需要量を考慮したバス路線決定問題

～東京都北区王子駅周辺のバス路線決定～

南谷　隆太　（沼田　一道　准教授）

１．はじめに

我々は日常生活において，移動手段として様々な交通機関を用いている．中でも主要なものが電車とバスで，電車は利用者を地元の駅から都心へ，バスは駅を中心とする路線のネットワークで家から駅へ，または駅から学校・会社へと人々を運ぶ役割をそれぞれ担い，どちらも通勤・通学などにおいて非常に重要な交通機関である．

本研究では，様々な交通機関の中でも，地域を覆う輸送手段として必要不可欠なものとなっているバスに着目し，駅を中心としたバス路線をどのように決定するべきかを考える．バスは公平性を考慮すると，多くの人が利用しやすい路線集合でなくてはならない．一方，効率性を考慮すると，需要量や走行距離に着目し，短い距離で，利用者がなるべく多くなるような路線集合にせざるを得ない．

本研究では，東京都北区の王子駅を中心とする地域を例として取り上げ，需要量や走行距離を考慮したバス路線集合を決定する問題を考える．

２．現状

現在，王子駅を中心とする地域には，10 本のバス路線が存在している．この路線集合は，経営側がバス以外の交通機関の利用状況や過去のバス路線の実地調査をもとに除々に作り上げたものである．しかし，王子駅周辺のバス路線集合が最後に変更されたのは９年程前であり，新興住宅地域の路線集合は，必ずしも多くの人に利用しやすいものとはなっていない．また，住宅地や学校，公共施設などが固まっている地域は利用者が多いため，複数の路線を通すことで混雑を緩和しようとしているが，経営側にとっては，同じ地域に複数の路線を通すことは非効率的であり，さらに路線の通っていない地域に住む人々にとっては，不公平である．そこで本研究では，以上のような問題を，バス路線集合を再構築することで解決しようと考えた．

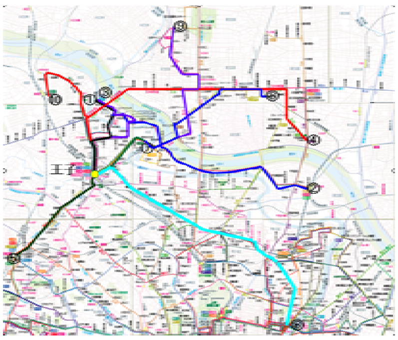

図１：王子駅周辺のバス路線集合

表１：各終点と王子駅からの路線長

終点	走行距離（m）
①新田一丁目	3800
②北千住駅前	9820
③新田一丁目	4566
④千住車庫前	10150
⑤池袋駅東口	4080
⑥浅草雷門	8683
⑦豊島五丁目団地	1750
⑧西新井駅前	6850
⑨加賀団地	7660
⑩赤羽駅東口	4650

３．目的

本研究では，現在のバス路線集合に見られる問題を解決するために，バス路線集合を最適に決定するための数理計画モデルを提案する．またこれを数理計画問題として定式化し，解法を提案する．そして，実際の道路網上で求めた解を，現在のバス路線集合と比較する．

４．先行研究

バス路線決定問題は，2001 年度の卒業生による先行研究[1]があるが，そこでは，複数の路線が通る地域の需要量を重複して数えている．それにより，需要量の多い地域に路線が集中してしまうといった結果であった．本研究では，このような点を解消し，より現実的な路線集合を決定するために，需要量を獲得できる条件を詳しく設定した．さらに，道路網の規模を大きくすることにより，先行研究よりも，より現実的で大規模な路線集合決定モデルを考えた．

５．路線集合決定モデル

5-1.前提

本研究では，バス路線集合を決定する問題に限定し，停留所の設置やダイヤの再構築は行わない．また，各路線の始発点（王子駅）と，10 個の終着点は，既存のままとする．

5-2.問題

王子駅周辺のバスが走行可能な道路網内の交差点を頂点（$0,1,\cdots,n$）とし，需要量として，人口に応じたポイント（人口ポイント）を対応付ける．ここで，点 0 は始発点（王子駅），点$n,n-1,\ldots,n-8$は各路線の終着点を表す．10 路線中２つは同一終着点なので，終着点は９個である．また，人口ポイントは、周辺の建物や「北区町丁目別人口」[5]で調べた実際の人口データを元に 10 段階で評価する. この道路網内で，獲得する総人口ポイントが最大になるようなバス路線集合を，再構築する．

