

道路網構成問題の解法について (II)

梶 谷 有 三*

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

Yuzo MASUYA

要 旨

ある需要交通量を効率的に処理するにはどのような道路網構成が望まれるかという問題は、今後の道路交通問題を解決してゆくうえでも基本的に考えていかなければならない。

本研究は、前報の解法アルゴリズムをさらに各リンクの建設可能な車線数が制限されている場合にも適用できるように発展させたものである。

Synopsis

There is a problem that what road network design to manage efficiently the traffic demand is desired.

Its problem is one of the questions which must be researched to solve the future road traffic subjects.

In this paper, author study the extension of the previous solution algorithm. As a result of research, its algorithm is able to apply to the problem that the number of the constructed possible lane is constrained in road network.

1. ま え が き

道路網構成問題の解法については、前々報、前報にても述べたように大きく分けて2つの面からの研究がなされてきた。一つは最適解を得るための方法論を開発するものであり、他の一つは具体的な問題に対する適用性を考慮した解法アルゴリズムについての研究である。これら両者の問題設定においては種々の制約条件、目的関数（評価基準）が考えられてきた。しかし、これらの制約条件・目的関数の中には両者のモデルに十分組み込まれているものと、一方にしか組み込まれていないものがある。その一つとして建設可能な車線数（幅員）に関する制約条件がある。この制約条件は前者においてリンク必要車線数とリンク交通量との関係において定式化された。しかし、後者においては問題をより一層複雑する等の理由でこの

制約条件を十分に考慮した解法アルゴリズムは見あたらない。すなわち各リンクは区間需要交通量に見合うだけ建設できるという仮定の下で種々議論を進めている。

しかし、道路網新設計画においては用地取得の困難性、地域住民の生活環境の保持、交通騒音・振動および排気ガスによる環境悪化、さらには過度の交通集中を避けるためなどから建設可能な車線数にはある制限を考慮しなければならない場合が生じると思われる。また、この事は既存の道路網の改良計画、道路網運用計画あるいは除雪路線網計画等を考える場合にはより一層実的な問題としてモデルに組み込まなければならない。

そこで、本研究は前報にて考察した解法アルゴリズムをさらに各リンクの建設可能な車線数（幅員）が制限されている場合にも適用できるように拡張させたものである。

* 講師 土木工学科

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、建設可能な車線数が与えられたリンクから構成される最大道路網を 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 (需要交通) 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)式で示される各リンクの容量制約がある。さらに、各リンクで建設される車線数は、各

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

ここで

X_{ij} : リンク ij の区間交通量。

Y_r^k : 第 k 番目の OD 交通のある定行ルート r の交通量

$ij \delta_r^k$: OD 交通 k のあるルート r がリンク ij を走行ルートとして含むとき 1, そうでないとき 0 とする定数

C_{ij} : 1 車線当りの交通容量 (問題を簡単にするため交通容量は車線数に比例するとする)

x_{ij} : リンク ij で建設される車線数

リンクの建設可能な車線数以下でなければならないという条件を示す(2)式がある。

$$X_{ij} \leq n_{ij} \quad (2)$$

ここで

n_{ij} : リンク ij の建設可能な車線数

前報においては、各 OD 交通が最短経路に配分されると仮定して、左辺の区間需要交通量を満たすのに必要な右辺の車線数を決定した。しかし、本研究の場合は区間需要交通量を満たすのに必要な車線数が建設可能な車線数以上になるとときには、(2)式によって前報とは逆に右辺の区間交通量が決定されるというリンクが生じる。従って、OD 交通のなかには(3)式に示されるように数本のルートに分割されて配分されるものがある。そうすると、ここで建設可能な車線数に見合った区間交通量にするために、対象となるリンクを走行す

$$Y^k = \sum_{r=1}^{n_k} Y_r^k \quad (3)$$

ここで

Y^k : 第 k 番目の OD 交通量

n_k : k 番目の OD 交通が走行するルート数

る各 OD 交通を他のリンクへどの様に分割するかという問題が生じる。この問題に対していくつかの方法があるが、後述する目的関数を考慮して次の様な配分手順によって行なう。すなわち、

