し、1/2 倍することにより算出)

V_d^e : 連続体近似した場合の要素交通量

N: 要素数 (=49)

である。

CV が推計値のまわりのランダム誤差を表わしているのに対し、AE と DSD は、ネットワークの違いによって特定のリンクに交通が偏在することから生じる体系的なシステム誤差を表わしている。したがって、RMSE² の中で AE² と DSD² の占める割合が多いほど、ネット

Table 3 Comparison of CPU Time ($\times 10^{-3}$ s).

Measures of CPU Time	Detailed Network	Continuum Approx.
Average CPU per Iteration	218	30
Within Minimum Path Search	192	16
Total CPU by 10 Iterations	2420	434

Table 4 Calculation Results of Element Flow.

R	RMSE	AE	DSD	CV
0.934	2360	-1500	-930	1550
Percentage for RMSE ²				
RMSE (%)	AE ²	DSD ²	CV ²	
21.7	41.3	15.5	43.2	

ワークの連続体近似によるシステム誤差が大きくなることを意味している。

計算結果を Table 4 に示す。相関係数や RMSE (%) の値はおおむね良好であり、連続体近似することによる要素交通量の精度低下は小さいことがわかる。しかし、RMSE² に占めるシステム誤差の割合が 60 % 弱と高いことから、モデル改良の余地も残されていることがわかる。

Fig. 7 は要素通過交通量について、連続体近似する場合としない場合の相関関係を示したものである。この図から、両者は全体的にかなり良く合致しているが、連続体近似の方が交通量の少ない要素でやや過大に、交通量の多い要素ではやや過小評価となる傾向が読み取れる。すなわち、連続体近似を行うと交通量が平均化される方向に多少のバイアスがかかるが、その傾向はそれほど強くはないといえる。

c) トリップ所要時間の計算精度 詳細ネットワークで計算した総走行時間に対して、連続体近似した場合の値を相対誤差率で比較すると +3.40 % であり、連続体近似の場合が少し大きくなっているが、両者はほとんど一致している。

Fig. 8 は、トリップ所要時間の分布を表わしている。連続体近似することによりトリップ所要時間が長くなり、分布形は長トリップの割合が増加する方向へと偏っ

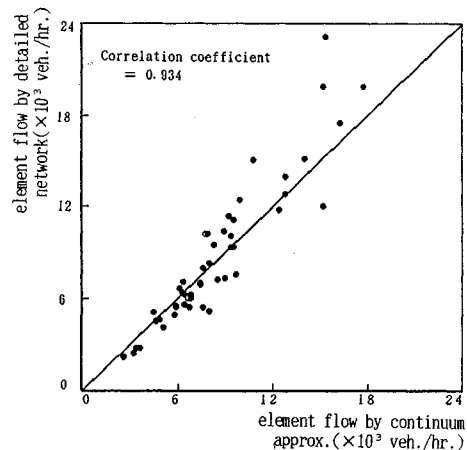


Fig. 7 Element Flows by Continuum Approximation v.s. Detailed Network.

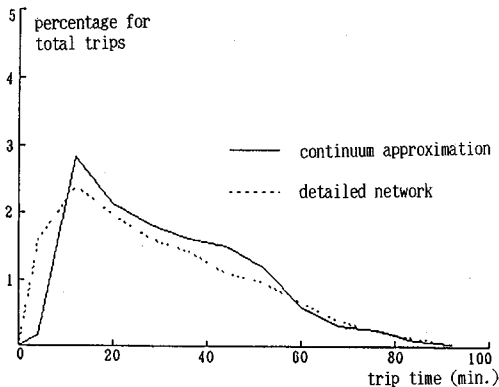


Fig. 8 Trip Time Distribution by Continuum Approximation v. s. Detailed Network.

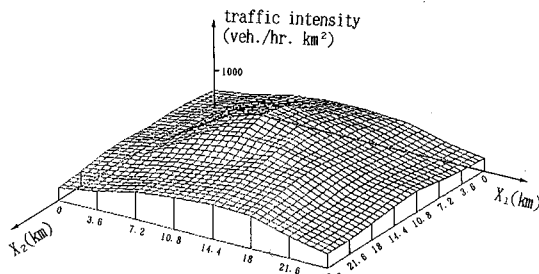


Fig. 9 Traffic Intensity Distribution.

