

道路網構成問題の解法について (Ⅲ)

梶 谷 有 三*

On the Solution Algorithm of the Road Network Design Problem (Ⅲ)

Yuzo MASUYA

要 旨

ある OD 交通量(需要交通量)を効率的に処理するためにはどのような道路網構成が望まれるかという問題は、道路交通問題の基本的な課題のひとつである。この問題の実際的な応用としては、道路網新設・改良・運用計画及び道路除雪線網計画などである。

本研究は、従来の解法アルゴリズムをさらに次の点を考慮して拡張させたものである。

- 1) 交通量配分の変量としてルートフローを用いる。
- 2) 利用者費用はサービスレベルの概念を用いて区間交通量に応じて変化させるものとする。

Synopsis

It is a basic subject of road traffic problem that what road network design to manage efficiently the traffic demand is desired.

Its problem is practicable to the construction, improvement and management in road network planning, and snow removal network in road system.

The present paper announces the sequel of the report which appeared in the previous number of this publication. So, in this paper another studies the extension of the previous solution algorithm considering the following two articles.

- (1) The use of the route-flow (path-flow) as a variable of traffic assignment.
- (2) The application of the idea of service level in traffic capacity, and varying the user-cost according to the link traffic volume.

1. ま え が き

交通量配分は、ある OD 交通(需要交通量)が道路上をどのような経路に沿って走行するかを知るとともに、また各道路区間上の交通量を推計して道路網の妥当性や道路巾員(車線数)を検討することにある。従って、道路網構成問題においても逐次探索される道路網の評価はこの交通量配分を通して行なわなければならない。この配分手法には、最短経路に基づくもの、配分率を用いたもの、等時間原則に基づくもの、輸送計画的なもの等種々の配分モデルが提案されてきた。これらの配分手法はそれぞれ一長一短があって優劣つけがた

いが、いずれの配分手法を用いるかは主に対象とする道路網あるいは計算上の精度等を考慮して決定されるようである。それ故、道路網構成問題の場合には交通量配分にどのような配分手法を用いるかは道路網の評価を行なう上でも大きな問題である。この問題の解法においては、主に次の点から最短経路配分がよく用いられている。まず、交通量配分が逐次探索される道路網において行なわれるため、最適な道路網を求めるまでに相当数の配分計算が繰返えされる。従って、実際の現象をできるだけ反映した配分手法を用いた場合には多大な計算時間を要する。また、道路網構成の解法を考察するのが主眼であるため、いたずらに問題を複雑化しない。さらに、最短経路配分は数学的な取り扱いが容易で大規模な問題にも適用できるな

どである。著者もこれらの点を考慮して前報等の考察は最短経路配分によって行ない、さらに取扱う変量としてはリンクフロー（区間交通量）を用いた。しかしこのリンクフローを用いた場合には、取扱う変量が多くなるあるいは逐次設定される道路網において各OD交通の最短経路を探索しなければならないという欠点を有する。これらの事は、この問題において配分計算が担当数繰り返される事を考慮した場合にはより一層大きな問題点である。

交通量配分において取扱う変量としては、リンクフローの他にルートフロー（経路交通量）がある。このルートフローは、与えられた建設可能な最大道路網において事前に各OD交通の走行可能な経路を探索することによって得られる。そうすると、取扱う変数が少なくなりまた計算過程において逐次OD交通の最短経路を探索しなくてもよい。さらに、各OD交通はどのような道路網構成が求められても事前に探索された経路のいずれかをかならず保障されるため各OD交通の走行便益をも考慮できる。そのため、前報の建設可能な車線数が制限された場合において設定された迂回制限値は考慮しなくてよくなるなどの利点を有する。

そこで、本研究は前報等で考察した解法アルゴリズムをさらにルートフローを用いた場合にも適用できるように拡張させた。さらに、利用者費用の算定をより実地的なものとするために各リンクのサービス水準を考え、利用者費用が区間交通量に応じて変化するようにした。

2. 道路網構成問題の解法アルゴリズムについて

(1) 問題の設定について

いま、与えられた建設可能な最大道路網を n 個のノード ($n_i \in N$) と m 個のリンク ($a_{ij} \in A$) をもつネットワーク $G(N, A)$ とし、この道路網に q 個のOD交通量(需要交通量)が存在するものとする。そうすると、問題はこの各OD交通を効率的に処理するには与えられた最大道路網からどのような道路網構成へ変換がなされれば、ある制約条件の下である目的関数を最大なり最小にするかとなる。