- 1) ある設定された道路網において各 OD 交通はまずその最短経路に配分される。
- 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大きいのから優先的に配分する。
- 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 交通を含めて以後の OD 交通はその容量に達したリンクを除去した道路網に再配分されるため 1) にもどる。
- 5) 1) から 4) を対象とする OD 交通がすべて配分をされるまでくり返す。なおこの手順において、以前に配分されている区間交通量は何んら影響を受けないものとする。

である。

次に、目的関数としては前報と同様(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。

$$T = 365 \cdot g \cdot U \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \sum_{r=1}^{n_k} ij \delta_r^k \cdot Y_r^k \cdot d_{ij} + K \cdot \sum_{ij \in A_L} \{H + \alpha(x_{ij} - 1)\} \cdot d_{ij} \quad (4)$$

ここで

g : 単位時間交通量を年平均日交通量に換算するための係数

U : 利用者費用 (円/km・台)

K : 資本回収係数

H : 1 車線当りの建設費用 (円/km)

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)

A_L : ある道路網 G^L を構成するリンクの集合

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用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、さらには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 $a_{ij} (\in A)$ 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_{ij}^l への変換にともなう、リンク a_{ij} を走行していた OD 交通は G_{ij}^l 上において走行費用がより高い他のルートへ変更しなければならない。すなわち、このリンク除去にもともなう利用者費用の増加ならびに建設費用の増減が生じる。従って、これらの費用の変化とともに目的関数の値もどの程度変化をするかを知るのがこの改善変数であり、(4) 式で求められる。この Δ_{ij} の値が正をとる場合に

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

ここで

$X_{mn} \cdot M_{mn}$: リンク a_{ij} を含んだ道路網 G^l におけるリンク a_{mn} の区間交通量及び建設費用

$X'_{mn} \cdot M'_{mn}$: リンク a_{ij} を除去した道路網 G_{ij}^l におけるリンク a_{mn} の区間交通量及び建設費用

A_{ij} : リンク a_{ij} を除去するに際し、区間交通量及び建設費用が変化するリンクの集合

は、リンク a_{ij} を除去することにより利用者費用の増加は逆に減少する建設費用より小さい、すなわち目的関数値をより小ならしめることを意味する。一方、負の場合は利用者費用の増加が減少する建設費用より大となり目的関数値を何んら改善させないという事である。

次に、リンク付加手順における改善変数について考える。この手順はリンク除去手順を終えて得られた道路網 G^l に、除去手順で除去されたリンクを再び付加することに生じる総費用への変化を分析する。計算手順の概念は前述の除去手順の方法と同様であるが、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。いま道路網 G^l にリンク a_{ij} を付加したことによ

て生じる利用者費用の変化を V_{ij} とすると、(6) 式で求められる。なおこの手順で計算の対象となるリンク a_{ij} の集合 A_f は、除去手順で除去されたリンクである。そうすると、この手順における改善

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

変数 δ_{ij} は(7)式となる。なお、(6), (7)式にあける各

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

ここで

A_{ij} : 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

変数は除去手順における各変数と同様な考え方をしたもので、ダッシュがついていない変数は道路網 G^l において計算されるものである。一方、ついているものはリンク a_{ij} を付加した道路網 G_{ij}^l において計算される。この改善変数が正の値をとるときは、前述と同様目的関数値をより改善することを意味する。一方、負の場合は何んら改善されない所以对象としたリンク a_{ij} を付加しない方がよいということになる。

以上が解法アルゴリズムの中心となりリンク除去及び付加手順であるが、いずれもリンクの除去、付加にともなう生ずる費用の変化を比較して目的関数値(総費用)を小なる方向へ改善するように展開される。

3) リンク除去手順における配分手順及び迂回制限について

前報においては建設可能な車線数の制限を考慮しなかったため、すべての OD 交通はある設定された道路網上の最短経路に配分されたとした。しかし、本研究は車線数の制限すなわち容量制限を考慮するため、OD 交通の中にはかならずしも最短経路に配分されずに他の走行ルートに配分される場合が生ずる。この配分手順は前述の様に、ある計算段階の道路網 G^l からあるリンク a_{ij} を除去した道路網 G_{ij}^l において(1)~(5)の手順が対象とするすべてのリンクに対して行なわれる。このとき、他の経路へ配分される OD 交通の中には最短経路に比べて相当過酷なルートを走行せざるを得ないものがある。そこで、各 OD 交通の走行便益を考慮してこの様な事をなるべく避けるために迂回制限値 (α) なるものを設定した。この迂回制限値は、