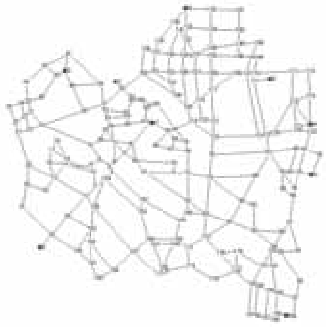

図２：王子駅周辺の道路網

5-3.定式化

点の集合を $N=\{0,\ldots,n\}$，点 i の人口ポイントを $p(i)$，点 i を通る路線の数を $c_i(\mathbf{x})$，路線の集合を $K=\{1,\ldots,10\}$，第 k 路線の始発点から終着点までの最短経路の長さを L_k とする．この時，最短距離からの最大倍率 α（最大許容計数）を与え，同一始終点で長さが αL_k 以下の全経路（M_k 個とする）を対象にする．この経路集合を $R^{(k)}$ で表す．第 1，第 3 路線は終着点が同一なので，路線集合も同一となるが, 便宜的に別の集合として扱う. ただし, 双方の第 j 経路は同一である（$j=1,\ldots,M_1=M_3$）. ここで，第 k 路線の第 j 経路が点 i を通る(1)か否(0)か，を定数 $a_{ij}^{(k)}$ で与える．決定変数 $x_j^{(k)}$ は，第 k 路線の第 j 経路を採用する(1)か否(0)かを表す．また， f_i は，点 i で獲得できる人口ポイントを表している．関数 f_i については後述する． α が与えられた時，路線集合が獲得する人口ポイントを最大化する問題は以下のように定式化される．

$$
\mathrm{P}(\alpha)\left\{
\begin{array}{llll}
\max & \sum_{i=0}^{n} f_i(c_i(\mathbf{x})) & & (1)\\
\text{sub.to} & c_i(\mathbf{x})=\sum_{k=1}^{10}\sum_{j=1}^{M_k} a_{ij}^{(k)} x_j^{(k)} & i=1,\ldots,n & (2)\\
 & \sum_{j=1}^{M_k} x_j^{(k)}=1 & k=1,\ldots,10 & (3)\\
 & x_j^{(1)}+x_j^{(3)}\le 1 & j=1,\ldots,M_1=M_3 & (4)\\
 & x_j^{(k)}\in\{0,1\} & k=1,\ldots,10 \quad j=1,\ldots,M_k & (5)
\end{array}
\right.
$$

関数 f_i は以下のように与える．

$$f_i(c_i(\mathbf{x})) = \begin{cases} p(i) \cdot \min\{c(i),\, p(i)-5\} & p(i) \geq 7 \quad (6) \\ p(i) \cdot \min\{c(i),\, 1\} & p(i) \leq 6 \quad (7) \end{cases}$$

関数 f_i は図３のような非線形グラフであり,“10 ポイントの点ならば，５路線目までポイントが加算されるが６路線目以降はポイントが加算されない”といったように，点 i で獲得できる人口ポイントを制限している．

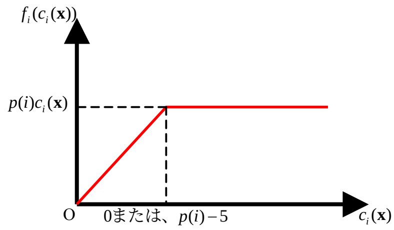

図３：関数 f_i

６．解法

問題 P(α) は，非線形 0-1 計画問題であり，$R^{(k)}$ の要素数も数十万に及ぶため，厳密な最適解を求めるのは困難である．そこで，発見的解法により準最適解を求める．その手順を以下に示す．

Step1：ダイクストラ法により各路線の最短経路長 L_k を求める．

Step2：Step1 で求めた L_k を α 倍し，長さ αL_k 以下の経路を各路線ごとに生成する．

Step3：Step2 で生成した各路線集合から, 単独での獲得人口ポイントが最大の経路を一つずつ選び, 全路線による獲得人口ポイントが最大となる路線集合を初期解とする．

Step4：Step3 で得た初期解のうちの一つの経路を入れ替えることによって解を改善し（近傍探索), 最適な路線集合を求める．

Step5：α を 1.1,1.2,...,1.7 と変え，Step2，Step3 を繰り返す．

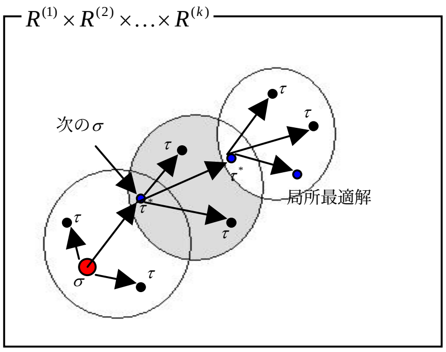

図４：近傍探索のイメージ図

$\sigma : \{r_j^{(1)} \ldots r_j^{(k)} \ldots r_j^{(10)}\}$

$\downarrow$

$\tau : \{r_j^{(1)} \ldots r_j^{(k)'} \ldots r_j^{(10)}\}$

（第k路線の第j経路を入れ替える）

σ：初期解
$\upsilon(\sigma)$: σの一つの路線について経路を入れ替えてできる解全体の集合
τ^*: $\upsilon(\sigma)$の中で人口ポイントが最大になる解（局所最適解）

