

幼稚園における送迎バスの運行経路に関する研究 停留ポイントと走行経路の決定

藤田 洋平 (沼田 一道 助教授)

1.はじめに

郊外に立地する幼稚園において、送迎バスはより多くの園児を獲得するためにはなくてはならないサービスである。

送迎計画は園児が入園してくる毎年4月に作成されるが、この送迎計画において、どこに停留ポイント(送迎バスが停車し、園児がバスの乗降を行う場所)を設けるか、またどのような経路でバスを運行させるかによって、園児が停留ポイントまで歩く負担や、園側の送迎のために費やす時間が変わってくる。毎日、送迎が行われることを考えると、より良い送迎計画の作成は重要である。

また近年の少子化に伴い、幼稚園では園児数を確保するため、より遠くに住んでいる園児をも積極的に獲得する必要がでてきている。つまり、より広範囲に送迎バスを運行する必要がでてきている。このことから、効率的に送迎を行うことはこれまでより重要になってきていると考えられる。

本研究では、家から停留ポイントまでの距離が長い園児の移動距離を短くするように停留ポイントを定め、その停留ポイントを通り、バスの総送迎時間が短くなるような運行計画の作成法を提案する。またF幼稚園の事例に適用し、その有効性を検証する。

2.問題の概要

幼稚園の送迎において園児の側から考えると、できるだけ家の近くに停留ポイントがあった方が望ましい。そのためにはより多くの停留ポイントを設ける必要がある。一方、送迎に費やす時間を短縮したい幼稚園にとっては、停留ポイントはできるだけ少なくし、かつ効率良く巡回したい。どこに停留ポイントを設けるかについては、できるだけ園児が停留ポイントまで歩く負担を小さく、かつ平等にする必要があると考える。

本研究では、停留ポイントまでの移動距離が最も長い園児の移動距離をできるだけ短くするように停留ポイントを設けること、選定された停留ポイントを巡回する送迎所要時間を最小にすることを考える。

この問題を扱う上での前提条件は以下の通りである。

- 各送迎バスは幼稚園を出発し、園児を乗せ、幼稚園に戻る。またバスには定員がある。
- 一回の巡回ルートには時間の上限を設ける。
- 停留ポイント間の移動時間は移動距離のみに依存する(渋滞は考慮しない)。
- 停留ポイントの選定はあらかじめ停留ポイントの候補地を与えておき、その中から選び出すものとする。
- 幼稚園へ歩いて通う園児は予め除外する。つまり送迎バスを使う園児についてのみを考える。
- 停留ポイント、園児宅間の距離は直線距離とする。

3.定式化

バスの総送迎所要時間と園児の最大移動距離の最小化という二目的の数理計画問題として、定式化する。

幼稚園を含む停留ポイント候補数を n 、園児数を m 、バスの定員を q 、巡回ルート数を L 、停留ポイント i, k 間の移動にかかる時間を $t_{ik} (= t_{ki})$ 、停留ポイント i から園児宅 j までの距離を $d_{ij} (= d_{ji})$ とし、停留ポイント 1 は幼稚園を表すものとする。

