道路拡幅計画における優先順位について
—— 距離制約付き最大流問題 ——

水野啓之（沼田一道助教授，桧垣正浩助手）

１． はじめに

自動車を主要な輸送手段とする集中の進んだ我国の都市部では，道路の恒常的渋滞という問題を抱えている．これは，道路網のある部分に許容限度を越えた交通量が集中してくるからであろう．渋滞を減少させる為には，一方通行や進入・右左折禁止などによる交通制御や違法駐車のきびしい取締りを効果的に行う必要がある．しかし，根本的解決を図る為には道路の拡幅，新設，立体交差などの政策をとらざるを得ない．

本研究では，道路の拡幅に焦点を絞り，拡幅工事の着工順（工事の優先順位）を決定するとき参考となる指標を考察し，その基準値を求める問題とその解法を提案する．

２． 研究内容

道路の拡幅は，道路容量の増加を意味する．ある始終点対（Origin Destination pair : ＯＤペア）に対して最大流（最大流問題の解）が容量限界に達している道路（飽和路）を拡幅すれば，このＯＤペアの最大流量は増加する．そこで然るべきＯＤペアの集合に対して最大流問題を解き，各道路が飽和した回数をカウントし，それを拡幅の着工順決定の参考指標とすることを考える．

ただし，通常の最大流問題は，使用される経路の長さについて何の制限もないので，この用途に対しては非現実的である．我々はこの点を考慮し，「距離制約付き最大流問題」という新しい問題を提案する．

３． 距離制約付き最大流問題の定式化

距離制約付き最大流問題とは，ＯＤペア間の最短経路長の M 倍以下の長さの経路のみを用いるときのＯＤペア間の最大流量を求める問題であり，次のように定式化される．

道路網をネットワーク $N(V, E, C, D)$ で表す．

$V=\{1,2,\cdots,n\}$ ： ノード（交差点）の集合

ノード i から j への部分道路を (i,j) で表し，枝と呼ぶ．

$E=$ 存在する枝の集合

$C=\{c_{ij}\}$　　c_{ij} ： 枝 (i,j) の容量 (>0)

$D=\{d_{ij}\}$　　d_{ij} ： 枝 (i,j) の長さ (>0)

N_i^+ ： ノード i から出ていく枝の先端のノードの集合

N_i^- ： ノード i に入ってくる枝の根元のノードの集合

考慮対象のＯＤペアの始点を $s \in V$ ，終点を $t \in V$ とする．

枝 (i,j) を流れる流量を x_{ij} ，s から出ていく正味の容量を q とすると，

目的関数は，

$$q=\sum_{j\in N_s^+} x_{sj}-\sum_{j\in N_s^-} x_{js}$$

制約条件は，

$$0 \leqq x_{ij} \leqq c_{ij}$$

$$\sum_{j \in N_i^+} x_{ij} - \sum_{j \in N_i^-} x_{ji} = 0 \quad (i \in N,\ i \neq s, t)$$

$$max\,(Pathlength\,(s, t, x)) \leqq L_{st} \cdot M$$

となる．

ただし，$Pathlength\,(s,t,x)$ は s から t へ流れがあるときの経路長，また L_{st} は $s-t$ 間の最短距離，M は許容度を表す定数とする．

4．距離制約付き最大流問題の解法

考慮対象のＯＤペア $s-t$ について，$L_{st} \cdot M$ 以下である $s-t$ 間の経路をすべて数え挙げ，それらに含まれる点と枝のみから成る部分ネットワークについて，普通の最大流問題に対する解法を適用すれば，距離制約付き最大流問題は原理的には解けるが，ノード数が多くなると非常に演算時間がかかるため，次のように，最大流問題を解くラベリング法［2］にダイクストラ法を付加したアルゴリズムを提案する．

以下では，v_j は s から j までの最短距離，p_j は j に入る直前のノード，P は経路を表すものとする．また，d_{ij} は，$(i, j) \notin E$ のとき ∞ とする．

