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

東京理科大学理工学部　正員　内山久雄
名古屋大学工学部　正員　林　良嗣
東京大学大学院　○学生員　槇谷博光
東京大学大学院　学生員　大島邦彦

1. はじめに

広域都市圏における土地利用計画や交通計画の分析を行う場合、土地利用と交通の相互依存関係を明示的に表現し得るモデルが必要であり、大型計算機を用いた総合的交通土地利用モデルが開発されてきている。[1)]

交通ネットワークモデルは各土地の有する地理的ポテンシャルを表現する最も重要な要因としての交通利便性を求めるため、交通ネットワーク上での各地点間の所要時間を計算することを目的としており、上述のような総合的交通土地利用モデルの中のサブモデルとして位置づけることができる。

都市圏の交通ネットワークの主なものは鉄道ネットワークと道路ネットワークであるが、これらの扱い方には次のような相違がある。すなわち、鉄道の場合には区間交通量と所要時間を切り離して扱い得るが道路の場合には後者が前者に依存し、これらを別々に扱うことはできない。従って鉄道ネットワークモデルでは所与のネットワーク上での最短経路探索を迅速に行うための算法の開発に主眼がおかれ、一方道路ネットワークモデルでは最短経路探索と交通量配分をいかに合理的に組み合わせて各区間の交通量及び所要時間を精度よく求めるかという観点から研究が行なわれる。

最短経路探索手法については、数理計画法あるいはネットワーク理論の分野で一般論が展開され、それらの手法を実際の交通ネットワークに適用した例もあるが[2)]、首都圏のような大規模交通ネットワークに適用しようとすると膨大な計算時間を必要とするのが現状である。

本研究ではネットワークを階層的に再構成することによって大規模な鉄道ネットワーク及び道路ネットワークを効率的に解くための手法を構築し、現実の大規模ネットワークへの適用を試みる。

2. 鉄道ネットワーク計算の簡略化手法

(1) 鉄道ネットワークの特徴

現実の鉄道ネットワークの物理的形状は、例えば首都圏について見た場合、道路ネットワークに比べればはるかに単純（駅数約1200，区間数約1300）である（図1）。

しかしながら鉄道ネットワーク上での交通挙動を見ると、同一路線上を等級を異にする複数の列車（普通、準急、急行など）が運行する、他路線への乗換えあるいは同一路線上での異等級列車への乗換えが存在するなどの特徴があり、これらを表現するためには図2に示すようにして仮想的なネットワークを構成する必要がある。すなわち、あらゆる駅について異なる列車等級毎、さらに上り線、下り線別にそれぞれ

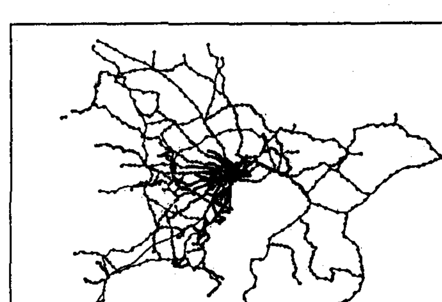


図1．首都圏の鉄道ネットワーク

仮想的なノード及びリンクを設け、各駅内での乗換えを表現するための仮想的なリンクを付与した仮想ネットワークを構成しなければならない。 首都圏の場合仮想ノードは約5000、仮想リンクは約12000が必要で、現実のネットワークよりもはるかに大規模かつ複雑なネットワークを扱わねばならない。

（2）鉄道ネットワーク階層モデル

本研究では上述のような大規模な鉄道ネットワークを計算する際の効率化を図るため、以下に述べるようにもとのネットワークを2階層に分け、各サブネットワークごとの最短経路探索結果を組み合わせることによって任意の2ノード間の最短経路を求めることにする。 以下に階層的なネットワークの構成法及び最短経路探索の手順の概要を示す。

①ネットワーク全体を、隣接する2つの分岐駅（始発・終着駅も含む）にはさまれる m 個のサブネットワーク $AP_1, AP_2, \cdots AP_m$ に分割する。 これらをアプローチネットワークと称する。