$r_j^{(k)}$:第k路線の第j経路

$(r_j^{(k)} \in R^{(k)})$

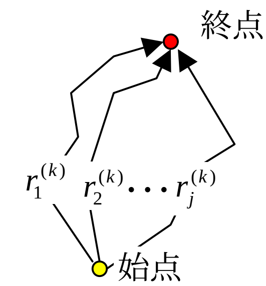

図５：経路のイメージ図

７．実験

道路ネットワークは，地図から計測した緯度・経度を座標に変換し，縮尺を合わせ実寸長にした．また，$n = 200$ とし，頂点に与えた人口ポイントは,「北区町丁目別人口」[5]を元に，表２に示す評価法で見積もり，割り振った．作成したプログラムは，α を変えたときの路線候補から，人口ポイントが最大になるようなバス路線集合を出力する．

表２：人口ポイントの評価

人口(人)	1～100	101～200	201～300	301～400	401～500	501～600	601～700	701～800	801～900	901～
人口ポイント	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

８．結果・考察

実験の結果，新しい路線集合の α と総人口ポイントの関係は図６，総走行距離との関係は図７のようになった．既存の路線集合では，α の平均は 1.3 であった．本研究の結果では，α =1.3 の時，新し

い路線集合の獲得総人口ポイントは 895 であり，既存の 682 と比較して，獲得需要量が増えている．またこの時の総走行距離に着目すると，新しい路線集合は 58632m となっており，既存の路線集合よりも短い. 以上のことから走行距離, 需要量の両面で優れていると考えられる．α =1.2 の時も同様に，総人口ポイント・総走行距離の両面で既存の路線集合よりも上回る結果であった．α =1.4 以上の路線集合は，総人口ポイントが大きくなっているものの，総走行距離が既存の路線集合よりも長くなっており，バス経営側の効率面や，利用者にとって終着点までの所要時間が長くなることを考慮するとあまり現実的でないと考えられる．以上のことを考慮すると α =1.3 の路線が需要量，走行距離両面において，検討に値する路線集合であると考えられる．

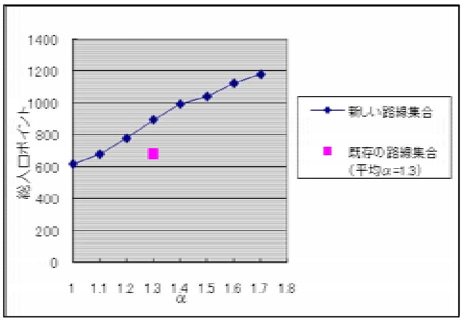

図６：α と総人口ポイントの関係

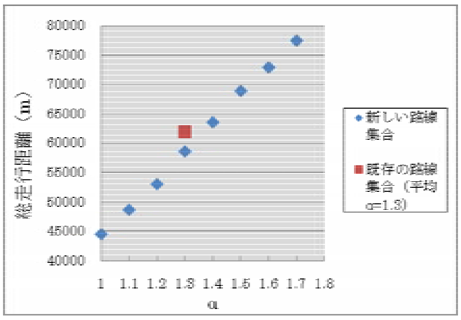

図７：α と総走行距離の関係

また，最短距離からの最大倍率を大きくするほど，人口ポイントの大きい点を何度も通過すると予想されたが, 三回以上通過している点は既存の 12 点と比較し, α =1.7 の時でも 17 点しかなかった．これは，点を通過する路線と獲得できるポイント $f_i(c_i(\mathbf{x}))$ の設定の仕方に関係していると考えられる．

既存の路線集合と，α =1.3 の時の新しい路線集合（図８）の経路を比較すると，路線集合の覆う点が増えていることがわかる．

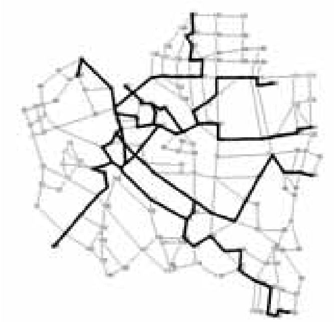

図８：新しい路線集合（α =1.3）

９．まとめと今後の課題

本研究では，各地域の人口をバスの需要量として扱い，さらに最短経路からの最大倍率（α ）を与えることよって，バス路線集合の覆う利用人口や走行距離を考慮したバス路線決定問題を行うことができた．しかし，現実ではバスの利用者数は人口に比例するとは言えない，よって，どの点に何人のバス利用者がいるかといったことを正確に調査し，利用人口を計算することができれば，より現実的な路線を求めることができると考えられる．またバス路線を決定する際には，停留所の設置場所やダイヤといった複数の要素も関係してくるが，これらを考慮することは今後の課題である．

10．参考文献

[1]戸田和宏：“ バス路線の決定問題 ”，東京理科大学工学部第一部経営工学科卒業論文，2001

[2]加藤直樹：「数理計画法」，コロナ社，2008

[3]森口繁一，小林光夫，武市正人：「Pascal プログラミング対話」，共立出版，1980

[4]東京都交通局：http://www.kotsu.metro.tokyo.jp/bus/（最終閲覧日：2009/12/24）

[5]東京都北区公式ホームページ：
http://www.city.kita.tokyo.jp/docs/service/005/000521.htm（最終閲覧日：2009/12/24）