あるリンクを除去するにともなう生ずる各OD交通の走行距離の増加をどの程度まで許容しうるかを示す指標である。そして、(8)式で求められる個々のODペアの迂回増加比(B_k)と比較して対象リンクを除去するかどうかの判定がなされる。この比較において、 $\alpha < B_k$ のときには対象

$$B_k = \frac{r'_k}{r_k} \quad (8)$$

ここで

B_k : リンク a_{ij} を走行しているOD交通 k の増加比

r_k : リンク a_{ij} 除去される前の走行距離

r'_k : リンク a_{ij} が除去された後の走行距離

リンクを除去しない。すなわち、対象リンクを除去すれば過酷なルートを走行するOD交通が出現するため、このリンクに対しては Δ_{ij} を適当な負値におきかえる。一方、 $\alpha > B_k$ のときには Δ_{ij} の値を具体的に計算して除去されるべきかどうか判定される。

なお付加手順においては、各OD交通の走行距離が短くなることはあっても長くなることはないので迂回制限について考察する必要はない。

4) 解法アルゴリズムについて

以上述べた事を十分吟味にして本問題に対する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に示した。

- (1) 建設可能な最大道路網 G^0 上に各OD交通を前述の配分手順によって配分して(4)式にて目的関数値(総費用) T を求める。
- (2) ある計算段階 l での道路網 G^l に対して(1)と同様各OD交通を配分して 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ク集合を A^l_e 、除去されたリンクの集合を A^l_f 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 $a_{ij} (\in A^l_e)$ を除去した道路網 G^l_{ij} 上に各OD交通を配分して(8)式の B_k を求めて迂回制限値(α)と比較する。 $B_k < \alpha$ のときは(5)へ、 $B_k > \alpha$ のときはリンクを除去しないということで Δ_{ij} を適当な大きい負値にして(6)へ進む。
- (5) G^l_{ij} 上に配分された区間交通量から(5)式の Δ_{ij} 値を求める。
- (6) (4)、(5)の計算過程を A^l_e の要素であるすべ

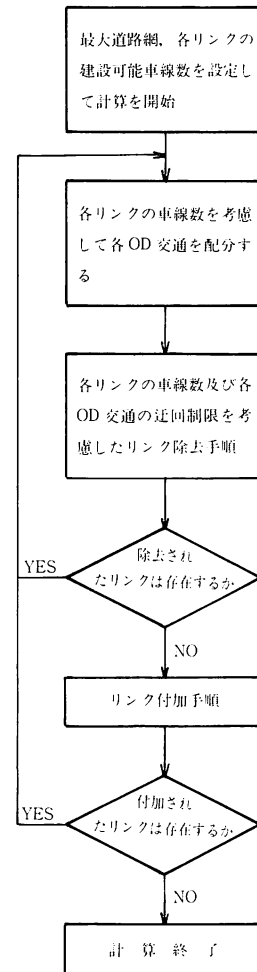


図-1 フローチャート

てのリンクに対して行なう。

- (7) もし、 A^l_e の要素の中で Δ_{ij} の値が正をとるリンクあればその中で一番大きい値を取るリンク a_{ij} を G^l から除去する。そして、道路網を G^l から $G^{l+1} (=G^l - a_{ij})$ 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値は何んら改善されないということで G^l を G^E として(8)へ進む。
- (8) (2)から(7)の手順において除去されたリンクの集合を A^l_e 、除去されたリンクの集合を A^l_f としてそれぞれを記憶しておく。
- (9) 道路網 G^E にリンク $a_{ij} (\in A^l_f)$ を付加した道路網 G^E_{ij} 上に各OD交通を配分して、(5)、(6)式より δ_{ij} の値を求める。