この問題を設定するにあたって、まず制約条件として(1)式で示されるOD交通の連続条件及び各リンクの容量制限に関する(2)式がある。さらに、名リンクで建設される車線数は各リンクの建設可能な車線数以下でなければならない(3)式がある。

$$Y^k = \sum_{r=1}^{n_k} Y_r^k \quad \text{—————(1)}$$

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^q \sum_{r=1}^{n_k} \delta_r^k \cdot Y_r^k \leq C_{ij} \cdot x_{ij} \quad \text{—————(2)}$$

ここで

Y^k ; k 番目のOD交通量

n_k ; k 番目のOD交通の最大道路網において
走行可能なルート数

Y_r ; k 番目のOD交通のある走行ルート r の
配分交通量

X_{ij} ; リンク ij の区間交通量

δ_r^k ; k 番目のOD交通の走行ルート r がリ
ンク ij を通過するとき 1, そうでないと
き 0 とする定数

C_{ij} ; リンク ij の 1 車線当りの交通容量

x_{ij} ; リンク ij で建設される車線数

$$x_{ij} \leq n_{ij} \quad \text{—————(3)}$$

ここで

n_{ij} ; リンク ij の建設可能な車線数

本研究においても、前報と同様(2)式の制約条件より各OD交通は数本のルートに分割されて配分されるが、このとき前報では容量に達したリンクを除去した後の道路網上で逐次最短経路を求めて配分した。しかし、本研究では事前に探索されている他のルートへ配分されるため計算途中での経路探索という手順は除かれる。しかしながら、前報と同様建設可能な車線数に見合った区間交通量にするためには容量に達したリンクを走行する各OD交通を他のルートへどの様に分割するかという問題が生じる。この問題に対しては扱う目的関数をも考慮して次の様な配分手順によって行なう。

- 1) ある設定された道路網において各OD交通は、その道路網において走行可能なルートのなかから一番短いルートに配分される。
- 2) 区間需要交通量が交通容量を越えるリンクが出現したとき、そのリンクを走行するOD交通を記憶しておく。
- 3) 容量を越えたリンクを走行する各OD交通のうちから交通量が多いものから優先的に配分される。
- 4) 配分される過程で容量に達したときには、その時点で分割されるOD交通及びまだ配分されていない他のOD交通はそのリンクを除去した道路網の他のルートへ再配分されるた

め1)へ進む。

5) 1)～4)を対象とするOD交通がすべて配分されるまで繰返えされる。なおこの手順において以前に配分されている他のOD交通には何んら影響を与えないものとする。

次に目的関数としては、(4)式で表わされる道路利用者の走行便益と道路建設の経済性を考慮した、すなわち道路利用者の年間費用と年間道路建設費用との和である総費用(T)を最小にするとした。この(4)式における利用者費用は前報におい

$$T = 365 \cdot g \sum_{ij \in A_l} U_{ij}(X_{ij}) \cdot \sum_{k=1}^q \sum_{r=1}^{n_k} \delta_r^k \cdot Y_r^k \cdot d_{ij} + K \sum_{ij \in A_l} \left\{ H + \alpha(x_{ij} - 1) \right\} \cdot d_{ij} \quad (4)$$

ここで

g; 単位時間交通量を平均日交通量に換算するための係数

$U_{ij}(X_{ij})$; リンク ij の交通量 X_{ij} のときの利用者費用 (円/km・台)

A_l ; ある道路網 G^l を構成するリンクの集合

H; 1車線当りの建設費用 (円/km)

K; 資本回収係数

α ; 1車線増加させるのに必要な建設費用 (円/km)

d_{ij} ; リンク ij の距離 (km)

て区間交通量に関係なく一定の値とした。しかし、一般に交通量の増加とともに走行速度は減少するのでこれによって利用者費用も変化する。そこで、本研究ではこの問題に対してサービス水準の考えを用いた。すなわち、区間交通量と交通容量の比によっていくつかのレベルを設定して、それぞれのレベルに対する平均走行速度を求めてさらにそれぞれより利用者費用を算定するようにした。従って、各リンクの単位距離当たりの利用者費用は各リンクの区間交通量に応じて異なってくる。