決定変数は次のように設定する。また、停留ポイント i で乗降する園児の人数を S_i 、停留ポイント i で園児がバスの乗降に要する時間



図1. F幼稚園の送迎範囲

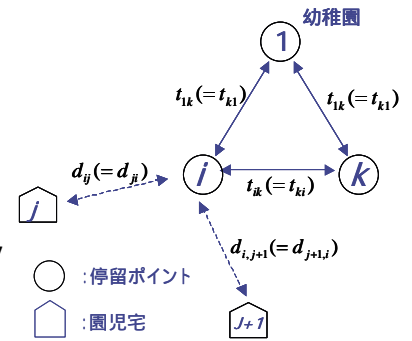


図2. 移動時間と移動距離

を c_i とする． S_i は次に述べる u_i によって決まり， c_i は S_i によって決まる．

$$\begin{aligned}
 u_i &= \begin{cases} 1: \text{停留ポイント } i \text{ を採用する} \\ 0: \text{それ以外} \end{cases} \\
 x_{ikl} &= \begin{cases} 1: \text{ルート } l \text{ において停留ポイント } i \text{ の直後に停留ポイント } k \text{ を訪れる} \\ 0: \text{それ以外} \end{cases} \\
 y_{il} &= \begin{cases} 1: \text{ルート } l \text{ において停留ポイント } i \text{ を訪れる} \\ 0: \text{それ以外} \end{cases} \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Minimize} \quad \sum_{i,k} t_{ik} \sum_l x_{ikl} + \sum_i c_i \sum_l y_{il} \quad \dots(1) \\
 \text{Minimize} \quad \max_j \left[\min_i \{d_{ij} u_i + M(1-u_i)\} \right] \quad M \gg 1 \quad \dots(2) \\
 \text{SubjectTo} \quad \left\lceil \frac{S_i}{q} \right\rceil u_i = \sum_l y_{il} \quad i=2, \dots, n \quad \dots(3) \\
 u_1 = 1 \quad \dots(4) \\
 y_{1l} = 1 \quad l=1, \dots, L \quad \dots(5) \\
 \sum_{k,l} x_{ikl} = u_i \left\lceil \frac{S_i}{q} \right\rceil \quad i=1, \dots, n \quad \dots(6) \\
 \sum_{i,l} x_{ikl} = u_k \left\lceil \frac{S_k}{q} \right\rceil \quad k=1, \dots, n \quad \dots(7) \\
 \sum_{i,k \in H} x_{ikl} \leq |H| - 1 \quad \forall H \subseteq \{2, \dots, n\} \quad l=1, \dots, L \quad \dots(8) \\
 \sum_k x_{ikl} = \sum_k x_{kil} = y_{il} \quad i=1, \dots, n \quad l=1, \dots, L \quad \dots(9) \\
 \sum_i \frac{S_i}{\lceil S_i/q \rceil} y_{il} \leq q \quad (S_i \neq 0) \quad l=1, \dots, L \quad \dots(10) \\
 \sum_{i,k} t_{ik} x_{ikl} + \sum_i c_i y_{il} \leq T \quad l=1, \dots, L \quad \dots(11) \\
 u_i, x_{ikl}, y_{il} \in \{0,1\} \quad i,k=1, \dots, n \quad l=1, \dots, L \quad \dots(12)
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

(1)は総送迎時間を最小化するという目的関数であり，(2)は園児の最大移動距離を最小化するという目的関数である．制約式(3) (6) (7)は選定された停留ポイントは送迎を行う上で通る，選定されなければ通らないことを示している．制約式(4) (5)はどの巡回路においても幼稚園を通ることを示している．(8)は部分巡回路を禁止することを示している．(9)はある停留ポイントでバスが停車するならば，そのバスは他の点からやってきて他の点に向かうことを示している．(10)はバスの定員が q であることを示している．(11)は一回の巡回における時間の上限を示している．

4.解法

解法は以下の(1)(2)の2段階で行う．

- (1)【停留ポイントを選定する】停留ポイントの候補地から園児の最大移動距離が短くなるように停留ポイントを選定する．(使用する停留ポイントの数を定め，絞り込む)
- (2)【経路を決定する】選定された停留ポイントを通り，総送迎時間が最短になるような送迎経路を求める．

本研究で扱う F 幼稚園は，停留ポイントの候補地が 83 箇所である．停留ポイント数が少なければ全列挙により厳密解を求めることができるが，本研究での全列挙による求解は困難である．そこで，(1)にはメタ戦略の一種である多スタート局所探索法を，(2)にはタブーサーチを用いた近似解

法を提案する。

局所探索法とは、ある初期解 x を生成し、解空間の中で x の近傍により良い解 x' を見つけたならば、 $x = x'$ とし x を更新し、新しい x の近傍により良い解がなくなるまで繰り返し探索する方法である。多スタート局所探索法は初期解を変えて何度か局所探索法を行い、その中から最も良い解を見つける方法である。

