

IV—5 道路網容量増強問題に関する研究

苫小牧工業高等専門学校 正会員 ○ 柳 谷 有 三
北海道大学工学部 , 加 来 照 俊

1. まえがき

増加する需要交通量を既存の道路網で処理できなくなったとき、これに対処するかに対処するかという事は道路交通問題において基礎的な重要課題である。その対策のひとつとして、既存の道路網を構成している各リンク(道路区間)の容量を増加させるあるいは新たにリンクを建設する等によって道路網容量を増加させることが考えられる。しかし、この問題に対しては単独試みを行った研究あるいはカット法に基礎をおいた研究以外あまり見られしていない。そこで、本研究は次の諸点を踏えた問題の定式化と解法について考察する。(1)道路網を評価する各種の要因と制約条件および目的関数として設定できる様々な問題の多様性をはかることができること。(2)道路網を評価するために必要な配分交通量をも各リンクの容量増加あるいは新設リンクの決定と同時に求めることができること。(3)(1)とも関連するが、この問題においては特にある道路網においてどの程度までの需要交通量(トリップ数)を処理できるかという道路網容量に関する要因をも目的関数あるいは制約条件として設定できることなどである。さらに、本研究は交通容量と建設費用との関係をも種類による交通容量-建設費用関数(図1参照)で表現することによって、各リンクの容量増加あるいは新設に関する変数を連続変数(幅員)あるいは整変数(車線数)いずれをも取り扱えるようにした。

2. 道路網容量増強問題の定式化について

(1) 問題の定式化

いま、交通需要の増加に伴って n 個のノードと m 個のリンクを有する道路網 N で処理できなくなったとき、いずれのリンクの容量増加あるいは新設リンクの付加によって既存道路網 N を道路網 N' へと変換すべきかについて考える。このとき、交通需要の増加現象としては大きく次の3つの場合が考えられる。(1)既存ODパアの構成比が大きく変化することなく漸次増加する場合。(2)既存道路網上に高層ビル等の出現などによって、既存ODパアの増加とともに新たにODパアが出現する場合。(3)大規模な工業団地、住宅団地などの造成によって、(1)、(2)の現象のほかに新たにノード(発生・集中点)が出現する場合などである。本研究においては、まず(1)の場合について定式化したのち(2)、(3)についても考察する。この問題を定式化するにあたって、 Y_{ij}^k を i 番目のOD交通のリンク j の交通量、 X_{ij} をリンク j の区間交通量とする。制約条件としては、まず(1)式のOD交通に関する連続条件がある。ここで、 P_k はOD交通 k 番目のOD構成比、 F_k は処理交通量である。次に、既

$$\sum_i (Y_{ij}^k - Y_{ij}^k) = \begin{cases} P_k \cdot F_k & (\text{これがノード} i \text{ のとき}) \\ -P_k \cdot F_k & (\text{これがノード} j \text{ のとき}) \\ 0 & (\text{これが通過ノードのとき}) \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, q) \quad (1)$$

存道路網における各リンクの幅員あるいは車線数を x_{ij} 、容量増加あるいは新設されるリンクの幅員(車線数)を Δx_{ij} とすると、(2)~(4)式の各リンクの容量制限に関する条件がある。ここで、 C_{ij} は幅員あるいは車線数あたり

$$X_{ij} = \sum_k Y_{ij}^k \leq C_{ij} \cdot x_{ij} \quad (\text{容量増加も新設せられないあるいはできないリンク}) \quad (2)$$

$$X_{ij} = \sum_k Y_{ij}^k \leq C_{ij} \cdot (x_{ij} + \Delta x_{ij}) \quad (\text{容量増加されるリンク}) \quad (3)$$

$$X_{ij} = \sum_k Y_{ij}^k \leq C_{ij} \cdot \Delta x_{ij} \quad (\text{新たに建設されるリンク}) \quad (4)$$

の交通容量とする。さらに、(5)、(6)式の総建設距離 L 、総建設費用 M をもそれぞれ自身が目的関数にならない場合制約条件として考えられる。これらの2つの式は道路建設者側からみた重要な評価要因である。ここで、 R は容量増加あるいは新設されるリンクの集合、 d_{ij} 、 m_{ij} はそれぞれリンク j の距離、単位幅員当りの建設費用である。

$$\sum_{ij \in R} d_{ij} \cdot \Delta x_{ij} \leq L \quad (5)$$

$$\sum_{ij \in R} d_{ij} \cdot m_{ij} \cdot \Delta x_{ij} \leq M \quad (6)$$

また、道路網全体の自動車による環境悪化あるいは各OD交通の走行便益なども考慮すると(7),(8)式の総走行台距離(TD),総走行台時間(TT)もそれぞれ自身の関数がない場合制約条件として考えられる。ここで、 t_{ij} はリンク