ている。しかし、要素走行時間関数のパラメーター α を調整すれば、所要時間を一律に変化させることができるため、この誤差を小さくすることは可能であると考えられる。

d) 計算結果の表示 連続体モデルの利点の1つは、計算結果の表示が容易であることである。Fig. 9は連続体近似によって求められた交通強度の分布を表わしている。交通強度とは、要素交通量を要素面積で除して求めたものであり、要素境界の交通強度は隣接する両要素の強度の平均に等しいと仮定して図化している。この図より、交通量の多い領域中心部で交通強度の山が高くなっていることがわかる。このような三次元的表示により、計算結果の視覚的検討が容易に行える。

(3) 混雑率が計算結果に及ぼす影響

詳細ネットワークの構成とリンク属性が同一であっても、ネットワークの平均的混雑率が変われば、計算結果も異なる可能性がある。そこで、混雑率の大小が連続体近似モデルの計算精度に及ぼす影響を調べるために、OD交通量を漸増させながら(2)の計算を行った。

Fig. 10は、ネットワーク全体の平均的混雑率の増加に対する要素交通量の精度評価指標の変化を示したものである。詳細ネットワーク交通流から換算した要素交通量と、連続体近似モデルから求められる要素交通量の相

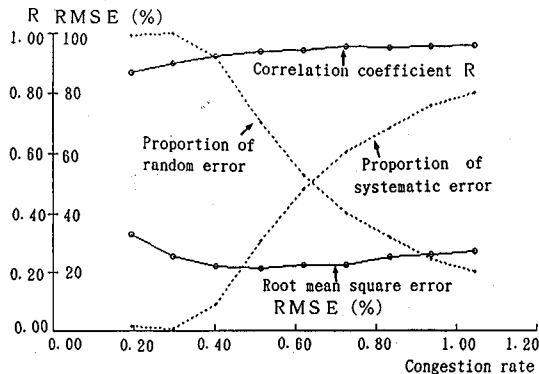


Fig. 10 R and RMSE (%) Values for Different Network Congestion Levels.

関係数 R は、0.9以上と高い値を示している。また、混雑率が高くなるにつれて、 R の値は単調に増加している。 $RMSE(\%)$ は混雑率の増加によって大幅に変化することではなく、20~30%の範囲にある。トータル誤差 ($RMSE^2$) のうちシステム誤差 ($AE^2 + DSD^2$) とランダム誤差 (CV^2) の占める割合の変化をみると、前者は混雑率の増加に従って単調に増加するのに対し、逆に後者は単調に減少していくことがわかる。

システム誤差は推計値全体のずれを表わしているから、相関係数の値にはほとんど関係ないが、ランダム誤差は定義式からも明らかのように相関係数に大きく影響する。したがって、混雑率の増加によるランダム誤差の減少に伴って、相関係数の値が高くなるのである。 $RMSE(\%)$ の変化が単調ではない理由は、システム誤差とランダム誤差の変化が相殺されたためと考えられる。

平均混雑率が高くなるとシステム誤差が大きくなる理由は、次のように考えられる。連続体近似しない場合では、混雑率が高くなるにつれてODペア間の配分経路数が多くなるため、ネットワーク全体に交通が分散する。一方、連続体近似すると、混雑率の増加に伴う配分経路数の増加割合が連続体近似しない場合に比較して相対的に小さく、迂回交通が発生しにくい。そのため、詳細ネットワークでは交通量が増加している要素の通過交通量を過小に評価することになる。これは、要素容量の設定が詳細ネットワークでの実質的な要素容量よりも過大に評価していることと関連していると思われる。この誤差は、混雑率が高い場合に一層顕著になると考えられる。

以上、(2)、(3)の結果をまとめると、①ネットワークの連続体近似により配分に要する計算時間は大幅に短縮されること、②要素交通量およびトリップ所要時間は連続体近似しない場合に比較的良く一致していることが確認できた。