②分岐駅間を結ぶリンクは、例えば図3-1のように模式化して表わされるが、これを図3-2のような統合された3本の仮想リンクで表わし、また各分岐駅に接続する列車等級毎に仮想ノードを設ける（図3-3）。 これを分岐駅ネットワークと称する。

③各アプローチネットワーク AP_s $(s=1,2,\cdots m)$ 内の全てのノード間の最小所要時間マトリックス T_s $(s=1,2,\cdots m)$ を求める。これは図4における対角成分マトリックスを求めることに相当する。

④分岐駅ネットワーク内の全てのノード間の最小所要時間マトリックス T_0 を求める。

⑤任意の2駅 $i\in AP_i$ 及び $j\in AP_j$ について、i から j への最小所要時間は上で求めた T_i、T_j 及び T_0 を用いて図5のように求めることができるが、解の厳密性を保証するためにはあらゆる乗換えを考慮する必要があるため、最小所要時間 $T_{min}(i,j)$ は次式で与えられる。

$$T_{min}(i,j)=\underset{\substack{k_1,k_2\in K\\ C_1\sim C_4\in C}}{\mathrm{Min}}\left(t^{C_1}_{iI_{k_1}}+w^{C_2}_{I_{k_1}}+t^{C_2C_3}_{I_{k_1}J_{k_2}}+w^{C_4}_{J_{k_2}}+t^{C_4}_{J_{k_2}j}\right)\cdots(※)$$

ここに、

C：列車等級（普通、準急、急行など）

K：隣接する2つの分岐駅のうち、いずれを経由するかを示す（$K=1,2$）。

$t^{C_1}_{iI_{k_1}}$：i より最寄の分岐駅 I_{k_1} まで等級 C_1 の列車で行くの

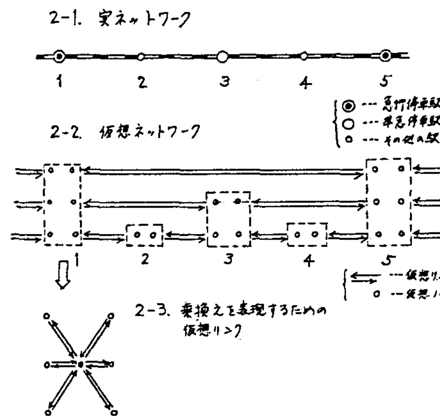


図2. 仮想ネットワークの構成法

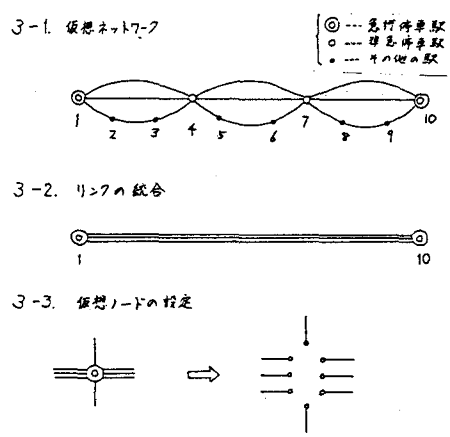


図3. リンクの統合および仮想ノードの設定

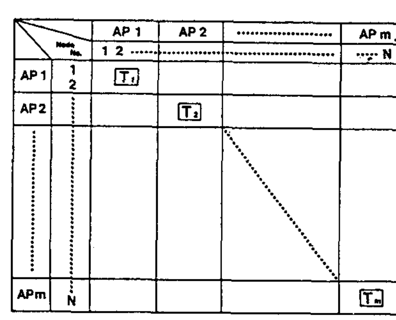
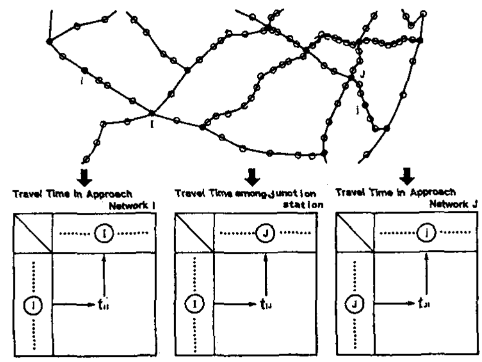


図4. 所要時間マトリックス

に要する時間

$t^{C_2C_3}_{I_{k_1}J_{k_2}}$：分岐駅$I_{k_1}$より$C_2$列車で出発し、分岐駅$J_{k_2}$に$C_3$列車で到着する経路における所要時間.