(2) 改善変数について

改善変数なるものは、ある計算段階における道路網からあるリンクを除去するか、あるいは付加することによる建設費及び利用者費用の変化が目的関数値にどれ程影響をもたらすかを分析するために、さらに解の収束を早めるために用いられる。

まず、リンク除去手順における改善変数について考える。いま、ある計算段階 l において得られた道路網を G^l とし、さらにこの道路網 G^l からあるリンク $a_{ij}(\in A_{ij}^l)$ を除去して得られる道路網を

G_{ij}^l とする。この道路網 G^l から G_{ij}^l への変換に伴もなつて、リンク a_{ij} を走行していた各OD交通は G_{ij}^l 上のリンク a_{ij} をルートに含まない他のルートへ再配分される。従って、このリンク除去による利用者費用の増加と建設費用の増減との比較という形で改善変数 Δ_{ij} が求められ、(5)式となる。ここで、利用者費用が増加するのは当然の結果であ

$$\Delta_{ij} = 365 \cdot g \sum_{mn \in A_{ij}} U_{mn}(X_{mn}) \cdot (X_{mn} - X'_{mn}) \cdot d_{mn} + K \cdot \sum_{mn \in A_{ij}} (M_{mn} - M'_{mn}) \cdot d_{mn} \quad (5)$$

ここで

A_{ij} ; リンク a_{ij} を除去したとき、区間交通量及び建設費用が変化するリンクの集合

X_{mn} , M_{mn} ; リンク a_{ij} を含んだ道路網におけるリンク $a_{mn}(\in A_{ij})$ の区間交通量及び建設費用

X'_{mn} , M'_{mn} ; リンク a_{ij} を除去した道路網におけるリンク $a_{mn}(\in A_{ij})$ の区間交通量及び建設費用

るが、建設費用は減少のみならず増加する場合も生ずるという事に注意を要する。これは、除去されるリンクを走行していた各OD交通は他のルートへ再配分される。そうすると、あるリンクにおいては区間交通量の増加をきたしそれによって車線数を増強させるために建設費用全体としては増加するという結果が生ずるためである。この Δ_{ij} の値が正の値をとる場合には、リンク a_{ij} を除去することによって利用者費用よりも建設費用が高いことを意味し、目的関数が最小の方向へ改善される。逆に、負の場合には何ら改善されてないことになる。

この手順における交通量配分は、道路網 G^l からあるリンクを除去した G_{ij}^l において前述の1)～5)の手順によって行なわれる。本研究においては前報と同様車線数の制限するすなわち容量制限を考慮しているが、さらに前報と異なつて各OD交通の走行可能なルートが事前に決定されている。このため、順次リンク除去を行なっていく過程であるリンクが除去されると配分が不可能になったりあるいは走行可能なルートが消滅するOD交通が出現する。従って、このような事は回避しなければならない。それ故、対象となつたリンクは以後の計算段階においても除去されないよう Δ_{ij} の値として適当な負値を与えるようにする。

次に、リンク付加手順における改善変数につい

て考える。この手順は除去手順を終えて得られた道路網 G^E に、除去手順で除去されたリンクを再び付加することによって生ずる総費用への影響を分析する。計算方法の概念は前述の除去手順と同様であるが、この場合は、建設費用の増加と利用者費用の減少との比較という形で行なわれる。いま、 G^E にリンク a_{ij} を付加したことによって生ずる利用者費用の変化を V_{ij} とすると、(6)式で求められる。ここで、この計算の対象となるリンクの

$$V_{ij} = 365 \cdot g \sum_{mn \in A_{ij}} U_{mn}(X_{mn}) \cdot (X_{mn} - X'_{mn}) \cdot d_{mn} \quad (a_{ij} \in A_f) \quad (6)$$

集合 A_f は除去手順で除去されたリンクである。そうすると、付加手順における改善変数 δ_{ij} は(7)式で求められる。なお、これらの式中における名変数

$$\delta_{ij} = \max[0, V_{ij}] - K \cdot \sum_{mn \in A_{ij}} (M_{mn} - M'_{mn}) \cdot d_{mn} \quad (a_{ij} \in A_f) \quad (7)$$

は(5)式における変数と同様な考え方で求められ、ダッシュがついたものはリンク a_{ij} を付加した G^E_{ij} において、ついていないものは G^E においてそれぞれ計算される。また、 A_{ij} はリンク a_{ij} を付加することによって区間交通量及び建設費用の変化をうけるリンクの集合である。この δ_{ij} が正の値のときは、あるリンクを付加することによって目的関数がより小さい値へと改善される事を意味し、一方負のときには何んら改善されないという事になる。

