

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 —

苫小牧工業高等専門学校 正員 ○ 樹谷 有 三
北海道大学工学部 加来 照 俊

1. まえがき

道路網探索問題の解法を考へる場合の問題点のひとつとして、交通量配分にどの様な配分手法を用いて行なうかという事が挙げられる。一般に交通量配分が探索過程で逐次行なわれるため、最適な道路網を定めるまでに相当数の配分計算が繰返さされている。従つて、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という問題が生ずる。また、最適な道路網構成を定める解法を考へるのが主眼であるため、いたゞずに問題を複雑化しないという様な事を考へてこの種の問題では最短経路配分がよく用いられる。著者等も前々報¹⁾、前報²⁾に考へた道路網探索アルゴリズムにおいて最短経路配分を用いて行なつた。しかし、この配分手法を用いた場合には逐次各ノード間の最短経路を探索してから配分を行なはなければならない。

そこで、本研究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しておくというルートフローを通じて考へた。このルートフローを用いた場合には計算過程において逐次最短経路を探索しなくともよく、また各OD交通はどの様な道路網構成が定められとも事前に探索された経路のいずれかが必ず保障されるため各OD交通の走行便益も考へて置ける。さらに、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も考へしなくともよくなる。

また、本研究においては前報の利用者費用の算定をより現実的なものとするために各リンクのサービス水準を考へ、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. 道路網探索アルゴリズムについて

(1) 問題の設定について

ある需要交通量(OD交通量)を効率的に処理するにはどの様な道路網構成がなされるかは、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について考へる。いま、与えられた建設可能な最大道路網をM個のノード($M \leq N$)とm個のリンク($0 \leq m \leq A$)をもつネットワークG(N, A)とし、この道路網にq個のOD交通が存在するものとする。まず、制約条件として(1)式で示されるOD交通の連積条件及び各リンクの交通容量制限に関する(2)式がある。さらに、各リンクを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。

$$Y_n^k = \sum_{r=1}^{M_k} Y_{nr}^k \quad \text{--- (1)} \quad X_{ij} \leq M_{ij} \quad \text{--- (3)}$$

$$X_{ij} = \sum_{r=1}^{M_k} \sum_{n=1}^{M_k} y_{ijn}^k \cdot Y_{nr}^k \leq C_{ij} \cdot X_{ij} \quad \text{--- (2)}$$

ここで Y_n^k : k番目のOD交通量 X_{ij} : リンクijの区間交通量
 M_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_{nr}^k : k番目のOD交通のある走行ルートrの配分交通量
 y_{ijn}^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が1車線当りの交通容量

X_{ij} : リンクijを建設される車線数 M_{ij} : リンクijの建設可能な車線数

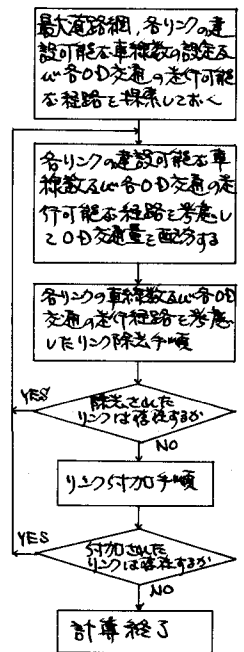


図-1 フローチャート

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して配分されるが、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 交通に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本研究で扱う目的関数を考慮して次の様な配分手順によって行う。

- 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) 区間所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 交通を認識しておく。
- 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) を繰り返す。
- 5) 1)~4) を対象とする OD 交通がすべて配分されるまで繰り返す。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費性を考慮した、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

$$T = 3.65 \cdot g \cdot \sum_{y \in A_L} U_y \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L y_k^l \cdot Y_k^l \cdot d_y + K \sum_{y \in A_L} \{ H + \alpha (X_y - 1) \} \cdot d_y \quad \text{--- (4)}$$

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_y : リンク y の利用者費用 (円/台・km)
- 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
- d_y : リンク y の距離 (km)
- α : 1 車線増加させるのに必要な建設費用 (円/km)

利用者費用は前報におい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に伴って走行速度は減少するのでこれにより、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、それと対応する平均走行速度を求めこ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) リンク除去及び付加手順について