$w^{C_2}_{I_{k_1}}$：分岐駅I_{k_1}において、J_{k_2}方面に向うC_2列車に乗りえるに要する平均待時間。



$t_{ij} = t_{iI} + t_{IJ} + t_{Jj} +$（I, J駅での乗換え待時間）

図5. 任意の2駅間の所要時間の求め方

(3) 一般的な計算方法との比較

与えられた鉄道ネットワークに対して(1)で述べたような仮想ネットワークを構成し、現在最も優れた最短経路探索手法であると言われるDijkstra法[3]を直接適用した場合に比べ、上述の階層モデルがどの程度計算の手間を省くことができるかという点について概算する。

いま、ノード総数$N=ma$(個)のネットワークが与えられたとして、Dijkstra法を直接適用して全ノード間の最小所要時間を求めるための演算回数は一般にN^{α}($2<\alpha\leq 3$)で与えられる。ここでは簡単のため$\alpha=3$とする。このネットワークをm個の等規模のアプローチネットワークに分解したとすると、各々のアプローチネットワーク内での全ノード間の最小所要時間を求めるための演算回数はa^3となる。また、分岐駅ネットワーク内の全仮想ノード数はおよそ$2mg$(gは1路線当りの平均列車等級数)であるから、$g=3$の場合について考えると、分岐駅ネットワーク内の全ノード間の最短経路探索に要する演算回数は$(6m)^3=216m^3$となる。そして任意のODペア$i\in AP_i$及び$j\in AP_j$について図5のような足し算が必要で、その総数は${}_NC_2 = ma(ma-1)/2$となる。従ってDijkstra法及び階層モデルによる演算回数をそれぞれF_D、F_Hとすると、

$$F_D = m^3a^3 \qquad F_H = ma^3 + 216m^3 + ma(ma-1)/2$$

故に両者の比は、

$$F_H/F_D = \frac{1}{m^2} + \frac{216}{a^3} + \frac{ma-1}{2m^2a^2}$$

この比の値をいくつかのm, aの値の組について実際に計算してみると表1のようになり、階層モデルによってかなりの計算時間の短縮が期待できることがわかる。

N	m	a	F_H/F_D
300	30	10	0.22
	20	15	0.07
480	60	8	0.42
	40	12	0.13
780	78	10	0.22
	60	13	0.10

表1. Dijkstra法と階層モデルとの演算回数比較

(4) 大規模ネットワークへの適用

以上のような鉄道ネットワーク階層モデルを実際の鉄道ネットワークに適用し、Dijkstra法を直接適用した場合との比較を行なう。

①対象ネットワーク

ここでは首都圏の鉄道ネットワークのうち東京及び神奈川に位置する11路線を選んで構成したものをサンプルネットワークとする(図6)。このネットワークの実ノード(駅)数は188、実リンク(区間)数は202であり、首都

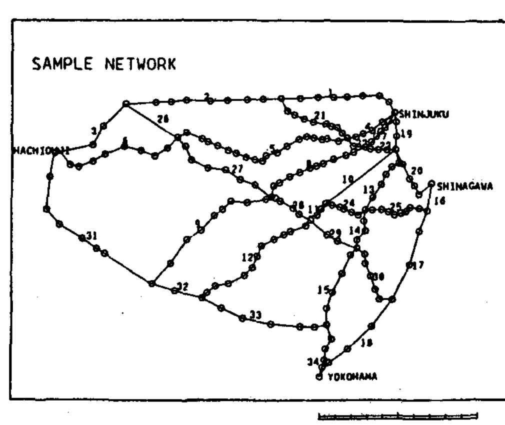


図6. サンプルネットワーク

圏全域のほぼ6分の1の規模を有するが、これを先述のように仮想ノード、仮想リンクに分解すると、仮想ノード数710、仮想リンク数2048となり，かなり大規模なものとなる。