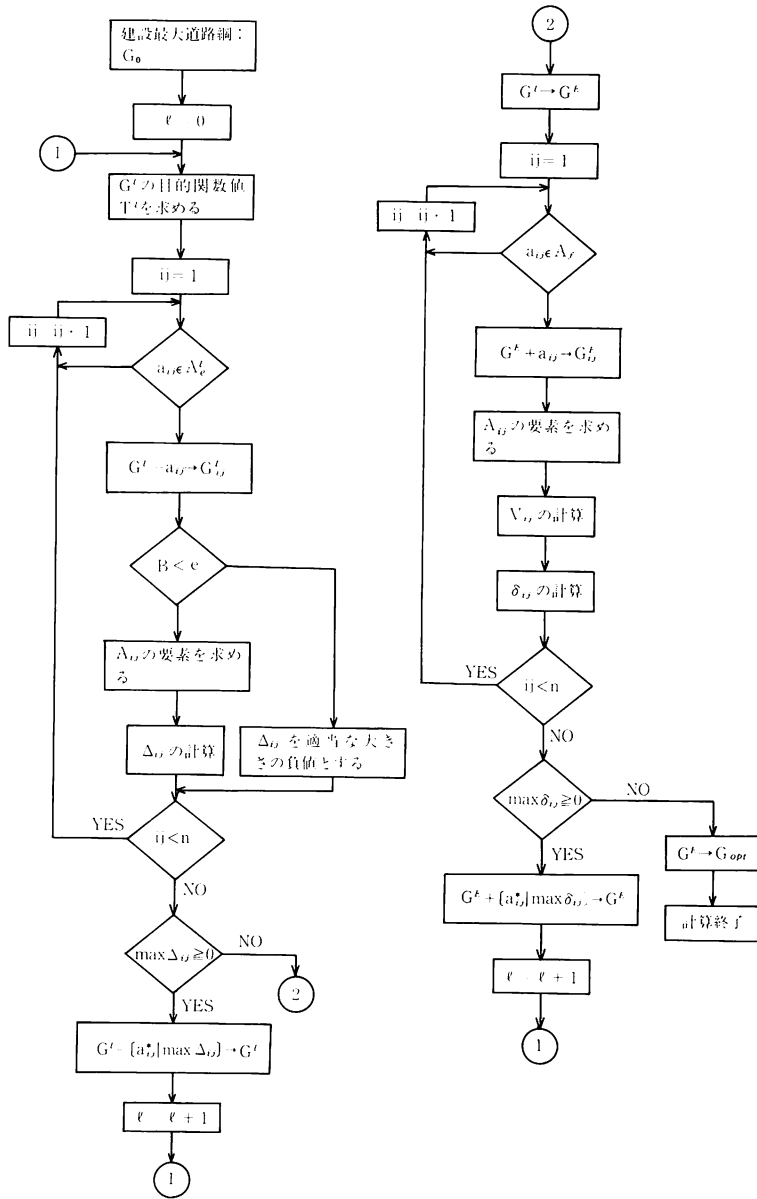


図-2 解法アルゴリズムのフローチャート

- (10) (9)の計算を 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^k に付加する。そして、道路網を G^k から $G^F (= G^k + a_{ij})$ へと変換して(2)へ進む。対象とするすべてのリンクの δ_{ij} が負であれば、これ以上リンク除去・付加手順を行なっても目的関数値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^k が求める最適道路網となる。

3. 計算結果及び考察

図-3の建設可能な最大道路網、表-1の需要交通量(OD交通量)およ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における表の右上半分はOD交通量 Y^* (台)であり、左下半分はリンク距離 d_{ij} (km)、 ∞ はノード間にリンクが存在しないことを示す。また、図-3における各リンク上の添字は建設可能な車線数 n_{ij} である。さらに、各リンクの車線数と交通容量 C_{ij} (台)、建設費用 H (億円/km)との関係を表-2に示した。

(4), (5)式等で用いられている時間係数 g 、資本回収係数 K 、利用者費用 U はそれぞれ18.28, 0.0726, 40.0とした。また、迂回制限値 α を1.5とした。

最大道路網における総費用268.8億円、建設費用65.4億円、利用者費用203.4億円が求められたのち、順次リンク除去手順が行なわれ表-3に示す計算結果を得た。さらに、この結果をリンク数と各費用との関係で図示したものが図-4である。まず、ステップ1において改善変数の値が一番大きいリンク a_{49} が除去され、それにもなつて総費用が4.7億円減少する。さらに計算過程を続行するとステップ11でリンク a_{35} が除去され、総費用が0.8億円減収した後ステップ12において Δ_{ij} の値はすべて負値となりリンク除去手順を終えた。次にリンク付加手順を行なったが、本計算においては δ_{ij} の値がすべて負の値となったため付加されるリンクは出現しなかった。その結果、除去手順のステップにおいて得られたリンク17本から構成される道路網が最適道路網 G_{opt} となり、図-5に区間交通量及び建設リンク数とともに図示した。