リンク除去及び付加手順はあるリンクをある計算段階における道路網から除くか、あるいは加えるかについての基準となる改善変数を主として計算する。従って、改善変数はリンクを除去・付加することによって生ずる建設費用及び利用者費用の変化が目的関数値をどの程度改善するかに分析するため、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_y ($a_y \in A_L$) を除去して得られる道路網 G_y^L とする。この道路網 G^L から G_y^L への変換に伴って、リンク a_y を走行していた各 OD 交通は G_y^L 上のリンク a_y 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_y を求められ、(5) 式の様になる。ここで、利用者費用が増加するのは当然の結果であるが、建設費用が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。とすると、あるリンクにおいては区間交通量の増加をきたすことによる車線数を増設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じるためである。この Δ_y の値が正の値になる場合には、リンク a_y 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の意味し、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ないことになる。

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

X_{mn}, M_{mn} : リンク a_{ij} を含む道路網におけるリンク a_{mn} 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} 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に変化を及ぼすリンクの集合

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^l_{ij} において前述の (1)~(5) の手順による行なわれる。本研究においては前報と同様車種数の制限すなわち容量制限を考慮してはいるが、さらに前報と異なるところとして各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、特定のリンクを除去して行くと、通過可能な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削減するOD交通が出現する。従って、この様な事は回避しなければならぬ。よって、対象となる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^r 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^r にリンク a_{ij} を付加したことで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集合 A_{ij} は除去手順で除去されたリンクである。とすると、付加手順における改善変数 S_{ij} は (7) 式で求められる。なお、これらの式における各変数は (5) 式における変数と同様に考えられて求められる。かつ、この場合 G^r において、ついでにないものは G^r においてと仮定して計算される。この S_{ij} が正のときには、あるリンクを付加することによって目的関数の値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も改善されないという事になる。

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

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

以上の解法アルゴリズムの中心となるリンク除去・付加手順があるが、いずれも目的関数の値が小さくなる方向へ展開されるように改善変数を求め行なわれる。

(3) 探索アルゴリズムについて

- (1) (2) で述べられた事に基づいてアルゴリズムを考察すると次のようになる。
- (1) 建設可能な最大道路網 G^l 上に各OD交通に前述の配分手順による配分を行って後、目的関数の値 (T) を求める。
- (2) ある計算段階 l での道路網 G^l に対して、(1) と同様各OD交通を配分して T を求める。
- (3) 計算段階 l において除去されたいリンクの集合を A_{ij}^l 、除去されたリンクの集合を A_{ij}^{l-1} としこれを A_{ij} と記述しておく。
- (4) 道路網 G^l からあるリンク $a_{ij} (a_{ij} \in A_{ij}^l)$ を除去して G^l_{ij} 上に各OD交通に前述の配分手順による配分を行う。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であるいは走行可能なルートが削減した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 (6) へ、とが当てはまる場合は (5) へ進む。
- (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) の計算過程で A_{ij}^l の要素であるリンクに対して行なう
- (7) もし A_{ij}^l の要素の中で Δ_{ij} の値が正の値をとりリンクがあれば、その中で一番大きい値を取りリンク $a_{ij} \in G^l$ から除去して、道路網 G^l から $G^{l+1} (= G^l - a_{ij})$ へと変換して (2) へ進む。すなわちこのリンクが負の値をとるときには、このリンクを除去する手順を行って、この目的関数は何んも改善されないということ $G^l \in G^r$ とし (8) へ進む。

(8) (2)~(7)の手順において除去されたリンクの集合を E_A 、除去された集合 E_A と E とを $E \setminus E_A$ とし、これを E と記述しておく。

(9) 道路網 G^F にリンク $A_{ij} \in E_A$ を付加した道路網 G^F 上に各OD交通を配分して改善変数 S_{ij} を求める。

(10) (9)の計算 E_A の要素である $\forall i, j$ のリンクに対して行う

(11) もし A_{ij} 要素の中で S_{ij} の値が正の値 ϵ とするリンクがあれば、その中で一番大きい値 ϵ を取りリンク $A_{ij} \in G^F$ に付加して、道路網 $E \setminus G^F$ から G^F ($G^F + A_{ij}$) と交換して (2)へ進出。すなわちリンクに対して S_{ij} が負値であれば、これ以上リンク除去・付加手順を行っても目的関数を何なり改善することができないということになり計算を終了する。このとき手順 (8) で得た道路網 G^F が求める最適道路網となる。