しかし、誤差の成分の中には、要素の連続体近似によるシステム誤差も多く含まれるため、混雑率が高い場合には注意が必要であることがわかった。詳細街路網のリンク走行時間関数のパラメーターがシステム誤差に及ぼす影響は明らかではないが、パラメーター値が大きければ混雑の影響が増幅されるため、システム誤差が増大する可能性がある。配分対象領域の境界要素や、要素内ネットワークの不均質性の処理についても検討する必要がある。

なお、計算時間と精度との関係を調べるために、逐次配分結果が得られる Frank-Wolfe 法による利用者均衡配分も行ったが、計算時間を増加させても、 R や $RMSE(\%)$ の指標値に著しい改善はみられず、計算精度の向上は認められなかった。このことは、提案した連続体近似モデルの精度には限界が存在することを示している。

4. 2 レベルネットワークを用いた配分計算

(1) 2 レベルネットワークの考え方

提案した連続体近似モデルの欠点として、①要素内の概略的な交通の流れはわかるが、詳細ネットワークのリンク交通量は得られないこと、②要素内の詳細ネットワークが均質でない場合に誤差が大きくなる可能性があること、が挙げられる。

この問題に対して、道路網を幹線道路(上位ネットワーク)と非幹線道路(下位ネットワーク)に分離した2レベルネットワークを用いて配分計算を行うことが考えられる。非幹線道路は連続体に近似するが、幹線道路は通常のネットワークで表示すれば、幹線道路に関してはリンク交通量を求めることができる。また、要素内の詳細ネットワークが非幹線道路のみによって構成されるため要素が均質になり、計算精度の向上が期待できる。

2レベルネットワークを用いた場合のネットワークの表示の一例を Fig. 11 に示す。上位ネットワークと下位ネットワークは、ダミーリンクで連結されている。1つ

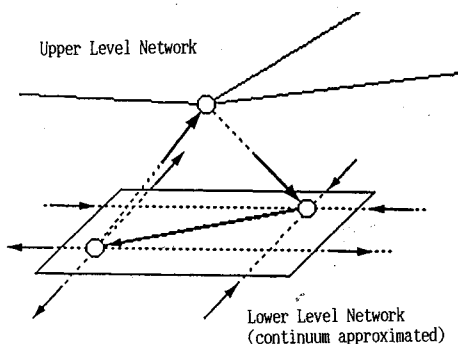


Fig. 11 Example of Two Level Network Representation.

の要素におけるダミーリンクの数は、要素内にある上位ネットワークのノード数の2倍となる。

(2) 数値計算例

3. で用いた詳細ネットワークに田の字形の高速道路網を付加し、高速道路を上位ネットワーク、平面街路を下位ネットワークとした。平面街路を連続体近似する場合としない場合について、それぞれ交通量配分計算を行い、高速道路のリンク交通量の計算結果を比較・考察する。

Fig. 12 は、高速道路ネットワークのリンク交通量を比較したものである。平面街路を連続体に近似する場合としない場合の交通量の相関係数は 0.954 と高く、両者は良く一致していることがわかる。しかし、平面街路を連続体近似すると、高速道路のリンク交通量が全体としてやや過大に評価されている。この理由は、要素走行時間関数のパラメーターが高速道路と平面街路との交通量分担にも影響しているためと考えられる。特に、パラメーター α の値は、下位ネットワークの平均的なサービス水準を規定しており、与えた α の値 ($=1.2$) では平面街路の所要時間がやや過大に評価されている。したがって、 α の値を調整することで、全体的な交通量の偏りを解消することは可能であると思われる。

2レベルネットワークを用いることの実用的な意義は、次のように考えることができる。幹線を対象とした道路網整備計画では、幹線道路区間の交通量は計画情報として必要であるが、細街路の交通量は特に取り出す必要がない場合もある。しかし、細街路網は幹線の交通量に影響を与えているため、その存在を無視するわけにはいかない。このような場合、非幹線道路網を連続体近似すれば、計画に見合った精度の配分結果が効率的に得られるものと思われる。また、非幹線道路であっても区間交通量が必要ならば、その区間を含む要素だけ通常の