②モデルの適用

図6のサンプルネットワークを上述のように仮想ノード、仮想リンクに分解し、Dijkstra法をそのまま適用して計算を行なった。一方、階層化の考え方に従い、図7に示すような分岐駅ネットワーク、さらに個々のアプローチネットワークに分けて計算を行なった。なお、今回の計算では「全駅→全駅」、「全駅→特定の1駅」の2ケースについて厳密な最短経路を求めている。

計算の結果は表2に示す通りであり、Dijkstra法をそのまま適用した場合に比べて階層モデルがかなりの計算時間を節約していることがわかる。

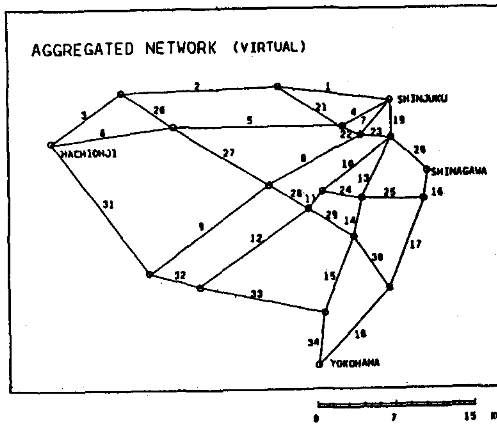


図7. 分岐駅ネットワーク

(5) 鉄道ネットワーク計算の簡略化手法

交通土地利用モデルの中にあっては、全体の整合性からみて所定の誤差範囲内でネットワーク計算を簡略化することが許される場合や、必要とされる最短経路情報もゾーン中心駅のような特定の駅についてのみでよい場合が多々ある。

そこで、このような観点から、利用目的に応じた簡略解法について提案する。この解法は、先述の階層モデルにおいて最短経路探索の過程で種々の仮定を設け、結果の厳密性は多少損われるが計算時間の大幅な短縮を図るものである。

①近似解法

この解法は先の(※)式において比較検討される最短経路候補の数を減らすことによって計算時間の短縮を図るものであり、生ずる誤差を一定の許容範囲内に抑えることが可能である。

すなわち、許容誤差をεとするとき、

$$T_{min}(i,j) = \mathop{\mathrm{Min}}_{\substack{k_1, k_2 \in K \\ c_1, c_4 \in C \\ c_2, c_3 \in C'}} \left(t^{c_1}_{iI_{k_1}} + W_{I_{k_1}} + t^{c_2 c_3}_{I_{k_1} J_{k_2}} + W_{J_{k_2}} + t^{c_4}_{J_{k_2} j} \right)$$

ただし、集合C'は

$$t^{c_2 c_3}_{I_{k_1} J_{k_2}} \leq (I_{k_1} と J_{k_2} の最小所要時間) + \varepsilon$$

を満足するc_2, c_3の集合であり、$W_{I_{k_1}}$および$W_{J_{k_2}}$はそれぞれI_{k_1}、J_{k_2}の2駅でのあらゆる乗換え待時間の最大値である。

	手法	計算時間
全駅間	Dijkstra法	9 min : 09.21 sec
	階層モデル	6 : 47.24
全駅より特定の1駅	Dijkstra法	9 : 09.21
	階層モデル	0 : 05.24

表2. Dijkstra法と階層モデルとの計算時間の比較

手法		所要時間	誤差
Dijkstra法		9 min : 09.21 sec	
近似解	Case-1 (許容誤差5分)	2 : 43.03	$\mu = 1.9$ min $\sigma = 2.66$ min
	Case-2 (許容誤差15分)	0 : 36.51	$\mu = 2.1$ min $\sigma = 2.73$ min

(μ: 誤差の絶対値の平均
σ: 誤差の標準偏差)