3. 計算結果

図2の建設可能な最大道路網、表1のOD交通量およびリンク距離を与えて、最適道路網の探索を試みた。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が、 ∞ は一方向にリンクが存在しないことを示す。また、図2における数字は各リンクの建設可能な車線数である。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に示した。各式で用いられている時間係数、資本回収係数(耐用年数30年、利率年6%とする)はそれぞれ18.28、0.07265とした。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。なお、各OD交通の走行可能なルート数 M_{ij} は3~5本選定した。最大道路網における総費用・建設費用・利用者費用がそれぞれ277.1・65.4・211.7億円が得られたのち、順次除去手順が行なわれ図3に示される道路網が得られた。この道路網における各費用はそれぞれ257.9・44.7・213.2億円であり、また各リンクの交通量、車線数は図3に示した。さらに、前報等の方法と比較するため車線数の制限を考慮しない、さらに利用者費用を一定とした場合についてこの結果を交通量・車線数とともに図4に示した。

図2の建設可能な最大道路網、表1のOD交通量およびリンク距離を与えて、最適道路網の探索を試みた。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が、 ∞ は一方向にリンクが存在しないことを示す。また、図2における数字は各リンクの建設可能な車線数である。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に示した。各式で用いられている時間係数、資本回収係数(耐用年数30年、利率年6%とする)はそれぞれ18.28、0.07265とした。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。なお、各OD交通の走行可能なルート数 M_{ij} は3~5本選定した。最大道路網における総費用・建設費用・利用者費用がそれぞれ277.1・65.4・211.7億円が得られたのち、順次除去手順が行なわれ図3に示される道路網が得られた。この道路網における各費用はそれぞれ257.9・44.7・213.2億円であり、また各リンクの交通量、車線数は図3に示した。さらに、前報等の方法と比較するため車線数の制限を考慮しない、さらに利用者費用を一定とした場合についてこの結果を交通量・車線数とともに図4に示した。

4. あとがき
以上本研究は、従来のこの種の問題においてはほとんど適用されなかったルートフローを通じた道路網探索手法を考察した。この配分手法を用いた場合の利点については前述したが、一方向リンクフローに比し事前に各OD交通の経路探索をしなればならないという事などの様々な経路選定すべきかどうかという問題点も有する。しかし、この事は道路交通の特性を適確に把握できればより一層実面的な解と与えるものと思われはる。

4. あとがき
以上本研究は、従来のこの種の問題においてはほとんど適用されなかったルートフローを通じた道路網探索手法を考察した。この配分手法を用いた場合の利点については前述したが、一方向リンクフローに比し事前に各OD交通の経路探索をしなればならないという事などの様々な経路選定すべきかどうかという問題点も有する。しかし、この事は道路交通の特性を適確に把握できればより一層実面的な解と与えるものと思われはる。

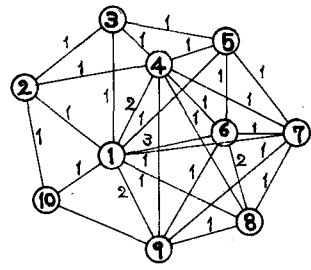


図-2 最大道路網

表-1 OD交通量とリンク距離

	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	0	4	3		700	100	50	0	0
6	6	0	0	6	4		400	600	150	50
7	7	0	0	8	6	2		300	200	50
8	7	0	0	11	0	5	6		400	200
9	6	0	0	13	0	7	8	3		300
10	4	8	0	0	0	0	0	0	0	

表-2 車線数と交通容量・建設費用の関係

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 利用者費用

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

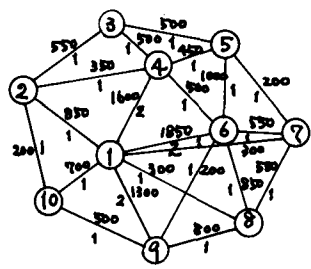


図-3 最適道路網

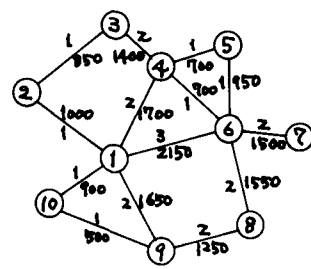


図-4 車線数の制限を考慮しないときの道路網

1) 柳谷・長瀬・加来; 土木学会論文誌第32号 1976

2) 柳谷・野原・加来; 土木学会論文誌第32号 1977