アルゴリズム

先ず初めに，$x_{ij}=0$ $((i, j) \in E)$ とする．

ROUTINE A.（増量可能候補路の探索）

STEP 1. $T=N-\{s\}$，$v_s=0$，$v_j=\infty$ $(j \in T)$ とおく．

STEP 2. $i=s$ とおく．

STEP 3. $t \notin T$ ならば，ROUTINE B に進む．

STEP 4. $j \in T$ であるすべての j に対して

a) $v_j > v_i + d_{ij}$，$x_{ij} < c_{ij}$ のとき，$v_j = v_i + d_{ij}$，$p_j = i$ とする．

b) $v_j > v_i + d_{ji}$，$x_{ji} > 0$ のとき，$v_j = v_i + d_{ji}$，$p_j = -i$ とする．

STEP 5. $v_i = min\,\{ v_j \mid j \in T \}$ である i を求め，T から i を除く．

STEP 6. $v_i = \infty$ ならば，アルゴリズムを終了する．さもなければ STEP 3 に戻る．

ROUTINE B.（距離制約の判別と増加可能量の決定）

STEP 1. $v_t \leqq L_{st} * M$ でなければ，アルゴリズムを終了する．

STEP 2. $P=(t)$，$j=t$，$f=\infty$ とおく．

STEP 3. $j=s$ ならば，現在の P を増量可能路 P_{st} とし，ROUTINE C に進む．

STEP 4. a) $p_j > 0$ のとき，$i = p_j$，$f = min\,(f, c_{ij} - x_{ij})$ とする．

b) $p_j < 0$ のとき，$i = -p_j$，$f = min\,(f, x_{ji})$ とする．

STEP 5. $P=(p_j, P)$，$j=i$ とし，STEP 3 に戻る．

ROUTINE C.（流れの変更）

STEP 1. $P=(t)$, $j=t$ とおく.

STEP 2. $j=s$ ならば, ROUTINE A に戻る.

STEP 3. a) $p_j>0$ のとき, $i=p_j$ とし, x_{ij} に f を加える.

b) $p_j<0$ のとき, $i=-p_j$ とし, x_{ji} から f を減ずる.

STEP 4. $j=i$ とし, STEP 2 に戻る.

5. 現実問題への適用

道路の拡幅による東京２３区内の道路網（右図１）の渋滞緩和を考えたときの着工順指標を実際に求めてみる. モデルとした路は, 都内の主要幹線道路である.

環状線は, 内側から, 内堀通り, 外堀通り, 明治通り, 山手通り, 環状七号線, 環状八号線, 放射線は, 南西部から時計回りに第一京浜, 第二京浜・桜田通り, 玉川・青山通り, 甲州街道, 青梅街道, 新青梅街道, 目白通り, 川越街道, 中山道, 北本通り, 日光街道・日比谷通り, 水戸街道・昭和通り, 蔵前橋通り, 京道路, 葛西橋・永代通り, 晴海通りである.

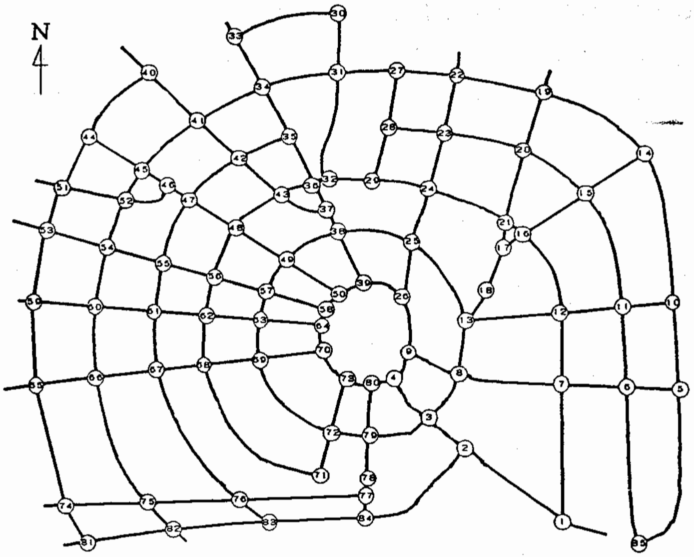

図１. 東京２３区内の道路網

許容度 M の決定条件は右表１のように定めている. 各路の長さ d_{ij} は, 地図より測定したものであり, 各路の最大容量 c_{ij} は, 基本的に実際の道路の車線数と法定速度との積とし, 路上駐車の頻度に基づいて実際の車線数より何割か少な目に設定している. 例えば, (3, 4) つまり数寄屋橋- 祝田橋 間においては, 車線数3, 法定速度60km/h, 少ない路上駐車数なので, $c_{34}=3\times1.0\times60=180$ とし, また, (49, 50) の飯田橋 - 九段下 間においては, 車線数3, 法定速度40km/h, そして比較的路上駐車数が多いので, $c_{4950}=3\times0.9\times40=108$ としている.