次に、前報にて考察した車線数の制限を考慮しない場合について計算を行なったところ、図-6に図示される14本のリンク構成からなる道路網を得た。さらに、この計算過程を表-4、図-7に示した。

この両者による結果を比較すると、車線数の制限を考慮するかしないかによって構成リンク数及び個々のリンク車線数に影響を及ぼしていることが明らかである。特に、リンク(1, 2), (5, 6), (8, 9)等は後者において前者の車線数制限を越えた値を得ている。これらの事が、建設費用の大巾な減少、利用者費用の増加という形で表わさ

表-1 OD交通量及びリンク距離

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

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 各計算過程において除去されるリンク及び各費用の変化

ステップ	リンク数	MAX Δ_{ij} の値	除去されるリンク	建設費用	利用者費用	総費用
1	28	4.7	(4,9)	65.4	203.4	268.8
2	27	4.0	(4,8)	60.7	203.4	264.0
3	26	3.0	(1,5)	56.7	203.4	260.0
4	25	2.9	(4,7)	53.4	203.6	257.0
5	24	2.5	(2,10)	50.5	203.6	254.1
6	23	2.4	(7,9)	47.6	204.0	251.6
7	22	2.2	(5,7)	44.7	204.6	249.3
8	21	2.1	(1,3)	42.5	204.6	247.1
9	20	1.2	(6,9)	39.6	206.7	246.3
10	19	1.0	(1,7)	37.8	207.4	245.2
11	18	0.8	(3,5)	36.1	208.0	244.2
12	17			34.7	208.7	243.4

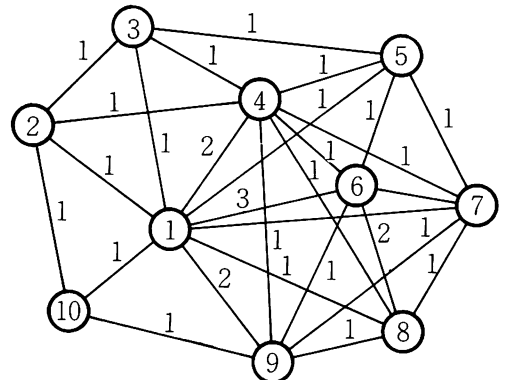


図-3 最大道路網

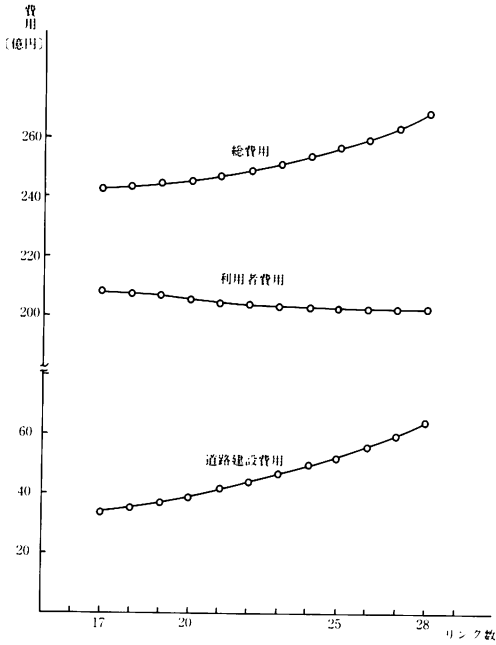


図-4 リンク数と各費用との関係

表-4 各計算過程において除去されるリンク及び各費用の変化

ステップ	リンク数	MAX Δ_{ij} の値	除去されるリンク	建設費用	利用者費用	総費用
1	28	4.7	(4,9)	65.4	203.4	268.8
2	27	4.0	(4,8)	60.7	203.4	264.0
3	26	3.0	(1,5)	56.7	203.4	260.0
4	25	2.9	(4,5)	53.4	203.6	257.0
5	24	2.5	(2,10)	50.5	203.6	254.1
6	23	2.4	(7,9)	47.6	204.0	251.6
7	22	2.2	(5,7)	44.7	204.6	249.3
8	21	1.4	(1,3)	42.5	204.6	247.1
9	20	1.4	(2,4)	40.3	205.4	245.7
10	19	1.3	(6,9)	38.1	206.2	244.3
11	18	0.9	(1,7)	36.3	206.7	243.0
12	17	0.6	(7,8)	34.7	207.5	242.2
13	16	0.5	(4,6)	32.7	208.8	241.6
14	15	0.5	(1,8)	31.2	209.9	241.1
15	14	0	—	29.1	211.5	240.6