タブーサーチは、改悪を許すことにより局所最適解で検索が終了してしまうことを避け、終了条件を満たすまで検索を繰り返す。また、タブーリストを用いて近傍に含まれる解から少し前に検索した解を除くことにより直前の解に戻ってしまう循環を防いでいる。

本研究での具体的な解法手順は以下ようになる。

(1) 【停留ポイントを選定する】

停留ポイントの選定数を a ，幼稚園を除いた停留ポイント候補地の集合を $V = \{v_2, v_3, \dots, v_n\}$ ，

選定される停留ポイントの集合を B ，選定されない停留ポイントの集合を \bar{B} とする。

step0: まず停留ポイントの候補地をすべて使えたと仮定したとき、各園児は最も近い停留ポイントを選ぶ。この時点でいずれの園児にも選ばれなかった停留ポイント数を p とし、 $n - p < a$ なら終了。

step1: V からランダムに a 個の要素を取り出し、 B とし、残りの停留ポイントを \bar{B} とする。このとき初期解を $x = B$ とし、各園児の最短移動距離を長い順に並べたリストを目的関数リスト $F_k (k = 1, 2, \dots, m)$ とする。

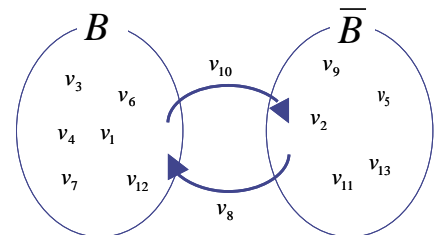


図3: 停留ポイント選定における入れ替え例

step2: B と \bar{B} の各 1 要素を入れ替え 1 回の範囲で得られる解の集合(近傍)の中で、目的関数リストの値が最小のとき、その解(値)をそれぞれ $x', F_k(x')$ とする。

step3: 目的関数を辞書的に比べ、 $F_k(x') < F_k$ ならば、 $F_k = F_k(x') (k = 1, 2, \dots, m)$ とし step2 へ、そうでなければ終了。

さらにこの局所探索を、初期解をランダムに与え数回行い、この中から最も良い解を準最適解とする。

(2) 【経路を決定する】

(1) で選定された停留ポイントの集合を $W = \{w_1, w_2, \dots, w_a\}$ (w_1 は幼稚園) , 巡回ルートの集合を $R = \{r_1, r_2, \dots, r_L\}$, D_i をルート r_i に割り当てられた停留ポイントの集合、 D_i を回る順番を $\sigma^{(i)}$ とする。

step1: $Tabu$ (タブーリスト) , $hantei$ (連続非改善回数 (C を超えたら終了)) を初期化する。
 $D_i (i = 1, 2, \dots, L)$ にそれぞれ q を超えないようにランダムに $w_j (j = 2, 3, \dots, a)$ を割り当て、それを初期解 $x = \{D_1, D_2, \dots, D_L\}$ とし、準最適な $\sigma^{(i)}$ を求め各巡回ルートの所要時間を求め、その和を目的関数値 f^* とする。

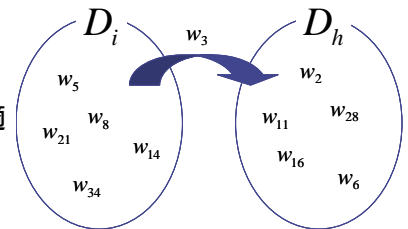


図4: 経路決定における入れ替え例

step2: $Tabu[w_j] = 0$ である全ての w_j を D_h に含まれる園児数が q を超えない限り D_i から $D_h (i \neq h)$ へ移し(近傍) , $\sigma^{(i)}$ を準最適化して目的関数値を計算する。それらの中で目的関数値が最小の解(値)をそれぞれ $x', f(x')$ として、改悪であっても $x = x'$ と更新する。また、そのときの移動させた停留ポイントを mv とする。

step3: $f(x') < f^*$ ならば $f^* = f(x')$ とし、 $hantei = 0$ とする。そうでなければ、 $hantei = hantei + 1$ とする。

step4: $hantei > C$ ならば終了。そうでなければ、移動した停留ポイントを $Tabu[mv] = b (b: \text{タブー期間})$, その他の停留ポイントは $Tabu[w_j] > 0$ ならば $Tabu[w_j] = Tabu[w_j] - 1$ とし、step2 へ。