表１. 許容度 M の決定条件

L_{st} (km)	M (km)
0 ～ 1	3.0
1 ～ 3	2.0
3 ～ 15	1.5
15 ～ 25	1.3
25 ～	1.1

6. 結果及び考察

ノード番号 1, 2, 5, 10, 14, 19, 22, 27, 30, 31, 33, 34, 40, 41, 44, 51, 53, 59, 65, 74, 81, 82, 83, 84, 85 をＯＤペアの対象とした. これは, 本研究で東京２３区内と設定したネットワークにおいて環状八号線が最外環であるのに対し, 実際の道路網ネットワークはそれに留まらず更に広がっており, 他県から他県へと東京を通過する交通量が多いからである.

この考慮対象のＯＤペアについて，距離制約付き最大流問題を解き，飽和回数をカウントした．これにより，外側（環状七号線から外）ほど飽和しやすく，逆に中心部（明治通りから内）ほど飽和しにくい，と言う結果が得られた（下表２）．これを下表３の実際の渋滞発生状況［5］と比較してみる．

渋滞する路線が表２では環状七号線に，表３では環状八号線に集中しており，多少の相違がみられるものの，全体的にはやはり実際にも表２同様，環状七号線から外側が渋滞している．そして，大和町 - 中央陸橋 間（34,41），豊玉陸橋 - 丸山陸橋 間（45,52），虎ノ門 - 赤羽橋間（79,78）においては，表２・３共に現れており，他にも，44 谷原，51 井草三丁目が渋滞に絡んでいることから，この結果はある程度妥当であると判断する．

表２．飽和回数ワースト２０

飽和路（枝）	路線	飽和路（枝）	路線
(34,41)	環七	(52,45)	環七
(41,34)	環七	(27,22)	環七
(31,34)	環七	(45,52)	環七
(34,31)	環七	(79,78)	桜田
(41,45)	環七	(51,52)	新青
(45,41)	環七	(52,51)	新青
(62,56)	明治	(78,79)	桜田
(25,26)	日比谷	(3,2)	晴海
(40,44)	環八	(22,27)	環七
(44,40)	環八	(56,62)	明治

表３．渋滞発生状況ワースト２０

交差点	方向	路線	交差点	方向	路線
65	←59	環八	44	←51	環八
51	←44	環八	21	←16	明治
34	←41	環七	51	←53	環八
55	←47	山手	45	←52	環七
82	←75	環七	60	←54	環七
81	←82	第一京	80	←73	内堀
59	←65	環八	7	← 1	明治
22	←23	日光	45	←44	目白
9	← 4	内堀	54	←53	青梅
66	←60	環七	79	←78	桜田

７．終わりに

本研究では，道路網のネック（渋滞しやすいところ）をネットワークの構造（道路の接続の具合）や特性（距離・容量）のみから特定するため，使用経路に制限を置いた距離制約付き最大流問題を考え，その解法を提案した．また，その最適解において，各枝が飽和した回数を合計したものを，拡幅工事の着工順の指標として利用することを考え，都内の一般幹線道路網に適用してみた．

提案した距離制約付き最大流問題の算法は，十分実用的であることが確認できた．また，提案した指標は，工事費のことや高速道路の存在を考慮していないので，国や都が決定する着工順と相違するのはやむを得ないと思われる．しかし，容量の増加は，確実に渋滞を緩和させるものであり，道路拡幅計画の１つの指標としては，十分に意味があると思う．

【参考文献】

[1] James R. Evans and Edward Minieka : Optimization Algorithms for Network And Graphs, Marcel Dekker, pp.77-122, 1992.

[2] 伊理正夫，古林隆 ： ネットワーク理論，日科技連，pp.53-80，1976.

[3] 大山達雄，田口東 ： On Some Results of the Shortest Path Counting Problem，日本ＯＲ学会1991年度春季研究発表会アブストラクト，pp.102-103，1991.

[4] 最新交通量センサス '92 <首都編>，（株）関西ビジネスサービス，pp.121-128，1992.

[5] 警視庁交通年鑑　平成３年度版，警視庁交通部，pp.276-310，1992.

[6] 東京５０キロ圏の将来交通量，東京都首都整備局，1968.