以上解法アルゴリムの中心となるリンク除去・付加手順における改善変数についてのべたが、いずれもリンクの除去、付加にともなって生ずる費用の変化によって目的関数値(総費用)を小なる方向へ改善するように展開される。

(3) 解法アルゴリズムについて

以上述べた事を考慮して本問題の解法アルゴリズムを考察すると、まず図-1に示される計算手順が考えられる。さらに、このフローチャートに沿った詳細な手順が以下の様になる。また、これに対するフローチャートを図-2に示す。

- (1) 建設可能な最大道路網 G^* 上に各 OD 交通を前述の配分手順によって配分した後、目的関数値(T)を求める。
- (2) ある計算段階 l での道路網 G^l に対して、(4)と同様交通量配分を行なってTを求める。
- (3) 計算段階 l において除去されていないリン

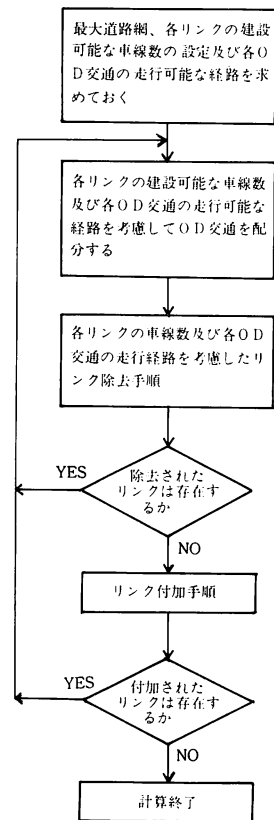


図-1

クの集合を A_f 、除去されたリンクの集合を A_e としてそれぞれを記憶しておく。

- (4) 道路網 G^l からあるリンク $a_{ij} (\in A_e^l)$ を除去した G^l_{ij} 上に OD 交通の配分を行なう。このとき、リンク a_{ij} を除去したことによって配分が不可能あるいは走行可能なルートが消滅した OD 交通が出現したときには、このリンクに対する改善変数 Δ_{ij} に適当な負値を与えて除去されないとする。このときは(6)へ進み、そうでないときには(5)へ。
- (5) G^l_{ij} 上に配分された区間交通量から各リンクの改善変数 Δ_{ij} を求める。
- (6) (4)、(5)の計算過程を A_e^l の要素であるすべてのリンクに対して行なう。
- (7) もし A_e^l の要素の中で Δ_{ij} の値が正の値を取るリンクがあれば、その中で一番大きい値を取るリンク a^*_{ij} を G^l から除去して、道路網を $G^{l+1} = (G^l - a^*_{ij})$ へと変換して(2)へ進む。すべてのリンクが負の値をとるときには、これ以上リンク除去手順を行なっても目的関数は何ら改善されないということで