表3. 近似解法による計算時間

手法	計算時間
Dijkstra法	1 min : 28.76 sec
特定駅間の解法	0 : 11.10

表4. 特定駅間の解法による計算時間（33駅間）

この種のモデルの例として本研究では次の2つの場合について、図6のネットワークを対象として計算を行なった。即ち、Case-1として誤差の最大値$\varepsilon = 5$（分）とし、Case-2として$\varepsilon = 15$（分）とした。結果は表3に示す通りであり、Dijkstra法に比べ、計算時間を大幅に短縮している。また、Case-1、Case-2ともに平均誤差は2分程度であり、通常の計画分析においては十分実用に耐え得るものと考えられる。

②特定駅間の解法

これは、ゾーン中心駅のような特定駅間の所要時間のみが必要とされる場合に有利な解法で、階層モデルで定義された分岐駅ネットワークをこれら特定駅をも含めたものにまで拡張し、その上での最短経路探索のみによって特定駅間の所要時間を求めるものである。 この解法はネットワーク構成自体を簡略化しているため、表4に示すように計算時間は他の方法に比べて圧倒的に短く、しかも得られる結果は厳密である。

3. 道路ネットワーク計算の簡略化手法

(1) 道路ネットワークの特徴

道路ネットワークは、細街路も含めればその規模は膨大となり、首都圏のような広域の道路ネットワークについて計算を行うためには、もとのネットワークの特質を損うことなくネットワークを統合する必要がある。

また、鉄道の場合と異なり、各経路の所要時間は交通量によって大きく違ってくるため、分割配分法により最短経路探索と交通量配分を繰り返し実行する必要があり、1回の最短経路探索に要する演算時間をできる限り小さく抑えることが必要である。 さらに、上述のように統合化された各リンクに対して容量制約式としてのQ-V曲線あるいはK-V曲線をどのように与えるかという点が重要な問題になる。

本研究ではIA法を基礎として、ODペア間の所要時間を能率的に見出すために以下に述べるような考え方にもとづいて道路ネットワークを階層化し、OD交通需要量をそのトリップ長に応じて各階層に配分する方法を構築することを試みる。

(2) 階層的ネットワーク構成

本研究では演算時間が短かく比較的信頼性のあるOD分割配分法を基礎とし、OD交通量をそのトリップ長に応じて長トリップ、短トリップの2階層に分解し、以下に述べるようにして構成される階層的なネットワークに対してこれらを配分することにより、演算時間の短縮と精度の向上を図る。

すなわち、図8に示すようにOD交通量を長トリップと短トリップに分け、長トリップについては運転者が細かい道路に関する情報に暗く幹線道路を選択するのに対して短トリップについては運転者が細かい道路に詳しく種々の迂回路を選択することが可能であるという前提のもとに、幹線道路に対して長トリップを優先的に配分し、然る後短トリップを全道路に対して配分するというものである。

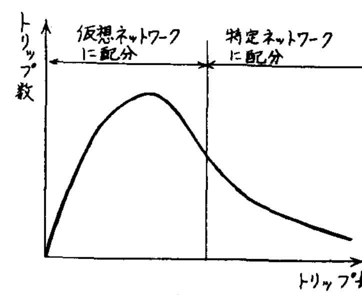


図8. トリップ長に応じた配分

このようなOD交通量の階層化に伴い、ネットワークの階層化が必要となるが、本研究においては主要地方道以上の全道路よりなる基本ネットワーク(図9)にもとづいて、長トリップ交通配分用の幹線道路よりなる特定ネットワークとそれをも含めた短トリップ交通配分用の集約された仮想ネットワークを作成する。

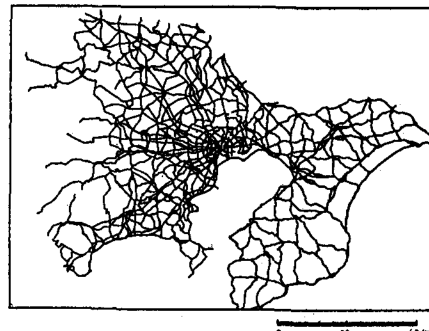


図9. 首都圏の基本ネットワーク

図10は千葉県全域についての基本ネットワーク図であるが、特定ネットワークはこの基本ネットワークより幹線道路を抽出することにより得られる(図11)。 一方仮想ネットワー