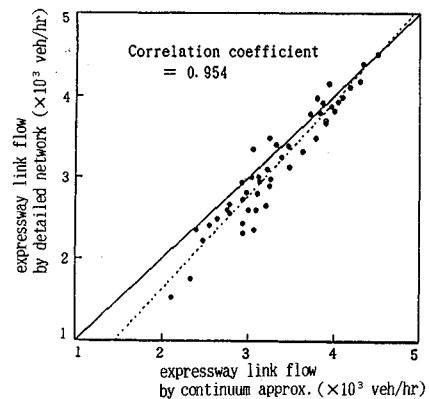


Fig. 12 Link Flows of Upper Level Expressway by Continuum Approximation v. s. Detailed Representation of Lower Level Street Networks.

ネットワークで表示すればよいことになる。

5. おわりに

本研究では、ネットワークの要素分割と要素内詳細ネットワークの連続体近似による交通量配分計算の方法を開発した。得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 分割した要素内では交通流が一様で方向性をもたないとして仮定することにより、要素内ネットワークを連続体とみなし、そのパフォーマンスを要素走行時間関数で表わした。この関数はリンク走行時間関数にアナロジーさせたものであり、要素を通過する総交通量と平均所要時間の関係を表わしている。

(2) 要素の連続体近似のために必要な情報は、要素内のリンク長、リンク容量および自由走行速度であり、詳細なネットワーク表示は不必要であるため、データ作成作業が省力化できる。要素内ネットワークがどのように高密度となっても連続体近似は可能であり、精度は向上する。

(3) 配分シミュレーションの結果を用いて、要素走行時間関数のパラメータを推定したが、設定した条件の範囲内ではほぼ安定した推定値を得ることができた。

(4) ネットワークを分割し連続体近似すれば、交通量配分に必要な計算時間は詳細ネットワークの規模によらず要素の数のみに依存するため、大幅な時間短縮が可能となる。

(5) 連続体近似による配分計算の結果は、連続体近似しない場合の結果と良く一致しており、精度面での限界はあるものの、提案した方法の有効性が確認できた。また、計算結果の二次元的表示により、交通流のマクロな視覚的把握が容易となることを示した。

(6) 幹線道路網は通常のネットワークで表示し、細街路は連続体近似するという2レベルネットワークの考え方を用いれば、幹線区間のリンク交通量を得ることができるほか、計算精度の向上も期待できる。

このように、本研究で提案した方法は、高密交通圏のマクロな交通流解析に適用し得る可能性をもつことが示されたが、以下のような課題が今後に残されている。

(1) 要素走行時間関数のパラメータ推定に関して、ケース設定を拡大する必要がある。要素内詳細街路網のグラフの諸条件をはじめ、要素の属性に応じてパラメータ値を修正することも考えられる。また、詳細ネットワークのリンク走行時間関数のパラメータ r と k の値は固定しているが、これらの値と要素走行時間関数のパラメータ値との関連についても調べる必要がある。

(2) 配分対象ネットワークの要素分割方法の検討が必要である。計画対象地域の中心部は細分割し、周辺部

は粗分割する方法や、中心部のみ通常のネットワーク表示を行うことなどが考えられる。また、計算時間を規定する分割数と、推計精度との間のトレードオフ関係を調べておく必要がある。

(3) 実際への適用において、現実道路網をいったんネットワーク化した後に、要素分割し要素走行時間関数を作成するという手順では、配分に要する作業量が逆に増大することも考えられる。しかし、式(3)、(4)の定義を部分的に修正すれば、現実道路網の諸属性の値から、直接、要素の容量と自由走行時間の値を求めることも可能であるため、その具体的方法を開発する必要がある。