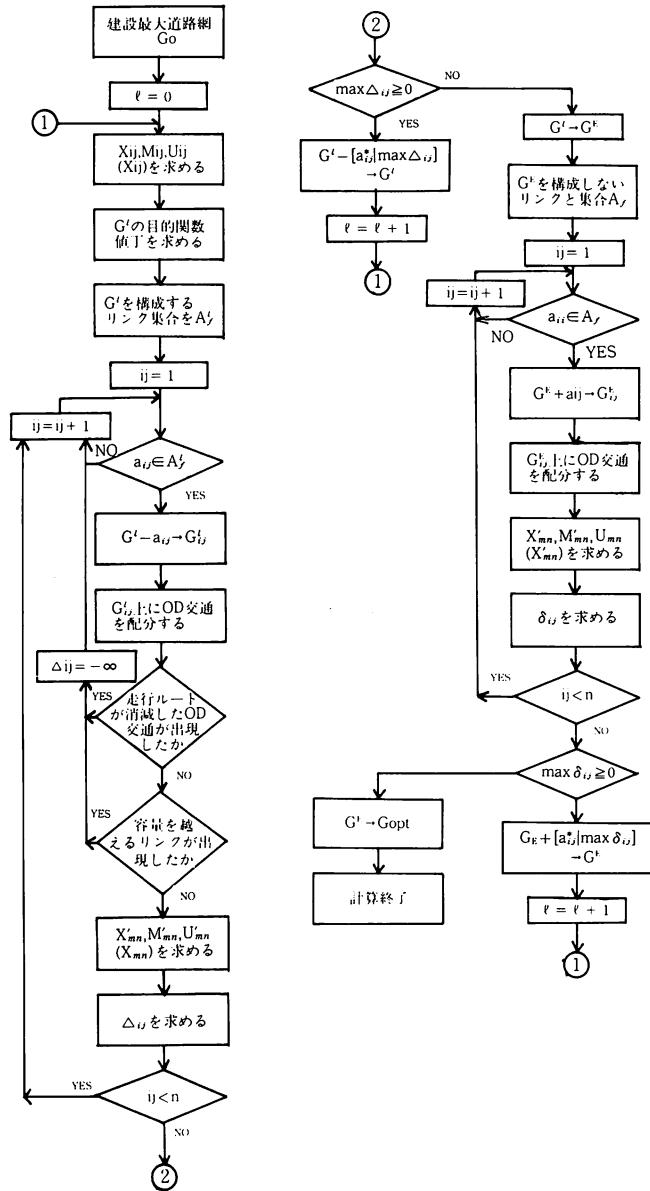


図-2

G^l を G^E として(8)へ進む。

(8) (2)~(7)の手順において除去されなかったリンクの集合を A_0 , 除去された集合を A_f としてそれぞれ記憶しておく。

(9) 道路網 G^E にリンク $a_{ij} (\in A_f)$ を付加した道路網 G^E_{ij} 上に名OD交通を配分して改善変数 δ_{ij} を求める。

(10) (9) 計算を A_f の要素であるすべてのリンクに対して行なう。

(11) もし, A_f の要素の中で δ_{ij} の値が正の値を

とるリンクがあれば, その中で一番大きい値を取るリンク a_{ij} を G^E に付加して, 道路網を G^E から $G^F (= G^E + a_{ij})$ へと交換して(2)へ進む。すべてのリンクに対して δ_{ij} が負値であれば, これ以上リンク除去, 付加手順を行なっても目的関数を何んら改善することができないということで計算を終了する。このとき手順(8)で得られた道路網 G^E が求める最適道路網 G^{opt} となる。

3. 計算結果及び考察

図-3 の建設可能な最大道路網、表-1 のOD 交通量及びリンク距離を与えて、前節で述べた解法アルゴリズムを用いて最適道路網構成の探索を試みる。なお、表-1 における右上半分はOD 交通量、左下半分はリンク距離で ∞ はノード間にリンクが存在しないことを示す。また、図-3 における数字は各リンクの建設可能な車数 n_{ij} である。さらに、各リンクの車線数と交通容量、建設費用との関係を表-2 に、また利用者費用については交通量-交通容量比との関係において表-3 で示される値を用いた。各式で用いられている時間係数 g 、資本回収係数 K （耐用年数30年、利率6%）はそれぞれ18.28、0.07265とした。

各OD 交通の走行可能なルートは、最大道路網上における各OD 交通の最短経路を参考に3~5本選定した。表-4 にはOD 交通量異なるいくつかのOD 交通に対してのルートを示した。

最大道路網における総費用277.1億円、建設費用65.4億円、利用者費用211.7億円が得られたの

ち、順次除去・付加手順が行われた。その結果、図-4 に示される23本のリンクから構成される道路網が最適道路網 G_{opt} として得られた。このときの総費用、建設・利用者費用はそれぞれ262.1、50.3、211.8億円である。

さらに、本問題に組み込まれているサービスレベル及び車線数の制限の影響を考察するため次の様な場合についても計算を行なった。まず、サービスレベルを考慮して車線数の制限がない場合には図-4 と同じ道路網が得られた。次にサービス

表-1 OD 交通量及びリンク距離

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		600	100	1400	100	1600	200	300	1200	500
2	5		500	300	50	100	50	0	100	150
3	8	5		350	250	100	50	150	0	50
4	8	6	2		400	150	150	100	50	100
5	9	∞	3	3		700	100	50	0	0
6	6	∞	∞	6	4		400	600	150	50
7	7	∞	∞	8	6	2		300	200	50
8	7	∞	∞	11	∞	5	6		400	200
9	6	∞	∞	13	∞	7	8	3		300
10	4	8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	5	