$$\sum_{i,j \in R} \sum_{q \in R} d_{ij} \cdot Y_{ij}^q = \sum_{i,j \in R} d_{ij} \cdot X_{ij} \leq TD \quad \text{--- (7)}$$

$$\sum_{i,j \in R} \sum_{q \in R} t_{ij} \cdot Y_{ij}^q = \sum_{i,j \in R} t_{ij} \cdot X_{ij} \leq TT \quad \text{--- (8)}$$

$$Y_{ij}^q \geq 0 \quad (i,j \in R, q \in R) \quad \text{--- (9)}$$

$$\Delta x_{ij} \geq 0 \quad (ij \in R) \quad \text{--- (10)}$$

$$F \geq TOD \quad \text{--- (11)}$$

q の走行時間、 m' は新設リンクをも含めた道路網 N' におけるリンク数である。(9),(10)式はそれぞれ変数に関する条件である。次に、目的関数について考えたと前述の(5)~(8)式の各式がそれぞれ自身制約条件として考えられたいないとき目的関数となり、すべて最小化問題となる。そして、これらの関数を用いるときには処理交通量に関する(11)式の制約条件を加味しなければならない。すなわち、ある計画交通量も処理するために必要なりリンクの容量増加あるいは新設リンクの幅員(車線数)を求める問題となる。一方、ある制約条件の下で処理交通量を最大にするときには(11)式を目的関数とする。以上、本問題を定式化するにあたって基本的に必要、また現在定式可能な要因についての制約条件および目的関数を考察した。このとき、本問題においては(5)~(8)式および(11)式のうち(11)式は必ずしも制約条件あるいは目的関数として考慮されたいないなければならない。前述の(2),(3)の問題を定式化するにあたって考慮すべき点は主に(1)式についてである。まず、問題(2)において(4)式の q が q' (新たに本ODペアも含め)に変わり、問題(3)においては(4)式の q が q' に、1-ード数が m (新たに本1-ードも含め)になるため $(m-1)$ か $(m'-1)$ となる。

(2) 交通容量-建設費用関数について

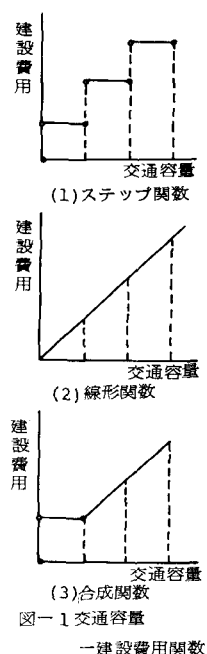
前述のように、各リンクの容量増加あるいは新設されるリンクの単位を幅員あるいは車線数として表わしたが、この車は交通容量と建設費用の関係が概念的に図-1で示される(1),(2)の2つの費用関数で表現されるためである。費用関数として(4)の非線形のステップ関数を用いると、変数 Δx_{ij} は建設すべき車線数を表わす整数変数(離散変数)いわゆる整数値となる。そうすると、問題は連続変数であるリンク交通量と整数変数 Δx_{ij} からなる混合整数計画問題(以下MIP問題という)となる。一方、(2)の線形関数の場合変数は建設すべき幅員を表わし連続変数となるため、問題は線形計画問題(以下LP問題という)として定式化できる。しかし、これらの問題の適用にあたっては次のような問題点が指摘される。前者の問題においては、多車線のリンクを多く含むとともにこの解法が一層困難となる欠点を有するとともに、1車線以上の交通容量を必要とするリンクにおいて容量の増加は車線数単位で介ねわぬより幅員単位で介ねわぬほうがより有効な場合も考えられるとともにこの解法も容易となる。また、後者の問題はマクロ的な道路網パターンを求めるときはこまかく、交通容量が1車線程度よりリンクでは現実的でない値が与えられるとともに道路網構成に大きな影響をおよぼす。そこで、本研究においてはこれらの点を踏えて図-1(3)で示されるステップ関数と線形関数とからなる合成関数についても考えた。この費用関数を用いたとき、変数 Δx_{ij} は少なくとも1車線を建設するかしないかを表わす0-1整数変数 Δx_{ij}^0 と1車線以上建設するときの程度の幅員まで建設されるかを表わす連続変数 Δx_{ij}^1 の2つの変数に分けられる。前述で定式化された各式のなかにはこれらの2つの変数を用いた式に変換しなければならない式もある。(3),(4)式は(12),(13)式となり、(5),(6)式も(14),(15)式となる。ここで、 C_{ij}^0, m_{ij}^0 はリンク ij の1車線あたりの交通容量、建設費用、 C_{ij}^1, m_{ij}^1 はリンク ij の単位幅員あたりの交通容量、建設費用であり、また q_{ij} はリンク ij の1車線あたりの幅員である。さらに、この問題の