5.実験

F 幼稚園のデータを用い、前節で示した解法により解く。F 幼稚園は園児数 218 人、バスの台数 2 台、停留ポイントの候補地 83 である。現状との比較のため、巡回ルート数は 6、停留ポイント選定数を 62 とした。また、各バスの送迎時間の上限を 40 分とし、バスは平均時速 30 km で走るものとし、バスが停留ポイントで止まる時間は(60 秒+停留ポイントで乗降する園児数*5 秒)とした。なお解法のプログラムは Borland 社の Delphi6 で作成した。



図 5 . (1)の実行画面



図 6 . (2)の実行画面

6.結果および考察

表 1 より、移動距離が最長の上位 7 人の園児については移動距離を短縮できたことがわかる。一方、現状より長くなった園児も少なくなかった。これは距離が長い園児を優先した結果であるので、やむをえない結果であると考えられる。

表 2 より、総送迎時間は現状より 10 分以上短縮できたことがわかる。しかし、各ルートの送迎時間は現状に比べばらついた、つまり園児のバスに乗っている時間の平等性は悪くなってしまった。これは総送迎時間の最小化を目的としたためである。

表 1 . 園児の停留ポイントまでの距離
(上位 10 人)

園児	現状(m)	準最適解(m)
1	236	226
2	226	198
3	225	191
4	216	176
5	198	176
6	191	176
7	188	176
8	176	176
9	176	176
10	168	176

表 2 . 送迎時間

現状		準最適解	
総送迎時間	11210 秒(約186分)	総送迎時間	10521 秒(175分)
バスA	5723 秒 (約95分)	バスA	5307 秒 (約88分)
ルート1(1858 秒)(44人)		ルート1(916 秒)(24人)	
ルート2(1960 秒)(49人)		ルート2(2247 秒)(30人)	
ルート3(1905 秒)(27人)		ルート3(2144 秒)(46人)	
バスB	5487 秒 (約92分)	バスB	5214 秒 (約87分)
ルート4(1837 秒)(38人)		ルート4(1772 秒)(42人)	
ルート5(1940 秒)(29人)		ルート5(1241 秒)(25人)	
ルート6(1710 秒)(30人)		ルート6(2201 秒)(51人)	

7.まとめ

本研究では、停留ポイントまでの移動距離が最も長い園児の移動距離をできるだけ短くするように停留ポイントを設けること、選定された停留ポイントを巡回する送迎所要時間を最小にするものの二目的の数理計画問題として、送迎バスの運行計画を考えた。その結果、移動距離が長い人の移動距離を短縮できたので、負担の大きい人に対しては負担を軽減でき、負担の小さい人との差を縮めることができた。またバスの送迎については、現状より 10 分以上総送迎時間を短縮できたことから、経験等に頼らない、より良い送迎計画の提案ができたと考える。今後の課題としては、園児宅から停留ポイントまでの負担だけでなく、園児宅から幼稚園までの負担も考慮に入れた送迎計画を考える必要がある。

参考文献

- [1]岡本晃昌「不動産管理業務における定期点検作業の実施計画の作成」,平成 14 年度東京理科大学工学部経営工学科卒業論文
- [2]柳浦睦憲、茨木俊秀「組合せ最適化 メタ戦略を中心として」,朝倉書店、2001
- [3]生活地図サイト マップファンウェブ <http://www.mapfan.com/>