最後に本研究を進めるうえで、数値計算において多大な協力をいただいた京都大学大学院 鷹尾和享君(現在、京都府庁勤務)、進士 肇君に感謝の意を表します。また、本研究は文部省科学研究費(一般研究C, No.63550388)を得た研究成果の一部であり、ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Daganzo, C.F.: An Equilibrium Algorithm for the Spatial Aggregation Problem of Traffic Assignment, *Transp. Res.*, Vol.14 B, pp.221~228, 1980.
- 2) Hearn, D.W.: Practical and Theoretical Aspects of Aggregation Problems, in *Transportation Planning Models* (Florian, M. ed), North-Holland, pp.257~287, 1984.
- 3) Friesz, T.L.: Transportation Network Equilibrium, Design and Aggregation: Key Developments and Research Opportunities, *Transp. Res.*, Vol.19 A, pp.413~427, 1985.
- 4) 加藤 晃・宮城俊彦・松葉秀樹・真野峰行: Bendersの分解原理を応用した交通配分手法の実用性, 土木計画学研究・講演集, No.10, pp.399~406, 1987.
- 5) 飯田恭敬・朝倉康夫・広川誠一・鷹尾和享: ネットワークの分割およびバンドリングによる交通量配分の簡略化, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.227~234, 1988.
- 6) 井上博司: 道路網における等時間原則による交通量配分に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, pp.110, 1975.
- 7) Eash, R.W., Chon, K.S., Lee, Y.J. and Boyce, D.E.: Equilibrium Traffic Assignment as an Aggregated Network for Sketch Planning, *Transp. Res. Rec.*, No.944, pp.30~37, 1983.
- 8) 内山久雄・林 良嗣・榎谷博光・大島邦彦: 大規模交通ネットワークにおける経路探索の簡略化手法に関する研究, 第4回土木計画学研究発表会・講演集, pp.413~419, 1982.
- 9) 林 良嗣・林由起夫・野口宏一: 階層的経路探索を用いた大規模道路網配分計算の簡略化手法, JSCE第37回年次学術講演会講演概要集IV, pp.395~396, 1982.
- 10) 飯田恭敬・高山純一・横山日出男: メッシュ分割によるネットワーク表示の簡略化手法を用いた交通量配分計算

- 法, 土木計画学研究・論文集, No. 2, pp.149~156, 1985.
- 11) Chan, Y. : A Method to Simplify Network Representation in Transportation Planning, *Transp. Res.*, Vol. 10, pp. 179~191, 1976.
 - 12) Haghani, A. E. and Daskin, M. S. : Network Design Application of an Extraction Algorithm for Network Aggregation, *Transp. Res. Rec.*, No. 944, pp. 37~46, 1983.
 - 13) Bovy, P. H. and Jansen, G. R. M. : Network Aggregation Effects upon Equilibrium Assignment Outcomes, ; An Empirical Investigation, *Transp. Sci.*, Vol. 17, pp. 240~262, 1983.
 - 14) 枝村俊郎・森津秀夫・木下暢男・樋口和夫：配分対象道路網作成の自動化, 第3回土木計画学研究発表会・講演集, No. 3, pp. 341~349, 1981.
 - 15) 溝上章志・松井 寛・二ノ宮明彦：道路網の集約化が配分交通量の推定精度に与える影響, 土木計画学研究・講演集, No. 10, pp. 377~384, 1987.
 - 16) 田口 東：交通網の分析手法, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 23, No. 12, pp. 756~763, 1978.
 - 17) Daganzo, C. F. : Network Representation, Continuum Approximation and a Solution to the Spatial Aggregation Problem of Traffic Assignment, *Transp. Res.*, Vol. 14 B, pp. 229~239, 1980.
 - 18) Dafermos, S. C. : Continuum Modeling of Transportation Networks, *Transp. Res.*, Vol. 14 B, pp. 295~301, 1980.
 - 19) 佐佐木綱・朝倉康夫・楊 海：連続的空間における単一 OD ペアに関する交通量配分, 土木計画学研究・講演集, No. 11, pp. 23~30, 1988.
 - 20) Yang Hai : Continuum Modeling of Large Scale Traffic Assignment, pp. 10~38, Kyoto Univ., Master Thesis, 1989.
 - 21) 飯田恭敬・朝倉康夫・楊 海・進士 肇：ネットワークの連続体近似による交通量配分, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 543~550, 1989.
 - 22) 伊理正夫ほか：地理的情報の処理に関する基本アルゴリズム, 日本 OR 学会報文シリーズ・T-83-1, pp. 147~156, 1983.

(1990. 4. 23・受付)