$$X_{ij} = \sum_{q \in R} Y_{ij}^q \leq C_{ij}^0 (\Delta x_{ij}^0 + \Delta x_{ij}^1) + C_{ij}^1 \Delta x_{ij}^2 \quad \text{--- (12)}$$

$$X_{ij} = \sum_{q \in R} Y_{ij}^q \leq C_{ij}^0 \cdot \Delta x_{ij}^0 + C_{ij}^1 \cdot \Delta x_{ij}^1 \quad \text{--- (13)}$$

$$\sum_{ij \in R} d_{ij} \cdot (C_{ij}^0 \cdot \Delta x_{ij}^0 + C_{ij}^1 \cdot \Delta x_{ij}^1) \leq L \quad \text{--- (14)}$$

$$\sum_{ij \in R} d_{ij} \cdot (m_{ij}^0 \cdot \Delta x_{ij}^0 + m_{ij}^1 \cdot \Delta x_{ij}^1) \leq M \quad \text{--- (15)}$$



定式化にあたっては、0-1 変数 Δx_{ij} と連続変数 Δx_{ij} の間には (16) 式で示される条件が必要である。この式は図から明らかなように、1 車線以上建設されること ($\Delta x_{ij} = 1$) だけ容量の増加 ($\Delta x_{ij} \geq 0$) が考えられ、建設されないとき ($\Delta x_{ij} = 0$) は Δx_{ij} も 0 となる。ここで、 U は適当な十分大きい値とする。そうすると、問題は 0-1 変数 $U \cdot \Delta x_{ij} \geq \Delta x_{ij}$ ($ij \in R$)

$$(16)$$

と連続変数であるリンク交通量、変数 Δx_{ij} からなる 0-1 混合整数計画問題 (以下 0-1 MIP 問題という) となる。このように、各リンクの容量増加あるいは新設リンクに関する変数は用いる費用関数による離散変数 (車線数) あるいは連続変数 (幅員) として捉えることができる。したがって、問題の定式化にあたってはこれらの費用関数を適用する対象とするリンクの状況に応じて取捨選択すればよいので、3つの費用関数をすべて含んだ問題も考えられる。

(3) 道路網容量と隘路区間の選定について

道路網容量増強計画を介する場合、一般に既存の道路網がどれ程までの需要交通量を処理できるのか、そしてさらに増加する需要交通量を処理しようとするときのリンクが容量以上に減るか否かについて検討する必要がある。このとき、前者の道路網容量問題をどの様に捉えるかによって後者の隘路区間として選定されるリンクが異なることにも、道路網容量増強問題の捉え方も変わってくる。すなわち、道路網容量を欠のいずれの立場によって考えるかである。(1) 現実の交通流に則したものはなく、絶対最大容量に達成するトリップ数を求めるのか、(2) 現実の交通流に則したときの最大容量を求めるのか、(3) さらに、道路利用者の走行便益、大気汚染・騒音あるいは振動などによる道路環境の悪化、地域住民の生活環境の保持など各種の要因を考慮したときの最大容量を求めるのか などである。したがって、道路網容量増強問題の定式化もこれらの道路網の部位状況に応じて行われなければならないが、本研究においては先に道路網容量増強問題において道路網容量をも考えられるようにした。この事は、(1) 式を目的関数なり制約条件として設定することによって行ないうる。(1)~(3) の道路網容量は前述の各式を種々組合せることによって求められるが、

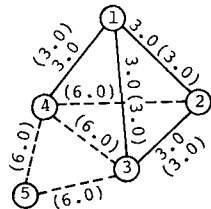


図-2 道路網

表-10 D 間距離

	1	2	3	4	5
1	0	6	9	5	∞
2	6	0	7	14	∞
3	9	7	0	5	7
4	5	14	5	0	5
5	∞	∞	7	5	0

表-20 D 構成比

OD-pair	構成比	OD-pair	構成比
1-3	0.182	3-1	0.273
	0.169		0.254
	0.127		0.190
2-3	0.145	3-2	0.090
	0.136		0.085
	0.101		0.063
2-4	0.127	4-2	0.182
	0.119		0.169
	0.089		0.127
3-4	0	4-3	0
	0.034		0.034
	0.025		0.025
1-5	0	5-1	0
	0		0
	0.063		0.063
3-5	0	5-3	0
	0		0
	0.063		0.063

$\Delta x_{ij} \leq U y_{ij}$ (17) ここで、 $U y_{ij}$ リンク ij の建設可能本幅員の問題はすべて LP 問題として定式化される。そして、増強計画はこの選定されたリンクを対象に前述の各種の費用関数を用いて行われる。