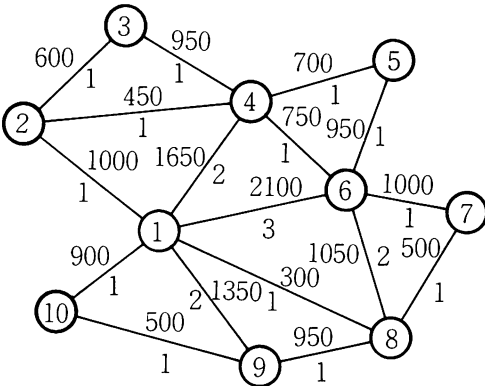


図-5 最適道路網

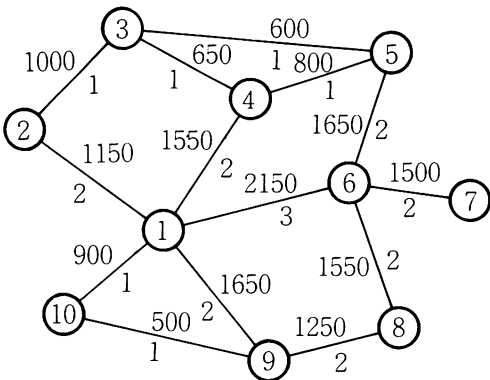


図-6 車道数の制限を考慮しない場合の道路網

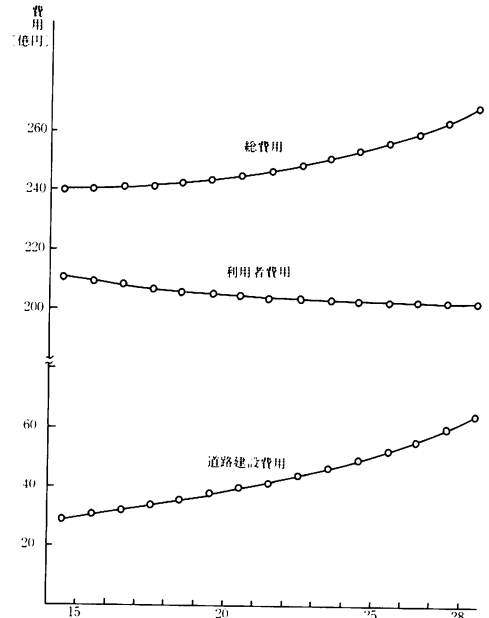


図-7 リンク数と費用との関係

れている。

さらに、迂回制限値をパラメータとして種々の値に対して計算をした結果、 α が1.2以下において道路網形態の変化が見られた。

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考慮されていなかった各リンクの建設可能な車線数の制限と、それに伴って考えなければならぬ利用者の走行便益を考慮した迂回制限とを加味した道路網構成問題の解法アルゴリズムについて考察した。ここで、各OD交通の配分交通量は各リンクの建設可能な車線数とのかかわりの中で求められたので、今後は演算時間なども考えて事前に各OD交通の走行ルートを求めて行なうルートフローをも扱えるように拡張してゆく。また、リンク付加手順についてはその機能を十分に発揮していない面も考えられるのでこの点についても考察を深めてゆく。さらに、利用者費用は問題を簡単にするため区間交通量と関係なく一定と

しているが、この点についてはより実際問題へと適用できるよう改善してゆきたい。

最後に、本研究を進めるにあたり御指導頂いた北海道大学工学部加来照俊教授に深く感謝の意を表わします。また、種々御討議・御協力頂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にも感謝する。

参 考 文 献

- 1) 榎谷有三：道路ネットワーク構成に関する基礎的研究，苫小牧高専紀要第11号，1976
- 2) 榎谷有三：道路網構成問題の解法について（I），苫小牧高専紀要第12号，1977
- 3) 榎谷・野坂・加来：道路網探索手法に関する考察—車線数の制限を考慮した場合について—，土木学会北海道支部論文報告集第32号，1977

（昭和52年12月1日受理）