表-2 車線数と交通容量、建設費用との関係

車線数	1	2	3	4	5
交通容量	1000	2000	3000	4000	5000
建設費用	5	7	9	11	13

表-3 サービスレベル及び利用者費用

レベル	交通量-交通容量比	利用者費用(円/台)
1	0.7以下	40
2	0.7~0.8	42
3	0.8~0.9	47
4	0.9~1.0	55

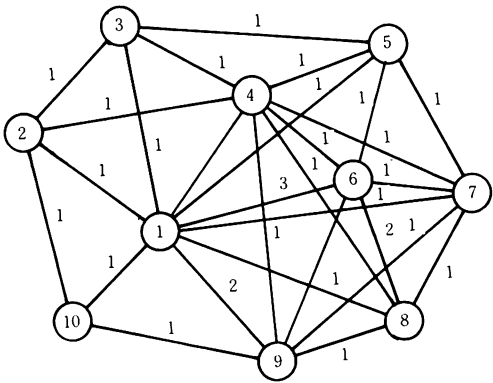


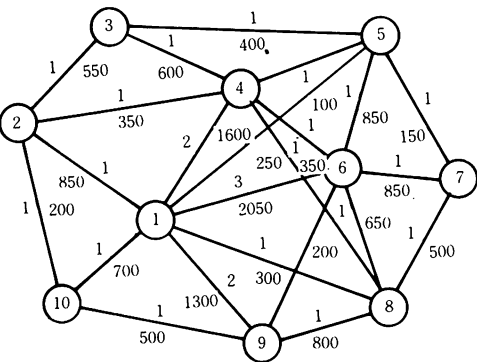
図-3 最大道路網

表-4 各OD 交通に対する走行ルート

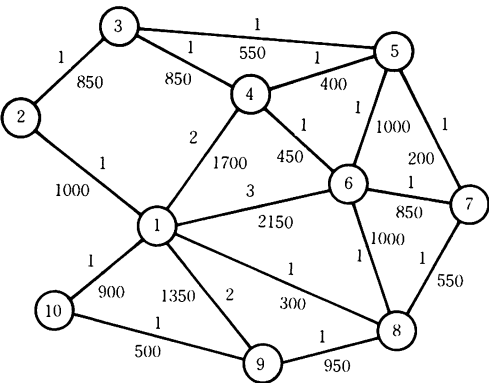
OD 交通	交通量	選定されたルート及び数
1-6	1600	1-6, 1-8-6, 1-9-6, 1-5-6, 1-4-6 (5)
1-4	1400	1-4, 1-2-4, 1-6-4, (3)
5-6	700	5-6, 5-7-6, 5-4-6 (3)
2-3	500	2-3, 2-4-3, 2-1-3 (3)
7-8	300	7-8, 7-6-8, 7-9-8 (3)
1-7	200	1-7, 1-6-7, 1-8-7, 1-9-7, 1-5-7 (5)
4-6	150	4-6, 4-5-6, 4-7-6, 4-5-7-6, 4-1-6 (5)
4-8	100	4-8, 4-7-8, 4-6-8, 4-1-8 (4)
7-10	50	7-1-10, 7-6-1-10, 7-9-10, 7-8-9-10 (4)

(各ルートはノード番号にて表わされている)

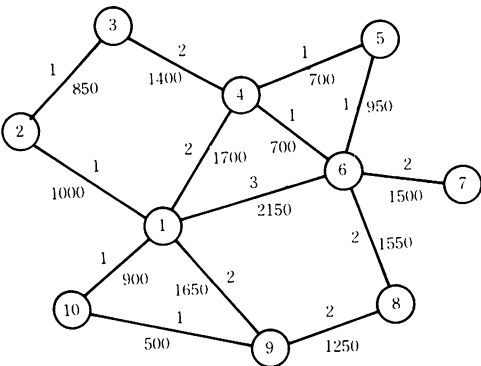
レベルを考慮しないすなわち利用者費用を一定として、車線数制限がある場合には図－5に示される道路網となり、さらに車線数制限がない場合には図－6となった。なお、各道路網構成における各費用は表－5に示した。