クは各ゾーンにひとつの代表ノードを対応させ、ゾーン内の全てのノードをその通過交通量で重みづけした重心位置にこの代表ノードを設定し、隣接する全ての代表ノード間をそれぞれ1本の仮想的なリンクで連結することにより得られる(図12)。　このようにしてネットワーク構造を簡略化することに加え、階層的な交通量配分によって最短経路探索を行う地域が限定されるため演算時間が大幅に短縮される。

(3) 交通量配分の方法

長トリップを対象とした幹線道路網上への配分に際しては、従来よりよく用いられているQ-K-Vの式を容量制約式として用いることにするが、仮想ネットワークへの配分計算には各ゾーンの面的特徴を考慮した配分を行うため次のように定義されるD-V式を用いることとする。

まずあるゾーンiの中を走行する自動車の総数T_iは次のようになる。

$$T_i = \sum_k \left(\frac{q_i^k}{v_i^k} \times l_i^k \right)$$

ただし、

q_i^k：iゾーンkリンクの断面交通量（台/時）

v_i^k：iゾーンkリンクの平均走行速度（Km/時）

l_i^k：iゾーンkリンクのリンク長（km）

これを用いてゾーン内の自動車面密度D_iを次のように定義する。

$$D_i = T_i / r_i \quad , \quad r_i = \sum_k \left(l_i^k \times w_i^k \right)$$

ただし、

D_i：iゾーンの単位道路面積あたりの自動車走行密度（台/km・m）

r_i：iゾーンの全道路面積（km・m）

w_i^k：iゾーンkリンクの車道幅員（m）

また、ゾーン内の平均走行速度V_i(Km/時)は次のように表現される。

$$V_i = \frac{\sum_k \left(q_i^k \times l_i^k \right)}{\sum_k \left(q_i^k \times l_i^k / v_i^k \right)}$$

上記のようにして得られるD、Vを全ゾーンについて算出し、統計的にパラメータ推定することによってこの関係式を設定することにする。　千葉県の道路データより上述のようなD-V関係式を推定したものが図13である。