3. 計算例

ここでは、簡単な例題を通じて本問題の定式化および解法について考察する。図-2 の既存道路網 (実線のリンクが構成されている) と新設可能リンク (破線) 、表-1 の OD 間距離を与えて介する。なお、図-2 の値は既存リンクおよび建設可能 (カッコ内の値) を幅員で示している。また、交通容量は単位幅員あたり 4,000 台/分、1 車線 (3m) あたり 12,000 台とし、建設費用はとれられる費用/km、9 費用/km とする。前述のように制約条件および目的関数によって種々の問題が設定されるが、ここでは建設費用制限を 150 億円として処理交通量を最大にする場合と、需要交通量を 100,000 トリップ処理するために建設費用を最小化する場合について考察す

る。また、用いる費用関数によつて種々の数理計画問題として定式化されるが、ここでは前者の問題に対しては新設リンクも合成関数、既存リンクを線形関数とした場合について、また後者についてはいずれのリンクもステップ関数とした場合について考へた。なお、解決は前報にこのバタ方法による。まず、OD構成比が大きく変化することなく漸次増加する場合の結果は図-3、図-4となる。このとき、OD構成比は表-2の上段と与えられ、またリンク2-4、3-4を建設可能とする。図-3における処理交通量は105,248トリップ、図-4の建設費用は189億円となった。次にロード3に新たな施設の建設によつてOD構成比の変化およびロード3-4に新たなトリップが発生する場合の結果は図-5、図-6となる。OD構成比は表-2の中段と与えられ、このときもリンク2-4、3-4を建設可能とする。図-5において処理交通量は109,448トリップとなり、図-6の建設費用は189億円となり図-4の道路網構成と同じとなった。さらに、新たなロードの発生とともにOD構成比も変わった場合の結果は、図-7、図-8となる。このとき、OD構成比は表-2の下段と与えられ、また、図-2の破線のリンク

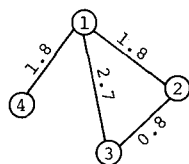


図-3

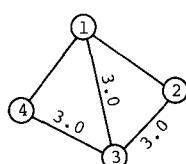


図-4

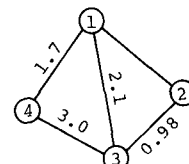


図-5

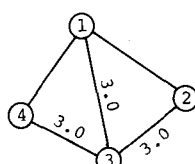


図-6

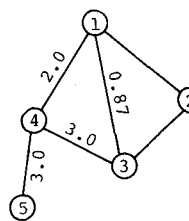


図-7

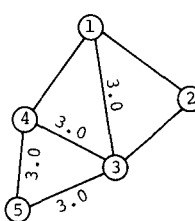


図-8

をすべて建設可能リンクとした。図-7において107,581トリップが処理可能であり、図-8の建設費用は198億円となった。なお、図中における値はすべて幅員が表わしたが、既存リンクにおいては増加すべき値のみを示した。他の費用関数を用いた場合にも同様だったが、得られた道路網構成の結果から新設リンクに対しては合成関数も既存リンクには線形関数を用いるのが十分満足されるのではないかとと思われる。この事は、特に解決の容易さからも言うことができる。すなわち、取扱う変数が大巾に減少するためである。

7. おわりに

以上本研究において、道路網容量増強問題を所要交通量の増加現象によつて大きく3つの場合に分けて設定して考へた。既存リンクの容量増強あるいは新設されるリンクの単位を対象とするリンクの状況などによつて連続変数(幅員)、整数変数(車線数)に取りうることを示し、さらに変数の取り方によつて問題をLP, MIP, 0-1 MIP問題として定式化した。定式化された問題は必ず評価基準を最大なり最小にする道路網構成の決定と同時に各リンクの交通量をも輸送計画的な配分結果として求めることができる。道路網の評価要因としては種々考へられ、本研究においては現在定量化可能なものについて定式化を試みた。そして、種々の制約条件および目的関数を設定することによつて所望の道路網形態を求めることができる。さらに、今後は交通公害、地域住民の生活環境などの要因を導入すること、交通量配分の変数の取扱い、あるいは大規模な道路網への適用などについて考へてゆきたい。

＜参考文献＞

- (1) 柳谷・加来：道路網構成問題に関する基礎的研究，土木学会北海道支部論文報告集第35号，1979
- (2) Fulkerson, D.R.; Increasing the Capacity of a Network, The Parametric Budget Problem, Management Science Vol.5, p472-483, 1959
- (3) Hu, T.C.; Integer Programming and Network Flows, Addison Wesley, 1970
- (4) Christofides, N. & P. Brooker; Optimal Expansion of an Existing Network, Management Science, Vol.6 P197-211, 1970
- (5) 西村 昂：ネットワーク容量増強問題と最適ネットワーク問題への拡張について，土木学会論文報告集第258号，1977
- (6) 〃：道路網容量増強に関する一考察，土木学会論文報告集第249号，1976
- (7) 飯田孝敏：道路網の最大容量の評価法，土木学会論文報告集第205号，1972