図－4 最適道路網



図－5 車線数制限のみを考慮したときの道路網



図－6 サービスレベル・車線数制限ともに考慮しないときの道路網

これらの結果から、サービスレベル、車線数制限の要因の導入が道路網構成に大きく影響していることがわかる。図－4と図－5とを比較すると、リンクの構成本数は23本から18本へと5本減少するとともに建設費用も減っている。しかし、図－5の各リンクの区間交通量から各リンクのサービスレベルを求めるとほとんどのリンクは図－4の値より大きな値を示している。この例を数本のリンクについて表－6に示した。すなわち、サービスレベルを導入すると各リンクはできるだけ低いレベル値（利用者費用をできるだけ小さく）になるように交通量配分が行なわれる。この事は、目的関数値（総費用＝建設費用＋利用者費用）を最小の方向へ導く当然の結果であるが、しかしこの例においては利用者費用と建設費用との位の違いやより鮮明に表われたものと思われる。

一方図－5と図－6とを比較すると、車線数制限の撤廃によって道路網全体で効率よくOD交通量を処理するよう各リンクの区間交通量が増加している。この事は表－6のリンク1－9の車線数

表－5 各道路網構成における各費用

道路網構成	総費用	建設費用	利用者費用
図－3	277.1	65.4	211.7
図－4	262.1	50.3	211.8
図－5	243.3	35.4	207.9
図－6	240.0	28.8	211.2

（単位：億円）

表－6 各リンクの車線数及びサービスレベル

リンク	道路網	区間交通量	車線数	サービスレベル
1－2	図－4	850	1	3
	図－5	1000	1	4
	図－6	1000	1	4
1－9	図－4	1300	2	1
	図－5	1350	2	1
	図－6	1650	2	3
1－10	図－4	700	1	1
	図－5	900	1	4
	図－6	900	1	4
3－4	図－4	600	1	1
	図－5	850	1	3
	図－6	1400	2	2
6－7	図－4	850	1	3
	図－5	850	1	3
	図－6	1500	2	2
8－9	図－4	800	1	3
	図－5	950	1	4
	図－6	1250	2	1

は変わらないが、区間交通量が增加していることでもわかる。また、他のリンク3-4, 6-7, 8-9等は車線数を増強させて区間交通量を増加させる、すなわちあるOD交通には迂回を強いている方がより総費用を減少させるとなる。

4. あ と が き

以上本研究は、従来この種の問題においてほとんど適用されなかったルートフローを通して道路網構成問題の解法アルゴリズムについて考察した。この変量を用いた場合の利点については前述したが、一方リンクフローに比べて事前に各OD交通の経路探索をしなければならないという手間を要する。また、各OD交通にどの様なルート(経路)を選定すればよいかという事は最適道路網構成にも影響を与えるので十分吟味されなければならない。しかし、この事は逆に道路交通の特性を適確に把握できればより一層実際の解を各えるものと思われる。

また、本研究においては新たに利用者費用の算定にあたってサービスレベルの概念を導入した。これは前述の様に道路網構成に大きく影響を及ぼしている。すなわち、本研究の計算例においてはより利用者側からの望ましい道路網構成(User-optimum network design)となっている。従って、今後は建設者側から望む道路網構成(System-optimum network design)(たとえば、道路建設費用のみを最小にするような場合)との係あについても考えてゆかねばならない。この点については特に、利用者費用と建設費用との算定

方法について十分吟味しなければならない。

今後はさらに、需要交通量を常に効率的に処理するというだけでなく、交通騒音・振動および排気ガスによる環境悪化、地域住民の良好な生活環境の保持等を考慮したモデルへ拡張してゆきたい。

最後に、本研究を取りまとめるにあたり御指導をいただいた北海道大学工学部加来照俊教授に謝意を表します。また、種々御協力いただいた北海道大学工学部辻 信三氏をはじめ交通工学講座の皆様感謝する。

なお、本研究の一部は昭和52年度北海道科学研究費補助金を受けたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 佐佐木綱; 都市交通計画, 国民科学社, 昭和49年4月
- 2) 松井 寛; 道路網における交通量配分理論について, 交通工学 No 5 pp 43~47 1971
- 3) 梶谷有三; 道路網構成問題の解法(I), 苫小牧高専紀要第12号, 1977
- 4) 梶谷有三; 道路網構成問題の解法(II), 苫小牧高専紀要第13号, 1978
- 5) 梶谷・加来; 道路網探索手法に関する考察—ルートフローを用いた場合について—, 土木学会北海道支部論文報告集第33号, 1978
- 6) 工藤康則; 最適道路網探索法に関する研究, 北海道大学工学部卒業論文, 1977

(昭和53年11月30日受理)