(4) 千葉県道路網への適用

本研究における配分手法は広域都市圏の大規模道路ネットワークを対象とする交通量配分を可能なものとし、地域間所

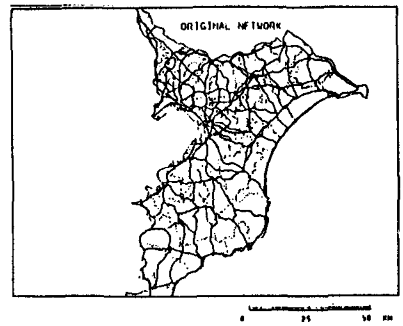


図10. 基本ネットワーク

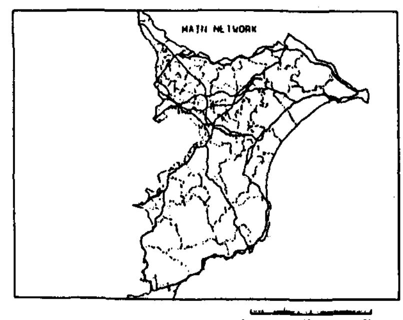


図11. 特定ネットワーク

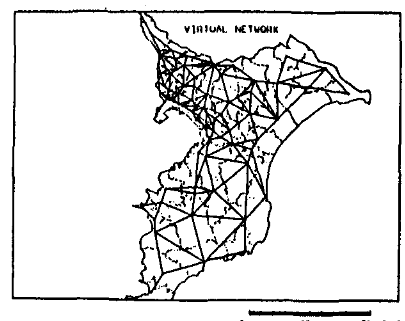


図12. 仮想ネットワーク

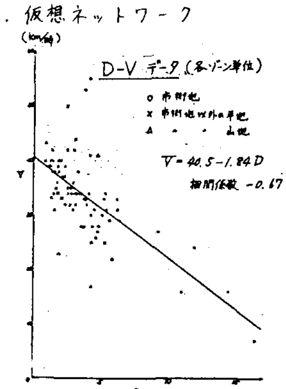


図13　D-V 関係式

要時間をある程度の精度で得ることを目的としているが、その実験的段階として千葉県道路網への適用を試みている。

ゾーニングは昭和53年度東京都市圏パーソントリップ調査に従い、84個のゾーンに分割している。 またOD表は、本来パーソントリップ調査結果を用いるべきであるが、分析時点でまだ集計されていないため、建設省関東地方建設局による自動車OD調査（昭和52年）を用いた。 また道路属性データについては、「全国道路情勢調査－千葉県」（昭和53年）によっている。

計算に用いた基本ネットワーク、特定ネットワーク、仮想ネットワーク、及びD-V式はそれぞれ図10～13に示す通りで、配分計算結果からランダムにODペアを抽出し、実測値との関係をグラフにプロットしたものが図14である。

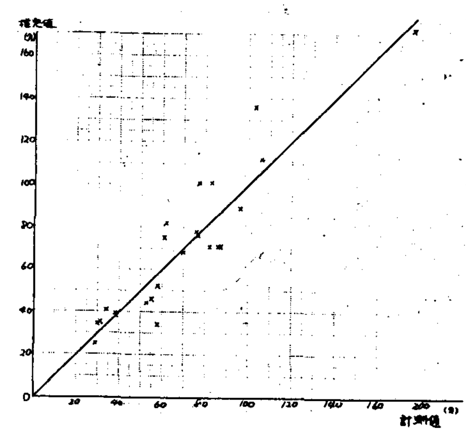


図14. 所要時間比較

同図を見ればわかるように、実測値と推定値とのかい離のほとんどは10分程度以下におさまっており、本研究における配分方法は十分実用に耐えうるものであると考えられる。

4. 結 語

本研究における成果は以下のように要約することができる。

まず、鉄道ネットワークに関しては、

(1) ネットワークを階層的に再構成することにより、従来の最短経路探索手法をそのまま適用する場合に比べて計算量を大幅に縮小し、首都圏のような大規模鉄道ネットワークに対しても適用可能なモデルを構築した。

(2) 種々の分析レベルにおける目的や必要精度に応じてネットワーク構成あるいは最短経路探索アルゴリズムを簡略化することにより、計算時間を飛躍的に短縮することができた。

(3) 階層的なネットワークの構成及び計算により、多数のネットワーク代替案の比較に要する総計算時間を大幅に節約することができた。

また、道路ネットワークについては、本研究での階層的な交通量配分方法の開発により、従来困難であった大規模道路ネットワークを対象とした交通量配分が可能となり、従来の配分方法の欠点を極力少なくするとともにより普遍的・客観的なモデル構築を可能にすることができた。

最後に、本研究を進めるにあたり東京大学中村英夫教授には基本的概念について多くの有益な示唆をいただいたことを記し、ここに深甚なる謝意を表する次第である。 さらに、日本IBM東京サイエンティフィックセンターの松家英雄、杉本和敏の両氏には計算機システムの面から貴重なアイデアをいただいた。 また、ネットワーク関係のデータ収集、プログラム開発には主に東京理科大学の福田宜彦君があたった。 各位の協力に負うところが大きいことを付記し、深謝する次第である。

〈参考文献〉

1) 中村英夫他：土地利用・交通分析支援システム，第2回地域計画と地域データベースシンポジウム，昭和56年 他
2) 林 良嗣：公共輸送機関網における実用的旅客配分法，名古屋大学工学部研究報告 No. 74032 他
3) 伊理正夫他：ネットワーク構造を有するオペレーションズリサーチ問題の電算機処理に関する基礎研究，日本オペレーションズリサーチ学会，昭和48年 他